

**ΑΕΙ ΠΕΙΡΑΙΑ Τ.Τ.
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ
ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ**

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΜΕΛΕΤΗ, ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ
ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗΣ
ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ**

ΣΠΟΥΔΑΣΤΕΣ

ΚΟΥΕΡΙΝΗΣ ΦΟΙΒΟΣ

ΒΑΓΕΝΑΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ

ΤΣΙΤΟΥΡΑΣ ΣΠΥΡΙΔΩΝ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΓΙΑΝΝΑΚΟΠΟΥΛΟΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ

ΑΘΗΝΑ 2017

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Για τη διεκπεραίωση της παρούσας Πτυχιακής Εργασίας, θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τους επιβλέποντες καθηγητές κ. Τσολάκη Αντώνιο και κ. Γιαννακόπουλο Κωνσταντίνο. Επίσης θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε την εταιρία Solid 3D για την εκτύπωση των δοκιμίων και την εταιρία Εβεταμ ΑΕ για τη χορήγηση του εργαστηριακού τους εξοπλισμού για το πείραμα του εφελκυσμού.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	8
ABSTRACT	8
ΣΚΟΠΟΣ	10
SCOPE	10
1. ΒΑΣΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ	12
1.1 Δομή και μηχανικές ιδιότητες	12
1.2 Δυναμική ανάλυση ιξωδοελαστικών υλικών	14
1.3 Φωτοπολυμερή	16
2. ΒΑΣΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΤΗΣ ΣΤΕΡΕΟΛΙΘΟΓΡΑΦΙΑΣ ΓΙΑ ΠΟΛΥΜΕΡΗ ΥΛΙΚΑ	19
2.1 Βασικά χαρακτηριστικά	19
2.2 Συγκριτική αξιολόγηση βασικότερων μεθόδων 3d printing	21
3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ	26
3.1 Μηχανικές δοκιμές και διεθνές στάνταρτ εφελκυσμού σε πολυμερή	26
3.2 Μηχανές εφελκυσμού	29
3.3 Παράμετροι σύμφωνα με ASME D368	33
3.4 Το δοκίμιο εφελκυσμού κατά D 638	34
3.5 Δοκιμές σε πολυμερή παραχθέντων με 3d printing	36
3.6 Διαδικασία δοκιμής	37
3.4 Επεξεργασία των μετρήσεων	38
4. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ	41
4.1 Γενικά	41
4.2 Διερεύνηση της ολκιμότητας (elongation)	44
4.3 Διερεύνηση του μέτρου ελαστικότητας (Young's modulus)	46
4.4 Διερεύνηση του ορίου διαρροής (yield stress)	48
4.5 Διερεύνηση του ορίου θραύσης (break stress)	49
5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	53
5.1 Σχολιασμός αποτελεσμάτων	54
5.2 Συμπεράσματα	56

5.3 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα	57
6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	59

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία εξετάζονται οι μηχανικές ιδιότητες δοκιμίων εφελκυσμού κατασκευασμένων με την τεχνολογία Polymer Jetting. Η συγκεκριμένη τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης χρησιμοποιείται κυρίως για την παραγωγή εξαρτημάτων από πολυμερή μέσω έγχυσης επάλληλων στρώσεων του υλικού. Συγκεκριμένα, παρήχθη ένας αριθμός εξαρτημάτων στο σχήμα του κλασσικού δοκιμίου εφελκυσμού με τρεις προσανατολισμούς επάλληλων στρώσεων, κατακόρυφο, εγκάρσιο και οριζόντιο. Τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε δοκιμή εφελκυσμού κατά το πρότυπο ASTM D368 (ισοδύναμο ISO 527-1) και καταγράφηκε η ασκούμενη δύναμη συναρτήσει της μετατόπισης του συστήματος συγκράτησης. Από την επεξεργασία των μετρήσεων προέκυψαν συμπεράσματα που περιγράφουν πλήρως την μηχανική συμπεριφορά των υλικών που παράγονται με καθέναν από τους τρεις προσανατολισμούς. Συγκεκριμένα διερευνήθηκε η ολκιμότητα και η αντοχή. Έπειτα, εξήχθησαν βασικά συμπεράσματα για τον βέλτιστο σχεδιασμό εξαρτημάτων με τη μέθοδο polymer jetting και διατυπώθηκαν συγκεκριμένες προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.

ABSTRACT

In this thesis, the mechanical properties of conventional “dogbone” tensile specimens produced by Polymer Jetting (PJ) are examined. The PJ is a 3d printing method used for producing polymer parts, by printing consecutive layers of the desired geometry. During this thesis three types of “dogbone” specimens were printed, ten for each of the three possible orientations of the specimen: horizontal, vertical and lateral. The produced specimens were tested according to ASTM D368 (ISO 527-1 equivalent) testing standard. A thorough statistical analysis of the test results has been conducted and a detailed description of the potential mechanical properties with each orientation is documented. Moreover, elongation at break and strength were particularly examined. Using these results the optimum printing orientation using Polymer Jetting method is presented and suggestions for future research are given, based on the challenges tackled and vital experience gained.

ΣΚΟΠΟΣ

Σκοπός της παρούσας ήταν η μελέτη των μηχανικών ιδιοτήτων δοκιμίων που εκτυπώνονται με τη μέθοδο ταχείας προτυποποίησης Polymer Jetting προκειμένου να εξαχθούν συμπεράσματα τόσο για την βέλτιστη τοποθέτηση τους στην τράπεζα εκτύπωσης όσο και να διατυπωθούν σε βασικό επίπεδο κατευθύνσεις για την σχεδίαση εξαρτημάτων για κατασκευή με την συγκεκριμένη μέθοδο.

SCOPE

The aim of this thesis is the study of the mechanical properties of specimens produced by Polymer Jetting 3D printing manufacturing method in order to extract design guidelines for mechanical components produced by the aforementioned method and for design optimization in terms of stiffness and strength.

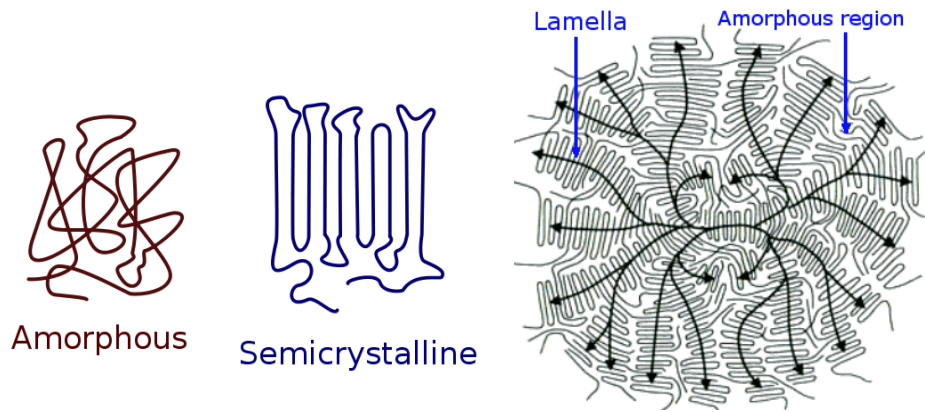
1. ΒΑΣΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ

1.1 Δομή και μηχανικές ιδιότητες

Τα πολυμερή είναι μόρια μεγάλου μεγέθους (μακρομόρια) που αποτελούνται από επαναλαμβανόμενες δομικές μονάδες (μονομερή). Μπορεί να έχουν φυσική προέλευση (λ.χ. κυτταρίνη, καουτσούκ), είτε να μην λαμβάνονται απευθείας από τη φύση και να είναι συνθετικά (λ.χ. PVC, σιλικόνες).

Επιπλέον, ανάλογα με τις θερμομηχανικές τους ιδιότητες, διακρίνονται σε θερμοπλαστικά (λ.χ. PE, PP, PMMA), τα οποία διαθέτουν δομή ευαίσθητη στις θερμοκρασιακές μεταβολές, σε θερμοσκληρυνόμενα ή θερμοσταθερά (λ.χ. πολυεστέρες, εποξειδικές ρητίνες), τα οποία είναι συνήθως άμορφα και πιο άτηκτα και σε ελαστομερή (λ.χ. σιλικόνες, καουτσούκ) τα οποία εμφανίζουν υπερελαστική συμπεριφορά σε μεγάλο εύρος θερμοκρασιακών μεταβολών και συνθηκών περιβάλλοντος. Αυτός είναι και ο λόγος για τον οποίο στη παρούσα εργασία θα γίνει αναφορά στις δύο πρώτες κατηγορίες πολυμερών, τα οποία χαρακτηρίζονται μηχανικά από ιξωδοελαστική συμπεριφορά.

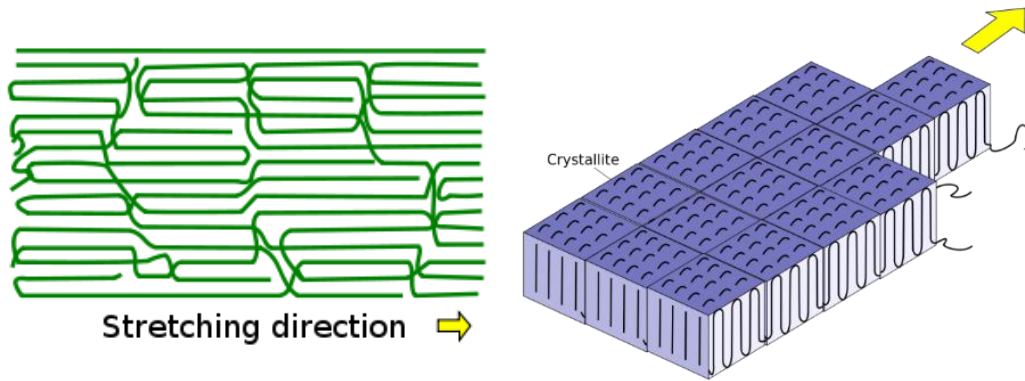
Τα θερμοπλαστικά πολυμερή αποτελούνται από μακριές μοριακές (πολυμερικές) αλυσίδες οι οποίες στην υγρή τους φάση εμφανίζουν ακανόνιστη και πεπλεγμένη μορφή. Κάποια πολυμερή διατηρούν αυτή την άτακτη δομή κατά τη διαδικασία της απόψυξης και έτσι σχηματίζουν στερεά με άμορφη κρυσταλλική δομή. Σε άλλα πολυμερή, οι αλυσίδες αναδιπλώνονται σχηματίζοντας υψηλότερου βαθμού τάξης περιοχές, οι οποίες ονομάζονται λαμέλλες (lamellae). Ωστόσο ακόμα και σε αυτή τη περίπτωση συνυπάρχουν κρυσταλλικές και άμορφες περιοχές. Συνήθως ο βαθμός κρυσταλλικότητας ενός πολυμερούς κυμαίνεται μεταξύ 10-80% και συναρτάται άμεσα με τη διαδικασία απόψυξης και των συνθηκών διαμόρφωσης του πολυμερούς.



Αυτός είναι και ο λόγος που τα πολυμερή θεωρούνται ημι-κρυσταλλικά (semi-crystalline) υλικά. Η ανάπτυξη των κρυσταλλικών περιοχών εκτυλίσσεται κατά προτίμηση προς την κατεύθυνση της μέγιστης θερμοκρασιακής διαφοράς κατά τη διαδικασία της απόψυξης. Στην περίπτωση ενός υψηλού θερμοκρασιακού δυναμικού σε μια κατεύθυνση, όπως για παράδειγμα κατά τη παραγωγή κάποιου φιλμ ή ίνας πολυμερούς, η ανάπτυξη λαμελών γίνεται με συγκεκριμένο προσανατολισμό και με τη μορφή δενδριτών. Διαφορετικά, στην περίπτωση για παράδειγμα ενός πολυμερούς, με ίδιας τάξης μεγέθους διαστάσεις, η κατανομή της θερμοκρασίας είναι περισσότερο ισοτροπική, με αποτέλεσμα την ακτινική ανάπτυξη λαμελών που θα οδηγήσει στον σχηματισμό μεγαλύτερων σφαιρικών κρυσταλλικών περιοχών που ονομάζονται σφαιρουλίτες (spherulites).

Συγκριτικά, η κρυσταλλική δομή εξασφαλίζει πιο ανθεκτικό πολυμερές (υψηλότερο μέτρο ελαστικότητας, αλλά συγχρόνως το καθιστά πιο ψαθυρό, με αποτέλεσμα τα πολύ κρυσταλλικά πολυμερή να μην επιδεικνύουν την κλασική συμπεριφορά των πλαστικών μετά το όριο διαρροής τους.

Το βασικότερο χαρακτηριστικό από τη σκοπιά του μηχανισμού ενός κρυσταλλικού πολυμερούς είναι ο προσανατολισμός ή κατευθυντικότητα (clini-city) του κρυστάλλου, καθώς περιγράφει την προτιμώμενη διεύθυνση που ακολουθούν τα μόρια ή συγκροτήματα μορίων σε στερεά κατάσταση σε ειδικές συνθήκες διαμόρφωσης του πολυμερούς. Αναφέρεται κυρίως στην περίπτωση πολυμερικών ινών, φύλλων και φιλμ, τα οποία υπό την επίδραση μηχανικής καταπόνησης (κατ' εξοχήν σε τάνυση) παρουσιάζουν τμήματα (αλυσίδες και περιοχές) που προσανατολίζονται κατά μήκος της διεύθυνσης φόρτισης. Ένας ακόμη τρόπος ελέγχου του προσανατολισμού είναι ο έλεγχος της απόψυξης στο χώρο (temperature grad control). Η κατευθυντικότητα σε κρυσταλλικό επίπεδο αντανακλάται στο μακρο-επίπεδο με την ανισοτροπία της μηχανικής συμπεριφοράς ενός πολυμερούς.



1.2 Δυναμική ανάλυση ιξωδοελαστικών υλικών

Το βασικό χαρακτηριστικό που διέπει τη μοντελοποίηση της μηχανικής συμπεριφοράς των ιξωδοελαστικών υλικών είναι η εξάρτηση του εγγενούς μηχανισμού απόσβεσης που διαθέτουν από τη θερμοκρασία και την ταχύτητα επιβολής παραμόρφωσης. Η μηχανική συμπεριφορά των περισσότερων πολυμερών μπορεί να μοντελοποιηθεί ως ιξωδοελαστική.

Ο σημαντικότερος παράγοντας που επηρεάζει την μηχανική συμπεριφορά ενός ιξωδοελαστικού υλικού είναι η δυναμική δυσκαμψία (dynamic stiffness), η σχέση δηλαδή μεταξύ της τάσης και παραμόρφωσης η οποία είναι πιο συνθέτη σε σχέση με τη γνωστή σχέση που διέπει την συσχέτιση τάσης και παραμόρφωσης για στερεά της κλασσικής Θεωρίας της Ελαστικότητας.

Πολλές φορές η μελέτη της δυναμικής συμπεριφοράς των πολυμερών γίνεται στο πεδίο της συχνότητας. Σε αυτή τη περίπτωση η τάση και η παραμόρφωση είναι συναρτήσεις του χρόνου και μάλιστα αρμονικές, παρουσιάζουν ωστόσο διαφορά φάσης, όπως φαίνεται στην εξίσωση:

$$\begin{aligned}\tau(t) &= \tau_0 \sin(\omega t) \\ \varphi(t) &= \varphi_0 \sin(\omega t - \psi)\end{aligned}$$

Για ένα ιξωδοελαστικό στερεό, η διαφορά φάσης σημαίνει ότι υπάρχει ένας όρος που εξαρτάται από την ταχύτητα επιβολής παραμόρφωσης στην σχέση τάσης-παραμόρφωσης:

$$\tau = G\varphi + \frac{G\eta}{|\omega|} \frac{d\varphi}{dt}$$

όπου θεωρούμε $G = \frac{\tau_0}{\varphi_0}$ και $\eta = \tan \psi$, το μέτρο της απόσβεσης.

Ο δεύτερος όρος στην παραπάνω εξίσωση σχετίζεται με το ρυθμό επιβολής της παραμόρφωσης και αντιπροσωπεύει την απόσβεση (damping) ή απορρόφηση ενέργειας (energy dissipation) η οποία συμβαίνει σε ένα ιξωδοελαστικό στερεό όταν δεχτεί μια αρμονική διέγερση.

