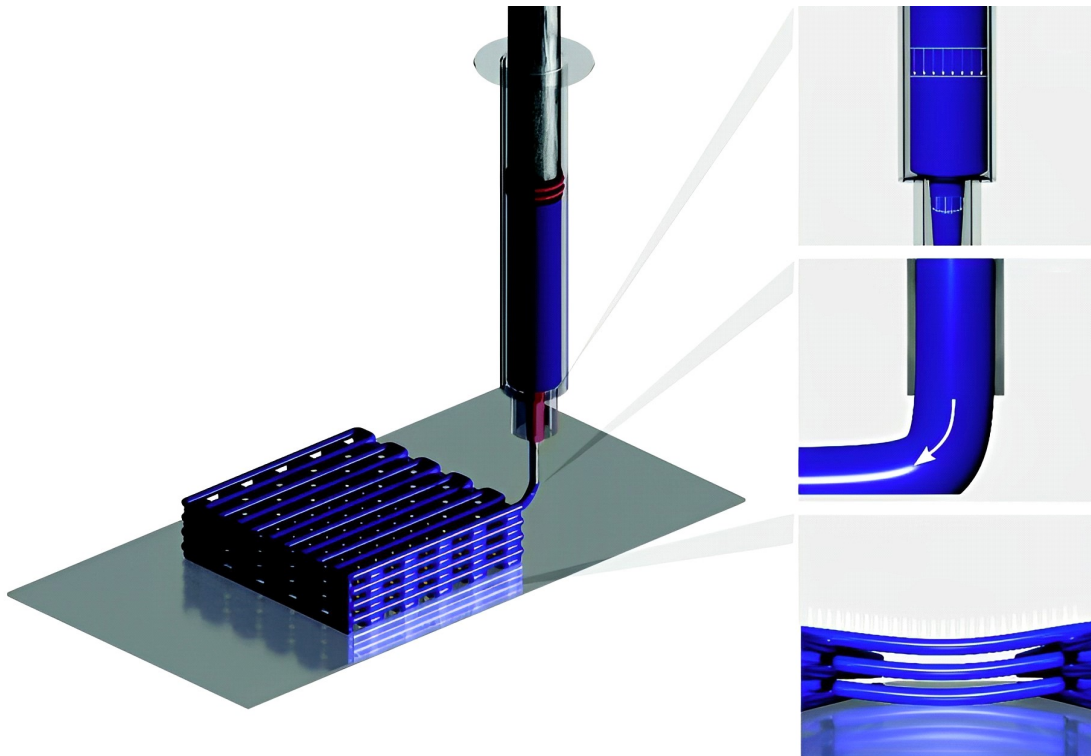




**ΘΕΡΜΟΪΔΡΑΥΛΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΡΟΗΣ, ΜΕΣΩ ΧΡΗΣΗΣ
ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ, ΘΕΡΜΟΠΛΑΣΤΙΚΟΥ ΥΛΙΚΟΥ ΕΝΤΟΣ
ΤΟΥ ΑΚΡΟΦΥΣΙΟΥ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΕΚΤΥΠΩΣΗ**



Διπλωματική Εργασία

ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ ΚΑΡΑΜΠΙΑΣΑΚΗΣ Δ.

Επιβλέπων

Άγγελος Μαρκόπουλος, Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ.

Αθήνα
Οκτώβριος, 2023

ΘΕΡΜΟΪΔΡΑΥΔΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΡΟΗΣ, ΜΕΣΩ ΧΡΗΣΗΣ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΔΩΝ,
ΘΕΡΜΟΠΛΑΣΤΙΚΟΥ ΥΛΙΚΟΥ ΕΝΤΟΣ ΤΟΥ ΑΚΡΟΦΥΣΙΟΥ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΕΚΤΥΠΩΣΗ



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ

**ΘΕΡΜΟΪΔΡΑΥΛΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΡΟΗΣ, ΜΕΣΩ ΧΡΗΣΗΣ
ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ, ΘΕΡΜΟΠΛΑΣΤΙΚΟΥ ΥΛΙΚΟΥ
ΕΝΤΟΣ ΤΟΥ ΑΚΡΟΦΥΣΙΟΥ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ
ΕΚΤΥΠΩΣΗ**

Διπλωματική Εργασία

ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ ΚΑΡΑΜΠΑΣΑΚΗΣ Δ.

Επιβλέπων: Άγγελος Μαρκόπουλος, Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ.

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή στις: 13 / 10 / 2023

1. Βοσνιάκος Γεώργιος - Χριστόφορος
2. Μαρκόπουλος Άγγελος
3. Μπενάρδος Πανώριος

Αθήνα, Οκτώβριος 2023

© 2023 Ε. Καραμπασάκης (Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος)

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή του υλικού του κειμένου, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτού, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα.

Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία διεξήχθη στο τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (ΕΜΠ) στα πλαίσια του τελευταίου (10^{ου}) εξαμήνου για την εκπλήρωση του ακαδημαϊκού προγράμματος σπουδών κατά το έτος 2023. Αποτελεί πεδίο έρευνας σε μία από τις πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες τεχνικές προσθετικών κατασκευών, την FFF (Fuse Filament Fabrication). Τα τελευταία χρόνια υπήρξαν μάρτυρας της αναγέννησης του ερευνητικού ενδιαφέροντος για τη μέθοδο αυτή, η οποία έχει κερδίσει έδαφος σχεδόν σε κάθε βιομηχανικό κλάδο, κυρίως λόγω της ραγδαίας προόδου στη δημιουργία εξαρτημάτων υψηλής απόδοσης και βιομηχανικής ποιότητας. Έχουν γίνει σημαντικές προσπάθειες για τη μοντελοποίηση της διαδικασίας FFF προκειμένου να κατανοηθούν οι υποκείμενοι μηχανισμοί που συμβάλλουν στην παραγωγή τεμαχίων επιθυμητών μηχανικών χαρακτηριστικών. Η εκπονούμενη μελέτη λαμβάνει υπόψη τις τρέχουσες αναλυτικές και αριθμητικές μεθόδους για τη μοντελοποίηση της ροής ενός τήγματος πολυμερούς στην εξώθηση και στοχεύει στη δημιουργία ενός μοντέλου που προσομοιώνει με ικανοποιητική ακρίβεια τα ρεολογικά χαρακτηριστικά των πιο διαδεδομένων θερμοπλαστικών υλικών κατά την εξώθηση, η κατανόηση των οποίων είναι κρίσιμη για τη διαδικασία της εναπόθεσης του υλικού και της ποιότητάς του.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά στο σημείο αυτό τον αναπληρωτή Καθηγητή ΕΜΠ κ. Μαρκόπουλο Άγγελο, υπό την επίβλεψη του οποίου εκπονήθηκε η παρούσα έρευνα. Είναι υποχρέωση μου να αναφέρω πως αισθάνομαι ιδιαίτερα τυχερός που είχα τη δυνατότητα να συνεργαστώ μαζί του. Η εμπιστοσύνη που μου έδειξε τόσο κατά την ανάθεση του συγκεκριμένου θέματος όσο και κατά τη χρονική περίοδο της συνεργασίας μας ήταν καθοριστικής σημασίας για την ολοκλήρωση της διπλωματικής. Τον ευχαριστώ ιδιαίτερος για τη συνεχή καθοδήγηση, τις συζητήσεις μας και τις συμβουλές του σε όλο αυτό το διάστημα. Εξίσου θερμές ευχαριστίες θα ήθελα να απευθύνω στον υποψήφιο διδάκτορα Χριστοδούλου Ιωάννη, ο οποίος πρότεινε το αντικείμενο της διπλωματικής και συνέβαλε στην ολοκλήρωσή της με επιστημονικές συμβουλές, πλείστες καθοδηγήσεις, άμεσες αποκρίσεις στα ερωτήματα που εγείρονταν και παρατηρήσεις. Επίσης, ευχαριστώ θερμά όλα τα μέλη του Εργαστηρίου Τεχνολογίας των Κατεργασιών του ΕΜΠ που μας επέτρεψαν να κάνουμε χρήση του εξοπλισμού όπου απαιτήθηκε. Τέλος, αισθάνομαι την ανάγκη να ευχαριστήσω όλους τους φίλους μου και την οικογένειά μου για τη συμπαράσταση, την υπομονή και την κατανόηση τους αυτή την περίοδο αποτελώντας για μένα ωθούσα δύναμη για κάθε επόμενο βήμα.

Αυτή η εργασία, όπως και κάθε πνευματικό δημιούργημα που χαρακτηρίζεται από υψηλή πολυπλοκότητα και μεγάλο αριθμό βαθμών ελευθερίας, ήταν για τον εκ πεποιθήσεως τελειομανή συγγραφέα της μια άσκηση ισορροπίας ανάμεσα στο ιδανικό και στο πρακτικά εφικτό. Για όλες τις παραλείψεις, τις ατέλειες και τα σφάλματα που αναπόφευκτα θα εντοπίσει ο αναγνώστης φέρω αμέριστα και βαρέως την ευθύνη.

Καραμπασάκης Εμμανουήλ

ΘΕΡΜΟΪΔΡΑΥΔΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΡΟΗΣ, ΜΕΣΩ ΧΡΗΣΗΣ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΔΩΝ,
ΘΕΡΜΟΠΛΑΣΤΙΚΟΥ ΥΛΙΚΟΥ ΕΝΤΟΣ ΤΟΥ ΑΚΡΟΦΥΣΙΟΥ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΕΚΤΥΠΩΣΗ

Περιεχόμενα

Πρόλογος	5
Περιεχόμενα.....	7
Πίνακας Εικόνων	9
Ευρετήριο Πινάκων	13
Λίστα Συμβόλων.....	14
Περίληψη	18
Abstract.....	18
Εισαγωγή	19
E.1 Στόχοι της Διπλωματικής	20
E.2 Διάρθρωση της Διπλωματικής	21
1. Τεχνολογικό Πλαίσιο Τρισδιάστατης Εκτύπωσης	22
1.1. Ιστορική Αναδρομή	22
1.1.1. Πρώιμο Στάδιο 3D Εκτύπωσης	22
1.1.2. Ανάπτυξη Μηχανών και Τεχνικών 3D Εκτύπωσης.....	22
1.1.3. Μείωση του Κόστους και Διάδοση της 3D Εκτύπωσης.....	23
1.1.4. Βιομηχανική ανάπτυξη και ενσωμάτωση της τρισδιάστατης εκτύπωσης.....	23
1.2. Τεχνικές Τρισδιάστατης Εκτύπωσης.....	24
1.2.1. Εξώθηση Υλικού.....	25
1.2.2. Στερεολιθογραφία.....	27
1.2.3. Εκτόξευση Υλικού.....	29
1.2.4. Δέσμευση Συνδετικού Υλικού.....	30
1.2.5. Σύντηξη Υποστρώματος Σκόνης	31
1.2.6. Κατευθυνόμενη Ενεργειακή Εναπόθεση	32
1.2.7. Ελάσματα σε Φύλλα	33
1.3. Χρήση Τρισδιάστατης Εκτύπωσης στη Βιομηχανία	34
1.3.1. Τεχνολογικές Δυνατότητες και Περιορισμοί.....	34
1.3.2. Κατηγοριοποίηση Υλικών	37
1.3.3. Βιομηχανικές Εφαρμογές	39
2. Ανάλυση Ροής Τήγματος Πολυμερούς στην Εξώθηση Υλικού.....	41
2.1. Μηχανισμός Εξώθησης Υλικού.....	41
2.1.1. Περιγραφή Δομικών Εξαρτημάτων	42
2.1.2. Συμπεριφορά Ροής Τήγματος	43
2.1.3. Προϋποθέσεις Εκτύπωσης.....	45
2.2. Ανασκόπηση Σύγχρονων Μοντέλων Ροής Πολυμερών	46
2.2.1. Αναλυτικά Μοντέλα	47
2.2.2. Αριθμητικά Μοντέλα	49
2.3. Διέπουσες Εξισώσεις Ροής Πολυμερών	51
2.3.1. Δυναμική της Ροής του Πολυμερούς.....	51
2.3.2. Μεταφορά Θερμότητας.....	52
2.3.3. Αναλυτικές Συσχετίσεις Κρίσιμων Παραμέτρων	53

2.4. Μαθηματική Ανάλυση Μοντέλων Πολυμερών.....	58
2.4.1. Ανελαστικά Μοντέλα Μη Νευτώνειου Ρευστού.....	58
2.4.2. Ιξωδοελαστικά Μοντέλα.....	60
3. Μοντέλο Αριθμητικής Προσομοίωσης.....	63
3.1. Περιγραφή Στρατηγικής.....	63
3.1.1. Υλοποίηση Στόχων.....	63
3.1.2. Επιλογή Μοντέλου Ιξώδους.....	64
3.2. Παράμετροι Μοντέλου.....	66
3.2.1. Γεωμετρία.....	66
3.2.2. Ιδιότητες Υλικού.....	67
3.2.3. Πλεγματοποίηση.....	70
3.2.4. Οριακές Συνθήκες και Παράμετροι Επίλυσης.....	71
4. Παρουσίαση Αποτελεσμάτων.....	73
4.1. Ρεολογικά Χαρακτηριστικά Τήγματος.....	73
4.1.1. Θερμοκρασιακή Κατανομή.....	73
4.1.2. Κατανομή Ταχύτητας.....	78
4.1.3. Κατανομή Πίεσης.....	83
4.2. Εξάρτηση Κρίσιμων Μεγεθών κι Επικύρωση.....	86
4.2.1. Δύναμη Τροφοδοσίας.....	86
4.2.2. Μέγιστος Ρυθμός Τροφοδοσίας.....	90
5. Σύνοψη.....	92
5.1 Ανακεφαλαίωση και Συμπεράσματα.....	92
5.1.1 Ρεολογική Μελέτη.....	92
5.1.2 Εξάρτηση Κρίσιμων Μεγεθών.....	94
5.1.3 Ελλείψεις κι Επικύρωση.....	94
5.2 Μελλοντική Έρευνα.....	96
Βιβλιογραφία.....	97

Πίνακας Εικόνων

Εικόνα 1. Σκαρίφημα της ροής του υλικού με την τεχνολογική μέθοδο της εξώθησης	26
Εικόνα 2. Ανάπτυξη χημικών διασυνδέσεων στα υλικά κατά την εκτύπωση με SLA [40]	27
Εικόνα 3. Αναπαράσταση δημιουργίας ενός τρισδιάστατου αντικειμένου με τη στερεολιθογραφία [41]	28
Εικόνα 4. Αναπαράσταση δημιουργίας ενός τρισδιάστατου αντικειμένου με εκτόξευση υλικού [41]	29
Εικόνα 5. Αναπαράσταση δημιουργίας ενός τρισδιάστατου αντικειμένου με δέσμευση συνδετικού υλικού [41]	30
Εικόνα 6. Αναπαράσταση δημιουργίας ενός τρισδιάστατου αντικειμένου με επιλεκτική σύντηξη υποστρώματος σκόνης [41]	32
Εικόνα 7. Αναπαράσταση δημιουργίας ενός τρισδιάστατου αντικειμένου με κατευθυνόμενη ενεργειακή εναπόθεση [41]	33
Εικόνα 8. Αναπαράσταση δημιουργίας ενός τρισδιάστατου αντικειμένου με ελάσματα σε φύλλα [63]	34
Εικόνα 9. Παραδείγματα Χρήσης Τρισδιάστατης Εκτύπωσης στη Βιομηχανία	40
Εικόνα 10. Λεπτομέρειες δομικών εξαρτημάτων ενός τυπικού εκτυπωτή τεχνολογίας FFF [106]	42
Εικόνα 11. Δυναμική της ροής του τήγματος κατά την τρισδιάστατη εκτύπωση μέσω FDM/FFF	44
Εικόνα 12. Μοντέλο τήξης και ροής που προτείνεται από τους Bellini et al. [124]; T_0 , T_m , T_h είναι η αρχική θερμοκρασία, η θερμοκρασία τήξης του πολυμερούς και η τιθέμενη θερμοκρασία θέρμανσης από το θερμό άκρο αντίστοιχα, με την κατανομή θερμοκρασίας του πολυμερούς στο θερμό άκρο να είναι ομοιόμορφη.	47
Εικόνα 13. Βελτιωμένο μοντέλο Osswald et al. [124]; T_0 , T_m , T_h είναι η αρχική θερμοκρασία, η θερμοκρασία τήξης του πολυμερούς και η τιθέμενη θερμοκρασία θέρμανσης από το θερμό άκρο αντίστοιχα στο οποίο μια μικρή μεμβράνη τήγματος στην επιφάνεια της κωνικής τομής παίζει σημαντικό ρόλο στον μετασχηματισμό φάσης	48
Εικόνα 14. Απλοποιημένη επίπεδη αξονοσυμμετρική γεωμετρία υγροποιητή	54
Εικόνα 15. Αναπαράσταση ροής πολυμερούς στα 3 διακριτά τμήματα του υγροποιητή	57
Εικόνα 16. Γραμμικό μοντέλο Maxwell ιξωδοελαστικής συμπεριφοράς πολυμερούς [144]	60
Εικόνα 17. Φαινόμενο παραμόρφωσης μήτρας κατά την έξοδο του πολυμερούς από το τριχοειδές ακροφύσιο	62
Εικόνα 18. Κλάσμα τήξης MF σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία [152]	64
Εικόνα 19. Τροποποιημένος συντελεστής μετατόπισης WLF $\alpha T T$	65
Εικόνα 20. Αξονοσυμμετρικό μοντέλο γεωμετρίας του υγροποιητή E3D-V6	66
Εικόνα 21. Αξονοσυμμετρικό μοντέλο γεωμετρίας του υγροποιητή E3D Volcano	67
Εικόνα 22. Μεταβολή της πυκνότητας του υγρού πολυμερούς ABS συναρτήσει της θερμοκρασίας	68
Εικόνα 23. Μεταβολή ειδικής θερμοχωρητικότητας και θερμικής αγωγιμότητας υγρού πολυμερούς ABS συναρτήσει της θερμοκρασίας	68
Εικόνα 24. Τροποποιημένος WLF συντελεστής μετατόπισης θερμοκρασίας για το ABS	69
Εικόνα 25. Πλεγματοποίηση υγροποιητή μοντέλου και μεταβολή λοξότητας ως παράμετρος ποιότητας	70
Εικόνα 26. Αναπαράσταση οριακών συνθηκών στο συζευγμένο μοντέλο επίλυσης της γεωμετρίας των υγροποιητών	72
Εικόνα 27. Κατανομή θερμοκρασίας του ABS στο κανάλι του υγροποιητή για διάφορους ρυθμούς ροής για τις τρεις επιθυμητές θερμοκρασίες θέρμανσης και για τα δύο διαφορετικά μήκη καναλιού. Καθώς η ταχύτητα του νήματος αυξάνεται και για χαμηλότερη θερμοκρασία	

- τοιχώματος, η θερμοκρασία μετάπτωσης υάλου πραγματοποιείται πλησιέστερα στην κωνική ζώνη μετάβασης του θερμού άκρου. Η ίδια τάση παρατηρείται στο αυξημένο μήκος, ωστόσο ο μεγαλύτερος χρόνος επαφής με το θερμό τοίχωμα ευνοεί την τήξη έναντι του μικρού. 74
Εικόνα 28. Ισοθερμική περιοχή κατανομής θερμοκρασίας μετάπτωσης υάλου Tg και 70°C του ABS στο κανάλι του υγροποιητή για διάφορους ρυθμούς ροής για τις τρεις επιθυμητές θερμοκρασίες θέρμανσης και για τα δύο διαφορετικά μήκη καναλιού. Καθώς η ταχύτητα του νήματος αυξάνεται και για χαμηλότερη θερμοκρασία τοιχώματος, η τήξη πραγματοποιείται πλησιέστερα στην κωνική ζώνη μετάβασης του θερμού άκρου. Η ίδια τάση παρατηρείται στο αυξημένο μήκος, ωστόσο η τήξη ευνοείται έναντι του μικρού μήκους. 75
Εικόνα 29. Αξονική κατανομή της θερμοκρασίας κατά μήκους του μικρού ακροφυσίου E3D-V6 για διαφορετικούς ογκομετρικούς ρυθμούς ροής και θερμοκρασίες στόχους του θερμαντήρα. 76
Εικόνα 30. Αξονική κατανομή της θερμοκρασίας κατά μήκους του μεγάλου ακροφυσίου E3D Volcano για διαφορετικούς ογκομετρικούς ρυθμούς ροής και θερμοκρασίες στόχους του θερμαντήρα. 77
Εικόνα 31. Ακτινική κατανομή της θερμοκρασίας στην έξοδο του μικρού ακροφυσίου E3D-V6 για διαφορετικούς ογκομετρικούς ρυθμούς ροής και θερμοκρασίες στόχους του θερμαντήρα. 78
Εικόνα 32. Ακτινική κατανομή της θερμοκρασίας στην έξοδο του μεγάλου ακροφυσίου E3D Volcano για διαφορετικούς ογκομετρικούς ρυθμούς ροής και θερμοκρασίες στόχους του θερμαντήρα. 78
Εικόνα 33. Κατανομή ταχύτητας του ABS στο κανάλι του υγροποιητή για το μέγιστο και ελάχιστο ρυθμό ροής για τις τρεις επιθυμητές θερμοκρασίες θέρμανσης και για τα δύο διαφορετικά μήκη καναλιού. Η ταχύτητα ροής είναι ομοιόμορφη και σταθερή στο μεγαλύτερο μήκος του υγροποιητή. Η ταχύτητα αυξάνεται στην κωνική περιοχή του ακροφυσίου και του τριχοειδούς τμήματος λόγω της μείωσης της επιφάνειας διατομής. Οι αλλαγές στη θερμοκρασία του ακροφυσίου έχουν πολύ ασθενέστερη επίδραση στην κατανομή της ταχύτητας στην έξοδο του ακροφυσίου από ό,τι οι αλλαγές στην ταχύτητα τροφοδοσίας του νήματος. 79
Εικόνα 34. Παραμετρικές καμπύλες ακτινικής κατανομής ταχύτητας στην έξοδο του μικρού ακροφυσίου E3D-V6 για διαφορετική ταχύτητα τροφοδοσίας του νήματος και τιθέμενη θερμοκρασία του θερμαντήρα. Με την αύξηση της ταχύτητας τροφοδοσίας, η ακτινική κατανομή της ταχύτητας δείχνει τη συμπεριφορά μιας ροής βύσματος. Η κατανομή της ταχύτητας στην έξοδο του ακροφυσίου εξαρτάται ελάχιστα από την προκαθορισμένη θερμοκρασία του τοιχώματος. 80
Εικόνα 35. Παραμετρικές καμπύλες ακτινικής κατανομής ταχύτητας στην έξοδο του μικρού ακροφυσίου E3D Volcano για διαφορετική ταχύτητα τροφοδοσίας του νήματος και τιθέμενη θερμοκρασία του θερμαντήρα. 80
Εικόνα 36. Παραμετρικές καμπύλες ακτινικής κατανομής ταχύτητας στο κωνικό τμήμα του μικρού ακροφυσίου E3D-V6 για διαφορετική ταχύτητα τροφοδοσίας του νήματος και τιθέμενη θερμοκρασία του θερμαντήρα. Σε μικρές ταχύτητες τροφοδοσίας νήματος παρατηρείται συμπεριφορά μη νευτώνειου ρευστού με τη μέγιστη ταχύτητα στο κέντρο και μηδενική στο τοίχωμα. Για μεγάλες ταχύτητες τροφοδοσίας νήματος, η μέγιστη ταχύτητα του πολυμερούς υφίσταται κοντά στο τοίχωμα, ενώ η ελάχιστη στο κέντρο του ακροφυσίου, λόγω της ύπαρξης μιας λεπτής μεμβράνης τήξης, σύμφωνα με το μοντέλο των Osswald et al. 81
Εικόνα 37. Παραμετρικές καμπύλες ακτινικής κατανομής ταχύτητας στο κωνικό τμήμα του μεγάλου ακροφυσίου E3D Volcano για διαφορετική ταχύτητα τροφοδοσίας του νήματος και τιθέμενη θερμοκρασία του θερμαντήρα. Σε μικρές ταχύτητες τροφοδοσίας νήματος παρατηρείται συμπεριφορά μη νευτώνειου ρευστού όπως και στο μικρό ακροφύσιο. Για τη

μεγάλη ταχύτητα τροφοδοσίας νήματος, η μέγιστη ταχύτητα του πολυμερούς υφίσταται κοντά στο τοίχωμα, ενώ η ελάχιστη στο κέντρο του ακροφυσίου. Λόγω της ύπαρξης του μεγαλύτερου τμήματος κάνης του υγροποιητή, μπορεί να μεταφερθεί μεγαλύτερη ποσότητα θερμότητας, έτσι ώστε ο σχηματισμός μιας μεμβράνης τήγματος να συμβαίνει μόνο σε πολύ υψηλότερες ταχύτητες νήματος, επομένως το φαινόμενο αυτό δεν παρατηρείται τόσο έντονα όσο στο μικρό ακροφύσιο για τις ταχύτητες τροφοδοσίας που εξετάστηκε, γι' αυτό και μεγεθύνεται στο σχήμα δεξιά, ώστε να γίνει αντιληπτό. _____ 82

Εικόνα 38. Παραμετρικές καμπύλες αξονική κατανομής της πίεσης κατά μήκος του κεντρικού άξονα συμμετρίας του μικρού ακροφυσίου E3D-V6 για διαφορετικές ταχύτητες τροφοδοσίας του νήματος και θερμοκρασίες θερμαντήρα. _____ 83

Εικόνα 39. Παραμετρικές καμπύλες αξονική κατανομής της πίεσης κατά μήκος του κεντρικού άξονα συμμετρίας του μεγάλου ακροφυσίου E3D Volcano για διαφορετικές ταχύτητες τροφοδοσίας του νήματος και θερμοκρασίες θερμαντήρα. _____ 83

Εικόνα 40. Κατανομή πίεσης του ABS στο κανάλι του υγροποιητή για διαφορετικούς ρυθμούς τροφοδοσίας στις τρεις επιθυμητές θερμοκρασίες θέρμανσης και για τα δύο διαφορετικά μήκη καναλιού. Η πίεση ελαττώνεται με τη μείωση της διαμέτρου του καναλιού μέχρι να φτάσει στην ατμοσφαιρική. Το μεγαλύτερο μέρος της πτώσης πίεσης υφίσταται στο τριχοειδές ακροφύσιο. Με την αύξηση του ρυθμού ροής, η ολική πτώση πίεσης εντός του υγροποιητή αυξάνεται. Αντιθέτως, με την αύξηση της θερμοκρασίας και του συνολικού μήκους του ακροφυσίου, η ολική πτώση πίεσης μειώνεται λόγω μείωσης του ιξώδους. Σημειακές ανομοιομορφίες ερμηνεύονται ανάλογα. _____ 85

Εικόνα 41. Εξάρτηση δύναμης τροφοδοσίας συναρτήσει της ταχύτητας τροφοδοσίας και του ογκομετρικού ρυθμού ροής για κάθε πειραματική θερμοκρασία θερμαντήρα για το μικρό ακροφύσιο E3D-V6. Με συνεχείς γραμμές ενώνονται τα πειραματικά σημεία, ενώ με διακεκομμένες οι καμπύλες που προκύπτουν ως πολυωνυμικές παρεμβολές 2^{ου} βαθμού που δείχνουν την τάση της αντίστοιχης μεταβολής. Όσο αυξάνεται η θερμοκρασία του υγροποιητή, η δύναμη τροφοδοσίας γίνεται μικρότερη, με την εξάρτηση της δύναμης τροφοδοσίας από τον ρυθμό τροφοδοσίας να ακολουθεί την ίδια τάση για διαφορετικές θερμοκρασίες υγροποιητή. _____ 86

Εικόνα 42. Εξάρτηση δύναμης τροφοδοσίας συναρτήσει της ταχύτητας τροφοδοσίας και του ογκομετρικού ρυθμού ροής για κάθε πειραματική θερμοκρασία θερμαντήρα για το μεγάλο ακροφύσιο E3D Volcano. Με συνεχείς γραμμές ενώνονται τα πειραματικά σημεία, ενώ με διακεκομμένες οι καμπύλες που προκύπτουν ως πολυωνυμικές παρεμβολές 2^{ου} βαθμού που δείχνουν την τάση της αντίστοιχης μεταβολής. Οι εξαρτώμενες τάσεις είναι αντίστοιχες με το μικρό ακροφύσιο. _____ 87

Εικόνα 43. Εξάρτηση της δύναμης τροφοδοσίας συναρτήσει της ταχύτητας τροφοδοσίας και του ογκομετρικού ρυθμού ροής για τα δύο ακροφύσια, το μικρό και το μεγάλο, για μια πειραματική θερμοκρασία θερμαντήρα 225°C. Σε χαμηλούς ρυθμούς τροφοδοσίας η επίδραση του μήκους είναι αμελητέα. Όταν ο ρυθμός τροφοδοσίας είναι μεγάλος, η μετρούμενη δύναμη είναι χαμηλότερη για το μακρύτερο υγροποιητή. _____ 88

Εικόνα 44. Αριστερά. Η δύναμη τροφοδοσίας του νήματος που μετράται ως συνάρτηση του ρυθμού τροφοδοσίας σε διαφορετικές θερμοκρασίες χρησιμοποιώντας ακροφύσιο E3D-V6 με διάμετρο 0.4 mm και υλικό τροφοδοσίας ABS. Οι ράβδοι δείχνουν την τυπική απόκλιση της δύναμης. Δεξιά. Εξάρτηση της δύναμης τροφοδοσίας συναρτήσει της ταχύτητας τροφοδοσίας και του ογκομετρικού ρυθμού ροής για τα δύο ακροφύσια, το μικρό και το μεγάλο, για μια πειραματική θερμοκρασία θερμαντήρα 200°C. Πραγματοποιείται σύγκριση με τις θεωρητικές τιμές του μοντέλου των Bellini et al. _____ 89

Εικόνα 45. Η δύναμη τροφοδοσίας του νήματος που μετράται ως συνάρτηση του ρυθμού τροφοδοσίας σε διαφορετικές θερμοκρασίες χρησιμοποιώντας ακροφύσιο E3D-V6 με

διάμετρο 0.4 mm και υλικό τροφοδοσίας ABS, για διαφορετικές θερμοκρασίες θερμαντήρα. Τα γραφήματα αφορούν στην εργασία των Cheng Luo et al. [112]. _____ 89

Εικόνα 46. Παράδειγμα εξαγόμενου μέγιστου ρυθμού τροφοδοσίας από μετρήσεις της δύναμης τροφοδοσίας νήματος για ABS σε θερμοκρασία θερμαντήρα 225°C. Κατά τη διάρκεια της σταθερής εξώθησης υπάρχει μια περιοχή περίπου γραμμικής αύξησης της δύναμης ως συνάρτηση του ρυθμού τροφοδοσίας. Πάνω από κάποιο κρίσιμο όριο που ονομάζεται μέγιστος ρυθμός τροφοδοσίας, η δύναμη αυξάνεται πιο απότομα. Η γραμμική αύξηση της δύναμης σχετίζεται με το σταθερό καθεστώς εξώθησης. Όταν ξεπεραστεί ο μέγιστος ρυθμός τροφοδοσίας, η εξώθηση εισέρχεται σε ασταθές καθεστώς λόγω της έλλειψης τήξης του νήματος. _____ 90

Εικόνα 47. Καμπύλες μέγιστης τραχύτητας τροφοδοσίας συναρτήσεως της θερμοκρασίας του υγροποιητή για τα δύο ακροφύσια. Προκειμένου να πραγματοποιηθεί επικύρωση των αποτελεσμάτων, προβάλλονται στο ίδιο γράφημα τα αντίστοιχα πειραματικά σημεία για τα αντίστοιχα ακροφύσια από την εργασία των Serdeczny et al. [140]. _____ 91

Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 1. Οι πλέον διαδεδομένες τεχνικές και ονομασίες ανά κατηγορία παραγωγής πρόσθετων	25
Πίνακας 2. Διαστάσεις υγροποιητών μοντέλου	66
Πίνακας 3. Παράμετροι και σταθερές των ιδιοτήτων του πολυμερούς ABS	69
Πίνακας 4. Στατιστικά πλέγματος των γεωμετριών του μοντέλου	71
Πίνακας 5. Τιμές των οριακών συνθηκών του συζευγμένου μοντέλου επίλυσης της γεωμετρίας των υγροποιητών	72
Πίνακας 6. Μέγιστος ογκομετρικός ρυθμός τροφοδοσίας σε κάθε θερμοκρασία θερμοαντήρα για τα δύο ακροφύσια	91

Λίστα Συμβόλων

Σύμβολο	Όνομα Μεταβλητής	Μονάδα
α	Παράμετρος μετάβασης από τη Νευτώνεια στη μη Νευτώνεια συμπεριφορά στο μοντέλο Carreau-Yasuda	-
a_T	Συντελεστής μετατόπισης χρόνου – θερμοκρασίας	-
a_V	Συντελεστής κυβικής θερμικής διαστολής	$^{\circ}\text{K}^{-1}$
\tilde{a}_T	Τροποποιημένος συντελεστής μετατόπισης WLF	-
A_f	Εμβαδό διατομής νήματος	mm^2
C_1	Σταθερά 1 μοντέλου WLF	-
C_2	Σταθερά 2 μοντέλου WLF	$^{\circ}\text{K}$
C_p	Ειδική θερμότητα	$\text{J}/(\text{Kg}\cdot^{\circ}\text{K})$
CTE	Συντελεστής γραμμικής θερμικής διαστολής	$^{\circ}\text{K}^{-1}$
dA	Διαφορικό επιφάνειας	mm^2
dr	Διαφορικό ακτινικής συντεταγμένης	mm
dz	Διαφορικό αξονικής συντεταγμένης	mm
$d\varphi$	Διαφορικό γωνίας αζιμουθίου	deg
d	Διάμετρος κυλινδρικού σωλήνα	
d_B	Διάμετρος κάνης θερμού άκρου	mm
d_C	Διάμετρος τριχοειδούς ακροφυσίου	mm
d_f	Διάμετρος νήματος	mm
D	Τανυστής ρυθμού παραμόρφωσης	s^{-1}
E_a	Ενέργεια ενεργοποίησης	J
F	Δύναμη τροφοδοσίας νήματος (Δύναμη εξώθησης)	N
g	Επιτάχυνση βαρύτητας	m/s^2
G	Μέτρο διάτμησης	Pa
G^*	Μέτρο χαλάρωσης	Pa
G'	Μέτρο αποθήκευσης	Pa
G''	Μέτρο απώλειας	Pa
h_L	Τοπικός συντελεστής συναγωγής	$\text{W}/(\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{K})$
\bar{h}	Μέσος συντελεστής συναγωγής	$\text{W}/(\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{K})$
i	Δείκτης αρίθμησης	-
j	Δείκτης αρίθμησης	-
k	Θερμική αγωγιμότητα	$\text{W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{K})$
L	Χαρακτηριστικό μήκος	mm
L_B	Μήκος κάνης	mm
L_C	Μήκος τριχοειδούς	mm
L_H	Θερμαινόμενο μήκος	mm
L_L	Μήκος υγροποιητή	mm
m_{ref}	Δείκτης συνέπειας στη θερμοκρασία αναφοράς	$\text{Pa}\cdot\text{s}$
$m(T)$	Δείκτης συνέπειας σε θερμοκρασία T	$\text{Pa}\cdot\text{s}$
\dot{m}	Ρυθμός τροφοδοσίας μάζας πολυμερούς	Kg/s

Σύμβολο	Όνομα Μεταβλητής	Μονάδα
\dot{m}_{max}	Μέγιστος ρυθμός τροφοδοσίας μάζας	Kg/s
M	Ροπή κινητήρα εξωθητή	N.m
MF	Κλάσμα τήξης	-
n	Δείκτης ψευδοπλαστικότητας	-
Na	Αριθμός Nahme-Griffith	-
p	Πίεση	Pa
P	Ισχύς κινητήρα εξωθητή	W
r	Ακτινική συντεταγμένη	mm
r_{μ}	Κλάσμα ιζώδους διαλύτη στο ολικό ιζώδες του πολυμερούς	-
R	Ακτίνα κυλινδρικού σωλήνα	mm
\mathcal{R}	Παγκόσμια σταθερά αερίων	J/°K
Re	Αριθμός Reynolds	-
R_r	Ακτίνα οδοντωτού τροχού	mm
q'_{w}	Θερμική ροή από το τοίχωμα	W/m ²
q_L	Λανθάνουσα θερμότητα τήξης	J
Q	Ογκομετρικός ρυθμός τροφοδοσίας νήματος	mm ³ /s
Q_{max}	Μέγιστος ογκομετρικός ρυθμός τροφοδοσίας νήματος	mm ³ /s
t	Χρόνος	s
T	Θερμοκρασία	°K
T_g	Θερμοκρασία μετάπτωσης υάλου	°K
T_{in}	Θερμοκρασία εισόδου στον υγροποιητή	°K
T_L	Επιθυμητή Θερμοκρασία θερμαντικού μπλόκ του υγροποιητή	°K
T_M	Θερμοκρασία τήξης	°K
T_0	Θερμοκρασία δωματίου	°K
T_{out}	Θερμοκρασία εξόδου από υγροποιητή	°K
T_{ref}	Θερμοκρασία αναφοράς	°K
T_w	Θερμοκρασία τοίχου	°K
ΔT	Μεταβολή θερμοκρασίας	°K
u	Διάνυσμα ταχύτητας	mm/s
u	Χαρακτηριστική ταχύτητα	mm/s
u_{rz}	Ταχύτητα κατά τον άξονα z	mm/s
$u_z(r)$	Ακτινικό προφίλ αξονικής ταχύτητας	mm/s
v_{in}	Ταχύτητα εισόδου στον υγροποιητή	mm/s
v_c	Ταχύτητα στην έξοδο του ακροφυσίου	mm/s
v_p	Ταχύτητα εκτύπωσης	mm/s
\hat{V}	Μέση ταχύτητα εισόδου	mm/s
V_{max}	Μέγιστη ταχύτητα εισόδου	mm/s
w	Πλάτος αποτιθέμενου κλώνου	mm
z	z συντεταγμένη	mm

Σύμβολο	Όνομα Μεταβλητής	Μονάδα
a	Συντελεστής θερμικής διαχυτότητας	m^2/s
α_i	Συντελεστής ευκινησίας i τρόπου στο μοντέλο Giesekus	
β	Γωνία κωνικής συστολής	$^\circ$
γ_f	Ιξώδης παραμόρφωση υγρού (συνεισφορά ρευστού)	-
γ_s	Ελαστική παραμόρφωση (συνεισφορά στερεού)	-
$\dot{\gamma}$	Μέτρο ρυθμού διάτμησης	s^{-1}
$\dot{\gamma}$	Τανυστής ρυθμού διάτμησης	s^{-1}
$\dot{\gamma}_\alpha$	Φαινόμενος ρυθμός διάτμησης	s^{-1}
$\dot{\gamma}_{ij}$	Συνιστώσες του τανυστή ταχύτητας παραμόρφωσης	s^{-1}
ϵ	Εκτατική παραμόρφωση	-
$\dot{\epsilon}$	Ρυθμός τανυστικής παραμόρφωσης	s^{-1}
ϵ_f	Συντελεστής εκπομπής ακτινοβολίας νήματος	-
ϵ_w	Συντελεστής εκπομπής ακτινοβολίας τοίχου	-
λ	Χρόνος χαλάρωσης τάσης	s
μ	Δυναμικό ιξώδες	$Pa \cdot s$
μ_α	Φαινόμενο ιξώδες	$Pa \cdot s$
μ_ϵ	Εκτατικό ιξώδες	$Pa \cdot s$
μ_0	Ιξώδες σε μηδενικό ρυθμό διάτμησης	$Pa \cdot s$
μ_∞	Ιξώδες σε άπειρο ρυθμό διάτμησης	$Pa \cdot s$
μ_p	Ιξώδες πολυμερούς	$Pa \cdot s$
μ_s	Ιξώδες διαλύτη	$Pa \cdot s$
μ_v	Συνεισφορά ιξώδους ρευστού	$Pa \cdot s$
μ^*	Μιγαδικό (συνθετικό ιξώδες)	$Pa \cdot s$
ξ	Παράμετρος ελαστικότητας PTT ιξωδοελαστικού μοντέλου	Pa
ρ	Πυκνότητα	Kg/m^3
ρ_r	Πυκνότητα στη θερμοκρασία αναφοράς	Kg/m^3
σ	Σταθερά Stefan–Boltzmann	$W/(m^2 \cdot ^\circ K^4)$
σ_{zz}	z συνιστώσα τανυστικής τάσης	Pa
$\bar{\tau}$	Τανυστής τάσης	Pa
τ_{rz}	rz συνιστώσα τανυστή διατμητικής τάσης	Pa
$\bar{\tau}_p$	Τανυστής τάσης πολυμερούς	Pa
$\bar{\tau}_s$	Τανυστής τάσης διαλύτη (Νευτώνεια συνεισφορά)	Pa
τ^*	Κρίσιμη τάση στο μοντέλο Cross	Pa
τ_{ij}	Συνιστώσες του τανυστή τάσης	Pa
ω	Γωνιακή συχνότητα	rad/s

ΘΕΡΜΟΪΔΡΑΥΔΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΡΟΗΣ, ΜΕΣΩ ΧΡΗΣΗΣ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΔΩΝ,
ΘΕΡΜΟΠΛΑΣΤΙΚΟΥ ΥΛΙΚΟΥ ΕΝΤΟΣ ΤΟΥ ΑΚΡΟΦΥΣΙΟΥ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΕΚΤΥΠΩΣΗ

Περίληψη

Η τρέχουσα διπλωματική εργασία συνιστά πεδίο έρευνας σε μία από τις πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες τεχνικές προσθετικών κατασκευών, την Κατασκευή Συντηγμένου Νήματος ή FFF (Fuse Filament Fabrication). Πραγματοεύεται την ανάλυση των ρεολογικών χαρακτηριστικών ενός τήγματος πολυμερούς στον υγροποιητή ενός εμπορικού τρισδιάστατου εκτυπωτή, τα οποία επιδρούν στην ποιότητα, την ακρίβεια και την επαναληψιμότητα του τελικού αντικειμένου. Εντός της παρούσας μελέτης γίνεται μια ανασκόπηση των σημαντικότερων αναλυτικών και αριθμητικών μοντέλων που έχουν αναπτυχθεί για το συντηγμένο τμήμα της ροής του πολυμερούς στο στάδιο που βρίσκεται εντός του υγροποιητή πριν την εναπόθεση στην τράπεζα. Κατόπιν ενδελεχούς εξέτασης των παραπάνω, κατασκευάζεται ένα αριθμητικό μοντέλο προσομοίωσης με χρήση πεπερασμένων στοιχείων αξιοποιώντας το εμπορικό πακέτο COMSOL Multiphysics. Το μοντέλο αυτό λαμβάνει υπόψη ότι η ροή είναι μη ισοθερμοκρασιακή και το ρευστό μη νευτώνειο, επομένως το ιξώδες επηρεάζεται από τη θερμοκρασία και το ρυθμό διάτμησης, από τα οποία εξαρτάται η δύναμη εξώθησης. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται μέσω της κατανομής (προφίλ) πίεσης, ταχύτητας και θερμοκρασίας κατά μήκος του καναλιού ροής. Για την περαιτέρω διερεύνηση, πραγματοποιείται παραμετρική επίλυση σε δύο εμπορικά ακροφύσια διαφορετικού μήκους για διαφορετικούς ογκομετρικούς ρυθμούς ροής και θερμοκρασίες θερμαντήρα ακροφυσίου, εντός κατάλληλου εύρους, για καθέναν εκ των οποίων υπολογίζεται αναλυτικά η απαιτούμενη δύναμη εξώθησης. Η επικύρωση των αποτελεσμάτων γίνεται μέσω σύγκρισης με πειραματικά δεδομένα από τη βιβλιογραφία για αντίστοιχη γεωμετρία υγροποιητή και υλικό εκτύπωσης.

Abstract

The current thesis focuses on a field of research within one of the most widely used additive manufacturing techniques known as Fuse Filament Fabrication (FFF). It aims to analyze the rheological characteristics of a polymer melt in the liquefier of a commercial 3D printer, as these characteristics have a direct impact on the quality, accuracy, and repeatability of the printed object. Within this study, an extensive review is conducted on the most significant analytical and numerical models that have been developed for the molten phase of the polymer flow inside the liquefier prior to deposition. After a thorough examination of the aforementioned models, a finite element numerical simulation model is constructed using the commercial software package COMSOL Multiphysics. This model takes into consideration the non-isothermal nature of the flow and the non-Newtonian behavior of the fluid. Consequently, the viscosity is influenced by both temperature and shear rate, which are key factors affecting the extrusion force. The results are presented as the profile of pressure drop, velocity and temperature along the flow channel. To further investigate the system, a parametric analysis is performed on two commercial nozzles of different lengths for different volumetric flow rates and nozzle heater temperatures, within an appropriate range. For each case, the required extrusion force is calculated analytically. The obtained results are then validated by comparing them with experimental data from the literature, specifically considering the corresponding liquefier geometry and print material.

Εισαγωγή

Οι κατασκευαστικές μέθοδοι μπορούν να διακριθούν σε τρεις θεμελιώδεις κατηγορίες [1] με κριτήριο το σκοπό της κατεργασίας προκειμένου να παραχθεί το τελικό τεμάχιο. Συγκεκριμένα:

- Οι αφαιρετικές (subtractive), όπου χρησιμοποιείται ένα αρχικό τεμάχιο χωρικά μεγαλύτερο από το τελικό προκειμένου να αφαιρεθεί από αυτό υλικό, ώστε να διαμορφωθεί το τελικό σχήμα του προϊόντος με τις κατάλληλες γεωμετρικές ανοχές.
- Οι συμπιεστικές (compressive), όπου το υλικό βρίσκεται σε ρευστή ή ημίρρευστη κατάσταση προκειμένου να συμπιεστεί πλαστικά μέσω άσκησης κατάλληλων χωρικών πιέσεων, ώστε να καταλήξει στην επιθυμητή μορφή στην οποία και θα στερεοποιηθεί.
- Οι προσθετικές (additive), όπου ο στόχος είναι η ενοποίηση σωματιδίων του υλικού μέσω προσθήκης διαδοχικών στρώσεων στο χώρο, μέχρι να σχηματιστεί η τελική μορφή.

Η «προσθετική κατασκευή» είναι ο καθιερωμένος πλέον όρος αυτού που τα προηγούμενα χρόνια ονομαζόταν «ταχεία πρωτοτυποποίηση» (Rapid Prototyping – RP) και σήμερα είναι γνωστή στο ευρύ κοινό ως τρισδιάστατη εκτύπωση (3D printing) [2]. Άλλοι όροι που έχουν χρησιμοποιηθεί για την ίδια ουσιαστικά τεχνολογία, είναι αυτοματοποιημένη κατασκευή (automated fabrication – autofab), κατασκευή ελεύθερης μορφής στερεού (freeform fabrication), στρωματική κατασκευή (layer-based manufacturing) και στερεολιθογραφία (stereolithography) [3]. Σε κάθε περίπτωση, αποτελώντας το νεότερο μέλος στην οικογένεια των κατασκευαστικών τεχνολογιών, η προσθετική κατασκευή ενσωματώνει το χαρακτήρα και τη φιλοσοφία των σχεδιαστικών και κατασκευαστικών τεχνολογιών με τη βοήθεια υπολογιστή, καθώς απαιτεί την ύπαρξη ενός ψηφιακού μοντέλου με βάση το οποίο κατασκευάζεται το τελικό προϊόν [4].

Η προσθετική κατασκευή κερδίζει όλο και περισσότερο έδαφος στη βιομηχανία την τελευταία δεκαετία, καθώς απλοποιεί σε σημαντικό βαθμό τη διαδικασία κατασκευής τρισδιάστατων αντικειμένων απευθείας από ψηφιακά δεδομένα CAD. Το κάθε κομμάτι δημιουργείται με τη διαδοχική πρόσθεση υλικού σε στρώσεις. Όλες οι σύγχρονες μηχανές προσθετικής κατασκευής που διατίθενται στην αγορά, στηρίζονται σε αυτή τη στρωματική προσέγγιση, ενώ διαφέρουν ως προς το υλικό που μπορούν να χρησιμοποιήσουν, καθώς και στον τρόπο με τον οποίο δημιουργούνται και συγκολλούνται μεταξύ τους οι στρώσεις [5]. Με άλλα λόγια, δίνει τη δυνατότητα κατασκευής ενός τεμαχίου βιομηχανικής ποιότητας και ακρίβειας χωρίς να απαιτείται προηγουμένως ο προγραμματισμός της διαδικασίας παραγωγής του μέσω του στησίματος κατάλληλης γραμμής παραγωγής.

Η νέα αυτή τεχνολογία έχει ήδη φέρει επανάσταση στην ανάπτυξη και στην παραγωγή προϊόντων. Κάποιοι αναλυτές εκτιμούν μάλιστα ότι η παραγωγή προϊόντων, όπως τη γνωρίζουμε σήμερα, σταδιακά θα πάψει να υπάρχει και θα αντικατασταθεί από παραλλαγές των τεχνολογιών προσθετικής κατασκευής [6]. Η νέα βιομηχανική επανάσταση αναμένεται ότι θα επιφέρει αλλαγές στον τρόπο με τον οποίο σχεδιάζονται και δημιουργούνται τα νέα προϊόντα σε όλους τους κλάδους της βιομηχανίας παγκοσμίως.

Ε.1 Στόχοι της Διπλωματικής

Στο πλαίσιο έρευνας σε μία από τις πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες τεχνικές προσθετικών κατασκευών, την Κατασκευή Συντηγμένου Νήματος (Fused Filament Fabrication), κινείται η μελέτη του θέματος της τρέχουσας διπλωματικής εργασίας. Εστιάζοντας στο κανάλι της ροής εντός του υγροποιητή ενός εμπορικού τρισδιάστατου εκτυπωτή, πραγματεύεται την ανάλυση της ρεολογίας του τήγματος πολυμερούς (πλαστικού) που το διαρρέει. Η σημασία αυτής της ανάλυσης έγκειται στο γεγονός ότι τα ρεολογικά χαρακτηριστικά της υγρής φάσης του υλικού εκτύπωσης επηρεάζουν την ποιότητα, την ακρίβεια και την επαναληψιμότητα του τελικού αντικειμένου. Παράλληλα λόγω της μη νευτώνειας φύσης του ρευστού αλλά και της μη ισοθερμοκρασιακής ροής, το ιξώδες επηρεάζεται από τη θερμοκρασία και το ρυθμό διάτμησης, από τα οποία εξαρτάται η δύναμη εξώθησης που απαιτείται να ασκήσει ο εξωθητήρας του εκτυπωτή, ώστε να διατηρηθεί ο ρυθμός ροής στην επιθυμητή τιμή. Με βάση τα ανωτέρω, οι ερευνητικοί στόχοι εστιάζουν στα κάτωθι:

- Ανάλυση των ρεολογικών χαρακτηριστικών της υγρής φάσης νήματος θερμοπλαστικού ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene), το οποίο αποτελεί ένα από τα πιο διαδεδομένα άμορφα συμπολυμερή υλικά εκτύπωσης. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στην κατανομή (προφίλ) της θερμοκρασίας, της πίεσης και της ταχύτητας κατά μήκος του καναλιού της ροής. Η επιμέρους ανάλυση πραγματοποιείται για δύο διαφορετικά εμπορικά ακροφύσια, ένα μικρότερου μήκους κι ένα μεγαλύτερο.
- Παραμετρική διερεύνηση των ρεολογικών χαρακτηριστικών του τήγματος για διαφορετικούς ογκομετρικούς ρυθμούς ροής και θερμοκρασίες τοιχώματος με παράλληλη μελέτη της εξάρτησης της απαιτούμενης δύναμης εξώθησης (τροφοδοσίας) του τήγματος για κάθε ογκομετρικό ρυθμό και θερμοκρασία. Ο ογκομετρικός ρυθμός ροής και θερμοκρασία πρέπει να βρίσκεται εντός κατάλληλου εύρους, προκειμένου το νήμα να προλάβει να τηχθεί πριν φτάσει στο ακροφύσιο. Εάν η πτώση πίεσης είναι πολύ μεγάλη, το νήμα μπορεί να λυγίσει, να σπάσει ή ο οδοντωτός τροχός να χαλαρώσει τη λαβή. Μέσω της γνώσης της πτώσης πίεσης, βελτιστοποιείται το μέγεθος του βηματικού κινητήρα του εξωθητήρα, το οποίο οδηγεί σε μικρότερη αδράνεια της κεφαλής εκτύπωσης άρα ευκολότερη μετακίνηση στις γερανογέφυρες. Ως εκ τούτου, η πτώση πίεσης είναι ένας από τους βασικότερους παράγοντες που περιορίζουν το ρυθμό εκτύπωσης.

Για την επίτευξη των ανωτέρω στόχων, πραγματοποιείται μια ανασκόπηση των σημαντικότερων αναλυτικών και αριθμητικών μοντέλων που έχουν αναπτυχθεί για το συντηγμένο τμήμα της ροής του πολυμερούς στο στάδιο που βρίσκεται εντός του υγροποιητή πριν την εναπόθεση στην τράπεζα. Εξετάζοντας ενδελεχώς την ακρίβεια των μοντέλων αυτών αλλά και το υπολογιστικό τους κόστος, κατασκευάζεται ένα αριθμητικό μοντέλο προσομοίωσης με χρήση πεπερασμένων στοιχείων αξιοποιώντας το εμπορικό πακέτο COMSOL Multiphysics. Το μοντέλο αυτό λαμβάνει υπόψη ότι η ροή είναι μη ισοθερμοκρασιακή και το ρευστό μη νευτώνειο. Επομένως αποτελεί μια συζευγμένη (coupled) επίλυση ενός μοντέλου μεταφοράς θερμότητας (thermal) και υπολογιστικής ρευστομηχανικής (CFD) που υπόκειται στις εξισώσεις του γενικευμένου νευτώνειου. Η επικύρωση των αποτελεσμάτων γίνεται μέσω σύγκρισης με πειραματικά δεδομένα από τη βιβλιογραφία για αντίστοιχη γεωμετρία υγροποιητή και υλικό εκτύπωσης.

Ε.2 Διάρθρωση της Διπλωματικής

Η παρούσα εργασία απαρτίζεται από τα κάτωθι κεφάλαια:

- Στο 1^ο Κεφάλαιο αναλύεται το ευρύτερο τεχνολογικό πλαίσιο της τρισδιάστατης εκτύπωσης. Αφού γίνει μια σύντομη ιστορική ανασκόπηση, περιγράφονται τα πιο διαδεδομένα εμπορικά είδη τρισδιάστατων εκτυπωτών, τα κυριότερα δομικά εξαρτήματα και οι τεχνικές εκτύπωσης στις οποίες αντιστοιχούν. Τέλος, γίνεται αναφορά στα υλικά εκτύπωσης, στο πεδίο εφαρμογής και τις προοπτικές τους.
- Στο 2^ο Κεφάλαιο πραγματοποιείται μια ανασκόπηση στις κυριότερες αναλυτικές και αριθμητικές μεθόδους μοντελοποίησης της ροής του πολυμερούς στο στάδιο που βρίσκεται εντός του υγροποιητή πριν την εναπόθεση στην τράπεζα. Αφού οριστούν τα αντίστοιχα μοντέλα και οι εξισώσεις που τα διέπουν, επιλέγεται εκείνο που ικανοποιεί περισσότερο, με κριτήριο την ακρίβεια και το υπολογιστικό κόστος, το αριθμητικό μοντέλο που κατασκευάζεται για τις ανάγκες της έρευνας.
- Στο 3^ο Κεφάλαιο ορίζεται και περιγράφεται το πλήρες μοντέλο που κατασκευάζεται στο COMSOL Multiphysics. Ιδιαίτερη βαρύτητα δίνεται στην επαναληψιμότητα της αναπαραγωγής του μοντέλου, επομένως ορίζονται η γεωμετρία του καναλιού της ροής, οι ιδιότητες των υλικών, το πλέγμα, οι οριακές συνθήκες της παραμετρικής επίλυσης, καθώς και λοιπές παράμετροι.
- Στο 4^ο Κεφάλαιο παρουσιάζεται η διαδικασία μετεπεξεργασίας και τα αποτελέσματα. Ζήτημα του κεφαλαίου αυτού είναι η εκπλήρωση των ερευνητικών στόχων, επομένως ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στην παρουσίαση της κατανομής (προφίλ) της θερμοκρασίας, της πίεσης και της ταχύτητας κατά μήκος του καναλιού της ροής με εξαρτημένη παράμετρο τον ογκομετρικό ρυθμό ροής. Επιπλέον, αποτυπώνεται και συζητιέται η εξάρτηση της δύναμης εξώθησης με τον ογκομετρικό ρυθμό ροής. Τέλος, πραγματοποιείται επικύρωση των αποτελεσμάτων με βάση πειραματικά αποτελέσματα σε αντίστοιχες ρεολογικές συνθήκες, που απαντώνται στη βιβλιογραφία.
- Στο 5^ο Κεφάλαιο καταγράφονται τα συμπεράσματα, όπως προέκυψαν από την διεξαγωγή της ερευνητικής διαδικασίας, τυχόν ελλείψεις του μοντέλου αλλά και προτάσεις για μελλοντική έρευνα ή βελτίωσης της ακρίβειας των αποτελεσμάτων.

