



ΤΕΙ ΚΡΗΤΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

## ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Μελέτη αντοχής δοκιμίου σε κάμψη κατασκευασμένου από υλικό Acrylonitrile Butadiene Styrene plus σε τρισδιάστατο εκτυπωτή**



Τσακαλάκης Νικόλαος ΑΜ 3954

Επιβλέποντες: Δρ. Πετούσης Μάρκος

Ηράκλειο 2015

## Ευχαριστίες

Η ολοκλήρωση αυτής της πτυχιακής υλοποιήθηκε με την υποστήριξη ενός αριθμού ανθρώπων στους οποίους θα ήθελα να εκφράσω τις θερμότερες ευχαριστίες μου. Θα ήθελα να ευχαριστήσω το συνάδελφό μου Ανδρέα Κασσελάκη, ο οποίος ευθύνεται για την κατασκευή των δοκιμίων και παρά το φόρτο εργασίας του ανταποκρίθηκε άμεσα με ευχαρίστηση. Στη συνέχεια θα ήθελα να ευχαριστήσω το κορίτσι μου Μάρα Μπουμπούλη για την αμέριστη συμπαράσταση και την τεχνική βοήθειά της. Επίσης καταλυτική ήταν η συνδρομή του αντιπροέδρου του ΤΕΙ κύριου Κώστα Σαββάκη, ο οποίος είχε καθοριστικές παρεμβάσεις, που οδήγησαν στη σωστή διεξαγωγή των αποτελεσμάτων και ήταν πάντα πρόθυμος παρά το βεβαρημένο φόρτο εργασίας. Τέλος θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στον εισηγητή της πτυχιακής εργασίας μου Δρ. Μάρκο Πετούση, επιστημονικό συνεργάτη της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών, ο οποίος ήταν παρών από την αρχή και μέχρι την ολοκλήρωση της πτυχιακής εργασίας και του οποίου οι οδηγίες και συμβουλές συνέβαλαν στην πραγματοποίησή της, η οποία δεν θα είχε επιτευχθεί αν δεν υπήρχε συνεργατικό κλίμα στις συζητήσεις.

## Περίληψη

Αντικείμενο της πτυχιακής εργασίας που ακολουθεί είναι η μελέτη της αντοχής στην κάμψη δοκιμίων κατασκευασμένων από υλικά ABS και ABS plus. Τα δοκίμια αυτά κατασκευάστηκαν με τη μέθοδο FDM στο εργαστήριο ρομποτικής του τμήματος, σύμφωνα με το πρότυπο ASTM D790. Στη συνέχεια ακολούθησε το πείραμα κάμψης με χρήση υδραυλικής πρέσας του εργαστηρίου της χημείας. Πραγματοποιήθηκε περισυλλογή και επεξεργασία των δεδομένων του πειράματος σε ηλεκτρονικό υπολογιστή, με χρήση του προγράμματος excel. Διαγράμματα τάσης παραμόρφωσης προέκυψαν από τα αποτελέσματα αυτά, βασισμένα στους τύπους του προτύπου. Τέλος έγινε ερμηνεία των αποτελεσμάτων με βάση τις φωτογραφίες που πάρθηκαν με τη μέθοδο SEM (scanning electron microscope) και έγινε σύγκριση με τις θεωρητικές τιμές του κατασκευαστή.

Στα πειραματικά αποτελέσματα φαίνεται ότι το ABS plus έχει μεγαλύτερη αντοχή στην κάμψη από το ABS, γεγονός το οποίο επιβεβαιώνουν και οι θεωρητικές τιμές του κατασκευαστή. Συγκεκριμένα, τα δοκίμια ABS plus πάχους εκτύπωσης 0,17mm έχουν την μεγαλύτερη αντοχή στην κάμψη.

Τέλος θα πρέπει να σημειωθεί ότι η μέθοδος κατασκευής των δοκιμίων FDM διαφέρει από τη μέθοδο χύτευσης με έγχυση, καθώς αφήνει κενά λόγω του θερμαντικού νήματος, γεγονός που δικαιολογεί την μεγάλη απόκλιση από τις τιμές του κατασκευαστή.

## Περιεχόμενα

Εισαγωγή .....	Σελ. 6
1. Κεφάλαιο 1: ABS και ABS plus	
1.1. Τα πολυμερή που αποτελούν τα ABS και ABS plus .....	Σελ. 7
1.2. Διαδικασία παραγωγής ABS και ABS plus .....	Σελ. 9
1.3. Ιδιότητες ABS και ABS plus .....	Σελ. 12
1.3.1. Χημικές ιδιότητες του ABS .....	Σελ. 13
1.3.2. Φυσικές ιδιότητες του ABS .....	Σελ. 14
1.3.3. Ηλεκτρικές ιδιότητες του ABS .....	Σελ. 15
1.3.4. Μηχανικές ιδιότητες του ABS .....	Σελ. 17
1.3.4.1. Επιπτώσεις του χρόνου στο ABS .....	Σελ. 18
1.3.4.2. Επιπτώσεις της θερμοκρασίας στο ABS .....	Σελ. 21
1.3.4.3. Επιπτώσεις των περιβαλλοντικών συνθηκών στο ABS .....	Σελ. 24
1.4. Εφαρμογές του ABS .....	Σελ. 27
2. Κεφάλαιο 2: Τρισδιάστατη εκτύπωση	
2.1. Τρισδιάστατοι εκτυπωτές .....	Σελ. 32
2.2. Εκτύπωση με τη μέθοδο FDM .....	Σελ. 33
3. Κεφάλαιο 3: Θεωρητικές έννοιες και είδη κάμψης .....	Σελ. 36
4. Κεφάλαιο 4: Πειραματικό μέρος	
4.1. Πρότυπο ASTM D 790 .....	Σελ. 43
4.2. Μέγεθος και αριθμός δοκιμών .....	Σελ. 43
4.3. Μέσα πραγματοποίησης του πειράματος .....	Σελ. 48
4.4. Τύποι και υπολογισμοί πειράματος .....	Σελ. 53
4.5. Πίνακες αποτελεσμάτων πειράματος .....	Σελ. 58
4.5.1. Συγκεντρωτικοί πίνακες δοκιμών .....	Σελ. 58
4.5.2. Ενδεικτικά διαγράμματα δύναμης (N) – μετατόπισης (mm), κλίσης (N/mm), τάσης κάμψης (MPa) – παραμόρφωσης (%) .....	Σελ. 60
4.5.3. Πίνακες μέσων όρων τάσης κάμψης και μέτρου ελαστικότητας κατά την κάμψη .....	Σελ. 61
4.5.4. Θεωρητικές τιμές κατασκευαστή για την τάση κάμψης και μέτρου ελαστικότητας κατά την κάμψη .....	Σελ. 64
4.6. Διαδικασία σάρωσης με χρήση ηλεκτρονικού μικροσκοπίου. SEM (scanning electron microscope) .....	Σελ. 68
4.6.1. Ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης .....	Σελ. 68
4.6.2. Λειτουργία και βασικές διατάξεις της SEM .....	Σελ. 69

4.6.3. Έλεγχος της επιφάνειας θραύσης και είδη θραύσης .....	Σελ. 71
Συζήτηση .....	Σελ. 74
Βιβλιογραφία .....	Σελ. 76
Παράρτημα I Πρότυπο ASTM D790 .....	Σελ. 77
Παράρτημα II Διαγράμματα πειράματος Κάμψης .....	Σελ. 86
Παράρτημα III Φωτογραφίες επιφάνειας θραύσης δοκιμίων .....	Σελ. 116

## Εισαγωγή

Στην πτυχιακή εργασία που ακολουθεί θα πραγματοποιηθεί μελέτη αντοχής σε κάμψη δοκιμίων που έχουν κατασκευαστεί σε τρισδιάστατο εκτυπωτή. Η δοκιμασία πραγματοποιείται σε υδραυλική πρέσα. Τα δοκίμια είναι κατασκευασμένα από θερμοπλαστικό υλικό abs και abs plus, τα οποία είναι συμπολυμερή που αποτελούνται από ακρυλονιτρίλιο, στυρόλιο και βουταδιένιο.

Τα δοκίμια έχουν κατασκευαστεί στους τρισδιάστατους εκτυπωτές του εργαστηρίου με τη μέθοδο rapid prototype (RP) με δύο διαφορετικούς προσανατολισμούς. Στην συνέχεια πραγματοποιήθηκε περισυλλογή των αποτελεσμάτων και επεξεργασία τους με χρήση του προγράμματος excel.

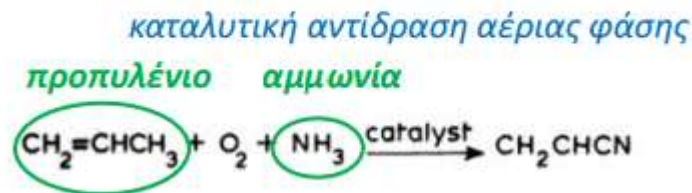
Στόχος της εργασίας είναι η ερμηνεία των αποτελεσμάτων και η σύγκριση τους με τις θεωρητικές τιμές του κατασκευαστή.

## Κεφάλαιο 1: ABS και ABS plus

### 1.1 Τα πολυμερή που αποτελούν τα ABS και ABS plus

Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή των δοκιμών είναι τα συμπολυμερή ABS και ABS plus. Το ABS δημιουργείται με πολυμερισμό ακρυλονιτρίλιου και στυρόλιου υπό την καταλυτική παρουσία πολυβουταδιένιου.

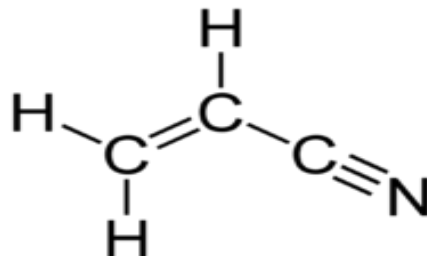
Το ακρυλονιτρίλιο είναι ένα συνθετικό μονομερές το οποίο παράγεται από προπυλένιο και αμμωνία με την παρακάτω καταλυτική αντίδραση αέριας φάσης.



*Εικόνα 1: Αντίδραση παραγωγής ακρυλονιτρίλιου.*

Το ακρυλονιτρίλιο έχει χημικό τύπο  $\text{C}_3\text{H}_3\text{N}$  είναι ένα άχρωμο υγρό μονομερές χρήσιμο για την κατασκευή πλαστικών. Το μεγαλύτερο ποσοστό ακρυλονιτρίλιου παράγεται με καταλυτική αμμωνιοξειδωση του προπενίου μία διαδικασία που είναι γνωστή και ως διεργασία sohio. Το ακρυλονιτρίλιο είναι ένα μονομερές το οποίο αποτελεί τη βάση για την κατασκευή πολλών συμπολυμερών όπως είναι το στυρένιο ακρυλονιτρίλιο (SAN), το ακρυλονιτρίλιο ακρυλικό στυρένιο (ASA), τα διάφορα ελαστικά νιτρίλιου (NBR) και το ABS.

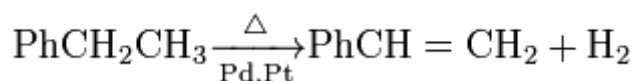
Ο συντακτικός του τύπος φαίνεται παρακάτω.



*Εικόνα 2: Συντακτικός τύπος ακρυλονιτρίλιου.*

Η προσφορά του ακρυλονιτρίλιου στο τελικό συμπολυμερές είναι μεγάλη καθώς παρέχει δύναμη, χημική αντοχή και σταθερότητα.

Το στυρένιο ή στυρόλιο ανήκει στους αρωματικούς υδρογονάνθρακες. Είναι ένα άχρωμο ελαιώδες υγρό το οποίο έχει χημικό τύπο  $C_8H_8$ . Αποτελεί μονομερές πολλών συμπολυμερών όπως είναι το πολυστυρόλιο. Η πιο διαδεδομένη διαδικασία για την παραγωγή του είναι αυτή της καταλυτικής αφυδρογόνωσης του αιθυλοβενζολίου.



*Εικόνα 3: Αντίδραση παραγωγής στυρόλιου.*

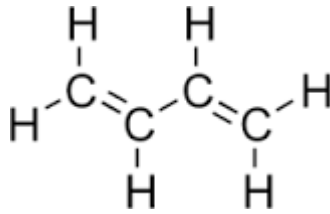
Στο τελικό συμπολυμερές προσφέρει δυσκαμψία και υψηλή δυνατότητα μορφοποίησης. Ο συντακτικός του τύπος φαίνεται παρακάτω.



*Εικόνα 4: Συντακτικός τύπος στυρόλιου.*

Το βουταδιένιο και συγκεκριμένα το 1,3-βουταδιένιο ή διβινύλιο αποτελεί το τρίτο πολυμερές του ABS. Είναι ένας άκυκλος ακόρεστος υδρογονάνθρακας με δύο διπλούς δεσμούς. Είναι ένα άχρωμο αέριο το οποίο χρησιμοποιείται σε ευρεία κλίμακα για την παραγωγή πολυβινυλίου, νάυλον και συνθετικού καουτσούκ. Ο χημικός του τύπος είναι  $C_4H_6$ . Οι κυριότερες διαδικασίες παραγωγής του βουταδιενίου είναι η πυρόλυση κλασμάτων πετρελαίου με ατμό και η καταλυτική αφυδρογόνωση βουτανίου. Ο συνηθέστερος συντακτικός του τύπος φαίνεται παρακάτω.





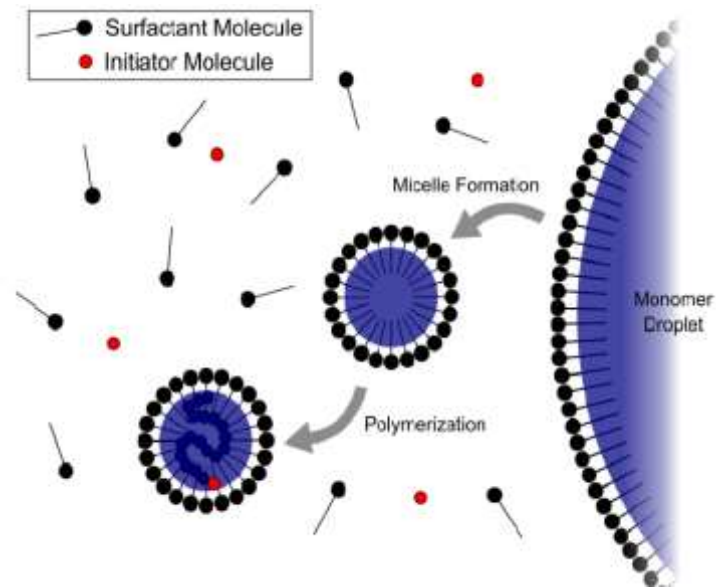
Εικόνα 5: Συντακτικός τύπος 1.3 βουταδιένιου.

Στο τελικό συμπολυμερές το βουταδιένιο προσφέρει ισχύ στην κρούση και ελαστικότητα ακόμα και σε χαμηλές θερμοκρασίες.

Η περιεκτικότητα του ABS σε ακρυλονιτρίλιο κυμαίνεται από 15 έως 35%, από 5 έως 30% σε βουταδιένιο και 40 έως 60% σε στυρόλιο. Αναλόγως με τις επιθυμητές ιδιότητες του υλικού μπορεί να τροποποιηθεί η περιεκτικότητα του στα πολυμερή που το συνθέτουν.

## 1.2 Διαδικασία παραγωγής ABS και ABS plus.

Το ακρυλονιτρίλιο βουταδιένιο στυρένιο ανακαλύφθηκε πρώτη φορά κατά τη διάρκεια του δευτέρου παγκοσμίου πολέμου όταν και χρησιμοποιήθηκε σαν εναλλακτική μέθοδος για την παραγωγή καουτσούκ. Εμπορικά διατέθηκε πρώτη φορά τη δεκαετία του 50' σε μία προσπάθεια επίτευξης καλύτερων ιδιοτήτων πολυστυρένιου και ακρυλονιτρίλιου. Η διαδικασία πολυμερισμού που ακολουθούσαν ήταν αυτή του γαλακτώματος κατά παρτίδες (emulsion polymerization). Κατά την μέθοδο αυτή διεξάγονται αντιδράσεις με πολυμερισμό ελεύθερων ριζών. Ειδικότερα μέσω της διαδικασίας δημιουργούνται κολλοειδή πολυμερή διασκορπισμένα σε συνεχές μέσο, το οποίο τις περισσότερες φορές είναι νερό. Τα πολυμερή που προκύπτουν είναι κατά κύριο λόγο σφαιρικά. Το σύστημα αυτό από μόνο του είναι θερμοδυναμικά ασταθές και η κινητική σταθερότητα επιτυγχάνεται με τη χρήση γαλακτωμοποιητών και με την ενσωμάτωση υδρόφιλων μορίων.

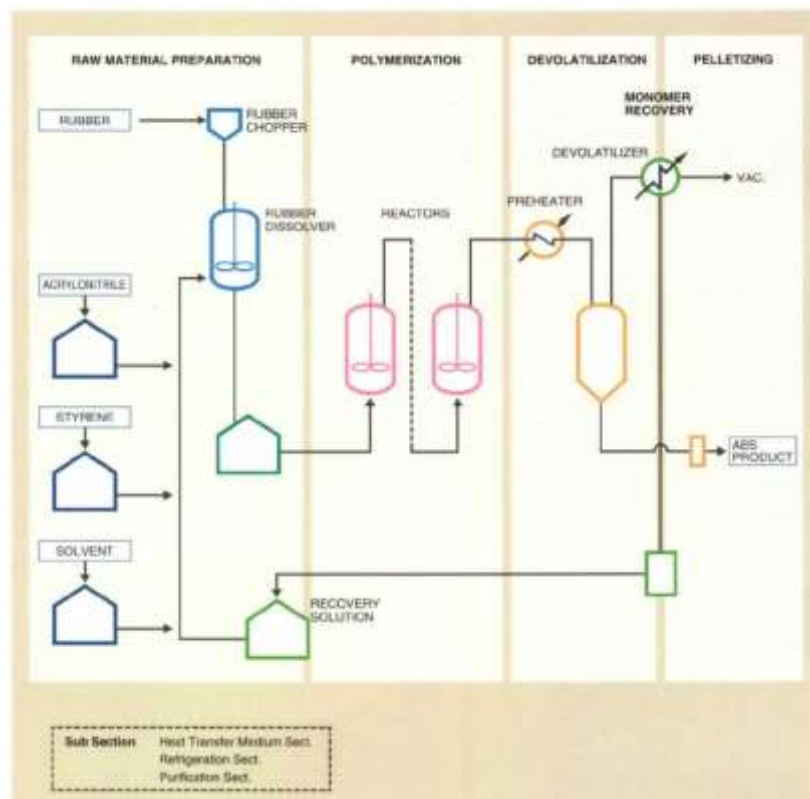


Εικόνα 6: Πολυμερισμός γαλακτώματος.

Σε αντιδραστήρα με συνεχές μέσο (νερό) διασκορπίζονται τα επιθυμητά μονομερή παρουσία επιφανειοδραστικών ουσιών (surfactant molecule). Οι επιφανειοδραστικές ουσίες προσροφώνται στην επιφάνεια των μονομερών σταθεροποιώντας τα (σχηματισμός μικκυλίων). Οι εκκινητές της αντίδρασης που προστίθενται στον αντιδραστήρα είναι υδατοδιαλυτοί. Κατά την επαφή τους με το νερό σχηματίζουν ελεύθερες ρίζες και επειδή είναι πολύ υδρόφιλοι ώστε να εισέλθουν στην οργανική φάση (φάση αντίδρασης), αντιδρούν με τα μονομερή και σχηματίζουν oligoradicals. Τα oligoradicals με τη σειρά τους αναπτύσσονται αργά λόγω της χαμηλής συγκέντρωσης μονομερούς στο υδατικό διάλυμα. Με την προσθήκη επιπλέον μονομερών τα oligoradicals καθίστανται υδροφοβικά και μπορούν να εισέλθουν στην οργανική φάση. Έτσι τα εισερχόμενα oligoradicals βρίσκουν ένα πλούσιο σε μονομερή περιβάλλον μέσα στο μικκύλιο και αναπτύσσονται γρήγορα σχηματίζοντας μια πολυμερική αλυσίδα. Η μέθοδος άρχισε να παρακμάζει λόγω του ότι ήταν μία ασυνεχής τεχνολογία, η οποία αδυνατούσε να προσδώσει επιπλέον ιδιότητες στα υλικά που παρήγαγε, όπως γυαλιστερό ABS. Επίσης είχαν δημιουργηθεί προβλήματα λειτουργικής και χρηματοοικονομικής φύσεως.

Η πλέον διαδεδομένη διαδικασία παραγωγής είναι αυτή συνεχούς όγκου πολυμερισμού. Κατά τη διαδικασία αυτή μπλοκ καουτσούκ συνθλίβονται σε μικρά

κομμάτια τα οποία στη συνέχεια αποστέλλονται σε δοχείο το οποίο περιέχει ακρυλονιτρίλιο, στυρόλιο, ανακυκλωμένο μονομερές και μικρή ποσότητα διαλύτη.



Εικόνα 7: Πολυμερισμός συνεχούς όγκου.

Το δοχείο αυτό (rubber dissolver) είναι υπεύθυνο για τη διάλυση των κομματιών καουτσούκ και την ανάμιξη τους με τα παραπάνω υλικά. Στη συνέχεια ο πολυμερισμός πραγματοποιείται σε ειδικά σχεδιασμένους αντιδραστήρες συνεχούς ροής και η διαδικασία ξεκινάει με ειδικό εκκινητή. Το προϊόν του πολυμερισμού το οποίο είναι ένα παχύρρευστο διάλυμα μεταφέρεται στον αποπτητικοποιητήρα μέσω ενός προθερμαντήρα. Στη συνέχεια τα πτητικά συστατικά διαχωρίζονται από το διάλυμα πολυμερούς με εξάτμιση υπό κενό. Τέλος το πολυμερές που βρίσκεται στον πάτο του αποπτητικοποιητήρα στέλνεται με τη βοήθεια μίας αντλίας σε τομέα σφαιροποίησης. Οι πτητικές ύλες οι οποίες βρίσκονται στο πάνω μέρος του αποπτητικοποιητήρα ανακτώνται ως ανακυκλωμένα μονομερή.

Με τη διαδικασία του συνεχούς όγκου πολυμερισμού υπάρχει ακρίβεια, έλεγχος σε όλη τη διάρκεια της μεθόδου, το σχέδιο της διαδικασίας είναι απλό και η εισαγωγή ξένων υλών είναι μικρή. Επίσης είναι μία ευέλικτη τεχνολογία η οποία προσφέρει λύσεις τύπου tailor-made οι οποίες προσαρμόζονται στις ανάγκες της κάθε επιχείρησης.



*Εικόνα 8: Μονάδα παραγωγής abs.*

### **1.3 Ιδιότητες abs και abs plus.**

Το ABS ανήκει στην κατηγορία των θερμοπλαστικών. Τα θερμοπλαστικά πολυμερή χαρακτηρίζονται από μεγάλη ελαστικότητα που τους επιτρέπει να παραμορφώνονται εύκολα και να παίρνουν επιθυμητό σχήμα όταν θερμανθούν. Σε αντίθετη περίπτωση υπό την παρουσία χαμηλής θερμοκρασίας σκληραίνουν. Η διαδικασία αυτή είναι αναστρέψιμη για πολλούς κύκλους και δείχνει την ικανότητα των πλαστικών να ανακυκλώνονται. Οι ιδιότητες των υλικών είναι ένα σημαντικό στοιχείο αξιολόγησής τους ιδιαίτερα όταν προορίζονται για προχωρημένες εφαρμογές και παραγωγή. Στους πίνακες που ακολουθούν παρουσιάζονται οι ιδιότητες του abs και των παραγώγων του abs m30 και abs m30i, υλικά από τα οποία κατασκευάστηκαν τα δοκίμια της πτυχιακής εργασίας.

### 1.3.1 Χημικές ιδιότητες του ABS.

Στις χημικές ιδιότητες του ABS θα παρουσιαστεί η αντοχή του υλικού σε διαφορετικά χημικά περιβάλλοντα. Το υλικό θα τοποθετηθεί σε λιωμένη μορφή με τη μέθοδο απόθεσης υλικού FDM και η αλληλεπίδραση του με το περιβάλλον στο οποίο θα εναποτίθεται, θα μετριέται με βάση την παρακάτω κλίμακα η οποία δίνει μία γενική εικόνα για την χημική του αντοχή.

1. Άριστη χημική αντοχή. Ο διαλύτης δεν καταφέρνει να υποβαθμίσει το θερμοπλαστικό υλικό κατά τη διάρκεια παρατεταμένης έκθεσης του σε αυτό.
2. Καλή χημική αντοχή. Ο διαλύτης δεν καταφέρνει να υποβαθμίσει το θερμοπλαστικό υλικό κατά τη διάρκεια παρατεταμένης έκθεσης του σε αυτό.
3. Περιορισμένη χημική αντοχή. Ο διαλύτης πιθανόν να υποβαθμίσει το θερμοπλαστικό υλικό, κατά τη διάρκεια βραχυπρόθεσμης έκθεσης.
4. Κακή χημική αντοχή. Ο διαλύτης θα υποβαθμίσει το θερμοπλαστικό υλικό.

Chemical	FDM Materials							
	ABS-M30™	ASA	PC-ABS	PC	ULTEM™ 9085 resin	FDM Nylon 12	PPSF	ULTEM™ 1010 resin
Aliphatic hydrocarbons (e.g. methane, propane, butane)	2	2	3	3	2	1	1	2
Aromatic hydrocarbons (e.g. benzene)	3	3	3	3	2	1	2	1
Halogenated hydrocarbons (e.g. CFCs)	4	4	4	4	4	4	3	3
Ketones (e.g. MEK, acetone)	4	4	4	4	3	2	3	3
Alcohol/ethanol	2	2	2	2	2	4	2	2
Phenols	4	4	4	4	4	4	4	4
esters	3	3	4	3	2	1	2	2

Πίνακας 1: Χημικές ιδιότητες abs.

Chemical	FDM Materials							
	ABS-M30™	ASA	PC-ABS	PC	ULTEM™	FDM	PPSF	ULTEM™

Μελέτη αντοχής δοκιμίου σε κάμψη κατασκευασμένου από υλικό Acrylonitrile Butadiene Styrene plus σε τρισδιάστατο εκτυπωτή

					9085 resin	Nylon 12		1010 resin
Transmission fluid	3	3	3	3	3	1	2	2
Windshield washer fluid	2	2	2	2	1	1	1	1
Brake fluid	3	3	3	3	3	1	2	2
Antifreeze/ engine coolant	2	2	2	3	2	1	1	1
Motor oil	3	3	3	3	2	1	2	2
Petroleum greases	2	2	2	3	2	1	1	2
Silicone greases/oil	4	4	4	4	2	2	2	2
Petroleum fuels	2	2	3	3	1	1	2	1
Weak acids (pH 3-6)	1	1	1	2	2	2	1	2
Strong acids (pH <3)	3	3	3	4	3	4	2	3
Weak bases (pH 8-10)	1	1	2	2	1	1	1	1
Strong bases (pH >10)	1	1	2	3	2	1	1	2
Delonized water	1	1	1	2	1	1	1	1

Πίνακας 2: Χημικές ιδιότητες abs.

### 1.3.2 Φυσικές ιδιότητες του ABS

Φυσικές ιδιότητες των ακατέργαστων πρώτων υλών, όπως είναι το abs είναι η ελάχιστη και μέγιστη θερμοκρασία αντοχής, η ικανότητα απορρόφησης του νερού, το σημείο τήξης, η διάδοση της φλόγας και η αντοχή σε κρούση. Στον παρακάτω πίνακα παρατίθενται οι ανοχές διαφόρων υλικών συμπεριλαμβανομένου και του abs.

Physical Properties table of raw materials						
Properties	ABS	HDPE	PC	PP	PA 6	PYC
Max. temperature (°C)	+80	+120	+130	+135	+105	+70
Min. temperature (°C)	-20	-100	-40	0	-30	-25
Water absorption % (24-hours)	0.25	<0.01	0.35	<0.02	0.3	0.06
Impact strength (kl/m <sup>2</sup> )	16.3-44	2.7-100	40-70	2.7-11	4-100	2.2-10
Melting point (°C)	+105	+130	+149	+170	+260	+80
Flame propagation (UL-94)	H8	H8	V0	V2	HB-V2-V0	V0

Πίνακας 3: Φυσικές ιδιότητες abs.

Το abs κρατάει τις ιδιότητές του για θερμοκρασίες από -20 έως +80 °C, η ικανότητα απορρόφησης του νερού είναι 25%, έχει σημείο τήξης τους 105 °C και η φλόγα διάδοσής του μεταδίδεται σε μικρό ποσοστό.

Other	Test method	Value
Specific Gravity	ASTM D792	1.04
Flame Classification	UL94	HB (0.09", 2.50 mm)
Rockwell Hardness	ASTM D785	109.5
UL File Number	*****	E345258

Πίνακας 4: Φυσικές ιδιότητες abs m30.

Other	Test method	Value
Specific Gravity	ASTM D792	1.04
Flame Classification	UL94	HB (0.06", 1.5 mm)
Rockwell Hardness	ASTM D785	109.5

Πίνακας 5: Φυσικές ιδιότητες abs m30i

### 1.3.3 Ηλεκτρικές ιδιότητες του ABS.

Στις ηλεκτρικές ιδιότητες των υλικών συγκαταλέγονται: η διηλεκτρική σταθερά, η διηλεκτρική αντοχή, ο συντελεστής απωλειών, η επιφανειακή ειδική αντίσταση και η αντίσταση όγκου. Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται οι τιμές του abs για τις ηλεκτρικές αυτές ιδιότητες. Έχει διηλεκτρική σταθερά περίπου 3.2-3.3 KHz, διηλεκτρική αντοχή 20-25 kV mm<sup>-1</sup>, συντελεστή απωλειών 0.02 MHz, δεν παρουσιάζει επιφανειακή ειδική αντίσταση και έχει αντίσταση όγκου >10<sup>15</sup> Ohm/cm.



Material	Formula	Dielectric constant @1kHz	Dielectric constant @1MHz	Dielectric strength kV mm <sup>-1</sup>	Dissipation factor @ 1kHz	Dissipation factor @ 1MHz	Surface resistivity Ohm/sq	Volume resistivity Ohm/cm
Cellulose Acetate	CA	·	~5	11	0.06	·	·	$5 \times 10^{12}$
Cellulose Acetate Butyrate	CAB	·	2.5-6.2	10	0.04	·	·	$10^{11}$ - $10^{15}$
Ethylene-Chlorotrifluoroethylene copolymer	E-CTFE	·	2.3-2.5	40	0.002	·	$10^{14}$ - $10^{15}$	$10^{15}$ - $10^{16}$
Ethylene-Tetrafluoroethylene Copolymer	ETFE	·	2.6	25	·	0.0005	$>10^{14}$	$10^{16}$
Fluorinated Ethylene Propylene Copolymer	FEP	·	2.1	20 @ 3.2mm	·	0.0007	$10^{16}$	$10^{18}$
Polyacrylonitrile-butadiene-styrene	ABS	·	3.2 - 3.3	20-25	·	0.02	·	$>10^{15}$
Polyamide - Nylon 6	PA 6	·	3.6	25	0.2	·	$5 \times 10^{10}$	$5 \times 10^{12}$
Polyamide - Nylon 6, 6	PA 6,6	·	3.4	25	0.2	·	$10^{11}$	$10^{13}$
Polyamide - Nylon 6, 6 - 30% Carbon Fiber Filled	PA 6, 6 - 30% CFR	·	·	·	·	·	$10^3$	$10^2$

Πίνακας 6: Ηλεκτρικές ιδιότητες abs

Electrical Properties	Test method	Orientation	Value Range
Volume Resistivity	ASTM D257	XZ Axis	$4.0 \times 10^{15}$ – $3.3 \times 10^{16}$ ohm-cm
Dielectric Constant	ASTM D150-98	XZ Axis	2.6 – 2.86
Dissipation Factor	ASTM D150-98	XZ Axis	0.0048 – 0.0054
Dielectric Strength	ASTM D149-09, Method A	XZ Axis	100 V/mil
Dielectric Strength	ASTM D149-09, Method A	XZ Axis	360 V/mil

Πίνακας 7: Ηλεκτρικές ιδιότητες abs m30

Electrical Properties	Test method	Value Range
Volume Resistivity	ASTM D257	$1.5 \times 10^{14}$ – $6.0 \times 10^{13}$ ohm-cm
Dielectric Constant	ASTM D150-98	2.9 – 2.7
Dissipation Factor	ASTM D150-98	0.0053 – 0.0051
Dielectric Strength	ASTM D149-09, Method A	370 - 80 V/mil

Πίνακας 8: Ηλεκτρικές ιδιότητες abs m30i

Μελέτη αντοχής δοκιμίου σε κάμψη κατασκευασμένου από υλικό Acrylonitrile Butadiene Styrene plus σε τρισδιάστατο εκτυπωτή



### 1.3.4 Μηχανικές ιδιότητες του ABS.

Στις μηχανικές ιδιότητες των θερμοπλαστικών συγκαταλέγονται: η αντοχή σε εφελκυσμό, το μέτρο ελαστικότητας young, η δύναμη κάμψης, το μέτρο κάμψης και η επιμήκυνση κατά τη θραύση. Οι τιμές που δημοσιεύει ο κατασκευαστής για τις παραπάνω μηχανικές ιδιότητες του abs φαίνονται στον πίνακα που ακολουθεί.

Property	Published	
Tensile Strength	ASTM D638	36 MPa
Young's Modulus	ASTM D638	2413 MPa
Flexural Strength	ASTM D790	61 MPa
Flexural Modulus	ASTM D790	2317 MPa
Elongation at Break	ASTM D638	4%

*Πίνακας 9: Μηχανικές ιδιότητες abs.*

Το υλικό το οποίο παράγει ο κατασκευαστής θα πρέπει να πληροί τις δημοσιευμένες προδιαγραφές. Υπάρχουν όμως παράγοντες οι οποίοι διαφοροποιούν τις μηχανικές ιδιότητες του τελικού προϊόντος, όπως είναι ο χρόνος ο οποίος θα επεξεργαστεί το υλικό μετά την παράδοση, η θερμοκρασία, η υγρασία του περιβάλλοντος και γενικότερα οι συνθήκες του περιβάλλοντος που εκτίθεται το υλικό.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται αναλυτικά οι επιπτώσεις αυτές και ο βαθμός που επηρεάζουν το υλικό. Τα δείγματα abs που θα παρουσιαστούν έχουν κατασκευαστεί και αποθηκευτεί σε ασφαλές περιβάλλον.

#### 1.3.4.1 Επιπτώσεις του χρόνου στο abs.

Στο παρακάτω ραβδόγραμμα παρουσιάζεται η επίπτωση του χρόνου στην αντοχή σε εφελκυσμό. Συγκεκριμένα μετρήσεις της αντοχής σε εφελκυσμό πραγματοποιούνται την 1<sup>η</sup>, την 4<sup>η</sup>, την 13<sup>η</sup>, την 26<sup>η</sup> και την 52<sup>η</sup> εβδομάδα από την παραγωγή του υλικού. Η επίπτωση του χρόνου είναι μικρή, της τάξεως του 0.73 MPa δηλαδή 2.3% μέχρι και την 52<sup>η</sup> εβδομάδα και αφορά και τα στεγνά και τα βρεγμένα δείγματα. Έτσι παρατηρείται ότι η επίπτωση του χρόνου δεν επηρεάζει σημαντικά την αντοχή σε εφελκυσμό.

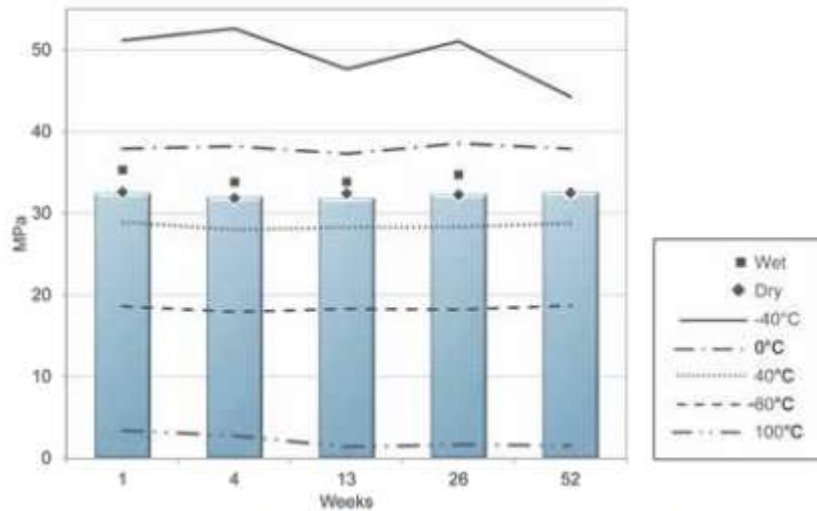


Figure 2a: Tensile strength - 20 °C, controlled environment, on edge.

Week	Tensile Strength (MPa)		
	Chart Data	Min	Max
1	32.5	32.3	33.0
4	32.1	32.0	32.2
13	31.9	31.6	32.3
26	32.4	32.3	32.6
52	32.6	32.5	33.1

Figure 2b: Tensile strength - 20 °C, controlled environment, on edge.

Week	Tensile Strength (MPa)						
	Wet	Dry	-40 °C	0 °C	40 °C	80 °C	100 °C
1	35.3	32.6	51.2	37.9	28.9	18.6	3.4
4	33.8	31.8	52.6	38.2	28.0	17.9	2.8
13	33.8	32.4	47.7	37.3	28.3	18.3	1.4
26	34.7	32.3	51.0	38.6	28.3	18.2	1.7
52	32.5	32.5	44.3	37.9	28.8	18.7	1.6

Figure 2c: Secondary data, tested in various conditions.

Στο παρακάτω ραβδόγραμμα παρουσιάζεται η επίπτωση του χρόνου στο μέτρο κάμψης. Όπως στην αντοχή στον εφελκυσμό έτσι και στο μέτρο κάμψης ο χρόνος δεν το επηρεάζει σημαντικά. Συγκεκριμένα η μέγιστη απόκλιση είναι 162 Mpa και από την 1<sup>η</sup> έως την 52<sup>η</sup> εβδομάδα η τιμή του μέτρου κάμψης επηρεάζεται κατά 36 Mpa ή (1.8%).

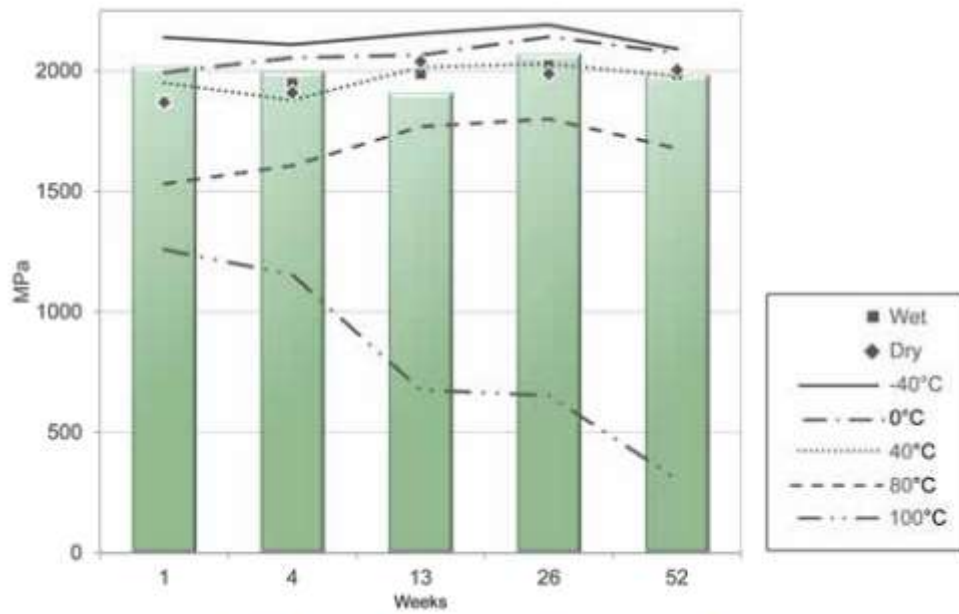


Figure 3a: Tensile strength - 20 °C, controlled environment, on edge.

Week	Flexural Modulus (MPa)			Flexural Modulus (MPa)						
	Chart Data	Min	Max	Wet	Dry	-40 °C	0 °C	40 °C	80 °C	100 °C
1	2022	1896	2134	1874	1869	2139	1993	1950	1531	1259
4	1999	1750	2167	1949	1909	2109	2055	1879	1607	1154
13	1911	1828	1987	1988	2039	2155	2066	2015	1768	677
26	2073	1893	2223	2023	1988	2191	2141	2029	1801	653
52	1986	1911	2018	1986	2004	2092	2075	1978	1678	305

Figure 3b: Tensile strength - 20 °C, controlled environment, on edge.

Figure 3c: Secondary data, tested in various conditions.

Η επιμήκυνση κατά τη θραύση παρουσιάζει μία αστάθεια η οποία κορυφώνεται στις 1,2 μονάδες (16.5%) κατά την περίοδο των 52 εβδομάδων. Όμως από την 13<sup>η</sup> εβδομάδα και μετά σταθεροποιείται στις 0,7 μονάδες (9.8%).

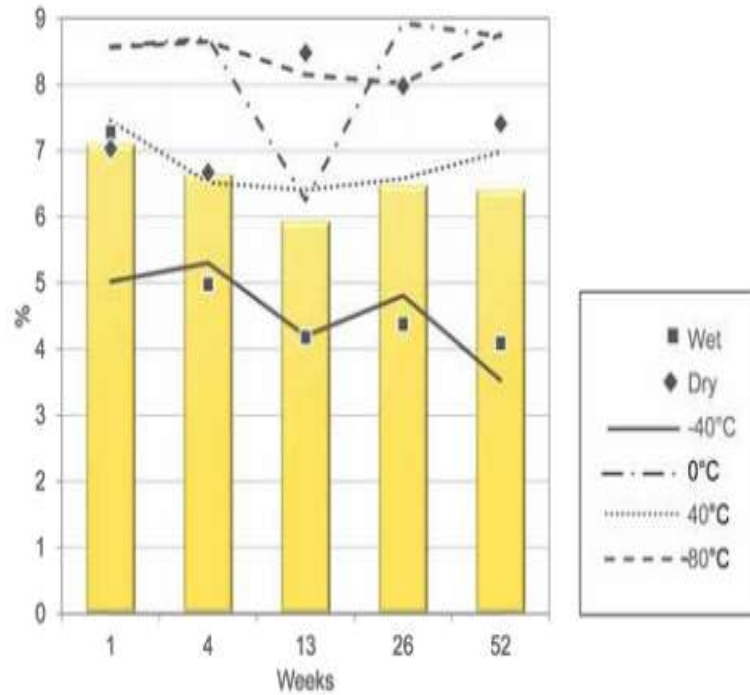


Figure 4a: Elongation at break - 20 °C, controlled environment, on edge.

Elongation at Break (%)			
Week	Chart Data	Min	Max
1	7.1	6.2	9.3
4	6.7	6.0	7.4
13	5.9	5.3	7.1
26	6.5	3.5	8.8
52	6.4	3.2	8.0

Figure 4b: Elongation at break - 20 °C, controlled environment, on edge.

Elongation at Break (%)							
Week	Wet	Dry	-40 °C	0 °C	40 °C	80 °C	100 °C
1	7.3	7.0	5.0	8.6	7.5	8.6	N/A
4	5.0	6.7	5.3	8.7	6.5	8.7	N/A
13	4.2	8.5	4.2	8.2	6.4	6.3	N/A
26	4.4	8.0	4.8	8.0	6.6	8.9	N/A
52	4.1	7.4	3.5	8.8	7.0	8.7	N/A

Figure 4c: Secondary data, tested in various conditions.

### 1.3.4.2 Επιπτώσεις της θερμοκρασίας στο abs.

Για να φανούν οι επιπτώσεις της θερμοκρασίας στο abs, οι μηχανικές ιδιότητες μετρήθηκαν σε θερμοκρασία: -40, -20, 0, 20, 40, 60, 80 και 100 °C. Τα δείγματα που χρησιμοποιήθηκαν κατασκευάστηκαν 28 μέρες πριν και αποθηκεύτηκαν σε ελεγχόμενο περιβάλλον. Από τα παρακάτω γραφήματα φαίνεται ότι οι επιπτώσεις τις θερμοκρασίας στο υλικό είναι σημαντικές.

Η θερμοκρασία επηρεάζει σημαντικά την αντοχή σε εφελκυσμό. Συγκεκριμένα στους 80°C και κάτω η αντοχή σε εφελκυσμό παρουσιάζει αύξηση, ενώ στην συνέχεια παρουσιάζεται μία απότομη μείωση που φτάνει τα 15,2 Mpa.

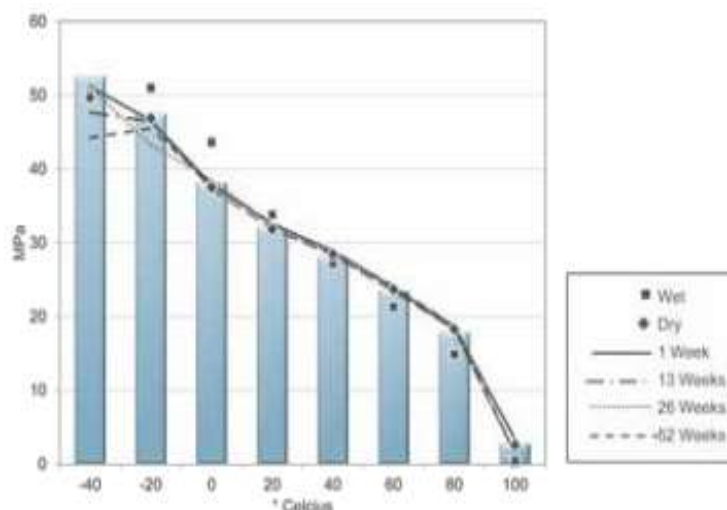


Figure 5a: Tensile strength - 4 weeks, controlled environment, on edge.

°C	Tensile Strength (MPa)		
	Chart Data	Min	Max
-40	52.6	50.4	53.8
-20	47.3	47.0	48.0
0	38.2	37.5	39.8
20	32.1	32.0	32.2
40	28.0	27.2	28.4
60	23.5	23.4	23.6
80	17.9	17.7	18.3
100	2.8	1.9	4.2

Figure 5b: Tensile strength - 4 weeks, controlled environment, on edge.

°C	Tensile Strength (MPa)					
	Wet	Dry	1 Week	13 Weeks	26 Weeks	52 Weeks
-40	50.1	49.7	51.2	47.7	51.0	44.3
-20	51.0	46.9	46.6	46.4	43.3	45.5
0	43.6	37.5	37.9	37.3	38.6	37.9
20	33.8	31.8	32.5	31.9	32.4	32.6
40	27.2	28.5	28.9	28.3	28.3	28.8
60	21.3	23.7	23.9	23.4	23.9	24.1
80	14.9	18.3	18.6	18.3	18.2	18.7
100	0.4	2.6	3.4	1.4	1.7	1.6

Figure 5c: Secondary data, tested in various conditions.

