



**ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΚΑΙ
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ**
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ»

Διπλωματική Εργασία:

**“Δυνατότητες και Περιορισμοί Μεθόδων 3D Printing στον Τομέα
των Κατασκευών”**

Νταντής Ιωάννης

Επιβλέπων καθηγητής:

Μπισκίνης Διονύσιος

Πάτρα, Ιούνιος 2022

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του φοιτητή («συγγραφέας/δημιουργός») που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο ΕΑΠ, μη αποκλειστική άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, προσαρμογής, δημόσιου δανεισμού, παρουσίας στο κοινό και ψηφιακής διάχυσής τους διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος και για όλο το χρόνο διάρκειας των δικαιωμάτων πνευματικής ιδιοκτησίας. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο για μελέτη και ανάγνωση δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, αποθήκευση, πώληση, εμπορική χρήση, μετάδοση, διανομή, έκδοση, εκτέλεση, «μεταφόρτωση» (downloading), «ανάρτηση» (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού. Ο συγγραφέας/δημιουργός διατηρεί το σύνολο των ηθικών και περιουσιακών του δικαιωμάτων.



«Δυνατότητες και Περιορισμοί Μεθόδων 3D Printing στον Τομέα
των Κατασκευών»

Νταντής Ιωάννης

Επιτροπή Επίβλεψης Πτυχιακής / Διπλωματικής Εργασίας

Επιβλέπων Καθηγητής:

Μπισκίνης Διονύσιος

Μέλος ΣΕΠ ΔΧΤ/ΣΘΕΤ ΕΑΠ

Συν-Επιβλέπων Καθηγητής:

Λιώλιος Άγγελος

Μέλος ΣΕΠ ΔΧΤ/ΣΘΕΤ ΕΑΠ

Πάτρα, Ιούνιος 2022

*«Στη γυναίκα μου Κατερίνα και το πρώτο μας παιδί,
που σύντομα πρόκειται να έρθει στον κόσμο»*

Περίληψη

Παρά τη συνεχή εξέλιξη της τεχνολογίας, μέσω της οποίας έχει αυτοματοποιηθεί σε μεγάλο βαθμό η παραγωγική διαδικασία σε πολλούς τομείς της βιομηχανίας, στον κατασκευαστικό κλάδο η πλειοψηφία των οικοδομικών εργασιών εξακολουθεί να εκτελείται με τις ίδιες παραδοσιακές μεθόδους εδώ και πολλά χρόνια. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ο κατασκευαστικός κλάδος να αντιμετωπίζει προβλήματα, όπως η χαμηλή παραγωγικότητα, ο υψηλός αριθμός εργατικών ατυχημάτων και η παραγωγή σημαντικού όγκου αποβλήτων. Προκειμένου να αντιμετωπιστούν τα ζητήματα αυτά, αλλά και να εκσυγχρονιστεί η διαδικασία κατασκευής ενός οικοδομικού έργου, στην παρούσα εργασία εξετάζονται οι δυνατότητες, που μπορεί να προσφέρει η χρήση μεθόδων 3D Printing στον τομέα των κατασκευών, καθώς και οι περιορισμοί, που τίθενται από την εφαρμογή τους. Όπως αποδεικνύεται από τα έργα, που έχουν ήδη υλοποιηθεί την τελευταία δεκαετία σε όλο τον κόσμο, η τεχνολογία 3D Printing μπορεί να εφαρμοστεί με επιτυχία στην κατασκευή οικοδομικών έργων και οι σημαντικότερες μέθοδοι είναι οι Contour Crafting, Concrete Printing και D-Shape. Το πλέον διαδεδομένο υλικό, που χρησιμοποιείται για κατασκευές μέσω 3D Printing είναι το σκυρόδεμα τρισδιάστατης εκτύπωσης (3DPC), οι ιδιότητες και η σύνθεση του οποίου είναι αρκετά πιο πολύπλοκες σε σύγκριση με το κοινό σκυρόδεμα των παραδοσιακών μεθόδων κατασκευής, ενώ για την υλοποίηση κατασκευών ακόμα πιο φιλικών προς το περιβάλλον είναι εφικτή και η χρήση γαιώδους υλικού. Οι σημαντικότερες δυνατότητες, που μπορεί να προσφέρει η τεχνολογία 3D Printing στον τομέα των κατασκευών είναι η μείωση του κόστους κατασκευής, των εργατικών ατυχημάτων και του χρόνου κατασκευής, η αύξηση της ακρίβειας στην κατασκευή και της ευελιξίας του αρχιτεκτονικού σχεδιασμού και η ενίσχυση της βιωσιμότητας, μέσω της μείωσης των παραγόμενων αποβλήτων και εκπομπών CO₂. Αντίστοιχα, οι σημαντικότεροι περιορισμοί, που προκύπτουν είναι το υψηλό κόστος του εξοπλισμού εκτύπωσης, ο περιορισμός των διαστάσεων του έργου από τις διαστάσεις του τρισδιάστατου εκτυπωτή, το μικρό εύρος των οικοδομικών εργασιών, που μπορούν να εκτελεστούν μέσω 3D Printing, η απαίτηση ενσωμάτωσης χαλύβδινων οπλισμών, η έλλειψη κανονισμών και προτύπων και η επίδραση στην αγορά εργασίας. Παρά την ύπαρξη των παραπάνω περιορισμών, οι δυνατότητες, που παρουσιάζει η τεχνολογία 3D Printing μπορούν να δώσουν λύσεις σε σημαντικά προβλήματα, που διαχρονικά αντιμετωπίζει ο κατασκευαστικός κλάδος και συνεπώς, με την περαιτέρω έρευνα και εξέλιξη της τεχνολογίας,

καθώς και την απόκτηση ολοένα και περισσότερης τεχνογνωσίας μέσω της υλοποίησης έργων στην πράξη, η τεχνολογία 3D Printing έχει την προοπτική να αποτελέσει στο σύντομο μέλλον έναν ευρέως διαδεδομένο και αποτελεσματικό τρόπο κατασκευής οικοδομικών έργων.

Λέξεις – Κλειδιά

Τρισδιάστατη εκτύπωση, αυτοματοποίηση, κατασκευαστικός τομέας

«Prospects and Limitations of 3D Printing Methods in Construction»

Ntantis Ioannis

Abstract

In spite of the continuous evolution of technology, through which the production process has been automated in many industrial sectors, in construction the majority of works continue to be carried out using the same traditional methods for many years. This results in problems such as low productivity, high number of work related accidents and significant volume of construction waste. In order to address these issues and also to modernize the construction process the present thesis examines the possibilities that 3D Printing methods can offer to the construction industry, as well as the limitations that arise from their application. As proven from projects already completed over the past decade throughout the world, 3D Printing technology can successfully be used in construction and the most important such methods are Contour Crafting, Concrete Printing and D-Shape. The most commonly used material for construction via 3D Printing is 3D Printing Concrete (3DPC), whose properties and composition are much more complex compared to common concrete used in traditional construction methods, while in order to achieve constructions even friendlier to the environment it is possible to use raw earth materials. The most important prospects that 3D Printing technology can offer to construction are the reduction of construction cost, time and work related accidents, the increase in construction accuracy and flexibility of architecture design and the enhancement of sustainability by reducing construction waste and CO₂ emissions. The most significant limitations respectively are the high cost of the 3D printers, the fact that the project's dimensions must be smaller than the 3D printers', the small range of construction works that can be executed via 3D Printing, the demand for tensile reinforcement by placing rebars, the lack of regulations and standards and the impact on labor market. Despite the limitations, the prospects that 3D Printing technology demonstrates can provide solutions to important problems that construction industry has been facing over time and consequently through further research and development of technology, as well as acquisition of more and more know-how through implementation of 3D Printing in practice, 3D Printing technology has the potential to become a widespread and efficient construction method in the near future.

Keywords

3D Printing, automation, construction industry

Περιεχόμενα

Περίληψη	v
Abstract.....	vii
Εισαγωγή	xv
Κεφάλαιο 1: Τεχνολογία 3D Printing-Ιστορικό	1
Κεφάλαιο 2: Μέθοδοι 3D Printing	4
2.1 Φωτοπολυμερισμός Δεξαμενής (Vat Photopolymerisation).....	4
2.2 Μέθοδος Ψεκασμού Υλικού (Material Jetting)	5
2.3 Μέθοδος Ψεκασμού Συνδετικού Υλικού (Binder Jetting).....	6
2.4 Μέθοδος Εξώθησης Υλικού (Material Extrusion).....	7
2.5 Μέθοδος Σύντηξης Στρώματος Σκόνης (Powder Bed Fusion).....	8
2.6 Μέθοδος Συγκόλλησης Φύλλων (Sheet Lamination)	9
2.7 Μέθοδος Εναπόθεσης με Κατευθυνόμενη Ενέργεια (Directed Energy Deposition)	10
Κεφάλαιο 3: 3D Printing στον τομέα των κατασκευών	12
3.1 Η πρώτη απόπειρα αυτοματοποίησης στην κατασκευή.....	13
3.2 Η έρευνα του Joseph Pegna	14
3.3 Η μέθοδος Κατασκευής Περιγράμματος - Contour Crafting.....	15
3.4 Η μέθοδος Εκτύπωσης Σκυροδέματος – Concrete Printing.....	21
3.5 Η μέθοδος D-Shape.....	23
3.6 Σύγκριση μεθόδων Contour Crafting, Concrete Printing και D-Shape	27
3.7 Κατασκευές που έχουν υλοποιηθεί με μεθόδους 3D Printing	29
Κεφάλαιο 4: Υλικά που χρησιμοποιούνται για κατασκευές με μεθόδους 3D Printing	33
4.1 Σκυρόδεμα τρισδιάστατης εκτύπωσης (3DPC) μεθόδων με βάση την εξώθηση υλικού	33
4.2 Υλικά σκυροδέματος τρισδιάστατης εκτύπωσης μεθόδων με βάση την εξώθηση υλικού	35
4.2.1 Τσιμέντο.....	35
4.2.2 Συμπληρωματικά Τσιμεντοειδή Υλικά (SCM).....	36
4.2.3 Γεωπολυμερή (Geopolymer).....	36
4.2.4 Αδρανή	38
4.2.5 Χημικά πρόσμικτα	40
4.3 Σκληρυμένη κατάσταση μίγματος	43
4.4 Σκυρόδεμα τρισδιάστατης εκτύπωσης (3DPC) μεθόδων με βάση τη σύντηξη στρώματος σκόνης	48

4.5 Τρισδιάστατη εκτύπωση με γαιώδη υλικά.....	50
Κεφάλαιο 5: Δυνατότητες και περιορισμοί μεθόδων 3D Printing	53
5.1 Δυνατότητες που παρέχει η εφαρμογή μεθόδων 3D Printing.....	53
5.1.1 Κόστος κατασκευής	53
5.1.2 Εργατικά ατυχήματα	58
5.1.3 Χρόνος κατασκευής	58
5.1.4 Ακρίβεια κατασκευής – αποκλίσεις διαστάσεων	60
5.1.5 Ευελιξία στον αρχιτεκτονικό σχεδιασμό	61
5.1.6 Περιβαλλοντικά οφέλη - βιωσιμότητα.....	62
5.2 Περιορισμοί μεθόδων 3D Printing.....	63
5.2.1 Κόστος εξοπλισμού.....	63
5.2.2 Διαστάσεις έργων.....	66
5.2.3 Εύρος εκτελούμενων εργασιών.....	66
5.2.4 Ενσωμάτωση οπλισμού.....	67
5.2.5 Έλλειψη κανονισμών και προτύπων	67
5.2.6 Επίδραση στην αγορά εργασίας.....	69
Κεφάλαιο 6: Μελέτες περιπτώσεων	70
6.1 Κατασκευή διώροφης κατοικίας στη Γερμανία	70
6.2 Κατασκευή διώροφου κτιρίου γραφείων στο Dubai.....	77
Συμπεράσματα.....	82
Βιβλιογραφία	89

Κατάλογος Εικόνων / Σχημάτων

Εικόνα 1: Η μέθοδος του Φωτοπολυμερισμού Δεξαμενής (Vat Photopolymerisation).....	5
Εικόνα 2: Η μέθοδος του Ψεκασμού Υλικού (Material Jetting)	6
Εικόνα 3: Η μέθοδος του Ψεκασμού Συνδετικού Υλικού (Binder Jetting).....	7
Εικόνα 4: Η Μέθοδος Εξώθησης Υλικού (Material Extrusion)	8
Εικόνα 5: Η Μέθοδος Σύντηξης Στρώματος Σκόνης (Powder Bed Fusion)	9
Εικόνα 6: Η Μέθοδος Συγκόλλησης Φύλλων (Sheet Lamination)	10
Εικόνα 7: Η Μέθοδος Εναπόθεσης με Κατευθυνόμενη Ενέργεια (Directed Energy Deposition)	11
Εικόνα 8: Αριστερά: σκαρίφημα της διάταξης σκυροδέτησης του Edison. Δεξιά: Φωτογραφία από την εφαρμογή της μεθόδου το 1919	13
Εικόνα 9: Απεικόνιση της διάταξης που χρησιμοποιείται για την κατασκευή κτιρίου μέσω της μεθόδου Contour Crafting	15
Εικόνα 10: Η κεφαλή εκτύπωσης της μεθόδου Contour Crafting	16
Εικόνα 11: Κατασκευή τοίχου με τη μέθοδο Contour Crafting	16
Εικόνα 12: Τοίχος από σκυρόδεμα κατασκευασμένος με τη μέθοδο Contour Crafting	17
Εικόνα 13: Τοποθέτηση οπλισμού ενίσχυσης τοίχου με ρομποτικούς βραχίονες.....	18
Εικόνα 14: Αυτόματη τοποθέτηση υδραυλικών και ηλεκτρολογικών εγκαταστάσεων.....	18
Εικόνα 15: Η διάταξη εκτύπωσης που χρησιμοποιείται από το τμήμα 3D Printing του Πανεπιστημίου Τεχνολογίας του Eindhoven.....	20
Εικόνα 16: Η διάταξη εκτύπωσης που χρησιμοποιείται στη μέθοδο Concrete Printing του Πανεπιστημίου Loughborough	21
Εικόνα 17: Σχηματική απεικόνιση της παροχής υλικού της μεθόδου Concrete Printing.....	22
Εικόνα 18: Κατασκευή εκτυπωμένη με τη μέθοδο Concrete Printing, με το χαρακτηριστικό ραβδωτό τελείωμα	23
Εικόνα 19: Οι τρεις τεχνικές που χρησιμοποιούνται για τη σύντηξη στρώματος σκόνης	24
Εικόνα 20: Αριστερά: η διάταξη εκτύπωσης της μεθόδου D-Shape. Δεξιά: τα ακροφύσια της κεφαλής εκτύπωσης	25
Εικόνα 21: Πάνω: το τρισδιάστατο μοντέλο της κατασκευής Radiolaria pavilion. Κάτω: τα στάδια εκτύπωσης της κατασκευής και το τελικό αντικείμενο	26
Εικόνα 22: Η πεζογέφυρα στο πάρκο της Μαδρίτης, που έχει κατασκευαστεί με τη μέθοδο D- Shape.....	27

Εικόνα 23: Κατασκευές από όλο τον κόσμο, που έχουν υλοποιηθεί με μεθόδους 3D Printing	32
Εικόνα 24: Το γεωπολυμερές κονίαμα, που αποτελείται εξ' ολοκλήρου από απόβλητα κατασκευών και κατεδαφίσεων. Αριστερά: εικόνα κατά την εκτύπωση του μίγματος στο εργαστήριο. Δεξιά: Κοντινή φωτογραφία των στρώσεων του υλικού μετά την εξώθηση.....	38
Εικόνα 25: Δείγματα εκτυπωμένου σκυροδέματος καλής ποιότητας εκτύπωσης στα δεξιά και χαμηλής ποιότητας εκτύπωσης στα αριστερά, όπου διακρίνεται το περίγραμμα των νημάτων υλικού και τα αντίστοιχα κενά ανάμεσά τους	44
Εικόνα 26: Ενσωμάτωση χαλύβδινων οπλισμών σε κατασκευές 3DPC, με εκτύπωση του περιγράμματος των υποστρωμάτων, τοποθέτηση του οπλισμού και πλήρωση με κοινό σκυρόδεμα.....	45
Εικόνα 27: Ενίσχυση κατασκευής 3DPC, με τοποθέτηση οριζόντιων εγκάρσιων οπλισμών, που συνδέουν τις παράλληλες στρώσεις υλικού.....	46
Εικόνα 28: Ενίσχυση κατασκευής 3DPC, με τοποθέτηση πλέγματος οριζόντιων και κατακόρυφων οπλισμών και εκτύπωση σκυροδέματος εκατέρωθέν τους	46
Εικόνα 29: Ευθυγράμμιση των ινών παράλληλα με την κατεύθυνση εκτύπωσης	47
Εικόνα 30: Δοκός κατασκευασμένη από σκυρόδεμα με βάση το MgO, όπου διακρίνεται η χαρακτηριστική τραχεία εξωτερική επιφάνεια	49
Εικόνα 31: Τρισδιάστατη εκτύπωση γαιώδους υλικού	51
Εικόνα 32: Πάνω: Το έργο «Gaia», κατά της διάρκεια της εκτύπωσης και ολοκληρωμένο. Κάτω: το έργο«TECLA» αντίστοιχα, κατά της διάρκεια της εκτύπωσης και ολοκληρωμένο (πηγή:www.3dwasp.com).....	52
Εικόνα 33: Η πρώτη κατασκευή μέσω 3D Printing στην Ινδία, από την εταιρείας Tvasta. Αριστερά: το τρισδιάστατο μοντέλο, Δεξιά: η κατασκευή ολοκληρωμένη	54
Εικόνα 34: Αριστερά: η κάτοψη του ισογείου κτιρίου, Δεξιά: η κατασκευή ολοκληρωμένη από την εταιρεία Zhengzhou Dingsheng Co. Ltd στην Κίνα.....	56
Εικόνα 35: Οι εξωτερικές όψεις της Αίθουσας Πολλαπλών Χρήσεων Ras Alain και η κάτοψη του κτιρίου με επεξήγηση των διάφορων χρήσεων	56
Εικόνα 36: Η διώροφη κατοικία Landscape House της ολλανδικής εταιρείας Universe Architecture.....	61
Εικόνα 37: Ο 3D Printer BOD2 της εταιρείας COBOD.....	64
Εικόνα 38: Η διώροφη κατοικία ολοκληρωμένη.....	70
Εικόνα 39: Η κάτοψη του ισογείου της κατοικίας (πηγή: 360ο tour από τον ιστότοπο https://www.peri3dconstruction.com/en/360-touren)	71

Εικόνα 40: Η κάτοψη του Α' ορόφου της κατοικίας (πηγή: 360ο tour από τον ιστότοπο https://www.peri3dconstruction.com/en/360-touren)	71
Εικόνα 41: Η κατασκευή της πλάκας θεμελίωσης του κτιρίου	72
Εικόνα 42: Οι φέρουσες τοιχοποιίες της κατασκευής. Με κίτρινο χρώμα είναι οι τοίχοι οι οποίοι πληρώθηκαν με θερμομονωτικό υλικό, ενώ με πράσινο οι τοίχοι που πληρώθηκαν με άοπλο σκυρόδεμα (πηγή: Mense-Korte ingenieure + architekten).....	73
Εικόνα 43: Φωτογραφία κατά τη διάρκεια της επί τόπου σκυροδέτησης τμήματος της τοιχοποιίας (πηγή: Mense-Korte ingenieure + architekten)	74
Εικόνα 44: Κατασκευή της πλάκας οροφής ισογείου (πηγή: Mense-Korte ingenieure + architekten)	74
Εικόνα 45: Ο χώρος της τραπεζαρίας στο ισόγειο (πηγή: 360ο tour από τον ιστότοπο https://www.peri3dconstruction.com/en/360-touren)	75
Εικόνα 46: Ο χώρος του σαλονιού με το τζάκι στο ισόγειο (πηγή: 360ο tour από τον ιστότοπο https://www.peri3dconstruction.com/en/360-touren)	75
Εικόνα 47: Χώρος δωματίου στον Α' όροφο (πηγή: 360ο tour από τον ιστότοπο https://www.peri3dconstruction.com/en/360-touren)	76
Εικόνα 48: Ο χώρος του κυρίως WC στον Α' όροφο (πηγή: 360ο tour από τον ιστότοπο https://www.peri3dconstruction.com/en/360-touren)	76
Εικόνα 49: Το διώροφο κτίριο γραφείων στο Dubai ολοκληρωμένο.....	77
Εικόνα 50: Η κατασκευή των πεδιλοδοκών της θεμελίωσης του κτιρίου με εκτύπωση του περιγράμματος με τεχνολογία 3D Printing και τοποθέτηση του απαιτούμενου οπλισμού	79
Εικόνα 51: Φωτογραφία κατά τη διάρκεια εκτύπωσης της τοιχοποιίας του κτιρίου. Εμφανή είναι επίσης τα εκτυπωμένα περιγράμματα των υποστυλωμάτων, στα οποία έχουν τοποθετηθεί οι απαιτούμενοι οπλισμοί και πρόκειται να ακολουθήσει πλήρωση με σκυρόδεμα	79
Εικόνα 52: Ο 3D Printer της Apis Cor, αποκαλούμενος «Frank», ο οποίος χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή του κτιρίου	80
Εικόνα 53: Φωτογραφία της εξωτερικής τοιχοποιίας από το εσωτερικό του κτιρίου, στην οποία είναι εμφανείς οι στρώσεις του εκτυπωμένου υλικού	81

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1: Επίδραση ορισμένων ορυκτών προσθέτων στις ρεολογικές ιδιότητες μιγμάτων 3DCP.....	36
Πίνακας 2: Εκτίμηση κόστους κατασκευής με χρήση παραδοσιακών μεθόδων.....	54
Πίνακας 3: Το κόστος αγοράς του εκτυπωτή BOD2, για τις διάφορες διαστάσεις του	65

Εισαγωγή

Η αλματώδης εξέλιξη της τεχνολογίας έχει συμβάλλει στον εκσυγχρονισμό και την αυτοματοποίηση των παραγωγικών διαδικασιών πολλών τομέων της βιομηχανίας, με κύριο σκοπό την αύξηση της παραγωγικότητας. Ο τομέας των κατασκευών αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους βιομηχανικούς κλάδους της παγκόσμιας αγοράς, καθώς η συνολική αξία της κατασκευαστικής παραγωγής το έτος 2020 ανήλθε σε 11,6 τρισεκατομμύρια δολάρια, ενώ τα έξοδα που αφορούν τις κατασκευές αντιπροσωπεύουν το 13% του παγκόσμιου ΑΕΠ. Παρ' όλα αυτά ο βαθμός αυτοματοποίησης των κατασκευών παραμένει ακόμα και σήμερα πολύ χαμηλός, με συνέπεια ο κατασκευαστικός κλάδος να χαρακτηρίζεται από χαμηλή παραγωγικότητα, η οποία έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του κόστους και του χρόνου υλοποίησης ενός έργου. Επιπλέον η εκτέλεση της πλειονότητας των οικοδομικών εργασιών από εργατικό προσωπικό έχει τη θλιβερή συνέπεια του υψηλού αριθμού εργατικών ατυχημάτων, πολλές φορές θανατηφόρων (3,1 εκατομμύρια μη θανατηφόρα εργατικά ατυχήματα στην Ευρωπαϊκή Ένωση το έτος 2019 και 3.408 θανατηφόρα), καθώς πολλές από τις εκτελούμενες εργασίες εγκυμονούν σοβαρούς κινδύνους για την ανθρώπινη ζωή (εργασία σε μεγάλα ύψη, πτώσεις αντικειμένων, ηλεκτροπληξία κλπ.). Ακόμα, κάθε κατασκευαστικό έργο συνεπάγεται την παραγωγή μεγάλου όγκου αποβλήτων (περίπου 96kg αποβλήτων για κάθε m² νέας κατασκευής), ενώ η παραγωγή οικοδομικών υλικών όπως το τσιμέντο οδηγούν στην έκλυση μεγάλων ποσοτήτων CO₂.

Η τεχνολογία 3D Printing ξεκίνησε να αναπτύσσεται στις αρχές της δεκαετίας του 1980 με την κατασκευή αντικειμένων μικρής κλίμακας κυρίως από πολυμερή. Μέσα στα επόμενα χρόνια αναπτύχθηκαν διάφορες μέθοδοι 3D Printing, οι οποίες βρήκαν εφαρμογή σε τομείς όπως η αυτοκινητοβιομηχανία, η αεροδιαστημική βιομηχανία, η ιατρική και το εμπόριο. Στα μέσα της δεκαετίας του 1990 ξεκινά ουσιαστικά η έρευνα για τη χρήση της τεχνολογίας 3D Printing και στον τομέα των κατασκευών, με σκοπό την αυτοματοποίηση της διαδικασίας παραγωγής ενός οικοδομικού έργου και από το 2014 και μετά εμφανίζονται οι πρώτες αναφορές για επιτυχή ολοκλήρωση κατασκευαστικών έργων με χρήση της τεχνολογίας 3D Printing.

Στην παρούσα εργασία πραγματοποιείται διερεύνηση των δυνατοτήτων, που μπορούν να προσφέρουν οι μέθοδοι 3D Printing στον τομέα των κατασκευών, καθώς και των περιορισμών που θέτει η εφαρμογή τους, με κριτική ανάλυση διεθνούς βιβλιογραφίας και παρουσίαση έργων, που έχουν πρόσφατα ολοκληρωθεί με χρήση μεθόδων 3D Printing. Στόχος της

εργασίας είναι να εξεταστούν τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της νέας αυτής κατασκευαστικής μεθόδου, σε σύγκριση με τους παραδοσιακούς τρόπους κατασκευής και να αξιολογηθεί η δυνατότητα ευρύτερης εφαρμογής της στο προσεχές μέλλον.

Στο κεφάλαιο 1 δίνονται βασικοί ορισμοί, που αφορούν την Προσθετική Κατασκευή και το 3D Printing, πραγματοποιείται ιστορική αναδρομή της εφαρμογής της μεθόδου και σύντομη αναφορά στους τομείς, όπου οι μέθοδοι 3D Printing βρίσκουν εφαρμογή σήμερα.

Στο κεφάλαιο 2 περιγράφονται οι 7 κατηγορίες Προσθετικής Κατασκευής, σύμφωνα με την κατηγοριοποίηση της Αμερικάνικης Εταιρείας Δοκιμών και Υλικών (ASTM): ο Φωτοπολυμερισμός Δεξαμενής (Vat Photopolymerisation), η Μέθοδος Ψεκασμού Υλικού (Material Jetting), η Μέθοδος Ψεκασμού Συνδετικού Υλικού (Binder Jetting), η Μέθοδος Εξώθησης Υλικού (Material Extrusion), η Μέθοδος Σύντηξης Στρώματος Σκόνης (Powder Bed Fusion), η Μέθοδος Συγκόλλησης Φύλλων (Sheet Lamination) και η Μέθοδος Εναπόθεσης με Κατευθυνόμενη Ενέργεια (Directed Energy Deposition).

Στο κεφάλαιο 3 περιγράφεται η προσπάθεια αυτοματοποίησης του τομέα των κατασκευών με ενσωμάτωση των μεθόδων 3D Printing. Αρχικά περιγράφεται η πρώτη απόπειρα αυτοματισμού στην κατασκευή, που πραγματοποιήθηκε από τον Thomas Edison στις αρχές του 20ου αιώνα και ακολουθεί η έρευνα του Joseph Pigna στα μέσα της δεκαετίας του 90'. Στη συνέχεια περιγράφονται οι τρεις μέθοδοι, που είναι κατάλληλες για εφαρμογή στον τομέα των κατασκευών: Η μέθοδος Κατασκευής Περιγράμματος (Contour Crafting), η μέθοδος Εκτύπωσης Σκυροδέματος (Concrete Printing) και η μέθοδος D-Shape. Στο τέλος του κεφαλαίου περιγράφονται οι βασικές διαφορές, που παρουσιάζουν οι τρεις μέθοδοι και γίνεται αναφορά πραγματικών κατασκευών, που έχουν υλοποιηθεί στον κόσμο με μεθόδους 3D Printing.

Στο κεφάλαιο 4 περιγράφονται τα υλικά, που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή οικοδομικών έργων με την τεχνολογία 3D Printing και οι ιδιότητες, τις οποίες θα πρέπει να διαθέτουν. Πραγματοποιείται αναλυτική παρουσίαση του συνηθέστερα χρησιμοποιούμενου υλικού, που είναι το σκυρόδεμα τρισδιάστατης εκτύπωσης (3DPC) και των συστατικών από τα οποία αποτελείται (τσιμέντο, αδρανή, χημικά πρόσμικτα, συμπληρωματικά τσιμεντοειδή υλικά), αλλά και άλλων υλικών, τα οποία δίνουν έμφαση στο περιβάλλον και τη βιωσιμότητα, όπως τα γεωπολυμερή και τα γαιώδη υλικά.

Στο κεφάλαιο 5 αναλύονται οι σημαντικότερες δυνατότητες και οι περιορισμοί των μεθόδων 3D Printing στον κατασκευαστικό τομέα. Περιγράφονται οι δυνατότητες που προσφέρονται

στη μείωση του κόστους κατασκευής, των εργατικών ατυχημάτων, του χρόνου κατασκευής και την αύξηση της κατασκευαστικής ακρίβειας, της ευελιξίας στον αρχιτεκτονικό σχεδιασμό και της βιωσιμότητας των κατασκευών. Αντίστοιχα, περιγράφονται οι περιορισμοί, που αφορούν το κόστος του κατασκευαστικού εξοπλισμού, τις διαστάσεις των προς εκτύπωση έργων, το εύρος των εκτελούμενων οικοδομικών εργασιών, την απαίτηση ενσωμάτωσης χαλύβδινων οπλισμών, την έλλειψη κανονισμών και προτύπων και την επίδραση στην αγορά εργασίας.

Στο κεφάλαιο 6 παρουσιάζονται αναλυτικά δύο κατασκευές, οι οποίες έχουν ανεγερθεί πρόσφατα με εφαρμογή της τεχνολογίας 3D Printing: μια διώροφη κατοικία με εμβαδόν ορόφου 80m² στην πόλη Beckum της Γερμανίας, η οποία ολοκληρώθηκε το 2021 και ενός διώροφου κτιρίου γραφείων στο Dubai, συνολικού εμβαδού 640m² και ύψους 9,5m, το οποίο ολοκληρώθηκε το 2019.

Στο τέλος της εργασίας καταγράφονται τα συμπεράσματα, που αφορούν την εφαρμογή της τεχνολογίας 3D Printing στον τομέα των κατασκευών.

Κεφάλαιο 1: Τεχνολογία 3D Printing-Ιστορικό

Η βασική ιδέα πίσω από την ανάπτυξη της τεχνολογίας 3D Printing είναι η δυνατότητα αυτόματης παραγωγής ενός τρισδιάστατου στερεού αντικειμένου από ένα ψηφιακό σχέδιο, που έχει δημιουργηθεί μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή (CAD-Computer Aided Design).

Σύμφωνα με τον ορισμό της Αμερικάνικης Εταιρείας Δοκιμών και Υλικών (American Society for Testing and Materials – ASTM) 3D Printing ορίζεται ως η κατασκευή αντικειμένων μέσω της εναπόθεσης ενός υλικού, χρησιμοποιώντας μια κεφαλή εκτύπωσης, ένα ακροφύσιο ή κάποια άλλη τεχνολογία εκτύπωσης. Ο όρος 3D-Printing αποτελεί ουσιαστικά υποσύνολο του γενικότερου όρου Προσθετική Κατασκευή (Additive Manufacturing – AM). Ως Προσθετική Κατασκευή, σύμφωνα με την ASTM, ορίζεται η διαδικασία ένωσης υλικών για τη δημιουργία αντικειμένων από δεδομένα τρισδιάστατων μοντέλων, συνήθως σε επάλληλα στρώματα, σε αντίθεση με τις αφαιρετικές μεθοδολογίες κατασκευής. Η αφαιρετική κατασκευή αναφέρεται στη δημιουργία ενός αντικειμένου με αφαίρεση υλικού από έναν στέρεο όγκο, για τη διαμόρφωση του επιθυμητού σχήματος (ASTM, 2013).

