



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Η ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΕΚΤΥΠΩΣΗ ΣΤΗ ΔΟΜΗΣΗ ΚΑΙ ΤΗΝ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ



Διπλωματική Εργασία

Μάνεσης Κωνσταντίνος

Αθήνα, Νοέμβριος 2022

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ : ΤΡΙΑΝΤΑΦΥΛΛΟΣ-ΦΙΛΗΣ ΚΟΚΚΙΝΟΣ



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Όνοματεπώνυμο φοιτητή: **Μάνεσης Κωνσταντίνος**

Τίτλος Διπλωματικής Εργασίας:

**Η ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΕΚΤΥΠΩΣΗ
ΣΤΗ ΔΟΜΗΣΗ ΚΑΙ ΤΗΝ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ**

Η διπλωματική εργασία εξετάστηκε επιτυχώς από την κάτωθι
Τριμελή Εξεταστική Επιτροπή:

Τριαντάφυλλος - Φίλης Κόκκινος
Αναπληρωτής Καθηγητής
Επιβλέπων

Νικόλαος Πνευματικός
Καθηγητής
Μέλος

Σταυρούλα Δενεζάκη
Λέκτορας
Μέλος

Νοέμβριος 2022, ΑΙΓΑΛΕΩ

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος **Μάνεσης Κωνσταντίνος** του Αντωνίου, με αριθμό μητρώου 6349, φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών, δηλώνει υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας της παρούσας διπλωματικής εργασίας με τίτλο *Η ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΕΚΤΥΠΩΣΗ ΣΤΗ ΔΟΜΗΣΗ ΚΑΙ ΤΗΝ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ* και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών, που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του διπλώματός μου».

Ο Δηλών



Μάνεσης Κωνσταντίνος



Περίληψη

Τίτλος Διπλωματικής Εργασίας:

Η Τρισδιάστατη Εκτύπωση στη Δόμηση και την Αρχιτεκτονική

Συγγραφέας: **Μάνεσης Κωνσταντίνος**

(Νοέμβριος 2022)

Η τρισδιάστατη (3D) εκτύπωση έχει ελκύσει την προσοχή από επαγγελματίες σε διάφορους τομείς για την ικανότητά της να μετατρέπει αποτελεσματικά εικονικές έννοιες σε πρωτότυπα μέρη προσθέτοντας υλικό σε στρώματα. Τα πλεονεκτήματά της μεθόδου περιλαμβάνουν ταχύτητα, άμεση μετατροπή δεδομένων, χειρισμό σύνθετης γεωμετρίας, υψηλή ακρίβεια, περιβαλλοντικά οφέλη και οικονομική αποδοτικότητα. Η παρούσα εργασία παρέχει μια τεχνολογική ανασκόπηση των πρακτικών αιχμής στην τρισδιάστατη εκτύπωση που εφαρμόζονται στην οικοδομική βιομηχανία. Εξετάζονται δύο τύποι τεχνολογιών τρισδιάστατης εκτύπωσης στην αρχιτεκτονική μαζί με μελέτες περιπτώσεων 3D εκτυπωμένων κτιρίων. Τέλος, συζητούνται τα δυνατά και τα αδύνατα σημεία κάθε τεχνολογίας σε σχέση με την κατασκευή κτιρίων, μαζί με τις προκλήσεις και τις μελλοντικές προοπτικές για τις τεχνολογίες τρισδιάστατης εκτύπωσης.



UNIVERSITY OF WEST ATTICA
SCHOOL OF ENGINEERING
Department of Civil Engineering

Abstract

Diploma Thesis Title:

Three-Dimensional Printing in Structures and Architecture

Author: **Manessis Konstantinos**

(November 2022)

Three-dimensional (3D) printing has attracted attention from professionals in various fields for its ability to efficiently transform virtual concepts into prototype parts by adding material in layers. Its advantages include speed, direct data conversion, handling of complex geometry, high accuracy, environmental benefits and cost effectiveness. This thesis provides a technological review of the best practices in 3D printing applied to the construction industry. Two classifications of 3D printing processes in architecture are reviewed along with case studies of 3D printed buildings. Finally, the strengths and weaknesses of each technology, are discussed, in relation to building construction, along with challenges and future prospects for 3D printing technologies.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	1
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	3
Εισαγωγή.....	3
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	5
Ανασκόπηση Μεθοδολογίας Τρισδιάστατης Εκτύπωσης.....	5
2.1 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ	6
2.2 ΥΛΙΚΑ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΝΤΑΙ ΣΤΗΝ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΕΚΤΥΠΩΣΗ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ.....	9
2.3 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΗΣ ΘΕΣΗΣ.....	10
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	11
Τεχνολογίες Τρισδιάστατης Εκτύπωσης κτιρίων Βασισμένες Σε Πολυμερή	11
3.1 ΒΑΑΜ.....	11
3.1.1 ΒΑΑΜ: Διαδικασία	12
3.1.2 ΒΑΑΜ: Απόδοση	13
3.2 ΔΙΧΤΥΩΤΟ ΚΑΛΟΥΠΙ (MESH MOULD)	14
3.2.1 Mesh Mould: Διαδικασία.....	14
3.2.2 Mesh Mould: Απόδοση.....	15
3.3 ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΕΚΤΥΠΩΣΗ ΚΑΜΠΥΛΗΣ (3D CURVE)	16
3.3.1 3D Curve: Διαδικασία	18
3.3.2 3D Curve: Απόδοση.....	18

3.4 ΜΕΘΟΔΟΣ ΙΚΡΙΩΜΑΤΟΣ (SCAFFOLD ADDITIVE MANUFACTURE).....	19
3.4.1 Μέθοδος Ικρίωματος: Διαδικασία	19
3.4.2 Μέθοδος Ικρίωματος: Απόδοση	20
3.5 ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΠΟΛΥΜΕΡΙΚΗΣ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ	20
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4.....	21
Τεχνολογίες Τρισδιάστατης Εκτύπωσης Βασισμένες Σε Κοκκώδη Υλικά	21
4.1 ΕΚΤΥΠΩΣΗ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ.....	21
4.1.1 Ιδιότητες σκυροδέματος στην τρισδιάστατη εκτύπωση	21
4.1.2 Διαδικασία εκτύπωσης σκυροδέματος	23
4.2 CONTOUR CRAFTING	23
4.3 ΕΚΤΥΠΩΣΗ D-SHAPE	25
4.4 ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ ΒΑΣΙΣΜΕΝΩΝ ΣΕ ΚΟΚΚΩΔΗ ΥΛΙΚΑ	27
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5.....	30
Εφαρμογές Τρισδιάστατης Εκτύπωσης Στην Αρχιτεκτονική	30
5.1 ADDITIVE MANUFACTURING INTEGRATED ENERGY (AMIE) ΑΠΟ ΤΗΝ ΒΑΑΜ.....	30
5.2 APIS COR/PIK 3D-PRINTED HOUSE: CONTOUR CRAFTING	33
5.3 WINSUN/GENSLER 3D-PRINTED BUILDING OFFICE: CONTOUR CRAFTING.....	34
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6.....	36
Πλεονεκτήματα Και Αδυναμίες Μεθόδων Τρισδιάστατης Εκτύπωσης Κτιρίων	36
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7.....	39
Συμπεράσματα Και Παρατηρήσεις	39
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	41

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η τρισδιάστατη εκτύπωση αποτελεί μία επαναστατική εφαρμογή κατασκευής πρόσθετων. Συγκεκριμένα είναι η κατασκευή ενός τρισδιάστατου αντικειμένου από μοντέλο CAD ή ψηφιακό τρισδιάστατο μοντέλο. Μπορεί να πραγματοποιηθεί με μια ποικιλία διεργασιών στις οποίες το υλικό εναποτίθεται, ενώνεται ή στερεοποιείται υπό έλεγχο υπολογιστή, με υλικό (όπως πλαστικά, υγρά ή κόκκοι σκόνης που συντήκονται), που προστίθεται με τη μέθοδο εναπόθεσης σε επάλληλες στρώσεις.

Βασικά πλεονεκτήματα της τρισδιάστατης εκτύπωσης είναι η ταχύτητα αλλά και υψηλή ακρίβεια παραγωγής πολύ σύνθετων σχημάτων ή γεωμετριών που διαφορετικά θα ήταν αδύνατο να κατασκευαστούν με το χέρι, συμπεριλαμβανομένων κοίλων μερών ή εξαρτημάτων με εσωτερικές δομές δοκών για μείωση του βάρους.

Η γενική ιδέα και η διαδικασία που πρέπει να χρησιμοποιείται στην τρισδιάστατη εκτύπωση περιγράφηκε για πρώτη φορά από τον Murray Leinster στο διήγημά του «*Things Pass By*» το 1945 ως ένας αποτελεσματικός και ευέλικτος βραχίονας που τροφοδοτεί πλαστικό με βάση σχέδια που σαρώνει μέσω φωτοκύτταρου.

Περιγράφηκε επίσης από τον Raymond F. Jones στην ιστορία του, «*Tools of the Trade*», το οποίο δημοσιεύτηκε στο τεύχος Νοεμβρίου 1950 του περιοδικού *Astounding Science Fiction*. Το περιέγραψε ως «μοριακό σπρέι».

Ωστόσο η μέθοδος δεν κάνει την εμφάνιση της πριν την δεκαετία του '80 όπου ένας Αμερικάνος επιπλοποιός ονόματι Chuck Hull κατασκευάζει τον πρώτο 3D printer. Εκείνη την εποχή, οι τεχνικές τρισδιάστατης εκτύπωσης θεωρούνταν κατάλληλες μόνο για την παραγωγή λειτουργικών ή αισθητικών πρωτοτύπων και ένας καταλληλότερος όρος της μεθόδου για αυτήν την εποχή ήταν η “ταχεία δημιουργία πρωτοτύπων”. Από το 2019 η ακρίβεια, η επαναληψιμότητα και η γκάμα υλικών της τρισδιάστατης εκτύπωσης έχουν αυξηθεί σε σημείο που ορισμένες διαδικασίες τρισδιάστατης εκτύπωσης θεωρούνται βιώσιμες ως τεχνολογία βιομηχανικής παραγωγής, όπου ο όρος κατασκευή προσθέτων μπορεί να χρησιμοποιηθεί συνώνυμος με την τρισδιάστατη εκτύπωση. Το Fused Deposition Modeling (FDM), το οποίο χρησιμοποιεί ένα συνεχές νήμα από θερμοπλαστικό υλικό, είναι η πιο κοινή διαδικασία τρισδιάστατης εκτύπωσης που χρησιμοποιείται από το 2020 .

Η οικοδομική βιομηχανία έχει σημειώσει ταχεία εξέλιξη τις τελευταίες δεκαετίες, έχοντας γεννήσει την ανάγκη για νέες τεχνολογίες, υλικά αιχμής και καινοτόμες διαδικασίες. Η αρχιτεκτονική έχει εξελιχθεί εξίσου σε βαθμό που έχει ενσωματώσει τον όρο “Ψηφιακή Υλικότητα” – «*Τα δεδομένα, το υλικό, ο προγραμματισμός και η κατασκευή είναι συνυφασμένα έτσι ώστε η αλγοριθμική λογική του υπολογιστή να μπορεί να συνδεθεί άμεσα με την πραγματικότητα της δομημένης αρχιτεκτονικής*» (Gramazio et al. 2014). Η τρισδιάστατη (3D) εκτύπωση είναι μια από τις νέες τεχνολογίες που στοχεύουν στην ψηφιακή υλικότητα. Διαμορφώνει ένα νέο παράδειγμα στην οικοδομική βιομηχανία καθώς αλλάζει ριζικά τον τρόπο παραγωγής, παράδοσης και κατασκευής για το μέλλον. Η παρούσα εργασία διερευνά τα σύνορα της τρισδιάστατης εκτύπωσης στο σχεδιασμό και την κατασκευή κτιρίων. Παρέχεται μια ολοκληρωμένη βιβλιογραφική και τεχνολογική ανασκόπηση της τελευταίας τεχνολογίας τρισδιάστατης εκτύπωσης όπως εφαρμόζεται στην οικοδομική βιομηχανία. Οι τεχνολογίες και τα υλικά τρισδιάστατης εκτύπωσης εισάγονται και αξιολογούνται με βάση το υλικό κατασκευής και την παραγωγή προς τρισδιάστατα εκτυπωμένα κτίρια. Τέλος, συζητούνται τα δυνατά και αδύνατα σημεία των κτιρίων τρισδιάστατης εκτύπωσης και η εφαρμογή τους, μαζί με τις τρέχουσες προκλήσεις και τις μελλοντικές προοπτικές για την αρχιτεκτονική.

ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ

Η τρισδιάστατη εκτύπωση, γνωστή και ως πρόσθετη κατασκευή, *additive manufacturing* (AM), είναι η διαδικασία ένωσης υλικών για την κατασκευή αντικειμένων από δεδομένα τρισδιάστατων μοντέλων (ASTM 2010). Η πλειονότητα των τεχνολογιών τρισδιάστατης εκτύπωσης χειρίζονται αντικείμενα στην ψηφιακή τους μορφή προσθέτοντας υλικό σε στρώματα, καθένα από τα οποία εκτυπώνεται απευθείας πάνω από το προηγούμενο, ενώ ορισμένες εκτυπώνονται προσθέτοντας καμπύλες ή γραμμές.

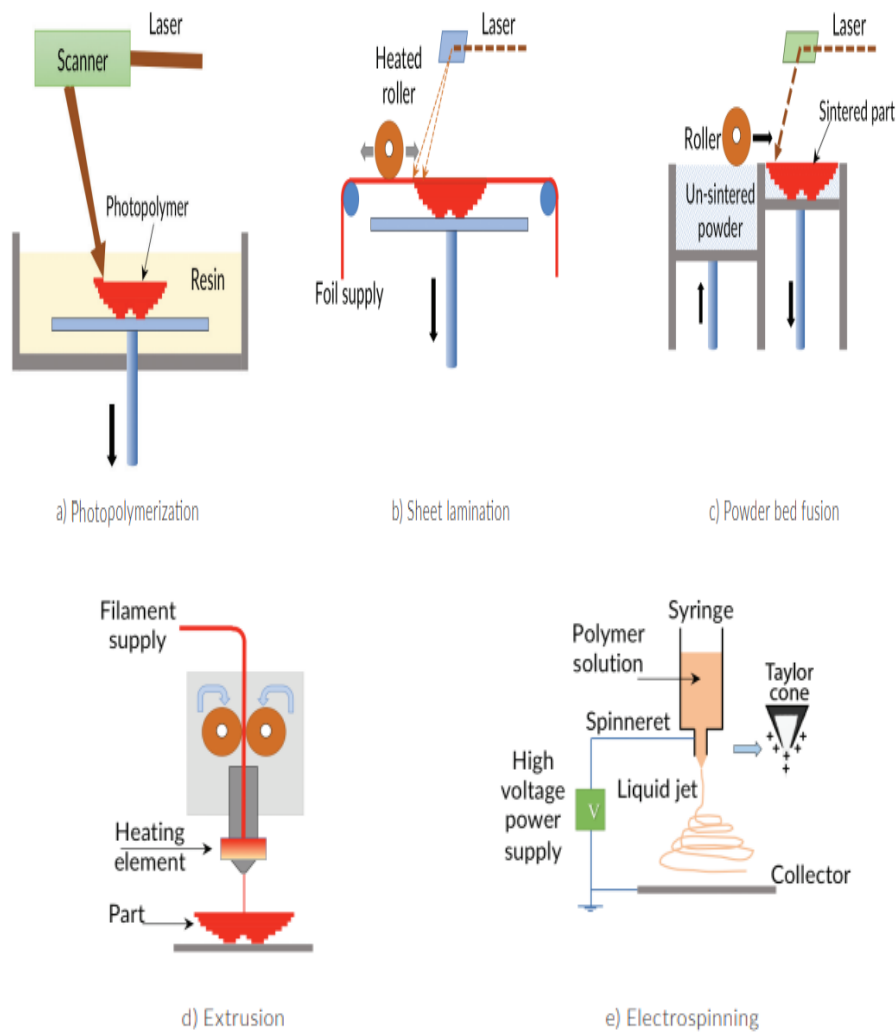
Το πρώτο δίπλωμα ευρεσιτεχνίας τρισδιάστατης εκτύπωσης εκδόθηκε στον Charles (Chuck) Hull για τη συσκευή στερεολιθογραφίας του (SLA) το 1986. Πολλές τεχνολογίες και διαδικασίες τρισδιάστατης εκτύπωσης εμφανίστηκαν αμέσως μετά. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται στην τρισδιάστατη εκτύπωση περιλαμβάνουν πολυμερές, πολυμερές ενισχυμένο με ίνες, μέταλλα, κεραμικά και κοκκώδη υλικά όπως τσιμέντο και άμμο.