Εναλλακτικά, χρησιμοποιώντας την αλγεβρική ταυτότητα:

$$\exp(i\omega t) = e^{i\omega t} = \cos \omega t + i \sin \omega t$$

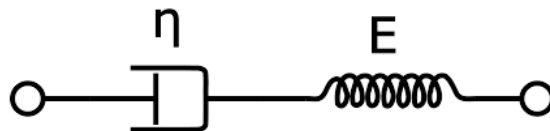
η προηγούμενη εξίσωση μπορεί να γραφεί:

$$\tau = G\varphi + \frac{G\eta}{|\omega|} i\omega\varphi = G\left(1 + i\eta \frac{\omega}{|\omega|}\right)\varphi$$

$$\tau = G(1 + i\eta)\varphi$$

Τα κλασικά μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν για τη μοντελοποίηση της ιξωδοελαστικής συμπεριφοράς των υλικών με τη χρήση στοιχείων μάζας, απόσβεσης και ελατηρίου αποτελούν τα μοντέλα Maxwell και Voigt αλλά και αρκετά ακόμη που προέκυψαν μεταγενέστερα και αξιοποιούνται ανάλογα με την επιθυμητή ακρίβεια που απαιτείται από την εκάστοτε εφαρμογή. Το απλούστερο μοντέλο είναι το μοντέλο Maxwell για το πιο ενδεικτικά αναφέρεται ότι μοντελοποιεί την ιξωδοελαστική συμπεριφορά ενός υλικού με τη χρήση ενός ελατηρίου και ενός αποσβεστήρα σε σειρά. Η σύνθετη δυσκαμψία του συστήματος είναι κατ' αντιστοιχία με τα παραπάνω:

$$k^* = k(1 + i\eta) = \frac{i\omega kc}{k + i\omega c}$$



1.3 Φωτοπολυμερή

Η χρήση πηγής φωτός στην επεξεργασία των πολυμερών εισήχθη τον 19^ο αιώνα, όπου τα φωτοπολυμερή βρήκαν μεγάλη εφαρμογή στην κατασκευή ηλεκτρονικών και στις γραφικές τέχνες. Τα φωτοπολυμερή είναι διαλύματα ευαίσθητα σε ένα μέρος του φάσματος του φωτός, τα οποία πολυμερίζονται μετά από έκθεση σε υπεριώδη (UV) ακτινοβολία. Υπάρχουν πολλά είδη πολυμερών, τα οποία μάλιστα απαντώνται σε διαφορετικές καταστάσεις της ύλης- άλλα είναι υγρά άλλα στερεά και άλλα έχουν τη μορφή φυλλωτού υλικού (sheet). Στη γενική περίπτωση τα πολυμερή μπορεί να περιέχουν διάφορα συστατικά συμπεριλαμβανομένων φωτοεκκινητών, ολιγομερή, πρόσθετα, χημικούς καταλύτες, πλαστικοποιητές και χρωστικές ουσίες. Ωστόσο, τα τρία βασικά χαρακτηριστικά ενός φωτοπολυμερούς υλικού είναι τα μονομερή, τα ολιγομερή και οι φωτοεκκινητές.

Ολιγομερή

Τα ολιγομερή είναι αντιδρώντα μόρια μέσου μοριακού βάρους αποτελούμενα από μερικά μονομερή, συνήθως διμερή, τριμερή και τετραμερή. Συνήθως είναι υγρά σε θερμοκρασία δωματίου και χρησιμοποιούνται σαν μελάνια, κόλλες ή υλικά επιστρώσεων. τα τυπικά πολυμερή εξαρτώνται κατά 50-80% από ολιγομερή.

Μονομερή

Τα μονομερή είναι μικρά μόρια δεσμευμένα με χημικούς δεσμούς που συνδέονται με άλλα μονομερή, ολιγομερή ή πολυμερή με ένα επαναλαμβανόμενο μοτίβο για την δημιουργία νέων πολυμερών. Κατά βάση τα φωτοπολυμερή αποτελούνται από μονομερή βασισμένα σε ακρυλικά σε ποσοστό 10-40%. Κατά τη διαδικασία του πολυμερισμού δύο τύποι μονομερών μπορούν να χρησιμοποιηθούν: πολύ-λειτουργικά (multifunctional) μονομερή ή μη πολύ-λειτουργικά.

Φωτοεκκινητές

Οι φωτοεκκινητές μετατρέπουν την υπεριώδη ακτινοβολία σε χημική ενέργεια δημιουργώντας ελεύθερες ρίζες ή κατιόντα κατά την έκθεσή τους σε αυτή. Κατά την αντίδραση με το υπεριώδες φως μπορούν να διασπαστούν σε τρία ή περισσότερα μέρη και κατ' ελάχιστο ένα από τα μέρη αντιδρά με ολιγομερή ή μονομερή και τα συνενώνει. Υπάρχουν φυσικά είτε είναι συντίθενται χημικά και είναι ευαίσθητα σε συγκεκριμένα μήκη φωτός. Η μεγαλύτερη ανάπτυξη τους σημειώθηκε τη δεκαετία μεταξύ 1960-1970 από εταιρείες όπως η BASF, AKZOCIBAGEIGY κλπ.

Τα φωτοπολυμερή μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε τρεις βασικές κατηγορίες με βάση την τα χαρακτηριστικά τους και κατ' επέκταση την εφαρμογή τους.

Κλασσικά πολυμερή

Είναι σύνθετα πολυμερή (πχ ακρυλικά και εποξειδικά) τα οποία χρησιμοποιούνται σε κόλλες, επιστρώσεις και γραφικές τέχνες. Από τον πολυμερισμό τους προκύπτει η φωτοευαισθησία που παρουσιάζουν.

Σύνθετο σύστημα

Το σύστημα αναπτύχθηκε προκειμένου να ξεπεραστούν προβλήματα συνυφασμένα με μονομερή-φωτοεκκινητές όπως είναι η μικρή κινηματική συνεκτικότητα σε εποξειδικές ρητίνες. Το σύστημα ενισχύει την αποτελεσματικότητα του πολυμερισμού υπό την αλληλεπίδραση μεταξύ μονομερών, φωτοεκκινητών και προ-πολυμερών. Επιπλέον, συμβάλλει στην παραγωγή μικροηλεκτρονικών συσκευών (πολυαμίδια), οι οποίες παρουσιάζουν αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες. Ακόμη, φωτοπολυμερισμός και συστήματα φωτοεκκινητών είναι αρκετά ευαίσθητες στο φάσμα του ορατού φωτός, το οποίο κυμαίνεται μεταξύ 400-700nm.

Νέα φωτοπολυμερή

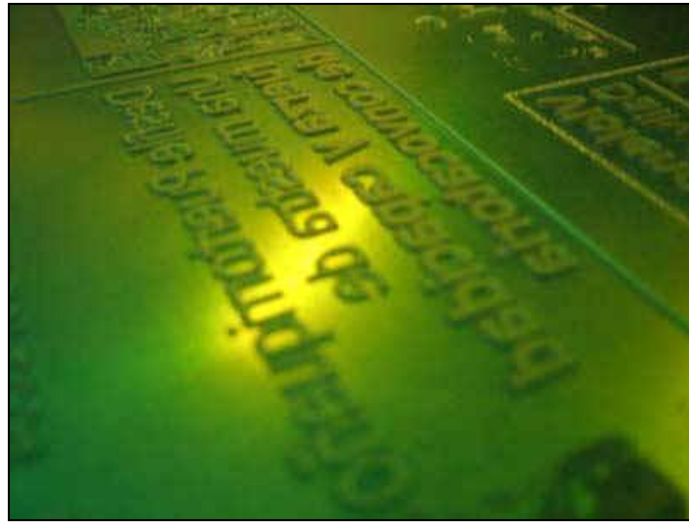
Τα νέα φωτοπολυμερή συμμετέχουν στον σχηματισμό όλων των απαραίτητων μερών σε συγκεκριμένα ποσοστά προκειμένου να δημιουργηθεί μια μακρομοριακή δομή.

Η κύρια διαφορά μεταξύ φωτοπολυμερών και άλλων τύπων πολυμερών είναι το ότι αυτά διεγείρονται με την ακτινοβολία κατάλληλης συχνότητας. Σε αυτή την περίπτωση, για να πραγματοποιηθούν οι χημικές αντιδράσεις, πρέπει τα μόρια των μονομερών να απορροφήσουν φως κατάλληλης συχνότητας, ώστε να διεγερθούν και να αντιδράσουν μεταξύ τους δημιουργώντας πολυμερή.

Σε αυτή την περίπτωση, απαιτείται η προσθήκη φωτοεκκινητών που απορροφούν φως και παράγουν ενεργές ρίζες. Επειδή τα άκορεστα μόρια των μονομερών χρειάζονται επαρκή ενέργεια για διέγερση και καταστροφή των αρχικών δεσμών τους, προκειμένου να δώσουν τα προϊόντα -πολυμερή -, το ορατό φως δεν τους αρκεί, οπότε χρειάζονται συχνότητες του υπεριώδους φάσματος και για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται κατάλληλες λάμπες UV.

Για την κατασκευή των εύκαμπτων πλακών εκτύπωσης χρησιμοποιείται UV ακτινοβολία για τον πολυμερισμό, οπότε δημιουργείται διαφορά μεταξύ φωτισμένου και αφώτιστου υλικού. Η επιφάνεια που δε φωτίζεται παραμένει μαλακή και μπορεί να απομακρυνθεί με

το κατάλληλο διαλυτικό και βούρτσα, ενώ στην αδιάλυτη επιφάνεια (φωτισμένη) δημιουργείται η εικόνα - θέμα που θα δεχτεί το μελάνι.



2. ΒΑΣΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΤΗΣ ΣΤΕΡΕΟΛΙΘΟΓΡΑΦΙΑΣ ΓΙΑ ΠΟΛΥΜΕΡΗ ΥΛΙΚΑ

Οι τελευταίες εξελίξεις στην τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης επιτρέπει την εκτύπωση οποιουδήποτε προϊόντος μέσα σε ελάχιστο χρόνο. Από υποδήματα μέχρι κοπτικά εργαλεία με την τεχνολογία 3D εκτύπωσης μπορεί κανείς να κερδίσει χρόνο και φυσικά κόστος. Επιπλέον η τεχνογνωσία που απαιτείται είναι ελάχιστη σε σχέση με τις παραδοσιακές μεθόδους παραγωγής των πολυμερών (extrusion και injection molding). Εδώ δεν απαιτούνται εξειδικευμένοι τεχνίτες προκειμένου να παραχθούν ικανοποιητικά αποτελέσματα ενώ παράλληλα το κόστος αυτών των μηχανών ολοένα και μειώνεται. Έχει παρατηρηθεί ότι ο σχεδιασμός των εξαρτημάτων που πρόκειται να παραχθούν με αυτή τη μέθοδο μπορεί να είναι απαιτητική σε πολλές περιπτώσεις. Ο σχεδιασμός των προϊόντων γίνεται με τη χρήση λογισμικών τρισδιάστατης μοντελοποίησης CAD. Οι περισσότεροι εκτυπωτές δέχονται τα παραδοσιακά 3D αρχεία που προορίζονται για στερεολιθογραφία με κατάληξη *.stl* (Standard Tessellation Language).

2.1 Βασικά χαρακτηριστικά

Οι μέθοδοι τρισδιάστατης εκτύπωσης μπορούν να ομαδοποιηθούν σε δύο ομάδες με βάση την αρχή λειτουργίας τους.

- Η πρώτη περιλαμβάνει όλες εκείνες τις μεθόδους εναπόθεσης υλικού. Οι εκτυπωτές είναι γνωστοί ως επιλεκτικής απόθεσης (selective deposition printer). Αυτός ο τύπος εκτυπωτή χρησιμοποιείται κυρίως σε οικιακές εφαρμογές και όπως είναι προφανές λειτουργεί εναποθέτοντας την πρώτη ύλη σε κάθε στρώση προκειμένου να δημιουργήσει την επιθυμητή γεωμετρία. Με κατάλληλα στόμια εναποθέτει υλικό συμπιέζοντας (squeezing) το σε μορφή πάστας, στερεή ή υγρή μορφή είτε με τη μορφή σπρέι.
- Η δεύτερη ομάδα περιλαμβάνει εκτυπωτές που επιτυγχάνουν την επιθυμητή γεωμετρία μέσω διάχυσης είτε μέσω συσσωμάτωσης (binding). Ονομάζονται επιλεκτικής κόλλησης (selective binder) καθώς συγκολλούν την πρώτη ύλη σε κάθε στρώση χρησιμοποιώντας υπεριώδη ακτινοβολία για την στερεοποίηση σκόνης (powder) πρώτης ύλης συνήθως πολυμερούς υλικού για την παραγωγή επιθυμητής

γεωμετρίας. Αυτή η κατηγορία εκτυπωτών αποτελούν τις πρώτες μορφές τρισδιάστατης εκτύπωσης, ωστόσο τεχνικές που ανήκουν σε αυτή όπως η στερεολιθογραφία (stereolithography) και το laser sintering ακόμη καταλαμβάνουν σημαντικό μέρος της βιομηχανίας 3D εκτυπώσεων. Συγκεκριμένα η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για την παρούσα εργασία ανήκει στη συγκεκριμένη κατηγορία.

Οι ευρύτερα γνωστές μέθοδοι για την ταχεία κατασκευή προϊόντων γενικότερα είναι οι παρακάτω:

- Στερεολιθογραφία (SLA)
- Polyjet photopolymer / Jetted photopolymer (J-P)
- Selective laser sintering (SLS)
- 3DP – Three-dimensional printing
- Fused deposition modeling (FDM)
- Syringe extrusion
- Selective laser melting (SLM)
- Direct metal laser sintering (DMLS)
- Electron beam melting (EBM)
- Laser deposition technology (LDT)
- Laminated object manufacturing (LOM)
- Laser engineered Net Shaping (LENS)

Από αυτές οι πέντε πρώτες είναι οι συχνότερα χρησιμοποιούμενες. Η στερεολιθογραφία και η τεχνολογία polyjet συγκεκριμένα εστιάζονται σε εξαρτήματα από πολυμερή ενώ οι υπόλοιπες χρησιμοποιούν μέταλλα, σκόνη, κεραμικά, σύνθετα υλικά και πολυμερή.

2.2 Συγκριτική αξιολόγηση βασικότερων μεθόδων 3d printing

Στερεολιθογραφία (SLA)

Η αρχή λειτουργίας της στερεολιθογραφίας είναι η μετατροπή πολυμερούς υγρής μορφής σε στερεή με την χρήση υπεριώδους λέιζερ. Η συγκεκριμένη τεχνική είναι η αρχαιότερη στην βιομηχανία της 3D εκτύπωσης και αναπτύχθηκε από τον Hull το 1984. Η SLA χρησιμοποιεί υγρό φωτοπολυμερές σαν πρώτη ύλη, το οποίο όταν εκτεθεί σε κατάλληλη πλατφόρμα, υπεριώδες laser ακτινοβολεί πάνω σε αυτή εκκινώντας τη διαδικασία πολυμερισμού. Έτσι κάθε επίπεδο της επιθυμητής γεωμετρίας χτίζεται με την σκλήρυνση πολυμερούς με χρήση δέσμης laser.

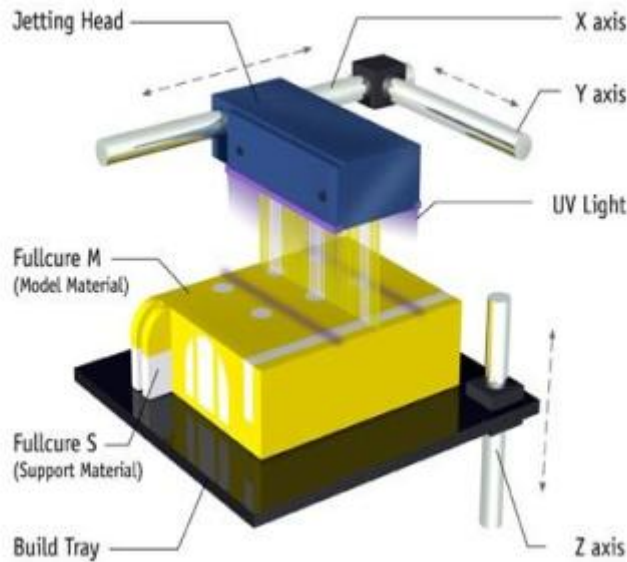
Ιστορικά, ρητίνες που χρησιμοποιούνται στην SLA ήταν μικρού μοριακού βάρους πολυμερή όπως πολυακρυλικά και εποξειδικά μακρομόρια, τα οποία έδιναν υαλώδεις αλυσίδες μεσω φωτοπολυμερισμού. Σήμερα προτιμώνται κυρίως εποξειδικές ρητίνες κυρίως λόγω της μεγαλύτερης αντοχής σε υψηλές θερμοκρασίες, μικρότερης απορρόφησης υγρασίας και μικρότερης συρρίκνωσης. Οι περιοχές εφαρμογής της συγκεκριμένης τεχνολογίας είναι κυρίως:

- Προϊόντα ηλεκτρονικής
- Φαρμακευτικά
- Αθλητικά
- Συσκευασία
- Εξαρτήματα σε στρατιωτικές εφαρμογές
- Εξαρτήματα αυτοκινητοβιομηχανίας

Polyjet photopolymer / Jetted photopolymer (J-P)

Πρόκειται για μια διαδικασία προσθήκης που χρησιμοποιεί φωτοπολυμερές σε υγρή μορφή για την δημιουργία της επιθυμητής γεωμετρίας σε στερεή κατάσταση. Χρησιμοποιείται από κεφαλές έγχυσης, οι οποίες κινούνται σε δύο άξονες σχηματίζοντας κάθε φορά μία στρώση φωτοπολυμερούς πάνω στην πλατφόρμα κατασκευής. Μία από τις κεφαλές έγχυσης προορίζονται για το τελικό προϊόν ενώ οι υπόλοιπες για το υποστηρικτικό υλικό, το οποίο στη συνέχεια αφαιρείται. Σε αυτή τη περίπτωση το φωτοπολυμερές πολυμερίζεται στιγμιαία ή όπως θα δούμε στη συνέχεια μέσα σε ένα πολύ μικρό χρονικό διάστημα σε

κάθε επίστρωση μέσω κάποιας κατάλληλα προσαρμοσμένης πηγής υπεριώδους ακτινοβολίας επιτυγχάνοντας την επιθυμητή γεωμετρία με μεγάλη ακρίβεια. Όταν αυτή είναι έτοιμη, τότε με τη βοήθεια δέσμης νερού σε υψηλή πίεση (waterjet) αφαιρείται το υποστηρικτικό υλικό με αποτέλεσμα το τελικό προϊόν αν είναι έτοιμο προς χρήση καθώς δεν απαιτείται κάποια περαιτέρω διαδικασία πολυμερισμού.



