



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

**Εφαρμογή της τεχνολογίας 3D printing στον
κατασκευαστικό τομέα με έμφαση στα τσιμεντοειδή
υλικά.**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Στουραϊτίης Γαβριήλ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΤΣΙΒΙΛΗΣ Σ. ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ, Ιανουάριος 2021

Περίληψη

Τα αυτόματα κατασκευαστικά συστήματα έχουν γίνει το επίκεντρο της κατασκευαστικής βιομηχανίας και των ερευνητικών έργων παγκοσμίως τα τελευταία χρόνια. Έχουν αναπτυχθεί πολλές τεχνολογίες τρισδιάστατης εκτύπωσης (3D Printing, 3DP) και η εφαρμογή τους σε κατασκευαστικά έργα όλο και περισσότερο συγκεντρώνει το ενδιαφέρον. Η τρισδιάστατη εκτύπωση στο κατασκευαστικό κλάδο και ειδικότερα η τρισδιάστατη εκτύπωση σκυροδέματος παρουσιάζει συγκριτικά πλεονεκτήματα έναντι των συμβατικών μεθόδων κατασκευής. Τα κύρια χαρακτηριστικά των μεθόδων τρισδιάστατης εκτύπωσης είναι η ελευθερία στη γεωμετρία και τη μορφή των κατασκευών, η ταχύτητα ολοκλήρωσης των έργων, η αποφυγή χρήσης ξυλότυπων, η συμβολή στη μείωση των παραγόμενων απορριμμάτων, ο φιλικός εν γένει χαρακτήρας τους ως προς το περιβάλλον, τη φύση και την ασφάλεια. Η παρούσα εργασία στοχεύει στην παρουσίαση των τεχνικών, οικονομικών και περιβαλλοντικών πτυχών που σχετίζονται με τη τρισδιάστατη εκτύπωση στο κατασκευαστικό τομέα και ειδικότερα στις κατασκευές σκυροδέματος. Οι κυρίαρχες μέθοδοι τρισδιάστατης εκτύπωσης σκυροδέματος είναι η μέθοδος εξώθησης υλικού και η μέθοδος κλίνης σωματιδίων. Η χρήση προσθέτων τσιμεντοειδών υλικών και η ενίσχυση ινών αποτελούν πεδίο έρευνας για την βελτίωση των χαρακτηριστικών των παραγόμενων στοιχείων κατασκευής. Σημαντικοί δείκτες απόδοσης, συμπεριλαμβανομένης της εργασιμότητας, του χρόνου ρύθμισης και σκλήρυνσης και των μηχανικών ιδιοτήτων, μπορούν να βελτιστοποιηθούν με την κατάλληλη επιλογή υλικών και παραμέτρων εκτύπωσης. Μέχρι σήμερα, πολλές κατασκευές έχουν τυπωθεί με επιτυχία χρησιμοποιώντας τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης σκυροδέματος. Χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι κατοικίες, υποστυλώματα και στοιχεία ύδρευσης και αποχέτευσης. Η εφαρμογή της τρισδιάστατης εκτύπωσης σκυροδέματος στον κατασκευαστικό τομέα είναι προς το παρόν περιορισμένη στις περισσότερες ανεπτυγμένες χώρες, η έλλειψη προτύπων και οδηγιών εμποδίζει την υιοθέτηση των τεχνολογιών από εταιρείες που δραστηριοποιούνται στο χώρο. Η ανάδειξη των πλεονεκτημάτων και παράλληλα η επίλυση των δυσκολιών της τρισδιάστατης εκτύπωσης σκυροδέματος αποτελούν πεδίο έρευνας στα επόμενα χρόνια.

Abstract

Automated construction systems have become the focus of the construction industry and research projects worldwide in recent years. Many 3D printing technologies (3D Printing, 3DP) have been developed and their application in construction projects is increasingly gaining interest. 3D printing in the construction industry and in particular 3D concrete printing has comparative advantages over conventional construction methods. The main features of 3D printing methods are freedom in the geometry and shape of structures, the speed of completion of projects, the avoidance of the use of formwork, the contribution to the reduction of waste, their generally environmentally friendly nature, nature and security. The present work aims to present the technical, economic and environmental aspects related to 3D printing in the construction sector and in particular in concrete constructions. The predominant methods of 3D concrete printing are the material extrusion method and the particle bed method. The use of additives in cementitious materials and the reinforcement of fibers are a field of research to improve the characteristics of the produced construction elements. Significant performance indicators, including workability, setting and curing time, and mechanical properties, can be optimized with the right choice of printing materials and parameters. To date, many constructions have been successfully printed using 3D concrete printing technology. Typical examples are houses, columns and elements of water supply and sewerage. The application of 3D printing in the construction sector is currently limited in most developed countries, the lack of standards and guidelines prevents the adoption of technologies by companies operating in the field. Highlighting the advantages and at the same time solving the difficulties of 3D concrete printing are a field of research in the coming years.

Πίνακας Περιεχομένων

1	Εισαγωγή	9
2	Βασικές μέθοδοι προσθετικής κατασκευής.....	11
2.1	Ορισμός προσθετικής κατασκευής	11
2.2	Τα βασικά χαρακτηριστικά της διαδικασίας τρισδιάστατης εκτύπωσης	12
2.3	Υλικά που χρησιμοποιούνται στη τρισδιάστατη εκτύπωση	14
2.4	Μέθοδοι Προσθετικής Κατασκευής.....	15
2.5	Εξώθηση Υλικού	16
2.6	Στερεολιθογραφία.....	18
2.7	Επιλεκτική πυροσυσσωμάτωση και επιλεκτική τήξη με laser	20
2.8	Μέθοδοι ψεκασμού	22
2.8.1	Ψεκασμός συνδετικού μέσου	22
2.8.2	Ψεκασμός υλικού	23
2.9	Βιο-εκτύπωση (Bioprinting).....	26
2.9.1	Μέθοδοι βιο-εκτύπωσης.....	27
3	Τρισδιάστατη εκτύπωση στον κατασκευαστικό τομέα	29
3.1	Πλεονεκτήματα εφαρμογής τρισδιάστατης εκτύπωσης στον κατασκευαστικό τομέα 3D	
3.2	Διαδικασίες τρισδιάστατης εκτύπωσης στον κατασκευαστικό κλάδο και εφαρμογές.....	31
3.2.1	Αδρανή υλικά	31
3.2.2	Μέταλλα	39
3.2.3	Πολυμερή	42
3.3	Ευκαιρίες και προκλήσεις	44
4	Εφαρμογές 3D printing με τιμντοειδή υλικά	47
4.1	Εκτύπωση τρισδιάστατου σκυροδέματος με βάση την εξώθηση	47
4.1.1	Παραδείγματα τρισδιάστατης εκτύπωσης σκυροδέματος με βάση την εξώθηση	48
4.2	Εκτύπωση σκυροδέματος σε κλίση	50
4.3	Επιλογή υλικών	51
4.3.1	Επιλογή υλικών τεχνικών εξώθησης	51
4.3.2	Επιλογή υλικών τεχνικών εκτύπωσης σε κλίση.....	54
4.4	Τεχνικές ενίσχυσης.....	55
4.4.1	Ελαστική ενίσχυση με ίνες	55
4.4.2	Ενίσχυση με ράβδους.....	57

4.5	Κρίσιμες συνθήκες έκθεσης	61
5	Μελέτες Περίπτωσης	63
5.1	Κατασκευή υποστυλώματος Aix-en-Provence, Γαλλία	63
5.1.1	Σχεδιασμός	65
5.1.2	Κατασκευή	68
5.1.3	Σύγκριση με τις τυπικές μεθόδους δόμησης	70
5.2	Βροχοσυλλέκτης - Lille Γαλλία	73
6	Συμπεράσματα	76
	Βιβλιογραφία	78

Κατάλογος Πινάκων

<i>Πίνακας 2-1: Συνήθη υλικά που εφαρμόζονται στην μέθοδο επιλεκτικής τήξης (Bournias Varotsis, 3D hubs)</i>	<u>21</u>
<i>Πίνακας 5-1: Σύγκριση ως προς την κατανάλωση υλικών</i>	<u>71</u>
<i>Πίνακας 5-2: Σύγκριση ως προς τη κατανάλωση</i>	<u>72</u>
<i>Πίνακας 5-3: Σύγκριση ως προς το εργατικό δυναμικό</i>	<u>72</u>
<i>Πίνακας 5-4: Σύγκριση 3D εκτύπωσης και παραδοσιακής μεθόδου για τον βροχοσυλλέκτη ως προς την κατανάλωση υλικών</i>	<u>74</u>
<i>Πίνακας 5-5: Σύγκριση 3D εκτύπωσης και παραδοσιακής μεθόδου για τον βροχοσυλλέκτη ως προς τη διαδικασία κατασκευής</i>	<u>75</u>
<i>Πίνακας 5-6: Σύγκριση 3D εκτύπωσης και παραδοσιακής μεθόδου για τον βροχοσυλλέκτη ως προς το εργατικό δυναμικό</i>	<u>75</u>

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 2-1: Ποσοστά χρήσης υλικών για τρισδιάστατη εκτύπωση στη βιομηχανία (EY global 3DP study, 2016).	14
Σχήμα 2-2: Αρχής λειτουργίας στερεολιθογραφίας	19
Σχήμα 2-3: Στάδια διαμόρφωσης προϊόντος στη στερεολιθογραφία	19
Σχήμα 2-4: Σχηματική αναπαράσταση διάταξης ψεκασμού συνδετικού μέσου (Bournias Varotsis, 3dhubs.com)	23
Σχήμα 2-5: Σχηματική αναπαράσταση διάταξης ψεκασμού υλικού (Bournias Varotsis, 3dhubs.com).	24
Σχήμα 2-6: Διαμόρφωση αντικειμένου με τη μέθοδο ψεκασμού υλικού (Bournias Varotsis, 3dhubs.com)	24
Σχήμα 2-7: Στρατηγικές και προσεγγίσεις σχεδιασμού για ανάπτυξη τρισδιάστατων ιστών και οργάνων	27
Σχήμα 2-8: Βιο-εκτύπωση μικρο-εξώθησης χρησιμοποιώντας πνευματικές και μηχανικές μεθόδους	28
Σχήμα 3-1: Τρισδιάστατος εκτυπωτής σκυροδέματος στο Τεχνολογικό Πανεπιστήμιο του Αϊντχόβεν (Eindhoven-University-of-Technology)	32
Σχήμα 3-2: Διατομή που παράγεται με εκτυπωτή D-Shape (EdilTecnico, 2016)	35
Σχήμα 3-3: Εξάρτημα μεταλλικής γέφυρας κατασκευασμένο με τον εκτυπωτή MX3D (MX3D)	42
Σχήμα 3-4: Δομικό στοιχείο τυπωμένο με το σύστημα BAAM (Biswas, Rose, Eikevik, Guerguis, Enquist, & Lee, 2017).	44
Σχήμα 4-1: Τρισδιάστατη εκτύπωση σκυροδέματος (3D printing concrete)	48
Σχήμα 4-2: Διώροφη εξοχική κατοικία που εκτυπώθηκε από την εταιρεία Huashang Tengda (a) και το τμήμα του ακροφυσίου που χρησιμοποιήθηκε επί τόπο (b)	49
Σχήμα 4-3: Η πρώτη τρισδιάστατη τυπωμένη αρθρωτή δοκός από σκυρόδεμα μήκους περίπου 3 m (WASP, 2017).	49
Σχήμα 4-4: Το «Y-Box Pavilion, 21st-century Cave» ύψους 3m.	50
Σχήμα 4-5: Τυπική διακύμανση της τάσης διαρροής ως συνάρτηση με το ύψος της κατασκευής	52

Σχήμα 4-6: Επίδραση νανο-αργίλου στην ικανότητα ροής και σκλήρυνσης (Soltan, Victor, & Li, 2018).	56
Σχήμα 4-7: Σύστημα ενίσχυσης με οπλισμό σε τρισδιάστατη εκτύπωση σκυροδέματος	58
Σχήμα 4-8: Σύστημα εξώθησης οπλισμού σε σκυρόδεμα εκτύπωσης	58
Σχήμα 4-9: Σύστημα εκτύπωσης οπλισμένου σκυροδέματος με συμβατικό σύστημα CNC τριών αξόνων	59
Σχήμα 4-10: Ενίσχυση εκτυπωμένου σκυροδέματος με την τεχνική CNC	60
Σχήμα 4-11: Σύστημα ενισχυτικής αγκύρωσης εκτυπωμένου σκυροδέματος	60
Σχήμα 4-12: Ανάπτυξη ρηγμάτωσης μεταξύ τυπωμένων στρώσεων σκυροδέματος	62
Σχήμα 5-1: Υποσύλωμα ελεύθερου σχήματος στην πόλη Aix-en-Provence.	63
Σχήμα 5-2: Διάγραμμα ροής σε μεγάλης κλίμακας διαδικασία τρισδιάστατης εκτύπωσης σκυροδέματος XtremeE.	64
Σχήμα 5-3: Σχηματική όψη της τρισδιάστατης εκτύπωσης σκυροδέματος XtremeE	64
Σχήμα 5-4: Αρχικός σχεδιασμός της εγκατάστασης και του στεγάστρου	66
Σχήμα 5-5: Τελική μορφή του υποστυλώματος μετά την εφαρμογή μεθόδου βελτιστοποίησης	67
Σχήμα 5-6: Αρχές διαχωρισμού και συναρμολόγησης για το σύστημα τρισδιάστατης εκτύπωσης.	68
Σχήμα 5-7: Διάταξη του ξυλότυπου με τα εξωτερικά στηρίγματα πριν την αφαίρεση τους	69
Σχήμα 5-8: Σύγκριση του υποστυλώματος πριν και μετά το επιφανειακό φινίρισμα	69
Σχήμα 5-9: Συνεδριακό Κέντρο της Ντόχα με υποστυλώματα σύνθετου σχήματος	70
Σχήμα 5-10: Τρισδιάστατη εκτύπωση του συλλέκτη βροχής.	73
Σχήμα 5-11: Επιτόπου εργασίες ανύψωσης και τοποθέτησης.	74

1 Εισαγωγή

Η ταχεία πρόοδος της αστικοποίησης και της εκβιομηχάνισης έχει συμβάλλει στην ανάπτυξη του κατασκευαστικού τομέα. Τρέχοντα προβλήματα όπως η έλλειψη ειδικευμένου εργατικού δυναμικού, η εξάντληση των πόρων, θέματα ασφαλείας, περιβαλλοντικοί περιορισμοί κ.α. αποτελούν παράγοντες που καθιστούν απαραίτητη την ανάπτυξη νέων σύγχρονων μεθόδων στο τομέα των κατασκευών. Η πρόοδος της τρισδιάστατης εκτύπωσης (3D Printing) είναι μία νέα ιδέα σε ερευνητές και σε μηχανικούς στον κατασκευαστικό κλάδο, η οποία έχει την αρχή της στην δισδιάστατη εκτύπωση (2D printing) που μπορεί να στοιβάξει στο επίπεδο διαδοχικά νέα τυπωμένα επίπεδα ανά στρώμα για να διαμορφωθεί τελικά τρισδιάστατο αντικείμενο. Η τρισδιάστατη εκτύπωση σκυροδέματος αναπτύσσεται παράλληλα με την πρόοδο της τεχνολογίας τρισδιάστατης εκτύπωσης και έχει υψηλές απαιτήσεις σχετικά με τις ιδιότητες των υλικών που χρησιμοποιούνται. Στόχος της παρούσας εργασίας είναι η ανασκόπηση των εφαρμοζόμενων τεχνολογιών τρισδιάστατης εκτύπωσης στον κατασκευαστικό κλάδο και η αναλυτικότερη περιγραφή των τεχνολογιών που αφορούν την τρισδιάστατη εκτύπωση τσιμεντοειδών υλικών.

Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζονται οι βασικές μέθοδοι προσθετικής κατασκευής. Γίνεται περιγραφή των βασικών χαρακτηριστικών της τρισδιάστατης εκτύπωσης και των υλικών που χρησιμοποιούνται ενώ στη συνέχεια γίνεται αναλυτική περιγραφή των μεθόδων εξώθησης υλικού, στερεολιθογραφίας, επιλεκτικής πυροσυσσωμάτωσης και τήξης laser, ψεκασμού και Βίο-εκτύπωσης.

Στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάζονται αναλυτικά οι σύγχρονες μέθοδοι τρισδιάστατης εκτύπωσης στον κατασκευαστικό τομέα. Ειδικότερα γίνεται περιγραφή των διαδικασιών που εφαρμόζονται στην περίπτωση χρήσης αδρανών και τσιμεντοειδών υλικών, μετάλλων, πολυμερών και διαδικασίες που σχετίζονται με την κλίση σωματιδίων.

Στο Κεφάλαιο 4 γίνεται αναλυτική προσέγγιση στις εφαρμογές τρισδιάστατης εκτύπωσης με τσιμεντοειδή υλικά. Οι εφαρμογές διακρίνονται σε δύο κατηγορίες, την εξώθηση και την κλίση σωματιδίων. Στη συνέχεια προσεγγίζονται τα χαρακτηριστικά και τα είδη των τσιμεντοειδών υλικών που εφαρμόζονται στη πράξη στις μεθόδους τρισδιάστατης εκτύπωσης. Επίσης περιγράφονται οι τεχνικές ενίσχυσης σε αυτές τις κατασκευές και οι κίνδυνοι που αναπτύσσονται σε συνθήκες έκθεσης.

Στο Κεφάλαιο 5 παρουσιάζονται μελέτες περίπτωσης τρισδιάστατης εκτύπωσης με τσιμεντοειδή υλικά. Ειδικότερα παρουσιάζονται δύο μελέτες περίπτωσης με τεχνική εξώθησης και «χαμένου» ξυλότυπου. Η πρώτη αφορά υποστύλωμα σε κτιριακό

συγκρότημα αθλητικών εγκαταστάσεων και η δεύτερη την κατασκευή βροχοσυλλέκτη. Γίνεται περιγραφή των τεχνικών που εφαρμόστηκαν και των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν.

Στο Κεφάλαιο 6 γίνεται συνοπτική παρουσίαση των σημαντικότερων συμπερασμάτων που προέκυψαν κατά την μελέτη των τεχνικών τρισδιάστατης εκτύπωσης που μελετήθηκαν στην παρούσα εργασία.

2 Βασικές μέθοδοι προσθετικής κατασκευής

2.1 Ορισμός προσθετικής κατασκευής

Προσθετική κατασκευή (Additive Manufacturing (AM)) είναι ο όρος που χρησιμοποιείται για να περιγράψει ένα σύνολο τεχνολογιών που μπορούν να εφαρμοσθούν ώστε να κατασκευασθούν φυσικά αντικείμενα άμεσα από ένα τρισδιάστατο σχέδιο που έχει προετοιμαστεί με τη βοήθεια Ηλεκτρονικού Υπολογιστή (Computer Aided Design-CAD). Η προσθετική κατασκευή χρησιμοποιεί υλικά σε οποιαδήποτε μορφή είτε υγρή είτε στερεή και τα εναποθέτει μέσω διαφόρων τεχνικών σε επάλληλες στρώσεις έτσι ώστε να σχηματιστούν τα επιθυμητά προϊόντα, σε αντίθεση με τις συμβατικές μεθόδους κατασκευής που βασίζονται κυρίως στην αφαίρεση ή τη χύτευση των υλικών.

Η προσθετική κατασκευή (Additive Manufacturing, (AM)) αποτελεί μια σύγχρονη καινοτομία, η οποία έχει αναπτυχθεί και τυποποιηθεί για την εκτύπωση οποιασδήποτε μεγάλης και περίπλοκης δομής με καλές μηχανικές ιδιότητες, μέσω ενός γρήγορου πρωτοτύπου συστήματος (Ngo, et al., 2018). Αυτή η τεχνολογία μπορεί να κατασκευάσει τρισδιάστατα αντικείμενα (3D) συνδέοντας στρώματα υλικών και μπορεί να εφαρμοστεί για τη μετατροπή απορριμμάτων και παραπροϊόντων σε νέα υλικά (Ford, et al., 2016). Η 3D εκτύπωση (3D Printing) είναι μια αυτοματοποιημένη διαδικασία προσθετικής κατασκευής για την δημιουργία αντικειμένων 3D από μοντέλα σχεδιασμού με τη βοήθεια υπολογιστή. Τα τρισδιάστατα μοντέλα χωρίζονται σε διάφορα επίπεδα 2D και αποτίθενται μέσω κατάλληλων εκτυπωτών για την κατασκευή των σχεδιασμένων αντικειμένων (Bogue, 2013). Η τρισδιάστατη εκτύπωση έχει επιτύχει αυξημένη ανάπτυξη σε διάφορους τομείς, όπως ο στρατιωτικός, η αεροδιαστημική και η βιοϊατρική και σήμερα θεωρείται ως μια αξιόλογη μέθοδος στον κατασκευαστικό τομέα (Paul SC, et al., 2018).

Ο όρος «Προσθετική κατασκευή» είναι ο επίσημος πρότυπος όρος της βιομηχανίας, ενώ ο όρος «τρειςδιάστατη εκτύπωση» (3d printing) αποτελεί ευρέως χρησιμοποιούμενο συνώνυμο (Τράντζας, 2017). Ο όρος «ταχεία προτυποποίηση» (Rapid Prototyping) έδειχνε στην αρχή να είναι μια πλήρης περιγραφή της τεχνολογίας καθώς βρισκόταν ακόμα σε πρώιμο στάδιο εξέλιξης. Όμως καθώς προέκυψε σημαντική πρόοδος που οδήγησε την τεχνολογία αυτή να χρησιμοποιείται και σε διαφορετικούς τομείς από την προτυποποίηση, από τη δεκαετία του 1990 άρχισε να χρησιμοποιείται ευρέως ο όρος «Τρισδιάστατη Εκτύπωση» (3D Printing) ο οποίος και επικράτησε. Ο όρος αυτός βέβαια αναφερόταν περισσότερο σε χαμηλού κόστους οικιακούς τρισδιάστατους εκτυπωτές και σε μερικά μεγαλύτερα εμπορικά συστήματα τρισδιάστατης εκτύπωσης που για την κατασκευή

αντικειμένων χρησιμοποιούν υλικό το οποίο τοποθετούν με ακροφύσιο, με εκτυπωτική κεφαλή (printhead) ή οποιαδήποτε άλλη μέθοδο εκτύπωσης . Ο όρος «προσθετική κατασκευή» προέκυψε αργότερα και δείχνει να καταφέρνει να περιγράφει πιο σωστά την τεχνολογία στο σύνολό της. Πιο συγκεκριμένα αναφέρεται περισσότερο στην τεχνολογία αιχμής που χρησιμοποιείται για βιομηχανικούς σκοπούς, για επαγγελματικό εξοπλισμό και για επαγγελματικές εφαρμογές. Σε γενικές γραμμές πάντως οι όροι «τριδιάστατη εκτύπωση» και «προσθετική κατασκευή» θεωρούνται συνώνυμοι. Άλλοι όροι οι οποίοι έχουν χρησιμοποιηθεί είναι το «ηλεκτρονική κατασκευή» (E-Manufacturing), «Ελεύθερη Παραγωγή» (Freedom Fabrication), «Προσθετική Στρώση Κατασκευής» (Additive Layer Manufacturing), «Γρήγορη Κατασκευή» (Rapid Manufacturing), «Εποικοδομητική Κατασκευή» (Constructive Manufacturing), «Άμεση Ψηφιακή Κατασκευή» (Direct Digital Manufacture), «Προσθετική Παραγωγή» (Additive Fabrication).

2.2 Τα βασικά χαρακτηριστικά της διαδικασίας τρισδιάστατης εκτύπωσης

Η πληθώρα των τεχνολογιών και των υλικών που έχει αναπτυχθεί στο τομέα της προσθετικής κατασκευής, απαιτούν τη πραγματοποίηση εξειδικευμένων εργασιών. Για κάθε διαφορετική τεχνική πρέπει να καλύπτονται συγκεκριμένες προϋποθέσεις που θα εξασφαλίσουν το επιθυμητό αποτέλεσμα. Ακόμα και όταν αναφερόμαστε στην ίδια μηχανή εκτύπωσης, οι αλλαγές στις ρυθμίσεις του τρόπου κατασκευής μπορούν να οδηγήσουν σε ένα πολύ διαφορετικό αποτέλεσμα σε ότι αφορά τα χαρακτηριστικά του αντικειμένου. Μπορεί οι εκτυπωτές οικιακής χρήσης να έχουν δημιουργηθεί έτσι ώστε να ελαχιστοποιείται όσο το δυνατόν περισσότερο η ανθρώπινη παρέμβαση, όμως στη βαριά βιομηχανία υπάρχει ένα σύνολο ατόμων και διαδικασιών που συμμετέχουν από τη σύλληψη της ιδέας του προϊόντος μέχρι την τελική του επεξεργασία.

Γενικότερα όμως υπάρχουν κάποια κοινά βήματα κατά τη διάρκεια της διαδικασίας της προσθετικής κατασκευής. Μπορούμε λοιπόν να διακρίνουμε πέντε στάδια (Prakash, et al., 2018) :

1. Δημιουργία τρισδιάστατου ψηφιακού αρχείου
2. Μετατροπή του αρχείου ώστε να έχει τη κατάλληλη μορφή για να το αναγνωρίσει και να το επεξεργαστεί ο εκτυπωτής.
3. Αποστολή αρχείου στη μηχανή προσθετικής κατασκευής όπου γίνεται η επεξεργασία χαρακτηριστικών και ρυθμίσεων.

4. Κατασκευή του αντικειμένου με διαδοχικές στρώσεις
5. Τελική επεξεργασία αντικειμένου (Καθαρισμός, φινιρίσμα κ.α.)

Η σχεδίαση του τρισδιάστατου αρχείου είναι μία διαδικασία που περιλαμβάνει όλα εκείνα τα στάδια από την σύλληψη της ιδέας μέχρι τη τελική μορφή του αρχείου στο σχεδιαστικό πρόγραμμα του υπολογιστή. Το αρχείο μπορεί να δημιουργηθεί εξ αρχής από τον σχεδιαστή σε κάποιο λογισμικό σχεδίασης, μπορεί να είναι προϊόν αντίστροφης σχεδίασης (Reverse engineering equipment) όπως η τρισδιάστατη σάρωση, ή να χρησιμοποιηθεί ένα ήδη υπάρχον αρχείο αλλάζοντας κάποια χαρακτηριστικά (Eyers, et al., 2017)

Η ανάπτυξη της τεχνολογίας δημιουργίας τρισδιάστατων ψηφιακών αρχείων CAD (Computer Aided Design) ήταν σημαντική για τη δημιουργία τεχνολογιών προσθετικής κατασκευής. Η ανάπτυξη τεχνολογιών τρισδιάστατης εκτύπωσης στηρίζεται στην λεπτομερή αναπαράσταση του στερεού αντικειμένου σε υπολογιστικό πρόγραμμα. Πλέον, με την εξέλιξη των λογισμικών σχεδίασης υπάρχει μία πληθώρα επιλογών, από απλά εκπαιδευτικά υπολογιστικά προγράμματα μέχρι προγράμματα ελεύθερης σχεδίασης. Η σάρωση αντικειμένων και οι αντίστοιχες μηχανές αναπτύχθηκαν και εφαρμόζονται είναι μία από τις δυνατότητες δημιουργίας CAD αρχείων. Ειδικά για αντικείμενα που παρουσιάζουν πολυπλοκότητα στη γεωμετρία τους, η τρισδιάστατη σάρωση είναι ο πιο απλός τρόπος αποτύπωσης του ψηφιακού σχεδίου τους. Οι σαρωτές, με τη χρήση λέιζερ ή κάμερας, προσπαθούν να συλλέξουν όσο το δυνατόν περισσότερες πληροφορίες από τα σημεία επιφάνειας του αντικειμένου και να τα επεξεργαστούν κατάλληλα ώστε να το μετατρέψουν σε ψηφιακό αρχείο.

Προκειμένου η μηχανή προσθετικής κατασκευής να αναγνωρίσει και να επεξεργαστεί το αντικείμενο, θα πρέπει το αρχείο να έχει τη κατάλληλη μορφή. Έτσι γίνεται μετατροπή του αρχείου τρισδιάστατης απεικόνισης σε αρχείο STL¹. Μέσω του αρχείου αυτού μεταφέρονται τα δεδομένα για τη γεωμετρία του αντικειμένου στον εκτυπωτή, χωρίς όμως να περιλαμβάνονται άλλες πληροφορίες για το χρώμα ή το υλικό.