Η τρισδιάστατη εκτύπωση ξεπερνά σε μεγάλο βαθμό την παραδοσιακή κατασκευή με πολλούς τρόπους, συμπεριλαμβανομένης της ακρίβειας, του χειρισμού της πολυπλοκότητας, της άμεσης μετατροπής δεδομένων (Gibson et al. 2010), των περιβαλλοντικών οφελών, της οικονομικής απόδοσης και της αποδοτικότητας πρωτοτύπων. Η τρισδιάστατη εκτύπωση έχει εμπορευματοποιηθεί στην αεροδιαστημική και την αυτοκινητοβιομηχανία (Stratasys 2007) και σε ένα ευρύ φάσμα ιατρικών εφαρμογών (Shafiee and Atala 2016). Στην αρχιτεκτονική, η τρισδιάστατη εκτύπωση βρίσκεται ακόμα στα πρώτα στάδια ανάπτυξης και εφαρμογής πλήρους κλίμακας.

2.1 Διαδικασία Τρισδιάστατης Εκτύπωσης

Η βασική αρχή της τεχνολογίας είναι ο στιγμιαίος σχηματισμός ενός στερεού τμήματος από πρώτες ύλες χρησιμοποιώντας είτε θερμότητα είτε φυσική σύνδεση. Υπάρχουν πέντε κύριοι τύποι μεθόδων τρισδιάστατης εκτύπωσης: ο φωτοπολυμερισμός, η πλαστικοποίηση φύλλων, η σύντηξη κλίνης σκόνης (powder bed fusion), καθώς και η μέθοδος εξώθησης και ηλεκτρο-ϊνοποίησης.

Οι εν λόγω μέθοδοι περιγράφονται στο παρακάτω σχήμα (Gibson et al. 2010; Sachs et al. 1990; Calì et al. 2012; Rengier et al. 2012· García-López et al. 2017)



Εικόνα 1. Πέντε τύποι βασικών μεθόδων τρισδιάστατης εκτύπωσης.

Στον φωτοπολυμερισμό, μια δέσμη λέιζερ, ή άλλη πηγή φωτός όπως το υπεριώδες (UV), αποστέλλεται μέσω ενός οπτικού συστήματος, το οποίο αντανακλά και εστιάζει την ακτινοβολία φωτός σε μια σκληρυνόμενη ρητίνη στην πλατφόρμα. Η δέσμη λέιζερ σκληραίνει με ακρίβεια τη ρητίνη και σχηματίζει ένα πεπερασμένο στρώμα. Η πλατφόρμα χαμηλώνει ένα πεπερασμένο βήμα και η σκληρυνόμενη με λέιζερ ρητίνη παραμένει ρηχά βυθισμένη καθώς το λέιζερ σκληραίνει το επόμενο στρώμα παραπάνω.

Στην πλαστικοποίηση φύλλων, ένα φύλλο υλικού τροφοδοτείται στην πλατφόρμα κατασκευής και η σιλουέτα της διατομής του μοντέλου CAD του εξαρτήματος κόβεται από μια δέσμη οπτικού λέιζερ από έναν σχεδιογράφο X-Y. Η σύνδεση μεταξύ των στρωμάτων επιτυγχάνεται μέσω συγκόλλησης/κολλητικής συγκόλλησης, θερμικής συγκόλλησης, συγκόλλησης με υπερήχους ή σύσφιξης.

Σε μια διαδικασία σύντηξης σκόνης-κλίνης, αφού προστεθούν τα σωματίδια σκόνης πολυμερούς, μετάλλου, κεραμικού ή σύνθετου υλικού, ένας κύλινδρος ισοπέδωσης πιέζει προς τα κάτω για να δημιουργήσει ένα σταθερό στρώμα. Τα σωματίδια της σκόνης στην περιοχή του κτιρίου πρώτα προθερμαίνονται για να αποφευχθεί η δημιουργία ατελειών και στη συνέχεια συντήκονται από την πηγή θέρμανσης, με αποτέλεσμα τη στερεοποίηση της περιοχής ενώ η γειτονική σκόνη παραμένει στη μορφή σωματιδίων.

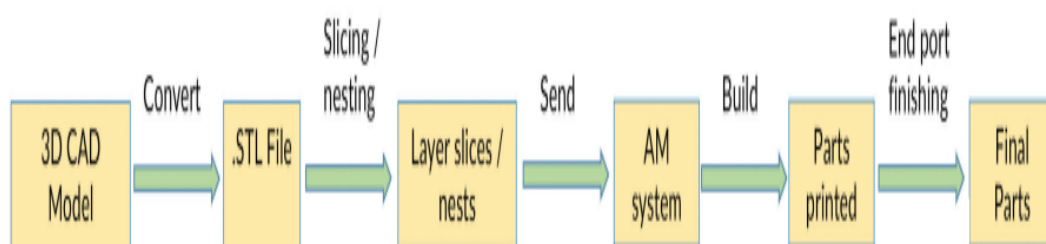
Ο τέταρτος τύπος, η εξώθηση, περιλαμβάνει τη φόρτωση υλικού σε ένα ακροφύσιο, στη συνέχεια είτε εφαρμόζεται θερμότητα γύρω από το ακροφύσιο για την τήξη του υλικού, είτε ακολουθεί ανάμειξη προσθέτων σε πλαστική κατάσταση. Στη συνέχεια εφαρμόζεται πίεση για την εξώθηση του υλικού έξω από το ακροφύσιο, σχεδιάζοντας τη διατομή ενός εξαρτήματος και συνδέοντας το νέο στρώμα πάνω στο προηγούμενο για να σχηματιστεί μια συμπαγής διαμόρφωση.

Η ηλεκτροϊνοποίηση, ο πέμπτος τύπος, παράγει εξαιρετικά λεπτές ίνες με ηλεκτροϋδροδυναμική εκτόξευση. Η ηλεκτροστατική απόθεση ωθεί την πρώτη ύλη, η οποία αποτελείται από πολυμερή μακράς αλυσίδας διαλυμένα σε έναν πολικό διαλύτη, από τον εκπομπό ηλεκτροϊνοποίησης σε έναν συλλέκτη. Χρησιμοποιείται ευρέως για την κατασκευή ικριωμάτων μηχανικής ιστών.

Δεδομένου ότι η ηλεκτροϊνοποίηση έχει έλλειψη ελεγχόμενης εναπόθεσης ινών, οι ερευνητές διερευνούν διάφορες προσεγγίσεις για να καταστήσουν την εναπόθεση ελεγχόμενη, ρυθμίζοντας τις παραμέτρους λειτουργίας, όπως το εφαρμοζόμενο ηλεκτρικό πεδίο, τη θερμοκρασία και τον ρυθμό ροής. Επίσης εξετάζονται οι ιδιότητες της πρώτης ύλης όπως η αγωγιμότητα, το ιξώδες, το διαλυμένο πολυμερές, η συγκέντρωση και η επιφανειακή τάση.

Σχεδόν όλες οι διαδικασίες ακολουθούν παρόμοια διαδικασία. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 2, η διαδικασία μπορεί να περιγραφεί σε έξι στάδια που μετακινούνται από την περιγραφή εικονικής σχεδίασης με τη βοήθεια υπολογιστή (CAD) στο φυσικό προκύπτον τμήμα.

Η τρισδιάστατη εκτύπωση μετατρέπει πρώτα το μοντέλο 3D CAD σε μορφή αρχείου Standard Tessellation Language (STL), η οποία περιγράφει τις εξωτερικές κλειστές επιφάνειες του αρχικού μοντέλου CAD και αποτελεί τη βάση για τον υπολογισμό των διατομών (Gibson et al. 2010). Το λογισμικό κοπής/ένθεσης μεταφέρει στη συνέχεια ένα μοντέλο 3D CAD σε διατομές που διαβάζει και εκτυπώνει το μηχάνημα AM. Το στάδιο κατασκευής/εκτύπωσης ελέγχεται από το σύστημα AM, σε μεγάλο βαθμό χωρίς ανθρώπινη επίβλεψη. Μόλις εκτυπωθούν τα εξαρτήματα, πρέπει να υποβληθούν σε μεταγενέστερη επεξεργασία για να καθαριστούν και να τελειώσουν.



Εικόνα 2. Έξι στάδια της διαδικασίας τρισδιάστατης εκτύπωσης.

2.2 Υλικά που χρησιμοποιούνται στην Τρισδιάστατη Εκτύπωση για την Αρχιτεκτονική.

Οι τρισδιάστατες τεχνολογίες εκτύπωσης που εφαρμόζονται σε κατασκευές κτιρίων πλήρους κλίμακας, χρησιμοποιούνται κυρίως για την κατασκευή πολύπλοκων περιβλημάτων κτιρίων. Το περίβλημα του κτιρίου αποτελεί το φράγμα που χωρίζει το εσωτερικό και το εξωτερικό και παίζει κρίσιμο ρόλο στην άνεση των επιβατών, την ενεργειακή απόδοση και την ανθεκτικότητα της κατασκευής. Εξυπηρετεί τέσσερις βασικές λειτουργίες: υποστήριξη, έλεγχο, φινίρισμα και διανομή (Straube 2012). Επομένως, τα 3D-εκτυπωμένα περιβλήματα κτιρίων πρέπει να ικανοποιούν όλες αυτές τις λειτουργίες. Σύμφωνα με τη μέχρι σήμερα διαθέσιμη βιβλιογραφία, τα πολυμερή και τα κοκκώδη υλικά είναι τα κύρια υλικά που χρησιμοποιούνται σε τρισδιάστατα εκτυπωμένα κτίρια. Η εναπόθεση εξώθησης (ED) είναι μια βασική διαδικασία τρισδιάστατης εκτύπωσης που χρησιμοποιεί υλικά βασισμένα σε πολυμερή για την εκτύπωση εξαρτημάτων κτιρίου. Τροφοδοτούνται γενικά από θερμοπλαστικά νήματα ή σφαιρίδια κατασκευασμένα από ακρυλονιτρίλιο βουταδιενο στυρένιο (ABS), πολυανθρακικό (PC), πολυλακτίδιο (PLA), πολυαμίδιο (PA) και μείγματα οποιωνδήποτε δύο τύπων θερμοπλαστικών υλικών.

Ενώ αυτά τα υλικά έχουν χαμηλό σημείο τήξης, χαμηλή παραμόρφωση και ανισότροπες μηχανικές ιδιότητες, δεν έχουν επίσης μηχανική αντοχή. Ως εκ τούτου, σύνθετα υλικά πολυμερούς μήτρας ενισχυμένα με σωματίδια, ίνες ή/και νανοϋλικά αναπτύχθηκαν πρόσφατα για να εξυπηρετήσουν την μέθοδο της τρισδιάστατης εκτύπωσης αντιμετωπίζοντας αυτές τις προκλήσεις. Inkjet Binder Jetting (IBJ) και ED είναι οι διαδικασίες που χρησιμοποιούν κοκκώδη υλικά για τρισδιάστατη εκτύπωση δομικών στοιχείων. Τα κοκκώδη υλικά που χρησιμοποιούνται περιλαμβάνουν κυρίως άμμο και τσιμεντοειδή υλικά. Σημαντικό είναι να αναφερθεί ότι κατά την IBJ μέθοδο τα υλικά είναι στεγνά, ενώ η διαδικασία εξώθησης είναι υγρή.

Σε μια υγρή διαδικασία, τα υλικά αναμιγνύονται πρώτα με νερό και πρόσθετα για να επιταχυνθεί η σκλήρυνση ή η πήξη. Το μείγμα στη συνέχεια εξωθείται μέσω της κεφαλής εκτύπωσης για να δημιουργηθεί η τρισδιάστατη δομή. Ωστόσο, σε μια στεγνή διαδικασία, η κεφαλή εκτύπωσης εξωθεί έναν συνδετικό παράγοντα σε ένα στρώμα μη στερεοποιημένου/κονιοποιημένου υλικού όπου αντιδρά για να συντήξει τη δομή μαζί.

2.3 Μηχανισμοί Τρισδιάστατης Εκτύπωσης Αναγνώρισης Θέσης.

Οι μηχανισμοί αναγνώρισης θέσης των μηχανών εκτύπωσης 3D περιλαμβάνουν ρομπότ αρθρωτού βραχίονα, ρομπότ σκελετών, Καρτεσιανά ρομπότ με αιωρούμενα καλώδια (CCSR), συστήματα κίνησης δέλτα, πολικά συστήματα και κινητά ρομπότ. Ένα ρομπότ με αρθρωτό βραχίονα, όπως αυτά που αναπτύχθηκαν από τις KUKA, Staubli και ABB (Schwartz and Park 2017), είναι ένας χειριστής ανοιχτής αλυσίδας (μηχανισμός ελέγχου) με σύνθετο σώμα που αποτελείται από συνδεδεμένους περιστροφικούς συνδέσμους οι οποίοι κινούνται από ενεργοποιητές. Ο χειριστής μπορεί να μετακινηθεί με ευελιξία, μπορεί να αλλάζει συχνά εργασίες και επιτρέπει αλληλεπιδράσεις με ανθρώπους ενώ παρέχει βοήθεια με δύναμη και ακρίβεια. Ο τελικός τελεστής στο πάνω μέρος του βραχίονα συγκρατεί το ακροφύσιο τρισδιάστατης εκτύπωσης και ακολουθεί μια καθορισμένη τροχιά του μοντέλου πλέγματος σε ένα δισδιάστατο στρώμα ή στο χώρο εργασίας. Ένα ρομπότ σκελετών παρέχει τη μεγαλύτερη ταχύτητα και την υψηλότερη επιτάχυνση σε μηχανές τρισδιάστατης εκτύπωσης με μεγάλη ικανότητα συστήματος και υψηλή ακρίβεια τοποθέτησης.