Σε αντίθεση με την αντοχή σε εφελκυσμό και ενώ και το μέτρο κάμψης παρουσιάζει καθοδική πορεία με την άνοδο της θερμοκρασίας, η μείωση αυτή δεν είναι το ίδιο γραμμική. Όπως φαίνεται από το γράφημα που ακολουθεί η πτώση της τιμής του μέτρου κάμψης είναι ομαλή από τους -40 μέχρι τους 80 °C όπου και ακολουθεί απότομη πτώση.

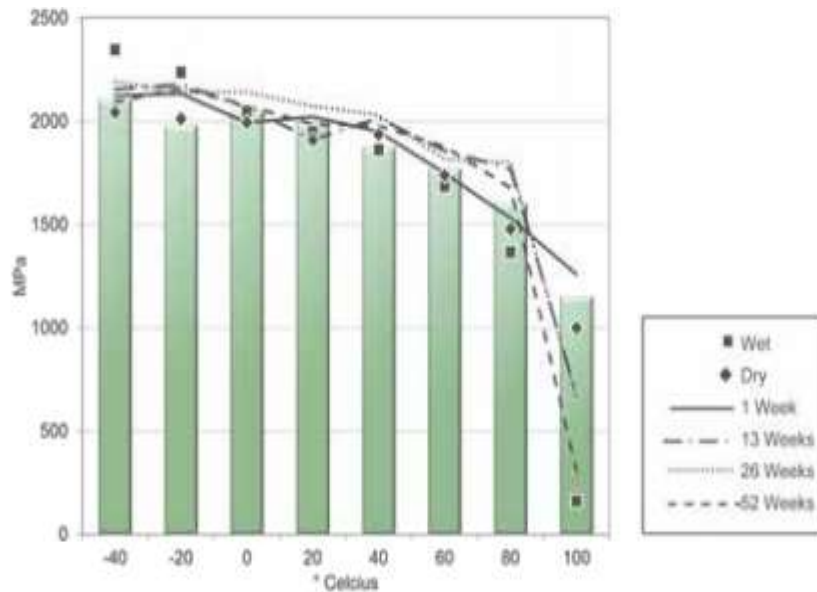


Figure 6a: Flexural modulus - 4 weeks, controlled environment, on edge.

°C	Flexural Modulus (MPa)		
	Chart Data	Min	Max
-40	2109	1988	2358
-20	1981	1917	2113
0	2055	1767	2277
20	1999	1750	2167
40	1879	1705	2067
60	1772	1511	2106
80	1607	1453	1878
100	1154	1015	1353

Figure 6b: Flexural modulus - 4 weeks, controlled environment, on edge.

°C	Flexural Modulus (MPa)					
	Wet	Dry	1 Week	13 Weeks	26 Weeks	52 Weeks
-40	2347	2043	2124	2155	2191	2092
-20	2237	2012	2133	2178	2144	2162
0	2047	1994	1993	2067	2141	2075
20	1949	1909	2022	1911	2073	1986
40	1862	1937	1950	2015	2029	1978
60	1686	1739	1748	1857	1816	1876
80	1367	1477	1531	1768	1801	1678
100	161	999	1259	677	653	305

Figure 6c: Secondary data, tested in various conditions.



Από τους  $-40$  μέχρι τους  $80^{\circ}\text{C}$  η επίπτωση της θερμοκρασίας στην επιμήκυνση κατά τη θραύση παρουσιάζει μία ακανόνιστη ανοδική πορεία, με εξαίρεση τα σημεία στους  $0$  και  $80^{\circ}\text{C}$  όπου παρατηρείται απότομη αύξηση που φτάνει τις 8.5 μονάδες.

Στο ραβδόγραμμα που ακολουθεί παρουσιάζεται η επιρροή της θερμοκρασίας στην επιμήκυνση κατά τη θραύση.

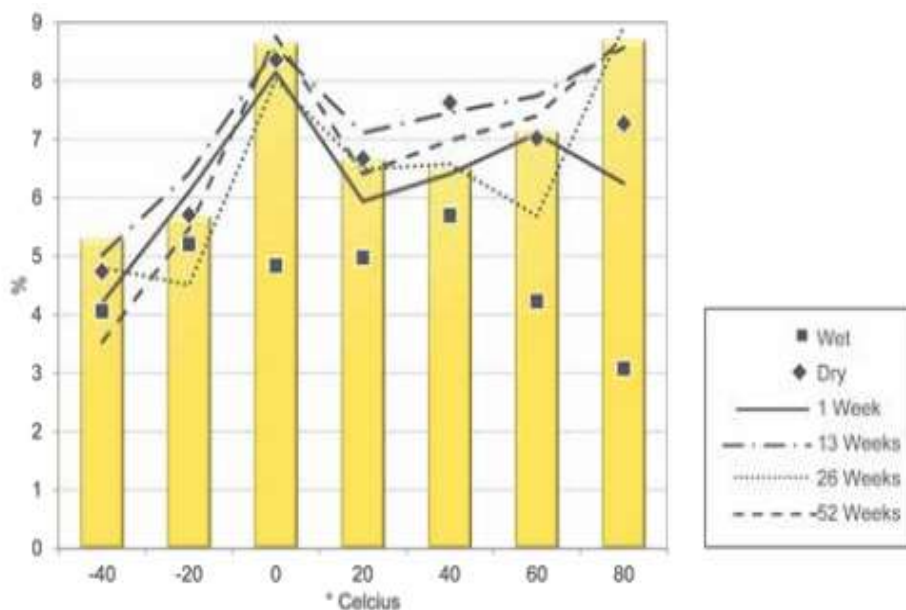


Figure 7a: Elongation at Break - 4 weeks, controlled environment, on edge.

Elongation at Break (%)			
°C	Chart Data	Min	Max
-40	5.3	4.7	5.6
-20	5.7	5.2	6.3
0	8.7	7.1	10.1
20	6.7	6.0	7.4
40	6.5	4.5	8.0
60	7.1	6.5	8.0
80	8.7	6.0	11.2
100	NA	NA	NA

Figure 7b: Elongation at Break - 4 weeks, controlled environment, on edge.

Elongation at Break (%)						
°C	Wet	Dry	1 Week	13 Weeks	26 Weeks	52 Weeks
-40	4.1	4.7	5.0	4.2	4.8	3.5
-20	5.2	5.7	6.4	6.1	4.5	5.5
0	4.8	8.4	8.7	8.2	8.0	8.8
20	5.0	6.7	7.1	5.9	6.5	6.4
40	5.7	7.6	7.5	6.4	6.6	7.0
60	4.2	7.0	7.7	7.1	5.7	7.4
80	3.1	7.3	8.6	6.3	8.9	8.7
100	NA	NA	NA	NA	NA	NA

Figure 7c: Secondary data, tested in various conditions.

### 1.3.4.3 Επιπτώσεις των περιβαλλοντικών συνθηκών στο abs.

Οι περιβαλλοντικές συνθήκες επηρεάζουν σημαντικά τις μηχανικές ιδιότητες του abs. Η μελέτη των επιπτώσεων παρουσιάζεται με τη χρήση δειγμάτων abs τα οποία αποθηκεύτηκαν σε υγρό, ξηρό και ελεγχόμενο περιβάλλον. Στη συνέχεια εμβαπτίστηκαν με νερό έτσι ώστε να φανεί η επίδραση της θερμοκρασίας επί των μηχανικών ιδιοτήτων.

Στην μελέτη για αντοχή με εφελκυσμό παρατηρείται σταθερή αντοχή και για τις τρεις περιβαλλοντικές συνθήκες.

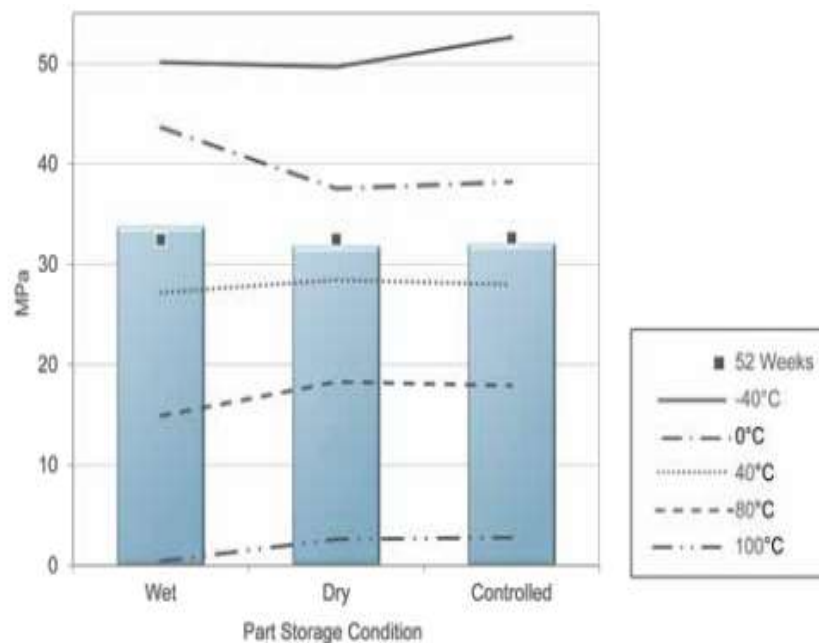


Figure 8a: Tensile strength - 4 weeks, controlled environment, on edge.

Condition	Tensile Strength (MPa)		
	Chart Data	Min	Max
Wet	33.8	33.6	33.9
Dry	31.8	31.7	32.0
Controlled	32.1	32.0	32.2

Figure 8b: Tensile strength - 4 weeks, controlled environment, on edge.

Condition	Tensile Strength (MPa)					
	52 Weeks	-40 °C	0 °C	40 °C	80 °C	100 °C
Wet	32.5	50.1	43.6	27.2	14.9	0.4
Dry	32.5	49.7	37.5	28.5	18.3	2.6
Controlled	32.6	52.6	38.2	28.0	17.9	2.8

Figure 8c: Secondary data, tested in various conditions.

Οι συνθήκες αποθήκευσης έχουν μικρές συνέπειες στο μέτρο κάμψης.



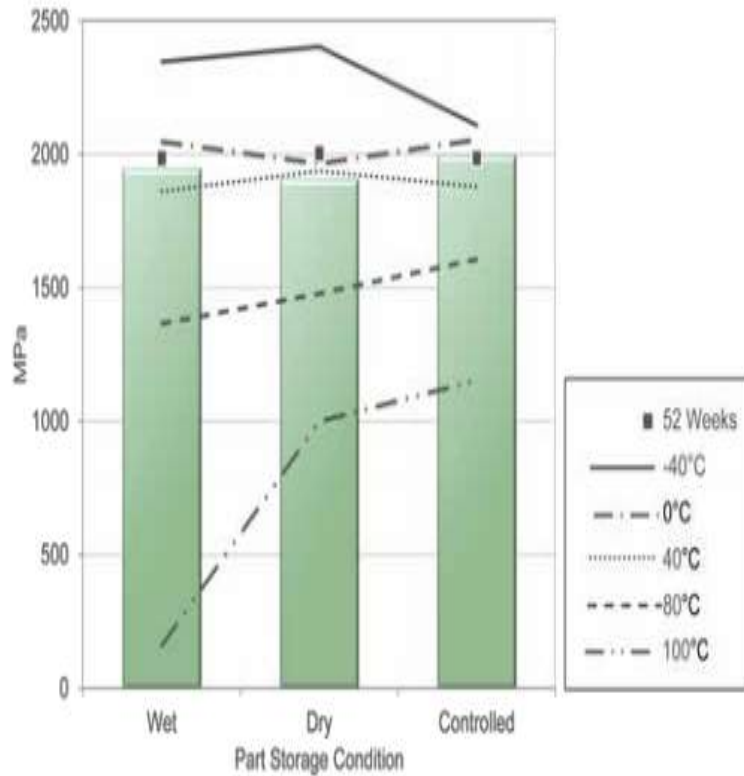


Figure 9a: Flexural modulus - 4 weeks, controlled environment, on edge.

Condition	Flexural Modulus (MPa)		
	Chart Data	Min	Max
Wet	1949	1768	2061
Dry	1909	1708	2184
Controlled	1999	1750	2167

Figure 9b: Flexural modulus - 4 weeks, controlled environment, on edge.

Condition	Flexural Modulus (MPa)					
	52 Weeks	-40 °C	0 °C	40 °C	80 °C	100 °C
Wet	1986	2347	2047	1862	1367	161
Dry	2004	2403	1964	1937	1477	999
Controlled	1986	2109	2055	1879	1607	1154

Figure 9c: Secondary data, tested in various conditions.

Οι επιπτώσεις των συνθηκών αποθήκευσης για τα δείγματα που έχουν αποθηκευτεί σε ξηρό και σε ελεγχόμενο περιβάλλον είναι ασήμαντες σε σχέση με τα αποτελέσματα της μελέτης αντοχής δοκιμίου σε κάμψη κατασκευασμένου από υλικό Acrylonitrile Butadiene Styrene plus σε τρισδιάστατο εκτυπωτή

δείγματα που έχουν αποθηκευτεί σε υγρό περιβάλλον. Στα υγρά δείγματα υπάρχει μείωση της επιμήκυνσης κατά τη θραύση της τάξης των 1.7 έως 3.8 μονάδων, ποσοστό 25-44%, σε σύγκριση με τα δείγματα που αποθηκεύτηκαν σε ξηρό και σε αυτά που αποθηκεύτηκαν σε ελεγχόμενο περιβάλλον.

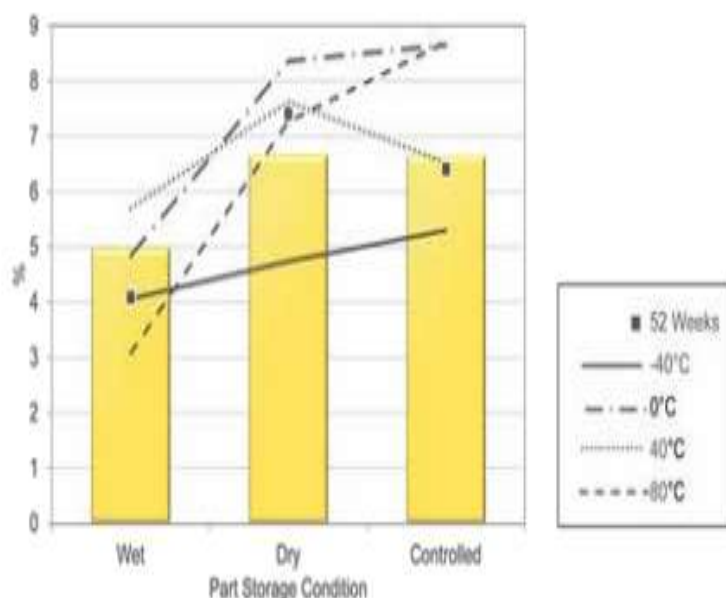


Figure 10a: Elongation at break - 4 weeks, controlled environment, on edge.

Condition	Elongation at Break (%)		
	Chart Data	Min	Max
Wet	5.0	4.6	5.5
Dry	6.7	5.9	8.0
Controlled	6.7	6.0	7.4

Figures 10b: Elongation at break - 4 weeks, controlled environment, on edge

Condition	Elongation at Break (%)					
	52 Weeks	-40 °C	0 °C	40 °C	80 °C	100 °C
Wet	4.1	4.1	4.8	5.7	3.1	0.0
Dry	7.4	4.7	8.7	7.6	7.3	0.0
Controlled	6.4	5.3	8.7	6.5	8.7	0.0

Figure 10c: Secondary data, tested in various conditions.

Mechanical Properties <sup>1</sup>	Test Method	English		Metric	
		XZ Axis	ZX Axis	XZ Axis	ZX Axis
Tensile Strength, Yield (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	4,550 psi	3,750 psi	31 MPa	26 MPa
Tensile Strength, Ultimate (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	4,650 psi	4,050 psi	32 MPa	28 MPa
Tensile Modulus (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	320,000 psi	310,000 psi	2,230 MPa	2,180 MPa
Tensile Elongation at Break (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	7%	2%	7%	2%
Tensile Elongation at Yield (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	2%	1%	2%	1%
Flexural Strength (Method 1, 0.05"/min)	ASTM D790	8,700 psi	7,000 psi	60 MPa	48 MPa
Flexural Modulus (Method 1, 0.05"/min)	ASTM D790	300,000 psi	250,000 psi	2,060 MPa	1,760 MPa
Flexural Strain at Break (Method 1, 0.05"/min)	ASTM D790	4%	3.5%	4%	3.5%

Mechanical Properties	Test Method	English	
		XZ Axis	ZX Axis
IZOD Impact, notched (Method A, 23°C)	ASTM D256	2.4 ft-lb/in	128 J/m
IZOD Impact, un-notched (Method A, 23°C)	ASTM D256	5.6 ft-lb/in	300 J/m

Πίνακας 10: Μηχανικές ιδιότητες abs m30.

Mechanical Properties <sup>2</sup>	Test Method	English	Metric
Tensile Strength (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	5,200 psi	36 MPa
Tensile Modulus (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	350,000 psi	2,400 MPa
Tensile Elongation (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	4%	4%
Flexural Strength (Method 1, 0.05"/min)	ASTM D790	8,800 psi	61 MPa
Flexural Modulus (Method 1, 0.05"/min)	ASTM D790	336,000 psi	2,300 MPa
IZOD Impact, notched (Method A, 23°C)	ASTM D256	2.6 ft-lb/in	139 J/m
IZOD Impact, un-notched (Method A, 23°C)	ASTM D256	5.3 ft-lb/in	283 J/m

Πίνακας 11: Μηχανικές ιδιότητες abs m30i.

## 1.4 Εφαρμογές του ABS

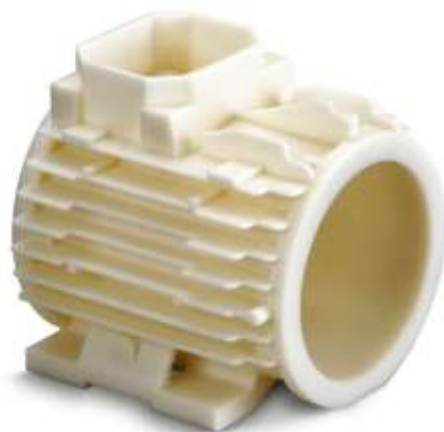
Το abs είναι ένα χαμηλού κόστους θερμοπλαστικό το οποίο βρίσκει εφαρμογή σε πολλούς διαφορετικούς τομείς λόγω των εξαιρετικών μηχανικών ιδιοτήτων του. Εξαιτίας της καλής αντοχής στην κρούση και της ακαμψίας του, αποτελεί μία ιδανική επιλογή για δομικές εφαρμογές. Έχει πολύ μεγάλες δυνατότητες μορφοποίησης και σταθερότητα διαστάσεων, που το καθιστούν εξαιρετική επιλογή για κατασκευή πρωτοτύπων παραγωγής. Είναι εύκολο να βαφεί και να κολληθεί. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μορφοποιημένα προϊόντα, σωληνώσεις, μουσικά όργανα, ράβδους για μπαστούνια του γκολφ εξαιτίας της μεγάλης του απορροφητικότητας στους κραδασμούς, μέρη αυτοκινήτου, περιβλήματα, προστατευτικά εργαλείων και για την κατασκευή παιχνιδιών όπως είναι τα τουβλάκια LEGO.



*Εικόνα 9: Εφαρμογές του abs.*

Παράγωγα του abs είναι τα υλικά abs m30 και abs m30i από τα οποία είναι κατασκευασμένα και τα δοκίμια της πτυχιακής αυτής. Το abs m30 είναι ένα υλικό 25-70% ισχυρότερο από το πρότυπο abs ιδανικό για την κατασκευή λειτουργικών πρωτοτύπων και εργαλείων. Έχει μεγαλύτερη αντοχή κάμψης από το πρότυπο abs όπως και ισχυρότερο συνδετικό στρώμα που προσφέρει καλύτερη ποιότητα.

Όταν το abs m30 συνδυαστεί με ένα 3D FORTUS σύστημα παραγωγής τότε το αποτέλεσμα είναι ένα πιο δυνατό με μεγαλύτερη λεπτομέρεια στα χαρακτηριστικά πρωτότυπο. Παρακάτω παρουσιάζονται πρωτότυπα τα οποία έχουν κατασκευαστεί από abs m30 με τη χρήση της 3D FORTUS διαδικασίας παραγωγής.



*Εικόνα 10: Κέλυφος γεννήτριας κατασκευασμένο από abs m30.*



*Εικόνα 11: Αεραγωγός αυτοκινήτου κατασκευασμένος από abs m30.*



*Εικόνα 12: Καλύπτρα φρένου κατασκευασμένη από abs m30.*



Εικόνα 13: Άξονας κατασκευασμένος από abs m30.



Εικόνα 14: Θήκη για θυροτηλέφωνο κατασκευασμένη από abs m30.

Το abs m30i είναι ένα υψηλής αντοχής υλικό κατάλληλο για την κατασκευή ιατρικού και φαρμακευτικού εξοπλισμού και για συσκευασία τροφίμων. Τα εξαρτήματα που κατασκευάζονται από το υλικό αυτό είναι βιοσυμβατά και υπάρχει η δυνατότητα αποστείρωσης τους με ακτίνες γ. Με την τεχνολογία FDM το abs m30i μπορεί να κατασκευάσει λειτουργικά πρωτότυπα, εξαρτήματα και εργαλεία τα οποία μπορούν να αποστειρωθούν. Παρακάτω παρουσιάζονται ορισμένες τέτοιες εφαρμογές του abs m30i.





Εικόνα 15: Ιατρικό εργαλείο κατασκευασμένο από abs m30i



Εικόνα 16: Νεφελοποιητής κατασκευασμένος από abs m30i.

## Κεφάλαιο 2: Τρισδιάστατη εκτύπωση.

### 2.1 Τρισδιάστατοι εκτυπωτές.

Για την κατασκευή των δοκιμών χρησιμοποιήθηκαν οι τρισδιάστατοι εκτυπωτές του εργαστηρίου της ρομποτικής του τμήματος. Οι εκτυπωτές αυτοί έχουν κατασκευαστεί από την εταιρία STRATASYS και είναι τα μοντέλα dimension BST 768 και dimension elite. Ο εκτυπωτής dimension BST 768 χρησιμοποιεί abs σαν πρώτη ύλη και έχει τη δυνατότητα γρήγορης παραγωγής ανθεκτικών και ισχυρών μοντέλων. Είναι ένα μηχάνημα 3D εκτύπωσης το οποίο μπορεί να εκτυπώσει περίπλοκα μοντέλα και λειτουργικά τμήματα με μεγάλη ακρίβεια. Ο dimension BST 768 έχει ακρίβεια  $\pm 0.127$  χιλιοστά (βάση γεωμετρίας). Διαστάσεις: (πλάτος 686 mm), (μήκος 914 mm), (ύψος 1041 mm) και ζυγίζει 136 κιλά. Υπάρχουν δύο επιλογές πάχους στρώσεως για την εκτύπωση: 0,254 mm, 0,33 mm.



*Εικόνα 17: Τρισδιάστατος εκτυπωτής dimension BST 768.*

Ο εκτυπωτής dimension elite χρησιμοποιεί σαν πρώτη ύλη το υλικό abs plus. Έχει την δυνατότητα παραγωγής λειτουργικών ανθεκτικών περίπλοκων 3D μοντέλων. Είναι ιδανικός για την κατασκευή λειτουργικών εξαρτημάτων, ιατρικών συσκευών, οργάνων ακρίβειας και μέρη ηλεκτρονικών εξαρτημάτων. Ο dimension Μελέτη αντοχής δοκιμίου σε κάμψη κατασκευασμένου από υλικό Acrylonitrile Butadiene Styrene plus σε τρισδιάστατο εκτυπωτή



elite έχει ακρίβεια εκτύπωσης (+- 0,127) χιλιοστά, διαστάσεις: (πλάτος 686 mm), (μήκος 914 mm), (ύψος 1041 mm) ενώ ζυγίζει 136 κιλά. Υπάρχουν δύο επιλογές πάχους εκτύπωσης 0,178 και 0,254 mm.



*Εικόνα 18: Τρισδιάστατος εκτυπωτής dimension elite.*

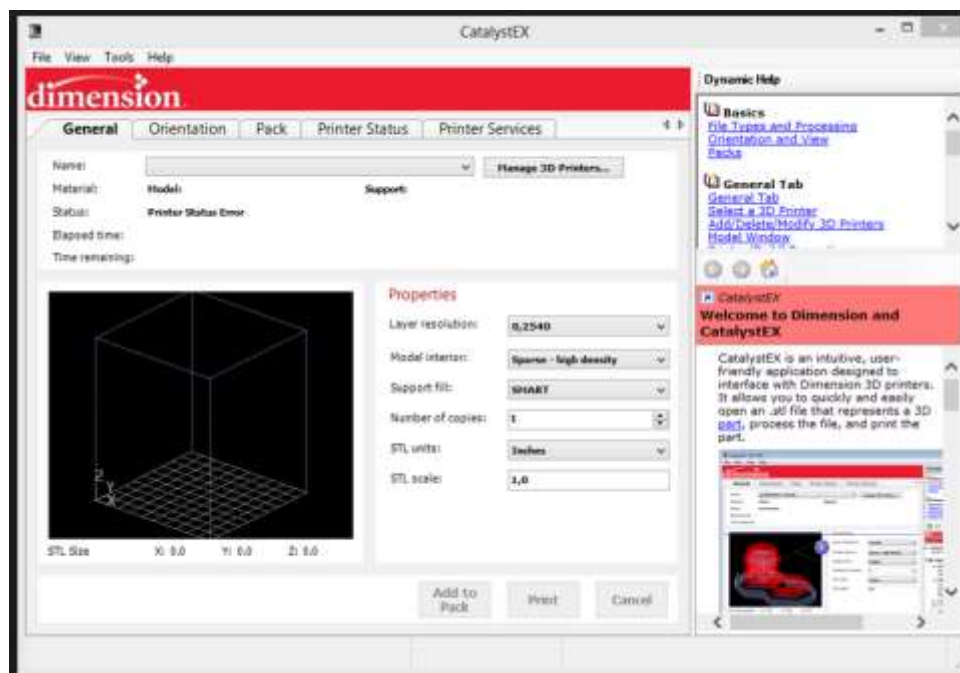
## **2.2 Εκτύπωση με τη μέθοδο FDM.**

Για την δημιουργία των μοντέλων και οι δύο εκτυπωτές χρησιμοποιούν τη μέθοδο FDM. Η μέθοδος FDM (fused deposition modeling) εφευρέθηκε πριν από είκοσι χρόνια και ήταν ένα επίτευγμα που βοήθησε την κατασκευαστρια εταιρεία (STRATASYS) να ηγηθεί στον τομέα της, αναπτύσσοντας μία σειρά μηχανημάτων που απευθύνονται σε μεγάλους κατασκευαστές, μηχανικούς, σχεδιαστές και άλλους επαγγελματίες.

Οι εκτυπωτές οι οποίοι λειτουργούν με FDM ουσιαστικά κατασκευάζουν τα διάφορα μοντέλα εναποθέτοντας υλικό από κάτω προς τα πάνω δημιουργώντας στρώματα, εκμεταλλευόμενοι την εξώθηση θερμοπλαστικού νήματος. Η διαδικασία αυτή χωρίζεται σε τρία στάδια:

Μελέτη αντοχής δοκιμίου σε κάμψη κατασκευασμένου από υλικό Acrylonitrile Butadiene Styrene plus σε τρισδιάστατο εκτυπωτή

1). Στο πρώτο στάδιο αυτό της προ-επεξεργασίας το λογισμικό τοποθετεί ένα αρχείο 3d CAD για να υπολογίσει τη διαδρομή εξώθησης του θερμοπλαστικού νήματος και της αναγκαίας υποστήριξής του. Το λογισμικό που χρησιμοποιούν οι BST 768 και ELITE είναι το CATALYST EX. Με το λογισμικό αυτό πραγματοποιείται η μετατροπή των CAD αρχείων που έχουν αποθηκευτεί σε STL σε 3D μοντέλα εκτύπωσης, συμπεριλαμβανομένου και όλων των αναγκαίων δομών υποστήριξης τους.

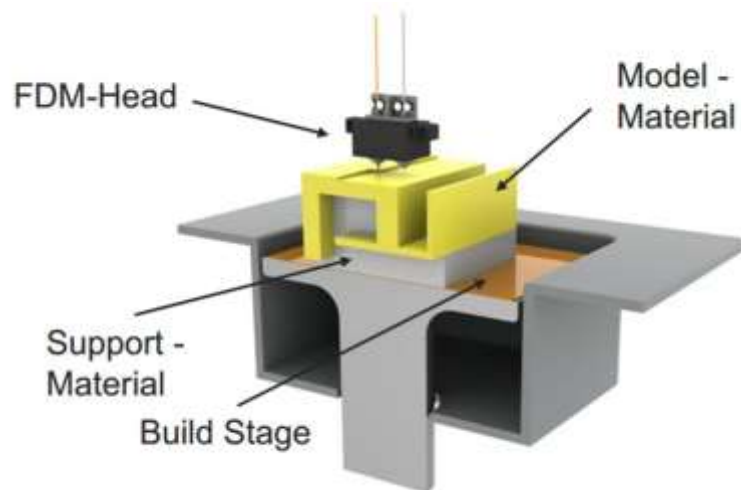


Εικόνα 19: Λογισμικό CATALYST EX.

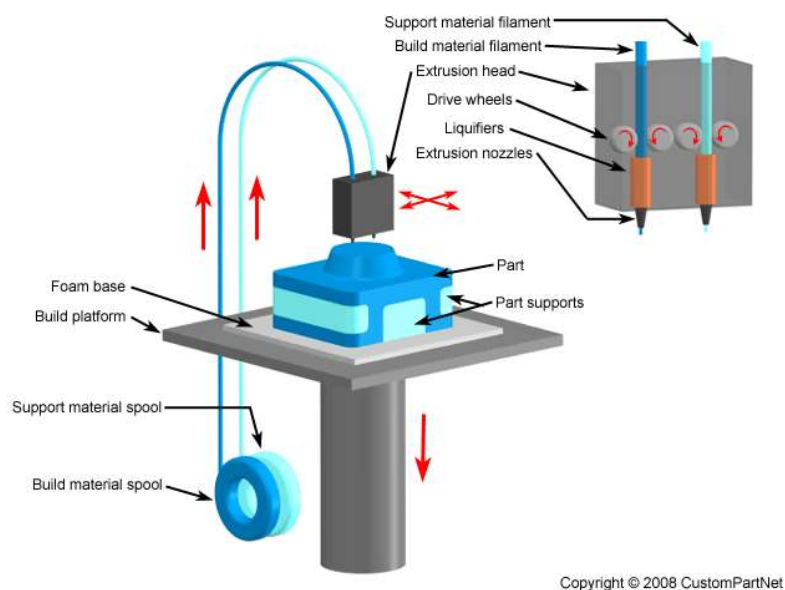
Το λογισμικό αυτό προσφέρει μία τρισδιάστατη απεικόνιση του μοντέλου ή των μοντέλων που πρόκειται να εκτυπωθούν. Υπάρχει δυνατότητα κλιμάκωσης των 3D μοντέλων στο επιθυμητό μέγεθος. Έλεγχος προσανατολισμού του μοντέλου στον θάλαμο εκτύπωσης. Δυνατότητα κατασκευής πολλών μοντέλων ταυτόχρονα. Δυνατότητα παρακολούθησης χρόνου κατασκευής και ποσότητα υλικού που απαιτείται.

2). Στο δεύτερο στάδιο της παραγωγής ο 3D εκτυπωτής θερμαίνει το θερμοπλαστικό σε μία ημι-υγρή κατάσταση και το υλικό εναποτίθεται σε πολύ μικρές χάντρες κατά μήκος της διαδρομής εξώθησης. Όπου χρειάζεται ο εκτυπωτής αφήνει

υλικό το οποίο θα έχει το ρόλο της υποστήριξης. Στις παρακάτω εικόνες φαίνεται ο τρόπος λειτουργίας εκτυπωτών με τη μέθοδο FDM.



Εικόνα 20: Εκτύπωση με διαδικασία FDM.



Copyright © 2008 CustomPartNet

Εικόνα 21: Περιγραφή μεθόδου εκτύπωσης FDM.

3). Στο τρίτο στάδιο της εκτύπωσης αφαιρείται το υλικό υποστήριξης από το χρήστη και τα δοκίμια είναι έτοιμα για χρήση.

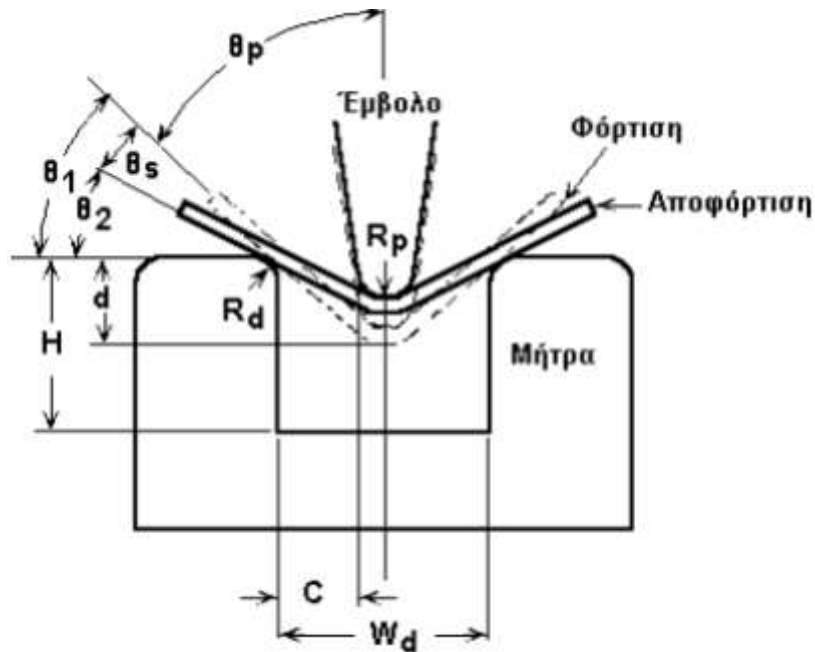
### Κεφάλαιο 3 Θεωρητικές έννοιες και είδη κάμψης.

Κάμψη ονομάζεται η καταπόνηση κατά την οποία το διάνυσμα της αναπτυσσόμενης ροπής είναι κάθετο στον επιμήκη άξονα της δοκού. Η καμπτική καταπόνηση μπορεί να δημιουργηθεί είτε από συγκεντρωμένο φορτίο σε κάποια θέση σε όλο το μήκος της δοκού είτε από ομοιόμορφα κατανεμημένα φορτία.



Εικόνα 22: Κάμψη δοκού.

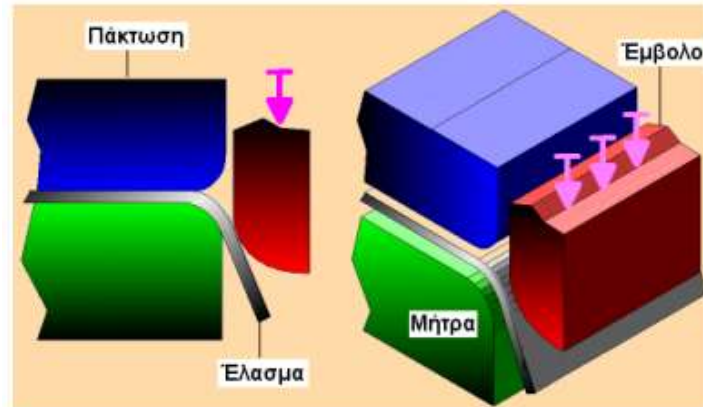
Κατά την κάμψη το πάνω μέρος της δοκού θλίβεται ενώ το κάτω μέρος εφελκύεται. Γενικά η κάμψη είναι η ομοιόμορφη μόνιμη παραμόρφωση υλικού υπό τη μορφή ελάσματος ή ταινίας, η οποία επιτυγχάνεται με περιστροφή τμήματος περί ευθύγραμμο άξονα που βρίσκεται στο ουδέτερο τμήμα της διατομής του και είναι κάθετος σε αυτή.



Εικόνα 23: Διαδικασία κάμψης.

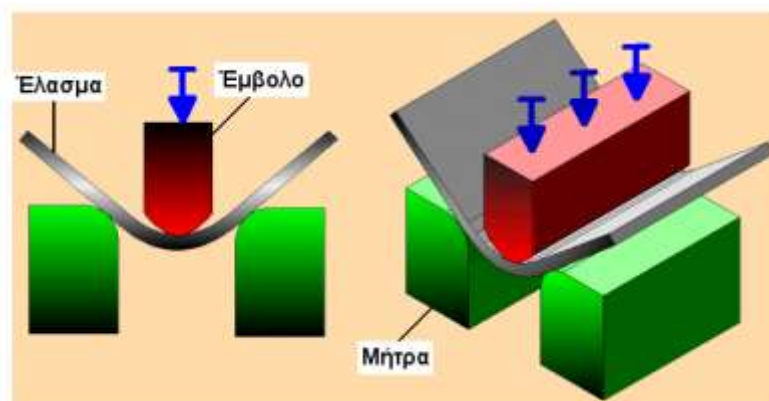
Η κάμψη είναι μία από τις απλούστερες διαδικασίες διαμόρφωσης επίπεδου ελάσματος ή ταινίας με μεγάλη πρακτική εφαρμογή και με επανάληψη καμπτικών παραμορφώσεων στο δοκίμιο λαμβάνεται ποικιλία διατομών με ευρεία βιομηχανική χρήση. Η διαδικασία διαμόρφωσης με κάμψη μπορεί να πραγματοποιηθεί με πολλούς τρόπους. Οι πιο διαδεδομένοι από αυτούς είναι οι εξής:

1). Κάμψη προβόλου κατά την οποία το έλασμα βρίσκεται πακτωμένο σε μήτρα και ένα έμβολο έρχεται σε επαφή μαζί του για να του δώσει την τελική διαμόρφωση.



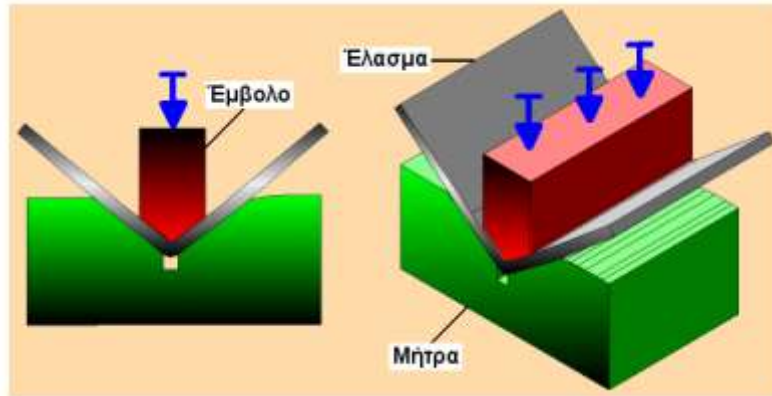
Εικόνα 24: Κάμψη προβόλου.

2). Ελεύθερη κάμψη κατά την οποία το έλασμα έρχεται σε επαφή με τρεις μόνο περιοχές του εργαλείου και η γωνία κορυφής του πάνω μέρους του εργαλείου είναι πάντοτε μικρότερη της γωνίας κάμψης.



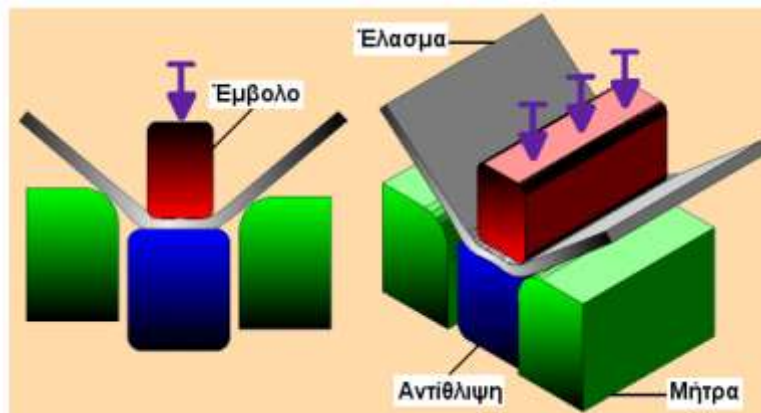
Εικόνα 25: Ελεύθερη κάμψη.

3). Κάμψη (V) κατά την οποία οι γωνίες των δύο τμημάτων του εργαλείου είναι ίσες και το έλασμα στο τέλος της διαδρομής έχει πλήρη επαφή με τις αντίστοιχες επιφάνειες του εργαλείου, υπάρχει αντίθλιψη.



Εικόνα 26: Κάμψη (V).

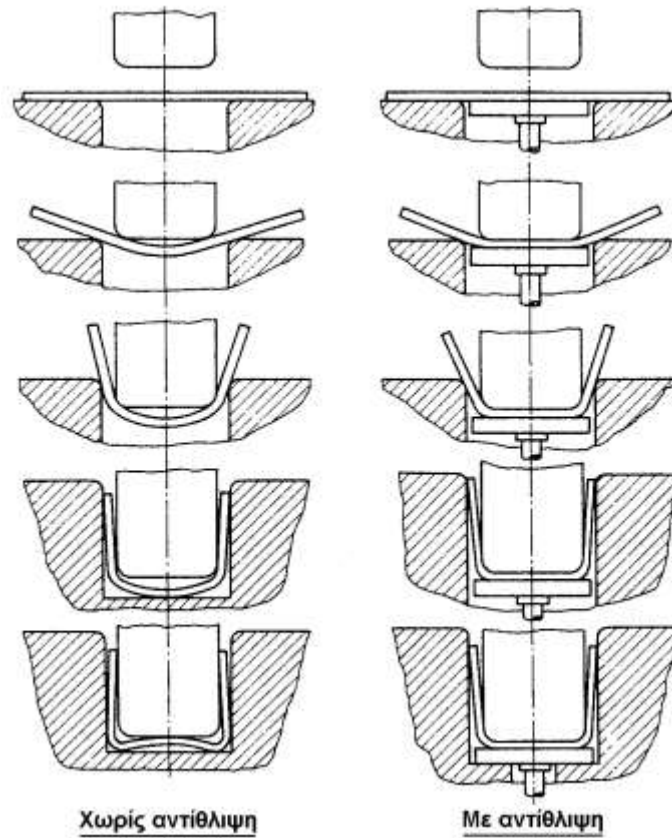
4). Διπλή κάμψη ή κάμψη (U) κατά την οποία το αποτέλεσμα της διαμόρφωσης του ελάσματος διαφοροποιείται ανάλογα με το είδος της. Στην ελεύθερη κάμψη (U) δεν υπάρχει αντίθλιψη στο τέλος της διαδρομής του εμβόλου με αποτέλεσμα ο πυθμένας του τεμαχίου να παρουσιάζεται έντονα κυρτός.



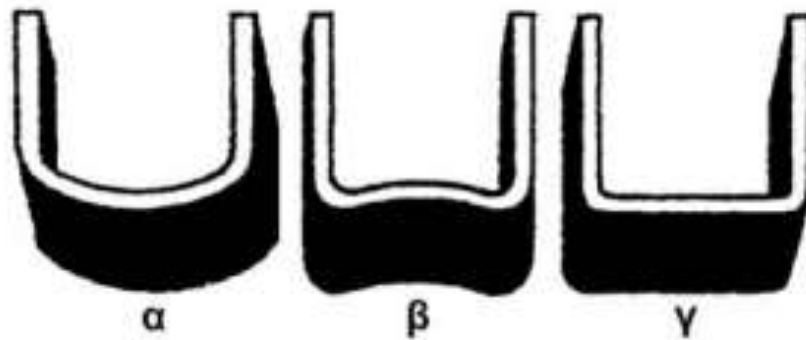
Εικόνα 27: Διπλή κάμψη ή κάμψη (U).

Κλειστή κάμψη με αντίθλιψη στο τέλος της διαδρομής κατά την οποία το τελικό τεμάχιο παρουσιάζεται με πυθμένα ο οποίος είναι έντονα κυρτός προς τα πάνω.

Τέλος με κλειστή κάμψη, με συγκράτηση κατά την οποία ο πυθμένας του τεμαχίου παρουσιάζεται επίπεδος.



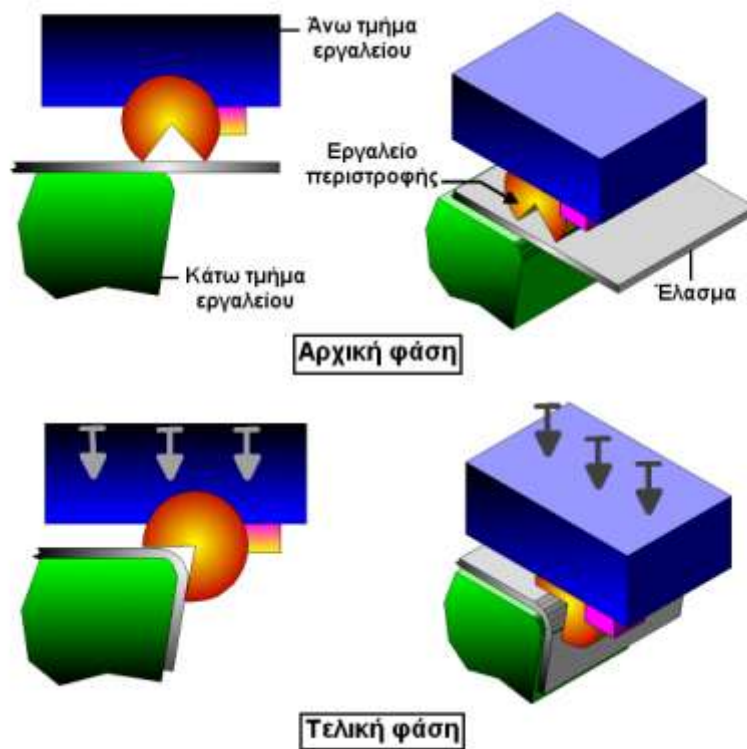
Εικόνα 28: Κλειστή κάμψη με η χωρίς αντίθλιψη.



Εικόνα 29: Είδη διπλής κάμψης.

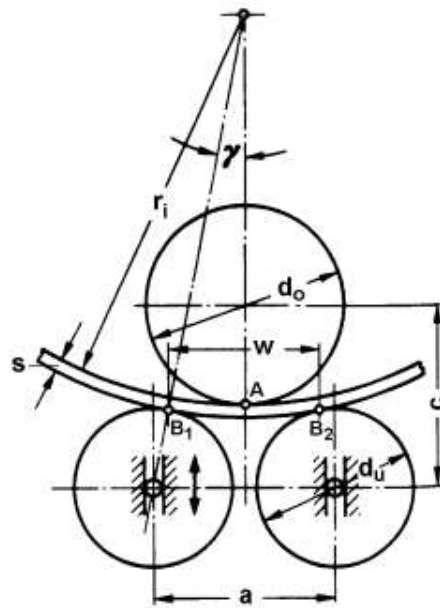
5). Περιστροφική κάμψη κατά την οποία το εργαλείο στροφής (στροφέας) περιστρέφει τμήμα του τεμαχίου.



