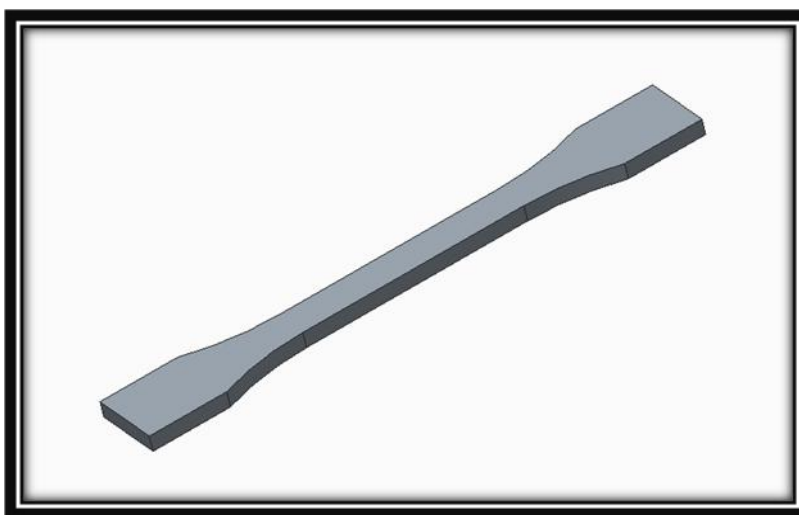




**ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ**

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΤΕΚΜΗΡΙΩΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ
ΕΦΕΛΚΥΣΜΟ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΜΕΝΩΝ ΑΠΟ ΥΛΙΚΟ
ACRYLONITRILE BUTADIENE STYRENE ΚΑΙ ACRYLONITRILE
BUTADIENE STYRENE PLUS ΣΕ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΟ ΕΚΤΥΠΩΤΗ**



ΕΚΠΟΝΗΤΗΣ: ΚΟΖΩΡΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

**ΕΠΙΒΛΕΠΟΝΤΕΣ ΚΑΘΗΓΗΤΕΣ:
ΔΡ. ΒΙΔΑΚΗΣ ΝΕΚΤΑΡΙΟΣ
ΔΡ. ΠΕΤΟΥΣΗΣ ΜΑΡΚΟΣ**

ΗΡΑΚΛΕΙΟ 2014

Ευχαριστίες

Η παρούσα εργασία αποτελεί τη πτυχιακή μου εργασία στα πλαίσια ολοκλήρωσης των σπουδών μου στο τμήμα Μηχανολογίας του Ανώτατου Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Κρήτης.

Υπό την επίβλεψη των καθηγητών μου Δρ. Βιδάκη Νεκτάριο και Δρ. Πετούση Μάρκο, στους οποίους οφείλω ιδιαίτερες ευχαριστίες τόσο για την ανάθεση της εργασίας και καθοδήγησή τους όσο και για την μελλοντική μου επαγγελματική σταδιοδρομία, κατάφερα να φέρω σε πέρας τη παρούσα πτυχιακή εργασία.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω στον κ. Κουδουμά και ιδιαίτερα στην βοηθό του Δρ. Mirela Sucheα για τη παραχώρηση του μηχανήματος SEM και την καθοδήγησή που προσέφεραν για την εκπόνηση ενός εκ των κεφαλαίων της παρούσας εργασίας.

Θέλω να ευχαριστήσω θερμά τους γονείς μου οι οποίοι σε καθ' όλη την διάρκεια των σπουδών μου με στήριξαν σε κάθε μου επιλογή και με βοήθησαν σε οποιοδήποτε πρόβλημα που αντιμετώπισα.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την αδελφή μου, τους φίλους και φίλες μου οι οποίοι με την υπομονή τους και τον υπέροχο τους χαρακτήρα με στήριξαν τα χρόνια αυτά των σπουδών μου και συνέβαλλαν στο να κάνουν το ταξίδι αυτό ακόμη πιο ευχάριστο και γεμάτο όμορφες αναμνήσεις και εμπειρίες.

Κοζώρης Γεώργιος

Ηράκλειο, Σεπτέμβριος 2014

Πίνακας Περιεχομένων

Ευχαριστίες	2
Πίνακας Περιεχομένων.....	3
Κεφάλαιο 1: Υλικά Ελέγχου	6
1.1 Acrylonitrile Butadiene Styrene.....	6
1.1.1 Εισαγωγικά και Ιστορικά Στοιχεία.....	6
1.1.2 Χημική Σύσταση και Παραγωγή	7
1.1.3 Ιδιότητες.....	13
1.1.4 Μέθοδοι Επεξεργασίας του ABS.....	17
1.1.5 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα.....	24
1.2 Acrylonitrile Butadiene Styrene Plus.....	25
1.2.1 Εισαγωγικά Στοιχεία.....	25
1.2.2 Ιδιότητες.....	26
Κεφάλαιο 2: Εργαστηριακός Εξοπλισμός	28
2.1 Οι Τρισδιάστατοι Εκτυπωτές (3D Printers)	28
2.1.1 Εισαγωγικά Στοιχεία.....	28
2.1.2 Εισαγωγικά Στοιχεία.....	29
2.1.3 Διαδικασία Τρισδιάστατης Εκτύπωσης	31
2.1.4 Πλεονεκτήματα Τρισδιάστατης Εκτύπωσης	32
2.1.5 Τεχνικά Χαρακτηριστικά	33
2.2 Μηχάνημα Εφελκυσμού.....	34
2.3 Scanning Electron Microscope (SEM)	36
2.3.1 Εισαγωγικά Στοιχεία.....	36
2.3.2 Λειτουργία του SEM.....	36
2.3.3 Μηχάνημα SEM Πειράματος	42
2.3.4 Προετοιμασία Δοκιμίων	42
Κεφάλαιο 3: Πείραμα Εφελκυσμού.....	46
3.1 Θεωρητικές Έννοιες.....	46
3.1.1 Τι είναι ο Εφελκυσμός	46
3.1.2 Διάγραμμα Τάσης - Παραμόρφωσης	47



Ανάλυση και τεκμηρίωση δεδομένων για την αντοχή σε εφελκυσμό δοκιμίων κατασκευασμένων από υλικό ABS και ABS Plus σε τρισδιάστατο εκτυπωτή

3.2	Κατηγορίες Δοκιμίων	49
3.3	Πρότυπο ASTM D 638.....	50
3.3.1	Εισαγωγικά Στοιχεία.....	50
3.3.2	Κατασκευή Δοκιμίων	50
3.3.3	Διαδικασία Υπολογισμού και Εξαγωγής Αποτελεσμάτων	52
3.4	Πίνακες Αποτελεσμάτων Πειράματος	54
3.5	Συγκριτικά Διαγράμματα Πειραματικών Δεδομένων	58
3.5.1	ABS με Πάχος Εκτύπωσης 0,25 mm και Διεύθυνση 0°.....	58
3.5.2	ABS με Πάχος Εκτύπωσης 0,25 mm και Διεύθυνση 45°.....	60
3.5.3	ABS με Πάχος Εκτύπωσης 0,25 mm και Διεύθυνση 90°.....	61
3.5.4	ABS με Πάχος Εκτύπωσης 0,33 mm και Διεύθυνση 0°.....	63
3.5.5	ABS με Πάχος Εκτύπωσης 0,33 mm και Διεύθυνση 45°.....	65
3.5.6	ABS με Πάχος Εκτύπωσης 0,33 mm και Διεύθυνση 90°.....	66
3.5.7	ABS Plus με Πάχος Εκτύπωσης 0,17 mm και Διεύθυνση 0°.....	68
3.5.8	ABS Plus με Πάχος Εκτύπωσης 0,17 mm και Διεύθυνση 45°.....	70
3.5.9	ABS Plus με Πάχος Εκτύπωσης 0,17 mm και Διεύθυνση 90°.....	71
3.5.10	ABS Plus με Πάχος Εκτύπωσης 0,25 mm και Διεύθυνση 0°.....	73
3.5.11	ABS Plus με Πάχος Εκτύπωσης 0,25 mm και Διεύθυνση 45°.....	75
3.5.12	ABS Plus με Πάχος Εκτύπωσης 0,25 mm και Διεύθυνση 90°.....	76
Κεφάλαιο 4: Συγκρίσεις και Ανάλυση Δεδομένων.....		79
4.1	Ανάλυση Πειραματικών Δεδομένων.....	79
4.2	Σύγκριση Αντοχής Δοκιμίων με τη Θεωρητική.....	81
Κεφάλαιο 5: Έλεγχος της Επιφάνειας Θραύσης		87
5.1	Σαρώσεις Μηχανήματος SEM	87
5.1.1	Σαρώσεις Μηχανήματος SEM για υλικό ABS.....	87
5.1.2	Σαρώσεις Μηχανήματος SEM για υλικό ABS Plus.....	91
5.2	Είδη Θραύσης Δοκιμίων	94
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα		100
Βιβλιογραφία.....		102

Εισαγωγή

Τα τελευταία χρόνια η τεχνολογία της ταχείας προτυποποίησης (*3D Printing*) χρησιμοποιείται ευρέως για την κάλυψη ποικίλων αναγκών του τομέα της Μηχανολογίας. Η ανάγκη των φυσικών πρωτοτύπων, για τον λειτουργικό έλεγχο προϊόντων έχοντας υψηλή ποιότητα, χαμηλό κόστος και όσο το δυνατό λιγότερο χρόνο κατασκευής, έδωσε τόπο στην εξέλιξη της τεχνολογίας αυτής.

Αντικείμενο της παρούσας πτυχιακής εργασίας είναι η ανάλυση αποτελεσμάτων πειραμάτων του εφελκυσμού και τεκμηρίωση της αντοχής δοκιμιών τα οποία είναι κατασκευασμένα από το υλικό Acrylonitrile Butadiene Styrene και το Acrylonitrile Butadiene Styrene Plus με τη μέθοδο ταχείας προτυποποίησης.

Η εργασία αυτή βασίζεται στα αποτελέσματα πειραμάτων εφελκυσμού που είχαν ως στόχο τη μέτρηση της αντοχής των προαναφερθέντων δοκιμιών. Αναλυτικότερα, θα μελετηθεί η αντοχή των τυπωμένων τεμαχίων τα οποία έχουν κατασκευαστεί στους τρισδιάστατους εκτυπωτές Dimension Elite και Dimension BST 768.

Έπειτα, θα γίνει μία βιβλιογραφική επισκόπηση των χρησιμοποιηθέντων υλικών Acrylonitrile Butadiene Styrene και Acrylonitrile Butadiene Styrene Plus, θα παρουσιαστούν ο εργαστηριακός εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε και κάποιες θεωρητικές έννοιες για τη καλύτερη δυνατή κατανόηση των αντικειμένων που μελετά η εργασία αυτή.

Ακόμη θα προσδιοριστούν οι αποκλίσεις της θεωρητικής αντοχής που δίνει ο κατασκευαστής των εκτυπωτών με τα δοκίμια. Στη συνέχεια θα συγκριθεί η θεωρητική και η πραγματική αντοχή των εκτυπωμένων δοκιμιών σε σχέση με τον τρόπο κατασκευής των τεμαχίων ως προς την κατεύθυνση εκτύπωσης και το πάχος τους.

Τέλος, θα γίνει έλεγχος της ποιότητας εκτύπωσης σε σύγκριση με τα τυποποιημένα τεμάχια, ενώ θα παρουσιαστούν και κατάλληλα διαγράμματα και η στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων των δοκιμών εφελκυσμού, όπου είναι απαραίτητο.



Κεφάλαιο 1: Υλικά Ελέγχου

1.1 Acrylonitrile Butadiene Styrene

1.1.1 Εισαγωγικά και Ιστορικά Στοιχεία

Το ABS είναι ένα πολυμερές υλικό το οποίο ανήκει στη κατηγορία των θερμοπλαστικών [1]. Δηλαδή μπορεί να τήκεται με θέρμανση, να στερεοποιείται με ψύξη και να επανατήκεται επαναληπτικά.

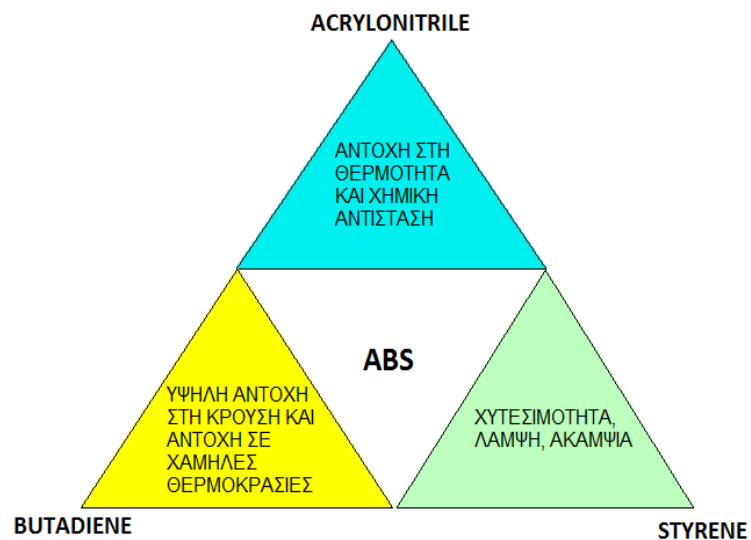
Αποτελείται από ακρυλονιτρίλιο (A), βουταδιένιο (B) και στυρένιο (S). Το ακρυλονιτρίλιο παρέχει αντοχή σε θερμότητα και χημική αντίσταση, το βουταδιένιο κάνει το υλικό πιο σκληρό και ανθεκτικό ακόμη και σε χαμηλές θερμοκρασίες, ενώ το μονομερές στυρενίου παρέχει καλή επεξεργασιμότητα, ακαμψία και γυαλάδα στο υλικό (Εικόνα 1.1.1.1).

Η ιστορία των ABS πολυμερών ξεκίνησε από τα μέσα του 1940. Με τη προσπάθεια για να κατασκευαστούν αλεξίσφαιρα φύλλα πλαστικού κατά τα τελευταία χρόνια του Δεύτερου παγκοσμίου πολέμου, αναπτύχθηκαν ειδικά συμπολυμερή βουταδιενίου - ακρυλονιτριλίου και στυρενίου - ακρυλονιτριλίου με υψηλές μοριακές μάζες. Το 1948 κατοχυρώθηκε ως πατέντα, ενώ η παραγωγή του και η πώληση του στις αγορές άρχισε το 1954 από την εταιρία Borg-Warner [2]

Αυτά τα υλικά είχαν μεγάλη αντοχή σε κρούση εξαιτίας της χαμηλής θερμοπλαστικής ροής αλλά μπορούσαν να επεξεργαστούν μόνο με τη χρήση εξωθητή (*extruder*).

Η δραστική εξέλιξη στη τεχνολογία των υλικών επέτρεψε την κατεργασία χύτευσης με έγχυση και έτσι άνοιξε ο δρόμος για την παραγωγή μηχανολογικών υλικών.

Η συστηματική έρευνα στα ABS πολυμερή οδήγησε στην ανάπτυξη καινούριων ενώσεων πλαστικών με διαφορετική χημική σύσταση. Τα πλαστικά αυτά περιέχουν και άλλα μονομερή που συμπληρώνονται μαζί ή αντικαταστούν το ακρυλονιτρίλιο, το βουταδιένιο και το στυρένιο.

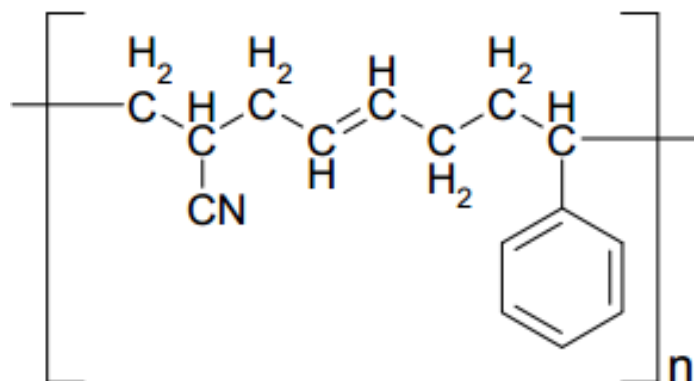


Εικόνα 1.1.1.1: Ιδιότητες των συστατικών μονομερών του ABS.

1.1.2 Χημική Σύσταση και Παραγωγή

1.1.2.1 Χημική Σύσταση

Κάθε ένα από τα τρία μονομερή ακρυλονιτρίλιο, βουταδιένιο και στυρένιο αποτελεί σημαντικό συστατικό για το ABS. Για να σχηματιστεί το πολυμερές ABS πρέπει να σχηματιστεί μία πολυμερική αλυσίδα από την εξής δομική μονάδα:



Εικόνα 1.1.2.1.1: Η δομή του πολυμερούς ABS.

Ανάλυση και τεκμηρίωση δεδομένων για την αντοχή σε εφελκυσμό δοκιμών κατασκευασμένων από υλικό ABS και ABS Plus σε τρισδιάστατο εκτυπωτή

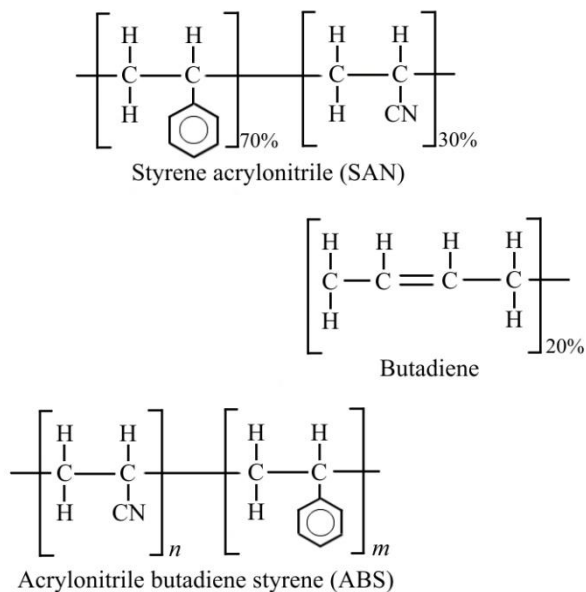
Η δημιουργία του ABS μπορεί να γίνει με δύο τρόπους [3] :

- **Τύπου A:** Δημιουργείται μέσω μηχανικής ανάμιξης ρητίνης πολυμερούς στυρενίου - ακρυλονιτριλίου με ελαστομερές που έχει ως βάση το βουταδιένιο.
- **Τύπου B:** Δημιουργείται με την έγχυση στυρενίου και ακρυλονιτριλίου σε πολυβουταδιένιο. Επίσης περιέχει συμπολυμερές στυρενίου-ακρυλονιτριλίου και εγχυμένο πολυβουταδιένιο.

Το συμπολυμερές στυρενίου-ακρυλονιτριλίου και για τους δύο τύπους δημιουργίας αποτελείται από (Εικόνα 1.1.2.1.2) :

- **65-76%** Στυρένιο.
- **24-35%** Ακρυλονιτρίλιο.

Το στυρένιο-ακρυλονιτρίλιο (SAN) είναι ένα καθαρό συμπολυμερές αλλά έχει κάποια χαρακτηριστικά όπως μεγάλη χημική αντίσταση, μεγάλη σκληρότητα επιφάνειας, ανθεκτικότητα ενώ είναι διαφανές και έχει πολύ καλή επεξεργασιμότητα. Είναι ιδανικό για τη κατασκευή θηκών για μπαταρίες και για τη κατασκευή οικιακών σκευών, κ.α. [6].



Εικόνα 1.1.2.1.2: Οι δομές των πολυμερών SAN, ABS και του μονομερούς βουταδιενίου[4] .

Οι πιο συνηθισμένες μορφές γίνονται κατά κύριο λόγο με τη χρήση πάνω από 50% στυρενίου και ποικίλα ποσοστά περιεκτικότητας βουταδιενίου και ακρυλονιτριλίου. Ειδικότερα, οι πιο συνηθισμένοι τύποι ABS έχουν κατά μέσο όρο τις εξής περιεκτικότητες μονομερών:

- **21-27%** Ακρυλονιτρίλιο.
- **12-25%** Βουταδιένιο.
- **54-63%** Στυρένιο.

1.1.2.2 Παραγωγή του ABS

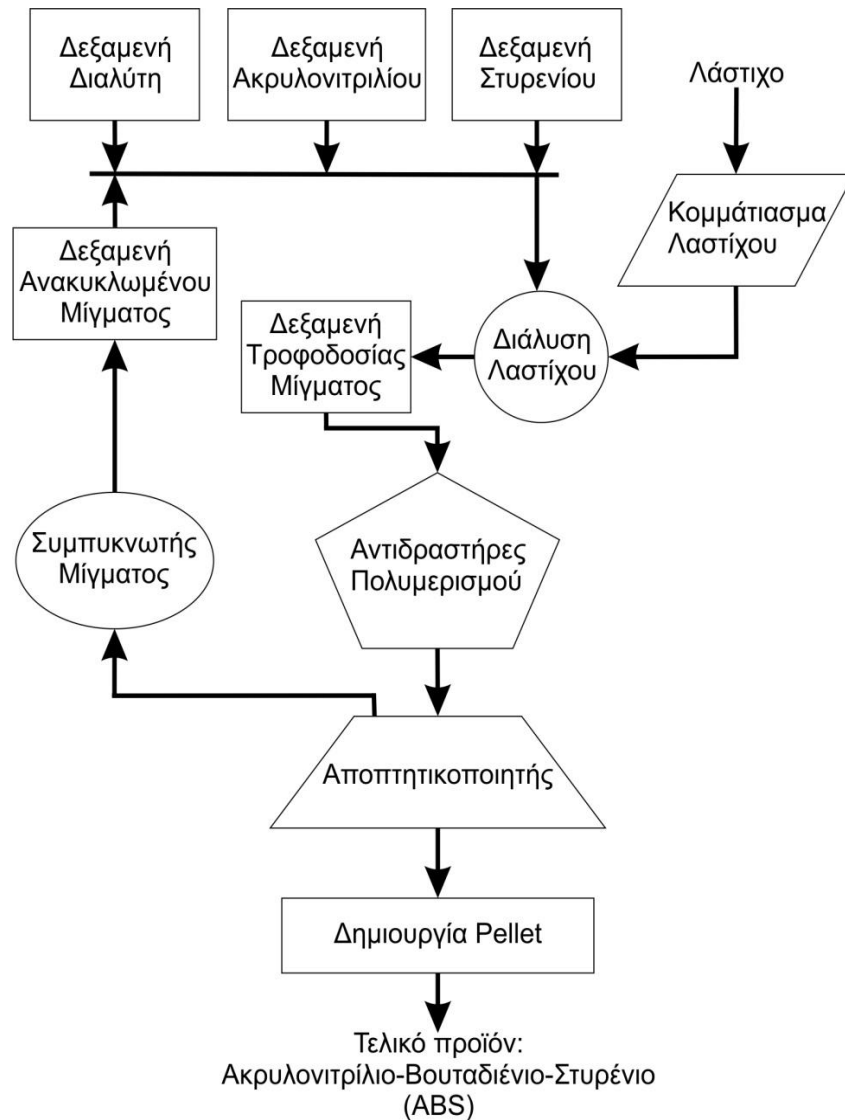
Για να δημιουργηθεί το ABS υπάρχουν τρεις κατηγορίες, βιομηχανικής κλίμακας, με τις οποίες μπορεί να γίνει διεξαγωγή πολυμερισμού [\[5\]](#) :

1. Συνεχής πολυμερισμός μάζας (*continuous mass polymerization*).
2. Πολυμερισμός γαλακτώματος (*emulsion polymerization*).
3. Πολυμερισμός αιωρήματος (*suspension polymerization*).

Στη κατηγορία (1) η αντίδραση πολυμερισμού γίνεται στην μάζα του μονομερούς ή μονομερών. Η μέθοδος αυτή είναι η πιο καθαρή με μικρή ποσότητα ακαθαρσιών στο τελικό προϊόν. Αυτό οφείλετε στην έλλειψη του νερού από τη διαδικασία. Επίσης έχει τη χαμηλότερη ανάγκη σε ενέργεια. Είναι χρηματικά αποδοτική μέθοδος αλλά κύριο μειονέκτημα της είναι η έλλειψη ευκαμψίας.

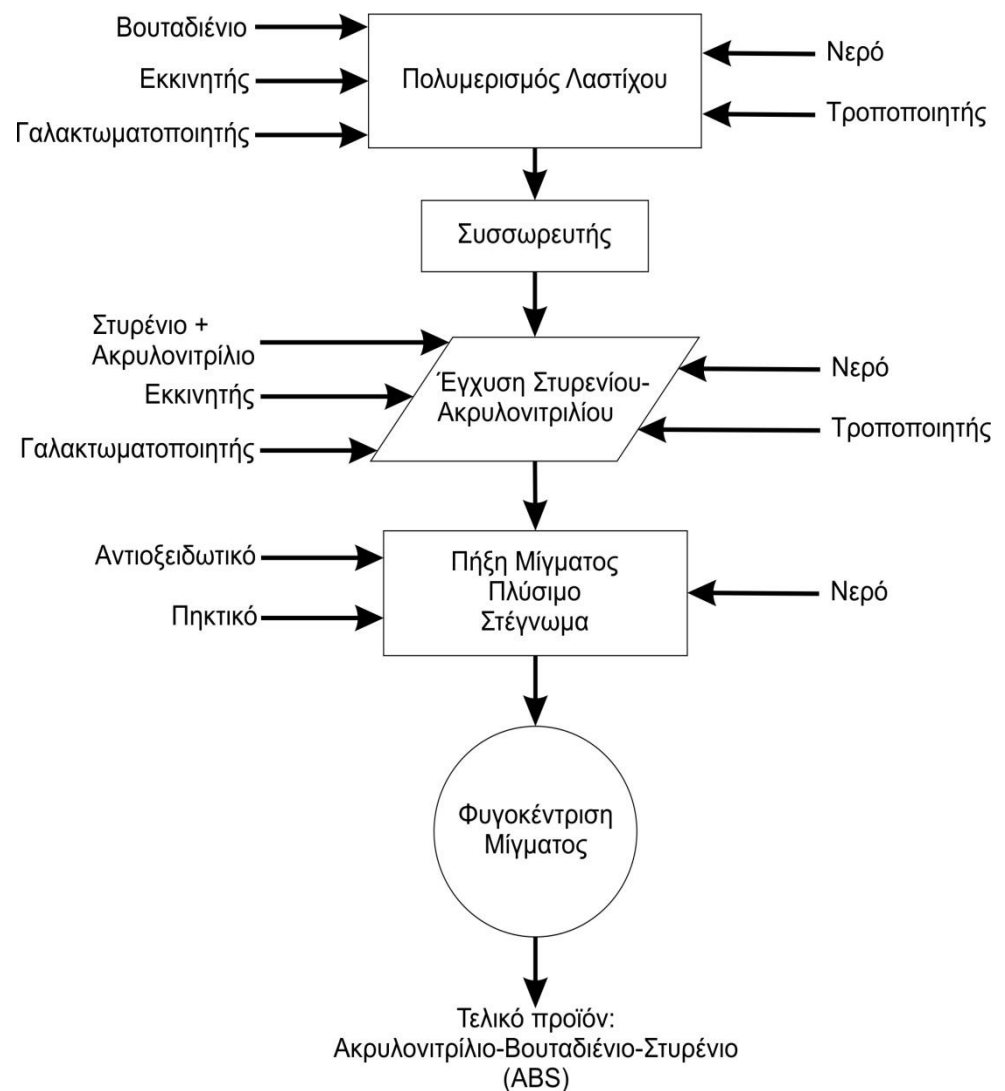


Ανάλυση και τεκμηρίωση δεδομένων για την αντοχή σε εφελκυσμό δοκιμίων κατασκευασμένων από υλικό ABS και ABS Plus σε τρισδιάστατο εκτυπωτή



Εικόνα 1.1.2.2.1: Διαδικασία παραγωγής ABS με συνεχής πολυμερισμό μάζας.

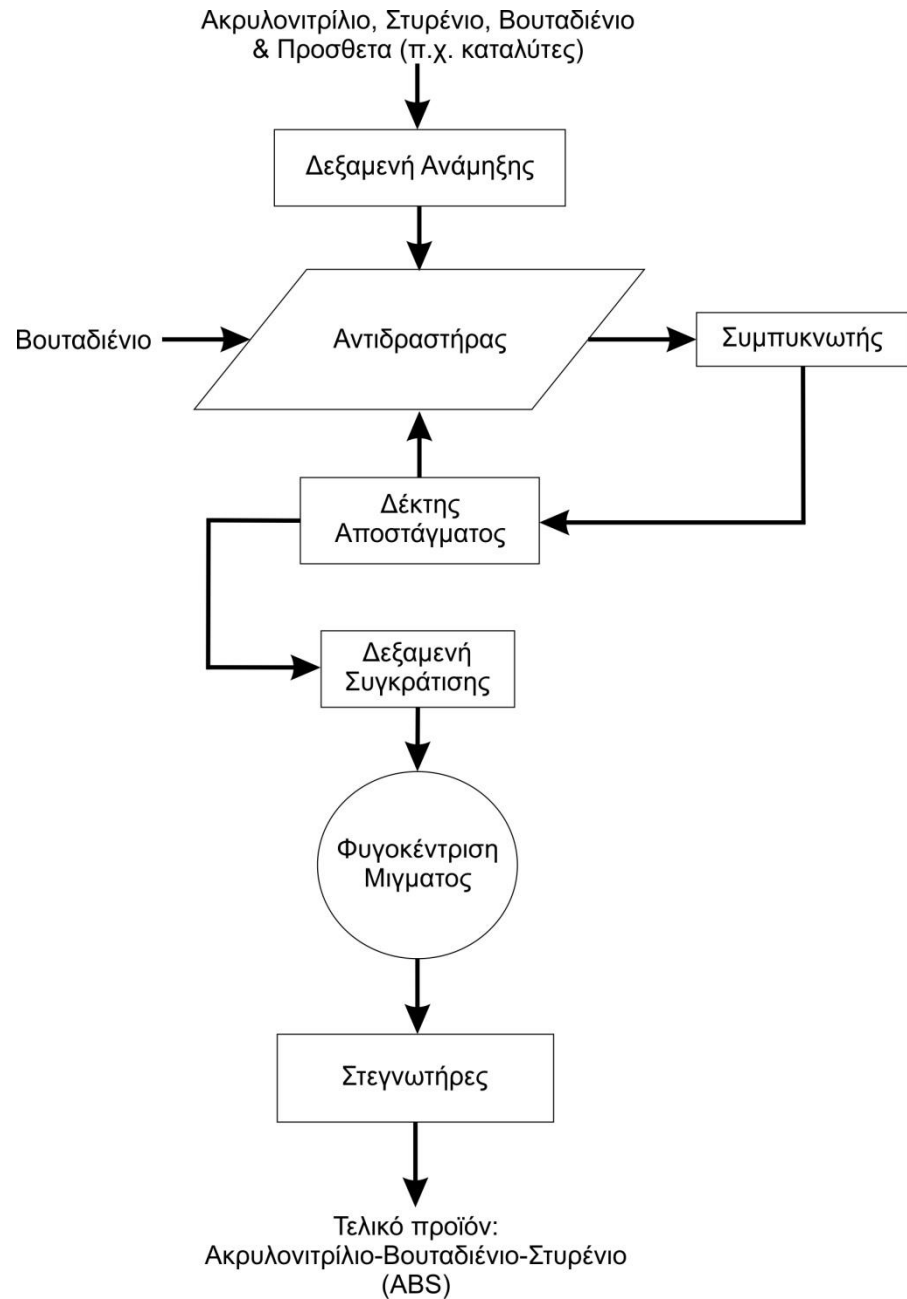
Στη κατηγορία (2) το μονομερές ή μονομερή φέρονται με τη μορφή γαλακτώματος σε υδατική φάση. Η μέθοδος αυτή είναι η παλαιότερη μέθοδος και η λιγότερη καθαρή. Προτιμάται για την κατασκευή ABS με υψηλό δείκτη αντοχής σε κρούση.



Εικόνα 1.1.2.2.2: Διαδικασία παραγωγής ABS με πολυμερισμό γαλακτώματος.

Στη κατηγορία (3) η αντίδραση πολυμερισμού διεξάγεται σε υδατικά αιωρήματα μονομερών. Η διαδικασία περιλαμβάνει ανάμειξη στυρενίου - ακρυλονιτριλίου (SAN) με λάστιχο σε μέτρια με υψηλή περιεκτικότητα.

Ανάλυση και τεκμηρίωση δεδομένων για την αντοχή σε εφελκυσμό δοκιμών κατασκευασμένων από υλικό ABS και ABS Plus σε τρισδιάστατο εκτυπωτή



Εικόνα 1.1.2.2.3: Διαδικασία παραγωγής ABS με πολυμερισμό αιωρήματος.

1.1.3 Ιδιότητες

Οι ιδιότητες του ABS πολυμερούς επηρεάζονται πάρα πολύ από τα χαρακτηριστικά του SAN πολυμερούς. Έτσι παρατηρώντας τις ιδιότητες του SAN μπορούμε να βγάλουμε αρκετά συμπεράσματα και για το ABS.

Το SAN έχει πολύ καλή αντίσταση σε χημικές και λιπαρές ουσίες, μεγάλη αντοχή σε κρούση και εφελκυσμό, υψηλή ακαμψία αλλά και ικανοποιητική αντοχή σε απότομες μεταβολές της θερμοκρασίας. Το μονομερές στυρενίου παρέχει καλή επεξεργασιμότητα ενώ το ακρυλονιτρίλιο, αντοχή σε θερμότητα και χημική αντίσταση [6].

Το ABS είναι ένα σκληρό, άκαμπτο θερμοπλαστικό, υψηλής αντίστασης στις ρωγμές και τον ερπυσμό. Έχει μεγάλη αντοχή στην κρούση η οποία διατηρείται και σε χαμηλές θερμοκρασίες (έως -40°C) [7].

Είναι ανθεκτικό στην υγρασία και τις χημικές ουσίες (π.χ. ανόργανα άλατα, αλκάλια και πολλά οξέα). Χάρη τον συνδυασμό των ιδιοτήτων αυτών το υλικό καθίσταται ικανό να έχει εξαιρετική διαστασιολογική σταθερότητα με πολύ καλή ποιότητα επιφάνειας. Μπορεί ακόμη να παραχθεί σε μεγάλη ποικιλία χρωμάτων. Διαθέτει εξαιρετικές ηλεκτρικές ιδιότητες. Όταν εκτίθεται σε εξωτερικό περιβάλλον μειώνεται η επιφανειακή του γυαλάδα, αποκτά ένα γκριζάρισμα στο χρώμα του.

1.1.3.1 Μηχανικές Ιδιότητες

Η αντοχή σε εφελκυσμό αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα κριτήρια για την επιλογή του ABS, ως υλικό κατασκευής, από τους κατασκευαστές για διάφορες εφαρμογές που αυτοί επιθυμούν. Για τον καθορισμό της τιμής των εφελκυστικών φορτίων που μπορεί να αντέξει το υλικό, γίνεται με την καθοδήγηση ενός προτύπου.

Τα πρότυπα που υποστηρίζουν τον υπολογισμό της αντοχής εφελκυσμού είναι τα ASTM D638 της Αμερικανικής Εταιρείας Δοκιμών και Υλικών (*American Society for Testing and*



Ανάλυση και τεκμηρίωση δεδομένων για την αντοχή σε εφελκυσμό δοκιμίων κατασκευασμένων από υλικό ABS και ABS Plus σε τρισδιάστατο εκτυπωτή

Materials) [8] και ISO 527 του Διεθνή Οργανισμού Τυποποίησης (International Organization for Standardization) [9].

Για τα πλαίσια αυτής της πτυχιακής εργασίας χρησιμοποιήθηκε το πρότυπο ASTM D638 με κάποιες παραλλαγές στις διαστάσεις των δοκιμίων επειδή το μηχάνημα εφελκυσμού δεν τις υποστήριζε.

Οι μηχανικές ιδιότητες του ABS σύμφωνα με τον κατασκευαστή φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Μηχανικές Ιδιότητες	Πρότυπο Δοκιμής	Τιμές
Αντοχή Εφελκυσμού, Τύπος 1, 0.125	ASTM D638	22 MPa
Μέτρο Ελαστικότητας, Τύπος 1, 0.125	ASTM D638	1,627 MPa
Ποσοστό Επιμήκυνσης, Τύπος 1, 0.125	ASTM D638	6%
Αντοχή σε Κάμψη	ASTM D790	41 MPa
Μέτρο Ελαστικότητας σε Κάμψη	ASTM D790	1,834 MPa
Αντοχή σε κρούση, IZOD, με εγκοπή	ASTM D256	106.78 J/a
Αντοχή σε κρούση, IZOD, χωρίς εγκοπή	ASTM D256	213.56 J/a

Πίνακας 1.1.3.1.1: Πίνακας μηχανικών ιδιοτήτων του ABS [10].

1.1.3.2 Θερμικές Ιδιότητες

Τα πλαστικά έχουν πολύ μεγαλύτερη θερμική διαστολή σε σύγκριση με τα μέταλλα. Για αυτό το λόγο οι τιμές των θερμικών καταπονήσεων που μπορεί να ασκηθούν σε ένα προϊόν ABS θα πρέπει να συμπεριληφθούν κατά τη σχεδίαση έτσι ώστε να μην υπάρχουν τυχών παραμορφώσεις.

Σε θερμοκρασίες κατεργασίας άνω των 280°C τα ABS πολυμερή χάνουν τη σκληρότητά τους διότι επιδέχονται ζημιά στην ελαστικότητά τους. Ο αποπολυμερισμός τους ξεκινάει σε θερμοκρασίες άνω των 300°C. Με την παρουσία ατμοσφαιρικού οξυγόνου η αποσύνθεσή τους μπορεί να ξεκινήσει από τους 280°C.

Ο σημαντικότερος όρος για τον χαρακτηρισμό των θερμικών ιδιοτήτων του ABS είναι η θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης (T_g). Στη περίπτωση όπου η θερμοκρασία του υλικού αυξηθεί η αντοχή του σε εφελκυστικά φορτία μειώνεται ενώ ανεβαίνει η σκληρότητά και η ολκιμότητά του.

Οι θερμικές ιδιότητες του ABS σύμφωνα με τον κατασκευαστή φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Θερμικές Ιδιότητες	Πρότυπο Δοκιμής	Τιμές
Θερμοκρασιακή Αντοχή @ 66 psi	ASTM D648	90°C
Θερμοκρασιακή Αντοχή @ 264 psi	ASTM D648	76°C
Θερμοκρασία Υαλώδους Μετάπτωσης (T_g)	DMA (SSYS)	104°C
Συντελεστής Θερμικής Διαστολής	ASTM D696	

Πίνακας 1.1.3.2.1: Πίνακας θερμικών ιδιοτήτων του ABS [\[10\]](#).

1.1.3.3 Ευφλεκτότητα

Τα ABS πολυμερή τα οποία δεν περιέχουν κάποιο μονομερές το οποίο να μειώνει τη διάδοση της φωτιάς, μπορούν να πάρουν φωτιά πολύ εύκολα. Κατά την καύση τους παράγουν μία δυνατή κίτρινη φωτιά, παράγοντας πολύ καπνό και συνεχίζει να καίγεται και μετά την απομάκρυνση της πηγής της φωτιάς.

