

ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΜΕΣΟΓΕΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«ΜΕΛΕΤΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΝΑΝΟΣΥΝΘΕΤΩΝ ΜΕ ΠΟΛΥΜΕΡΗ PA12, HDPE, PETG ΚΑΙ ΝΑΝΟΣΩΜΑΤΙΔΙΑ ΟΞΕΙΔΙΟΥ ΤΟΥ ΑΝΤΙΜΟΝΙΟΥ ΣΤΗΝ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΕΚΤΥΠΩΣΗ»

ΤΗΣ ΦΟΙΤΗΤΡΙΑΣ

ΚΥΡΙΑΚΑΚΗΣ ΜΑΡΙΑΣ

ΤΜ: 6767

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΔΡ. ΒΙΔΑΚΗΣ ΝΕΚΤΑΡΙΟΣ

ΔΡ. ΠΕΤΟΥΣΗΣ ΜΑΡΚΟΣ

ΗΡΑΚΛΕΙΟ, ΙΟΥΝΙΟΣ 2024



HELLENIC MEDITERRANEAN UNIVERSITY

SCHOOL OF ENGINEERING

DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING

THESIS

«MECHANICAL PROPERTIES OF NANOCOMPOSITES WITH POLYMERS PA12, HDPE, PETG AND NANOPARTICLES OF ANTIMONY OXIDE IN 3D PRINTING»

BY KYRIAKAKI MARIA

STUDENT ID:TM6767

SUPERVISING PROFESSORS: DR.NEKTARIOS VIDAKIS
DR.PETOUSIS MARKOS

HERAKLION, JUNE 2024

Copyright © Κυριακάκη Μαρία, 2024

Ελληνικό Μεσογειακό Πανεπιστήμιο

Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών

Σχολή Μηχανικών • ΕΛ.ΜΕ.ΠΑ.

Απαγορεύεται η αναπαραγωγή ολόκληρου ή τμήματος του κειμένου χωρίς την έγγραφη άδεια του συγγραφέα.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες σε όλους εκείνους που συνέβαλαν στην ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας με τίτλο "Μηχανικές ιδιότητες νανοσύνθετων με πολυμερή PA12, HDPE, PETG και νανοσωματίδια νιτρικού πυριτίου στην τρισδιάστατη εκτύπωση". Η εργασία αυτή πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Μηχανολογίας Ακρίβειας, Αντίστροφης Μηχανικής και Εμβιομηχανικής, του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών, του Ελληνικού Μεσογειακού Πανεπιστημίου.

Πρώτα και κύρια, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους επιβλέποντες καθηγητές μου, Δρ. Νεκτάριο Βιδάκη και Δρ. Μάρκο Πετούση, για την αμέριστη υποστήριξη, την καθοδήγηση και τις πολύτιμες συμβουλές τους καθ' όλη τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας. Η εμπειρία και οι γνώσεις τους ήταν καθοριστικές για την επιτυχή ολοκλήρωση της εργασίας μου.

Επίσης, ένα μεγάλο ευχαριστώ στις φίλες μου, Μαρία Δέμπη και Κατερίνα Γκαγκανάτσιου, καθώς και στον Γιάννη Βάλσαμο, για την αδιάκοπη βοήθεια, την ενθάρρυνση και τη στήριξή τους. Η συμβολή σας ήταν ανεκτίμητη και οι στιγμές που μοιραστήκαμε θα μείνουν αξέχαστες.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω από καρδιάς την οικογένειά μου για την αδιάκοπη υποστήριξη και την πίστη τους σε εμένα. Η υπομονή, η κατανόηση και η αγάπη σας μου έδωσαν τη δύναμη να φτάσω μέχρι εδώ.

Όπως είπε και ο Λάο Τσε, «Να ευγνωμονείς αυτούς που σε βοήθησαν στο ταξίδι σου, γιατί χωρίς αυτούς το μονοπάτι δεν θα είχε νόημα».

Ευχαριστώ όλους από καρδιάς.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ 4
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ 5
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ ΕΙΚΟΝΩΝ 9
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ 11
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ ΠΙΝΑΚΩΝ 12
ΠΕΡΙΛΗΨΗ 13
ABSTRACT 14
ΜΕΡΟΣ 1^{Ο} – ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ 15
1^{ο} ΚΕΦΑΛΑΙΟ – ΕΙΣΑΓΩΓΗ 15
2^{ο} ΚΕΦΑΛΑΙΟ – ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΕΞΑΓΩΓΗΣ ΝΗΜΑΤΟΣ 18
2.1 Παραγωγή πολυμερικών νημάτων 18
2.1.1 Ιστορική αναδρομή 18
2.1.2 Διαδικασία παραγωγής 19
2.2 Παραγωγή νήματος νανσύνθετων υλικών 21
2.2.1 Ιστορική Αναδρομή 21
2.2.2 Διαδικασία παραγωγής 21
2.3 Μέρη Εξωθητήρα 22
2.4 Σημαντικότητα Ποιότητας 22
3^{ο} ΚΕΦΑΛΑΙΟ – ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΕΚΤΥΠΩΣΗ 24
3.1 Ιστορική αναδρομή 26
3.2 Τεχνολογίες 3D Printing 27
3.2.1 Συνδετική με πίεση ακροφυσίου (Binder Jetting BJ) 27
3.2.2 Κατευθυνόμενη Εναπόθεση Ενέργειας (Directed Energy Deposition –DED) 27
3.2.3 Φωτοπολυμερισμός σε Δεξαμενή (Vat Photopolymerisation) 29
3.2.4 Εξώθηση Υλικών (Material Extrusion) 32
3.2.5 Υλικά με Πίεση Ακροφυσίου (Material Jetting) 34
3.2.6 Σύντηξη Στρώματος Σκόνης (Powder Bed Fusion) 35
3.2.7 Συγκόλληση Φύλλων (Sheet Lamination) 37
3.3 Τρισδιάστατη σχεδίαση -3D Design 41

3.3.1 Δημιουργία ψηφιακού μοντέλου CAD 41
3.3.2 Μετατροπή μοντέλου CAD σε αρχείο εξαγωγής 43
3.4. ΣΧΕΔΙΑΣΤΙΚΑ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΑ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΑ (CAD/CAM/CAE) 46
3.4.1 Τρισδιάστατη σχεδίαση στον υπολογιστή (Computer Aided Design-CAD) . 46
3.4.2 Μηχανική στον υπολογιστή (Computer Aided Engineering-CAE) 47
3.4.3 Μηχανική Κατασκευή στον υπολογιστή (Computer Aided Manufacturing-CAM) 48
3.5. ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ 49
3.5.1 Δοκιμή εφελκυσμού 49
3.5.2 Δοκιμή κάμψης 55
3.5.3 Δοκιμή κρούσης 59
3.5.4 Δοκιμή μικροσκληρότητας 62
4ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ – ΠΟΛΥΜΕΡΗ 66
4.1- Εισαγωγή 66
4.2 Ιστορική Αναδρομή 67
4.3 ΠΟΛΥΜΕΡΗ 69
4.3.1 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ 69
4.3.2 Ιδιότητες πολυμερών 73
4.4 ΠΟΛΥΜΕΡΗ ΣΤΗΝ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΕΚΤΥΠΩΣΗ 77
4.5 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ 77
4.6 ΒΑΣΙΚΑ ΠΟΛΥΜΕΡΗ 80
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5ο - PA12, HDPE, PETG 84
5.1 PA12 (πολυαμίδιο 12, polyamide 12) 84
5.1.1 Χαρακτηριστικά και ιδιότητες του PA12. 84
5.1.2 Εφαρμογές για το PA12. 85
5.1.3 Πλεονεκτήματα του PA12 στην τρισδιάστατη εκτύπωση. 86
5.2 HDPE (πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας, high density polyethylene) 87
5.2.1 Χαρακτηριστικά και Ιδιότητες του HDPE. 87
5.2.2 Εφαρμογές του HDPE 89
5.2.3 Πλεονεκτήματα του HDPE στην τρισδιάστατη εκτύπωση. 90
5.3. PETG (γλυκόλη πολυαιθυλενίου τερεφθαλικού, polyethylene terephthalate glycol) 92
5.3.1 Χαρακτηριστικά και ιδιότητες του PETG. 92
5.3.2 Εφαρμογές PETG 93

5.3.3 Πλεονεκτήματα του PETG στην τρισδιάστατη εκτύπωση. 94
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6ο - ΝΑΝΟΥΛΙΚΑ, ΝΑΝΟΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ 96
6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ 96
6.2 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ 97
6.3 ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ 98
6.4 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ 100
6.4.1 Μηχανικές ιδιότητες. 100
6.4.2 Θερμικές ιδιότητες. 100
6.4.3 Ηλεκτρικές ιδιότητες. 101
6.4.4 Οπτικές ιδιότητες. 101
6.4.5 Χημικές ιδιότητες. 101
6.4.6 Βιολογικές ιδιότητες. 102
6.4.7 Μακροεπιδράσεις. 102
6.5 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ – ΚΑΙΝΟΤΟΜΙΑ 103
6.5.1 Ιατρική και βιοτεχνολογία. 103
6.5.2 Ενέργεια. 103
6.5.3 Ηλεκτρονικά και υπολογιστές. 104
6.5.4 Περιβαλλοντική τεχνολογία. 104
6.6 ΟΞΕΙΔΙΟΥ ΤΟΥ ΑΝΤΥΜΟΝΙΟΥ (ΑΤΟ) 106
6.6.1 ΔΟΜΗ 106
6.6.2- ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ 108
6.6.3 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ 112
6.6.4 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ 115
ΜΕΡΟΣ 2ο - ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ 118
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7ο -ΥΛΙΚΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ 118
7.1 Συγκεντρώσεις υλικών 118
7.2 ΑΝΑΜΙΞΗ ΥΛΙΚΩΝ 119
7.2.1 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΝΗΜΑΤΩΝ 120
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8Ο – ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΕΚΤΥΠΩΣΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ 125
8.1 ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ 126
8.2 ΕΚΤΥΠΩΣΕΙΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ 128
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9Ο - ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ 130
9.1 ΔΟΚΙΜΕΣ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ 130

9.2 ΔΟΚΙΜΕΣ ΚΑΜΨΗΣ 132
9.3 ΔΟΚΙΜΕΣ ΚΡΟΥΣΗΣ 133
9.4 ΔΟΚΙΜΕΣ ΜΙΚΡΟΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑΣ 134
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10^{Ο} - ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ 135
10.1 PETG-ATO 135
10.1.1 ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΣ PETG-ATO 135
10.1.2 ΚΑΜΨΗ PETG - ATO 139
10.1.3 κρούση PETG-ATO 142
10.1.4 μικρόσκληρότητα PETG-ATO 144
10.2 PA12-ATO 146
10.2.1 εφελκυσμός PA12-ATO 146
10.2.2 κάμψη PA12-ATO 150
10.2.3 κρούση PA12 - ATO 153
10.2.4 μικρόσκληρότητα PA12-ATO 154
10.3 HDPE – ATO 155
10.3.1 εφελκυσμός HDPE-ATO 155
10.3.2 κάμψη HDPE - ATO 159
10.3.3 κρούση HDPE-ATO 161
10.3.4 μικρόσκληρότητα HDPE-ATO 162
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 11^{Ο} – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ 163
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 165

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ ΕΙΚΟΝΩΝ

Figure 1:Τρισδιάστατη εκτύπωση καρδιάς....16
Figure 2 Τρισδιάστατη εκτύπωση – νήμα από PLA....19
Figure 3 Διαδικασία εξώθησης νήματος....22
Figure 4: Τρισδιάστατη εκτύπωση προσώπου....25
Figure 5 Τεχνολογία Binder Jetting....27
Figure 6 Διαδικασία εκτύπωσης με απόθεση μετάλλου βασισμένη σε λέιζερ....28
Figure 7 διαδικασία εκτύπωσης με απόθεση μετάλλου βασισμένη σε δομή ηλεκτρονίων....29
Figure 8 Διαδικασία εκτύπωσης με Στερεολιθογραφία....30
Figure 9 διαδικασία εκτύπωσης με συνέχειας υγρό περιβάλλον παραγωγής....31
Figure 10 διαδικασία εκτύπωσης με ψηφιακή επεξεργασία φωτός....32
Figure 11 διαδικασία εκτύπωσης με μοντελοποίηση εναπόθεσης τηγμένου υλικού....33
Figure 12 Felix Bioprinter....33
Figure 13 Διαδικασία εκτύπωσης με Matterial Jetting....34
Figure 14 Διαδικασία εκτύπωσης με MJ, NPJ, DOD....35
Figure 15 Διαδικασία εκτύπωσης με SLS....36
Figure 16 Διαδικασία εκτύπωσης με EBM....36
Figure 17 Διαδικασία εκτύπωσης με DMLS....37
Figure 18 Laminated Object Manufacturing – LOM....38
Figure 19 Διαδικασία εκτύπωσης με SDL....39
Figure 20 Διαδικασία εκτύπωσης με UAM....40
Figure 21 Διαδικασία σάρωσης με περιστροφική πλατφόρμα....42
Figure 22 Διαδικασία σάρωσης με συσκευή....43
Figure 23 Αναπαράσταση αρχείου STL....43
Figure 24 Υψηλή και χαμηλή ανάλυση σε STL αρχεία....44
Figure 25 Διαδικασία slicing....45
Figure 26 Διαδικασία τρισδιάστατης εκτύπωσης (3D Printing)....46
Figure 27 προσομοίωση δυνάμεων- ανάλυση αντοχής σε λογισμικό CAE....47
Figure 28 Περιβάλλον λογισμικού CAM....48
Figure 29: Δοκιμή εφελκυσμού δοκιμίου....49
Figure 30 Εργαστηριακός εξοπλισμός για δοκιμές σε αντοχή σε εφελκισμό.....51
Figure 31 Δοκιμή εφελκυσμού....54
Figure 32: Εξοπλισμός για δοκιμές σε αντοχή κάμψης....55
Figure 33 Κάμψη....58
Figure 34: Δοκιμή κρούσης....59
Figure 35 Εξοπλισμός για δοκιμή μικροσκληρότητας....62
Figure 36 Δοκιμές μικροσκληρότητας. Βασικές αρχές....65
Figure 37 πολυμερή....68
Figure 38 Κατηγορίες πολυμερών....70
Figure 39 Πολημερή- στάδια τρισδιάστατης εκτύπωσης....72
Figure 40 Ανακύκλωση πολυμερών....76

Figure 41 Πολυμερή σε μορφή pellets 79
Figure 42 Πολυμερή σε μορφή νήματος 79
Figure 43 PC (Polycarbonate) 82
Figure 44 PLA pellets 83
Figure 45 Δομή PA12 85
Figure 46 Κόκοι HDPE 88
Figure 47 Χημική και μοριακή δομή HDPE 91
Figure 48 Κόκκοι PETG 92
Figure 49 Χημική δομή PETG 95
Figure 50 Νανοϋλικά 97
Figure 51 Εφαρμογές Νανοϋλικών και Νανοσύνθετων υλικών 105
Figure 52 Οξείδιο του Αντυμονίου Δομή 107
Figure 53 Οξείδιο του Αντυμονίου σε μορφή Σκόνης 108
Figure 54 Αντιμονίτης Sb2O3 115
Figure 55 Συγκεντρώσεις υλικών PETG και ATO 119
Figure 56 Τοποθέτηση υλικών σε κλίβανο 120
Figure 57 Διαδικασία εξώθησης νήματος στον 3D EVO COMPOSER 450 121
Figure 58 Τοποθέτηση καρουλιών σε κλίβανο 122
Figure 59 Διαστάσεις δοκιμίων με βάση τα διεθνή πρότυπα 125
Figure 60 Τρισδιάστατος εκτυπωτής INTAMSYS 126
Figure 61 Εκτύπωση Δοκιμίων εφελκυσμού 128
Figure 62 Δοκίμια εφελκυσμού PETG – ATO 6% ΚΑΙ 2% 128
Figure 63 Δοκίμια κρούσης PA12 – ATO 2% 129
Figure 64 Δοκίμια κάμψης PA12 – ATO 2% 129
Figure 65 Imada MX2 130
Figure 66 Δοκιμή εφελκυσμού, σε θερμοκρασία δωματίου 131
Figure 67 Δοκιμή κάμψης στο Amada MX2 132
Figure 68 Δοκιμή κρούσης HDPE-ATO 4% στο το Terco MT220 Charpy 133
Figure 69 Μηχάνημα Innova Test 300 Vickers 134

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Διάγραμμα 1 Ultimate Strength - Tension – PETG vs ATO.....136
Διάγραμμα 2 Elastic Modulus - Tension - PETG vs ATO.....137
Διάγραμμα 3 Toughness - Tension - PETG vs ATO.....138
Διάγραμμα 4 Ultimate Strength - Flexural - PETG vs ATO.....139
Διάγραμμα 5 Elastic Modulus - Flexural - PETG vs ATO.....141
Διάγραμμα 6 Impact PETG Vs ATO.....143
Διάγραμμα 7 Vickers PETG Vs ATO.....145
Διάγραμμα 8 Ultimate Strength - Tension – PA12 vs ATO.....147
Διάγραμμα 9 Elastic Modulus - Tension – PA12 vs ATO.....148
Διάγραμμα 10 Toughness - Tension – PA12 vs ATO.....149
Διάγραμμα 11 Ultimate Strength - Flexural – PA12 vs ATO.....151
Διάγραμμα 12 Elastic Modulus - Flexural – PA12 vs ATO.....152
Διάγραμμα 13 Impact PA12 Vs ATO.....153
Διάγραμμα 14 Vickers PA12 Vs ATO.....154
Διάγραμμα 15 Ultimate Strength - Tension – HDPE vs ATO.....156
Διάγραμμα 16 Elastic Modulus - Tension – HDPE vs ATO.....157
Διάγραμμα 17 Toughness - Tension – HDPE vs ATO.....158
Διάγραμμα 18 Ultimate Strength - Flexural – HDPE vs ATO.....159
Διάγραμμα 19 Elastic Modulus - Flexural – HDPE vs ATO.....160
Διάγραμμα 20 Impact HDPE Vs ATO.....161
Διάγραμμα 21 Vichers HDPE Vs ATO.....162

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1 Συγκεντρώσεις ATO και PETG 118
Πίνακας 2 Συγκεντρώσεις ATO και HDPE 118
Πίνακας 3 Συγκεντρώσεις ATO και PA12 119
Πίνακας 4 Παράμετροι εξώθησης για PA12 και ATO 123
Πίνακας 5 Παράμετροι εξώθησης νήματος για HDPE και ATO 123
Πίνακας 6 Παράμετροι εξώθησης νήματος για PETG και ATO 124
Πίνακας 7 Παράμετροι εκτύπωσης δοκιμίων PA12 - ATO 126
Πίνακας 8 Παράμετροι εκτύπωσης δοκιμίων PETG - ATO 127
Πίνακας 9 Παράμετροι εκτύπωσης δοκιμίων HDPE - ATO 127

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εστιάζει στη διερεύνηση των μηχανικών ιδιοτήτων νανοσύνθετων υλικών που κατασκευάζονται μέσω τρισδιάστατης εκτύπωσης. Σκοπός της έρευνας είναι η αξιολόγηση της συμπεριφοράς και των ιδιοτήτων αυτών των υλικών σε παραμορφώσεις εφελκυσμού, κάμψης, κρούσης και μικροσκληρότητας.

Για την εκπόνηση της εργασίας επιλέχθηκαν ως πολυμερική βάση το PA12 (πολυαμίδιο 12), HDPE (πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας) και PETG (γλυκόλη πολυαιθυλενίου τερεφθαλικού), ενισχυμένα με νανοσωματίδια ATO (οξειδίου του αντιμονίου), σε περιεκτικότητες 2%, 4%, 6%, 8%,10% αντίστοιχα για κάθε πολυμερή.

Στο πρώτο και θεωρητικό μέρος της εργασίας, , περιγράφεται η διαδικασία εξώθησης νήματος από την ανάμειξη των πολυμερών και των νανοσωματιδίων, με σκοπό την εκ νέου δημιουργία νήματος, όπου θα είναι ικανό να εκτυπωθεί με την μέθοδο της τρισδιάστατης εκτύπωσης από 3D printer. Ακόμα, παρουσιάζονται οι μέθοδοι τρισδιάστατης εκτύπωσης και αναλύεται η μέθοδος FFF (Fused Filament Fabrication) όπου και χρησιμοποιήθηκε για το πείραμα. αναλύονται τα πολυμερή υλικά, τα χαρακτηριστικά και οι ιδιότητες τους, καθώς και η χρήση τους στον μηχανολογικό τομέα μέσω της τρισδιάστατης εκτύπωσης.

Στη συνέχεια, αναλύονται τα πολυμερή υλικά, τα χαρακτηριστικά και οι ιδιότητες τους, καθώς και η χρήση τους στον μηχανολογικό τομέα μέσω της τρισδιάστατης εκτύπωσης.

Έπειτα, αναφορά στα νανοϋλικά και εκτενή περιγραφή του Οξειδίου του Αντυμονίου (ATO), όπου και χρησιμοποιήθηκε ως πρόσθετο υλικό στην παρούσα εργασία.

Στο δεύτερο και πειραματικό μέρος της εργασίας, αναλύεται η διαδικασία του πειράματος. Πρώτα παρουσιάζεται η ανάμιξη των υλικών, η διαδικασία εξώθησης των νημάτων των νεοσύνθετων υλικών, έπειτα η τρισδιάστατη εκτύπωση των δοκιμίων και οι παράμετροι εκτύπωσης και τέλος τα αποτελέσματα σε μορφή διαγράμματος κα ο σχολιασμός τους.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: Τρισδιάστατη εκτύπωση, πολυμερή, νανοϋλικά, PA12 (πολυαμίδιο 12), HDPE (πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας) και PETG (γλυκόλη πολυαιθυλενίου τερεφθαλικού), ATO (οξειδίου του αντιμονίου), Μηχανικές ιδιότητες

ABSTRACT

This diploma thesis focuses on the investigation of the mechanical properties of nanocomposites manufactured through three-dimensional printing. The purpose of the research is to evaluate the behavior and properties of these materials in tensile, bending, impact and microhardness deformations.

PA12 (polyamide 12), HDPE (high density polyethylene) and PETG (polyethylene terephthalate glycol), reinforced with ATO (antimony oxide) nanoparticles, were selected as polymeric bases in contents of 2%, 4%, 6%, 8%, 10% respectively for each polymer.

In the first and theoretical part of the work, the process of filament extrusion from the mixing of polymers and nanoparticles is described, in order to re-create filament, where it will be able to be printed with the method of 3D printing by a 3D printer. Furthermore, the 3D printing methods are presented and the FFF (Fused Filament Fabrication) method used for the experiment is analyzed. Polymeric materials, their characteristics and properties, as well as their use in the mechanical field through three-dimensional printing are analyzed.

Next, polymeric materials, their characteristics and properties, as well as their use in the mechanical field through three-dimensional printing are analyzed.

Next, reference to nanomaterials and an extensive description of Antymonium Oxide (ATO), where it was used as an additional material in this paper.

In the second and experimental part of the work, the process of experiment is analyzed. First the mixing of materials, the process of extrusion of the threads of the neocomposite materials is presented, then the three-dimensional printing of the proofs and the printing parameters and finally the results in diagram form and their annotation.

KEYWORDS: 3D printing, polymers, nanomaterials, PA12 (polyamide 12), HDPE (high density polyethylene) and PETG (polyethylene terephthalate glycol), ATO (antimony oxide), Mechanical properties

ΜΕΡΟΣ 1^{Ο} – ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ

1ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ – ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η Μηχανολογία αποτελεί έναν από τους βασικότερους τομείς για την εξέλιξη της ανθρωπότητας. Ανέκαθεν, είχε ιδιαίτερα ευρεία απήχηση λόγω των πολλαπλών αναγκών που αναπτύχθηκαν με τον καιρό, σχετικά με την διευκόλυνση της καθημερινότητας. Η Μηχανολογία συσχετίζει τα πεδία των μαθηματικών και των θετικών επιστημών με στόχο τόσο να δημιουργήσει νέα πράγματα, όσο και να βελτιώσει την καθημερινότητα. Συγκεκριμένα, ασχολείται με την ανάπτυξη, την ανάλυση, το σχεδιασμό, την κατασκευή, και την συντήρηση των μηχανικών συστημάτων.

Η ζήτηση στον τομέα της μηχανολογίας εξαρτάται από πολλούς παράγοντες. Με τα χρόνια, είναι φανερό πως η ζήτηση των μηχανολογικών κατασκευών όλο ένα και αυξάνεται. Κύριο αίτιο αποτελεί η τεχνολογία. Η τεχνολογία με το πέρασμα των χρόνων εξελίσσεται με ταχύτατους ρυθμούς ασκώντας πολύ μεγάλη επίδραση σε όλους τους τομείς της ζωής. Με την εξέλιξη αυτή και με σύμμαχο την επιστήμη, η ανθρωπότητα έχει φτάσει σε ένα θαυμαστό επίπεδο. Η ζωή του κάθε ανθρώπου πλέον, στο πρακτικό κομμάτι, έχει διευκολυνθεί σε μεγάλο βαθμό.

Κατά αυτόν τον τρόπο, η ανάπτυξη της μηχανολογίας δεν άργησε. Όχι μόνο σε αυτοκίνητα αλλά και σε διάφορα οικιακά είδη, είδη μεταφοράς κ.α., η μηχανολογία έχει χαράξει ένα λαμπρό δρόμο. Πλέον, υπάρχουν υπερσύγχρονες μηχανές και ρομπότ για την εξυπηρέτηση οποιασδήποτε ανάγκης ή προτίμησης. Περισσότερο χρήσιμη, φυσικά, έχει φανεί στον τομέα της βιομηχανίας. Με το πέρας του χρόνου οι μηχανές μπήκαν και εγκαταστάθηκαν στη ζωή του ανθρώπου, αφαιρώντας τον, ως επί το πλείστων, από την χειρωνακτική εργασία.

Η μηχανολογία είναι μία πρωτοποριακή επιστήμη που διακλαδίζεται σε πολλούς τομείς και έχει ως κίνητρο την επίλυση διαφόρων προκλήσεων. Κάποιοι από αυτούς είναι τεχνολογία των υλικών, η ρομποτική, η μελέτη φυσικών πόρων, η στατική μελέτη κτηρίων και ο μηχανολογικός σχεδιασμός.

Όσο οι ανάγκες της καθημερινότητας αυξάνονται, αναπτύσσονται νέες τεχνικές με σκοπό τη γρήγορη και αυτοματοποιημένη παραγωγή, με τη χρήση οικολογικών, ανακυκλωμένων υλικών για την προστασία του πλανήτη. Μια τέτοια δημιουργία αποτελεί η τρισδιάστατη εκτύπωση (3D printing).

Η τρισδιάστατη εκτύπωση μπορεί να βοηθήσει στην κάλυψη της αυξανόμενης ζήτησης για νέα προϊόντα, μειώνοντας τους χρόνους σχεδιασμού της παραγωγής. Με την τρισδιάστατη εκτύπωση, οι σχεδιαστές αναπτύσσουν νέες ιδέες χρησιμοποιώντας

λογισμικό Computer Aided Design (CAD). Στη συνέχεια, στέλνουν αυτά τα σχέδια για εκτύπωση 3D, για την κατασκευή λειτουργικών πρωτοτύπων. Οι μηχανικοί μπορούν στη συνέχεια να χρησιμοποιήσουν αυτά τα τρισδιάστατα εκτυπωμένα μοντέλα για να αξιολογήσουν τα χαρακτηριστικά σχεδιασμού και δοκιμής. Αυτή η διαδικασία διαρκεί κάποιες ημέρες μέχρι να ολοκληρωθεί, σε σύγκριση με τις παραδοσιακές διαδικασίες που μπορεί να διαρκέσουν εβδομάδες. [1]

Τι είναι όμως ουσιαστικά η τρισδιάστατη εκτύπωση; Η τρισδιάστατη εκτύπωση, γνωστή και ως τεχνική πρόσθετης κατασκευής, είναι μια μέθοδος δημιουργίας ενός τρισδιάστατου αντικειμένου στρώση προς στρώση, χρησιμοποιώντας το σχέδιο που δημιουργήθηκε από υπολογιστή, με τη χρήση σχεδιαστικού προγράμματος.



Figure 1:Τρισδιάστατη εκτύπωση καρδιάς

Στην καρδιά αυτής της τεχνολογίας βρίσκονται τα πολυμερή και τα νανοϋλικά που παίζουν σημαντικό ρόλο στη βελτίωση των ιδιοτήτων και της λειτουργικότητας των τρισδιάστατων εκτυπωμένων αντικειμένων.

Τα πολυμερή υλικά είναι ιδιαίτερα δημοφιλή στην τρισδιάστατη εκτύπωση λόγω της ευελιξίας, της ανθεκτικότητας και της εύκολης επεξεργασίας τους. Η χρήση πολυμερών επιτρέπει την κατασκευή ελαφρών και ανθεκτικών εξαρτημάτων για ποικίλες εφαρμογές, από την αεροδιαστημική και την αυτοκινητοβιομηχανία έως την ιατρική και την ηλεκτρονική. Η δυνατότητα επεξεργασίας πολυμερών σε λεπτομερή και πολύπλοκα σχήματα καθιστά την τρισδιάστατη εκτύπωση εξαιρετικά χρήσιμη για την παραγωγή πρωτοτύπων και τελικών προϊόντων με υψηλή ακρίβεια.

Ταυτόχρονα, τα νανοϋλικά παρέχουν μοναδικές ιδιότητες που μπορούν να βελτιώσουν σημαντικά τις μηχανικές, θερμικές και ηλεκτρικές ιδιότητες των πολυμερών. Όταν τα νανοϋλικά ενσωματώνονται στη μήτρα πολυμερών, παράγονται Νανοσύνθετα με ενισχυμένες ιδιότητες όπως αυξημένη αντοχή, αυξημένη σκληρότητα και αυξημένη αντοχή στη φθορά. Αυτές οι βελτιώσεις είναι ιδιαίτερα σημαντικές για τις εφαρμογές όπου οι μηχανικές απαιτήσεις είναι υψηλές. Τα νανοϋλικά μπορούν επίσης να παρέχουν ειδικές

λειτουργικές ιδιότητες όπως αγωγιμότητα και αντίσταση σε φλόγα, επεκτείνοντας περαιτέρω τη λειτουργικότητα των τρισδιάστατων τυπωμένων εξαρτημάτων.

Η συσχέτιση μεταξύ τρισδιάστατης εκτύπωσης και πολυμερών και νανοϋλικών υπογραμμίζει τη δυνατότητα δημιουργίας καινοτόμων λύσεων που μπορούν να αντιμετωπίσουν σύγχρονες προκλήσεις στον τομέα της μηχανολογίας. Η δυνατότητα προσαρμογής των ιδιοτήτων του υλικού με την προσθήκη νανοϋλικών επιτρέπει την κατασκευή εξαρτημάτων με ειδικές προδιαγραφές και υψηλή απόδοση. Αυτό ανοίγει το δρόμο για την ανάπτυξη νέων τεχνολογιών και την προώθηση της καινοτομίας στον τομέα της μηχανολογίας.

Συνοπτικά, η τρισδιάστατη εκτύπωση σε συνδυασμό με πολυμερή και νανοϋλικά είναι ένας ισχυρός καταλύτης για την πρόοδο της μηχανολογίας. Η ευελιξία και οι δυνατότητές του επιτρέπουν τη δημιουργία εξαρτημάτων και συστημάτων με μοναδικές ιδιότητες και επιτρέπουν νέες λύσεις και βελτιώσεις σε πολλούς τομείς της βιομηχανίας και της τεχνολογίας.

Σε αυτήν την εργασία, κύριος σκοπός είναι η δημιουργία δοκιμίων νανοσύνθετων υλικών με την τεχνολογία FFF, και οι δοκιμές τους σχετικά με την μελέτη των μηχανικών ιδιοτήτων τους, σύμφωνα με τα διεθνή πρότυπα.

Τα νανοσύνθετα υλικά αποτελούνται από πολυμερική μήτρα PETG,HDPE και PA12 με πρόσμιξη Οξειδίου του Αντυμονίου (ATO) σε περιεκτικότητες 2%, 4%, 6%, 8%, 10% αντίστοιχα.

2ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ – ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΕΞΑΓΩΓΗΣ ΝΗΜΑΤΟΣ

Προκειμένου να πραγματοποιηθεί οποιαδήποτε εργασία μέσω της προσθετικής μεθόδου, βασική προϋπόθεση αποτελεί η παραγωγή νήματος, με σκοπό την τοποθέτηση του στον εκτυπωτή για να ξεκινήσει η διαδικασία εκτύπωσης των δοκιμίων.

2.1 Παραγωγή πολυμερικών νημάτων

2.1.1 Ιστορική αναδρομή

Η παραγωγή νήματος για τρισδιάστατη εκτύπωση έχει τις ρίζες της στις πρώτες μέρες της τρισδιάστατης εκτύπωσης, στα τέλη της δεκαετίας του 1980 και στις αρχές της δεκαετίας του 1990. Με την ανάπτυξη της τεχνολογίας Fused Deposition Modeling (FDM) από την εταιρεία Stratasys και τον ιδρυτή της Scott Crump, άρχισε να εμφανίζεται η ανάγκη για αξιόπιστο και σταθερό υλικό εκτύπωσης. Τα πρώτα νήματα ήταν κατασκευασμένα από κοινά θερμοπλαστικά όπως το ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene), τα οποία προσέφεραν καλή μηχανική αντοχή και ευκολία στην επεξεργασία.

Κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 2000, η τεχνολογία της τρισδιάστατης εκτύπωσης γνώρισε σημαντική ανάπτυξη και διεύρυνση. Τα νήματα για τρισδιάστατη εκτύπωση άρχισαν να κατασκευάζονται από ποικίλα υλικά, όπως το PLA (Polylactic Acid), το οποίο είναι βιοδιασπώμενο και φιλικό προς το περιβάλλον. Η ζήτηση για ποιοτικά και εξειδικευμένα νήματα αυξήθηκε, οδηγώντας στην εμφάνιση νέων κατασκευαστών και την ανάπτυξη διαδικασιών παραγωγής με μεγαλύτερη ακρίβεια και έλεγχο ποιότητας.

Στη σημερινή εποχή, η παραγωγή νήματος για τρισδιάστατη εκτύπωση είναι μια καθιερωμένη βιομηχανία με πολλούς κατασκευαστές που προσφέρουν μεγάλη ποικιλία υλικών, από απλά θερμοπλαστικά μέχρι εξειδικευμένα πολυμερή με βελτιωμένες ιδιότητες, όπως αντοχή στη θερμότητα, ευκαμψία και ηλεκτρική αγωγιμότητα. Οι σύγχρονες διαδικασίες παραγωγής περιλαμβάνουν αυστηρούς ελέγχους ποιότητας και χρήση προηγμένων τεχνικών εξώθησης για την παραγωγή ομοιόμορφων και υψηλής ποιότητας νημάτων.

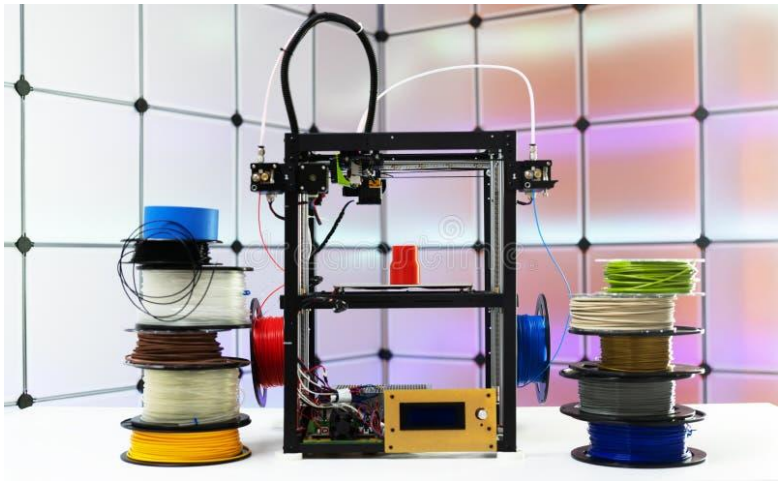


Figure 2 Τρισδιάστατη εκτύπωση – νήμα από PLA

2.1.2 Διαδικασία παραγωγής

Η παραγωγή νήματος για τρισδιάστατη εκτύπωση είναι μια σημαντική διαδικασία που επηρεάζει άμεσα την ποιότητα και την απόδοση του εκτυπωμένου αντικειμένου. Αυτά τα νήματα κατασκευάζονται από θερμοπλαστικά πολυμερή και η διαδικασία παραγωγής περιλαμβάνει διάφορα στάδια, από την αρχική προετοιμασία του υλικού έως την τελική συσκευασία του προϊόντος. Η διαδικασία κατασκευής νημάτων τρισδιάστατης εκτύπωσης περιγράφεται λεπτομερέστερα παρακάτω:

1. Προετοιμασία υλικού

Η διαδικασία ξεκινά με την επιλογή των πρώτων υλών: θερμοπλαστικά πολυμερή όπως PLA (πολυγαλακτικό οξύ), ABS (ακρυλονιτρίλιο βουταδιένιο στυρένιο) και PETG (τροφινικό πολυαιθυλενογλυκόλιο) παραλαμβάνονται με τη μορφή σφαιριδίων ή κόκκων. Εάν είναι απαραίτητο, τα πολυμερή μπορούν να αναμιχθούν με πρόσθετα όπως χρωστικές ουσίες, ενισχύσεις (π.χ. ίνες άνθρακα) και σταθεροποιητές.

2. Ξήρανση

Το πολυμερές υλικό πρέπει να ξηραίνεται για να απομακρυνθεί η υγρασία που μπορεί να επηρεάσει αρνητικά την ποιότητα του νήματος. Η ξήρανση πραγματοποιείται με τη χρήση ειδικών στεγνωτηρίων και σε θερμοκρασία και χρόνο κατάλληλο για το υλικό.

3. Εξώθηση

Η εξώθηση είναι η κύρια διαδικασία παραγωγής νήματος. Τα αποξηραμένα σφαιρίδια πολυμερούς τροφοδοτούνται σε έναν εξωθητήρα, όπου θερμαίνονται και λιώνουν. Το λιωμένο πολυμερές εξωθείται μέσω ενός καλουπιού (μήτρας) για να παραχθούν συνεχείς νήματα συγκεκριμένης διαμέτρου, συνήθως 1,75 ή 2,85 mm.

4. Ψύξη και σταθεροποίηση

Το εξωθημένο νήμα ψύχεται αμέσως μετά την έξοδο από τη μήτρα, προκειμένου να σταθεροποιηθεί το σχήμα του. Η ψύξη πραγματοποιείται συνήθως με εμβάπτιση του νήματος σε υδατόλουτρο ή με ψυχρό αέρα. Η ομοιόμορφη ψύξη είναι σημαντική για την αποφυγή εσωτερικών τάσεων και ατελειών στο νήμα.

5. Τράβηγμα και βαθμονόμηση

Μετά την ψύξη, το νήμα διέρχεται από ένα σύστημα ευθυγράμμισης το οποίο εξασφαλίζει ότι η διάμετρος είναι σταθερή και ακριβής. Σε αυτό το στάδιο, η διάμετρος μετράται συνεχώς με τη χρήση βαθμονομητή ή αισθητήρα λέιζερ και ο εξωθητής μπορεί να ρυθμιστεί αυτόματα ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή ακρίβεια.

6. Τύλιγμα και συσκευασία

Το τελικό στάδιο είναι το τύλιγμα του νήματος σε καρούλια. Το νήμα τυλίγεται προσεκτικά, ώστε οι κόμποι και οι στρεβλώσεις του νήματος να μην προκαλούν προβλήματα κατά την εκτύπωση. Τα καρούλια ζυγίζονται και ελέγχονται ποιοτικά πριν συσκευαστούν αεροστεγώς σε αφυγραντήρα για να αποφευχθεί η απορρόφηση υγρασίας.

7. Ποιοτικός έλεγχος

Κατά τη διάρκεια της παραγωγικής διαδικασίας, χρησιμοποιούνται αυστηροί ποιοτικοί έλεγχοι για να διασφαλιστεί ότι το νήμα πληροί τις προδιαγραφές, όπως η διάμετρος, η στρογγυλότητα και οι φυσικοχημικές ιδιότητες. Δείγματα κάθε παρτίδας δοκιμάζονται στον εκτυπωτή 3D για να διασφαλιστεί ότι τα νήματα λειτουργούν σωστά και παράγουν εκτυπώσεις υψηλής ποιότητας.

Συμπέρασματικά, η παραγωγή νημάτων τρισδιάστατης εκτύπωσης είναι μια πολύπλοκη διαδικασία που απαιτεί ακριβή έλεγχο των παραμέτρων και προσεκτική επιλογή των υλικών για να εξασφαλιστεί η υψηλή ποιότητα και η αξιοπιστία του τελικού προϊόντος. Από την προετοιμασία των πρώτων υλών έως τη συσκευασία, κάθε στάδιο παίζει σημαντικό ρόλο στην παραγωγή νημάτων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν με επιτυχία σε διάφορες εφαρμογές τρισδιάστατης εκτύπωσης.

2.2 Παραγωγή νήματος νανσύνθετων υλικών

2.2.1 Ιστορική Αναδρομή

Η χρήση νανοϋλικών στην παραγωγή νημάτων για τρισδιάστατη εκτύπωση είναι μια πρόσφατη εξέλιξη που ξεκίνησε την τελευταία δεκαετία. Οι πρώτες έρευνες για την ενσωμάτωση νανοϋλικών στα πολυμερή για τη βελτίωση των μηχανικών και φυσικών ιδιοτήτων τους ξεκίνησαν στις αρχές της δεκαετίας του 2000, όταν οι επιστήμονες ανακάλυψαν τις μοναδικές ιδιότητες των νανοσωματιδίων, όπως η αυξημένη αντοχή και σκληρότητα και οι βελτιωμένες θερμικές και ηλεκτρικές ιδιότητες.

Στη δεκαετία του 2010, η πρόοδος στην τεχνολογία των νανοϋλικών και η αυξανόμενη ζήτηση για εξειδικευμένα υλικά οδήγησαν στην ανάπτυξη νημάτων ενσωματωμένων με νανοσωματίδια. Τα νήματα αυτά προσφέρουν σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τα συμβατικά πολυμερή, επιτρέποντας τη βελτίωση των επιδόσεων και την παραγωγή αντικειμένων με νέες λειτουργικές ιδιότητες. Νανοϋλικά όπως νανοσωματίδια οξειδίου του αντιμονίου, νανοσωλήνες άνθρακα και νανοΐνες αργύρου αρχίζουν να ενσωματώνονται σε νήματα για τρισδιάστατη εκτύπωση.

Σήμερα, η παραγωγή νημάτων από νανοϋλικά είναι ένας συνεχώς εξελισσόμενος τομέας, με την έρευνα και τις εφαρμογές να επεκτείνονται σε διάφορους βιομηχανικούς τομείς. Κατά τη διαδικασία παραγωγής αυτών των νημάτων, χρησιμοποιούνται προηγμένες τεχνικές ανάμιξης και εξώθησης για να εξασφαλιστεί η ομοιόμορφη κατανομή των νανοσωματιδίων στο πολυμερές. Η συνεχής ανάπτυξη και βελτίωση της διαδικασίας παραγωγής επιτρέπει τη δημιουργία νέων και καινοτόμων υλικών που διευρύνουν τις δυνατότητες της τρισδιάστατης εκτύπωσης.

2.2.2 Διαδικασία παραγωγής

Η παραγωγή νήματος για πολυμερή με πρόσμιξη νανοϋλικού περιλαμβάνει εξειδικευμένες διαδικασίες για την ενσωμάτωση των νανοσωματιδίων στο πολυμερές. Αρχικά, οι κόκκοι του πολυμερούς αναμειγνύονται με νανοσωματίδια σε συγκεκριμένες αναλογίες. Αυτή η ανάμιξη πρέπει να είναι εξαιρετικά ομοιογενής για να εξασφαλιστεί ότι τα νανοσωματίδια κατανέμονται ισομερώς στο τελικό νήμα.

Μετά την ανάμιξη, το μίγμα τροφοδοτείται σε έναν εξωθητήρα, όπου θερμαίνεται και τήκεται σε ομοιογενή μάζα. Η θερμοκρασία τήξης και οι παράμετροι εξώθησης ρυθμίζονται προσεκτικά για να αντιμετωπιστούν οι αλλαγές στις ιδιότητες του υλικού λόγω της πρόσμιξης των νανοσωματιδίων. Η λιωμένη μάζα εξωθείται μέσω ενός ακροφυσίου με συγκεκριμένη διάμετρο, δημιουργώντας ένα συνεχές νήμα.

Το νήμα στη συνέχεια ψύχεται και καλιμπράρεται για να εξασφαλιστεί η σωστή διάμετρος και ομοιομορφία. Η περιέλιξη του νήματος σε καρούλια και η τελική επιθεώρηση για τυχόν ατέλειες ή παραμορφώσεις ολοκληρώνουν τη διαδικασία παραγωγής. Το τελικό νήμα

περιέχει ομοιόμορφα κατανεμημένα νανοσωματίδια, προσφέροντας βελτιωμένες μηχανικές, θερμικές και ηλεκτρικές ιδιότητες, καθιστώντας το ιδανικό για εξειδικευμένες εφαρμογές τρισδιάστατης εκτύπωσης.

2.3 Μέρη Εξωθητήρα

Οι εξωθητήρες νήματος (extruders) είναι ένα σημαντικό στοιχείο στη διαδικασία τρισδιάστατης εκτύπωσης, που χρησιμοποιείται για την επεξεργασία και την εξώθηση θερμοπλαστικών υλικών σε μορφή νήματος. Σύμφωνα με την έρευνα αγοράς, ο σχεδιασμός και η λειτουργικότητα των εξωθητήρων ποικίλλει σε μεγάλο βαθμό ανάλογα με το υλικό και τις απαιτήσεις της διαδικασίας εκτύπωσης.

Κάθε εξωθητήρας αποτελείται από βασικά εξαρτήματα, όπως μια κύρια μονάδα εξώθησης που λιώνει και τροφοδοτεί το νήμα, μια ζώνη θέρμανσης που ελέγχει τη θερμοκρασία του υλικού και ένα ακροφύσιο που καθορίζει τη διάμετρο και την ομοιομορφία του νήματος. Οι σύγχρονοι εξωθητήρες έχουν σχεδιαστεί για να είναι ακριβείς και αξιόπιστοι, προσφέροντας υψηλές επιδόσεις και ευελιξία στην τρισδιάστατη εκτύπωση.