Άλλοι όροι που χρησιμοποιούνται για την Προσθετική Κατασκευή είναι οι: Ταχεία Προτυποποίηση (Rapid Prototyping), Κατασκευή Προσθετικών Στρωμάτων (Additive Layer Manufacturing), Ψηφιακή Προσθετική Κατασκευή (Additive Digital Manufacturing), Ελεύθερη Κατασκευή (Freeform Manufacturing). Ο όρος 3D Printing αναφέρεται στην μέθοδο προσθετικής κατασκευής, η οποία αναπτύχθηκε το 1993 στο Ινστιτούτο Τεχνολογίας της Μασαχουσέτης (MIT), σύμφωνα με την οποία γίνεται παραγωγή ενός τρισδιάστατου μοντέλου με χρήση μηχανισμού παρομοίου με αυτόν που χρησιμοποιείται από έναν εκτυπωτή έγχυσης μελάνης (inkjet) για την παραγωγή ενός μοντέλου δύο διαστάσεων (USA Patent No. 5204055, 1993). Πλέον υπερέρχει όλων των ορισμών της προσθετικής κατασκευής και έχει γίνει παγκοσμίως αποδεκτός για την περιγραφή των αυτοματοποιημένων διαδικασιών κατασκευής σε στρώσεις, καθώς είναι περισσότερο γενικός και κατανοητός στο ευρύ κοινό (Gebhardt, Kessler, & Thurn, 2019).

Ο Hideo Kodama από το Δημοτικό Ινστιτούτο Βιομηχανικών Ερευνών της Ναγκόγια στην Ιαπωνία μπορεί να θεωρηθεί ως ο πρώτος που εφάρμοσε τεχνικές προσθετικής κατασκευής (AM) στις αρχές της δεκαετίας του 1980. Στην εργασία του με τίτλο «Αυτόματη μέθοδος κατασκευής τρισδιάστατου πλαστικού μοντέλου με χρήση φωτοπολυμερών», η οποία

δημοσιεύτηκε το 1981, περιγράφει τεχνικές για την κατασκευή πλαστικών αντικειμένων μέσω της στερεοποίησης λεπτών αλληπάλληλων φύλλων από φωτοπολυμερή (Kodama, 1981).

Έπειτα, το 1984 ο Charles Hull, συνιδρυτής της εταιρείας 3D Systems στην Αμερική, υπέβαλε αίτηση για δίπλωμα ευρεσιτεχνίας με τίτλο «Συσκευή για την Παραγωγή Τρισδιάστατων Αντικειμένων μέσω Στερεολιθογραφίας». Στην ευρεσιτεχνία του Hull περιγράφεται η Στερεολιθογραφία ως μια μέθοδος παραγωγής στερεών αντικειμένων «εκτυπώνοντας» λεπτά διαδοχικά στρώματα ενός υλικού, το οποίο σκληρύνεται με την εφαρμογή μιας δέσμης υπεριώδους ακτινοβολίας, που μπορεί να προγραμματιστεί ψηφιακά (USA Patent No. 4575330, 1986). Διαμορφώνονται με αυτό τον τρόπο οι στέρεες τομές ενός αντικειμένου και με τη διαδοχική τοποθέτηση της μιας πάνω στην άλλη δημιουργείται το συνολικό αντικείμενο.

Η εμπορική εφαρμογή της Προσθετικής Κατασκευής ξεκινά στην Αμερική το 1987, όταν η εταιρεία 3D Systems διαθέτει στην αγορά το μηχάνημα SLA-1 (τα αρχικά SLA προέρχονται από τις λέξεις StereoLithography Apparatus-Συσκευή Στερεολιθογραφίας). Ακολουθεί η Ιαπωνία, όπου τα έτη 1988 και 1989 αντίστοιχα οι εταιρείες NTT Data CMET και Sony/D-MEC λανσάρουν τις δικές τους συσκευές στερεολιθογραφίας.

Το 1991 έρχονται στο προσκήνιο τρεις νέες τεχνολογίες Προσθετικής Κατασκευής: η μέθοδος της μοντελοποίησης με εναπόθεση τηγμένου υλικού (Fused Deposition Modelling – FDM) από την εταιρεία Stratasys, η μέθοδος σκλήρυνσης στερεού εδάφους (Solid Ground Curing – SGC) από την εταιρεία Cubital και η μέθοδος κατασκευής πλαστικοποιημένων αντικειμένων (Laminated Object Manufacturing – LOM) από την εταιρεία Helisys. Το επόμενο έτος εμφανίζεται η μέθοδος επιλεκτικής πυροσυσσωμάτωσης με χρήση laser (Selective Laser Sintering – SLS) από την εταιρεία DTM.

Το 1993, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, το MIT λαμβάνει δίπλωμα ευρεσιτεχνίας για την τεχνολογία 3D Printing. Το 1996 εισάγονται στην αγορά οι πρώτοι 3D εκτυπωτές χρησιμοποιώντας την τεχνολογία αυτή, ο «Genisys» από την εταιρεία Stratasys, ο «Actua 2100» από εταιρεία 3D Systems και ο «Z402» από την εταιρεία Z Corp (Wohlers & Gornet, 2016).

Η χρήση της τεχνολογίας 3D Printing βρίσκει εφαρμογή σε πολλούς τομείς (Gebhardt, Kessler, & Thurn, 2019), όπως:

- Στην Αυτοκινητοβιομηχανία, για την κατασκευή διαφόρων εσωτερικών και εξωτερικών εξαρτημάτων (δεξαμενές καυσίμων, αεροτομές, προφυλακτήρες, εξατμίσεις κλπ.)
- Στην Αεροδιαστημική βιομηχανία, για την κατασκευή εξαρτημάτων κινητήρων κλπ.
- Στην Ιατρική και οδοντιατρική, για την κατασκευή εμφυτευμάτων, επιθεμάτων, ακόμα και ζωτικών οργάνων
- Στο Εμπόριο, για την παραγωγή καταναλωτικών αγαθών, όπως σκελετοί γυαλιών, σόλες παπουτσιών, λάμπες, παιχνίδια, κοσμήματα κλπ.
- Στην Αρχιτεκτονική, για την κατασκευή μακετών
- Στην Τέχνη

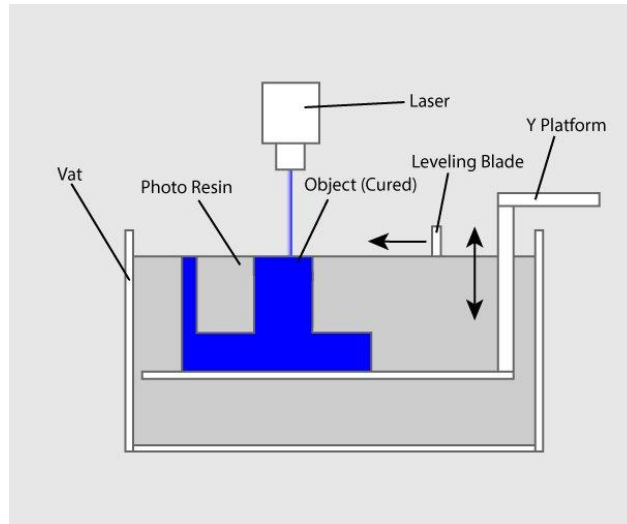
Κεφάλαιο 2: Μέθοδοι 3D Printing

Η διαδικασία της τρισδιάστατης εκτύπωσης, ανεξάρτητα από τη μέθοδο, ξεκινά με τη δημιουργία ενός τρισδιάστατου μοντέλου μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή (CAD-Computer Aided Design). Το μοντέλο αυτό μπορεί είτε να είναι προϊόν σχεδίασης εξ' αρχής, είτε να προέλθει από τρισδιάστατη σάρωση ενός υπάρχοντος αντικειμένου. Στη συνέχεια το μοντέλο αυτό θα πρέπει να μετατραπεί σε κατάλληλη μορφή ώστε να μπορεί να αναγνωστεί από τη διάταξη εκτύπωσης. Η συνηθέστερη μορφή που μπορεί ένας 3D printer να διαβάσει είναι τα αρχεία STL (από τη λέξη STereolithography), τα οποία κωδικοποιούν τη γεωμετρία του αντικειμένου μέσω ενός πλέγματος αλληλοσυνδεμένων τριγωνικών εδρών.

Από το 1984 και την ανακάλυψη της Στερεολιθογραφίας από τον Hull έχουν αναπτυχθεί πολλές μέθοδοι Προσθετικής Κατασκευής, οι οποίες διαφοροποιούνται ως προς τα υλικά και το χρησιμοποιούμενο μηχανολογικό εξοπλισμό. Σύμφωνα με την Αμερικάνικη Εταιρεία Δοκιμών και Υλικών (ASTM) υπάρχουν 7 κατηγορίες μεθόδων Προσθετικής Κατασκευής (Loughborough University), (What is 3D Printing?), οι οποίες αναφέρονται στη συνέχεια.

2.1 Φωτοπολυμερισμός Δεξαμενής (Vat Photopolymerisation)

Η μέθοδος του Φωτοπολυμερισμού Δεξαμενής χρησιμοποιεί μια δεξαμενή με ρητίνη σε υγρή φάση, η οποία με την παρουσία υπεριώδους ακτινοβολίας υποβάλλεται σε χημική αντίδραση και στερεοποιείται. Μια δέσμη υπεριώδους ακτινοβολίας χρησιμοποιείται για τη σκλήρυνση της ρητίνης στην επιφάνεια της δεξαμενής και όταν μια στρώση ολοκληρώνεται η δεξαμενή μετακινείται προς τα κάτω ώστε να κατασκευαστεί η επόμενη στρώση του αντικειμένου. Με την ολοκλήρωση όλων των στρώσεων του αντικειμένου, απομακρύνεται η υγρή ρητίνη από τη δεξαμενή και απομένει το εκτυπωμένο τρισδιάστατο αντικείμενο.



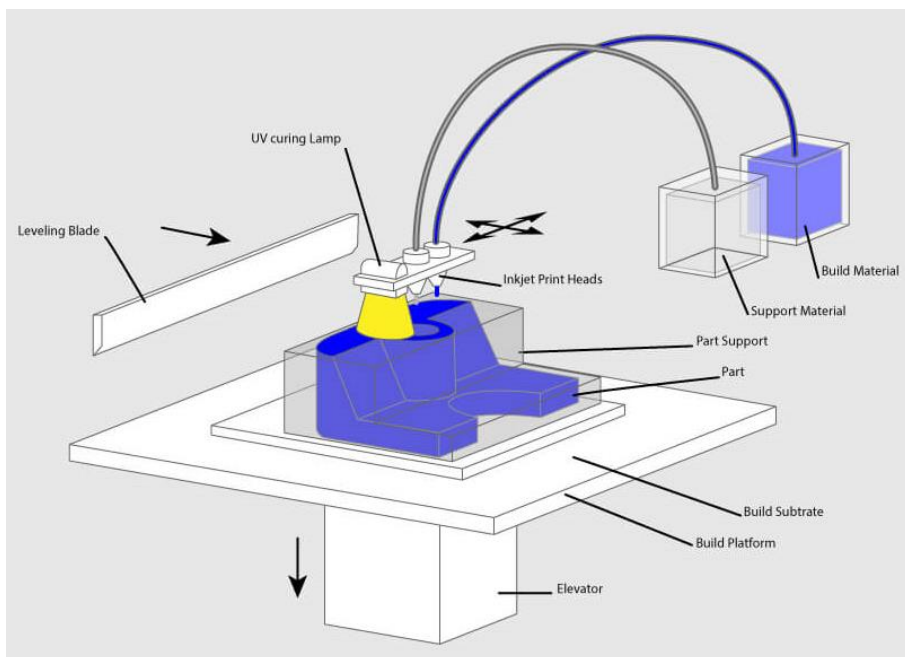
Εικόνα 1: Η μέθοδος του Φωτοπολυμερισμού Δεξαμενής (Vat Photopolymerisation)

Οι σημαντικότερες μέθοδοι, που εντάσσονται σε αυτή την κατηγορία είναι η Στερεολιθογραφία (SLA), η Ψηφιακή Επεξεργασία Φωτός (Digital Light Processing - DLP) και η Συνεχής Παραγωγή Διασύνδεσης Υγρών (Continuous Liquid Interface Production – CLIP).

Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι η υψηλή ακρίβεια στην απόδοση του τρισδιάστατου αντικειμένου, το καλό τελείωμα, η ταχύτητα της κατασκευής και η δυνατότητα εκτύπωσης μεγάλων αντικειμένων, διαστάσεων 1000x800x500mm και βάρους έως 200kg. Τα μειονεκτήματά της είναι το σχετικά υψηλό κόστος, η περιορισμένη χρήση υλικού φωτορητίνων και η χαμηλή αντοχή του τελικού αντικειμένου.

2.2 Μέθοδος Ψεκασμού Υλικού (Material Jetting)

Με τη μέθοδο Ψεκασμού Υλικού κατασκευάζονται τρισδιάστατα αντικείμενα με παρόμοιο τρόπο, όπως γίνεται η εκτύπωση δύο διαστάσεων με χρήση ενός απλού εκτυπωτή έγχυσης μελάνης (inkjet). Μια κεφαλή εκτύπωσης ψεκάζει το υλικό με τη μορφή σταγονιδίων πάνω σε μια επιφάνεια εργασίας, διαμορφώνοντας την πρώτη στρώση του αντικειμένου. Το υλικό στη συνέχεια σκληρύνεται με την έκθεση σε υπεριώδη ακτινοβολία. Έπειτα η επιφάνεια εργασίας μετακινείται προς τα κάτω και η διαδικασία επαναλαμβάνεται για τη διαμόρφωση των επόμενων στρώσεων μέχρι την ολοκλήρωση του συνολικού αντικειμένου.

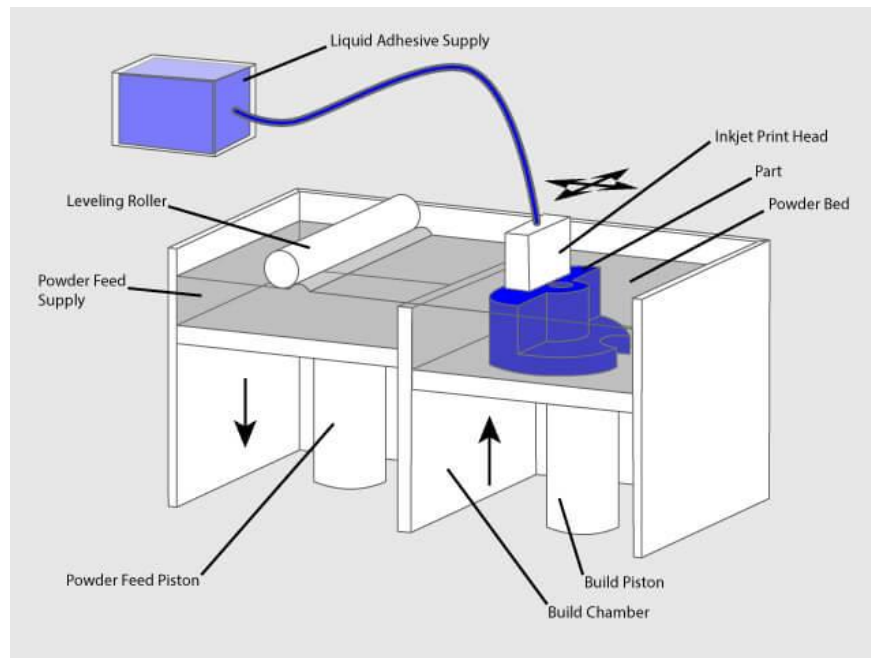


Εικόνα 2: Η μέθοδος του Ψεκασμού Υλικού (Material Jetting)

Βασικό πλεονέκτημα της μεθόδου είναι η υψηλή ακρίβεια στην απόθεση των σταγονιδίων του υλικού, που συνεπάγεται τη χαμηλή παραγωγή αποβλήτων. Στα μειονεκτήματά της εντάσσονται ότι συνήθως απαιτείται η χρήση υλικού υποστήριξης της κατασκευής και ο περιορισμός στη χρήση μόνο πολυμερών υλικών ή κεριού.

2.3 Μέθοδος Ψεκασμού Συνδετικού Υλικού (Binder Jetting)

Η μέθοδος Ψεκασμού Συνδετικού Υλικού χρησιμοποιεί δύο υλικά: τα κύρια συστατικά της κατασκευής σε μορφή σκόνης και ένα συνδετικό μέσο σε υγρή μορφή. Η σκόνη του υλικού διαστρώνεται σε μια επιφάνεια εργασίας, με τη χρήση ενός κυλίνδρου και στη συνέχεια η κεφαλή εκτύπωσης εναποθέτει το συνδετικό μέσο, όπου απαιτείται, για τη δημιουργία μιας στρώσης. Στη συνέχεια η επιφάνεια εργασίας μετακινείται προς τα κάτω και η διαδικασία επαναλαμβάνεται για τη δημιουργία των επόμενων στρώσεων του αντικειμένου.



Εικόνα 3: Η μέθοδος του Ψεκασμού Συνδετικού Υλικού (Binder Jetting)

Η συγκεκριμένη τεχνολογία είναι αυτή που είναι γνωστή ως 3D Printing και εφευρέθηκε στο MIT το 1993, όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο.

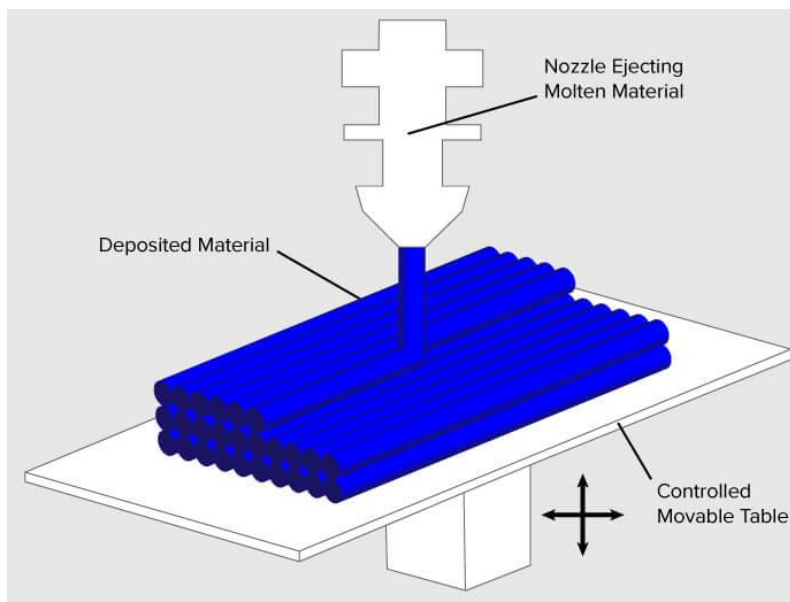
Τα βασικά πλεονεκτήματα της μεθόδου αυτής είναι η δυνατότητα χρήσης ενός ευρέως φάσματος υλικών, όπως μέταλλα, κεραμικά και πολυμερή και η ταχύτητα κατασκευής. Βασικό της μειονέκτημα είναι η πρόσθετη διαδικασία που απαιτείται για το τελικό φινίρισμα του εκτυπωμένου αντικειμένου.

2.4 Μέθοδος Εξώθησης Υλικού (Material Extrusion)

Η μέθοδος Εξώθησης Υλικού βασίζεται στην επιλεκτική εναπόθεση υλικού μέσω ενός ακροφυσίου για τη δημιουργία των στρώσεων του ζητούμενου αντικειμένου. Όταν ολοκληρώνεται μια στρώση, η επιφάνεια εργασίας μετακινείται προς τα κάτω ώστε να δημιουργηθεί η επόμενη στρώση του αντικειμένου πάνω στην προηγούμενη. Οι επάλληλες στρώσεις συγκολλούνται μεταξύ τους κατά την εναπόθεση, καθώς το υλικό βρίσκεται σε τηγμένη κατάσταση.

Η κυριότερη μέθοδος εξώθησης υλικού είναι η Μοντελοποίηση με Εναπόθεση Τηγμένου Υλικού (Fused Deposition Modelling - FDM). Η μέθοδος εφευρέθηκε στα τέλη της δεκαετίας του '80 από τον Scott Crump και αποτελεί σήμα κατατεθέν της εταιρείας του Stratasys. Το υλικό διέρχεται μέσα από ένα ακροφύσιο, το οποίο το θερμαίνει και μέσω της οριζόντιας

κίνησής του πάνω από την επιφάνεια εργασίας το εναποθέτει στις επιθυμητές θέσεις. Το υλικό σκληρύνεται αμέσως μετά την εναπόθεσή του, συνθέτοντας έτσι μια εγκάρσια τομή του προς εκτύπωση αντικειμένου. Ακολουθεί η μετακίνηση της επιφάνειας εργασίας προς τα κάτω και η δημιουργία της επόμενης στρώσης του αντικειμένου πάνω στην προηγούμενη, με την ίδια διαδικασία.



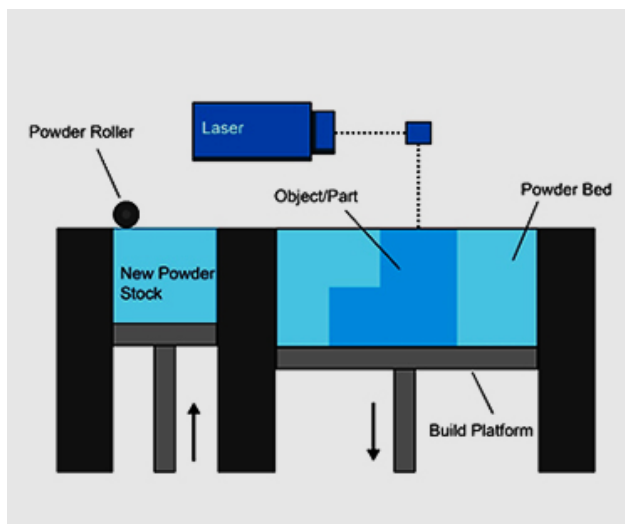
Εικόνα 4: Η Μέθοδος Εξώθησης Υλικού (Material Extrusion)

Παρόμοια μέθοδος της ίδιας κατηγορίας είναι και η Κατασκευή Τηγμένου Νήματος (Fused Filament Fabrication – FFF), η οποία χρησιμοποιεί υλικό σε νηματοειδή μορφή.

Το βασικό πλεονέκτημα της μεθόδου είναι ότι είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη και οικονομική. Σημαντικό μειονέκτημά της είναι η χαμηλότερη ακρίβεια και ταχύτητα κατασκευής σε σύγκριση με άλλες τεχνολογίες.

2.5 Μέθοδος Σύντηξης Στρώματος Σκόνης (Powder Bed Fusion)

Η μέθοδος Σύντηξης Στρώματος Σκόνης βασίζεται στη χρήση μιας δέσμης ηλεκτρονίων ή ενός laser για την επιλεκτική σύντηξη του κατασκευαστικού υλικού, το οποίο είναι σε μορφή σκόνης. Αρχικά η σκόνη του υλικού απλώνεται πάνω σε μια επιφάνεια εργασίας μέσω ενός κυλίνδρου ή μιας λεπίδας. Ακολουθεί η σύντηξη του υλικού και η διαμόρφωση μιας στρώσης ή εγκάρσιας τομής του τρισδιάστατου αντικειμένου. Στη συνέχεια η επιφάνεια εργασίας μετακινείται προς τα κάτω και ακολουθεί η διαμόρφωση της επόμενης στρώσης του αντικειμένου.



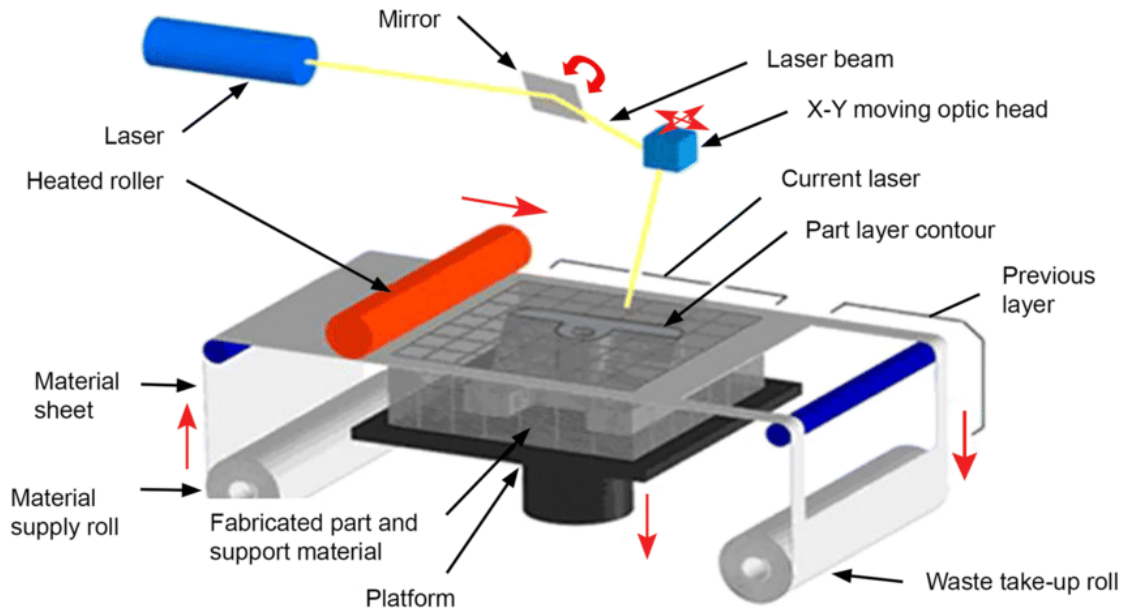
Εικόνα 5: Η Μέθοδος Σύντηξης Στρώματος Σκόνης (Powder Bed Fusion)

Οι κυριότερες μέθοδοι αυτής της κατηγορίας είναι η Επιλεκτική Πυροσυσσωμάτωση με Λείζερ (Selective Laser Sintering - SLS), η Επιλεκτική Τήξη με Λείζερ (Selective Laser Melting - SLM), η Τήξη με Δέσμη Ηλεκτρονίων (Electron Beam Melting – EBM) και η Άμεση Πυροσυσσωμάτωση Μετάλλου με Λείζερ (Direct Metal Laser Sintering – DMLS). Τα κυριότερα υλικά που χρησιμοποιούνται είναι πολυμερή και μέταλλα, όπως αλουμίνιο, τιτάνιο, χάλυβας και χαλκός.

Πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι το χαμηλό κόστος, το εύρος των χρησιμοποιούμενων υλικών και το μικρό μέγεθος των μηχανημάτων. Τα βασικότερα μειονεκτήματά της είναι η χαμηλή σχετικά ταχύτητα παραγωγής και ο περιορισμός στο μέγεθος των εκτυπωμένων αντικειμένων.

2.6 Μέθοδος Συγκόλλησης Φύλλων (Sheet Lamination)

Η μέθοδος βασίζεται στη συγκόλληση λεπτών φύλλων υλικού για τη διαμόρφωση του τρισδιάστατου αντικειμένου. Τα φύλλα αυτά μπορεί να αποτελούνται από μέταλλο, χαρτί ή πολυμερές υλικό. Το φύλλο διαστρώνεται στην επιφάνεια εργασίας με τη χρήση κυλίνδρων και κόβεται στο επιθυμητό σχήμα της εγκάρσιας τομής του αντικειμένου, μέσω μιας δέσμης laser ή κάποιας κοπτικής κεφαλής. Στη συνέχεια συγκολλείται στο προηγούμενο φύλλο και η επιφάνεια εργασίας μετακινείται προς τα κάτω για να ακολουθήσει η διαμόρφωση του επόμενου φύλλο με την ίδια διαδικασία.



Εικόνα 6: Η Μέθοδος Συγκόλλησης Φύλλων (Sheet Lamination)

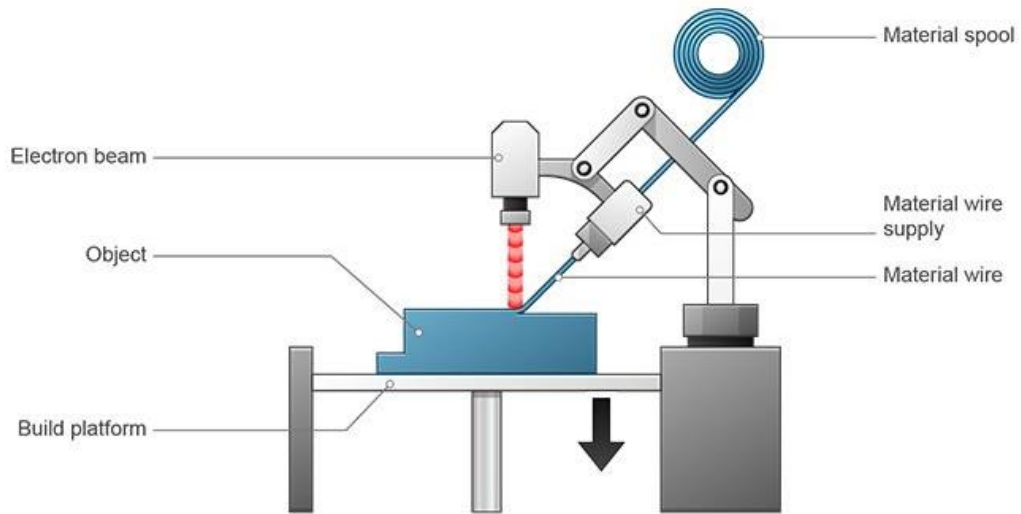
Η μέθοδος Συγκόλλησης Φύλλων περιλαμβάνει την Προσθετική Κατασκευή με Υπέρηχους (Ultrasonic Additive Manufacturing – UAM), η οποία χρησιμοποιεί κυρίως μεταλλικά φύλλα που συγκολλούνται μεταξύ τους με υπέρηχους και την Κατασκευή Αντικειμένων με Συγκόλληση (Laminated Object Manufacturing – LOM), η οποία χρησιμοποιεί κυρίως χαρτί ως κατασκευαστικό υλικό και κόλλα για την σύνδεση των φύλλων μεταξύ τους.

Πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι η ταχύτητα κατασκευής, το χαμηλό κόστος και η χρήση εύκολα διαχειρίσιμων υλικών. Μειονεκτημάτά της αποτελούν ότι συχνά απαιτείται επεξεργασία του εκτυπωμένου προϊόντος για την τελική διαμόρφωση του επιθυμητού σχήματος και ο περιορισμός στη χρήση υλικών.

2.7 Μέθοδος Εναπόθεσης με Κατευθυνόμενη Ενέργεια (Directed Energy Deposition)

Για την εφαρμογή της μεθόδου χρησιμοποιείται ένας ρομποτικός βραχίονας, ο οποίος έχει τη δυνατότητα να κινείται σε πολλαπλούς άξονες. Μέσω του ακροφυσίου του εναποτίθεται στην επιφάνεια εργασίας το κατασκευαστικό υλικό, το οποίο βρίσκεται σε μορφή σκόνης ή σύρματος. Αμέσως μετά την εναπόθεση το υλικό τήκεται με χρήση μιας δέσμης ηλεκτρονίων ή laser. Αφού στερεοποιηθεί η στρώση του υλικού, πραγματοποιείται εναπόθεση υλικού πάνω στην προηγούμενη στρώση και κατασκευή της επόμενης με την ίδια διαδικασία. Η μέθοδος

εφαρμόζεται κυρίως για μεταλλικές κατασκευές και συνήθως χρησιμοποιείται για επισκευή ή προσθήκη υλικού σε υπάρχοντα αντικείμενα.