Για να βρεθούν τα χαρακτηριστικά ευφλεκτότητας του υλικού μας χρησιμοποιούνται δύο είδη προτύπων [\[11\]](#). Το πρώτο χρησιμοποιείται για τον καθορισμό της ικανότητας ενός πλαστικού υλικού να σβήσει ή να μεταδώσει τη φλόγα όταν το δοκίμιο πάρει φωτιά. Το πρότυπο αυτό ονομάζεται UL 94 το οποίο δημιουργήθηκε από το *Underwriters Laboratories* των ΗΠΑ [\[12\]](#).

Το δεύτερο πρότυπο χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της αντίστασης του πλαστικού υλικού να πάρει φωτιά από πηγές που προέρχονται από ηλεκτρισμό. Ονομάζεται IEC



Ανάλυση και τεκμηρίωση δεδομένων για την αντοχή σε εφελκυσμό δοκιμίων κατασκευασμένων από υλικό ABS και ABS Plus σε τρισδιάστατο εκτυπωτή

60112 , είναι ένα διεθνές πρότυπο το οποίο συντάχθηκε από τη Διεθνή Ηλεκτροτεχνική Επιτροπή (*International Electromechanical Commission*) [13].

Από τα αποτελέσματα του Πίνακα 1.1.3.3.1 συμπεραίνεται ότι το ABS που χρησιμοποιήθηκε στο πείραμα δεν περιέχει μονομερή τα οποία μειώνουν τη διάδοση φλόγας, οπότε είναι εύφλεκτο. Ανήκει στη κατηγορία HB όπου γίνεται αργή καύση σε οριζόντιο δείγμα, με ταχύτητα καύσης 76 mm/min για πάχος < 3 mm και η καύση σταματά πριν τα 100 mm.

Άλλα	Πρότυπο δοκιμής	Τιμές
Ειδικό Βάρος	ASTM D792	1.05
Σκληρότητα κατά Rockwell	ASTM D785	R105
Διάδοση Φλόγας	UL 94	HB
Διηλεκτρική Αντοχή kV/mm	IEC 60112	32
Διηλεκτρική Σταθερά @60 Mhz	IEC 60250	2.4

Πίνακας 1.1.3.3.1: Πίνακας λοιπών ιδιοτήτων του ABS [10]

1.1.3.4 Αντίσταση στην Υπεριώδη Ακτινοβολία

Η έκθεση του ABS σε υπεριώδης ακτινοβολίες μπορεί να προκαλέσει μη αναστρέψιμες αλλαγές στη χημική του σύσταση. Το ποσοστό της υποβάθμισης που μπορεί να υποστεί εξαρτάται από τη δομή του πολυμερούς, τις κατεργασίες από τις οποίες έχει περάσει, τις ιδιότητες των επιμέρους υλικών που εμπεριέχονται, τις συνθήκες υπό τις οποίες εκθέτεται το δοκίμιο αλλά και από το αν υπάρχουν προστατευτικές επικαλύψεις.

Σε περιπτώσεις όπου το υλικό έχει εκτεθεί σε υπεριώδη ακτινοβολίες οι οποίες έχουν επηρεάσει τη σύσταση και έχουν οδηγήσει το υλικό σε αστοχία παρατηρούνται κάποια χαρακτηριστικά. Τα χαρακτηριστικά αυτά μπορούν να είναι η εμφάνιση ενός κίτρινου χρώματος στην επιφάνεια του υλικού αλλά και μικρορωγμές . Για το λόγω αυτό χρησιμοποιούνται ειδικοί σταθεροποιητές υπεριώδους ακτινοβολίας, διάφορες βαφές, μέχρι και μεμβράνες.

1.1.3.5 Χημική Αντίσταση

Το ABS σε γενικές γραμμές έχει πολύ καλές ιδιότητες ενάντια στις χημικές ουσίες. Ειδικότερα, δεν επηρεάζεται από οξέα, το νερό, τα άλατα, τα αλκάλια και οργανικές ουσίες όπως τα λάδια και τα τρόφιμα, εκτός και αν οι συνθήκες (χρόνος, θερμοκρασία, επίπεδα τάσης, κ.α.) κατά τις οποίες εκθέτεται σε αυτά είναι υπερβολικές. Από την άλλη μεριά, το ABS είναι ευαίσθητο απέναντι σε διαλύτες που αποτελούνται από κετόνες, εστέρες [\[14\]](#).

1.1.4 Μέθοδοι Επεξεργασίας του ABS

Το ABS όπως έχει αναφερθεί ανήκει στη κατηγορία των θερμοπλαστικών. Έτσι η επεξεργασία του μπορεί να γίνει με τους παρακάτω τρόπους, για να παραχθούν προϊόντα από ABS, οι οποίοι είναι κοινότυποι για την κατηγορία αυτή [\[7\]](#):

- Χύτευση με έγχυση (*Injection molding*).
- Εξώθηση (*Extrusion*).
- Χύτευση με εμφύσηση (*Blow molding*).
- Χύτευση με συμπίεση (*Compression molding*).
- Θερμική διαμόρφωση (*Thermoforming*).

1.1.4.1 Χύτευση με Έγχυση

Κατά τη κατεργασία αυτή, μία χοάνη τροφοδοσίας τροφοδοτείται με μία ποσότητα τεμαχισμένου υλικού (*masterbatch*) το οποίο οδηγείται σε ένα κύλινδρο μέσω της κίνησης ενός εμβόλου (*ram*) ή ενός κοχλία (*screw*). Το υλικό πιέζεται προς ένα θερμαινόμενο θάλαμο όπου εκεί τήκεται ώστε να μετατραπεί σε παχύρρευστο υγρό.

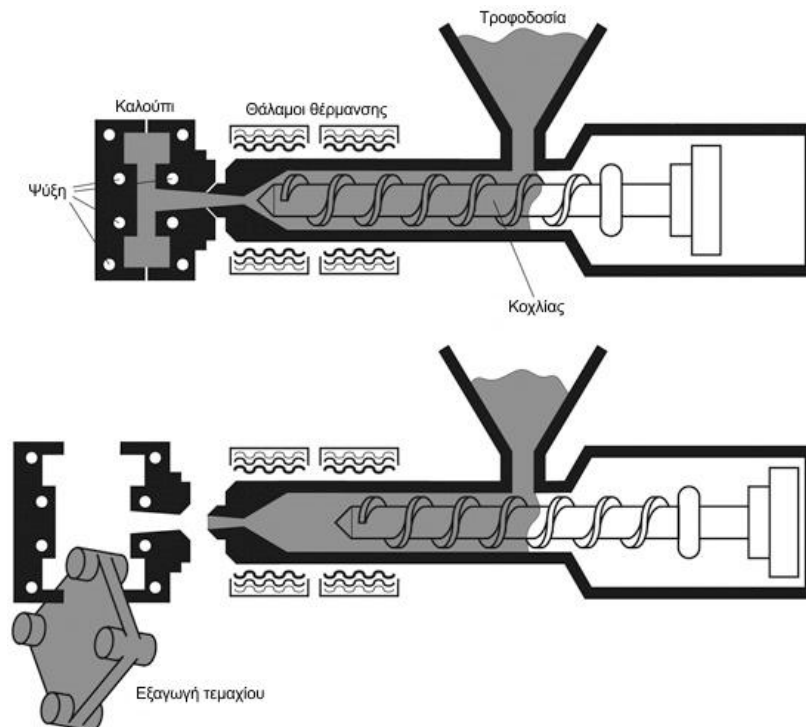
Έπειτα, αφού βρίσκεται σε υγρή μορφή, με κίνηση του κοχλία οδηγείται σε ένα καλούπι μέσω ενός ακροφυσίου. Εκεί διατηρείται η πίεση ώστε να στερεοποιηθεί το υλικό ενώ παράλληλα ψύχεται. Τέλος ανοίγεται το καλούπι ανοίγεται ώστε να αφαιρεθεί το τεμάχιο και ο κύκλος αυτός επαναλαμβάνεται.



Ανάλυση και τεκμηρίωση δεδομένων για την αντοχή σε εφελκυσμό δοκιμών κατασκευασμένων από υλικό ABS και ABS Plus σε τρισδιάστατο εκτυπωτή

Μεγάλο πλεονέκτημα της διαδικασίας αυτής είναι η ταχύτητα με την οποία μπορούν να παραχθούν τα τεμάχια. Ιδιαίτερα, τα θερμοπλαστικά, χρειάζονται πολύ λίγο χρόνο για τη διαδικασία της στερεοποίησης, έτσι ένας κύκλος μπορεί να είναι πολύ σύντομος συνήθως 10 - 30 δευτερόλεπτα [16].

Η μέθοδος αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη κατασκευή τεμαχίων που δε χρειάζονται μεγάλη κατεργασία, δηλαδή μετά τη τύπωσή τους από το καλούπι είναι σχεδόν έτοιμα. Μερικά από τα πράγματα που μπορούν να κατασκευαστούν έτσι είναι: θήκες για CD, σύριγγες, ταμπλό αυτοκινήτων, θήκες μπαταριών, πλαστικές καρτέλες, κουτιά ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών συσκευών, κ.α.

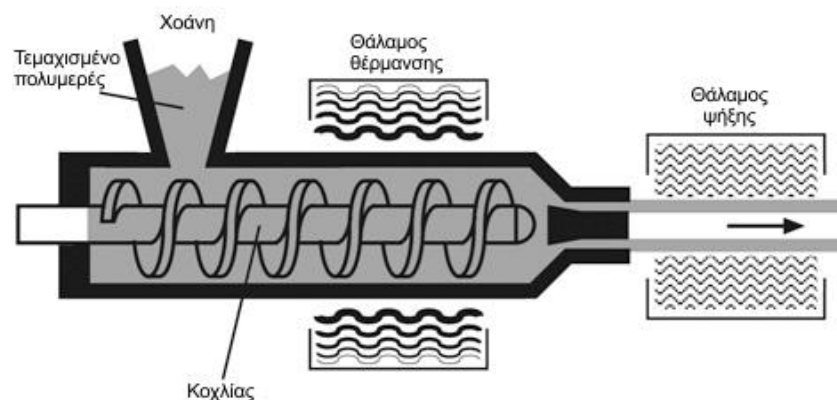


Εικόνα 1.1.4.1.1: Σχηματικό διάγραμμα συσκευής χύτευσης με έγχυση.

1.1.4.2 Εξώθηση

Με τη κατεργασία αυτή, παρόμοια με την έγχυση, μία μήτρα με ανοιχτό άκρο τροφοδοτείται με τεμαχισμένο υλικό το οποίο με τη βοήθεια ενός κοχλίου προωθείται μέσω ενός θαλάμου ενώ παράλληλα συμπιέζεται, τήκεται, και μορφοποιείται μέσα σε συνεχές φορτίο παχύρρευστου υγρού. Η εξώθηση γίνεται κατά τη διαδικασία όπου το υγρό υλικό ωθείται μέσω ενός ακροφυσίου. Για να στερεοποιηθεί, γίνεται έγχυση αέρα ή ψεκασμός νερού πριν περάσει μέσα από κινητό μεταφορέα.

Πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι ότι μπορούν να παραχθούν συνεχή επιμήκη τεμάχια με σταθερές γεωμετρικές διατομές όπως σωλήνες, ράβδοι, φύλλα και λεπτά νήματα.



Εικόνα 1.1.4.2.1: Σχηματικό διάγραμμα συσκευής εξώθησης.

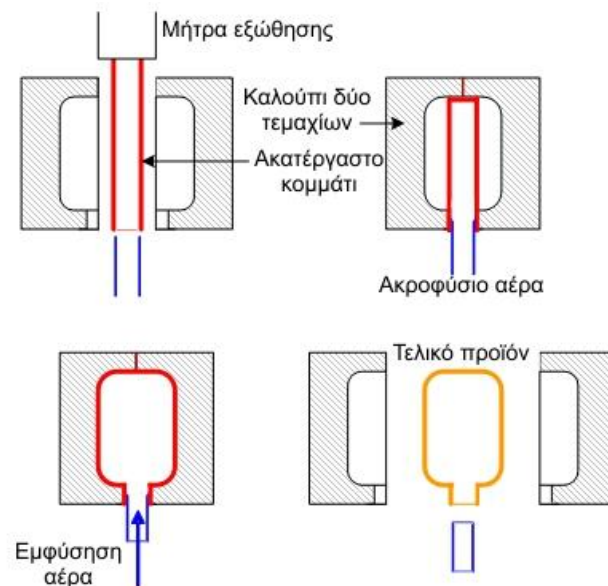
1.1.4.3 Χύτευση με Εμφύσηση

Η διαδικασία αυτού του είδους χύτευσης χρησιμοποιείται για την κατασκευή πλαστικών δοχείων όπως μπιτόνια καυσίμων, βαρέλια, διάφορα είδη μπουκαλιών όπως τροφίμων και είναι παρόμοια με εκείνη των γυάλινων μπουκαλιών. Αρχικά ένα ακατέργαστο κομμάτι πολυμερούς ή ένα κομμάτι πολυμερούς σωλήνα εξωθείται και ενώ βρίσκεται σε ημιτηγμένη φάση, τοποθετείται σε ένα καλούπι που έχει το επιθυμητό σχήμα.

Στη συνέχεια, το κούφιο δοχείο σχηματίζεται εμφυσώντας αέρα ή ατμό υπό πίεση μέσα στο τεμάχιο, υποχρεώνοντας τα τοιχώματα του πολυμερούς να ακολουθήσουν το

Ανάλυση και τεκμηρίωση δεδομένων για την αντοχή σε εφελκυσμό δοκιμίων κατασκευασμένων από υλικό ABS και ABS Plus σε τρισδιάστατο εκτυπωτή

περίγραμμα του καλουπιού. Μεγάλη σημασία έχουν η θερμοκρασία και το ιξώδες των οποίων η παρακολούθηση πρέπει να είναι συνεχής.

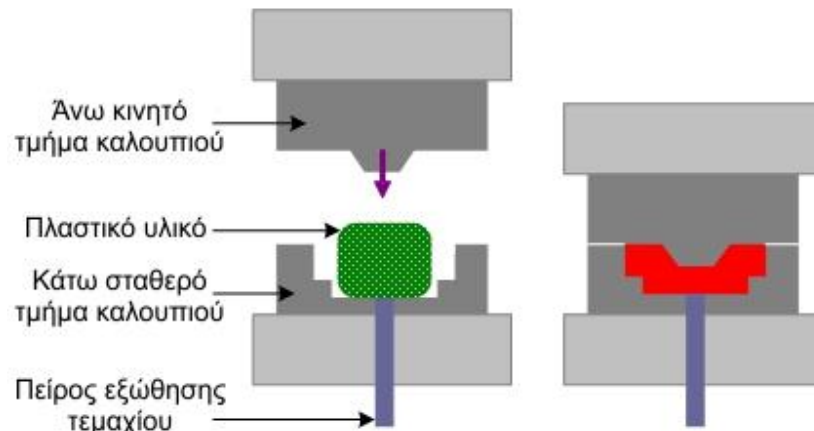


Εικόνα 1.1.4.3.1: Σχηματικό διάγραμμα συσκευής χύτευσης με εμφύσηση.

1.1.4.4 Χύτευση με Συμπίεση

Για να πραγματοποιηθεί αυτό το είδος χύτευσης, χρειάζεται να τοποθετηθεί το πολύ καλά αναμιγμένο πολυμερές ανάμεσα στο θηλυκό και το αρσενικό τμήμα ενός καλουπιού. Τα τμήματα του καλουπιού θερμαίνονται αλλά μόνο το ένα από τα δύο μπορεί να κινηθεί. Αφού το καλούπι σφραγιστεί, τότε αρχίζει να εφαρμόζεται θερμότητα και πίεση ώστε το υλικό να λιώσει και να πάρει την μορφή του καλουπιού. Κύριο μειονέκτημα της διαδικασίας αυτής είναι ότι η χρήση της σε θερμοπλαστικά απαιτεί περισσότερο χρόνο και είναι δαπανηρή.

Με τη μέθοδο αυτή μπορούν να παραχθούν τεμάχια όπως: χερούλια συσκευών, μαγειρικά σκεύη όπως πλαστικά πιάτα, μαχαιροπήρουνα, προφυλακτήρες και αεροτομές για την αυτοκινητοβιομηχανία, κ.α.



Εικόνα 1.1.4.4.1: Σχηματικό διάγραμμα συσκευής χύτευσης με συμπίεση.

1.1.4.5 Θερμική Διαμόρφωση

Η θερμική διαμόρφωση είναι μία διαδικασία η οποία χρησιμοποιείται συνήθως σε θερμοπλαστικά τα οποία βρίσκονται σε μορφή φύλλου. Τα φύλλα αυτά αφού συγκρατηθούν από κάποιους σφιγκτήρες, θερμαίνονται για να μαλακώσουν και έπειτα χρησιμοποιώντας κάποιες μεθόδους, παίρνουν τη μορφή του καλουπιού με το οποίο θα γίνει η κατεργασία.

Υπάρχουν τρεις βασικοί μέθοδοι θερμικής διαμόρφωσης και είναι οι εξής:

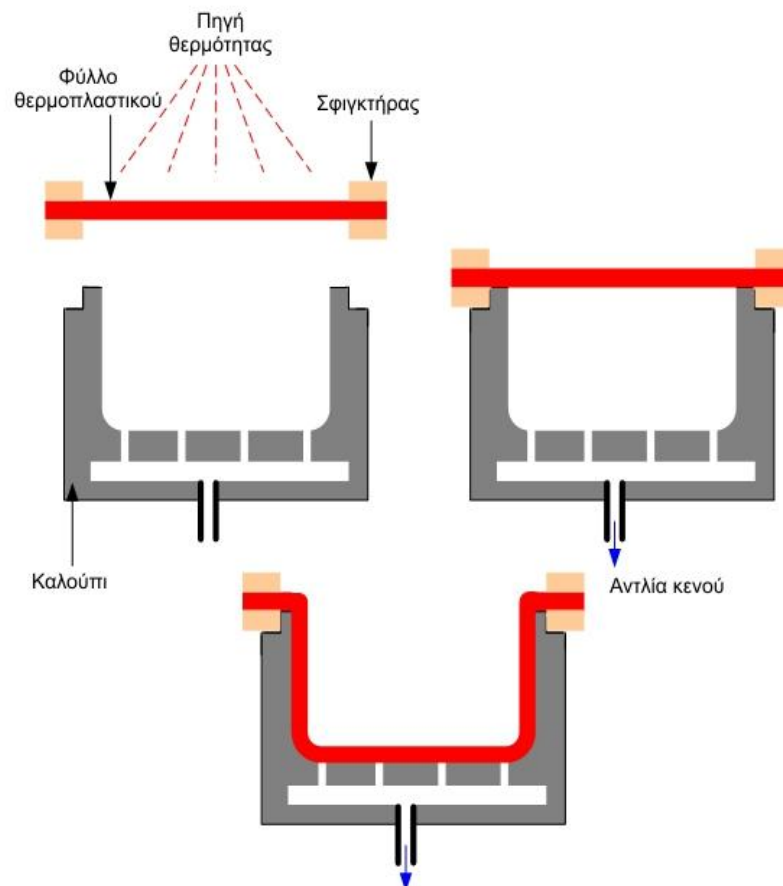
1. Θερμική διαμόρφωση σε κενό αέρος.
2. Θερμική διαμόρφωση υπό πίεση.
3. Μηχανική θερμική διαμόρφωση.

1.1.4.5.1 Θερμική Διαμόρφωση σε Κενό Αέρος

Σε αυτή τη περίπτωση θερμικής διαμόρφωσης, αφού το φύλλο πλαστικού ασφαλιστεί με τους σφιγκτήρες, θερμαίνεται και η ατμοσφαιρική πίεση κάνει το μαλακό φύλλο πλαστικού να παραμορφωθεί. Το φύλλο μετά από ένα χρονικό διάστημα θα φτάσει στα τοιχώματα του καλουπιού όπου θα σταματήσει και θα ψηχθεί. Για να πάρει τη μορφή του καλουπιού, το φύλλο, θα πρέπει να μην υπάρχει αέρας στο κάτω μέρος του συστήματος. Έτσι, υπάρχει και μία αντλία κενού η οποία τον αφαιρεί.

Ανάλυση και τεκμηρίωση δεδομένων για την αντοχή σε εφελκυσμό δοκιμίων κατασκευασμένων από υλικό ABS και ABS Plus σε τρισδιάστατο εκτυπωτή

Η διαμόρφωση αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη παραγωγή πλαστικών τεμαχίων και περιβλημάτων που έχουν μεγάλη επιφάνεια και όγκο όπως: εξωτερικές επιγραφές καταστημάτων, μπανιέρες, εξωτερικά περιβλήματα και κουτιά μηχανημάτων, γάστρα σκαφών, ράφια και κουτιά ψυγείων, τμήματα της καμπίνας των αυτοκινήτων όπως της πόρτας, κ.α.

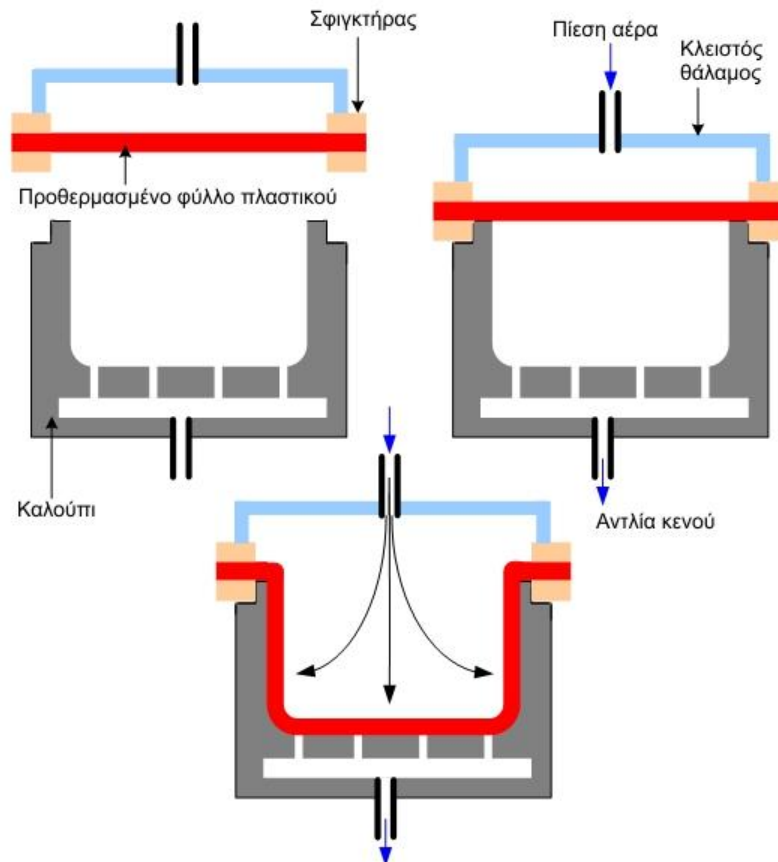


Εικόνα 1.1.4.5.1.1: Σχηματικό διάγραμμα συσκευής θερμικής διαμόρφωσης σε κενό αέρος.

1.1.4.5.2 Θερμική Διαμόρφωση Υπό Πίεση

Το προθερμασμένο φύλλο πλαστικού τοποθετείται ενδιάμεσα σε ένα σφραγισμένο θάλαμο όπου στο επάνω μέρος εφαρμόζεται πίεση αέρα ο οποίος ωθεί το φύλλο προς τα τοιχώματα του καλουπιού. Από το κάτω μέρος υπάρχει αντλία κενού ώστε να αφαιρεί τον αέρα όπως και στη προηγούμενη περίπτωση.

Αν και χρησιμοποιούνται για τον ίδιο σκοπό, η βασική διαφορά με τη προηγούμενη μέθοδο είναι ότι με αυτή μπορούν να παραχθούν αντικείμενα τα οποία απαιτούν λεπτομέρειες και μεγαλύτερη αισθητική όπως είναι οι απότομες γωνίες, γράμματα, ειδική υφή επιφάνειας, κ.α.



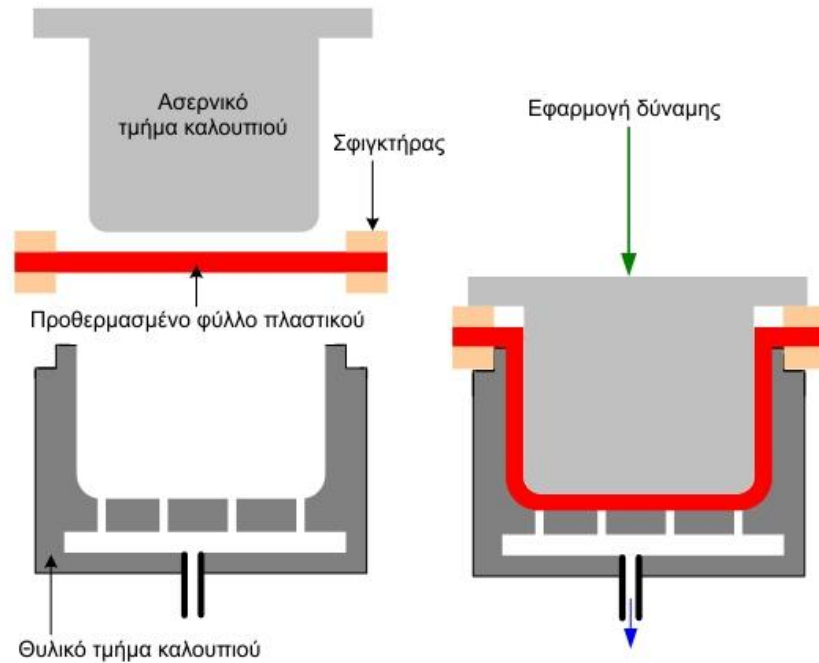
Εικόνα 1.1.4.5.2.1: Σχηματικό διάγραμμα συσκευής θερμικής διαμόρφωσης σε κενό αέρος.

1.1.4.5.3 Μηχανική Θερμική Διαμόρφωση

Στη μηχανική θερμική διαμόρφωση χρησιμοποιείται ένα έμβολο - αρσενικό τμήμα καλουπιού το οποίο ασκεί δύναμη πάνω στο προθερμασμένο πλαστικό φύλλο, αναγκάζοντάς το να γεμίσει τον χώρο ανάμεσα στα δύο τμήματα του καλουπιού. ενώ όπως και πριν υπάρχει αντλία κενού για να αφαιρεί τον αέρα και να βοηθά το φύλλο να εφαρμόσει πάνω στο καλούπι.

Ανάλυση και τεκμηρίωση δεδομένων για την αντοχή σε εφελκυσμό δοκιμίων κατασκευασμένων από υλικό ABS και ABS Plus σε τρισδιάστατο εκτυπωτή

Με τη μέθοδο αυτή επιτυγχάνεται καλύτερος έλεγχος των διαστάσεων του αντικειμένου αλλά και η δημιουργία ανάγλυφων επιφανειών και στην εσωτερική και την εξωτερική επιφάνεια.



Εικόνα 1.1.4.5.3.1: Σχηματικό διάγραμμα συσκευής μηχανικής θερμικής διαμόρφωσης.

1.1.5 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα

Όντας συμπολυμερές, τριών διαφορετικών μονομερών, το ABS διαθέτει αρκετά χαρακτηριστικά και ιδιότητες, τα οποία το καθιστούν ένα εξαιρετικό θερμοπλαστικό.

Αρχικά κάποια από τα πλεονεκτήματα που διαθέτει είναι τα εξής:

- Υψηλή αντοχή σε κρουστικά φορτία.
- Μεγάλη αντοχή σε εφελκυσμό λόγο μεγάλης ακαμψίας.
- Εξαιρετική ευκολία και ποικιλία στην επεξεργασία του.
- Ικανοποιητική σταθερότητα στις διαστάσεις του.
- Καλή ηλεκτρική μόνωση.

- Ποικιλία χρωμάτων - υψηλή γυαλάδα.
- Ευκολία στην ανακύκλωσή του.

Η ισορροπία που έχει το ABS στις ιδιότητές του δεν παρουσιάζεται σε κανένα άλλο πλαστικό υλικό. Έτσι, προτιμάται για αρκετές εφαρμογές αφού είναι εύκολο να γίνουν προσαρμογές στις ιδιότητές του, αλλάζοντας τις περιεκτικότητες των μονομερών ανάλογα τη περίπτωση.

Από την άλλη μεριά, το ABS έχει και έναν αριθμό μειονεκτημάτων και περιορισμών. Ορισμένα από αυτά παρουσιάζονται παρακάτω:

- Περιορισμένη χημική αντίσταση σε οξέα, αλκάλια και υδρογονάνθρακες.
- Εύφλεκτο με μεγάλη παραγωγή καπνού.
- Μέτρια αντίσταση σε θερμοκρασία και υγρασία.
- Δεν είναι κατάλληλο για συνεχή έκθεση σε υπεριώδεις ακτινοβολίες.
- Μέτριες διηλεκτρικές ιδιότητες.
- Σχετικά μεγάλο κόστος.

1.2 Acrylonitrile Butadiene Styrene Plus

1.2.1 Εισαγωγικά Στοιχεία

Το ABS Plus όπως και το ABS ανήκει στη κατηγορία των θερμοπλαστικών. Είναι ένα υλικό το οποίο αναπτύχθηκε κυρίως για να χρησιμοποιείται από τη τεχνολογία των τρισδιάστατων εκτυπωτών (*3D Printer*) της εταιρίας Stratasys. Οι προδιαγραφές του υλικού είναι ιδανικές για τη κατασκευή υψηλής ποιότητας πρωτοτύπων.

Οι περιεκτικότητες των συστατικών του είναι οι εξής:

- 70-75% συμπολυμερές μεθακρυλικού μεθυλεστέρα - ακρυλονιτριλίου - βουταδιενίου - στυρενίου.
- 25-30% 2-προπενονιτρίλιο, πολυμερές με αιθενυλοβενζόλιο.



Ανάλυση και τεκμηρίωση δεδομένων για την αντοχή σε εφελκυσμό δοκιμίων κατασκευασμένων από υλικό ABS και ABS Plus σε τρισδιάστατο εκτυπωτή

1.2.2 Ιδιότητες

Το ABS Plus είναι υλικό με βελτιωμένες ιδιότητες σε σχέση με το κοινό ABS. Ειδικότερα έχει 40% μεγαλύτερη αντοχή, είναι πιο σταθερό σε συνθήκες περιβάλλοντος (δε στρεβλώνεται, δε συρρικνώνεται, δεν απορροφά υγρασία), προσφέρει ομαλότερες επιφάνειες στα πρωτότυπα με καλύτερα χαρακτηριστικά και λεπτομέρεια ενώ μπορεί να παραχθεί σε μεγάλη γκάμα χρωμάτων [17].

Οι ιδιότητες του υλικού αναγράφονται στους παρακάτω πίνακες του κατασκευαστή:

Μηχανικές Ιδιότητες	Πρότυπο δοκιμής	Τιμές
Αντοχή Εφελκυσμού, Τύπος 1, 0.125, 0.2*/min	ASTM D638	37 MPa
Μέτρο Ελαστικότητας, Τύπος 1, 0.125, 0.2*/min	ASTM D638	2,320 MPa
Ποσοστό Επιμήκυνσης, Τύπος 1, 0.125, 0.2*/min	ASTM D638	3%
Αποκόλληση λόγω Καμπτικών Ρωγμών	ASTM D790	31 MPa
Αντοχή σε Κάμψη, Μέθοδος 1, 0.05*/min	ASTM D790	53 MPa
Μέτρο Ελαστικότητας σε Κάμψη, Μέθοδος 1, 0.05*/min	ASTM D790	2,250 MPa
Αντοχή σε κρούση, IZOD, με εγκοπή, Μέθοδος A 23°C	ASTM D256	106 J/m

Πίνακας 1.2.2.1: Πίνακας μηχανικών ιδιοτήτων του ABS Plus [18].

Θερμικές Ιδιότητες	Πρότυπο δοκιμής	Τιμές
Θερμοκρασιακή Αντοχή @ 66 psi	ASTM D648	96°C
Θερμοκρασιακή Αντοχή @ 264 psi	ASTM D648	82°C
Θερμοκρασία Υαλώδους Μετάπτωσης (Tg)	DMA (SSYS)	108°C
Συντελεστής Θερμικής Διαστολής	ASTM D831	4.90E-05 in/in/°F

Πίνακας 1.2.2.2: Πίνακας θερμικών ιδιοτήτων του ABS Plus [18].

Άλλα	Πρότυπο δοκιμής	Τιμές
Ειδικό Βάρος	ASTM D792	1.04
Διάδοση Φλόγας	UL 94	HB
Διηλεκτρική Αντοχή kV/mm	IEC 60112	28 kV/mm
Διηλεκτρική Σταθερά	ASTM D150-98	2.9 - 2.6

Πίνακας 1.2.2.3: Πίνακας λοιπών ιδιοτήτων του ABS Plus [18].

Κεφάλαιο 2: Εργαστηριακός Εξοπλισμός

2.1 Οι Τρισδιάστατοι Εκτυπωτές (3D Printers)

2.1.1 Εισαγωγικά Στοιχεία

Η τρισδιάστατη εκτύπωση είναι μία διαδικασία κατασκευής τρισδιάστατων στερεών αντικειμένων σε οποιοδήποτε σχήμα και γεωμετρία που έχει σχεδιαστεί σε ένα ψηφιακό μοντέλο CAD (*computer aided design*) ή έχει σαρωθεί από ένα τρισδιάστατο σαρωτή. Η τεχνολογία αυτή χρησιμοποιεί μία προσθετική διαδικασία όπου διαδοχικές στρώσεις υλικού (*layer by layer*), η μία πάνω από την άλλη, συνθέτουν ένα αντικείμενο [19].

Οι τρισδιάστατοι εκτυπωτές χρησιμοποιούνται σε πολλούς τομείς όπως των κοσμημάτων, των υποδημάτων, της αρχιτεκτονικής, του βιομηχανικού σχεδιασμού, στην αεροδιαστημική, της μηχανικής, στην αυτοκινητοβιομηχανία, την οδοντιατρική, στην ιατρική βιομηχανία, τη χαρτογράφηση πληροφοριακών συστημάτων, την εκπαίδευση, σε έργα πολιτικών μηχανικών και πολλούς ακόμη άλλους.

Βασίζονται σε διάφορες τεχνολογίες και ανάλογα το υλικό και τη γεωμετρία που πρέπει να κατασκευαστεί χρησιμοποιείται η καταλληλότερη. Οι βασικότερες τεχνολογίες είναι οι εξής:

- *SLA (stereo lithography apparatus)*: Ρητίνες σε υγρή μορφή στερεοποιούνται με τη βοήθεια ακτίνας laser. Στο τέλος μένει το πρωτότυπο με τα στηρίγματα ενώ η υπόλοιπη ρητίνη απομακρύνεται. Έχει πολύ μεγάλη ακρίβεια και παράγει πολύπλοκες γεωμετρίες.
- *FDM (fused deposition modeling)*: Λιωμένο θερμοπλαστικό εξωθείται από κεφαλή εκτύπωσης με ελεγχόμενη θερμοκρασία. Αφού εγχυθεί το υλικό η θερμοκρασία του πέφτει και στερεοποιείται, χτίζοντας έτσι το πρωτότυπο. Έχει ικανοποιητική ποιότητα επιφάνειας.

- SLS (*selective laser sintering*): Μία μεγάλη γκάμα υλικών όπως κερί, κεραμικά, μέταλλα, νάιλον κ.α. υπό τη μορφή σκόνης στερεοποιούνται με τη βοήθεια ακτίνας laser. Οι τελικές επιφάνειες είναι τραχείες και χρειάζονται περαιτέρω κατεργασία για βελτίωση. Όμως τα παραγόμενα αντικείμενα έχουν μεγάλη αντοχή και δεν απαιτούνται στηρίγματα.
- MJM (*multi-jet modeling*): Χρησιμοποιώντας υλικά υπό μορφή σκόνης (συνήθως φωτο-πολυμερές υλικό), μία κεφαλή παρόμοια με του τύπου inkjet ψεκάζει το υλικό σε συνδετικό διάλυμα που κολλάει επιλεκτικά τους κόκκους.

2.1.2 Εισαγωγικά Στοιχεία

Για την εκπόνηση του πειράματος εφελκυσμού και τη κατασκευή των δοκιμίων χρησιμοποιήθηκαν οι τρισδιάστατοι εκτυπωτές που βρίσκονται στο εργαστήριο Ρομποτικής του τμήματος Μηχανολογίας του ΤΕΙ Κρήτης (*Εικόνα 2.1.2.1*). Οι εκτυπωτές αυτοί είναι:

1. Stratasys - Dimension Elite
2. Stratasys - Dimension BST 768

Αυτοί οι εκτυπωτές λειτουργούν βάση την FDM τεχνολογία, είναι πανομοιότυποι με διαφορά ότι ο Dimension Elite υποστηρίζει τη χρήση υδατοδιαλυτών στηριγμάτων.

Ανάλυση και τεκμηρίωση δεδομένων για την αντοχή σε εφελκυσμό δοκιμών κατασκευασμένων από υλικό ABS και ABS Plus σε τρισδιάστατο εκτυπωτή

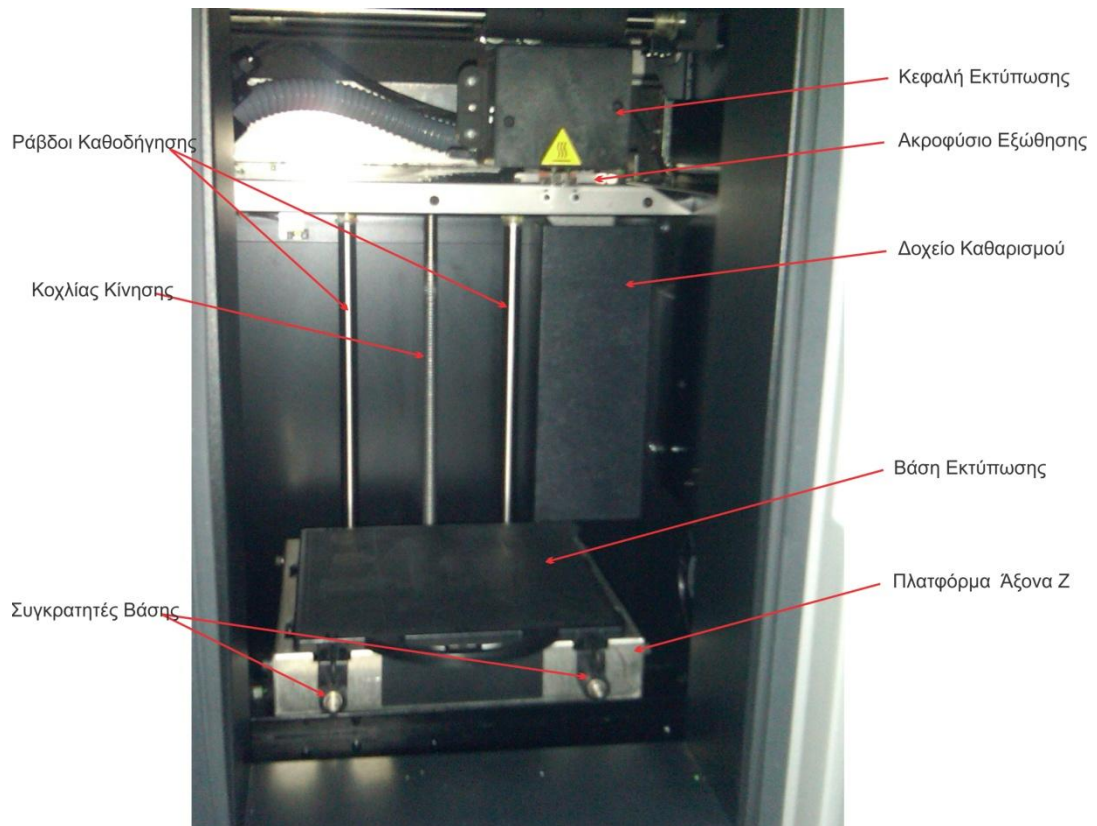


Εικόνα 2.1.2.1: *Dimension Elite* (αριστερά) και *Dimension BST 768* (δεξιά).