1. Τεχνολογικό Πλαίσιο Τρισδιάστατης Εκτύπωσης

1.1. Ιστορική Αναδρομή

Η τρισδιάστατη εκτύπωση, όπως την αντιλαμβανόμαστε σήμερα, ξεκίνησε από τα μέσα της δεκαετίας του 1980. Κάθε δεκαετία έκτοτε βρέθηκε μάρτυρας ορισμένων γεγονότων που αποτέλεσαν τεχνολογικά ορόσημα. Σε μια απόπειρα σύνοψης των γεγονότων αυτών σε ένα ευρύτερο πλαίσιο, σε κάθε περίοδο μπορεί να αποδοθεί κι ένας τίτλος.

- 1980-1990: Πρώιμο στάδιο 3D εκτύπωσης.
- 1990-2000: Ανάπτυξη μηχανών και τεχνικών 3D εκτύπωσης.
- 2000-2010: Μείωση του κόστους και διάδοση της 3D εκτύπωσης.
- 2010-Σήμερα: Βιομηχανική ανάπτυξη και ενσωμάτωση της τρισδιάστατης εκτύπωσης.

1.1.1. Πρώιμο Στάδιο 3D Εκτύπωσης

Η πρώτη προσέγγιση στην ιδέα της τρισδιάστατης εκτύπωσης έγινε το Μάιο του 1981 από τον Δρ. Hideo Kodama, ο οποίος δημοσίευσε λεπτομέρειες σχετικά με μια καινοτόμα τεχνική «ταχείας δημιουργίας πρωτοτύπων» [7]. Η έρευνά του ήταν, ουσιαστικά, η πρώτη που περιέγραφε την προσέγγιση «στρώμα προς στρώμα», που ήταν βασισμένη στη μέθοδο της στερεολιθογραφίας [8]. Το 1984, τρεις Γάλλοι μηχανικοί οι Alain Le Méhauté, Olivier de Witte και Jean Claude André κατέθεσαν ένα δίπλωμα ευρεσιτεχνίας για τη διαδικασία της Στερεολιθογραφίας [9]. Την ίδια εποχή ο Charles Chuck Hull κατέθεσε το δίπλωμα ευρεσιτεχνίας του για τη Στερεολιθογραφία, περιλαμβάνοντας νέα χαρακτηριστικά σε σχέση με αυτά των Γάλλων. Το 1986 ίδρυσε την 3D Systems κυκλοφορώντας τον πρώτο 3D εκτυπωτή, τον SLA-1 [10]. Το 1988 ο Carl Deckard από το Πανεπιστήμιο του Τέξας, κατέθεσε το δικό του δίπλωμα ευρεσιτεχνίας για μία νέα τεχνολογία, αυτή της επιλεκτικής πυροσυσσωμάτωσης με laser (Selective Laser Sintering), όπου ο εκτυπωτής χρησιμοποιεί δέσμη laser για τη σύντηξη κονιοποιημένου υλικού σε στερεές δομές [11], κάτι το οποίο ως ιδέα προέρχεται από τον κλάδο της μεταλλουργίας. Το 1989 ιδρύθηκε η Stratasys από το Scott Crump, ο οποίος κατέθεσε το δίπλωμα ευρεσιτεχνίας για την τεχνική του FDM (Fused Deposition Modeling) [12], ίσως την πιο διαδεδομένη τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης σήμερα.

1.1.2. Ανάπτυξη Μηχανών και Τεχνικών 3D Εκτύπωσης

Στη δεκαετία που ακολούθησε, εφόσον είχαν ήδη τεθεί οι βάσεις, η εξέλιξη της προσθετικής κατασκευής ήταν ταχύτατη. Εμφανίστηκαν οι βασικοί κατασκευαστές εκτυπωτών, βελτιώθηκαν δραστικά οι υπάρχουσες τεχνολογίες, ενώ κάνανε την εμφάνισή τους νέες. Στην Ευρώπη, ιδρύθηκε η γερμανική EOS GmbH κατασκευάζοντας το 1990 το πρώτο σύστημά της, το EOS “Stereos” για βιομηχανικές εφαρμογές πρωτοτύπων και παραγωγής μέσω της τρισδιάστατης εκτύπωσης [13]. Η τεχνολογία SLS (Selective Laser Sintering), στην οποία βασίστηκε, εφαρμόζεται τόσο για πλαστικά όσο και μεταλλικά υλικά, και η βιομηχανική του ποιότητα αναγνωρίζεται παγκοσμίως έως και σήμερα. Η Stratasys κυκλοφόρησε το 1991 τον πρώτο της εκτυπωτή με βάση την τεχνολογία FDM, ενώ το 1992 η DTM Inc παρουσίασε τον πρώτο της εκτυπωτή με τεχνολογία SLS [14]. Στο MIT αναπτύχθηκε μια νέα τεχνική τρισδιάστατης εκτύπωσης βασισμένη σε εκτυπωτές inkjet. Η ZCorp με βάση αυτή την τεχνολογία κυκλοφόρησε το 1995 τον πρώτο της εκτυπωτή, τον Z Corp Z402 [15]. Την ίδια χρονιά ιδρύθηκε στις ΗΠΑ η Solidscap, η οποία δημιούργησε τρισδιάστατους εκτυπωτές με πρώτη ύλη το κερί (wax 3D printers) [16] καθιερώνοντας την εταιρεία ως την αγαπημένη μεταξύ των κοσμηματοπωλών, οι οποίοι μπορούσαν πλέον να εμπορεύονται τρισδιάστατα

εκτυπωμένα κοσμήματα. Η Arcam το 1997 ανέπτυξε εκτυπωτές μετάλλου καινοτομώντας ως προς τη χρήση δέσμης ηλεκτρονίων (Electron Beam Melting) για την τήξη έναντι laser [17]. Μια χρονιά αργότερα, το 1998 στο Ισραήλ, ιδρύθηκε η Objet Geometries, η οποία εισήγαγε την τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης PolyJet στον κόσμο [18]. Το 1999 κατάφεραν στο Ινστιτούτο Αναγεννητικής Ιατρικής του Wake Forest να τυπώσουν τρισδιάστατα συνθετικά ικρίσματα ανθρώπινης κύστης [19]. Ταυτόχρονα αναπτύχθηκαν νέα εργαλεία παραμετρικής σχεδίασης (CAD) που επέτρεπαν τη δημιουργία 3D μοντέλων με μεγαλύτερη ευκολία.

1.1.3. Μείωση του Κόστους και Διάδοση της 3D Εκτύπωσης

Κατά τη δεκαετία αυτή δημιουργήθηκαν εκτυπωτές ανοικτού κώδικα. Αυτό βοήθησε στη δημιουργία φθηνών εκτυπωτών και κατ' επέκταση στην ευρύτερη διάδοσή τους. Η ανάπτυξη των εκτυπωτών χαμηλού κόστους βασίστηκε στην ιδέα του Λέκτορα Adrian Bowyer (Bath University) για αυτό-αναπαραγόμενους εκτυπωτές με εργαλεία ανοικτού κώδικα δημιουργώντας το κίνημα RepRap Project [9]. Το αποτέλεσμα ήταν ένας τρισδιάστατος εκτυπωτής που ονομάζεται RepRap, ο οποίος έγινε έμπνευση για κάθε επιτυχημένο 3D εκτυπωτή χαμηλού κόστους από εκείνο το σημείο και μετά. Ο εκτυπωτής RepRap 3D είναι κατασκευασμένος από πλαστικά μέρη που μπορούν να εκτυπωθούν από τον ίδιο τον εκτυπωτή RepRap [20]. Αυτό σημαίνει ότι οποιοσδήποτε ιδιοκτήτης ενός RepRap μπορεί να εκτυπώσει έναν άλλο τρισδιάστατο εκτυπωτή, ως εκ τούτου «αυτοαναπαραγόμενο», μαζί με άλλα εξαρτήματα, εργαλεία ή σχέδια. Το 2008, η κυκλοφορία του 3D εκτυπωτή «Darwin» RepRap ήταν ευρεία [21]. Η επιτυχία του έργου RepRap ήταν καταλύτης για την άνοδο των εμπορικών τρισδιάστατων εκτυπωτών. Πολλά από τα διπλώματα ευρεσιτεχνίας που κατατέθηκαν τη δεκαετία του 1980 σχετικά με το FDM έληξαν το 2006. Αυτό προκάλεσε την αύξηση του αριθμού των κατασκευαστών μηχανημάτων τρισδιάστατης εκτύπωσης στην αγορά. Ένα αξιοσημείωτο παράδειγμα αυτού είναι η Makerbot, η οποία ιδρύθηκε το 2009 στο Μπρούκλιν, εμπορευόταν DIY kit ανοιχτού κώδικα που επέτρεψαν στους πελάτες να κατασκευάσουν τους δικούς τους τρισδιάστατους εκτυπωτές [22].

1.1.4. Βιομηχανική ανάπτυξη και ενσωμάτωση της τρισδιάστατης εκτύπωσης

Το έτος 2010 αποτέλεσε το λυκαυγές μιας δεκαετίας εκθετικά αυξημένης ζήτησης στην τεχνολογία αυτή, η οποία συντέλεσε στην ίδρυση εταιρειών παροχής υπηρεσιών όπως η Shapeways, η Sculpteo, η i.materialise και αργότερα η 3D Hubs. Το 2011 η Kor Ecologic παρήγαγε το πρώτο τρισδιάστατο εκτυπωμένο αυτοκίνητο, το Urbee [23]. Το 2012-2013 συγχωνεύτηκαν οι Stratasys με την Objet ενώ μετέπειτα εξαγόρασαν και την εταιρεία MakerBot η οποία σταμάτησε να είναι ανοιχτού κώδικα. Το 2014 έληξαν και οι πατέντες για τις τεχνολογίες SLA, SLS ανοίγοντας το δρόμο για την είσοδο νέων κατασκευαστών μειώνοντας περαιτέρω τα κόστη επένδυσης απόκτησης ενός τρισδιάστατου εκτυπωτή. Την ίδια χρονιά η NASA ανακοινώνει ότι χρησιμοποίησε έναν τρισδιάστατο εκτυπωτή στο διάστημα, δημιουργώντας έτσι το πρώτο 3D εκτυπωμένο αντικείμενο εκτός του πλανήτη Γη [24]. Το 2015 η Carbon3D ανακοίνωσε μια νέα καινοτόμα τεχνολογία με δυνατότητα εκτύπωσης έως και 100 φορές πιο γρήγορα [25]. Την ίδια χρονιά η Desktop Metal ξεκίνησε να επενδύει στην τεχνολογία του Bound Metal Deposition, που βασίζεται στην τεχνική FDM, όμως χρησιμοποιεί ως πρώτη ύλη ένα νήμα σύνθετου υλικού μετάλλου με κάποιο συνδετικό πολυμερές υλικό (binder) [26]. Την ίδια χρονιά η εταιρεία Cellink λάνσαρε το πρώτο «βιομελάνι» [27]. Το 2016 η Ultimaker κυκλοφόρησε τον εκτυπωτή Ultimaker 3, ο οποίος βασίζεται στην τεχνολογία FFF (Fused Filament Fabrication), κέρδισε τότε πολλά βραβεία καλύτερου 3D εκτυπωτή [28]. Το 2018 δημιουργήθηκαν οι πρώτοι εκτυπωτές ρητίνης χαμηλού κόστους, ενώ το 2019 κατασκευάστηκε στο Ντουμπάι το μεγαλύτερο τρισδιάστατο εκτυπωμένο κτίριο στον κόσμο, από την εταιρεία Apis Cor [29]. Στο τέλος αυτής της δεκαετίας καταμετρήθηκαν περισσότερες από 170 κατασκευαστές εκτυπωτών παγκοσμίως.

1.2. Τεχνικές Τρισδιάστατης Εκτύπωσης

Από την πρώτη εμφάνισή τους οι τρισδιάστατοι εκτυπωτές έχουν αλλάξει και εξελιχθεί σε πολύ μεγάλο βαθμό περιλαμβάνοντας πλέον ένα σημαντικό φάσμα μεθόδων. Νέες τεχνολογίες και καινούργια υλικά εμφανίζονται συνεχώς, καθιστώντας τις πιθανές επιλογές πολλές φορές δυσδιάκριτες. Οι τεχνολογίες αυτές διαφέρουν ως προς τον τρόπο που τοποθετούν και συνδέουν τις διαδοχικές στρώσεις και κατ' επέκταση ως προς τις πρώτες ύλες που μπορούν να διαχειριστούν. Κοινό χαρακτηριστικό όλων αυτών των μεθόδων είναι ότι κατασκευάζουν προσθετικά τοποθετώντας και συνδέοντας επάλληλες στρώσεις του υλικού. Έτσι, η κατασκευή ενός αντικειμένου μέσω τρισδιάστατης εκτύπωσης μπορεί να παράγει ολοκληρωμένα λειτουργικά αντικείμενα σε ένα μόνο στάδιο παραγωγής εξαλείφοντας σε ορισμένες περιπτώσεις την ανάγκη συναρμολόγησης επιμέρους εξαρτημάτων που συνιστούν το τελικό.

Η τρισδιάστατη εκτύπωση δεν είναι μια ενιαία τεχνολογία αλλά μια ευρεία γκάμα με αρκετά διαφορετικές, αν και πιθανώς συμπληρωματικές διαδικασίες. Υπάρχουν τρισδιάστατοι εκτυπωτές που μπορούν να παράγουν όχι μόνο σε θερμοπλαστικά αλλά και σε σύνθετα υλικά, ρητίνες, μέταλλα, κεραμικά τρόφιμα, πηλό, άμμο, σκυρόδεμα, ακόμα και ζωντανά κύτταρα. Ο συνηθέστερος βασικός διαχωρισμός των συστημάτων τρισδιάστατης εκτύπωσης είναι:

- Συστήματα ελεγχόμενης εναπόθεσης υλικού (selective deposition), όπου οι πρώτες ύλες αφού τηχθούν, τοποθετούνται σε στρώσεις μέσω κάποιας σύριγγας, ακροφυσίου ή ψεκαστικού μηχανισμού. Το υλικό ψεκάζεται ή εξωθείται από τη κεφαλή του εκτυπωτή σε ρευστή ή ημίρρευστη φάση, ώσπου τελικά στερεοποιείται.
- Συστήματα ελεγχόμενης συσσωμάτωσης ή διασύνδεσης των πρώτων υλών, οι οποίες βρίσκονται μέσα σε δεξαμενές, σε ρευστή μορφή ή σκόνη.

Η βιομηχανία της τρισδιάστατης εκτύπωσης είναι γεμάτη με πολλές κατοχυρωμένες πατέντες με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας και εμπορικές ετικέτες τεχνολογίας, όπως κατέστη σαφές και από την ιστορική ανασκόπηση. Πολλοί, μάλιστα, κατασκευαστές τρισδιάστατων εκτυπωτών χρησιμοποιούν διαφορετικά ονόματα για τις ίδιες διαδικασίες παραγωγής προσθέτων. Αυτό καθιστά την αυστηρή κατηγοριοποίησή της δύσκολη και χρονοβόρα. Ο διεθνής οργανισμός τυποποίησης (ISO) και η Αμερικανική Εταιρεία Δοκιμών και Υλικών (ASTM) έχουν αναπτύξει διάφορα πρότυπα, το τελευταίο εκ των οποίων εισήχθη το Δεκέμβριο του 2015 με το όνομα ISO / ASTM 52900. Μέσω αυτού ορίζονται επτά κατηγορίες διαδικασιών παραγωγής προσθέτων, οι οποίες επεκτείνονται στις δύο βασικές που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Οι κατηγορίες αυτές είναι οι εξής:

- Εξώθηση υλικού (material extrusion)
- Στερεολιθογραφία μέσω φωτοπολυμερισμού (photopolymerization)
- Εκτόξευση υλικού (material jetting ή multijet modeling)
- Δέσμευση συνδετικού υλικού (binder jetting)
- Σύντηξη υποστρώματος σκόνης (powder bed fusion)
- Κατευθυνόμενη ενεργειακή εναπόθεση (directed energy deposition)
- Ελάσματα σε φύλλα (sheet lamination)

Ο Πίνακας 1 συνοψίζει τις ονομασίες των κυριότερων εμπορικών τεχνικών παραγωγής πρόσθετων ταξινομημένες ανά κατηγορία.

Πίνακας 1. Οι πλέον διαδεδομένες τεχνικές και ονομασίες ανά κατηγορία παραγωγής πρόσθετων

Κατηγορίες	Εμπορική Τεχνική	Ονομασία
Material Extrusion	Fuse Deposition Modeling	FDM
	Fuse Filament Fabrication	FFF
Photopolymerization	StereoLithogrAphy	SLA
	Digital Light Processing	DLP
	Continuous Liquid Interface Production	CLIP
	Daylight Polymer Printing	DPP
Material Jetting	Drop On Demand	DOD
	PolyJet by Objet	PJO
	NanoParticle Jetting	NPJ
Binder Jetting	ColorJet Printing	CPJ
Powder Bed Fusion	Selective Laser Sintering	SLS
	Selective Laser Melting /	SLM /
	Direct Metal Laser Sintering	DMLS
	Electron Beam Melting	EBM
	Multi Jet Fusion	MJF
Directed Energy Deposition	LENS Technology	-
	Aerosol Jet Technology	-
	Electron Beam Additive Manufacturing	EBAM
	Laser Deposition Welding	LDW
Sheet Lamination	Composite Based Additive Manufacturing	CBAM
	Selective Lamination Composite Object Manufacturing	SLCOM

1.2.1. Εξώθηση Υλικού

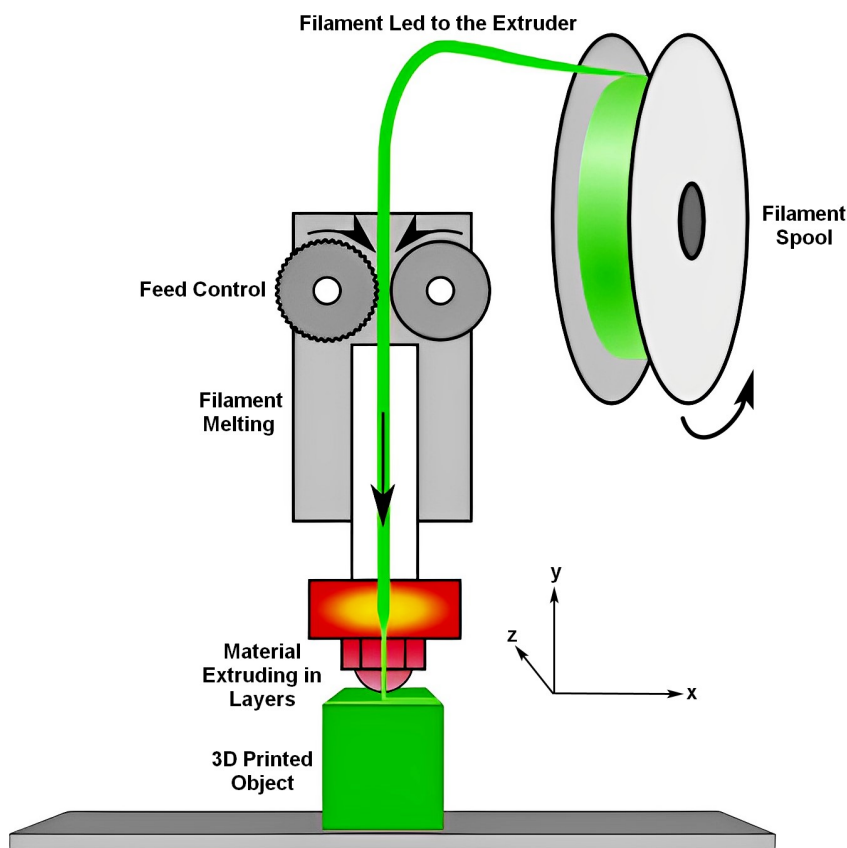
Η εξώθηση υλικού συνιστά την πιο διαδεδομένη τεχνολογία στους επιτραπέζιους τρισδιάστατους εκτυπωτές. Οι σημαντικότερες τεχνικές εκτύπωσης που εμπίπτουν στην κατηγορία αυτή είναι η επιλεκτική εναπόθεση υλικού (Fused Deposition Modeling – FDM) και η κατασκευή συντηγμένου νήματος (Fused Filament Fabrication – FFF), στην ανάλυση της οποίας εστιάζει και η τρέχουσα διπλωματική. Πολλά διαφορετικά υλικά, φυσικά και συνθετικά πολυμερή, μεταλλικά, κεραμικά, οικοδομικά, ακόμα και βρώσιμα όπως σοκολάτα, μπορούν να εκτυπωθούν με αυτόν τον τρόπο [30].

Μεταξύ της FDM και της FFF δεν υπάρχει καμία εννοιολογική ή τεχνολογική διαφορά. Το ακρωνύμιο FDM αποτελεί εμπορικό σήμα της Stratasys και η εταιρεία διατηρεί μέχρι και σήμερα το αποκλειστικό δικαίωμα χρήσης αυτού του ονόματος για τα προϊόντα της. Ωστόσο, η πραγματική τεχνολογία που εκπροσωπεί το όνομα αυτό, μπορεί να κατασκευαστεί από οποιονδήποτε κατασκευαστή, αρκεί να χρησιμοποιήσει μια ονομασία χωρίς αυτό το εμπορικό σήμα. Το ακρωνύμιο FFF αποτελεί έναν τέτοιο όρο [31]. Στην πράξη, εντοπίζονται διαφορές μεταξύ των μηχανών FDM που κατασκευάζονται από τη Stratasys και των μηχανών FFF που κατασκευάζονται από άλλες εταιρείες, αλλά αυτές οι διαφορές είναι τυχαίες και δεν είναι εγγενείς στον ορισμό είτε του FFF είτε του FDM.

Για λόγους απλοποίησης της τεχνολογικής ανασκόπησης, οι τεχνολογικές μέθοδοι FFF και FDM θεωρούνται κοινές και δεν αναλύονται τυχόν διαφορές που μπορούν να εντοπιστούν. Η τεχνολογία αυτή βασίζεται στη θέρμανση και στην ελεγχόμενη εναπόθεση νημάτων (ινών) υλικού σε κατάσταση τήγματος. Τα νήματα συγκολλούνται και στερεοποιούνται καθώς

ψύχονται με τέτοιο τρόπο ώστε να διαμορφώνεται διαρκώς το παραγόμενο προϊόν. Η τροφοδοσία του υλικού γίνεται σε κατάλληλη κεφαλή όπου θερμαίνεται, τήκεται και εξωθείται μέσω μεταλλικού ακροφυσίου πάνω σε μία επίπεδη επιφάνεια που ονομάζεται πλατφόρμα εκτύπωσης [32]. Η σχετική κίνηση μεταξύ της κεφαλής και της πλατφόρμας είναι αυτή που επιτρέπει την ελεγχόμενη εναπόθεση των τηκόμενων νημάτων που δεν ξεπερνούν σε μέγεθος κατά ύψος και πλάτος μερικά δεκάδες μm [33]. Η συγκόλληση των νημάτων και η στερεοποίηση τους γίνεται σχεδόν ακαριαία, με σχηματισμό στρώσεων παράλληλων στο επίπεδο της πλατφόρμας εκτύπωσης [34]. Μία τέτοια στρώση αποτελεί μία εγκάρσια τομή του αντικείμενου σε επίπεδο παράλληλο στην πλατφόρμα. Καθώς μία στρώση ολοκληρώνεται, η κεφαλή απομακρύνεται από αυτή μετακινούμενη σε διεύθυνση κάθετη στο επίπεδο της πλατφόρμας ξεκινώντας μία νέα στρώση πάνω στην υπάρχουσα. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρι να σχηματιστεί το τρισδιάστατο αντικείμενο με φορά από την πλατφόρμα εκτύπωσης και προς τα άνω.

Η παραπάνω διαδικασία δημιουργίας ενός τρισδιάστατου αντικείμενου με τη μέθοδο αυτή φαίνεται στο σκαρίφημα της Εικόνας 1, όπου αναπαρίσταται μια τυπική διάταξη τροφοδοσίας, θέρμανσης και εξώθησης υλικού με τη μέθοδο FDM/FFF. Σημειώνεται ότι για τη δημιουργία μεγάλων προεξοχών και εσωτερικών κοιλιοτήτων, σε αντικείμενα βιομηχανικής κλίμακας και ακριβείας, είθισται να εκτυπώνονται παράλληλα στηρίγματα του υπό κατασκευή αντικείμενου, είτε από το ίδιο το υλικό εκτύπωσης είτε από διαφορετικό υλικό υποστήριξης, τα οποία απομακρύνονται μετά την ολοκλήρωση της εκτύπωσης [35].

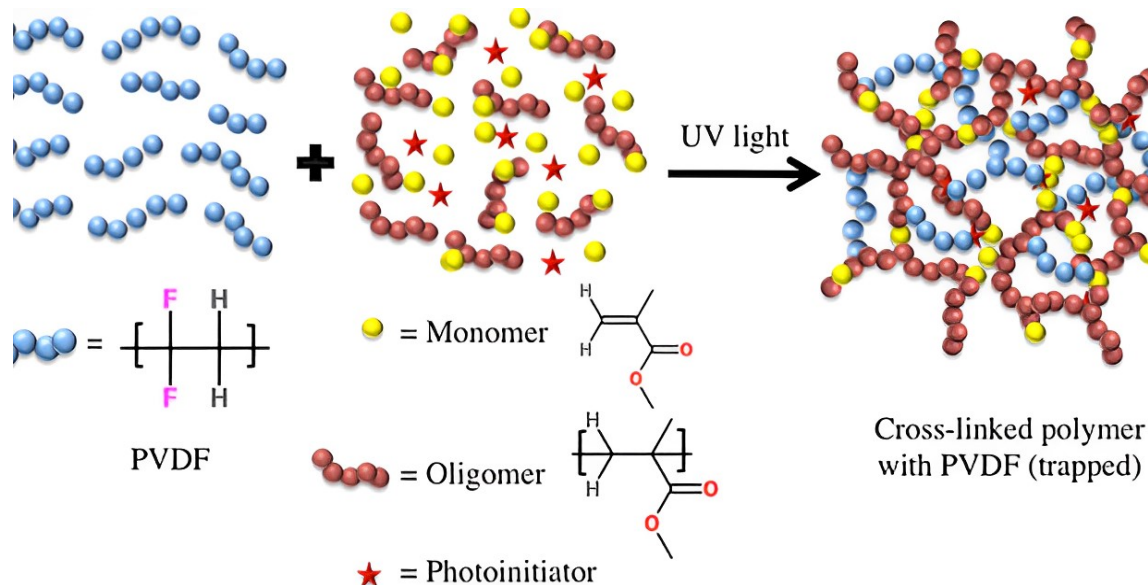


Εικόνα 1. Σκαρίφημα της ροής του υλικού με την τεχνολογική μέθοδο της εξώθησης

1.2.2. Στερεολιθογραφία

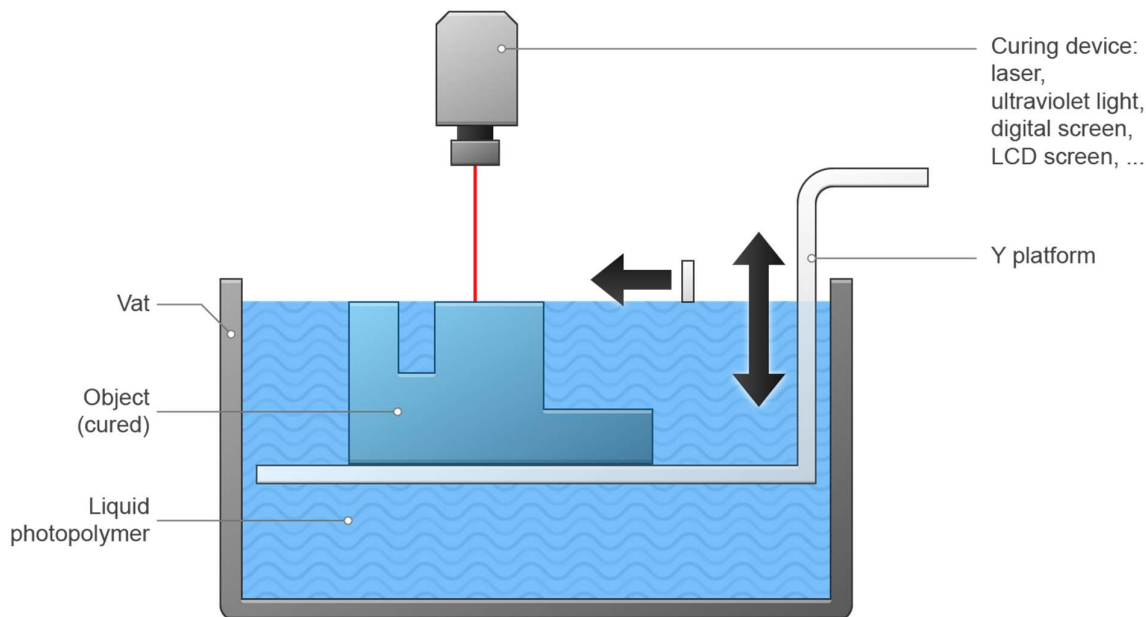
Η στερεολιθογραφία (SLA) αποτελεί την παλαιότερη τεχνική τρισδιάστατης εκτύπωσης. Την εφηύρε ο Charles Hall το 1984 και κατοχυρώθηκε επισήμως το 1986 [36]. Έχει ως αρχή λειτουργίας τον ελεγχόμενο φωτοπολυμερισμό ρευστών ρητινών με σκοπό τη δημιουργία τρισδιάστατων αντικειμένων, και μέχρι και σήμερα έχει εξέχουσα θέση στην αγορά. Τα πρώτα χρόνια της στερεολιθογραφίας, τα κατασκευαζόμενα αντικείμενα ήταν σχετικά εύθραυστα, ενώ εμφάνιζαν διάφορες στρεβλώσεις και παραμορφώσεις κατά τη φάση της σκλήρυνσης, αλλά τα προβλήματα αυτά διορθώθηκαν αργότερα [37].

Το αντικείμενο κατασκευάζεται πάνω σε μια βάση, η οποία βυθίζεται σε ένα δοχείο που περιέχει υγρή εποξική ή ακρυλική ρητίνη. Αρχικά, η βάση τοποθετείται σε ελάχιστο βάθος μέσα στο υγρό, ίσο με το πάχος της διατομής που πρόκειται να κατασκευαστεί. Κατόπιν μια κεφαλή διοδικού laser, που φέρει ο εκτυπωτής, υπεριώδους ακτινοβολίας χαμηλής ισχύος κινούμενη στους άξονες x και y, διαγράφει το σχήμα της διατομής, όπως προβλέπεται από το ψηφιακό σχέδιο, φωτίζοντας και στερεοποιώντας τις αντίστοιχες περιοχές του στρώματος του πολυμερούς, το υπόλοιπο τμήμα του οποίου παραμένει στο υγρό. Ο μηχανισμός στερεοποίησης βασίζεται στην ανάπτυξη χημικών διασυνδέσεων (crosslinking) [38] και αναπαρίσταται στην Εικόνα 2. Κατόπιν, η βάση βυθίζεται μέσα στο υγρό πολυμερές κατά το πάχος της επόμενης διατομής, ενώ ένας κύλινδρος «απλώνει» και οριζοντιώνει το υγρό πάνω στο στερεοποιημένο τμήμα και η κεφαλή laser χαράσσει τη νέα διατομή πάνω στην πρώτη. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρι να ολοκληρωθεί η κατασκευή του αντικειμένου. Στη συνέχεια, το αντικείμενο απομακρύνεται από το δοχείο, πλένεται, αφαιρούνται τα στηρίγματά του, εφόσον υπάρχουν, και κατόπιν τοποθετείται σε ένα φούρνο υπεριωδών ακτινών για την τελική σκλήρυνση [39].



Εικόνα 2. Ανάπτυξη χημικών διασυνδέσεων στα υλικά κατά την εκτύπωση με SLA [40]

Στην Εικόνα 3 αναπαρίσταται η διαδικασία δημιουργίας ενός τρισδιάστατου αντικειμένου με τη μέθοδο αυτή.



Εικόνα 3. Αναπαράσταση δημιουργίας ενός τρισδιάστατου αντικειμένου με τη στερεολιθογραφία [41]

Τα φωτοπολυμερή υλικά που χρησιμοποιούνται εμπεριέχουν μονομερή, oligομερή και προπολυμερή φωτοευαίσθητες ουσίες, οι οποίες ενεργοποιούνται με την απορρόφηση υπεριώδους ακτινοβολίας. Με αυτό τον τρόπο ξεκινούν αλυσωτές χημικές αντιδράσεις που καταλήγουν τελικά σε ένα τρισδιάστατο δίκτυο πολυμερών διασταυρωμένων μακρομορίων.

Τα φωτοπολυμερή υλικά που χρησιμοποιούνται στη τεχνολογία αυτή είναι:

- Ακρυλικά, τα οποία λειτουργούν μέσω πολυμερισμού ελευθέρων ριζών. Έχουν υψηλή δραστηριότητα, όμως δημιουργούν καταστάσεις τοπικής συρρίκνωσης. Επίσης το οξυγόνο δρα ως αναστολέας.
- Εποξειδικά, τα οποία σχηματίζουν προϊόντα με κατιοντικό πολυμερισμό. Οι αντιδράσεις έχουν χαμηλή ταχύτητα φωτοπολυμερισμού. Τα τελικά προϊόντα παρουσιάζουν σχετικά υψηλότερη ευθραυστότητα αλλά με υψηλή επιφανειακή σκληρότητα. Επίσης αναπτύσσουν μικρές αλλοιώσεις δομής, δεν έχουν προβλήματα από την παρουσία οξυγόνου και τέλος έχουν ευαισθησία στην υγρασία.

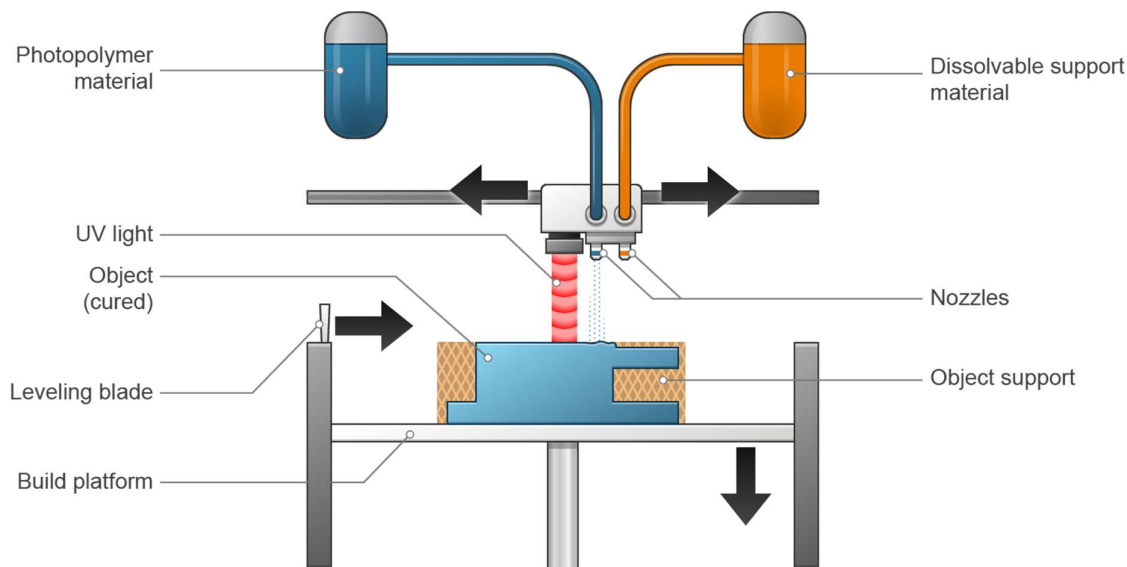
Σήμερα χρησιμοποιούνται κυρίως εποξειδικά φωτοπολυμερή με μικρό ποσοστό ακρυλικού περιεχομένου [42]. Τα συνηθέστερα στην εφαρμογή μονομερή είναι:

- Ακρυλικά πολυεστέρων (polyester acrylates)
- Εποξειδικά ακρυλικά (epoxy acrylates)
- Ακρυλικά ουρεθάνης (urethane acrylates)
- Ακρυλικά αμινών (amino acrylates)

1.2.3. Εκτόξευση Υλικού

Η τεχνική προσθετικής κατασκευής με εκτόξευση υλικού (MJ) επιτρέπει την τρισδιάστατη εκτύπωση διαφορετικών υλικών στο ίδιο μέρος, με τρόπο γρήγορο και γραμμικό. Υπάρχουν διαφορετικές δημοφιλείς τεχνικές εκτύπωσης με αυτή τη μέθοδο, η κάθε μία εκ των οποίων βασίζεται σε διαφορετική πατέντα κάποιας εταιρείας. Ανεξάρτητα από τις επιμέρους μικροδιαφορές όλες έχουν σαν κοινό χαρακτηριστικό ότι το αντικείμενο δημιουργείται στρωματικά (layer by layer), καθώς σταγονίδια φωτοπολυμερούς υλικού εναποτίθεται σε μια πλατφόρμα κατασκευής, σκληραίνονται απευθείας και στερεοποιούνται με χρήση υπεριώδους ακτινοβολία ή θερμότητας ή απλώς λόγω της επαφής. Μετά τη σκλήρυνση ενός στρώματος, η πλατφόρμα κατασκευής χαμηλώνει σε ένα επίπεδο συγκεκριμένου πάχους στρώματος και νέο υγρό υλικό εκτοξεύεται στο προηγούμενο στρώμα. Μετά τη σκλήρυνση κάθε διαδοχικής στρώσης, κατασκευάζεται πλήρως ένα τμήμα πλήρους κλίμακας [43].

Η εκτόξευση του αρχικά υγρού υλικού γίνεται μέσω κατάλληλης κεφαλής, η οποία φέρει εκατοντάδες μικροσκοπικά ακροφύσια, ικανά να διανέμουν επιλεκτικά το υλικό σε μορφή μικροσκοπικών σταγονιδίων (νέφους). Εφόσον χρησιμοποιείται υγρό ή λιωμένο υλικό σε αυτήν την τεχνική, απαιτείται μια δομή υποστήριξης που μοιάζει με γέλη, ειδικά στις περιοχές προεξοχής. Αυτές οι δομές στήριξης αφαιρούνται από το εξάρτημα χρησιμοποιώντας διαφορετικές μεθόδους, επεξεργασία υπερήχων σε λουτρό διαλύματος υδροξειδίου του νατρίου, θέρμανση ή χρήση πίδακα νερού υψηλής πίεσης [44]. Όταν αφαιρεθούν όλες οι υποστηρίξεις, δεν απαιτείται κανονικά καμία περαιτέρω επεξεργασία. Η ροή του υλικού στη δεδομένη τεχνική απεικονίζεται στην Εικόνα 4.



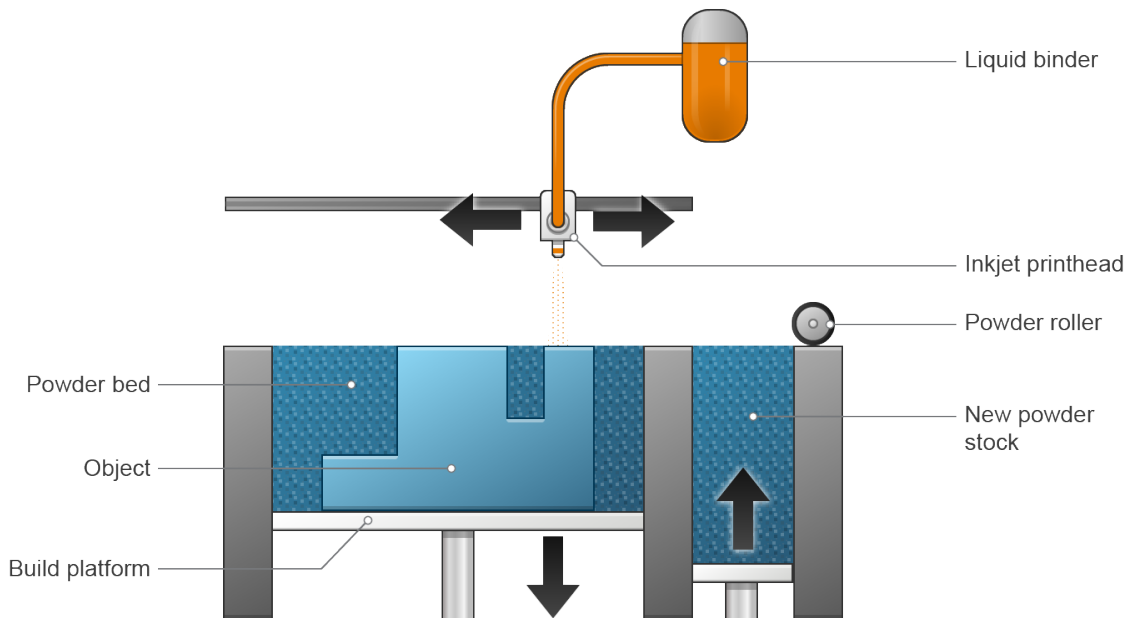
Εικόνα 4. Αναπαράσταση δημιουργίας ενός τρισδιάστατου αντικειμένου με εκτόξευση υλικού [41]

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται στην τεχνική αυτή μπορούν να είναι όλα εκείνα που στερεοποιούνται με την υπεριώδη ακτινοβολία και τη θερμότητα. Τέτοια είναι οξείδια ορισμένων μετάλλων, όπως αλουμινίου, το ζirkόνιο, το κερί και κάθε είδους ρητίνη ικανή να φωτοπολυμεριστεί (UV-cured). Τέτοιου τύπου ρητίνες, οι οποίες αποτελούν σε μορφή μελάνης την εμπορικά διαδεδομένη επιλογή για τη μέθοδο αυτή, συνήθως παρασκευάζονται από τροποποιημένα ακρυλικά μονομερή [45].

1.2.4. Δέσμευση Συνδετικού Υλικού

Η τεχνική τρισδιάστατης εκτύπωσης με δέσμευση συνδετικού υλικού (BJ) αναπτύχθηκε στις αρχές της δεκαετίας του 1990, κυρίως στο MIT. Όλες οι τεχνικές εκτύπωσης με τη μέθοδο αυτή βασίζονται στην εναπόθεση ενός συνδετικού συγκολλητικού παράγοντα σε λεπτές στρώσεις κονιοποιημένου υλικού. Ως κύρια υλικά κατασκευής χρησιμοποιούνται πολυμερή, μέταλλα και κεραμικά (διοξείδιο του πυριτίου ή γύψος). Ως υλικά διασύνδεσης χρησιμοποιούνται διαλύματα οργανικών ουσιών (binders), με χαρακτηριστικές περιπτώσεις τα διαλύματα παραφινών σε οργανικούς διαλύτες και τα συστήματα σκληρυνόμενων ρητινών δύο συστατικών (φουρενίου) ή θερμοσκληραινόμενες ρητίνες (φαινολικές) [46].

Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας, η κεφαλή εκτύπωσης μετακινείται πάνω από την πλατφόρμα κατασκευής εναποθέτοντας στρωματικά σταγονίδια συνδετικού υλικού. Όταν ένα στρώμα ολοκληρωθεί, το στρώμα πούδρας μετακινείται προς τα κάτω κι ένα νέο στρώμα σκόνης απλώνεται στην περιοχή κατασκευής. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να ολοκληρωθεί το αντικείμενο. Όταν το εξάρτημα έχει εκτυπωθεί πλήρως, παραμένει εγκλεισμένο σε ένα μπλοκ χαλαρής σκόνης, από το οποίο πρέπει να αφαιρεθεί με το χέρι και να ψεκαστεί με πεπιεσμένο αέρα σε κατάλληλο θάλαμο μέχρι να καθαριστεί [47]. Συνήθως τα εξαρτήματα είναι σε ημιτελή κατάσταση μετά την εκτύπωση κι απαιτείται μια επιπλέον μετεπεξεργασία για τη βελτίωση των μηχανικών τους ιδιοτήτων. Συχνά, για το σκοπό αυτό προστίθεται μια διεισδυτική ουσία. Σε κεραμικές πούδρες γίνεται χρήση κυανοκρυσταλλικών ενώσεων, ενώ σε μεταλλικές μπρούτζου. Εναλλακτικά, το τεμάχιο τοποθετείται σε φούρνο για την επίτευξη της πυροσυσσωμάτωσης των κόκκων της ύλης [48]. Η ροή του υλικού στη δεδομένη τεχνική απεικονίζεται στην Εικόνα 5.



Εικόνα 5. Αναπαράσταση δημιουργίας ενός τρισδιάστατου αντικειμένου με δέσμευση συνδετικού υλικού [41]

1.2.5. *Σύντηξη Υποστρώματος Σκόνης*

Η συγκεκριμένη τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης (PBF) δημιουργεί προϊόντα με μεγάλη ακρίβεια επιτρέποντας παράλληλα την κατασκευή μιας μεγάλης γκάμας γεωμετρικά πολύπλοκων προϊόντων. Αυτό επιτυγχάνεται με χρήση δέσμης laser ή ηλεκτρονίων ή άλλης πηγής θερμότητας, η οποία είναι ικανή να συντήξει (διασυνδέσει) επιλεκτικά διαδοχικά στρώματα σκόνης. Ο μηχανισμός συσσωμάτωσης διαφέρει ανάλογα το είδος της τεχνικής. Διακρίνοντας οι εξής κατηγορίες [49].

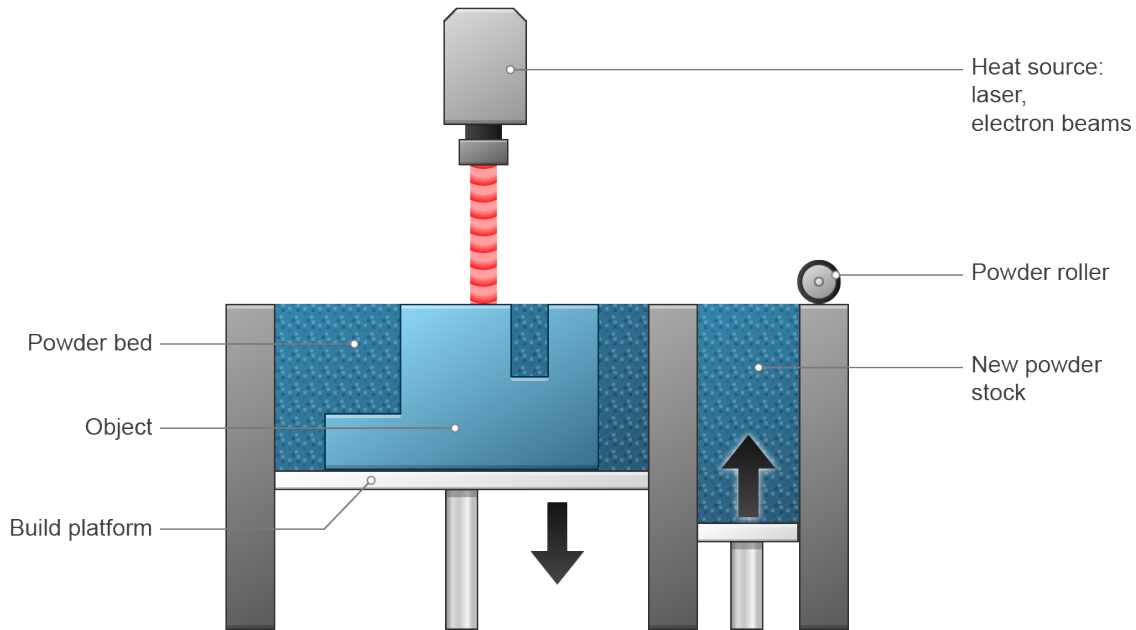
- Πυροσυσσωμάτωση στερεάς κατάστασης
- Χημικά προκαλούμενη συσσωμάτωση
- Υγρή θερμοσυσσωμάτωση
- Μερική ή πλήρης τήξη

Οι σημαντικότερες τεχνικές εκτύπωσης μέσω σύντηξης υποστρώματος περιλαμβάνουν [50]:

- Επιλεκτική Συσσωμάτωση με Laser (Selective Laser Sintering – SLS)
- Επιλεκτική Τήξη με Laser (Selective Laser Melting – SLM)
- Τήξη με Δέσμη Ηλεκτρονίων (Electron Beam Melting – EBM)

Η σημαντικότερη από τις παραπάνω τεχνικές είναι η SLS, η οποία περιλαμβάνει αρχικά την προθέρμανση του υλικού που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί σε μορφή σκόνης, σε σταθερή θερμοκρασία λίγο χαμηλότερη από το σημείο τήξης του. Στη συνέχεια, η σκόνη απλώνεται πάνω στην πλατφόρμα εκτύπωσης σε λεπτή στρώση σταθερού πάχους (20-100 μm). Η δέσμη laser υψηλής ισχύος δρα στη στρώση επιλεκτικά αυξάνοντας τοπικά τη θερμοκρασία σε συγκεκριμένες περιοχές της επιφάνειας, μέχρι το σημείο τήξεως ή και πάνω από αυτό. Η επιλεκτική αυτή τήξη λειτουργεί συνδυαστικά για τους κόκκους της σκόνης του υλικού και τη διαμόρφωση μίας εγκάρσιας τομής του αντικειμένου που κατασκευάζεται [51]. Αφού ολοκληρωθεί ένας κύκλος σάρωσης της δέσμης laser σε μία επιφάνεια, η πλατφόρμα υποχωρεί κατακόρυφα κατά ένα μήκος πάχους μίας στρώσης και μία νέα στρώση υλικού εφαρμόζεται πάνω από την προϋπάρχουσα ώστε να ξεκινήσει ένας νέος κύκλος σάρωσης από το laser. Η σκόνη που περιβάλλει το αντικείμενο που κατασκευάζεται βοηθά στην αγωγή θερμότητας έτσι ώστε να απαιτούνται λιγότερες δομές μηχανικής υποστήριξης για την σταθεροποίηση του αντικειμένου πάνω στη πλατφόρμα. Στο σχεδιασμό του αντικειμένου πρέπει να λαμβάνεται υπόψη ο ικανοποιητικός ρυθμός αγωγής της θερμότητας αφού σε αντίθετη περίπτωση μπορεί να προκληθούν ρωγμές και παραμορφώσεις [52]. Αφού γίνουν επαναλαμβανόμενοι κύκλοι σάρωσης με την δέσμη laser και ολοκληρωθεί η διαμόρφωση του τελικού αντικειμένου, αφήνεται να ψυχθεί ενώ τα υπολείμματα σκόνης στις επιφάνειες απομακρύνονται σε θάλαμο μέσω πεπιεσμένου αέρα. Η σκόνη που δεν εκτέθηκε στη δέσμη laser και παρέμεινε αναλλοίωτη συλλέγεται και μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί για τη κατασκευή ενός νέου αντικειμένου [53]. Η ροή του υλικού στη δεδομένη τεχνική απεικονίζεται στην Εικόνα 6.

Συνηθέστερα εμπορικά υλικά σε πούδρα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ευρέως με τη μέθοδο αυτή είναι πολυαμίδια (nylon), πολυπροπυλένια και ορισμένα θερμοπλαστικά. Τα τελευταία χρόνια έχει γίνει ιδιαίτερη πρόοδος και στη χρήση ορισμένων μεταλλικών κραμάτων [54].



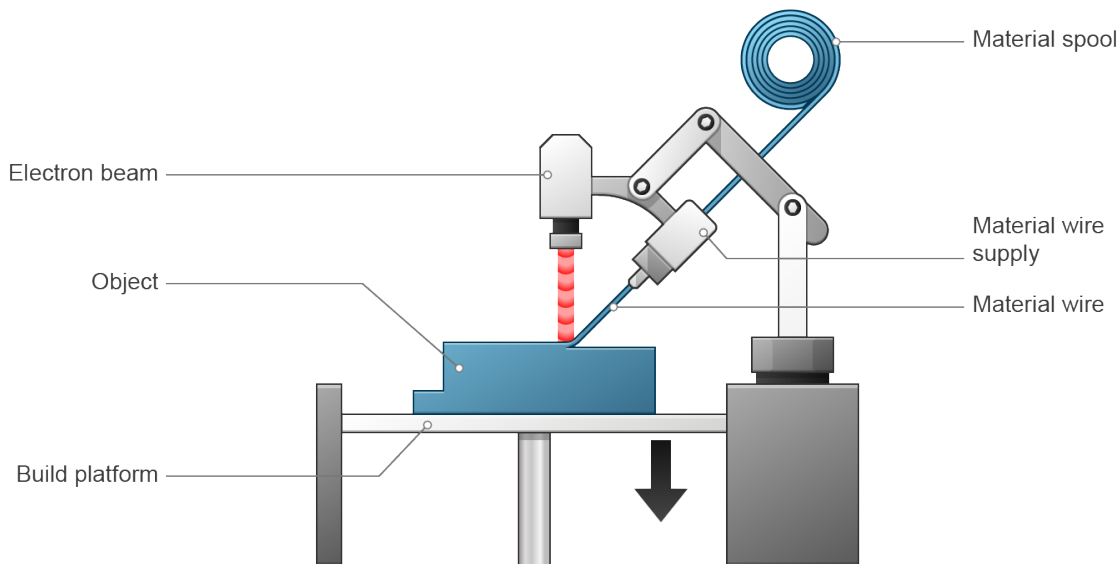
Εικόνα 6. Αναπαράσταση δημιουργίας ενός τρισδιάστατου αντικειμένου με επιλεκτική σύντηξη υποστρώματος σκόνης [41]

1.2.6. Κατευθυνόμενη Ενεργειακή Εναπόθεση

Η συγκεκριμένη τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης (DED), δημιουργεί αντικείμενα τήκοντας απευθείας το υλικό και εναποθέτοντάς το επί του υπό κατασκευή τεμαχίου στρωματικά. Αυτή η τεχνική χρησιμοποιείται κατά κύριο λόγο με μεταλλικές πούδρες ή με πηγή σύρματος [55]. Λόγω της φύσης της δεδομένης κατεργασίας, μπορεί να χρησιμοποιηθεί όχι μόνο για την κατασκευή εξαρτημάτων από το μηδέν αλλά και για την επισκευή κατεστραμμένων αντικειμένων, όπως πτερύγια στροβίλων ή έλικες [56].

Οι περισσότεροι τρισδιάστατοι εκτυπωτές αυτής της τεχνολογίας είναι βιομηχανικής κλίμακας και απαιτούν ένα κλειστό πλήρως ελεγχόμενο περιβάλλον για να λειτουργήσουν. Ένας τυπικός τέτοιος εκτυπωτής αποτελείται από ένα ακροφύσιο τοποθετημένο σε έναν βραχίονα πολλαπλών αξόνων μέσα σε ένα κλειστό πλαίσιο, το οποίο εναποθέτει τηγμένο υλικό στην επιφάνεια του τεμαχίου εργασίας, όπου και στερεοποιείται [57]. Η διαδικασία είναι παρόμοια με την τεχνική εκτύπωσης με εξώθηση υλικού, με τη βασικότερη διαφορά ότι στη συγκεκριμένη τεχνική το ακροφύσιο μπορεί να κινηθεί σε πολλαπλές κατευθύνσεις, με έως και πέντε διαφορετικούς άξονες ελευθερίας σε σύγκριση τους τρεις χωρικούς για τις περισσότερες μηχανές FFF [41]. Η ροή του υλικού κατά την τυπική διαδικασία εκτύπωσης μέσω της κατευθυνόμενης ενεργειακής εναπόθεσης απεικονίζεται στην Εικόνα 7.

Οι διεργασίες εναπόθεσης με κατευθυνόμενη ενεργειακή δέσμη είναι σε θέση να δημιουργήσουν διαβαθμισμένες συνθέσεις υλικού [58]. Τα διάφορα υλικά μεταφέρονται με τη μορφή πούδρας στην περιοχή που γίνεται η τήξη, χρησιμοποιώντας ξεχωριστές τροφοδοτικές διατάξεις και οι ποσότητές τους ελέγχονται ξεχωριστά για τη ρύθμιση της τελικής σύνθεσης [59].



