



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ**  
**«ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ»**

Μεταπτυχιακή Εργασία

**«Εγκαταστάσεις 3-D εκτύπωσης τσιμέντου.  
Πλεονεκτήματα και τεchnοοικονομική μελέτη»**

Δημήτριος Κονταρούδας

***Επιβλέπων: Καθηγητής Βασίλειος Σπιτάς***

ΑΘΗΝΑ 2024



## **Αφιερώσεις**

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια του Διατμηματικού Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, Συστήματα Αυτοματισμού.

Με την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας ολοκληρώνεται το ταξίδι των μεταπτυχιακών σπουδών μου που είχα την ευκαιρία να πραγματοποιήσω στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. Η παρούσα διπλωματική εργασία αφιερώνεται στους γονείς μου Κλαίρη και Νάσο, στον αδερφό μου Γιάννη και στην κοπέλα μου Μαρία, οι οποίοι με τη συνεχή βοήθεια και επικρότηση τους με βοηθούν να προχωράω και να πετυχαίνω τους στόχους και τα όνειρα μου.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή του ΕΜΠ κο. Βασίλη Σπιτά για την ανάθεση του θέματος, την καθοδήγηση του και τη βοήθεια του, με την οποία ολοκληρώθηκε με επιτυχία ο κύκλος των μεταπτυχιακών μου σπουδών, καθώς και τον υπ. Διδάκτορα του ΕΜΠ Γιώργο Βασιλείου για τη βοήθεια του και την παρακολούθηση της πορείας της εργασίας μου.

# Περιεχόμενα

Κατάλογος Πινάκων	7
Περίληψη	8
Abstract	9
Πρόλογος	10
<b>1 Εισαγωγή στο 3D Printing</b>	<b>12</b>
1.1 Εφαρμογές 3DCP .....	15
1.2 Πλεονεκτήματα & Μειονεκτήματα.....	15
1.3 Εισαγωγή στις βασικές μεθόδους προσθετικής κατασκευής.....	16
1.3.1 Εξώθηση υλικού .....	18
1.3.2 Στερεολιθογραφία (SLA).....	19
1.3.1 Τεχνολογία BAAM.....	20
Βιβλιογραφία Κεφαλαίου 1. ....	21
<b>2 Μεθοδολογία 3D εκτύπωσης τσιμέντου</b>	<b>23</b>
2.1 Τεχνολογίες Προσθετικής κατασκευής βασισμένες σε σύνθετα υλικά.....	23
2.1.1 Τεχνολογία Mesh Mould διχτυωτό καλούπι .....	23
2.1.2 Τρισδιάστατη Εκτύπωση Καμπύλης 3D Curve.....	24
2.1.3 Μέθοδος Ικριώματος (Scaffold Additive Manufacture) .....	25
2.2 Τεχνολογίες κοκκοειδών υλικών.....	25
2.2.1 Εκτύπωση σκυροδέματος με εξώθηση .....	25
2.2.2 Contour Crafting.....	26
2.2.3 Concrete Printing .....	27
2.2.4 Powder-based Technique. ....	29
2.2.5 D-shape .....	30
2.2.6 Emerging Objects.....	31
2.2.7 Powder-based 3DCP με χρήση Γεοπολυμερών.....	31
2.2.8 Σύνοψη Μεθόδων .....	32
2.2.9 Διαδικασία Εκτύπωσης.....	33
2.3 Το Τσιμέντο και τα χαρακτηριστικά του .....	33
2.4 Μηχανικές Ιδιότητες Κονιάματος 3DCP .....	39
2.4.1 Εισαγωγή.....	39
2.4.2 Πειραματική διάταξη.....	40
2.4.3 Προετοιμασία και πειράματα .....	41
2.4.4 Παρουσίαση ρωγμών.....	43
2.4.5 Αντοχή σε κάμψη .....	44
2.4.6 Παραμετρική ανάλυση αντοχής δεσμού.....	45
2.4.7 Αντοχή σε θλίψη & εφελκυσμό.....	47

Βιβλιογραφία Κεφαλαίου 2.....	49
<b>3 Οι απαιτήσεις της τρισδιάστατης εκτύπωσης τσιμέντου στον κατασκευαστικό τομέα</b>	<b>53</b>
3.1 Ο ψηφιακός σχεδιασμός.....	53
3.2 Εξέλιξη του ψηφιακού σχεδιασμού .....	54
3.3 Ο Αλγοριθμικός σχεδιασμός .....	56
3.4 Εργαλεία σχεδιασμού.....	58
3.5 Οι απαιτήσεις της τρισδιάστατης εκτύπωσης κατοικιών σκυροδέματος.....	60
Βιβλιογραφία κεφαλαίου 3 .....	67
<b>4 Βιωσιμότητα της 3DCP στον κατασκευαστικό τομέα Πλεονεκτήματα &amp; Μειονεκτήματα</b>	<b>69</b>
4.1 Πλεονεκτήματα & μειονεκτήματα της 3D εκτύπωσης.....	69
4.2 Βιώσιμη αρχιτεκτονική & σχεδιασμός στο πλαίσιο των τριπλών μηδενικών οικολογικών κτιρίων .....	71
4.3 Οι αρχιτεκτονικές προδιαγραφές των 3D printed σπιτιών απέναντι στους διεθνείς κανονισμούς και πρότυπα .....	73
4.3.1 Προτυποποίηση & Κανονισμοί 3DCP .....	76
4.4 Περιβαλλοντική βιωσιμότητα .....	76
4.5 Η χρήση πράσινων υλικών.....	79
4.6 Κοινωνικά οφέλη και η ανάγκη για πράσινη τρισδιάστατη εκτύπωση σε κλίμακα .....	80
Βιβλιογραφία κεφαλαίου 4 .....	82
<b>5 Τεχνοοικονομική Ανάλυση</b>	<b>86</b>
5.1 Εισαγωγή στην κυκλική οικονομία.....	86
5.2 Ανάλυση των κατηγοριών των εκτυπωτών .....	87
5.2.1 Εκτυπωτές Gantry.....	88
5.2.2 Ρομποτικοί εκτυπωτές.....	88
5.2.3 Επιτόπιοι Εκτυπωτές – in situ.....	89
5.2.4 Εκτυπωτές εκτός τοποθεσίας – off site .....	89
5.2.5 Εκτυπωτές σμήνους.....	90
5.2.6 Κόστος .....	91
5.3 Σύγκριση συμβατικής διαδικασίας με το 3D printing .....	92
5.4 Υπόδειγμα κατασκευής.....	96
Βιβλιογραφία κεφαλαίου 5 .....	98
<b>6 Επίλογος</b>	<b>100</b>

# Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1-1. Παραδείγματα εφαρμογών τρισδιάστατης εκτύπωσης τσιμέντου: (α) τραπέζι και παγκάκι, (β) δομικά υλικά, (γ) γέφυρα στην Βενετία σχεδιασμένη από το αρχ. Γραφείο Zaha Hadid, (δ) σπίτι στην Γερμανία, (ε) δημαρχείο στο Dubai, (στ) γλάστρα (πηγή: διαδίκτυο) .....	15
Σχήμα 1-2. Μέθοδος στερεολιθογραφίας .....	20
Σχήμα 2-1. Μέθοδος Mesh Mould .....	24
Σχήμα 2-2. Η μέθοδος Contour Crafting .....	27
Σχήμα 2-3. Παράδειγμα 3D concrete printing .....	28
Σχήμα 2-4. Παράδειγμα 3D concrete printing μεγάλης κλίμακας .....	29
Σχήμα 2-5. powder based Technique .....	29
Σχήμα 2-6. (α) Η κατασκευή Bloom, (β) η κατασκευή shed .....	31
Σχήμα 2-7. Powder bases 3DCP με χρήση Γεοπολυμερών .....	32
Σχήμα 2-8. Παράδειγμα τσιμέντου για χρήση 3DCP .....	33
Σχήμα 2-9. Αναπαράσταση παροχέτευσης στην αντλία για την σκυροδέτηση με τη μέθοδο 3DCP .....	38
Σχήμα 2-10. (α) δύναμη εφελκυσμού, (β) δύναμη συμπίεσης, (γ) δύναμη διαχωρισμού, (δ) διατμητική τάση .....	40
Σχήμα 2-11. Εξοπλισμός πειράματος: (α) εκτυπωτής τύπου gantry, (β) nozzle .....	42
Σχήμα 2-12. Σχέδια ρωγμών. (α-ε) 3D εκτυπωμένο ECC, (f) παραμορφωμένο πλέγμα με ζημιά από εφελκυσμό, (g, h) ECC σε χυτό καλούπι .....	43
Σχήμα 2-13. Διαδικασία εμφάνισης ρωγμών του 3D-ECC-300 .....	44
Σχήμα 2-14. Ποσοτική αξιολόγηση διακλάδωσης και εκτροπής ρωγμών. (α) 3D-ECC-300. (β) 3D-ECC-500 .....	44
Σχήμα 2-15. Καμπύλες φόρτισης CTOD του 3D-ECC-100 με διαφορετικές αντοχές δεσμού .....	46
Σχήμα 2-16. Αντοχή σε κάμψη και αντοχή σε θραύση του 3D-ECC-100 με διαφορετικές αντοχές δεσμού .....	46
Σχήμα 2-17. μεθοδος κοπής εκτυπωμένου υλικού για την πειραματική διάταξη .....	47
Σχήμα 2-18. Αντοχή σε θλίψη εκτυπωμένων δοκιμών με (α) μεταλλική ενίσχυση και (β) χωρίς – και κατευθύνσεις εκτύπωσης .....	47
Σχήμα 2-19. Αποτελέσματα δοκιμής αντοχής σε θλίψη .....	48
Σχήμα 2-20. Αντοχή σε εφελκυσμό .....	48
Σχήμα 2-21. παραμόρφωση εκτυπωμένου υλικού από 5 έως 30 layers .....	49
Σχήμα 3-1. Το πρόγραμμα Grasshopper .....	54
Σχήμα 3-2. Κατασκευή με τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης από την εταιρεία WinSun .....	61
Σχήμα 3-3. Δοκιμαστικές ενέργειες τρισδιάστατης εκτύπωσης σε ερευνητικό στούντιο .....	62
Σχήμα 3-4. Protohouse 2.0 .....	64
Σχήμα 3-5. Απεικόνιση έντυπων υλικών .....	66
Σχήμα 3-6. Διαδικασία εκτύπωσης 3DCP μέσω εκτυπωτών σμήνους .....	66
Σχήμα 3-7. Solar Sinter του Markus Kayser .....	81
Σχήμα 5-1. Εκτυπωτές 3DCP τύπου gantry .....	88
Σχήμα 5-2. (α) Ρομποτικός βραχίονας 3DCP της εταιρείας Cybe, (β) κατασκευή 3DCP .....	89
Σχήμα 5-3. Ρομποτικοί βραχίονες σμήνους (α) σε σταθερή βάση, (β) σε κινητή βάση .....	90
Σχήμα 5-4. Κάτοψη ισόγειας κατοικίας με εμβαδόν 120m <sup>2</sup> .....	96
Σχήμα 5-5. Όψη ισόγειας κατοικίας .....	97

## Κατάλογος Πινάκων

<i>Πίνακας 2-1. Αναλογίες μίξης του 3D τσιμέντου</i> .....	41
<i>Πίνακας 2-2. Χημικές ενώσεις και αναλογίες των αναμειγμένων υλικών στο τσιμέντο</i> .....	41
<i>Πίνακας 2-3. Φυσικές και μηχανικές ιδιότητες των ινών πολυαιθυλενίου</i> .....	41
<i>Πίνακας 2-4. Γεωμετρικά χαρακτηριστικά τσιμέντου</i> .....	42
<i>Πίνακας 2-5. πειραματικά και αριθμητικά αποτελέσματα τυπωμένων δοκών ECC.</i> .....	45
<i>Πίνακας 3-1. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα 3DCP</i> .....	71
<i>Πίνακας 5-1. Σύγκριση εκτυπωτών 3DCP</i> .....	91
<i>Πίνακας 5-2. Σύγκριση συμβατικής μεθόδου κατασκευής με 3DCP</i> .....	95
<i>Πίνακας 5-3. Ποσοτικά χαρακτηριστικά των μεθόδων 3DCP και της συμβατικής μεθόδου</i> .....	97
<i>Πίνακας 5-4. Σύγκριση κόστους συμβατικής μεθόδου κατασκευής &amp; 3DCP</i> .....	98

## Περίληψη

Η σύνοψη αυτής της ερευνητικής εργασίας συζητά το αναδυόμενο πεδίο της τρισδιάστατης εκτύπωσης τσιμέντου, επεξεργάζοντας τις μεθοδολογίες, τα οφέλη και τα εμπόδια που αντιμετωπίζει. Η εφαρμογή αυτής της τεχνολογίας αιχμής στον οικοδομικό τομέα είναι έτοιμη να φέρει επανάσταση στις παραδοσιακές κατασκευαστικές πρακτικές. Η παρούσα εργασία υπογραμμίζει την κρίσιμη ανάγκη για αυτοματισμό και αυξημένη απόδοση μέσω της ανάπτυξης τρισδιάστατων εκτυπωτών, οι οποίοι είναι ικανοί να κατασκευάζουν περίπλοκα αρχιτεκτονικά στοιχεία απευθείας επί τόπου. Επιπλέον, η εργασία θέτει τον στόχο της προώθησης νέων υλικών και μεθοδολογιών που θα ενισχύσουν την αποτελεσματικότητα και τη λειτουργικότητα αυτής της τεχνολογίας. Αντιμετωπίζει βασικές προκλήσεις, όπως η επιτακτική ανάγκη για προόδους στη ρεολογία του τσιμέντου και η τελειοποίηση των διαδικασιών για την ενσωμάτωση του οπλισμού σε τυπωμένες κατασκευές. Επιπλέον, τονίζει τη σημασία της οικολογικής βιωσιμότητας και τη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που διευκολύνει η τρισδιάστατη εκτύπωση. Αυτό επιτυγχάνεται με τη μείωση των απορριμμάτων και τη μείωση της κατανάλωσης υλικών, τα οποία καθίστανται δυνατά μέσω της σημαντικής ευελιξίας σχεδιασμού που εισάγει η τρισδιάστατη εκτύπωση στις αρχιτεκτονικές πρακτικές.

**Λέξεις κλειδιά:** Τρισδιάστατη εκτύπωση τσιμέντου, Κατασκευαστική καινοτομία, Αυτοματισμός στο Κτίριο, Επιστήμη Υλικών, Δομική Ρεολογία, Τεχνικές Ενίσχυσης, Αειφόρος Κατασκευή, Αρχιτεκτονική Ελευθερία, Μείωση απορριμμάτων, Αύξηση παραγωγικότητας



## **Abstract**

The synopsis of this research paper discusses the emerging field of cement 3D printing, elaborating on its methodologies, benefits, and the hurdles it faces. The implementation of this cutting-edge technology in the building sector is poised to revolutionize traditional construction practices. The paper underscores the critical need for automation and heightened efficiency through the deployment of 3D printers, which are capable of fabricating intricate architectural components directly on-site. Moreover, the paper sets forth the objective of advancing novel materials and methodologies that will enhance the effectiveness and functionality of this technology. It addresses key challenges, such as the imperative for advancements in the rheology of cement and refining the processes for embedding reinforcement within printed constructs. Furthermore, it emphasizes the significance of ecological sustainability and the reduction of environmental impacts that 3D printing facilitates. This is achieved by decreasing waste and lowering material consumption, which are made possible through the significant design flexibility that 3D printing introduces to architectural practices.

**Keywords:** Cement 3D Printing, Construction Innovation, Automation in Building, Material Science, Structural Rheology, Reinforcement Techniques, Sustainable Construction, Architectural Freedom, Waste Reduction, Productivity Enhancement

## Πρόλογος

Η ιδέα της κατασκευής τρισδιάστατων αντικειμένων από ψηφιακά μοντέλα, που κάποτε ήταν εικαστική ιδέα συνδεδεμένη με τις σφαίρες της επιστημονικής φαντασίας, άρχισε να υλοποιείται στα μέσα της δεκαετίας του 1980 με την εμφάνιση των πρώτων διπλωμάτων ευρεσιτεχνίας για την κατασκευή προσθέτων και την τρισδιάστατη εκτύπωση. Αρχικά περιοριζόταν στα πολυμερή, το πεδίο της παραγωγής πρόσθετων έχει έκτοτε διευρυνθεί ώστε να περιλαμβάνει μια ποικιλία υλικών. Η δεκαετία του 2000 σηματοδότησε μια σημαντική εποχή με την ανάπτυξη της μοντελοποίησης συντηγμένης εναπόθεσης, η οποία έκανε δημοφιλή την τεχνολογία επιδεικνύοντας τις τεράστιες δυνατότητές της για οικονομικές και βιομηχανικές εφαρμογές στο κοινό.

Τα κοινωνικά και περιβαλλοντικά οφέλη της τρισδιάστατης εκτύπωσης γίνονται όλο και πιο σημαντικά. Αυτή η τεχνολογία εξοικονομεί υλικά κατά την κατασκευή εξαρτημάτων με περίπλοκες γεωμετρίες και διευκολύνει την παραγωγή ανταλλακτικών κατά παραγγελία. Η εξερεύνηση της εφαρμογής αυτών των καινοτόμων μεθόδων στον κατασκευαστικό κλάδο, ιδιαίτερα με υλικά όπως το σκυρόδεμα, ξεκίνησε με μελέτες από την Pegna το 1997 και προωθήθηκε από τον καθηγητή B. Khoshnevis από το Πανεπιστήμιο της Νότιας Καλιφόρνια στις αρχές της δεκαετίας του 2000. Η εποχή είδε επίσης προόδους στον ψηφιακό αρχιτεκτονικό σχεδιασμό, ιδιαίτερα με την εισαγωγή του Building Information Modeling (BIM), φέρνοντας επανάσταση στις παραδοσιακές μεθοδολογίες κατασκευής.

Αυτές οι καινοτομίες υπαινίσσονται μια βαθιά στροφή προς την Τρίτη Βιομηχανική Επανάσταση, που αγκαλιάζει την ψηφιοποίηση και την μηχανογράφηση στον τομέα των κατασκευών. Η ενσωμάτωση του BIM έχει ήδη αρχίσει να βελτιώνει τις φάσεις σχεδιασμού και εκτέλεσης των κατασκευαστικών έργων, ευθυγραμμίζοντας με τις αρχές της λιτής δόμησης για τη βελτιστοποίηση τόσο των μεθόδων όσο και των αποτελεσμάτων. Ενώ ο ψηφιακός μετασχηματισμός στις κατασκευές εξακολουθεί να αναδύεται, η δυνατότητα για πλήρως ψηφιοποιημένες και αυτοματοποιημένες κτιριακές διαδικασίες υπόσχεται σημαντικά βήματα προς πιο αποτελεσματικές κατασκευαστικές πρακτικές.

Έτσι, η σφαίρα της κατασκευής προσθέτων, που αρχικά ήταν προσαρμοσμένη στα πλαστικά, είναι τώρα μάρτυρας εκτεταμένης ακαδημαϊκής και ιδιωτικής έρευνας παγκοσμίως όσον αφορά την εφαρμογή της στο σκυρόδεμα. Από το 2015, σημειώθηκε άνοδος σε πρωτοβουλίες και επιστημονικά άρθρα, υποδεικνύοντας ένα έντονο ενδιαφέρον και την αυξανόμενη συνάφεια της τρισδιάστατης εκτύπωσης σκυροδέματος στις σύγχρονες κατασκευαστικές πρακτικές. Αυτό το αναπτυσσόμενο πεδίο όχι μόνο υπόσχεται μείωση του κόστους και των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, αλλά προσφέρει επίσης στους αρχιτέκτονες πρωτοφανή σχεδιαστική ελευθερία, φέρνοντας δυνητικά επανάσταση στον τρόπο σύλληψης και κατασκευής των κατασκευών.

Η εξερεύνηση της τρισδιάστατης εκτύπωσης στον κατασκευαστικό τομέα είναι έτοιμη να μεταμορφώσει τις παραδοσιακές μεθόδους κατασκευής μεταβαίνοντας σε πλήρως ψηφιοποιημένες κτιριακές διαδικασίες. Αυτή η πρόοδος όχι μόνο προβλέπει πιθανές κατασκευαστικές προκλήσεις, αλλά και βελτιστοποιεί τον συντονισμό μεταξύ διαφόρων φάσεων κατασκευής και επαγγελματικών πεδίων. Με τη χρήση ψηφιακών μοντέλων, που λειτουργούν ως βασικοί πόροι, η διαδικασία κατασκευής μπορεί να εκτελεστεί πιο αποτελεσματικά, γρήγορα και με ακρίβεια μέσω της βοήθειας αυτοματισμών και ρομποτικών τεχνολογιών. Αυτή η ενοποίηση διασφαλίζει ότι η τοποθέτηση του σκυροδέματος είναι ακριβής, λαμβάνοντας υπόψη τις ειδικές συνθήκες και περιορισμούς της τοποθεσίας.

Οι ρεολογικές ιδιότητες του σκυροδέματος είναι κρίσιμες για την αποτελεσματική τρισδιάστατη εκτύπωση. Το σκυρόδεμα πρέπει να είναι αρκετά ρευστό για μεταφορά αλλά και αρκετά άκαμπτο για να υποστηρίξει το βάρος του και τα επόμενα στρώματα αμέσως μετά την εξώθηση. Η ισορροπία μεταξύ του χρόνου πήξης του σκυροδέματος και της ταχύτητας της διαδικασίας δόμησης είναι ζωτικής σημασίας, καθιστώντας αναγκαία τον ακριβή έλεγχο των φρέσκων ιδιοτήτων του σκυροδέματος και της συμπεριφοράς του καθώς πήζει. Η έρευνα σχετικά με τη μηχανική συμπεριφορά του σκυροδέματος σε νεαρή ηλικία είναι ζωτικής σημασίας για να διασφαλιστεί ότι το υλικό διατηρεί τα επιδιωκόμενα χαρακτηριστικά του καθ' όλη τη διάρκεια της διαδικασίας τοποθέτησης. Είναι απαραίτητες οι προηγμένες μεθοδολογίες για την αξιολόγηση και τη διαχείριση των ρεολογικών αλλαγών με την πάροδο του χρόνου,

εστιάζοντας τόσο σε εμπειρικές τεχνικές όσο και σε ενσωματωμένη παρακολούθηση της διαδικασίας για να διασφαλιστεί η συνέπεια και η ποιότητα.

Επιπλέον, η δομική ακεραιότητα των τυπωμένων κτιρίων απαιτεί σημαντική προσοχή. Η πολυεπίπεδη φύση του τυπωμένου σκυροδέματος εισάγει ανισοτροπία, η οποία θα μπορούσε ενδεχομένως να αποδυναμώσει τις διεπαφές μεταξύ των στρωμάτων. Η ανάπτυξη μεθόδων για τον χαρακτηρισμό και την ενίσχυση αυτών των δομών είναι απαραίτητη, λαμβάνοντας υπόψη τόσο τις παραδοσιακές τεχνικές ενίσχυσης όσο και τις καινοτόμες προσεγγίσεις όπως η ενσωμάτωση ινών ή οπλισμών χάλυβα απευθείας κατά τη διαδικασία εκτύπωσης.

Η τοπολογική βελτιστοποίηση παρουσιάζει μια άλλη συναρπαστική ικανότητα, επιτρέποντας κατασκευές που χρησιμοποιούν υλικά μόνο όπου είναι απαραίτητο, εμπνευσμένες από φυσικές μορφές και αποτελεσματική χρήση πόρων. Αυτή η προσέγγιση όχι μόνο εξοικονομεί υλικά αλλά και δυνητικά μειώνει το περιβαλλοντικό αποτύπωμα των κατασκευαστικών έργων. Ωστόσο, αυτή η καινοτομία απαιτεί τη θέσπιση νέων προτύπων και προτύπων που θα καθοδηγούν τον σχεδιασμό των τρισδιάστατων εκτυπωμένων κατασκευών, διασφαλίζοντας ότι πληρούν τόσο λειτουργικά όσο και κριτήρια ασφάλειας.

Τέλος, η βιωσιμότητα των τρισδιάστατων εκτυπωμένων κατασκευών χρειάζεται ενδελεχή αξιολόγηση. Ενώ η τεχνική υπόσχεται μειωμένη χρήση υλικού μέσω στρατηγικού σχεδιασμού, τα απαραίτητα πρόσθετα για τη δυνατότητα εκτύπωσης θα μπορούσαν να αναιρέσουν ορισμένα περιβαλλοντικά οφέλη. Μια λεπτομερής σύγκριση περιβαλλοντικών επιπτώσεων μεταξύ των παραδοσιακών μεθόδων χύτευσης και 3D εκτύπωσης θα αποσαφηνίσει τα πραγματικά πλεονεκτήματα βιωσιμότητας, παρέχοντας μια σαφέστερη εικόνα για το πού η τρισδιάστατη εκτύπωση μπορεί να αντικαταστήσει αποτελεσματικά τις συμβατικές μεθόδους κατασκευής και όπου χρειάζονται ακόμα βελτιώσεις.

# 1 Εισαγωγή στο 3D Printing

Ο κατασκευαστικός κλάδος αποτελεί έναν από τους μεγαλύτερους βιομηχανικούς τομείς παγκοσμίως, με ετήσια έσοδα περίπου 10 τρισεκατομμυρίων δολαρίων ΗΠΑ, τα οποία αντιπροσωπεύουν περίπου το 6% του παγκόσμιου ΑΕΠ. Ως ακρογωνιαίος λίθος της παγκόσμιας οικονομίας, οι κατασκευαστικές εταιρείες αναζητούν συνεχώς μεθόδους για την ενίσχυση της παραγωγικότητας με ταυτόχρονη μείωση του κόστους παραγωγής. Ενώ η παραγωγικότητα της εργασίας στη μεταποιητική βιομηχανία βρίσκεται σε άνοδο, οι μελέτες έχουν δείξει μείωση της παραγωγικότητας της εργασίας στον κατασκευαστικό τομέα με την πάροδο των ετών. Ένας σημαντικός παράγοντας που συμβάλλει σε αυτή την πτώση είναι η έλλειψη υιοθέτησης νέων τεχνολογιών στις κατασκευαστικές πρακτικές. Η εμφάνιση της τέταρτης βιομηχανικής επανάστασης γνωστή και ως Industry 4.0, υπερασπίζεται την ψηφιοποίηση περίπλοκων βιομηχανικών εργασιών. Ενώ αυτή η τάση υιοθετήθηκε γρήγορα στη μεταποιητική βιομηχανία, η εφαρμογή της στον κατασκευαστικό τομέα παραμένει στα εκκολαπτόμενα στάδια [1].

Η 3D Concrete Printing ή αλλιώς Additive Manufacturing, κοινώς γνωστή ως τρισδιάστατη εκτύπωση, αντιπροσωπεύει μια από τις πιο πρόσφατες τεχνολογικές εξελίξεις που εισήχθησαν στον κατασκευαστικό κλάδο και θα μπορούσε να χρησιμεύσει ως βασικός καταλύτης για την ψηφιοποίηση της. Βιομηχανίες όπως η αυτοκινητοβιομηχανία και η κατασκευή έχουν ήδη καρπωθεί τα οφέλη από διάφορες νέες τεχνολογίες που εισήχθησαν από το Industry 4.0 με αποτέλεσμα βελτιώσεις στην ποιότητα των προϊόντων και τη συνολική απόδοση. Ωστόσο, η υιοθέτηση του Industry 4.0 στον κατασκευαστικό τομέα υστερεί σε σχέση με αυτόν της μεταποιητικής βιομηχανίας [1]. Οι Dallasega et al. προσπάθησαν να διευκρινίσουν πώς οι έννοιες του Industry 4.0 θα μπορούσαν να φέρουν επανάσταση στη μεταποιητική βιομηχανία και τις σχετικές αλυσίδες εφοδιασμού, ενώ άλλοι έχουν διερευνήσει τις αλλαγές που φέρνει το Industry 4.0 στη διαχείριση του μεταποιητικού τομέα [1].

Η κατασκευή προσθετικών αντιπροσωπεύει μια από τις πιο πρόσφατες τεχνολογικές εισαγωγές στον κατασκευαστικό κλάδο. Η τρισδιάστατη εκτύπωση, η οποία έχει βρει επιτυχημένες εφαρμογές σε βιομηχανίες όπως η αεροδιαστημική, η αυτοκινητοβιομηχανία και η υγειονομική περίθαλψη, κερδίζει έλξη και στις κατασκευές. Ταυτόχρονα, υπάρχει ένα αυξανόμενο ενδιαφέρον για την αυτοματοποίηση των διαδικασιών κατασκευής και την ενσωμάτωση εφαρμογών τρισδιάστατης εκτύπωσης στις κατασκευαστικές πρακτικές. Διάφοροι παράγοντες οδηγούν την πρόοδο του αυτοματισμού στις κατασκευές, συμπεριλαμβανομένης της μείωσης των ωρών εργασίας για λόγους ασφαλείας, του μειωμένου χρόνου κατασκευής, του μειωμένου κόστους παραγωγής και της διευρυμένης αρχιτεκτονικής ελευθερίας [1]. Επιπλέον, η τρισδιάστατη εκτύπωση συμβάλλει στην αντιμετώπιση προβλημάτων αειφορίας, καθώς ο κατασκευαστικός κλάδος αναγνωρίζεται ως σημαντικός καταναλωτής πόρων και πηγή σημαντικών περιβαλλοντικών πιέσεων.

Ωστόσο, η εφαρμογή της τρισδιάστατης εκτύπωσης σε κατασκευαστικά έργα προκαλεί σκέψεις σχετικά με τον κίνδυνο. Οι κίνδυνοι στα κατασκευαστικά έργα προέρχονται από διάφορους παράγοντες συμπεριλαμβανομένων των διαφορετικών υλικών που χρησιμοποιούνται και των μεθόδων που χρησιμοποιούνται για τη σύνδεση δομικών στοιχείων. Αυτοί οι κίνδυνοι αποτελούν σημαντική απειλή για την επιτυχία του έργου, καθώς η ανεπαρκής διαχείριση κινδύνου μπορεί να οδηγήσει σε υπερβάσεις κόστους και χρόνου. Οι κίνδυνοι ταξινομούνται ως εσωτερικούς ή εξωτερικούς για τα κατασκευαστικά έργα, με εσωτερικούς κινδύνους που περιλαμβάνουν τεχνικά θέματα, θέματα σχεδιασμού και υλικά, ενώ οι εξωτερικοί κίνδυνοι περιλαμβάνουν πολιτικούς περιβαλλοντικούς και κοινωνικοοικονομικούς παράγοντες. Η εισαγωγή οποιασδήποτε νέας τεχνολογίας σε έναν κλάδο εισάγει πάντα αβεβαιότητα και δυνατότητα εκδήλωσης κινδύνου στα έργα. Για παράδειγμα, το πρώτο κτίριο 3D που ολοκληρώθηκε στην Κοπεγχάγη αντιμετώπισε καθυστερήσεις λόγω προβλημάτων με τις παραδόσεις υλικών και αστοχίες εξοπλισμού που αποδίδονται σε ανεπαρκή γνώση της νέας εισαγόμενης τεχνολογίας τρισδιάστατης εκτύπωσης και των πρακτικών χειρισμού υλικών [1].

Αυτές οι προκλήσεις περιλαμβάνουν ζητήματα όπως τα κενά και η ανισοτροπία, η οποία προκύπτει από τις κατευθυντικές ιδιότητες των υλικών που χρησιμοποιούνται στα τυπωμένα εξαρτήματα. Η κατασκευαστική βιομηχανία υιοθέτησε γρήγορα αυτήν την

τεχνολογία, αξιοποιώντας τρισδιάστατους εκτυπωτές από σκυρόδεμα. Οι εφαρμογές των υφιστάμενων τρισδιάστατων εκτυπωμένων δομών αναλύονται περαιτέρω σε μια μελέτη των Zhang et al. [2], τονίζοντας ότι η εκτυπωσιμότητα του σκυροδέματος εξαρτάται από την εργασιμότητα του και την επιθυμητή μηχανική αντοχή, που επηρεάζονται από τη σύνθεση του υλικού.

Η χρήση της τρισδιάστατης εκτύπωσης ως εργαλείο αυτοματισμού στις κατασκευές είναι έτοιμη να βελτιώσει την ασφάλεια, να μειώσει το κόστος εργασίας και να ενισχύσει την αρχιτεκτονική καινοτομία εξαλείφοντας την ανάγκη για παραδοσιακούς ξυλότυπους. Η ίδια η διαδικασία εκτύπωσης επηρεάζεται από την πολυπλοκότητα της επιδιωκόμενης γεωμετρίας, τις ιδιότητες του φρέσκου μείγματος και τις παραμέτρους εκτύπωσης. Η αλληλεπίδραση μεταξύ των φρέσκων και σκληρυμένων ιδιοτήτων του μείγματος και ο αντίκτυπός τους στην ευρωστία της διαδικασίας εκτύπωσης σε σχέση με την ευρεία υιοθέτηση της τρισδιάστατης εκτύπωσης σκυροδέματος συζητείται στις πηγές [3,4]. Οι ειδικές προκλήσεις για το φρέσκο σκυρόδεμα περιλαμβάνουν χειρισμό στην εξώθηση, χρόνο κύκλου στρώσης και παραμόρφωση υπό το βάρος του. Ο όρος «ανοιχτός χρόνος» αναφέρεται στη διάρκεια κατά την οποία το ιξώδες και η τάση διαρροής του σκυροδέματος παραμένουν σταθερά, καθοριστικής σημασίας για τη διασφάλιση της εργασιμότητας σε συμβατικές ρυθμίσεις σκυροδέματος.

Μια κριτική από τους Wu et al [5] προσδιόρισε μελλοντικούς τομείς εστίασης, όπως υλοποίηση μεγάλης κλίμακας, ενσωμάτωση με μοντελοποίηση πληροφοριών κτιρίου, μαζική προσαρμογή και εκτίμηση κόστους κύκλου ζωής. Οι Wangler et al. [6] περιγράφουν τις προκλήσεις που σχετίζονται με τη διαδικασία εκτύπωσης του σκυροδέματος, όπως η τοποθέτηση υλικού ο έλεγχος της ενυδάτωσης και η ενσωμάτωση του οπλισμού. Η δυνατότητα του οπλισμένου σκυροδέματος με ίνες στην τρισδιάστατη εκτύπωση εξετάζεται στην πηγή [7] για την ικανότητά του να παράγει όλκιμο σκυρόδεμα κατάλληλο για εκτύπωση. Σε οποιαδήποτε διαδικασία τρισδιάστατης εκτύπωσης, τα δεδομένα από ένα αρχείο CAD αποθηκεύονται σε στερεολιθογραφική μορφή (STL) και μετατρέπονται σε μορφή στρώμα προς στρώμα για εκτύπωση. Υπάρχουν διάφοροι τύποι εκτυπωτών που χειρίζονται διαφορετικά υλικά όπως πολυμερή, μέταλλα και σκυρόδεμα, ο καθένας με μοναδικές μεθόδους εναπόθεσης λόγω των ξεχωριστών ιδιοτήτων αυτών των υλικών. Η τρισδιάστατη εκτύπωση από σκυρόδεμα χρησιμοποιεί σημαντικές τεχνολογίες όπως η σύντηξη κρεβατιού σε σκόνη και η εκτύπωση με βάση την εξώθηση.

Η τεχνική που βασίζεται στην εξώθηση, ειδικότερα είναι κατάλληλη για την παραγωγή δομών μεγάλης κλίμακας επί τόπου και συγκρίνεται με την εκτύπωση με έγχυση μελάνης όσον αφορά τη μέθοδο εναπόθεσης στρώμα-προς-στρώμα. Αυτή η διαδικασία οδηγεί στο σχηματισμό διεπαφών μεταξύ των νημάτων, που περιέχουν κενά που επηρεάζονται από το μέγεθος και το σχήμα του ακροφυσίου. Η πολυεπίπεδη δομή έχει ως αποτέλεσμα ανισότροπες μηχανικές αποκρίσεις στα τυπωμένα εξαρτήματα, με τη θιξοτροπική φύση του φρέσκου σκυροδέματος να βοηθά τη δομική ακεραιότητα κατά την εκτύπωση. Παραδείγματα τρισδιάστατης εκτύπωσης που βασίζεται σε εξώθηση περιλαμβάνουν έργα στο πανεπιστήμιο της Νότιας Καλιφόρνια και στο πανεπιστήμιο του Loughborough. Η εξειδικευμένη περιοχή της τρισδιάστατης εκτύπωσης σκυροδέματος απαιτεί σημαντική έρευνα για την αποτελεσματική εφαρμογή αυτής της τεχνολογίας σε μεγάλη κλίμακα. Αυτή η εργασία στοχεύει στην ανασκόπηση των μιγμάτων σκυροδέματος που είναι κατάλληλα για τρισδιάστατη εκτύπωση με εξώθηση, λαμβάνοντας υπόψη διάφορες παραμέτρους όπως η διαμόρφωση του εκτυπωτή και οι απαιτούμενες ιδιότητες. Οι επόμενες ενότητες θα παρουσιάσουν την επίδραση αυτών των παραμέτρων στις σκληρυμένες ιδιότητες του σκυροδέματος, παράλληλα με στρατηγικές για τη βελτίωση της εκτυπωσιμότητας και της ανθεκτικότητας των τυπωμένων δομών. Οι καθορισμένοι βασικοί τομείς έρευνας στοχεύουν στη βελτίωση της ποιότητας των τυπωμένων δειγμάτων.

Στο πλαίσιο των μιγμάτων σκυροδέματος, το  $(s_0)$  αντιπροσωπεύει την τάση διαρροής που μετράται σε Pascal ορίζοντας το επίπεδο τάσης κατωφλίου πέρα από το οποίο συμβαίνει η πλαστική παραμόρφωση. Ο ρυθμός διάτμησης συμβολίζεται ως  $(\dot{\gamma})$  στο  $(s_0)$  και το  $(\mu)$  αντιπροσωπεύει το πλαστικό ιξώδες στο Pa·s. Το φαινόμενο της θιξοτροπίας παρατηρείται σε μικροσκοπικό επίπεδο ως αναστρέψιμες φυσικές αλλαγές, συγκεκριμένα η δόμηση και η αποδιάρθρωση των σωματιδίων κατά τη διάρκεια μιας περιόδου

αδράνειας που ξεκινά όταν ξεπεραστεί ένα ορισμένο επίπεδο τάσης, όπως περιγράφεται λεπτομερώς στην αναφορά [13]. Η θιξοτροπική συμπεριφορά στο σκυρόδεμα ενισχύει σημαντικά τόσο τη ρευστότητα του μίγματος σκυροδέματος όσο και τη δομική ακεραιότητα των νημάτων σκυροδέματος. Αυτή η συμπεριφορά αξιολογείται ποσοτικά από την περιοχή που περικλείεται μέσα στον βρόχο υστέρησης που σχηματίζεται κατά τις δοκιμές κυκλικής διατμητικής τάσης έναντι ρυθμού διατμητικής τάσης, όπως αναφέρεται στο [14].

Η στατική τάση διαρροής του σκυροδέματος επηρεάζεται από τη διασωματιδιακή τριβή και τη συνοχή, η οποία μπορεί να προσδιοριστεί μέσω των κριτηρίων τάσης διαρροής Mohr-Coulomb [15] ή να εκτιμηθεί μέσω μελετών ρυθμού δόμησης [16]. Με την πάροδο του χρόνου, λόγω της ενυδάτωσης και της δομικής συσσώρευσης ενώ το υλικό είναι σε ηρεμία, η τάση διαρροής εξελίσσεται, παίζοντας καθοριστικό ρόλο στη δυνατότητα εκτύπωσης και στη δομική ακεραιότητα του μίγματος σκυροδέματος. Κάτω από την τάση διαρροής, η συμπεριφορά του σκυροδέματος είναι κρίσιμη για την υποστήριξη των επόμενων στρωμάτων κατά τη διαδικασία της τρισδιάστατης εκτύπωσης, διατηρώντας την ακεραιότητα και τη μορφή των τυπωμένων νημάτων.

Για το αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα (SCC), η ρευστότητα ήταν πάντα προτεραιότητα, όπου ιδιότητες όπως το χαμηλό ιξώδες και η ελάχιστη στατική τάση διαρροής είναι επιθυμητές. Ωστόσο, για να είναι ένα μείγμα σκυροδέματος κατάλληλο για τρισδιάστατη εκτύπωση, πρέπει να διαθέτει χαμηλό ιξώδες για να παραμένει ρευστό και επαρκή στατική τάση διαρροής για να υποστηρίξει τα στρώματα που χτίζονται πάνω του. Η ρεολογία του σκυροδέματος περιγράφεται εύστοχα από τη χαρακτηριστική τάση διαρροής και το πλαστικό του ιξώδες. Ένας ρεόγραφος, όπως ορίζεται στο [17], απεικονίζει αλλαγές στην τάση διαρροής και στο πλαστικό ιξώδες σε σχέση με τα συστατικά υλικά του μίγματος, χρησιμεύοντας ως ζωτικό εργαλείο για το σχεδιασμό μιγμάτων για την κάλυψη συγκεκριμένων λειτουργικών αναγκών όπως η τρισδιάστατη εκτύπωση. Για παράδειγμα, η προσαρμογή ενός ρεογράφου SCC θα μπορούσε ενδεχομένως να βελτιστοποιήσει την τάση διαρροής χωρίς να μεταβάλλει σημαντικά το πλαστικό ιξώδες, πολύτιμο για την ενίσχυση των δομικών ικανοτήτων του τρισδιάστατου εκτυπώσιμου σκυροδέματος.

Οι τρισδιάστατοι εκτυπωτές που βασίζονται σε εξώθηση δίνουν προτεραιότητα στην αντλησιμότητα, την ικανότητα εξώθησης και τη δυνατότητα κατασκευής του μίγματος σκυροδέματος, τα οποία είναι βασικά χαρακτηριστικά που καθορίζουν την εκτυπωσιμότητα του μίγματος [18]. Κατά τη διάρκεια της άντλησης, το σκυρόδεμα μπορεί να διαχωριστεί μέσα στον εύκαμπτο σωλήνα, σχηματίζοντας ένα στρώμα λίπανσης που μειώνει την πίεση της αντλίας [19]. Αυτό το στρώμα είναι αποτέλεσμα της μετανάστευσης σωματιδίων που προκαλείται από τη διάτμηση, η οποία συνήθως διαχωρίζει τα συσσωματώματα μακριά από περιοχές υψηλής διατμητικής τάσης. Ωστόσο, αυτός ο διαχωρισμός μπορεί να επηρεάσει αρνητικά την ποιότητα του εξωθημένου νήματος, οδηγώντας δυνητικά σε ζητήματα ανθεκτικότητας, όπως ρωγμές συρρίκνωσης. Οι προσαρμογές στο σχεδιασμό του εξωθητήρα θα μπορούσαν να μετριάσουν αυτά τα ζητήματα. Απαιτούνται εκτενείς πειραματικές και αριθμητικές μελέτες για την κατανόηση της δυναμικής ροής μιγμάτων σκυροδέματος κατάλληλων για τρισδιάστατη εκτύπωση χρησιμοποιώντας ως βάση την κατανομή αδρανών και πάστας από συμβατικά μείγματα σκυροδέματος και κονιάματος [19-22].

Συνοπτικά, η βέλτιστη διαμόρφωση για τρισδιάστατο εκτυπώσιμο σκυρόδεμα περιλαμβάνει την επίτευξη ισορροπίας μεταξύ επαρκούς τάσης διαρροής για την υποστήριξη των νεοαποτιθέμενων νημάτων και τη διατήρηση της ρευστότητας. Αυτή η ισορροπία είναι κρίσιμη για την αποφυγή βλάβης στα υποκείμενα στρώματα ή αδύναμη σύνδεση μεταξύ τους, η οποία θα μπορούσε να οδηγήσει σε ψυχρές αρθρώσεις. Η συστηματική τυποποίηση των μιγμάτων σκυροδέματος για τρισδιάστατη εκτύπωση θα μπορούσε να αντιμετωπίσει αυτές τις προκλήσεις, διασφαλίζοντας τόσο σταθερότητα μετά την εναπόθεση όσο και επαρκή ρευστότητα κατά την εξώθηση.

## 1.1 Εφαρμογές 3DCP

Οι εφαρμογές την τρισδιάστατης εκτύπωσης τσιμέντου ποικίλουν σε πολλές κατηγορίες. Υπάρχει η δυνατότητα εκτύπωσης μιας γλάστρας, δομικών στοιχείων, όπως για παράδειγμα κολώνες ή δοκάρια, γεφυρών, επίπλων, καθώς και σπιτιών. Στο σχήμα 1-1 παρουσιάζονται παραδείγματα τρισδιάστατης εκτύπωσης τσιμέντου.



(α)



(β)



(γ)



(δ)



(ε)



(στ)

**Σχήμα 1-1. Παραδείγματα εφαρμογών τρισδιάστατης εκτύπωσης τσιμέντου: (α) τραπέζι και παγκάκι, (β) δομικά υλικά, (γ) γέφυρα στην Βενετία σχεδιασμένη από το αρχ. Γραφείο Zaha Hadid, (δ) σπίτι στην Γερμανία, (ε) δημαρχείο στο Dubai, (στ) γλάστρα (πηγή: διαδίκτυο)**

## 1.2 Πλεονεκτήματα & Μειονεκτήματα

Σε σύγκριση με τις συμβατικές διαδικασίες παραγωγής, η χρήση τεχνικών τρισδιάστατης εκτύπωσης στην κατασκευή, ιδιαίτερα εκείνων που αφορούν σκυρόδεμα, προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα:

1. **Μείωση του κόστους κατασκευής:** Με την εξάλειψη της ανάγκης για ξυλότυπο, η τρισδιάστατη εκτύπωση μπορεί να οδηγήσει σε εξοικονόμηση κόστους σε κατασκευαστικά έργα.
2. **Μείωση των ποσοστών τραυματισμών:** Επικίνδυνες εργασίες, όπως η εργασία σε ύψη, μπορούν να εξαιρεθούν, με αποτέλεσμα ένα βελτιωμένο επίπεδο ασφάλειας κατασκευής και μείωση των ποσοστών τραυματισμών.

3. **Δημιουργία θέσεων εργασίας υψηλής τεχνολογίας:** Η υιοθέτηση της τεχνολογίας τρισδιάστατης εκτύπωσης στις κατασκευές απαιτεί εξειδικευμένο εργατικό δυναμικό, δημιουργώντας έτσι ευκαιρίες για θέσεις εργασίας υψηλής τεχνολογίας.
4. **Μείωση του χρόνου κατασκευής στο εργοτάξιο:** Με τη δυνατότητα να λειτουργεί με σταθερό ρυθμό, η τρισδιάστατη εκτύπωση μπορεί να ελαχιστοποιήσει τον επιτόπιο χρόνο κατασκευής, οδηγώντας στην αποδοτικότητα του έργου.
5. **Ελαχιστοποίηση σφαλμάτων:** Η ακριβής εναπόθεση υλικού μειώνει την πιθανότητα σφαλμάτων κατά τη διαδικασία κατασκευής.
6. **Πρώθηση της Αειφορίας:** Η τρισδιάστατη εκτύπωση συμβάλλει στην αύξηση της βιωσιμότητας στον κατασκευαστικό τομέα μειώνοντας τα απόβλητα, ιδιαίτερα στις διαδικασίες ξυλουργικής.
7. **Βελτιωμένη Αρχιτεκτονική Ελευθερία:** Η τεχνολογία προσφέρει αυξημένη αρχιτεκτονική ελευθερία, επιτρέποντας την υλοποίηση πιο εξελιγμένων σχεδίων τόσο για δομικούς όσο και για αισθητικούς σκοπούς.
8. **Διευκόλυνση της Πολυλειτουργικότητας:** Τα δομικά και αρχιτεκτονικά στοιχεία μπορούν να επωφεληθούν από τη δυνατότητα πολυλειτουργικότητας, αξιοποιώντας πολύπλοκες γεωμετρίες για την εξυπηρέτηση διαφόρων σκοπών [27].

Ωστόσο η μέθοδος της τρισδιάστατης εκτύπωσης τσιμέντου έχει και μειονεκτήματα:

1. **Περιορισμοί στα υλικά:** Η συνέπεια στην ομοιογένεια μίγματος σκυροδέματος που είναι κατάλληλο για εξώθηση είναι δύσκολη. Επίσης το υλικό μπορεί να μην έχει πάντα τις κατάλληλες μηχανικές ιδιότητες
2. **Περιορισμοί στον εξοπλισμό:** Οι εκτυπωτές μέχρι σήμερα έχουν ένα συγκεκριμένο μέγεθος και μπορούν να περιορίσουν αρκετά το μέγεθος της κατασκευής. Επιπλέον χρειάζονται συχνά συντήρηση και βαθμονόμηση
3. **Κόστος εκτυπωτών:** Το κόστος των εκτυπωτών 3DCP, καθώς και το λειτουργικό κόστος είναι αρκετά υψηλό, οπότε σε μικρότερες κατασκευές μπορεί να μην είναι η οικονομικότερη λύση. Συνήθως οι εκτυπωτές πρέπει να στηθούν επί τόπου του έργου ή να φτιαχτούν για συγκεκριμένο έργο.
4. **Δομική ακεραιότητα:** Η σύνδεση μεταξύ των layers είναι το βασικότερο. Η κακή συγκόλληση μεταξύ τους μπορεί να οδηγήσει σε μειωμένη αντοχή, αποκόλληση, ή καταστροφή της κατασκευής.
5. **Σχεδιασμός:** Η χρήση των κατάλληλων λογισμικών για την εκτύπωση 3D κατασκευών απαιτεί γνώσεις και έμπειρο εργατικό προσωπικό. Επίσης η προετοιμασία των αρχείων εκτύπωσης είναι χρονοβόρα.
6. **Πρότυπα σχεδιασμού:** Τα πρότυπα σχεδιασμού και ανέγερσης μπορεί να μη συνάδουν με τις κατασκευές 3D εκτύπωσης.

Συνοπτικά, ενώ η 3DCP έχει αρκετά πλεονεκτήματα τα οποία υπερτερούν, υπάρχουν και αρκετά μειονεκτήματα τα οποία για να επιλυθούν θα πρέπει να δοθεί αρκετός χρόνος και κεφάλαια σχετικά με την έρευνα και ανάπτυξη της μεθόδου. Επίσης θα πρέπει να βρεθούν κατάλληλες τεχνολογίες ώστε να ενσωματώσουν τα υπάρχοντα πρότυπα ή να δημιουργηθούν νέα πρότυπα.

### 1.3 Εισαγωγή στις βασικές μεθόδους προσθετικής κατασκευής

Η 3D concrete printing αναφέρεται σε μια συλλογή τεχνικών που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή φυσικών αντικειμένων απευθείας από τρισδιάστατα (3D) ψηφιακά σχέδια, που συνήθως δημιουργούνται με χρήση σχεδίασης με τη βοήθεια υπολογιστή (CAD). Αυτή η τεχνολογία χρησιμοποιεί υλικά σε διάφορες καταστάσεις-στερεά ή υγρά-και τα στρώνει διαδοχικά για να διαμορφώσει το επιδιωκόμενο αντικείμενο, αποκλίνοντας από τις παραδοσιακές μεθόδους κατασκευής που περιλαμβάνουν κυρίως διαδικασίες αφαίρεσης, όπως μηχανική κατεργασία ή χύτευση. Η 3D concrete printing έχει αναδειχθεί ως μια σύγχρονη καινοτομία προσφέροντας τυποποιημένες λύσεις για την εκτύπωση μεγάλων,



περίπλοκων δομών με στιβαρές μηχανικές ιδιότητες, γρήγορα μέσω της ταχείας δημιουργίας πρωτοτύπων [1]. Αυτή η διαδικασία δημιουργεί τρισδιάστατα αντικείμενα ενώνοντας διαδοχικά στρώματα υλικού, διευκολύνοντας επίσης τη μετατροπή των απορριμμάτων και των παραπροϊόντων σε νέα υλικά [2]. Η αυτοματοποιημένη μέθοδος που είναι γνωστή ως τρισδιάστατη εκτύπωση, αντλεί τρισδιάστατα αντικείμενα από μοντέλα CAD, τα οποία τεμαχίζονται σε πολυάριθμα δισδιάστατα στρώματα και στη συνέχεια κατασκευάζονται χρησιμοποιώντας κατάλληλους εκτυπωτές [3]. Η τρισδιάστατη εκτύπωση έχει σημειώσει σημαντική επέκταση σε διάφορους τομείς, συμπεριλαμβανομένου του στρατιωτικού, της αεροδιαστημικής και της βιοϊατρικής, και πλέον φημίζεται ως μια πρωτοποριακή τεχνική στον κατασκευαστικό κλάδο [4].

Ο όρος «Προσθετική κατασκευή» χρησιμεύει ως το καθιερωμένο βιομηχανικό πρότυπο, ενώ η «τρειςδιάστατη εκτύπωση» χρησιμοποιείται συνήθως εναλλακτικά [5]. Αρχικά η «ταχεία δημιουργία πρωτοτύπων» εμφανίστηκε ως ένας περιεκτικός περιγραφέας για την τεχνολογία κατά τα πρώτα στάδια ανάπτυξής της. Ωστόσο, καθώς η τεχνολογία προχώρησε σημαντικά και βρήκε εφαρμογές πέρα από τη δημιουργία πρωτοτύπων, ιδιαίτερα από τη δεκαετία του 1990 και μετά, ο όρος 3D Printing επικράτησε. Αυτός ο όρος συνδέθηκε τόσο με οικιακούς τρισδιάστατους εκτυπωτές χαμηλού κόστους όσο και με μεγαλύτερα εμπορικά συστήματα που χρησιμοποιούν διάφορες μεθόδους, όπως εναπόθεση υλικού μέσω ακροφυσίου ή κεφαλής εκτύπωσης, για την κατασκευή αντικειμένων. Στη συνέχεια, εμφανίστηκε ο όρος «προσθετική κατασκευή», παρέχοντας μια πιο ακριβή απεικόνιση της τεχνολογίας, ειδικά όσον αφορά τις βιομηχανικές και επαγγελματικές εφαρμογές της. Ενώ οι όροι «3D Printing» και «Additive Manufacturing» χρησιμοποιούνται συνήθως εναλλακτικά, έχουν χρησιμοποιηθεί και άλλοι όροι όπως «electronic manufacturing: (E-manufacturing)», «free production (Freedom fabrication)», «Additive Layer Manufacturing», «Rapid manufacturing», «Constructive Construction ή (Constructive Manufacturing)» και «Direct Digital Manufacturing ή (Direct Digital Manufacture)», οι οποίοι ωστόσο δεν επικράτησαν.

Η ποικιλία τεχνολογιών και υλικών στο χώρο της προσθετικής κατασκευής απαιτεί εξειδικευμένες διαδικασίες. Κάθε τεχνική απαιτεί συγκεκριμένες συνθήκες για να εξασφαλίσει το επιθυμητό αποτέλεσμα. Ακόμη και όταν χρησιμοποιείται η ίδια μηχανή εκτύπωσης, οι προσαρμογές στις ρυθμίσεις της λειτουργίας κατασκευής μπορούν να αποφέρουν πολύ διαφορετικά αποτελέσματα όσον αφορά τα χαρακτηριστικά του αντικειμένου. Ενώ οι οικιακοί εκτυπωτές έχουν σχεδιαστεί για να ελαχιστοποιούν την ανθρώπινη παρέμβαση, η βαριά βιομηχανία περιλαμβάνει ένα πλήθος ατόμων και διεργασιών από την σύλληψη έως την τελική παραγωγή. Παρά αυτή την ποικιλομορφία, υπάρχουν κοινά στάδια στη διαδικασία κατασκευής προσθετικών, τα οποία συνήθως περιλαμβάνουν πέντε βασικά βήματα [7,8]:

1. Δημιουργία ψηφιακού αρχείου 3D.
2. Μετατροπή του αρχείου σε μορφή αναγνωρίσιμη από τον εκτυπωτή και συμβατή με την επεξεργασία του.
3. Μετάδοση του αρχείου στο μηχάνημα κατασκευής προσθετικών, όπου υφίσταται επεξεργασία και προσαρμογή ρυθμίσεων.
4. Κατασκευή του αντικειμένου στρώμα προς στρώμα.
5. Τελική επεξεργασία του αντικειμένου, συμπεριλαμβανομένου του καθαρισμού και του φινιρίσματος

Ο σχεδιασμός του τρισδιάστατου αρχείου περιλαμβάνει μια ολοκληρωμένη διαδικασία, ξεκινώντας από τη σύλληψη έως την οριστικοποίηση του αρχείου σε ένα πρόγραμμα σχεδίασης με τη βοήθεια υπολογιστή (CAD). Το αρχείο μπορεί να δημιουργηθεί από την αρχή χρησιμοποιώντας λογισμικό σχεδιασμού, να δημιουργηθεί μέσω τεχνικών αντίστροφης μηχανικής, όπως η τρισδιάστατη σάρωση, ή να τροποποιηθεί από ένα υπάρχον αρχείο προσαρμόζοντας ορισμένα χαρακτηριστικά.

Η πρόοδος της τεχνολογίας για τη δημιουργία τρισδιάστατων ψηφιακών αρχείων CAD υπήρξε καθοριστική για την προσθετική κατασκευή. Η λεπτομερής αναπαράσταση στερεών αντικειμένων σε προγράμματα υπολογιστών διευκολύνει την ανάπτυξη τεχνολογιών τρισδιάστατης εκτύπωσης. Σήμερα διατίθεται ένα ευρύ φάσμα επιλογών λογισμικού σχεδιασμού από εκπαιδευτικά προγράμματα έως δωρεάν εργαλεία σχεδίασης. Η εμφάνιση των συσκευών σάρωσης και του αντίστοιχου λογισμικού επέτρεψε τη δημιουργία αρχείων

CAD από φυσικά αντικείμενα ιδιαίτερα ευεργετικά για πολύπλοκες γεωμετρίες. Οι σαρωτές χρησιμοποιούν τεχνολογία λέιζερ ή κάμερας για να συλλάβουν πληροφορίες επιφάνειας και να τις μετατρέψουν σε ψηφιακό αρχείο.

Για να αναγνωριστεί και να υποβληθεί σε επεξεργασία από το μηχάνημα κατασκευής τρισδιάστατης εκτύπωσης, το αρχείο πρέπει να είναι στην κατάλληλη μορφή, συνήθως μετατρέπεται σε αρχείο STL (στερεολιθογραφία). Αυτό το αρχείο μεταφέρει τα δεδομένα γεωμετρίας του αντικειμένου στον εκτυπωτή χωρίς να περιλαμβάνει πληροφορίες χρώματος ή υλικού.

Μόλις ξεκινήσει η διαδικασία εκτύπωσης, η ανθρώπινη παρέμβαση είναι ελάχιστη. Τα αρχικά στρώματα είναι ζωτικής σημασίας, καθώς το επόμενο υλικό θα χτιστεί πάνω τους. Ενώ η επίβλεψη και ο έλεγχος διατηρούνται καθ' όλη τη διάρκεια εκτύπωσης, ο εκτυπωτής λειτουργεί σε μεγάλο βαθμό αυτόνομα, ακολουθώντας οδηγίες από το λογισμικό. Η διαδικασία συνεχίζεται δημιουργώντας διαδοχικά στρώματα μέχρι να ολοκληρωθεί η εκτύπωση, χρησιμοποιώντας διάφορες μεθόδους όπως η εξώθηση υλικού, η στερεοποίηση υγρής ρητίνης με υπεριώδη ακτινοβολία ή σύντηξη υλικού σε σκόνη. Τα τελευταία χρόνια, οι μέθοδοι κατασκευής τρισδιάστατης εκτύπωσης έχουν αναπτυχθεί ραγδαία, οδηγώντας σε πολλαπλασιασμό των τεχνολογιών που εφαρμόζονται στον τομέα αυτό. Αυτές οι τεχνολογίες ποικίλλουν σημαντικά ως προς τον τρόπο με τον οποίο εναποτίθενται και συνδέουν διαδοχικά στρώματα τόσο ως προς τη μορφή όσο και ως προς τη σύνθεση των πρώτων υλών που χρησιμοποιούνται. Γενικά, τα συστήματα τρισδιάστατης εκτύπωσης μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε δύο κύριες ομάδες:

1. **Συστήματα ελεγχόμενης εναπόθεσης υλικού:** Σε αυτήν την κατηγορία, οι πρώτες ύλες είτε ψεκάζονται είτε εξωθούνται από την κεφαλή του εκτυπωτή και τοποθετούνται σε στρώματα χρησιμοποιώντας σύριγγες, ακροφύσια ή συσκευές ψεκασμού.
2. **Ελεγχόμενη συσσώρευση:** Η μέθοδος αυτή, η οποία ονομάζεται και διασύνδεση συστημάτων πρώτων υλών λειτουργεί με την αποθήκευση των πρώτων υλών σε δεξαμενές, είτε σε υγρή είτε σε μορφή σκόνης.

Η πρώτη ομάδα περιλαμβάνει ένα ευρύ φάσμα πρώτων υλών, συμπεριλαμβανομένων μετάλλων, συνθετικών πολυμερών κεραμικών, σύνθετων και νανοσύνθετων υλικών. Αντίθετα, η δεύτερη ομάδα αποτελείται από πρώτες ύλες σε μορφή σκόνης. Σε αυτήν την κατηγορία, κατά τη διαδικασία εκτύπωσης η κεφαλή του εκτυπωτή μπορεί να κατευθύνει μια δέσμη λέιζερ για να λιώσει τοπικά το υλικό (Selective Laser Sintering/Melting) ή να ψεκάσει συνδετικές ουσίες στην επιφάνειά του για να σχηματίσει τα στρώματα του αντικειμένου [10-13]. Επιπλέον, αυτή η κατηγορία περιλαμβάνει εκτυπωτές που χρησιμοποιούν στερεολιθογραφία με ελεγχόμενη σκλήρυνση υγρών ρητινών. Επίσης, οι τεχνολογίες κατασκευής προσθετικών κατατάσσονται σε επτά κατηγορίες με βάση την τυποποίηση ISO και ASTM (ISO/ASTM52900-15). Αυτές οι κατηγορίες περιλαμβάνουν:

1. Φωτοπολυμερισμός (Φωτοπολυμερισμός ΦΠΑ)
2. Υλικό Jetting
3. Binder Jetting
4. Εξώθηση υλικού
5. Powder Bed Fusion
6. Πλαστικοποίηση Φύλλων
7. Κατευθυνόμενη Εναπόθεση Ενέργειας

### 1.3.1 Εξώθηση υλικού

Μία από τις κύριες τεχνολογίες εξώθησης υλικών είναι η Κατασκευή Συντηγμένου Νήματος (FFF), η οποία περιλαμβάνει την ελεγχόμενη θέρμανση και εναπόθεση νημάτων σε τετηγμένη κατάσταση. Αυτά τα νήματα, όταν εναποτίθενται σε μια πλατφόρμα εκτύπωσης μέσω ενός μεταλλικού ακροφυσίου, συγκολλούνται και στερεοποιούνται καθώς κρυσταλλώνουν, διαμορφώνοντας συνεχώς το επιθυμητό προϊόν. Το υλικό τροφοδοτείται σε μια κατάλληλη κεφαλή όπου υφίσταται θέρμανση τήξη και εξώθηση στην πλατφόρμα εκτύπωσης [15,17]. Η ελεγχόμενη κίνηση μεταξύ της κεφαλής και της πλατφόρμας διευκολύνει την εναπόθεση λιωμένων νημάτων, σχηματίζοντας στρώματα που συνήθως δεν ξεπερνούν μερικές δεκάδες μικρόμετρα σε ύψος και πλάτος. Καθώς κάθε επίπεδο ολοκληρώνεται, η κεφαλή απομακρύνεται από αυτήν, ξεκινώντας ένα νέο στρώμα πάνω από το υπάρχον, μέχρι να

σχηματιστεί πλήρως το τρισδιάστατο αντικείμενο. Για τη στήριξη μεγάλων προεξοχών και εσωτερικών κοιλιοτήτων κατά την κατασκευή τυπώνονται παράλληλα στηρίγματα είτε από το ίδιο το υλικό εκτύπωσης είτε από ξεχωριστό υλικό στήριξης, το οποίο μπορεί να αφαιρεθεί μετά την εκτύπωση. Τα κοινά πολυμερή που χρησιμοποιούνται σε αυτή την τεχνολογία περιλαμβάνουν το πολύ (γαλακτικό οξύ), (PLA), τα συμπολυμερή-ακρυλονιτριλίου-βουταδιενίου-στυρενίου (ABS), καθώς και σύνθετα και νανοσύνθετα υλικά που βασίζονται σε αυτά τα πολυμερή.