Εικόνα 7: Η Μέθοδος Εναπόθεσης με Κατευθυνόμενη Ενέργεια (Directed Energy Deposition)

Κεφάλαιο 3: 3D Printing στον τομέα των κατασκευών

Αδιαμφισβήτητα ο κατασκευαστικός τομέας αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους βιομηχανικούς κλάδους της παγκόσμιας αγοράς. Η συνολική αξία της κατασκευαστικής παραγωγής το έτος 2020 ανερχόταν σε 11,6 τρισεκατομμύρια δολάρια και προβλέπεται να υπάρξει ετήσια αύξηση της τάξης του 3,2% μέχρι το 2023. Τα συνολικά έσοδα των 100 μεγαλύτερων κατασκευαστικών εταιρειών του κόσμου το 2020 ήταν περίπου 1,5 τρισεκατομμύρια δολάρια, ενώ τα έξοδα που αφορούν την κατασκευή αποτελούν το 13% περίπου του παγκοσμίου ΑΕΠ. Στην Ευρωπαϊκή Ένωση ο κατασκευαστικός τομέας προσφέρει περίπου 18 εκατομμύρια θέσεις εργασίας (Deloitte, 2021).

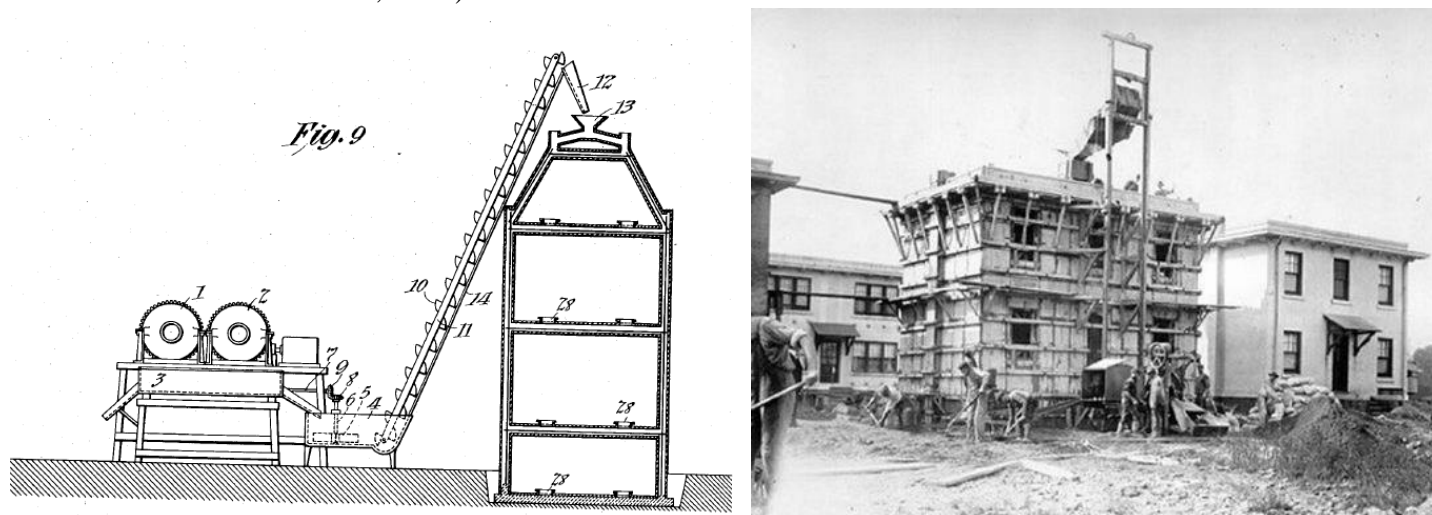
Παρότι πολλοί βιομηχανικοί κλάδοι ενσωματώνουν αυτοματισμούς στην παραγωγική τους διαδικασία, με σκοπό την αύξηση της παραγωγικότητας, ο κατασκευαστικός τομέας βασίζεται κυρίως σε παραδοσιακές/χειρωνακτικές μεθόδους. Η καθυστέρηση στην εισαγωγή αυτοματισμών στον κατασκευαστικό τομέα μπορεί να οφείλεται σε ακαταλληλότητα των υφιστάμενων τεχνολογιών για χρήση σε έργα μεγάλης κλίμακας, το υψηλό κόστος του αυτοματοποιημένου κατασκευαστικού εξοπλισμού, οι περιορισμοί στη χρήση των υλικών και το χαμηλό ποσοστό της ποσότητας παραγωγής προς το είδος του τελικό προϊόντος, δεδομένου ότι κάθε κατασκευαστικό έργο είναι μοναδικό (Khoshnevis, 2004).

Παρ' όλα αυτά η ενσωμάτωση αυτοματισμών θα μπορούσε να συνεισφέρει στην αύξηση της παραγωγικότητας, τη μείωση των εργατικών ατυχημάτων, ως συνέπεια της μείωσης των χειρωνακτικών εργασιών και του απαιτούμενου εργατικού δυναμικού, τη μείωση του κόστους παραγωγής και την αύξηση της ελευθερίας στον αρχιτεκτονικό σχεδιασμό (S. Lim, 2012). Επιπλέον, η στροφή στις αυτοματοποιημένες διαδικασίες κατασκευής μπορεί να αποτελέσει τη λύση σε δύο προβλήματα, που εσχάτως έχουν οδηγήσει σε εκτόξευση του κόστους κατασκευής: την έλλειψη εργατικού δυναμικού και το συνεχώς αυξανόμενο κόστος των οικοδομικών υλικών.

Οι σημαντικότερες μέθοδοι 3D Printing, που μπορούν να αποδώσουν μεγάλης κλίμακας αντικείμενα και έχουν αναπτυχθεί με στόχο τη χρήση τους στον τομέα των κατασκευών και την Αρχιτεκτονική είναι τρεις: η μέθοδος Κατασκευής Περιγράμματος (Contour Crafting), η μέθοδος Εκτύπωσης Σκυροδέματος (Concrete Printing) και η μέθοδος D-Shape (Perkins & Skitmore, 2015).

3.1 Η πρώτη απόπειρα αυτοματοποίησης στην κατασκευή

Ο πρώτος που προσπάθησε να αυτοματοποιήσει τη διαδικασία της κατασκευής ενός ολόκληρου κτιρίου μπορεί να θεωρηθεί ο μεγάλος Αμερικάνος εφευρέτης Thomas Edison (1847-1931). Ο Edison στις αρχές του 20^{ου} αιώνα σχεδίασε μια διάταξη, η οποία είχε τη δυνατότητα να κατασκευάσει μια ολόκληρη κατοικία με μία μόνο σκυροδέτηση (USA Patent No. 1219272, 1917).



Εικόνα 8: Αριστερά: σκαρίφημα της διάταξης σκυροδέτησης του Edison. Δεξιά: Φωτογραφία από την εφαρμογή της μεθόδου το 1919

Για την υλοποίηση της κατασκευής αρχικά πραγματοποιείται το καλούπωμα όλων των δομικών της στοιχείων (τοίχοι, πλάκες, στέγη, κλπ). Έπειτα ξεκινά η σκυροδέτηση από την κορυφή του κτιρίου, με τη χρήση μιας διάταξης ανύψωσης του υλικού και τη συνεχή παροχή του εντός των καλουπιών μέχρι την πλήρωσή τους. Το υλικό κατασκευής αποτελείται από ειδικό μίγμα τσιμέντου Portland και ο ρυθμός παροχής του έπρεπε να είναι τέτοιος ώστε τα κατώτερα τμήματα να προλαβαίνουν να σκληρύνονται επαρκώς, για να μην ασκούνται υπερβολικές υδραυλικές πιέσεις στα καλούπια. Με αυτό τον τρόπο ο Edison θεωρούσε πως θα μπορούσε να κατασκευάσει «πρακτικά άφθαρτες» κατοικίες σε χαμηλό κόστος. Η ιδέα του Edison έλαβε δίπλωμα ευρεσιτεχνίας το 1917 και παρότι χρησιμοποιήθηκε στην πράξη για την κατασκευή ορισμένων κατοικιών στην Αμερική (κάποιες από τις οποίες υφίστανται μέχρι και σήμερα), απέτυχε να επεκταθεί όσο εκτιμούσε ο ίδιος, κυρίως λόγω του μεγάλου κόστους των ξυλοτύπων.

3.2 Η έρευνα του Joseph Pegna

Πέρασαν αρκετά χρόνια μέχρι τα μέσα της δεκαετίας του '90, οπότε πραγματοποιήθηκαν οι επόμενες έρευνες σχετικά με την αυτοματοποίηση στον κλάδο των κατασκευών από τον Joseph Pegna. Ο Pegna ήταν ο πρώτος που οραματίστηκε την ενσωμάτωση τεχνολογιών προσθετικής κατασκευής (που χρησιμοποιούνταν ήδη εκείνη την εποχή σε διάφορους τομείς της βιομηχανίας) στον τομέα των κατασκευών. Σύμφωνα με την εργασία του Pegna (Exploratory investigation of solid freeform construction, 1997), η επιλεκτική συσσωμάτωση στέρεου υλικού αποτελεί την κατάλληλη τεχνική για την κατασκευή στοιχείων διαστάσεων άνω του 1m, ώστε να προκύπτει υλικό ομοιογενές, χωρίς πόρους.

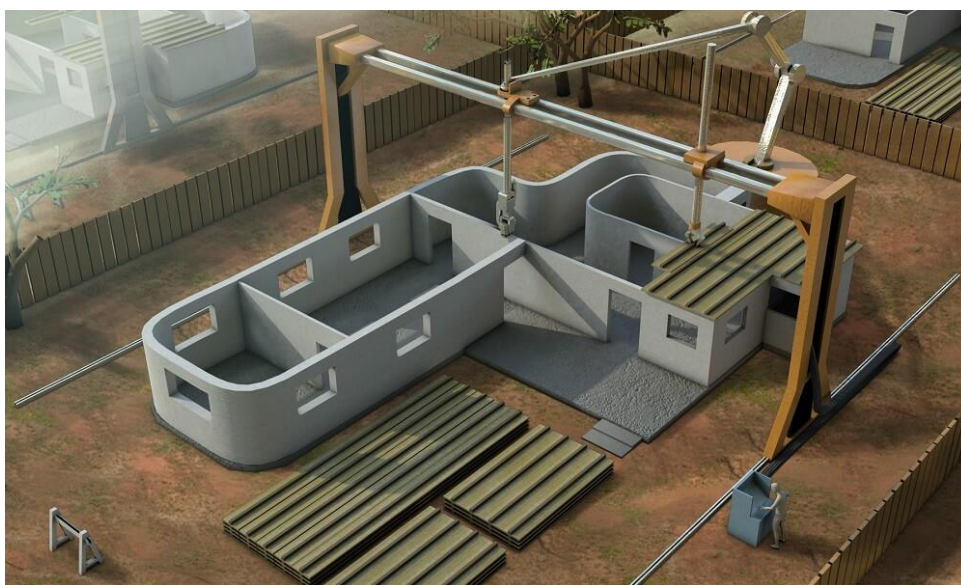
Η πειραματική κατασκευή του Pegna είχε μικρές διαστάσεις (3x3x6 in με πάχος τοιχωμάτων 1/2in). Η μέθοδος που διερεύνησε είναι η συμπαγής κατασκευή ελεύθερης μορφής (Solid Freeform Fabrication – SFF), η οποία ουσιαστικά εντάσσεται στις μεθόδους Ψεκασμού Συνδετικού Υλικού (Binder Jetting). Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, η κατασκευή πραγματοποιήθηκε σε επάλληλες στρώσεις μίγματος τσιμέντου Portland με άμμο, το οποίο σκληρύνθηκε με την εφαρμογή ατμού. Η εφαρμογή του νερού με τη μορφή ατμού προτιμήθηκε διότι, στις δοκιμές που χρησιμοποιήθηκε σε υγρή μορφή, παρατηρήθηκε ότι το υλικό που προκύπτει είναι εύθραυστο. Μικροσκοπική ανάλυση έδειξε ότι αυτό οφείλεται στο ότι δημιουργούνται μεγάλα κομμάτια από τσιμέντο, τα οποία δεν αντιδρούν με την άμμο και συνεπώς προκύπτουν ρωγμές κατά μήκος των στρώσεων του υλικού. Αντιθέτως, με τη χρήση ατμού παρατηρείται καλή ένωση των υλικών και το σκυρόδεμα που προκύπτει είναι πυκνό και δεν εμφανίζει πόρους ή ρηγματώσεις.

Η βέλτιστη αναλογία άμμου προς τσιμέντο που χρησιμοποιήθηκε μετρήθηκε σε $3\pm 10\%$. Για τον προσδιορισμό των μηχανικών χαρακτηριστικών του υλικού λήφθηκαν δοκίμια, τα οποία κόπηκαν υπό γωνία 0° , 45° και 90° , ώστε να ληφθεί υπόψη η επιρροή της διεύθυνση των στρώσεων του υλικού. Οι εργαστηριακοί έλεγχοι που πραγματοποιήθηκαν έδειξαν ότι η μέγιστη αντοχή του υλικού σε θλίψη είναι 33,84MPa και προκύπτει για φόρτιση κάθετα στη διεύθυνση των στρώσεων, ενώ η εφελκυστική αντοχή λαμβάνει τη μέγιστη τιμή της, 20,19MPa, για φόρτιση υπό γωνία 45° . Η αντίστοιχη αντοχή σε εφελκυσμό για φόρτιση κάθετα στη διεύθυνση των στρώσεων είναι 18,6MPa και η αντίστοιχη αντοχή σε θλίψη για φόρτιση υπό γωνία 45° είναι 11,48MPa.

Αξιοσημείωτα χαρακτηριστικά του υλικού είναι ότι προκύπτει ανισοτροπικό, παρότι η δομή του μικροσκοπικά φαίνεται ομογενής και ο υψηλός λόγος εφελκυστικής προς θλιπτική αντοχή σε σύγκριση με το κοινό σκυρόδεμα.

3.3 Η μέθοδος Κατασκευής Περιγράμματος - Contour Crafting

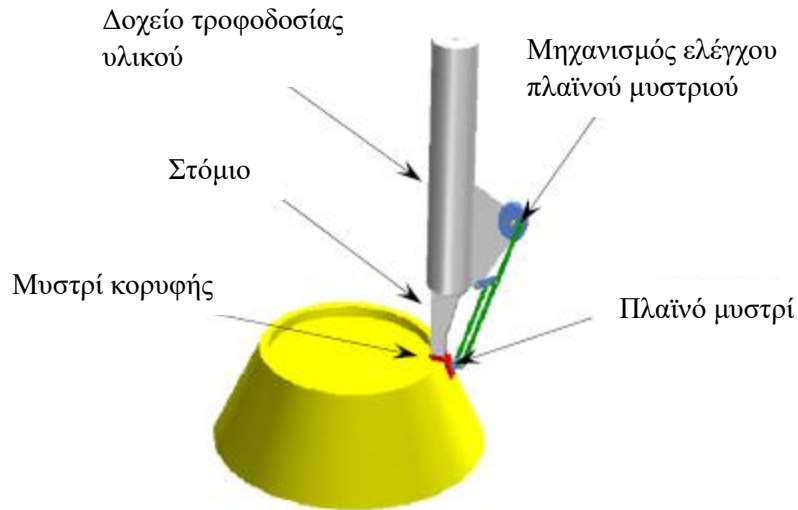
Την ίδια περίοδο στο Πανεπιστήμιο της Νότια Καλιφόρνια αναπτύσσεται από τον καθηγητή Behrokh Khoshnevis, μια νέα μέθοδος προσθετικής κατασκευής, κατάλληλη για κατασκευή ολόκληρων κτιρίων, η μέθοδος Κατασκευής Περιγράμματος (Contour Crafting - CC). Η CC ακολουθεί την ίδια προσέγγιση της κατασκευής σε επάλληλες στρώσεις, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο εξώθησης υλικού. Το στόμιο για την εξώθηση του υλικού είναι τοποθετημένο πάνω σε ένα σύστημα γερανογέφυρας, το οποίο έχει τη δυνατότητα να κινείται παράλληλα σε δύο λωρίδες. Η κίνηση όλης της διάταξης προγραμματίζεται μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή. Η διάταξη εκτύπωσης μπορεί επιπλέον να αναδιπλωθεί ώστε να είναι δυνατή η μεταφορά της από ειδικό όχημα επί τόπου στο έργο.



Εικόνα 9: Απεικόνιση της διάταξης που χρησιμοποιείται για την κατασκευή κτιρίου μέσω της μεθόδου Contour Crafting

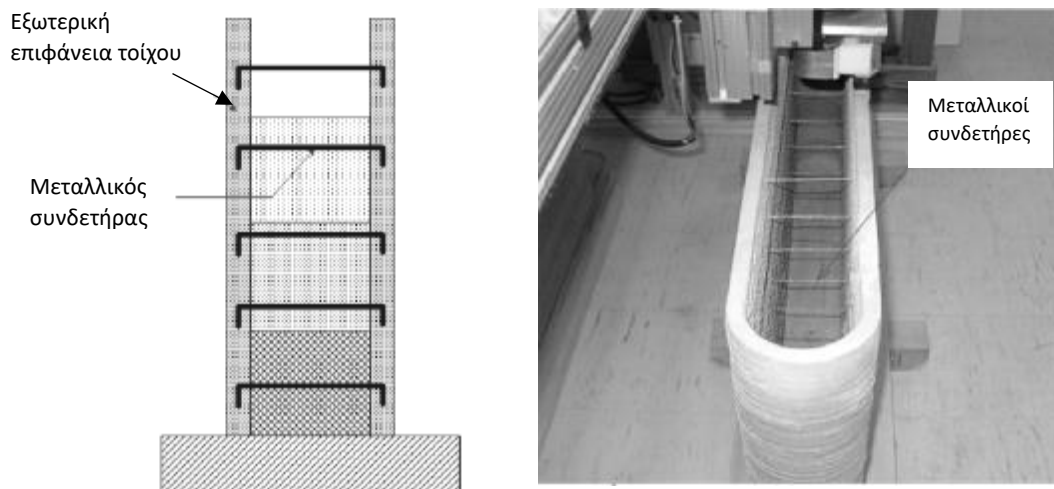
Οι κατασκευές με τη μέθοδο Contour Crafting πραγματοποιούνται με την εξώθηση υλικού σε ρευστή μορφή μέσω του στομίου. Το υλικό που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή είναι κυρίως τσιμεντοκονίαμα, πολυμερές ή κεραμικό. Βασική καινοτομία της μεθόδου αποτελεί η ενσωμάτωση δύο μυστριών στην κεφαλή του στομίου εξώθησης, ενός στην κορυφή και ενός στο πλάι. Η χρήση των επιφανειών αυτών έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία λείας

τελικής επιφάνειας στο υλικό. Παράλληλα η κεφαλή με τα μυστριά έχει τη δυνατότητα να περιστρέφεται, ώστε να κατασκευάζονται τοίχοι με καμπύλο σχήμα.



Εικόνα 10: Η κεφαλή εκτύπωσης της μεθόδου Contour Crafting

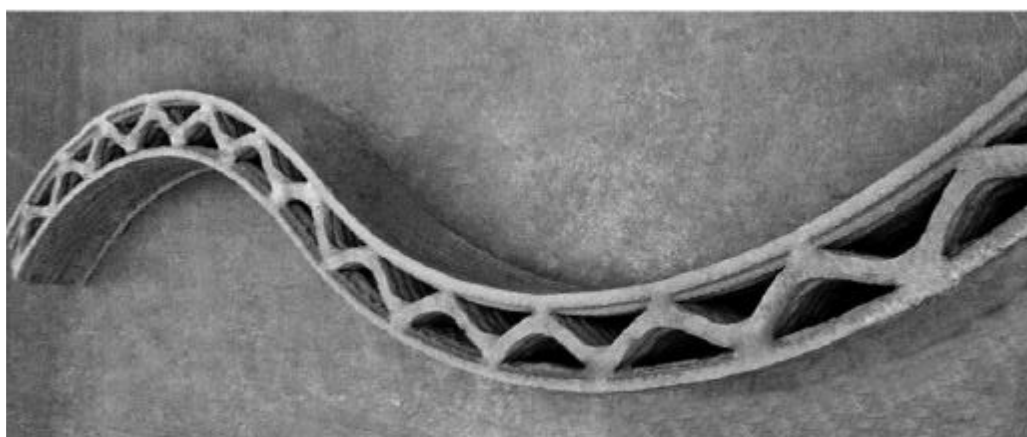
Ουσιαστικά με τη μέθοδο αυτή κατασκευάζονται σε πρώτη φάση οι εξωτερικές επιφάνειες ενός τοίχου (το περίγραμμά του), οι οποίες χρησιμοποιούνται και ως ξυλότυπος, που ενσωματώνεται στον τοίχο. Οι επιφάνειες αυτές μπορούν να κατασκευαστούν από σκυρόδεμα ή κονίαμα επιχρίσματος (ασβεστοτσιμεντοκονίαμα). Οι δύο παράλληλες εξωτερικές επιφάνειες ενώνονται μεταξύ τους με μεταλλικούς συνδετήρες σχήματος «Π» (Khoshnevis, Hwang, Yao, & Yeh, 2006).



Εικόνα 11: Κατασκευή τοίχου με τη μέθοδο Contour Crafting

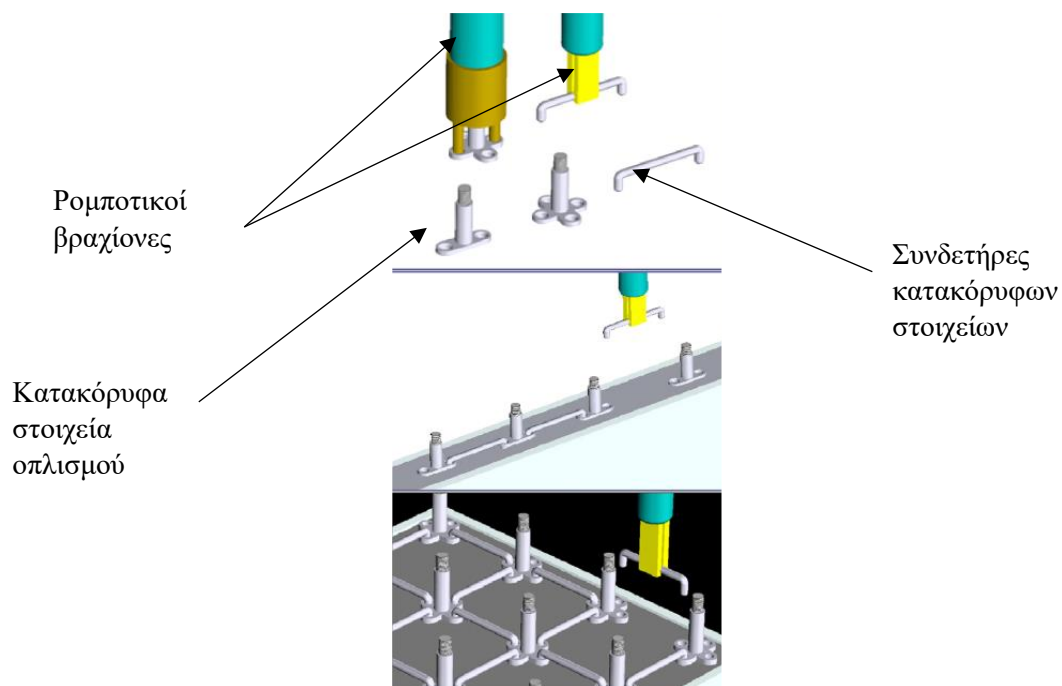
Το εσωτερικό του τοίχου μπορεί στη συνέχεια να γεμίσει με σκυρόδεμα. Το πρώτο μέρος της σκυροδέτησης θα πρέπει να γίνει μέχρι ύψους περίπου 13cm και το επόμενο μέρος να ακολουθήσει μετά από 1 ώρα, ώστε η υποκείμενη στρώση να έχει σκληρυνθεί αρκετά για τον περιορισμό των πλευρικών πιέσεων.

Εναλλακτικά το γέμισμα ανάμεσα στις δύο παράλληλες στρώσεις ενός τοίχου μπορεί να πραγματοποιηθεί με μια ακόμη στρώση του υλικού σε σχήμα ζιγκ-ζαγκ, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα:



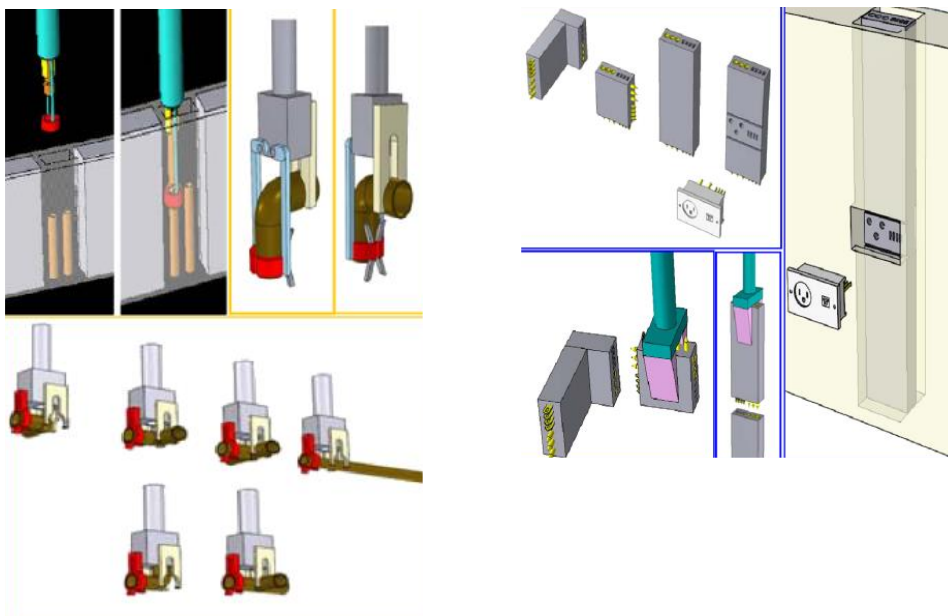
Εικόνα 12: Τοίχος από σκυρόδεμα κατασκευασμένος με τη μέθοδο Contour Crafting

Η διάταξη της CC δίνει επίσης τη δυνατότητα αυτόματης τοποθέτησης οπλισμού ενίσχυσης στους τοίχους. Ρομποτικοί βραχίονες τοποθετούν κατακόρυφα χαλύβδινα στοιχεία κατά μήκος του τοίχου σε σταθερή απόσταση μεταξύ τους. Τα στοιχεία αυτά στη συνέχεια συνδέονται μεταξύ τους με χαλύβδινους συνδετήρες. Ύστερα πραγματοποιείται η σκυροδέτηση του γεμίματος του τοίχου και πάνω από τα κατακόρυφα στοιχεία βιδώνονται τα κατακόρυφα στοιχεία της επόμενης στρώσης. Για το λόγο αυτό το ύψος τους θα πρέπει να είναι μεγαλύτερο από το πάχος της υπερκείμενης στρώσης υλικού.



Εικόνα 13: Τοποθέτηση οπλισμού ενίσχυσης τοίχου με ρομποτικούς βραχίονες

Επιπλέον παρέχεται η δυνατότητα για αυτόματη τοποθέτηση ηλεκτρολογικών και υδραυλικών εγκαταστάσεων με ρομποτικούς βραχίονες, μέσα σε εσοχές που έχουν κατασκευαστεί στους τοίχους.



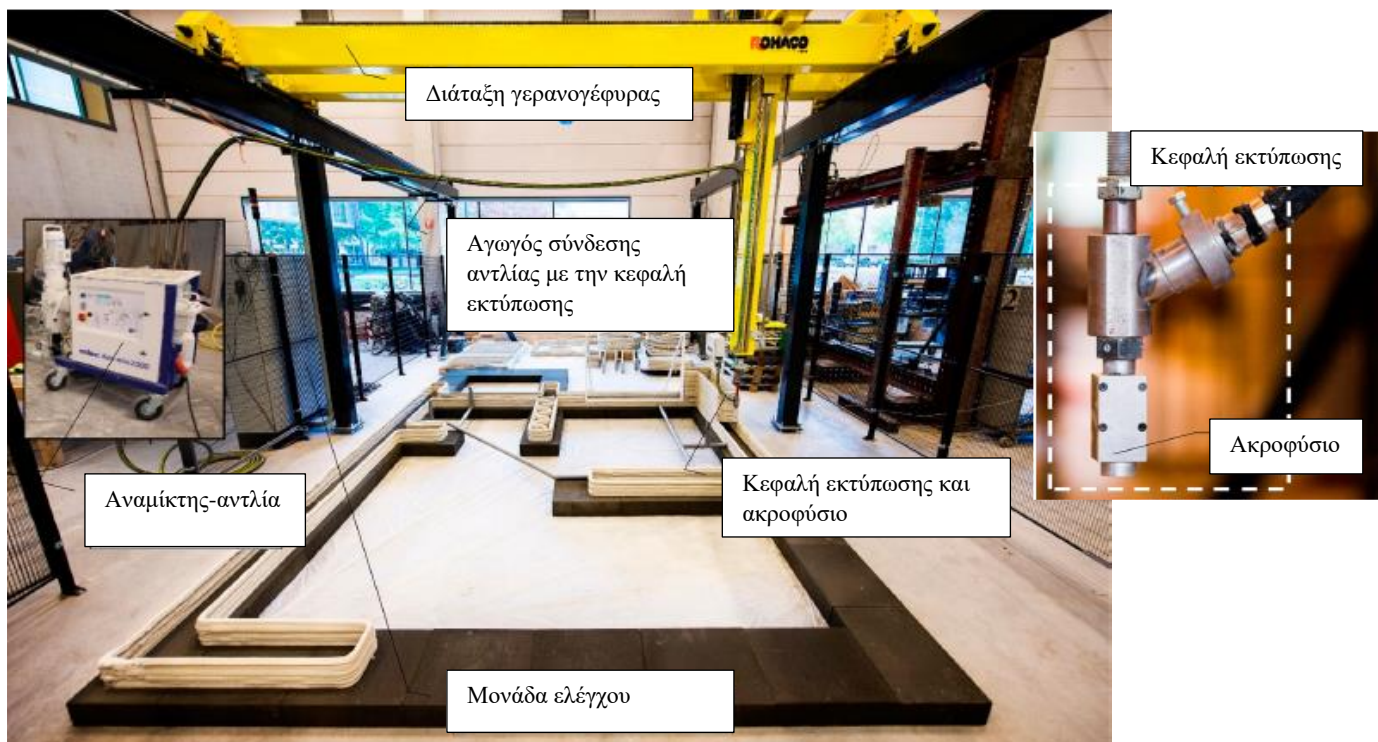
Εικόνα 14: Αυτόματη τοποθέτηση υδραυλικών και ηλεκτρολογικών εγκαταστάσεων

Τα βασικά πλεονεκτήματα της μεθόδου CC έναντι των παραδοσιακών μεθόδων κατασκευής είναι η μείωση του κόστους του έργου, η παροχή μεγάλου βαθμού ελευθερίας στον αρχιτεκτονικό σχεδιασμό και η μείωση των εκπομπών CO₂, καθώς η κατασκευαστική διάταξη λειτουργεί με ηλεκτρικό ρεύμα (Khorramshahi & Mokhtari, 2017). Ενδιαφέρον στοιχείο για τη μέθοδο είναι επίσης ότι, σύμφωνα με το δημιουργό της Behrokh Khoshnevis, είναι πολλά υποσχόμενη για χρήση σε κατασκευές σε περιβάλλοντα εκτός της Γης, όπως το φεγγάρι και ο Άρης. Σε αυτή την περίπτωση οι κατασκευές θα πρέπει να υλοποιούνται με χρήση επί τόπου υλικών της περιοχής (όπως ο ρεγόλιθος της Σελήνης), τα οποία θα ρευστοποιούνται ώστε να μπορούν να εξωθηθούν από το στόμιο της κατασκευαστικής διάταξης, η οποία θα λειτουργεί με ηλιακή ενέργεια.