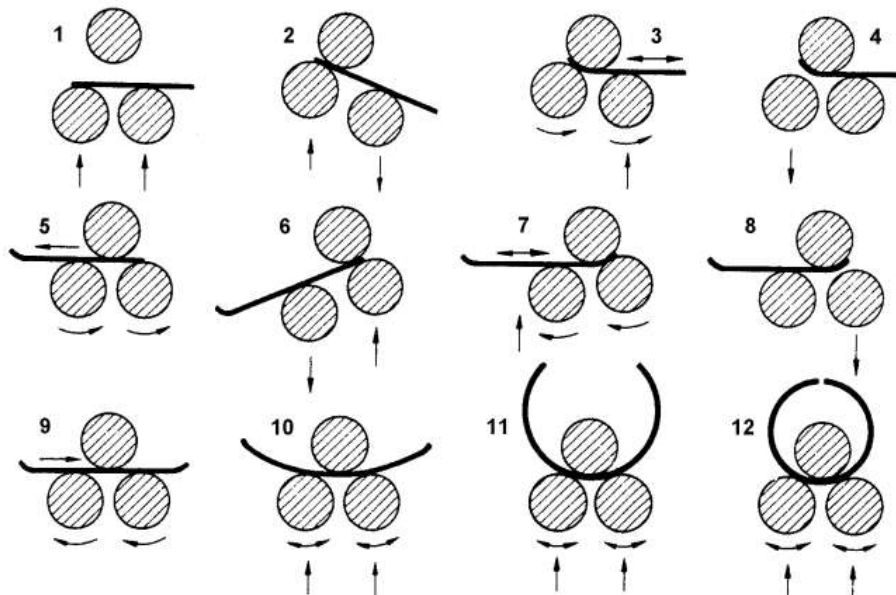


Εικόνα 30: Περιστροφική κάμψη.

6). Κάμψη μεταξύ ράουλων κατά την οποία με κατάλληλη μετάθεση και περιστροφή των ράουλων μεταξύ των οποίων βρίσκεται το κατεργαζόμενο τεμάχιο, αλλάζεται η καμπυλότητά του. Τα στάδια διαμόρφωσης ενός επίπεδου τεμαχίου σε σωλήνα με ραφή με τη κάμψη μεταξύ ράουλων παρουσιάζονται στο παρακάτω σχήμα:



Εικόνα 31: Κάμψη μεταξύ ράουλων.



Εικόνα 32: Στάδια διαμόρφωσης με κάμψη μεταξύ ράουλων.

## Κεφάλαιο 4 Πειραματικό μέρος.

### 4.1. Πρότυπο ASTM D 790

Η κατασκευή των δοκιμών όπως και η παρούσα πτυχιακή βασίστηκε στο πρότυπο ASTM D 790. Στο πρότυπο αυτό αναφέρονται αναλυτικά ο σκοπός του πειράματος, ο τρόπος διεξαγωγής του, όπως επίσης και το μέγεθος των δοκιμών που συμμετέχουν στο πείραμα. Τέλος αναφέρονται όλοι οι τύποι που θα χρησιμοποιηθούν και οι υπολογισμοί που είναι απαραίτητοι για την εξαγωγή τεκμηριωμένων αποτελεσμάτων. Το πρότυπο είναι διαθέσιμο στο παράρτημα Ι.

### 4.2. Μέγεθος και αριθμός δοκιμών

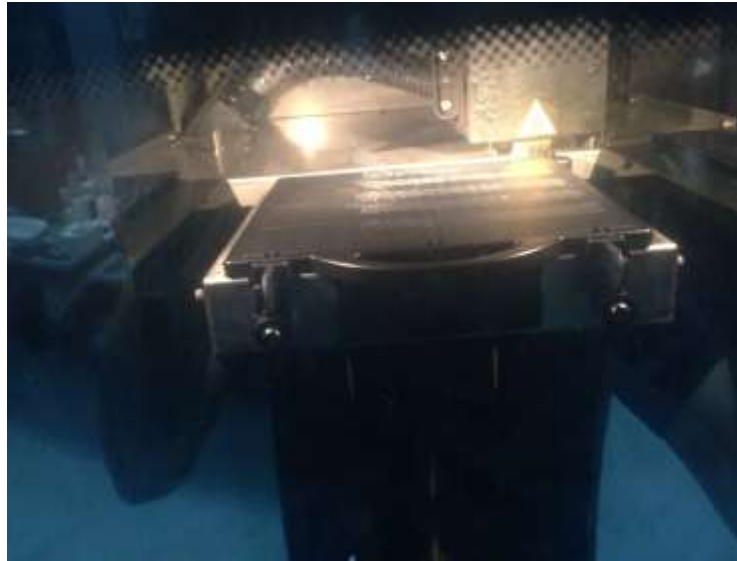
Σύμφωνα με το πρότυπο το μήκος των δοκιμών είναι 140 (mm), το πλάτος 10 (mm), το πάχος 15 (mm) και το διάστημα μεταξύ των κυλινδρικών εδράνων 100(mm). Συνολικά κατασκευάστηκαν 40 δοκίμια, 20 εκ των οποίων από abs και 20 από abs plus. Τα είδη των δοκιμών παρουσιάζονται στη συνέχεια:

Υλικό	Αριθμός δοκιμών	Πάχος εκτύπωσης (mm)	Προσανατολισμός (μοίρες, °)
<b>ABS</b>	5	0,25	0
	5	0,33	0
	5	0,25	90
	5	0,33	90
<b>ABS plus</b>	5	0,17	0
	5	0,25	0
	5	0,17	90
	5	0,25	90

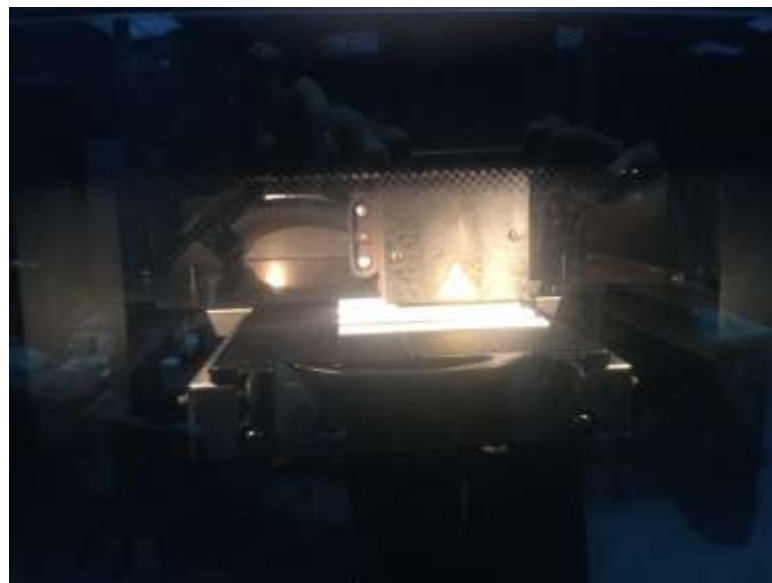
*Πίνακας 12: Πίνακας με τα είδη δοκιμών.*

Τα δοκίμια κατασκευάστηκαν στους τρισδιάστατους εκτυπωτές του εργαστηρίου της ρομποτικής με 2 διαφορετικούς προσανατολισμούς χτισίματος μηδέν και ενενήντα μοίρες για κάθε υλικό.

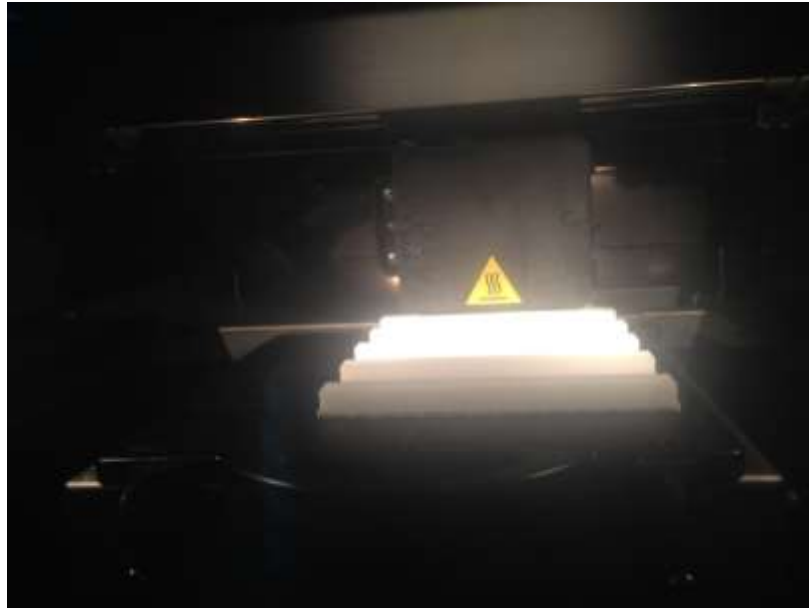
Τα δοκίμια της παρούσας πτυχιακής κατασκευάστηκαν με τη μέθοδο FDM στο εργαστήριο ρομποτικής του τμήματος. Παρακάτω παρουσιάζονται εικόνες που δείχνουν την πορεία εκτύπωσης δοκιμών abs στον εκτυπωτή BST 768.



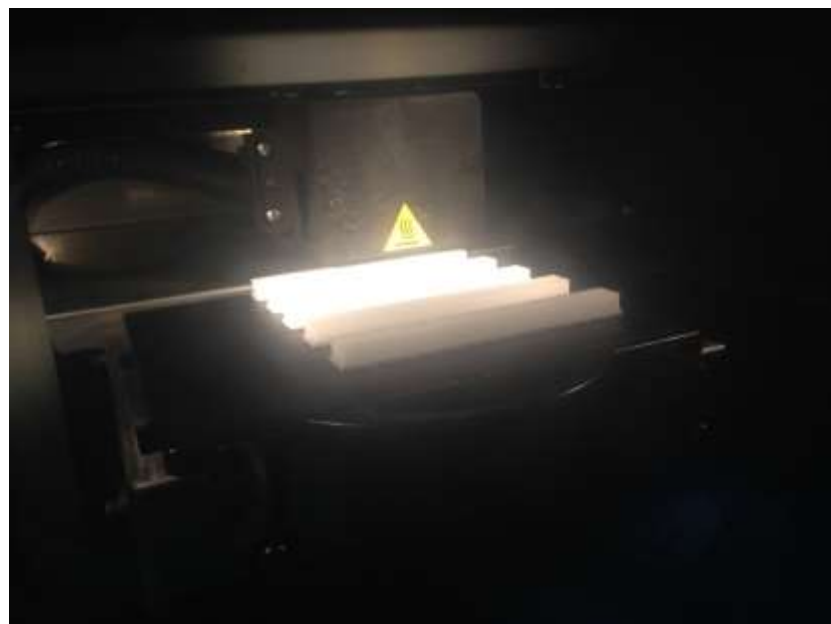
*Εικόνα 33: Εκτύπωση δοκιμίων abs πτυχιακής με διαδικασία FDM*



*Εικόνα 34: Εκτύπωση δοκιμίων abs με διαδικασία FDM.*



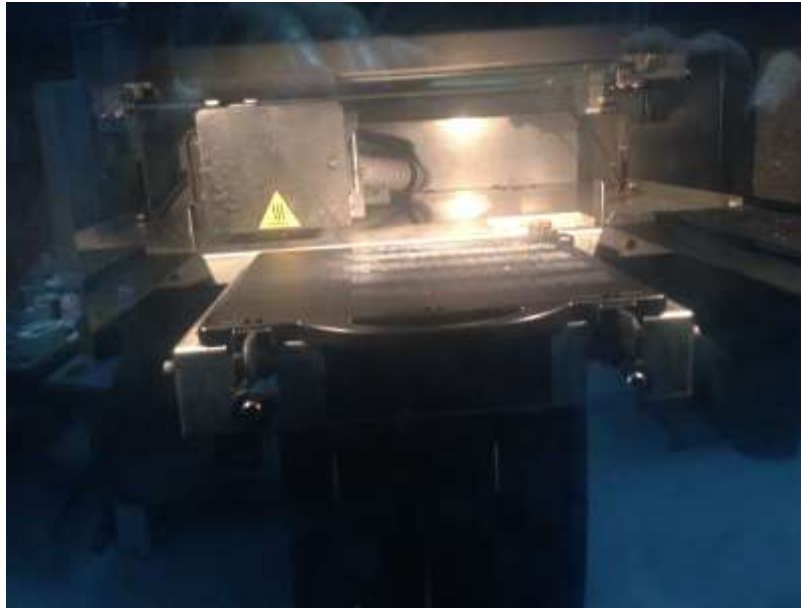
*Εικόνα 35: Εκτύπωση δοκιμίων πτυχιακής abs με διαδικασία FDM.*



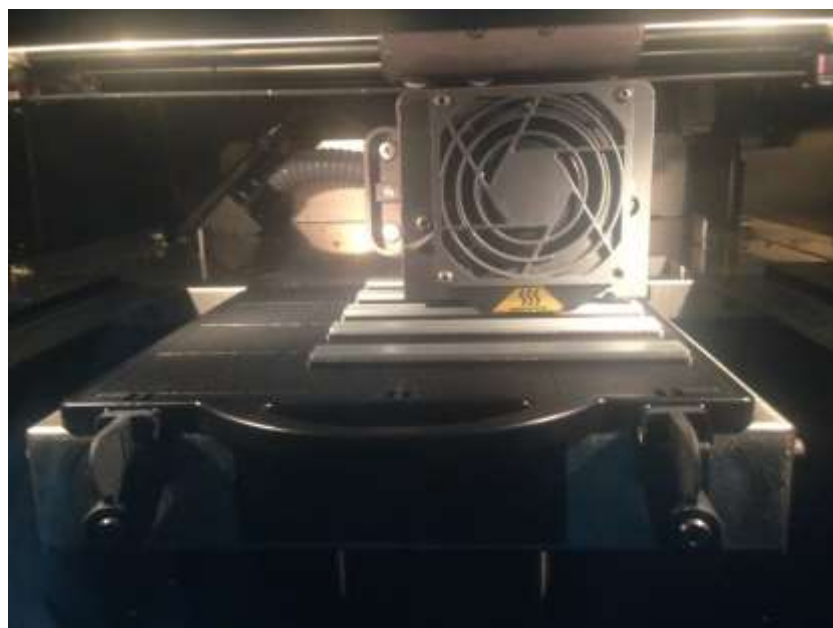
*Εικόνα 36: Εκτύπωση δοκιμίων πτυχιακής abs με διαδικασία FDM.*

Στην συνέχεια ακολουθούν εικόνες που παρουσιάζουν την πορεία εκτύπωσης των δοκιμίων abs plus σε τρισδιάστατο εκτυπωτή dimension elite.

Μελέτη αντοχής δοκιμίου σε κάμψη κατασκευασμένου από υλικό Acrylonitrile Butadiene Styrene plus σε τρισδιάστατο εκτυπωτή



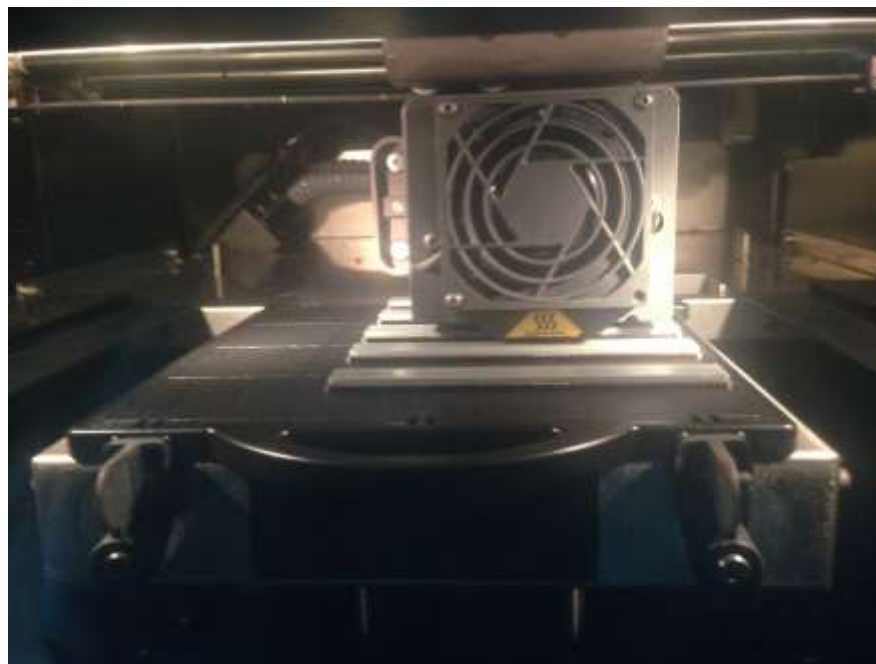
*Εικόνα 37: Εκτύπωση δοκιμίων abs plus με τη μέθοδο FDM.*



*Εικόνα 38: Εκτύπωση δοκιμίων abs plus με τη μέθοδο FDM.*



*Εικόνα 39: Εκτύπωση δοκιμίων πτυχιακής abs plus με τη μέθοδο FDM.*



*Εικόνα 40: Εκτύπωση δοκιμίων πτυχιακής abs plus με τη μέθοδο FDM.*



### 4.3. Μέσα πραγματοποίησης του πειράματος

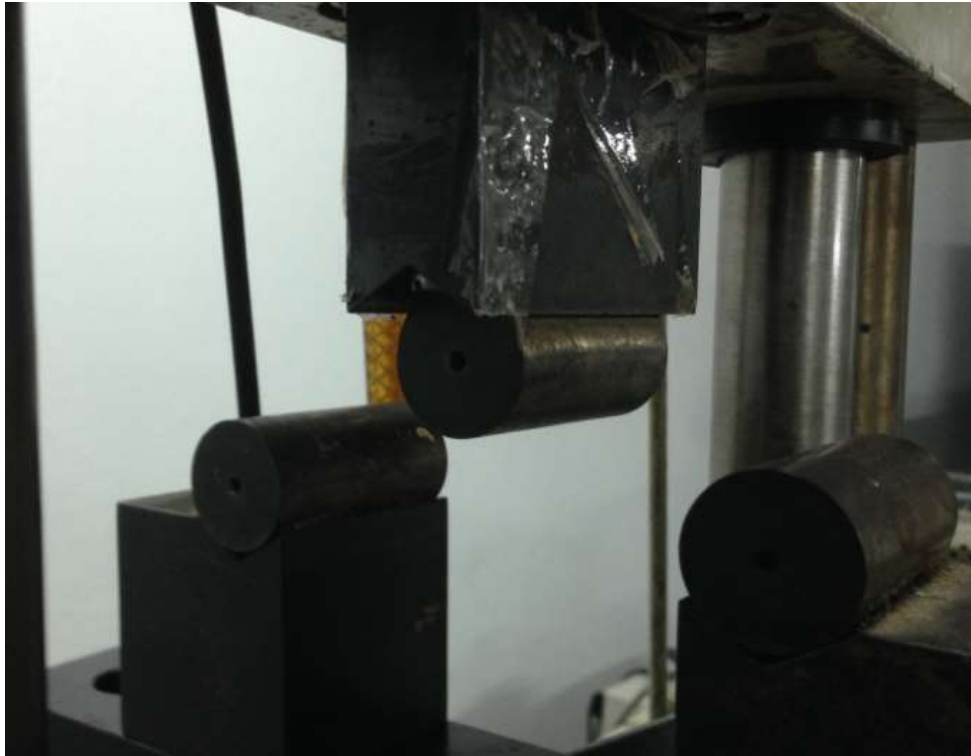
Για την πραγματοποίηση του πειράματος αντοχής έγινε χρήση μηχανής του εργαστηρίου τεχνολογίας των υλικών.



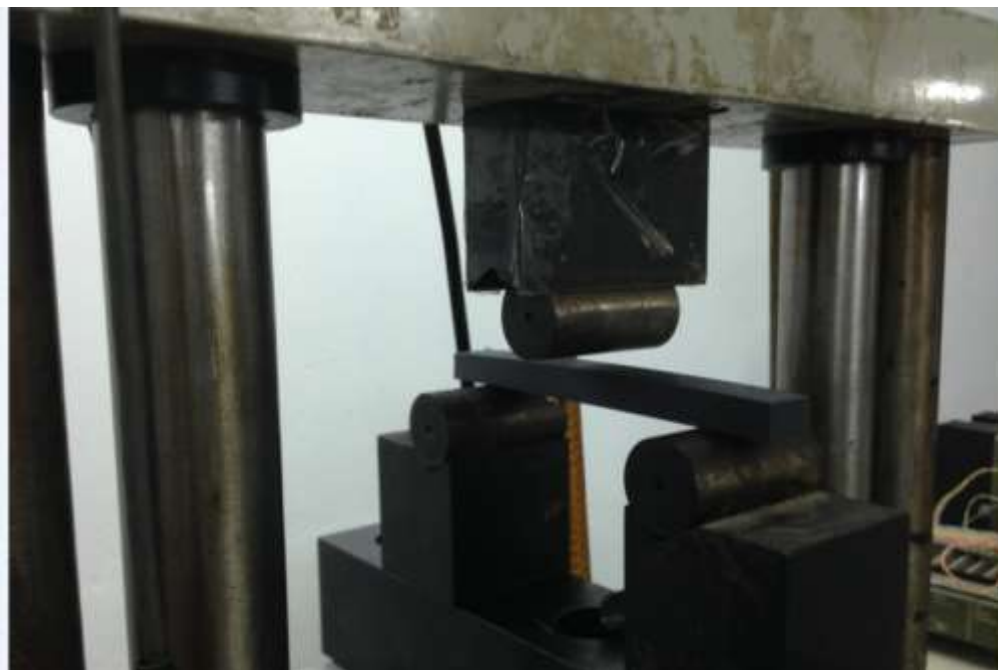
*Εικόνα 41: Υδραυλική πρέσα εργαστηρίου.*

Η μηχανή αυτή είναι μία υδραυλική πρέσα η οποία τροποποιήθηκε κατάλληλα για την διεξαγωγή του πειράματος σε αντοχή κάμψης. Ειδικότερα η τροποποίηση πραγματοποιήθηκε μέσω μίας διάταξης η οποία αποτελείται από μία ορθογωνική ράβδο στην οποία βρίσκονται πάνω δύο κυλινδρικά έδρανα σταθερά. Πάνω στα δύο έδρανα στηρίζονται τα δοκίμια του πειράματος. Με τη λειτουργία της υδραυλικής πρέσας ένα έμβολο ενεργοποιείται στο οποίο βρίσκεται ένα τρίτο κυλινδρικό έδρανο το οποίο κατεβαίνει κατακόρυφα σε τέτοιο σημείο ώστε να ασκήσει δύναμη στο κέντρο του δοκιμίου μέχρι αυτό να σπάσει.





*Εικόνα 42: Πειραματική διάταξη αντοχής σε κάμψη τριών σημείων.*



*Εικόνα 43: Δοκίμιο λίγο πριν την επαφή με το κινούμενο έδρανο.*



*Εικόνα 44: Δοκίμιο abs plus κατά τη διάρκεια του πειράματος*



*Εικόνα 45: Δοκίμιο abs plus κατά τη διάρκεια μέγιστης φόρτισης.*

Στην αριστερή πλευρά της υδραυλικής πρέσας υπάρχει ένα μηκηνσιόμετρο το οποίο μετράει για πολύ μικρές χρονικές στιγμές τη μετατόπιση (βέλος κάμψης) που παρατηρείται στο δοκίμιο.



*Εικόνα 46: Πορτοκαλί μηκηνσιόμετρο υπεύθυνο για τις μετρήσεις.*

Έτσι συνολικά συλλέγονται μετρήσεις δύναμης load  $F$  (N) και μετατόπισης deflection (mm) για πολύ μικρές χρονικές στιγμές από τη στιγμή της επαφής του κυλινδρικού εδράνου με το δοκίμιο μέχρι και το σπάσιμο του δοκιμίου.



Εικόνα 47: Δοκίμια abs plus μετά το πείραμα κάμψης.

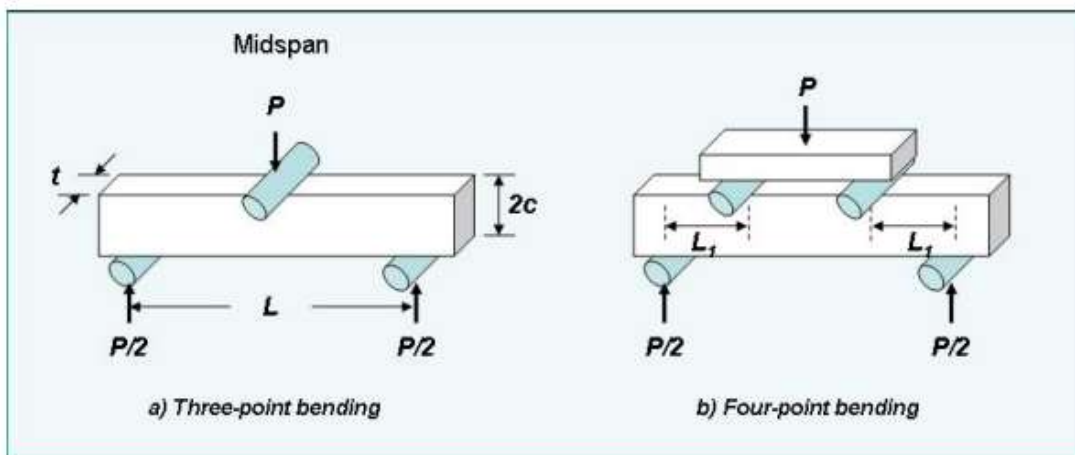


Εικόνα 48: Παράθεση δοκιμίων abs plus μετά το πείραμα κάμψης.

#### 4.4 Τύποι και υπολογισμοί πειράματος.

Η μελέτη της αντοχής της κάμψης εύθραυστων υλικών των οποίων η μηχανική συμπεριφορά είναι γραμμική όπως είναι τα κεραμικά, τα θερμοπλαστικά, τα γυαλιά πραγματοποιείται με κάμψη τριών και κάμψη τεσσάρων σημείων. Τέτοιο υλικό είναι και το abs του οποίου η αντοχή στην κάμψη θα μελετηθεί στην παρούσα πτυχιακή.

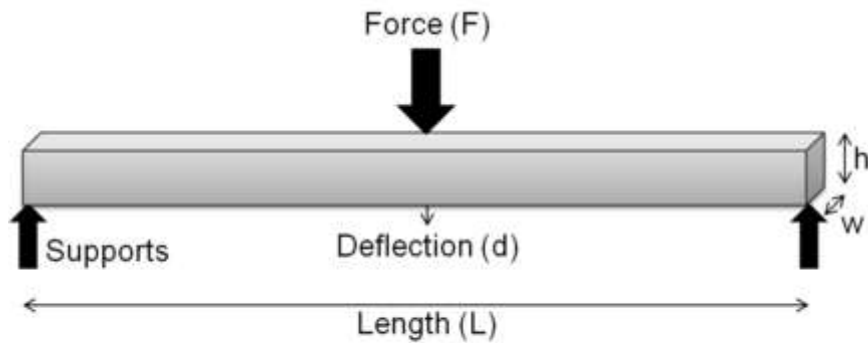
Η κάμψη είναι ιδανική για την αξιολόγηση της αντοχής των εύθραυστων υλικών όπου η ερμηνεία των αποτελεσμάτων, όταν το ίδιο υλικό υποβληθεί σε αντοχή εφελκυσμού είναι δύσκολη λόγω σπασίματος των δοκιμίων. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζονται δοκίμια ορθογωνικής διατομής τα οποία υποβάλλονται σε κάμψη τριών και κάμψη τεσσάρων σημείων.



Εικόνα 49: Δοκίμια υπό κάμψη τριών και τεσσάρων σημείων.

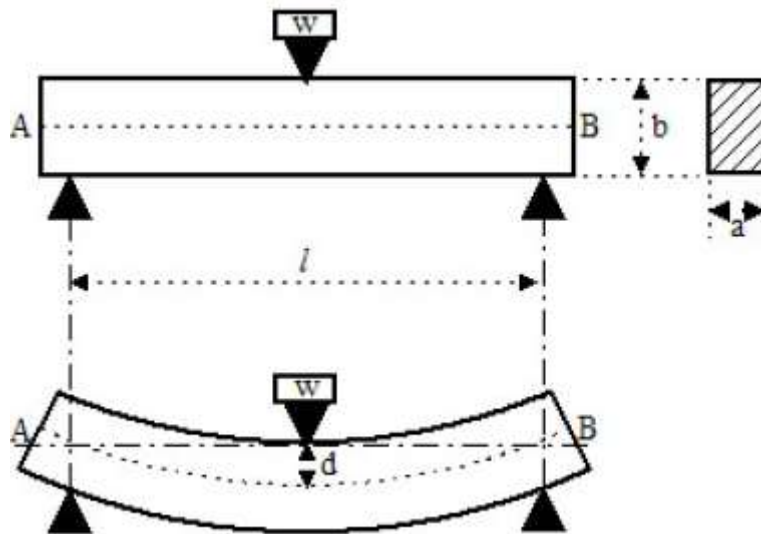
Γενικότερα σε κάθε πείραμα αντοχής στο οποίο υποβάλλεται ένα υλικό υπάρχει ένα αίτιο το οποίο του προκαλεί κάποια αλλαγή και ένα αποτέλεσμα που μας παρουσιάζει την διαμόρφωση του υλικού μετά.

Στην κάμψη τριών σημείων το αίτιο το οποίο προκαλεί την αλλαγή είναι μία δύναμη η οποία εφαρμόζεται κάθετα στο κέντρο δοκιμίου ορθογωνικής διατομής και το αποτέλεσμα αυτής είναι το βέλος κάμψης το οποίο δημιουργείται, που ουσιαστικά μας παρουσιάζει τη μετατόπιση λόγω της δύναμης. Το βέλος κάμψης μετριέται σε (mm) ενώ η δύναμη που εφαρμόζεται στη δοκό σε (N).



Εικόνα 50: Αίτιο: δύναμη ( $F$ ), αποτέλεσμα: deflection ( $D$ ).

Στην εικόνα 43 που ακολουθεί παρουσιάζεται το βέλος κάμψης  $d$  (deflection) (mm) το οποίο δημιουργείται σε μία απλή δοκό ως απόρροια της δύναμης ( $N$ ) που εφαρμόστηκε σε αυτή.



Εικόνα 51: Απλή δοκός πριν και μετά την κάμψη.

Τα δεδομένα της δύναμης και της μετατόπισης τα οποία θα συλλέξουμε από την υδραυλική πρέσα του εργαστηρίου θα μετασχηματιστούν σύμφωνα με το πρότυπο ASTM D 790 σε διαγράμματα τάσης-παραμόρφωσης. Τα διαγράμματα δύναμης-μετατόπισης και τάσης παραμόρφωσης παρουσιάζονται στο παράρτημα II.



Στα εύθραυστα υλικά τα οποία συνδέονται με μία γραμμική σχέση τάσης-παραμόρφωσης η τάση θραύσης(  $\sigma_f$ ) μπορεί να δοθεί από τον ακόλουθο τύπο(1):

$$\sigma_f = \frac{Mc}{I} = \frac{3M}{2tc^2}$$

*Εξίσωση 1: Τάση θραύσης.*

Όπου:

- $M \rightarrow$  η ροπή κάμψης
- $c \rightarrow$  το μισό από το πλάτος της δοκού
- $t \rightarrow$  το πάχος του δοκιμίου
- $I \rightarrow$  ροπή αδράνειας του εμβαδού της διατομής

Η ροπή αδράνειας του εμβαδού της διατομής παρουσιάζεται στην ακόλουθο τύπο(2):

$$I = \frac{2tc^3}{3}$$

*Εξίσωση 2: Ροπή αδράνειας*

Η μέγιστη ροπή κάμψης που δημιουργείται στο μέσο της δοκού (midspan) παρουσιάζεται στον ακόλουθο τύπο(3):

$$M = \frac{PL}{4}$$

*Εξίσωση 3: Ροπή κάμψης*

Όπου: P → Φορτίο που εφαρμόζεται στο μέσο της δοκού (midspan)

L → Μήκος της δοκού

Από τις εξισώσεις 1,2 και 3 προκύπτει ο τύπος(4) ο οποίος μας παρουσιάζει τη δύναμη κάμψης ή τάση κάμψης  $\sigma_{fb}$  (fracture stress) η οποία είναι ισοδύναμη με το συντελεστή θραύσης κάμψης.

$$\sigma_{fb} = \frac{3LP_f}{8tc^2} = \frac{3LP_f}{2tw^2}$$

*Εξίσωση 4: Τάση κάμψης*

Όπου: w → πλάτος δοκού (w=2c)

Έτσι με τους παραπάνω μετασχηματισμούς καταλήγουμε στην εξίσωση 4 από την οποία μπορεί να υπολογιστεί η τάση κάμψης. Το επόμενο μέγεθος το οποίο πρέπει να υπολογιστεί είναι η καμπτική καταπόνηση  $\epsilon_f$  (flexural strain) η οποία δίνεται από τον ακόλουθο τύπο (5) :



$$\varepsilon_f = \frac{6wv}{L^2}$$

*Εξίσωση 5: Καμπτική καταπόνηση*

Επιπλέον από τα πειραματικά αποτελέσματα μπορεί να υπολογιστεί και ένα τρίτο μέγεθος το μέτρο ελαστικότητας στην κάμψη  $E_B$  (elastic modulus) το οποίο υπολογίζεται από την κλίση  $m = \frac{dP}{dv}$  (slope) του διαγράμματος δύναμης- παραμόρφωσης ως εξής. Ο υπολογισμός του μέτρου ελαστικότητας στην κάμψη παρουσιάζεται στον ακόλουθο τύπο (6) :

$$E_B = \frac{L^3}{48I} \left( \frac{dP}{dv} \right) = \frac{L^3}{32tc^3} \left( \frac{dP}{dv} \right)$$

$$E_B = \frac{L^3 m}{4tw^3}$$

*Εξίσωση 6: Μέτρο ελαστικότητας στην κάμψη*

Το μέτρο ελαστικότητας κατά την κάμψη επηρεάζεται από κάποιους παράγοντες οι οποίοι είναι οι εξής:

- Η πλαστική παραμόρφωση στους κυλίνδρους οι οποίοι υποστηρίζουν την δοκό.

- Η τιμή του μέτρου ελαστικότητας επηρεάζεται από διαμητικές τάσεις λόγω παραμόρφωσης.
- Τα υλικά έχουν διαφορετικούς ελαστικούς συντελεστές για κάμψη, εφελκυσμό και θλίψη.

Τα μεγέθη τα οποία παρουσιάζουν ενδιαφέρον στο πείραμα κάμψης είναι:

- Η τάση κάμψης  $\sigma_{fb}$  (flexural stress) (MPa)
- Παραμόρφωση, καμπτική καταπόνηση  $\epsilon_f$  (flexural strain) (%)
- Μέτρο ελαστικότητας στην κάμψη  $E_B$  (flexural modulus) (MPa)

Ακολουθούν συγκεντρωτικοί πίνακες με τις τιμές των τριών μεγεθών για κάθε δοκίμιο.

## 4.5 Πίνακες αποτελεσμάτων πειράματος.

### 4.5.1. Συγκεντρωτικοί πίνακες δοκιμών.

Στους πίνακες που ακολουθούν παρουσιάζονται συγκεντρωτικές τιμές για κάθε δοκίμιο του πειράματος συμπεριλαμβανομένου των διαστάσεων και των σημαντικών μεγεθών του πειράματος κάμψης.

ABS Πάχος εκτύπωσης 0.25 mm							
Μήκος 140 mm, Πλάτος 10 mm, Πάχος 5mm, Εμβαδό διατομής 50 mm <sup>2</sup>							
Αριθμός δοκιμίου	Προσανατολισμός εκτύπωσης (°)	Βέλος κάμψης (mm)	Τάση κάμψης (MPa)	Μέτρο ελαστικότητας κάμψης (MPa)	Παραμόρφωση (%)	Κλίση (N/mm)	Μέγιστο φορτίο (N)
1	0	12.381	22.15778	552.9	0.111429	74.64	335.724
2	0	11.503	21.44089	530.8	0.103527	71.66	324.862
3	0	12.351	20.73588	522.41	0.037053	70.526	345.598
4	0	12.394	20.73588	529.7	0.037182	71.51	345.598
5	0	12.611	19.52136	525.62	0.037833	70.959	325.356
1	90	–	18.0	522.22	–	70.5	300
2	90	–	19.2	532.59	–	71.9	320
3	90	–	19.8	525.92	–	71	330
		–			–		

Μελέτη αντοχής δοκιμίου σε κάμψη κατασκευασμένου από υλικό Acrylonitrile Butadiene Styrene plus σε τρισδιάστατο εκτυπωτή

4	90		20.1	548.14		74	335
---	----	--	------	--------	--	----	-----

Πίνακας 13. Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων

## ABS Πάχος εκτύπωσης 0.33 mm

Μήκος 140 mm, Πλάτος 10 mm, Πάχος 5mm, Εμβαδό διατομής 50 mm<sup>2</sup>

Αριθμός δοκιμίου	Προσανατολισμός εκτύπωσης (°)	Βέλος κάμψης (mm)	Τάση κάμψης (MPa)	Μέτρο ελαστικότητας κάμψης (MPa)	Παραμόρφωση (%)	Κλίση (N/mm)	Μέγιστο φορτίο (N)
1	0	11.25	21.63638	525.45	0.03375	70.337	327.824
2	0	12.111	23.07017	530.93	0.012129	71.676	349.548
3	0	11.746	23.65664	550.22	0.035238	74.28	358.434
4	0	12.558	22.48363	521.34	0.037674	70.381	340.661
5	0	11.5211	22.32067	539.4	0.034563	72.82	338.192
1	90	12.946	18.44311	475.38	0.038838	64.176	279.441
2	90	11.426	20.33302	494.23	0.034278	66.721	308.076
3	90	11.896	17.46558	407.96	0.035688	55.074	264.63
4	90	11.836	18.34529	475.74	0.035508	64.226	277.959
5	90	12.5911	20.49597	474.43	0.037773	64.048	310.545

Πίνακας 14. Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων

## ABS plus Πάχος εκτύπωσης 0.17 mm

Μήκος 140 mm, Πλάτος 10 mm, Πάχος 5mm, Εμβαδό διατομής 50 mm<sup>2</sup>

Αριθμός δοκιμίου	Προσανατολισμός εκτύπωσης (°)	Βέλος κάμψης (mm)	Τάση κάμψης (MPa)	Μέτρο ελαστικότητας κάμψης (MPa)	Παραμόρφωση (%)	Κλίση (N/mm)	Μέγιστο φορτίο (N)
1	0	12.487	40.79638	860.37	0.037461	116.15	618.127
2	0	9.22	39.1345	847.41	0.027888	114.4	592.947
3	0	10.109	41.38292	870.22	0.03495	117.48	627.014
4	0	12.951	33.92096	651	0.039291	87.883	513.954
5	0	11.524	40.47054	829.11	0.034824	111.93	613.19
1	90	–	37.2	941.48	–	127.1	620
2	90	–	37.14	935.55	–	126.3	619

Μελέτη αντοχής δοκιμίου σε κάμψη κατασκευασμένου από υλικό Acrylonitrile Butadiene Styrene plus σε τρισδιάστατο εκτυπωτή

3	90	–	33.3	819.26	–	110.6	555
4	90	–	36.18	919.26	–	124.1	603

Πίνακας 15. Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων

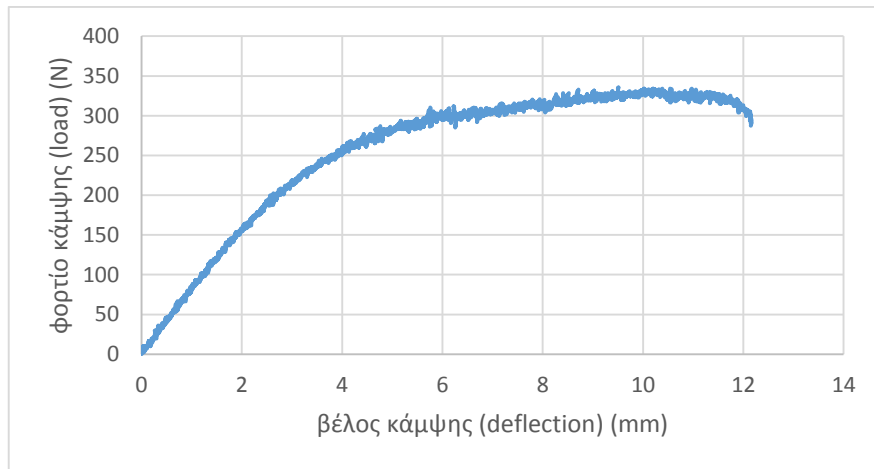
ABS plus Πάχος εκτύπωσης 0.25 mm							
Μήκος 140 mm, Πλάτος 10 mm, Πάχος 5mm, Εμβαδό διατομής 50 mm <sup>2</sup>							
Αριθμός δοκιμίου	Προσανατολισμός εκτύπωσης (°)	Βέλος κάμψης (mm)	Τάση κάμψης (MPa)	Μέτρο ελαστικότητας κάμψης (MPa)	Παραμόρφωση (%)	Κλίση (N/mm)	Μέγιστο φορτίο (N)
1	0	9.715	35.84341	849.92	0.029145	114.74	543.082
2	0	10.395	28.38152	744.89	0.031185	100.56	430.025
3	0	11.782	39.00422	793.48	0.035346	107.12	590.973
4	0	10.653	37.66818	831.92	0.031959	112.31	570.73
5	0	10.878	37.5379	777.48	0.032634	104.96	568.756
1	90	10.019	37.83113	780	0.0300571	105.3	573.199
2	90	10.653	34.05125	681.38	0.051959	91.987	515.928
3	90	9.307	32.81302	783.92	0.024459	105.83	497.167
4	90	10.405	36.62551	746.07	0.0312631	100.72	554.932
5	90	9.661	37.60304	867.33	0.028983	117.09	569.743

Πίνακας 16. Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων

#### 4.5.2. Ενδεικτικά διαγράμματα δύναμης (N) – μετατόπισης (mm), κλίσης (N/mm), τάσης κάμψης (MPa) – παραμόρφωσης (%)

Από τους συγκεντρωτικούς πίνακες των οποίων τα στοιχεία είναι σύμφωνα με τύπους από το πρότυπο D 790, δημιουργήθηκαν τα διαγράμματα δύναμης-μετατόπισης, κλίσης και τάσης-παραμόρφωσης. Στη συνέχεια ακολουθούν ενδεικτικά παραδείγματα ενώ στο παράρτημα II παρουσιάζονται όλα τα διαγράμματα του πειράματος κάμψης.

- **Δοκίμιο abs 0,25, προσανατολισμός χτισίματος 0°, α/δ**  
**(1)**



#### 4.5.3. Πίνακες μέσωσ όρων τάσης κάμψης και μέτρου ελαστικότητας κατά την κάμψη.

Μετά τους συγκεντρωτικούς πίνακες υπολογίστηκε ο μέσος όρος της τάσης κάμψης και του μέτρου ελαστικότητας κατά την κάμψη. Ο λόγος που επιλέχθηκαν τα δύο μεγέθη αυτά είναι διότι ο κατασκευαστής παρουσιάζει θεωρητικές τιμές για τα συγκεκριμένα μεγέθη. Στους παρακάτω πίνακες φαίνονται οι μέσοι όροι των τιμών για κάθε υλικό με κάθε προσανατολισμό και πάχος εκτύπωσης.

ABS 0.25 mm		
Προσανατολισμός εκτύπωσης (°)	Τάση κάμψης (MPa)	Μέτρο ελαστικότητας κάμψης (MPa)
0	20.9183	532.286
90	19.275	532.217

Πίνακας 17. Μέσος όρος τιμών ABS 0.25mm

ABS 0.33 mm		
Προσανατολισμός εκτύπωσης (°)	Τάση κάμψης (MPa)	Μέτρο ελαστικότητας κάμψης

		(MPa)
0	20.57591	533.468
90	19.016	465.548

Πίνακας 18. Μέσος όρος τιμών ABS 0.33mm

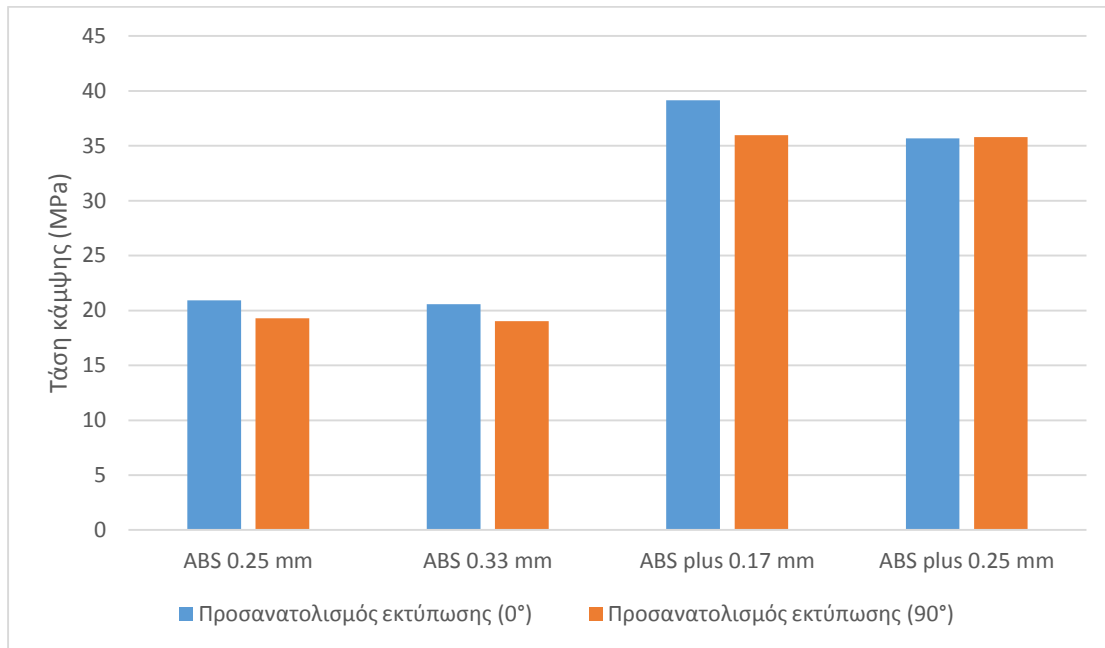
ABS plus 0.17 mm		
Προσανατολισμός εκτύπωσης (°)	Τάση κάμψης (MPa)	Μέτρο ελαστικότητας κάμψης (MPa)
0	39.141	811.62
90	35.955	903.88

Πίνακας 19. . Μέσος όρος τιμών ABS plus 0.17mm

ABS plus 0.25 mm		
Προσανατολισμός εκτύπωσης (°)	Τάση κάμψης (MPa)	Μέτρο ελαστικότητας κάμψης (MPa)
0	35.687	799.53
90	35.784	771.74

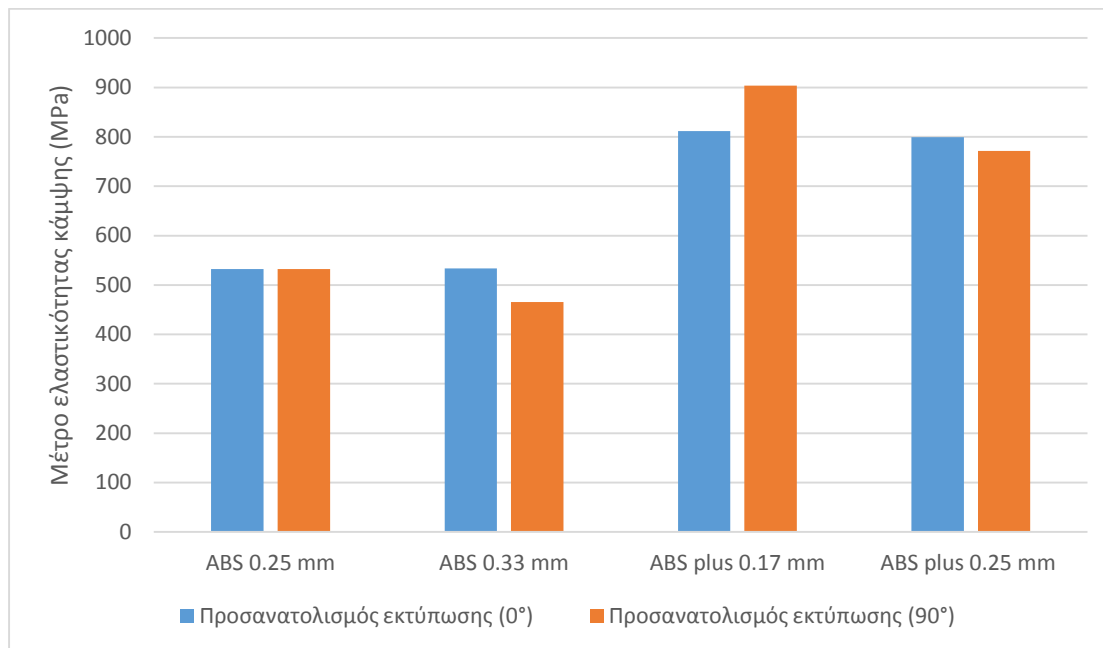
Πίνακας 20. Μέσος όρος τιμών ABS plus 0.25mm

Στη συνέχεια παρουσιάζονται συγκριτικά ραβδογράμματα των μέσων όρων των τιμών της τάσης κάμψης και του μέτρου ελαστικότητας κατά την κάμψη.