Οι τρισδιάστατοι εκτυπωτές Dimension χρησιμοποιούν το λογισμικό Catalyst EX 4.2 για να επικοινωνήσει ο χρήστης τους με τη βοήθεια του υπολογιστή που βρίσκεται συνδεδεμένος στο ίδιο δίκτυο με αυτούς. Αφού φορτωθεί το σχέδιο CAD στον εκτυπωτή μέσω του λογισμικού και γίνει η "μετάφραση" μέσω του compiler η εκτύπωση ξεκινάει.

Ο εκτυπωτής λειτουργεί αθόρυβα και χωρίς να απαιτείται επιτήρηση. Η εκτύπωση πραγματοποιείται σε ξεχωριστό αεροστεγή θάλαμο (στο επάνω μέρος του μηχανήματος) μεγιστοποιώντας έτσι την αποδοτικότητά τους και την ποιότητα του αντικειμένου αφού μηδενίζονται οι ανεπιθύμητες ενοχλήσεις από το εξωτερικό περιβάλλον (*Εικόνα 1.3.2.2*).

Το υλικό που χρησιμοποιείται από τον εκτυπωτή βρίσκεται μέσα σε μία κασέτα η οποία τοποθετείται στις ειδικές εσοχές του.



Εικόνα 1.3.2.2: Εσωτερικός θάλαμος εκτύπωσης του εκτυπωτή.

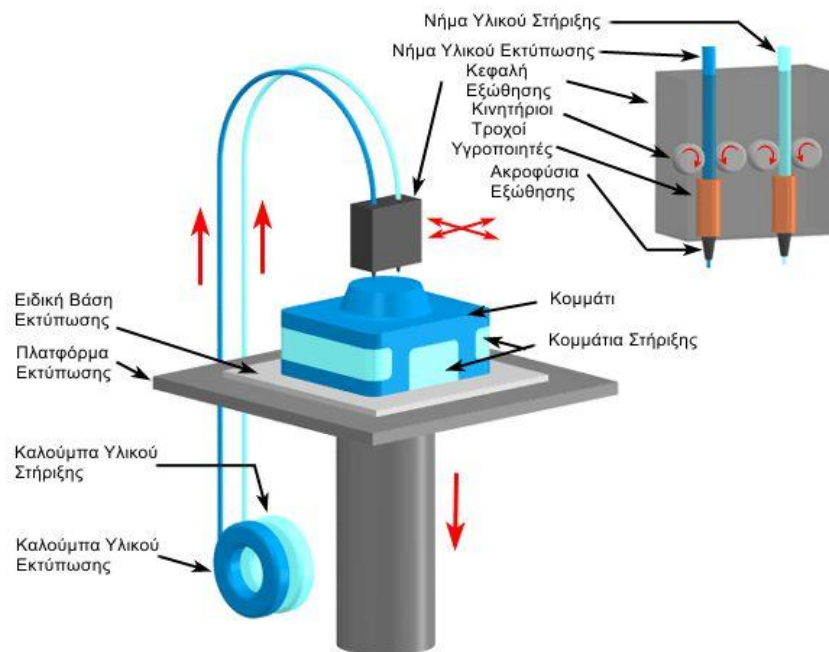
2.1.3 Διαδικασία Τρισδιάστατης Εκτύπωσης

Όπως προαναφέρθηκε, οι τρισδιάστατοι εκτυπωτές λειτουργούν με βάση την FDM τεχνολογία. Η διαδικασία ξεκινά φορτώνοντας ένα STL αρχείο στον εκτυπωτή. Στη συνέχεια το αρχείο αυτό αναλύεται μαθηματικά έτσι ώστε να οριστούν οι συνθήκες εκτύπωσης. Σε περίπτωση που το υποστηρίζει και ο εκτυπωτής, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και στηρίγματα.

Η εκτύπωση γίνεται πάνω σε μία ειδική βάση, όπου το υλικό εναποθέτεται μέσω μίας κεφαλής εξώθησης, η οποία τοποθετείται πάνω στη πλατφόρμα εκτύπωσης. Μέσα στη κεφαλή εξώθησης υπάρχουν κινητήριοι τροχοί οι οποίοι τραβούν υλικό που είναι σε μορφή νήματος από τη καλούμπα. Έπειτα το νήμα θερμαίνεται μέσω ειδικών υγροποιητών και από εκεί οδηγείται προς τα ακροφύσια εξώθησης από όπου και βγαίνει το υλικό (Εικόνα 2.1.3.1).

Ανάλυση και τεκμηρίωση δεδομένων για την αντοχή σε εφελκυσμό δοκιμών κατασκευασμένων από υλικό ABS και ABS Plus σε τρισδιάστατο εκτυπωτή

Μέσω του λογισμικού του εκτυπωτή υπάρχει η δυνατότητα ορισμού του πάχους εκτύπωσης του υλικού, της διεύθυνσης εκτύπωσης, τοποθέτησης του τεμαχίου στη βάση, της κλίμακας του υλικού, κ.α.



Εικόνα 2.1.3.1: Σχηματικό διάγραμμα διαδικασίας τρισδιάστατης εκτύπωσης με βάση τη τεχνολογία FDM.

2.1.4 Πλεονεκτήματα Τρισδιάστατης Εκτύπωσης

Οι τρισδιάστατοι εκτυπωτές έχουν παρόμοια αρχή λειτουργίας με αυτή των FDM συστημάτων αλλά με σημαντικά χαμηλότερη ακρίβεια στην ποιότητα της επιφάνειας. Μερικά από τα πλεονεκτήματα τα οποία τη καθιστούν μία από τις προτιμότερες τεχνολογίες, είναι τα εξής [19]:

- Δημιουργούνται κομμάτια από πλαστικό σε επιτραπέζια συστήματα.
- Έχει παρόμοια χαρακτηριστικά με την FDM, αλλά με πιο χαμηλή
- ακρίβεια και κόστος.
- Μεγάλη ταχύτητα κατασκευής κομματιών.

- Δυνατότητα χρήσης χρωμάτων.
- Μεγάλη αντοχή των κομματιών.
- Δυνατότητα δημιουργίας πολύπλοκων γεωμετριών.
- Ικανοποιητική ποιότητα επιφάνειας.

2.1.5 Τεχνικά Χαρακτηριστικά

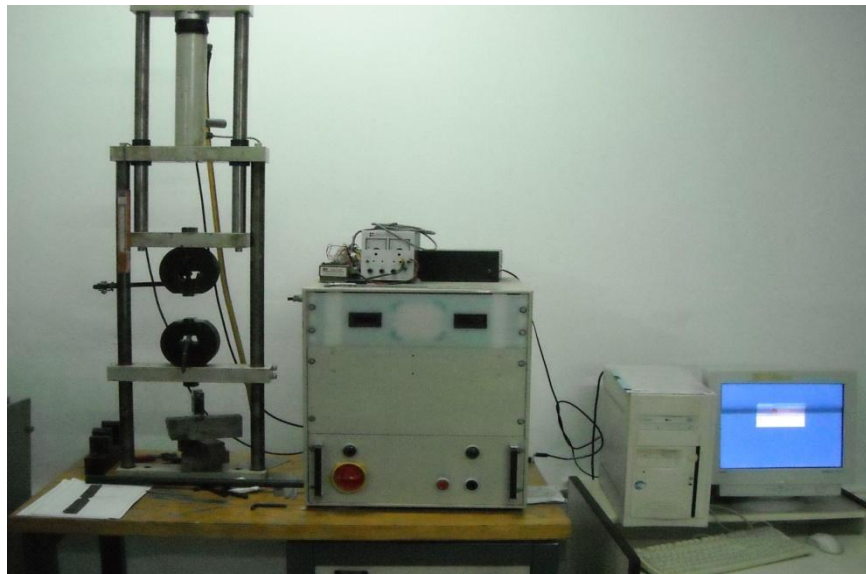
- **Συμβατά υλικά:** ABS και ABS Plus σε οποιαδήποτε απόχρωση.
- **Υλικό στηρίγματος:** Τεχνολογία υδατοδιαλυτού υλικού στηρίγματος (*SST, soluble support technology*).
- **Θάλαμος εκτύπωσης:** 203 x 203 x 305 mm.
- **Πάχος στρώσης υλικού:** 0.178 mm ή 0.254 mm σε ιδανικά τοποθετημένο υλικό (ABS Plus και υλικό στήριξης).
- **Συμβατότητα εκτυπωτή:** Windows Vista.
- **Συνδεσιμότητα δικτύου:** Ethernet TCP/IP 10/100Base-T.
- **Μέγεθος και βάρος:** 686 x 914 x 1041 mm και 136 kg.
- **Απαιτήσεις Τροφοδότησης:** 110-120 VAC, 60Hz, το λιγότερο 15A δεσμευμένα για το κύκλωμα, ή 220-240 VAC, 50/60 Hz, το λιγότερο 7A δεσμευμένα για το κύκλωμα.
- **Ρυθμιστική συμβατότητα:** CE/ ETL.
- **Ειδικές απαιτήσεις εγκατάστασης:** Καμία.



2.2 Μηχάνημα Εφελκυσμού

Ως μηχανές εφελκυσμού (Εικόνα 2.2.1) ορίζονται οι μηχανές οι οποίες μπορούν να εφαρμόσουν ελεγχόμενο εφελκυστικό φορτίο στα δοκίμια εφελκυσμού. Ακόμη μπορούν να μεταβάλλουν την ταχύτητα εφαρμογής του φορτίου και να μετρήσουν με ακρίβεια τις δυνάμεις, παραμορφώσεις και επιμηκύνσεις, κατά την εκτέλεση της δοκιμής.

Η δοκιμή σε εφελκυσμό (*Tensile testing*) περιλαμβάνει τη πάκτωση ενός κατάλληλου δοκιμίου στις αρπάγες της μηχανής εφελκυσμού και τη φόρτισή του σε μονοαξονικό προοδευτικά αυξανόμενο φορτίο, μέχρι την τελική του θραύση (Εικόνα 2.2.2).



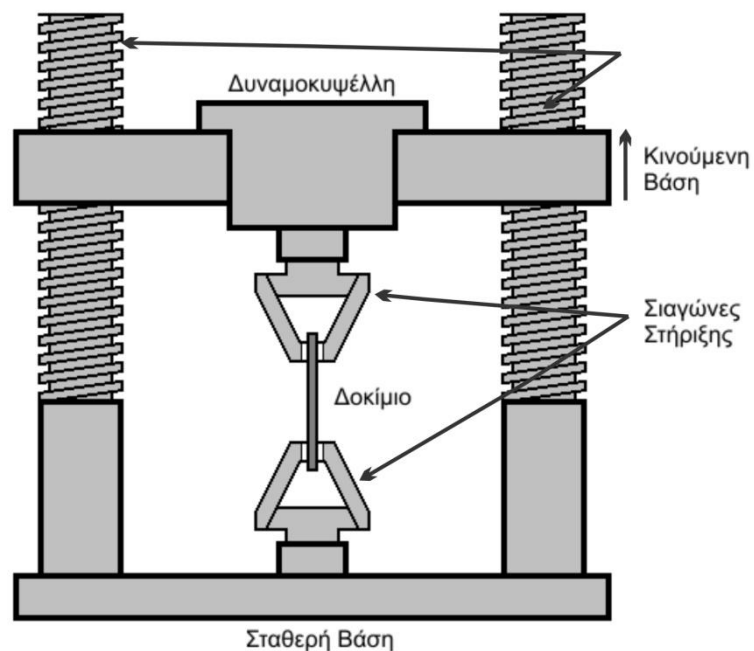
Εικόνα 2.2.1: Μηχάνημα εφελκυσμού εργαστηρίου.

Με βάση το πρότυπο ASTM D 638 ορίζεται η ταχύτητα ελέγχου των δοκιμίων και ο ρυθμός παραμόρφωσης. Αφού γίνει η εισαγωγή των προϋποθέσεων και των συνθηκών του πειράματος τοποθετούνται τα δοκίμια στο μηχάνημα και ξεκινά η εφαρμογή των εφελκυστικών φορτίων.

Στη συνέχεια, μετά την εφαρμογή των φορτίων γίνεται η συλλογή των δεδομένων μέσω του υπολογιστή ο οποίος είναι συνδεδεμένος με το μηχάνημα εφελκυσμού. Ο υπολογιστής μέσω του λογισμικού *Lab View* καταγράφει τα φορτία και τις επιμηκύνσεις σε πολύ μικρά χρονικά διαστήματα.

Μετά τη δοκιμή της αντοχής των δοκιμίων οι τιμές κατατάσσονται σε πίνακες. Πραγματοποιείται επεξεργασία των αποτελεσμάτων ώστε να απομακρυνθούν λανθασμένες τιμές που δόθηκαν κατά την εκκίνηση της εφαρμογής των τάσεων.

Τέλος, αποσπώνται οι επιθυμητές τιμές από τους πίνακες και έτσι κατασκευάζονται οι γραφικές παραστάσεις, για τη καλύτερη κατανόηση των αποτελεσμάτων, και οι τελικές τιμές οι οποίες δείχνουν τις αντοχές των δοκιμίων.



Εικόνα 2.2.2:

Σχηματικό διάγραμμα διαδικασίας τοποθέτησης δοκιμίου και εφαρμογής εφελκυστικών φορτίων.

2.3 Scanning Electron Microscope (SEM)

2.3.1 Εισαγωγικά Στοιχεία

Για να πραγματοποιηθεί έλεγχος της ποιότητας εκτύπωσης και η εύρεση του πορώδους επιλέχθηκε η χρήση ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης (SEM). Κατά τη χρήση του μηχανήματος αυτού γίνεται αναπαράσταση του δείγματος εκθέτοντάς το σε μία ακτίνα ηλεκτρονίων υψηλής ενέργειας. Με την ακτίνα αυτή σαρώνεται το δείγμα. Τα ηλεκτρόνια αλληλεπιδρούν με τα άτομα του δείγματος και μετά ανιχνεύονται δίνοντας πληροφορίες για την τοπογραφία, τη χημική σύσταση και τη δομή του δείγματος.

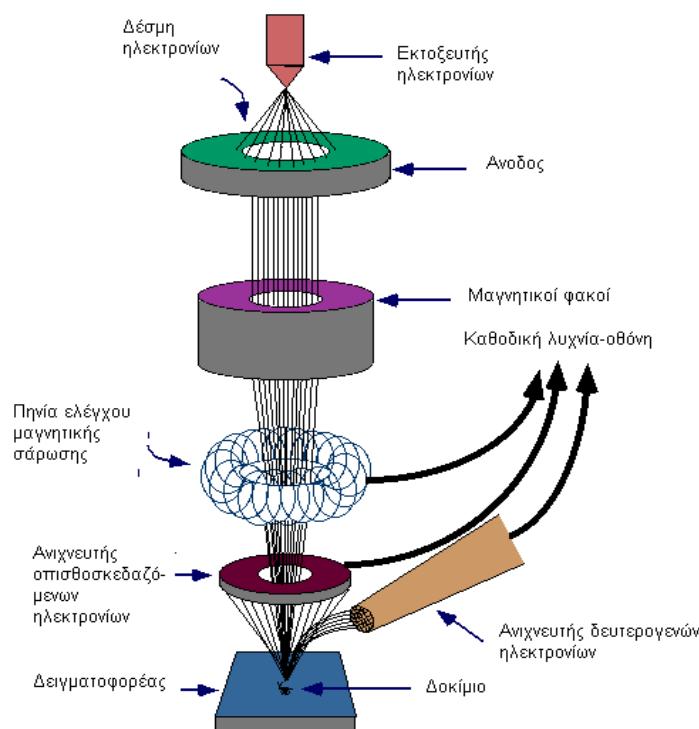
Η ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης, είναι χρήσιμη σε πολλά είδη ερευνών διότι παρέχει πραγματική εικόνα ενός δοκιμίου σε αντίθεση με τεχνολογίες όπως το XRD και το Raman. Έπειτα η εικόνα είναι πολύ περισσότερο τρισδιάστατη από την εικόνα του μηχανήματος TEM, ενώ χρησιμοποιείται για σκληρά δείγματα.

2.3.2 Λειτουργία του SEM

Το SEM έχει διακριτική ικανότητα έως και 1-5 nm. Εξ' αιτίας του μηχανισμού με τον οποίο λειτουργεί, παρέχεται ένα υψηλό βάθος επιπέδου που έχει ως αποτέλεσμα να εμφανίζει εικόνα του δείγματος σχεδόν τρισδιάστατη. Το μηχάνημα παρέχει τρία είδη σήματος: Το πρώτο χρησιμοποιεί τα δευτερεύοντα ηλεκτρόνια, παρέχει τοπογραφικές λεπτομέρειες και ονομάζεται *Secondary Electron Image* (SEI). Το δεύτερο χρησιμοποιεί τα σκεδαζόμενα ηλεκτρόνια, δίνοντας έτσι πληροφορίες για τη σύσταση του δείγματος και ονομάζεται *Backscattered Electron Image* (BES). Τελικά, το τρίτο δίνει πληροφορίες για την ταυτότητα του δείγματος χρησιμοποιώντας ακτίνες X και ονομάζεται *Energy Dispersive X-ray* (EDX).

Οι βασικές διατάξεις που υπάρχουν στο μικροσκόπιο είναι το σύστημα παραγωγής δέσμης ηλεκτρονίων, το σύστημα κατεύθυνσης της δέσμης, το σύστημα πληροφοριών και το σύστημα κενού. Τα βασικά στάδια λειτουργίας ενός ηλεκτρονικού μικροσκοπίου είναι:

- Σχηματισμός δέσμης ηλεκτρονίων από πηγή η οποία επιταχύνεται προς το δείγμα μέσω ενός θετικού ηλεκτρικού δυναμικού.
- Σάρωση της επιφάνειας του δοκιμίου μέσω μίας λεπτής εστιασμένης μονοχρωματικής δέσμης η οποία κατευθύνεται χρησιμοποιώντας μεταλλικά ανοίγματα, ηλεκτρομαγνητικούς φακούς και πηνία σάρωσης
- Καταγραφή και μετατροπή των αλληλεπιδράσεων της δέσμης με το δοκίμιο από τους ανιχνευτές σε εικόνα.



Εικόνα 2.3.2.1: Σχηματικό διάγραμμα τμηματοποίησης ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης.

Το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης αποτελείται από τα παρακάτω μέρη:

- **Πυροβόλο ηλεκτρονίων:** Βρίσκεται στο πάνω μέρος του μηχανήματος όπου παράγονται ελεύθερα ηλεκτρόνια από θερμική εκπομπή μέσω ενός νήματος βολφραμίου. Το νήμα αυτό βρίσκεται μέσα σε ένα κύλινδρο *Wehnelt* μέσω του

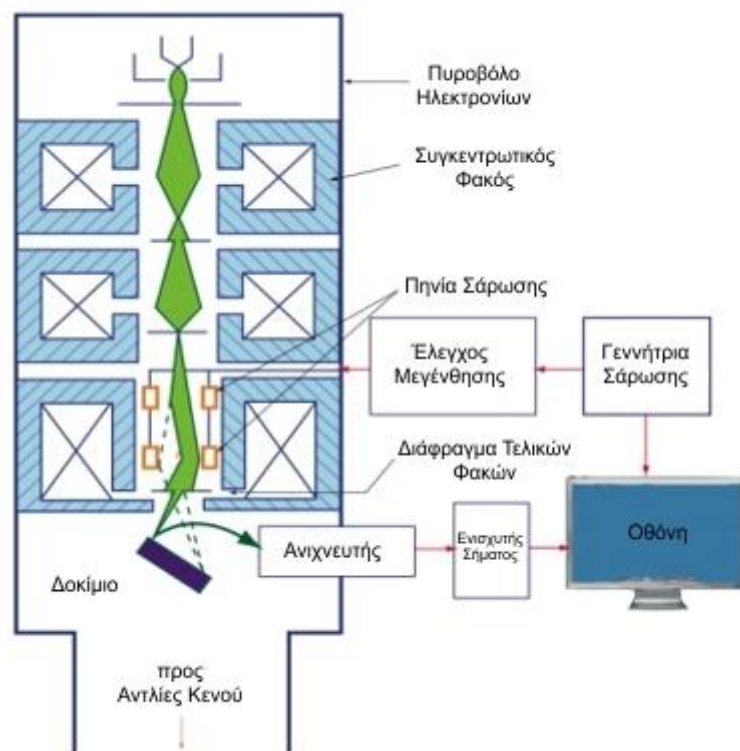
Ανάλυση και τεκμηρίωση δεδομένων για την αντοχή σε εφελκυσμό δοκιμίων κατασκευασμένων από υλικό ABS και ABS Plus σε τρισδιάστατο εκτυπωτή

οποίου πραγματοποιείται έλεγχος του αριθμού των ηλεκτρονίων που φεύγουν από το πυροβόλο. Τα ηλεκτρόνια επιταχύνονται προς μία άνοδο που ρυθμίζεται ανάμεσα στα 200V έως τα 30kV.

- **Συγκεντρωτικοί φακοί:** Αφού η δέσμη ηλεκτρονίων περάσει από την άνοδο, επηρεάζεται από δύο συγκεντρωτικούς φακούς οι οποίοι κάνουν την ακτίνα να συγκλίνει και να περνά μέσα από το επίκεντρο. Αυτό που συμβαίνει είναι ότι η ακτίνα συγκεντρώνεται μέχρι και 1000 φορές από το αρχικό της μέγεθος. Σε συνδυασμό με την επιλεγμένη τάση επιτάχυνσης οι συγκεντρωτικοί φακοί είναι αρχικά υπεύθυνοι για το προσδιορισμό της έντασης της ακτίνας ηλεκτρονίων, όταν προσπίπτει πάνω στο δοκίμιο [23].
- **Διαφράγματα:** Ανάλογα το μικροσκόπιο μπορεί να βρεθούν ένα ή περισσότερα διαφράγματα στο μηχάνημα. Η λειτουργία τους είναι να μειώνουν και να αποκλείουν τα παραπανίσια ηλεκτρόνια στους φακούς. Το τελικό διάφραγμα του τελευταίου φακού βρίσκεται τοποθετημένος κάτω από τα πηνία σάρωσης και ορίζει τη διάμετρο ή το μέγεθος του σημείου που προσπίπτει η ακτίνα στο δοκίμιο. Το σημείο αυτό πάνω στο δοκίμιο ορίζει το πεδίο, το βάθος και την ανάλυση. Με τη σμίκρυνση του σημείου αυξάνεται η ανάλυση και το βάθος του πεδίου, προκαλώντας όμως μείωση της φωτεινότητας.
- **Σύστημα σάρωσης:** Δημιουργούνται εικόνες ψηφιοποιώντας την ακτίνα των ηλεκτρονίων που προσπίπτει στο δοκίμιο χρησιμοποιώντας πηνία που βρίσκονται μέσα στους τελευταίους φακούς. Ο διορθωτής στιγματισμού και αστιγματισμού βρίσκεται στον τελικό φακό και χρησιμοποιεί μαγνητικό πεδίο για να μειώσει τις αποκλίσεις της ακτίνας ηλεκτρονίων. Η ακτίνα θα πρέπει να έχει κυκλική διατομή όταν προσπίπτει στο δοκίμιο, όμως συνήθως έχει ελλειπτική για αυτό χρησιμοποιείται ο στιγματιστής για να διορθώσει το πρόβλημα αυτό.
- **Θάλαμος δοκιμίου:** Στο κάτω μέρος του μηχανήματος υπάρχει ο θάλαμος όπου τοποθετείται το δοκίμιο και οι διακόπτες. Τα δευτερεύοντα ηλεκτρόνια από το δοκίμιο προσελκύονται από τον ανιχνευτή χρησιμοποιώντας θετική φόρτιση.

- **Αντλία κενού:** Χρησιμοποιείται για να υπάρχει έλεγχος της ακτίνας των ηλεκτρονίων. Αρχικά, το ρεύμα που περνά από το νήμα βολφραμίου, προκαλεί την υπερθέρμανσή του, φτάνει σε θερμοκρασίες κοντά στους 2400°C [24]. Έπειτα ένα καυτό νήμα βολφραμίου θα οξειδωθεί και θα καεί σε περιβάλλον που υπάρχει αέρας και ατμοσφαιρική πίεση. Ακόμη, η αντλία προσφέρει τη δυνατότητα στους φακούς να λειτουργούν σωστά και σε καθαρό περιβάλλον χωρίς σκόνη.

Τέλος, τα σωματίδια του αέρα και η σκόνη μέσα στο μηχάνημα μπορεί να παρεμποδίσουν τα ηλεκτρόνια πριν φτάσουν το δοκίμιο που βρίσκεται στον θάλαμο [23]. Το σύστημα άντλησης αέρα συνήθως αποτελείται από δύο ή περισσότερες αντλίες κενού.



Εικόνα 2.3.2.2:

Σχηματικό διάγραμμα λειτουργίας ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης.

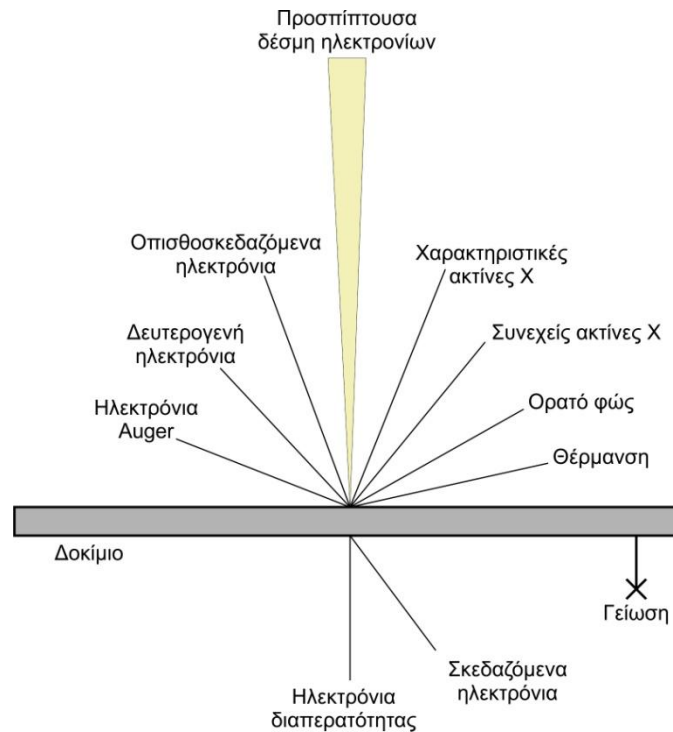
Ανάλυση και τεκμηρίωση δεδομένων για την αντοχή σε εφελκυσμό δοκιμίων κατασκευασμένων από υλικό ABS και ABS Plus σε τρισδιάστατο εκτυπωτή

Από τη στιγμή που η δέσμη των ηλεκτρονίων προσπίπτει στο δοκίμιο δημιουργούνται κάποιες αλληλεπιδράσεις μεταξύ τους. Λόγω αυτών των αλληλεπιδράσεων εκπέμπονται διάφοροι τύποι φωτονίων και ηλεκτρονίων από το δοκίμιο και τα σημαντικότερα είναι τα εξής:

- **Δευτερογενή ηλεκτρόνια:** Τα ηλεκτρόνια αυτά δημιουργούνται όταν κάποιο ηλεκτρόνιο από την ακτίνα περνάει κοντά από ένα άτομο και το ιονίζει. Έτσι τα δευτερεύοντα ηλεκτρόνια, χρησιμοποιώντας χαμηλή ενέργεια της τάξης των 50 eV παράγονται κοντά στην επιφάνεια του δοκιμίου. Με τον τρόπο αυτό προσφέρουν πληροφορίες για την επιφανειακή τοπογραφία του δοκιμίου και μία καθαρή εικόνα των πτυχώσεων και κυρτώσεων.

Τέλος, δείχνουν το βάθος, εκ του οποίου, λόγω της δυσκολίας των ηλεκτρονίων να ξεφύγουν από αυτό και λόγω της φωτεινότητας, εμφανίζεται σχεδόν τρισδιάστατη η εικόνα του δοκιμίου.

- **Οπισθοσκεδαζόμενα ηλεκτρόνια:** Τα ηλεκτρόνια αυτά δημιουργούνται από τη πρόσκρουση ενός ηλεκτρονίου της ακτίνας σε κάποιο πυρήνα ατόμου στο δοκίμιο, το οποίο σκεδάζεται προς τα πίσω. Επειδή δεν υπάρχει μεταφορά ενέργειας, τα ηλεκτρόνια της ακτίνας και τα σκεδαζόμενα ηλεκτρόνια είναι ίσης ενέργειας. Τα άτομα με μεγαλύτερους πυρήνες μπορούν να οπισθοσκεδάσουν αποτελεσματικότερα τα ηλεκτρόνια και έτσι από αυτά να δίνεται πιο ξεκάθαρη εικόνα.



Εικόνα 2.3.2.3: Φαινόμενα αλληλεπίδρασης των ηλεκτρονίων με το δοκίμιο.

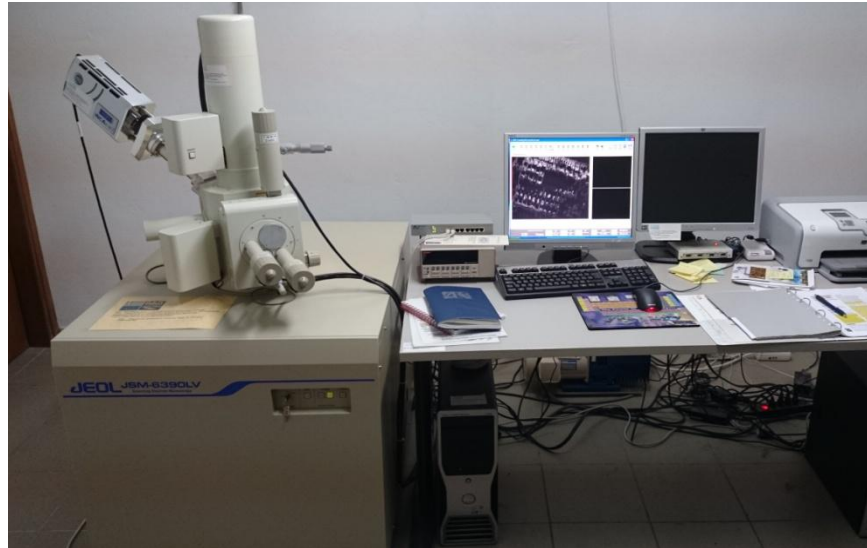
Όπως αναφέρθηκε και πριν, ανάμεσα στα ηλεκτρόνια ης δέσμης και στο δοκίμιο υπάρχει πιθανότητα να παρουσιαστούν κάποιες αλληλεπιδράσεις. Αρχικά μπορεί να συσσωρευτούν μεγάλα φορτία ηλεκτρονίων στο δείγμα. Για να μην συμβεί αυτό, θα πρέπει το δοκίμιο να είναι αγώγιμο και να έχει συνδεθεί με γείωση.

Στη συνέχεια, κλασσικό φαινόμενο αποτελεί η ελαστική και μη ελαστική σκέδαση των ηλεκτρονίων. Η πρώτη περίπτωση χαρακτηρίζεται από μεγάλη γωνία σκέδασης και μικρότερη απώλεια ενέργειας ενώ η δεύτερη, από μικρή γωνία σκέδασης και μεγαλύτερες απώλειες ενέργειας. Τέλος, σύνηθες φαινόμενο είναι η θέρμανση του δοκιμίου όπου για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται οι αντλίες κενού.

Ανάλυση και τεκμηρίωση δεδομένων για την αντοχή σε εφελκυσμό δοκιμίων κατασκευασμένων από υλικό ABS και ABS Plus σε τρισδιάστατο εκτυπωτή

2.3.3 Μηχάνημα SEM Πειράματος

Το Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης που χρησιμοποιήθηκε στη παρούσα εργασία είναι ένα JSM6390 SEM κατασκευασμένο από την εταιρία JEOL (Εικόνα 2.3.3.1). Το μηχάνημα αυτό βρίσκεται στο εργαστήριο Κέντρο Έρευνας Τεχνολογίας Υλικών και Φωτονικής (Κ.Ε.Τ.Υ.Φ) του ΤΕΙ Κρήτης.



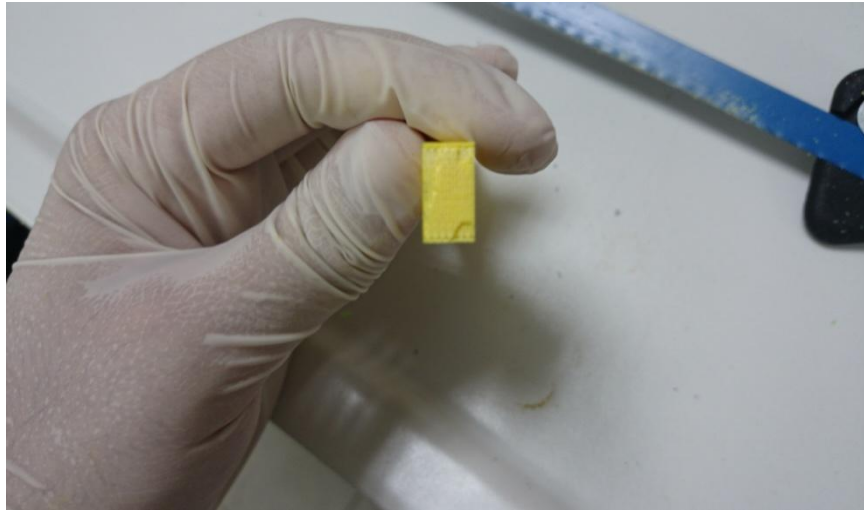
Εικόνα 2.3.3.1: Μηχάνημα SEM JSM6390 της εταιρίας JEOL.

2.3.4 Προετοιμασία Δοκιμίων

Για να τοποθετηθεί το δοκίμιο στο Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης θα πρέπει να γίνουν κάποιες ενέργειες από πριν. Αρχικά, για να είναι δυνατή η τοποθέτηση του δοκιμίου στη βάση των δειγμάτων θα πρέπει να έχει συγκεκριμένες διαστάσεις. Για το λόγο αυτό, από το εξεταζόμενο δοκίμιο, είναι υποχρεωτικό να κοπεί και να απομονωθεί ένα μικρό κομμάτι που θα περιέχει την επιφάνεια της οποίας χρειαζόμαστε την εικόνα. Έτσι χρησιμοποιώντας ένα μικρό πριόνι κόβεται το απαιτούμενο κομμάτι.

Αφού κοπεί το κομμάτι, θα πρέπει να γίνει η αποστείρωσή του. Αυτή η ενέργεια απαιτείται για να αποφευχθεί η μόλυνση του μηχανήματος. Η μόλυνση του μηχανήματος συμβαίνει όταν υπάρχει η παρουσία ξένων σωμάτων όπως είδη άνθρακα και υγρασίας

στην επιφάνεια του δοκιμίου ή στο σύστημα των αντλιών κενού. Κατά την αλληλεπίδραση των ειδών άνθρακα με την δέσμη ηλεκτρονίων δημιουργούνται σταυροειδής δομές στο δοκίμιο. Αυτή η επίστρωση άνθρακα διακρίνεται στο SEM και χαρακτηρίζεται ως "μαύρο κουτί". Η μόλυνση αυτή οδηγεί στη μείωση της ευκρίνειας και των χαρακτηριστικών του δοκιμίου [27].

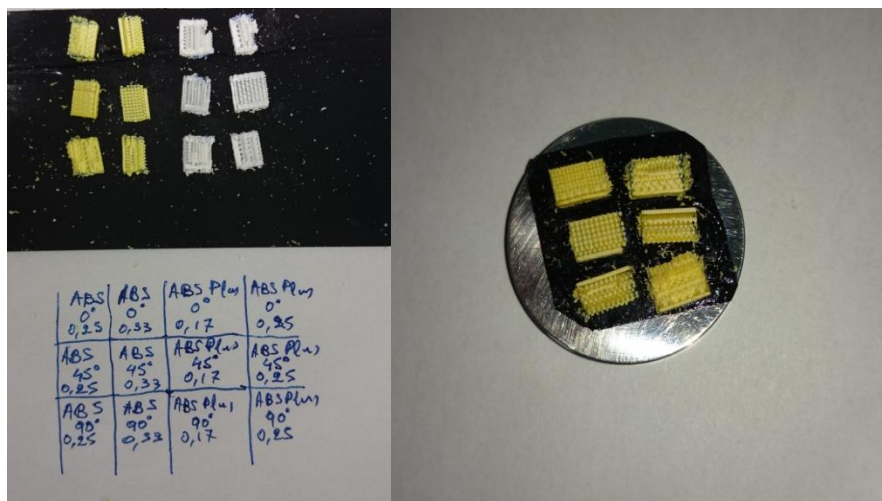


Εικόνα 2.3.4.1: Διαδικασία προετοιμασίας δοκιμίων.

Πέρα από την αλλοίωση της μορφολογίας της επιφάνειας, η μόλυνση παρεμβαίνει στην εστίαση και τον αστιγματισμό του μηχανήματος. Έτσι δημιουργούνται πρόσθετα σήματα τα οποία δεν είναι αντιπροσωπευτικά του δείγματος. Για να μη μολυνθεί το δοκίμιο θα πρέπει να ακολουθηθούν ορισμένα μέτρα ασφάλειας τα οποία είναι η μεταχείριση των δοκιμίων με γάντια, και η αποστείρωση τους με αλκοόλη (οινόπνευμα).

Στη συνέχεια τα μικρά κομμάτια τοποθετούνται πάνω σε μία ημιαγώγιμη ταινία άνθρακα από όπου θα κοπούν και θα κολληθούν πάνω στη μεταλλική βάση των δοκιμίων του SEM. Η κολλητική ταινία αυτή χρησιμοποιείται διότι κατά τη διαδικασία της σάρωσης, τα μη αγώγιμα υλικά (όπου στη περίπτωση αυτή το ABS είναι μη αγώγιμο υλικό) πρέπει να είναι γειωμένα, έτσι η ταινία αυτή που είναι διπλής όψης ενώνει το δοκίμιο με τη μεταλλική βάση ενώ παράλληλα το γειώνει.