Σχηματίζει ένα καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων κατά μήκος του άξονα x , του άξονα y ή/και του άξονα z . Με πολλαπλά εξαρτήματα εργαλείων, ένα ρομπότ σκελετού μπορεί να εκτελέσει σύνθετη κατασκευή, όπως τρισδιάστατη εκτύπωση, συγκόλληση με αντίσταση, ολική άλεση, διάτρηση, διαμόρφωση περιγράμματος και άλλες διαδικασίες κατασκευής. Τα καρτεσιανά ρομπότ με αιωρούμενα καλώδια χρησιμοποιούν τον τελικό τελεστή για να παράγουν μια μοναδική μεταφορική κίνηση. Η CCSR υπερτερεί όχι μόνο σε ο,τι έχει να κάνει με το κόστος, αλλά και σε τομείς μηχανικής σημασίας όπως η λειτουργία σε κρίσιμες συνθήκες.

Ένα σύστημα κίνησης δέλτα αποτελείται από τρεις ρυθμιζόμενους βραχίονες που κινούνται πάνω και κάτω σε τρεις στήλες κατανεμημένες σε σχήμα δέλτα. Τα κινούμενα μέρη του είναι ελαφριά και είναι κατάλληλα για εκτύπωση ψηλών κατασκευών. Ένα πολικό σύστημα, σε αντίθεση με τους άλλους μηχανισμούς, μετακινεί την επιφάνεια εκτύπωσης αντί να μετακινεί την κεφαλίδα εκτύπωσης. Ένα κινητό ρομπότ είναι ένα αυτόνομο έξυπνο όχημα (AIV) με κινητικότητα, χάρτη και καθοδήγηση για τρισδιάστατη εκτύπωση. Στόχος τους ήταν να αναπτύξουν τεχνικές για να επισκευάσουν κατεστραμμένες επιφάνειες σε δυσπρόσιτες περιοχές με παραδοσιακά μέσα.

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ ΚΤΙΡΙΩΝ ΒΑΣΙΣΜΕΝΕΣ ΣΕ ΠΟΛΥΜΕΡΗ

Υπάρχουν τέσσερις τεχνολογίες τρισδιάστατης εκτύπωσης βασισμένες σε πολυμερή τα οποία αναπτύχθηκαν για την αρχιτεκτονική: 1) κατασκευή πρόσθετων μεγάλων περιοχών (BAAM), 2) καλούπι πλέγματος, 3) εκτύπωση καμπύλης 3D και 4) AM με ικρίωμα.

3.1 BAAM

Οι τεχνολογίες τρισδιάστατης εκτύπωσης περιορίζονται γενικά σε μικρούς όγκους κατασκευής. Για την αντιμετώπιση αυτών των προκλήσεων, το BAAM® αναπτύχθηκε από την Cincinnati Inc. (CI) και το Εθνικό Εργαστήριο Oak Ridge (ORNL) για γρήγορη και οικονομικά αποδοτική κατασκευή μεγάλων εξαρτημάτων 3D. Το σύστημα BAAM εξωθεί τα σύνθετα πολυμερή ενισχυμένα με τηγμένες ίνες και τα αποθέτει ρομποτικά σε μια θερμαινόμενη πλατφόρμα από ένα ρομπότ σκελετού. Ωστόσο, αντί για νήματα, το σύστημα BAAM χρησιμοποιεί πέλλετ μέσω ενός εξωθητήρα μονού κοχλίου ως πρώτη ύλη. Δεδομένου ότι τα pellets κοστίζουν περίπου το 1/20 του κόστους των νημάτων, μειώνει σημαντικά το κόστος του συστήματος BAAM (Kishore et al. 2017; Duty et al. 2014). Τα διάφορα πολυμερή που τυπώθηκαν επιτυχώς περιλαμβάνουν ABS, ABS ενισχυμένο με 20% ίνες άνθρακα (CF), ABS ενισχυμένο με ίνες υάλου (GF), CF-ULTEM, 25–40% CF πολυφαινυλοσουλφόνη (PPSU) και 40–50% πολυφαινυλενοσουλφίδιο (PPS).

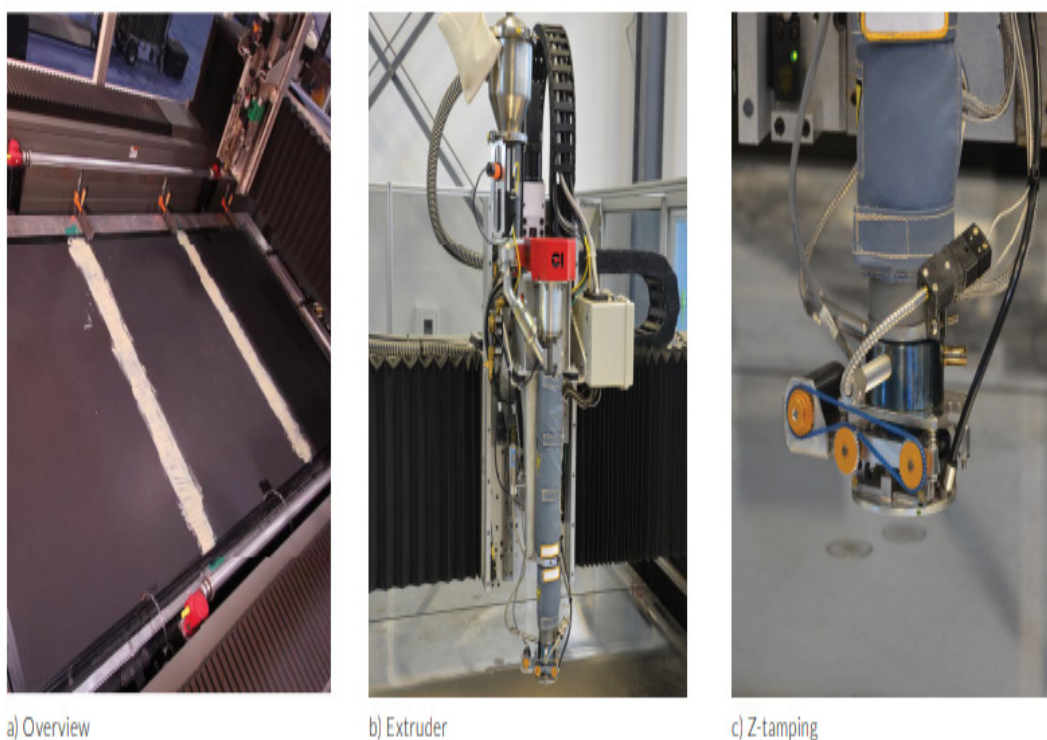
Τα σύνθετα υλικά βιολογικής βάσης όπως το μπαμπού, το PLA και το πολυπροπυλένιο από ίνες κυτταρίνης (PP) βρίσκονται υπό έρευνα για πιθανή χρήση από το BAAM. Επί του παρόντος, το BAAM είναι η ταχύτερη και μεγαλύτερη τεχνολογία κατασκευής προσθέτων στον κόσμο. Μπορεί να εκτυπώσει τρισδιάστατες δομές δέκα φορές μεγαλύτερες, χίλιες φορές πιο γρήγορα και εκατό φορές φθηνότερα από τα πιο εμπορικά συστήματα τρισδιάστατης εκτύπωσης (Love and Duty 2015).

3.1.1 BAAM: Διαδικασία

Η ικανότητα εκτύπωσης BAAM φιλοξενεί δομές μεγάλες έως 6 m x 2,4 m x 1,8 m, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3α. Παρόμοια με το Fused Deposition Modeling (FDM), ο πρωτεύων άξονας του μηχανισμού εξώθησης είναι προσανατολισμένος ορθογώνια σε μια οριζόντια πλατφόρμα κατασκευής και η κεφαλή εναπόθεσης κινείται κυρίως στο οριζόντιο επίπεδο (x-y). Τα τηγμένα σφαιρίδια που εξέρχονται από τον εξωθητή (άξονας z) εναποτίθενται είτε στη θερμαινόμενη κλίνη είτε σε ένα στρώμα που έχει εναποτεθεί προηγουμένως. Για να αποφευχθούν οι φυσαλίδες στα εκτυπωμένα μέρη από την υγρασία, το BAAM διαθέτει στεγνωτήρα pellet και σύστημα μεταφοράς pellet που κινείται με αέρα για την αφαίρεση της υγρασίας στα pellet πριν εισέλθουν σε μια χοάνη συνδεδεμένη με έναν εξωθητήρα με ένα κοχλία.

Ο εξωθητής BAAM, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3β, είναι τοποθετημένος κατακόρυφα σε ένα σύστημα σκελετών x-y-z και εναποθέτει ωοειδείς χάντρες, 8,4 mm x 4 mm από ένα κυκλικό στόμιο 7,6 mm (Love and Duty 2015). Η βάση του θερμαινόμενου κρεβατιού κινείται κατακόρυφα, συγχρονίζοντας με τη γάστρα και τον εξωθητή. Ο εξωθητήρας μονής βίδας σχεδιάστηκε ειδικά για τροφοδοσία πέλλετ με πολύ μικρότερο στραγγαλισμό της ροής σφαιριδίων στην είσοδο και την έξοδο. Αυτή η λειτουργία επιτρέπει ρυθμούς ροής που υπερβαίνουν τα 36 kg/hr (80 lb./hr) ή τα 36.000 cm³/hr (2.200 in.³/hr), που είναι περίπου 200 έως 1000 φορές ο ρυθμός δόμησης για τα πιο συμβατικά συστήματα FDM.

Για να εξασφαλιστεί η καλή ενοποίηση μεταξύ των στρωμάτων, αναπτύχθηκε ένα εξάρτημα συμπίεσης Z για το σύστημα BAAM (Εικόνα 3γ) για τη συμπίεση των εναποτιθέμενων σφαιριδίων. Το Z-tamping είναι μια ιδιαίτερα σημαντική τεχνική για πολυμερές ενισχυμένο με ίνες, καθώς οι ίνες δεν ρέουν φυσικά υπό πίεση από εξώθηση. Η συμπίεση αυξάνει την αντοχή στην κατεύθυνση x κατά 10% και τη διπλασιάζει στην κατεύθυνση y. Η μηχανική αντοχή και οι φυσικές ιδιότητες του τυπωμένου εξαρτήματος καθορίζονται επίσης από λειτουργικές διεργασίες και παραμέτρους υλικού όπως η θερμοκρασία εξώθησης, ο ρυθμός ροής, η ταχύτητα κεφαλής και οι διαδρομές του εργαλείου.



Εικόνα 3. BAAM στο ORNL.

3.1.2 BAAM: Απόδοση

Το εναποτιθέμενο πολυμερές υλικό από το BAAM είναι ανισότροπο και σχετίζεται έντονα με τον προσανατολισμό των σφαιριδίων. Το ORNL πραγματοποίησε διάφορες μελέτες και πειράματα για την ανάπτυξη μιας ποικιλίας σύνθετων πολυμερών ενισχυμένων ινών για το BAAM και παρέχει μια βάση δεδομένων ιδιοτήτων και απόδοσης αυτών των υλικών. Τα αποτελέσματα δείχνουν σημαντικές διαφορές αντοχής μεταξύ της κατεύθυνσης εναπόθεσης (άξονας x) και της διεύθυνσης εγκάρσιας στρώσης (άξονας z). Η αντοχή σε εφελκυσμό όλων

των υλικών που εκτυπώνονται από το BAAM είναι γενικά χαμηλότερη από το τυπικό μοντέλο έγχυσης, αλλά η ακαμψία είναι συγκρίσιμη.

Τα σύνθετα πολυμερή από ανθρακονήματα παρουσιάζουν την υψηλότερη αντοχή/ακαμψία στην κατεύθυνση του άξονα x μεταξύ των σύνθετων πολυμερών, αλλά στην κατεύθυνση του άξονα z , πέφτει σχεδόν 70-80%. Από την άλλη πλευρά, τα υλικά GF-ABS έχουν μικρότερη αντοχή σε εφελκυσμό και ακαμψία, αλλά η διαφορά μεταξύ των κατευθύνσεων x και z είναι πολύ μικρότερη σε σύγκριση με το CF-ABS. Εκτός από την αποτελεσματική αύξηση της αντοχής, η προσθήκη ινών στο πολυμερές μπορεί επίσης να μειώσει τον συντελεστή θερμικής διαστολής (CTE), ο οποίος προκαλεί στρέβλωση του τυπωμένου τμήματος. Έρευνα από το ORNL ανέφερε ότι το CTE του ABS με 13% CF στην κατεύθυνση του άξονα x είναι $9,85 \text{ (}\mu\text{m/m)/}^\circ\text{C}$, που είναι το ένα έβδομο του CTE για καθαρό ABS $75 \text{ (}\mu\text{m/m)/}^\circ\text{C}$ (NTO). Η CTE στην κατεύθυνση του άξονα z είναι $119,8 \text{ (}\mu\text{m/m)/}^\circ\text{C}$, σχεδόν οκτώ φορές αυτή της ευθυγραμμισμένης κατεύθυνσης. Επομένως, οι διαδρομές εργαλείων της εκτύπωσης BAAM πρέπει να χρησιμοποιούνται για την αποφυγή μετρήσιμων παραμορφώσεων.

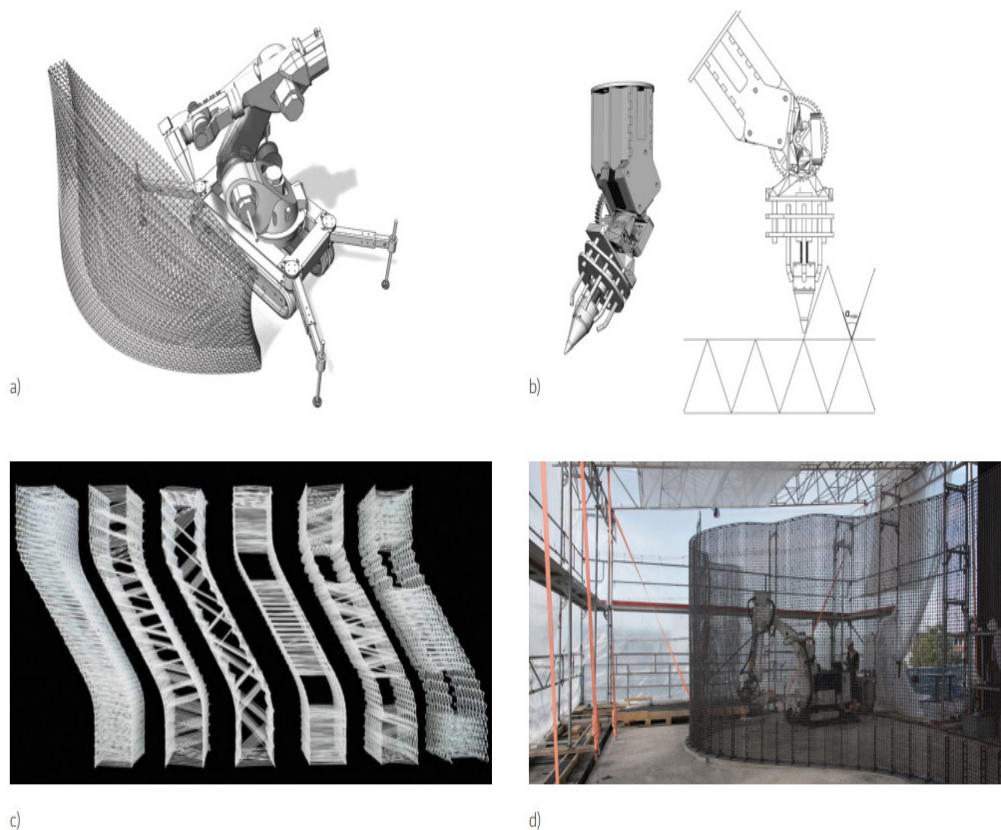
3.2 Δικτυωτό Καλούπι (Mesh Mould)

Το σύστημα Mesh Mold που εφευρέθηκε από ερευνητές στο Ελβετικό Ομοσπονδιακό Ινστιτούτο Τεχνολογίας της Ζυρίχης (ETH) ενοποιεί την παραγωγή σπλισμού και ξυλότυπου σε ένα ρομποτικά ελεγχόμενο σύστημα κατασκευής, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4α. Αυτό το σύστημα βασίζεται σε έναν ρομποτικό βραχίονα για την εξώθηση κοντού πολυμερούς ενισχυμένου με ίνες σε ένα στοιχείο ξυλότυπου πλέγματος. Τα προκύπτοντα σύνθετα πλέγματα πολυμερών συνεχών ινών (Εικόνα 4) προορίζονται ως ξυλότυποι από σκυρόδεμα (Hack, Lauer, Gramazio et al. 2013). ωστόσο; δεν έχει ακόμη εφαρμοστεί στο πεδίο.