Βασιζόμενο στην Contour Crafting, το Πανεπιστήμιο Τεχνολογίας του Eindhoven στην Ολλανδία (TU/e) ανέπτυξε τη δικιά του μεθοδολογία 3D Printing. Η διαδικασία εκτύπωσης έχει ως εξής: το μίγμα σκυροδέματος αναμιγνύεται με νερό και μεταφέρεται μέσω ενός αγωγού στην κεφαλή εκτύπωσης, με χρήση αντλίας. Η κεφαλή εκτύπωσης είναι τοποθετημένη στην άκρη ενός κατακόρυφου βραχίονα, ο οποίος στηρίζεται σε γερανογέφυρα με δυνατότητα ελεγχόμενης κίνησης 4 βαθμών ελευθερίας (κίνηση κατά τους άξονες x, y, z και στροφή κατά τον άξονα z). Οι διαστάσεις της περιοχής εκτύπωσης είναι 9,00x4,50x2,80m. Για το ακροφύσιο της κεφαλής εκτύπωσης έχουν δοκιμαστεί διάφορες διαστάσεις ανοίγματος, όπως στρογγυλό διαμέτρου Ø25mm, τετράγωνης διατομής 25x25mm και ορθογωνικής διατομής 40x10mm.

Η γραμμική ταχύτητα εκτύπωσης που χρησιμοποιείται είναι 100mm/s, η οποία μειώνεται στις γωνίες της κατασκευής και η πίεση στην αντλία κυμαίνεται από 10 ως 30bar.

Το κονίαμα εκτύπωσης αποτελείται από τσιμέντο Portland, αδρανή πυριτίου μέγιστης διάστασης 1mm, ασβεστολιθικό υλικό πλήρωσης με ειδικά πρόσθετα για τη διευκόλυνση της άντλησης, ρεολογικούς τροποποιητές για εξασφάλιση θιξοτροπικές συμπεριφοράς και ίνες πολυπροπυλενίου για τον περιορισμό των ρηγματώσεων λόγω ξήρανσης. Η θλιπτική αντοχή 28 ημερών του υλικού είναι 30MPa, ενώ η αντίστοιχη εφελκυστική αντοχή είναι 5MPa (Bos, Wolfs, Ahmed, & Salet, 2016).



Εικόνα 15: Η διάταξη εκτύπωσης που χρησιμοποιείται από το τμήμα 3D Printing του Πανεπιστημίου Τεχνολογίας του Eindhoven

3.4 Η μέθοδος Εκτύπωσης Σκυροδέματος – Concrete Printing

Το 2009 ξεκίνησε να αναπτύσσεται η μέθοδος Concrete Printing στο Πανεπιστήμιο Loughborough του Ηνωμένου Βασιλείου. Η μεθοδολογία της βασίζεται στην εξώθηση υλικού και η διάταξη εκτύπωσης αποτελείται από ένα μεταλλικό πλαίσιο διαστάσεων 5,4x4,4x5,4m (μήκος x πλάτος x ύψος) και μια κεφαλή εκτύπωσης πάνω σε μια κινητή οριζόντια δοκό, η οποία έχει τη δυνατότητα να κινείται σε δύο άξονες (κατά μήκος και καθ' ύψος), ενώ η κεφαλή εκτύπωσης κινείται μόνο κατά έναν άξονα (κατά πλάτος) (Lim, Le, Buswell, & Austin, 2009).



Εικόνα 16: Η διάταξη εκτύπωσης που χρησιμοποιείται στη μέθοδο Concrete Printing του Πανεπιστημίου Loughborough

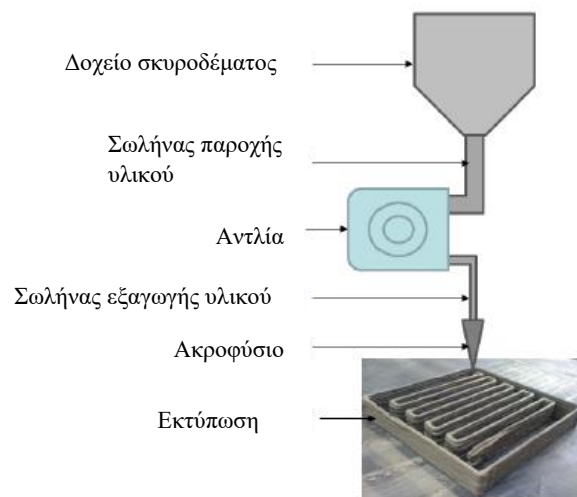
Όπως σε κάθε μέθοδο προσθετικής κατασκευής, η διαδικασία ξεκινά με το «κόψιμο» ενός μοντέλου 3D CAD σε στρώσεις και την αποθήκευση σε μορφή αρχείου, που μπορεί να διαβαστεί από τη διάταξη εκτύπωσης. Η διαδικασία εκτύπωσης έπειτα αποτελείται από τρία στάδια: την προετοιμασία του υλικού, την παροχή του και την τελική εκτύπωση.

Το υλικό που εξωθείται από το ακροφύσιο θα πρέπει να διαθέτει επαρκή αντοχή ώστε να μπορεί να φέρει το βάρος των υπερκείμενων στρώσεων και να βρίσκεται σε κατάλληλα ρευστή κατάσταση, ώστε να μπορεί να κολλήσει με τις στρώσεις που βρίσκονται σε επαφή. Επιπλέον σημαντικές ιδιότητες του υλικού είναι η υψηλή εργασιμότητα, η οποία επιτυγχάνεται με την προσθήκη επιβραδυντικού προσμίκτου και η χαμηλή συρρίκνωση, καθώς η απουσία ξυλότυπων θα μπορούσε να επιταχύνει την εξάτμιση του νερού από το μίγματος και να δημιουργηθούν ρηγματώσεις.

Ύστερα από πειράματα, αναπτύχθηκε το υλικό που ανταποκρίνεται με το βέλτιστο τρόπο στις παραπάνω απαιτήσεις. Το υλικό αποτελείται κατά 60% από αδρανή και κατά 40% από

συνδετικό κονίαμα, το οποίο αποτελείται κατά 70% από τσιμέντο, 20% ιπτάμενη τέφρα και 10% σκόνη πυριτίου. Ο λόγος νερού προς κονίαμα είναι 0,26. Στο υλικό προστίθενται επίσης $1,2\text{kg/m}^3$ μικροϊνες πολυπροπυλενίου, 1% υπερρυστοποιητής και 0,5% επιβραδυντικό πρόσμικτο. Η θλιπτική αντοχή των δειγμάτων του υλικού μετρήθηκε στις 1, 7, 28 και 56 ημέρες και προέκυψε 20, 80, 110 και 125MPa αντίστοιχα (Le T. , et al., 2012).

Μόλις το μίγμα είναι έτοιμο ξεκινά η παροχή του προς την περιοχή εκτύπωσης. Το υλικό τοποθετείται αρχικά σε ένα δοχείο και έπειτα μεταφέρεται μέσω μιας αντλίας στην κεφαλή εκτύπωσης. Από εκεί εναποτίθεται μέσω ενός ακροφυσίου, διαμέτρου 9mm, στην επιθυμητή θέση. Η διαδικασία παροχής υλικού απεικονίζεται σχηματικά στο παρακάτω σκαρίφημα:



Εικόνα 17: Σχηματική απεικόνιση της παροχής υλικού της μεθόδου Concrete Printing

Η μέθοδος Concrete Printing έχει ομοιότητες με την Contour Crafting, καθώς και οι δύο βασίζονται στην εξώθηση τσιμεντοειδούς υλικού σε στρώσεις. Η σημαντική τους διαφορά έγκειται στην τελική επιφάνεια του εκτυπωμένου υλικού. Ενώ στην Contour Crafting η τελική επιφάνεια είναι σχετικά λεία, με την Concrete Printing παράγεται το χαρακτηριστικό ραβδωτό τελείωμα. Εφόσον η τελική επιφάνεια είναι επιθυμητό να είναι επίπεδη θα πρέπει να ακολουθήσει λείανση με χρήση μυστριού, ενώ το υλικό είναι ακόμα ρευστό, ή εφαρμογή κοινών επιχρισμάτων όταν η επιφάνεια στερεοποιηθεί. Και οι δύο αυτές διεργασίες πρέπει να υλοποιηθούν χειρωνακτικά.



Εικόνα 18: Κατασκευή εκτυπωμένη με τη μέθοδο Concrete Printing, με το χαρακτηριστικό ραβδωτό τελείωμα

3.5 Η μέθοδος D-Shape

Η μέθοδος D-Shape εφευρέθηκε από τον Ιταλό Μηχανικό Enrico Dini. Διαφοροποιείται σημαντικά από τις μεθόδους Contour Crafting και Concrete Printing καθώς δεν βασίζεται στην εξώθηση υλικού, αλλά στη σύντηξη στρώματος σκόνης (Powder Bed Fusion). Ο Dini συνέλαβε την ιδέα το 2004 παρατηρώντας έναν 3D Printer της εταιρείας Z Corp στην εργασία του και θέλησε να εφαρμόσει την ίδια τεχνολογία σε μεγαλύτερη κλίμακα. Το 2006 υπέβαλε αίτηση για δίπλωμα ευρεσιτεχνίας και το επόμενο έτος ξεκίνησε την κατασκευή της διάταξης εκτύπωσης.

Η μέθοδος σύντηξης στρώματος σκόνης σε σύγκριση με τις μεθόδους εξώθησης υλικού έχει το πλεονέκτημα ότι δεν θέτει ουσιαστικά κανέναν περιορισμό στη μορφή της κατασκευής προς εκτύπωση. Το ξηρό υλικό του στρώματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως προσωρινή αντιστήριξη, καθιστώντας εφικτή την κατασκευή κεκλιμένων κατασκευών, προεξοχών, καμάρων ή θόλων. Επιπλέον οι κατασκευές παρουσιάζει πολύ καλή «ανάλυση», καθώς το μέγεθος των δομικών σωματιδίων μπορεί να είναι της τάξης των 0,1mm. Βασικό μειονέκτημά της όμως είναι ότι το μέγεθος των εκτυπωμένων αντικειμένων περιορίζεται από τις διαστάσεις της διάταξης εκτύπωσης (Lowke, et al., 2018).

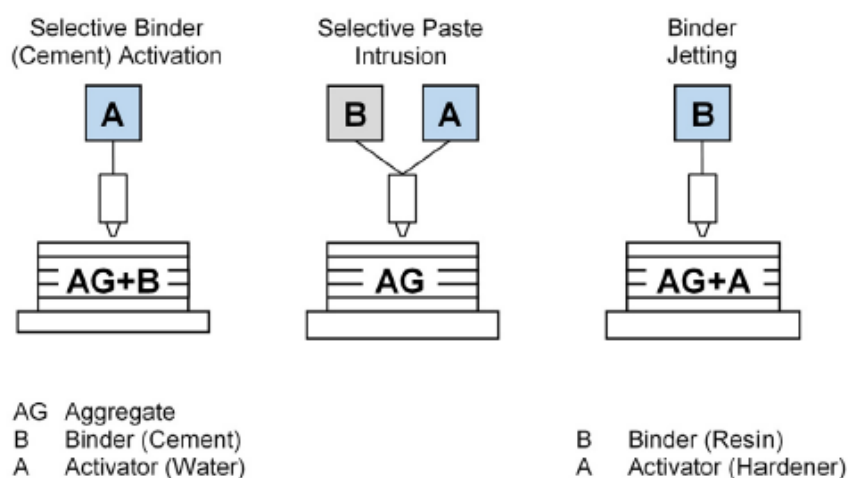
Η σύντηξη στρώματος σκόνης μπορεί να επιτευχθεί με τρεις τεχνικές:

α) Με επιλεκτική ενεργοποίηση συνδετικού υλικού (selective binder activation). Το στρώμα σκόνης αποτελείται από λεπτόκοκκα αδρανή (<1mm) και το συνδετικό υλικό (τσιμέντο). Το

συνδετικό υλικό ενεργοποιείται στις επιθυμητές θέσεις με τον επιλεκτικό ψεκασμό με νερό, δημιουργώντας το τελικό τσιμεντοκονίαμα.

β) Με επιλεκτική εισχώρηση τσιμεντόπαστας (selective paste intrusion). Σε αυτή την περίπτωση το στρώμα αποτελείται μόνο από αδρανή και πραγματοποιείται ταυτόχρονα η επιλεκτική προσθήκη του νερού με το τσιμέντο μέσω του ακροφυσίου.

γ) Με ψεκασμό του συνδετικού υλικού (binder jetting). Σε αυτή την περίπτωση το συνδετικό υλικό πρέπει να είναι υγρής μορφής, συνήθως ρητίνη, η οποία αντιδρά με ένα σκληρυντικό υλικό, που αποτελεί μαζί με τα αδρανή το στρώμα σκόνης.

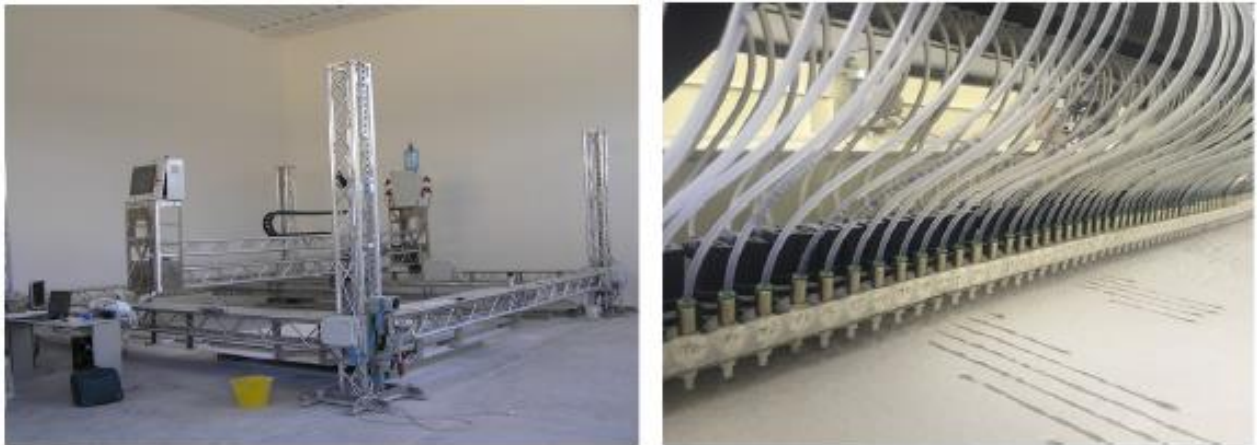


Εικόνα 19: Οι τρεις τεχνικές που χρησιμοποιούνται για τη σύντηξη στρώματος σκόνης

Η μέθοδος D-Shape υιοθετεί την πρώτη προσέγγιση. Το βασικό μειονέκτημα της προσέγγισης αυτής είναι ότι η σκόνη του υλικού ενεργοποιείται με το νερό, επομένως είναι ευαίσθητη στην παρουσία υγρασίας. Άρα με την προσέγγιση αυτή η εφαρμογή της μεθόδου καθίσταται εφικτή μόνο σε εσωτερικούς χώρους (Lowke, et al., 2018).

Στα πρώτα πειράματα της μεθόδου χρησιμοποιήθηκε στρώμα σκόνης από άμμο και τσιμέντο Portland και πόσιμο νερό για την ενεργοποίησή τους, τα αποτελέσματα όμως δεν ήταν ικανοποιητικά. Ύστερα από δοκιμές παρατηρήθηκε ότι οι ιδιότητες του εκτυπωμένου αντικειμένου βελτιώνονται με χρήση οξειδίου του μαγνησίου ως αντιδραστικό συστατικό και εξαυδρικό χλωριούχο μαγνήσιο διαλυμένο στο νερό.

Η διάταξη εκτύπωσης της μεθόδου D-Shape έχει διαστάσεις 6,00x6,00m και αποτελείται από ένα περιμετρικό μεταλλικό πλαίσιο και μια οριζόντια πλαισιωτή δοκό. Στη δοκό αυτή έχει τοποθετηθεί η κεφαλή εκτύπωσης, η οποία αποτελείται από 300 ακροφύσια ανά απόσταση 20mm. Το βήμα εκτύπωσης, το πάχος δηλαδή της κάθε εκτυπωμένης στρώσης της κατασκευής, είναι 5mm.



Εικόνα 20: Αριστερά: η διάταξη εκτύπωσης της μεθόδου D-Shape. Δεξιά: τα ακροφύσια της κεφαλής εκτύπωσης

Το 2008 ανατέθηκε στον Dini η κατασκευή του έργου «Radiolaria pavilion» από τον Ιταλό αρχιτέκτονα Andrea Morgante, συνολικού ύψους 2m. Η κατασκευή υλοποιήθηκε από 400 στρώσεις πάχους 5mm, υλικού αποτελούμενου από δολομιτική άμμο και οξείδιο του μαγνησίου. Η συνολική διάρκεια κατασκευής του έργου ήταν μία εβδομάδα.



Εικόνα 21: Πάνω: το τρισδιάστατο μοντέλο της κατασκευής Radiolaria pavilion. Κάτω: τα στάδια εκτύπωσης της κατασκευής και το τελικό αντικείμενο

Επιπλέον, στα τέλη του 2016 η ισπανική εταιρεία Acciona σε συνεργασία με το Ινστιτούτο Προχωρημένης Αρχιτεκτονικής της Καταλονίας (IAAC) κατασκεύασαν σε πάρκο της Μαδρίτης την πρώτη τρισδιάστατα εκτυπωμένη γέφυρα, με εφαρμογή της μεθόδου D-Shape. Η γέφυρα έχει συνολικό μήκος 12m, πλάτος 1,75m και αποτελείται από μίγμα άμμου και τσιμέντου Portland.



Εικόνα 22: Η πεζογέφυρα στο πάρκο της Μαδρίτης, που έχει κατασκευαστεί με τη μέθοδο D-Shape

3.6 Σύγκριση μεθόδων Contour Crafting, Concrete Printing και D-Shape

Οι μέθοδοι Contour Crafting, Concrete Printing και D-Shape έχουν το κοινό ότι κατασκευάζουν αντικείμενα με προσθετικό τρόπο, με τη μορφή διαδοχικών στρώσεων/εγκάρσιων τομών του εκτυπώμενου αντικειμένου.

Η σημαντικότερη διαφοροποίησή τους αφορά τη μεθοδολογία που ακολουθούν. Όπως αναφέρθηκε και στις προηγούμενες παραγράφους, οι μέθοδοι Contour Crafting και Concrete Printing υιοθετούν τη μέθοδο εξώθησης υλικού, ενώ η D-Shape τη μέθοδο σύντηξης

στρώματος σκόνης. Λόγω της μορφής του υλικού που χρησιμοποιούν οι δύο πρώτες περιγράφονται ως «υγρές» διαδικασίες, ενώ η D-Shape ως «ξηρή» διαδικασία (S. Lim, 2012).

Επιπλέον, βασική διαφορά των τριών μεθόδων είναι ότι η Contour Crafting αναπτύχθηκε με τέτοιο τρόπο, ώστε να μπορεί να εφαρμοστεί για κατασκευές επί τόπου στο εργοτάξιο, ενώ οι Concrete Printing και D-Shape κατά βάση αναπτύχθηκαν για εφαρμογές σε εσωτερικές εγκαταστάσεις, εκτός εργοταξίου, αν και μπορούν να τροποποιηθούν κατάλληλα ώστε να χρησιμοποιηθούν και επί τόπου (S. Lim, 2012).

Και με τις τρεις μεθόδους η απόδοση του τρισδιάστατου αντικειμένου υλοποιείται με κατασκευή διαδοχικών στρώσεων από κάτω προς τα πάνω, με την κάθε στρώση να στηρίζεται στην υποκείμενή της. Επομένως, στην περίπτωση των υπέρθυρων των ανοιγμάτων της τοιχοποιίας, όπου δεν υφίσταται υποκείμενη στρώση υλικού, δημιουργείται πρόβλημα στήριξης. Οι τρεις μέθοδοι διαφοροποιούνται ως προς τον τρόπο που αντιμετωπίζουν το ζήτημα αυτό. Στην Contour Crafting ένας δεύτερος βραχίονας, ο οποίος είναι εγκατεστημένος στην ίδια διάταξη εκτύπωσης, τοποθετεί προκατασκευασμένα δομικά στοιχεία στη θέση των υπέρθυρων και πάνω σε αυτά συνεχίζεται η διαδικασία εναπόθεσης του υλικού εκτύπωσης. Στη μέθοδο Concrete Printing στη θέση του ανοίγματος εναποτίθεται ένα δεύτερο υλικό, το οποίο αποτελεί προσωρινή στήριξη του υπερκείμενου υλικού εκτύπωσης και απομακρύνεται μετά τη σκλήρυνσή του. Στη μέθοδο D-Shape το ρόλο της προσωρινής στήριξης αναλαμβάνει το μη στερεοποιημένο υλικό σε μορφή σκόνης, το οποίο απομακρύνεται μετά την ολοκλήρωση της εκτύπωσης (Hamidi & Aslani, 2019).

Η «ανάλυση» της εκτύπωσης είναι μια ακόμα παράμετρος, που διαφέρει από μέθοδο σε μέθοδο. Η ανάλυση εξαρτάται από το πάχος της στρώσης εκτύπωσης, το οποίο για τις μεθόδους Concrete Printing και D-Shape είναι 4-6mm, ενώ στην Contour Crafting είναι περίπου 13mm. Όσο μικρότερο είναι το πάχος των στρώσεων, τόσο καλύτερη ανάλυση εκτύπωσης επιτυγχάνεται. Όμως το πάχος των στρώσεων προφανώς επηρεάζει την ταχύτητα κατασκευής, καθώς όσο μικρότερο είναι το πάχος τόσο περισσότερες στρώσεις υλικού θα απαιτηθούν για την απόδοση του πλήρους ύψους της εκτυπωμένης κατασκευής.

Εκτός από το πάχος των στρώσεων, η ταχύτητα εκτύπωσης εξαρτάται επίσης από το ρυθμό εναπόθεσης του κατασκευαστικού ή του συνδετικού υλικού. Στην Contour Crafting η ολοκλήρωση μιας στρώσης της κατασκευής πραγματοποιείται με δύο περάσματα της κεφαλής εκτύπωσης, για την εκτύπωση του περιγράμματος των τοίχων. Η χρήση ακροφυσίου μεγάλης διατομής εξασφαλίζει υψηλό ρυθμό εναπόθεσης υλικού, ελαχιστοποιώντας το χρόνο

εκτύπωσης. Αντίστοιχα, η Concrete Printing χρησιμοποιεί επίσης μια κεφαλή εκτύπωσης, η οποία πρέπει να καλύψει ολόκληρη την επιφάνεια εκτύπωσης και συνεπώς ο ρυθμός εναπόθεσης υλικού εξαρτάται από τη διατομή του ακροφυσίου. Η μέθοδος D-Shape χρησιμοποιεί μεγάλο αριθμό ακροφυσίων, που μπορούν να κατασκευάσουν μια στρώση της κατασκευής με ένα πέρασμα, όμως ο χρόνος εκτύπωσης είναι αυξημένος, λόγω του ότι πριν ξεκινήσει η εναπόθεση του συνδετικού υλικού κάθε στρώσης η σκόνη του κατασκευαστικού υλικού πρέπει να διαστρωθεί σε ολόκληρη την επιφάνεια εκτύπωσης, να συμπιεστεί και να επιπεδωθεί (S. Lim, 2012).

3.7 Κατασκευές που έχουν υλοποιηθεί με μεθόδους 3D Printing

Οι μέθοδοι που περιγράφηκαν παραπάνω έχουν χρησιμοποιηθεί στην πράξη με επιτυχία για την υλοποίηση κατασκευών μεγάλης κλίμακας σε διάφορα μέρη του κόσμου. Μερικά αξιόλογα παραδείγματα τέτοιων κατασκευών είναι (Wu, Wang, & Wang, 2016), (Bos, Wolfs, Ahmed, & Salet, 2016):

- Το 2014 η κινέζικη εταιρεία Winsun κατασκεύασε μια σειρά 10 κατοικιών στην Σαγκάη, επιφάνειας 200m² η καθεμία (Εικ. 23α), σε χρονικό διάστημα μικρότερο από 24 ώρες. Η κατασκευή των κατοικιών πραγματοποιήθηκε από έναν 3D Printer μήκους 150m, πλάτους 10m και ύψους 6,60m, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο Contour Crafting. Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε ήταν μίγμα από τσιμέντο υψηλής ποιότητας με ενσωματωμένες γυάλινες ίνες. Σύμφωνα με την εταιρεία, το κόστος κατασκευής κάθε κατοικίας ανήλθε σε \$4.800 (Levy, 2014).
- Στις αρχές του 2015 η ίδια εταιρεία κατασκεύασε στην πόλη Suzhou της Κίνας μια βίλα συνολικής επιφάνειας 1.110m² (Εικ. 23β), με τη μέθοδο εξώθησης υλικού, χρησιμοποιώντας μείγμα τσιμέντου, γυάλινων ινών και οικοδομικών αποβλήτων. Για την κατασκευή χρησιμοποιήθηκε 3D Printer μήκους 40m, πλάτους 10m και ύψους 6,60m. Σε αυτή την περίπτωση τα περισσότερα δομικά στοιχεία της κατασκευής εκτυπώθηκαν στις εγκαταστάσεις της εταιρείας και μεταφέρθηκαν στο εργοτάξιο για επί τόπου συναρμολόγηση. Το κόστος κατασκευής ανήλθε σε περίπου \$161.000 (Starr, World's first 3D-printed apartment building constructed in China, 2015).
- Το ίδιο έτος, η εταιρεία Winsun κατασκεύασε και πάλι στην πόλη Suzhou ένα πεντάωρο κτίριο διαμερισμάτων (Εικ. 23γ), το οποίο αποτελεί το ψηλότερο κτίριο, που έχει κατασκευαστεί με τεχνολογία 3D Printing. Όπως και στην περίπτωση της

- βίλας, τα περισσότερα δομικά στοιχεία κατασκευάστηκαν στις εγκαταστάσεις της εταιρείας και συναρμολογήθηκαν επί τόπου στο εργοτάξιο.
- Το 2016 και πάλι η εταιρεία Winsun κατασκεύασε το πρώτο κτίριο γραφείων με τεχνολογία 3D Printing στο Dubai, συνολικής επιφάνειας περίπου 250m² (Εικ. 23δ). Τα τμήματα της κατασκευής εκτυπώθηκαν στις εγκαταστάσεις της εταιρείας στη Σαγκάη και μεταφέρθηκαν με πλοίο στο χώρο του έργου για εγκατάσταση. Η εκτύπωση των επιμέρους τμημάτων διήρκησε 17 ημέρες, ενώ η επί τόπου συναρμολόγησή τους 2 ημέρες.
 - Το 2016 η αμερικάνικη εταιρεία Apis Cor κατασκεύασε στην πόλη Stupino της Ρωσίας μια ισόγεια κατοικία 38m²(Εικ. 23ε). Η καινοτομία του έργου αυτού ήταν ότι κατασκευάστηκε ολόκληρο επί τόπου. Ο συνολικός χρόνος εκτύπωσης ήταν 24 ώρες περίπου και το κόστος κατασκευής \$10.134 (Carolo, 2020).
 - Επίσης το 2016 η κινέζικη εταιρεία HuaShang Tengda κατασκεύασε στο Πεκίνο μια διώροφη βίλα, συνολικής επιφάνειας 400m² (Εικ. 23στ). Η κατασκευή πραγματοποιήθηκε επί τόπου, διήρκησε 45 ημέρες και, σύμφωνα με την κατασκευάστρια εταιρεία, μπορεί να αντέξει σεισμό μεγέθους 8 βαθμών της κλίμακας Richter (Carolo, 2020).
 - Το 2017 η γαλλική κατασκευαστική εταιρεία Bouygues Construction σε συνεργασία με το Πανεπιστήμιο της Nantes κατασκεύασαν το έργο «Yhnova House», μια ισόγεια κατοικία εμβαδού 95m² (Εικ. 23ζ). Ο χρόνος που απαιτήθηκε για την εκτύπωση της κατοικίας είναι 54 ώρες και χρειάστηκαν επιπλέον περίπου 4 μήνες για τα εσωτερικά και εξωτερικά τελειώματα. Το κτίριο κατοικήθηκε το 2018.
 - Το 2018 η ιταλική εταιρεία WASP κατασκεύασε στη Massa Lombarda της Ιταλίας το έργο «Gaia» (Εικ. 23η), το οποίο διαφοροποιήθηκε από τις μέχρι τότε κατασκευές με μεθόδους 3D Printing λόγω της χρήσης μόνο φυσικών υλικών από τον χώρο κατασκευής του έργου. Συγκεκριμένα για την κατασκευή χρησιμοποιήθηκε μίγμα από αργιλικό εδαφικό υλικό, άχυρο, τέφρα φλοιού ρυζιού και υδραυλική άσβεστο. Η κατασκευή έχει εμβαδόν περίπου 20m², ο συνολικός χρόνος εκτύπωσης ήταν 10 ημέρες και το κόστος του υλικού της τοιχοποιίας ήταν 900€ (Chiusoli, 2018).
 - Το 2019 η εταιρεία Apis Cor κατασκεύασε στο Dubai το μεγαλύτερο κτίριο με τεχνολογία 3D Printing. Πρόκειται για διώροφο κτίριο συνολικής επιφάνειας 640m², ύψους 9,50m, το οποίο κατασκευάστηκε επί τόπου (Εικ. 23θ). Το κτίριο

χρησιμοποιείται για τη στέγαση διοικητικών υπηρεσιών του δήμου του Dubai (Apis Cor, 2022).

- Το 2020 η αμερικάνικη εταιρεία SQ4D κατασκεύασε στο Long Island των ΗΠΑ μια κατοικία συνολικού εμβαδού 176m² (Εικ. 23ι). Για την ανέγερση της κατοικίας επί τόπου απαιτήθηκαν 48 ώρες εκτύπωσης, οι οποίες κατανεμήθηκαν σε μια περίοδο 8 ημερών. Για το χειρισμό και την επίβλεψη της κατασκευής απαιτήθηκε προσωπικό αποτελούμενο από 3 άτομα και το κόστος των υλικών ήταν \$6.000 (SQ4D, 2020).
- Την άνοιξη του 2021 η εταιρεία WASP ολοκλήρωσε στην πόλη Massa Lombarda της Ιταλίας το έργο «TECLA», το οποίο πρόκειται για μια κατοικία 60m², σε σχήμα διπλού θόλου (Εικ. 23κ), αποτελούμενο εξ' ολοκλήρου από επαναχρησιμοποιούμενα και ανακυκλώσιμα γαιώδη υλικά (η ονομασία TECLA προέρχεται από τις λέξεις Technology και Clay). Για το έργο απαιτήθηκαν 200 ώρες εκτύπωσης και 350 στρώσεις υλικού πάχους 12mm (Chiusoli, 2018).
- Το 2021 η γερμανική εταιρεία Peri ολοκλήρωσε την κατασκευή του πρώτου σπιτιού με μέθοδο 3D Printing στη Γερμανία. Πρόκειται για μια διώροφη κατοικία, εμβαδού 80m² ανά όροφο, η οποία κατασκευάστηκε στην πόλη Beckum (Εικ. 23λ).
- Η ίδια εταιρεία λίγους μήνες αργότερα κατασκεύασε στην πόλη Wallenhausen της Γερμανίας το μεγαλύτερο μέχρι στιγμής κτίριο διαμερισμάτων στην Ευρώπη. Πρόκειται για τριώροφο κτίριο, το οποίο διαθέτει υπόγειο και πέντε διαμερίσματα, συνολικής επιφάνειας περί τα 380m². Για την κατασκευή του κτιρίου ο απαιτούμενος χρόνος εκτύπωσης ήταν περίπου 6 εβδομάδες (Εικ. 23μ).