Αυτή η τεχνική προσφέρει τη δυνατότητα έγχυσης του υγρού φωτοπολυμερούς σε πολύ λεπτές στρώσεις ακόμη και τάξης των 16μm. Όπως γίνεται αντιληπτό αυτή η τεχνολογία έχει συμβάλει στην υλοποίηση σημαντικών ιατροφαρμακευτικών εφαρμογών.

Το κόστος της πρώτης ύλης είναι συγκριτικά υψηλό, ωστόσο το τελικό προϊόν παρουσιάζει αρκετά καλές μηχανικές ιδιότητες σε σχέση με προϊόντα άλλων μεθόδων που παράγουν συνήθως ψαθυρά φωτοπολυμερή.

Ένα ακόμη σημαντικό στοιχείο της συγκεκριμένης τεχνολογίας 3D εκτύπωσης είναι ότι επιτρέπει την χρήση πολλών υλικών ταυτόχρονα. Οι εκτυπωτές Polymer Jetting περιέχουν διάφορες κεφαλές και δοχεία για διαφορετικές πρώτες ύλες για την παραγωγή ποικιλίας προϊόντων σε μία μόνο εκτύπωση, κάτι το οποίο αυξάνει ριζικά τις δυνατότητες παραγωγής.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η γκάμα των υλικών που έχουν αναπτυχθεί για χρήση σε 3D εκτύπωση με Polymer Jetting:

- Polyjet digital material

Τα ψηφιακά υλικά αποτελούν έναν συνδυασμό διαφορετικών πολυμερών σε συγκεκριμένες αναλογίες προκειμένου να επιτευχθούν βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες.

- Ψηφιακό ABS

Το συγκεκριμένο υλικό είναι σχεδιασμένο για να υποκαταστήσει το συνηθισμένο ABS που χρησιμοποιείται σε πληθώρα εφαρμογών με τη διαφορά ότι μπορεί να επιτύχει μεγαλύτερη αντοχή σε κρούση και απορρόφηση κραδασμών συνδυάζοντας αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες και μηχανική αντοχή. Χρησιμοποιείται για ηλεκτρονικά, πλαίσια τηλεφωνικών συσκευών, καλύμματα εξαρτημάτων κινητήρων.

- Υψηλών θερμοκρασιών

Πολυμερή υψηλών θερμοκρασιών είναι ιδιαίτερα χρήσιμα σε εφαρμογές ελέγχου της ροής σε σωληνώσεις με θερμό εργαζόμενο μέσο. Αυτός ο τύπος υλικού διευρύνει τις λειτουργικές παραμέτρους του υλικού.

- Διάφανα πολυμερή

Τα συγκεκριμένα πολυμερή χρησιμοποιούνται κυρίως σε εικαστικές εφαρμογές, φακούς επαφής, βαφές και ιατρικές εφαρμογές. Η 3D εκτύπωση προσφέρει μεγάλες δυνατότητες καλλιτεχνικών μοτίβων.

- Αδιάφανα έγχρωμα υλικά

Αυτοί οι τύποι υλικού μπορούν να δώσουν προϊόντα σε μια μεγάλη γκάμα αποχρώσεων όπως μαύρο, μπλε, λευκό, γκρίζο σε ένα πλήθος εφαρμογών. Τα υλικά αυτά είναι στιβαρά και μεγάλης αντοχής οπότε μπορούν να αξιοποιηθούν ακόμα και σε κινούμενα μέρη.

- Ψηφιακό πολυπροπυλένιο

Αυτά τα υλικά μοιάζουν με το γνωστό PP, έχουν όμως καλύτερη αντοχή στη θερμοκρασία. Το συγκεκριμένο υλικό είναι ιδανικό για μια πληθώρα εφαρμογών όπου απαιτείται μηχανική αντοχή, ελαστικότητα, στιβαρότητα αλλά και καλή εμφάνιση. Τέτοια παραδείγματα είναι εργαστηριακός εξοπλισμός, εξαρτήματα της αυτοκινητοβιομηχανίας κτλ.

- Ψηφιακά ελαστομερή

Παρουσιάζουν τα χαρακτηριστικά των ελαστομερών, κατά βάση την υπερελαστική μηχανική συμπεριφορά και βρίσκουν εφαρμογή σε διάφορα πεδία όπως οι καθίσματα, υποδήματα, εκθεσιακά μοντέλα κλπ. Επιπλέον μπορεί κανείς να τα συνδυάσει με κάποιο από τα αδιάφανα έγχρωμα υλικά.

- Ιστοσυμβατά

Έχουν σχεδιαστεί για συγκεκριμένες εφαρμογές μέσα σε ζωντανούς οργανισμούς. Αυτή η νέα και πολύ αναπτυσσόμενη ομάδα υλικών επιδεικνύει διαφάνεια στο χρώμα αλλά και μεγάλη ακρίβεια διαστασιολογική.

- Πολυμερή για οδοντιατρικές εφαρμογές (dental)

Τα συγκεκριμένα υλικά έχουν σχεδιαστεί για οδοντιατρικές και παρόμοιες εφαρμογές. Για την ραγδαία αναπτυσσόμενη βιομηχανία οδοντιατρικών εφαρμογών, η 3D εκτύπωση έχει φέρει μια νέα εποχή στην παραγωγή σφραγισμάτων, γεφυρών κ.α. με εξαιρετική ακρίβεια, χαμηλό κόστος και καλή ανάλυση.

Fused Deposition Modeling (FDM)

Η μέθοδος FDM είναι μια σχετικά παλαιότερη μέθοδος 3d printing από την STRATASYS. Κεφαλή ελεγχόμενης θερμοκρασίας εγχύει θερμοπλαστικό σε στρώσεις. Σε αυτή τη διαδικασία το υλικό μεταβαίνει από την στερή φάση σε ένα μείγμα υγρής-στερεής και ακολουθείται συγκεκριμένη διαδρομή, ελεγχόμενη από Η/Υ για το χτίσιμο της γεωμετρίας. Είναι απαραίτητη η ύπαρξη συσκευής στήριξης των τεμαχίων για να ολοκληρωθεί η γεωμετρία επιτυχώς. Τα συχνότερα χρησιμοποιούμενα υλικά είναι AABS, PC, PC-ABS, ABSI κ.α. Η FDM έχει καλύτερα αποτελέσματα σε άμορφα παρά σε κρυσταλλικά υλικά. Και αυτό γιατί τα άμορφα πολυμερή έχουν καλύτερα ρεολογικά χαρακτηριστικά για τη συγκεκριμένη εφαρμογή, εμφανίζουν δηλαδή μικρότερη συνεκτικότητα. Εφαρμογές της συγκεκριμένης μεθόδου απαντώνται στην Αυτοκινητοβιομηχανία, την βιομηχανία φαρμάκων και σίτισης. Προτιμάται επίσης πολλές φορές από εργαστήρια και εκπαιδευτικούς οργανισμούς ως μέθοδος ταχείας προτυποποίησης.

Selective laser sintering (SLS)

Αποτελεί μια ακόμη μέθοδο παραγωγής τρισδιάστατων τεμαχίων με προσθήκη υλικού, η οποία χρησιμοποιεί σκόνη μικρής κοκκομετρίας. Για την παραγωγή της γεωμετρίας χρησιμοποιείται αρχείο CAD το οποίο στη συνέχεια χωρίζεται σε μικρο-στρώσεις. Στη συνέχεια μιας υψηλής ισχύος δέσμη λέιζερ λιώνει το υλικό που έχει ήδη αποθεθεί για την

κατασκευή της εκάστοτε στρώσης. Υλικά όπως το τιτάνιο, το αλουμίνιο και το κοβάλτιο χρησιμοποιούνται ενώ η μέθοδος βρίσκει εφαρμογή σε τομείς όπως η αεροδιαστημική και στη βιομηχανία πετρελαίου αλλά και σε ιατρικές εφαρμογές.

3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

3.1 Μηχανικές δοκιμές και διεθνές στάνταρτ εφελκυσμού σε πολυμερή

Ο μηχανικός δεν μπορεί να υπολογίσει την συμπεριφορά ενός μεταλλικού υλικού ούτε να προσδιορίσει τις αποδεκτές καταπονήσεις χωρίς να γνωρίζει τα μηχανικά χαρακτηριστικά του υλικού που πρόκειται να χρησιμοποιήσει. Οι μηχανικές δοκιμές είναι απλές αναπαραγωγίσιμες και τα αποτελέσματα ερμηνεύσιμα και αξιοποιήσιμα κατά τον ίδιο τρόπο από όλους. Για αυτό το λόγο εθνικοί και διεθνείς οργανισμοί όπως η ASTM, ACNOR και ο ISO κανονικοποιούν τις δοκιμές τους. Η κανονικοποίηση αυτή των δοκιμών και των ενδείξεων στις συσκευές των δοκιμών και την βαθμονόμηση τους, στις πειραματικές τεχνικές και στην αξιοποίηση και παρουσίαση των αποτελεσμάτων. Στη συνέχεια θα μελετηθεί η κυριότερη μηχανική δοκιμή που χρησιμοποιείται για τον χαρακτηρισμό των υλικών, το πείραμα του εφελκυσμού, το οποίο και αξιοποιήθηκε στα πλαίσια της παρούσας εργασίας.

Η δοκιμή του εφελκυσμού είναι η συνηθέστερη μηχανική δοκιμή. Συνίσταται στην υποβολή δοκιμίου σε εφελκυστική καταπόνηση κατά τη διάρκεια της οποίας καταγράφεται η προκαλούμενη επιμήκυνση Δl .

Τα δοκίμια εφελκυσμού είναι συνήθως ράβδοι κυκλικής διατομής ή ελάσματα τυποποιημένων διαστάσεων. Η επιμήκυνση μετράται στο κεντρικό τμήμα του δοκιμίου που έχει σταθερή διατομή ανάμεσα σε δύο χαραγές αναφοράς που καθορίζουν το ωφέλιμο μήκος του δοκιμίου (l_0). Τα άκρα του δοκιμίου με τα οποία θα συγκρατηθεί στις αρπάγες της μηχανής εφελκυσμού έχουν ισχυρότερη διατομή.

Ένα βασικό ερώτημα που αξίζει να σχολιασθεί εδώ είναι με ποιο τρόπο και για ποιο λόγο μπορεί κανείς να χρησιμοποιήσει αποτελέσματα πειραματικών δοκιμών.

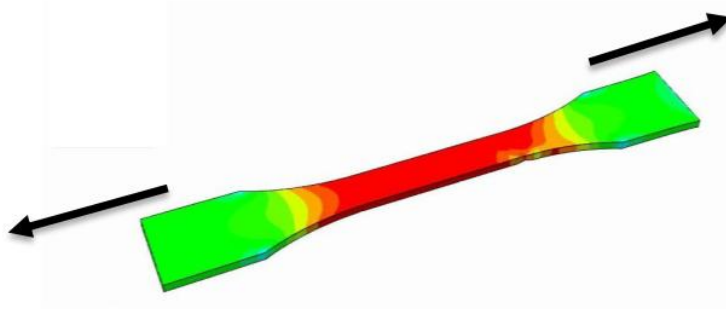
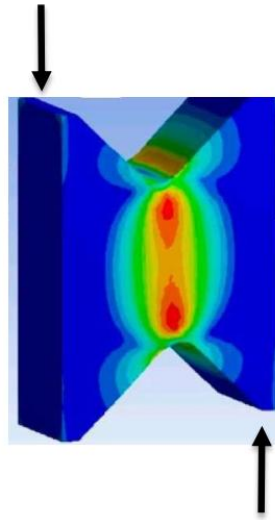
Η ανάγκη αυτή οδήγησε στην ανάπτυξη των κλασικών δοκιμών (εφελκυσμού, στρέψης, διάτμησης) οι οποίες είχαν στη βάση της φιλοσοφίας τους την απαίτηση για εξαγωγή μετρήσεων, αποτελεσμάτων και μεγεθών που αφορούν και θα χαρακτηρίζουν το σύνολο του υλικού του δοκιμίου. Μεγέθη τα οποία περιγράφουν καταστατικά την μηχανική συμπεριφορά ενός υλικού και επιτρέπουν την αναλυτική περιγραφή της εντατικής

κατάστασης κάθε γεωμετρίας που μπορεί να προκύψει από αυτό το υλικό με βάση την θεωρία της Μηχανικής του Παραμορφώσιμου Σώματος. Έτσι προκύπτουν δυο βασικές απαιτήσεις για μια τέτοια δοκιμή:

- Καταπόνηση του υλικού με μία καθαρή εντατική κατάσταση ώστε να μπορεί να συνδεθεί το αποτέλεσμα με ένα από τα γνωστά μεγέθη της Μηχανικής του Παραμορφώσιμου Σώματος. Για παράδειγμα στο τεστ κλασσικό τεστ εφελκυσμού με δοκίμιο τύπου dogbone (Εικόνα 16) παρατηρούμε ότι το υλικό καταπονείται στην περιοχή ενδιαφέροντος (gauge length) από μια ορθή τάση κατά το μήκος του ενώ σε όλες τις άλλες διευθύνσεις είναι ελεύθερο να παραμορφωθεί, ώστε να μη δέχεται καμία εξωτερική καταπόνηση (ορθή και διατμητική) σε κάποια άλλη διεύθυνση. Έτσι μπορεί κανείς να προσδιορίσει το μέτρο ελαστικότητας στη διεύθυνση του μεγαλύτερου άξονα ή Young's Modulus ως:

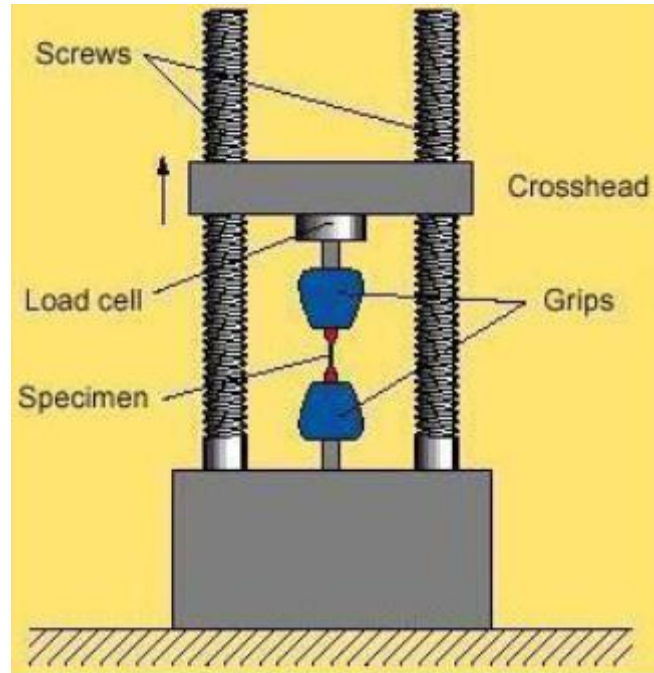
$$\sigma_x = E\varepsilon_x \rightarrow \frac{f_{\text{applied}}}{A} = E \frac{\Delta l}{l_0} \rightarrow E$$

- Για την εξαγωγή συμπερασμάτων για το σύνολο του υλικού είναι αναγκαίο η καταπόνηση να επηρεάζει στον ίδιο βαθμό το σύνολο ή ένα πολύ μεγάλο μέρος του υλικού όπως φαίνεται στο τεστ εφελκυσμού ή στο κλασσικό τεστ διάτμησης κατά Ιοσιπέσκου (Iosipescu test). Ιδιαίτερη σημασία έχει σε αυτή την κατεύθυνση η καταπόνηση του εξεταζόμενου υλικού να είναι απαλλαγμένη από τις συγκεντρώσεις τάσεων που αναπτύσσονται σε μια μακρο-δοκιμή και σε γενικότερο πλαίσιο η καταπόνηση του δοκιμίου σε μία ορισμένη εντατική κατάσταση επιτρέποντας έτσι τη σύνδεση των μετρήσεων με κάποιο από τα μεγέθη της Μηχανικής των Υλικών.