Πίνακας 21. Σύγκριση μέσου όρου τάσης κάμψης δοκιμίων

Στον πίνακα 21 φαίνεται ότι για το υλικό ABS μεγαλύτερη αντοχή στην κάμψη έχει η εκτύπωση με προσανατολισμό 90°, με μέγιστο στο πάχος εκτύπωσης 0.25 mm. Για το ABS plus αντίθετα, παρατηρείτε μεγαλύτερη αντοχή στην κάμψη στο δοκίμιο με προσανατολισμό 0°, με μέγιστο το δοκίμιο πάχους εκτύπωσης 0.17mm. Τη μεγαλύτερη τιμή τάσης κάμψης μεταξύ των δύο υλικών έχει το ABS plus 0.17mm με προσανατολισμό εκτύπωσης 0°.



Πίνακας 22. Σύγκριση μέσου όρου τιμών για το μέτρο ελαστικότητας στην κάμψη

Στον πίνακα 22 φαίνεται ότι για το υλικό ABS παρατηρούνται πολύ μικρές αποκλίσεις μεταξύ των ABS πάχους εκτύπωσης 0.25mm (0 και 90°) και του ABS πάχους εκτύπωσης 0.33mm 0°. Το ABS 0.33mm των 90° φαίνεται να έχει μικρότερη ελαστικότητα κάμψης. Στο υλικό ABS plus τη μεγαλύτερη ελαστικότητα κάμψης παρουσιάζει το ABS plus 0.17mm των 90° ενώ τη μικρότερη το ABS plus 0.25 90°.

Μεταξύ του ABS και του ABS plus μεγαλύτερη ελαστικότητα κάμψης παρουσιάζει το ABS plus.

#### 4.5.4. Θεωρητικές τιμές κατασκευαστή για την τάση κάμψης και μέτρο ελαστικότητας κατά την κάμψη.

Στη συνέχεια ακολουθεί πίνακας με τις θεωρητικές τιμές του κατασκευαστή για την τάση κάμψης και το μέτρο ελαστικότητας κατά την κάμψη.

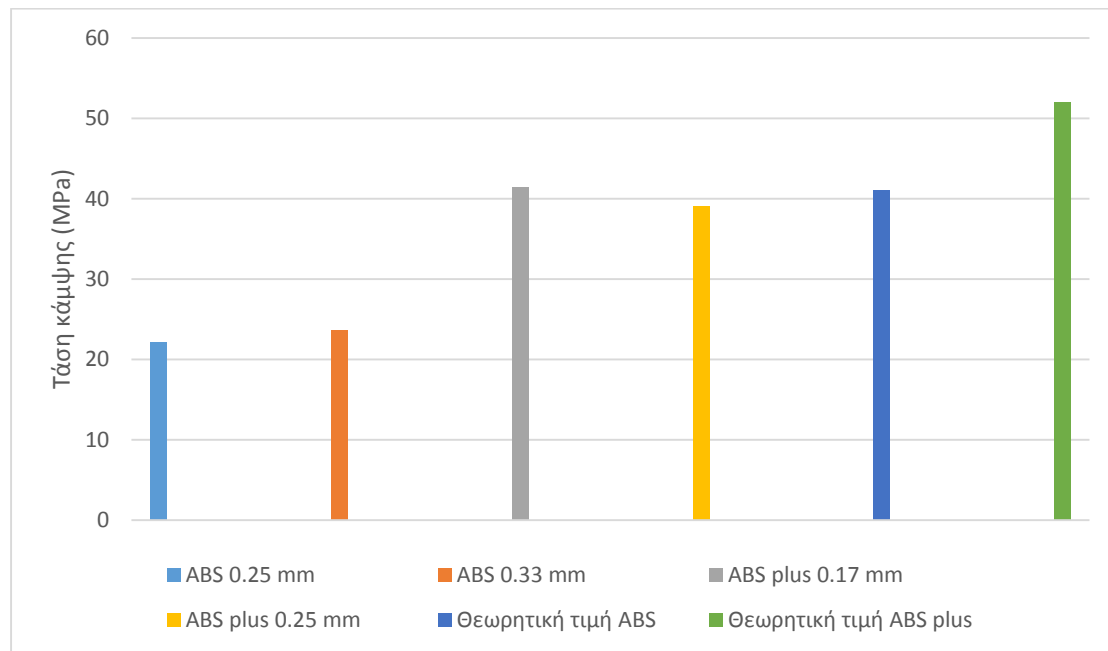
Υλικό κατασκευής	Τάση κάμψης (MPa)	Μέτρο ελαστικότητας κάμψης (GPa)
ABS	41	1.834
ABS plus	52	2.204

Μελέτη αντοχής δοκιμίου σε κάμψη κατασκευασμένου από υλικό Acrylonitrile Butadiene Styrene plus σε τρισδιάστατο εκτυπωτή

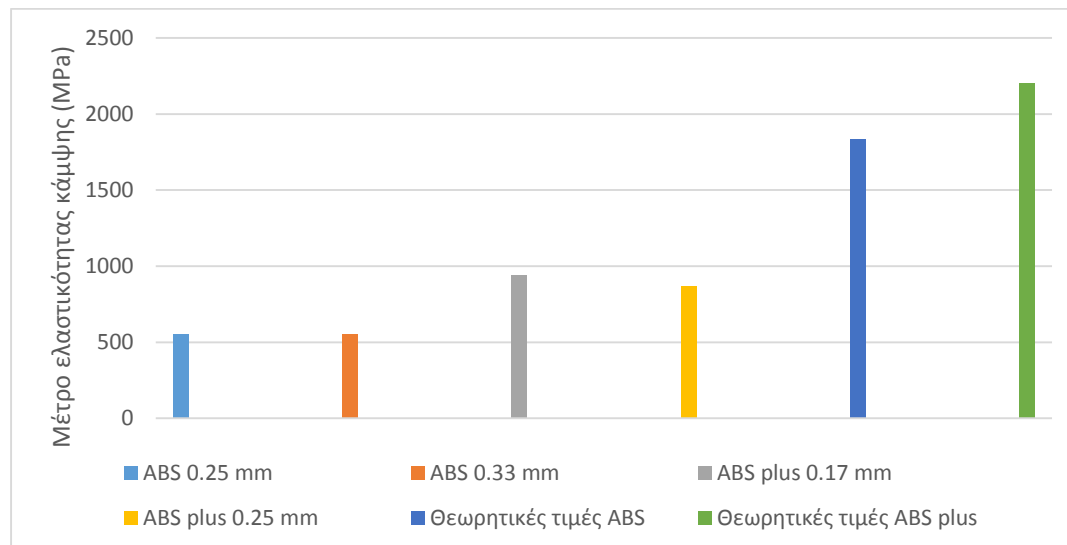


Πίνακας 23. Θεωρητικές τιμές του κατασκευαστή για ABS και ABS plus

Για να πραγματοποιηθεί η σύγκριση των θεωρητικών τιμών με τις πειραματικές επιλέγονται οι μέγιστες τιμές τάσης κάμψης, μέτρου ελαστικότητας κατά την κάμψη λόγω του πλήθους των δοκιμών. Οι τιμές αυτές είναι οι μέγιστες για κάθε υλικό και πάχος εκτύπωσης, ανεξαρτήτως προσανατολισμού εκτύπωσης. Στα παρακάτω ραβδογράμματα παρουσιάζεται η σύγκριση αυτή.



Πίνακας 24. Σύγκριση μέγιστων πειραματικών τιμών, για κάθε είδος δοκιμίου, με θεωρητικές τιμές



Πίνακας 25. Σύγκριση μέγιστων πειραματικών τιμών, για κάθε είδος δοκιμίου, με θεωρητικές τιμές

Ακολουθεί πίνακας στον οποίο εκφράζεται η εκατοστιαία διαφορά της θεωρητικής από τη μέγιστη πειραματική τιμή της τάσης κάμψης για το ABS και το ABS plus. Η μέγιστη πειραματική τιμή επιλέγεται για κάθε υλικό ανεξαρτήτως πάχους και προσανατολισμού εκτύπωσης.

Υλικό κατασκευής	Θεωρητική τιμή (MPa)	Πειραματική τιμή (MPa)	Διαφορά (%)
ABS	41	23.65664	42.3
ABS plus	52	41.38292	20.4

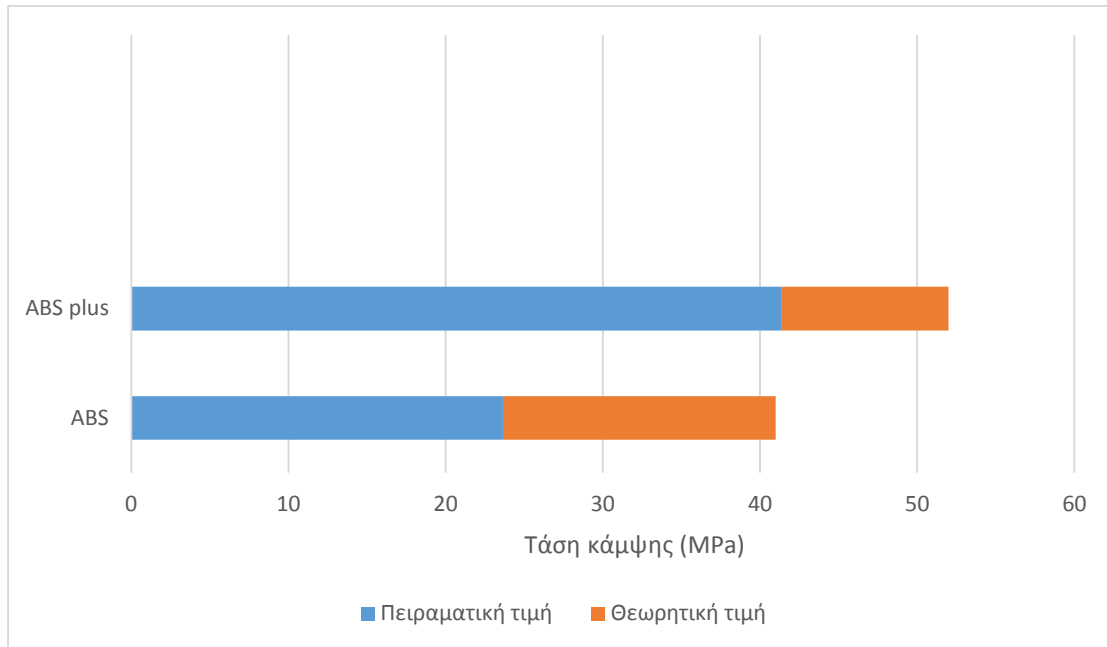
Πίνακας 26. Υπολογισμός της διαφοράς μεταξύ των θεωρητικών και των πειραματικών τιμών για την τάση κάμψης

Αντίστοιχα υπολογίζεται η διαφορά της θεωρητικής από τη μέγιστη πειραματική τιμή και για το μέτρο ελαστικότητας κατά την κάμψη.

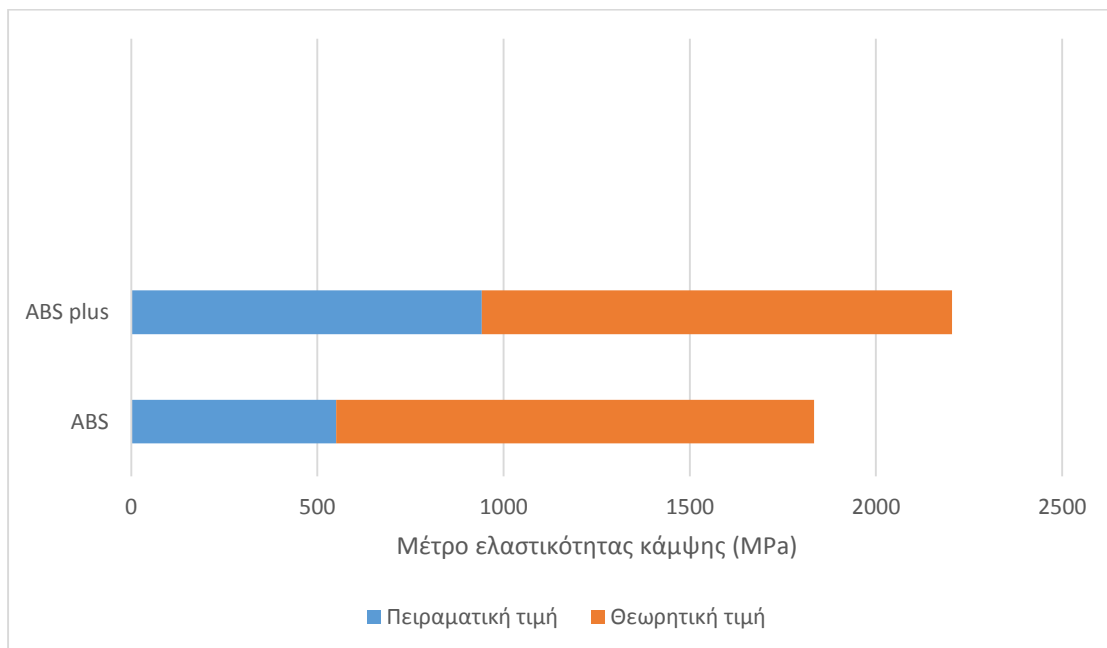
Υλικό κατασκευής	Θεωρητική τιμή (GPa)	Πειραματική τιμή (GPa)	Διαφορά (%)
ABS	1.834	0.55022	70
ABS plus	2.204	0.94148	57.28

Μελέτη αντοχής δοκιμίου σε κάμψη κατασκευασμένου από υλικό Acrylonitrile Butadiene Styrene plus σε τρισδιάστατο εκτυπωτή

Πίνακας 27. Υπολογισμός της διαφοράς μεταξύ των θεωρητικών και των πειραματικών τιμών για το μέτρο ελαστικότητας κατά την κάμψη



Πίνακας 28. Διάγραμμα σωρευμένης ράβδου όπου φαίνεται η απόκλιση μεταξύ θεωρητικής και πειραματικής τιμής για την τάση κάμψης



Πίνακας 29. Διάγραμμα σωρευμένης ράβδου όπου φαίνεται η απόκλιση μεταξύ θεωρητικής και πειραματικής τιμής για το μέτρο ελαστικότητας κατά την κάμψη

## 4.6 Διαδικασία σάρωσης με χρήση ηλεκτρονικού μικροσκοπίου. SEM (scanning electron microscope).

### 4.6.1 Ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης.

Η ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης είναι μία από τις σύγχρονες και ευέλικτες μεθόδους ανάλυσης της μικροδομής μεγάλου αριθμού υλικών.

Η ικανότητα των οπτικών μικροσκοπίων λόγω της φύσης του φωτός περιορίζεται σε επίπεδα μεγέθυνσης μέχρι χίλιες φορές και διακριτικής ικανότητας μέχρι 0.2 μm. Στις αρχές της δεκαετίας του 30' δημιουργήθηκε η ανάγκη για εξέταση του εσωτερικού του κυττάρου (πυρήνας, μιτοχόνδρια) που απαιτούσε μεγέθυνση μεγαλύτερη από 10000 φορές. Η απαίτηση αυτή οδήγησε στην ανακάλυψη και εφαρμογή των ηλεκτρονικών μικροσκοπίων.



*Εικόνα 52: scanning electron microscope.*

Το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης είναι ένα όργανο που λειτουργεί όπως ένα οπτικό μικροσκόπιο μόνο που χρησιμοποιεί δέσμη ηλεκτρονίων υψηλής ενέργειας αντί για φως, για να εξετάσει αντικείμενα σε λεπτομερή κλίμακα. Τα ηλεκτρόνια λόγω της κυματικής τους φύσης μπορούν να εστιάσουν όπως και τα φωτεινά κύματα αλλά σε πολύ μικρότερη επιφάνεια. (π.χ. κόκκος υλικού). Η δέσμη Μελέτη αντοχής δοκιμίου σε κάμψη κατασκευασμένου από υλικό Acrylonitrile Butadiene Styrene plus σε τρισδιάστατο εκτυπωτή

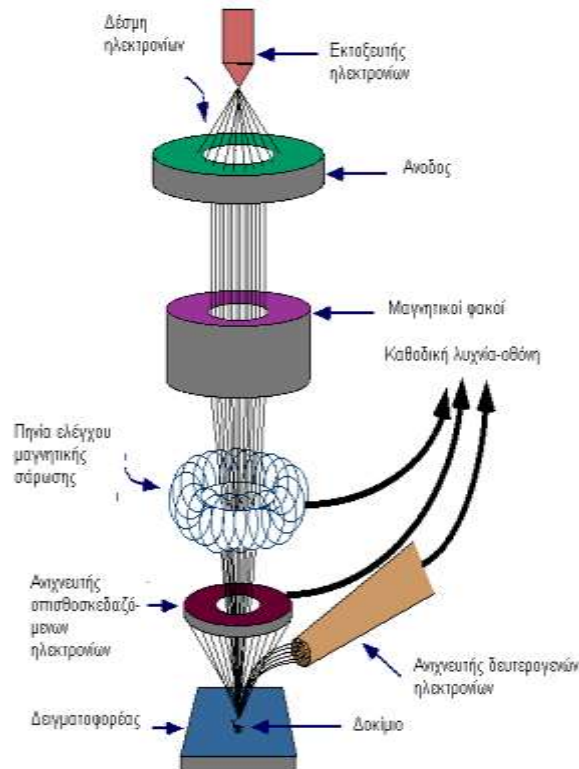
ηλεκτρονίων σαρώνει την επιφάνεια του δείγματος τα οποία αλληλεπιδρά. Από την αλληλεπίδραση αυτή προκύπτουν πληροφορίες σε σχέση με τα άτομα των στοιχείων που απαρτίζουν το εξεταζόμενο υλικό. Από τα άτομα των στοιχείων εκπέμπονται κυρίως δευτερογενή και οπισθοσκεδαζόμενα ηλεκτρόνια καθώς και ακτίνες χ.

Η ένταση των εκπεμπομένων ηλεκτρονίων επηρεάζεται από τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας. Έτσι το sem δίνει πληροφορίες που αφορούν κυρίως στη μορφολογία και στη σύσταση της επιφάνειας. Εφαρμόζοντας ένα σύστημα ανίχνευσης της διασποράς των ενεργειών των ακτίνων χ που δημιουργούνται στην επιφάνεια από την προσπίπτουσα δέσμη, μπορεί να γίνει ημιποσοτική, στοιχειακή ανάλυση του υλικού.

Επομένως το sem χρησιμοποιείται για την εξέταση μικροδομής στερεών δειγμάτων και για να δίνει εικόνες υψηλού βαθμού διείσδυσης.

#### **4.6.2 Λειτουργία και βασικές διατάξεις της sem.**

Η λειτουργία της sem στηρίζεται στις αλληλεπιδράσεις του προς εξέταση δείγματος και της προσπίπτουσας σε αυτό δέσμης ηλεκτρονίων. Οι βασικές διατάξεις που υπάρχουν στο μικροσκόπιο είναι το σύστημα παραγωγής δέσμης ηλεκτρονίων, το σύστημα κατεύθυνσης της δέσμης, το σύστημα πληροφοριών και τέλος το σύστημα κενού.



Εικόνα 53: Μέρη λειτουργίας SEM

Τα βασικά στάδια λειτουργίας ενός ηλεκτρονικού μικροσκοπίου είναι:

- 1) Σχηματίζεται μία δέσμη ηλεκτρονίων από την η οποία επιταχύνεται προς το δείγμα μέσω ενός ηλεκτρικού δυναμικού.
- 2) Χρησιμοποιώντας μεταλλικά ανοίγματα, ηλεκτρομαγνητικούς φακούς και πηνία σάρωσης, επιτυγχάνεται μία λεπτή εστιασμένη μονοχρωματική δέσμη η οποία σαρώνει την επιφάνεια του δείγματος.
- 3) Οι αλληλεπιδράσεις δέσμης δείγματος καταγράφονται από τους αιχνευτές και μετατρέπονται σε εικόνα.

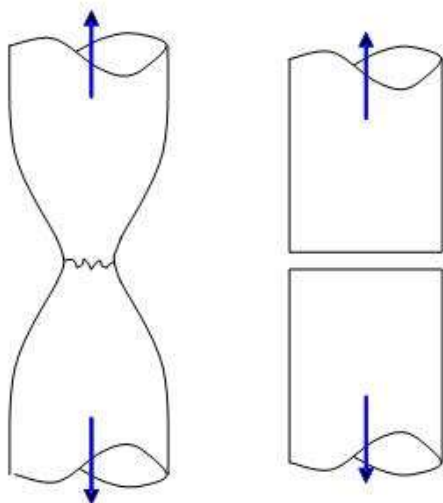
Τα ηλεκτρόνια παράγονται από ένα νήμα βολφραμίου το οποίο λειτουργεί σαν κάθοδος. Μέσα από το νήμα περνάει ρεύμα. Καθώς το ρεύμα αυξάνεται, εκπέμπονται ηλεκτρόνια τα οποία κατευθύνονται προς την άνοδο στην οποία εφαρμόζεται ένα δυναμικό.

Η άνοδος που είναι θετική όπως και το κύκλωμα δημιουργεί ισχυρές ηλεκτικές δυνάμεις στα ηλεκτρόνια. Αποτέλεσμα αυτού είναι ότι η άνοδος κατευθύνει και επιταχύνει τα ηλεκτρόνια, ελέγχει δηλαδή την ενέργεια τους.

Τα ηλεκτρόνια επιταχύνονται από την άνοδο και περνούν μέσα από ένα ηλεκτρομαγνητικό φακό συμπύκνωσης που τα μετατρέπει σε δέσμη. Η ισχύς αυτού του φακού καθορίζει την διάμετρο της δέσμης.

### 4.6.3 Έλεγχος της επιφάνειας θραύσης και Είδη Θραύσης

Για να πραγματοποιηθεί έλεγχος στην ποιότητα εκτύπωσης των δοκιμίων χρειάζεται να βρεθεί το είδος θραύσης του κάθε δοκιμίου με τη βοήθεια των εικόνων SEM. Στη συνέχεια, με τη βοήθεια των διαγραμμάτων τάσης παραμόρφωσης θα διασταυρωθεί αν η μορφή της επιφάνειας θραύσης συμφωνεί με τα διαγράμματα των πειραματικών δεδομένων. Τα είδη θραύσης των δοκιμίων χωρίζονται σε όλκιμα και ψαθυρά. Κάθε διαδικασία θραύσης εμπεριέχει δύο βήματα, το σχηματισμό της ρωγμής και ως αποτέλεσμα τη διάδοσή της εξαιτίας της τάσης. Το είδος της θραύσης εξαρτάται κατά πολύ από τον τρόπο που διαδίδεται η ρωγμή. Η όλκιμη θραύση χαρακτηρίζεται από εκτεταμένη πλαστική παραμόρφωση στην περιοχή όπου αναπτύσσεται μια ρωγμή, δηλαδή μια σταθερή ρωγμή. Από την άλλη μεριά, στη ψαθυρή θραύση, οι ρωγμές μπορούν να εξαπλωθούν πολύ γρήγορα ενώ συνοδεύονται από πολύ μικρή πλαστική παραμόρφωση.



Εικόνα 54: Σχηματική απεικόνιση της όλκιμης και ψαθυρής παραμόρφωσης

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 54, χαρακτηριστικό της όλκιμης θραύσης είναι η στένωση και η δημιουργία λαιμού, ενώ στη ψαθυρή είναι η απουσία πλαστικής παραμόρφωσης. Ακόμη στην όλκιμη θραύση η ρωγμή μπορεί να δημιουργεί μια ινώδη επιφάνεια θραύσης, ενώ στη ψαθυρή η διεύθυνση κίνησης της ρωγμής είναι σχεδόν κάθετη στη διεύθυνση της εφαρμοζόμενης τάσης, δίνοντας έτσι μία σχετικά επίπεδη επιφάνεια.

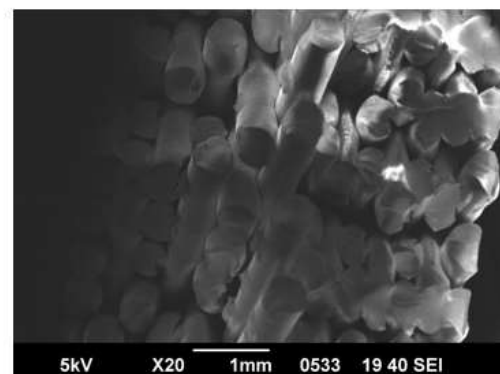
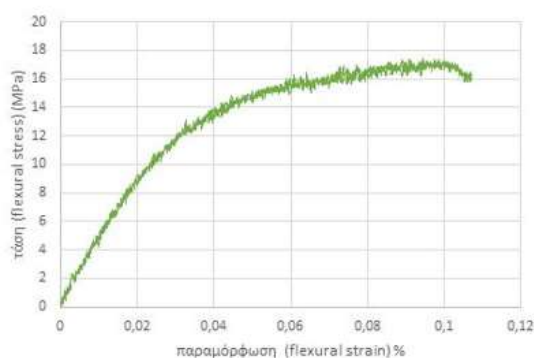
Λαμβάνοντας υπόψιν τα διαγράμματα τάσης- παραμόρφωσης των δοκιμίων ABS και ABS plus, παρατηρούμε μεγάλη πλαστική περιοχή και μεγάλη μετατόπιση. Η παρατήρηση αυτή, σε συνδυασμό με την ανομοιομορφία στην επιφάνεια θραύσης, όπως επίσης και η παραμόρφωση που έχουν υποστεί, στο μεγαλύτερο μήκος τους, ορισμένα νήματα του ABS και

του ABS plus, μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι τα δοκίμια έχουν υποστεί όλκιμη θραύση. Όμως η όλκιμότητα των δοκιμίων διαφέρει μεταξύ του ABS και του ABS plus. Όπως φαίνεται στα διαγράμματα τάσης- παραμόρφωσης των δύο υλικών, σε αυτά του ABS, λόγω του μικρότερου μέτρου ελαστικότητας, υπάρχει μικρότερη κλίση, γεγονός το οποίο συμβάλλει στο ομαλότερο πέρασμα του υλικού από την πλαστική στην ελαστική περιοχή. Στα διαγράμματα τάσης παραμόρφωσης του ABS plus, λόγω του μεγαλύτερου μέτρου ελαστικότητας, που έχει ως αποτέλεσμα μεγαλύτερη κλίση, το υλικό δεν έχει ομαλή μετάβαση από την πλαστική στην ελαστική περιοχή.

Συγκρίνοντας τις φωτογραφίες SEM των δύο υλικών παρατηρείτε ότι σε αυτές του ABS υπάρχει μεγαλύτερη ανομοιομορφία στην επιφάνεια θραύσης σε σχέση με του ABS plus. Επίσης νήματα του ABS παραμορφώνονται δυσανάλογα, ενώ φαίνεται η ινώδης επιφάνεια που σχηματίζεται στην επιφάνεια θραύσης των νημάτων.

Παρακάτω παρατίθενται τα διαγράμματα τάσης παραμόρφωσης και οι φωτογραφίες SEM για τα εξής δοκίμια: ABS πάχους εκτύπωσης 0,33mm 90° (δοκίμιο 3) με μέτρο ελαστικότητας 407,96 MPa και ABS plus πάχους εκτύπωσης 0,17mm 90° (δοκίμιο 1) με μέτρο ελαστικότητας 941,48 MPa.

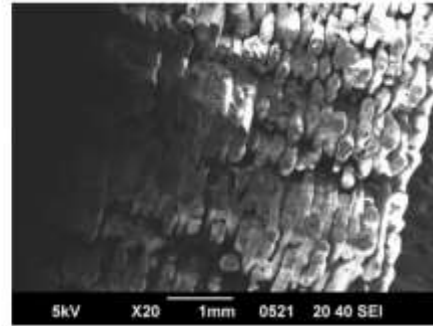
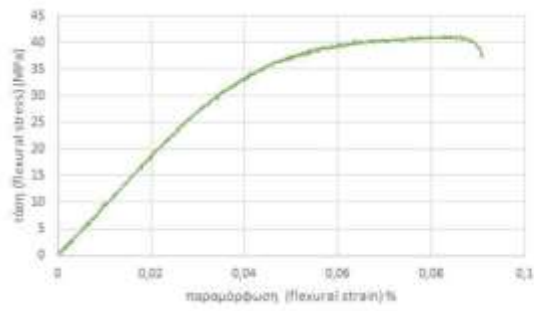
- ABS πάχους εκτύπωσης 0,33mm 90°



Εικόνα 55: Στα αριστερά: διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης Στα δεξιά: φωτογραφία SEM

- ABS πάχους εκτύπωσης 0,17mm 90°





Εικόνα 56: Στα αριστερά: διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης Στα δεξιά: φωτογραφία SEM

## Συζήτηση

Μεγάλο κομμάτι της παρούσας εργασίας ήταν η ανάλυση των πειραματικών δεδομένων, με βασικό στόχο τη μελέτη της αντοχής των τυπωμένων δοκιμίων. Κατά τη διαδικασία αυτή, πραγματοποιήθηκε καθαρισμός των πινάκων, με τις τιμές οι οποίες προέκυψαν από την υδραυλική πρέσα. Με τις τιμές αυτές κατασκευάστηκαν διαγράμματα τάσης παραμόρφωσης καθώς και συγκεντρωτικοί πίνακες αποτελεσμάτων. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε σύγκριση της αντοχής των δοκιμίων με τη θεωρητική τιμή που δίνεται από τον κατασκευαστή. Ο κατασκευαστής για τις τιμές της τάσης κάμψης χρησιμοποίησε το πρότυπο ASTM D790, το οποίο ακολουθήθηκε για την εκπόνηση της εργασίας αυτής. Σύμφωνα με το πρότυπο τα δοκίμια πρέπει να είναι κατασκευασμένα με τη μέθοδο της χύτευσης με έγχυση (injection molding). Έτσι είναι προφανές ότι η σύγκριση πραγματοποιείται σε δύο διαφορετικές μεθόδους.

Οι τιμές του κατασκευαστή είναι 41 MPa για το ABS και 52 MPa για το ABS plus για την τάση κάμψης και αντίστοιχα 1,834 GPa για το ABS και 2,204 GPa για το ABS plus για το μέτρο ελαστικότητας. Για τη σύγκριση χρησιμοποιήθηκαν οι μέγιστες πειραματικές τιμές, οι οποίες αντιστοιχούν σε 23,65664 MPa για το ABS και 41,38292 MPa για το ABS plus για την τάση κάμψης. Αντίστοιχα για το μέτρο ελαστικότητας η μέγιστη πειραματική τιμή είναι 0,55022 GPa για το ABS και 0,94148 GPa για το ABS plus. Η επί τοι εκατό διαφορά για το ABS είναι 42,3% για την τάση κάμψης και 70% για το μέτρο ελαστικότητας κατά την κάμψη. Αντίστοιχα για το ABS plus είναι 20,4% για την τάση κάμψης και 57,28% για το μέτρο ελαστικότητας κατά την κάμψη.

Είναι φανερό ότι η μέθοδος της χύτευσης με έγχυση υπερτερεί σε σχέση με αυτή της τρισδιάστατης εκτύπωσης. Το γεγονός αυτό είναι λογικό μιας και με τη μέθοδο της χύτευσης δημιουργούνται στιβαρά αντικείμενα, χωρίς κενά στην εσωτερική τους δομή, ενώ στην τρισδιάστατη σχεδίαση η υποβάθμιση των μηχανικών ιδιοτήτων είναι αναπόφευκτη, αφού η κατασκευή των δοκιμίων γίνεται με νήματα ABS τα οποία δημιουργούν κενά ανάμεσα σε κάθε στρώση υλικού.

Συγκρίνοντας τα δύο υλικά, μεγαλύτερη αντοχή στην κάμψη παρέχει το ABS plus, το οποίο έχει ενισχυμένες μηχανικές ιδιότητες σε σχέση με το ABS, το οποίο και συμβαδίζει με τη θεωρία. Καλύτερη αντοχή στην κάμψη έχουν τα δοκίμια πάχους εκτύπωσης 0,17mm και διεύθυνσης εκτύπωσης 0°. Σχετικά με το μέτρο


ΤΕΙ Κρήτης  
Τμήμα Μηχανολογίας

ελαστικότητας πιο ανθεκτικά είναι τα δοκίμια πάχους εκτύπωσης 0,17mm και προσανατολισμού 90°.

## Βιβλιογραφία

1. <http://www.resinex.gr/typon-polymeroy/abs.html>
2. [http://en.wikipedia.org/wiki/Acrylonitrile\\_butadiene\\_styrene#Production](http://en.wikipedia.org/wiki/Acrylonitrile_butadiene_styrene#Production)
3. [http://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A3%CF%84%CF%85%CF%81%CE%AD%CE%BD%CE%B9%CE%BF#.CE.9A.CE.B1.CF.84.CE.B1.CE.BB.CF.85.CF.84.CE.B9.CE.BA.CE.AE\\_.CE.B1.CF.86.CF.85.CE.B4.CF.81.CE.BF.CE.B3.CF.8C.CE.BD.CF.89.CF.83.CE.B7\\_.CE.B1.CE.B9.CE.B8.CF.85.CE.BB.CE.BF.CE.B2.CE.B5.CE.BD.CE.B6.CE.BF.CE.BB.CE.AF.CE.BF.CF.85](http://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A3%CF%84%CF%85%CF%81%CE%AD%CE%BD%CE%B9%CE%BF#.CE.9A.CE.B1.CF.84.CE.B1.CE.BB.CF.85.CF.84.CE.B9.CE.BA.CE.AE_.CE.B1.CF.86.CF.85.CE.B4.CF.81.CE.BF.CE.B3.CF.8C.CE.BD.CF.89.CF.83.CE.B7_.CE.B1.CE.B9.CE.B8.CF.85.CE.BB.CE.BF.CE.B2.CE.B5.CE.BD.CE.B6.CE.BF.CE.BB.CE.AF.CE.BF.CF.85)
4. <http://www.manufacturingterms.com/Greek/ABS.html>
5. [http://www.mitsuichem.com/techno/license/pdf/4.ABS\\_PROCESS.pdf](http://www.mitsuichem.com/techno/license/pdf/4.ABS_PROCESS.pdf)
6. [http://www.eni.com/it\\_IT/attachments/azienda/attivita-strategie/petrochimica/licensing/ABS-flyer-lug09.pdf](http://www.eni.com/it_IT/attachments/azienda/attivita-strategie/petrochimica/licensing/ABS-flyer-lug09.pdf)
7. <http://www.stratasys.com/materials/fdm/abs-m30>
8. <http://usglobalimages.stratasys.com/Main/Secure/Material%20Specs%20MS/Fortus-Material-Specs/SSYS-MS-ABS-M30-PropertiesReport-01-11.pdf?v=635176952945846399>
9. <http://www.viokar.gr/en/support/raw-material/raw-material-properties>
10. <http://www.professionalplastics.com/professionalplastics/ElectricalPropertiesofPlastics.pdf>
11. <http://usglobalimages.stratasys.com/Main/Secure/Material%20Specs%20MS/Fortus-Material-Specs/SSYS-MS-ABS-M30-PropertiesReport-01-11.pdf?v=635176952945846399>
12. <http://www.absmaterial.com/>
13. <http://www.springitalia.com/applications/materials/3d-printing/fused-deposition-modeling/abs-m30/>
14. <http://www.javelin-tech.com/3d-printer/materials/fdm-thermoplastic/abs-m30/>
15. <http://courseware.mech.ntua.gr/ml26065/mathimata/14-Kampsi.pdf>
16. [http://eng.sut.ac.th/metal/images/stories/pdf/Lab\\_7Bend\\_Eng.pdf](http://eng.sut.ac.th/metal/images/stories/pdf/Lab_7Bend_Eng.pdf)
17. [https://www.google.gr/search?q=deflection+of+beams&espv=2&biw=1600&bih=799&source=lnms&tbn=isch&sa=X&ei=-vdyVdPFNcWrU6qfgOAP&ved=0CAYQ\\_AUoAQ#imgrc=pVIFoPP](https://www.google.gr/search?q=deflection+of+beams&espv=2&biw=1600&bih=799&source=lnms&tbn=isch&sa=X&ei=-vdyVdPFNcWrU6qfgOAP&ved=0CAYQ_AUoAQ#imgrc=pVIFoPP)
18. Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials

## Παράρτημα Ι. Πρότυπο ASTM D790



Designation: D 790 – 02

### Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials<sup>1</sup>

This standard is issued under the fixed designation D 790; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon ( $\epsilon$ ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

This standard has been approved for use by agencies of the Department of Defense.

#### 1. Scope \*

1.1 These test methods cover the determination of flexural properties of unreinforced and reinforced plastics, including high-modulus composites and electrical insulating materials in the form of rectangular bars molded directly or cut from sheets, plates, or molded shapes. These test methods are generally applicable to both rigid and semirigid materials. However, flexural strength cannot be determined for those materials that do not break or that do not fail in the outer surface of the test specimen within the 5.0 % strain limit of these test methods. These test methods utilize a three-point loading system applied to a simply supported beam. A four-point loading system method can be found in Test Method D 6272.

1.1.1 Procedure A, designed principally for materials that break at comparatively small deflections.

1.1.2 Procedure B, designed particularly for those materials that undergo large deflections during testing.

1.1.3 Procedure A shall be used for measurement of flexural properties, particularly flexural modulus, unless the material specification states otherwise. Procedure B may be used for measurement of flexural strength only. Tangent modulus data obtained by Procedure A tends to exhibit lower standard deviations than comparable data obtained by means of Procedure B.

1.2 Comparative tests may be run in accordance with either procedure, provided that the procedure is found satisfactory for the material being tested.

1.3 The values stated in SI units are to be regarded as the standard. The values provided in parentheses are for information only.

1.4 This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.

NOTE 1—These test methods are not technically equivalent to ISO 178.

<sup>1</sup> These test methods are under the jurisdiction of ASTM Committee D20 on Plastics and are the direct responsibility of Subcommittee D20.10 on Mechanical Properties.  
Current edition approved April 10, 2002. Published June 2002. Originally published as D 790 – 70. Last previous edition D 790 – 00.

#### 2. Referenced Documents

2.1 *ASTM Standards:*  
D 618 Practice for Conditioning Plastics for Testing<sup>2</sup>  
D 638 Test Method for Tensile Properties of Plastics<sup>2</sup>  
D 883 Terminology Relating to Plastics<sup>2</sup>  
D 4000 Classification System for Specifying Plastic Materials<sup>3</sup>  
D 5947 Test Methods for Physical Dimensions of Solid Plastic Specimens<sup>4</sup>  
D 6272 Test Method for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials by Four-Point Bending<sup>4</sup>  
E 4 Practices for Force Verification of Testing Machines<sup>5</sup>  
E 691 Practice for Conducting an Interlaboratory Study to Determine the Precision of a Test Method<sup>6</sup>

#### 3. Terminology

3.1 *Definitions*—Definitions of terms applying to these test methods appear in Terminology D 883 and Annex A1 of Test Method D 638.

#### 4. Summary of Test Method

4.1 A bar of rectangular cross section rests on two supports and is loaded by means of a loading nose midway between the supports (see Fig. 1). A support span-to-depth ratio of 16:1 shall be used unless there is reason to suspect that a larger span-to-depth ratio may be required, as may be the case for certain laminated materials (see Section 7 and Note 8 for guidance).

4.2 The specimen is deflected until rupture occurs in the outer surface of the test specimen or until a maximum strain (see 12.7) of 5.0 % is reached, whichever occurs first.

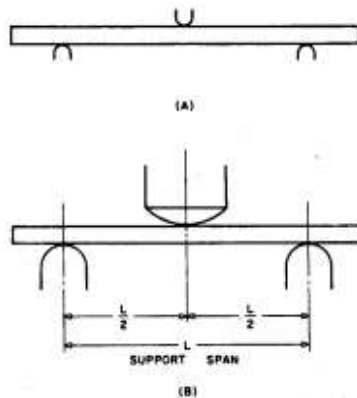
4.3 Procedure A employs a strain rate of 0.01 mm/mm/min (0.01 in./in./min) and is the preferred procedure for this test method, while Procedure B employs a strain rate of 0.10 mm/mm/min (0.10 in./in./min).

<sup>2</sup> Annual Book of ASTM Standards, Vol 08.01.  
<sup>3</sup> Annual Book of ASTM Standards, Vol 08.02.  
<sup>4</sup> Annual Book of ASTM Standards, Vol 08.03.  
<sup>5</sup> Annual Book of ASTM Standards, Vol 03.01.  
<sup>6</sup> Annual Book of ASTM Standards, Vol 14.02.

\*A Summary of Changes section appears at the end of this standard.

Copyright © ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2909, United States.

146



NOTE—(a) Minimum radius = 3.2 mm (1/8 in.). (b) Maximum radius supports 1.6 times specimen depth; maximum radius loading nose = 4 times specimen depth.

FIG. 1 Allowable Range of Loading Nose and Support Radii

5. Significance and Use

5.1 Flexural properties as determined by these test methods are especially useful for quality control and specification purposes.

5.2 Materials that do not fail by the maximum strain allowed under these test methods (3-point bend) may be more suited to a 4-point bend test. The basic difference between the two test methods is in the location of the maximum bending moment and maximum axial fiber stresses. The maximum axial fiber stresses occur on a line under the loading nose in 3-point bending and over the area between the loading noses in 4-point bending.

5.3 Flexural properties may vary with specimen depth, temperature, atmospheric conditions, and the difference in rate of straining as specified in Procedures A and B (see also Note 8).

5.4 Before proceeding with these test methods, reference should be made to the specification of the material being tested. Any test specimen preparation, conditioning, dimensions, or testing parameters, or combination thereof, covered in the materials specification shall take precedence over those mentioned in these test methods. If there are no material specifications, then the default conditions apply. Table 1 in Classification System D 4000 lists the ASTM materials standards that currently exist for plastics.

6. Apparatus

6.1 *Testing Machine*—A properly calibrated testing machine that can be operated at constant rates of crosshead motion over the range indicated, and in which the error in the load measuring system shall not exceed ±1 % of the maximum load expected to be measured. It shall be equipped with a deflection measuring device. The stiffness of the testing machine shall be such that the total elastic deformation of the system does not exceed 1 % of the total deflection of the test specimen during

TABLE 1 Flexural Strength

Material	Mean, 10 <sup>3</sup> psi	Values Expressed in Units of % of 10 <sup>3</sup> psi			
		V <sub>L</sub> <sup>A</sup>	V <sub>L</sub> <sup>B</sup>	F <sup>C</sup>	R <sup>D</sup>
ABS	9.99	1.59	6.05	4.44	17.2
DAP thermoset	14.3	6.58	6.58	18.6	18.6
Cast acrylic	16.3	1.67	11.3	4.73	32.0
GR polyester	19.5	1.43	2.14	4.05	6.08
GR polycarbonate	21.0	5.16	6.05	14.8	17.1
SMC	26.0	4.76	7.19	13.5	20.4

<sup>A</sup> V<sub>L</sub> = within-laboratory coefficient of variation for the indicated material. It is obtained by first pooling the within-laboratory standard deviations of the test results from all of the participating laboratories:  $S_r = [(s_1)^2 + (s_2)^2 + \dots + (s_n)^2] / n$  then  $V_L = (S_r \text{ divided by the overall average for the material}) \times 100$ .

<sup>B</sup> V<sub>L</sub> = between-laboratory reproducibility, expressed as the coefficient of variation:  $S_{RL} = (S_r^2 + S_L^2)^{1/2}$  where S<sub>L</sub> is the standard deviation of laboratory means. Then:  $V_{RL} = (S_{RL} \text{ divided by the overall average for the material}) \times 100$ .

<sup>C</sup> F = within-laboratory critical interval between two test results = 2.8 × V<sub>L</sub>.

<sup>D</sup> R = between-laboratory critical interval between two test results = 2.8 × V<sub>RL</sub>.

testing, or appropriate corrections shall be made. The load indicating mechanism shall be essentially free from inertial lag at the crosshead rate used. The accuracy of the testing machine shall be verified in accordance with Practices E 4.

6.2 *Loading Noses and Supports*—The loading nose and supports shall have cylindrical surfaces. In order to avoid excessive indentation, or failure due to stress concentration directly under the loading nose, the radii of the loading nose and supports shall be 5.0 ± 0.1 mm (0.197 ± 0.004 in.) unless otherwise specified or agreed upon between the interested clients. When other loading noses and supports are used they must comply with the following requirements: they shall have a minimum radius of 3.2 mm (1/8 in.) for all specimens, and for specimens 3.2 mm or greater in depth, the radius of the supports may be up to 1.6 times the specimen depth. They shall be this large if significant indentation or compressive failure occurs. The arc of the loading nose in contact with the specimen shall be sufficiently large to prevent contact of the specimen with the sides of the nose (see Fig. 1). The maximum radius of the loading nose shall be no more than 4 times the specimen depth.

NOTE 2—Test data have shown that the loading nose and support dimensions can influence the flexural modulus and flexural strength values. The loading nose dimension has the greater influence. Dimensions of the loading nose and supports must be specified in the material specification.

6.3 *Micrometers*—Suitable micrometers for measuring the width and thickness of the test specimen to an incremental discrimination of at least 0.025 mm (0.001 in.) should be used. All width and thickness measurements of rigid and semirigid plastics may be measured with a hand micrometer with ratchet. A suitable instrument for measuring the thickness of nonrigid test specimens shall have: a contact measuring pressure of 25 ± 2.5 kPa (3.6 ± 0.36 psi), a movable circular contact foot 6.35 ± 0.025 mm (0.250 ± 0.001 in.) in diameter and a lower fixed anvil large enough to extend beyond the contact foot in all directions and being parallel to the contact foot within 0.005 mm (0.002 in.) over the entire foot area. Flatness of foot and anvil shall conform to the portion of the Calibration section of Test Methods D 5947.

 D 790

**7. Test Specimens**

7.1 The specimens may be cut from sheets, plates, or molded shapes, or may be molded to the desired finished dimensions. The actual dimensions used in Section 4.2, Calculation, shall be measured in accordance with Test Methods D 5947.