Μια άλλη τεχνολογία χρησιμοποιεί μη νευτώνεια ρευστά υλικά υψηλού ιξώδους, τα οποία εναποτίθενται με παρόμοιο τρόπο για να δημιουργήσουν τρισδιάστατες δομές μέσω διαφόρων φυσικών και χημικών μηχανισμών (Direct Ink Writing/Assembly) [14,16]. Αυτή η μέθοδος περιλαμβάνει διάφορες τεχνικές κατασκευής τρισδιάστατων κατασκευών με ελεγχόμενη αρχιτεκτονική και σύνθεση ρευστών υλικών (μελάνια). Οι πρωτογενείς τεχνικές εναπόθεσης περιλαμβάνουν εξώθηση τύπου νήματος (DIW υποβοηθούμενη από πίεση) ή ψεκασμό με τη μορφή μικρο- ή νανο-σταγόνων (Drop on Demand και Laser-Assisted DIW)[20,23]. Τυπικά, αυτές οι τεχνικές χρησιμοποιούν πολυμερικά διαλύματα ή κολλοειδή εναιωρήματα πολύ παχύρρευστων και μη νευτώνειων σωματιδίων. Συγκεκριμένα, αυτά τα υλικά παρουσιάζουν αραίωση διάτμησης, όπου το φαινομενικό ιξώδες τους μειώνεται υπό τάσεις διάτμησης κατά την εξώθηση, ακολουθούμενο από αύξηση του ιξώδους μετά την εναπόθεση λόγω της αναμόρφωσης των διαμοριακών συνδέσεων μεταξύ των πολυμερών αλυσίδων (Lewis, 2006). Αυτό το φαινόμενο διευκολύνει τη μερική στερεοποίηση των στρωμάτων, που ενισχύεται περαιτέρω από την ανάπτυξη σταυροδεσμών μεταξύ των πολυμερών αλυσίδων.

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται συνήθως στην τεχνολογία Direct Ink Writing/Assembly περιλαμβάνουν κολλοειδή αιωρήματα κεραμικών (όπως πυρίτιο, τιτάνια, αλουμίνα και νιτρίδιο πυριτίου), αγωγίμα μελάνια με σωματίδια αργύρου, νανοσωλήνες άνθρακα, οξειδίο γραφενίου, οξειδία μετάλλων, ηλεκτρολύτες, συνθετικές υδρογέλες, αδρομερή συμπολυμερή αιθυλενοξειδίου προπυλενοξειδίου (polyamers), βιομόρια και κύτταρα [17-19].

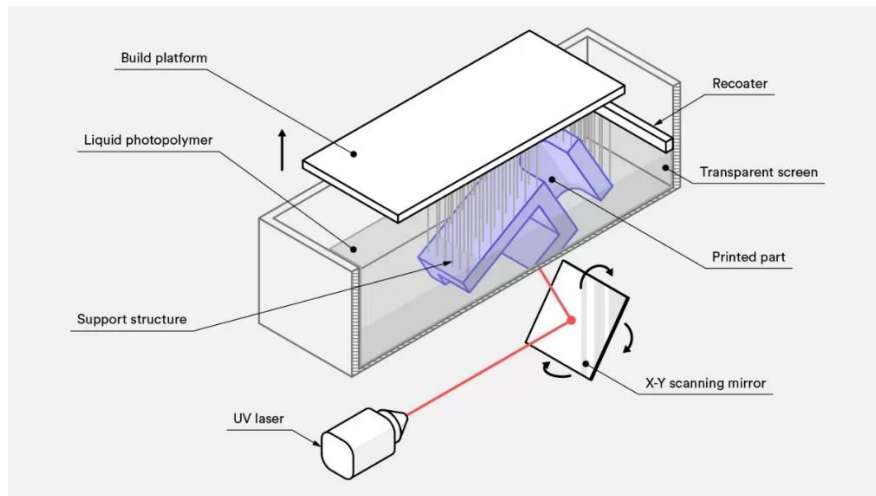
### 1.3.2 Στερεολιθογραφία (SLA)

Η στερεολιθογραφία (SLA), λειτουργεί ελέγχοντας τον φωτοπολυμερισμό υγρών ρητινών για την κατασκευή τρισδιάστατων αντικειμένων. Ξεκινώντας το 1984 από τον Charles Hall και κατοχυρώθηκαν επίσημα με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας το 1986, οι πρώτες μηχανές SLA κατασκευάστηκαν από την 3D Systems στη Βαλένθια της Καλιφόρνια (ΗΠΑ), καθιερώνοντας σημαντική παρουσία στην αγορά από τότε. Η διάταξη της στερεολιθογραφίας περιλαμβάνει μια δεξαμενή που περιέχει φωτοευαίσθητη ρητίνη σε υγρή μορφή με την πλατφόρμα εκτύπωσης τοποθετημένη είτε στην ελεύθερη επιφάνεια της δεξαμενής και προοδευτικά κατερχόμενη (top-down SLA) ή πλήρως βυθισμένη στην υγρή ρητίνη και ανοδική (από κάτω προς τα πάνω SLA).

Ο εκτυπωτής εκπέμπει μια δέσμη λέιζερ με διόδους υπεριώδους ακτινοβολίας (HeCd, 325 nm), ενεργοποιώντας τους μηχανισμούς στερεοποίησης μέσω χημικής σύνδεσης (διασταυρούμενη σύνδεση) και σκλήρυνσης υλικού. Η στερεοποίηση συμβαίνει σε διατομές του προϊόντος καθώς η πλατφόρμα κινείται μέσα στη δεξαμενή. Μετά την ολοκλήρωση, το μοντέλο εξάγεται από το διάλυμα και τυχόν υπολειμματικό υγρό που έχει παγιδευτεί μέσα αφαιρείται χρησιμοποιώντας έναν εξειδικευμένο φούρνο. Τα φωτοπολυμερή υλικά που χρησιμοποιούνται τυπικά αποτελούνται από μονομερή ολιγομερή και προπολυμερείς φωτοευαίσθητες ουσίες, που προκαλούνται από την απορρόφηση της υπεριώδους ακτινοβολίας, ξεκινώντας αλυσιδωτές χημικές αντιδράσεις που οδηγούν στο σχηματισμό ενός τρισδιάστατου δικτύου πολυμερικών σταυροδεσμών.

Τα φωτοπολυμερή υλικά που χρησιμοποιούνται στο SLA περιλαμβάνουν ακρυλικά, τα οποία πολυμερίζονται μέσω πολυμερισμού ελεύθερων ριζών, επιδεικνύοντας υψηλή δραστηριότητα αλλά οδηγώντας σε εντοπισμένες καταστάσεις συρρίκνωσης. Επιπλέον, τα εποξικά υλικά που πολυμερίζονται μέσω κατιονικού πολυμερισμού, παρουσιάζουν χαμηλούς ρυθμούς φωτοπολυμερισμού με αποτέλεσμα προϊόντα με σχετικά υψηλότερη ευθραυστότητα αλλά με υψηλή επιφανειακή σκληρότητα. Αν και υφίστανται μικρές δομικές αλλοιώσεις και είναι ευαίσθητα στην υγρασία δεν επηρεάζονται από την παρουσία οξυγόνου. Επί του παρόντος, χρησιμοποιούνται κυρίως εποξικά φωτοπολυμερή με μικρό ποσοστό περιεκτικότητας σε

ακρυλικό. Τα κοινά μονομερή που χρησιμοποιούνται σε αυτό το πλαίσιο περιλαμβάνουν τα ακρυλικά ολυεστέρα (ακρυλικός πολυεστέρας), τα εποξειδικά ακρυλικά, τα ακρυλικά πολυουρεθάνης και τα αμινοακρυλικά



Σχήμα 1-2. Μέθοδος στερεολιθογραφίας

### 1.3.1 Τεχνολογία BAAM

Οι τεχνολογίες τρισδιάστατης εκτύπωσης συνήθως αντιμετωπίζουν περιορισμούς όσον αφορά την κλίμακα των αντικειμένων που μπορούν να παράγουν. Για να ξεπεραστούν αυτοί οι περιορισμοί, το Big Area Additive Manufacturing (BAAM®) αναπτύχθηκε μέσω μιας συνεργασίας μεταξύ των εταιρειών Cincinnati Incorporated (CI) και Oak Ridge National Laboratory (ORNL). Αυτή η τεχνολογία επιτρέπει την ταχεία και οικονομικά αποδοτική παραγωγή τρισδιάστατων αντικειμένων μεγάλης κλίμακας. Το σύστημα BAAM εκκενώνει ενισχυμένα σύνθετα πολυμερή από τηγμένη κατάσταση και χρησιμοποιεί έναν ρομποτικό μηχανισμό για την απόθεσή τους σε μια δυναμικά θερμαινόμενη πλατφόρμα. Σε αντίθεση με τις παραδοσιακές μεθόδους που χρησιμοποιούν νήματα, το BAAM χρησιμοποιεί πέλλετ, που τροφοδοτούνται μέσω ενός εξωθητήρα μονής βίδας, ως υλικό βάσης. Η χρήση πέλλετ, που είναι περίπου το 1/20 του κόστους των παραδοσιακών υλικών νημάτων, μειώνει σημαντικά τα έξοδα που σχετίζονται με το σύστημα BAAM. Αυτό το σύστημα είναι ικανό να επεξεργάζεται μια ποικιλία πολυμερών, συμπεριλαμβανομένου του ABS και των σύνθετων υλικών του με 20% ανθρακονήματα ή ίνες γυαλιού, καθώς και υλικά υψηλής απόδοσης όπως CF-ULTEM και σύνθετα πολυφαινολεσουλφονή με έως και 40% ίνες άνθρακα. Επιπλέον, η έρευνα βρίσκεται σε εξέλιξη για την ενσωμάτωση σύνθετων υλικών με βιολογική βάση όπως το μπαμπού, το PLA και το πολυπροπυλένιο με ίνες κυτταρίνης στις δυνατότητες του BAAM.

Επί του παρόντος, το BAAM αποτελεί μια από τις ταχύτερες και πιο εκτεταμένες τεχνολογίες κατασκευής τρισδιάστατης εκτύπωσης παγκοσμίως, ικανή να παράγει αντικείμενα που είναι σημαντικά μεγαλύτερα, ταχύτερα και πιο οικονομικά από τα συμβατικά συστήματα τρισδιάστατης εκτύπωσης. Αυτό συμβαίνει, γιατί μπορεί να φιλοξενήσει κατασκευές με μήκος έως 6 μέτρα, πλάτος 2,4 μέτρα και ύψος 1,8 μέτρα. Η λειτουργία του συστήματος είναι παράλληλη με αυτή του Fused Deposition Modeling (FDM), όπου ο πρωτεύων άξονας του μηχανισμού εξώθησης είναι ευθυγραμμισμένος κάθετα σε μια οριζόντια πλατφόρμα κατασκευής. Η κεφαλή εναπόθεσης διασχίζει κυρίως το οριζόντιο επίπεδο. Τα τηγμένα σφαιρίδια εναποτίθενται είτε σε μια θερμαινόμενη βάση είτε σε ένα ήδη στρωμένο στρώμα. Για την εξάλειψη των φυσαλίδων που σχετίζονται με την υγρασία στα εκτυπωμένα μέρη, το BAAM ενσωματώνει ένα στεγνωτήριο pellet και ένα σύστημα μεταφοράς με αέρα που στεγνώνει τα pellet πριν τροφοδοτηθούν σε μια χοάνη που συνδέεται με τον εξωθητή. Ο κατακόρυφα τοποθετημένος εξωθητής στο BAAM έχει σχεδιαστεί για την εναπόθεση σφαιριδίων σε σχήμα οβάλ και λειτουργεί με υψηλό ρυθμό ροής, ξεπερνώντας σημαντικά τις δυνατότητες των παραδοσιακών συστημάτων FDM[24,27].

Για να βελτιωθεί η πρόσφυση του στρώματος εντός του συστήματος BAAM, χρησιμοποιείται ένα εξάρτημα συμπίεσης του άξονα Z (που απεικονίζεται στο σχήμα 3c) για

τη συμπίεση των εξωθημένων σφαιριδίων. Αυτή η διαδικασία συμπίεσης Z είναι ζωτικής σημασίας για πολυμερή ενισχυμένα με ίνες, καθώς οι ίνες δεν συμμορφώνονται εύκολα κάτω από πιέσεις εξώθησης. Μέσω της συμπίεσης, η μηχανική αντοχή κατά μήκος του άξονα x αυξάνεται κατά 10%, και αξιοσημείωτα, διπλασιάζεται κατά μήκος του άξονα y. Τα μηχανικά χαρακτηριστικά και τα φυσικά χαρακτηριστικά των εξαρτημάτων που παράγονται επηρεάζονται από διάφορες λειτουργικές παραμέτρους, όπως η θερμοκρασία εξώθησης, ο ρυθμός ροής, η ταχύτητα κεφαλής και οι στρατηγικές διαδρομής εργαλείου [30-33].

Ο προσανατολισμός του εναποτιθέμενου πολυμερούς υλικού επηρεάζει σημαντικά την ανισοτροπία του, με τις ιδιότητες να ποικίλλουν σημαντικά σε διαφορετικές κατευθύνσεις. Το Εθνικό Εργαστήριο Oak Ridge (ORNL) διεξήγαγε εκτεταμένη έρευνα και δοκιμές για τη βελτιστοποίηση των σύνθετων πολυμερών ενισχυμένων με ίνες ειδικά για το BAAM, συμβάλλοντας σε μια ολοκληρωμένη βάση δεδομένων σχετικά με τις ιδιότητες και την απόδοση αυτών των υλικών. Τα ευρήματα υπογραμμίζουν ότι η αντοχή στην κατεύθυνση εναπόθεσης (άξονας x) και κατά μήκος των στρωμάτων (άξονας z) παρουσιάζει σημαντικές διαφορές [25,26]. Γενικά, η αντοχή σε εφελκυσμό των τυπωμένων με BAAM υλικών είναι χαμηλότερη από αυτή που επιτυγχάνεται μέσω των τυπικών τεχνικών χύτευσης με έγχυση. Ωστόσο, τα επίπεδα ακαμψίας είναι συγκρίσιμα [28].

Μεταξύ των σύνθετων υλικών, τα πολυμερή ενισχυμένα με ανθρακονήματα παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη αντοχή και ακαμψία κατά μήκος του άξονα x, αλλά παρουσιάζουν μια δραματική μείωση 70-80% στην κατεύθυνση του άξονα z. Αντίθετα, τα υλικά ABS ενισχυμένα με ίνες γυαλιού (GF-ABS) παρουσιάζουν χαμηλότερη αντοχή εφελκυσμού και ακαμψία συνολικά, ωστόσο η διαφορά μεταξύ των κατευθύνσεων x και z είναι σημαντικά μικρότερη από αυτή που παρατηρείται με το CF-ABS [29]. Πέρα από την ενίσχυση της αντοχής, η ενσωμάτωση των ινών στα πολυμερή βοηθά επίσης στη μείωση του συντελεστή θερμικής διαστολής (CTE), ελαχιστοποιώντας έτσι τη στρέβλωση των τυπωμένων τμημάτων. Η έρευνα δείχνει ότι το CTE για ABS που περιέχει 13% ανθρακονήματα στον άξονα x είναι 9,85 (um/m)/°C, το οποίο είναι σημαντικά χαμηλότερο από το 75 (um/m)/°C που παρατηρείται στο καθαρό ABS. Αντίθετα, το CTE στον άξονα z φτάνει τα 119,8 (um/m)/°C, σχεδόν οκταπλάσιο από αυτόν του προσανατολισμού του άξονα x. Κατά συνέπεια, η στρατηγική χρήση των διαδρομών εργαλείων στην εκτύπωση BAAM είναι ζωτικής σημασίας για τον μετριασμό τυχόν σημαντικών παραμορφώσεων κατά την κατασκευή [31,32].

## Βιβλιογραφία Κεφαλαίου 1.

- [1] T.D. Ngo, A. Kashani, G. Imbalzano, K.T. Nguyen, D. Hui, "Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges," *Compos. B Eng.*, vol. 143, pp. 172–196, 2018.
- [2] Zhang, J., Wang, J., Dong, S., Yu, X., & Han, B. (2019). "A review of the current progress and application of 3D printed concrete," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 105533.
- [3] R.A. Buswell, R.C. Soar, A.G. Gibb, A. Thorpe, "Freeform construction: mega-scale rapid manufacturing for construction," *Autom. Constr.*, vol. 16, no. 2, pp. 224–231, 2007.
- [4] R.A. Buswell, W.L. de Silva, S.Z. Jones, J. Dirrenberger, "3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research," *Cem. Concr. Res.*, vol. 112, pp. 37–49, 2018.
- [5] P. Wu, J. Wang, X. Wang, "A critical review of the use of 3-D printing in the construction industry," *Autom. Constr.*, vol. 68, pp. 21–31, 2016.
- [6] T. Wangler, E. Lloret, L. Reiter, N. Hack, F. Gramazio, M. Kohler, R. Flatt, "Digital concrete: opportunities and challenges," *RILEM Tech. Lett.*, vol. 1, pp. 67–75, 2016.
- [7] Weng, Yiwei, Lu, B., Tan, M. J., & Qian, S. (2016). "Rheology and printability of engineered cementitious composites-a literature review," 2nd International Conference on Progress in Additive Manufacturing (Pro-AM 2016), May 16-19, Singapore.
- [8] M.A. Khan, S. Kumar, "Performance enhancement of tubular multilayers via compliance-tailoring: 3D printing, testing and modeling," *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 140, pp. 93–108, 2018.

- [9] M.A. Khan, S. Kumar, Wesley J. Cantwell, "Additively manufactured cylindrical systems with stiffness-tailored interface: Modeling and experiments," *Int. J. Solids Struct.*, vol. 152, pp. 71–84, 2018.
- [10] D. Asprone, F. Auricchio, C. Menna, V. Mercuri, "3D printing of reinforced concrete elements: Technology and design approach," *Constr. Build. Mater.*, vol. 165, pp. 218–231, 2018.
- [11] T.T. Le, S.A. Austin, S. Lim, R.A. Buswell, R. Law, A.G. Gibb, T. Thorpe, "Hardened properties of high-performance printing concrete," *Cem. Concr. Res.*, vol. 42, no. 3, pp. 558–566, 2012.
- [12] B. Khoshnevis, "Automated construction by contour crafting—related robotics and information technologies," *Autom. Constr.*, vol. 13, no. 1, pp. 5–19, 2004.
- [13] N. Roussel, G. Ovarlez, S. Garrault, C. Brumaud, "The origins of thixotropy of fresh cement pastes," *Cem. Concr. Res.*, vol. 42, no. 1, pp. 148–157, 2012.
- [14] D. Feys, R. Cepuritis, S. Jacobsen, K. Lesage, E. Secrieru, A. Yahia, "Measuring rheological properties of cement pastes: most common techniques, procedures and challenges," *RILEM Tech. Lett.*, vol. 2, pp. 129–135, 2018.
- [15] R.J.M. Wolfs, F.P. Bos, T.A.M. Salet, "Early age mechanical behaviour of 3D printed concrete: Numerical modelling and experimental testing," *Cem. Concr. Res.*, vol. 106, pp. 103–116, 2018.
- [16] Biranchi Panda, Jian Hui Lim, Ming Jen Tan, "Mechanical properties and deformation behaviour of early age concrete in the context of digital construction," *Compos. B Eng.*, vol. 165, pp. 563–571, 2019.
- [17] Wallevik, Olafur Haraldsson, and Jon Elvar Wallevik. "Rheology as a tool in concrete science: The use of rheographs and workability boxes," *Cement and Concrete Research*, vol. 41, no. 12, pp. 1279-1288, 2011.
- [18] T.T. Le, S.A. Austin, S. Lim, R.A. Buswell, A.G. Gibb, T. Thorpe, "Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete," *Mater. Struct.*, vol. 45, no. 8, pp. 1221–1232, 2012.
- [19] Myoung Sung Choi, Young Jin Kim, Jin Keun Kim, "Prediction of concrete pumping using various rheological models," *Int. J. Concr. Struct. Mater.*, vol. 8, no. 4, pp. 269–278, 2014.
- [20] S.H. Kwon, K.P. Jang, J.H. Kim, S.P. Shah, "State of the art on prediction of concrete pumping," *Int. J. Concr. Struct. Mater.*, vol. 10, no. 3, pp. 75–85, 2016.
- [21] Choi, Myoung Sung, Young Jin Kim, and Seung Hee Kwon. "Prediction on pipe flow of pumped concrete based on shear-induced particle migration," *Cement and Concrete Research*, vol. 52, pp. 216-224, 2013.
- [22] S. Jacobsen, L. Haugan, T.A. Hammer, E. Kalogiannidis, "Flow conditions of fresh mortar and concrete in different pipes," *Cem. Concr. Res.*, vol. 39, no. 11, pp. 997–1006, 2009.
- [23] Y. Weng, M. Li, M.J. Tan, S. Qian, "Design 3D printing cementitious materials via Fuller Thompson theory and Marson-Percy model," *Constr. Build. Mater.*, vol. 163, pp. 600–610, 2018.
- [24] S.H. Lee, H.J. Kim, E. Sakai, M. Daimon, "Effect of particle size distribution of fly ash–cement system on the fluidity of cement pastes," *Cem. Concr. Res.*, vol. 33, no. 5, pp. 763–768, 2003.
- [25] . Arnaud Perrot, D. Rangeard, A. Pierre, "Structural built-up of cement-based materials used for 3D-printing extrusion techniques," *Mater. Struct.*, vol. 49, no. 4, pp. 1213–1220, 2016.
- [26] 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.
- [27] 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.

## 2 Μεθοδολογία 3D εκτύπωσης τσιμέντου

### 2.1 Τεχνολογίες Προσθετικής κατασκευής βασισμένες σε σύνθετα υλικά

#### 2.1.1 Τεχνολογία Mesh Mould δίκτυωτό καλούπι

Η τεχνολογία Mesh Mould, που αναπτύχθηκε από ερευνητές στο Ελβετικό Ομοσπονδιακό Ινστιτούτο Τεχνολογίας στη Ζυρίχη (ETH Zurich), ενσωματώνει την κατασκευή οπλισμού και ξυλότυπου σε μια ενιαία ρομποτική διαδικασία κατασκευής, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-2. Αυτό το καινοτόμο σύστημα χρησιμοποιεί έναν ρομποτικό βραχίονα για την εξώθηση ενός κοντού πολυμερούς ενισχυμένου με ίνες, σχηματίζοντας ένα πλέγμα που χρησιμεύει ως ξυλότυπος από σκυρόδεμα. Το πολυμερές ενισχύεται με συνεχείς ίνες, δημιουργώντας στιβαρά σύνθετα πλέγματα σχεδιασμένα για αυτό το σκοπό. Ωστόσο, αυτή η τεχνολογία δεν έχει ακόμη αναπτυχθεί σε πραγματικές κατασκευές [28,34].

Ένας αρθρωτός ρομποτικός βραχίονας, τοποθετημένος σε μια εύκαμπτη βάση που μπορεί να είναι τροχήλατη ή σε τροχιά, είναι ικανός να παράγει μεγάλης κλίμακας, μεταβλητούς ξυλότυπους δικτυωτών. Ο βραχίονας είναι εξοπλισμένος με έξι βαθμούς ελευθερίας, επιτρέποντας τον ακριβή έλεγχο της τοποθέτησης και του προσανατολισμού του σύνθετου νήματος και του πλαισίου του πλέγματος. Το σύστημα διαθέτει έναν τελικό τελεστή που περιλαμβάνει έναν ελεγκτή και ένα ακροφύσιο εξώθησης. Αυτό το ακροφύσιο μπορεί να επεξεργαστεί δύο τύπους πρώτων υλών: πλαστικές χάντρες ή νήμα και ένα καρούλι συνεχών ινών, που μπορεί να περιλαμβάνει υλικά όπως μπαμπού, Kevlar, βασάλτη ή υαλοβάμβακα [15,36]. Κατά τη λειτουργία, ο τελικός τελεστής τυλίγει τα θερμοπλαστικά σφαιρίδια γύρω από τις συνεχείς ίνες, εξωθώντας τα ως ένα ενιαίο, επίμηκες νήμα. Αυτό το νήμα παρουσιάζει σημαντικά μεγαλύτερη αντοχή και ακαμψία σε σύγκριση με εκείνα που κατασκευάζονται με κοντές ίνες ενίσχυσης πολυμερούς. Καθώς το εξωθημένο ζεστό νήμα προσκολλάται σε άλλα νήματα, ψύχεται γρήγορα από αγωγούς αέρα που περιβάλλουν το ακροφύσιο του εξωθητή, γεγονός που εξασφαλίζει την άμεση στερεοποίηση του εξωθημένου νήματος κατά την εκφόρτωση από το ακροφύσιο.

Το τυπικό πάχος εξώθησης για το σύστημα Mesh Mold φτάνει τα 3 mm σε διάμετρο, εξοπλισμένο με ικανότητα ψύξης 10 λίτρων ανά δευτερόλεπτο. Οι πρόσφατες εξελίξεις στην τεχνολογία Mesh Mold περιλαμβάνουν την ενσωμάτωση χάλυβα για τη δημιουργία πλέγματος σχηματισμού ως μέρος μιας διαδικασίας τρισδιάστατης εκτύπωσης στην κατασκευή και την αρχιτεκτονική. Η διαδικασία διευκολύνεται από ένα κατά παραγγελία ρομποτικό τελικό τελεστή σχεδιασμένο για συγκεκριμένες εργασίες [35,37]. Αυτό το εργαλείο τοποθετεί μοναδικά το πλέγμα σε συνεχή οριζόντια και κάθετα συρμάτινα στοιχεία. Ο εξελιγμένος σχεδιασμός του τελικού τελεστή περιλαμβάνει μηχανισμούς για κάμψη σύρματος στο μπροστινό μέρος και χαρακτηριστικά για σύσφιξη, τροφοδοτικό σύρμα, πνευματική κοπή και συγκόλληση με αντίσταση στο πίσω μέρος. Αυτή η βελτιωμένη έκδοση του Mesh Mold υπερβαίνει την παραδοσιακή τρισδιάστατη εκτύπωση, προσφέροντας μια ολοκληρωμένη ψηφιακή κατασκευαστική λύση που υποστηρίζει την επιτόπου κατασκευή αυτοφερόμενων κατασκευών.

Έρευνα που διεξήχθη από τις ομάδες Dickson και Tian έδειξε ότι η αντοχή σε εφελκυσμό του Mesh Mold με συνεχείς ίνες είναι περίπου έξι έως επτά φορές υψηλότερη από εκείνη των σύνθετων πολυμερών ενισχυμένων με κοντές ίνες. Ο δικτυωτός ξυλότυπος, ενισχυμένος με συνεχείς ίνες, έχει διπλές λειτουργίες: λειτουργεί ως καλούπι για τη χύτευση τσιμεντοειδών μιγμάτων και ως δομικός οπλισμός. Αυτός ο ξυλότυπος μπορεί να έχει ένα ακανόνιστο σχέδιο τριγωνικών ή εξαγωνικών ανοιγμάτων, τα οποία μπορεί να ποικίλλουν από 2 cm έως 4 cm για να προσαρμόζονται σε διαφορετικές τοπικές συνθήκες φορτίου. Ο σχεδιασμός των ανοιγμάτων του Mesh Mold διαχειρίζεται στρατηγικά την υδροστατική πίεση που ασκείται από μίγματα υγρού τσιμέντου, με μικρότερες κυψέλες τοποθετημένες στο κάτω μέρος για να αντέχουν σε υψηλότερες πιέσεις και μεγαλύτερες κυψέλες στο επάνω μέρος για χαμηλότερες πιέσεις. Ολόκληρη η διαμόρφωση Mesh Mold προκύπτει από εκτενή δομική ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων, βελτιστοποιώντας την απόδοση και ανθεκτικότητα σε κτιριακές εφαρμογές [38].



**Σχήμα 2-1. Μέθοδος Mesh Mould**

### **2.1.2 Τρισδιάστατη Εκτύπωση Καμπύλης 3D Curve**

Η ιδέα της τρισδιάστατης εκτύπωσης καμπύλης πρωτοεμφανίστηκε από ερευνητές στο Ινστιτούτο Προηγμένης Αρχιτεκτονικής της Καταλονίας. Αυτή η καινοτόμος τεχνική περιλαμβάνει την εξώθηση μιας ακολουθίας τρισδιάστατων καμπυλών για τον καθορισμό της γεωμετρίας ενός αντικειμένου επιφάνειας. Η τεχνολογία χρησιμοποιεί θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή δύο συστατικών, όπως η πολυουρεθάνη για να σχηματίσει αυτές τις δομές. Ένας ρομποτικός βραχίονας, ο οποίος διέπει την τροχιά και την τοποθέτηση του ακροφυσίου εξώθησης, διευκολύνει αυτή τη διαδικασία. Μία από τις μοναδικές δυνατότητες της τρισδιάστατης καμπύλης εκτύπωσης είναι η ικανότητά της να κατασκευάζει αντικείμενα σε διάφορες επιφάνειες εργασίας, ανεξάρτητα από την κλίση ή την ομαλότητά τους, χωρίς να απαιτούνται πρόσθετες δομές στήριξης [39-41].

Διαφέροντας σημαντικά από άλλες τεχνικές κατασκευής πρόσθετων που δημιουργούν αντικείμενα χρησιμοποιώντας στρώματα 2D, η τρισδιάστατη καμπύλη εκτύπωσης ευθυγραμμίζεται ακριβώς με τις γραμμές πίεσης ενός αντικειμένου προσαρμοσμένου σχήματος. Αυτή η μέθοδος αποφεύγει τη δομή στρώμα προς στρώμα που συνήθως αγνοείται κατά τις συμβατικές διαδικασίες εκτύπωσης. Η τροφοδοσία για το θερμοσκληρυνόμενο πολυμερές διοχετεύεται σε ένα στατικό αναμικτήρα όπου στερεοποιείται μετά από μια χημική αντίδραση μεταξύ των δύο υγρών συστατικών. Προαιρετικά, μπορούν να εισαχθούν βαφές στο ακροφύσιο για να αλλοιωθεί το χρώμα του εξωθημένου υλικού [42,45].

Καθώς ο ρομποτικός βραχίονας εξωθεί το υγρό μίγμα μέσω του ακροφυσίου, διατηρεί σταθερή απόδοση και εφαρμόζει θερμότητα στους περίπου 190°C (374°F) χρησιμοποιώντας θερμαντήρες που βρίσκονται σε κάθε πλευρά του ακροφυσίου. Οι διαστάσεις του ακροφυσίου και του ανοίγματος της κεφαλής εκτύπωσης, που γενικά κυμαίνονται από λιγότερο από 0,8 mm (0,03 ίντσες) έως και 12 mm (0,5 ίντσες) και μπορούν να προσαρμοστούν βάσει συγκεκριμένων απαιτήσεων. Η τοποθέτηση του ακροφυσίου ελέγχεται από ένα υπολογιστικό πρόγραμμα που μεταφράζει την ψηφιακή γεωμετρία σε μια σειρά από τρισδιάστατες στατικές καμπύλες [47,49]. Η ταχύτητα κίνησης του ακροφυσίου βαθμονομείται σύμφωνα με τον ρυθμό σκλήρυνσης του πολυμερούς και τη δομική ακεραιότητα που απαιτείται για το τελικό προϊόν. Είναι σημαντικό το μείγμα πολυμερών να ωριμάσει πλήρως προτού η κεφαλή εκτύπωσης προχωρήσει πέρα από το πλάτος της εξωθημένης καμπύλης, απαιτώντας προσαρμογές στην ταχύτητα εκτύπωσης και το πάχος του υλικού με βάση τις ρυθμίσεις λειτουργίας.

Αν και αυτή η τεχνολογία αντιπροσωπεύει μια σημαντική πρόοδο στην τρισδιάστατη εκτύπωση, παραμένει υπό ανάπτυξη και δοκιμή και ορισμένες πτυχές ενδέχεται να εξακολουθούν να προστατεύονται από πνευματικά δικαιώματα. Δεν υπάρχουν επί του παρόντος διαθέσιμα εκτεταμένα δεδομένα σχετικά με τις μηχανικές ή θερμικές ιδιότητες του υλικού εκτύπωσης 3D καμπύλης. Ωστόσο, με βάση τις γνωστές ιδιότητες της άκαμπτης θερμοσκληρυνόμενης πολυουρεθάνης, η οποία έχει αντοχή εφελκυσμού περίπου 60 MPa, περαιτέρω βελτιώσεις στη σύνθεση των θερμοσκληρυνόμενων πολυμερών θα μπορούσαν ενδεχομένως να αυξήσουν την απόδοση των υλικών που χρησιμοποιούνται στην τρισδιάστατη καμπύλη εκτύπωσης [43,44].



### 2.1.3 Μέθοδος Ικριώματος (Scaffold Additive Manufacture)

Τα κατασκευασμένα ικριώματα, που χρησιμοποιούνται κυρίως για ιατρικές εφαρμογές, έχουν σχεδιαστεί για να αναπαράγουν την εξωκυτταρική μήτρα των φυσικών ιστών για να διευκολύνουν το σχηματισμό λειτουργικών ιστών μέσω κυτταρικών αλληλεπιδράσεων. Αυτά τα ικριώματα χαρακτηρίζονται από το υψηλό πορώδες τους, το οποίο διασφαλίζει τη δομική ακεραιότητα σε κυτταρικά περιβάλλοντα. Η Branch Technology έχει προσαρμόσει αυτή την ιδέα για τον κατασκευαστικό κλάδο, αναπτύσσοντας μια μέθοδο για την εκτύπωση αρχιτεκτονικών κατασκευών που χρησιμεύουν ως ικριώματα για τσιμεντοειδές υλικό ή μονωτικό αφρό, τα οποία γεμίζονται και ωριμάζουν μέσα σε αυτά τα πλαίσια. Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιεί έναν παρόμοιο τύπο πρώτης ύλης με το σύστημα Big Area Additive Manufacturing (BAAM), χρησιμοποιώντας πέλλετ που μπορούν να θερμανθούν και στη συνέχεια να στερεοποιηθούν αφού εξωθηθούν από έναν αρθρωτό ρομποτικό βραχίονα, ο οποίος επιτρέπει την ακριβή κίνηση και τοποθέτηση [46,50].

Το σύστημα Scaffold ενσωματώνει έναν ρομποτικό βραχίονα που ταξιδεύει κατά μήκος μιας διαδρομής δέκα μέτρων, επιτρέποντάς του να καλύψει μια περιοχή εκτύπωσης 7,6 m x 17,6 m. Αυτό το σύστημα είναι εξοπλισμένο με ένα συμπαγές δοχείο υλικού και έναν τελικό τελεστή ειδικά σχεδιασμένο για τρισδιάστατη εκτύπωση. Η Branch Technology έχει χρησιμοποιήσει με επιτυχία υλικά όπως ABS, ABS ενισχυμένο με ίνες γυαλιού (GF-ABS), ABS ενισχυμένο με ίνες άνθρακα (CF-ABS) και άλλα σύνθετα υλικά ABS ενισχυμένα με ίνες σε αυτή τη διαδικασία. Μια βασική διάκριση μεταξύ της μεθόδου σκαλωσιάς και της τεχνικής Mesh Mold είναι ότι ενώ το Mesh Mold χρησιμοποιεί συνεχείς ίνες επικαλυμμένες με πολυμερές, η μέθοδος σκαλωσιάς χρησιμοποιεί κοντές ίνες ενισχυμένο πολυμερές, με αποτέλεσμα την αντοχή του υλικού συγκρίσιμη με το BAAM αλλά μικρότερη από αυτή του Mesh Mold [48]. Ο εξωθητής, τοποθετημένος στο μπροστινό μέρος του βραχίονα, περιλαμβάνει πολλαπλά εξαρτήματα όπως χοάνη υλικού για αποθήκευση πρώτων υλών, βίδα για κονιοποίηση, μερική τήξη και διασπορά, ζώνες θέρμανσης γύρω από τον εξωθητή, βαλβίδα διακοπής για έλεγχο ροής, ένα ακροφύσιο διαμόρφωσης και έναν σωλήνα αέρα ψύξης για στερεοποίηση. Εκτελεί τέσσερις βασικές λειτουργίες: θέρμανση, ανάμειξη, ψύξη αέρα και εξώθηση [58]. Το σύστημα ενσωματώνει επίσης αισθητήρες που παρακολουθούν τη θέση, τη θερμοκρασία και τον ρυθμό ροής με υψηλή ακρίβεια, εξασφαλίζοντας εκτύπωση υψηλής ποιότητας.

Ο εξωθητής κινείται κατά μήκος μιας προγραμματισμένης διαδρομής που του επιτρέπει να εναποθέτει υλικό με ακρίβεια, αποφεύγοντας την επικάλυψη με υλικό που είχε προηγουμένως εναποτεθεί [51,52]. Οι δομές του ικριώματος μπορούν να λάβουν διάφορες μορφές, όπως κύβους, κηρήθρες, τριγωνικά πρίσματα ή περισσότερα οργανικά σχήματα. Η επιλογή του βέλτιστου σχήματος και απόστασης των στοιχείων του ικριώματος καθοδηγείται από τη μοντελοποίηση πεπερασμένων στοιχείων για τη βελτιστοποίηση της χρήσης του υλικού, των ποσοστών πορώδους και της δομικής αντοχής. Παρά το υψηλό πορώδες των τυπωμένων ικριωμάτων, η αντοχή και η ακαμψία τους παραμένουν ζωτικής σημασίας. Σύμφωνα με την Branch Technology, οι κατασκευές ικριώματος παρουσιάζουν σχεδόν τριπλάσια αντοχή σε εφελκυσμό από τα τυπικά ξύλινα στελέχη, που κυμαίνονται από 100–120 MPa [53]. Η μέθοδος Scaffold στοχεύει στη μείωση της χρήσης υλικών και είναι συμβατή με συμβατικά δομικά υλικά όπως σκυροδέμα και μόνωση. Όπως το Mesh Mold, χρησιμεύει και ως ξυλότυπος για τσιμεντοειδείς ύλες ή μόνωση ψεκασμού και ως δομικός οπλισμός.

## 2.2 Τεχνολογίες κοκκοειδών υλικών

Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι τρισδιάστατης εκτύπωσης που χρησιμοποιούν κοκκοειδή υλικά:

1. εκτύπωση με εξώθηση (extrusion based printing)
2. εκτύπωση περιγράμματος (contour crafting)
3. εκτύπωση με σκόνη (powder based printing)
4. εκτύπωση με ρομποτικό βραχίονα (robotic arm Printing)
5. εκτύπωση με κινούμενο καλούπι (slip form printing)

### 2.2.1 Εκτύπωση σκυροδέματος με εξώθηση

Η εκτύπωση με εξώθηση μοιάζει πολύ με τη διαδικασία Fused Deposition Modeling (FDM), όπου ένα μείγμα τσιμέντου εξωθείται στρώμα-στρώμα μέσω μιας κεφαλής εκτυπωτή μέχρι να διαμορφωθεί πλήρως η δομή. Αυτή η κεφαλή εκτυπωτή μπορεί να συνδεθεί σε έναν σταθερό

ρομποτικό βραχίονα 6 αξόνων ή να ενσωματωθεί σε ένα σύστημα σκελετού μέσα σε μια σφραγισμένη περιοχή εκτύπωσης. Τα βασικά στοιχεία αυτού του συστήματος περιλαμβάνουν επίσης μια μονάδα ελέγχου εκτύπωσης, μια συσκευή ανάμειξης και μια αντλία [54,55].

Το μίγμα σκυροδέματος που χρησιμοποιείται στην τρισδιάστατη εκτύπωση πρέπει να παρουσιάζει τέσσερις κρίσιμες ιδιότητες για να είναι κατάλληλο για αυτήν την εφαρμογή:

1. **Χωρητικότητα εξώθησης**, η οποία είναι η ικανότητα του μείγματος να περνά μέσα από τους μικρούς σωλήνες και τα ακροφύσια της κεφαλής του εκτυπωτή.
2. **Εργατικότητα**, που αναφέρεται στην ευκολία με την οποία το μίγμα μπορεί να αναμειχθεί, να τοποθετηθεί και να τελειώσει σε μια σταθερή και συνεκτική δομή.
3. **Ανοιχτός Χρόνος**, η διάρκεια που το μίγμα μπορεί να παραμείνει χρησιμοποιήσιμο ενώ διατηρεί τη ρευστότητά του για αποτελεσματική άντληση και εξώθηση.
4. **Κατασκευαστικότητα** ή ικανότητα του μείγματος να εξωθείται και να διατηρεί το σχήμα του μετά την εναπόθεση [57,59].

Αυτές οι ιδιότητες είναι συχνά αλληλένδετες και μπορεί να έρχονται σε αντίθεση μεταξύ τους, θέτοντας προκλήσεις για την επίτευξη ενός βέλτιστου μείγματος για εκτύπωση. Συμβατικά, τα μείγματα σκυροδέματος αποτελούνται από τρία κύρια συστατικά:

1. τσιμέντο (9–15%),
2. νερό (15–16%) και
3. λεπτά και χονδροειδή αδρανή (25–35% και 30–45%, αντίστοιχα) (PCA, 2000).

Για να ανταποκριθούν στις συγκεκριμένες απαιτήσεις τόσο του φρέσκου όσο και του σκληρυμένου σκυροδέματος σε τρισδιάστατες εφαρμογές, οι ερευνητές βελτιώνουν τα σχέδια μιγμάτων σκυροδέματος. Για το τρισδιάστατο εκτυπωμένο σκυρόδεμα, χρησιμοποιούνται λεπτότερα υλικά όπως άμμος, πηλός, ιπτάμενη τέφρα ή καπνός πυριτίου αντί για μεγάλα αδρανή για την επίτευξη βέλτιστων ιδιοτήτων. Επιπλέον, πειραματίζονται διάφορες άλλες ίνες, όπως μέταλλο, νάιλον, γυαλί και ίνες άνθρακα για την αντιμετώπιση προβλημάτων όπως η συρρίκνωση, η ρωγμή και η ενίσχυση της αντοχής στην κάμψη [56,60].

Ειδικές συνθέσεις μιγμάτων έχουν αναπτυχθεί για εφαρμογές τρισδιάστατης εκτύπωσης. Για παράδειγμα, οι Lim et al. περιέγραψε ένα κονίαμα με βάση το τσιμέντο με 54% άμμο, 36% ενεργά τσιμεντοειδή υλικά και 10% νερό, που αποκλίνει σημαντικά από τα παραδοσιακά μείγματα σκυροδέματος. Οι Rushing et al. προσδιόρισε ότι το μέγιστο μέγεθος χονδροειδών αδρανών δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 9,5 mm (3/8 ίντσας) για να αποφευχθεί η απόφραξη κατά την εξώθηση. Οι Bos et al. δημιούργησαν ένα μίγμα 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. Οι Gosselin et al. παρασκεύασαν ένα μίγμα από 30-40% τσιμέντο Portland, 40-50% κρυσταλλικό πυρίτιο, 10% καπνό πυριτίας και 10% πληρωτικό ασβεστόλιθου, επιτυγχάνοντας αναλογία νερού προς τσιμέντο 0,1 και εκτιμώμενη αντοχή σε θλίψη 120 MPa (17,404 psi). Τέλος, οι Le et al. ανέπτυξαν ένα μίγμα που περιλαμβάνει 70% τσιμέντο, αναλογία άμμου-συνδετικού 60:40, 20% ιπτάμενη τέφρα, 10% καπνό πυριτίας, 1,2 kg/m<sup>3</sup> κοντών ινών πολυπροπυλενίου, 1% υπερρρευστοποιητή και 0,5% επιβραδυντή με w/ αναλογία c 0,26, με αποτέλεσμα αντοχή σε θλίψη 28 ημερών 110 MPa (15.954 psi) [65].

### 2.2.2 Contour Crafting

Η τεχνολογία Contour Crafting (CC), που αναπτύχθηκε στο Πανεπιστήμιο της Νότιας Καλιφόρνια, χρησιμοποιεί μια μέθοδο που βασίζεται στην εξώθηση για την κατασκευή κάθετων κατασκευών από σκυρόδεμα. Αναπτύχθηκε από τον Behrokh Khoshnevis. Αυτή η τεχνική περιλαμβάνει την εξώθηση δύο στρωμάτων ενός τσιμεντοειδούς μίγματος για να σχηματιστεί ένας κατακόρυφος ξυλότυπος. Οι εξατομικευμένοι ενισχυτικοί δεσμοί εισάγονται χειροκίνητα σε καθορισμένα διαστήματα—κάθε 30 cm οριζόντια και 13 cm κάθετα κατά τη συνεχή λειτουργία του μηχανήματος CC.

Επιπλέον, πτερύγια που μοιάζουν με μυστρί που συνδέονται με την κεφαλή εκτύπωσης λειαίνουν τις επιφάνειες του εξωθημένου υλικού. Μόλις ολοκληρωθεί η δομή του ξυλότυπου, το σκυρόδεμα χύνεται χειροκίνητα σε στάδια: η πρώτη στρώση σε βάθος 13 cm, ακολουθούμενη από μια επόμενη στρώση μετά από μία ώρα [62,67]. Αυτή η σταδιακή

μέθοδος έκχυσης βοηθά στη διαχείριση της πλευρικής πίεσης του σκυροδέματος, αφήνοντας χρόνο για μερική σκλήρυνση και σκλήρυνση μεταξύ των εκροών.

Τα κύρια πλεονεκτήματα της τεχνολογίας CC περιλαμβάνουν ανώτερο φινίρισμα επιφάνειας και σημαντικά μεγαλύτερη ταχύτητα κατασκευής. Ένα άλλο αξιοσημείωτο πλεονέκτημα είναι η δυνατότητα ενσωμάτωσης με άλλες ρομποτικές τεχνολογίες για την εγκατάσταση εσωτερικών δομικών στοιχείων όπως σωληνώσεις, ηλεκτρικές καλωδιώσεις και δομές οπλισμού, που μπορούν να βελτιώσουν περαιτέρω τις μηχανικές ιδιότητες της κατασκευής [61]. Το σύστημα CC παράγει κυρίως κατακόρυφα δομικά στοιχεία υπό συμπίεση. Για αρχιτεκτονικά χαρακτηριστικά, όπως πόρτες ή παράθυρα, εγκαθίσταται ένα υπέρθυρο που καλύπτει το άνοιγμα, επιτρέποντας την κατασκευή των τμημάτων του τοίχου από πάνω, παρακάμπτοντας έτσι ζητήματα που σχετίζονται με σχέδια προβόλου.

Ωστόσο, οι Gosselin et al. έχουν εντοπίσει αρκετούς περιορισμούς της τεχνολογίας CC. Πρώτον, περιορίζεται σε κατακόρυφες εξωθήσεις, οι οποίες παράγουν δομές 2,5D κάθετες προεκτάσεις επίπεδων σχημάτων [63,64]. Δεύτερον, η αρχική ρύθμιση του συστήματος ξυλότυπου και σπάτουλας μπορεί να είναι πολύπλοκη και δύσκολη στην εφαρμογή, ιδιαίτερα για αντικείμενα με περίπλοκα σχήματα ή μεγάλα μεγέθη. Τέλος, η διαδικασία διαδοχικής χύτευσης εντός του ξυλότυπου μπορεί να οδηγήσει σε προκλήσεις υδροστατικής πίεσης και αδύναμες μηχανικές ιδιότητες στις διεπαφές μεταξύ των στρωμάτων, δυνητικά σε κίνδυνο τη δομική ακεραιότητα του εξωθημένου σκυροδέματος [69].



**Σχήμα 2-2. Η μέθοδος Contour Crafting**

### **2.2.3 Concrete Printing**

Η τεχνολογία Concrete Printing, που αναπτύχθηκε από ερευνητές στο Πανεπιστήμιο Loughborough στο Ηνωμένο Βασίλειο, προάγει τον τομέα της κατασκευής προσθέτων χρησιμοποιώντας μια μέθοδο που βασίζεται στην εξώθηση. Ενώ μοιράζεται ομοιότητες με την τεχνολογία Contour Crafting (CC), διακρίνεται προσφέροντας δυνατότητες τρισδιάστατης εκτύπωσης και λεπτότερη ανάλυση εναπόθεσης. Αυτό επιτρέπει βελτιωμένο έλεγχο τόσο σε εσωτερικές όσο και σε εξωτερικές γεωμετρίες. Το υλικό που χρησιμοποιείται στην εκτύπωση σκυροδέματος είναι ένα υψηλής απόδοσης ινοπλισμένο σκυρόδεμα λεπτών αδρανών, το οποίο εμφανίζει ανώτερες ιδιότητες υλικού σε σύγκριση με αυτές που επιτυγχάνονται συνήθως με την τεχνολογία CC [68].

Ένα παράδειγμα εφαρμογής αυτής της τεχνολογίας είναι ένας πάγκος πλήρους κλίμακας που παράγεται με τη χρήση Εκτύπωσης σκυροδέματος. Αυτός ο πάγκος, με μήκος 2 μέτρα, πλάτος 0,9 μέτρα και ύψος 0,8 μέτρα, είναι κατασκευασμένος από 128 στρώματα, το καθένα πάχους 6 mm. Ο σχεδιασμός ενσωματώνει 12 κενά τα οποία όχι μόνο μειώνουν το βάρος του πάγκου αλλά παρέχουν επίσης λειτουργίες όπως ακουστική βελτιστοποίηση, θερμομόνωση και μονοπάτια για άλλες υπηρεσίες κτιρίου [70]. Επιπλέον, αυτά τα κενά είναι στρατηγικά τοποθετημένα για να επιτρέπουν τη μεταγενέστερη τοποθέτηση του οπλισμού, ενισχύοντας τη δομική ακεραιότητα του πάγκου.

Ωστόσο, η διαδικασία Concrete Printing απαιτεί πρόσθετες δομές υποστήριξης για τη δημιουργία προεξοχών και άλλων χαρακτηριστικών ελεύθερης μορφής, παρόμοια με τη μέθοδο Fused Deposition Modeling (FDM). Αυτό απαιτεί ένα δευτερεύον υλικό, το οποίο εισάγει πολυπλοκότητες όπως η ανάγκη για μια πρόσθετη συσκευή εναπόθεσης. Αυτή η συμπερίληψη οδηγεί σε αυξημένη συντήρηση, πιο εκτεταμένες απαιτήσεις καθαρισμού και πιο

λεπτομερείς οδηγίες ελέγχου. Επιπλέον, οι δευτερεύουσες δομές πρέπει να αφαιρεθούν σε μια διαδικασία μετα-επεξεργασίας, αυξάνοντας την πολυπλοκότητα.

Οι Gosselin et al. έχουν εντοπίσει αρκετούς περιορισμούς που σχετίζονται με την τεχνολογία Concrete Printing. Πρώτον, η ανάγκη διατήρησης υψηλής ακρίβειας διαστάσεων επιβραδύνει σημαντικά τη διαδικασία, γεγονός που μπορεί να εμποδίσει την εφαρμογή της σε βιομηχανικά περιβάλλοντα. Δεύτερον, αν και η τεχνολογία σχεδιάστηκε αρχικά για τη δημιουργία τρισδιάστατων τοπολογιών, η αναγκαιότητα για ένα υλικό υποστήριξης για προεξοχές θέτει σε κίνδυνο την αποτελεσματικότητα και την ευελιξία της διαδικασίας ενώ επίσης αυξάνει το κόστος υλικών. Τέλος, οι δυνατότητες σχεδίασης σχήματος και οι διαστάσεις των εκτυπώσιμων αντικειμένων περιορίζονται από το μέγεθος του πλαισίου εκτύπωσης. Αυτοί οι παράγοντες επηρεάζουν συλλογικά την πρακτική εφαρμογή και τις δυνατότητες ανάπτυξης της τεχνολογίας Concrete Printing [66].

### **Concrete On-Site 3D Printing**

Οι τεχνολογίες Contour Crafting και Concrete Printing παρουσιάζουν αρκετές τεχνολογικές εξελίξεις, αλλά αντιμετωπίζουν και συγκεκριμένες προκλήσεις, όπως η απαίτηση για εξελιγμένα νέα μηχανήματα, η χρήση κονιάματος λεπτών αδρανών αντί για το παραδοσιακό σκυρόδεμα και περιορισμοί στο μέγεθος των στοιχείων που μπορούν να εκτυπωθούν. Για την αντιμετώπιση αυτών των περιορισμών, μια πρωτοποριακή προσέγγιση στην τεχνολογία 3D Concrete Printing (3DCP), με το όνομα CONPrint3D, αναπτύσσεται στο Technische Universität Dresden της Γερμανίας. Αυτή η καινοτομία στοχεύει στην εφαρμογή του 3DCP απευθείας στα εργοτάξια.

Τα κύρια πλεονεκτήματα της τεχνολογίας CONPrint3D περιλαμβάνουν την υψηλή γεωμετρική ευελιξία και τη δυνατότητα χρήσης τυπικών μηχανημάτων κατασκευής, μειώνοντας έτσι την εξάρτηση από εξειδικευμένο εργατικό δυναμικό. Αυτή η προσέγγιση όχι μόνο επιδιώκει να βελτιώσει την αποδοτικότητα της κατασκευής από άποψη χρόνου, εργασίας και πόρων, αλλά στοχεύει επίσης να ενισχύσει την οικονομική σκοπιμότητα της τεχνολογίας για να αποκτήσει ευρύτερη αποδοχή από τους επαγγελματίες του κλάδου. Η στρατηγική ανάπτυξης ενσωματώνει τη χρήση διαδομένων κατασκευαστικών τεχνικών και τις προσαρμόζει στις συγκεκριμένες απαιτήσεις και περιορισμούς των εργοταξίων. Μια κρίσιμη καινοτομία σε αυτό το έργο περιλαμβάνει την τροποποίηση μιας αντλίας μπούμας σκυροδέματος ώστε να παρέχει αυτόνομα και με ακρίβεια υλικό σε καθορισμένες τοποθεσίες χρησιμοποιώντας μια ειδικά σχεδιασμένη κεφαλή εκτύπωσης. Αυτή η προσαρμογή αποτελεί παράδειγμα του τρόπου με τον οποίο το CONPrint3D ενσωματώνει υπάρχοντα εργαλεία και τεχνολογίες για να προωθήσει τον τομέα της εκτύπωσης κατασκευών [65].



**Σχήμα 2-3. Παράδειγμα 3D concrete printing**

### **Large-Scale 3DCP (Ultra-High Performance Concrete)**

Με βάση την κατανόηση των προκλήσεων που παρατηρούνται στις τεχνολογίες Contour Crafting (CC) και Concrete Printing, μια γαλλική ερευνητική ομάδα έχει αναπτύξει μια νέα τεχνολογία 3D Concrete Printing (3DCP) που χρησιμοποιεί σκυρόδεμα εξαιρετικά υψηλής

απόδοσης (UHPC). Αυτή η νέα τεχνολογία χρησιμοποιεί μια μέθοδο που βασίζεται στην εξώθηση, όπου το UHPC τοποθετείται διαδοχικά σε στρώματα με μια κεφαλή εκτύπωσης εξώθησης συνδεδεμένη σε ρομποτικό βραχίονα 6 αξόνων. Τα κύρια πλεονεκτήματα αυτής της καινοτόμου τεχνολογίας περιλαμβάνουν:

1. την ικανότητα παραγωγής μεγάλης κλίμακας, πολύπλοκων τρισδιάστατων γεωμετριών χωρίς την ανάγκη προσωρινών στηρίξεων.
2. η εφαρμογή της μεθόδου της επαπτομενικής συνέχειας για τον τεμαχισμό, η οποία επιτρέπει μεταβλητό πάχος στρώσης και οδηγεί σε δομικά πιο στιβαρές κατασκευές.
3. η χρήση ενός ευέλικτου ρομποτικού βραχίονα 6 αξόνων που προσφέρει μεγαλύτερο έλεγχο στη γεωμετρική πολυπλοκότητα σε σύγκριση με τους παραδοσιακούς γεραμούς ή σκελετό σκελετών και
4. τη δυνατότητα για πολυλειτουργικότητα στα δομικά στοιχεία λόγω των περίπλοκων γεωμετριών που μπορούν να επιτευχθούν [45,68].

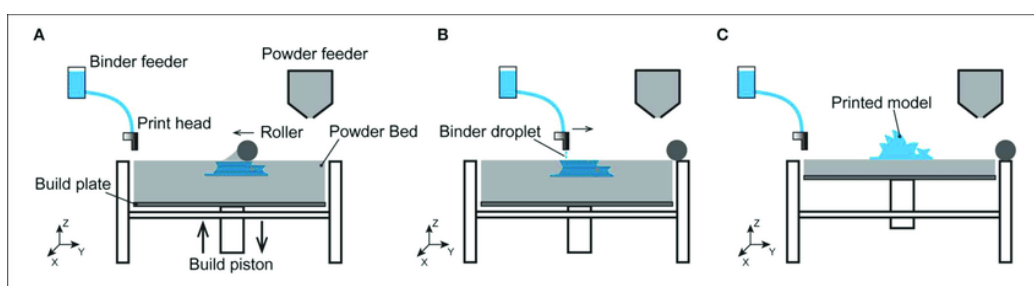
Αυτή η προηγμένη τεχνολογία αποδείχθηκε μέσω της δημιουργίας ενός "πολυλειτουργικού στοιχείου τοίχου". Αυτό το στοιχείο διαθέτει απορροφητικό ξυλότυπο που έχει σχεδιαστεί για πλήρωση με ενισχυμένο με ίνες UHPC για δομικά τμήματα ή με θερμομονωτικά υλικά όπως αφρός. Επιπλέον, συγκεκριμένα τμήματα έμειναν σκόπιμα κενά για να φιλοξενήσουν επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας όπως σωληνώσεις ή ηλεκτρικές καλωδιώσεις. Η παραγωγή αυτού του στοιχείου τοίχου, με διαστάσεις 1360 mm επί 1500 mm επί 170 mm και βάρος 450 kg, ολοκληρώθηκε σε περίπου 12 ώρες, περιλαμβάνοντας την ατσακευή 139 στρώσεων.



**Σχήμα 2-4. Παράδειγμα 3D concrete printing μεγάλης κλίμακας**

#### 2.2.4 Powder-based Technique.

Η τεχνική με βάση τη σκόνη αντιπροσωπεύει μια ξεχωριστή διαδικασία παραγωγής τρισδιάστατης εκτύπωσης που διευκολύνει τη δημιουργία ακριβών δομών με πολύπλοκες γεωμετρίες. Αυτή η μέθοδος περιλαμβάνει την επιλεκτική εναπόθεση ενός συνδετικού υγρού, που συχνά αναφέρεται ως "μελάνη", σε μια κλίνη σκόνης για τη σύνδεση των σωματιδίων όπου το συνδετικό έρχεται σε επαφή. Αυτή η τεχνική είναι κυρίως μια διαδικασία παραγωγής εκτός εργοταξίου, και είναι ιδιαίτερα κατάλληλη για την παραγωγή μικρής κλίμακας δομικών στοιχείων όπως πάνελ, μόνιμους ξυλότυπους και εσωτερικές κατασκευές σχεδιασμένες για επακόλουθη επιτόπια συναρμολόγηση.



**Σχήμα 2-5. powder based Technique**

Μια οπτική απεικόνιση αυτής της διαδικασίας παρέχεται στο Σχήμα 2-6. Αρχικά, ένας κύλινδρος, ο οποίος είναι ενσωματωμένος με μια κεφαλή εκτύπωσης, διανέμει ένα βασικό στρώμα σκόνης πάχους περίπου 3 mm κατά μήκος της πλάκας κατασκευής. Κατόπιν αυτού, ο κύλινδρος εφαρμόζει ένα λεπτότερο στρώμα σκόνης, πάχους περίπου 0,1 mm, εξομαλύνοντάς το πάνω από το υπάρχον στρώμα πούδρας σύμφωνα με τις ρυθμίσεις πάχους στρώματος του εκτυπωτή. Το διάλυμα συνδετικού στη συνέχεια τροφοδοτείται από έναν τροφοδότη συνδετικού στην κεφαλή εκτύπωσης, όπου εκτοξεύεται με ακρίβεια μέσω των ακροφυσίων στο στρώμα σκόνης, προκαλώντας την προσκόλληση των σωματιδίων σκόνης μεταξύ τους. Αυτή η ακολουθία βημάτων επαναλαμβάνεται στρώμα προς στρώμα μέχρι να σχηματιστεί πλήρως η δομή. Μετά την ολοκλήρωση της εκτύπωσης, το τεμάχιο αφήνεται να στεγνώσει για μια καθορισμένη περίοδο προτού αφαιρεθεί τυχόν περίσσεια ή μη δεσμευμένη σκόνη χρησιμοποιώντας έναν φυσητήρα αέρα. Η καταλληλότητα αυτής της μεθόδου για εξαρτήματα μικρής κλίμακας πηγάζει από την ακρίβειά της και την ποιότητα των περίπλοκων λεπτομερειών που μπορεί να παράγει, καθιστώντας την ιδανική για πολύπλοκα αρχιτεκτονικά στοιχεία που απαιτούν υψηλή ακρίβεια και λεπτή ανάλυση.

### 2.2.5 D-shape

Η τεχνολογία εκτύπωσης D-Shape, που σχεδιάστηκε από τον Enrico Dini, έχει ομοιότητα με τη διαδικασία Inkjet-Based Job (IBJ) στην οποία ένας συνδετικός παράγοντας ψεκάζεται σε ένα στρώμα κοκκώδους υλικού, το οποίο μπορεί να περιέχει ίνες. Η εγκατάσταση περιλαμβάνει ένα σύστημα πλαισίου αλουμινίου 6 m x 6 m, που υποστηρίζει δύο σκελετικά ρομπότ. Το ένα ρομπότ χειρίζεται τη διανομή και την ισοπέδωση του κοκκώδους υλικού, ενώ το άλλο χειρίζεται μια κεφαλή εκτύπωσης που μπορεί να φιλοξενήσει πολλαπλές εμπλοκές. Το πλαίσιο συνδέεται με τέσσερις βηματικούς κινητήρες που προσαρμόζουν το ύψος της πλατφόρμας στην κατεύθυνση z. Η ίδια η κεφαλή εκτύπωσης είναι εξοπλισμένη με έως και 300 ακροφύσια, με δυνατότητα επέκτασης στα 1000 βάσει ειδικών απαιτήσεων, σε απόσταση 20 mm μεταξύ τους. Αυτά τα ακροφύσια ψεκάζουν ταυτόχρονα έναν συνδετικό παράγοντα με βάση το χλώριο που αντιδρά με το οξείδιο μετάλλου στο κοκκώδες υλικό για να σχηματίσει μια στερεή δομή.