16. Δοκίμο τύπου dog bone.

3.2 Μηχανές εφελκυσμού



Μια τυπική πειραματική διάταξη εφελκυσμού αποτελείται από τα εξής βασικά σημεία:

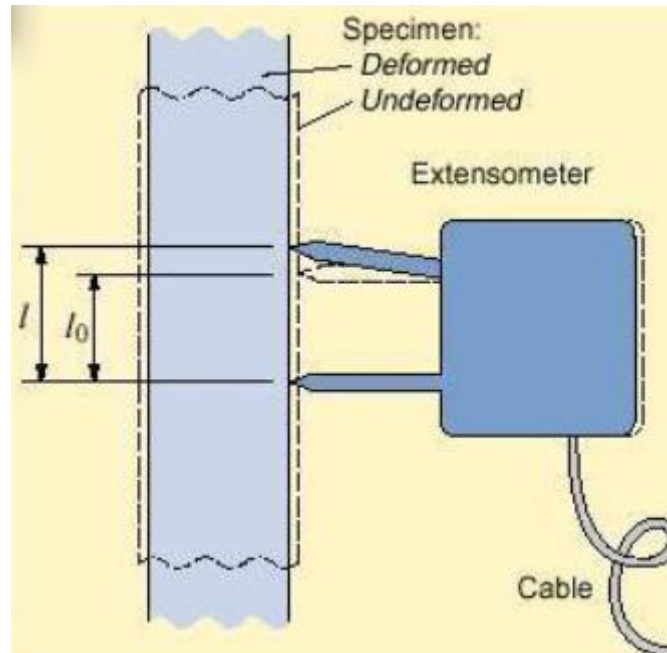
- Ένα σταθερό πλαίσιο (reaction frame) το οποίο απορροφά όλες τις δυνάμεις αντίδρασης. Σε αυτό συμπεριλαμβάνεται και μια συσκευή συγκράτησης (grip) πάνω στο οποίο προσδένεται το δοκίμιο.
- Ένα κινητό μέρος στο οποίο προσδένεται το δοκίμιο και προκαλεί την μετατόπιση. Και εδώ υπάρχει αντίστοιχα συσκευή συγκράτησης συνήθως αυτορρυθμιστή ώστε να παραλαμβάνει όποιες γωνιακές αποκλίσεις μεταξύ του άξονα του τεμαχίου στον οποίο θέλουμε να προκαλέσουμε εφελκυσμό και του άξονα του της μηχανής μπορούν να προκληθούν κατά το σετάρισμα της μηχανής και οι οποίες μπορεί να προκαλέσουν σημαντικές αλλοιώσεις στα αποτελέσματα της δοκιμής. Όπως είναι κατανοητό οι αυτορρυθμιστές συσκευές συγκράτησης πρέπει να μπορούν να ευθυγραμμίσουν το δοκίμιο με τον άξονα της μηχανής αμέσως μόλις ασκηθεί οποιοδήποτε φορτίο ώστε καμία περιστροφή ή ολίσθηση να μη συμβεί μεταξύ μηχανής και δοκιμίου, γεγονός το οποίο θα οδηγούσε σε αποτυχημένη δοκιμή. Φυσικά, οι παραπάνω ισχυρισμοί ποσοτικοποιούνται με βάση το πρότυπο.

Το δοκίμιο πρέπει να συγκρατείται ώστε να υπάρχει ελάχιστη ολίσθηση. Αυτό επιτυγχάνεται με την δημιουργία εγκοπών στην διεπιφάνεια δοκιμίου – συσκευής. Εγκοπές που απέχουν 2.4mm και έχουν βάθος 1.6mm έχει παρατηρηθεί ότι είναι ικανοποιητικές για τα περισσότερα θερμοπλαστικά. Πυκνότερες εγκοπές είναι κατάλληλες για πιο σκληρά πλαστικά, όπως τα θερμοσταθερά. Άλλες αντίστοιχες τεχνικές συγκράτησης έχουν βρεθεί επίσης ιδιαίτερα χρήσιμες όπως ο εγκλωβισμός μεταξύ τεμαχίου και συσκευής κάποιο ύφασμα ή γυαλόχαρτο, ή ακόμα κάποιο συνθετικό ύφασμα με ελαστική επίστρωση όπως είναι για παράδειγμα οι γάζες.

- Μηχανισμός μετάδοσης κίνησης, ο οποίος προκαλεί μετατόπιση με ελεγχόμενο ρυθμό, ελεγχόμενη δηλαδή ταχύτητα και άρα ρυθμό επιβαλλόμενης παραμόρφωσης, σύμφωνα με όσα θα οριστούν παρακάτω για την ταχύτητα διεξαγωγής του πειράματος.
- Δυναμόμετρο, κατάλληλα προσαρμοσμένο, το οποίο θα παίρνει σε συγκεκριμένη συχνότητα μετρήσεις για την ασκούμενη δύναμη στο τεμάχιο. Ο συγκεκριμένος μηχανισμός θα πρέπει να έχει αμελητέα αδράνεια σε σχέση με το δοκίμιο ώστε να μην προκαλεί καμία υστέρηση. Επιπλέον η διακριτική του ακρίβεια του ορίζεται κατ' ελάχιστο +/- 1%.

Η στιβαρότητα της μηχανής που θα φέρει το φορτίο συνολικά θα πρέπει να είναι τέτοια ώστε η παραμόρφωση που θα δέχεται κατά την επιβολή φορτίου να μην είναι μεγαλύτερη από 1% από την συνολική παραμόρφωση στον άξονα επιβολής φορτίου στην ζώνη εφελκυσμού (gage length) του δοκιμίου.

- Μηκυσιόμετρο το οποίο θα παρακολουθεί την απομάκρυνση μεταξύ των συσκευών συγκράτησης. Η απαιτούμενη ακρίβεια πρέπει να είναι τουλάχιστον +/- 10%
- Μηκυσιόμετρο το οποίο θα μετράει την επιμήκυνση του τεμαχίου στη ζώνη εφελκυσμού, καθώς το δοκίμιο εφελκύεται. Είναι επιθυμητό το όργανο να έχει ελάχιστη υστέρηση και ελάχιστη αδράνεια ενώ θα πρέπει περιοδικά να διακριτοποιείται. Για να μπορούν να εξαχθούν αξιόπιστα συμπεράσματα για το μέτρο ελαστικότητας μηκυσιόμετρο με μέγιστο σφάλμα 0.0002 mm/mm πρέπει να χρησιμοποιηθεί.



Η διάταξη η οποία χρησιμοποιήθηκε και ικανοποιεί όλες τις παραπάνω προϋποθέσεις φαίνεται στις εικόνες που ακολουθούν:



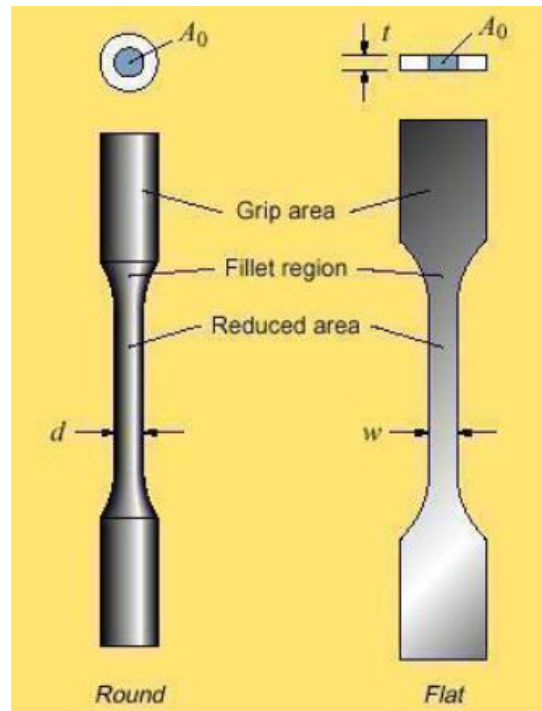
3.3 Παράμετροι σύμφωνα με ASME D368

Το συγκεκριμένο πρότυπο καλύπτει όλη την διαδικασία πειραματικού προσδιορισμού των μηχανικών ιδιοτήτων των κλασικών δοκιμών εφελκυσμού υπό σαφώς ορισμένες συνθήκες προετοιμασίας, θερμοκρασίας, υγρασίας και ταχύτητας ασκούμενης επιμήκυνσης του τεμαχίου. Οι μηχανικές ιδιότητες πολλές φορές μπορεί να μεταβληθούν εξαιτίας των συνθηκών διεξαγωγής του πειράματος και έτσι δόθηκε ιδιαίτερη προσοχή στην τήρηση όλων εκείνων των διαδικασιών που ορίζονται από το πρότυπο. Συνεπώς, για να μπορούμε να ισχυριστούμε ότι όλα τα δοκίμια προετοιμάστηκαν με τον ίδιο τρόπο αποφασίστηκε να παραχθούν όλα με την ίδια μηχανή, STRATASYS, τοποθετημένα στην ίδια πλάκα, με τα ίδια υποστηρίγματα και μάλιστα να εκτυπωθούν όλα ταυτόχρονα. Όλα τα δοκίμια, λοιπόν, ετοιμάστηκαν στις ίδιες συνθήκες.

Η συγκεκριμένη μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για δοκίμια πάχους έως 14 mm. Για δοκίμια μεγαλύτερου πάχους συστήνεται κατεργασία τους μέχρι το επιθυμητό πάχος. Από την άλλη το τεστ μπορεί να δώσει αποτελέσματα για δοκίμια πάχους κατ' ελάχιστο 1mm. Για μικρότερα πάχη συστήνεται η χρήση του προτύπου D882 για φυλλωτά υλικά. Επιπλέον, το πρότυπο καθορίζει και μέθοδο και τον υπολογισμό του μέτρου Poisson σε θερμοκρασία δωματίου, ωστόσο στην παρούσα δεν θα ασχοληθούμε με αυτό.

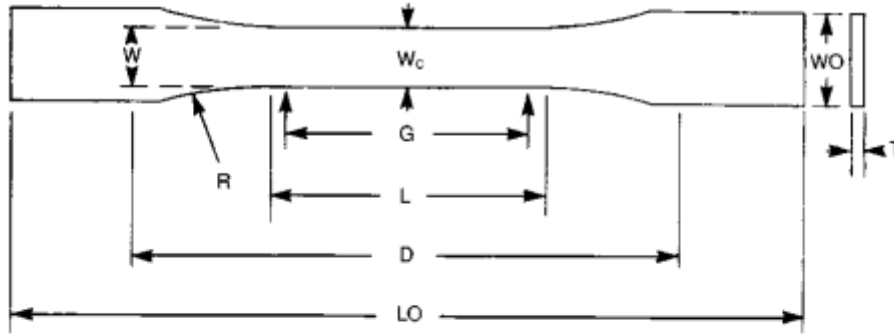
Όπως αναλύθηκε και στο πρώτο κεφάλαιο, η μηχανική συμπεριφορά των πολυμερών μπορεί να μεταβληθεί σημαντικά από συνθήκες περιβάλλοντος αλλά και από την ταχύτητα επιβολής φορτίου. Έτσι, τα αποτελέσματα που θα προκύψουν από μια τέτοια δοκιμή δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για εφαρμογές στις οποίες η κλίμακα στην οποία επιβάλλονται τα φορτία έχει μεγάλη απόκλιση από την κλίμακα του πειράματος. Ωστόσο, αν κάποιος επιθυμεί να χρησιμοποιήσει σε τέτοιες περιπτώσεις αυτά τα αποτελέσματα τότε θα πρέπει να προβεί σε μια σειρά άλλων μετρήσεων ερπυσμού-χαλάρωσης κ.α.

3.4 Το δοκίμιο εφελκυσμού κατά D 638

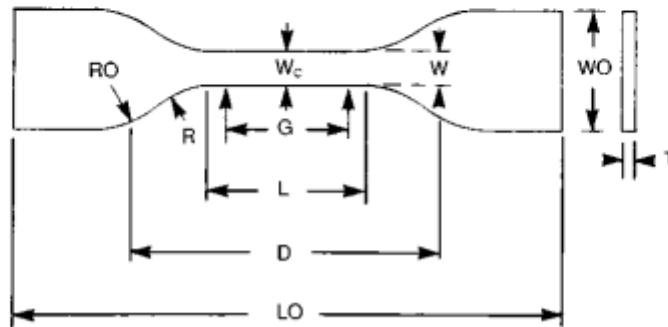


Διαστάσεις

Για στιβαρά και ημι-στιβαρά πλαστικά οι διαστάσεις του δοκιμίου, προκειμένου αυτό να είναι συμβατό με το πρότυπο φαίνονται στο πίνακα που ακολουθεί:



TYPES I, II, III & V



TYPE IV

Dimensions (see drawings)	7 [0.28] or under		Over 7 to 14 [0.28 to 0.55], incl	4 [0.16] or under	
	Type I	Type II	Type III	Type IV ^B	Type V ^{C,D}
W—Width of narrow section ^{E,F}	13 [0.50]	6 [0.25]	19 [0.75]	6 [0.25]	3.18 [0.125]
L—Length of narrow section	57 [2.25]	57 [2.25]	57 [2.25]	33 [1.30]	9.53 [0.375]
WO—Width overall, min ^G	19 [0.75]	19 [0.75]	29 [1.13]	19 [0.75]	...
WO—Width overall, min ^G	...	...	...	...	9.53 [0.375]
LO—Length overall, min ^H	165 [6.5]	183 [7.2]	246 [9.7]	115 [4.5]	63.5 [2.5]
G—Gage length ^I	50 [2.00]	50 [2.00]	50 [2.00]	...	7.62 [0.300]
G—Gage length ^I	...	...	...	25 [1.00]	...
D—Distance between grips	115 [4.5]	135 [5.3]	115 [4.5]	65 [2.5]	25.4 [1.0]
R—Radius of fillet	76 [3.00]	76 [3.00]	76 [3.00]	14 [0.56]	12.7 [0.5]
RO—Outer radius (Type IV)	...	...	...	25 [1.00]	...

Από τον παραπάνω πίνακα χρησιμοποιήθηκε ο τύπος IV δοκιμίου ώστε να παραχθούν δοκίμια αντιπροσωπευτικά της βιομηχανικής πρακτικής σε περίπτωση 3δ εκτύπωσης.

Συγκεντρωτικά σε συμφωνία με τον πίνακα που παρατίθεται οι διαστάσεις του πρέπει να είναι:

- Μήκος L=25mm
- Πλάτος w=6mm
- Πάχος t=4mm

Ταχύτητα πειράματος

Μια ακόμη σημαντική παράμετρος ειδικά όταν αναφέρεται κανείς σε πλαστικά είναι η ταχύτητα επιβολής παραμόρφωσης και στην περίπτωση ενός πειράματος, η ταχύτητα

εκτέλεσης. Η ταχύτητα, η οποία προδιαγράφεται από το πρότυπο είναι 5, 50 και 500mm/min. Για το συγκεκριμένο πείραμα χρησιμοποιήθηκαν οι δύο πρώτες, διότι κρίθηκε ότι για μεγαλύτερες ταχύτητες η επίδραση παραγόντων που σχετίζονται με τη βισκοελαστική συμπεριφορά της γίνεται σημαντικότερη από εκείνη των βασικότερων μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού. Ο αριθμός των δοκιμών για κάθε ταχύτητα πρέπει να είναι ικανός για την εξαγωγή των κατάλληλων στατιστικών μεγεθών και με βάση το πρότυπο καθορίζεται σε πέντε για κάθε ταχύτητα για τρεις διαφορετικούς προσανατολισμούς, και συνολικά τριάντα.

3.5 Δοκιμές σε πολυμερή παραγμένων με 3d printing

Στη διεθνή βιβλιογραφία καταγράφονται αρκετές προσπάθειες και σημαντικός όγκος ερευνητικής δουλειάς για την αξιολόγηση των μηχανικών ιδιοτήτων τεμαχίων που παράγονται με 3d printing και συγκεκριμένα με παρεμφερείς μεθόδους με αυτή που χρησιμοποιήθηκε για τους σκοπούς της παρούσας. Όπως φαίνεται στη συνέχεια, η προσπάθεια εστιάζεται -όπως και στη παρούσα εργασία- στην καλύτερη κατανόηση των παραμέτρων που επηρεάζουν τα τεμάχια από 3d printing ώστε να γίνεται η βέλτιστη επιλογή των παραγόντων ανάλογα με το επιθυμητό αποτέλεσμα.