Από τη στιγμή εκκίνησης της εκτύπωσης της κατασκευής η ανθρώπινη παρέμβαση είναι ελάχιστη. Είναι αρκετά σημαντικό οι πρώτες στρώσεις να δημιουργηθούν σωστά καθώς πάνω σε αυτές θα χτιστεί το υπόλοιπο υλικό. Φυσικά προβλέπεται επίβλεψη και έλεγχος κατά τη διάρκεια λειτουργίας όμως κατά βάση ο εκτυπωτής λειτουργεί αυτόνομα ακολουθώντας τις οδηγίες που έχει λάβει από το λογισμικό. Η διαδικασία θα ολοκληρωθεί δημιουργώντας διαδοχικές στρώσεις μέχρι την ολοκλήρωση της εκτύπωσης. Η κατασκευή

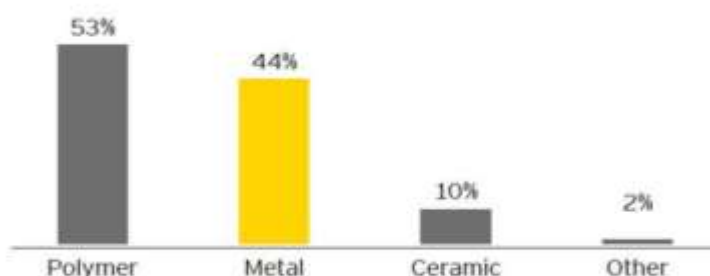
¹ Το όνομα STL προέρχεται από τη λέξη Στερεολιθογραφία (Stereolithography), που ήταν η πρώτη εμπορική εφαρμογή προσθετικής κατασκευής που αναπτύχθηκε από την εταιρεία 3D Systems.

της κάθε στρώσης μπορεί να γίνει με διάφορες μεθόδους όπως θα αναφερθούν σε επόμενο κεφάλαιο της παρούσας εργασίας με τις πλέον συνήθεις να είναι η εξώθηση υλικού πάνω σε μία βάση, η στερεοποίηση υγρής ρητίνης με χρήση υπεριώδους ακτινοβολίας, η σύντηξη υλικού σε μορφή πούδρας κ.α.

2.3 Υλικά που χρησιμοποιούνται στη τρισδιάστατη εκτύπωση

Υπάρχει η δυνατότητα χρησιμοποίησης μιας πολύ μεγάλης ποικιλίας πρώτων υλών στη προσθετική κατασκευή. Η κάθε τεχνολογική μέθοδος τρισδιάστατης εκτύπωσης μπορεί να χρησιμοποιήσει διαφορετικά υλικά από τις άλλες και σε πολλές περιπτώσεις κάθε μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιήσει πολλά είδη πρώτων υλών ταυτόχρονα. Πιο συγκεκριμένα κάποια από τα υλικά που χρησιμοποιούνται είναι: πλαστικά, μέταλλα, κεραμικά, χαρτί, κεριά, γυαλί, βιοϊατρικά υλικά, άμμος και άλλα.

Το υλικό που χρησιμοποιείται σε μεγαλύτερο ποσοστό στη βιομηχανική και την οικιακή χρήση για τρισδιάστατη εκτύπωση είναι τα πλαστικά. Το ποσοστό βιομηχανικής χρήσης πλαστικών φτάνει στο 53 % όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-1.



Σχήμα 2-1: Ποσοστά χρήσης υλικών για τρισδιάστατη εκτύπωση στη βιομηχανία (2016).

Πλέον οι επιχειρήσεις έχουν αποκτήσει τεχνογνωσία στη χρήση μετάλλων για την τρισδιάστατη εκτύπωση και τα χρησιμοποιούν σε ποσοστό 44% και επιλέγονται κυρίως για την κατασκευή αντικειμένων από πολύτιμα μέταλλα όπως τιτάνιο, ανοξείδωτο χάλυβα και κράματα αλουμινίου. Επιπλέον σύμφωνα με την έρευνα EY global 3DP study (2016) το 52% των επιχειρήσεων θεωρούν απαραίτητη τη δυνατότητα τρισδιάστατης εκτύπωσης με χρήση μετάλλου πριν την υιοθέτηση της τεχνολογίας (2016).

Σύμφωνα με τη συγκεκριμένη μελέτη, όσον αφορά τη ζήτηση πρώτων υλών, εκτός από πλαστικά και μέταλλα που βρίσκονται στην κορυφή, υπάρχει ζήτηση για υλικά που έχουν σχέση με τη φαρμακευτική, τα φαγητά, την κατασκευή κτιρίων και τα υφάσματα

Παρόλα αυτά, η τιμή των υλικών είναι ένα σημαντικό εμπόδιο για την 3D εκτύπωση. Για παράδειγμα, το κόστος της πλαστικής ύλης που χρησιμοποιείται κυμαίνεται από 60 έως 425 \$ /kg, ενώ η ισοδύναμη ποσότητα του υλικού που χρησιμοποιείται στην παραδοσιακή χύτευση με έγχυση είναι μόνο 2.40 έως 3.30 \$/kg. Αν και το υψηλότερο κόστος δεν αποτελεί πρόβλημα για τη δημιουργία πρωτοτύπων ή μικρών αντικειμένων, σε ευρείας κλίμακας παραγωγές μοιάζει ασύμφορο.

Για ορισμένα υλικά, η 3D εκτύπωση είναι κάτι περισσότερο από μια εξειδικευμένη εναλλακτική. Στην πραγματικότητα είναι η ιδανική μέθοδος παραγωγής όπως για παράδειγμα στην περίπτωση του τιτανίου. Το τιτάνιο παρουσιάζει σημαντικές μηχανικές ιδιότητες (ελαφρύ, υψηλή αντοχή, αντοχή στη διάβρωση κ.α.). Εκτός από το τρέχον κόστος, το κύριο μειονέκτημα του τιτανίου (και ο λόγος που η χρήση του περιορίζεται σε εξειδικευμένες εφαρμογές στην αεροδιαστημική, τα ιατρικά εμφυτεύματα, κοσμήματα και αυτοκίνητα επιδόσεων) είναι ότι είναι δύσκολο επεξεργάσιμο. Έχει την τάση να σκληραίνει κατά την κοπή και είναι ευαίσθητο σε επιμολύνσεις με ξένες ουσίες κατά τη συγκόλληση. Η εκτύπωση σε τιτάνιο είναι ελκυστική επειδή εξαλείφει τα προβλήματα της κατεργασίας. Περαιτέρω, καθώς οι εκτυπωτικές μηχανές θα γίνονται μεγαλύτερες σε μέγεθος, θα υπάρχει δυνατότητα παρασκευής μεγαλύτερων φορέων, εξαλείφοντας την ανάγκη για συγκόλληση.

2.4 Μέθοδοι Προσθετικής Κατασκευής

Οι μέθοδοι προσθετικής κατασκευής έχουν αναπτυχθεί με ταχύτατο ρυθμό τα τελευταία χρόνια. Υπάρχει πλέον ένας μεγάλος αριθμός τεχνολογιών που εφαρμόζονται στη προσθετική κατασκευή. Οι τεχνολογίες αυτές διαφέρουν ως προς τον τρόπο που τοποθετούν και συνδέουν τις διαδοχικές στρώσεις και ως προς τη μορφή και τη σύσταση των πρώτων υλών που χρησιμοποιούν. Ο συνηθέστερος βασικός διαχωρισμός των συστημάτων τρισδιάστατης εκτύπωσης είναι :

- Συστήματα ελεγχόμενης εναπόθεσης υλικού, όπου οι πρώτες ύλες μέσω ψεκασμού ή εξώθησης από τη κεφαλή του εκτυπωτή τοποθετούνται σε στρώσεις μέσω κάποιας σύριγγας, ακροφυσίου ή ψεκαστικού μηχανισμού.
- Συστήματα ελεγχόμενης συσσωμάτωσης ή διασύνδεσης των πρώτων υλών, οι οποίες βρίσκονται μέσα σε δεξαμενές, σε ρευστή μορφή ή σκόνη.

Η πρώτη ομάδα περιλαμβάνει μία μεγάλη ποικιλία πρώτων υλών, όπως μέταλλα, φυσικά και συνθετικά πολυμερή, κεραμικά, σύνθετα και νανοσύνθετα υλικά κ.α. Η δεύτερη ομάδα περιλαμβάνει πρώτες ύλες σε μορφή σκόνης. Στη κατηγορία αυτή κατά την εκτύπωση η κεφαλή του εκτυπωτή μπορεί να κατευθύνει μία δέσμη laser για τοπική τήξη του υλικού (Selective Laser Sintering/Melting) ή να ψεκάζει συνδεδετικές ουσίες στην επιφάνεια της σκόνης, για το σχηματισμό των στρώσεων του αντικειμένου (Diegel, 2014). Σε αυτή τη κατηγορία εντάσσονται και οι εκτυπωτές που εφαρμόζουν τη μέθοδο της στερεολιθογραφίας (Stereolithography), με εφαρμογή της ελεγχόμενης σκλήρυνσης ρευστών ρητινών.

Οι τεχνολογίες προσθετικής κατασκευής ταξινομούνται επίσημα όμως σε 7 κατηγορίες με βάση τη προτυποποίηση κατά ISO και ASTM (ISO/ASTM52900-15). Οι κατηγορίες αυτές είναι :

- Φωτοπολυμερισμός (Vat Photopolymerisation)
- Εκτόξευση υλικού (Material Jetting)
- Εκτόξευση συνδεδετικών (Binder Jetting)
- Εξώθηση Υλικού (Material Extrusion)
- Κλίνη κόνεως σύντηξης (Powder Bed Fusion)
- Ελασματοποίηση σε φύλλα (Sheet Lamination)
- Κατευθυνόμενη εναπόθεση ενέργειας (Directed Energy Deposition)

2.5 Εξώθηση Υλικού

Η κυριότερη τεχνολογία εξώθησης υλικού είναι η κατασκευή μέσω σύντηξης νημάτων (Fused Filament Fabrication-FFF). Η μέθοδος αυτή βασίζεται στην 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 (Gibson, et al., 2010). 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. Η συγκόλληση των νημάτων και η στερεοποίηση τους γίνεται σχεδόν ακαριαία, με σχηματισμό στρώσεων παράλληλων στο επίπεδο της πλατφόρμας εκτύπωσης. Μία τέτοια στρώση αποτελεί μία εγκάρσια τομή του αντικειμένου

σε επίπεδο παράλληλο στη 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. Για τη δημιουργία μεγάλων προεξοχών και εσωτερικών κοιλοτήτων εκτυπώνονται παράλληλα στηρίγματα του υπό κατασκευή αντικειμένου, είτε από το ίδιο το υλικό εκτύπωσης είτε από διαφορετικό υλικό υποστήριξης, τα οποία απομακρύνονται μετά την ολοκλήρωση της εκτύπωσης. Τα συνηθέστερα πολυμερή που χρησιμοποιούνται ως πρώτες ύλες σε αυτή τη τεχνολογία είναι :

- Πολύ(γαλακτικό οξύ) (poly(lactic acid))
- PLA
- Συμπολυμερή ακρυλονιτριλίου-βουταδιενίου-στυρενίου (acryl-butadiene-styrene, ABS)
- Σύνθετα και νάνο-σύνθετα υλικά με βάση τα προηγούμενα πολυμερή

Μία άλλη τεχνολογία είναι αυτή που χρησιμοποιεί μη νευτωνικά ρευστά υλικά υψηλού ιξώδους, που εναποτίθενται με παρόμοιο τρόπο και αποκτούν τρισδιάστατη δομή με διάφορους φυσικούς και χημικούς μηχανισμούς (Direct Ink Writing/Assebly) (Wong, et al., 2012). Περιλαμβάνει διάφορες κατασκευαστικές μεθόδους τρισδιάστατων δομών ελεγχόμενης αρχιτεκτονικής και σύστασης από ρευστά υλικά (inks). Οι κυριότερες τεχνικές εναπόθεσης είναι υπό την μορφή νημάτων (pressure assisted DIW) είτε με ψεκασμό με τη μορφή μικρο- ή νάνο- σταγόνων (Drop on Demand and Laser – Assisted DIW) (Gibson, et al., 2010). Η πρώτη τεχνική χρησιμοποιεί υλικά τα οποία είναι συνήθως πολυμερικά διαλύματα ή κολλοειδή αιωρήματα σωματιδίων υψηλού ιξώδους και μη νευτωνικής συμπεριφοράς. Ιδιαίτερο χαρακτηριστικό αυτής της τεχνικής είναι η εμφάνιση του φαινομένου της διατμητικής λέπτυνσης, δηλαδή το φαινόμενο ιξώδες τους μειώνεται όταν αναπτύσσονται διατμητικές τάσεις κατά την εξώθηση από το ακροφύσιο. Μετά την εναπόθεση όμως επανασηματίζονται οι διαμοριακές συνδέσεις μεταξύ των πολυμερικών αλυσίδων με συνέπεια την αύξηση του ιξώδους (Lewis, 2006). Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται η μερική στερεοποίηση των στρώσεων η οποία ενισχύεται επιπλέον με την ανάπτυξη σταυροδεσμών μεταξύ των πολυμερικών αλυσίδων.

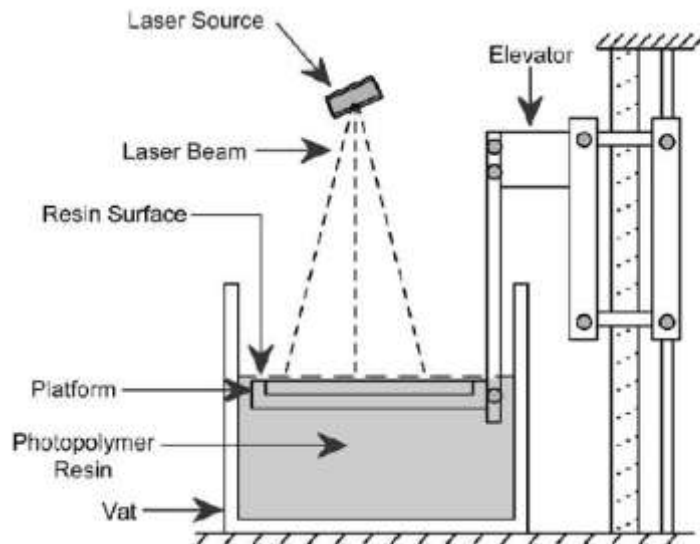
Τα υλικά που χρησιμοποιούνται για αυτή την τεχνολογία (Direct Ink Writing/Assebly) είναι (Lewis, 2006) :

- Κολλοειδή αιωρήματα κεραμικών (πυριτία, τιτανία, αλουμίνα, νιτρίδιο του πυριτίου κ.α.)
- Αγώγιμα μελάνια με σωματίδια αργύρου
- Νανοσωλήνες άνθρακα
- Οξείδιο του γραφενίου
- Μεταλλικά οξείδια
- Πολύ-ηλεκτρολύτες
- Φυσικές και συνθετικές υδρογέλες
- Αδρομερή συμπολυμερή αιθυλενοξειδίου-προπυλενοξειδίου (Polaxamers)
- Βιομόρια και κύτταρα

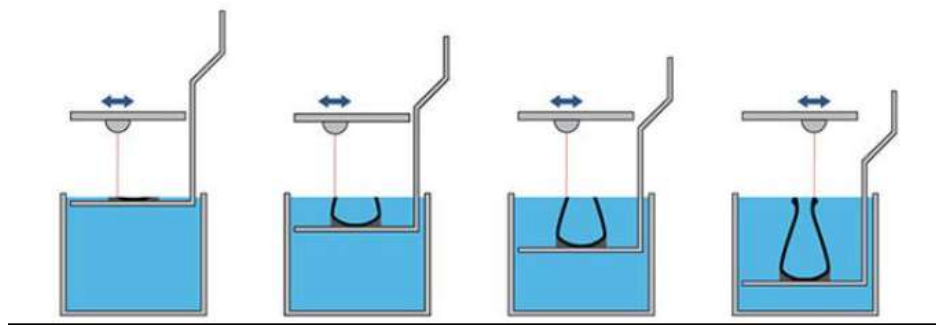
2.6 Στερεολιθογραφία

Η στερεολιθογραφία (stereolithography,SLA) έχει ως αρχή λειτουργίας τον ελεγχόμενο φωτοπολυμερισμό ρευστών ρητίνων με σκοπό τη δημιουργία τρισδιάστατων αντικειμένων. Την εφηύρε ο Charles Hall το 1984 και κατοχυρώθηκε επισήμως το 1986. Οι πρώτες μηχανές κατασκευάστηκαν από την εταιρεία 3D Systems στη Valencia της Καλιφόρνιας (ΗΠΑ) το 1988 και μέχρι και σήμερα έχει εξέχουσα θέση στην αγορά.

Στην Εικόνα 2 παρουσιάζεται η διάταξη της στερεολιθογραφίας. Αποτελείται από μία δεξαμενή η οποία περιέχει σε υγρή φάση φωτοευαίσθητη ρητίνη. Η πλατφόρμα εκτύπωσης είτε βρίσκεται στην ελεύθερη επιφάνεια της δεξαμενής και μέσω ενός μηχανικού συστήματος ανέλκυσης κινείται προοδευτικά προς τα κάτω (top-down SLA) είτε βρίσκεται βυθισμένη εξ' ολοκλήρου στην υγρή ρητίνη και κινείται προοδευτικά προς τα πάνω (bottom-up, SLA). Ο εκτυπωτής κατευθύνει μία δέσμη διοδικού laser υπεριώδους ακτινοβολίας (HeCd, 325 nm) η οποία ενεργοποιεί τους μηχανισμούς στερεοποίησης μέσω ανάπτυξης χημικών διασυνδέσεων (crosslinking) και σκλήρυνσης του υλικού. Η στερεοποίηση εξελίσσεται σε εγκάρσιες διατομές του σχηματιζόμενου προϊόντος καθώς η πλατφόρμα κινείται μέσα στην δεξαμενή (Σχήμα 2-2, Σχήμα 2-3). Κατά τον τερματισμό της διαδικασίας το μοντέλο αφαιρείται από το διάλυμα και το παγιδευμένο στο εσωτερικό του μοντέλου ρευστό, αφαιρείται σε ειδικό φούρνο.



Σχήμα 2-2: Αρχής λειτουργίας στερεολιθογραφίας



Σχήμα 2-3: Στάδια διαμόρφωσης προϊόντος στη στερεολιθογραφία

Τα φωτοπολυμερικά υλικά που χρησιμοποιούνται περιέχουν μονομερή, ολιγομερή 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 πολυμερικών διασταυρωμένων μακρομορίων. Τα φωτοπολυμερικά υλικά που χρησιμοποιούνται στη τεχνολογία αυτή είναι :

- Τα ακρυλικά : Με πολυμερισμό ελευθέρων ριζών. Έχουν υψηλή δραστηριότητα όμως δημιουργούν καταστάσεις τοπικής συρρίκνωσης. Επίσης το οξυγόνο δρα ως αναστολέας.
- Εποξειδικά : 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. Τα συνηθέστερα στην εφαρμογή μονομερή είναι :

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

2.7 Επιλεκτική πυροσυσσωμάτωση και επιλεκτική τήξη με laser

Οι τεχνικές της επιλεκτικής πυροσυσσωμάτωσης με laser (Selective Laser Sintering ή SLS) και της επιλεκτικής τήξης με λέιζερ (Selective Laser Melting ή SLM) είναι τεχνικές προσθετικής κατασκευής κατά στρώσεις, που επιτρέπουν τη δημιουργία σύνθετων τρισδιάστατων αντικειμένων. Η αρχή της λειτουργίας τους στηρίζεται στη συσσωμάτωση διαδοχικών στρώσεων σκόνης υλικού με τη εφαρμογή ελεγχόμενης δέσμης laser. Ο μηχανισμός συσσωμάτωσης διαφέρει ανάλογα το είδος της τεχνικής, διακρίνοντας οι εξής κατηγορίες (Benchmarking of different SLS/SLM processes as rapid manufacturing techniques, 2005) (Merzelis, et al., 2005):

1. Πυροσυσσωμάτωση στερεάς κατάστασης
2. Χημικά προκαλούμενη συσσωμάτωση
3. Υγρη θερμοσυσσωμάτωση
4. Μερική ή πλήρης τήξη

Η διαδικασία για την κατασκευή προϊόντων με την τεχνική SLS 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. 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. 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. Στον Πίνακα 2-1 παρουσιάζονται τα συνήθη υλικά που εφαρμόζονται σε αυτές τις τεχνικές.

Πίνακας 2-1: Συνήθη υλικά που εφαρμόζονται στην μέθοδο επιλεκτικής τήξης (Bourrias Varotsis)

Υλικά	Χαρακτηριστικά
Πολυαμίδιο 12 (PA 12)	Καλές μηχανικές ιδιότητες Καλή χημική αντοχή Ματ, τραχιά επιφάνεια
Πολυαμίδιο 11 (PA11)	Πλήρως ισοτροπική συμπεριφορά Υψηλή ελαστικότητα
Νάιλον με προσθήκη αλουμινίου (Alumide)	Μεταλλική εμφάνιση Υψηλή ακαμψία
Νάιλον με προσθήκη γυαλιού (PA-GF)	Υψηλή Ακαμψία Υψηλή αντοχή στη φθορά και στη θερμοκρασία
Νάιλον με προσθήκη ινών άνθρακα (PA-FR)	Εξαιρετική ακαμψία Υψηλή αναλογία βάρους-αντοχής Υψηλή ανισοτροπία

Τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα των τεχνικών SLS/SLM είναι :

- Γεωμετρική ελευθερία
- Παραμετροποίηση των ιδιοτήτων της σκόνης του υλικού
- Ευελιξία στην επιλογή των υλικών

Σε αντίθεση με τις τεχνικές αφαίρεσης υλικού, με τις τεχνικές SLS και SLM μπορούν να κατασκευαστούν σύνθετα σχήματα χωρίς την ανάγκη υπολογισμών πολύπλοκων διαδρομών, ενώ η ακατέργαστη σκόνη μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί.

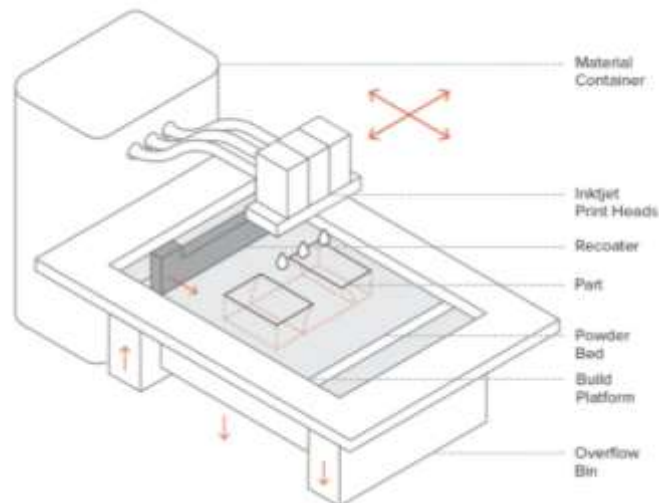
2.8 Μέθοδοι ψεκασμού

2.8.1 Ψεκασμός συνδετικού μέσου

Οι μέθοδοι ψεκασμού συνδετικών μέσων (Binder Jetting – BJ) χρησιμοποιούν πολυμερή, μέταλλα και κεραμικά σε μορφή σκόνης ως κύρια συστατικά κατασκευής. Ως υλικά διασύνδεσης χρησιμοποιούνται διαλύματα οργανικών ουσιών (binders), με χαρακτηριστικές περιπτώσεις τα διαλύματα παραφινών σε οργανικούς διαλύτες και τα συστήματα σκληρυνόμενων ρητινών δύο συστατικών (φουρένιου) ή θερμοσκληρυνόμενες ρητίνες (φαινολικές).

Όπως γίνεται και στη μέθοδο SLS, η σκόνη του υλικού κατασκευής απλώνεται πάνω από την πλατφόρμα εκτύπωσης, σχηματίζοντας ένα ισοπαχές στρώμα και στη συνέχεια η κεφαλή εκτύπωσης, ψεκάζει μικρό-σταγόνες του συνδετικού μέσου μέσα από διαδοχικά ακροφύσια, σε προεπιλεγμένα σημεία για τον σχηματισμό της εγκάρσιας διατομής του αντικειμένου. Οι μηχανισμοί ψεκασμού, που εφαρμόστηκαν μπορούν να παράγουν με συνεχή (Continuous Inkjet) ή με διακεκομμένη (Drop on Demand Inkjet) ροή συνδετικού μέσου. Μετά την ολοκλήρωση μίας στρώσης, η πλατφόρμα εκτύπωσης μετακινείται προς τα κάτω και η δεξαμενή τροφοδοσίας προς τα πάνω ώστε με τη χρήση μίας κινούμενης κυλινδρικής επιφάνειας να απλώνεται το νέο στρώμα σκόνης για την επανάληψη της διαδικασίας και την ολοκλήρωση ενός νέου στρώματος (Σχήμα 2-4).

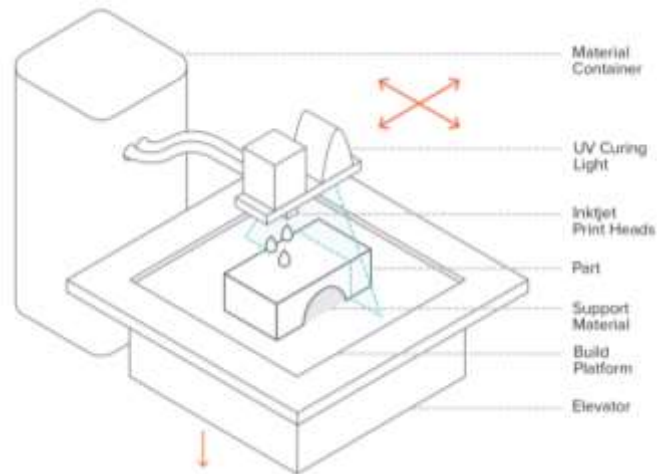
Κρίσιμες παράμετροι για την διαδικασία είναι η κίνηση της κεφαλής, η διάμετρος των σχηματιζόμενων σταγόνων του συνδετικού μέσου, η κοκκομετρική κατανομή της σκόνης και οι δυνάμεις συνοχής που αναπτύσσονται κατά τη προσθήκη του συνδετικού μέσου στο υλικό κατασκευής. Η μέθοδος δεν απαιτεί τη χρήση υποστηρικτικών μηχανισμών και μπορεί να κατασκευάσει εύκολα συνεργαζόμενα μηχανικά εξαρτήματα που δεν χρειάζονται συναρμολόγηση. Σημαντικό πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι η σκόνη που δεν εκτίθεται στο συνδετικό μέσο μπορεί να ξαναχρησιμοποιηθεί.



Σχήμα 2-4: Σχηματική αναπαράσταση διάταξης ψεκασμού συνδετικού μέσου (Bournias Varotsis)

2.8.2 Ψεκασμός υλικού

Η μέθοδος ψεκασμού υλικού (Material Jetting (MJ)) είναι μια διαδικασία προσθετικής κατασκευής που λειτουργεί με παρόμοιο τρόπο όπως οι 2D εκτυπωτές. Ο ψεκασμός του υλικού γίνεται μέσω μιας κεφαλή εκτύπωσης (παρόμοια με τις κεφαλές εκτύπωσης που χρησιμοποιούνται για τυπική εκτύπωση inkjet) που διανέμει τα σταγονίδια ενός φωτοευαίσθητου υλικού που στερεοποιείται κάτω από υπεριώδες (UV) φως. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται στη τεχνολογία MJ είναι θερμοσκληρυνόμενα φωτοπολυμερή (ακρυλικά) που εφαρμόζονται σε υγρή μορφή. Ανάλογα με το είδος της συμπίεσης, το υγρό μπορεί να εξέρχεται σε συνεχή ροή (continuous inkjet-CIJ) ή σε διακριτά σταγονίδια (drop on demand –DOD) και εναποτίθενται σε προεπιλεγμένα σημεία πάνω στη πλατφόρμα εκτύπωσης ή σε υποκείμενες στρώσεις, για να σχηματιστούν οι εγκάρσιες τομές του αντικειμένου (Σχήμα 2-5, Σχήμα 2-6).



Σχήμα 2-5: Σχηματική αναπαράσταση διάταξης ψεκασμού υλικού (Bournias Varotsis).



Σχήμα 2-6: Διαμόρφωση αντικειμένου με τη μέθοδο ψεκασμού υλικού (Bournias Varotsis)

Οι σημαντικότερες παράμετροι που ελέγχουν τις διεργασίες ψεκασμού και την ποιότητα του τελικού προϊόντος είναι :

- Ταχύτητα κίνησης της κεφαλής
- Διάμετρος και γεωμετρία ακροφυσίων
- Απόσταση ακροφυσίου από το υπόστρωμα
- Ομοιογένεια και συχνότητα παραγόμενων παλμών πίεσης του υλικού προς τη πλατφόρμα
- Ταχύτητα παραγόμενων σταγόνων

Οι παράμετροι αυτές μπορούν να καθορίζονται λαμβάνοντας υπόψη χαρακτηριστικά του υλικού που χρησιμοποιείται κάθε φορά όπως η πυκνότητα, επιφανειακή τάση, ιξώδες κ.α. Ειδικότερα το ιξώδες είναι ταυτόχρονα και περιοριστικός παράγοντας της εφαρμογής,

ανάλογα της ικανότητας της μηχανής εκτύπωσης με αναφερόμενο άνω όριο τα 40 mPa/sec στις συνθήκες εκτύπωσης (Gibson, et al., 2010).