Άξιο αναφοράς είναι επίσης ότι σύμφωνα με τη «Στρατηγική 3D Printing του Dubai», την οποία εξήγγειλε το 2016 ο σείχης Mohammed bin Rashid Al Maktoum, πρόεδρος των Ηνωμένων Αραβικών Εμιράτων, στόχος της κυβέρνησης είναι το 25% των κτιρίων στο Dubai να βασίζονται στην τεχνολογία 3D Printing μέχρι το έτος 2030 (The United Arab Emirates' Government portal, 2021).



Εικόνα 23: Κατασκευές από όλο τον κόσμο, που έχουν υλοποιηθεί με μεθόδους 3D Printing

Κεφάλαιο 4: Υλικά που χρησιμοποιούνται για κατασκευές με μεθόδους 3D Printing

Η έρευνα για τη δημιουργία μειγμάτων υλικών, κατάλληλων για εφαρμογή στις μεθόδους 3D Printing, είναι υπό εξέλιξη εδώ και πάνω από 10 χρόνια και στρέφεται ως επί το πλείστον στο πιο σημαντικό δομικό υλικό, που χρησιμοποιείται στις κατασκευές εδώ και αιώνες: το σκυρόδεμα. Ερευνητικές ομάδες σε όλο τον κόσμο επικεντρώνονται στην ανάπτυξη μειγμάτων σκυροδέματος τρισδιάστατης εκτύπωσης (3DPC – 3 dimensional printing concrete) με τις κατάλληλες ιδιότητες για την απόδοση κατασκευών μεγάλης κλίμακας. Άλλοι ερευνητές έχουν στρέψει το ενδιαφέρον τους σε υλικά πιο φιλικά προς το περιβάλλον και προσπαθούν να αναπτύξουν κονιάματα αποτελούμενα από φυσικές πρώτες ύλες (χώμα, άχυρο και νερό).

4.1 Σκυρόδεμα τρισδιάστατης εκτύπωσης (3DPC) μεθόδων με βάση την εξώθηση υλικού

Επειδή η εισχώρηση των μεθόδων 3D Printing στον κατασκευαστικό τομέα αποτελεί μια πρόσφατη προσέγγιση και το εύρος χρησιμοποίησής της είναι περιορισμένο, δεν έχουν αναπτυχθεί ακόμα κοινά αποδεκτά κριτήρια ή πρότυπα για αυτή τη διαδικασία κατασκευής, καθιστώντας δύσκολο τον προσδιορισμό ενός μίγματος υλικού με βέλτιστες ιδιότητες. Παρ' όλα αυτά είναι προφανές ότι το σκυρόδεμα τρισδιάστατης εκτύπωσης θα πρέπει να έχει διαφορετική σύσταση και ρεολογικές ιδιότητες από το κοινό σκυρόδεμα που χρησιμοποιείται στις παραδοσιακές μεθόδους κατασκευής (Sahin & Mardani-Aghabaglou, 2022).

Ένα μίγμα σκυροδέματος για να είναι κατάλληλο για χρήση στις μεθόδους, που βασίζονται στην εξώθηση υλικού, θα πρέπει να συνδυάζει τα πλεονεκτήματα του αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος και του εκτοξευόμενου σκυροδέματος (Le T. , et al., 2012). Οι σημαντικότερες παράμετροι που καθορίζουν τις ιδιότητες του νωπού μίγματος είναι οι εξής:

- Δυνατότητα εξώθησης (Extrudability) ή δυνατότητα εκτύπωσης (Printability)
Αναφέρεται στην ιδιότητα μεταφοράς του νωπού μίγματος στο ακροφύσιο, μέσω του συστήματος διανομής της διάταξης εκτύπωσης και εξώθησής του από το ακροφύσιο, ως ένα συνεχές νήμα υλικού.

- **Εργασιμότητα (Workability)**
Όπως και στο κοινό σκυρόδεμα, είναι η ιδιότητα του νωπού σκυροδέματος που χαρακτηρίζει την ευκολία, με την οποία αυτό μεταφέρεται, διαστρώνεται και συμπυκνώνεται και η οποία εκτιμάται έμμεσα μέσω τυποποιημένων δοκιμών, όπως είναι η δοκιμή κάθισης (Κανονισμός Τεχνολογίας Σκυροδέματος, 2016).
- **Οικοδομησιμότητα (Buildability)**
Αφορά την αντίσταση του εναποτιθέμενου υλικού στην παραμόρφωση υπό το ίδιο βάρος του και το φορτίο, λόγω εναπόθεσης των υπερκείμενων στρώσεων υλικού.
- **Ανοιχτός χρόνος (Open time)**
Προσδιορίζεται ως η χρονική περίοδος κατά την οποία η εργασιμότητα του μίγματος είναι σε τέτοιο επίπεδο ώστε να εξασφαλίζεται επαρκής δυνατότητα εξώθησης. Σε γενικές γραμμές κατά το διάστημα αυτό τόσο η δυνατότητα εκτύπωσης όσο και η οικοδομησιμότητα του μίγματος βρίσκονται εντός των αποδεκτών ορίων.

Το να ικανοποιεί το υλικό τις παραμέτρους της δυνατότητας εξώθησης και της οικοδομησιμότητας σε πρώτη ανάλυση φαίνεται παράδοξο, καθώς θα πρέπει να διαθέτει εκ διαμέτρου αντίθετες ιδιότητες: στη φάση της εξώθησης απαιτείται ένα ρευστό, «μαλακό», εύκολα αντλήσιμο υλικό, ενώ ύστερα από την εναπόθεσή του θα πρέπει το υλικό να είναι στερεό και ισχυρό. Επομένως οι ρεολογικές ιδιότητές του θα πρέπει να διαφέρουν κατά τη φάση της εξώθησης/εκτύπωσης και ύστερα από την εναπόθεση. Προκειμένου στην πρώτη φάση το υλικό να είναι εύκολα αντλήσιμο, θα πρέπει να διαθέτει χαμηλό ιξώδες, υψηλή εργασιμότητα και χαμηλή τάση διαρροής. Σημειώνεται ότι ως τάση διαρροής στο σκυρόδεμα τρισδιάστατης εκτύπωσης ορίζεται ως η ελάχιστη τάση που πρέπει να εφαρμοστεί ώστε να ξεκινήσει η ροή του υλικού (Souza, Ferreira, de Moraes, Senff, & de Oliveira, 2020). Αμέσως μετά την εναπόθεση το υλικό θα πρέπει να παρουσιάζει υψηλό ιξώδες, χαμηλή εργασιμότητα, υψηλή τάση διαρροής και σύντομο χρόνο σκλήρυνσης, ώστε να εμφανίζει σταθερότητα σχήματος και να έχει τη δυνατότητα να φέρει το φορτίο των υπερκείμενων στρώσεων. Ο σύντομος χρόνος σκλήρυνσης δίνει τη δυνατότητα στο υλικό να αναπτύσσει γρήγορα υψηλή θλιπτική αντοχή, επηρεάζει όμως αρνητικά την προσκόλληση των επάλληλων στρώσεων υλικού μεταξύ τους, αποτρέποντας έτσι τη μονολιθικότητα της κατασκευής. Γίνεται επομένως

φανερό ότι απαιτείται μια βελτιστοποίηση όλων των παραμέτρων, ώστε να προκύψει ένα υλικό με κατάλληλες ιδιότητες (Sahin & Mardani-Aghabaglou, 2022).

Κρίσιμη παράμετρος για την επίτευξη των επιθυμητών ρεολογικών ιδιοτήτων αποτελεί η τάση διαρροής, το εύρος της οποίας θα πρέπει να κυμαίνεται από 1,5-2,5kPa για την εξασφάλιση επαρκούς δυνατότητας εξώθησης και οικοδομησιμότητας. Επιπλέον, η προσθήκη λεπτόκοκκων ορυκτών προσθέτων, όπως πυριτική παιπάλη, νανοϋλικών ή τροποποιητών ιξώδους οδηγούν σε αύξηση της τάσης διαρροής του μίγματος και ταυτόχρονα επηρεάζουν θετικά την οικοδομησιμότητα (Rahul, Santhanam, Meena, & Ghani, 2019).

4.2 Υλικά σκυροδέματος τρισδιάστατης εκτύπωσης με βάση την εξώθηση υλικού

Προκειμένου να δημιουργηθεί ένα μίγμα με τις επιθυμητές ιδιότητες, θα πρέπει να πραγματοποιηθεί κατάλληλη επιλογή των υλικών που το συνθέτουν, δηλαδή του τσιμέντου, των ορυκτών προσθέτων, των χημικών προσμίκτων και των αδρανών.

4.2.1 Τσιμέντο

Όσον αφορά το τσιμέντο, απαιτείται μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε σύγκριση με το κοινό σκυρόδεμα, καθώς με αυτό τον τρόπο αυξάνεται η δυνατότητα εκτύπωσης (printability). Υψηλή ποσότητα τσιμέντου οδηγεί, ωστόσο, σε αύξηση της εκλυόμενης θερμότητας ενυδάτωσης του μίγματος. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα αφενός την αύξηση της πρώιμης αντοχής του μίγματος, αφετέρου όμως αυξάνει και την πιθανότητα εμφάνισης ρηγματώσεων λόγω συστολής ξηράνσεως. Η μείωση στην περιεκτικότητα του μίγματος σε τσιμέντο οδηγεί σε μεγαλύτερο χρόνο σκλήρυνσης και μειωμένη πρώιμη αντοχή, ιδιότητες μη επιθυμητές για την μετά την εξώθηση φάση του υλικού. Εξετάστηκαν επομένως εναλλακτικές επιλογές ως συνδετικά υλικά των μιγμάτων 3DPC. Γενικά, οι επιθυμητές ιδιότητες των συνδετικών υλικών είναι: η μείωση της συρρίκνωσης (αυτογενούς ή λόγω ξηράνσεως), η μείωση της θερμότητας ενυδάτωσης, η ελάττωση του χρόνου σκλήρυνσης και η αύξηση της πρώιμης αντοχής. Μια ενδιαφέρουσα εναλλακτική είναι η χρήση σουλφοαλουμινικού τσιμέντου αντί για κοινό τσιμέντο Portland ή σε συνδυασμό με αυτό. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται μείωση της συστολής ξηράνσεως και του χρόνου σκλήρυνσης. Επιπλέον η παραγωγή σουλφοαλουμινικού τσιμέντου συνεπάγεται σημαντικά λιγότερες εκπομπές CO₂ σε σύγκριση με το τσιμέντο Portland, καθιστώντας το 3DPC πιο φιλικό προς το περιβάλλον. Παρά τα πλεονεκτήματά του,

η χρήση σουλφοαλουμινικού τσιμέντου είναι περιορισμένη, λόγω υψηλού κόστους παραγωγής.

4.2.2 Συμπληρωματικά Τσιμεντοειδή Υλικά (SCM)

Μια άλλη εναλλακτική στη χρήση κοινού τσιμέντου είναι η χρησιμοποίηση ορυκτών προσθέτων ή συμπληρωματικών τσιμεντοειδών υλικών (Supplementary Cementitious Materials – SCM), όπως η ιπτάμενη τέφρα, η σκωρία υψικαμίνου, η πυριτική στάχτη, η μετακαολίνη και η σκόνη ασβεστόλιθου, τα οποία βελτιώνουν τις ιδιότητες τόσο του νωπού όσο και του σκληρυμένου μίγματος. Αντίστοιχα με το κοινό σκυρόδεμα, η χρήση των υλικών αυτών έχει θετική επίδραση στην εργασιμότητα του μίγματος, όμως επίσης επιφέρει μείωση στην πρώιμη αντοχή, κάτι το οποίο μπορεί να αντισταθμιστεί με την προσθήκη νανοϋλικών. Η επίδραση των ορυκτών προσθέτων στις ιδιότητες του μίγματος συνοψίζεται στον πίνακα που ακολουθεί (Sahin & Mardani-Aghabaglou, 2022):

Υλικό	Εργασιμότητα	Τάση διαρροής	Ιξώδες	Οικοδομησιμότητα
Ιπτάμενη τέφρα	↑	↓	↓	↓
Πυριτική στάχτη	↓	↑	↑	↑
Μετακαολίνη	↓	↑	↑	↑
Σκόνη ασβεστόλιθου	-	↓	↓	-

Πίνακας 1: Επίδραση ορισμένων ορυκτών προσθέτων στις ρεολογικές ιδιότητες μιγμάτων 3DCP

4.2.3 Γεωπολυμερή (Geopolymer)

Η αναζήτηση όλο και πιο φιλικών προς το περιβάλλον δομικών υλικών οδήγησε στην προσπάθεια αντικατάστασης του κοινού τσιμέντου Portland με γεωπολυμερή, τα οποία μπορούν να αξιοποιήσουν βιομηχανικά παραπροϊόντα ή απόβλητα κατασκευών και κατεδαφίσεων. Ο όρος «γεωπολυμερή» δημιουργήθηκε από τον Joseph Davidovits το 1978 και αναφέρεται σε υλικά που προκύπτουν από τη δράση ενός αλκαλικού ενεργοποιητή, ο οποίος προκαλεί τον πολυμερισμό ενός αργιλοπυριτικού συνδετικού υλικού. Το πρώτο συνθετικό του όρου «γεω» προέρχεται από τη χρήση γεωλογικών ή βιομηχανικών υλικών, όπως η ιπτάμενη τέφρα, η σκωρία υψικάμινου ή η πυριτική παιπάλη, ενώ το συνθετικό

«πολυμερή» περιγράφει τη διαδικασία δημιουργίας μιας αλυσίδας μορίων, προερχόμενων από την ίδια μονάδα (Thomas, et al., 2022).

Ο αλκαλικός ενεργοποιητής μπορεί να είναι υδροξείδιο του νατρίου (NaOH), υδροξείδιο του καλίου (KOH), πυριτικό νάτριο (Na_2SiO_3) ή ανθρακικό νάτριο (Na_2CO_3) διαλυτά σε νερό. Το αργιλοπυριτικό συνδετικό υλικό μπορεί να αποτελείται από ιπτάμενη τέφρα, σκωρία υψικάμινου, πυριτική παιπάλη, μετακαολίνη, σκωρία σιδήρου, τέφρα φλοιού ρυζιού, απόβλητα γυαλιού, απορρίμματα ορυχείων χαλκού ή τέφρα από ξύλινα απόβλητα (Thomas, et al., 2022).

Αν και ο όρος γεωπολυμερή αποδίδεται στον Davidovits, η ανάπτυξή τους είχε ξεκινήσει στα τέλη της δεκαετίας του 1950 από τον ουκρανό επιστήμονα Glukhovsky. Ο Glukhovsky δημιούργησε ένα τσιμεντοειδές μίγμα από αργιλοπυριτικά υλικά και διάλυμα αλκαλιμετάλλων, το οποίο χρησιμοποιήθηκε τη δεκαετία του 1960 στην κατασκευή ενός κτιρίου 9 ορόφων στη Μαριούπολη της Ουκρανίας. Μερικά χρόνια αργότερα, το 1989, πραγματοποιήθηκε η κατασκευή ενός κτιρίου κατοικιών, ύψους 20 ορόφων, με χρήση παρόμοιου υλικού, στο Lieptsk της Ρωσίας (Almutairi, Tayeh, Adesina, Isleem, & Zeyad, 2021).

Όσον αφορά τις ρεολογικές τους ιδιότητες, τα γεωπολυμερή συμπεριφέρονται ως Νευτώνεια ρευστά. Επομένως, με μια πρώτη ανάλυση φαίνεται ότι δεν μπορούν να ικανοποιήσουν τις απαιτήσεις για αντλησιμότητα, δυνατότητα εξώθησης και δυνατότητα εκτύπωσης, που χρειάζεται ένα κατάλληλο μίγμα 3DPC. Επιπλέον, η προσθήκη ρευστοποιητών, που χρησιμοποιούνται για το κοινό σκυρόδεμα, δεν είναι αποτελεσματική (Favier, Hot, Habert, Roussel, & d'Espinose de Lacaillerie, 2014). Άρα η ανάπτυξη ενός κατάλληλου μίγματος 3DCP με γεωπολυμερή, το οποίο θα είναι επαρκώς εκτυπώσιμο και οικοδομήσιμο, μπορεί να προκύψει με πειράματα ως προς τα συστατικά του στοιχείου. Οι Panda και Jen Tan (Panda & Jen Tan, 2018) μελέτησαν τη δημιουργία ενός τέτοιου μίγματος, αποτελούμενου από ιπτάμενη τέφρα, κοκκοποιημένη σκωρία υψικάμινου, πυριτική στάχτη, αλκαλικό ενεργοποιητή, ποταμίσις άμμο με μέγιστη διάμετρο 2mm και νερό. Κάνοντας πειράματα με 5 διαφορετικά μίγματα, αυξάνοντας την αναλογία άμμου/συνδετικού υλικού από 1,1 μέχρι 1,9 κατά βάρος, κατέληξαν ότι η βέλτιστη αναλογία είναι 1,5. Επιπλέον, το επιθυμητό εύρος της τάσης διαρροής, προκειμένου το μίγμα να παρουσιάζει επαρκή δυνατότητα εξώθησης είναι 0,60-1,00kPa. Για τη βελτίωση της ρεολογικής συμπεριφοράς του μίγματος, προστέθηκε αργιλικό

νανουϊκό (αταπουλίτης) σε ποσοστό 1,2%, ενώ για τη μείωση της συστολής ξηράνσεως προστέθηκαν ίνες σε ποσοστό 0,25%.

Είναι επίσης δυνατή η δημιουργία ενός κατάλληλου πολυμερούς κονιάματος χρησιμοποιώντας αποκλειστικά απόβλητα κατασκευών και κατεδαφίσεων, χωρίς την προσθήκη χημικών προσμίκτων. Οι Ilcan et al. (Ilcan, Sahin, Kul, Yildirim, & Sahmaran, 2022) ανέπτυξαν ένα μίγμα αποτελούμενο από απόβλητα τούβλων, κεραμιδιών, γυαλιού και σκυροδέματος, αλεσμένων σε μορφή σκόνης. Το συνδετικό υλικό αποτελούνταν από απόβλητα αργλικής προέλευσης (τούβλα, κεραμίδια) σε ποσοστό 80% κατά βάρος, ενώ τα αντίστοιχα ποσοστά του γυαλιού και του σκυροδέματος ήταν 10%. Ως αλκαλικοί ενεργοποιητές χρησιμοποιήθηκαν διαλύματα υδροξειδίου του νατρίου (NaOH), υδροξειδίου του ασβεστίου (Ca(OH)₂) και πυριτικό νάτριο (Na₂SiO₃) σε διάφορους συνδυασμούς. Επιπλέον στο μείγμα προστέθηκαν λεπτόκοκκα ανακυκλωμένα αδρανή, με αναλογία αδρανών/συνδετικό υλικό 0,35. Το τελικό υλικό παρουσίασε επαρκή δυνατότητα εξώθησης και οικοδομησιμότητα και γενικά οι ρεολογικές ιδιότητές του ήταν κατάλληλες για χρήση σε εφαρμογές 3D Printing.



Εικόνα 24: Το γεωπολυμερές κονίαμα, που αποτελείται εξ' ολοκλήρου από απόβλητα κατασκευών και κατεδαφίσεων. Αριστερά: εικόνα κατά την εκτύπωση του μίγματος στο εργαστήριο. Δεξιά: Κοντινή φωτογραφία των στρώσεων του υλικού μετά την εξώθηση

4.2.4 Αδρανή

Όπως και στο κοινό σκυρόδεμα, οι ιδιότητες των αδρανών παίζουν σημαντικό ρόλο στη συνολική συμπεριφορά του μίγματος. Όμως στο 3DPC υπάρχει ένας σημαντικός περιορισμός ως προς το μέγεθος των αδρανών: μεγάλη διάμετρος αδρανών μπορεί να προκαλέσει έμφραξη στο ακροφύσιο κατά την εξώθηση του υλικού. Δεδομένου ότι η διάμετρος των ακροφυσίων που χρησιμοποιούνται είναι από 20-40mm, η προτιμώμενη διάμετρος των αδρανών δεν θα πρέπει να υπερβαίνει τα 4-6mm (Sahin & Mardani-Aghabaglou, 2022). Άλλοι μελετητές

προτείνουν διάφορες τιμές του λόγου της μέγιστης διαμέτρου των αδρανών προς το άνοιγμα του ακροφυσίου, οι Cheikh et al. προτείνουν την τιμή 1/4, ώστε να αποτρέπεται η έμφραξη του ακροφυσίου (Cheikh, Remond, Khalil, & Aouad, 2017), ενώ οι Malaeb et al. προτείνουν την τιμή 1/10 προκειμένου να επιτευχθεί βέλτιστη δυνατότητα εξώθησης (Malaeb, Al Sakka, & Hamzeh, 2019).

Σε γενικές γραμμές τα αδρανή χωρίζονται σε δύο κατηγορίες (Souza, Ferreira, de Moraes, Senff, & de Oliveira, 2020): τα λεπτόκοκκα, με μέγιστη διάμετρο τα 5mm και τα χονδρόκοκκα με εύρος διαμέτρου 9,5-37,5mm. Στην πλειονότητα των ερευνών χρησιμοποιούνται λεπτόκοκκα αδρανή, ώστε να εξασφαλίζεται ικανοποιητική αντλησιμότητα του μίγματος, όμως πιο πρόσφατες μελέτες διερευνούν τα οφέλη που μπορούν να προκύψουν από την ενσωμάτωση και χονδρόκοκκων αδρανών.

Αφ' ενός, η χρησιμοποίηση χονδρόκοκκων αδρανών, μειώνει την πιθανότητα εμφάνισης ρηγματώσεων, λόγω σημαντικής μείωσης της θερμότητας ενυδάτωσης και της συστολής ξηράνσεως. Επιπλέον, έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της τάσης διαρροής, κάτι το οποίο βελτιώνει την οικοδομησιμότητα και οδηγεί σε κατασκευές με μεγαλύτερη σταθερότητα ως προς το σχήμα. Σημαντικά επίσης πλεονεκτήματα των χονδρόκοκκων αδρανών είναι το μειωμένο κόστος και η βιωσιμότητα, υπό την έννοια ότι απαιτείται μικρότερη ποσότητα συνδετικού υλικού, όπως το τσιμέντο, η παραγωγή του οποίου είναι ενεργοβόρος και έχει αποτέλεσμα υψηλές εκπομπές CO₂ (Bhattacharjee, et al., 2021). Αφ' ετέρου, όμως, η προσθήκη αδρανών μεγαλύτερης διαμέτρου επιδρά αρνητικά στην αντλησιμότητα του μίγματος, ενώ αυξάνει και τον κίνδυνο έμφραξης του ακροφυσίου. Προκειμένου να ξεπεραστεί η δυσκολία αυτή οι Rahul και Santhanam προτείνουν τη χρήση μιας εμβολοφόρου αντλίας. Επιπλέον, η αντικατάσταση των λεπτόκοκκων αδρανών με χονδρόκοκκα, μέγιστης διαμέτρου 10mm, μέχρι ποσοστού 30% κατ' όγκον, δεν επιφέρει αρνητικές συνέπειες στη δυνατότητα εξώθησης του μίγματος. Παράλληλα έχει θετική επίδραση στην οικοδομησιμότητα του μίγματος, καθώς συνεπάγεται αύξηση στη θλιπτική αντοχή και το μέτρο ελαστικότητάς του (Rahul & Santhanam, 2020). Για το μίγμα που χρησιμοποίησαν στην έρευνά τους, ο λόγος αδρανών προς συνδετικό υλικό ήταν 1,5 κατά βάρος, ενώ σύμφωνα με άλλες μελέτες ο λόγος αυτός κυμαίνεται στο εύρος 0,83-1,79.

Στα πλαίσια της ενίσχυσης της βιωσιμότητας και της κυκλικής οικονομίας, είναι δυνατή και η χρήση ανακυκλωμένων αδρανών. Τα ανακυκλωμένα αδρανή (Recycled Aggregates-RA) προέρχονται από απόβλητα κατασκευών και κατεδαφίσεων, αφού προηγηθεί η απομάκρυνση

διάφορων άχρηστων υπολειμμάτων, πλύσιμο και στέγνωμα. Όσον αφορά τη μορφολογία, ενώ τα φυσικά αδρανή παρουσιάζουν περισσότερο ακανόνιστο σχήμα με αιχμηρές άκρες, τα ανακυκλωμένα διαθέτουν πιο στρογγυλεμένες πλευρές. Επιπλέον, τα ανακυκλωμένα αδρανή διαθέτουν χαμηλότερη σχετική πυκνότητα και απορροφούν περίπου 3,5 φορές περισσότερο νερό από τα φυσικά αδρανή (Hu, Tang, Li, Li, & Tam, 2019). Παρότι οι ιδιότητες αυτές μπορεί να έχουν αρνητικές συνέπειες στις ιδιότητες του κοινού σκυροδέματος, δεν φαίνεται να επιδρούν σημαντικά στις μηχανικές ιδιότητες του εκτυπωμένου σκυροδέματος, καθιστώντας την εναλλακτική της χρησιμοποίησης των ανακυκλωμένων αδρανών πολλά υποσχόμενη (Rahul, Mohan, De Schutter, & Van Tittelboom, 2022).

4.2.5 Χημικά πρόσμικτα

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, το σκυρόδεμα τρισδιάστατης εκτύπωσης θα πρέπει να διαθέτει διαφορετικές ρεολογικές ιδιότητες πριν και μετά την εξώθησή του. Η αντιφατική αυτή συνθήκη μπορεί να επιτευχθεί με την προσθήκη διαφόρων χημικών προσμίκτων στο μίγμα, όπως υπερρυστοποιητές, τροποποιητές ιξώδους, επιταχυντές και επιβραδυντές πήξεως (Sahin & Mardani-Aghabaglou, 2022).

Υπερρυστοποιητές χρησιμοποιούνται σχεδόν σε κάθε μίγμα σκυροδέματος τρισδιάστατης εκτύπωσης, διότι διευκολύνουν την άντληση και την εξώθησή του, λόγω του ότι προκαλούν μείωση στην τάση διαρροής και το ιξώδες του και αυξάνουν την εργασιμότητα. Υπάρχουν διάφοροι τύποι υπερρυστοποιητών, όπως οι σουλφονικοί, οι φωσφονικοί και οι πολυκαρβοξυλικοί. Άξιοι αναφοράς είναι οι υπερρυστοποιητές πολυκαρβοξυλικού αιθέρα (PCEs), η χρήση των οποίων δίνει τη δυνατότητα επίτευξης χαμηλού λόγου νερού/τσιμέντο στο μίγμα, της τάξεως του 0,20 (Souza, Ferreira, de Moraes, Senff, & de Oliveira, 2020).

Οι τροποποιητές ιξώδους (Viscosity Modifying Agents – VMAs) χρησιμοποιούνται για την αύξηση του ιξώδους και την ενίσχυση της συνοχής του μίγματος και της σταθερότητας του σχήματος της κατασκευής μετά την εξώθηση. Η προσθήκη τους στο μίγμα έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της τάσης διαρροής, του ιξώδους και της θλιπτικής αντοχής. Οι πιο κοινοί τύποι τροποποιητών ιξώδους είναι οι τροποποιητές με βάση την κυτταρίνη και τα αργιλικά νανοϋλικά (Hou, Duan, Xiao, & Ye, 2021).

Οι επιταχυντές πήξεως ενισχύουν την οικοδομησιμότητα, καθώς μειώνουν το χρόνο σκλήρυνσης του υλικού, βελτιώνοντας την ικανότητά του να φέρει το φορτίο των υπερκείμενων στρώσεων. Παρ' όλα αυτά η προσθήκη τους στο μίγμα εξ' αρχής θα είχε

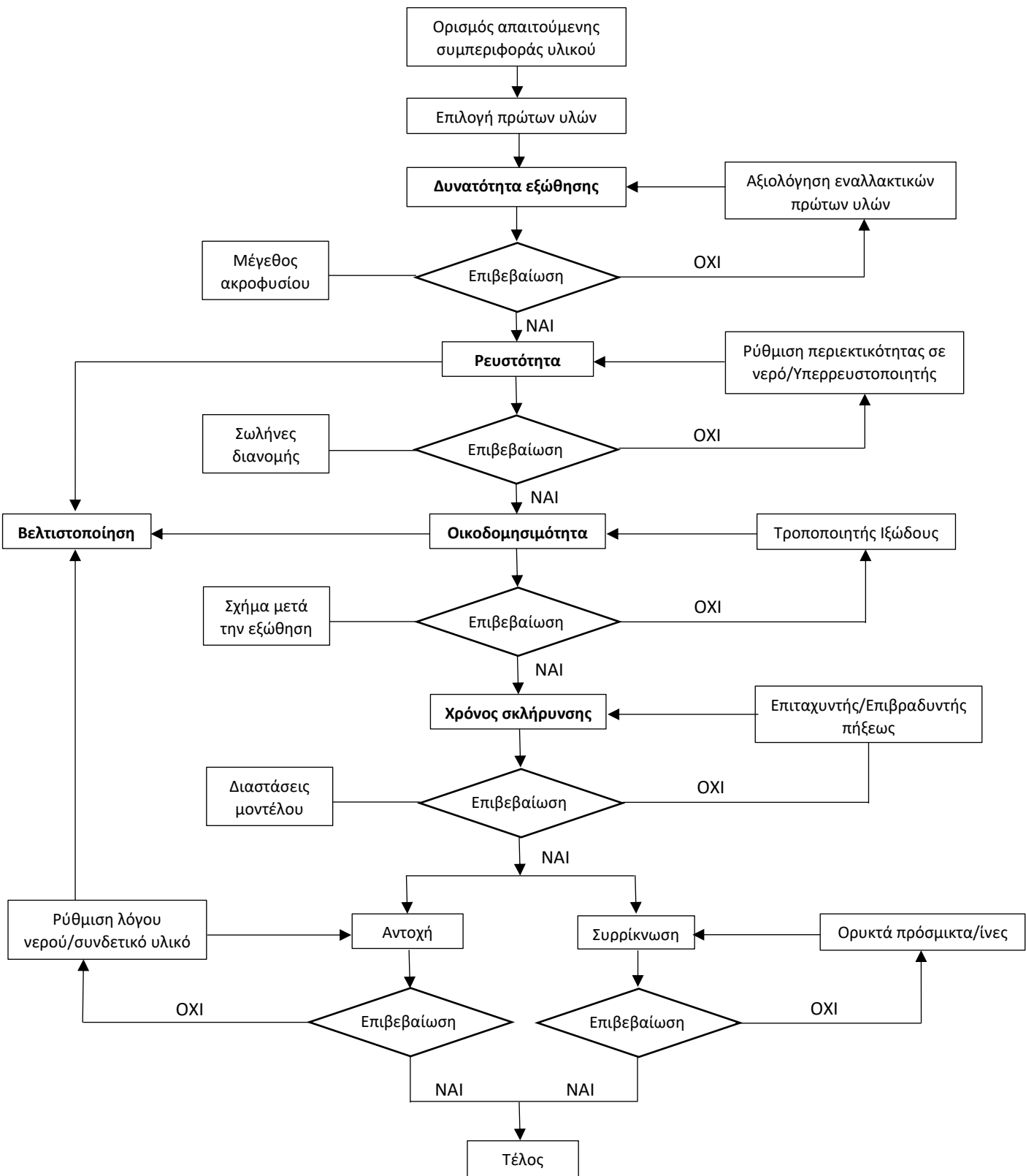
αρνητική επίδραση στη δυνατότητα εκτύπωσης και θα ενίσχυε τον κίνδυνο έμφραξης του ακροφυσίου. Για το λόγο αυτό προτείνεται η προσθήκη τους είτε να γίνεται στο ακροφύσιο είτε να πραγματοποιείται ψεκασμός σε υγρή μορφή πάνω στο εκτυπωμένο υλικό από κάποια άλλη διάταξη (Sahin & Mardani-Aghabaglou, 2022).