Πιο αναλυτικά το 2007 στο Πανεπιστήμιο του Ζάγκρεμπ, έγινε σύγκριση μεταξύ ιδιοτήτων που είχαν δοκίμια που παρήχθησαν με δύο διαφορετικές τεχνικές 3d printing. Τα τεστ που έγιναν είναι η κάμψη τριών σημείων, ο εφελκυσμός αλλά και η μέτρηση ακρίβειας τελικών διαστάσεων και μέτρηση της ποιότητας επιφανείας μέσω της τραχύτητας. Παρατηρήθηκε ότι η μέθοδος hybrid polymer jetting έδωσε τα δοκίμια με τη μεγαλύτερη αντοχή και δυσκαμψία [Experimental analysis of properties of materials for rapid prototyping, Ana Pilirović & Pero Raos & Mladen Šercer].

Έπειτα στο TUR της Πολωνίας δημοσιεύεται εργασία που αφορά στην αξιολόγηση της επίδρασης του προσανατολισμού τοποθέτησης των δοκιμών σε μηχανές Polymer Jetting [Mechanical properties of parts produced by using polymer jetting technology, A. Kęsy, J. Kotliński].

Ακόμη μία σημαντική δουλειά για την αξιολόγηση των βασικών μεθόδων ταχείας προτυποποίησης έγινε στο Virginia Tech το 2012. Εκεί θεωρώντας την μέθοδο Polyjet έγινε προσπάθεια να εξεταστεί η σχέση των μηχανικών ιδιοτήτων των παραγόμενων δοκιμών με τις λειτουργικές παραμέτρους της μεθόδου. Οι παράμετροι που εξετάστηκαν ήταν η

απόσταση μεταξύ των τεμαχίων και ο προσανατολισμός τους. Διαπιστώθηκε μέσω τεστ εφελκυσμού ότι η απόσταση ήταν ο πιο καθοριστικός παράγοντας για την αντοχή σε εφελκυσμό [Examining variability in the mechanical properties of parts manufactured via polyjet direct 3d printing, Michael W. Barclift and Christopher B. Williams].

Στο Πανεπιστήμιο του Oviedo έγινε εργασία η οποία ασχολήθηκε περισσότερο με το cure των υλικών σε μια διαδικασία Polyjet ενώ τα δοκίμια μοντελοποιήθηκαν στη πλήρη βισκοελαστική συμπεριφορά τους. Αξιολογώντας το μέτρο χαλάρωσης ($E(t)$) μελετήθηκε η απόσταση κατά τον X και Y άξονα μεταξύ των τεμαχίων, ο προσανατολισμός τους και η ποιότητα επιφάνειας. Και εδώ παρατηρήθηκε ότι σημαντικότερος παράγοντας είναι η απόσταση μεταξύ των τεμαχίων και μικρή σημασία έχει ο προσανατολισμός τους.

3.6 Διαδικασία δοκιμής

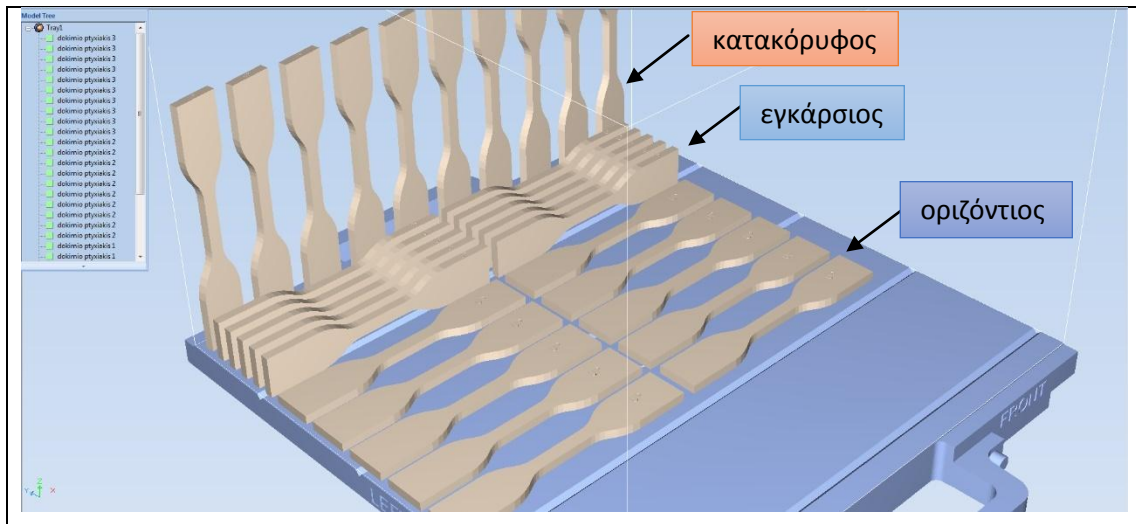
Η διαδικασία που ακολουθήθηκε είναι:

- Μετρήθηκε με παχύμετρο βερνιέρου το πλάτος και το πάχος κάθε δοκιμίου. Με βάση τα συγκεκριμένα μεγέθη μπορεί κανείς αξιόπιστα να υπολογίσει την διατομή για την αναγωγή σε αυτή των ασκούμενων δυνάμεων. Παρατηρήθηκε απόκλιση μεταξύ δοκιμών στα συγκεκριμένα μεγέθη κάτω του 2%.
- Τοποθέτηση των δοκιμών στην συσκευή συγκράτησης με ιδιαίτερη προσοχή στην ευθυγράμμιση του άξονα του δοκιμίου με τον άξονα φόρτισης της δοκιμής. Η σύσφιξη του δοκιμίου στις συσκευές συγκράτησης δεν πρέπει να οδηγήσει το δοκίμιο σε αστοχία.
- Στη συνέχεια εισάγουμε το μηκυνσιόμετρο. Σε αυτό το σημείο πρέπει να σημειωθεί ότι είναι απαραίτητο να υπάρχει ταυτόχρονη καταγραφή μετατόπισης και αναπτυσσόμενου φορτίου κάθε χρονική στιγμή.
- Η αρχή λειτουργίας της πειραματικής δοκιμής επιβάλλει την ταυτόχρονη μέτρηση και καταγραφή παραμόρφωσης και ασκούμενης δύναμης. Αυτό σημαίνει ότι θα πρέπει να έχουν τα αντίστοιχα προαναφερθέντα όργανα την ίδια συχνότητα δειγματοληψίας. Συγκεκριμένα κατ' ελάχιστο πρέπει να λαμβάνονται είκοσι (20) τιμές σε κάθε δευτερόλεπτο.

3.7 Επεξεργασία των μετρήσεων

Από το διάγραμμα που παράγεται μπορούν να εξαχθούν τα παρακάτω θεμελιώδη μεγέθη που χαρακτηρίζουν τη μηχανική συμπεριφορά του υλικού.

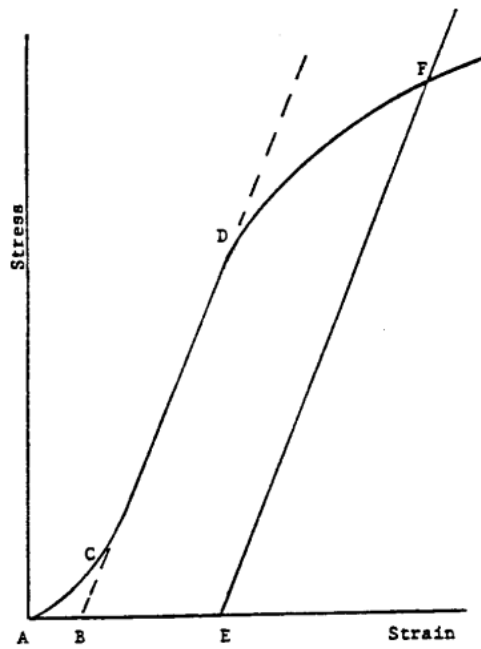
- Μέτρο ελαστικότητας
- Ολικιμότητα
- Όριο διαρροής
- Όριο θραύσης



ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΣ	ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΕΠΙΒΟΛΗΣ ΠΑΡ/ΣΗΣ	ΑΡΙΘΜΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ	ΠΑΧΟΣ	ΠΛΑΤΟΣ
ΕΓΚΑΡΣΙΟΣ	5	1	4	5.98
		2	4	5,95
		3	4	6,02
		4	4	6,02
		5	4	5,91
	50	6	4	6,01
		7	4,1	6,02
		8	4	6,03

		9	4,1	6,03
		10	4	6,01
ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΟΣ	5	11	4	6,39
		12	4	6,33
		13	4	6,34
		14	4	6,3
		15	4	6,32
	50	16	4,1	6,34
		17	4,1	6,36
		18	4,1	6,37
		19	4,1	6,34
		20	4,1	6,35
ΟΡΙΖΟΝΤΙΟΣ	5	21	3,9	6,04
		22	3,9	6,05
		23	4	6,06
		24	3,9	6,05
		25	3,9	6,05
	50	26	4	6,07
		27	3,9	6,06
		28	3,9	6,08
		29	3,9	6,07
		30	4	6,06

Στις γραφικές παραστάσεις δύναμης-μετατόπισης έχει παρατηρηθεί ότι εξαιτίας ατελειών στις συσκευές συγκράτησης, συσσώρευση ακαθαρσιών στη περιοχή και άλλων παραγόντων πολλές φορές η καμπύλη εμφανίζεται μετατοπισμένη στον άξονα της μετατόπισης. Παρουσιάζεται δηλαδή μια φαινομενική υστέρηση στην περιοχή όπως φαίνεται στην εικόνα. Αυτή η υστέρηση όπως εξηγήθηκε δεν αντιπροσωπεύει μια πραγματική ιδιότητα του υλικού και για αυτό είναι απαραίτητο να μετατοπιστεί στην αρχή των αξόνων ώστε να αντιπροσωπεύει την πραγματική συσχέτιση μεταξύ μετατόπισης και επιβαλλόμενου φορτίου.



Από τα τριάντα στο σύνολο δοκίμια έγιναν μετρήσεις και εξήχθησαν οι μέσοι όροι των παραπάνω ιδιοτήτων. Επιπλέον για να περιγραφεί η διασπορά των μετρήσεων από τη μέση τιμή υπολογίστηκε και η τυπική τους απόκλιση σύμφωνα με τον τύπο:

$$s = \sqrt{\frac{\sum X^2 - n\bar{X}^2}{n-1}}$$

Όπου X η τιμή του δείγματος, \bar{X} η μέση τιμή και το πλήθος του δείγματος.

4. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

4.1 Γενικά

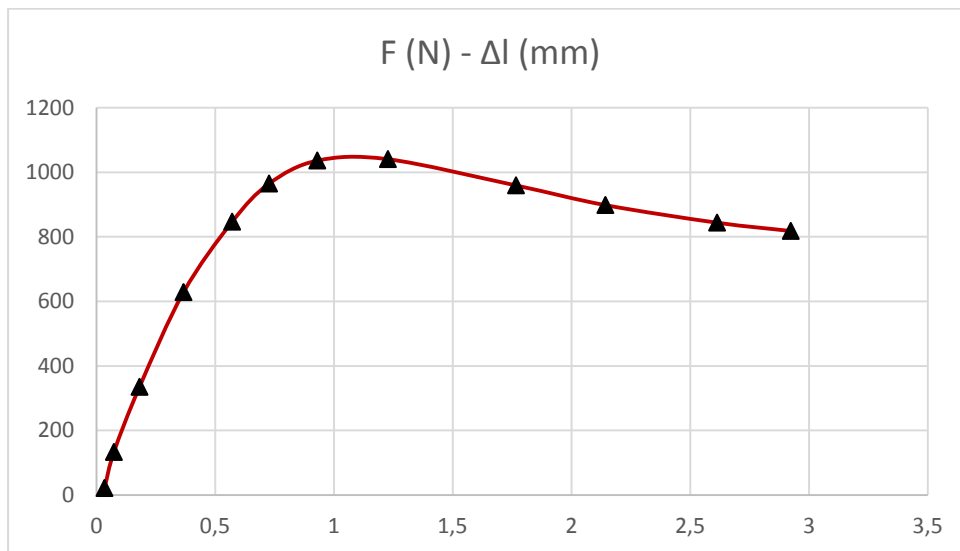
Στην εικόνα μπορεί κανείς να παρατηρήσει τις καμπύλες δύναμης συναρτήσει της παραμόρφωσης του υλικού. Από τα συγκεκριμένα διαγράμματα μπορεί κανείς να εξάγει τις αντίστοιχες καμπύλες τάσης παραμόρφωσης:

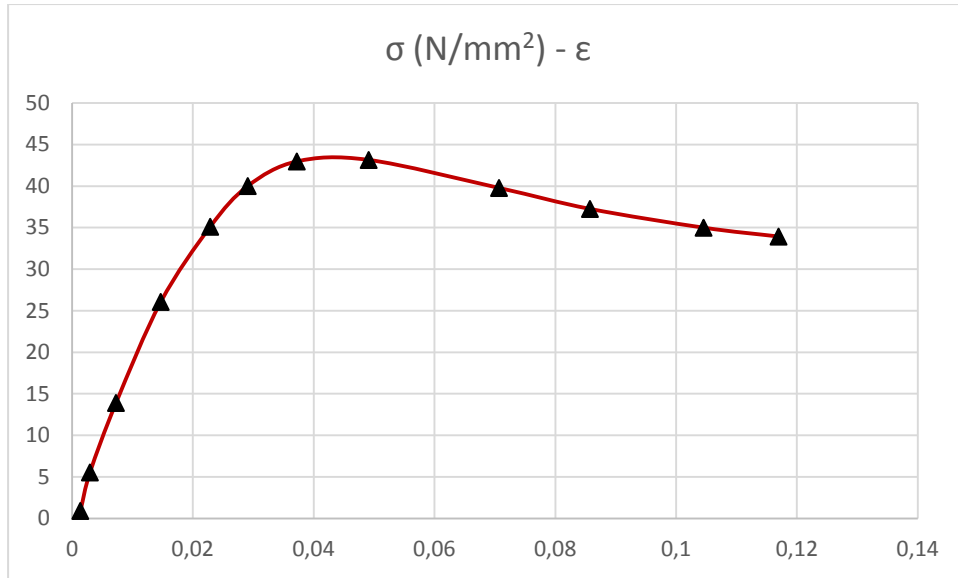
Η παραμόρφωση είναι $\varepsilon_x = \frac{\delta l}{l_0}$, όπου δl η μετρούμενη επιμήκυνση και l_0 το αρχικό μήκος

του δοκιμίου και η τάση $\sigma = \frac{F}{A}$, όπου F η δύναμη εφελκυσμού του δοκιμίου και A το εμβαδόν της εφελκυσόμενης διατομής.

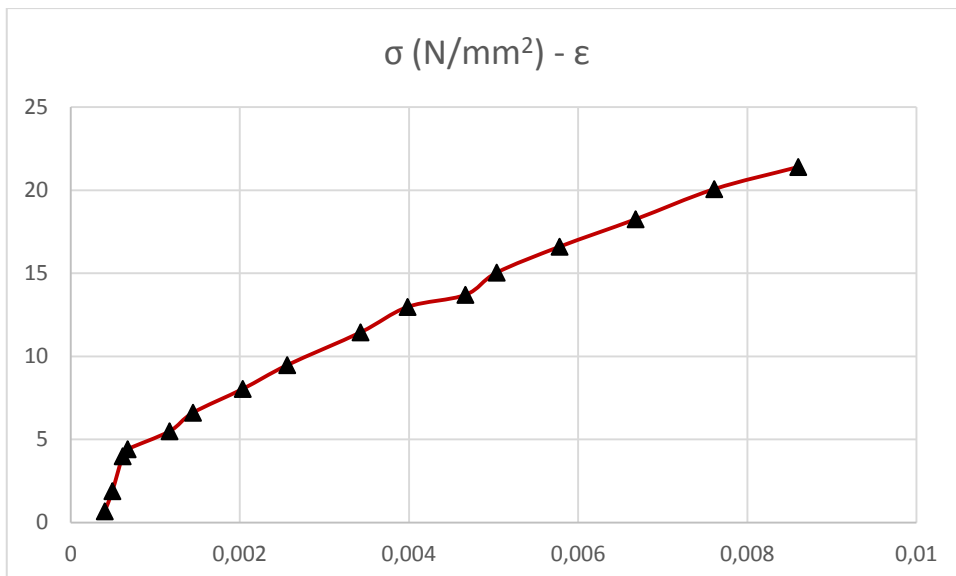
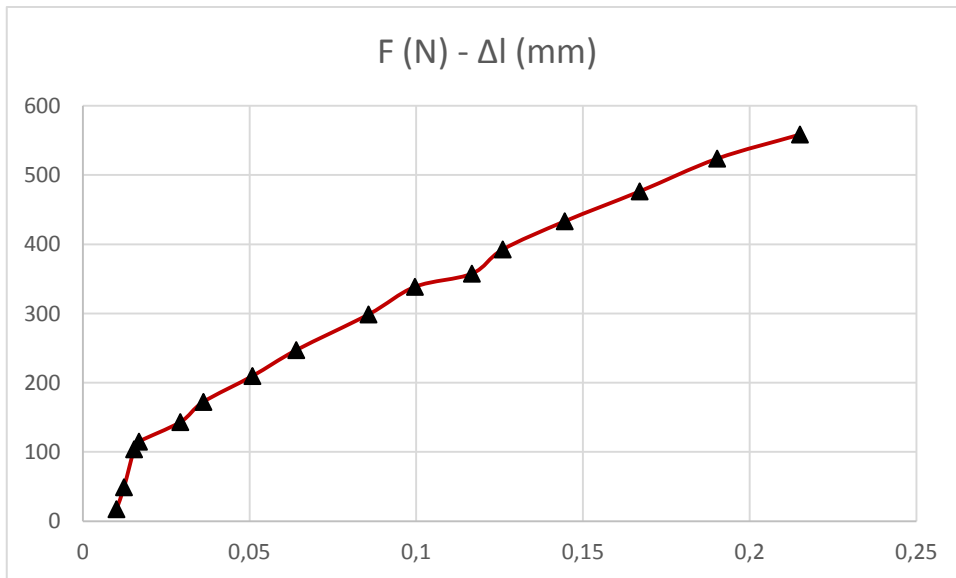
Από τα τριάντα δοκίμια εξήχθησαν τριάντα διαφορετικές καμπύλες από τις οποίες μπορούν να εξαχθούν βασικά συμπεράσματα που σχετίζονται με την μηχανική τους συμπεριφορά. Στα διαγράμματα που ακολουθούν μπορεί κανείς να δει τρεις αντιπροσωπευτικές καμπύλες δύναμης παραμόρφωσης και της αντίστοιχης τάσης παραμόρφωσης, ένα για κάθε περίπτωση εκτύπωσης.