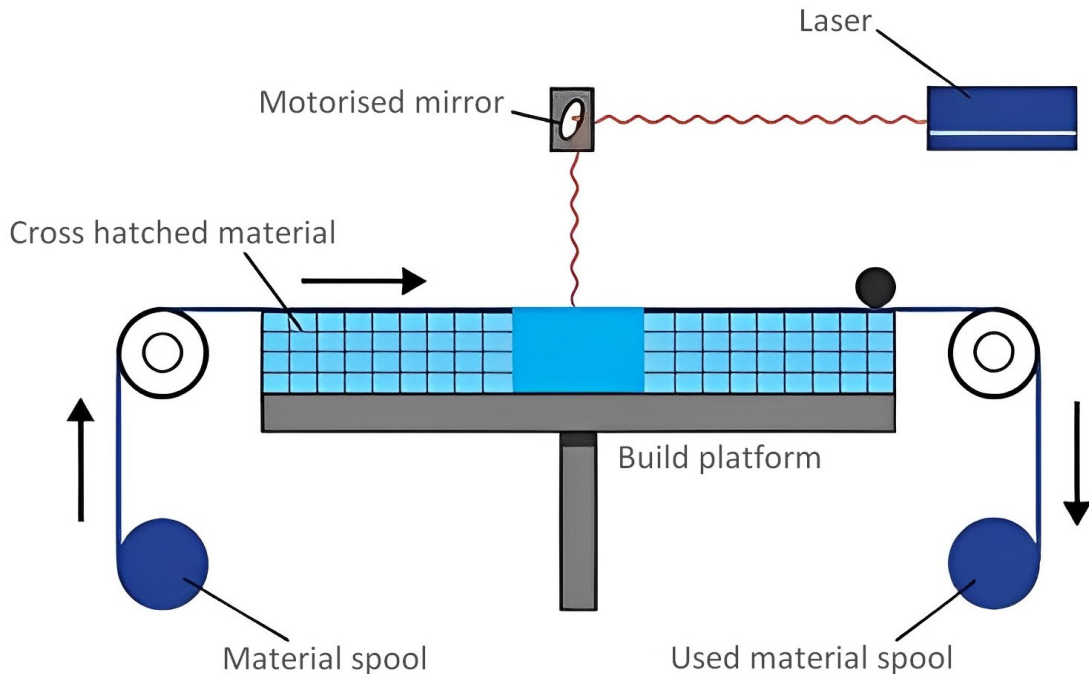
Εικόνα 7. Αναπαράσταση δημιουργίας ενός τρισδιάστατου αντικειμένου με κατευθυνόμενη ενεργειακή εναπόθεση [41]

1.2.7. Ελάσματα σε Φύλλα

Η συγκεκριμένη τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης (SL) διαφοροποιείται από τις υπόλοιπες. Βασίζεται στη συγκόλληση χάρτινων, μεταλλικών ή πλαστικών φύλλων. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί μέσω μιας ποικιλίας διαφορετικών μηχανισμών, σε όλους όμως προωθείται ένα φύλλο δομικού υλικού σε μια πλατφόρμα κατασκευής. Διαδοχικές στρώσεις υλικού κολλιούνται και σχηματίζουν μία συμπαγή δομή [60].

Η μέθοδος μπορεί να χαρακτηριστεί και ως υβριδική αφού χρησιμοποιεί προσθετικές και αφαιρετικές διεργασίες. Αντικείμενα που έχουν κατασκευαστεί με τη συγκεκριμένη μέθοδο μπορούν να τροποποιηθούν περαιτέρω με μηχανική κατεργασία. Η διαδικασία κατασκευής του αντικειμένου ξεκινά με την τροφοδότηση του υλικού επιστρώματος στην πλατφόρμα. Κάθε επίστρωση έχει πάνω του μία ουσία κόλλας η οποία ενεργοποιείται θερμικά [61]. Ένας θερμαινόμενος κύλινδρος από ανοξείδωτο χάλυβα παρέχει την απαιτούμενη πίεση ώστε να φέρει κάθε μία στρώση σε επαφή με τις προηγούμενες και προκαλεί επαρκή συγκόλληση. Κάθε στρώμα κόβεται και μορφοποιείται με ένα laser στη διατομή που έχει ορίσει το αρχείο CAD. Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας η πλατφόρμα κινείται προς τα κάτω και αυτό επαναλαμβάνεται μέχρι να ολοκληρωθεί ο σχηματισμός του αντικειμένου. Το περισσευούμενο υλικό που έχει μείνει για την καλύτερη υποστήριξη, αφαιρείται στο τέλος με το χέρι [41]. Η ροή του υλικού κατά την τυπική διαδικασία εκτύπωσης μέσω ελασμάτων σε φύλλα απεικονίζεται στην Εικόνα 8.

Χαρακτηριστικό της μεθόδου αυτής είναι η υψηλή αντοχή και η χαμηλή ευθραυστότητα του τελικού προϊόντος λόγω μειωμένων παραμορφώσεων. Εστιάζει στην κατασκευή μεγάλων αντικειμένων, ενώ παράλληλα μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορα οργανικά και ανόργανα υλικά με διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες δίνοντας έτσι τη δυνατότητα στους χρήστες να επεκταθούν στην επιλογή υλικού [62]. Ωστόσο, η μέθοδος αυτή δεν κρίνεται ιδανική για τη δημιουργία περίπλοκων γεωμετριών λόγω της αδυναμίας κατασκευής κοίλων επιφανειών. Έτσι, η δυνατότητα της τεχνολογίας περιορίζεται σε γεωμετρίες χαμηλής πολυπλοκότητας και μεγάλου μεγέθους .



Εικόνα 8. Αναπαράσταση δημιουργίας ενός τρισδιάστατου αντικειμένου με ελάσματα σε φύλλα [63]

1.3. Χρήση Τρισδιάστατης Εκτύπωσης στη Βιομηχανία

Η τρισδιάστατη εκτύπωση ολοένα κερδίζει σε δημοτικότητα, λόγω του ότι μπορεί να παρέχει αναμφισβήτητα υψηλή ακρίβεια στις κατασκευές, να εφαρμοσθεί με ευρεία επιλογή υλικών, να επιτρέπει την ελευθερία στο σχεδιασμό ιδιαίτερα σύνθετων κατασκευών και να έχει χαμηλή παραγωγή αποβλήτων.

Πολλοί κλάδοι, με διαφορετικές απαιτήσεις και ιδιαιτερότητες ο καθένας, όπως η αυτοκινητοβιομηχανία, η αεροδιαστημική και η ιατρική έχουν ήδη εισάγει με επιτυχία την προσθετική κατασκευή στη φαρέτρα τους. Παράλληλα αναπτύσσεται αυξημένο ενδιαφέρον στις εφαρμογές τρισδιάστατης εκτύπωσης στον κατασκευαστικό κλάδο, ο οποίος αποτελεί τον ακρογωνιαίο λίθο της παγκόσμιας οικονομίας καταλαμβάνοντας το 7% του παγκόσμιου ΑΕΠ για το έτος 2022 [47]. Στην ενότητα αυτή αναλύεται εκτενέστερα το τεχνολογικό εύρος της τρισδιάστατης εκτύπωσης.

1.3.1. Τεχνολογικές Δυνατότητες και Περιορισμοί

Το κατά πόσο μία εφαρμογή τρισδιάστατης εκτύπωσης είναι τεχνικά εφαρμόσιμη ή οικονομικά εφικτή, εξαρτάται κυρίως από τη χρήση, το μέγεθος, την πολυπλοκότητα της μορφολογίας και το κόστος του αντικειμένου προς παραγωγή. Η τρισδιάστατη εκτύπωση είναι η πιο ευρέως διαδεδομένη μέθοδος σε εφαρμογές όπου το αντικείμενο έχει μικρό μέγεθος αλλά υψηλό βαθμό πολυπλοκότητας, ενώ το μέγεθος παραγωγής αναφέρεται σε μικρούς όγκους [64]. Ειδικότερα, για την περίπτωση της εκτύπωσης πλαστικού με τη μέθοδο της έγχυσης που είναι η πιο διαδεδομένη, η διαδικασία είναι οικονομικά αποτελεσματική και αποδοτική συνήθως σε βαθμούς παραγωγής από 50 έως 5.000 μονάδες [65]. Το εύρος της παραγωγικότητας αυξάνεται όσο η τεχνολογία βελτιώνεται ή το κόστος του υλικού μειώνεται [66].

Παλαιότερες τεχνολογίες τρισδιάστατων εφαρμογών παρήγαγαν αντικείμενα ή εξαρτήματα τα οποία ήταν συνήθως εύθραυστα και χρειαζόντουσαν περαιτέρω επιφανειακή επεξεργασία [67]. Σήμερα, οι τρισδιάστατοι εκτυπωτές μπορούν να χρησιμοποιήσουν μια πληθώρα υλικών σε βαθμό ακριβείας που προσεγγίζει υποδιαιρέσεις του χιλιοστού [68]. Ταυτόχρονα, ο ρομποτικός εξοπλισμός των τρισδιάστατων εκτυπωτών είναι πλέον αρκετά γρήγορος, σταθερός και αξιόπιστος και μπορεί να ανταπεξέλθει σε βιομηχανικές εφαρμογές, ακόμη και σε περιβάλλοντα συνεχούς καταπόνησης, ανάλογα με τις απαιτήσεις και το προϊόν [69].

Λόγω των πλεονεκτημάτων και των πολλαπλών δυνατοτήτων που έχει η τεχνολογία αυτή σήμερα, το εύρος των εφαρμογών που χρησιμοποιείται έχει πλέον αυξηθεί. Τα σημαντικότερα από τα πλεονεκτήματα που την καθιστούν εφαρμόσιμη σε όλο και περισσότερες υλοποιήσεις, μπορούν να περιγραφούν στα κάτωθι [23]:

- Ευελιξία σχεδίασης. Επιτρέπει το σχεδιασμό και την εκτύπωση πιο περίπλοκων δομών από ό,τι οι παραδοσιακές διαδικασίες παραγωγής, οι οποίες έχουν σχεδιαστικούς περιορισμούς ή συχνά απαιτείται συνδυασμός τους, αυξάνοντας έτσι το χρόνο και το κόστος παραγωγής. Οι πλεγματικές δομές είναι ένα τέτοιο χαρακτηριστικό παράδειγμα «αρχιτεκτονικής ελευθερίας».
- Ταχεία πρωτοτυποποίηση. Έχει δυνατότητα να κατασκευάσει εξατομικευμένα εξαρτήματα μέσα σε λίγες ώρες, γεγονός που επιταχύνει τη διαδικασία δημιουργίας πρωτοτύπων. Σε σύγκριση με τα πρωτότυπα μηχανικής κατασκευής, η τρισδιάστατη εκτύπωση είναι φθηνή και πιο γρήγορη στη δημιουργία εξαρτημάτων, καθώς το εξάρτημα μπορεί να τελειώσει σε ώρες, επιτρέποντας τροποποιήσεις του τελικού σχεδιασμού με πολύ πιο αποτελεσματικό ρυθμό. Επομένως, μειώνεται σημαντικό το ρίσκο ή ο κίνδυνος ενός αποτυχημένου σχεδιασμού και της επένδυσης στην οποία αυτός υπόκειται.
- Εκτύπωση κατ' απαίτηση. Εξαλείφει την ανάγκη για την αποθήκευση αποθεμάτων, σε αντίθεση με τις παραδοσιακές διαδικασίες παραγωγής. Αυτό εξοικονομεί χώρο και κόστος, καθώς δεν χρειάζεται να γίνει κάποια μαζική εκτύπωση εκτός κι αν απαιτηθεί για κάποια εξειδικευμένη παραγγελία. Ταυτόχρονα τα αρχεία τρισδιάστατης σχεδίασης αποθηκεύονται όλα σε μια εικονική βιβλιοθήκη καθώς εκτυπώνονται χρησιμοποιώντας ένα τρισδιάστατο μοντέλο είτε ως αρχείο CAD είτε ως αρχείο STL, το οποίο συνεπάγεται ότι μπορούν εντοπιστούν και να εκτυπωθούν όταν χρειάζεται. Οι επεξεργασίες σε σχέδια μπορούν να γίνουν με πολύ χαμηλό κόστος με την επεξεργασία μεμονωμένων αρχείων χωρίς σπατάλη ξεπερασμένου αποθέματος ή επενδύοντας σε κοπτικά εργαλεία. Οι δε καταναλωτές μπορούν να αποκτήσουν διαδικτυακά ένα αρχείο ψηφιακού σχεδιασμού ή κάποιο πρόγραμμα ψηφιακής σχεδίασης και να έχουν τη δυνατότητα να εκτυπώσουν τρισδιάστατα ένα εξάρτημα που θέλουν να αντικαταστήσουν για ίδια χρήση.
- Ελαφριά εξαρτήματα υψηλής αντοχής. Το πλέον διαδεδομένο υλικό τρισδιάστατης εκτύπωσης είναι το πλαστικό που ανήκει στην ευρύτερη γκάμα των πολυμερών, αν και πλέον είναι διαδεδομένη κι εκτύπωση μεταλλικών αντικειμένων. Ωστόσο, με τη βελτίωση της τεχνολογίας των υλικών, υπάρχουν πολυμερή, όπως το PEEK, τα οποία να παραμένουν ελαφρύτερα από τα μεταλλικά αλλά με ισοδύναμη μηχανική αντοχή. Αυτό είναι από τα πλέον σημαντικά χαρακτηριστικά που επιδιώκουν ορισμένοι κλάδοι όπως η αυτοκινητοβιομηχανία και η αεροδιαστημική, όπου το μικρό βάρος και η υψηλή αντοχή αποτελούν πρωτεύοντα ζητήματα.

- Γρήγορη σχεδίαση και παραγωγή. Ανάλογα με τον σχεδιασμό και την πολυπλοκότητα ενός εξαρτήματος, η τρισδιάστατη εκτύπωση μπορεί να εκτυπώσει αντικείμενα σημαντικά γρηγορότερα από ό,τι γίνεται με συμβατικές μεθόδους, ειδικά χύτευσης όπου απαιτείται και η κατασκευή καλουπιού.
- Ελαχιστοποίηση των απορριμμάτων. Η παραγωγή εξαρτημάτων απαιτεί μόνο τα υλικά που χρειάζονται για το ίδιο το ανταλλακτικό, με ελάχιστη ή καθόλου σπατάλη σε σύγκριση με συμβατικές μεθόδους, ιδιαίτερα όσες εντάσσονται στην ευρύτερη κατηγορία της αποβολής υλικού. Με τον τρόπο αυτό εξοικονομούνται πόροι και μειώνεται το συνολικό κόστος της διαδικασίας. Αυτό αντικατοπτρίζεται και στο περιβαλλοντικό αποτύπωμα.
- Οικονομική. Ως διαδικασία κατασκευής ενός σταδίου, η τρισδιάστατη εκτύπωση εξοικονομεί χρόνο και κόστος που σχετίζεται με τη χρήση διαφορετικών μηχανών για την κατασκευή. Οι τρισδιάστατοι εκτυπωτές μπορούν επίσης να ρυθμιστούν και να αφηθούν για να συνεχίσουν την εργασία, πράγμα που σημαίνει ότι δεν υπάρχει ανάγκη για τους χειριστές να είναι παρόντες όλη την ώρα. Το γεγονός αυτό ενισχύεται από την ελαχιστοποίηση της σπατάλης του υλικού.
- Ευκολία πρόσβασης. Οι τρισδιάστατοι εκτυπωτές γίνονται όλο και πιο προσιτοί με περισσότερους τοπικούς παρόχους υπηρεσιών που προσφέρουν υπηρεσίες εξωτερικής ανάθεσης για κατασκευαστικές εργασίες, σε αντίθεση με άλλες παραδοσιακές μεθόδους παραγωγής που έχουν πολύ πιο συγκεντρωτικό χαρακτήρα.

Όπως με σχεδόν κάθε άλλη διαδικασία, έτσι κι η τρισδιάστατη εκτύπωση διέπεται από ορισμένους περιορισμούς οι οποίοι πρέπει να λαμβάνονται υπόψη πριν γίνει η επιλογή της μεθόδου ως κύριας κατεργασίας παραγωγής [70]:

- Περιορισμένα υλικά. Η διαθέσιμη επιλογή πρώτων υλών δεν είναι ανεξάντλητη. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι δεν μπορούν όλα τα μέταλλα ή τα πλαστικά να περάσουν ποιοτικό έλεγχο άρα να ελεγχθούν για κάθε πιθανή εφαρμογή. Επιπλέον, πολλά από τα εκτυπώσιμα υλικά δεν μπορούν να ανακυκλωθούν και ακόμα λιγότερα είναι ασφαλή για τα τρόφιμα.
- Περιορισμένο μέγεθος κατασκευής. Οι τρισδιάστατοι εκτυπωτές έχουν επί του παρόντος μικρούς θαλάμους εκτύπωσης που περιορίζουν το μέγεθος των εξαρτημάτων που μπορούν να εκτυπωθούν. Οτιδήποτε μεγαλύτερο θα πρέπει να εκτυπωθεί σε ξεχωριστά μέρη και να ενωθεί μετά την παραγωγή. Αυτό μπορεί να αυξήσει το κόστος και τον χρόνο για μεγαλύτερα εξαρτήματα λόγω του ότι ο εκτυπωτής πρέπει να εκτυπώσει περισσότερα εξαρτήματα πριν χρησιμοποιηθεί χειρωνακτική εργασία για την ένωση των εξαρτημάτων μεταξύ τους.
- Μετεπεξεργασία. Αν και τα μεγάλα εξαρτήματα απαιτούν σίγουρα μετεπεξεργασία, τα περισσότερα από τα εξαρτήματα που εκτυπώνονται τρισδιάστατα χρειάζονται εν γένει κάποια μορφή καθαρισμού για να αφαιρεθεί το υλικό στήριξης από την κατασκευή και να εξομαλυνθεί η επιφάνεια για να επιτευχθεί το απαιτούμενο φινιρίσμα. Οι κυριότερες μέθοδοι μετεπεξεργασίας που χρησιμοποιούνται περιλαμβάνουν την εκτόξευση νερού, τη λείανση, το χημικό εμποτισμό και ξέβγαλμα, το στέγνωμα με αέρα ή θερμότητα και τη συναρμολόγηση. Η ποσότητα της μεταγενέστερης επεξεργασίας που απαιτείται εξαρτάται από παράγοντες όπως το μέγεθος του εξαρτήματος που παράγεται, την προβλεπόμενη εφαρμογή και τον τύπο της τεχνολογίας τρισδιάστατης εκτύπωσης που χρησιμοποιείται για την παραγωγή. Επομένως, ενώ η τρισδιάστατη εκτύπωση επιτρέπει τη γρήγορη παραγωγή εξαρτημάτων, η ταχύτητα κατασκευής μπορεί να επιβραδυνθεί λόγω μεταγενέστερης επεξεργασίας.

- Μεγάλοι όγκοι. Η τρισδιάστατη εκτύπωση ενέχει ένα στατικό κόστος σε αντίθεση με τις πιο συμβατικές τεχνικές όπως η χύτευση, όπου η παραγωγή μεγάλων όγκων μπορεί να είναι πιο οικονομική. Ενώ η αρχική επένδυση για τρισδιάστατη εκτύπωση μπορεί να είναι χαμηλότερη από άλλες μεθόδους κατασκευής, αφού κλιμακωθεί για την παραγωγή μεγάλων όγκων για μαζική παραγωγή, το κόστος ανά μονάδα δε μειώνεται.
- Τμηματική δομή. Με την τρισδιάστατη εκτύπωση παράγονται εξαρτήματα στρώμα προς στρώμα. Ο μηχανισμός αυτής της στρωματικής προσκόλλησης σημαίνει ότι η δομή δεν είναι ενιαία, κι επομένως εν γένει υπάρχει συγκέντρωση τάσεων στο υλικό, που σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να καταστήσει την αστοχία πιθανό σενάριο, ακόμα κι αν δεν υπερβαίνεται το μηχανικό όριο αντοχής των υλικού αυτού καθ' εαυτού.
- Ανοχές σχεδιασμού. Ένα πιθανό πρόβλημα με την τρισδιάστατη εκτύπωση σχετίζεται άμεσα με τον τύπο του μηχανήματος ή της διαδικασίας που χρησιμοποιείται, με ορισμένους εκτυπωτές να έχουν σημαντικά χαμηλότερες ανοχές από άλλους. Αυτό σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να διορθωθεί στην εκ των υστέρων επεξεργασία, αλλά πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι αυτό θα αυξήσει περαιτέρω το χρόνο και το κόστος παραγωγής.

1.3.2. Κατηγοριοποίηση Υλικών

Όπως κάθε διαδικασία κατασκευής, έτσι και στην τρισδιάστατη εκτύπωση απαιτούνται υλικά που να μπορούν να πληρούν σταθερές προδιαγραφές και να εξασφαλίσουν τα επιθυμητά χαρακτηριστικά του τελικού προϊόντος για ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών. Για να διασφαλιστεί αυτό, διαδικασίες, απαιτήσεις και συμφωνίες για τον έλεγχο των υλικών καθορίζονται μεταξύ των προμηθευτών, των αγοραστών και των τελικών χρηστών του υλικού. Η τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης είναι ικανή να παράγει πλήρως λειτουργικά εξαρτήματα σε ένα ευρύτατο φάσμα υλικών, συμπεριλαμβανομένων κεραμικών, μετάλλων, πολυμερών και συνδυασμού αυτών με τη μορφή υβριδικών, σύνθετων ή λειτουργικά διαβαθμισμένων υλικών (FGMs) [71]. Εξειδικεύοντας:

- Μέταλλα. Η τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης μετάλλων έχει κερδίσει τα τελευταία χρόνια ιδιαίτερη δημοφιλία στην αεροδιαστημική, την αυτοκινητοβιομηχανία και την ιατρική [72], με την κατασκευή μεγάλης γκάμας εξαρτημάτων. Τα κυριότερα μέταλλα που χρησιμοποιούνται είναι κράματα αλουμινίου [73], κοβαλτίου [74], νικελίου [75] και τιτανίου [76], καθώς και μια μεγάλη γκάμα από ανοξείδωτους χάλυβες [77]. Το κράμα με βάση το κοβάλτιο είναι ιδιαίτερα διαδεδομένο σε οδοντιατρικές εφαρμογές, καθώς χαρακτηρίζεται από υψηλή ειδική ακαμψία και ελαστικότητα [74]. Τα δε κράματα νικελίου αξιοποιούνται ιδιαίτερα στην αεροδιαστημική, καθώς μπορούν να αντέξουν σε ακραία περιβάλλοντα, λόγω υψηλής αντοχής στη διάβρωση και το υψηλό σημείο τήξης [72]. Αναφορικά με τα κράματα τιτανίου, έχουν εξέχουσες ιδιότητες όπως ολκιμότητα, αντοχή στην οξείδωση και τη θερμότητα, χαμηλή πυκνότητα και υψηλή μηχανική αντοχή, κάτι που τα καθιστά απαραίτητα σχεδόν σε κάθε βιομηχανικό κλάδο.
- Πολυμερή. Αποτελεί το πρώτο είδος υλικών σε μορφή θερμοπλαστικών νημάτων που χρησιμοποιήθηκαν με τη μέθοδο της τρισδιάστατης εκτύπωσης. Η πλέον διαδεδομένη μέθοδος που εκτυπώνει κατεξοχήν αυτή την ομάδα υλικών είναι η Κατασκευή Συντηγμένου Νήματος (FFF). Τα πιο κοινά πολυμερή που τροφοδοτούν τέτοιου είδους εκτυπωτές είναι το πολυγαλακτικό οξύ (PLA), το ακρυλονιτρίλιο βουταδιένο στυρένιο (ABS), καθώς και το πολυπροπυλένιο (PP) ή πολυαιθυλένιο (PE) [78]. Τα

πλέον πρόσφατα θερμοπλαστικά νήματα που χρησιμοποιούνται είναι το PEEK και το PMMA, τα οποία έχουν ανώτερες μηχανικές ιδιότητες αλλά σημαντικά υψηλότερες θερμοκρασίες τήξης απ' ό,τι τα κοινά πολυμερή [79]. Γενικά, τα πολυμερή έχουν εξέχοντα ρόλο ως βιοϋλικά για ιατροτεχνολογικές εφαρμογές, όπως ορθοπεδικά εμφυτεύματα, λόγω τόσο των ιδιοτήτων τους όσο και του αδρανούς τους χαρακτήρα [74].

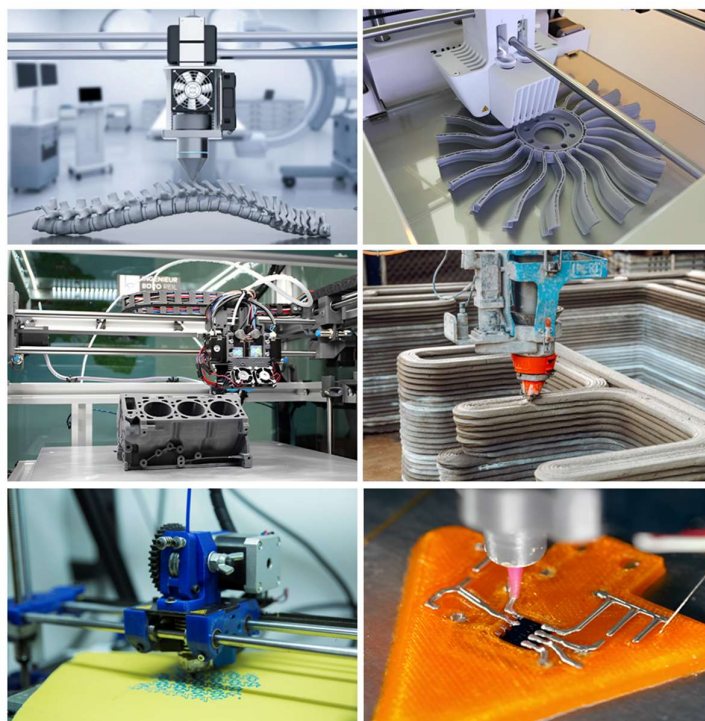
- Κεραμικά. Η σημερινή τεχνολογία της τρισδιάστατης εκτύπωσης μπορεί να παράγει τρισδιάστατα εκτυπωμένα αντικείμενα από κεραμικά υλικά και σκυρόδεμα χωρίς υψηλό πορώδες ή ρωγματώσεις στη δομή, μέσω βελτιστοποίησης των παραμέτρων εκτύπωσης. Τα κεραμικά χαρακτηρίζονται από υψηλή μηχανική αντοχή, ιδιαίτερα στη συμπίεση και την κάμψη, καθώς και αντίσταση στη θερμότητα. Μπορούν να εφαρμοστούν σχεδόν σε οποιοδήποτε γεωμετρία και σχήμα, κάτι το οποίο τα καθιστά ιδιαίτερα ευέλικτα σχεδόν σε κάθε βιομηχανικό κλάδο, από την αρχιτεκτονική και τις κατασκευές μέχρι την αεροδιαστημική. Τα σημαντικότερα κεραμικά είναι η αλουμίνα [80], οι βιοενεργό ύαλοι [81] και το ζirkόνιο [82]. Η σκόνη αλουμίνας ως οξειδίου του αργιλίου αποτελεί ένα από τα πιο σκληρά και υψηλής πυκνότητας κεραμικά με ένα πολύ ευρύτατο φάσμα εφαρμογών, με χαρακτηριστικότερη την παραγωγή καταλυτών, προσροφητικών μέσων, μικροηλεκτρονικών και χημικών [83]. Το βιοενεργό γυαλί έχει αποδειχθεί πολύτιμο εργαλείο της βιοϊατρικής σε εφαρμογές οστών. Τέλος, το ζirkόνιο αποτελεί το κατεξοχήν δομικό υλικό στην πυρηνική τεχνολογία, λόγω της, λόγω της χαμηλής δέσμευσης νετρονίων και της αντοχής στο θερμικό φορτίο και την ακτινοβολία [82].
- Σύνθετα. Τα σύνθετα υλικά με την εξαιρετική τους ευελιξία, το χαμηλό βάρος και τις προσαρμοσίμες ιδιότητες έχουν φέρει επανάσταση στη βιομηχανία υψηλών επιδόσεων. Οι χαρακτηριστικότεροι εκπρόσωποι των σύνθετων υλικών είναι πολυμερή ενισχυμένα με ίνες άνθρακα [84] και πολυμερή ενισχυμένα με ίνες γυαλιού [85]. Τα συνθετικά πολυμερή με ανθρακονήματα χρησιμοποιούνται ευρέως στην αεροδιαστημική βιομηχανία λόγω της υψηλής ειδικής ακαμψίας, μηχανικής αντοχής καθώς και της αντοχής τους στη διάβρωση σε συνδυασμό με την απόδοση στην κόπωση [84]. Τα πολυμερή ενισχυμένα με ίνες υάλου χαρακτηρίζονται από ιδιαίτερα οικονομική αποδοτικότητα και υψηλή απόδοση [86]. Έχουν υψηλή θερμική αγωγιμότητα και σχετικά χαμηλό συντελεστή θερμικής διαστολής, το οποίο τα καθιστά ιδανικά σε περιβάλλοντα υψηλών θερμοκρασιών.
- Έξυπνα υλικά. Ορίζονται ως έξυπνα λόγω της δυνατότητάς τους να μεταβάλλουν τη γεωμετρία και το σχήμα του αντικειμένου αναλόγως τις εξωτερικές περιβαλλοντικές συνθήκες, όπως θερμοκρασία και υγρασία [87]. Συνήθως ταξινομούνται σε κράματα μνήμης σχήματος (shape memory alloys) [88] και η πολυμερή μνήμης σχήματος (shape memory polymers) [89]. Ο κυριότερος εκπρόσωπος των κραμάτων μνήμης είναι εκείνο του νικελίου - τιτανίου [88] που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε εύρος εφαρμογών από ιατρικά εμφυτεύματα μέχρι μικροηλεκτρονικές συσκευές [90]. Από την άλλη τα πολυμερή μνήμης αποτελούν λειτουργικά υλικά, τα οποία αποκρίνονται σε ένα ερέθισμα όπως φως, υγρασία, ηλεκτρική ενέργεια, θερμότητα ή τύπους χημικών [89].
- Ειδικά υλικά. Χαρακτηριστικότεροι εκπρόσωποι τέτοιων υλικών είναι τα βρώσιμα και τα υφάσματα. Η τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης μπορεί να επεξεργαστεί και να παράγει το επιθυμητό σχήμα και γεωμετρία χρησιμοποιώντας υλικά τροφίμων όπως η σοκολάτα, το κρέας, η καραμέλα, η πίτσα, τα μακαρόνια, η σάλτσα και ούτω καθεξής [91]. Ειδικές κατασκευές μπορούν να παραχθούν επίσης στη βιομηχανία των κοσμημάτων και της ενδυματοποιίας [92].

1.3.3. Βιομηχανικές Εφαρμογές

Τα τελευταία χρόνια οι ανάγκες για την αύξηση της παραγωγικότητας, τη μείωση του κόστους στη βιομηχανία αλλά και τις σύγχρονες ανάγκες μίας πιο εξατομικευμένης και στοχευμένης βιομηχανοποίησης, έχουν ωθήσει την ανάπτυξη των τρισδιάστατων εφαρμογών σε ένα πολύ υψηλό επίπεδο. Μάλιστα, προβλέπεται από κάποιους υποστηρικτές των τεχνολογιών της τρισδιάστατης εκτύπωσης ότι η συγκεκριμένη τεχνολογική ανάπτυξη θα αλλάξει την φύση της παραγωγής και του εμπορίου, καθώς οι τελικοί χρήστες θα έχουν τη δυνατότητα να κατασκευάσουν μόνοι τους προϊόντα ή κάποια εξαρτήματα που χρειάζονται αντί να το αποκτήσουν έναντι ενός χρηματικού ποσού από κάποιον κατασκευαστή. Η τεχνολογία συνεχίζει να βελτιώνεται έως ότου να είναι σε θέση να εξάγει ποιοτικά και πλήρως λειτουργικά προϊόντα. Στη συνέχεια παρατίθενται τα χαρακτηριστικότερα παραδείγματα βιομηχανικών κλάδων, οι οποίοι έχουν εισάγει την τεχνολογία της τρισδιάστατης εκτύπωσης στη φαρέτρα τους με σκοπό να αναπτύξουν νέα προϊόντα με υψηλό βαθμό εξατομίκευσης και σχηματικής πολυπλοκότητας. Οι κλάδοι αυτοί απεικονίζονται στην Εικόνα 9.

- **Ιατρική βιομηχανία.** Η προοπτική των τρισδιάστατων εκτυπωτών για χρήση στην ιατρική βιομηχανία εξελίσσεται με ένα εξαιρετικά γρήγορο ρυθμό, καθώς οι ειδικοί του κλάδου έχουν ξεκινήσει να χρησιμοποιούν τρισδιάστατες μεθόδους εκτύπωσης σε πιο προχωρημένο και εξελιγμένο στάδιο, εστιάζοντας στην εξατομίκευση [93]. Πολλοί ασθενείς σε ολόκληρο τον κόσμο βιώνουν τη βελτίωση της ιατρικής περίθαλψης μέσω τρισδιάστατων εκτυπωμένων μοσχευμάτων και προσθετικών μελών [94]. Η χρήση τρισδιάστατων εκτυπωτών στην ιατρική είναι κατά πολλά υποσχόμενη, καθώς η συγκεκριμένη τεχνολογία έχει τη δυνατότητα είτε της ίασης είτε της βελτίωσης του βιοτικού επιπέδου των ασθενών. Οι πλέον πρόσφατες έρευνες και δοκιμές εξέλιξης εστιάζουν στη δημιουργία ιστών, οργάνων, οστών και προσθετικών μελών αναδεικνύοντας ενθαρρυντικές κι ελπιδοφόρες προοπτικές [95].
- **Αεροπορική και αεροδιαστημική βιομηχανία.** Η ανάπτυξη της μεθόδου στη βιομηχανία αυτή συνδέεται άμεσα με την κατασκευή πολύπλοκων μεταλλικών γεωμετριών, με απaráμιλλη σχεδιαστική ελευθερία. Έχει τη δυνατότητα να παράγει ελαφριά εξαρτήματα και βελτιωμένες και πολύπλοκες γεωμετρίες, οι οποίες μπορούν να μειώσουν σημαντικά τις ενεργειακές απαιτήσεις και τους πόρους. Επιπλέον παράγονται εξαρτήματα κινητήρων τα οποία καταστρέφονται εύκολα και απαιτούν τακτική αντικατάσταση, επομένως η τεχνολογία της τρισδιάστατης εκτύπωσης είναι ιδανική για την προμήθεια τέτοιων ανταλλακτικών [96]. Στην αεροδιαστημική, τα κράματα με βάση το νικέλιο προτιμώνται περισσότερο για τους λόγους που εξηγήθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο. Συνολικά, έρευνες στον τομέα δείχνουν ότι η τρισδιάστατη εκτύπωση εξαρτημάτων σε βιομηχανικές με τόσο ιδιαίτερες απαιτήσεις μπορούν να βελτιώσουν σημαντικά την αποδοτικότητά τους σε σχέση με την ποιότητα αλλά και το κόστος, να μειώσουν τις απαιτήσεις συντήρησης και να εξοικονομήσουν σημαντικούς πόρους με τη χρήση ελαφρύτερων εξαρτημάτων [97].
- **Αυτοκινητοβιομηχανία.** Είναι από τους πρώτους κλάδους που υιοθέτησαν τις μεθόδους των τρισδιάστατων εκτυπώσεων για την κατασκευή ολοκληρωμένων οχημάτων αλλά και εξαρτημάτων σε επίπεδο πρωτοτύπων. Η δημιουργία αυτών των μοντέλων βοηθά στην αξιολόγησή τους σε σχεδιαστικό, αεροδυναμικό και λειτουργικό επίπεδο [98]. Ταυτόχρονα, με την χρήση αυτών των μεθόδων, οι κατασκευάστριες εταιρείες μπορούν να παράξουν πολλαπλές εκδοχές πρωτοτύπων ενός σχεδίου που βρίσκεται προς αξιολόγηση, μειώνοντας έτσι χρονικούς και οικονομικούς πόρους μέχρι να καταλήξουν σε ένα βελτιστοποιημένο σχεδιασμό [99].

- Κατασκευαστική βιομηχανία. Οι απεριόριστες δυνατότητες υλοποίησης γεωμετρικής πολυπλοκότητας μπορούν να βρουν σημαντικές εφαρμογές και στον οικοδομικό και αρχιτεκτονικό κλάδο, ο οποίος έχει αξιοποιήσει την τεχνολογία αυτή για την εκτύπωση όχι μόνο κατασκευαστικών στοιχείων αλλά και ολόκληρων κτιρίων. Η τεχνολογία αυτή μπορεί να συνδυαστεί με τη μοντελοποίηση και την ψηφιακή αναπαράσταση ολόκληρου του κύκλου λειτουργίας της ζωής ενός κτηρίου ή συγκροτήματος. Με τον τρόπο αυτό, δύναται να σχεδιαστεί και να αναπαρασταθεί η εικόνα του κτιρίου άμεσα με παράλληλο εντοπισμό προβληματικών περιοχών [100].
- Βιομηχανία υφασμάτων. Ο συνδυασμός της μόδας με την τρισδιάστατη εκτύπωση μπορεί να μην φαίνεται σαν τον πιο φυσική εφαρμογή, αλλά αρχίζει να γίνεται πραγματικότητα σε όλο τον κόσμο. Παραδείγματα τέτοιων εταιρειών είναι η Nike, η New Balance και η Adidas που αναπτύσσουν τη μαζική παραγωγή τρισδιάστατων εκτυπωμένων παπουτσιών, ιδιαίτερα για εφαρμογές σε αθλητές με συγκεκριμένες απαιτήσεις σε αντικραδασμικές σόλες [101]. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον δίνεται και στην παραγωγή κοσμημάτων, ρολογιών και λουπών αξεσουάρ, με τη βελτίωση του σχεδιασμού και την παροχή εξατομικευμένων και μοναδικών προϊόντων σε πελάτες, μειώνοντας ταυτόχρονα το χρόνο και το κόστος της εφοδιαστικής αλυσίδας [102].
- Βιομηχανία ηλεκτρικών και ηλεκτρονικής. Είναι δυνατή η κατασκευή διαφόρων τύπων ολοκληρωμένων κυκλωμάτων μέσω της τεχνολογίας της τρισδιάστατης εκτύπωσης, ειδικά με τη μέθοδο FFF. Μια μεγάλη γκάμα αγωγίμων και ημιαγωγίμων μελανιών μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μια ευρύτατη γκάμα στοιχειωδών ηλεκτρονικών, όπως αγωγοί, ημιαγωγοί, διηλεκτρικά, αντιστάσεις, πυκνωτές και αισθητήρες. Ταυτόχρονα, ωστόσο, είναι δυνατή η εκτύπωση πλήρως λειτουργικών ολοκληρωμένων κυκλωμάτων που εμπεριέχουν ηλεκτρονικά αγωγή μεταλλικά μελάνια και μονωτικά πολυμερή. Προς το παρόν η τεχνολογία αυτή περιορίζεται σε χρήση ηλεκτρονικών πρωτοτύπων για επερχόμενα προϊόντα, ιδιαίτερα πολύπλοκης γεωμετρίας [103].



Εικόνα 9. Παραδείγματα Χρήσης Τρισδιάστατης Εκτύπωσης στη Βιομηχανία

2. Ανάλυση Ροής Τήγματος Πολυμερούς στην Εξώθηση Υλικού

Στην παράγραφο 1.2.1 περιγράφηκε η πλέον διαδεδομένη τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης, εκείνη της εξώθησης υλικού, η οποία συνδέεται άρρηκτα με τεχνική της επιλεκτικής εναπόθεσης υλικού (Fused Deposition Modeling – FDM), που κατοχύρωσε εμπορικά πρώτη η Stratasys [104]. Λόγω της εμπορικής της διάδοσης, η ίδια διαδικασία απαντάται και ως κατασκευή συντηγμένου νήματος (Fused Filament Fabrication – FFF), ένας όρος ο οποίος χρησιμοποιείται από άλλους κατασκευαστές τρισδιάστατων εκτυπωτών που βασίζονται στην τεχνολογία αυτή.

Τα τελευταία χρόνια υπήρξαν μάρτυρας της αναγέννησης του ερευνητικού ενδιαφέροντος για τη FDM λόγω των ραγδαίων προόδων στη δημιουργία εξαρτημάτων υψηλής απόδοσης και βιομηχανικής ποιότητας, ιδιαίτερα λόγω της προόδου στην έρευνα της ανάπτυξης σύνθετων πολυμερών ενισχυμένων με ίνες, τα οποία έχουν κατάλληλες ιδιότητες για πάρα πολλές εφαρμογές. Παρά τη δημοτικότητά της, ωστόσο, η διαδικασία εξακολουθεί να αντιμετωπίζει προκλήσεις ως προς τη μηχανική αντοχή των εξαρτημάτων, την ακρίβεια των διαστάσεων και τον ρυθμό κατασκευής, οι οποίες οφείλονται κυρίως σε πτυχές της μεθόδου που δεν είναι επαρκώς κατανοητές. Από αυτές τις πτυχές, οι σημαντικότερες είναι το ρεολογικό και θερμοκρασιακό προφίλ του υλικού κατά την εξώθηση και την εναπόθεση, οι οποίες διαδραματίζουν ουσιαστικό ρόλο για την επαναληψιμότητα και την ποιότητα του τελικού προϊόντος, επομένως η πλήρης κατανόησή τους συνιστά επιτακτική ανάγκη για τις μελλοντικές καινοτομίες. Προς αυτήν την κατεύθυνση κινείται κι η τρέχουσα διπλωματική, η οποία παρέχει κατευθυντήριες γραμμές και εργαλεία για το σχεδιασμό και τη βελτιστοποίηση της διαδικασίας συντηγμένης εναπόθεσης με βάση μια εις βάθος ανάλυση της δυναμικής των ρευστών και της μεταφοράς θερμότητας κατά τη διάρκεια της διαδικασίας.

Μέχρι στιγμής, έχουν γίνει σημαντικές προσπάθειες για τη μοντελοποίηση της διαδικασίας FFF προκειμένου να μελετηθούν οι υποκείμενοι μηχανισμοί εκτύπωσης. Το κεφάλαιο αυτό στοχεύει να παρέχει μια ολοκληρωμένη ανασκόπηση της πρόσφατης προόδου στις προσομοιώσεις ροής τήγματος πολυμερών. Συγκεκριμένα, συνοψίζονται οι αναλυτικές και αριθμητικές μέθοδοι για τη μοντελοποίηση της ροής τήγματος πολυμερούς στην εξώθηση, όπου κι εστιάζει και το μοντέλο που κατασκευάζεται στη συνέχεια. Με τον τρόπο αυτό αναδεικνύονται οι εξαρτήσεις των κρίσιμων παραμέτρων αλλά και οι συσχετίσεις αυτών με τους αντίστοιχους μηχανισμούς εκτύπωσης. Μέσω της ανάλυσης των παραπάνω γεφυρώνεται το χάσμα μεταξύ της τρέχουσας έρευνας στο πεδίο και της ανάπτυξης του θερμορευστομηχανικού μοντέλου προσομοίωσης για το πολυμερές ABS κατά την εξώθησή του.

2.1. Μηχανισμός Εξώθησης Υλικού

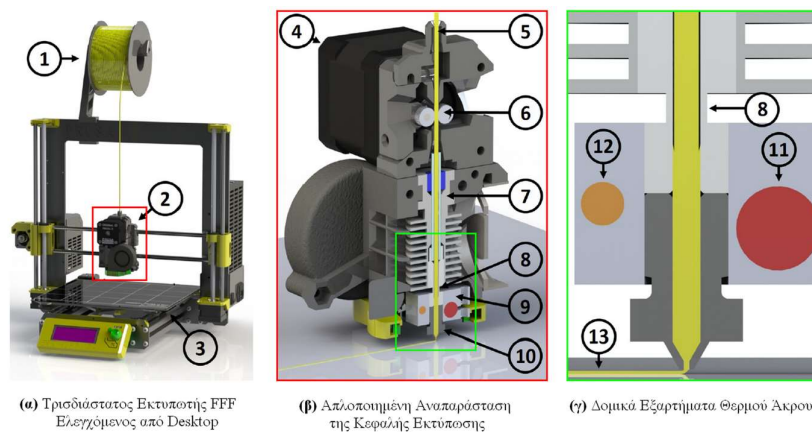
Στην Κατασκευή Συντηγμένου Νήματος (FFF) ένα άκαμπτο νήμα υλικού τροφοδοτείται μέσω ενός θερμαινόμενου κυλίνδρου για να επιτευχθεί ημίρρευστη κατάσταση και στη συνέχεια εξωθείται μέσω ενός ακροφυσίου στρώμα-στρώμα ενώ καθοδηγείται από ένα σύστημα κίνησης για να δημιουργηθεί η γεωμετρία του τελικού τεμαχίου [105].

2.1.1. Περιγραφή Δομικών Εξαρτημάτων

Ένας τυπικός εκτυπωτής τεχνολογίας συντηγμένης εναπόθεσης, ελεγχόμενος από έναν επιτραπέζιο υπολογιστή, αποτελείται από συγκεκριμένα εξαρτήματα, τα οποία παρουσιάζονται αριθμημένα στα σχήματα της Εικόνας 10 [106]. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 10α, η πρώτη ύλη παρέχεται συνήθως ως καρούλι συμπαγούς νήματος (1) που τροφοδοτείται κατά τη διάρκεια της διαδικασίας στην κεφαλή εκτύπωσης (2). Τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα υλικά νήματος είναι το ακρυλονιτρίλιο βουταδιένο στυρένιο (ABS), το πολυγαλακτικό οξύ (PLA), καθώς και σύνθετα ή νανοσύνθετα υλικά με βάση αυτά τα δύο πολυμερή [107]. Η κεφαλή εκτύπωσης και το υπόστρωμα (3) είναι τοποθετημένα σε γερανογέφυρες που κινούνται μέσω βηματικών κινητήρων, που ελέγχονται από τη μητρική πλακέτα. Η επιλεκτική εναπόθεση υλικού λαμβάνει χώρα λόγω της σχετικής κίνησης μεταξύ της κεφαλής εκτύπωσης και του υποστρώματος στην ταχύτητα που ονομάζεται ταχύτητα εκτύπωσης. Η επικοινωνία με τον τρισδιάστατο εκτυπωτή πραγματοποιείται μέσω της γλώσσας προγραμματισμού, που ονομάζεται Γκώδικας (Gcode). Με βάση τη γεωμετρία του υπό κατασκευή εξαρτήματος, ένα ειδικά σχεδιασμένο λογισμικό, δημιουργεί τη διαδρομή εργαλείου για την κεφαλή εκτύπωσης και την αποθηκεύει σε γκώδικα.

Το σχήμα 10β απεικονίζει τις λεπτομέρειες του σχεδιασμού της κεφαλής εκτύπωσης. Ο μηχανισμός τροφοδοσίας, που ονομάζεται εξωθητής (extruder), κινείται από έναν βηματικό κινητήρα (4) και μεταφέρει το υλικό χάρη στη στατική τριβή μεταξύ της επιφάνειας του νήματος (5) και των οδοντωτών τροχών (6). Το νήμα εισάγεται σε ένα κυλινδρικό κανάλι, το οποίο αποτελείται από: μια ψήκτρα (7) που απάγει το πλεονάζον θερμικό φορτίο στο περιβάλλον, ένα τμήμα σωλήνα θερμικής διακοπής (8) που μειώνει τη ροή θερμότητας στα ανώτερα μέρη της κεφαλής εκτύπωσης, έναν υγροποιητή (9) που παρέχει τη θερμότητα και λιώνει το νήμα, και ένα ακροφύσιο (10) που εξωθεί το τηγμένο πολυμερές.

Η συναρμολόγηση της ψήκτρας, της θερμικής διακοπής, του υγροποιητή και του ακροφυσίου αναφέρεται συνήθως στη βιβλιογραφία με τον όρο «θερμό άκρο» (hot-end), το οποίο διακρίνεται στο Σχήμα 2γ. Η θέρμανση του καναλιού πραγματοποιείται συνήθως με μια ηλεκτρική αντίσταση (11) που είναι τοποθετημένη μέσα στο μπλοκ του υγροποιητή. Η αντίσταση ελέγχεται μέσω βρόχου με ελεγκτή (PID) με βάση τις μετρήσεις από ένα θερμίστορ (12). Ο έλεγχος της θερμοκρασίας του υγροποιητή είναι συνήθως ο μόνος αυτόματος έλεγχος κλειστού βρόχου σε ολόκληρο το μηχάνημα. Ως εκ τούτου, η γνώση σχετικά με τις τρέχουσες συνθήκες ροής μέσα στο κανάλι του θερμού άκρου είναι περιορισμένη και τα προγνωστικά μοντέλα έχουν μεγάλη σημασία. Μετά την εξώθηση του υλικού, αυτό εναποτίθεται με τη μορφή κλώνου (13) πάνω στην τράπεζα.



Εικόνα 10. Λεπτομέρειες δομικών εξαρτημάτων ενός τυπικού εκτυπωτή τεχνολογίας FFF [106]

2.1.2. Συμπεριφορά Ροής Τήγματος

Ο σχεδιασμός των εξαρτημάτων και της ίδιας της διεργασίας της εκτύπωσης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το θερμοκρασιακό προφίλ του προς εκτύπωση υλικού. Η ανάλυση της κατανομής της θερμοκρασίας της ροής ενός δεδομένου πολυμερούς εντός του υγροποιητή παρέχει ιδιαίτερα χρήσιμες πληροφορίες, οι οποίες σχετίζονται με:

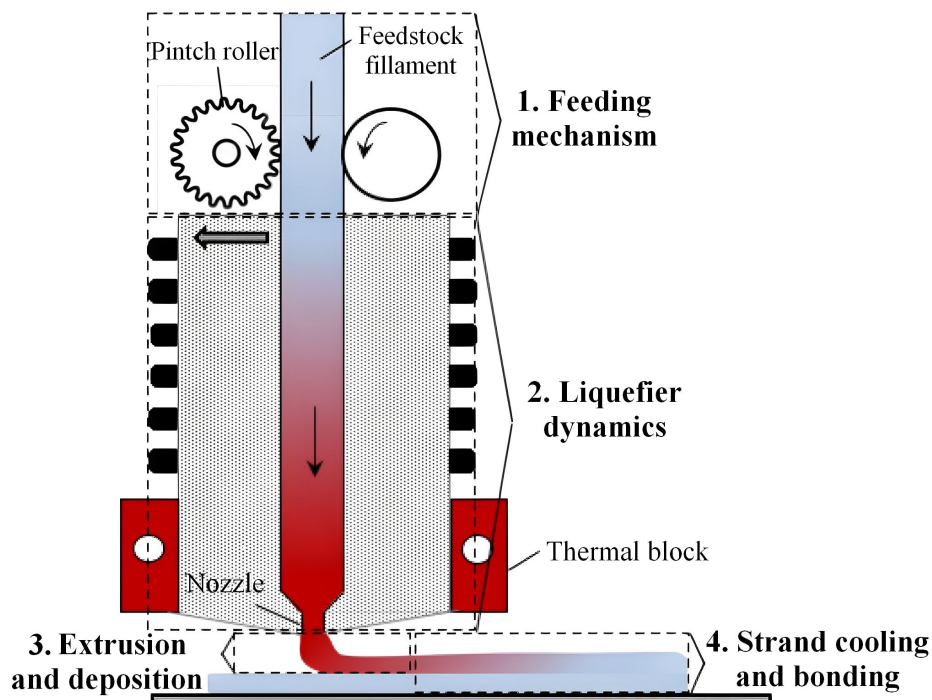
- Την πρόβλεψη της ζώνης μετάπτωσης υάλου και της ζώνης τήξης του υλικού. Το υλικό πρέπει να βρίσκεται σε τηγμένη κατάσταση κατά την είσοδό του στο κωνικό τμήμα του ακροφυσίου (εντός του υγροποιητή), το οποίο αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση τόσο για τη μετέπειτα διαδικασία της εναπόθεσης όσο και της απρόσκοπτης λειτουργίας της εξώθησης. Η παρακολούθηση συγκεκριμένων σημείων κατά μήκος του υγροποιητή έχει ενδιαφέρον επειδή επιτρέπει την εποπτεία ολόκληρης τη διαδρομής θερμοκρασίας ενός πολυμερούς μέσω του συστήματος. Έχει παρατηρηθεί ότι οι υψηλότερες θερμοκρασίες τήγματος οδηγούν σε καλύτερη πρόσφυση μεταξύ των εξωθημένων σφαιριδίων κατά την εκτύπωση, αλλά αντίθετα εάν οι θερμοκρασίες είναι πολύ υψηλές, το πολυμερές μπορεί να αποικοδομηθεί, με αποτέλεσμα ανεπιθύμητες ιδιότητες υλικού και κατάλοιπα εντός του υγροποιητή [108].
- Την πτώση πίεσης της ροής εντός του συστήματος. Η πτώση πίεσης εντός του κυλίνδρου εξαρτάται από το ιξώδες του υλικού εντός του υγροποιητή, επομένως η γνώση αυτή έχει ως αποτέλεσμα τον καλύτερο έλεγχο της διαδικασίας για κρίσιμα μηχανικά στοιχεία όπως οι κινητήρες που τροφοδοτούν το στερεό νήμα [109].
- Η συμπεριφορά του τήγματος εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις ρεολογικές και θερμικές ιδιότητες του πολυμερούς, όπως το ιξώδες, η θερμική αγωγιμότητα, η ειδική θερμότητα και η πυκνότητα, οι οποίες μεταβάλλονται ως συνάρτηση της θερμοκρασίας [110].

Η ροή μέσα στο θερμό άκρο δημιουργείται από την πίεση που προέρχεται από τη δύναμη τροφοδοσίας που εφαρμόζεται από τον εξωθητή στο νήμα. Έτσι, το νήμα λειτουργεί ως συνεχές έμβολο, όπου ο στερεός πυρήνας ασκεί μια δύναμη στο ήδη λιωμένο υλικό. Το μέγεθος της δύναμης τροφοδοσίας εξαρτάται από την πτώση πίεσης μέσω του θερμού άκρου που είναι συνάρτηση του ρυθμού τροφοδοσίας του νήματος [111]. Εάν η πτώση πίεσης είναι πολύ μεγάλη, το νήμα μπορεί να λυγίσει [112], να σπάσει λόγω υπέρβασης της διατμητικής αντοχής του [113] ή να ολισθήσει ως προς τον οδοντωτό τροχό [114]. Επιπλέον, η μείωση της πτώσης πίεσης στο θερμό άκρο είναι απαραίτητη για τη βελτιστοποίηση του μεγέθους του βηματικού κινητήρα του εξωθητή. Αυτό οδηγεί σε μικρότερη αδράνεια της κεφαλής εκτύπωσης η οποία έτσι μπορεί να μετακινηθεί πιο γρήγορα στις γερανογέφυρες. Ως εκ τούτου, το μέγεθος της πτώσης πίεσης στο θερμό άκρο είναι ένας από τους κύριους παράγοντες που περιορίζουν τους ρυθμούς κατασκευής στη διαδικασία FFF.

Μετά την εξώθηση του υλικού, αυτό εναποτίθεται με τη μορφή κλώνου. Εκτός των ρεολογικών χαρακτηριστικών του τήγματος, το σχήμα και το μέγεθος των κλώνων καθορίζουν σχεδόν κάθε πτυχή της ποιότητας του παραγόμενου προϊόντος, όπως η τραχύτητα της επιφάνειας, το πορώδες, η γεωμετρική ακρίβεια, η μηχανική αντοχή και ο ρυθμός κατασκευής [115]. Οι παρακείμενοι κλώνοι συνδέονται μεταξύ τους μέσω μιας διαδικασίας διάχυσης που καθοδηγείται από τη θερμοκρασία και δημιουργούν μια πορώδη δομή [116]. Οι δεσμοί (συγκολλήσεις μεταξύ γειτονικών στρώσεων) είναι συνήθως τα αδύναμα σημεία, όπου είναι πιθανό να συμβεί η μηχανική αστοχία [117]. Ως εκ τούτου, τα εξαρτήματα που παράγονται με την FFF έχουν συχνά κατώτερη μηχανική απόδοση σε σύγκριση με άλλες διεργασίες πολυμερών [118]. Έτσι, τα σχήματα των κλώνων πρέπει να

ελέγχονται καλά για να μεγιστοποιηθεί το πλάτος του δεσμού και να ελαχιστοποιηθεί η παρουσία κενών μεταξύ γειτονικών στρώσεων. Ο σχηματισμός κλώνων μπορεί να ελεγχθεί μέσω της επιλογής παραμέτρων της διεργασίας, όπως το πάχος του στρώματος, η ταχύτητα εκτύπωσης, ο ρυθμός τροφοδοσίας νήματος και η διαδρομή του εργαλείου [30]. Η επιλογή των παραμέτρων αποτελεί συμβιβασμό μεταξύ του χρόνου κατασκευής και της ποιότητας.