3.2.1 Mesh Mould: Διαδικασία

Ένας αρθρωτός ρομποτικός βραχίονας παράγει μεταβλητό, μεγάλης κλίμακας δικτυωτό ξυλότυπο με τη βοήθεια μιας ρυθμιζόμενης και κινητής βάσης που αποτελείται είτε από πλατφόρμα τροχών είτε από τροχιές.

Ο ρομποτικός βραχίονας χρησιμοποιεί έξι βαθμούς ελευθερίας για να εντοπίσει τη θέση και τον προσανατολισμό του σύνθετου νήματος και του πλαισίου πλέγματος. Ο τελικός τελεστής έχει έναν ελεγκτή και ένα ακροφύσιο εξώθησης (Εικόνα 4β) που δέχεται δύο πρώτες ύλες: πλαστικά σφαιρίδια/νήμα και ένα καρούλι από συνεχείς ίνες όπως σύρματα από μπαμπού, Kevlar, βασάλτη ή ίνες γυαλιού. Ο τελικός τελεστής επικαλύπτει τα θερμά πλαστικά σφαιρίδια γύρω από τις συνεχείς ίνες και τα διώχνει για να σχηματίσει ένα επιμήκη νήμα, το οποίο είναι πολύ ισχυρότερο και πιο άκαμπτο από τον οπλισμό κοντών πολυμερών ινών. Το εξωθημένο καυτό νήμα κολλάει σε άλλα νήματα ενώ το πλαστικό ψύχεται. Το ακροφύσιο του εξωθητή περιβάλλεται από αγωγούς αέρα ψύξης για τη σκλήρυνση του εξωθημένου νήματος από την άκρη του ακροφυσίου.



Εικόνα 4. Mesh Mould: α) σύστημα β) ακροφύσιο εξώθησης γ) διάφορα διαμορφωμένα πλέγματα δ) χάλυβα Mesh Mold

Το τυπικό πάχος εξώθησης είναι έως 3 mm σε διάμετρο με χωρητικότητα 10 L/s αέρα για ψύξη (Hack et al. 2015). Για την παροχή βελτιωμένης δομικής απόδοσης, οι νέες εξελίξεις του Mesh Mold περιλαμβάνουν πλέγμα διαμόρφωσης χάλυβα (Εικόνα 4δ). Αυτή η

διαδικασία κατασκευής χρησιμοποιεί ένα προσαρμοσμένο, αυτόνομο, ειδικού σκοπού ρομποτικό τελικό τελεστή για να διακρίνει το πλέγμα σε συνεχή οριζόντια και κατακόρυφα συρμάτινα στοιχεία. Αυτός ο ρομποτικά ελεγχόμενος τελικός τελεστής περιλαμβάνει έναν μπροστινό μηχανισμό κάμψης σύρματος και ένα πίσω μέρος για σύσφιξη, τροφοδοσία σύρματος, πνευματική κοπή και συγκόλληση με αντίσταση (Hack et al. 2017). Αυτή η έκδοση του Mesh Mold κινείται πέρα από την τρισδιάστατη εκτύπωση προς μια ολοκληρωμένη λύση ψηφιακής κατασκευής για την επιτόπια κατασκευή κτιρίων ελεύθερης μορφής.

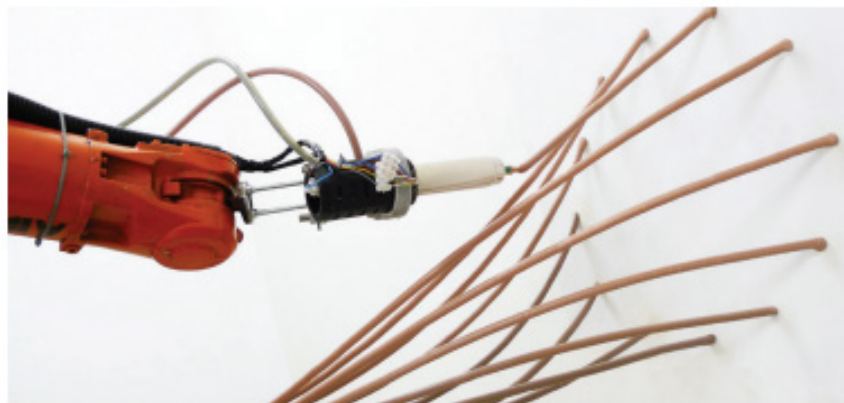
3.2.2 Mesh Mould: Απόδοση

Η αντοχή σε εφελκυσμό του Mesh Mold με συνεχείς ίνες είναι περίπου 6-7 φορές μεγαλύτερη από το σύνθετο πολυμερές ενισχυμένο με κοντές ίνες, σύμφωνα με τις μελέτες από την ομάδα Dickson (Dickson et al. 2017) και την ομάδα Tian (Tian et al. 2016). Ο δικτυωτός ξυλότυπος με συνεχείς ίνες λειτουργεί τόσο ως καλούπι για τη χύτευση τσιμεντοειδούς μίγματος όσο και ως ενισχυτική δομή. Το στοιχείο ξυλότυπου πλέγματος μπορεί να περιλαμβάνει μια ακανόνιστη διάταξη τριγωνικών ή εξαγωνικών ανοιγμάτων, που κυμαίνονται από 2 cm έως 4 cm, ανάλογα με τις τοπικές συνθήκες φορτίου. Τα ανοίγματα του Mesh Mold είναι σχεδιασμένα να αντέχουν στην υδροστατική πίεση υγρών μιγμάτων τσιμέντου (Hack, Lauer, Gramazio et al. 2013). Η υδροστατική πίεση μειώνεται με το ύψος, έτσι ώστε οι μικρότερες κυψέλες να βρίσκονται στο κάτω μέρος για να κρατούν υψηλή πίεση και οι μεγαλύτερες κυψέλες να βρίσκονται στην κορυφή για χαμηλότερη πίεση. Ο σχεδιασμός Mesh Mold είναι το αποτέλεσμα δομικής ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων.

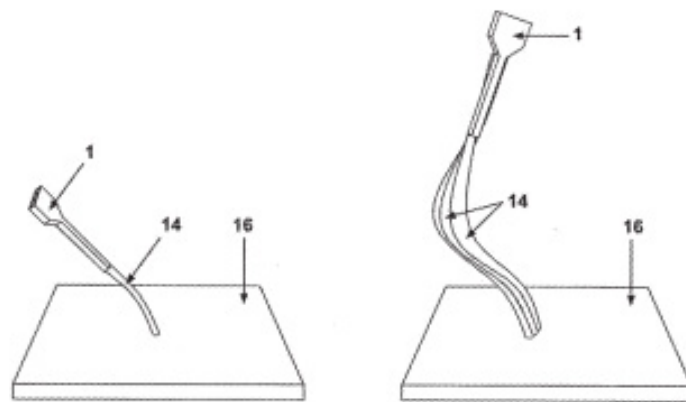
3.3 Τρισδιάστατη Εκτύπωση Καμπύλης (3D Curve)

Η τρισδιάστατη εκτύπωση καμπύλης εφευρέθηκε από ερευνητές από το Ινστιτούτο Προηγμένης Αρχιτεκτονικής της Καταλονίας (Novikou και Jokic 2013) για να εξωθήσει μια σειρά από τρισδιάστατες καμπύλες για να σχηματίσει τη γεωμετρία της επιφάνειας ενός αντικειμένου (Εικόνα 5β). Τα υλικά ταχείας σκλήρυνσης που χρησιμοποιούνται είναι θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή δύο συστατικών όπως η πολυουρεθάνη (Perez et al. 2014). Ένας ρομποτικός βραχίονας ελέγχει τη διαδρομή και τη θέση του ακροφυσίου εξώθησης (Εικόνα 5α). Η τρισδιάστατη καμπύλη εκτύπωσης μπορεί να δημιουργήσει τρισδιάστατα αντικείμενα

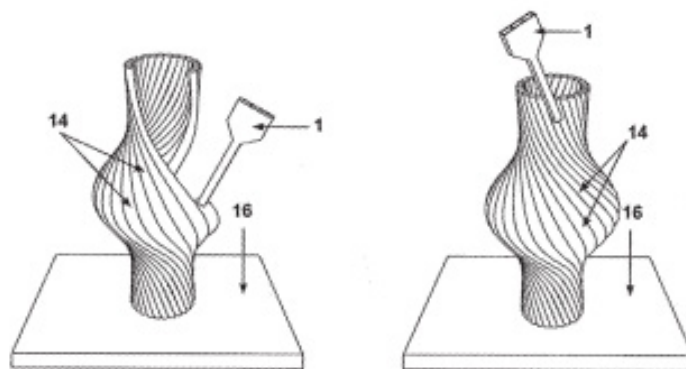
σε πολλές επιφάνειες εργασίας, ανεξάρτητα από την κλίση και την ομαλότητά της, και χωρίς την ανάγκη πρόσθετων δομών στήριξης (Εικόνα 5α). Η σημαντική διαφορά μεταξύ της τρισδιάστατης καμπύλης εκτύπωσης και της άλλης κατασκευής πρόσθετων που βασίζεται στην προσθήκη στρώσης 2D είναι ότι η εκτύπωση καμπύλης 3D ακολουθεί στην πραγματικότητα ακριβείς γραμμές πίεσης ενός προσαρμοσμένου σχήματος, ενώ η κατασκευή πρόσθετων στρώσεων 2D αγνοεί τη δομή του αντικειμένου κατά τη διαδικασία εκτύπωσης (Εικόνα 5β).



a)



b)



Εικόνα 5. Εκτύπωση 3D καμπύλης: α) Δομή τρισδιάστατης εκτύπωσης κατά της βαρύτητας (Mataerial 2013) β) η διαδικασία τρισδιάστατης εκτύπωσης ενός αγγείου.

3.3.1 3D Curve: Διαδικασία

Η θερμοσκληρυνόμενη τροφοδοσία πολυμερούς της τρισδιάστατης καμπύλης εκτύπωσης τροφοδοτείται σε ένα στατικό μίκτη για να σκληρύνει μέσω μιας χημικής αντίδρασης μεταξύ των δύο ρευστών συστατικών. Η βαφή μπορεί να εγχυθεί στο ακροφύσιο για να αλλάξει το χρώμα του εξωθημένου μίγματος. Ο ρομποτικός βραχίονας εξωθεί το μείγμα, ακόμα ρευστό, μέσω ενός ακροφυσίου με σταθερό ρυθμό ενώ εφαρμόζει σταθερή ροή αέρα 190 °C (374 °F) από θερμαντήρες και στις δύο πλευρές του ακροφυσίου (Novikov and Jokic 2013). Το μέγεθος και το σχήμα του ακροφυσίου και το άνοιγμα της κεφαλής εκτύπωσης, συνήθως μικρότερο από 0,8 mm (0,03") και έως 12 mm (0,5"), ενδέχεται να ποικίλλουν ανάλογα με τις ανάγκες. Ο ρομποτικός βραχίονας τοποθετεί το ακροφύσιο σύμφωνα με ένα πρόγραμμα υπολογιστικής ανάλυσης που προσεγγίζει την ψηφιακή γεωμετρία με μια σειρά από τρισδιάστατες καμπύλες. Η ταχύτητα του ακροφυσίου καθορίζεται από τον ρυθμό σκλήρυνσης και τη δομική σταθερότητα του θερμοσκληρυνόμενου πολυμερούς. Το μείγμα που εξωθείται από την κεφαλή εκτύπωσης του ακροφυσίου πρέπει να έχει ωριμάσει πλήρως μέχρι τη στιγμή που η κεφαλή μετακινηθεί μακρύτερα από το πλάτος της εκτυπωμένης καμπύλης. Επομένως, οι μεγαλύτερες ταχύτητες απαιτούν παχύτερο εκτυπωμένο υλικό.

3.3.2 3D Curve: Απόδοση

Λόγω της αναδυόμενης φύσης αυτής της τεχνολογίας, εξακολουθεί να υποβάλλεται σε δοκιμές ή/και υπό την προστασία της πνευματικής ιδιοκτησίας. Δεν έχει βρεθεί βιβλιογραφία για τις μηχανικές ή θερμικές ιδιότητες της τρισδιάστατης καμπύλης εκτύπωσης. Σύμφωνα με τις ιδιότητες της διαθέσιμης άκαμπτης θερμοσκληρυνόμενης πολυουρεθάνης, η αντοχή εφελκυσμού της θερμοσκληρυνόμενης πολυουρεθάνης είναι στα 60 MPa (Makeitfrom 2009). Ωστόσο, μέσω της ανάπτυξης ενός νέου θερμοσκληρυνόμενου πολυμερούς για αυτή τη διαδικασία, η απόδοση του υλικού εκτύπωσης καμπύλης 3D μπορεί να βελτιωθεί.

3.4 Μέθοδος Ικριώματος (Scaffold Additive Manufacture)

Τα ικριώματα, κατασκευασμένα υλικά για ιατρικούς σκοπούς, μιμούνται την εξωκυτταρική μήτρα του φυσικού ιστού για να σχηματίσουν νέους λειτουργικούς ιστούς για κυτταρικές αλληλεπιδράσεις. Τα ικριώματα έχουν υψηλό πορώδες για να παρέχουν δομική ακεραιότητα μέσα στα κύτταρα. Η μέθοδος ικριώματος, ή μέθοδος Scaffold, αναπτύχθηκε από την Branch Technology για την εκτύπωση κατασκευών ως ικριώματα για τσιμεντοειδές υλικό ή μονωτικό αφρό για πλήρωση και σκλήρυνση. Για την μεθόδου ικριώματος χρησιμοποιείται παρόμοια πρώτη ύλη με το BAAM, δηλαδή σφαιρίδια οποιουδήποτε υλικού που μπορεί να θερμανθεί και να στερεοποιηθεί μόλις εξωθηθεί από έναν αρθρωτό ρομποτικό βραχίονα για κίνηση θέσης και αναγνώριση. Εξωθείται το λιωμένο πολυμερές σε ανοιχτό χώρο για να δημιουργήσει τυπωμένα μέρη. Ο εκτυπωτής μετακινείται από σημείο σε σημείο για να δημιουργήσει μια δομή ικριώματος ελεύθερης μορφής.