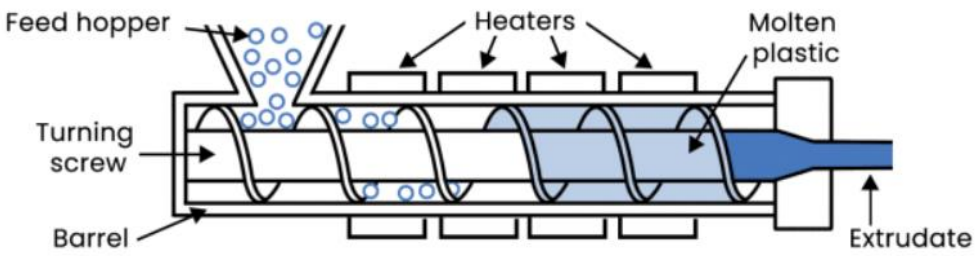


Figure 3 Διαδικασία εξώθησης νήματος

2.4 Σημαντικότητα Ποιότητας

Η παραγωγή νημάτων για τρισδιάστατους εκτυπωτές γίνεται για να παρέχονται στους χρήστες αξιόπιστα και σταθερά υλικά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν με ακρίβεια και αποτελεσματικότητα σε τρισδιάστατους εκτυπωτές. Υπάρχουν πολλοί λόγοι για τους οποίους είναι απαραίτητη αυτή η διαδικασία, αλλά οι κυριότεροι είναι η σταθερότητα και η ομοιομορφία, η ποιότητα εκτύπωσης και η απόδοση, η ευκολία χρήσης, η ποικιλία υλικών και χρωμάτων και η υποστήριξη της έρευνας και της ανάπτυξης νέων υλικών.

Η τρισδιάστατη εκτύπωση απαιτεί υλικά που είναι σταθερά και ομοιόμορφα σε διάμετρο ώστε να ρέουν ομαλά μέσα από το ακροφύσιο του εκτυπωτή. Ελαφρές διακυμάνσεις στη διάμετρο του νήματος μπορούν να προκαλέσουν προβλήματα στην εκτύπωση, όπως μπλοκαρίσματα του ακροφυσίου και ασυνέπειες στα στρώματα των εκτυπωμένων αντικειμένων. Η βιομηχανική παραγωγή νήματος διασφαλίζει ότι κάθε καρούλι νήματος πληροί αυστηρές προδιαγραφές διαμέτρου και ποιότητας.

Τα νήματα βιομηχανικής παραγωγής ελέγχονται και δοκιμάζονται για να παρέχουν βέλτιστη απόδοση κατά την εκτύπωση. Λόγω της υψηλής ποιότητας των νημάτων, το εκτυπωμένο υλικό έχει καλή πρόσφυση μεταξύ των στρώσεων, υψηλή αντοχή και λεία επιφάνεια. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε εφαρμογές όπου η ακρίβεια και η ανθεκτικότητα του εκτυπωμένου υλικού είναι κρίσιμες.

Τα νήματα βιομηχανικής παραγωγής είναι εύχρηστα και προσαρμοσμένα στις ανάγκες των χρηστών τρισδιάστατων εκτυπωτών. Τα νήματα συσκευάζονται με τρόπο που τα προστατεύει από την υγρασία και άλλα περιβαλλοντικά στοιχεία που μπορεί να επηρεάσουν την ποιότητα του υλικού. Τα καρούλια των νημάτων τυλίγονται επίσης με τέτοιο τρόπο ώστε να αποφεύγονται τα μπερδέματα και οι κόμποι, που μπορούν να διακόψουν την εκτύπωση.

Η βιομηχανική παραγωγή νημάτων επιτρέπει την ανάπτυξη και την προμήθεια μιας μεγάλης ποικιλίας υλικών και χρωμάτων: εκτός από τα κοινά θερμοπλαστικά, όπως το PLA και το ABS, υπάρχουν ειδικά πολυμερή, νανοσύνθετα και νήματα με μεταλλικά και ξύλινα σωματίδια. Αυτή η ποικιλομορφία επιτρέπει στους χρήστες να επιλέγουν το καταλληλότερο υλικό για την εκάστοτε εφαρμογή, αυξάνοντας τις δυνατότητες και την ευελιξία της τρισδιάστατης εκτύπωσης.

Τέλος, η παραγωγή νημάτων για τρισδιάστατη εκτύπωση υποστηρίζει την έρευνα και την ανάπτυξη νέων υλικών και τεχνολογιών. Οι κατασκευαστές νημάτων εργάζονται συνεχώς για τη βελτίωση των ιδιοτήτων των υλικών, όπως η αντοχή, η ευελιξία, η αντοχή στη θερμότητα και οι ειδικές ιδιότητες, όπως η αγωγιμότητα και η βιοδιασπασιμότητα. Αυτή η συνεχής καινοτομία οδηγεί την εξέλιξη της τρισδιάστατης εκτύπωσης και ανοίγει νέες δυνατότητες για βιομηχανικές και καταναλωτικές εφαρμογές.

Η παραγωγή νημάτων τρισδιάστατης εκτύπωσης είναι απαραίτητη για τη διασφάλιση της ποιότητας, της αξιοπιστίας και της ευελιξίας της τρισδιάστατης εκτύπωσης. Χρησιμοποιώντας νήματα που παράγονται βιομηχανικά, οι χρήστες μπορούν να αξιοποιήσουν όλες τις δυνατότητες της τρισδιάστατης εκτύπωσης για να επιτύχουν εξαιρετικά αποτελέσματα σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών.

3ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ – ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΕΚΤΥΠΩΣΗ

Η τρισδιάστατη εκτύπωση, γνωστή και ως προσθετική κατασκευή, είναι μια από τις πιο επαναστατικές τεχνολογίες της εποχής μας. Από την εισαγωγή της, η τρισδιάστατη εκτύπωση έχει μεταμορφώσει τον τρόπο με τον οποίο σχεδιάζονται και κατασκευάζονται τα προϊόντα, ανοίγοντας νέες δυνατότητες για μια σειρά από βιομηχανίες. Η δυνατότητα κατασκευής πολύπλοκων γεωμετρικών σχημάτων με μεγάλη ακρίβεια και ταχύτητα καθιστά την τρισδιάστατη εκτύπωση ιδιαίτερα ελκυστική για εφαρμογές που απαιτούν εξατομικευμένες λύσεις και ταχύτητα παραγωγής.

Μια σημαντική πτυχή της τρισδιάστατης εκτύπωσης είναι η χρήση πολυμερών υλικών. Τα πολυμερή έχουν καταστεί σημαντικό υλικό για την τρισδιάστατη εκτύπωση λόγω της ευελιξίας, της ανθεκτικότητας και της ευκολίας επεξεργασίας τους. Η δυνατότητα επεξεργασίας πολυμερών σε λεπτά και πολύπλοκα σχήματα επιτρέπει την κατασκευή πρωτοτύπων και τελικών προϊόντων με υψηλό βαθμό ακρίβειας. Από την ιατρική και την αεροδιαστημική έως την αυτοκινητοβιομηχανία και την ηλεκτρονική, τα πολυμερή υλικά χρησιμοποιούνται ευρέως για τη δημιουργία ελαφρών, ανθεκτικών και λειτουργικών εξαρτημάτων.

Στις τελευταίες εξελίξεις στην τρισδιάστατη εκτύπωση, η ενσωμάτωση νανοσύνθετων υλικών αποτελεί έναν ιδιαίτερα ενδιαφέροντα τομέα. Τα νανοσύνθετα που αποτελούνται από πολυμερικές μήτρες ενισχυμένες με νανοϋλικά παρουσιάζουν βελτιωμένες ιδιότητες που δεν μπορούν να επιτευχθούν με τα συμβατικά υλικά. Οι ενισχύσεις σε νανοκλίμακα, όπως τα νανοσωματίδια και οι νανοΐνες, βελτιώνουν τις μηχανικές, θερμικές και ηλεκτρικές ιδιότητες των πολυμερών, καθιστώντας τα πιο ανθεκτικά και αποδοτικά για απαιτητικές εφαρμογές.

Η τρισδιάστατη εκτύπωση νανοσύνθετων υλικών ανοίγει νέες δυνατότητες για την κατασκευή εξαρτημάτων με ειδικές ιδιότητες. Χρησιμοποιώντας νανοϋλικά, οι μηχανικοί μπορούν να σχεδιάσουν και να κατασκευάσουν προϊόντα που χαρακτηρίζονται από αυξημένη αντοχή, αυξημένη σκληρότητα και βελτιωμένη αντοχή στη φθορά. Επιπλέον, τα νανοϋλικά μπορούν να προσδώσουν ειδικές λειτουργικές ιδιότητες, όπως ηλεκτρική αγωγιμότητα και αντοχή στη θερμότητα, διευρύνοντας περαιτέρω τις δυνατότητες των τρισδιάστατα εκτυπωμένων εξαρτημάτων. Οι βελτιώσεις αυτές ανοίγουν το δρόμο για την ανάπτυξη νέων τεχνολογιών και την προώθηση της καινοτομίας σε διάφορους βιομηχανικούς και τεχνολογικούς τομείς.

Για την κατασκευή ενός αντικειμένου, μπορούν να λειτουργήσουν δύο μέθοδοι. Η αφαιρετική μέθοδος παραγωγής SM (Subtractive Manufacturing), κατά την οποία ένα ακατέργαστο υλικό επεξεργάζεται μέσω μιας διαδικασίας αφαίρεσης υλικού και αποκτά το επιθυμητό τελικό μέγεθος και σχήμα. Η μέθοδος αυτή εμπεριέχει κοπή, φινίρισμα, και διάτρηση. [2], [1]

Η προσθετική μέθοδος παραγωγής AM (Additive Manufacturing) ή τρισδιάστατη εκτύπωση, κατά την οποία κατασκευάζονται 3D αντικείμενα εναποθέτοντας υλικό στρώση προς στρώση. Αυτή η διαδικασία προϋποθέτει ένα τρισδιάστατο ψηφιακά σχεδιασμένο μοντέλο και επιτυγχάνεται με τη χρήση υπολογιστή, και σχεδιαστικών προγραμμάτων (Computer Aided Design ή CAD), ένας τρισδιάστατος εκτυπωτής και το κατάλληλο υλικό. Ο εκτυπωτής διαβάζει τα δεδομένα του ψηφιακού μοντέλου, μέσω μιας διαδικασίας μετατροπής του αρχείου CAD σε αρχείο stereolithography (.stl) για να χρησιμοποιηθεί σε πρόγραμμα slicing, όπου εκεί τεμαχίζεται το αντικείμενο σε μικρές οριζόντιες στρώσεις, που αναπαριστούν τις κινήσεις που θα εκτελέσει ο εκτυπωτής. Από το πρόγραμμα slicing, αποθηκεύεται το αρχείο .gcode, το οποίο αναγράφει όλα τα δεδομένα για τις κινήσεις που πρέπει να εκτελέσει ο εκτυπωτής. Στη συνέχεια, διαβάζει αυτά τα δεδομένα και εναποθέτει υλικό κατάλληλα (υγρό, σκόνη κ.α.), στρώση προς στρώση, για την παραγωγή του επιθυμητού τρισδιάστατου αντικειμένου. [3]

Έχει τη δυνατότητα να κατασκευάσει περίπλοκα σχηματικά αντικείμενα από διάφορα είδη υλικών όπως κεραμικό, μέταλλο, πλαστικά κ.α., κάτι το οποίο θα ήταν αδύνατο να συμβεί με παραδοσιακές μεθόδους κατεργασίας.

Η τρισδιάστατη εκτύπωση οποιουδήποτε φυσικού αντικειμένου βασίζεται σε μια θεωρία του Ιταλού μαθηματικού Guido Fubini, κατά το οποίο ένα αντικείμενο n διαστάσεων, μπορεί να απεικονιστεί πιστά ως ένα φάσμα από στρώματα σχημάτων n-1, δηλαδή ένα τρισδιάστατο σχέδιο οποιωνδήποτε διαστάσεων μπορεί να αναπαρασταθεί ως στρώματα σχημάτων 2 διαστάσεων.

Επομένως η θεωρία Fubini, αποδεικνύει ότι οι τρισδιάστατοι εκτυπωτές μπορούν να αναπαραστήσουν οποιοδήποτε υπαρκτό αντικείμενο. Ωστόσο, ένας περιορισμός μπορεί είναι η ανάλυση των στρώσεων κατά την πραγμάτωση της εκτύπωσης και η επίτευξη της φυσικής σταθερότητας της διαστρωμάτωσης. [29]

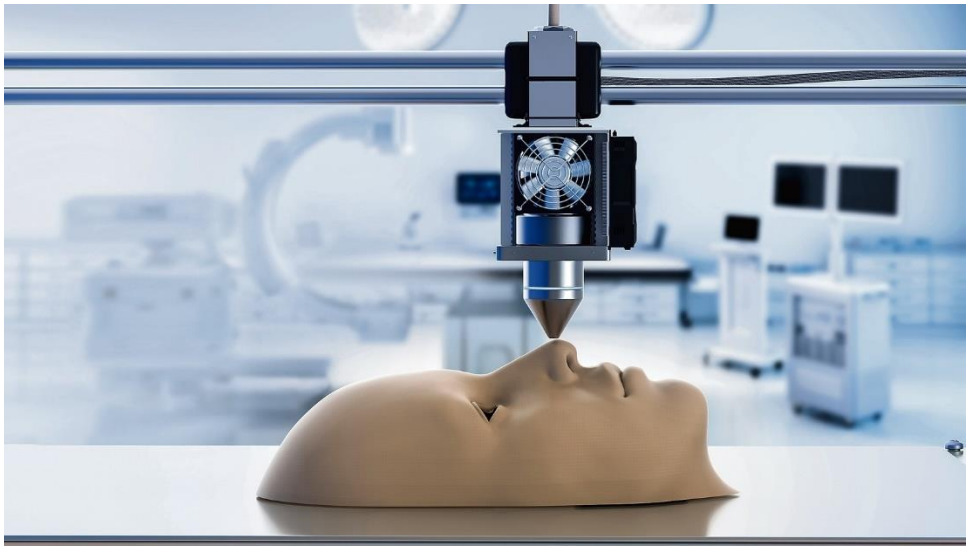


Figure 4: Τρισδιάστατη εκτύπωση προσώπου

3.1 Ιστορική αναδρομή

Η ιστορία της τρισδιάστατης εκτύπωσης χρονολογείται από τη δεκαετία του 1980, όταν ο Chuck Hull εφηύρε την πρώτη μέθοδο στερεολιθογραφίας (SLA) το 1983. Αυτή η εφεύρεση σηματοδότησε την αρχή μιας επανάστασης στην κατασκευή προϊόντων, επιτρέποντας τη δημιουργία τρισδιάστατων αντικειμένων με τη σταδιακή προσθήκη στρωμάτων υλικού από ένα ψηφιακό μοντέλο. 1986, ο Hull ίδρυσε την 3D Systems, η οποία ανέπτυξε και εμπορευματοποίησε τον πρώτο εμπορικό τρισδιάστατο εκτυπωτή, ανοίγοντας το δρόμο για περαιτέρω εξελίξεις στην τεχνολογία.

Κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1990, η τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης επεκτάθηκε και βελτιώθηκε σημαντικά. Αναπτύχθηκαν νέες μέθοδοι, όπως η επιλεκτική τήξη με λέιζερ (SLS) και η τήξη σε κλίνη σκόνης, επιτρέποντας την εκτύπωση σε μεταλλικά και κεραμικά υλικά και διευρύνοντας τις εφαρμογές της τεχνολογίας. Ταυτόχρονα, η τεχνολογία FDM (Fused Deposition Modelling) που αναπτύχθηκε από την Stratasys έγινε ιδιαίτερα δημοφιλής λόγω της ικανότητάς της να χρησιμοποιεί θερμοπλαστικά πολυμερή, καθιστώντας την τρισδιάστατη εκτύπωση πιο προσιτή και οικονομικά αποδοτική.

Στη δεκαετία του 2000, η τρισδιάστατη εκτύπωση έγινε όλο και πιο προσιτή και διαδεδομένη τόσο στον βιομηχανικό όσο και στον καταναλωτικό τομέα. Η ανάπτυξη λογισμικού ανοικτού κώδικα και το χαμηλό κόστος των εκτυπωτών έκαναν την τεχνολογία προσιτή σε χομπίστες και μικρές επιχειρήσεις. Ταυτόχρονα, η βιομηχανία άρχισε να συνειδητοποιεί τις δυνατότητες της τρισδιάστατης εκτύπωσης για την παραγωγή εξειδικευμένων εξαρτημάτων και πρωτοτύπων γρήγορα και οικονομικά αποδοτικά.

Την τελευταία δεκαετία, η τρισδιάστατη εκτύπωση εξελίχθηκε περαιτέρω με την ενσωμάτωση νανοσύνθετων υλικών. Τα νανοσύνθετα αποτελούνται από μια πολυμερή μήτρα ενισχυμένη με νανοϋλικά, όπως νανοσωματίδια και νανοΐνες, τα οποία παρέχουν εξαιρετικές ιδιότητες που βελτιώνουν τις μηχανικές, θερμικές και ηλεκτρικές επιδόσεις των εκτυπωμένων αντικειμένων. Η δυνατότητα προσαρμογής των υλικών μέσω της προσθήκης νανοϋλικών επιτρέπει την παραγωγή εξαρτημάτων με ειδικές και βελτιωμένες ιδιότητες, ανοίγοντας νέους ορίζοντες για την τρισδιάστατη εκτύπωση σε διάφορους τομείς, όπως η αεροδιαστημική, η ιατρική και η ηλεκτρονική.

Από την αρχική της εμφάνιση ως καινοτόμου τεχνολογίας πρωτοτύπων, η τρισδιάστατη εκτύπωση έχει εξελιχθεί σε μια ολοκληρωμένη βιομηχανική παραγωγική διαδικασία με αμέτρητες εφαρμογές και συνεχείς καινοτομίες. Η δυνατότητα ενσωμάτωσης νανοϋλικών έχει επεκτείνει περαιτέρω τις δυνατότητες αυτής της τεχνολογίας, καθιστώντας την έναν από τους πιο δυναμικούς και καινοτόμους τομείς της σύγχρονης μηχανικής.

3.2 Τεχνολογίες 3D Printing

Σύμφωνα με την Αμερικανική Κοινωνία Δοκιμών και Υλικών (ASTM), οι τεχνολογίες τρισδιάστατης εκτύπωσης χωρίζονται σε 7 μεθόδους. (ΚΑΛΤΣΗ, 2017)

3.2.1 Συνδετική με πίεση ακροφυσίου (Binder Jetting BJ)

Η τεχνολογία BJ λειτουργεί συνδυάζοντας τη σύντηξη σκόνης και την εκτόξευση υλικού. Πρώτα με ένα κύλινδρο εφαρμόζεται ένα λεπτό στρώμα σκόνης από το υλικό στη πλατφόρμα κατασκευής. Τα ακροφύσια εναποθέτουν ένα συνδετικό υγρό πάνω στη σκόνη για να γίνει η συγκόλληση τους. Αφού γίνει η συγκόλληση αυτή, η πλατφόρμα μετακινείται προς τα κάτω και γίνεται η εφαρμογή της επόμενης στρώσης σκόνης και η συγκόλληση τους ώστε να γίνει η κατασκευή του αντικειμένου. Μόλις ολοκληρωθεί η εκτύπωση, αφαιρείται το αντικείμενο και γίνεται η απομάκρυνση της σκόνης. Οι διαδικασίες BJ τείνουν να είναι χρονοβόρες και να μην προσφέρουν λείες επιφάνειες, ούτε υψηλές ακρίβειες. Ωστόσο, έχουν τη δυνατότητα λειτουργίας με μεταλλικά και κεραμικά υλικά, υψηλής ποιότητας.

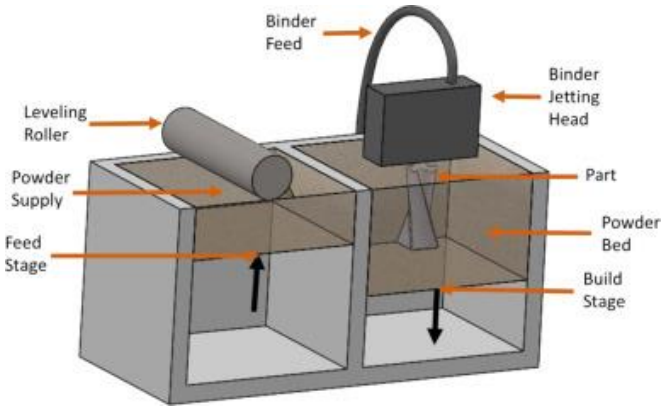


Figure 5 Τεχνολογία Binder Jetting

3.2.2 Κατευθυνόμενη Εναπόθεση Ενέργειας (Directed Energy Deposition –DED)

Η τεχνολογία DED, έχει κύρια εφαρμογή στην επεξεργασία κάποιου ήδη υπάρχον εξαρτήματος. Αποτελεί μια διαδικασία κατά την οποία το εκάστοτε υλικό υπόκειται τήξη όσο εφαρμόζεται. Μπορεί να λειτουργήσει με πολλά υλικά (κεραμικά, πολυμερή κ.α.), αλλά χρησιμοποιείται κυρίως στη βιομηχανία μετάλλων υψηλής τεχνολογίας.

Κατά αυτή τη διαδικασία, ο τρισδιάστατος εκτυπωτής είναι άμεσα συνδεδεμένος με ένα ρομποτικό βραχίονα που αποτελείται από ένα ακροφύσιο το οποίο εφαρμόζει μεταλλική

σκόνη ή σύρμα και μια πηγή ενέργειας τη λιώνει με στόχο την κατασκευή του αντικειμένου. (Ambrosi & Pumera, 2016)

3.2.2.1 Απόθεση Μετάλλου Βασισμένη σε Λέιζερ (LaserBased Metal Deposition – LBMD)

Σε αυτή τη διαδικασία, γίνεται η εναπόθεση σκόνης μεταλλικού υλικού και με τη χρήση ακτίνας λέιζερ σαν πηγή θερμότητας, η πρώτη ύλη λιώνει. Η διαδικασία γίνεται σε θάλαμο, μέσα στον οποίο αποσπάτε οο μτο οξυγόνο και τροφοδοτείται από ένα αδρανές αέριο, συνήθως αργόν. Στη συνέχεια γίνεται εμπεριστατωμένη ρύθμιση των παραμέτρων της διεργασίας, όπως η ισχύς του λέιζερ, ο ρυθμός ροής της πρώτης ύλης κ.α. (Διονύσιος, 2021)

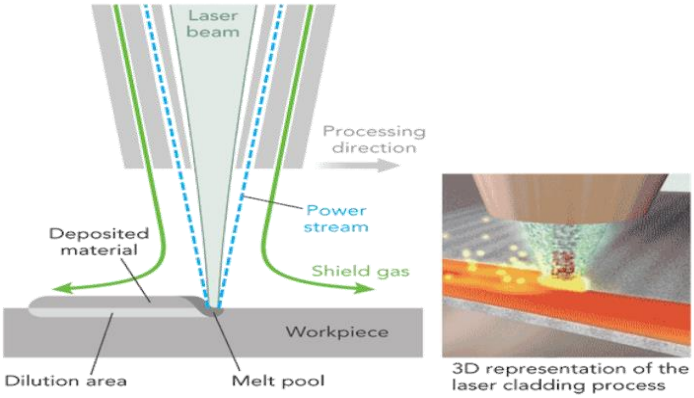


Figure 6 Διαδικασία εκτύπωσης με απόθεση μετάλλου βασισμένη σε λέιζερ

3.2.2.2 Απόθεση Μετάλλου Βασισμένη σε Δέσμη Ηλεκτρονίων (Electron Beam Based Metal Deposition)

Η τεχνολογία βασίζεται στην εναπόθεση μεταλλικού σύρματος έχοντας ως κύρια πηγή θερμότητας τη δέσμη ηλεκτρονίων. Έχοντας τον κώδικα CNC του τρισδιάστατου μοντέλου, γίνεται η εναπόθεση υλικού, από τη δέσμη ηλεκτρονίων, στρώμα προς στρώμα έως ότου το αντικείμενο φτάσει τη τελική επιθυμητή μορφή. Αποτελεί μια διαδικασία που εκτελείται, επίσης, σε θάλαμο κενού (χωρίς οξυγόνο) και έχει ως μοναδικό περιορισμό το μέγεθος του θαλάμου αυτού. Τέλος, η επιλογή του σύρματος αντί σκόνης, είναι καθώς η σκόνη είναι περισσότερο δύσκολη ως προς τη διαχείριση της. (Ambrosi & Pumera, 2016)

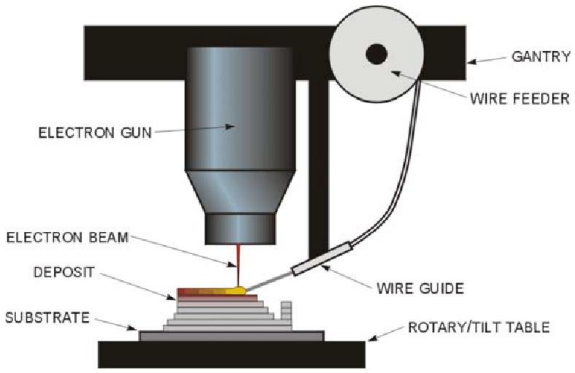


Figure 7 διαδικασία εκτύπωσης με απόθεση μετάλλου βασισμένη σε δομή ηλεκτρονίων

3.2.3 Φωτοπολυμερισμός σε Δεξαμενή (Vat Photopolymerisation)

Σύμφωνα με αυτή τη διαδικασία, χρησιμοποιούνται ως κύρια υλικά υγρά ρητίνης, τα οποία υπόκεινται σε πολυμερισμό υπό την επίδραση ακτινοβολίας, ακόμα και φωτοπολυμερή υλικά. Φωτοπολυμερισμός ορίζεται η χημική αντίδραση κατά την οποία, όταν το υγρό υλικό έρθει σε επαφή με ελεγχόμενη υπεριώδη ακτίνα UV, αντιδρά με αποτέλεσμα να πολυμερίζεται, άρα να στερεοποιείται. Η ρητίνη αποτελείται από μονομερείς αλυσίδες άνθρακα, οι οποίες ενεργοποιούνται όταν έρθουν σε επαφή με το φως και έτσι το υλικό σκληραίνει. Κάθε πολυμερή αντιδρά σε διάφορους τύπους ακτινοβολίας.

3.2.3.1 Στερεολιθογραφία (Stereolithography SLA)

Ένας εκτυπωτής SLA, αποτελείται από μια δεξαμενή, μια βάση και την ακτίνα λέιζερ. Αρχικά, η βάση βυθίζεται μέσα στη δεξαμενή, τόσο όσο το πάχος της στρώσης που επίκειται να κατασκευαστεί και μια κεφαλή λέιζερ, κινούμενη οριζόντια και κάθετα, φωτίζει τα σημεία που απαιτείται σύμφωνα με το ψηφιακό μοντέλο ώστε να παραχθεί η εκάστοτε στρώση με τη χρήση καθρεπτών (γάλβοι). Το υπόλοιπο τμήμα που δεν φωτίζεται παραμένει υγρό. Έπειτα, ένας κύλινδρος οριζοντιώνει το υγρό υλικό πάνω στο ήδη υπάρχων στερεό και επαναλαμβάνεται η διαδικασία έως ότου παραχθεί το αντικείμενο. Τέλος, το αντικείμενο τοποθετείται σε ένα ειδικό φούρνο, ώστε να αφαιρεθούν τα υπολείμματα ρευστού και να καθαριστεί και αργότερα σε φούρνο με υπεριώδης ακτίνες για την τελική του σκλήρυνση. (ΚΑΛΤΣΗ, 2017)

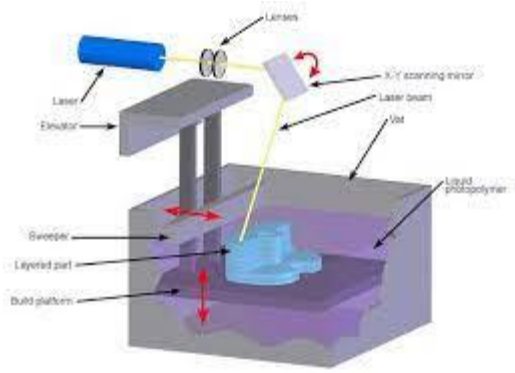


Figure 8 Διαδικασία εκτύπωσης με Στερεολιθογραφία

3.2.3.2 Συνεχές Υγρό Περιβάλλον Παραγωγής (Continuous Liquid Interface Production – CLIP)

Η διαδικασία αυτή χρησιμοποιεί ένα διαπερατό παράθυρο, όπου περιέχει οξυγόνο, και μέσα από αυτό περνάνε οι ακτίνες φωτός και φωτίζουν μέσα σε μια δεξαμενή με το φωτοπολυμεριζόμενο υλικό. Η πλατφόρμα κατασκευής ανεβαίνει συνεχώς προς τα πάνω όσο το αντικείμενο αναπτύσσεται. Ελέγχοντας τη ροή οξυγόνου από το παράθυρο, δημιουργείται μια "νεκρή ζώνη", στην οποία δεν μπορεί να συμβεί στερεοποίηση αφού αποτελεί ένα λεπτό στρώμα μεταξύ του υγρού και του στερεού τμήματος. (ΚΑΛΤΣΗ, 2017)

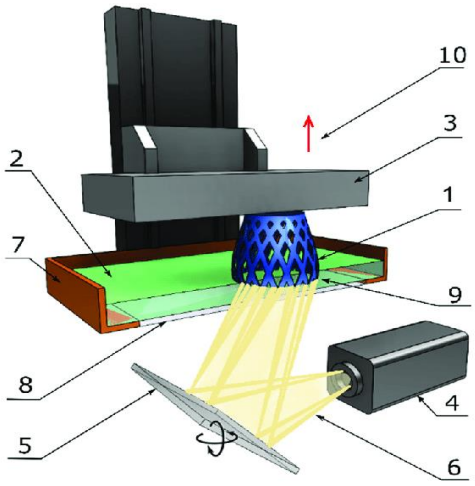


Figure 9 διαδικασία εκτύπωσης με συνέχειας υγρό περιβάλλον παραγωγής

3.2.3.3 Ψηφιακή Επεξεργασία Φωτός (Digital Light Processing- DLP)

Αποτελεί μια διαδικασία, σχεδόν ίδια με την Στερεολιθογραφία με τη διαφορά ότι στην DLP χρησιμοποιείται ψηφιακός προβολές DLP. Ο προβολές εμφανίζει όλο το ψηφιακό μοντέλο στο φωτοπολυμεριζόμενο υλικό, με αποτέλεσμα να στερεοποιείται όλο ταυτόχρονα. Επίσης η πλατφόρμα είναι βυθισμένη και ανεβαίνει σταδιακά προς τα πάνω και όσο συμβαίνει αυτό το υγρό πολυμερές εκτίθεται στο φως και η διαδικασία επαναλαμβάνεται ώσπου στερεοποιηθούν όλα τα στρώματα του αντικειμένου. Τέλος, η δεξαμενή αποστραγγίζεται και αποκαλύπτει το τελικό μοντέλο. (Ambrosi & Pumera, 2016)

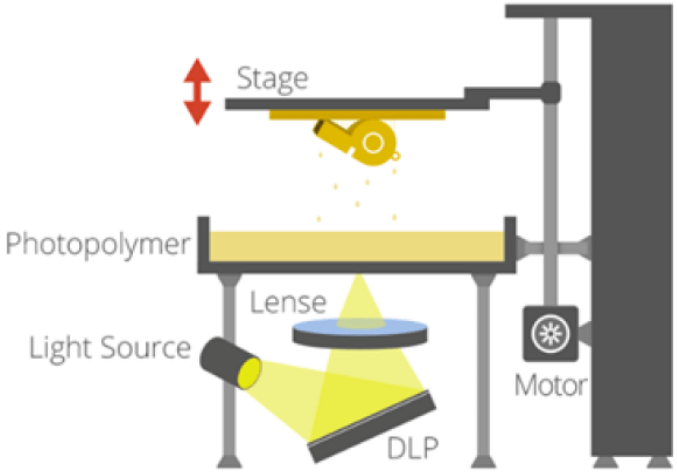


Figure 10 διαδικασία εκτύπωσης με ψηφιακή επεξεργασία φωτός

3.2.4 Εξώθηση Υλικών (Material Extrusion)

Στην Εξώθηση Υλικών, χρησιμοποιείται συνεχές υλικό είτε από θερμοπλαστικά υλικά είτε από συνθετικά, με τη μορφή νήματος. Το νήμα τοποθετείται σε θερμαινόμενο ακροφύσιο – κεφαλή εξώθησης, λιώνει, εξέρχεται σε ημι-στερεά κατάσταση και εφαρμόζεται στη πλατφόρμα κατασκευής στρώση προς στρώση, όπου και στερεοποιείται πλήρως.

3.2.4.1 Μοντελοποίηση Εναπόθεσης Τηγμένου Υλικού (Fused Deposition Modeling – FDM)

Η τεχνολογία FMD, αποτελεί την πλέον πιο διαδεδομένη τεχνολογία, αφού οι περισσότεροι εκτυπωτές που υπάρχουν στην αγορά λειτουργούν κατά αυτή τη φιλοσοφία. Αποτελούνται από τουλάχιστον μια κεφαλή εξώθησης υλικού, μια πλατφόρμα κατασκευής και βηματικούς κινητήρες οι οποίοι χρησιμοποιούνται για να μετακινήσουν τα παραπάνω. Στους εκτυπωτές αυτούς επιτρέπεται η κίνηση σε καρτεσιανές συντεταγμένες (x,y,z).

Η διαδικασία πραγματοποιείται ως εξής : Το νήμα, όπου βρίσκεται προσεκτικά τυλιγμένο σε ένα καρούλι, τοποθετείται στο ακροφύσιο και θερμαίνεται. Έπειτα, αφού η κεφαλή και η πλατφόρμα έχουν φτάσει στις επιθυμητές τιμές θερμοκρασίας με βάση το υλικό που χρησιμοποιείται, κινούνται ανάλογα ώστε να τοποθετηθούν οι στρώσεις ημι-στερεοποιημένου υλικού στη πλατφόρμα. Το υλικό ρέει με σταθερό ρυθμό από τη μύτη της κεφαλής και στερεοποιείται αμέσως μόλις έρθει σε επαφή με την εξωτερική θερμοκρασία. Η πλατφόρμα κατεβαίνει όσο και το πάχος κάθε στρώσης για την εναπόθεση της επόμενης έως ότου ολοκληρωθεί η διαδικασία.

Βασικό πλεονέκτημα της τεχνολογίας FDM, αποτελεί το εύρος υλικών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Τα πιο δημοφιλή υλικά είναι τα θερμοπλαστικά (ακρυλονιτρίλιο βουταδιένιο στυρόλιο, πολυγαλακτικό οξύ, πολυστυρόλιο υψηλής πρόσκρουσης, το θερμοπλαστικό πολυουρεθάνιο, το αλειφατικό PolyAmides/Nylon) ακόμα και υλικά όπως κεραμικά, σκυρόδεμα και σοκολάτα. (Ambrosi & Pumera, 2016)

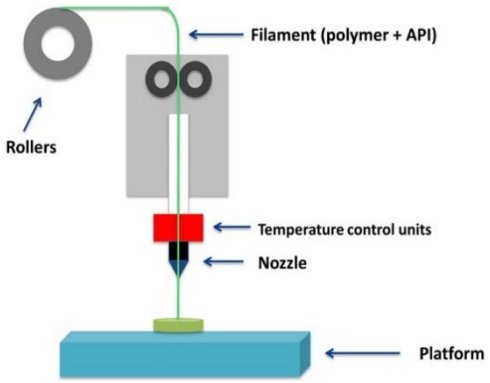


Figure 11 διαδικασία εκτύπωσης με μοντελοποίηση εναπόθεσης τηγμένου υλικού

3.2.4.2 Κατευθυνόμενη Γραφή Μελανιού (Direct Ink Writing -DIW), Βιοεξώθηση (Bioextrusion)

Είναι μια μέθοδος η οποία προϋποθέτει το υλικό να είναι σε ρευστή μορφή και να μπορεί να στερεοποιηθεί γρήγορα. Για τη στερεοποίηση, υπάρχουν δύο τρόποι : είτε με θερμική παρεμβολή, όπως τη τεχνική FDM, είτε με χημική διεργασία, δηλαδή το ρευστό υλικό να υπόκεινται σε σκλήρυνση ή ξήρανση. Λόγω του ότι, το ρευστό μπορεί να διατηρήσει το σχήμα του μετά την εξώθηση, η σκλήρυνση και η ξήρανση μπορούν να αποτρέψουν το υλικό να είναι μαλακό ή εύθραυστο.

Η διαδικασία αυτή είναι γνωστή καθώς χρησιμοποιείται για βιοεκτυπώσεις για τη δημιουργία ικριωμάτων βιοδιασπώμενων, ώστε να φιλοξενούν ζωικά κύτταρα, με σκοπό τη δημιουργία ιστών. Χρησιμοποιούνται πολυμερές υλικά, υπό τη μορφή πάστας (υδρογέλες) αδιάλυτα στο νερό αλλά με την ικανότητα διάσπασης σε αυτό.

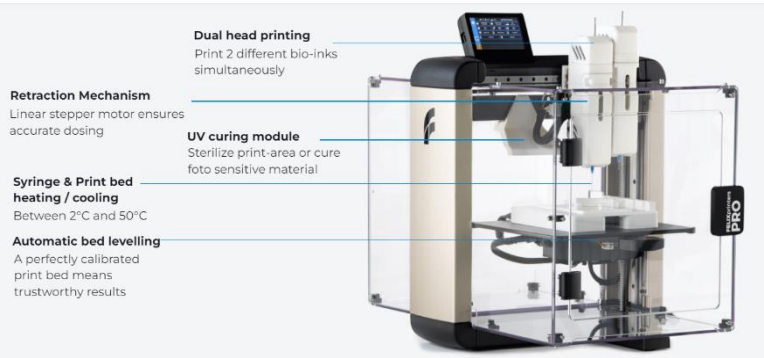


Figure 12 Felix Bioprinter

3.2.5 Υλικά με Πίεση Ακροφυσίου (Material Jetting)

Στη τεχνολογία αυτή, οι κεφαλές εξώθησης εναποθέτουν φωτοαντιδραστικό υλικό σε υγρή ή ρευστή κατάσταση πάνω στη πλατφόρμα κατασκευής για τη δημιουργία του στρώματος, το οποίο άμεσα εκτίθεται σε ακτίνες UV για την στερεοποίηση του. Μετά τη πρώτη στρώση η πλατφόρμα κατεβαίνει και επαναλαμβάνεται η διαδικασία έως ότου δημιουργηθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα. Ταυτόχρονα με την εναπόθεση υλικού, ψεκάζεται και ένα υλικό υποστήριξης, ώστε να επιτευχθεί η υψηλή ακρίβεια σε πολύπλοκες λεπτομέρειες. Τα εκτυπωμένα αντικείμενα, δεν χρειάζονται μετα-επεξεργασία, ενώ υπάρχει η δυνατότητα το ίδιο αντικείμενο να κατασκευαστεί ταυτόχρονα με διαφορετικά υλικά για διαφορετικές ιδιότητες. Αποτελεί μια διαδικασία η οποία προσφέρει πληθώρα μηχανικών ιδιοτήτων στα παραγμένα αντικείμενα όπως ανθεκτικότητα, ακρίβεια, λείες επιφάνειες, αντοχή σε θλίψη, εφελκυσμό και θερμική αντίδραση, ελαστικότητα, αγωγιμότητα κ.α.(Guo & Leu, 2013)

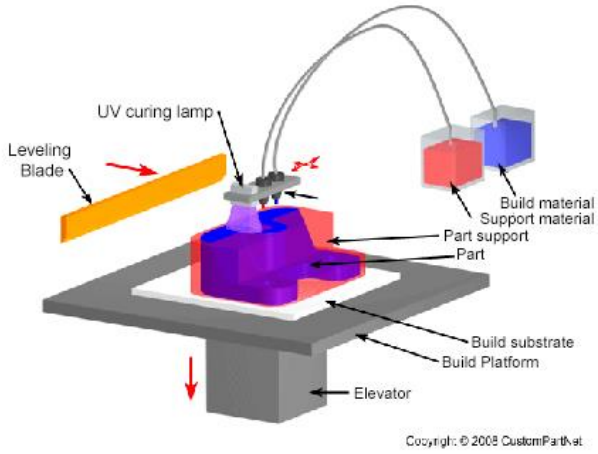


Figure 13 Διαδικασία εκτύπωσης με Matterial Jetting

3.2.5.1 Νανοσωματίδια με Πίεση Ακροφυσίου (NanoParticle Jetting – NPJ)

Στη διαδικασία NJP, τα υλικά που χρησιμοποιούνται είναι μεταλλικά ή κεραμικά νανοσωματίδια, τα οποία περιβάλλονται από ελαιώδες υγρό και δημιουργούν σταγονίδια. Τα σταγονίδια ψεκάζονται και παράγουν ένα πολύ λεπτό στρώμα όπως και το υλικό υποστήριξης, το οποίο αφαιρείται πολύ εύκολα με πίεση από νερό. Το υλικό κατασκευής και το υλικό υποστήριξης, αιωρούνται σε ένα υγρό, που βρίσκεται στη πλατφόρμα κατασκευής και εξατμίζεται λόγω της υψηλής θερμοκρασίας που αποκτά η πλατφόρμα (300°C) και τα σταγονίδια δένουν μεταξύ τους, χωρίς να δημιουργούνται πορώδες επιφάνειες. Με αυτό το τρόπο παραμένει μόνο το επιθυμητό αντικείμενο, που αργότερα μπαίνει σε μια διαδικασία πυροσυσσωμάτωσης σε κλίβανο, για την εξασφάλιση ομοιομορφίας σε όλο το αντικείμενο.

Κι άλλες διαδικασίες όπως η Εκτόξευση Φωτοπολυμερούς (Photopolymer Jetting - PJ) και η Εκτύπωση με Φυσαλίδες (Drop On Demand - DOD), λειτουργούν με τις ίδιες βασικές αρχές εκτύπωσης. (Διονύσιος, 2021)

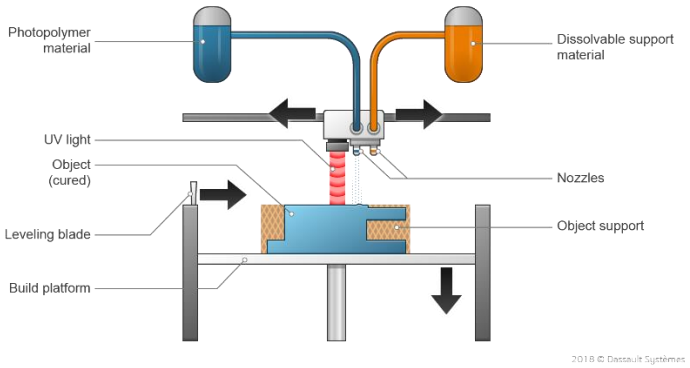


Figure 14 Διαδικασία εκτύπωσης με MJ, NPJ, DOD

3.2.6 Σύντηξη Στρώματος Σκόνης (Powder Bed Fusion)

Σε αυτή τη διαδικασία γίνεται η χρήση λέιζερ ή δέσμης ηλεκτρονίων για την ένωση μικρών σωματιδίων σκόνης από μέταλλο, κεραμικό ή γυαλί ώστε να γίνει η στερεοποίηση τους και να δημιουργηθεί η κάθε στρώση σύμφωνα με το ψηφιακό μοντέλο. Όλες οι διαδικασίες λειτουργούν με παρόμοιο τρόπο, έχουν δηλαδή μία ή περισσότερες θερμικές πηγές, έλεγχο για τη συγκεκριμένη σύντηξη σκόνης σε κάθε στρώση και μηχανισμούς για τη προσθήκη και την εξομάλυνση της.

3.2.6.1 Επιλεκτική Σύντηξη με την Χρήση Ακτινών Λέιζερ (Selective Laser Sintering` – SLS)

Ένας κύλινδρος εφαρμόζει την εκάστοτε σκόνη, κατάλληλου πάχους (0,075-0,1mm), στη πλατφόρμα κατασκευής και έπειτα η κεφαλή λέιζερ σαρώνει και σχηματίζει τη πρώτη διατομή του αντικειμένου, στερεοποιώντας επιλεκτικά τη σκόνη. Στη συνέχεια η πλατφόρμα κατέρχεται όσο το πάχος της επόμενης στρώσης, όπου και εφαρμόζεται εκ νέου σκόνη και επαναλαμβάνεται η ίδια διαδικασία μέχρι την ολοκλήρωση του αντικειμένου. Η διαδικασία πραγματοποιείται σε αδρανή ατμόσφαιρα.