Τα ακροφύσια μπορούν να διασχίσουν τον άξονα y που κινείται από ένα ηλεκτρικό έμβολο εναλλασσόμενου ρεύματος, εξασφαλίζοντας ολοκληρωμένη κάλυψη της περιοχής εκτύπωσης. Το κοκκώδες υλικό βάσης τυπικά αποτελείται από μια ουσία που μοιάζει με άμμο αναμεμειγμένη με οξείδιο μετάλλου σε σκόνη, το οποίο αντιδρά χημικά με το συνδετικό. Οι εναλλακτικοί συνδετικοί παράγοντες που χρησιμοποιούνται μπορεί να είναι ιλύς με βάση το τσιμέντο Portland/Sorel, γεωπολυμερή ή πολυμερικά αστάρια.

Για τον εντοπισμό των πιο αποτελεσματικών διαμορφώσεων τρισδιάστατης εκτύπωσης υπό ποικίλες συνθήκες φορτίου και θερμότητας, χρησιμοποιούνται διάφορα εμπορικά προγράμματα Computer-Aided Engineering (CAE). Αυτά βασίζονται στην ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων (FEA) για δομική βελτιστοποίηση και μερικές φορές βελτιστοποίηση τοπολογίας για την ανάλυση των φυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων ενός σχεδίου κτιρίου. Η βέλτιστη δομή που προσδιορίζεται μέσω αυτής της ανάλυσης στη συνέχεια εξάγεται στην τυπική μορφή STL για εκτύπωση.

Η διαδικασία εκτύπωσης ξεκινά με την τοποθέτηση ενός βασικού στρώματος κοκκώδους υλικού. Στη συνέχεια, η κεφαλή εκτύπωσης εφαρμόζει μια προκαθορισμένη ποσότητα συνδετικού υλικού σε συγκεκριμένες περιοχές, ξεκινώντας την εκτύπωση αυτού του στρώματος. Λόγω της απόστασης 20 mm μεταξύ των ακροφυσίων, δεν επιτυγχάνεται αμέσως πλήρης κάλυψη, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται κενά [72]. Έτσι, η κεφαλή εκτύπωσης μετακινείται κατά μήκος του άξονα y για να γεμίσει αυτά τα κενά. Κάθε σταγόνα συνδετικού έχει μέση διάμετρο 5 mm, απαιτώντας τέσσερα περάσματα για να γεφυρωθεί το διάκενο των 20 mm μεταξύ των ακροφυσίων. Μετά την ολοκλήρωση ενός στρώματος, η κεφαλή εκτύπωσης ανυψώνεται κατά μήκος του άξονα z και ένα άλλο στρώμα κοκκώδους υλικού εφαρμόζεται και συμπιέζεται στο προηγούμενο στρώμα με δύναμη που κυμαίνεται από 0,0 έως 0,5 kg/cm<sup>2</sup>. Αυτή η σειρά επαναλαμβάνεται μέχρι να σχηματιστεί ολόκληρη η δομή. Η περίσσεια κοκκώδους υλικού στη συνέχεια αφαιρείται με ισχυρά κενά και ανακυκλώνεται για μεταγενέστερη χρήση.

### 2.2.6 Emerging Objects

Η Emerging Objects, μια εταιρεία με έδρα τις ΗΠΑ, έχει αναπτύξει μια αποκλειστική τεχνολογία που χρησιμοποιεί μια τεχνική που βασίζεται σε σκόνη για τρισδιάστατη εκτύπωση. Αυτή η μέθοδος περιλαμβάνει την επιλεκτική σκλήρυνση ενός μοναδικού σύνθετου σκευάσματος τσιμέντου μέσω της εναπόθεσης ενός συνδετικού παράγοντα. Αυτή η τεχνολογία χρησιμοποιήθηκε για τη δημιουργία του "Bloom", η οποία απεικονίζεται στο σχήμα 2-7, μιας ανεξάρτητης κατασκευής ύψους 2,74 μέτρων με επιφάνεια βάσης περίπου 3,66 μέτρα επί 3,66 μέτρα. Το Bloom αποτελείται από 840 προσαρμοσμένα μπλοκ τρισδιάστατης εκτύπωσης, που παράγονται χρησιμοποιώντας μια συλλογή 11 τρισδιάστατων εκτυπωτών σε σκόνη [73]. Αυτά τα μπλοκ κατασκευάζονται από ένα σύνθετο τσιμέντο που αποτελείται κυρίως από συνηθισμένο τσιμέντο Portland (OPC) χωρίς οξειδία σιδήρου. Τα μεμονωμένα μπλοκ συνδέονται με εξοπλισμό από ανοξείδωτο χάλυβα και είναι οργανωμένα σε 16 μεγάλα, ελαφριά προκατασκευασμένα πάνελ. Αυτά τα πάνελ μπορούν να συναρμολογηθούν γρήγορα, χρειάζονται μόλις λίγες ώρες για να ολοκληρωθεί η δομή.

Επιπλέον, η ίδια τεχνολογία εφαρμόστηκε για την κατασκευή του "Shed", η οποία απεικονίζεται στο σχήμα 2-7, μιας άλλης πρωτότυπης δομής. Το υπόστεγο κατασκευάζεται χρησιμοποιώντας Ricooco Blocks™, τα οποία είναι δομοστοιχεία 3D εκτυπωμένα δομικά στοιχεία σχεδιασμένα για την κατασκευή τοίχων. Αυτά τα μπλοκ, διαστάσεων 0,3 × 0,3 × 0,3 μέτρα, εκτυπώνονται από άμμο, επιδεικνύοντας την ευελιξία και τις δυνατότητες αυτής της τεχνολογίας τρισδιάστατης εκτύπωσης στη δημιουργία ποικίλων δομικών στοιχείων.



(α)



(β)

Σχήμα 2-6. (α) Η κατασκευή Bloom, (β) η κατασκευή shed

### 2.2.7 Powder-based 3DCP με χρήση Γεωπολυμερών

Η τεχνική με βάση την πούδρα αναγνωρίζεται για την ικανότητά της να κατασκευάζει δομικά στοιχεία που χαρακτηρίζονται από λεπτές λεπτομέρειες και πολύπλοκα σχήματα. Στον κατασκευαστικό κλάδο, υπάρχει αξιοσημείωτη ζήτηση για τέτοια εξαρτήματα, τα οποία παραδοσιακά απαιτούν δαπανηρούς ξυλοτύπους χρησιμοποιώντας τρέχοντα κατασκευαστικά συστήματα. Αυτή η τεχνική προσφέρει τη δυνατότητα αποτελεσματικής παραγωγής στιβαρών και ανθεκτικών εξαρτημάτων, καλύπτοντας τις ανάγκες της βιομηχανίας [75]. Ωστόσο, η χρήση υλικών εκτύπωσης με βάση το τσιμέντο σε εμπορικά διαθέσιμους τρισδιάστατους εκτυπωτές με βάση τη σκόνη είναι σημαντικά περιορισμένη, περιορίζοντας το πλήρες δυναμικό της τεχνικής στις κατασκευαστικές εφαρμογές. Για να αντιμετωπίσουν αυτόν τον περιορισμό, οι συγγραφείς αυτής της μελέτης ανέπτυξαν με επιτυχία μια καινοτόμο μεθοδολογία για την ενσωμάτωση υλικών με βάση τα γεωπολυμερή σε εμπορικά διαθέσιμους τρισδιάστατους εκτυπωτές με βάση τη σκόνη.

Τα γεωπολυμερή αντιπροσωπεύουν μια βιώσιμη εναλλακτική λύση στο συνηθισμένο τσιμέντο Portland (OPC) και παράγονται μέσω της αλκαλικής ενεργοποίησης βιομηχανικών παραπροϊόντων όπως η ιπτάμενη τέφρα και η σκωρία από σταθμούς παραγωγής ενέργειας άνθρακα και η παραγωγή σιδήρου, αντίστοιχα. Τα γεωπολυμερή όχι μόνο επιδεικνύουν ανώτερες μηχανικές, χημικές και θερμικές ιδιότητες, αλλά και παράγουν περίπου 80% λιγότερες εκπομπές άνθρακα σε σύγκριση με το OPC. Η ερευνητική ομάδα ετοίμασε ένα

εκτυπώσιμο υλικό με βάση το γεωπολυμερές αναμειγνύοντας σκωρία, άνυδρο μεταπυριτικό νάτριο και λεπτή άμμο. Βασικές παράμετροι όπως η κατανομή του μεγέθους των σωματιδίων, η ποιότητα της επιφάνειας του στρώματος σκόνης, οι πραγματικές/μαζικές πυκνότητες της σκόνης, το πορώδες της κλίνης και η συμπεριφορά διείσδυσης σταγονιδίων συνδεδεμένου υλικού αξιολογήθηκαν ποσοτικά για να αξιολογηθεί η δυνατότητα εκτύπωσης του υλικού με βάση το γεωπολυμερές [77]. Πραγματοποιήθηκαν περαιτέρω έρευνες σχετικά με την ακρίβεια εκτύπωσης, το φαινομενικό πορώδες και τις μηχανικές ιδιότητες των τυπωμένων δομών, με λεπτομερή ευρήματα που αναφέρθηκαν στο Xia και στο Sanjayan.

Για την παρασκευή της σκόνης γεωπολυμερούς, άνυδρα σφαιρίδια μεταπυριτικού νατρίου αρχικά αλέστηκαν ξηρά για πέντε λεπτά σε πλανητικό μύλο με σφαιρίδια χρησιμοποιώντας κεραμικές μπάλες. Στη συνέχεια, η σκωρία, το άνυδρο μεταπυριτικό νάτριο και η λεπτή άμμος αναμίχθηκαν ξηρά σε αναμικτήρα Hobart μέχρις ότου επιτευχθεί ένα ομοιογενές μίγμα. Ένας εμπορικός τρισδιάστατος εκτυπωτής (Zprinter® 150, Z-Corp, USA) χρησιμοποιήθηκε για την εκτύπωση τόσο μιας κυβικής δομής διαστάσεων 20 × 20 × 20 mm όσο και μιας σύνθετης γεωμετρικής δομής μέτρησης 56 × 35 × 25 mm. Η αντοχή σε θλίψη της τυπωμένης κυβικής δομής αξιολογήθηκε τόσο σε προσανατολισμό X όσο και σε προσανατολισμό Z πριν και μετά τη σκλήρυνση. Για μετα-σκλήρυνση, οι κυβικές δομές βυθίστηκαν σε ένα κορεσμένο άνυδρο διάλυμα μεταπυριτικού νατρίου για 1 και 7 ημέρες σε θερμοκρασία 60°C.



**Σχήμα 2-7. Powder bases 3DCP με χρήση Γεωπολυμερών**

### **2.2.8 Σύνοψη Μεθόδων**

Γενικεύοντας, η εκτύπωση σκυροδέματος, η δημιουργία περιγράμματος (CC) και η εκτύπωση σε σχήμα D χρησιμοποιούν αρχές κατασκευής πρόσθετων για την κατασκευή δομών στρώμα προς στρώμα, καθεμία από τις οποίες προσφέρει μοναδικές δυνάμεις και χαρακτηριστικά [79]. Το σκυρόδεμα και η εκτύπωση σε σχήμα D σημειώνονται για την παραγωγή υψηλότερης αντοχής σε θλίψη και κάμψη σε σύγκριση με το Contour Crafting, κυρίως λόγω των διαφορών στη σύνθεση των υλικών εκτύπωσης τους.

Στη μέθοδο Contour Crafting, το μείγμα έχει υψηλή περιεκτικότητα σε τσιμέντο, μοιάζει περισσότερο με κονίαμα από το παραδοσιακό σκυρόδεμα και δεν έχει σχεδιαστεί ως αυτόνομο σύστημα. Σχηματίζει μόνο το εξωτερικό πλαίσιο μιας κατασκευής, το οποίο στη συνέχεια γεμίζεται με ένα ισχυρότερο υλικό που παρέχει την απαραίτητη δομική στήριξη. Τα χαρακτηριστικά του μηχανήματος, όπως η διάμετρος του ακροφυσίου και το πάχος του στρώματος, επηρεάζουν σημαντικά την ταχύτητα και την ποιότητα εκτύπωσης. Η διάμετρος του ακροφυσίου υπαγορεύει την ποσότητα του υλικού που εξωθείται ανά πέρασμα, ενώ το πάχος του στρώματος καθορίζει το ύψος κάθε στρώματος. Οι μεγαλύτερες διαμέτροι ακροφυσίων και τα πάχη στρώσης μειώνουν τον χρόνο εκτύπωσης, αλλά σε βάρος της λεπτομέρειας και της πολυπλοκότητας στον τελικό σχεδιασμό. Η βελτιστοποίηση διαδρομής εκτύπωσης μπορεί να βελτιώσει την απόδοση του υλικού και να μειώσει τον χρόνο εκτύπωσης έως και 30% συνδέοντας την αρχή και το τέλος μιας διαδρομής εκτύπωσης στην ίδια θέση.

Στην τρισδιάστατη εκτύπωση, οι δομές κατασκευάζονται από κάτω προς τα πάνω, γεγονός που εισάγει προκλήσεις κατά την ενσωμάτωση προεξοχών για χαρακτηριστικά όπως παράθυρα και πόρτες. Στην Εκτύπωση Σκυροδέματος, ένα δευτερεύον υλικό υποστηρίζει το σκυρόδεμα κατά τη σκλήρυνση και αφαιρείται στη συνέχεια, προσθέτοντας πολυπλοκότητα στη διαδικασία. Στο CC, τα υπέρθυρα τοποθετούνται αυτόματα πάνω από ανοίγματα,



επιτρέποντας τη συνέχιση της εκτύπωσης με ελάχιστη διακοπή. Στην εκτύπωση σχήματος D, το μη δεσμευμένο κοκκώδες υλικό χρησιμεύει ως δομή στήριξης [67,73].

Κάθε μέθοδος έχει τους περιορισμούς της. Η εκτύπωση σκυροδέματος, που συνήθως χρησιμοποιεί ένα μόνο ακροφύσιο, είναι πιο αργή από τις άλλες μεθόδους και μπορεί να απαιτεί εκτεταμένη μετα-επεξεργασία για να επιτευχθεί η επιθυμητή αισθητική λόγω του τυπικού φινιρίσματος με ραβδώσεις. Η εξάρτηση της CC σε πρόσθετα υλικά και ακροφύσια εισάγει πολυπλοκότητα, μειώνοντας τα παραδοσιακά οφέλη της τρισδιάστατης εκτύπωσης, όπως η απλότητα και η ταχύτητα, και προσθέτει προκλήσεις συντήρησης και ελέγχου. Η εκτύπωση σε σχήμα D απαιτεί σημαντικές ποσότητες υλικού, παρουσιάζοντας υλικοτεχνικές προκλήσεις σε κατασκευές μεγάλης κλίμακας. Αν και το μη δεσμευμένο κοκκώδες υλικό μπορεί να ανακυκλωθεί, ο χρόνος που απαιτείται για το χειρισμό του υλικού και τη μετεπεξεργασία μπορεί να είναι σημαντικός. Επιπλέον, προβλήματα με τον συνδετικό παράγοντα, όπως η αιμορραγία σε ανεπιθύμητες περιοχές του κρεβατιού εκτύπωσης, μπορεί να οδηγήσουν σε μια τραχιά επιφάνεια που απαιτεί σημαντική μετα-επεξεργασία για να επιτευχθεί ομαλό φινίρισμα.

### 2.2.9 Διαδικασία Εκτύπωσης

Για την εκτύπωση με τη μέθοδο 3DCP ακολουθούνται κάποια βήματα και μοιάζουν αρκετά με τις συμβατικές μεθόδους 3D εκτύπωσης:

1. Σχεδίαση & μοντελοποίηση κάτοψης και 3D σχεδίου με χρήση CAD
2. Εξαγωγή αρχείου σε μορφή STL
3. Επιλογή υλικών εκτύπωσης
4. Επιλογή παραμέτρων με χρήση προγράμματος slicer (π.χ. Ultimaker Cura, Slic3r, Simplify3D)
5. Δημιουργία G-κώδικα
6. Ρύθμιση και καλιμπράρισμα εκτυπωτή
7. Εκτύπωση
8. Επιθεώρηση και φινίρισμα

## 2.3 Το Τσιμέντο και τα χαρακτηριστικά του

Το τσιμέντο περιλαμβάνει μια ευρεία κατηγορία σκονών που εμφανίζουν μηχανικές ιδιότητες, οι οποίες αναφέρονται στην ικανότητα ενός υλικού να πήξει και να σκληραίνει αφού λειοτριβεί και αναμιχθεί με νερό, υφίσταται πήξη και στερεοποίηση στον αέρα. Αυτή η κατηγορία περιλαμβάνει κυρίως ενώσεις πυριτικών αλάτων ασβεστίου και αργιλικού ασβεστίου [50,63]. Τα τσιμέντα ταξινομούνται περαιτέρω σε φυσικά τσιμέντα, τσιμέντα Portland και τσιμέντα αργίλου, μεταξύ των οποίων το τσιμέντο Portland είναι το πιο σημαντικό λόγω της εκτεταμένης χρήσης του στις κατασκευές και της σταθερά αυξανόμενης παγκόσμιας παραγωγής.



**Σχήμα 2-8. Παράδειγμα τσιμέντου για χρήση 3DCP**

Η κύρια πρώτη ύλη για την παραγωγή κλίνκερ, που αποτελεί βασικό συστατικό του τσιμέντου Portland, είναι ο ασβεστόλιθος. Το υλικό αυτό εξάγεται κυρίως μέσω επιφανειακής εξόρυξης κοντά σε εργοστάσια παραγωγής τσιμέντου. Δεδομένου ότι περίπου το 80% των 1,50-1,65 τόνων πρώτων υλών που απαιτούνται για την παραγωγή ενός τόνου κλίνκερ αποτελείται από ασβεστόλιθο, η εγγύτητα των τοποθεσιών εξόρυξης ασβεστόλιθου στις εγκαταστάσεις παραγωγής κλίνκερ τσιμέντου είναι ζωτικής σημασίας για τη λειτουργική αποτελεσματικότητα. Η διαδικασία παραγωγής ξεκινά με την ανάμειξη πρώτων υλών,

συμπεριλαμβανομένου θρυμματισμένου ασβεστόλιθου, αργίλου, χαλαζία, βωξίτη και σιδηρομεταλλεύματος σε ακριβείς αναλογίες [74]. Αυτό το μίγμα στη συνέχεια αλέθεται λεπτό για να σχηματιστεί αυτό που συνήθως αναφέρεται ως «ωμό γεύμα» ή «αλεύρι». Αυτό το αλεύρι υφίσταται πυρομεταλλουργική επεξεργασία σε περιστροφικό κλίβανο, όπου υποβάλλεται σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες χρησιμοποιώντας καύσιμα όπως φυσικό αέριο, πετρέλαιο, άνθρακας ή εναλλακτικά καύσιμα. Μέσω πολύπλοκων φυσικοχημικών μετασχηματισμών, αυτή η επεξεργασία έχει ως αποτέλεσμα το σχηματισμό γκριζοπράσινων σφαιριδίων με διάμετρο από 10 έως 25 mm, γνωστά ως κλίνκερ τσιμέντου.

Η παραγωγή κλίνκερ μέσω διαδικασιών κλιβάνου περιλαμβάνει πολλά βασικά στάδια, τα οποία είναι ζωτικής σημασίας για τη μετατροπή των πρώτων υλών στο τελικό προϊόν. Αυτά τα στάδια είναι:

1. **Εξατμική Ελεύθερο Νερού:** Η αρχική φάση όπου το μη δεσμευμένο νερό που υπάρχει στις πρώτες ύλες εξατμίζεται.
2. **Αφαίρεση Κρυσταλλικού Νερού:** Αυτό το στάδιο περιλαμβάνει κυρίως την εξαγωγή δεσμευμένου νερού από αργιλικά υλικά.
3. **Αποσύνθεση Ασβεστόλιθου:** Σε αυτή την κρίσιμη φάση, ο ασβεστόλιθος ( $\text{CaCO}_3$ ) αποσυντίθεται μέσω της όπτησης.
4. **Σχηματισμός Φάσεων Κλίνκερ Τσιμέντου:** Αυτό περιλαμβάνει το σχηματισμό:
  - a. Ενώσεις πυριτικού ασβεστίου ( $\text{C}_2\text{S}$ ,  $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$  και  $\text{C}_3\text{S}$ ,  $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ )
  - b. Αργιλικό ασβέστιο ( $\text{C}_3\text{A}$ ,  $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ )
  - c. Αλουμινο-φερρίτης ασβεστίου ( $\text{C}_4\text{AF}$ ,  $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ )
5. **Ψύξη του κλίνκερ:** Το τελικό στάδιο όπου το κλίνκερ ψύχεται για να σταθεροποιηθούν οι νεοσχηματιζόμενες ενώσεις.

Μετά την παραγωγή κλίνκερ, για την κατασκευή του απλού τσιμέντου Portland (OPC), τα πρόσθετα βήματα περιλαμβάνουν:

1. **Ανάμιξη κλίνκερ και γύψου:** Συνήθως, το κλίνκερ αποτελεί το 95% του μείγματος, με περίπου 5% γύψο.
2. **Λεπτή λείανση:** Το μίγμα στη συνέχεια αλέθεται λεπτή για να παραχθεί τσιμέντο.

Η υιοθέτηση του ασβεστολιθικού τσιμέντου Portland αναγνωρίζεται για τα τεχνικά και οικονομικά του οφέλη. Τα Ευρωπαϊκά Πρότυπα EN 197-1 κατηγοριοποιούν δύο τύπους ασβεστολιθικού τσιμέντου Portland: έναν με περιεκτικότητα σε ασβεστόλιθο 6-20%, με την ένδειξη CEMII/A-L και έναν άλλο με περιεκτικότητα σε ασβεστόλιθο 21-35%, που ονομάζεται CEMII/B-L. Η χρήση ασβεστόλιθου στο τσιμέντο Πόρτλαντ αναμένεται να αυξηθεί λόγω των ευεργετικών ιδιοτήτων του. Η εκτενής έρευνα σε αυτόν τον τομέα επικεντρώνεται σε τρεις κύριες ανησυχίες: την επίδραση του ασβεστόλιθου στη συμπεριφορά του τσιμέντου, τον ρόλο του κατά τις αντιδράσεις ενυδάτωσης κλίνκερ και την επίδρασή του κατά τη διαδικασία λείανσης του κλίνκερ και του ασβεστόλιθου. Αυτή η εις βάθος κατανόηση είναι απαραίτητη καθώς η ζήτηση για τσιμέντο Πόρτλαντ συνεχίζει να αυξάνεται, υπογραμμίζοντας την ανάγκη για ενδελεχή κατανόηση των ιδιοτήτων του τσιμέντου και του σκυροδέματος [76].

## Αδρανή

Τα αδρανή, που αποτελούνται κυρίως από θραύσματα ασβεστόλιθου από κυρίως υαλώδη πετρώματα, παρουσιάζουν το χαρακτηριστικό ότι δεν αντιδρούν με το υδροξείδιο του ασβεστίου [ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ], ένα υποπροϊόν της ενυδάτωσης του τσιμέντου. Αυτά τα αδρανή βρίσκουν εκτεταμένη χρήση όχι μόνο στην παραγωγή σκυροδέματος αλλά και ως υλικά για οδοστρώματα και σε μεγαλύτερα μεγέθη για την κατασκευή σιδηροδρομικών γραμμών. Ο πρωταρχικός τους ρόλος στο σκυρόδεμα είναι κρίσιμος λόγω των γωνιακών και ακανόνιστων σχημάτων τους που συμπλέκονται και συνδέονται με τσιμεντοπολτό - ένα μίγμα τσιμέντου και νερού. Ωστόσο, δεδομένου του υψηλού κόστους παραγωγής του τσιμέντου, η αναλογία του στο σκυρόδεμα είναι βελτιστοποιημένη ώστε να ελαχιστοποιείται το κόστος διατηρώντας παράλληλα την επαρκή αντοχή.

Τα αδρανή αποτελούν περίπου το 70-80% του βάρους του σκυροδέματος, μειώνοντας σημαντικά το συνολικό κόστος του υλικού αφού είναι λιγότερο ακριβά τόσο ως πρώτες ύλες όσο και ως προς τις διαδικασίες παραγωγής. Στο σκυρόδεμα, τα αδρανή χρησιμεύουν ουσιαστικά ως πληρωτικά. Ωστόσο, τα οφέλη των αδρανών υλικών εκτείνονται πέρα από οικονομικούς παράγοντες. Ενισχύουν επίσης την τεχνική απόδοση του σκυροδέματος,

συμβάλλοντας στη στατική συμπεριφορά των κατασκευών, εξασφαλίζοντας μεγαλύτερη σταθερότητα όγκου και επεκτείνοντας τη διάρκεια ζωής των κατασκευών πέρα από αυτές που κατασκευάζονται μόνο με τσιμεντοκονία. Οι φυσικές και μηχανικές ιδιότητες των αδρανών είναι καθοριστικές για τον καθορισμό των επιθυμητών χαρακτηριστικών και προδιαγραφών απόδοσης του σκυροδέματος. Τα αδρανή με χαμηλή πυκνότητα και υψηλό πορώδες γενικά οδηγούν σε ασθενέστερο σκυροδέμα με χαμηλότερη αντοχή στη φθορά. Αντίθετα, τα πυκνά και σκληρά αδρανή βοηθούν στην παραγωγή σκυροδέματος που παρουσιάζει υψηλή αντοχή σε θλίψη και αντοχή στην τριβή. Είναι σημαντικό τα αδρανή σκυροδέματος να είναι καθαρά, χωρίς σκόνη, άργιλο, οργανική ύλη (που συνήθως επιτυγχάνεται με το πλύσιμο) και να είναι σκληρά και ισχυρά για να διασφαλίζεται η ποιότητα.

Τα αδρανή είναι διαθέσιμα σε διάφορα μεγέθη και σχήματα και κατηγοριοποιούνται με βάση το μέγεθος:

1. **Άμμος:** μέγιστη διάμετρος 5mm
2. **Χαλίκι:** 5-12,5mm (ψιλό ή χοντρό)
3. **Βότσαλα:** 12,5-38mm ή και μεγαλύτερα.

Αυτές οι ταξινομήσεις είναι απαραίτητες για την προσαρμογή του μείγματος αδρανών στις συγκεκριμένες κατασκευαστικές ανάγκες, διασφαλίζοντας τη βέλτιστη απόδοση του προκύπτοντος σκυροδέματος [78].

Τα αδρανή επηρεάζουν σημαντικά τις θερμικές και μηχανικές ιδιότητες του σκυροδέματος, επηρεάζοντας χαρακτηριστικά, όπως η εργασιμότητα και η αλληλεπίδραση και η συγκόλληση μεταξύ των αδρανών και της πάστας τσιμέντου. Αυτά τα αποτελέσματα καθορίζονται σε μεγάλο βαθμό από το σχήμα και την τραχύτητα της επιφάνειας των αδρανών, καθώς και από τον τύπο τους. Ανάλογα με την ορυκτολογική τους σύσταση, η επιφάνεια των αδρανών μπορεί να είναι είτε σκληρή, είτε μαλακή. Οι σκληρότερες επιφάνειες αδρανών ενισχύουν την πρόσφυση και τη συνεκτικότητα μεταξύ της πάστας τσιμέντου και των αδρανών, διευκολύνοντας μεγαλύτερη μηχανική στιβαρότητα. Αντίθετα, τα αδρανή με μαλακότερες επιφάνειες βελτιώνουν την εργασιμότητα του μίγματος σκυροδέματος κατά την προετοιμασία και τη χύτευσή του.

Η ιστορική έρευνα έχει αξιολογήσει εκτενώς την επίδραση των αδρανών στις μηχανικές ιδιότητες του σκυροδέματος. Τα ευρήματα δείχνουν ότι αδρανή όπως χαλίκι και άλλα σκληρά υλικά αποδίδουν συνήθως ικανοποιητικές τιμές αντοχής σε θλίψη. Τα ασβεστολιθικά αδρανή, ιδιαίτερα, διακρίνονται για την παροχή ακόμη μεγαλύτερης αντοχής. Επιπλέον, τα σκυροδέματα που αποτελούνται από λεπτόκοκκα αδρανή ή ασβεστόλιθο τείνουν να παρουσιάζουν υψηλότερη αντοχή σε εφελκυσμό σε σύγκριση με εκείνα που χρησιμοποιούν χονδρόκοκκα αδρανή.

Διάφορες μελέτες έχουν συγκρίνει τις τελικές ιδιότητες του σκυροδέματος σε σχέση με τους τύπους των αδρανών που χρησιμοποιούνται, με τα αποτελέσματα να δείχνουν ξεκάθαρα ότι οι ιδιότητες αντοχής που παρέχονται από κάθε τύπο αδρανών εξαρτώνται από τις ειδικές εφαρμογές τους στην κατασκευή. Αυτές οι συγκρίσεις είναι ζωτικής σημασίας για την κατανόηση του πώς τα διαφορετικά χαρακτηριστικά των αδρανών επηρεάζουν τη συνολική απόδοση και την καταλληλότητα του σκυροδέματος για διάφορους κατασκευαστικούς σκοπούς.

## **Κονιάμα & Σκυρόδεμα**

Τα κονιάματα είναι μείγματα λεπτών αδρανών (με μέγιστο μέγεθος κόκκου  $\leq 4\text{mm}$ ), συνδετικών υλικών και νερού, που χρησιμοποιούνται συνήθως στις κατασκευές για διάφορους σκοπούς, όπως εφαρμογές τοιχοποιίας και επίστρωσης. Για την παρασκευή αυτών των κονιαμάτων, χρησιμοποιούνται διάφοροι τύποι σκονών που αντιδρούν με νερό ή αέρα για να παρουσιάσουν πλαστικές και συνδετικές ιδιότητες. Αυτά τα υλικά σκληραίνουν με την πάροδο του χρόνου για να σχηματίσουν μια πυκνή, συμπαγή μάζα.

Στο πλαίσιο των κονιαμάτων επίστρωσης, είναι κρίσιμο να έχουν την ικανότητα να παραμορφώνονται υπό θερμικούς κύκλους ή να αυτοσυρρικνώνονται χωρίς να αποτυγχάνουν. Η αδυναμία προσαρμογής αυτών των παραμορφώσεων μπορεί να οδηγήσει σε εσωτερικές τάσεις, με αποτέλεσμα ρωγμές, το οποίο είναι ένα διαδεδομένο και επιζήμιο ζήτημα στις δομικές προσόψεις. Αυτό δεν υπονομεύει μόνο την αισθητική εμφάνιση των κτιρίων αλλά και τις προστατευτικές τους λειτουργίες. Για τον μετριασμό τέτοιων

προβλημάτων, η κατανόηση του συντελεστή ελαστικότητας (E) του κονιάματος είναι απαραίτητη στον αρχιτεκτονικό σχεδιασμό των προσώπων. Αυτή η γνώση βοηθά στη διασφάλιση της συμβατότητας και της συνέπειας μεταξύ του κονιάματος σοβατίσματος και του χρησιμοποιούμενου δομικού κονιάματος, διαχειριζόμενη αποτελεσματικά τη διαστολή και τον έλεγχο της παραμόρφωσης.

Το σκυρόδεμα, ένα άλλο θεμελιώδες δομικό υλικό, είναι ένα μείγμα τσιμέντου, νερού, αέρα και αδρανών υλικών τόσο λεπτόκοκκο όσο και χοντρό. Η αναλογία αυτών των συστατικών στο σκυρόδεμα υπαγορεύεται από τις ειδικές απαιτήσεις του έργου, όπως η εργασιμότητα, η αντοχή, η ανθεκτικότητα, η πυκνότητα και η επιθυμητή τελική εμφάνιση. Αυτές οι προδιαγραφές επηρεάζονται από τις περιβαλλοντικές συνθήκες που αναμένονται κατά την τοποθέτηση του σκυροδέματος και σε όλη τη διάρκεια ζωής του.

Η σύνθεση των μειγμάτων σκυροδέματος μπορεί να προσδιοριστεί χρησιμοποιώντας δύο κύριες μεθόδους: τη μέθοδο δοκιμαστικής παρτίδας και τη μέθοδο προσδιορισμού του απόλυτου όγκου των συστατικών του σκυροδέματος. Η επιλογή των συστατικών βασίζεται στρατηγικά στην οικονομική χρήση των διαθέσιμων υλικών, με στόχο την επίτευξη υψηλής αντοχής σε θλίψη και αντοχής, διασφαλίζοντας παράλληλα καλή εργασιμότητα κατά την εφαρμογή. Χρησιμοποιώντας θεμελιώδεις μαθηματικές σχέσεις και εργαστηριακές δοκιμές, μπορεί να συντεθεί σκυρόδεμα με τις επιθυμητές ιδιότητες [82,84].

Η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος αναγνωρίζεται ως η πιο κρίσιμη μηχανική του ιδιότητα. Η έρευνα έχει δείξει ότι αυτή η αντοχή επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες, όπως ο τύπος και το μέγεθος των αδρανών, η αναλογία νερού προς τσιμέντο, ο τύπος και η ποσότητα του τσιμέντου που χρησιμοποιείται, η εργασιμότητα του σκυροδέματος, οι ορυκτολογικές και χημικές προσμίξεις και οι συνθήκες κάτω από το οποίο παρασκευάζεται. Επιπλέον, η αντοχή του σκυροδέματος επηρεάζεται από τα χαρακτηριστικά του κονιάματος, των χονδροειδών αδρανών και της διεπαφής μεταξύ τους. Διάφοροι τύποι χονδροειδών αδρανών, που διαφέρουν ως προς το σχήμα, την υφή και την ορυκτολογία, μπορούν να οδηγήσουν σε διαφορετικές αντοχές σκυροδέματος για την ίδια ποιότητα κονιάματος. Μια βασική στρατηγική για τη βελτίωση της αντοχής και της απόδοσης του σκυροδέματος είναι ο έλεγχος της αναλογίας νερού προς τσιμέντο (W/C), όπου τα αδρανή διαδραματίζουν ζωτικό ρόλο.

## Οπλισμός

Για την ενίσχυση του σκυροδέματος, χρησιμοποιείται χάλυβας οπλισμού - κοινώς γνωστός ως οπλισμός. Οι χάλυβες οπλισμού ταξινομούνται με βάση διάφορα κριτήρια:

1. Μέθοδος Παραγωγής:
  - **Θερμή έλαση:** Αυτή η διαδικασία δεν περιλαμβάνει πρόσθετη επεξεργασία μετά την έλαση.
  - **Θερμή έλαση με απευθείας εν σειρά θερμική επεξεργασία:** Ακολουθεί την αρχική θερμή έλαση.
  - **Εργασία εν ψυχρώ:** Αυτή η μέθοδος περιλαμβάνει τη συστροφή ή το τράβηγμα του χάλυβα, που προέρχεται από προϊόντα θερμής έλασης.
2. Μορφή Επιφανείας:
  - Λείες κυλινδρικές ράβδους ή σύρματα και συγκολλημένα δομικά πλέγματα: Έχουν ομοιόμορφη, λεία επιφάνεια.
  - Ράβδοι ή σύρματα υψηλής συνάφειας και συγκολλημένα δομικά πλέγματα με νευρώσεις: Γνωστοί ως ενισχυμένοι χάλυβες, αυτοί διαθέτουν νευρώσεις για βελτιωμένη πρόσφυση και συγκόλληση με σκυρόδεμα.
3. Συγκολλησιμότητα:
  - Συγκολλησιμοί χάλυβες υπό όρους: Αυτοί οι χάλυβες απαιτούν συγκεκριμένες συνθήκες για επιτυχή συγκόλληση.
  - Συγκολλησιμοί χάλυβες: Συγκολλούνται εύκολα υπό κανονικές συνθήκες.

Η χαρακτηριστική ισχύς, που συμβολίζεται ως  $f_{yk}$  (όπου το 'y' σημαίνει απόδοση και το 'k' αντιπροσωπεύει τον στατιστικό όρο 'kappa'), ορίζεται ως το σημείο διαρροής κάτω από το οποίο υπάρχει 5% πιθανότητα η τιμή της αντοχής να εμφανιστεί τυχαία δείγμα. Οι ποιότητες χάλυβα που χρησιμοποιούνται συνήθως για ράβδους οπλισμού είναι B500A και B500C, οι οποίες αντικαθιστούν αποτελεσματικά την παλαιότερη κατηγορία S500. Αυτοί οι βαθμοί

απεικονίζονται σε διαγράμματα τάσης-παραμόρφωσης, παρέχοντας μια οπτική σύγκριση των μηχανικών ιδιοτήτων τους. Επιπλέον, μια σημαντική πτυχή της χρήσης χάλυβα ως οπλισμού είναι ο συντελεστής θερμικής διαστολής του, ο οποίος είναι πολύ κοντά σε αυτόν του σκυροδέματος - ουσιαστικά πανομοιότυπος. Αυτή η ομοιότητα είναι ζωτικής σημασίας καθώς διασφαλίζει ότι και τα δύο υλικά διαστέλλονται και συστέλλονται με παρόμοιους ρυθμούς με αλλαγές θερμοκρασίας, διατηρώντας τη δομική τους ακεραιότητα και αποτρέποντας διαφορικές παραμορφώσεις που θα μπορούσαν να θέσουν σε κίνδυνο τη συνεργατική τους λειτουργία [80].

Το οπλισμένο σκυρόδεμα είναι ένα διαδεδομένο δομικό υλικό γνωστό για την ανθεκτικότητά του και έχει χρησιμοποιηθεί εκτενώς για πολλά χρόνια σε μια ποικιλία κατασκευών από κτίρια κατοικιών έως γέφυρες. Η ευρεία χρήση του οπλισμένου σκυροδέματος αποδίδεται σε πολλά βασικά πλεονεκτήματα. Πρώτον, είναι οικονομικό αφού τα πρωταρχικά υλικά που απαιτούνται - αδρανή, νερό και τσιμέντο - δεν είναι μόνο φθηνά αλλά και άμεσα διαθέσιμα και οι κατασκευές συνήθως απαιτούν λίγη συντήρηση. Δεύτερον, το οπλισμένο σκυρόδεμα είναι ευέλικτο και εύπλαστο. Το φρέσκο σκυρόδεμα μπορεί να διαμορφωθεί ώστε να ταιριάζει σε κάθε ξυλότυπο, καλύπτοντας έτσι ένα ευρύ φάσμα αρχιτεκτονικών απαιτήσεων. Επιπλέον, διαθέτει υψηλή αντοχή στη μηχανική φθορά και τη φωτιά. Το οπλισμένο σκυρόδεμα είναι ιδιαίτερα ωφέλιμο σε μονολιθικές κατασκευές που απαιτούν μεγάλα περιθώρια ασφαλείας, όπως σε σεισμικές ζώνες, λόγω της ικανότητάς του να χειρίζεται πολλαπλές στατικά ακαθόριστες διαμορφώσεις.

Ωστόσο, παρά τα πολυάριθμα οφέλη του, το οπλισμένο σκυρόδεμα έχει επίσης αρκετά μειονεκτήματα που μπορούν να περιορίσουν την εφαρμογή του. Το σημαντικό βάρος του μπορεί να δημιουργήσει σημαντικές προκλήσεις σε κατασκευές με μεγάλα ανοίγματα, όπως γέφυρες, απαιτώντας ογκώδη δομικά στοιχεία όπως δοκοί και κολώνες που περιπλέκουν την κατασκευή [83,85]. Η επιτόπια κατασκευή μπορεί να αυξήσει τον κίνδυνο ελαττωμάτων και σε περίπτωση ζημιάς, οι επισκευές μπορεί να είναι δαπανηρές και δύσκολο να εκτελεστούν. Επιπλέον, το οπλισμένο σκυρόδεμα προσφέρει περιορισμένες θερμομονωτικές ιδιότητες, κάτι που μπορεί να είναι μειονέκτημα σε ορισμένες περιβαλλοντικές συνθήκες. Αυτοί οι παράγοντες απαιτούν προσεκτική εξέταση κατά τις φάσεις σχεδιασμού και υλοποίησης των κατασκευαστικών έργων.

## Διάβρωση

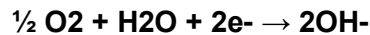
Το οπλισμένο σκυρόδεμα χρησιμοποιείται παγκοσμίως σε κατασκευαστικά έργα και έργα υποδομής λόγω της ευελιξίας και της οικονομικής του προσιτότητας. Κατά συνέπεια, η κατανόηση της απόδοσης και της μακροζωίας του έχει γίνει ένας κρίσιμος τομέας έρευνας στην επιστήμη των υλικών και την πολιτική μηχανική τις τελευταίες δεκαετίες. Παρά τα πολλά οφέλη του, το σκυρόδεμα έχει την τάση να υποβαθμίζεται με την πάροδο του χρόνου, γεγονός που μειώνει τη διάρκεια ζωής του. Ως εκ τούτου, η ανάπτυξη στρατηγικών συντήρησης για οπλισμένο σκυρόδεμα είναι απαραίτητη για τη διασφάλιση της ανθεκτικότητας των έργων υποδομής. Ένας από τους πιο διαδεδομένους μηχανισμούς που θέτει σε κίνδυνο τις κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα είναι η διάβρωση του χάλυβα οπλισμού, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε ρωγμές, θρυμματισμό του σκυροδέματος και απώλεια της δομικής συνοχής [81].

Η διάβρωση στο οπλισμένο σκυρόδεμα συνήθως συμβαίνει μέσω δύο βασικών διεργασιών: της ενανθράκωσης και της έκθεσης σε χλωρίδια. Η ενανθράκωση παρατηρείται συχνά με επιταχυνόμενους ρυθμούς σε τροπικές περιοχές, ενώ η διάβρωση που προκαλείται από το χλώριο είναι συχνή στις παράκτιες περιοχές. Η διάβρωση του χάλυβα οπλισμού μέσα στο σκυρόδεμα είναι πρωτίστως μια ηλεκτροχημική διαδικασία που περιλαμβάνει μια άνοδο, μια κάθοδο και έναν ηλεκτρολύτη που διευκολύνει τη μεταφορά ιόντων. Στην άνοδο, ο σίδηρος υφίσταται οξειδωτική διάλυση, απελευθερώνοντας ηλεκτρόνια και σχηματίζοντας ιόντα σιδήρου:

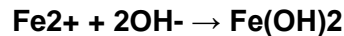


Οι περιβαλλοντικές συνθήκες μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά τον ρυθμό αυτής της αντίδρασης. Για παράδειγμα, ο σχηματισμός ενός στρώματος παθητικού οξειδίου στον χάλυβα μπορεί να αναστείλει τη διάβρωση, αλλά εάν το pH του σκυροδέματος πέσει κάτω από το 9 ή εάν τα επίπεδα χλωρίου είναι επαρκή για να διαταράξουν αυτό το στρώμα, ο

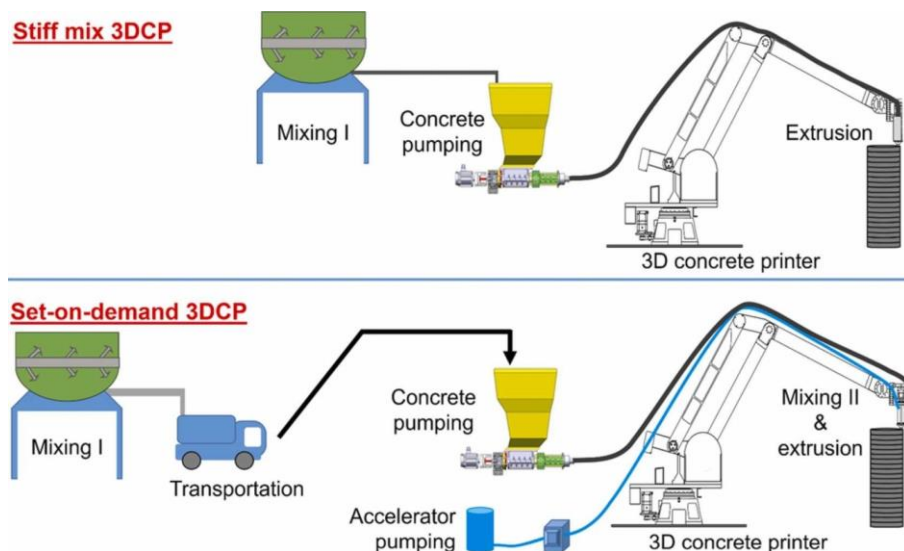
ρυθμός διάβρωσης αυξάνεται δραματικά. Στην κάθοδο, η παρουσία ενός οξειδωτικού παράγοντα, όπως το οξυγόνο, είναι απαραίτητη για την αντίδραση αναγωγής, όπου το οξυγόνο μετατρέπεται σε ιόντα υδροξυλίου:



Αυτά τα ιόντα υδροξυλίου στη συνέχεια αντιδρούν με τα ιόντα σιδήρου για να σχηματίσουν υδροξείδιο του σιδήρου:



Αυτό το υδροξείδιο του σιδήρου αντιδρά περαιτέρω με το οξυγόνο για να σχηματίσει υδροξείδιο του σιδήρου ( $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ), το οποίο μπορεί να αποτεθεί είτε στην επιφάνεια του χάλυβα είτε μέσα στο σκυρόδεμα ανάλογα με τις συνθήκες. Η συσσώρευση προϊόντων διάβρωσης, όπως το υδροξείδιο του σιδήρου, μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικές δευτερογενείς επιπτώσεις. Εάν αυτά τα προϊόντα σχηματιστούν μέσα στους πόρους του σκυροδέματος, μπορεί αρχικά να εμποδίσουν περαιτέρω διαβρωτική δράση. Ωστόσο, εάν συσσωρευτούν στην επιφάνεια του χάλυβα, ο μεγαλύτερος όγκος τους σε σύγκριση με τον χάλυβα μπορεί να ασκήσει εκτεταμένες δυνάμεις στο περιβάλλον σκυρόδεμα, οδηγώντας ενδεχομένως σε ρωγμές. Συνολικά, για να συμβεί διάβρωση του χάλυβα σπλισμού, απαιτούνται τρεις προϋποθέσεις: η ανοδική διάλυση του σιδήρου, η παρουσία οξυγόνου και η ηλεκτρική αγωγιμότητα μέσω του ρευστού πόρων του σκυροδέματος. Η εμφάνιση, ο ρυθμός και η έκταση της διάβρωσης εξαρτώνται από αυτές τις συνθήκες και επηρεάζονται από διάφορους περιβαλλοντικούς και υλικούς παράγοντες [86].



Σχήμα 2-9. Αναπαράσταση παροχέτευσης στην αντλία για την σκυροδέτηση με τη μέθοδο 3DCP

Συνοψίζοντας το τσιμέντο και τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την 3DCP είναι:

1. **Τσιμέντο Portland:** αλεσμένο κλίνκερ με προσθήκη γύψου
2. **Fly Ash / Ιπτάμενη τέφρα:** υποπροϊόν που προέρχεται από την καύση του άνθρακα
3. **Πυριτική άμμος:** αδρανές υλικό γνωστό ως καπνός από πυρίτιο
4. **Άμμος:** βιομηχανική ή χαλαζιακή άμμος
5. **Νανοάργιλος:** είδος αργίλου από πολύ μικρά σωματίδια
6. **Πολυαιθυλένιο:** πολυμερές υλικό αποτελούμενο από άνθρακα και υδρογόνο με μεγάλη αντοχή σε φθορά και σε υψηλές θερμοκρασίες
7. **Glass fiber:** ίνες γυαλιού – βασικό συστατικό.
8. **Νερό**

## 2.4 Μηχανικές Ιδιότητες Κονιάματος 3DCP

Η έλλειψη των μεταλλικών ενισχύσεων εμποδίζει την πρακτική εφαρμογή του 3DCP. Η μοναδική διαδικασία εκτύπωσης layer-to-layer του 3DCP καθιστά δύσκολη την άμεση ενσωμάτωση συμβατικών οπλισμών από χάλυβα, όπως διαμήκεις ράβδους οπλισμού και συνδέσμους. Για την αντιμετώπιση της πρόκλησης, έχουν προταθεί διάφορες προσεγγίσεις, συμπεριλαμβανομένης της εκτύπωσης χαλύβδινου οπλισμού, της εγκατάστασης προεντεταμένου οπλισμού από χάλυβα, της προσθήκης συνεχούς ενίσχυσης μικροϊνών και της εγκατάστασης εύκαμπτων υφασμάτων πολυμερών ενισχυμένων με ίνες. Ωστόσο, αυτές οι μέθοδοι έχουν περιορισμούς, ιδιαίτερα στην επίτευξη της ακεραιότητας του συστήματος και του συνεργατικού ελέγχου κατά τη διάρκεια της διαδικασίας εκτύπωσης.

Τα Σύνθετα μηχανικά τσιμεντοειδή ή Engineered Cementitious Composites (ECC) παρέχουν μια πολλά υποσχόμενη λύση για την αντιμετώπιση των προαναφερθέντων περιορισμών λόγω των ανώτερων ιδιοτήτων εφελκυσμού. Ο Yu et al. ανέφεραν ότι οι δοκοί και οι κολώνες ECC με 2 % ίνες πολυαιθυλενίου (PE) παρουσίασαν φέρουσα ικανότητα κοντά σε αυτή της δοκού από οπλισμένο σκυρόδεμα (RC) με αναλογία χάλυβα 1,51 % και της στήλης RC με αναλογία χάλυβα 0,8 % , αντίστοιχα. Επομένως, η ανάπτυξη τρισδιάστατου εκτυπώσιμου ECC έχει τη δυνατότητα να αφαιρέσει τον χαλύβδινο οπλισμό στο 3DCP για την κατασκευή δομικών στοιχείων.

Οι υπάρχουσες εργασίες έχουν διερευνήσει την εκτυπωσιμότητα και τις σκληρυμένες ιδιότητες του τυπωμένου ECC. Διαφορετικά χημικά πρόσθετα και ακατέργαστα συστατικά έχουν υιοθετηθεί για την προσαρμογή της δυνατότητας εκτύπωσης του ECC, όπως το αλουμινικό τσιμέντο, το θειικό αλουμίνιο τσιμέντο και ο νανο-άργιλος.

Στο παρόν κεφάλαιο μελετήθηκαν οι μηχανικές ιδιότητες του κονιάματος που χρησιμοποιείται σε κατασκευές 3D Concrete printing (3DCP). Τα κυριότερα υλικά που χρησιμοποιούνται στο κονίαμα 3DCP είναι τα κάτωθι:

9. **Ordinary Portland cement (OPC):** το πιο συνηθισμένο τσιμέντο στον κατασκευαστικό κλάδο. Ως πρώτες ύλες έχει τον ασβεστόλιθο, τον πηλό (πυρίτιο και αλουμίνα), σιδηρομεταλλεύματα και γύψο.
10. **Fly Ash:** υποπροϊόν που προέρχεται από την καύση του άνθρακα σε μονάδες παραγωγής ενέργειας.
11. **Silica Fume:** χρήση ως αδρανές υλικό ο οποίος είναι γνωστός και ως καπνός πυρίτιο. Είναι μια λεπτή σκόνη η οποία βρίσκεται στα καυσαέρια των κλιβάνων
12. **Silica sand:** ονομάζεται και βιομηχανική άμμος ή χαλαζιακή άμμος.
13. **Νανοάργιλος:** είδος αργίλου που αποτελείται από πολύ μικρά σωματίδια.
14. **Πολυαιθυλένιο (PE):** πολυμερές υλικό που αποτελείται κυρίως από άνθρακα και υδρογόνο. Το υλικό αυτό έχει πολύ μεγάλη αντοχή στην φθορά και την ευελιξία του. Επίσης έχει μεγάλη αντοχή σε διάφορα χημικά και σε υψηλές θερμοκρασίες.
15. **Glass fiber:** Προέρχεται από λεπτές ίνες γυαλιού. Χρησιμοποιείται σε πολλούς τομείς, από τις απλές κατασκευές μέχρι και την αεροπορία.

### 2.4.1 Εισαγωγή

Οι Zhu et al. διαπίστωσαν ότι το τρισδιάστατο εκτυπωμένο ECC με 2 % ίνες πολυαιθυλενίου (PE) παρουσίασε ικανότητα εφελκυσμού άνω του 11 %. Οι Li et al. και Yu et al. χρησιμοποίησαν μια μέθοδο κατασκευής με στριφτή ανύψωση για να βελτιώσουν τη δυνατότητα κατασκευής του ECC και εκτύπωσαν μια στήλη ECC ύψους 1500 mm μέσα σε 2 ώρες. Οι Ye et al. σχεδίασαν ένα εκτυπώσιμο και φιλικό προς το περιβάλλον ECC αντικαθιστώντας εν μέρει την πυριτική άμμο με τρίμμα καουτσούκ και τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το αναπτυγμένο υλικό είχε αντοχή σε εφελκυσμό και ικανότητα παραμόρφωσης που κυμαίνονταν από 4,51 MPa έως 4,79 MPa και 4,38 % έως 7,54 %, αντίστοιχα.

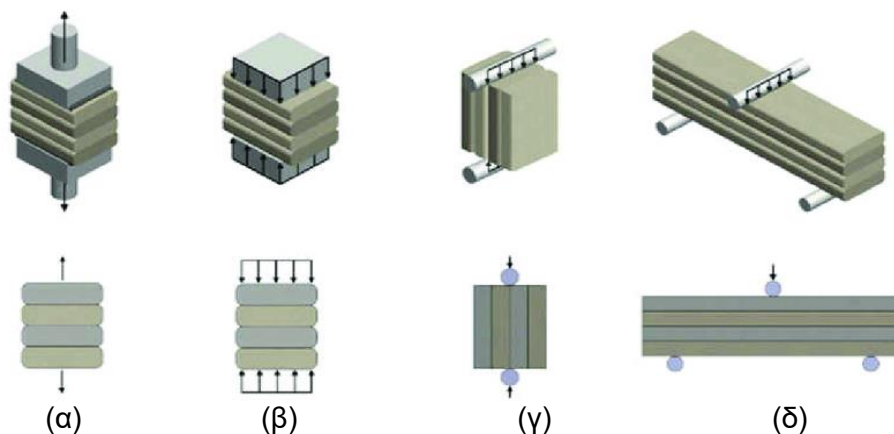
Ωστόσο, υπάρχει έλλειψη έρευνας σχετικά με το μέγεθος της κατασκευής και τις συμπεριφορές θραύσης του τυπωμένου ECC με διεπαφές ενδιάμεσων επιπέδων. Η επίδραση του μεγέθους του σκυροδέματος προέρχεται από μια ζώνη διεργασίας θραύσης (FPZ), η οποία είναι μια αμβλυόμενη ζώνη στο άκρο της κρίσιμης ρωγμής

Πραγματοποιήθηκαν δοκιμές κάμψης τριών σημείων σε τυπωμένες εγκοπές ECC με βάθη από 60 mm έως 500 mm. Οι συμπεριφορές κάμψης και θραύσης διερευνήθηκαν με βάση την αντοχή σε κάμψη, την αντοχή στη θραύση και το FPZ. Το φαινόμενο μεγέθους χαρακτηρίστηκε

από αντοχή σε κάμψη και αναλύθηκε από τη θεωρία Bažant [24]. Η μοντελοποίηση πεπερασμένων στοιχείων υιοθετήθηκε για να διερευνηθεί την επίδραση της αντοχής του δεσμού στις συμπεριφορές κάμψης και θραύσης με παραμετρική ανάλυση.

Όσον αφορά τις μηχανικές ιδιότητες του κονιάματος, μελετήθηκαν οι παρακάτω δυνάμεις:

1. Εφελκυσμός (Tensile strength): Είναι η μέγιστη δύναμη που μπορεί να αντέξει ένα υλικό πριν αποτύχει και σπάσει κατά μήκος της δύναμης καθώς αυτό τεντώνεται.
2. Δύναμη συμπίεσης (Compression strength): Είναι η μέγιστη δύναμη που μπορεί να αντέξει ένα υλικό πριν αποτύχει και σπάσει κατά μήκος της δύναμης καθώς αυτό συμπιέζεται.
3. Όριο διαρροής – ελασικότητας (Yield stress): Αφορά την ποσότητα της τάσης στην οποία το υλικό αρχίζει να παραμορφώνεται πλαστικά. Είναι δηλαδή το σημείο στο οποίο ένα υλικό μεταβαίνει από την ελαστική του παραμόρφωση στην πλαστική του και μη αναστρέψιμη παραμόρφωση.
4. Αντοχή σε κάμψη (Flexural stress): η ικανότητα ενός υλικού να αντέξει δύναμη η οποία επιδρά κατά μήκος του άξονα κάμψης, χωρίς να υπάρχει παραμόρφωση
5. Αντοχή δεσμού (Bond strength): η ικανότητα ενός υλικού να αντέξει τις δυνάμεις που δρουν μεταξύ των μοριακών δομικών του στοιχείων.
6. Διατμητική τάση (Shear stress): η τάση που προκαλείται όταν δυνάμεις διατμητικής τάσης εφαρμόζονται παράλληλα με την επιφάνεια του υλικού.



Σχήμα 2-10. (α) δύναμη εφελκυσμού, (β) δύναμη συμπίεσης, (γ) δύναμη διαχωρισμού, (δ) διατμητική τάση

#### 2.4.2 Πειραματική διάταξη

Ο Πίνακας 2.1 παραθέτει την αναλογία μείγματος του τρισδιάστατου εκτυπώσιμου ECC (3D-ECC). Ως συνδετικά υλικά χρησιμοποιήθηκαν P II 52,5 συνηθισμένο τσιμέντο Portland (OPC), ιπτάμενη τέφρα κατηγορίας F (FA) και καπνός πυριτίας (SF). Η χημική σύνθεση των συνδετικών υλικών παρέχεται στον Πίνακα 2-2. Ως αδρανή χρησιμοποιήθηκε εξαιρετικά λεπτή πυριτική άμμος, με μέσο μέγεθος κόκκου 0,11 mm. Προστέθηκε ίνα πολυαιθυλενίου (PE) υψηλού συντελεστή και υψηλής αντοχής κατά ένα κλάσμα όγκου 1,5%. Το μήκος και η αναλογία διαστάσεων της ίνας PE είναι 12 mm και 500, αντίστοιχα. Ένας μειωτήρας νερού υψηλής εμβέλειας (HRWR) προστέθηκε για τον έλεγχο της ρευστότητας της φρέσκιας πάστας και της διασποράς των ινών πολυαιθυλενίου. Τρίχωμα καουτσούκ (CR) με μέγεθος σωματιδίων 120 mesh χρησιμοποιήθηκε για την προσαρμογή της αντοχής και της ολκιμότητας του ECC. Λεπτομερή δεδομένα σχετικά με τις φυσικές και μηχανικές ιδιότητες της ίνας PE φαίνονται στον Πίνακα 2-3



**Πίνακας 2-1. Αναλογίες μίξης του 3D τσιμέντου**

OPC	FA	Sand	SF	CR	HRWR
656	246	604	118	57	3

**Πίνακας 2-2. Χημικές ενώσεις και αναλογίες των αναμειγμένων υλικών στο τσιμέντο**

Chemical composition	OPC	FA	SF
SiO <sub>2</sub>	19.90	51.70	92.26
CaO	64.9	7.65	0.49
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.42	23.9	0.89
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.00	5.22	1.97
SO <sub>3</sub>	2.67	0.91	0.33
K <sub>2</sub> O	0.79	1.40	1.31
MgO	0.66	0.90	0.96
TiO <sub>2</sub>	0.21	1.19	\
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.10	0.40	\
MnO	0.10	0.07	\
Na <sub>2</sub> O	0.08	0.58	0.42

**Πίνακας 2-3. Φυσικές και μηχανικές ιδιότητες των ινών πολυαιθυλενίου**

Table 3. Physical and mechanical properties of PE fiber.

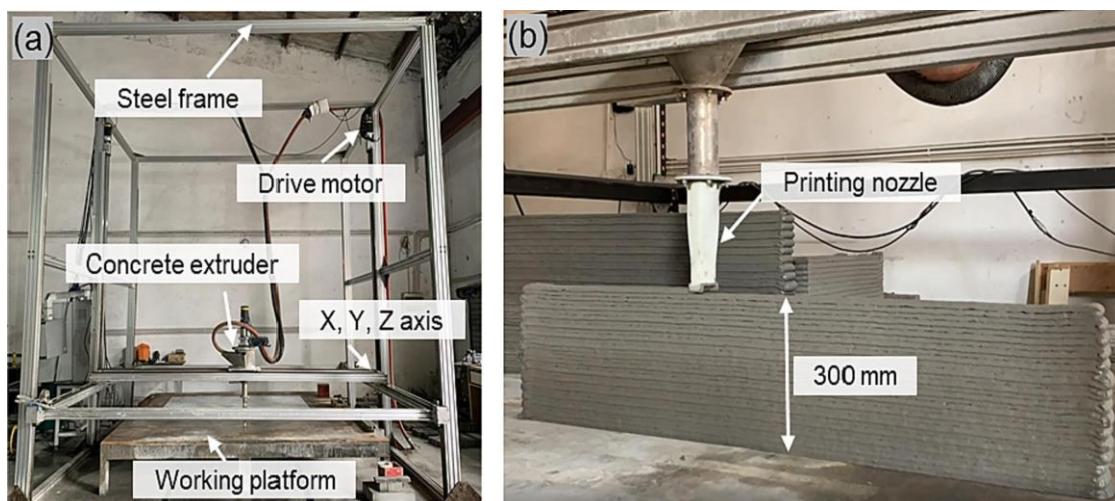
Length (mm)	Diameter ( $\mu$ m)	Aspect ratio	Strength (GPa)	Elastic modulus (GPa)	Density (g/cm <sup>3</sup> )
12	24	500	2.90	116	0.97

Για την παρασκευή της φρέσκιας πάστας ECC χρησιμοποιήθηκε ένας αναγκαστικός αναδευτήρας μονού κατακόρυφου άξονα χωρητικότητας 24 λίτρων. Αρχικά χύθηκε νερό στο μίξερ. Στη συνέχεια, προστέθηκαν OPA, FA, άμμος, SF, CR και HRWR και αναμίχθηκαν στις 140 rpm για 3 λεπτά. Αφού υγροποιήθηκαν όλα τα ξηρά συστατικά, συνεχίστηκε η γρήγορη ανάμιξη (420 rpm) για 1 λεπτό για να εξασφαλιστεί μια ομοιογενής μήτρα. Στη συνέχεια, ίνες PE προστέθηκαν στη μήτρα και αναμίχθηκαν στις 420 rpm για 3 λεπτά. Τέλος, η φρέσκια πάστα ECC χύθηκε σε εξωθητή σκυροδέματος για εκτύπωση.

#### 2.4.3 Προετοιμασία και πειράματα

Στο σχήμα 2-10 παρουσιάζεται ο εκτυπωτής τρισδιάστατης εκτύπωσης τσιμέντου, τύπου gantry που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα, καθώς και η εκτυπωμένη επιφάνεια. Το

ακροφύσιο που χρησιμοποιήθηκε έχει διαστάσεις nozzle 50mm X 10mm και η ταχύτητα κίνησης του ακροφύσιου είναι 50mm/s ενώ η ταχύτητα άντλησης του υλικού είναι 1.5L/min.