3.4.1 Μέθοδος Ικριώματος: Διαδικασία

Ο ρομποτικός βραχίονας του συστήματος Scaffold εδράζεται σε μια διαδρομή δέκα μέτρων, που καλύπτει ένα πεδίο εκτύπωσης 7,6 m x 17,6 m. Φέρει ένα μικρό δοχείο υλικού με τελικό τελεστή για τρισδιάστατη εκτύπωση. Η Branch Technology έχει εκτυπώσει με επιτυχία τα ABS, GF-ABS, CF-ABS και άλλα σύνθετα υλικά ABS ενισχυμένα με ίνες (Boyd IV 2013). Η διαφορά μεταξύ της μεθόδου ικριώματος και του Mesh Mold είναι ότι το Mesh Mold χρησιμοποιεί συνεχείς ίνες επικαλυμμένες με πολυμερές, ενώ η μέθοδος ικριωμάτων χρησιμοποιεί πολυμερές ενισχυμένο με βραχείες ίνες. Επομένως, η αντοχή του υλικού του ικριώματος είναι παρόμοια με το BAAM αλλά χαμηλότερη από αυτή του Mesh Mould. Ο εξωθητήρας βρίσκεται στον μπροστινό βραχίονα και έχει πολλά εξαρτήματα για διάφορες λειτουργίες. Αυτά περιλαμβάνουν μια χοάνη υλικού για την αποθήκευση πρώτων υλών, μια βίδα για κονιοποίηση, μερική τήξη και διασπορά. Ζώνες θέρμανσης γύρω από τον εξωθητή σε διάφορες θέσεις, μια βαλβίδα διακοπής για τον έλεγχο της ροής, ένα ακροφύσιο που σχηματίζει διαφορετικά σχήματα, και σωλήνα αέρα ψύξης για στερεοποίηση. Ο εξωθητής εκπληρώνει τις τέσσερις λειτουργίες θέρμανσης, ανάμειξης, ψύξης αέρα και εξώθησης. Υπάρχουν επίσης αισθητήρες που παρακολουθούν τη θέση, τη θερμοκρασία και τον ρυθμό ροής με μεγάλη ακρίβεια για να εξασφαλίσουν ποιοτική εκτύπωση (Boyd IV 2013). Το ακροφύσιο κινείται από σημείο σε σημείο κατά μήκος μιας διαδρομής που ορίζεται από το πρόγραμμα

σχεδιασμού προκειμένου να προσκολληθεί σε προηγουμένως εναποτιθέμενους αρμούς υλικού χωρίς να περάσει μέσα από υλικό που είχε εφαρμοστεί προηγουμένως. Τα επιμέρους στοιχεία του ικρίωματος μπορεί να είναι κύβοι, κηρήθρες, τριγωνικά πρίσματα ή οργανικά στοιχεία σώματος. Προκειμένου να επιλεγεί το βέλτιστο σχήμα του στοιχείου και της διάστασης του ικρίωματος, ένα μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων βελτιστοποιεί την ποσότητα του χρησιμοποιούμενου υλικού, τον ρυθμό πορώδους και την αντοχή.

3.4.2 Μέθοδος Ικρίωματος: Απόδοση

Αν και το τυπωμένο ικρίωμα έχει υψηλό πορώδες, η αντοχή και η ακαμψία του ικρίωματος είναι ακόμα σημαντική. Σύμφωνα με την Branch Technology, η δομή του ικρίωματος έχει σχεδόν τριπλάσια αντοχή σε εφελκυσμό από ένα ξύλινο στέλεχος 100–120 MPa.

Η μέθοδος Scaffold σχεδιάστηκε για να χρησιμοποιεί λιγότερο υλικό εκτύπωσης και να λειτουργεί με παραδοσιακά οικοδομικά υλικά όπως σκυρόδεμα και μόνωση. Παρόμοια με το Mesh Mould, το η εν λόγω μέθοδος χρησιμοποιείται ως ξυλότυπος για τσιμεντοειδές υλικό ή μονωτικό υλικό ψεκασμού και ως δομικός σπλισμός (Εικόνα 5β).

3.5 Συζήτηση Τεχνικών Πολυμερικής Τρισδιάστατης Εκτύπωσης

Το BAAM, το Mesh Mould, η 3D curve printing και το scaffold AM χρησιμοποιούν όλες τις αρχές της κατασκευής πρόσθετων για την κατασκευή μιας δομής στρώμα προς στρώμα, αλλά οι μέθοδοι διαφέρουν ως προς το σχεδιασμό και τις δομικές ιδιότητες και το καθένα έχει τα δικά του πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Το BAAM έχει τη δυνατότητα να εκτυπώνει γρήγορα μια μεγάλη δομή. Ωστόσο, το Mesh Mold και το ικρίωμα AM μπορούν επίσης να ικανοποιήσουν μεγαλύτερες δομικές απαιτήσεις. Ενσωματωμένο με τσιμεντοειδή υλικά, το Mesh Mold έχει μεγάλες δυνατότητες για εφαρμογές δομικών κατασκευών.

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ ΒΑΣΙΣΜΕΝΕΣ ΣΕ ΚΟΚΚΩΔΗ ΥΛΙΚΑ

Υπάρχουν τρεις κύριες διαδικασίες τρισδιάστατης εκτύπωσης που χρησιμοποιούν κοκκώδη υλικά: 1) εκτύπωση σκυροδέματος, 2) δημιουργία περιγράμματος και 3) εκτύπωση σε σχήμα D.

4.1 Εκτύπωση Σκυροδέματος

Η εκτύπωση από σκυροδέμα μοιάζει πολύ με τη διαδικασία Fused Deposition Modeling (FDM), όπου η τσιμεντοκονία εξωθείται μέσω μιας κεφαλής εκτυπωτή στρώμα προς στρώμα μέχρι να ολοκληρωθεί το εκτυπωμένο αντικείμενο (Perkins and Skitmore 2015). Η κεφαλή του εκτυπωτή μπορεί είτε να συνδεθεί σε σταθερό ρομποτικό βραχίονα 6 αξόνων είτε σε σύστημα σκελετών σε κλειστή περιοχή εκτύπωσης. Άλλα απαιτούμενα εξαρτήματα του συστήματος περιλαμβάνουν μονάδα ελέγχου εκτύπωσης, μίκτη και αντλία.

4.1.1 Ιδιότητες σκυροδέματος στην τρισδιάστατη εκτύπωση

Λόγω της φύσης της τρισδιάστατης εκτύπωσης, το μείγμα σκυροδέματος για τρισδιάστατη εκτύπωση πρέπει να πληροί τέσσερις ιδιότητες για αυτήν την εφαρμογή:

- i. Ικανότητα Εξώθησης. Πρόκειται για την ικανότητα του μίγματος σκυροδέματος να περνά μέσα από τους μικρούς σωλήνες και τα ακροφύσια της κεφαλής εκτύπωσης.
- ii. Εργασιμότητα. Πρόκειται για την ικανότητα του μίγματος σκυροδέματος να αναμιγνύεται, να τοποθετείται και να τελειώνει για να σχηματίζει ένα συνεκτικό μείγμα.
- iii. Ανοιχτός Χρόνος. Το χρονικό διάστημα που μπορεί να αποθηκευτεί το μείγμα σκυροδέματος διατηρώντας τη ρευστότητά του, ώστε να μπορεί να αντληθεί και να εξωθηθεί από τη δεξαμενή αποθήκευσης στο ακροφύσιο.
- iv. Κατασκευασιμότητα. Δηλαδή η ικανότητα του μίγματος σκυροδέματος να εξωθείται και να διατηρεί το σχήμα του.

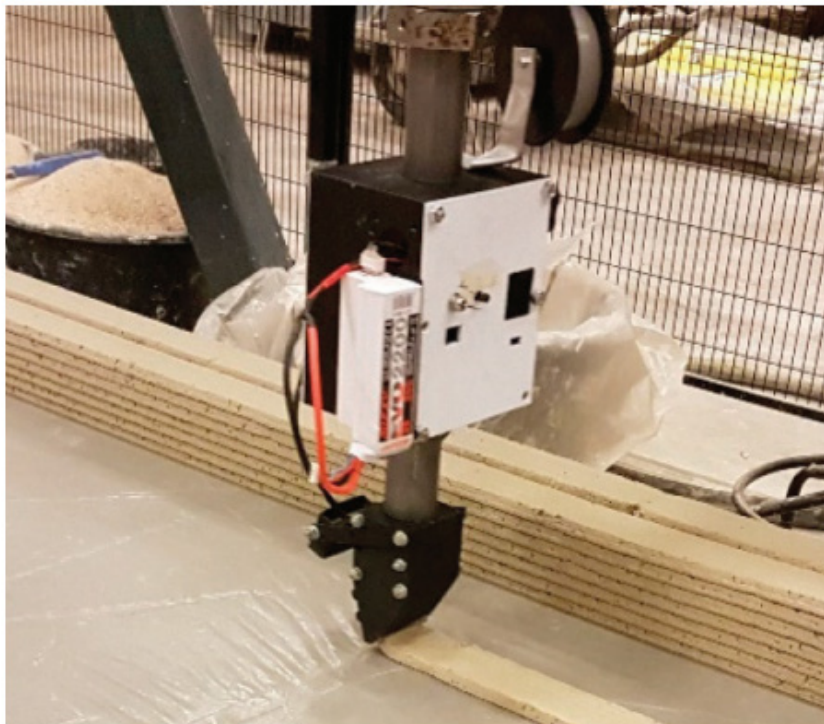
Αξίζει να σημειωθεί ότι οι τέσσερις ιδιότητες είναι αλληλένδετες και συχνά αντιφατικές, καθιστώντας δύσκολο να επιτευχθεί ένα ιδανικό μείγμα σκυροδέματος εκτύπωσης.

Παραδοσιακά, τα μείγματα σκυροδέματος περιλαμβάνουν τρία συστατικά: τσιμέντο (9–15%), νερό (15–16%) και λεπτά και χονδροειδή αδρανή (25–35% και 30–45%, αντίστοιχα) (PCA 2000). Οι ερευνητές διερευνούν τον σχεδιασμό του μίγματος σκυροδέματος για να ανταποκριθούν στις απαιτήσεις απόδοσης τόσο του νωπού όσο και του σκληρυμένου σκυροδέματος (Rushing et al. 2017; Le et al. 2012). Για να μειώσει το μέγεθος του μεγάλου αδρανούς ενώ πλησιάζει τις βέλτιστες ιδιότητες φρέσκου σκυροδέματος, το τρισδιάστατο εκτυπωμένο σκυρόδεμα χρησιμοποιεί κατά σειρά πολύ λεπτότερα υλικά όπως άμμο, άργιλο, ιπτάμενη τέφρα ή καπνό πυριτίου (Reharjo και Subakti 2013). Οι ενισχύσεις κοντών ινών όπως οι μεταλλικές ίνες, οι ίνες νάιλον, οι ίνες γυαλιού και οι ίνες άνθρακα δοκιμάζονται επίσης για τον μετριασμό της συρρίκνωσης, της ρωγμής και της αυξημένης αντοχής στην κάμψη (Shah 1991· Olivito and Zuccarello 2010). Οι Lim et al. ανέφεραν ότι το εκτυπωτικό κονίαμα με βάση το τσιμέντο αποτελούνταν από 54% άμμο, 36% δραστικές τσιμεντοειδείς ενώσεις και 10% νερό, αρκετά διαφορετικό από το συμβατικό μίγμα σκυροδέματος (Lim et al. 2012). Οι Rushing et al. προσδιόρισε το μεγαλύτερο μέγεθος χονδροειδών αδρανών ως 9,5 mm (3/8”), προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η πιθανότητα απόφραξης κατά την εξώθηση (Rushing et al. 2017). Bos et al. ανέπτυξε ένα μείγμα χρησιμοποιώντας τσιμέντο Portland με αντοχή σε θλίψη 28 ημερών 30 MPa (4.351 psi) χρησιμοποιώντας πυριτικό αδρανή με

μέγεθος σωματιδίων 1 mm, πληρωτικό ασβεστόλιθου και ίνες πολυπροπυλενίου (Bos et al. 2016). Gosselin et al. ανέπτυξε ένα μείγμα από 30–40% τσιμέντο Portland, 40–50% κρυσταλλικό πυρίτιο, 10% καπνό πυριτίας και 10% ασβεστόλιθο πληρωτικό με αναλογία νερού/τσιμέντου 0,1. Μια συντηρητική εκτίμηση για τη θλιπτική αντοχή ορίστηκε στα 120 MPa (17.404 psi) (Gosselin et al. 2016). Οι Le et al. ανέπτυξε ένα μείγμα από τσιμέντο 70% με αναλογία άμμου-συνδετικού 60:40, 20% ιπτάμενη τέφρα, 10% καπνό πυριτίας, 1,2 kg/m³ ίνες μικρού πολυπροπυλενίου, 1% υπερρρευστοποιητή και 0,5% επιβραδυντή με αναλογία w/c 0,26. Η αντοχή σε θλίψη 28 ημερών ήταν 110 MPa (15.954 psi)

4.1.2 Διαδικασία εκτύπωσης σκυροδέματος

Η διαδικασία εκτύπωσης ξεκινά με την προσθήκη νερού για την προετοιμασία της τσιμεντοκονίας. Το προαναμεμιγμένο διάλυμα αποθηκεύεται σε αναμικτήρα διάτμησης για να αποφευχθεί η πήξη και αντλείται στην κεφαλή εκτύπωσης, όπως φαίνεται στην εικόνα 6.



Εικόνα 6. Τρισδιάστατη εκτύπωση σκυροδέματος.

Μέσα στην κεφαλή εκτύπωσης υπάρχει ένας κοχλίας ανάμειξης, όπου διάφορα πρόσθετα ενσωματώνονται στο προαναμεμιγμένο διάλυμα για να επιταχυνθεί η πήξη του μείγματος μια

φορά εξωθήθηκε (Gosselin et al. 2016). Όταν ένα στρώμα τελειώσει την εκτύπωση, η κεφαλή εκτύπωσης σηκώνεται και εκτυπώνεται το επόμενο στρώμα. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να ολοκληρωθεί ολόκληρη η δομή. Διάφορα διαθέσιμα σχήματα και μεγέθη ακροφυσίων επηρεάζουν τον ρυθμό ροής και την ικανότητα εκτύπωσης της τσιμεντοκονίας. Επιπλέον, η γραμμική ταχύτητα της κεφαλής του εκτυπωτή επηρεάζει την απαιτούμενη πίεση της αντλίας και τον συνολικό χρόνο εκτύπωσης. Το ύψος της κεφαλής του εκτυπωτή πάνω από την επιφάνεια εκτύπωσης θα επηρεάσει επίσης τη γεωμετρία και τις ιδιότητες του τελικού προϊόντος.