Τα μηχανήματα αυτά αποτελούνται από τον θάλαμο κατασκευής, τον υπολογιστή ελέγχου και τον έλεγχο ατμόσφαιρας. Ο θάλαμος κατασκευής εμπεριέχει το λέιζερ, που εστιάζεται με οπτικά και σαρώνει την επιφάνεια της σκόνης με καθρέπτες, και το σύστημα διαχείρισης σκόνης. Ο υπολογιστής ελέγχου, παρακολουθεί τη διαδικασία της εκτύπωσης και ο έλεγχος της ατμόσφαιρα περιλαμβάνει όργανα φιλτραρίσματος του αέρα μέσα στο θάλαμο. Βασική του αποστολή είναι να κρατάει τις θερμοκρασίες του αέρα του θαλάμου σταθερές και η έλεγχος της ποσότητας αζώτου. (ΚΑΛΤΣΗ, 2017)

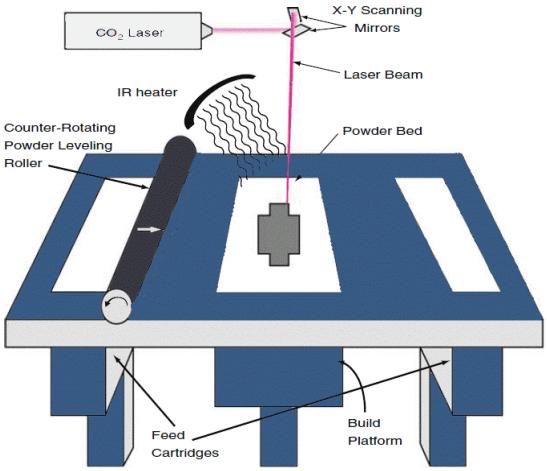


Figure 15 Διαδικασία εκτύπωσης με SLS

3.2.6.2 Λιώσιμο με Δέσμη Ηλεκτρονίων (Electron Beam Melting – EBM)

Η διαδικασία δεν διαφέρει πολύ από τις υπόλοιπες. Μοναδική διαφορά αποτελεί ότι χρησιμοποιείται δέσμη ηλεκτρονίων για τη σύντηξη της σκόνης για τη δημιουργία μάζας. Η κινητική ενέργεια των ηλεκτρονίων μετατρέπεται σε θερμική και με αυτό το τρόπο λιώνει και στερεοποιεί τα σωματίδια σκόνης για κάθε στρώση. Τα ηλεκτρόνια εκπέμπονται από ένα θερμαινόμενο νήμα βολφραμίου με υψηλή ταχύτητα και ρυθμίζονται από δύο μαγνητικά πεδία (πηνίο εστίασης και πηνίο εκτροπής). Το ένα λειτουργεί σαν μαγνητικός φακός, εστιάζοντας τη δέσμη στη διάμετρο και το άλλο εκτρέπει τη δέσμη στο σημείο σάρωσης του κάθε στρώματος σκόνης. Η σκόνη περνάει από δύο φάσεις : τη προθέρμανση και τη τήξη. Αποτελεί μια διαδικασία χαμηλού κόστους και πολύ αποδοτική.

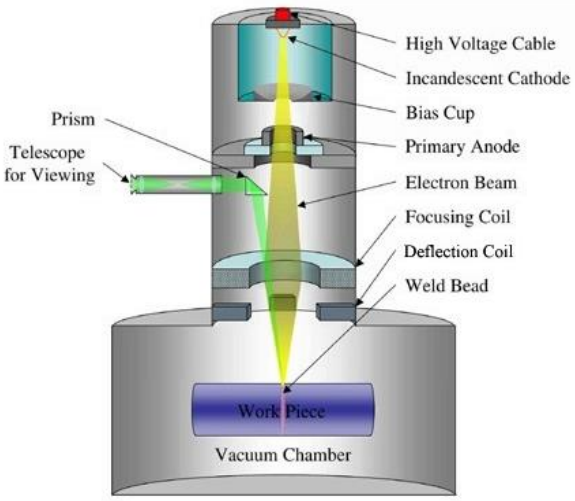


Figure 16 Διαδικασία εκτύπωσης με EBM

3.2.6.3 Άμεση Μεταλλική Σύντηξη με Λέιζερ (Direct Metal Laser Sintering – DMLS)

Η διαδικασία DMLS, δεν διαφέρει πολύ από τις δύο παραπάνω, αφού ακολουθεί τις ίδιες βασικές αρχές: 3D ψηφιακό μοντέλο και χάραξη διατομής πάνω σε σκόνη στρώμα προς στρώμα. Η διαφορά είναι πως τα υλικά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν είναι κράματα μετάλλου, καθαρά μέταλλα, μείγματα υλικών (πχ αλουμίνιο και νάιλον), κράματα αλουμινίου, ανοξείδωτου χάλυβα και μη, χαλκού, κοβάλτιου-χρωμίου, τιτανίου κ.α.

Στην DMLS, εφαρμόζεται το στρώμα μεταλλικής σκόνης στη πλατφόρμα κατασκευής και στη συνέχεια οι θερμαντήρες φέρνουν τη σκόνη περίπου στο σημείο τήξη της. Έπειτα με τη βοήθεια του λέιζερ υψηλής ισχύος, σαρώνεται η επιφάνεια σκόνης, διαγράφεται το επιθυμητό σχήμα και οι κόκκοι μετάλλου συσσωματώνονται. Στη συνέχεια η πλατφόρμα κατασκευής κατεβαίνει για τη δημιουργία του επόμενου στρώματος. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται για κάθε στρώση μέχρι να κατασκευαστεί το τελικό αντικείμενο. Μετά το τέλος της εκτύπωσης, το μεταλλικό αντικείμενο μένει να κρυώσει και απομακρύνονται οι περιττές σκόνες και τα υποστηρίγματα.(ΚΑΛΤΣΗ, 2017)

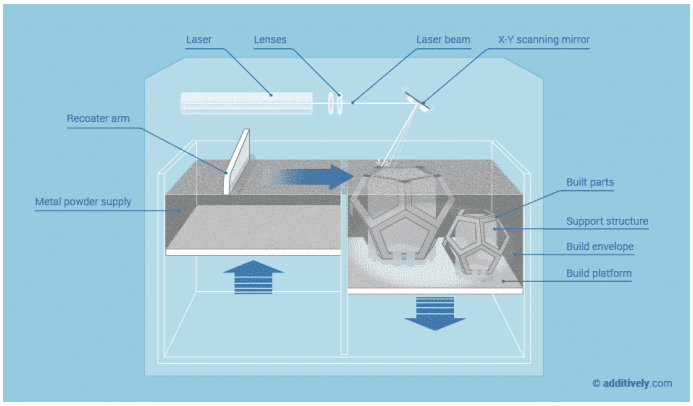


Figure 17 Διαδικασία εκτύπωσης με DMLS

3.2.7 Συγκόλληση Φύλλων (Sheet Lamination)

Η μέθοδος βασίζεται στη συγκόλληση φύλλων υλικού από μέταλλο, χαρτί ή και πολυμερή, τα οποία τοποθετούνται το ένα πάνω στο άλλο και συγκολλούνται μεταξύ τους είτε με κάποια συγκολλητική ουσία είτε με ηλεκτρική διαδικασία. Για τη δημιουργία του τελικού αντικειμένου, χρειάζεται η κοπή των εξωτερικών περιγραμμάτων των φύλλων. Υπάρχουν δύο τρόποι : το κάθε φύλλο κόβεται πριν γίνει η συγκόλληση και στη συνέχεια στοιβάζεται ή τα φύλλα στοιβάζονται πρώτα και στη συνέχεια κόβονται το επιθυμητό περίγραμμα.

Οι μέθοδοι χωρίζονται ανάλογα τη συγκόλληση των φύλλων που χρησιμοποιείται σε: α) συγκόλληση ή κόλληση, β) θερμική σύνδεση, γ) σύσφιξη, και (δ) συγκόλληση με υπερήχους. (Διονύσιος, 2021)

3.2.7.1 Συγκόλληση ή Κόλληση (Gluing or Adhesive Bonding)

3.2.7.1.1 Παραγωγή Αντικειμένων με Συγκόλληση (Laminated Object Manufacturing – LOM)

Το πρώτο υλικό που χρησιμοποιήθηκε για την τεχνολογία LOM, ήταν φύλλο χαρτιού. Υπάρχουν δύο ρολά, από τα οποία το ένα προμηθεύει υλικό τη μηχανή και το άλλο μαζεύει. Η διαδικασία αρχίζει να εκτελείται όταν η διάταξη τροφοδοσίας υλικού τοποθετεί το πρώτο φύλλο χαρτιού, με επίστρωση συγκολλητικής ουσίας, πάνω στη πλατφόρμα κατασκευής και ένας θερμαινόμενος κύλινδρος περνάει πάνω από το φύλλο, πιέζοντας το, για να το προσκολληθεί στην επιφάνεια. Στη συνέχεια, μια κεφαλή λέιζερ CO2 ή μια λεπίδα, κόβει το φύλλο στο επιθυμητό σχέδιο. Αφού ολοκληρωθεί η κοπή του πρώτου στρώματος, η βάση κατέρχεται για να επιτευχθεί η τοποθέτηση του επόμενου φύλλου. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου ολοκληρωθεί το αντικείμενο.

Υπάρχουν πολλές περιπτώσεις στις οποίες απαιτείται η χρήση βερνικιού ή χρώματος για την επικάλυψη του τελικού προϊόντος, για να αποφευχθεί η παραμόρφωση του από την υγρασία.

Πλέον, εκτός από χαρτί μπορούν να χρησιμοποιηθούν κι άλλα υλικά όπως αδιάβροχο χαρτί, πλαστικό, λεπτές στρώσεις κεραμικών ή μετάλλων.

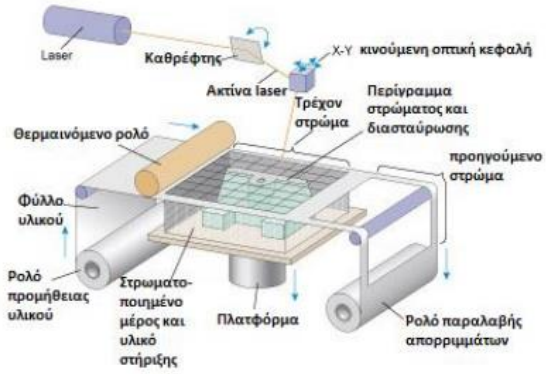


Figure 18 Laminated Object Manufacturing – LOM

3.2.7.1.2 Επιλεκτική Συγκόλληση Εναπόθεσης (Selective Deposition Lamination – SDL)

Η διαδικασία αυτή βασίζεται στην εφαρμογή συγκολλητικής ουσίας υψηλής πυκνότητας επιλεκτικά στις περιοχές που θα συγκολληθούν, σύμφωνα με το τρισδιάστατο ψηφιακό μοντέλο και λιγότερης πυκνότητας συγκολλητικής ουσίας στη γύρω περιοχή (υπόστρωμα). Έτσι, είναι πιο εύκολη η ανασκαφή του κομματιού από το χαρτί υποστήριξης. Επιπλέον, η κόλλα δεν εφαρμόζεται σε ολόκληρο το φύλλο αλλά εφαρμόζεται μετά τη κοπή της επιθυμητής διατομής. (Διονύσιος, 2021)

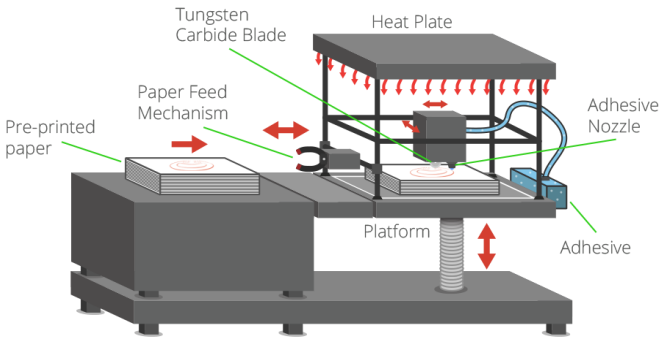


Figure 19 Διαδικασία εκτύπωσης με SDL

3.2.7.2 Θερμική Σύνδεση (Thermal Bonding)

Η τεχνική αυτή ασχολείται με τη συγκόλληση μεταλλικών φύλλων. Κόβονται φύλλα μετάλλου, με τη χρήση λέιζερ, συναρμολογούνται μεταξύ τους με μηχανισμούς σύνδεσης και τελικά γίνεται χρήση θέρμανσης σε όλο το δοκίμιο. Ακόμα, εφαρμόζεται μια προσέγγιση κατά την οποία, σε φύλλα χάλυβα προσδένεται στην πάνω και κάτω πλευρά τους κράμα υλικού με χαμηλό σημείο τήξης. Αυτό βοηθάει στο σχηματισμό σύνθετων μεταλλικών αντικειμένων.

3.2.7.3 Προσθετική Μέθοδος Παραγωγής με Υπερήχους (Ultrasonic Additive Manufacturing – UAM)

Είναι μια υβριδική διαδικασία που βασίζεται στη μεταλλική συγκόλληση με υπερήχους. Το αντικείμενο κατασκευάζεται πάνω σε μια βάση, η οποία βρίσκεται προσδεμένη πάνω σε μία άλλη θερμαινόμενη βάση, σε θερμοκρασίες δωματίου έως και 200°C. Τα μεταλλικά φύλλα ξετυλίγονται από ένα περιστρεφόμενο ρόλο που ταλαντεύεται σταθερά (20Hz). Ύστερα τοποθετείται το ένα δίπλα στο άλλο, για τη δημιουργία του κάθε στρώματος. Στη συνέχεια η εργαλειομηχανή κοπής CNC διαγράφει το περίγραμμα των στρωμάτων και η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να δημιουργηθεί το τελικό μοντέλο.

Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα της είναι ότι μπορεί να εκτυπώσει περίπλοκα αντικείμενα και αντικείμενα με αισθητήρες, οπτικές ίνες κ.α. (ΚΑΛΤΣΗ, 2017), (Διονύσιος, 2021), (Prakash et al., 2018), (Guo & Leu, 2013).

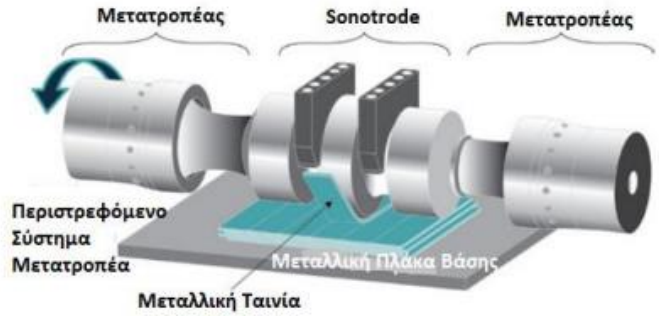


Figure 20 Διαδικασία εκτύπωσης με UAM

3.3 Τρισδιάστατη σχεδίαση -3D Design

Τρισδιάστατη σχεδίαση είναι η διαδικασία κατά την οποία σχεδιάζεται ένα μαθηματικό μοντέλο, που απεικονίζει ένα τρισδιάστατο αντικείμενο ή σχήμα, με τη χρήση κατάλληλου λογισμικού. Τα παραγόμενα αντικείμενα ονομάζονται τρισδιάστατα μοντέλα και απεικονίζονται ως εικόνες τρισδιάστατης φωτοσκίασης (3D rendering) και αργότερα οδηγούνται στην εκτύπωση τους μέσω 3D εκτυπωτών. Ούτως ώστε η εικονική ψηφιακή περιγραφή ενός μοντέλου να καταλήξει σε φυσικό εκτυπωμένο προϊόν, όλες οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται ακολουθούν κάποια βασικά βήματα. (Τράντζας, 2016)

3.3.1 Δημιουργία ψηφιακού μοντέλου CAD

Πρώτο βήμα αποτελεί η δημιουργία του ψηφιακού μοντέλου. Είναι μια διαδικασία η οποία εκτελείται σε λογισμικά σχεδίασης στερεών αντικειμένων, όπου δημιουργείται ένα παραμετροποιήσιμο μοντέλο. Στα λογισμικά αυτά, υπάρχει είτε η δυνατότητα χρήσης ενός ήδη υπάρχον μοντέλου και η επεξεργασία του είτε η δημιουργία νέου. Ακόμα, χρησιμοποιείται η τρισδιάστατη σάρωση (3D Scanning), κατά την οποία γίνεται η ψηφιακή σάρωση ενός φυσικού αντικειμένου και δημιουργείται έτσι το τρισδιάστατο μοντέλο του. Αυτή η διαδικασία ανήκει στην κατηγορία αντίστροφης σχεδίασης. (ΚΑΛΤΣΗ, 2017)

3.3.1.1 Υπολογιστικά προγράμματα (Computer Aided Design, CAD)

Η διαδικασία σχεδίασης με τη βοήθεια σχεδιαστικών λογισμικών απαιτεί υπολογιστή. Επομένως, γίνεται χρήση ψηφιακού περιβάλλοντος, με σκοπό την ανάλυση, επεξεργασία, και δημιουργία ενός τρισδιάστατου μοντέλου. Μέσω αυτού, οι σχεδιαστές έχουν τη δυνατότητα να καθορίσουν τη γεωμετρία οποιουδήποτε σχεδίου, κάτι που αποτελεί βασικό στοιχείο για την δημιουργία του. Όλα τα προγράμματα που μπορούν να τα υποστηρίξουν από υπολογιστές είναι ταξινομημένα στην κατηγορία CAD. (Τράντζας, 2016)

3.3.1.2 Βιβλιοθήκες 3D μοντέλων (3D Model Repositories)

Η δημιουργία των ψηφιακών μοντέλων, μέσω της σχεδίασης από υπολογιστή, μπορεί να αρχειοθετηθεί και να χρησιμοποιηθεί ως πρότυπο για διάφορες λειτουργίες. Στο διαδίκτυο υπάρχουν ηλεκτρονικά αποθετήρια με πληθώρα τρισδιάστατων σχεδίων, τα οποία έχουν δημιουργηθεί από σχεδιαστές και είτε είναι προσβάσιμα επί πληρωμή είτε δωρεάν. Δίνεται η δυνατότητα στους υπόλοιπους χρήστες να τα χρησιμοποιήσουν ως έχουν, να τα επεξεργαστούν και να επιβάλλουν αλλαγές χωρίς να επηρεάζουν το πρότυπο σχέδιο ή και να πάρουν έμπνευση από αυτά. Πλέον δεν χρειάζεται κάποιος να δημιουργεί ένα σχέδιο στο τρισδιάστατο χώρο, όταν υπάρχει ήδη, πράγμα που αποσκοπεί στην αύξηση παραγωγικού χρόνου.

3.3.1.3 Τρισδιάστατη σάρωση (3D Scanning)

Η τρισδιάστατη σάρωση είναι μια διαδικασία η οποία σαρώνει ένα φυσικό μοντέλο και το μετατρέπει σε τρισδιάστατο ψηφιακό. Καθιστά τη διαδικασία της μοντελοποίησης πολύ πιο εύκολη, ειδικότερα αν το αντικείμενο που πρόκειται να σχεδιαστεί είναι περίπλοκο και δεν υπάρχουν διαθέσιμα κατασκευαστικά σχέδια. Συνήθως, μετά τη χρήση τρισδιάστατων σαρωτών, απαιτείται και η βελτιστοποίηση – επεξεργασία των σαρωμένων ψηφιακών μοντέλων. Με την εξέλιξη της τεχνολογίας όμως, έχουν κατασκευαστεί σαρωτές υψηλής ανάλυσης για μικρά και μεγάλα αντικείμενα, ώστε να μην είναι απαραίτητη η επέμβαση των σχεδιαστών στα τελικά σαρωμένα μοντέλα.

Για την τρισδιάστατη σάρωση χρησιμοποιούνται τρείς βασικές τεχνικές: (Oliver Wulf, 2003), (ΚΑΛΤΣΗ, 2017)

1. Φωτογραμμετρία (photogrammetry):

Η τεχνική εκτελείται με τη χρήση φωτογραφικής μηχανής. Η σάρωση γίνεται μετακινώντας τη κάμερα γύρω από το εκάστοτε αντικείμενο, κάνοντας συνεχόμενες λήψεις φωτογραφιών. Το πρόγραμμα, με βάση τα δεδομένα, παρουσιάζει ένα 3D πλέγμα και ένα UV χάρτη με τα δεδομένα των χρωμάτων. Είναι κατάλληλη για ανθρώπους και αγάλματα κι όχι τόσο για αντικείμενα με γυαλιστερή ή διάφανη επιφάνεια.

2. Περιστροφική πλάκα σάρωσης (Turn table Scanning):

Σε αυτή τη διαδικασία γίνεται η χρήση περιστροφικής πλάκας, δέσμης λέιζερ και κάμερας. Το εκάστοτε αντικείμενο τοποθετείται στη πλάκα και καθώς περιστρέφεται το λέιζερ προβάλει μια γραμμή πάνω του. Η κάμερα καταγράφει την απεικόνιση της γραμμής σε κάθε σημείο του αντικειμένου και το πρόγραμμα μετατρέπει τη πληροφορία σε μια μάζα σημείων και δημιουργεί ένα 3D πλέγμα από την ένωση τους.



Figure 21 Διαδικασία σάρωσης με περιστροφική πλατφόρμα

3. Μηχανές σάρωσης:

Η αρχή λειτουργίας είναι όμοια με εκείνη της φωτογραμμετρίας, η μόνη διαφορά είναι ότι γίνεται η χρήση υπέρυθρου φωτισμού. Η μηχανή, έχοντας ενσωματωμένη κάμερα, μετακινείται από τον χειριστή γύρω από το αντικείμενο και παρουσιάζει το τρισδιάστατο πλέγμα και τα δεδομένα χρώματος. Είναι κατάλληλη για τη καταγραφή βάθους σε μεγάλα αντικείμενα.

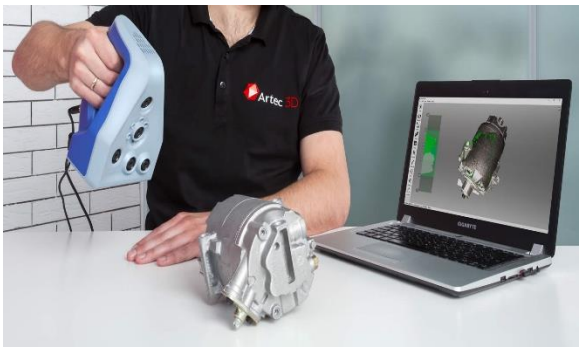


Figure 22 Διαδικασία σάρωσης με συσκευή

3.3.2 Μετατροπή μοντέλου CAD σε αρχείο εξαγωγής

Δεύτερο βήμα αποτελεί η μετατροπή του τρισδιάστατου ψηφιακού αρχείου σε αρχείο κατάλληλο, ώστε να μπορεί να αναγνωριστεί από τον τρισδιάστατο εκτυπωτή. Έχει οριστεί ως “standard” αρχείο εξαγωγής το αρχείο STL (Stereolithography), που μπορούν όλοι οι εκτυπωτές να το αναγνωρίσουν και σχεδόν όλα τα προγράμματα CAD έχουν τη δυνατότητα να εξάγουν αρχεία τέτοια μορφής.

3.3.2.1 Αρχείο εξαγωγής STL

Συγκεκριμένα ένα αρχείο STL είναι μια απλή, φορητή μορφή που χρησιμοποιείται από συστήματα σχεδίασης με τη βοήθεια υπολογιστή (CAD) για τον καθορισμό της συμπαγούς γεωμετρίας για τρισδιάστατα εκτυπώσιμα μέρη. Αυτού του είδους αρχεία, παρέχουν τις πληροφορίες εισόδου για τρισδιάστατη εκτύπωση μοντελοποιώντας τις επιφάνειες του αντικειμένου ως τρίγωνα, που μοιράζονται άκρες και κορυφές με άλλα γειτονικά τρίγωνα για την πλατφόρμα κατασκευής.

Η ανάλυση του αρχείου STL επηρεάζει την ποιότητα των εξαρτημάτων που εκτυπώνονται 3D - εάν η ανάλυση του αρχείου είναι πολύ υψηλή, το τρίγωνο μπορεί να επικαλύπτεται, εάν είναι πολύ χαμηλή, το μοντέλο θα έχει κενά, καθιστώντας το μη εκτυπώσιμο.(Τράντζας, 2016)

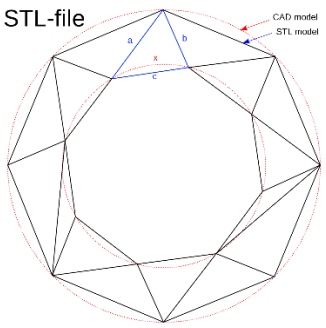


Figure 23 Αναπαράσταση αρχείου STL

Υπάρχουν επτά παράμετροι, οι οποίοι αν επεξεργαστούν επηρεάζεται και η ανάλυση του αρχείου. Οι παράμετροι είναι:

1. Angle, Deviation, and Chord Height
2. Surfaces
3. Wall Thickness
4. Inversed Normals
5. Multiple Shells or Nested Parts
6. Edges
7. Tabbed Areas

Εφόσον χρησιμοποιούνται στοιχειώδη επίπεδα, καθίσταται δυσκολότερη η διαδικασία αναπαράστασης καμπύλων επιφανειών. Όσο περισσότερη πολυπλοκότητα έχει ένα μοντέλο, τόσα περισσότερα τρίγωνα δημιουργούνται από το αρχείο STL, επομένως τα αρχεία από μόνα τους έχουν μεγάλο μέγεθος. Έτσι, πρέπει να υπάρχει μια εξισορρόπηση ανάμεσα στην ευχρηστία και την ακρίβεια, από τους σχεδιαστές.

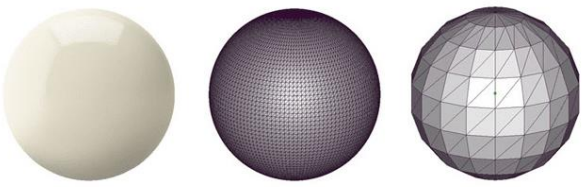


Figure 24 Υψηλή και χαμηλή ανάλυση σε STL αρχεία

Αξίζει να σημειωθεί πως σε κάθε σχεδιαστικό πρόγραμμα χρησιμοποιούνται πρότυπα αρχεία εξαγωγής. Χρησιμοποιούνται αρχεία .obj, 3MF, .amf, .ply, vrml, wrl, .3ds, .igs, .model, .mxp, .wrl, .3dm, .fbx, .zip, .rar, .7s, .skp, .dae, .mgx, .matAMX, .ndo, .asc, .cli, .slc, .cls, .f&s, .ssl, .sli, .jt, .prj, .sat, .CATPart, .CATProduct, .dxf, .zcp, .prt, .asm, .gts, .x3d8, Compressed Mesh, Wave front OB, .zpr, Slice, XYZ format (.3w) κ.α. Τα αρχεία 3MF και .amf μεταφέρουν πληροφορίες για τη θέση του τεμαχίου στον 3D εκτυπωτή, το υλικό, και την ποσότητα υλικού που θα χρειαστεί. (ΚΑΛΤΣΗ, 2017)

3.3.3 Μεταφορά αρχείου εξαγωγής στον εκτυπωτή

Τρίτο βήμα αποτελεί η εισαγωγή του αρχείου εξαγωγής στον τρισδιάστατο εκτυπωτή. Για αυτό το βήμα, είναι απαραίτητη η χρήση κάποιου προγράμματος που να μπορεί να διαβάσει το αρχείο Stereolithography (STL) και να προετοιμάσει τη διαδικασία εκτύπωσης. Το πρόγραμμα διαβάζει τα δεδομένα του τεμαχίου που πρόκειται να κατασκευαστεί και το διαχωρίζει σε μικρές στρώσεις, που έχουν πάχος ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του εκτυπωτή, και τη τεχνική εκτύπωσης, καθώς και την εναπόθεση της μίας επάνω στην άλλη. Στην περίπτωση που το τεμάχιο έχει εσωτερικές εσοχές, προβόλους κτλ., το πρόγραμμα μπορεί να δημιουργήσει βοηθητικές στρώσεις από υλικό, ώστε να λειτουργήσουν ως υποστήριξη και είναι πολύ εύκολες στην αφαίρεση τους.

Μέσω των προγραμμάτων, υπάρχει η δυνατότητα ορισμού των παραμέτρων. Σημαντικό ρόλο έχει ο προσανατολισμός του τεμαχίου πάνω στη πλατφόρμα κατασκευής του εκτυπωτή, αφού ο τρόπος με τον οποίο θα τοποθετηθεί μπορεί να επηρεάσει τη διάρκεια της εκτύπωσης, τη στιβαρότητα του τελικού αποτελέσματος, ακόμα και την ποσότητα του υλικού. Από τους περισσότερους σχεδιαστές προτιμάται η διάσταση z (κατακόρυφη) να είναι και η μικρότερη διάσταση του τεμαχίου, με σκοπό να μειωθεί ο αριθμός των στρώσεων άρα και ο χρόνος κατασκευής. (ΚΑΛΤΣΗ, 2017)



Figure 25 Διαδικασία slicing

3.3.4 Εκτύπωση Αντικειμένου

Τέταρτο στάδιο αποτελεί η τελική εκτύπωση του αντικειμένου. Αρχικά, προετοιμάζεται ο εκτυπωτής, με την τοποθέτηση του επιθυμητού υλικού και στη συνέχεια με τη βοήθεια του προαναφερόμενου προγράμματος (slicing) γίνεται η λήψη ενός κώδικα G, τον οποίο διαβάζει ο εκτυπωτής και ακολουθεί πιστά. Ο κώδικας G περιλαμβάνει κωδικοποιημένες εντολές για τις κινήσεις της κεφαλής εξώθησης υλικού, τις κινήσεις της πλατφόρμας κατασκευής, τις κατάλληλες θερμοκρασίες εκτύπωσης, κ.α.

3.3.5 Μετα-επεξεργασία αντικειμένου

Πέμπτο και τελευταίο στάδιο αποτελεί η επεξεργασία του αντικειμένου, μετά την ολοκλήρωση της εκτύπωσης του. Πρώτα, απομακρύνεται από τη πλατφόρμα κατασκευής, γίνεται η αφαίρεση τυχόν στηριγμάτων, με πίεση αέρα, νερού ή με το χέρι, και ένας καθαρισμός από υπολείμματα υλικού. Κάποιες τεχνικές που χρησιμοποιούν φωτοευαίσθητα υλικά, το παραγόμενο προϊόν χρειάζεται μια επιπλέον διαδικασία κατά την οποία σκληραίνει.



Figure 26 Διαδικασία τρισδιάστατης εκτύπωσης (3D Printing)

3.4. ΣΧΕΔΙΑΣΤΙΚΑ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΑ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΑ (CAD/CAM/CAE)

Τα σχεδιαστικά και υπολογιστικά προγράμματα CAD,CAM και CAE, είναι τα εργαλεία τα οποία χρησιμοποιούν οι μηχανικοί, για τον σχεδιασμό και τους μηχανικούς υπολογισμούς ενός τεμαχίου. Κάθε εργαλείο χρησιμοποιείται για διαφορετική εφαρμογή. Πλέον, υπάρχουν λογισμικά σχεδίασης με ενσωματωμένα λογισμικά CAD, CAM, CAE. Αυτό εξυπηρετεί στην διευκόλυνση σχεδίασης και ανάπτυξης ενός προϊόντος.

3.4.1 Τρισδιάστατη σχεδίαση στον υπολογιστή (Computer Aided Design-CAD)

Για τη σχεδίαση με τη βοήθεια υπολογιστή, απαιτείται η χρήση λογισμικών σχεδίασης. Όλα τα λογισμικά σχεδίασης προσφέρουν ένα περιβάλλον με επιλογές και εντολές στο χώρο σχεδίασης για να καθίσταται δυνατή η δημιουργία τρισδιάστατων μοντέλων. Οι κινήσεις του χειριστή μετατρέπονται σε μαθηματικά μοντέλα πινάκων, γίνεται η επεξεργασία τους με τους κατάλληλους υπολογισμούς και τελικά μεταφράζονται γραφικά.

Η μοντελοποίηση αντικειμένων στον υπολογιστή κατηγοριοποιείται σε δύο βασικές κατηγορίες:

1. Στερεά γεωμετρική μοντελοποίηση (Solid Design):

Στο solid design, το λογισμικό αναγνωρίζει τα γεωμετρικά μοντέλα ως συμπαγή (με μάζα, όγκο κλπ.) και μπορούν να χρησιμοποιηθούν πράξεις πρόσθεσης αφαίρεσης, τομής κ.α.

2. Επιφανειακή γεωμετρική μοντελοποίηση (Surface Design):

Τα γεωμετρικά μοντέλα δεν θεωρούνται συμπαγή. Για τη σχεδίαση τους πρέπει να σχεδιαστούν όλες οι έδρες τους. Δημιουργείται ένας φλοιός του αντικειμένου.

Είναι διαθέσιμη πληθώρα λογισμικών τρισδιάστατης σχεδίασης, είτε επί πληρωμή, είτε όχι, που απευθύνονται σε αρχάριου έως και επαγγελματικού επιπέδου κοινό. (Διονύσιος, 2021)

3.4.2 Μηχανική στον υπολογιστή (Computer Aided Engineering-CAE)

Ένα τρισδιάστατο σχεδιασμένο προϊόν, προτείνεται να υποστεί μηχανική ανάλυση μέσω της γεωμετρικής αναπαράστασης του, ώστε να οριστούν οι αντοχές του (εφελκυσμό, θλίψη, διάτμηση). Αυτή η τεχνική πραγματοποιείται σε ψηφιακό περιβάλλον και ονομάζεται Computer Aided Engineering. Μέσω αυτού του περιβάλλοντος ανάλυσης ο σχεδιαστείς μπορεί να ελέγξει την συμπεριφορά του προϊόντος και να πραγματοποιήσει τυχόν βελτιώσεις. (Αναστάσιος, 2018)

Το λογισμικό CAE προσφέρει τη δυνατότητα για γίνουν αναλύσεις διαφόρων ειδών.

1. Ανάλυση με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων, για θερμικές και κατασκευαστικές αναλύσεις (Finite Element Analysis [FEA])

2. Ανάλυση μηχανικής ρευστών, για τη θερμική ανάλυση ρευστών

3. Λογισμικά ανάλυσης μεγάλων μετατοπίσεων, για την ανάλυση φορτίων σε μεγάλα αντικείμενα

4. Κινηματική ανάλυση, για τις τροχιές κίνησης

5. Εργαλεία κατασκευαστικής ανάλυσης, για τη προσομοίωση κατεργασιών

6. Εργαλεία για αυτοματοποιημένη σχεδίαση και βελτιστοποίηση

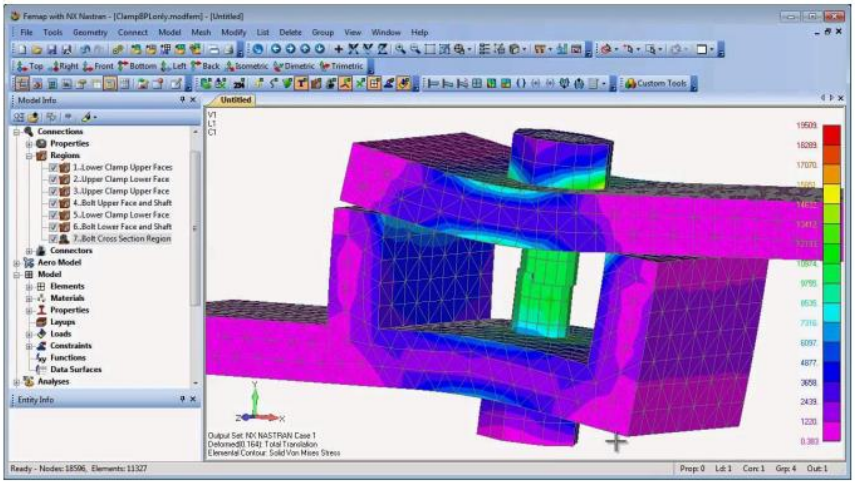


Figure 27 προσομοίωση δυνάμεων- ανάλυση αντοχής σε λογισμικό CAE

3.4.3 Μηχανική Κατασκευή στον υπολογιστή (Computer Aided Manufacturing-CAM)

Με βάση τη τεχνολογία CAM, χρησιμοποιείται ένα ψηφιακό περιβάλλον για να γίνει ο προγραμματισμός των διαδικασιών κατασκευής του προϊόντος. Στην 3D εκτύπωση, πρέπει να γίνει η εξαγωγή του ψηφιακού μοντέλου σε αρχείο STL και στη συνέχεια μετατρέπεται σε αρχείο .gcode, όπου εκεί εμπεριέχεται ένα εύρος εντολών για όλες τις λειτουργίες, παραμέτρους και τις κινήσεις των τμημάτων του εκτυπωτή. Οι κώδικες χρησιμοποιούνται και σε μηχανές CNC. (Trimble, 2018)

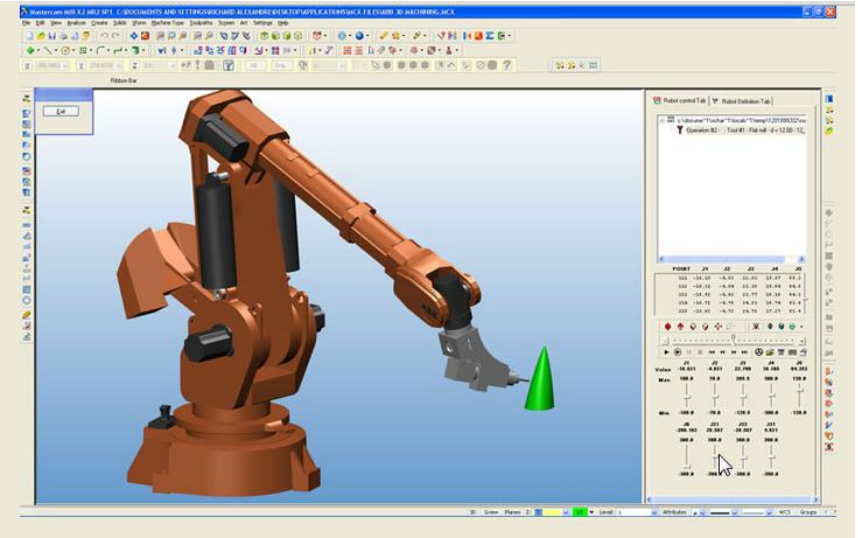


Figure 28 Περιβάλλον λογισμικού CAM

3.5. ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Η τρισδιάστατη εκτύπωση έχει αναδειχθεί σε μια σημαντική τεχνολογία για την παραγωγή δοκιμίων που χρησιμοποιούνται σε μηχανικές δοκιμές, όπως δοκιμές εφελκυσμού, κάμψης, κρούσης και μικροσκληρότητας. Αυτές οι δοκιμές είναι σημαντικές για την αξιολόγηση των μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών και η τρισδιάστατη εκτύπωση προσφέρει μοναδικά πλεονεκτήματα στην ακριβή και επαναλαμβανόμενη δημιουργία αυτών των δοκιμίων.

3.5.1 Δοκιμή εφελκυσμού

Οι δοκιμές εφελκυσμού (Tensile test) είναι μια θεμελιώδης μέθοδος αξιολόγησης της αντοχής και της ελαστικότητας των υλικών και η τρισδιάστατη εκτύπωση μπορεί να παράγει δοκίμια εφελκυσμού με απόλυτη διαστατική και γεωμετρική ακρίβεια σύμφωνα με τα πρότυπα ASTM και ISO. Η δυνατότητα εκτύπωσης δοκιμίων σε διαφορετικούς προσανατολισμούς και υλικά επιτρέπει την ανάλυση της αντοχής των υλικών σε διαφορετικές συνθήκες καταπόνησης.

Η δοκιμή εφελκυσμού τρισδιάστατα εκτυπωμένων δοκιμίων είναι μια σημαντική διαδικασία για την αξιολόγηση των μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών που χρησιμοποιούνται στην τρισδιάστατη εκτύπωση. Η δοκιμή αυτή βοηθά στην κατανόηση της αντοχής, της ελαστικότητας και της ανθεκτικότητας του εκτυπωμένου υλικού.

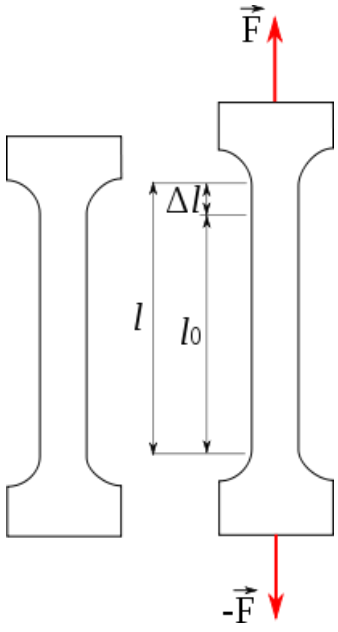


Figure 29: Δοκιμή εφελκυσμού δοκιμίου

3.5.1.1 Βασικά στοιχεία της δοκιμής εφελκυσμού:

1. Προετοιμασία της δοκιμής.
   Τα δοκίμια δοκιμής εκτυπώνονται σύμφωνα με πρότυπα όπως το ASTM D638 και το ISO 527, ώστε να διασφαλίζονται τυποποιημένες διαστάσεις και σχήμα.
   Η κατεύθυνση εκτύπωσης (δημιουργία στρώματος) πρέπει να λαμβάνεται υπόψη, καθώς επηρεάζει τα αποτελέσματα της δοκιμής.

2. Εξοπλισμός δοκιμών.
   Χρησιμοποιείται μια μηχανή δοκιμής για τη σταδιακή εφαρμογή δύναμης μέχρι να σπάσει το δοκίμιο.
   Λαμβάνονται μετρήσεις με τη χρήση αισθητήρων παραμόρφωσης και επιμήκυνσης για την καταγραφή της δύναμης και της παραμόρφωσης του υλικού.

3. Διαδικασία δοκιμής
   Το δοκίμιο τοποθετείται στη μηχανή δοκιμής εφελκυσμού και εφαρμόζεται δύναμη μέχρι τη θραύση.
   Κατά τη διάρκεια της δοκιμής καταγράφονται δεδομένα όπως η αντοχή σε θραύση, το μέτρο ελαστικότητας και η επιμήκυνση στο σημείο θραύσης.

4. Ανάλυση δεδομένων
   Τα δεδομένα χρησιμοποιούνται για την παραγωγή διαγραμμάτων τάσης-παραμόρφωσης από τα οποία εξάγονται σημαντικές μηχανικές ιδιότητες.
   Πραγματοποιούνται συγκρίσεις μεταξύ δοκιμίων διαφορετικών υλικών ή παραμέτρων εκτύπωσης για την αξιολόγηση της απόδοσης.

3.5.1.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Τα αποτελέσματα της δοκιμής εφελκισμού περιλαμβάνουν διάφορες κρίσιμες μηχανικές ιδιότητες των δοκιμίων. Αυτές οι ιδιότητες βοηθούν στην αξιολόγηση της απόδοσης και της καταλληλότητας των υλικών για συγκεκριμένες εφαρμογές. Παρακάτω αναλύονται οι κύριες μετρήσεις και τα δεδομένα που εξάγονται από μια δοκιμή εφελκισμού:

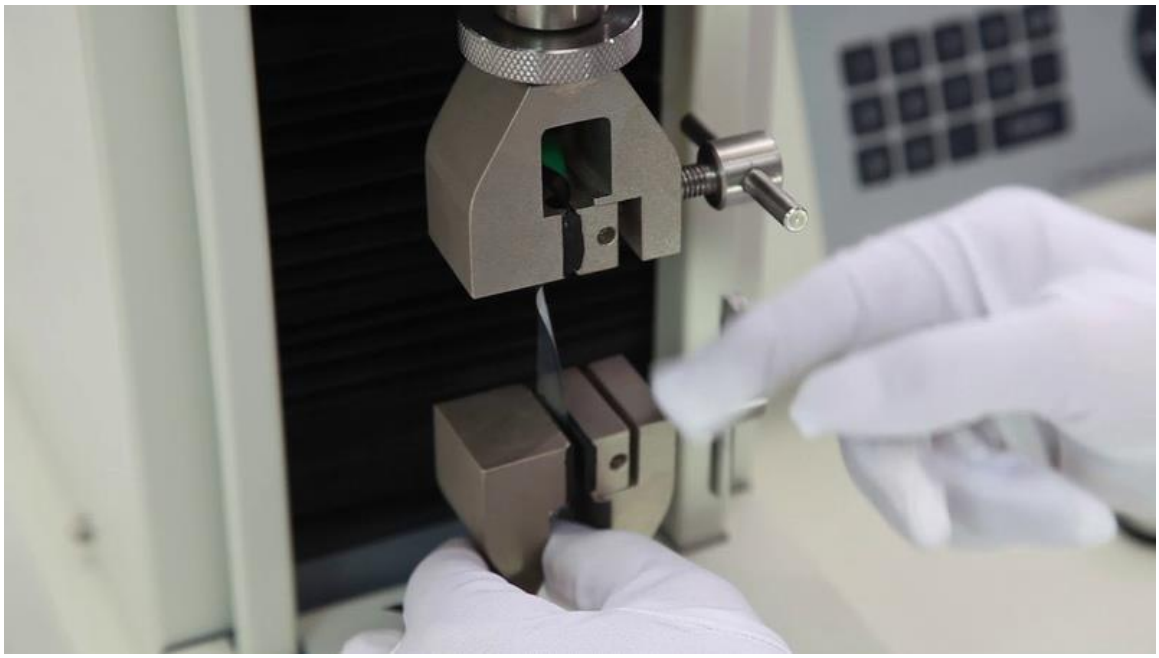


Figure 30 Εργαστηριακός εξοπλισμός για δοκιμές σε αντοχή σε εφελκισμό.

3.5.1.3 Κύριες Μετρήσεις και Δεδομένα

1. Αντοχή Εφελκισμού (Tensile Strength):
   Απόλυτη Αντοχή (Ultimate Tensile Strength, UTS)**: Η μέγιστη τάση που μπορεί να αντέξει το δοκίμιο πριν από τη θραύση. Μετράται σε MPa (megapascals) ή psi (pounds per square inch).

2. Όριο Διαρροής (Yield Strength)
   Η τάση στην οποία το υλικό υπόκειται σε πλαστική παραμόρφωση. Πριν από αυτό το σημείο, η παραμόρφωση είναι ελαστική και αναστρέψιμη.

3. Μέτρο Ελαστικότητας (Young's Modulus ή Elastic Modulus)
   Το μέτρο της ακαμψίας του υλικού, δηλαδή, η αναλογία τάσης προς την ελαστική παραμόρφωση. Δείχνει πόσο ανθεκτικό είναι το υλικό σε ελαστική παραμόρφωση.

4. Επιμήκυνση στο Σημείο Θραύσης (Elongation at Break)
   Το ποσοστό επιμήκυνσης που υφίσταται το υλικό μέχρι να σπάσει. Αυτό το μέγεθος εκφράζεται συνήθως ως ποσοστό της αρχικής μήκους του δοκιμίου.

5. Διάγραμμα Τάσης-Παραμόρφωσης (Stress-Strain Curve)
   Ένα γράφημα που δείχνει τη σχέση μεταξύ της εφαρμοζόμενης τάσης και της αντίστοιχης παραμόρφωσης του δοκιμίου. Από το διάγραμμα αυτό μπορούν να εξαχθούν όλες οι παραπάνω μετρήσεις.