Σχήμα 2-11. Εξοπλισμός πειράματος: (α) εκτυπωτής τύπου gantry, (β) nozzle

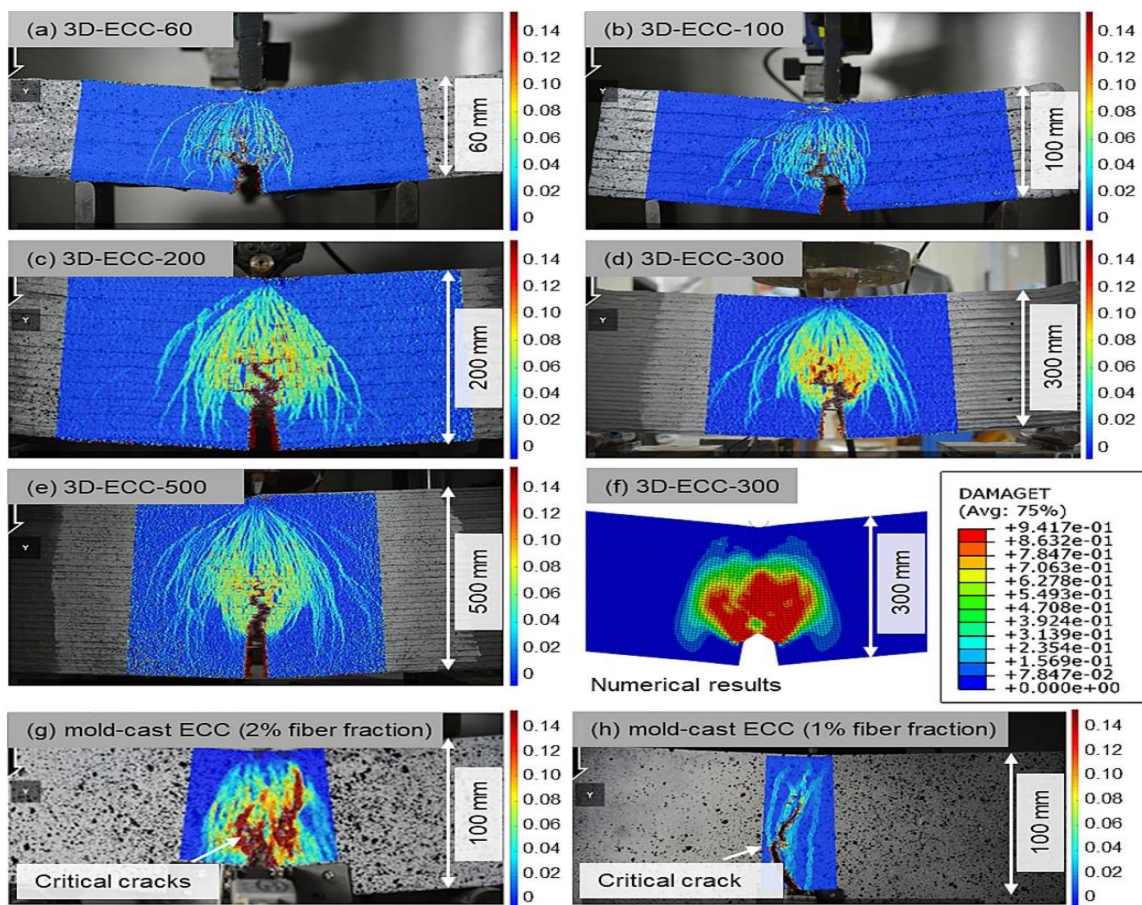
Ο Πίνακας 2-4 παρουσιάζει τα γεωμετρικά δεδομένα των δειγμάτων. Τα δείγματα έχουν παρόμοια γεωμετρία, συμπεριλαμβανομένου του πλάτους δέσμης (b), του λόγου εγκοπής/βάθους ( $\alpha = a/d$ ) και του λόγου βάθους/ανάπτυξης ( $d/s$ ). Το πλάτος της δοκού (b) όλων των δειγμάτων ήταν 50 mm. Για το πείραμα στην προηγούμενη μελέτη χρησιμοποιήθηκαν δοκοί ECC από καλούπι με λόγο εγκοπής/βάθους 0,23 και λόγο βάθους/ανάπτυξης 0,44, και έτσι, η ίδια τιμή αυτών των δύο παραμέτρων υιοθετήθηκε σε αυτή τη μελέτη για τη σύγκριση στις Ενότητες Αποτελεσμάτων και Συζήτηση. Σε αυτή τη μελέτη χρησιμοποιήθηκαν πέντε βάθη δέσμης (d), συμπεριλαμβανομένων των 60 mm, 100 mm, 200 mm, 300 mm και 500 mm.

Πίνακας 2-4. Γεωμετρικά χαρακτηριστικά τσιμέντου

Specimen ID	Notch/depth ratio ( $\alpha = a/d$ )	Depth/span ratio ( $d/s$ )	Width (mm)	Depth (mm)	Notch (mm)	Span (mm)
3D-ECC-60	0,23	0,44	50	60	14	136
3D-ECC-100				100	23	228
3D-ECC-200				200	46	454
3D-ECC-300				300	69	682
3D-ECC-500				500	115	1136

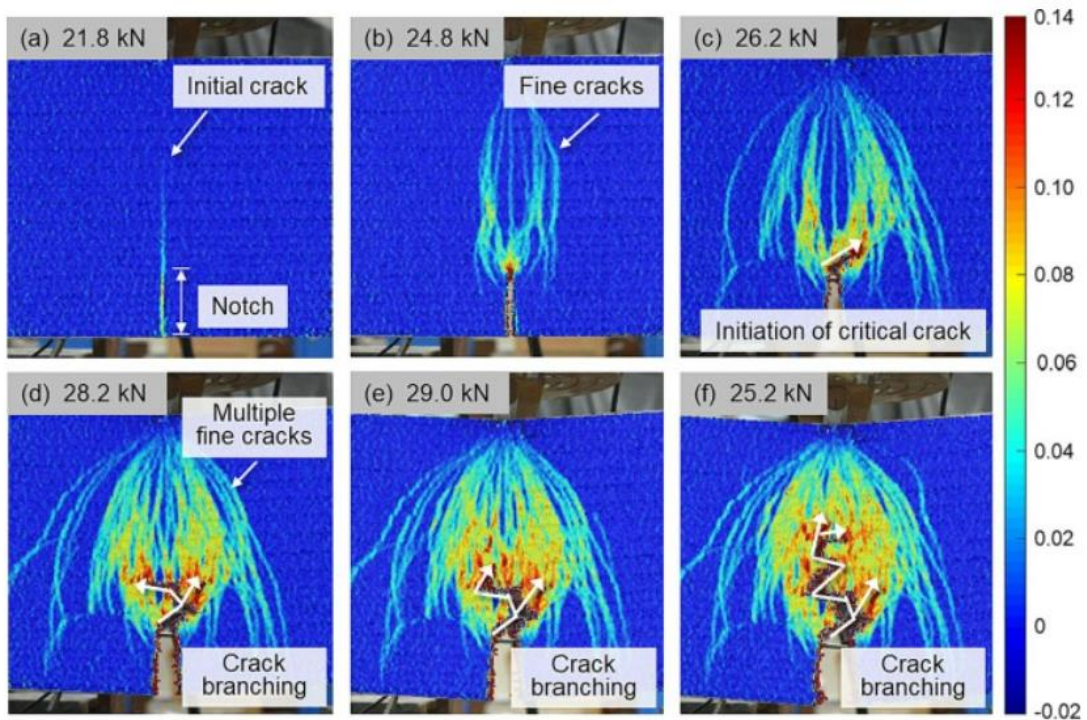
#### 2.4.4 Παρουσίαση ρωγμών

Το Σχ. 2-12 παρουσιάζει τα μοτίβα ρωγμών του 3D εκτυπωμένου και χυτού ECC, Στις εικόνες (α-ε) του σχήματος 2-12 παρουσιάζονται τα τυπωμένα δείγματα τα οποία εμφανίζουν παρόμοια μοτίβα ρωγμών: πολλαπλές λεπτές ρωγμές με μια κρίσιμη ρωγή που διαδίδεται από το άκρο της εγκοπής. Στο (f) παρουσιάζεται το μοτίβο προσομοίωσης ρωγμών του 3D-ECC-300, που αντιπροσωπεύεται από περιγράμματα ζημιάς εφελκυσμού στο παραμορφωμένο πλέγμα. Η προσομοιωμένη εξαιρετικά κατεστραμμένη περιοχή του 3D-ECC-300 ταιριάζει καλά με τα πειραματικά αποτελέσματα. Στα (g και h) παρουσιάζονται τα σχέδια ρωγμών του ECC χυτού καλουπιού με κλάσματα ινών 1 % και 2 %. Συμπεραίνουμε ότι η παρόμοια συμπεριφορά πολλαπλών ρωγμών μπορεί να βρεθεί τόσο σε τυπωμένο όσο και σε καλουπωμένο ECC. Ωστόσο, το Σχ. 2-12 (g και h) φαίνονται οι γραμμικά αναπτυσσόμενες κρίσιμες ρωγμές του ECC χυτού καλουπιού, το οποίο είναι διαφορετικό από μια διακλαδισμένη και εκτρέπεται ελικοειδής κρίσιμη ρωγή σε τυπωμένο ECC.



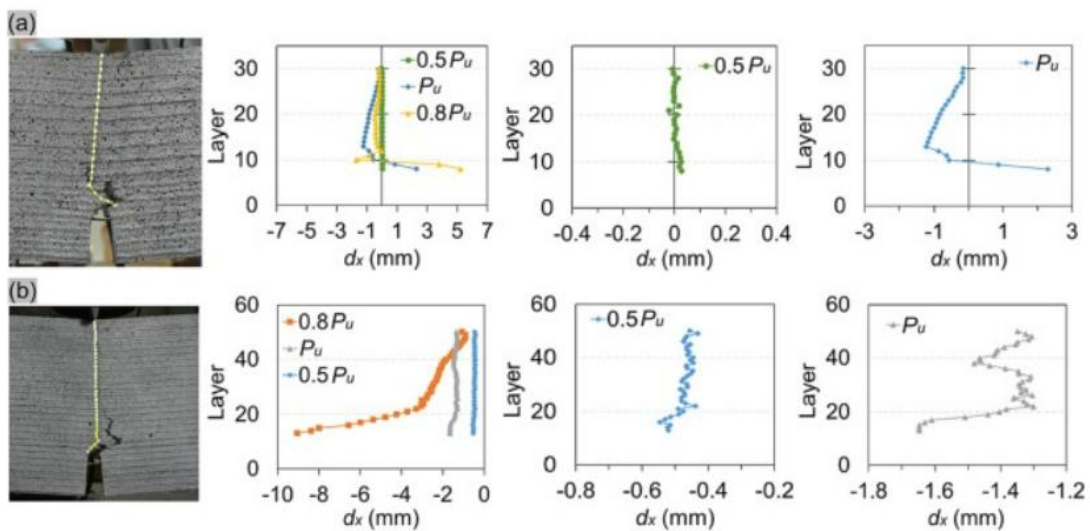
Σχήμα 2-12. Σχέδια ρωγμών. (α-ε) 3D εκτυπωμένο ECC, (f) παραμορφωμένο πλέγμα με ζημιά από εφελκυσμό, (g, h) ECC σε χυτό καλούπι

Το Σχήμα 2-12 παρουσιάζει τη διαδικασία ρωγμής του 3D-ECC-300 για την κατανόηση του σχηματισμού της ελικοειδούς κρίσιμης ρωγμής. Η πρώτη ρωγή ξεκινά από το άκρο της εγκοπής όταν το φορτίο φτάσει στην αντοχή ρωγμής της μήτρας και στη συνέχεια εμφανίζονται αρκετές λεπτές ρωγμές γύρω από την πρώτη ρωγή (a και b). Με την αύξηση του φορτίου, μία από τις λεπτές ρωγμές διευρύνεται από το άκρο της εγκοπής, σχηματίζει την κρίσιμη ρωγή και διαδίδεται προς τα πάνω δεξιά (c). Ωστόσο, η κρίσιμη ρωγή διακλαδίζεται προς τα αριστερά και μετατοπίζεται προς την ασθενή περιοχή της διεπιφάνειας, οδηγώντας σε διαστρωματική αποκόλληση, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-12 (d). Η κρίσιμη ρωγή στη συνέχεια παρεμποδίζεται από τη σχετικά ισχυρή περιοχή της διεπαφής και μετατοπίζεται ξανά στο ανώτερο στρώμα (e). Κατά συνέπεια, παράγεται μια ελικοειδής, ζιγκ-ζαγκ κρίσιμη ρωγή σε συνδυασμό με πολλαπλές λεπτές ρωγμές, όπως φαίνεται στο (f). Η ποσοτική αξιολόγηση της διακλάδωσης της ρωγμής συζητείται στην Ενότητα 5.3 με τα αποτελέσματα DIC.



Σχήμα 2-13. Διαδικασία εμφάνισης ρωγμών του 3D-ECC-300.

Το Σχήμα 2-13 παρουσιάζει την οριζόντια μετατόπιση ( $dx$ ) των 3D-ECC-300 και 3D-ECC-500 σε διαφορετικές καταστάσεις φορτίου, συμπεριλαμβανομένων  $0,5 P_u$ ,  $P_u$  και  $0,8 P_u$  στον κατερχόμενο κλάδο (δηλαδή, τελική κατάσταση).



Σχήμα 2-14. Ποσοτική αξιολόγηση διακλάδωσης και εκτροπής ρωγμών. (α) 3D-ECC-300. (β) 3D-ECC-500.

#### 2.4.5 Αντοχή σε κάμψη

Ο Πίνακας 2-5 παρουσιάζει το μέγιστο φορτίο και την αντοχή σε κάμψη των τυπωμένων δοκών ECC και οι τυπικές αποκλίσεις φαίνονται σε παρένθεση. Η αντοχή σε κάμψη ( $\sigma_f$ ) της εκτυπωμένης δέσμης ECC υπολογίζεται με  $\sigma_f = c_n P_u / bd$ , όπου  $P_u$  είναι το φορτίο αιχμής της δέσμης ECC και  $c_n$  είναι μια παράμετρος διαστάσεων που υπολογίζεται με  $c_n = 3 s / [2d(1-\alpha)]^2$ .

**Πίνακας 2-5. πειραματικά και αριθμητικά αποτελέσματα τυπωμένων δοκών ECC.**

Specimen ID	Measured width $b$ (mm)	Experimental peak load $P_u$ (kN)	Predicted peak load $P_u$ (kN)	Experimental flexural strength $\sigma_f$ (MPa)	Theoretical flexural strength $\sigma_{tf}$ (MPa)	Error   $\sigma_f - \sigma_{tf}   / \sigma_n$
3D-ECC-60	54	9.34 (0.23)	9.43	16.92 (0.59)	17.47	3.3%
3D-ECC-100	52	14.73 (0.68)	14.68	15.51 (0.73)	16.79	8.2%
3D-ECC-200	57	32.67 (1.69)	27.60	15.24 (0.86)	15.85	7.2%
3D-ECC-300	53	30.93 (1.48)	32.89	11.67 (0.55)	12.57	7.7%
3D-ECC-500	55	52.80 (3.84)	49.79	10.89 (0.82)	11.45	5.2%

Όπως φαίνεται από τον Πίνακα 2-5, η αντοχή σε κάμψη των τυπωμένων δειγμάτων με εύρος βάθους 60–200 mm μειώνεται ελαφρώς από 16,92 MPa σε 15,24 MPa (μείωση 10 %). Παρόμοια αποτελέσματα παρατηρούνται επίσης στην αντοχή σε κάμψη του ECC χυτού καλουπιού. Όταν το βάθος αυξάνεται από 40 mm σε 150 mm, το ECC από καλούπι με κλάσμα όγκου ινών PE 2 % παρουσιάζει αμελητέα επίδραση μεγέθους στην αντοχή στην κάμψη, η οποία κυμαίνεται από 18,56 MPa έως 20,02 MPa. Το αμελητέο αποτέλεσμα μεγέθους στις δοκούς ECC με χυτό καλούπι και εκτυπωμένες δοκούς μπορεί να αποδοθεί στα περιορισμένα μεγέθη δοκιμής (π.χ. μικρότερα από 150 mm και 200 mm σε αυτήν τη μελέτη). Όταν το βάθος της δέσμης εκτείνεται στα 500 mm, παρατηρείται επίδραση μεγέθους στην αντοχή σε κάμψη του εκτυπωμένου ECC. Όπως παρατίθεται στον Πίνακα 2-12, το 3D-ECC-500 δείχνει μείωση 35,6 % στην αντοχή σε κάμψη σε σύγκριση με εκείνη του 3D-ECC-60.

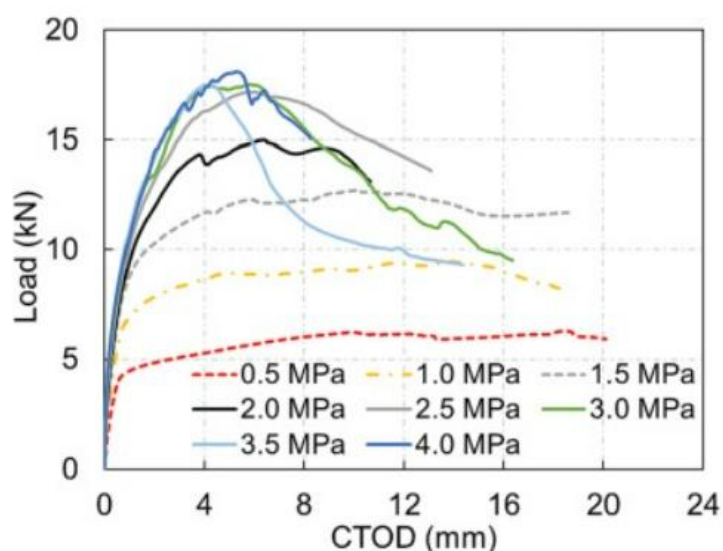
Η θεωρητική αντοχή σε κάμψη όλων των μοντέλων FEM είναι υψηλότερη από τα πειραματικά δεδομένα, ενώ η προβλεπόμενη Το μέγιστο φορτίο ορισμένων μοντέλων είναι μικρότερο από αυτό των πειραματικών ομολόγων τους. Η απόκλιση θα μπορούσε να προκληθεί από το γεγονός ότι το μοντέλο FEM υιοθέτησε ένα ομοιογενές υλικό (CDP) χωρίς να προσομοιώνει τις κατανομές των ινών. Ένας άλλος πιθανός λόγος είναι ότι το πλάτος των κάτω στρωμάτων των τυπωμένων δειγμάτων είναι μεγαλύτερο από 50 mm λόγω συμπίεσης από το ίδιο βάρος των άνω στρωμάτων. Το μέσο μετρούμενο πλάτος των δοκών, όπως παρατίθεται στον Πίνακα 2-12, χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της πειραματικής αντοχής σε κάμψη, ενώ το πλάτος του μοντέλου FEM ήταν σταθερά 50 mm. Παρόλα αυτά, το σχετικό σφάλμα της αντοχής σε κάμψη είναι μικρότερο από 8,2%, γεγονός που υποδηλώνει την υψηλή ακρίβεια του μοντέλου CDP που ενσωματώνεται με τη σύνδεση συνεκτικού στοιχείου.

#### 2.4.6 Παραμετρική ανάλυση αντοχής δεσμού

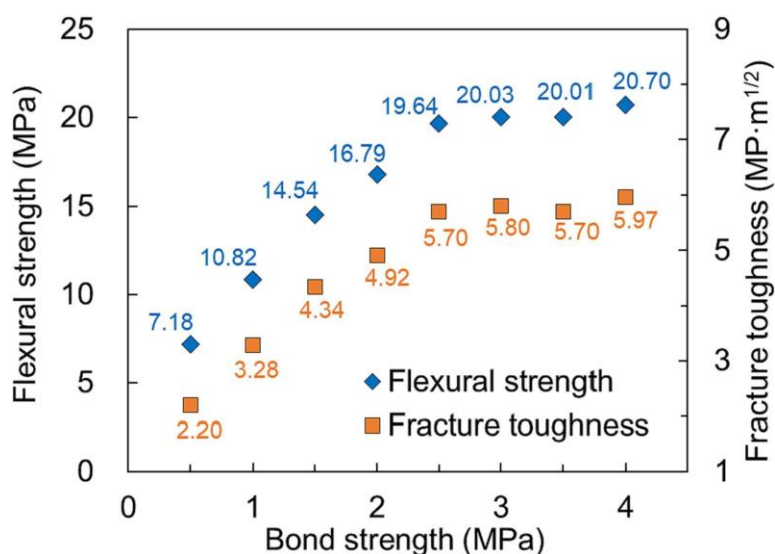
Σε αυτή την ενότητα πραγματοποιήθηκε παραμετρική ανάλυση για να διερευνηθεί την επίδραση της αντοχής του δεσμού στις συμπεριφορές κάμψης και θραύσης του τυπωμένου ECC. Τα αποτελέσματα μπορούν να υιοθετηθούν για τον προσδιορισμό της βέλτιστης αντοχής συγκόλλησης για την καθοδήγηση της πρακτικής εκτύπωσης. Οι [86], [89] ανέφεραν ότι η αντοχή του δεσμού της επιφάνειας είχε καθοριστική επίδραση στη μηχανική απόδοση των τρισδιάστατων εκτυπωμένων δομών. Η αντοχή συγκόλλησης του τυπωμένου σκυροδέματος ήταν γενικά στο εύρος 0,5-4,0 MPa [90], το οποίο υιοθετήθηκε στην

παραμετρική ανάλυση. Το μοντέλο 3D-ECC-100 χρησιμοποιήθηκε στην παραμετρική ανάλυση, καθώς προτάθηκε ένα βάθος δοκού 100 mm για τη δοκιμή της καμπτικής απόδοσης του ινοπλισμένου σκυροδέματος [40].

Τα Σχήμα 2-14 και 2-15 δείχνουν τα αποτελέσματα της παραμετρικής ανάλυσης. Το Σχ. 2-14 παρουσιάζει τις καμπύλες φορτίου **crack tip opening displacement** (CTOD) του 3D-ECC-100 με διαφορετικές αντοχές δεσμού. Μπορεί να βρεθεί ότι η φέρουσα ικανότητα του 3D-ECC-100 αυξάνεται με την αύξηση της αντοχής του δεσμού. Το Σχ. 2-15 δείχνει την αντοχή σε κάμψη και την αντοχή σε θραύση του 3D-ECC-100. Με την αύξηση της αντοχής του δεσμού από 0,5 MPa σε 2,5 MPa, η αντοχή σε κάμψη και θραύση του 3D-ECC-100 αυξάνεται από 7,18 MPa σε 19,64 MPa και 2,20 MPa·m<sup>1/2</sup> σε 5,70 MPa·m<sup>1/2</sup>, αντίστοιχα. Όταν η αντοχή του δεσμού υπερβαίνει τα 2,5 MPa, η αντοχή στην κάμψη και η αντοχή σε θραύση του 3D-ECC-100 διατηρούν περίπου 20 MPa και 5,8 MPa·m<sup>1/2</sup>, αντίστοιχα, τα οποία είναι συγκρίσιμα με εκείνη του χυτού καλουπιού 2,0 % ECC (με το ίδιο βάθος δέσμης 100 mm), δηλαδή 22,11 MPa και 6,06 MPa·m<sup>1/2</sup>, αντίστοιχα.



Σχήμα 2-15. Καμπύλες φόρτισης CTOD του 3D-ECC-100 με διαφορετικές αντοχές δεσμού.

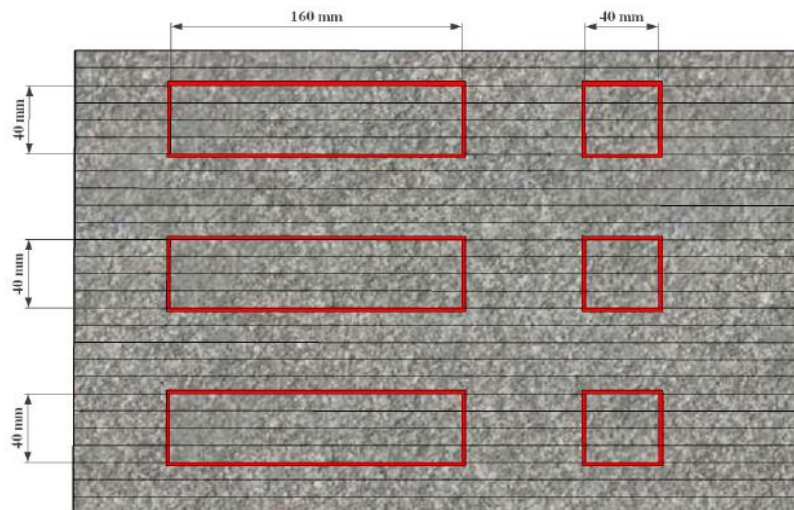


Σχήμα 2-16. Αντοχή σε κάμψη και αντοχή σε θραύση του 3D-ECC-100 με διαφορετικές αντοχές δεσμού

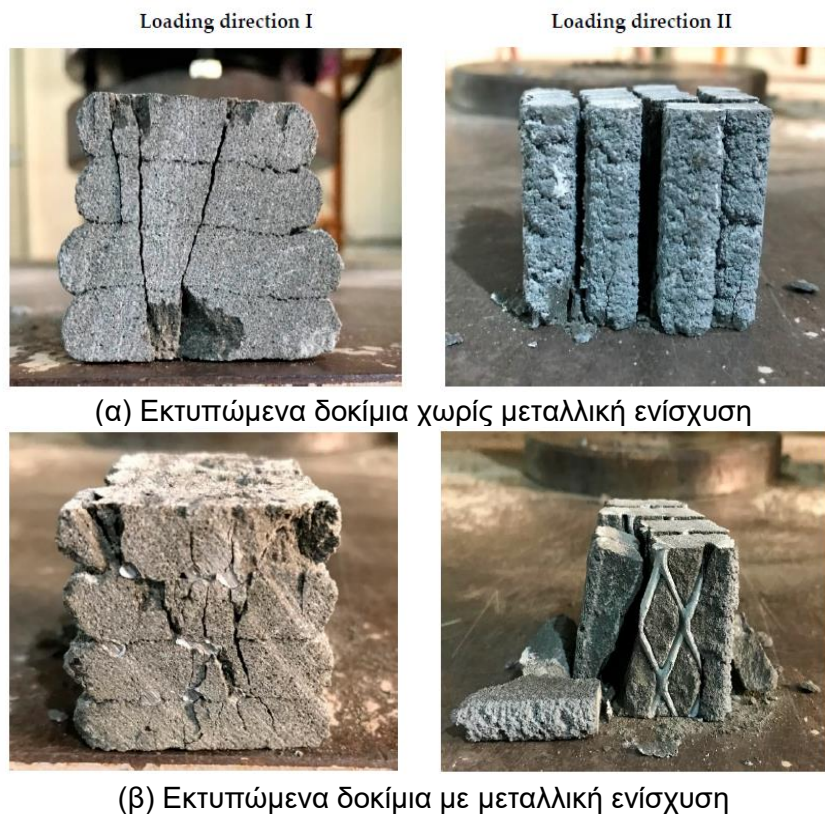
## 2.4.7 Αντοχή σε θλίψη & εφελκυσμό

### Αντοχή σε θλίψη

Για την μέτρηση αντοχής σε θλίψη και αντοχής σε εφελκυσμό χρησιμοποιήθηκε άλλη πειραματική διάταξη με δοκίμια με διαστάσεις 40mm X 40mm X 40mm για κυβο ή 40mm X 40mm X 160mm για πρισματικά δοκίμια. Ο τεμαχισμός των δοκιμίων παρουσιάζεται στο σχήμα 2-16. Για την μελέτη και τα πειράματα των δυνάμεων αντοχής, οι δυνάμεις δρουν σε 2 κατευθύνσεις όπως παρουσιάζεται και στο σχήμα 2-17 και επιπλέον τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν σε δοκίμια με και χωρίς μεταλλική ενίσχυση.



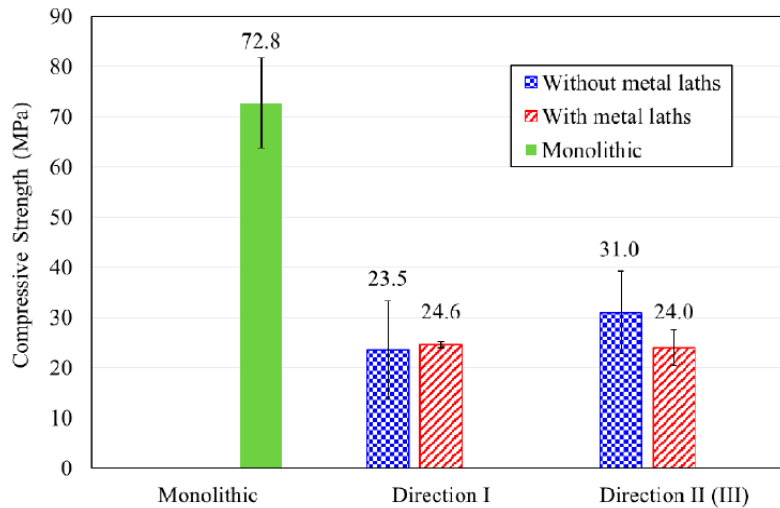
Σχήμα 2-17. μεθοδος κοπής εκτυπωμένου υλικού για την πειραματική διάταξη



(α) Εκτυπώμενα δοκίμια χωρίς μεταλλική ενίσχυση

(β) Εκτυπώμενα δοκίμια με μεταλλική ενίσχυση

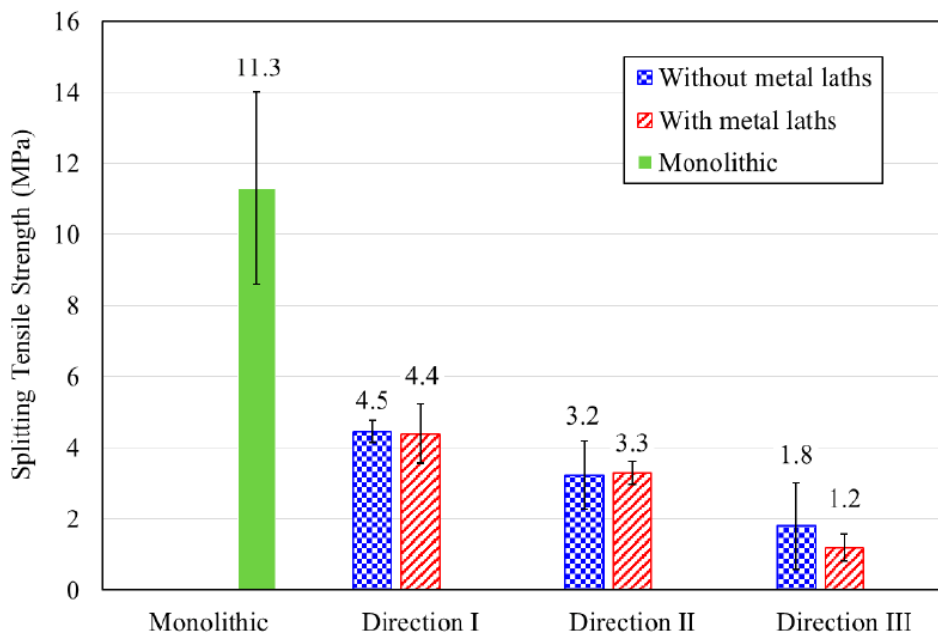
Σχήμα 2-18. Αντοχή σε θλίψη εκτυπωμένων δοκιμίων με (α) μεταλλική ενίσχυση και (β) χωρίς – και κατευθύνσεις εκτύπωσης



**Σχήμα 2-19. Αποτελέσματα δοκιμής αντοχής σε θλίψη**

Η αντοχή σε θλίψη του μονολιθικού δοκιμίου, όπως παρουσιάζεται και στο σχήμα 2-18 ήταν 72.8MPa, ενώ των εκτυπωμένων δοκιμίων χωρίς μεταλλική ενίσχυση στις κατευθύνσεις 1 & 2 ήταν 23.5 και 31.0 MPa. Αντιθέτως με την μεταλλική ενίσχυση οι τιμές διαμορφώνονται σε 24.6 και 24.0 MPa. Η διακύμανση της αντοχής σε θλίψη είναι από 32.3 έως 42.6% λιγότερη από αυτής του μονολιθικού δοκιμίου.

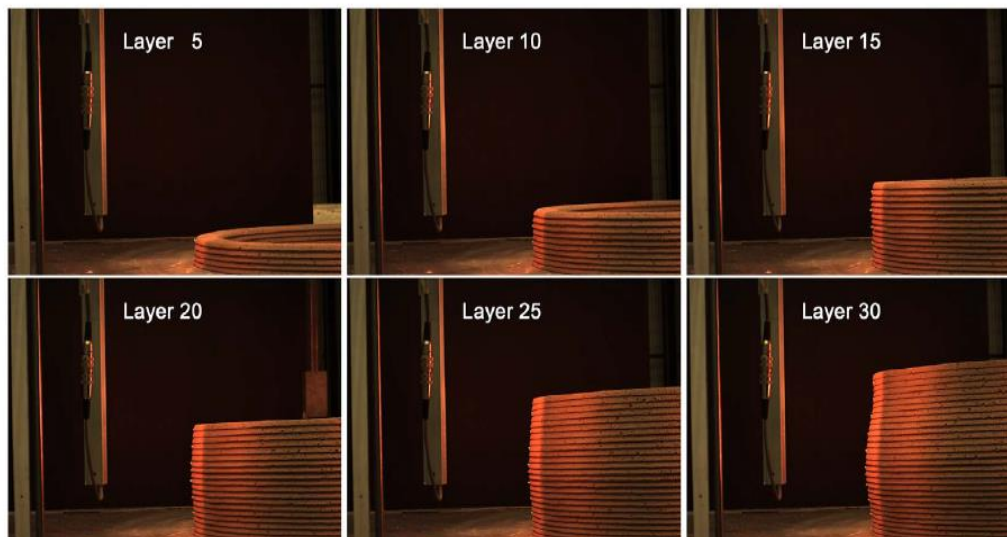
### Δυνάμεις εφελκυσμού



**Σχήμα 2-20. Αντοχή σε εφελκυσμό**

Η αντοχή σε εφελκυσμό το μονολιθικού δοκιμίου ήταν 11.2 MPa, ενώ των εκτυπωμένων δοκιμίων με και χωρίς μεταλλική ενίσχυση ήταν 4.5, 3.2 και 1.8 MPa στις κατευθύνσεις 1 και 2. Η διακύμανση της αντοχής σε εφελκυσμό των εκτυπωμένων δοκιμίων σε σχέση με τα μονολιθικά είναι από 11.1 έως 39.7% μικρότερη.





Σχήμα 2-21. παραμόρφωση εκτυπωμένου υλικού από 5 έως 30 layers

## Βιβλιογραφία Κεφαλαίου 2

- [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.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] Kreiger, M., and J. Pearce. 2015. "Environmental Life Cycle Analysis of Distributed Threedimensional Printing and Conventional Manufacturing of Polymer Products." *ACS Sustainable Chemical Engineering* 1: 1511–1519.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] Mataerial. 2013. "A Radically New 3D Printing Method." Accessed February 26, 2018. <http://www.Mataerial.com/#firstPage>.
- [27] 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>.
- [28] 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.
- [29] Noorani, R. 2006. *Rapid Prototyping—Principles and Applications*. New York: John Wiley & Sons, 14–20; 63–80.
- [30] 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.
- [31] 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.
- [32] ORNL. 2015. "Fact Sheet of AMIE." Accessed July 28, 2017. <http://web.ornl.gov/sci/eere/amie/media/AMIE-DemonstrationProject.pdf>.
- [33] Perkins, I., and M. Skitmore. 2015. "Three-Dimensional Printing in the Construction Industry: A Review." *Journal of Construction Management* 15 (1): 1–9.
- [34] 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.
- [35] 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.
- [36] 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.
- [37] Sisson, P. 2016. "The World's First 3D-Printed Office is Now Open in Dubai." Accessed August 2, 2017. <https://www.curbed.com/2016/5/31/11816486/3dprinted-office-dubai-gensler>.

- [39] Zhang, J., and B. Khoshnevis. 2013. "Optimal Machine Operation Planning for Construction by Contour Crafting." *Automation in Construction* 29, 50–67
- [40] F. Perez, C. Bos, T. Olivito, and R. Zuccarello, "3D concrete printing: Machine and mix design," *Journal of Industrial and Intelligent Information*, vol. 6, no. 2, pp. 89–97, Jun. 2018.
- [41] L. March, C. C. Ferraro, D. Shah, and C. Gosselin, "Contour crafting: architectural applications of 3D printing," *Journal of Construction Engineering and Management*, vol. 142, no. 5, pp. 04016007-1–04016007-9, May 2016.
- [42] J. Le, K. J. Rushing, T. Perkins, and R. Skitmore, "A review of 3D concrete printing systems and materials properties: Current status and future research prospects," *Rapid Prototyping Journal*, vol. 23, no. 4, pp. 784–798, 2017.
- [43] E. Dini, M. Wenman, and P. Yates, "The properties of 3D printed materials in construction," *Automation in Construction*, vol. 21, pp. 127–135, Mar. 2012.
- [44] H. Lim, S. R. Pandey, and H. J. Choi, "Effect of mesh reinforcement on tensile strength of 3D printed concrete," *Materials and Structures*, vol. 50, no. 2, pp. 153–164, Apr. 2017.
- [45] M. Makeitfrom, Properties of thermoset polyurethane, viewed April 24, 2023, <https://www.makeitfrom.com/material-properties/Thermoset-Polyurethane-TPU>.
- [46] Y. Olivito and F. Zuccarello, "Performance evaluation of 3D printed concrete beams: A comparative study," *Construction and Building Materials*, vol. 47, pp. 1020–1028, Nov. 2013.
- [47] J. A. De Larrard and A. Belloc, "The influence of aggregate on the compressive strength of concrete," *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 10, no. 2, pp. 83–92, 1997.
- [48] C. Marques, R. G. Talukdar, and P. Rocha, "Structural performance and durability of 3D printed concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 112, pp. 1127–1138, 2016.
- [49] B. Nematollahi, J. Sanjayan, and M. Xia, "A novel 3D printing method for building construction," *Materials and Design*, vol. 139, pp. 531–541, Apr. 2018.
- [50] S. Kilic, M. K. Marcon, and N. Wan-Wendner, "Effects of various factors on the properties of concrete using experimental design," *Cement and Concrete Research*, vol. 38, no. 12, pp. 1550–1559, Dec. 2008.
- [51] R. Tsimas and E. Karavezyroglou, "Long-term performance of concrete with recycled concrete aggregates," *Cement and Concrete Composites*, vol. 31, no. 9, pp. 663–671, Sep. 2009.
- [52] D. Benitez, J. Rodrigues, and V. Varum, "An overview of the degradation and durability of reinforced concrete under environmental conditions," *Journal of Structural Integrity and Maintenance*, vol. 4, no. 3, pp. 137–150, 2019.
- [53] Nematollahi, B., Xia, M., & Sanjayan, J. (2017). Current Progress of 3D Concrete Printing Technologies. In *Proceedings of the 34th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC 2017)*, Melbourne, Australia.
- [54] Boral Innovation Factory. (2016). *Construction 3D Printing. Concrete in Australia*, 42(3), 30-35.
- [55] Llatas, C. (2011). A model for quantifying construction waste in projects according to the European waste list. *Waste Management*, 31(6), 1261-1276.
- [56] Safe Work Australia. (2015). *Work-related injuries and fatalities in construction, Australia, 2003 to 2013*. ISBN: 978-1-76028-236-3.
- [57] Yan, H., Shen, Q., Fan, L.C., Wang, Y., & Zhang, L. (2010). Greenhouse gas emissions in building construction: A case study of One Peking in Hong Kong. *Building and Environment*, 45(4), 949-955.
- [58] ASTM F42. (2015). *Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies*, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [59] Wohlers, T. (2014). *3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry*. Wohlers Associates, Inc., Colorado.
- [60] 8. Pegna, J. (1997). Exploratory investigation of solid freeform construction. *Automation in Construction*, 5(5), 427-437.
- [61] Buswell, R.A., Soar, R., Gibb, A.G., & Thorpe, A. (2007). Freeform construction: Mega-scale rapid manufacturing for construction. *Automation in Construction*, 16, 224-231.
- [62] Gosselin, C., Duballet, R., Roux, Ph., Gaudillière, N., Dirrenberger, J., & Morel, Ph. (2016). Large-scale 3D printing of ultra-high performance concrete – a new processing route for architects and builders. *Materials and Design*, 100, 102-109.
- [63] Khoshnevis, B., Hwang, D., Yao, K.-T., & Yeh, Z. (2006). Mega-scale fabrication by contour crafting. *International Journal of Industrial and System Engineering*, 1(3), 301-320.
- [64] Lim, S., Buswell, R.A., Le, T.T., Austin, S.A., Gibb, A.G.F., & Thorpe, T. (2012). Developments in construction-scale additive manufacturing processes. *Automation in Construction*, 21, 262-268.

- [65] Nerella, V.N., Krause, M., Näther, M., & Mechtcherine, V. (2016). CONPrint3D – 3D printing technology for onsite construction. *Concrete in Australia*, 42(3), 36-39.
- [66] Wang, L. (2017). Chinese company assembles 10 3D-printed concrete houses in a day for less than \$5,000 each. Retrieved March 20, 2017, from <http://inhabitat.com/chinese-company-assembles-ten-3d-printed-concrete-houses-in-one-day-for-less-than-5000-each/>
- [67] Severson, B. (2017). Shanghai-based Winsun 3D prints 6-story apartment building and an incredible home. Retrieved March 20, 2017, from <https://3dprint.com/38144/3d-printed-apartment-building/>
- [68] Scott, C. (2017). Chinese construction company 3D prints an entire two-story house on-site in 45 days. Retrieved March 20, 2017, from <https://3dprint.com/138664/huashang-tengda-3d-print-house/>
- [69] WASP. (2017). Concrete beam created with 3D printing. Retrieved March 20, 2017, from <http://www.wasproject.it/w/en/concrete-beam-created-with-3d-printing/>
- [70] Alec. (2016). Thai cement maker SCG develops an elegant 3m-tall 3D printed 'pavilion' home, 21st C. Cave. Retrieved March 20, 2017, from <http://www.3ders.org/articles/20160427-thai-cement-maker-scg-develops-an-elegant-3m-tall-3d-printed-pavilion-home-21st-c-cave.html>
- [71] Apis Core. (2016). The first on-site house has been printed in Russia. Retrieved March 20, 2017, from <http://apis-cor.com/en/about/news/first-house>
- [72] Cesaretti, G., Dini, E., De Kestelier, X., Colla, V., & Pambaguian, L. (2014). Building components for an outpost on the Lunar soil by means of a novel 3D printing technology. *Acta Astronautica*, 93, 430-450.
- [73] Rael, R., & San Fratello, V. (2017). Bloom. Retrieved March 20, 2017, from <http://www.emergingobjects.com/project/bloom-2/>
- [74] Xia, M., & Sanjayan, J. (2016). Method of formulating geopolymers for 3D printing for construction applications. *Materials and Design*, 110, 382-390.
- [75] Frosch, R. J., 1999, "Another approach to cracking and time effects in concrete", In *Proceedings of the Second International Conference on Creep, Shrinkage and Durability Mechanics of Concrete and other Quasi-Brittle Materials*, pp. 271-278.
- [76] Kakali, G., Tsvilis, S., Aggeli, E., and Bati, M., 2000, "Hydration products of C3A, C3S and Portland cement in the presence of CaCO<sub>3</sub>", *Cement and Concrete Research*, vol. 30, no. 7, pp. 1073-1077.
- [77] Chaniotakis, E., Kakali, G., and Tsvilis, S., 2001, "An investigation on the hydration of Portland cement in the presence of calcium carbonate", *Cement and Concrete Research*, vol. 31, no. 6, pp. 853-857.
- [78] Benitez, P., Rocha, M., Talukdar, S., Varum, H., & Rodrigues, H., 2019
- [79] Karavezyroglou, M., 2009, "Longitudinal consideration of concrete and steel reinforcement strengths based on regulations," At the 16th Concrete Conference, TEE, ETEK, Paphos, Cyprus.
- [80] J. Xiao, H. Liu, T. Ding  
Finite element analysis on the anisotropic behavior of 3D printed concrete under compression and flexure
- [81] S. Xu, H.W. Reinhardt. A simplified method for determining double-K fracture parameters for three-point bending tests
- [82] Ashby MF. Chapter 4—material property charts. In: *Materials selection in mechanical design*, fourth ed. Butterworth-Heinemann, Oxford A simplified method for determining double-K fracture parameters for three-point bending tests
- [83] H. Liu, J. Xiao, T. Ding Flexural performance of 3D-printed composite beams with ECC and recycled fine aggregate concrete: experimental and numerical analysis
- [84] A.J. Babafemi, J.T. Kolawole, M.J. Miah, S.C. Paul, B. Panda  
A concise review on interlayer bond strength in 3d concrete printing

## 3 Οι απαιτήσεις της τρισδιάστατης εκτύπωσης τσιμέντου στον κατασκευαστικό τομέα

### 3.1 Ο ψηφιακός σχεδιασμός

Ο τομέας της τεχνολογίας των υπολογιστών έχει σημειώσει σημαντική επέκταση τα τελευταία χρόνια, επηρεάζοντας βαθιά τη διαδικασία του αρχιτεκτονικού σχεδιασμού. Αυτή η τεχνολογική διείσδυση έχει επαναπροσδιορίσει τις αρχιτεκτονικές μεθοδολογίες, εισάγοντας μια πληθώρα καινοτόμων ευκαιριών. Μεταξύ αυτών των εξελίξεων είναι η τρισδιάστατη μοντελοποίηση, η ψηφιακή μορφογένεση, τα συστήματα κωδικοποιημένων διαμορφώσεων, καθώς και οι δομικές και θερμικές αναλύσεις. Αυτά τα εργαλεία διευκολύνουν την βελτιωμένη διαχείριση και τον συντονισμό των κατασκευαστικών έργων, καθιστώντας βασικές πρακτικές για αρχιτέκτονες και συμβούλους κατασκευών. Επιπλέον, ο ψηφιακός σχεδιασμός και οι συναφείς τεχνολογίες έχουν παίξει καθοριστικό ρόλο στην προώθηση των μεθόδων ψηφιακής κατασκευής [1]. Η ανάλυση της προόδου, των καινοτόμων τεχνικών και των δυνατοτήτων του ψηφιακού (υπολογιστικού) σχεδιασμού θεωρείται επομένως τόσο ενδιαφέρουσα όσο και απαραίτητη.

#### Το αρχιτεκτονικό σχέδιο στο ( CAD).

Η εξέλιξη και η σημασία του αρχιτέκτονα και του αρχιτεκτονικού σχεδιασμού συνδέονται εγγενώς με την έννοια του «αρχιτεκτονικού σχεδιασμού». Επί του παρόντος, ο σχεδιασμός περιλαμβάνει πρωτίστως τη μετάφραση μιας ιδέας σε σχέδιο, σχέδιο ή μοντέλο για να βοηθήσει στη φυσική της δημιουργία και να καθορίσει τον σκοπό και τη λειτουργικότητά της. Ο όρος "σχέδιο" προέρχεται από την ιταλική λέξη "disegno", η οποία περιλαμβάνει τόσο την πράξη του σχεδίου όσο και την ευρύτερη διαδικασία μετατροπής μιας ιδέας σε πραγματικότητα. Αυτή η ιδέα υποδηλώνει μια απρόσκοπτη σύνδεση μεταξύ μιας ιδέας και της φυσικής της εκδήλωσης [2]. Όπως σημειώθηκε από τον Vilém Flusser, ο όρος προέρχεται από το λατινικό «signum», που σημαίνει σημάδι, υποδηλώνοντας μια κοινή ετυμολογική ρίζα.

Αυτή η έννοια του σχεδιασμού, η οποία αποκρυσταλλώθηκε κατά την Ιταλική Αναγέννηση, έκτοτε κυριαρχεί στον τομέα, υποδηλώνοντας ότι το σχέδιο ξεκινά με μια ιδέα ή όραμα, το οποίο στη συνέχεια αποδίδεται σε χαρτί πριν κατασκευαστεί. Έτσι, ο σχεδιασμός σχετίζεται με την πράξη του σχεδιασμού - από τη σύλληψη στο μυαλό μέχρι την υλοποίησή του. Η διαδικασία σχεδιασμού περιλαμβάνει μια σειρά από δραστηριότητες που αναλαμβάνουν οι σχεδιαστές για την επίλυση τεχνολογικών προκλήσεων. Ο σχεδιασμός με τη βοήθεια υπολογιστή (CAD) περιλαμβάνει τη χρήση συστημάτων υπολογιστών για να βοηθήσει στη δημιουργία, τροποποίηση, ανάλυση και βελτιστοποίηση ενός σχεδίου. Το σύγχρονο λογισμικό CAD χρησιμοποιεί διαδραστικά γραφικά, επιτρέποντας στους υπολογιστές να δημιουργούν και να προσαρμόζουν οπτικά δεδομένα σχεδίασης, ενώ οι χρήστες αλληλεπιδρούν μέσω συσκευών εισόδου, με αποκορύφωμα τα σχέδια ψηφιακής μορφής [5]. Τα εργαλεία CAD επιτρέπουν τη δημιουργία τόσο δισδιάστατων σχεδίων όσο και τρισδιάστατων μοντέλων.

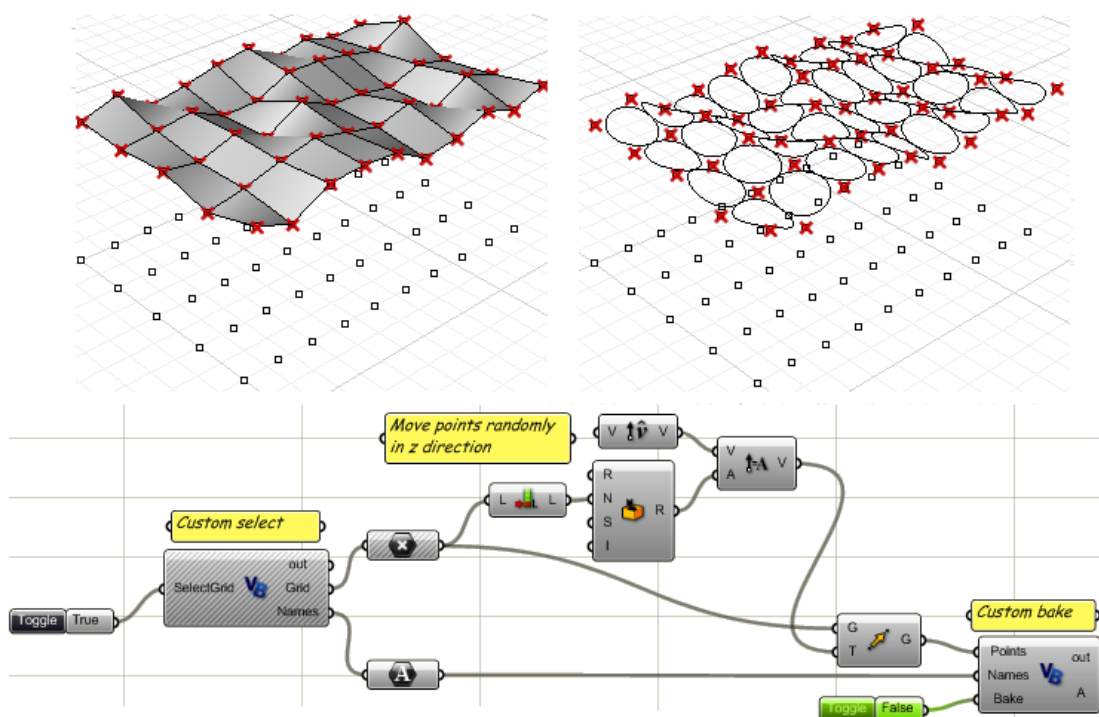
Επιπλέον, ο συνδυασμός σχεδιασμού και κατασκευής με τη βοήθεια υπολογιστή (CAD/CAM) αναφέρεται σε συστήματα που όχι μόνο σχεδιάζουν αλλά και απλοποιούν και αυτοματοποιούν τις διαδικασίες παραγωγής. Στον υπολογιστικό σχεδιασμό, οι υπολογιστικές στρατηγικές εφαρμόζονται σε δραστηριότητες σχεδιασμού. Το καθοριστικό του χαρακτηριστικό είναι η αλγοριθμική επεξεργασία των πληροφοριών. Ενώ οι αρχιτέκτονες παραδοσιακά εξαρτώνται από τη διαίσθηση και την εμπειρία για την επίλυση προβλημάτων σχεδιασμού, ο υπολογιστικός σχεδιασμός ενισχύει αυτήν την προσέγγιση κωδικοποιώντας αποφάσεις σχεδιασμού σε γλώσσες υπολογιστών. Ο στόχος δεν είναι απλώς η τεκμηρίωση του τελικού προϊόντος αλλά η περιγραφή των βημάτων που οδηγούν σε αυτό το αποτέλεσμα.

Τα περισσότερα συστήματα υπολογιστικού σχεδιασμού χρησιμοποιούν οπτικό προγραμματισμό, όπου τα προγράμματα κατασκευάζονται γραφικά και όχι μέσω της παραδοσιακής γραφής κώδικα, οδηγώντας σε μια διαγραμματική αναπαράσταση της διαδικασίας που επιτυγχάνει τον τελικό σχεδιασμό [3,6].

Πολλοί θεωρούν τον υπολογιστικό σχεδιασμό ως ένα υποσύνολο του σχεδιασμού με τη βοήθεια υπολογιστή (CAD), που περιλαμβάνει όλα τα προγράμματα που διευκολύνουν τις διαδικασίες σχεδιασμού με τη βοήθεια υπολογιστή. Ωστόσο, είναι κρίσιμο να διαφοροποιηθεί ο υπολογιστικός σχεδιασμός από τον παραδοσιακό CAD, ιδιαίτερα όσον αφορά την καθοδήγηση που παρέχει στους σχεδιαστές για την επίτευξη της τελικής μορφής.

Η διάκριση μεταξύ CAD και υπολογιστικού σχεδιασμού έγκειται στις προσεγγίσεις τους στον προγραμματισμό και όχι στις ειδικές τους δυνατότητες ή τεχνογνωσία. Το CAD χρησιμοποιεί κυρίως μια στρατηγική συμβολικής αναπαράστασης όπου οι πληροφορίες βασίζονται σε αντικείμενα και μορφές. Αντίθετα, ο υπολογιστικός σχεδιασμός χρησιμοποιεί μια λογική που επιτρέπει την υλοποίηση συγκεκριμένων δεδομένων μέσω αρχικών αφαιρέσεων κωδικοποιημένων με τιμές και σχέσεις. Όπως σημειώνει ο Κώστας Τερζίδης, η διαδεδομένη χρήση των υπολογιστών στην αρχιτεκτονική σήμερα μπορεί να περιγραφεί ως μηχανογράφηση, όπου προσχεδιασμένες οντότητες και διαδικασίες από τον σχεδιαστή απλώς εισάγονται, επεξεργάζονται ή αποθηκεύονται στο σύστημα υπολογιστών. Αυτή η προσέγγιση δεν αξιοποιεί πλήρως τις νέες δυνατότητες που ενδέχεται να προσφέρουν οι υπολογιστές. Ο υπολογιστικός σχεδιασμός, από την άλλη πλευρά, περιορίζεται εγγενώς από τις υπολογιστικές ικανότητες του υλικού που χρησιμοποιείται, με αποτέλεσμα συχνά την υποχρησιμοποίηση της διαθέσιμης υπολογιστικής ισχύος.

Στο πεδίο του υπολογιστικού σχεδιασμού, υπάρχουν αρκετές υποκατηγορίες, συμπεριλαμβανομένου του αλγοριθμικού σχεδιασμού, που δημιουργεί πρωτότυπες και σύνθετες φόρμες μέσω καθορισμένων ακολουθιών ενεργειών, καθώς και εξελικτικού και γενετικού σχεδιασμού [4]. Μια άλλη σημαντική κατηγορία είναι ο παραμετρικός σχεδιασμός, όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 3-1, ο οποίος περιγράφει τις σχέσεις μεταξύ οντοτήτων χρησιμοποιώντας καθορισμένες παραμέτρους και περιορισμούς. Ενώ αυτές οι κατηγορίες έχουν διακριτούς ορισμούς, η ενσωμάτωσή τους παρατηρείται συνήθως στην πράξη, αντανακλώντας τη ρευστή φύση των ορίων υπολογιστικού σχεδιασμού.



Σχήμα 3-1. Το πρόγραμμα Grasshopper

### 3.2 Εξέλιξη του ψηφιακού σχεδιασμού

Η χρήση υπολογιστικών συστημάτων στο σχεδιασμό έχει γίνει, εδώ και αρκετές δεκαετίες, θεμελιώδες εργαλείο στην αρχιτεκτονική σύνθεση, αντικαθιστώντας σημαντικά τις παραδοσιακές μεθόδους σχεδίασης με το χέρι. Η έναρξη των συστημάτων σχεδίασης με τη βοήθεια υπολογιστή (CAD) χρονολογείται από τη δεκαετία του 1960, τα οποία αναπτύχθηκαν

αρχικά για την αυτοκινητοβιομηχανία και την αεροδιαστημική βιομηχανία. Αρχικά, τα προγράμματα CAD αναπαρήγαγαν παραδοσιακές μεθόδους σχεδίασης, χρησιμοποιώντας τον υπολογιστή κυρίως για την ευκολία της οπτικής αναπαράστασης [7,8]. Καθώς η παραγωγή σχεδιασμού πέρασε από την αναλογική στην ψηφιακή, τα προγράμματα CAD άρχισαν να αντικαθιστούν τα παραδοσιακά εργαλεία όπως χάρακες και μολύβια. Ωστόσο, οι ίδιες οι αρχιτεκτονικές μορφές δεν αντικατοπτρίζουν αμέσως αυτήν την τεχνολογική αλλαγή. Απαιτούσε την εισαγωγή τεχνικών τρισδιάστατης ψηφιακής μοντελοποίησης και ψηφιακής κατασκευής για να μεταμορφώσει πραγματικά τη σχεδιαστική σκέψη, ωθώντας τα όρια των αρχιτεκτονικών μορφών και των κατασκευαστικών πρακτικών.

Μια παραδοσιακή προσέγγιση στον ψηφιακό αρχιτεκτονικό σχεδιασμό είναι η χαρτογράφηση εικόνων, όπου οι σχεδιαστικές επιλογές γίνονται με βάση αναπαραστατικά κριτήρια και όχι λειτουργικές επιδόσεις. Οι πρώτες χρήσεις του λογισμικού τρισδιάστατης μοντελοποίησης συχνά περιλάμβαναν την προσομοίωση της τελικής εμφάνισης μιας δομής χρησιμοποιώντας βιβλιοθήκες υλικού, συνήθως εικόνες bitmap, που εφαρμόστηκαν εύκολα σε προκαθορισμένες φόρμες. Αυτή η προσέγγιση έτεινε να απομακρύνει τους αρχιτέκτονες από τις υλικές πτυχές της οικοδομικής διαδικασίας. Για παράδειγμα, ένα bitmap από τούβλο, γρασίδι, πέτρα ή οποιοδήποτε άλλο υλικό στερείται των φυσικών ιδιοτήτων και χαρακτηριστικών που θα έπρεπε να λάβει υπόψη ένας αρχιτέκτονας στη φυσική διαδικασία κατασκευής. Ως αποτέλεσμα, τέτοιες ψηφιακές αναπαραστάσεις δεν παρέχουν τα απαραίτητα δεδομένα για να αξιολογηθεί εάν ένα υλικό θα μπορούσε να λειτουργήσει αποτελεσματικά σε πραγματικό περιβάλλον.

Στη σύγχρονη πρακτική, συχνά επικρατεί μια προσέγγιση από πάνω προς τα κάτω, ξεκινώντας από τη σύλληψη μιας φόρμας, ακολουθούμενη από το σχεδιασμό της δομικής της απόδοσης και καταλήγοντας στην πραγματοποίησή της σε μια δομή υλικού, με κατάλληλες προσαρμογές για το σχεδιασμό και την απόδοση [9,11]. Αυτή η αρχική ψηφιακή εποχή διατήρησε αυτά τα στάδια, αλλά τα μετέφρασε σε ψηφιακά μέσα: «μοντελοποίηση» ως αρχική φάση, ακολουθούμενη από «ανάλυση» και τελικά «κατασκευή».

Στα μέσα της δεκαετίας του 1990, οι αρχιτέκτονες άρχισαν να ενσωματώνουν καμπύλες σφήνες και NURBS (Μη ομοιόμορφα ορθολογικά B-Splines) στα προγράμματά τους CAD. Αυτοί οι μαθηματικοί ορισμοί για τις καμπύλες, που αναπτύχθηκαν αρχικά από τη γαλλική αυτοκινητοβιομηχανία τη δεκαετία του 1950, άρχισαν να επηρεάζουν τα αρχιτεκτονικά σχέδια παγκοσμίως. Ωστόσο, ο αρχικός ενθουσιασμός έδωσε σύντομα τη θέση του σε πρακτικές προκλήσεις κατά τη διάρκεια των φάσεων κατασκευής [13]. Αυτό που ξεκίνησε ως μια απελευθερωτική απομάκρυνση από τα μονότονα, βιομηχανικά και ορθογώνια σχέδια του παρελθόντος γρήγορα εξελίχθηκε σε μια περίπλοκη δοκιμασία, όπως περιγράφεται από έναν σχολιαστή ως μια μετάβαση «από ένα χαρούμενο ταξίδι σε έναν εφιάλτη εξαντλητικής δουλειάς».

Για παράδειγμα, η υλοποίηση τέτοιων σχεδίων απαιτούσε τα κουφώματα των παραθύρων στους σταθμούς του τελεφερίκ της Zaha Hadid στο Ίνσμπρουκ της Αυστρίας (2007) να είναι καμπυλωμένα, μια προσαρμογή που αποδείχθηκε δαπανηρή. Ομοίως, η εγκατάσταση αυτών των κουφωμάτων χρειαζόταν σχολαστική βελτιστοποίηση για να ευθυγραμμιστεί με τις καμπύλες επιφάνειες χρησιμοποιώντας επίπεδες προσόψεις, όπως φαίνεται στο πολυκατάστημα Peek & Cloppenburg του Renzo Piano στην Κολωνία. Αυτή η απόκλιση από τις επαναλαμβανόμενες κατασκευαστικές λεπτομέρειες, όπου ένα μεμονωμένο σχέδιο μπορούσε να επαναχρησιμοποιηθεί πολλές φορές, αντικαταστάθηκε από ένα σενάριο όπου κάθε πλαίσιο και κάθε σύνδεσμος είχαν ανεπαίσθητες παραλλαγές στη γεωμετρία. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα τη δημιουργία εκατοντάδων ή χιλιάδων μοναδικών σχεδίων έντασης εργασίας. Αυτές οι προκλήσεις στο σχεδιασμό και την κατασκευή προκάλεσαν την εμφάνιση του υπολογιστικού σχεδιασμού και της ψηφιακής κατασκευής ως λύσεις για την αντιμετώπιση των πολυπλοκοτήτων που εισάγονται από τη χρήση του NURBS στον αρχιτεκτονικό σχεδιασμό [10].