Ανάλυση και τεκμηρίωση δεδομένων για την αντοχή σε εφελκυσμό δοκιμών κατασκευασμένων από υλικό ABS και ABS Plus σε τρισδιάστατο εκτυπωτή



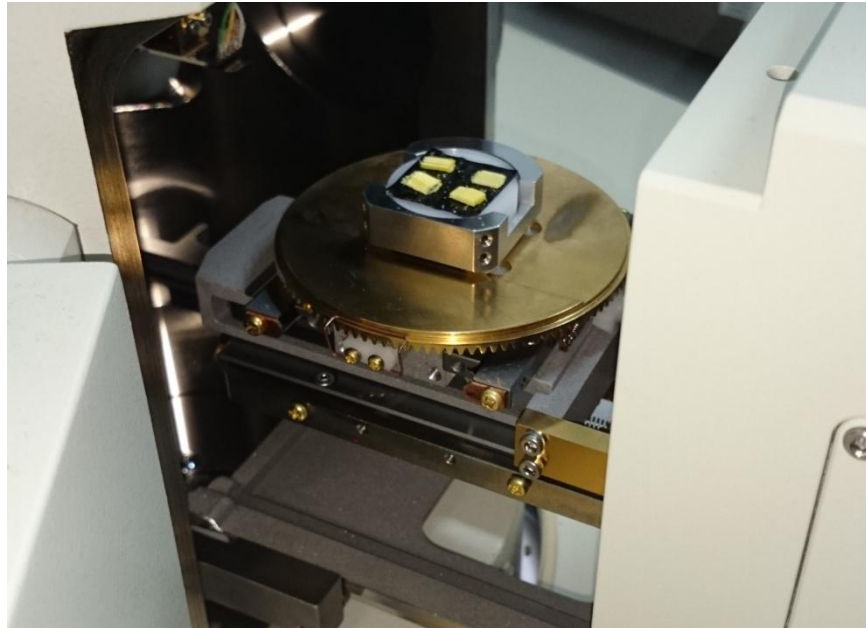
Εικόνα 2.3.4.2: Τοποθέτηση δοκιμών σε ημιαγωγική ταινία άνθρακα και κατηγοριοποίησή τους.

Αφού τα δοκίμια κοπούν και αποστειρωθούν τοποθετούνται στο SEM για να ξεκινήσει η διαδικασία της σάρωσης. Κατά τη διαδικασία αυτή για να υπάρξει καλή εικόνα θα πρέπει το δοκίμιο να σαρωθεί σε χαμηλό κενό αέρα. Σε περίπτωση που με το κενό αέρα δεν υπάρχει το επιθυμητό αποτέλεσμα, το δοκίμιο επικαλύπτεται με άνθρακα (Εικόνα 2.3.4.3). Αυτό γίνεται διότι τα δοκίμια που μελετούνται στην εργασία είναι κατασκευασμένα από ABS και ABS Plus, υλικά τα οποία δεν είναι αγωγικά.



Εικόνα 2.3.4.3: Μηχάνημα επικάλυψης άνθρακα.

Η επικάλυψη άνθρακα βοηθά στο να μη συσσωρεύονται ηλεκτρόνια στο δοκίμιο ώστε και να μην υπάρχει αυξημένη φωτεινότητα και να δίνεται εικόνα καλής ευκρίνειας.



Εικόνα 2.3.4.4: Τοποθέτηση των δοκιμίων στο θάλαμο του SEM.

Κεφάλαιο 3: Πείραμα Εφελκυσμού

3.1 Θεωρητικές Έννοιες

Για τη καλύτερη κατανόηση των αποτελεσμάτων που παρουσιάζονται στη παρούσα εργασία, θα πρέπει αρχικά να γίνουν κατανοητές κάποιες θεωρητικές έννοιες.

3.1.1 Τι είναι ο Εφελκυσμός

Ο εφελκυσμός ανήκει στα βασικότερα είδη φορτίσεως, που μπορεί να καταπονούν μία διατομή ενός σώματος, μαζί με τη θλίψη, τη κάμψη, τη διάτμηση και τη στρέψη [20].

Κατά τη διάρκεια του εφελκυσμού δύο ομοαξονικές και αντίθετες δυνάμεις φορτίζουν τα άκρα ενός σώματος όπως φαίνεται στην *Εικόνα 3.1.1.1* Οι δυνάμεις αυτές βρίσκονται στον άξονα του σώματος, ο οποίος περνά από το κέντρο βάρους.

Για να υπάρχει στατική ισορροπία οι δυνάμεις πρέπει να έχουν ίσα μέτρα, αντίθετες φορές και να κατευθύνονται από το σώμα προς το εξωτερικό του.



Εικόνα 3.1.1.1: Δοκίμιο σε εφελκυσμό.

3.1.2 Διάγραμμα Τάσης - Παραμόρφωσης

Για όλα τα είδη παραμορφώσεων των στερεών σωμάτων υπάρχουν δύο βασικά φυσικά μεγέθη που εμπλέκονται στο φαινόμενο: Η τάση (αίτιο) και η παραμόρφωση (αποτέλεσμα) [21].

Η τάση σ (stress) είναι ο λόγος του φορτίου (F) που δρα πάνω σε ένα σώμα (και ευθύνεται για την παραμόρφωσή του) προς το εμβαδό (A) της εγκάρσιας επιφάνειας του σώματος πάνω στο οποίο δρα η δύναμη και υπολογίζεται από τη σχέση (3.1):

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (3.1)$$

Η παραμόρφωση ε (strain) είναι ο λόγος της αλλαγής του μήκους ενός σώματος (εξαιτίας των εφελκυστικών ή θλιπτικών δυνάμεων) προς το αρχικό μήκος (l) του σώματος και εκφράζεται από τη σχέση (3.2):

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} \quad (3.2)$$

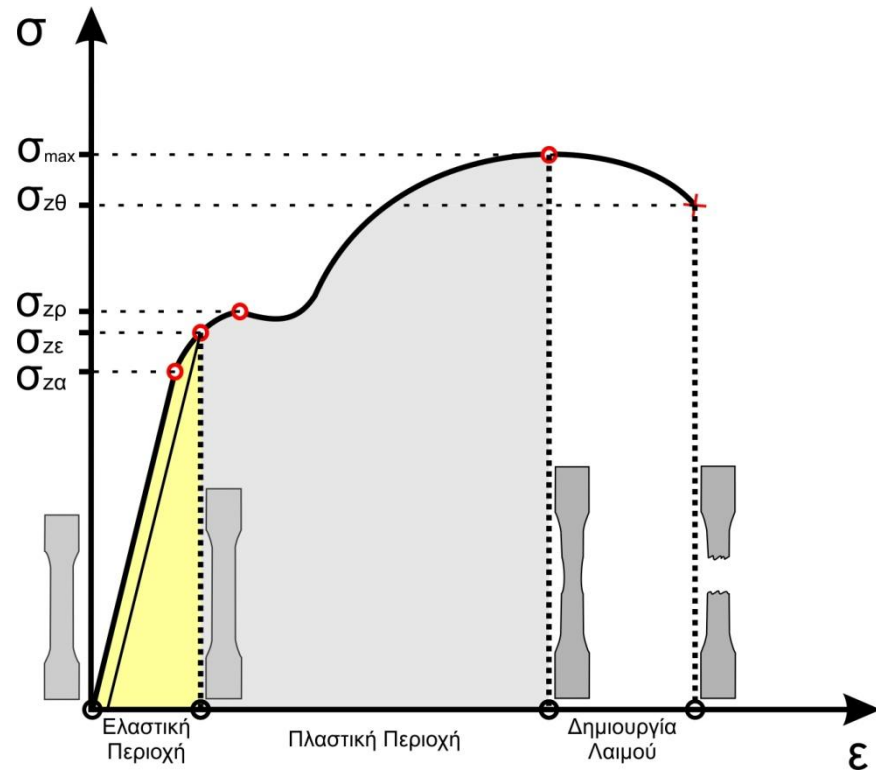
Για οποιοδήποτε υλικό, που έχει καμπύλη τάσης - ανηγμένης παραμόρφωσης της μορφής του διαγράμματος, η σχέση μεταξύ της τάσης και της παραμόρφωσης είναι γραμμική για μικρές τιμές της παραμόρφωσης.

Η γραμμική σχέση μεταξύ της επιμήκυνσης και του αξονικού φορτίου που την προκαλεί καλείται *νόμος του Hooke* ο οποίος περιγράφει τη συμπεριφορά του υλικού και εκφράζεται από τη σχέση (3.3):

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (3.3)$$

Χρησιμοποιώντας το γενικό διάγραμμα εφελκυσμού - επιμηκύνσεως ενός μαλακού χάλυβα (Διάγραμμα 3.1.2.1), μπορούν να εξηγηθούν όλα τα χαρακτηριστικά μεγέθη τάσεων ενός οποιοδήποτε υλικού.





Διάγραμμα 3.1.2.1: Γενικό διαγράμματα Τάσης - Παραμόρφωσης

Αρχικά στο διάγραμμα παρατηρείται ότι υπάρχει το σ_{za} το οποίο αντιστοιχεί στη μέγιστη τάση που μπορεί να αναπτυχθεί κατά τη δοκιμή εφελκυσμού, τέτοια ώστε η τάση να είναι γραμμική συνάρτηση της παραμόρφωσης και ονομάζεται *όριο αναλογίας*.

Έπειτα, το σημείο που υπάρχει μετά το όριο αναλογίας είναι το σ_{ze} . Το σημείο αυτό ονομάζεται *όριο ελαστικότητας* και είναι η μέγιστη τάση που μπορεί να επιβληθεί κατά τη δοκιμή εφελκυσμού, τέτοια ώστε όταν το φορτίο απομακρυνθεί εντελώς, να μην παραμείνει καμία μόνιμη παραμόρφωση.

Τα όρια ελαστικότητας και αναλογίας είναι συνώνυμοι όροι διότι για πολλά υλικά οι τιμές τους είναι ίδιες. Σε ορισμένες περιπτώσεις όπου γίνεται διάκριση μεταξύ τους, το όριο ελαστικότητας είναι μεγαλύτερο.

Το τμήμα της καμπύλης τάσης - παραμόρφωσης, που εκτείνεται από την αρχή μέχρι το όριο αναλογίας είναι η ελαστική περιοχή. Το τμήμα που εκτείνεται από το όριο αναλογίας μέχρι το σημείο θραύσης είναι η πλαστική περιοχή.

Στη συνέχεια υπάρχει και το σημείο σ_{zp} το οποίο ονομάζεται *όριο διαρροής* και είναι η τιμή της τάσης όπου η παραμόρφωση αυξάνεται χωρίς να αυξάνεται η τάση. Δηλαδή η τιμή από την οποία η παραμόρφωση παύει να είναι ελαστική και γίνεται πλαστική (μόνιμη αλλοίωση της διάταξης των ατόμων του υλικού).

Μετά την πλαστική παραμόρφωση του υλικού, η καταπόνηση μπορεί να αυξηθεί μέχρι η τάση να φτάσει το *όριο θραύσης* σ_{zb} . Όριο θραύσης είναι η τάση κατά την οποία το δοκίμιο σπάει. Φαίνεται να είναι μικρότερη από την αντοχή εφελκυσμού διότι η διατομή του δοκιμίου θεωρείται σταθερή ενώ στη πραγματικότητα μικραίνει και πριν τη θραύση σχηματίζεται "λαιμός".

3.2 Κατηγορίες Δοκιμών

Για το πείραμα αυτό η εκτύπωση των δοκιμών έγινε στα εξής πάχη στρώματος εκτύπωσης και διευθύνσεις :

- Για υλικό ABS:
 - πάχος 0,25 mm - οριζόντια διεύθυνση (0°)
 - υπό κλίση (45°)
 - κάθετη διεύθυνση (90°)
 - πάχος 0,33 mm - οριζόντια διεύθυνση (0°)
 - υπό κλίση (45°)
 - κάθετη διεύθυνση (90°)
- 1. Για υλικό ABS Plus:
 - πάχος 0,17 mm - οριζόντια διεύθυνση (0°)
 - υπό κλίση (45°)
 - κάθετη διεύθυνση (90°)
 - πάχος 0,25 mm - οριζόντια διεύθυνση (0°)
 - υπό κλίση (45°)
 - κάθετη διεύθυνση (90°)

Για την εκτύπωση με υλικό ABS χρησιμοποιήθηκε ο τρισδιάστατος εκτυπωτής Dimension BST 768 ενώ για αυτή με το υλικό ABS Plus ο Dimension Elite.

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω για να σχεδιαστούν και να κατασκευαστούν τα δοκίμια χρησιμοποιήθηκαν τιμές οι οποίες ορίζονται από το πρότυπο αλλά με κάποιες



Ανάλυση και τεκμηρίωση δεδομένων για την αντοχή σε εφελκυσμό δοκιμίων κατασκευασμένων από υλικό ABS και ABS Plus σε τρισδιάστατο εκτυπωτή

παραλλαγές για να μπορέσουν να εφαρμόσουν στη μηχανή εφελκυσμού. Αφού ορίστηκαν οι διαστάσεις, ο σχεδιασμός του δοκιμίου έγινε μέσω ενός CAD λογισμικού, το Pro Engineer.

3.3 Πρότυπο ASTM D 638

Όπως έχει προαναφερθεί, για τη διεξαγωγή του πειράματος εφελκυσμού πρέπει να ακολουθηθεί το πρότυπο ASTM D 638. Το πρότυπο αυτό αναφέρει αναλυτικά τον τρόπο διεξαγωγής του πειράματος. Ειδικότερα αναφέρονται, ο σκοπός του πειράματος και η χρησιμότητα του, τα είδη μηχανημάτων που θα χρησιμοποιηθούν, οι διαστάσεις και οι παράμετροι κατασκευής των δοκιμίων, ο τρόπος υπολογισμού των αποτελεσμάτων ενώ εμπεριέχονται παραρτήματα με χρήσιμη θεωρία και τύπους υπολογισμών.

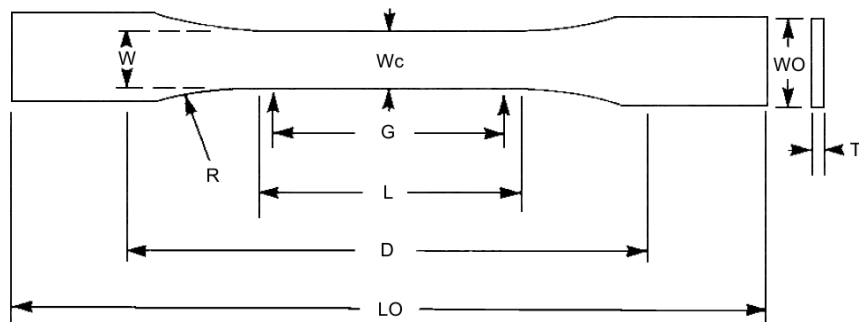
3.3.1 Εισαγωγικά Στοιχεία

Αρχικά η επιλογή του προτύπου έγινε με βάση τον κατασκευαστή των υλικών, ο οποίος για να πραγματοποιήσει έλεγχο των ιδιοτήτων των υλικών, χρησιμοποίησε το πρότυπο αυτό (Πίνακες 1.1.3.1.1, 1.1.3.2.1, 1.1.3.3.1, 1.2.2.1, 1.2.2.2, 1.2.2.3). Χρησιμοποιείται για τον καθορισμό των ιδιοτήτων ενός πλαστικού υλικού, το οποίο αφού κατασκευαστεί με μορφή αλτήρα καθορισμένων διαστάσεων (Εικόνα 2.1.3.2.1), του ασκείται εφελκυστικό φορτίο.

Στη συνέχεια, από τη διαδικασία αυτή προσκομίζονται κάποια δεδομένα από τα οποία προσδιορίζονται οι εφελκυστικές ιδιότητες του υλικού, που μελετάται, οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη συνέχεια για σκοπούς μηχανολογικού σχεδιασμού.

3.3.2 Κατασκευή Δοκιμίων

Με βάση το πρότυπο, αφού το ABS και το ABS Plus είναι άκαμπτα υλικά και το πάχος είναι ίσο με 7mm, καλύπτουν τις απαιτήσεις ώστε τα δοκίμια να ανήκουν στον Τύπο I του προτύπου και θα διαστασιολογηθούν ανάλογα με αυτόν (Εικόνα 3.3.2.1, Πίνακας 3.3.2.1). Ακόμη, θα πρέπει να οριστούν οι συνθήκες υπό τις οποίες θα δοκιμαστεί το δοκίμιο. Έτσι με βάση την παράγραφο των συνθηκών του προτύπου ορίζεται η ταχύτητα ελέγχου και ο ρυθμός παραμόρφωσης (Πίνακας 3.3.2.1).



Εικόνα 3.3.2.1: Διαστασιολόγηση δοκιμίου με βάση το πρότυπο ASTM D 638 [8].

ASTM D 638 Τύπος I	
Παράμετρος	Τιμή
Πλάτος στενού τμήματος δοκιμίου (W)	$13 \pm 0,5 \text{ mm}$
Μήκος στενού τμήματος δοκιμίου (L)	$57 \pm 0,5 \text{ mm}$
Συνολικό πλάτος (WO)	$19 + 6,4 \text{ mm}$
Συνολικό μήκος (LO)	165 mm
Μήκος περιοχής μέτρησης (G)	$50 \pm 0,25 \text{ mm}$
Απόσταση μεταξύ λαβών (D)	$115 \pm 5 \text{ mm}$
Ακτίνα κοψίματος (R)	$76 \pm 1 \text{ mm}$
Ταχύτητα ελέγχου	50 mm / min
Ρυθμός παραμόρφωσης	1 mm / (mm * min)

Πίνακας 3.3.2.1: Πίνακας διαστάσεων και παραμέτρων δοκιμών με βάση το πρότυπο ASTM D 638 Τύπου I [8].

Ανάλυση και τεκμηρίωση δεδομένων για την αντοχή σε εφελκυσμό δοκιμίων κατασκευασμένων από υλικό ABS και ABS Plus σε τρισδιάστατο εκτυπωτή



Εικόνα 3.3.2.2: Μερικά από τα κατασκευασμένα δοκίμια.

3.3.3 Διαδικασία Υπολογισμού και Εξαγωγής Αποτελεσμάτων

Για να γίνει σωστή σύγκριση των δοκιμίων θα πρέπει να γίνει υπολογισμός ορισμένων τιμών όπως η τάση εφελκυσμού, η παραμόρφωση, η εκατοστιαία επιμήκυνση και το μέτρο ελαστικότητας, από τις οποίες μπορούν να βγουν και άλλα αποτελέσματα όπως τα συγκριτικά διαγράμματα.

Αρχικά, εξαιτίας του μηχανήματος εφελκυσμού έχουμε λίστες με τις τιμές της επιμήκυνσης και των φορτίων του κάθε δοκιμίου. Για αυτό τον λόγο οι υπολογισμοί ξεκινούν βρίσκοντας την τάση εφελκυσμού. Ο υπολογισμός της τάσης εφελκυσμού γίνεται διαιρώντας το μέγιστο φορτίο σε *Newton* (N) προς το εμβαδό διατομής της περιοχής μέτρησης του δοκιμίου σε τετραγωνικά μέτρα (m²) (Σχέση 3.1).

Έπειτα, υπολογίζεται η εκατοστιαία επιμήκυνση, η οποία είναι η διαφορά του μήκους της περιοχής μέτρησης, σε σχέση με το ονομαστικό μήκος της.

$$\%El = \frac{Lu - L_0}{L_0} \times 100 \quad (3.4)$$

Στη συνέχεια μπορεί να υπολογιστεί η παραμόρφωση του δοκιμίου η οποία προκύπτει διαιρώντας την επιμήκυνση του δοκιμίου προς το αρχικό μήκος μέτρησης του δοκιμίου. Η σχέση που χρησιμοποιείται είναι η Σχέση 3.2 και οι τιμές είναι σε επί τοις εκατό (%).

Τέλος, γίνεται ο υπολογισμός του μέτρου ελαστικότητας το οποίο ισούται με την τάση προς την παραμόρφωση. Δίνεται από τη Σχέση 3.3, λύνοντας όμως ως προς E , δηλαδή προκύπτει η σχέση:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (3.5)$$



3.4 Πίνακες Αποτελεσμάτων Πειράματος

Acrylonitrile Butadiene Styrene									
Πάχος Εκτύπωσης 0,25mm									
Αριθμός Δοκιμίου	Διεύθυνση	Πλάτος (Wc)	Πάχος (T)	Αρχικό Μήκος (G)	Εμβαδό Διατομής (E)	Μέγιστο Φορτίο	Τάση Εφελκυσμού	Μέτρο Ελαστικότητας	Εκατοστιαία Επιμήκυνση
A/A	°	mm	mm	mm	mm ²	N	MPa	Pa	%
1	0	13.01	7.31	69	95.1031	1830.683	19.249	371.61	15.6
2						1616.906	17.002	357.38	13.2
3						1689.481	17.765	365.53	13.67
4						1802.047	18.948	367.22	17.6
5						1861.292	19.571	397.80	14.57
1	45	13.01	7.31	69	95.1031	1851.912	19.473	405.94	4.85
2						1720.585	18.092	398.03	4.52
3						1794.642	18.870	373.77	4.73
4						1868.698	19.649	439.70	4.55
5						1859.812	19.556	388.60	4.94
1	90	13.01	7.31	69	95.1031	817.586	8.597	204.10	5.54
2						772.658	8.124	193.19	5.69
3						814.13	8.560	197.88	6.15
4						814.624	8.566	204.08	5.91
5						823.017	8.654	213.56	6.19

Πίνακας 3.4.1:

Πίνακας αποτελεσμάτων πειράματος για υλικό ABS και πάχος εκτύπωσης 0,25 mm.

Acrylonitrile Butadiene Styrene									
Πάχος Εκτύπωσης 0,33mm									
Αριθμός Δοκιμίου	Διεύθυνση	Πλάτος (Wc)	Πάχος (T)	Αρχικό Μήκος (G)	Εμβαδό Διατομής (E)	Μέγιστο Φορτίο	Τάση Εφελκυσμού	Μέτρο Ελαστικότητας	Εκατοστιαία Επιμήκυνση
A/A	°	mm	mm	mm	mm ²	N	MPa	Pa	%
1	0	13.01	7.31	69	95.1031	1624.805	17.085	352.75	8.93
2						1618.88	17.022	363.52	9.96
3						1622.83	17.064	340.75	9.5
4						1572.964	16.540	341.71	10
5						1569.015	16.498	327.41	9.1
1	45	13.01	7.31	69	95.1031	1439.169	15.133	321.07	4.18
2						1303.892	13.710	359.94	3.62
3						1395.723	14.676	398.03	3.46
4						1470.767	15.465	341.49	4.18
5						1466.817	15.423	364.98	4.02
1	90	13.01	7.31	69	95.1031	1573.459	16.545	318.99	8.72
2						1587.282	16.690	316.71	7.8
3						1618.387	17.017	361.70	8.61
4						1607.031	16.898	360.62	7.27
5						1586.789	16.685	338.66	7.43

Πίνακας 3.4.2:

Πίνακας αποτελεσμάτων πειράματος για υλικό ABS και πάχος εκτύπωσης 0,33 mm.



Ανάλυση και τεκμηρίωση δεδομένων για την αντοχή σε εφελκυσμό δοκιμίων κατασκευασμένων από υλικό ABS και ABS Plus σε τρισδιάστατο εκτυπωτή

Acrylonitrile Butadiene Styrene Plus									
Πάχος Εκτύπωσης 0,17mm									
Αριθμός Δοκιμίου	Διεύθυνση	Πλάτος (Wc)	Πάχος (T)	Αρχικό Μήκος (G)	Εμβαδό Διατομής (E)	Μέγιστο Φορτίο	Τάση Εφελκυσμού	Μέτρο Ελαστικότητας	Εκατοστιαία Επιμήκυνση
A/A	°	mm	mm	mm	mm ²	N	MPa	Pa	%
1	0	13.01	7.31	69	95.1031	1852.406	19.478	337.99	13.73
2						1707.254	17.952	380.10	11.82
3						1862.28	19.582	349.21	14.48
4						1842.531	19.374	351.43	12.86
5						1801.554	18.943	353.47	12.38
1	45	13.01	7.31	69	95.1031	1823.277	19.171	381.70	4.49
2						1952.629	20.532	402.60	4.74
3						1783.779	18.756	360.63	4.53
4						1811.921	19.052	402.92	4.3
5						1839.851	19.346	392.71	4.52
1	90	13.01	7.31	69	95.1031	1891.903	19.893	337.31	7.56
2						1628.261	17.121	320.90	6.83
3						1797.603	18.902	299.17	11.86
4						1683.556	17.702	302.86	9.55
5						1785.755	18.777	352.81	7.77

Πίνακας 3.4.3:

Πίνακας αποτελεσμάτων πειράματος για υλικό ABS Plus και πάχος εκτύπωσης 0,17 mm.

Acrylonitrile Butadiene Styrene Plus									
Πάχος Εκτύπωσης 0,25mm									
Αριθμός Δοκιμίου	Διεύθυνση	Πλάτος (Wc)	Πάχος (T)	Αρχικό Μήκος (G)	Εμβαδό Διατομής (E)	Μέγιστο Φορτίο	Τάση Εφελκυσμού	Μέτρο Ελαστικότητας	Εκατοστιαία Επιμήκυνση
A/A	°	mm	mm	mm	mm ²	N	MPa	Pa	%
1	0	13.01	7.31	69	95.1031	1864.748	19.608	378.15	6.7
2						1818.34	19.120	353.13	6.3
3						1993.113	20.957	370.41	7.63
4						1986.201	20.885	360.16	6.85
5						1955.591	20.563	423.71	5.89
1	45	13.01	7.31	69	95.1031	1907.701	20.059	424.67	4.55
2						2085.437	21.928	301.89	6.28
3						1935.843	20.355	453.92	4.27
4						1935.843	20.355	463.42	4.27
5						1875.116	19.717	384.96	4.67
1	90	13.01	7.31	69	95.1031	1914.614	20.132	370.09	6.28
2						1976.821	20.786	368.58	7.37
3						1262.914	13.279	272.84	4.72
4						1884.991	19.821	354.33	6
5						1842.532	19.374	378.47	5.55

Πίνακας 3.4.4:

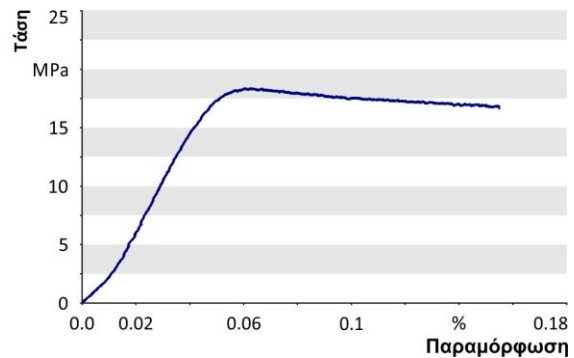
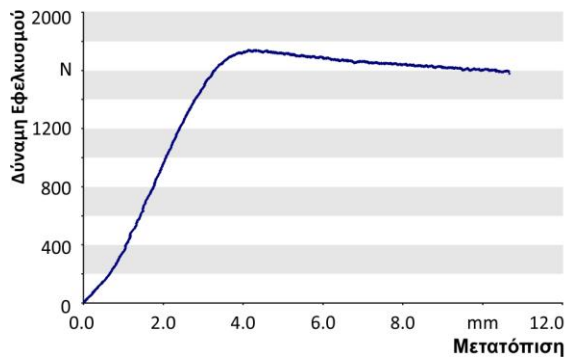
Πίνακας αποτελεσμάτων πειράματος για υλικό ABS Plus και πάχος εκτύπωσης 0,25 mm.

Ανάλυση και τεκμηρίωση δεδομένων για την αντοχή σε εφελκυσμό δοκιμίων κατασκευασμένων από υλικό ABS και ABS Plus σε τρισδιάστατο εκτυπωτή

3.5 Συγκριτικά Διαγράμματα Πειραματικών Δεδομένων

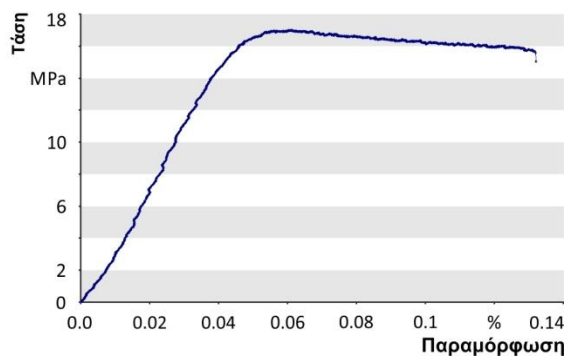
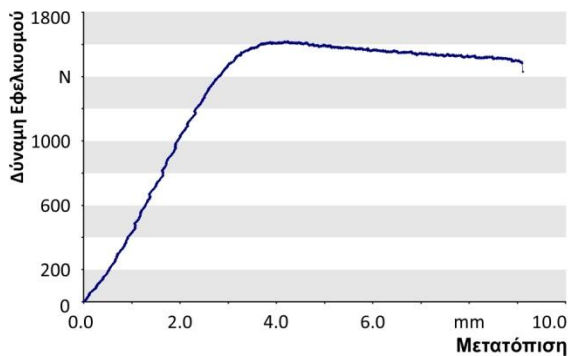
Αφού έχουν υπολογιστεί οι τιμές, μπορούν να σχεδιαστούν τα διαγράμματα Φορτίου - Μετατόπισης και Τάσης - Παραμόρφωσης ώστε να γίνει πιο ξεκάθαρη σύγκριση.

3.5.1 ABS με Πάχος Εκτύπωσης 0,25 mm και Διεύθυνση 0°



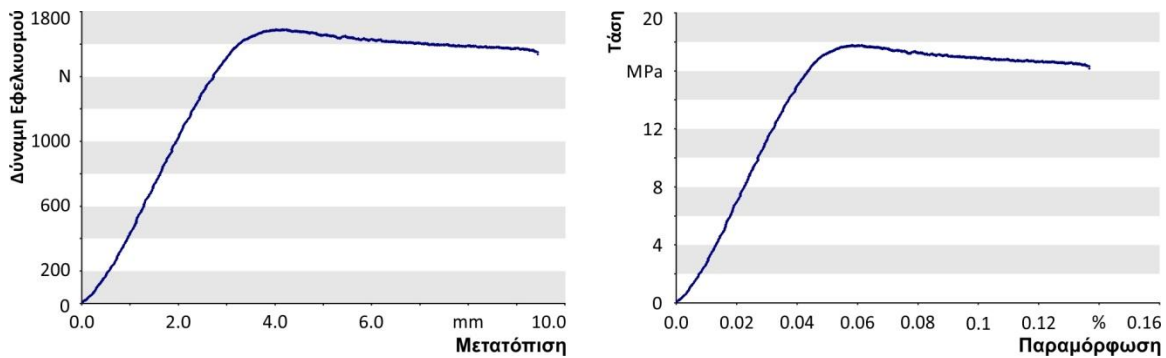
Διάγραμμα 3.5.1.1:

Διαγράμματα Φορτίου - Μετατόπισης και Τάσης - Παραμόρφωσης για το δοκίμιο 1, υλικού ABS, πάχους εκτύπωσης 0,25mm και διεύθυνσης 0°.

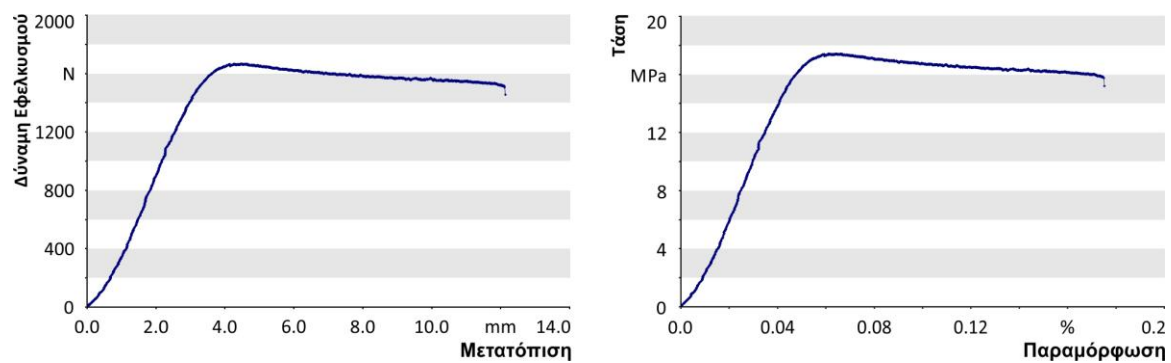


Διάγραμμα 3.5.1.2:

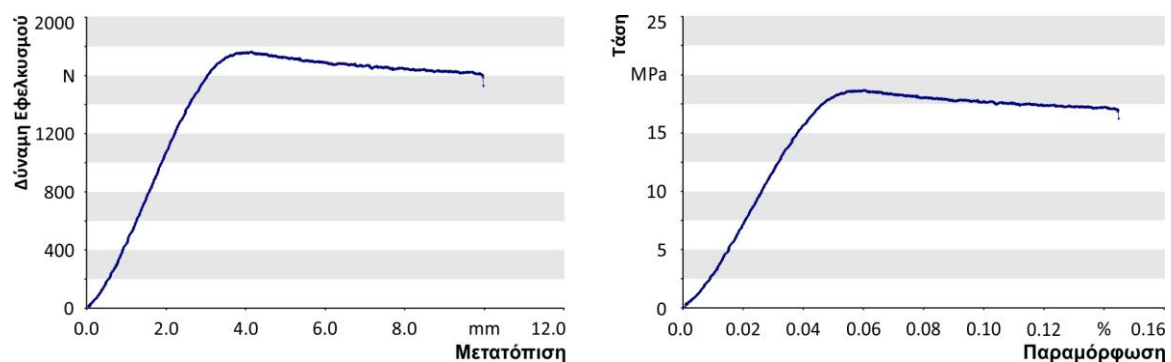
Διαγράμματα Φορτίου - Μετατόπισης και Τάσης - Παραμόρφωσης για το δοκίμιο 2, υλικού ABS, πάχους εκτύπωσης 0,25mm και διεύθυνσης 0°.



Διάγραμμα 3.5.1.3: Διαγράμματα Φορτίου - Μετατόπισης και Τάσης - Παραμόρφωσης για το δοκίμιο 3, υλικού ABS, πάχους εκτύπωσης 0,25mm και διεύθυνσης 0°.



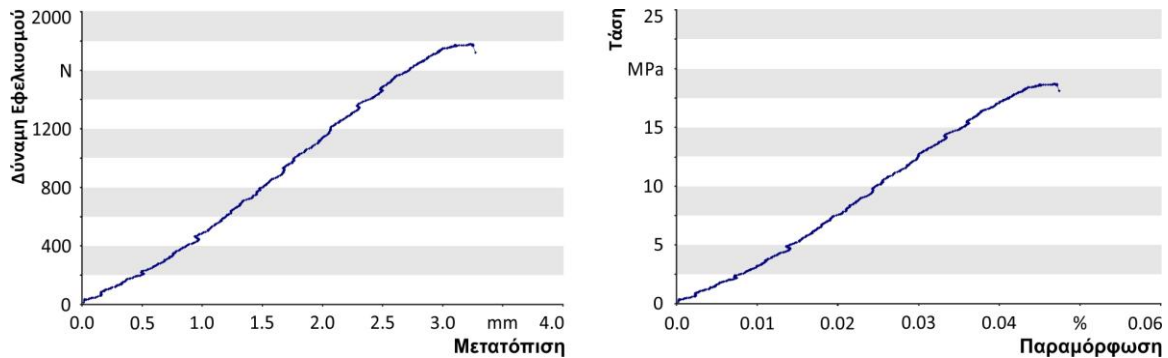
Διάγραμμα 3.5.1.4: Διαγράμματα Φορτίου - Μετατόπισης και Τάσης - Παραμόρφωσης για το δοκίμιο 4, υλικού ABS, πάχους εκτύπωσης 0,25mm και διεύθυνσης 0°.



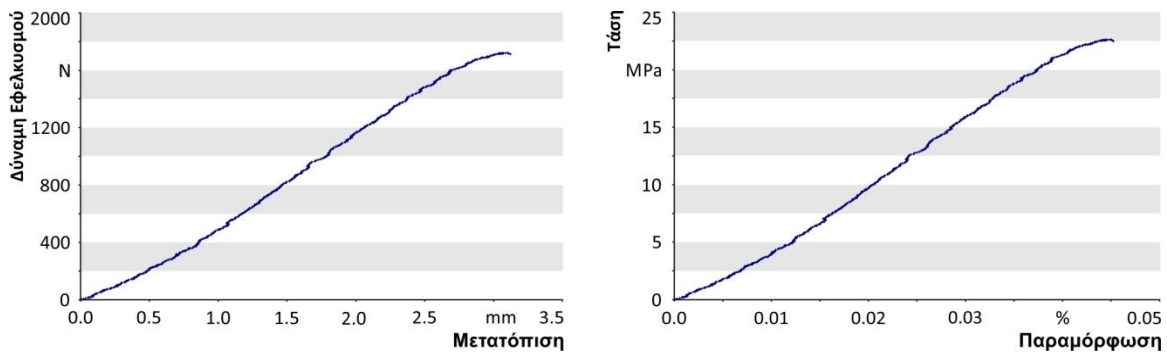
Διάγραμμα 3.5.1.5: Διαγράμματα Φορτίου - Μετατόπισης και Τάσης - Παραμόρφωσης για το δοκίμιο 5, υλικού ABS, πάχους εκτύπωσης 0,25mm και διεύθυνσης 0°.

Ανάλυση και τεκμηρίωση δεδομένων για την αντοχή σε εφελκυσμό δοκιμίων κατασκευασμένων από υλικό ABS και ABS Plus σε τρισδιάστατο εκτυπωτή

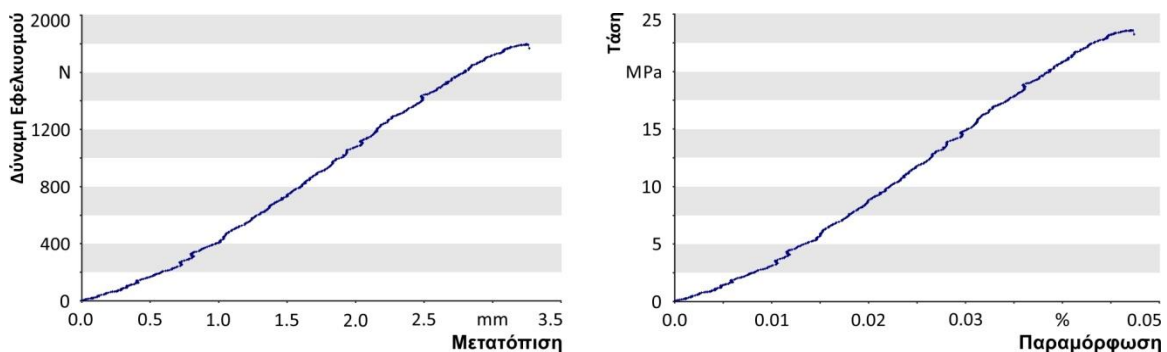
3.5.2 ABS με Πάχος Εκτύπωσης 0,25 mm και Διεύθυνση 45°



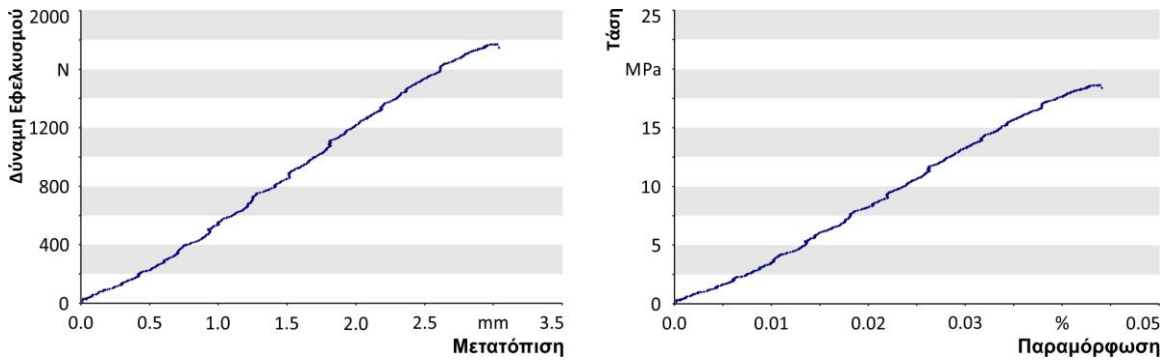
Διάγραμμα 3.5.2.1: Διαγράμματα Φορτίου - Μετατόπισης και Τάσης - Παραμόρφωσης για το δοκίμιο 1, υλικού ABS, πάχους εκτύπωσης 0,25mm και διεύθυνσης 45°.