3.5.1.4 Συμπληρωματικά Δεδομένα

- Ενέργεια έως Θραύση (Toughness)
  Η συνολική ενέργεια που απορροφάται από το δοκίμιο μέχρι τη θραύση, συνήθως υπολογίζεται από την επιφάνεια κάτω από το διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης.

- Αντοχή σε Τάση Θραύσης (Fracture Stress)
  Η τάση στην οποία το δοκίμιο σπάει.

- Λόγος Πουασόν (Poisson's Ratio)
  Η αναλογία της εγκάρσιας συρρίκνωσης προς τη διαμήκη επιμήκυνση, η οποία δίνει πληροφορίες για την παραμόρφωση του υλικού σε διάφορες διευθύνσεις.

3.5.1.5 Παραδείγματα και Εφαρμογές

a) Συγκρίσεις Υλικών
   Τα αποτελέσματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη σύγκριση διαφορετικών υλικών ή παραλλαγών του ίδιου υλικού (π.χ. PLA vs. ABS).

b) Βελτιστοποίηση Παραμέτρων Εκτύπωσης
   Η ανάλυση των αποτελεσμάτων βοηθά στον προσδιορισμό των καλύτερων παραμέτρων εκτύπωσης για τη βελτίωση της αντοχής και της ποιότητας των εκτυπωμένων αντικειμένων.

c) Αξιολόγηση Ποιότητας
   Η τακτική δοκιμή εφελκισμού μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον έλεγχο της ποιότητας της παραγωγής και τη διασφάλιση της συνέπειας των προϊόντων.

Τα αποτελέσματα της δοκιμής εφελκισμού παρέχουν σημαντικές πληροφορίες για την κατανόηση και τη βελτίωση των υλικών και των διαδικασιών στην τρισδιάστατη εκτύπωση, καθιστώντας τα χρήσιμα για μια πληθώρα βιομηχανικών εφαρμογών.

3.5.1.6 Παράγοντες που επηρεάζουν τα αποτελέσματα.

a. Υλικό εκτύπωσης
   Διαφορετικά υλικά όπως PLA, ABS, PETG και σύνθετα υλικά έχουν διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες.

b. Παράμετροι εκτύπωσης
   Η θερμοκρασία εκτύπωσης, η ταχύτητα εκτύπωσης, το πάχος στρώματος και η πλήρωση έχουν σημαντική επίδραση στα αποτελέσματα της δοκιμής.

c. Απόδοση κατεύθυνσης εκτύπωσης
   Η κατεύθυνση του στρώματος σε σχέση με τη διεύθυνση της εφαρμοζόμενης δύναμης μπορεί να μεταβάλει την αντοχή και την ελαστικότητα του δοκιμίου.

3.5.1.6 Σημασία των δοκιμών.

Οι δοκιμές εφελκυσμού είναι σημαντικές για την επαλήθευση της ποιότητας των τρισδιάστατα εκτυπωμένων αντικειμένων. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό όταν η ποιότητα χρησιμοποιείται σε εφαρμογές όπου οι μηχανικές ιδιότητες είναι κρίσιμες, όπως η αεροδιαστημική, η ιατρική και η αυτοκινητοβιομηχανία.



Figure 31 Δοκιμή εφελκυσμού

3.5.2 Δοκιμή κάμψης

Οι δοκιμές κάμψης χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση της αντοχής σε κάμψη και της ευκαμψίας των υλικών σε κάμψη και η τρισδιάστατη εκτύπωση μπορεί να παράγει δοκίμια κάμψης με υψηλή ακρίβεια, επιτρέποντας τη λεπτομερή διερεύνηση της συμπεριφοράς των υλικών υπό κάμψη. Η ευελιξία της τρισδιάστατης εκτύπωσης καθιστά επίσης δυνατή τη δημιουργία σύνθετων δοκιμίων με ενισχύσεις ή ειδικά σχεδιασμένα εσωτερικά δομικά στοιχεία που βελτιώνουν τις ιδιότητες κάμψης.

Οι δοκιμές κάμψης είναι μια άλλη σημαντική μέθοδος αξιολόγησης των μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών που χρησιμοποιούνται στην τρισδιάστατη εκτύπωση. Η δοκιμή αυτή παρέχει πληροφορίες σχετικά με την αντοχή σε κάμψη, τη δυσκαμψία και την ελαστικότητα του υλικού.

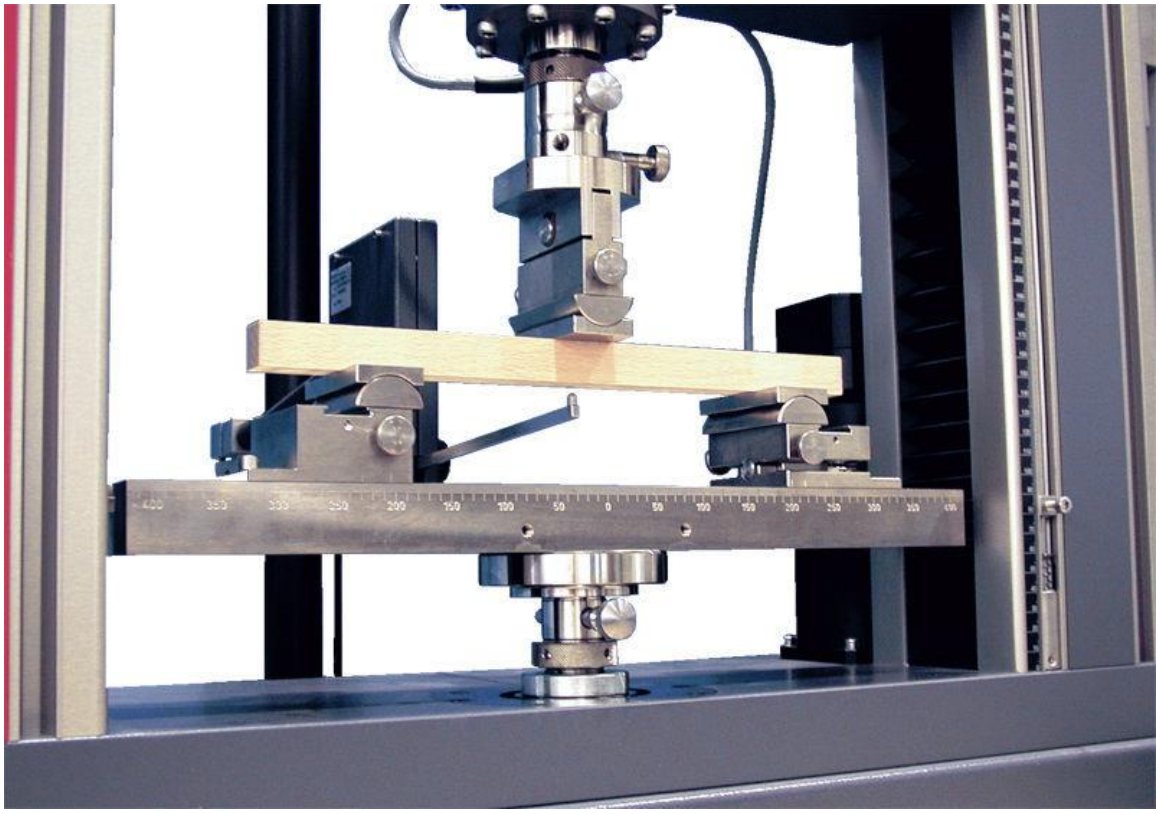


Figure 32: Εξοπλισμός για δοκιμές σε αντοχή κάμψης

3.5.2.1 Βασικά στοιχεία της δοκιμής κάμψης

1. Προετοιμασία της δοκιμής:
   Τα δοκίμια εκτυπώνονται σύμφωνα με πρότυπα όπως το ASTM D790 και το ISO 178 για την τυποποίηση των διαστάσεων και της γεωμετρίας.
   Πρέπει να δίνεται προσοχή ώστε η κατεύθυνση της εκτύπωσης και οι παράμετροι εκτύπωσης να επηρεάζουν τα αποτελέσματα της δοκιμής.

2. Εξοπλισμός δοκιμής:
   Χρησιμοποιείται μηχανή κάμψης όπου το δοκίμιο τοποθετείται μεταξύ δύο στηριγμάτων και ασκείται δύναμη στο κέντρο του δοκιμίου.
   Λαμβάνονται μετρήσεις με τη χρήση αισθητήρων παραμόρφωσης και μετατόπισης για την καταγραφή της δύναμης και της παραμόρφωσης του υλικού.

3. Διαδικασία δοκιμής:
   Το δοκίμιο τοποθετείται στο στήριγμα της μηχανής δοκιμών και εφαρμόζεται δύναμη στο κέντρο του μέχρι να λυγίσει ή να σπάσει.
   Κατά τη διάρκεια της δοκιμής, καταγράφονται δεδομένα όπως η αντοχή σε κάμψη, το μέτρο κάμψης και η παραμόρφωση στο σημείο κάμψης.

4. Ανάλυση δεδομένων:
   Τα δεδομένα χρησιμοποιούνται για την παραγωγή διαγραμμάτων τάσης-παραμόρφωσης από τα οποία εξάγονται σημαντικές μηχανικές ιδιότητες.
   Γίνονται συγκρίσεις μεταξύ δοκιμίων από διαφορετικά υλικά και παραμέτρους εκτύπωσης για την αξιολόγηση της απόδοσης.

3.5.2.2 Κύριες μετρήσεις και δεδομένα

1. Αντοχή σε κάμψη:
   Η μέγιστη τάση που μπορεί να αντέξει ένα δοκίμιο πριν λυγίσει ή σπάσει. Οι μονάδες είναι σε MPa (megapascals) ή psi (λίβρες ανά τετραγωνική ίντσα).

2. Μέτρο κάμψης:
   Μέτρο της δυσκαμψίας ενός υλικού σε κάμψη, δηλαδή ο λόγος της τάσης προς την παραμόρφωση σε κάμψη.

3. Επιμήκυνση θραύσης σε κάμψη:
   Ο ρυθμός επιμήκυνσης που υφίσταται ένα υλικό πριν από την κάμψη ή τη θραύση. Το μέγεθος αυτό εκφράζεται συνήθως ως ποσοστό του αρχικού μήκους του δοκιμίου.

4. Καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης:
   Ένα γράφημα που δείχνει τη σχέση μεταξύ της τάσης που εφαρμόζεται σε ένα δοκίμιο κάμψης και της αντίστοιχης παραμόρφωσης. Όλες οι παραπάνω μετρήσεις μπορούν να προκύψουν από αυτό το γράφημα.

3.5.2.3 Συμπληρωματικά δεδομένα

- Ανθεκτικότητα:
  Η συνολική ενέργεια που απορροφάται από ένα δοκίμιο μέχρι την κάμψη ή την αστοχία. Υπολογίζεται συνήθως από το εμβαδόν κάτω από το διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης.

- Τάση θραύσης:
  Η τάση στην οποία το δοκίμιο αστοχεί σε κάμψη.

3.5.2.4 Παράγοντες που επηρεάζουν τα αποτελέσματα

a. Υλικό εκτύπωσης:
   Διαφορετικά υλικά όπως PLA, ABS, PETG και σύνθετα υλικά έχουν διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες σε κάμψη.

b. Παράμετροι εκτύπωσης:
   Η θερμοκρασία εκτύπωσης, η ταχύτητα εκτύπωσης, το πάχος στρώματος και η πλήρωση έχουν σημαντική επίδραση στα αποτελέσματα της δοκιμής.

c. Κατεύθυνση εκτύπωσης:
   Η κατεύθυνση του στρώματος σε σχέση με τη διεύθυνση της δύναμης που εφαρμόζεται κατά την κάμψη μπορεί να μεταβάλει την αντοχή και την ελαστικότητα του δοκιμίου.

3.5.2.5 Σημασία των δοκιμών.

Οι δοκιμές κάμψης είναι πολύ σημαντικές για την επαλήθευση της ποιότητας των τρισδιάστατα εκτυπωμένων αντικειμένων. Αυτό ισχύει ιδιαίτερα εάν το αντικείμενο χρησιμοποιείται σε εφαρμογές όπου οι μηχανικές ιδιότητες είναι σημαντικές, όπως στην κατασκευή δομικών στοιχείων, μηχανικών εξαρτημάτων και άλλων βιομηχανικών εφαρμογών.

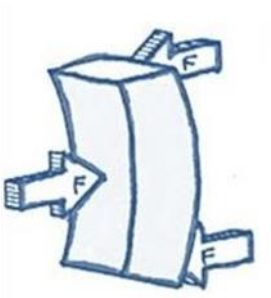


Figure 33 Κάμψη

3.5.3 Δοκιμή κρούσης

Οι δοκιμές κρούσης είναι κρίσιμες για την αξιολόγηση της αντίστασης ενός υλικού σε ξαφνικά φορτία και κρούσεις και τα δοκίμια κρούσης που παράγονται με τρισδιάστατη εκτύπωση μπορούν να προσαρμοστούν σε συγκεκριμένες προδιαγραφές ή να ενσωματώσουν νανοσύνθετα υλικά για βελτιωμένη απόδοση. Η ενσωμάτωση νανοϋλικών, όπως νανοσωματίδια ή νανοΐνες, μπορεί να βελτιώσει την αντοχή των υλικών στην κρούση και να δημιουργήσει πιο ανθεκτικά δοκίμια.

Η δοκιμή κρούσης είναι μια κρίσιμη διαδικασία για την αξιολόγηση της αντοχής των υλικών σε ξαφνικά και ισχυρά φορτία. Η δοκιμή αυτή παρέχει πληροφορίες σχετικά με την ανθεκτικότητα σε θραύση και την ικανότητα απορρόφησης ενέργειας των υλικών που χρησιμοποιούνται στην τρισδιάστατη εκτύπωση.

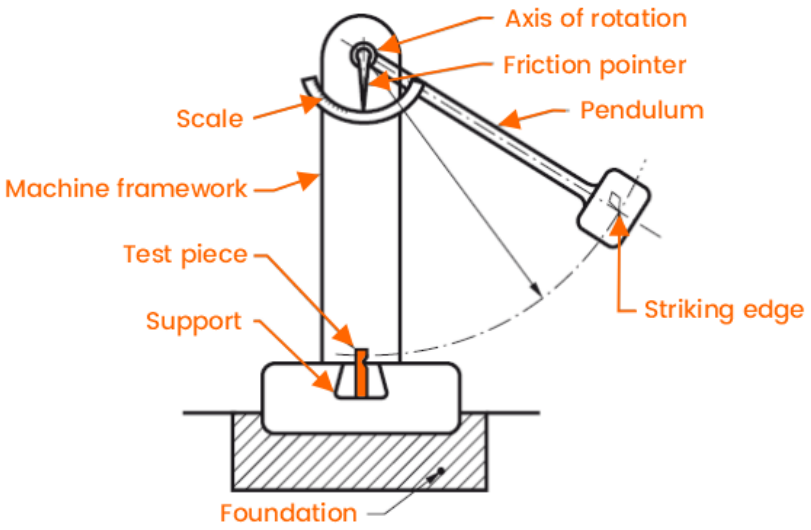


Figure 34: Δοκιμή κρούσης

3.5.3.1 Βασικά στοιχεία της δοκιμής κρούσης.

1. Προετοιμασία της δοκιμής.
   Τα δοκίμια εκτυπώνονται σύμφωνα με πρότυπα όπως το ASTM D256 και το ISO 179 για να διασφαλιστούν τυποποιημένες διαστάσεις και σχήμα.
   Πρέπει να δίνεται προσοχή ώστε η κατεύθυνση της εκτύπωσης και οι παράμετροι εκτύπωσης να επηρεάζουν τα αποτελέσματα της δοκιμής.

2. Εξοπλισμός δοκιμής.
   Χρησιμοποιείται πεντάλ ή εκκρεμές κρούσης, το οποίο απελευθερώνεται από προκαθορισμένο ύψος και χτυπά το δοκίμιο.
   Καταγράφεται η ενέργεια που απορροφάται από το δοκίμιο κατά τη θραύση.

3. Διαδικασία δοκιμής:
   Το δοκίμιο τοποθετείται σε ένα βάθρο και το εκκρεμές αφήνεται να πέσει ελεύθερα και να χτυπήσει το δοκίμιο.
   Καταγράφεται η ενέργεια που απορροφάται από το δοκίμιο κατά τη στιγμή της θραύσης.

4. Ανάλυση δεδομένων:
   Τα δεδομένα χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της αντοχής σε κρούση και της ικανότητας απορρόφησης ενέργειας του υλικού.
   Γίνονται συγκρίσεις μεταξύ δοκιμίων διαφορετικών υλικών και παραμέτρων εκτύπωσης για την εκτίμηση της απόδοσης.

3.5.3.2 Βασικές μετρήσεις και δεδομένα.

1. Ενέργεια πρόσκρουσης
   Ενέργεια που απορροφάται από ένα δοκίμιο κατά τη διάρκεια της θραύσης. Συνήθως μετράται σε τζάουλ (J) ή foot-pounds (ft-lbs).

2. Αντοχή σε κρούση:
   Η ενέργεια κρούσης ανά μονάδα επιφάνειας του δοκιμίου. Συνήθως μετράται σε J/m^2 ή $ft\text{-}lbs/in^2$.

3. Διάγραμμα κρούσης
   Ένα διάγραμμα που δείχνει τη σχέση μεταξύ της εφαρμοζόμενης ενέργειας και της απόκρισης του υλικού. Ωστόσο, είναι λιγότερο συνηθισμένο από ό,τι στις δοκιμές εφελκυσμού ή κάμψης.

3.5.3.3 Συμπληρωματικά δεδομένα.

- Τρόπος αστοχίας:
  Η παρατήρηση του τρόπου αστοχίας (εύθραυστος, ιξωδοπλαστικός) του δοκιμίου παρέχει πρόσθετες πληροφορίες για τη συμπεριφορά του υλικού.

- Ανάλυση της επιφάνειας
  Οι επιφάνειες θραύσης αναλύονται για την κατανόηση του μηχανισμού θραύσης.

3.5.3.4 Παράγοντες που επηρεάζουν τα αποτελέσματα.

a. Υλικά εκτύπωσης
   Διαφορετικά υλικά όπως PLA, ABS, PETG και σύνθετα υλικά έχουν διαφορετικές ιδιότητες αντοχής στην κρούση.

b. Παράμετροι εκτύπωσης
   Η θερμοκρασία εκτύπωσης, η ταχύτητα εκτύπωσης, το πάχος στρώματος και η πλήρωση έχουν σημαντική επίδραση στα αποτελέσματα της δοκιμής.

c. Απόσταση εκτύπωσης:
   Η κατεύθυνση του στρώματος σε σχέση με τη διεύθυνση της δύναμης που ασκείται κατά την κρούση μπορεί να μεταβάλει την αντοχή και την ελαστικότητα του δοκιμίου.

3.5.3.5 Σημασία των δοκιμών.

Οι δοκιμές κρούσης είναι πολύ σημαντικές για την επαλήθευση της ποιότητας των τρισδιάστατα εκτυπωμένων χυτευμένων εξαρτημάτων. Είναι ιδιαίτερα σημαντική όταν η προβλεπόμενη εφαρμογή είναι μια εφαρμογή όπου οι μηχανικές ιδιότητες και η αντοχή σε ταχεία φόρτιση είναι σημαντικές, όπως στην κατασκευή προστατευτικών εξαρτημάτων, πλαισίων συσκευών και άλλων βιομηχανικών εφαρμογών.

3.5.4 Δοκιμή μικροσκληρότητας

Η δοκιμή μικροσκληρότητας χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση της επιφανειακής σκληρότητας των υλικών σε μικροκλίμακα. Η τρισδιάστατη εκτύπωση επιτρέπει την παραγωγή δοκιμίων με εξαιρετικά λεία και ακριβή επιφάνεια, η οποία είναι απαραίτητη για αξιόπιστες μετρήσεις της μικροσκληρότητας. Επιπλέον, η χρήση νανοϋλικών στην εκτύπωση βελτιώνει τις επιφανειακές ιδιότητες των υλικών, με αποτέλεσμα πιο ανθεκτικές και σκληρές επιφάνειες.

Η τρισδιάστατη εκτύπωση δοκιμίων για μηχανικές δοκιμές, όπως δοκιμές εφελκυσμού, κάμψης, κρούσης και μικροσκληρότητας, προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα όσον αφορά την ακρίβεια, την προσαρμοστικότητα και την ενσωμάτωση προηγμένων υλικών. Η δυνατότητα δημιουργίας σύνθετων δοκιμίων με βελτιωμένες ιδιότητες μέσω της χρήσης νανοσύνθετων υλικών ανοίγει νέες προοπτικές για την αξιολόγηση και την ανάπτυξη υλικών, καθιστώντας την τρισδιάστατη εκτύπωση απαραίτητο εργαλείο για τη σύγχρονη μηχανική.



Figure 35 Εξοπλισμός για δοκιμή μικροσκληρότητας

3.5.4.1 Βασικά στοιχεία της δοκιμής μικροσκληρότητας.

1. Προετοιμασία της δοκιμής
   Το δοκίμιο προετοιμάζεται με εκτύπωση και στίλβωση της επιφάνειας ώστε να αποκτήσει μια καθαρή και λεία επιφάνεια.
   Πρέπει να δίνεται προσοχή ώστε η κατεύθυνση της εκτύπωσης και οι παράμετροι εκτύπωσης να επηρεάζουν τα αποτελέσματα της δοκιμής.

2. Εξοπλισμός δοκιμής.
   Χρησιμοποιείται ένα μικροσκληρόμετρο, όπου εφαρμόζεται μια μικρή δύναμη στην επιφάνεια του δοκιμίου μέσω ενός άκαμπτου αισθητήρα (συνήθως κωνικού ή διαμαντένιου άκρου).
   Η δύναμη και ο χρόνος εφαρμογής της δύναμης είναι συνήθως πολύ μικρός και είναι κατάλληλος για τη μέτρηση λεπτών στρωμάτων ή επιφανειών.

3. Διαδικασία δοκιμής
   ο αισθητήρας πιέζεται στην επιφάνεια του δοκιμίου με σταθερή δύναμη για σταθερό χρονικό διάστημα.
   Η επαγόμενη εσοχή μετράται και υπολογίζεται η επιφανειακή σκληρότητα.

4. Ανάλυση δεδομένων
   Τα δεδομένα από τη μέτρηση της εσοχής χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της σκληρότητας με βάση την καθορισμένη μέθοδο (μέθοδος Vickers, μέθοδος Knoop κ.λπ.).

3.5.4.2 Βασικές μετρήσεις και δεδομένα.

1. Μικροσκληρότητα Vickers:
   μετράται με τη χρήση μιας κορυφής διαμαντιού σε σχήμα πυραμίδας που αφήνει ένα τετράγωνο αποτύπωμα. Η σκληρότητα υπολογίζεται από την αντοχή και την επιφάνεια της χάραξης.

2. Μικροσκληρότητα Κνουπ:
   Μετριέται χρησιμοποιώντας μια πυραμιδοειδή αιχμή διαμαντιού που αφήνει ένα επίμηκες ίχνος. Η σκληρότητα υπολογίζεται από την αντοχή και τη διαμήκη διάσταση του αποτυπώματος.

3. Καμπύλη φορτίου-μετατόπισης της εγκοπής:
Γραφική παράσταση που δείχνει τη σχέση μεταξύ της εφαρμοζόμενης δύναμης και της εσοχής του αισθητήρα. Από αυτήν μπορούν να εξαχθούν πληροφορίες για τη συμπεριφορά του υλικού.

3.5.4.3 Συμπληρωματικά δεδομένα.

- Χαρτογράφηση σκληρότητας:
Οπτική αναπαράσταση της κατανομής της σκληρότητας στην επιφάνεια του δείγματος. 2.

- Δομή και ανάλυση της επιφάνειας:
Παρατηρεί τη μικροδομή και την ποιότητα της επιφάνειας του υλικού σε συνδυασμό με τη μικροσκοπία.

3.5.4.4 Παράγοντες που επηρεάζουν τα αποτελέσματα.

1. Υλικά εκτύπωσης:
Διαφορετικά υλικά όπως PLA, ABS, PETG και σύνθετα υλικά έχουν διαφορετικές επιφανειακές ιδιότητες και σκληρότητα.

2. Παράμετροι εκτύπωσης:
Η θερμοκρασία εκτύπωσης, η ταχύτητα εκτύπωσης, το πάχος στρώματος και η πλήρωση έχουν σημαντική επίδραση στη σκληρότητα της επιφάνειας.

3. Κατεύθυνση εκτύπωσης
Η κατεύθυνση του στρώματος μπορεί να αλλάξει την επιφανειακή σκληρότητα και την ομοιογένεια της επιφάνειας του δείγματος.

3.5.4.5 Σημασία της δοκιμής.

Οι δοκιμές μικροσκληρότητας είναι πολύ σημαντικές για την επαλήθευση της ποιότητας των τρισδιάστατα εκτυπωμένων αντικειμένων. Είναι ιδιαίτερα σημαντική όταν πρόκειται για εφαρμογές όπου η αντοχή στη φθορά και η αντοχή της επιφάνειας είναι κρίσιμες, όπως στην κατασκευή εργαλείων, εξαρτημάτων μηχανών και άλλων βιομηχανικών εφαρμογών.

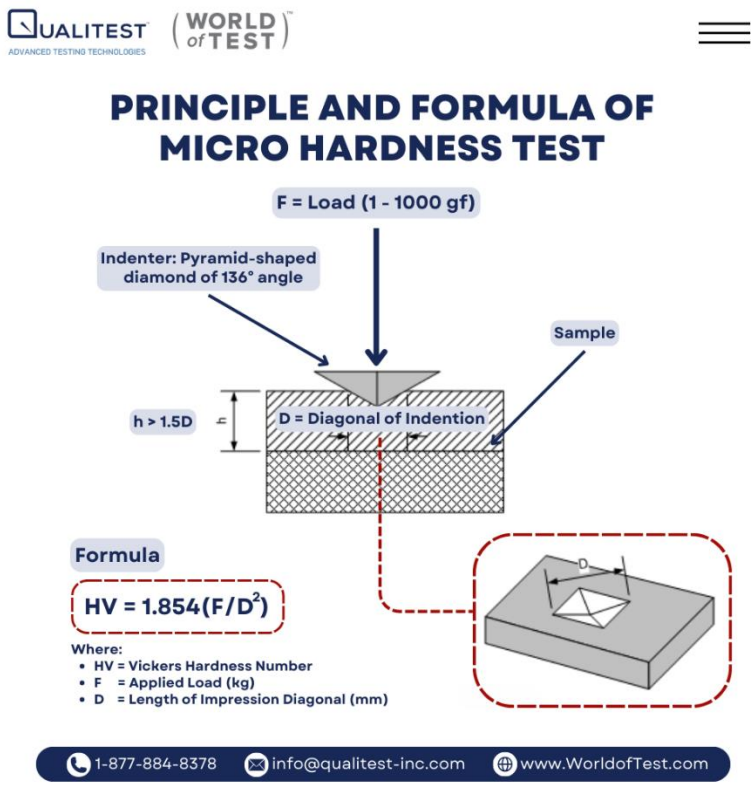


Figure 36 Δοκιμές μικροσκληρότητας. Βασικές αρχές

4ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ – ΠΟΛΥΜΕΡΗ

4.1- Εισαγωγή

Τα πολυμερή είναι από τα πιο σημαντικά υλικά στην καθημερινή ζωή και τη βιομηχανία. Τα πολυμερή αυτά αποτελούνται από επαναλαμβανόμενες μονάδες που ονομάζονται μονομερή και μπορούν να έχουν ποικίλες δομές και ιδιότητες. Φυσικά πολυμερή όπως το καουτσούκ και το μετάξι υπάρχουν και χρησιμοποιούνται εδώ και πολύ καιρό, αλλά η ανάπτυξη συνθετικών πολυμερών όπως το νάιλον και το πολυαιθυλένιο τον 20ό αιώνα οδήγησε σε έκρηξη των χρήσεων και των εφαρμογών τους.

Οι ιδιότητες των πολυμερών, όπως η ευκαμψία, η ανθεκτικότητα, η χημική αντοχή και η ικανότητα μετατροπής σε διαφορετικές μορφές, τα καθιστούν ιδανικά για χρήση σε πολλούς τομείς, από την αυτοκινητοβιομηχανία και την αεροδιαστημική μέχρι την ιατρική και τα καταναλωτικά αγαθά. Η προσαρμοστικότητα των πολυμερών επιτρέπει την τροποποίηση των ιδιοτήτων τους ώστε να ανταποκρίνονται σε συγκεκριμένες εφαρμογές, γεγονός ανεκτίμητο για την ανάπτυξη νέων τεχνολογιών και προϊόντων. Η συνεχής έρευνα και ανάπτυξη στον τομέα των πολυμερών έχει οδηγήσει σε νέες συνθέσεις και υλικά με βελτιωμένες ή εξειδικευμένες ιδιότητες.

Με την έλευση της τρισδιάστατης εκτύπωσης, τα πολυμερή έχουν βρει νέες εφαρμογές ιδιαίτερης σημασίας: η δυνατότητα κατασκευής αντικειμένων με την προσθήκη στρωμάτων υλικού, όπως εφαρμόζεται στην τρισδιάστατη εκτύπωση, επωφελείται από την ευκολία επεξεργασίας και τις ποικίλες ιδιότητες των πολυμερών. τα θερμοπλαστικά πολυμερή όπως το PLA και το ABS είναι FDM τεχνολογίες εκτύπωσης χρησιμοποιούνται ευρέως, ενώ οι φωτοπολυμερισμένες ρητίνες είναι τα κύρια υλικά για τη στερεολιθογραφία (SLA). Αυτή η συνύπαρξη της τεχνολογίας τρισδιάστατης εκτύπωσης και των πολυμερών φέρνει επανάσταση στη σύγχρονη κατασκευή, επιτρέποντας την ταχεία και ακριβή δημιουργία πρωτοτύπων, λειτουργικών εξαρτημάτων και εξατομικευμένων προϊόντων.

4.2 Ιστορική Αναδρομή

Τα πολυμερή έχουν μακρά ιστορία, από τα αρχαία φυσικά υλικά μέχρι τις σύγχρονες συνθετικές και εξειδικευμένες μορφές. Οι φυσικές ρητίνες, το καουτσούκ και τα βιολογικά πολυμερή, όπως το μετάξι και η κυτταρίνη, χρησιμοποιούνται από την αρχαιότητα- η ανακάλυψη και η χρήση των συνθετικών πολυμερών τον 20ό αιώνα άλλαξε ριζικά τον τρόπο παραγωγής και χρήσης των υλικών.

Η πρώτη γνωστή χρήση πολυμερών χρονολογείται στους αρχαίους αιγυπτιακούς και μεσοποταμιακούς πολιτισμούς. Χρησιμοποιούσαν φυσικές ρητίνες για την ταρίχευση και την προστασία από τερμίτες. Το κερί και το μελισσοκέρι χρησιμοποιούνταν επίσης σε πολλές αρχαίες πρακτικές για τη συντήρηση υλικών και για κατασκευές. Αυτές οι πρώιμες χρήσεις δείχνουν πώς τα φυσικά πολυμερή ήταν σημαντικά υλικά για τη συντήρηση και τη δημιουργία προϊόντων.

Τον 19ο αιώνα, η βιομηχανική επανάσταση και οι εξελίξεις στη χημεία οδήγησαν σε σημαντικές καινοτομίες στα πολυμερή: το 1839, ο Charles Goodyear ανακάλυψε τη διαδικασία βουλκανισμού, η οποία βελτίωσε τις ιδιότητες του φυσικού καουτσούκ, καθιστώντας το πιο ανθεκτικό και εύκαμπτο. Η ανακάλυψη αυτή συνέβαλε σημαντικά στη χρήση του καουτσούκ στη βιομηχανία, ιδίως στην κατασκευή ελαστικών.

Στις αρχές του 20ού αιώνα, η ανάπτυξη των πρώτων συνθετικών πολυμερών έφερε επανάσταση στη βιομηχανία ελαστικού: το 1907, ο Leo Bakeland ανέπτυξε τον βακελίτη, το πρώτο πλήρως συνθετικό πλαστικό. Ο βακελίτης ήταν ανθεκτικός στη θερμότητα και τα χημικά, καθιστώντας τον ιδανικό για ηλεκτρικές συσκευές και εξαρτήματα. Η εφεύρεση αυτή σηματοδότησε την αυγή της εποχής των συνθετικών πολυμερών και άνοιξε το δρόμο για πολλές νέες ανακαλύψεις.

Στη δεκαετία του 1930 αναπτύχθηκαν πολλά νέα συνθετικά πολυμερή που άλλαξαν τον κόσμο. Το νάιλον ανακαλύφθηκε από τον Wallace Carothers της DuPont το 1935. Το νάιλον ήταν η πρώτη συνθετική ίνα που χρησιμοποιήθηκε ευρέως, αντικαθιστώντας φυσικές ίνες όπως το μετάξι- το πολυαιθυλένιο, που ανακαλύφθηκε από τους Eric Fawcett και Reginald Gibson το 1933, έγινε ένα από τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα πλαστικά στον κόσμο, με εφαρμογές στη συσκευασία, τους σωλήνες και τη μόνωση. Χρησιμοποιήθηκε επίσης για την κατασκευή ποικίλων άλλων προϊόντων, συμπεριλαμβανομένων των συσκευασιών, των σωλήνων και της μόνωσης.

Κατά τη διάρκεια του Β' Παγκοσμίου Πολέμου, η ζήτηση για νέα υλικά οδήγησε στην περαιτέρω ανάπτυξη των συνθετικών πολυμερών. Η μαζική παραγωγή και χρήση πλαστικών έγινε αναγκαία για την κατασκευή πολεμικού εξοπλισμού και προμηθειών. Μετά τον πόλεμο, η παραγωγή πολυμερών αυξήθηκε δραματικά, καθώς τα πλαστικά χρησιμοποιήθηκαν σε οικιακά είδη, παιχνίδια, ρούχα και άλλα καθημερινά αντικείμενα.

Η εξέλιξη των πολυμερών συνεχίστηκε με την ανάπτυξη νέων τύπων και τη βελτίωση των υπαρχόντων: τη δεκαετία του 1950, η ανάπτυξη του πολυπροπυλενίου και του πολυεστέρα από τον Giulio Natta είχε σημαντικό αντίκτυπο στις βιομηχανίες κλωστοϋφαντουργίας και πλαστικών- τη δεκαετία του 1960, το Kevlar της Stephanie Kwolek ήταν Kevlar ανακαλύφθηκε. Το Kevlar είναι ένα ισχυρό πολυμερές και χρησιμοποιείται ευρέως σε αλεξίσφαιρα γιλέκα και άλλες εφαρμογές υψηλής αντοχής.

Στα τέλη του 20ού και στις αρχές του 21ου αιώνα, η έμφαση δόθηκε στη βελτίωση των ιδιοτήτων των πολυμερών και στην ανάπτυξη νέων υλικών για ειδικές εφαρμογές. Τα σύνθετα υλικά που περιέχουν ενισχυτικές ίνες, όπως ίνες άνθρακα και γυαλιού, αυξάνουν την αντοχή και το βάρος- αναπτύχθηκαν βιοδιασπώμενα πολυμερή, όπως το PLA (πολυγαλακτικό οξύ), για να μειωθούν οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις των πλαστικών αποβλήτων.

Με την ανάπτυξη της τρισδιάστατης εκτύπωσης, τα πολυμερή απέκτησαν νέες εφαρμογές και σημαντική θέση στην παραγωγή: στην τρισδιάστατη εκτύπωση, τα αντικείμενα μπορούν να δημιουργηθούν με τη δημιουργία στρωμάτων υλικού και τα πολυμερή είναι ένα από τα κύρια υλικά που χρησιμοποιούνται σε αυτή τη διαδικασία. Τα θερμοπλαστικά πολυμερή, όπως το PLA και το ABS, είναι δημοφιλή επειδή είναι εύκολα στην επεξεργασία και ανακυκλώσιμα. Οι φωτοπολυμερισμένες ρητίνες χρησιμοποιούνται επίσης ευρέως στη στερεολιθογραφία (SLA), παρέχοντας υψηλό βαθμό ακρίβειας και λεπτομέρειας στα εκτυπωμένα υλικά.

Συνοψίζοντας, η ιστορία των πολυμερών είναι πλούσια και γεμάτη καινοτομίες που διαμόρφωσαν την καθημερινή ζωή και τη βιομηχανία. Από τα αρχαία φυσικά πολυμερή έως τα σύγχρονα συνθετικά και βιοδιασπώμενα υλικά, η εξέλιξη των πολυμερών είναι ασταμάτητη, προσφέροντας νέες δυνατότητες και εφαρμογές Η τρισδιάστατη εκτύπωση είναι μόνο ένα παράδειγμα του πώς τα πολυμερή συνεχίζουν να ανοίγουν το δρόμο και να επιτρέπουν τη δημιουργία νέων και καινοτόμων προϊόντων.

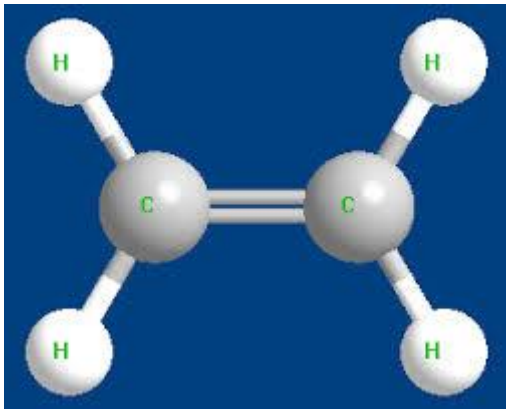


Figure 37 πολυμερή

4.3 ΠΟΛΥΜΕΡΗ

Τα πολυμερή είναι ένα ευρύ φάσμα υλικών που έχουν γίνει αναπόσπαστο μέρος της σύγχρονης ζωής και της βιομηχανίας. Ο όρος "πολυμερές" προέρχεται από τις ελληνικές λέξεις "πόλυ" (πολλά) και "μέρος" (μέρος) και περιγράφει μια δομή που αποτελείται από έναν αριθμό επαναλαμβανόμενων μονομερών. Τα μονομερή αυτά συνδέονται με ομοιοπολικούς δεσμούς για να σχηματίσουν πολυμερικές αλυσίδες.

4.3.1 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ

Τα πολυμερή μπορούν να ταξινομηθούν με διάφορους τρόπους ανάλογα με τη χημική τους σύνθεση, την προέλευση, το σχήμα και τις ιδιότητές τους. Οι κύριες ταξινομήσεις των πολυμερών παρατίθενται παρακάτω:

4.3.1.1 Ταξινόμηση με βάση την προέλευση.

- Φυσικά πολυμερή

  Πρωτεΐνες: συστατικά όλων των ζωντανών οργανισμών. Για παράδειγμα, κολλαγόνο, κερατίνη, ένζυμα κ.λπ.
  - Νουκλεϊκά οξέα: DNA και RNA, υπεύθυνα για τη γενετική πληροφορία και τον έλεγχο των κυτταρικών δραστηριοτήτων
  - Πολυσακχαρίτες: υδατάνθρακες όπως το άμυλο, η κυτταρίνη και το γλυκογόνο.

- Συνθετικά πολυμερή
  - Πλαστικά: τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα συνθετικά πολυμερή, που χρησιμοποιούνται σε μεγάλη ποικιλία προϊόντων. Παραδείγματα περιλαμβάνουν το πολυαιθυλένιο (PE), το πολυπροπυλένιο (PP), το πολυστυρένιο (PS) και το χλωριούχο πολυβινύλιο (PVC).
  - Συνθετικές ίνες: πολυμερή που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή κλωστοϋφαντουργικών προϊόντων, π.χ. νάιλον, πολυεστέρας, ακρυλικό.
  - Συνθετικά ελαστομερή: πολυμερή με ελαστικές ιδιότητες, όπως το νεοπρένιο, το βουταδιένιο-στυρένιο (SBR).

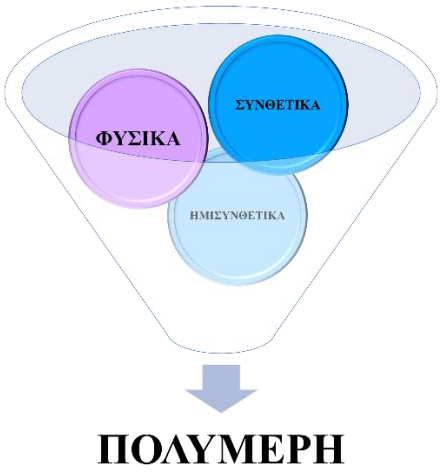


Figure 38 Κατηγορίες πολυμερών

4.3.1.2 Με βάση τις θερμικές ιδιότητες.

- Θερμοπλαστικά πολυμερή:

Θερμοπλαστικά πολυμερή**: πολυμερή που μπορούν να λιώσουν και να τροποποιηθούν πολλές φορές χωρίς χημική αλλαγή. Παραδείγματα περιλαμβάνουν το πολυαιθυλένιο (PE), το πολυπροπυλένιο (PP) και το χλωριούχο πολυβινύλιο (PVC). 2.

- Πολυμερή θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή

Πολυμερή που σκληραίνουν μόνιμα με την πρώτη θέρμανση και δεν μπορούν να επαναλιωθούν. Παραδείγματα περιλαμβάνουν τις εποξειδικές, τις μελαμινικές και τις πολυεστερικές ρητίνες.

4.3.1.3 Με βάση τη χημική σύνθεση.

- Ομοπολυμερή:

Πολυμερή που αποτελούνται από επαναλαμβανόμενες μονάδες ενός μόνο τύπου μονομερούς. Για παράδειγμα, το πολυαιθυλένιο αποτελείται αποκλειστικά από αιθυλένιο.

- Υποπολυμερή:

Πολυμερή που αποτελούνται από δύο ή περισσότερα διαφορετικά μονομερή. Τα παραδείγματα περιλαμβάνουν.

-Τυχαία συμπολυμερή: μονομερή τυχαία κατανεμημένα κατά μήκος της αλυσίδας (π.χ. στυρένιο-βουταδιένιο).

- Εναλλασσόμενα συμπολυμερή: μονομερή που εναλλάσσονται τακτικά κατά μήκος της αλυσίδας.

- Ατακτοποιημένα συμπολυμερή: μονομερή οργανωμένα σε συγκεκριμένη αλληλουχία

- Μπλοκ συμπολυμερή: μεγάλη αλληλουχία του ίδιου μονομερούς ακολουθούμενη από άλλη αλληλουχία μονομερών (π.χ. SBS - στυρένιο-βουταδιένιο-στυρένιο)

- Μονομερή συμπολυμερή: πολυμερή με πλευρικές ομάδες μονομερών.

4.3.1.4 Με βάση τις μηχανικές ιδιότητες.

1. Πλαστικά:
   Χρησιμοποιούνται ευρέως σε δομικές εφαρμογές και καταναλωτικά αγαθά.

2. Ελαστομερή:
   Πολυμερή που είναι ελαστικά και επιστρέφουν στο αρχικό τους σχήμα μετά από τέντωμα. Χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές όπως τα ελαστικά αυτοκινήτων και οι σφραγίδες.

3. Ινες:
   Πολυμερή που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή κλωστοϋφαντουργικών προϊόντων λόγω της υψηλής εφελκυστικής τους αντοχής και ευελιξίας.

4.3.1.5 Λόγω των χημικών αντιδράσεων που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή τους.

- Πρόσθετα πολυμερή:
  Κατασκευάζονται με αντιδράσεις προσθήκης στις οποίες τα μονομερή προστίθενται το ένα μετά το άλλο χωρίς να παράγονται παραπροϊόντα. Παραδείγματα περιλαμβάνουν το πολυαιθυλένιο και το πολυστυρένιο. 2.

- Πολυμερή συμπύκνωσης
  Κατασκευάζονται με αντιδράσεις συμπύκνωσης κατά τις οποίες δύο μονομερή αντιδρούν και παράγουν παραπροϊόντα όπως νερό και μεθανόλη. Παραδείγματα περιλαμβάνουν τον πολυεστέρα και το πολυαμίδιο (νάιλον).

Η ταξινόμηση των πολυμερών παρέχει μια ευρεία επισκόπηση της ποικιλομορφίας και της ευελιξίας τους, που τα καθιστά απαραίτητα για πολλές βιομηχανικές, ιατρικές και καθημερινές εφαρμογές. Από καθημερινά υλικά έως εξειδικευμένα εργαλεία και συσκευές, τα πολυμερή διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην εξέλιξη και την ανάπτυξη της τεχνολογίας και της επιστήμης.

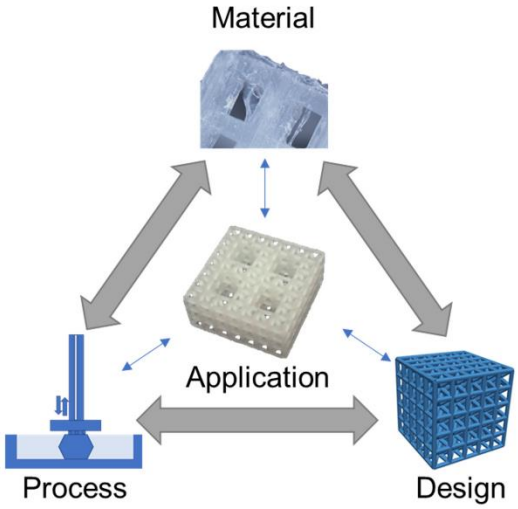


Figure 39 Πολυμερή- στάδια τρισδιάστατης εκτύπωσης

4.3.2 Ιδιότητες πολυμερών

4.3.2.1 Μηχανικές Ιδιότητες

Μηχανικές ιδιότητες αφορούν την ικανότητα ενός πολυμερούς να αντέχει δυνάμεις χωρίς να σπάει. Οι αντοχές περιλαμβάνουν την αντοχή σε εφελκυσμό (αντοχή σε εφελκυσμό), την αντοχή σε θλίψη (αντοχή σε συμπίεση) και την αντοχή σε κάμψη (αντοχή σε κάμψη). Για παράδειγμα, το πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας (HDPE) έχει υψηλή αντοχή σε εφελκυσμό.

- Ελαστικότητα:

Η ικανότητα ενός πολυμερούς να επιστρέφει στο αρχικό του σχήμα μετά από παραμόρφωση. Τα ελαστομερή, όπως το καουτσούκ, έχουν υψηλή ελαστικότητα.