NOTE 3—Any necessary polishing of specimens shall be done only in the lengthwise direction of the specimen.

7.2 *Sheet Materials (Except Laminated Thermosetting Materials and Certain Materials Used for Electrical Insulation, Including Vulcanized Fiber and Glass Bonded Mica):*

7.2.1 *Materials 1.6 mm (1/16 in.) or Greater in Thickness—*For flatwise tests, the depth of the specimen shall be the thickness of the material. For edgewise tests, the width of the specimen shall be the thickness of the sheet, and the depth shall not exceed the width (see Notes 4 and 5). For all tests, the support span shall be 16 (tolerance  $\pm 1$ ) times the depth of the beam. Specimen width shall not exceed one fourth of the support span for specimens greater than 3.2 mm (1/8 in.) in depth. Specimens 3.2 mm or less in depth shall be 12.7 mm (1/2 in.) in width. The specimen shall be long enough to allow for overhanging on each end of at least 10 % of the support span, but in no case less than 6.4 mm (1/4 in.) on each end. Overhang shall be sufficient to prevent the specimen from slipping through the supports.

NOTE 4—Whenever possible, the original surface of the sheet shall be unaltered. However, where testing machine limitations make it impossible to follow the above criterion on the unaltered sheet, one or both surfaces shall be machined to provide the desired dimensions, and the location of the specimens with reference to the total depth shall be noted. The value obtained on specimens with machined surfaces may differ from those obtained on specimens with original surfaces. Consequently, any specifications for flexural properties on thicker sheets must state whether the original surfaces are to be retained or not. When only one surface was machined, it must be stated whether the machined surface was on the tension or compression side of the beam.

NOTE 5—Edgewise tests are not applicable for sheets that are so thin that specimens meeting these requirements cannot be cut. If specimen depth exceeds the width, buckling may occur.

7.2.2 *Materials Less than 1.6 mm (1/16 in.) in Thickness—*The specimen shall be 50.8 mm (2 in.) long by 12.7 mm (1/2 in.) wide, tested flatwise on a 25.4-mm (1-in.) support span.

NOTE 6—Use of the formulas for simple beams cited in these test methods for calculating results presumes that beam width is small in comparison with the support span. Therefore, the formulas do not apply rigorously to these dimensions.

NOTE 7—Where machine sensitivity is such that specimens of these dimensions cannot be measured, wider specimens or shorter support spans, or both, may be used, provided the support span-to-depth ratio is at least 14 to 1. All dimensions must be stated in the report (see also Note 6).

7.3 *Laminated Thermosetting Materials and Sheet and Plate Materials Used for Electrical Insulation, Including Vulcanized Fiber and Glass-Bonded Mica—*For paper-base and fabric-base grades over 25.4 mm (1 in.) in nominal thickness, the specimens shall be machined on both surfaces to a depth of 25.4 mm. For glass-base and nylon-base grades, specimens over 12.7 mm (1/2 in.) in nominal depth shall be machined on both surfaces to a depth of 12.7 mm. The support span-to-depth ratio shall be chosen such that failures occur in

the outer fibers of the specimens, due only to the bending moment (see Note 8). Therefore, a ratio larger than 16:1 may be necessary (32:1 or 40:1 are recommended). When laminated materials exhibit low compressive strength perpendicular to the laminations, they shall be loaded with a large radius loading nose (up to four times the specimen depth to prevent premature damage to the outer fibers).

7.4 *Molding Materials (Thermoplastics and Thermosets)—*The recommended specimen for molding materials is 127 by 12.7 by 3.2 mm (5 by 1/2 by 1/8 in.) tested flatwise on a support span, resulting in a support span-to-depth ratio of 16 (tolerance  $\pm 1$ ). Thicker specimens should be avoided if they exhibit significant shrink marks or bubbles when molded.

7.5 *High-Strength Reinforced Composites, Including Highly Orthotropic Laminates—*The span-to-depth ratio shall be chosen such that failure occurs in the outer fibers of the specimens and is due only to the bending moment (see Note 8). A span-to-depth ratio larger than 16:1 may be necessary (32:1 or 40:1 are recommended). For some highly anisotropic composites, shear deformation can significantly influence modulus measurements, even at span-to-depth ratios as high as 40:1. Hence, for these materials, an increase in the span-to-depth ratio to 60:1 is recommended to eliminate shear effects when modulus data are required, it should also be noted that the flexural modulus of highly anisotropic laminates is a strong function of ply-stacking sequence and will not necessarily correlate with tensile modulus, which is not stacking-sequence dependent.

NOTE 8—As a general rule, support span-to-depth ratios of 16:1 are satisfactory when the ratio of the tensile strength to shear strength is less than 8 to 1, but the support span-to-depth ratio must be increased for composite laminates having relatively low shear strength in the plane of the laminate and relatively high tensile strength parallel to the support span.

**8. Number of Test Specimens**

8.1 Test at least five specimens for each sample in the case of isotropic materials or molded specimens.

8.2 For each sample of anisotropic material in sheet form, test at least five specimens for each of the following conditions. Recommended conditions are flatwise and edgewise tests on specimens cut in lengthwise and crosswise directions of the sheet. For the purposes of this test, "lengthwise" designates the principal axis of anisotropy and shall be interpreted to mean the direction of the sheet known to be stronger in flexure. "Crosswise" indicates the sheet direction known to be the weaker in flexure and shall be at 90° to the lengthwise direction.

**9. Conditioning**

9.1 *Conditioning—*Condition the test specimens at 23  $\pm$  2°C (73.4  $\pm$  3.6°F) and 50  $\pm$  5 % relative humidity for not less than 40 h prior to test in accordance with Procedure A of Practice D 618 unless otherwise specified by contract or the relevant ASTM material specification. Reference pre-test conditioning, to settle disagreements, shall apply tolerances of  $\pm 1^\circ\text{C}$  (1.8°F) and  $\pm 2\%$  relative humidity.

9.2 *Test Conditions—*Conduct the tests at 23  $\pm$  2°C (73.4  $\pm$  3.6°F) and 50  $\pm$  5 % relative humidity unless otherwise



## D 790

specified by contract or the relevant ASTM material specification. Reference testing conditions, to settle disagreements, shall apply tolerances of  $\pm 1^\circ\text{C}$  ( $1.8^\circ\text{F}$ ) and  $\pm 2\%$  relative humidity.

## 10. Procedure

## 10.1 Procedure A:

10.1.1 Use an untested specimen for each measurement. Measure the width and depth of the specimen to the nearest 0.03 mm (0.001 in.) at the center of the support span. For specimens less than 2.54 mm (0.100 in.) in depth, measure the depth to the nearest 0.003 mm (0.0005 in.). These measurements shall be made in accordance with Test Methods D 5947.

10.1.2 Determine the support span to be used as described in Section 7 and set the support span to within 1% of the determined value.

10.1.3 For flexural fixtures that have continuously adjustable spans, measure the span accurately to the nearest 0.1 mm (0.004 in.) for spans less than 63 mm (2.5 in.) and to the nearest 0.3 mm (0.012 in.) for spans greater than or equal to 63 mm (2.5 in.). Use the actual measured span for all calculations. For flexural fixtures that have fixed machined span positions, verify the span distance the same as for adjustable spans at each machined position. This distance becomes the span for that position and is used for calculations applicable to all subsequent tests conducted at that position. See Annex A2 for information on the determination of and setting of the span.

10.1.4 Calculate the rate of crosshead motion as follows and set the machine for the rate of crosshead motion as calculated by Eq 1:

$$R = ZL^2/6d \quad (1)$$

where:

$R$  = rate of crosshead motion, mm (in.)/min,  
 $L$  = support span, mm (in.),  
 $d$  = depth of beam, mm (in.), and  
 $Z$  = rate of straining of the outer fiber, mm/mm/min (in./in./min).  $Z$  shall be equal to 0.01.

In no case shall the actual crosshead rate differ from that calculated using Eq 1, by more than  $\pm 10\%$ .

10.1.5 Align the loading nose and supports so that the axes of the cylindrical surfaces are parallel and the loading nose is midway between the supports. The parallelism of the apparatus may be checked by means of a plate with parallel grooves into which the loading nose and supports will fit when properly aligned (see A2.3). Center the specimen on the supports, with the long axis of the specimen perpendicular to the loading nose and supports.

10.1.6 Apply the load to the specimen at the specified crosshead rate, and take simultaneous load-deflection data. Measure deflection either by a gage under the specimen in contact with it at the center of the support span, the gage being mounted stationary relative to the specimen supports, or by measurement of the motion of the loading nose relative to the supports. Load-deflection curves may be plotted to determine the flexural strength, chord or secant modulus or the tangent modulus of elasticity, and the total work as measured by the area under the load-deflection curve. Perform the necessary toe

compensation (see Annex A1) to correct for seating and indentation of the specimen and deflections in the machine.

10.1.7 Terminate the test when the maximum strain in the outer surface of the test specimen has reached 0.05 mm/mm (in./in.) or at break if break occurs prior to reaching the maximum strain (Notes 9 and 10). The deflection at which this strain will occur may be calculated by letting  $r$  equal 0.05 mm/mm (in./in.) in Eq 2:

$$D = rL^2/6d \quad (2)$$

where:

$D$  = midspan deflection, mm (in.),  
 $r$  = strain, mm/mm (in./in.),  
 $L$  = support span, mm (in.), and  
 $d$  = depth of beam, mm (in.).

Note 9—For some materials that do not yield or break within the 5% strain limit when tested by Procedure A, the increased strain rate allowed by Procedure B (see 10.2) may induce the specimen to yield or break, or both, within the required 5% strain limit.

Note 10—Beyond 5% strain, this test method is not applicable. Some other mechanical property might be more relevant to characterize materials that neither yield nor break by either Procedure A or Procedure B within the 5% strain limit (for example, Test Method D 638 may be considered).

## 10.2 Procedure B:

10.2.1 Use an untested specimen for each measurement.

10.2.2 Test conditions shall be identical to those described in 10.1, except that the rate of straining of the outer surface of the test specimen shall be 0.10 mm/mm (in./in.)/min.

10.2.3 If no break has occurred in the specimen by the time the maximum strain in the outer surface of the test specimen has reached 0.05 mm/mm (in./in.), discontinue the test (see Note 10).

## 11. Retests

11.1 Values for properties at rupture shall not be calculated for any specimen that breaks at some obvious, fortuitous flaw, unless such flaws constitute a variable being studied. Retests shall be made for any specimen on which values are not calculated.

## 12. Calculation

12.1 Toe compensation shall be made in accordance with Annex A1 unless it can be shown that the toe region of the curve is not due to the take-up of slack, seating of the specimen, or other artifact, but rather is an authentic material response.

12.2 Flexural Stress ( $\sigma_f$ )—When a homogeneous elastic material is tested in flexure as a simple beam supported at two points and loaded at the midpoint, the maximum stress in the outer surface of the test specimen occurs at the midpoint. This stress may be calculated for any point on the load-deflection curve by means of the following equation (see Notes 11-13):

$$\sigma_f = 3PL/2bd^2 \quad (3)$$

where:

$\sigma$  = stress in the outer fibers at midpoint, MPa (psi),



## D 790

$P$  = load at a given point on the load-deflection curve, N (lbf),

$L$  = support span, mm (in.),

$b$  = width of beam tested, mm (in.), and

$d$  = depth of beam tested, mm (in.).

NOTE 11—Eq 3 applies strictly to materials for which stress is linearly proportional to strain up to the point of rupture and for which the strains are small. Since this is not always the case, a slight error will be introduced if Eq 3 is used to calculate stress for materials that are not true Hookean materials. The equation is valid for obtaining comparison data and for specification purposes, but only up to a maximum fiber strain of 5% in the outer surface of the test specimen for specimens tested by the procedures described herein.

NOTE 12—When testing highly orthotropic laminates, the maximum stress may not always occur in the outer surface of the test specimen.<sup>7</sup> Laminated beam theory must be applied to determine the maximum tensile stress at failure. If Eq 3 is used to calculate stress, it will yield an apparent strength based on homogeneous beam theory. This apparent strength is highly dependent on the ply-stacking sequence of highly orthotropic laminates.

NOTE 13—The preceding calculation is not valid if the specimen slips excessively between the supports.

12.3 *Flexural Stress for Beams Tested at Large Support Spans ( $\sigma_f$ )*—If support span-to-depth ratios greater than 16 to 1 are used such that deflections in excess of 10% of the support span occur, the stress in the outer surface of the specimen for a simple beam can be reasonably approximated with the following equation (see Note 14):

$$\sigma_f = (3PL/2bd^3)[1 + 6(D/L)^2 - 4(d/L)(D/L)] \quad (4)$$

where:

$\sigma_f$ ,  $P$ ,  $L$ ,  $b$ , and  $d$  are the same as for Eq 3, and

$D$  = deflection of the centerline of the specimen at the middle of the support span, mm (in.).

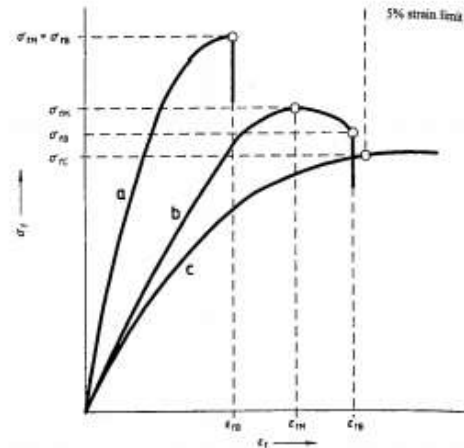
NOTE 14—When large support span-to-depth ratios are used, significant end forces are developed at the support noses which will affect the moment in a simple supported beam. Eq 4 includes additional terms that are an approximate correction factor for the influence of these end forces in large support span-to-depth ratio beams where relatively large deflections exist.

12.4 *Flexural Strength ( $\sigma_{fb}$ )*—Maximum flexural stress sustained by the test specimen (see Note 12) during a bending test. It is calculated according to Eq 3 or Eq 4. Some materials that do not break at strains of up to 5% may give a load deflection curve that shows a point at which the load does not increase with an increase in strain, that is, a yield point (Fig. 2, Curve B),  $Y$ . The flexural strength may be calculated for these materials by letting  $P$  (in Eq 3 or Eq 4) equal this point,  $Y$ .

12.5 *Flexural Offset Yield Strength*—Offset yield strength is the stress at which the stress-strain curve deviates by a given strain (offset) from the tangent to the initial straight line portion of the stress-strain curve. The value of the offset must be given whenever this property is calculated.

NOTE 15—This value may differ from flexural strength defined in 12.4.

<sup>7</sup> For a discussion of these effects, see Zweben, C., Smith, W. S., and Wardle, M. W., "Test Methods for Fiber Tensile Strength, Composite Flexural Modulus and Properties of Fabric-Reinforced Laminates," *Composite Materials: Testing and Design (Fifth Conference)*, ASTM STP 674, 1979, pp. 228-262.



NOTE—Curve a: Specimen that breaks before yielding.  
Curve b: Specimen that yields and then breaks before the 5% strain limit.  
Curve c: Specimen that neither yields nor breaks before the 5% strain limit.

FIG. 2 Typical Curves of Flexural Stress ( $\sigma_f$ ) Versus Flexural Strain ( $\epsilon_f$ )

Both methods of calculation are described in the annex to Test Method D 638.

12.6 *Flexural Stress at Break ( $\sigma_{fb}$ )*—Flexural stress at break of the test specimen during a bending test. It is calculated according to Eq 3 or Eq 4. Some materials may give a load deflection curve that shows a break point,  $B$ , without a yield point (Fig. 2, Curve a) in which case  $\sigma_{fb} = \sigma_{fb}$ . Other materials may give a yield deflection curve with both a yield and a break point,  $B$  (Fig. 2, Curve b). The flexural stress at break may be calculated for these materials by letting  $P$  (in Eq 3 or Eq 4) equal this point,  $B$ .

12.7 *Stress at a Given Strain*—The stress in the outer surface of a test specimen at a given strain may be calculated in accordance with Eq 3 or Eq 4 by letting  $P$  equal the load read from the load-deflection curve at the deflection corresponding to the desired strain (for highly orthotropic laminates, see Note 12).

12.8 *Flexural Strain,  $\epsilon_f$* —Nominal fractional change in the length of an element of the outer surface of the test specimen at midspan, where the maximum strain occurs. It may be calculated for any deflection using Eq 5:

$$\epsilon_f = 6Dd/L^2 \quad (5)$$

where:

$\epsilon_f$  = strain in the outer surface, mm/mm (in./in.),

$D$  = maximum deflection of the center of the beam, mm (in.),

$L$  = support span, mm (in.), and



D 790

$d$  = depth, mm (in.).  
 $D$  = maximum deflection of the center of the beam, mm (in.).  
 $L$  = support span, mm (in.), and  
 $d$  = depth, mm (in.).

### 12.9 Modulus of Elasticity:

12.9.1 *Tangent Modulus of Elasticity*—The tangent modulus of elasticity, often called the “modulus of elasticity,” is the ratio, within the elastic limit, of stress to corresponding strain. It is calculated by drawing a tangent to the steepest initial straight-line portion of the load-deflection curve and using Eq 6 (for highly anisotropic composites, see Note 16).

$$E_B = L^3 m / 4bd^3 \quad (6)$$

where:

$E_B$  = modulus of elasticity in bending, MPa (psi),  
 $L$  = support span, mm (in.),  
 $b$  = width of beam tested, mm (in.),  
 $d$  = depth of beam tested, mm (in.), and  
 $m$  = slope of the tangent to the initial straight-line portion of the load-deflection curve, N/mm (lb/in.) of deflection.

NOTE 16—Shear deflections can seriously reduce the apparent modulus of highly anisotropic composites when they are tested at low span-to-depth ratios.<sup>7</sup> For this reason, a span-to-depth ratio of 60 to 1 is recommended for flexural modulus determinations on these composites. Flexural strength should be determined on a separate set of replicate specimens at a lower span-to-depth ratio that induces tensile failure in the outer fibers of the beam along its lower face. Since the flexural modulus of highly anisotropic laminates is a critical function of ply-stacking sequence, it will not necessarily correlate with tensile modulus, which is not stacking-sequence dependent.

12.9.2 *Secant Modulus*—The secant modulus is the ratio of stress to corresponding strain at any selected point on the stress-strain curve, that is, the slope of the straight line that joins the origin and a selected point on the actual stress-strain curve. It shall be expressed in megapascals (pounds per square inch). The selected point is chosen at a prespecified stress or strain in accordance with the appropriate material specification or by customer contract. It is calculated in accordance with Eq 6 by letting  $m$  equal the slope of the secant to the load-

deflection curve. The chosen stress or strain point used for the determination of the secant shall be reported.

12.9.3 *Chord Modulus ( $E_C$ )*—The chord modulus may be calculated from two discrete points on the load deflection curve. The selected points are to be chosen at two prespecified stress or strain points in accordance with the appropriate material specification or by customer contract. The chosen stress or strain points used for the determination of the chord modulus shall be reported. Calculate the chord modulus,  $E_C$  using the following equation:

$$E_C = (\sigma_B - \sigma_A) / (\epsilon_B - \epsilon_A) \quad (7)$$

where:

$\sigma_B$  and  $\sigma_A$  are the flexural stresses, calculated from Eq 3 or Eq 4 and measured at the predefined points on the load deflection curve, and  $\epsilon_B$  and

$\epsilon_A$  are the flexural strain values, calculated from Eq 5 and measured at the predetermined points on the load deflection curve.

12.10 *Arithmetic Mean*—For each series of tests, the arithmetic mean of all values obtained shall be calculated to three significant figures and reported as the “average value” for the particular property in question.

12.11 *Standard Deviation*—The standard deviation (estimated) shall be calculated as follows and be reported to two significant figures:

$$s = \sqrt{(\sum X^2 - n\bar{X}^2) / (n - 1)} \quad (8)$$

where:

$s$  = estimated standard deviation,  
 $X$  = value of single observation,  
 $n$  = number of observations, and  
 $\bar{X}$  = arithmetic mean of the set of observations.

## 13. Report

13.1 Report the following information:

13.1.1 Complete identification of the material tested, including type, source, manufacturer’s code number, form, principal dimensions, and previous history (for laminated materials, ply-stacking sequence shall be reported).

13.1.2 Direction of cutting and loading specimens, when appropriate,

13.1.3 Conditioning procedure,

13.1.4 Depth and width of specimen,

13.1.5 Procedure used (A or B),

13.1.6 Support span length,

13.1.7 Support span-to-depth ratio if different than 16:1,

13.1.8 Radius of supports and loading noses if different than 5 mm,

13.1.9 Rate of crosshead motion,

13.1.10 Flexural strain at any given stress, average value and standard deviation,

13.1.11 If a specimen is rejected, reason(s) for rejection,

13.1.12 Tangent, secant, or chord modulus in bending, average value, standard deviation, and the strain level(s) used if secant or chord modulus,

13.1.13 Flexural strength (if desired), average value, and standard deviation,

TABLE 2 Flexural Modulus

Material	Mean, 10 <sup>3</sup> psi	Values Expressed in units of % of 10 <sup>3</sup> psi			
		$V_L^A$	$V_L^B$	$C^C$	$R^D$
ABS	338	4.79	7.89	13.6	21.8
DAP thermoset	485	2.89	7.18	8.15	20.4
Cast acrylic	810	13.7	16.1	38.8	45.4
GR polyester	816	3.49	4.20	9.91	11.9
GR polycarbonate	1790	5.52	5.52	15.6	15.6
SMC	1950	10.9	13.8	30.8	39.1

<sup>A</sup>  $V_L$  = within-laboratory coefficient of variation for the indicated material. It is obtained by first pooling the within-laboratory standard deviations of the test results from all of the participating laboratories:  $S_L = \{[(s_1)^2 + (s_2)^2 + \dots + (s_n)^2] / n\}^{1/2}$  where  $V_L$  = ( $S_L$  divided by the overall average for the material)  $\times 100$ .

<sup>B</sup>  $V_L$  = between-laboratory reproducibility, expressed as the coefficient of variation:  $S_L = \{[S_1^2 + S_2^2 + \dots + S_n^2] / n\}^{1/2}$  where  $S_L$  is the standard deviation of laboratory means. Then:  $V_L$  = ( $S_L$  divided by the overall average for the material)  $\times 100$ .

<sup>C</sup>  $C$  = within-laboratory critical interval between two test results =  $2.8 \times V_L$ .

<sup>D</sup>  $R$  = between-laboratory critical interval between two test results =  $2.8 \times V_L$ .

## D 790

13.1.14 Stress at any given strain up to and including 5 % (if desired), with strain used, average value, and standard deviation,

13.1.15 Flexural stress at break (if desired), average value, and standard deviation,

13.1.16 Type of behavior, whether yielding or rupture, or both, or other observations, occurring within the 5 % strain limit, and

13.1.17 Date of specific version of test used.

#### 14. Precision and Bias <sup>8</sup>

14.1 Tables 1 and 2 are based on a round-robin test conducted in 1984, in accordance with Practice E 691, involving six materials tested by six laboratories using Procedure A. For each material, all the specimens were prepared at one source. Each "test result" was the average of five individual determinations. Each laboratory obtained two test results for each material.

NOTE 17—**Caution:** The following explanations of  $r$  and  $R$  (14.2-14.2.3) are intended only to present a meaningful way of considering the approximate precision of these test methods. The data given in Tables 2 and 3 should not be applied rigorously to the acceptance or rejection of materials, as those data are specific to the round robin and may not be representative of other lots, conditions, materials, or laboratories. Users of

<sup>8</sup> Supporting data are available from ASTM Headquarters. Request RR: D20-1128.

these test methods should apply the principles outlined in Practice E 691 to generate data specific to their laboratory and materials, or between specific laboratories. The principles of 14.2-14.2.3 would then be valid for such data.

14.2 *Concept of "r" and "R" in Tables 1 and 2*—If  $S_r$  and  $S_R$  have been calculated from a large enough body of data, and for test results that were averages from testing five specimens for each test result, then:

14.2.1 *Repeatability*—Two test results obtained within one laboratory shall be judged not equivalent if they differ by more than the  $r$  value for that material.  $r$  is the interval representing the critical difference between two test results for the same material, obtained by the same operator using the same equipment on the same day in the same laboratory.

14.2.2 *Reproducibility*—Two test results obtained by different laboratories shall be judged not equivalent if they differ by more than the  $R$  value for that material.  $R$  is the interval representing the critical difference between two test results for the same material, obtained by different operators using different equipment in different laboratories.

14.2.3 The judgments in 14.2.1 and 14.2.2 will have an approximately 95 % (0.95) probability of being correct.

14.3 *Bias*—No statement may be made about the bias of these test methods, as there is no standard reference material or reference test method that is applicable.

#### 15. Keywords

15.1 flexural properties; plastics; stiffness; strength

## ANNEXES

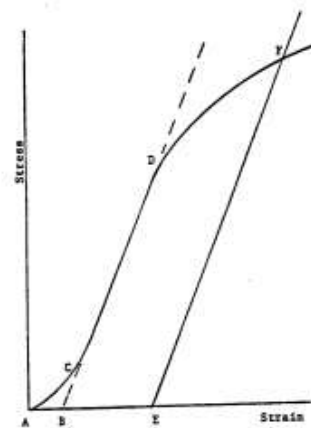
### (Mandatory Information)

#### A1. TOE COMPENSATION

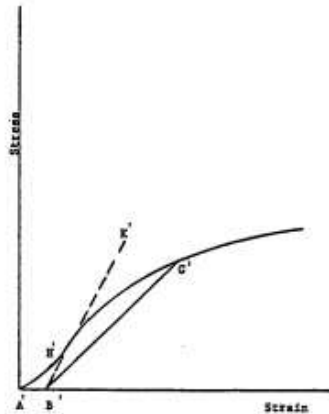
A1.1 In a typical stress-strain curve (see Fig. A1.1) there is a toe region,  $AC$ , that does not represent a property of the material. It is an artifact caused by a takeup of slack and alignment or seating of the specimen. In order to obtain correct values of such parameters as modulus, strain, and offset yield point, this artifact must be compensated for to give the corrected zero point on the strain or extension axis.

A1.2 In the case of a material exhibiting a region of Hookean (linear) behavior (see Fig. A1.1), a continuation of the linear ( $CD$ ) region of the curve is constructed through the zero-stress axis. This intersection ( $B$ ) is the corrected zero-strain point from which all extensions or strains must be measured, including the yield offset ( $BE$ ), if applicable. The elastic modulus can be determined by dividing the stress at any point along the Line  $CD$  (or its extension) by the strain at the same point (measured from Point  $B$ , defined as zero-strain).

A1.3 In the case of a material that does not exhibit any linear region (see Fig. A1.2), the same kind of toe correction of the zero-strain point can be made by constructing a tangent to the maximum slope at the inflection Point  $H'$ . This is extended to intersect the strain axis at Point  $B'$ , the corrected zero-strain



NOTE—Some chart recorders plot the mirror image of this graph.  
FIG. A1.1 Material with Hookean Region

 D 790


Note—Some chart recorders plot the mirror image of this graph.

FIG. A1.2 Material with No Hookean Region

point. Using Point  $B'$  as zero strain, the stress at any point ( $G'$ ) on the curve can be divided by the strain at that point to obtain a secant modulus (slope of Line  $B'G'$ ). For those materials with no linear region, any attempt to use the tangent through the inflection point as a basis for determination of an offset yield point may result in unacceptable error.

## A2. MEASURING AND SETTING SPAN

A2.1 For flexural fixtures that have adjustable spans, it is important that the span between the supports is maintained constant or the actual measured span is used in the calculation of stress, modulus, and strain, and the loading nose or noses are positioned and aligned properly with respect to the supports. Some simple steps as follows can improve the repeatability of your results when using these adjustable span fixtures.

### A2.2 Measurement of Span:

A2.2.1 This technique is needed to ensure that the correct span, not an estimated span, is used in the calculation of results.

A2.2.2 Scribe a permanent line or mark at the exact center of the support where the specimen makes complete contact. The type of mark depends on whether the supports are fixed or rotatable (see Figs. A2.1 and A2.2).

A2.2.3 Using a vernier caliper with pointed tips that is readable to at least 0.1 mm (0.004 in.), measure the distance between the supports, and use this measurement of span in the calculations.

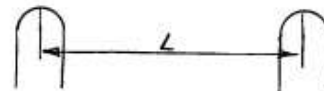


FIG. A2.1 Markings on Fixed Specimen Supports

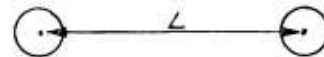


FIG. A2.2 Markings on Rotatable Specimen Supports

A2.3 *Setting the Span and Alignment of Loading Nose(s)*—To ensure a consistent day-to-day setup of the span and ensure the alignment and proper positioning of the loading nose, simple jigs should be manufactured for each of the standard setups used. An example of a jig found to be useful is shown in Fig. A2.3.

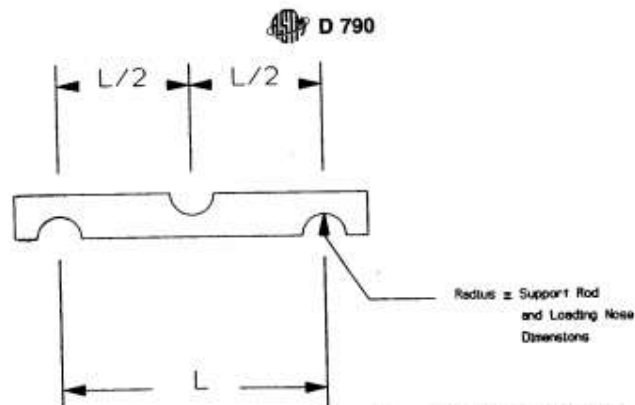


FIG. A2.3 Fixture Used to Set Loading Nose and Support Spacing and Alignment

### SUMMARY OF CHANGES

This section identifies the location of selected changes to these test methods. For the convenience of the user, Committee D20 has highlighted those changes that may impact the use of these test methods. This section may also include descriptions of the changes or reasons for the changes, or both.

*D 790 – 02:*

(J) Revised 9.1 and 9.2.

*D 790 – 00:*

(J) Revised 12.1.

*D 790 – 99:*

(J) Revised 10.1.3.

*D 790 – 98:*

(1) Section 4.2 was rewritten extensively to bring this standard closer to ISO 178.

(2) Fig. 2 was added to clarify flexural behaviors that may be observed and to define what yielding and breaking behaviors look like, as well as the appropriate place to select these points on the stress strain curve.

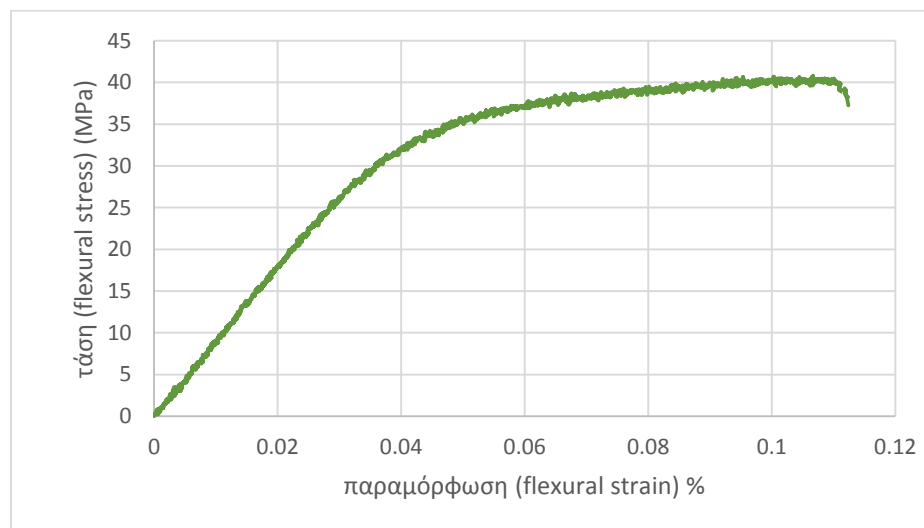
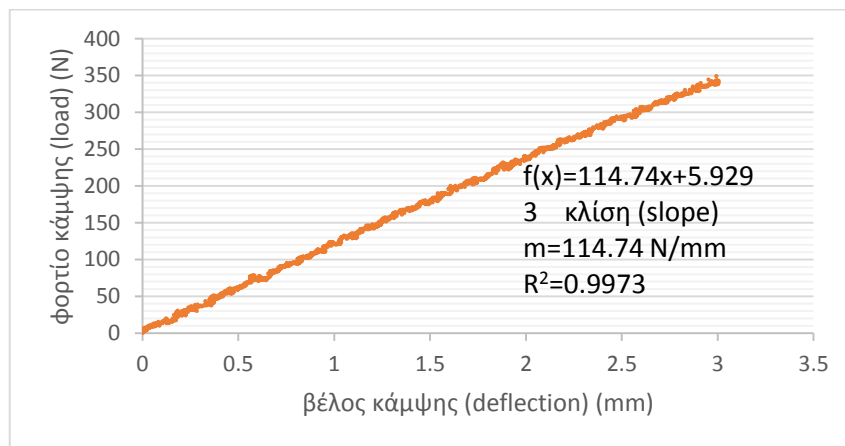
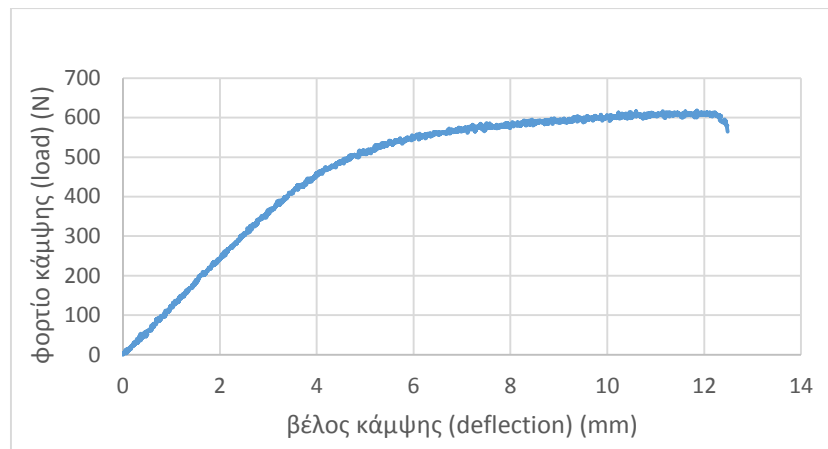
*ASTM International takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.*

*This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM International Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, at the address shown below.*

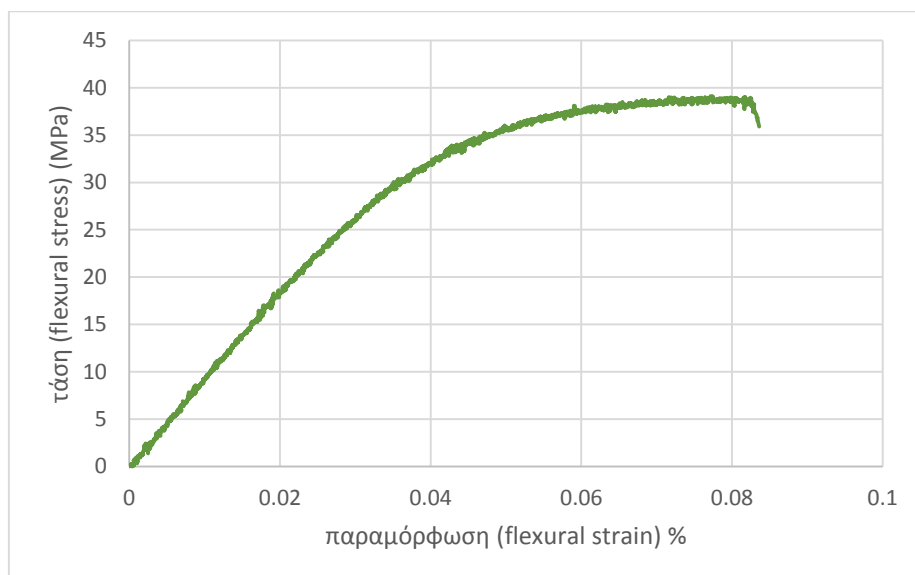
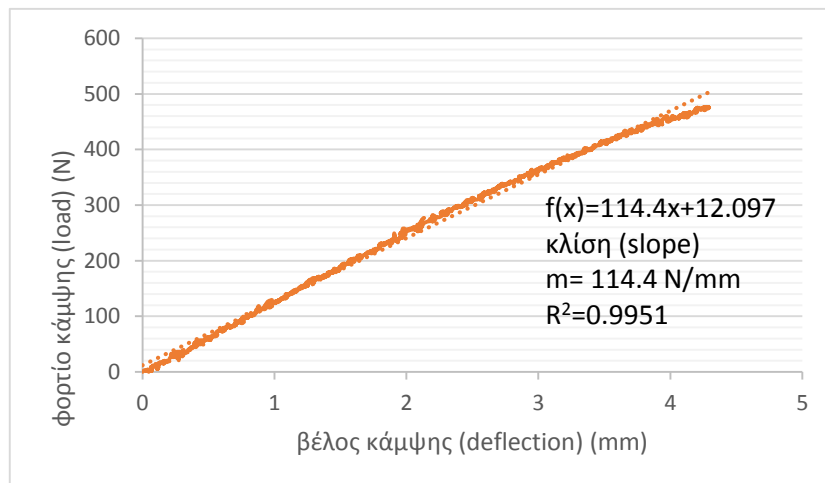
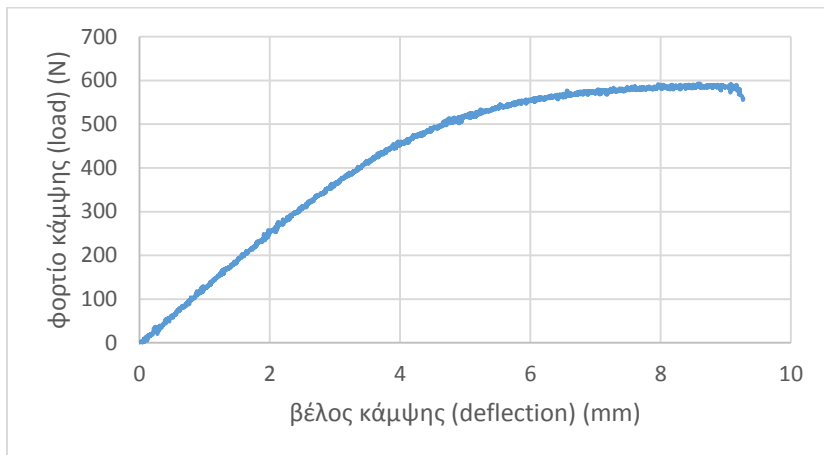
*This standard is copyrighted by ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States. Individual reprints (single or multiple copies) of this standard may be obtained by contacting ASTM at the above address or at 610-832-9585 (phone), 610-832-9555 (fax), or service@astm.org (e-mail); or through the ASTM website (www.astm.org).*

## Παράρτημα II. Διαγράμματα πειράματος κάμψης

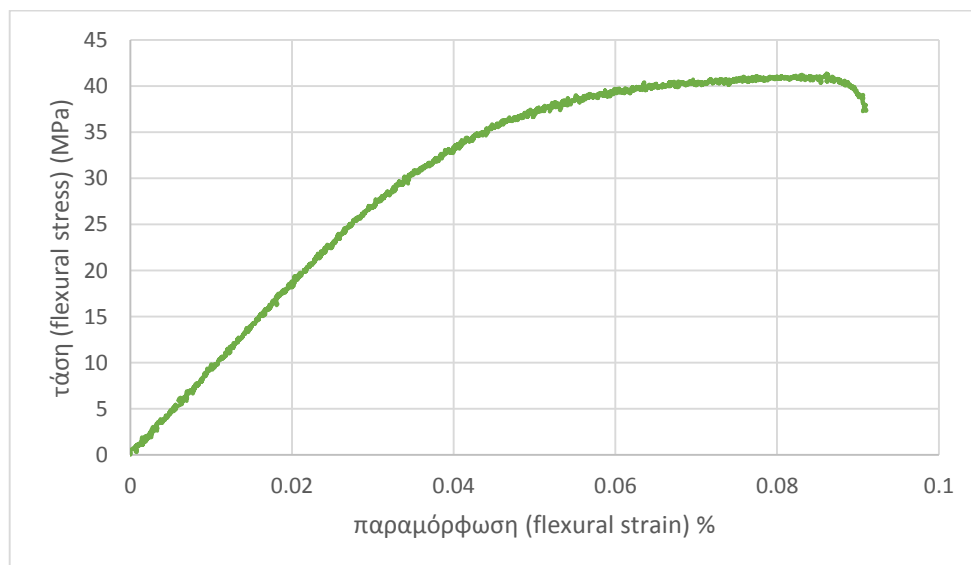
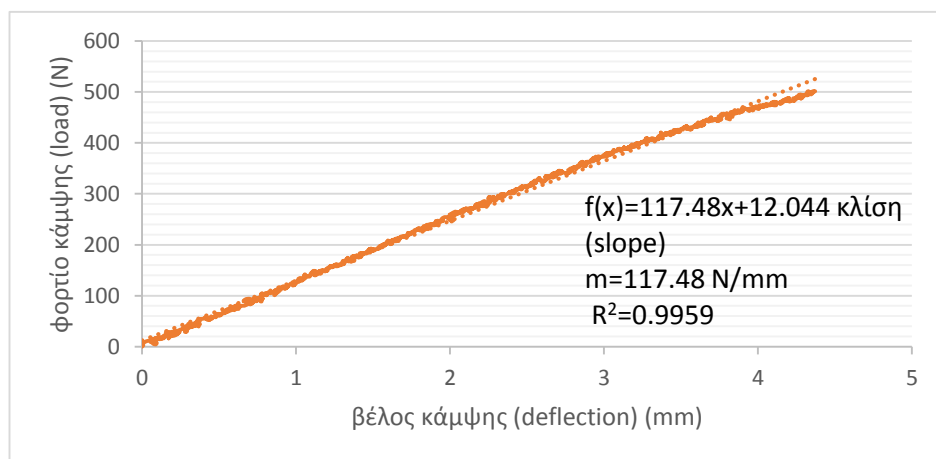
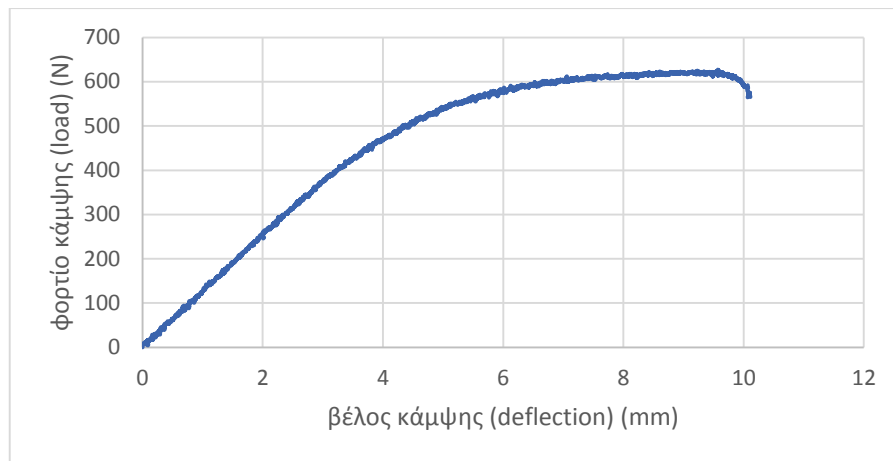
Δοκίμιο abs plus 0,17, προσανατολισμός χτισίματος 0°, α/δ (1)



- Δοκίμιο abs plus 0,17, προσανατολισμός χτισίματος 0°, α/δ (2)

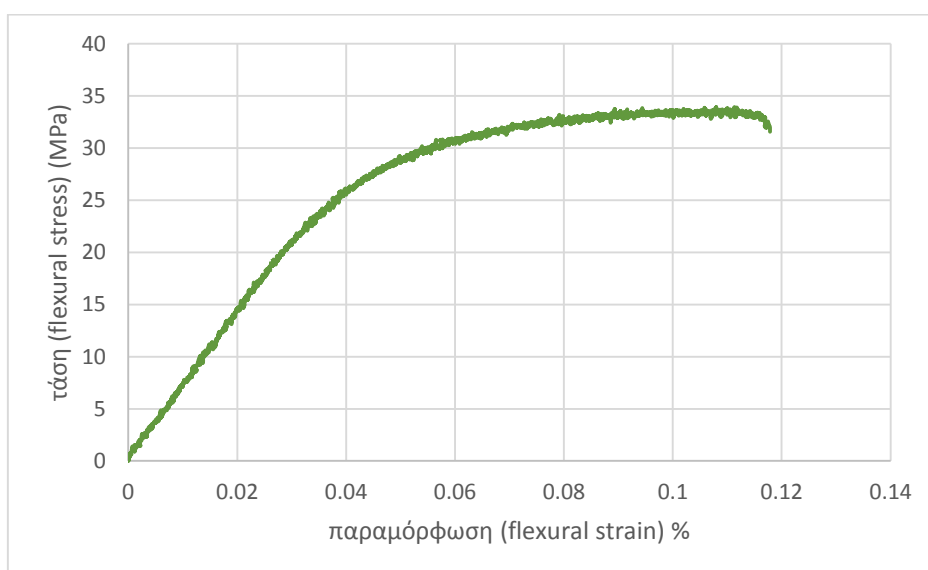
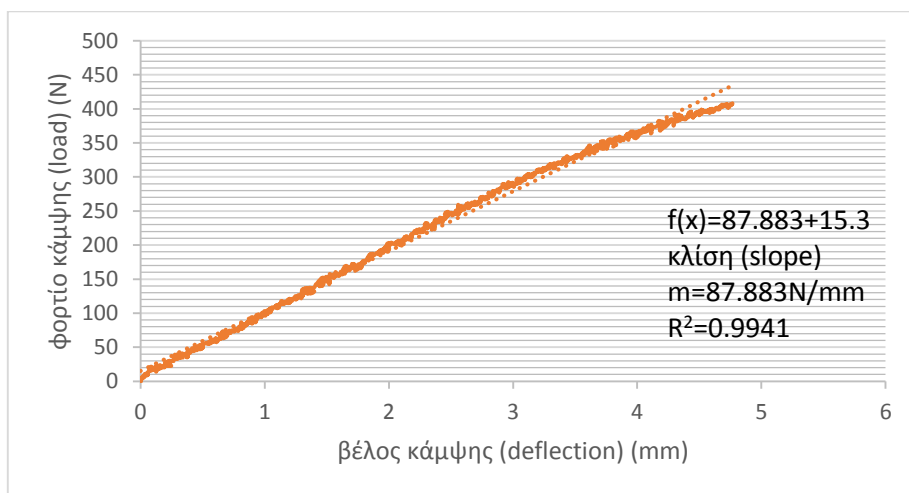
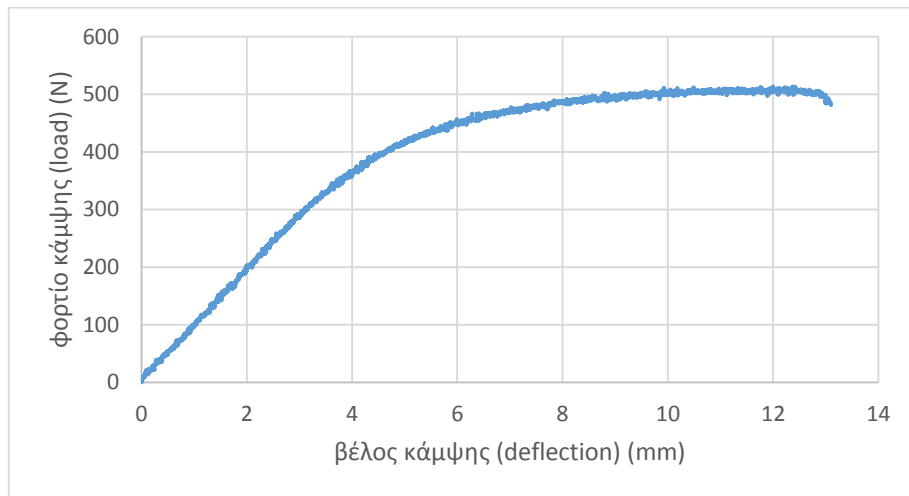