4.2 Contour Crafting

Ο Khoshnevis ανέπτυξε το contour crafting (CC) στα μέσα της δεκαετίας του 1990 ώστε να εκτυπώσει ένα ολόκληρο σπίτι σε μια ενιαία εκτύπωση σε ένα σύστημα σκελετών. Κατά την μέθοδο αυτή, εξωθείται μια πάστα με βάση το τσιμέντο και εδράζεται στρώμα προς στρώμα. Το μίγμα που χρησιμοποίησε ο Khoshnevis για την μέθοδο περιελάμβανε 37% υδραυλικό τσιμέντο Portland τύπου II, 41% άμμο, 3% πλαστικοποιητή και 19% νερό, επιτυγχάνοντας τη μέγιστη αντοχή σε λίγες ώρες. Καθ' όλη τη διάρκεια της διαδικασίας εκτύπωσης, τα κατώτερα στρώματα έχουν χρόνο για μερική ωρίμανση, επιτρέποντάς τους να αντέχουν το φορτίο των στρωμάτων παραπάνω χωρίς να παραμορφώνουν τη δομή.

Σύμφωνα με τον Khoshnevis, η μέθοδος CC είναι μια πιο ολιστική μέθοδος κατασκευής, όπου ο οπλισμός από χάλυβα, τα πλακάκια δαπέδων και τοίχων, τα υδραυλικά, τα ηλεκτρικά συστήματα και η βαφή μπορούν όλα να αυτοματοποιηθούν και να εγκατασταθούν χωρίς την ανάγκη ανθρώπινης παρέμβασης, οδηγώντας σε εξοικονόμηση κόστους και χρόνου.

Το CC έχει δύο σπάτουλες που λειτουργούν ως συμπαγείς επίπεδες επιφάνειες στις οποίες το τυπωμένο υλικό μπορεί να διαμορφωθεί σε ελεύθερη μορφή και σύνθετες επιφάνειες. Η πλαϊνή σπάτουλα μπορεί να περιστραφεί για να σχηματίσει μη ορθογώνιες λείες επιφάνειες, όπως φαίνεται στην Εικόνα 7. Η άλλη πλευρά θα μοιάζει με το ραβδωτό φινίρισμα παρόμοιο με την εκτύπωση από σκυρόδεμα. Ωστόσο, σε αντίθεση με την εκτύπωση σκυροδέματος, το Cotour Crafting μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί ως υβριδικό σύστημα που εκμεταλλεύεται την τρισδιάστατη εκτύπωση μαζί με παραδοσιακές μεθόδους.



Εικόνα 7. Κατασκευή περιγράμματος.

4.3 Εκτύπωση D-Shape

Η εκτύπωση σε σχήμα D, που αναπτύχθηκε από τον Enrico Dini, μοιάζει πολύ με τη διαδικασία IBJ, όπου ένας συνδετικός παράγοντας ψεκάζεται σε κοκκώδες υλικό με ίνες ή και χωρίς (Εικόνα 8).

Η περιοχή εκτύπωσης είναι ένα σύστημα σκελετών αλουμινίου διαστάσεων 6 m x 6 m με την κεφαλή εκτύπωσης τοποθετημένη σε δύο ρομπότ σκελετών, το ένα εκ των οποίων διανέμει και απλώνει ένα κοκκώδες υλικό, ενώ το δεύτερο κρατά μια κεφαλή εκτύπωσης πολλαπλής δέσμησης (σχήμα D, 2017). Ο σκελετός του σκελετού είναι συνδεδεμένος σε τέσσερις βηματικούς κινητήρες που ρυθμίζουν το ύψος στην κατεύθυνση z. Η κεφαλή εκτύπωσης αποτελείται από 300 ακροφύσια (έως και 1000 ακροφύσια ανάλογα με τις

ανάγκες) που απέχουν 20 mm μεταξύ τους και ψεκάζουν ταυτόχρονα το συνδετικό μέσο. Ο συνδετικός παράγοντας είναι ένα υγρό με βάση το χλώριο που, όταν ψεκάζεται στο οξείδιο του μετάλλου στο κοκκώδες υλικό, αντιδρά για να σχηματίσει μια στερεή δομή (Lim et al. 2012). Αυτά τα ακροφύσια έχουν την ικανότητα να κινούνται κατά μήκος του άξονα y από ένα ηλεκτρικό έμβολο AC για να έχουν πλήρη κάλυψη της περιοχής εκτύπωσης (Cesaretti et al. 2014). Το κοκκώδες υλικό αποτελείται από υλικό που μοιάζει με άμμο, αναμεμιγμένο με κονιοποιημένο οξείδιο μετάλλου για να αντιδράσει με τον συνδετικό παράγοντα (Perkins and Skitmore 2015). Άλλα διαθέσιμα υγρά συνδετικά περιλαμβάνουν πολτούς με βάση το τσιμέντο Portland/Sorel ή γεωπολυμερή, και πολυμερικά αστάρια. Προκειμένου να προσδιοριστεί η βέλτιστη δομή τρισδιάστατης εκτύπωσης για το διαφορετικό φορτίο και τις θερμικές συνθήκες, διάφορα εμπορικά προγράμματα CAE βασίζονται σε δομική βελτιστοποίηση FEA και μερικές φορές τοπολογία για την ανάλυση ενός δεδομένου σχεδίου κτιρίου με τις φυσικές και μηχανικές ιδιότητες του 3D-εκτυπωμένου υλικού. Η προκύπτουσα βέλτιστη δομή εξάγεται ως τυπικό STL (σχήμα D 2017). Η εκτύπωση ξεκινά προσθέτοντας ένα βασικό στρώμα κοκκώδους υλικού στην περιοχή εκτύπωσης.



Εικόνα 8. Εκτύπωση με την μέθοδο D-Shape.

Στη συνέχεια, η κεφαλή εκτύπωσης ψεκάζει μια προκαθορισμένη ποσότητα του συνδετικού παράγοντα στις επιθυμητές θέσεις, εκτυπώνοντας αποτελεσματικά αυτή την περιοχή. βλέπε Εικόνα 8 (Cesaretti et al. 2014). Λόγω του διαχωρισμού των ακροφυσίων

κατά 20 mm, δεν υπάρχει πλήρης κάλυψη που οδηγεί σε κενά μεταξύ των περιοχών που ψεκάζονται. Επομένως, η κεφαλή εκτύπωσης μπορεί να μετακινηθεί στον άξονα y για να γεμίσει τα κενά. Κάθε σταγόνα συνδετικού έχει μέση διάμετρο 5 mm, επομένως απαιτούνται τέσσερα περάσματα για να γεμίσει το κενό των 20 mm μεταξύ δύο ακροφυσίων. Μόλις ολοκληρωθεί η εκτύπωση ενός στρώματος, η κεφαλή εκτύπωσης ανυψώνεται στον άξονα z και το επόμενο στρώμα κοκκώδους υλικού τοποθετείται και πιέζεται στο προηγούμενο στρώμα με δύναμη 0,0–0,5 kg/cm² (Cesaretti et al. 2014). Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να εκτυπωθεί πλήρως η δομή. Το υπόλοιπο κοκκώδες υλικό αφαιρείται με ισχυρές ηλεκτρικές σκούπες και ανακυκλώνεται στην επόμενη εκτύπωση.

4.4 Συζήτηση τεχνικών εκτύπωσης βασισμένων σε κοκκώδη υλικά

Η εκτύπωση σκυροδέματος, η εκτύπωση Contour Crafting, καθώς και η εκτύπωση σε σχήμα D είναι παρόμοιες στο ότι χρησιμοποιούν τις αρχές της κατασκευής πρόσθετων για την κατασκευή μιας δομής στρώμα προς στρώμα. Ωστόσο, κάθε μέθοδος έχει τις δικές της διακριτές αντοχές και ιδιότητες. Η εκτύπωση από σκυρόδεμα και σχήμα D παράγει σημαντικά υψηλότερη αντοχή σε θλίψη και κάμψη σε σύγκριση με την κατασκευή περιγράμματος CC λόγω της σύνθεσης του υλικού εκτύπωσης.

Κατά την μέθοδο Contour Crafting (CC), το μείγμα έχει πολύ υψηλή περιεκτικότητα σε τσιμέντο και μοιάζει περισσότερο με κονίαμα παρά με σκυρόδεμα. Επιπλέον η εν λόγω μέθοδος δεν σχεδιάστηκε για να είναι ένα αυτόνομο σύστημα. δημιουργεί απλώς ένα εξωτερικό πλαίσιο της κατασκευής που πρέπει να γεμίσει από ένα ισχυρότερο υλικό που τελικά παρέχει δομική στήριξη. Όταν εξετάζουμε τα φυσικά χαρακτηριστικά των μηχανών εκτύπωσης, η διάμετρος του ακροφυσίου και το πάχος του στρώματος είναι συνήθως ενδεικτικά της ταχύτητας εκτύπωσης και της ποιότητας που προκύπτει. Η διάμετρος του ακροφυσίου δείχνει πόσο υλικό μπορεί να εξωθηθεί σε μια επίπεδη επιφάνεια σε ένα μόνο πέρασμα, ενώ το πάχος του στρώματος δείχνει πόσο ψηλά μπορεί να κατασκευαστεί κάθε στρώμα. Αυτά τα δύο χαρακτηριστικά επηρεάζουν επίσης την ταχύτητα εκτύπωσης και την ανάλυση εκτύπωσης. Όσο μεγαλύτερη είναι η διάμετρος του ακροφυσίου και το πάχος του στρώματος, τόσο λιγότερος χρόνος θα χρειαστεί για να ολοκληρωθεί η εκτύπωση.

Η ταχύτητα, ωστόσο, έχει το κόστος της ανάλυσης. Όσο μεγαλύτερη είναι η διάμετρος του ακροφυσίου και το πάχος του στρώματος, τόσο λιγότερο λεπτομερές και περίπλοκο θα είναι ο τελικός σχεδιασμός (Perkins και Skitmore 2015). Η βελτιστοποίηση των διαδρομών εκτύπωσης έχει επίσης τη δυνατότητα να μειώσει τον χρόνο εκτύπωσης έως και 30% και να βελτιώσει την απόδοση του υλικού συνδέοντας την αρχή μιας διαδρομής εκτύπωσης με μια άλλη που τελειώνει στην ίδια θέση (Lim et al. 2012). Λόγω της φύσης της τρισδιάστατης εκτύπωσης, μια δομή κατασκευάζεται από κάτω προς τα πάνω. Ωστόσο, κατά την εκτύπωση ενός κτιρίου, οι προεξοχές για παράθυρα και πόρτες δημιουργούν μια πρόκληση.

Στην εκτύπωση σκυροδέματος, ένα δευτερεύον υλικό χρησιμοποιείται για την εκτύπωση μιας δομής στήριξης για το σκυρόδεμα μέχρι να τελειώσει η σκλήρυνση. Αυτή η υποστήριξη αφαιρείται αργότερα, προσθέτοντας ένα άλλο επίπεδο πολυπλοκότητας στη διαδικασία εκτύπωσης. Στην CC μέθοδο, ένα υπέρθυρο τοποθετείται αυτόματα πάνω από το κενό και η εκτύπωση συνεχίζεται με μικρή έως καθόλου καθυστέρηση. Στην εκτύπωση σε σχήμα D, το μη δεσμευμένο κοκκώδες υλικό χρησιμοποιείται ως στήριγμα.

Στην εκτύπωση σκυροδέματος, ο μεγαλύτερος περιορισμός είναι η χρήση ενός μόνο ακροφυσίου εκτύπωσης, με αποτέλεσμα να είναι πιο αργή από τις άλλες δύο διαδικασίες. Επίσης, ανάλογα με την επιθυμητή αισθητική εμφάνιση της ολοκληρωμένης κατασκευής, το τυπικό ραβδωτό φινίρισμα που σχετίζεται με την εκτύπωση σκυροδέματος θα μπορούσε να απαιτήσει εκτεταμένη μετα-επεξεργασία. Στο CC, το γεγονός ότι δεν είναι ένα αυτόνομο σύστημα και απαιτεί πρόσθετα υλικά και ακροφύσια προσθέτει ένα επίπεδο πολυπλοκότητας που αφαιρεί από τα παραδοσιακά οφέλη της τρισδιάστατης εκτύπωσης.

Όχι μόνο προσθέτει πολυπλοκότητα στην ίδια τη διαδικασία εκτύπωσης, αλλά και στη συντήρηση, τον καθαρισμό και τον έλεγχο αυτών των πρόσθετων συστημάτων (Lim et al. 2012). Στην εκτύπωση σε σχήμα D, η τεράστια ποσότητα υλικού που απαιτείται δημιουργεί προκλήσεις όταν θέλετε να χτίσετε μια δομή μεγάλης κλίμακας. Αν και το μη δεσμευμένο κοκκώδες υλικό μπορεί να συλλεχθεί και να επαναχρησιμοποιηθεί, ο χρόνος που απαιτείται για τη στρώση του υλικού και την αφαίρεσή του μετά την ολοκλήρωση της εκτύπωσης μπορεί να είναι αρκετά μεγάλος. Αυτό δεν μπορεί να ληφθεί σοβαρά υπόψη και πρέπει να σταθμιστεί με τα οφέλη αυτής της διαδικασίας. Ο συνδετικός παράγοντας μπορεί επίσης να προκαλέσει προβλήματα λόγω αιμορραγίας. Ενώ η διάμετρος μιας σταγόνας είναι 5 mm,

μπορεί να παρουσιαστεί αιμορραγία όταν ο συνδεδετικός παράγοντας διαρρέει σε άλλα μέρη της περιοχής εκτύπωσης και αντιδρά με μη καθορισμένες περιοχές. Αυτό δημιουργεί μια τραχιά επιφάνεια που απαιτεί σημαντική μετα-επεξεργασία όταν είναι επιθυμητό ένα λείο φινίρισμα.

ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ ΣΤΗΝ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ

Μέχρι σήμερα, υπάρχουν μόνο λίγα πλήρως τυπωμένα κτίρια και αυτή η τεχνολογία βρίσκεται ακόμη στα αρχικά στάδια ανάπτυξης. Η ενσωμάτωση τεχνολογιών τρισδιάστατης εκτύπωσης με παραδοσιακά δομικά στοιχεία και συστήματα εξακολουθεί να αποτελεί σημαντική πρόκληση. Αυτή η ενότητα εξετάζει κτίρια επίδειξης που κατασκευάστηκαν με μεθόδους τρισδιάστατης εκτύπωσης. Οι διαθέσιμες πληροφορίες για τη μελέτη περίπτωσης είναι πολύ περιορισμένες επειδή ορισμένες από τις εργασίες είναι εμπιστευτικές.

5.1 Additive Manufacturing Integrated Energy (AMIE) από την BAAM

Το AMIE, που φαίνεται στην εικόνα 9, είναι ένα τρισδιάστατο εκτυπωμένο κτίριο ενός δωματίου με αποτύπωμα 19,5 m² (210 ft.²) και 2,8 m (9 ft.3) ύψος, που υποστηρίζεται από το Υπουργείο Ενέργειας των ΗΠΑ (DOE).