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται στη μέθοδο είναι συνήθως κηρώδεις πρώτες ύλες και φωτοσκληρυνόμενες ρητίνες. Στην περίπτωση των κηρωδών πρώτων υλών τα περισσότερα εμπορικά υλικά είναι μίγματα πολυμερικών ρητινών μικρού συντελεστή συρρίκνωσης, παραφινών χαμηλού ιξώδους, πολυμερών που ενισχύουν τις μηχανικές ιδιότητες και μικρής ποσότητας πλαστικοποιητών. Επιπλέον προστίθενται αντιοξειδωτικά, χρωστικές και εγκλείσματα που σκοπό έχουν να βελτιώσουν τη θερμική αγωγιμότητα. Τα μίγματα των υλικών αυτών θερμαίνονται κατά τη διαδικασία προκειμένου να ρυθμίζεται κατάλληλα το ιξώδες σε εύρη τιμών που καθιστούν κατάλληλη τη ροή του υγρού και τη δημιουργία σταγόνων (τυπικό εύρος τιμών ιξώδους 18-25 mPa/s για θερμοκρασίες 80-130°C) (Wong, et al., 2012).

Οι φωτοσκληρυνόμενες ρητίνες που χρησιμοποιούνται είναι αντίστοιχες με τις ρητίνες της στερολιθογραφίας. Η σημαντικότερη διαφορά τους είναι ότι έχουν λεπτόρρευστη υγρή κατάσταση προκειμένου να ρέουν ικανοποιητικά μέσω των ακροφυσίων. Συνήθως αποτελούνται από μίγματα μονομερών μεγάλου μοριακού βάρους και ολιγομερών (διαφόρων τύπων πολυεστέρα, πολυουρεθάνης κ.α.) στα οποία προσδένονται λειτουργικές ομάδες (ακρυλικές, εποξειδικές κ.α.). Επίσης προστίθενται κατάλληλοι φωσσεκκινητές, σταθεροποιητές, επιφανειοδραστικές ουσίες και άλλες ουσίες ανάλογα το είδος της κάθε λειτουργικής ομάδας. Η ρύθμιση του ιξώδους αρχικά γίνεται με την κατάλληλη αναλογία μεταξύ διαλυτών και ολιγομερών που υπάρχουν στο μίγμα, σε περίπτωση που χρειάζεται γίνεται προθέρμανση της ρητίνης 20-30 °C πάνω από τη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης (Wong, et al., 2012).

Τα βασικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της τεχνολογίας συνοψίζονται παρακάτω:

- Η μέθοδος ψεκασμού υλικού μπορεί να παράγει αντικείμενα με λείες επιφάνειες ανάλογης ποιότητα με τη χύτευση με έγχυση και με πολύ υψηλή ακρίβεια διαστάσεων.
- Τα αντικείμενα που κατασκευάζονται έχουν ομοιογενείς μηχανικές και θερμικές ιδιότητες.
- Η δυνατότητα χρησιμοποίησης πολλαπλών ουσιών σε υγρά μίγματα καθιστά δυνατή τη δημιουργία οπτικών εξαρτημάτων υψηλής ακριβείας και υψηλής διαφάνειας όπως οι ρητίνες με βάση τον μεθακρυλικό μεθυλεστέρα (φακοί, πρίσματα κ.α.).

- Τα αντικείμενα που παράγονται είναι κατάλληλα κυρίως ως μη λειτουργικά πρωτότυπα, καθώς έχουν κακές μηχανικές ιδιότητες (χαμηλή αντοχή σε εφελκυσμό).
- Τα υλικά που χρησιμοποιούνται είναι φωτοευαίσθητα και οι μηχανικές τους ιδιότητες υποβαθμίζονται με την πάροδο του χρόνου.
- Το υψηλό κόστος της τεχνολογίας μπορεί να την κάνει οικονομικά μη βιώσιμη για ορισμένες εφαρμογές.

2.9 Βιο-εκτύπωση (Bioprinting)

Η εκτύπωση δομών βιομιμητικού ιστού αποτελεί προϋπόθεση για την πρόοδο αναδυόμενων τεχνολογιών, όπως δοκιμές φαρμάκων, μηχανική ιστών, βιομιμητικοί αισθητήρες και μοντέλα τρισδιάστατων ιστών. Λόγω των προβλημάτων απόρριψης στις μεταμοσχεύσεις οργάνων και την έλλειψη δοτών, διερευνώνται νέες μέθοδοι για μεταμόσχευση ιστών / οργάνων. Αυτές οι μέθοδοι περιλαμβάνουν την επέκταση των αυτόλογων κυττάρων που προέρχονται από τον ασθενή και τη χρήση τους ως την κύρια κυτταρική πηγή για την ανάπτυξη ιστών / οργάνων για μεταμόσχευση. Αυτά τα τρισδιάστατα ανάλογα ιστών μπορούν να επιτευχθούν ενσωματώνοντας φυσικά κύτταρα με κατάλληλα βιοσυμβατά υλικά χρησιμοποιώντας μια ακριβή και καλά ελεγχόμενη διαδικασία κατασκευής.

Η βιολογική εκτύπωση μπορεί να οριστεί ως η χρήση της επιστήμης των υλικών και τεχνικών κατασκευής για την δημιουργία βιολογικών δομών που περιέχουν ιστούς, κύτταρα και βιομόρια με συγκεκριμένη οργάνωση και βιολογική λειτουργία. Τεχνικές βιολογικής εκτύπωσης διερευνήθηκαν πρόσφατα για διαφορετικές βιολογικές εφαρμογές λόγω της δυνατότητάς τους να ξεπεράσουν τα περισσότερα από τα προβλήματα που σχετίζονται με τις κλασικές μεθόδους μηχανικής ιστών.

Η βιοεκτύπωση ενός ιστού ή ενός οργάνου είναι μια πολύπλοκη διαδικασία που εξαρτάται από τις εγγενείς ιδιότητες των βιοσυνδέσεων, των τεχνικών εκτύπωσης και των κυτταρικών συστημάτων που χρησιμοποιούνται για την εκτύπωση. Επιπλέον, η ανάλυση της τυπωμένης δομής ελέγχεται από παραμέτρους όπως το μέγεθος του ακροφυσίου εκτύπωσης, την επιφανειακή τάση και το ιξώδες του βιοσυνδέτη (bioink), τη θερμοκρασία και την υγρασία (Σχήμα 2-7).

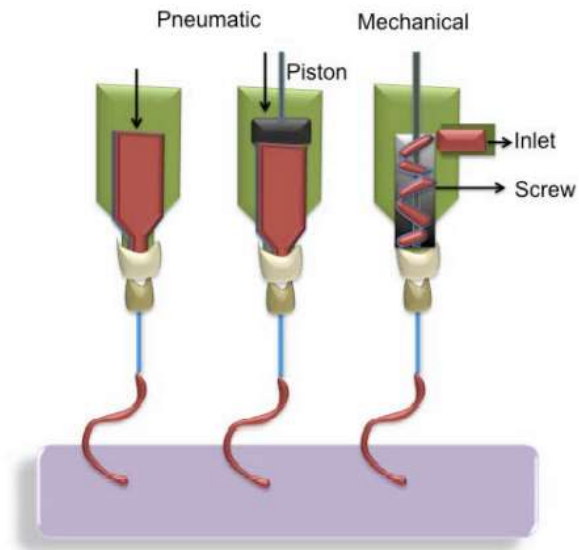


Σχήμα 2-7: Στρατηγικές και προσεγγίσεις σχεδιασμού για ανάπτυξη τρισδιάστατων ιστών και οργάνων

2.9.1 Μέθοδοι βιο-εκτύπωσης

Η μικρο-εξώθηση είναι μια μέθοδος 3D εκτύπωσης που χρησιμοποιείται κυρίως για μη βιολογικούς σκοπούς αλλά και για βιολογικούς. Οι εκτυπωτές που χρησιμοποιούν την μέθοδο της μικρο-εξώθησης χρησιμοποιούν συνήθως ένα θερμο-ρυθμιζόμενο σύστημα χειρισμού και διανομής, έναν πιεζοηλεκτρικό υγραντήρα και ένα στάδιο με διατάξεις για κινήσεις κατά μήκος των κατευθύνσεων x, y και z. Η περιοχή εναπόθεσης φωτίζεται με μια πηγή φωτός που επιτρέπει την ενεργοποίηση των φωτοεναρκτήρων. Η τεχνική μικρο-εξώθησης χρησιμοποιήθηκε με επιτυχία στην εκτύπωση ικριωμάτων για την μηχανική ιστών. Η κεφαλή μικρο-εξώθησης εναποθέτει το υλικό στο υπόστρωμα ως συνεχείς σφαιρίδια με βάση τις οδηγίες του λογισμικού CAD-CAM. Αρχικά, τα σφαιρίδια εναποτίθενται στην κατεύθυνση x-y, στη συνέχεια μετακινώντας τη κεφαλής εξώθησης στον άξονα z, κατασκευάζονται σύνθετες τρισδιάστατες δομές. Τα βιοσυμβατά πολυμερή, τα κυτταρικά σφαιροειδή και πολλές υδρογέλες έχουν αποδειχθεί ότι είναι συμβατά με την μικρο-εξώθηση. Δύο κύρια συστήματα διανομής που χρησιμοποιούνται για την εξώθηση βιοϋλικών είναι μηχανικά και πνευματικά (Σχήμα 2-8). Η ροή του βιοσυνδεδετικού υλικού

αντιμετωπίζεται καλύτερα στη μηχανική διανομή παρά στη μέθοδο διανομής με πεπιεσμένου αέρα.



Σχήμα 2-8: Βιο-εκτύπωση μικρο-εξώθησης χρησιμοποιώντας πνευματικές και μηχανικές μεθόδους

3 Τρισδιάστατη εκτύπωση στον κατασκευαστικό τομέα

Η κατασκευαστική βιομηχανία είναι ένας από τους μεγαλύτερους βιομηχανικούς κλάδους παγκοσμίως. Με ετήσια έσοδα περίπου 10 τρισεκατομμυρίων δολαρίων ΗΠΑ, ή περίπου με το 6% του παγκόσμιου ΑΕΠ, η βιομηχανία των κατασκευών αποτελεί τον ακρογωνιαίο λίθο της παγκόσμιας οικονομίας (Gerbert, et al., 2016). Οι κατασκευαστικές εταιρείες αναζητούν με συνέπεια μεθόδους αύξησης της παραγωγικότητας και ταυτόχρονα μείωσης του κόστους παραγωγής. Η παραγωγικότητα της εργασίας στη μεταποιητική βιομηχανία αυξάνεται. Ωστόσο, μελέτες έχουν δείξει ότι με την πάροδο των ετών, η παραγωγικότητα της εργασίας στον κατασκευαστικό κλάδο μειώνεται. Η έλλειψη εφαρμογής νέων τεχνολογιών στον κατασκευαστικό κλάδο είναι μία σημαντική αιτία αυτής της μείωσης. Η τέταρτη βιομηχανική επανάσταση, γνωστή και ως Industry 4.0, προωθεί την ψηφιοποίηση των πιο περίπλοκων βιομηχανικών εργασιών. Αυτή η τάση εφαρμόστηκε γρήγορα κυρίως στη μεταποιητική βιομηχανία ενώ η εφαρμογή της στον κατασκευαστικό κλάδο βρίσκεται ακόμη στα αρχικά της στάδια. Η προσθετική κατασκευή (AM), ή συνηθέστερα η τρισδιάστατη εκτύπωση, είναι μια από τις νεότερες μορφές τεχνολογίας που έχει εισαχθεί στον κατασκευαστικό κλάδο, και η οποία θα μπορούσε να θεωρηθεί ως ένας από τους κύριους κινητήριους μοχλούς προς την ψηφιοποίηση του κατασκευαστικού κλάδου. Άλλοι βιομηχανικοί κλάδοι όπως η αυτοκινητοβιομηχανία και η μεταποιητική βιομηχανία επωφελήθηκαν από την ποικιλία νέων τεχνολογιών που επέφερε η Industry 4.0 και είχε ως αποτέλεσμα βελτιώσεις στην ποιότητα των προϊόντων και συνολική αύξηση της απόδοσης. Παρά τα οφέλη αυτά, η Industry 4.0 δεν υιοθετήθηκε προς το παρόν στον κατασκευαστικό κλάδο με τον ίδιο ρυθμό όπως και στη μεταποιητική βιομηχανία. Οι Dallasega et al. προσπάθησαν να εξηγήσουν πώς οι έννοιες της Industry 4.0 μπορούν να αναπτύξουν τον κατασκευαστικό κλάδο και τις συνδεδεμένες αλυσίδες εφοδιασμού του. Άλλοι μελέτησαν τις αλλαγές που φέρνει η industry 4.0 στην διαχειριστική πλευρά του κατασκευαστικού κλάδου. Η προσθετική κατασκευή είναι μια από τις νεότερες μορφές τεχνολογίας που έχει εισαχθεί στον κατασκευαστικό κλάδο.

Η τρισδιάστατη εκτύπωση είναι επωφελής για διάφορους κλάδους, συμπεριλαμβανομένης της αεροδιαστημικής, της αυτοκινητοβιομηχανίας και της υγείας. Η τρισδιάστατη εκτύπωση χρησιμοποιείται ήδη με επιτυχία στην ιατρική στην αυτοκινητοβιομηχανία και στη βιομηχανία τροφίμων. Παράλληλα αναπτύσσεται αυξημένο ενδιαφέρον στον αυτοματισμό των κατασκευών και στις εφαρμογές τρισδιάστατης εκτύπωσης στις κατασκευές. Πολλοί είναι οι παράγοντες που επηρεάζουν την προώθηση της αυτοματοποίησης στις κατασκευές, οι σημαντικότεροι είναι η μείωση των ωρών εργασίας για λόγους ασφαλείας, η

μείωση του χρόνου κατασκευής, η μείωση του κόστους παραγωγής και η αύξηση της αρχιτεκτονικής ελευθερίας. Επιπλέον, η τρισδιάστατη εκτύπωση βοηθά στην αντιμετώπιση θεμάτων βιωσιμότητας. Η κατασκευαστική βιομηχανία έχει αναγνωριστεί ως ο κλάδος που καταναλώνει σημαντικό αριθμό πόρων και δημιουργεί σημαντικές περιβαλλοντικές πιέσεις. Η εφαρμογή τρισδιάστατης εκτύπωσης σε κατασκευαστικά έργα δημιουργεί παράλληλα τον προβληματισμό για την ανάπτυξη κινδύνων. Ο κίνδυνος γενικά είναι ένα αβέβαιο γεγονός που μπορεί να έχει αρνητική ή θετική επίδραση σε τουλάχιστον έναν από τους στόχους του έργου. Τα κατασκευαστικά έργα εξαιτίας της φύσης τους, περιλαμβάνουν κινδύνους λόγω του διαφορετικού είδους των υλικών που χρησιμοποιούνται καθώς και λόγω των διαφορετικών τρόπων σύνδεσης των μελών μιας κατασκευής. Οι κίνδυνοι τελικά αποτελούν μείζονα απειλή για την επιτυχία ενός έργου. Η μη ικανοποιητική αντιμετώπιση των κινδύνων προκαλεί υπέρβαση κόστους και χρόνου στα κατασκευαστικά έργα. Οι κίνδυνοι ταξινομούνται ως εσωτερικοί ή εξωτερικοί στα κατασκευαστικά έργα. Οι εσωτερικοί κίνδυνοι βρίσκονται στο επίπεδο του έργου (microlevel) και περιλαμβάνουν τεχνικούς, σχεδιαστικούς, υλικούς και άλλους κινδύνους, ενώ οι εξωτερικοί κίνδυνοι περιλαμβάνουν πολιτικούς, περιβαλλοντικούς και κοινωνικοοικονομικούς κινδύνους (macrolevel). Με την εισαγωγή οποιασδήποτε νέας τεχνολογίας σε οποιαδήποτε βιομηχανία, προκύπτει αβεβαιότητα και κατά συνέπεια αναπτύσσεται πιθανότητα εκδήλωσης ενός κινδύνου για το έργο. Το πρώτο τρισδιάστατο κτίριο που ολοκληρώθηκε στην Κοπεγχάγη, παραδόθηκε με καθυστέρηση αρκετών εβδομάδων σε σχέση με τον αρχικό προγραμματισμό. Η καθυστέρηση οφειλόταν σε ελαττωματικές παραδόσεις υλικού και αστοχίες εξοπλισμού που σχετίζονται με την έλλειψη επαρκούς γνώσης της νέα εισαγόμενης τεχνολογίας της τρισδιάστατης εκτύπωσης και τον χειρισμό των υλικών.

3.1 Πλεονεκτήματα εφαρμογής τρισδιάστατης εκτύπωσης στον κατασκευαστικό τομέα

Σε σύγκριση με τις συμβατικές διαδικασίες κατασκευής, η εφαρμογή τεχνικών εκτύπωσης 3D στις κατασκευές και ειδικότερα σε εκείνες που αφορούν το σκυρόδεμα μπορεί να προσφέρει εξαιρετικά πλεονεκτήματα όπως (Sanjayan, et al., 2019):

1. Μείωση του κόστους κατασκευής με εξάλειψη του ξυλότυπου.
2. Μείωση των ποσοστών τραυματισμών με εξάλειψη επικίνδυνων θέσεων εργασίας (π.χ. εργασία σε ύψη), κάτι που θα είχε ως αποτέλεσμα αυξημένο επίπεδο ασφάλειας στις κατασκευές.

3. Δημιουργία θέσεων εργασίας υψηλής τεχνολογίας.
4. Μείωση του χρόνου κατασκευής επιτόπου με λειτουργία σε σταθερό ρυθμό
5. Ελαχιστοποίηση της πιθανότητας σφαλμάτων με ακριβή εναπόθεση υλικού.
6. Αύξηση της αειφορίας στον τομέα των κατασκευών με μείωση των αποβλήτων (ξυλότυπος)
7. Αύξηση της αρχιτεκτονικής ελευθερίας, η οποία θα επέτρεπε πιο εξελιγμένα σχέδια για δομικούς και αισθητικούς σκοπούς.
8. Ενεργοποίηση του δυναμικού πολυλειτουργικότητας για δομικά / αρχιτεκτονικά στοιχεία, εκμεταλλευόμενοι την περίπλοκη γεωμετρία (Buswell, et al., 2007).

3.2 Διαδικασίες τρισδιάστατης εκτύπωσης στον κατασκευαστικό κλάδο και εφαρμογές

Οι μέθοδοι προσθετικής κατασκευής (AM) συνδέονται στενά στις εφαρμογές των κατασκευών με τα κλασικά δομικά υλικά. Όσον αφορά την εφαρμογή της εκτύπωσης σε τμήματα μίας κατασκευής (π.χ. τμημάτων κτιρίων) η μελέτη μας επικεντρώθηκε στα αδρανή υλικά, τα μέταλλα και τα πολυμερή.

3.2.1 Αδρανή υλικά

Αδρανή υλικά όπως το σκυρόδεμα είναι τα πιο συνηθισμένα στον τομέα της προσθετικής κατασκευής (AM). Κυρίως, εφαρμόζονται τεχνικές εξώθησης υλικού και κλίνης σωματιδίων για την εκτύπωση του σκυροδέματος, αλλά έχουν μελετηθεί και άλλες προσεγγίσεις όπως η «έξυπνη» δυναμική χύτευση (Smart Dynamic Casting). Εφόσον το σκυρόδεμα έχει σχετικά χαμηλή αντοχή σε εφελκυσμό και είναι αρκετά εύθραυστο, έχουν αναπτυχθεί λύσεις για την ενσωμάτωση οπλισμού για την παραγωγή πιο σταθερών και όλκιμων κατασκευών (Incorporating reinforcement in 3D-printing with concrete, 2018).

Εξώθηση υλικού

Στην εξώθηση σκυροδέματος, δημιουργείται μια δομή κατά στρώσεις με ένα ακροφύσιο που εναποθέτει φρέσκο τσιμεντοειδές υλικό κατά μήκος μιας καθορισμένης διαδρομής, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-1. Προκειμένου να διασφαλιστεί η καλή ποιότητα των εκτυπωμένων στοιχείων, το υλικό πρέπει να έχει ορισμένα χαρακτηριστικά. Πρώτον, πρέπει να είναι δυνατή η άντληση του φρέσκου μίγματος στο ακροφύσιο. Για παράδειγμα, δεν

πρέπει να πραγματοποιηθεί διαχωρισμός σωματιδίων στον εύκαμπτο σωλήνα για να αποφευχθούν μπλοκαρίσματα (ανάπτυξη ικανοποιητικής αντλησιμότητας) (Buswell, et al., 2018). Επιπλέον, το σκυρόδεμα πρέπει να ρέει μέσω του ακροφυσίου και το εναποτιθέμενο νήμα πρέπει να διατηρεί σε μεγάλο βαθμό το σχήμα του (διαρκής εξώθηση (Buswell, et al., 2018). Επίσης, το νέο στρώμα πρέπει να συνδεθεί με το υποκείμενο υπάρχον στρώμα (προσκόλληση μεταξύ στρώσεων) (Nerella, et al., 2019). Τέλος, δεν πρέπει να εμφανιστεί σημαντική παραμόρφωση κάτω από το βάρος των υπερκείμενων στρωμάτων (οικοδομησιμότητα) (Panda, et al., 2019). Για το σκοπό αυτό, οι παράμετροι που σχετίζονται με το υλικό και τη διαδικασία, όπως οι αναλογίες μίξης και η προσθήκη προσμείξεων καθώς και η διαδρομή και η ταχύτητα της κεφαλής εκτύπωσης, πρέπει να επιλέγονται κατάλληλα ώστε να συνδυάζονται μεταξύ τους αποδίδοντας τα ποιοτικά χαρακτηριστικά που αναφέρθηκαν. Στην σκληρυμένη κατάσταση, το καλά εκτυπωμένο σκυρόδεμα μπορεί να έχει παρόμοια αντοχή και πυκνότητα με το χυτοσίδηρο (Buswell, et al., 2018) Οι μετρήσεις έδειξαν ότι μπορεί να επιτευχθεί ακόμη μεγαλύτερη πυκνότητα στο σκυρόδεμα μέσω της εκτύπωσης (Le, et al., 2012). Ωστόσο, ανάλογα με την κατεύθυνση του φορτίου, η αντοχή σε θλίψη του εξωθημένου σκυροδέματος μειώθηκε έως και 15% στην περίπτωση των ευθύγραμμων νημάτων και έως και 30% στην περίπτωση των καμπυλωμένων νημάτων.



Σχήμα 3-1: Τρισδιάστατος εκτυπωτής σκυροδέματος στο Τεχνολογικό Πανεπιστήμιο του Αϊντχόβεν (Eindhoven-University-of-Technology)

Αρκετές διαφορετικές διαδικασίες εξώθησης σκυροδέματος αναπτύχθηκαν τα τελευταία χρόνια. Αυτές μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις τύπους, ανάλογα με το μέγεθος του νήματος (Incorporating reinforcement in 3D-printing with concrete, 2018):

- Απόθεση λεπτών ινών με διάμετρο μικρότερη από 1cm. Ένα παράδειγμα αυτού του τύπου είναι το 3D Concrete Printing (3DCP) στο Πανεπιστήμιο Loughborough, για το οποίο χρησιμοποιείται ρομπότ 3 διευθύνσεων (Lim, et al., 2012).
- Απόθεση μεσαίων λεπτών ινών με διαστάσεις διατομής έως αρκετά cm. Το Contour Crafting στο Πανεπιστήμιο της Νότιας Καλιφόρνιας και το 3DCP στο Πανεπιστήμιο Τεχνολογίας του Eindhoven ανήκουν σε αυτήν την ομάδα (Khoshnevis, et al., 2006) (Salet, et al., 2017). Και στις δύο περιπτώσεις, η κεφαλή εκτύπωσης είναι τμήμα ρομπότ 3 διευθύνσεων. Επιπλέον, στο Contour Crafting, σπάτουλες συνδέονται στο ακροφύσιο με σκοπό την επίτευξη ομαλότερων και ακριβέστερων επιφανειών.
- Απόθεση χονδροειδών νημάτων στο εύρος αρκετών dm. Το CONPrint3D στο Πολυτεχνείο της Δρέσδης εμπίπτει σε αυτήν την κατηγορία. Σε αυτό γίνεται προσπάθεια για την εκτεταμένη χρήση καθιερωμένων προτύπων για το σκυρόδεμα και τον υπάρχοντα κατασκευαστικό εξοπλισμό. Για τον σκοπό αυτό, διερευνάται η τροποποίηση μιας αντλίας σκυροδέματος για την εκτύπωση (Schach, et al., 2017).

Ένα πλεονέκτημα των λεπτότερων νημάτων είναι η υψηλότερη ανάλυση εκτύπωσης, επιτρέποντας μεγαλύτερη ακρίβεια και γεωμετρική πολυπλοκότητα. Από την άλλη πλευρά, ένα νήμα με μεγαλύτερη διατομή οδηγεί σε υψηλότερη παραγωγικότητα και επιτρέπει τη χρήση χονδροειδούς σκυροδέματος, με αποτέλεσμα τη μειωμένη ανάγκη για τσιμέντο και σε μικρότερη συρρίκνωση (Incorporating reinforcement in 3D-printing with concrete, 2018). Τα συστήματα προσθετικών κατασκευών (AM) τα οποία είναι κατάλληλα για διαδικασίες εξώθησης σκυροδέματος κατηγοριοποιούνται σύμφωνα με το μέγεθος του τυπωμένου αντικειμένου, το πάχος του στρώματος, το περιβάλλον εκτύπωσης, τη στρατηγική συναρμολόγησης, τη χρήση δομών στήριξης και τη ρομποτική πολυπλοκότητα (Duballet, et al., 2017). Έχει εξαχθεί το συμπέρασμα ότι οι συσκευές εκτύπωσης 3 αξόνων είναι οι πιο συνηθισμένες και ότι παράγουν κυρίως στρώματα με πάχος λίγων εκατοστών. Επιπλέον, περιορισμένες είναι οι πληροφορίες σχετικά με τη συναρμολόγηση και τη στήριξη των δομών.

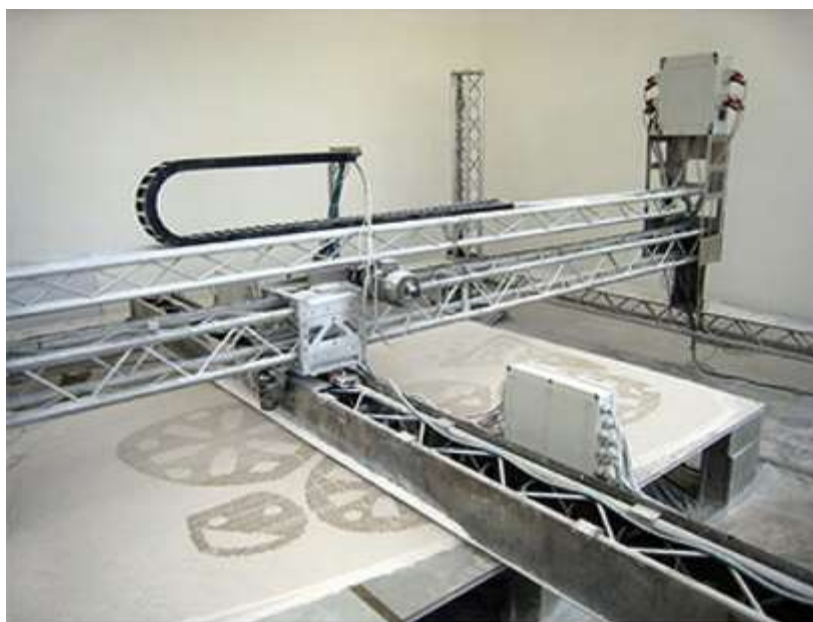
Ενδεικτικά αναφέρονται ορισμένα έργα που υλοποιήθηκαν με αυτά τα συστήματα προσθετικών κατασκευών (AM):

- Το Πανεπιστήμιο Loughborough δημιούργησε δοκό καμπύλου σχήματος με διαστάσεις $2 \times 0,9 \times 0,8 \text{ m}^3$ με το 3DCP. Η εκτύπωση χρειάστηκε περίπου 42 ώρες. Η υψηλή ανάλυση εκτύπωσης χρησιμοποιήθηκε για να δημιουργηθεί μια δομημένη επιφάνεια, και να περιλαμβάνει χωριστά κενά για μείωση του βάρους και μετά την τοποθέτηση του οπλισμού (Lim, et al., 2012).
- Στοιχείο σύνθετου τοιχώματος διαστάσεων $1,36 \times 1,50 \times 0,17 \text{ m}^3$ εκτυπώθηκε από την εταιρεία XtreesE χρησιμοποιώντας βραχίονα ρομπότ 6 αξόνων (XtreesE). Το στοιχείο είναι κατασκευασμένο από σκυρόδεμα εξαιρετικά υψηλής απόδοσης και γεωμετρικά βελτιστοποιήθηκε ως προς την ανάπτυξη θερμομόνωσης. Ο χρόνος παραγωγής ήταν περίπου 12 ώρες (Gosselin, et al., 2016).
- Η εταιρεία WinSun εκτύπωσε τα στοιχεία ενός μονόροφου κτιρίου γραφείων με έκταση περίπου 250 m^2 για το Dubai Future Foundation (). Η διαδικασία εκτύπωσης, που είναι παρόμοια με την μέθοδο Contour Crafting, χρειάστηκε 17 ημέρες. Μετά από αυτό, τα τμήματα μεταφέρθηκαν στο Ντουμπάι και συναρμολογήθηκαν εκεί σε 2 ημέρες (Delgado Camacho, et al., 2018).
- Στην Ολλανδία, κατασκευάστηκε μια γέφυρα ποδηλάτων με έκταση 6,5 μέτρα και πλάτος 3,5 μέτρα με την εφαρμογή του 3DCP στο Τεχνολογικό Πανεπιστήμιο του Αϊντχόβεν. Η γέφυρα αποτελείται από εκτυπωμένα στοιχεία, τα οποία διασυνδέονται με τένοντες που εγκαταστάθηκαν στη συνέχεια. Επιπλέον, καλώδια ενίσχυσης ενσωματώθηκαν σε ορισμένα στρώματα κατά την εναπόθεσή τους. Όλα τα στοιχεία εκτυπώθηκαν εντός 48 ωρών. Επιπλέον έργα πραγματοποιήθηκαν από τις εταιρείες Apis Cor, BetAbram, CyBe, WASP και Total Kustom () () () () ()

Διαδικασίες κλίσης σωματιδίων

Αδρανή, συνδετικά και ενεργοποιητές όπως η άμμος, το τσιμέντο και το νερό, αντίστοιχα, αναμιγνύονται πριν από την εναπόθεση σε διαδικασίες εξώθησης σκυροδέματος. Αντίθετα, σε διεργασίες κλίσης σωματιδίων, οι πρώτες ύλες συγκεντρώνονται μαζί στην πλατφόρμα κατασκευής. Εδώ δημιουργείται πρώτα ένα στρώμα ξηρών σωματιδίων. Στη συνέχεια, κατάλληλο υγρό διάλυμα εναποτίθεται επιλεκτικά έτσι ώστε τα σωματίδια να συνδέονται μεταξύ τους σε ορισμένες περιοχές, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-2. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου ολοκληρωθούν όλα τα στρώματα, το ένα πάνω στο άλλο. Μετά

από αυτό, το εκτυπωμένο αντικείμενο δημιουργείται αφαιρώντας όλα τα χαλαρά σωματίδια, τα οποία μπορεί να επαναχρησιμοποιηθούν.