- **Δοκίμιο abs plus 0,17, προσανατολισμός χτισίματος 0°, α/δ (3)**

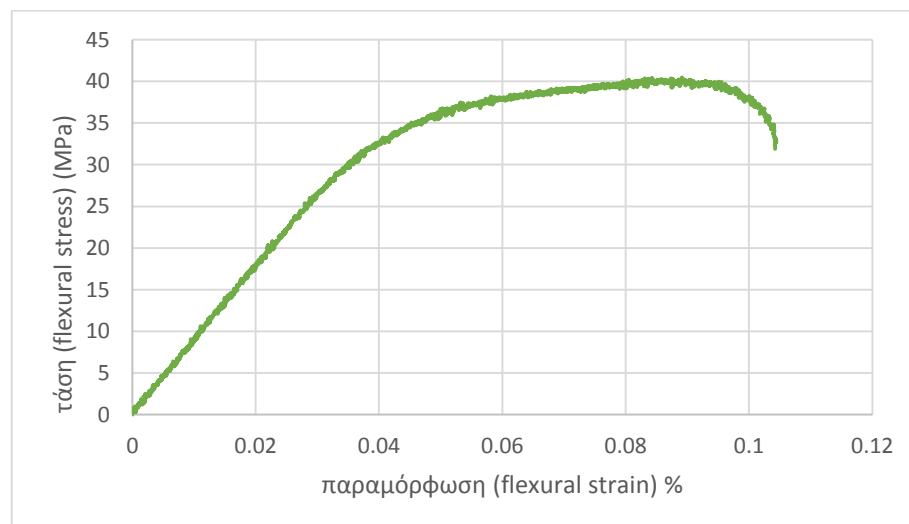
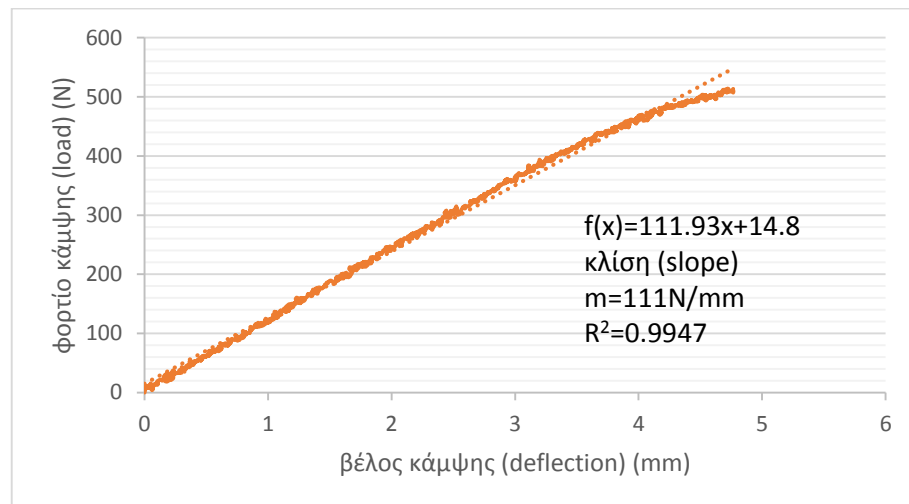
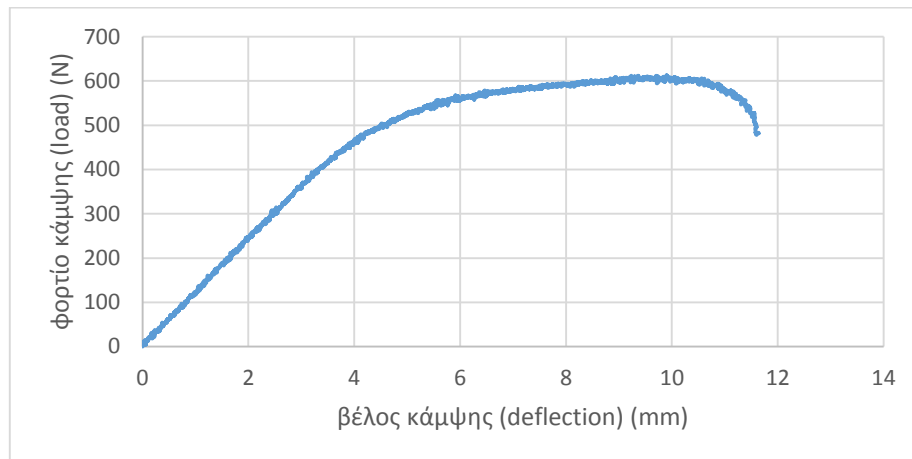




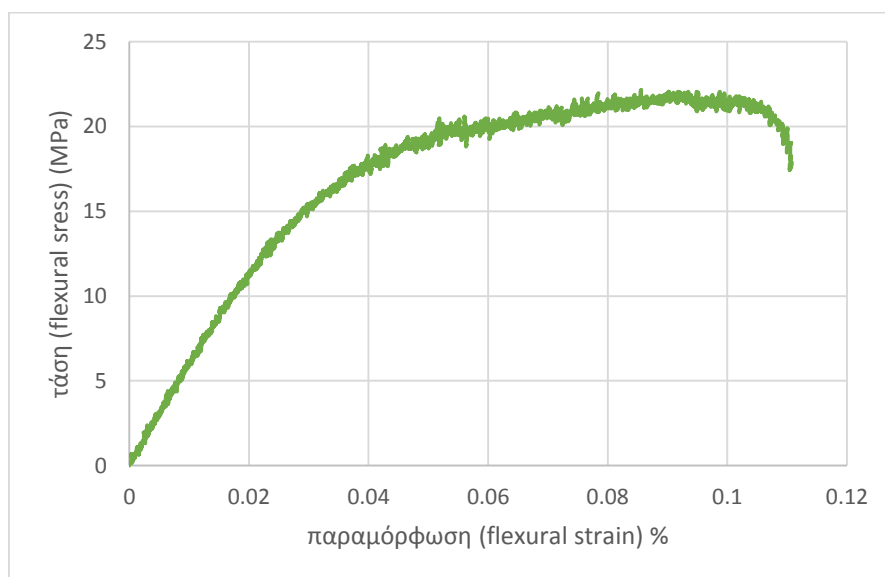
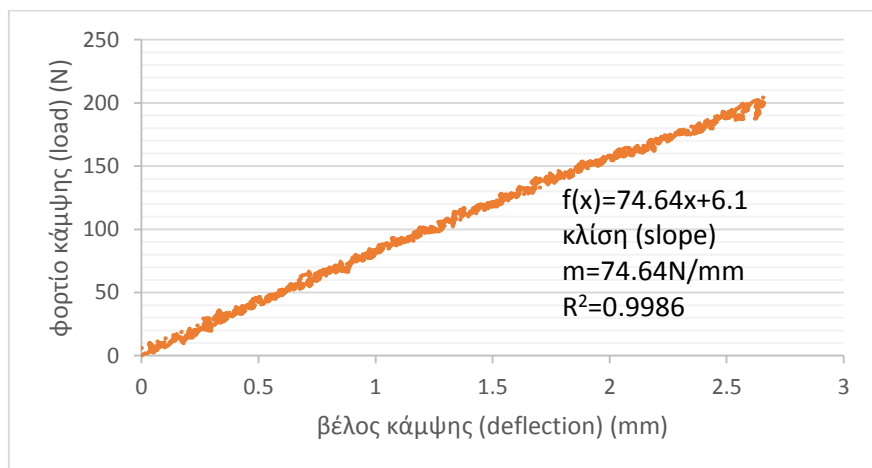
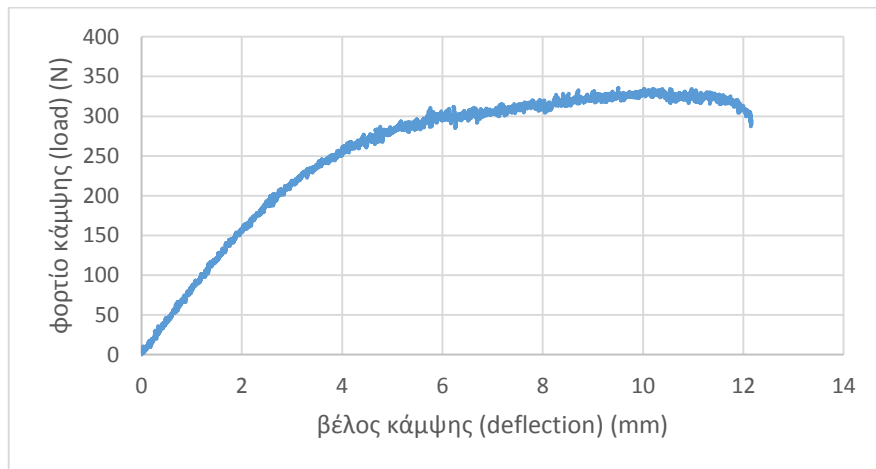
- **Δοκίμιο abs plus 0,17, προσανατολισμός χτισίματος 0°, α/δ (4)**



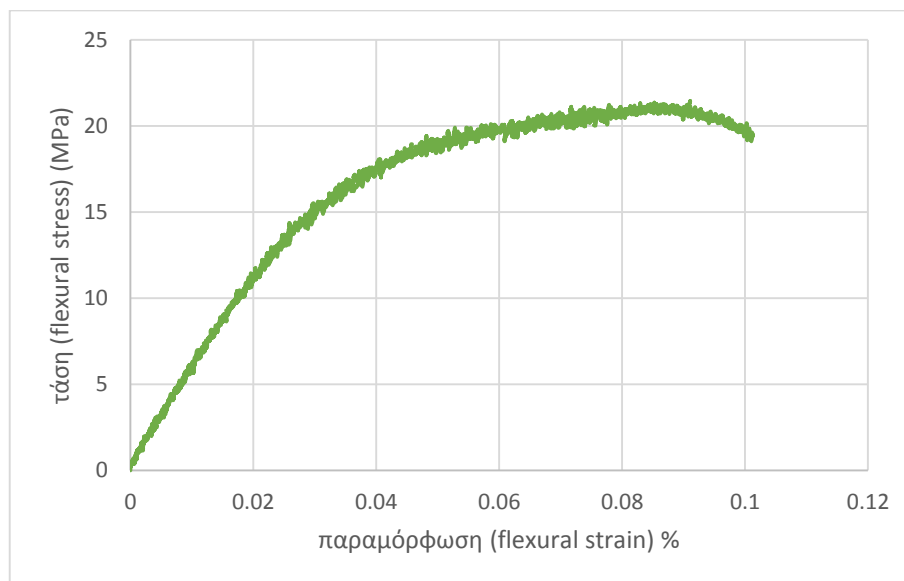
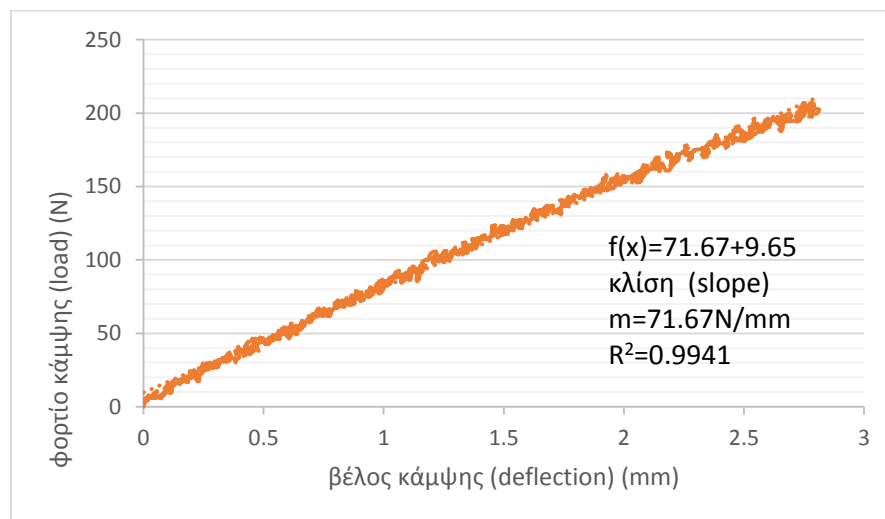
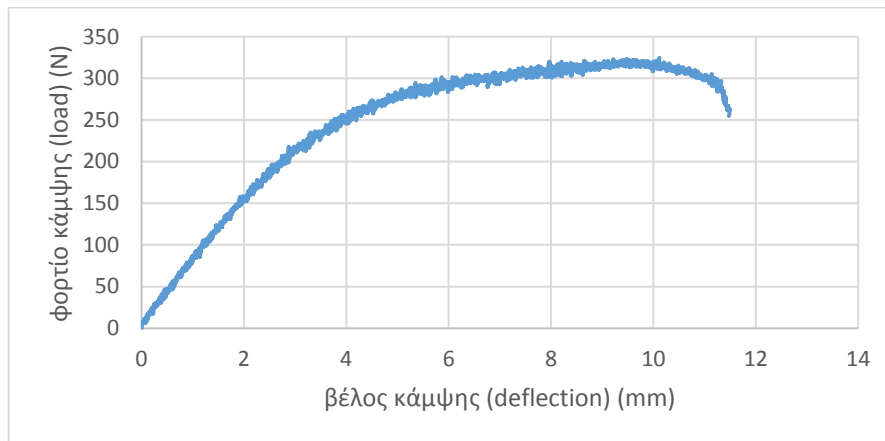
- **Δοκίμιο abs plus 0,17, προσανατολισμός χτισίματος 0°, α/δ (5)**



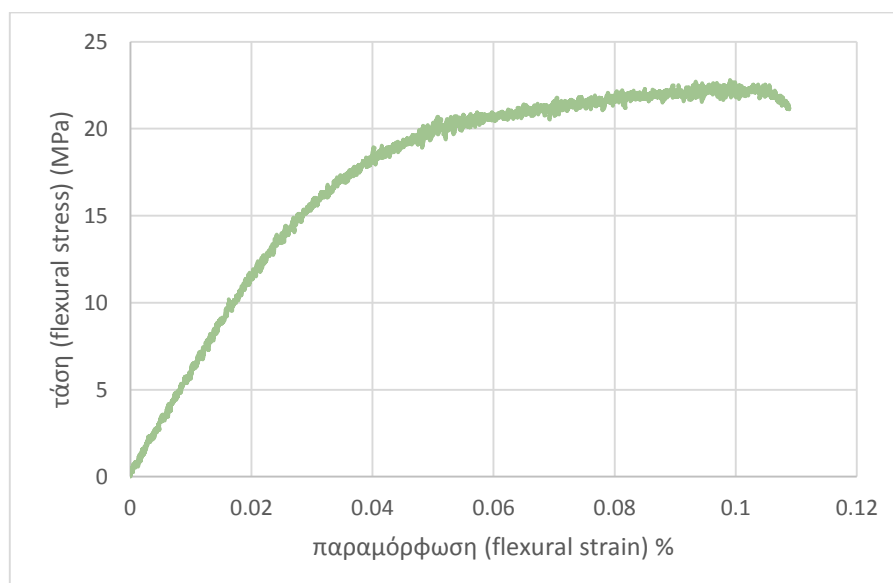
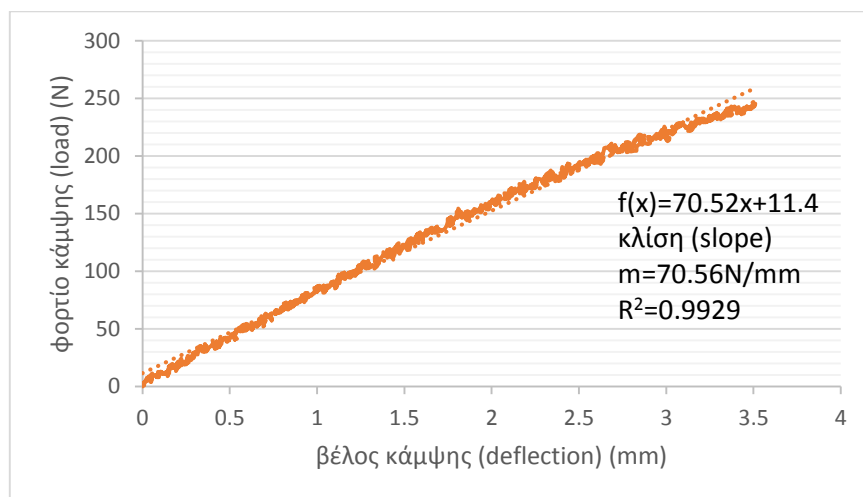
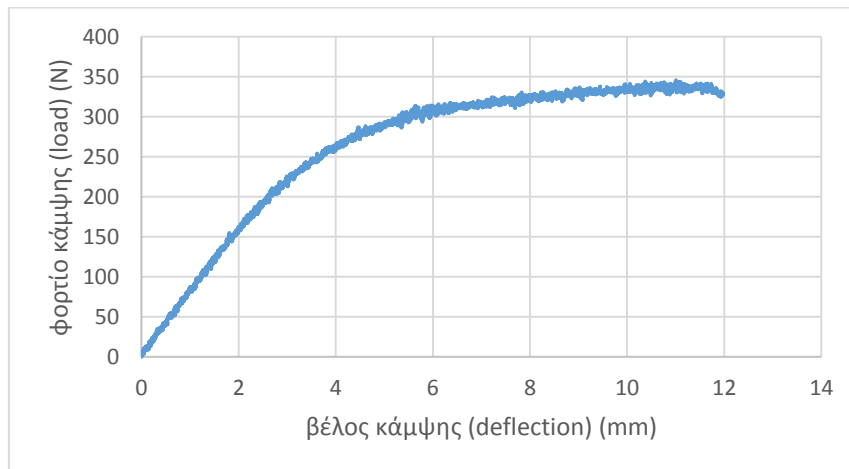
- Δοκίμιο abs 0,25, προσανατολισμός χτισίματος 0°, α/δ (1)



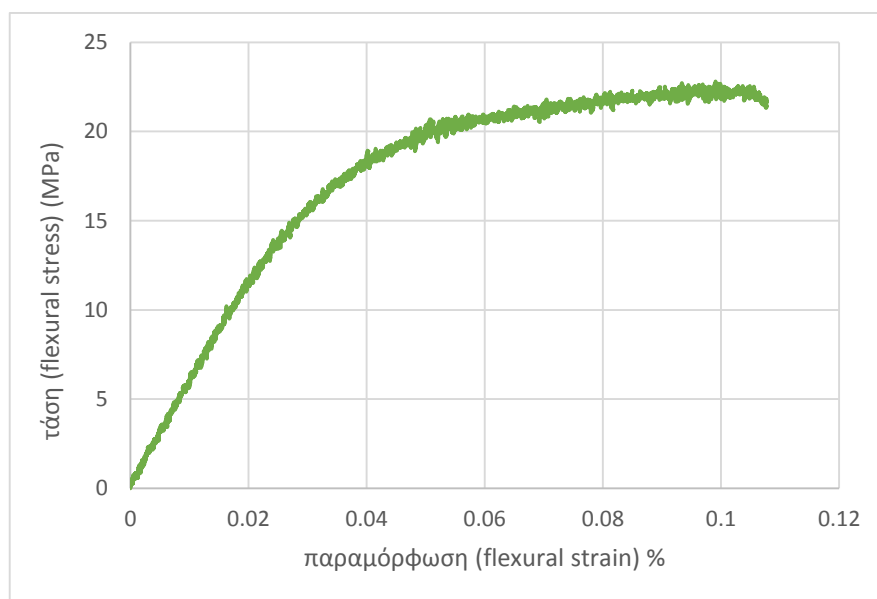
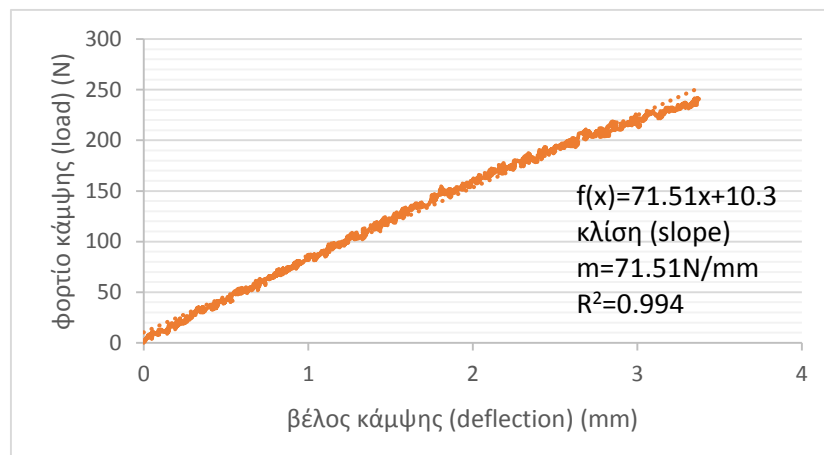
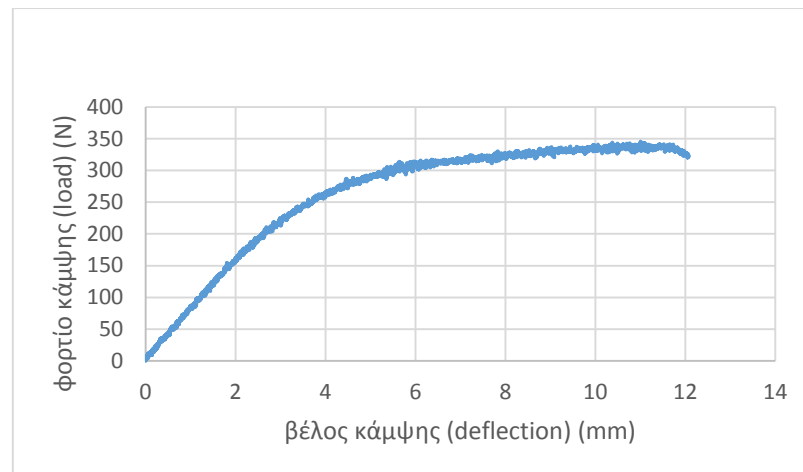
- **Δοκίμιο abs 0,25, προσανατολισμός χτισίματος 0°, α/δ (2)**



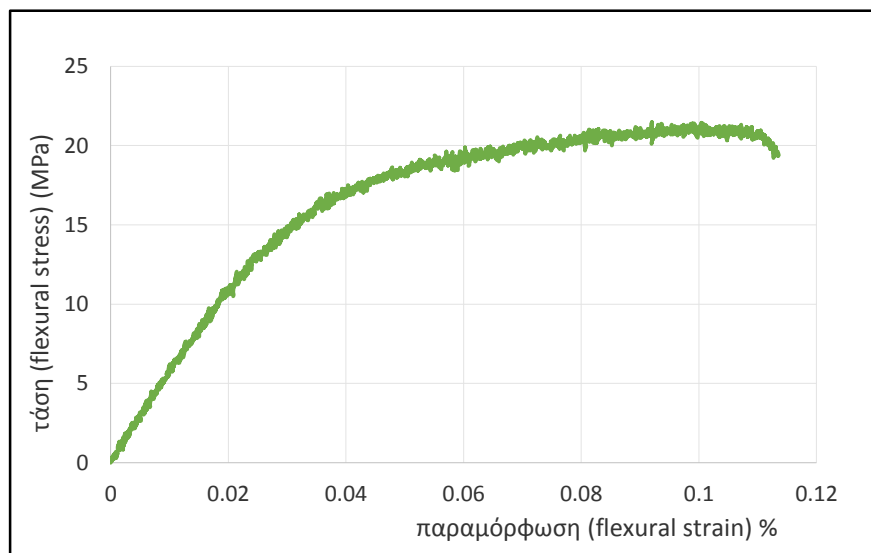
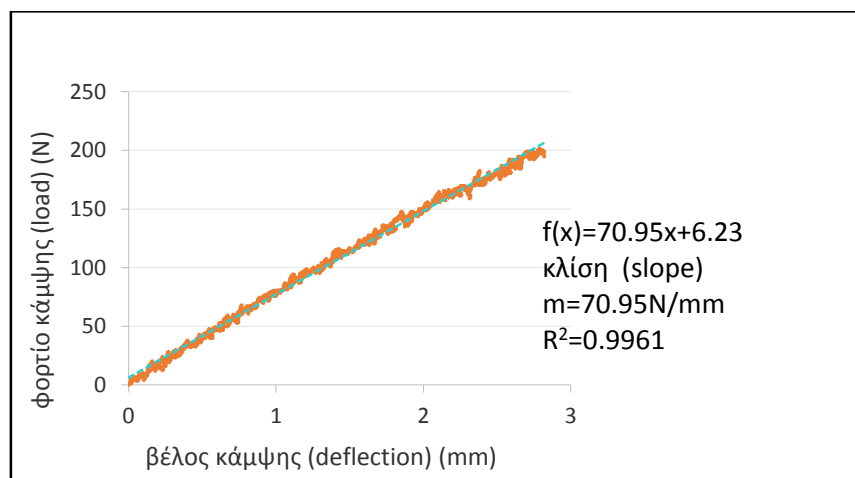
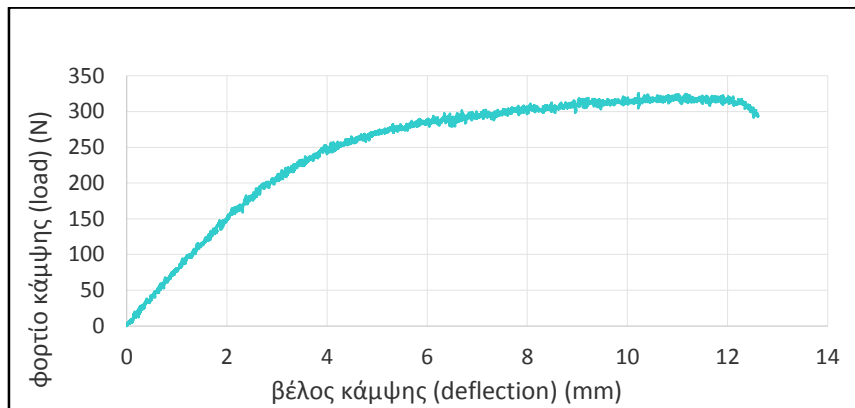
- **Δοκίμιο abs 0,25, προσανατολισμός χτισίματος 0°, α/δ (3)**



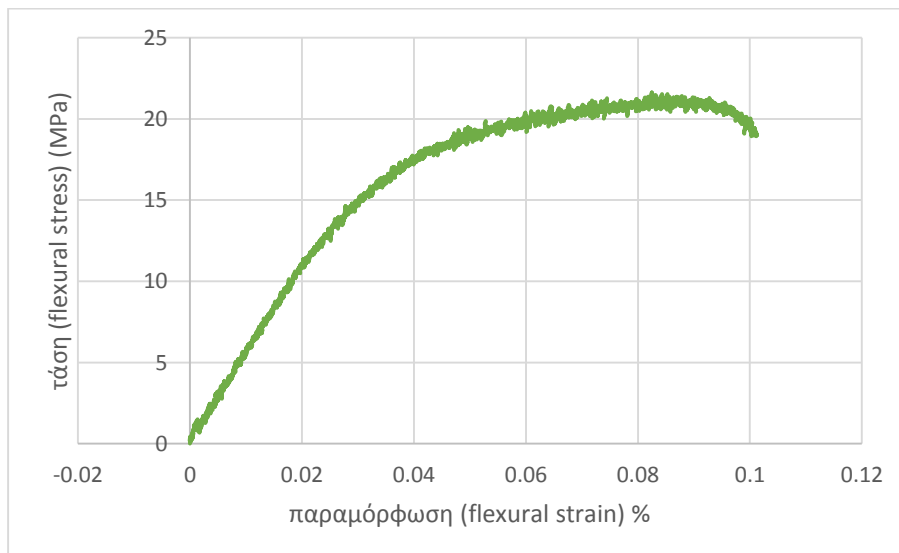
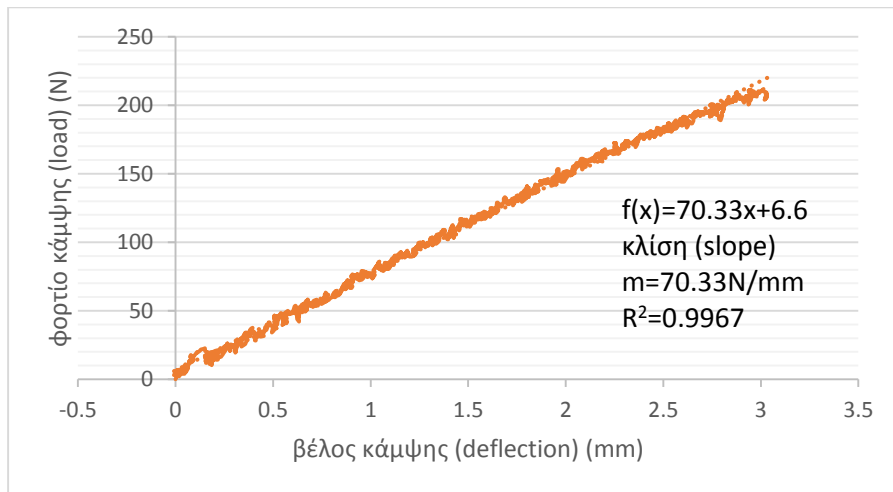
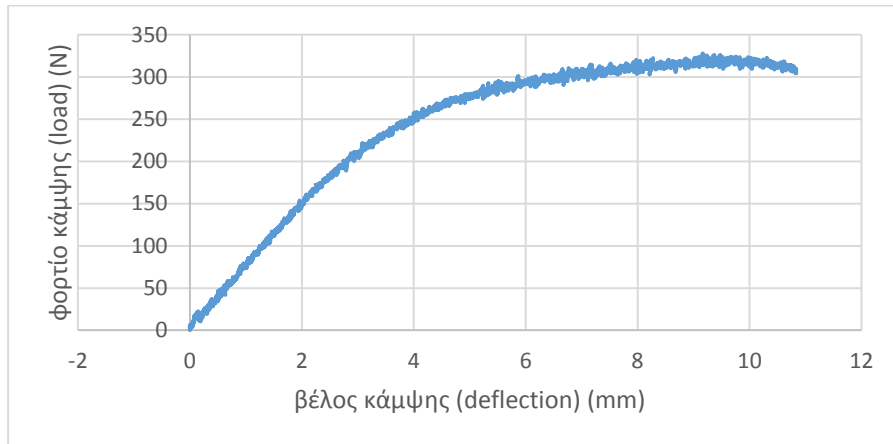
- Δοκίμιο abs 0,25, προσανατολισμός χτισίματος 0°, α/δ (4)



- **Δοκίμιο abs 0,25, προσανατολισμός χτισίματος 0°, α/δ (5)**

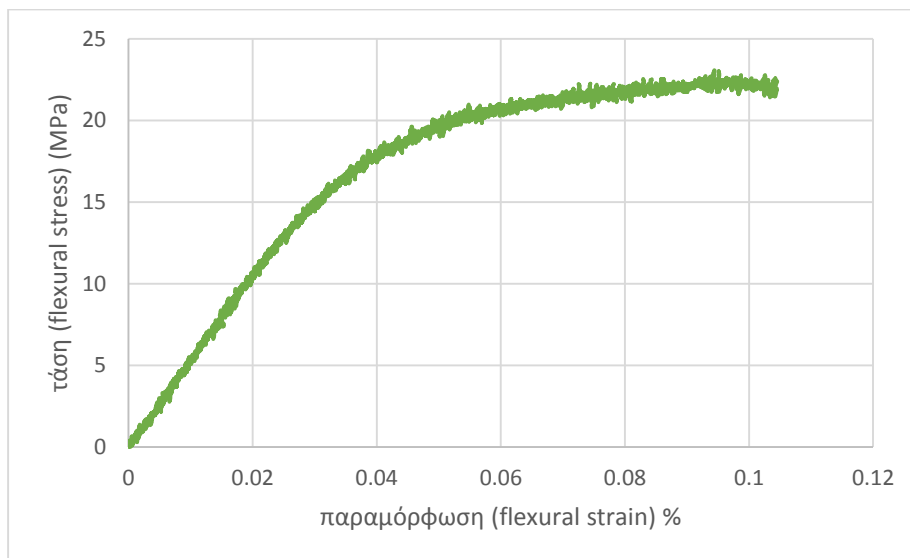
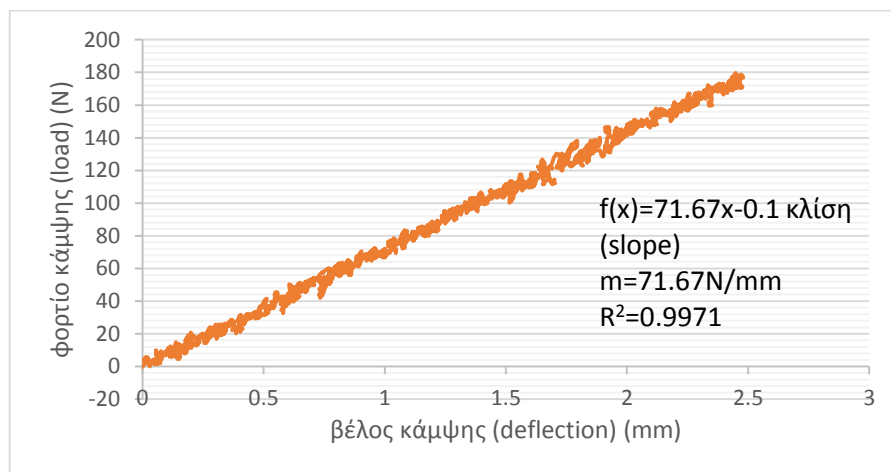
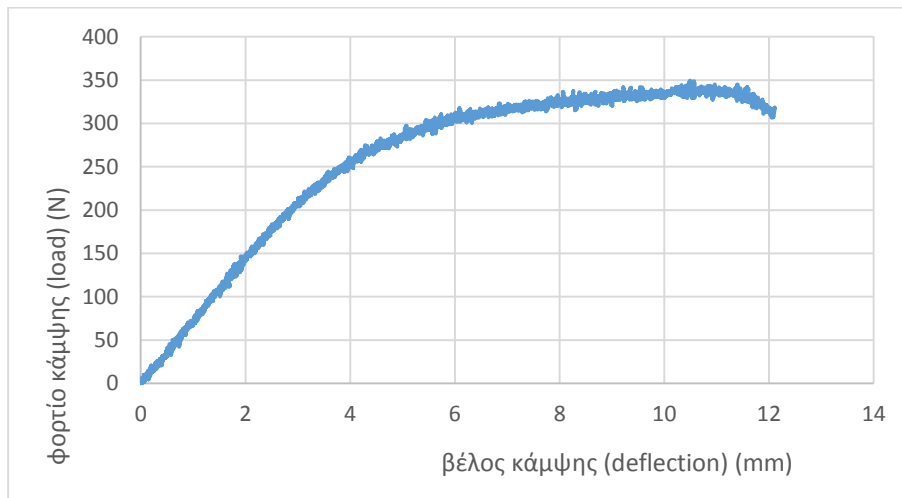


- **Δοκίμιο abs 0,33, προσανατολισμός χτισίματος 0°, α/δ (1)**

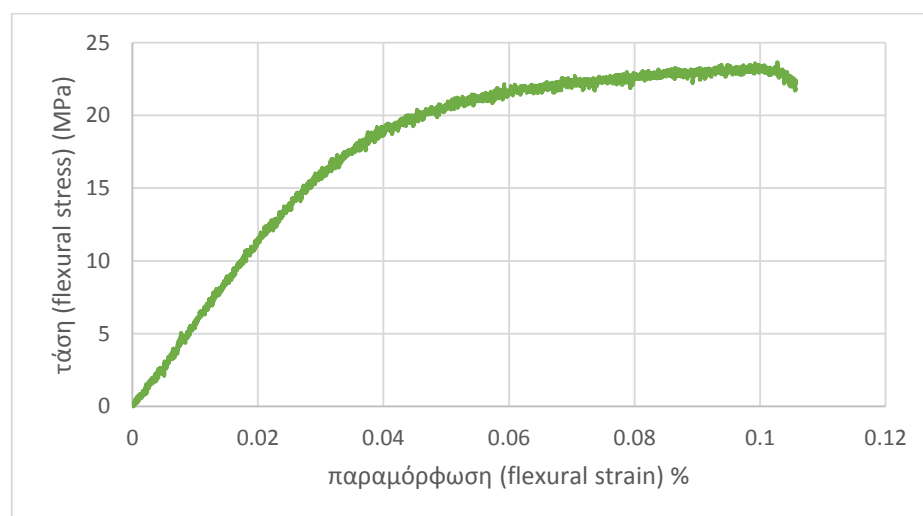
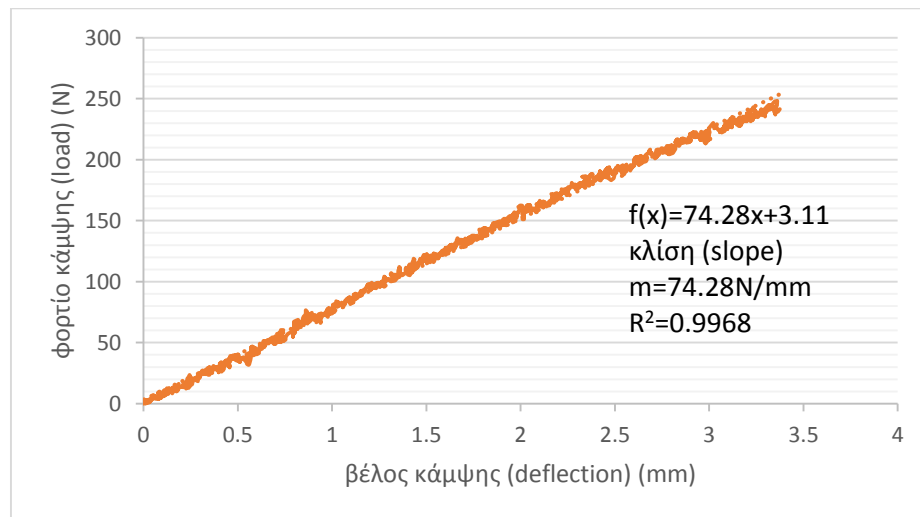
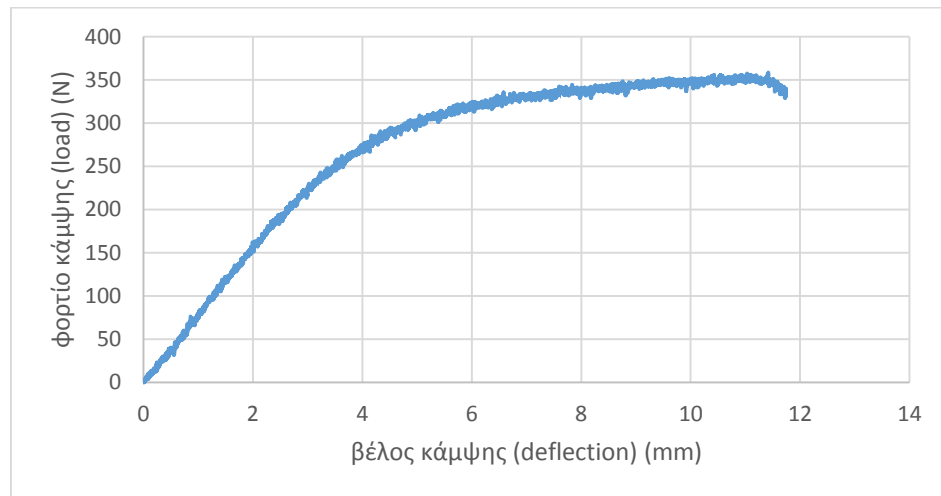




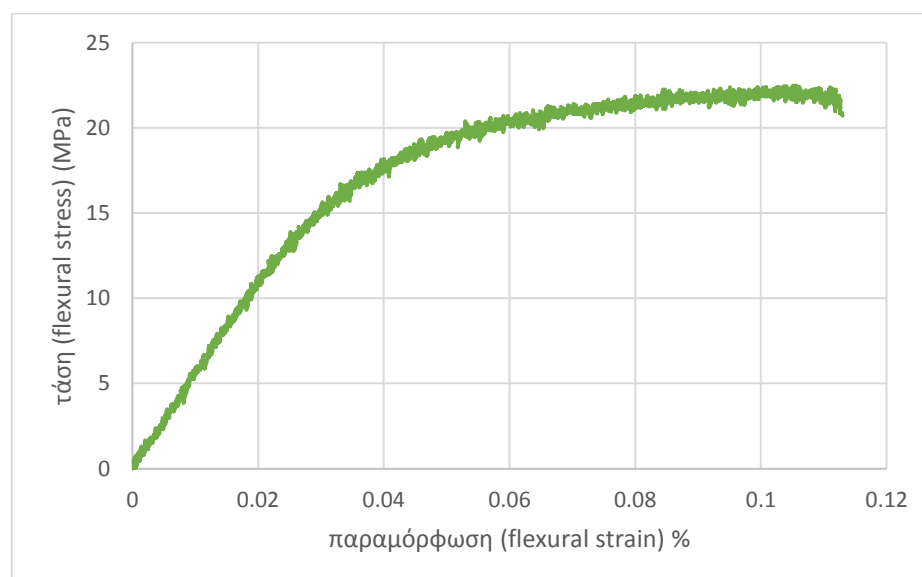
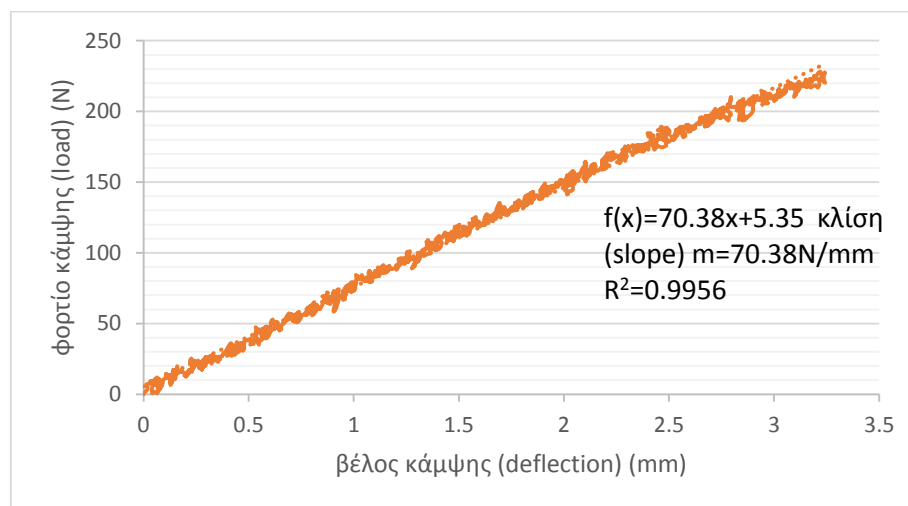
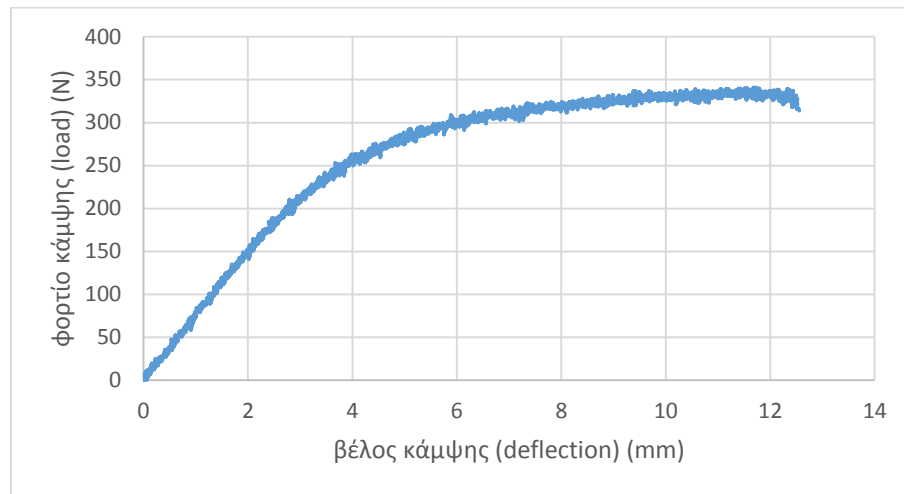
- **Δοκίμιο abs 0,33, προσανατολισμός χτισίματος 0°, α/δ (2)**



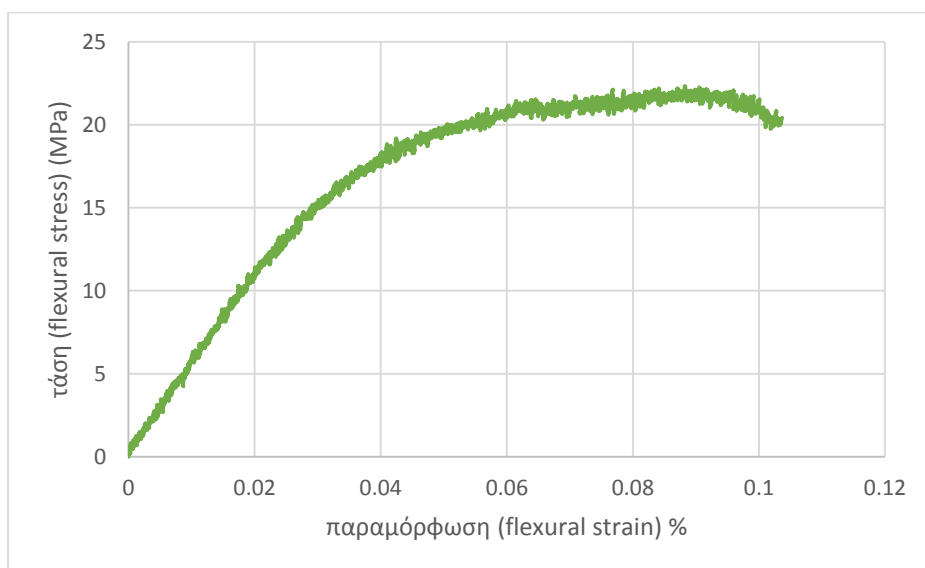
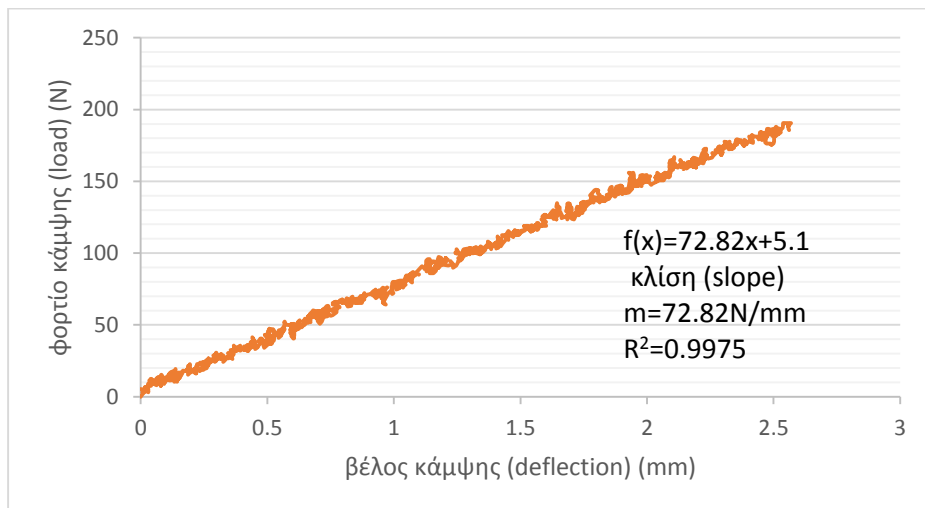
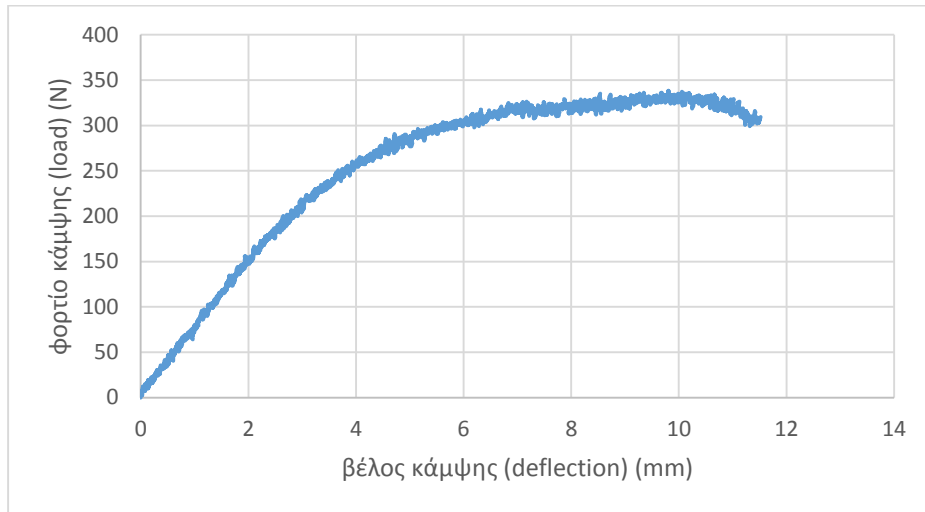
- **Δοκίμιο abs 0,33, προσανατολισμός χτισίματος 0°, α/δ (3)**