Σε ορισμένα προγράμματα CAD, οι διεπαφές προγραμματισμού (API) επιτρέπουν τον χειρισμό εργαλείων σχεδιασμού μέσω αλγοριθμικών μεθόδων. Αυτή η ικανότητα επέτρεψε στους αρχιτέκτονες να στραφούν από τον χειροκίνητο σχεδιασμό αμέτρητων παραλλαγών του ίδιου στοιχείου σε αλγόριθμους σχεδιασμού προγραμματισμού. Αυτοί οι αλγόριθμοι δέχονται τον καθορισμό των ιδιοτήτων ενός στοιχείου ή μιας σύνδεσης ως παραμέτρους εισόδου και

εξάγουν ένα λεπτομερές σχέδιο ή τρισδιάστατο μοντέλο. Κατά συνέπεια, οι τεράστιες πληροφορίες που απαιτούνται για χιλιάδες σχέδια μπορούν να συμπυκνωθούν σε έναν καλοφτιαγμένο αλγόριθμο συνοδευόμενο από εκατοντάδες σύνολα παραμέτρων [11]. Αυτή η αλλαγή σηματοδότησε την έναρξη των διαδικασιών υπολογιστικού σχεδιασμού, οι οποίες χρησιμοποιούν δυνατότητες υπολογιστών πολύ πέρα από το παραδοσιακό CAD για τη δημιουργία αρχιτεκτονικών μορφών [12].

Η μετάβαση σε μια αλγοριθμική προσέγγιση στον σχεδιασμό εισάγει νέες προκλήσεις, ιδιαίτερα στο σύνολο των δεξιοτήτων που απαιτούνται από τους αρχιτέκτονες. Παραδοσιακά συνηθισμένοι στην αντιμετώπιση διφορούμενων και χαλαρά καθορισμένων προβλημάτων, οι αρχιτέκτονες αντιμετωπίζουν τώρα προβλήματα που είναι ξεκάθαρα, πλήρως καθορισμένα και απαιτούν γραμματικά ακριβείς περιγραφές μέχρι τα τελευταία σημεία στίξης. Η εύρεση μιας καθολικής, κομψής λύσης για διάφορες λεπτομέρειες μιας καμπύλης πρόσοψης αποτελεί μια πιο περίπλοκη πρόκληση από την αντιμετώπιση μιας απλής ορθογωνίας κατάστασης. Επιπλέον, αυτή η μέθοδος απαιτεί όχι μόνο τεράστια ακρίβεια αλλά και σε βάθος κατανόηση της γεωμετρίας. Κατά την εφαρμογή αυτών των αλγορίθμων στην κατασκευή υψηλής τεχνολογίας, όπου ο εξοπλισμός που ελέγχεται από υπολογιστή λειτουργεί με αποκλίσεις μικρότερες από ένα χιλιοστό, η ακρίβεια του ψηφιακού μοντέλου πρέπει να είναι ακόμη μεγαλύτερη [14,15].

### 3.3 Ο Αλγοριθμικός σχεδιασμός

Όπως επεξηγήθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, η ενσωμάτωση αλγορίθμων στον αρχιτεκτονικό σχεδιασμό σηματοδοτεί ένα σημαντικό ορόσημο εισάγοντας μια νέα λογική στην παραγωγή αρχιτεκτονικών μορφών.

Η σχέση μεταξύ του ψηφιακού σχεδιασμού, ιδιαίτερα των υπολογιστικών διαδικασιών, και της πολυπλοκότητας είναι βαθιά. Αυτά τα εργαλεία είναι απαραίτητα για τη δημιουργία και τη διαχείριση πολύπλοκων αρχιτεκτονικών κατασκευών, που θα ήταν εξαιρετικά δύσκολο, αν όχι αδύνατο, να κατασκευαστούν χωρίς αυτά. Ο όρος "πολυπλοκότητα" αναφέρεται συχνά στην πολυπλοκότητα κατά του Κολμογκόροφ ή στην πολυπλοκότητα  $K$  [16,17]. Αυτή η έννοια, που τονίστηκε από τον Ρώσο μαθηματικό Andrey Nikolayevich Kolmogorov, περιστρέφεται γύρω από τη θεωρία αλγορίθμων και στοχεύει στον μαθηματικό προσδιορισμό της ποσότητας των πληροφοριών. Η πολυπλοκότητα, σε αυτό το πλαίσιο, ορίζεται ως το μήκος του συντομότερου αλγορίθμου ή της διαδικασίας βήμα προς βήμα που απαιτείται για την αναπαραγωγή ενός μηνύματος «Η πολυπλοκότητα αναφέρεται στη διάρκεια της περιγραφής ενός συστήματος ή στον χρόνο που απαιτείται για τη δημιουργία ενός συστήματος». Είναι σημαντικό να γίνει διάκριση μεταξύ των όρων «σύνθετο» και «πολυπλοκότητα». Σύμφωνα με τον Τερζίδη, το «σύνθετο» αναφέρεται σε συστήματα με μεγάλο αριθμό διασυνδεδεμένων στοιχείων, τα οποία μπορούν να γίνουν πλήρως κατανοητά μέσω λεπτομερούς ανάλυσης αυτών των στοιχείων. Αντίθετα, η «πολυπλοκότητα» περιλαμβάνει χαρακτηριστικά και λειτουργίες ενός συστήματος που δεν διακρίνονται πλήρως μέσω της απλής αποσύνθεσης [18,21].

Στον σύγχρονο υπολογιστικό σχεδιασμό, οι αλγόριθμοι διαδραματίζουν κεντρικό ρόλο στη δημιουργία πρωτοτύπων ή περίπλοκων δομών. Η σημαντική αύξηση στην υπολογιστική ισχύ των προσωπικών υπολογιστών επέτρεψε μια βαθύτερη κατανόηση και περιγραφή πολύπλοκων αλγορίθμων, παράλληλα με την ικανότητα οπτικοποίησης των αποτελεσμάτων τους σε ταχύτητες που προηγουμένως ήταν απρόσιτες από την ανθρώπινη γνώση [22,23].

Ακόμα περιγράφει περαιτέρω έναν αλγόριθμο ως «μια υπολογιστική διαδικασία που αρθρώνει ένα πρόβλημα σε έναν πεπερασμένο αριθμό βημάτων, ενσωματώνοντας αναγωγή, επαγωγή, έκπτωση, γενίκευση και δομημένη λογική». Αυτή η συστηματική εξαγωγή λογικών αρχών και η διαμόρφωση ενός γενικού σχεδίου λύσης είναι κεντρικής σημασίας για αλγοριθμικές στρατηγικές, οι οποίες εστιάζουν στον εντοπισμό επαναλαμβανόμενων μοτίβων, καθολικών αρχών, εναλλασσόμενων υποσυνόλων και επαγωγικών συνδέσεων. Ενώ οι αλγόριθμοι συνδέονται συχνά με την πολυπλοκότητα, είναι ζωτικής σημασίας να γίνει διάκριση μεταξύ της πολυπλοκότητας των αποτελεσμάτων που παράγονται και της απλότητας των ίδιων των αλγορίθμων, καθώς οι απλοί αλγόριθμοι μπορούν να αποδώσουν εξαιρετικά πολύπλοκα αποτελέσματα. Ένα βασικό χαρακτηριστικό των αλγορίθμων είναι η γενική τους εφαρμογή [24], που αρχικά σχεδιάστηκαν για την αντιμετώπιση συγκεκριμένων



προβλημάτων, μπορούν επίσης να προσαρμοστούν για να λύσουν ή να πλαισιώσουν άλλα ζητήματα. Έτσι, ένας αλγόριθμος μπορεί να αντιπροσωπεύει ένα σύνολο αφηρημένων και ευέλικτων κανόνων που, ανάλογα με την πρόθεση του δημιουργού, μπορούν να οδηγήσουν σε απρόβλεπτα αποτελέσματα από τον αρχικό σχεδιαστή του αλγορίθμου[25].

Στα μαθηματικά, μια παράμετρος ορίζεται συνήθως ως μια σταθερά ή μεταβλητή μέσα σε μια συνάρτηση που καθορίζει το συγκεκριμένο σχήμα αλλά όχι τη γενική φύση της, όπως παραδειγματίζεται στη συνάρτηση  $f(x) = ax$ , όπου το  $a$  επηρεάζει μόνο την κλίση της γραμμής που αντιπροσωπεύεται από  $f(x)$ . Σε ένα ευρύτερο πλαίσιο, μπορεί επίσης να αναφέρεται σε μία από τις ανεξάρτητες μεταβλητές σε ένα σύνολο παραμετρικών εξισώσεων. Αντίθετα, στην επιστήμη των υπολογιστών, μια παράμετρος προσδιορίζεται ως μια μεταβλητή στην οποία πρέπει να εκχωρηθεί μια συγκεκριμένη τιμή κατά την εκτέλεση ενός προγράμματος ή μιας συγκεκριμένης διαδικασίας εντός αυτού του προγράμματος.

Στον υπολογιστικό σχεδιασμό και κατά τη διαμόρφωση των αλγορίθμων δημιουργίας φόρμας, οι σχεδιαστές δεν περιγράφουν απλώς αντικείμενα αλλά τις σχέσεις μεταξύ τους, οι οποίες παραμένουν σταθερές. Η μοναδικότητα των μορφών που παράγονται επιτυγχάνεται με την εισαγωγή διαφορετικών τιμών στις παραμέτρους που ορίζουν αυτές τις σχέσεις[26,27]. Οι παράμετροι επομένως δεν περιλαμβάνουν μόνο αισθητικές και λειτουργικές πτυχές αλλά και υλικά και δομικά στοιχεία. Ιδιαίτερα στην κατασκευή, οι παράμετροι γίνονται κρίσιμες με την εμφάνιση των μεθόδων ψηφιακής κατασκευής στην αρχιτεκτονική.

Η ψηφιακή μορφογένεση περιλαμβάνει τη δημιουργία σχεδιαστικών λύσεων μέσω γενετικών και εκτελεστικών διαδικασιών, αντλώντας έμπνευση από εξελικτικές διαδικασίες που παρατηρούνται στη φύση και τη βιολογία[28,30]. Αυτό απαιτεί μια γεωμετρικά καθορισμένη σειρά σχέσεων αλληλεξάρτησης, από τις οποίες μπορούν να προκύψουν παραμετρικά οι γεωμετρικές παραλλαγές μιας δομής μεταβάλλοντας τις τιμές των στοιχείων που την αποτελούν. Εργαλεία όπως το Generative Components της Bentley Systems και το Grasshopper for Rhino της McNeel διευκολύνουν τέτοιες γενετικές και επαναληπτικές διαδικασίες σχεδιασμού.

Στην ανάλυση δομικού σχεδιασμού, η πρόβλεψη της συμπεριφοράς πολύπλοκων δομών ενισχύεται με την ενσωμάτωση όχι μόνο αναλυτικών αλλά και γενετικών στρατηγικών. Καθώς προχωρά η εξερεύνηση των φυσικών συστημάτων και των εξελικτικών τους αλληλεπιδράσεων, σημειώνεται μια στροφή προς τις διαδικασίες σχεδιασμού που βασίζονται στη γενετική, επηρεασμένη από τις θεωρίες εμφάνισης. Το Emergence περιγράφει τη διαδικασία όπου απλοί οργανωτικοί κανόνες χαμηλής τάξης οδηγούν σε πολυπλοκότητα υψηλής τάξης μέσω πολύπλοκων αλληλεπιδράσεων μεταξύ τοπικών παραγόντων. Αυτή η πολυπλοκότητα χαρακτηρίζει συστήματα όπου η συμπεριφορά είναι απρόβλεπτη και οι αναδυόμενες ιδιότητες του συστήματος δεν αποδίδονται σε μεμονωμένα στοιχεία αλλά προκύπτουν από αυτές τις πολύπλοκες αλληλεπιδράσεις χωρίς ρητό έλεγχο από πάνω προς τα κάτω.

Οι εξελικτικοί αλγόριθμοι λειτουργούν δημιουργώντας και χειραγωγώντας συμβολοσειρές που λειτουργούν ως γονότυποι ή σχεδιαγράμματα για ολόκληρους πληθυσμούς κατασκευών. Αυτοί οι γονότυποι χρησιμεύουν ως δεδομένα εισόδου για τη δημιουργία παραμετρικών μοντέλων, τα οποία στη συνέχεια αξιολογούνται με βάση κριτήρια που περιλαμβάνουν τόσο δομικές ανάγκες όσο και αρχιτεκτονικές πτυχές. Ο στόχος δεν είναι η βελτιστοποίηση μιας ενιαίας δομής αλλά η εξισορρόπηση διαφόρων απαιτήσεων. Οι δομές προσαρμόζονται και αναπαράγονται συνεχώς για να δημιουργήσουν νέες, ποικίλες λύσεις [28]. Αυτή η επαναληπτική διαδικασία βασίζεται κυρίως στα γονίδια των πιο επιτυχημένων λύσεων από προηγούμενους κύκλους, δημιουργώντας έναν βρόχο ανάδρασης αντί για μια απλή σχέση αίτιου-αποτελέσματος.

Ενώ τα εξελικτικά μοντέλα σχεδίασης αμφισβητούν τις παραδοσιακές διαδικασίες σχεδίασης από πάνω προς τα κάτω και υποστηρίζουν την εμφάνιση μορφών και πολυπλοκότητας μέσω αλγοριθμικών διαδικασιών, συχνά τηρούν τη σύγχρονη διαίρεση μεταξύ σχεδιασμού και κατασκευής[29]. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την παραμέληση της έννοιας της ουσιαστικότητας στη διαδικασία σχεδιασμού. Ο Μένγκες αναφέρεται σε αυτό το φαινόμενο ως «γενιά μορφής που καθοδηγείται από γεωμετρία». Μια τέτοια νοοτροπία προωθεί ένα κλειστό σύστημα όπου δημιουργούνται φόρμες με βάση αλγοριθμικά δεδομένα

χωρίς ενημερώσεις σε πραγματικό χρόνο ή ανατροφοδότηση από το φυσικό περιβάλλον, που υπάρχει αποκλειστικά εντός του ψηφιακού πεδίου.

Οι HoB Lipson και Melba Kurman έχουν ασκήσει κριτική σε αυτήν την προσέγγιση σημειώνοντας ότι «... η φαντασία μας παραμένει κλειδωμένη σε παλιές εμπειρίες... οι δημιουργίες μας είναι παραλλαγές αυτού που είναι ήδη οικείο σε εμάς». Επισημαίνουν ότι οι αρχιτέκτονες δεν χρησιμοποιούν πλήρως τις νέες ψηφιακές τεχνολογίες που έχουν στη διάθεσή τους, όπως οι προηγμένες τεχνικές κατασκευής και η τρισδιάστατη εκτύπωση, που θα μπορούσαν να διευρύνουν σημαντικά το πεδίο της αρχιτεκτονικής καινοτομίας. Αντίθετα, τα βιολογικά μοντέλα απεικονίζουν έναν σύγχρονο ρόλο για τους αρχιτέκτονες ως μεσολαβητές που καθορίζουν παραμέτρους και σχέσεις μεταξύ των στοιχείων αντί να υπαγορεύουν την τελική μορφή. Αυτή η προσέγγιση αντιπροσωπεύει μια απόκλιση από την παραδοσιακή έννοια της εξουσίας που είναι διάχυτη στη σύγχρονη εποχή, υπογραμμίζοντας μια στροφή προς μια πιο συνεργατική και προσαρμοστική φιλοσοφία σχεδιασμού[27,30].

### 3.4 Εργαλεία σχεδιασμού

Η μετάβαση από τις παραδοσιακές αναλυτικές και αναπαραστατικές μεθόδους στον αρχιτεκτονικό σχεδιασμό στην εστίαση στη διαχείριση της αλλαγής, των αλληλεπιδράσεων και των σχέσεων μεταξύ των διαφόρων στοιχείων και των παραγόντων αλλαγής απαιτεί την ανάπτυξη νέων, κατάλληλων εργαλείων και λογισμικού σχεδιασμού. Ακόμη και προγράμματα που υιοθετούν μια παραδοσιακή στρατηγική διάδοσης, προσφέροντας ολοκληρωμένα πακέτα εφαρμογών που επιβλέπουν ολόκληρο το αντικείμενο σχεδιασμού, περιλαμβάνουν πλέον δυνατότητες που επιτρέπουν στους χρήστες να αναπτύξουν νέα εργαλεία (όπως Bentley - GC). Ταυτόχρονα, πιο ευέλικτες και εξειδικευμένες πλατφόρμες λογισμικού υποστηρίζουν τη δημιουργία προσθηκών που ενισχύουν το κύριο πρόγραμμα και προσφέρουν δυνατότητες παραμετρικής σχεδίασης (όπως το Rhino 3D - Grasshopper).

Επιπλέον, υπάρχει μια στρατηγική σχεδιασμού που υπερβαίνει συγκεκριμένα προγράμματα λογισμικού. Αυτή η προσέγγιση περιλαμβάνει την ενσωμάτωση παραμετρικών μικροεφαρμογών σε διαφορετικά στάδια ή τμήματα της διαδικασίας σχεδιασμού για την αντιμετώπιση συγκεκριμένων προβλημάτων (όπως με την Επεξεργασία). Αυτή η στρατηγική αξιοποιεί τη δυναμική φύση του ελεύθερου λογισμικού ανοιχτού κώδικα, που υποστηρίζεται από μια διεθνή κοινότητα αφιερωμένη στην ελεύθερη ανταλλαγή γνώσεων και εργαλείων παραγωγής [29]. Ο συνεργατικός χαρακτήρας αυτών των προγραμμάτων είναι καθοριστικός, καθώς χρησιμεύουν ως κοινή πλατφόρμα για τη σύγκλιση και την κατανόηση διαφόρων επιστημονικών κλάδων, με την επιστήμη των υπολογιστών ως κοινό σύνδεσμο.

Παρά τις καινοτομίες που επιφέρει ο υπολογιστικός σχεδιασμός και την απομάκρυνση από τις καθαρά αναπαραστατικές εφαρμογές, αυτά τα προγράμματα παραμένουν κυρίως ως εργαλεία για το σχεδιασμό και την παραγωγή αρχιτεκτονικών μορφών, σε μεγάλο βαθμό ανεξάρτητα από τις μεθόδους κατασκευής τους. Αυτό έρχεται σε αντίθεση με το λογισμικό Building Information Modeling (BIM), το οποίο ενσωματώνει δεδομένα και παράγοντες που σχετίζονται με την κατασκευή, τα οποία θα συζητηθούν αργότερα.

Μια πρόσφατη εξέλιξη στα εργαλεία σχεδιασμού που υποστηρίζει μια απρόσκοπτη ενοποίηση του ψηφιακού σχεδιασμού με την πραγματική κατασκευή είναι το Building Information Modeling (BIM). Ο Ιωάννης Βενέρης το αναφέρει στα ελληνικά ως «Πληροφοριακό Πρότυπο Κτίριο». Όπως συζητήθηκε σε προηγούμενα κεφάλαια, ο ψηφιακός σχεδιασμός έχει πλέον επεκταθεί σε τομείς πέρα από τον απλό αναπαραστατικό σχεδιασμό, που περιλαμβάνει ανάλυση, προσομοίωση και ψηφιακή κατασκευή. Αυτή η σύγκλιση τεχνολογιών και η ανάγκη για ενισχυμένη επίβλεψη των κατασκευών έχουν προκαλέσει την άνοδο του BIM, το οποίο γεφυρώνει αποτελεσματικά το χάσμα μεταξύ σχεδιασμού και κατασκευής, υποσχόμενος να μεταμορφώσει τις σύγχρονες πρακτικές σχεδιασμού.

Το BIM προσφέρει την καινοτόμο δυνατότητα χρήσης ενός ενιαίου, «έξυπνου» εικονικού μοντέλου για τη διαχείριση όλων των πτυχών της διαδικασίας σχεδιασμού. Αυτό περιλαμβάνει αρχική σύλληψη, ανίχνευση και επίλυση χωρικών συγκρούσεων, αυτοματοποιημένη παραγωγή δομικών στοιχείων και ηλεκτρική καλωδίωση, αλληλουχία των κατασκευαστικών δραστηριοτήτων και έρευνα και διαχείριση υλικών. Ενώ το BIM δίνει σημαντική έμφαση στη γεωμετρική αναπαράσταση των στοιχείων ενός κτιρίου, διευκολύνει επίσης τη συμπερίληψη των προδιαγραφών υλικών, των ποσοτήτων εργασίας, του κόστους,

του προγραμματισμού εργασιών και διαφόρων αναλυτικών προσομοιώσεων (όπως η ενέργεια και οι δομικές αναλύσεις). Ουσιαστικά, το BIM χρησιμεύει ως μια ολοκληρωμένη βάση δεδομένων για ένα κτίριο, η οποία ενημερώνεται συνεχώς ώστε να περιλαμβάνει όλα τα απαραίτητα στοιχεία σε όλο τον κύκλο ζωής του, από το σχεδιασμό και την κατασκευή έως τη λειτουργία και τον τελικό παροπλισμό.

Αυτή η συνεχής επέκταση και ενίσχυση του BIM προκύπτει από την ενεργό συμμετοχή και τη συμβολή όλων των ενδιαφερομένων στη διαδικασία κατασκευής, όχι μόνο των αρχιτεκτόνων [22,23]. Το BIM προωθεί ένα είδος αυτοματοποιημένου συντονισμού και συνεργασίας που προηγουμένως ήταν ανέφικτο στον ευρύτερο κατασκευαστικό κλάδο λόγω των περιορισμών τόσο των διαθέσιμων εργαλείων όσο και των προθέσεων των σχεδιαστών. Επιπλέον, η ικανότητα προσομοίωσης διαδικασιών κατασκευής μέσα σε ένα ψηφιακό μοντέλο ενσωματώνει λειτουργίες που συχνά αναφέρονται ως 4D και 5D. Η τέταρτη διάσταση προσθέτει την πτυχή του χρόνου, σχεδιάζοντας τη διάρκεια, τις φάσεις και τη συνολική χρονική εξέλιξη ενός έργου. Εν τω μεταξύ, η πέμπτη διάσταση συνήθως αφορά την εκτίμηση κόστους, εμπλουτίζοντας περαιτέρω τη χρησιμότητα του BIM στη διαχείριση περιεκτικών λεπτομερειών του έργου.

Αυτές οι τεχνολογίες όχι μόνο συγχωνεύουν τις έννοιες της δημιουργικότητας και της καινοτομίας με την απόδοση και την αποτελεσματικότητα, αλλά ενσωματώνουν επίσης προσομοιώσεις κόστους και υλικού, οι οποίες είναι όλες ψηφιακά τελειοποιημένες μέχρι να φτάσουν στη βελτιστοποίηση. Αυτή η πρόοδος μειώνει σημαντικά την εμφάνιση δαπανηρών σφαλμάτων ή συγκρούσεων στο εργοτάξιο, διασφαλίζοντας ότι τα πιθανά ζητήματα εντοπίζονται και επιλύονται κατά τη φάση του σχεδιασμού.

Η δυνατότητα μεταφοράς ψηφιακών δεδομένων απευθείας στους κατασκευαστές απλοποιεί την κατανόηση και την ερμηνεία των σχεδίων, επιτυγχάνοντας μια προσέγγιση «μηδενικής ανοχής» σε αποκλίσεις σχεδιασμού και κατασκευής από το ψηφιακό μοντέλο στην υλοποιημένη μορφή. Τα ψηφιακά μοντέλα που χρησιμοποιούνται είναι εγγενώς ρεαλιστικά. Σχεδιασμένα ως ακριβείς τρισδιάστατες ιδέες, αυτά τα μοντέλα δοκιμάζονται, αναθεωρούνται και βελτιστοποιούνται σε έναν εικονικό χώρο, απαιτώντας μόνο τη μετάφρασή τους στον φυσικό κόσμο.

Επιπλέον, εάν οι διαδικασίες παραγωγής μπορούν τώρα να ελέγχονται μέσω ενός ενιαίου μοντέλου - μιας βιβλιοθήκης δεδομένων που λαμβάνει εισόδους από διάφορες πηγές - οι βελτιστοποιήσεις σχεδιασμού μπορούν να αξιολογηθούν και να ενσωματωθούν από τα πρώτα στάδια ανάπτυξης ενός έργου. Αυτή η ικανότητα επιτρέπει στους σχεδιαστές να προσαρμόζονται σε υλικά και γεωμετρικούς παράγοντες και να διαχειρίζονται ζητήματα χρονισμού, όπως η αλληλουχία κατασκευής, εμποτίζοντας αποτελεσματικά τις σχεδιασμένες φόρμες με τα επιθυμητά χαρακτηριστικά. Ουσιαστικά, η διαδικασία σχεδιασμού είναι ταυτόχρονα και μελέτη στην κατασκευή κτιρίων. Ο σχεδιαστής, ιδιαίτερα ο αρχιτέκτονας, αναμένεται όλο και περισσότερο να σκέφτεται σαν οικοδόμος. Η BIM υποστηρίζει αυτή τη μετατόπιση, προκαλώντας και βοηθώντας τους αρχιτέκτονες στην υιοθέτηση αυτού του ενοποιητικού ρόλου, όπου οι σχεδιαστικές εκτιμήσεις είναι άρρηκτα συνδεδεμένες με πρακτικά κατασκευαστικά ζητήματα.

### **Αρχιτεκτονική Γεωμετρία.**

Η γεωμετρία ήταν από καιρό ένα θεμελιώδες στοιχείο της αρχιτεκτονικής γνώσης, που εκδηλώνεται κυρίως ως σχέδια βασισμένα σε κανόνες στην εικονιστική γεωμετρία, αν και παραδοσιακά δεν αποτελούσε ερευνητικό πεδίο. Ωστόσο, η έλευση του ψηφιακού σχεδιασμού άνοιξε άνευ προηγουμένου ευκαιρίες στους σύγχρονους αρχιτέκτονες να πειραματιστούν με γεωμετρικές ελεύθερης μορφής, σηματοδοτώντας μια ριζική απόκλιση από τα προηγούμενα πρότυπα.

Η εισαγωγή αριθμητικά ελεγχόμενων μηχανημάτων και τεχνολογιών ψηφιακής παραγωγής σε τομείς όπως η αυτοκινητοβιομηχανία και η βιομηχανία αεροσκαφών έχει οδηγήσει σε σημαντική έρευνα για κατάλληλες μαθηματικές αναπαραστάσεις και αλγοριθμικές λύσεις. Οι γνώσεις που αποκτήθηκαν από αυτές τις μελέτες τώρα στηρίζουν το προηγμένο λογισμικό τρισδιάστατης σχεδίασης που χρησιμοποιείται σήμερα. Οι αρχιτέκτονες αξιοποιούν όλο και περισσότερο αυτές τις τεχνολογίες τα τελευταία χρόνια για αρχιτεκτονικό σχεδιασμό και κατασκευή, οδηγώντας σε μοναδικές προκλήσεις[15,19]. Οι αρχιτεκτονικές εφαρμογές

συχνά διαφέρουν από τη βιομηχανική τους προέλευση όσον αφορά την αισθητική, τις δομικές εκτιμήσεις και τις μεθοδολογίες κατασκευής.

Ο Helmut Pottmann προτείνει ότι η αναδυόμενη ερευνητική περιοχή προσαρμοσμένη στις αρχιτεκτονικές εφαρμογές θα μπορούσε να ονομαστεί «αρχιτεκτονική γεωμετρία». Αυτός ο τομέας εστιάζει στην ανάπτυξη νέων ψηφιακών εργαλείων που όχι μόνο βοηθούν στη φάση του αρχιτεκτονικού σχεδιασμού, αλλά ενσωματώνουν επίσης κρίσιμες πτυχές της πραγματικής κατασκευής, όπως υλικά, τεχνολογίες κατασκευής και δομικές ιδιότητες. Η αρχιτεκτονική γεωμετρία διευκολύνει έτσι μια πλήρως ψηφιακή ροή εργασίας από το σχεδιασμό έως την κατασκευή, ιδιαίτερα για πολύπλοκες γεωμετρίες.

Η αρχιτεκτονική γεωμετρία συχνά απαιτεί επίσης μια φάση επανασχεδιασμού γνωστή ως εξορθολογισμός. Αυτή η φάση υπολογίζει εκ νέου τη γεωμετρία για να προσκολληθεί όσο το δυνατόν περισσότερο στον αρχικό σχεδιασμό, ενώ πληροί συγκεκριμένες απαιτήσεις σχετικά με τους τύπους πλαισίου, την ομοιομορφία της επιφάνειας, την αισθητική, το κόστος παραγωγής και άλλους παράγοντες. Το πεδίο διερευνά την ανάπτυξη αποδοτικών αλγορίθμων βελτιστοποίησης και την ενσωμάτωσή τους σε φιλικά προς τον χρήστη εργαλεία εξορθολογισμού [26,28].

Επιπλέον, η τάση προς σύνθετα γεωμετρικά σχέδια επιβάλλει σημαντικές απαιτήσεις στην αρχιτεκτονική εκπαίδευση. Η επάρκεια χρήσης εξελιγμένου λογισμικού γεωμετρικού σχεδιασμού απαιτεί βαθύτερη γνώση της γεωμετρίας από ό,τι προσφέρεται παραδοσιακά στα μαθήματα σχεδίασης και παρουσίασης, κάτι που απαιτεί βαθύτερη κατανόηση για την πλήρη αξιοποίηση των δυνατοτήτων των τεχνολογιών παραμετρικού σχεδιασμού.

### **3.5 Οι απαιτήσεις της τρισδιάστατης εκτύπωσης κατοικιών σκυροδέματος**

Η αξιοποίηση της τρισδιάστατης εκτύπωσης στις κατασκευές έχει επιτύχει αξιοσημείωτα αποτελέσματα με τη χρήση του σκυροδέματος ως πρώτης ύλης από την κινεζική εταιρεία Winsun. Τον Μάρτιο του 2014, η εταιρεία Winsun ανακοίνωσε ένα σημαντικό επίτευγμα: την εκτύπωση δέκα μονώροφων σπιτιών μέσα σε ένα 24ωρο χρησιμοποιώντας έναν τρισδιάστατο εκτυπωτή που κατασκευάστηκε ειδικά από την εταιρεία [19,23]. Αυτά τα σπίτια, κάποτε τυπωμένα σε επίπεδες φόρμες για τοίχους και πλάκες, συναρμολογήθηκαν επί τόπου. Αυτή η μέθοδος μείωσε σημαντικά το κόστος κατασκευής, με κάθε σπίτι να υπολογίζεται στα 5.000 δολάρια. Αυτά τα σπίτια σχεδιάστηκαν επίσης για να ενσωματώνουν υδραυλικά, ηλεκτρικά συστήματα και μόνωση μετά τη συναρμολόγηση.

Μετά από αυτό, η Winsun συνέχισε να επεκτείνει τις δυνατότητές της, κατασκευάζοντας μια βίλα 1.100 τετραγωνικών μέτρων και μια πενταώροφη πολυκατοικία με πολλές μονάδες, χρησιμοποιώντας την ίδια τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης. Αυτές οι κατασκευές έχουν γίνει προσβάσιμες στο κοινό στο βιομηχανικό εκθεσιακό πάρκο της πόλης Suzhou στην Κίνα. Μέχρι σήμερα, η Winsun έχει αναλάβει και έχει ολοκληρώσει επιτυχώς πολλές παραγγελίες για επιπλέον κτίρια με τρισδιάστατη εκτύπωση.

Ο εκτυπωτής που χρησιμοποιείται σε αυτές τις κατασκευές είναι αρκετά μεγάλος με 6,6 μέτρα ύψος, 10 μέτρα πλάτος και 40 μέτρα μήκος. Λειτουργεί χρησιμοποιώντας ένα μείγμα από δομικά απόβλητα, βιομηχανικά υπολείμματα και ίνες γυαλιού, αναμειγμένα με τσιμέντο ταχείας πήξης και ειδικό σκληρυντικό. Αυτό το μείγμα εξωθείται μέσω του άκρου του εκτυπωτή με ακριβές σχέδιο και απαιτεί 24 ώρες για να στεγνώσει [10,17]. Η διαδικασία ξεκινά με ένα σχέδιο CAD, το οποίο κατευθύνει τον ελεγχόμενο από υπολογιστή βραχίονα με έναν εξωθητήρα για να εναποθέσει το υλικό. Συγκεκριμένα, οι τοίχοι είναι τυπωμένοι με ένα κοίλο σχέδιο "ζιγκ-ζαγκ" στο εσωτερικό, παρέχοντας δομική ενίσχυση, απόδοση υλικού και χώρο για μόνωση.

Η κατασκευή της βίλας των 105.000 δολαρίων αποτελεί παράδειγμα της αποτελεσματικότητας της τρισδιάστατης εκτύπωσης στις σύγχρονες κατασκευές, απαιτώντας μόνο οκτώ άτομα να εργάζονται κατά τη διάρκεια ενός μήνα. Ο Zheng Jian εξηγεί ότι, συγκριτικά, η χρήση παραδοσιακών μεθόδων κατασκευής θα απαιτούσε τριάντα εργάτες σε μια περίοδο τριών μηνών, με το κόστος να διπλασιάζεται δυνητικά. Αυτή η καινοτόμος μέθοδος κατασκευής αποδεικνύεται όχι μόνο οικονομικά επωφελής αλλά και φιλική προς το περιβάλλον λόγω της χρήσης ανακυκλώσιμων υλικών.

Ο Ma Yihe υπογραμμίζει τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της παραδοσιακής κατασκευής, σημειώνοντας ότι τα βιομηχανικά συντρίμια από τις κατεδαφίσεις κτιρίων συνήθως βλάπτουν το περιβάλλον. Ωστόσο, η τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης προσφέρει μια βιώσιμη εναλλακτική, επιτρέποντας την ανακύκλωση τέτοιων υπολειμμάτων σε νέα δομικά υλικά. Αυτή η προσέγγιση όχι μόνο παρέχει ένα ασφαλέστερο περιβάλλον εργασίας για τους εργάτες, αλλά μειώνει επίσης σημαντικά το κόστος παραγωγής, παρουσιάζοντας διπλό πλεονέκτημα στη μείωση τόσο των περιβαλλοντικών επιπτώσεων όσο και των οικονομικών δαπανών.



**Σχήμα 3-2. Κατασκευή με τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης από την εταιρεία WinSun**

Η προσέγγιση που συζητήθηκε βασίζεται θεμελιωδώς σε οικονομικούς λόγους, επιδεικνύοντας αξιοσημείωτα επιτεύγματα διευκολύνοντας την ταχεία κατασκευή κτιρίων. Αυτή η ικανότητα έχει τη δυνατότητα να αντιμετωπίσει τις ελλείψεις κατοικιών σε αναπτυσσόμενες περιοχές ή να παρέχει άμεση στέγαση σε σενάρια περιβαλλοντικών καταστροφών ή προσφυγικών κρίσεων. Επιπλέον, τα οικονομικά οφέλη ενισχύονται από τη χρήση ανακυκλώσιμων υλικών, τα οποία μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν μετά την κατεδάφιση, προσθέτοντας ένα επίπεδο βιωσιμότητας στη διαδικασία κατασκευής. Ωστόσο, υπάρχουν ανησυχίες σχετικά με την εξάρτηση αυτής της καινοτόμου μεθόδου σε αρχιτεκτονικά στυλ που απηχούν τη συμβατική αρχιτεκτονική του προηγούμενου αιώνα ή τον νεοκλασικισμό. Αυτή η τάση πιθανότατα προκύπτει επειδή η κύρια εστίαση της εταιρείας, όπως σημειώνει ο Ma, είναι στην πρόοδο της κατασκευαστικής τεχνολογίας και όχι στην πρωτοπορία νέων αρχιτεκτονικών στυλ. «Το μέλλον της Winsun είναι ως εταιρεία τεχνολογίας, που προωθεί τις νέες τεχνολογίες» [2,13].



**Σχήμα 3-3. Δοκιμαστικές ενέργειες τρισδιάστατης εκτύπωσης σε ερευνητικό στούντιο**

Μια ευρύτερη ανησυχία που διατυπώθηκε από ειδικούς, όπως ο καθηγητής Austin περιλαμβάνει την αμφισβήτηση του κατά πόσον η τρισδιάστατη εκτύπωση με σκυρόδεμα είναι η καταλληλότερη για την παραγωγή βασικών δομικών στοιχείων ή ολόκληρων κτιρίων. Ενώ η τεχνολογία δεν θεωρείται πιθανό να κυριαρχήσει στην αγορά κατασκευής πολυτελών κατοικιών, ιδιαίτερα στον αναπτυσσόμενο κόσμο όπου η εργασία είναι φθηνή και οι παραδοσιακές μέθοδοι που χρησιμοποιούν τοπικά υλικά είναι αποτελεσματικές εδώ και αιώνες, η ιδέα της εγκατάστασης μεγάλων μηχανών επί τόπου για την εκτύπωση ολόκληρων σπιτιών φαίνεται μη πρακτικό. Αντίθετα, η χρήση αυτής της τεχνολογίας για την εκτύπωση ποικίλων γεωμετρικών στοιχείων κτιρίων παρουσιάζει μια ελκυστική και σύντομα υλοποιήσιμη στρατηγική. Παρά τους πιθανούς περιορισμούς στην κατασκευή πλήρους κλίμακας, η ταχύτητα και η σχέση κόστους-αποτελεσματικότητας αυτής της μεθόδου κατασκευής παραμένουν πολύτιμα, ειδικά για την παραγωγή μερών κτιρίων γρήγορα και οικονομικά, κάτι που είναι ζωτικής σημασίας όταν χρειάζονται γρήγορες και οικονομικές λύσεις στέγασης [26,29].

Το ερευνητικό στούντιο FABbots υιοθετεί μια μοναδική προσέγγιση στην τρισδιάστατη εκτύπωση, η οποία περιλαμβάνει την τροποποίηση των υπαρχόντων ρομποτικών μηχανημάτων για τη χρήση τεχνικών κατασκευής προσθέτων απευθείας στα εργοτάξια. Αυτή η προσέγγιση δίνει έμφαση στη χρήση υλικών τοπικής προέλευσης, στην προσαρμογή των σύγχρονων μηχανικών εργαλείων και στην ανάπτυξη λογισμικού κατά παραγγελία. Αυτή η σύνθεση της επιστήμης των υλικών, του σχεδιασμού μηχανών και του υπολογιστικού σχεδιασμού στοχεύει στη σφυρηλάτηση αρχιτεκτονικών λύσεων που αξιοποιούν πλήρως τις δυνατότητες αυτών των κλάδων.

Αυτή η καινοτόμος μέθοδος έχει ως αποτέλεσμα συστήματα μηχανής-υλικού που επιτρέπουν τη δημιουργία αρχιτεκτονικών μοναδικών σε μεθόδους παραγωγής πρόσθετων, που χαρακτηρίζονται από πολύπλοκες κατανομές υλικών που προσφέρουν πολυλειτουργικές δυνατότητες. Αυτή η ακρίβεια στην παραγωγή και στην εκτέλεση των τυπωμένων κωδικών βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στις λειτουργικές ικανότητες του μηχανήματος, σε συνδυασμό με μια ενδελεχή ανάλυση των ιδιοτήτων των υλικών και των περιβαλλοντικών συνθηκών. Σε αντίθεση με την ομαλή και πολυεπίπεδη εμφάνιση που συνήθως αναμένεται από την εκτύπωση 3D υψηλής ακρίβειας, οι δομές που παράγονται από τα FABbots παρουσιάζουν συχνά ένα πιο ανάγλυφο και φυσικό φινίρισμα.

Το απρόβλεπτο των αποτελεσμάτων προέρχεται από μια σχολαστική εκτέλεση του κώδικα μηχανής που αλληλεπιδρά με τις εγγενείς ιδιότητες των υλικών κάτω από ποικίλες περιβαλλοντικές συνθήκες [17,23]. Η φυσική μορφή αυτών των κατασκευών επηρεάζεται από

δύο βασικούς παράγοντες: τη χρήση άφθονων, φυσικών οικοδομικών υλικών όπως ο πηλός ή η άμμος, τα οποία είναι ετερογενή και αντιδρούν διαφορετικά στις διαδικασίες εναπόθεσης, σκλήρυνσης και σκλήρυνσης, και τη χρήση μηχανημάτων μεγάλης κλίμακας προσαρμοσμένων σε συγκεκριμένες εργασίες και ανταποκρίνεται σε περιβαλλοντικές μεταβλητές στο εργοτάξιο.

Αυτή η διαδικασία περιλαμβάνει συνεχείς προσαρμογές και ανατροφοδότηση στον ψηφιακό κώδικα, διευκολύνοντας μια διαδικασία γενετικού σχεδιασμού όπου η πολυπλοκότητα των υλικών, οι ιδιαιτερότητες του μηχανήματος και η λογική της εκτύπωσης οδηγούν την εμφάνιση του σχεδίου. Όπως τονίστηκε από τη Marta Malé-Alemanly και τον Jordi Portell, η FABbots υποστηρίζει μια προσθετική προσέγγιση κατασκευής που αγκαλιάζει τις ενσωματωμένες ανοχές και την απρόβλεπτη ομορφιά των αναδυόμενων μορφών, εκτιμώντας την υλική έκφραση και την υφή τους. Είναι ενδιαφέρον ότι οι τεχνικές που αναπτύχθηκαν από τα FABbots εναρμονίζονται με το φυσικό περιβάλλον λόγω της επιλογής των υλικών και των μεθόδων οργανικής εναπόθεσής τους [12,16]. Αυτές οι κατασκευές εμφανίζονται ως φυσικοί σχηματισμοί και όχι ως βιομηχανικά προϊόντα, γεγονός που τις καθιστά ιδιαίτερα κατάλληλες για ενσωμάτωση σε αγροτικές περιοχές.

Το Protohouse 2.0, που παρουσιάζεται στο σχήμα 3-4 αντιπροσωπεύει μια νέα προσέγγιση στη σφαίρα της τρισδιάστατης εκτύπωσης, εστιάζοντας στην εκτύπωση ινών υλικών εκτύπωσης και στο πλέξιμο μεταξύ τους και όχι στις παραδοσιακές τεχνικές διαστρωμάτωσης. Αναπτύχθηκε από τον αρχιτεκτονικό όμιλο Softkill Design με έδρα το Λονδίνο, αυτή η μονώροφη κατασκευή μιμείται την ινώδη υφή των οστών και κατασκευάζεται με πλαστικό, τυπωμένο σε τμήματα σε ένα εργοστάσιο πριν συναρμολογηθεί επί τόπου.

Ο σχεδιασμός του Protohouse 2.0 χρησιμοποιεί έναν αλγόριθμο εμπνευσμένο από την ανάπτυξη των οστών, ο οποίος τοποθετεί στρατηγικά το υλικό ως απόκριση στα αναμενόμενα φορτία και δυνάμεις. Αυτή η αλγοριθμική προσέγγιση όχι μόνο βελτιστοποιεί τη δομική ακεραιότητα, αλλά επιτρέπει επίσης στους αρχιτέκτονες να εξερευνήσουν μοναδικές αρχιτεκτονικές μορφές. Το αποτέλεσμα είναι ένα πυκνό δίκτυο ινών, καθεμία με διάμετρο 0,7 mm, που δημιουργεί μια ποικιλία υφών και επιτρέπει την ολοκληρωμένη παραγωγή διαφόρων αρχιτεκτονικών στοιχείων, συμπεριλαμβανομένων κουφωμάτων, σκαλοπατιών, επίπλων και προσόψεων. Η πορώδης φύση της κατασκευής επιτρέπει στο νερό της βροχής να διαπερνά, διασφαλίζοντας ότι η στεγανοποίηση είναι εσωτερική και όχι εξωτερική, με παραδοσιακά τζάμια που εφαρμόζονται στα κουφώματα [18,20]. Ολόκληρο το σχέδιο εκτυπώνεται σε 31 τμήματα χρησιμοποιώντας έναν μεγάλο τρισδιάστατο εκτυπωτή και στη συνέχεια μεταφέρεται στην τοποθεσία για συναρμολόγηση, η οποία δεν απαιτεί πρόσθετα εξαρτήματα ή εξαρτήματα λόγω της σύμπλεξης των τεμαχίων ινών. Η Softkill Design επέλεξε να χρησιμοποιήσει τις υπάρχουσες τεχνολογίες τρισδιάστατης εκτύπωσης με έναν σχετικά μικρό εκτυπωτή σε ελεγχόμενο εργαστηριακό περιβάλλον, μεταφέροντας μόνο τα κομμάτια στην τοποθεσία για συναρμολόγηση. Η επιλεγμένη τεχνική εκτύπωσης είναι το Selective Laser Sintering, μια διαδικασία που περιγράφεται λεπτομερώς σε προηγούμενες συζητήσεις.

Σύμφωνα με τον Aaron Silver από την ομάδα Softkill Design, η 3D εκτύπωση έχει τη δυνατότητα να παράγει οικονομικά κτίρια που χρησιμοποιούν υλικά πιο αποτελεσματικά. Προβλέπει ένα πολλά υποσχόμενο μέλλον για τη διασταύρωση της αρχιτεκτονικής και της τρισδιάστατης εκτύπωσης, τονίζοντας τη σημαντική εξοικονόμηση κόστους και την αυξημένη απόδοση που προσφέρει. Η Silver σημειώνει περαιτέρω ότι η επένδυση κτιρίων και η στέγη θα μπορούσαν να εκτυπωθούν ως εύκαμπτα υφάσματα για να περιβάλουν τις κατασκευές. Η ομάδα αναπτύσσει επίσης εμπριμέ κουρτίνες που θα μπορούσαν να χρησιμεύσουν ως εσωτερικές μεμβράνες ή εξωτερικά αδιάβροχα πάνελ.



**Σχήμα 3-4. Protohouse 2.0**

Το Protohouse 2.0 αποτελεί παράδειγμα της ιδέας της μίμησης φυσικών διεργασιών στην αρχιτεκτονική για τη βελτιστοποίηση της χρήσης και της αποτελεσματικότητας των υλικών [9,13]. Αυτή η καινοτόμος προσέγγιση όχι μόνο ωθεί τα όρια της ψηφιακής κατασκευής αλλά εισάγει επίσης μια χαρακτηριστική μέθοδο τρισδιάστατης εκτύπωσης, με αποτέλεσμα μια δομή που αποκλίνει σημαντικά από τις παραδοσιακές αρχιτεκτονικές μορφές. Αυτός ο ριζοσπαστικός σχεδιασμός προκαλεί σκέψεις σχετικά με την εφαρμογή του σε όλες τις αρχιτεκτονικές προκλήσεις και προτείνει ένα μέλλον όπου η αρχιτεκτονική, βαθιά επηρεασμένη από υπολογιστικά εργαλεία, μπορεί να φαίνεται πολύ διαφορετική από τις σημερινές δομές.

Η ερευνητική ομάδα του Mediated Matter στο Ινστιτούτο Τεχνολογίας της Μασαχουσέτης (MIT) εμβαθύνει σε «υπολογιστικές στρατηγικές για μορφογένεση με κατασκευή εμπνευσμένη από τη βιολογία», όπως περιγράφεται στον ιστότοπό τους. Η έρευνά τους περιλαμβάνει την πρόοδο των τεχνολογιών τρισδιάστατης εκτύπωσης που εφαρμόζονται σε αρχιτεκτονικές χρήσεις, συμπεριλαμβανομένης της ανάπτυξης υλικών με διαβαθμισμένες ιδιότητες. Εμπνευσμένη από τη φύση, η Neri Oxman και η ομάδα της μελέτησαν πώς οι μεταξοσκώληκες κατασκευάζουν τα κουκούλια τους, παρατηρώντας αυτά τα πλάσματα ως φυσικούς τρισδιάστατους εκτυπωτές. Οι μεταξοσκώληκες δημιουργούν τα κουκούλια τους κινώντας ρυθμικά το κεφάλι τους σε σχέδια, τοποθετώντας ίνες μεταξιού για να σχηματίσουν μια δομή. Περιέργως, μπορούν να αλλάξουν τις υλικές ιδιότητες του μεταξιού, καθιστώντας το πιο απαλό εσωτερικά και πιο σκληρό εξωτερικά [29]. Επιπλέον, κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας, ο μεταξοσκώληκας εκκρίνει σερικίνη, μια κολλώδη ουσία που δεσμεύει τις ίνες του μεταξιού, στερεοποιώντας τη δομή του κουκούλι.

Αναγνωρίζοντας τους παραλληλισμούς μεταξύ αυτής της φυσικής διαδικασίας και της συνθετικής τρισδιάστατης εκτύπωσης, η ερευνητική ομάδα πειραματίστηκε προσαρτώντας μικροσκοπικούς μαγνήτες στα κεφάλια των μεταξοσκωλήκων για να παρακολουθεί τις κινήσεις τους καθώς έφτιαχναν τα κουκούλια τους. Τα δεδομένα που συλλέχθηκαν από αυτές τις κινήσεις στη συνέχεια μεταφράστηκαν σε ένα σύστημα που έλεγχε έναν 3D εκτυπωτή εξοπλισμένο με ρομποτικό βραχίονα, επιτρέποντας την εξερεύνηση της βιολογικής δομής σε ενισχυμένη κλίμακα.

Η παραδοσιακή τρισδιάστατη εκτύπωση συχνά περιορίζεται από το μεταλλικό πλαίσιο του εκτυπωτή, το οποίο περιορίζει την κλίμακα και την πολυπλοκότητα των αντικειμένων που μπορούν να εκτυπωθούν. Για να ξεπεράσει αυτούς τους περιορισμούς και να επιτρέψει μεγαλύτερη ελευθερία στην εκτύπωση, η ομάδα του Oxman επέλεξε να αντικαταστήσει το συμβατικό πλαίσιο με ένα ρομποτικό βραχίονα ικανό για κίνηση έξι κατευθύνσεων. Αυτή η καινοτομία διευκολύνει την εκτύπωση ελεύθερης μορφής μεγάλης κλίμακας χωρίς την ανάγκη πρόσθετων δομών στήριξης. Τέτοιες εξελίξεις υπογραμμίζουν τη δυνατότητα των τεχνολογιών



τρισδιάστατης εκτύπωσης να ενσωματώνουν πολύπλοκες, βιολογικά εμπνευσμένες τεχνικές και υλικά.

#### **4D Printing, μια εφαρμογή εξελικτικής κατασκευής.**

Το Εργαστήριο Αυτοσυναρμολόγησης στο Ινστιτούτο Τεχνολογίας της Μασαχουσέτης (MIT) είναι αφιερωμένο στην πρωτοπορία στην ανάπτυξη αυτοσυναρμολογούμενων, προγραμματιζόμενων υλικών και των σχετικών τεχνολογιών για κατασκευές και άλλες βιομηχανικές εφαρμογές. Αυτή η πρωτοβουλία οδήγησε στη δημιουργία πολυάριθμων προτύπων για αυτοσυναρμολογούμενα, αυτο-αναδιαμορφώσιμα και προγραμματιζόμενα υλικά [11,26]. Ωστόσο, πολλά από αυτά τα υλικά απαιτούν ένα πρόσθετο βήμα στη διαδικασία κατασκευής τους για την ενσωμάτωση των δυνατοτήτων μετασχηματισμού και της ενέργειας που απαιτείται για τέτοιες αλλαγές, χρησιμοποιώντας εξαρτήματα όπως μαγνήτες, ελαστικά νήματα, σύρματα νικελίου και γρανάζια.

Αυτή η πρόκληση προώθησε μια συνεργασία με την Stratasys Ltd, ηγέτη στην εκτύπωση πολλαπλών υλικών, με αποκορύφωμα την ανάπτυξη αυτού που ονομάζουν "4D Printing". Αυτή η καινοτομία στοχεύει να φέρει επανάσταση στην κατασκευή προσθέτων, προσφέροντας βελτιωμένα, πολυλειτουργικά συστήματα υλικών. Η 4D Printing εισάγει μια δυναμική διαδικασία κατασκευής με την οποία τα υλικά που εκτυπώνονται μπορούν να μεταμορφωθούν με την πάροδο του χρόνου ή να μετατραπούν αμέσως μετά την εκτύπωση σε προκαθορισμένα συστήματα υλικών. Αυτή η ικανότητα ενσωματώνει μια ροή από την εννοιολόγηση στην υλοποίηση, με λειτουργικότητα εγγενώς ενσωματωμένη στα υλικά. Η τέταρτη διάσταση σε αυτό το πλαίσιο ορίζεται ως μετασχηματισμός με την πάροδο του χρόνου, υπογραμμίζοντας ότι οι τυπωμένες δομές δεν είναι απλώς στατικά αντικείμενα αλλά είναι προγραμματικά ενεργές και ικανές για ανεξάρτητο μετασχηματισμό.

Η 4D Printing χρησιμοποιεί υλικά και δυνατότητες εκτυπωτή για να μετατρέψει οποιοδήποτε μονοδιάστατο νήμα ή δισδιάστατη επιφάνεια σε τρισδιάστατες μορφές ή να μεταμορφώσει ένα τρισδιάστατο σχήμα σε ένα άλλο. Αξιοσημείωτο είναι ότι αυτός ο μετασχηματισμός ενεργοποιείται μόνο από το νερό, παρουσιάζοντας νέες δυνατότητες κατασκευής και παραγωγής.

Κεντρικό στοιχείο αυτής της τεχνολογίας είναι ο εκτυπωτής, το υλικό και το γεωμετρικό «πρόγραμμα». Ο εκτυπωτής που χρησιμοποιείται είναι ικανός για εκτύπωση PolyJet που χειρίζεται πολλά υλικά, από άκαμπτα έως μαλακά πλαστικά και διαφανή υλικά, όλα με ακριβή έλεγχο της δυναμικής των άκρων και της εναπόθεσης υλικού [17,29]. Το δυναμικό υλικό που αναπτύχθηκε από την ερευνητική ομάδα της Stratasys είναι ένα υδρόφιλο πολυμερές που διαστέλλεται κατά 150% κατά την απορρόφηση νερού. Κατά τη διάρκεια της εκτύπωσης, ένα άκαμπτο πολυμερές υλικό που δομεί και θέτει τα όρια για το δίπλωμα εναποτίθεται παράλληλα με το ενεργό υλικό. Η κεντρική πτυχή της 4D εκτύπωσης έγκειται στο γεωμετρικό πρόγραμμα που έχει σχεδιαστεί για τα υλικά, επιτρέποντας αλλαγές κατάστασης εγγενείς στα ίδια τα υλικά.

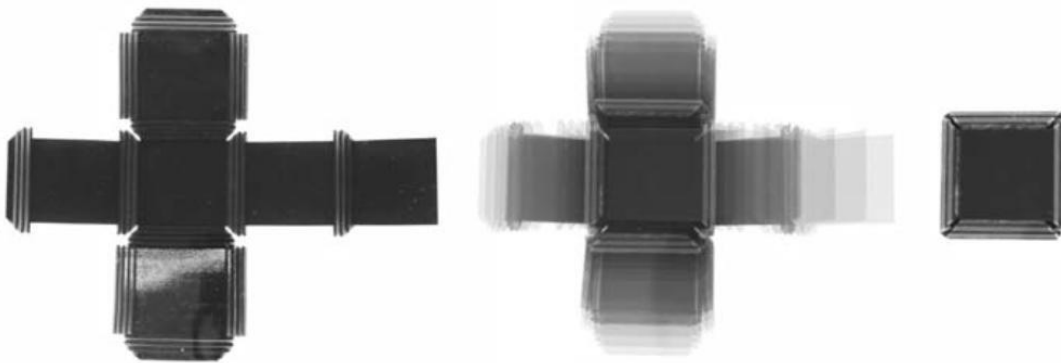
Κατά την εκτύπωση, το υλικό διατηρεί ένα αρχικό σχήμα που, κατά την επαφή με το νερό, ενεργοποιεί το ενεργό υλικό να διογκωθεί και το άκαμπτο υλικό να λυγίσει μέχρι να φτάσει σε μια προκαθορισμένη τελική διαμόρφωση. Αυτός ο γεωμετρικός προγραμματισμός των άκαμπτων και ενεργών υλικών είναι αναπόσπαστο μέρος της δομής, παρέχοντας την απαραίτητη ενέργεια ενεργοποίησης για μετασχηματισμό από τη μια μορφή στην άλλη [22].

Η έλευση των προγραμματιζόμενων έντυπων υλικών πρόκειται να μεταμορφώσει δραματικά το τοπίο των διαδικασιών σχεδιασμού και κατασκευής προϊόντων. Αυτά τα προηγμένα υλικά έχουν σχεδιαστεί για να προσαρμόζονται δυναμικά στις συγκεκριμένες ανάγκες ενός χρήστη, ανταποκρινόμενοι στα βιομετρικά στοιχεία, τη θερμοκρασία του σώματος και τις εσωτερικές πιέσεις. Ομοίως, αυτά τα καινοτόμα προϊόντα θα έχουν την ικανότητα να προσαρμόζονται στις περιβαλλοντικές αλλαγές όπως υγρασία, θερμοκρασία, πίεση, υψόμετρο και ήχος, βελτιώνοντας τη λειτουργικότητα και την ενσωμάτωσή τους με το περιβάλλον.

Αυτή η προσαρμοστικότητα επιτρέπει μεθόδους παραγωγής που προηγουμένως ήταν αδιανόητες, με υλικά που διαθέτουν την εγγενή ενέργεια που απαιτείται για αυτοσυναρμολόγηση, αυτο-μεταρρύθμιση, μετάλλαξη και ακόμη και αναπαραγωγή. Τέτοιες δυνατότητες υπόσχονται επίσης να φέρουν επανάσταση στα logistics. Τα υλικά μπορούν να μεταφερθούν σε συμπυκνωμένες μορφές, ενεργοποιώντας μετά την παράδοση για να

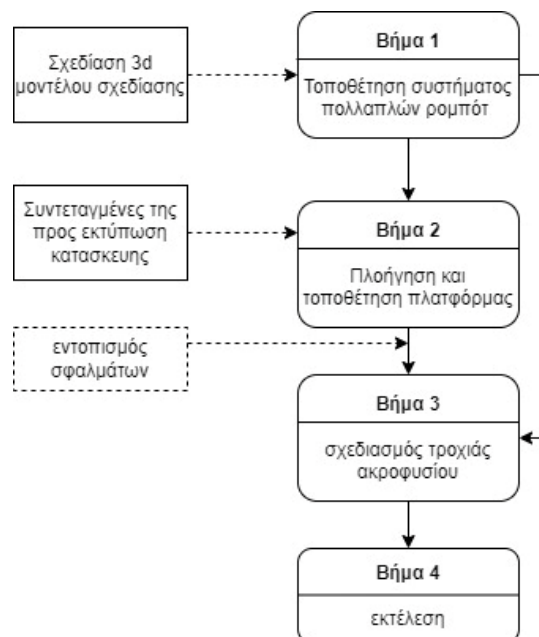
επεκταθούν στον πλήρη όγκο και τη λειτουργικότητά τους, μειώνοντας έτσι σημαντικά τους περιορισμούς όγκου.

Επιπλέον, η βιωσιμότητα αυτών των υλικών επεκτείνει τον κύκλο ζωής τους. Αντί να απορρίπτονται σε περίπτωση βλάβης, αυτά τα υλικά έχουν τη δυνατότητα αυτοδιάγνωσης και επισκευής, προσαρμόζοντας τις νέες απαιτήσεις με την πάροδο του χρόνου. Καθώς γερνούν, μπορούν να αποσυναρμολογηθούν μόνοι τους, διασπώνται στα θεμελιώδη συστατικά τους για πλήρη ανακύκλωση. Αυτή η διαδικασία διασφαλίζει ότι μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν για τη δημιουργία νέων προϊόντων, υποστηρίζοντας έτσι μια κυκλική οικονομία.



**Σχήμα 3-5. Απεικόνιση έντυπων υλικών**

Οι επιπτώσεις της εξελικτικής κατασκευής και των προγραμματιζόμενων ενεργών υλικών είναι βαθιές, προσφέροντας συναρπαστικές προοπτικές για την ανάπτυξη εξατομικευμένων και διαδραστικών προϊόντων [24]. Αυτή η τεχνολογία υπόσχεται όχι μόνο σε καταναλωτικά προϊόντα, αλλά και στην κατασκευή αυτοσυναρμολογούμενων δομικών στοιχείων και στην επανάσταση στις βιομηχανίες μεταφορών και κατασκευής, δείχνοντας προς ένα μέλλον όπου τα υλικά και τα προϊόντα είναι εγγενώς πιο προσαρμοστικά, βιώσιμα και έξυπνα.



**Σχήμα 3-6. Διαδικασία εκτύπωσης 3DCP μέσω εκτυπωτών σμήνους**

### **Απαιτήσεις 3DCP**

Η επιτυχής εφαρμογή της τρισδιάστατης εκτύπωσης σκυροδέματος στον κατασκευαστικό τομέα προϋποθέτει την εκπλήρωση συγκεκριμένων απαιτήσεων. Αρχικά, το σκυρόδεμα πρέπει να παρουσιάζει ισορροπία μεταξύ ρευστότητας και σταθερότητας. Συγκεκριμένα, πρέπει να είναι αρκετά ρευστό ώστε να μπορεί να μεταφέρεται και να εξωθείται αποτελεσματικά, αλλά και αρκετά σταθερό για να διατηρεί το σχήμα του και να υποστηρίξει τα επόμενα στρώματα κατά τη διαδικασία εκτύπωσης [1].

Επιπλέον, η ανάπτυξη μεθόδων για την ενσωμάτωση οπλισμού κατά τη διάρκεια της εκτύπωσης είναι ζωτικής σημασίας για την ενίσχυση της αντοχής των δομών. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί μέσω παραδοσιακών τεχνικών οπλισμού ή μέσω καινοτόμων προσεγγίσεων, όπως η ενσωμάτωση ινών στο μείγμα σκυροδέματος [5].

Η περιβαλλοντική βιωσιμότητα αποτελεί επίσης κρίσιμη παράμετρο. Η τρισδιάστατη εκτύπωση σκυροδέματος πρέπει να συμβάλλει στη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, όπως η μείωση των αποβλήτων και η ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης υλικών, προκειμένου να είναι συμβατή με τις αρχές της αιεφόρου ανάπτυξης [3].

Η ακρίβεια και ο αυτοματισμός στις κατασκευαστικές διαδικασίες είναι απαραίτητες για την αποτελεσματική εφαρμογή της τρισδιάστατης εκτύπωσης. Η χρήση αυτοματισμών και ψηφιακών μοντέλων (CAD) διασφαλίζει την ακριβή τοποθέτηση του σκυροδέματος και την αποτελεσματική διαχείριση των διαδικασιών κατασκευής [4].

Επιπλέον, οι ρεολογικές ιδιότητες του σκυροδέματος, όπως η τάση διαρροής και το πλαστικό ιξώδες, πρέπει να είναι κατάλληλες για την τρισδιάστατη εκτύπωση, ώστε να εξασφαλίζεται η εκτυπωσιμότητα και η δομική ακεραιότητα των κατασκευών. Οι ιδιότητες αυτές είναι ζωτικής σημασίας για την αποφυγή βλαβών στα υποκείμενα στρώματα και για τη διατήρηση της συνοχής και της ανθεκτικότητας των τυπωμένων δομών [16].