ΕΓΚΑΡΣΙΟΣ

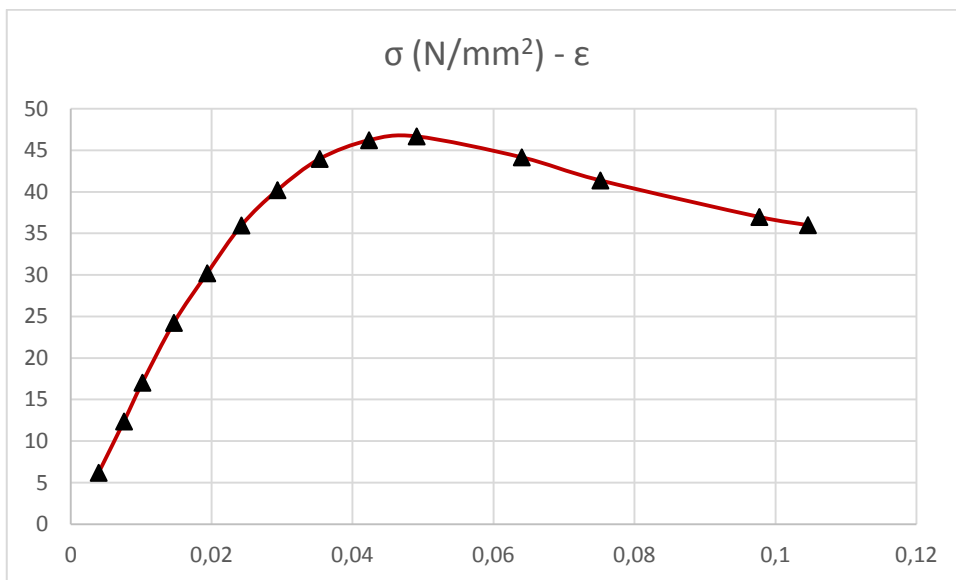
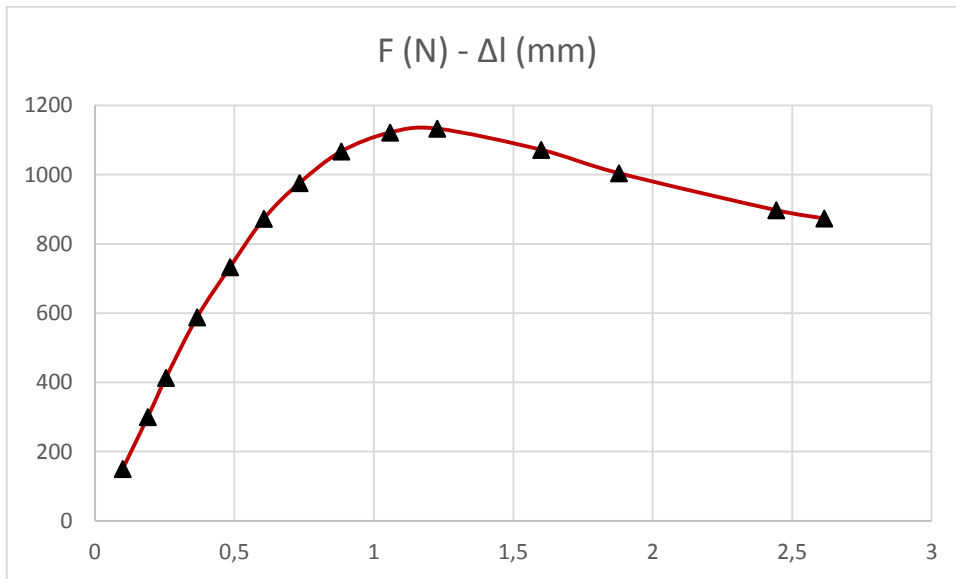




ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΟΣ



ΟΡΙΖΟΝΤΙΟΣ



Παρακάτω φαίνονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων για τις παρακάτω ιδιότητες:

1. ολκιμότητα
2. μέτρο ελαστικότητας
3. όριο διαρροής
4. όριο θραύσης

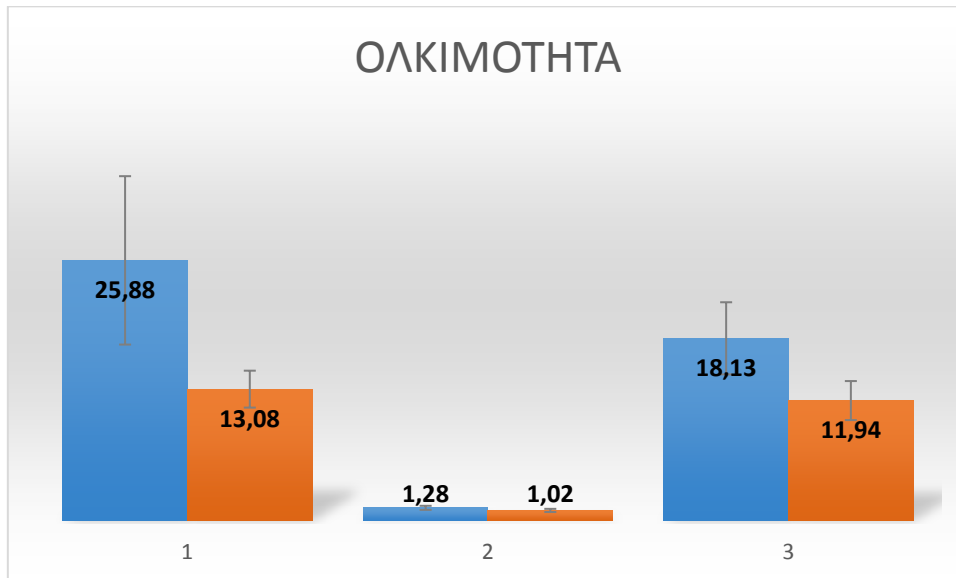
4.2 Διερεύνηση της ολκιμότητας (elongation)

Όπως φαίνεται και στις καμπύλες σ-ε που προηγήθηκαν ο προσανατολισμός εκτύπωσης παίζει τον κυρίαρχο ρόλο για τη συμπεριφορά του υλικού μετά την ελαστική περιοχή. Παρατηρούμε ότι η κατακόρυφη εκτύπωση έδωσε δοκίμια με ψαθυρή θραύση ενώ οι άλλες δύο (οριζόντια κα εγκάρσια) έδωσαν δοκίμια με όλκιμη συμπεριφορά. Αυτό δίνει τη δυνατότητα στα δεύτερα να παραλάβουν φορτία ακόμη και μετά την αστοχία τους. Αυτή η ιδιότητα είναι πολύ κομβικής σημασίας σε περίπτωση που ενδιαφέρει εκτός από τη αντοχή και ο τρόπος αστοχίας ενός υλικού. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η χρήση ενός εκτυπωμένου με polymer jetting μηχανολογικού εξαρτήματος σε μια γραμμή παραγωγής. Σε αυτή την περίπτωση το εξάρτημα που έχει αστοχήσει θα θέλαμε να μη θέσει τη γραμμή παραγωγής εκτός λειτουργίας μέχρι την αντικατάστασή του.

ΠΡΟΣ/ΣΜΟΣ	ΤΑΧΥΤΗ ΤΑ ΤΕΣΤ	ΑΡΙΘΜΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟ Σ	ΠΑΡΑΜ/Σ Η	ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ	ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣ Η	Τ.Α. %
ΕΓΚΑΡΣΙΟΣ (1)	5	1	25.34	25.88	8.37	32.34%
		2	39.95			
		3	18.8			
		4	24.99			
		5	20.31			
	50	6	11.28	13.08	1.83	14.03%
		7	15.8			
		8	11.71			
		9	12.64			
		10	13.95			
ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΟΣ (2)	5	11	1.408	1.28	0.20	15.93%
		12	1.4			
		13	1.408			
		14	0.94			
		15	1.228			
	50	16	1.12	1.02	0.16	15.48%
		17	1.012			
		18	0.868			
		19	1.228			
		20	0.868			
ΟΡΙΖΟΝΤΙΟΣ (3)	5	21	23.97	18.13	3.59	19.78%
		22	16.84			
		23	17.28			
		24	14.27			

		25	18.28			
	50	26	10.48	11.94	1.94	16.25%
		27	10.64			
		28	15.12			
		29	12.45			
		30	11.01			

Όπως φαίνεται και στο παραπάνω συγκριτικό διάγραμμα η συμπεριφορά αυτή επιβεβαιώνεται τόσο στην δοκιμή με μεγάλη ταχύτητα παραμόρφωσης (strain rate) όσο και στη μικρότερη.



Ενδιαφέρον παρουσιάζει ότι το συστατικό υλικό του εκτυπωμένου ανήκει στην κατηγορία των θερμοπλαστικών υλικών τα οποία εμφανίζουν όλα μια καθαρά όλκιμη συμπεριφορά μετά την διαρροή τους. Ωστόσο εδώ φαίνεται ότι η συμπεριφορά τους μετά την εκτύπωση τους έχει αλλάξει άρδην.

Το μέτρο της ολκιμότητας είναι η μέγιστη παραμόρφωση που παρουσιάζει το υλικό. Φαίνεται ότι ο εγκάρσιος προσανατολισμός παρουσιάζει αισθητά μεγαλύτερη παραμόρφωση μέχρι τη θραύση. Ωστόσο και ο οριζόντιος προσανατολισμός φαίνεται να δίνει ίδιας τάξης μεγέθους ολκιμότητα αν και μικρότερη. Τέλος, τα δοκίμια που κατασκευάστηκαν με τον κατακόρυφο προσανατολισμό δεν παρουσίασαν όλκιμη

συμπεριφορά, αντιθέτως μάλιστα όπως φαίνεται και στη συνέχεια έδωσαν ψαθυρές θραύσεις.

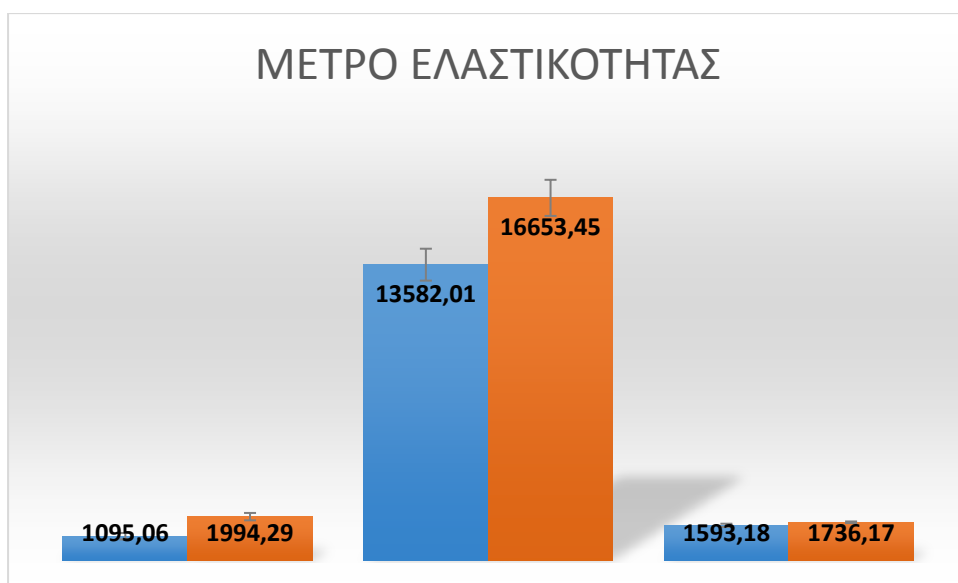
4.3 Διερεύνηση του μέτρου ελαστικότητας (Young's modulus)

Ο υπολογισμός του μέτρου ελαστικότητας E του εκτυπωμένου βασίστηκε στο διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης. Για μεγαλύτερη ακρίβεια χρησιμοποιήθηκαν τα σημεία που αντλήθηκαν από το αρχικό διάγραμμα δύναμης-επιμήκυνσης και υπολογίστηκε η κλίση της καμπύλης:

$$E = \frac{d\sigma}{d\varepsilon} = \frac{\frac{1}{A} dF}{\frac{1}{l_0} d(\delta l)} = \frac{l_0}{A} \frac{dF}{d(\delta l)}$$

ΠΡΟΣ/ΣΜΟΣ	ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΤΕΣΤ	ΑΡΙΘΜΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ	ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤ/ΤΑΣ	ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ	ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ	Τ.Α. %
ΕΓΚΑΡΣΙΟΣ (1)	5	1	1040.16	1110.98	138.19	12.44%
		2	1061.03			
		3	1357.78			
		4	1051.44			
		5	1044.49			
	50	6	1871.88	1971.85	121.98	6.19%
		7	2050.29			
		8	2147.30			
		9	1914.05			
		10	1875.71			
ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΟΣ (2)	5	11	14787.30	13798.23	1218.73	8.83%
		12	14444.46			
		13	12536.01			
		14	12411.15			
		15	14812.23			
	50	16	16357.66	16795.96	595.58	3.55%
		17	17181.77			
		18	16104.57			
		19	17569.90			
		20	16765.92			
ΟΡΙΖΟΝΤΙΟΣ (3)	5	21	1545.81	1575.59	29.25	1.86%

		22	1621.14			
		23	1572.95			
		24	1555.49			
		25	1582.57			
	50	26	1694.73	1704.19	60.41	3.54%
		27	1730.14			
		28	1759.43			
		29	1604.25			
		30	1732.40			



Παρατηρούμε ότι το μεγαλύτερο μέτρο ελαστικότητας σημειώθηκε σε δοκίμια με τον κατακόρυφο προσανατολισμό. Ωστόσο αυτό συμβαίνει για ένα εξαιρετικά μικρό εύρος φόρτισης, πράγμα το οποίο καθιστά τα συγκεκριμένα δοκίμια άχρηστα για παραλαβή φορτίων. Πέραν τούτου, παρατηρήθηκε ότι στην περίπτωση του οριζόντιου προσανατολισμού υπάρχει μικρότερη απόκλιση μεταξύ των δύο ταχυτήτων εφελκυσμού. Μεταξύ των δύο περιπτώσεων στην περίπτωση του εγκάρσιου προσανατολισμού για μεγάλες ταχύτητες εφελκυσμού παρήχθησαν τα πιο στιβαρά δοκίμια. Το αντίθετο όμως συνέβη για την περίπτωση του της μικρής ταχύτητας εφελκυσμού.