Η δυναμική της ροής του τήγματος από το στάδιο της εξώθησης μέχρι και την εναπόθεση σε μια τυπική διεργασία τρισδιάστατης εκτύπωσης μέσω FDM/FFF διακρίνεται στην Εικόνα 11.



Εικόνα 11. Δυναμική της ροής του τήγματος κατά την τρισδιάστατη εκτύπωση μέσω FDM/FFF

Συμπερασματικά τα υποσυστήματα της διαδικασίας FFF που συμβάλλουν στην τελική απόδοση του δεδομένου συστήματος είναι [113]:

- Μηχανισμός εξώθησης. Παρέχει την απαραίτητη δύναμη για την οδήγηση της πρώτης ύλης πολυμερούς μέσω του υγροποιητή και του ακροφυσίου με τον επιθυμητό ογκομετρικό ρυθμό. Τα περισσότερα συστήματα χρησιμοποιούν μια παραλλαγή ενός μηχανισμού οδοντωτών τροχών με εφαπτομενική κίνηση που κινείται από έναν ηλεκτρικό κινητήρα. Το όριο της δύναμης εξώθησης καθορίζεται από τη μέγιστη δύναμη που μπορεί να ασκηθεί στο νήμα πριν συμβεί αστοχία ολίσθησης ή διάτμησης στη διεπαφή κινητήριου τροχού-νήματος.
- Υγροποιητής. Καθορίζει το ρυθμό με τον οποίο η πρώτη ύλη, που τροφοδοτείται στον εκτυπωτή ως νήμα, μπορεί να θερμανθεί στη θερμοκρασία τήξης. Η χαμηλή θερμική αγωγιμότητα του πολυμερούς έχει ως αποτέλεσμα τον περιορισμό του ρυθμού ροής για τον οποίο η θερμότητα μπορεί να διεισδύσει στο νήμα, καθώς ο πυρήνας πρέπει να θερμανθεί επαρκώς για να περάσει στο ακροφύσιο χωρίς να προκαλέσει υπερβολική αύξηση της δύναμης εξώθησης και ταυτόχρονα πρέπει να είναι αρκετά λιωμένος για να προσκολληθεί στην προηγούμενη στρώση και να προσδώσει επαρκή αντοχή στο ενδιάμεσο στρώμα του εξαρτήματος.

- Σύστημα κίνησης. Αποτελεί το συνδυασμός κινητήρων και στοιχείων μετάδοσης που επιτρέπουν την επίπεδη κίνηση της κεφαλής εκτύπωσης. Η ταχύτητα της κεφαλής εκτύπωσης πρέπει να είναι ίση με την ταχύτητα εξώθησης, η οποία απαιτεί αυξανόμενη ικανότητα του κινητήρα όσο αυξάνεται ο ρυθμός τροφοδοσίας νήματος για μια σταθερή διάμετρο ακροφυσίου. Επίσης, το σύστημα κίνησης πρέπει να έχει τη δυναμική ακρίβεια που απαιτείται για την εκτέλεση της προγραμματισμένης διαδρομής εργαλείου στην επιθυμητή απόδοση.

2.1.3. Προϋποθέσεις Εκτύπωσης

Προκειμένου ένα υλικό να χρησιμοποιηθεί με επιτυχία σε μια διεργασία τρισδιάστατης εκτύπωσης με εξώθηση, πρέπει να πληρούνται μια σειρά από θεμελιώδεις προϋποθέσεις [119].

- Η εξώθηση υπό πίεση πρέπει να πραγματοποιείται μέσω ενός ακροφυσίου δεδομένης διαμέτρου με καθορισμένο ρυθμό ροής. Στο πιο βασικό επίπεδο για διεργασίες εναπόθεσης που βασίζονται στην εξώθηση, ένα υλικό πρέπει να ωθηθεί μέσα από ένα στόμιο με δεδομένο ρυθμό σε πίεση που είναι κάτω από το όριο του συστήματος. Για απλή ιξώδη ροή, αυτό εξαρτάται κυρίως από το ιξώδες του υλικού σε σχέση με το ρυθμό διάτμησης. Ένα υλικό θεωρείται ότι πληροί αυτήν την προϋπόθεση εάν μπορεί να επιτύχει τον απαιτούμενο ογκομετρικό ρυθμό ροής υπό την τυπική πίεση του συστήματος. Έτσι υπάρχει ένα συνεπακόλουθο κριτήριο επιτυχούς εκτύπωσης με βάση το οποίο εάν η υπολογισμένη πτώση πίεσης που απαιτείται για την επίτευξη του επιθυμητού ογκομετρικού ρυθμού ροής είναι μικρότερη από τη μέγιστη δυνατή πίεση συστήματος, το υλικό μπορεί να εξωθηθεί με επιτυχία χρησιμοποιώντας το καθορισμένο σύστημα εναπόθεσης. Εάν δεν πληρούνται τα κριτήρια εκτύπωσης, δεν σημαίνει απαραίτητα ότι το σύστημα εξώθησης θα φράξει, αλλά το υλικό δεν θα εξωθηθεί στην επιθυμητή ογκομετρική ροή. Στην περίπτωση της FFF, η πίεση του συστήματος δημιουργείται με την εφαρμογή δύναμης απευθείας στο υλικό τροφοδοσίας, επομένως η μέγιστη πίεση συστήματος γίνεται συνάρτηση της δυσκαμψίας και της γεωμετρίας του υλικού πρώτης ύλης καθώς και της μέγιστης ροπής που εφαρμόζεται από τους κινητήρες κίνησης.
- Το εξωθημένο υλικό πρέπει να έχει το επιθυμητό σχήμα. Υποθέτοντας ότι το υλικό θα ρέει έξω από το στόμιο εξώθησης, ο πρώτος στόχος είναι να σχηματιστεί ένας κλώνος (σφαιρίδιο) με σταθερή γεωμετρία. Κατά τον αρχικό σχηματισμό του σφαιριδίου, το υλικό μεταβαίνει από ένα κυκλικό στόμιο σε ένα πεπλατυσμένο ορθογώνιο σφαιρίδιο με καθορισμένο πλάτος και ύψος. Η ικανότητα ενός υλικού να διατηρεί το ορθογώνιο σχήμα αφού περάσει η κεφαλή εξώθησης εξαρτάται κυρίως από την επιφανειακή ενέργεια του υλικού. Για να σχηματιστεί μια αποδεκτή ημι-ορθογώνια γεωμετρία σφαιριδίων, το εξωθημένο υλικό πρέπει να μπορεί να διατηρεί ένα ελεύθερο ύψος τουλάχιστον ίσο με την απόσταση μεταξύ του υποστρώματος και του ακροφυσίου εξώθησης μόλις περάσει το ακροφύσιο εξώθησης. Αυτό το πάχος μπορεί εύλογα να εκτιμηθεί ως το «ύψος ελεύθερης τοποθέτησης» που θα αποκτούσε φυσικά ένα υλικό σε ένα υπόστρωμα όταν δεν υπόκειται σε εξωτερικές δυνάμεις. Το υποψήφιο υλικό πληροί αυτήν την προϋπόθεση εάν το υπολογιζόμενο ύψος ελεύθερης τοποθέτησης υπερβαίνει το επιθυμητό ύψος σφαιριδίων.

- Το εξωθημένο στρώμα πρέπει να μπορεί να γεφυρώνει ένα διάκενο συγκεκριμένου μήκους με το διπλανό στρώμα και να χρησιμεύσει ως μηχανικά υγιές υπόστρωμα. Υποθέτοντας ότι ένα υλικό εξωθείται και σχηματίζει ένα ελεύθερο κλώνο, υπάρχουν πρόσθετες λειτουργίες που απαιτούνται για μια επιτυχημένη εκτύπωση. Στις περισσότερες περιπτώσεις, η τρισδιάστατη εκτύπωση περιλαμβάνει πολύπλοκες γεωμετρίες που απαιτούν οι εναποτιθέμενοι κλώνοι να μπορούν να γεφυρώνουν επιτυχώς τα κενά πλήρωσης. Ο εναποτιθέμενος κλώνος πρέπει επίσης να χρησιμεύει ως στερεό υπόστρωμα για την εναπόθεση του επόμενου στρώματος και πρέπει να παρέχει επαρκή αντίσταση για να ανακατευθύνει τη ροή και να σχηματίζει το νέο σχήμα σφαιριδίου χωρίς να παραμορφώνεται σημαντικά. Ο κλώνος που χρησιμεύει ως υπόστρωμα έχει ένα σαφές πλεονέκτημα σε αυτή την περίπτωση, καθώς είναι γενικά σε θερμοκρασία χαμηλότερη από τη μετάβασης υάλου ή σε πιο προχωρημένη κατάσταση σκλήρυνσης κι έτσι δεν εκτίθεται σε διάτμηση. Ένα εναποτιθέμενο σφαιρίδιο πρέπει επίσης να χρησιμεύσει ως θεμέλιο για να υποστηρίξει το βάρος ενός σημαντικού αριθμού εναποτιθέμενων στρωμάτων πάνω από αυτό.
- Η εναποτιθέμενη δομή πρέπει να είναι γεωμετρικά σταθερή κατά τη μετάβαση στην τελική κατάσταση, ήτοι στη πλήρη στερεοποίηση σε θερμοκρασία δωματίου. Υποθέτοντας ότι τα επιμέρους εναποτιθέμενα σφαιρίδια είναι σταθερά και λειτουργικά, εξακολουθεί να είναι σημαντικό το συνολικό εξάρτημα να είναι δομικά σταθερό και ακριβές ως προς τις διαστάσεις. Μια εγγενής πρόκληση των τεχνολογιών τρισδιάστατης εκτύπωσης που βασίζονται σε θερμότητα είναι η ανάπτυξη υπολειμματικών τάσεων εντός του εξαρτήματος. Τα θερμοπλαστικά έχουν γενικά μεγάλους συντελεστές θερμικής διαστολής, το οποίο αποτελεί αιτία εξαιρετικής ανισοτροπίας για τα εξωθημένα υλικά. Η διαφορική συρρίκνωση που συμβαίνει μεταξύ των επόμενων στρωμάτων θα μπορούσε να εκδηλωθεί είτε σε μεγάλης κλίμακας παραμόρφωση στο συστατικό είτε σε τοπική εκτόνωση μέσω ρωγμάτωσης.

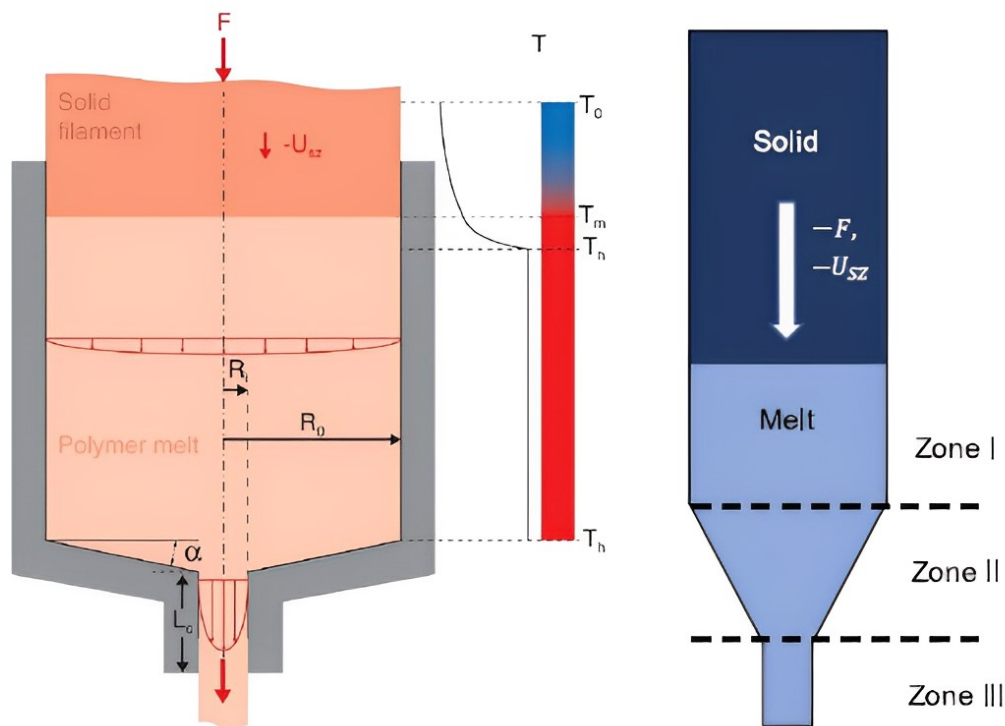
Από τις παραπάνω προϋποθέσεις, η τρέχουσα διπλωματική εστιάζει στην εξέταση και τη μελέτη της πρώτης κατά το στάδιο της εξώθησης, πριν την εναπόθεση. Παραμένει ωστόσο από τα σημαντικότερα κριτήρια επιτυχούς εκτύπωσης, καθώς το αποτυχημένο στάδιο εξώθησης επηρεάζει και τη διαδικασία της εναπόθεσης.

2.2. Ανασκόπηση Σύγχρονων Μοντέλων Ροής Πολυμερών

Με βάση τα προλεχθέντα, έχει καταστεί σαφές ότι ο έλεγχος και η παρακολούθηση των ρεολογικών ιδιοτήτων είναι υψίστης σημασίας προκειμένου να εξασφαλιστεί η εύκολη εξώθηση του τήγματος μέσω του ακροφυσίου. Οι προσομοιώσεις ροής τήγματος μπορούν να χωριστούν σε δύο τμήματα, τη διαδικασία εξώθησης και τη διαδικασία εναπόθεσης πάνω σε μια κλίση εκτύπωσης. Η τρέχουσα ενότητα στοχεύει να συνοψίσει την πρόσφατη πρόοδο στις προσομοιώσεις ροής τήγματος θερμοπλαστικών, οι οποίες εφαρμόζονται τόσο σε απλά όσο και σύνθετα πολυμερή από την είσοδο του νήματος στο(ν) θερμό άκρο (υγροποιητή) μέχρι την εξώθηση, πριν το στάδιο της εναπόθεσης. Μέσω αυτής της βιβλιογραφική ανασκόπησης, γεφυρώνεται το χάσμα ανάμεσα στις προκλήσεις που αντιμετωπίζει μέχρι και σήμερα η FFF και του υπό κατασκευή μοντέλο προσομοίωσης.

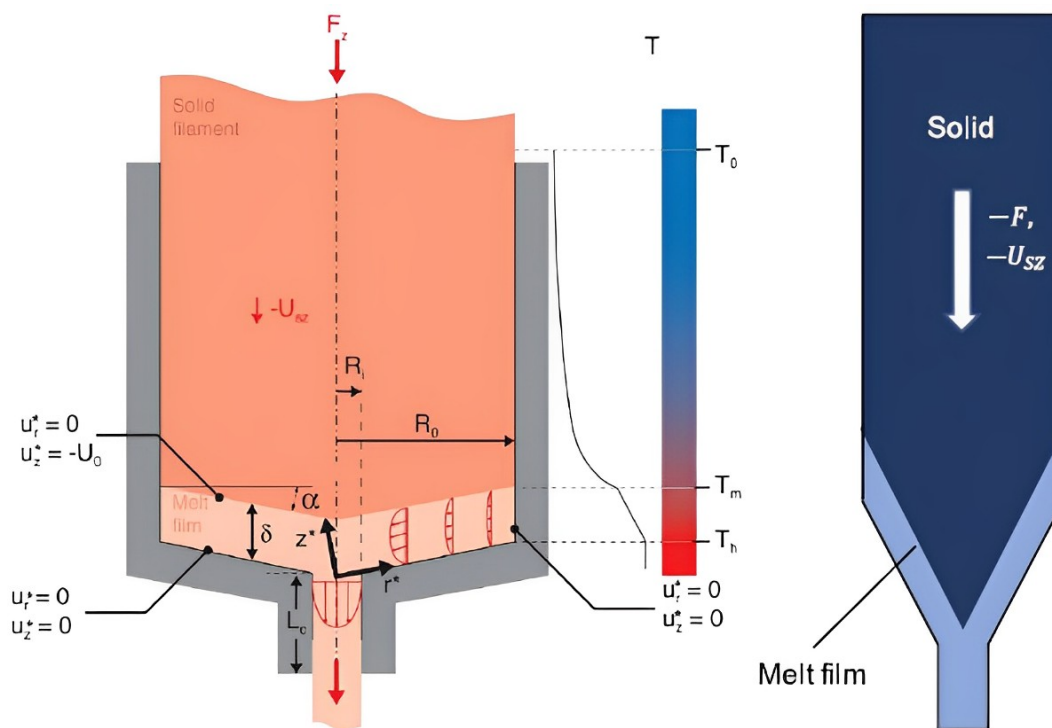
2.2.1. Αναλυτικά Μοντέλα

Ένα από τα πρώτα μοντέλα για τη ροή πολυμερούς μέσω του θερμού άκρου αναπτύχθηκε από Bellini et al. [120], όπου χρησιμοποιείται μια αναλυτική λύση για την πτώση πίεσης στην πλήρως ανεπτυγμένη ροή ενός ρευστού, που το ιξώδες του ακολουθεί νόμο δύναμης (εκθετικό) σχετικά με το ρυθμό διάτμησης, μέσω κυλινδρικών καναλιών και μιας κωνικής συστολής. Το μοντέλο συγκρίθηκε αργότερα με τις πειραματικές μετρήσεις από τους Anderegg et al. [121] όπου ένας μεταλλάκτης πίεσης τοποθετήθηκε μέσα στο κανάλι του υγροποιητή. Η σύγκριση αποκάλυψε ότι το μοντέλο των Bellini et al. υποτιμάει τη μετρούμενη πίεση κατά περίπου 30%. Ένα διαφορετικό αναλυτικό μοντέλο για την πτώση πίεσης στο θερμό άκρο προτάθηκε από Phan et al. [122] όπου συμπεριλήφθηκαν φαινόμενα εκτατικού ιξώδους στο τμήμα συστολής του ακροφυσίου. Το μοντέλο ρυθμίστηκε προσαρμόζοντας το λόγο Trouton, δηλαδή το λόγο εκτατικού ιξώδους προς ιξώδες διάτμησης, στις μετρήσεις της πτώσης πίεσης σε έναν κοχλία εξώθησης. Στην ίδια εργασία, η πτώση πίεσης μέσα στο ακροφύσιο ενός τρισδιάστατου εκτυπωτή υπολογίστηκε χρησιμοποιώντας μετρήσεις της κατανάλωσης ισχύος του βηματικού κινητήρα που κινεί τον εξωθητή. Τα μοντέλα των Bellini και Phan συγκρίθηκαν με τις μετρήσεις της δύναμης τροφοδοσίας από τους Nienhaus et al. [123] και βρέθηκε ότι και οι δύο αναλυτικές λύσεις δεν προβλέπουν με ακρίβεια την εξάρτηση της δύναμης τροφοδοσίας από τον ρυθμό τροφοδοσίας. Επιπλέον, οι μετρήσεις των Nienhaus et al. έδειξαν ότι η δύναμη τροφοδοσίας γίνεται ασταθής σε υψηλούς ρυθμούς τροφοδοσίας, πιθανώς λόγω ανεπαρκούς τήξης του πυρήνα του νήματος. Η βασική αρχή της ροής του μοντέλου του Bellini αναπαρίσταται στην Εικόνα 12.



Εικόνα 12. Μοντέλο τήξης και ροής που προτείνεται από τους Bellini et al. [124]; T_0 , T_m , T_h είναι η αρχική θερμοκρασία, η θερμοκρασία τήξης του πολυμερούς και η τιθέμενη θερμοκρασία θέρμανσης από το θερμό άκρο αντίστοιχα, με την κατανομή θερμοκρασίας του πολυμερούς στο θερμό άκρο να είναι ομοιόμορφη.

Στα μοντέλα των Bellini και Phan, υποτέθηκε ότι το κανάλι ροής είναι εξ ολοκλήρου γεμάτο με το λιωμένο πολυμερές. Αυτό ήρθε σε αντίθεση με το μεταγενέστερο μοντέλο των Osswald et al. [125] όπου υποστηρίχθηκε ότι αυτή η υπόθεση εκπληρώνεται μόνο σε χαμηλούς ρυθμούς τροφοδοσίας νήματος, ενώ για τυπικές συνθήκες λειτουργίας σε FFF, υπάρχει ένα κενό μεταξύ του τοιχώματος του υγροποιητή και του εισερχόμενου νήματος. Το διάκενο περιορίζει τη μεταφορά θερμότητας και καθυστερεί την τήξη του πολυμερούς. Ως εκ τούτου, το νήμα λιώνει μόνο στην κάτω επιφάνεια του υγροποιητή δημιουργώντας ένα λεπτό στρώμα υγρού πολυμερούς. Έτσι πρότειναν ένα αναλυτικό μοντέλο που εξηγεί αυτό το φαινόμενο και το συνέκριναν με τις μετρήσεις από μια ειδικά σχεδιασμένη διάταξη εξώθησης. Ωστόσο, η μελέτη στερείται σύγκρισης με μετρήσεις από έναν πραγματικό εκτυπωτή FFF. Η βασική αρχή της ροής του μοντέλου του Osswald αναπαρίσταται στην Εικόνα 13.



Εικόνα 13. Βελτιωμένο μοντέλο Osswald et al. [124]; T_0 , T_m , T_h είναι η αρχική θερμοκρασία, η θερμοκρασία τήξης του πολυμερούς και η τιθέμενη θερμοκρασία θέρμανσης από το θερμό άκρο αντίστοιχα στο οποίο μια μικρή μεμβράνη τήγματος στην επιφάνεια της κωνικής τομής παίζει σημαντικό ρόλο στον μετασχηματισμό φάσης

Οι Peng et al. [126] παρουσίασαν απεικονίσεις του προφίλ ροής εντός του θερμού άκρου. Έκαναν σαρώσεις τομογραφίας με υπολογιστή (CT) του ακροφυσίου με στερεοποιημένο χρωματισμένο νήμα στο εσωτερικό, το οποίο επέτρεψε τις παρατηρήσεις του πεδίου ροής. Παρατήρησαν ότι το μετρούμενο προφίλ ταχύτητας αποκλίνει από την αναλυτική λύση της πλήρως ανεπτυγμένης ροής ενός ρευστού με ιξώδες του ακολουθεί εκθετικό νόμο δύναμης, πιθανώς λόγω των ακτινικών διαβαθμίσεων θερμοκρασίας που δεν λαμβάνονται υπόψη στο αναλυτικό μοντέλο. Επιπλέον, στην ίδια εργασία, εισήγαγαν ένα θερμοστοιχείο μέσα στο κανάλι για τη μέτρηση της θερμοκρασίας του πολυμερούς κατά τη διάρκεια της ροής. Βρήκαν ότι η θερμοκρασία αυξάνεται γρήγορα κατά τη διάρκεια της θερμικής διακοπής και ότι η μέγιστη θερμοκρασία εξαρτάται από τον ρυθμό τροφοδοσίας του νήματος.

2.2.2. Αριθμητικά Μοντέλα

Οι αριθμητικές προσομοιώσεις αποτελούν ένα ελκυστικό εργαλείο για τη μελέτη των διαδικασιών παραγωγής. Μπορούν να χειριστούν πιο πολύπλοκα φυσικά φαινόμενα σε σύγκριση με τα αναλυτικά μοντέλα και είναι συχνά πιο εύκολο να εκτελεστούν από τις πειραματικές μετρήσεις. Ωστόσο, λόγω της πολυπλοκότητας της ροής στην FFF, έχουν γίνει μόνο λίγες αριθμητικές μελέτες που προσομοιώνουν τη ροή μέσω του θερμού άκρου. Μια πρόωμη μελέτη των Ramanath et al. [127] προσομοιώνει μια μη ισοθερμοκρασιακή ροή ενός ρευστού που το ιξώδες του ακολουθεί νόμο δύναμης στο θερμό άκρο χρησιμοποιώντας υπολογιστική ρευστομηχανική (CFD). Προσομοιώθηκε η εξάρτηση της πτώσης πίεσης από τη διάμετρο του ακροφυσίου και τη γωνία συστολής του ακροφυσίου. Ωστόσο, δεν παρασχέθηκε πειραματική επικύρωση.

Οι Pigeonneau et al. [118] πραγματοποίησαν προσομοιώσεις CFD για να μοντελοποιηθεί η θέρμανση του πολυμερούς κατά τη ροή μέσω του θερμού άκρου. Χρησιμοποίησαν τις μετρήσεις των Peng et al. [126] για να επικυρώσουν τις προσομοιώσεις τους και κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι το πολυμερές πρέπει να βρίσκεται σε τέλεια επαφή με το τοίχωμα του υγροποιητή προκειμένου να φτάσει τις θερμοκρασίες που μετρήθηκαν από τους Peng et al. Αυτό το συμπέρασμα έρχεται σε αντίθεση με το έργο των Phan et al., όπου διαπίστωσε ότι η θερμοκρασία του πολυμερούς στην έξοδο είναι χαμηλότερη από τη θερμοκρασία του υγροποιητή λόγω περιορισμών μεταφοράς θερμότητας στους υψηλότερους ρυθμούς τροφοδοσίας. Οι Phan et al. πρότειναν ότι η παρουσία παλιού αποικοδομημένου πολυμερούς στην επιφάνεια του καναλιού, γνωστή ως ρύπανση, μπορεί να είναι υπεύθυνη για την ατελή θερμική επαφή.

Οι Go et al. [128] προσομοίωσαν τη ροή ενός γενικευμένου νευτώνειου ρευστού με ιξώδες εξαρτώμενο από τη διάτμηση και τη θερμοκρασία μέσω του θερμού άκρου. Επικεντρώθηκαν στον εντοπισμό της εξάρτησης της δύναμης τροφοδοσίας από τον ρυθμό τροφοδοσίας του νήματος, τη διάμετρο του ακροφυσίου και το μήκος του υγροποιητή. Ωστόσο, τα αριθμητικά αποτελέσματα δεν συγκρίθηκαν με τις πειραματικές μετρήσεις, επομένως είναι άγνωστο εάν καταγράφηκαν όλες οι σημαντικές πτυχές της ροής. Έπειτα, οι Phan et al. [129] παρουσίασαν μια ανάλυση CFD της ροής θερμού άκρου, όπου χρησιμοποίησαν μια μη ισοθερμοκρασιακή προσομοίωση με ανελαστικό μοντέλο μη νευτώνειου ρευστού μέσω του υγροποιητή και μια ισοθερμοκρασιακή προσομοίωση ενός ιξωδοελαστικού ρευστού μέσα στο ακροφύσιο. Παρατήρησαν ότι το μεγαλύτερο μέρος της πτώσης πίεσης μέσω του θερμού άκρου συμβαίνει στην άκρη του ακροφυσίου όπου το κανάλι έχει τη μικρότερη διάμετρο. Επιπλέον, η προσομοίωση έδειξε την παρουσία μιας δίνης ανακυκλοφορίας στην είσοδο του υγροποιητή. Ωστόσο, δεν έγινε σύγκριση με τις μετρήσεις της πτώσης πίεσης μέσω του θερμού άκρου.

Οι περισσότερες από τις παρουσιαζόμενες αριθμητικές μελέτες στερούνται σύγκρισης με πειραματικές μετρήσεις. Έτσι, είναι αβέβαιο εάν η φυσική που περιλαμβάνεται στην ανάλυση είναι επαρκής και τα αποτελέσματα ακριβή. Το πιο σημαντικό είναι ότι όλα τα αριθμητικά μοντέλα και οι περισσότερες από τις αναλυτικές λύσεις (εκτός από του Osswald et al.) υποθέτουν ότι ολόκληρο το κανάλι είναι γεμάτο με τηγμένο πολυμερές. Ωστόσο, καθώς η διάμετρος του νήματος είναι συνήθως μικρότερη από τη διάμετρο του καναλιού, αναμένεται ότι υπάρχει ένα διάκενο αέρα μεταξύ των δύο που περιορίζει τη μεταφορά θερμότητας καθώς και τη διατμητική τάση στον τοίχο.

Σε πιο πρόσφατες μελέτες, έχει διερευνηθεί η διαδικασία πλήρωσης για το διάκενο μεταξύ του νήματος πολυμερούς και του εσωτερικού τοιχώματος του καναλιού θερμού άκρου. Οι Serdeczny et al. [130] και Marion et al. [131] βελτίωσαν το γεωμετρικό μοντέλο και εφάρμοσαν ένα πολυφασικό μοντέλο για να χαρακτηρίσουν τη διαδικασία πλήρωσης κενών. Η σύγκριση μεταξύ των δύο μοντέλων χωρίς και με τη διαδικασία πλήρωσης κενού, δείχνει ότι απαιτείται περισσότερος χρόνος για να επιτευχθεί η σταθερή κατάσταση για να σχηματιστεί μια σταθερή περιοχή αντίστροφης ροής λόγω της διαδικασίας πλήρωσης κενού. Ωστόσο, διαπιστώθηκε ότι όταν ο ρυθμός τροφοδοσίας είναι υψηλότερος από ένα ορισμένο όριο, η θέση της περιοχής αντίστροφης ροής στο νέο μοντέλο δεν θα παραμείνει σταθερή. Διαφορετικά, δεν υπάρχει διαφορά μεταξύ των δύο μοντέλων. Σε υψηλούς ρυθμούς τροφοδοσίας, η ακτινική θερμική αγωγιμότητα δεν θα είναι επαρκής ώστε να λιώσει το πολυμερές εγκαίρως και το νήμα μπορεί να ωθηθεί απευθείας προς τα κάτω στο κανάλι. Όταν το νήμα έρχεται σε επαφή με το κωνικό τμήμα του ακροφυσίου, η πίεση που εφαρμόζεται στο πολυμερές γίνεται μεγαλύτερη. Στη συνέχεια, δημιουργείται η αντίστροφη ροή για να γεμίσει το κενό προς τα πάνω και να αυξήσει την περιοχή επαφής μεταξύ του τοιχώματος του νήματος και του υγροποιητή, γεγονός που αυξάνει τη θερμοκρασία τήγματος και μειώνει το ιξώδες και τη συνολική πίεση. Αυτή η διακύμανση του επιπέδου πλήρωσης του κενού επαναλαμβάνεται ενώ το νήμα τροφοδοτείται. Εν τω μεταξύ, οι Hong Y et al. [132] έχουν παρατηρήσει αυτά τα φαινόμενα χρησιμοποιώντας ένα διαφανές ακροφύσιο. Επιπλέον, διαπιστώθηκε ότι η διακύμανση του επιπέδου πλήρωσης κενού συμβαίνει όταν ο ρυθμός τροφοδοσίας είναι πέρα από ένα όριο. Ένας πολύ υψηλός ρυθμός τροφοδοσίας θα προκαλέσει υπερχειλίση από το θερμό άκρο και θα φράξει την κεφαλή εκτύπωσης.

Συνοψίζοντας τις σχετικές μελέτες και τα αριθμητικά μοντέλα τήξης που έχουν προταθεί, ακολουθείται πάντα μια τυπική διαδικασία για την κατασκευή μοντέλων υπολογιστικής δυναμικής ρευστών (CFD). Η διαδικασία μοντελοποίησης περιλαμβάνει μοντελοποίηση γεωμετρίας υγροποιητή κι ακροφυσίου, επιλογή μοντέλου ροής ρευστού, ορισμό ιδιοτήτων υλικού, ορισμό συνοριακών συνθηκών και επιλογή αριθμητικών μεθόδων. Η επιλογή των μοντέλων ροής ρευστού εξαρτάται από τον αριθμό Reynolds. Σε ένα τυπικό σενάριο, η διάμετρος εξόδου του ακροφυσίου, η ταχύτητα εξόδου και η πυκνότητα πολυμερούς είναι από 0.4 mm, 120 mm/s και 1000 Kg/m³, αντίστοιχα. Λαμβάνοντας υπόψη και το πολύ μεγάλο ιξώδες των πολυμερών ο αριθμός Reynolds είναι μικρότερος από ένα, επομένως η ροή του ρευστού είναι στρωτή. Αναφορικά με τον καθορισμό των ιδιοτήτων του υλικού, οι βασικές θερμοφυσικές και ρεολογικές ιδιότητες που πρέπει να ληφθούν υπόψη είναι η πυκνότητα, το ιξώδες, η ειδική θερμότητα και η θερμική αγωγιμότητα. Για τα άμορφα πολυμερή πρέπει να ληφθεί υπόψη η θερμοκρασία μετάπτωσης υάλου, ενώ για ημικρυσταλλικά πολυμερή η ενθαλπία τήξης και η θερμοκρασία τήξης.

Σχετικά με τα αποτελέσματα που έχουν προκύψει από τα περισσότερα μοντέλα που έχουν προταθεί, απαντώνται ορισμένες ομοιότητες μεταξύ τους. Η βασικότερη εξ αυτών αφορά την πτώση πίεσης, όπου σε όλες τις μελέτες φαίνεται να συμβαίνει κυρίως στο κωνικό τμήμα του ακροφυσίου και το μέγεθος της πτώσης πίεσης είναι ανάλογο με τον ρυθμό τροφοδοσίας του πολυμερούς. Αναφορικά με τη θέση της διεπαφής στερεού-υγρού που σχετίζεται με την κατανομή της θερμοκρασίας, αυτή μετακινείται προς την έξοδο του ακροφυσίου με αύξηση του ρυθμού τροφοδοσίας. Έτσι, το νήμα πολυμερούς είναι επιρρεπές να φράξει το ακροφύσιο με υψηλό ρυθμό τροφοδοσίας λόγω ανεπαρκούς τήξης.

2.3. Διέπουσες Εξισώσεις Ροής Πολυμερών

Στην τρέχουσα ενότητα παρουσιάζονται οι εξισώσεις που διέπουν τη ροή του πολυμερούς και χρησιμοποιούνται στα αριθμητικά μοντέλα της διαδικασίας FFF.

2.3.1. Δυναμική της Ροής του Πολυμερούς

Η δυναμική της ροής του πολυμερούς κατά τη διάρκεια της FFF μπορεί γενικά να εκφραστεί μέσω της εξίσωσης συνέχειας ή νόμο διατήρησης μάζας και της γενικευμένης Navier-Stokes, όπως φαίνεται στην Εξίσωση 2.1 και 2.2 αντίστοιχα [130].

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \cdot \mathbf{u}) = 0 \quad (2.1)$$

$$\rho \cdot \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho \cdot (\mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u}) = \nabla \left[-P \cdot \mathbf{I} + \mathbf{u} \cdot (\nabla \mathbf{u} + \nabla \mathbf{u}^T) - \frac{2}{3} \mu (\nabla \cdot \mathbf{u}) \mathbf{I} \right] + \rho \mathbf{g} + \mathbf{F}_{st} + \mathbf{F} \quad (2.2)$$

Στη περίπτωση στρωτής ροής, λόγω πολύ χαμηλού αριθμού Reynolds, όπως στη περίπτωση της μελέτης που πραγματοποιείται, η εξίσωση Navier-Stokes της Εξίσωσης 2.2 εκφυλίζεται στη μορφή της Εξίσωσης 2.3. Το πρώτο μέλος της Εξίσωσης 2.2 δίνει τη χρονική μεταβολή ορμής και τη μεταφορά ορμής (ανά μονάδα όγκου) σ' ένα όγκο ρευστού, λόγω των αδρανειακών φαινομένων. Οι όροι στο δεξί μέλος συνιστούν το άθροισμα των δυνάμεων που ασκούνται στον όγκο του ρευστού (ανά μονάδα όγκου), λόγω πίεσης P , ιξωδών και ελαστικών τάσεων $\bar{\boldsymbol{\tau}}$, βαρύτητας \mathbf{g} , επιφανειακών δυνάμεων \mathbf{F}_{st} και εξωτερικών δυνάμεων \mathbf{F} [133].

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} \right) = -\nabla P \cdot \mathbf{I} + \nabla \cdot \bar{\boldsymbol{\tau}} + \rho \mathbf{g} + \mathbf{F}_{st} + \mathbf{F} \quad (2.3)$$

Ο τανυστής της τάσης $\bar{\boldsymbol{\tau}}$ δίνεται από την εξίσωση 2.4 με μ το δυναμικό ιξώδες του πολυμερούς [133].

$$\bar{\boldsymbol{\tau}} = \mu \cdot \dot{\boldsymbol{\gamma}} \quad (2.4)$$

Ο τανυστής του ρυθμού παραμόρφωσης $\dot{\boldsymbol{\gamma}}$ εκφράζεται μέσω της εξίσωσης 2.5 [133].

$$\dot{\boldsymbol{\gamma}} = \nabla \mathbf{u} + \nabla \mathbf{u}^T \quad (2.5)$$

Στο κυλινδρικό σύστημα συντεταγμένων, όπου πραγματοποιείται η μοντελοποίηση της ροής, λόγω της γεωμετρίας του ακροφυσίου, η συνιστώσα $\nabla \mathbf{u}$ εκφράζεται μέσω της Εξίσωσης 2.6 [133].

$$\nabla \mathbf{u} = \begin{bmatrix} \frac{\partial u_r}{\partial r} & \frac{\partial u_r}{\partial \varphi} & \frac{\partial u_r}{\partial z} \\ \frac{\partial u_\varphi}{\partial r} & \frac{\partial u_\varphi}{\partial \varphi} & \frac{\partial u_\varphi}{\partial z} \\ \frac{\partial u_z}{\partial r} & \frac{\partial u_z}{\partial \varphi} & \frac{\partial u_z}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

2.3.2. Μεταφορά Θερμότητας

Η διατήρηση της ενέργειας, η οποία καθορίζει την εξέλιξη της θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια της διαδικασίας εκφράζεται μέσω της Εξίσωσης 2.7. Το πρώτο μέλος αποτελείται από τον ασταθή όρο του χρονικού ρυθμού μεταβολής θερμότητας (ανά μονάδα όγκου) και τον όρο του χωρικού ρυθμού (ανά μονάδα όγκου) προσαγωγής θερμότητας στο πολυμερές στην κατεύθυνση της ταχύτητας ροής. Οι δύο όροι στο δεξί μέλος εκφράζουν τη μεταφορά θερμότητας με αγωγή και την παραγωγή θερμότητας λόγω της ιξώδους διασποράς, αντίστοιχα [134].

$$\frac{\partial(\rho \cdot c_p \cdot T)}{\partial t} + \nabla(\rho c_p \cdot \mathbf{u} \cdot T) = \nabla(k \cdot \nabla T) + \bar{\boldsymbol{\tau}} : \dot{\boldsymbol{\gamma}} \quad (2.7)$$

Ο όρος ιξώδους διασποράς (ή παραγωγής θερμότητας λόγω ιξώδους τριβής) εκφράζεται μέσω της εξίσωσης 2.8. Ωστόσο, έχει αμελητέα επίδραση στη διαδικασία FFF [135].

$$\bar{\boldsymbol{\tau}} : \dot{\boldsymbol{\gamma}} = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \tau_{ij} \cdot \dot{\gamma}_{ij} \quad (2.8)$$

Η σχέση των δύο όρων στο 2^ο μέλος της Εξίσωσης 2.7 μπορεί να βρεθεί αν υπολογιστεί ο αδιάστατος αριθμός Nahme-Griffith, ο οποίος εκφράζει τη θερμότητα που οφείλεται στην ιξώδη διασπορά σε σχέση με τη θερμότητα λόγω αγωγής. Για την πλειονότητα των συνθηκών που εμφανίζονται στην FFF, ο αριθμός Na είναι πολύ κάτω από τη μονάδα, υποδεικνύοντας ότι η ιξώδης παραγωγή θερμότητας δεν έχει σημαντική επίδραση, παρά μόνο στην είσοδο του υγροποιητή όπου το ιξώδες είναι πολύ υψηλό [136].

Για μια απλοποιημένη γεωμετρία υγροποιητή μονοκατευθυντικής ροής, όπου ισχύει αξονοσυμμετρία με θέρμανση κατά την ακτινική κατεύθυνση, είναι $u = u_{rz}$. Έτσι στην Εξίσωση 2.7 της διατήρησης ενέργειας μπορεί να αγνοηθεί τόσο ο 2ος όρος του 1ου μέλους καθώς δεν υπάρχει προσαγωγή θερμότητας στη z κατεύθυνση, όσο και ο όρος παραγωγής θερμότητας λόγω ιξώδους τριβής στο 2ο μέλος ως πολύ μικρός. Υποθέτοντας, λοιπόν, μόνο ακτινική ροή θερμότητας και καμία πηγή θερμότητας η Εξίσωση 2.7 στο κυλινδρικό σύστημα έχει τη μορφή της Εξίσωσης 2.9, με το συντελεστή θερμικής διαχυτότητας του υλικού α [137].

$$\rho \cdot c_p \frac{\partial T}{\partial t} = k \cdot \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right) \right] \quad \text{ή} \quad \frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right) \right] \quad (2.9)$$

Αξίζει να σημειωθεί ότι ενώ η Εξίσωση 9 περιγράφει τη φυσική της θέρμανσης εντός του υγροποιητή, μπορεί να συμβεί πρόσθετη θέρμανση στις περιοχές σύγκλισης και ακροφυσίου, το οποίο αναμένεται να απαιτεί σημαντικά μεγαλύτερη δύναμη λόγω της εξαιρετικά μη γραμμικής σχέσης μεταξύ ιξώδους και θερμοκρασίας για τα θερμοπλαστικά. Επομένως, ένας πρωταρχικός στόχος σχεδιασμού είναι να επιτευχθεί πλήρης θέρμανση του νήματος στον υγροποιητή.

Υποθέτοντας διατήρηση μάζας και όγκου κατά τη διαδικασία εξώθησης, η ογκομετρική παροχή Q του υγροποιητή μπορεί να εκφραστεί όπως στην εξίσωση 2.10 [137].

$$Q \cong \alpha \cdot L \quad (2.10)$$

Από αυτό μπορεί να συναχθεί το συμπέρασμα ότι, σε μια πρώτη προσέγγιση, ο ρυθμός τροφοδοσίας νήματος που εκφράζει και το ρυθμό δόμησης του τελικού προϊόντος είναι γραμμικά ανάλογος με το μήκος του υγροποιητή και ανεξάρτητος από τη διάμετρο του νήματος.

Σχετικά με τη ροή θερμότητας μεταξύ του τοιχώματος του καναλιού και του ρευστού πολυμερούς, αυτή διέπεται κυρίως από τη μεταφορά θερμότητας με συναγωγή σύμφωνα με την Εξίσωση 2.11. Ο όρος q'_w συνιστά την προσαγόμενη στο πολυμερές από το τοίχωμα θερμική ισχύ ανά μονάδα επιφάνειας, T είναι η θερμοκρασία του ρευστού, T_w η θερμοκρασία του τοιχώματος και h_L ο τοπικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή στο τοίχωμα του καναλιού. Ο συντελεστής τοπικής μεταφοράς θερμότητας αντιπροσωπεύει τη θερμική αντίσταση της διεπαφής στερεού υγρού και η τιμή του υπολογίζεται μέσω πειραματικών δεδομένων [138].

$$q'_w = h_L \cdot (T_w - T) \quad (2.11)$$

Στο πάνω μέρος του τμήματος εισόδου του ακροφυσίου κατά τη θέρμανση του στερεού εισαχθέντος νήματος, συμβάλλει και η μεταφορά θερμότητας από το τοίχωμα λόγω ακτινοβολίας που διέπεται από την Εξίσωση 2.12 [139], όπου q_r η ροή θερμότητας με ακτινοβολία, σ η σταθερά Stefan-Boltzmann και ϵ_w και ϵ_f η ικανότητα εκπομπής του τοιχώματος και της επιφάνειας του νήματος αντίστοιχα.

$$q_r = \frac{\sigma \cdot (T^4 - T_w^4)}{\frac{1}{\epsilon_w} + \left(\frac{1}{\epsilon_f} - 1\right)} \quad (2.12)$$

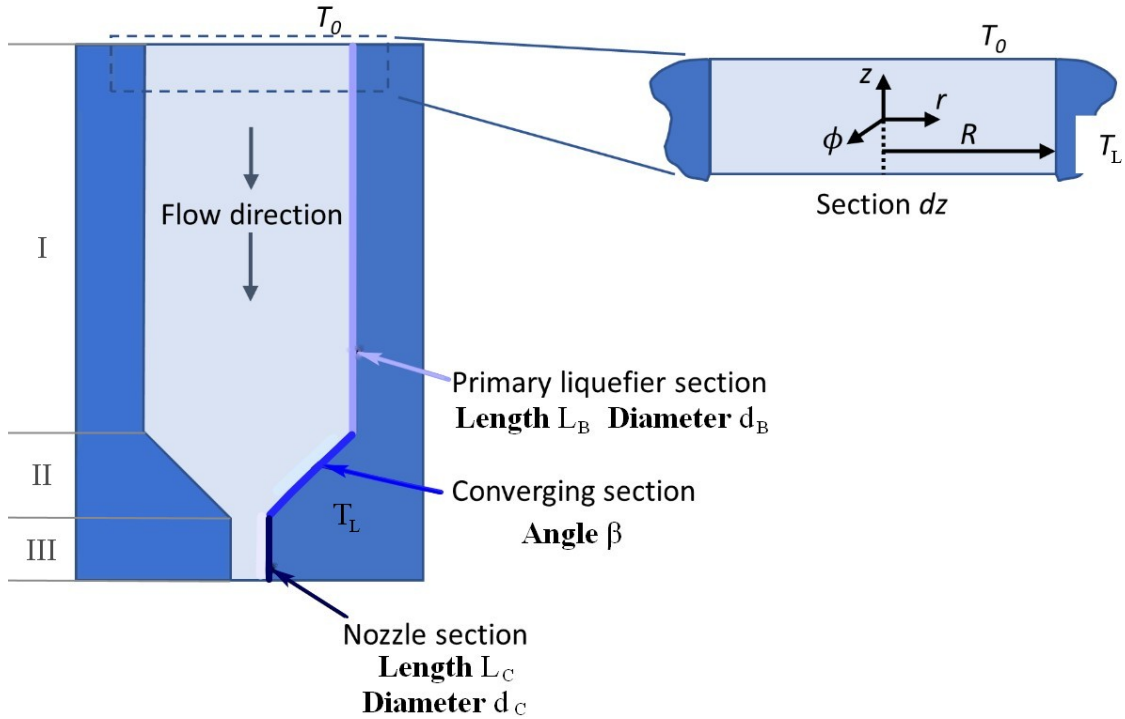
2.3.3. Αναλυτικές Συσχετίσεις Κρίσιμων Παραμέτρων

Από τις σημαντικότερες παραμέτρους της τρισδιάστατης εκτύπωσης με τη μέθοδο FFF που είναι υπό διερεύνηση, συνιστούν η δύναμη εξώθησης κι η μέγιστη ογκομετρική παροχή.

Η δύναμη τροφοδοσίας μπορεί να υπολογιστεί αναλυτικά με δεδομένη την ολική πτώση πίεσης στον υγροποιητή. Μια απλοποιημένη γεωμετρία ενός τυπικού υγροποιητή της Εικόνας 2.14 μπορεί να μοντελοποιηθεί ως επίπεδη αξονοσυμμετρική με μονοκατευθυντική ροή, επομένως είναι $u = u_{rz}$. Έτσι η z συνιστώσα της Εξίσωσης 2.3 Navier-Stokes απλοποιείται στη μορφή της Εξίσωσης 2.13 [137], απ' όπου υπολογίζεται η ακτινική κατανομή της ταχύτητας σε ορισμένη αξονική απόσταση z του ρευστού πολυμερούς στα κυλινδρικά τμήματα του υγροποιητή (κάνη I και τριχοειδές ακροφύσιο III). Αγνοούνται οι αδρανειακές δυνάμεις του 1^{ου} μέλους λόγω του πολύ μικρού αριθμού $Re \ll 1$, που οφείλεται στο μεγάλο ιξώδες. Επιπλέον αγνοείται η βαρύτητα και οι δυνάμεις επιφανειακής τάσης. Ο τανυστής της τάσης στην αντίστοιχη κατεύθυνση τ_{rz} ορίζεται στην Εξίσωση 2.14 [137].

$$0 = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\partial \tau_{rz}}{\partial r} \right) \quad (2.13)$$

$$\tau_{rz} = \mu \cdot \frac{\partial u_{rz}}{\partial r} \quad (2.14)$$



Εικόνα 14. Απλοποιημένη επίπεδη αξονοσυμμετρική γεωμετρία υγροποιητή

Στα μη Νευτώνεια ρευστά το δυναμικό ιξώδες μ αναφέρεται ως φαινόμενο ιξώδες μ_α γιατί η τιμή του ορίζεται μόνο σε συγκεκριμένο (φαινόμενο) ρυθμό διάτμησης $\dot{\gamma}_\alpha$, ενώ μόνο στα Νευτώνεια ρευστά είναι σταθερό και θεωρείται ιδιότητα του ρευστού. Στα πολυμερή ως μη Νευτώνεια ρευστά, το ιξώδες μειώνεται με το ρυθμό διάτμησης, το οποίο ορίζεται ως συμπεριφορά λέπτυνσης διάτμησης, σύμφωνα με τον εκθετικό νόμο ή νόμο δύναμης, όπως φαίνεται στην Εξίσωση 2.15 [137], όπου $m(T)$ ο δείκτης συνέπειας του ρευστού που εκφράζει τη δυσκολία στη ρευστότητα, και n ο δείκτης ψευδοπλαστικότητας με τιμές $0 < n < 1$.

$$\mu_\alpha = m(T) \cdot \dot{\gamma}^{n-1} \quad (2.15)$$

Από τη λύση της απλοποιημένης εξίσωσης Navier – Stokes προκύπτει η Εξίσωση 2.16, με r το διάνυσμα της ακτινικής κατεύθυνσης και R την ακτίνα του υγροποιητή στη θέση αυτή [137].

$$u_z(r) = \frac{3n+1}{n+1} \hat{V} \cdot \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^{\frac{1+n}{n}} \right] \quad (2.16)$$

Η μέση ταχύτητα εισόδου \hat{V} ορίζεται στην Εξίσωση 2.17 [137].

$$\hat{V} = \frac{n}{3n+1} \left[\frac{R^{n+1}}{2m} \left(\frac{\Delta p}{L} \right) \right]^{\frac{1}{n}} \quad (2.17)$$

Για $r=0$ κατά μήκος του άξονα φαίνεται από την Εξίσωση 2.18 ότι η ταχύτητα μεγιστοποιείται.

$$V_{max} = \frac{3n + 1}{n + 1} \hat{V} \quad (2.18)$$

Ο ρυθμός διάτμησης προσδιορίζεται με παραγωγή της εξίσωσης ταχύτητας και προκύπτει όπως στην Εξίσωση 2.19 [137].

$$\dot{\gamma} = \frac{du}{dr} = \frac{3n + 1}{n \cdot R} \cdot \hat{V} \cdot \left[\left(\frac{r}{R} \right)^{\frac{1+n}{n} - 1} \right] \quad (2.19)$$

Η μέγιστη ταχύτητα διάτμησης που βρίσκεται στο εσωτερικό τοίχωμα του ακροφυσίου, προκύπτει όπως στην Εξίσωση 2.20 για $r=R$, με Q τον ογκομετρικό ρυθμό ροής και d τη διάμετρο του ακροφυσίου [137].

$$\dot{\gamma}_w = \frac{3n + 1}{n \cdot R} \cdot \hat{V} = \frac{8 \cdot (3n + 1) \cdot Q}{n \cdot \pi \cdot d^3} \quad (2.20)$$

Η μέγιστη τάση διάτμησης στο τοίχωμα του ακροφυσίου προκύπτει στην Εξίσωση 2.21 [137].

$$\tau_w = \mu_\alpha \cdot \dot{\gamma}_w = m \cdot \dot{\gamma}_w^{n-1} \cdot \dot{\gamma}_w = m(T) \left[\frac{8 \cdot (3n + 1) \cdot Q}{n \cdot \pi \cdot d^3} \right]^n \quad (2.21)$$

Από την ισορροπία δύναμης διάτμησης στο τοίχωμα και δύναμης λόγω πίεσης προκύπτει η Εξίσωση 2.22, όπου ΔP η πτώση πίεσης, L το μήκος και d η διάμετρος του ακροφυσίου.

$$\tau_w \cdot (\pi \cdot d \cdot L) = \Delta P \cdot \frac{\pi d^2}{4} \quad (2.22)$$

Εξισώνοντας τα δεύτερα μέλη των Εξισώσεων 2.21 και 2.22 προκύπτει στις Εξισώσεις 2.23 και 2.24 η πτώση πίεσης στα τμήματα I και III του ακροφυσίου αντίστοιχα, όπως φαίνονται στην Εικόνα 14, με το δείκτη c να συμβολίζει το τριχοειδές ακροφύσιο (τμήμα III) και το B το κυλινδρικό τμήμα (τμήμα I) [140].

$$\Delta P_B = m(T) \cdot \left[\frac{3n + 1}{4n} \cdot \frac{32Q}{\pi d_B^3} \right]^n \cdot \frac{4L_B}{d_B} \quad (2.23)$$

$$\Delta P_C = m(T) \cdot \left[\frac{3n + 1}{4n} \cdot \frac{32Q}{\pi d_C^3} \right]^n \cdot \frac{4L_C}{d_C} \quad (2.24)$$

Για το κωνικό τμήμα του υγροποιητή γωνίας β (τμήμα II), η πτώση πίεσης υπολογίζεται σύμφωνα με το μοντέλο Bellini στην Εξίσωση 2.25 [120].

$$\Delta P_{cone} = m(T) \cdot \left[\frac{3n + 1}{4n} \cdot \frac{32Q}{\pi d_c^3} \right]^n \cdot \left(\frac{1}{d_c^{3n}} - \frac{1}{d_B^{3n}} \right) \frac{2}{3n \tan\left(\frac{\beta}{2}\right)} \quad (2.25)$$

Τελικά η ολική πτώση πίεσης στον υγροποιητή ορίζεται στην Εξίσωση 2.26 [140].

$$\Delta P = \Delta P_B + \Delta P_{cone} + \Delta P_C \quad (2.26)$$

Μέσω της ολικής πτώσης πίεσης υπολογίζεται η δύναμη εξώθησης ή δύναμη τροφοδοσίας του νήματος στον υγροποιητή F, όπως φαίνεται στη Εξίσωση 2.27, όπου η d_f διάμετρος του νήματος [140].

$$F = \Delta P \cdot A_f = \Delta P \cdot \frac{\pi d_f^2}{4} \quad (2.27)$$

Καθότι η δύναμη εξώθησης επιβάλλεται μέσω δύο οδοντωτών τροχών που κινούνται από ένα ζεύγος βηματικών κινητήρων, η ροπή M και η ισχύς P που απαιτείται σε κάθε κινητήρα για την εξώθηση υπολογίζεται θεωρητικά από τις Εξισώσεις 2.28 και 2.29 αντίστοιχα, όπου R_r η ακτίνα και ω_r η γωνιακή ταχύτητα κάθε τροχού [141].

$$M = \frac{F}{2} \cdot R_r \quad (2.28)$$

$$P = M \cdot \omega_r \quad (2.29)$$

Από τις παραπάνω αναλυτικές σχέσεις εξάγεται το συμπέρασμα ότι το μεγαλύτερο τμήμα της πτώσης πίεσης συμβαίνει στο τριχοειδές ακροφύσιο ($\Delta p \sim 1/d^4$) και η αναγκαία δύναμη τροφοδοσίας νήματος ή δύναμη εξώθησης εξαρτάται άμεσα από τον ογκομετρικό ρυθμό τροφοδοσίας Q, αλλά και το ιξώδες του πολυμερούς. Υλικά με μεγαλύτερο ιξώδες όπως το PEEK απαιτούν μεγαλύτερες δυνάμεις εξώθησης. Επίσης μικρότερες διαμέτροι ακροφυσίου απαιτούν μεγαλύτερες δυνάμεις εξώθησης. Επιπλέον, λόγω της μείωσης του ιξώδους με τη θερμοκρασία, με υψηλότερη θερμοκρασία ακροφυσίου απαιτείται μικρότερη δύναμη εξώθησης και ροπή κινητήρων του εξωθητή [142].