Σχήμα 3-2: Διατομή που παράγεται με εκτυπωτή D-Shape (EdilTecnico, 2016)

Οι διεργασίες μετά την κατασκευή όπως η διήθηση και η θερμική επεξεργασία μπορούν να αυξήσουν την αντοχή και την ανθεκτικότητα της εκτυπωμένης δομής. Ο χώρος της κατασκευής είναι γενικά πιο περιορισμένος από ό, τι στην περίπτωση διαδικασιών εξώθησης σκυροδέματος επειδή αυτός πρέπει να γεμίσει πλήρως με σωματίδια. Ωστόσο, οι διεργασίες κλίνης σωματιδίων επιτρέπουν μεγαλύτερη ελευθερία σχεδιασμού, λόγω της μηχανικής υποστήριξης από τα μη συνδεδεμένα σωματίδια. Για παράδειγμα, οι προεξοχές μπορούν να εκτυπωθούν χωρίς πρόσθετες δομές υποστήριξης. Επιπλέον, μπορούν να δημιουργηθούν πάχη στρώσης έως 0,1 mm. Έτσι, μικρές λεπτομέρειες μπορούν να εκτυπωθούν με υψηλή ακρίβεια. Υπάρχουν τρεις τύποι διεργασιών κλίνης σωματιδίων (Lowke, et al., 2018):

- Επιλεκτικής ενεργοποίησης συνδετικών. Το στρώμα σωματιδίων εδώ αποτελείται από ένα λεπτό αδρανές και ένα συνδετικό, για παράδειγμα άμμο σε συνδυασμό με τσιμέντο. Ένας υγρός ενεργοποιητής, όπως νερό με προσμίξεις, προστίθεται επιλεκτικά σε αυτό.

- Επιλεκτικής εισχώρησης πάστας. Το στρώμα σωματιδίων εδώ περιέχει μόνο το αδρανές και το επιλεκτικά εναποτιθέμενο υγρό που είναι μια συνδεδετική πάστα που αποτελείται από τσιμέντο, νερό και προσμείξεις.
- Εκτόξευσης συνδεδετικών. Η κλίνη σωματιδίων εδώ είναι ένα μείγμα αδρανών και ενεργοποιητών. Ένα υγρό συνδεδετικό μπορεί να εφαρμόζεται επιλεκτικά σε αυτό το μείγμα. Για παράδειγμα, αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται για την παραγωγή καλουπιών άμμου με τοπική προσθήκη ρητίνης σε στρώματα σωματιδίων που αποτελούνται από άμμο και σκληρυντικό.

Οι διεργασίες κλίνης σωματιδίων και οι ιδιότητες των προκύπτων σκληρυμένων υλικών, καθώς και η εξάρτησή τους από τις παραμέτρους που σχετίζονται με το υλικό και τη διεργασία, έχουν διερευνηθεί σε διάφορες εργασίες (Xia, et al., 2018). Για παράδειγμα, διερευνήθηκε η επίδραση της αναλογίας νερού-τσιμέντου στην αντοχή του προϊόντος στην περίπτωση της επιλεκτικής ενεργοποίησης συνδεδετικών (Lowke, et al., 2015). Εκεί η αντοχή σε θλίψη έφτασε τα 16,4MPa μετά από 7 ημέρες. Σε αντίθεση με τις συμβατικές μεθόδους παραγωγής, η αντοχή αυξήθηκε με την επίδραση στην αναλογία νερού-τσιμέντου. Αυτό το φαινόμενο έχει μελετηθεί και θεωρείται ότι προκαλείται από βελτιωμένη συγκόλληση στα στρώματα του υλικού (Shakor, et al., 2017). Επίσης αποδείχθηκε ότι το βάθος διείσδυσης του τσιμέντου έχει μεγάλη επίδραση στην αντοχή στην περίπτωση της επιλεκτικής εισχώρησης πάστας (3D printing of concrete structures using the selective binding method – effect of concrete technology on contour precision and compressive strength, 2016). Το βάθος διείσδυσης με τη σειρά του εξαρτάται από την τάση διαρροής της τσιμεντόπαστας και το μέγεθος κόκκων του αδρανούς υλικού. Σε πρόσφατες μελέτες, επιτεύχθηκαν θλιπτικές αντοχές άνω των 70MPa μετά από 7 ημέρες (Lowke, et al., 2018).

Ένα ήδη καθιερωμένο σύστημα σωματιδιακής κλίνης για εφαρμογές μεγάλης κλίμακας είναι το DShape, που αναπτύχθηκε από τον Enrico Dini (). Ο εκτυπωτής D-Shape έχει κεφαλή εκτύπωσης πλάτους 6 μέτρων με 300 ακροφύσια, ελεγχόμενη από ρομπότ χαλύβδινου σκελετού (Εικόνα 9) (Cesaretti, et al., 2014). Ένας εκτυπωτής D-Shape μπορεί να χρησιμοποιήσει σωματίδια μεγέθους 0,2 mm έως 4 mm και να αποθέσει νερό, υδατικά διαλύματα ή τσιμεντοειδείς πάστες πάνω στην κλίνη (Lowke, et al., 2018). Επιπλέον, εμπορικοί εκτυπωτές ψεκασμού για καλούπια άμμου με μεγάλες διαστάσεις παράγονται στο εμπόριο. Για παράδειγμα, οι μεγαλύτεροι εκτυπωτές που κατασκευάστηκαν από την εταιρεία Voxeljet έχουν όγκο κατασκευής $4,0 \times 2,0 \times 1,0 \text{ m}^3$ και εκείνοι από την ExOne έχουν όγκο κατασκευής $2,2 \times 1,2 \times 0,6 \text{ m}^3$ (). Πολλές διαφορετικές κατασκευές από

σκυρόδεμα έχουν κατασκευαστεί τα τελευταία χρόνια με την εφαρμογή διαδικασιών κλίνης σωματιδίων:

- Με εκτυπωτές DShape, έχουν παραχθεί περισσότερα από 1000 αντικείμενα από το 2008. Το πρώτο αντικείμενο ήταν το υπόστεγο Radiolaria, το οποίο έχει διαστάσεις $3 \times 3 \times 3 \text{ m}^3$. Εκτυπώθηκε συνολικά σε μία εβδομάδα εφαρμόζοντας μια διαδικασία επιλεκτικής ενεργοποίησης συνδετικών υλικών. Κάθε στρώμα σωματιδίων είχε πάχος 5 mm και περιείχε άμμο και οξείδιο μαγνησίου. Ο υγρός ενεργοποιητής ήταν εξαένυδρο χλωριούχο μαγνήσιο διαλυμένο σε νερό. Ένα άλλο σημαντικό παράδειγμα είναι μία πεζογάφυρα στη Μαδρίτη, η οποία κατασκευάστηκε το 2016. Σε αυτήν την περίπτωση, χρησιμοποιήθηκε ένα μείγμα άμμου και νερό (Lowke, et al., 2018).
- Στο πλαίσιο κατασκευαστικού έργου το 2015 κατασκευάστηκε υπόστεγο ύψους 2.7 m με εμβασμό $3,7 \times 3,7 \text{ m}^2$ (). Συναρμολογήθηκε από 840 προσαρμοσμένα στοιχεία που εκτυπώθηκαν χρησιμοποιώντας τιμεντοκονίες (Lowke, et al., 2018).
- Καλούπια άμμου που κατασκευάζονται με διεργασίες εκτόξευσης συνδετικών έχουν χρησιμοποιηθεί σε διάφορα ερευνητικά έργα για τη δημιουργία σύνθετων κατασκευών από σκυρόδεμα: Οι εταιρίες Züblin, Voxeljet και MEVA Formwork Systems εκτύπωσαν καλούπι παραβολικού σχήματος κολώνας σκυροδέματος για το νέο Κεντρικού Σταθμού της Στουτγάρδης (Large scale 3D printing of complex geometric shapes in construction, 2016). Επίσης σε κατασκευαστικό έργο στη Ζυρίχη (Smart Slab), κατασκευάστηκε μια οροφή από προεντεταμένα στοιχεία σκυροδέματος (). Το εκτυπωμένο καλούπι βελτιστοποιήθηκε για να μειωθεί η χρήση υλικού και να απλοποιηθεί η διαδικασία παραγωγής για τα στοιχεία σκυροδέματος (Lowke, et al., 2018). Επιπλέον κατασκευάστηκαν βελτιστοποιημένα στοιχεία πλακών με ενίσχυση οπλισμένου σκυροδέματος κατασκευασμένα από τυπωμένα καλούπια άμμου. Σε αντίθεση με τα προηγούμενα παραδείγματα, τα καλούπια άμμου αποτελούν μέρος της τελικής κατασκευής και δεν αφαιρέθηκαν μετά τη χύτευση του σκυροδέματος (The Smart Takes from the Strong, 2017).

Ενσωμάτωση οπλισμού

Η ενσωμάτωση οπλισμού για την ενίσχυση των τρισδιάστατων τυπωμένων τμημάτων σκυροδέματος προκειμένου να βελτιωθεί η δομική τους απόδοση αποτελεί σημαντική παράμετρο στις κατασκευές (Incorporating reinforcement in 3D-printing with concrete,

2018). Οι μέθοδοι ενίσχυσης μπορούν να ταξινομηθούν ανάλογα με το αν ο οπλισμός είναι εξωτερικός ή εσωτερικός καθώς και αν έχει εγκατασταθεί μετά, κατά τη διάρκεια ή πριν από την εναπόθεση του σκυροδέματος:

- Εξωτερική ενίσχυση. Με την εξωτερική ενίσχυση, η διαδικασία εκτύπωσης δεν χρειάζεται να διακοπεί και η τελική δομική μορφή μπορεί να προκύψει με συναρμολόγηση από ξεχωριστά εκτυπωμένα τμήματα (Asprone, et al., 2018). Χαρακτηριστικά παραδείγματα τέτοιων κατασκευών που χρησιμοποιήθηκε προεντεταμένη εξωτερική ενίσχυση είναι δοκοί παθητικής εξωτερικής ενίσχυσης μήκους 3m έως (Asprone, et al., 2018), καμπύλη δοκός του Πανεπιστημίου Loughborough και η τρισδιάστατη τυπωμένη γέφυρα ποδηλάτων στην Ολλανδία (Lim, et al., 2012).
- Εσωτερική ενίσχυση σε εκτυπωμένο τρισδιάστατο καλούπι. Η μέθοδος της συμβατικής εσωτερικής ενίσχυσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί εάν το σκυρόδεμα χύνεται σε ένα εκτυπωμένο τρισδιάστατο καλούπι που μπορεί να είναι προσωρινό, ή μόνιμο (Large scale 3D printing of complex geometric shapes in construction, 2016) (Asprone, et al., 2018). Το καλούπι από το εκτυπωμένο σκυρόδεμα δεν χρειάζεται να ληφθεί υπόψη για φέροντες σκοπούς. Ωστόσο, το αποτέλεσμα της ανθεκτικότητας μπορεί να μειωθεί στις διεπιφάνειες μεταξύ των στρωμάτων (Incorporating reinforcement in 3D-printing with concrete, 2018).
- Εσωτερική ενίσχυση που καλύπτεται από τυπωμένο σκυρόδεμα. Μια άλλη ιδέα που είναι κατάλληλη για συμβατική εσωτερική ενίσχυση είναι αυτή της εγκατάστασης του οπλισμού πριν την τοποθέτηση του εκτυπωμένου σκυροδέματος. Τέτοιες τεχνικές έχουν αναπτυχθεί και προβλέπουν τη χρήση κατάλληλα διαμορφωμένου ακροφυσίου. Περιορισμοί κατά την εφαρμογή παρατηρήθηκαν σχετικά με το πάχος και το μήκος των προεγκατεστημένων οπλισμών (Incorporating reinforcement in 3D-printing with concrete, 2018).
- Εσωτερική ενίσχυση εγκατεστημένη κατά την διάρκεια της εκτύπωσης. Ενίσχυση παράλληλη προς την κατεύθυνση των στρώσεων μπορεί να εγκατασταθεί κατά τη διαδικασία της εκτύπωσης. Τέτοιες τεχνικές έχουν δοκιμαστεί με ενσωμάτωση καλωδίων οπλισμού στο νήμα στρώσης σκυροδέματος για τη κατασκευή δοκών. Τα αποτελέσματα δοκιμών σε αντοχή των εκτυπωμένων στοιχείων έδειξαν ότι στην περίπτωση ενίσχυσης καλωδίων υψηλής αντοχής σε εφελκυσμό αναπτύσσεται ολίσθηση του καλωδίου και αστοχία. Η τεχνική χρήζει περαιτέρω μελέτης για την ανάπτυξη ικανοποιητικών αντοχών στα τελικά προϊόντα (Asprone, et al., 2018).

3.2.2 Μέταλλα

Για την εκτύπωση μεταλλικών εξαρτημάτων, μπορούν να εφαρμοστούν διαδικασίες σύντηξης κλίνης σε σκόνη και κατευθυνόμενης απόθεσης ενέργειας. Εκεί, μια πηγή θερμότητας όπως ένα λέιζερ ή μια δέσμη ηλεκτρονίων συντήκουν μεταλλική πρώτη ύλη με τη μορφή σκόνης ή σύρματος. Τα μέταλλα που χρησιμοποιούνται συνήθως στην προσθετική είναι χάλυβες, τιτάνιο και τα κράματά του, καθώς και κράματα αλουμινίου. Χάλυβες όπως ωστενιτικός ανοξείδωτος 316L ή χάλυβες εργαλείων μπορούν να εφαρμοστούν για γενικούς σκοπούς ή για τμήματα με υψηλότερες απαιτήσεις αντοχής και σκληρότητας. Τιτάνιο και κράματα τιτανίου όπως το Ti6Al4V χρησιμοποιούνται ιδιαίτερα για εξαρτήματα υψηλής απόδοσης. Δεδομένου ότι αυτά είναι ακριβά, η προσθετική κατασκευή μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική εξοικονόμηση κόστους σε σχέση με την συμβατική κατασκευή. Αντίθετα, το αλουμίνιο είναι σχετικά εύκολο στην συμβατική κατασκευή, και αυτός είναι ένας από τους λόγους για τους οποίους δεν διερευνάται τόσο διεξοδικά η χρήση του όσο για το τιτάνιο. Τα εκτυπώσιμα 3D κράματα αλουμινίου είναι, για παράδειγμα, τα AlSi10Mg και AlSi12 (Herzog, et al., 2016).

Με τις σημερινές τεχνικές προσθετικής κατασκευής μετάλλων, είναι δυνατόν να ληφθούν μηχανικές ιδιότητες παρόμοιες με αυτές που προκύπτουν από συμβατικές μεθόδους παραγωγής. Περαιτέρω, οι στατικές ιδιότητες εφελκυσμού ενός εκτυπωμένου εξαρτήματος εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τη μικροδομή του, η οποία είναι το αποτέλεσμα ενός πολύπλοκου θερμικού κύκλου με επαναλαμβανόμενες διαδικασίες θέρμανσης και ψύξης, λόγω της προσθήκης υπερκείμενων στρωμάτων (Herzog, et al., 2016). Λόγω του υψηλότερου ρυθμού ψύξης, οι μικροδομές των κατασκευασμένων εξαρτημάτων είναι γενικά μικρού μεγέθους κόκκων σε σχέση με αυτές των συμβατικά παραγόμενων. Αυτό οδηγεί σε υψηλότερη απόδοση των τελικών προϊόντων (Ngo, et al., 2018). Επιπλέον, η μικροδομή και, συνεπώς, οι στατικές εφελκυστικές ιδιότητες είναι ανισοτροπικές. Στις περισσότερες περιπτώσεις, η κάθετη κατεύθυνση προς το επίπεδο εναπόθεσης είναι η ασθενέστερη (Frazier, 2014). Η αντοχή μπορεί να μειωθεί λόγω ελαττωμάτων του υλικού όπως το υπολειπόμενο πορώδες ή/και λόγω χονδροειδούς επιφάνειας που προκύπτει από την διαδικασία παραγωγής σε στρώσεις. Τέτοια προβλήματα μπορεί να αντιμετωπιστούν με εξωτερικές παρεμβάσεις μετά την κατασκευή (Ngo, et al., 2018) Το υπολειμματικό πορώδες μπορεί να μειωθεί με θερμική επεξεργασία και θερμή ισοστατική πίεση, ενώ η τραχύτητα της επιφάνειας μπορεί να μειωθεί με στίλβωση ή χημική κατεργασία (Herzog, et al., 2016).

Συγκρίνοντας προσθετικής κατασκευής και συμβατικά κατασκευασμένα εξαρτήματα από μέταλλο, προέκυψε το συμπέρασμα ότι είναι γενικά εφικτό να παραχθούν και με τεχνικές προσθετικών κατασκευών (AM) με περιβαλλοντικές επιπτώσεις που μπορούν να μειωθούν ουσιαστικά με αυτόν τον τρόπο. Από την άλλη πλευρά, το κόστος παραγωγής και ο χρόνος θα είναι σημαντικά υψηλότεροι με την εφαρμογή διαδικασιών προσθετικών κατασκευών αντί συμβατικών. Πιθανές βελτιώσεις μπορεί να γίνουν με μαζικές μειώσεις στο κόστος μέσω βελτιστοποίησης, η χρήση καλωδίου τροφοδοσίας με μεγαλύτερες διαστάσεις και οι μελλοντικές βελτιώσεις των τεχνικών προσθετικών κατασκευών για μεταλλικές κατασκευές (Mrazović, et al., 2018). Με βάση αυτήν τη μελέτη, αναπτύχθηκε μια γρήγορη και συνεπής μέθοδος αξιολόγησης για τη σύγκριση των επιπτώσεων της πρόσθετης και συμβατικής κατασκευής για μεμονωμένα δομικά στοιχεία (Mrazović, et al., 2018). Στη συνέχεια, περιγράφονται οι μέθοδοι προσθετικών κατασκευών μετάλλων AM και η εφαρμογή τους στην παραγωγή εξαρτημάτων κτιρίων.

Σύντηξη σε σκόνη

Στις διαδικασίες σύντηξης κλίνης σε σκόνη όπως η τήξη δέσμης λέιζερ (LBM), η τήξη δέσμης ηλεκτρονίων (EBM) και η άμεση σύντηξη μετάλλων με λέιζερ (DMLS), η μεταλλική σκόνη απλώνεται πρώτα σε όλη την περιοχή εργασίας σε κλειστό θάλαμο παρέχοντας ένα ελεγχόμενο περιβάλλον. Μετά από αυτό, λέιζερ ή δέσμη ηλεκτρονίων συντήκουν επιλεκτικά τη σκόνη για να δημιουργήσουν ένα στρώμα της τελικής δομής. Στη συνέχεια, η πλατφόρμα κατασκευής χαμηλώνει ανάλογα με το πάχος του στρώματος και η διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου ολοκληρωθεί το προς εκτύπωση στοιχείο (Herzog, et al., 2016). Τα συστήματα σύντηξης κλίνης σε σκόνη συνήθως επιτρέπουν υψηλή γεωμετρική ακρίβεια και καλές μηχανικές ιδιότητες, αλλά έχουν σχετικά χαμηλό ρυθμό εναπόθεσης και χρησιμοποιούνται κυρίως για την παραγωγή εξαρτημάτων με μικρές διαστάσεις όπως τα ακόλουθα παραδείγματα (Ngo, et al., 2018):

- Δομικός κόμβος μιας υπάρχουσας κατασκευής εφελκυσμού επανασχεδιάστηκε με χρήση μεθόδων προσθετικών κατασκευών από την εταιρεία Agur. Ο τροποποιημένος κόμβος παρήχθη από ανοξείδωτο χάλυβα με χρήση DMLS. Το κόστος του ήταν υψηλότερο από τον αρχικό κόμβο, αλλά είναι 75% ελαφρύτερο, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε μια λιγότερο συνολικά δαπανηρή δομή. Χρησιμοποιήθηκαν αρκετές διαφορετικές εφαρμογές λογισμικού για την δημιουργία του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων, για την πραγματοποίηση της βελτιστοποίησης και για την τροποποίηση του προκύπτοντος σχήματος

προκειμένου να επιτευχθεί ομαλότερη γεωμετρία και να ληφθούν υπόψη οι απαιτήσεις παραγωγής. Τα προγράμματα λογισμικού ήταν κατάλληλα για συγκεκριμένες εργασίες, αλλά υπήρχε περιθώριο βελτίωσης όσον αφορά την αλληλεπίδραση μεταξύ τους. Οι τροποποιήσεις της γεωμετρίας μετά τη βελτιστοποίηση τοπολογίας δεν αυτοματοποιήθηκαν και για αυτόν τον λόγο ήταν μάλλον χρονοβόρες. Επιπλέον, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις σε τρισδιάστατα εκτυπωμένα δείγματα δοκιμής. Η αντοχή σε εφελκυσμό και η ολκιμότητα είναι επαρκείς και συγκρίσιμες με αυτές που προκύπτουν από συμβατικές μεθόδους κατασκευής (Optimizing structural building elements in metal by using additive manufacturing, 2015).

- Ο Buchanan και άλλοι μελέτησαν την δομική συμπεριφορά δοκών από ανοξείδωτο χάλυβα 316L που παράγονται με χρήση DMLS (Buchanan, et al., 2017). Οι δοκοί έχουν ύψος 200 mm και έχουν τετραγωνικές κοίλες διατομές ενώ έχουν διαφορετικά πάχη τοιχώματος που κυμαίνονται από 1 έως 5 mm. Το φορτίο θραύσης λόγω συμπίεσης των δοκών μετρήθηκε και τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η δομική συμπεριφορά των προσθετικά κατασκευασμένων δοκών από ανοξείδωτο χάλυβα είναι παρόμοια με εκείνη των συμβατικά παραγόμενων δοκών (Buchanan, et al., 2017).

Κατευθυνόμενη εναπόθεση ενέργειας

Στην κατευθυνόμενη εναπόθεση ενέργειας, δημιουργείται ένα λουτρό τήξης στην επιφάνεια της τυπωμένης δομής χρησιμοποιώντας λέιζερ, δέσμη ηλεκτρονίων ή ηλεκτρικό τόξο. Ταυτόχρονα, προστίθεται μεταλλική σκόνη ή σύρμα στη δεξαμενή τήξης προκειμένου να δημιουργηθεί ένα επιπλέον στρώμα (Herzog, et al., 2016). Ένα λέιζερ και μια μεταλλική σκόνη χρησιμοποιούνται στην εναπόθεση μετάλλων λέιζερ (LMD), ενώ μια δέσμη ηλεκτρονίων και ένα μεταλλικό σύρμα χρησιμοποιούνται στην κατασκευή προσθετικών τόξων (WAAM). Οι διεργασίες εναπόθεσης κατευθυνόμενης ενέργειας είναι γενικά γρηγορότερες από τις διαδικασίες σύντηξης κλίνης σε σκόνη και είναι κατάλληλες για την παραγωγή μεγάλων κατασκευών. Επιπλέον, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανακατασκευή υπάρχοντων εξαρτημάτων (Frazier, 2014).

Εφαρμογές WAAM μεγάλης κλίμακας έχουν εφαρμοστεί από το MX3D. Ο εκτυπωτής που φαίνεται στο Σχήμα 3-3 αποτελείται από μια μηχανή συγκόλλησης τόξου μέταλλου - αερίου και ένα βιομηχανικό ρομπότ 6 αξόνων. Ο εκτυπωτής μπορεί να κατασκευάσει μεταλλικές ράβδους που συνδέονται μεταξύ τους με αυτό-υποστηριζόμενο τρόπο. Με αυτόν τον τρόπο, εκτυπώθηκαν μεγάλες μεταλλικές κατασκευές (Bolderen, 2017). Ένα

τρέχον έργο είναι η προσθετική κατασκευή γέφυρας από ανοξείδωτο χάλυβα πλάτους 2,5 μέτρων και μήκους 10 μέτρων, η οποία έχει εγκατασταθεί στο Άμστερνταμ (Buchanan, et al., 2019). Η γέφυρα σχεδιάστηκε από τις εταιρείες Joris Laarman Lab και Arup. Άλλοι συνεργάτες του έργου είναι, για παράδειγμα, η Autodesk, η Oerlikon, το Πολυτεχνείο του Delft και το Imperial College του Λονδίνου (MX3D).



Σχήμα 3-3: Εξάρτημα μεταλλικής γέφυρας κατασκευασμένο με τον εκτυπωτή MX3D (MX3D)

3.2.3 Πολυμερή

Για τα έργα παραγωγής δομικών στοιχείων, τα φωτοπολυμερή ήταν μέχρι τώρα απαγορευτικά ως προς το κόστος (Wu, et al., 2016). Επιπλέον, πολλά είδη πολυμερών δεν είναι κατάλληλα ώστε τα εκτυπωμένα στοιχεία να αναλάβουν υψηλά φορτία λόγω της χαμηλής ακαμψίας και αντοχής τους. Ωστόσο, πολυμερή σύνθετα υλικά με βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες, όπως με ενίσχυση ινών άνθρακα ABS (CF-ABS), έχουν αναπτυχθεί και χρησιμοποιηθεί στη προσθετική κατασκευή (Ghaffar, et al., 2018). Επίσης έχουν εφαρμοστεί τεχνικές εκτόξευσης συνδετικού υλικού, στις οποίες συνδετικό πολυμερές και άμμος επεξεργάζονται για την παραγωγή καλουπιών σε κατασκευές από σκυρόδεμα όπως έχει ήδη αναφερθεί. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται διεργασίες εξώθησης υλικού και σύντηξης κλίνης σε σκόνη για πολυμερή καθώς και η χρήση τους για κατασκευαστικούς σκοπούς.

Εξώθηση υλικού

Μια τεχνική τρισδιάστατης εκτύπωσης που ονομάζεται Big Area Additive Manufacturing (BAAM), η οποία είναι παρόμοια με την FDM, αναπτύχθηκε στο Εθνικό Εργαστήριο Oak Ridge για την παραγωγή μεγάλων πολυμερών εξαρτημάτων μεγέθους έως $6 \times 2,4 \times 1,8 \text{ m}^3$

(Duty, et al., 2017). Το σύστημα BAAM που απεικονίζεται στο Σχήμα 3-4, είναι ένας απλός εξωθητής με μορφή κοχλία που χρησιμοποιείται για τη θέρμανση μιας σφαιροποιημένης θερμοπλαστικής πρώτης ύλης και για την απόθεση του τηγμένου υλικού κατά μήκος του άξονα του αντικειμένου που πρόκειται να παραχθεί. Με αυτήν την τεχνική, το κόστος της πρώτης ύλης μπορεί να μειωθεί κατά 20 φορές και ο ρυθμός απόθεσης μπορεί να αυξηθεί κατά 200 φορές σε σύγκριση με τα συμβατικά συστήματα προσθετικών κατασκευών που επεξεργάζονται πολυμερή. Μελετήθηκε η αντοχή σε εφελκυσμό και η ακαμψία των διαφορετικών ειδών πρώτων υλών όπως το καθαρό ABS και το CF-ABS, που χρησιμοποιήθηκαν για τη παραγωγή εκτυπωμένων αντικειμένων. Το καθαρό ABS που εναποτίθεται στο σύστημα BAAM είχε σχεδόν ισοτροπικές ιδιότητες, παρόμοιες με το ABS σε χύτευση με έγχυση. Αντίθετα, το εκτυπωμένο με σύστημα BAAM CF-ABS ήταν ανισότροπο και παρουσίασε βελτιωμένη αντοχή εφελκυσμού και ακαμψία στην διεύθυνση εναπόθεσης. Με βάση αυτά τα αποτελέσματα, προέκυψε το συμπέρασμα ότι οι πρώτες ύλες που χρησιμοποιήθηκαν στο σύστημα BAAM μπορεί να είναι κατάλληλα για ορισμένες εφαρμογές περιορισμένης αντοχής σε κάμψη (Duty, et al., 2017). Το σύστημα BAAM χρησιμοποιήθηκε για την εκτύπωση τμημάτων ενός κυλινδρικού μονόροφου κτιρίου με εμβαδόν 19,5 m² και ύψος 2,8 m ως μέρος ερευνητικού έργου (Additive Manufacturing Integrated Energy, (AMIE)) (Biswas, et al., 2017). Όλα τα τμήματα που τυπώθηκαν είχαν σχήμα ημίδακτυλίου. Συνολικά, χρησιμοποιήθηκαν περισσότεροι από 6 τόνοι CF-ABS και εκτυπώθηκαν μέσα σε περίπου 225 ώρες. Μετά από αυτό, συναρμολογήθηκαν σε δακτυλίου οι οποίοι με τη σειρά τους ενώθηκαν με τέσσερις χαλύβδινες ράβδους προσανατολισμένες κατά τη διαμήκη κατεύθυνση του κτηρίου και κάθετα στο επίπεδο εκτύπωσης των τμημάτων. Με αυτό τον τρόπο αντιμετωπίστηκε το ζήτημα της χαμηλής αντοχής σε εφελκυσμό και της ακαμψίας του CF-ABS κατά την κατασκευή (Biswas, et al., 2017).