Σε μια τυπική καμπύλη εφελκυσμού υπάρχει μια περιοχή στην αρχή του, η οποία δεν αντιπροσωπεύει μια πραγματική ιδιότητα του υλικού. Είναι artifact το οποίο προκαλείται από παράγοντες που δύσκολα μπορεί κανείς να μηδενίσει όπως είναι η ευθυγράμμιση και η πρόσδεση του δοκιμίου. Προκειμένου να εξαχθούν αξιόπιστα αποτελέσματα για

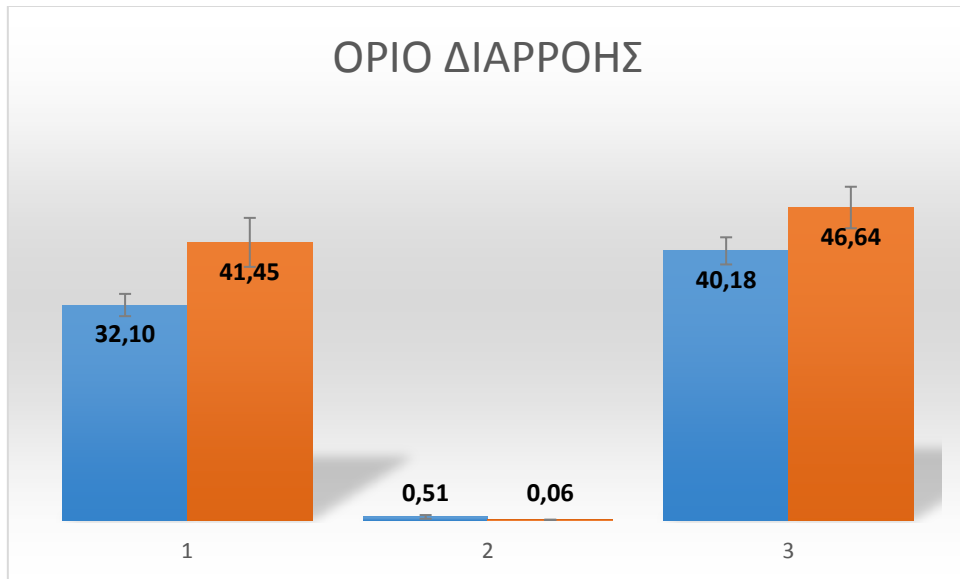
παραμέτρους όπως το μέτρο ελαστικότητας αυτή η περιοχή θα πρέπει να ληφθεί υπόψη στον υπολογισμό του σημείου μηδέν (zero set).

4.4 Διερεύνηση του ορίου διαρροής (yield stress)

Με βάση όσα σημειώθηκαν στη παράγραφο 4.1 δεν έχει νόημα ο υπολογισμός του ορίου διαρροής για ένα ψαθυρό υλικό. Ωστόσο για λόγους πληρότητας παρατίθεται ο πίνακας των αποτελεσμάτων για όλα τα δοκίμια. Το όριο διαρροής είναι ίσως η σημαντικότερη πληροφορία που προκύπτει για ένα όλκιμο υλικό από ένα τεστ εφελκυσμού.

ΠΡΟΣ/ΣΜΟΣ	ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΤΕΣΤ	ΑΡΙΘΜΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ	ΟΡΙΟ ΔΙΑΡΡΟΗΣ	ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ	ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ	ΤΑ %
ΕΓΚΑΡΣΙΟΣ (1)	5	1	32.02	32.10	1.66	5.17%
		2	31.66			
		3	33.85			
		4	29.62			
		5	33.37			
	50	6	42.95	41.45	3.65	8.81%
		7	34.92			
		8	43.33			
		9	42.88			
		10	43.16			
ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΟΣ (2)	5	11	0.918	0.51	0.27	53.67%
		12	25.15			
		13	0.4045			
		14	0.4142			
		15	0.3108			
	50	16	24.06	0.06	0.05	86.14%
		17	0.063			
		18	0.0214			
		19	0.0208			
		20	0.1269			
ΟΡΙΖΟΝΤΙΟΣ (3)	5	21	37.49	40.18	2.02	5.03%
		22	43.18			
		23	40.31			
		24	40.05			
		25	39.88			
	50	26	46.59	46.64	3.10	6.64%
		27	48.08			
		28	41.62			
		29	49.95			

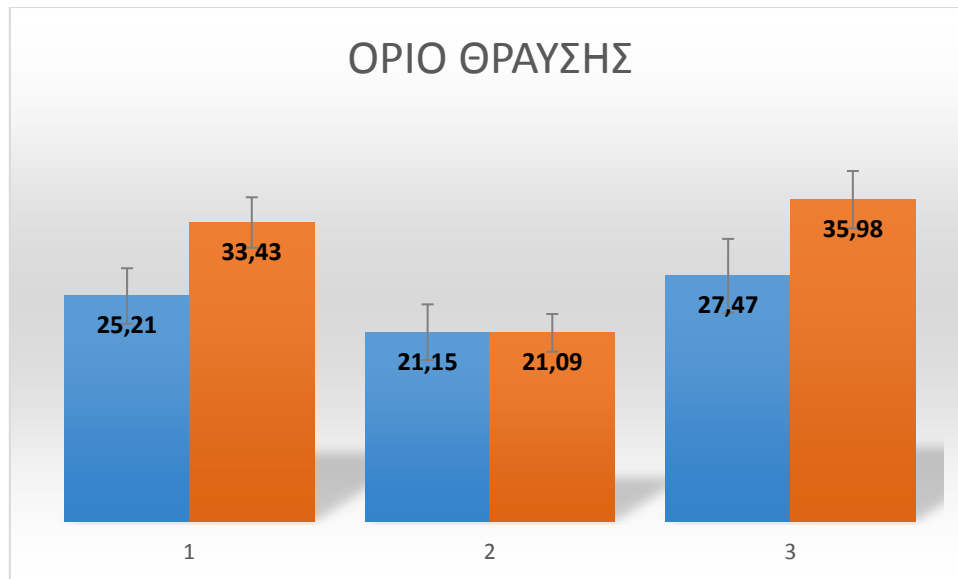
		30	46.98			
--	--	----	-------	--	--	--



Όπως είναι φανερό ο οριζόντιος προσανατολισμός έχει δώσει τα δοκίμια με τη μεγαλύτερη αντοχή. Η αντοχή των δοκιμών του εγκάρσιου προσανατολισμού είναι επίσης μεγάλης αντοχής ωστόσο τα πρώτα παρουσίασαν μεγαλύτερο όριο διαρροής κατά 25,1% και 12,5% αντίστοιχα.

4.5 Διερεύνηση του ορίου θραύσης (break stress)

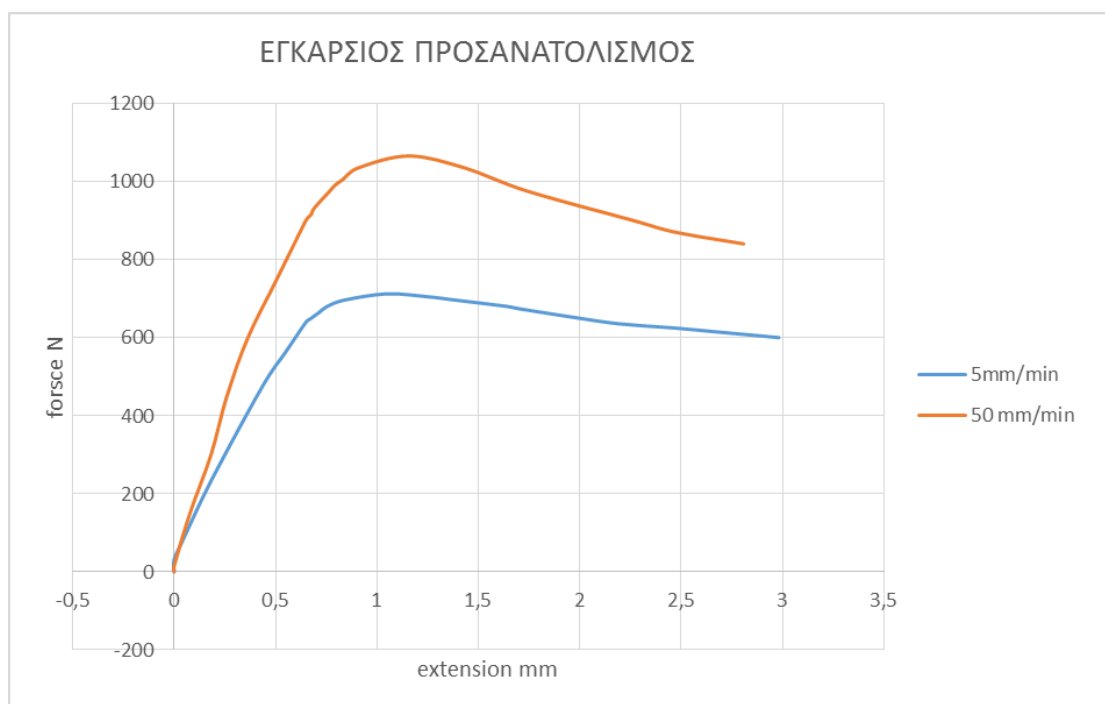
Ο ορισμός της αστοχίας ενός υλικού ή ενός μηχανολογικού εξαρτήματος εξαρτάται από την λειτουργία την οποία επιτελεί. Θεωρήθηκε λοιπόν σκόπιμο να συμπεριληφθεί η τάση θραύσης τόσο των όγκιμων δοκιμών όσο και των ψαθυρών.

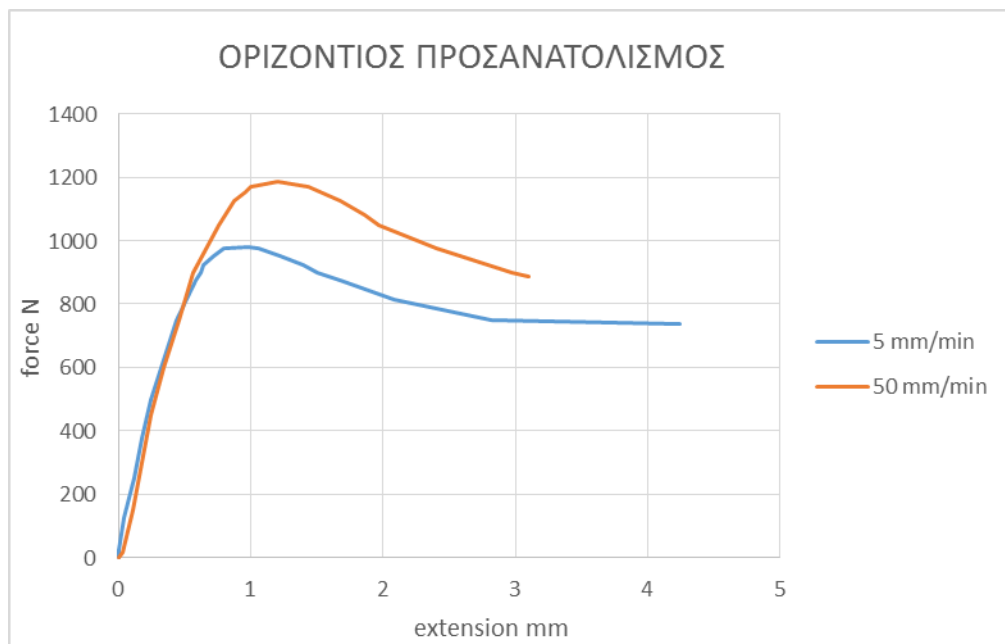
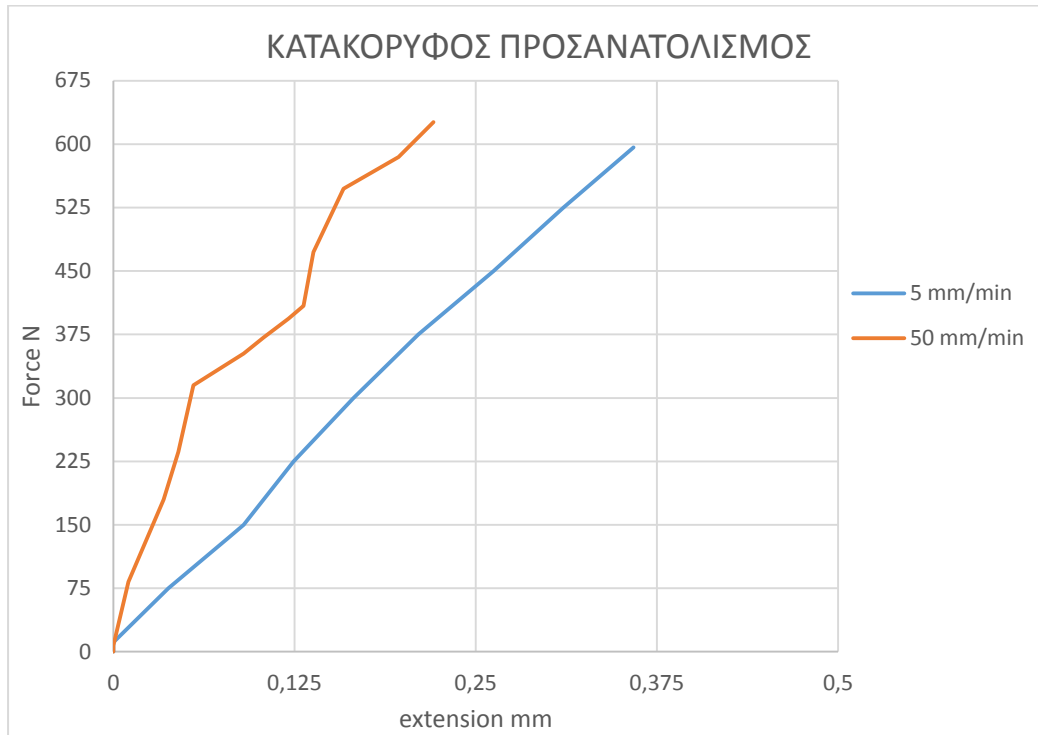


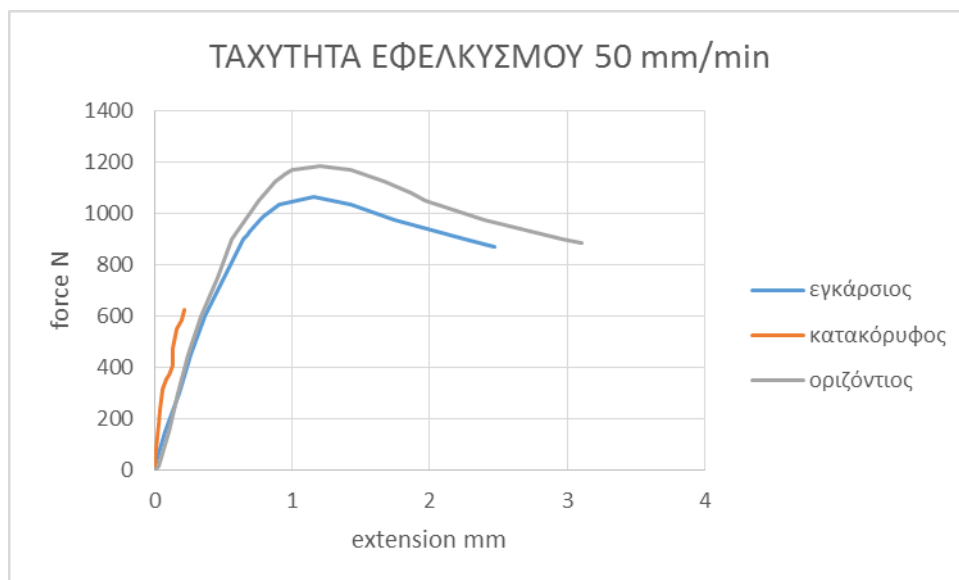
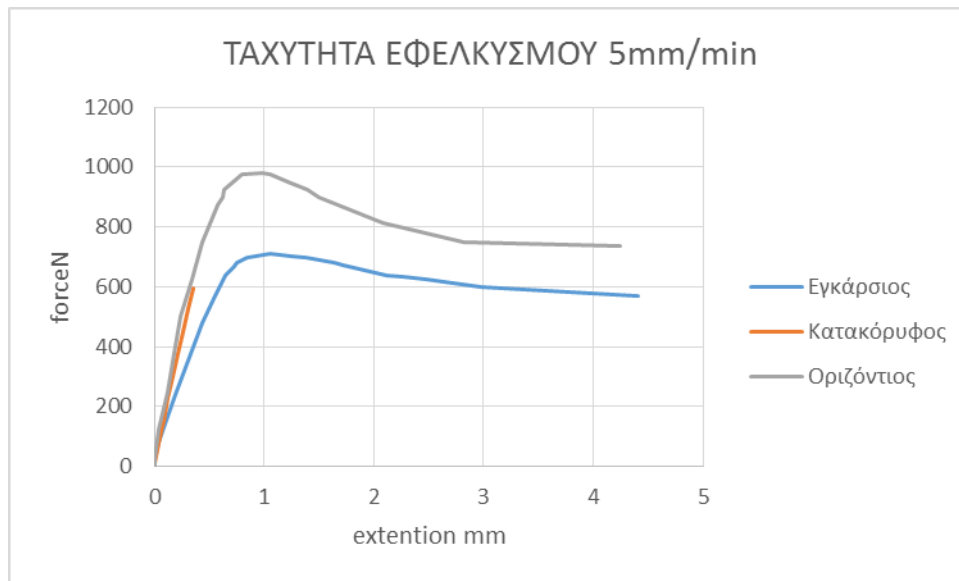
Με βάση το παραπάνω διάγραμμα γίνεται αντιληπτό ότι ο οριζόντιος προσανατολισμός είχε μια οριακά μεγαλύτερη τάση θραύσης.