- Ακαμψία:

Η αντίσταση ενός πολυμερούς να αλλάξει σχήμα όταν ασκείται δύναμη. Πολυμερή όπως το πολυκαρβονικό (PC) είναι γνωστά για την υψηλή ακαμψία τους.

- Σκληρότητα:

Αντοχή ενός πολυμερούς στην επιφανειακή τριβή και το ξύσιμο. Το πολυαμίδιο (νάιλον) έχει υψηλή σκληρότητα.

- Ανθεκτικότητα:

Ικανότητα ενός πολυμερούς να απορροφά ενέργεια και να παραμορφώνεται χωρίς να σπάει. Οι πολυουρεθάνες είναι πολυμερή με υψηλή ανθεκτικότητα.

4.3.2.2 Θερμικές Ιδιότητες

- Θερμική σταθερότητα:

Η ικανότητα ενός πολυμερούς να διατηρεί τις ιδιότητές του σε υψηλές θερμοκρασίες χωρίς να διασπάται. Το πολυτετραφθοροαιθυλένιο (PTFE), γνωστό και ως τεφλόν, έχει εξαιρετική θερμική σταθερότητα.

- Θερμική αγωγιμότητα:

Η ικανότητα ενός πολυμερούς να μεταφέρει θερμότητα. Τα περισσότερα πολυμερή έχουν χαμηλή θερμική αγωγιμότητα και χρησιμοποιούνται ως μονωτές.

- Θερμοκρασία υαλώδους μετάβασης (Tg):

Η θερμοκρασία στην οποία ένα άμορφο πολυμερές μεταπίπτει από την άκαμπτη υαλώδη κατάσταση στην εύκαμπτη ελαστική κατάσταση. Η Tg του πολυστυρενίου είναι χαμηλή και του πολυκαρβονικού είναι υψηλή.

- Σημείο τήξης (Tm):

Η θερμοκρασία στην οποία λιώνουν τα κρυσταλλικά πολυμερή. Για παράδειγμα, το σημείο τήξης του πολυαιθυλενίου υψηλής πυκνότητας (HDPE) είναι περίπου 130°C.

4.3.2.2 Χημικές Ιδιότητες

- Χημική αντοχή:

Η αντίσταση ενός πολυμερούς στη χημική διάβρωση. Το χλωριούχο πολυβινύλιο (PVC) είναι ανθεκτικό σε πολλές χημικές ουσίες.

- Διαλυτότητα:

Ικανότητα ενός πολυμερούς να διαλύεται σε έναν διαλύτη. Τα περισσότερα πολυμερή δεν είναι διαλυτά σε κοινούς διαλύτες λόγω του υψηλού μοριακού τους βάρους.

- Υδρόφοβο/υδρόφιλο:

Αντίδραση των πολυμερών στο νερό. Τα πολυμερή με μη πολικές ομάδες, όπως το πολυαιθυλένιο, είναι συνήθως υδρόφοβα, ενώ τα πολυμερή με πολικές ομάδες, όπως το πολυακρυλικό οξύ, είναι υδρόφιλα.

4.3.2.3 Ηλεκτρικές Ιδιότητες

- Ηλεκτρική αγωγιμότητα:

Τα περισσότερα πολυμερή είναι μονωτές και έχουν χαμηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα. Ωστόσο, ορισμένα αγώγιμα πολυμερή, όπως η πολυανιλίνη και το πολυακετυλένιο, χρησιμοποιούνται σε ηλεκτρονικές εφαρμογές.

- Διηλεκτρική σταθερά:

Η ικανότητα ενός πολυμερούς να αποθηκεύει ηλεκτρική ενέργεια σε ηλεκτρικό πεδίο. Τα πολυμερή χρησιμοποιούνται συχνά ως διηλεκτρικά υλικά σε πυκνωτές.

- Ειδική ηλεκτρική αντίσταση:

Η αντίσταση των πολυμερών στο ηλεκτρικό ρεύμα. Οι μονωτικές ιδιότητες των πολυμερών τα καθιστούν κατάλληλα για εφαρμογές όπως καλώδια και μονωτικές ταινίες.

4.3.2.4 Οπτικές ιδιότητες

- Διαφάνεια:

Διαφάνεια του πολυμερούς όσον αφορά τη διαπερατότητα του φωτός. Το μεθακρυλικό πολυμεθύλιο (PMMA), γνωστό ως πλεξιγκλάς, είναι ένα διαφανές πολυμερές.

- Δείκτης διάθλασης:

Μέτρηση της ικανότητας ενός πολυμερούς να κάμπτει το φως. Πολυμερή με υψηλό δείκτη διάθλασης χρησιμοποιούνται σε οπτικές εφαρμογές όπως φακοί και οπτικές ίνες.

- Σταθερότητα χρώματος:

Η ικανότητα ενός πολυμερούς να διατηρεί το χρώμα του υπό την επίδραση του φωτός και άλλων παραγόντων. Πολυμερή όπως το πολυκαρβονικό έχουν υψηλή σταθερότητα χρώματος.

4.3.2.5 Περιβαλλοντικές ιδιότητες.

- Βιοδιασπασιμότητα:

Η ικανότητα ενός πολυμερούς να αποικοδομείται από μικροοργανισμούς. Το πολυγαλακτικό οξύ (PLA) είναι ένα βιοαποικοδομήσιμο πολυμερές. 2.

- Αντοχή στην υπεριώδη ακτινοβολία:

Αντοχή των πολυμερών στην αποικοδόμηση από την έκθεση σε υπεριώδη ακτινοβολία. Το πολυανθρακικό και το πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας (HDPE) έχουν εξαιρετική αντοχή στην υπεριώδη ακτινοβολία. 3.

- Ευαισθησία ανακύκλωσης:

Ικανότητα των πολυμερών να ανακυκλώνονται και να επαναχρησιμοποιούνται. Πολυμερή όπως το πολυαιθυλένιο (PE) και το πολυπροπυλένιο (PP) είναι ανακυκλώσιμα.

Οι ιδιότητες των πολυμερών καθορίζουν την καταλληλότητά τους για συγκεκριμένες εφαρμογές και τους επιτρέπουν να χρησιμοποιούνται ευρέως σε διάφορους τομείς, από τις κατασκευές και την αυτοκινητοβιομηχανία έως τις ιατρικές και ηλεκτρονικές συσκευές. Τα πολυμερή αποτελούν αναπόσπαστο μέρος της σύγχρονης τεχνολογίας και βιομηχανίας, καθώς οι μηχανικές, θερμικές, χημικές, ηλεκτρικές, οπτικές και περιβαλλοντικές ιδιότητές τους συνδυάζονται για την παραγωγή υλικών που ανταποκρίνονται στις απαιτήσεις κάθε εφαρμογής.

Τα πολυμερή διατίθενται επίσης σε διάφορα σχήματα. Μπορούν να κατασκευαστούν σε διάφορες μορφές, όπως φύλλα, ράβδοι, ίνες, κόκκοι και υγρές μορφές. Η ευελιξία αυτών των μορφών επιτρέπει στα πολυμερή να χρησιμοποιούνται σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών. Οι πολυμερικές ίνες χρησιμοποιούνται ευρέως στην κλωστοϋφαντουργία για την παραγωγή ενδυμάτων και υφασμάτων. Τα φύλλα και οι ράβδοι πολυμερών χρησιμοποιούνται στις κατασκευές, στη συσκευασία και σε διάφορες βιομηχανικές εφαρμογές. Οι κόκκοι πολυμερών χρησιμοποιούνται ως πρώτες ύλες για τη μορφοποίηση και την εξώθηση προϊόντων, ενώ τα υγρά πολυμερή χρησιμοποιούνται για επιστρώσεις, κόλλες και τρισδιάστατη εκτύπωση.

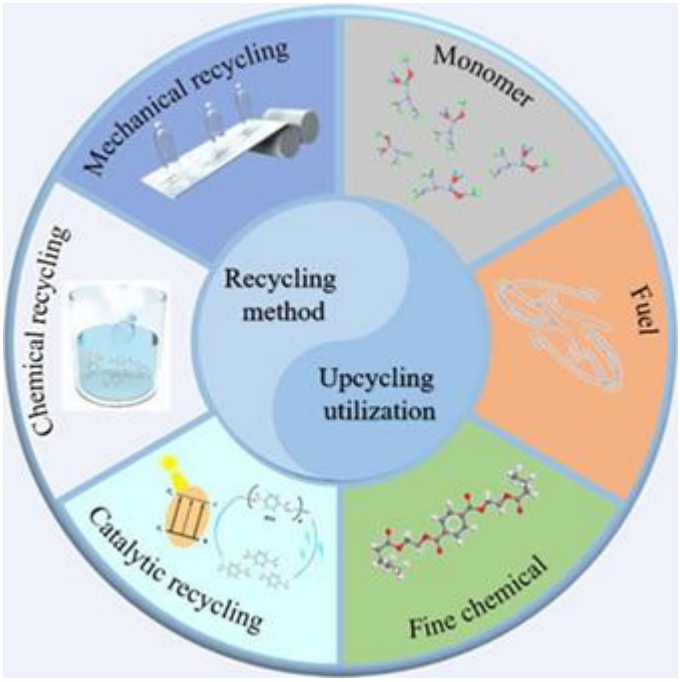


Figure 40 Ανακύκλωση πολυμερών

4.4 ΠΟΛΥΜΕΡΗ ΣΤΗΝ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΕΚΤΥΠΩΣΗ

Η χρήση πολυμερών στην τρισδιάστατη εκτύπωση έχει εξελιχθεί σημαντικά τα τελευταία χρόνια και προσφέρει μοναδικά πλεονεκτήματα σε πολλούς τομείς. Τα πολυμερή είναι ιδανικά για την τρισδιάστατη εκτύπωση λόγω της ευκολίας επεξεργασίας τους, της ευελιξίας των ιδιοτήτων τους και της σχέσης κόστους-αποτελεσματικότητας.

Υπάρχει μια ποικιλία τεχνολογιών τρισδιάστατης εκτύπωσης με βάση τα πολυμερή. Μία από τις πιο συνηθισμένες είναι η Fused Deposition Modelling (FDM), όπου θερμοπλαστικά πολυμερή όπως PLA (πολυγαλακτικό οξύ) ή ABS (ακρυλονιτρίλιο-βουταδιένιο-στυρένιο) λιώνουν και εξωθούνται μέσω ενός ακροφυσίου για να σχηματίσουν ένα καλούπι στρώμα προς στρώμα Η FDM είναι δημοφιλής επειδή είναι απλή και οικονομικά αποδοτική, ιδανική για την κατασκευή πρωτοτύπων και την παραγωγή μικρής κλίμακας.

Μια άλλη κοινή τεχνική είναι η στερεολιθογραφία (SLA), η οποία χρησιμοποιεί φωτοπολυμερισμένες ρητίνες. Στο SLA, μια πηγή λέιζερ ή υπεριώδους φωτός σκληραίνει επιλεκτικά μια υγρή ρητίνη για να σχηματίσει το αντικείμενο στρώμα προς στρώμα.Το SLA προσφέρει υψηλό βαθμό ακρίβειας και λεπτομέρειας, καθιστώντας το κατάλληλο για εφαρμογές που απαιτούν πολύπλοκα σχήματα και λεπτά χαρακτηριστικά, όπως κοσμήματα και οδοντιατρική.

Η τεχνολογία επιλεκτικής πυροσυσσωμάτωσης με λέιζερ (SLS) χρησιμοποιεί λέιζερ για τη σύντηξη θερμοπλαστικών σκονών, όπως το νάιλον. Αυτή η μέθοδος είναι ιδανική για την παραγωγή ανθεκτικών εξαρτημάτων με πολύπλοκες γεωμετρίες και εσωτερικές δομές, όπως εξαρτήματα αεροδιαστημικής και αυτοκινητοβιομηχανίας- τα μορφοποιημένα εξαρτήματα που παράγονται με SLS είναι γενικά πιο ανθεκτικά από εκείνα που παράγονται με FDM, καθιστώντας την τεχνολογία κατάλληλη για λειτουργικές δοκιμές και τελικά προϊόντα.

4.5 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Η τρισδιάστατη εκτύπωση με πολυμερή έχει φέρει επανάσταση στην κατασκευή πρωτοτύπων και λειτουργικών εξαρτημάτων. Η δυνατότητα γρήγορης και οικονομικής δημιουργίας πρωτοτύπων επιτρέπει στους σχεδιαστές και τους μηχανικούς να δοκιμάζουν και να βελτιώνουν τα σχέδιά τους σε πολύ λιγότερο χρόνο από ό,τι με τις παραδοσιακές μεθόδους κατασκευής. Αυτό επιταχύνει τον κύκλο ανάπτυξης προϊόντων και μειώνει το κόστος E&A.

Στον ιατρικό τομέα, η τρισδιάστατη εκτύπωση με βάση τα πολυμερή χρησιμοποιείται για την κατασκευή εξατομικευμένων ιατρικών συσκευών και εμφυτευμάτων. Ειδικά σχεδιασμένα πολυμερή που είναι βιοσυμβατά και απορροφώνται εύκολα από το ανθρώπινο σώμα χρησιμοποιούνται για την παραγωγή εμφυτευμάτων που ενσωματώνονται στον ιστό και απορροφώνται με την πάροδο του χρόνου. Επιπλέον, η

τρισδιάστατη εκτύπωση επιτρέπει την παραγωγή ορθοπεδικών και οδοντιατρικών συσκευών προσαρμοσμένων στις ανάγκες μεμονωμένων ασθενών.

Η αυτοκινητοβιομηχανία και η αεροδιαστημική βιομηχανία μπορούν να χρησιμοποιήσουν την τρισδιάστατη εκτύπωση για να δημιουργήσουν εξατομικευμένες λύσεις για μεμονωμένους ασθενείς.

Η τρισδιάστατη εκτύπωση πολυμερών χρησιμοποιείται για την παραγωγή ελαφρών και ανθεκτικών εξαρτημάτων. Τα πολυμερή ενισχυμένα με ίνες άνθρακα και γυαλιού παρέχουν ανώτερη αντοχή και μείωση του βάρους, η οποία είναι απαραίτητη για τις επιδόσεις και την αποδοτικότητα των αυτοκινήτων και των αεροσκαφών. Η δυνατότητα κατασκευής πολύπλοκων γεωμετριών και εσωτερικών δομών επιτρέπει τον σχεδιασμό εξαρτημάτων που δεν θα ήταν δυνατόν να κατασκευαστούν με συμβατικές μεθόδους κατασκευής.

Στην εκπαίδευση και την έρευνα, η τρισδιάστατη εκτύπωση με πολυμερή παρέχει στους φοιτητές και τους ερευνητές τα εργαλεία για την υλοποίηση των ιδεών τους- η ευκολία χρήσης και η προσβασιμότητα της τρισδιάστατης εκτύπωσης επιτρέπει στους εκπαιδευτικούς να ενσωματώνουν πρακτικές δραστηριότητες στο πρόγραμμα σπουδών, ενθαρρύνοντας την καινοτομία και τη δημιουργικότητα. Μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για να βοηθήσει τους εκπαιδευτικούς να αναπτύξουν νέες ιδέες και ιδέες για τα δικά τους προγράμματα σπουδών.

Τα πολυμερή αποτελούν τη βάση για πολλές από τις σημερινές τεχνολογικές εξελίξεις και θα συνεχίσουν να διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην ανάπτυξη νέων υλικών και εφαρμογών. Η συνεχής έρευνα και ανάπτυξη στον τομέα των πολυμερών αποσκοπεί στη βελτίωση των ιδιοτήτων τους, στην ανάπτυξη νέων συνθέσεων και στην επέκταση των εφαρμογών τους, ενώ η τρισδιάστατη εκτύπωση είναι ένα μόνο παράδειγμα του τρόπου με τον οποίο τα πολυμερή μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη δημιουργία καινοτόμων και αποτελεσματικών λύσεων για τη βιομηχανία και την καθημερινή ζωή. Καθώς η τεχνολογία εξελίσσεται, τα πολυμερή θα συνεχίσουν αναμφίβολα να βρίσκουν νέες και συναρπαστικές εφαρμογές, καθιστώντας τα πολυμερή ένα από τα πολυτιμότερα υλικά γενικής χρήσης της εποχής μας.



Figure 41 Πολυμερή σε μορφή pellets



Figure 42 Πολυμερή σε μορφή νήματος

4.6 ΒΑΣΙΚΑ ΠΟΛΥΜΕΡΗ

Υπάρχει μεγάλη ποικιλία πολυμερών που χρησιμοποιούνται ευρέως σε διάφορες βιομηχανικές και καταναλωτικές εφαρμογές. Ορισμένα από τα πιο σημαντικά πολυμερή παρατίθενται παρακάτω, μαζί με μια περιγραφή των κύριων χαρακτηριστικών και χρήσεών τους:

1. Πολυαιθυλένιο (PE)

Το πολυαιθυλένιο είναι το πιο διαδεδομένο πλαστικό και κυκλοφορεί σε πολλές μορφές με διαφορετικές πυκνότητες και ιδιότητες:

- Πολυαιθυλένιο χαμηλής πυκνότητας (LDPE)**: εύκαμπτο, διαφανές και ανθεκτικό στην υγρασία. Πολυαιθυλένιο χαμηλής πυκνότητας (LDPE)**: εύκαμπτο, διαφανές και ανθεκτικό στην υγρασία.

- Πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας (HDPE)**: σκληρό και ανθεκτικό, χρησιμοποιείται για δοχεία, σωλήνες, παιχνίδια, εξαρτήματα αυτοκινήτων κ.λπ.

- Γραμμικό πολυαιθυλένιο χαμηλής πυκνότητας (LLDPE)**: συνδυάζει τις ιδιότητες των LDPE και HDPE και χρησιμοποιείται για ταινίες και σακούλες.

2. Πολυπροπυλένιο (PP)

Το πολυπροπυλένιο είναι ένα ανθεκτικό, ελαφρύ πολυμερές με εξαιρετική χημική και θερμική αντοχή. Χρησιμοποιείται στις ακόλουθες εφαρμογές:

- Συσκευασία: μπουκάλια, καπάκια, σακούλες.

- Κλωστοϋφαντουργικά προϊόντα: χαλιά, υφάσματα, σχοινιά.

- Αυτοκινητοβιομηχανία: εξαρτήματα αυτοκινήτων, μπαταρίες.

3. Πολυβινυλοχλωρίδιο (PVC)

Το PVC είναι ένα εύκαμπτο πολυμερές, το οποίο μπορεί να είναι άκαμπτο ή μαλακό:

- Άκαμπτο PVC: χρησιμοποιείται για σωλήνες, πλαίσια παραθύρων, οικοδομικά υλικά.

- Άκαμπτο PVC: χρησιμοποιείται για καλώδια, σωλήνες, επενδύσεις δαπέδων, τεχνητό δέρμα κ.λπ.

4. Πολυστυρένιο (PS).

Το πολυστυρένιο είναι ένα διαφανές, σκληρό και εύθραυστο πολυμερές που χρησιμοποιείται ευρέως για

- Συσκευασία: κουτιά CD και DVD, δίσκοι τροφίμων, ποτήρια μίας χρήσης.

- Διογκωμένη πολυστερίνη (EPS) για μόνωση και προστατευτική συσκευασία.

5. Πολυαμίδιο (νάιλον).

Το πολυαμίδιο, γνωστό και ως νάιλον, είναι ένα ανθεκτικό και ανθεκτικό στην τριβή πολυμερές που χρησιμοποιείται σε

- Κλωστοϋφαντουργικά προϊόντα: ρούχα, καλσόν και υφάσματα.

- Μηχανικά μέρη: ρουλεμάν, γρανάζια, βίδες.

6. Πολυουρεθάνη (PU).

Η πολυουρεθάνη είναι ένα εύκαμπτο πολυμερές, το οποίο μπορεί να είναι είτε αφρώδες είτε στερεό:

- Αφρώδης πολυουρεθάνη: χρησιμοποιείται σε στρώματα, καθίσματα και μονώσεις.

- Στερεά πολυουρεθάνη: χρησιμοποιείται για σόλες παπουτσιών, τροχούς, προστατευτικές επιφάνειες κ.λπ.

7. Πολυανθρακικό (PC).

Το πολυανθρακικό είναι ένα διαφανές, ανθεκτικό στη θερμότητα και την κρούση πολυμερές που χρησιμοποιείται για

- Οπτικά υλικά: γυαλιά, φακοί, CD, DVD.

- Υλικά: θερμοκήπια, γυαλί ασφαλείας, οικοδομικά υλικά.

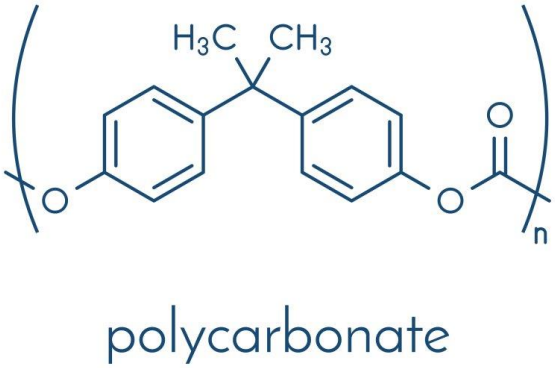


Figure 43 PC (Polycarbonate)

8. Πολυτετραφθοροαιθυλένιο (PTFE)

Γνωστό και ως Teflon, το PTFE είναι ανθεκτικό στα χημικά και τη θερμότητα:

- Μαγειρικά σκεύη: αντικολλητικές επιφάνειες.

- Βιομηχανικά εξαρτήματα: σφραγίδες, γρανάζια, παρεμβύσματα.

9. Μεθακρυλικό πολυμεθύλιο (PMMA)

Το PMMA, επίσης γνωστό ως πλεξιγκλάς, είναι ένα διαφανές, ελαφρύ πολυμερές που χρησιμοποιείται για:

- Οπτικά υλικά: φακοί, οθόνες, πινακίδες.

- Κτίριο: παράθυρα, προσόψεις κτιρίων.

10. Πολυγαλακτικό οξύ (PLA)

Το πολυγαλακτικό οξύ (PLA) είναι ένα βιοδιασπώμενο πολυμερές που παράγεται από ανανεώσιμες πηγές όπως το καλαμπόκι:

- Συσκευασία: κύπελλα, καλαμάκια, σακούλες.

- Τρισδιάστατη εκτύπωση: χρησιμοποιείται ευρέως ως υλικό για τρισδιάστατη εκτύπωση λόγω της βιοδιασπασιμότητάς του και της ευκολίας χρήσης του.



Figure 44 PLA pellets

11. Πολυεστέρας.

Ο πολυεστέρας είναι μια οικογένεια πολυμερών που χρησιμοποιούνται στις ακόλουθες εφαρμογές:

- Κλωστοϋφαντουργικά προϊόντα: ρούχα, υφάσματα, κορδέλες.

- Σύνθετα υλικά: ενισχυμένα πλαστικά, ίνες γυαλιού.

Κάθε πολυμερές έχει τις δικές του μοναδικές ιδιότητες και χρήσεις, καθιστώντας το αναπόσπαστο μέρος πολλών βιομηχανιών και καθημερινών εφαρμογών. Διαφορετικές χημικές δομές και μέθοδοι επεξεργασίας μπορούν να παράγουν υλικά με ειδικές ιδιότητες που μπορούν να ικανοποιήσουν διαφορετικές απαιτήσεις και ανάγκες.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5ο - PA12, HDPE, PETG

5.1 PA12 (πολυαμίδιο 12, polyamide 12)

Το PA12 (πολυαμίδιο 12, νάιλον 12) είναι ένας τύπος θερμοπλαστικού πολυμερούς που ανήκει στην οικογένεια των πολυαμιδίων. Γνωστό για τις εξαιρετικές του ιδιότητες και χρησιμοποιείται σε ποικίλες βιομηχανικές εφαρμογές, ας δούμε αναλυτικά τα χαρακτηριστικά, τις ιδιότητες και τις εφαρμογές του PA12:

5.1.1 Χαρακτηριστικά και ιδιότητες του PA12.

1. Χημική δομή.

Ο PA12 είναι ουσιαστικά ένας μακράς αλυσίδας αλειφατικός γραμμικός πολυεστέρας. Παρασκευάζεται με πολυμερισμό με άνοιγμα δακτυλίου είτε του μονομερούς λαυρυλακτάμης είτε δωδεκαλακτάμης. Η δομή του είναι (-NH-(CH2)11-CO-)n.

2. Χαμηλή απορρόφηση υγρασίας:

Το PA12 απορροφά λιγότερη υγρασία σε σχέση με άλλα πολυαμίδια, για παράδειγμα, το PA6. Έτσι, είναι το κατάλληλο υλικό για εφαρμογές που απαιτούν σταθερότητα διαστάσεων και ηλεκτρική αντίσταση.

3. Ελαφρύ και ανθεκτικό:

Το PA12 ενώ έχει μικρό βάρος, μπορεί παράλληλα να είναι ιδιαίτερα ανθεκτικό σε κρούσεις και λειαντικές ενέργειες, καθώς είναι σε θέση να διατηρήσει τις μηχανικές του ιδιότητες σε ένα ευρύ φάσμα θερμοκρασιών.

4. Χημική αντοχή:

Το PA12 είναι εξαιρετικά ανθεκτικό σε καύσιμα, λάδια, λιπαντικά και στους περισσότερους διαλύτες.

5. Θερμικές ιδιότητες:

Έχει Υψηλό σημείο τήξης και καταφέρνει μπορεί να αντέξει σε υψηλές θερμοκρασίες χωρίς να χάνονται μηχανικές ιδιότητες.

6. Ευκαμψία και αντοχή σε θραύση:

Το PA12 είναι ιδανικό για εφαρμογές που είναι απαραίτητη η ευκαμψία καθώς έχει αντοχή σε θραύση ακόμη και σε χαμηλές θερμοκρασίες.

5.1.2 Εφαρμογές για το PA12.

- Αυτοκινητοβιομηχανία

Στην αυτοκινητοβιομηχανία πολλά εξαρτήματα αυτοκινήτων κατασκευάζονται από PA12, όπως γραμμές καυσίμου, καλύμματα καλωδίων και εξαρτήματα συστήματος ψύξης. Αυτό συμβαίνει καθώς αφορά ένα υλικό όπου έχει μεγάλη αντοχή σε χημική διάβρωση και σε υψηλές θερμοκρασίες.

- Ηλεκτρικές και ηλεκτρονικές εφαρμογές

Χρησιμοποιείται σε καλώδια και συνδέσμους επειδή έχει υψηλή αντίσταση στην υγρασία και κατά βάση ηλεκτρική αντίσταση.

- Ιατρικές εφαρμογές.

Είναι από τα λίγα που εφαρμόζονται σε ιατρικές συσκευές και εξαρτήματα επειδή είναι βιοσυμβατό και χημικά ανθεκτικό.

- Μηχανολογικές εφαρμογές

Συνιστάται για σωλήνες, εξαρτήματα και φίλτρα που υπόκεινται σε λειαντική και χημική φθορά.

- Εκτύπωση 3D

Αποτελεί ενα από τα πιο κοινά υλικά για τρισδιάστατη εκτύπωση, καθώς είναι εύκολο στην επεξεργασία του, έχει υψηλή αντοχή και σταθερότητα στα εκτυπωμένα δοκίμια. Χρησιμοποιείται σε διαδικασίες που βασίζονται σε SLS για την παραγωγή πρωτοτύπων και τελικών εξαρτημάτων.

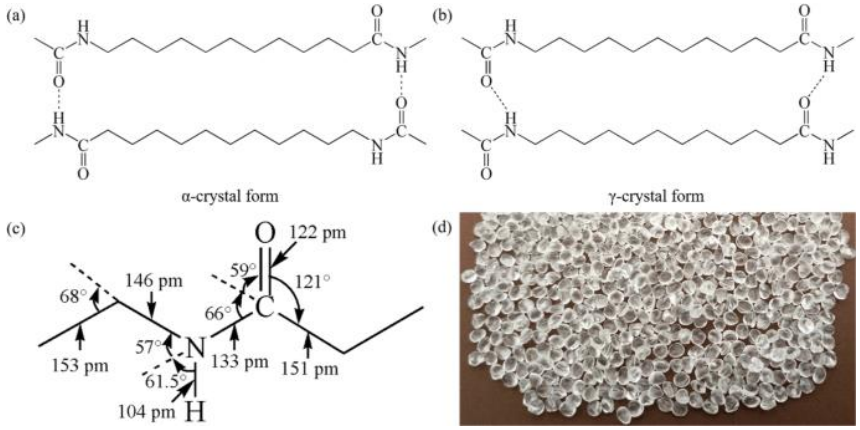


Figure 45 Δομή PA12

5.1.3 Πλεονεκτήματα του PA12 στην τρισδιάστατη εκτύπωση.

- Σταθερότητα διαστάσεων

Έχει χαμηλό δείκτη παραμόρφωσης όσον αφορά τα εκτυπωμένα δοκίμια, λόγω της υψηλής αντοχής του σε υγρασία.

- Υψηλή αντοχή και ευελιξία

Τα αντικείμενα που εκτυπώνονται χαρακτηρίζονται για την ευκαμψία και ανθεκτικότητα τους, και τα καθιστά κατάλληλα για πρότυπα και εξαρτήματα.

- Εύκολη επεξεργασία

Το PA12 έχει την ευελιξία επεξεργασίας και μπορεί να παράξει δοκίμια μεγάλης ακρίβειας και λεπτομέρειας.

- Καλή ποιότητα επιφάνειας

Τα τελικά δοκίμια από PA12, παρουσιάζονται με εξαιρετική ποιότητα επιφάνειας και μπορούν να χρησιμοποιηθούν χωρίς τελική επεξεργασία.

Το PA12 είναι ένα πολύτιμο πολυμερές ικανό να ανταπεξέλθει σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών λόγω των εξαιρετικών μηχανικών, θερμικών και χημικών ιδιοτήτων του. Σε πολλές βιομηχανίες είναι πρότυπο λόγω της ευελιξίας του, ενώ οι δυνατότητες τρισδιάστατης εκτύπωσης το καθιστούν σημαντικό εργαλείο για την κατασκευή ακριβών και ανθεκτικών προτύπων.

5.2 HDPE (πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας, high density polyethylene)

Το πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας (HDPE) είναι ένα από τα πιο σημαντικά και ευρέως χρησιμοποιούμενα πολυμερή. Χαρακτηρίζεται από την υψηλή πυκνότητα και την κρυσταλλική δομή του, έχει εξαιρετικές μηχανικές και χημικές ιδιότητες Ας δούμε αναλυτικά τις ιδιότητες, τα χαρακτηριστικά και τις εφαρμογές του HDPE.

5.2.1 Χαρακτηριστικά και Ιδιότητες του HDPE.

1. Χημική δομή

Το HDPE αποτελείται από επαναλαμβανόμενες μονάδες αιθυλενίου (-CH2-CH2-) και χαρακτηρίζεται από μακριές γραμμικές αλυσίδες με λίγες ή καθόλου διακλαδώσεις. Αυτή η δομή παρέχει υψηλή πυκνότητα και κρυσταλλικότητα.

2. Υψηλή πυκνότητα και σκληρότητα

Τα είδη HDPE έχουν υψηλότερη πυκνότητα και σκληρότητα σε σύγκριση με το LDPE.

3. Μηχανική αντοχή

Το HDPE έχει υψηλή αντοχή σε εφελκυσμό και αντοχή σε κρούσεις. μπορεί να συνιστάται για υπεύθυνες εφαρμογές μηχανικής.

4. Χαμηλή απορρόφηση υγρασίας

Πρακτικά δεν δέχεται νερό, το HDPE απορροφά πολύ μικρή ποσότητα υγρασίας, γεγονός που το καθιστά κατάλληλη λύση όταν εργάζεστε σε υγρά περιβάλλοντα.

5. Χημική αντοχή

Αντέχει στα περισσότερα οξέα, βάσεις και χημικούς διαλύτες. Αντέχει στα περισσότερα χημικά και διαλύτες.

6. Θερμικές ιδιότητες

Το σημείο τήξης του HDPE είναι περίπου 130°C. Χαρακτηριστικό του είναι η υψηλή αντοχή σε χαμηλές θερμοκρασίες, ενώ σε πολύ υψηλές μπορεί να χάσει τις μηχανικές του ιδιότητες.

7. Εύκολη επεξεργασία

Το HDPE μπορεί να υποστεί επεξεργασία με διάφορους τρόπους, όπως χύτευση με έγχυση, εξώθηση και εμφύσηση, για την παραγωγή ενός ευρέος φάσματος προϊόντων.



Figure 46 Κόκοι HDPE

5.2.2 Εφαρμογές του HDPE

- Συσκευασία

Χρησιμοποιείται ευρέως στην κατασκευή δοχείων και φιαλών, όπως δοχεία γάλακτος, δοχεία σαμπουάν και καπάκια φιαλών, το HDPE είναι ασφαλές σε επαφή με τρόφιμα, καθιστώντας το ιδανικό για τη συσκευασία τροφίμων και ποτών.

- Σωληνώσεις και συστήματα παροχής νερού

Το HDPE χρησιμοποιείται για σωληνώσεις σε συστήματα ύδρευσης, αποχέτευσης και παροχής αερίου λόγω της εξαιρετικής αντοχής του στη διάβρωση και τη χημική επεξεργασία- οι σωλήνες HDPE είναι εύκαμπτοι και αντέχουν σε υψηλές πιέσεις.

- Κατασκευές

Χρησιμοποιείται για οικοδομικά υλικά όπως πλαστικά φύλλα, δάπεδα και μονώσεις. Είναι κατάλληλο επίσης για την κατασκευή υπόγειων και υποβρύχιων υποδομών.

- Γεωτεχνικές εφαρμογές

Χρησιμοποιείται σε συστήματα άρδευσης και αποστράγγισης λόγω της αντοχής του στην υγρασία και τα χημικά, καθώς οι σωλήνες και τα εξαρτήματα από HDPE είναι ανθεκτικά και ικανά να αντέξουν στο χρόνο.

- Προϊόντα για καταναλωτές

Πολλά παιχνίδια, κάδοι απορριμμάτων, εργαλεία και άλλα είδη οικιακής χρήσης. Είναι κατάλληλο υλικό κατασκευής λόγω της ανθεκτικότητας και της ασφάλειάς του έναντι της επαφής με τρόφιμα και παιδιά.

- Εκτύπωση 3D

Αν και δεν είναι τόσο διαδεδομένο όσο άλλα πολυμερή, το HDPE χρησιμοποιείται επίσης στην τρισδιάστατη εκτύπωση για τη δημιουργία ανθεκτικών εξαρτημάτων και πρωτοτύπων.

5.2.3 Πλεονεκτήματα του HDPE στην τρισδιάστατη εκτύπωση.

- Υψηλή αντοχή και ευελιξία

Τα αντικείμενα που εκτυπώνονται με HDPE είναι ανθεκτικά και εύκαμπτα, ιδανικά για λειτουργικά πρωτότυπα και τελικά προϊόντα.

- Χαμηλή απορρόφηση υγρασίας

Προβάλλουν υψηλή ανθεκτικότητα στην υγρασία. Έχουν την δυνατότητα να διατηρούν τις διαστάσεις τους, χωρίς να παραμορφώνονται σε υγρό περιβάλλον.

- Καλή χημική αντοχή

Τα εκτυπωμένα κομμάτια από HDPE είναι ανθεκτικά στις χημικές ουσίες και κατάλληλα για βιομηχανικές εφαρμογές.

- Οικονομικό υλικό

Βασικό πλεονέκτημα του αποτελεί το χαμηλό κόστος αγοράς του ως πρώτη ύλη. Το καθιστά μια οικονομική επιλογή για διάφορες εφαρμογές τρισδιάστατης εκτύπωσης.

Ο συνδυασμός αντοχής, ευελιξίας και χημικής αντοχής του HDPE το καθιστά ένα εξαιρετικά πολύτιμο υλικό. Οι ποικίλες εφαρμογές του σε διάφορους κλάδους, από την αυτοκινητοβιομηχανία και τις κατασκευές μέχρι τη γεωργία και την καθημερινή ζωή, πιστοποιούν τη σημασία και την ευελιξία του. Η χρήση του σε τρισδιάστατους εκτυπωτές προσφέρει πρόσθετες δυνατότητες και οφέλη, καθιστώντας το απαραίτητο υλικό στη σύγχρονη τεχνολογία και βιομηχανία.

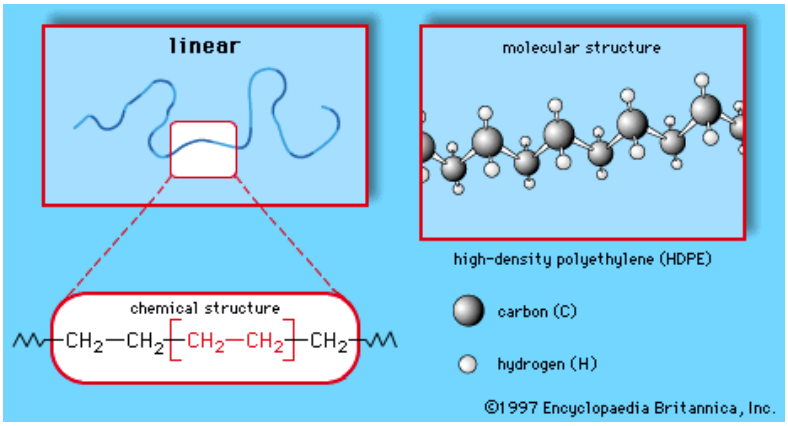


Figure 47 Χημική και μοριακή δομή HDPE

5.3. PETG (γλυκόλη πολυαιθυλενίου τερεφθαλικού, polyethylene terephthalate glycol)

Το PETG (polyethylene terephthalate glycol) είναι ένα θερμοπλαστικό πολυμερές που παρασκευάζεται με την προσθήκη γλυκόλης στο PET (polyethylene terephthalate). Αυτή η τροποποίηση έχει βελτιώσει τις ιδιότητες του PETG και το έχει καταστήσει ένα πολύ δημοφιλές υλικό για μια ποικιλία εφαρμογών, συμπεριλαμβανομένης της τρισδιάστατης εκτύπωσης.



Figure 48 Κόκκοι PETG

5.3.1 Χαρακτηριστικά και ιδιότητες του PETG.

1. Χημική δομή

Το PETG είναι ένα συμπολυμερές που περιλαμβάνει μονομερή αιθυλενίου, τουρφθαλικού οξέος και γλυκόλης. Η προσθήκη γλυκόλης στο πολυμερές μειώνει την κρυσταλλικότητα και αυξάνει την αντοχή σε κρούση.

2. Υψηλή διαφάνεια

Το PETG είναι διαφανές και γυαλιστερό, γεγονός που το καθιστά ιδανικό για εφαρμογές όπου απαιτείται αχρωμία.

3. Μηχανική αντοχή

Κύριο πλεονέκτημα αποτελεί η αντοχή του σε εφελκυσμό σε θραύση, θεωρείται από τα πιο αξιόπιστα υλικά όσον αφορά τις μηχανικές ιδιότητες και την ανθεκτικότητά.

4. Ακαμψία και ελαστικότητα

Περισσότερο εύκαμπτο συγκριτικά με το ακρυλικό ή το ABS. Ως εκ τούτου, είναι ιδανικό για εφαρμογές όπου απαραίτητη είναι η ευελιξία και η ανθεκτικότητα.

5. Χημική αντοχή

Το PETG είναι αρκετά ανθεκτικό σε χημικές ουσίες, συμπεριλαμβανομένων των οξέων και των βάσεων. Είναι επίσης ανθεκτικό στους περισσότερους διαλύτες.

6. Θερμικές ιδιότητες

Το PETG έχει σημείο τήξης περίπου 260°C πράγμα που υποδηλώνει υψηλή θερμική αντοχή, και αυτό το καθιστά ικανό να αντέχει σε ένα ευρύ φάσμα θερμοκρασιών χωρίς να διακυβεύονται οι μηχανικές του ιδιότητες.

7. Δυνατότητα επεξεργασίας.

Το PETG παρουσιάζεται ως ένα ευέλικτο υλικό ως προς τις χρήσεις του για την κατασκευή πλαστικών προϊόντων καθώς μπορεί εύκολα να υποστεί επεξεργασία με διάφορους τρόπους, όπως η χύτευση με έγχυση και η χύτευση με εξώθηση.

5.3.2 Εφαρμογές PETG.

- Συσκευασία

Λόγω της οπτικής του καθαρότητας και αντοχής, το PETG χρησιμοποιείται ευρέως στην κατασκευή διαφανών φιαλών, δοχείων και καπακιών.

- Ιατρικές συσκευές.

Λόγω της βιοσυμβατότητας και της χημικής του αντοχής, χρησιμοποιείται σε ιατρικές συσκευές και όργανα. Είναι επίσης κατάλληλο για αποστείρωση με ατμό και ακτινοβολία.

- Επιγραφές διαφήμισης και σήμανση

Λόγω της διαφάνειας και της αντοχής του, το PETG χρησιμοποιείται στην κατασκευή διαφημιστικών πινακίδων, οθονών και άλλων διαφανών προϊόντων.

- Εφαρμογές στη μεταποίηση.

Λόγω της μηχανικής του αντοχής και της ευκολίας επεξεργασίας του, το PETG χρησιμοποιείται σε διάφορα κατασκευαστικά υλικά, όπως πάνελ και προστατευτικά καλύμματα.

- Καταναλωτικά προϊόντα

Πολλά παιχνίδια, εργαλεία, οικιακά και άλλα προϊόντα καθημερινής χρήσης κατασκευάζονται από PETG, λόγω της ασφάλειας και της ανθεκτικότητάς του.

- Εκτύπωση 3D

Το PETG λόγω του γεγονότος ότι παρουσιάζει πολύ καλές μηχανικές και θερμικές ιδιότητες, το καθιστά ένα από τα πιο δημοφιλή υλικά για τρισδιάστατη εκτύπωση.

5.3.3 Πλεονεκτήματα του PETG στην τρισδιάστατη εκτύπωση.

➢ Υψηλή αντοχή και ευελιξία

Τα εκτυπωμένα δοκίμια από PETG παρουσιάζουν υψηλή ανθεκτικότητα και ευκαμψία, πράγμα που τα καθιστά πλήρως λειτουργικά για οποιαδήποτε χρήση.

➢ Καλή πρόσφυση στρώματος

Κατά την εκτύπωση τα στρώματα έχουν εξαιρετική πρόσφυση μεταξύ τους, έτσι μειώνονται οι πιθανότητες θραύσης του δοκιμίου και βελτιώνεται η συνολική του αντοχή.

➢ Χαμηλή απορρόφηση υγρασίας

Τα εκτυπωμένα αντικείμενα έχουν μεγάλη αντοχή στην υγρασία και μπορούν να διατηρούν τις διαστάσεις τους.

➢ Αντοχή σε χημικές ουσίες

Τα τυπωμένα μέρη PETG είναι ανθεκτικά στις χημικές ουσίες και κατάλληλα για βιομηχανικές εφαρμογές.

➢ Οικονομικό υλικό

Συχνά χρησιμοποιείται στην τρισδιάστατη εκτύπωση καθώς πέρα από τις εξαιρετικές του ιδιότητες, αποτελεί και ένα σχετικά φθηνό υλικό ως πρώτη ύλη.

Το PETG είναι ένα ιδιαίτερα πολύτιμο πολυμερές με ευρύ φάσμα εφαρμογών λόγω των εξαιρετικών μηχανικών, θερμικών και χημικών ιδιοτήτων του. Οι ποικίλες εφαρμογές του σε πολλούς τομείς, από την ιατρική και τις κατασκευές έως την καθημερινή ζωή, πιστοποιούν τη σημασία και την ευελιξία του. Η χρήση του στην τρισδιάστατη εκτύπωση προσφέρει πρόσθετες δυνατότητες και οφέλη, καθιστώντας το απαραίτητο υλικό στη σύγχρονη τεχνολογία και βιομηχανία.

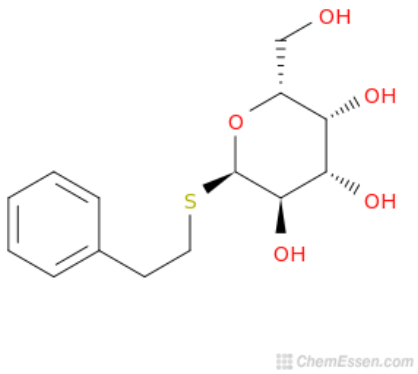


Figure 49 Χημική δομή PETG

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6ο - ΝΑΝΟΥΛΙΚΑ, ΝΑΝΟΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ

6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στον κόσμο της επιστήμης και της τεχνολογίας, η αναζήτηση υλικών με ανώτερες ιδιότητες και λειτουργικότητα έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη καινοτόμων κλάδων. Ένας από τους πιο συναρπαστικούς και πολλά υποσχόμενους τομείς είναι τα νανοϋλικά και τα νανοσύνθετα υλικά. Τα νανοϋλικά σε μέγεθος νανομέτρου παρουσιάζουν νέες ιδιότητες και συμπεριφορές που δεν παρατηρούνται στα μακροϋλικά. Αυτές οι μοναδικές ιδιότητες αποδίδονται σε κβαντικά φαινόμενα και σε υψηλές αναλογίες επιφάνειας προς όγκο, επιτρέποντας τη δημιουργία υλικών με βελτιωμένη μηχανική αντοχή, ηλεκτρική αγωγιμότητα, χημική δραστηριότητα και βιοσυμβατότητα.

Οι εξελίξεις στην τεχνολογία των νανοϋλικών και στις μεθόδους κατασκευής έχουν οδηγήσει στην ανάπτυξη νανοσύνθετων υλικών. Τα νανοσύνθετα υλικά ενσωματώνουν νανοσωματίδια σε μια μήτρα άλλων υλικών για τη δημιουργία σύνθετων δομών με εξαιρετικές ιδιότητες. Αυτές οι σύνθετες δομές προσφέρουν βελτιώσεις σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, από την αεροδιαστημική και την αυτοκινητοβιομηχανία έως την ιατρική και την ηλεκτρονική.

Η εισαγωγή αυτού του κεφαλαίου περιγράφει τις βασικές αρχές και ιδιότητες των νανοϋλικών, αναλύει τον τρόπο παραγωγής τους και τις ιδιότητες που τα καθιστούν ιδιαίτερα. Στη συνέχεια διερευνά την ανάπτυξη και την εφαρμογή των νανοσύνθετων υλικών, εστιάζοντας σε καινοτομίες που έχουν αλλάξει τον τρόπο με τον οποίο τα υλικά αντιμετωπίζονται και χρησιμοποιούνται στη σύγχρονη τεχνολογία. Με την εκρηκτική ανάπτυξη της νανοτεχνολογίας, ο κόσμος των νανοϋλικών και των νανοσύνθετων υλικών συνεχίζει να μας εκπλήσσει.