Εξίσου σημαντική είναι η ολοκληρωμένη σχεδίαση των τρισδιάστατα εκτυπωμένων κατοικιών. Οι δομές πρέπει να είναι σχεδιασμένες έτσι ώστε να ενσωματώνουν υδραυλικά και ηλεκτρικά συστήματα, καθώς και μόνωση, απρόσκοπτα μέσα από τους τοίχους κατά τη διαδικασία εκτύπωσης [10].

Τέλος, η τρισδιάστατη εκτύπωση σκυροδέματος πρέπει να είναι οικονομικά αποδοτική. Η μείωση του κόστους κατασκευής σε σύγκριση με τις παραδοσιακές μεθόδους, η αύξηση της παραγωγικότητας και η μείωση του χρόνου κατασκευής αποτελούν βασικά κριτήρια για την ευρεία αποδοχή και εφαρμογή αυτής της τεχνολογίας [15].

Η εκπλήρωση αυτών των απαιτήσεων είναι απαραίτητη για την επιτυχή ενσωμάτωση της τρισδιάστατης εκτύπωσης σκυροδέματος στις σύγχρονες κατασκευαστικές πρακτικές, προσφέροντας βιώσιμες και καινοτόμες λύσεις στον τομέα της οικοδομής.

### **Βιβλιογραφία κεφαλαίου 3**

- [1] Menges, Achim, and Sean Ahlquist. *\*AD Reader: Computational Design Thinking\**. Wiley, London, 2011.
- [2] Gramazio, Fabio, and Matthias Kohler. *\*Digital Materiality in Architecture\**. Lars Müller Publishers, Baden, 2008.
- [3] Lipson, Hod, and Melba Kurman. *\*Fabricated: the new world of 3d printing\**. Wiley, London, 2013.
- [4] Iwamoto, Lisa. *\*Digital Fabrications: Architectural and Material Techniques\**. Princeton Architectural Press, New York, 2009.
- [5] Brell-Cokcan, Sigrid, and Johannes Braumann. *\*RobArch: Robotic Fabrication in Architecture, Art, and Design\**. Springer Wien, New York, 2013.
- [6] Βενέρης, Ιωάννης. *\*Πληροφορική και Αρχιτεκτονική\**. Εκδ. Τζιόλα, Θεσσαλονίκη, 2011.
- [7] Sheil, Bob. "Design through Making: an Introduction." In *\*Architectural Design, Design through Making\**, Vol 75. Wiley, London, 2005.
- [8] Hill, Jonathan. "Building the Drawing." In *\*Architectural Design, Design through Making\**, Vol 75. Wiley, London, 2005.
- [9] Stacey, Michael. "In my Craft and Sullen Art or Sketching the Future by Drawing on the Past." In *\*Architectural Design, Design through Making\**, Vol 75. Wiley, London, 2005.

- [10] Oxman, Rivka, and Robert Oxman. "The New Structuralism, Introduction." In *\*Architectural Design, The New Structuralism\**, Vol 80. Wiley, London, 2010.
- [11] Bollinger, Klaus, Manfred Grohmann, and Oliver Tessmann. "Structured becoming: Evolutionary Processes in Design Engineering." In *\*Architectural Design, The New Structuralism\**, Vol 80. Wiley, London, 2010.
- [12] Pottmann, Helmut. "Architectural Geometry as Design Knowledge." In *\*Architectural Design, The New Structuralism\**, Vol 80. Wiley, London, 2010.
- [13] Oxman, Neri. "Structuring Materiality: Design Fabrication of Heterogeneous Materials." In *\*Architectural Design, The New Structuralism\**, Vol 80. Wiley, London, 2010.
- [14] Scheurer, Fabian. "Materializing Complexity." In *\*Architectural Design, The New Structuralism\**, Vol 80. Wiley, London, 2010.
- [15] Gramazio, Fabio, Matthias Kohler, and Silvan Oesterle. "Encoding Material." In *\*Architectural Design, The New Structuralism\**, Vol 80. Wiley, London, 2010.
- [16] Sheil, Bob. "Introduction." In *\*Architectural Design: High Definition: Zero Tolerance in Design and Production\**. Wiley, London, 2014.
- [17] Malé-Alemány and Jordi Portell. "Soft Tolerance: An Approach for Additive Construction on Site." In *\*Architectural Design: High Definition: Zero Tolerance in Design and Production\**. Wiley, London, 2014.
- [18] Tibbits, Skylar. "4D Printing: Multi-Material Shape Change." In *\*Architectural Design: High Definition: Zero Tolerance in Design and Production\**. Wiley, London, 2014.
- [19] Ottchen, Cynthia. "The Future of Information Modelling and the End of Theory." In *\*Architectural Design, Closing The Gap: Information Models in Contemporary Design Practice\**, Vol 79. Wiley, London, 2009.
- [20] Garber, Richard. "Optimization Stories: The Impact of Building Information Modeling on Contemporary Design Practice." In *\*Architectural Design, Closing The Gap: Information Models in Contemporary Design Practice\**, Vol 79. Wiley, London, 2009.
- [21] Kilkelly, Michael. "5 Ways Computational Design Will Change the Way You Work." ArchDaily, April 15, 2016. [www.archdaily.com/785602/5-ways-computational-design-will-change-the-way-you-work](http://www.archdaily.com/785602/5-ways-computational-design-will-change-the-way-you-work).
- [22] Stott, Rory. "Silk Pavilion / MIT Media Lab." ArchDaily, June 5, 2013. [www.archdaily.com/384271/silk-pavilion-mit-media-lab](http://www.archdaily.com/384271/silk-pavilion-mit-media-lab).
- [23] Chalcraft, Emilie. "How 3D printing will change architecture and construction." Dezeen, 2013. [www.dezeen.com/2013/05/21/3d-printing-architecture-print-shift](http://www.dezeen.com/2013/05/21/3d-printing-architecture-print-shift).
- [24] Wakefield, Jane. "Tomorrow's Buildings: Construction industry goes robotic." BBC News, May 4, 2016. [www.bbc.com/news/technology-35746648](http://www.bbc.com/news/technology-35746648).
- [25] Fairs, Marcus. "3D printed house interview with Universe Architecture." Dezeen, January 24, 2013. [www.dezeen.com/2013/01/24/3d-printed-house-interview/](http://www.dezeen.com/2013/01/24/3d-printed-house-interview/).
- [26] Fairs, Marcus. "Protohouse by Softkill Design." Dezeen, October 23, 2012. [www.dezeen.com/2012/10/23/protohouse-by-softkill-design/](http://www.dezeen.com/2012/10/23/protohouse-by-softkill-design/).
- [27] Williams, Adam. "Berkeley researchers pioneer new powder-based concrete 3D printing technique." New Atlas, 2015. [newatlas.com/berkeley-researchers-pioneer-powder-based-concrete-3d-printing/36515/](http://newatlas.com/berkeley-researchers-pioneer-powder-based-concrete-3d-printing/36515/).
- [28] Stott, Rory. "Chinese Company Showcases Ten 3D-Printed Houses." ArchDaily, September 2, 2014. [www.archdaily.com/543518/chinese-company-showcases-ten-3d-printed-houses](http://www.archdaily.com/543518/chinese-company-showcases-ten-3d-printed-houses).
- [29] Davison, Nicola. "3D-printed cities: is this the future?" The Guardian, February 26, 2015. [www.theguardian.com/cities/2015/feb/26/3d-printed-cities-future-housing-architecture](http://www.theguardian.com/cities/2015/feb/26/3d-printed-cities-future-housing-architecture).
- [30] Brandt, Jordan. "3D Printing And The Complexity Of Compiling Matter." Forbes, September 2, 2015. [www.forbes.com/sites/valleyvoices/2015/09/02/3d-printing-and-the-complexity-of-compiling-matter/](http://www.forbes.com/sites/valleyvoices/2015/09/02/3d-printing-and-the-complexity-of-compiling-matter/).

## 4 Βιωσιμότητα της 3DCP στον κατασκευαστικό τομέα Πλεονεκτήματα & Μειονεκτήματα

### 4.1 Πλεονεκτήματα & μειονεκτήματα της 3D εκτύπωσης

Στον τομέα της κατασκευής κτιρίων, η μετάβαση στην τεχνολογία 3D εκτύπωσης (3DP) προσφέρει μια αλλαγή παραδείγματος από τις παραδοσιακές μεθοδολογίες κατασκευής, σύμφωνα με μια συλλογή ακαδημαϊκών γνώσεων και εμπειρικών δεδομένων. Τα βασικά οφέλη και οι προκλήσεις που σχετίζονται με την πλήρη εφαρμογή του 3DP στον κατασκευαστικό κλάδο έχουν αναλυθεί και διατυπωθεί συστηματικά.

Η υιοθέτηση του 3DCP εξορθολογίζει σημαντικά την παραδοσιακή διαδικασία κατασκευής, η οποία συνήθως περιλαμβάνει την κατασκευή υλικών εκτός εργοταξίου, τη μεταφορά τους στο εργοτάξιο και τη χρήση διαφόρων εξειδικευμένων συνεργείων για την κατασκευή της κατοικίας. Αντίθετα, το 3DCP ενοποιεί αυτά τα βήματα στη μεταφορά και την προμήθεια εκτυπωτικού υλικού στην τοποθεσία και στην εκτύπωση της κατοικίας απευθείας στην τοποθεσία [1].

Η στρατηγική χρήση της τρισδιάστατης εκτύπωσης στην κατασκευή κτιρίων όχι μόνο απλοποιεί τη διαδικασία κατασκευής αλλά ενισχύει επίσης τη δομική, θερμική και ακουστική απόδοση των κτιρίων. Αντιμετωπίζει τις παραδοσιακές προκλήσεις της σπατάλης υλικών, της αναποτελεσματικότητας της εργασίας και των υψηλών ποσοστών ατυχημάτων που σχετίζονται με τις συμβατικές μεθόδους κατασκευής. Επιπλέον, ανοίγει νέες δυνατότητες για τη χρήση ανακυκλωμένων και φιλικών προς το περιβάλλον υλικών, συμβάλλοντας περαιτέρω στους στόχους βιωσιμότητας της σύγχρονης κατασκευής [2].

Παρά αυτά τα πλεονεκτήματα, η στροφή στην τρισδιάστατη εκτύπωση στον κατασκευαστικό κλάδο παρουσιάζει επίσης αρκετές προκλήσεις. Αυτά περιλαμβάνουν τη διασφάλιση της δομικής ακεραιότητας και ανθεκτικότητας των τυπωμένων δομών, την αποτελεσματική διαχείριση της διαδικασίας διέλασης και τη σημαντική επένδυση που απαιτείται σε συσκευές εκτυπωτών μεγάλης κλίμακας. Επιπλέον, υπάρχει ανάγκη για τους εργάτες των κατασκευών να αποκτήσουν νέες δεξιότητες σχετικές με τη λειτουργία προηγμένων συστημάτων 3DP, σηματοδοτώντας μια αλλαγή στις απαιτήσεις εργασίας στον κλάδο [4].

Αναλυτικότερα, ενώ η τρισδιάστατη εκτύπωση στις κατασκευές προσφέρει μετασχηματιστικές δυνατότητες όσον αφορά την αποτελεσματικότητα, τη βιωσιμότητα και την ευελιξία του σχεδιασμού, απαιτεί επίσης προσεκτική εξέταση των συνθέσεων υλικών, των δομικών σχεδίων και της εκπαίδευσης του εργατικού δυναμικού για την πλήρη αξιοποίηση των πλεονεκτημάτων της και τον μετριασμό των προκλήσεων. Οι τεχνολογίες τρισδιάστατης εκτύπωσης προσφέρουν μια μεταμορφωτική προσέγγιση στην κατασκευή, επιτρέποντας την κατασκευή ελεύθερης μορφής που είναι ταυτόχρονα οικονομική και βιώσιμη. Αυτή η μέθοδος καταναλώνει λιγότερα υλικά, εργασία, ενέργεια και χρόνο και παράγει λιγότερα απόβλητα σε σύγκριση με τις παραδοσιακές τεχνικές κατασκευής, τοποθετώντας την ως δυνητικά ανώτερη εναλλακτική λύση για την κατασκευή κτιρίων.

Συνοπτικά, ενώ η τρισδιάστατη εκτύπωση στις κατασκευές προσφέρει μετασχηματιστικές δυνατότητες όσον αφορά την αποτελεσματικότητα, τη βιωσιμότητα και την ευελιξία του σχεδιασμού, απαιτεί επίσης προσεκτική εξέταση των συνθέσεων υλικών, των δομικών σχεδίων και της εκπαίδευσης του εργατικού δυναμικού για την πλήρη αξιοποίηση των πλεονεκτημάτων της και τον μετριασμό των προκλήσεων. Οι τεχνολογίες τρισδιάστατης εκτύπωσης προσφέρουν μια μεταμορφωτική προσέγγιση στην κατασκευή, επιτρέποντας την κατασκευή ελεύθερης μορφής που είναι ταυτόχρονα οικονομική και βιώσιμη. Αυτή η μέθοδος καταναλώνει λιγότερα υλικά, εργασία, ενέργεια και χρόνο και παράγει λιγότερα απόβλητα σε σύγκριση με τις παραδοσιακές τεχνικές κατασκευής, τοποθετώντας την ως δυνητικά ανώτερη εναλλακτική λύση για την κατασκευή κτιρίων.

Προσβλέποντας στο μέλλον, οι εξελίξεις στον υπολογιστικό σχεδιασμό, τη ρομποτική κατασκευή και την επιστήμη των υλικών αναμένεται να ενισχύσουν περαιτέρω την αποτελεσματικότητα και την ελκυστικότητα της τρισδιάστατης εκτύπωσης στις κατασκευές. Παρά τα τρέχοντα μειονεκτήματα κόστους σε σύγκριση με τις συμβατικές μεθόδους για τυπικές

ορθογώνιες κατασκευές, η τρισδιάστατη εκτύπωση έχει οικονομική υπόσχεση για κτίρια με σχέδια ελεύθερης μορφής και πολύπλοκες γεωμετρίες. Η τεχνολογία διευκολύνει μια βελτιωμένη διαδικασία από το σχεδιασμό έως την κατασκευή και την επιτόπια κατασκευή [3,5]. Η ρομποτική κατασκευή θα μπορούσε να μειώσει σημαντικά ή και να εξαλείψει την ανάγκη για ανθρώπινη εργασία, ελαχιστοποιώντας έτσι πολλούς από τους κινδύνους και τα λάθη που σχετίζονται με τις παραδοσιακές κατασκευαστικές πρακτικές.

Επιπλέον, η τρισδιάστατη εκτύπωση είναι μια ευέλικτη και φορητή διαδικασία, η οποία χρησιμοποιεί εξοπλισμό ικανό να χρησιμοποιεί τοπικά υλικά, τα οποία θα μπορούσαν να είναι κρίσιμα για κατασκευαστικά έργα. Παρά τις τεράστιες δυνατότητές της, η τρισδιάστατη εκτύπωση στις κατασκευές εξακολουθεί να αντιμετωπίζει σημαντικές προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπιστούν από ερευνητές, αρχιτέκτονες, μηχανικούς και τεχνικούς. Οι τρέχοντες περιορισμοί περιλαμβάνουν τις μικρές διαστάσεις των τρισδιάστατων εκτυπωτών, οι οποίοι περιορίζουν την άμεση εκτύπωση μεγάλων κατασκευών. Αυτό το ζήτημα οδήγησε στην εξάρτηση από μικρής κλίμακας και προκατασκευασμένα εξαρτήματα σε πολλά έργα επίδειξης.

Η χρήση μη παραδοσιακών σύνθετων υλικών στην κατασκευή προσθέτων παρουσιάζει δυσκολίες στη σύνδεση εξαρτημάτων που εκτυπώνονται 3D. Είναι απαραίτητη μια ολοκληρωμένη προσέγγιση στον δομικό σχεδιασμό για την αντιμετώπιση παραμορφώσεων, θερμικών τάσεων και άλλων παραγόντων καθοριστικών για την εξασφάλιση της ακρίβειας. Ενώ η προκατασκευή μπορεί να εγγυηθεί υψηλότερη ποιότητα και να παρακάμψει την ανάγκη μεταφοράς μεγάλων τρισδιάστατων εκτυπωτών σε εργοτάξια, συνεπάγεται σημαντικό κόστος μεταφοράς. Αντίθετα, η επιτόπια κατασκευή μπορεί να είναι οικονομικά αποδοτική και επιτρέπει τροποποιήσεις σχεδιασμού κατά τη διαδικασία κατασκευής. Ωστόσο, οι περιβαλλοντικές και καιρικές συνθήκες όπως ο άνεμος, η θερμοκρασία και η υγρασία μπορούν να επηρεάσουν βαθιά την ασφάλεια και την ποιότητα της κατασκευής. Έτσι, η χρήση ελεγχόμενων θαλάμων παραγωγής επί τόπου μπορεί να απαιτείται για τη διασφάλιση υψηλής ποιότητας εκτύπωσης. Θα πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι τα υλικά που βασίζονται σε πολυμερή είναι γενικά ακατάλληλα για δομικές εφαρμογές λόγω της περιορισμένης μηχανικής αντοχής, της ανισοτροπίας και της θερμικής ευαισθησίας τους [13,56].

Επιπλέον, τα υλικά τρισδιάστατης εκτύπωσης που βασίζονται σε πολυμερή συχνά δεν παρέχουν την αντίσταση στη φωτιά που απαιτείται για πολλές εφαρμογές κτιρίων και σενάρια κατάληψης. Η τεχνολογία Mesh Mold έχει ένα πλεονέκτημα εδώ, καθώς ενσωματώνει πολυμερές συνεχούς ίνας, το οποίο διαθέτει ανώτερη μηχανική αντοχή σε σύγκριση με άλλες μεθόδους όπως το ικρίωμα BAAM (Big Area Additive Manufacturing) ή AM (Additive Manufacturing), οι οποίες είναι γεμάτες με τσιμεντοειδές υλικό εντός του Mesh. Η ενσωμάτωση σύνθετων πολυμερών με τσιμεντοειδή υλικά μπορεί να πληροί τους απαιτούμενους οικοδομικούς κώδικες. Ωστόσο, οι μεθοδολογίες κατασκευής που χρησιμοποιούν μοντέλα πλέγματος εξακολουθούν να απαιτούν βελτιώσεις [5,23].

Τα υλικά με βάση το τσιμέντο προσφέρουν γενικά δομικά οφέλη ανώτερα από τα πολυμερή σύνθετα. Ενώ αυτά τα υλικά παρουσιάζουν στιβαρή αντοχή σε θλίψη, τείνουν να παρουσιάζουν έλλειψη αντοχής σε εφελκυσμό, κάτι που απαιτεί πρόσθετη ενίσχυση. Η ενσωμάτωση κοντών ινών και συνεχών νημάτων σε τσιμεντοειδείς μήτρες μπορεί να βελτιώσει τη δομική ακεραιότητα. Παρά αυτές τις βελτιώσεις, εξακολουθεί να υπάρχει ανησυχία σχετικά με την αντοχή σε κάμψη του σκυροδέματος, η οποία συχνά απαιτεί περαιτέρω ενίσχυση. Επί του παρόντος, αυτή η διαδικασία ενίσχυσης δεν είναι αυτοματοποιημένη και απαιτεί χειρωνακτική εργασία, γεγονός που αποτελεί σημαντικό εμπόδιο [6,8]. Η αυτοματοποίηση αυτής της πτυχής της διαδικασίας θα μπορούσε να εξορθολογίσει και να βελτιώσει την αποτελεσματικότητα των λειτουργιών τρισδιάστατης εκτύπωσης.

Λόγω των περιορισμών στις φυσικές ιδιότητες των υλικών που χρησιμοποιούνται, τα τρισδιάστατα εκτυπωμένα εξαρτήματα συχνά απαιτούν βελτιστοποίηση σχεδίασης χρησιμοποιώντας λογισμικό ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων. Αυτή η απαίτηση θα μπορούσε να περιορίσει την ευρύτερη υιοθέτηση τεχνολογιών τρισδιάστατης εκτύπωσης στον κατασκευαστικό τομέα. Επιπλέον, τα περιβάλλοντα στα οποία πραγματοποιείται η τρισδιάστατη εκτύπωση μπορεί να θέτουν κινδύνους για την ανθρώπινη υγεία, που αποδίδονται στην εκπομπή αερίων από πολυμερή ή στα λεπτά σωματίδια που εκπέμπονται από υλικά με βάση τη σκόνη. Ως εκ τούτου, είναι επιτακτική ανάγκη να παρακολουθούνται

συνεχώς οι συνθήκες εκτύπωσης εκτός και επιτόπου για τον μετριασμό των κινδύνων για την ανθρώπινη υγεία, με την εφαρμογή των κατάλληλων μέτρων ασφαλείας[9,10].

**Πίνακας 3-1. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα 3DCP**

A/A	ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ	ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ
1	Μείωση του κόστους κατασκευής	Περιορισμοί στα υλικά
2	Μείωση των ποσοστών τραυματισμών	Περιορισμοί στον εξοπλισμό
3	Δημιουργία θέσεων εργασίας υψηλής τεχνολογίας	Κόστος εκτυπωτών
4	Μείωση του χρόνου κατασκευής στο εργοτάξιο	Δομική ακεραιότητα
5	Ελαχιστοποίηση σφαλμάτων	Σχεδιασμός
6	Προώθηση της Αειφορίας	Πρότυπα σχεδιασμού
7	Βελτιωμένη Αρχιτεκτονική Ελευθερία	
8	Διευκόλυνση της Πολυλειτουργικότητας	
9	Λιγότερο εργατικό δυναμικό	

## 4.2 Βιώσιμη αρχιτεκτονική & σχεδιασμός στο πλαίσιο των τριπλών μηδενικών οικολογικών κτιρίων

Τα τελευταία πενήντα χρόνια, υπήρξε μια αλλαγή στις ιδεολογίες που στηρίζουν το σχεδιασμό και την κατασκευή, επηρεασμένη σε μεγάλο βαθμό από την παγκόσμια έγκριση της έννοιας της βιώσιμης ανάπτυξης το 1987. Αυτή η αλλαγή οδήγησε την ανθρωπότητα στην αναζήτηση τρόπων ενσωμάτωσης αυτών των αρχών σε διάφορους τομείς, ιδίως στην αρχιτεκτονική.

Στο Παγκόσμιο Συνέδριο Αρχιτεκτόνων του 1993, η Διακήρυξη της αλληλεξάρτησης για ένα βιώσιμο μέλλον υπογράμμισε τον σημαντικό ρόλο του δομημένου περιβάλλοντος στην επιδείνωση των ανθρώπινων επιπτώσεων στη φύση. Τόνισε τη δύναμη που έχουν οι αρχιτέκτονες στον μετριασμό αυτών των επιπτώσεων, ενισχύοντας την οικολογική ισορροπία και βελτιώνοντας την ποιότητα της ανθρώπινης ζωής μέσω βιώσιμων αρχιτεκτονικών πρακτικών. Αυτή η προσέγγιση, που ονομάζεται «βιώσιμη αρχιτεκτονική», δεν αφορά μόνο τις ίδιες τις δομές αλλά και τις μεθοδολογίες που χρησιμοποιούνται στη δημιουργία τους.

Στον 21ο αιώνα, καθώς οι διαδικασίες της ζωής έχουν αλλάξει δραματικά, η παγκόσμια κοινότητα σφυρηλατεί τώρα ένα παγκόσμιο αρχιτεκτονικό ήθος που προσαρμόζεται σε διαφορετικές κλιματικές, πολιτικές, κοινωνικές και πολιτιστικές συνθήκες. Η αρχιτεκτονική θεωρείται όλο και περισσότερο ως μια δυναμική διασύνδεση μεταξύ των ανθρώπων και του περιβάλλοντος τους.

Η βιώσιμη αρχιτεκτονική υπερβαίνει την απλή υφολογική κατηγοριοποίηση. Είναι βασικά μια κατευθυντήρια γραμμή για τη διαδικασία σχεδιασμού, ένας αναπτυξιακός φορέας και ένα σύστημα αρχών ή ένα πρότυπο σχεδιασμού. Περιλαμβάνει αρχιτεκτονικές και μηχανολογικές λύσεις που ενισχύουν την απόδοση του ανθρώπινου περιβάλλοντος διατηρώντας παράλληλα την οικολογική ισορροπία.

Σε ευθυγράμμιση με την «Έννοια της Βιώσιμης Ανάπτυξης», η βιώσιμη αρχιτεκτονική στοχεύει να ικανοποιήσει τις ανάγκες της τρέχουσας γενιάς χωρίς να διακυβεύεται η ικανότητα των μελλοντικών γενεών να καλύψουν τις δικές τους ανάγκες. Συχνά συζητείται παράλληλα με όρους όπως «πράσινη αρχιτεκτονική», «οικολογική αρχιτεκτονική», «αρχιτεκτονική χαμηλού κόστους», «αρχιτεκτονική υψηλής τεχνολογίας» και «βιοκλιματική αρχιτεκτονική». Αυτές οι έννοιες μοιράζονται έναν κοινό στόχο: μείωση της κατανάλωσης υλικών πόρων, βελτίωση της ποιότητας του κτιρίου, ενίσχυση της άνεσης σε εσωτερικούς χώρους, χαμηλότερη χρήση ενέργειας (τόσο από ανανεώσιμες όσο και μη) και βελτίωση των τεχνολογιών κατασκευής και λειτουργίας κτιρίων [7,11].

Οι σημερινές αρχές της βιώσιμης αρχιτεκτονικής περιλαμβάνουν την εναρμόνιση των κοινωνικών, οικονομικών, οικολογικών, εδαφικών και χωρικών παραγόντων ανάπτυξης των

οικισμών, τον καθορισμό του βέλτιστου μείγματος σταθερών και μεταβλητών στοιχείων σε προγράμματα σχεδιασμού, προσαρμογή σε φυσικές, κλιματικές και τεχνολογικές προκλήσεις και κινδύνους, χρήση χωρικής και μαθηματικής μοντελοποίησης για την προσαρμογή των σχεδίων κτιρίων στους παράγοντες του κύκλου ζωής και ενίσχυση της σωματικής και ψυχολογικής άνεσης των ατόμων μέσω βελτιωμένων λειτουργικών, μικροκλιματικών και αισθητικών παραμέτρων των χώρων διαβίωσης [8]. Αυτές οι αρχές, αν και περιεκτικές, αποτελούν μέρος ενός ευρύτερου φάσματος στόχων και εννοιών που περιλαμβάνονται από ένα βιώσιμο αρχιτεκτονικό περιβάλλον.

Στο σύγχρονο αρχιτεκτονικό λόγο, ένα κτίριο δεν θεωρείται πλέον απλώς ένα καταφύγιο από αντίξοες περιβαλλοντικές συνθήκες ή μια απλή ανθρώπινη κατοικία. Αντίθετα, θεωρείται ως ένα εξωτερικό «μακροκέλυφος» που καλύπτει τις ζωτικές και πνευματικές ανάγκες των ενοίκων του. Είτε πρόκειται για μονώροφη κατοικία είτε για σύνθετη πολυώροφη αστική δομή, ένα κτίριο ξεπερνά τον παραδοσιακό του ρόλο ως απλό δομικό κέλυφος. Γίνεται μια τεχνικά εξελιγμένη οντότητα, εξοπλισμένη με αγωγούς ενέργειας, όπως γραμμές ηλεκτρικού ρεύματος και φυσικού αερίου. συστήματα απαραίτητα για την υποστήριξη της ζωής και τις μεταβολικές λειτουργίες όπως η παροχή νερού, η αποχέτευση, ο εξαερισμός, ο κλιματισμός και η ψύξη. και ένα πολύπλοκο δίκτυο παρόμοιο με ένα νευρικό σύστημα που αποτελείται από εξοπλισμό ήχου και εικόνας, συσκευές τηλεπικοινωνιών, συστήματα ασφαλείας και σύνδεση στο Διαδίκτυο [9]. Ουσιαστικά, ένα κτίριο λειτουργεί ως τεχνητός οργανισμός - αξιοποιεί το φως και τη θερμότητα, χρησιμοποιεί νερό και ενέργεια, αναπνέει, επεξεργάζεται τα απόβλητα και απορρίπτει μεταβολικά υποπροϊόντα.

Επιπλέον, τα κτίρια συμμετέχουν σε συνεχή ανταλλαγή με το περιβάλλον τους, απορροφώντας οξυγόνο από τον αέρα και εκπέμποντας διοξείδιο του άνθρακα, συμβάλλοντας στις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου. Μια μέση κατοικία από μόνη της μπορεί να παράγει αρκετούς τόνους αερίων θερμοκηπίου ετησίως. Όταν επεκταθεί για να συμπεριλάβει το πλήθος των οικιστικών και εμπορικών κτιρίων παγκοσμίως, η κλίμακα αυτού του ζητήματος γίνεται εμφανής [10,18]. Αυτή η περιβαλλοντική επίπτωση επιδεινώνεται περαιτέρω από τον αυξανόμενο αριθμό οχημάτων και την επέκταση των χωματερών.

Η υιοθέτηση μιας οικολογικής προσέγγισης στο σχεδιασμό αυτόνομων κτιρίων, με γνώμονα την έννοια του «Triple Zero», πλαισιώνει το κτίριο ως έναν οργανισμό βαθιά ενσωματωμένο με το περιβάλλον του. Αυτή η προοπτική δίνει προτεραιότητα στο σχεδιασμό και την εφαρμογή αποτελεσματικών φυσικών «μεταβολικών διεργασιών» τόσο εντός του κτιρίου όσο και στις αλληλεπιδράσεις του με το εξωτερικό περιβάλλον. Αυτές οι διαδικασίες στοχεύουν στην αξιοποίηση των φυσικών πηγών ενέργειας και στη βελτιστοποίηση της οικολογικής απόδοσης σε όλο τον κύκλο ζωής του κτιρίου, υπογραμμίζοντας τη δέσμευση για βιωσιμότητα που εκτείνεται πέρα από τις συμβατικές αρχιτεκτονικές πρακτικές [11,12].

Η αρχιτεκτονική σύλληψη των κτιρίων Triple Zero προαναγγέλλει μια προληπτική αναζήτηση για τεχνικές καινοτομίες που στοχεύουν στην ελαχιστοποίηση των αρνητικών επιπτώσεων και στη μεγιστοποίηση των ευεργετικών επιδράσεων σε ενεργειακούς, περιβαλλοντικούς και τεχνολογικούς παράγοντες σε όλα τα στάδια του κύκλου ζωής. Αυτή η προσέγγιση υπογραμμίζει το ρόλο του κτιρίου ως θεμελιώδους συστατικού της ανθρώπινης κατοίκησης.

Ο πρωταρχικός στόχος στο σχεδιασμό οικολογικά ανεξάρτητων κτιρίων είναι η δημιουργία ενός τεχνητού ανθρώπινου περιβάλλοντος που να είναι φιλικό προς το περιβάλλον, άνετο και ασφαλές. Αυτό επιτυγχάνεται με την αξιοποίηση όλων των διαθέσιμων φυσικών συνθηκών και των ανανεώσιμων πηγών για την ενίσχυση της αυτονομίας. Οι σχεδιαστικές προκλήσεις που σχετίζονται με τέτοια κτίρια περιλαμβάνουν τη διασφάλιση του βέλτιστου προσανατολισμού σε σχέση με τις βασικές κατευθύνσεις, τη στρατηγική τοποθέτηση εντός της περιοχής ανάπτυξης, την προσεκτική επιλογή των σχημάτων του κελύφους του κτιρίου, τα υλικά για τα εξωτερικά εμπόδια και τους τύπους υαλοπινάκων. Το κτίριο θεωρείται ένα ενιαίο ενεργειακό σύστημα, σχεδιασμένο να αλληλεπιδρά ευεργετικά με τις εξωτερικές κλιματικές δυνάμεις [18,33].

Για παράδειγμα, τα κτίρια που έχουν σχεδιαστεί για φυσικό αερισμό είναι προσανατολισμένα και δομημένα με τέτοιο τρόπο ώστε οι ροές αέρα να μπορούν να διαχειρίζονται αποτελεσματικά σε όλες τις κατευθύνσεις του ανέμου, διευκολύνοντας την ομοιόμορφη ανταλλαγή αέρα. Η χρήση της αρχής της συναγωγής επιτρέπει τη δημιουργία



ανοδικών ρευμάτων αέρα ακόμη και υπό συνθήκες ηρεμίας. Υλικά υψηλού albedo σε τοίχους και στέγες αντανακλούν το ηλιακό φως, προστατεύοντας το κτίριο και το άμεσο περιβάλλον του από την υπερβολική ζέση [13]. Συχνά συνιστάται η βλάστηση επιπέδων στεγών με φυτά κατάλληλα για το κλίμα για να μετριαστεί η υπερθέρμανση της στέγης το καλοκαίρι και οι απώλειες θερμότητας το χειμώνα, ενώ παράλληλα ενισχύονται τα επίπεδα τοπικής υγρασίας.

Μια κρίσιμη πτυχή του σχεδιασμού οικολογικά ενεργειακά αποδοτικών κτιρίων περιλαμβάνει την επινόηση μεθόδων μετατροπής, αποθήκευσης και διανομής ενέργειας για τη διατήρηση των βέλτιστων μικροκλιματικών συνθηκών εντός του κτιρίου εν μέσω κυκλικών και περιοδικών αλλαγών στο εξωτερικό περιβάλλον. Αυτό συνεπάγεται στρατηγικές για την αξιοποίηση, τη διατήρηση και τη συνετή κατανομή της ενέργειας για να ταιριάζει σε πραγματικό χρόνο και σε συγκεκριμένες λειτουργικές, τεχνολογικές και μικροκλιματικές ανάγκες των χώρων και των στοιχείων του κτιρίου.

Για την αντιμετώπιση αυτών των απαιτήσεων, χρησιμοποιούνται τόσο παθητικά όσο και ενεργητικά συστήματα ηλιακής θέρμανσης, όπως ο τοίχος Trombe, διάφορες συστοιχίες ηλιακών πάνελ και συστήματα ηλιακών συλλεκτών. Επιπλέον, δομικά στοιχεία του κτιρίου χρησιμοποιούνται ως θερμική μάζα για την αποθήκευση θερμότητας. Για παράδειγμα, σε ένα σπίτι με ηλιακή θέρμανση στο Kappelrodeck, Ortenau County, Baden-Württemberg, Γερμανία, μια εποχιακή χωρητική αποθήκευση θερμότητας είναι ενσωματωμένη στον πυρήνα του κτιρίου με τη μορφή κεντρικής στήλης, ευθυγραμμίζοντας αποτελεσματικά τη λειτουργία του κτιρίου με τις οικολογικές του φιλοδοξίες.

### **4.3 Οι αρχιτεκτονικές προδιαγραφές των 3D printed σπιτιών απέναντι στους διεθνείς κανονισμούς και πρότυπα**

Οι σημερινές εξελίξεις στην τρισδιάστατη εκτύπωση για την κατασκευή κτιρίων είναι αξιοσημείωτες για την ποικιλομορφία και την καινοτομία τους, που περιλαμβάνουν ένα ευρύ φάσμα τύπων κτιρίων και αρχιτεκτονικών σχεδίων. Αυτός ο αναπτυσσόμενος τομέας έχει ήδη συσσωρεύσει σημαντική εμπειρία στην κατασκευή διαφόρων κατασκευών, που κυμαίνονται από απλά μονώροφα κτίρια έως πολύπλοκα πολυώροφα κτίρια που ενσωματώνουν οικολογικά υλικά και τεχνολογίες εξοικονόμησης ενέργειας [15,17]. Η παγκόσμια εμπειρία στα τρισδιάστατα εκτυπωμένα κτίρια επιτρέπει μια λεπτομερή ταξινόμηση με βάση πολλαπλά κριτήρια: λειτουργικός σκοπός, αριθμός ορόφων, χωρικές διαστάσεις, αρχιτεκτονικός σχεδιασμός, μεθοδολογία κατασκευής και υλικά που χρησιμοποιούνται.

Τα κτίρια που δημιουργούνται μέσω της τρισδιάστατης εκτύπωσης μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ανάλογα με το λειτουργικό τους σκοπό, συμπεριλαμβανομένων οικιστικών χρήσεων (όπως μονοκατοικίες, όπως εξοχικές κατοικίες, αρχοντικά και βίλες ή πολυκατοικίες), εμπορικούς χώρους (ξενοδοχεία, γραφεία, συνεδριακά κέντρα) και εξειδικευμένες εγκαταστάσεις όπως το διώροφο SolarPark Innovation Center. Οι τύποι των σπιτιών ποικίλλουν από σταθερά σε κινητά, καλύπτοντας διαφορετικούς τρόπους ζωής και ανάγκες μετακίνησης.

Όσον αφορά τη δομή, αυτά τα κτίρια κυμαίνονται από μονώροφα, που είναι πιο συνηθισμένα, έως φιλόδοξα πολυώροφα σχέδια που εκτείνονται έως και πέντε ορόφους. Η έκταση αυτών των κτιρίων μπορεί να ποικίλλει ευρέως από ένα συμπαγές 30 m<sup>2</sup> έως ένα τεράστιο 1100 m<sup>2</sup>, με διαστάσεις προσαρμοσμένες σε συγκεκριμένες λειτουργικές και αισθητικές απαιτήσεις [15,28]. Τα αρχιτεκτονικά σχέδια μπορεί να υιοθετούν απλά γεωμετρικά σχήματα, όπως τετράγωνα ή ορθογώνια, ή πιο σύνθετες διαμορφώσεις, όπως τοξωτών τοίχων ή σχέδια ελεύθερης μορφής που ενσωματώνουν βιονικές ή άλλες μη συμβατικές μορφές. Από την άποψη της κατασκευαστικής τεχνολογίας, οι μέθοδοι περιλαμβάνουν:

1. Ολοκληρωμένη επιτόπια εκτύπωση κτιρίου,
2. Εκτύπωση βάσει εξαρτημάτων με επακόλουθη συναρμολόγηση,
3. Τμηματική εκτύπωση που περιλαμβάνει ξεχωριστά μπλοκ ή πάνελ, συχνά πολύπλοκων σχημάτων,
4. Αρθρωτή εκτύπωση όπου παράγονται και συναρμολογούνται μεμονωμένες μονάδες.

Η επιλογή των δομικών υλικών είναι εξίσου ποικίλη, καθώς περιλαμβάνει παραδοσιακέςτσιμεντοκονίες ενισχυμένες με πρόσθετα για αντοχή και ανθεκτικότητα, καινοτόμους ξυλότυπους όπως μονωτικό αφρό και οικολογικές επιλογές που ενσωματώνουν

γεωργικά υποπροϊόντα όπως φλοιούς ρυζιού [19]. Οι ενισχύσεις μπορεί να περιλαμβάνουν υαλοβάμβακα για ενίσχυση της δομικής ακεραιότητας. Επιπλέον, τα ανακυκλωμένα υλικά από απόβλητα κατασκευών και κατεδαφίσεων χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο, αντανάκλωντας τη δέσμευση για βιωσιμότητα.

Αυτή η κατηγοριοποίηση όχι μόνο αντανάκλα την ευελιξία της τρισδιάστατης εκτύπωσης στην κάλυψη ενός ευρέος φάσματος αρχιτεκτονικών απαιτήσεων και περιβαλλοντικών συνθηκών, αλλά υπογραμμίζει επίσης τις δυνατότητες της τεχνολογίας να φέρει επανάσταση στην κατασκευή κτιρίων βελτιώνοντας την προσαρμογή, μειώνοντας τα απόβλητα και ενδεχομένως μειώνοντας το αποτύπωμα άνθρακα που σχετίζεται με τις παραδοσιακές μεθόδους κατασκευής [20].

Οι δυνατότητες των κατασκευαστικών τρισδιάστατων εκτυπωτών ενισχύουν σημαντικά την ευελιξία σχεδιασμού και τις αρχιτεκτονικές δυνατότητες των κτιριακών κατασκευών. Αυτοί οι εκτυπωτές επιτρέπουν προσαρμογές στο πάχος των τοίχων, των πλακών δαπέδου, των δοκών και άλλων δομικών στοιχείων. Επιτρέπουν επίσης την προσαρμογή ως προς το πάχος, το ύψος και το υλικό κάθε στρώσης σκυροδέματος και επιτρέπουν δομές πολλαπλών θαλάμων και ποικίλα σχήματα διατομής [16]. Τέτοιοι εκτυπωτές μπορούν εύκολα να κατασκευάσουν τοίχους με καμπυλόγραμμα σχήματα, αιχμηρές ή αμβλείες γωνίες και καμπύλες οποιασδήποτε ακτίνας, διευρύνοντας το φάσμα των αρχιτεκτονικών δυνατοτήτων. Θεμελίωσεις: Ο σχεδιασμός θεμελίων για φέροντες τοίχους που δημιουργούνται μέσω τρισδιάστατης εκτύπωσης πρέπει να συμμορφώνεται με τους τυπικούς κανονισμούς και τις οδηγίες για το σχεδιασμό θεμελίων κτιρίων, αν και μέχρι σήμερα δεν έχουν θεσπιστεί ειδικές πρόσθετες απαιτήσεις για τρισδιάστατες εκτυπωμένες κατασκευές.

### **Θεμελίωση**

Ο σχεδιασμός θεμελίων για φέροντες τοίχους που δημιουργούνται μέσω τρισδιάστατης εκτύπωσης πρέπει να συμμορφώνεται με τους τυπικούς κανονισμούς και τις οδηγίες για το σχεδιασμό θεμελίων κτιρίων, αν και μέχρι σήμερα δεν έχουν θεσπιστεί ειδικές πρόσθετες απαιτήσεις για τρισδιάστατες εκτυπωμένες κατασκευές [69].

### **Τοίχοι**

Στο σχεδιασμό κτιρίων με τρισδιάστατη εκτύπωση, είναι κρίσιμο να τοποθετηθούν τα στοιχεία ομοιόμορφα και συμμετρικά γύρω από τους κεντρικούς άξονες για να αποφευχθούν σχέδια που θα μπορούσαν να προκαλέσουν στρεπτικές δυνάμεις. Συνιστάται να συμπεριλάβετε στα σχέδια τόσο διαμήκεις όσο και εγκάρσιους φέροντες τοίχους. Οι τοίχοι που κατασκευάζονται με τρισδιάστατους εκτυπωτές μπορούν να είναι εξωτερικοί ή εσωτερικοί, με δυνατότητες που κυμαίνονται από φέροντες έως μη φέροντες και από μονό έως πολλαπλούς θαλάμους. Οι τυπικές σχεδιαστικές επιλογές για φέροντες τοίχους σε 3D εκτυπωμένες κατασκευές απεικονίζονται σε διάφορα σχηματικά, παρουσιάζοντας μια σειρά από πλάτη διατομής, πάχη στρώματος σκυροδέματος, αριθμούς εσωτερικών χωρισμάτων, τύπους θερμομονωτικών και ηχομονωτικών υλικών, τη συμπερίληψη εύκαμπτων αρμών, και θύλακες αέρα γεμάτες με μονωτικά υλικά ή σκυρόδεμα.

Η ακεραιότητα και η λειτουργικότητα αυτών των κατασκευών τοίχων εξαρτώνται από την τήρηση των προτύπων που αφορούν τη φέρουσα ικανότητα, τη σταθερότητα, καθώς και τις απαιτήσεις θερμομόνωσης και ηχομόνωσης [14]. Για την ενίσχυση αυτών των κατασκευών τοίχων, χρησιμοποιούνται τόσο παραδοσιακά υλικά από χάλυβα όσο και σύνθετα υλικά για τη δημιουργία ενός χωρικού ενισχυτικού πλαισίου χρησιμοποιώντας κάθετες και οριζόντιες ράβδους. Επιπλέον, διάφοροι τύποι ινών χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο για ενίσχυση σε τρισδιάστατες εκτυπωμένες δομές. Μια συγκριτική ανάλυση διαφορετικών τύπων ινών για ενίσχυση στην τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης περιγράφεται λεπτομερώς στην αντίστοιχη τεχνική τεκμηρίωση.

### **Πλάκα**

Οι επικαλυπτόμενες πλάκες και τα καλύμματα σε σύγχρονες κατασκευές μπορούν να κατασκευαστούν χρησιμοποιώντας παραδοσιακές μεθόδους ή να εκτυπωθούν καινοτόμα με τρισδιάστατο εκτυπωτή και μπορούν επίσης να έχουν μονολιθικό χαρακτήρα. Η ενσωμάτωση προκατασκευασμένων πλακών από οπλισμένο σκυρόδεμα με φέροντες τοίχους απαιτεί

ελάχιστο βάθος στήριξης 120 mm. Συνιστάται η ενσωμάτωση ενισχυτικών πλακών εντός των πλακών δαπέδου για τη διευκόλυνση της σύνδεσης με τους ιμάντες αντισεισμικής αντίστασης. Για να εξασφαλιστεί ομοιόμορφη κατανομή του φορτίου στον τοίχο, συνιστάται ένα μαξιλάρι από σκυρόδεμα πάχους περίπου 60 mm. Αυτό μπορεί να διαμορφωθεί αποτελεσματικά από έναν τρισδιάστατο εκτυπωτή που τοποθετεί συνεχείς στρώσεις σκυροδέματος πολλαπλών σειρών, διάσπαρτες με σύνθετο πλέγμα οπλισμού [17,20]. Για μονολιθικά δάπεδα, θα πρέπει να τοποθετούνται προφυλάξεις, όπως υποστρώματα στη συμβολή με τους τοίχους, ώστε να αποτρέπεται η διαρροή σκυροδέματος στις κοιλότητες των τοίχων.

### **Στέγη**

Η στέγη θα πρέπει να χρησιμοποιεί ελαφριά υλικά και δομές. Οι κεκλιμένες στέγες, ειδικότερα, θα πρέπει να σχεδιάζονται με την απαραίτητη χωρική ακαμψία για να αποτρέπεται η μετάδοση δυνάμεων διαστολής στους τοίχους, χρησιμοποιώντας αρμούς διαστολής όπου αυτό είναι δυνατό. Οι επίπεδες στέγες μπορεί να ενσωματώνουν εσωτερικές και εξωτερικές υδρορροές, με τη βάση της οροφής με κατάλληλη κλίση για την αποστράγγιση του νερού, δυναμικά κατασκευασμένη από έναν 3D εκτυπωτή ως μεμονωμένο δομικό στοιχείο.

### **Ανοίγματα & παράθυρα**

Τα ανοίγματα παραθύρων και θυρών θα πρέπει να έχουν τις επιφάνειες στήριξης που σχηματίζονται από έναν τρισδιάστατο εκτυπωτή, χρησιμοποιώντας ένα συνεχές στρώμα σκυροδέματος πολλαπλών σειρών πάνω από ένα υπόστρωμα κατασκευασμένο από σύνθετο ή μεταλλικό πλέγμα. Λεπτομέρειες όπως αυτές πρέπει να προσδιορίζονται στη φάση τρισδιάστατης μοντελοποίησης του κτιρίου. Τα υπέρθυρα πάνω από τα ανοίγματα μπορούν επίσης να τυπωθούν απευθείας, αν και τα προκατασκευασμένα υπέρθυρα από οπλισμένο σκυρόδεμα είναι μια εναλλακτική λύση. Για αυτά, η τοποθέτηση εντός του τρισδιάστατου μοντέλου και το ελάχιστο βάθος στήριξης 100 mm θα πρέπει να είναι προκαθορισμένα. Τα συστήματα κοινής ωφέλειας εντός του κτιρίου θα πρέπει να σχεδιάζονται σχολαστικά στο τρισδιάστατο μοντέλο ώστε να περιλαμβάνουν κάθετες κόγχες και ανοίγματα για την εγκατάσταση υδραυλικών και αποχετευτικών συστημάτων. Η ηλεκτρική καλωδίωση θα πρέπει να δρομολογείται εντός των κοιλοτήτων του θαλάμου τοίχου, απαιτώντας το τελευταίο εσωτερικό στρώμα του τρισδιάστατου μοντέλου να ενσωματώνει τεχνολογικά κανάλια και ανοίγματα για το σκοπό αυτό. Οι άξονες εξαερισμού ενδέχεται να χρησιμοποιούν κοιλότητες εντός δομών τοίχων [21,22].

### **Συστήματα κοινής ωφέλειας**

Τα συστήματα κοινής ωφέλειας εντός του κτιρίου θα πρέπει να σχεδιάζονται σχολαστικά στο τρισδιάστατο μοντέλο ώστε να περιλαμβάνουν κάθετες κόγχες και ανοίγματα για την εγκατάσταση υδραυλικών και αποχετευτικών συστημάτων. Η ηλεκτρική καλωδίωση θα πρέπει να δρομολογείται εντός των κοιλοτήτων του θαλάμου τοίχου, απαιτώντας το τελευταίο εσωτερικό στρώμα του τρισδιάστατου μοντέλου να ενσωματώνει τεχνολογικά κανάλια και ανοίγματα για το σκοπό αυτό. Οι άξονες εξαερισμού ενδέχεται να χρησιμοποιούν κοιλότητες εντός δομών τοίχων [6].

### **Φινιρίσματα & τελική τοιχοποιία**

Τα εξωτερικά και εσωτερικά φινιρίσματα τοίχων διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στην προστασία από την υγρασία, ειδικά σε θέσεις με έντονη υγρασία και οριζόντιες επιφάνειες όπως περβάζια παραθύρων και στηθαία. Οι ημιτελείς επιφάνειες τοίχων μπορούν να βαφτούν ή να υποβληθούν σε επεξεργασία με υδρόφοβα διαλύματα για να αποφευχθεί η είσοδος υγρασίας. Για βελτιωμένη αντοχή και αισθητική, συνιστώνται επιλογές όπως σοβάτισμα, βάψιμο πάνω από σοβά και τοποθέτηση συστημάτων επένδυσης ή αναρτημένης πρόσοψης, διασφαλίζοντας ότι το κτίριο δεν είναι μόνο δομικά σταθερό αλλά και αισθητικά ευχάριστο και περιβαλλοντικά ανθεκτικό [61-64].

### **Σύνοψη**

Συνοψίζοντας, η υιοθέτηση της τρισδιάστατης εκτύπωσης στην κατασκευή κτιρίων απαιτεί την εναρμόνιση με υπάρχοντες κανονισμούς, την ανάπτυξη νέων προτύπων, την εκτενή

πιστοποίηση και δοκιμή των νέων τεχνολογιών, καθώς και την εκπαίδευση των επαγγελματιών του χώρου. Μέσα από συνεργασίες και επενδύσεις, η τεχνολογία αυτή έχει τη δυνατότητα να μετασχηματίσει τις παραδοσιακές κατασκευαστικές πρακτικές και να προσφέρει βιώσιμες λύσεις για το μέλλον της αρχιτεκτονικής και της οικοδομής [8, 15, 33].

#### 4.3.1 Προτυποποίηση & Κανονισμοί 3DCP

Η 3D εκτύπωση τσιμέντου επειδή είναι σχετικά νέα μέθοδος και ακόμα γίνεται αρκετό R&D σε τεχνολογίες και υλικά, τόσο σε παγκόσμιο όσο και σε εγχώριο επίπεδο, τα πρότυπα κατασκευής εξακολουθούν να διαμορφώνονται και να αναπτύσσονται. Υπάρχουν διάφοροι κανόνες που διέπουν την 3D εκτύπωση τσιμέντου. Υπάρχουν ωστόσο κατευθυντήριες γραμμές και οδηγίες, καθώς σε πολλές χώρες έχουν χτιστεί σπίτια με την μέθοδο 3DCP.

1. **International organization for Standardization / ISO 52900.** Υπάρχει το συγκεκριμένο πρότυπο που αφορά 3D εκτύπωση πλαστικών, αλλά μπορεί να παρέχει βασικές αρχές και ορολογία χρήσιμες για το 3DCP.
2. **ISO / AST 52939:2023.** Είναι ένα νέο πρότυπο, σημαντικό για την αντιμετώπιση διάφορων προκλήσεων, που αφορά την 3D εκτύπωση τσιμέντου. Ο επίσημος τίτλος του προτύπου είναι στα Αγγλικά είναι **“Additive Manufacturing for Construction — Qualification Principles — Structural and Infrastructure Elements”**, ενώ στα Ελληνικά σε ελεύθερη μετάφραση: **«Προσθετική κατασκευή για κατασκευές – Αρχές πιστοποίησης – Δομικά & κατασκευαστικά στοιχεία»**. Το πρότυπο αυτό παρέχει κατευθυντήριες γραμμές ως προς:
  - **Ποιότητα:** περιγραφή κριτηρίων για διαδικασίες προσθετικής κατασκευής και μέτρων ελέγχου ποιότητας.
  - **Λειτουργικές ακολουθίες:** περιγραφή των βημάτων που πρέπει να διαχειρίζεται ένας πιστοποιημένος μηχανικός στο χώρο της προσθετικής κατασκευής.

Ωστόσο το πρότυπο δεν καλύπτει περιβαλλοντικές, υγειονομικές και ασφαλιστικές οδηγίες σχετικά με την 3D εκτύπωση τσιμέντου.

3. **O ACI 564,** είναι μια επιτροπή που ασχολείται με την ανάπτυξη οδηγιών και προτύπων για την 3DCP. Οι οδηγίες αφορούν την εναρμόνιση των μεθόδων εκτύπωσης, τις ιδιότητες των υλικών και την αξιολόγηση των δοκιμών που έχουν εκτυπωθεί.
4. **CEN/tc 229.** Είναι μια Ευρωπαϊκή επιτροπή η οποία ασχολείται με την ανάπτυξη προϊόντων 3DCP.
5. **Επικοινωνία με τοπικούς εγχώριους φορείς.** Κάθε χώρα διαθέτει άλλα πρότυπα κατασκευής, κυρίως όσον αφορά τους όρους δόμησης, θεμελίωσης και τους αντισεισμικούς κανονισμούς. Για παράδειγμα στην Ελλάδα όλα τα κτίρια είναι από οπλισμένο σκυρόδεμα, ενώ σε άλλες χώρες τα σπίτια μπορεί να είναι και από ξύλο.

Συνοψίζοντας, δεν υπάρχουν ακόμα σαφείς οδηγίες για την ορθή μελέτη και το χτίσιμο μιας οικίας, ενός κτιρίου και γενικά μιας κατασκευής σπιτιού με τη μέθοδο 3DCP. Για την ορθή μελέτη και εκτύπωση – χτίσιμο θα πρέπει να γίνει αρκετή έρευνα και ανάπτυξη. Ωστόσο υπάρχουν διάφοροι κανονισμοί που αφορούν τις συμβατικές μεθόδους κατασκευής, οι οποίοι θα μπορούσαν να εναρμονιστούν με την 3DCP, καθώς επίσης και βάση των τοπικών κανονισμών. Για παράδειγμα μπορεί να κατατεθεί φάκελος υπολογισμών στην αρμόδια πολεοδομία κάθε περιοχής, ο οποίος θα περιλαμβάνει αναλυτικούς υπολογισμούς και σχέδια έτσι ώστε να δοθεί η κατάλληλη άδεια οικοδόμησης με τη μέθοδο 3DCP.

#### 4.4 Περιβαλλοντική βιωσιμότητα

Επί του παρόντος, οι βιομηχανικές δραστηριότητες παγκοσμίως συμβάλλουν περίπου στο 29% στις παγκόσμιες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, με άλλες σημαντικές πηγές όπως

τα κτίρια, οι μεταφορές και η γεωργία. Αν και τα ακριβή δεδομένα σχετικά με τις εκπομπές που αποδίδονται στα πλαστικά με έγχυση είναι σπάνια, τα δεδομένα αξιολόγησης του κύκλου ζωής (LCA) από διάφορες μελέτες υποδηλώνουν ότι τα πλαστικά που παράγονται με χύτευση με έγχυση μπορεί να αντιπροσωπεύουν μεταξύ 0,5% και 2% των παγκόσμιων εκπομπών [51,55]. Η μείωση αυτών των εκπομπών κατά 70% θα αντιπροσώπευε σημαντική βελτίωση, ενώ μια δεκαπλάσια αύξηση θα ορούσε να δημιουργήσει σοβαρές περιβαλλοντικές προκλήσεις.

Η μετάβαση από τη χύτευση με έγχυση στην τρισδιάστατη εκτύπωση είναι πιθανό να ξεδιπλωθεί αργά λόγω οικονομικών και τεχνολογικών παραγόντων. Αρχικά, η τρισδιάστατη εκτύπωση αναμένεται να αντικαταστήσει τη χύτευση με έγχυση κυρίως για παραγωγή μικρής κλίμακας λόγω της τρέχουσας δομής κόστους της. Με την πάροδο του χρόνου, καθώς το κόστος μειώνεται και η ποιότητα προχωρά, η τρισδιάστατη εκτύπωση μπορεί να αρχίσει να εισβάλλει σε αγορές που χαρακτηρίζονται από μέτριους όγκους παραγωγής. Ωστόσο, αναμένεται να αντιμετωπίσει σημαντικές προκλήσεις για την αντικατάσταση των τεχνικών παραγωγής μεγάλου όγκου και χαμηλού κόστους [23,50].

Όσον αφορά τη χρήση των πόρων, η παγκόσμια κατανάλωση πλαστικών για χύτευση με έγχυση υπολογίζεται σε περίπου 39 εκατομμύρια τόνους ετησίως. Αυτός ο αριθμός αντιπροσωπεύει ένα μικρό κλάσμα της συνολικής παγκόσμιας εξόρυξης υλικού. Στις Ηνωμένες Πολιτείες, για παράδειγμα, τα προϊόντα πετρελαίου, που περιλαμβάνουν τις πρώτες ύλες για τα πλαστικά, αντιπροσωπεύουν λιγότερο από το 5% της συνολικής εξόρυξης υλικών κατά μάζα. Από αυτό, λιγότερο από το 3% χρησιμοποιείται για την παραγωγή πλαστικών, υποδηλώνοντας ότι όλη η χρήση πλαστικού, συμπεριλαμβανομένης της χύτευσης με έγχυση, αποτελεί περίπου το 0,1% της συνολικής κατανάλωσης υλικού κατά μάζα.

Δεδομένου ότι τα ποσοστά χρήσης υλικών για την τρισδιάστατη εκτύπωση και τη χύτευση με έγχυση είναι μεταξύ δέκα, η μετάβαση στην τρισδιάστατη εκτύπωση είναι απίθανο να επηρεάσει σημαντικά την παγκόσμια κατανάλωση υλικού. Κατά συνέπεια, η ευρεία υιοθέτηση της τεχνολογίας τρισδιάστατης εκτύπωσης, αν και μετασχηματίζει σε ορισμένα πλαίσια, ενδέχεται να μην αλλάξει ουσιαστικά τη συνολική χρήση υλικού σε παγκόσμια κλίμακα [42].

Η δυνατότητα της τρισδιάστατης εκτύπωσης να βελτιώσει την περιβαλλοντική βιωσιμότητα είναι σημαντική, ωστόσο τα πρακτικά της αποτελέσματα μπορεί να διαφέρουν από τις δημοφιλείς προσδοκίες. Σε αντίθεση με τις κοινές πεποιθήσεις, η τρισδιάστατη εκτύπωση είναι απίθανο να εξαλείψει εντελώς τις αρνητικές εξωτερικές επιδράσεις που σχετίζονται με τη μεταφορά και τα απόβλητα. Επιπλέον, μπορεί πράγματι να μειώσει τα ποσοστά ανακύκλωσης πλαστικών. Τα πραγματικά περιβαλλοντικά οφέλη της πράσινης τρισδιάστατης εκτύπωσης ευθυγραμμίζονται πιο διακριτικά με τα οικονομικά κίνητρα, την προώθηση της λιτής παραγωγής, τη διαφοροποίηση των επιλογών υλικών και τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης κατά τη φάση χρήσης του προϊόντος. Αυτή η τεχνολογία προσφέρει ένα βήμα προς τη μίμηση φυσικών διεργασιών μέσω της χρήσης λιπασματοποιήσιμων βιοπολυμερών, αντιμετωπίζοντας αποτελεσματικά ζητήματα διαχείρισης απορριμμάτων [24]. Επιπλέον, εκδημοκρατίζει την πρόσβαση στα μέσα παραγωγής, ενισχύοντας δυνητικά τα κοινωνικά οφέλη.

Οι εσφαλμένες αντιλήψεις σχετικά με την πράσινη τρισδιάστατη εκτύπωση συχνά περιλαμβάνουν την πεποίθηση ότι θα μειώσει σημαντικά τις εξωτερικές επιδράσεις που σχετίζονται με τις μεταφορές αποκεντρώνοντας την κατασκευή σε περιφερειακό ή ακόμη και μεμονωμένο επίπεδο. Ωστόσο, αυτό δεν είναι απολύτως ακριβές. Οι σημερινοί τρισδιάστατοι εκτυπωτές παράγουν συνήθως μόνο μέρη προϊόντων, όχι ολόκληρα συγκροτήματα, εκτός εάν τα προϊόντα είναι εξαιρετικά απλά. Τα περισσότερα προϊόντα εξακολουθούν να απαιτούν συναρμολόγηση από εκτυπώσιμα και μη εκτυπώσιμα εξαρτήματα στα εργοστάσια και επακόλουθη διανομή στους καταναλωτές. Ακόμη και σε σενάρια όπου είναι δυνατή η πλήρης επιτόπια εκτύπωση, οι πρώτες ύλες για τρισδιάστατους εκτυπωτές πρέπει να μεταφέρονται.

Για παράδειγμα, ένα συνεργείο αυτοκινήτων θα μπορούσε να μειώσει σημαντικά τις επιπτώσεις της μεταφοράς αποθηκεύοντας μόνο τη σκόνη από κράμα χάλυβα για εκτύπωση διαφόρων εξαρτημάτων όπως απαιτείται, αντί να διατηρεί ένα απόθεμα 500 διαφορετικών προκατασκευασμένων εξαρτημάτων. Ομοίως, τα καταστήματα επίπλων θα μπορούσαν να

μειώσουν το κόστος αποστολής που σχετίζεται με ογκώδη αντικείμενα επιλέγοντας να μεταφέρουν συμπαγή καρούλια από σύνθετο υλικό ξύλου-πλαστικού για τοπική εκτύπωση.

Ωστόσο, ακόμη και σημαντικές μειώσεις στη μεταφορά μπορεί να έχουν ελάχιστες περιβαλλοντικές επιπτώσεις σε σχέση με ολόκληρη τη διαδικασία παραγωγής. Η έρευνα έχει δείξει σταθερά ότι για τα περισσότερα καταναλωτικά προϊόντα, η μεταφορά συνεισφέρει ένα σχετικά μικρό κλάσμα στις συνολικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις από την κούνια μέχρι τον τάφο, με ορισμένες εξαιρέσεις. Ακόμη και υποθετικά σενάρια όπου η 3D εκτύπωση εξαλείφει τις εξωτερικές επιδράσεις που σχετίζονται με τις μεταφορές μέσω της μοριακής κλίμακας τοπικής προμήθειας υλικών θα είχαν αμελητέα επίδραση στις συνολικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις για τα περισσότερα προϊόντα [25]. Αυτό υποδηλώνει ότι οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις των διαδικασιών παραγωγής και της χρήσης ενέργειας κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής του προϊόντος είναι πολύ πιο κρίσιμοι τομείς για εστίαση.