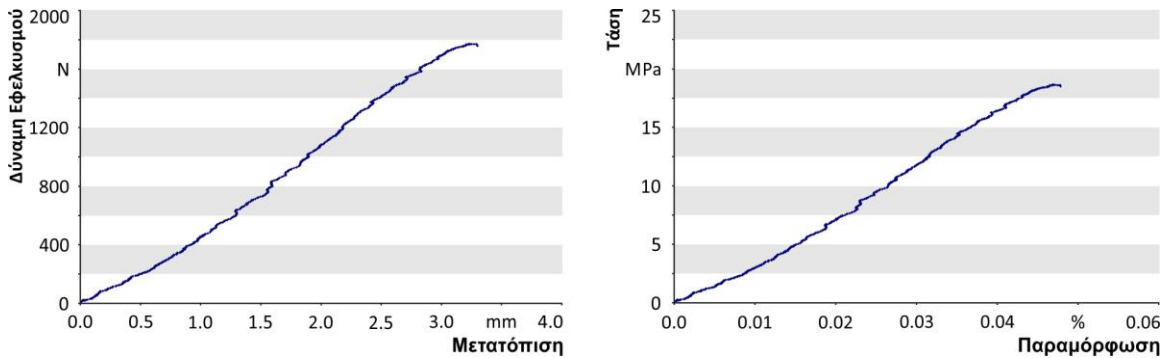
Διάγραμμα 3.5.2.2: Διαγράμματα Φορτίου - Μετατόπισης και Τάσης - Παραμόρφωσης για το δοκίμιο 2, υλικού ABS, πάχους εκτύπωσης 0,25mm και διεύθυνσης 45°.



Διάγραμμα 3.5.2.3: Διαγράμματα Φορτίου - Μετατόπισης και Τάσης - Παραμόρφωσης για το δοκίμιο 3, υλικού ABS, πάχους εκτύπωσης 0,25mm και διεύθυνσης 45°.

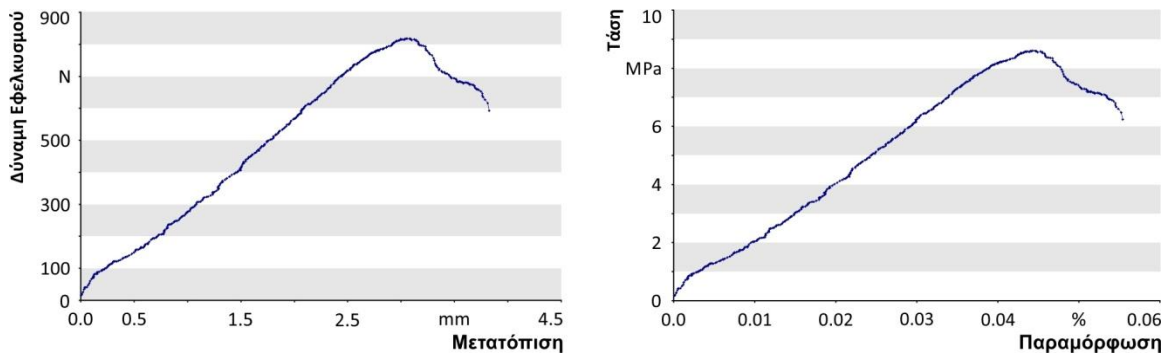


Διάγραμμα 3.5.2.4: Διαγράμματα Φορτίου - Μετατόπισης και Τάσης - Παραμόρφωσης για το δοκίμιο 4, υλικού ABS, πάχους εκτύπωσης 0,25mm και διεύθυνση 45° .



Διάγραμμα 3.5.2.5: Διαγράμματα Φορτίου - Μετατόπισης και Τάσης - Παραμόρφωσης για το δοκίμιο 5, υλικού ABS, πάχους εκτύπωσης 0,25mm και διεύθυνση 45° .

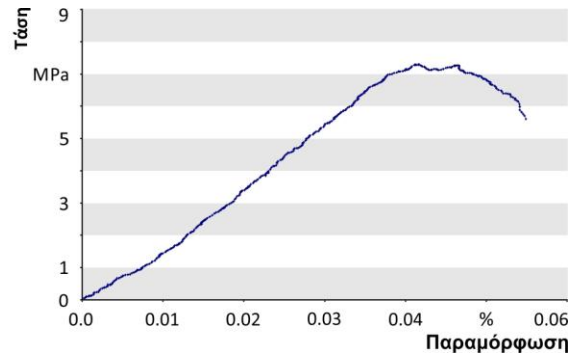
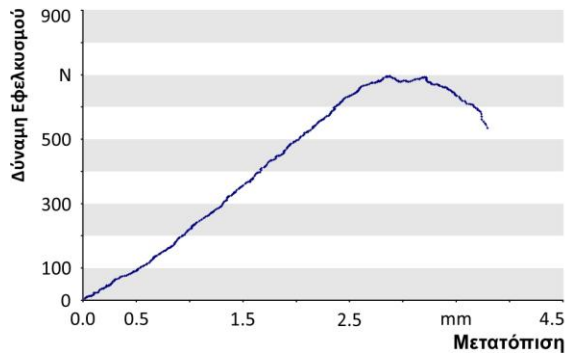
3.5.3 ABS με Πάχος Εκτύπωσης 0,25 mm και Διεύθυνση 90°



Διάγραμμα 3.5.3.1: Διαγράμματα Φορτίου - Μετατόπισης και Τάσης - Παραμόρφωσης για το δοκίμιο 1, υλικού ABS, πάχους εκτύπωσης 0,25mm και διεύθυνσης 90° .

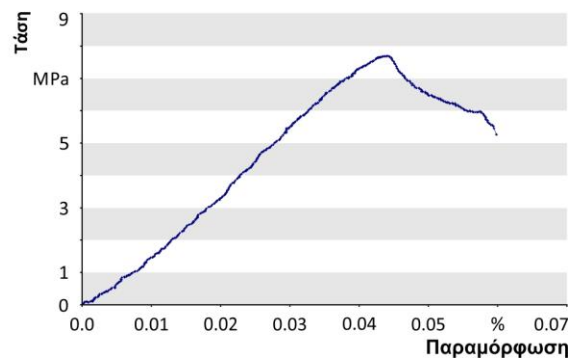
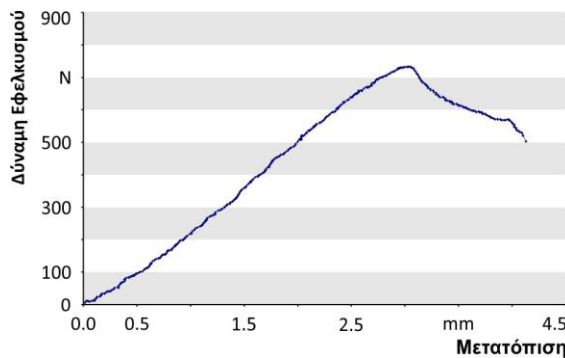


Ανάλυση και τεκμηρίωση δεδομένων για την αντοχή σε εφελκυσμό δοκιμίων κατασκευασμένων από υλικό ABS και ABS Plus σε τρισδιάστατο εκτυπωτή



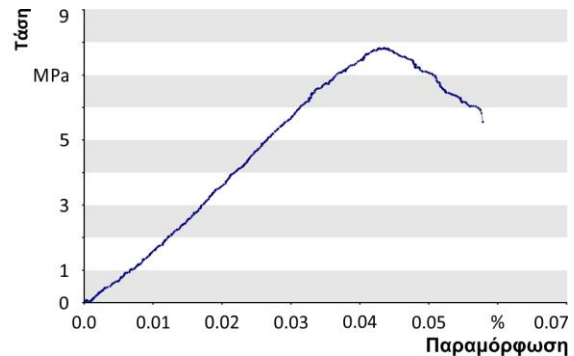
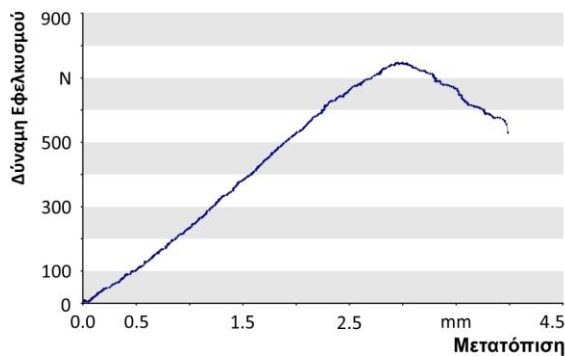
Διάγραμμα 3.5.3.2:

Διαγράμματα Φορτίου - Μετατόπισης και Τάσης - Παραμόρφωσης για το δοκίμιο 2, υλικού ABS, πάχους εκτύπωσης 0,25mm και διεύθυνσης 90°.



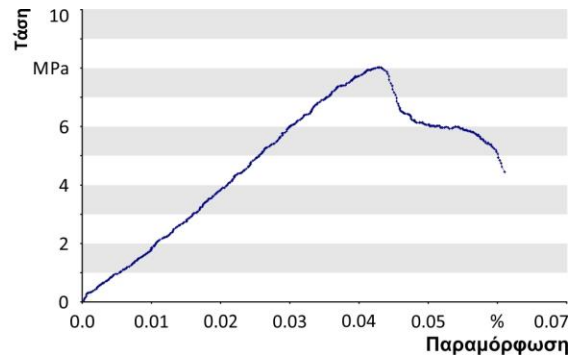
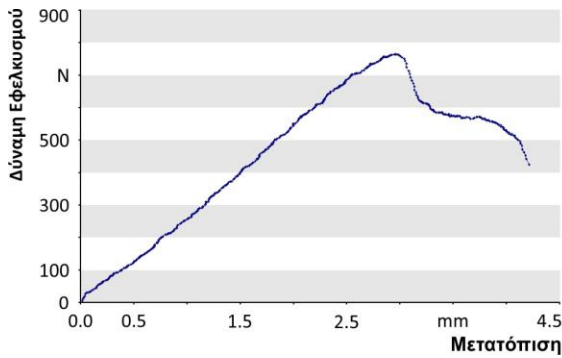
Διάγραμμα 3.5.3.3:

Διαγράμματα Φορτίου - Μετατόπισης και Τάσης - Παραμόρφωσης για το δοκίμιο 3, υλικού ABS, πάχους εκτύπωσης 0,25mm και διεύθυνσης 90°.



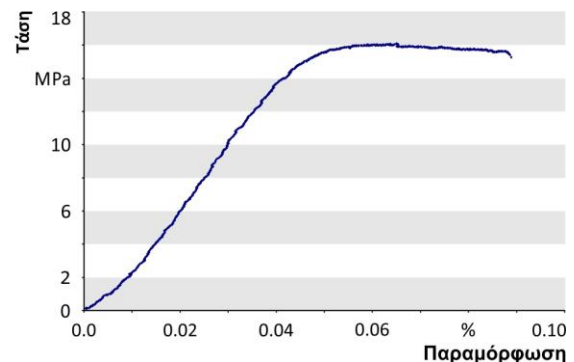
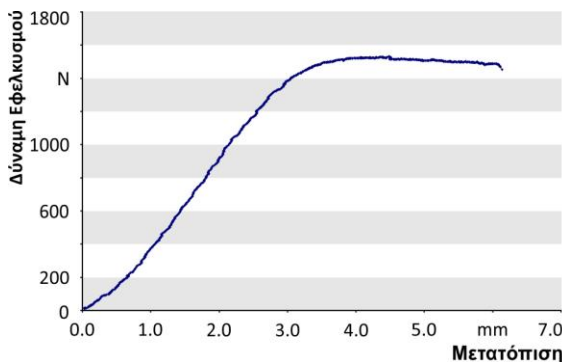
Διάγραμμα 3.5.3.4:

Διαγράμματα Φορτίου - Μετατόπισης και Τάσης - Παραμόρφωσης για το δοκίμιο 4, υλικού ABS, πάχους εκτύπωσης 0,25mm και διεύθυνσης 90°.

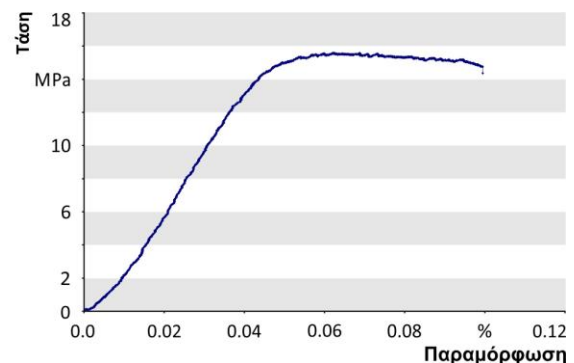
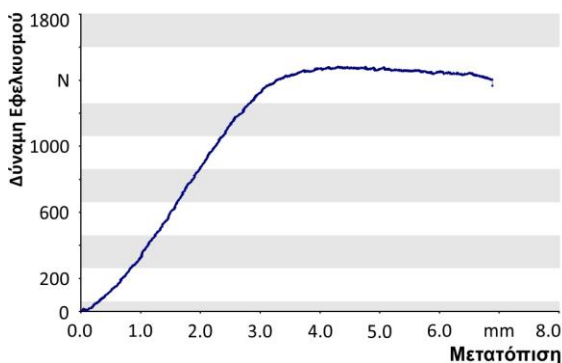


Διάγραμμα 3.5.3.5: Διαγράμματα Φορτίου - Μετατόπισης και Τάσης - Παραμόρφωσης για το δοκίμιο 5, υλικού ABS, πάχους εκτύπωσης 0,25mm και διεύθυνσης 90°.

3.5.4 ABS με Πάχος Εκτύπωσης 0,33 mm και Διεύθυνση 0°

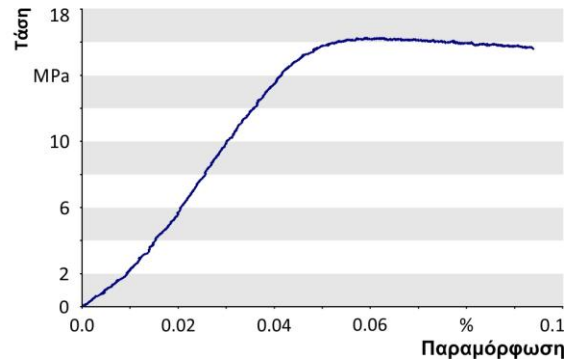
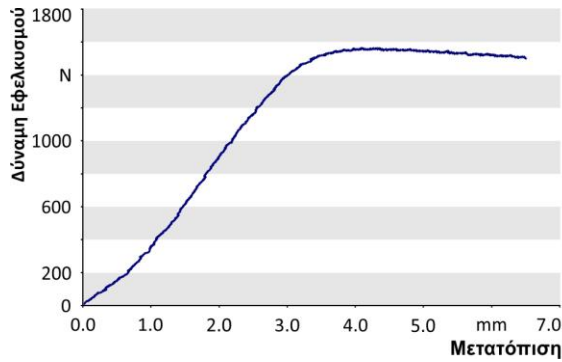


Διάγραμμα 3.5.4.1: Διαγράμματα Φορτίου - Μετατόπισης και Τάσης - Παραμόρφωσης για το δοκίμιο 1, υλικού ABS, πάχους εκτύπωσης 0,33mm και διεύθυνσης 0°.

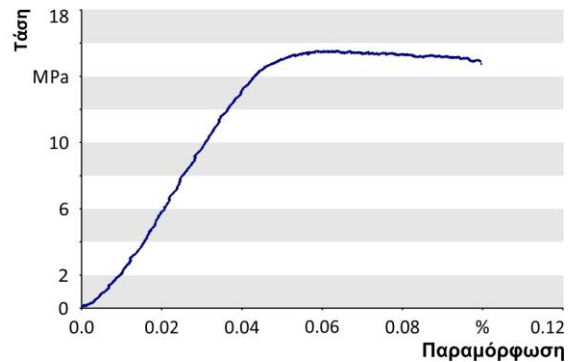
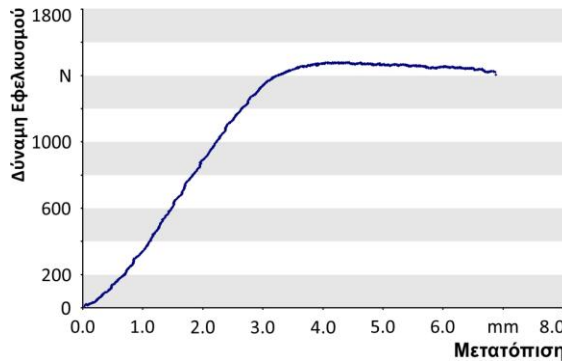


Διάγραμμα 3.5.4.2: Διαγράμματα Φορτίου - Μετατόπισης και Τάσης - Παραμόρφωσης για το δοκίμιο 2, υλικού ABS, πάχους εκτύπωσης 0,33mm και διεύθυνσης 0°.

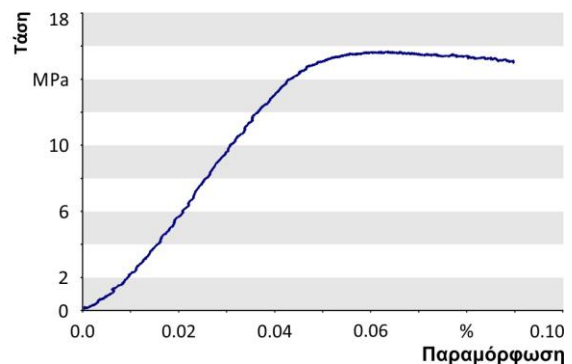
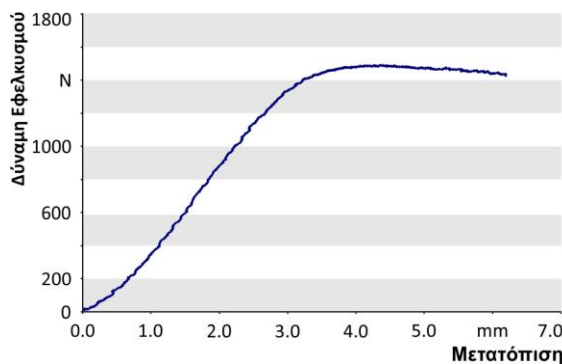
Ανάλυση και τεκμηρίωση δεδομένων για την αντοχή σε εφελκυσμό δοκιμίων κατασκευασμένων από υλικό ABS και ABS Plus σε τρισδιάστατο εκτυπωτή



Διάγραμμα 3.5.4.3: Διαγράμματα Φορτίου - Μετατόπισης και Τάσης - Παραμόρφωσης για το δοκίμιο 3, υλικού ABS, πάχους εκτύπωσης 0,33mm και διεύθυνσης 0°.

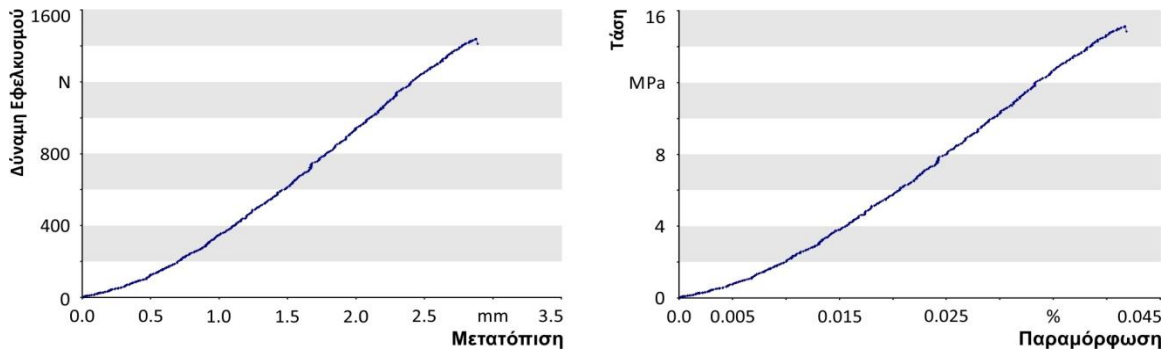


Διάγραμμα 3.5.4.4: Διαγράμματα Φορτίου - Μετατόπισης και Τάσης - Παραμόρφωσης για το δοκίμιο 4, υλικού ABS, πάχους εκτύπωσης 0,33mm και διεύθυνσης 0°.

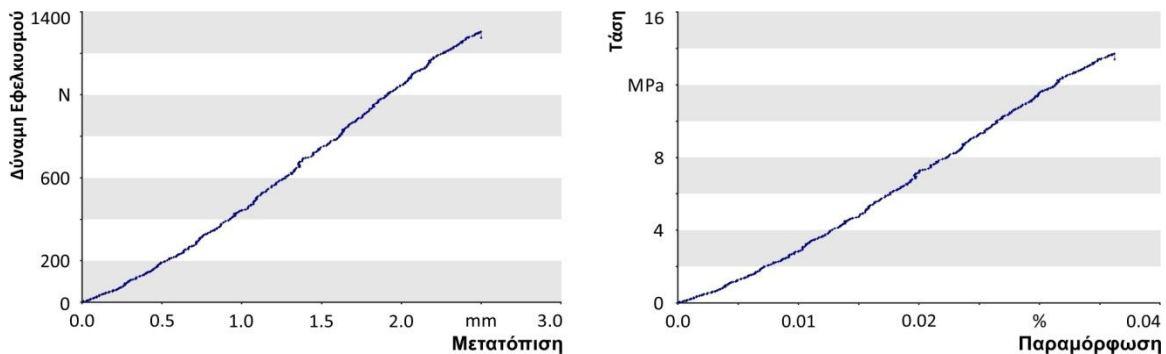


Διάγραμμα 3.5.4.5: Διαγράμματα Φορτίου - Μετατόπισης και Τάσης - Παραμόρφωσης για το δοκίμιο 5, υλικού ABS, πάχους εκτύπωσης 0,33mm και διεύθυνσης 0°.

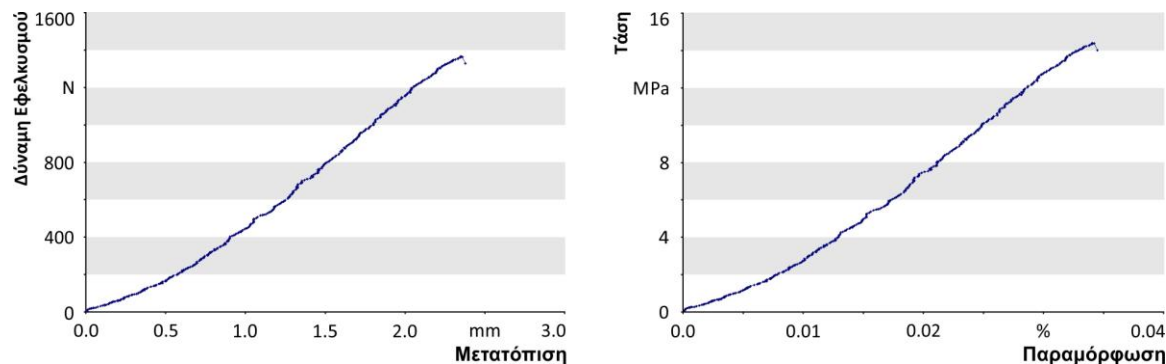
3.5.5 ABS με Πάχος Εκτύπωσης 0,33 mm και Διεύθυνση 45°



Διάγραμμα 3.5.5.1: Διαγράμματα Φορτίου - Μετατόπισης και Τάσης - Παραμόρφωσης για το δοκίμιο 1, υλικού ABS, πάχους εκτύπωσης 0,33mm και διεύθυνσης 45°.



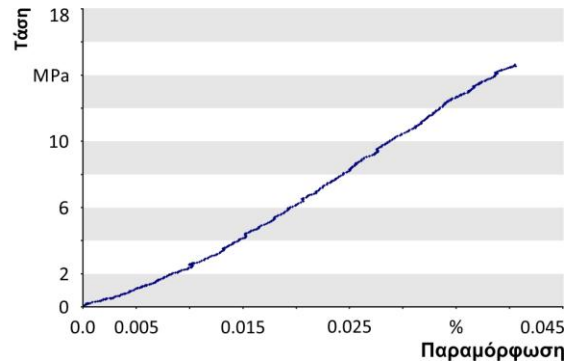
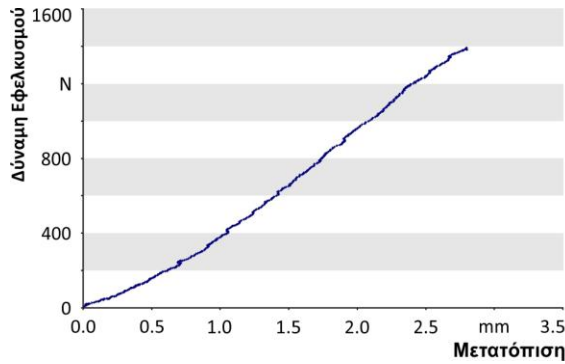
Διάγραμμα 3.5.5.2: Διαγράμματα Φορτίου - Μετατόπισης και Τάσης - Παραμόρφωσης για το δοκίμιο 2, υλικού ABS, πάχους εκτύπωσης 0,33mm και διεύθυνσης 45°.



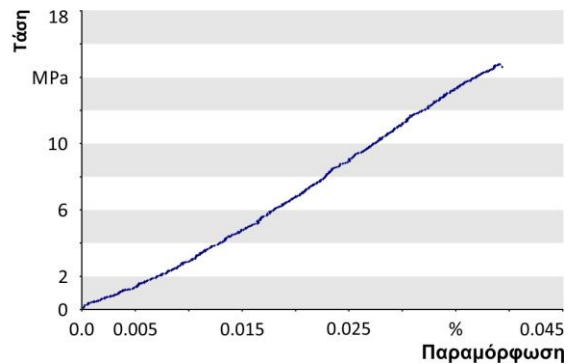
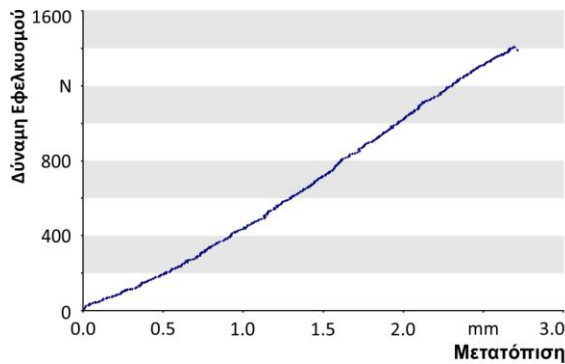
Διάγραμμα 3.5.5.3: Διαγράμματα Φορτίου - Μετατόπισης και Τάσης - Παραμόρφωσης για το δοκίμιο 3, υλικού ABS, πάχους εκτύπωσης 0,33mm και διεύθυνσης 45°.



Ανάλυση και τεκμηρίωση δεδομένων για την αντοχή σε εφελκυσμό δοκιμίων κατασκευασμένων από υλικό ABS και ABS Plus σε τρισδιάστατο εκτυπωτή

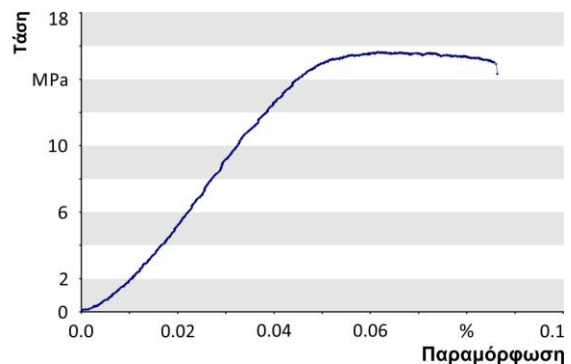
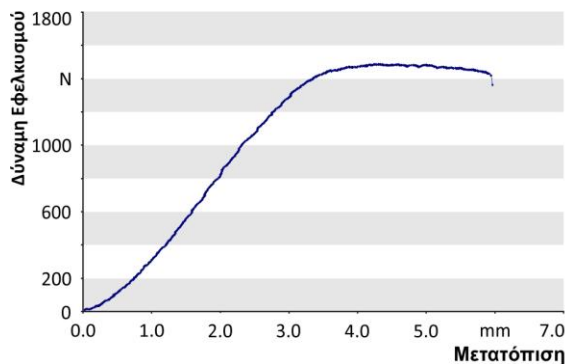


Διάγραμμα 3.5.5.4: Διαγράμματα Φορτίου - Μετατόπισης και Τάσης - Παραμόρφωσης για το δοκίμιο 4, υλικού ABS, πάχους εκτύπωσης 0,33mm και διεύθυνσης 45°.

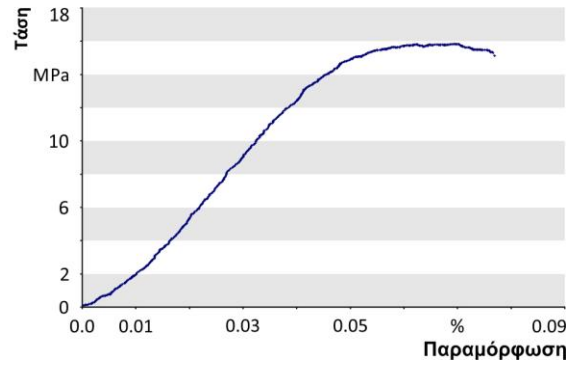
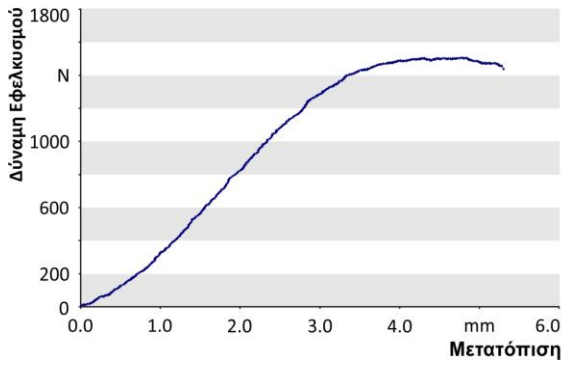


Διάγραμμα 3.5.5.5: Διαγράμματα Φορτίου - Μετατόπισης και Τάσης - Παραμόρφωσης για το δοκίμιο 5, υλικού ABS, πάχους εκτύπωσης 0,33mm και διεύθυνσης 45°.

3.5.6 ABS με Πάχος Εκτύπωσης 0,33 mm και Διεύθυνση 90°

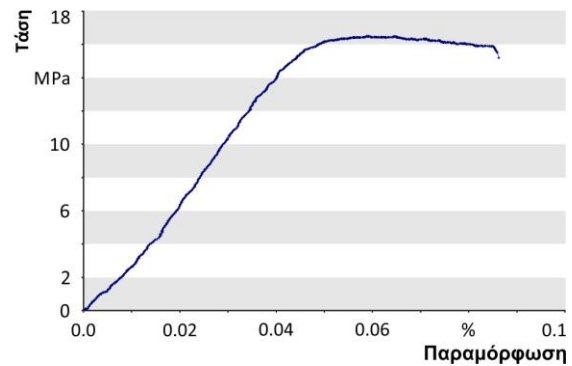
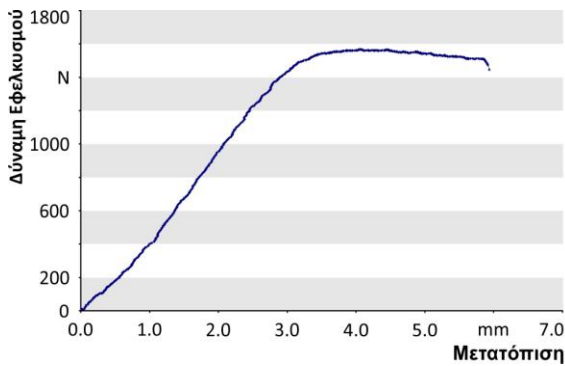


Διάγραμμα 3.5.6.1: Διαγράμματα Φορτίου - Μετατόπισης και Τάσης - Παραμόρφωσης για το δοκίμιο 1, υλικού ABS, πάχους εκτύπωσης 0,33mm και διεύθυνσης 90°.



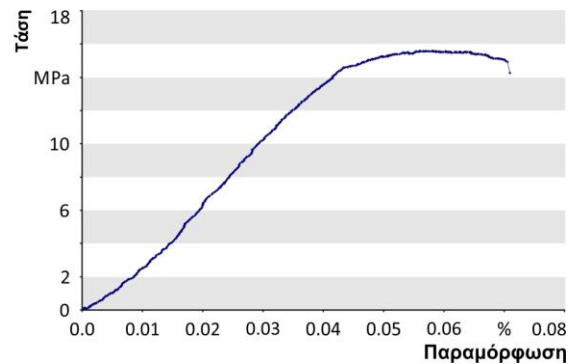
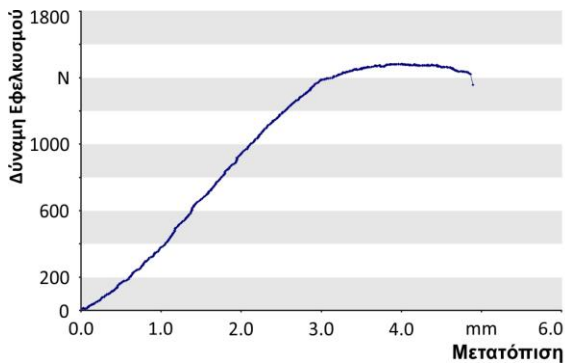
Διάγραμμα 3.5.6.2:

Διαγράμματα Φορτίου - Μετατόπισης και Τάσης - Παραμόρφωσης για το δοκίμιο 2, υλικού ABS, πάχους εκτύπωσης 0,33mm και διεύθυνσης 90°.



Διάγραμμα 3.5.6.3:

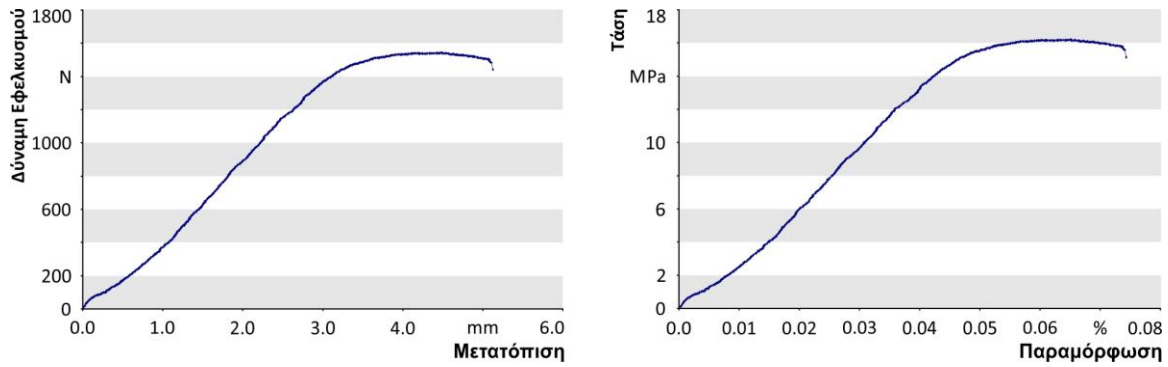
Διαγράμματα Φορτίου - Μετατόπισης και Τάσης - Παραμόρφωσης για το δοκίμιο 3, υλικού ABS, πάχους εκτύπωσης 0,33mm και διεύθυνσης 90°.



Διάγραμμα 3.5.6.4:

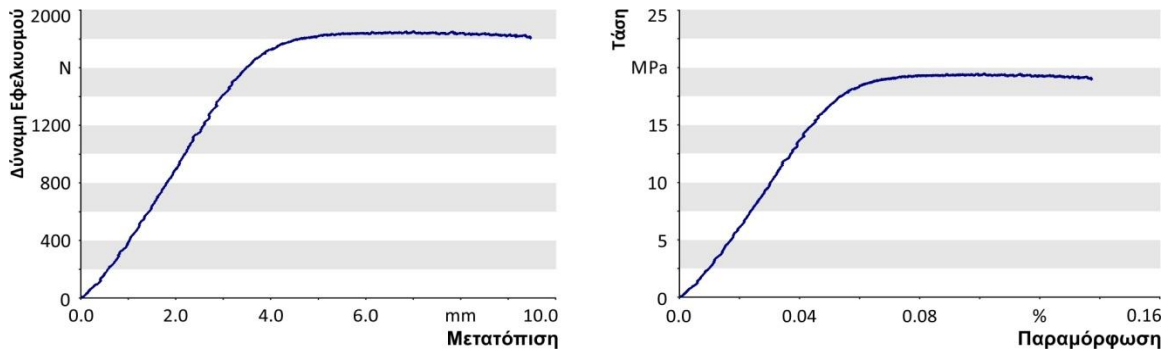
Διαγράμματα Φορτίου - Μετατόπισης και Τάσης - Παραμόρφωσης για το δοκίμιο 4, υλικού ABS, πάχους εκτύπωσης 0,33mm και διεύθυνσης 90°.

Ανάλυση και τεκμηρίωση δεδομένων για την αντοχή σε εφελκυσμό δοκιμίων κατασκευασμένων από υλικό ABS και ABS Plus σε τρισδιάστατο εκτυπωτή

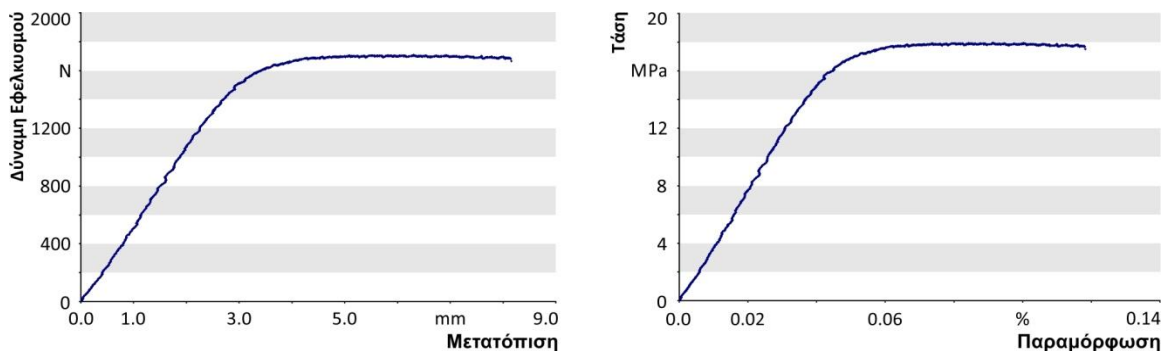


Διάγραμμα 3.5.6.5: Διαγράμματα Φορτίου - Μετατόπισης και Τάσης - Παραμόρφωσης για το δοκίμιο 5, υλικού ABS, πάχους εκτύπωσης 0,33mm και διεύθυνσης 90°.