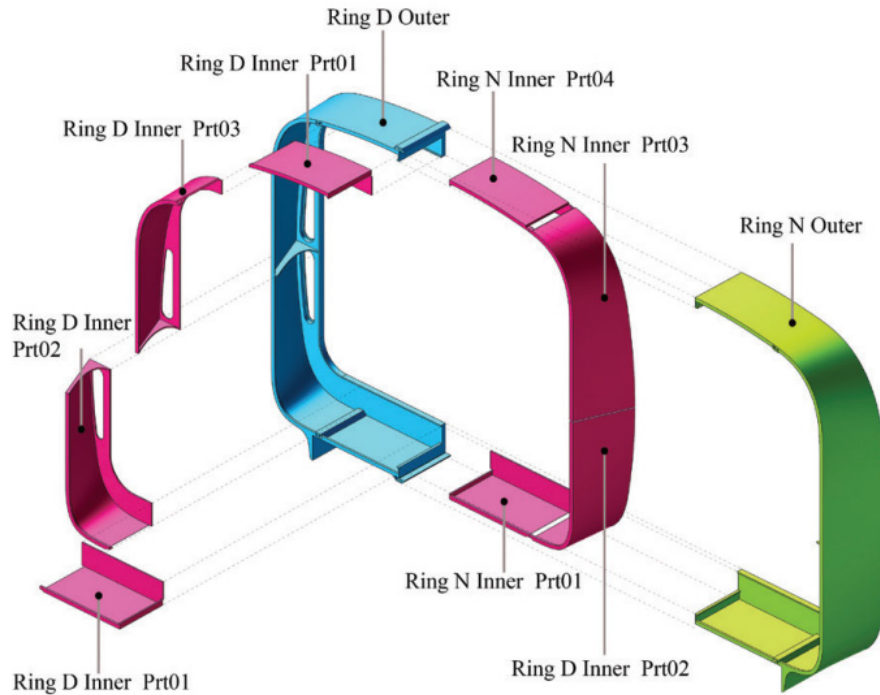
Σχεδιασμένο και κατασκευασμένο μέσω κοινής προσπάθειας με τις ORNL, Skidmore, Owings & Merrill (SOM), Clayton Homes, General Electric, Alcoa, Nanopore και Trudesign, η AMIE είναι μια εξαιρετική βιτρίνα ταχείας κατασκευής μέσω της κατασκευής πρόσθετων για τη σύνδεση ενός υβριδικού ηλεκτρικού οχήματος σε ένα κτίριο υψηλής απόδοσης (ORNL 2015). Η δομή και το περίβλημα του AMIE εκτυπώθηκαν με BAAM χρησιμοποιώντας 6.136 kg (13.500 λίβρες) υλικού ABS ενισχυμένου με 20% CF σε περίπου 225 ώρες (Biswas et al.

2017). Ο μηχανικός σχεδιασμός του AMIE αντιμετώπισε καινοτόμα τις ανισότροπες μηχανικές ιδιότητες. Η δομή του AMIE αποτελείται από 10 δακτυλίους πλάτους δύο ποδιών, όπως φαίνεται στην εικόνα 10 (αριστερά), και 8 δακτυλίους θόλου πλάτους δύο ποδιών.



Εικόνα 9. AMIE (SOM 2015). Ευγενική προσφορά του Εθνικού Εργαστηρίου Oak Ridge, Υπουργείο Ενέργειας των Η.Π.Α. Φωτογραφήθηκε από τον Jason Richards.

Καθένας από τους 3D-εκτυπωμένους δακτυλίους έχει δύο στρώματα: έναν εσωτερικό δακτύλιο και έναν εξωτερικό δακτύλιο για την ενσωμάτωση του εξωτερικού τοίχου, του υαλοπίνακα, του δαπέδου, των ηλεκτρικών διαδρομών, του φωτισμού και των ράβδων τάνσης. Λόγω του περιορισμού μεγέθους του BAAM, κάθε εξωτερικός δακτύλιος τυπώθηκε σε δύο μέρη σε σχήμα C, ενώ ο εσωτερικός δακτύλιος τυπώθηκε σε δύο σετ των τεσσάρων τεμαχίων για ευκολία εγκατάστασης. Αυτοί οι δακτύλιοι συνδέονται μεταξύ τους χρησιμοποιώντας ράβδους μετά την τάση σε όλο το μήκος του κτιρίου για να μετριάσουν την αδυναμία στην κατεύθυνση του άξονα z. Τα επάνω τμήματα δύο τμημάτων σχήματος C δένονται μεταξύ τους με πλευρικές βιδωμένες συνδέσεις, σχηματίζοντας μια δεμένη οροφή ζευκτών, όπως φαίνεται στην Εικόνα 10 (δεξιά). Η στρογγυλή οροφή μεταφέρει τη βαρύτητα, το χιόνι και τα φορτία στα πλευρικά τοιχώματα με μεγαλύτερη αντοχή. Το κάτω μέρος της καμάρας είναι δεμένο για να αποτρέπεται ο λυγισμός των τοίχων λόγω της ώθησης.



Εικόνα 10. AMIE: left: C-ring printing details; right: side plate bolted connection for truss roof.

Για να εξαλειφθεί η πιθανότητα ρωγμών εφελκυσμού, τέσσερις ράβδοι μετά την τάση, μία ανά γωνία του κτιρίου, προ-συμπιέζουν το κτίριο (Biswas et al. 2017). Καθώς ο συντελεστής θερμικής διαστολής στην κατεύθυνση Z για σύνθετο υλικό CF-ABS 20% είναι περίπου 7–8 φορές μεγαλύτερος από εκείνον της κατεύθυνσης του άξονα x, το AMIE στερεώνεται μόνο κοντά στο κέντρο για να αντιμετωπίσει πιθανά 12,5 mm (½ in.) διαστολή και συστολή. Επιτρέπει την κίνηση μέσω συρόμενων συνδέσεων μεταξύ της τρισδιάστατης εκτυπωμένης βάσης και της χαλύβδινης στήριξης. Το AMIE επιτυγχάνει καλή θερμική απόδοση με λεπτά τοιχώματα χρησιμοποιώντας μονωτικά πάνελ κενού πάχους 18 mm με το 1/10 της θερμικής αγωγιμότητας των δομικών υλικών που διατίθενται στο εμπόριο. Αυτή η μόνωση μείωσε αποτελεσματικά το κόστος θέρμανσης του κτιρίου (Balla et al 2008). Η AMIE επιδεικνύει καινοτόμες προσεγγίσεις και αποτελεσματικές λύσεις στις προκλήσεις που σχετίζονται με την τρισδιάστατη εκτύπωση.

5.2 Apis Cor/PIK 3D-printed house: contour crafting

Η Apis Cor/PIK κατασκεύασε ένα σπίτι 38 m² χρησιμοποιώντας έναν κινητό τρισδιάστατο εκτυπωτή σκυροδέματος τον Δεκέμβριο του 2016, όπως φαίνεται στην Εικόνα 11 (άνω). Ο εκτυπωτής CC 3D έχει διαστάσεις 4.00 x 1.60 x 1.50 μέτρα και ζυγίζει δύο τόνους, επιτρέποντάς του να χωράει σε φορτηγό για μεταφορά στη θέση εκτύπωσης. Σε αντίθεση με άλλες μεθόδους εκτύπωσης επιτόπου, που απαιτούν τη ρύθμιση ενός συστήματος σκελετών, ο εκτυπωτής Apis Cor (Εικόνα 11, κάτω) είναι ένα αυτόνομο σύστημα που μπορεί να ρυθμιστεί σε τριάντα λεπτά.



Εικόνα 11. Πάνω: Τελειωμένο εκτυπωμένο σπίτι 38m² από την ApisCor/PIK
Κάτω: Κινητός 3D printer επί τω έργω.

Όπως εύκολα καταλαβαίνει κανείς, δεν χρειάζεται προετοιμασία του χώρου, καθώς ο εκτυπωτής διαθέτει δύο ενεργά αντίβαρα για σταθεροποίηση. Ο ίδιος ο εκτυπωτής έχει

επιφάνεια εκτύπωσης 132 m² από τον περιστρεφόμενο βραχίονα χειριστή 360ο που μπορεί να εκτείνεται από 4 έως 8,5 μέτρα. Έχει δυνατότητα εκτύπωσης σε ύψος 3,3 μέτρων με επιφάνεια εξώθησης 2,5 x 2,5 cm που μπορεί να ρυθμιστεί με βάση το έργο. Το ιδιόκτητο μίγμα εκτύπωσης τσιμεντοκονίας χρησιμοποιεί πρόσθετα πρόσθετα για ενίσχυση, επιτυγχάνοντας φέρουσα ικανότητα 550 kN. Το υλικό έρχεται ως ξηρό μείγμα που τοποθετείται στη "Mobile Automated Mix and Supply Unit" (MAU) που προσθέτει αυτόματα νερό και τροφοδοτεί το μείγμα στην κεφαλή εκτύπωσης.

Η διαδικασία εκτύπωσης για τον οίκο Apis Cor ξεκίνησε με την εγκατάσταση του εκτυπωτή και του MAU επί τόπου. Ένας αισθητήρας υπερήχων προσαρτήθηκε στον εξωθητή για να εκτελέσει μια ανάλυση τραχύτητας στην επιφάνεια. Στη συνέχεια, ο εκτυπωτής γέμισε τις τρύπες για να δημιουργήσει μια λεία επιφάνεια εκτύπωσης. Ακολούθως, τυπώθηκε το πλαίσιο θεμελίωσης και προστέθηκε χειροκίνητα μεταλλική ενίσχυση κάθε 600 mm. Το πλαίσιο γέμισε με βαρύ σκυρόδεμα που σκληρύνθηκε για 12 ώρες για να στηρίξει την κατασκευή που θα κατασκευαστεί από πάνω. Το θεμέλιο ήταν αδιάβροχο και μια συσκευή εξομάλυνσης προσαρτήθηκε στον εξωθητή, παρόμοια με τη διαδικασία CC. Στη συνέχεια οι τοίχοι τυπώθηκαν στο καλούπι. Κάθε 60 cm τοποθετούνταν οριζόντια πλαστικός οπλισμός και χύνονταν κάθετος οπλισμός με βαρύ σκυρόδεμα. Η μόνωση αφρού γεμίστηκε στην καθορισμένη κοιλότητα και η οροφή τοποθετήθηκε χρησιμοποιώντας μια πολυμερή μεμβράνη. Τα παράθυρα και οι πόρτες τοποθετήθηκαν χειροκίνητα.

5.3 Winsun/Gensler 3D-Printed Building Office: Contour Crafting

Ένα τρισδιάστατο κτήριο γραφείων 250 m², που ονομάστηκε Γραφείο του Μέλλοντος, κατασκευάστηκε για το προσωπικό του Μουσείου του Μέλλοντος στο Ντουμπάι. (βλέπε Εικόνα 12, Sisson 2016).

Η Winsun είναι ο κατασκευαστής του τρισδιάστατου εκτυπωτή και οι Gensler, Thornton Thomasetti και Syska Hennessy είναι οι αρχιτεκτονικές και μηχανικές εταιρείες του έργου (Molitch-Hou 2016). Ο τρισδιάστατος εκτυπωτής σκυροδέματος που βασίζεται σε σκελετό, που αναπτύχθηκε από την Winsun, έχει ύψος 6,6 μέτρα, πλάτος 10 μέτρα και μήκος 40 μέτρα. Το μήκος του εκτυπωτή επεκτάθηκε στα 150 μέτρα για αυτό το έργο.



Εικόνα 12. Κτίριο γραφείων Winsun/Gensler

Τα δομικά στοιχεία και η δομή του κτιρίου εκτυπώθηκαν σε μια μονάδα παραγωγής και αποστέλλονται στην τοποθεσία για συναρμολόγηση. Το υλικό εκτύπωσης ήταν ένα ειδικό μείγμα από τσιμέντο, άμμο, ίνες και ιδιόκτητα πρόσθετα. Ο εκτυπωτής δημιούργησε κοίλα τμήματα για την εγκατάσταση σωληνώσεων, καλωδίωσης και μόνωσης (Winsun 2017). Μόλις στο εργοτάξιο, εγκαταστάθηκαν τυπωμένα τμήματα με παραδοσιακές μεταλλικές κατασκευές και πρόσθετο οπλισμό. Το κτίριο τυπώθηκε σε δεκαεπτά ημέρες και συναρμολογήθηκε επί τόπου σε μόνο δύο ημέρες. Σε σύγκριση με τις παραδοσιακές μεθόδους επιτόπιας κατασκευής, αυτή η διαδικασία εξοικονόμησε περίπου 80% στο κόστος κατασκευής και, 60% στο κόστος εργασίας, και αντιπροσώπευε μια μείωση κατά 60% στα στερεά απόβλητα (Winsun 2017).

ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΑΔΥΝΑΜΙΕΣ ΜΕΘΟΔΩΝ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ ΚΤΙΡΙΩΝ

Οι τρισδιάστατες τεχνολογίες εκτύπωσης επιτρέπουν την κατασκευή ελεύθερης μορφής και την οικονομική, βιώσιμη κατασκευή. Η τρισδιάστατη εκτύπωση απαιτεί λιγότερο υλικό, εργασία, ενέργεια και χρόνο και δημιουργεί λιγότερα απόβλητα από τις συμβατικές διαδικασίες κατασκευής και κατασκευής (Zhang and Khoshnevis 2013; Faludi et al. 2015; Kreiger and Pearce 2015). Με αυτούς τους τρόπους, καινοτόμες, ελεγχόμενες από υπολογιστή διεργασίες θα ξεπεράσουν δυνητικά την απόδοση των συμβατικών μεθόδων κατασκευής κτιρίων.

Οι μελλοντικές εξελίξεις στον υπολογιστικό σχεδιασμό, τη ρομποτική κατασκευή και την επιστήμη των υλικών πιθανότατα θα ενισχύσουν περαιτέρω την αποτελεσματικότητα και την ελκυστικότητα των τεχνολογιών κατασκευής τρισδιάστατης εκτύπωσης. Αν και η τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης είναι επί του παρόντος πιο ακριβή από τις συμβατικές μεθόδους κατασκευής για τυπικά ορθογώνια κτίρια, έχει τη δυνατότητα να είναι οικονομικά αποδοτική για κτίρια ελεύθερης μορφής και πολύπλοκες γεωμετρίες. Η τρισδιάστατη εκτύπωση επιτρέπει επίσης μια απρόσκοπτη διαδικασία από το σχεδιασμό έως την κατασκευή και την κατασκευή. Η ρομποτική κατασκευή μπορεί να εξαλείψει ή να μειώσει την ανάγκη για ανθρώπινη συμμετοχή, εξαλείφοντας πολλούς κινδύνους και λάθη στην κατασκευή (Schwartz and Park 2017).

Επιπλέον, η τρισδιάστατη εκτύπωση είναι μια συμπαγής φορητή διαδικασία κατασκευής ικανή να χρησιμοποιεί τοπικά υλικά, ακόμη και σε άλλους πλανήτες, για ρομποτική κατασκευή και κατασκευή. Αν και οι τεχνολογίες τρισδιάστατης εκτύπωσης επιδεικνύουν μεγάλες δυνατότητες στην κατασκευή, εξακολουθούν να υπάρχουν πολλές προκλήσεις για ερευνητές, αρχιτέκτονες, μηχανικούς και τεχνικούς. Λόγω των μικρών διαστάσεων του 3D εκτυπωτή, η απευθείας εκτύπωση σημαντικού μεγέθους κτιρίου είναι πολύ περιορισμένη. Εξ ου και η μικρής κλίμακας και τα προκατασκευασμένα μέρη πολλών κτιρίων επίδειξης (Keating et al. 2017). Η χρήση προκατασκευής μπορεί να εξασφαλίσει υψηλή ποιότητα και να αποφύγει τη μεταφορά του ίδιου του εκτυπωτή 3D.