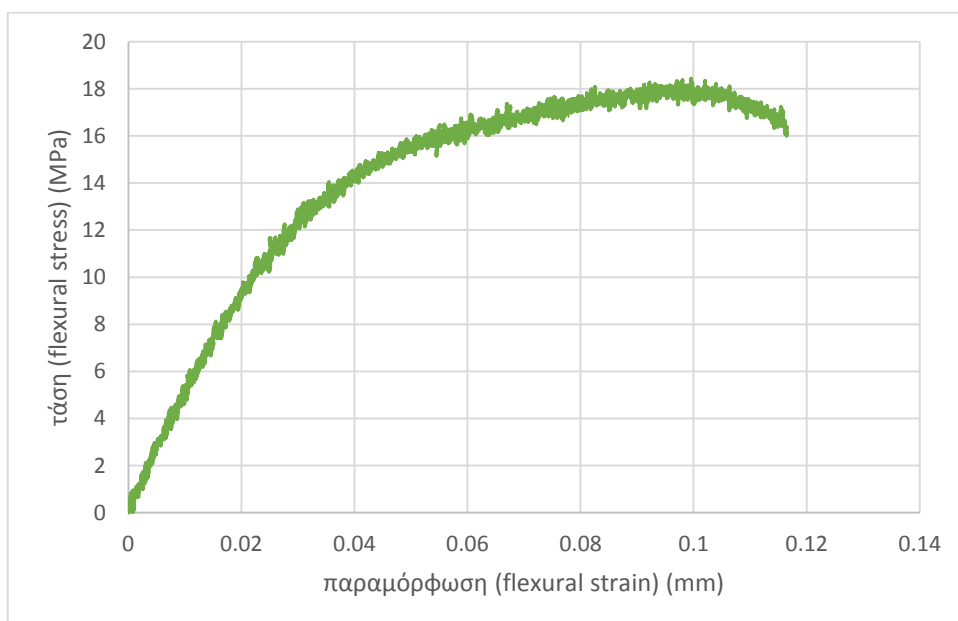
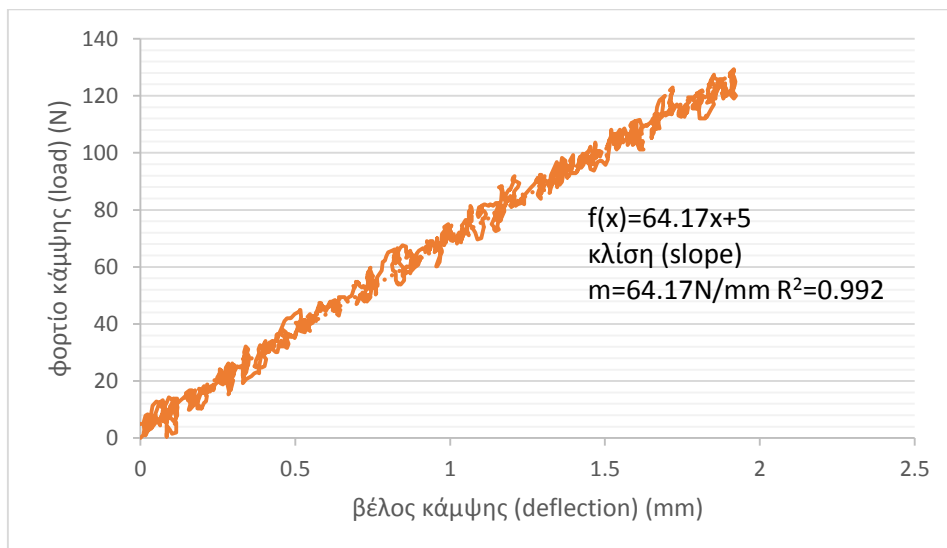
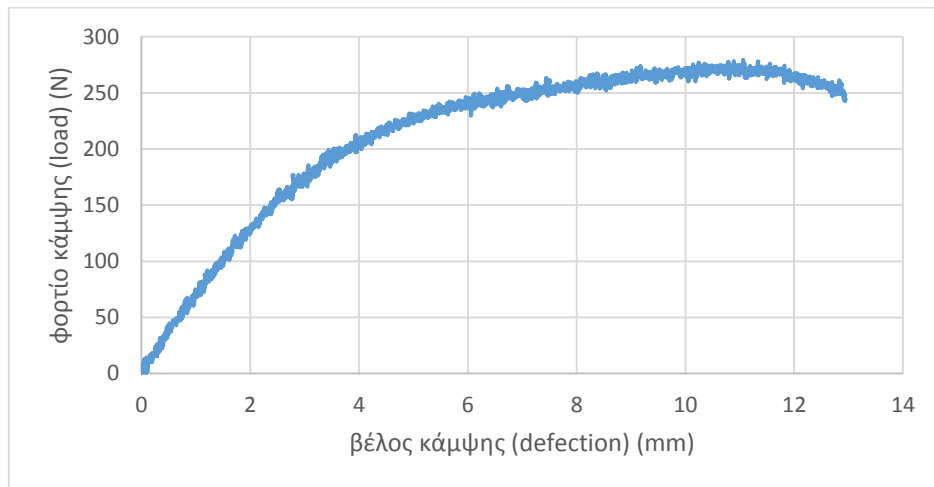
- **Δοκίμιο abs 0,33, προσανατολισμός χτισίματος 0°, α/δ (4)**



- **Δοκίμιο abs 0,33, προσανατολισμός χτισίματος 0°, α/δ (5)**

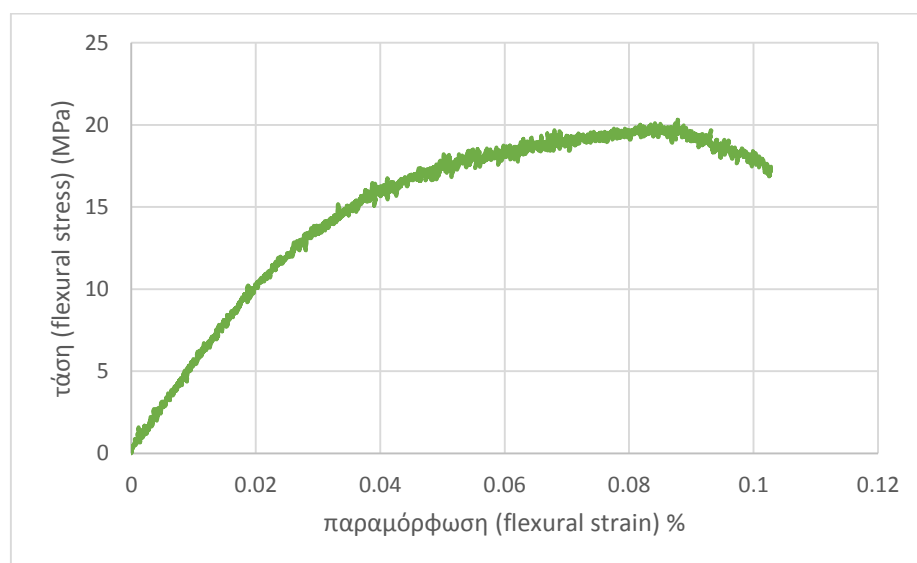
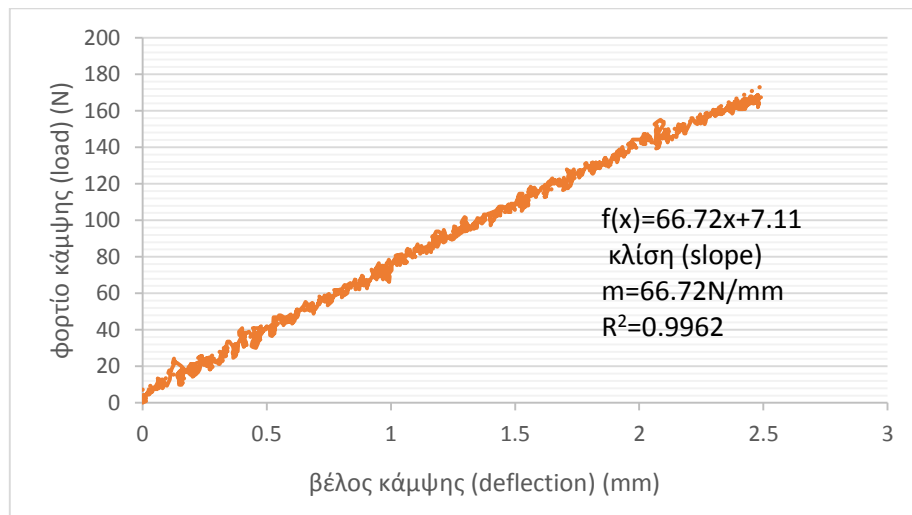
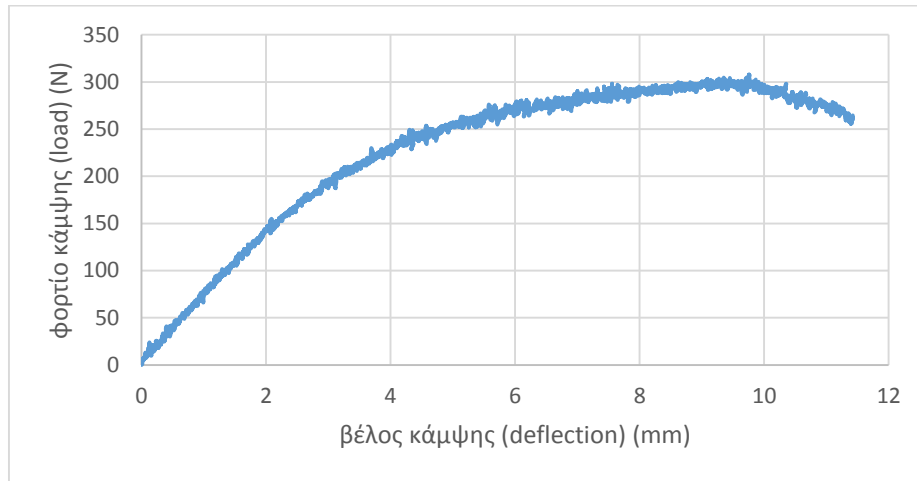


- **Δοκίμιο abs 0,33, προσανατολισμός χτισίματος 90°, α/δ (1)**

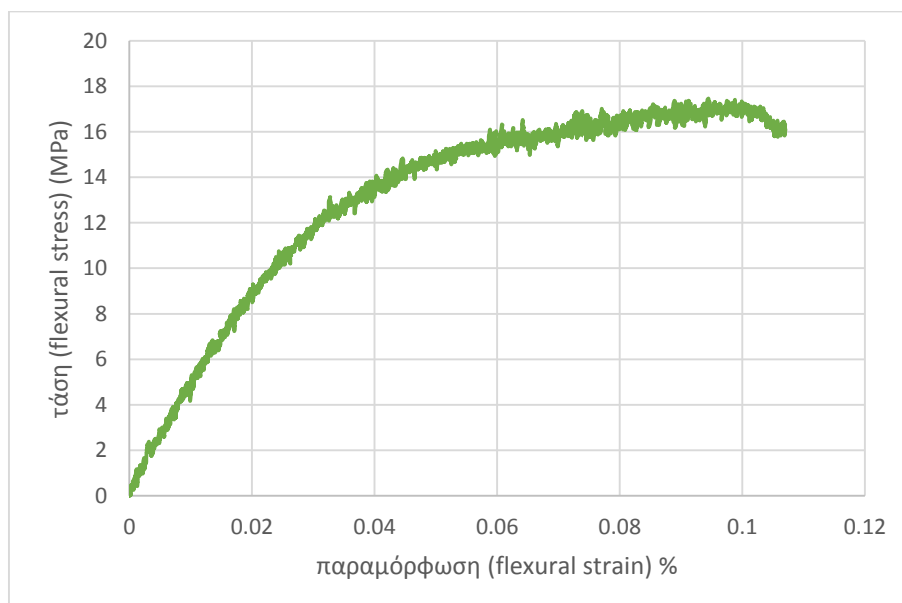
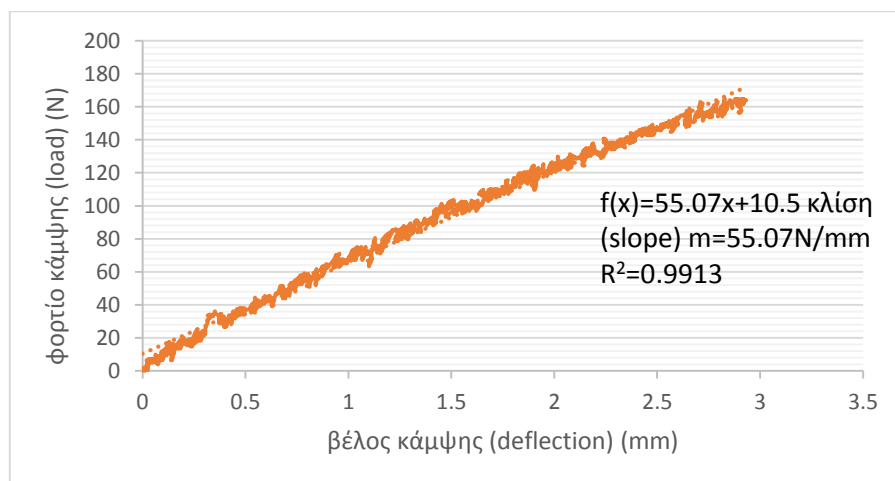
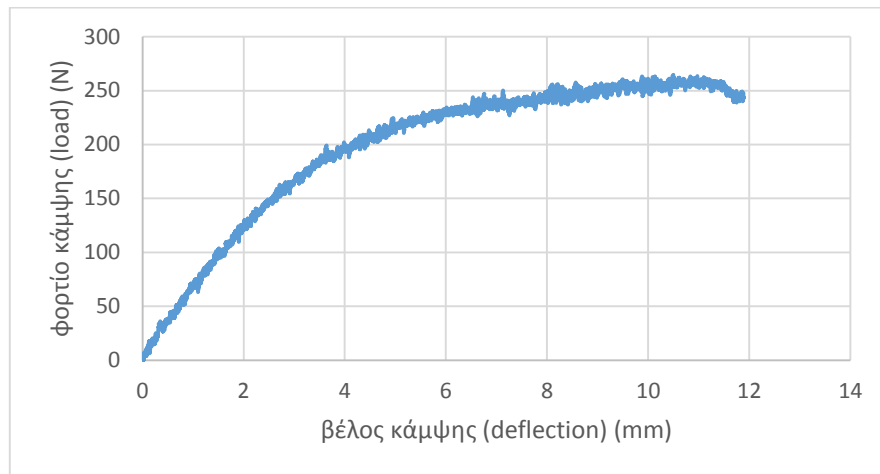


Μελέτη αντοχής δοκιμίου σε κάμψη κατασκευασμένου από υλικό Acrylonitrile Butadiene Styrene plus σε τρισδιάστατο εκτυπωτή

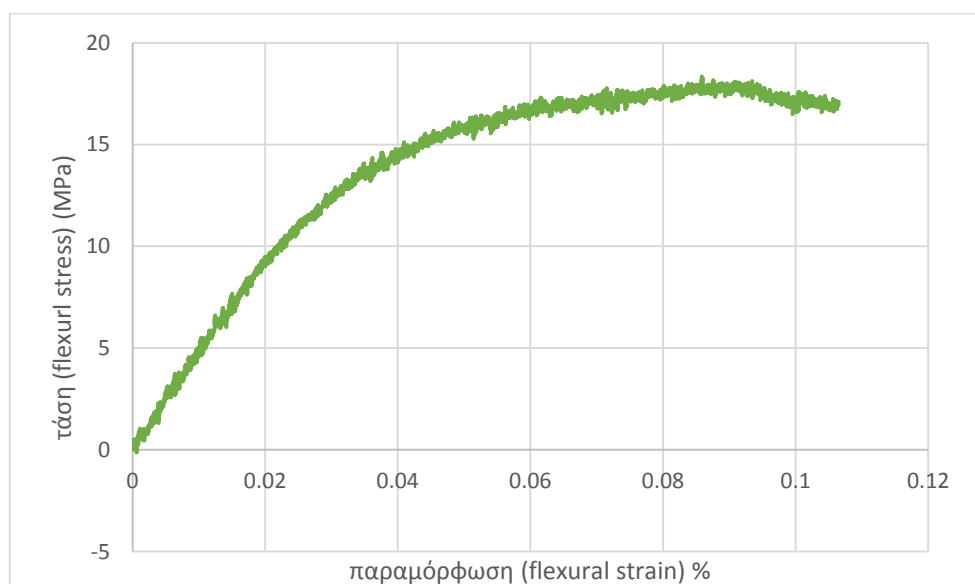
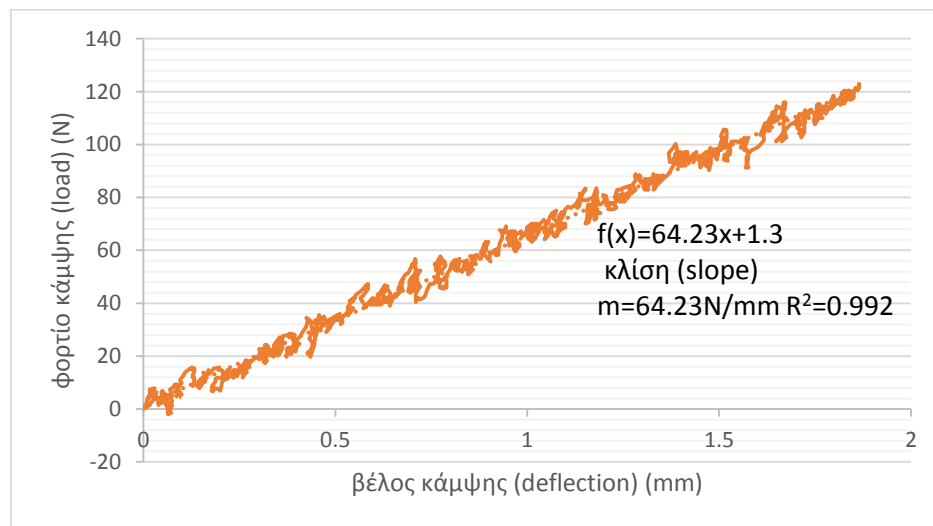
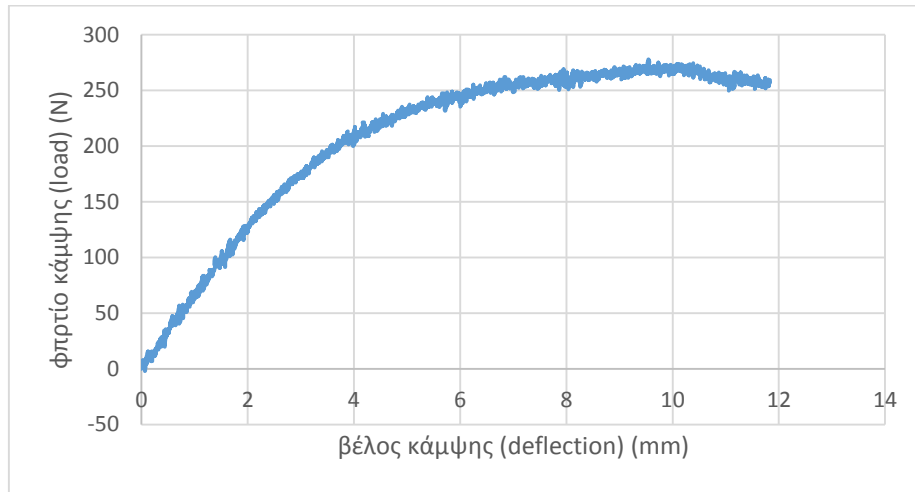
- **Δοκίμιο abs 0,33, προσανατολισμός χτισίματος 90°, α/δ (2)**



- Δοκίμιο abs 0,33, προσανατολισμός χτισίματος 90°, α/δ (3)

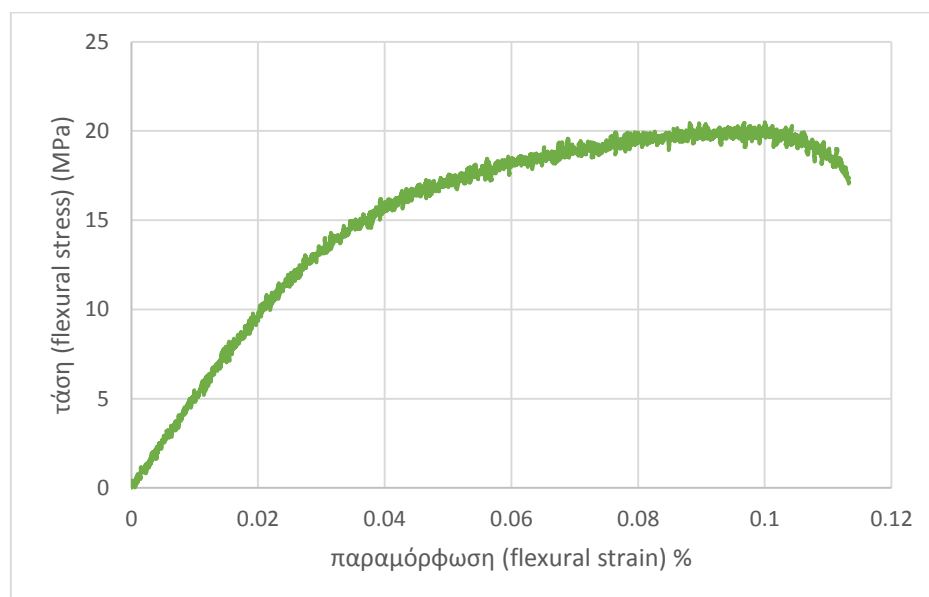
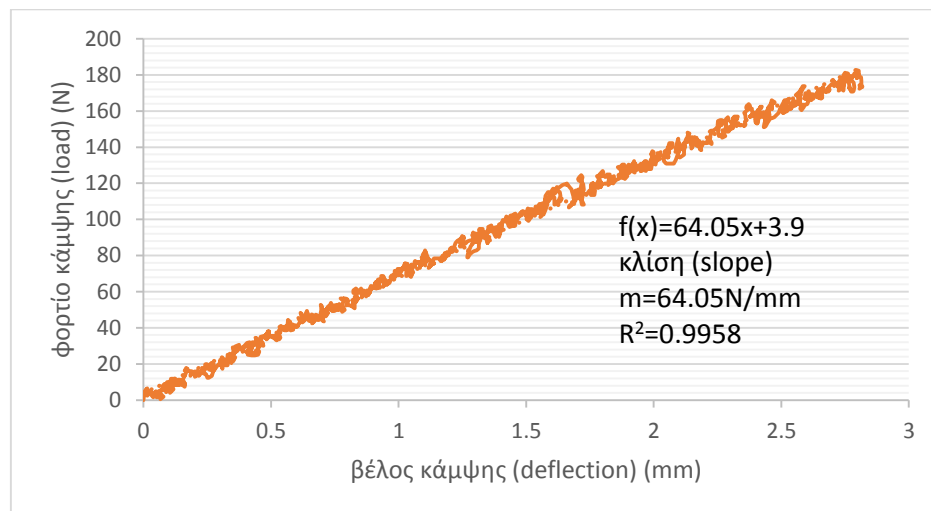
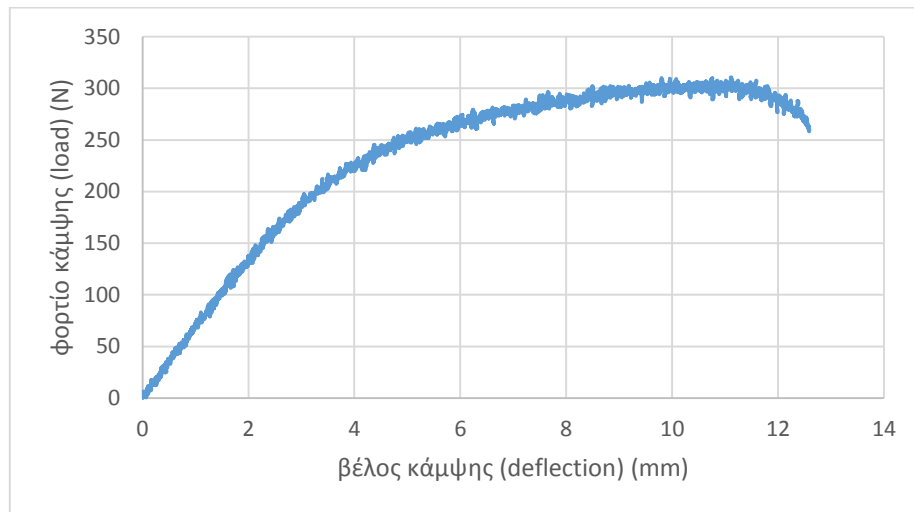


- **Δοκίμιο abs 0,33, προσανατολισμός χτισίματος 90°, α/δ (4)**

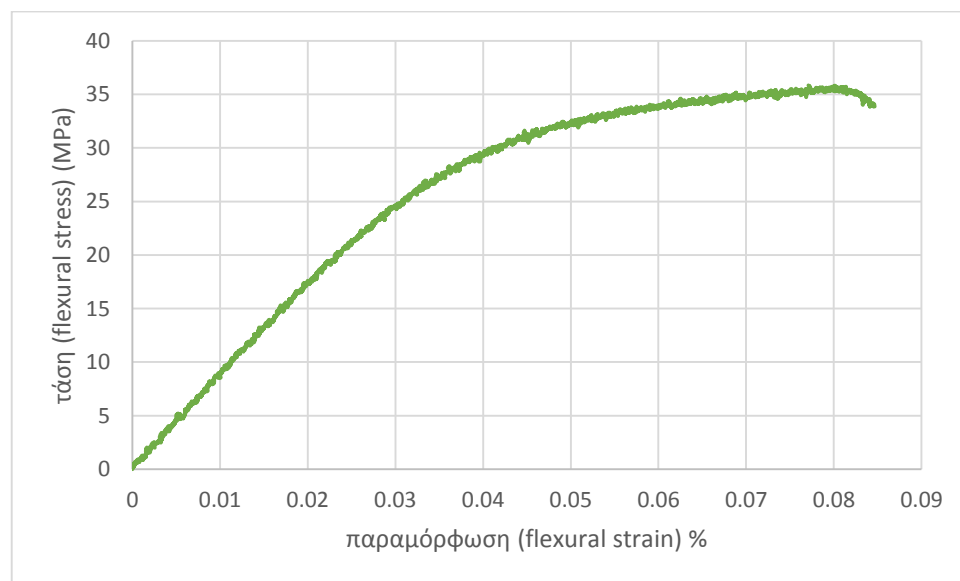
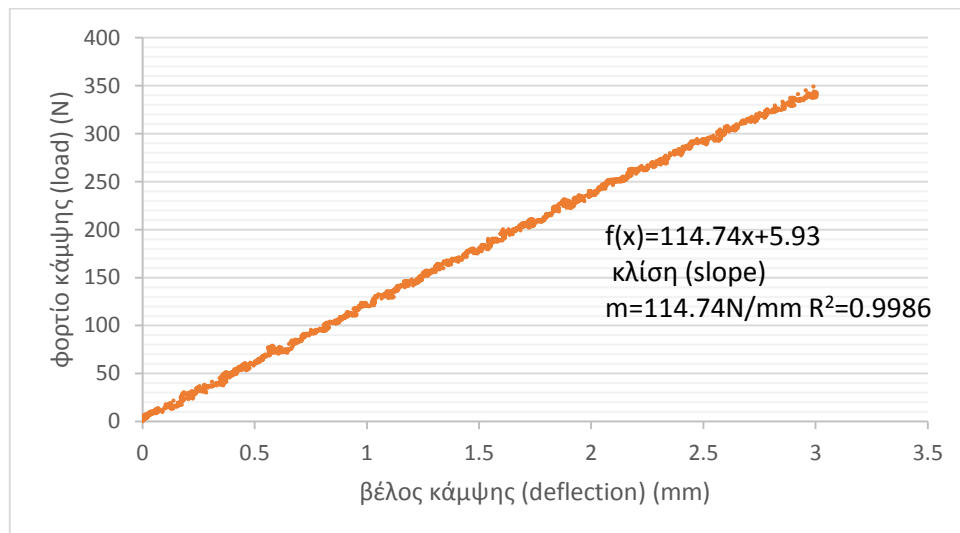
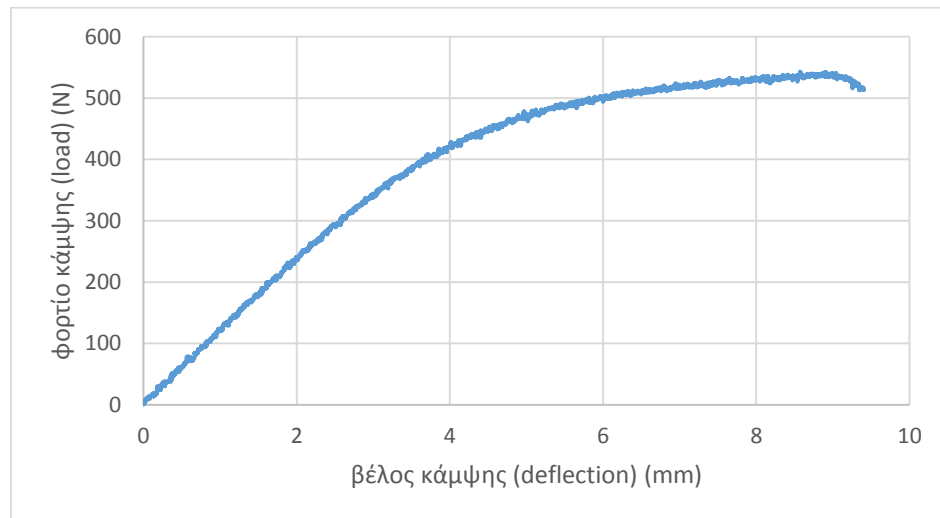




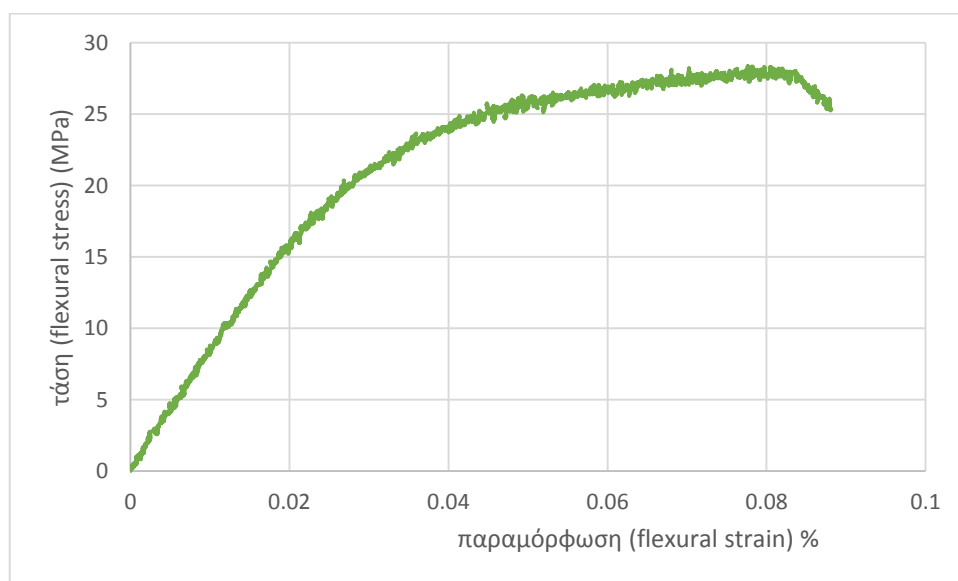
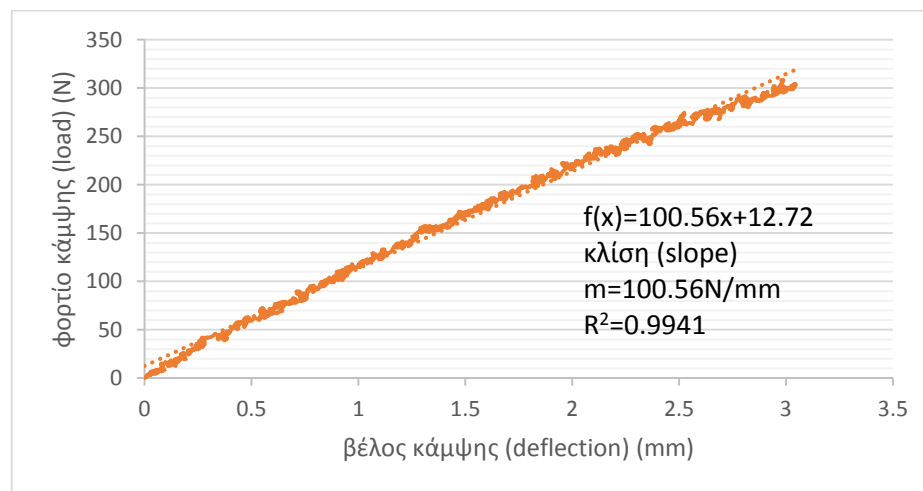
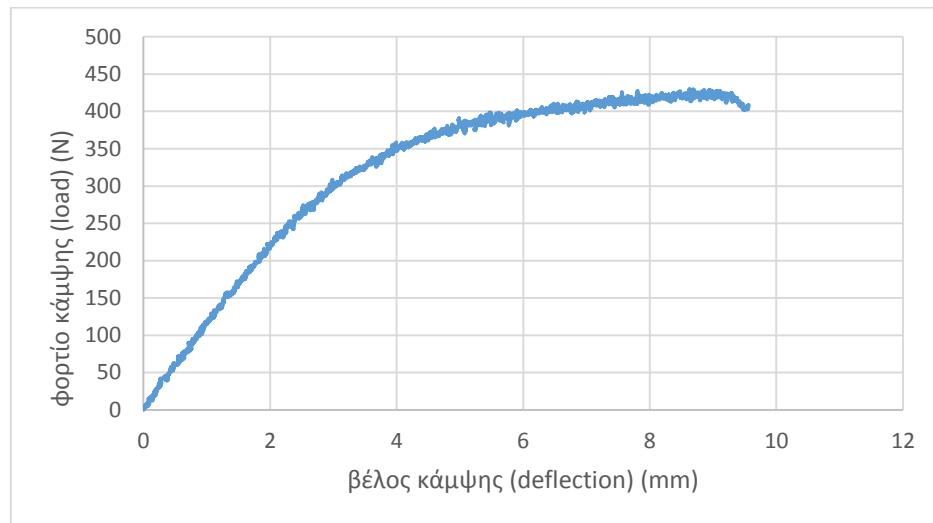
- **Δοκίμιο abs 0,33, προσανατολισμός χτισίματος 90°, α/δ (5)**



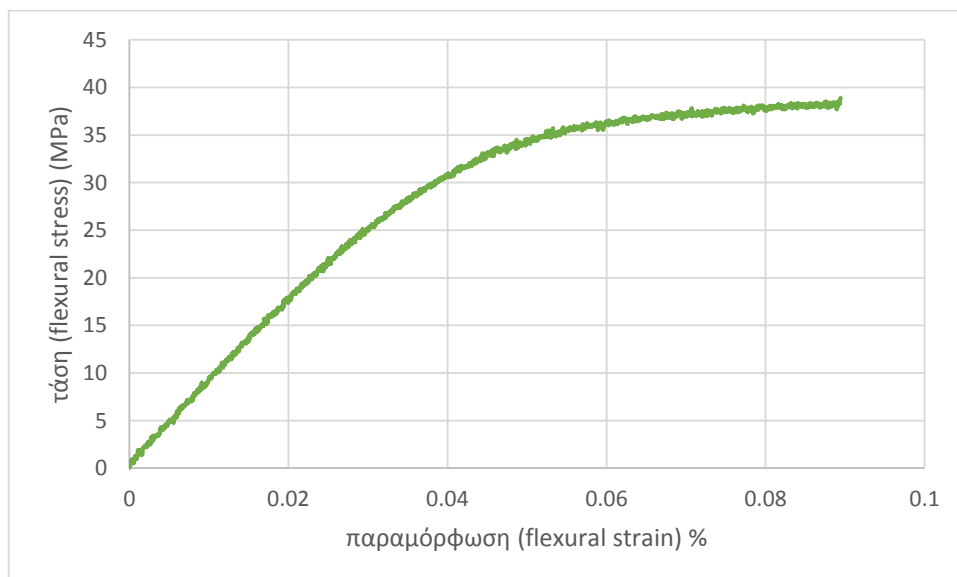
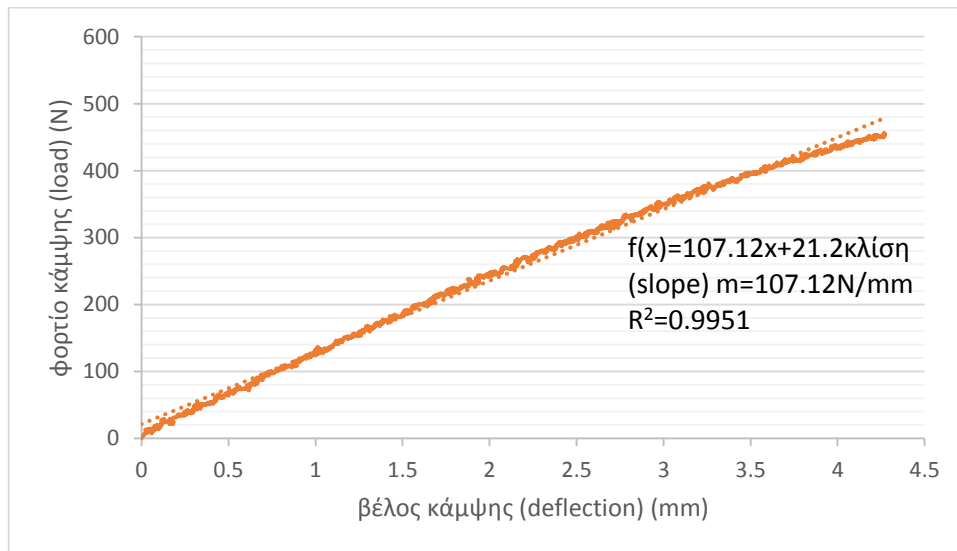
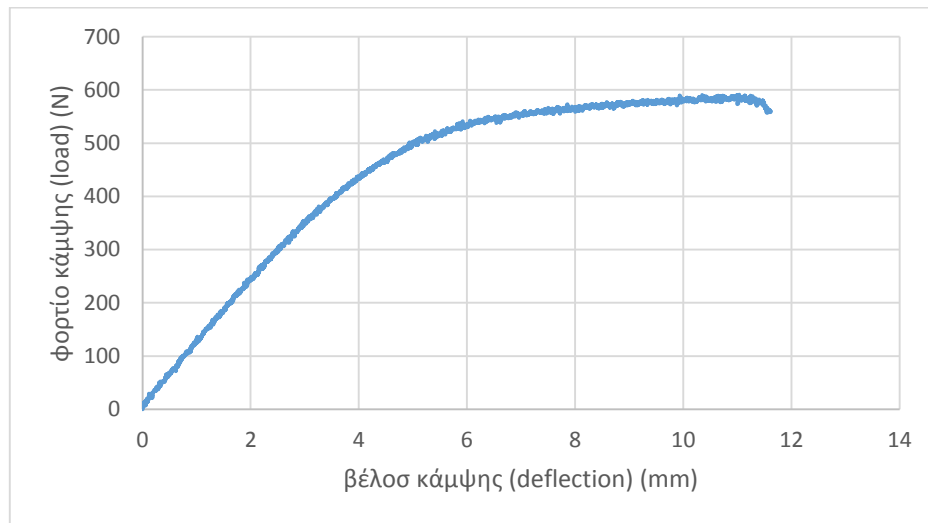
- **Δοκίμιο abs plus 0,25, προσανατολισμός χτισίματος 0°, α/δ (1)**



- **Δοκίμιο abs plus 0,25, προσανατολισμός χτισίματος 0°, α/δ (2)**

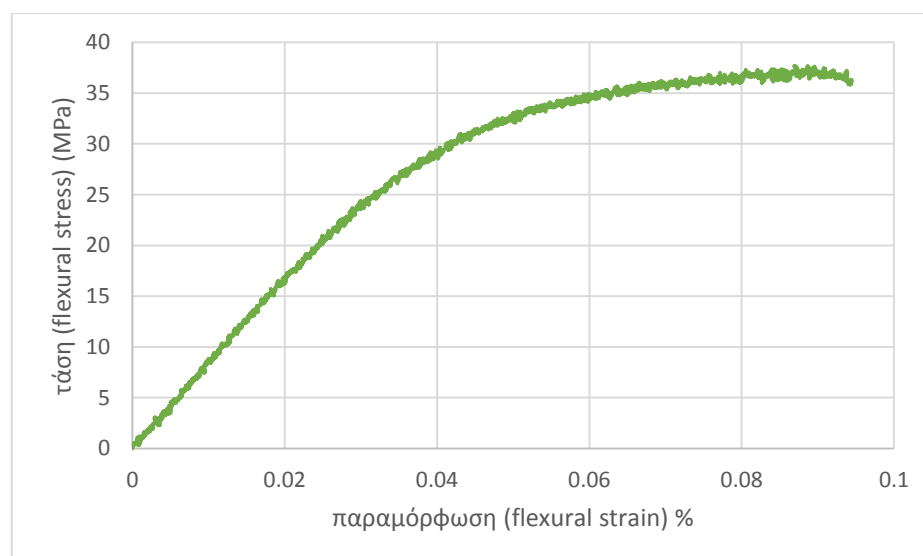
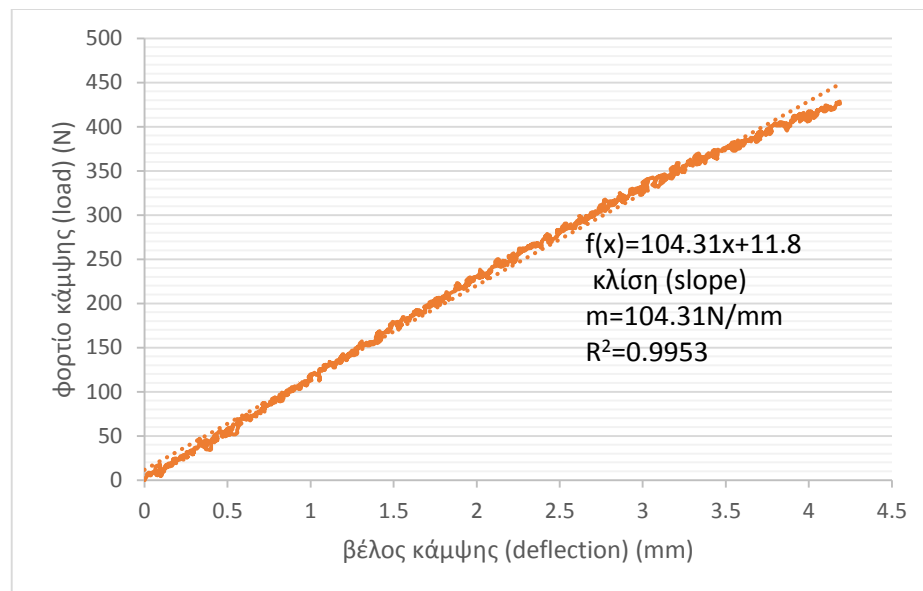
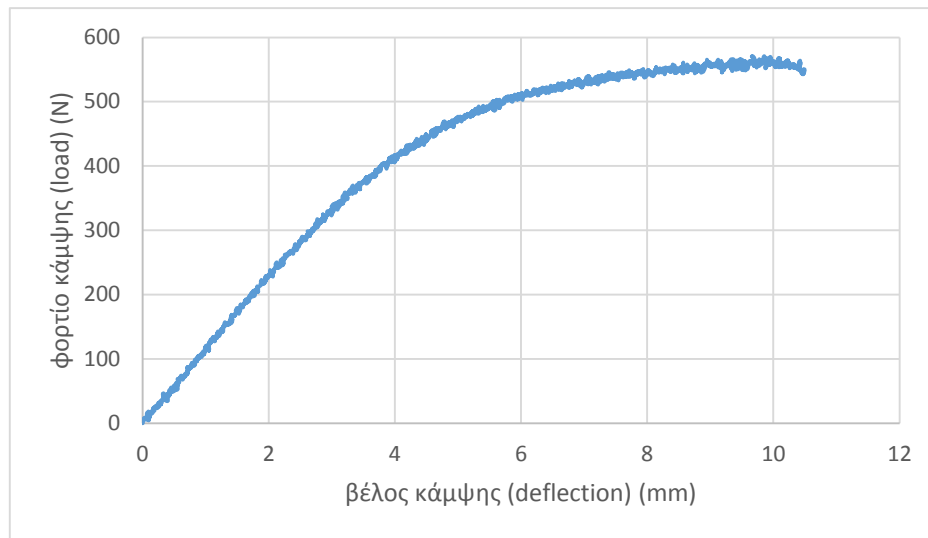