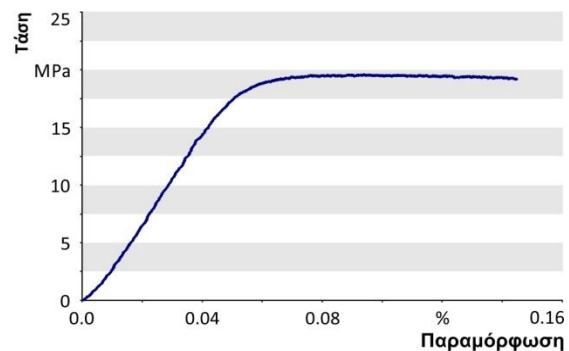
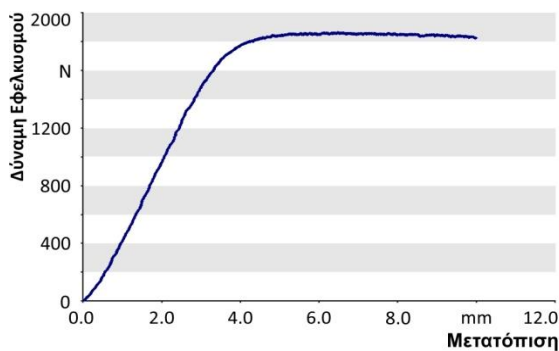
3.5.7 ABS Plus με Πάχος Εκτύπωσης 0,17 mm και Διεύθυνση 0°



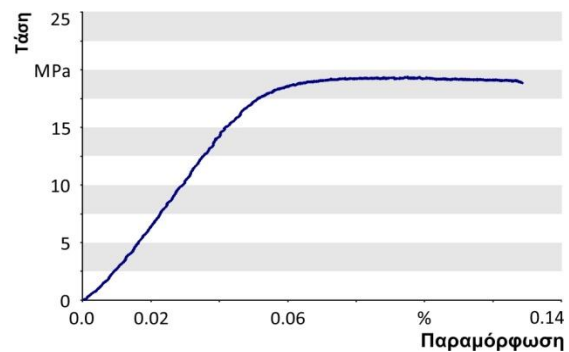
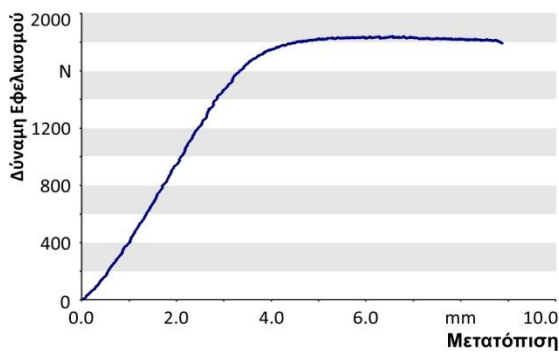
Διάγραμμα 3.5.7.1: Διαγράμματα Φορτίου - Μετατόπισης και Τάσης - Παραμόρφωσης για το δοκίμιο 1, υλικού ABS Plus, πάχους εκτύπωσης 0,17mm και διεύθυνσης 0°.



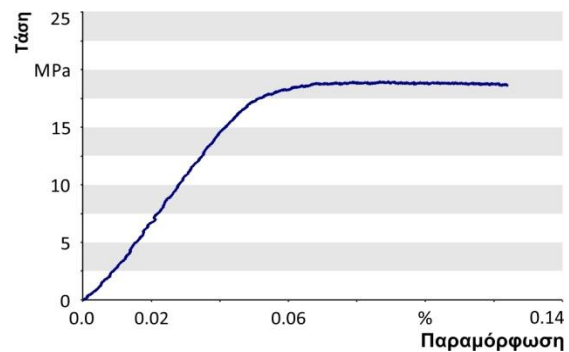
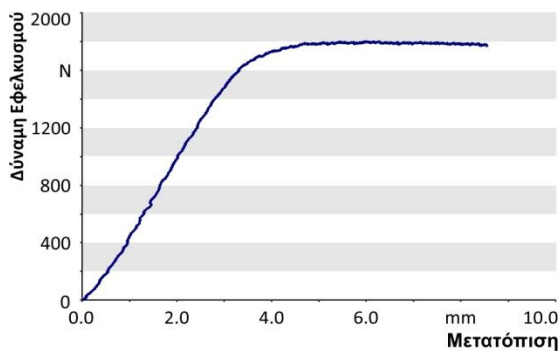
Διάγραμμα 3.5.7.2: Διαγράμματα Φορτίου - Μετατόπισης και Τάσης - Παραμόρφωσης για το δοκίμιο 2, υλικού ABS Plus, πάχους εκτύπωσης 0,17mm και διεύθυνσης 0°.



Διάγραμμα 3.5.7.3: Διαγράμματα Φορτίου - Μετατόπισης και Τάσης - Παραμόρφωσης για το δοκίμιο 3, υλικού ABS Plus, πάχους εκτύπωσης 0,17mm και διεύθυνσης 0°.

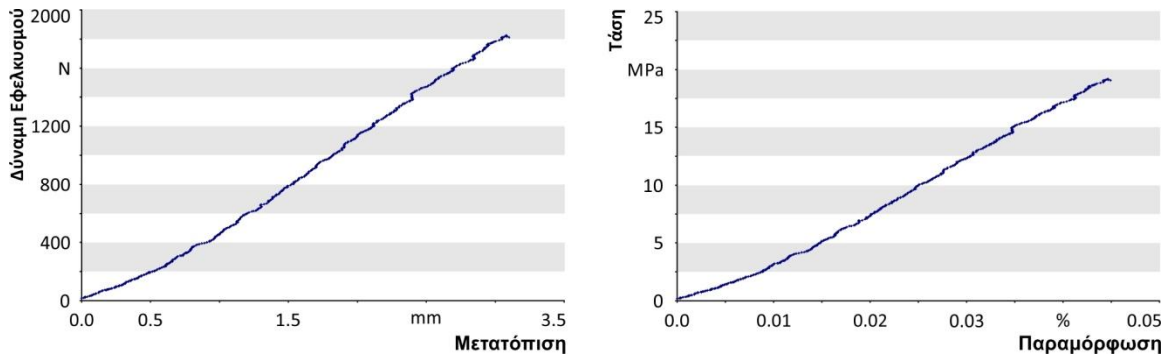


Διάγραμμα 3.5.7.4: Διαγράμματα Φορτίου - Μετατόπισης και Τάσης - Παραμόρφωσης για το δοκίμιο 4, υλικού ABS Plus, πάχους εκτύπωσης 0,17mm και διεύθυνσης 0°.

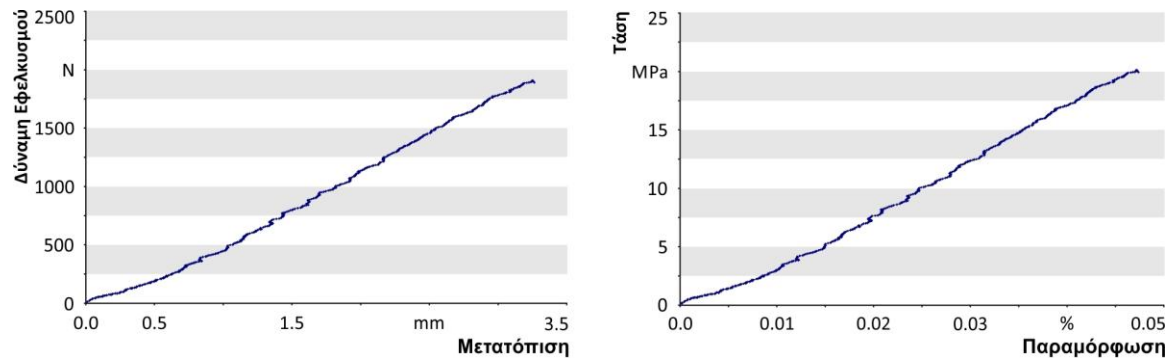


Διάγραμμα 3.5.7.5: Διαγράμματα Φορτίου - Μετατόπισης και Τάσης - Παραμόρφωσης για το δοκίμιο 5, υλικού ABS Plus, πάχους εκτύπωσης 0,17mm και διεύθυνσης 0°.

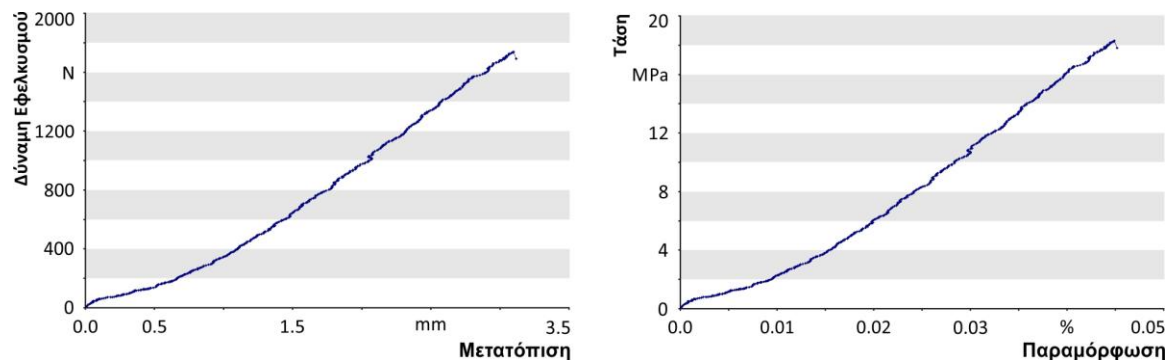
3.5.8 ABS Plus με Πάχος Εκτύπωσης 0,17 mm και Διεύθυνση 45°



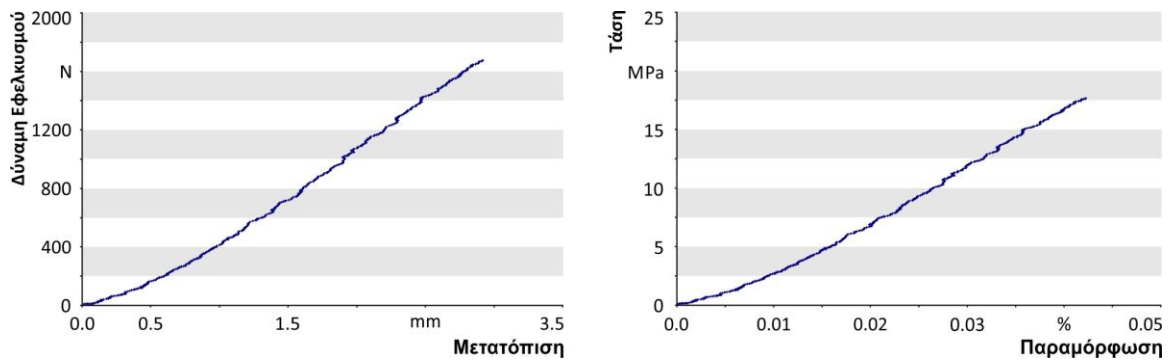
Διάγραμμα 3.5.8.1: Διαγράμματα Φορτίου - Μετατόπισης και Τάσης - Παραμόρφωσης για το δοκίμιο 1, υλικού ABS Plus, πάχους εκτύπωσης 0,17mm και διεύθυνσης 45°.



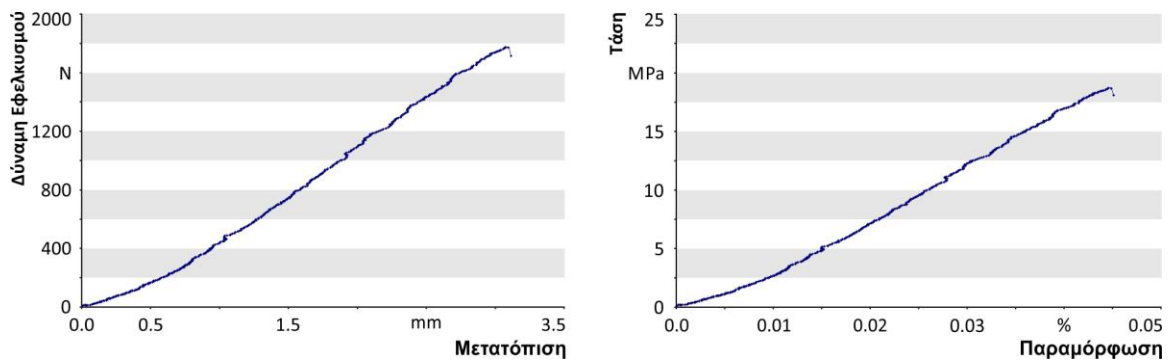
Διάγραμμα 3.5.8.2: Διαγράμματα Φορτίου - Μετατόπισης και Τάσης - Παραμόρφωσης για το δοκίμιο 2, υλικού ABS Plus, πάχους εκτύπωσης 0,17mm και διεύθυνσης 45°.



Διάγραμμα 3.5.8.3: Διαγράμματα Φορτίου - Μετατόπισης και Τάσης - Παραμόρφωσης για το δοκίμιο 3, υλικού ABS Plus, πάχους εκτύπωσης 0,17mm και διεύθυνσης 45°.

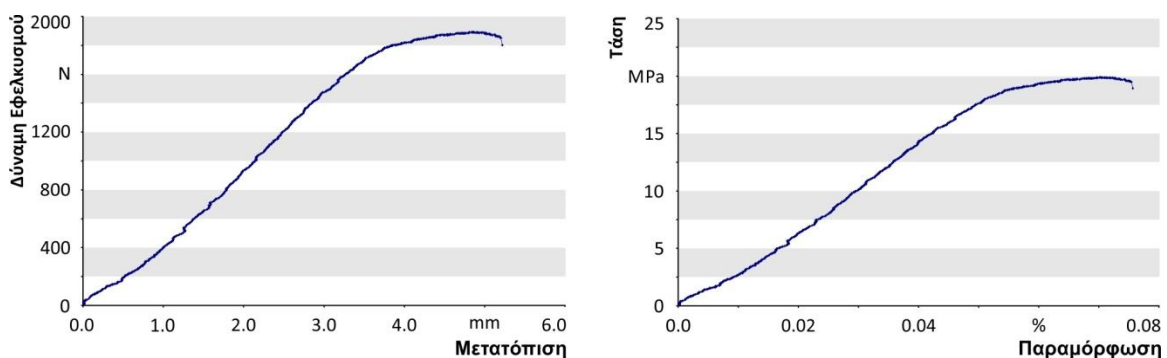


Διάγραμμα 3.5.8.4: Διαγράμματα Φορτίου - Μετατόπισης και Τάσης - Παραμόρφωσης για το δοκίμιο 4, υλικού ABS Plus, πάχους εκτύπωσης 0,17mm και διεύθυνσης 45°.



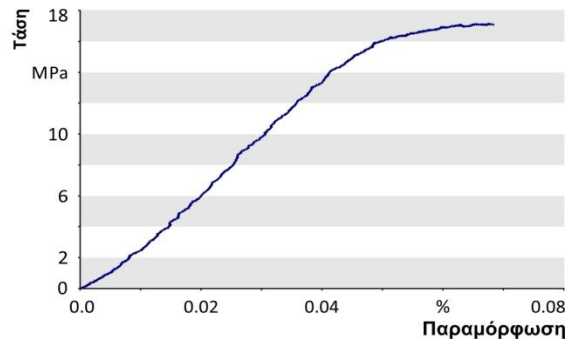
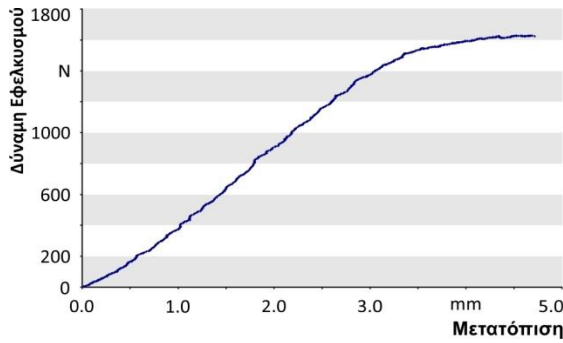
Διάγραμμα 3.5.8.5: Διαγράμματα Φορτίου - Μετατόπισης και Τάσης - Παραμόρφωσης για το δοκίμιο 5, υλικού ABS Plus, πάχους εκτύπωσης 0,17mm και διεύθυνσης 45°.

3.5.9 ABS Plus με Πάχος Εκτύπωσης 0,17 mm και Διεύθυνση 90°

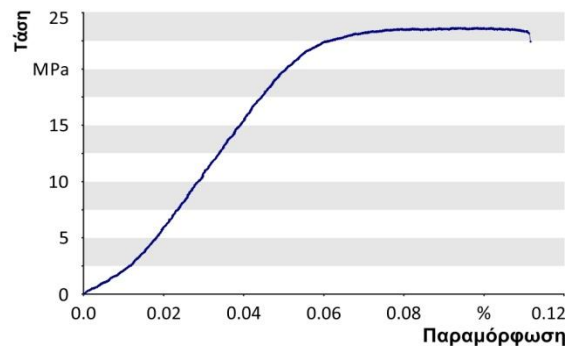
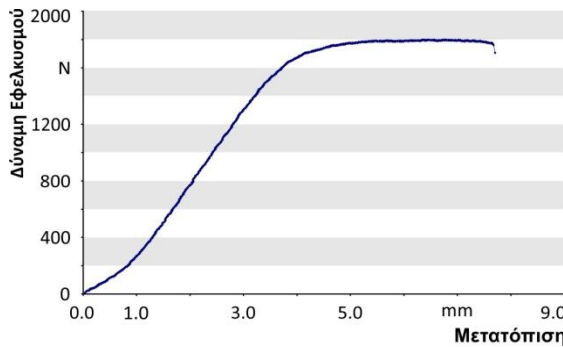


Διάγραμμα 3.5.9.1: Διαγράμματα Φορτίου - Μετατόπισης και Τάσης - Παραμόρφωσης για το δοκίμιο 1, υλικού ABS Plus, πάχους εκτύπωσης 0,17mm και διεύθυνσης 90°.

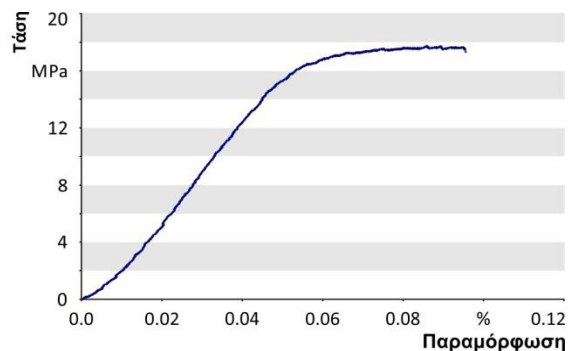
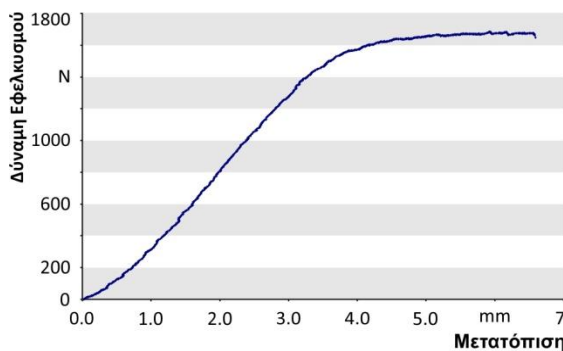
Ανάλυση και τεκμηρίωση δεδομένων για την αντοχή σε εφελκυσμό δοκιμίων κατασκευασμένων από υλικό ABS και ABS Plus σε τρισδιάστατο εκτυπωτή



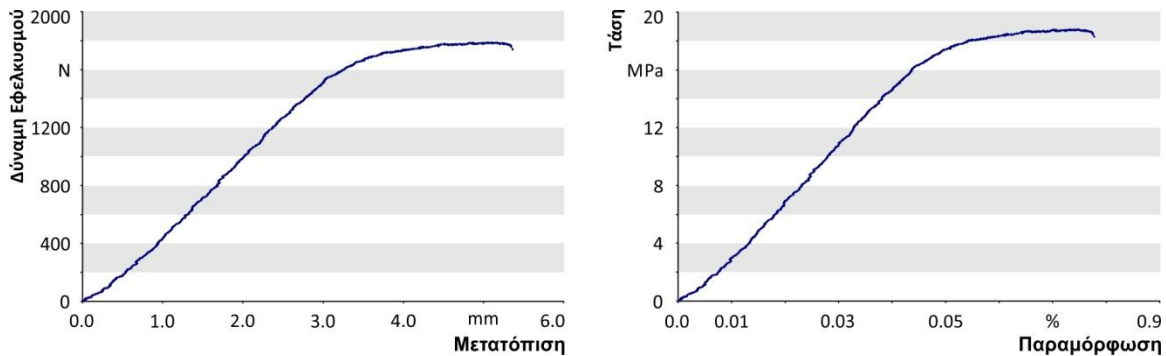
Διάγραμμα 3.5.9.2: Διαγράμματα Φορτίου - Μετατόπισης και Τάσης - Παραμόρφωσης για το δοκίμιο 2, υλικού ABS Plus, πάχους εκτύπωσης 0,17mm και διεύθυνσης 90°.



Διάγραμμα 3.5.9.3: Διαγράμματα Φορτίου - Μετατόπισης και Τάσης - Παραμόρφωσης για το δοκίμιο 3, υλικού ABS Plus, πάχους εκτύπωσης 0,17mm και διεύθυνσης 90°.

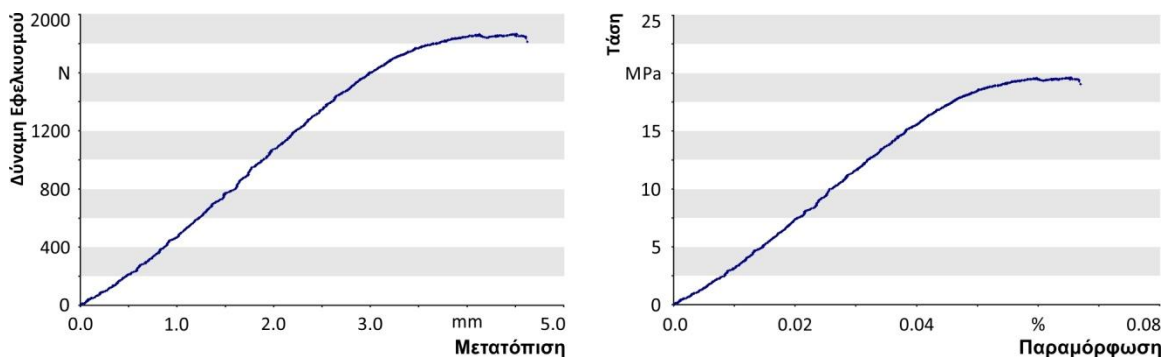


Διάγραμμα 3.5.9.4: Διαγράμματα Φορτίου - Μετατόπισης και Τάσης - Παραμόρφωσης για το δοκίμιο 4, υλικού ABS Plus, πάχους εκτύπωσης 0,17mm και διεύθυνσης 90°.

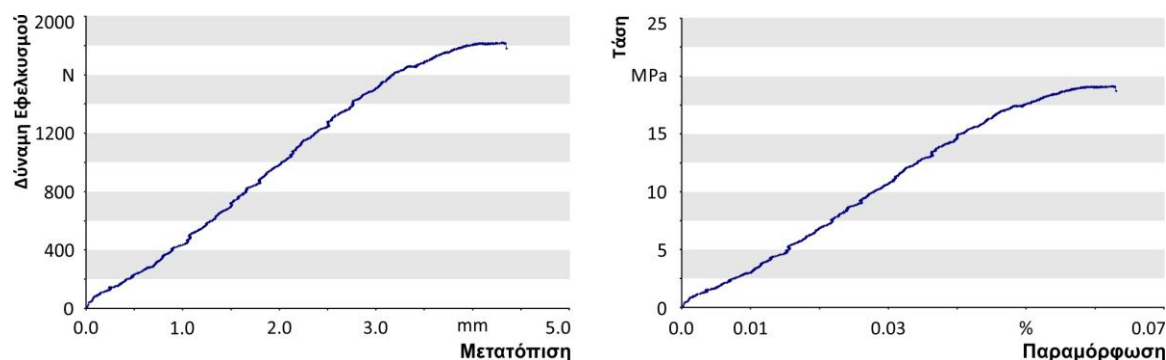


Διάγραμμα 3.5.9.5: Διαγράμματα Φορτίου - Μετατόπισης και Τάσης - Παραμόρφωσης για το δοκίμιο 5, υλικού ABS Plus, πάχους εκτύπωσης 0,17mm και διεύθυνσης 90°.

3.5.10 ABS Plus με Πάχος Εκτύπωσης 0,25 mm και Διεύθυνση 0°

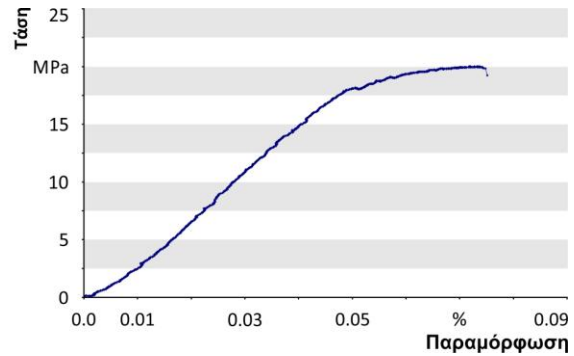
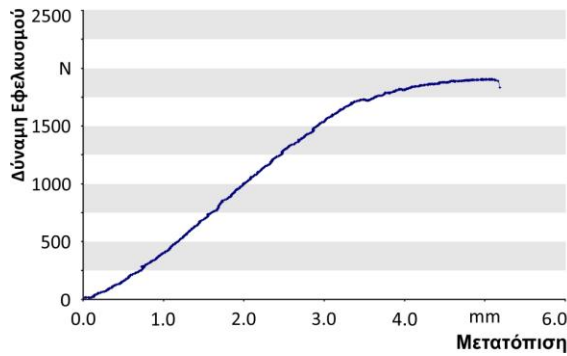


Διάγραμμα 3.5.10.1: Διαγράμματα Φορτίου - Μετατόπισης και Τάσης - Παραμόρφωσης για το δοκίμιο 1, υλικού ABS Plus, πάχους εκτύπωσης 0,25mm και διεύθυνσης 0°.

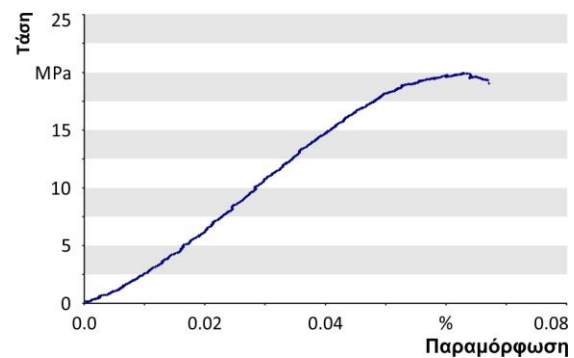
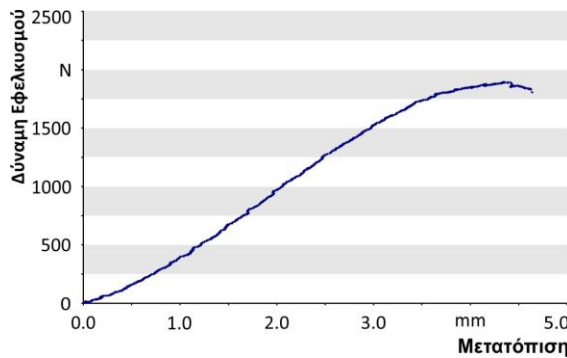


Διάγραμμα 3.5.10.2: Διαγράμματα Φορτίου - Μετατόπισης και Τάσης - Παραμόρφωσης για το δοκίμιο 2, υλικού ABS Plus, πάχους εκτύπωσης 0,25mm και διεύθυνσης 0°.

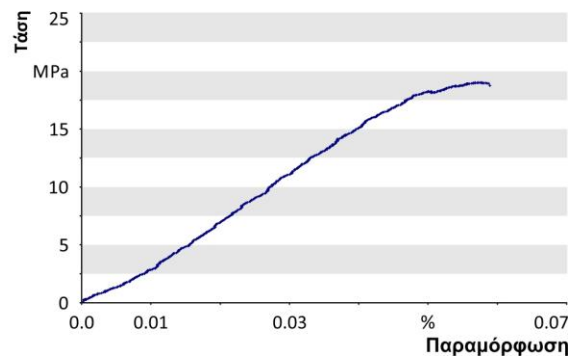
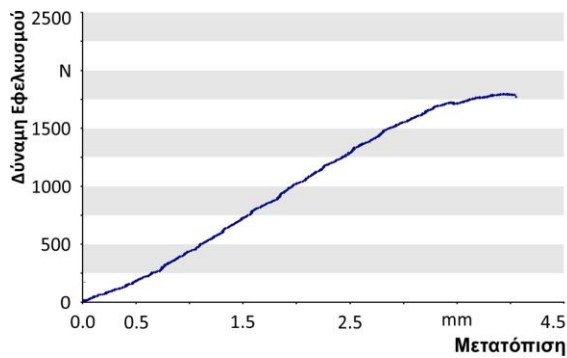
Ανάλυση και τεκμηρίωση δεδομένων για την αντοχή σε εφελκυσμό δοκιμίων κατασκευασμένων από υλικό ABS και ABS Plus σε τρισδιάστατο εκτυπωτή



Διάγραμμα 3.5.10.3: Διαγράμματα Φορτίου - Μετατόπισης και Τάσης - Παραμόρφωσης για το δοκίμιο 3, υλικού ABS Plus, πάχους εκτύπωσης 0,25mm και διεύθυνσης 0°.

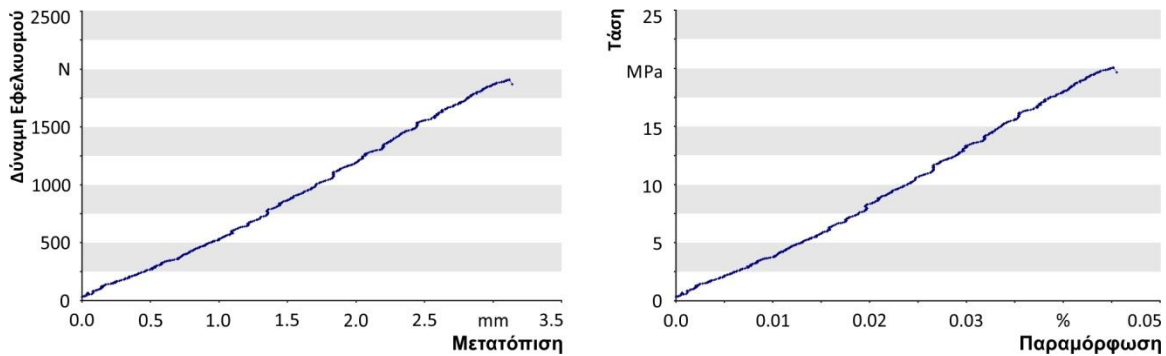


Διάγραμμα 3.5.10.4: Διαγράμματα Φορτίου - Μετατόπισης και Τάσης - Παραμόρφωσης για το δοκίμιο 4, υλικού ABS Plus, πάχους εκτύπωσης 0,25mm και διεύθυνσης 0°.

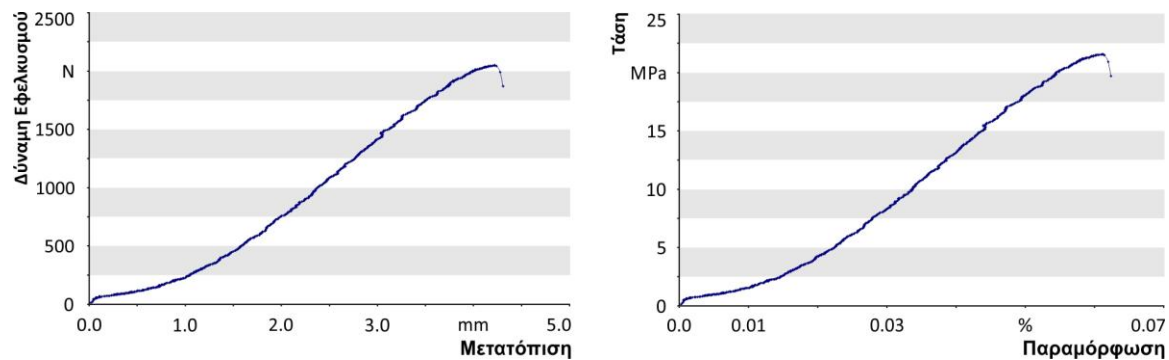


Διάγραμμα 3.5.10.5: Διαγράμματα Φορτίου - Μετατόπισης και Τάσης - Παραμόρφωσης για το δοκίμιο 5, υλικού ABS Plus, πάχους εκτύπωσης 0,25mm και διεύθυνσης 0°.

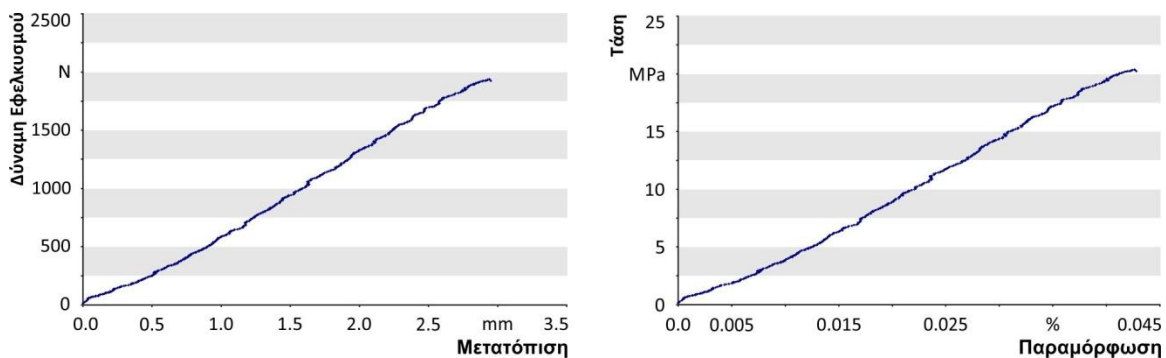
3.5.11 ABS Plus με Πάχος Εκτύπωσης 0,25 mm και Διεύθυνση 45°



Διάγραμμα 3.5.11.1: Διαγράμματα Φορτίου - Μετατόπισης και Τάσης - Παραμόρφωσης για το δοκίμιο 1, υλικού ABS Plus, πάχους εκτύπωσης 0,25mm και διεύθυνσης 45°.

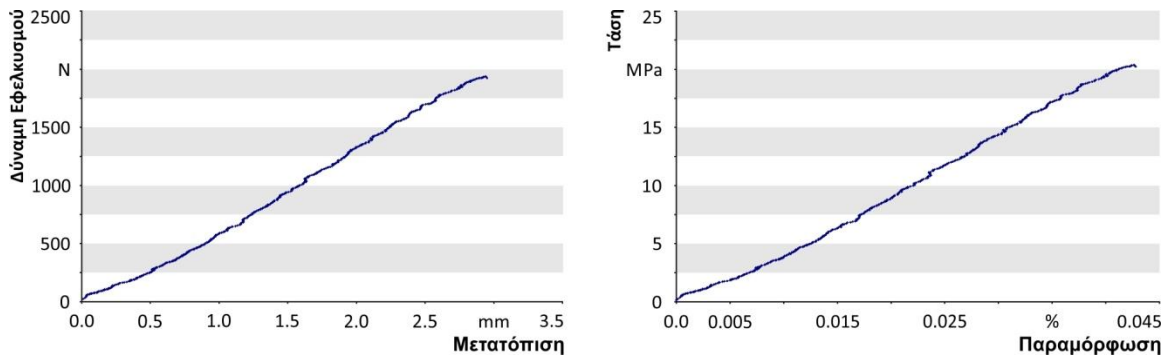


Διάγραμμα 3.5.11.2: Διαγράμματα Φορτίου - Μετατόπισης και Τάσης - Παραμόρφωσης για το δοκίμιο 2, υλικού ABS Plus, πάχους εκτύπωσης 0,25mm και διεύθυνσης 45°.

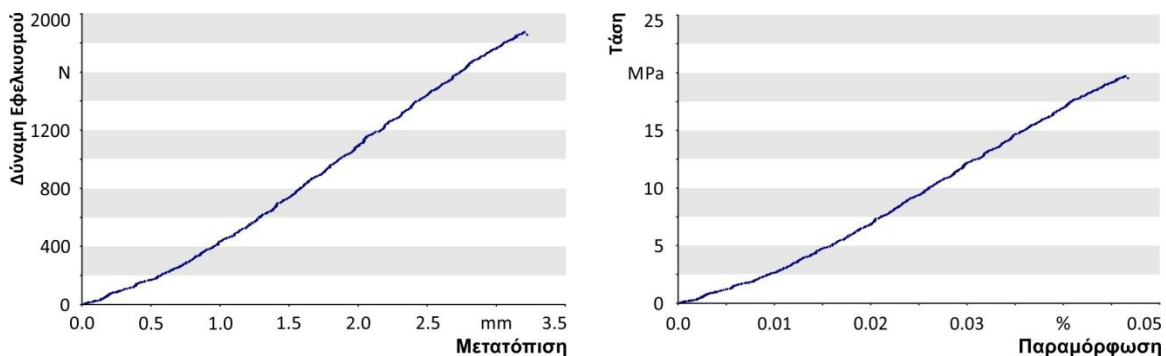


Διάγραμμα 3.5.11.3: Διαγράμματα Φορτίου - Μετατόπισης και Τάσης - Παραμόρφωσης για το δοκίμιο 3, υλικού ABS Plus, πάχους εκτύπωσης 0,25mm και διεύθυνσης 45°.

Ανάλυση και τεκμηρίωση δεδομένων για την αντοχή σε εφελκυσμό δοκιμίων κατασκευασμένων από υλικό ABS και ABS Plus σε τρισδιάστατο εκτυπωτή

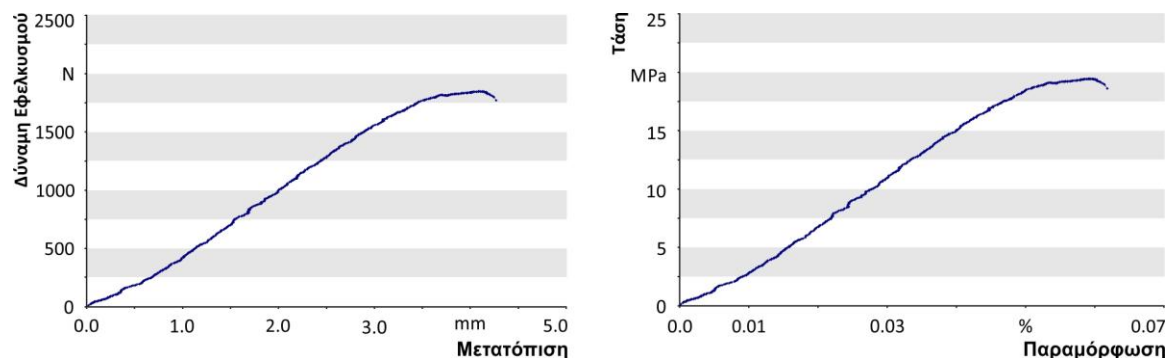


Διάγραμμα 3.5.11.4: Διαγράμματα Φορτίου - Μετατόπισης και Τάσης - Παραμόρφωσης για το δοκίμιο 4, υλικού ABS Plus, πάχους εκτύπωσης 0,25mm και διεύθυνσης 45°.