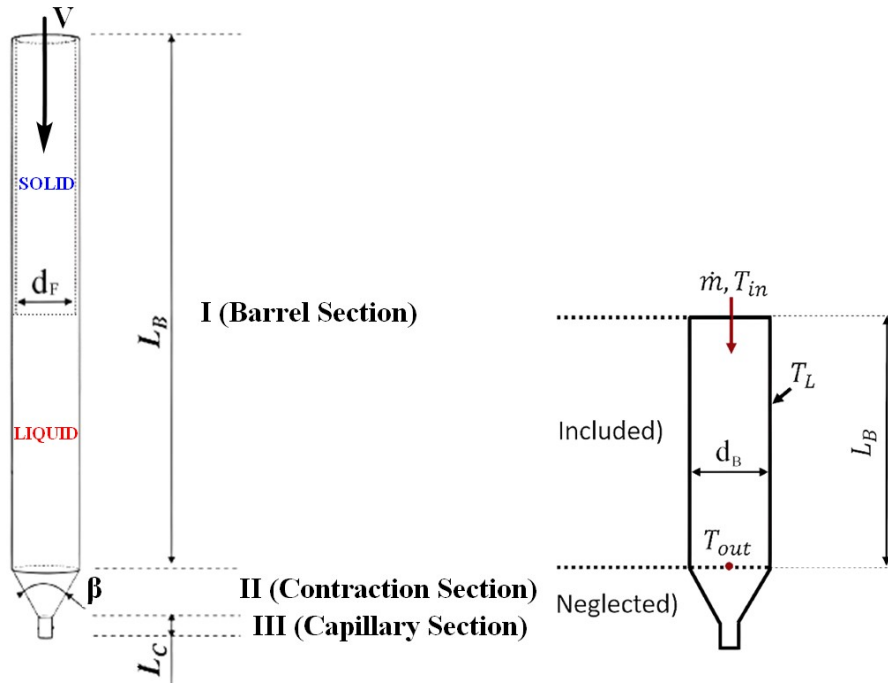
Ο υπολογισμός του μέγιστου ογκομετρικού ρυθμού τροφοδοσίας Q_{max} του νήματος στον υγροποιητή είναι μια ακόμη σημαντική παράμετρος. Η χαμηλή θερμική αγωγιμότητα του πολυμερούς έχει ως αποτέλεσμα τον περιορισμό του ρυθμού ροής για τον οποίο η θερμότητα μπορεί να διεισδύσει στο νήμα, καθώς ο πυρήνας πρέπει να θερμανθεί επαρκώς για να περάσει στο ακροφύσιο χωρίς να προκαλέσει υπερβολική αύξηση της δύναμης εξώθησης και ταυτόχρονα πρέπει να είναι αρκετά λιωμένος για να προσκολληθεί κατά την έξοδο του από το ακροφύσιο στην προηγούμενη στρώση και να προσδώσει επαρκή αντοχή στο ενδιάμεσο στρώμα στο τελειωμένο προϊόν [142].

Το πολυμερές θεωρείται ότι εισέρχεται στον υγροποιητή της Εικόνας 15 με θερμοκρασία εισόδου T_{in} και θερμαίνεται μέσω της μεταφοράς θερμότητας από το τοίχωμα που διατηρείται σε σταθερή θερμοκρασία T_L . Το πολυμερές πρέπει να φτάσει τη θερμοκρασία τήξης T_M προτού εισέλθει στο κωνικό τμήμα συστολής (II) προκειμένου να εξωθηθεί επιτυχώς. Επομένως, ο μέγιστος ρυθμός τροφοδοσίας Q_{max} είναι αυτός που αντιστοιχεί σε θερμοκρασία εξόδου στο κέντρο της διατομής εξόδου του υγροποιητή τουλάχιστον $T_{out} = T_M$. Στην Εξίσωση 2.30 φαίνεται το ισοζύγιο ενέργειας στο κυλινδρικό τμήμα του υγροποιητή για υπολογισμό του μέγιστου ρυθμού ροής μάζας \dot{m}_{max} με q_L η λαμβάνουσα θερμότητα τήξης, c_p η ειδική θερμοχωρητικότητα του πολυμερούς [140].

$$\dot{m}_{max} \cdot q_L + \dot{m}_{max} \cdot c_p \cdot \Delta T = \bar{h} \cdot (\pi d_B L_L) \cdot \Delta T \quad (2.30)$$

Ο ογκομετρικός ρυθμός ροής συνδέεται με το μαζικό ρυθμό ροής όπως φαίνεται στην Εξίσωση 2.31 [140].

$$\dot{m}_{max} = \rho Q_{max} \quad (2.31)$$



Εικόνα 15. Αναπαράσταση ροής πολυμερούς στα 3 διακριτά τμήματα του υγροποιητή

Η μέση λογαριθμική διαφορά θερμοκρασίας που προκύπτει από τη θεωρία εναλλακτών θερμότητας και η οποία εξηγεί την εκθετική φύση του ακτινικού προφίλ θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια θέρμανσης με συναγωγή της ροής του πολυμερούς στο σωλήνα εκφράζεται μέσω της Εξίσωσης 2.32 [143].

$$\Delta T = \frac{(T_L - T_{in}) - (T_L - T_M)}{\ln\left(\frac{T_L - T_{in}}{T_L - T_M}\right)} = \frac{T_M - T_{in}}{\ln\left(\frac{T_L - T_{in}}{T_L - T_M}\right)} \quad (2.32)$$

Με βάση τα ανωτέρω προκύπτει ότι ο μέγιστος ογκομετρικός ρυθμός τροφοδοσίας νήματος για επιτυχή εξώθηση μπορεί αναλυτικά να εκφραστεί μέσω της Εξίσωσης 2.33 [140].

$$Q_{max} = \frac{\bar{h} \cdot (\pi d_B L_L) \cdot \Delta T}{\rho [q_L + c_P \cdot (T_M - T_{in})]} \quad (2.33)$$

Ο μέγιστος ρυθμός τροφοδοσίας κατά τη διάρκεια της σταθερής εξώθησης έχει πρακτική αξία, καθώς εκφράζει ένα πραγματικό όριο στο οποίο θα πρέπει να λειτουργεί το θερμό άκρο. Σημειώνεται ότι η ανάπτυξη της ανωτέρω εξίσωσης βασίζεται αποκλειστικά στην ανάλυση μεταφοράς θερμότητας, ενώ ενδέχεται να υπάρχουν και άλλα φαινόμενα που περιορίζουν τον ρυθμό τροφοδοσίας του νήματος, όπως λυγισμός του νήματος, αστοχία ολίσθησης και υπέρβαση διατμητικής αντοχής κατά τη διεπαφή κινητήριου οδοντωτού τροχού και νήματος στο μηχανισμό εξώθησης που παρέχει την απαραίτητη δύναμη για την οδήγηση του νήματος στον υγροποιητή [122].

2.4. Μαθηματική Ανάλυση Μοντέλων Πολυμερών

Στην τρέχουσα παράγραφο περιγράφονται μαθηματικά δύο διακριτοί τρόποι προσέγγισης της ρεολογικής συμπεριφοράς των πολυμερών. Ο πρώτος αφορά στο ανελαστικό μοντέλο μη Νευτώνειου ρευστού ή μοντέλο Γενικευμένου Νευτώνειου Ρευστό (GNF), όπου το ρευστό έχει μια απόκριση τάσης που εξαρτάται από τον εφαρμοζόμενο ρυθμό παραμόρφωσης. Η ιξώδης τάση και ο ρυθμός παραμόρφωσης σχετίζονται με το φαινόμενο ιξώδες που μπορεί να είναι είτε σταθερό (περίπτωση Νευτώνειου ρευστού), είτε εξαρτώμενο από το ρυθμό διάτμησης και τη θερμοκρασία. Ο δεύτερος αφορά το ιξωδοελαστικό μοντέλο, όπου ο τανυστής τάσης εξαρτάται όχι μόνο από τον τρέχοντα ρυθμό παραμόρφωσης αλλά και από τις προηγούμενες παραμορφώσεις.

2.4.1. Ανελαστικά Μοντέλα Μη Νευτώνειου Ρευστού

Εφόσον το φαινόμενο ιξώδες μ_a είναι συνάρτηση του ρυθμού διάτμησης $\dot{\gamma}$ καθώς και της θερμοκρασίας T , μπορεί να αναπαρασταθεί από την Εξίσωση 2.34, όπου $\mu_a(\dot{\gamma}, T_{ref})$ το εξαρτώμενο από το ρυθμό διάτμησης φαινόμενο ιξώδες σε μια θερμοκρασία αναφοράς T_{ref} και $\alpha_T(T)$ ο εξαρτώμενος από τη θερμοκρασία δείκτης μετατόπισης χρόνου – θερμοκρασίας που παίρνει τιμή ίση με τη μονάδα στη θερμοκρασία αναφοράς [142].

$$\mu_a(\dot{\gamma} \cdot \alpha_T, T) = \alpha_T(T) \cdot \mu_a(\dot{\gamma}, T_{ref}) \quad (2.34)$$

Τα κυριότερα μοντέλα που χρησιμοποιούνται στα πολυμερή για να εκφράσουν τη μείωση του ιξώδους με την αύξηση του ρυθμού διάτμησης αναλύονται στη συνέχεια [144].

- Μοντέλο εκθετικού νόμου ή νόμου δύναμης. Διέπεται από την Εξίσωση 2.35, όπου m_{ref} η συνεκτικότητα του ρευστού στη θερμοκρασία αναφοράς, που εκφράζει τη δυσκολία στη ρευστότητα και n ο δείκτης ψευδοπλαστικότητας.

$$\mu_a(\dot{\gamma}) = m_{ref} \cdot \dot{\gamma}^{n-1} \quad (2.35)$$

Λαμβάνοντας υπόψη την εξάρτηση του ιξώδους από τη θερμοκρασία, η Εξίσωση 2.35 λαμβάνει τη μορφή της Εξίσωσης 2.36.

$$\mu_a(\dot{\gamma} \cdot \alpha_T, T) = m_{ref} \cdot \dot{\gamma}^{n-1} \cdot [\alpha_T(T)]^n \cdot \frac{T}{T_{ref}} \quad (2.36)$$

- Μοντέλο Carreau – Yasuda. Διέπεται από την Εξίσωση 2.37, όπου μ_0 το ιξώδες του ρευστού σε μηδενικό ρυθμό διάτμησης, μ_∞ το ιξώδες του ρευστού με άπειρο ρυθμό διάτμησης, λ ο δείκτης χρόνου χαλάρωσης, n ο δείκτης νόμου δύναμης, α μια αδιάστατη παράμετρος που περιγράφει τη μετάβαση μεταξύ του πρώτου Νευτώνειου πλατώ και της ζώνης πτώσης του ιξώδους με την αύξηση του ρυθμού διάτμησης στη σχετική καμπύλη.

$$\mu_a(\dot{\gamma}) = \mu_\infty + (\mu_0 - \mu_\infty) \cdot [1 + (\lambda \cdot \dot{\gamma})^\alpha]^{\frac{n-1}{\alpha}} \quad (2.37)$$

Λαμβάνοντας υπόψη την εξάρτηση του ιξώδους από τη θερμοκρασία, η Εξίσωση 2.37 λαμβάνει τη μορφή της Εξίσωσης 2.38.

$$\mu_a(\dot{\gamma} \cdot a_T, T) = \mu_\infty + a_T(T) \cdot (\mu_0 - \mu_\infty) \cdot [1 + (\lambda \cdot a_T(T) \cdot \dot{\gamma})^\alpha]^{\frac{n-1}{\alpha}} \quad (2.38)$$

- Μοντέλο Cross. Διέπεται από την Εξίσωση 2.39, όπου τ^* το επίπεδο κρίσιμης τάσης κατά τη μετάβαση από το Νευτώνειο πλατώ στο τμήμα της καμπύλης που δείχνει τη μείωση του ιξώδους με την αύξηση του ρυθμού διάτμησης και n ο δείκτης νόμου δύναμης στο καθεστώς υψηλής ταχύτητας διάτμησης

$$\mu_a(\dot{\gamma}) = \mu_\infty + \frac{\mu_0 - \mu_\infty}{\left(1 + \frac{\mu_0 \cdot \dot{\gamma}}{\tau^*}\right)^{1-n}} \quad (2.39)$$

Λαμβάνοντας υπόψη την εξάρτηση του ιξώδους από τη θερμοκρασία, η Εξίσωση 2.39 λαμβάνει τη μορφή της Εξίσωσης 2.40.

$$\mu_a(\dot{\gamma} \cdot a_T, T) = \mu_\infty + \frac{(\mu_0 - \mu_\infty) \cdot a_T(T)}{\left(1 + \frac{\mu_0 \cdot a_T(T) \cdot \dot{\gamma}}{\tau^*}\right)^{1-n}} \quad (2.40)$$

Για την εξάρτηση του συντελεστή μετατόπισης χρόνου – θερμοκρασίας a_T από τη θερμοκρασία χρησιμοποιείται συνήθως ένα από τα ακόλουθα μοντέλα εξάρτησης.

- Η εξάρτηση Arrhenius. Διέπεται από την Εξίσωση 2.41, όπου R η καθολική σταθερά των αερίων, E_a η ενέργεια ενεργοποίησης και T_{ref} η θερμοκρασία αναφοράς [145].

$$a_T(T) = \exp \left[\frac{E_a}{R} \cdot \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right) \right] \quad (2.41)$$

- Η εξάρτηση Williams–Landel–Ferry (WLF). Διέπεται από την Εξίσωση 2.42, όπου C_1 αδιάστατη σταθερά, C_2 σταθερά με διάσταση θερμοκρασίας και T_{ref} θερμοκρασία αναφοράς καθοριζόμενη από το πολυμερές [146].

$$a_T(T) = \exp \left[\frac{-C_1(T - T_{ref})}{C_2 + (T - T_{ref})} \right] \quad (2.42)$$

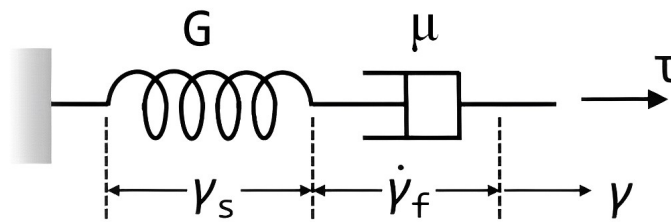
Όπως καθίσταται προφανές από τις παραπάνω εξισώσεις οποιαδήποτε στιγμή που η T δεν είναι ίση με τη θερμοκρασία αναφοράς, η εξάρτηση από τη θερμοκρασία γίνεται δυνητικά σημαντική. Το γεγονός αυτό δε συνιστά προβληματική κατάσταση για τη ροή στο ακροφύσιο όταν το σύστημα λειτουργεί σε σχεδόν σταθερή κατάσταση, όπου η θερμότητα που παρέχεται από το θερμαντήρα είναι επαρκής για να διατηρήσει μια σχεδόν σταθερή θερμοκρασία στη δεξαμενή τήξης. Ωστόσο, με οποιαδήποτε αλλαγή στη ροή του πολυμερούς, κυρίως λόγω έλλειψης ελεγχόμενου ογκομετρικού ρυθμού τροφοδοσίας νήματος Q , οι συνθήκες θα αλλάξουν, αφού λόγω της χαμηλής θερμικής αγωγιμότητας του πολυμερούς, μπορούν να αναπτυχθούν σημαντικές θερμικές διαβαθμίσεις τόσο στην αξονική όσο και στην ακτινική κατεύθυνση. Μια αύξηση στην ταχύτητα του νήματος και άρα στον ογκομετρικό ρυθμό ροής Q θα εμποδίσει το τήγμα να αποκτήσει την ισοθερμική συμπεριφορά και θα μειώσει τοπικά τη θερμοκρασία του πολυμερούς, η οποία με τη σειρά της θα προκαλέσει αύξηση του τοπικού ιξώδους. Κάτι τέτοιο θα μπορούσε να επιφέρει αστοχία λυγισμού στο σύστημα λόγω αύξησης της πίεσης που απαιτείται για την εξώθηση του τηγμένου πολυμερούς ή αστοχία λόγω ανάστροφης ροής που οφείλεται σε αύξηση αντί για μείωση του ιξώδους [147].

2.4.2. Ιξωδοελαστικά Μοντέλα

Εξ' ορισμού στα ιξωδοελαστικά μοντέλα ο τανυστής της τάσης εξαρτάται όχι μόνο από τον τρέχοντα ρυθμό παραμόρφωσης αλλά και από τις προηγούμενες παραμορφώσεις. Η συνολική τάση $\tau(t)$ είναι το άθροισμα των τάσεων που παράγονται σε κάθε βήμα από t' έως t , όπως φαίνεται στην Εξίσωση 2.43, όπου G^* το μέτρο χαλάρωσης τάσης [144].

$$\tau(t) = \int_{-\infty}^t G^*(t-t') \cdot \dot{\gamma}(t') \cdot dt' \quad (2.43)$$

Η ιξωδοελαστική συμπεριφορά των πολυμερών μπορεί να προσομοιωθεί μέσω ενός απλού γραμμικού μοντέλου Maxwell της Εικόνας 2.16, που δείχνει τη συνδυασμένη ελαστική συμπεριφορά στερεού μέτρου διάτμησης G και συμπεριφορά ιξώδους ρευστού του πολυμερούς.



Εικόνα 16. Γραμμικό μοντέλο Maxwell ιξωδοελαστικής συμπεριφοράς πολυμερούς [144]

Το συνδυασμένο υλικό έχει ρυθμό διάτμησης ίσο με το άθροισμα των δύο ρυθμών διάτμησης όπως φαίνεται στην Εξίσωση 2.44 [144].

$$\dot{\gamma} = \dot{\gamma}_s + \dot{\gamma}_f \quad (2.44)$$

Η δοκιμή ροόμετρου που χρησιμοποιείται για τον χαρακτηρισμό των γραμμικών ιξωδοελαστικών ιδιοτήτων των πολυμερών περιλαμβάνει εφαρμογή δυναμικού φορτίου μεταβαλλόμενης γωνιακής συχνότητας ω στο υλικό με μεταβαλλόμενο πλάτος παραμόρφωσης. Με τον αυστηρά μαθηματικό ορισμό, σ' ένα ιξωδοελαστικό υλικό αν εφαρμοστεί διατμητική παραμόρφωση γ_{tz} της μορφής $\gamma_0 \sin(\omega t)$ τότε η αναπτυσσόμενη τάση παρουσιάζει καθυστέρηση φάσης σχετικά με την παραμόρφωση. Το μέτρο διάτμησης έχει μιγαδική μορφή της Εξίσωσης 2.45, όπου G' το μέτρο αποθήκευσης και G'' το μέτρο απώλειας, που αντιπροσωπεύουν το ελαστικό (ενέργεια που αποθηκεύεται στο υλικό) και το ιξώδες τμήμα (ενέργεια διάχυσης στην παραμόρφωση) αντίστοιχα [148].

$$G^* = G' + jG'' \quad (2.45)$$

Ομοίως το ιξώδες του ιξωδοελαστικού υλικού είναι μιγαδικό και αποτελείται από την καθαρά ιξώδη συνιστώσα μ_v και την ελαστική συνιστώσα μ_e . Το μέτρο του ιξωδοελαστικού συντελεστή ιξώδους ή σύνθετου ιξώδους μ^* αποτελείται από το ιξώδες μ_v και το ελαστικό μέρος μ_e και εκφράζεται όπως στην Εξίσωση 2.46 [148].

$$\mu^* = \sqrt{\mu_v^2 + \mu_e^2} = \sqrt{\left(\frac{G''}{\omega}\right)^2 + \left(\frac{G'}{\omega}\right)^2} \quad (2.46)$$

Τα μη γραμμικά ιξωδοελαστικά μοντέλα ισχύουν για μεγάλο εύρος ρυθμών παραμόρφωσης. Η ολική τάση αποτελεί το άθροισμα δύο όρων όπως φαίνεται στην Εξίσωση 2.47. Ο όρος $\bar{\mathbf{t}}_p$ είναι η συνεισφορά του ταυστή τάσης που οφείλεται στην ελαστική και ιξώδη συμπεριφορά του πολυμερούς, η οποία προσδιορίζεται από τη συστατική εξίσωση του αντίστοιχου ιξωδοελαστικού μοντέλου. Ο όρος $\bar{\mathbf{t}}_s$ αποτελεί τη νευτώνεια συνεισφορά στην τάση, η οποία προσδιορίζεται από τη Νευτώνεια Εξίσωση 2.48 [149].

$$\bar{\mathbf{t}} = \bar{\mathbf{t}}_p + \bar{\mathbf{t}}_s \quad (2.47)$$

$$\bar{\mathbf{t}}_s = \mu_s \cdot \dot{\gamma} = 2\mu_s \cdot \mathbf{D} \quad (2.48)$$

Ο ταυστής του ρυθμού παραμόρφωσης \mathbf{D} προσδιορίζεται από την Εξίσωση 2.49 [149].

$$\mathbf{D} = \frac{1}{2} (\nabla \mathbf{u} + \nabla \mathbf{u}^T) \quad (2.49)$$

Στη συνέχεια ορίζονται οι συστατικές εξισώσεις τάσης για τα δύο πιο χαρακτηριστικά μη γραμμικά ιξωδοελαστικά μοντέλα [149].

- Μοντέλο Giesekus. Ο όρος $\bar{\mathbf{t}}_p$ προσδιορίζεται από την Εξίσωση 2.50-2.52, όπου $\bar{\mathbf{t}}_{p_i}$ η τάση του i τρόπου εφαρμογής της τάσης, λ_i ο χρόνος χαλάρωσης τάσης στο i τρόπο, μ_{p_i} το ιξώδες του πολυμερούς στο i τρόπο, α_i ο αντίστοιχος συντελεστής ευκινησίας και μ_s το σταθερό Νευτώνειο ιξώδες

$$\bar{\mathbf{t}}_p = \sum_{i=1}^m \bar{\mathbf{t}}_{p_i} \quad (2.50)$$

$$\lambda_i + \lambda_i \bar{\mathbf{t}}_{p_i}^\nabla + \lambda_i \frac{\alpha_i}{\mu_{p_i}} (\bar{\mathbf{t}}_{p_i} \cdot \bar{\mathbf{t}}_{p_i}) = \eta_{p_i} \cdot \mathbf{D} \quad (2.51)$$

$$\bar{\mathbf{t}}_{p_i}^\nabla = \frac{\partial \bar{\mathbf{t}}_{p_i}}{\partial t} + \nabla (\mathbf{u} \cdot \bar{\mathbf{t}}_{p_i}) - (\nabla \mathbf{u}^T) \cdot \bar{\mathbf{t}}_{p_i} - \bar{\mathbf{t}}_p \cdot \nabla \mathbf{u} \quad (2.52)$$

Οι ιξωδοελαστικές παράμετροι είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας σε μη ισόθερμες διεργασίες όπως η FFF. Η εξάρτησή τους από τη θερμοκρασία μπορεί να μοντελοποιηθεί χρησιμοποιώντας τον συντελεστή μετατόπισης α_T ο οποίος υπολογίζεται με τη μέσω της εξάρτησης Williams-Landel-Ferry (WLF) όπως φαίνεται στις Εξισώσεις 2.53-2.55.

$$\lambda_i(T) = \alpha_T \cdot \lambda_i(T_{\text{ref}}) \quad (2.53)$$

$$\mu_{p_i}(T) = \alpha_T \frac{T}{T_{\text{ref}}} \mu_{p_i}(T_{\text{ref}}) \quad (2.54)$$

$$\mu_s(T) = \alpha_T \frac{T}{T_{\text{ref}}} \mu_s(T_{\text{ref}}) \quad (2.55)$$

- Μοντέλο Phan-Thien-Tanner (PTT). Ο όρος $\bar{\mathbf{t}}_p$ προσδιορίζεται από την Εξίσωση 2.56-2.58, όπου μ_p το ιξώδες του πολυμερούς, λ ο χρόνος χαλάρωσης του

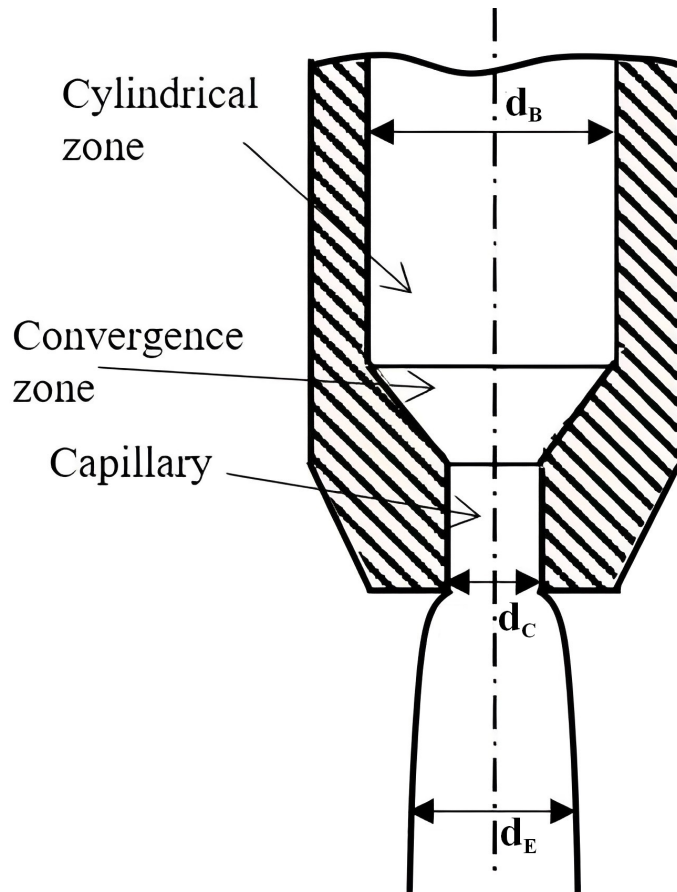
πολυμερούς, ε η παράμετρος επιμήκυνσης, ξ η παράμετρος διάτμησης και r_μ το κλάσμα Νευτώνειου ιξώδους στο ολικό ιξώδες.

$$\left[\exp\left(\frac{\varepsilon \cdot \lambda}{\mu_p}\right) \cdot \text{tr}(\bar{\tau}_p) \right] \cdot \bar{\tau}_p + \lambda \left[\left(1 - \frac{\xi}{2}\right) \cdot \bar{\tau}_p + \frac{\xi}{2} \bar{\tau}_p \right] = 2\mu_p \cdot \mathbf{D} \quad (2.56)$$

$$\mu_p = (1 - r_\mu) \cdot \mu \quad (2.57)$$

$$r_\mu = \frac{\mu_s}{\mu} \quad (2.58)$$

Γενικά το ιξωδοελαστικό μοντέλο είναι απαραίτητο στη μελέτη της παραμόρφωσης του τηγμένου πολυμερούς κατά την έξοδο του από το τριχοειδές ακροφύσιο, καθώς υπόκειται στο φαινόμενο παραμόρφωσης μήτρας (Die Swell) όπως φαίνεται στην Εικόνα 17 [150].



Εικόνα 17. Φαινόμενο παραμόρφωσης μήτρας κατά την έξοδο του πολυμερούς από το τριχοειδές ακροφύσιο

3. Μοντέλο Αριθμητικής Προσομοίωσης

Στην προηγούμενο κεφάλαιο αναλύθηκαν οι υποκείμενοι μηχανισμοί εκτύπωσης με τη μέθοδο FFF και πραγματοποιήθηκε μια ανασκόπηση της πρόσφατης προόδου στα μαθηματικά μοντέλα και τις εξισώσεις που διέπουν τη ροή του τήγματος του πολυμερούς. Για την επίτευξη των στόχων που έχουν τεθεί στην τρέχουσα διπλωματική, κατασκευάζεται ένα αριθμητικό μοντέλο προσομοίωσης της μη ισοθερμοκρασιακής ροής του πολυμερούς ABS με το υπολογιστικό πακέτο πεπερασμένων στοιχείων COMSOL Multiphysics 6.1. Στο κεφάλαιο αυτό ορίζονται και αναλύονται οι παράμετροι του μοντέλου.

3.1. Περιγραφή Στρατηγικής

3.1.1. Υλοποίηση Στόχων

Ο σκοπός εκτέλεσης των αριθμητικών προσομοιώσεων είναι η συσχέτιση των σημαντικότερων παραμέτρων της διεργασίας FFF. Τα πειράματα έχουν σχεδιαστεί σε δύο γεωμετρίες υγροποιητή – ακροφυσίου, μία με μικρό μήκος υγροποιητή, με βάση τον τύπο εμπορικής μηχανής E3D-V6 και μία με μεγάλο μήκος με βάση τον εμπορικό τύπο E3D-Volcano. Οι προσομοιώσεις παραμετροποιήθηκαν λαμβάνοντας υπόψη όλο το φάσμα των ταχυτήτων τροφοδοσίας νήματος και των θερμοκρασιών του μπλοκ θέρμανσης που είναι κατάλληλες για το πολυμερές ABS.

Η υλοποίηση των στόχων της μελέτης που εκπονείται βασίζεται στην κατασκευή μοντέλων υπολογιστικής ρευστομηχανικής (CFD) συζευγμένα με θερμικό επιλύτη (CFD – Thermal Coupling). Τα μοντέλα αυτά συνίστανται σε ορισμένους πυλώνες.

- Τη γεωμετρική διάταξη.
- Την κατάλληλη διαμόρφωση και ρύθμιση των παραμέτρων δημιουργίας του πλέγματος της γεωμετρίας που έχει σχεδιαστεί.
- Τον ορισμό των ιδιοτήτων του πολυμερούς ABS, καθώς και τις επιμέρους εξαρτήσεις αυτών από τη θερμοκρασία.
- Τον ορισμό των οριακών συνθηκών που αφορούν τόσο στο ρεολογικό κομμάτι όσο και το θερμικό, αλλά και των παραμέτρων της σύζευξης μεταξύ των δύο.
- Τον παραμετρικό ορισμό των παραμέτρων επίλυσης.

Η ροή του άμορφου πολυμερούς ABS στο θερμό άκρο του υγροποιητή μοντελοποιείται σε καθεστώς μόνιμης κατάστασης στρωτής ροής. Η προσέγγιση μοντελοποίησης βασίζεται στην υπόθεση ότι η ροή του στερεού πολυμερούς μπορεί να θεωρηθεί ως ροή ενός υψηλού ιξώδους ρευστού. Για ένα άμορφο πολυμερές, αυτή η προσέγγιση απαιτεί μια απότομη αύξηση στη τιμή του ιξώδους μηδενικής διάτμησης στη θερμοκρασία μετάπτωσης υάλου για να οριοθετήσει την περιοχή του υγρού από τη στερεά περιοχή. Έτσι εισάγεται ένα μαθηματικό μοντέλο κλάσματος τήγματος με τη μορφή μιας υπερβολικής επαπτομένης που επιτρέπει την έκφραση του εξαρτώμενου από τη θερμοκρασία ιξώδους σε μια μόνο εξίσωση για τη στερεά και την υγρή φάση.

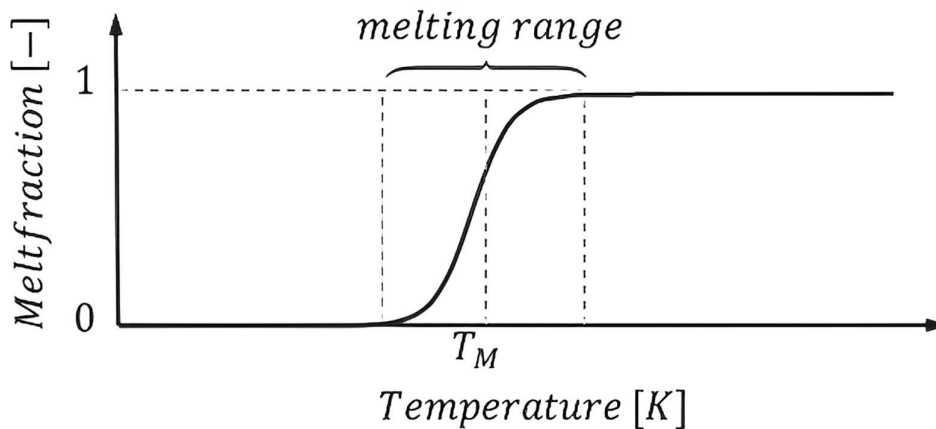
Για να μειωθεί ο υπολογιστικός χρόνος, μοντελοποιείται ένα δισδιάστατο (2-D) αξονοσυμμετρικό προφίλ με τον άξονα της γεωμετρίας να αντιπροσωπεύει τον άξονα του πραγματικού εξωθητήρα FFF. Το αξονικό συμμετρικό μοντέλο επιτρέπει τη χρήση δομημένου πλέγματος που δίνει ταχύτερη σύγκλιση και καλύτερα αποτελέσματα σε σύγκριση με ένα τρισδιάστατο μη δομημένο πλέγμα.

3.1.2. Επιλογή Μοντέλου Ιξώδους

Για την προσομοίωση της ροής του πολυμερούς ABS χρησιμοποιείται το ανελαστικό μοντέλο μη Νευτώνειου ρευστού Cross – WLF. Για να μπορέσει να προσομοιωθεί η συμπεριφορά της ροής του πολυμερούς στη στερεή φάση, αυτή μοντελοποιείται ως ροή ρευστού πολύ υψηλού ιξώδους. Κατά την προσέγγιση αυτή, στη θερμοκρασία μετάπτωσης υάλου που οριοθετεί την περιοχή του υγρού από του στερεού υλικού, συντελείται μια απότομη αύξηση στη τιμή του ιξώδους μηδενικής διάτμησης. Παρόμοιες προσεγγίσεις έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως στην προσομοίωση εξώθησης ή χύτευσης με έγχυση [151]. Οι Karrenberg και Wortberg [152] έχουν εισαγάγει ένα μοντέλο κλάσματος τήγματος με τη μορφή μιας υπερβολικής εφαπτομένης που επιτρέπει την έκφραση του εξαρτώμενου από τη θερμοκρασία ιξώδους σε μια εξίσωση για τη στερεά και την υγρή φάση, όπως φαίνεται στην Εξίσωση 3.1. Στην σχέση αυτή το T_g αντιπροσωπεύει τη θερμοκρασία μετάπτωσης υάλου που είναι το σημείο της μεγαλύτερης κλίσης και η παράμετρος S το εύρος θερμοκρασιών μετάβασης γύρω από την T_g που εκφράζει τη μοντελοποίηση της μετάβασης. Το μοντέλο αυτό χρησιμεύει ως βάση για τη μοντελοποίηση του ιξώδους μηδενικής διάτμησης στις δύο διακριτές φάσεις.

$$MF(T) = \frac{\tanh[(T - T_g) \cdot S]}{2} \quad (3.1)$$

Η μορφή της συνάρτησης του κλάσματος τήξης MF σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία φαίνεται στην Εικόνα 18.



Εικόνα 18. Κλάσμα τήξης MF σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία [152]

Για να επιτευχθεί απότομη αύξηση του μηδενικού ιξώδους διάτμησης μ_0 στη θερμοκρασία μετάπτωσης υάλου, ο συντελεστής μετατόπισης στο μοντέλο WLF της Εξίσωσης 2.42 υπερτίθεται από μια τροποποιημένη μέγιστη μετατόπιση θερμοκρασίας της Εξίσωσης 3.2.

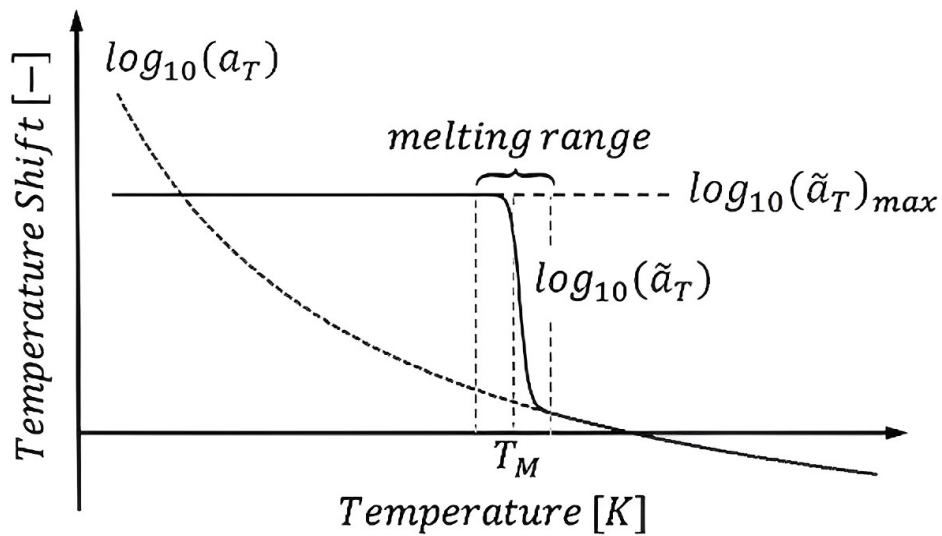
$$a_T(T)_{max} = [1 - MF(T)] \cdot \frac{-C_1(T_g - T_{ref})}{C_2 + (T_g - T_{ref})} \quad (3.2)$$

Έτσι προκύπτει η τροποποιημένη συνάρτηση WLF της Εξίσωσης 3.3 [152] που χρησιμοποιείται στο υπό κατασκευή μοντέλο.

$$\tilde{a}_T(T)_{max} = \exp \left\{ [1 - MF(T)] \cdot \frac{-C_1(T_g - T_{ref})}{C_2 + (T_g - T_{ref})} + MF(T) \cdot \frac{-C_1(T - T_{ref})}{C_2 + (T - T_{ref})} \right\} \quad (3.3)$$

Οι σταθερές C_1 και C_2 της συνάρτησης WLF περιγράφουν την εξάρτηση από τη θερμοκρασία του υλικού. Το κλάσμα τήγματος που ορίζεται στην Εξίσωση 3.1 χρησιμεύει ως συνάρτηση στάθμισης για την υπέρθεση. Για θερμοκρασίες πάνω από τη θερμοκρασία μετάπτωσης υάλου, η Εξίσωση 3.3 αποδίδει μια καμπύλη που αντιστοιχεί στο μοντέλο WLF της Εξίσωσης 2.42. Κάτω από τη θερμοκρασία μετάπτωσης υάλου T_g , η εξίσωση αποδίδει ένα ιξώδες ανεξάρτητο από τη θερμοκρασία.

Η καμπύλη της τροποποιημένης συνάρτησης WLF αναπαρίσταται στην Εικόνα 19. Ο νέος συντελεστής μετατόπισης περιγράφει μια συνεχή καμπύλη με απότομη αλλαγή στο εύρος θερμοκρασιών S μετάπτωσης υάλου. Σε περίπτωση θερμοκρασιών κάτω από το εύρος της θερμοκρασίας T_g , ο συντελεστής μετατόπισης είναι συνεπής. Έτσι, μια υπερβολική αύξηση του ιξώδους για πολύ χαμηλές θερμοκρασίες μπορεί να αποφευχθεί περιορίζοντας τον παράγοντα μετατόπισης. Ωστόσο, το ιξώδες της στερεάς φάσης μπορεί πάντα να διατηρηθεί σε πολύ υψηλό επίπεδο. Σε περίπτωση θερμοκρασιών πάνω από το εύρος της T_g , χρησιμοποιείται η αρχική εξίσωση WLF χωρίς τροποποιήσεις. Αυτό οδηγεί σε μια σύνθεση ιξώδους που είναι ίση με το καθιερωμένο μοντέλο Cross-WLF για τη ρευστή φάση. Για τη στερεά φάση δίνεται ένα ιξώδες ανεξάρτητο από τη θερμοκρασία, αλλά εξαρτώμενο από την ταχύτητα διάτμησης σε υψηλό επίπεδο. Η μετάβαση πραγματοποιείται συνεχώς και ομαλά. Αυτό είναι σημαντικό για την αριθμητική προσομοίωση.



Εικόνα 19. Τροποποιημένος συντελεστής μετατόπισης WLF $\tilde{a}_T(T)$

3.2. Παράμετροι Μοντέλου

3.2.1. Γεωμετρία

Για τις ανάγκες του μοντέλου χρησιμοποιήθηκαν δύο γεωμετρίες υγροποιητή-ακροφυσίου. Η μία αφορά σε μικρό μήκος υγροποιητή, με βάση το τύπο μηχανής E3D-V6 και η άλλη σε μεγάλο μήκος με βάση τον τύπο E3D-Volcano. Ο Πίνακας 2 συνοψίζει τις βασικές διαστάσεις του κάθε τύπου υγροποιητή.

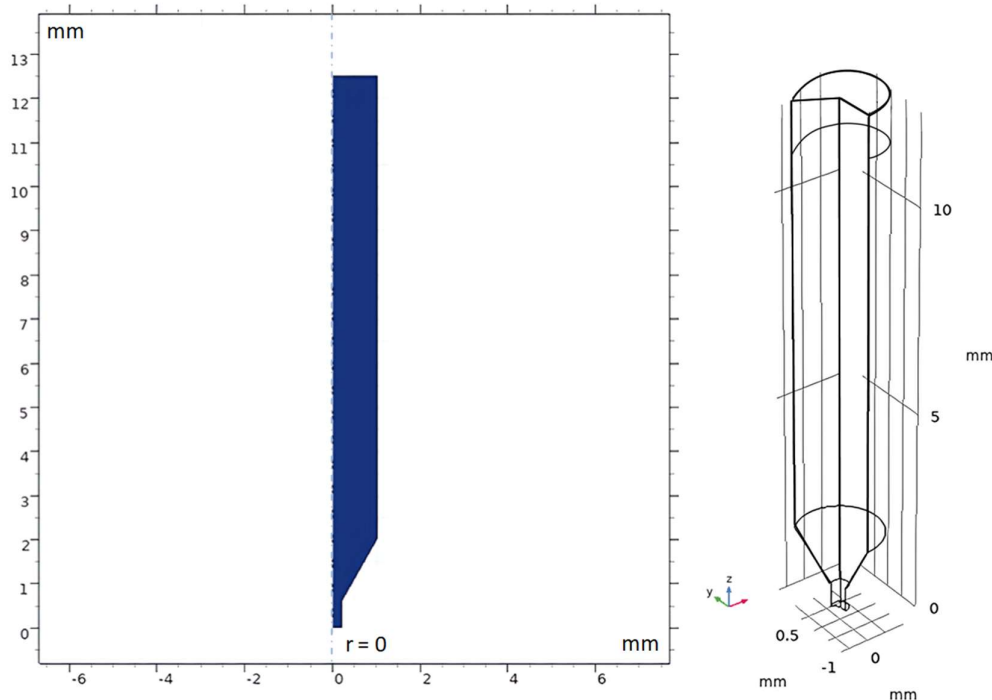
Πίνακας 2. Διαστάσεις υγροποιητών μοντέλου

Τύπος υγροποιητή	Διάμετρος Ακροφυσίου (d _c)	Μήκος Τριχοειδούς (L _c)	Γωνία Συστολής (β)	Μήκος Κάνης Υγροποιητή (L _L)	Διάμετρος Κάνης (D _B)
E3D-V6 [153]	0,4 mm	0,6 mm	60°	10,51 mm	2 mm
E3D Volcano [154]	0,4 mm	0,6 mm	60°	19,01 mm	2 mm

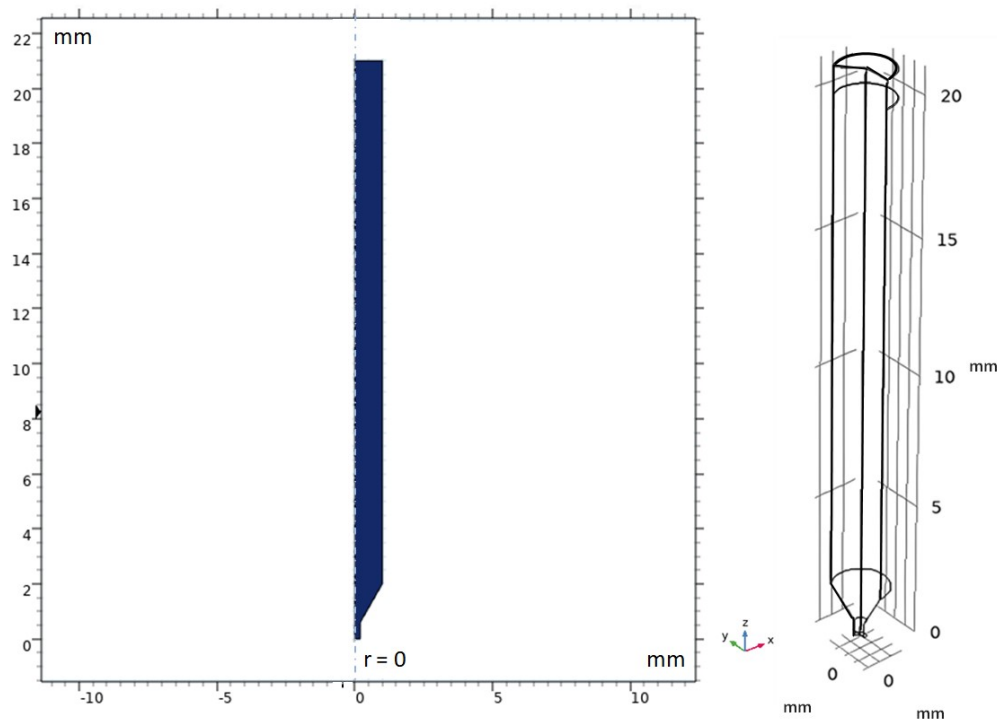
Το θερμαινόμενο μήκος υπολογίζεται από την Εξίσωση 3.4.

$$L_H = L_L + \frac{d_B - d_c}{2 \tan \frac{\beta}{2}} + L_c \quad (3.4)$$

Στις Εικόνες 20-21 φαίνονται τα αξονοσυμμετρικά μοντέλα υγροποιητών του Πίνακα 2.



Εικόνα 20. Αξονοσυμμετρικό μοντέλο γεωμετρίας του υγροποιητή E3D-V6



Εικόνα 21. Αξονοσυμμετρικό μοντέλο γεωμετρίας του υγροποιητή E3D Volcano

3.2.2. Ιδιότητες Υλικού

Μεταξύ των υλικών που χρησιμοποιούνται στη διαδικασία FFF, για το σκοπό της μελέτης έχει επιλεγεί το ABS, το οποίο συνιστά ένα τεχνικό θερμοπλαστικό πολυμερές που χρησιμοποιείται ευρέως στη βιομηχανία τόσο για τις μηχανικές του ιδιότητες όσο και την ικανότητα μετεπεξεργασίας. Το ABS είναι ένα άμορφο πολυμερές που αποτελείται από τρία μονομερή, το ακρυλονιτρίλιο, το βουταδιένιο και το στυρένιο, ενώ ανάλογα με τα επιμέρους ποσοστά των συστατικών του αλλάζουν κι οι ιδιότητές του [155]. Μερικά από τα μοναδικά χαρακτηριστικά του, σε σύγκριση με άλλα πολυμερή, είναι η ακαμψία του, η αντοχή σε κρούση, η ανθεκτικότητα, το σχετικά υψηλό σημείο ροής σε σχέση με άλλα πολυμερή όπως το PLA αλλά και το σχετικά χαμηλό σημείο τήξης σε σχέση με πολυμερή όπως το PEEK [156]. Αυτό το καθιστά εύκολα εκτυπώσιμο ακόμα και σε οικιακούς τρισδιάστατους εκτυπωτές. Δεν είναι βιοδιασπώμενο όπως το PLA αλλά είναι ανακυκλώσιμο με μικρή τοξικότητα στην υγρή φάση. Επομένως, αποτελεί μια κλασσική επιλογή εκτύπωσης εξαρτημάτων μέσω της FFF με δυνατότητα χρήσης σε πολλούς κλάδους.

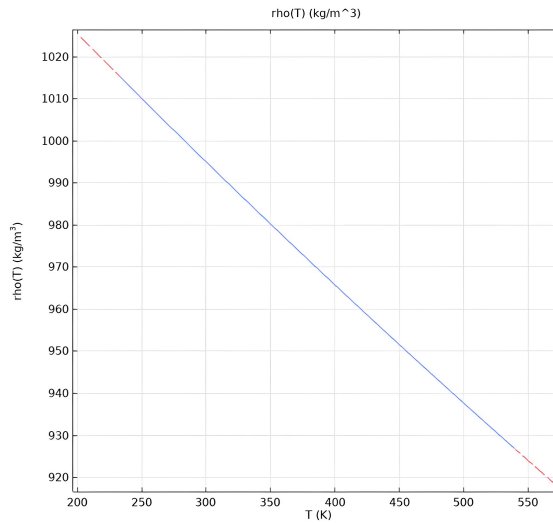
Η μοντελοποίηση πραγματοποιήθηκε με ρητίνη ABS CYCOLAC BDT5510. Η πυκνότητα του στερεού ABS ρ_s θεωρείται σταθερή και ίση με 1060 Kg/m^3 . Επειδή, ωστόσο, στη μοντελοποίηση η ροή της στερεής φάσης του πολυμερούς που εισέρχεται στο θερμό άκρο υπολογίζεται, όπως εξηγήθηκε, ως ροή ενός ρευστού πολύ υψηλού ιξώδους, γίνεται η θεώρηση ότι η πυκνότητα του ABS σε όλο το τμήμα του υγροποιητή μεταβάλλεται με τη θερμοκρασία σύμφωνα με την Εξίσωση 3.5 που ισχύει για τα ρευστά πολυμερή, όπου ρ_r η πυκνότητα στη θερμοκρασία αναφοράς που λαμβάνεται ίση με 945 Kg/m^3 και T_{ref} η θερμοκρασία αναφοράς που για το υλικό αυτό είναι οι 200°C [130].

$$\rho(T) = \rho_r \frac{1}{1 + a_v(T - T_{ref})} \quad (3.5)$$

Ο συντελεστής θερμικής διαστολής όγκου α_V της Εξίσωσης 3.5 υπολογίζεται από την Εξίσωση 3.6 [130], όπου ο συντελεστής γραμμικής θερμικής διαστολής CTE του ABS λαμβάνεται ίσος με $9,82 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ [157].

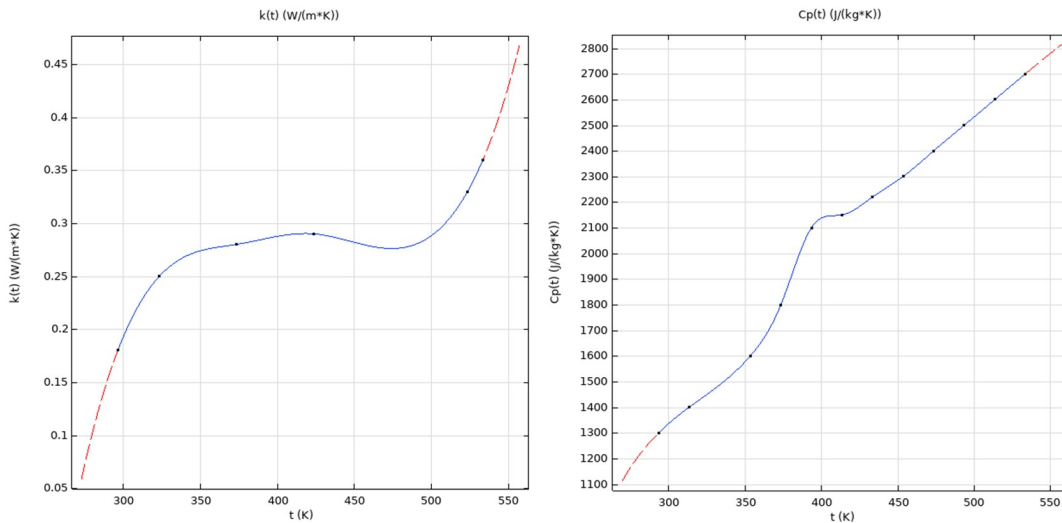
$$\alpha_V = \frac{\{[1 + \text{CTE} \cdot (T - T_{\text{ref}})]^3 - 1\}}{T - T_{\text{ref}}} \quad (3.6)$$

Η μεταβολή της πυκνότητας του πολυμερούς συναρτήσει της θερμοκρασίας με βάση τις συναρτήσεις των Εξισώσεων 3.5 και 3.6 φαίνεται στην Εικόνα 22.



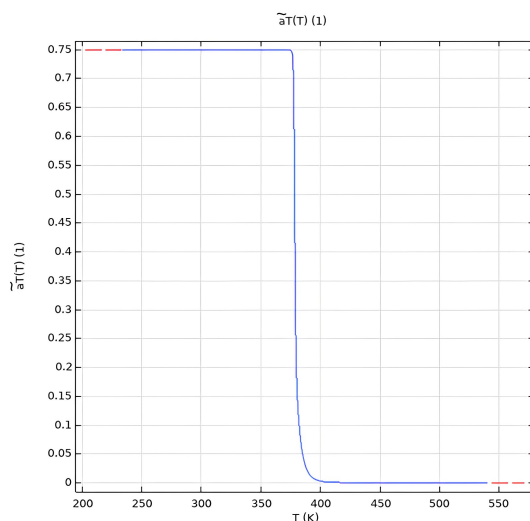
Εικόνα 22. Μεταβολή της πυκνότητας του υγρού πολυμερούς ABS συναρτήσει της θερμοκρασίας

Η ειδική θερμότητα C_p και ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας k του ABS μεταβάλλονται με τη θερμοκρασία σύμφωνα με τις πειραματικές βιβλιογραφικές τιμές [158], μέσω των οποίων εξάγονται οι αντίστοιχες συναρτήσεις κυβικών παρεμβολών (cubic spline interpolation) της Εικόνας 23.



Εικόνα 23. Μεταβολή ειδικής θερμοχωρητικότητας και θερμικής αγωγιμότητας υγρού πολυμερούς ABS συναρτήσει της θερμοκρασίας

Ο τροποποιημένος WLF συντελεστής μετατόπισης θερμοκρασίας, όπως εκφράστηκε στην Εξίσωση 3.3, με βάση τις τιμές των σταθερών του υλικού αυτού, προκειμένου να εκφραστεί η εξάρτηση του ιξώδους από το ρυθμό διάτμησης και τη θερμοκρασία με βάση του μοντέλο Cross – WLF φαίνεται στην Εικόνα 24.



Εικόνα 24. Τροποποιημένος WLF συντελεστής μετατόπισης θερμοκρασίας για το ABS

Οι παράμετροι και οι σταθερές των ιδιοτήτων του πολυμερούς αποτυπώνονται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 3.