- **Δοκίμιο abs plus 0,25, προσανατολισμός χτισίματος 0°, α/δ (3)**

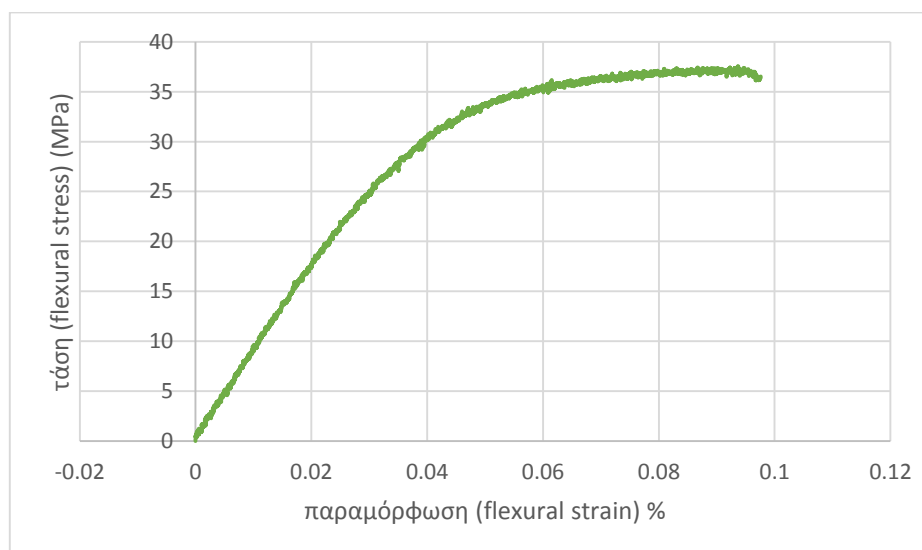
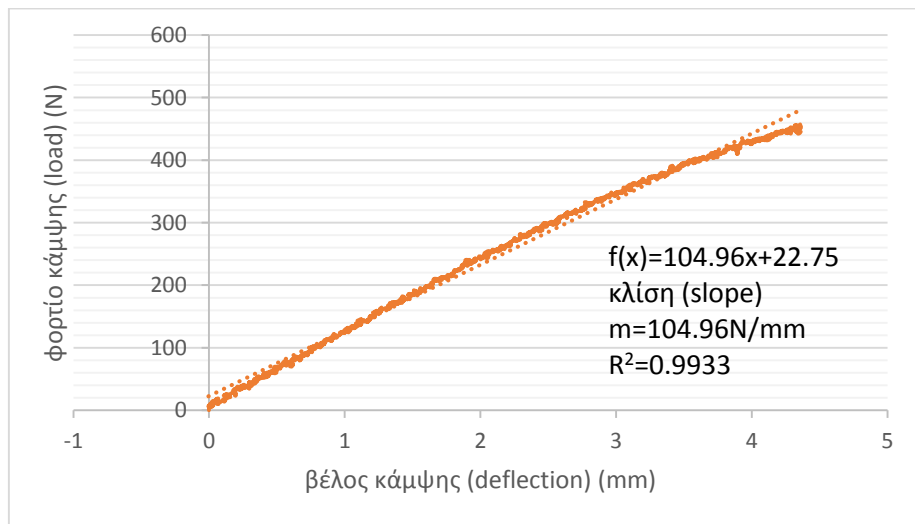
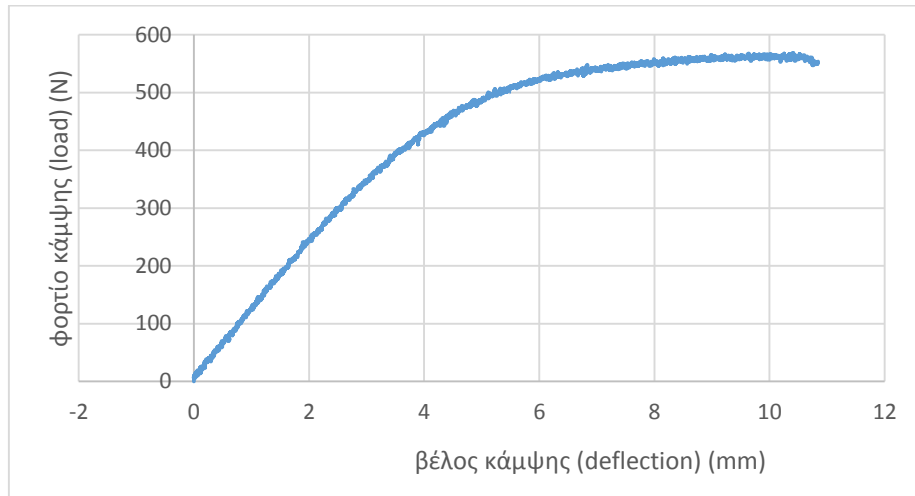


Μελέτη αντοχής δοκίμιου σε κάμψη κατασκευασμένου από υλικό Acrylonitrile Butadiene Styrene plus σε τρισδιάστατο εκτυπωτή

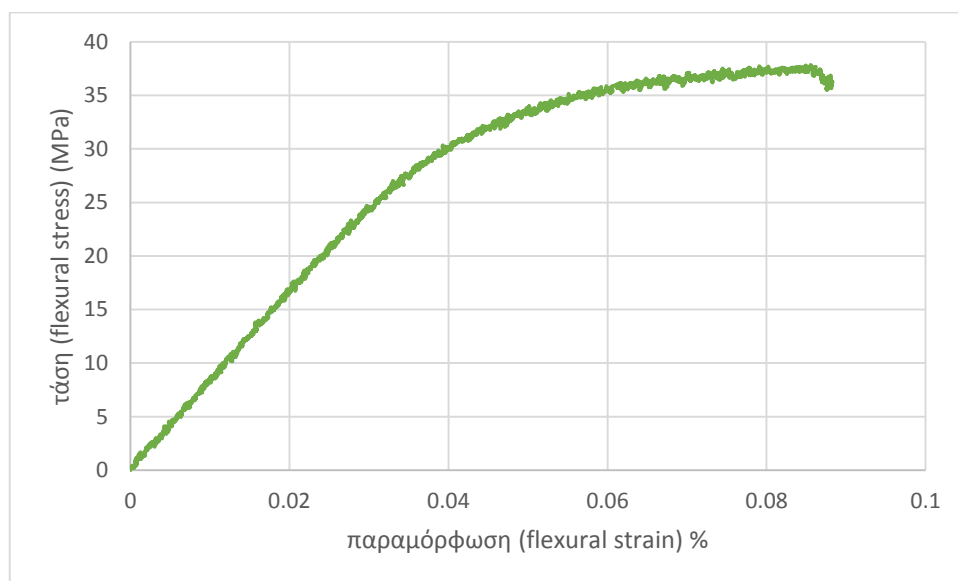
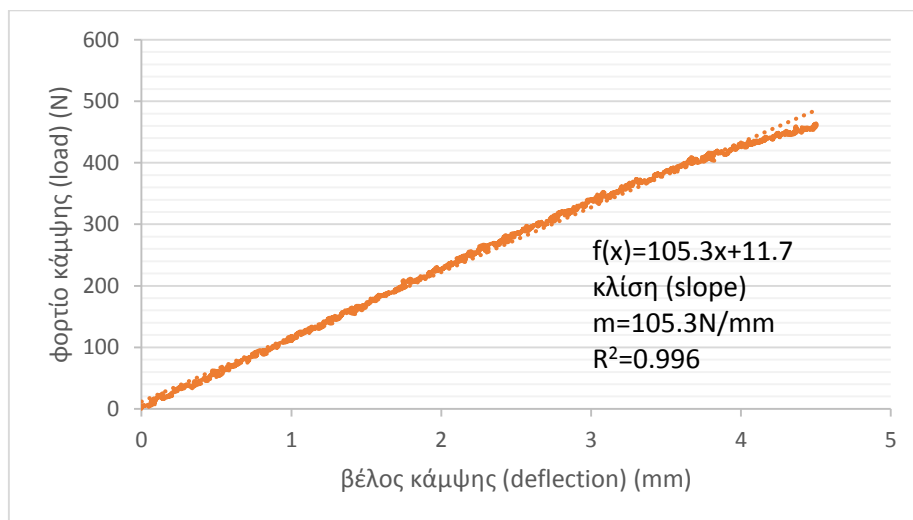
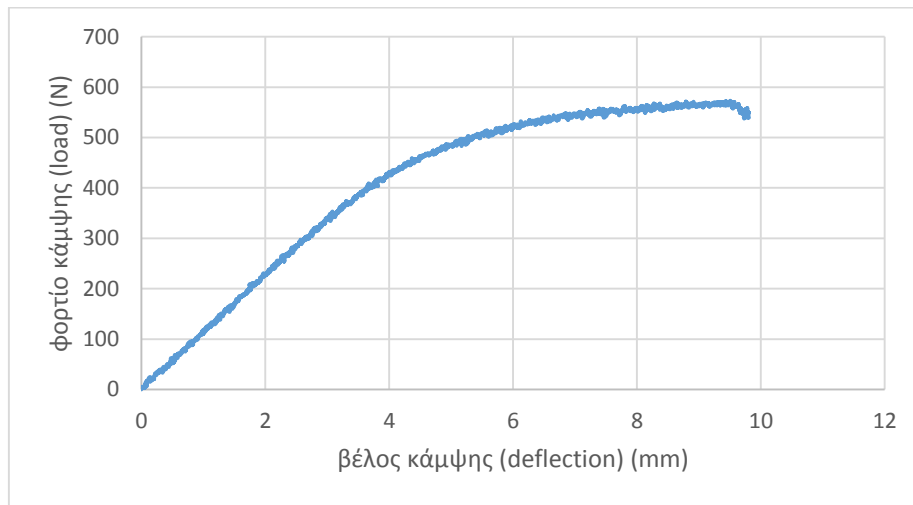
- **Δοκίμιο abs plus 0,25, προσανατολισμός χτισίματος 0°, α/δ (4)**



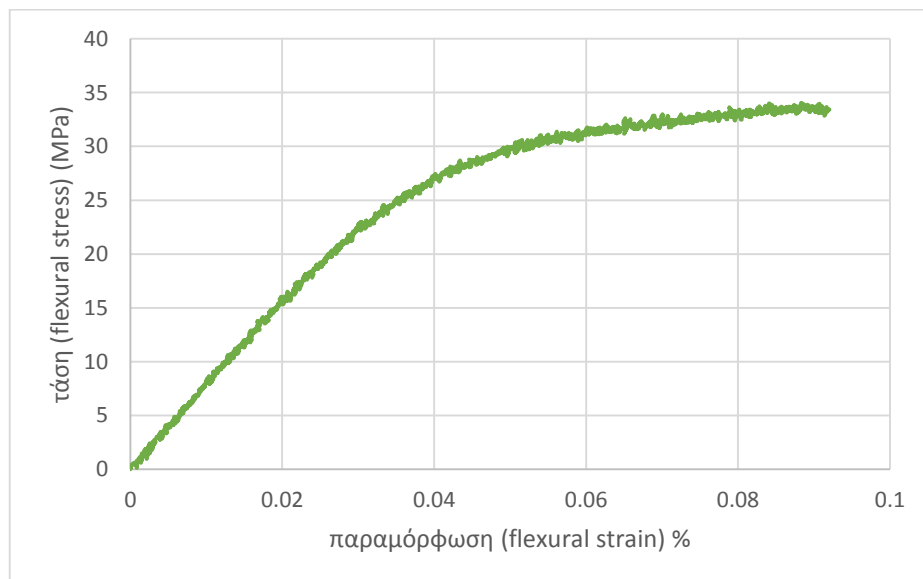
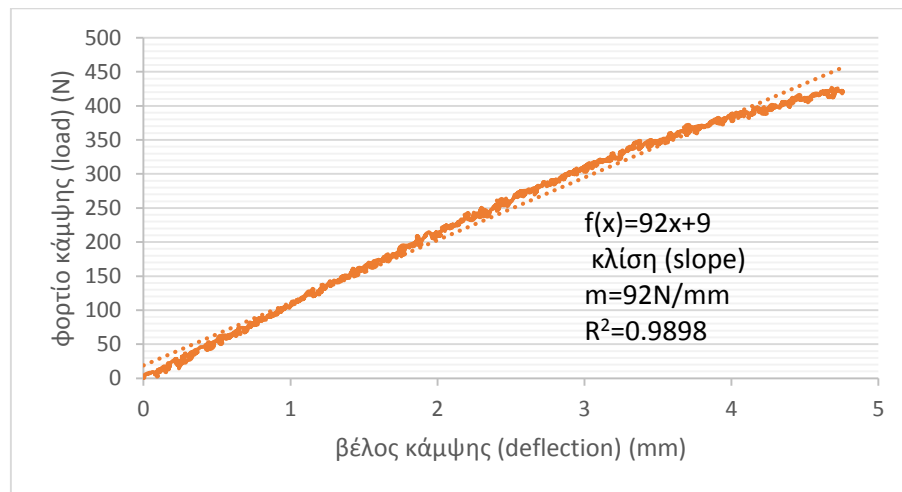
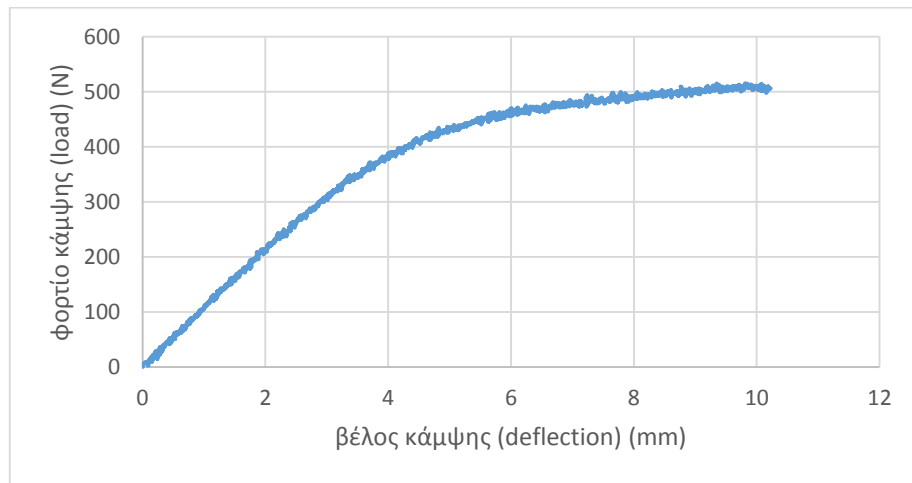
- Δοκίμιο abs plus 0,25, προσανατολισμός χτισίματος 0°, α/δ (5)



- Δοκίμιο abs plus 0,25, προσανατολισμός χτισίματος 90°, α/δ (1)

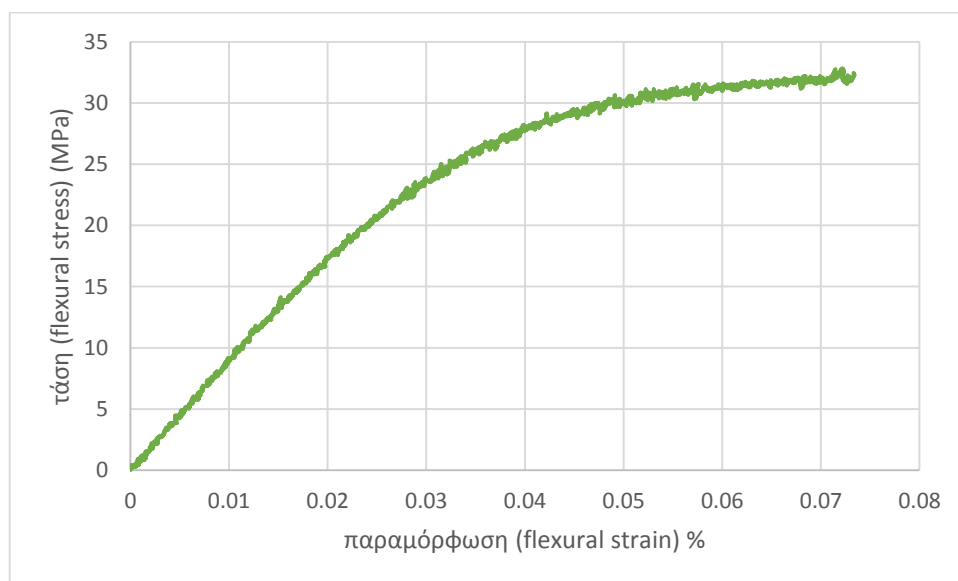
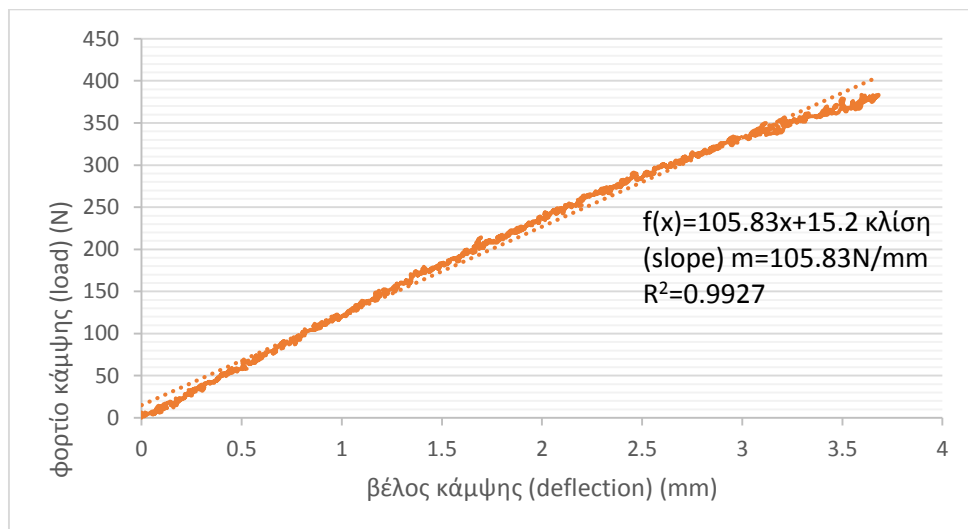
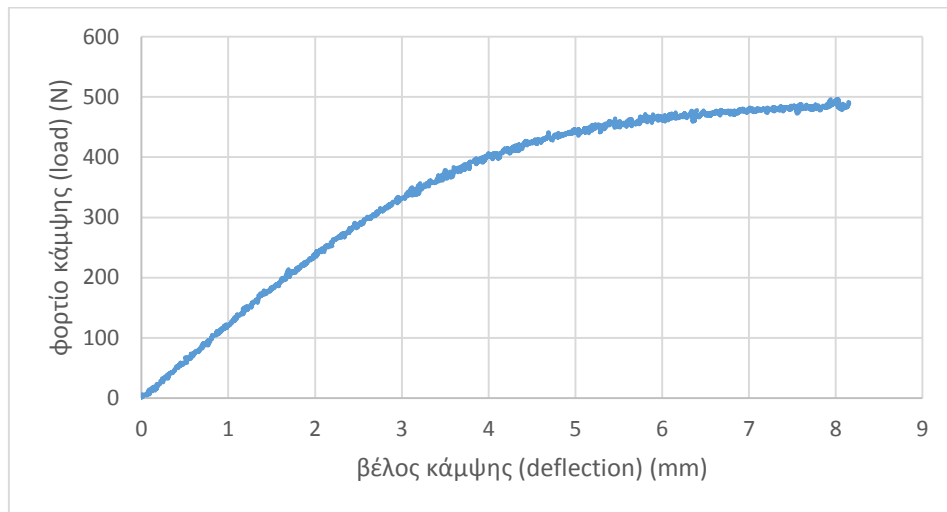


- Δοκίμιο abs plus 0,25, προσανατολισμός χτισίματος 90°, α/δ (2)

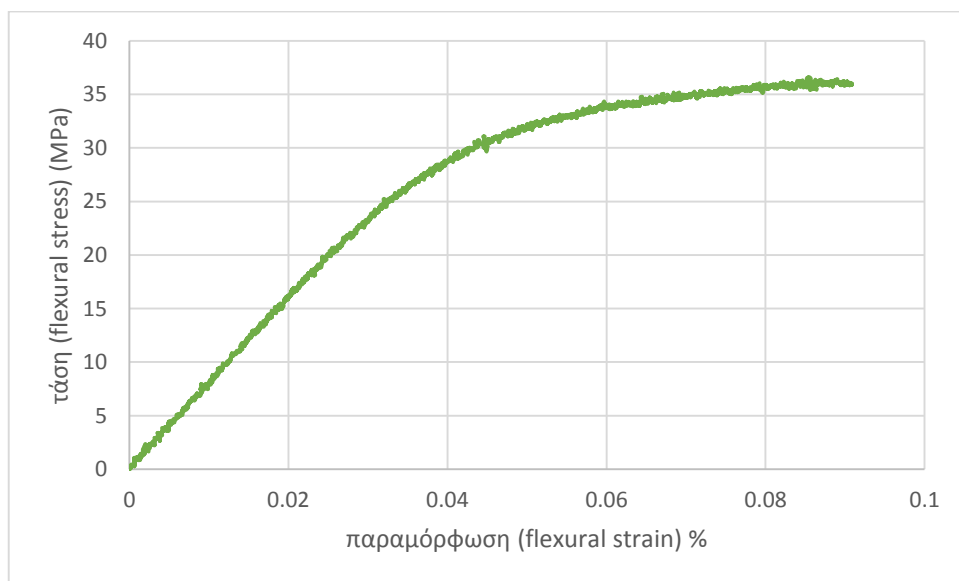
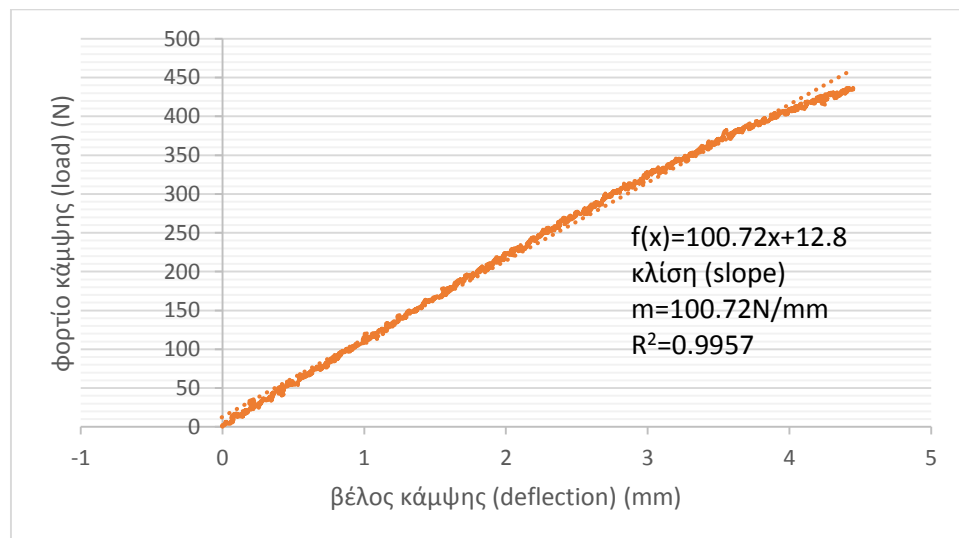
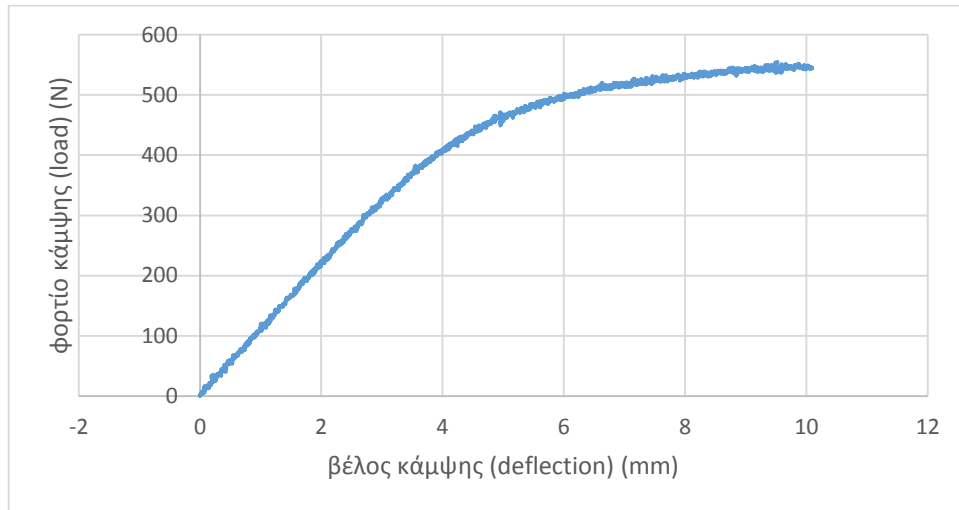




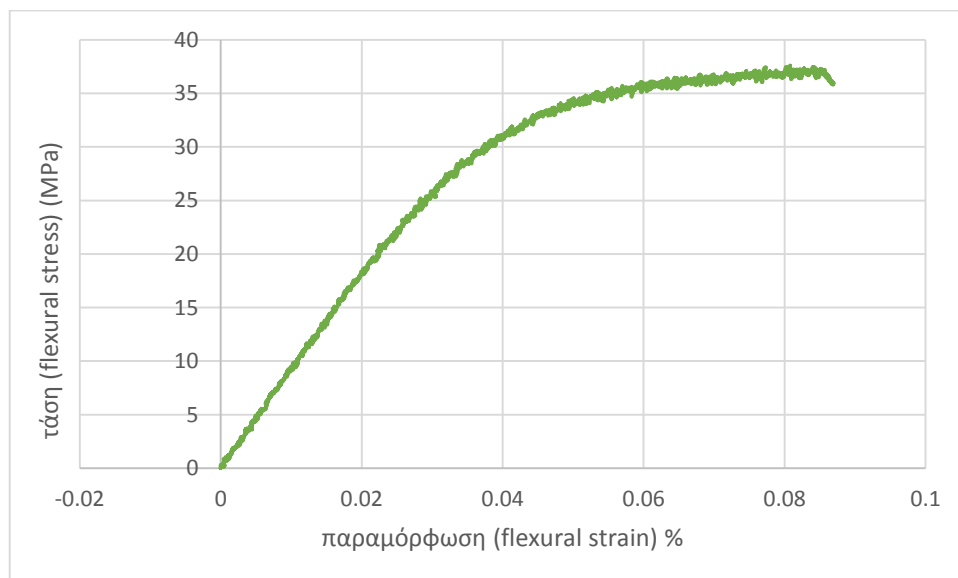
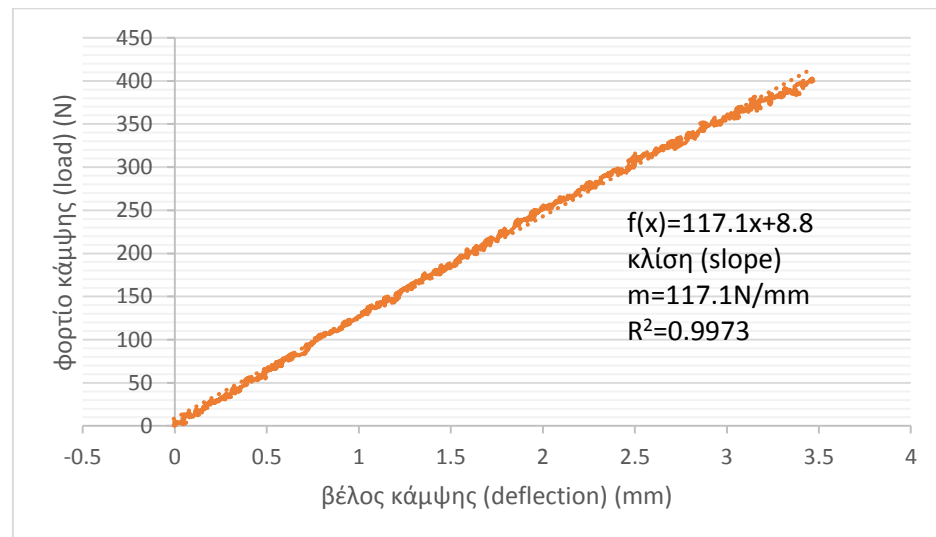
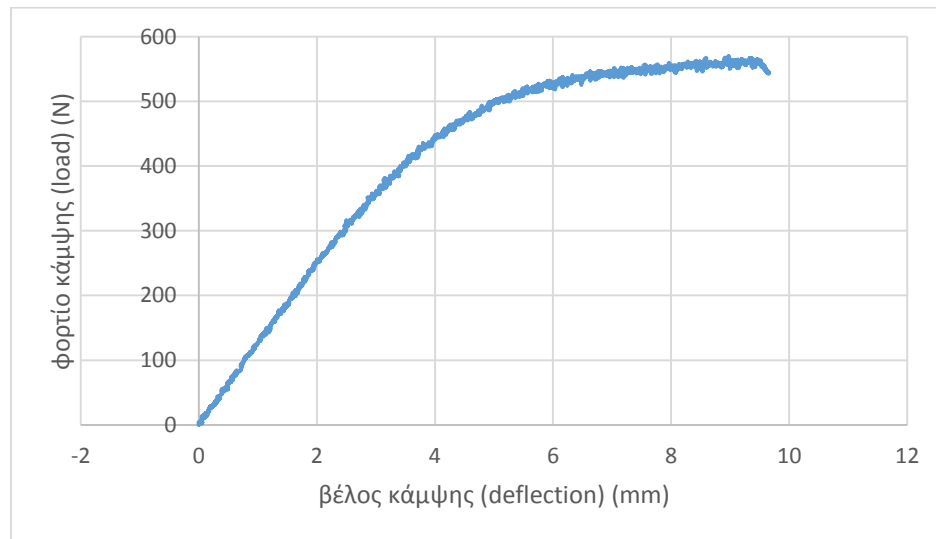
- **Δοκίμιο abs plus 0,25, προσανατολισμός χτισίματος 90°, α/δ (3)**



- Δοκίμιο abs plus 0,25, προσανατολισμός χτισίματος 90°, α/δ (4)

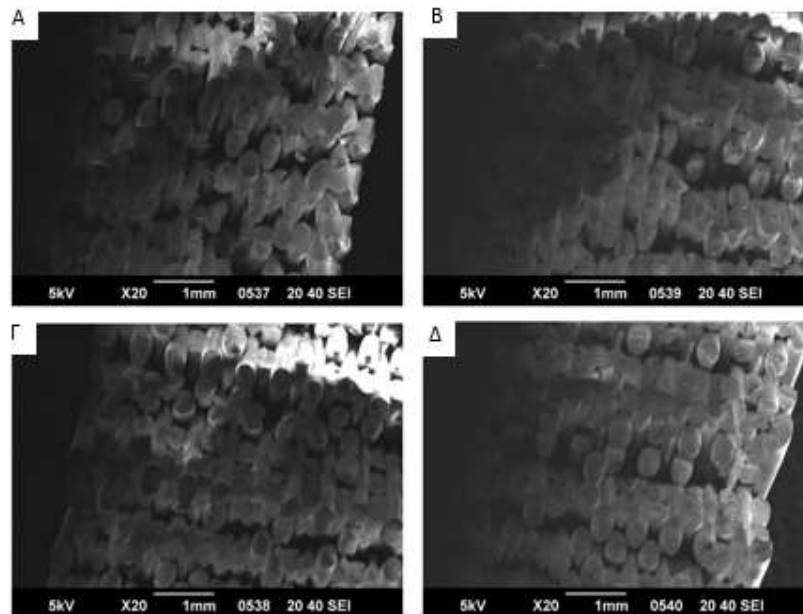


- Δοκίμιο abs plus 0,25, προσανατολισμός χτισίματος 90°, α/δ (5)



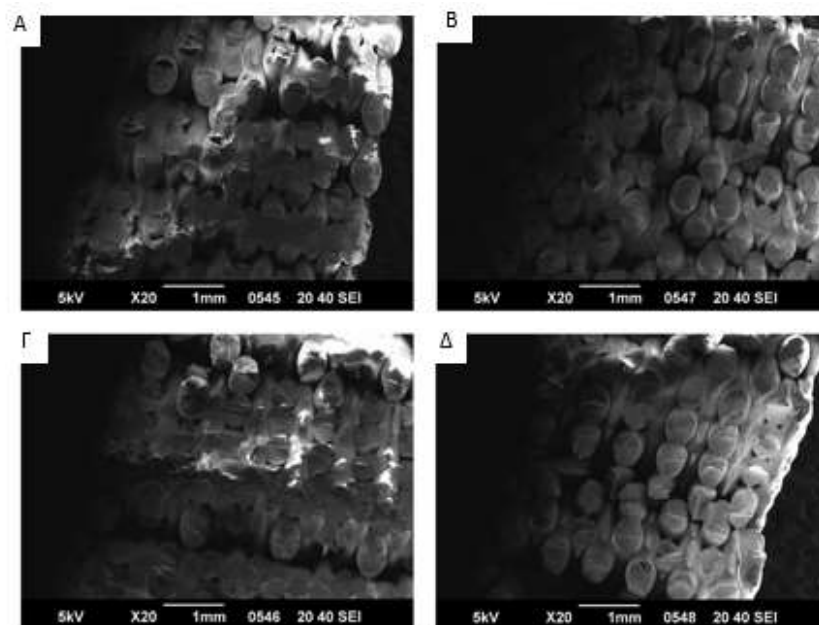
### Παράρτημα III: Φωτογραφίες επιφάνειας θραύσης δοκιμίων

- **ABS 0.25mm 0°**



Εικόνα 57: Φωτογραφίες SEM. Α,Β. Φωτογραφίες παρμένες δίπλα από την επιφάνεια θραύσης. Γ,Δ. Φωτογραφίες παρμένες απέναντι του σημείου θραύσεως.

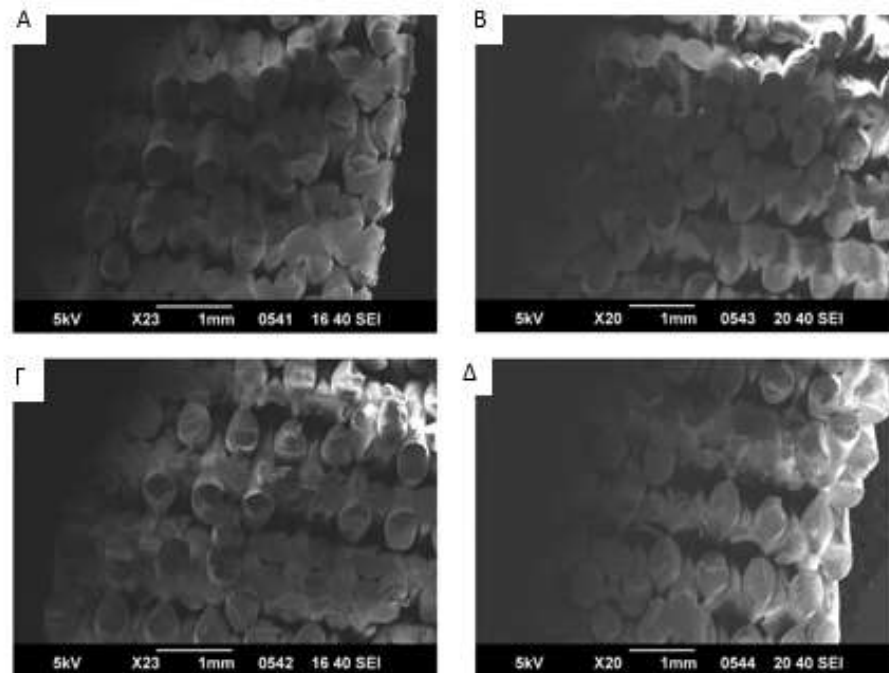
- **ABS 0.25mm 90°**



Εικόνα 58: Φωτογραφίες SEM. Α,Β. Φωτογραφίες παρμένες δίπλα από την επιφάνεια θραύσης. Γ,Δ. Φωτογραφίες παρμένες απέναντι του σημείου θραύσεως.

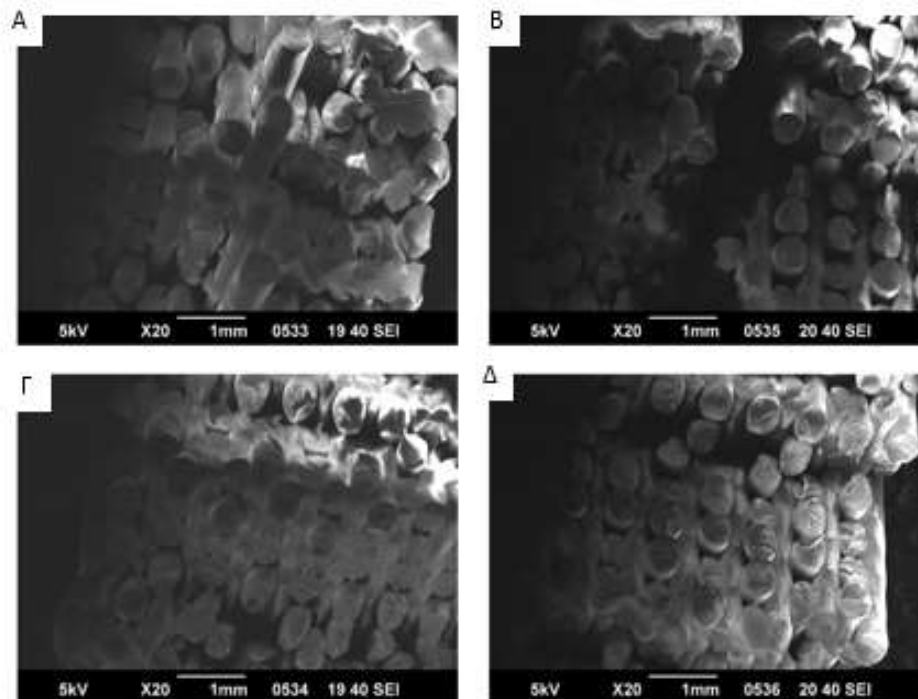
Μελέτη αντοχής δοκιμίου σε κάμψη κατασκευασμένου από υλικό Acrylonitrile Butadiene Styrene plus σε τρισδιάστατο εκτυπωτή

- **ABS 0.33mm 0°**



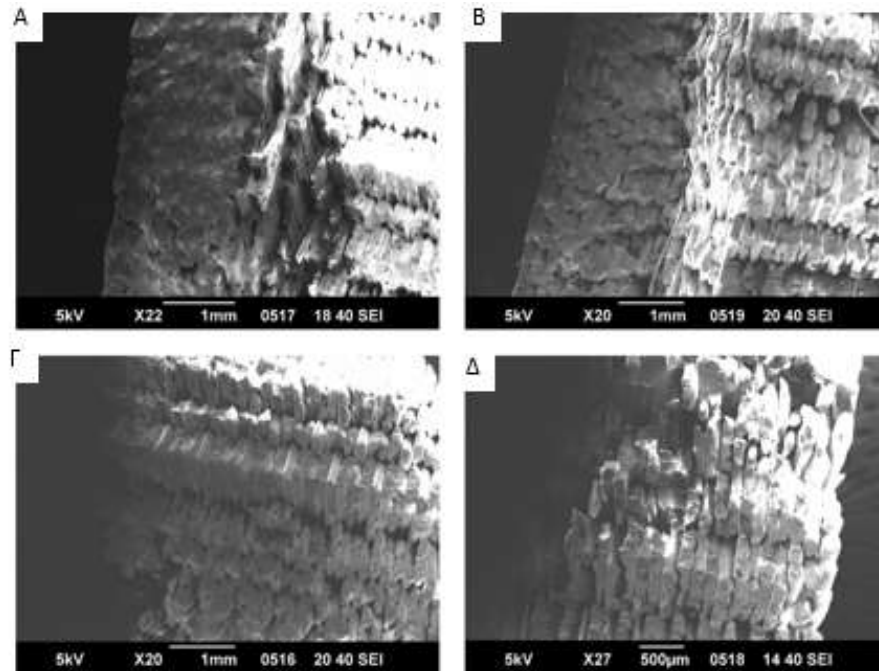
Εικόνα 59: Φωτογραφίες SEM. Α,Β. Φωτογραφίες παρμένες δίπλα από την επιφάνεια θραύσης. Γ,Δ. Φωτογραφίες παρμένες απέναντι του σημείου θραύσεως.

- **ABS 0.33mm 90°**



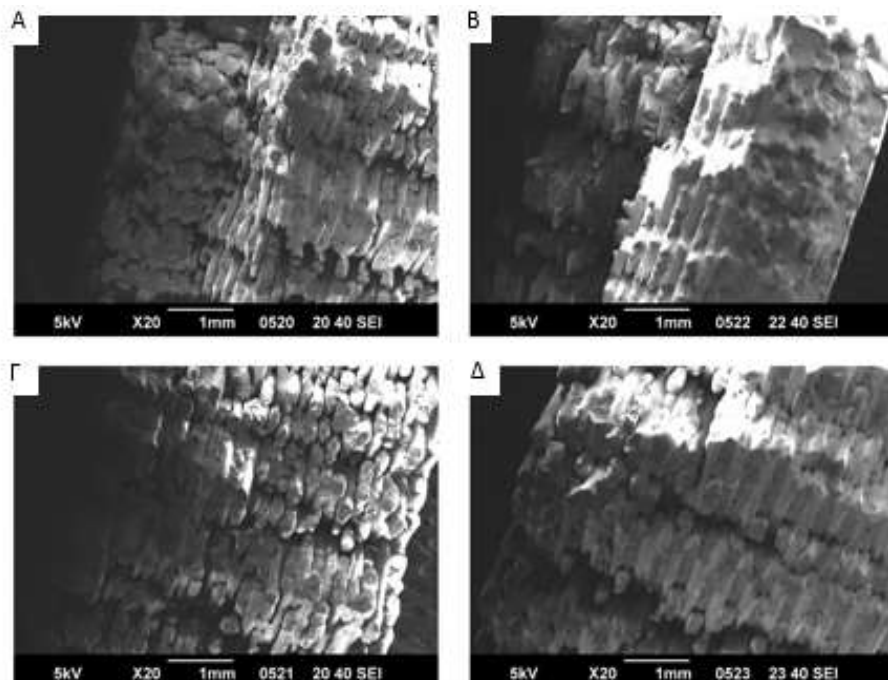
Εικόνα 60: Φωτογραφίες SEM. Α,Β. Φωτογραφίες παρμένες δίπλα από την επιφάνεια θραύσης. Γ,Δ. Φωτογραφίες παρμένες απέναντι του σημείου θραύσεως.

- **ABS plus 0.17mm 0°**



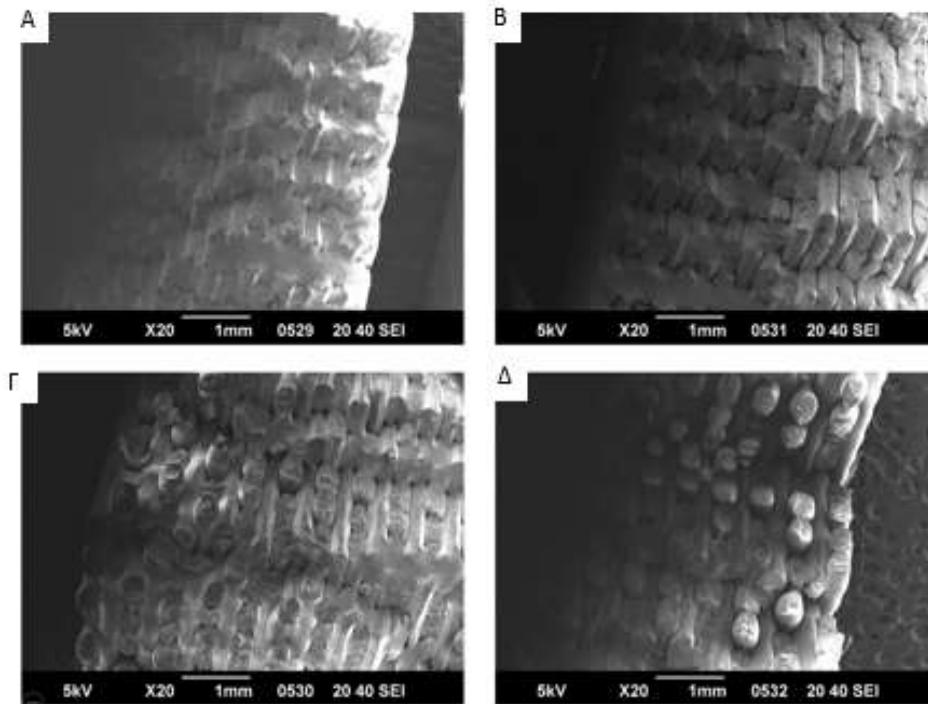
Εικόνα 61: Φωτογραφίες SEM. Α,Β. Φωτογραφίες παρμένες δίπλα από την επιφάνεια θραύσης. Γ,Δ. Φωτογραφίες παρμένες απέναντι του σημείου θραύσεως.

- **ABS plus 0.17mm 90°**



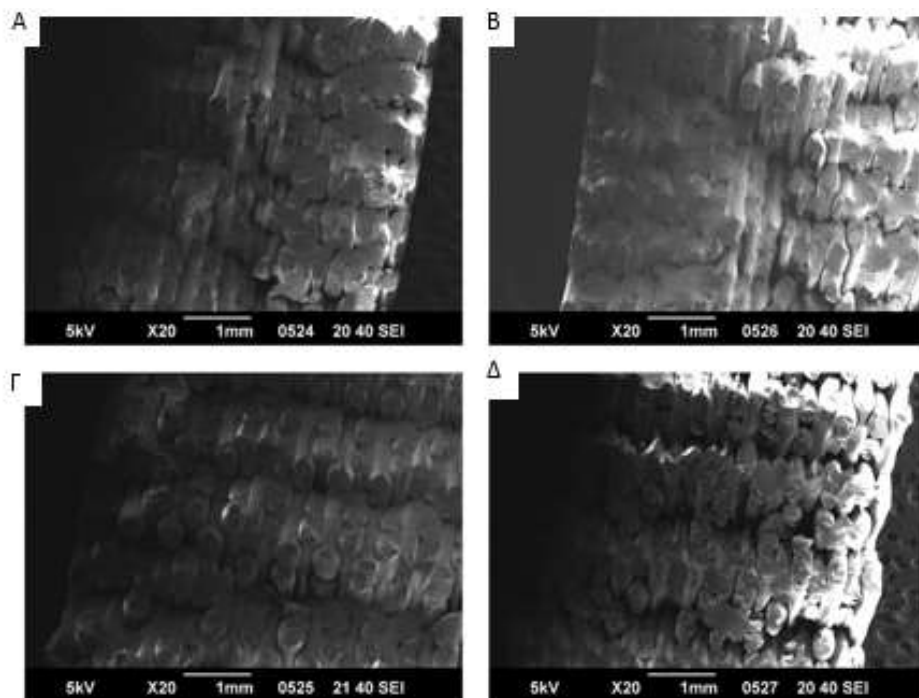
Εικόνα 62: Φωτογραφίες SEM. Α,Β. Φωτογραφίες παρμένες δίπλα από την επιφάνεια θραύσης. Γ,Δ. Φωτογραφίες παρμένες απέναντι του σημείου θραύσεως.

- **ABS plus 0.25mm 0°**



Εικόνα 63: Φωτογραφίες SEM. Α,Β. Φωτογραφίες παρμένες δίπλα από την επιφάνεια θραύσης. Γ,Δ. Φωτογραφίες παρμένες απέναντι του σημείου θραύσεως.

- **ABS plus 0.25mm 90°**



Εικόνα 64: Φωτογραφίες SEM. Α,Β. Φωτογραφίες παρμένες δίπλα από την επιφάνεια θραύσης. Γ,Δ. Φωτογραφίες παρμένες απέναντι του σημείου θραύσεως.