Οι επιβραδυντές πήξεως επιμηκύνουν το χρονικό διάστημα ενυδάτωσης του σκυροδέματος, διευρύνοντας έτσι τον ανοιχτό χρόνο του μίγματος πριν την εκτύπωση. Η ιδιότητα αυτή μπορεί να είναι ιδιαίτερα χρήσιμη σε περίπτωση εκτύπωσης κατασκευών μεγάλης κλίμακας με μεγάλο μήκος διαδρομής εκτύπωσης ή σε περιπτώσεις καθυστερήσεων στην παροχή του μίγματος (Souza, Ferreira, de Moraes, Senff, & de Oliveira, 2020).

Τέλος, είναι γνωστό ότι το σκυρόδεμα υπόκειται σε συρρίκνωση κατά τη διάρκεια της διαδικασίας ενυδάτωσής του. Στο παραδοσιακό σκυρόδεμα η συρρίκνωση περιορίζεται λόγω της ύπαρξης των ξυλοτύπων. Στο σκυρόδεμα τρισδιάστατης εκτύπωσης όμως η απουσία ξυλοτύπων, σε συνδυασμό με τη συνήθη απουσία χονδρόκοκκων αδρανών, οδηγούν σε αυξημένο κίνδυνο συρρίκνωσης. Για το λόγο αυτό είναι δυνατή η προσθήκη προσμίκτων μείωσης της συρρίκνωσης (shrinkage reducing admixtures – SRAs) ή προσμίκτων αντιστάθμισης της συρρίκνωσης (shrinkage compensating admixtures – SCAs) (Souza, Ferreira, de Moraes, Senff, & de Oliveira, 2020). Τα SRAs έχουν ως αποτέλεσμα την αποφυγή της υπερβολικής συρρίκνωσης, μειώνοντας την επιφανειακή τάση του νερού εντός των πόρων του υλικού, ενώ τα SCAs προκαλούν ελεγχόμενη διόγκωση, η οποία αντισταθμίζει τη συρρίκνωση του μίγματος.

Από τα παραπάνω γίνεται φανερό ότι η χρήση χημικών προσμίκτων μπορεί να επιφέρει τόσο θετικές όσο και αρνητικές συνέπειες στις ιδιότητες του μίγματος. Επιπλέον, ιδιαίτερη σημασία έχει και η επίδραση του συνδυασμού διαφόρων προσμίκτων στις ιδιότητες του μίγματος. Επομένως, ελλείψει θεσμοθετημένων κριτηρίων και προτύπων, απαιτείται προσεκτικός σχεδιασμός και διενέργεια εργαστηριακών δοκιμών για την προετοιμασία ενός κατάλληλου μίγματος.

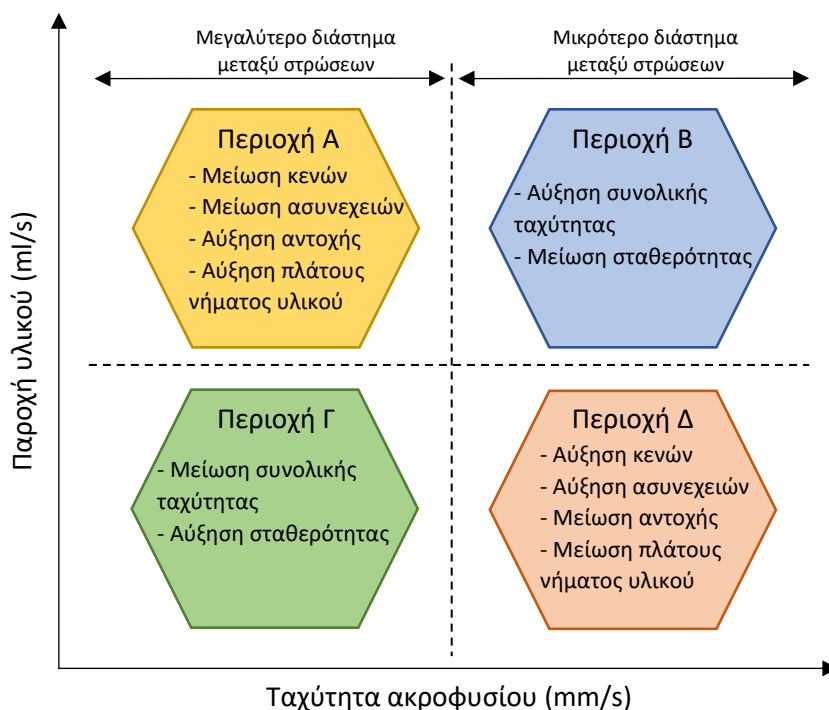
Το παρακάτω διάγραμμα ροής περιγράφει σχηματικά τη διαδικασία προετοιμασίας ενός τσιμεντοειδούς μίγματος για κατασκευές 3D Printing (Ma, Wang, & Ju, 2017):



4.3 Σκληρυμένη κατάσταση μίγματος

Η δημιουργία μιας κατασκευής μέσω συσσωμάτωσης εκτυπωμένων «νημάτων» υλικού εγκυμονεί κίνδυνο ανισοτροπίας του υλικού, επηρεάζοντας έτσι τη συνολική συμπεριφορά της κατασκευής. Επομένως θα πρέπει να αξιολογηθούν και οι ιδιότητες του υλικού στη σκληρυμένη φάση του, εξετάζοντας κριτήρια όπως η προσκόλληση των στρώσεων του υλικού μεταξύ τους, η πυκνότητα του υλικού, η εφελκυστική αντοχή και η συρρίκνωση (Buswell, Leal de Silva, Jones, & Dirrenberger, 2018).

Η προσκόλληση των στρώσεων του υλικού επηρεάζεται κυρίως από το χρόνο του κύκλου στρώσης (layer cycle-time), ο οποίος ορίζεται ως το χρονικό διάστημα μεταξύ της εναπόθεσης μιας νέας στρώσης υλικού πάνω στην προηγούμενή της. Βασικές παράμετροι που καθορίζουν το χρόνο του κύκλου στρώσης είναι το μήκος της διαδρομής εκτύπωσης (printing path) και η ταχύτητα απόθεσης του υλικού. Μεγάλος χρόνος κύκλου στρώσης μπορεί να οδηγήσει στη δημιουργία περιοχών στρώσεων υλικού, οι οποίες δεν έχουν «δέσει» επαρκώς μεταξύ τους και αναφέρονται ως «κρύες ενώσεις» (cold joints). Στο παρακάτω ποιοτικό διάγραμμα απεικονίζεται η επιρροή της παροχής υλικού και της ταχύτητας του ακροφυσίου εξώθησης στην ποιότητα του εκτυπωμένου υλικού (Hamidi & Aslani, 2019):



Μελετώντας τον τρόπο υλοποίησης μιας κατασκευής 3DPC μέσω εναπόθεσης νημάτων υλικού, γίνεται αντιληπτό ότι ελλοχεύει ο κίνδυνος εμφάνισης κενών ανάμεσα στα γειτονικά νήματα υλικού. Το φαινόμενο αυτό καλείται ανεπάρκεια πλήρωσης (under-filling) και έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της πυκνότητας του εκτυπωμένου δομικού στοιχείου. Η δημιουργία τέτοιων κενών εξαρτάται από τη σύσταση του μίγματος, τις ρεολογικές ιδιότητες κατά τη διάρκεια της εκτύπωσης, καθώς και τη διαδρομή εκτύπωσης. Επιπλέον, η παραμόρφωση του εκτυπωμένου υλικού μπορεί να συμβάλει στην πλήρωση των κενών αυτών και την ελαχιστοποίησή τους. Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζεται ένα δείγμα καλής ποιότητας εκτύπωσης στα δεξιά και αντίστοιχα ένα δείγμα χαμηλής ποιότητας εκτύπωσης στα αριστερά, στο οποίο διακρίνεται καθαρά η ύπαρξη κενών ανάμεσα στα εκτυπωμένα νήματα υλικού (Buswell, Leal de Silva, Jones, & Dirrenberger, 2018):



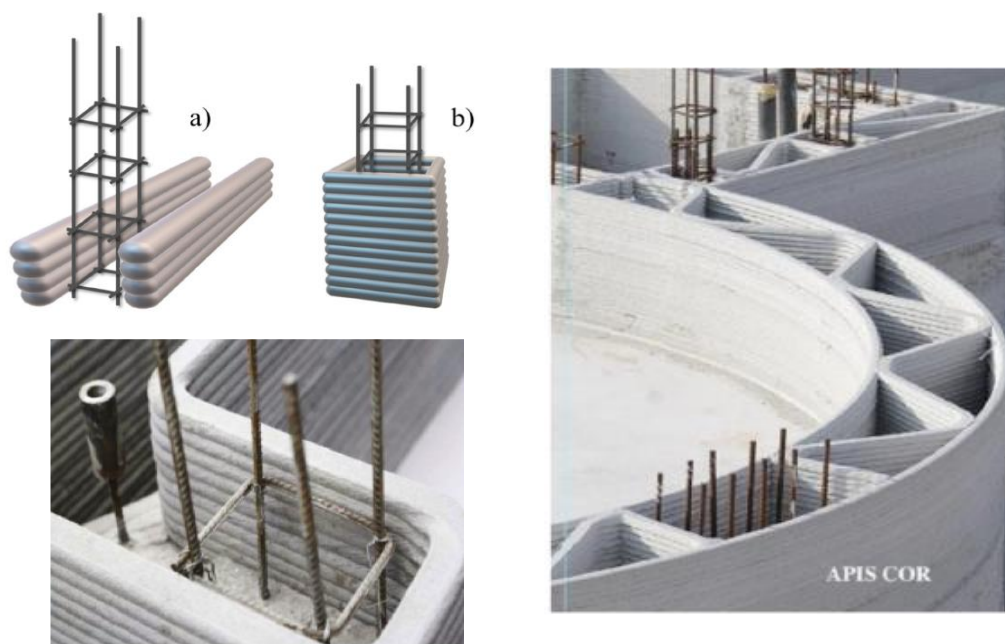
Εικόνα 25: Δείγματα εκτυπωμένου σκυροδέματος καλής ποιότητας εκτύπωσης στα δεξιά και χαμηλής ποιότητας εκτύπωσης στα αριστερά, όπου διακρίνεται το περίγραμμα των νημάτων υλικού και τα αντίστοιχα κενά ανάμεσά τους

Από πειράματα που διεξήγαγαν οι Le et al. του Πανεπιστημίου του Loughborough μετρήθηκε ποσοστό κενών 4,8% (διαμέτρου 0,2-4mm) και πυκνότητα 2.260kg/m^3 σε δείγμα με χαμηλή ποιότητα εκτύπωσης, ενώ οι αντίστοιχες τιμές σε δείγμα με καλή ποιότητα εκτύπωσης ήταν 1% και 2.350kg/m^3 (Le T. , et al., 2012).

Όπως και στο κοινό σκυρόδεμα, η εφελκυστική αντοχή του εκτυπωμένου σκυροδέματος αποτελεί ένα μικρό μόνο ποσοστό της θλιπτικής αντοχής του. Επομένως, προκειμένου η

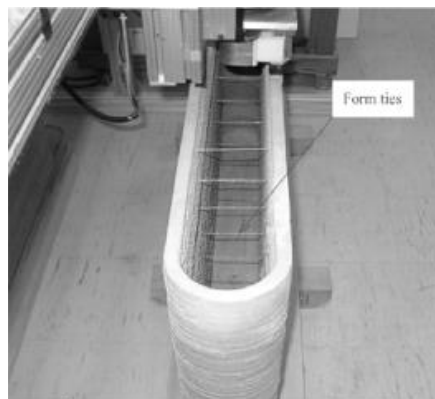
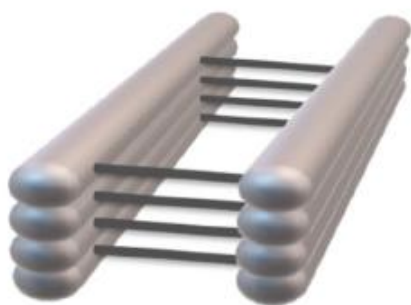
κατασκευή να μπορέσει να ανταποκριθεί στις αναπτυσσόμενες εφελκυστικές τάσεις σε πολλές περιπτώσεις είναι απαραίτητη η ενίσχυση με την ενσωμάτωση χαλύβδινων οπλισμών.

Υπάρχουν διάφορες τεχνικές για την ενσωμάτωση των χαλύβδινων οπλισμών στο 3DPC. Η πιο συνήθης είναι η εκτύπωση του περιγράμματος των υποστρωμάτων της κατασκευής, με τρόπο ανάλογο με την κατασκευή του ξυλοτύπου σε μια συμβατική κατασκευή, η τοποθέτηση των απαιτούμενων διαμήκων και εγκάρσιων οπλισμών (με χειρωνακτικό τρόπο) και ύστερα η πλήρωση με κοινό σκυρόδεμα (Εικ.26) (Souza, Ferreira, de Moraes, Senff, & de Oliveira, 2020).



Εικόνα 26: Ενσωμάτωση χαλύβδινων οπλισμών σε κατασκευές 3DPC, με εκτύπωση του περιγράμματος των υποστρωμάτων, τοποθέτηση του οπλισμού και πλήρωση με κοινό σκυρόδεμα

Ένας άλλος τρόπος ενίσχυσης, ο οποίος έχει εφαρμογή στη μέθοδο Contour Crafting, είναι η τοποθέτηση οριζόντιου εγκάρσιου οπλισμού, με χειρωνακτικό ή αυτόματο τρόπο, αμέσως μετά την εκτύπωση κάθε στρώσης υλικού (Εικ. 27). Με τον τρόπο αυτό συνδέονται οι παράλληλες στρώσεις υλικού και ενισχύεται συνολικά η κατασκευή .



Εικόνα 27: Ενίσχυση κατασκευής 3DPC, με τοποθέτηση οριζόντιων εγκάρσιων οπλισμών, που συνδέουν τις παράλληλες στρώσεις υλικού

Επιπλέον, μια τεχνική για την ενσωμάτωση τόσο οριζόντιου όσο και κατακόρυφου οπλισμού είναι η τοποθέτηση ενός δομικού πλέγματος κατακόρυφα και η εκτύπωση σκυροδέματος και από τις δύο πλευρές του, με χρήση ενός ειδικά διαμορφωμένου ακροφυσίου (Εικ. 28).

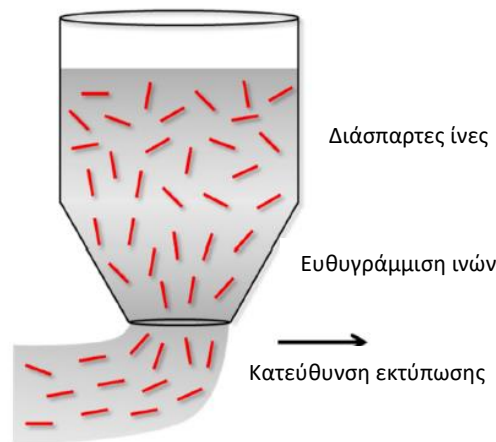


Εικόνα 28: Ενίσχυση κατασκευής 3DPC, με τοποθέτηση πλέγματος οριζόντιων και κατακόρυφων οπλισμών και εκτύπωση σκυροδέματος εκατέρωθέν τους

Εναλλακτικά, η βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων του 3DPC μπορεί να επιτευχθεί με την προσθήκη ινών στο μίγμα. Οι ίνες αυτές μπορεί να αποτελούνται από χάλυβα, γυαλί, άνθρακα, πολυπροπυλένιο ή πολυαιθυλένιο. Η προσθήκη των ινών επηρεάζει θετικά διάφορες ιδιότητες του υλικού, όπως η σκληρότητα, η πλαστιμότητα, η αντοχή σε κόπωση, η αντοχή σε κρούση και κυρίως η εφελκυστική αντοχή (Souza, Ferreira, de Moraes, Senff, & de Oliveira, 2020). Επιπλέον, οι ίνες συμβάλλουν στη μείωση της συστολής ξηράνσεως του μίγματος.

Η επιρροή των ινών στις ιδιότητες του 3DPC εξαρτάται από τον προσανατολισμό τους, την αναλογία των διαστάσεων και την περιεκτικότητα κατ' όγκο. Σχετικά με τον προσανατολισμό, η επιρροή τους στην εφελκυστική αντοχή μεγιστοποιείται όταν οι ίνες είναι παράλληλες στις στρώσεις του υλικού. Στην τρισδιάστατη εκτύπωση, ο τρόπος εκτύπωσης ευνοεί γενικά την

ευθυγράμμιση των ινών σε μια προκαθορισμένη κατεύθυνση, παράλληλα με τη διαδρομή εκτύπωσης (Εικ. 29).



Εικόνα 29: Ευθυγράμμιση των ινών παράλληλα με την κατεύθυνση εκτύπωσης

Σχετικά με την αναλογία των διαστάσεων των ινών, η οποία ορίζεται ως ο λόγος του μήκους προς τη διάμετρό τους, οι τυπικές τιμές της κυμαίνονται μεταξύ 30-150 και όσο αυξάνεται ο λόγος, τόσο αυξάνεται η αντοχή του υλικού μετά τη ρηγμάτωση.

Όσον αφορά την περιεκτικότητα κατ' όγκο, σε γενικές γραμμές όσο υψηλότερη είναι, τόσο περισσότερο επηρεάζεται αρνητικά η δυνατότητα εξώθησης και αυξάνεται ο κίνδυνος έμφραξης του ακροφυσίου (Hou, Duan, Xiao, & Ye, 2021). Μια τυπική τιμή της περιεκτικότητας κατ' όγκο είναι το 2%.

Τέλος, σχετικά με τη συρρίκνωση, όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω, το 3DPC είναι περισσότερο ευάλωτο από το κοινό σκυρόδεμα λόγω απουσίας των ξυλοτύπων. Προκειμένου να ελεγχθεί η συρρίκνωση του υλικού υπάρχουν διάφορες εναλλακτικές, όπως η προσθήκη ινών, η προσθήκη προσμίκτων (μείωσης ή αντιστάθμισης της συρρίκνωσης – SRAs ή SCAs), η χρήση ιπτάμενης τέφρας και σουλφοαλουμινικού τσιμέντου, η μείωση του λόγου νερού προς τσιμέντο ή η αύξηση του λόγου άμμου προς τσιμέντο (Hamidi & Aslani, 2019).

4.4 Σκυρόδεμα τρισδιάστατης εκτύπωσης (3DPC) μεθόδων οι οποίες βασίζονται στη σύντηξη στρώματος σκόνης

Στις μεθόδους τρισδιάστατης εκτύπωσης, που βασίζονται στη σύντηξη στρώματος σκόνης (Powder Bed Fusion) οι ιδιότητες του σκυροδέματος δεν εξαρτώνται μόνο από τις ιδιότητες των υλικών από τα οποία αποτελείται, όπως η σύνθεση, η κοκκομετρία, η πυκνότητα του ξηρού μίγματος και ο λόγος νερού/τσιμέντο, αλλά και από παραμέτρους, που αφορούν τη διαδικασία εκτύπωσης, όπως το πάχος των στρώσεων, η πίεση εκτόξευσης του συνδετικού υλικού και η μετέπειτα επεξεργασία της εκτυπωμένης κατασκευής (Lowke, και συν., 2018).

Η μέθοδος D-Shape, όπως έχει αναφερθεί και στο κεφάλαιο 3, χρησιμοποιεί την τεχνική της επιλεκτικής ενεργοποίησης συνδετικού υλικού (selective binder activation). Τα υλικά που χρησιμοποιούνται είναι άμμος ως αδρανές, τσιμέντο ως συνδετικό υλικό και νερό ως καταλύτης, που ενεργοποιεί το μίγμα. Ως τσιμέντο μπορεί να χρησιμοποιηθεί το κοινό τσιμέντο Portland ή τσιμέντο με βάση το οξείδιο του μαγνησίου (MgO). Η χρήση του δευτέρου έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή σκυροδέματος με ανώτερες μηχανικές ιδιότητες, όπως υψηλότερη θλιπτική αντοχή, υψηλή αντοχή σε φωτιά, θερμομονωτικές ιδιότητες, αντοχή σε απότριψη, υψηλές τιμές αντοχής σε σύντομο χρόνο σκλήρυνσης και καλές ιδιότητες συνάφειας με ευρύ φάσμα υλικών, όπως τα οργανικά αδρανή. Το σκυρόδεμα με βάση το MgO παρουσιάζει όμως και κάποια σημαντικά μειονεκτήματα, όπως η μεγάλη απώλεια αντοχής όταν εκτεθεί παρατεταμένα σε νερό και ότι είναι επιρρεπές στη συρρίκνωση και εξαιρετικά διαβρωτικό προς τον χάλυβα οπλισμού (Jakupovic, 2016).

Το εκτυπωμένο σκυρόδεμα με βάση το MgO παρουσιάζει συνήθως τραχεία εξωτερική επιφάνεια. Η θλιπτική αντοχή του για φόρτιση κάθετα στις στρώσεις του υλικού μετρήθηκε στα 49MPa, ενώ η αντίστοιχη τιμή για φόρτιση παράλληλα στις στρώσεις του υλικού προκύπτει 59MPa. Η εφελκυστική αντοχή είναι 9MPa και το μέτρο ελαστικότητας 25GPa. Το μέσο πορώδες ανέρχεται σε 5,6% και η πυκνότητα του υλικού είναι 2.000kg/m³ (περίπου 20% μικρότερη από το κοινό σκυρόδεμα). Το πάχος των στρώσεων κυμαίνεται μεταξύ 5-10mm και η θεωρητική ταχύτητα εκτύπωσης είναι 6min/στρώση.



Εικόνα 30: Δοκός κατασκευασμένη από σκυρόδεμα με βάση το MgO, όπου διακρίνεται η χαρακτηριστική τραχεία εξωτερική επιφάνεια

Οι Lowke et al. το 2015 διερεύνησαν την επιρροή του λόγου N/T στην αντοχή σκυροδέματος, το οποίο παράγεται με τη μέθοδο της επιλεκτικής ενεργοποίησης συνδετικού υλικού. Μελέτησαν σκυρόδεμα αποτελούμενο από τσιμέντο και λεπτόκοκκα αδρανή, με μέγιστη διάσταση <math><0,5\text{mm}</math> και πάχος στρώσης εκτύπωσης από 1-3mm. Τα αποτελέσματα της έρευνάς του έδειξαν ότι τόσο η θλιπτική όσο και η εφελκυστική αντοχή τείνουν να αυξηθούν με αύξηση του λόγου N/T.

Οι Shakor et al. το 2017 μελέτησαν την παραγωγή σκυροδέματος μέσω ενός εμπορικού τρισδιάστατου εκτυπωτή, με τσιμεντοειδή σκόνη, αποτελούμενη από κοινό τσιμέντο Portland σε ποσοστό 30,8%, τσιμέντο αργιλικού ασβεστίου (Calcium Aluminate Cement – CAC) σε ποσοστό 64,7% και ανθρακικό λίθιο σε ποσοστό 4,5% για την επιτάχυνση της πήξης. Ο ενεργοποιητής αποτελούνταν από νερό και 5-10% πολυβινυλική αλκοόλη ή γλυκερόλη ή μεθανόλη. Από εργαστηριακά αποτελέσματα σε δοκίμια διαστάσεων $20 \times 20 \times 20 \text{mm}^3$ με διαφορετικές περιεκτικότητες σε νερό προέκυψε μέγιστη θλιπτική αντοχή 8,3MPa, όταν ο κορεσμός σε νερό ήταν της τάξης του 170% (Shakor, Sanjayan, Nazari, & Nejadi, 2017).

Οι Weger et al. το 2016 μελέτησαν μια άλλη τεχνική σύντηξης στρώματος σκόνης, την επιλεκτική εισχώρηση τσιμεντόπαστας (selective paste intrusion). Με την τεχνική αυτή εφαρμόζεται ρευστός τσιμεντοπολτός πάνω σε στρώσεις αδρανών. Στην προκειμένη περίπτωση τα αδρανή είχαν μέση διάμετρο <math><3\text{mm}</math> και το πάχος των στρώσεων ήταν 3mm. Εργαστηριακές δοκιμές έδειξαν ότι το υλικό που μελέτησαν ανέπτυξε θλιπτική αντοχή 22,1MPa, με λόγο N/T 0,40. Σε άλλη έρευνα του 2018 οι ίδιοι μελετητές ανέπτυξαν σκυρόδεμα

με την ίδια τεχνική, το οποίο παρουσίασε θλιπτική αντοχή 70MPa και λόγο N/T 0,30 (Lowke, και συν., 2018).

Οι Xia και Sanjayan το 2016 ανέπτυξαν ένα εναλλακτικό γεωπολυμερές υλικό, κατάλληλο για την τεχνική της επιλεκτικής ενεργοποίησης συνδετικού υλικού. Το ξηρό μίγμα αποτελούνταν από ψιλή άμμο, με μέση διάσταση 0,184mm, σκωρία και άνυδρο μεταπυριτικό νάτριο, ενώ ο υγρός ενεργοποιητής ήταν ένας κοινός διαλύτης διαθέσιμος στο εμπόριο (κυρίως νερό με 2-πυρρολιδόνη). Χωρίς μετέπειτα επεξεργασία, η θλιπτική αντοχή του υλικού μετρήθηκε στα 0,91MPa για φόρτιση παράλληλα με τη φορά των στρώσεων και 0,76MPa για φόρτιση κάθετα σε αυτή. Όταν όμως το δείγμα αμέσως μετά την εκτύπωση βυθίστηκε σε κορεσμένο διάλυμα άνυδρου μεταπυριτικού νατρίου για 7 ημέρες στους 60°C, η θλιπτική αντοχή του αυξήθηκε σημαντικά σε 16,5MPa για φόρτιση παράλληλα στις στρώσεις και 15,7MPa για κάθετη φόρτιση αντίστοιχα. Ο λόγος που προκαλείται αυτή η αύξηση είναι η συνεχιζόμενη διαδικασία γεωπολυμερισμού παρουσία του αλκαλικού διαλύματος (Xia & Sanjayan, 2016).

4.5 Τρισδιάστατη εκτύπωση με γαιώδη υλικά

Στα πλαίσια της βελτίωσης της βιωσιμότητας των κατασκευών με χρήση μεθόδων τρισδιάστατης εκτύπωσης, μια ενδιαφέρουσα εναλλακτική είναι η χρήση γαιώδους κατασκευαστικού υλικού. Τα γαιώδη υλικά, από περιβαλλοντικής άποψης, είναι προτιμητέα, διότι είναι πλήρως ανακυκλώσιμα, έχουν χαμηλή ενσωματωμένη ενέργεια (ορίζεται ως η ολική ενέργεια που έχει καταναλωθεί για την κατασκευή ενός προϊόντος) και δεν παράγουν απόβλητα. Επιπλέον, διαθέτουν υψηλή θερμική μάζα, κάτι το οποίο οδηγεί σε βελτιωμένη θερμική απόδοση, ιδίως σε περιοχές με μεγάλη διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα στην ημέρα και τη νύχτα (Gomaa, Vaculik, Soebarto, Griffith, & Jabi, 2021). Επιπρόσθετα, το κόστος των γαιωδών υλικών είναι σημαντικά μικρότερο σε σύγκριση με τα συνήθη οικοδομικά υλικά (σκυρόδεμα, χάλυβας).

Το υλικό που είναι κατάλληλο για εφαρμογή στις μεθόδους τρισδιάστατης εκτύπωσης, σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, είναι ένα πηλοκονίαμα γνωστό ως cob, το οποίο αποτελείται από εδαφικό υλικό σε ποσοστό 73%, νερό σε ποσοστό 25% και ίνες από άχυρο συνήθως σε ποσοστό 2% κατά βάρος. Το εδαφικό υλικό αποτελείται από πηλό σε ποσοστό 15-25% και άμμο/αδρανή σε ποσοστό 75-85%. Εργαστηριακές δοκιμές έδειξαν ότι το υλικό παρουσιάζει μέση θλιπτική αντοχή 0,87MPa, μέτρο ελαστικότητας 22,9MPa και είναι κατάλληλο για κατασκευές μικρής κλίμακας (Gomaa, Vaculik, Soebarto, Griffith, & Jabi, 2021). Σε άλλη

έρευνα, όπου χρησιμοποιήθηκε βιοπολυμερές από θαλάσσια φύκια αντί για άχυρο, επετεύχθη θλιπτική αντοχή 1,2MPa για κυκλική διατομή υλικού και 1,7MPa για ορθογωνική (Perrot, Rangeard, & Courteille, 2018).



Εικόνα 31: Τρισδιάστατη εκτύπωση γαιώδους υλικού

Όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 3, η ιταλική εταιρεία WASP (προέρχεται από τη φράση World's Advanced Saving Project) έχει κατασκευάσει στην Ιταλία έργα με τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης, χρησιμοποιώντας γαιώδη υλικά, όπως οι κατοικίες «Gaia» το 2018, εμβαδού 20m² και «TECLA» το 2021, συνολικού εμβαδού 60m², με σχήμα διπλού θόλου.



Εικόνα 32: Πάνω: Το έργο «Gaia», κατά της διάρκεια της εκτύπωσης και ολοκληρωμένο. Κάτω: το έργο«TECLA» αντίστοιχα, κατά της διάρκεια της εκτύπωσης και ολοκληρωμένο (πηγή:www.3dwasp.com)

Κεφάλαιο 5: Δυνατότητες και περιορισμοί μεθόδων 3D Printing

Στο παρόν κεφάλαιο διερευνώνται οι δυνατότητες που προσφέρει η χρησιμοποίηση μεθόδων τρισδιάστατης εκτύπωσης στον τομέα των κατασκευών, καθώς και οι περιορισμοί που απορρέουν από αυτή.

5.1 Δυνατότητες που παρέχει η εφαρμογή μεθόδων 3D Printing

Αρχικά παρουσιάζονται οι σημαντικότερες δυνατότητες, που μπορούν να παρέχουν οι μέθοδοι 3D Printing στον τομέα των κατασκευών και αποτελούν την κινητήρια δύναμη για την περαιτέρω εφαρμογή τους.