Πίνακας 3. Παράμετροι και σταθερές των ιδιοτήτων του πολυμερούς ABS

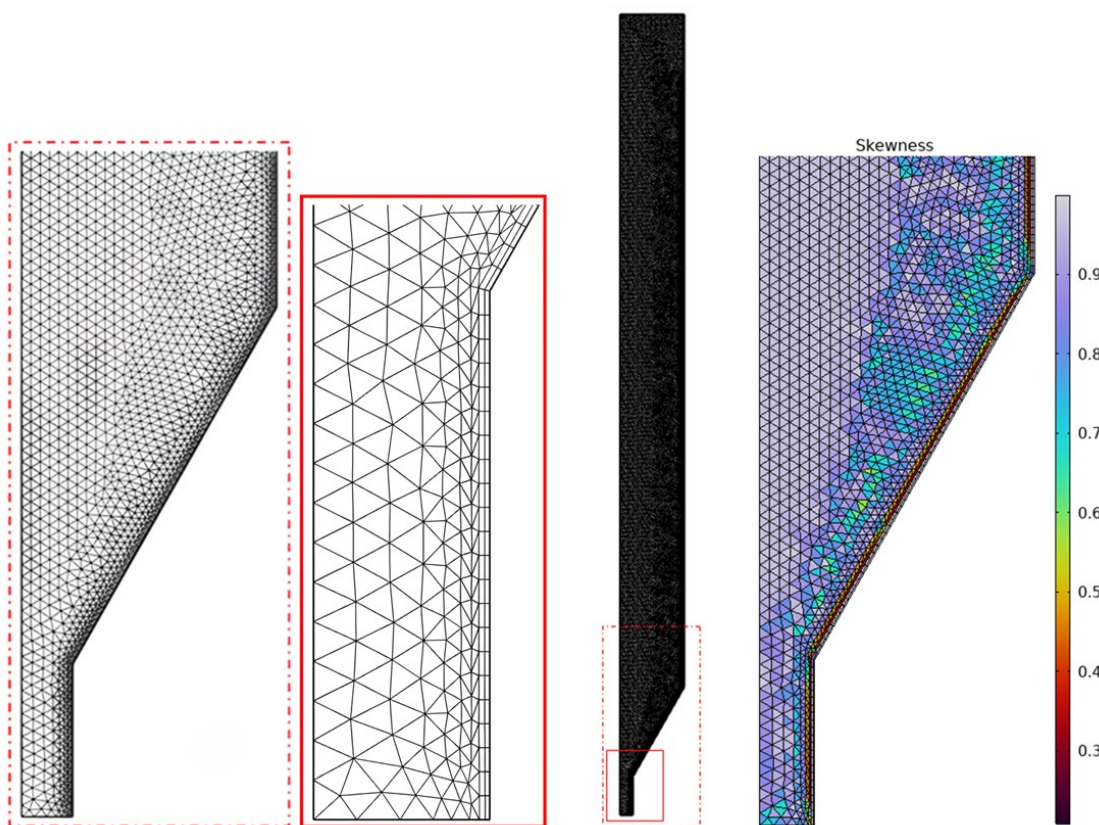
Ιδιότητα	Τύπος	Παραπομπή	Σταθερές Πολυμερούς *	Τιμή
Ποικνότητα [157]	Αναλυτική Έκφραση Θερμοκρασίας	Εξίσωση 3.5-3.6	CTE	$9.82e^{-5} K^{-1}$
			ρ_r	$945 Kg/m^3$
			T_{ref}	$473.15 K$
Ειδική Θερμότητα [158]	Συνάρτηση Κυβικής Παρεμβολής	Εικόνα 23	Πειραματικές Τιμές $C_p = f(T)$	-
Συντελεστής Θερμικής Αγωγιμότητας [158]	Συνάρτηση Κυβικής Παρεμβολής	Εικόνα 23	Πειραματικές Τιμές $K = f(T)$	-
Τροποποιημένος Συντελεστής WLF [151]	Αναλυτική Έκφραση Θερμοκρασίας	Εξίσωση 3.3 Εικόνα 24	T_{ref}	$373.15 K$
			C_1	27.21
			C_2	$92.85 K$
			T_g	$378.15 K$
			S	1
Φαινόμενο Ιξώδες Κατά Cross [151]	Αναλυτική Έκφραση Ρυθμού Διάτμησης και Τροποποιημένου WLF	Εξίσωση 2.40	τ^*	$2.9e^4 Pa$
			n	0.33
			μ_0	$3.61e^{11} Pas$
			μ_{∞}	0

* Οι τιμές των παραμέτρων ενδείκνυται να βρεθούν πειραματικά ελαφρώς διαφορετικές σε άλλες βιβλιογραφικές πηγές

3.2.3. Πλεγματοποίηση

Ο τρόπος δημιουργίας του πλέγματος βασίζεται στην εκάστοτε εφαρμογή, την επιζητούμενη ακρίβεια των αποτελεσμάτων αλλά και τις πραγματικές διαστάσεις της γεωμετρίας τις οποίες το μοντέλο καλείται να προσομοιώσει. Στα υπό κατασκευή μοντέλα τα σημεία ενδιαφέροντος είναι τα τοιχώματα του υγροποιητή, όπου οι συνθήκες ολίσθησης πρέπει να αποτυπωθούν με ακρίβεια. Το αξονικό συμμετρικό μοντέλο επιτρέπει τη χρήση δομημένου πλέγματος που δίνει ταχύτερη σύγκλιση σε σύγκριση με ένα τρισδιάστατο μη δομημένο πλέγμα.

Για την πλεγματοποίηση της αξονοσυμμετρικής τομής του μοντέλου επιλέχθηκαν τετραγωνικά στοιχεία για την επιφάνεια γύρω από τα τοιχώματα και τριγωνικά μειούμενης πυκνότητας και αυξανόμενης λοξότητας κατά τη μετάβαση από τα τοιχώματα προς το κέντρο συμμετρίας, που αντιστοιχεί στον άξονα του πραγματικού εξωθητήρα FFF, όπως φαίνεται στην Εικόνα 25. Με τον τρόπο αυτό παρέχεται η χρυσή τομή μεταξύ ακρίβειας αποτελέσματος, μέσω ικανοποιητικής σύγκλισης, και υπολογιστικού κόστους διατηρώντας την ικανότητα ακριβούς αποτύπωσης της συμπεριφορά του πολυμερούς.



Εικόνα 25. Πλεγματοποίηση υγροποιητή μοντέλου και μεταβολή λοξότητας ως παράμετρος ποιότητας

Ένα από τα σημαντικότερα κριτήρια ποιότητας του πλέγματος αφορά στη λοξότητά του η οποία αντικατοπτρίζει τη γωνία μεταξύ των γραμμών που ενώνουν τις αντίθετες πλευρές ενός τετράγωνου στοιχείου ή τη μεγαλύτερη γωνία μεταξύ τριών διάμεσων στοιχείων τριγώνου. Με βάση το κριτήριο αυτό, ενδείκνυται οι τιμές μέγιστης λοξότητας να διατηρούνται κάτω από 0.95 με μια μέση τιμή κάτω από 0.8 [159]. Τα βασικά στατιστικά του πλέγματος που χρησιμοποιήθηκε στις δύο γεωμετρίες παρουσιάζεται στον Πίνακα 4.

Πίνακας 4. Στατιστικά πλέγματος των γεωμετριών του μοντέλου

Παράμετρος Πλέγματος		Γεωμετρία	
		E3D-V6	E3D Volcano
Περιοχή Πλέγματος	Σύνολο	11.46 mm ²	19.96 mm ²
	Τριγωνικά	18035	31817
	Τετραγωνικά	838	1444
Στοιχεία	Σύνολο	18873	33261
	Μέση	0.16	0.15
Λοξότητα	Ελάχιστη	0.8	0.79

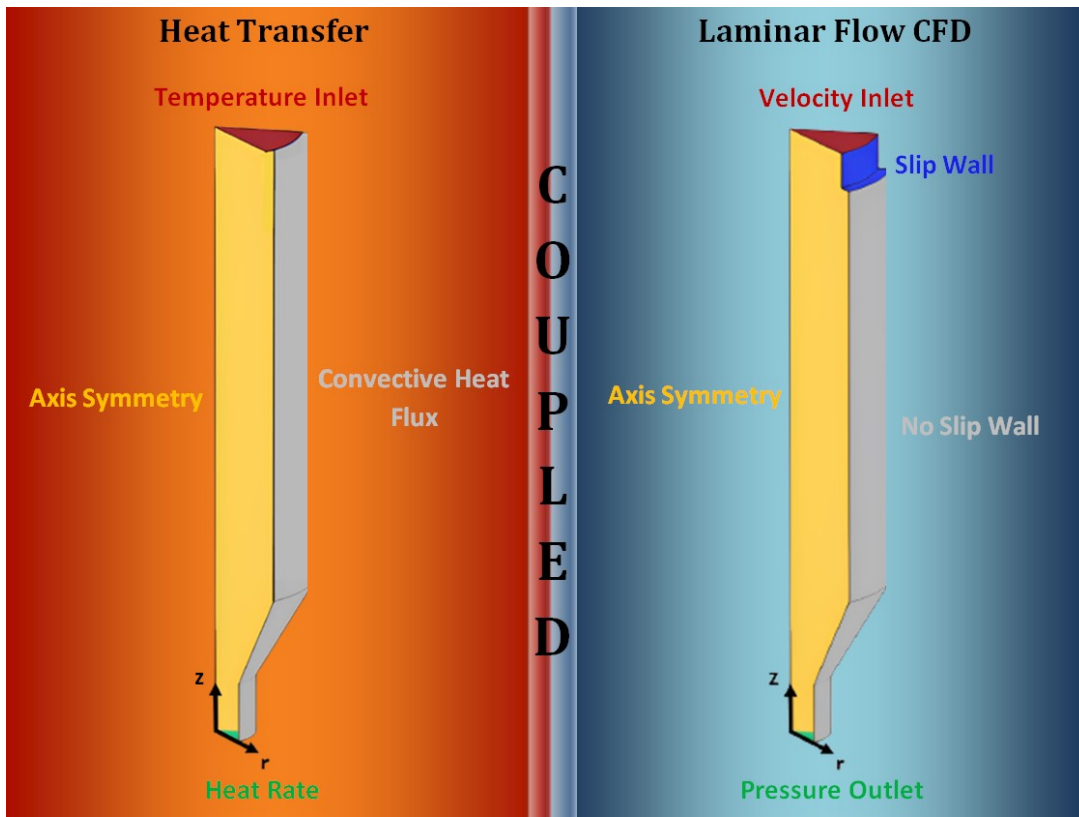
3.2.4. Οριακές Συνθήκες και Παράμετροι Επίλυσης

Οι οριακές συνθήκες του αξονοσυμμετρικού μοντέλου αφορούν τόσο στη ρεολογική επίλυση όσο και τη διάδοση θερμότητας σε καθεστώς μόνιμης κατάστασης με σύζευξη των αντίστοιχων επιλυτών. Για τη στρωτή ροή επιβλήθηκε οριακή συνθήκη ορισμένης ταχύτητας εισόδου Feeding Rate στην κορυφή του καναλιού, όπου εισήχθη το νήμα. Εφόσον η διάμετρος του νήματος d_f ίση με 1,75mm είναι ελαφρώς μικρότερη από τη διάμετρο του τμήματος εισόδου του υδροποιητή d_B ίσο με 2mm, θεωρείται ότι δεν υπάρχει τέλεια θερμική επαφή μεταξύ του νήματος και του υδροποιητή κατά την κίνηση προς τα κάτω. Έτσι θεωρήθηκε ένα κοντό τμήμα εισόδου μήκους 1mm με συνθήκη τέλει ολίσθησης μέσω του οποίου άγεται το στερεό νήμα στον υδροποιητή προκειμένου να αρχίσει να λιώνει και να αρχίζει να μην ολισθαίνει επί των τοιχωμάτων. Επομένως, το τοίχωμα του υπόλοιπου καναλιού μέχρι και την έξοδο μοντελοποιήθηκε με οριακή συνθήκη μη ολίσθησης, σύμφωνα με το μοντέλο του Bellini της παραγράφου 2.2.1. Στην έξοδο του τριχοειδούς του ακροφυσίου επιβλήθηκε οριακή συνθήκη στατικής πίεσης P ίση με την P_{atm} ή σχετική πίεση $P=0$.

Για τη θερμική επίλυση έγινε η υπόθεση ότι οι περιοχές πάνω από το τμήμα θερμικής διακοπής συμβάλλουν ελάχιστα στη θέρμανση του νήματος, επομένως η περιοχή ροής μπορεί να εκφυλιστεί αποκλειστικά στο τμήμα μετά τη θερμική διακοπή. Επιβλήθηκε θερμοκρασία εισόδου η θερμοκρασία περιβάλλοντος T_{in} ίση με 20°C. Στο τοίχωμα του καναλιού τέθηκε οριακή συνθήκη μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή, όπου θεωρήθηκε ομοιόμορφη εξωτερική θερμοκρασία τοιχώματος T_{wall} του καναλιού ίση με την επιθυμητή θερμοκρασία του συστήματος θέρμανσης για το ABS. Η ρύθμιση στην επιθυμητή τιμή γίνεται με το σύστημα αυτομάτου ελέγχου της θερμοαντικής διάταξης. Θεωρήθηκε μια τιμή τοπικού μέσου συντελεστή συναγωγής h , που αφορά στη διεπαφή τοιχώματος και τηγμένου ABS, ίση με 2000 W/(m²K). Η τιμή αυτή λαμβάνει υπόψη τις μετρήσεις τιμών του αντίστοιχου συντελεστή στην επαφή τοιχώματος (καλουπιού) και ABS σε πειράματα χύτευσης με έγχυση [160]-[161]. Επιπλέον συνυπολογίζονται τόσο οι διαφορές στον υδροποιητή της παρούσας εργασίας με τις πειραματικές διατάξεις των πειραμάτων της βιβλιογραφίας που αναφέρονται στη χύτευση με έγχυση όσο και οι διαφορές που σχετίζονται με τις ιδιότητες του υλικού, τις παραμέτρους επεξεργασίας και την τραχύτητα της επιφάνειας του τοιχώματος, οι οποίες επιδρούν στη τιμή του συντελεστή μεταφοράς. Στην έξοδο του ακροφυσίου τέθηκε ρυθμός παραγωγής θερμότητας μηδενικός.

Σημειώνεται ότι καθότι ο άξονας συμμετρίας της γεωμετρίας του μοντέλου αντιστοιχεί στον πραγματικό άξονα του συστήματος τροφοδοσίας, η βαρύτητα λαμβάνεται υπόψη.

Στην Εικόνα 26 αναπαρίστανται τα είδη των οριακών συνθηκών σε κάθε συνοριακό στοιχείο του μοντέλου και στον Πίνακα 5 οι τιμές των παραμέτρων αυτών που αφορούν στην παραμετρική επίλυση.



Εικόνα 26. Αναπαράσταση οριακών συνθηκών στο συζευγμένο μοντέλο επίλυσης της γεωμετρίας των υγροποιητών

Πίνακας 5. Τιμές των οριακών συνθηκών του συζευγμένου μοντέλου επίλυσης της γεωμετρίας των υγροποιητών

ΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ					
Θερμικής Διάδοσης			Ρεολογικές		
Επιφάνεια	Είδος	Τιμή	Επιφάνεια	Είδος	Τιμή
Εισόδου	Θερμοκρασία	$T_{in} = 20^{\circ}\text{C}$	Εισόδου	Ταχύτητα	Feeding Rate = $C(v)$ **
Τοιχώματος Καναλιού	Ροή Θερμότητας με Συναγωγή	$h = 2000 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$	Τοιχώματος Θερμικής Διακοπής	Τέλεια Ολίσθηση	
		$T_{wall} = C(T)$ *	Τοιχώματος Υγροποιητή	Μη Ολίσθηση Μηδενική Ταχύτητα στο Σύνορο	
Εξόδου	Ρυθμός Παραγωγής Θερμότητας	0	Εξόδου	Στατική Πίεση	P_{atm}

* $C(T) = 200, 225, 250$ [$^{\circ}\text{C}$]

** $C(v) = 0.0005, 0.001, 0.002, 0.003, 0.004, 0.006, 0.009, 0.012$ (Μόνο για E3D Volcano) [m/s]

4. Παρουσίαση Αποτελεσμάτων

Στην τρέχουσα ενότητα παρουσιάζεται η διαδικασία μετεπεξεργασίας και τα αποτελέσματα. Προκειμένου να εκπληρωθούν οι ερευνητικοί στόχοι, έμφαση δίνεται στην ανάλυση των ρεολογικών χαρακτηριστικών του νήματος θερμοπλαστικού ABS μέσω της παρουσίαση της κατανομής (προφίλ) της θερμοκρασίας, της πίεσης και της ταχύτητας κατά μήκος του καναλιού της ροής με εξαρτημένες παραμέτρους τον ογκομετρικό ρυθμό ροής και τη εξωτερική θερμοκρασία τοιχώματος του καναλιού. Η επιμέρους ανάλυση πραγματοποιείται για δύο διαφορετικά εμπορικά ακροφύσια, ένα μικρότερου μήκους, το E3D-V6 κι ένα μεγαλύτερο μήκους, το E3D Volcano.

Η παραμετρική διερεύνηση στοχεύει στη μελέτη της εξάρτησης της απαιτούμενης δύναμης εξώθησης (τροφοδοσίας) του τήγματος για κάθε ογκομετρικό ρυθμό και θερμοκρασία τοιχώματος αλλά και την εκτίμηση του μέγιστου ογκομετρικού ρυθμού ροής σε κάθε συνθήκη, με βάση τα ανωτέρω πειραματικά δεδομένα. Τέλος, πραγματοποιείται επικύρωση των αποτελεσμάτων με βάση πειραματικά αποτελέσματα σε αντίστοιχες ρεολογικές συνθήκες, που απαντώνται στη βιβλιογραφία.

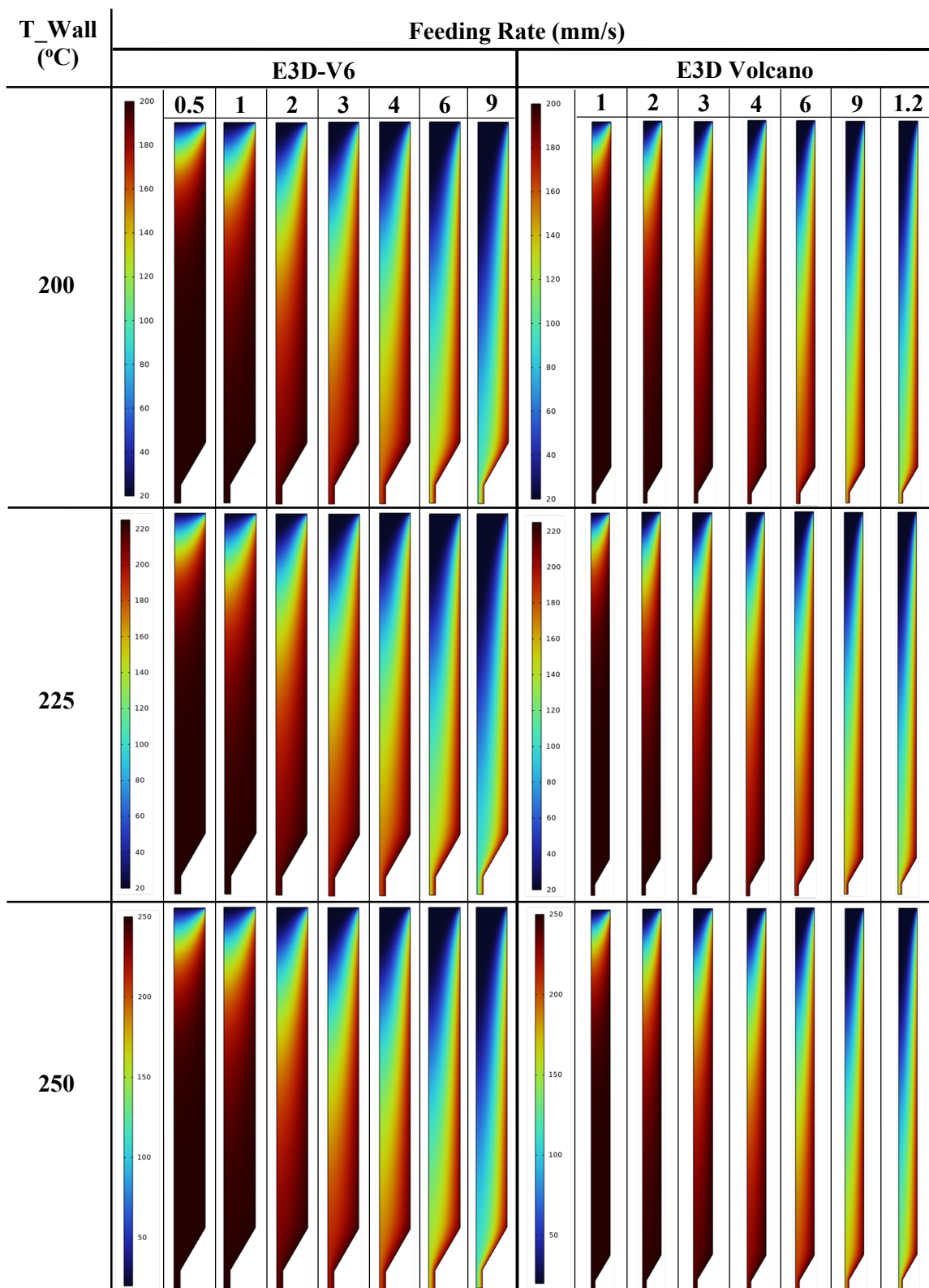
4.1. Ρεολογικά Χαρακτηριστικά Τήγματος

4.1.1. Θερμοκρασιακή Κατανομή

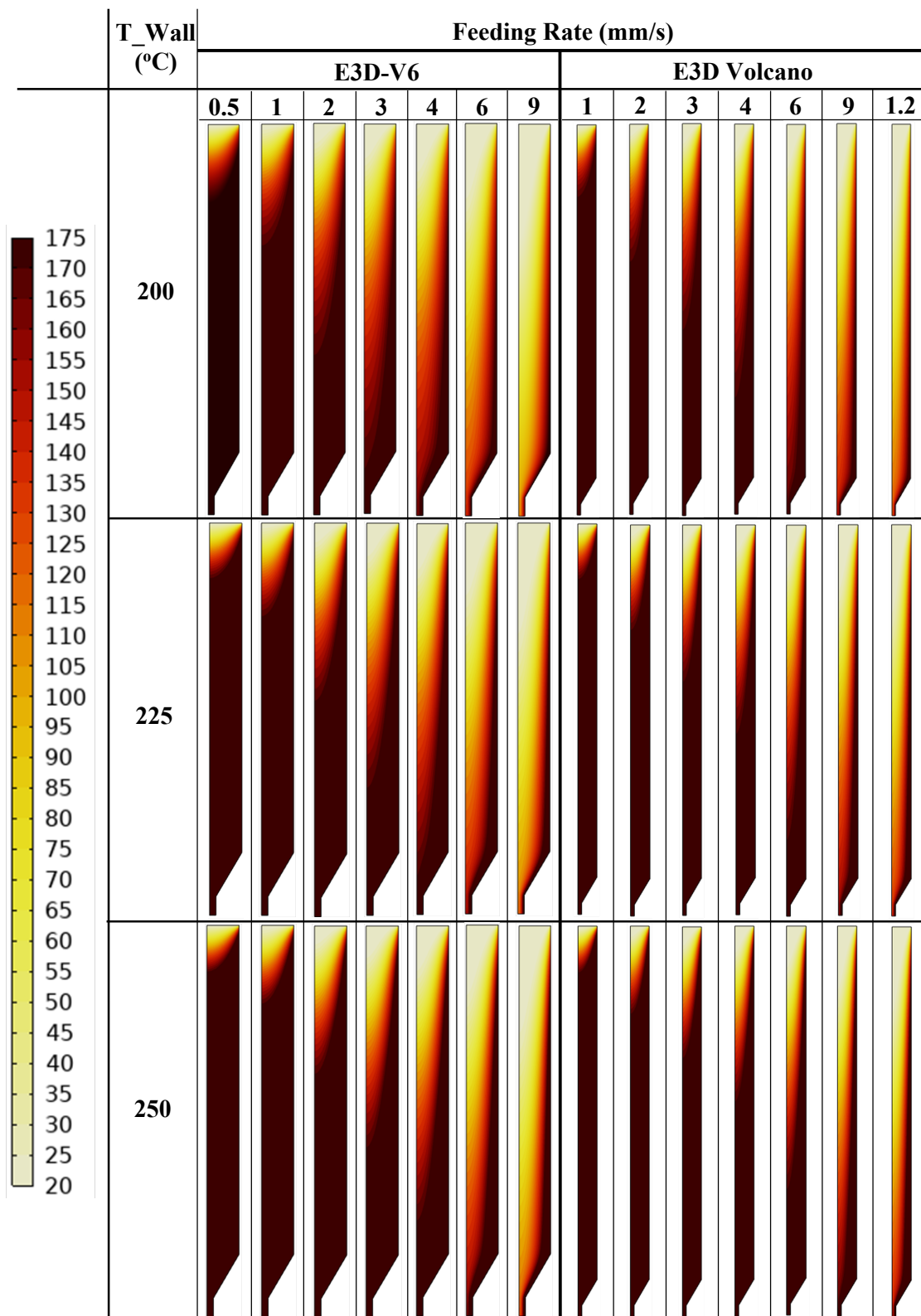
Οι προσομοιώσεις αποκαλύπτουν πώς το μήκος του τηγμένου πολυμερούς (ζώνη τήξης) είναι συνάρτηση της ταχύτητας του νήματος. Στη χαμηλότερη εξεταζόμενη ταχύτητα νήματος ίση με 0.5 mm/s, η θερμοκρασία μετάπτωσης υάλου επιτυγχάνεται αμέσως μετά την είσοδο στον υγροποιητή. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα μια συμπεριφορά τήξης που συμπίπτει με τα επικρατέστερα μοντέλα που υποθέτουν ότι το στερεό νήμα λειτουργεί ως έμβολο για να ωθήσει το τηγμένο πολυμερές μέσα από το ακροφύσιο. Καθώς η ταχύτητα του νήματος αυξάνεται, η θερμοκρασία μετάπτωσης υάλου πραγματοποιείται πλησιέστερα στην κωνική ζώνη μετάβασης του θερμού άκρου. Έτσι, η μεταφορά θερμότητας στο κανάλι θέρμανσης δεν είναι πλέον επαρκής για να λιώσει το νήμα. Όταν η ταχύτητα του νήματος αυξάνεται περαιτέρω, το νήμα τελικά λιώνει σε επαφή με το άκρο του ακροφυσίου και σχηματίζεται μια μεμβράνη τήξης. Αυτό αντανακλάται και στην κατανομή της ταχύτητας, όπου η μεμβράνη τήγματος είναι αισθητή με τη μορφή μέγιστης ταχύτητας κοντά στο τοίχωμα και ελάχιστης ταχύτητας στο κέντρο του ακροφυσίου. Σε αυτές τις ταχύτητες νήματος, η προσομοίωση συμφωνεί με το μοντέλο των Osswald et al. του οποίου η βασική υπόθεση είναι ο σχηματισμός μεμβράνης τήγματος. Το εύρος της ταχύτητας του νήματος στο οποίο σχηματίζεται μια μεμβράνη τήγματος είναι αισθητή από μια σημαντική αύξηση της δύναμης εξώθησης, καθώς ο ρυθμός τήξης γίνεται ο περιοριστικός παράγοντας της διαδικασίας. Με ένα μεγαλύτερο τμήμα κάνης υγροποιητή, μπορεί να μεταφερθεί μεγαλύτερη ποσότητα θερμότητας, έτσι ώστε ο σχηματισμός μιας μεμβράνης τήγματος στο κωνικό τμήμα να συμβαίνει μόνο σε υψηλότερες ταχύτητες νήματος.

Η κατανομή θερμοκρασίας του ABS στο κανάλι του υγροποιητή για διάφορους ρυθμούς ροής για τις τρεις επιθυμητές θερμοκρασίες θέρμανσης και για τα δύο διαφορετικά μήκη καναλιού (μικρό και μεγάλο) αναπαρίσταται στην Εικόνα 27.

Αντίστοιχα, οι κατανομές θερμοκρασίας που εστιάζουν στην ισοθερμική περιοχή της θερμοκρασίας μετάπτωσης υάλου T_g και 70°C πάνω από την T_g , όπου το ABS θεωρείται ότι ρέει ως υγρό, φαίνονται στην Εικόνα 28. Μέσω αυτών αναπαρίστανται οι μεταβατικές ζώνες μέχρι το ABS να έχει τηχθεί πλήρως οπότε και συμπεριφέρεται ως ρευστό στους 175°C .



Εικόνα 27. Κατανομή θερμοκρασίας του ABS στο κανάλι του υγροποιητή για διάφορους ρυθμούς ροής για τις τρεις επιθυμητές θερμοκρασίες θέρμανσης και για τα δύο διαφορετικά μήκη καναλιού. Καθώς η ταχύτητα του νήματος αυξάνεται και για χαμηλότερη θερμοκρασία τοιχώματος, η θερμοκρασία μετάπτωσης νάλου πραγματοποιείται πλησιέστερα στην κωνική ζώνη μετάβασης του θερμού άκρου. Η ίδια τάση παρατηρείται στο αυξημένο μήκος, ωστόσο ο μεγαλύτερος χρόνος επαφής με το θερμό τοίχωμα ευνοεί την τήξη έναντι του μικρού.



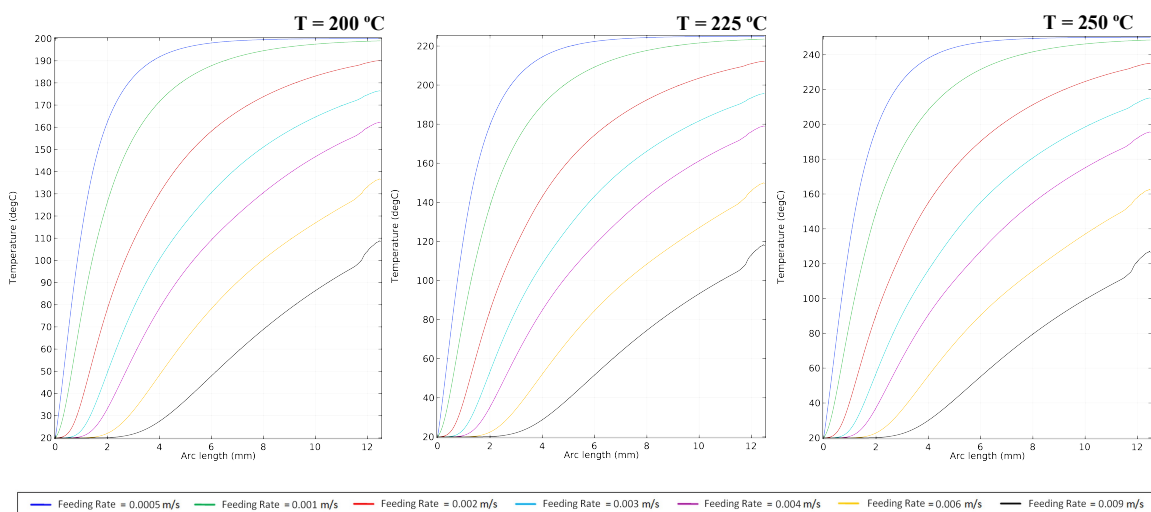
Εικόνα 28. Ισοθερμική περιοχή κατανομής θερμοκρασίας μετάπτωσης υάλου T_g και 70°C του ABS στο κανάλι του υγροποιητή για διάφορους ρυθμούς ροής για τις τρεις επιθυμητές θερμοκρασίες θέρμανσης και για τα δύο διαφορετικά μήκη καναλιού. Καθώς η ταχύτητα του νήματος αυξάνεται και για χαμηλότερη θερμοκρασία τοιχώματος, η τήξη πραγματοποιείται πλησιέστερα στην κωνική ζώνη μετάβασης του θερμού άκρου. Η ίδια τάση παρατηρείται στο αυξημένο μήκος, ωστόσο η τήξη ευνοείται έναντι του μικρού μήκους.

Σημειώνεται ότι ABS ως άμορφο πολυμερές δεν έχει στην πραγματικότητα συγκεκριμένο σημείο τήξης. Στη θερμοκρασία T_g ίση με 105°C μεταβαίνει από την υαλώδη κατάσταση του άκαμπτου στερεού σε ελαστική κατάσταση και με την μετέπειτα άνοδο της θερμοκρασίας μαλακώνει σταδιακά μέχρι τη πλήρη τήξη που επιτυγχάνεται σε πολύ μεγαλύτερη θερμοκρασία. Επειδή είναι γνωστή πειραματικά [140] η θερμοκρασία τήξης του PLA ίση με 155°C και ότι το ABS εκτυπώνεται καλά σε θερμοκρασία 20°C πάνω από αυτή που απαιτείται για το PLA, θεωρείται εδώ ότι το ABS τήκεται και ρέει καλά στους 175°C .

Για την καλύτερη κατανόηση της θερμοκρασιακής κατανομής του πολυμερούς, παρουσιάζεται η μεταβολή της θερμοκρασίας τόσο κατά μήκος του κεντρικού άξονα συμμετρίας της μήτρας του εξωθητή (αξονική κατανομή) όσο και στην ακτινική φορά στην έξοδο του ακροφυσίου, παραμετρικά για τους διαφορετικούς ρυθμούς ροής και θερμοκρασίες στόχους θερμαντήρα στα δύο διαφορετικά μήκη υγροποιητή.

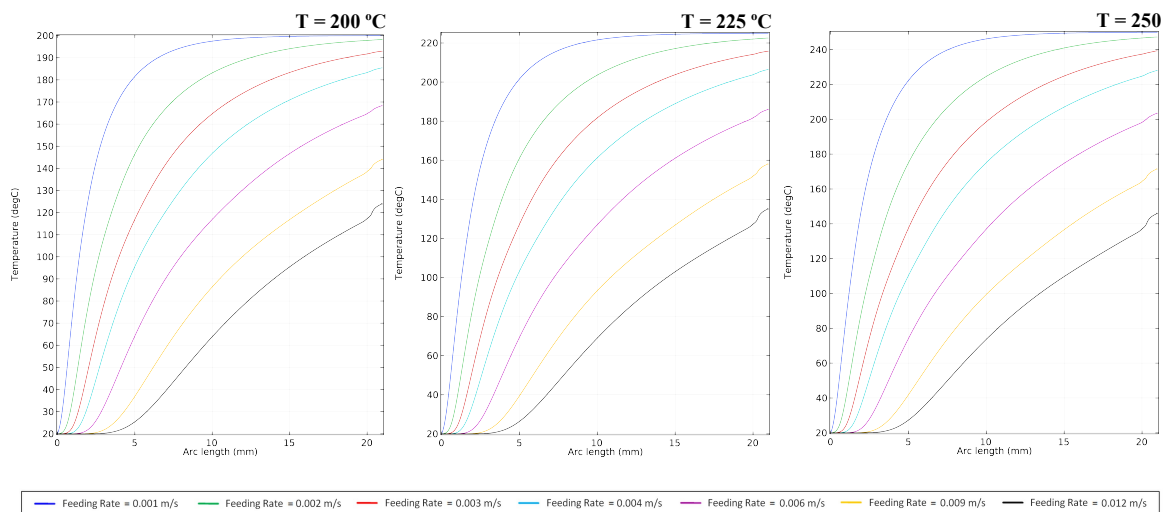
Η πρώτη τριάδα διαγραμμάτων της Εικόνας 29 αναφέρεται στην αξονική κατανομή της θερμοκρασίας κατά μήκος του μικρού ακροφυσίου E3D-V6 ενώ η δεύτερη τριάδα της Εικόνας 30 στην αξονική κατανομή κατά μήκος του μεγάλου ακροφυσίου E3D Volcano. Όπως επιβεβαιώνεται και από τα διαγράμματα αυτά, με το μεγαλύτερο μήκος επιτυγχάνεται πιο απότομη αύξηση της θερμοκρασίας επιτρέποντας έτσι υψηλότερες θερμοκρασίες στην έξοδο του ακροφυσίου. Επιπλέον, όπως φάνηκε κι από τις δισδιάστατες θερμοκρασιακές κατανομές κι επιβεβαιώνεται και κατά μήκος των αντίστοιχων τομών, καθώς η ταχύτητα του νήματος αυξάνεται και για χαμηλότερη θερμοκρασία τοιχώματος, η θερμοκρασία μετάπτωσης υάλου πραγματοποιείται πλησιέστερα στην κωνική ζώνη μετάβασης του θερμού άκρου. Για ορισμένους, μάλιστα, ρυθμούς ροής και πάνω φαίνεται ότι δεν προλαβαίνει καν το πολυμερές να τηχθεί μέχρι την έξοδο στο κέντρο του ακροφυσίου, κάτι το οποίο όπως θα αναλυθεί και στη συνέχεια συσχετίζεται με το μέγιστο ογκομετρικό ρυθμό ροής που μπορεί να επιτευχθεί σε κάθε περίπτωση.

Symmetry Axis Temperature Profile for Different Wall Temperature and Feeding Rate



Εικόνα 29. Αξονική κατανομή της θερμοκρασίας κατά μήκος του μικρού ακροφυσίου E3D-V6 για διαφορετικούς ογκομετρικούς ρυθμούς ροής και θερμοκρασίες στόχους του θερμαντήρα.

Symmetry Axis Temperature Profile for Different Wall Temperature and Feeding Rate



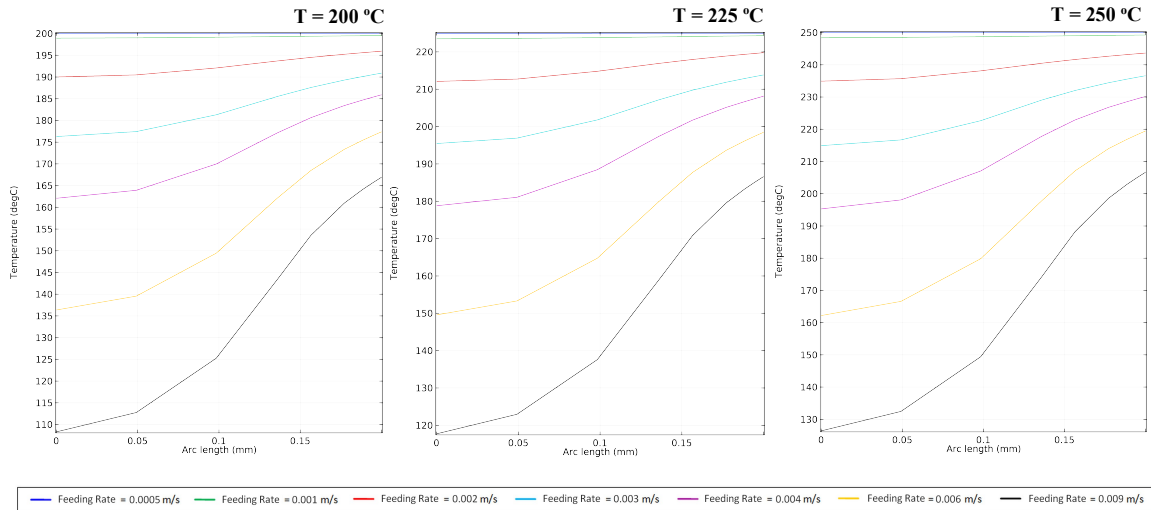
Εικόνα 30. Αξονική κατανομή της θερμοκρασίας κατά μήκος του μεγάλου ακροφυσίου E3D Volcano για διαφορετικούς ογκομετρικούς ρυθμούς ροής και θερμοκρασίες στόχους του θερμαντήρα.

Τα παραπάνω διαγράμματα μπορούν να δώσουν άμεσες ποσοτικές πληροφορίες ως προς το σημείο ως προς τον άξονα συμμετρίας όπου επιτυγχάνεται τόσο η τήξη του πολυμερούς όσο κι η επιθυμητή θερμοκρασία στόχος που τίθεται στο θερμαντήρα. Ενδεικτικά, εστιάζοντας στα παραπάνω διαγράμματα για επιθυμητή θερμοκρασία θερμαντήρα ίση με 225°C, μια κλασική θερμοκρασία εκτύπωσης ABS με FFF εξάγονται ορισμένες παρατηρήσεις.

- Στον υγροποιητή μικρού μήκους για ταχύτητες τροφοδοσίας νήματος μέχρι και 4 mm/s, η θερμοκρασία του ABS στον κεντρικό άξονα του υγροποιητή μπορεί να επιτύχει τη θερμοκρασία τήξης πριν την έξοδο του ακροφυσίου. Αντίστοιχα στον υγροποιητή μεγάλου μήκους η ταχύτητα τροφοδοσίας πάνω από την οποία δεν επιτυγχάνεται τήξη ούτε εντός του τριχοειδούς πριν την έξοδο του ακροφυσίου είναι τα 6mm/s, αναμενόμενα υψηλότερη.
- Η θερμοκρασία που ορίζεται στο θερμαντικό τοίχωμα μπορεί να φτάσει στον κεντρικό άξονα του ακροφυσίου μόνο σε μικρές ταχύτητες τροφοδοσίας. Συγκεκριμένα στο μικρό μήκος αυτό συμβαίνει μέχρι και τα 1mm/s, οριακά πριν την έξοδο, ενώ στο μεγάλο μήκος μέχρι και τα 2mm/s.

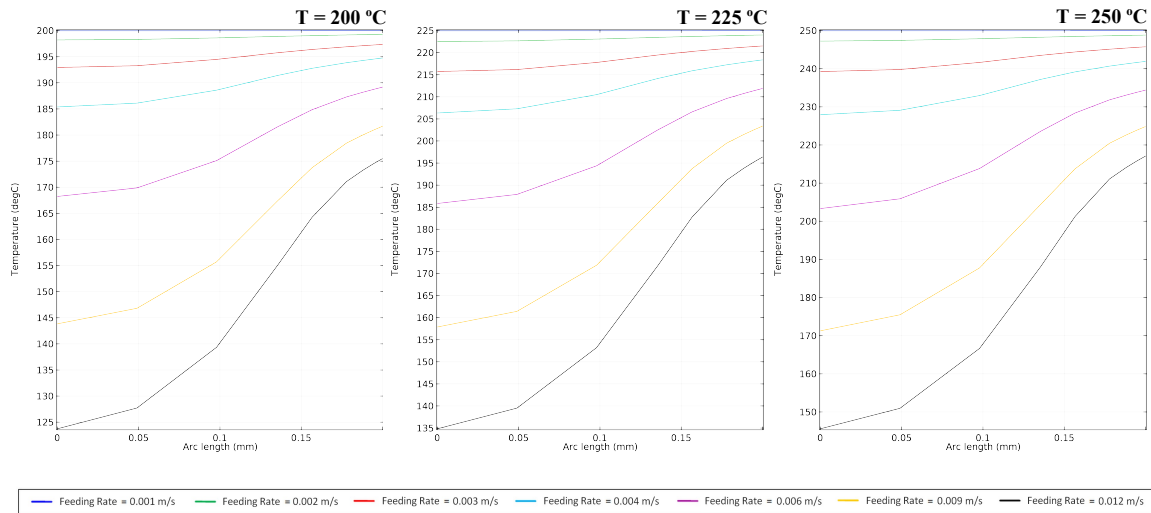
Αντίστοιχες ποσοτικές πληροφορίες μπορούν να εξαχθούν από τα γραφήματα κατανομής θερμοκρασίας στην ακτινική τομή εξόδου του ακροφυσίου. Η τριάδα διαγραμμάτων της Εικόνας 31 αναφέρεται στην ακτινική κατανομή της θερμοκρασίας στην έξοδο του ακροφυσίου E3D-V6 ενώ η τριάδα της Εικόνας 32 στην ακτινική κατανομή κατά μήκος του μεγάλου ακροφυσίου E3D Volcano. Είναι προφανές και από τις κατανομές αυτές ότι υπάρχει άμεση εξάρτηση τόσο από τη θερμοκρασία του θερμαντήρα όσο και από την ταχύτητα τροφοδοσίας του νήματος. Στη χαμηλότερη ταχύτητα τροφοδοσίας νήματος που εξετάστηκε σε κάθε γεωμετρία, αναμένεται μια ισοθερμική κατανομή ακτινικά της ροής, καθώς έχει προλάβει να επιτευχθεί στον κεντρικό άξονα θερμοκρασία ίση με του θερμαντικού. Με την αύξηση της ταχύτητας τροφοδοσίας του νήματος, η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του κέντρου του νήματος και του τοιχώματος αυξάνεται. Έτσι, αναμένεται μια μεγάλη διαφορά ιξώδους μεταξύ επιφάνειας και κέντρου, η οποία αντανακλάται στην ακτινική κατανομή θερμοκρασίας που απεικονίζεται στις δύο εικόνες.

Output Axis Temperature Profile for Different Wall Temperature and Feeding Rate



Εικόνα 31. Ακτινική κατανομή της θερμοκρασίας στην έξοδο του μικρού ακροφυσίου E3D-V6 για διαφορετικούς ογκομετρικούς ρυθμούς ροής και θερμοκρασίες στόχους του θερμαντήρα.

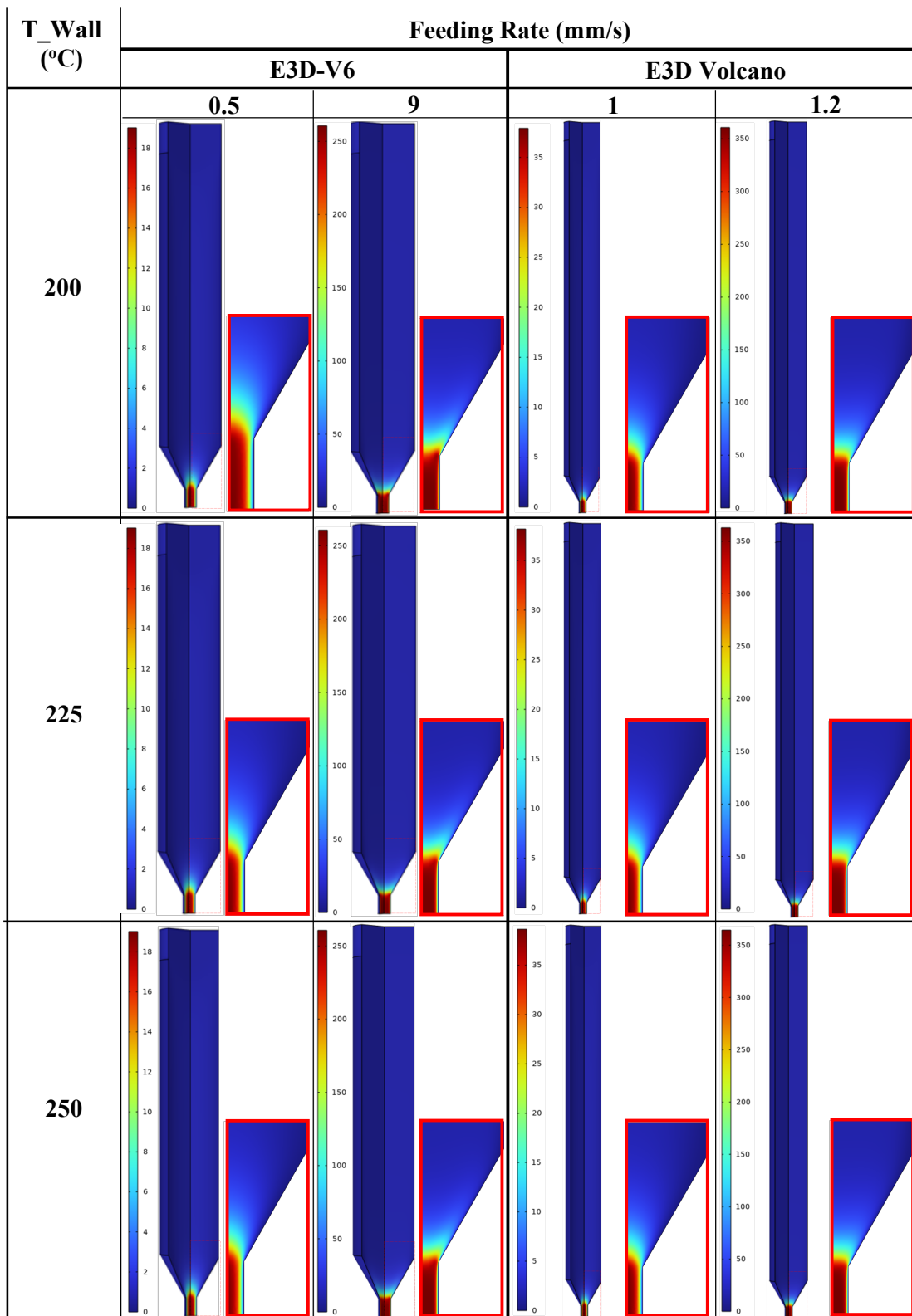
Output Axis Temperature Profile for Different Wall Temperature and Feeding Rate



Εικόνα 32. Ακτινική κατανομή της θερμοκρασίας στην έξοδο του μεγάλου ακροφυσίου E3D Volcano για διαφορετικούς ογκομετρικούς ρυθμούς ροής και θερμοκρασίες στόχους του θερμαντήρα.

4.1.2. Κατανομή Ταχύτητας

Η ταχύτητα ροής είναι ομοιόμορφη και σταθερή στο μεγαλύτερο μήκος του υγροποιητή. Η ταχύτητα αυξάνεται στην κωνική περιοχή του ακροφυσίου και του τριχοειδούς τμήματος λόγω της μείωσης της επιφάνειας διατομής. Επομένως, η διατμητική τάση στον τοίχο αυξάνεται σημαντικά και φτάνει στη μέγιστη τιμή της πριν εξαχθεί το τήγμα από το ακροφύσιο. Η κατανομή της ταχύτητας του ABS στο κανάλι του υγροποιητή για τον ελάχιστο και το μέγιστο ρυθμό ροής που μελετήθηκε για τις τρεις επιθυμητές θερμοκρασίες θέρμανσης και για τα δύο διαφορετικά μήκη καναλιού, το μικρό και το μεγάλο, αναπαρίσταται στην Εικόνα 33.

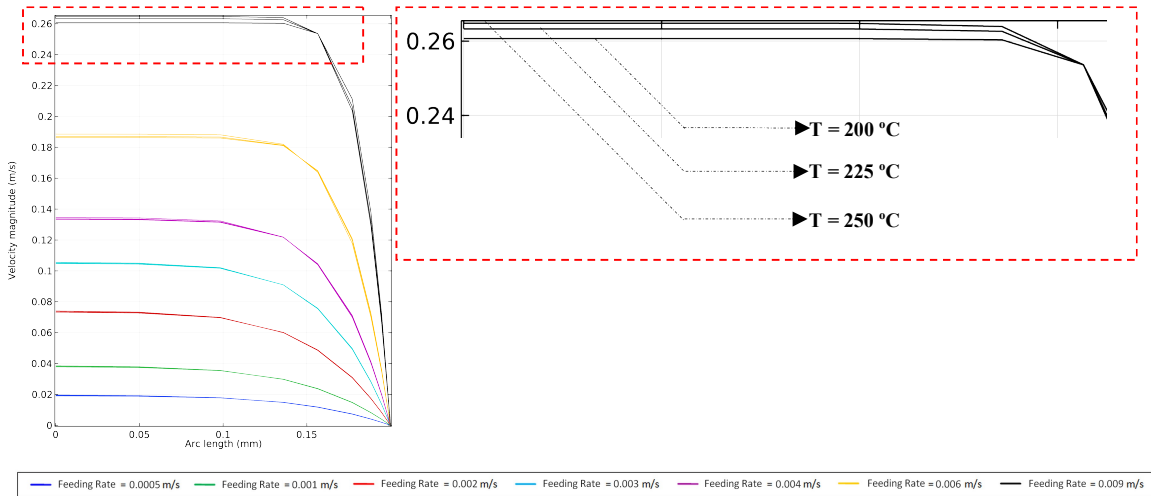


Εικόνα 33. Κατανομή ταχύτητας του ABS στο κανάλι του υγροποιητή για το μέγιστο και ελάχιστο ρυθμό ροής για τις τρεις επιθυμητές θερμοκρασίες θέρμανσης και για τα δύο διαφορετικά μήκη καναλιού. Η ταχύτητα ροής είναι ομοιόμορφη και σταθερή στο μεγαλύτερο μήκος του υγροποιητή. Η ταχύτητα αυξάνεται στην κωνική περιοχή του ακροφυσίου και του τριχοειδούς τμήματος λόγω της μείωσης της επιφάνειας διατομής. Οι αλλαγές στη θερμοκρασία του ακροφυσίου έχουν πολύ ασθενέστερη επίδραση στην κατανομή της ταχύτητας στην έξοδο του ακροφυσίου από ό,τι οι αλλαγές στην ταχύτητα τροφοδοσίας του νήματος.

Για την καλύτερη μελέτη της συμπεριφοράς της ταχύτητας του πολυμερούς έχει νόημα η παρουσίαση της μεταβολής της ταχύτητάς του σε δύο ακτινικές τομές, μία στην έξοδο του ακροφυσίου και μία στο κωνικό τμήμα.

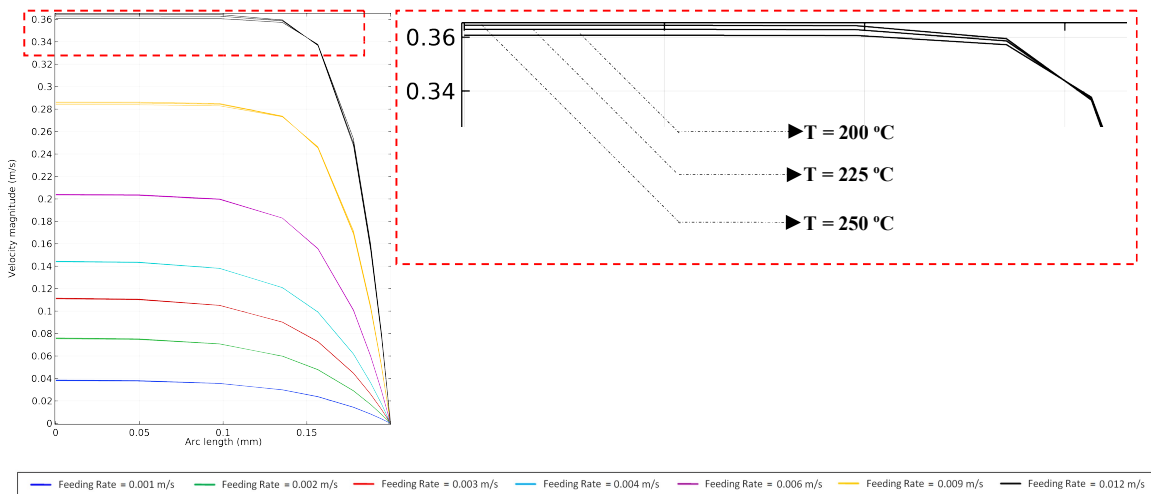
Στα διαγράμματα της Εικόνας 34 παρουσιάζεται η ακτινική κατανομή ταχύτητας στην έξοδο του μικρού ακροφυσίου E3D-V6 για διαφορετικές ταχύτητες τροφοδοσίας του νήματος και θερμοκρασίες θερμαντήρα, ενώ στα διαγράμματα της Εικόνας 35 η αντίστοιχη ακτινική κατανομή ταχύτητας στην έξοδο του μεγάλου ακροφυσίου E3D Volcano.

Velocity as a Function of Output Axis Distance for Different Wall Temperature and Feeding Rate



Εικόνα 34. Παραμετρικές καμπύλες ακτινικής κατανομής ταχύτητας στην έξοδο του μικρού ακροφυσίου E3D-V6 για διαφορετική ταχύτητα τροφοδοσίας του νήματος και τιθέμενη θερμοκρασία του θερμαντήρα. Με την αύξηση της ταχύτητας τροφοδοσίας, η ακτινική κατανομή της ταχύτητας δείχνει τη συμπεριφορά μιας ροής βύσματος. Η κατανομή της ταχύτητας στην έξοδο του ακροφυσίου εξαρτάται ελάχιστα από την προκαθορισμένη θερμοκρασία του τοιχώματος.

Velocity as a Function of Output Axis Distance for Different Wall Temperature and Feeding Rate

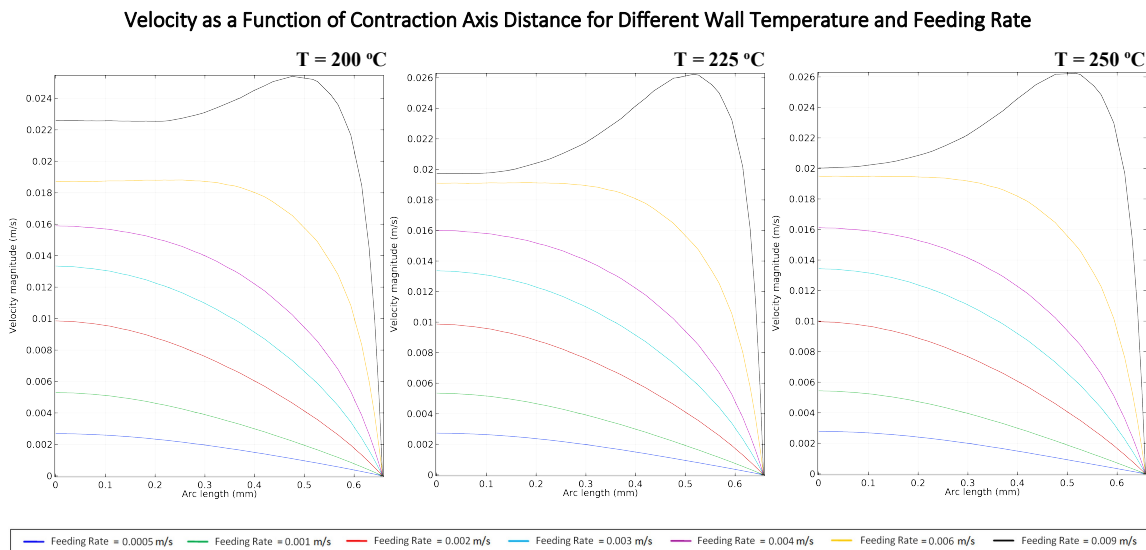


Εικόνα 35. Παραμετρικές καμπύλες ακτινικής κατανομής ταχύτητας στην έξοδο του μικρού ακροφυσίου E3D Volcano για διαφορετική ταχύτητα τροφοδοσίας του νήματος και τιθέμενη θερμοκρασία του θερμαντήρα.