Αλλα παραδείγματα τρισδιάστατων εκτυπωτών εξώθησης πολυμερών μεγάλης κλίμακας είναι (Delgado Camacho, et al., 2018):

- KamerMaker από την DUS Architects (3dprintcanalhouse)
- Προσαρμοσμένοι τρισδιάστατοι εκτυπωτές από την BLB Industries (blbindustries)
- Delta WASP 3MT από την WASP (3dwasp)
- Μηχανή παρασκευής πρόσθετων υλικών μεγάλης κλίμακας από την Thermwood (thermwood)
- AiMaker από την Ai Build (ai-build)
- Εκτυπωτής C-Fab από την Branch Technology (branch technology)

- Οι Minibuilders που αναπτύχθηκαν στο Ινστιτούτο Προηγμένης Αρχιτεκτονικής της Καταλονίας (Iaac)



Σχήμα 3-4: Δομικό στοιχείο τυπωμένο με το σύστημα BAAM (Biswas, et al., 2017).

Σύντηξη σε σκόνη

Στη διαδικασία σύντηξης κλίνης σε σκόνη, στρώματα πολυμερούς σκόνης εφαρμόζονται επαναληπτικά το ένα πάνω στο άλλο. Μεταξύ κάθε σταδίου, ένα λέιζερ θερμαίνει επιλεκτικά τα σωματίδια πολυμερούς του αντίστοιχου στρώματος έτσι ώστε να συντήκονται μαζί σε ορισμένες περιοχές χωρίς να τήκονται πλήρως. Τα οφέλη της μεθόδου αυτής είναι η υψηλή ανάλυση και η ποιότητα που μπορεί να επιτευχθεί. Ωστόσο, είναι πιο ακριβό και πιο αργό από τις διαδικασίες εξώθησης υλικού (Ngo, et al., 2018). Η διαδικασία σύντηξης με σκόνη εφαρμόστηκε με επιτυχία σε κατασκευές όπως αυτή της 3D Systems προκειμένου να παράγει γεωμετρικά περίπλοκη πολυμερή επένδυση που εφαρμόστηκε στην οροφή κτιρίου στο Λονδίνο. Το τρισδιάστατα εκτυπωμένο κάλυμμα δεν έχει δομική λειτουργία, αλλά προστέθηκε για αισθητική και είναι ανθεκτικό στη βροχή, το φως του ήλιου και τη θερμότητα (Skanska).

3.3 Ευκαιρίες και προκλήσεις

Οι συμβατικές διαδικασίες κατασκευής όπως η πλινθοδομή, η εγκατάσταση οπλισμού και η χύτευση σκυροδέματος συνεπάγονται βαριά χειρωνακτική εργασία και είναι συχνά επικίνδυνες. Αυξάνοντας τον βαθμό αυτοματοποίησης, η προσθετική κατασκευή πρόσθετων μπορεί να μειώσει τον φυσικό φόρτο εργασίας και να βελτιώσει την ασφάλεια στο χώρο εργασίας (Keating, et al., 2017). Οι τεχνικές προσθετικής κατασκευής θα

μπορούσε επίσης να χρησιμοποιηθούν για κατασκευαστικά έργα σε σκληρά περιβάλλοντα, για παράδειγμα σε μέρη που έχουν πληγεί από φυσικές καταστροφές, πολεμικές ζώνες ή εξωγήινες τοποθεσίες (Labonnote, et al., 2016). Ως εκ τούτου, η NASA και η ESA διεξήγαγαν και υποστηρίζουν έρευνα σχετικά με τη χρήση σεληνιακού υλικού για τεχνικές προσθετικών κατασκευών όπως το Contour Crafting και το D-Shape (Cesaretti, et al., 2014) (On the development of additive construction technologies for application to development of Lunar/ Martian surface structures using in-situ materials, 2015). Η εφαρμογή διαδικασιών προσθετικής κατασκευής μπορεί, επιπλέον, να μειώσει το κόστος εργασίας. Ωστόσο, ακόμη και αν απαιτείται μικρότερο εργατικό δυναμικό και χαμηλότερη χρήση υλικών, οι ακριβότερες πρώτες ύλες και εξοπλισμός μπορούν να οδηγήσουν σε υψηλότερο συνολικό κόστος (Labonnote, et al., 2016). Περαιτέρω, ο χρόνος παραγωγής μπορεί να είναι μεγαλύτερος και το μέγεθος του εξαρτήματος πιο περιορισμένο από ότι στην περίπτωση των συμβατικών μεθόδων παραγωγής. Για αυτόν τον λόγο, πολλές διαδικασίες και συστήματα προσθετικής κατασκευής πρέπει να βελτιωθούν, αλλά και μελέτες περιπτώσεων, βάσεις δεδομένων και μέθοδοι αξιολόγησης, απαιτείται να αναλυθούν για την εκτίμηση της παραγωγικότητας, του χρόνου κατασκευής και του κόστους, καθώς και των περιβαλλοντικών επιπτώσεων τρισδιάστατης εκτύπωσης τμημάτων κτιρίων (Mrzovic, et al., 2018).

Εκτός από την άποψη του αυτοματισμού, η προσθετική κατασκευή προσφέρει μεγάλη ελευθερία σχεδιασμού. Συνδυάζοντας και τροποποιώντας τις πρώτες ύλες κατά τη διάρκεια της διαδικασίας, είναι δυνατή η παραγωγή αντικειμένων που αποτελούνται από λειτουργικά αξιολογημένα υλικά (FGM). Έτσι, για παράδειγμα, η αντοχή μπορεί να αυξηθεί σε περιοχές του στοιχείου εκτύπωσης με έντονη φόρτιση (Zhang B., et al., 2018). Επιπλέον, πολύπλοκες εξωτερικές και εσωτερικές γεωμετρίες μπορούν να ληφθούν για τη βελτίωση της λειτουργικότητας ή της εμφάνισης ενός στοιχείου. Για παράδειγμα, κενά διαφόρων σχημάτων και μεγεθών μπορούν να συμπεριληφθούν για την προσθήκη αγωγών αέρα ή αγωγών καλωδίωσης. Επιπλέον, μπορούν να δημιουργηθούν ελαφριές κυψελοειδείς δομές με χαρακτηριστικά μεσαίας κλίμακας μεγέθους 0,1 έως 10 mm ή ακόμη και με μικροσκοπικά χαρακτηριστικά μικρότερα από 0,1 mm (Tang, et al., 2016). Μπορούν επίσης τα παραγόμενα στοιχεία να διαβαθμιστούν και να έχουν εξαιρετικές ιδιότητες, όπως συνδυασμός υψηλής ακαμψίας και υψηλής απόσβεσης κραδασμών (Andreasen, et al., 2014). Ωστόσο, σε κάθε βήμα όμως της διαδικασίας παραγωγής σε στρώσεις, πρέπει να διασφαλίζεται ότι το τυπωμένο μέρος είναι σταθερό και ότι δεν παραμορφώνεται σημαντικά. Ως εκ τούτου, κατά τη διαδικασία εκτύπωσης δομές στήριξης μπορεί να είναι

απαραίτητες. Εναλλακτικά, το εξάρτημα μπορεί να σχεδιαστεί με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι αυτό-υποστηριζόμενο καθ' όλη τη διαδικασία κατασκευής. Ένας άλλος περιορισμός που σχετίζεται με την γεωμετρία και προκύπτει από την σταδιακή προσέγγιση είναι η τραχύτητα της επιφάνειας. Ένα μικρότερο πάχος στρώσης ή εργασίες φινιρίσματος μπορεί να οδηγήσουν σε μεγαλύτερη ακρίβεια και ομαλότητα της επιφάνειας, αλλά ταυτόχρονα και σε μεγαλύτερο χρόνο παραγωγής (Thompson, et al., 2016).

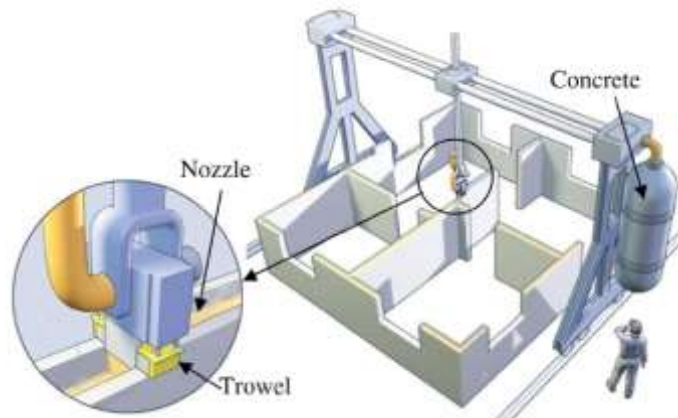
Ο υψηλός βαθμός σχεδιαστικής ελευθερίας προσφέρει εκτεταμένες δυνατότητες βελτιστοποίησης. Για τον σκοπό αυτό και για την πραγματοποίηση δομικών επαληθεύσεων, θα πρέπει να είναι δυνατή η ακριβής πρόβλεψη των ιδιοτήτων των εκτυπωμένων τμημάτων. Όπως περιγράφηκε παραπάνω, τέτοιες μετρήσεις έχουν ήδη διεξαχθεί για διάφορες διαδικασίες κατασκευής πρόσθετων (AM), αλλά μόνο σε περιορισμένο βαθμό. Περαιτέρω δοκιμές και τυποποιήσεις είναι απαραίτητες για να επιτρέψουν στους μηχανικούς να αντλήσουν αξιόπιστες ιδιότητες των προϊόντων ανάλογα με το επιλεγμένο υλικό πρώτης ύλης, την διαδικασία εκτύπωσης και τις παραμέτρους της διαδικασίας. Για τον σκοπό αυτό, είναι επίσης απαραίτητο να αναπτυχθούν και να επικυρωθούν μοντέλα προσομοίωσης για διαφορετικές διαδικασίες κατασκευής πρόσθετων (AM) (Salet, et al., 2017). Επιπλέον, απαιτείται μια ευρέως αυτοματοποιημένη ροή εργασιών ψηφιακού σχεδιασμού, η οποία θα επιτρέπει την αναπαράσταση και αποθήκευση σύνθετων γεωμετρικών και υλικών δεδομένων, για να ληφθούν υπόψη οι κατασκευαστικοί περιορισμοί, καθώς και για να εκτελεστούν αποτελεσματικά αριθμητικές προσομοιώσεις για οποιαδήποτε εκτυπώσιμη γεωμετρία.

4 Εφαρμογές 3D printing με τσιμεντοειδή υλικά

Οι δύο βασικές μέθοδοι που υιοθετήθηκαν στην τεχνολογία προσθετικής κατασκευής (AM) με τσιμεντοειδή υλικά είναι η εναπόθεση με βάση την τεχνική της εξώθησης (επιλεκτική απόθεση υλικού με εξώθηση) και οι μέθοδοι κλίνης σε σκόνη (επιλεκτική σύνδεση). Η στρώση με βάση την εξώθηση έχει την ομοιότητα με τη μοντελοποίηση τήξης (FDM), όπου μίγματα επιλεγμένων υλικών εναποτίθενται στρώση προς στρώση μέσω μιας κεφαλής εκτύπωσης με εξώθηση σύμφωνα με εντολές που δίνονται από εργαλεία σχεδίασης με τη βοήθεια υπολογιστή σε γερανό, σε ρομπότ ή σε εκτυπωτή 3D με βραχίονες έξι ή τεσσάρων αξόνων. Οι τεχνολογίες στην πλειοψηφία τους είναι μέθοδοι εκτός τοποθεσίας όπου τα εκτυπωμένα μέρη μπορούν να συναρμολογηθούν επιτόπου και είναι κατάλληλες για μεγάλες και πολύπλοκες γεωμετρικές δομικές εκτυπώσεις ακολουθώντας τη μέθοδο της στερεολιθογραφίας.

4.1 Εκτύπωση τρισδιάστατου σκυροδέματος με βάση την εξώθηση

Η τρισδιάστατη εκτύπωση σκυροδέματος (3DCP) που βασίζεται στην εξώθηση είναι μία παρόμοια τεχνική με το μοντέλο εναπόθεσης που χρησιμοποιείται σε τεχνολογίες πολυμερών και μετάλλων. Η πλέον διαδομένη τεχνολογία κατασκευής στρωμάτων που βρίσκεται σε ανάπτυξη τα τελευταία 15 χρόνια ονομάζεται Contour Crafting (Zhang, et al., 2013). Βασίζεται στην εξώθηση σκυροδέματος με βάση το τσιμέντο πάνω σε επιφάνεια όπου εφαρμόζεται διαμόρφωση (τύπου μυστρί) που επιτρέπει ένα ομαλό φινίρισμα της εξωτερικής επιφάνειας που δημιουργείται μέσω της συσσώρευσης των διαδοχικών στρωμάτων. Η κινούμενη κεφαλή εναπόθεσης είναι ικανή να τοποθετήσει υλικό για να δημιουργήσει δομικό τοίχωμα πλήρους πλάτους (Σχήμα 4-1). Η τεχνολογία Contour Crafting επιτρέπει τη διερεύνηση ποικίλων υλικών (όπως κονίαμα, σκυρόδεμα, πάστες τσιμέντου και οπλισμένο σκυρόδεμα).



Σχήμα 4-1: Τρισδιάστατη εκτύπωση σκυροδέματος (3D printing concrete)

4.1.1 Παραδείγματα τρισδιάστατης εκτύπωση σκυροδέματος με βάση την εξώθηση

Το 2014, η κινεζική εταιρεία Winsun ισχυρίστηκε ότι έχει κατασκευάσει 10 κατοικίες σε λιγότερο από μια ημέρα, με την έκταση και το κόστος της κάθε μίας να είναι περίπου 195 τ.μ. και 4000 USD αντίστοιχα. Η εταιρεία χρησιμοποίησε έναν μεγάλο τρισδιάστατο εκτυπωτή με βάση την εξώθηση για την κατασκευή των βασικών τμημάτων του κάθε σπιτιού χωριστά εκτός του χώρου πριν μεταφερθούν και συναρμολογηθούν επί τόπου (Wang, 2017). Το 2015, η ίδια εταιρεία δημιούργησε μια πολυώροφη πολυκατοικία με εμβαδόν περίπου 1100 m², που είναι μία από τις υψηλότερες τρισδιάστατες τυπωμένες κατασκευές. Επίσης κατασκεύασε μια αυτόνομη τυπωμένη εξοχική κατοικία από μπετόν με κόστος περίπου 160.000 US \$, σ αυτή την περίπτωση εκτυπώθηκαν τρισδιάστατα οι τοίχοι και άλλα στοιχεία της δομής εκτός του χώρου και στη συνέχεια συναρμολογήθηκαν επί τόπου.

Η κινεζική εταιρεία Huashang Tengda στο Πεκίνο ανέφερε πρόσφατα ότι έχει εκτυπώσει τρισδιάστατα μια ολόκληρη διώροφη βίλα 400 m² σε χώρο ξενοδοχείου εντός 45 ημερών (Σχήμα 4-2 (a)). Σε αντίθεση με την εταιρεία Winsun, η εταιρεία Huashang Tengda χρησιμοποίησε μια μοναδική διαδικασία που επιτρέπει την εκτύπωση ενός «ολόκληρου σπιτιού», «επί τόπου» σε «μία κίνηση». Κατασκευάστηκε αρχικά το πλαίσιο του σπιτιού, συμπεριλαμβανομένων των μεταλλικών ενισχύσεων από χάλυβα και των υδραυλικών σωλήνων. Στη συνέχεια, τα συνηθισμένα χονδροειδή αδρανή που περιέχουν σκυρόδεμα της κατηγορίας C30 εξωθήθηκαν στο πλαίσιο και γύρω από τους ράβδους μέσω της χρήσης ενός νέου σχεδιασμού ακροφυσίων και ενός πολύ μεγάλου διαστάσεων τρισδιάστατου εκτυπωτή (Scott, 2017). Το έργο αυτό κατάργησε φαινομενικά μια από τις μεγαλύτερες

προκλήσεις της τρισδιάστατης εκτύπωσης σκυροδέματος που είναι η ενσωμάτωση συμβατικών μεταλλικών ενισχύσεων όταν το δομικό σκυρόδεμα πρόκειται να εκτυπωθεί 3D. Ο εξαιρετικά μεγάλων διαστάσεων εκτυπωτής 3D έχει ένα είδος διχαλωτού ακροφυσίου (Σχήμα 4-2 (b)) που ταυτόχρονα τοποθετεί σκυρόδεμα και στις δύο πλευρές των ράβδων και το περικλείει με ασφάλεια μέσα στους τοίχους (Scott, 2017).



Σχήμα 4-2: Διώροφη εξοχική κατοικία που εκτυπώθηκε από την εταιρεία Huashang Tengda (a) και το τμήμα του ακροφυσίου που χρησιμοποιήθηκε επί τόπο (b)

Στο πλαίσιο ερευνητικής εργασίας στο Πανεπιστήμιο Federico II της Νάπολης της Ιταλίας χρησιμοποιήθηκε εκτυπωτής τύπου BIGDELTA WASP (World's Advanced Saving Project) ύψους 4 μέτρων για να κατασκευαστεί η πρώτη αρθρωτή δοκός από σπλισμένο σκυρόδεμα μήκους περίπου 3 μέτρων (Σχήμα 4-3). Με αυτή την τεχνική, αναπτύσσεται ένα σύστημα για την παραγωγή στοιχείων από σκυρόδεμα που μπορούν να συναρμολογηθούν με χαλύβδινες ράβδους και δοκάρια ή μπορούν να συνθέσουν υποστυλωματα από σπλισμένο σκυρόδεμα (WASP, 2017).



Σχήμα 4-3: Η πρώτη τρισδιάστατη τυπωμένη αρθρωτή δοκός από σκυρόδεμα μήκους περίπου 3 m (WASP, 2017).

Ως αποτέλεσμα της συνεργασίας μεταξύ των εταιρειών Supermachine Studio και του Siam Cement Group (SCG), κατασκευάστηκε στην Ταϊλάνδη ένα περίπτερο ύψους 3 μέτρων που ονομάζεται «Y-Box Pavilion, 21st-century Cave» χρησιμοποιώντας τον εκτυπωτή BIGDELTA WASP ύψους 4 μέτρων (Σχήμα 4-4). Τα δομικά στοιχεία του περιπτέρου εκτυπώθηκαν τρισδιάστατα στις εγκαταστάσεις του εργοστασίου και στη συνέχεια όλα τα εξαρτήματα συναρμολογήθηκαν μαζί. Το κόστος κατασκευής του περιπτέρου αναφέρθηκε περίπου στα 28.000 USD.



Σχήμα 4-4: Το «Y-Box Pavilion, 21st-century Cave» ύψους 3m.

4.2 Εκτύπωση σκυροδέματος σε κλίνη

Στα συστήματα τρισδιάστατης εκτύπωσης με κλίνη σωματιδίων, η εκτύπωση μπορεί να εκτελεστεί άμεσα χρησιμοποιώντας τσιμεντοειδή υλικά ή με πλήρωση του τυπωμένου πολυμερικού ξυλότυπου με συμβατικό φρέσκο σκυρόδεμα και με τεχνική εξώθησης (Lowke, et al., 2018). Σε αυτήν τη διαδικασία, η ελεύθερης μορφής κατασκευή κοίλου στοιχείου πραγματοποιείται τοποθετώντας ένα στρώμα άμμου ως μήτρα που καλύπτεται επιλεκτικά από τσιμέντο το οποίο αποτελεί τον δραστικό παράγοντα, ο οποίος ενεργοποιείται χρησιμοποιώντας υδρατμούς. Τα συστήματα εκτύπωσης σωματιδιακής κλίνης μπορεί να ταξινομηθούν σε τρεις τεχνικές ανάλογα με τον τρόπο εφαρμογής του συνδετικού υλικού.

Η τεχνική σχήματος D (D-shape) είναι μια μέθοδος εκτύπωσης σε σκόνη, όπου τα κοκκώδη υλικά σε μορφή σκόνης (με βάση την άμμο) εναποτίθενται και συνδέονται με στρώματα

τσιμεντοειδούς υλικού. Αυτή η διαδικασία είναι γρήγορη και δεν απαιτεί εξωτερική μηχανική υποστήριξη. Όλο το αδέσμευτο υλικό λειτουργεί ως προσωρινή υποστήριξη στα τυπωμένα στρώματα. Η κύρια πρόκληση σε αυτή τη μέθοδο είναι η αφαίρεση της μη δεσμευμένης σκόνης και η παροχή συστήματος ενίσχυσης (Wangler , et al., 2016).

Η τεχνική αναδύομένου αντικειμένου (emerging object) είναι μια άλλη τεχνική της μεθόδου εκτύπωσης σε σκόνη. Σε αυτήν τη μέθοδο, μια ξηρή κλίνη τσιμέντου ενεργοποιείται με τη βοήθεια νερού και πολυμερούς. Σε όλες τις μεθόδους κλίνης σε σκόνη, εφαρμόζονται τεχνικές για ρίψη διαλύματος συνδετικού υλικού στην κλίνη.

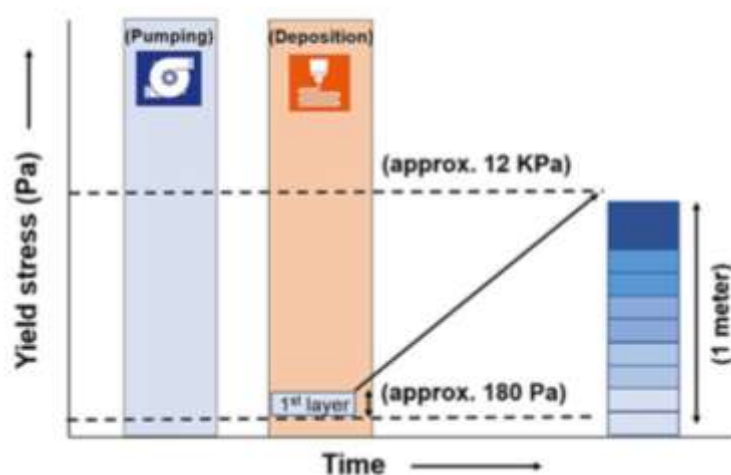
4.3 Επιλογή υλικών

4.3.1 Επιλογή υλικών τεχνικών εξώθησης

Το σκυρόδεμα κατά την διαδικασία της 3D εκτύπωσης μπορεί να εξωθηθεί εύκολα σε μικρά νήματα μέσω συστήματος ακροφυσίου-αντλιοσωλήνα. Τα κύρια χαρακτηριστικά της διαδικασίας εκτύπωσης για τη κατασκευή κτιρίων είναι από τη μία πλευρά, η εργασιμότητα του σκυροδέματος η οποία είναι κρίσιμη παράμετρος και εξαρτάται κυρίως από την αναλογία ανάμιξης και την επιλογή των υλικών και από την άλλη πλευρά, η υψηλή πρόσφυση και ακαμψία ώστε να αναπτυχθεί υψηλή αντοχή και να μην εμφανιστεί αστοχία. Σύμφωνα με την ρεολογία, το υψηλότερο ιξώδες και η χαμηλότερη τάση διαρροής του σκυροδέματος έχουν ως αποτέλεσμα υψηλότερη πλαστικότητα και καλύτερη εργασιμότητα. Επιπλέον, απαιτείται μικρότερος χρόνος ρύθμισης και υψηλότερη πρώιμη αντοχή για το τρισδιάστατα τυπωμένο σκυρόδεμα (Perrot, et al., 2016).

Τα υλικά τρισδιάστατης εκτύπωσης σκυροδέματος πρέπει να είναι θιξοτροπικά για να διασφαλίζουν την αντλησιμότητα, την εξώθηση και το οικοδομήσιμό τους εντός του επιτρεπόμενου χρόνου (Hager, et al., 2016). Η θιξοτροπία είναι μια ένδειξη της ικανότητας ανάκτησης ιξώδους και αντιπροσωπεύει την ικανότητα ροής πριν και μετά την εξώθηση. Η στατική και η δυναμική τάση διαρροής και το ιξώδες που είναι γνωστά ως ρεολογικές ιδιότητες των τσιμεντοειδών μειγμάτων, εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την περιεκτικότητα σε νερό, τις αθροιστικές ιδιότητες, την διαβάθμιση, τον χρόνο ανάμιξης, το σύστημα ανάμιξης και τη θερμοκρασία (Weng, et al., 2018). Οι παράμετροι που αναφέρθηκαν ελέγχουν πρακτικά την κροκίδωση των σωματιδίων και την αντίδραση ενυδάτωσης στο μείγμα και κατά συνέπεια τη ρεολογία του μείγματος . Η υψηλή τάση διαρροής και το χαμηλό πλαστικό ιξώδες του μείγματος πρέπει να διατηρούνται όσο το δυνατόν περισσότερο για να εξασφαλιστεί η δυνατότητα κατασκευής και η αντλησιμότητα

αντίστοιχα, τα οποία γενικά εξαρτώνται από την τεχνολογία που χρησιμοποιείται, την απόσταση άντλησης, το μέγεθος των ακροφυσίων και την σύνθεση των μιγμάτων (Weng, και συν., 2018). Η αρχική τάση διαρροής ενός εξωθημένου στρώματος εξαρτάται από την πυκνότητα, τη βαρύτητα και το ύψος του εξωθημένου στρώματος. Η ανάπτυξη της τάσης διαρροής με το χρόνο και τη διαδοχική εναπόθεση στρώματος παρουσιάζεται στο Σχήμα 4-5 (Panda, και συν., 2019).



Σχήμα 4-5: Τυπική διακύμανση της τάσης διαρροής ως συνάρτηση με το ύψος της κατασκευής

Αρχικά απαιτείται αντοχή γύρω στα 180-1000 Pa σε ένα εξωθημένο μονό στρώμα για την ανάπτυξη σταθερότητας και στη συνέχεια το κάτω στρώμα πρέπει να έχει αντοχή περίπου 12 kPa για να υποστηρίξει 1 m εξωθημένο στρώμα πάνω του. Υλικά υψηλής αντοχής με βάση το τσιμέντο είναι ακατάλληλα για ρεολογικές και σκληρυντικές ιδιότητες, συνεπώς δεν έχουν θιξοτροπικό χαρακτήρα (De Schutter, et al., 2018). Τα θιξοτροπικά υλικά πρέπει να έχουν 10-15 λεπτά ανοιχτού χρόνου (open time: time during which a material may be used in 3dp) για να παρέχουν επαρκή εξώθηση και δυνατότητα κατασκευής. Τα τυπικά μείγματα για εκτύπωση σκυροδέματος θα πρέπει να έχουν ανοιχτό χρόνο περίπου 15-30 λεπτά. Η επιλογή του ανοιχτού χρόνου ποικίλλει ανάλογα με την κλίμακα και την ταχύτητα της εκτύπωσης, αλλά πρέπει να ελέγχεται κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού μίξης. Επιπλέον, η ειδική απαίτηση για μηδενική υποχώρηση (ολίσθηση) των μιγμάτων τσιμέντου στις εφαρμογές της τρισδιάστατης εκτύπωσης αντιτίθεται με την ικανότητα αυτοσυμπίεσης τους (Paul SC, et al., 2018). Ένα μείγμα σκυροδέματος με μηδενική ολίσθηση έχει υψηλή τάση αντοχής αμέσως μετά την απόθεση, επομένως το στρώμα αυτό δεν παραμορφώνεται.