Λόγω των μη παραδοσιακών σύνθετων υλικών της μεθόδου κατασκευής πρόσθετων, οι συνδέσεις των εξαρτημάτων που εκτυπώνονται με 3D είναι μία πρόκληση. Απαιτείται μια ολοκληρωμένη δομική μελέτη για να ληφθούν υπόψη οι εκτροπές, οι θερμικές καταπονήσεις και άλλοι κρίσιμοι παράγοντες που ελέγχουν την ακρίβεια. Καθώς η προκατασκευή συνεπάγεται σχετικά υψηλό κόστος διαπνοής, η επιτόπια κατασκευή προσφέρει πλεονέκτημα κόστους ενώ επιτρέπει αλλαγές σχεδιασμού κατά την κατασκευή. Ωστόσο, οι δομικές (επιφανειακές), περιβαλλοντικές και καιρικές συνθήκες (άνεμος, θερμοκρασία και υγρασία) του χώρου θα έχουν σημαντικές επιπτώσεις στην ασφάλεια και την ποιότητα της τυπωμένης κατασκευής. Επομένως, οι επιτόπιοι ελεγχόμενοι θάλαμοι κατασκευής ενδέχεται να βελτιστοποιήσουν την εκτύπωση υψηλής ποιότητας επί τόπου. Τα υλικά που βασίζονται σε πολυμερή δεν είναι αποτελεσματικά δομικά συστατικά λόγω του περιορισμού της μηχανικής αντοχής, της ανισοτροπίας και της θερμικής ευαισθησίας τους.

Επιπλέον, τα υλικά τρισδιάστατης εκτύπωσης που βασίζονται σε πολυμερή δεν προσφέρουν την αντίσταση στη φωτιά που απαιτείται για πολλές τοποθεσίες και καταλήψεις. Το Mesh Mold έχει ένα πλεονέκτημα δεδομένου ότι χρησιμοποιεί πολυμερές συνεχούς ίνας, το οποίο έχει καλύτερη μηχανική αντοχή είτε από το ΒΑΑΜ είτε από το ικρίωμα ΑΜ γεμάτο με τσιμεντοειδές υλικά μέσα στο Mesh Mould. Ο συνδυασμός πολυμερών σύνθετων υλικών και τσιμεντοειδών υλικών θα μπορούσε να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις του οικοδομικού κώδικα. Ωστόσο, οι μέθοδοι κατασκευής των μοντέλων πλέγματος χρειάζονται ακόμα βελτίωση. Τα υλικά με βάση το τσιμέντο προσφέρουν δομικά πλεονεκτήματα έναντι των σύνθετων πολυμερών. Τα τσιμεντοειδή υλικά έχουν καλή αντοχή στη θλίψη αλλά είναι αδύναμα σε τάση. Ως εκ τούτου, απαιτείται ενίσχυση.

Οι κοντές ίνες και οι συνεχείς μύθοι που προστίθενται σε τσιμεντοειδές υλικά μπορούν να ενισχύσουν τη δομική αντοχή. Ωστόσο, υπάρχουν ανησυχίες σχετικά με την αντοχή σε κάμψη του σκυροδέματος, που απαιτεί πρόσθετο οπλισμό. Αυτός ο πρόσθετος οπλισμός δεν είναι αυτοματοποιημένος και απαιτεί χειροκίνητη εγκατάσταση. Η αυτοματοποίηση αυτής της διαδικασίας θα επιτρέψει πιο απρόσκοπτη και αποτελεσματική εκτύπωση. Λόγω των περιορισμών των φυσικών ιδιοτήτων των υλικών, τα τρισδιάστατα εκτυπωμένα εξαρτήματα πρέπει να σχεδιάζονται με λογισμικό υπολογιστικής ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων. Αυτή η απαίτηση μπορεί να περιορίσει την ευρεία εφαρμογή της τρισδιάστατης εκτύπωσης στην οικοδομική βιομηχανία. Τέλος, τα περιβάλλοντα τρισδιάστατης εκτύπωσης μπορεί να είναι επιβλαβή για τους ανθρώπους, λόγω της απελευθέρωσης αερίων από πολυμερή ή των λεπτών σωματιδίων που παράγονται από τα υλικά με βάση τη σκόνη. Επομένως, οι συνθήκες εκτύπωσης εκτός και επί τόπου εκτύπωσης πρέπει να παρακολουθούνται συνεχώς για κινδύνους για την ανθρώπινη υγεία και πρέπει να λαμβάνονται οι απαραίτητες προφυλάξεις.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

Οι τρισδιάστατες τεχνολογίες εκτύπωσης επιτρέπουν νέες λύσεις στο σχεδιασμό και την κατασκευή κτιρίων. Η χρήση της τρισδιάστατης εκτύπωσης στην αρχιτεκτονική εξαρτάται από την ακρίβεια του εκτυπωτή, τη διαθεσιμότητα μιας μεγάλης ποικιλίας υλικών και το κόστος παραγωγής. Οι μελλοντικοί τομείς έρευνας περιλαμβάνουν την ανάπτυξη τρισδιάστατων εκτυπωτών ικανών να εκτυπώνουν κατασκευές μεγάλης κλίμακας και να λειτουργούν αυτόνομα σε διάφορες περιβαλλοντικές συνθήκες, που είναι προσαρμόσιμοι σε ένα ευρύ φάσμα έργων και προσφέρουν ευκολία στη συναρμολόγηση, τη μεταφορά και την αποσυναρμολόγηση. Τα δεδομένα που συλλέγονται στο εργοτάξιο από τρισδιάστατους εκτυπωτές θα αποτελούν αναπόσπαστο μέρος του λογισμικού σχεδίασης και κατασκευής με δυνατότητες παραμετρικής βελτιστοποίησης.

Αυτή η ενοποίηση θα επιτρέψει αυξημένη ανταγωνιστικότητα κόστους και βιωσιμότητα της αγοράς σε σύγκριση με την παραδοσιακή κατασκευή κτιρίων. Στην κατασκευή εκτός του χώρου, το λογισμικό θα βελτιστοποιήσει τις μηχανικές και δομικές επιδόσεις ελαχιστοποιώντας τα απόβλητα και την κατανάλωση ενέργειας. Απαιτούνται πρόσθετες μελέτες για προηγμένα υλικά κατασκευής προσθέτων για την αύξηση της δομικής αντοχής, της αντοχής στη φωτιά και της οικονομικής αποδοτικότητας.

Τέλος, δεδομένου ότι τα τρισδιάστατα εκτυπωμένα κτίρια, όπως και τα συμβατικά αντίστοιχά τους, πρέπει να παρέχουν υγιή και άνετα περιβάλλοντα διαβίωσης, δεδομένου του

περιορισμένου αριθμού τρισδιάστατων εκτυπωμένων κτιρίων που υπάρχουν επί του παρόντος, απαιτείται περισσότερη έρευνα σχετικά με τις περιβαλλοντικές επιδόσεις και τη μακροζωία του

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. 3DPI. 2014. "Printing Processes." Accessed June 21, 2016. <http://3dprintingindustry.com/3d-printing-basics-free-beginners-guide/processes/>.
2. ASTM. 2010. "ASTM F2792-10 Standard Terminology for Additive Manufacturing." <http://www.astm.org/DATABASE.CART/HISTORICAL/F2792-10.htm>.
3. Biswas, K., J. Rose, L. Eikevik, M. Guerguis, P. Enquist, Brian Lee, R. Jackson. 2017. "Additive Manufacturing Integrated Energy— Enabling Innovative Solutions for Buildings of the Future." *Journal of Solar Energy Engineering* 139: 015001–10.
4. Bos, F., R. Wolfs, Z. Ahmed, and T. Salet. 2016. "Additive Manufacturing of Concrete in Construction: Potentials and Challenges of 3D Concrete Printing." *Virtual and Physical Prototyping* 11 (3): 209–225.
5. Bosscher, P., R. Williams, L. Bryson, and D. Castro-Lacouture. 2007. "Cable-Suspended Robotic Contour Crafting System." *Automation in Construction* 17 (1): 45–55.
6. Boyd IV, R. P. 2013. Additive manufacturing of Building and Other Structures. World Patent No. WO2015/065936 A3, filed October 30, 2013, and issued May 7, 2015.
7. Cali, J., D. Calian, C. Amati, R. Kleinberger, A. Steed, J. Kautz, and T. Weyrich. 2012. "3D-Printing of Non-assembly, Articulated Models." *ACM Transactions on Graphics (TOG) - Proceedings of ACM SIGGRAPH Asia 2012* 31: 10. December 2012, Singapore.

8. Costanzi, C. B. 2016. 3D Printing Concrete onto Flexible Surfaces. Master thesis, Delft University of Technology, The Netherlands.
9. D-shape. 2017. "D-shape the Large-Scale 3D Printer." <https://dshape.com/what-is-it/>
10. Duty, C., T. Drye, and A. Franc. 2014. "Material Development for Tooling Applications Using Big Area Additive Manufacturing (BAAM)." Oak Ridge, TN: Oak Ridge National Lab, ORNL/ TM-2015/78.
11. Duty, C., V. Kunc, B. Compton, B. Post, D. Erdman, R. Smith, and L. Love. 2017. "Structure and Mechanical Behavior of Big Area Additive Manufacturing (BAAM) Materials." *Rapid Prototyping Journal* 23 (1), 181–189.
12. Faludi, J., C. Bayley, S. Bhogal, and M. Irubarne. 2015. "Comparing Environmental Impacts of Additive Manufacturing vs Traditional Machining via Life-Cycle Assessment." *Rapid Prototyping* 21: 14–33.
13. Gibson, I., D. W. Rosen, and B. Stucker. 2010. *Additive Manufacturing Technologies Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing*. New York: Springer, 19–243.
14. Gosselin, C., R. Duballet, P. Roux, N. Gausilliere, J. Dirrenberger, and P. Morel. 2016. "Large-Scale 3D Printing of Ultra-High Performance Concrete—A New Processing Route for Architects and Builders." *Materials & Design* 100: 102–109.
15. Hack, N., W. Lauer, F. Gramazio, and M. Kohler. 2015. "Mesh Mould: Robotically Fabricated Metal Meshes as Concrete Formwork and Reinforcement." *Ferro* 11: 347–359.
16. Hack, N. P., W. Lauer, F. M. Gramazio, M. Kohler, and N. Blank. 2013, *Methods of Fabricating a 3-Dimensional Structure, Mesh Formwork Element for Fabricating a 3-Dimensional Structure, and Method of Fabricating the Same*. World Patent No. WO 2015/034438 A1, filed September 4, 2013, and issued March 12, 2015.
17. Hack, N., T. Wangler, J. Mata-Falcón, K. Dörfler, N. Kumar, A. N. Walzer, and M. Kohler. 2017. "Mesh Mould: An On-Site, Robotically Fabricated, Functional Formwork." *Second Concrete Innovation Conference (2nd CIC)*. (Tromsø: CIC), 11.

18. Jakob, and J. Groll. 2015. "Additive Manufacturing of Scaffolds with Submicron Filaments via Melt Electrospinning Writing." *Biofabrication* 7: 035002.
19. Hwa-Hsing, T., C. Ming-Lu, and Y. Hsiao-Chuan. 2011. "Slurrybased Selective Laser Sintering of Polymer-Coated Ceramic Powders to Fabricate High Strength Alumina Parts." *Journal of the European Ceramic Society* 31 (8): 1383–1388.
- Hwang, D., and B. Khoshnevis. 2005. "An Innovative Construction Process-Contour Crafting (CC)." 22nd International Symposium on Automation and Robotics in Construction. (Ferrara: ISARC), 6.
20. Jayanthi, V., K. Chandru, S. Mehala, D. Divya, and B. Soundara. 2017. "Construction of Buildings Using 3D Printers." *International Journal of Intellectual Advancements and Research in Engineering Computations* 5 (1): 891–894.
21. Kreiger, M., and J. Pearce. 2015. "Environmental Life Cycle Analysis of Distributed Threedimensional Printing and Conventional Manufacturing of Polymer Products." *ACS Sustainable Chemicle Engineering* 1: 1511–1519.
22. Le, T. T., S. A. Austin, S. Lim, R. A. Buswell, A. G. Gibb, and T. Thorpe. 2012. "Mix Design and Fresh Properties for HighPerformance Printing Concrete." *Materials and Structures* 45: 1221–1232.
23. Love, L., C. Duty, B. Post, R. Lind, P. Lloyd, V. Kunc, and C. Blue. 2015. "Breaking Barriers in Polymer Additive Manufacturing." Baltimore, MD: SAMPE.
24. Love, L., V. Kunc, O. Rios, C. Duty, A. Elliott, B. Post, and C. Blue. 2014. "The Importance of Carbon Fiber to Polymer Additive Manufacturing." *Journal of Materials Research* 29 (17): 1893–1898.
25. Mataerial. 2013. "A Radically New 3D Printing Method." Accessed February 26, 2018. <http://www.Mataerial.com/#firstPage>.
26. Molitch-Hou, M. 2016. "Dubai Unveils First 3D-Printed Office Building." Accessed July 28, 2017. <http://www.engineering.com/3DPrinting/3DPrintingArticles/ArticleID/12225/Dubai-UnveilsFirst-3D-Printed-Office-Building.aspx>.
27. Ning, F., W. Cong, J. Qiu, J. Wei, and S. Wang. (2015). "Additive Manufacturing of Carbon Fiber Reinforced Thermoplastic Composites Using Fused Deposition Modeling." *Composites Part B: Engineering* 80, 369–378.

28. Noorani, R. 2006. *Rapid Prototyping—Principles and Applications*. New York: John Wiley & Sons, 14–20; 63–80.
29. Novikov, P., and S. Jokic. 2013. System and Methods for Manufacturing a Three-Dimensional Object from Freely Formed Three-Dimensional Curves. US Patent No. 20140/284832, filed May 14, 2013, and issued September 25, 2014.
30. Olivito, R., and F. Zuccarello. 2010. “An Experimental Study on the Tensile Strength of Steel Fiber Reinforced Concrete.” *Composites: Part B* 41 (3): 246–255.
31. ORNL. (2015). “Fact Sheet of AMIE.” Accessed July 28, 2017. <http://web.ornl.gov/sci/eere/amie/media/AMIE-DemonstrationProject.pdf>.
32. Perkins, I., and M. Skitmore. 2015. “Three-Dimensional Printing in the Construction Industry: A Review.” *Journal of Construction Management* 15 (1): 1–9.
33. Petrovic, V., Gonzalez, J., Ferrando, O., Gordillo, J., Puchades, J., & Griñan, L. 2010. Additive Layered Manufacturing: Sectors of Industrial Application Shown through Case Studies. *International Journal of Production Research*, 49(4):1061-1079.
34. Rushing, T., G. Al-Chaar, B. Eick, J. Burroughs, J. Shannon, L. Barna, and M. Case. 2017. “Investigation of Concrete Mixtures for Additive Construction.” *Rapid Prototyping Journal* 23 (1): 74–80.
35. Sachs, E., M. Cima, and J. Cornie. 1990. “Three-Dimensional Printing: Rapid Tooling and Prototypes Directly from a CAD Model.” *CIRP Annals—Manufacturing Technology* 39 (1): 201–204.
36. Sisson, P. 2016. “The World’s First 3D-Printed Office is Now Open in Dubai.” Accessed August 2, 2017. <https://www.curbed.com/2016/5/31/11816486/3d-printed-office-dubai-gensler>.
37. Zhang, J., and B. Khoshnevis. 2013. “Optimal Machine Operation Planning for Construction by Contour Crafting.” *Automation in Construction* 29, 50–67