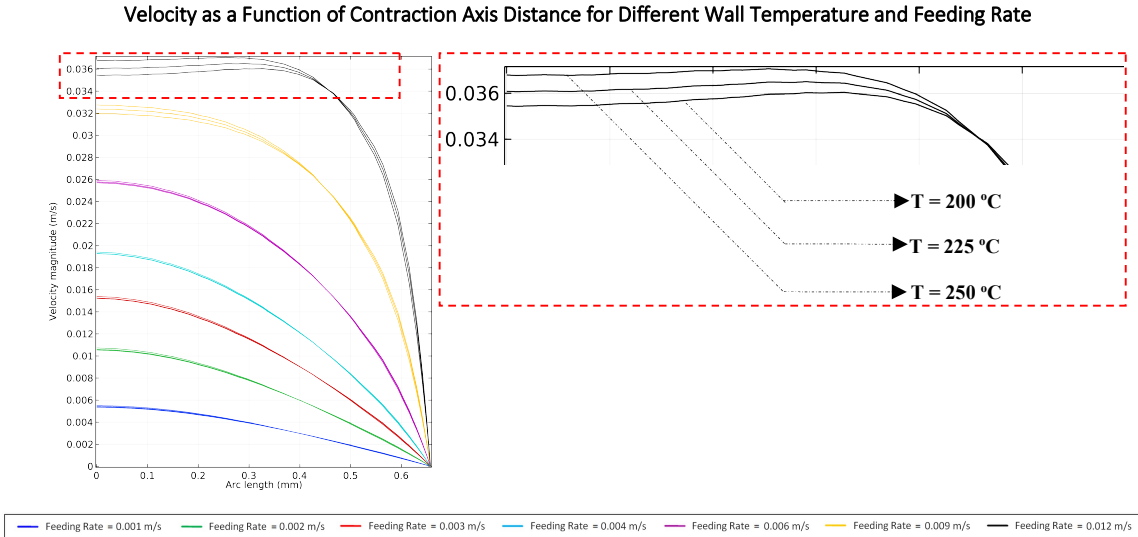
Όπως μπορεί εύκολα να παρατηρηθεί από τα παραπάνω γραφήματα, με την αύξηση της ταχύτητας τροφοδοσίας, η ακτινική κατανομή της ταχύτητας δείχνει τη συμπεριφορά μιας ροής βύσματος, δηλαδή απότομη αύξηση από τη μηδενική τιμή στο τοίχωμα στη μέγιστη σταθερή τιμή στον κεντρικό άξονα συμμετρίας του ακροφυσίου.

Και στις δύο περιπτώσεις ακροφυσίων, όπως διακρίνεται από τα μεγεθυμένα σχήματα των διαγραμμάτων, όπου ξεχωρίζουν οι τρεις καμπύλες που αντιστοιχούν στις τρεις διαφορετικές τιθέμενες θερμοκρασίες υγροποιητή, η κατανομή της ταχύτητας στην έξοδο του ακροφυσίου εξαρτάται ελάχιστα από την προκαθορισμένη θερμοκρασία του τοιχώματος. Όσο μεγαλύτερη η ταχύτητα τροφοδοσίας, τόσο μεγαλύτερη αυτή η εξάρτηση. Για μικρές ταχύτητες τροφοδοσίας οι αντίστοιχες καμπύλες για διαφορετικές θερμοκρασίες σχεδόν ταυτίζονται. Αυτό το αποτέλεσμα μπορεί να εξηγηθεί από τη χαμηλή θερμική αγωγιμότητα των πολυμερών, κάτι το οποίο επιβεβαιώνεται και πειραματικά από τους Peng et al. που έδειξαν ότι οι αλλαγές στη θερμοκρασία του ακροφυσίου έχουν πολύ ασθενέστερη επίδραση στην κατανομή της ταχύτητας στην έξοδο από ό,τι οι αλλαγές στην ταχύτητα τροφοδοσίας του νήματος [126].

Στα διαγράμματα της Εικόνας 36 παρουσιάζεται η ακτινική κατανομή ταχύτητας εντός της κωνικής ζώνης του μικρού ακροφυσίου E3D-V6 για διαφορετικές ταχύτητες τροφοδοσίας του νήματος και θερμοκρασίες θερμαντήρα, ενώ στα διαγράμματα της Εικόνας 37 η αντίστοιχη ακτινική κατανομή ταχύτητας στην κωνική ζώνη του μεγάλου ακροφυσίου E3D Volcano.



Εικόνα 36. Παραμετρικές καμπύλες ακτινικής κατανομής ταχύτητας στο κωνικό τμήμα του μικρού ακροφυσίου E3D-V6 για διαφορετική ταχύτητα τροφοδοσίας του νήματος και τιθέμενη θερμοκρασίας του θερμαντήρα. Σε μικρές ταχύτητες τροφοδοσίας νήματος παρατηρείται συμπεριφορά μη νευτώνειου ρευστού με τη μέγιστη ταχύτητα στο κέντρο και μηδενική στο τοίχωμα. Για μεγάλες ταχύτητες τροφοδοσίας νήματος, η μέγιστη ταχύτητα του πολυμερούς υφίσταται κοντά στο τοίχωμα, ενώ η ελάχιστη στο κέντρο του ακροφυσίου, λόγω της ύπαρξης μιας λεπτής μεμβράνης τήξης, σύμφωνα με το μοντέλο των Osswald et al.



Εικόνα 37. Παραμετρικές καμπύλες ακτινικής κατανομής ταχύτητας στο κωνικό τμήμα του μεγάλου ακροφυσίου E3D Volcano για διαφορετική ταχύτητα τροφοδοσίας του νήματος και τιθέμενη θερμοκρασία του θερμαντήρα. Σε μικρές ταχύτητες τροφοδοσίας νήματος παρατηρείται συμπεριφορά μη νευτώνειου ρευστού όπως και στο μικρό ακροφύσιο. Για τη μεγάλη ταχύτητα τροφοδοσίας νήματος, η μέγιστη ταχύτητα του πολυμερούς υφίσταται κοντά στο τοίχωμα, ενώ η ελάχιστη στο κέντρο του ακροφυσίου. Λόγω της ύπαρξης του μεγαλύτερου τμήματος κάνης του υγροποιητή, μπορεί να μεταφερθεί μεγαλύτερη ποσότητα θερμότητας, έτσι ώστε ο σχηματισμός μιας μεμβράνης τήγματος να συμβαίνει μόνο σε πολύ υψηλότερες ταχύτητες νήματος, επομένως το φαινόμενο αυτό δεν παρατηρείται τόσο έντονα όσο στο μικρό ακροφύσιο για τις ταχύτητες τροφοδοσίας που εξετάστηκε, γι' αυτό και μεγεθύνεται στο σχήμα δεξιά, ώστε να γίνει αντιληπτό.

Παρατηρείται και για τα δύο ακροφύσια, για τη μεγαλύτερη ταχύτητα τροφοδοσίας νήματος, ότι η μέγιστη ταχύτητα του πολυμερούς υφίσταται κοντά στο τοίχωμα, ενώ η ελάχιστη στο κέντρο του ακροφυσίου. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι το νήμα σ' αυτό το ρυθμό τροφοδοσίας τελικά λιώνει σε επαφή με το άκρο του ακροφυσίου, επομένως σχηματίζεται μια λεπτή μεμβράνη τήξης. Η ζώνη τήξης έχει διαφορετική ρεολογική συμπεριφορά σε σχέση με το γειτονικό άτηκτο πολυμερές, το οποίο συμβάλλει στην παρατηρούμενη ανομοιογένεια της ταχύτητας, η οποία επιβεβαιώνεται κι τις αντίστοιχες κατανομές της Εικόνας 33. Σε αυτή την υψηλή ταχύτητα τροφοδοσίας, η προσομοίωση συμφωνεί με το μοντέλο των Osswald et al. του οποίου η βασική υπόθεση είναι ο σχηματισμός μεμβράνης τήγματος.

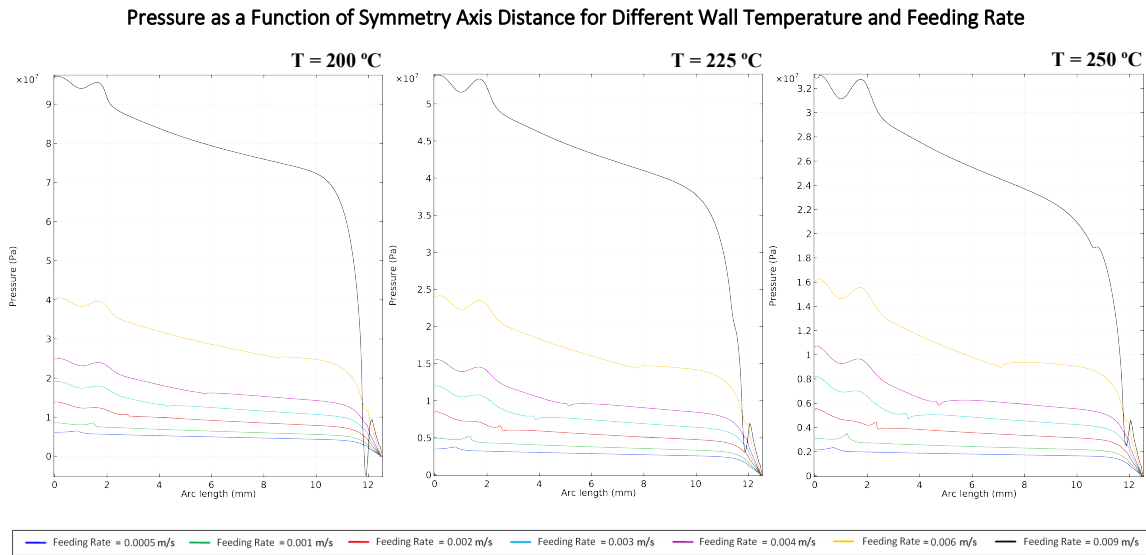
Στο μεγάλο ακροφύσιο από την άλλη, λόγω της ύπαρξης του μεγαλύτερου τμήματος κάνης του υγροποιητή, μπορεί να μεταφερθεί μεγαλύτερη ποσότητα θερμότητας, έτσι ώστε ο σχηματισμός μιας μεμβράνης τήγματος να συμβαίνει μόνο σε πολύ υψηλότερες ταχύτητες νήματος, επομένως το φαινόμενο αυτό δεν παρατηρείται τόσο έντονα όσο στο μικρό ακροφύσιο για τις ταχύτητες τροφοδοσίας που εξετάστηκε.

Σε μικρότερες ταχύτητες τροφοδοσίας νήματος παρατηρείται συμπεριφορά μη νευτώνειου ρευστού και η κατανομή της ταχύτητας είναι οι προβλεπόμενες από τις αναλυτικές σχέσεις που προβλέπουν μέγιστη ταχύτητα στο κέντρο και μηδενική στο τοίχωμα, λόγω συνθήκης μη ολίσθησης.

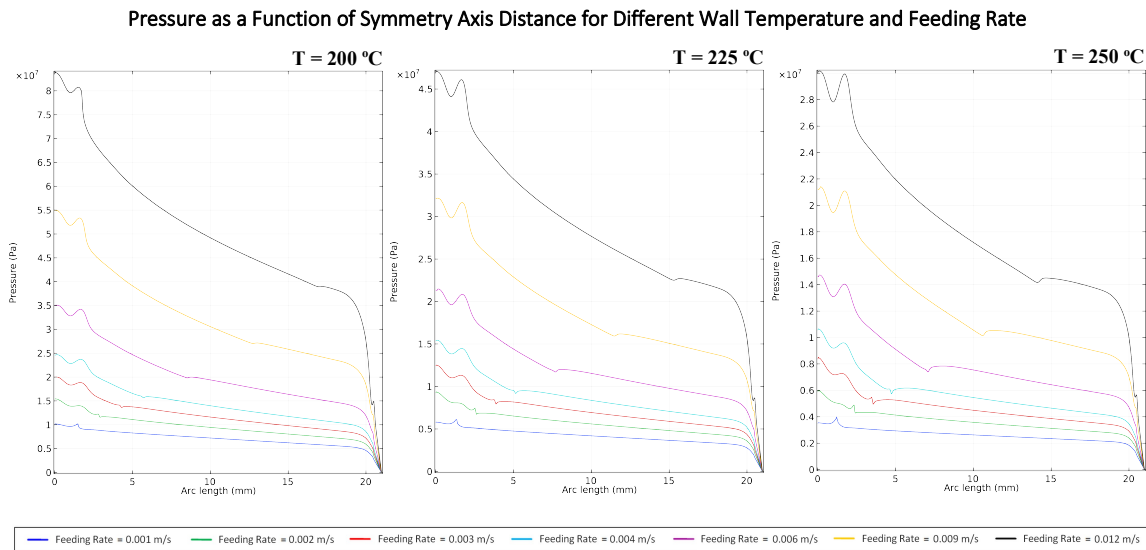
4.1.3. Κατανομή Πίεσης

Η μελέτη της πτώσης πίεσης στα δύο ακροφύσια για διαφορετικές ταχύτητες τροφοδοσίας και θερμοκρασίες θερμαντήρα πραγματοποιείται της παρουσίας των σχετικών κατανομών στις αντίστοιχες τομές αλλά και της μεταβολής της πίεσης κατά μήκος του κεντρικού άξονα συμμετρίας του εξωθητήρα του εκάστοτε ακροφυσίου.

Στα διαγράμματα της Εικόνας 38 παρουσιάζεται η αξονική κατανομή της πίεσης κατά μήκος του κεντρικού άξονα συμμετρίας του μικρού ακροφυσίου E3D-V6 για διαφορετικές ταχύτητες τροφοδοσίας του νήματος και θερμοκρασίες θερμαντήρα, ενώ στα διαγράμματα της Εικόνας 39 η αντίστοιχη αξονική κατανομή κατά μήκος του κεντρικού άξονα του μεγάλου ακροφυσίου E3D Volcano.



Εικόνα 38. Παραμετρικές καμπύλες αξονική κατανομής της πίεσης κατά μήκος του κεντρικού άξονα συμμετρίας του μικρού ακροφυσίου E3D-V6 για διαφορετικές ταχύτητες τροφοδοσίας του νήματος και θερμοκρασίες θερμαντήρα.



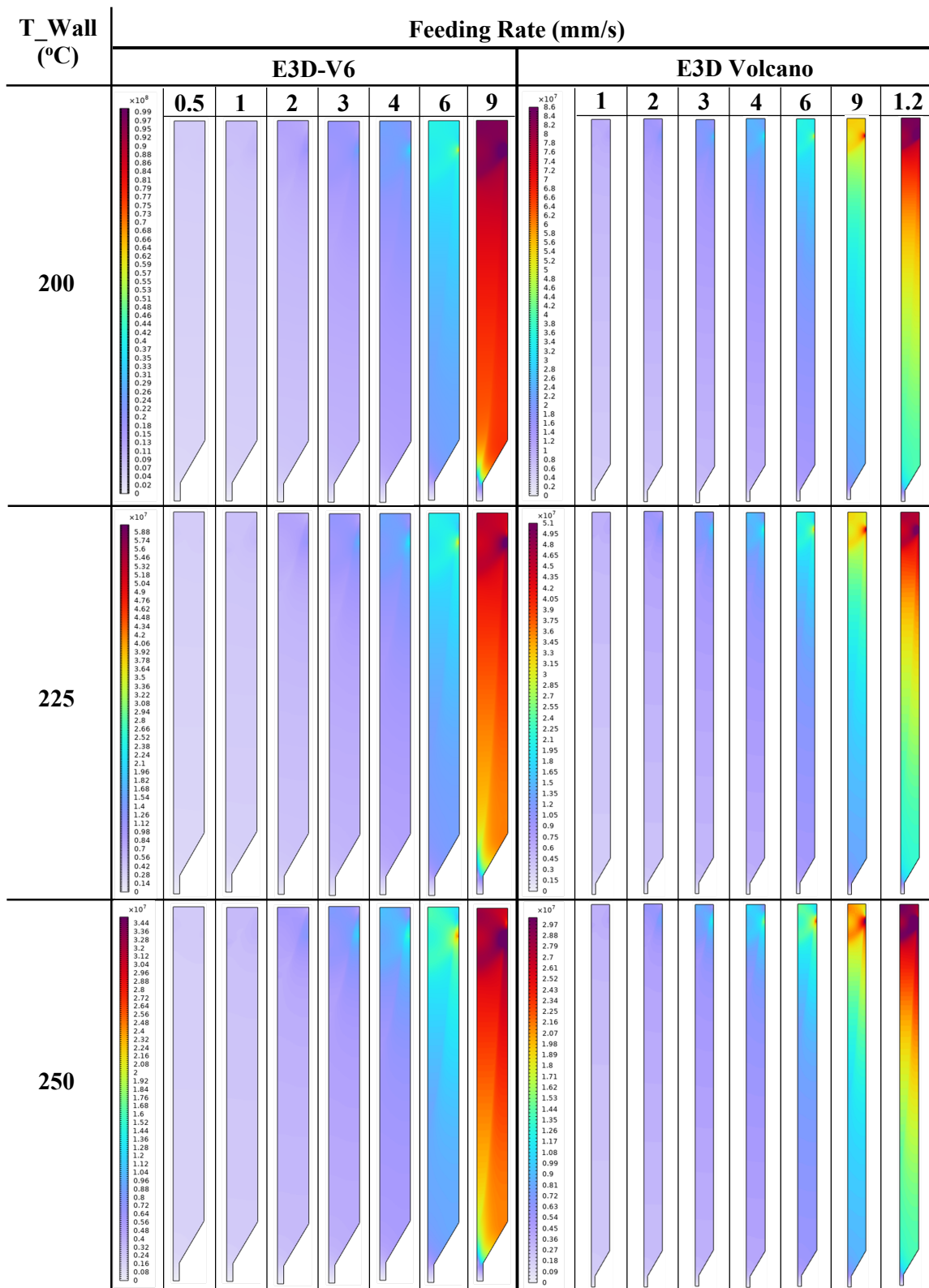
Εικόνα 39. Παραμετρικές καμπύλες αξονική κατανομής της πίεσης κατά μήκος του κεντρικού άξονα συμμετρίας του μεγάλου ακροφυσίου E3D Volcano για διαφορετικές ταχύτητες τροφοδοσίας του νήματος και θερμοκρασίες θερμαντήρα.

Όπως φαίνεται από τα παραπάνω γραφήματα, υπάρχει η ίδια τάση στον υγροποιητή και στην έξοδο του ακροφυσίου ως προς την πίεση, καθώς όλα φανερώνουν πτώση πίεσης στο μηδέν. Μάλιστα, η πίεση ελαττώνεται με τη μείωση της διαμέτρου του καναλιού ως μια ακολουθία αύξησης της ταχύτητας στις μικρότερες διατομές. Το μεγαλύτερο μέρος της πτώσης πίεσης υφίσταται στο τριχοειδές ακροφύσιο όπως επιβεβαιώνουν και οι αναλυτικές σχέσεις που αναπτύχθηκαν στο Κεφάλαιο 2. Επιπροσθέτως, με την αύξηση του ρυθμού ροής, η ολική πτώση πίεσης εντός του υγροποιητή αυξάνεται. Αντιθέτως, με τη αύξηση της θερμοκρασίας και του συνολικού μήκους του ακροφυσίου, η ολική πτώση πίεσης μειώνεται λόγω μείωσης του ιξώδους, εφόσον μεταφέρεται μεγαλύτερη ποσότητα θερμότητας υπ' αυτές τις συνθήκες.

Πέραν της γενικής τάσης μεταβολής της πίεσης, μπορούν να παρατηρηθούν σημειακές ανομοιομορφίες με τη μορφή αιχμών στην πίεση λόγω αύξησης του ιξώδους στη θερμοκρασία μετάπτωσης υάλου της οποίας η θέση μετατοπίζεται προς την έξοδο του ακροφυσίου με την αύξηση της ταχύτητας τροφοδοσίας του νήματος. Αυτές οι αιχμές μπορούν να δικαιολογηθούν μαθηματικά από το τροποποιημένο μοντέλο WLF που επιλέχθηκε για τη μεταβολή του ιξώδους του άμορφου ABS με τη θερμοκρασία, το οποίο απαιτεί μια απότομη αύξηση στη τιμή του ιξώδους μηδενικής διάτμησης στη θερμοκρασία μετάπτωσης υάλου για να οριοθετήσει την περιοχή του υγρού από τη στερεά περιοχή. Τα γραφήματα επιπλέον φανερώνουν την παρουσία μιας περιοχής αυξημένης πίεσης άρα αυξημένου ιξώδους αμέσως μετά το τμήμα εισόδου που έχει οριακή συνθήκη τέλειας ολίσθησης, άρα υφίσταται μια περιοχή ανακυκλοφορίας (δίνη), όπου το ρευστό υψηλού ιξώδους ρέει ανάντη κατά μήκος του τοιχώματος του υγροποιητή. Η χαμηλή θερμοκρασία και το υψηλό ιξώδες στην είσοδο του υγροποιητή αποτρέπουν την αντίστροφη ροή του τηγμένου υλικού προς την ψήκτρα. Η περιοχή ανακυκλοφορίας έχει επίσης παρατηρηθεί στις προσομοιώσεις ροής μιας φάσης μέσω του υγροποιητή από τους Phan et al. [129].

Ιδιαίτερη αναφορά μπορεί να γίνει στις καμπύλες της μεγαλύτερης ταχύτητας τροφοδοσίας των 9mm/s και στις 3 θερμοκρασίες στο μικρό ακροφύσιο, οι οποίες φανερώνουν λίγο πριν την έξοδο απότομη πτώση πίεσης, και ειδικά στους 200°C ακόμα και κάτω από την ατμοσφαιρική, και αμέσως μετά άλμα πάνω από την ατμοσφαιρική λίγο πριν την έξοδο του ακροφυσίου. Αυτό γίνεται καθώς η θερμοκρασία μετάπτωσης υάλου που οριοθετεί τη περιοχή στερεού-ρευστού πραγματοποιείται ακριβώς πριν την έξοδο, επομένως λόγω ανάστροφης διαφοράς πίεσης μεταξύ εισόδου και εξόδου στο τριχοειδές τμήμα του ακροφυσίου εμποδίζεται η εξώθηση σ αυτή τη ταχύτητα. Ανάλογη συμπεριφορά παρατηρείται, λιγότερο έντονα μέσω μικρών αιχμών, στην περίπτωση του μεγάλου ακροφυσίου στη μεγάλη ταχύτητα τροφοδοσίας των 1.2mm/s, με τη διαφορά τη μεγαλύτερη πτώση πίεσης στο τμήμα κάνης του υγροποιητή λόγω του μεγαλύτερου μήκους.

Οι παραπάνω παρατηρήσεις επιβεβαιώνονται και από την κατανομή πίεσης του ABS στο κανάλι του υγροποιητή για διάφορους ρυθμούς ροής για τις τρεις επιθυμητές θερμοκρασίες θέρμανσης και για τα δύο διαφορετικά μήκη καναλιού, όπως αναπαρίσταται στην Εικόνα 40. Λόγω μεγάλου εύρους τιμών πίεσης σε Pascal για μια σταθερή θερμοκρασία και ανεπάρκεια ανάλογου χρωματικού εύρους, η αναπαράσταση είναι δύσκολη. Η επιπλέον πληροφορία που μπορεί να εξαχθεί από τις κατανομές αυτές είναι η αύξηση της πίεσης κοντά στο τοίχωμα σε όλες τις περιπτώσεις στο σημείο μετάβασης από την οριακή συνθήκη τέλειας ολίσθησης στην οριακή συνθήκη μη ολίσθησης που οριοθετεί τις περιοχές στερεού – ρευστού πολυμερούς. Πράγματι για μη νευτώνειο ρευστό η πτώση πίεσης είναι μέγιστη στο τοίχωμα, επειδή εκεί η διατμητική τάση του ρευστού μεγιστοποιείται. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται πιο έντονα σε μεγαλύτερες ταχύτητες τροφοδοσίας, γιατί τότε η ταχύτητα διάτμησης και η διατμητική τάση είναι μεγαλύτερη.

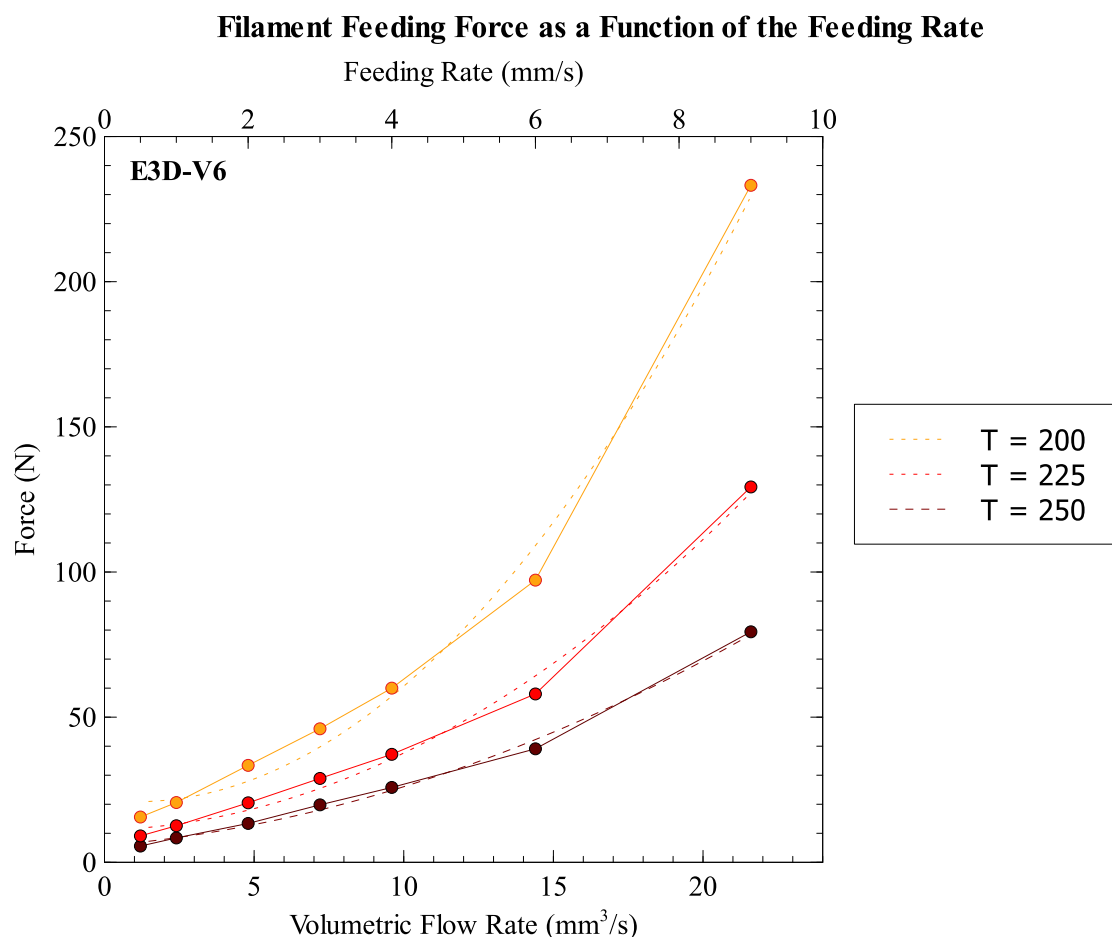


Εικόνα 40. Κατανομή πίεσης του ABS στο κανάλι του υγροποιητή για διαφορετικούς ρυθμούς τροφοδοσίας στις τρεις επιθυμητές θερμοκρασίες θέρμανσης και για τα δύο διαφορετικά μήκη καναλιού. Η πίεση ελαττώνεται με τη μείωση της διαμέτρου του καναλιού μέχρι να φτάσει στην ατμοσφαιρική. Το μεγαλύτερο μέρος της πτώσης πίεσης υφίσταται στο τριχοειδές ακροφύσιο. Με την αύξηση του ρυθμού ροής, η ολική πτώση πίεσης εντός του υγροποιητή αυξάνεται. Αντιθέτως, με την αύξηση της θερμοκρασίας και του συνολικού μήκους του ακροφυσίου, η ολική πτώση πίεσης μειώνεται λόγω μείωσης του ιξώδους. Σημειακές ανομοιομορφίες ερμηνεύονται ανάλογα.

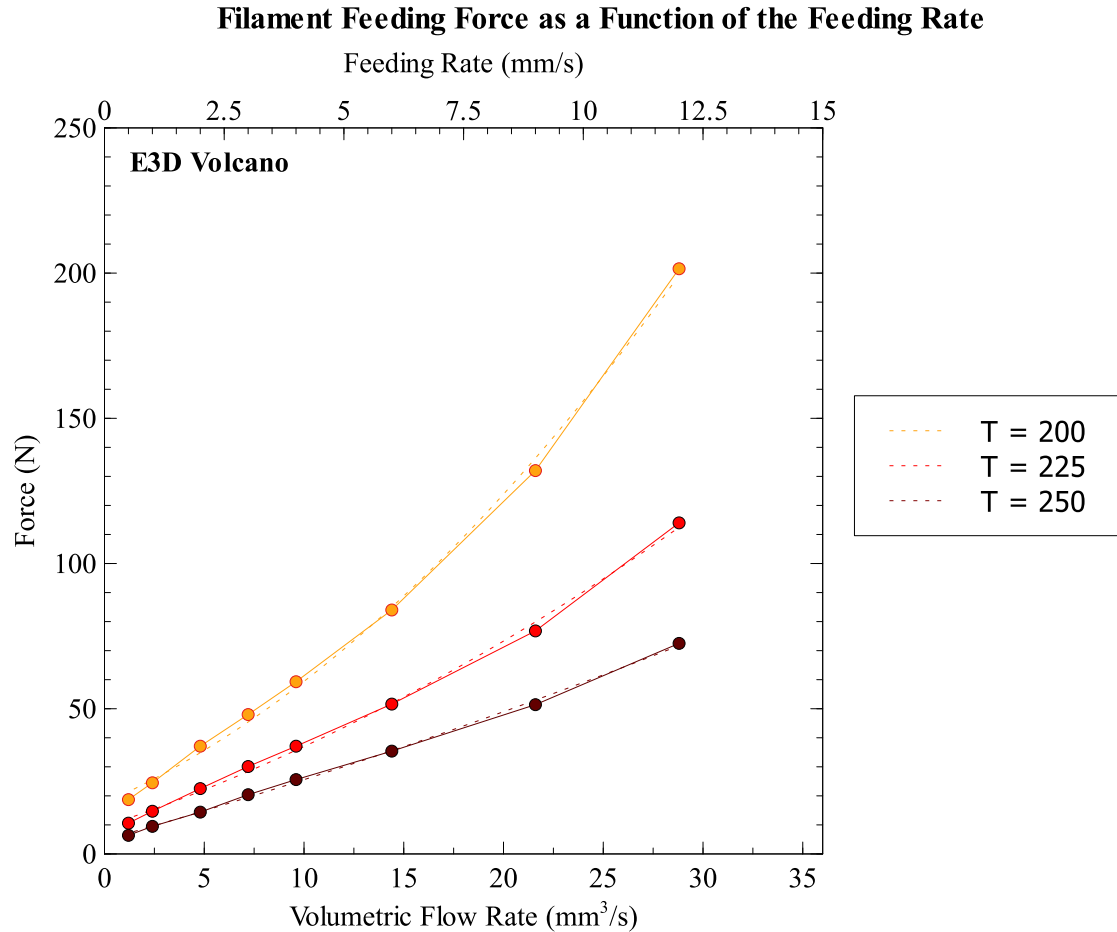
4.2. Εξάρτηση Κρίσιμων Μεγεθών κι Επικύρωση

4.2.1. Δύναμη Τροφοδοσίας

Από τα γραφήματα πτώσης πίεσης για κάθε ακροφύσιο, θερμοκρασία και ογκομετρικό ρυθμό ροής φαίνεται η μέγιστη πτώση πίεσης μέχρι την ατμοσφαιρική. Μέσω αυτής υπολογίζεται αναλυτικά σε κάθε περίπτωση η δύναμη τροφοδοσίας ή εξώθησης μέσω της σχέσης 2.27 με δεδομένη τη διατομή του νήματος ίση με 2.4 mm^2 . Έτσι προκύπτουν οι καμπύλες της δύναμης τροφοδοσίας συναρτήσει της ταχύτητας τροφοδοσίας και του ογκομετρικού ρυθμού ροής για κάθε πειραματική θερμοκρασία θερμαντήρα τόσο για το μικρό ακροφύσιο E3D-V6 όσο και για το μεγάλο E3D Volcano, όπως φαίνεται στην Εικόνα 41 και Εικόνα 42 αντίστοιχα.



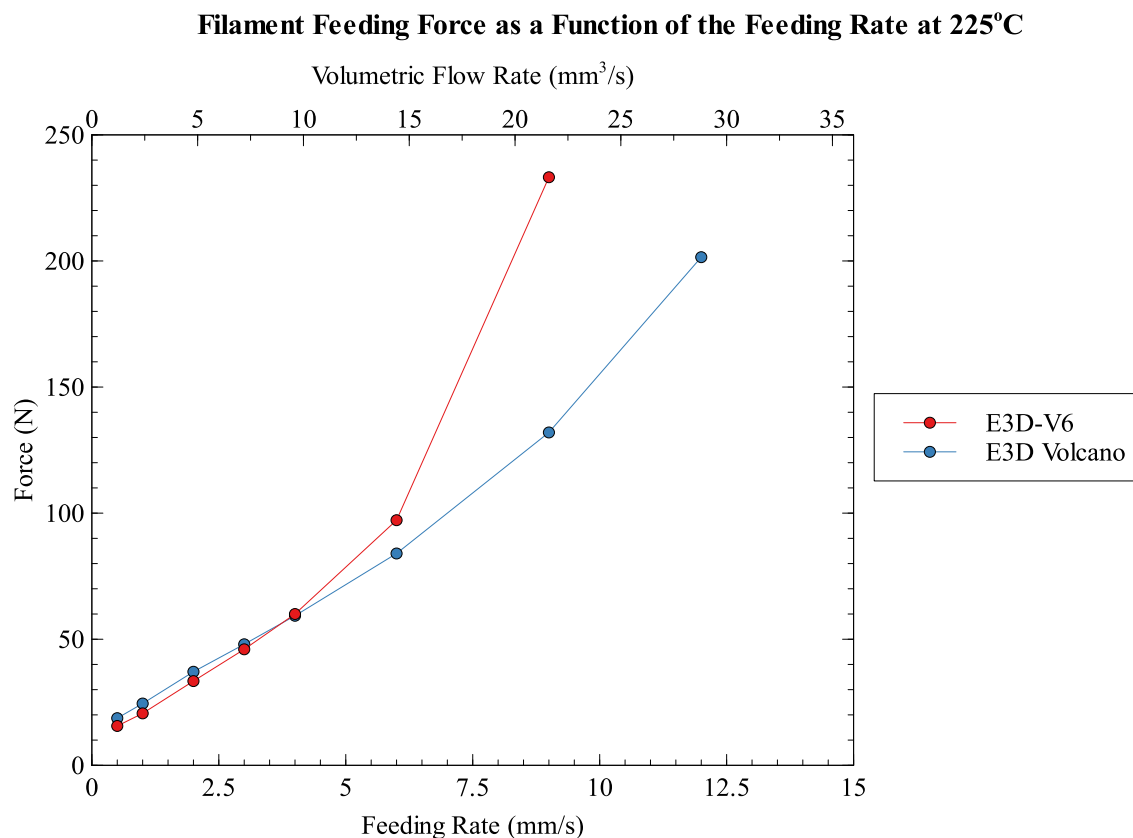
Εικόνα 41. Εξάρτηση δύναμης τροφοδοσίας συναρτήσει της ταχύτητας τροφοδοσίας και του ογκομετρικού ρυθμού ροής για κάθε πειραματική θερμοκρασία θερμαντήρα για το μικρό ακροφύσιο E3D-V6. Με συνεχείς γραμμές ενώνονται τα πειραματικά σημεία, ενώ με διακεκομμένες οι καμπύλες που προκύπτουν ως πολυωνμικές παρεμβολές 2^{ου} βαθμού που δείχνουν την τάση της αντίστοιχης μεταβολής. Όσο αυξάνεται η θερμοκρασία του υγροποιητή, η δύναμη τροφοδοσίας γίνεται μικρότερη, με την εξάρτηση της δύναμης τροφοδοσίας από τον ρυθμό τροφοδοσίας να ακολουθεί την ίδια τάση για διαφορετικές θερμοκρασίες υγροποιητή.



Εικόνα 42. Εξάρτηση δύναμης τροφοδοσίας συναρτήσει της ταχύτητας τροφοδοσίας και του ογκομετρικού ρυθμού ροής για κάθε πειραματική θερμοκρασία θερμαντήρα για το μεγάλο ακροφύσιο E3D Volcano. Με συνεχείς γραμμές ενώνονται τα πειραματικά σημεία, ενώ με διακεκομμένες οι καμπύλες που προκύπτουν ως πολυωνυμικές παρεμβολές 2^{ου} βαθμού που δείχνουν την τάση της αντίστοιχης μεταβολής. Οι εξαρτώμενες τάσεις είναι αντίστοιχες με το μικρό ακροφύσιο.

Εξετάζοντας τα αποτελέσματα, φαίνεται ότι όταν αυξάνεται η θερμοκρασία του υγροποιητή, η δύναμη τροφοδοσίας γίνεται μικρότερη, λόγω του χαμηλότερου ιξώδους του πολυμερούς, όπως αναμενόταν. Επιπλέον, το πείραμα δείχνει ότι η εξάρτηση της δύναμης τροφοδοσίας από τον ρυθμό τροφοδοσίας ακολουθεί την ίδια τάση για διαφορετικές θερμοκρασίες υγροποιητή. Πρώτον, υπάρχει μια περιοχή περίπου γραμμικής αύξησης της δύναμης ως συνάρτηση του ρυθμού τροφοδοσίας. Πάνω από κάποιο κρίσιμο όριο που ονομάζεται μέγιστος ρυθμός τροφοδοσίας, η δύναμη αυξάνεται πιο απότομα και ταλαντώνεται σε συνάρτηση με το χρόνο. Η γραμμική αύξηση της δύναμης σχετίζεται με το σταθερό καθεστώς εξώθησης. Όταν ξεπεραστεί ο μέγιστος ρυθμός τροφοδοσίας, η εξώθηση εισέρχεται σε ασταθές καθεστώς λόγω της έλλειψης τήξης του νήματος. Έτσι, ο μέγιστος ρυθμός τροφοδοσίας εκφράζει το όριο της κανονικής λειτουργίας του θερμού άκρου. Με βάση αυτό, φαίνεται ότι ο μέγιστος ρυθμός τροφοδοσίας αυξάνεται με τη θερμοκρασία του υγροποιητή, επεκτείνοντας έτσι το παράθυρο λειτουργίας του θερμού άκρου.

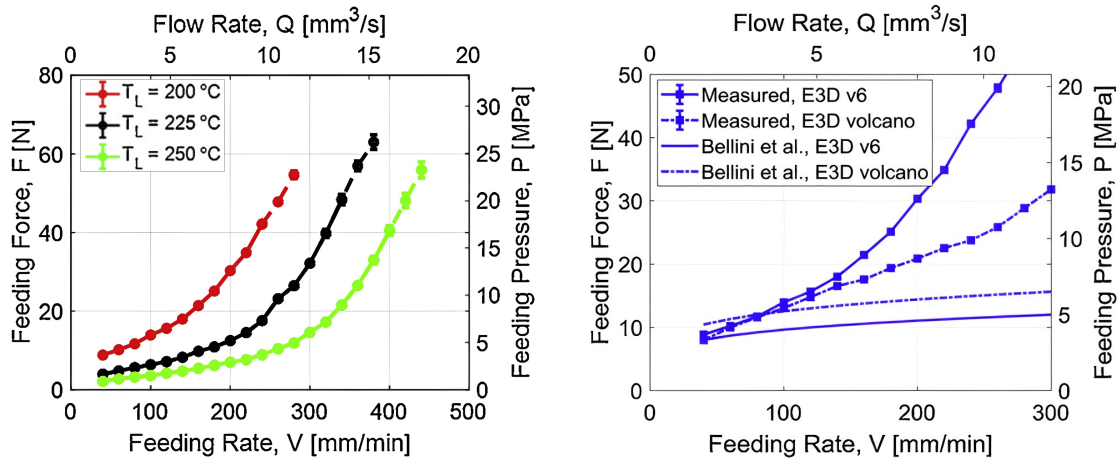
Συγκρίνοντας τη δύναμη τροφοδοσίας στα δύο ακροφύσια, μικρού και μεγάλου μήκους κάνης, φαίνεται ότι σε χαμηλούς ρυθμούς τροφοδοσίας η επίδραση του μήκους είναι αμελητέα και μετράται σχεδόν η ίδια δύναμη τροφοδοσίας και για τους δύο υγροποιητές. Από την άλλη πλευρά, όταν ο ρυθμός τροφοδοσίας είναι μεγάλος, η μετρούμενη δύναμη είναι χαμηλότερη για το μακρύτερο υγροποιητή, καθώς το πολυμερές θερμαίνεται σε υψηλότερη θερμοκρασία πριν εισέλθει στο τμήμα συστολής, λόγω μεγαλύτερης επιφάνειας θερμικής συναλλαγής. Επιπλέον, το σταθερό καθεστώς εξώθησης, όπου η δύναμη αυξάνεται γραμμικά, επεκτείνεται για τον μακρύτερο υγροποιητή. Έτσι, το μήκος του υγροποιητή επηρεάζει τον μέγιστο ρυθμό τροφοδοσίας, αυξάνοντάς τον. Οι παρατηρήσεις αυτές επιβεβαιώνονται και από τις καμπύλες που αναπαρίστανται στην Εικόνα 43, οι οποίες δείχνουν σε κοινό γράφημα για μια σταθερή θερμοκρασία θερμαντήρα 225°C την εξάρτηση της δύναμης εξώθησης για διαφορετικούς ρυθμούς ροής στα δύο ακροφύσια.



Εικόνα 43. Εξάρτηση της δύναμης τροφοδοσίας συναρτήσει της ταχύτητας τροφοδοσίας και του ογκομετρικού ρυθμού ροής για τα δύο ακροφύσια, το μικρό και το μεγάλο, για μια πειραματική θερμοκρασία θερμαντήρα 225°C. Σε χαμηλούς ρυθμούς τροφοδοσίας η επίδραση του μήκους είναι αμελητέα. Όταν ο ρυθμός τροφοδοσίας είναι μεγάλος, η μετρούμενη δύναμη είναι χαμηλότερη για το μακρύτερο υγροποιητή.

Προκειμένου να πραγματοποιηθεί η επικύρωση, γίνεται σύγκριση με βιβλιογραφικά πειραματικά δεδομένα. Στην Εικόνα 44 φαίνονται οι πειραματικές τιμές της δύναμης τροφοδοσίας σε συνάρτηση με τη ταχύτητα τροφοδοσίας νήματος όπως μετρήθηκαν για το θερμό άκρο μηχανής E3D-V6 με διάμετρο ακροφυσίου 0.4mm στην εργασία των Serdeczny et al. [140]. Οι ράβδοι σφάλματος σε υψηλούς ρυθμούς τροφοδοσίας υποδεικνύουν τη ταλάντωση της δύναμης σε συνάρτηση με το χρόνο σε ψηλές ταχύτητες τροφοδοσίας. Επιπλέον φαίνεται η εξάρτηση της δύναμης τροφοδοσίας συναρτήσει της ταχύτητας

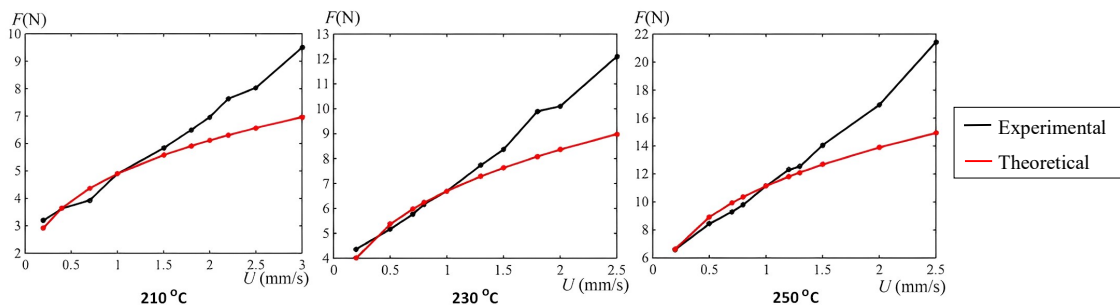
τροφοδοσίας και του ογκομετρικού ρυθμού ροής για τα δύο ακροφύσια, το μικρό και το μεγάλο, για μια πειραματική θερμοκρασία θερμαντήρα 200°C.



Εικόνα 44. Αριστερά. Η δύναμη τροφοδοσίας του νήματος που μετράται ως συνάρτηση του ρυθμού τροφοδοσίας σε διαφορετικές θερμοκρασίες χρησιμοποιώντας ακροφύσιο E3D-V6 με διάμετρο 0.4 mm και υλικό τροφοδοσίας ABS. Οι ράβδοι δείχνουν την τυπική απόκλιση της δύναμης. Δεξιά. Εξάρτηση της δύναμης τροφοδοσίας συναρτήσεως της ταχύτητας τροφοδοσίας και του ογκομετρικού ρυθμού ροής για τα δύο ακροφύσια, το μικρό και το μεγάλο, για μια πειραματική θερμοκρασία θερμαντήρα 200°C. Πραγματοποιείται σύγκριση με τις θεωρητικές τιμές του μοντέλου των Bellini et al. Τα γραφήματα αφορά στην εργασία των Serdeczny et al. [140].

Παρατηρείται μικρή υπερίμηση των τιμών της δύναμης της προσομοίωσης στην τρέχουσα εργασία σε σχέση με τις αντίστοιχες πειραματικές. Η απόκλιση οφείλεται στο μικρότερο θερμαινόμενο μήκος που χρησιμοποιήθηκε στην εργασία μας σχετικά με αυτό που χρησιμοποιήθηκε στην εργασία των Serdeczny et al. Επιβεβαιώνεται πλήρως από τις πειραματικές τιμές της βιβλιογραφίας ότι σε χαμηλούς ρυθμούς τροφοδοσίας η επίδραση του μήκους του υγροποιητή είναι αμελητέα και μετράται η ίδια δύναμη τροφοδοσίας και για τους δύο υγροποιητές, ενώ για μεγαλύτερες ταχύτητες τροφοδοσίας, η μετρούμενη δύναμη είναι χαμηλότερη για τον μακρύτερο υγροποιητή.

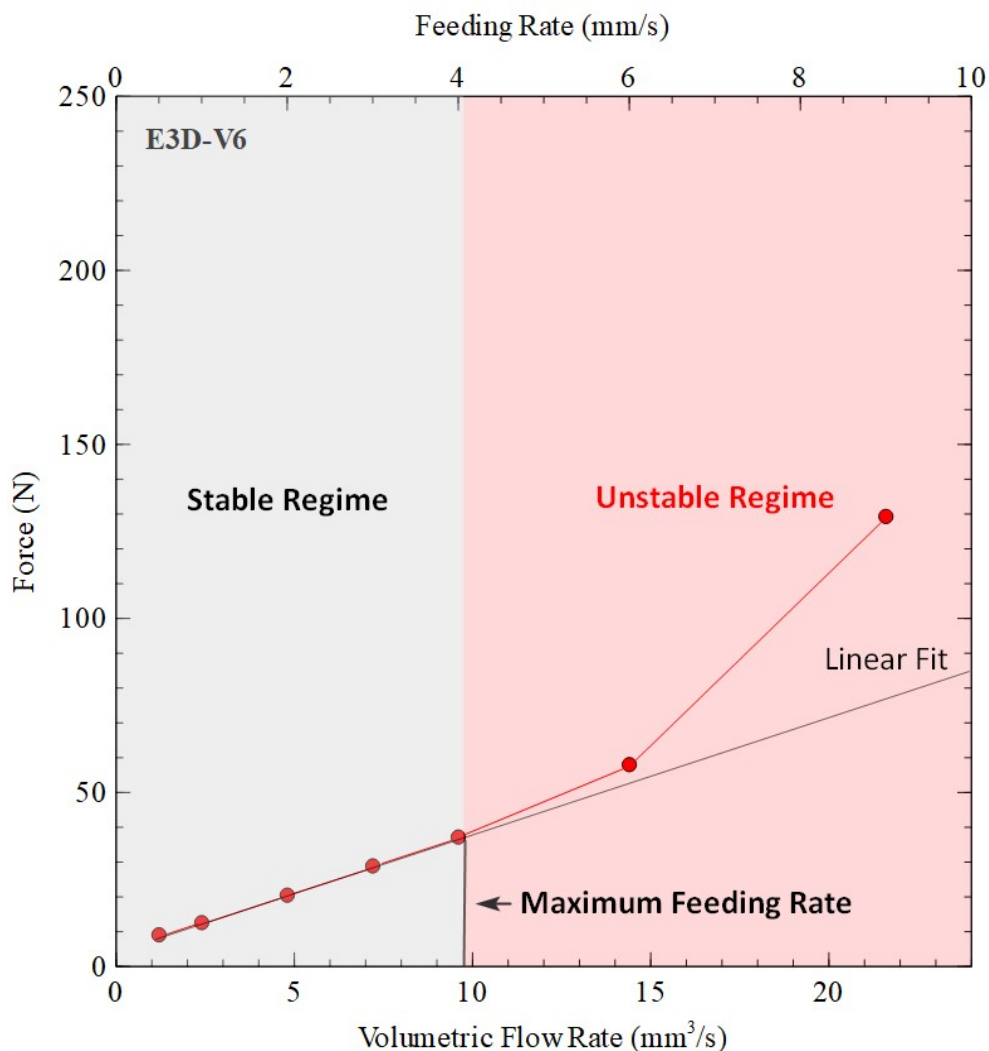
Ανάλογη υπερίμηση παρατηρείται και σε σύγκριση με την εργασία των Cheng Luo et al. [112], οι οποίοι βρήκαν πειραματικά τη δύναμη τροφοδοσίας σε συνάρτηση με την ταχύτητα τροφοδοσίας νήματος για τιθέμενες θερμοκρασίες υγροποιητή 210 °C, 230 °C και 250 °C σε θερμαινόμενο μήκος υγροποιητή 12.5 mm και διάμετρο τριχοειδούς 0.4mm, όπως φαίνεται στην Εικόνα 45.



Εικόνα 45. Η δύναμη τροφοδοσίας του νήματος που μετράται ως συνάρτηση του ρυθμού τροφοδοσίας σε διαφορετικές θερμοκρασίες χρησιμοποιώντας ακροφύσιο E3D-V6 με διάμετρο 0.4 mm και υλικό τροφοδοσίας ABS, για διαφορετικές θερμοκρασίες θερμαντήρα. Τα γραφήματα αφορούν στην εργασία των Cheng Luo et al. [112].

4.2.2. Μέγιστος Ρυθμός Τροφοδοσίας

Στο Κεφάλαιο 2 αναπτύχθηκε ένα απλό αναλυτικό μοντέλο για την πρόβλεψη του μέγιστου ρυθμού τροφοδοσίας και μέσω της προσομοίωσης ελέγχεται η απόδοσή του. Από τα διαγράμματα της Εικόνας 41 και Εικόνας 42 φάνηκε ότι πάνω από έναν κρίσιμο ρυθμό τροφοδοσίας, που ονομάζεται μέγιστος ρυθμός τροφοδοσίας, η ροή γίνεται ασταθής και η δύναμη τροφοδοσίας αυξάνεται γρήγορα, καθώς η συνολική ροή θερμότητας δεν είναι επαρκής για να λιώσει το πολυμερές. Ο μέγιστος ρυθμός τροφοδοσίας κατά τη διάρκεια της σταθερής εξώθησης υπολογίστηκε από τις μετρήσεις με την εύρεση ενός σημείου, όπου η υπολογισμένη από τη προσομοίωση δύναμη τροφοδοσίας αποκλίνει από την προσαρμογή της γραμμικής καμπύλης κατά περισσότερο από 3%, όπως φαίνεται στο σχήμα της Εικόνας 46.



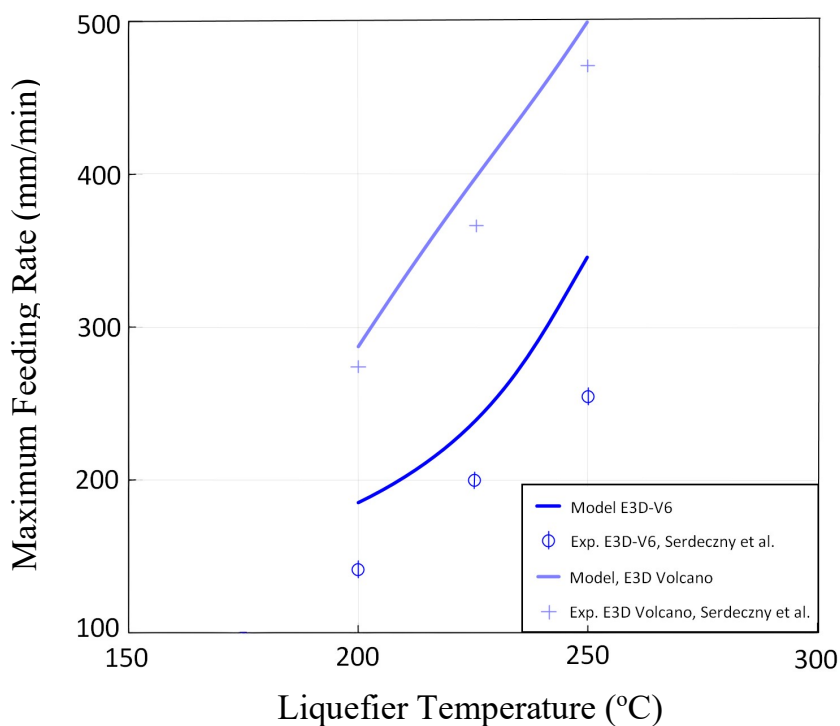
Εικόνα 46. Παράδειγμα εξαγόμενου μέγιστου ρυθμού τροφοδοσίας από μετρήσεις της δύναμης τροφοδοσίας νήματος για ABS σε θερμοκρασία θερμοαντήρα 225°C. Κατά τη διάρκεια της σταθερής εξώθησης υπάρχει μια περιοχή περίπου γραμμικής αύξησης της δύναμης ως συνάρτηση του ρυθμού τροφοδοσίας. Πάνω από κάποιο κρίσιμο όριο που ονομάζεται μέγιστος ρυθμός τροφοδοσίας, η δύναμη αυξάνεται πιο απότομα. Η γραμμική αύξηση της δύναμης σχετίζεται με το σταθερό καθεστώς εξώθησης. Όταν ξεπεραστεί ο μέγιστος ρυθμός τροφοδοσίας, η εξώθηση εισέρχεται σε ασταθές καθεστώς λόγω της έλλειψης τήξης του νήματος.

Στον Πίνακα 6 παρουσιάζονται οι υπολογισμένες τιμές του μέγιστου ογκομετρικού ρυθμού τροφοδοσίας για τις τρεις τιθέμενες θερμοκρασίες και τα δύο μήκη του υγροποιητή με σταθερή διάμετρο ακροφυσίου 0.4mm.

Πίνακας 6. Μέγιστος ογκομετρικός ρυθμός τροφοδοσίας σε κάθε θερμοκρασία θερμαντήρα για τα δύο ακροφύσια

Θερμοκρασία Θερμαντήρα (°C)	Μέγιστος Ογκομετρικός Ρυθμός Ροής (mm ³ /s)	
	E3D-V6	E3D Volcano
200	7,2	11,2
225	9,6	15,8
250	14,4	20

Στην Εικόνα 47 αναπαρίστανται οι καμπύλες που αντιστοιχούν στη μέγιστη τραχύτητα τροφοδοσίας συναρτήσει της θερμοκρασίας του υγροποιητή για τα δύο ακροφύσια, το μικρό και το μεγάλο. Προκειμένου να πραγματοποιηθεί επικύρωση των αποτελεσμάτων, προβάλλονται στο ίδιο γράφημα τα αντίστοιχα πειραματικά σημεία για τα αντίστοιχα ακροφύσια από την εργασία των Serdeczny et al [140]. Παρατηρείται κι εδώ μικρή υπερεκτίμηση της μέγιστης ταχύτητας τροφοδοσίας και αντίστοιχα του μέγιστου ογκομετρικού ρυθμού ροής, ο οποίος είναι αναμενόμενος από τη στιγμή που υφίσταται υπερτίμηση των τιμών της δύναμης εξώθησης στην τρέχουσα εργασία σε σχέση με τις αντίστοιχες πειραματικές.