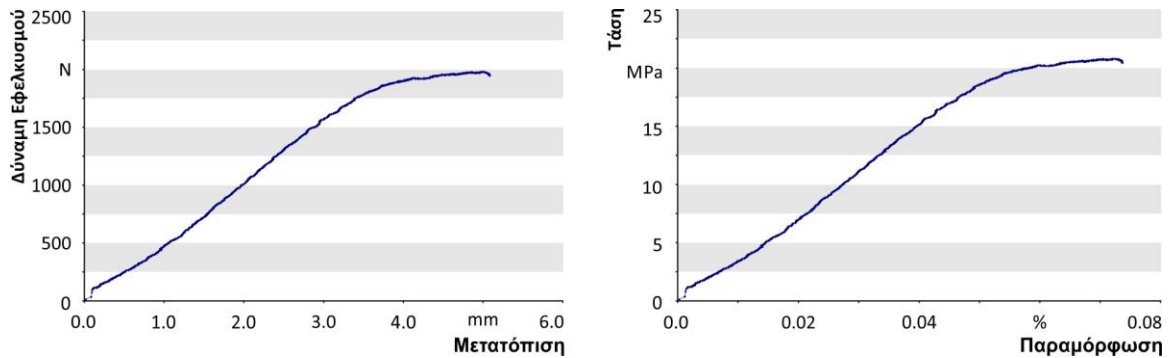


Διάγραμμα 3.5.11.5: Διαγράμματα Φορτίου - Μετατόπισης και Τάσης - Παραμόρφωσης για το δοκίμιο 5, υλικού ABS Plus, πάχους εκτύπωσης 0,25mm και διεύθυνσης 45°.

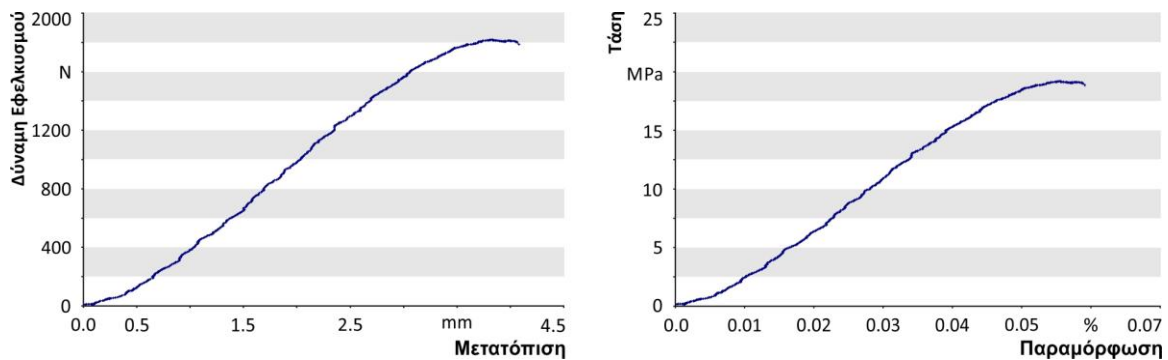
3.5.12 ABS Plus με Πάχος Εκτύπωσης 0,25 mm και Διεύθυνση 90°



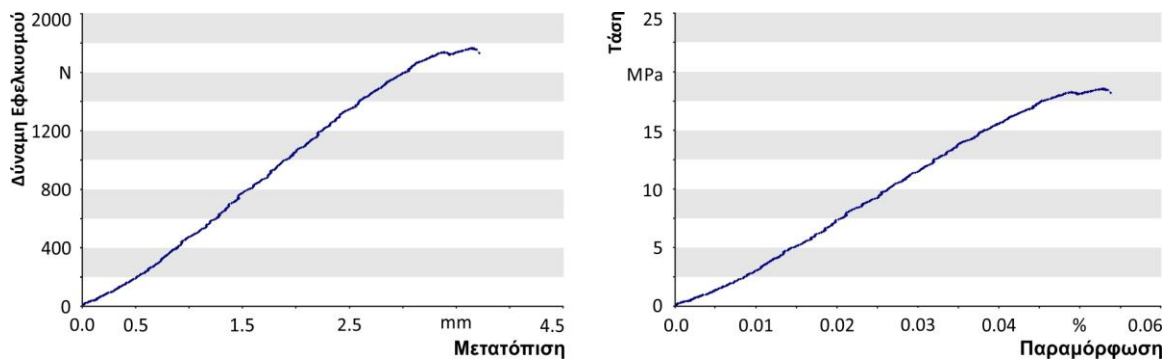
Διάγραμμα 3.5.12.1: Διαγράμματα Φορτίου - Μετατόπισης και Τάσης - Παραμόρφωσης για το δοκίμιο 1, υλικού ABS Plus, πάχους εκτύπωσης 0,25mm και διεύθυνσης 90°.



Διάγραμμα 3.5.12.2: Διαγράμματα Φορτίου - Μετατόπισης και Τάσης - Παραμόρφωσης για το δοκίμιο 2, υλικού ABS Plus, πάχους εκτύπωσης 0,25mm και διεύθυνσης 90°.

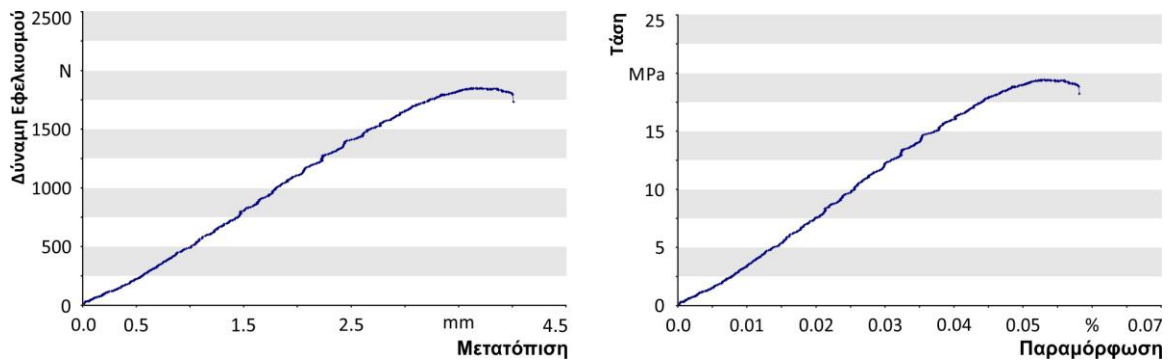


Διάγραμμα 3.5.12.3: Διαγράμματα Φορτίου - Μετατόπισης και Τάσης - Παραμόρφωσης για το δοκίμιο 3, υλικού ABS Plus, πάχους εκτύπωσης 0,25mm και διεύθυνσης 90°.



Διάγραμμα 3.5.12.4: Διαγράμματα Φορτίου - Μετατόπισης και Τάσης - Παραμόρφωσης για το δοκίμιο 4, υλικού ABS Plus, πάχους εκτύπωσης 0,25mm και διεύθυνσης 90°.

Ανάλυση και τεκμηρίωση δεδομένων για την αντοχή σε εφελκυσμό δοκιμίων κατασκευασμένων από υλικό ABS και ABS Plus σε τρισδιάστατο εκτυπωτή



Διάγραμμα 3.5.12.5: Διαγράμματα Φορτίου - Μετατόπισης και Τάσης - Παραμόρφωσης για το δοκίμιο 5, υλικού ABS Plus, πάχους εκτύπωσης 0,25mm και διεύθυνσης 90°.

Κεφάλαιο 4: Συγκρίσεις και Ανάλυση Δεδομένων

4.1 Ανάλυση Πειραματικών Δεδομένων

Αρχικά, η σύγκριση των δοκιμών θα πραγματοποιηθεί, συγκρίνοντας τις τιμές του κατασκευαστή σε σχέση με τις πειραματικές τιμές. Επειδή οι πειραματικές τιμές που έχουν αναδειχθεί είναι πολλές λόγω του πλήθους των δοκιμών, θα κατασκευαστούν νέοι πίνακες αποτελεσμάτων. Στους πίνακες αυτούς θα χρησιμοποιηθεί η περιγραφική στατιστική όπου θα παραθέτονται οι μέσοι όροι των τιμών των δοκιμών ώστε να πραγματοποιηθεί η σύγκριση.

Η μέθοδος αυτή των μέσων τιμών είναι μέτρο κεντρικής τάσης (*measures of central tendency*) όπου ανήκει στη περιγραφική στατιστική. Ο σκοπός των μέτρων κεντρικής τάσης είναι να προσδιοριστεί ένα στατιστικό μέγεθος το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να αντιπροσωπεύσει ένα σύνολο δεδομένων [22].

Οι παρακάτω πίνακες 4.1.1, 4.1.2, 4.1.3, 4.1.4 συγκεντρώνουν τους μέσους όρους από ένα σύνολο 5 δοκιμών για κάθε συνθήκη (υλικό, πάχος και διεύθυνση εκτύπωσης). Στους πίνακες αυτούς αναφέρονται οι μέσοι όροι για τις εξής τιμές: Φορτίο θραύσης, Τάση Εφελκυσμού, Μέτρο Ελαστικότητας και Εκατοστιαία Επιμήκυνση.

Acrylonitrile Butadiene Styrene				
Πάχος Εκτύπωσης 0,25mm				
Διεύθυνση	Φορτίο Θραύσης	Τάση Εφελκυσμού	Μέτρο Ελαστικότητας	Εκατοστιαία Επιμήκυνση
°	N	MPa	Pa	%
0	1760.08	18.51	371.91	14.93
45	1819.13	19.13	401.21	4.72
90	808.40	8.50	202.56	5.90

Πίνακας 4.1.1: Πίνακας μέσων όρων αποτελεσμάτων πειράματος για υλικό ABS και πάχος εκτύπωσης 0,25 mm.

Ανάλυση και τεκμηρίωση δεδομένων για την αντοχή σε εφελκυσμό δοκιμών κατασκευασμένων από υλικό ABS και ABS Plus σε τρισδιάστατο εκτυπωτή

Acrylonitrile Butadiene Styrene				
Πάχος Εκτύπωσης 0,33mm				
Διεύθυνση	Φορτίο Θραύσης	Τάση Εφελκυσμού	Μέτρο Ελαστικότητας	Εκατοστιαία Επιμήκυνση
°	N	MPa	Pa	%
0	1601.70	16.84	345.23	9.50
45	1415.27	14.88	357.10	3.89
90	1594.59	16.77	339.34	7.97

Πίνακας 4.1.2:

Πίνακας μέσω των όρων αποτελεσμάτων πειράματος για υλικό ABS και πάχος εκτύπωσης 0,33 mm.

Acrylonitrile Butadiene Styrene Plus				
Πάχος Εκτύπωσης 0,17mm				
Διεύθυνση	Φορτίο Θραύσης	Τάση Εφελκυσμού	Μέτρο Ελαστικότητας	Εκατοστιαία Επιμήκυνση
°	N	MPa	Pa	%
0	1813.21	19.07	354.44	13.05
45	1842.29	19.37	388.11	4.52
90	1757.42	18.48	322.61	8.71

Πίνακας 4.1.3:

Πίνακας μέσω των όρων αποτελεσμάτων πειράματος για υλικό ABS Plus και πάχος εκτύπωσης 0,17 mm.

Acrylonitrile Butadiene Styrene Plus				
Πάχος Εκτύπωσης 0,25mm				
Διεύθυνση	Φορτίο Θραύσης	Τάση Εφελκυσμού	Μέτρο Ελαστικότητας	Εκατοστιαία Επιμήκυνση
°	N	MPa	Pa	%
0	1923.60	20.23	377.11	6.67
45	1947.99	20.48	405.77	4.81
90	1776.37	18.68	348.86	5.98

Πίνακας 4.1.4:

Πίνακας μέσω των όρων αποτελεσμάτων πειράματος για υλικό ABS Plus και πάχος εκτύπωσης 0,25 mm.

4.2 Σύγκριση Αντοχής Δοκιμών με τη Θεωρητική

Για να πραγματοποιηθεί η σύγκριση της αντοχής των δοκιμών χρησιμοποιούνται ως μέτρο σύγκρισης οι τιμές του κατασκευαστή, οι οποίες αναφέρονται στον Πίνακα 1.1.3.1.1 για το ABS και στον Πίνακα 1.2.2.1 αντίστοιχα. Σε αυτούς αναγράφεται ότι η αντοχή εφελκυσμού για το ABS είναι 22 MPa, ενώ για το υλικό ABS Plus η αντοχή είναι 37 MPa.

Η σύγκριση των εκτυπωμένων δοκιμών με τη θεωρητική αντοχή που δίνεται από τον κατασκευαστή, γίνεται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 4.2.1) στον οποίο υπολογίζεται η διαφορά σε επί τοις εκατό (%). Για τις πειραματικές τιμές επιλέγονται οι μέγιστες τιμές για κάθε υλικό κατασκευής από τους Πίνακες 4.1.1 - 4.1.4 Για τα αποτελέσματα του Πίνακα 4.2.1 υπάρχει και αντίστοιχο συγκριτικό διάγραμμα (Διάγραμμα 4.2.1).

Στη συνέχεια παρέχεται συγκριτικό διάγραμμα στο οποίο διακρίνεται η διαφορά της πειραματικής αντοχής του μέσου όρου των δοκιμών ανά διεύθυνση, πάχος εκτύπωσης και υλικό, σε σχέση με τις τιμές της αντοχής που παρέχονται από τον κατασκευαστή (Διάγραμμα 4.2.2).

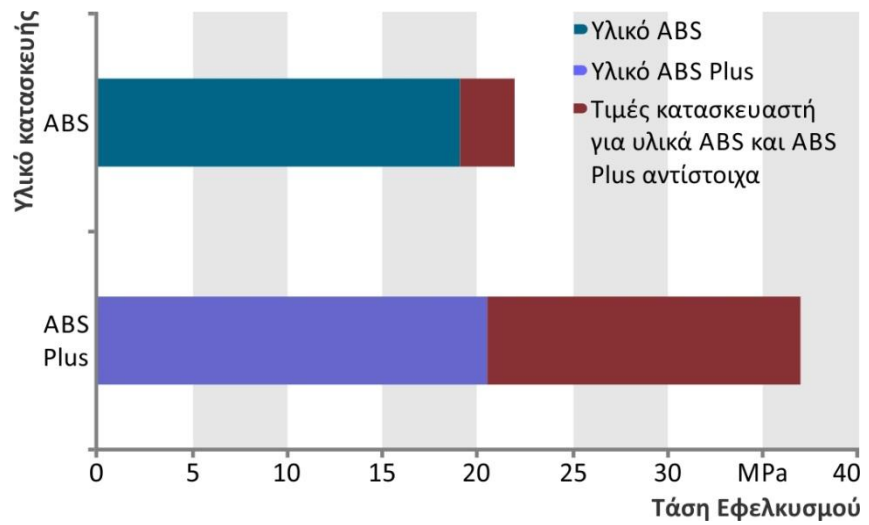
Υλικό Κατασκευής	Θεωρητική Τιμή	Μέγιστη Πειραματική Τιμή	Διαφορά
	MPa	MPa	%
Acrylonitrile Butadiene Styrene	22	19.13	13.0
Acrylonitrile Butadiene Styrene Plus	37	20.48	44.6

Πίνακας 4.2.1:

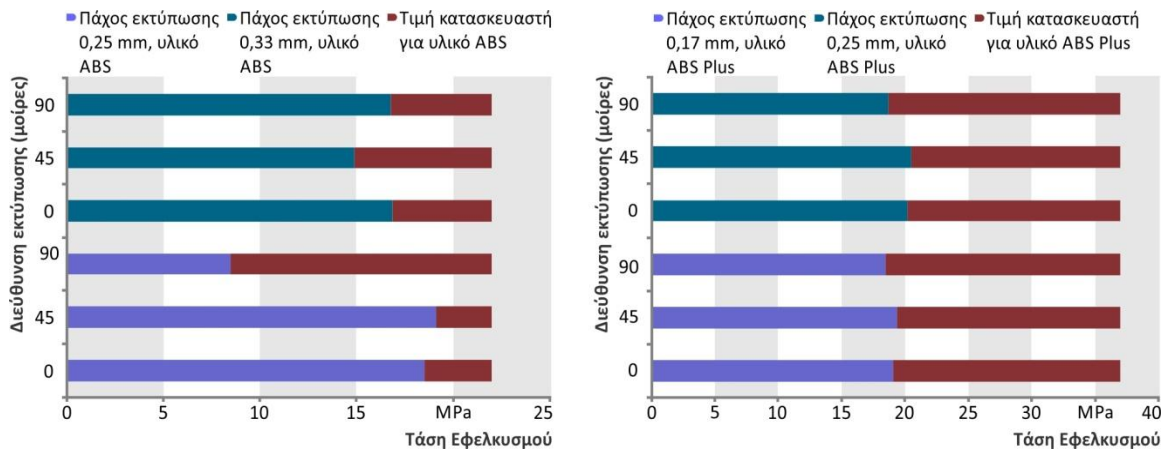
Πίνακας σύγκρισης θεωρητικών - πειραματικών τιμών και υπολογισμός διαφοράς.



Ανάλυση και τεκμηρίωση δεδομένων για την αντοχή σε εφελκυσμό δοκιμών κατασκευασμένων από υλικό ABS και ABS Plus σε τρισδιάστατο εκτυπωτή



Διάγραμμα 4.2.1: Διαγράμματα σύγκρισης μέγιστης πειραματικής αντοχής δοκιμών με αντοχή που δίνεται από κατασκευαστή.



Διάγραμμα 4.2.2: Διαγράμματα σύγκρισης πειραματικής αντοχής δοκιμών με αντοχή που δίνεται από κατασκευαστή, σε σχέση τη διεύθυνση, το πάχος εκτύπωσης και το υλικό.

Οι παρακάτω πίνακες (Πίνακας 4.2.2 και 4.2.3) αποτελούν συγκεντρωτικούς πίνακες όπου αναγράφεται ξεκάθαρα ο μέσος όρος της τάσης εφελκυσμού των δοκιμών σε κάθε μία από τις περιπτώσεις εκτύπωσης. Από τους πίνακες αυτούς προκύπτουν τα διαγράμματα 4.2.3 και 4.2.4. Στα διαγράμματα αυτά χρησιμοποιώντας τις τιμές της τάσης εφελκυσμού των προαναφερθέντων πινάκων υπολογίζεται η επί τοις εκατό διαφορά που έχει η κάθε κατηγορία δοκιμών από τις τιμές του κατασκευαστή.

Acrylonitrile Butadiene Styrene		
Πάχος Εκτύπωσης	Διεύθυνση	Τάση Εφελκυσμού
mm	°	MPa
0.25	0	18.51
	45	19.13
	90	8.50
0.33	0	16.84
	45	14.88
	90	16.77

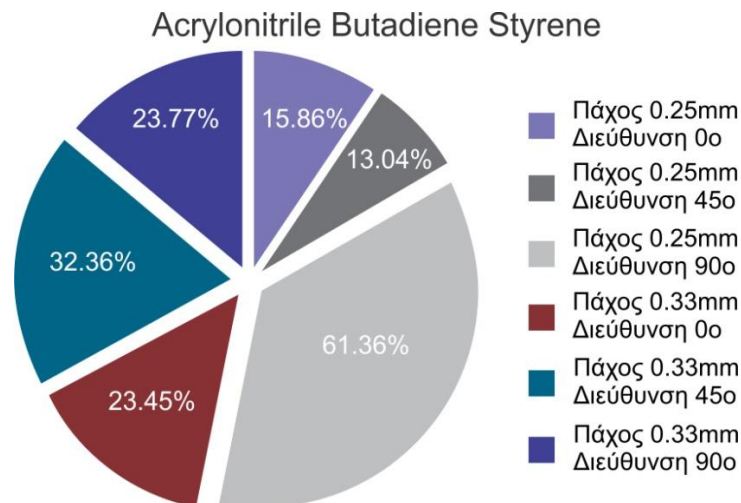
Πίνακας 4.2.2: Πίνακας πειραματικών αποτελεσμάτων του ABS.

Acrylonitrile Butadiene Styrene Plus		
Πάχος Εκτύπωσης	Διεύθυνση	Τάση Εφελκυσμού
mm	°	MPa
0.17	0	19.06
	45	19.37
	90	18.48
0.25	0	20.23
	45	20.48
	90	18.68

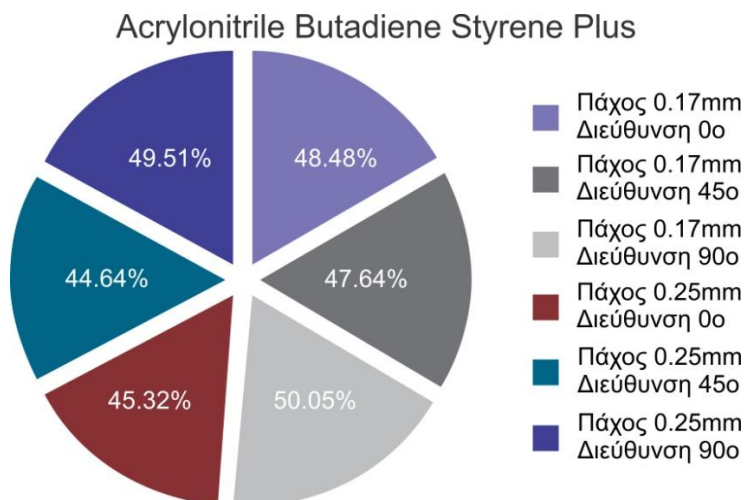
Πίνακας 4.2.3: Πίνακας πειραματικών αποτελεσμάτων του ABS Plus.



Ανάλυση και τεκμηρίωση δεδομένων για την αντοχή σε εφελκυσμό δοκιμίων κατασκευασμένων από υλικό ABS και ABS Plus σε τρισδιάστατο εκτυπωτή



Διάγραμμα 4.2.3: Διαγράμματα ποσοστιαίας διαφοράς πειραματικών τιμών με τιμές κατασκευαστή για υλικό ABS.

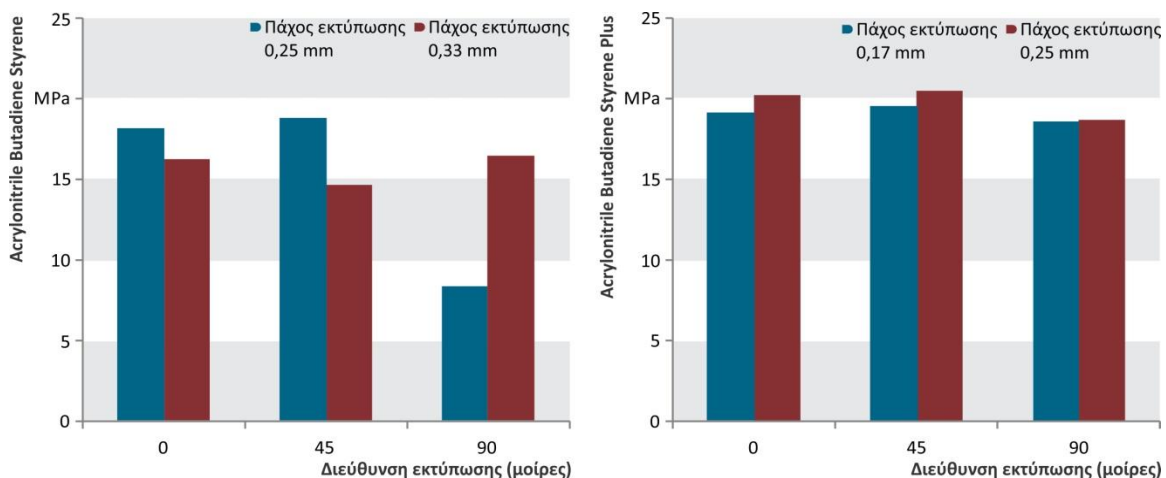


Διάγραμμα 4.2.4: Διαγράμματα ποσοστιαίας διαφοράς πειραματικών τιμών με τιμές κατασκευαστή για υλικό ABS Plus.

Στο παρακάτω διάγραμμα χρησιμοποιώντας ως κύριο άξονα σύγκρισης το υλικό κατασκευής και ανάλογα τη διεύθυνση εκτύπωσης, συγκρίνονται τα πάχη εκτύπωσης του κάθε υλικού ώστε να φανεί ξεκάθαρα η αντοχή του καθενός και ποιό είναι ανθεκτικότερο. Για τη περίπτωση του ABS φαίνεται ξεκάθαρα ότι ανθεκτικότερα είναι τα δοκίμια που έχουν διεύθυνση εκτύπωσης 45° και πάχος εκτύπωσης 0,25 mm. Σε γενικές

γραμμές για το υλικό ABS ανθεκτικότερο πάχος εκτύπωσης σε εφελκυσμό είναι τα 0,25 mm και όχι τα 0,33 mm.

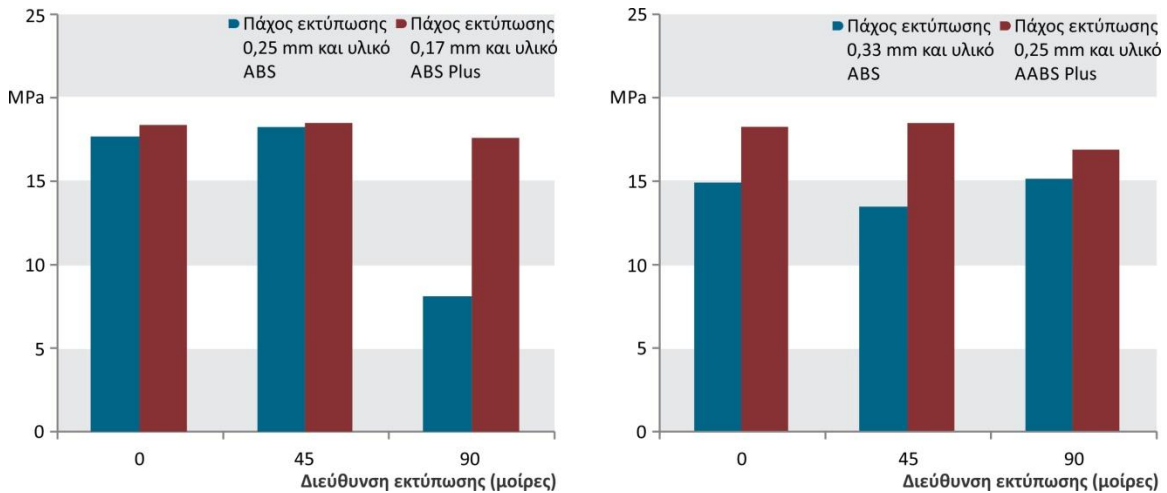
Από την άλλη μεριά υπάρχει το ABS Plus, με πάχη 0,17 mm και 0,25 mm πάχη εκτύπωσης. Από το διάγραμμα προκύπτει ότι αν και με μικρές διαφορές το ανθεκτικότερο πάχος είναι και πάλι τα 0,25 mm. Ειδικότερα, συγκρίνοντας τις διευθύνσεις εκτύπωσης προκύπτει ότι και σε αυτή την περίπτωση ανθεκτικότερη είναι αυτή των 45°.



Διάγραμμα 4.2.5: Διαγράμματα σύγκρισης πειραματικής αντοχής ανά πάχος εκτύπωσης για κάθε υλικό.

Για να υπάρξει μία πιο ξεκάθαρη εικόνα, δημιουργήθηκαν τα Διαγράμματα 4.2.6 όπου σε κάθε ένα συγκρίνονται τα υλικά μεταξύ έχοντας ως γνώμονα τα μικρότερα τους και τα μεγαλύτερα πάχη εκτύπωσης ξεχωριστά. Στο αριστερό διάγραμμα συγκρίνεται το πάχος 0,25 mm για το υλικό ABS με το πάχος 0,17 mm για το ABS Plus, ενώ στο δεξί συγκρίνεται το πάχος 0,33 mm του ABS με το 0,25 του ABS Plus.

Ανάλυση και τεκμηρίωση δεδομένων για την αντοχή σε εφελκυσμό δοκιμίων κατασκευασμένων από υλικό ABS και ABS Plus σε τρισδιάστατο εκτυπωτή



Διάγραμμα 4.2.6: Διαγράμματα σύγκρισης πειραματικής αντοχής των μικρότερων και μεγαλύτερων παχών εκτύπωσης ανά υλικό .

Από το διάγραμμα 4.2.6 είναι προφανές ότι το ABS Plus είναι ανθεκτικότερο από το ABS για οποιαδήποτε διεύθυνση και οποιοδήποτε πάχος εκτύπωσης.

Συνοψίζοντας από τους Πίνακες 4.2.2 και 4.2.3 βγαίνει το συμπέρασμα ότι για κάθε υλικό η βέλτιστη μέθοδος εκτύπωσης, ώστε να παρέχεται η μεγαλύτερη δυνατή αντοχή του εκτυπωμένου δοκιμίου είναι η εκτύπωση σε 0,25 mm πάχος και διεύθυνση 45°.

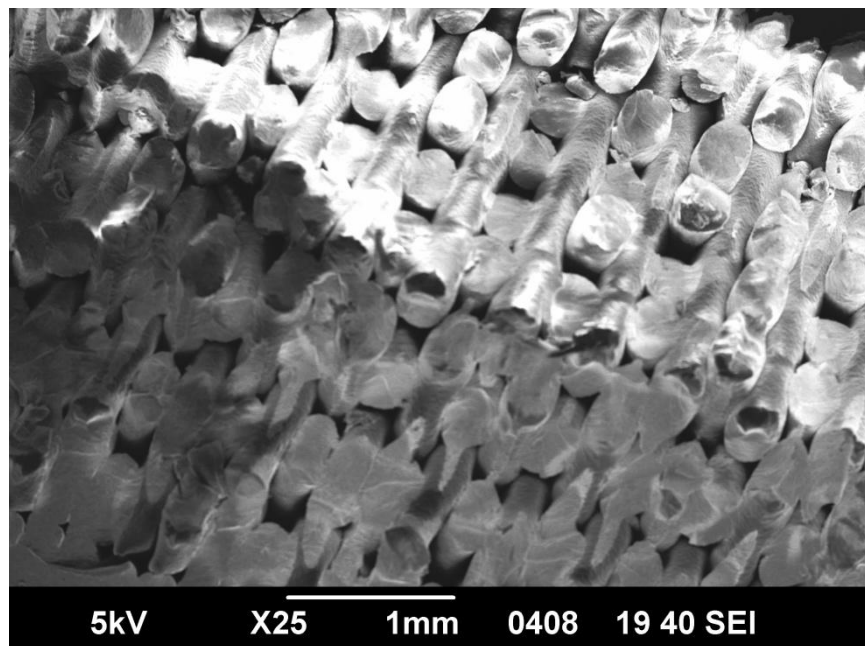
Κεφάλαιο 5: Έλεγχος της Επιφάνειας Θραύσης

5.1 Σαρώσεις Μηχανήματος SEM

Για να ελεγχθεί η ποιότητα στο εσωτερικό μέρος των δοκιμίων και να γίνει πιο κατανοητή η μέθοδος εκτύπωσης η οποία χρησιμοποιήθηκε για να εκτυπωθούν τα δοκίμια παραθέτονται παρακάτω εικόνες από τις σαρώσεις της επιφάνειας θραύσης του κάθε δοκιμίου.

Για όλες τις σαρώσεις η τάση που χρησιμοποιήθηκε στο μηχάνημα ήταν της τάξης των 5 kV. Η τάση αυτή επιλέγεται ανάλογα τη θερμοκρασία του μηχανήματος και το σημείο τήξης του δοκιμίου το οποίο σαρώνεται γιατί σε μεγαλύτερες τάσεις ενδέχεται να λιώσει ή να καταστραφεί το δοκίμιο. Η μεγέθυνση ορίστηκε στα x25 η οποία ήταν ικανοποιητική για να φαίνονται ξεκάθαρα οι ίνες και οι στρώσεις. Η κλίμακα της εικόνας είναι 1mm ενώ χρησιμοποιήθηκε ο ανιχνευτής SEI (*Secondary Electron Imaging*) ο οποίος ανιχνεύοντας τα εκπεμπόμενα δευτερογενή ηλεκτρόνια έδωσε τις εικόνες αυτές.

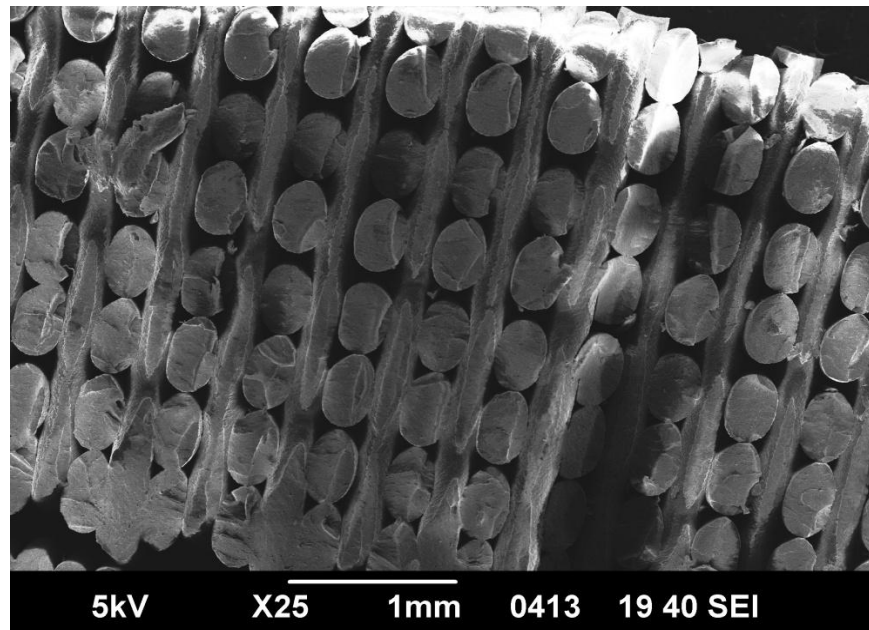
5.1.1 Σαρώσεις Μηχανήματος SEM για υλικό ABS



Εικόνα 5.1.1.1:

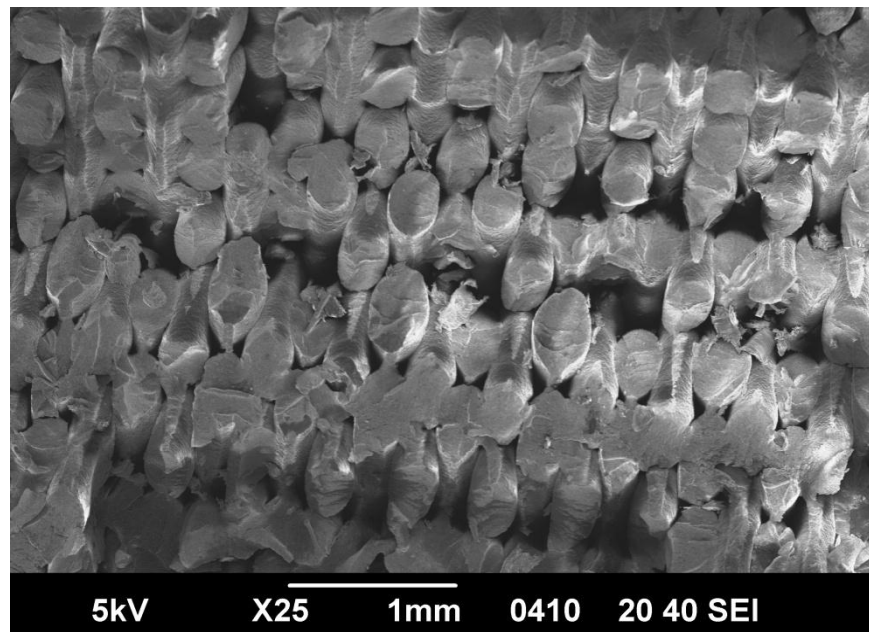
Σάρωση SEM της επιφάνειας θραύσης δοκιμίου, κατασκευασμένο από υλικό ABS, διεύθυνση 0°, πάχος εκτύπωσης 0,25 mm.

Ανάλυση και τεκμηρίωση δεδομένων για την αντοχή σε εφελκυσμό δοκιμίων κατασκευασμένων από υλικό ABS και ABS Plus σε τρισδιάστατο εκτυπωτή



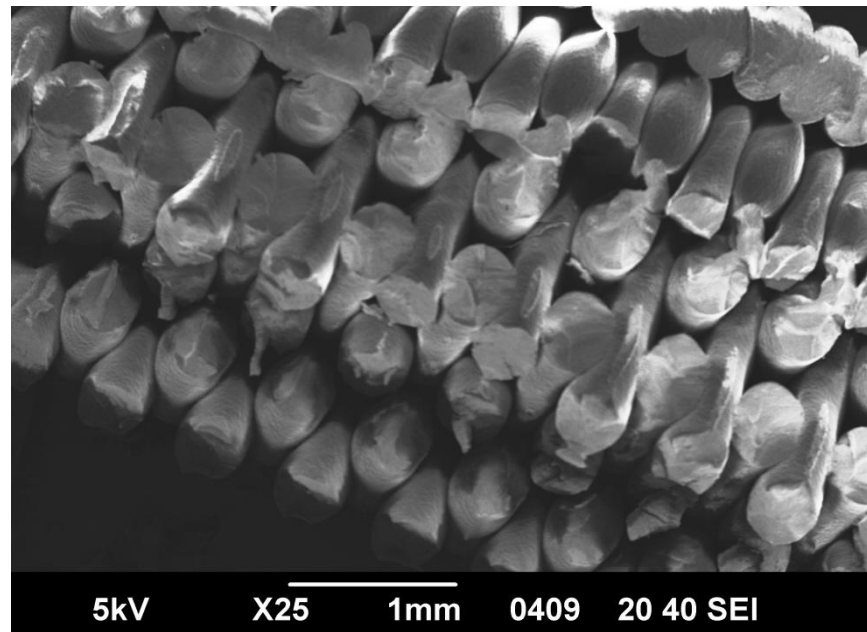
Εικόνα 5.1.1.2:

Σάρωση SEM της επιφάνειας θραύσης δοκιμίου, κατασκευασμένο από υλικό ABS, διεύθυνση 45°, πάχος εκτύπωσης 0,25 mm.