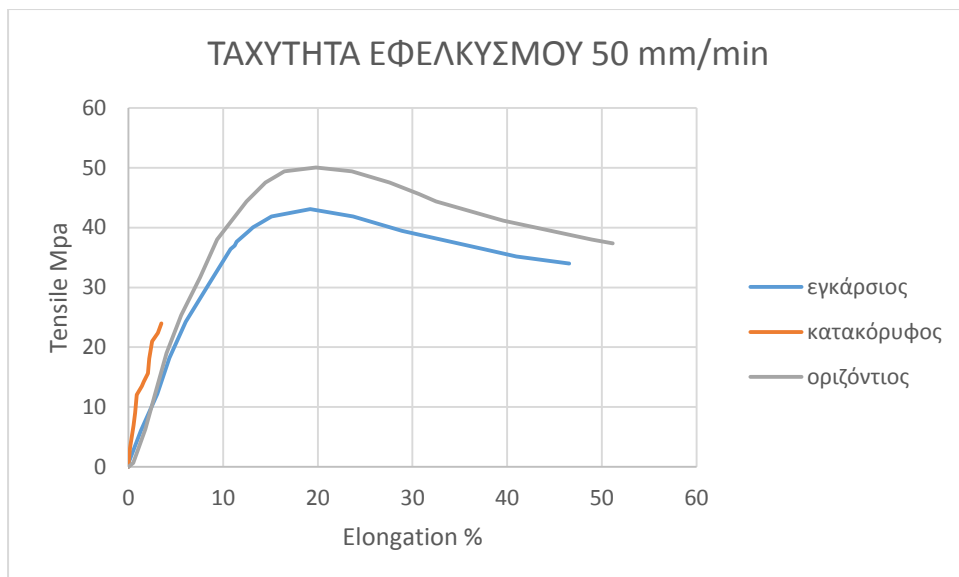
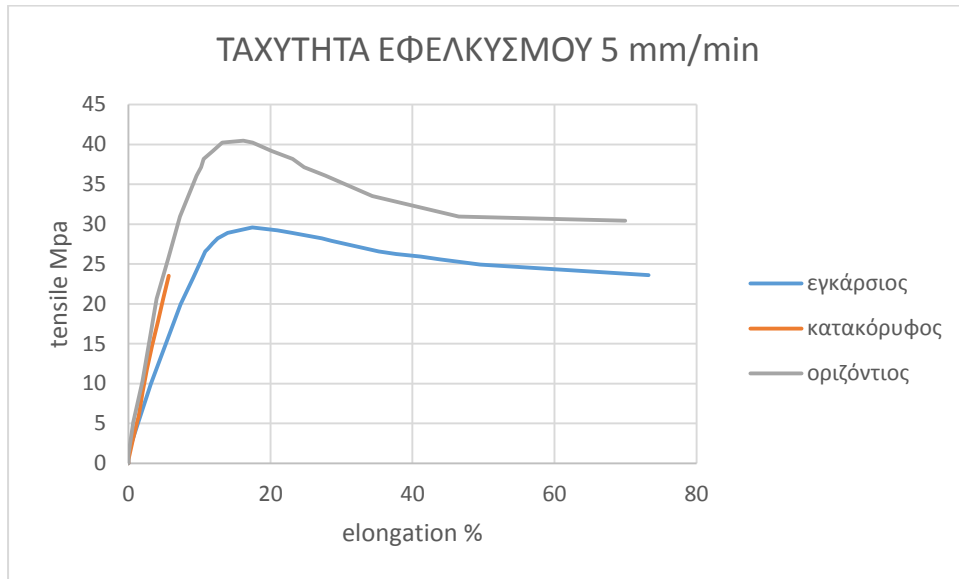
4.6 Συνδυαστικά συγκεντρωτικά διαγράμματα

Ακολουθούν συγκεντρωτικά διαγράμματα για όλους τους προσανατολισμούς αλλά και για τις δύο διαφορετικές ταχύτητες.









5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

5.1 Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Από τους πίνακες που ακολουθούν καθίσταται σαφές ότι υπάρχει μια αρκετά μεγάλη διαφορά σε ποσοτικό και όχι ποιοτικό επίπεδο στην καταγραφόμενη μηχανική συμπεριφορά ανάλογα με την ταχύτητα του πειράματος. Παρατηρείται ότι για καθένα από τους τρεις προσανατολισμούς, εγκάρσιο, οριζόντιο και κατακόρυφο υπάρχει διαφορά στο όριο διαρροής. Η διαφορά αυτή είναι 22.5% στην περίπτωση του εγκάρσιου και 13.9% στην περίπτωση του οριζόντιου. Για την περίπτωση του κατακόρυφου προσανατολισμού η διαφορά στο όριο θραύσης είναι η πλέον μικρότερη. Μάλιστα, εδώ παρατηρείται μείωση του ορίου θραύσης όταν αυξάνεται η ταχύτητα επιβολής παραμόρφωσης.

ΠΡΟΣ/ΣΜΟΣ	ΤΑΧΥΤΗΤ Α ΤΕΣΤ	ΤΑΣΗ ΔΙΑΡΡΟΗΣ ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ	Τ.Α.	Τ.Α. %	ΤΑΣΗ ΘΡΑΥΣΗΣ ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ	Τ.Α.	Τ.Α. %
ΕΓΚΑΡΣΙΟΣ	5	32.13	1.66	5.17%	25.21	1.17	4.64%
	50	41.45	3.65	8.81%	33.43	1.96	5.87%
ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΟΣ	5	0.51	0.27	53.67%	21.15	3.12	14.76%
	50	0.06	0.05	86.14%	21.09	2.11	9.99%
ΟΡΙΖΟΝΤΙΟΣ	5	40.18	2.02	5.03%	27.47	1.31	4.79%

	50	46.64	3.10	6.64%	35.98	2.49	6.92%
--	----	-------	------	-------	-------	------	-------

ΠΡΟΣ/ΣΜΟΣ	ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΤΕΣΤ	ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤ/ΤΑΣ ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ	Τ.Α.	Τ.Α. %	ΠΑΡΑΜ/ΣΗ ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ	Τ.Α.	Τ.Α. %
ΕΓΚΑΡΣΙΟΣ	5	1110.98	138.19	12.44%	26.01	9.66	37.13%
	50	1971.85	121.98	6.19%	13.08	1.83	14.03%
ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΟΣ	5	13798.23	1218.73	8.83%	1.28	0.20	15.93%
	50	16795.96	595.58	3.55%	1.02	0.16	15.48%
ΟΡΙΖΟΝΤΙΟΣ	5	1575.59	29.25	1.86%	18.13	3.59	19.78%
	50	1704.19	60.41	3.54%	11.94	1.94	16.25%

Όπως ήδη έχει σημειωθεί στο πρώτο κεφάλαιο σε αυτό το φαινόμενο πρωτεύοντα ρόλο παίζει η βισκοελαστική ιδιότητα που παρουσιάζουν τα πολυμερή. Αντίστροφα το ίδιο παρατηρείται και στην ολκιμότητα των δοκιμίων.

Οι μεγάλες διαφορές που παρατηρήθηκαν στις μηχανικές ιδιότητες των τεμαχίων που παρήχθησαν με την τεχνολογία polymer jetting θα μπορούσαν να ερμηνευθούν με βάση τον βαθμό πολυμερισμού που έχει επιτευχθεί μεταξύ των επάλληλων στρώσεων ανάλογα με τον προσανατολισμό κίνησης του φορείου πάνω στο οποίο είναι εγκατεστημένοι οι λαμπτήρες υπεριώδους ακτινοβολίας (UV). Οι λαμπτήρες UV σε κάθε επίστρωση μέσω της

ενέργειας που φτάνει στο πολυμερές επιταχύνουν την διαδικασία του cure. Κατά τη διαδικασία έγχυσης οι πλευρικές επιφάνειες των δοκιμίων δέχονται μεγαλύτερα ποσά ενέργειας από την ίδια την στρώση που παράγεται για δύο κυρίως λόγους:

A) η απόσταση από τον λαμπτήρα μέχρι την πλευρική επιφάνεια είναι μικρότερη από αυτή μέχρι την επιφάνεια όπου γίνεται η επίστρωση

B) σε κάθε επίστρωση οι λαμπτήρες φωτίζουν κάθε φορά την πλευρική επιφάνεια καθώς και την εκάστοτε στρώση. Άρα οι πλευρικές επιφάνειες δέχονται συνολικά μεγαλύτερα ποσά ενέργειας με αποτέλεσμα να αυξάνεται ο βαθμός πολυμερισμού τους.

5.2 Συμπεράσματα

Με βάση τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα προέκυψαν χρήσιμα συμπεράσματα για το σχεδιασμό εξαρτημάτων με τη μέθοδο Polymer Jetting.

1. Σε εφαρμογές όπου ο σημαντικότερος παράγοντας είναι η επίτευξη μεγάλων μερίδων παραγωγής σε σύντομο χρονικό διάστημα ο οριζόντιος προσανατολισμός φαίνεται να πλεονεκτεί. Αυτό συμβαίνει διότι η κίνηση στον κατακόρυφο άξονα γίνεται με την μικρότερη ταχύτητα συγκριτικά με τις κινήσεις στις άλλες κατευθύνσεις. Έτσι, κανείς μπορεί με λιγότερα περάσματα της συσκευής που φέρει τις κεφαλές να παράγει συγκριτικά περισσότερα τεμάχια. Απολογιστικά μπορεί να κανείς να συμπεράνει ότι για μεγαλύτερη ταχύτητα πρέπει να προτιμάται τοποθέτηση γεωμετρίας με την λιγότερη δυνατή μετακίνηση κατά τον άξονα Z.
2. Σε εφαρμογές όπου υπάρχουν απαιτήσεις μεγαλύτερη αντοχής πρέπει σίγουρα να αποφεύγεται ο κατακόρυφος προσανατολισμός. Όπως είδαμε ο συγκεκριμένος προσανατολισμός δίνει δοκίμια με μικρό όριο διαρροής. Οι δύο άλλοι προσανατολισμοί είδαμε ότι δίνουν ίδιας τάξης μεγέθους μηχανικές ιδιότητες στα δοκίμια που παράγονται με αυτούς. Ωστόσο ο οριζόντιος έχει σαφές πλεονέκτημα. Σαν γενικό κανόνα θα μπορούσαμε να θέσουμε σαν βέλτιστη για τη συγκεκριμένη περίπτωση μια διάταξη τέτοια που να επιτρέπει την μέγιστη δυνατή έκθεση σε υπεριώδη ακτινοβολία και επακόλουθα πληρέστερο πολυμερισμό.
3. Σε εφαρμογές όπου η θέλουμε όσο το δυνατό μεγαλύτερη ολκιμότητα ο εγκάρσιος προσανατολισμός έχει σαφές πλεονέκτημα. Τα αποτελέσματα, ωστόσο, έχουν μια σχετικά μεγάλη διασπορά. Αντίστροφα, ο κατακόρυφος προσανατολισμός μπορεί να αξιοποιηθεί για περιπτώσεις όπου είναι αναγκαία η μικρότερη δυνατή

παραμόρφωση καθώς τα δοκίμια από τον συγκεκριμένο προσανατολισμό παρουσιάζουν μεγαλύτερο μέτρο ελαστικότητας.

5.3 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Με βάση την εμπειρία από τη διεξαγωγή μιας σειράς πειραμάτων για τις ανάγκες της παρούσας εν συντομία κρίθηκε σκόπιμο να παρουσιαστούν κάποιες βασικές κατευθύνσεις πάνω στις οποίες, κατά τη γνώμη των συντακτών, θα ήταν σημαντικό και χρήσιμο να επεκταθεί η πορεία έρευνας πάνω στη διερεύνηση των μηχανικών ιδιοτήτων των εξαρτημάτων που παράγονται με τη μέθοδο SLA.

Σε πρώτη φάση μπορεί κανείς εύκολα να επεκτείνει την παρούσα μελέτη και για διατμητικές τάσεις προκειμένου να μοντελοποιηθεί η πλήρης ισοτροπική συμπεριφορά ενός εξαρτήματος. Ένας τρόπος για να επιτευχθεί αυτό είναι υπολογίζοντας πειραματικά τον λόγο Poisson όπως ορίζεται από το πρότυπο. Αυτό θα επέτρεπε να υπολογίσουμε κάθε περίπτωση φόρτισης για τα συγκεκριμένα υλικά και όχι μόνο τις περιπτώσεις φόρτισης με ορθές τάσεις (στρέψη, θλίψη, εφελκυσμός).

Μια ακόμη βασική παράμετρος για την μηχανική συμπεριφορά για των πλαστικών είναι η θερμοκρασία. Για τα περισσότερα πλαστικά παρατηρείται σημαντική μεταβολή του μέτρου ελαστικότητας ακόμη και για σχετικά μικρές μεταβολές της θερμοκρασίας. Αυτό θα μπορούσε να ποσοτικοποιηθεί για τη συγκεκριμένη μέθοδο διεξάγοντας το πείραμα σε διαφορετικές θερμοκρασίες. Έτσι θα μπορούσε να παραχθεί η σχέση-συνάρτηση $E(\theta)$ του μέτρου ελαστικότητας και θερμοκρασίας προκειμένου να χρησιμοποιηθεί από τον μηχανικό που θα χρησιμοποιήσει το συγκεκριμένο δοκίμιο σε εφαρμογές με μεταβαλλόμενη θερμοκρασία περιβάλλοντος όπως είναι για παράδειγμα μέσα σε ένα κιβώτιο ταχυτήτων.

Επιπλέον, η διερεύνηση των ιδιοτήτων μπορεί να επεκταθεί και σε προβλήματα της δυναμικής όπως είναι η ικανότητα απορρόφησης κραδασμών με τον υπολογισμό της εσωτερικής απόσβεσης του υλικού. Αυτό μπορεί φυσικά να προσδιοριστεί πειραματικά. Ωστόσο πριν από αυτό για να μπορεί κανείς να αξιοποιήσει αυτά τα δεδομένα σε ανάλυση κατασκευών είτε με αναλυτικές είτε αριθμητικές μεθόδους είναι απαραίτητο να γνωρίζει την πυκνότητα του υλικού.

$$\frac{\partial F_k}{\partial x} + F_x - \rho A(x) \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0,$$

Όπου u οι μετατοπίσεις και $A(x)$ το εμβαδό διατομής.

Όπως φαίνεται από την εξίσωση ισορροπίας που περιγράφει την δυναμική συμπεριφορά του μονοδιάστατου συνεχούς μέσου αν θεωρήσουμε F_x τις εξωτερικές δυνάμεις, για ένα τμήμα dx , για την μοντελοποίηση των δυναμικών ιδιοτήτων είναι απαραίτητη η γνώση της πυκνότητας αλλά και της διατομής.

Η πυκνότητα του υλικού πειραματικά μπορεί να προσδιοριστεί μέσω της γνωστής σχέσης:

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Αφού κάθε δοκίμιο εφελκυσμού ζυγιστεί με ακρίβεια, στη συνέχεια τοποθετείται σε ογκομετρικό δοχείο προκειμένου να προσδιοριστεί ο όγκος του ρευστού που εκτοπίζει. Έτσι μπορούμε να γνωρίζουμε με ποιο προσανατολισμό μπορεί κανείς να τοποθετήσει το προς κατασκευή δοκίμιο ώστε να επιτύχει την επιθυμητή πυκνότητα ή τις επιθυμητές δυναμικές ιδιότητες εν γένει.

Σε αυτή τη κατεύθυνση και επειδή πρόκειται για πλαστικά δεν μπορεί κανείς να παραλείψει να αναφερθεί στην βισκοελαστικότητα και γενικά στην επιβολή μιας εντατικής κατάστασης με ανεξάρτητη μεταβλητή τον χρόνο επιβολής.

Τέλος, σημαντική πληροφορία μπορεί κανείς να αντλήσει από την μελέτη της μικροδομής των υλικών αυτών. Έτσι, μια εικόνα της διατομής σε μικροσκόπιο για τα τρία είδη δοκιμίων μπορούν να μας δώσουν με σαφήνεια και απόλυτο τρόπο σε ποιο μέρος της διατομής έχει προχωρήσει ο πολυμερισμός και σε ποιο είναι ημιτελής και έτσι να ορίσουμε τελικά έναν βέλτιστο τρόπο για την τοποθέτηση των τεμαχίων ανάλογα με την εφαρμογή για την οποία προορίζονται. Εάν για παράδειγμα χρειάζεται κανείς να παράγει κάποια τεμάχια για λόγους επίδειξης και μόνο και όχι για κάποιο λειτουργικό λόγο τότε μάλλον πρέπει να επιλέξει την οριζόντια τοποθέτηση μιας και πρόκειται για την πιο γρήγορα κατασκευάσιμη επιλογή. Ωστόσο, όταν πρόκειται για λειτουργικά κομμάτια, τότε θα ήταν χρήσιμο να έχει μια βαθύτερη κατανόηση της ικανότητας παραλαβής φορτιών από το εξάρτημα.

5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Βιβλία

- Handbook of plastics and failure analysis
- Materials science of Polymers for Engineers
- Standard test method for tensile properties of plastics (ASME D-638)
- Επιστήμη και Τεχνολογία Υλικών

Δημοσιεύσεις

- Experimental analysis of properties of materials for rapid prototyping
- Examining variability in mechanical properties of parts manufactures via polyjet direct 3d printing
- Mechanical properties produced by parts by Polymer Jetting
- Photopolymer materials and processes for advanced technologies