Η αύξηση της αναλογίας νερού-τσιμέντου ασκεί θετική επίδραση στην εξώθηση αλλά μειώνει την οικοδομησιμότητα (Malaeb, et al., 2019). Με βάση όσα αναφέρθηκαν για την τεχνική εκτύπωσης με εξώθηση τσιμεντοειδούς υλικού, απαιτείται μείγμα με υψηλή τάση διαρροής και απαιτούμενη ικανότητα ροής στη φρέσκια κατάσταση παράλληλα όμως συνιστάται ταχεία σκλήρυνση για γρήγορη κατασκευή. Επιπλέον για την απελευθέρωση του νερού που παγιδεύεται μέσα στα κενά και την αύξηση της ρεολογικής ρευστότητας του μίγματος με αυξανόμενη μηχανική αντοχή προστίθενται υπερπλαστικοποιητές . Η υπερβολική ποσότητα υπερπλαστικοποιητών μπορεί όμως να έχει αρνητική επίδραση στην ικανότητα δόμησης (Malaeb, et al., 2019). Προκειμένου να διατηρηθεί ο σωστός ανοιχτός χρόνος κατά την εκτύπωση μεγάλου αριθμού στρωμάτων με πολλές ομάδες νημάτων, συνιστάται 1% υπερπλαστικοποιητής και 0,5% επιβραδυντής (Le, et al., 2012).

Τα αδρανή με λεία επιφάνεια μπορούν να κινηθούν εύκολα και να αυξήσουν τη ρευστότητα κατά την εξώθηση. Πρέπει όμως να χαρακτηριστούν σωστά, επειδή η πιθανότητα ύπαρξης πορώδους και μίκρης πρόσφυσης σε λεία επιφάνεια είναι υψηλή. Ωστόσο, ένας κατάλληλος επιβραδυντής μπορεί να διατηρήσει τη εξώθηση ενός μίγματος για μεγάλο χρονικό διάστημα. Ο επιβραδυντής μπορεί να αποτελείται από μεθυλενο-φωσφονικό οξύ, κιτρικό οξύ και φορμαλδεΐδη. Η τριαιθανολαμίνη μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μικρές περιεκτικότητες (έως 0,05%) ως επιβραδυντής ενυδάτωσης τσιμέντου και μπορεί να είναι χρήσιμη για τη δημιουργία ενός μείγματος σκυροδέματος με χρόνο πήξης 20 λεπτά (Han, et al., 2015). Όμως, οι υψηλές δόσεις τριαιθανολαμίνης μπορούν να επιταχύνουν τη ρύθμιση του τσιμέντου. Η προσθήκη γύψου στο τσιμέντο μπορεί να είναι χρήσιμη για τον έλεγχο της ρύθμισης. Η ενυδάτωση της γύψου κατά τη διάρκεια της ενυδάτωσης του τσιμέντου έχει πολύπλοκη συμπεριφορά. Με την αντικατάσταση 20% -60% τσιμέντου από γύψο, ο τελικός χρόνος ρύθμισης του μίγματος μειώθηκε από 20 λεπτά σε 16 λεπτά και η θερμοκρασία αυξήθηκε από περίπου 27,72 ° C σε 31,49 ° C. όπου για 100% περιεχόμενο γύψου καταγράφηκε ο τελικός χρόνος ρύθμισης 30 λεπτά . Έτσι, πρέπει να επιλεγεί κατάλληλος επιβραδυντής ή επιταχυντής με την καταλληλότερη σύσταση για ακριβή χρόνο ρύθμισης του μίγματος εκτύπωσης.

Η επιλογή του βέλτιστου μεγέθους υλικών εξαρτάται από τη μέθοδο και τον τύπο εκτύπωσης, τους τύπους εκτυπωτών και τις τεχνικές εκτύπωσης. Στην τεχνική Contour Crafting μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο λεπτόκοκκο σκυρόδεμα ή κονίαμα, αλλά το μείγμα θα πρέπει να έχει υψηλή συγκέντρωση και άλλων υλικών σε μορφή σκόνης όπως ανόργανα πρόσθετα (π.χ. πυριτίας, ιπτάμενης τέφρας κ.α.) και ενώσεις τροποποίησης ιξώδους. Το μέγιστο μέγεθος υλικών εξαρτάται από το μέγεθος του ακροφυσίου του εκτυπωτή και την

ικανότητα άντλησης και πρέπει να είναι μικρότερο από το 1/10 της διαμέτρου των ακροφυσίων του εκτυπωτή. Το μέγεθος των αδρανών μπορεί να φτάσει μέχρι και τα 2 mm για διάμετρο ακροφυσίου 2 cm.

Οι αναλογίες λεπτών αδρανών προς τσιμέντο και λεπτών αδρανών προς άμμο προσδιορίστηκαν ως 1.28 και 2.0 . Τα τσιμεντοειδή υλικά που χρησιμοποιούνται γενικά στην τρισδιάστατη εκτύπωση σκυροδέματος με εξώθηση αποτελούνται από (Liu, et al., 2019):

- 12% -16% OPC
- 21% -26% Silica fume
- 25% -30% άμμο
- 33% -35% ιπτάμενη τέφρα
- 2% -4% νερό

Για εκτυπώσεις από σκυρόδεμα με ενίσχυση ινών, συνιστάται περίπου (Le, et al., 2012):

- 70% OPC
- 20% ιπτάμενη τέφρα
- 10% Silica fume
- αναλογία άμμου / συνδετικού 3:2
- αναλογία νερού / συνδετικού 0.26

Ο πυριτική σκόνη μπορεί να απορροφήσει μεγάλη ποσότητα νερού ενώ η προσθήκη μικροκρυσταλλικής κυτταρίνης σε υλικά εκτύπωσης με βάση το τσιμέντο μπορεί επίσης να ενισχύσει το πλαστικό ιξώδες και την αντοχή της εκτύπωσης.

4.3.2 Επιλογή υλικών τεχνικών εκτύπωσης σε κλίνη

Στις τεχνικές εκτύπωσης σκυροδέματος σε κλίνη σωματιδίων, και ειδικά στην τεχνολογία D-Shape όπως αναφέρθηκε κατασκευάζεται μία βάση πάνω στην οποία τοποθετείται το τσιμεντοειδές μίγμα και το συνδετικό σε υγρή μορφή ενεργοποιεί επιλεκτικά την διαδικασία σκλήρυνσης του στρώματος. Η αδρανή κλίνη μπορεί να είναι κατασκευασμένη από θρυμματισμένη πέτρα, άμμο, χαλίκι, θρυμματισμένα πήλινα αδρανή και κεραμικά (Pacewicz, et al., 2018). Στην τεχνολογία D-Shape, ανακυκλωμένο γυαλί, ίνες, ξύλινα τσιπς, καουτσούκ, γύψος μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν ως αδρανή. Επιπροσθέτως με αυτή την τεχνική χρησιμοποιούνται υλικά μεγέθους περίπου 0,2-4 mm με δυνατότητα εκτύπωσης στρώματος πάχους τουλάχιστον 5 mm (Pacewicz, et al., 2018). Επομένως αυτή η

τεχνική εκτύπωσης σκυροδέματος δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τυπικά χονδροειδή σκυροδέματα. Η απόδοση της εκτύπωσης στο στρώμα εξαρτάται από την πυκνότητα και το ύψος της κλίνης, το βάρος του στρώματος καθώς και την τριβή μεταξύ των σωματιδίων. Η βελτιστοποίηση της τεχνικής εκτύπωσης σε σκόνη περιλαμβάνει όλες αυτές τις παραμέτρους με σκοπό τη σωστή διατήρηση των ρεολογικών χαρακτηριστικών και την ανάπτυξης αντοχής στο στρώμα.

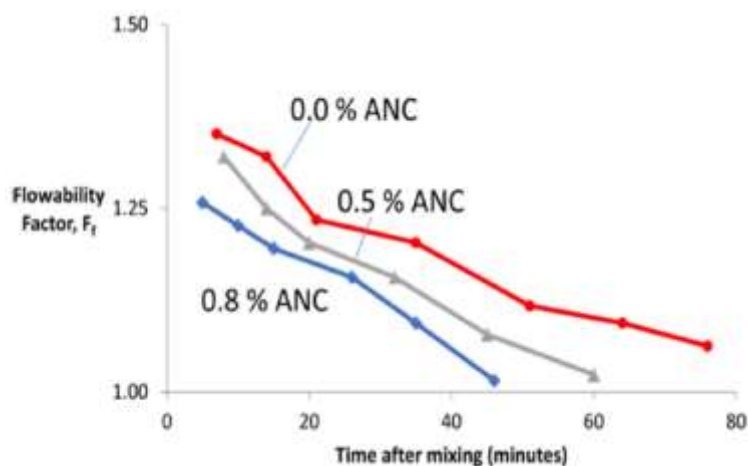
Εάν εφαρμόζονται τεχνικές εναπόθεσης σκόνης στην τρισδιάστατη εκτύπωση σκυροδέματος, τότε θα πρέπει να εξεταστεί η πιθανότητα συσσωμάτωση της λεπτής σκόνης κατά την απόθεση γιατί εξαιτίας αυτής μπορεί να δημιουργηθεί πορώδες στο τελικό εκτυπωμένο στρώμα (Xia, et al., 2016). Επιπλέον, η πυκνότητα της σκόνης, ο ρυθμός διείδυσης του σταγονιδίου του συνδετικού και ο ρυθμός ενεργοποίησης είναι οι κύριες παράμετροι που επηρεάζουν την ποιότητα. Επίσης η κοκκομετρική διαβάθμιση των σωματιδίων στην αδρανή κλίση είναι σημαντική για την ανάπτυξη της απαιτούμενης πυκνότητας για υψηλή αντοχή σε θλίψη καθώς και επαρκών διαπερατών πόρων για διείδυση συνδετικού (Lowke, et al., 2018). Ωστόσο, η υπερβολική ποσότητα συνδετικού μπορεί να είναι ο λόγος για παραμόρφωση και μείωση της ακρίβειας διαστάσεων λόγω της ανάγκης μεγαλύτερης περιόδου σκλήρυνσης. Για καλύτερη αντοχή μπορεί να γίνει προσθήκη μικρού μήκους ινών κατά μήκος της πιθανής ζώνης υψηλής τάσης. Ωστόσο, οι ίνες πρέπει να είναι συμβατές με το στρώμα του αδρανούς και τον ενεργοποιητή - συνδετικό.

4.4 Τεχνικές ενίσχυσης

4.4.1 Ελαστική ενίσχυση με ίνες

Προκειμένου να μειωθεί ή να εξαλειφθεί η χρήση χάλυβα σε τρισδιάστατα τυπωμένα κτίρια, μελετήθηκε η περίπτωση να δοθεί στο τρισδιάστατο τυπωμένο σκυρόδεμα αυτό-ενίσχυση με προσθήκη ινών. Ανάμεσα στα είδη ινών που δοκιμάστηκαν ήταν οι ίνες άνθρακα, γυαλιού και βασάλτη σε τρισδιάστατη τυπωμένη πάστα τσιμέντου. Έτσι διαπιστώθηκε ότι η προσθήκη 1 % κ.ο. ινών άνθρακα μπορεί να αυξήσει την αντοχή σε κάμψη της πάστας τσιμέντου κατά 18,5 MPa χωρίς όμως να βελτιώνει σημαντικά την αντοχή σε θλίψη. Σε άλλες μελέτες ερευνήθηκαν οι ιδιότητες τσιμεντοειδών ενισχυμένων με ίνες συνθετικών σε νωπή και σκληρυμένη μορφή (Soltan, και συν., 2018). Διαπιστώθηκε ότι η ενσωμάτωση υδροξυπροπυλο-μεθυλοκυτταρίνης μπορεί να χειριστεί την αρχική ροή των τσιμεντοειδών συνθετικών, αλλά δεν χειρίζεται αποτελεσματικά τον ρυθμό σκλήρυνσης τους. Διαπιστώθηκε επίσης ότι η προσθήκη μικρής ποσότητας νάνο-αργίλου στα σύνθετα

τσιμεντοειδή ενισχυμένα με ίνες μπορεί να μειώσει τον χρόνο σκλήρυνσης μειώνοντας την ρευστότητα τους, αλλά η αλλαγή του ρυθμού σκλήρυνσης δεν ήταν εμφανής (όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-6).



Σχήμα 4-6: Επίδραση νανο-αργίλου στην ικανότητα ροής και σκλήρυνσης (Soltan, και συν., 2018).

Η χρήση ενισχυτικών ινών για την ανάπτυξη ολκιμότητας, αντοχής σε εφελκυσμό, σε διάτμηση και θραύση σε τυπωμένα στοιχεία σκυροδέματος αποτελεί σημαντικό πεδίο μελέτης (Nematollahi, et al., 2018). Στις κατασκευές τρισδιάστατης εκτύπωσης με τσιμέντο (3DPC) χρησιμοποιούνται διαφορετικοί τύποι ινών. Παραδείγματα αυτών των ινών είναι οι μικροϊνες πολυαιθυλενίου, ίνες πολυπροπυλενίου, ίνες πολυβινυλικής αλκοόλης, ίνες άνθρακα, γυαλιού και βασάλτη, και χαλύβδινες ίνες. Οι ίνες επηρεάζουν τη γεφύρωση ρωγμών εντός του τυπωμένου σκυροδέματος υπό συνθήκες φόρτισης, με συνέπεια την αναστολή της ανάπτυξης ρωγμών, την μείωση του πλάτους των υπαρχόντων και κατά συνέπεια αύξηση της μηχανικής απόδοσης της κατασκευής. Η προσθήκη ινών μεταβάλλει σημαντικά τις ρεολογικές ιδιότητες του φρέσκου μίγματος. Η προσθήκη ινών προκαλεί γενικά υψηλή αύξηση της απαίτησης νερού στο τσιμεντοειδές μείγμα, με αποτέλεσμα την δημιουργία χαμηλού ιξώδους, το οποίο μπορεί να δημιουργήσει πρόβλημα στην αντλησιμότητα και την εξώθηση. Επομένως, η περιεκτικότητα σε ίνες στο μείγμα πρέπει να ελέγχεται. Για να μειωθεί η πιθανότητα πλαστικής συρρίκνωσης, χρησιμοποιούνται ίνες στην εκτύπωση σκυροδέματος με συνιστώμενη τιμή περιεκτικότητας $1,2 \text{ kg} / \text{m}^3$ (Le, et al., 2012). Η προσθήκη υπερβολικών ινών μπορεί να φράξει το ακροφύσιο εξώθησης και να αποτρέψει την ομαλή εκτύπωση, συνεπώς πρέπει να παρέχεται πρόσθετη εργασιμότητα, είτε με την προσθήκη πλαστικοποιητών είτε με κατάλληλη επεξεργασία των ινών. Πριν από

την χρήση πολυμερών ινών σε μείγμα 3DPC, οι ίνες πρέπει να υποστούν θερμική επεξεργασία προκειμένου να επιτευχθεί καλή διασπορά και συγκόλληση με την τσιμεντοειδή πάστα. Για τις ίνες άνθρακα, η θερμική επεξεργασία πρέπει να γίνεται σε θερμοκρασία περίπου 400 °C, ενώ για τους βασάλτες και τις ίνες γυαλιού στους 500 °C.

Ο τυχαίος προσανατολισμός των ινών σε μίγματα οδηγεί σε υψηλή αντοχή του τυπωμένου στρώματος. Η κατεύθυνση της ευθυγράμμισης των ινών που είναι παράλληλη προς την κατεύθυνση εξώθησης παράγει την καλύτερη απόδοση εφελκυσμού αλλά τη χειρότερη αντοχή σε θλίψη (Yu, et al., 2018). Επομένως, η προτιμώμενη διεύθυνση ευθυγράμμισης ινών είναι παράλληλη προς την κατεύθυνση φόρτωσης. Για τον έλεγχο του υψηλού βαθμού ευθυγράμμισης ινών, η διάμετρος του ακροφυσίου πρέπει να είναι μικρότερη από το μέσο μήκος της ίνας.

Η κύρια πρόκληση της προσθήκης ινών στην εκτύπωση σκυροδέματος είναι ο έλεγχος της κατεύθυνσης των ινών, η δυνατότητα απόφραξης και η μείωση της αντλησιμότητας και της εξώθησης. Συνήθως συνιστάται η προσθήκη βραχέων συνθετικών και εύκαμπτων ινών που όπως αποδεικνύεται μπορεί να είναι πλεονεκτική. Επιπλέον, οι φυσικές ίνες μπορεί να είναι επίσης αποτελεσματικές σε σχέση με την βελτίωση της αντοχής του σκυροδέματος. Για παράδειγμα ίνες κάνναβης, βαμβακερές ίνες και μαλλί μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την διερεύνηση της αποτελεσματικότητας και της απόδοσης όσον αφορά την εκτύπωση και τη σταθερότητα.

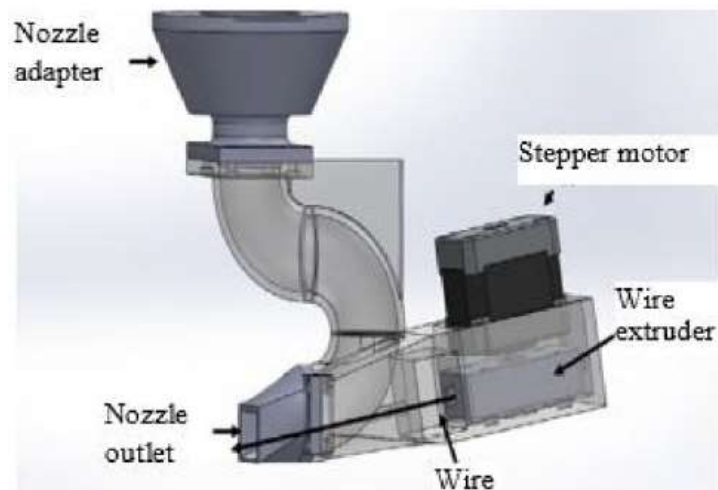
4.4.2 Ενίσχυση με ράβδους

Οι ράβδοι ενίσχυσης μπορούν να εισαχθούν είτε χειροκίνητα κατά την εκτύπωση είτε μετά την εκτύπωση των κατασκευών. Ωστόσο, η τοποθέτηση οπλισμού με ένα σύστημα άμεσης εκτύπωσης επί τόπου δεν είναι εφικτή με τους εκτυπωτές. Έτσι η εκτύπωση κοίλων κατασκευών μπορεί να γίνει με την τοποθέτηση των ενισχυτικών ράβδων εντός των κοίλων χώρων μεταξύ των τυπωμένων στρώσεων σκυροδέματος, οι οποίες τελικά θα συγκολληθούν από το σκυρόδεμα πλήρωσης (Wangler , και συν., 2016). Ένα τυπικό σύστημα ενίσχυσης ράβδων εμφανίζεται στο Σχήμα 4-7.



Σχήμα 4-7: Σύστημα ενίσχυσης με οπλισμό σε τρισδιάστατη εκτύπωση σκυροδέματος

Ένα άλλο σύστημα ενίσχυσης με ράβδους είναι η εξώθηση των ράβδων από με τέτοιο τρόπο ώστε να ωθείται στην περιοχή του σκυροδέματος καθώς και αυτό παράλληλα εξωθείται από το σύστημα (Σχήμα 4-8) (Lim, et al., 2018).

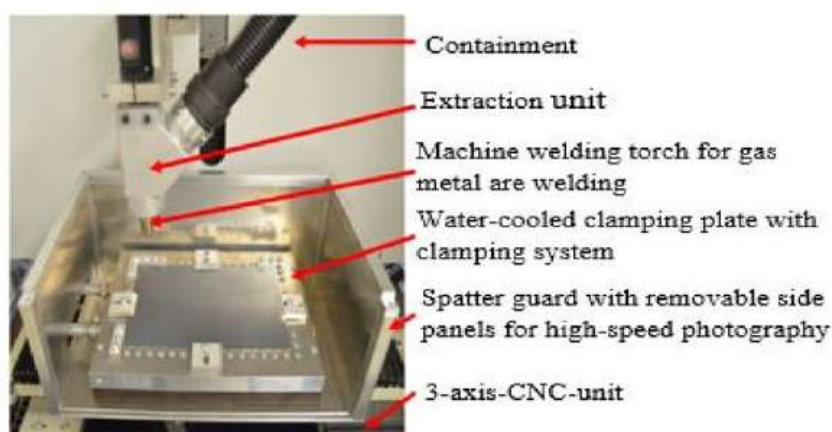


Σχήμα 4-8: Σύστημα εξώθησης οπλισμού σε σκυρόδεμα εκτύπωσης

Ωστόσο, η ολίσθηση μίας χαλύβδινης ράβδου εντός της περιοχής του εκτυπωμένου σκυροδέματος σχετίζεται με μία σειρά λειτουργικών προβλημάτων. Η εξώθηση του οπλισμού μπορεί να προκαλέσει επιπλέον πίεση στα πρόσφατα τυπωμένα στρώματα, τα οποία μπορούν να επηρεάσουν την κατασκευή και την σταθερότητα του σχήματος. Παρόλα αυτά, η εισαγωγή χαλύβδινων ράβδων ή καλωδίων με ενισχυτική ίνα γεωπολυμερούς μήτρας μπορεί να βελτιώσει την ικανότητα εφελκυσμού των τυπωμένων στοιχείων κατά 290% (Lim, και συν., 2018). Το σύστημα εισαγωγής καλωδίου παρέχει περιορισμό σε κάθε στρώμα τυπωμένου στοιχείου σχηματίζοντας διαμόρφωση τύπου πηνίου.

Επιπλέον για το σύστημα μετά την ένταση, πρέπει να διατηρούνται ευθεία κενά εντός των δομών για την εισαγωγή τενόντων, τα οποία μπορεί να προκαλέσουν εμπόδιο στην ελευθερία στη γεωμετρική μορφή.

Μία νέα τεχνική είναι η εισαγωγή της ενίσχυσης απευθείας μέσω του εκτυπωτή. Η έννοια της εκτύπωσης από οπλισμένο σκυρόδεμα περιλαμβάνει μια συσκευή εκτύπωσης, η οποία μπορεί να τροφοδοτήσει τον οπλισμό στην κεφαλή εκτύπωσης και στη συνέχεια να ενσωματώσει το νήμα οπλισμού σκυροδέματος που απελευθερώνεται από το ακροφύσιο (Bos, et al., 2018). Μια τέτοια προσέγγιση της εκτύπωσης οπλισμού χάλυβα που προτάθηκε με βάση την διαδικασία συγκόλλησης αερίου-μετάλλου-τόξου με ένα συμβατικό σύστημα τριών αξόνων CNC, φαίνεται στο σχήμα 4-9.



Σχήμα 4-9: Σύστημα εκτύπωσης οπλισμένου σκυροδέματος με συμβατικό σύστημα CNC τριών αξόνων

Η ακρίβεια των διαστάσεων, η γεωμετρία, το ιξώδες και η επιφανειακή τάση επηρεάζονται αρνητικά από την υπερβολική θερμότητα που παράγεται από την ταχεία εκτύπωση των στρωμάτων. Επιπλέον αναπτύσσεται υψηλή απόδοση και ικανότητα καταπόνησης του τυπωμένου χάλυβα οπλισμού και καλή συγκόλληση με το τυπωμένο σκυρόδεμα αλλά έχει περίπου 20% λιγότερη αντοχή από τον συμβατικό χάλυβα οπλισμού. Το αποτέλεσμα μίας τέτοιας κατασκευής ενίσχυσης φαίνεται στο Σχήμα 4-10.



Σχήμα 4-10: Ενίσχυση εκτυπωμένου σκυροδέματος με την τεχνική CNC

Όμως, η ταυτόχρονη εκτύπωση σπλισμού και σκυροδέματος δεν είναι εφικτή τελικά λόγω της υψηλής θερμοκρασίας που δημιουργείται από την εκτύπωση χάλυβα. Ωστόσο, η άρθρωση και η διάταξη του σπλισμού πρέπει να διερευνηθούν σημαντικά, καθώς η τρέχουσα γνώση της εκτύπωσης σπλισμού δεν επαρκεί.

Διάφορα ειδικά ενισχυτικά συστήματα αγκύρωσης μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν μεταξύ των τυπωμένων κοίλων στρωμάτων του τοίχου από σκυρόδεμα (Σχήμα 4-11).



Σχήμα 4-11: Σύστημα ενισχυτικής αγκύρωσης εκτυπωμένου σκυροδέματος

Η ρομποτική εδραίωση του χάλυβα σπλισμού σε κάθε στρώση μπορεί να γίνει μέσω ρομποτικού συστήματος τροφοδοσίας. Αυτό το σύστημα ενίσχυσης πλέγματος μπορεί να

εφαρμοστεί αποτελεσματικά ταυτόχρονα με εκτύπωση σκυροδέματος για ενίσχυση της διεπαφής των τυπωμένων στρωμάτων.

4.5 Κρίσιμες συνθήκες έκθεσης

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται στην τρισδιάστατη εκτύπωση σκυροδέματος είναι ευαίσθητα σε κρίσιμες συνθήκες έκθεσης. Η ταχεία διαδικασία δόμησης των τυπωμένων στρωμάτων και ο κίνδυνος συρρίκνωσης του ξηρού εκτυπωμένου στοιχείου σε θερμό κλίμα θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε υποβάθμιση της μηχανικής αντοχής (Bond strength in 3D printed geopolymer mortar, 2019). Οι εκτυπωμένες κατασκευές χρειάζονται προστασία από δυσμενείς περιβαλλοντικές συνθήκες, όπως υπεριώδη ακτινοβολία, έκθεση σε νερό και χημικά και υψηλές θερμοκρασίες. Απαιτείται μετεπεξεργασία με εποξειδικά σκληρυντικά και προστασία έναντι υπεριώδους ακτινοβολίας (Pacewicz, et al., 2018). Η σκόνη πυριτίας που μπορεί να έχει προστεθεί στο μείγμα εκτύπωσης σκυροδέματος είναι ικανή να αυξήσει την πυκνότητα του προϊόντος και κατά συνέπεια να μειώσει το πορώδες των τυπωμένων στοιχείων και να βελτιώσει την αντοχή έναντι της χημικής απορρόφησης και του νερού (Ting, et al., 2019). Το τσιμεντοειδές μίγμα αιθυλενίου-οξικού βινυλίου διαθέτει υψηλή αντοχή στο νερό, στη χημική απορρόφηση και τη διείσδυση και μπορεί να εφαρμοστεί για να βελτιώσει την ανθεκτικότητα (Yeon, et al., 2019). Ωστόσο, αυτό το πρόσθετο μπορεί να προκαλέσει αρνητική επίδραση στη μηχανική αντοχή. Η ζώνη σύνδεσης εντός των στρωμάτων μπορεί να αναπτύσσει διαδρομές για έντονη τριχοειδή αναρρίχηση υδατικού υγρού στην δομή και μπορεί να οδηγήσει σε επιδείνωση της αντοχής. Το Σχήμα 4-12 παρουσιάζει την αστοχία λόγω φαινομένων τοπικής τριχοειδούς αναρρόφησης στη διεπαφή μεταξύ τυπωμένων στρωμάτων και ρωγμών, όπου η κύρια διαδρομή αναρρόφησης ήταν η ένωση, η οποία σχηματίστηκε λόγω του υψηλού χρονικού διαστήματος εκτύπωσης.



Σχήμα 4-12: Ανάπτυξη ρηγμάτωσης μεταξύ τυπωμένων στρώσεων σκυροδέματος

Η ευπάθεια στην φωτιά και στις υψηλές θερμοκρασίες είναι σημαντική για τυπωμένα στοιχεία σκυροδέματος λόγω του μικρότερου μεγέθους των υλικών στο μείγμα. Το σκυρόδεμα εκτύπωσης ενισχυμένο με ίνες PVA είναι πιο αποτελεσματικό από το απλό σκυρόδεμα όσον αφορά την υπολειμματική αντοχή μετά από έκθεση σε υψηλές θερμοκρασίες έως 800 ° C (Weng, et al., 2019). Περίπου 49% υπολειμματική αντοχή σε θλίψη παρατηρήθηκε στα τυπωμένα δείγματα οπλισμένου σκυροδέματος, το οποίο είναι πολύ κοντά σε αυτό του συμβατικού, μετά από έκθεση στους 800 ° C για 60 λεπτά.

Η απόδοση και η ανθεκτικότητα των δομών τρισδιάστατης εκτύπωσης τσιμεντοειδών υλικών που εκτίθενται σε κύκλους ψύξης-απόψυξης, κυκλικής ενυδάτωσης, χημικής έκθεσης, προσβολής με νερό και αυξημένες θερμοκρασίες αποτελεί πεδίο μελέτης και λόγω των σημαντικών επιπτώσεων που μπορούν να επιφέρουν πρέπει ιδιαίτερως να προσεχθούν κατά το σχεδιασμό. Κατασκευές που προέρχονται από τρισδιάστατη εκτύπωση σκυροδέματος με πολύ λεπτά υλικά σε σύγκριση με το συμβατικό χυτό σκυρόδεμα εμφανίζουν μεγάλη πιθανότητα δημιουργίας πόρων μεταξύ των στρωμάτων εκτύπωσης. Επομένως, η απορρόφηση νερού και χημικών θα είναι επίσης υψηλότερη από εκείνη των συμβατικών χυτών στοιχείων. Κρίσιμη παράμετρο κατά το σχεδιασμό είναι η κατάλληλη επιλογή αδρανών, μεγέθους και είδους ως να συμβάλλουν στην μείωση της ανάπτυξης πορώδους στις τελικές κατασκευές.