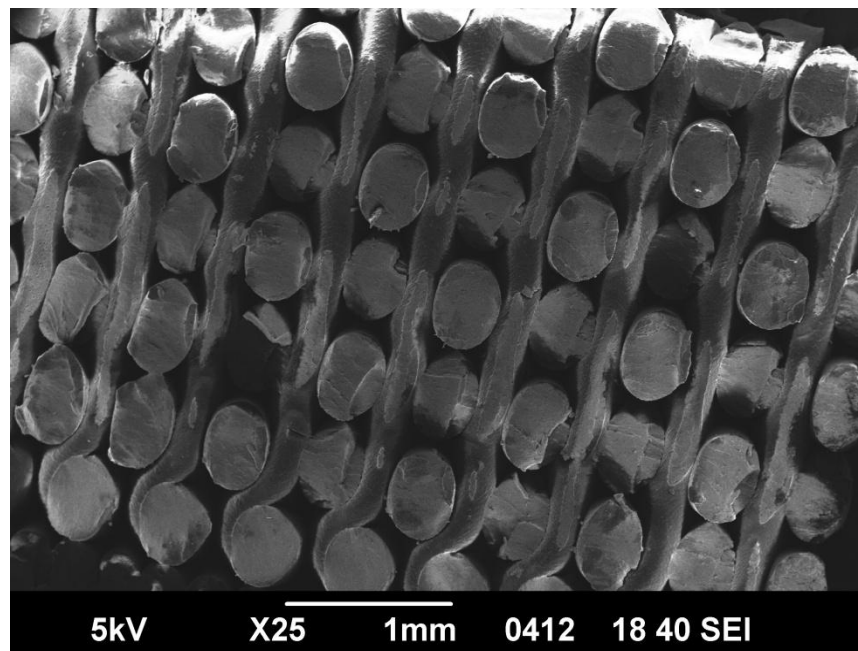
Εικόνα 5.1.1.3:

Σάρωση SEM της επιφάνειας θραύσης δοκιμίου, κατασκευασμένο από υλικό ABS, διεύθυνση 90°, πάχος εκτύπωσης 0,25 mm.



Εικόνα 5.1.1.4:

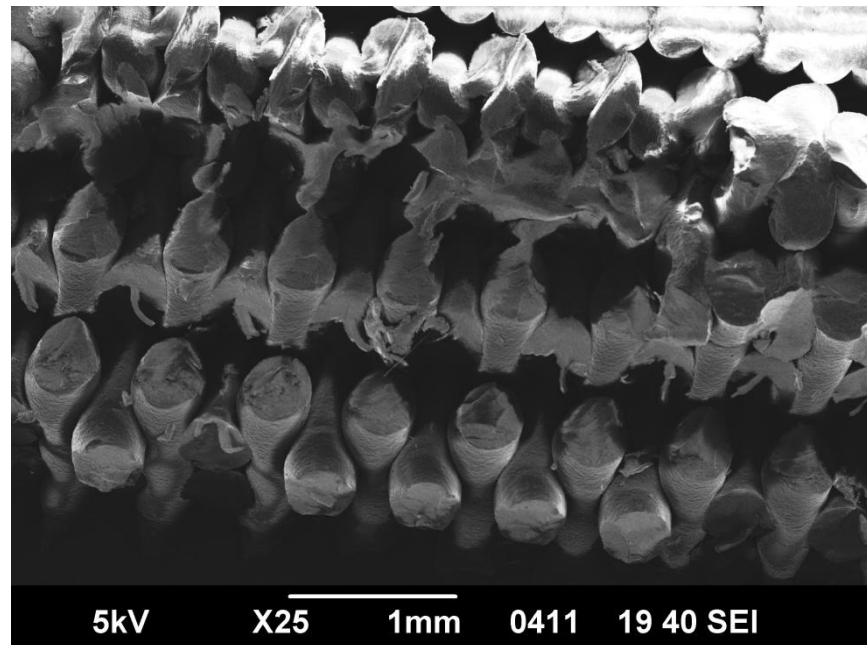
Σάρωση SEM της επιφάνειας θραύσης δοκιμίου, κατασκευασμένο από υλικό ABS, διεύθυνση 0° , πάχος εκτύπωσης 0,33 mm.



Εικόνα 5.1.1.5:

Σάρωση SEM της επιφάνειας θραύσης δοκιμίου, κατασκευασμένο από υλικό ABS, διεύθυνση 45° , πάχος εκτύπωσης 0,33 mm.

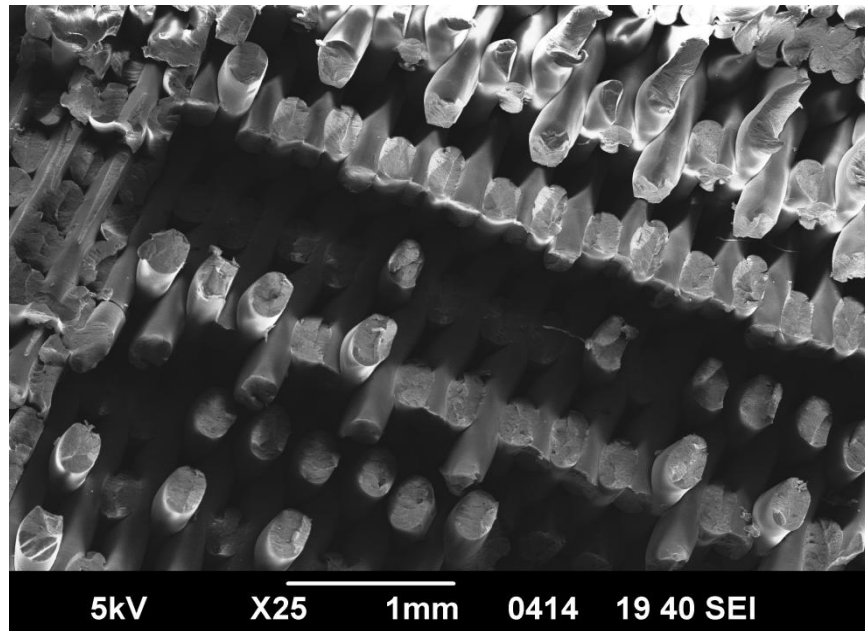
Ανάλυση και τεκμηρίωση δεδομένων για την αντοχή σε εφελκυσμό δοκιμίων κατασκευασμένων από υλικό ABS και ABS Plus σε τρισδιάστατο εκτυπωτή



Εικόνα 5.1.1.6:

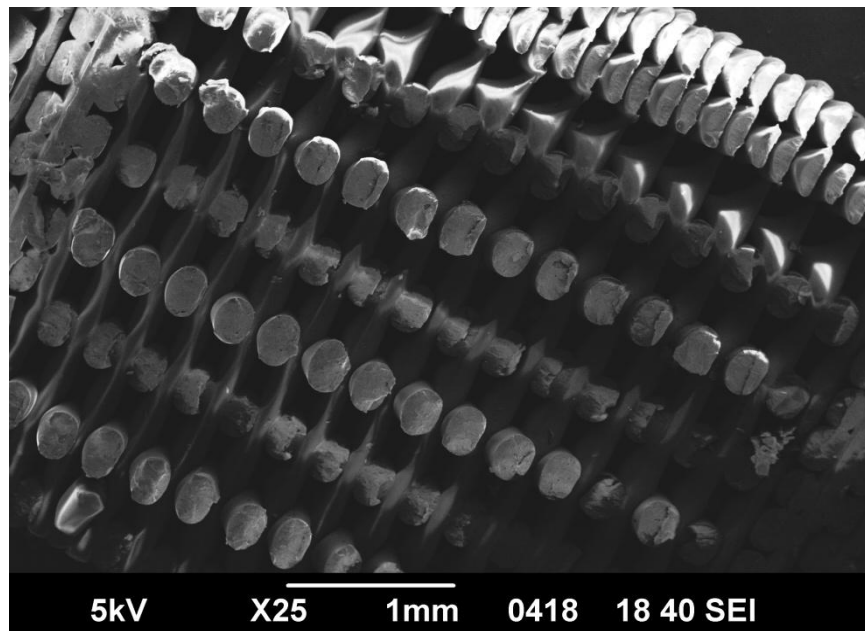
Σάρωση SEM της επιφάνειας θραύσης δοκιμίου, κατασκευασμένο από υλικό ABS, διεύθυνση 90°, πάχος εκτύπωσης 0,33 mm.

5.1.2 Σαρώσεις Μηχανήματος SEM για υλικό ABS Plus



Εικόνα 5.1.2.1:

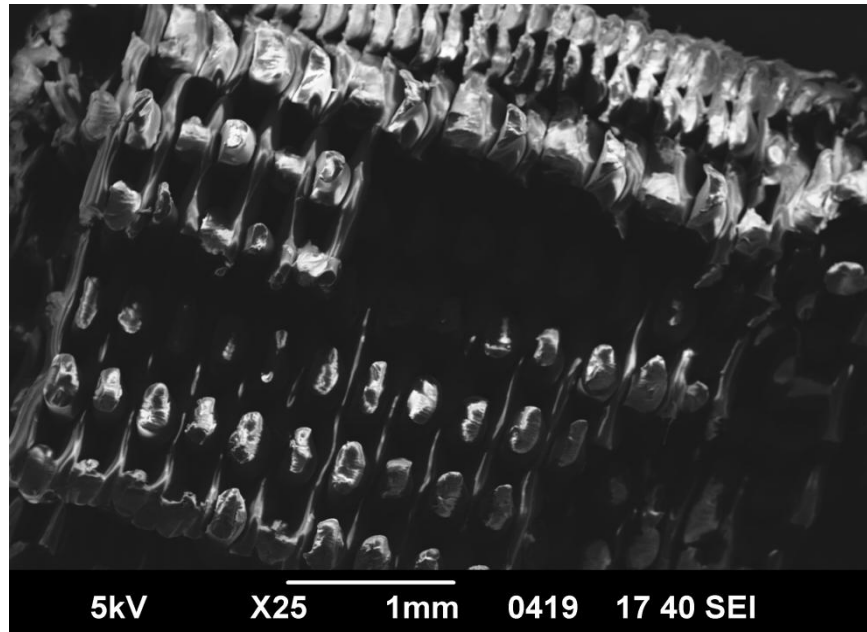
Σάρωση SEM της επιφάνειας θραύσης δοκιμίου, κατασκευασμένο από υλικό ABS Plus, διεύθυνση 0°, πάχος εκτύπωσης 0,17 mm.



Εικόνα 5.1.2.2:

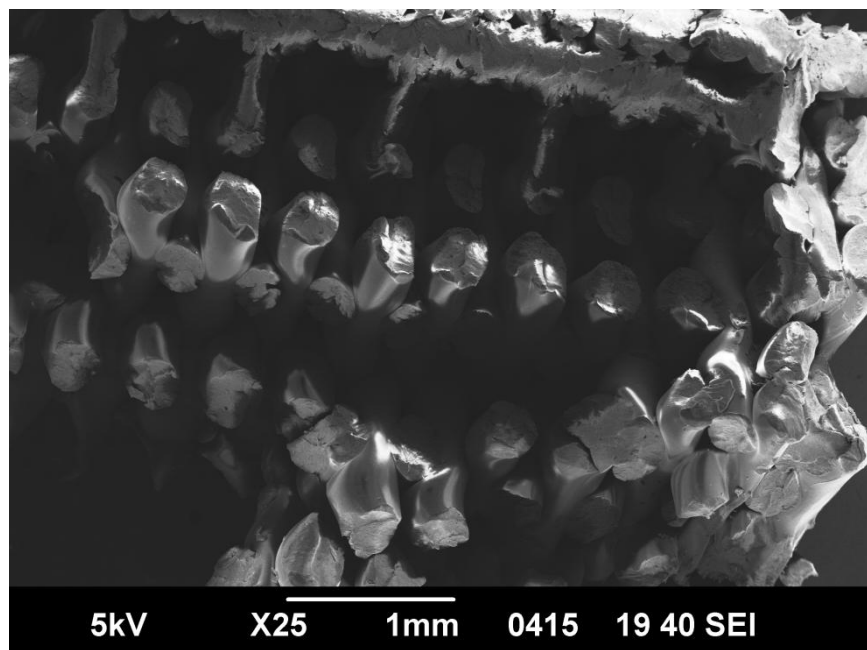
Σάρωση SEM της επιφάνειας θραύσης δοκιμίου, κατασκευασμένο από υλικό ABS Plus, διεύθυνση 45°, πάχος εκτύπωσης 0,17 mm.

Ανάλυση και τεκμηρίωση δεδομένων για την αντοχή σε εφελκυσμό δοκιμίων κατασκευασμένων από υλικό ABS και ABS Plus σε τρισδιάστατο εκτυπωτή



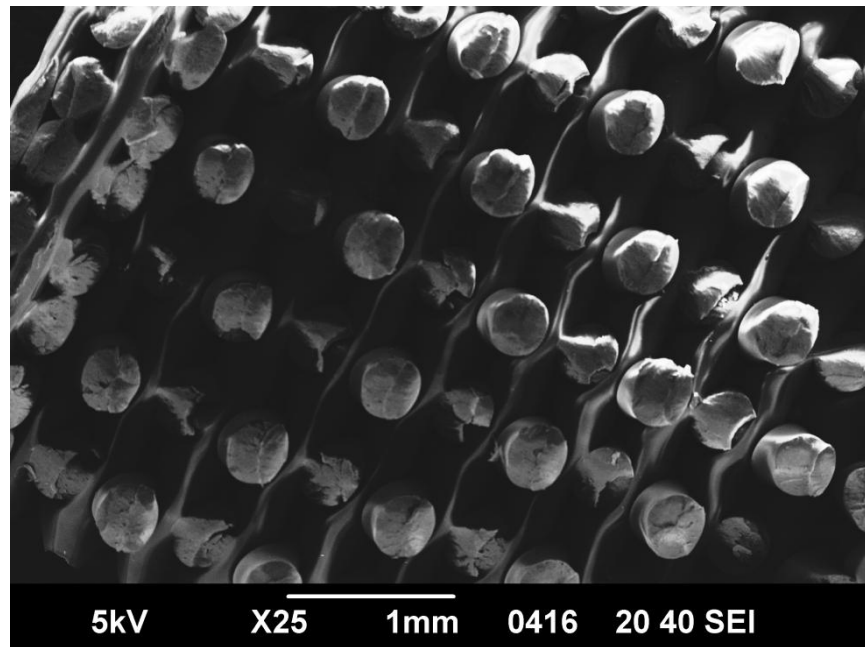
Εικόνα 5.1.2.3:

Σάρωση SEM της επιφάνειας θραύσης δοκιμίου, κατασκευασμένο από υλικό ABS Plus, διεύθυνση 90°, πάχος εκτύπωσης 0,17 mm.



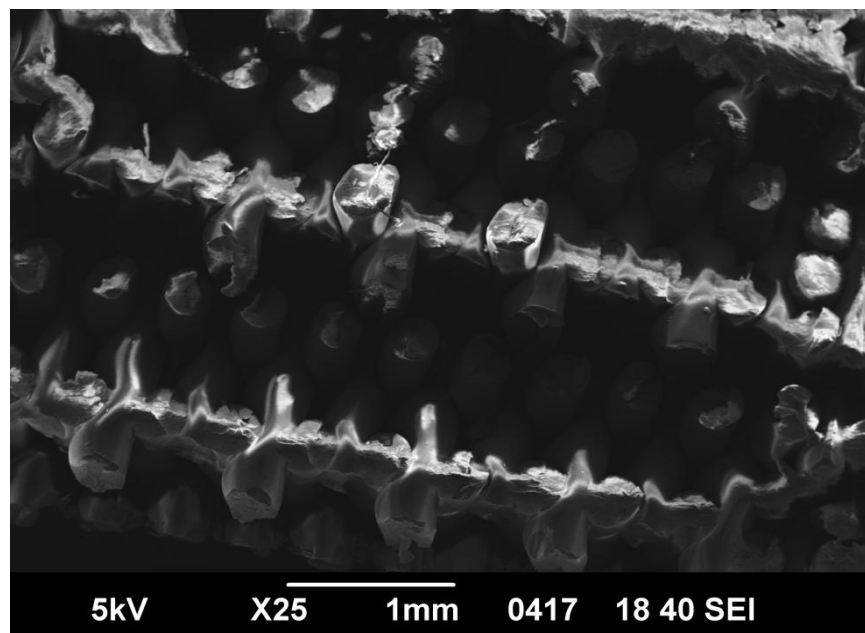
Εικόνα 5.1.2.4:

Σάρωση SEM της επιφάνειας θραύσης δοκιμίου, κατασκευασμένο από υλικό ABS Plus, διεύθυνση 0°, πάχος εκτύπωσης 0,25 mm.



Εικόνα 5.1.2.5:

Σάρωση SEM της επιφάνειας θραύσης δοκιμίου, κατασκευασμένο από υλικό ABS Plus, διεύθυνση 45°, πάχος εκτύπωσης 0,25 mm.



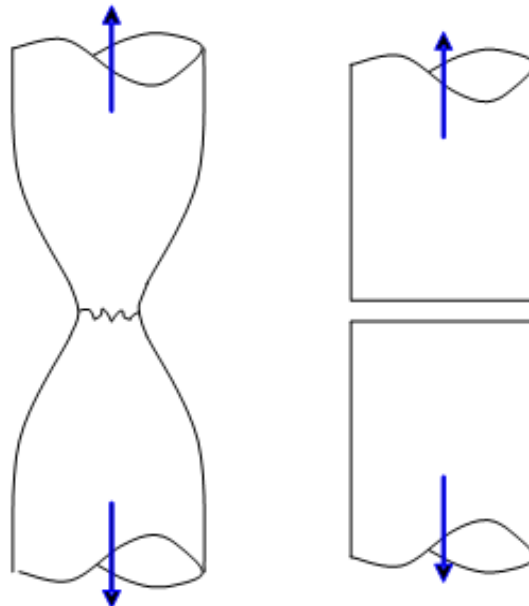
Εικόνα 5.1.2.6:

Σάρωση SEM της επιφάνειας θραύσης δοκιμίου, κατασκευασμένο από υλικό ABS Plus, διεύθυνση 90°, πάχος εκτύπωσης 0,25 mm.

5.2 Είδη Θραύσης Δοκιμίων

Για να πραγματοποιηθεί έλεγχος στη 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 να 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, τον 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 στη 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. [28]



Εικόνα 5.2.1:

Είδη θραύσης. Αριστερά: Όλκιμη, Δεξιά: Ψαθυρή.

Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 5.2.1 χαρακτηριστικό της όλκιμης θραύσης είναι η στένωση, δημιουργία λαιμού, ενώ στη ψαθυρή είναι η απουσία πλαστικής παραμόρφωσης. Ακόμη στην όλκιμη θραύση η ρωγμή μπορεί να δημιουργεί μια ινώδης επιφάνεια θραύσης, ενώ στη ψαθυρή η διεύθυνση κίνησης της ρωγμής είναι σχεδόν κάθετη στη διεύθυνση της εφαρμοζόμενης τάσης δίνοντας έτσι μία σχετικά επίπεδη επιφάνεια.

Στη συνέχεια για να γίνει χαρακτηρισμός της επιφάνειας θραύσης επιλέγονται οι σαρώσεις SEM για κάθε κατηγορία δοκιμίου και έτσι προκύπτουν τα εξής:

1. Στη σάρωση SEM της επιφάνειας θραύσης δοκιμίου, κατασκευασμένο από υλικό ABS, διεύθυνση 0° , πάχος εκτύπωσης 0,25 mm (Εικόνα 5.1.1.1) παρατηρείται μία σχετική ανομοιομορφία στην επιφάνεια θραύσης. Ορισμένα νήματα του ABS έχουν παραμορφωθεί έχοντας μεγαλύτερο μήκος, ενώ φαίνεται η ινώδης επιφάνεια που σχηματίζεται στην επιφάνεια θραύσης των νημάτων. Έτσι, παράλληλα με τα διαγράμματα της παραγράφου 3.5.1 που χαρακτηρίζονται από μεγάλη πλαστική περιοχή καθώς και μεγάλη μετατόπιση, συμπεραίνεται ότι το δοκίμιο υπόκειται σε όλκιμη θραύση.
2. Στη σάρωση SEM της επιφάνειας θραύσης δοκιμίου, κατασκευασμένο από υλικό ABS, διεύθυνση 45° , πάχος εκτύπωσης 0,25 mm (Εικόνα 5.1.1.2) παρατηρείται ομοιομορφία στην επιφάνεια θραύσης. Η επιφάνεια θραύσης των νημάτων του ABS είναι ομοιόμορφη χωρίς να παρατηρείται ιδιαίτερη πλαστική παραμόρφωση. Έτσι, παράλληλα με τα διαγράμματα της παραγράφου 3.5.2 που χαρακτηρίζονται από μηδαμινή πλαστική περιοχή και μικρή μετατόπιση, συμπεραίνεται ότι το δοκίμιο υπόκειται σε ψαθυρή θραύση.
3. Στη Σάρωση SEM της επιφάνειας θραύσης δοκιμίου, κατασκευασμένο από υλικό ABS, διεύθυνση 90° , πάχος εκτύπωσης 0,25 mm. (Εικόνα 5.1.1.3) παρατηρείται ανομοιομορφία στην επιφάνεια θραύσης. Ορισμένα νήματα του ABS έχουν παραμορφωθεί έχοντας μεγαλύτερο μήκος, ενώ φαίνεται η ινώδης επιφάνεια που σχηματίζεται στην επιφάνεια θραύσης των νημάτων. Έτσι, παράλληλα με τα διαγράμματα της παραγράφου 3.5.3 που εμφανίζουν πλαστική περιοχή καθώς

Ανάλυση και τεκμηρίωση δεδομένων για την αντοχή σε εφελκυσμό δοκιμίων κατασκευασμένων από υλικό ABS και ABS Plus σε τρισδιάστατο εκτυπωτή

και σχετικά μεγάλη μετατόπιση, συμπεραίνεται ότι το δοκίμιο υπόκειται σε όλκιμη θραύση.

4. Στη σάρωση SEM της επιφάνειας θραύσης δοκιμίου, κατασκευασμένο από υλικό ABS, διεύθυνση 0° , πάχος εκτύπωσης 0,33 mm (Εικόνα 5.1.1.4) παρατηρείται ανομοιομορφία στην επιφάνεια θραύσης. Ορισμένα νήματα του ABS έχουν παραμορφωθεί έχοντας μεγαλύτερο μήκος, ενώ φαίνεται η ινώδης επιφάνεια που σχηματίζεται στην επιφάνεια θραύσης των νημάτων. Έτσι, παράλληλα με τα διαγράμματα της παραγράφου 3.5.4 που χαρακτηρίζονται από μεγάλη πλαστική περιοχή καθώς και μεγάλη μετατόπιση, συμπεραίνεται ότι το δοκίμιο υπόκειται σε όλκιμη θραύση.
5. Στη σάρωση SEM της επιφάνειας θραύσης δοκιμίου, κατασκευασμένο από υλικό ABS, διεύθυνση 45° , πάχος εκτύπωσης 0,33 mm (Εικόνα 5.1.1.5) παρατηρείται ομοιομορφία στην επιφάνεια θραύσης. Η επιφάνεια θραύσης των νημάτων του ABS είναι ομοιόμορφη χωρίς να παρατηρείται ιδιαίτερη πλαστική παραμόρφωση. Έτσι, παράλληλα με τα διαγράμματα της παραγράφου 3.5.5 που δεν έχουν πλαστική περιοχή και χαρακτηρίζονται από μικρή μετατόπιση, συμπεραίνεται ότι το δοκίμιο υπόκειται σε ψαθυρή θραύση.
6. Στη Σάρωση SEM της επιφάνειας θραύσης δοκιμίου, κατασκευασμένο από υλικό ABS, διεύθυνση 90° , πάχος εκτύπωσης 0,33 mm. (Εικόνα 5.1.1.6) παρατηρείται ανομοιομορφία στην επιφάνεια θραύσης. Ορισμένα νήματα του ABS έχουν παραμορφωθεί έχοντας μεγαλύτερο μήκος, ενώ φαίνεται η ινώδης επιφάνεια που σχηματίζεται στην επιφάνεια θραύσης των νημάτων. Έτσι, παράλληλα με τα διαγράμματα της παραγράφου 3.5.6 που εμφανίζουν πλαστική περιοχή καθώς και σχετικά μεγάλη μετατόπιση, συμπεραίνεται ότι το δοκίμιο υπόκειται σε όλκιμη θραύση.
7. Στη σάρωση SEM της επιφάνειας θραύσης δοκιμίου, κατασκευασμένο από υλικό ABS Plus, διεύθυνση 0° , πάχος εκτύπωσης 0,17 mm (Εικόνα 5.1.2.1) παρατηρείται μεγάλη ανομοιομορφία στην επιφάνεια θραύσης. Χαρακτηριστικό της ανομοιομορφίας είναι τα μεγάλα κενά που έχουν σχηματιστεί και φαίνονται ως μαύρες περιοχές στην εικόνα, Ορισμένα νήματα του ABS Plus έχουν

παραμορφωθεί έχοντας μεγαλύτερο μήκος, ενώ φαίνεται η ινώδης επιφάνεια που σχηματίζεται στην επιφάνεια θραύσης των νημάτων. Έτσι, παράλληλα με τα διαγράμματα της παραγράφου 3.5.7 που χαρακτηρίζονται από μεγάλη πλαστική περιοχή καθώς και μεγάλη μετατόπιση, συμπεραίνεται ότι το δοκίμιο υπόκειται σε όλκιμη θραύση.

8. Στη σάρωση SEM της επιφάνειας θραύσης δοκιμίου, κατασκευασμένο από υλικό ABS Plus, διεύθυνση 45° , πάχος εκτύπωσης 0,17 mm (Εικόνα 5.1.2.2) παρατηρείται ομοιομορφία στην επιφάνεια θραύσης. Η επιφάνεια θραύσης των νημάτων του ABS Plus είναι ομοιόμορφη χωρίς να παρατηρείται ιδιαίτερη πλαστική παραμόρφωση. Έτσι, παράλληλα με τα διαγράμματα της παραγράφου 3.5.8 που χαρακτηρίζονται από μηδαμινή πλαστική περιοχή και μικρή μετατόπιση, συμπεραίνεται ότι το δοκίμιο υπόκειται σε ψαθυρή θραύση.
9. Στη Σάρωση SEM της επιφάνειας θραύσης δοκιμίου, κατασκευασμένο από υλικό ABS Plus, διεύθυνση 90° , πάχος εκτύπωσης 0,17 mm. (Εικόνα 5.1.2.3) παρατηρείται ανομοιομορφία στην επιφάνεια θραύσης και μεγάλες μαύρες περιοχές οι οποίες είναι περιοχές με βάθος. Ορισμένα νήματα του ABS Plus έχουν παραμορφωθεί έχοντας μεγαλύτερο μήκος, ενώ φαίνεται η ινώδης επιφάνεια που σχηματίζεται στην επιφάνεια θραύσης των νημάτων. Έτσι, παράλληλα με τα διαγράμματα της παραγράφου 3.5.9 που εμφανίζουν πλαστική περιοχή καθώς και σχετικά μεγάλη μετατόπιση, συμπεραίνεται ότι το δοκίμιο υπόκειται σε όλκιμη θραύση.
10. Στη σάρωση SEM της επιφάνειας θραύσης δοκιμίου, κατασκευασμένο από υλικό ABS Plus, διεύθυνση 0° , πάχος εκτύπωσης 0,25 mm (Εικόνα 5.1.2.4) παρατηρείται μεγάλη ανομοιομορφία στην επιφάνεια θραύσης. Χαρακτηριστικό της ανομοιομορφίας είναι τα μεγάλα κενά που έχουν σχηματιστεί και φαίνονται ως μαύρες περιοχές στην εικόνα, Ορισμένα νήματα του ABS Plus έχουν παραμορφωθεί έχοντας μεγαλύτερο μήκος, ενώ φαίνεται η ινώδης επιφάνεια που σχηματίζεται στην επιφάνεια θραύσης των νημάτων. Έτσι, παράλληλα με τα διαγράμματα της παραγράφου 3.5.10 που έχουν πλαστική περιοχή καθώς και μεγάλη μετατόπιση, συμπεραίνεται ότι το δοκίμιο υπόκειται σε όλκιμη θραύση.



11. Στη σάρωση SEM της επιφάνειας θραύσης δοκιμίου, κατασκευασμένο από υλικό ABS Plus, διεύθυνση 45°, πάχος εκτύπωσης 0,25 mm (Εικόνα 5.1.2.5) παρατηρείται ομοιομορφία στην επιφάνεια θραύσης. Η επιφάνεια θραύσης των νημάτων του ABS Plus είναι ομοιόμορφη χωρίς να παρατηρείται ιδιαίτερη πλαστική παραμόρφωση. Έτσι, παράλληλα με τα διαγράμματα της παραγράφου 3.5.11 που χαρακτηρίζονται από μηδαμινή πλαστική περιοχή και μικρή μετατόπιση, συμπεραίνεται ότι το δοκίμιο υπόκειται σε ψαθυρή θραύση.
12. Στη Σάρωση SEM της επιφάνειας θραύσης δοκιμίου, κατασκευασμένο από υλικό ABS Plus, διεύθυνση 90ο, πάχος εκτύπωσης 0,25 mm. (Εικόνα 5.1.2.6) παρατηρείται ανομοιομορφία στην επιφάνεια θραύσης και μεγάλες μαύρες περιοχές οι οποίες είναι περιοχές με βάθος. Ορισμένα νήματα του ABS Plus έχουν παραμορφωθεί έχοντας μεγαλύτερο μήκος, ενώ φαίνεται η ινώδης επιφάνεια που σχηματίζεται στην επιφάνεια θραύσης των νημάτων. Έτσι, παράλληλα με τα διαγράμματα της παραγράφου 3.5.12 που εμφανίζουν πλαστική περιοχή καθώς και σχετικά μεγάλη μετατόπιση, συμπεραίνεται ότι το δοκίμιο υπόκειται σε όλκιμη θραύση.

Στους πίνακες 5.2.1 και 5.2.2 αναφέρονται τα είδη θραύσης για κάθε κατηγορία δοκιμίων όπως προκύπτουν από τις παραπάνω περιγραφές:

Acrylonitrile Butadiene Styrene		
Πάχος Εκτύπωσης	Διεύθυνση	Είδος Θραύσης
mm	°	
0.25	0	Όλκιμη
	45	Ψαθυρή
	90	Όλκιμη
0.33	0	Όλκιμη
	45	Ψαθυρή
	90	Όλκιμη

Πίνακας 5.2.1:

Πίνακας κατηγοριοποίησης των ειδών θραύσης για κάθε είδος δοκιμίου κατασκευασμένου από υλικό ABS.

Acrylonitrile Butadiene Styrene Plus		
Πάχος Εκτύπωσης	Διεύθυνση	Είδος Θραύσης
mm	°	
0.17	0	Όλκιμη
	45	Ψαθυρή
	90	Όλκιμη
0.25	0	Όλκιμη
	45	Ψαθυρή
	90	Όλκιμη

Πίνακας 5.2.2:

Πίνακας κατηγοριοποίησης των ειδών θραύσης για κάθε είδος δοκιμίου κατασκευασμένου από υλικό ABS Plus.

Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα

Ένα μεγάλο κομμάτι της παρούσης 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 του μηχανήματος εφελκυσμού. Με τις τιμές αυτές κατασκευάστηκαν τα διαγράμματα τάσης - παραμόρφωσης και δύναμης εφελκυσμού - μετατόπισης καθώς και οι πίνακες αποτελεσμάτων του πειράματος.

Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε σύγκριση της αντοχής των δοκιμίων με τη θεωρητική που δίνεται από τον κατασκευαστή. Ο κατασκευαστής για τις τιμές της τάσης εφελκυσμού χρησιμοποίησε το πρότυπο ASTM D638 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 ανάμεσα στις δύο αυτές μεθόδους.

Οι τιμές του κατασκευαστή είναι 22 MPa για το ABS και 37 MPa για το ABS Plus. Για τη σύγκριση χρησιμοποιήθηκαν οι μέγιστες πειραματικές τιμές οι οποίες αντιστοιχούν σε 19,13 MPa για το ABS και 20,45 για το ABS Plus. Η επί τοις εκατό διαφορά για το ABS είναι 13% ενώ για το ABS Plus 44,6%, με τη μέθοδο της χύτευσης με έγχυση να υπερτερεί σε σχέση με αυτή της τρισδιάστατης σχεδίασης.

Η επικράτηση της χύτευσης με έγχυση σε σχέση με την αντοχή είναι λογική, αφού με τη μέθοδο αυτή δημιουργούνται στιβαρά αντικείμενα χωρίς κενά στην εσωτερική τους δομή. Από την άλλη μεριά στη τρισδιάστατη σχεδίαση η υποβάθμιση των μηχανικών ιδιοτήτων είναι αναπόφευκτη αφού η κατασκευή των δοκιμίων γίνεται με νήματα ABS τα οποία μικραίνουν τον όγκο και δημιουργούν κενά ανάμεσα σε κάθε στρώση υλικού.

Κατά τη σύγκριση της θεωρητικής αντοχής των υλικών με την αντοχή του δοκιμίου, μεγαλύτερη εμφανίζει το ABS Plus. Το γεγονός αυτό δικαιολογείται και από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση όπου αναφέρθηκε ότι το ABS Plus είναι ένα υλικό με βελτιωμένες ιδιότητες το οποίο έχει δημιουργηθεί για τη χρήση σε τρισδιάστατους εκτυπωτές και για τη δημιουργία υψηλής ποιότητας πρωτοτύπων.

Ανά πάχος εκτύπωσης καλύτερη αντοχή έχουν τα δοκίμια με πάχος 0,25 mm, ενώ ανά διεύθυνση σε όλες τις περιπτώσεις ανθεκτικότερες αναδείχτηκαν οι 45ο. Συνεπώς ανθεκτικότερα δοκίμια αναδείχτηκαν αυτά που είναι κατασκευασμένα με υλικό ABS Plus, πάχους 0,25 και διεύθυνση 45ο με τιμή τάσης εφελκυσμού 20,48 MPa.



Βιβλιογραφία

- [1] C.A. Harper, Handbook of Plastics and Elastomers, McGraw-Hill Book Company, 1975.
- [2] <http://www.britannica.com/EBchecked/topic/4259/acrylonitrile-butadiene-styrene-copolymer-ABS>, Encyclopedia Britannica.
- [3] Joseph V. Rutkowski, Barbara C. Levin, Fire and Materials, Vol. 10, 1986, 93 - 105.
- [4] William D. Callister, Jr. Επιστήμη και τεχνολογία των υλικών, 5η Έκδοση, Εκδόσεις Τζιόλα, 2008, σελ.564.
- [5] D. M. Kulich, S. K. Gaggar, V. Lowry, R. Stepien, Acrylonitrile-Butadiene-Styrene Polymers, Encyclopedia of Polymer Science and Technology, 2001.
- [6] Michael M. Wu, Acrylonitrile Polymers, Survey and Styrene-Acrylonitrile (SAN), Kirk-Othmer Encyclopedia of chemical Technology, 2001.
- [7] Anne-Marie M. Baker, Joey Mead, Acrylonitrile butadiene styrene (ABS) terpolymer, Handbook of Plastics, Elastomers, & Composites, 4η Έκδοση, McGraw-Hill Handbooks, 2004.
- [8] Book Of ASTM Standards, Designation: D 638-02a, Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics, 2002.
- [9] BS EN ISO 527 Part 1-3, Plastics - Determination of tensile properties, 1996.
- [10] http://www.me.umn.edu/intranet/rapid/ABS_SPECS.pdf, Specifications Sheet, Stratasys Inc., 2007.
- [11] <http://www.ul.com/global/eng/pages/offerings/industries/chemicals/plastics/testing/flame/>, UL 94, the Standard for Safety of Flammability of Plastic Materials for Parts in Devices and Appliances testing.
- [12] UL 94, Test for Flammability of Plastic Materials for Parts in Devices and Appliances, Underwriters Laboratories Inc., 1998.

- [13] International Standard IEC 60112, Method for the determination of the proof and the comparative tracking indices of solid insulating materials, 2003.
- [14] Mel Schwartz, ABS Plastics, Encyclopedia of Materials, Parts and Finishes, 2η Έκδοση, CRC Press, 2002.
- [15] Dr. Dmitri Kopeliovich, <http://www.substech.com/>, search keywords: Extrusion of polymers, Injection molding of polymers, Blow molding, Compression molding of polymers, Thermoforming.
- [16] William D. Callister, Jr. Επιστήμη και τεχνολογία των υλικών, 5η Έκδοση, Εκδόσεις Τζιόλα, 2008, σελ.611-614.
- [17] <http://www.advtek.com/stratasys/materials-technology/fdm-materials.php>
- [18] <http://www.stratasys.com/~media/Main/Secure/Material%20Specs%20MS/Fortus-Material-Specs/Fortus-MS-ABSplus-01-13-web.pdf>, ABS plus Specifications Sheet
- [19] Πετούσης Α. Μάρκος, Ανάπτυξη Μηχανολογικών Εφαρμογών με τη βοήθεια Η/Υ, Διδακτικές σημειώσεις, 2003, σελ. 107-117.
- [20] Ρ. Γραικούσης, Τεχνική Αντοχή Υλικών, Στοιχεία Μηχανών Ι, 2η Έκδοση, Εκδόσεις Γιακούδη - Γιαπούλη, 1983.
- [21] William A. Nash, Εφελκυσμός και Θλίψη, Αντοχή των Υλικών, Εκδόσεις McGraw-Hill, 1988.
- [22] <http://karagian.users.uth.gr/cscl/22-Katsanos-Avouris.pdf> , Στατιστικές μέθοδοι ανάλυσης πειραματικών δεδομένων συνεργασίας, Χρήστος Κατσάνος και Νικόλαος Αβούρης, Πανεπιστήμιο Πατρών .
- [23] M.T. Postek, K.S. Howard, A.H. Johnson and K.L. McMichael, Scanning Electron Microscopy: A Student's Handbook, Ladd Research Ind., Inc. Williston, 1980.
- [24] C.E. Lyman, D.E. Newbury, J.I Goldstein, D.B. Williams, A.D. Roming, J.T. Armstrong, P. Echlin, C.E. Fiori, D.C. Joy, E. Lifshin, Klaus-Ruediger Peters,



Ανάλυση και τεκμηρίωση δεδομένων για την αντοχή σε εφελκυσμό δοκιμίων κατασκευασμένων από υλικό ABS και ABS Plus σε τρισδιάστατο εκτυπωτή

Scanning Electron Microscopy, X-Ray Microanalysis and Analytical Electron Microscopy: A Laboratory Workbook, Plenum Press, New York, 1990.

- [25] http://ph277.edu.physics.uoc.gr/files/VB_Electron_Microscopy_lecture_4.pdf , Ηλεκτρονική Μικροσκοπία, Διδακτικές σημειώσεις, Δρ. Βασίλειος Μπινάς, Πανεπιστήμιο Κρήτης.
- [26] http://www.institute.loni.org/lasigma/document_files/workshopdocuments/SEMnotes.pdf , Scanning Electron Microscopy, Alfred Gunasekaran, Institute for Micromanufacturing, Louisiana Tech University.
- [27] <http://hitachi-hta.com/sites/default/files/technotes/Microscopy%20Today-Zone%20literature.pdf>, Contamination Cleaning of TEM/SEM Samples with ZONE Cleaner, Charles Soong, Patrick Woo, David Hoyle, Hitachi High-Technologies Canada.
- [28] William D. Callister, Jr. Επιστήμη και τεχνολογία των υλικών, 5η Έκδοση, Εκδόσεις Τζιόλα, 2008, σελ.241