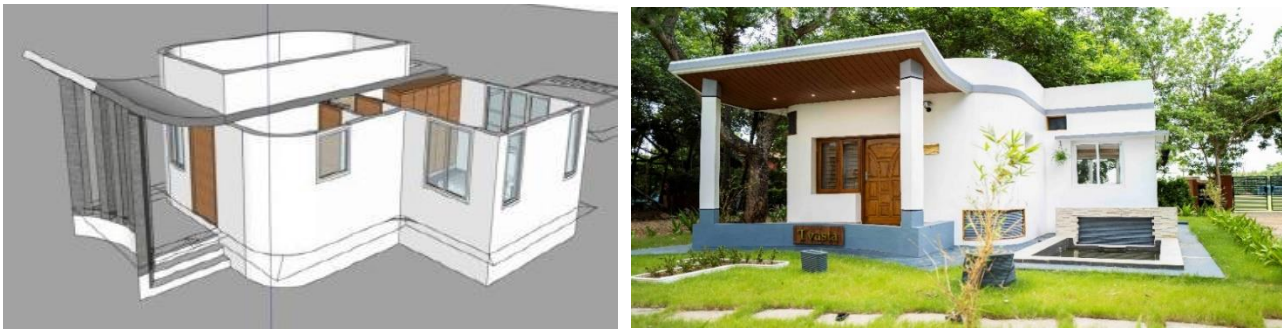
5.1.1 Κόστος κατασκευής

Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα της κατασκευής με τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης είναι οι δυνατότητες που προσφέρει για μειωμένο κόστος κατασκευής. Οι κύριοι λόγοι που συμβάλλουν στη μείωση του κόστους κατασκευής είναι:

- Η μείωση του κόστους εργασίας, λόγω της μείωσης του απαιτούμενου εργατικού δυναμικού. Οι μόνον εργαζόμενοι, που είναι απαραίτητο να είναι παρόντες κατά τη διάρκεια της εκτύπωσης είναι αυτοί που επιβλέπουν τη διαδικασία της εκτύπωσης και την εγκατάσταση των ηλεκτρομηχανολογικών δικτύων και, σε γενικές γραμμές, ένα συνεργείο 2-3 εργαζομένων είναι επαρκές.
- Η απουσία ξυλοτύπων. Σε μια κατασκευή από σκυρόδεμα το κόστος των ξυλοτύπων μόνο κυμαίνεται μεταξύ 35-60% του συνολικού κόστους κατασκευής (Sanjayan & Nematollahi, 2019).
- Η βέλτιστη κατανάλωση των οικοδομικών υλικών και η ελαχιστοποίηση των αποβλήτων.

Οι Pandit και Kumari (Pandit & Kumari, 2021) συνέκριναν το κόστος κατασκευής μιας ισόγειας κατοικίας εμβαδού περίπου 56m² με παραδοσιακές μεθόδους και με μέθοδο τρισδιάστατης εκτύπωσης. Στα πλαίσια της σύγκρισης αυτής χρησιμοποίησαν δεδομένα από ένα πραγματικό κτίριο κατασκευασμένο μέσω τρισδιάστατης εκτύπωσης και εκτίμησαν το αντίστοιχο κόστος κατασκευής με χρήση παραδοσιακών μεθόδων. Η εν λόγω κατασκευή

αποτελεί τη πρώτη κατοικία μέσω 3D Printing στην Ινδία, η οποία ολοκληρώθηκε το 2020 από την εταιρεία Tvasta.



Εικόνα 33: Η πρώτη κατασκευή μέσω 3D Printing στην Ινδία, από την εταιρείας Tvasta. Αριστερά: το τρισδιάστατο μοντέλο, Δεξιά: η κατασκευή ολοκληρωμένη

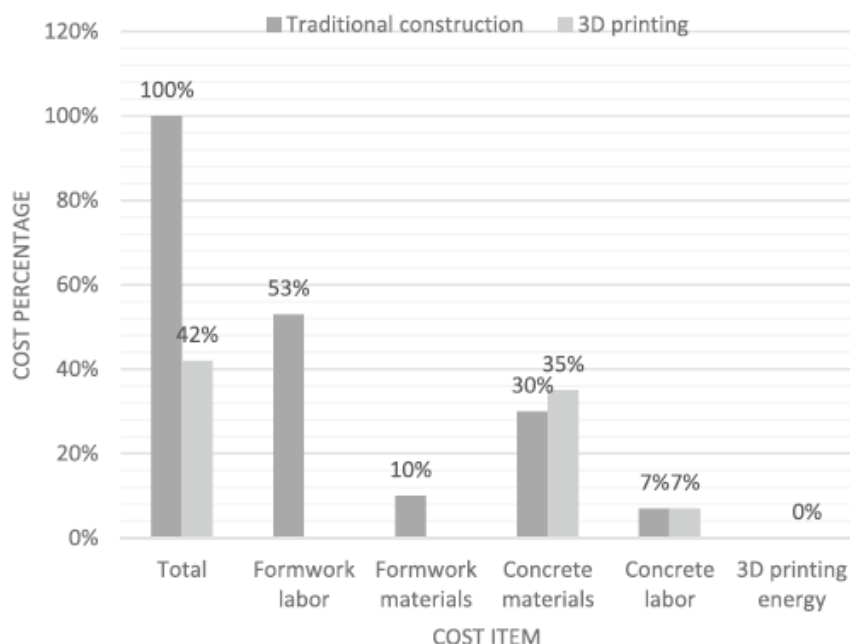
Σύμφωνα με την κατασκευαστική εταιρεία, το πραγματικό κόστος κατασκευής ανήλθε σε περίπου 6.700€ (550.000 ρούπια). Η εκτίμηση του κόστους με τον παραδοσιακό τρόπο παρουσιάζεται στον πίνακα που ακολουθεί:

a/a	Εργασία	Ποσότητα	Τιμή μονάδος (ρούπια)	Κόστος (ρούπια)
1	Τσιμέντο	260,00	300,00	78.000,00
2	Χάλυβας	1.500 kg	45Rs/kg	67.500,00
3	Άμμος	1250 cub.ft	50Rs/cub.ft	62.500,00
4	Αδρανή	750 cub.ft	22Rs/cub.ft	16.500,00
5	Εργασία	600sqft	250Rs/sqft	150.000,00
6	Ενυδάτωση σκυροδέματος και κονιαμάτων	6 months	250Rs/day	33.750,00
7	Τούβλα	15.000,00	9,00	135.000,00
8	Υαλωμένα πλακίδια	420,00	37,00	15.540,00
9	Γρανίτης	190,00	160,00	30.400,00
10	Επένδυση με πέτρα	270,00	22,00	5.940,00
11	Σίτα παραθύρων	4,00	1.950,00	7.800,00
12	Πόρτα	6,00	3.650,00	21.900,00
13	Συρόμενο παράθυρο	4,00	3.500,00	14.000,00
14	Ντεπόζιτο νερού	1000lt	8Rs/lt	8.000,00
15	Σπατουλάρισμα και χρωματισμός	2.850,00	19,00	54.150,00
16	Ηλεκτρολογικές εγκαταστάσεις	1,00	45.000,00	45.000,00
17	Υδραυλικές εγκαταστάσεις	1,00	17.000,00	17.000,00
18	Κεραμικά πλακίδια	250,00	22,00	5.500,00
19	Εκσκαφή	1950 cub.ft	7Rs/cub.ft	13.650,00
20	Κάσες θυρών	6,00	1.950,00	11.700,00
21	Διάφορα αντικείμενα	1,00	17.500,00	17.500,00
	ΣΥΝΟΛΟ			811.330,00

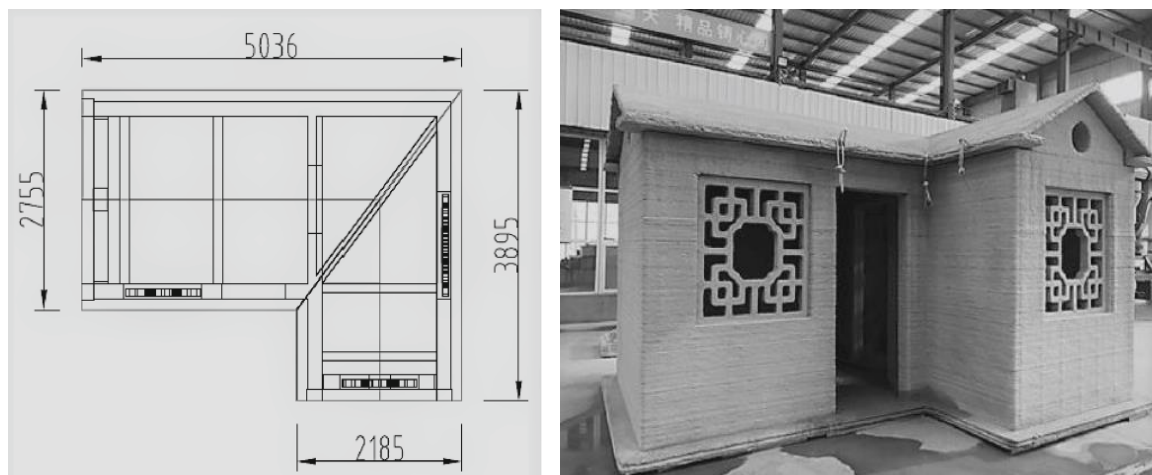
Πίνακας 2: Εκτίμηση κόστους κατασκευής με χρήση παραδοσιακών μεθόδων

Το συνολικό εκτιμώμενο κόστος της κατασκευής με παραδοσιακό τρόπο υπολογίζεται σε 811.330 ρούπια (περίπου 9.900€). Επομένως παρουσιάζεται μείωση στο κόστος κατά 261.330 ρούπια (περίπου 3.200€) ή αλλιώς ποσοστιαία μείωση κατά 32%.

Οι Pan et al. συνέκριναν το κόστος κατασκευής ενός μικρού κτιρίου, που δημιουργήθηκε με τεχνολογία 3D Printing, με το κόστος κατασκευής ενός νέου κτιρίου από σκυρόδεμα με παραδοσιακές μεθόδους. Το έργο υλοποιήθηκε από την εταιρεία Zhengzhou Dingsheng Co. Ltd στην Κίνα και πρόκειται για μια μικρή ισόγεια κατοικία, εμβαδού περίπου 16m². Η μελέτη κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η κατασκευή με τεχνολογία 3D Printing έχει ως αποτέλεσμα μειωμένο κόστος κατασκευής κατά 58%. Η κατανομή του κόστους κατασκευής με τους δύο διαφορετικούς τρόπους κατασκευής παρουσιάζεται στο παρακάτω γράφημα (Pan, Zhang, Zhang, & Song, 2021):



Γράφημα 1: Η κατανομή του κόστους για κατασκευή με παραδοσιακές μεθόδους και κατασκευή με μεθόδους 3D Printing



Εικόνα 34: Αριστερά: η κάτοψη του ισόγειου κτιρίου, Δεξιά: η κατασκευή ολοκληρωμένη από την εταιρεία Zhengzhou Dingsheng Co. Ltd στην Κίνα

Οι Allouzi et al. ακολούθησαν την αντίστροφη διαδικασία και διερεύνησαν την επίδραση, που θα είχε στο κόστος κατασκευής η ανέγερση της Αίθουσας Πολλαπλών Χρήσεων Ras Alain στο Amman της Ιορδανίας, με χρήση μεθόδων 3D Printing. Πρόκειται για ισόγειο κτίριο συνολικής επιφάνειας 350m², με 477m² εξωτερική επιφάνεια τοίχων και συνολικό όγκο σκυροδέματος 438m³ (Allouzi, Al-Azhari, & Allouzi, 2020).



Εικόνα 35: Οι εξωτερικές όψεις της Αίθουσας Πολλαπλών Χρήσεων Ras Alain και η κάτοψη του κτιρίου με επεξήγηση των διάφορων χρήσεων

Το κτίριο ανεγέρθη με παραδοσιακές μεθόδους κατασκευής και κόστισε συνολικά 240.716 JD (314.656€). Από το παραπάνω ποσό, το κόστος για το οπλισμένο σκυρόδεμα πάνω από τη

στάθμη θεμελίωσης και τις εσωτερικές και εξωτερικές τοιχοποιίες ανήλθε σε 26.287JD (34.361€).

Προκειμένου να εκτιμηθεί το κόστος κατασκευής με εφαρμογή μεθόδων 3D Printing, αρχικά δημιουργήθηκε το τρισδιάστατο μοντέλο με χρήση του προγράμματος Revit. Για την κατασκευή θεωρήθηκε η χρήση αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος ενισχυμένου με ίνες. Οι εξωτερικές τοιχοποιίες θεωρήθηκε πως έχουν συνολικό πάχος 30cm και αποτελούνται από τρεις παράλληλες στρώσεις, πάχους 5cm και ανάμεσά τους γέμισμα με δύο στρώσεις ζιγκ-ζαγκ, πάχους 2,5cm. Οι εσωτερικοί τοίχοι είναι δύο ειδών: κάποιιοι έχουν συνολικό πάχος 15cm και αποτελούνται από δύο παράλληλες στρώσεις πάχους 2,5cm και ενδιάμεση στρώση ζιγκ-ζαγκ πάχους 2,5cm και άλλοι είναι συμπαγείς και έχουν συνολικό πάχος 10cm. Η πλάκα οροφής διαμορφώνεται με μεταλλικές δοκούς και λαμαρίνες, οι οποίες τοποθετούνται επί των τοίχων από ρομποτική διάταξη του 3D printer και ύστερα πραγματοποιείται διάστρωση σκυροδέματος.

Το συνολικό κόστος του κατασκευαστικού υλικού στην περίπτωση της κατασκευής με τεχνολογία 3D Printing εκτιμάται σε 8.872,5JD (11.597€), δηλαδή επέρχεται μείωση του κόστους του υλικού κατά περίπου 66%. Άρα λαμβάνοντας υπόψη μόνο το κόστος του υλικού, χωρίς να συνυπολογίζονται το εργατικό κόστος και το κόστος του εξοπλισμού, επιτυγχάνεται μείωση του συνολικού κόστους κατασκευής κατά $(26.287-8.872,5)/240.716 = 7,2\%$.

Τα παρακάτω δεδομένα κόστους προέρχονται από πραγματικές κατασκευές που έχουν υλοποιηθεί με μεθόδους 3D Printing:

- Το κόστος κατασκευής μιας βίλας συνολικής επιφάνειας 1.110m² στην πόλη Suzhou της Κίνας το 2015 από την εταιρεία Winsun ανήλθε σε \$161.000. Για την κατασκευή της βίλας τα περισσότερα δομικά στοιχεία εκτυπώθηκαν στις εγκαταστάσεις της εταιρείας και μεταφέρθηκαν στο εργοτάξιο για επί τόπου συναρμολόγηση.
- Το κόστος κατασκευής του πρώτο κτίριο γραφείων με τεχνολογία 3D Printing στο Dubai, επιφάνειας 250m² από την εταιρεία Winsun το 2016 ανήλθε περίπου σε \$140.000, χωρίς να συμπεριλαμβάνονται τα εσωτερικά και εξωτερικά τελειώματα (Starr, 2016).
- Το κόστος κατασκευής μιας ισόγειας κατοικίας εμβαδού περίπου 38m² στη Ρωσία από την εταιρεία Apis Cor το 2016 ανήλθε περίπου σε \$10.134.

Σύμφωνα με τα παραπάνω δεδομένα φαίνεται ότι μέσω της τεχνολογίας 3D Printing είναι εφικτή η κατασκευή πιο προσιτών οικονομικά κατοικιών, συμβάλλοντας με αυτό τον τρόπο

στη μείωση του άστεγου πληθυσμού. Ειδικά στα μεγάλα αστικά κέντρα, όπου συγκεντρώνεται το μεγαλύτερο ποσοστό του πληθυσμού παγκοσμίως και το κόστος της αγοράς ή της ενοικίασης κατοικίας είναι δυσανάλογα υψηλό σε σύγκριση με το εισόδημα των κατοίκων, οι κατασκευές με την τεχνολογία 3D Printing μπορούν να παρέχουν προσιτές οικονομικά εναλλακτικές σε μεγάλο αριθμό ανθρώπων. Ιδίως στην Κίνα και την Ινδία, χώρες με το μεγαλύτερο πληθυσμό στη Γη, ο οποίος είναι συγκεντρωμένος στις μεγάλες πόλεις, υπάρχει πρόσφορο έδαφος για υιοθέτηση των μεθόδων 3D Printing για κατασκευές μεγάλης κλίμακας (Hossain, Zhumabekova, Chandra Paul, & Kim, 2020).

5.1.2 Εργατικά ατυχήματα

Σύμφωνα με στοιχεία της ευρωπαϊκής στατιστικής υπηρεσίας Eurostat, το 2019 συνέβησαν 3,1 εκατομμύρια μη θανατηφόρα εργατικά ατυχήματα στην Ευρωπαϊκή Ένωση και 3.408 θανατηφόρα. Ο κατασκευαστικός τομέας κατέχει τα πρωτεία όσον αφορά τα θανατηφόρα ατυχήματα, καθώς είναι υπεύθυνος για πάνω από το 1/5 αυτών (22,2%) (Eurostat: Statistics explained, 2020). Η συχνότερη μορφή ατυχημάτων αφορά πτώσεις από μεγάλο ύψος, που αντιστοιχούν περίπου στο 1/3 των θανατηφόρων ατυχημάτων.

Η χρήση μεθόδων 3D Printing στην κατασκευή έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του απαιτούμενου εργατικού δυναμικού, καθώς αυτό μπορεί να περιοριστεί στους 2-3 εργαζόμενους επί τόπου στο έργο κατά τη διάρκεια της εκτύπωσης. Επιπλέον το προσωπικό εκτελεί εργασίες επίβλεψης και υποστήριξης του 3D printer και αποφεύγει επικίνδυνες εργασίες, όπως είναι αυτές σε μεγάλα ύψη. Επομένως είναι εύλογο να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι η κατασκευή μέσω μεθόδων 3D Printing μπορεί να συμβάλλει σημαντικά στη μείωση των εργατικών ατυχημάτων του κατασκευαστικού τομέα.

5.1.3 Χρόνος κατασκευής

Η κατασκευή με παραδοσιακές μεθόδους θεωρείται ότι παρουσιάζει χαμηλή παραγωγικότητα (Khoshnevis, 2004). Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα συχνά στα κατασκευαστικά έργα να παρατηρείται υπέρβαση του χρονοδιαγράμματος, το οποίο οδηγεί και σε υπέρβαση του προϋπολογισμού. Η εφαρμογή μεθόδων 3D Printing θα μπορούσε να βελτιώσει την παραγωγικότητα στις κατασκευές και να έχει θετική επίδραση στο χρόνο ολοκλήρωσης του έργου.

Οι Rouhana et al. διερεύνησαν το 2014 τη μείωση του χρόνου κατασκευής με την εφαρμογή της μεθόδου Contour Crafting έναντι των παραδοσιακών μεθόδων κατασκευής. Προκειμένου

να προχωρήσουν στη σύγκριση, προσομοίωσαν την κατασκευή ενός ισόγειου κτιρίου τετραγωνικής κάτοψης, εμβαδού 200m² με τους δύο διαφορετικούς τρόπους. Η σύγκριση αφορούσε μόνο τις εργασίες σκυροδέτησης και τοποθέτησης οπλισμών και όχι εργασίες όπως η κατασκευή της θεμελίωσης, ηλεκτρομηχανολογικές εγκαταστάσεις και εργασίες τελειωμάτων. Η κατασκευή αναλύθηκε στατικά με το πρόγραμμα ETABS και αποτελείται από τοίχια από οπλισμένο σκυρόδεμα, πάχους 20cm. Στην παραδοσιακή μέθοδο κατασκευής, η οροφή του κτιρίου αποτελείται από πλάκα σκυροδέματος, πάχους 30cm, ενώ στην κατασκευή με τη μέθοδο Contour Crafting η πλάκα είναι σύμμικτη, αποτελούμενη από μεταλλική λαμαρίνα και σκυρόδεμα πάχους 10cm. Επιπλέον, στην κατασκευή αυτή το μοντέλο περιλαμβάνει 24 μεταλλικές δοκούς στα πρέκια των ανοιγμάτων.

Ο χρονικός προγραμματισμός του έργου πραγματοποιήθηκε με το πρόγραμμα EZStrobe. Ύστερα από εκτέλεση 1000 προσομοιώσεων, για την κατασκευή με παραδοσιακές μεθόδους ο μέσος χρόνος κατασκευής υπολογίστηκε στις 90,52 ώρες. Ο αντίστοιχος χρόνος για την κατασκευή με τη μέθοδο Contour Crafting υπολογίστηκε στις 29,54 ώρες. Επιτυγχάνεται επομένως μείωση του χρόνου κατασκευής της τάξης του 67%. Αναλυτική εξέταση των επιμέρους δραστηριοτήτων του έργου δείχνει ότι οι σημαντικότερες δραστηριότητες, που οδηγούν στην αύξηση του χρόνου κατασκευής στις παραδοσιακές μεθόδους έναντι της Contour Crafting, είναι η κατασκευή και αφαίρεση των ξυλοτύπων του σκυροδέματος και η αναμονή για την πήξη του σκυροδέματος, για επαρκή χρόνο μέχρι να μπορούν να συνεχιστούν με ασφάλεια οι δραστηριότητες που έπονται (Rouhana, El Jazzar, Faek, & Hamzeh, 2014).

Η εμπειρία από ήδη κατασκευασμένα έργα με τεχνολογία 3D Printing έχει δείξει ότι όταν ξεκινάει η λειτουργία του 3D printer, η διαδικασία της εκτύπωσης είναι ομαλή και γρήγορη (Bos, et al., 2022). Κατά τη διάρκεια της κατασκευής ενός έργου, όμως, μπορεί να προκληθούν καθυστερήσεις για διάφορους λόγους, όπως (Diggs-McGee, Kreiger, Kreiger, & Case, 2019): καθυστερήσεις λόγω της κίνησης του 3D printer, αναμονή για την προετοιμασία και την παροχή του υλικού, παύσεις για την τοποθέτηση χαλύβδινων οπλισμών, καθυστερήσεις λόγω καιρικών συνθηκών, τοπικές παραμορφώσεις υλικού, ρυθμίσεις του ακροφυσίου και έμφραξη στις σωληνώσεις ή το ακροφύσιο. Οι Diggs-McGee et al. μελέτησαν το συνολικό χρόνο κατασκευής ενός κτιρίου περίπου 47,5m² με εξώθηση τσιμεντοειδούς υλικού, εκτελώντας ανάλυση χρονοσειρών. Η μελέτη αφορούσε το χρόνο κατασκευής των τοίχων του κτιρίου και όχι εργασίες όπως η κατασκευή της στέγης, η τοποθέτηση κουφωμάτων και τα τελειώματα. Η ανάλυσή τους περιλαμβάνει μια μελέτη της διακύμανσης των αναμενόμενων χρόνων εκτύπωσης των στρώσεων των τοίχων, καθώς και προβλέψεις για το τι αναμένεται σε μελλοντικές εκτυπώσεις παρόμοιων κατασκευών. Ως χρόνος κατασκευής ορίστηκε το

άθροισμα του καθαρού χρόνου εκτύπωσης και των διαφόρων καθυστερήσεων/παύσεων μέχρι την ολοκλήρωση του έργου. Το αποτέλεσμα της μελέτης ήταν ότι ο απαιτούμενος συνολικός χρόνος κατασκευής ήταν 9 ημέρες, συμπεριλαμβανομένων των ημερών του Σαββατοκύριακου και των ημερών με κακές καιρικές συνθήκες. Ο χρόνος κατά τον οποίο έλαβε χώρα η εκτύπωση ήταν 5 ημέρες, ο καθαρός χρόνος εκτύπωσης ήταν 14 ώρες και ο συνολικός χρόνος καθυστέρησης ήταν 17,4 ώρες.

Στο παραπάνω παράδειγμα παρατηρείται ότι ο συνολικός χρόνος των καθυστερήσεων υπερβαίνει τον καθαρό χρόνο εκτύπωσης, κάτι το οποίο οφείλεται στο ότι η τεχνολογία 3D Printing στις κατασκευές βρίσκεται ακόμα σε πολύ πρώιμο στάδιο. Η μείωση των καθυστερήσεων θα μπορούσε να επιτευχθεί με την κατάλληλη εκπαίδευση του προσωπικού, τη βελτίωση των ιδιοτήτων των υλικών και την εφαρμογή κατάλληλης κάλυψης από τις καιρικές συνθήκες και θα είχε ως αποτέλεσμα την ολοκλήρωση του έργου εντός 24 ωρών (Diggs-McGee, Kreiger, Kreiger, & Case, 2019).

5.1.4 Ακρίβεια κατασκευής – αποκλίσεις διαστάσεων

Στις κατασκευές με τεχνολογία 3D Printing η εναπόθεση του υλικού πραγματοποιείται αυτόματα από το ακροφύσιο του 3D printer, σύμφωνα με το τρισδιάστατο μοντέλο που έχει δημιουργήσει ο μελετητής και έχει εισαχθεί με την κατάλληλη μορφή στη διάταξη εκτύπωσης. Η αφαίρεση του ανθρώπινου παράγοντα εξαλείφει την πιθανότητα λάθους και εξασφαλίζει υψηλή ακρίβεια στην κατασκευή, με αποκλίσεις λίγων μόνο χιλιοστών. Παρά την ακρίβεια στην εναπόθεση, αποκλίσεις των διαστάσεων μπορούν να προκύψουν και λόγω των ιδιοτήτων του νωπού μίγματος του κατασκευαστικού υλικού. Οι αποκλίσεις αυτές μπορεί να αφορούν το πλάτος ή και το ύψος των επάλληλων στρώσεων του υλικού. Για παράδειγμα, η απόκλιση καθ' ύψος, που μετρήθηκε κατά την κατασκευή του κτιρίου γραφείων στο Dubai το 2019 από την εταιρεία Apis Cor ήταν της τάξης των 5mm ύστερα από εκτύπωση ύψους 3m. Αντίστοιχη απόκλιση λίγων χιλιοστών μετρήθηκε και κατά την κατασκευή της διώροφης κατοικίας στο Beckum της Γερμανίας από την εταιρεία Peri το 2021. Επίσης, κατά την κατασκευή ενός ισόγειου κτιρίου εμβαδού 37m² στο Holstebro της Δανίας το 2021, ύστερα από την εκτύπωση 58 στρώσεων υλικού το πραγματικό ύψος των τοίχων μετρήθηκε σε 2.280mm αντί 2.320mm του αρχικού σχεδιασμού (Bos, et al., 2022). Οι αποκλίσεις διαφέρουν από έργο σε έργο λόγω των διαφορετικών ιδιοτήτων του κατασκευαστικού υλικού και λόγω των διαφορών στη φόρτιση των στρώσεων από το ίδιο βάρος τους, φαίνεται όμως ότι βρίσκονται εντός του αποδεκτού από τους οικοδομικούς κανονισμούς εύρους.

5.1.5 Ευελιξία στον αρχιτεκτονικό σχεδιασμό

Ο τρόπος κατασκευής και η απουσία ξυλοτύπων στις κατασκευές με τεχνολογία 3D Printing επιτρέπει μεγάλη ελευθερία στον αρχιτεκτονικό σχεδιασμό, παρέχοντας τη δυνατότητα απόδοσης πολύπλοκων γεωμετριών, οι οποίες θα ήταν δύσκολο, κοστοβόρο ή και αδύνατον να κατασκευαστούν με παραδοσιακές μεθόδους (Ma, Wang, & Ju, 2017). Ένας τρισδιάστατος εκτυπωτής μπορεί με την ίδια ευκολία να εκτυπώσει τοίχους σε ορθογωνική ή καμπύλη κάτοψη, με κατάλληλες τροποποιήσεις στην ταχύτητα του ακροφυσίου και την ποσότητα εξώθησης υλικού στις περιοχές αλλαγής κατεύθυνσης, λόγω αδράνειας (Κο, 2022).

Παράδειγμα ενός έργου με πολύπλοκο αρχιτεκτονικό σχεδιασμό αποτελεί η διώροφη κατοικία Landscape House της ολλανδικής εταιρείας Universe Architecture. Η σχεδίαση του έργου πραγματοποιήθηκε το 2013 και το σχήμα του κτιρίου είναι εμπνευσμένο από μια λωρίδα Möbius, με μήκος 100m και πλάτος 8m. Σύμφωνα με τον αρχιτέκτονα της εταιρείας Janjaap Ruijssenaars, η βασική ιδέα του σχεδιασμού είναι η δημιουργία μιας συνεχούς κατασκευής, χωρίς αρχή και τέλος, η οποία ενσωματώνεται στην τοποθεσία και δεν την καταστρέφει. Για την κατασκευή του έργου επιλέχθηκε ως πλέον κατάλληλος τρόπος η τεχνολογία 3D Printing και συγκεκριμένα η μέθοδος D-Shape, αφενός γιατί οι καμπύλες επιφάνειες του κτιρίου θα ήταν αδύνατον να κατασκευαστούν με τοποθέτηση καλουπιών και προσθήκη σκυροδέματος και αφετέρου γιατί το έργο ήταν ήδη σχεδιασμένο στον ηλεκτρονικό υπολογιστή και μπορούσε εύκολα να εκτυπωθεί η πολύπλοκη μορφή του, με τις καμπύλες και τις στροφές του, ακριβώς όπως έχει σχεδιαστεί (Fairs, 2013). Επιπλέον ο τρόπος κατασκευής με τεχνολογία 3D Printing ήταν πιο κοντά στη βασική ιδέα του σχεδιασμού. Μέχρι σήμερα έχει κατασκευαστεί η μακέτα του κτιρίου σε κλίμακα 1:15 με χρήση της μεθόδου D-Shape, όμως η κατασκευή του κτιρίου δεν έχει ακόμα ξεκινήσει.



Εικόνα 36: Η διώροφη κατοικία Landscape House της ολλανδικής εταιρείας Universe Architecture

5.1.6 Περιβαλλοντικά οφέλη - βιωσιμότητα

Ο κατασκευαστικός τομέας θεωρείται μια από τις κύριες πηγές πρόκλησης αρνητικών περιβαλλοντικών επιπτώσεων παγκοσμίως, καθώς είναι υπεύθυνος για το 36% της παγκόσμιας κατανάλωσης ενέργειας, το 39% της παραγωγής εκπομπών CO₂ (Adaloudis & Roca, 2021), την κατανάλωση του 20-50% των φυσικών πόρων του πλανήτη και το 50% της συνολικής παραγωγής στερεών αποβλήτων (Vasilca, et al., 2021).

Αρχικά, οι παραδοσιακές κατασκευαστικές μέθοδοι περιλαμβάνουν τη χρήση οχημάτων και μηχανημάτων, τα οποία ως επί το πλείστον λειτουργούν με πετρέλαιο ή βενζίνη και απελευθερώνουν μεγάλες ποσότητες CO₂. Οι τρισδιάστατοι εκτυπωτές λειτουργούν με ηλεκτρικό ρεύμα, συνεπώς οι εκπομπές CO₂ μπορούν να μειωθούν σημαντικά, σε ποσοστό έως και 75% (Pan, Zhang, Zhang, & Song, 2021).

Οι Batikha et al. συνέκριναν την κατασκευή μιας διώροφης κατοικίας συνολικού εμβαδού 219,3m² στο Dubai με πέντε διαφορετικές μεθόδους: το οπλισμένο σκυρόδεμα με επιτόπου έγχυση, το χάλυβα ψυχρής έλασης, το χάλυβα θερμής έλασης, την προκατασκευή στοιχείων από σκυρόδεμα και τη μέθοδο 3D Printing. Για τις ανάγκες της σύγκρισης εκτιμήθηκαν οι ποσότητες των απαιτούμενων υλικών για κάθε εναλλακτική μέθοδο και πραγματοποιήθηκε ανάλυση ώστε, μεταξύ άλλων, να συγκριθούν οι εκπομπές CO₂ από την παραγωγή των υλικών, που χρησιμοποιούνται στην εκάστοτε περίπτωση. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης έδειξαν ότι η μέθοδος 3D Printing παράγει τις λιγότερες εκπομπές CO₂, οι οποίες εκτιμήθηκαν σε 218kg/m², ενώ αντίστοιχα η μέθοδος που παράγει τις περισσότερες εκπομπές CO₂ είναι η μέθοδος της προκατασκευής με 308kg/m². Η δημοφιλέστερη μέθοδος κατασκευής παγκοσμίως, η επιτόπου έγχυση οπλισμένου σκυροδέματος, εκτιμήθηκε ότι παράγει περίπου 25% περισσότερο CO₂ σε σύγκριση με τη μέθοδο 3D Printing (272kg/m² έναντι 218kg/m² αντίστοιχα) (Batikha, Jotangia, Baaj, & Mousleh, 2022).