Μια άλλη κοινή παρανόηση είναι ότι η τρισδιάστατη εκτύπωση ενισχύει εγγενώς τη βιωσιμότητα «εξαλείφοντας τα απόβλητα», τόσο των τελικών προϊόντων όσο και των πρώτων υλών. Ορισμένοι τύποι τρισδιάστατων εκτυπωτών, όπως οι μηχανές FDM, μπορούν πράγματι να λειτουργήσουν με ελάχιστη σπατάλη κατά την εκτύπωση εξαρτημάτων χωρίς υλικό υποστήριξης. Ωστόσο, πολύπλοκες γεωμετρίες εξαρτημάτων που απαιτούν σημαντικό υλικό υποστήριξης μπορεί να οδηγήσουν σε σημαντική σπατάλη, που μερικές φορές υπερβαίνει τη μάζα του ίδιου του υλικού του μοντέλου. Επομένως, ενώ ορισμένες εφαρμογές τρισδιάστατης εκτύπωσης επιτυγχάνουν χαμηλά επίπεδα απορριμμάτων, άλλες όχι, και τα συνολικά οφέλη βιωσιμότητας μπορεί να ποικίλλουν ευρέως ανάλογα με τη συγκεκριμένη τεχνολογία και εφαρμογή.

Το υλικό υποστήριξης δεν είναι ο μόνος παράγοντας που συμβάλλει στη σπατάλη στην τρισδιάστατη εκτύπωση. Άλλες πηγές διαφέρουν ανάλογα με τον τύπο του εκτυπωτή που χρησιμοποιείται. Για παράδειγμα, ένας εκτυπωτής PolyJet μπορεί να σπαταλήσει έως και το 43% του υγρού πολυμερούς του, που περιλαμβάνει τόσο το μοντέλο όσο και το υλικό υποστήριξης[26]. Κατά συνέπεια, μια εκτύπωση που απαιτεί ίση ποσότητα υλικού υποστήριξης με το υλικό μοντέλου θα μπορούσε να οδηγήσει σε 65% απόβλητα—σχεδόν διπλάσιο από τα απόβλητα σε σύγκριση με το τελικό προϊόν. Επιπλέον, το υγρό υλικό του μοντέλου PolyJet σημειώνεται ότι είναι πιο τοξικό ανά κιλό από τα συμβατικά πλαστικά χύτευσης με έγχυση όπως το PET ή το ABS.

Στην περίπτωση της πλαστικής πυροσυσσωμάτωσης, έρευνα των Telenko και Seepersad τόνισε ότι έως και το 44% του υλικού που χρησιμοποιείται στη διαδικασία επιλεκτικής πυροσυσσωμάτωσης με λείζερ (SLS) θα μπορούσε να χαθεί. Για την πυροσυσσωμάτωση μετάλλων, μελέτες των Kellens et al. έχουν αναφέρει ότι περίπου το 20% της αχρησιμοποίητης σκόνης χάνεται, αν και το υπόλοιπο μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί. Ακόμη και οι εκτυπωτές Fused Deposition Modeling (FDM) μπορούν να δημιουργήσουν σημαντικά απόβλητα λόγω μη βέλτιστων επιλογών σχεδιασμού. Ένα παράδειγμα είναι ο επιτραπέζιος εκτυπωτής 3D Systems Cube FDM, ο οποίος χρησιμοποιεί ιδιόκτητα δοχεία που δεν είναι ανακυκλώσιμα λόγω της διπλής πλαστικής σύστασής τους—με αποτέλεσμα σε περισσότερο από 50% σπατάλη εάν η μάζα του νήματος είναι μικρότερη από τη μάζα του φυσιγγίου.

Συγκριτικά, οι παραδοσιακές διαδικασίες μηχανικής κατεργασίας, ειδικά εκείνες που περιλαμβάνουν τη δημιουργία κοίλων εξαρτημάτων από συμπαγείς όγκους πλαστικού, συνήθως δημιουργούν πολύ μεγαλύτερες ποσότητες απορριμμάτων, που συχνά υπερβαίνουν το 80%. Επομένως, σε ορισμένα περιβάλλοντα, η τρισδιάστατη εκτύπωση μπορεί να δημιουργήσει λιγότερα απόβλητα από αυτές τις συμβατικές μεθόδους. Ωστόσο, τα πλαστικά στη μαζική παραγωγή σχηματίζονται συνήθως μέσω καλουπώματος και όχι κατεργασίας[26,27].

Η χύτευση με έγχυση είναι γνωστή για την αποτελεσματικότητά της, με τα ποσοστά απορριμμάτων ή σκραπ να κυμαίνονται από 1% έως περίπου 10%, υποδηλώνοντας σημαντικά χαμηλότερη παραγωγή απορριμμάτων από ορισμένες μεθόδους τρισδιάστατης εκτύπωσης. Ενώ η τρισδιάστατη εκτύπωση μπορεί μερικές φορές να μειώσει τα απόβλητα σε σύγκριση με τη χύτευση με έγχυση, μπορεί επίσης να οδηγήσει σε μεγαλύτερη σπατάλη σε άλλα σενάρια. Παρά τις πιθανές μειώσεις των αποβλήτων, αυτή η πτυχή δεν είναι πάντα η πιο κρίσιμη. Η κατανάλωση ενέργειας παραμένει ο κυρίαρχος περιβαλλοντικός αντίκτυπος της

τρισδιάστατης εκτύπωσης[28,41]. Η αυξημένη κατανάλωση ενέργειας ανά εξάρτημα μπορεί να αντισταθμίσει τυχόν εξοικονόμηση υλικών, αυξάνοντας ενδεχομένως τις συνολικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

Όταν η τρισδιάστατη εκτύπωση όντως μειώνει τις συνολικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις, το επιτυγχάνει ενσωματώνοντας την παραγωγή χαμηλών αποβλήτων με την επιλογή υλικών χαμηλής επίπτωσης και ενεργειακά αποδοτικών διαδικασιών. Αυτή η πολύπλευρη προσέγγιση είναι απαραίτητη για την ενίσχυση της βιωσιμότητας των εφαρμογών τρισδιάστατης εκτύπωσης στον κατασκευαστικό κλάδο και όχι μόνο. Η τρισδιάστατη εκτύπωση παρουσιάζει μια πολλά υποσχόμενη οδό για τη βελτίωση της βιωσιμότητας της παραγωγής ευθυγραμμίζοντας τα οικονομικά κίνητρα με περιβαλλοντικούς λόγους [29,30]. Παραδοσιακά, τόσο στη δημιουργία πρωτοτύπων όσο και στη μαζική κατασκευή, η πολυπλοκότητα στο σχεδιασμό τείνει να αυξάνει το κόστος, οδηγώντας συχνά σε αναποτελεσματικότητα υλικών και ενέργειας. Αντίθετα, η τρισδιάστατη εκτύπωση αντιστρέφει αυτή τη δυναμική: ενώ τα υλικά παραμένουν δαπανηρά, η πολυπλοκότητα στο σχεδιασμό δεν συνεπάγεται πρόσθετο κόστος. Αυτή η αλλαγή αναμένεται να οδηγήσει σε καινοτομίες όπου τα σχέδια γίνονται όλο και πιο περίπλοκα για εξοικονόμηση στη χρήση υλικών. Είναι ήδη διαθέσιμα εργαλεία λογισμικού που βελτιστοποιούν τη γεωμετρία των εξαρτημάτων για να ελαχιστοποιήσουν τη μάζα του υλικού ενώ πληρούν συγκεκριμένα φυσικά κριτήρια, όπως κατευθύνσεις και μεγέθη τάσεων [38-40].

Επιπλέον, η σχέση κόστους μεταξύ ενέργειας και χρόνου εκτύπωσης ενθαρρύνει έμμεσα την εξοικονόμηση ενέργειας μεταξύ των χειριστών εκτυπωτών, καθώς οι μεγαλύτεροι χρόνοι εκτύπωσης μεταφράζονται άμεσα σε υψηλότερο κόστος ενέργειας. Ωστόσο, αυτό το κίνητρο δεν επεκτείνεται απαραίτητα στους κατασκευαστές εκτυπωτών, οι οποίοι ενδέχεται να μην δίνουν προτεραιότητα στην ενεργειακή απόδοση στα σχέδιά τους[31,32]. Τα τρέχοντα δεδομένα υποδηλώνουν ασθενή συσχέτιση μεταξύ της κατανάλωσης ενέργειας και της διάρκειας εκτύπωσης σε συγκεκριμένους τύπους εκτυπωτών, υποδηλώνοντας μικρότερη έμφαση στην εξοικονόμηση ενέργειας σε σύγκριση με την εξοικονόμηση υλικού.

Η αρχή της λιτής παραγωγής βρίσκει επίσης μια ισχυρή εφαρμογή στην τρισδιάστατη εκτύπωση. Σε αντίθεση με τις παραδοσιακές μεθόδους κατασκευής όπως η χύτευση με έγχυση, όπου το κόστος ανά μονάδα μειώνεται σημαντικά με την κλίμακα, το κόστος για την εκτύπωση του πρώτου μέρους στην τρισδιάστατη εκτύπωση είναι το ίδιο με την εκτύπωση του εκατομμυριοστού μέρους [43,49]. Αυτό το μοντέλο τιμολόγησης μετριάζει την οικονομική πίεση για υπερπαραγωγή, μειώνοντας έτσι πιθανά τα απόβλητα που σχετίζονται με τα απούλητα αποθέματα και την υπερπαραγωγή. Ιστορικά, η μαζική παραγωγή ευνόησε τη δημιουργία και αποθήκευση μεγάλων αποθεμάτων με βάση την προβλεπόμενη ζήτηση, η οποία μπορεί να μην υλοποιηθεί, οδηγώντας σε σημαντικό οικονομικό και περιβαλλοντικό κόστος. Αντίθετα, η τρισδιάστατη εκτύπωση επιτρέπει την παραγωγή κατ' απαίτηση, περιορίζοντας σημαντικά τις ανάγκες αποθήκευσης και ευθυγραμμίζοντας στενά με τις αρχές λιτής κατασκευής.

Ωστόσο, η δυνατότητα εξάλειψης των απορριμμάτων μέσω μειωμένης υπερπαραγωγής πρέπει να εξισορροπηθεί με την τάση για αυξημένα απόβλητα λόγω της ευκολίας παραγωγής και των υψηλών ποσοστών αστοχίας που παρατηρούνται σήμερα στην τρισδιάστατη εκτύπωση. Καθώς η τεχνολογία συνεχίζει να ωριμάζει, αναμένεται ότι οι βελτιώσεις στην αξιοπιστία του εκτυπωτή και την τεχνογνωσία του χειριστή θα μετριάσουν αυτά τα ζητήματα, μειώνοντας τη συχνότητα αποτυχίας εκτυπώσεων και, κατά συνέπεια, τη σπατάλη[33,44]. Αυτή η εξέλιξη στις πρακτικές τρισδιάστατης εκτύπωσης υποδηλώνει ότι σημαντικά κέρδη στην παραγωγική αποδοτικότητα και βιωσιμότητα είναι επιτεύξιμα χωρίς την ανάγκη παρεμβάσεων πολιτικής, με γνώμονα τις δυνάμεις της αγοράς και τα εγγενή κίνητρα για βελτιστοποίηση των διαδικασιών παραγωγής και μείωση της σπατάλης υλικών.

#### **4.5 Η χρήση πράσινων υλικών**

Η τρισδιάστατη εκτύπωση έχει τη δυνατότητα να βελτιώσει σημαντικά την περιβαλλοντική βιωσιμότητα των διαδικασιών παραγωγής επεκτείνοντας τη χρήση βιώσιμων υλικών και βελτιστοποιώντας το εύρος των φυσικών τους ιδιοτήτων. Αυτή η δυνατότητα δεν προκύπτει μόνο από τις εγγενείς τεχνολογικές δυνατότητες της τρισδιάστατης εκτύπωσης αλλά και από τις οικονομικές της πτυχές [58-60]. Μια καινοτόμος πτυχή είναι η ανάπτυξη «συντονισιμων»

υλικών, τα οποία μπορούν να αλλάξουν τις φυσικές τους ιδιότητες με βάση συγκεκριμένες παραμέτρους εκτύπωσης.

Η ευελιξία της τρισδιάστατης εκτύπωσης επιτρέπει τη χρήση μιας ποικιλίας υλικών πέρα από τα παραδοσιακά πλαστικά και μέταλλα [36,37]. Αυτά περιλαμβάνουν κεραμικά, διάφορες ουσίες τροφίμων, συγκολλημένες σκόνες από υλικά όπως αλάτι, πριονίδι ή άμυλο, ακόμη και ζωντανούς ανθρώπινους ιστούς. Όσον αφορά τα πλαστικά υλικά, οι θερμοφυσικές ιδιότητες του βιοπλαστικού PLA έχουν αποδειχθεί πιο ευνοϊκές από εκείνες του πλαστικού ABS για εκτύπωση με Fused Deposition Modeling (FDM), προωθώντας έτσι τη χρήση του PLA. Επιπλέον, εξωτικά υλικά όπως το κεραμικό κράμα κοβαλτίου χρωμίου έχουν χρησιμοποιηθεί για συγκεκριμένα εξαρτήματα όπως τα ακροφύσια κινητήρων jet, τα οποία προηγουμένως δεν ήταν εφικτά με παλαιότερες τεχνικές κατασκευής [34,35].

Ωστόσο, είναι σημαντικό να αναγνωρίσουμε ότι τα περισσότερα τρέχοντα υλικά τρισδιάστατης εκτύπωσης δεν αντιπροσωπεύουν απαραίτητα μια βελτίωση σε σχέση με τα παραδοσιακά υλικά από περιβαλλοντικούς όρους. μερικοί μπορεί να εγκυμονούν ακόμη μεγαλύτερους κινδύνους. Για παράδειγμα, τα κονιοποιημένα μέταλλα που χρησιμοποιούνται στην τρισδιάστατη εκτύπωση απαιτούν γενικά περισσότερη ενέργεια για να παραχθούν από τα παραδοσιακά μεταλλικά πλινθώματα [38,39]. Ομοίως, οι σκληρυμένες με υπεριώδη ακτινοβολία ρητίνες που χρησιμοποιούνται σε ορισμένες διαδικασίες τρισδιάστατης εκτύπωσης είναι τοξικές στην υγρή τους μορφή, αν και θεωρούνται μη τοξικές όταν στερεοποιηθούν [44,45].

Παρά αυτές τις προκλήσεις, οικονομικοί παράγοντες μπορεί να ενθαρρύνουν την υιοθέτηση πιο οικολογικών υλικών στην τρισδιάστατη εκτύπωση. Για παράδειγμα, ενώ τα εναλλακτικά υλικά όπως το PLA είναι συχνά πιο δαπανηρά λόγω περιορισμένων κλιμάκων παραγωγής, η σημαντική μείωση του κόστους εργασίας που προσφέρει η τρισδιάστατη εκτύπωση μπορεί να καταστήσει αυτά τα υλικά οικονομικά βιώσιμα. Η κατάργηση των οικονομικών κλίμακας στην τρισδιάστατη εκτύπωση, όπου η εναλλαγή από το ένα υλικό στο άλλο δεν συνεπάγεται πρόσθετο κόστος λόγω της απουσίας απαιτήσεων εργαλείων, υποστηρίζει επίσης τη χρήση ευρύτερου φάσματος υλικών [37]. Αυτή η ευελιξία ενισχύεται από τα επιχειρηματικά μοντέλα πολλών εταιρειών τρισδιάστατης εκτύπωσης, που προωθούν τον πειραματισμό με εναλλακτικά υλικά.

Η τεχνική, εμπορική και βιομηχανική αποδοχή νέων υλικών θέτει σημαντικά εμπόδια. Αυτά περιλαμβάνουν τη συμβατότητα με τις υπάρχουσες τεχνολογίες τρισδιάστατης εκτύπωσης, τη διαθεσιμότητα σε κλίμακα και την αντιστοίχιση ιδιοτήτων υλικού σε συγκεκριμένες περιπτώσεις χρήσης [52,53]. Επιπλέον, τα περιβαλλοντικά οφέλη από τη χρήση βιώσιμων και συντονισιμων υλικών στην τρισδιάστατη εκτύπωση εξαρτώνται από τη συνεχή καινοτομία και ανάπτυξη, που ενδεχομένως υποστηρίζονται από στοχευμένη χρηματοδότηση της έρευνας.

Συνοπτικά, ενώ η τρισδιάστατη εκτύπωση παρουσιάζει ευκαιρίες για την προώθηση της χρήσης βιώσιμων υλικών, εξακολουθούν να υπάρχουν σημαντικές προκλήσεις όσον αφορά τις ιδιότητες των υλικών, τη χρήση ενέργειας διεργασίας και τις συνολικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις [54,57]. Η υπέρβαση αυτών των προκλήσεων θα απαιτήσει συνεχή τεχνολογική καινοτομία και πιθανώς παρέμβαση πολιτικής για την προώθηση πιο βιώσιμων πρακτικών στον αναπτυσσόμενο τομέα της τρισδιάστατης εκτύπωσης.

#### **4.6 Κοινωνικά οφέλη και η ανάγκη για πράσινη τρισδιάστατη εκτύπωση σε κλίμακα**

Η δυνατότητα βιωσιμότητας της τρισδιάστατης εκτύπωσης μπορεί να επεκταθεί πέρα από τα περιβαλλοντικά οφέλη για να συμπεριλάβει σημαντικές κοινωνικές επιπτώσεις, κυρίως μέσω της οικονομικής ενδυνάμωσης. Αυτή η τεχνολογία μειώνει τα εμπόδια για την είσοδο στη μεταποίηση για τις μικρές επιχειρήσεις και τα άτομα με περιορισμένο κεφάλαιο [70-75]. Με πρόσβαση σε υπολογιστή με μέτρια ικανότητα και λογισμικό CAD, μπορεί κανείς να σχεδιάσει και να παράγει εξαρτήματα υψηλής ποιότητας χωρίς το υψηλό κόστος που σχετίζεται με τη δημιουργία παραδοσιακών γραμμών μαζικής παραγωγής. Αυτός ο εκδημοκρατισμός της μεταποίησης θα μπορούσε να διαδραματίσει κρίσιμο ρόλο στη μείωση της εισοδηματικής ανισότητας στα ανεπτυγμένα έθνη και να βοηθήσει στην εκβιομηχάνιση των αναπτυσσόμενων χωρών.



Ωστόσο, η μετάβαση από τις παραδοσιακές μεθόδους κατασκευής, όπως η χύτευση με έγχυση στην τρισδιάστατη εκτύπωση, δεν έρχεται χωρίς περιβαλλοντικές προκλήσεις [45-48]. Οι τρέχοντες τρισδιάστατοι εκτυπωτές μπορεί να δημιουργήσουν περιβαλλοντικό πρόβλημα εάν αντικαταστήσουν τη χύτευση με έγχυση για μαζική κατασκευή, αλλά η αντικατάσταση της μηχανικής για εξαρτήματα με κοίλο κέλυφος θα μπορούσε να αποφέρει περιβαλλοντικά οφέλη, υπό την προϋπόθεση ότι υπάρχει σημαντική μείωση στην κατανάλωση ενέργειας ανά εκτυπωμένο μέρος και μείωση της ενσωματωμένης επιπτώσεις των υλικών εκτύπωσης [52,53].

Οι στρατηγικές βιωσιμότητας για την τρισδιάστατη εκτύπωση ποικίλλουν ανάλογα με τον τύπο του εκτυπωτή και επικεντρώνονται κυρίως στη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας και της σπατάλης υλικών. Μια κοινή στρατηγική σε όλους τους τύπους εκτυπωτών είναι η ελαχιστοποίηση της χρήσης ενέργειας σε αδράνεια. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί ρυθμίζοντας τους εκτυπωτές ώστε να εισέρχονται αυτόματα σε καταστάσεις αδράνειας χαμηλής κατανάλωσης μετά την εκτύπωση και βελτιστοποιώντας την κοινή χρήση εκτυπωτή μεταξύ πολλών χρηστών [77,78]. Μια άλλη καθολική προσέγγιση είναι ο σχεδιασμός εκτυπωτών για μεγαλύτερη ενεργειακή απόδοση, όπως η προσθήκη μόνωσης γύρω από τα θερμαινόμενα εξαρτήματα για τη μείωση της απώλειας ενέργειας.

Οι στρατηγικές μείωσης των επιπτώσεων των υλικών ποικίλλουν επίσης, αλλά γενικά περιλαμβάνουν ρύθμιση των ιδιοτήτων του υλικού για τη βελτίωση της βιωσιμότητας. Αυτό μπορεί να περιλαμβάνει τη χρήση κομποστοποιήσιμων βιοπολυμερών, ειδικά για συστήματα φωτοπολυμερών που συνήθως ασχολούνται με εγγενώς μη ανακυκλώσιμα υλικά [66-69]. Για τους εκτυπωτές πυροσυσσωμάτωσης μετάλλων, η βελτίωση της δυνατότητας ανακύκλωσης των μεταλλικών σκονών και η ανάπτυξη διαδικασιών παραγωγής αυτών των σκονών από ανακυκλωμένα μέταλλα αποτελούν προτεραιότητα.

Ένα καινοτόμο παράδειγμα είναι το έργο Solar Sinter του Markus Kayser, το οποίο χρησιμοποιεί ηλιακή ενέργεια για τη σύντηξη άμμου σε γυαλί. Αν και είναι κυρίως επίδειξη και δεν είναι ακόμη πρακτικό για βιομηχανικές εφαρμογές, δείχνει τη δυνατότητα χρήσης άφθονων, μη τοξικών τοπικών πόρων για τρισδιάστατη εκτύπωση χωρίς σημαντική κατανάλωση ενέργειας. Παρά αυτές τις εξελίξεις, απαιτείται περαιτέρω ανάπτυξη για την ενίσχυση της εμπορικής βιωσιμότητας και της φυσικής απόδοσης των βιώσιμων υλικών. Αυτά τα υλικά πρέπει να είναι ανταγωνιστικά σε κόστος και να ενσωματώνονται αποτελεσματικά με τα τρέχοντα συστήματα ανακύκλωσης χωρίς να προκαλούν διαταραχές. Καθώς η τεχνολογία της τρισδιάστατης εκτύπωσης εξελίσσεται, υπάρχει μια σαφής ευκαιρία να μειωθεί σημαντικά το περιβαλλοντικό αποτύπωμα της κατασκευής με τη χρήση υλικών χαμηλού αντίκτυπου και ενεργειακά αποδοτικών διαδικασιών [76,80].



Σχήμα 3-7. Solar Sinter του Markus Kayser

#### Βιβλιογραφία κεφαλαίου 4

- [1] Eiy, Il, KO A. A. "np1-1MeHeH1-1e 3d npl-1HTepos B CTp01-1Te/lbCTBe, ,ll,0CT0l-1HCTBa 1-1 He,l],0CTaTKl-1 TeXH0/lOrl-1." KpacH0RpcK:111HHosau,1-10HHb1i'.1 u,eHTp pa3B1-1Tl-1R06pa30BaHl-1R 1-1 HayKl-1, 2017.
- [2] nyHesa, A. A. "np1-1MeHeH1-1e 3d-ne4arn s cTpo1-1Te11bcTse 1-1 nepcneKrnBb1eepa3s1-1rnR." BecTHl-1K nepMCKOroHau,1-10Ha/lbHOro1-1cc11e,£1,0BaTe/lbCKOroyH1-1Bepc1-1TeTa, 2017, T.8, NQl, c. 90-101.
- [3] Topw1-1H, A. O. "nepcneKrnBb11-1cno11b30BaH1-1R 3D-np1-1HTepa s cTpo1-1Te11bcTse." Ycnex1-1 s x1-1M1-11-1 1-1 Xl-1Ml-14eCKOli::iTeXH0/lOrl-11-1, TOM XXX, 2016, NQ 7, c.118-120.
- [4] Warns, C. B., CaBl-1U,Kl-1i::i H. B., Kapnyw1-1H C. A. "06o6w,eH1-1e l-1HHOBaU,l-10HHblXTeXH0/lOrl-1i::i 3D-ne4arn CTp01-1Te/lbHblX06beKTOB ,ll,/lR pa3pa60TKl-1CTapTanos." CTp01-1Te/lbCTBO MaTep1-1a11ose,£1,eH1-1eMaw1-1HocTpoeh1-1e, Bbm. 99, ,Ll,,:rBY3 «nrACA», 2017, c. 194-200.
- [5] Warszawski, A., Navan, R. "Implementation of Robotics in Building: Current Status and Future Prospects." Journal of Construction Engineering and Management, 1998, Vol. 124, iss. 1, p. 31-41. Available at: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(1998\)124:1\(31\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(1998)124:1(31)).
- [6] "B 4eM yH1-1Ka11bH0CTb 3D-np1-1HTepa APIS COR." Construction 3D printing, 2016. Available at: <http://apis-cor.com/3d-printer>.
- [7] "Eia30BbleOCHOBbl 3D ne4arn." «CMapT-np1-1HT» Bee o 3D np1-1HTepax 1-1 3D ne4arn s YKpa1-1He 1-1 s M1-1pe, 2016. Available at: [www.xn--3-htbdlzkhdq6g.com.ua/blog](http://www.xn--3-htbdlzkhdq6g.com.ua/blog).
- [8] Kurman, M., Lipson, H. Fabricated: The New World of 3D Printing. 320 p., 3D Systems, 2012.
- [9] Andrews, R. et al. "Continuous production of aligned carbon nanotubes: A step closer to commercial realization." Chemical Physics Letters, Vol. 303, Elsevier, Amsterdam, 1999, pp. 467-474. Available at: [http://dx.doi.org/10.1016/S0009-2614\(99\)00282-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0009-2614(99)00282-1).
- [10] Apple. "iPhone 6 Environmental Report." 2014. Available at: [www.apple.com/environment/reports/docs/iPhone6\\_PER\\_Sept2014.pdf](http://www.apple.com/environment/reports/docs/iPhone6_PER_Sept2014.pdf) (accessed 2 February 2015).
- [11] Askin, R.G., Goldberg, J.B. Design and Analysis of Lean Production Systems. John Wiley & Sons, New York, 2007.
- [12] Atzeni, E., Salmi, A. "Economics of additive manufacturing for end-usable metal parts." International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 62, Springer Verlag, London, 2012, pp. 1147-1155. Available at: <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-011-3878-1>.
- [13] Baechler, C., DeVuono, M., Pearce, J.M. "Distributed recycling of waste polymer into RepRap feedstock." Rapid Prototyping Journal, Vol. 19, Emerald Group Publishing, 2013, pp. 118-125. Available at: <http://dx.doi.org/10.1108/13552541311302978>.
- [14] Bammani, S.S., Birajdar, P.R., Metan, S.S. "Dental Crown Manufacturing using Stereolithography Method." Proceedings of International Conference on Advances in Industrial and Production Engineering, 2012, pp. 7-10. Available at: <http://searchdl.org/index.php/conference/downloadPDF/555>.
- [15] Banerjee, A., Solomon, B.D. "Eco-labeling for energy efficiency and sustainability: a meta-evaluation of US programs." Energy Policy, Vol. 31, Elsevier, Amsterdam, 2003, pp. 109-123. Available at: [http://dx.doi.org/10.1016/S0301-4215\(02\)00012-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0301-4215(02)00012-5).
- [16] Baumers, M. et al. "Transparency Built-in." Journal of Industrial Ecology, Vol. 17, John Wiley & Sons, New York, 2013, pp. 418-431. Available at: <http://dx.doi.org/10.1111/j.1530-9290.2012.00512.x>.
- [17] Baumers, M. et al. "Sustainability of additive manufacturing: measuring the energy consumption of the laser sintering process." Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B, Journal of Engineering Manufacture, Vol. 225, Institution of Mechanical Engineers, 2011a, pp. 2228-2239. Available at: <http://dx.doi.org/10.1177/0954405411406044>.
- [18] Baumers, M. et al. "Energy inputs to additive manufacturing: Does capacity utilization matter?" Proceedings of the 2011 Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium, 2011b, pp. 30-40.
- [19] Baumers, M., Holweg, M., Rowley, J. "The economics of 3D printing: A total cost perspective." Project report, University of Nottingham, 2016.

- [20] BEA (Bureau of Economic Analysis). "Use of commodities by industry valued at producers' prices, 2007." Input-Output Accounts Data, Bureau of Economic Analysis, 2014. Available at: [www.bea.gov/industry/io\\_annual.htm](http://www.bea.gov/industry/io_annual.htm).
- [21] Beyer, C. "Strategic Implications of Current Trends in Additive Manufacturing." *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 136, The American Society of Mechanical Engineers, 2014, pp. 064701-1. Available at: <http://dx.doi.org/10.1115/1.4028599>.
- [22] Bhasin, V., Bodla, M.R. "Impact of 3D printing on global supply chains by 2020." Doctoral dissertation, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Mass., 2014.
- [23] Biggs, J. "The upcycling Filabot turns regular plastic scrap into 3D printer filament." TechCrunch, 2013. Available at: <http://social.techcrunch.com/2013/01/13/the-upcycling-filabot-turns-regular-plastic-scrap-into-3d-printer-filament/> (accessed 29 January 2015).
- [24] Birtchnell, T., Hoyle, W. *3D Printing for Development in the Global South: The 3D4D Challenge*. Palgrave Macmillan, London, 2014. Available at: <http://dx.doi.org/10.1057/9781137365668>.
- [25] Bjorn, A., MacLean, H. "A comparison of US and Canadian industry environmental performance using EIO-LCA models." Presentation at the InLCA/LCM conference, Seattle, 27 September, 2003. Available at: <http://documentslide.com/documents/a-comparison-of-us-and-canadian-industry-environmental-performance-using-eio-lca.html>.
- [26] Bohm, R.A. et al. "The costs of municipal waste and recycling programs." *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 54, Elsevier, Amsterdam, 2010, pp. 864-871. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2010.01.005>.
- [27] Bot, B.L., Neumann, C.-S. "Growing pains for logistics outsourcers." *McKinsey Quarterly*, Vol. 2, McKinsey & Company, 2003, pp. 68-77.
- [28] Bourell, D.L., Leu, M.C., Rosen, D.W. "Roadmap for additive manufacturing: identifying the future of freeform processing." Report from the 2009 Roadmap for Additive Manufacturing Workshop, The University of Texas at Austin, 2009. Available at: <http://wohlersassociates.com/roadmap2009A.pdf>.
- [29] Campbell, T.A., Ivanova, O.S. "3D printing of multifunctional nanocomposites." *Nano Today*, Vol. 8, Elsevier, Amsterdam, 2013, pp. 119-120. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.nantod.2012.12.002>.
- [30] Cialdini, R.B. *Influence: The Psychology of Persuasion*, revised edition. HarperCollins, New York, 1993.
- [31] Coetzee, G. "Thingiverse receives first DMCA takedown." Hackaday.com, 2011. Available at: <http://hackaday.com/2011/02/20/thingiverse-receives-first-dmca-takedown/> (accessed 1 February 2015).
- [32] Cohen, D., Sargeant, M., Somers, K. "3-D printing takes shape." *McKinsey Quarterly*, Vol. 1, McKinsey & Company, 2014, pp. 1-6.
- [33] Conner, B.P. et al. "Making sense of 3-D printing: Creating a map of additive manufacturing products and services." *Additive Manufacturing*, Inaugural Issue, Vols. 1-4, Elsevier, Amsterdam, 2014, pp. 64-76. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.addma.2014.08.005>.
- [34] Dahmus, J.B., Gutowski, T.G. "What gets recycled: an information theory based model for product recycling." *Environmental Science & Technology*, ACS Publications, Vol. 41, 2007, pp. 7543-7550. Available at: <http://dx.doi.org/10.1021/es062254b>.
- [35] Davidson, P. "3-D printing could remake US manufacturing." *USA Today*, 10 July 2012. Available at: <http://usatoday30.usatoday.com/money/industries/manufacturing/story/2012-07-10/digitalmanufacturing/56135298/1>.
- [36] Davis, J. "This is the world's first 3D printed electric car." *Business Insider*, 2014. Available at: [www.businessinsider.com/this-is-the-worlds-first-3d-printed-electric-car-2014-12#ixzz3QB6iqz5x](http://www.businessinsider.com/this-is-the-worlds-first-3d-printed-electric-car-2014-12#ixzz3QB6iqz5x) (accessed 15 January 2015).
- [37] Dichter, T.W. *Despite Good Intentions: Why Development Assistance to the Third World Has Failed*. University of Massachusetts Press, Amherst, 2003.
- [38] Dotchev, K., Yusoff, W. "Recycling of polyamide 12 based powders in the laser sintering process." *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 15, Emerald Group Publishing Limited, 2009, pp. 192-203. Available at: <http://dx.doi.org/10.1108/13552540910960299>.
- [39] Ecofys. "World GHG emissions flow chart 2010." 2013. Available at: [www.ecofys.com/files/files/asn-ecofys-2013-world-ghg-emissions-flow-chart-2010.pdf](http://www.ecofys.com/files/files/asn-ecofys-2013-world-ghg-emissions-flow-chart-2010.pdf) (accessed 10 March 2014).
- [40] Ecovative. "Mushroom Packaging." Webpage, N.D. Available at: [www.ecovatedesign.com/mushroom-packaging](http://www.ecovatedesign.com/mushroom-packaging) (accessed 22 October 2016).

- [41] Fairs, M. "Mycelium Chair by Eric Klarenbeek is 3D-printed with living fungus." Dezeen, 2013. Available at: [www.dezeen.com/2013/10/20/mycelium-chair-by-eric-klarenbeek-is-3d-printed-with-living-fungus/](http://www.dezeen.com/2013/10/20/mycelium-chair-by-eric-klarenbeek-is-3d-printed-with-living-fungus/) (accessed 20 February 2017).
- [42] Faludi, J. et al. "Comparing environmental impacts of additive manufacturing vs. traditional machining via life-cycle assessment." *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 21, Emerald Group Publishing Limited, 2015a, pp. 14-33. Available at: <http://dx.doi.org/10.1108/RPJ-07-2013-0067>.
- [43] Faludi, J. et al. "Does material choice drive sustainability of 3D printing?" *International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering*, Vol. 9/2, World Academy of Science, Engineering and Technology, 2015b, pp. 216-223. Available at: <https://waset.org/Publication/does-material-choice-drive-sustainability-of-3d-printing-/10000327>.
- [44] Faludi, J., Lepech, M.D., Loisos, G. "Using life cycle assessment methods to guide architectural decision-making for sustainable prefabricated modular buildings." *Journal of Green Building*, Vol. 7, College Publishing, 2012, pp. 151-170. Available at: <http://dx.doi.org/10.3992/jgb.7.3.151>.
- [45] Freedman, D.H. "Layer by layer." *MIT Technology Review*, 19 December 2011. Available at: [www.technologyreview.com/s/426391/layer-by-layer/](http://www.technologyreview.com/s/426391/layer-by-layer/).
- [46] Frischknecht, R. et al. "The ecoinvent database: Overview and methodological framework." *The International Journal of Life Cycle Assessment*, Vol. 10, Springer, Heidelberg, 2005, pp. 3-9. Available at: <http://dx.doi.org/10.1065/lca2004.10.181.1>.
- [47] Gill, K. *Of Poverty and Plastic: Scavenging and Scrap Trading Entrepreneurs in India's Urban Informal Economy*. Oxford University Press, 2009. Available at: <http://dx.doi.org/10.1093/acprof:oso/9780198060864.001.0001>.
- [48] Goedkoop, M.J. et al. "ReCiPe 2008, a life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level; First edition Report I: Characterisation." Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieu, The Hague, 2009. Available at: [www.lcia-recipe.net](http://www.lcia-recipe.net).
- [49] Granta Design. "Acrylonitrile butadiene styrene (ABS)." Granta Design Limited, 2009. Available at: [www.grantadesign.com/education/datasheets/ABS.htm](http://www.grantadesign.com/education/datasheets/ABS.htm) (accessed 19 January 2015).
- [50] Grenchus, E. et al. "Linking demanufacturing operations with product DFE initiatives." *Proceedings of the 1998 IEEE International Symposium on Electronics and the Environment*, 1998, pp. 270-274. Available at: <http://dx.doi.org/10.1109/ISEE.1998.675070>.
- [51] Grossman, B. "Oldest News." *Bathsheba.com*, 2003. Available at: [www.bathsheba.com/artist/news\\_old\\_0.html](http://www.bathsheba.com/artist/news_old_0.html) (accessed 1 May 2015).
- [52] Hanssen, O.J. "Environmental impacts of product systems in a life cycle perspective: a survey of five product types based on life cycle assessments studies." *Journal of Cleaner Production*, Vol. 6, Elsevier, Amsterdam, 1998, pp. 299-311. Available at: [http://dx.doi.org/10.1016/S0959-6526\(98\)00031-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0959-6526(98)00031-6).
- [53] Hendrickson, C. et al. "Economic input-output models for environmental life-cycle assessment." *Environmental Science & Technology*, Vol. 32, American Chemical Society, 1998, pp. 184A-191A. Available at: <http://dx.doi.org/10.1021/es983471i>.
- [54] Hornick, J., Roland, D. "Many 3D printing patents are expiring soon: Here's a round up & overview of them." *3D Printing Industry*, 2013. Available at: <https://3dprintingindustry.com/news/many-3d-printing-patents-expiring-soon-heres-round-overview-21708/> (accessed 4 February 2015).
- [55] Hunter, P. "Transparency, Product Disclosures, and Reducing Embodied Carbon and Energy." Presentation at the 2013 Buildex conference, Vancouver.
- [56] Khoshnevis, B. et al. "Contour crafting simulation plan for lunar settlement infrastructure buildup." *Earth and Space 2012: Engineering, Science, Construction, and Operations in Challenging Environments*, 2012, pp. 1458-1467. Available at: <http://dx.doi.org/10.1061/9780784412190.155>.
- [57] Kilner, G.E. "Biodegradable and recyclable electrostatically shielded packaging for electronic devices and media." US Patent 5,177,660, issued 5 January 1993.
- [58] Kong, Y.L. et al. "3D printed quantum dot light-emitting diodes." *Nano Letters*, Vol. 14, ACS Publications, 2014, pp. 7017-7023. Available at: <http://dx.doi.org/10.1021/nl5033292>.
- [59] Krassenstein, E. "Filabot launches incredible new 3D printing filaments – Graphite infused ABS, carbon nano tube and more." *3DPrint.com*, 2014. Available at: <http://3dprint.com/13724/filabot-new-filaments-graphite/> (accessed 29 January 2015).

- [60] Kreiger, M. et al. "Distributed recycling of post-consumer plastic waste in rural areas." MRS Proceedings, Vol. 1492, Cambridge University Press, 2013, pp. 91-96.
- [61] Kreiger, M., Pearce, J.M. "Environmental life cycle analysis of distributed three-dimensional printing and conventional manufacturing of polymer products." ACS Sustainable Chemistry & Engineering, Vol. 1, ACS Publications, 2013, pp. 1511-1519. Available at: <http://dx.doi.org/10.1021/sc400093k>.
- [62] Larsen, B.M., Nesbakken, R. "Norwegian emissions of CO2 1987-1994: A study of some effects of the CO2 tax." Environmental and Resource Economics, Vol. 9, 1997, pp. 275-290. Available at: <http://dx.doi.org/10.1023/A:1026464129609>.
- [63] Liaukus, C. "Energy efficiency measures to incorporate into remodeling projects." National Renewable Energy Laboratory (NREL), Golden, CO, 2014. Available at: [www.nrel.gov/docs/fy15osti/63154.pdf](http://www.nrel.gov/docs/fy15osti/63154.pdf).
- [64] Li, L. et al. "Laser nano-manufacturing – State of the art and challenges." CIRP Annals – Manufacturing Technology, Vol. 60, 2011, pp. 735-755. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2011.05.005>.
- [65] Li, L., Geiser, K. "Environmentally responsible public procurement (ERPP) and its implications for integrated product policy (IPP)." Journal of Cleaner Production, Vol. 13, 2005, pp. 705-715. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2004.01.007>.
- [66] Matos, G.R. "Use of Raw Materials in the United States From 1900 Through 2010." US Geological Survey, 2012. Available at: <https://pubs.usgs.gov/fs/2012/3140/pdf/fs2012-3140.pdf>.
- [67] Mayers, C.K. "Strategic, financial, and design implications of extended producer responsibility in Europe: A Producer Case Study." Journal of Industrial Ecology, Vol. 11, 2007, pp. 113-131. Available at: <http://dx.doi.org/10.1162/jiec.2007.1228>.
- [68] McDonald, S. "3D printing: A future collapse-compliant means of production." Proceedings of the Second Workshop on Computing within Limits, ACM, 2016, p. 4.
- [69] McKenna, B. "3D systems plans 50X speed increase for Google's Project Ara." The Motley Fool, 2014. Available at: [www.fool.com/investing/general/2014/06/13/3d-systems-plans-50x-speed-increase-for-googles-pr.aspx](http://www.fool.com/investing/general/2014/06/13/3d-systems-plans-50x-speed-increase-for-googles-pr.aspx) (accessed 1 October 2015).
- [70] McKinsey Global Institute. "Manufacturing the Future: The Next Era of Global Growth and Innovation." 2012. Available at: [www.mckinsey.com/business-functions/operations/our-insights/the-future-of-manufacturing](http://www.mckinsey.com/business-functions/operations/our-insights/the-future-of-manufacturing).
- [71] Meindl, J.D. "Beyond Moore's Law: The interconnect era." Computing in Science & Engineering, Vol. 5, 2003, pp. 20-24. Available at: <http://dx.doi.org/10.1109/MCISE.2003.1166548>.
- [72] Microsoft. "Getting started guide – Microsoft Standard Driver for 3D Printers." Microsoft.com, 2016. Available at: <https://msdn.microsoft.com/en-us/windows/hardware/drivers/3dprint/microsoft-standard-driver-for-3d-printers>.
- [73] Miettinen, J. et al. "Inkjet printed System-in-Package design and manufacturing." Microelectronics Journal, Vol. 39, 2008, pp. 1740-1750. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.mejo.2008.02.014>.
- [74] Mogas-Soldevila, L., Duro-Royo, J., Oxman, N. "Water-based robotic fabrication: Large-scale additive manufacturing of functionally graded hydrogel composites via multichamber extrusion." 3D Printing and Additive Manufacturing, Vol. 1, 2014, pp. 141-151. Available at: <http://dx.doi.org/10.1089/3dp.2014.0014>.
- [75] Molitch-Hou, M. "Hershey & 3D Systems Unveil New Cutting-Edge Chocolate 3D Printer at CES." 3Dprintingindustry.com, 2015. Available at: <https://3dprintingindustry.com/news/hershey-3d-systems-unveil-new-cutting-edge-chocolate-3d-printer-ces-39279/> (accessed 8 April 2015).
- [76] Morrow, W.R. et al. "Environmental aspects of laser-based and conventional tool and die manufacturing." Journal of Cleaner Production, Vol. 15, 2007, pp. 932-943. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2005.11.030>.
- [77] Mraz, S. "Care and feeding of living hinges." Machine Design, 2004. Available at: <http://machinedesign.com/fasteners/care-and-feeding-living-hinges> (accessed 1 May 2015).
- [78] Nelson, A. "The greening of US investment real estate-market fundamentals, prospects and opportunities." RREEF Research, San Francisco, 2007.
- [79] Olmsted, B.A., Davis, M. *Practical Injection Molding*. CRC Press, Boca Raton, FL, 2001.

## 5 Τεχνοοικονομική Ανάλυση

### 5.1 Εισαγωγή στην κυκλική οικονομία

Η επικρατούσα αρχή «take-make-waste» υπογραμμίζει ένα κρίσιμο ζήτημα όχι με τα ίδια τα απόβλητα αλλά με τη θεμελιώδη γραμμική οικονομία, η οποία συμβάλλει σημαντικά στις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και οδηγεί στην εξάντληση των πόρων που εκμεταλλεύονται κυρίως εύπορες μειονότητες τόσο στις αναπτυγμένες όσο και στις αναδυόμενες χώρες. Αυτή η εξόρυξη πόρων από τις τρέχουσες και τις προηγούμενες γενιές θα μπορούσε ενδεχομένως να εμποδίσει την παγκόσμια αναπτυξιακή πρόοδο, υποδηλώνοντας ότι η υιοθέτηση ενός μοντέλου κυκλικής οικονομίας θα μπορούσε να διορθώσει αυτήν την ανισότητα [1].

Η μετάβαση σε μη παρθένα και ανανεώσιμα υλικά δίνει τη δυνατότητα στις κατασκευαστικές εταιρείες να γεφυρώσουν τα κενά κυκλικότητας τους μειώνοντας την εξάρτησή τους από παρθένα υλικά. Αυτή η μετατόπιση μπορεί να μειώσει σημαντικά τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις που σχετίζονται με την εξόρυξη και την επεξεργασία ορυκτών και την καύση ορυκτών καυσίμων [2,6]. Επιπλέον, αυτή η μετάβαση είναι πιθανό να έχει αυξανόμενη εμπορική αξία λόγω του κυμαινόμενου κόστους υλικών και ενέργειας και της αυξημένης ζήτησης των πελατών για βιωσιμότητα.

Μια μετάβαση σε μια κυκλική αλυσίδα αξίας θα άλλαζε σημαντικά τις ροές υλικών, όπως παραδείγματος χάριν τα προϊόντα πετροβάμβακα, των οποίων η αλυσίδα αξίας θα μπορούσε να γίνει εξ ολοκλήρου κυκλική. Τα κρίσιμα βήματα προς αυτόν τον στόχο περιλαμβάνουν τη μετάβαση σε πρώτες ύλες που αποτελούνται εξ ολοκλήρου από μη παρθένα και ανανεώσιμα υλικά, τη βελτίωση των υποδομών αντίστροφης εφοδιαστικής και ανακύκλωσης και τη δημιουργία περισσότερων προϊόντων υψηλής αξίας που ευθυγραμμίζονται με τους προβλεπόμενους κύκλους υλικών [4,10]. Αρχικά, οι πρακτικές προμήθειας θα περιστρέφονταν από παρθένα και ορυκτά υλικά σε κυρίως μη παρθένα και ανανεώσιμες πηγές. Στη συνέχεια, αυτά τα μη παρθένα υλικά θα προέρχονται όλο και περισσότερο από τις προσπάθειες και τις συνεργασίες αντίστροφης εφοδιαστικής των ίδιων των κατασκευαστικών εταιρειών σε βιομηχανίες και υπηρεσίες διαχείρισης απορριμμάτων.

Επιπλέον, τα απόβλητα των ΧΥΤΑ προβλέπεται να μειωθούν σημαντικά καθώς βελτιώνονται οι υποδομές ανακύκλωσης για τα απόβλητα κατεδάφισης, ολοκληρώνοντας έτσι τους βρόχους υλικών. Επιπλέον, μια κυκλική οικονομία προωθεί ένα σύστημα όπου ο σχεδιασμός διασφαλίζει ότι τα προϊόντα και τα υλικά χρησιμοποιούνται συνεχώς, ακυρώνοντας την ανάγκη για εξόρυξη νέων πόρων. Αυτό το σύστημα στηρίζεται σε αρχές που στοχεύουν στην αποσύνδεση της παροχής νέων προϊόντων και υπηρεσιών από τη διαθεσιμότητα πεπερασμένων πόρων, την εξάλειψη των αποβλήτων και της ρύπανσης, τη διατήρηση υψηλής αξίας συστατικών και υλικών μέσω του σχεδιασμού για επαναχρησιμοποίηση και ανακυκλωσιμότητα και τη διατήρηση του φυσικού κεφαλαίου προωθώντας τον κύκλο των θρεπτικών ουσιών και την αναγέννηση του οικοσυστήματος[3,5].

Ουσιαστικά, η κυκλική οικονομία παρουσιάζει ένα δυναμικό σύστημα μετασχηματισμού και όχι στατικής ύπαρξης, προάγοντας μια στροφή προς τους αναγεννητικούς πόρους και την καθαρή ενέργεια και ενσωματώνοντας μια ολοκληρωμένη στρατηγική για τη βιώσιμη ανάπτυξη. Αυτή η προσέγγιση όχι μόνο ενισχύει τη βιωσιμότητα της αλυσίδας αξίας των κατασκευών, αλλά προσφέρει επίσης ευρύτερα κοινωνικά οφέλη, εμπνέοντας τα ενδιαφερόμενα μέρη σε όλο το φάσμα να συμμετάσχουν στην ενίσχυση της κυκλικότητας στις ροές υλικών.

Η κυκλική οικονομία παρουσιάζει μια μετασχηματιστική προσέγγιση για την ενίσχυση της βιωσιμότητας στον κατασκευαστικό τομέα, σημαντικό καταναλωτή παγκόσμιων πόρων και σημαντικό συντελεστή στις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου. Αυτό το μοντέλο εστιάζει σε ευκαιρίες υψηλού επιπέδου εντός της αλυσίδας αξίας των κατασκευών που θα μπορούσαν να ωφελήσουν σημαντικά την κοινωνία. Αυτές οι ευκαιρίες περιγράφονται σε ένα πλαίσιο που ονομάζεται "7 στοιχεία", το οποίο έχει σχεδιαστεί για να αυξήσει την κυκλικότητα στις ροές υλικών και να ενθαρρύνει τους ενδιαφερόμενους να συμμετάσχουν σε αυτόν τον βιώσιμο μετασχηματισμό. Αυτοί οι μοχλοί είναι δομημένοι γύρω από τρία βασικά σημεία μόχλευσης εντός της τρέχουσας αλυσίδας αξίας: πρώτον, αύξηση της χρήσης μη παρθένων και

αναγεννητικών υλικών σε αντίθεση με παρθένους πετρώματα και ορυκτές πηγές. Δεύτερον, ανάπτυξη εφαρμογών για κυκλικά προϊόντα υψηλής αξίας. και τρίτον, αποτύπωση της αξίας που ενυπάρχει στα απόβλητα κατασκευών και κατεδαφίσεων [14,15].

Η κυκλική οικονομία βασίζεται σε δυναμικά συστήματα που δίνουν έμφαση στις διαδικασίες μετασχηματισμού. Τα επτά κρίσιμα στοιχεία στοχεύουν να επιβραδύνουν, να περιορίσουν και να κλείσουν τους βρόχους πόρων κατά τη μετάβαση σε αναγεννητικούς πόρους και καθαρή ενέργεια. Αυτή η στρατηγική περιλαμβάνει την ιεράρχηση των αναγεννητικών πόρων, τη μεγιστοποίηση του κύκλου ζωής των υπαρχόντων υλικών, τη χρήση των απορριμμάτων ως πόρους, την επανεξέταση των επιχειρηματικών μοντέλων, τον σχεδιασμό για μελλοντική χρήση, την αξιοποίηση της ψηφιακής τεχνολογίας και την ενίσχυση της συνεργασίας για την ενίσχυση της κοινής αξίας.

Στον κατασκευαστικό τομέα, η υιοθέτηση κυκλικών αρχών έχει σημαντικές δυνατότητες λόγω της εκτεταμένης χρήσης υλικών της βιομηχανίας, η οποία αντιπροσωπεύει πάνω από το ήμισυ της συνολικής χρήσης υλικών στη Γη [7]. Οι μεθοδολογίες κυκλικής κατασκευής επικεντρώνονται στο σχεδιασμό, την κατασκευή και την κατεδάφιση κατασκευών με τρόπο που όχι μόνο διευκολύνει την επαναχρησιμοποίηση υλικών υψηλής ποιότητας αλλά και ευθυγραμμίζεται με τους στόχους βιωσιμότητας στην ενέργεια, τη διαχείριση του νερού, τη βιοποικιλότητα και τη διατήρηση του οικοσυστήματος.

Παρά τα πολλά δομικά στοιχεία που επαναχρησιμοποιούνται σήμερα, όπως σκυρόδεμα και πέτρες για θεμέλια δρόμων, αυτός ο τύπος ανακύκλωσης συχνά υποβαθμίζει την εγγενή ποιότητα των υλικών και δεν μειώνει την εξόρυξη νέων πόρων [8]. Ο υποχρεωτικός διαχωρισμός υλικών όπως το γυαλί, ο χάλυβας και το ξύλο θα μπορούσε να επιβληθεί για τη διατήρηση πολύτιμων πόρων. Επιπλέον, οι στοχευμένες λειτουργίες μπορούν να εξοικονομήσουν πολύτιμα υλικά από μη κυκλικά κτίρια μέσω της «αστικής εξόρυξης», αν και τα ανακυκλωμένα υλικά συχνά κοστίζουν περισσότερο από τα νέα.

Ο πολεοδομικός σχεδιασμός παίζει επίσης κρίσιμο ρόλο, με πιθανές στρατηγικές όπως η αξιοποίηση κενής γης στο κέντρο της πόλης και η επιβολή νέων οικοδομικών κανονισμών για χρήση λιγότερου τσιμέντου, γυαλιού και χάλυβα, ενσωμάτωσης ενός συγκεκριμένου ποσοστού επαναχρησιμοποιούμενων υλικών και επίτευξης ενεργειακά θετικής κατάστασης [11]. Επιπλέον, η υποχρεωτική επαναχρησιμοποίηση υφιστάμενων εξαρτημάτων θα μπορούσε να επηρεάσει βαθιά τον σχεδιασμό και την κατασκευή νέων κτιρίων.

Οι μέθοδοι βιομηχανικής παραγωγής όπως η τρισδιάστατη εκτύπωση μπορούν να εξορθολογίσουν τη διαδικασία κατασκευής, μειώνοντας πιθανώς το κόστος κατά 30% και μειώνοντας στο μισό τους χρόνους παράδοσης. Για παράδειγμα, το 2014, η κινεζική εταιρεία Winsun εκτύπωσε δέκα σπίτια σε 24 ώρες με σημαντικά μειωμένο κόστος υλικού, χρησιμοποιώντας ένα μείγμα ξηρού τσιμέντου και απορριμμάτων κατασκευών. Η πρωτοβουλία της Winsun να ιδρύσει εργοστάσια ανακύκλωσης για τη μετατροπή των απορριμμάτων σε οικονομικά αποδοτικό εκτυπωτικό «μελάνι» αποτελεί παράδειγμα της καινοτόμου συγχώνευσης των αρχών της κυκλικής οικονομίας με τις σύγχρονες τεχνολογίες παραγωγής [12].

## 5.2 Ανάλυση των κατηγοριών των εκτυπωτών

Κατά την κατασκευή ενός κτιρίου μέσω τρισδιάστατης εκτύπωσης, το υλικό εναποτίθεται μεθοδικά σε στρώματα με μια αυτοματοποιημένη διαδικασία που ελέγχεται από έναν υπολογιστή, η οποία ακολουθεί ένα προσχεδιασμένο τρισδιάστατο μοντέλο του κτιρίου. Σε αυτή τη μέθοδο χρησιμοποιούνται διαφορετικοί τύποι εκτυπωτών, αντανακλώντας την καινοτόμο φύση της τρισδιάστατης εκτύπωσης στον κατασκευαστικό τομέα. Επί του παρόντος, μόνο ένας περιορισμένος αριθμός εταιρειών και ερευνητικών κέντρων παγκοσμίως ειδικεύονται σε αυτήν την τεχνολογία, καθεμία από τις οποίες αναπτύσσει διαφορετικούς τύπους τρισδιάστατων εκτυπωτών. Παρακάτω, εξερευνούμε τις κύριες κατηγορίες εκτυπωτών και επισημαίνουμε τις διακρίσεις τους [9].

### 5.2.1 Εκτυπωτές Gantry

Ο εκτυπωτής τύπου gantry είναι ο πιο διαδεδομένος τύπος εκτυπωτή τρισδιάστατης σχεδίασης. Χρησιμοποιεί μια γέφυρα – δικτύωμα στο οποίο τοποθετείται το ακροφύσιο εκτύπωσης. Έχει τη δυνατότητα να εκτυπώνει σε οποιοδήποτε μέρος εντός μια προκαθορισμένης ζώνης. Αποτελείται από μια σταθερή διάταξη τεσσάρων στηλών & τριών δοκών. Είναι κατάλληλος για εκτύπωση μεγάλων μονάδων, όπως για παράδειγμα διαμερίσματα. Επιπλέον είναι οικονομικά προσιτός. Λειτουργεί ως εξής:

- Η εκτύπωση ή η εναπόθεση του σκυροδέματος γίνεται μέσω μιας κεφαλής (nozzle).
- Το σύστημα ανάμειξης μετακινεί τη γέφυρα κονιάματος μέσω ενός εύκαμπτου σωλήνα.
- Ο έλεγχος γίνεται απομακρυσμένα και αυτοματοποιημένα

Αντιθέτως, υπάρχουν και προβλήματα στον εκτυπωτή αυτού του είδους. Αρχικά η κατασκευή και το μέγεθος του συστήματος gantry εξαρτάται από το μέγεθος της κατασκευής. Αυτό σημαίνει ότι δεν είναι πρακτικό και βιώσιμο ένας εκτυπωτής να προορίζεται και να είναι εξειδικευμένος σε μια μόνο κατασκευή ή να κατασκευάζεται ανά κατασκευή. Επιπλέον, η τοποθέτηση του gantry είναι σχετικά περίπλοκη και δύσκολη σε σχέση με άλλα συστήματα, δεδομένου ότι ο εκτυπωτής πρέπει να είναι μεγαλύτερος σε μέγεθος από την προς εκτύπωση δομή. Αυτό σημαίνει ότι όταν υπάρχουν μεγάλες κατασκευές, το μέγεθος του εκτυπωτή θα πρέπει να είναι ανάλογο, το οποίο σημαίνει μεγάλο κόστος κατασκευής του εκτυπωτή και δυσκολία μεταφοράς στο εργοτάξιο.

Οι μικροελέγκτες, το σύστημα του εκτυπωτή και ότι έχει σχέση με την είσοδο και έξοδο των εντολών τροφοδοτούνται μέσω μιας μονάδας ισχύος 12V.

Οι περισσότεροι εκτυπωτές τύπου gantry έχουν 3 βαθμούς ελευθερίας, αλλά υπάρχει και η δυνατότητα επιπλέον επέκτασης τους, όσον αφορά την περιστροφική κίνηση, το οποίο οδηγεί στη δημιουργία πιο σύνθετων κατασκευών.

Οι Gantry Printers, λειτουργούν με μια κεφαλή εκτύπωσης συνδεδεμένη σε ένα σύστημα σκελετών που διευκολύνει την κίνηση στους άξονες X, Y και Z. Ωστόσο, η λειτουργία τους περιορίζεται στην περιοχή που περικλείεται από τη γέφυρα. Αυτοί οι εκτυπωτές προσφέρουν σταθερότητα και ασφάλεια στην κατασκευή και μπορούν να κατασκευαστούν σχετικά εύκολα και φθηνά. Ωστόσο, παρουσιάζουν προκλήσεις στην κινητικότητα και τη μεταφορά, απαιτούν μεγάλο αποτύπωμα και το εύρος εκτύπωσής τους περιορίζεται εντός της εγκατάστασης του σκελετού.



Σχήμα 5-1. Εκτυπωτές 3DCP τύπου gantry

### 5.2.2 Ρομποτικοί εκτυπωτές

Αν και ο ρομποτικός βραχίονας χρησιμοποιείται αρκετά χρόνια στη βιομηχανία και σε διάφορων τύπων εφαρμογές, στο κομμάτι της 3d εκτύπωσης τσιμέντου είναι σχετικά νέα μέθοδος. Αποτελείται από ένα φορητό εκτυπωτή 3d εκτύπωσης κονιάματος. Η εναπόθεση και η χρήση του γίνεται μέσω ενός ρομποτικού βραχίονα, ο οποίος είναι στερεωμένος σ' έναν κινητό ή σε ένα ακίνητο μέρος. Όσον αφορά το κινητό μέρος, μπορεί να είναι ένα όχημα ερπυστριοφόρο, ώστε να κινείται και να ελίσσεται ο βραχίονας.



Γενικώς ο ρομποτικός βραχίονας είναι η πιο συνήθης κατασκευή σε μια βιομηχανία και πλέον εξελίσσεται και για την εκτύπωση 3d κονιάματος. Ένας ρομποτικός βραχίονας είναι κατάλληλος για εφαρμογές εκτύπωσης όπως τα θεμέλια, οι τοίχοι και οι οροφές. Πολύ σημαντικό στην εκτύπωση με ρομποτικό βραχίονα είναι η επαπτομενική συνέχεια για την ομαλότερη μετάβαση μεταξύ των layers καθώς και η διατήρηση σταθερής καμπυλότητας ώστε να δίνει καλύτερη αισθητικά εμφάνιση.

Στο σχήμα 5-2 παρουσιάζεται ένας ρομποτικός βραχίονας από την εταιρεία Cybe και μια κατασκευή τρισδιάστατης εκτύπωσης τσιμέντου με αυτού του είδους τον εκτυπωτή.

Οι ρομποτικοί εκτυπωτές, τοποθετούνται συνήθως κεντρικά εντός της καθορισμένης περιοχής εκτύπωσης, με το ακροφύσιο εκτύπωσης να βρίσκεται σε κατάλληλα διαμορφωμένο βραχίονα ή γερανό. Αυτοί οι εκτυπωτές είναι συμπαγείς και βελτιωμένοι για φορητότητα, συχνά μεταφερόμενοι μέσω γερανού. Τα κύρια μειονεκτήματα είναι το υψηλότερο κόστος απόκτησης και το εύρος εκτύπωσης που γενικά περιορίζεται σε μια συγκεκριμένη περιοχή, αν και αυτός ο περιορισμός μπορεί να μετριαστεί με τη χρήση πρόσθετων εκτυπωτών ή την επανατοποθέτηση της υπάρχουσας μονάδας.



(α)

(β)

**Σχήμα 5-2. (α) Ρομποτικός βραχίονας 3DCP της εταιρείας Cybe, (β) κατασκευή 3DCP**

### 5.2.3 Επιτόπιοι Εκτυπωτές – in situ

Οι Επιτόπιοι εκτυπωτές, είτε μεταφέρονται απευθείας στο εργοτάξιο (ρομποτικοί εκτυπωτές) είτε συναρμολογούνται εκεί (εκτυπωτές σκελετού), επιτρέποντας την επιτόπια εκτύπωση. Αυτή η ρύθμιση διευκολύνει μια απρόσκοπτη διαδικασία κατασκευής χωρίς την ανάγκη προκατασκευασμένων εξαρτημάτων και μειώνει τα υλικοτεχνικά βάρη. Ωστόσο, η διαδικασία κατασκευής είναι επιρρεπής στις καιρικές συνθήκες, δημιουργώντας ένα μειονέκτημα. Παραδείγματα in-situ εκτυπωτών περιλαμβάνουν τους AspisCor, Batiprinter, Cybe 3D Printer και Contour Crafting.

Αυτές οι παραλλαγές στην τεχνολογία της τρισδιάστατης εκτύπωσης απεικονίζουν το εύρος των προσεγγίσεων στο πεδίο, καθεμία με το μοναδικό σύνολο πλεονεκτημάτων και προκλήσεων [12]. Η επιλογή του τύπου εκτυπωτή εξαρτάται από συγκεκριμένες απαιτήσεις του έργου, συμπεριλαμβανομένων των περιορισμών κλίμακας, τοποθεσίας και προϋπολογισμού, αντανακλώντας τις διαφορετικές δυνατότητες και περιορισμούς της σύγχρονης τεχνολογίας τρισδιάστατης εκτύπωσης στις κατασκευές.