6.2 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

Η ανάπτυξη των νανοϋλικών και των νανοσύνθετων υλικών είναι ένας τομέας βαθιά ριζωμένος στην ιστορία της επιστήμης και της τεχνολογίας, που χρονολογείται από τις αρχές του 20ού αιώνα. Η ιδέα των υλικών νανοκλίμακας μπορεί να αναχθεί σε ένα πείραμα που διεξήγαγε ο Richard Feynman το 1959. Στην ομιλία του, ο Feynman προέβλεψε μια επανάσταση στη νανοτεχνολογία και περιέγραψε πώς τα υλικά θα μπορούσαν να κατασκευαστούν και να ελεγχθούν σε ατομικό και μοριακό επίπεδο. Η πρόβλεψη αυτή έθεσε τα θεμέλια για τις μετέπειτα εξελίξεις στην κατανόηση και τη χρήση των νανοϋλικών.

Στη δεκαετία του 1980, οι ερευνητές ανακάλυψαν δύο από τα πιο σημαντικά νανοϋλικά: τους νανοσωλήνες άνθρακα και τα φουλερένια, που ανακαλύφθηκαν από τον Sumio Iijima το 1991, είναι κυλινδρικές δομές άνθρακα με εξαιρετική μηχανική αντοχή και ηλεκτρική αγωγιμότητα Το 1985, ο Robert Carl, Harold Kroot και ο Richard Smalley ανακάλυψαν τα φουλερένια, σφαιρικές δομές άνθρακα που άνοιξαν νέες δυνατότητες στη χημεία και την επιστήμη των υλικών. Οι ανακαλύψεις αυτές οδήγησαν σε ένα κύμα έρευνας και εφαρμογών, συμβάλλοντας στην ανάπτυξη της σύγχρονης νανοτεχνολογίας.

Τις τελευταίες δεκαετίες, η νανοτεχνολογία έχει σημειώσει ραγδαία πρόοδο και έχουν αναπτυχθεί διάφορα νανοϋλικά και νανοσύνθετα υλικά. Οι μέθοδοι σύνθεσης και επεξεργασίας, όπως η χημική εναπόθεση ατμών (CVD) και η μηχανική άλεση, έχουν εξελιχθεί σημαντικά, επιτρέποντας την παραγωγή νανοϋλικών σε βιομηχανική κλίμακα. Ταυτόχρονα, προηγμένες αναλυτικές τεχνικές όπως η ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης (SEM) και η μικροσκοπία ατομικής δύναμης (AFM) έχουν βελτιώσει την κατανόηση των ιδιοτήτων των νανοϋλικών. Οι εξελίξεις αυτές έχουν οδηγήσει σε πρακτικές εφαρμογές σε τομείς όπως η ιατρική, η ενέργεια, η ηλεκτρονική και η περιβαλλοντική τεχνολογία, αποδεικνύοντας ότι η νανοτεχνολογία δεν είναι μόνο ένα θεωρητικό πεδίο έρευνας, αλλά και μια κινητήρια δύναμη για τη βιομηχανική καινοτομία και την κοινωνική πρόοδο.

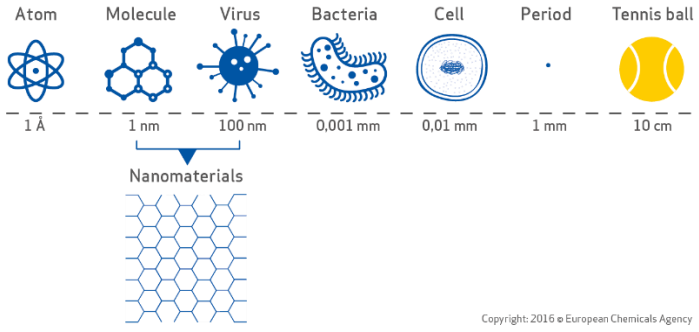


Figure 50 Νανοϋλικά

6.3 ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ

Οι θεμελιώδειςαρχές της νανοτεχνολογίας και των νανοϋλικών είναι σημαντικές για την κατανόηση των μοναδικών ιδιοτήτων και της συμπεριφοράς αυτών των υλικών. Οι αρχές αυτές επικεντρώνονται στην κατανόηση της ατομικής και μοριακής δομής των υλικών, των μεθόδων σύνθεσης καιεπεξεργασίας και της επίδρασηςτης κλίμακας νανομέτρων στις φυσικές και χημικές ιδιότητες των υλικών.

1. Κβαντικάφαινόμενα

Στη νανοκλίμακα, τα υλικά παρουσιάζουν ιδιότητες που είναι πολύ διαφορετικές από εκείνε ςπου παρατηρούνται σε μεγαλύτερες κλίμακες. Αυτό οφείλεται σεκ βαντικά φαινόμενα, τα οποία γίνονται κυρίαρχα καθώ ςοι διαστάσεις του υλικού πλησιάζουν το μήκος κύματος ενός ηλεκτρονίου. Για παράδειγμα, η κβαντική σύλληψη επηρεάζει τις ηλεκτρονικές ιδιότητες των υλικών, οδηγώντας σε αυξημένη αγωγιμότητα και μοναδικές οπτικές ιδιότητες.Τέτοιακ βαντικά φαινόμενα μπορούν να αξιοποιηθούν για τη δημιουργία νέων συσκευών και εφαρμογών, όπως τα κβαντικά σημεία και οι νανοσωλήνες άνθρακα.

2. Υψηλός λόγος επιφάνειας προς όγκο

Ένα από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά των νανοϋλικών είναι ο υψηλός λόγος επιφάνειας προς όγκο. Καθώς μειώνονται οι διαστάσεις του υλικού, αυξάνεται ο λόγος επιφάνειας προς όγκο. Ως αποτέλεσμα, τα νανοϋλικά έχουν μεγαλύτερη επιφάνεια για να αλληλεπιδράσουν με το περιβάλλον, γεγονός που βελτιώνει τις χημικές και καταλυτικές τους ιδιότητες. Η αρχή αυτή είναι απαραίτητη για την ανάπτυξη καταλυτών, αισθητήρων και συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας.

3. Σχεδιασμός και σύνθεση

Η σύνθεση και ο σχεδιασμός των νανοϋλικών απαιτεί εξειδικευμένες μεθόδους και τεχνικές. Δύο κύριες προσεγγίσεις είναι η από κάτω προς τα πάνω και η από πάνω προς τα κάτω. Στην προσέγγιση "από κάτω προς τα πάνω", τα νανοσωματίδια συντίθενται χημικά από άτομα ή μόρια, π.χ. με χημική εναπόθεση ατμών (CVD) ή σε υδατικό διάλυμα. Στην προσέγγιση "από πάνω προς τα κάτω", μεγάλες δομές νανοκλίμακας υφίστανται μηχανική επεξεργασία, όπως με νανολιθογραφία ή μηχανικό φρεζάρισμα. Αυτές οι τεχνικές επιτρέπουν την παραγωγή νανοϋλικών με επακριβώς ελεγχόμενη μορφολογία, μέγεθος και δομή.

4. Χαρακτηρισμός και ανάλυση

Η κατανόηση και η αξιολόγηση των ιδιοτήτων των νανοϋλικών απαιτεί προηγμένες τεχνικές χαρακτηρισμού και ανάλυσης. Η ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης (SEM), η μικροσκοπία ατομικής δύναμης (AFM) και η φασματοσκοπία Raman είναι μερικές από τις τεχνικές που χρησιμοποιούνται για την απεικόνιση και την ανάλυση των νανοϋλικών σε ατομικό επίπεδο. Οι τεχνικές αυτές επιτρέπουν την παρατήρηση δομικών και μορφολογικών χαρακτηριστικών καθώς και την κατανόηση των φυσικών και χημικών ιδιοτήτων των νανοϋλικών.

5. Βιοσυμβατότητα και ασφάλεια.

Η βιοσυμβατότητα και η ασφάλεια των νανοϋλικών είναι επίσης σημαντικές αρχές που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά την ανάπτυξη και την εφαρμογή τους. Τα νανοϋλικά έχουν τη δυνατότητα να αλληλεπιδρούν με βιολογικά συστήματα με τρόπους που δεν παρατηρούνται σε μεγαλύτερες κλίμακες, γεγονός που αποτελεί ευκαιρία και πρόκληση. Η κατανόηση των βιολογικών επιδράσεων και η διασφάλιση της ασφάλειας των νανοϋλικών είναι ζωτικής σημασίας για την επιτυχή ενσωμάτωση των νανοϋλικών σε βιοϊατρικές και άλλες ευαίσθητες εφαρμογές.

Οι βασικές αρχές των νανοϋλικών και των νανοσύνθετων υλικών αποτελούν έναν τρόπο προσέγγισης της έρευνας και της ανάπτυξης σε αυτόν τον καινοτόμο τομέα. Με την κατανόηση αυτών των αρχών, μπορούμε να αξιοποιήσουμε τις μοναδικές ιδιότητες των νανοϋλικών για τη δημιουργία νέων και βελτιωμένων τεχνολογιών, οδηγώντας σε έναν κόσμο ατελείωτων δυνατοτήτων και εφαρμογών.

6.4 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

Οι ιδιότητες των νανοϋλικών και των νανοσύνθετων υλικών διαφέρουν σημαντικά από εκείνες των μακροϋλικών λόγω της κυριαρχίας των νανοκλίμακας και των κβαντικών φαινομένων. Οι ιδιότητες αυτές καθορίζουν τη συμπεριφορά και τη λειτουργικότητα των νανοϋλικών σε διάφορες εφαρμογές. Ακολουθούν οι κύριες ιδιότητες που χαρακτηρίζουν τα νανοϋλικά και τα νανοσύνθετα υλικά:

6.4.1 Μηχανικές ιδιότητες.

- Αντοχή και σκληρότητα

Τα νανοϋλικά είναι συχνά πιο ανθεκτικά και σκληρότερα από τα μακροϋλικά. Για παράδειγμα, οι νανοσωλήνες άνθρακα έχουν πολύ υψηλή αντοχή στον εφελκυσμό, γεγονός που τους καθιστά ιδανικούς για την ενίσχυση σύνθετων υλικών.

- Ελαστικότητα

Οι μικρές διαστάσεις των νανοσωματιδίων έχουν ως αποτέλεσμα μεγαλύτερη ελαστικότητα και ευκαμψία. Η ιδιότητα αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική σε εφαρμογές όπου απαιτείται ευελιξία, όπως στην κατασκευή εύκαμπτων ηλεκτρονικών.

6.4.2 Θερμικές ιδιότητες.

- Θερμική αγωγημότητα

Τα νανοϋλικά μπορούν να παρουσιάσουν εξαιρετική θερμική αγωγιμότητα. Για παράδειγμα, οι νανοσωλήνες άνθρακα έχουν πολύ υψηλή θερμική αγωγιμότητα, γεγονός που τους καθιστά κατάλληλους για θερμική διαχείριση.

- Θερμική σταθερότητα

Πολλά νανοϋλικά παραμένουν σταθερά σε υψηλές θερμοκρασίες. Η ιδιότητα αυτή είναι απαραίτητη για εφαρμογές σε περιβάλλοντα υψηλών θερμοκρασιών.

6.4.3 Ηλεκτρικές ιδιότητες.

- Η ηλεκτρική αγωγιμότητα των νανοϋλικών, όπως οι νανοσωλήνες άνθρακα και το γραφένιο, μπορεί να είναι πολύ υψηλή. Τα υλικά αυτά είναι κατάλληλα για την ανάπτυξη αγώγιμων διασυνδέσεων και ηλεκτρονικών συσκευών υψηλής απόδοσης.

- Πολλά νανοϋλικά μπορούν να λειτουργήσουν ως ημιαγωγοί και η ηλεκτρική τους αγωγιμότητα μπορεί να ελεγχθεί με ντοπάρισμα ή άλλες μεθόδους. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό για την ανάπτυξη της νανοηλεκτρονικής και των νανοσυσκευών.

6.4.4 Οπτικές ιδιότητες.

- Φωτονική απόκριση

Τα νανοϋλικά μπορούν να παρουσιάζουν μοναδικές οπτικές ιδιότητες που επηρεάζουν τη φωτονική τους απόκριση, όπως η κβαντική σύλληψη. Τα κβαντικά σημεία, για παράδειγμα, μπορούν να εκπέμπουν φως σε συγκεκριμένα μήκη κύματος ανάλογα με το μέγεθός τους.

- Επιφάνεια

Ορισμένα νανοϋλικά, όπως το γραφένιο, είναι εξαιρετικά διαφανή και μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές όπως οθόνες αφής και διαφανή ηλεκτρόδια.

6.4.5 Χημικές ιδιότητες.

- Καταλυτική δραστικότητα

Τα νανοϋλικά έχουν υψηλή αναλογία επιφάνειας προς όγκο, γεγονός που τα καθιστά χημικά ενεργά και άριστους καταλύτες. Τα νανοσωματίδια μετάλλων, όπως τα νανοσωματίδια λευκόχρυσου, χρησιμοποιούνται ευρέως για καταλυτικές αντιδράσεις.

- Χημική σταθερότητα

Πολλά νανοϋλικά έχουν βελτιωμένη χημική σταθερότητα και αντέχουν στη διάβρωση και τις χημικές επιθέσεις. Αυτή η ιδιότητα είναι σημαντική για την ανάπτυξη υλικών μακράς διάρκειας ζωής.

6.4.6 Βιολογικές ιδιότητες.

- Μερικά νανοϋλικά, όπως τα νανοσωματίδια διοξειδίου του τιτανίου, είναι βιοσυμβατά και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για ιατρικές εφαρμογές, όπως η απεικόνιση και η στοχευμένη δοσολογία.

- Αντιμικροβιακές ιδιότητες

Ορισμένα νανοϋλικά, όπως τα νανοσωματίδια αργύρου, έχουν αντιμικροβιακές ιδιότητες και χρησιμοποιούνται σε επιφάνειες και υλικά για την πρόληψη της μικροβιακής μόλυνσης.

6.4.7 Μακροεπιδράσεις.

- Συμπεριφορά στη ροή του αέρα και των υγρών

Τα νανοϋλικά έχουν διαφορετική επίδραση στη ροή του αέρα και των υγρών από ό,τι τα μακροϋλικά, λόγω του μικρότερου μεγέθους και της μεγαλύτερης επιφάνειάς τους. Αυτό έχει μεγάλη σημασία σε εφαρμογές όπως τα φίλτρα και οι βιοϊατρικές συσκευές.

- Επιφανειακή τάση

Η μεγάλη επιφάνεια των νανοϋλικών οδηγεί σε αύξηση της επιφανειακής τάσης, η οποία επηρεάζει την πρόσφυση και τη συμπεριφορά τους σε υγρό περιβάλλον.

Αυτές οι ιδιότητες καθιστούν τα νανοϋλικά και τα νανοσύνθετα υλικά πολύ πολύτιμα σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών. Η δυνατότητα ελέγχου και τροποποίησης αυτών των ιδιοτήτων μέσω της σύνθεσης και της επεξεργασίας ανοίγει νέους δρόμους για την ανάπτυξη καινοτόμων τεχνολογιών σε διάφορους τομείς της βιομηχανίας και της επιστήμης.

6.5 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ – ΚΑΙΝΟΤΟΜΙΑ

Τα νανοϋλικά και τα νανοσύνθετα υλικά έχουν δημιουργήσει μια σειρά καινοτόμων εφαρμογών για τις μοναδικές τους ιδιότητες, παρέχοντας λύσεις σε διάφορους τομείς της τεχνολογίας και της βιομηχανίας. Εδώ παρουσιάζουμε μερικές από τις πιο εντυπωσιακές καινοτομίες που έχουν προκύψει από την έρευνα και την ανάπτυξη των νανοϋλικών:

6.5.1 Ιατρική και βιοτεχνολογία.

- Νανοϊατρική και νανοφορείς φαρμάκων:

Τα νανοϋλικά χρησιμοποιούνται για την ανάπτυξη νανοφορέων που μπορούν να παραδώσουν φάρμακα απευθείας στα καρκινικά κύτταρα, μειώνοντας τις παρενέργειες και ενισχύοντας τη θεραπευτική αποτελεσματικότητα. Τα λιπιδικά νανοσωματίδια και οι πολυμερείς νανοδομές είναι παραδείγματα τέτοιων φορέων που χρησιμοποιούνται για στοχευμένη φαρμακοθεραπεία.

- Νανοδιαγνωστικά εργαλεία:

Νανοϋλικά όπως κβαντικές κουκκίδες και νανοσωλήνες άνθρακα χρησιμοποιούνται για την ανάπτυξη εξαιρετικά ευαίσθητων αισθητήρων για την έγκαιρη ανίχνευση ασθενειών. Οι αισθητήρες αυτοί μπορούν να ανιχνεύουν βιοδείκτες σε πολύ χαμηλές συγκεντρώσεις, επιτρέποντας την έγκαιρη διάγνωση και την παρακολούθηση της θεραπείας.

6.5.2 Ενέργεια.

- Η χρήση νανοϋλικών, όπως οι κβαντικές τελείες και το γραφένιο, μπορεί να βελτιώσει την αποδοτικότητα και να μειώσει το κόστος κατασκευής. Τα υλικά αυτά επιτρέπουν τη δημιουργία εύκαμπτων, ημιδιαφανών ηλιακών κυψελών που μπορούν να ενσωματωθούν σε κτίρια και φορητές συσκευές.

- Νανοκαταλύτες για κυψέλες καυσίμου

Οι νανοκαταλύτες από λευκόχρυσο και άλλα μέταλλα χρησιμοποιούνται για τη βελτίωση της απόδοσης και της διάρκειας ζωής των κυψελών καυσίμου. Οι κυψέλες καυσίμου είναι πιο αποδοτικές και φιλικές προς το περιβάλλον, παρέχοντας καθαρή ενέργεια για οχήματα και σταθερές εφαρμογές.

6.5.3 Ηλεκτρονικά και υπολογιστές.

- Γραφένιο, νανοηλεκτρονική και τρανζίστορ

Νανοϋλικά όπως το γραφένιο και οι νανοσωλήνες άνθρακα χρησιμοποιούνται για την ανάπτυξη τρανζίστορ και άλλων ηλεκτρονικών εξαρτημάτων. Αυτά τα νανοϋλικά προσφέρουν υψηλότερες ταχύτητες και χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας από τα συμβατικά υλικά πυριτίου, ανοίγοντας το δρόμο για αποδοτικότερες και μικρότερες ηλεκτρονικές συσκευές.

- Εύκαμπτα ηλεκτρονικά

Τα εύκαμπτα νανοϋλικά, όπως τα αγώγιμα νανοφίλμ και οι μεταλλικές ίνες σε νανοκλίμακα, επιτρέπουν την ανάπτυξη εύκαμπτων και τεντώσιμων ηλεκτρονικών συσκευών. Οι συσκευές αυτές μπορούν να ενσωματωθούν σε ρούχα και άλλα καθημερινά αντικείμενα, προσφέροντας νέες δυνατότητες για την τεχνολογία που φοριέται και το Διαδίκτυο των πραγμάτων (IoT).

6.5.4 Περιβαλλοντική τεχνολογία.

- Νανοφίλτρα για τον καθαρισμό του νερού

Νανοϋλικά όπως νανοσωλήνες άνθρακα και νανοΐνες χρησιμοποιούνται για την παραγωγή φίλτρων που απομακρύνουν βακτήρια, ιούς και τοξίνες από το νερό. Τα φίλτρα αυτά είναι πιο αποτελεσματικά και ανθεκτικά από τα συμβατικά φίλτρα και παρέχουν μια λύση για την πρόσβαση σε καθαρό νερό στις αναπτυσσόμενες περιοχές.

- Νανοκαταλύτες για τη μείωση της ρύπανσης

Οι νανοκαταλύτες χρησιμοποιούνται σε συστήματα καθαρισμού καυσαερίων για τη διάσπαση των ρύπων και τη μείωση των εκπομπών από βιομηχανικές εγκαταστάσεις και οχήματα. Οι καταλύτες αυτοί είναι πιο αποτελεσματικοί και έχουν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής, συμβάλλοντας έτσι στη μείωση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης.

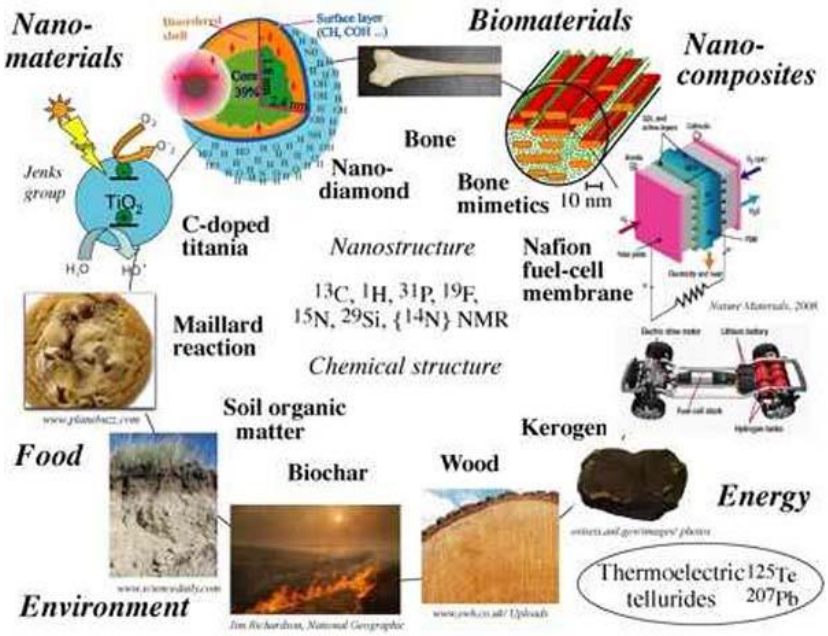


Figure 51 Εφαρμογές Νανοϋλικών και Νανοσύνθετων υλικών

Οι καινοτόμες εφαρμογές νανοϋλικών και νανοσύνθετων υλικών καταδεικνύουν τις δυνατότητες και το δυναμικό που προσφέρει η νανοτεχνολογία. Καθώς η έρευνα και η ανάπτυξη στον τομέα αυτό συνεχίζεται, μπορούμε να περιμένουμε να δούμε ακόμη πιο εντυπωσιακές εφαρμογές που θα βελτιώσουν την ποιότητα ζωής και θα αντιμετωπίσουν τις μεγάλες προκλήσεις της σύγχρονης κοινωνίας.

Τα νανοϋλικά μπορούν να σχεδιαστούν και να τροποποιηθούν σε μοριακό επίπεδο, επιτρέποντας την ακριβή προσαρμογή των ιδιοτήτων τους σε συγκεκριμένες εφαρμογές. Αυτή η δυνατότητα ελέγχου παρέχει τεράστια ευελιξία στην ανάπτυξη νέων τεχνολογιών και προϊόντων. Τα νανοσύνθετα υλικά, τα οποία συνδυάζουν νανοσωματίδια με άλλες υλικές μήτρες, επωφελούνται από τις βελτιωμένες ιδιότητες των νανοσωματιδίων, ενώ παράλληλα χρησιμοποιούν τις ιδιότητες της μήτρας για να δημιουργήσουν ένα υλικό με ιδιότητες βελτιστοποιημένες για μια συγκεκριμένη εφαρμογή.Αυτές οι ιδιότητες καθιστούν τα νανοϋλικά και τα νανοσύνθετα πολύτιμα σε πολλούς τομείς, από την ιατρική και την ηλεκτρονική μέχρι την ενέργεια και τις περιβαλλοντικές τεχνολογίες.

6.6 ΟΞΕΙΔΙΟΥ ΤΟΥ ΑΝΤΥΜΟΝΙΟΥ (ΑΤΟ)

Το οξείδιο του αντιμονίου είναι ένα υλικό με ευρύ φάσμα χρήσεων, που επηρεάζει την καθημερινή μας ζωή με τρόπους που δεν είναι πάντα προφανείς. Το οξείδιο του αντιμονίου ανακαλύφθηκε για πρώτη φορά στην αρχαιότητα και χρησιμοποιείται σε διάφορες μορφές και εφαρμογές εδώ και χιλιάδες χρόνια. Σήμερα, το οξείδιο του αντιμονίου παραμένει ένα σημαντικό υλικό σε πολλές βιομηχανίες λόγω των μοναδικών χημικών και φυσικών ιδιοτήτων του.

Οι σύγχρονες εφαρμογές του οξειδίου του αντιμονίου έχουν επεκταθεί και περιλαμβάνουν τη βιομηχανία πλαστικών, την παραγωγή καουτσούκ και την κατασκευή γυαλιού, όπου χρησιμοποιείται κυρίως ως επιβραδυντικό φλόγας. Παράλληλα, η χημική του σταθερότητα και η ικανότητά του να αλληλεπιδρά με άλλες ουσίες το καθιστούν πολύτιμο σε εφαρμογές καταλυτών και χρωμάτων. Επιπλέον, οι μοναδικές οπτικές και ηλεκτρικές ιδιότητές του ανοίγουν νέους δρόμους για την τεχνολογία ημιαγωγών και αισθητήρων.

Το κεφάλαιο αυτό περιγράφει τη σύνθεση, τις ιδιότητες και τις εφαρμογές του οξειδίου του αντιμονίου. Από τις παραδοσιακές χρήσεις του στην αρχαία Αίγυπτο στα καλλυντικά και τα φαρμακευτικά προϊόντα έως τις σύγχρονες καινοτομίες στην ηλεκτρονική και τα σύνθετα υλικά, το οξείδιο του αντιμονίου συνεχίζει να αποδεικνύει τη σημασία του ως υλικό με μεγάλη ποικιλία εφαρμογών.

6.6.1 ΔΟΜΗ

Το οξείδιο του αντιμονίου είναι μια ένωση που περιέχει αντιμόνιο και οξυγόνο. Το οξείδιο του αντιμονίου εμφανίζεται σε διάφορες μορφές, με πιο συνηθισμένες το τριοξείδιο του αντιμονίου (Sb_2O_3) και το πεντοξείδιο του αντιμονίου (Sb_2O_5). Η δομή τους εξαρτάται από τον αριθμό των ατόμων οξυγόνου που συνδέονται με το αντιμόνιο.

- Τριοξείδιο του αντιμονίου (Sb_2O_3)

Το τριοξείδιο του αντιμονίου (Sb_2O_3) είναι το πιο κοινό οξείδιο του αντιμονίου. Υπάρχουν δύο κρυσταλλικές μορφές αυτού του οξειδίου:

1. Η πιο κοινή μορφή, η οποία έχει κυβική κρυσταλλική δομή. Τα άτομα του αντιμονίου βρίσκονται σε τετραεδρική θέση και περιβάλλονται από οξυγόνο.

2. Ορθορομβική μορφή (Βαλεντίτης): Η μορφή αυτή είναι σπανιότερη και έχει ορθορομβική δομή.

- Πεντοξείδιο του αντιμονίου (Sb_2O_5)

Το πεντοξείδιο του αντιμονίου (Sb_2O_5) είναι λιγότερο κοινό από το τριοξείδιο του αντιμονίου και έχει πιο πολύπλοκη κρυσταλλική δομή. Το πεντοξείδιο του αντιμονίου (Sb_2O_5) είναι λιγότερο κοινό από το τριοξείδιο του αντιμονίου και έχει πιο πολύπλοκη κρυσταλλική δομή. Σε αυτή τη μορφή, κάθε άτομο αντιμονίου συνδέεται με πέντε άτομα οξυγόνου σε σχεδόν οκταεδρική διάταξη.

- Χαρακτηριστικά και εφαρμογές

Το τριοξείδιο του αντιμονίου χρησιμοποιείται κυρίως ως επιβραδυντικό φλόγας σε πλαστικά και κλωστοϋφαντουργικά προϊόντα.

Το πεντοξείδιο του αντιμονίου χρησιμοποιείται σε κεραμικά και γυαλί και ως καταλύτης για διάφορες χημικές αντιδράσεις.

Συνοπτικά, η δομή του οξειδίου του αντιμονίου εξαρτάται από την κρυσταλλική του μορφή και τον αριθμό των ατόμων οξυγόνου που συνδέονται με το αντιμόνιο.

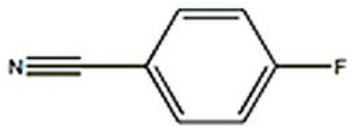


Figure 52 Οξείδιο του Αντυμονίου Δομή



Figure 53 Οξείδιο του Αντυμονίου σε μορφή Σκόνης

6.6.2- ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

Το οξείδιο του αντιμονίου έχει μοναδικές φυσικές και χημικές ιδιότητες που το καθιστούν πολύτιμο για πολλές βιομηχανικές και τεχνικές εφαρμογές. Ακολουθεί επισκόπηση των κύριων ιδιοτήτων του οξειδίου του αντιμονίου:

❖ Φυσικές ιδιότητες.

1. Κρυσταλλική δομή

Το τριοξείδιο του αντιμονίου έχει δύο κύριες κρυσταλλικές μορφές: ορθορομβική (κενοστιβίτης) και κυβική (βαλεριανίτης). Η ορθορομβική μορφή είναι σταθερή σε θερμοκρασία δωματίου, ενώ η κυβική μορφή σταθεροποιείται σε υψηλότερες θερμοκρασίες.

- Sb_2O_5: το πεντοξείδιο του αντιμονίου έχει πιο πολύπλοκη δομή και εξαρτάται από τις συνθήκες σύνθεσης και θερμικής επεξεργασίας.

2. Χρώμα και εμφάνιση.

- Το τριοξείδιο του αντιμονίου είναι συνήθως ένα λευκό ή άχρωμο κρυσταλλικό στερεό.

- Το πεντοξείδιο του αντιμονίου είναι κίτρινο ή γκρι.

3. Το σημείο τήξης και το σημείο βρασμού

- Sb_2O_3: το σημείο τήξης είναι περίπου 656 °C και το σημείο βρασμού είναι περίπου 1425 °C.

- Sb_2O_5: το σημείο τήξης του πεντοξειδίου του αντιμονίου είναι περίπου 380 °C και αποσυντίθεται πριν από την εξάχνωση.

4. Πυκνότητα.

- Sb_2O_3: η πυκνότητα είναι περίπου 5,2 g/cm³.

- Sb_2O_5: έχει πυκνότητα περίπου 3,78 g/cm³.

❖ Χημικές ιδιότητες.

1. Χημική σταθερότητα.

Το οξείδιο του αντιμονίου είναι γενικά σταθερό στον αέρα, αλλά μπορεί να αντιδράσει με ισχυρά οξέα και βάσεις.

2. Διαλυτότητα.

- Sb_2O_3: Ελαφρώς διαλυτό στο νερό, αλλά διαλυτό σε ισχυρά οξέα, όπως το υδροχλωρικό και το θειικό οξύ.

- Sb_2O_5: πολύ ελαφρά διαλυτό στο νερό, αλλά διαλυτό σε ισχυρά αλκαλικά διαλύματα.

3. Οξείδωση

- Το τριοξείδιο του αντιμονίου οξειδώνεται σε πεντοξείδιο του αντιμονίου υπό ισχυρές οξειδωτικές συνθήκες.

- Το πεντοξείδιο του αντιμονίου μπορεί να αναχθεί σε τριοξείδιο του αντιμονίου υπό αναγωγικές συνθήκες.

❖ Ηλεκτρικές και οπτικές ιδιότητες.

❖ Ηλεκτρική αγωγιμότητα :

Τα οξείδια του αντιμονίου δεν αγωγιμοποιούν πολύ τον ηλεκτρισμό στη φυσική τους κατάσταση. Ωστόσο, μπορούν να ενσωματωθούν σε υλικά για να βελτιώσουν την αγωγιμότητά τους και μπορούν να λειτουργήσουν ως ημιαγωγοί σε ορισμένες εφαρμογές.

❖ Οπτικές ιδιότητες.

Το Sb_2O_3 χρησιμοποιείται στην κατασκευή γυαλιού λόγω της ικανότητάς του να βελτιώνει τη διαφάνεια και την ανθεκτικότητα του γυαλιού. Έχει επίσης χαμηλό δείκτη διάθλασης και υψηλή ικανότητα σκέδασης του φωτός.

❖ Θερμικές ιδιότητες.

1. Θερμική σταθερότητα:

Και τα δύο οξείδια αντιμονίου είναι θερμικά σταθερά, αλλά το Sb_2O_3 μετατρέπεται σε Sb_2O_{225} όταν θερμαίνεται σε υψηλές θερμοκρασίες παρουσία οξυγόνου.

2. Θερμική αγωγιμότητα:

Το οξείδιο του αντιμονίου έχει χαμηλή θερμική αγωγιμότητα και είναι χρήσιμο ως επιβραδυντικό φλόγας.

❖ Ειδικές ιδιότητες.

1. Επιβράδυνση φλόγας:

Το οξείδιο του αντιμονίου έχει χαμηλή θερμική αγωγιμότητα και είναι χρήσιμο ως επιβραδυντικό φλόγας:

Το οξείδιο του αντιμονίου χρησιμοποιείται ευρέως ως επιβραδυντικό φλόγας σε πλαστικά και καουτσούκ. Δρα συνεργιστικά με αλογονωμένα επιβραδυντικά φλόγας για την αναστολή της εξάπλωσης της πυρκαγιάς.

2. Καταλυτικές ιδιότητες.

Το Sb_2O_3 και το Sb_2O_5 χρησιμοποιούνται ως καταλύτες για ποικίλες χημικές αντιδράσεις, συμπεριλαμβανομένης της παραγωγής πολυμερών και της μετατροπής αλκοολών σε αλδεΰδες και κετόνες.

❖ Βιοσυμβατότητα και ασφάλεια.

1. Τοξικότητα.

Το οξείδιο του αντιμονίου είναι τοξικό σε περίπτωση εισπνοής ή κατάποσης και πρέπει να χειρίζεται με προσοχή. Έχουν αναφερθεί επιπτώσεις στην υγεία, όπως ερεθισμός του δέρματος και των ματιών. 2.

2. Συμβατότητα

Αν και δεν είναι βιοδιασπώμενο, το οξείδιο του αντιμονίου μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ιατρικές εφαρμογές με κατάλληλη επεξεργασία και στο περιβάλλον χρήσης. Από τη θερμική και χημική σταθερότητα έως τις ειδικές ηλεκτρικές και οπτικές ιδιότητες, οι μοναδικές ιδιότητες του οξειδίου του αντιμονίου το καθιστούν σημαντικό υλικό σε πολλούς βιομηχανικούς τομείς. Η ευελιξία του και η ποικιλία των εφαρμογών του δείχνουν ότι κατέχει σημαντική θέση στη σύγχρονη τεχνολογία και βιομηχανία.

6.6.3 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Το οξείδιο του αντιμονίου έχει ευρύ φάσμα εφαρμογών σε διάφορους τομείς της βιομηχανίας και της τεχνολογίας λόγω των μοναδικών χημικών και φυσικών ιδιοτήτων του. Ορισμένες από τις κύριες εφαρμογές παρατίθενται παρακάτω:

- Επιβραδυντικά φλόγας.

Μία από τις σημαντικότερες χρήσεις του οξειδίου του αντιμονίου είναι ως επιβραδυντικό φλόγας. Το οξείδιο του αντιμονίου, όταν συνδυάζεται με αλογονωμένα επιβραδυντικά φλόγας, σχηματίζει ενώσεις αλογοαντιμονίου, οι οποίες εμποδίζουν την εξάπλωση της φωτιάς. Η ιδιότητα αυτή καθιστά το οξείδιο του αντιμονίου χρήσιμο στις ακόλουθες εφαρμογές:

- Πλαστικά:

Χρησιμοποιείται σε διάφορα πλαστικά όπως το πολυαιθυλένιο και το πολυπροπυλένιο και σε προϊόντα που απαιτούν επιβράδυνση της φλόγας, όπως καλώδια, ηλεκτρικά εξαρτήματα και συσκευές.

- Κλωστοϋφαντουργικά προϊόντα

Ενσωματώνονται σε υφάσματα για την παραγωγή πυράντοχων προστατευτικών ενδυμάτων, ταπετσαριών και κουρτινών.

- Καουτσούκ:

Χρησιμοποιείται σε προϊόντα από καουτσούκ όπως ελαστικά και πατάκια αυτοκινήτων για τη βελτίωση της πυραντίστασης.

- Γυαλί και κεραμικά.

Το οξείδιο του αντιμονίου χρησιμοποιείται στην κατασκευή γυαλιού και κεραμικών για τη βελτίωση των ιδιοτήτων τους:

- Πολύ διαφανές γυαλί:

Χρησιμοποιείται στην κατασκευή ειδικού γυαλιού για φακούς και οθόνες λόγω της ικανότητάς του να αυξάνει τη διαφάνεια και να μειώνει τη διάθλαση.

- Κεραμικά προϊόντα

Προστίθεται σε κεραμικά υλικά για να αυξήσει τη θερμική τους αντοχή και τη μηχανική τους σταθερότητα.

- Ημιαγωγοί και ηλεκτρονικά

Οι χρήσεις του οξειδίου του αντιμονίου στις βιομηχανίες ηλεκτρονικών και ημιαγωγών περιλαμβάνουν

- Συσκευές ημιαγωγών:

Το οξείδιο του αντιμονίου συνδυάζεται με άλλα υλικά για την παραγωγή ημιαγωγών, οι οποίοι εφαρμόζονται σε διάφορες ηλεκτρονικές συσκευές, όπως LED και αισθητήρες.

- Θερμικοί εκτυπωτές

Χρησιμοποιείται ως πρόσθετο σε θερμογραφικό χαρτί για την ενίσχυση των θερμικών αντιδράσεων και τη βελτίωση της ποιότητας της εκτύπωσης.

- Καταλυτικές εφαρμογές.

Το οξείδιο του αντιμονίου έχει καταλυτικές ιδιότητες και είναι χρήσιμο σε διάφορες χημικές διεργασίες:

- Παραγωγή πολυμερών

Χρησιμοποιείται ως καταλύτης στην παραγωγή πολυμερών, όπως το πολυ(τερεφθαλικό αιθυλένιο) (PET), το οποίο χρησιμοποιείται ευρέως στην κατασκευή φιαλών PET και συνθετικών ινών.

- Αντιδράσεις οξείδωσης:

Δρα ως καταλύτης σε διάφορες αντιδράσεις οξείδωσης στη χημική βιομηχανία, συμβάλλοντας στη σύνθεση ενώσεων υψηλής αξίας.

- Βαφές και χρωστικές ουσίες

Το οξείδιο του αντιμονίου χρησιμοποιείται ως πρώτη ύλη για βαφές και χρωστικές ουσίες:

- Βαφές υψηλής απόδοσης

Χρησιμοποιείται στην παραγωγή χρωστικών ουσιών για βαφές που απαιτούν υψηλή σταθερότητα και αντοχή στις καιρικές συνθήκες και στη φωτιά.

- Κεραμικά χρώματα

Προστίθεται σε κεραμικά χρώματα για τη βελτίωση της σταθερότητας του χρώματος και της αντοχής σε υψηλές θερμοκρασίες.

- Φαρμακευτικές εφαρμογές.

Σε μικρότερη κλίμακα, το οξείδιο του αντιμονίου έχει επίσης εφαρμογές στη φαρμακευτική βιομηχανία:

- Ενώσεις αντιμονίου

Χρησιμοποιούνται στη θεραπεία παρασιτικών λοιμώξεων όπως η λεϊσμανίαση, αλλά η χρήση τους είναι περιορισμένη λόγω τοξικότητας.

Το οξείδιο του αντιμονίου έχει ευρύ φάσμα εφαρμογών, καθιστώντας το ένα από τα πιο πολύτιμα και ευέλικτα υλικά της σύγχρονης βιομηχανίας. Οι μοναδικές του ιδιότητες επιτρέπουν τη χρήση του σε κρίσιμες τεχνολογίες και προϊόντα, υπογραμμίζοντας τη σημασία του για τη βελτίωση της απόδοσης και της ασφάλειας σε διάφορες βιομηχανίες.

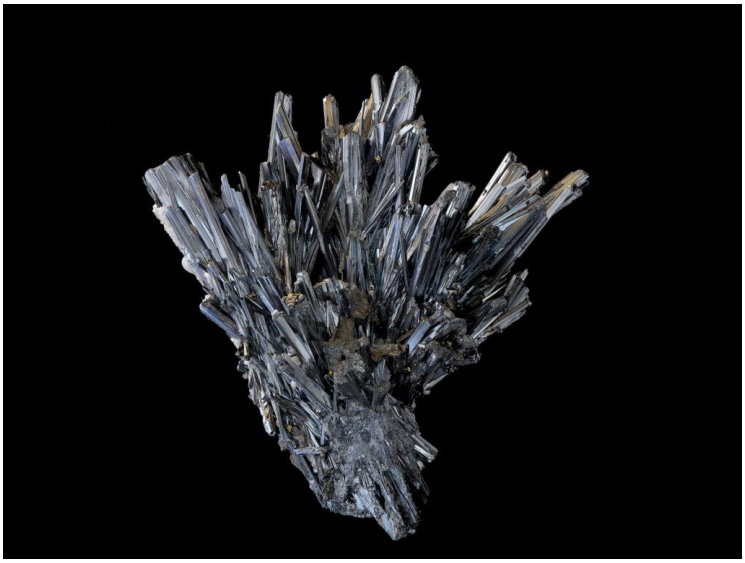


Figure 54 Αντιμονίτης Sb2O3

6.6.4 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ

Το οξείδιο του αντιμονίου, κυρίως το τριοξείδιο του αντιμονίου (Sb2O3) και το πεντοξείδιο του αντιμονίου (Sb2O5), έχει πολλά πλεονεκτήματα που το καθιστούν χρήσιμο σε διάφορες βιομηχανικές εφαρμογές. Ακολουθούν ορισμένα από τα κυριότερα πλεονεκτήματα αυτών των υλικών:

❖ <u>Τριοξείδιο του αντιμονίου (Sb2O3).</u>

1. Επιβραδυντικό φλόγας:

Χρησιμοποιείται ευρέως ως επιβραδυντικό φλόγας σε πλαστικά, υφάσματα, ηλεκτρονικά και δομικά υλικά. Μειώνει την ευφλεκτότητα των υλικών αυτών και βελτιώνει την ασφάλειά τους.

2. Σταθερότητα.

Το τριοξείδιο του αντιμονίου είναι χημικά σταθερό και δεν αντιδρά εύκολα με άλλες ουσίες, καθιστώντας το κατάλληλο για μακροχρόνια χρήση σε διάφορες εφαρμογές.

3. Επιφάνεια

Χρησιμοποιείται για τη βελτίωση της διαφάνειας και της χρωματικής καθαρότητας του γυαλιού και των κεραμικών και για την αύξηση της μηχανικής τους αντοχής.

4. Καταλύσεις.

Λειτουργεί ως καταλύτης σε διάφορες χημικές αντιδράσεις και προάγει τη μετατροπή άλλων ουσιών.

❖ Πεντοξείδιο του αντιμονίου (Sb_2O_5)

1. Κατάλυση

Το πεντοξείδιο του αντιμονίου χρησιμοποιείται συχνά ως καταλύτης σε χημικές αντιδράσεις, ιδίως σε διεργασίες οξείδωσης. 2.

2. Ηλεκτρονικές ιδιότητες

Λόγω των ηλεκτρονικών και ημιαγωγικών ιδιοτήτων του, το πεντοξείδιο του αντιμονίου χρησιμοποιείται για ειδικές εφαρμογές σε ηλεκτρονικές συσκευές.

3. Σταθερότητα σε υψηλές θερμοκρασίες

Λόγω της υψηλής θερμικής του σταθερότητας, μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές που απαιτούν αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες.

➢ Γενικά πλεονεκτήματα.

1. Χημική σταθερότητα

Το οξείδιο του αντιμονίου είναι χημικά σταθερό και δεν αντιδρά εύκολα με άλλες ουσίες, καθιστώντας το ανθεκτικό σε ένα ευρύ φάσμα συνθηκών.

2. Πολύπλευρες εφαρμογές:

Λόγω των ποικίλων φυσικών και χημικών ιδιοτήτων του, χρησιμοποιείται σε ένα ευρύ φάσμα βιομηχανιών, συμπεριλαμβανομένων των πλαστικών, των κλωστοϋφαντουργικών προϊόντων, των ηλεκτρονικών, των κεραμικών και της κατάλυσης.

3. Εγγενής αντοχή

Το οξείδιο του αντιμονίου είναι εξαιρετικά ανθεκτικό στην οξείδωση και την υδρόλυση και μπορεί να αντέξει σε σκληρές περιβαλλοντικές συνθήκες.

Αυτά τα πλεονεκτήματα καθιστούν το οξείδιο του αντιμονίου πολύτιμο υλικό σε πολλές βιομηχανικές και επιστημονικές εφαρμογές.

ΜΕΡΟΣ 2ο - ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7ο -ΥΛΙΚΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ

Όπως προαναφέρθηκε, τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για την εκπόνηση της εργασίας, χωρίζονται σε δυο κατηγορίες. Τα πολυμερή, PETG, HDPE, PA12, όπου χρησιμοποιήθηκαν ως βάση, και το νανοϋλικό Οξείδιο του Αντυμονίου (Antimony Tin Oxide-ATO).

7.1 Συγκεντρώσεις υλικών

Το πρώτο στάδιο του πειράματος, αφορά τις προσμίξεις των υλικών. Αρχικά για όλες τις δοκιμές, έγινε η χρήση του εκάστοτε καθαρού πολυμερούς, ως δοκίμιο, και στη συνέχεια έγιναν οι προσμίξεις, όπως φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

PETG PURE	ATO
98%	2%
96%	4%
94%	6%
92%	8%
90%	10%

Πίνακας 1 Συγκεντρώσεις ATO και PETG

HDPE PURE	ATO
98%	2%
96%	4%
94%	6%
92%	8%
90%	10%

Πίνακας 2 Συγκεντρώσεις ATO και HDPE

PA12 PURE	ATO
98%	2%
96%	4%
94%	6%
92%	8%
90%	10%

Πίνακας 3 Συγκεντρώσεις ATO και PA12



Figure 55 Συγκεντρώσεις υλικών PETG και ATO

7.2 ΑΝΑΜΙΞΗ ΥΛΙΚΩΝ

Μετά τις προσμίξεις των υλικών στις ανάλογες περιεκτικότητες, ακολουθεί η παραγωγή των νημάτων από τα νέα πλέον υλικά.