5 Μελέτες Περίπτωσης

5.1 Κατασκευή υποστυλώματος Aix-en-Provence, Γαλλία

Υποστύλωμα ελεύθερης μορφής ύψους 4 μέτρων κατασκευάστηκε και τοποθετήθηκε στις αθλητικές εγκαταστάσεις ενός συγκροτήματος στην πόλη Aix-En-Provence της Γαλλίας. Το υποστύλωμα στηρίζει στέγαστρο που καλύπτει τμήμα εξωτερικού χώρου των αθλητικών εγκαταστάσεων, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5-1. Το έργο αυτό ήταν τμήμα του μεγαλύτερου έργου της ανέγερσης των αθλητικών εγκαταστάσεων².



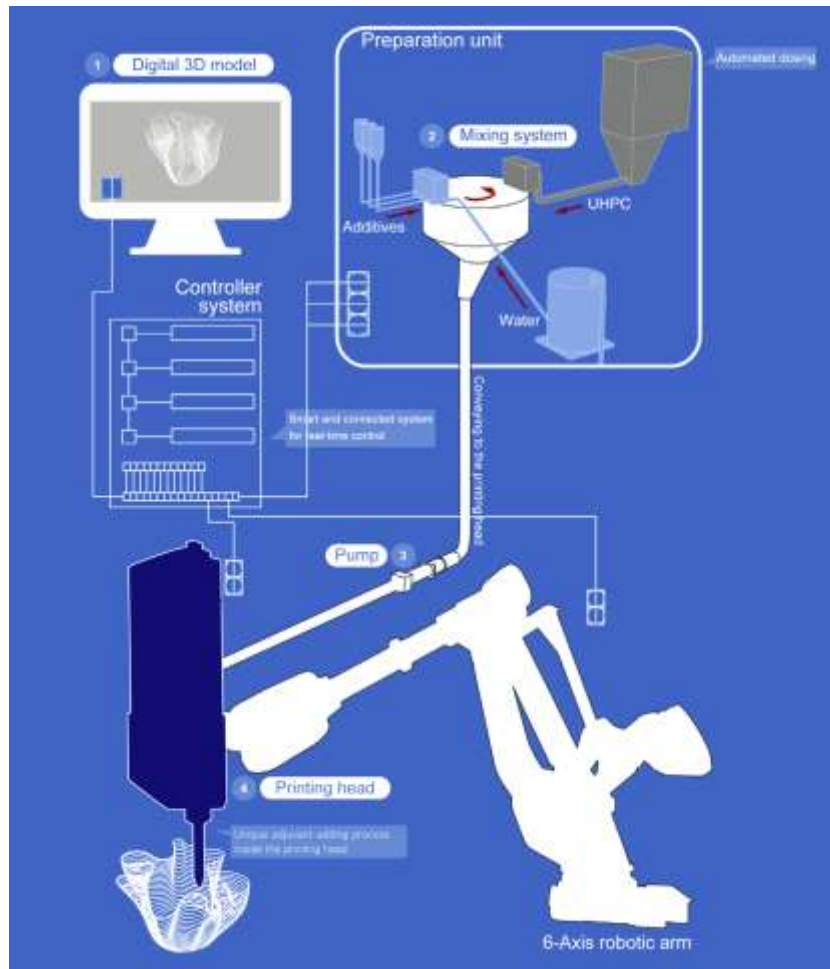
Σχήμα 5-1: Υποστύλωμα ελεύθερου σχήματος στην πόλη Aix-en-Provence.

Η διαδικασία τρισδιάστατης εκτύπωσης σκυροδέματος μεγάλης κλίμακας που εφαρμόστηκε στο συγκεκριμένο έργο αναπτύχθηκε από την XtreeE. Η συνολική διαδικασία συνοψίζεται στο Σχήμα 5-2

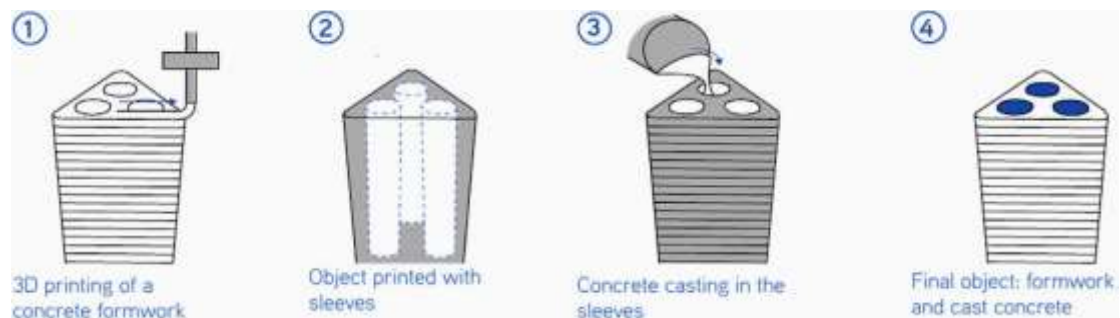
Με βάση αυτήν τη διαδικασία, μπορεί να εξαχθεί μια στρατηγική κατασκευής για 3D εκτύπωση ξυλοτύπου σκυροδέματος. Η αρχή συνίσταται στην 3D εκτύπωση μόνο του ξυλότυπου που είναι απαραίτητος για τη χύτευση ενός άλλου δομικού υλικού, όπως το σκυρόδεμα εξαιρετικά υψηλής απόδοσης (UHPC) για παραγωγή οπλισμένου σκυροδέματος, ή ενός μονωτικού υλικού όπως το αφρώδες σκυρόδεμα, για την κατασκευή πολυλειτουργικών εξαρτημάτων, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5-2. Μετά την διαδικασία ο

² Το έργο των αθλητικών εγκαταστάσεων στη πόλη Aix-En-Provence, ανατέθηκε από την Μητρόπολη της Aix-Marseille. Ο πυλώνας, ως τμήμα του μεγαλύτερου έργου, σχεδιάστηκε από τον Marc Dalibard (αρχιτέκτονας για ολόκληρο το κτίριο αθλητικών εγκαταστάσεων). Στο έργο συμμετείχαν οι εταιρείες: Artelia ως γραφείο δομικής μηχανικής, η AD Concept ως κατασκευαστική εταιρεία, η LafargeHolcim ως προμηθευτής υλικών και η Fehr Architectural ως υπεύθυνη εταιρία χύτευσης του σκυροδέματος.

εκτυπωμένος ξυλότυπος είναι ένα «χαμένος» ξυλότυπος αφού παραμένει στη κατασκευή (lost formwork).



Σχήμα 5-2: Διάγραμμα ροής σε μεγάλης κλίμακας διαδικασία τρισδιάστατης εκτύπωσης σκυροδέματος XtreeE.



Σχήμα 5-3: Σχηματική όψη της τρισδιάστατης εκτύπωσης σκυροδέματος XtreeE

Μια βέλτιστη αντιστάθμιση πρέπει να ληφθεί υπόψη από τα πρώτα στάδια σχεδιασμού σχετικά με την αναλογία του εκτυπωμένου υλικού εντός του κατασκευασμένου τμήματος, το οποίο μπορεί να είναι κρίσιμο για την επίτευξη οικονομικής βιωσιμότητας. Ανάλογα με την εξεταζόμενη εφαρμογή, η τρισδιάστατη εκτύπωση ξυλοτυπου σκυροδέματος μπορεί να είναι πιο αποτελεσματική από την εξ ολοκλήρου 3D εκτύπωση σκυροδέματος ή τις παραδοσιακές τεχνικές κατασκευής, τόσο από οικονομικής άποψης όσο και / ή από την στρατηγική κατασκευής.

Η XtreeE προσδιόρισε μια στρατηγική κατασκευής και προσαρμοσε το σύστημα εκτύπωσης που αναπτύχθηκε νωρίτερα σύμφωνα με την στρατηγική κατασκευής και τις απαιτήσεις. Κατά τη διάρκεια των σταδίων σχεδιασμού, η XtreeE κωδικοποίησε τα φορτία για την τοπολογική βελτιστοποίηση με την εταιρία δομικής μηχανικής Artelia και σχεδίασε ένα ακριβές σχήμα για τον πυλώνα μέσω της βελτιστοποίησης. Στα στάδια κατασκευής, η XtreeE κωδικοποίησε τα αρχεία κατασκευής για το σύστημα εκτύπωσης και πραγματοποίησε την κατασκευή πριν από την τοποθέτηση της κολόνας επί τόπου.

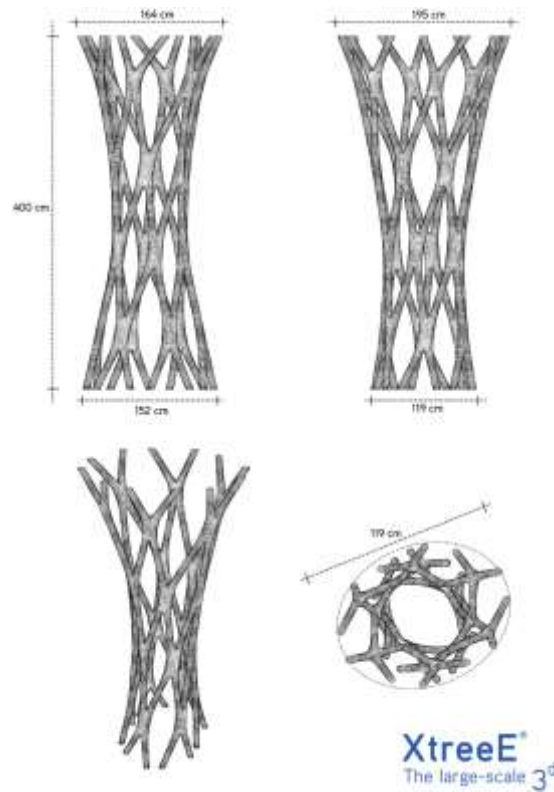
5.1.1 Σχεδιασμός

Στην αρχική του μορφή το έργο προέβλεπε την κατασκευή ενός σύνθετου υποστυλώματος για την στήριξη του στεγάστρου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5-4. Η κατασκευή του υποστυλώματος τελικά προτάθηκε να γίνει με την διαδικασία της τρισδιάστατης εκτύπωσης και ο σχεδιασμός έγινε από την εταιρεία XtreeE. Ο σχεδιασμός του υποστυλώματος βασίζεται τόσο στα αρχικά σχέδια, στους περιορισμούς που καθορίστηκαν από τους κανονισμούς δόμησης και από τη μέθοδο κατασκευής της 3D εκτύπωσης. Δεδομένου ότι δεν υπήρχε κανονισμός κτιρίων σχετικά με τα τρισδιάστατα εκτυπωμένα αντικείμενα που ενσωματώνονται σε κτίρια κατά τη στιγμή της κατασκευής και προκειμένου να τηρηθεί το προβλεπόμενο πρόγραμμα, έγινε η επιλογή να χρησιμοποιηθεί η μέθοδος κατασκευής της «χαμένου ξυλότυπου». Αυτός ο τρόπος επέτρεψε στην κατασκευή να βασιστεί στους υφιστάμενους κανονισμούς για το σκυρόδεμα UHPC.



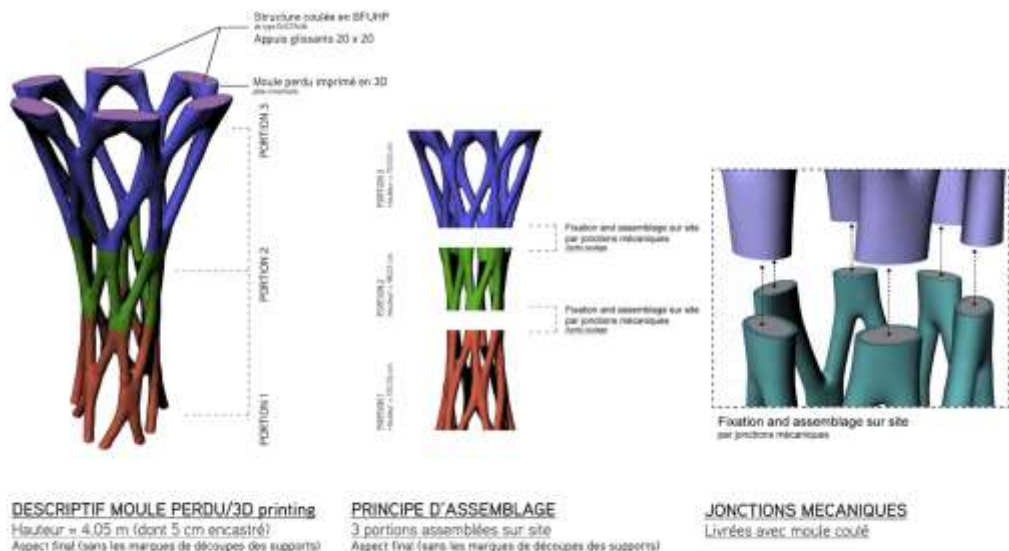
Σχήμα 5-4: Αρχικός σχεδιασμός της εγκατάστασης και του στεγάστρου

Ο κύριος περιορισμός για το σύστημα 3D εκτύπωσης που αναπτύχθηκε ήταν η μέγιστη κλίση που μπορεί να επιτευχθεί για τη δεδομένη γεωμετρία. Ο περιορισμός αυτός αποφεύχθηκε εκτυπώνοντας τα υποστηρίγματα ταυτόχρονα, προκειμένου να καταστεί δυνατή η εκτύπωση οποιασδήποτε γωνίας. Ο προσδιορισμός του ακριβούς σχήματος του υποστυλώματος βασίστηκε σε μέθοδο βελτιστοποίησης για να διασφαλιστεί η βέλτιστη χρήση του υλικού στα στηρίγματα της εκτύπωσης. Η τελική μορφή που προκύπτει φαίνεται στο Σχήμα 5-5 και σε αυτήν έχουν περιληφθεί παράμετροι αντοχής όπως ο πλευρικός άνεμος και τα σημεία ζεύξης με το στέγαστρο (Duballet, et al., 2015).



Σχήμα 5-5: Τελική μορφή του υποστυλώματος μετά την εφαρμογή μεθόδου βελτιστοποίησης

Λαμβάνοντας υπόψη την επιλεγμένη διαδικασία της εκτύπωσης «lost formwork», το υποστύλωμα κατασκευάστηκε αρχικά με τον εξωτερικό του κέλυφος που ήταν τρισδιάστατα εκτυπωμένο και στη συνέχεια έγινε χύτευση με σκυρόδεμα UHPC. Το τρισδιάστατο σύστημα εκτύπωσης που ήταν διαθέσιμο δεν επέτρεπε την εκτύπωση του εξωτερικού κελύφους σε ένα τμήμα και ως εκ τούτου, το υποστύλωμα χωρίστηκε σε τρία μικρότερα μέρη (Σχήμα 5-6) , όπου το καθένα γέμισε με σκυρόδεμα και στη συνέχεια συναρμολογήθηκαν μαζί για να σχηματίσει ολόκληρο το υποστύλωμα. Κατά την χύτευση, μεταλλικοί θηλυκοί σύνδεσμοι εισήχθησαν στο σκυρόδεμα σε κάθε άκρο των τμημάτων. Στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκαν αρσενικοί σύνδεσμοι για την σύνδεση των διαφόρων μερών της κολόνας στην τελική συναρμολόγηση.



XtreeE
The large-scale 3^d

Σχήμα 5-6: Αρχές διαχωρισμού και συναρμολόγησης για το σύστημα τρισδιάστατης εκτύπωσης.

5.1.2 Κατασκευή

Η κατασκευή του πυλώνα περιλάμβανε τρία στάδια. Την τρισδιάστατη εκτύπωση του εξωτερικού κελύφους στον κεντρικό χώρο της XtreeE στο νότιο Παρίσι. Την χύτευση του σκυροδέματος UHPC και την ενσωμάτωση των συνδετήρων στην εγκατάσταση παραγωγής Fehr Architectural στην βόρεια Γαλλία, και την τελική συναρμολόγηση, επί τόπου, στο Aix-en-Provence. Η τρισδιάστατη εκτύπωση του εξωτερικού κελύφους και η χύτευση του σκυροδέματος σε εσωτερικό χώρο επιτρέπει τον ακριβή έλεγχο του περιβάλλοντος, για να εξασφαλιστούν ιδανικές συνθήκες θερμοκρασίας και υγρασίας έτσι ώστε το σκυρόδεμα να συμπεριφέρεται όπως αναμένεται.

Προληπτικά, μετά από διεξαγωγή δοκιμών σε μικρότερες γεωμετρίες παρόμοιες με του πυλώνα, αποφασίστηκε η 3D εκτύπωση του ξυλότυπου σε τέσσερα μέρη και όχι σε τρία. Ο συγκεκριμένος ξυλότυπος χρειάστηκε 15 ώρες για να εκτυπωθεί, δηλαδή περίπου 3 ώρες και 45 λεπτά για κάθε τμήμα του. Ο χρόνος ρύθμισης ήταν συνήθως συγκρίσιμος με τον χρόνο ρύθμισης του σκυροδέματος C60, δηλαδή περίπου 2 ώρες. Μόλις ο ξυλότυπος εκτυπώθηκε με επιτυχία, πραγματοποιήθηκε μια δοκιμή συναρμολόγησης για να διασφαλιστεί ότι τα αποτελέσματα ήταν τόσο ακριβή όσο αναμενόταν πριν από την αποστολή των τμημάτων.

Η χύτευση του σκυροδέματος UHPC σε κάθε τμήμα του πυλώνα έγινε στη συνέχεια από την ομάδα της Fehr Architectural. Για να υπάρξει αντίσταση στην υδροστατική πίεση που

προκύπτει από την χύτευση, τα στηρίγματα που εκτυπώθηκαν μαζί αφέθηκαν στη θέση τους μέχρι την τοποθέτηση του σκυροδέματος UHPC. Τα στηρίγματα στη συνέχεια αφαιρέθηκαν, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.7, και τα τμήματα στάλθηκαν στην τοποθεσία στο Aix-en-Provence. Η οριστική συναρμολόγηση των εξαρτημάτων πραγματοποιήθηκε επιτόπου και πριν από την εγκατάσταση της κολόνας στην θέση της με συρόμενα στηρίγματα στην κορυφή και στα πόδια του υποστυλώματος. Τέλος, εφαρμόστηκε ένα ομαλό φινίρισμα με επικάλυψη για να καλυφτούν σημάδια γραμμών προερχόμενα από την τρισδιάστατη εκτύπωση. Η διαφορά στην επιφανειακή τραχύτητα πριν και μετά το φινίρισμα φαίνεται στο Σχήμα 5-8.



Σχήμα 5-7: Διάταξη του ξυλότυπου με τα εξωτερικά στηρίγματα πριν την αφαίρεση τους



Σχήμα 5-8: Σύγκριση του υποστυλώματος πριν και μετά το επιφανειακό φινίρισμα

5.1.3 Σύγκριση με τις τυπικές μεθόδους δόμησης

Μετά την ολοκλήρωση του έργου του υποστυλώματος στην Aix-en-Provence, πραγματοποιήθηκε μελέτη για να συγκριθεί η συγκεκριμένη διαδικασία για την κατασκευή σύνθετων δοκών με τις τυπικές μεθόδους κατασκευής. Έτσι συγκρίθηκαν δύο τύποι υποστυλωμάτων. Ένα παραδοσιακά κατασκευασμένο υποστύλωμα με σύνθετο σχήμα και γεωμετρία συγκρίσιμη με τα υποστυλώματα του Συνεδριακού Κέντρου της Ντόχα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5-9, αλλά σε μικρότερη κλίμακα, και ένα πιο περίπλοκη υποστύλωμα, ως προς το σχήμα, που κατασκευάστηκε με την τεχνική lost formwork, όπως το υποστύλωμα στην Aix-en-Provence.



Σχήμα 5-9: Συνεδριακό Κέντρο της Ντόχα με υποστυλώματα σύνθετου σχήματος

Η διαδικασία κατασκευής και το κέρδος ως προς το υλικό, ο χρόνος κατασκευής και το εργατικό δυναμικό και για τους δύο τύπους πυλώνων παρουσιάζονται στους Πίνακες 5-1. 5-2, 5-3. Τα δεδομένα για την τρισδιάστατη εκτύπωση βασίζονται στην εμπειρία που αποκτήθηκε από το έργο στην Aix-en-Provence, ενώ τα δεδομένα για την παραδοσιακή τεχνική χύτευσης με χρήση χαλύβδινων καλουπιών βασίζονται σε ρεαλιστικές τιμές στο ίδιο κοινωνικο-οικονομικό περιβάλλον, δηλαδή στη Δυτική Ευρώπη. Αξίζει να σημειωθεί ότι το πραγματικό κόστος των χαλύβδινων καλουπιών δεν έχει ληφθεί υπόψη αν και είναι πιθανό να είναι η πιο δαπανηρή πτυχή σε με μια παραδοσιακή τεχνική χύτευσης. Ακόμα και χωρίς

να ληφθούν υπόψη τα καλούπια, η τρισδιάστατη εκτύπωση αναδύεται ως η οικονομικά αποδοτική εναλλακτική λύση για την κατασκευή υποστυλωμάτων.

Οι πίνακες που παρουσιάζονται υπογραμμίζουν το πιθανό κέρδος από διαφορετικές όψεις, μερικές από τις οποίες είναι πιο σημαντικές από άλλες. Ένα άλλο στοιχείο σύγκρισης μπορεί να δοθεί λαμβάνοντας υπόψη την συνολική τιμή παραγωγής του πυλώνα στην Aix-en-Provence σε σχέση με τη συνολική τιμή παραγωγής ενός παραδοσιακά κατασκευασμένου σύνθετου πυλώνα, έτσι επιτυγχάνεται συνολικό κέρδος 62,5%, με βάση τις πληροφορίες για την τιμή του πυλώνα στην Aix-en-Provence και τιμές που ισχύουν για μια παραδοσιακή κατασκευή. Ένας από τους κύριους λόγους για αυτήν τη διαφορά τιμής (πάνω από το κέρδος που προσδιορίστηκε στο χρόνο, τα υλικά και το εργατικό δυναμικό) είναι η μη χρήση εξειδικευμένου υλικού και εξειδικευμένης διαμόρφωσης καλουπιού, που επιτυγχάνεται με χρήση της μεθόδου lost formwork.

Ο πυλώνας της Aix-en-Provence παρέιχε επίσης πληροφορίες για πιθανές βελτιώσεις για της μεθόδου, συμπεριλαμβανομένης της απαλλαγής από τα υποστηρίγματα με την ανάπτυξη ενός προωθημένου συστήματος εκτύπωσης 3D, με την συγκέντρωση όλων των σταδίων κατασκευής (δηλαδή, εκτύπωση 3D, χύτευση, συναρμολόγηση) στο ίδιο μέρος για την μείωση των μεταφορών, καθώς και την θέσπιση κατασκευαστικών κανονισμών για τρισδιάστατα τυπωμένα δομικά μέρη από σκυρόδεμα.

Πίνακας 5-1: Σύγκριση ως προς την κατανάλωση υλικών

Xtree (3D Εκτύπωση)	Παραδοσιακή Μέθοδος
Κατανάλωση Υλικών	
Σκυρόδεμα 3D Εκτύπωσης: 650 kg	Σκυρόδεμα Χυτευσής UHPC: 2250 kg
Σκυρόδεμα Χυτευσής UHPC: 1600 kg	
Χαλύβδινες Ενισχύσεις (Ινες): 50 kg	Χαλύβδινες Ενισχύσεις (Ινες): 50 kg
(+) Σκυρόδεμα 3D Εκτύπωσης για τα Υποστηρίγματα	(+) Χάλυβας για τον Ξυλότυπο
Κατανάλωση Σκυροδέματος -0 / -0 %	
Κατανάλωση Χάλυβα (Ξυλότυπο) -100%	

Πίνακας 5-2: Σύγκριση ως προς τη κατανάλωση

Xtree (3D Εκτύπωση)	Παραδοσιακή Μέθοδος
Διαδικασία Κατασκευής	
Βελτιστοποίηση ψηφιακού σχεδιασμού και σχεδιασμός διεργασιών: 3 ημέρες	Βελτιστοποίηση ψηφιακού σχεδιασμού και σχεδιασμός διεργασιών: 3 ημέρες
Τρισδιάστατη εκτύπωση του εξωτερικού κελύφους σε σκυροδέμα: 2 ημέρες	Δημιουργία Μοντέλου: 3 ημέρες
Ρυθμίσεις: 1 ημέρα	Δημιουργία Ατσάλινου Καλουπιού: 3 ημέρες
Χύτευση Σκυροδέματος στο Κέλυφος: 1 ημέρα	Χύτευση Σκυροδέματος στο Καλούπι: 1 ημέρα
Ρυθμίσεις: 5 ημέρες	Ρυθμίσεις: 5 ημέρες
Μεταφορά στο Σημείο Εγκατάστασης: 0.5 ημέρας	Μεταφορά στο Σημείο Εγκατάστασης: 0.5 ημέρας
Εγκατάσταση και Σύνδεση: 1 ημέρα	Εγκατάσταση: 1 ημέρα
Επικάλυψη (Φινίρισμα): 2 ημέρες	Επικάλυψη (Φινίρισμα): 2 ημέρες
	(+) Απόρριψη και Ανακύκλωση του Μοντέλου και του Καλουπιού
Σύνολο 15.5 ημέρες	Σύνολο 18.5 ημέρες
Κατασκευαστικός Χρόνος -3 ημέρες / -16.2%	

Πίνακας 5-3: Σύγκριση ως προς το εργατικό δυναμικό

Xtree (3D Εκτύπωση)	Παραδοσιακή Μέθοδος
Εργατικό Δυναμικό	
Σχεδιαστής / Μηχανικός για το σχεδιασμό της διαδικασίας : 1 άτομο - 3 ημέρες	Σχεδιαστής / Μηχανικός για τον σχεδιασμό του ξυλότυπου: 1 άτομο - 3 ημέρες
Supervisor 3D Εκτύπωσης: 1 άτομο - 2 ημέρες	Χειριστής Κατασκευής Χαλύβδινου Καλουπιού: 2 άτομα - 5 ημέρες
Χειριστής 3D Εκτύπωσης: 2 άτομα - 2 ημέρες	Χειριστής Χύτευσης Σκυροδέματος: 1 άτομο - 1 ημέρα
Χειριστής Χύτευσης Σκυροδέματος :1 άτομο - 1 ημέρα	<i>Μεταφορά -----Εξωτερικά-----</i>
<i>Μεταφορά -----Εξωτερικά-----</i>	Χειριστής Συναρμολόγησης: 2 άτομα - 1 ημέρα
Χειριστής Συναρμολόγησης: 2 άτομα - 1 ημέρα	Χειριστής Επικάλυψης: 1 άτομο - 2 ημέρες
Χειριστής Επικάλυψης: 1 άτομο - 2 ημέρες	
Σύνολο 14 εργατό-ημέρες	Σύνολο 18 εργατό-ημέρες
Χρήση Εργατικού Δυναμικού: -4 εργατό-ημέρες / -22.2%	

5.2 Βροχοσυλλέκτης - Lille Γαλλία

Στην περιοχή Lille της Γαλλίας αναπτύχθηκε ο σχεδιασμός και η κατασκευή συλλεκτών βροχής ως μέρος μιας μακροχρόνιας συνεργασίας εταιρειών που δραστηριοποιούνται στο τομέα των δομικών υλικών (Point P TP, Sade κ.α.). Καθώς οι συλλέκτες βροχής πρέπει να εφαρμόζονται υπόγεια στο δίκτυο αποχέτευσης της πόλης, η ταχύτητα εκτέλεσης αποτελεί προτεραιότητα για τις πόλεις, προκειμένου να αποφευχθεί ο αποκλεισμός των δρόμων για μεγάλο χρονικό διάστημα λόγω της κατασκευής. Ωστόσο, η κατασκευή συλλεκτών βροχής με τον παραδοσιακό τρόπο απαιτεί αποκλεισμό της κυκλοφορίας, εκσκαφές, κατασκευή του κατάλληλου περιβλήματος, χύτευση, σκλήρυνση, σκυροδέτηση και τέλος, την αποκατάσταση του δρόμου. Αυτή η μακρά διαδικασία μπορεί να βελτιωθεί δραστικά χρησιμοποιώντας την τρισδιάστατη εκτύπωση, και την τεχνική του «χαμένου ξυλότυπου» (lost formwork).

Ο συλλέκτης βροχής που κατασκευάστηκε είχε διαστάσεις 2.15 x 2.2 x 2.6 m. Η εταιρεία XtreeE ανέπτυξε τον σχεδιασμό σε τρισδιάστατη εκτύπωση έτσι ώστε να καλύπτονται περιορισμοί της διαδικασίας αλλά και περιορισμοί σχετικοί με τον χώρο και την τοποθέτηση σωλήνων συνδεδεμένων με τον συλλέκτη. Ο συλλέκτης βροχής διαθέτει τρισδιάστατο τυπωμένο κέλυφος σκυροδέματος με ημιτονοειδές στοιχείο στο εσωτερικό. Το ημιτονοειδές τμήμα, που αναπτύχθηκε και σε παλαιότερα έργα ως τρόπος μείωσης των θερμικών γεφυρών, λειτουργεί επίσης και ως στοιχείο ενίσχυσης για τα δύο εξωτερικά μέρη του κελύφους. Ολόκληρη η κατασκευή εκτυπώθηκε εντός 9 ωρών (όπως φαίνεται στο Σχήμα 5-10), απευθείας σε πλάκα από οπλισμένο σκυρόδεμα σχεδιασμένο για να υποστηρίζει τις εργασίες ανύψωσης και τοποθέτησης του συλλέκτη επί τόπου (Σχήμα 5-11).