### 5.2.4 Εκτυπωτές εκτός τοποθεσίας – off site

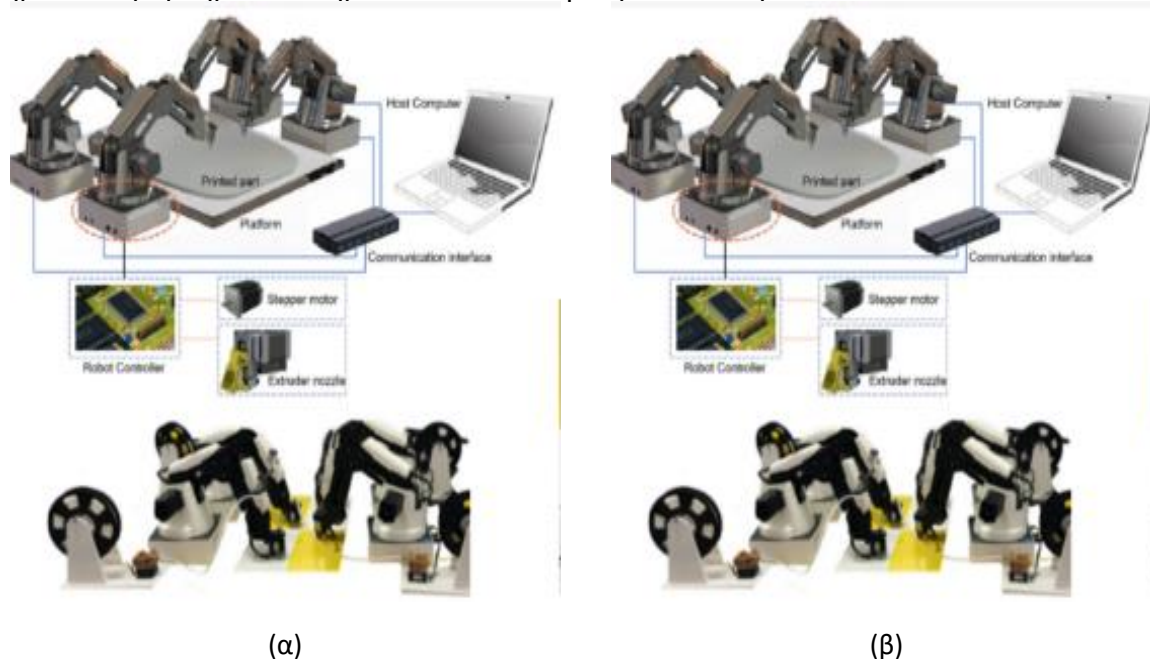
Οι εκτυπωτές εκτός τοποθεσίας συχνά περιλαμβάνουν τη χρήση προκατασκευασμένων στοιχείων που εκτυπώνονται σε εργοστασιακή ρύθμιση χρησιμοποιώντας μόνιμα εγκατεστημένους εκτυπωτές. Αφού εκτυπωθούν τα εξαρτήματα, μεταφέρονται στο εργοτάξιο για συναρμολόγηση. Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα αυτής της προσέγγισης είναι η σταθερότητα του εκτυπωτή, η οποία παραμένει ανεπηρέαστη από τις εξωτερικές καιρικές

συνθήκες. Ωστόσο, υπάρχουν αξιοσημείωτα μειονεκτήματα, όπως η ανάγκη μεταφοράς μεγάλων τυπωμένων στοιχείων στο εργοτάξιο και η απαίτηση για σημαντική χειρωνακτική εργασία για τη συναρμολόγηση αυτών των εξαρτημάτων επί τόπου.

### 5.2.5 Εκτυπωτές σμήνους

Οι ρομποτικοί βραχίονες μπορούν να εκτυπώνουν και σε ομάδες. Αυτό λέγεται εκτύπωση σμήνους. Πρακτικά, πρόκειται για πάνω από 2 ρομποτικούς βραχίονες οι οποίοι εκτυπώνουν την ίδια κατασκευή, ο καθένας το δικό του κομμάτι και έτσι η τελική κατασκευή παραδίδεται πιο γρήγορα. Η δυσκολία που προκύπτει από αυτή την διαδικασία είναι ότι θα πρέπει οι ρομποτικοί βραχίονες να είναι πλήρως συγχρονισμένοι, να εκτυπώνουν με την ίδια ταχύτητα εκτύπωσης, ο extruder θα πρέπει να είναι της ίδιας ποιότητας, ώστε να μην υπάρχουν διαφοροποιήσεις στην κατασκευή. Επιπλέον η αντλία που ωθεί μείγμα στον extruder θα πρέπει να το στέλνει και στους 2 ή σε περισσότερους ρομποτικούς βραχίονες με την ίδια ταχύτητα. Οι κινήσεις των ρομπότ θα πρέπει να έχουν σχεδιαστεί λεπτομερώς και με μεγάλη ακρίβεια. Έτσι ώστε να αποφεύγονται οι συγκρούσεις. Ο εντοπισμός του κάθε ρομπότ θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο ακριβής, έτσι ώστε και τα εκτυπωσιμα κομμάτια να είναι ευθυγραμμισμένα.

Αξίζει να σημειωθεί ότι οι μηχανικές ιδιότητες των εκτυπωμένων δοκιμίων με πολλά ρομπότ είναι αρκετά καλές, καθώς δε διακόπτεται η εκτύπωση και εκτυπώνονται μεγαλύτερες επιφάνειες. Σε μια συμβατική τρισδιάστατη εκτύπωση τσιμέντου, η εκτύπωση θα σταματούσε σε ένα σημείο και έπειτα θα ξαναξεκινούσε από εκεί που σταμάτησε. Αυτό θα οδηγούσε σε σημειακό πρόβλημα στο σημείο που διακόπηκε η εκτύπωση.



Σχήμα 5-3. Ρομποτικοί βραχίονες σμήνους (α) σε σταθερή βάση, (β) σε κινητή βάση

**Πίνακας 5-1. Σύγκριση εκτυπωτών 3DCP**

Κατηγορία Εκτυπωτών	Περιγραφή	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα	Κόστος	Παραδείγματα Εκτυπωτών
<b>Gantry Printers</b>	Κεφαλή εκτύπωσης συνδεδεμένη σε σύστημα σκελετών που διευκολύνει την κίνηση στους άξονες X, Y και Z.	Σταθερότητα, ασφάλεια, ευκολία κατασκευής και χαμηλό κόστος.	Περιορισμένη κινητικότητα και μεταφορά, μεγάλο αποτύπωμα, περιορισμένο εύρος εκτύπωσης.	100.000\$ - 1.000.000\$	TotalKustom, Contour Crafting
<b>Ρομποτικοί Εκτυπωτές</b>	Κεντρικά τοποθετημένοι εντός της περιοχής εκτύπωσης, με ακροφύσιο εκτύπωσης σε βραχίονα ή γερανό.	Συμπαγείς και φορητοί, δυνατότητα μεταφοράς μέσω γερανού.	Υψηλότερο κόστος απόκτησης, περιορισμένο εύρος εκτύπωσης (μπορεί να μετριαστεί με πρόσθετους εκτυπωτές ή επανατοποθέτηση).	50.000\$ - 400.000\$	AspisCor, Batiprinter, Cybe 3D Printer, Contour Crafting
<b>Επιτόπιοι Εκτυπωτές</b>	Μεταφέρονται ή συναρμολογούνται στο εργοτάξιο, επιτρέποντας επιτόπια εκτύπωση.	Απρόσκοπτη διαδικασία κατασκευής χωρίς την ανάγκη προκατασκευασμένων εξαρτημάτων, μειωμένα υλικοτεχνικά βάρη.	Επιρρεπής στις καιρικές συνθήκες.	300.000\$ - 5.000.000\$	AspisCor, Batiprinter, Cybe 3D Printer, Contour Crafting
<b>Εκτυπωτές Εκτός Τοποθεσίας</b>	Χρήση προκατασκευασμένων στοιχείων που εκτυπώνονται σε εργοστασιακή ρύθμιση και μεταφέρονται στο εργοτάξιο για συναρμολόγηση	Σταθερότητα εκτυπωτή ανεπηρέαστη από καιρικές συνθήκες.	Ανάγκη μεταφοράς μεγάλων τυπωμένων στοιχείων, απαίτηση για σημαντική χειρωνακτική εργασία για συναρμολόγηση.	~ 300.000\$	TotalKustom, Contour Crafting, AspisCor, Batiprint

### 5.2.6 Κόστος

Όπως παρουσιάζεται στον πίνακα 5-1 το κόστος των εκτυπωτών 3DCP έχει μεγάλες διακυμάνσεις. Το κόστος ενός εκτυπωτή, εξαρτάται από το μέγεθος και την εμβέλεια του, την ακρίβεια και ταχύτητα εκτύπωσης, τα υλικά και την κατασκευή του, καθώς και από κάποια πρόσθετα τεχνικά χαρακτηριστικά, όπως αυτοματισμοί κλπ.

Η αγορά προσφέρει μια ποικιλία μοντέλων εκτυπωτών που ποικίλλουν ανάλογα με τον τύπο του εκτυπωτή και τη μέθοδο εκτύπωσης. Αυτά τα μοντέλα κατηγοριοποιούνται σε δύο κύριες μεθόδους εκτύπωσης: in-situ και off-site, με περαιτέρω διακρίσεις μεταξύ των τύπων όπως οι εκτυπωτές που είναι ενσωματωμένοι σε γερανογέφυρες ή αυτοί που περιγράφονται ως εκτυπωτές "ρομποτικής". Αξιοσημείωτα παραδείγματα κάθε κατηγορίας περιλαμβάνουν το TotalKustom και το Contour Crafting για εκτυπωτές γερανογέφυρας και το AspisCor και το Batiprint μεταξύ των εκτυπωτών ρομποτικής.

Όσον αφορά το κόστος, οι τρισδιάστατοι εκτυπωτές διατίθενται στο εμπόριο από διάφορους παρόχους και το κόστος απόκτησης ενός κατάλληλου για εκτύπωση μικρών σπιτιών είναι ενδεικτικό. Για παράδειγμα, το μοντέλο StroyBot από την TotalKustom, με δυνατότητα εκτύπωσης επιφάνειας 150 τετραγωνικών μέτρων σε ύψος 6 μέτρων (αρκετό για ένα διώροφο κτίριο), κοστίζει περίπου 300.000 \$. Ομοίως, άλλα μοντέλα όπως το AspisCor D και το Cazza X1 προσφέρουν διαφορετικές διαστάσεις και δυνατότητες με ποικίλο κόστος, αντανakλώντας την κλίμακα της ικανότητας εκτύπωσης και τις συγκεκριμένες κατασκευαστικές ανάγκες που καλύπτουν [17].

Η TotalKustom, ειδικότερα, έχει αναπτύξει μια σειρά εκτυπωτών σκυροδέματος διαφόρων μεγεθών προσαρμοσμένων σε διαφορετικές δυνατότητες εκτύπωσης και κατασκευαστικές απαιτήσεις. Οι τιμές για αυτούς τους εκτυπωτές ξεκινούν από περίπου 300.000 \$ για τα μικρότερα μοντέλα, τα οποία είναι ικανά να κατασκευάζουν μικρά κτίρια, και μπορεί να φτάσουν έως και τα 5.000.000 \$ για μοντέλα εξοπλισμένα με πιο σύνθετες δυνατότητες εκτύπωσης [13]. Αυτή η δομή τιμολόγησης υπογραμμίζει τη σημαντική επένδυση που απαιτείται για την υιοθέτηση της τεχνολογίας τρισδιάστατης εκτύπωσης στις κατασκευές, εξισορροπημένη από τη δυνατότητα μεγαλύτερης αποτελεσματικότητας και προσαρμογής στις κατασκευαστικές διαδικασίες.

### **5.3 Σύγκριση συμβατικής διαδικασίας με το 3D printing**

Όπως αναλύθηκε και στο κεφάλαιο 4.3 οι μέθοδοι 3D εκτύπωσης τσιμέντου και η συμβατική μέθοδος κατασκευής έχουν πολλά κοινά, αλλά και πολλές διαφορές στον τρόπο κατασκευής ενός κτιρίου.

#### **Συμβατική μέθοδος**

Στη συμβατική κατασκευή κατοικιών, η θεμελίωση, ανεξάρτητα από το φέρον δομικό πλαίσιο, κατασκευάζεται συνήθως από οπλισμένο σκυρόδεμα. Η διαδικασία ξεκινά με εκσκαφή και ακολουθεί κατασκευή ξυλότυπου, τοποθέτηση οπλισμού και τέλος, έκχυση σκυροδέματος [16]. Αντίθετα, η βάση για ένα τρισδιάστατο εκτυπωμένο σπίτι ποικίλλει ανάλογα με τη συγκεκριμένη μέθοδο κατασκευής που χρησιμοποιείται. Μια κοινή προσέγγιση αντικατοπτρίζει τις παραδοσιακές μεθόδους, που περιλαμβάνουν την κατασκευή ξυλότυπου, την τοποθέτηση οπλισμού και τη σκυροδέτηση. Αυτή η τεχνική είναι καθολική εφαρμογή και καθίσταται απαραίτητη όταν δεν υπάρχει διαθέσιμος εκτυπωτής στο εργοτάξιο, όπως όταν οι τοίχοι εκτυπώνονται σε ένα εργοστάσιο και στη συνέχεια μεταφέρονται στο εργοτάξιο.

Εναλλακτικά, είναι εφικτό να εκτυπώσετε το περίγραμμα του θεμελίου χρησιμοποιώντας έναν τρισδιάστατο εκτυπωτή, ο οποίος στη συνέχεια λειτουργεί ως καλούπι για το θεμέλιο. Στη συνέχεια χύνεται σκυρόδεμα σε αυτό το τυπωμένο περίγραμμα. Αυτή η μέθοδος είναι ιδιαίτερα κατάλληλη για έργα όπου η εκτύπωση πραγματοποιείται in situ με έναν εκτυπωτή που βρίσκεται απευθείας στο εργοτάξιο.

#### **Υπερδομή σε συμβατικές κατοικίες**

Στις παραδοσιακές μεθόδους δόμησης, το δομικό πλαίσιο διαφέρει από τα μη φέροντα στοιχεία. Συνήθως, η φέρουσα κατασκευή κατασκευάζεται από σκυρόδεμα ή μέταλλο, ενώ οι τοίχοι κατασκευάζονται από τούβλα ή πάνελ. Σε ορισμένες σπάνιες περιπτώσεις, τα νέα κτίρια ενδέχεται να χρησιμοποιούν φέρουσα κατασκευή από λιθοδομή ή τοιχοποιία.

Στην Ελλάδα, η διαδεδομένη μέθοδος κατασκευής περιλαμβάνει τη χρήση οπλισμένου σκυροδέματος για τα δομικά στοιχεία όπως δοκοί, υποστυλώματα και πλάκες, και τούβλα για εσωτερική και εξωτερική τοιχοποιία. Η διαδικασία κατασκευής μιας φέρουσας κατασκευής από οπλισμένο σκυρόδεμα απαιτεί σχολαστικό σχεδιασμό της προμήθειας υλικών και των

εργασιών. Αυτό περιλαμβάνει την προμήθεια υλικών, την κατασκευή ξυλοτύπων, την τοποθέτηση οπλισμών από εξειδικευμένα συνεργεία και την παραγωγή και επιτόπια παράδοση σκυροδέματος. Μετά την έκχυση σκυροδέματος, ο ξυλότυπος συνήθως αφαιρείται εντός 2 έως 5 ημερών, ανάλογα με το μέγεθος και τον τύπο του δομικού στοιχείου [17,24].

Μόλις ολοκληρωθεί το δομικό πλαίσιο, ξεκινά η κατασκευή τοίχων. Η τοιχοποιία αποτελείται γενικά από εργοστασιακά κατασκευασμένα τούβλα συγκεκριμένων διαστάσεων που μεταφέρονται στον χώρο. Η κατασκευή τοίχων αναλαμβάνεται από εξειδικευμένα συνεργεία και μπορεί να διαρκέσει αρκετές ημέρες. Για την ολοκλήρωση της διαδικασίας απαιτείται η προμήθεια διαφόρων άλλων δομικών υλικών όπως τσιμέντο, ασβέστης και άμμος. Η διαδικασία κατασκευής περιλαμβάνει πολλά συνεργεία, καθένα από τα οποία είναι υπεύθυνο για διαφορετικές εργασίες. Ο σωστός συντονισμός, το χρονοδιάγραμμα, η προμήθεια και η μεταφορά των υλικών είναι ζωτικής σημασίας για την αποτελεσματική ολοκλήρωση του έργου. Επιπλέον, αυτή η παραδοσιακή μέθοδος κατασκευής οδηγεί συχνά σε σημαντική παραγωγή απορριμμάτων. Τυπικά, απαιτείται περίπου ένας μήνας για την ολοκλήρωση των κατακόρυφων στοιχείων (φέρουσα κατασκευή και τοιχοποιία πλήρωσης) για ένα κτίριο κατοικιών έκτασης 100 τετραγωνικών μέτρων.

### **Κατοικία με 3D εκτύπωση**

Στον τομέα των τρισδιάστατων εκτυπωμένων οίκων, η προσέγγιση και ο τύπος του εκτυπωτή που χρησιμοποιείται επηρεάζουν σημαντικά τις υλικοτεχνικές απαιτήσεις και το συνολικό κόστος του έργου. Ανάλογα με την επιλεγμένη μέθοδο, οι ανάγκες μπορεί να κυμαίνονται από απλή μεταφορά του εκτυπωτή στο εργοτάξιο, όπως συμβαίνει με τους ρομποτικούς εκτυπωτές, έως τη συναρμολόγηση του εκτυπωτή επί τόπου εάν χρησιμοποιείτε συστήματα με γερανό που κατασκευάζονται *in situ*, ή ακόμα και εκτύπωση τους τοίχους επί τόπου και στη συνέχεια τη μεταφορά τους στη θέση του έργου. Η χρήση τρισδιάστατου εκτυπωτή μειώνει σημαντικά τη χειρωνακτική εργασία που συνήθως απαιτείται για την κατασκευή τοίχων [23,26]. Όταν η εκτύπωση πραγματοποιείται επί τόπου, τα απαραίτητα υλικά, συνήθως σκυρόδεμα, μεταφέρονται στον χώρο και ένας εκτυπωτής μπορεί να κατασκευάσει το κτίριο μέσα σε λίγες ημέρες. Αυτή η διαδικασία απαιτεί τη μεταφορά του εκτυπωτή, των υλικών εκτύπωσης και του εξοπλισμού για την ανάμιξη και την αποθήκευση του σκυροδέματος.

Για κατασκευαστικά έργα που χρησιμοποιούν τον εκτυπωτή της *Aspicoor* ή παρόμοιους φορητούς εκτυπωτές, ο εκτυπωτής χρειάζεται απλώς να μεταφερθεί στην τοποθεσία. Η ρύθμιση είναι απλή και η διαδικασία εκτύπωσης απαιτεί ελάχιστη επίβλεψη, που γενικά απαιτεί μόνο δύο χειριστές. Η μέθοδος 3d concrete printing περιλαμβάνει τη συναρμολόγηση του εκτυπωτή απευθείας στο εργοτάξιο. Ο εκτυπωτής λειτουργεί κατά μήκος παράλληλων αξόνων τοποθετημένων σε κατάλληλα προετοιμασμένο μεταλλικό φορέα εγκατεστημένο *in situ*. Απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή για να διασφαλιστεί ότι η βάση είναι τέλεια επίπεδη και οι άξονες είναι σωστά ευθυγραμμισμένοι για να αποφευχθούν τυχόν λειτουργικά προβλήματα κατά την εκτύπωση.

Η υιοθέτηση της τεχνολογίας τρισδιάστατης εκτύπωσης στις κατασκευές μειώνει την ανάγκη για χειρωνακτική εργασία, εξασφαλίζει ομοιομορφία στην κατασκευή τοίχων, μειώνει τις απαιτούμενες ποσότητες υλικών και μειώνει σημαντικά την παραγωγή απορριμμάτων [18,19]. Ακόμη και όταν η προσέγγιση περιλαμβάνει την εκτύπωση μεμονωμένων τοίχων σε ένα εργοστασιακό περιβάλλον και στη συνέχεια τη μεταφορά τους στο εργοτάξιο - μέθοδος που χρησιμοποιείται από εταιρείες όπως η *Winsun* - το προσωπικό που απαιτείται, η ποσότητα των υλικών που χρησιμοποιούνται και τα απορρίμματα που προκύπτουν είναι όλα σημαντικά λιγότερα σε σύγκριση με την παραδοσιακή κατασκευή μεθόδους.

Οι τεχνικές προδιαγραφές της *Aspicoor* παρέχουν λεπτομέρειες για την απαιτούμενη ποσότητα σκυροδέματος και το κόστος ανά τετραγωνικό μέτρο τοίχου. Το κόστος για το μείγμα σκυροδέματος που χρησιμοποιείται στην τρισδιάστατη εκτύπωση κυμαίνεται από 6000 έως 9000 ρούβλια ανά κυβικό μέτρο, ανάλογα με την περιοχή, με την εταιρεία να προτείνει μέση τιμή περίπου 7.500 ρούβλια, δηλαδή 99.40€/m<sup>3</sup>. Το σκυρόδεμα που χρησιμοποιείται για την εκτύπωση περιλαμβάνει ίνες άμμου και πολυπροπυλενίου, που ευθυγραμμίζονται με την ποιότητα του σκυροδέματος B20 (C16/20). Για σύγκριση, σημειώνεται ότι η τιμή του σκυροδέματος C16/20 φθάνει συνήθως περίπου τα 90,00€/m<sup>3</sup> μέτρο πλέον ΦΠΑ, όπως περιγράφεται στο Περιγραφικό Τιμολόγιο Κατασκευαστικών Έργων – 2017, το οποίο καλύπτει

την προμήθεια, τη μεταφορά επί τόπου, τη διάστρωση και τη συμπίεση. σκυροδέματος χρησιμοποιώντας είτε αντλία είτε πυργογερανό.

Για τον υπολογισμό του κόστους και της διάρκειας κατασκευής, καθώς και του απαιτούμενου όγκου σκυροδέματος, πρέπει να ληφθεί υπόψη το εμβαδόν των τοίχων μείον τυχόν ανοίγματα, χρησιμοποιώντας τις τιμές που παρέχονται σε συγκεκριμένους πίνακες αναφοράς. Οι τοίχοι κατηγοριοποιούνται σε δύο τύπους: Κατηγορία Α, που περιλαμβάνει εσωτερικούς φέροντες τοίχους και μη φέροντες διαχωριστικούς τοίχους, και Κατηγορία Β, που περιλαμβάνει εξωτερικούς και αυτοφερόμενους τοίχους που περιλαμβάνουν μόνωση.

Στη διαδικασία σχεδιασμού που περιγράφεται, οι τοίχοι κατασκευάζονται με εκτύπωση δύο παράλληλων στρώσεων σκυροδέματος, οι οποίες ενισχύονται εσωτερικά με διαγώνιο οπλισμό. Για μονωμένους τοίχους (Κλάση Β), η μόνωση εφαρμόζεται εξωτερικά με εκτύπωση μιας πρόσθετης στρώσης. Οι πίνακες που περιλαμβάνονται στην τεκμηρίωση περιγράφουν λεπτομερώς τον όγκο σκυροδέματος, τη διάρκεια εκτύπωσης και το κόστος που σχετίζεται με την κατασκευή τοίχων κατηγορίας Α και κατηγορίας Β, παρέχοντας συγκεκριμένες μετρήσεις για διαφορετικά πάχη τοίχων.

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι αυτές οι τιμές δεν υπολογίζουν το κόστος που σχετίζεται με τη μεταφορά του εκτυπωτή στην τοποθεσία του έργου ή τα έξοδα που σχετίζονται με την αγορά ή τη μίσθωση του ίδιου του εκτυπωτή. Για σύγκριση, ένας επόμενος πίνακας αντιπαραβάλλει αυτά τα κόστη με αυτά της κατασκευής ενός παραδοσιακού τοίχου από τούβλα, συμπεριλαμβανομένων όλων των απαραίτητων υλικών όπως τούβλα, ασβέστης,τσιμέντο, άμμος και ΦΠΑ για την κατασκευή ενός τετραγωνικού μέτρου τοίχου [21]. Η ανάλυση κόστους αποκαλύπτει ότι τα υλικά για έναν τοίχο από τούβλα είναι περίπου 50% πιο ακριβά από αυτά για έναν 3D εκτυπωμένο τοίχο από σκυρόδεμα χρησιμοποιώντας τη μέθοδο AspisCor. Ωστόσο, αυτή η σύγκριση δεν λαμβάνει υπόψη την κατασκευή των απαραίτητων κατακόρυφων δοκών από σκυρόδεμα στην κατασκευή τοίχων από τούβλα και τα στοιχεία δεν είναι απολύτως συγκρίσιμα λόγω των διαφοροποιήσεων στις νομισματικές πολιτικές και τις πολιτικές τιμών σε διάφορες χώρες.

Η κατασκευή ενός σπιτιού με συμβατικές μεθόδους περιλαμβάνει μια διαδικασία πολλαπλών βημάτων που περιλαμβάνει την κατασκευή υλικών σε ένα εργοστάσιο, τη μεταφορά τους στο εργοτάξιο και στη συνέχεια τη χρήση διαφόρων εξειδικευμένων συνεργείων και εξοπλισμού για την κατασκευή της κατοικίας. Αντίθετα, η μέθοδος τρισδιάστατης εκτύπωσης απλοποιεί σημαντικά αυτή τη διαδικασία απαιτώντας πρωτίστως τη μεταφορά και την επιτόπια προμήθεια υλικών εκτύπωσης, ακολουθούμενη από την πραγματική εκτύπωση της κατοικίας.

### **Μόνωση σε μεθόδους κατασκευής**

Στην παραδοσιακή κατασκευή, η μόνωση συνήθως εγκαθίσταται μετά την ολοκλήρωση του κτιρίου. Εφαρμόζεται εξωτερικά σε στοιχεία από οπλισμένο σκυρόδεμα και στριμωγμένα μεταξύ των στρώσεων τοίχων από τούβλα. Ωστόσο, σε σπίτια που κατασκευάζονται με τρισδιάστατη εκτύπωση, ένα επιπλέον στρώμα σκυροδέματος τυπώνεται στην εξωτερική πλευρά του τοίχου και η μόνωση ενσωματώνεται απευθείας μέσα σε αυτό το στρώμα. Αυτή η προσέγγιση παρέχει ομοιόμορφη μονωτική κάλυψη χωρίς θερμογέφυρες, ενισχύοντας την ενεργειακή απόδοση του κτιρίου.

### **Τοποθέτηση κουφωμάτων & ανοίγματα**

Η διαδικασία εγκατάστασης για κουφώματα, όπως παράθυρα και πόρτες, παραμένει συνεπής ανεξάρτητα από το αν ένα σπίτι κατασκευάζεται παραδοσιακά ή μέσω τρισδιάστατης εκτύπωσης. Οι μέθοδοι και τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την ενσωμάτωση κουφωμάτων στη δομή δεν διαφέρουν σημαντικά μεταξύ αυτών των δύο προσεγγίσεων κατασκευής.

### **Ηλεκτρολογικές και υδραυλικές εγκαταστάσεις**

Στις συμβατικές κατοικίες, αφού κατασκευαστούν οι τοίχοι, ξεκινά η εγκατάσταση ηλεκτρικών και υδραυλικών συστημάτων. Αυτό συνήθως περιλαμβάνει τη δημιουργία κατάλληλων καναλιών εντός των τοίχων για τη διέλευση καλωδίων και σωλήνων. Σε ορισμένες περιπτώσεις, αυτά τα στοιχεία κρύβονται μέσα στις κοιλότητες του γυψοσανίδας. Αντίθετα, στα τρισδιάστατα εκτυπωμένα σπίτια, οι ηλεκτρικές και υδραυλικές εγκαταστάσεις

δρομολογούνται μέσα από χώρους που αφήνονται μέσα στους τοίχους κατά τη διαδικασία εκτύπωσης. Αυτή η ολοκληρωμένη προσέγγιση επιτρέπει την απρόσκοπτη ενσωμάτωση αυτών των συστημάτων στη δομή του κτιρίου, μειώνοντας ενδεχομένως την πολυπλοκότητα και την εργασία που απαιτείται για την εγκατάσταση και την απόκρυψη αυτών των κρίσιμων συστημάτων.

Συνολικά, η μετάβαση από τις παραδοσιακές μεθόδους δόμησης στην τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης στις κατασκευές προσφέρει αρκετές αποδόσεις, ιδιαίτερα στη μείωση του αριθμού των βημάτων και της ποσότητας εργασίας που απαιτείται επιτόπου, καθώς και στην ενίσχυση της ενοποίησης των βοηθητικών υπηρεσιών κτιρίου και της μόνωσης [22]. Η σύγκριση των 2 μεθόδων παρουσιάζεται συνοπτικά στον πίνακα

**Πίνακας 5-2. Σύγκριση συμβατικής μεθόδου κατασκευής με 3DCP**

<b>Παράμετρος</b>	<b>Συμβατική Μέθοδος</b>	<b>Μέθοδος 3D Εκτύπωσης</b>
<b>Θεμελίωση</b>	Εκσκαφή, κατασκευή ξυλότυπου, τοποθέτηση οπλισμού, έκχυση σκυροδέματος.	Εκτύπωση περιγράμματος θεμελίου με 3D εκτυπωτή ή χρήση παραδοσιακών μεθόδων για προκατασκευασμένα εξαρτήματα.
<b>Υπερδομή</b>	Φέρουσα κατασκευή από σκυρόδεμα ή μέταλλο, τοιχοποιία από τούβλα ή πάνελ.	Εκτύπωση τοίχων in situ ή εκτύπωση προκατασκευασμένων τοίχων σε εργοστάσιο και μεταφορά τους στο εργοτάξιο.
<b>Χρονική Διάρκεια Κατασκευής</b>	Περίπου ένας μήνας για κατακόρυφα στοιχεία σε κτίριο 100 τ.μ.	Λίγες ημέρες για την κατασκευή κτιρίου με 3D εκτυπωτή, μειώνοντας τη χειρωνακτική εργασία και τον χρόνο κατασκευής.
<b>Προμήθεια Υλικών</b>	Σχολαστικός σχεδιασμός, προμήθεια υλικών, κατασκευή ξυλότυπου, τοποθέτηση οπλισμών, παραγωγή και παράδοση σκυροδέματος.	Μεταφορά εκτυπωτή, υλικών εκτύπωσης και εξοπλισμού για ανάμειξη και αποθήκευση σκυροδέματος.
<b>Μονωτικές Εργασίες</b>	Εγκατάσταση μόνωσης μετά την ολοκλήρωση του κτιρίου, εξωτερικά ή μεταξύ στρώσεων τοίχων από τούβλα.	Ενσωμάτωση μόνωσης απευθείας στην εκτυπωμένη στρώση σκυροδέματος, παρέχοντας ομοιομορφη κάλυψη χωρίς θερμογέφυρες.
<b>Τοποθέτηση Κουφωμάτων</b>	Παραδοσιακές μέθοδοι εγκατάστασης κουφωμάτων.	Παρόμοιες μέθοδοι με τις συμβατικές, με ενσωμάτωση κουφωμάτων κατά την εκτύπωση ή μετά από αυτήν.
<b>Ηλεκτρολογικές και Υδραυλικές Εργασίες</b>	Δημιουργία καναλιών στους τοίχους για καλώδια και σωλήνες, κρυμμένα στις κοιλότητες του γυψοσανίδας.	Ενσωμάτωση καναλιών κατά την εκτύπωση των τοίχων, επιτρέποντας απρόσκοπτη εγκατάσταση των συστημάτων.
<b>Κόστος Σκυροδέματος</b>	Περίπου 90,00 € ανά κυβικό μέτρο πλέον ΦΠΑ για C16/20.	7500 ρούβλια (περίπου 99,40 €) ανά κυβικό μέτρο για σκυρόδεμα με ίνες άμμου και πολυπροπυλενίου, κατηγορίας B20 (C16/20).
<b>Απορρίμματα Κατασκευής</b>	Σημαντική παραγωγή απορριμμάτων λόγω της παραδοσιακής μεθόδου κατασκευής.	Μείωση απορριμμάτων λόγω της ακριβούς εναπόθεσης υλικών από τον 3D εκτυπωτή.
<b>Συντονισμός Συνεργείων</b>	Απαιτεί συντονισμό πολλών συνεργείων και χρονοδιαγράμματα για προμήθεια και μεταφορά υλικών.	Μείωση του αριθμού των απαιτούμενων συνεργείων, απλοποίηση της διαδικασίας μεταφοράς και προμήθειας υλικών.

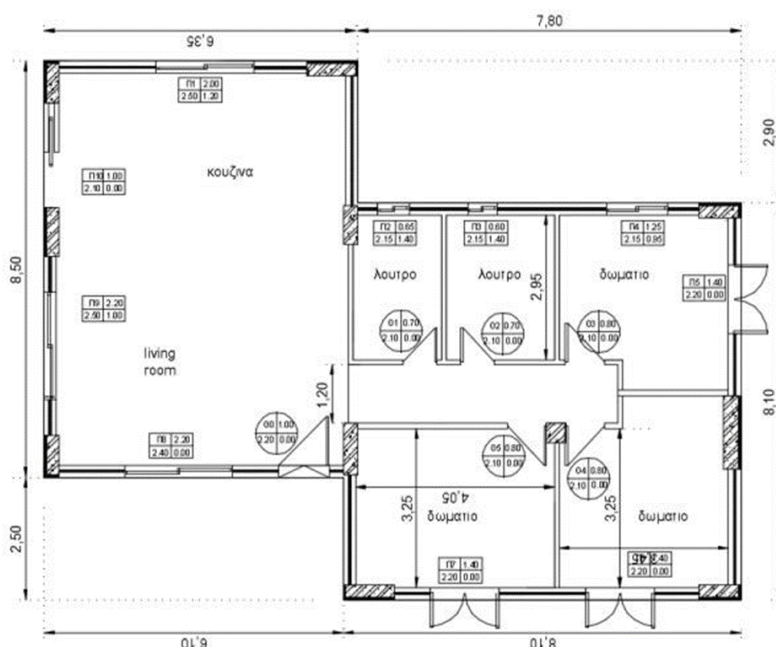
## 5.4 Υπόδειγμα κατασκευής

Για να διευκρινιστούν οι διακρίσεις στις μεθοδολογίες κατασκευής, αναλύεται μια υπάρχουσα μονοκατοικία. Το σπίτι, έκτασης 119,72m<sup>2</sup>, αποτελείται από κατακόρυφα και οριζόντια φέροντα στοιχεία κατασκευασμένα από οπλισμένο σκυρόδεμα, ενώ οι τοίχοι πλήρωσης κατασκευάζονται με τούβλα: πάχους 10 cm για εσωτερικούς τοίχους και 25 cm πάχους βαφής τοιχοποιίας, συμπεριλαμβανομένων της μόνωσης, για εξωτερικούς τοίχους. Το ισόγειο βρίσκεται σε ύψος 3,30 μέτρων και η θεμελίωση αποτελείται από οπλισμένο σκυρόδεμα. Η κατοικία ολοκληρώνεται με ξύλινη στέγη με κεραμίδια. Η κάτοψη που μελετήθηκε παρουσιάζεται στο σχήμα 5-3.

Παρά τις διαφορετικές μεθόδους κατασκευής, ορισμένες βασικές εργασίες είναι ίδιες και στις δύο μεθόδους. Σημειώνεται χαρακτηριστικά ότι οι προετοιμασίες όπως η εκσκαφή και η διαμόρφωση του εδάφους μέχρι το επιθυμητό επίπεδο θεμελίωσης είναι απαραίτητες, ανεξάρτητα από την επιλεγμένη τεχνική κατασκευής. Η θεμελιακή δομή, συνήθως πλάκες από οπλισμένο σκυρόδεμα, παραμένει η ίδια. Στην περίπτωση της 3D εκτύπωσης, όταν υπάρχει εκτυπωτής in situ, είναι δυνατό αντί για τη δημιουργία καλουπιών να εκτυπωθεί το περίγραμμα των θεμελίων και στη συνέχεια να γεμιστεί το κενό με οπλισμένο σκυρόδεμα. Ακόμη και σε αυτή την περίπτωση, ο όγκος του απαιτούμενου σκυροδέματος δεν μεταβάλλεται, επομένως εκτιμάται ότι το κόστος καθώς και ο χρόνος που σχετίζεται με τις ανασκαφές - διαμορφώσεις - κατασκευή της θεμελίωσης είναι κοινά.

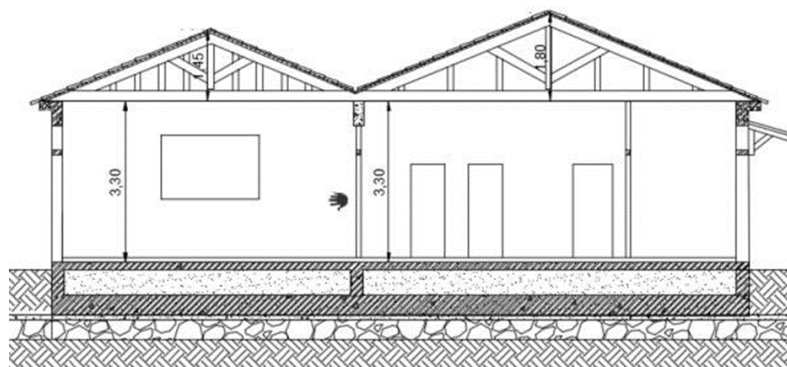
Αυτή η προσέγγιση δεν αλλάζει τον απαιτούμενο όγκο σκυροδέματος, υποδηλώνοντας ότι το κόστος και τα χρονοδιαγράμματα που σχετίζονται με την εκσκαφή, τη διαμόρφωση και την κατασκευή θεμελίωσης παραμένουν αμετάβλητα.

Επίσης, η κατασκευή της στέγης δεν διαφέρει με κανέναν τρόπο από τον τρόπο κατασκευής του κτιρίου, καθώς πρόκειται για ξύλινη στέγη με κεραμίδια, η οποία σε κάθε περίπτωση τοποθετείται μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής των τοίχων. Τέλος, τα κόστη που σχετίζονται με την τελική διαμόρφωση των τοίχων - σοβατίσματα, βάψιμο, τοποθέτηση κουφωμάτων - δεν υπολογίζονται. Ουσιαστικά γίνεται σύγκριση αποκλειστικά στον τρόπο κατασκευής των κατακόρυφων στοιχείων, τα οποία συνήθως αποτελούν το μεγαλύτερο κόστος κατά τη διάρκεια κατασκευής ενός σπιτιού.



Σχήμα 5-4. Κάτοψη ισόγειας κατοικίας με εμβαδόν 120m<sup>2</sup>





**Σχήμα 5-5. Όψη ισόγειας κατοικίας**

Σύμφωνα με πληροφορίες της εταιρείας Aspiscor, η υποθετική κατασκευή ενός σπιτιού με χρήση τρισδιάστατης εκτύπωσης θα απαιτούσε **24,93 ώρες** για τους εσωτερικούς τοίχους και **58,38 ώρες** για τους εξωτερικούς τοίχους. Συνολικά 83,81 ώρες ή περίπου 10,40 οκτάωρες εργάσιμες ημέρες. Αυτή η διάρκεια είναι συγκρίσιμη με τις παραδοσιακές μεθόδους κατασκευής. Το εκτιμώμενο κόστος που παρέχει η Aspiscor είναι **2186,58€**, σημαντικά χαμηλότερο από το παραδοσιακό κόστος κατασκευής. Ωστόσο, αυτή η εκτίμηση ενδέχεται να μην είναι άμεσα εφαρμόσιμη σε άλλες περιοχές λόγω έλλειψης δεδομένων τοπικού κόστους και πιθανών πρόσθετων εξόδων, όπως η μεταφορά του εκτυπωτή, της μηχανής ανάμειξης και του σιλό στο εργοτάξιο [17,19].

Παρά το υψηλό αρχικό κόστος αγοράς του εκτυπωτή, η προσέγγιση της τρισδιάστατης εκτύπωσης προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με την παραδοσιακή κατασκευή, όπως ευκολία εφαρμογής, δυνατότητα δημιουργίας πολύπλοκων αρχιτεκτονικών σχεδίων και αυτοματισμό που ενισχύει την ασφάλεια, την ακρίβεια και μειώνει τα σφάλματα. Η διαδικασία κατασκευής μπορεί να διαχειρίζεται μόνο δύο άτομα χωρίς την ανάγκη πολλαπλών συντονισμένων ομάδων, μειώνοντας ενδεχομένως τον αριθμό των εργατικών ατυχημάτων και τον όγκο των απορριμμάτων. Η μέθοδος επιτρέπει επίσης τη χρήση νέων ανακυκλώσιμων υλικών.

**Πίνακας 5-3. Ποσοτικά χαρακτηριστικά των μεθόδων 3DCP και της συμβατικής μεθόδου**

ΕΡΓΑΣΙΑ	ΧΡΟΝΟΣ ΜΕ 3DCP	ΧΡΟΝΟΣ ΜΕ ΣΥΜΒΑΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟ
<b>Σχεδιασμός και Μοντελοποίηση</b>	7 - 14 ημέρες για 3D Modeling	2 - 3 μήνες για την ολοκλήρωση των σχεδίων
<b>Εγκατάσταση Μηχανημάτων</b>	1 - 2 ημέρες	1 ημέρα ανά φάσεις
<b>Κατασκευή</b>	7 - 14 ημέρες για δομικά στοιχεία, μερικές ημέρες για την οροφή	1 - 2 εβδομάδες για θεμέλια / 1 - 2 μήνες για κατασκευή ανωδομής / 1 - 2 μήνες για τοιχοποιίες
<b>Ηλεκτρικές &amp; Υδραυλικές Εργασίες</b>	7 - 14 ημέρες	1 - 2 μήνες για κατασκευή ανωδομής / 1 - 2 μήνες για τοιχοποιίες
<b>Εσωτερικές εργασίες</b>	7 - 14 ημέρες	2 - 3 μήνες
<b>ΣΥΝΟΛΟ</b>	<b>30 - 60 ημέρες</b>	<b>6 - 12 μήνες</b>

Αντιθέτως, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, το υψηλό κόστος εξοπλισμού και η ανάγκη για συνεχή παρακολούθηση της διαδικασίας εκτύπωσης υπογραμμίζουν ότι το συνολικό κόστος ενδέχεται να μην είναι ακόμα ανταγωνιστικό. Η συνεχής έρευνα και ανάπτυξη είναι απαραίτητες για τη βελτίωση των υλικών που χρησιμοποιούνται στην εκτύπωση και για τη δημιουργία νέων κόμβων παραγωγής για αυτά τα υλικά. Η συνεργασία μεταξύ ακαδημαϊκού

κόσμου και βιομηχανίας μπορεί να επιταχύνει αυτές τις εξελίξεις. Μεγάλες εταιρείες στους τομείς των υλικών και των κατασκευών, όπως η Skanska, η Sika και η Caterpillar, επενδύουν ήδη σε αυτήν την τεχνολογία. Η τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης υπόσχεται σημαντικές προόδους στην κατασκευή. Ωστόσο, ο πλήρης αυτοματισμός και η πιστοποίηση τόσο της μεθόδου όσο και των υλικών παραμένουν σε εξέλιξη, κάτι που απαιτεί περαιτέρω ανάπτυξη προτού αυτή η προσέγγιση καταστεί κυρίαρχη τεχνολογία κατασκευής [24,26].

**Πίνακας 5-4. Σύγκριση κόστους συμβατικής μεθόδου κατασκευής & 3DCP**

	3DCP	ΣΥΜΒΑΤΙΚΗ
Εξοπλισμός	Κόστος εκτυπωτή από 50.000€ έως 500000€	Κόστος μίσθωσης η αγοράς βαρέων οχημάτων & μηχανημάτων
Εγκατάσταση στο Εργοτάξιο	αρκετές χιλιάδες ευρώ για εγκατάσταση & καλιμπράρισμα	Ανάλογα την περιοχή υπάρχουν δυσκολίες
Υλικά	Σκυρόδεμα ~ 100€ / m3	Σκυρόδεμα & πρόσθετα υλικά (σίδερα) ~ 50-60€/m3
Πρόσθετα υλικά	Κόστος επιταχυντών, ινών και πρόσθετων υλικών	Ενίσχυση σκυροδέματος
<b>Ακρίβεια</b>	Υψηλή ακρίβεια κατασκευής	Εξαρτάται από την εμπειρία και την προσοχή του εργατοτεχνικού προσωπικού
Ποιότητα	Σταθερή ποιότητα κατασκευής λόγω ελεγχόμενης κατασκευής	Ασυνέπεια λόγω διακυμάνσεων υλικών και τεχνιτών
Περιβάλλον	Χαμηλότερη κατανάλωση υλικών & μειωμένες εκπομπές CO2 λόγω ταχύτερης κατασκευής	Υψηλότερη κατανάλωση υλικών και αυξημένες εκπομπές CO2 λόγω μεγαλύτερου χρόνου κατασκευής
Κατασκευή	Εξειδικευμένο Προσωπικό κατά τη διάρκεια εκτύπωσης	μεγάλη ποσότητα εργατικού δυναμικού
Συντήρηση	Τακτική συντήρηση και έλεγχος εκτυπωτή	
Χρόνος κατασκευής	Για 100m2 περίπου 75 ώρες (3 εργάσιμες ημέρες)	6- 12 μήνες
Κόστος κατασκευής	Για 100m2 από 10.000 έως 30.000€	Για 100m2 από 80.000 έως 150.000€

## Βιβλιογραφία κεφαλαίου 5

- [1] Anastasiou A., Tsirmpas C., Rompas A., Giokas K., Koutsouris D. (2013). 3D Printing: Basic concepts Mathematics and Technologies. School of Electrical and Computer Engineering, National Technical University of Athens, Athens. Retrieved from <https://pdfs.semanticscholar.org/3865/7486320e82081935ac20bcac95acb44073d9.pdf>
- [2] Forrest E., & Cao Y. (2013). Digital Additive Manufacturing: A Paradigm Shift in the Production Process and Its Socio-economic Impacts. University of Alaska Anchorage, Anchorage. Retrieved from <http://www.ccsenet.org/journal/index.php/emr/article/view/312703>
- [3] Matias E., & Rao B. (2015). 3D Printing: On Its Historical Evolution and the Implications for Business. New York University Polytechnic School of Engineering, New York. Retrieved from <https://nyuscholars.nyu.edu/en/publications/3dprinting-on-its-historical-evolution-and-the-implications-for--2>
- [4] Wu D., Greer M. J., Rosen D. W., Schaefer D. (no date). Cloud manufacturing: Strategic vision and state-of-the-art. George W. Woodruff School of Mechanical Engineering, Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA. Retrieved from [https://www.insight.tech/industrial?cid=sem43700027892988831&intel\\_term=%2Bmanufacturing+%2Bengineering&gclid=EAlaIqobChMI7Kf8rdrN2QIVrZPtCh1qHQT1EAAAYiAAEgJuVP\\_D\\_BwE&gclidsrc=aw.ds](https://www.insight.tech/industrial?cid=sem43700027892988831&intel_term=%2Bmanufacturing+%2Bengineering&gclid=EAlaIqobChMI7Kf8rdrN2QIVrZPtCh1qHQT1EAAAYiAAEgJuVP_D_BwE&gclidsrc=aw.ds)
- [5] Lund-Nielsen H. (no date). 3D Construction Printing. A worldwide overview. The Danish Partnership for 3D Construction Printing, MBA.

- [6] Kor J. (2013). New Energy Efficient Car Built With 3d Printing. Stratasy 3D Printers Build Urbee, First Prototype Car to Have Entire Body Created with an Additive Process. Retrieved from <http://www.javelin-tech.com/3d-printer/3dp-promotion-fortus-380mc/>
- [7] Crump S. (no date). Is Now The Time To Try Direct Digital Manufacturing? You can Reap Major Savings With This Growing Trend. Take Your First Small Step Today. Stratasy, Israel. Retrieved from [http://usglobalimages.stratasy.com/Main/Secure/White%20Papers/Rebranded/SSYS\\_WP\\_direct\\_digital\\_manufacturing\\_part\\_three\\_identify.pdf?v=635334289469047013](http://usglobalimages.stratasy.com/Main/Secure/White%20Papers/Rebranded/SSYS_WP_direct_digital_manufacturing_part_three_identify.pdf?v=635334289469047013)
- [8] Wohlers T., & Gornet T. (2012). History of additive manufacturing. Wohlers Associates, Inc. Retrieved from <http://www.wohlersassociates.com/history2014.pdf>
- [9] Hager I., Golonka A., Putanowicz R. (no date). 3D printing of buildings and buildings components as the future of sustainable construction. Science Direct. Retrieved from <http://www.kathimerini.gr/806376/article/tecnologia/gadgets/ktiria-ftiagmena-apo-3d-ektypwtes>
- [10] Sobotka A., Pacewica K. (no date). Building site organization with 3D Technology in Use. ScienceDirect.
- [11] Sharma P. (no date). Automated Construction by contour crafting. Department of Civil Engineering, Dronacharya College of Engineering Maharishi Dayanand University, Haryana, India.
- [12] (no date). Από την Κλασσική στην Τρισδιάστατη Εκτύπωση: Αρχές και Εφαρμογές. Retrieved from [http://1lyk-peirthess.thess.sch.gr/portal/files/Apo\\_tin\\_klassiki\\_stin\\_3d\\_ektiposi\\_2013.pdf](http://1lyk-peirthess.thess.sch.gr/portal/files/Apo_tin_klassiki_stin_3d_ektiposi_2013.pdf)
- [13] (2015). Εταιρία τυπώνει 10 οικίες σε λιγότερο από μία μέρα και με κόστος «ψίχουλα». Newsbeast. Retrieved from <https://www.newsbeast.gr/technology/arthro/672421/to-trisdiastato-tupoma-spition-ginetai-paihnidaki>
- [14] Goldenberg D. (Σεπ, 2014). History of 3D Printing: It's Older Than You Are (That Is, If You're Under 30). Autodesk Redshift. Retrieved from <https://redshift.autodesk.com/history-of-3dprinting/>
- [15] Benjamin G. (2012). Disruptive manufacturing, The effects of 3D printing. Deloitte. Retrieved from <https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/ca/Documents/insights-andissues/ca-en-insights-issues-disruptive-manufacturing.pdf>
- [16] (2019). Ρωσία: 3D εκτυπωτής έχτισε σπίτι σε 24 ώρες. ERT News. Retrieved from <http://www.ert.gr/eidiseis/epistimi/rosia-3d-ektypotis-echtise-spiti-se-24-ores-video/>
- [17] (2015). The Authority on 3d printing. 3D Printing Industry. Retrieved from <https://3dprintingindustry.com/>
- [18] . Winsun, Demonstrating the Viability of 3D Printing at Construction Scale. Case Study. Boston Consulting Group, World Economic Forum. Retrieved from [https://ec.europa.eu/growth/industry/sustainability/circular-economy\\_en](https://ec.europa.eu/growth/industry/sustainability/circular-economy_en)
- [19] European Environment Agency (2019). Paving the way for a circular economy: insights on status and potentials. EEA Report No 11/2019. Retrieved from [here](https://www.eea.europa.eu/en/press/news/2019/09/11/11-2019-09-11).
- [20] United Nations (2019). Sustainable Development Goals. Retrieved from <https://sustainabledevelopment.un.org/?menu=1300>.
- [21] Sotiropoulos, A. (2019). Circular Economy. A new model of sustainable development and prosperity. Observatory of sustainable development and prosperity, Institute of alternative policies, ENA. Retrieved from [https://www.enainstitute.org/wpcontent/uploads/2019/12/Kykliki\\_Oikonomia\\_ENA.pdf](https://www.enainstitute.org/wpcontent/uploads/2019/12/Kykliki_Oikonomia_ENA.pdf).
- [22] European Commission (2019). European Green Deal, COM (2019) 640 final. Retrieved from [https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:b828d165-1c22-11ea-8c1f-01aa75ed71a1.0001.02/DOC\\_1&format=PDF](https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:b828d165-1c22-11ea-8c1f-01aa75ed71a1.0001.02/DOC_1&format=PDF).
- [23] MacArthur Foundation and McKinsey & Company (2014). Towards the Circular Economy: Accelerating the scale-up across global supply chains. WEF. Retrieved from [http://www3.weforum.org/docs/WEF\\_ENV\\_TowardsCircularEconomy\\_Report\\_2014.pdf](http://www3.weforum.org/docs/WEF_ENV_TowardsCircularEconomy_Report_2014.pdf).
- [24] Circular cities - Smart City Hub (2020). Retrieved from <https://smartcityhub.com/sustainability/circular-cities/>.
- [25] Kirchherr, J., Reike, D., Hekkert, M. (2017). Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. Resources, Conservation and Recycling, Volume 127, Pages 221-232, ISSN 0921-3449.
- [26] National Documentation Centre (EKT) (2019). Circular Economy. A new model of sustainable development. Athens, Greece, Volume 115, pp.12-17.

## 6 Επίλογος

Οι τεχνολογίες τρισδιάστατης εκτύπωσης εισάγουν καινοτόμες προσεγγίσεις στο σχεδιασμό και την κατασκευή στον αρχιτεκτονικό τομέα. Η πρακτική εφαρμογή της τρισδιάστατης εκτύπωσης σε αυτόν τον τομέα εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως η ακρίβεια των εκτυπωτών, η ποικιλία των διαθέσιμων υλικών και το κόστος που σχετίζεται με την παραγωγή. Προσβλέποντας στο μέλλον, η έρευνα πρόκειται να διερευνήσει την ανάπτυξη προηγμένων εκτυπωτών ικανών να κατασκευάζουν αυτόνομα κατασκευές μεγάλης κλίμακας κάτω από ποικίλες περιβαλλοντικές συνθήκες. Αυτοί οι εκτυπωτές αναμένεται να διευκολύνουν τη συναρμολόγηση, τη μεταφορά και την αποσυναρμολόγηση των κατασκευών, ενισχύοντας έτσι την πρακτικότητά τους για διάφορα έργα.

Η ενσωμάτωση της επιτόπιας συλλογής δεδομένων από τρισδιάστατους εκτυπωτές σε λογισμικό σχεδιασμού και κατασκευής θα επιτρέψει την παραμετρική βελτιστοποίηση, τη βελτίωση της αποδοτικότητας του κόστους και της βιωσιμότητας της αγοράς σε σύγκριση με τις παραδοσιακές μεθόδους κατασκευής. Σε σενάρια παραγωγής εκτός έδρας, τέτοιο λογισμικό θα στοχεύει στη βελτιστοποίηση της μηχανικής και δομικής απόδοσης, μειώνοντας παράλληλα τα απόβλητα και την κατανάλωση ενέργειας. Περαιτέρω έρευνα σε προηγμένα υλικά κατασκευής πρόσθετων είναι απαραίτητη για τη βελτίωση των ιδιοτήτων όπως η δομική ακεραιότητα, η αντοχή στη φωτιά και η οικονομική αποδοτικότητα.

Καθώς αυξάνεται η υιοθέτηση των τρισδιάστατων εκτυπωμένων κτιρίων, παρόμοια με τα συμβατικά αντίστοιχά τους, αυτές οι κατασκευές πρέπει επίσης να υποστηρίζουν υγιή και άνετα περιβάλλοντα διαβίωσης. Επί του παρόντος, με την περιορισμένη επικράτηση των τρισδιάστατων εκτυπωμένων κτιρίων, υπάρχει πιεστική ανάγκη για πιο ολοκληρωμένη έρευνα σχετικά με τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις και την αντοχή τους για να διασφαλιστεί ότι πληρούν τα μακροπρόθεσμα πρότυπα διαβίωσης.

Η τρισδιάστατη εκτύπωση έχει τη δυνατότητα να μεταμορφώσει σημαντικά τη βιομηχανική κατασκευή απομακρύνοντας τις παραδοσιακές τεχνολογίες και διευρύνοντας την πρόσβαση στις παραγωγικές δυνατότητες για βιομηχανικά προϊόντα. Αυτή η τεχνολογία, γνωστή και ως κατασκευή προσθέτων, θα μπορούσε να φέρει δυνητικά οφέλη και μειονεκτήματα στην περιβαλλοντική βιωσιμότητα εάν επεκταθεί σε διάφορους κλάδους την επόμενη δεκαετία. Τα αποτελέσματα βιωσιμότητας της ευρέως διαδεδομένης τρισδιάστατης εκτύπωσης αναμένεται να περιλαμβάνουν μια σύνθετη σειρά αντισταθμίσεων σε σύγκριση με τις συμβατικές μεθόδους κατασκευής. Ενώ προσφέρει οφέλη σε ορισμένες εφαρμογές όπως συγκεκριμένους τύπους πρωτοτύπων ή περιορισμένες σειρές παραγωγής και μπορεί να μειώσει τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις κατά τη φάση χρήσης σε σενάρια όπως ελαφρά εξαρτήματα στην αεροδιαστημική, η συνολική προτεραιότητά του για βιωσιμότητα παραμένει ελάχιστη στην πλειονότητα της βιομηχανίας. με τους περισσότερους τυπικούς εκτυπωτές να παράγουν μεγαλύτερες επιπτώσεις ανά εξάρτημα σε σύγκριση με τη χύτευση πλαστικών με έγχυση μεγάλου όγκου.

Οι περιβαλλοντικές συνέπειες των τρεχουσών τεχνολογιών κατασκευής ποικίλλουν πολύ και εξαρτώνται από τις ιδιαιτερότητες των εξαρτημάτων που παράγονται. Οι μελλοντικές αναλυτικές συγκρίσεις της τρισδιάστατης εκτύπωσης θα πρέπει να αφορούν συγκεκριμένα κάθε σημαντική τεχνολογία που σκοπεύει να αντικαταστήσει, προσαρμοσμένη σε κάθε σχετικό τύπο προϊόντος και υλικό. Ελλείψει τέτοιων περιεκτικών μελετών, αυτή η συζήτηση επικεντρώνεται στη μηχανική κατεργασία και τη χύτευση με έγχυση, που απεικονίζουν το φάσμα από την κατασκευή πρωτοτύπων μιας μονάδας έως την κατασκευή μεγάλου όγκου. Ακόμη και εντός αυτών των ορίων, οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις που αποδίδονται στην τρισδιάστατη εκτύπωση μπορεί να διαφέρουν ουσιαστικά, καθιστώντας δύσκολη την εξαγωγή συνεπών συμπερασμάτων. Για παράδειγμα, οι εκτιμήσεις του κύκλου ζωής δείχνουν ότι η εκτύπωση ενός τμήματος με κοίλο κέλυφος έχει γενικά χαμηλότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις από την κατεργασία του ίδιου εξαρτήματος από συμπαγές πλαστικό ή μέταλλο. Ωστόσο, σε σύγκριση με εξαρτήματα που παράγονται με χύτευση με έγχυση μαζικής παραγωγής, η τρισδιάστατη εκτύπωση οδηγεί συχνά σε μεγαλύτερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

Κατά κύριο λόγο, το περιβαλλοντικό αποτύπωμα της τρισδιάστατης εκτύπωσης προκύπτει από την κατανάλωση ενέργειας. Άλλοι σημαντικοί παράγοντες περιλαμβάνουν την τοξικότητα και το κόστος των πόρων που ενσωματώνονται στα υλικά εκτύπωσης και, σε

μικρότερο βαθμό, τη σπατάλη υλικών και την παραγωγή των ίδιων των εκτυπωτών. Ορισμένα καινοτόμα συστήματα έχουν επιδείξει σημαντικά χαμηλότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις ανά εξάρτημα σε σύγκριση με τη συμβατική χύτευση με έγχυση, μειώνοντας πιθανώς τις επιπτώσεις έως και 70% υπό ορισμένες συνθήκες. Ωστόσο, η τρέχουσα πορεία του κλάδου δεν ευνοεί αυτές τις τεχνολογίες χαμηλότερης επίδρασης, αλλά μάλλον στρέφεται προς συστήματα που έχουν σημαντικά υψηλότερο αντίκτυπο. Κατά συνέπεια, οι παρεμβάσεις πολιτικής θα πρέπει να προσανατολίζονται προς την προώθηση τεχνολογιών που ελαχιστοποιούν τις περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις.

Η τρισδιάστατη εκτύπωση θα μπορούσε να μεταμορφώσει βαθιά τις μεθόδους βιομηχανικής παραγωγής διευρύνοντας την πρόσβαση στα μέσα παραγωγής. Αυτή η επέκταση, που εξαρτάται από την πρόοδο στον χρόνο εκτύπωσης, το κόστος, την ποιότητα, το μέγεθος και τις επιλογές υλικών, θα μπορούσε να απομακρύνει τις βιομηχανίες από την παραδοσιακή κατασκευή. Παρά την υπόσχεσή της, η τροχιά κόστους από τη μαζική παραγωγή έως την τρισδιάστατη εκτύπωση είναι υπερβολική, υποδηλώνοντας γρήγορη υιοθέτηση σε τομείς υψηλού κόστους και χαμηλού όγκου όπως η αεροδιαστημική και αργή υιοθέτηση σε τομείς χαμηλού κόστους και μεγάλου όγκου.

Οι ευρύτερες οικονομικές επιπτώσεις εκκινούνται πέρα από τη μεταποίηση. Η τρισδιάστατη εκτύπωση θα μπορούσε να μειώσει την απασχόληση στη μεταποίηση, καθιστώντας αναγκαία μια αλλαγή στους ρόλους του εργατικού δυναμικού, αλλά και τον εκδημοκρατισμό της παραγωγής, ενισχύοντας την επιχειρηματικότητα. Η κύρια χρησιμότητα του στις αναπτυσσόμενες χώρες μπορεί να μην έγκειται στην παροχή βοήθειας στους φτωχότερους αλλά στο να επιτρέψει στους αστικούς επιχειρηματίες να ξεκινήσουν επιχειρήσεις παραγωγής μικρής κλίμακας.

Περιβαλλοντικά, η τρισδιάστατη εκτύπωση ευθυγραμμίζει τα οικονομικά κίνητρα με μειωμένη χρήση υλικών και ενέργειας μέσω προηγμένου σχεδιασμού. Ωστόσο, δεν υπάρχει κίνητρο για τους κατασκευαστές εκτυπωτών να αναπτύξουν ενεργειακά αποδοτικά μοντέλα. Ενώ η τρισδιάστατη εκτύπωση θα μπορούσε να ενθαρρύνει τη χρήση βιώσιμων υλικών λόγω της ευελιξίας της στο χειρισμό διαφόρων υλικών και της μειωμένης εξάρτησής της από οικονομίες κλίμακας, οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις είναι αποχρώσεις. Οι αξιολογήσεις του κύκλου ζωής δείχνουν ότι η τρισδιάστατη εκτύπωση μπορεί να μειώσει τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις για ορισμένα προϊόντα σε σύγκριση με τις παραδοσιακές μεθόδους όπως η μηχανική κατεργασία, αν και όχι σε όλα τα σενάρια παραγωγής.

Έτσι, ενώ η τρισδιάστατη εκτύπωση προσφέρει πιθανά περιβαλλοντικά οφέλη ελαχιστοποιώντας τα απόβλητα και ενισχύοντας την αποδοτικότητα των υλικών, αυτά δεν είναι εγγυημένα και απαιτούν στοχευμένες παρεμβάσεις πολιτικής για να πραγματοποιηθούν. Η ενθάρρυνση της βιώσιμης χρήσης υλικών και των ενεργειακά αποδοτικών διαδικασιών εκτύπωσης θα πρέπει να αποτελεί προτεραιότητα, παράλληλα με την προώθηση της ανακύκλωσης και της επαναχρησιμοποίησης υλικών για τη βελτίωση της συνολικής βιωσιμότητας των πρακτικών τρισδιάστατης εκτύπωσης.