Για αρχή έγινε η παραγωγή νήματος από τα καθαρά πολυμερή, όπου βρίσκονται είτε σε μορφή σφαιριδίων (pellets), όπως το PETG και το PA12 είτε σε μορφή σκόνης, όπως το HDPE.

Στην συνέχεια, μετρήθηκαν οι συγκεντρώσεις των υλικών ανάλογα με τις περιεκτικότητες που αντιστοιχούν σε κάθε πρόσμιξη, τοποθετήθηκαν σε ειδικό κλίβανο, για την καταπολέμηση της υγρασίας και ύστερα ομογενοποιήθηκαν με ανάδευση.

Η ίδια διαδικασία ακολουθείται και στις τρεις περιπτώσεις υλικών.

7.2.1 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΝΗΜΑΤΩΝ

Η διαδικασία της εξώθησης του νήματος, αποτελεί ένα από τους πυλώνες του πειράματος, καθώς στο στάδιο αυτό απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή σε όλα τα βήματα, με σκοπό την παραγωγή νήματος σωστής διατομής.

7.2.1.1 Κλίβανος ξηρής αποστείρωσης – Memmert UV

Μετά την ανάμειξη των υλικών, απαιτείται η τοποθέτηση τους σε κλίβανο ξηρής αποστείρωσης. Ο κλίβανος ξηρής αποστείρωσης Memmert UV, χρησιμοποιεί ξηρή θερμότητα και υπεριώδη ακτινοβολία για την αποστείρωση εργαλείων και υλικών. Τα υλικά διατηρήθηκαν σε θερμοκρασία 50°C, εξασφαλίζοντας την καταστροφή μικροοργανισμών και σπορίων, με διαδικασίες αποστείρωσης που διαρκούν από 30 λεπτά έως μερικές ώρες. Η UV λάμπα ενισχύει την απολύμανση, προσφέροντας επιπλέον βακτηριοκτόνο δράση. Ο κλίβανος είναι σχεδιασμένος για ακριβή έλεγχο της θερμοκρασίας και ομοιόμορφη κατανομή της θερμότητας, ενώ περιλαμβάνει μηχανισμούς ασφαλείας και πιστοποιήσεις σύμφωνα με διεθνή πρότυπα.

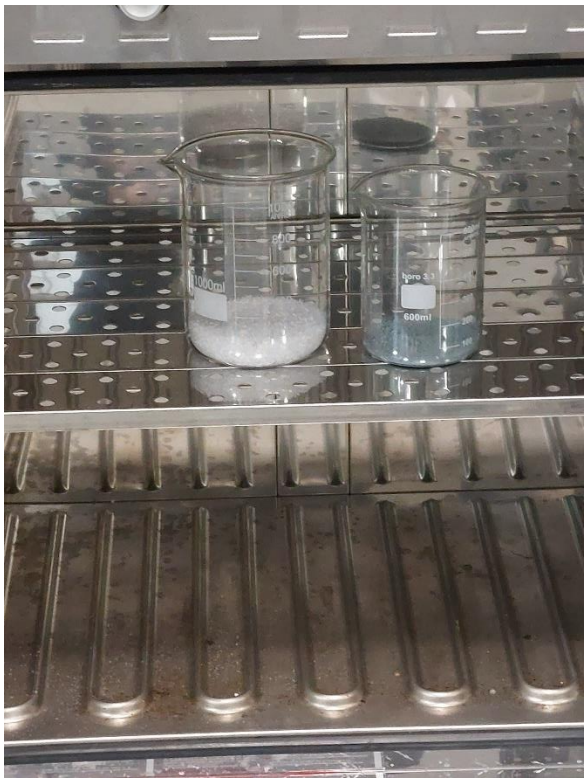


Figure 56 Τοποθέτηση υλικών σε κλίβανο

7.2.1.2 Μηχάνημα εξώθησης νήματος 3D EVO COMPOSER 450

Το μηχάνημα εξώθησης νήματος 3D EVO COMPOSER 450 είναι μια προηγμένη συσκευή που παράγει νήματα για 3D εκτύπωση από διάφορα υλικά, συμπεριλαμβανομένων των σύνθετων υλικών. Διαθέτει ακριβή έλεγχο θερμοκρασίας και ταχύτητας, επιτρέποντας την παραγωγή υψηλής ποιότητας και συνεκτικότητας νημάτων. Παράγει νήματα διαμέτρου 1,65mm εως 1,75mm και διαθέτει 4 ζώνες θέρμανσης, με μέγιστη θερμοκρασία 450°C. Βασικό χαρακτηριστικό του είναι η λειτουργία DemoVision, όπου μετράται σε πραγματικό χρόνο η διάμετρος του νήματος.



Figure 57 Διαδικασία εξώθησης νήματος στον 3D EVO COMPOSER 450

Μετά την εξώθηση των νημάτων, εκείνα τοποθετούνται ξανά σε κλίβανο.

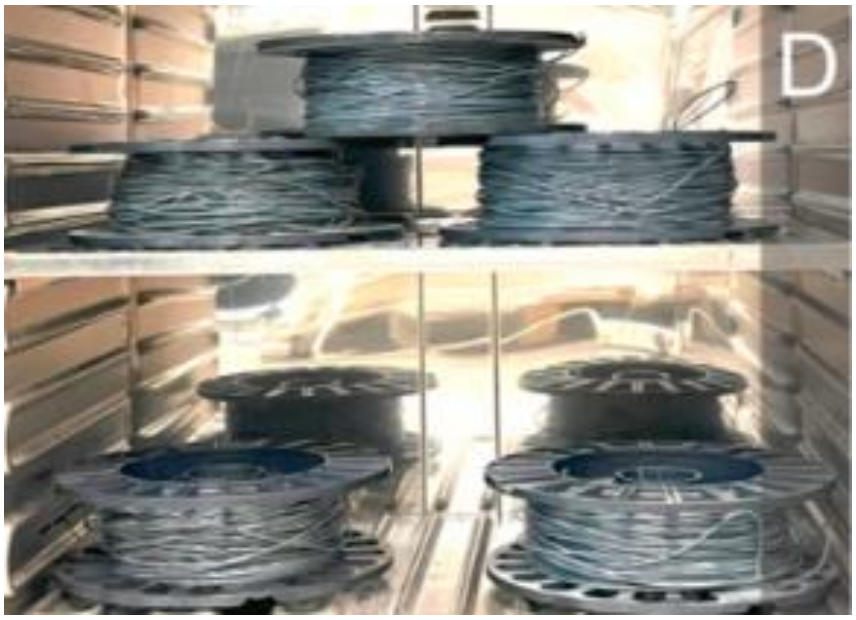


Figure 58 Τοποθέτηση καρουλιών σε κλίβανο

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι παράμετροι εξώθησης για τα υλικά.

PA12 Vs ATO	
TEMP.	**1: 225°C** **2: 235°C** **3: 235°C** **4: 240°C**
PULLER SPEED	**1724**
RPM	**5**

Πίνακας 4 Παράμετροι εξώθησης για PA12 και ATO

HDPE Vs ATO	
TEMP.	**1: 195°C** **2: 205°C** **3: 205°C** **4: 190°C**
PULLER SPEED	**1145**
RPM	**3,5**

Πίνακας 5 Παράμετροι εξώθησης νήματος για HDPE και ATO

PETG Vs ATO	
TEMP.	**1: 212°C** **2: 216°C** **3: 216°C** **4: 220°C**
PULLER SPEED	**1724**
RPM	**5**

Πίνακας 6 Παράμετροι εξώθησης νήματος για PETG και ATO

Η διαδικασία συνεχίζεται, τοποθετώντας τα νήματα, τυλιγμένα σε καρούλια, για ξήρανση (80°C για 24 ώρες), καθώς στην περίπτωση που έμεναν στο εξωτερικό περιβάλλον, υπάρχει πιθανότητα υγρασίας τους, πράγμα που δημιουργεί προβλήματα στην εκτύπωση των δοκιμίων αργότερα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8^{Ο} – ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΕΚΤΥΠΩΣΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Στο κεφάλαιο αυτό, γίνεται η ανάλυση της διαδικασίας τρισδιάστατης εκτύπωσης των δοκιμιών των νανοσύνθετων υλικών. Με την μέθοδο FFF, θα παραχθούν δοκίμια αντοχής για την μελέτη τους σε εφελκυσμό, κάμψη, κρούση και μικροσκληρότητα

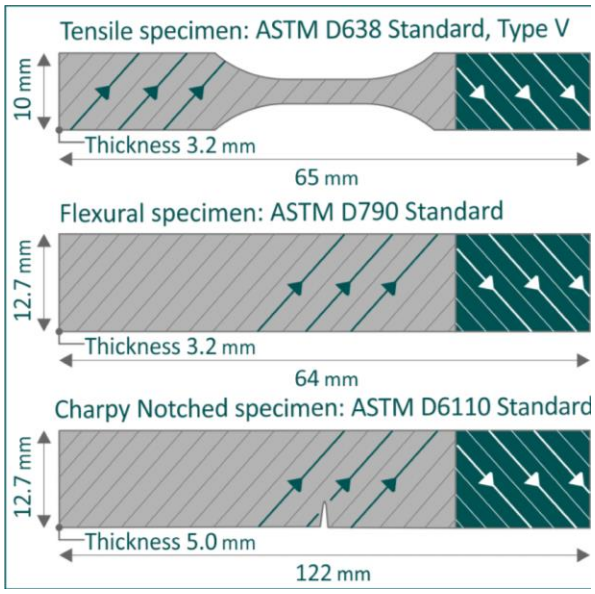


Figure 59 Διαστάσεις δοκιμίων με βάση τα διεθνή πρότυπα

8.1 ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ

Για την εκτύπωση των δοκιμίων, χρησιμοποιήθηκε ο τρισδιάστατος εκτυπωτής Intamsys Funmat HT, ένας εξειδικευμένος εκτυπωτής, σχεδιασμένος για εκτυπώσεις υωηλής θερμοκρασίας και σε εξειδικευμένα υλικά. Αποτελείται από κλειστό θάλαμο και θερμαινόμενη επιφάνεια εκτύπωσης (bed) και την κεφαλή, όπου μπορεί να φθάσει έως και 450°C.



Figure 60 Τρισδιάστατος εκτυπωτής INTAMSYS

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι παράμετροι εκτύπωσης, ανάλογα τα υλικά.

PA12	VALUE
Nozzle temp.	270**°C**
Printing orientation	**±45Deg**
Layer thickness	**0.2mm**
Bed temp.	**80°C**
Infill density	**100%**
Top layers	**2**
Bottom layers	**2**

Πίνακας 7 Παράμετροι εκτύπωσης δοκιμίων PA12 - ATO

PETG	VALUE
Nozzle temp.	250**°C**
Printing orientation	**±45Deg**
Layer thickness	**0.2mm**
Bed temp.	**80°C**
Infill density	**100%**
Top layers	**2**
Bottom layers	**2**

Πίνακας 8 Παράμετροι εκτύπωσης δοκιμίων PETG - ATO

HDPE	VALUE
Nozzle temp.	265**°C**
Printing orientation	**±45Deg**
Layer thickness	**0.2mm**
Bed temp.	**95°C**
Infill density	**100%**
Top layers	**2**
Bottom layers	**2**

Πίνακας 9 Παράμετροι εκτύπωσης δοκιμίων HDPE - ATO

8.2 ΕΚΤΥΠΩΣΕΙΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Η διαδικασία της τρισδιάστατης εκτύπωσης των δοκιμίων, παραμένει η ίδια και για τις τρεις προσμίξεις των υλικών.

Πρώτα γίνεται η προθέρμανση του printer, η τοποθέτηση του καρουλιού με το εκάστοτε νήμα και η επιλογή του κατάλληλου κώδικα για την εκτύπωση.

Παρακάτω παρουσιάζονται κάποια από τα εκτυπωμένα δοκίμια εφελκυσμού, κάμψης και κρούσης.

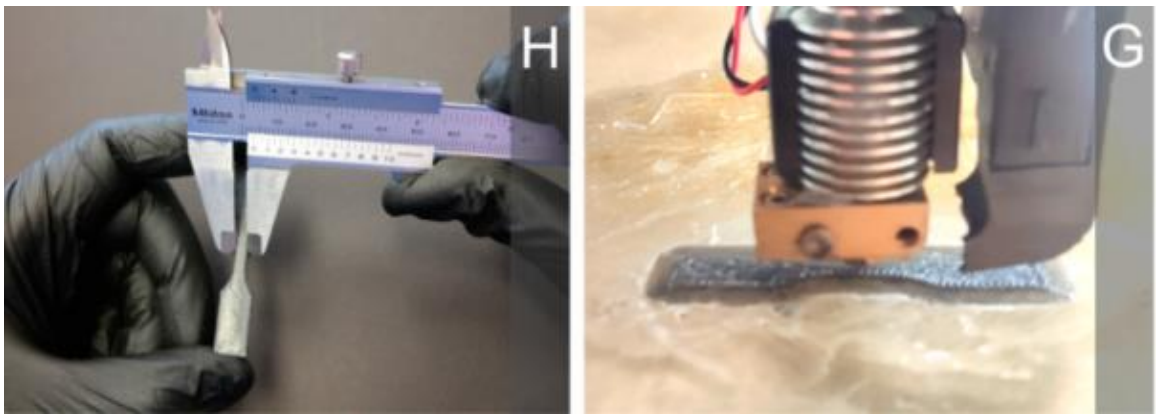


Figure 61 Εκτύπωση Δοκιμίων εφελκυσμού

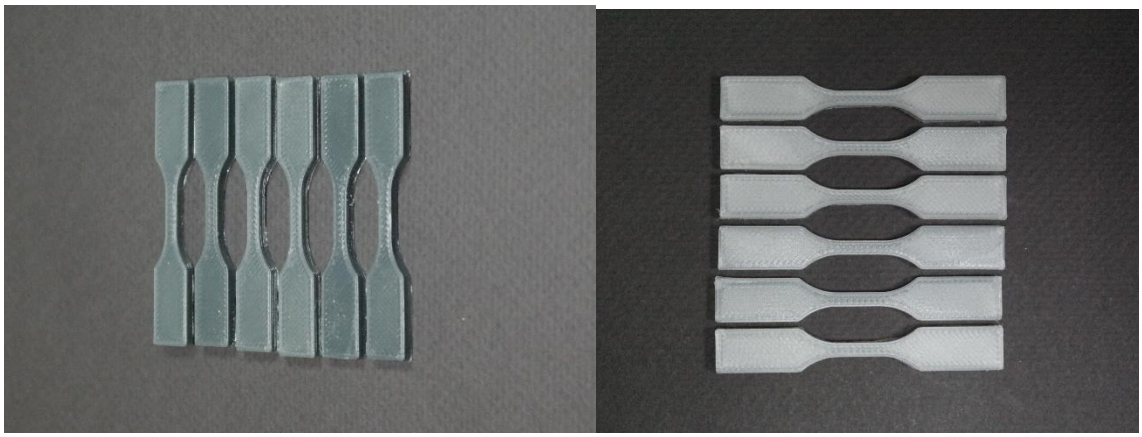


Figure 62 Δοκίμια εφελκυσμού PETG – ATO 6% KAI 2%

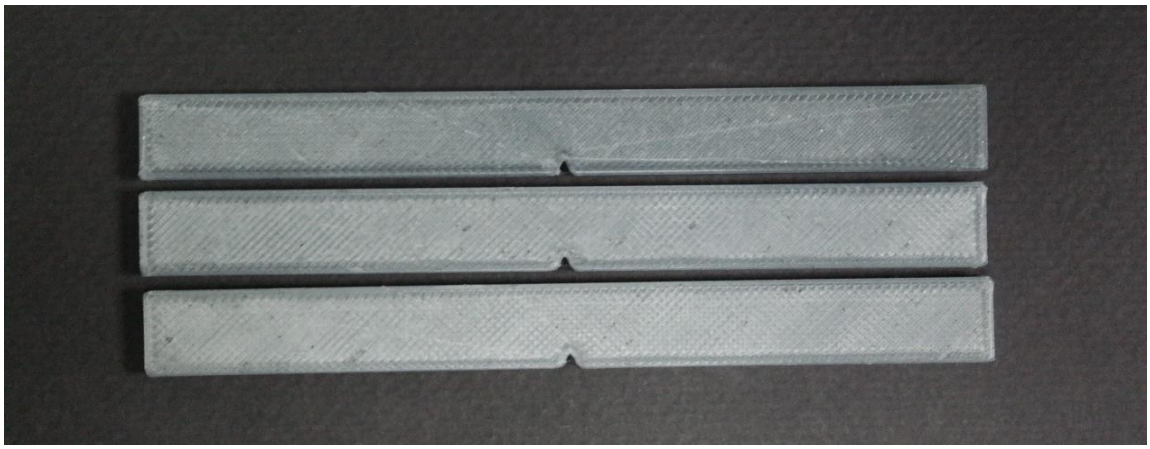


Figure 63 Δοκίμια κρούσης PA12 – ATO 2%

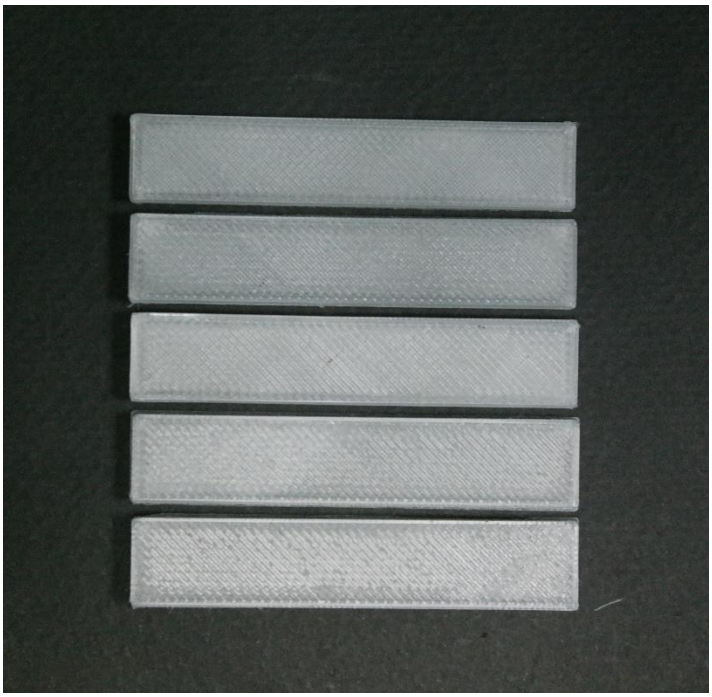


Figure 64 Δοκίμια κάμψης PA12 – ATO 2%

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9^{Ο} - ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ

Στο στάδιο των πειραμάτων για μηχανικές ιδιότητες τα δοκίμια υπόκεινται σε διαδικασία δοκιμής όσον αφορά τις ιδιότητες και την αντοχή του σε εφελκυσμό κάμψη κρούση και μικρόσκληρότητα.

9.1 ΔΟΚΙΜΕΣ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ

Για την δοκιμή εφελκυσμού, χρησιμοποιήθηκε το Imada MX2, σύμφωνα με το διεθνή πρότυπο ASTM D638-02a, με ταχύτητα εφελκυσμού 10mm/min, 50mm/min, 100mm/min, 200mm/min και 300mm/min και θερμοκρασία δωματίου.



Figure 65 Imada MX2

Η διαδικασία αυτή, αφορά τον προσδιορισμό των ιδιοτήτων εφελκυσμού των πολυμερών, μέσω σταθερών δοκιμών υπό συγκεκριμένες συνθήκες θερμοκρασίας, και υγρασίας και ταχύτητας δοκιμής. Η μέθοδος αυτή, θεωρείται κατάλληλη για υλικά με πάχος έως και 14 χιλιοστά, καθώς σε μεγαλύτερα δείγματα, πρέπει να υποβληθούν σε μηχανική επεξεργασία.

Για την επίτευξη της δοκιμής, είναι απαραίτητο όλα τα δείγματα να έχουν το ίδιο πάχος, διαφορετικά υπάρχει η πιθανότητα επηρεασμού της αναλογίας της επιφάνειας προς όγκο, πράγμα που οδηγεί σε εσφαλμένα αποτελέσματα.



Figure 66 Δοκιμή εφελκυσμού, σε θερμοκρασία δωματίου

9.2 ΔΟΚΙΜΕΣ ΚΑΜΨΗΣ

Για την δοκιμή κάμψης, χρησιμοποιήθηκε το Amada MX2, σύμφωνα με το διεθνή πρότυπο ASTM D790-10, με ταχύτητα εφελκυσμού 10mm/min, και θερμοκρασία δωματίου.

Η διαδικασία αυτή, αφορά τον προσδιορισμό των ιδιοτήτων κάμψης των πολυμερών, μέσω σταθερών δοκιμών υπό συγκεκριμένες συνθήκες θερμοκρασίας, και ταχύτητας δοκιμής. Η μέθοδος αυτή, δεν θεωρείται κατάλληλη για που δεν θραύονται ή που δεν έχουν σωστή εξωτερική επιφάνεια.

Η διαδικασία πραγματοποιείται με τα δοκίμια να έχουν μορφή ορθογώνιων ράβδων, σε ένα σύστημα φόρτωσης τριών σημείων, όπου τα δοκίμια εφαρμόζονται σε μια υποστηριζόμενη δοκό.



Figure 67 Δοκιμή κάμψης στο Amada MX2

9.3 ΔΟΚΙΜΕΣ ΚΡΟΥΣΗΣ

Για την δοκιμή κρούσης, χρησιμοποιήθηκε το Terco MT220 Charpy, σύμφωνα με το διεθνή πρότυπο ASTM D6110-04, με ταχύτητα εφελκυσμού 10mm/min, και θερμοκρασία δωματίου.

Η διαδικασία αυτή, αφορά τον προσδιορισμό των ιδιοτήτων κρούσης των οδοντωτών δειγμάτων πολυμερών, μέσω σταθερών δοκιμών υπό συγκεκριμένες και σταθερές συνθήκες θερμοκρασίας, και ταχύτητας δοκιμής.

Η διαδικασία πραγματοποιείται με τα δοκίμια να έχουν μια φρεζαρισμένη εγκοπή , με σκοπό την συγκέντρωση τάσης σε ένα εύθραυστο κάταγμα.

Τα αποτελέσματα της, προσδιορίζουν την αντίσταση του δοκιμίου στην θραύση λόγω καμπτικής κρούσης, με βάση την ενέργεια που απορροφάται ανά μονάδα πλάτους δείγματος .

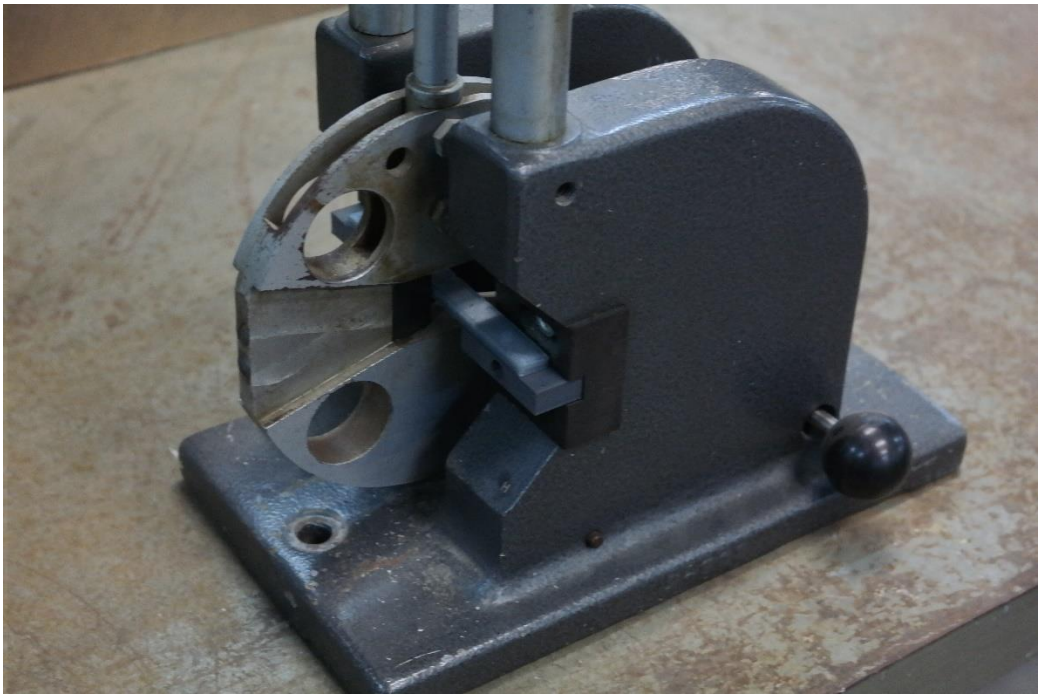


Figure 68 Δοκιμή κρούσης HDPE-ATO 4% στο το Terco MT220 Charpy

9.4 ΔΟΚΙΜΕΣ ΜΙΚΡΟΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑΣ

Για την δοκιμή μικροσκληρότητας, χρησιμοποιήθηκε το Innova Test 300 Vickers, σύμφωνα με το διεθνή πρότυπο ASTM E384-17, όπου προσδιορίζεται η σκληρότητα μικροενδόνησης των υλικών και των μικροεσοχλήσεων με εσοχές Knoop και Vickers, με δοκιμαστικές δυνάμεις (από 9,8* 10^{-3} έως 9,8N). Επίσης, γίνεται ανάλθση για σφάλματα που επηρεάζουν το αποτέλεσμα όσον αφορά την αναπαραγωγημότητα, την επαναληψημότητα, την ακρίβεια και την προκατάληψη.



Figure 69 Μηχάνημα Innova Test 300 Vickers

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10^{Ο} - ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Παρακάτω, γίνεται η ανάλυση των αποτελεσμάτων σχετικά με τις δοκιμές που προαναφέρθηκαν, στα τρία πολυμερή (PETG, PA12, HDPE) υλικά με την προσθήκη Οξειδίου του αντιμονίου σε περιεκτικότητες 2%,4%,6%,8%,10%.

10.1 PETG-ATO

10.1.1 ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΣ PETG-ATO

Στον παρακάτω πίνακα, παρουσιάζονται οι ακριβές τιμές της δοκιμής, σε όλες τις περιεκτικότητες.

Ultimate Strength			
PETG vs ATO	AVG [MPa]	STDEV [MPa]	Change
PETG Pure	39,92	3,19	0,0%
PETG vs ATO 2%	43,52	2,46	9,0%
PETG vs ATO 4%	46,54	4,23	16,6%
PETG vs ATO 6%	48,32	2,67	21,0%
PETG vs ATO 8%	43,83	2,19	9,8%
PETG vs ATO 10%	41,55	3,57	4,1%

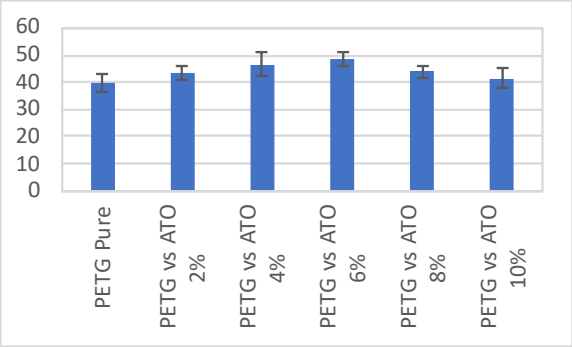
Παρατηρείται, πως το καθαρό PETG είναι 39,92 MPa, με τυπική απόκλιση 3,19 MPa.

Αυξάνοντας το ATO στο 4%, η αντοχή αυξάνεται περαιτέρω στα 46,54 MPa, που είναι 16,6% υψηλότερη από το καθαρό PETG. Αυτή η αύξηση δείχνει ότι το ATO αυξάνει σημαντικά την ισχύ του PETG.

Όταν η περιεκτικότητα σε ATO είναι 6%, η τελική αντοχή φτάνει σε μέγιστη τιμή 48,32 MPa, μια αύξηση 21%. Αυτό δείχνει ότι το συγκεκριμένο περιεχόμενο είναι το βέλτιστο για την αύξηση της αντοχής του υλικού.

Αυτό αποδεικνύεται όταν αυξάνοντας το ATO στο 8%, η αντοχή μειώνεται στα 43,83 MPa, μεταβολή 9,8% σε σύγκριση με το καθαρό PETG. Μια μείωση δείχνει ότι το πρόσθετο αρχίζει να έχει αρνητικό αντίκτυπο πέρα από ένα συγκεκριμένο όριο συγκέντρωσης.

Κατ'επέκταση στο PETG με 10% ATO, η αντοχή μειώνεται περαιτέρω στα 41,55 MPa, που είναι μόλις 4,1% αύξηση σε σχέση με το καθαρό PETG. Αυτό δείχνει ότι η υπερβολική προσθήκη ATO θα μειώσει την αποτελεσματικότητα ενίσχυσης και μπορεί να μειώσει την απόδοση του υλικού.



Διάγραμμα 1 Ultimate Strength - Tension – PETG vs ATO

Elastic Modulus			
PETG vs ATO	AVG [MPa]	STDEV [MPa]	Change
PETG Pure	214,54	17,38	0,0%
PETG vs ATO 2%	223,87	29,62	4,3%
PETG vs ATO 4%	229,50	6,25	7,0%
PETG vs ATO 6%	247,83	9,28	15,5%
PETG vs ATO 8%	238,60	4,17	11,2%
PETG vs ATO 10%	226,32	19,58	5,5%

Το αρχικό μέτρο ελαστικότητας του καθαρού PETG είναι 214,54 MPa, με τυπική απόκλιση 17,38 MPa.

Η προσθήκη ATO 2%, αυξάνει το μέτρο ελαστικότητας κατά 4,3%, συγκριτικά με το καθαρό, πράγμα που σημαίνει πως αυξάνεται ελαφρώς η δυσκαμψία του υλικού.

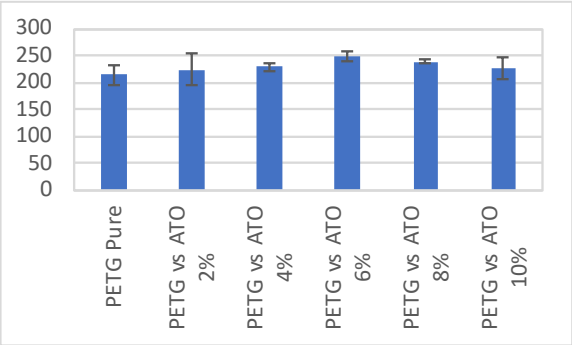
Μετά την προσθήκη 4% ATO, ο συντελεστής ελαστικότητας αυξήθηκε περαιτέρω στα 229,50 MPa, μια αύξηση 7%. Αυτό δείχνει ότι η ελαστικότητα συνεχίζει να βελτιώνεται καθώς προστίθενται περισσότερα ATO.

Όταν η περιεκτικότητα σε ATO είναι 6%, ο συντελεστής ελαστικότητας φτάνει στην υψηλότερη τιμή των 247,83 MPa, μια αύξηση 15,5%. Αυτή η τιμή δείχνει ότι η προσθήκη αυτής της συγκέντρωσης ATO μεγιστοποιεί την ακαμψία του PETG.

ο συντελεστής ελαστικότητας μειώνεται ελαφρώς στα 238,60 MPa, που είναι 11,2% υψηλότερος από αυτόν του καθαρού PETG. Αυτή η μείωση δείχνει ότι η αποτελεσματικότητα του ATO αρχίζει να μειώνεται περισσότερο από 6%.

Με την αύξηση της περιεκτικότητας σε ATO στο 10%, ο συντελεστής ελαστικότητας μειώνεται περαιτέρω στα 226,32 MPa, που είναι μόνο μια αύξηση 5,5% σε σχέση με το

καθαρό PETG. Αυτό υποδηλώνει ότι η υπερβολική προσθήκη ATO μπορεί να είναι επιζήμια για την ακαμψία του υλικού



Διάγραμμα 2 Elastic Modulus - Tension - PETG vs ATO

Toughnes			
PETG vs ATO	AVG [MJ/m3]	STDEV [MJ/m3]	Change
PETG Pure	6,06	0,41	0,0%
PETG vs ATO 2%	6,37	0,54	5,0%
PETG vs ATO 4%	6,73	0,53	10,9%
PETG vs ATO 6%	6,97	0,72	14,9%
PETG vs ATO 8%	6,82	0,71	12,5%
PETG vs ATO 10%	6,64	0,23	9,5%

Η αρχική ανθεκτικότητα του καθαρού PETG είναι 6,06 MJ/m³, με τυπική απόκλιση 0,41 MJ/m³.

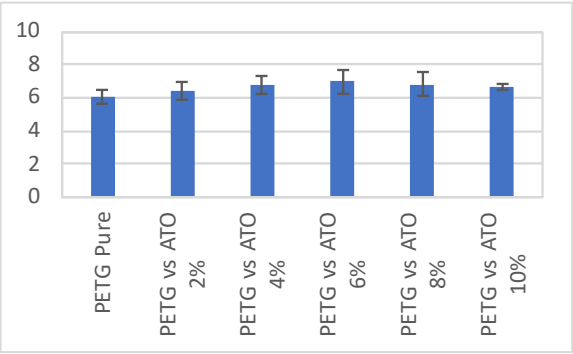
Η προσθήκη ATO κατά 2%, υποδεικνύει μια μικρή αύξηση κατά 5% στην ανθεκτικότητα του PETG.

Αυξάνοντας την περιεκτικότητα σε ATO στο 4%, η ανθεκτικότητα φτάνει τα 6,73 MJ/m3, με βελτίωση 10,9%. Αυτή η τιμή δείχνει ότι η προσθήκη αυτής της συγκέντρωσης ATO συνεχίζει να βελτιώνει σημαντικά την ανθεκτικότητα.

Με την προσθήκη 6% ATO, η αντοχή έφτασε στη μέγιστη τιμή των 6,97 MJ/m3, σημειώνοντας αύξηση 14,9%. Αυτό υποδηλώνει ότι αυτή η συγκεκριμένη συγκέντρωση ATO μεγιστοποιεί την ανθεκτικότητα του PETG.

Η αντοχή μειώθηκε ελαφρά στα 6,82 MJ/m3, αύξηση 12,5% σε σύγκριση με το καθαρό PETG. Αν και εξακολουθεί να είναι πάνω από τα αρχικά επίπεδα, η πτώση υποδηλώνει ότι η αποτελεσματικότητα του ATO στη βελτίωση της ανθεκτικότητας αρχίζει να μειώνεται.

Τέλος, η ανθεκτικότητα μειώνεται στα 6,64 MJ/m³, με αύξηση 9,5% σε σχέση με το καθαρό PETG, στη προσθήκη 10% ATO. Αν και η μείωση εξακολουθεί να είναι μεγαλύτερη από το καθαρό, φαίνεται πως η υπερβολική συγκέντρωση ATO, έχει αρνητική αντίδραση.



Διάγραμμα 3 Toughness - Tension - PETG vs ATO

10.1.2 ΚΑΜΨΗ PETG - ATO

Οι δοκιμές για κάμψη έχουν παρόμοια δομή με τις δοκιμές του εφελκυσμού. Σύμφωνα με το διάγραμμα 4 η βέλτιστη πρόσμιξη όσον αφορά τις δοκιμές κάμψης είναι το 6% αντίστοιχα και για το μέτρο ελαστικότητας, χωρίς όμως να υπάρχουν μεγάλες διαφορές στις τιμές από το καθαρό petg.

PETG vs ATO	AVG [MPa]	STDEV [MPa]	Change
PETG Pure	81,47	7,82	0,0%
PETG vs ATO 2%	88,40	9,00	8,5%
PETG vs ATO 4%	89,74	8,07	10,1%
PETG vs ATO 6%	93,23	9,93	14,4%
PETG vs ATO 8%	88,97	5,54	9,2%
PETG vs ATO 10%	84,73	8,78	4,0%

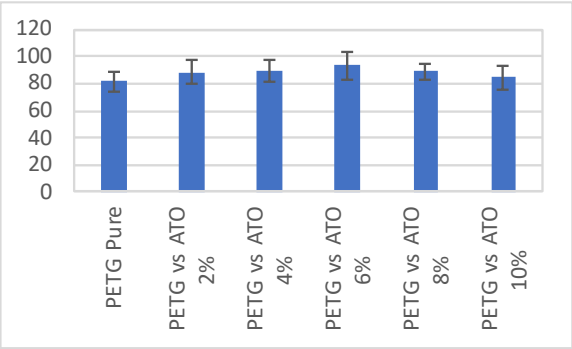
Η προσθήκη ATO στο PETG γενικά αυξάνει τη μέση αντοχή (MPa) σε σύγκριση με το καθαρό υλικό.

Για παράδειγμα, όταν η περιεκτικότητα σε ATO είναι 2%, η αντοχή μπορεί να αυξηθεί κατά 8,5%, και όταν η περιεκτικότητα σε ATO είναι 4%, η αντοχή μπορεί να αυξηθεί κατά 10,1%.

Όταν η περιεκτικότητα σε ATO είναι 6%, η αντοχή αυξάνεται περισσότερο, φτάνοντας τα 93,23 MPa, που είναι 14,4% υψηλότερα από το καθαρό PETG.

Σε επίπεδα 8% και 10%, η αντοχή αρχίζει να μειώνεται αλλά εξακολουθεί να είναι υψηλότερη από το καθαρό PETG. Συγκεκριμένα, όταν η περιεκτικότητα είναι 8%, η αντοχή πέφτει στο 9,2% σε σχέση με την αρχική αύξηση, ενώ όταν η περιεκτικότητα είναι 10%, η αύξηση περιορίζεται στο 4,0%.

Αυτό μπορεί να υποδεικνύει ότι σε υψηλότερη περιεκτικότητα σε ATO, το πρόσθετο γίνεται λιγότερο συμβατό με το PETG ή αρχίζει να έχει δυσμενείς επιπτώσεις,



Διάγραμμα 4 Ultimate Strength - Flexural - PETG vs ATO

Elastic Modulus			
PETG vs ATO	AVG [MPa]	STDEV [MPa]	Change
PETG Pure	2043,58	134,01	0,0%
PETG vs ATO 2%	2134,69	140,16	4,5%
PETG vs ATO 4%	2241,73	125,25	9,7%
PETG vs ATO 6%	2355,06	106,37	15,2%
PETG vs ATO 8%	2132,68	141,37	4,4%
PETG vs ATO 10%	2054,78	103,48	0,5%

Το αρχικό μέτρο ελαστικότητας του καθαρού PETG είναι 2043,58 MPa, με τυπική απόκλιση 134,01 MPa.

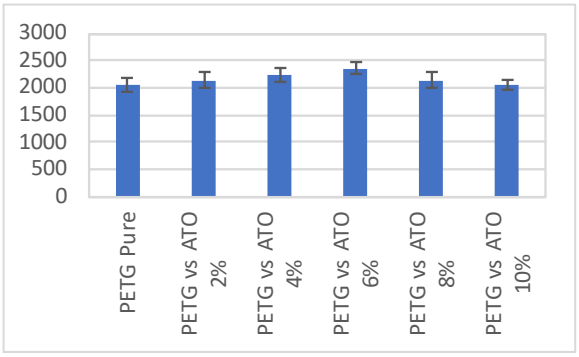
Με την προσθήκη 2% ATO αυξάνεται, το μέτρο ελαστικότητας στα 2134,69 MPa, σημειώνοντας αύξηση 4,5%. Αυτή η αύξηση δείχνει μια μικρή βελτίωση στη δυσκαμψία του PETG με την προσθήκη του πρόσθετου.

Μετά την προσθήκη 4% ATO, ο συντελεστής ελαστικότητας αυξήθηκε στα 2241,73 MPa, μια αύξηση 9,7%. Αυτή η τιμή υποδηλώνει σημαντική βελτίωση στην ακαμψία του PETG σε μέτριες συγκεντρώσεις ATO.

Όταν προστεθεί 6% ATO, ο συντελεστής ελαστικότητας φτάνει στην υψηλότερη τιμή των 2355,06 MPa, με αύξηση 15,2%. Αυτό υποδεικνύει ότι αυτή η ειδική συγκέντρωση ATO μεγιστοποιεί την ακαμψία του PETG.

Η αντοχή μειώθηκε ελαφρά στα 2132,68 MPa, που ήταν 4,4% υψηλότερη από το καθαρό PETG. Παρά τη μείωση από το υψηλότερο σημείο, η συγκέντρωση ATO 8% εξακολουθεί να παρέχει καλύτερη ακαμψία από το καθαρό PETG, αν και με περιορισμένη αύξηση.

Μετά την προσθήκη 10% ATO, ο συντελεστής ελαστικότητας μειώθηκε ελαφρά στα 2054,78 MPa, που ήταν μόνο μια αύξηση 0,5% σε σύγκριση με το καθαρό PETG. Αυτή η μείωση υποδηλώνει ότι οι υψηλότερες συγκεντρώσεις ATO μπορεί να έχουν περιορισμένες ή ακόμα και αρνητικές επιπτώσεις στην ακαμψία του υλικού.



Διάγραμμα 5 Elastic Modulus - Flexural - PETG vs ATO

10.1.3 κρούση PETG-ATO

Η προσθήκη οξειδίου του αντιμονίου φαίνεται να έχει ελαφριά επίδραση στην συγκεκριμένη ιδιότητα, καθώς η πρόσμιξη με τη μεγαλύτερη αντοχή σε κρούση είναι το 8% χωρίς όμως να έχει μεγάλη διαφορά από το καθαρό πολυμερή.

Impact Strength			
PETG vs ATO	AVG [kJ/m2]	STDEV [kJ/m2]	Change
PETG Pure	6,96	0,09	0,0%
PETG vs ATO 2%	7,39	0,49	6,2%
PETG vs ATO 4%	7,68	0,66	10,4%
PETG vs ATO 6%	7,97	0,71	14,5%
PETG vs ATO 8%	8,27	0,86	18,8%
PETG vs ATO 10%	8,06	0,72	15,8%

Η ανθεκτικότητα σε κρούση του καθαρού είναι 6,96 kJ/m², με τυπική απόκλιση 0,09 kJ/m².

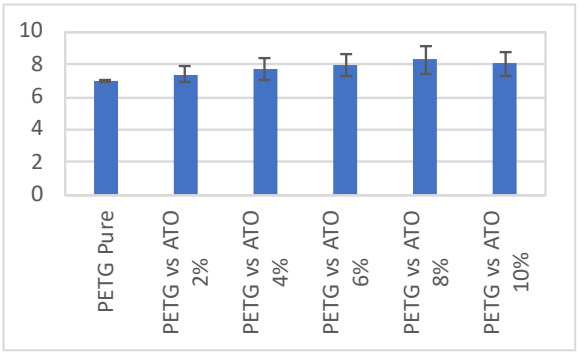
Στην προσθήκη 2% φαίνεται πως η μικρή ποσότητα ATO βελτιώνει την ικανότητα του PETG να αντέχει σε κρούσεις κατά 6,2%.

Μετά την προσθήκη 4% ATO, η αντίσταση κρούσης φτάνει τα 7,68 kJ/m², σημειώνοντας αύξηση 10,4%. Αυτή η αύξηση δείχνει ότι το ATO συνεχίζει να ενισχύει την αντίσταση κρούσης του PETG.

Όταν προστεθεί 6% ATO, η αντίσταση κρούσης φτάνει στο υψηλότερο επίπεδο στα 7,97 kJ/m², σημειώνοντας αύξηση 14,5%. Αυτό υποδηλώνει ότι αυτή η συγκεκριμένη συγκέντρωση ATO μεγιστοποιεί την αντοχή σε κρούση του PETG.

Η αντίσταση κρούσης φτάνει τα 8,27 kJ/m², που είναι 18,8% υψηλότερη από το καθαρό PETG. Αυτή η αύξηση δείχνει ότι η συγκέντρωση 8% ATO μεγιστοποιεί την αντίσταση κρούσης.

Με την προσθήκη 10% ATO, η αντοχή κρούσης μειώθηκε ελαφρά στα 8,06 kJ/m², αύξηση 15,8% σε σύγκριση με το καθαρό PETG. Αν και η αντίσταση παραμένει πάνω από την αρχική τιμή, η ελαφρά μείωση υποδηλώνει ότι οι υπερβολικές συγκεντρώσεις ATO μπορεί να μην είναι τόσο αποτελεσματικές όσο οι χαμηλότερες συγκεντρώσεις.



Διάγραμμα 6 Impact PETG Vs ATO

10.1.4 μικρόσκληρότητα PETG-ATO

Στη δοκιμή μικρό σκληρότητας η πρόσμιξη 10% φαίνεται να έχει βελτιώσει την ιδιότητα του καθαρού PETG κατά γκολ 2,8HV.

Hardness Strength			
PETG vs ATO	AVG [HV]	STDEV [HV]	Change
PETG Pure	11,17	0,81	0,0%
PETG vs ATO 2%	11,77	0,91	5,4%
PETG vs ATO 4%	12,36	1,04	10,6%
PETG vs ATO 6%	13,32	0,95	19,3%
PETG vs ATO 8%	13,54	1,03	21,3%
PETG vs ATO 10%	13,97	1,01	25,1%

Η αρχική σκληρότητα του καθαρού PETG είναι 11,17 HV (Vickers Hardness), με τυπική απόκλιση 0,81 HV.

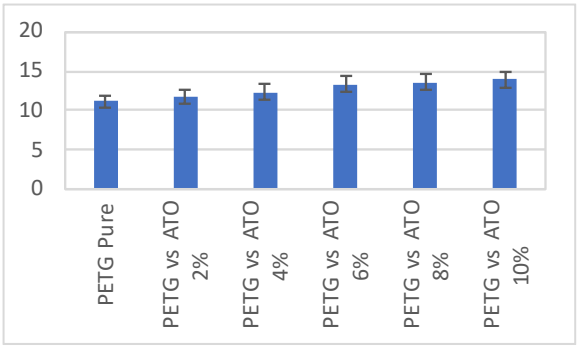
Η προσθήκη 2% ATO αύξησε τη σκληρότητα στα 11,77 HV, μια αύξηση 5,4%. Αυτή η αύξηση δείχνει ότι μια μικρή ποσότητα ATO βελτιώνει την ικανότητα του PETG να αντιστέκεται στην παραμόρφωση.