Εικόνα 47. Καμπύλες μέγιστης τραχύτητας τροφοδοσίας συναρτήσει της θερμοκρασίας του υγροποιητή για τα δύο ακροφύσια. Προκειμένου να πραγματοποιηθεί επικύρωση των αποτελεσμάτων, προβάλλονται στο ίδιο γράφημα τα αντίστοιχα πειραματικά σημεία για τα αντίστοιχα ακροφύσια από την εργασία των Serdeczny et al. [140].

5. Σύνοψη

5.1 Ανακεφαλαίωση και Συμπεράσματα

Στην τρέχουσα διπλωματική παρουσιάζεται ένα αριθμητικό μοντέλο που επιλύει ένα συζευγμένο ισοζύγιο μάζας, ορμής και ενέργειας για τη μελέτη της ροής του πολυμερούς μέσω του ακροφυσίου ενός εκτυπωτή κατασκευής συντηγμένου νήματος. Η σημασία αυτής της ανάλυσης έγκειται στο γεγονός ότι τα ρεολογικά χαρακτηριστικά της υγρής φάσης του υλικού εκτύπωσης επηρεάζουν την ποιότητα, την ακρίβεια και την επαναληψιμότητα του τελικού αντικειμένου.

Το μοντέλο λαμβάνει υπόψη ότι η ροή είναι μη ισοθερμοκρασιακή και το ρευστό μη νευτώνειο, επομένως το ιξώδες επηρεάζεται από τη θερμοκρασία και το ρυθμό διάτμησης, από τα οποία εξαρτάται η δύναμη εξώθησης. Η προσέγγιση μοντελοποίησης βασίζεται σε ένα μοντέλο κλάσματος τήγματος που επιτρέπει την κάλυψη ολόκληρου του πεδίου ροής, από τη στερεά κατάσταση στην είσοδο του υγροποιητή μέχρι και την κατάσταση τήξης. Αυτό το επιτυγχάνει μέσω της χρήσης μιας τροποποιημένης συνάρτησης WLF η οποία μπορεί να περιγράψει την απότομη αλλαγή του ιξώδους στο εύρος θερμοκρασιών S της μετάπτωσης υάλου του πολυμερούς, περιορίζοντας την υπερβολική αύξηση του ιξώδους για πολύ χαμηλές θερμοκρασίες. Σε περίπτωση θερμοκρασιών πάνω από το εύρος της T_g , χρησιμοποιείται η αρχική εξίσωση WLF χωρίς τροποποιήσεις. Αυτό οδηγεί σε μια σύνθεση ιξώδους που είναι ίση με το καθιερωμένο μοντέλο Cross-WLF για τη ρευστή φάση. Για τη στερεά φάση δίνεται ένα ιξώδες ανεξάρτητο από τη θερμοκρασία, αλλά εξαρτώμενο από την ταχύτητα διάτμησης σε υψηλό επίπεδο. Η μετάβαση πραγματοποιείται συνεχώς και ομαλά. Αυτό είναι σημαντικό για την αριθμητική προσομοίωση.

Προκειμένου να ληφθεί υπόψη και η συνεισφορά των υλικών του τοιχώματος του καναλιού στη θερμική συμπεριφορά της ροής του πολυμερούς εισήχθη ένας τοπικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας ως οριακή συνθήκη για τη μεταφορά θερμότητας από το τοίχωμα του υγροποιητή στο νήμα, ο οποίος προσδιορίστηκε μέσω πειραματικών τιμών της βιβλιογραφίας σε ανάλογες συνθήκες ροής.

5.1.1 Ρεολογική Μελέτη

Προκειμένου να πραγματοποιηθεί η επικύρωση του αριθμητικού μοντέλου, γίνεται σύγκριση με πειραματικά δεδομένα από τη βιβλιογραφία για το πολυμερές ABS σε αντίστοιχε συνθήκες ροής. Η επικύρωση αφορά την εξάρτηση της δύναμης τροφοδοσίας από τον ογκομετρικό ρυθμό ροής και του μέγιστου ογκομετρικού ρυθμού ροής από τη θερμοκρασιακή οριακή συνθήκη.

Μέσω της παραμετρικής διερεύνησης που πραγματοποιήθηκε και τα αποτελέσματα που εξήχθησαν από το αριθμητικό μοντέλο εξάγονται σημαντικά συμπεράσματα για τη ρεολογική συμπεριφορά του ABS.

- Η συμπεριφορά τήξης συμπίπτει με τα επικρατέστερα μοντέλα που υποθέτουν ότι το στερεό νήμα λειτουργεί ως έμβολο για να ωθήσει το τηγμένο πολυμερές μέσα από το ακροφύσιο.

- Καθώς η ταχύτητα του νήματος αυξάνεται, η θερμοκρασία μετάπτωσης υάλου πραγματοποιείται πλησιέστερα στην κωνική ζώνη μετάβασης του θερμού άκρου. Το δε μήκος του τηγμένου πολυμερούς μειώνεται όταν η ταχύτητα του νήματος είναι πάνω από μια κρίσιμη τιμή, οπότε το νήμα τελικά λιώνει μόνο στην επαφή με το άκρο του ακροφυσίου και σχηματίζεται μια λεπτή μεμβράνη τήξης.
- Η θερμοκρασία του πολυμερούς στην έξοδο του ακροφυσίου (μέση θερμοκρασία εξωθημένου κλώνου) μειώνεται με την αύξηση της ταχύτητας του νήματος.
- Η ταχύτητα ροής είναι ομοιόμορφη και σταθερή στο μεγαλύτερο μήκος του υγροποιητή. Η ταχύτητα αυξάνεται στην κωνική περιοχή του ακροφυσίου και του τριχοειδούς τμήματος λόγω της μείωσης της επιφάνειας διατομής. Επομένως, η διαμητική τάση στον τοίχο αυξάνεται σημαντικά και φτάνει στη μέγιστη τιμή της πριν εξαχθεί το τήγμα από το ακροφύσιο.
- Η κατανομή της ταχύτητας στην έξοδο του ακροφυσίου επηρεάζεται σημαντικά περισσότερο από την ταχύτητα του νήματος, παρά από τη θερμοκρασία του ακροφυσίου. Σε μικρότερες ταχύτητες τροφοδοσίας νήματος παρατηρείται συμπεριφορά μη νευτώνειου ρευστού και η κατανομή της ταχύτητας είναι η προβλεπόμενη από τις αναλυτικές σχέσεις που προβλέπουν μέγιστη ταχύτητα στο κέντρο και μηδενική στο τοίχωμα, λόγω συνθήκης μη ολίσθησης. Αντιθέτως, ο σχηματισμός λεπτής μεμβράνης τήγματος σε μεγάλες ταχύτητες έχει ως αποτέλεσμα η ταχύτητα να μεγιστοποιείται κοντά στο τοίχωμα και να ελαχιστοποιείται στο κέντρο του ακροφυσίου. Με ένα μεγαλύτερο τμήμα κάνης υγροποιητή, μπορεί να μεταφερθεί μεγαλύτερη ποσότητα θερμότητας, έτσι ώστε ο σχηματισμός μιας μεμβράνης τήγματος στο κωνικό τμήμα να συμβαίνει μόνο σε υψηλότερες ταχύτητες νήματος.
- Η πίεση ελαττώνεται με τη μείωση της διαμέτρου του καναλιού ως μια ακολουθία αύξησης της ταχύτητας στις μικρότερες διατομές. Το μεγαλύτερο μέρος της πτώσης πίεσης υφίσταται στο τριχοειδές ακροφύσιο. Επιπροσθέτως, με την αύξηση του ρυθμού ροής, η ολική πτώση πίεσης εντός του υγροποιητή αυξάνεται. Αντιθέτως, με τη αύξηση της θερμοκρασίας και του συνολικού μήκους του ακροφυσίου, η ολική πτώση πίεσης μειώνεται λόγω μείωσης του ιξώδους, εφόσον μεταφέρεται μεγαλύτερη ποσότητα θερμότητας υπ' αυτές τις συνθήκες.
- Πέραν της γενικής τάσης μεταβολής της πίεσης, υφίστανται σημειακές ανομοιομορφίες στη θερμοκρασία μετάπτωσης υάλου, λόγω απότομης μεταβολής του ιξώδους, της οποίας η θέση μετατοπίζεται προς την έξοδο του ακροφυσίου με την αύξηση της ταχύτητας τροφοδοσίας του νήματος. Επιπλέον υπάρχει μια περιοχή αυξημένης πίεσης άρα αυξημένου ιξώδους αμέσως μετά το τμήμα εισόδου που έχει οριακή συνθήκη τέλει ολίσθησης, άρα υφίσταται μια περιοχή ανακυκλοφορίας (δίνη), όπου το ρευστό υψηλού ιξώδους ρέει ανάντη κατά μήκος του τοιχώματος του υγροποιητή. Η χαμηλή θερμοκρασία και το υψηλό ιξώδες στην είσοδο του υγροποιητή αποτρέπουν την αντίστροφη ροή του τηγμένου υλικού προς την ψήκτρα.
- Όταν η θερμοκρασία μετάπτωσης υάλου που οριοθετεί τη περιοχή στερεού-ρευστού πραγματοποιείται ακριβώς πριν την έξοδο, λόγω ανάστροφης διαφοράς πίεσης μεταξύ εισόδου και εξόδου στο τριχοειδές τμήμα του ακροφυσίου, εμποδίζεται η εξώθηση σ αυτή τη ταχύτητα.

5.1.2 Εξάρτηση Κρίσιμων Μεγεθών

Μέσω της μελέτης βρέθηκε η εξάρτηση της δύναμης τροφοδοσίας από τον ογκομετρικό ρυθμό ροής αλλά και του μέγιστου ογκομετρικού ρυθμού ροής από τη θερμοκρασία της θερμαντικής διάταξης. Με βάση τη μελέτη αυτή εξάγονται ορισμένα συμπεράσματα που αφορούν την εξάρτηση των μεγεθών.

- Όταν αυξάνεται η θερμοκρασία του υγροποιητή, η δύναμη τροφοδοσίας γίνεται μικρότερη, λόγω του χαμηλότερου ιξώδους του πολυμερούς. Επιπλέον, το πείραμα δείχνει ότι η εξάρτηση της δύναμης τροφοδοσίας από τον ρυθμό τροφοδοσίας ακολουθεί την ίδια τάση για διαφορετικές θερμοκρασίες υγροποιητή. Ο μέγιστος ρυθμός τροφοδοσίας αυξάνεται με τη θερμοκρασία του υγροποιητή, επεκτείνοντας έτσι το παράθυρο λειτουργίας του θερμού άκρου.
- Συγκρίνοντας τη δύναμη τροφοδοσίας στα δύο ακροφύσια, μικρού και μεγάλου μήκους κάνης, φαίνεται ότι σε χαμηλούς ρυθμούς τροφοδοσίας η επίδραση του μήκους είναι αμελητέα και μετράται σχεδόν η ίδια δύναμη τροφοδοσίας και για τους δύο υγροποιητές. Από την άλλη πλευρά, όταν ο ρυθμός τροφοδοσίας είναι μεγάλος, η μετρούμενη δύναμη είναι χαμηλότερη για το μακρύτερο υγροποιητή, καθώς το πολυμερές θερμαίνεται σε υψηλότερη θερμοκρασία πριν εισέλθει στο τμήμα συστολής, λόγω μεγαλύτερης επιφάνειας θερμικής συναλλαγής. Επιπλέον, το σταθερό καθεστώς εξώθησης, όπου η δύναμη αυξάνεται γραμμικά, επεκτείνεται για τον μακρύτερο υγροποιητή. Έτσι, το μήκος του υγροποιητή επηρεάζει τον μέγιστο ρυθμό τροφοδοσίας, αυξάνοντάς τον.
- Όταν ξεπεραστεί ο μέγιστος ρυθμός τροφοδοσίας, η εξώθηση εισέρχεται σε ασταθές καθεστώς, λόγω της έλλειψης τήξης του νήματος, το οποίο αντιστοιχεί στο μέγιστο ρυθμός τροφοδοσίας, όπου η ροή γίνεται ασταθής και η δύναμη τροφοδοσίας αυξάνεται γρήγορα, καθώς η συνολική ροή θερμότητας δεν είναι επαρκής για να λιώσει το πολυμερές.

5.1.3 Ελλείψεις κι Επικύρωση

Ο ορισμός του μέγιστου ρυθμού τροφοδοσίας που εισάγεται σ αυτή την εργασία διαφέρει από ένα τελικό όριο της παροχής στο θερμό άκρο στο οποίο το νήμα ωθείται από τους γραναζωτούς τροχούς του εξωθητήρα. Ο μέγιστος ρυθμός τροφοδοσίας κατά τη διάρκεια της σταθερής εξώθησης είναι σημαντικός από πρακτική άποψη, καθώς εκφράζει ένα πραγματικό όριο στο οποίο θα πρέπει να λειτουργεί το θερμό άκρο. Τέλος, σημειώνεται ότι η ανάπτυξη της αναλυτικής Εξίσωσης 2.33 που αναφέρεται στο μέγιστο ογκομετρικό ρυθμό τροφοδοσίας νήματος για επιτυχή εξώθηση βασίζεται αποκλειστικά στην ανάλυση μεταφοράς θερμότητας, ενώ ενδέχεται να υπάρχουν και άλλα φαινόμενα που περιορίζουν τον ρυθμό τροφοδοσίας του νήματος όπως π.χ. λυγισμός του νήματος, το οποίο δε λαμβάνεται υπόψη στο μοντέλο.

Με βάση αυτά προκύπτουν ορισμένα συμπεράσματα που αφορούν σε ελλείψεις του τρέχοντος μοντέλου.

- Το όριο στο ρυθμό τροφοδοσίας θέτει ένα ανώτερο όριο για την ταχύτητα κίνησης του ακροφυσίου (ταχύτητα εκτύπωσης) σε ένα δεδομένο ύψος στρώσης. Η κατεργασία με τον υψηλότερο σταθερό ρυθμό ροής όγκου εγγυάται την υψηλότερη απόδοση παραγωγής, αλλά όχι απαραίτητα επιτυχημένη εκτύπωση, η οποία αργότερα (κατά το στάδιο της εναπόθεσης) επηρεάζεται από τις διακυμάνσεις της χρονικής και χωρικής κατανομής της θερμοκρασίας στα εκτυπωμένα μέρη.
- Σύμφωνα με τις προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν, το νήμα λιώνει ήδη σε χαμηλές ταχύτητες νήματος (< 3 mm/s) προτού φτάσει στην κωνική περιοχή. Σε πιο ψηλές ταχύτητες λιώνει στο κωνικό τμήμα ή στο τριχοειδές. Σαν αποτέλεσμα, το νήμα δεν έρχεται σε επαφή με το τοίχωμα, παρά μόνο αν υποθεθεί ότι λυγίζει. Κατά συνέπεια, η υπόθεση της μη ολίσθησης μεταξύ νήματος-τοιχώματος σε όλο το μήκος της κάνης σε υψηλές ταχύτητες νήματος δεν είναι απόλυτα σωστή.
- Στην κωνική τομή του ακροφυσίου αναμένονται επιμήκεις παραμορφώσεις λόγω της εγκάρσιας συστολής, οι οποίες δεν αντιπροσωπεύονται επαρκώς από το επιλεγμένο μη ιξωδοελαστικό ρεολογικό μοντέλο. Ένα ιξωδοελαστικό μοντέλο για το πολυμερές ίσως να είχε καλύτερη προσέγγιση με τα πειραματικά δεδομένα.
- Θεωρείται σταθερή η διάμετρος του νήματος στο τμήμα εισόδου του υγροποιητή. Η απουσία πραγματικών πειραματικών δεδομένων περιορίζει τη γνώση ως προς το εάν και υπό ποιες συνθήκες κλείνει ή παραμένει το κενό μεταξύ του εισερχόμενου νήματος και του τοιχώματος του υγροποιητή.

Με βάση τα ανωτέρω κρίνεται σκόπιμη η επικύρωση με πειραματικά βιβλιογραφικά δεδομένα από την οποία προκύπτουν κρίσιμα συμπεράσματα.

- Το αριθμητικό μοντέλο δείχνει καλή συμφωνία με τα πειραματικά δεδομένα της βιβλιογραφίας για την αποτύπωση της εξάρτησης της δύναμης εξώθησης από την ταχύτητα τροφοδοσίας του νήματος. Παρατηρείται μικρή υπερέτιμηση των τιμών της δύναμης της προσομοίωσης στην τρέχουσα εργασία σε σχέση με τις αντίστοιχες πειραματικές. Η απόκλιση οφείλεται κυρίως στο μικρότερο θερμαινόμενο μήκος που χρησιμοποιήθηκε στην εργασία μας σχετικά με αυτό που χρησιμοποιήθηκε στην εργασία των Serdeczny et al.
- Επιβεβαιώνεται πλήρως από τις πειραματικές τιμές της βιβλιογραφίας ότι σε χαμηλούς ρυθμούς τροφοδοσίας η επίδραση του μήκους του υγροποιητή είναι αμελητέα και μετράται η ίδια δύναμη τροφοδοσίας και για τους δύο υγροποιητές, ενώ για μεγαλύτερες ταχύτητες τροφοδοσίας, η μετρούμενη δύναμη είναι χαμηλότερη για τον μακρύτερο υγροποιητή.
- Το μοντέλο παρέχει μια καλή πρόβλεψη της επίδρασης της τιθέμενης θερμοκρασίας του μπλοκ θέρμανσης και του μήκους του υγροποιητή στη δύναμη εξώθησης. Μπορεί να φανεί ότι τα αποτελέσματα είναι σε καλή συμφωνία με τις μετρούμενες τιμές, και το μοντέλο είναι ικανό να ανιχνεύει την επίδραση της θερμοκρασίας του υγροποιητή και του μήκους του υγροποιητή στη μέγιστη ταχύτητα τροφοδοσίας.

5.2 Μελλοντική Έρευνα

Σε μελλοντική εργασία αναμένεται σύγκριση των αποτελεσμάτων που παρήχθησαν με βάση το μοντέλο προσομοίωσης της παρούσας εργασίας με αποτελέσματα από πειραματική μελέτη της ροής του θερμοπλαστικού ABS στο θερμό άκρο της κεφαλής εκτύπωσης με τη διαδικασία FFF στο εργαστήριο κατεργασιών της Σχολής. Επιπροσθέτως, η μελλοντική έρευνα μπορεί να στραφεί κατά κύριο λόγο στη μελέτη του ίδιου πολυμερούς, του ABS, μετά την εξώθηση. Με βάση αυτό θα είχε ιδιαίτερο νόημα να μελετηθεί πώς η διάμετρος του τριχοειδούς του ακροφυσίου επιδρά στη δύναμη εξώθησης, όπως και το φαινόμενο αύξησης της διαμέτρου (διόγκωσης μήτρας) του τηγμένου πολυμερούς κατά την έξοδό του από το τριχοειδές του ακροφυσίου (φαινόμενο "Die Swell"), το οποίο εξαρτάται από τον ογκομετρικό ρυθμό ροής και τη θερμοκρασία. Το φαινόμενο αυτό παίζει ιδιαίτερο ρόλο στην ακρίβεια των διαστάσεων και στη ποιότητα του τελικού προϊόντος. Επιπλέον, θα μπορούσε να μελετηθεί η χρονική και χωρική κατανομή της θερμοκρασίας του εξωθημένου τήγματος για διαφορετικές ταχύτητες εκτύπωσης.

Σε μελλοντική εργασία μπορεί, επιπροσθέτως, να πραγματοποιηθεί μελέτη συσχέτισης των κρίσιμων παραμέτρων της διεργασίας FFF, δηλαδή της μέσης ταχύτητας στην έξοδο του ακροφυσίου, της διαμέτρου του ακροφυσίου, του μήκους του υγροποιητή και της μέσης θερμοκρασίας στην έξοδο, με την ποιότητα της εναπόθεσης του τήγματος μετά την έξοδο από το ακροφύσιο. Συγκεκριμένα αναμένεται οι παράμετροι της διεργασίας να επηρεάζουν το σχήμα της διατομής του εξωθημένου κλώνου και το πορώδες της επιφάνειάς του, το οποίο σχετίζεται με το μήκος συγκόλλησης μεταξύ γειτονικών στρώσεων. Μέσω αυτής της συσχέτισης θα μπορούσε να βελτιστοποιηθεί η γεωμετρία του ακροφυσίου καθώς και οι παράμετροι θέρμανσης και ροής.

Μια διαφορετική προσέγγιση μελλοντικής έρευνας θα ήταν η μελέτη ενός πιο σύγχρονου πολυμερούς, όπως το PEEK. Αντίστοιχη μελέτη, επομένως, με προσομοίωση πεπερασμένων στοιχείων, θα μπορούσε να γίνει για το ημικρυσταλλικό πολυμερές PEEK, στο οποίο η διαδικασία FFF παρουσιάζει πολλές προκλήσεις λόγω της πολύ υψηλότερης θερμοκρασίας τήξης του και του υψηλότερου ιξώδους του.

Βιβλιογραφία

- [1] H. Bikas, P. Stavropoulos, and G. Chryssolouris, “Additive manufacturing methods and modelling approaches: a critical review,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 83, pp. 389–405, 2016.
- [2] S. Upcraft and R. Fletcher, “The rapid prototyping technologies,” *Assembly Automation*, vol. 23, no. 4, pp. 318–330, 2003.
- [3] P. F. Jacobs, “Fundamentals of stereolithography,” in *1992 international solid freeform fabrication symposium*, 1992.
- [4] M. Groover and E. Zimmers, *CAD/CAM: computer-aided design and manufacturing*. Pearson Education, 1983.
- [5] V. Gokhare, D. Raut, and D. Shinde, “A Review paper on 3D-Printing Aspects and Various Processes Used in the 3D-Printing,” *International Journal of Engineering and Technical Research*, vol. 6, pp. 953–958, Jun. 2017.
- [6] C. Balletti, M. Ballarin, and F. Guerra, “3D printing: State of the art and future perspectives,” *Journal of Cultural Heritage*, vol. 26, pp. 172–182, 2017.
- [7] V. G. Gokhare, D. N. Raut, and D. K. Shinde, “A review paper on 3D-printing aspects and various processes used in the 3D-printing,” *Int. J. Eng. Res. Technol*, vol. 6, no. 06, pp. 953–958, 2017.
- [8] J. Z. Manapat, Q. Chen, P. Ye, and R. C. Advincula, “3D printing of polymer nanocomposites via stereolithography,” *Macromolecular Materials and Engineering*, vol. 302, no. 9, p. 1600553, 2017.
- [9] J. Horvath and J. Horvath, “A brief history of 3D printing,” *Mastering 3D Printing*, pp. 3–10, 2014.
- [10] V. Gupta, P. Nesterenko, and B. Paull, “An introduction to 3D printing,” *3D printing in chemical sciences: applications across chemistry*. London, UK: The Royal Society of Chemistry, pp. 1–21, 2019.
- [11] C. R. Deckard, *Selective laser sintering*. The University of Texas at Austin, 1988.
- [12] E. Matias and B. Rao, “3D printing: On its historical evolution and the implications for business,” in *2015 Portland International Conference on Management of Engineering and Technology (PICMET)*, IEEE, 2015, pp. 551–558.
- [13] B. Özbay, “Manufacturing and characterization of polymer composites by using selective laser sintering 3D printing method,” PhD Thesis, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü.
- [14] A. Su and S. J. Al’Aref, “History of 3D printing,” in *3D Printing Applications in Cardiovascular Medicine*, Elsevier, 2018, pp. 1–10.
- [15] S. Graham, “Rapid prototyping: a key to fast tracking design to manufacture,” *Assembly Automation*, vol. 20, no. 4, pp. 291–294, 2000.
- [16] M. A. Raoufi *et al.*, “Fabrication of unconventional inertial microfluidic channels using wax 3D printing,” *Soft Matter*, vol. 16, no. 10, pp. 2448–2459, 2020.
- [17] M. Koike *et al.*, “Evaluation of titanium alloys fabricated using rapid prototyping technologies—electron beam melting and laser beam melting,” *Materials*, vol. 4, no. 10, pp. 1776–1792, 2011.
- [18] M. W. Barclift and C. B. Williams, “Examining variability in the mechanical properties of parts manufactured via polyjet direct 3D printing,” in *2012 International Solid Freeform Fabrication Symposium*, University of Texas at Austin, 2012.
- [19] M. Whitaker, “The history of 3D printing in healthcare,” *The Bulletin of the Royal College of Surgeons of England*, vol. 96, no. 7, pp. 228–229, 2014.
- [20] G. C. Anzalone, C. Zhang, B. Wijnen, P. G. Sanders, and J. M. Pearce, “A low-cost open-source metal 3-D printer,” *IEEE Access*, vol. 1, pp. 803–810, 2013.

- [21] R. Jones *et al.*, “RepRap—the replicating rapid prototyper,” *Robotica*, vol. 29, no. 1, pp. 177–191, 2011.
- [22] R. Mercuri and K. Meredith, “An educational venture into 3D Printing,” in *2014 IEEE Integrated STEM Education Conference*, IEEE, 2014, pp. 1–6.
- [23] M. Attaran, “The rise of 3-D printing: The advantages of additive manufacturing over traditional manufacturing,” *Business horizons*, vol. 60, no. 5, pp. 677–688, 2017.
- [24] A. Witze, “NASA to send 3D printer into space,” *Nature*, vol. 513, no. 7517, p. 156, 2014.
- [25] M. Zastrow, “The new 3D printing,” *Nature*, vol. 578, no. 7793, pp. 20–23, 2020.
- [26] M. A. Mechter, Y. Mace, and O. Kerbrat, “A new design for additive manufacturing method: applied on the bound metal deposition process,” *Journal of Engineering Design*, vol. 33, no. 10, pp. 787–810, 2022.
- [27] S. Sultan, G. Siqueira, T. Zimmermann, and A. P. Mathew, “3D printing of nanocellulosic biomaterials for medical applications,” *Current Opinion in Biomedical Engineering*, vol. 2, pp. 29–34, 2017.
- [28] M. F. Ernst, A. Maletzko, S. Baumann, N. Baumann, C. Hübner, and C.-C. Höhne, “FFF 3D Printing of Small Porous Structures from Polymer Compounds Using the Ultimaker 3,” *Macromolecular Materials and Engineering*, vol. 307, no. 10, p. 2200095, 2022.
- [29] Б. Б. Маликов, “Application 3D printing in construction,” in *Избранные доклады 65-й Юбилейной университетской научно-технической конференции студентов и молодых ученых*, 2019, pp. 909–913.
- [30] G. Ćwikła, C. Grabowik, K. Kalinowski, I. Paprocka, and P. Ociepka, “The influence of printing parameters on selected mechanical properties of FDM/FFF 3D-printed parts,” in *IOP conference series: materials science and engineering*, IOP Publishing, 2017, p. 012033.
- [31] J. Koprnický, J. Šafka, and M. Ackermann, “Using of 3D printing technology in low cost prosthetics,” in *Materials Science Forum*, Trans Tech Publ, 2018, pp. 199–206.
- [32] M. Fernandez-Vicente, M. Canyada, and A. Conejero, “Identifying limitations for design for manufacturing with desktop FFF 3D printers,” *International Journal of Rapid Manufacturing*, vol. 5, no. 1, pp. 116–128, 2015.
- [33] R. Mendricky and D. Fris, “Analysis of the accuracy and the surface roughness of fdm/fff technology and optimisation of process parameters,” *Tehnički vjesnik*, vol. 27, no. 4, pp. 1166–1173, 2020.
- [34] A. PANDA and S. CEHELSKY, “WELDING METHODS OF FILAMENTS USED IN FFF/FDM 3D PRINTING TECHNOLOGY”.
- [35] M. Olender-Skóra, W. Banaś, and A. Gwiazda, “Possibilities of industrial utilization of FFF/FDM process for chosen element printing,” *Int. J. Mod. Manuf. Technol.*, vol. 23, no. 3, 2021.
- [36] V. Kopačín, “3D printing in medicine: Extension of diagnostic imaging,” *European Congress of Radiology-ECR 2018*, 2018.
- [37] Y. Pan, C. Zhou, and Y. Chen, “A fast mask projection stereolithography process for fabricating digital models in minutes,” *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 134, no. 5, 2012.
- [38] C. Decker, “Light-induced crosslinking polymerization,” *Polymer International*, vol. 51, no. 11, pp. 1141–1150, 2002.
- [39] F. P. Melchels, J. Feijen, and D. W. Grijpma, “A review on stereolithography and its applications in biomedical engineering,” *Biomaterials*, vol. 31, no. 24, pp. 6121–6130, 2010.

- [40] H. Kim *et al.*, “3D printing of polyvinylidene fluoride/photopolymer resin blends for piezoelectric pressure sensing application using the stereolithography technique,” *MRS Communications*, vol. 9, no. 3, pp. 1115–1123, Sep. 2019, doi: 10.1557/mrc.2019.109.
- [41] “Photopolymerization - VAT, SLA, DLP, CDLP | Make.” <https://make.3dexperience.3ds.com/processes/photopolymerization> (accessed Jun. 16, 2023).
- [42] E. M. Maines, M. K. Porwal, C. J. Ellison, and T. M. Reineke, “Sustainable advances in SLA/DLP 3D printing materials and processes,” *Green Chemistry*, vol. 23, no. 18, pp. 6863–6897, 2021.
- [43] O. Gülcan, K. Günaydın, and A. Tamer, “The state of the art of material jetting—a critical review,” *Polymers*, vol. 13, no. 16, p. 2829, 2021.
- [44] H. Yang *et al.*, “Performance evaluation of projet multi-material jetting 3D printer,” *Virtual and physical prototyping*, vol. 12, no. 1, pp. 95–103, 2017.
- [45] P. Szymczyk-Ziółkowska, M. B. Labowska, J. Detyna, I. Michalak, and P. Gruber, “A review of fabrication polymer scaffolds for biomedical applications using additive manufacturing techniques,” *Biocybernetics and Biomedical Engineering*, vol. 40, no. 2, pp. 624–638, 2020.
- [46] A. Mostafaei *et al.*, “Binder jet 3D printing—Process parameters, materials, properties, modeling, and challenges,” *Progress in Materials Science*, vol. 119, p. 100707, 2021.
- [47] P. Shakor, S. H. Chu, A. Puzatova, and E. Dini, “Review of binder jetting 3D printing in the construction industry,” *Progress in Additive Manufacturing*, vol. 7, no. 4, pp. 643–669, 2022.
- [48] I. Gibson *et al.*, “Binder jetting,” *Additive manufacturing technologies*, pp. 237–252, 2021.
- [49] J.-P. Kruth, B. Vandenbroucke, J. Van Vaerenbergh, and P. Mercelis, “Benchmarking of different SLS/SLM processes as rapid manufacturing techniques,” in *Proceedings of the International Conference Polymers & Moulds Innovations PMI 2005*, 2005.
- [50] S. Sun, M. Brandt, and M. Easton, “Powder bed fusion processes: An overview,” *Laser additive manufacturing*, pp. 55–77, 2017.
- [51] M. Schmid, A. Amado, and K. Wegener, “Polymer powders for selective laser sintering (SLS),” in *AIP Conference proceedings*, AIP Publishing LLC, 2015, p. 160009.
- [52] A. T. Sutton, C. S. Kriewall, M. C. Leu, and J. W. Newkirk, “Powder characterisation techniques and effects of powder characteristics on part properties in powder-bed fusion processes,” *Virtual and physical prototyping*, vol. 12, no. 1, pp. 3–29, 2017.
- [53] F. Fina, A. Goyanes, S. Gaisford, and A. W. Basit, “Selective laser sintering (SLS) 3D printing of medicines,” *International journal of pharmaceutics*, vol. 529, no. 1–2, pp. 285–293, 2017.
- [54] R. Singh *et al.*, “Powder bed fusion process in additive manufacturing: An overview,” *Materials Today: Proceedings*, vol. 26, pp. 3058–3070, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2020.02.635.
- [55] R. Anderson, J. Terrell, J. Schneider, S. Thompson, and P. Gradl, “Characteristics of bi-metallic interfaces formed during direct energy deposition additive manufacturing processing,” *Metallurgical and Materials Transactions B*, vol. 50, pp. 1921–1930, 2019.
- [56] A. Dass and A. Moridi, “State of the Art in Directed Energy Deposition: From Additive Manufacturing to Materials Design,” *Coatings*, vol. 9, no. 7, Art. no. 7, Jul. 2019, doi: 10.3390/coatings9070418.
- [57] D. Svetlizky *et al.*, “Directed energy deposition (DED) additive manufacturing: Physical characteristics, defects, challenges and applications,” *Materials Today*, vol. 49, pp. 271–295, 2021.

- [58] A. Farzaneh *et al.*, “Sandwich structure printing of Ti-Ni-Ti by directed energy deposition,” *Virtual and Physical Prototyping*, vol. 17, no. 4, pp. 1006–1030, 2022.
- [59] M. Vaezi, S. Chianrabutra, B. Mellor, and S. Yang, “Multiple Material Additive Manufacturing – Part 1: A Review,” *Virtual and Physical Prototyping*, vol. 8, Mar. 2013, doi: 10.1080/17452759.2013.778175.
- [60] I. Gibson, D. W. Rosen, B. Stucker, I. Gibson, D. W. Rosen, and B. Stucker, “Sheet lamination processes,” *Additive manufacturing technologies: rapid prototyping to direct digital manufacturing*, pp. 223–252, 2010.
- [61] I. Gibson *et al.*, “Sheet lamination,” *Additive Manufacturing Technologies*, pp. 253–283, 2021.
- [62] T. Singh, S. Kumar, and S. Sehgal, “3D printing of engineering materials: A state of the art review,” *Materials today: proceedings*, vol. 28, pp. 1927–1931, 2020.
- [63] “Sheet Lamination | Additive Manufacturing Research Group | Loughborough University.”
<https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/sheetlamination/> (accessed Jun. 21, 2023).
- [64] M. M. Prabhakar, A. K. Saravanan, A. H. Lenin, K. Mayandi, and P. S. Ramalingam, “A short review on 3D printing methods, process parameters and materials,” *Materials Today: Proceedings*, vol. 45, pp. 6108–6114, 2021.
- [65] C. Camposeco-Negrete, “Optimization of FDM parameters for improving part quality, productivity and sustainability of the process using Taguchi methodology and desirability approach,” *Progress in Additive Manufacturing*, vol. 5, no. 1, pp. 59–65, 2020.
- [66] T. T. Turaevich, B. Y. Anvarxodjaevich, and M. B. Mirodilovich, “Choosing the Optimal Processing Method to Improve the Productivity of Machine Tools and Machine Systems,” *International Journal of Multicultural and Multireligious Understanding*, vol. 8, no. 5, pp. 490–494, 2021.
- [67] B. Bhushan and M. Caspers, “An overview of additive manufacturing (3D printing) for microfabrication,” *Microsystem Technologies*, vol. 23, pp. 1117–1124, 2017.
- [68] C. M. Thakar, S. S. Parkhe, A. Jain, K. Phasinam, G. Murugesan, and R. J. M. Ventayen, “3d Printing: Basic principles and applications,” *Materials Today: Proceedings*, vol. 51, pp. 842–849, 2022.
- [69] R. Bogue, “3D printing: the dawn of a new era in manufacturing?,” *Assembly Automation*, vol. 33, no. 4, pp. 307–311, 2013.
- [70] H. G. Lemu, “Study of capabilities and limitations of 3D printing technology,” in *AIP Conference Proceedings*, American Institute of Physics, 2012, pp. 857–865.
- [71] S. A. Tofail, E. P. Koumoulos, A. Bandyopadhyay, S. Bose, L. O’Donoghue, and C. Charitidis, “Additive manufacturing: scientific and technological challenges, market uptake and opportunities,” *Materials today*, vol. 21, no. 1, pp. 22–37, 2018.
- [72] D. J. Horst, C. A. Duvoisin, and R. de Almeida Vieira, “Additive manufacturing at Industry 4.0: a review,” *International journal of engineering and technical research*, vol. 8, no. 8, 2018.
- [73] J. H. Martin, B. D. Yahata, J. M. Hundley, J. A. Mayer, T. A. Schaedler, and T. M. Pollock, “3D printing of high-strength aluminium alloys,” *Nature*, vol. 549, no. 7672, pp. 365–369, 2017.
- [74] L. Hitzler *et al.*, “Additive manufacturing of cobalt-based dental alloys: analysis of microstructure and physicomechanical properties,” *Advances in materials science and engineering*, vol. 2018, pp. 1–12, 2018.
- [75] L. E. Murr, “Frontiers of 3D printing/additive manufacturing: from human organs to aircraft fabrication,” *Journal of Materials Science & Technology*, vol. 32, no. 10, pp. 987–995, 2016.

- [76] E. Uhlmann, R. Kersting, T. B. Klein, M. F. Cruz, and A. V. Borille, “Additive manufacturing of titanium alloy for aircraft components,” *Procedia Cirp*, vol. 35, pp. 55–60, 2015.
- [77] T. DebRoy *et al.*, “Additive manufacturing of metallic components—process, structure and properties,” *Progress in Materials Science*, vol. 92, pp. 112–224, 2018.
- [78] M. A. Caminero, J. M. Chacón, I. García-Moreno, and G. P. Rodríguez, “Impact damage resistance of 3D printed continuous fibre reinforced thermoplastic composites using fused deposition modelling,” *Composites Part B: Engineering*, vol. 148, pp. 93–103, 2018.
- [79] J. R. C. Dizon, A. H. Espera Jr, Q. Chen, and R. C. Advincula, “Mechanical characterization of 3D-printed polymers,” *Additive manufacturing*, vol. 20, pp. 44–67, 2018.
- [80] A. Zocca, P. Lima, and J. Günster, “LSD-based 3D printing of alumina ceramics,” *Journal of ceramic science and technology*, vol. 8, no. 1, pp. 141–148, 2017.
- [81] R. Gmeiner *et al.*, “Additive manufacturing of bioactive glasses and silicate bioceramics,” *J. Ceram. Sci. Technol*, vol. 6, no. 2, pp. 75–86, 2015.
- [82] T. Ianko, S. Panov, O. Sushchyns’ky, M. Pylypenko, and O. Dmytrenko, “Zirconium alloy powders for manufacture of 3d printed articles used in nuclear power industry,” *Вопросы атомной науки и техники*, 2018.
- [83] X. Tang and Y. Yu, “Electrospinning preparation and characterization of alumina nanofibers with high aspect ratio,” *Ceramics International*, vol. 41, no. 8, pp. 9232–9238, 2015.
- [84] W. Hao, Y. Liu, H. Zhou, H. Chen, and D. Fang, “Preparation and characterization of 3D printed continuous carbon fiber reinforced thermosetting composites,” *Polymer Testing*, vol. 65, pp. 29–34, 2018.
- [85] T. P. Sathishkumar, S. Satheeshkumar, and J. Naveen, “Glass fiber-reinforced polymer composites—a review,” *Journal of reinforced plastics and composites*, vol. 33, no. 13, pp. 1258–1275, 2014.
- [86] Z. Liu *et al.*, “Modification of glass fiber surface and glass fiber reinforced polymer composites challenges and opportunities: from organic chemistry perspective,” *Current organic chemistry*, vol. 19, no. 11, pp. 991–1010, 2015.
- [87] J.-Y. Lee, J. An, and C. K. Chua, “Fundamentals and applications of 3D printing for novel materials,” *Applied materials today*, vol. 7, pp. 120–133, 2017.
- [88] J. Van Humbeeck, “Additive manufacturing of shape memory alloys,” *Shape Memory and Superelasticity*, vol. 4, pp. 309–312, 2018.
- [89] Y. Yang, Y. Chen, Y. Wei, and Y. Li, “3D printing of shape memory polymer for functional part fabrication,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 84, pp. 2079–2095, 2016.
- [90] F. Baldassarre and F. Ricciardi, “The additive manufacturing in the Industry 4.0 Era: the case of an Italian FabLab,” *Journal of Emerging Trends in Marketing and Management*, vol. 1, no. 1, pp. 105–115, 2017.
- [91] L. Liu, Y. Meng, X. Dai, K. Chen, and Y. Zhu, “3D printing complex egg white protein objects: properties and optimization,” *Food and Bioprocess Technology*, vol. 12, pp. 267–279, 2019.
- [92] A. Pasricha and R. Greeninger, “Exploration of 3D printing to create zero-waste sustainable fashion notions and jewelry,” *Fashion and Textiles*, vol. 5, no. 1, pp. 1–18, 2018.
- [93] A. Aimar, A. Palermo, and B. Innocenti, “The role of 3D printing in medical applications: a state of the art,” *Journal of healthcare engineering*, vol. 2019, 2019.

- [94] H. Dodziuk, “Applications of 3D printing in healthcare,” *Kardiochirurgia i Torakochirurgia Polska/Polish Journal of Thoracic and Cardiovascular Surgery*, vol. 13, no. 3, pp. 283–293, 2016.
- [95] C.-Y. Liaw and M. Guvendiren, “Current and emerging applications of 3D printing in medicine,” *Biofabrication*, vol. 9, no. 2, p. 024102, 2017.
- [96] M. Kalender, S. E. Kılıç, S. Ersoy, Y. Bozkurt, and S. Salman, “Additive manufacturing and 3D printer technology in aerospace industry,” in *2019 9th International Conference on Recent Advances in Space Technologies (RAST)*, IEEE, 2019, pp. 689–694.
- [97] Y.-C. Wang, T. Chen, and Y.-L. Yeh, “Advanced 3D printing technologies for the aircraft industry: a fuzzy systematic approach for assessing the critical factors,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 105, pp. 4059–4069, 2019.
- [98] B. J. Tuazon, N. A. V. Custodio, R. B. Basuel, L. A. Delos Reyes, and J. R. C. Dizon, “3D printing technology and materials for automotive application: a mini-review,” *Key Engineering Materials*, vol. 913, pp. 3–16, 2022.
- [99] T. Lecklider, “3D printing drives automotive innovation,” *EE-Evaluation Engineering*, vol. 56, no. 1, pp. 16–20, 2017.
- [100] Y. W. D. Tay, B. Panda, S. C. Paul, N. A. Noor Mohamed, M. J. Tan, and K. F. Leong, “3D printing trends in building and construction industry: a review,” *Virtual and Physical Prototyping*, vol. 12, no. 3, pp. 261–276, 2017.
- [101] S. Horaczek, “Nike hacked a 3D printer to make its new shoe for elite marathon runners,” *Popular Sciences*, 2018.
- [102] A. Vanderploeg, S.-E. Lee, and M. Mamp, “The application of 3D printing technology in the fashion industry,” *International Journal of Fashion Design, Technology and Education*, vol. 10, no. 2, pp. 170–179, 2017.
- [103] A. H. Espera, J. R. C. Dizon, Q. Chen, and R. C. Advincula, “3D-printing and advanced manufacturing for electronics,” *Progress in Additive Manufacturing*, vol. 4, pp. 245–267, 2019.
- [104] W. Gao *et al.*, “The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering,” *Computer-Aided Design*, vol. 69, pp. 65–89, Dec. 2015, doi: 10.1016/j.cad.2015.04.001.
- [105] P. Dudek, “FDM 3D printing technology in manufacturing composite elements,” *Archives of metallurgy and materials*, vol. 58, no. 4, pp. 1415–1418, 2013.
- [106] M. P. Serdeczny, “Numerical and Experimental Analysis of Filament-Based Material Extrusion Additive Manufacturing,” 2020.
- [107] A. D. Valino, J. R. C. Dizon, A. H. Espera Jr, Q. Chen, J. Messman, and R. C. Advincula, “Advances in 3D printing of thermoplastic polymer composites and nanocomposites,” *Progress in Polymer Science*, vol. 98, p. 101162, 2019.
- [108] “A review of melt extrusion additive manufacturing processes: I. Process design and modeling | Request PDF.” https://www.researchgate.net/publication/262574645_A_review_of_melt_extrusion_additive_manufacturing_processes_I_Process_design_and_modeling (accessed Jul. 16, 2023).
- [109] B. Shaqour *et al.*, “Gaining a better understanding of the extrusion process in fused filament fabrication 3D printing: a review,” *Int J Adv Manuf Technol*, vol. 114, no. 5–6, pp. 1279–1291, May 2021, doi: 10.1007/s00170-021-06918-6.
- [110] N. Schiavone, V. Verney, and H. Askanian, “Effect of 3D printing temperature profile on polymer materials behavior,” *3D Printing and Additive Manufacturing*, vol. 7, no. 6, pp. 311–325, 2020.

- [111] M. E. Mackay, “The importance of rheological behavior in the additive manufacturing technique material extrusion,” *Journal of Rheology*, vol. 62, no. 6, pp. 1549–1561, Nov. 2018, doi: 10.1122/1.5037687.
- [112] C. Luo, X. Wang, K. B. Migler, and J. E. Seppala, “Effects of feed rates on temperature profiles and feed forces in material extrusion additive manufacturing,” *Additive Manufacturing*, vol. 35, p. 101361, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.addma.2020.101361.
- [113] J. Go, S. N. Schiffres, A. G. Stevens, and A. J. Hart, “Rate limits of additive manufacturing by fused filament fabrication and guidelines for high-throughput system design,” *Additive Manufacturing*, vol. 16, pp. 1–11, Aug. 2017, doi: 10.1016/j.addma.2017.03.007.
- [114] G. P. Greeff and M. Schilling, “Closed loop control of slippage during filament transport in molten material extrusion,” *Additive Manufacturing*, vol. 14, pp. 31–38, Mar. 2017, doi: 10.1016/j.addma.2016.12.005.
- [115] N.-H. Tran, V.-N. Nguyen, A.-V. Ngo, and V.-C. Nguyen, “Study on the Effect of Fused Deposition Modeling (FDM) Process Parameters on the Printed Part Quality,” vol. 7, no. 12, 2017.
- [116] Q. Sun, G. M. Rizvi, C. T. Bellehumeur, and P. Gu, “Effect of processing conditions on the bonding quality of FDM polymer filaments,” *Rapid Prototyping Journal*, vol. 14, no. 2, pp. 72–80, Jan. 2008, doi: 10.1108/13552540810862028.
- [117] “Mechanical strength of welding zones produced by polymer extrusion additive manufacturing - ScienceDirect.”
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214860416303116?via%3Dihub>
(accessed Jul. 16, 2023).
- [118] “Numerical and Experimental Analysis of Filament-based Material Extrusion Additive Manufacturing — Welcome to DTU Research Database.”
<https://orbit.dtu.dk/en/publications/numerical-and-experimental-analysis-of-filament-based-material-ex> (accessed Jul. 16, 2023).
- [119] C. Duty *et al.*, “What makes a material printable? A viscoelastic model for extrusion-based 3D printing of polymers,” *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 35, p. 526, 2018.
- [120] A. Bellini, S. Gucceri, and M. Bertoldi, “Liquefier Dynamics in Fused Deposition,” *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 126, no. 2, pp. 237–246, Jul. 2004, doi: 10.1115/1.1688377.
- [121] D. A. Anderegg *et al.*, “In-situ monitoring of polymer flow temperature and pressure in extrusion based additive manufacturing,” *Additive Manufacturing*, vol. 26, pp. 76–83, Mar. 2019, doi: 10.1016/j.addma.2019.01.002.
- [122] “Rheological and heat transfer effects in fused filament fabrication | Journal of Rheology | AIP Publishing.”
<https://pubs.aip.org/sor/jor/article/62/5/1097/958742/Rheological-and-heat-transfer-effects-in-fused> (accessed Jul. 19, 2023).
- [123] V. Nienhaus, K. Smith, D. Spiehl, and E. Dörsam, “Investigations on nozzle geometry in fused filament fabrication,” *Additive Manufacturing*, vol. 28, pp. 711–718, Aug. 2019, doi: 10.1016/j.addma.2019.06.019.
- [124] X. Xu, H. Ren, S. Chen, X. Luo, F. Zhao, and Y. Xiong, “Review on melt flow simulations for thermoplastics and their fiber reinforced composites in fused deposition modeling,” *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 92, pp. 272–286, Apr. 2023, doi: 10.1016/j.jmapro.2023.02.039.

- [125] T. A. Osswald, J. Puentes, and J. Kattinger, “Fused filament fabrication melting model,” *Additive Manufacturing*, vol. 22, pp. 51–59, Aug. 2018, doi: 10.1016/j.addma.2018.04.030.
- [126] F. Peng, B. D. Vogt, and M. Cakmak, “Complex flow and temperature history during melt extrusion in material extrusion additive manufacturing,” *Additive Manufacturing*, vol. 22, pp. 197–206, Aug. 2018, doi: 10.1016/j.addma.2018.05.015.
- [127] H. S. Ramanath, C. K. Chua, K. F. Leong, and K. D. Shah, “Melt flow behaviour of poly-epsilon-caprolactone in fused deposition modelling,” *J Mater Sci Mater Med*, vol. 19, no. 7, pp. 2541–2550, Jul. 2008, doi: 10.1007/s10856-007-3203-6.
- [128] J. Go and A. J. Hart, “Fast Desktop-Scale Extrusion Additive Manufacturing.” arXiv, Jul. 02, 2017. doi: 10.48550/arXiv.1709.05918.
- [129] D. D. Phan, J. S. Horner, Z. R. Swain, A. N. Beris, and M. E. Mackay, “Computational fluid dynamics simulation of the melting process in the fused filament fabrication additive manufacturing technique,” *Additive Manufacturing*, vol. 33, p. 101161, May 2020, doi: 10.1016/j.addma.2020.101161.
- [130] “Numerical modeling of the polymer flow through the hot-end in filament-based material extrusion additive manufacturing | Request PDF.” https://www.researchgate.net/publication/342973248_Numerical_modeling_of_the_polymer_flow_through_the_hot-end_in_filament-based_material_extrusion_additive_manufacturing (accessed Jul. 19, 2023).
- [131] S. Marion, L. Sardo, T. Joffre, and F. Pigeonneau, “First steps of the melting of an amorphous polymer through a hot-end of a material extrusion additive manufacturing,” *Additive Manufacturing*, vol. 65, p. 103435, Mar. 2023, doi: 10.1016/j.addma.2023.103435.
- [132] Y. Hong, M. Mrinal, H. Phan, V. Tran, X. Liu, and C. Luo, “In-situ observation of the extrusion processes of Acrylonitrile Butadiene Styrene and Polylactic Acid for material extrusion additive manufacturing,” *Additive Manufacturing*, vol. 49, p. 102507, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.addma.2021.102507.
- [133] S. Bakrani Balani, F. Chabert, V. Nassiet, and A. Cantarel, “Influence of printing parameters on the stability of deposited beads in fused filament fabrication of poly(lactic) acid,” *Additive Manufacturing*, vol. 25, pp. 112–121, Jan. 2019, doi: 10.1016/j.addma.2018.10.012.
- [134] J. Go, “High-throughput extrusion-based additive manufacturing,” Thesis, Massachusetts Institute of Technology, 2015. Accessed: Jul. 22, 2023. [Online]. Available: <https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/101812>
- [135] “Equations relating viscosity to concentration of suspension | Download Table.” https://www.researchgate.net/figure/Equations-relating-viscosity-to-concentration-of-suspension_tbl1_2378156 (accessed Jul. 22, 2023).
- [136] H. Ockendon, “Channel flow with temperature-dependent viscosity and internal viscous dissipation,” *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 93, no. 4, pp. 737–746, 1979.
- [137] J. Vlachopoulos and N. D. Polychronopoulos, *UNDERSTANDING RHEOLOGY AND TECHNOLOGY OF POLYMER EXTRUSION*. POLYDYNAMICS INC, 2019. Accessed: Jul. 22, 2023. [Online]. Available: <https://macsphere.mcmaster.ca/handle/11375/27289>
- [138] R. J. Goldstein *et al.*, “Heat transfer—a review of 2001 literature,” *International journal of heat and mass transfer*, vol. 46, no. 11, pp. 1887–1992, 2003.
- [139] S. B. Giddings, “Hawking radiation, the Stefan–Boltzmann law, and unitarization,” *Physics Letters B*, vol. 754, pp. 39–42, 2016.
- [140] M. P. Serdeczny, R. Comminal, D. B. Pedersen, and J. Spangenberg, “Experimental and analytical study of the polymer melt flow through the hot-end in material extrusion additive manufacturing,” *Additive Manufacturing*, vol. 32, p. 100997, 2020.

- [141] K. Mateja and W. Panfil, “Design of a motion system for 3D printed snakebot,” *Technical Sciences*, vol. 24, pp. 57–66, 2021.
- [142] “Importance of Polymer Rheology on Material Extrusion Additive Manufacturing: Correlating Process Physics to Print Properties | ACS Applied Polymer Materials.” <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsapm.0c01228> (accessed Jul. 22, 2023).
- [143] A. Zavala Río, A. R. Femat Flores, and R. Santiesteban Cos, “An analytical study of the logarithmic mean temperature difference,” 2005.
- [144] T. Osswald, “Polymer Rheology, Fundamentals and Applications”.
- [145] S. G. E. Giap, “The hidden property of Arrhenius-type relationship: viscosity as a function of temperature,” *Journal of Physical Science*, vol. 21, no. 1, pp. 29–39, 2010.
- [146] L. Dagdug and L. S. García-Colín, “Generalization of the Williams–Landel–Ferry equation,” *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, vol. 250, no. 1–4, pp. 133–141, 1998.
- [147] P. Lomellini, “Williams-Landel-Ferry versus Arrhenius behaviour: polystyrene melt viscoelasticity revised,” *Polymer*, vol. 33, no. 23, pp. 4983–4989, 1992.
- [148] M. Bousmina, “Rheology of polymer blends: linear model for viscoelastic emulsions,” *Rheologica Acta*, vol. 38, no. 1, pp. 73–83, 1999.
- [149] F. Pimenta and M. A. Alves, “Stabilization of an open-source finite-volume solver for viscoelastic fluid flows,” *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, vol. 239, pp. 85–104, Jan. 2017, doi: 10.1016/j.jnnfm.2016.12.002.
- [150] Z. Wang and D. E. Smith, “The effect of polymer melt rheology on predicted die swell and fiber orientation in fused filament fabrication nozzle flow,” in *2017 International Solid Freeform Fabrication Symposium*, University of Texas at Austin, 2017.
- [151] A. Altınkaynak, M. Gupta, M. A. Spalding, and S. L. Crabtree, “Melting in a Single Screw Extruder: Experiments and 3D Finite Element Simulations,” *International Polymer Processing*, vol. 26, no. 2, pp. 182–196, May 2011, doi: 10.3139/217.2419.
- [152] “3D-CFD-simulation of melting processes in a high-speed-extruder with solid-melt-separation | AIP Conference Proceedings | AIP Publishing.” <https://pubs.aip.org/aip/acp/article/1593/1/623/694665/3D-CFD-simulation-of-melting-processes-in-a-high> (accessed Jul. 25, 2023).
- [153] “V6 Datasheet,” *E3D Help Centre*. <https://e3d-online.zendesk.com/hc/en-us/articles/360017153277-V6-Datasheet> (accessed Jul. 28, 2023).
- [154] “Volcano Datasheet,” *E3D Help Centre*. <https://e3d-online.zendesk.com/hc/en-us/articles/360017153377-Volcano-Datasheet> (accessed Jul. 28, 2023).
- [155] S. Olivera, H. B. Muralidhara, K. Venkatesh, K. Gopalakrishna, and C. S. Vivek, “Plating on acrylonitrile–butadiene–styrene (ABS) plastic: a review,” *Journal of materials science*, vol. 51, pp. 3657–3674, 2016.
- [156] M. Samykano, S. K. Selvamani, K. Kadirgama, W. K. Ngui, G. Kanagaraj, and K. Sudhakar, “Mechanical property of FDM printed ABS: influence of printing parameters,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 102, pp. 2779–2796, 2019.
- [157] M. Akay and S. Ozden, “The influence of residual stresses on the mechanical and thermal properties of injection moulded ABS copolymer,” *Journal of materials science*, vol. 30, pp. 3358–3368, 1995.
- [158] S. Clark, T. Yap, and M. Tehrani, “Validation of a Finite Element Model for Fused Filament Fabrication Additive Manufacturing,” in *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, American Society of Mechanical Engineers, 2021, p. V02AT02A025.

- [159] “Skewness and orthogonal quality mesh metrics spectrums. | Download Scientific Diagram.” https://www.researchgate.net/figure/Skewness-and-orthogonal-quality-mesh-metrics-spectrums_fig2_320786408 (accessed Jul. 30, 2023).
- [160] “Heat Transfer Coefficient in Injection Molding of Polymers.” <https://www.degruyter.com/document/doi/10.3139/217.3084/html> (accessed Sep. 01, 2023).
- [161] H. Massé, É. Arquis, D. Delaunay, S. Quilliet, and P. H. Le Bot, “Heat transfer with mechanically driven thermal contact resistance at the polymer–mold interface in injection molding of polymers,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 47, no. 8, pp. 2015–2027, Apr. 2004, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2002.04.001.