Σχήμα 5-10: Τρισδιάστατη εκτύπωση του συλλέκτη βροχής.



Σχήμα 5-11: Επιτόπου εργασίες ανύψωσης και τοποθέτησης.

Μια σύγκριση μεταξύ του συλλέκτη βροχής που κατασκευάστηκε και των παραδοσιακών συλλεκτών βροχής πραγματοποιήθηκε αναφορικά με βάση το κέρδος σε υλικό, το χρόνο και το εργατικό δυναμικό. Τα δεδομένα που παρουσιάζονται στους Πίνακες 5-4, 5-5, 5-6 (Gaudilliere, et al., 2019)

Πίνακας 5-4: Σύγκριση 3D εκτύπωσης και παραδοσιακής μεθόδου για τον βροχοσυλλέκτη ως προς την κατανάλωση υλικών

3D Εκτύπωση	Παραδοσιακή Μέθοδος
Κατανάλωση Υλικών	
Σκυρόδεμα 3D Εκτύπωσης: 2200 kg	Σκυρόδεμα Χυτευσής: 3500 kg
Σκυρόδεμα Χυτευσής UHPC: 1600 kg	Χαλύβδινες Ενισχύσεις: 200 kg
(+) Σκυρόδεμα για τις Ενισχύσεις και τις Πλάκες	(+) Ξύλο για τον Ξυλότυπο
Κατανάλωση Σκυροδέματος -1300 kg / 40.5%	

Πίνακας 5-5: Σύγκριση 3D εκτύπωσης και παραδοσιακής μεθόδου για τον βροχοσυλλέκτη ως προς τη διαδικασία κατασκευής

3D Εκτύπωση	Παραδοσιακή Μέθοδος
Διαδικασία Κατασκευής	
Εκσκαφή του Οδοστρώματος: 1 ημέρα	Εκσκαφή του Οδοστρώματος: 1 ημέρα
Έλεγχος του Δικτύου Αποστράγγισης: 0.5 ημέρες	Κατασκευή Πλαισίου: 3 ημέρες
Ψηφιακός Σχεδιασμός του Συλλέκτη (Βελτιστοποίηση): 2 ημέρες	Χύτευση Σκυροδέματος: 1 ημέρα
3D Εκτύπωση των Πλακών και του Εξωτερικού Κελύφους: 2 ημέρες	Ρυθμίσεις: 5 ημέρες
Ρυθμίσεις: 1 ημέρα	Αφαίρεση Πλαισίου: 1 ημέρα
Μεταφορά και Χρήση Γερανού: 0.5 ημέρες	Αποκατάσταση Οδοστρώματος: 2 ημέρες
Υλοποίηση (περιλαμβάνει και την σύνδεση με το δίκτυο αποστράγγισης): 1 ημέρα	(+) Απόρριψη και Ανακύκλωση του Πλαισίου
Αποκατάσταση Οδοστρώματος: 2 ημέρες	
Σύνολο 10 ημέρες	Σύνολο 13 ημέρες
Χρόνος Κατασκευής -3 ημέρες / -23%	
Επι-τόπου Χρόνος Κατασκευής -8.5 ημέρες / -65%	

Πίνακας 5-6: Σύγκριση 3D εκτύπωσης και παραδοσιακής μεθόδου για τον βροχοσυλλέκτη ως προς το εργατικό δυναμικό

3D Εκτύπωση	Παραδοσιακή Μέθοδος
Εργατικό Δυναμικό	
Εκσκαφή και Αποκατάσταση Οδοστρώματος: 3 άτομα - 3 ημέρες	Εκσκαφή και Αποκατάσταση Οδοστρώματος: 3 άτομα - 3 ημέρες
Χειριστής 3D σάρωσης: 1 άτομο - 0.5 ημέρας	Εξειδικευμένος Εργάτης για την Κατασκευή του Πλαισίου: 2 άτομα - 3 ημέρες
Σχεδιαστής / Μηχανικός για την Σχεδίαση της Διαδρομής της Μηχανής: 1 άτομο - 2 ημέρες	Χειριστής Χύτευσης Σκυροδέματος: 2 άτομα - 1 ημέρα
Supervisor 3D Εκτύπωσης: 1 άτομο - 2 ημέρες	
Χειριστής 3D Εκτύπωσης: 2 άτομα - 2 ημέρες	Απόρριψη και Ανακύκλωση του Πλαισίου --- Εξωτερική---
<i>Μεταφορά</i>	
Χειριστής Χύτευσης Σκυροδέματος: 1 άτομο - 1 ημέρα	
Σύνολο 16.5 εργατό-ημέρες	Σύνολο 17 εργατό-ημέρες
Χρήση Εργατικού Δυναμικού -0.5 εργατό-ημέρες / - 76%	

6 Συμπεράσματα

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 και ειδικά σύνθετων κατασκευών και να έχει χαμηλή παραγωγή αποβλήτων. Στη παρούσα εργασία έγινε ανασκόπηση των σύγχρονων εφαρμογών αυτής της τεχνολογίας και των υλικών που χρησιμοποιούνται με έμφαση στις κατασκευές από σκυρόδεμα. Παρά τα εκτεταμένα οφέλη, υπάρχουν και σημαντικές προκλήσεις σχετικά με την υιοθέτηση της τρισδιάστατης εκτύπωση στον κατασκευαστικό τομέα. Αναφέρθηκαν επίσης στην παρούσα εργασία τα χαρακτηριστικά και οι προϋποθέσεις για τα τσιμεντοειδή υλικά που σχετίζονται με τις μεθόδους τρισδιάστατης εκτύπωσης. Με βάση τις σημαντικότερες παρατηρήσεις από αυτήν την ανασκόπηση προέκυψαν τα ακόλουθα συμπεράσματα.

- Τα συστήματα ελεγχόμενης εναπόθεσης υλικού εφαρμόζονται με επιτυχία στο κατασκευαστικό τομέα λόγω του σχετικά χαμηλού κόστους, της απλότητας και της επεξεργασίας υψηλής ταχύτητας. Απλοποιημένες επιτόπιες μέθοδοι εκτύπωσης σκυροδέματος, όπως η μέθοδος Countor Crafting, αναπτύχθηκαν χρησιμοποιώντας την τεχνολογία αυτή. Μία επίσης εφαρμοζόμενη μέθοδος είναι η D-Shape που βασίζεται στην τεχνική της κλίνης σωματιδίων και απόθεσης σε σκόνη. Η επιλογή των μεθόδων εξαρτάται από τα υλικά και τις κατασκευές που θα εκτυπωθούν.
- Η σύνθεση υλικών για εκτύπωση σκυροδέματος είναι ένα σημαντικό χαρακτηριστικό στην τεχνολογία της τρισδιάστατης εκτύπωσης, επειδή η ποιότητα των τυπωμένων στοιχείων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις ιδιότητες των μιγμάτων εκτύπωσης. Οι πρώιμες ρεολογικές ιδιότητες των μιγμάτων σκυροδέματος εξαρτώνται από τις αναλογίες, τα μεγέθη και τις ιδιότητες των συστατικών. Τα χαρακτηριστικά εκτύπωσης του μίγματος πρέπει να ελέγχονται έναντι του ανοιχτού χρόνου, του χρόνου καθυστέρησης και του χρόνου ρύθμισης ώστε να παρέχουν επαρκή ικανότητα ροής, εκτυπώσιμη ικανότητα και δυνατότητα κατασκευής.
- Οι τεχνικές ενίσχυσης είναι ακόμη υπό εξέταση για την τρισδιάστατη εκτύπωση σκυροδέματος. Το σύστημα ενίσχυσης ινών είναι ευκολότερο από άλλους τύπους, διότι μπορεί να εφαρμοστεί σε συνδυασμό με την εκτύπωση σκυροδέματος. Από την άλλη μεριά το σύστημα ενίσχυσης με χαλύβδινες ράβδους και με ανάπτυξη έντασης μετά την εκτύπωση παρουσιάζει βελτιωμένη απόδοση σε όρους αντοχής.

- Η βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων εκτύπωσης μιγμάτων σκυροδέματος πρέπει να αναλυθεί με βάση τη σύνθεση, την τεχνολογία εκτύπωσης και τις συνθήκες φόρτωσης. Στις περισσότερες περιπτώσεις, οι μηχανικές ιδιότητες των εκτυπώσιμων μιγμάτων κρίνονται επαρκείς ως συνθέσεις και είναι αξιόπιστες και συγκρίσιμες με αυτές του χυτού κλασικής διαμόρφωσης σκυροδέματος .
- Οι κύριες προκλήσεις που εμπλέκονται στην τρισδιάστατη εκτύπωση στον τομέα των κατασκευών και ειδικότερα στην εκτύπωση σκυροδέματος αφορούν τις κρίσιμες εκθέσεις φόρτισης και την αντοχή έναντι αυτών. Η έλλειψη προτύπων χαρακτηρίζει τη παρούσα κατάσταση των συστημάτων τρισδιάστατης εκτύπωσης ενώ σε πολλές περιπτώσεις το κόστος κατασκευής με αυτά τα συστήματα μπορεί να είναι αυξημένο. Η ανάπτυξη συγκεκριμένων προτύπων μπορεί να αυξήσει την παγκόσμια υιοθέτηση αυτής της τεχνολογίας.
- Η τρισδιάστατη εκτύπωση και ειδικότερα στον τομέα των κατασκευών από σκυρόδεμα μπορεί να προσφέρει απίστευτες προοπτικές και δυνατότητες με παράλληλη όμως ανάπτυξη έρευνας που θα δείχνει την κατεύθυνση της βελτιστοποίησης των μεθόδων και την μείωση των περιορισμών κατά την εφαρμογή.

Βιβλιογραφία

3D printing of concrete structures using the selective binding method –effect of concrete technology on contour precision and compressive strength. **Weger, D., Lowke, D. και Gehlen, C. 2016.** Tokyo : s.n., 2016. σ. 11th fib International PhD Symposium in Civil Engineering.

3dprintcanalhouse. 3D PRINT CANAL HOUSE. [Ηλεκτρονικό] <http://3dprintcanalhouse.com/>.

3dwasp. [Ηλεκτρονικό] <https://www.3dwasp.com/en/>.

3dwasp. WASP. [Ηλεκτρονικό] <https://www.3dwasp.com/en/>.

ai-build. AiBUILD. [Ηλεκτρονικό] <https://ai-build.com/technology.html>.

Andreasen, C.S., και συν. 2014. On the realization of the bulk modulus bounds for two-phase viscoelastic composites. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 2014 February 2014, σσ. 228-241.

Apis-cor. [Ηλεκτρονικό] <http://apis-cor.com/en>.

Asprone, D., και συν. 2018. 3D printing of reinforced concrete elements: technology and design approach. *Construction and Building Materials (165)*. 2018, σσ. 218-231.

Asprone, D., και συν. 2018. Rethinking reinforcement for digital fabrication with concrete. *Cement and Concrete Research (112)*. 2018, σσ. 111-121.

Benchmarking of different SLS/SLM processes as rapid manufacturing techniques. **Kruth, J.-P., και συν. 2005.** Gent, Belgium : s.n., 2005. Int. Conf. Polymers & Moulds Innovations. σ. 7.

Betabram. [Ηλεκτρονικό] <http://betabram.com/>.

Biswas, K., και συν. 2017. Additive manufacturing integrated energy-enabling innovative solutions for buildings of the future. *Journal of Solar Energy Engineering*. January 2017, σ. 015001 (10 pages).

blbindustries. BBL. [Ηλεκτρονικό] <http://blbindustries.se/>.

Bogue, R. 2013. 3D printing: the dawn of a new era in manufacturing? *Assem Autom.* 2013, σσ. 307-311.

Bolderen, G.S. van. 2017. *Exploration of Stability of 3D-Printed Steel Members*. Delft : TU Delft Civil Engineering and Geosciences, 2017.

Bond strength in 3D printed geopolymers mortar. **Panda, B., Noor Mohamed, NA και Tay YWD. 2019.** s.l. : Springer, 2019. Cham. σσ. 200-206.

Bos, FP, Ahmed, ZY και Wolfs, RJM. 2018. 3D printing concrete with reinforcement. [συγγρ. βιβλίου] M. Lukovic και DA Hordijk. *High tech concrete: where technology and engineering meet, Proceedings of the 2017 Fib Symposium*. Maastricht : Springer, 2018, σσ. 2484-2493.

Bournias Varotsis, Alkaios. 3D hubs. *Introduction to sls 3d-printing*. [Ηλεκτρονικό]
<https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-sls-3d-printing/>.

—. 3dhubs.com. *Introduction to material jetting 3D printing*. [Ηλεκτρονικό]
<https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-material-jetting-3d-printing/>.

branch technology. Branch Technology. [Ηλεκτρονικό]
<https://www.branch.technology/projects>.

Buchanan, C. και Gardner, L. 2019. Metal 3d printing in construction: a review of methods, research, applications, opportunities and challenge. *Engineering Structures (180)*. February 2019, σσ. 332-348.

Buchanan, C., και συν. 2017. Structural performance of additive manufactured metallic material and cross-sections. *Journal of Constructional Steel Research*. September 2017, σσ. 35-48.

Buswell, R.A., Leal de Silva, W.R. και S.Z. Jones, J.D. 2018. 3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research. *Cement and Concrete Research*. October 2018, σσ. 37-49.

Buswell, R.A., και συν. 2007. Freeform construction: mega-scale rapid manufacturing for construction. *Autom. Constr.* 16. 2007, σσ. 224-231.

Cesaretti, G., και συν. 2014. Building components for an outpost on the Lunar soil by means of a novel 3D printing technology. *Acta Astronautica*. 2014 January 2014, σσ. 430-450.

Cybe.eu. [Ηλεκτρονικό] <https://cybe.eu/>.

De Schutter, G., Lesage, K. και Mechtcherine, V. 2018. Vision of 3D printing with concrete – technical, economic and environmental potentials. *Cem Concr Res*. 2018, σσ. 112: 25-36.

Delgado Camacho, D., και συν. 2018. Applications of additive manufacturing in the construction industry –a forward-looking review. *Automation in Construction*. May 2018, σσ. 110-119.

Dfabhouse. [Ηλεκτρονικό] <http://dfabhouse.ch/smart-slab/>.

Diegel, O. 2014. Additive Manufacturing: An Overview A2. [συγγρ. βιβλίου] Saleem Hashmi. *Comprehensive Materials Processing*. Oxford : Elsevier, 2014, σσ. 3-18.

DShape. [Ηλεκτρονικό] <https://d-shape.com/>.

Duballet, R., Baverel, O. και Dirrenberger, J. 2017. Classification of building systems for concrete 3D printing. *Automation in Construction (83)*. November 2017, σσ. 247-258.

—. 2015. Design of Space Truss Based Insulating Walls for Robotic Fabrication in Concrete. *Humanizing Digital Reality* . 2015, σσ. 453-461.

Duty, C., και συν. 2017. Structure and mechanical behavior of big area additive manufacturing (BAAM) materials. *Rapid Prototyping Journal (23)*. January 2017, σσ. 181-189.

EdilTecnico. 2016. Tecnologie digitali di stampa 3D: l'applicazione in edilizia. [Ηλεκτρονικό] 2016. <https://www.ediltecnico.it/37001/tecnologie-digitali-stampa-3d-lapplicazione-in-edilizia/>.

Exone. [Ηλεκτρονικό] <https://www.exone.com/>.

2016. EY global 3DP study. [Ηλεκτρονικό] 2016. <https://www.ey.com/>.

Eyers, Daniel και Potter, Andrew Thomas. 2017. Industrial Additive Manufacturing: a manufacturing systems perspective. *Computers in Industry* 92-93. 2017, σσ. 208-215.

Ford, S. και Despeisse, M. 2016. Additive manufacturing and sustainability: an exploratory study of the advantages and challenges. *J Clean Prod.* 137 2016, σσ. 1573-1587.

Frazier, W.E. 2014. Metal additive manufacturing. *Journal of Materials Engineering and Performance* (23). April 2014, σσ. 1917-1928.

Gaudilliere, N., και συν. 2019. Building Applications Using Lost Formworks Obtained Through Large-Scale Additive Manufacturing of Ultra - High- Performance Concrete. [συγγρ. βιβλίου] Jay G. Sanjayan, Ali Nazari και Behzad Nematollahi. *Concrete Printing Technology.* Oxford : Elsevier, 2019, σσ. 55-57.

Gerbert, P., και συν. 2016. The transformative power of building information modeling. *Boston Consulting Group.* [Ηλεκτρονικό] 8 March 2016. <https://www.bcgperspectives.com/content/articles/engineered-products-project-business-digital-engineering-construction/>.

Ghaffar, S., Corker, J. και Fan, M. 2018. Additive manufacturing technology and its implementation in construction as an eco-innovative solution. *Automation in Construction* (93). September 2018, σσ. 1-11.

Gibson, I., Rosen, W. D. και Stucker, B. 2010. *Direct Write Technologies, in Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing.* Boston MA : Springer US, 2010. σσ. 275-298.

—. **2010.** Photopolymerization Processes, in *Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing.* Boston MA : Springer US, 2010, σσ. 78-119.

—. **2010.** *Introduction and Basic Principles in Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing.* Boston MA : Springer US, 2010.

Gosselin, C., και συν. 2016. Large scale 3D printing of ultra-high performance concrete –a new processing route for architects and builders. *Materials & Design.* June 2016, σσ. 102-109.

Hager, I., Golonka, A. και Putanowicz, R. 2016 . 3D printing of buildings and building components as the future of sustainable construction. *Procedia Eng.* 2016 , σσ. 151: 292-299.

Han, J., Wang, K. και Shi, J. 2015 . Mechanism of triethanolamine on Portland cement hydration process and microstructure characteristics. *Constr. Build Mater (93)*. 2015 , σσ. 457-462.

Herzog, D., και συν. 2016. Additive manufacturing of metals. *Acta Materialia (117)*. September 2016, σσ. 371-392.

iaac. IAAC. [Ηλεκτρονικό] <https://iaac.net/project/on-site-robotics/>.

Incorporating reinforcement in 3D-printing with concrete. **Nerella, V.N. και Mechtcherine, V. 2018**. Cambridge : MIT, 2018. The annual Symposium of the IAASS – International Association for Shell and Spatial Structures: Creativity in Structural Design.

Keating, S., και συν. 2017. Toward site-specific and self-sufficient robotic fabrication on architectural scales. *Science Robotics*. April 2017.

Khoshnevis, B., και συν. 2006. Mega-scale fabrication by Contour Crafting. *Int. J. Industrial and Systems Engineering (1)*. 2006, σσ. 301-320.

Labonnote, N., και συν. 2016. Additive construction: state-of-the-art, challenges and opportunities. *Automation in Construction*. December 2016, σσ. 347-366.

Large scale 3D printing of complex geometric shapes in construction. **Teize, J., και συν. 2016**. s.l. : ISARC, 2016. 33rd International Symposium on Automation and Robotics in Construction.

Le, T.T., και συν. 2012. Hardened properties of high-performance printing concrete. *Cement and Concrete Research*. March 2012, σσ. 558-566.

Lewis, J. A. 2006 . Direct Ink Writing of 3D Functional Materials. *Advanced Functional Materials* . 16 2006 , σσ. 2193-2204.

Lim, JH, Panda, B. και Pham, Q-C. 2018. Improving flexural characteristics of 3D printed geopolymer composites with in-process steel cable reinforcement. *Constr. Build. Mater. (178)*. 2018, σσ. 32-41.

Lim, S., και συν. 2012. Developments in construction-scale additive manufacturing processes. *Automation in Construction*. January 2012, σσ. 262-268.

—. **2012**. Developments in construction-scale additive manufacturing processes. *Automation in Construction*. January 2012, σσ. 262-268.

Liu, Z., Li, M. και Weng, Y. 2019. Mixture design approach to optimize the rheological properties of the material used in 3D cementitious material printing. *Constr Build Mater (198)*. 2019, σσ. 242-255.

Lowke, D., και συν. 2015. *3D-Drucken von betonbauteilen durch selektives binden mit calciumsilikatbasierten zementen erste ergebnisse zu betontechnologischen und verfahrenstechnischen einflüssen*. 2015.

Lowke, D., και συν. 2018. Particle-bed 3D printing in concrete construction –Possibilities and challenges. *Cement and Concrete Research (42)*. March 2018, σσ. 558-566.

Malaeb, Z., Al Sakka, F. και Hamzech, F. 2019. 3D concrete printing: machine design, mix proportioning, and mix comparison between difference machine setups. [συγγρ. βιβλίου] JG Sanjayan, A. Nazari και B. Nematollahi. *3D concrete printing technology 1st ed. Vol. 6*. Amsterdam : Elsevier, 2019, σσ. 115-136.

Mercelis, P., Froyen, L. και Rombouts, M. 2005. Binding Mechanisms in Selective Laser Sintering and Selective Laser Melting. *Rapid Prototyping Journal 11 (1)*. February 2005, σσ. 26-36.

Mrazovic, N., και συν. 2018. Guiding building professionals in selecting additive manufacturing technologies to produce building components. *Materials Today Communications*. June 2018, σσ. 199-202.

MX3D. MX3d. [Ηλεκτρονικό] <https://mx3d.com/>.

Nematollahi, B., Vijay, P. και Sanjayan, J. 2018. Effect of polypropylene fibre addition on properties of geopolymers made by 3D printing for digital construction. *Materials (11)*. 2018, σ. 2352.

Nerella, V., Mechtcherine, V. και Hempel, S. 2019. Effects of layer-interface properties on mechanical performance of concrete elements produced by extrusion-based 3Dprinting. *Construction and Building Materials (205)*. April 2019, σσ. 586-601.

Ngo, TD, Kashani, A. και Imbalzano, G. 2018. Additive manufacturing (3D printing): a review of materials, methods, applications and challenges. *Compos Part B Eng.* 143 2018, σσ. 172-96.

On the development of additive construction technologies for application to development of Lunar/ Martian surface structures using in-situ materials. **Werkheiser, M., και συν. 2015.** Pasadena, California : ARC, 2015. σ. AIAA SPACE 2015 Conference and Exposition.

Optimizing structural building elements in metal by using additive manufacturing. **Galjaard, S., και συν. 2015.** Amsterdam : IAAS, 2015. Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures .

Pacewicz, K., Sobotka, A. και Golek, L. 2018. Characteristic of materials for the 3D printed building constructions by additive printing. *MATEC Web Conf.* 2018, σ. 222:01013.

Panda, B., Lim, J.H. και Tan, M.J. 2019. Mechanical properties and deformation behaviour of early age concrete in the context of digital construction. *Composites Part B: Engineering (165)*. May 2019, σσ. 563-571.

Paul SC, Tay, YWD και Panda, B. 2018. Fresh and hardened properties of 3D printable cementitious materials for building and construction. *Arch Civil Mech Eng.* 2018, σσ. 18: 311-319.

- Paul SC, van Zijl, G. και Tan, MJ. 2018.** A review of 3D concrete printing systems and materials properties: current status and future research prospects. *Rapid Prototyp J.* 24 2018, σσ. 784-798.
- Perrot, A., Rangeard, D. και Pierre, A. 2016.** Structural built-up of cement-based materials used for 3D-printing extrusion techniques. *Materials and Structures (49)*. February 2016, σσ. 1231-1220.
- Prakash, S., Nancharaih, T. και Subba Rao, V. V. 2018.** Additive Manufacturing Techniques in Manufacturing -An Overview. *materialstoday:proceedings*. 2018, σσ. 3873-3882.
- rael-sanfratello. [Ηλεκτρονικό] <http://www.rael-sanfratello.com/>.
- Salet, T.A.M., και συν. 2017.** 3D concrete printing –a structural engineering perspective. *High Tech Concrete: where technology and engineering meet*. 2017, σσ. 193-208.
- Sanjayan, Jay G. και Nematollahi, Behzad. 2019.** 3D Concrete Printing for Construction Applications. [συγγρ. βιβλίου] Jay G. Sanjayan, Ali Nazari και Behzad Nematollahi. *3D concrete printing technology*. s.l. : Elsevier Inc, 2019, σσ. 1-10.
- Schach, R., και συν. 2017.** CONPrint3D: 3D-concrete-printing as an alternative for masonry. *Bauingenieur 92 (9)*. September 2017, σσ. 353-363.
- Scott, C. 2017.** Chinese construction company 3D prints an entire two-story house on-site in 45 days. [Ηλεκτρονικό] 2017. [Παραπομπή: 10 12 2020.]
,<https://3dprint.com/138664/huashang-tengda-3d-printhouse/>.
- Shakor, P., και συν. 2017.** Modified 3D printed powder to cement-based material and mechanical properties of cement scaffold used in 3D printing. *Construction and Building Materials (138)*. 2017, σσ. 389-409.
- Skanska.** Skanska. [Ηλεκτρονικό] <https://www.skanska.co.uk/aboutskanska/innovation-and-digital-engineering/innovation/3d-printing>, ..
- Soltan, D., Victor, C. και Li. 2018.** A self-reinforced cementitious composite for building-scale 3D printing. *Cement and Concrete Composites (90)*. July 2018, σσ. 1-13.
- Tang, Y. και Zhao, Y.F. 2016.** A survey of the design methods for additive manufacturing to improve functional performance. *Rapid Prototyping Journal 22 (3)*. April 2016, σσ. 569-590.
- The Smart Takes from the Strong.* **Meibodi, M.A, και συν. 2017.** Zurich : s.n., 2017.
Conference: Fabricate 2017.
- thermwood.** THERMWOOD. [Ηλεκτρονικό] <http://www.thermwood.com/>.
- Thompson, M., και συν. 2016.** Design for additive manufacturing: trends, opportunities, considerations, and constraints. *CIPR Annals (65)*. 2016, σσ. 737-760.

Ting, GHA, Tay, YWD και Qian, Y. 2019. Utilization of recycled glass for 3D concrete printing: rheological and mechanical properties. *J Mater Cycles Waste Manag.* (21). 2019, σσ. 994-1003.

totalkustom. [Ηλεκτρονικό] <http://www.totalkustom.com/>.

Voxeljet. [Ηλεκτρονικό] <https://www.voxeljet.com/>.

Wang, L. 2017. Chinese company assembles 10 3D-printed concrete houses in a day for less than \$5000 each. [Ηλεκτρονικό] 2017. [Παραπομπή: 10 1 2021.]
,<http://inhabitat.com/chinese-company-assembles-ten-3d-printed-concrete-houses-in-one-day-for-less-than-5000-each/>.

Wangler , T., Lloret, E. και Reiter, L. 2016. Digital concrete: opportunities and challenges. *RILEM Tech Lett.* [Ηλεκτρονικό] 2016. [Παραπομπή: 25 1 2021.]
<https://letters.rilem.net/index.php/rilem>.

WASP. 2017. Concrete beam created with 3D printing. [Ηλεκτρονικό] 2017. [Παραπομπή: 29 12 2020.] <http://www.wasproject.it/w/en/concrete-beam-created-with-3d-printing/>.

Weng, Y, Li, M. και Tan, Mj. 2018. Design 3D printing cementitious materials via Fuller Thompson theory and Marson-Percy model. *Constr Build Mater.* 2018, σσ. 163: 600-610.

Weng, Y., Li, M. και Liu, Z. 2019. Printability and fire performance of a developed 3D printable fibre reinforced cementitious composites under elevated temperatures . *Virtual Phys Prototyp* (14). 2019, σσ. 284-292.

Winsun3d. [Ηλεκτρονικό] <http://www.winsun3d.com/en>.

Wong, K. V. και Hernandez, A. 2012. A Review of Additive Manufacturing. *ISRN Mechanical Engineering.* 2012, σ. 10.

Wu, P., Wang, J. και Wang, X. 2016. A critical review of the use of 3-D printing in the construction industry. *Automation in Construction* (68). August 2016, σσ. 21-31.

Xia, M. και Sanjayan, J. 2016. Method of formulating geopolymer for 3D printing for construction applications. *Mater Des.* (110). 2016, σσ. 382-390.

Xia, M. και Sanjayan, J.G. 2018. Methods of enhancing strength of geopolymer produced from powder-based 3D printing process. *Materials Letters* (227). September 2018, σσ. 281-283.

Xtreee. XtreeE the large-scale 3D. [Ηλεκτρονικό] www.xtreee.eu.

Yeon, K.S., Kim, KK και Yeon, J. 2019. Compressive and flexural strengths of EVA-modified mortars for 3D additive construction. *Materials.* 2019, σσ. 12-26.

Yu, J. και Leung, C. 2018. Impact of 3D printing direction on mechanical performance of strain-hardening cementitious composite. [συγγρ. βιβλίου] T. Wangler και R. Flatt. *First RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication.* s.l. : Springer, 2018.

Zhang B., και συν. 2018. Additive manufacturing of functionally graded material objects:. *Journal of Computing and Information Science in Engineering (18)*. December 2018, σ. 041002 (16 pages).

Zhang, J. και Khoshnevis, B. 2013. Optimal machine operation planning for construction by contour crafting. *Autom. Constr.* 29. 2013, σσ. 50-67.

Τράντζας, Γ. 2017. Pcsteps. *Τι είναι η τρισδιάστατη εκτύπωση και ποιες είναι οι εφαρμογές της.* [Ηλεκτρονικό] 29 December 2017. <http://www.pcsteps.gr/100046-τρικδιάστατη-εκτύπωση-3d-printing/>.