Μετά την προσθήκη 4% ATO, η σκληρότητα φτάνει τα 12,36 HV, αύξηση 10,6%. Αυτή η τιμή δείχνει ότι το ATO συνεχίζει να βελτιώνει τη σκληρότητα του PETG.

Το υψηλότερο επίπεδο σκληρότητας παρατηρήθηκε με την προσθήκη 6% ATO, φτάνοντας τα 13,32 HV, αύξηση 19,3%. Αυτή η τιμή δείχνει ότι αυτή η συγκεκριμένη συγκέντρωση ATO μεγιστοποιεί τη σκληρότητα του PETG.

Η σκληρότητα αυξάνεται περαιτέρω στα 13,54 HV, που είναι 21,3% υψηλότερη από το καθαρό PETG. Αν και η σκληρότητα συνεχίζει να αυξάνεται, το 8% ATO είναι κοντά στη μέγιστη αύξηση.

Μετά την προσθήκη 10% ATO, η σκληρότητα φτάνει τα 13,97 HV, που είναι 25,1% υψηλότερη από το καθαρό PETG. Αυτή η τιμή δείχνει τη μεγαλύτερη αύξηση της σκληρότητας, αν και η αύξηση είναι πιο αργή σε σύγκριση με την προηγούμενη συγκέντρωση.



Διάγραμμα 7 Vickers PETG Vs ATO

10.2 PA12-ATO

10.2.1 εφελκυσμός PA12-ATO

στην περίπτωση και της δοκιμής εφελκυσμού του PA12, φαίνεται πώς η προσθήκη ATO έχει αυξήσει φανερά την αντοχή σχεδόν κατά 4 MPa, στην πρόσμειξη 4%, ενώ παράλληλα πολύ κοντά σε αυτό είναι και το 6%.

Ultimate Strength			
PA12 vs ATO	AVG [MPa]	STDEV [MPa]	Change
PA12 Pure	34,38	1,62	0,0%
PA12 vs ATO 2%	36,97	1,71	7,5%
PA12 vs ATO 4%	41,02	3,04	19,3%
PA12 vs ATO 6%	39,77	2,48	15,7%
PA12 vs ATO 8%	37,28	1,30	8,4%
-	-	-	-

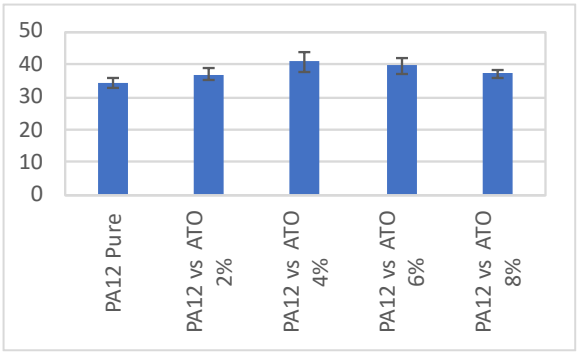
Το καθαρό PA12, έχει τελική αντοχή 34,38 MPa, με τυπική απόκλιση 1,62 MPa.

Η προσθήκη 2% ATO φέρνει την απόλυτη αντοχή στα 36,97 MPa, μια αύξηση 7,5%. Αυτή η αύξηση υποδηλώνει βελτίωση της ισχύος του PA12 με την προσθήκη μικρής ποσότητας ATO.

Με προσθήκη 4% ATO, η τελική αντοχή φτάνει τα 41,02 MPa, μια αύξηση 19,3%. Αυτή η αύξηση δείχνει ότι η προσθήκη ATO αυξάνει σημαντικά την τελική αντοχή του PA12.

Η τελική αντοχή μειώθηκε ελαφρά στα 39,77 MPa όταν προστέθηκε 6% ATO, το οποίο ήταν 15,7% υψηλότερο από το καθαρό PA12. Αν και η τελική αντοχή είναι υψηλότερη από το αρχικό επίπεδο, η αύξηση είναι μικρότερη σε σύγκριση με τη συγκέντρωση ATO 4%.

Όταν προσθέτετε 8% ATO, η τελική αντοχή φτάνει τα 37,28 MPa, που είναι 8,4% υψηλότερη από την καθαρή PA12. Αυτή η μείωση σε σχέση με τη συγκέντρωση 4% υποδηλώνει ότι η προσθήκη υψηλότερων συγκεντρώσεων ATO έχει περιορισμένη θετική επίδραση στην τελική αντοχή.



Διάγραμμα 8 Ultimate Strength - Tension – PA12 vs ATO

Πάλι στις ίδιες προσμίξεις είναι φανερή η αύξηση του μέτρου ελαστικότητας βελτιώνοντας έτσι τις αντοχές του PA12.

Elastic Modulus			
PA12 vs ATO	AVG [MPa]	STDEV [MPa]	Change
PA12 Pure	114,78	5,20	0,0%
PA12 vs ATO 2%	119,02	6,86	3,7%
PA12 vs ATO 4%	134,63	4,21	17,3%
PA12 vs ATO 6%	136,49	10,21	18,9%
PA12 vs ATO 8%	125,13	6,28	9,0%
-	-	-	-

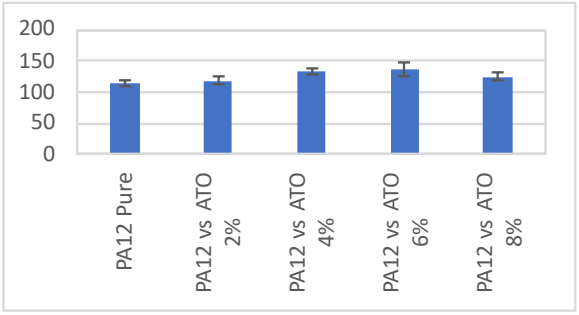
Ο αρχικός ελαστικός μόδιος του καθαρού PA12 είναι 114,78 MPa, με τυπική απόκλιση 5,20 MPa

Η προσθήκη 2% ATO αυξάνει τον ελαστικό μόδιο στα 119,02 MPa, σημειώνοντας αύξηση 3,7%. Αυτή η αύξηση δείχνει μια ελαφρά ενίσχυση της ικανότητας του υλικού να αντιστέκεται σε παραμορφώσεις με την προσθήκη μιας μικρής ποσότητας ATO.

Με 4% ATO, ο ελαστικός μόδιος φτάνει τα 134,63 MPa, με αύξηση 17,3%. Αυτή η αύξηση υποδηλώνει σημαντική βελτίωση στη σκληρότητα του PA12 με την προσθήκη ATO.

Ο ελαστικός μόδιος αυξάνεται περαιτέρω στα 136,49 MPa με 6% ATO, σημειώνοντας αύξηση 18,9%. Αυτή η συγκέντρωση φαίνεται να προσφέρει τη μεγαλύτερη βελτίωση στην ελαστικότητα του PA12.

Με 8% ATO, ο ελαστικός μόδιος μειώνεται ελαφρώς στα 125,13 MPa, σημειώνοντας αύξηση 9,0% σε σχέση με το καθαρό PA12. Παρά την ελαφρά μείωση, η τιμή παραμένει υψηλότερη από την αρχική.



Διάγραμμα 9 Elastic Modulus - Tension – PA12 vs ATO

Toughnes			
PA12 vs ATO	AVG [MJ/m3]	STDEV [MJ/m3]	Change
PA12 Pure	22,03	1,44	0,0%
PA12 vs ATO 2%	22,66	2,11	2,9%
PA12 vs ATO 4%	25,63	1,94	16,3%
PA12 vs ATO 6%	26,06	1,49	18,3%
PA12 vs ATO 8%	23,50	2,22	6,7%
-	-	-	-

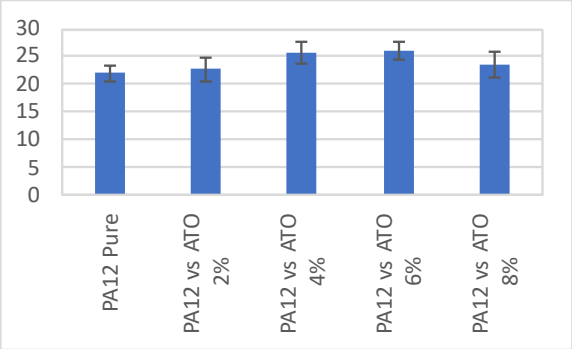
Το καθαρό PA12 έχει αντοχή θραύσης 22,03 MJ/m³, με τυπική απόκλιση 1,44 MJ/m³.

Η προσθήκη 2% ATO αύξησε την ανθεκτικότητα θραύσης σε 22,66 MJ/m³, δηλαδή κατά 2,9%. Αυτή η μικρή αύξηση δείχνει ότι μια μικρή ποσότητα ATO αυξάνει ελαφρώς την αντοχή του PA12.

Με 4% ATO, η ανθεκτικότητα σε θραύση έφθασε τα 25,63 MJ/m³, αύξηση 16,3%. Αυτή η σημαντική αύξηση υποδηλώνει ότι μια μεσαία ποσότητα ATO βελτιώνει την ικανότητα του PA12 να απορροφά ενέργεια πριν από τη θραύση.

Η προσθήκη 6% ATO αύξησε περαιτέρω την ανθεκτικότητα σε θραύση σε 26,06 MJ/m³, αύξηση 18,3%. Αυτή η συγκέντρωση αυξάνει περισσότερο την αντοχή του PA12.

Όταν προστίθεται 8% ATO, η ανθεκτικότητα σε θραύση μειώνεται ελαφρώς σε 23,50 MJ/m³, αύξηση 6,7% σε σύγκριση με το καθαρό PA12. Η αντοχή παραμένει υψηλότερη από το αρχικό επίπεδο, αλλά η αύξηση είναι μικρότερη σε σύγκριση με τις συγκεντρώσεις ATO 4% και 6%.



Διάγραμμα 10 Toughness - Tension – PA12 vs ATO

10.2.2 κάμψη PA12-ATO

στο παρακάτω διάγραμμα είναι φανερή η αύξηση σε αντοχή κάμψης. Το PA12 PURE, έχει τη μικρότερη αντοχή ενώ με την προσθήκη ATO αυξάνεται συνεχώς χωρίς να πέφτει κάτω από την τιμή.

Ultimate Strength			
PA12 vs ATO	AVG [MPa]	STDEV [MPa]	Change
PA12 Pure	45,68	3,13	0,0%
PA12 vs ATO 2%	47,01	2,01	2,9%
PA12 vs ATO 4%	53,95	2,93	18,1%
PA12 vs ATO 6%	54,18	1,99	18,6%
PA12 vs ATO 8%	50,20	2,80	9,9%
-	-	-	-

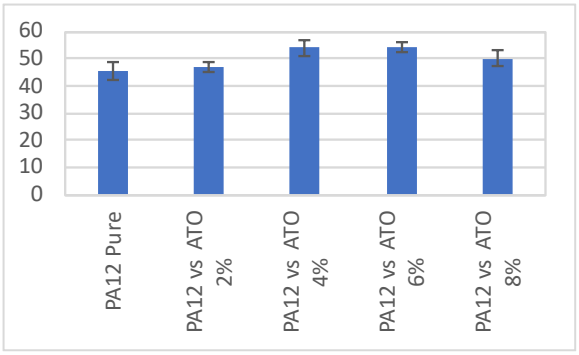
Το καθαρό PA112 έχει αντοχή σε κάμψη 45,68 MPa,με τυπική απόκλιση 3,13 MPa.

Αυτή η μικρή αύξηση δείχνει ότι η προσθήκη μικρής ποσότητας ATO αυξάνει ελαφρώς την αντοχή του PA12.

Με την προσθήκη4% ATO, η τελική αντοχή έφθασε τα 53,95 MPa, αύξηση 18,1%. Αυτή η σημαντική αύξηση υποδηλώνει ότι μια μεσαία ποσότητα ATO αυξάνει σημαντικά την αντοχή του PA12.

Η τελική αντοχήτου PA12 με 6% ATO αυξήθηκε ελαφρώς στα 54,18 MPa, αύξηση 18,6%. Αυτή η συγκέντρωση αντιπροσωπεύει τη μεγαλύτερη αύξηση της αντοχής σε θραύση του PA12.

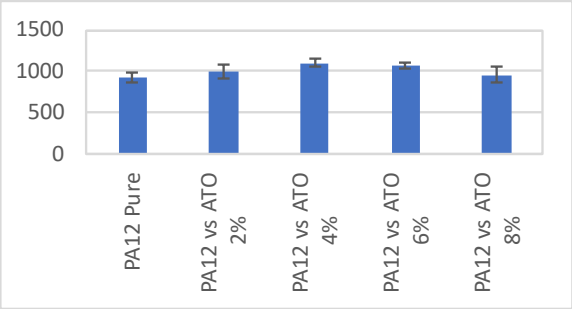
Όταν προστέθηκε 8% ATO, η τελική αντοχή μειώθηκε ελαφρώς στα 50,20 MPa, αντιπροσωπεύοντας αύξηση 9,9% σε σύγκριση με το καθαρό PA12. Παρά τη μικρή μείωση, η τελική αντοχή παραμένει υψηλότερη από την αρχική τιμή του καθαρού PA12.



Διάγραμμα 11 Ultimate Strength - Flexural – PA12 vs ATO

Ομοίως ισχύει και για το μέτρο ελαστικότητας

Elastic Modulus			
PA12 vs ATO	AVG [MPa]	STDEV [MPa]	Change
PA12 Pure	930,05	58,86	0,0%
PA12 vs ATO 2%	997,71	90,94	7,3%
PA12 vs ATO 4%	1099,70	44,92	18,2%
PA12 vs ATO 6%	1064,54	40,03	14,5%
PA12 vs ATO 8%	959,60	93,49	3,2%
-	-	-	-

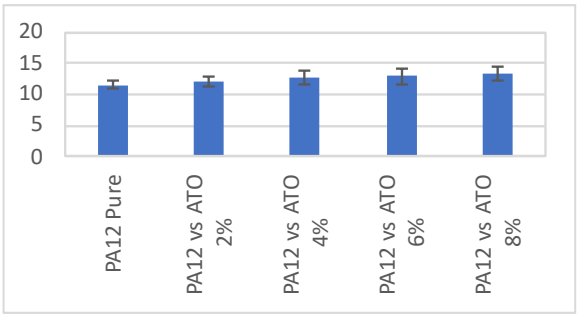


Διάγραμμα 12 Elastic Modulus - Flexural – PA12 vs ATO

10.2.3 κρούση PA12 - ATO

στην περίπτωση της κρούσης δεν υπάρχουν μεγάλες αλλαγές από το καθαρό PA12. Οι τιμές αυξάνονται ομαλά, με την πρόσμιξη των 8%, με έχει μεγαλύτερη τιμή.

Impact Strength			
PA12 vs ATO	AVG [kJ/m2]	STDEV [kJ/m2]	Change
PA12 Pure	11,51	0,56	0,0%
PA12 vs ATO 2%	12,07	0,81	4,9%
PA12 vs ATO 4%	12,72	1,14	10,5%
PA12 vs ATO 6%	12,98	1,26	12,8%
PA12 vs ATO 8%	13,36	1,00	16,1%
-	-	-	-

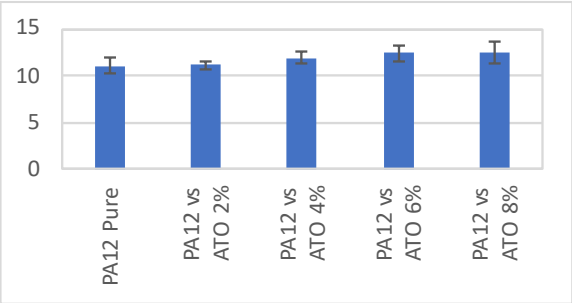


Διάγραμμα 13 Impact PA12 Vs ATO

10.2.4 μικρόσκληρότητα PA12-ATO

σύμφωνα με το παρακάτω διάγραμμα, η αύξηση της μικροσκληρότητας είναι ανάλογη με την αύξηση της περιεκτικότητας του οξειδίου του αντιμονίου.

Hardness Strength			
PA12 vs ATO	AVG [HV]	STDEV [HV]	Change
PA12 Pure	11,09	0,89	0,0%
PA12 vs ATO 2%	11,21	0,44	1,1%
PA12 vs ATO 4%	11,97	0,58	8,0%
PA12 vs ATO 6%	12,42	0,85	12,0%
PA12 vs ATO 8%	12,53	1,19	13,0%
-	-	-	-



Διάγραμμα 14 Vickers PA12 Vs ATO

10.3 HDPE – ATO

10.3.1 εφελκυσμός HDPE-ATO

στην περίπτωση του HDPE, η προσθήκη οξειδίου του αντιμονίου φαίνεται να είναι βοηθητική καθώς στην πρόσμιξη των 6%, η αντοχή σε καθολικισμό αυξάνεται κατά 3,67MPa. Ωστόσο, καθώς αυξάνεται η περιεκτικότητα του ATO, η αντοχή σε εφελκυσμό τείνει να επιστρέφει στην αρχική τιμή του καθαρού HDPE.

Ultimate Strength			
HDPE vs ATO	AVG [MPa]	STDEV [MPa]	Change
HDPE Pure	17,58	0,57	0,0%
HDPE vs ATO 2%	18,74	0,81	6,6%
HDPE vs ATO 4%	19,70	1,18	12,1%
HDPE vs ATO 6%	21,25	1,82	20,9%
HDPE vs ATO 8%	20,15	1,26	14,7%
HDPE vs ATO 10%	18,09	0,78	2,9%

Η αντοχή σε εφελκυσμό του HDPE είναι 17,58 MPa, με τυπική απόκλιση 0,57 MPa.

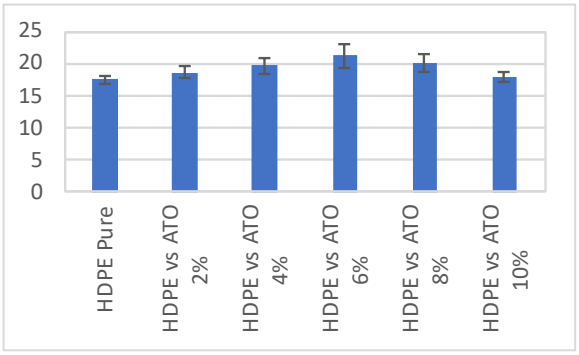
Η προσθήκη 2% ATO αύξησε την τελική αντοχή κατά 6,6% σε 18,74 MPa. Η αύξηση αυτή υποδηλώνει μια μικρή αύξηση της αντοχής του HDPE.

Όταν προστέθηκε 4% ATO, η τελική αντοχή έφτασε τα 19,70 MPa, δηλαδή αύξηση 12,1%. Αυτή η σημαντική αύξηση υποδηλώνει ότι η μέτρια ATO αυξάνει την αντοχή του HDPE.

Η τελική αντοχή του HDPE με 6% ATO έφτασε τα 21,25 MPa, αύξηση 20,9%. Σε αυτή τη συγκέντρωση, η τελική αντοχή του HDPE αυξήθηκε περισσότερο.

Με 8% ATO, η τελική αντοχή μειώθηκε ελαφρώς στα 20,15 MPa και αυξήθηκε κατά 14,7% σε σύγκριση με το καθαρό HDPE. Παρά τη μικρή μείωση, η τελική αντοχή παραμένει υψηλότερη από την αρχική τιμή του καθαρού HDPE.

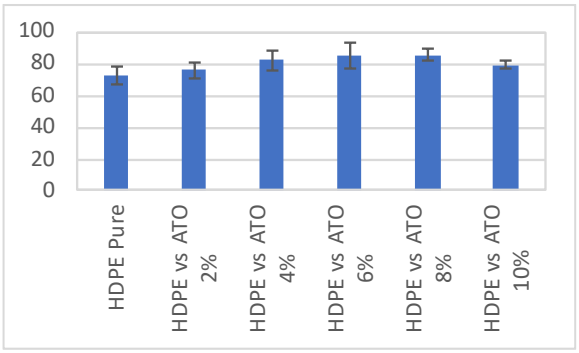
Με την προσθήκη 10% ATO, η τελική αντοχή μειώθηκε στα 18,09 MPa, σημειώνοντας αύξηση κατά 2,9% σε σύγκριση με το καθαρό HDPE. Η τελική αντοχή παραμένει υψηλότερη από την αρχική τιμή, αλλά η αύξηση είναι μικρότερη από ό,τι για χαμηλότερες συγκεντρώσεις ATO.



Διάγραμμα 15 Ultimate Strength - Tension – HDPE vs ATO

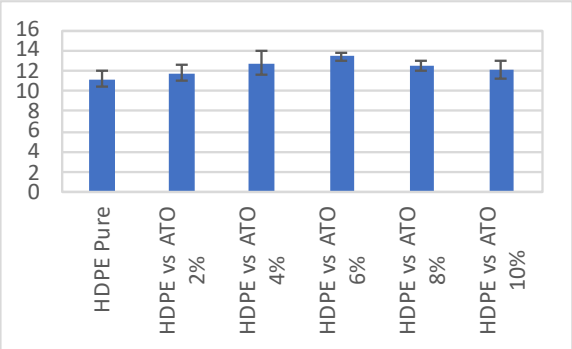
Παρόμοια δομή ακολουθείται και για το μέτρο ελαστικότητας με μόνη διαφορά ότι αυτό γίνεται στην πρόσμιξη του 8%.

Elastic Modulus			
HDPE vs ATO	AVG [MPa]	STDEV [MPa]	Change
HDPE Pure	72,38	5,70	0,0%
HDPE vs ATO 2%	75,90	5,56	4,9%
HDPE vs ATO 4%	82,22	6,58	13,6%
HDPE vs ATO 6%	85,41	8,06	18,0%
HDPE vs ATO 8%	85,89	3,40	18,7%
HDPE vs ATO 10%	79,28	2,48	9,5%



Διάγραμμα 16 Elastic Modulus - Tension – HDPE vs ATO

Toughnes			
HDPE vs ATO	AVG [MJ/m3]	STDEV [MJ/m3]	Change
HDPE Pure	11,16	0,77	0,0%
HDPE vs ATO 2%	11,76	0,80	5,3%
HDPE vs ATO 4%	12,78	1,13	14,5%
HDPE vs ATO 6%	13,38	0,45	19,9%
HDPE vs ATO 8%	12,53	0,49	12,2%
HDPE vs ATO 10%	12,09	0,94	8,3%



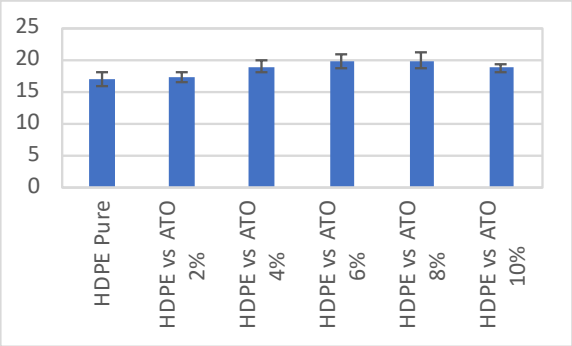
Διάγραμμα 17 Toughness - Tension – HDPE vs ATO

10.3.2 κάμψη HDPE - ATO

Στη δοκιμή κάμψης οι προσμίξεις 6% και 8% φαίνεται να έχουν περισσότερη αντοχή από ότι το καθαρό HDPE,

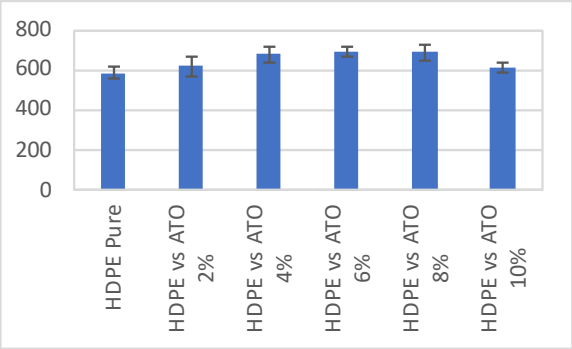
Το ίδιο ισχύει και για το μέτρο ελαστικότητας.

Ultimate Strength			
HDPE vs ATO	AVG [MPa]	STDEV [MPa]	Change
HDPE Pure	16,87	1,08	0,0%
HDPE vs ATO 2%	17,38	0,73	3,0%
HDPE vs ATO 4%	18,96	0,97	12,4%
HDPE vs ATO 6%	19,78	1,04	17,2%
HDPE vs ATO 8%	19,91	1,13	18,0%
HDPE vs ATO 10%	18,72	0,70	10,9%



Διάγραμμα 18 Ultimate Strength - Flexural – HDPE vs ATO

Elastic Modulus			
HDPE vs ATO	AVG [MPa]	STDEV [MPa]	Change
HDPE Pure	586,02	31,72	0,0%
HDPE vs ATO 2%	619,96	50,44	5,8%
HDPE vs ATO 4%	678,20	37,89	15,7%
HDPE vs ATO 6%	690,64	21,31	17,9%
HDPE vs ATO 8%	689,33	40,39	17,6%
HDPE vs ATO 10%	614,53	23,70	4,9%



Διάγραμμα 19 Elastic Modulus - Flexural – HDPE vs ATO

10.3.3 κρούση HDPE-ATO

Στην περίπτωση αυτή, υπάρχει μια ομαλή αύξηση έως και το 8%, αφού μετά φαίνεται να μειώνεται σχετικά γρήγορα.

Impact Strength			
HDPE vs ATO	AVG [kJ/m2]	STDEV [kJ/m2]	Change
HDPE Pure	9,92	0,75	0,0%
HDPE vs ATO 2%	10,12	0,45	2,0%
HDPE vs ATO 4%	10,85	0,47	9,4%
HDPE vs ATO 6%	11,22	0,61	13,1%
HDPE vs ATO 8%	11,84	1,08	19,4%
HDPE vs ATO 10%	11,38	0,75	14,7%

Η καθαρή ανταχή σε κρούση είναι 9,92 kJ/m², με τυπική απόκλιση 0,75 kJ/m².

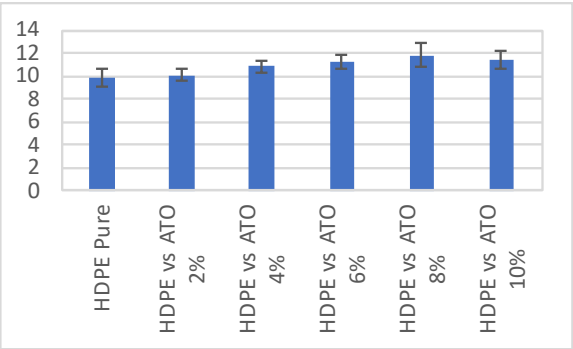
Η προσθήκη 2% ATO αύξησε την αντοχή σε κρούση κατά 2,0% σε 10,12 kJ/m². Αυτή η μικρή αύξηση δείχνει ότι μια μικρή ποσότητα ATO βελτιώνει ελαφρώς την αντοχή σε κρούση του HDPE.

Η αντοχή σε κρούση του HDPE με 4% ATO έφθασε τα 10,85 kJ/m², αύξηση 9,4%. Αυτή η σημαντική αύξηση υποδηλώνει ότι η μέτρια ATO βελτιώνει την αντοχή σε κρούση του HDPE.

Η αντοχή σε κρούση του HDPE με 6% ATO έφθασε τα 11,22 kJ/m², αύξηση 13,1%. Αυτή η συγκέντρωση αυξάνει περισσότερο την αντοχή σε κρούση του HDPE.

Η αντοχή σε κρούση του HDPE με 8% ATO έφθασε τα 11,84 kJ/m², αύξηση 19,4% σε σύγκριση με το καθαρό HDPE. Αυτή η συγκέντρωση έχει την υψηλότερη αύξηση της αντοχής σε κρούση.

Με την προσθήκη 10% ATO, η αντοχή σε κρούση μειώθηκε ελαφρώς στα 11,38 kJ/m² και αυξήθηκε κατά 14,7% σε σύγκριση με το καθαρό HDPE.

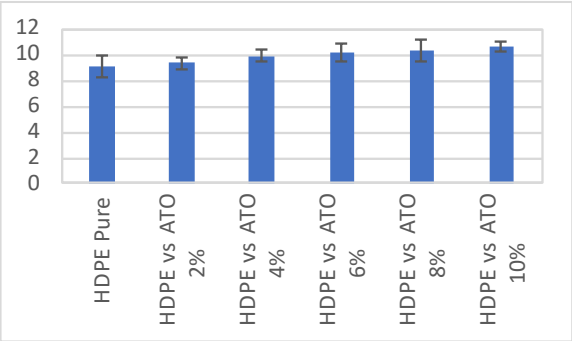


Διάγραμμα 20 Impact HDPE Vs ATO

10.3.4 μικρόσκληρότητα HDPE-ATO

σύμφωνα με το διάγραμμα, η προσθήκη οξειδίου του αντιμονίου στο HDPE, φαίνεται να έχει ελαφριά επίδραση αλλά ομαλά αυξανόμενη.

Hardness Strength			
HDPE vs ATO	AVG [HV]	STDEV [HV]	Change
HDPE Pure	9,09	0,85	0,0%
HDPE vs ATO 2%	9,37	0,51	3,0%
HDPE vs ATO 4%	9,96	0,48	9,6%
HDPE vs ATO 6%	10,17	0,66	11,8%
HDPE vs ATO 8%	10,40	0,83	14,4%
HDPE vs ATO 10%	10,65	0,34	17,2%



Διάγραμμα 21 Vichers HDPE Vs ATO

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 11^{Ο} – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Για το πείραμα που πραγματοποιήθηκε για τη μελέτη των μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών που επιλέχθηκαν για τη διατριβή και τις αντοχές τους, τα ευρήματα βρέθηκαν πολύ καλά. Ως εκ τούτου, για να κατανοήσουμε επαρκώς τη μεθοδολογία και τα αποτελέσματα της έρευνας, είναι απαραίτητο να δοθούν λεπτομέρειες για τις μεθόδους και τα υλικά που χρησιμοποιούνται, καθώς και τις συνθήκες και τα αποτελέσματα των πειραμάτων. Αυτή είναι μια πολύ πρακτική μελέτη, καθώς οι μηχανικές ιδιότητες των πολυμερών υλικών πρέπει να είναι πολύ καλές για να ανταποκρίνονται στις νέες απαιτήσεις στην ανάπτυξη βιομηχανικών προϊόντων και τεχνολογιών.

Σε αυτή την εργασία, τα υπό έρευνα υλικά προορίζονται για κατασκευαστικούς σκοπούς, συγκεκριμένα για χρήση σε κατασκευές όπου απαιτούνται καλύτερες μηχανικές ιδιότητες: υψηλότερη αντοχή σε εφελκυσμό και κάμψη. Η διαδικασία επιλογής των συγκεκριμένων πολυμερών βασίστηκε σε κριτήρια που αφορούν τη βιομηχανική τους εφαρμογή, την ευκολία πρόσβασης και τη δυνατότητα βελτίωσης μέσω προσμίξεων.

Τα πολυμερή υπό δοκιμή είναι PETG, HDPE και PA12. Ενώ το PETG είναι εξαιρετικά εύκαμπτο και διαφανές, το HDPE είναι σκληρό και έχει υψηλή χημική αντοχή. Από την άλλη πλευρά, το PA12 χαρακτηρίζεται από εξαιρετικές μηχανικές και χημικές ιδιότητες βρίσκοντας έτσι εφαρμογές σε διάφορες τεχνολογίες. Το οξείδιο του αντιμονίου (ATO) ενσωματώθηκε σε αυτά τα πολυμερή, καθώς έχει αναφερθεί ότι αυξάνει τη μηχανική αντοχή, τη θερμική σταθερότητα και τις προστατευτικές ιδιότητες των υλικών από την υπεριώδη ακτινοβολία. Άλλα πρόσθετα που θα μπορούσαν να έχουν χρησιμοποιηθεί στην τροποποίηση των πολυμερών περιλαμβάνουν το οξείδιο του τιτανίου ή το οξείδιο του ψευδαργύρου. μπορούν επίσης να βελτιώσουν τις ιδιότητες του υλικού προμορφώματος.

Οι μηχανικές ιδιότητες αξιολογήθηκαν μέσω δοκιμών εφελκυσμού, κάμψης, κρούσης και μικροσκληρότητας. Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν ακολουθώντας μια διαδικασία βήμα προς βήμα για τη σταθεροποίηση των συνθηκών, με ιδιαίτερη προσοχή στην ακρίβεια των μετρήσεων. Στις δοκιμές εφελκυσμού, τα καλύτερα αποτελέσματα έδειξαν το PETG-ATO, ενώ η χαμηλότερη αντοχή σε εφελκυσμό βρέθηκε στο HDPE. Η αντοχή σε εφελκυσμό είναι μία από τις βασικές μηχανικές ιδιότητες και παίζει ζωτικό ρόλο, επιτρέποντας τη χρήση πολυμερών σε περιοχές εφαρμογής όπου υπόκεινται σε διαφορετικούς τύπους καταπόνησης. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το πρόσθετο ATO ενισχύει δραματικά την ικανότητα εφελκυσμού του PETG πάνω από τα υπόλοιπα υλικά, καθιστώντας το πολύ σκληρό.

Παρόμοια αποτελέσματα παρατηρήθηκαν σε πειράματα κάμψης, όπου το PETG έδειξε την υψηλότερη αντοχή και το HDPE τη χαμηλότερη αντοχή. Η αντοχή σε κάμψη είναι εξίσου σημαντική, ειδικά σε εφαρμογές που απαιτούν το υλικό να αντέχει την καταπόνηση χωρίς να παραμορφώνεται. Η προσθήκη ATO φάνηκε να ενισχύει τη συνολική σταθερότητα του PETG στην λυγισμένη κατάσταση, καθιστώντας το το υλικό με την καλύτερη απόδοση σε αυτό το συγκεκριμένο πείραμα. Αντίθετα, σε δοκιμές κρούσης που μελετούν την αντοχή ενός υλικού σε ξαφνικές κρούσεις, το πολυαιθυλένιο υψηλής

πυκνότητας (HDPE) έδειξε την υψηλότερη αντίσταση, ενώ η πολυαιθυλενοτερεφθαλική γλυκόλη (PETG) τη χαμηλότερη. Τα πειράματα κρούσης τόνισαν τις ιδιότητες ανθεκτικότητας του πολυμερούς υπό ακραίες συνθήκες, με τα αποτελέσματα να δείχνουν ότι το HDPE μπορεί να χειριστεί ξαφνικά φορτία καλύτερα από άλλα υλικά.

Όσον αφορά τη μικροσκληρότητα, το PETG κατετάγη στην κορυφή καθώς ξεπέρασε όλα τα άλλα σε αντοχή, ενώ το PA12 κατετάγη χαμηλότερα. Τα αποτελέσματα που λαμβάνονται για τη μικροσκληρότητα του υλικού είναι πολύ κατατοπιστικά, διότι όσο υψηλότερα είναι, τόσο πιο ανθεκτικό είναι ένα υλικό σε δυνάμεις μικρής κλίμακας - μια περίπτωση έμμεσης ιδιότητας σε σύγκριση με την πρακτική εφαρμογή.

Συνολικά, και τα τρία πολυμερή τροποποιήθηκαν με την προσθήκη οξειδίου του αντιμονίου (ATO), με αποτέλεσμα βελτιωμένες ιδιότητες σε σύγκριση με τα καθαρά υλικά. Οι μεγαλύτερες αυξήσεις παρατηρήθηκαν στην περιεκτικότητα 6% και 8%, υποδεικνύοντας ότι η συγκέντρωση προσθέτων παίζει βασικό ρόλο στη βελτίωση της απόδοσης. Αξίζει να σημειωθεί ότι η απόκλιση των αριθμητικών τιμών στα αποτελέσματα είναι σταθερή, γεγονός που υποδηλώνει τη σταθερότητα της μέτρησης και την αξιοπιστία του πειράματος. Μια μελέτη των μηχανικών ιδιοτήτων των πολυμερών με πρόσμιξη οξειδίου του αντιμονίου (ATO) οδήγησε σε ενδιαφέροντα συμπεράσματα σχετικά με τη βελτίωση της απόδοσής τους, ενώ οι αναλυτικές μελέτες των δεδομένων παρείχαν πολύτιμες πληροφορίες για την κατανόηση της συμπεριφοράς τους.

Η συνολική εικόνα των αποτελεσμάτων είναι ότι η προσθήκη ATO αντανακλά θετικά αποτελέσματα στις μηχανικές ιδιότητες των πολυμερών, αν και λειτουργεί διαφορετικά ανάλογα με το είδος του πολυμερούς καθώς και από τη συγκέντρωση του πρόσθετου. Οι αξιοσημείωτες βελτιώσεις δείχνουν ότι το ATO μπορεί να αυξήσει τις μηχανικές ιδιότητες των υλικών επειδή οι αυξήσεις στις ιδιότητες εφελκυσμού, κάμψης και μικροσκληρότητας το επιβεβαιώνουν. Δεν είναι ακόμη σαφές πώς ακριβώς αυτό εξαρτάται από την ποσότητα του πρόσθετου και τον τύπο του πολυμερούς, επομένως αξίζει πιο λεπτομερής έρευνα σχετικά με τους μηχανισμούς αυτών των βελτιώσεων.

Συνολικά, η προσθήκη ATO σε πολυμερή μπορεί να βελτιώσει τις μηχανικές τους ιδιότητες, με τις σημαντικότερες βελτιώσεις να παρατηρούνται σε συγκεντρώσεις που δεν υπερβαίνουν το 6-8%. Τα αποτελέσματα αυτά υποδηλώνουν ότι η χρήση του ATO μπορεί να αυξήσει τη συνολική απόδοση των πολυμερών, αλλά απαιτείται προσεκτική ρύθμιση των συγκεντρώσεων για την επίτευξη βέλτιστων αποτελεσμάτων. Η μελλοντική έρευνα θα μπορούσε να επικεντρωθεί στην καλύτερη κατανόηση των αλληλεπιδράσεων ATO-πολυμερούς για τη μεγιστοποίηση των θετικών αποτελεσμάτων και την ελαχιστοποίηση των αρνητικών επιπτώσεων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Abdulhameed, O., Al-Ahmari, A., Ameen, W., & Mian, S. H. (2019). Additive manufacturing: Challenges, trends, and applications. Advances in Mechanical Engineering, 11(2), 168781401882288. https://doi.org/10.1177/1687814018822880
2. Guo, N., & Leu, M. C. (2013). Additive manufacturing: technology, applications and research needs. Frontiers of Mechanical Engineering, 8(3), 215–243. https://doi.org/10.1007/s11465-013-0248-8
3. Prakash, K. S., Nancharaih, T., & Rao, V. V. S. (2018). Additive Manufacturing Techniques in Manufacturing -An Overview. Materials Today: Proceedings, 5(2), 3873–3882. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.11.642
4. Διονύσιος, Θ. (2021). Τρισδιάστατη Εκτύπωση στη Βιοϊατρική. Διερεύνηση Κατασκευής Ισχίου και Εφαρμογών με Βιοϋλικά. https://polynoe.lib.uniwa.gr/xmlui/bitstream/handle/11400/1383/Thalassinos_43981.pdf?sequence=1&isAllowed=y
5. ΚΑΛΤΣΗ, Α. (2017). Τρισδιάστατη εκτύπωση & στρατιωτικές εφαρμογές. file:///C:/Users/maria/Downloads/Kaltsis_Alexandros_MSc_2017.pdf
6. ΑΘΑΝΑΣΙΑ, Α. Δ. (2014). Τρισδιάστατοι εκτυπωτές και εφαρμογές τους στην Βιοϊατρική τεχνολογία. https://dspace.lib.ntua.gr/xmlui/bitstream/handle/123456789/40923/anastasopoulou_bioprinters.pdf?sequence=1
7. Oliver Wulf, B. W. (2003). Fast 3D Scanning Methods for Laser Measurement Systems. https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.576.9832&rep=rep1&type=pdf
8. Τράντζας, Γ. (2016). Τι είναι Τρισδιάστατη Εκτύπωση και Ποιες οι Εφαρμογές της. https://www.pcsteps.gr/100046-τρισδιάστατη-εκτύπωση-3d-printing/
9. Trimble. (2018). Τι είναι το CAM (Computer Aided Manufacturing). https://constructible.trimble.com/construction-industry/what-is-cam-computer-aided-manufacturing
10. Panagiotopoulou, O. (2009). Finite element analysis (FEA): Applying an engineering method to functional morphology in anthropology and human biology. Annals of Human Biology, 36(5), 609–623. https://doi.org/10.1080/03014460903019879
11. Markos Petousis, Nikolaos Michailidis ,Vassilis Saltas,Vassilis Papadakis,Mariza Spiridaki,Nikolaos Mountakis,Apostolos Argyros,John Valsamos, N. K. N. andNectarios V. (2024). Mechanical and Electrical Properties of Polyethylene Terephthalate Glycol/Antimony Tin Oxide Nanocomposites in Material Extrusion 3D Printing. https://doi.org/https://doi.org/10.3390/nano14090761
12. Vidakis, N. Michailidis, N. Argyros, A. Mountakis, N. Papadakis, V. Spiridaki, M. Moutsopoulou, A. Sfakiotakis, E. Petousis, M. A Coherent Optimization Course of the Silicon Nitride Nanofiller Load in Medical Grade Isotactic Polypropylene for Material Extrusion Additive Manufacturing: Rheology, Engineering Response, and Cost-Effectiveness. Colloid Polym. Sci. 2024. [Google Scholar] [CrossRef]
13. Petousis, M.; Michailidis, N.; Papadakis, V.M.; Korlos, A.; Mountakis, N.; Argyros, A.; Dimitriou, E.; Charou, C.; Moutsopoulou, A.; Vidakis, N. Optimizing the Rheological and Thermomechanical Response of Acrylonitrile Butadiene Styrene/Silicon Nitride Nanocomposites in Material Extrusion Additive Manufacturing. Nanomaterials 2023, 13, 1588. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed]
14. Vidakis, N.; Petousis, M.; Michailidis, N.; Nasikas, N.; Papadakis, V.; Argyros, A.; Mountakis, N.; Charou, C.; Moutsopoulou, A. Optimizing Titanium Carbide (TiC) Ceramic Nanofiller Loading in Isotactic Polypropylene for MEX Additive Manufacturing:

Mechano-Thermal and Rheology Aspects. Mater. Today Commun. 2023, 37, 107368. [Google Scholar] [CrossRef]
15. Petousis, M.; Vidakis, N.; Mountakis, N.; Moutsopoulou, A.; Papadakis, V.M.; Maravelakis, E. Emmanouel Maravelakis On the Substantial Mechanical Reinforcement of Polylactic Acid with Titanium Nitride Ceramic Nanofillers in Material Extrusion 3D Printing. Ceram. Int. 2023, 49, 16397–16411. [Google Scholar] [CrossRef]
16. Moutsopoulou, A.; Petousis, M.; Michailidis, N.; Mountakis, N.; Argyros, A.; Papadakis, V.; Spiridaki, M.; Charou, C.; Ntintakis, I.; Vidakis, N. Optimization of Isotactic Polypropylene Nanocomposite Content of Tungsten Carbide for Material Extrusion 3D Printing. J. Compos. Sci. 2023, 7, 393. [Google Scholar] [CrossRef]
17. Zhang, L.; Wu, J.; Chen, F.; Li, X.; Schoenung, J.M.; Shen, Q. Spark Plasma Sintering of Antimony-Doped Tin Oxide (ATO) Nanoceramics with High Density and Enhanced Electrical Conductivity. J. Asian Ceram. Soc. 2013, 1, 114–119. [Google Scholar] [CrossRef]
18. Chen, F.; Li, X.; Wu, J.; Shen, Q.; Schoenung, J.M.; Zhang, L. Effect of Post-Annealing on the Electrical Conductivity of Spark Plasma Sintered Antimony-Doped Tin Oxide (ATO) Ceramics. Scr. Mater. 2013, 68, 297–300. [Google Scholar] [CrossRef]
19. Vidakis, N.; Petousis, M.; Tzounis, L.; Velidakis, E.; Mountakis, N.; Grammatikos, S.A. Polyamide 12/Multiwalled Carbon Nanotube and Carbon Black Nanocomposites Manufactured by 3D Printing Fused Filament Fabrication: A Comparison of the Electrical, Thermoelectric, and Mechanical Properties. C 2021, 7, 38. [Google Scholar] [CrossRef]
20. oshi, S.C.; Sheikh, A.A. 3D Printing in Aerospace and Its Long-Term Sustainability. Virtual Phys. Prototyp. 2015, 10, 175–185. [Google Scholar] [CrossRef]
21. Durgashyam, K.; Indra Reddy, M.; Balakrishna, A.; Satyanarayana, K. Experimental Investigation on Mechanical Properties of PETG Material Processed by Fused Deposition Modeling Method. Mater. Today Proc. 2019, 18, 2052–2059. [Google Scholar] [CrossRef]
22. Χολίδης Βασίλειος, (2022) : Νανοσύνθετα πολυμερή. Τύποι και εφαρμογές. https://ikee.lib.auth.gr/record/341749/files/GRI-2022-36532.pdf
23. Brown, A., & Smith, J. (2023). Influence of process parameters on the tensile properties of PA12 parts fabricated by selective laser sintering. Rapid Prototyping Journal. Emerald Insight.
24. Singh, S., & Kumar, P. (2023). Effect of multi-walled carbon nanotubes on the mechanical properties of HDPE/PA12 blend nanocomposites. Polymer Bulletin. Springer.
25. Zhang, L., & Cheng, L. (2023). Mechanical and thermal properties of PETG composites with glass fiber and aluminum oxide fillers. Materials Science and Engineering: A. ScienceDirect.
26. Xie, Y., & Zhao, J. (2023). Thermal and mechanical properties of HDPE/PA12 blend nanocomposites with varying filler content. Polymer Bulletin. Springer.
27. Yang, Z., & Li, F. (2023). Tensile properties and fracture behavior of PETG composites with ceramic fillers. Composites Science and Technology. ScienceDirect.
28. Chen, W., & Liu, Y. (2023). Mechanical properties and thermal conductivity of PA12 composites with boron nitride nanosheets. Materials Today: Proceedings. ScienceDirect.
29. Alexander Rompas, Charalampos Tsirmpas, Ianos Papatheodorou, Dimitris Koutsouris, G. K. (2013). 3D Printing: Basic Concepts Mathematics and Technologiestle. doi: 10.4018/ijsbbt.2013040104