Τα απόβλητα, που προκύπτουν από μια νέα κατασκευή ή προσθήκη με παραδοσιακές μεθόδους κατασκευής, προκύπτουν από τη σχέση (ENVITERRA I.K.E, 2020):

$$CW = (NC + EX) * VW * D \quad (1)$$

,όπου CW: Απόβλητα Κατασκευής σε tn, NC: Νέα επιφάνεια οικοδομής σε m², EX: Επιφάνεια προσθηκών σε υπάρχουσες κατασκευές σε m², VW: Όγκος παραγόμενων αποβλήτων ανά επιφάνεια κατασκευής σε m³ /m² και D: Πυκνότητα Αποβλήτων σε tn/m³.

Οι παράμετροι VW και D προσαρμοσμένοι στην Ελληνική πρακτική υπολογίζονται ως εξής (Fatta et al, 2003, Kourmouis F., 2013, LIFE03/TCY/CY/018):

$$VW = 0,06\text{m}^3/\text{m}^2 \text{ και } D = 1,6\text{tn}/\text{m}^3$$

Αντικαθιστώντας τις τιμές αυτές στην εξίσωση (1) προκύπτει:

$$CW = (NC + EX) * 0,06 * 1,6 \Leftrightarrow CW/(NC + EX) = 0,096 \text{ tn/m}^2$$

Επομένως για κάθε m^2 νέας κατασκευής ή προσθήκης προκύπτουν 0,096tn ή 96kg αποβλήτων. Κατά την κατασκευή με μεθόδους 3D Printing πραγματοποιείται εναπόθεση ακριβώς της απαιτούμενης ποσότητας υλικού, κάτι που σημαίνει ότι μπορεί να επιτευχθεί μεγάλη μείωση των παραγόμενων αποβλήτων, σε ποσοστό της τάξης του 86% (Pan, Zhang, Zhang, & Song, 2021). Για παράδειγμα, η κατασκευή του διάφορου κτιρίου γραφείων στο Dubai από την εταιρεία Apis Cor το 2019, του μεγαλύτερου κτιρίου κατασκευασμένου με τεχνολογία 3D Printing στον κόσμο μέχρι στιγμής, υπολογίζεται ότι παρήγαγε 60% μικρότερη ποσότητα αποβλήτων (Hossain, Zhumabekova, Chandra Paul, & Kim, 2020).

Επιπλέον, η διαδικασία παραγωγής του τσιμέντου μόνο εκτιμάται ότι έχει ως συνέπεια την παραγωγή του 5-7% των παγκοσμίων εκπομπών CO_2 (Adaloudis & Roca, 2021). Η μείωση της ποσότητας του κοινού τσιμέντου Portland στο υλικό εκτύπωσης μέσω της αντικατάστασής του με συμπληρωματικά τσιμεντοειδή υλικά ή γεωπολυμερή, όπως περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, μπορεί να συμβάλλει σημαντικά στη βελτίωση της βιωσιμότητας των τρισδιάστατα εκτυπωμένων κατασκευών. Το αποτύπωμα CO_2 του γεωπολυμερούς σκυροδέματος είναι περίπου 16% μικρότερο σε σύγκριση με το κοινό σκυρόδεμα με τσιμέντο Portland (Pettrillo, Cioffi, Ferone, Colangelo, & Borrelli, 2016). Ακόμα μεγαλύτερη βελτίωση στην περιβαλλοντική συμπεριφορά του υλικού μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση ανακυκλωμένων αδρανών.

5.2 Περιορισμοί μεθόδων 3D Printing

Ακολουθεί η παρουσίαση των σημαντικότερων περιορισμών, οι οποίοι, τουλάχιστον προς το παρόν, φαίνεται να εμποδίζουν την ευρύτερη χρησιμοποίηση των μεθόδων 3D Printing στον τομέα των κατασκευών.

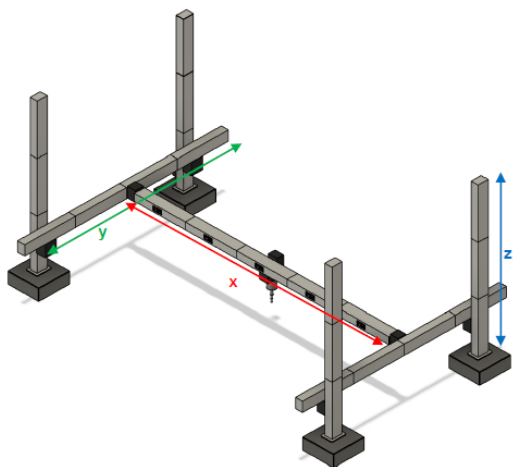
5.2.1 Κόστος εξοπλισμού

Στην παράγραφο 5.1.1 αναφέρθηκε ότι η χρήση μεθόδων 3D Printing μπορεί να οδηγήσει σε μειωμένο κόστος κατασκευής σε σύγκριση με παραδοσιακές μεθόδους κατασκευής. Όμως το κόστος για την απόκτηση του απαιτούμενου μηχανολογικού εξοπλισμού από μια κατασκευαστική εταιρεία, προκειμένου να προχωρήσει στην τρισδιάστατη εκτύπωση κατασκευών μεγάλης κλίμακας, είναι πολύ υψηλό.

Η εταιρεία COBOD με έδρα την Κοπεγχάγη στη Δανία έχει κατασκευάσει τον 3D Printer BOD2, ο οποίος έχει χρησιμοποιηθεί σε διάφορα έργα παγκοσμίως, όπως η διώροφη κατοικία στην πόλη Beckum της Γερμανίας το 2021 από την εταιρεία Peri. Ο BOD2 αποτελείται από ένα ρομποτικό σύστημα γερανογέφυρας, ορθογωνικής κάτοψης, σε διάφορες διαστάσεις ανάλογα με τις απαιτήσεις του έργου. Τα επί μέρους τμήματα του BOD2 είναι:

- Τα μεταλλικά δικτυωτά υποστυλώματα (4-6 στον αριθμό), τα οποία πακτώνονται στην πλάκα θεμελίωσης της κατασκευής ή πάνω σε μεμονωμένες βάσεις από σκυρόδεμα και επιτρέπουν την κίνηση κατά τον άξονα Z.
- Δύο παράλληλες μεταλλικές δικτυωτές δοκούς, οι οποίες στηρίζονται στα υποστυλώματα και επιτρέπουν την κίνηση κατά τον άξονα Y.
- Την γερανογέφυρα, η οποία στηρίζεται στις δοκούς και φέρει την κεφαλή εκτύπωσης με το ακροφύσιο. Η κεφαλή εκτύπωσης κινείται κατά μήκος της γερανογέφυρας, κατά τον άξονα X.

Η μέγιστη ταχύτητα εκτύπωσης του BOD2 είναι 1000mm/s, το ύψος των στρώσεων υλικού κυμαίνεται από 5-30mm και το πλάτος τους από 30-300mm. Ο χρόνος εγκατάστασής του εκτιμάται σε 4-6 ώρες, ο χρόνος αποσυναρμολόγησης σε 2-3 ώρες, ενώ για τη λειτουργία του απαιτείται προσωπικό 2 ατόμων (<https://cobod.com>).



Εικόνα 37: Ο 3D Printer BOD2 της εταιρείας COBOD

Το κόστος αγοράς του εκτυπωτή BOD2, ανάλογα με τις διαστάσεις του, παρουσιάζεται στον πίνακα που ακολουθεί. Οι τιμές δεν περιλαμβάνουν ΦΠΑ και έξοδα μεταφοράς (Peri Group, 2022):

α/α	Όνομασία Μοντέλου	Χαρακτηριστικά			Κόστος
		Διαστάσεις εκτύπωσης	Εμβαδόν εκτυπωμένου ορόφου	Διαστάσεις εγκατάστασης	
1	BOD 2-2-2	4,32 x 3,95 x 3,09 m	~17m ²	7,45 x 5,05 x 6,55 m	422.760,00€
2	BOD 4-3-3	9,37 x 6,47 x 5,62 m	~61m ²	12,50 x 7,58 x 9,08 m	519.480,00€
3	BOD 5-4-3	11,90 x 9,00 x 5,62 m	~107m ²	15,03 x 10,10 x 9,08 m	550.680,00€
4	BOD 5-7-4	11,90 x 16,58 x 8,14 m	~197m ²	15,03 x 17,68 x 11,60 m	850.200,00€

Πίνακας 3: Το κόστος αγοράς του εκτυπωτή BOD2, για τις διάφορες διαστάσεις του

Οι εκτυπωτές που αναφέρονται στον παραπάνω πίνακα χρησιμοποιούνται για κατασκευές με μεθόδους εναπόθεσης υλικού. Για μεθόδους επιλεκτικής ενεργοποίησης συνδεδετικού υλικού είναι διαθέσιμος στην αγορά ο 3D Printer της εταιρείας D-Shape, ο οποίος επίσης αποτελείται από ένα σύστημα γερανογέφυρας. Τα επιμέρους στοιχεία του είναι:

- 4 μεταλλικά υποστυλώματα ύψους 3m, στις κορυφές μιας τετράγωνης κάτοψης διαστάσεων 6,00x6,00m. Τα υποστυλώματα φέρουν ηλεκτροκινητήρες ώστε να είναι εφικτή η κίνηση ως προς τον κατακόρυφο άξονα.
- Μια μεταλλική δοκό στη μέση της κατασκευής, μήκους 6m, κάθετα στην οποία στηρίζεται η συστοιχία των 300 ακροφυσίων, που εναποθέτουν επιλεκτικά νερό στις περιοχές όπου είναι επιθυμητή η ενεργοποίηση του μίγματος. Τα ακροφύσια κινούνται κάθετα στη μεσαία δοκό και καλύπτουν με ένα πέρασμα ολόκληρη την επιφάνεια εκτύπωσης.

Οι διαστάσεις της κατασκευής που μπορεί να εκτυπωθεί με τον 3D Printer της D-Shape είναι 5,00x5,00x2,50m. Η θεωρητική ταχύτητα εκτύπωσης είναι 6min/στρώση, με πάχος στρώσης 10mm. Οι στρώσεις μπορούν να έχουν πάχος 5-10mm. Το απαιτούμενο προσωπικό για τη λειτουργία του εκτυπωτή είναι 1-2 άτομα και το κόστος του ανέρχεται σε 250.000€ (Jakuronic, 2016).

Το υψηλό κόστος απόκτησης του απαραίτητου εξοπλισμού ενδέχεται να ξεπερνά τη μείωση του κόστους κατασκευής, που μπορεί να προσφέρει η τεχνολογία 3D Printing, ειδικά στις αναπτυσσόμενες χώρες, όπου το κόστος εργασίας είναι ιδιαίτερα χαμηλό (Hossain, Zhumabekova, Chandra Paul, & Kim, 2020), καθιστώντας την επιλογή των μεθόδων 3D Printing ασύμφορη.

5.2.2 Διαστάσεις έργων

Ένας από τους βασικότερους περιορισμούς που θέτει η τεχνολογία 3D Printing στον κατασκευαστικό τομέα είναι οι διαστάσεις του προς εκτύπωση κτιρίου. Είναι φανερό ότι το μέγεθος του 3D Printer θα πρέπει να είναι μεγαλύτερο από το μέγεθος του κτιρίου, καθιστώντας έτσι τη μέθοδο μη εφαρμόσιμη σε περιπτώσεις κτιρίων μεγάλων διαστάσεων, κυρίως ως προς το ύψος.

Προκειμένου να ξεπεραστεί ο περιορισμός αυτός μια πιθανή λύση είναι να πραγματοποιηθεί προκατασκευή τμημάτων του κτιρίου με χρήση μεθόδων 3D Printing και ύστερα επί τόπου συναρμολόγηση στο εργοτάξιο. Αυτή την εναλλακτική εφάρμοσε η κινέζικη εταιρεία Winsun για την κατασκευή μιας βίλας εμβαδού 1.100m² και ενός πενταώροφου κτιρίου διαμερισμάτων στην πόλη Suzhou της Κίνας το 2015, καθώς και ενός κτιρίου γραφείων εμβαδού 250m² στο Dubai το 2016. Όμως η διαδικασία της συναρμολόγησης των επιμέρους τμημάτων της κατασκευής μπορεί να επιφέρει αύξηση στον απαιτούμενο χρόνο και το κόστος κατασκευής, εξουδετερώνοντας έτσι τα βασικά πλεονεκτήματα της τεχνολογίας 3D Printing (Ko, 2022).

Μια επιπλέον λύση είναι η χρησιμοποίηση 3D Printer με μορφή κινούμενου ρομποτικού βραχίονα, όπως ο εκτυπωτής «Frank» της εταιρείας Apis Cor (εικ. 52). Η επιλογή ενός τέτοιου εκτυπωτή αντιμετωπίζει τον περιορισμό του μεγέθους εκτύπωσης, όμως έχει ως αποτέλεσμα την πρόκληση καθυστερήσεων, λόγω των αλλαγών θέσης και της απαιτούμενης επαναρύθμισης του εκτυπωτή (Peri 3D Construction).

5.2.3 Εύρος εκτελούμενων εργασιών

Από τη φύση τους πολλές κατασκευαστικές εργασίες είναι ακατάλληλες για υλοποίηση με αυτοματοποιημένο τρόπο. Επομένως το πεδίο εφαρμογής των μεθόδων 3D Printing, τουλάχιστον στο στάδιο που βρίσκεται η έρευνα μέχρι στιγμής, είναι περιορισμένο. Ουσιαστικά οι εργασίες, που μπορούν να υλοποιηθούν με τεχνολογία 3D Printing σε ένα οικοδομικό έργο είναι η κατασκευή της εξωτερικής και της εσωτερικής τοιχοποιίας, οι οποίες μπορεί να είναι φέρουσες ή μη, ανάλογα με το χρησιμοποιούμενο υλικό και τους οικοδομικούς κανονισμούς της χώρας κατασκευής του έργου. Εργασίες όπως η κατασκευή της θεμελίωσης του κτιρίου, η κατασκευή των πλακών των ορόφων, η κατασκευή της στέγης, τα επιχρίσματα, οι ηλεκτρομηχανολογικές εγκαταστάσεις, τα τελειώματα των δαπέδων (τοποθέτηση πλακιδίων, μαρμάρων, ξύλινων πατωμάτων κλπ.) εξακολουθούν να εκτελούνται με παραδοσιακές μεθόδους. Ακόμα και στις εργασίες κατασκευής των τοιχοποιιών, όταν η

κατασκευή πραγματοποιείται με εναπόθεση υλικού, τα πρέκια των ανοιγμάτων είναι πιθανό να υλοποιηθούν με τοποθέτηση προκατασκευασμένων δοκών χειρωνακτικά.

Τα πλεονεκτήματα που προσφέρει η τεχνολογία 3D Printing σε ένα κατασκευαστικό έργο αφορούν μόνο τις εργασίες που εκτελούνται με χρήση της συγκεκριμένης τεχνολογίας. Επομένως όσο μικρότερο είναι το ποσοστό των εργασιών που υλοποιούνται με την τεχνολογία 3D Printing, τόσο μικρότερο είναι και το ποσοστό εκμετάλλευσης των δυνατοτήτων που μπορεί να παρέχει.

5.2.4 Ενσωμάτωση οπλισμού

Το εκτυπωμένο σκυρόδεμα, όπως και το κοινό σκυρόδεμα, διαθέτει χαμηλή εφελκυστική αντοχή και όταν υπόκειται σε εφελκυσμό παρουσιάζει ψαθυρή συμπεριφορά. Η προσθήκη ινών βελτιώνει την πλαστιμότητα του υλικού και αυξάνει την εφελκυστική αντοχή, όμως προκειμένου να κατασκευαστούν φέροντα δομικά στοιχεία, τα οποία μπορούν να υπόκεινται σε σημαντικές εφελκυστικές τάσεις, η ενσωμάτωση χαλύβδινων οπλισμών αποτελεί μονόδρομο. Το πρόβλημα αυτό είναι σημαντικότερο σε περιοχές όπου οι σεισμικές δράσεις αποτελούν κρίσιμο παράγοντα του σχεδιασμού της στατικής συμπεριφοράς του κτιρίου.

Στην παράγραφο 4.3 αναφέρθηκαν διάφοροι τρόποι ενσωμάτωσης χαλύβδινων οπλισμών στο τρισδιάστατα εκτυπωμένο σκυρόδεμα (3DPC), οι οποίοι όμως εφαρμόζονται με χειρωνακτικό τρόπο. Παρότι έχουν πραγματοποιηθεί έρευνες με σκοπό την εφαρμογή αυτοματοποιημένων διαδικασιών τοποθέτησης χαλύβδινων οπλισμών (όπως για παράδειγμα με τη μέθοδο Contour Crafting – ενότητα 3.3), μέχρι στιγμής παραμένουν σε θεωρητικό επίπεδο και καμία δεν έχει χρησιμοποιηθεί με επιτυχία σε πραγματικά έργα.

5.2.5 Έλλειψη κανονισμών και προτύπων

Η υλοποίηση κατασκευαστικών έργων με χρήση της τεχνολογίας 3D Printing αποτελεί ένα πολύ πρόσφατο γεγονός. Συνεπώς για τις κατασκευές αυτές δεν έχουν ακόμα αναπτυχθεί κανονισμοί και πρότυπα, τα οποία θα μπορούσαν να καθοδηγούν τους μελετητές και τους κατασκευαστές, καθώς και τους αρμόδιους ελεγκτικούς μηχανισμούς, ως προς τον ασφαλή και ορθό τρόπο δόμησης. Η σημαντικότερη ίσως αιτία στην οποία οφείλεται αυτό είναι ότι οι πρώτες κατοικίες, που κατασκευάστηκαν με μεθόδους 3D Printing, είναι πολύ πρόσφατες, με αποτέλεσμα να μην υπάρχουν ακόμα διαθέσιμες πληροφορίες σχετικά με τη μακροχρόνια συμπεριφορά τους (Holt, Edwards, Keyte, Moghaddam, & Townsend, 2019).

Προκειμένου η τεχνολογία 3D Printing να υιοθετηθεί ευρέως στον τομέα των κατασκευών θα πρέπει να αναπτυχθούν κατάλληλοι κανονισμοί και πρότυπα, τα οποία θα διασφαλίζουν αφενός τη στατική επάρκεια των κατασκευών και την ικανότητά τους να φέρουν με ασφάλεια τους απαιτούμενους συνδυασμούς φορτίσεων (ίδιο βάρος, σεισμός, άνεμος, χιόνι κλπ.) και αφετέρου την ικανοποίηση κριτηρίων ανθεκτικότητας σε φαινόμενα όπως η ενανθράκωση, η διάβρωση και οι κύκλοι ψύξης-απόψυξης (Ma, Wang, & Ju, 2017).

Η εμπειρία από πρόσφατες ολοκληρωμένες κατασκευές δείχνει ότι, ελλείπει του παραπάνω κανονιστικού πλαισίου, προκειμένου να ληφθούν οι απαραίτητες οικοδομικές άδειες από τις αρμόδιες υπηρεσίες, οι μελετητές κατέφυγαν σε έναν συνδυασμό παραδοσιακών φερόντων στοιχείων από οπλισμένο σκυρόδεμα και τρισδιάστατα εκτυπωμένων στοιχείων. Με τον τρόπο αυτό οι αδειοδοτήσεις δόθηκαν με χρήση των ισχυόντων οικοδομικών κανονισμών (Bos, et al., 2022). Για παράδειγμα, στο διώροφο κτίριο γραφείων στο Dubai (Apis Cor – 2019), η τεχνολογία 3D Printing χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή της μη φέρουσας εξωτερικής και εσωτερικής τοιχοποιίας και του περιγράμματος υποστυλωμάτων και δοκών, στα οποία ακολούθησε χειρωνακτικά η τοποθέτηση οπλισμών και η σκυροδέτηση. Το τρισδιάστατα εκτυπωμένο περίγραμμα χρησιμοποιήθηκε δηλαδή ως ενσωματωμένος ξυλότυπος για παραδοσιακά φέροντα στοιχεία οπλισμένου σκυροδέματος. Οι πλάκες των ορόφων του κτιρίου ήταν προκατασκευασμένες από οπλισμένο σκυρόδεμα. Επομένως, αφού ο φέρων οργανισμός του κτιρίου αποτελείται από οπλισμένο σκυρόδεμα, ο σχεδιασμός και η αδειοδότηση πραγματοποιήθηκαν σύμφωνα με τους ισχύοντες εγχώριους οικοδομικούς κανονισμούς.

Η διώροφη κατοικία στο Beckum της Γερμανίας (Peri – 2021) αποτελεί παράδειγμα κατασκευής, στην οποία μέλη από τρισδιάστατα εκτυπωμένο σκυρόδεμα (3DPC) συμμετέχουν στο φέροντα οργανισμό του κτιρίου. Για την κατασκευή χρησιμοποιήθηκαν δύο ειδών φέροντες τοίχοι: ένα τοίχος με περίγραμμα από 3DPC και πλήρωση με μονωτικό υλικό και ένας τοίχος με τρεις στρώσεις 3DPC, στον οποίο το ένα κενό πληρώθηκε με μονωτικό υλικό και το δεύτερο με άοπλο έγχυτο σκυρόδεμα. Στους πρώτους θεωρήθηκε φέρον το περίγραμμα του τοίχου και στους δεύτερους μόνο το άοπλο σκυρόδεμα, με το 3DPC να αποτελεί ενσωματωμένο ξυλότυπο. Για τη διαδικασία αδειοδότησης του κτιρίου ελέγχθηκε η αντοχή του περιγράμματος από 3DPC στην πίεση που ασκήθηκε από το νωπό σκυρόδεμα, με χρήση μεθόδων πεπερασμένων στοιχείων. Επιπλέον, διενεργήθηκαν εργαστηριακές δοκιμές στο χρησιμοποιούμενο υλικό και σε δομικά μέλη μεγάλης κλίμακας για τον προσδιορισμό χαρακτηριστικών όπως η θλιπτική αντοχή, η εφελκυστική αντοχή, το μέτρο ελαστικότητας, η προσκόλληση των στρώσεων του υλικού, η ανθεκτικότητα σε ψύξη-απόψυξη και η εξόλκευση

αγκυρίων. Τμήματα τοίχων υποβλήθηκαν σε εργαστηριακές δοκιμές κάμψης και κρούσης. Η τελική άδεια, που δόθηκε από τις αρμόδιες υπηρεσίες, βασίστηκε σε υφιστάμενους κανονισμούς κατασκευών από σκυρόδεμα και φέρουσα τοιχοποιία και απαιτούσε επίσης παρακολούθηση των κατασκευαστικών λεπτομερειών κατά τη φάση της κατασκευής, καθώς και μακροχρόνια παρακολούθηση της κατασκευής (Bos, et al., 2022).

5.2.6 Επίδραση στην αγορά εργασίας

Η ευρύτερη εφαρμογή των μεθόδων 3D Printing στον τομέα των κατασκευών αναμένεται να έχει και κοινωνικό αντίκτυπο, μιας και αναπόφευκτα θα επηρεάσει και την αγορά εργασίας. Υπολογίζεται ότι ο κατασκευαστικός τομέας προσφέρει περίπου το 7-8,5% των συνολικών θέσεων εργασίας παγκοσμίως (Hossain, Zhumabekova, Chandra Paul, & Kim, 2020). Η εργασία παίζει σημαντικό ρόλο στις κατασκευές, σε βαθμό που οι βασικότερες αιτίες καθυστέρησης ενός έργου είναι η έλλειψη εργατικού δυναμικού ή η χαμηλή παραγωγικότητά του.

Η ευρύτερη υιοθέτηση των μεθόδων 3D Printing θα οδηγήσει σε απώλεια πολλών θέσεων εργασίας, ειδικά όσον αφορά τους ανειδίκευτους εργαζομένους, καθώς οι εργασίες που βρίσκονται στο πεδίο εφαρμογής των μεθόδων αυτών θα εκτελούνται αυτόματα από τις ρομποτικές διατάξεις εκτύπωσης. Το γεγονός αυτό θα ευνοούσε μεν τις κατασκευαστικές εταιρείες, που δραστηριοποιούνται σε χώρες, όπου ειδικά τα τελευταία χρόνια παρατηρούνται ελλείψεις στη διαθεσιμότητα εργατικού δυναμικού, αλλά θα δημιουργούσε προβλήματα σε χώρες, όπου υπάρχει αφθονία σε διαθέσιμα εργατικά χέρια και οι κατασκευές αποτελούν έναν από τους βασικότερους πυλώνες απασχόλησης.

Παράλληλα, η εφαρμογή της τεχνολογίας 3D Printing θα δημιουργήσει την ανάγκη απασχόλησης πιο εξελιγμένου και εξειδικευμένου προσωπικού, ύστερα φυσικά από κατάλληλη εκπαίδευση. Θα δημιουργηθούν επομένως νέες θέσεις εργασίας με διαφοροποιημένα καθήκοντα, όπως για παράδειγμα το χειρισμό του 3D Printer, την επίβλεψη του, τον έλεγχο ποιότητας του υλικού εκτύπωσης, έρευνα και ανάπτυξη υλικών και τρόπων κατασκευής και νομική υποστήριξη (μιας και όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο δεν έχουν ακόμα αναπτυχθεί κανονισμοί και πρότυπα για κατασκευές μέσω της τεχνολογίας 3D Printing).

Κεφάλαιο 6: Μελέτες περιπτώσεων

6.1 Κατασκευή διώροφης κατοικίας στη Γερμανία

Το Σεπτέμβριο του 2020 ξεκίνησε η κατασκευή του πρώτου κτιρίου με εφαρμογή της τεχνολογίας 3D Printing στη Γερμανία. Πρόκειται για μια διώροφη κατοικία με εμβαδόν 80m² ανά όροφο, η οποία βρίσκεται στην πόλη Beckum της Περιφέρειας Βόρειας Ρηνανίας-Βεστφαλίας στη δυτική Γερμανία (εικ. 38). Η μελέτη του έργου πραγματοποιήθηκε από το αρχιτεκτονικό γραφείο Mense-Korte GbR, ingenieure+architekten και η κατασκευή από την εταιρεία PERI GmbH. Για την αδειοδότηση του κτιρίου υπήρξε επιπλέον υποστήριξη από το τεχνικό γραφείο Ingenieurbüro Schiebl Gehlen Sodeikat GmbH με έδρα το Μόναχο, ενώ ο σχεδιασμός και η εκτέλεση των απαραίτητων δοκιμών για την αδειοδότηση πραγματοποιήθηκε από το Κέντρο Οικοδομικών Υλικών του Τεχνικού Πανεπιστημίου του Μονάχου (Centrum Baustoffe München, Technische Universität München) (Mense-Korte ingenieure + architekten).

Στο ισόγειο του κτιρίου διατάσσονται οι χώροι διημέρευσης (σαλόνι, τραπεζαρία), η κουζίνα, καθώς και βοηθητικοί χώροι (WC, δωμάτιο Η/Μ εξοπλισμού) (εικ. 39). Στον Α' όροφο βρίσκονται 4 δωμάτια, δύο WC και ένας χώρος γραφείου (εικ. 40). Η επικοινωνία των δύο επιπέδων πραγματοποιείται μέσω εσωτερικής σκάλας.



Εικόνα 38: Η διώροφη κατοικία ολοκληρωμένη



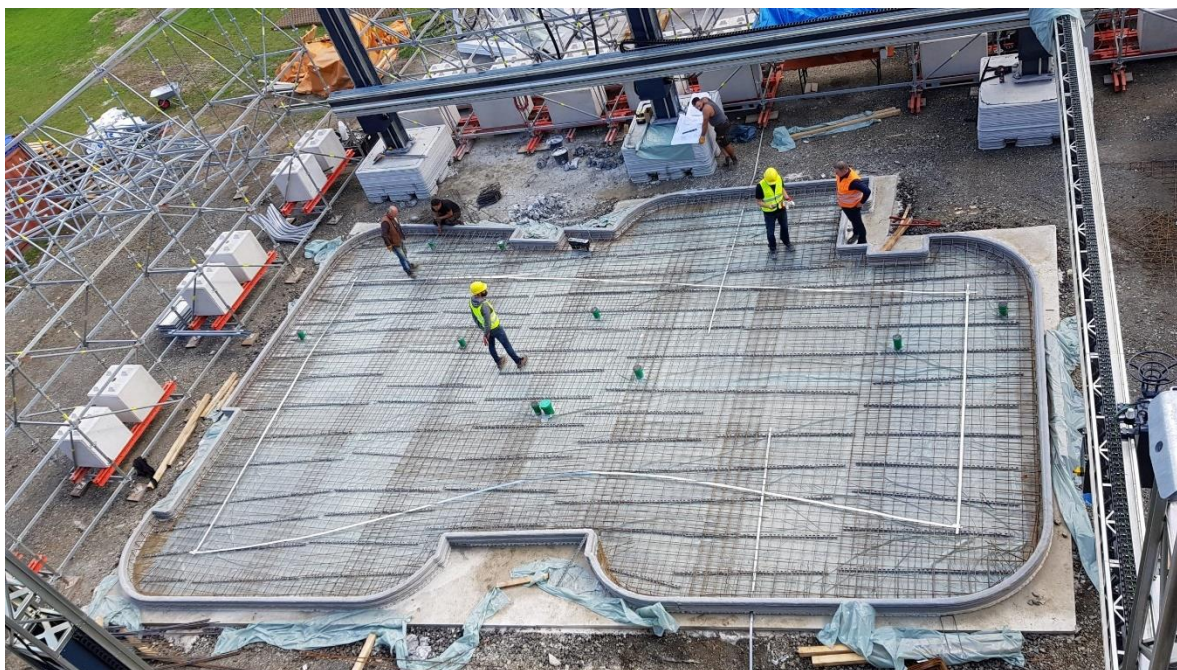
Εικόνα 39: Η κάτοψη του ισόγειου της κατοικίας (πηγή: 360ο tour από τον ιστότοπο <https://www.peri3dconstruction.com/en/360-touren>)



Εικόνα 40: Η κάτοψη του Α' ορόφου της κατοικίας (πηγή: 360ο tour από τον ιστότοπο <https://www.peri3dconstruction.com/en/360-touren>)

Για την κατασκευή του κτιρίου χρησιμοποιήθηκε ο εκτυπωτής BOD2 της εταιρείας COBOD, με δυνατότητα εκτύπωσης 14,6m σε πλάτος και 8,1m σε ύψος. Ο συγκεκριμένος εκτυπωτής αποτελείται από 6 μεταλλικά υποστυλώματα, τα οποία πακτώθηκαν σε βάσεις από σκυρόδεμα περιμετρικά του κτιρίου πριν την έναρξη της κατασκευής (εικ. 37). Σύμφωνα με την κατασκευάστρια εταιρεία, ο BOD2 έχει τη δυνατότητα εκτύπωσης 1m² τοίχου με ενδιάμεσο διάκενο σε 5 λεπτά.

Στην περιοχή που χωροθετείται το κτίριο διαστρώθηκε σκυρόδεμα καθαριότητας και ακολούθησε η κατασκευή της πλάκας θεμελίωσης με συμβατικό τρόπο (τοποθέτηση χαλύβδινων οπλισμών και σκυροδέτηση). Για την κατασκευή της πλάκας θεμελίωσης εκτυπώθηκε το περίγραμμα του κτιρίου και το υλικό αυτό χρησιμοποιήθηκε ως περιμετρικός ξυλότυπος (εικ. 41). Στη συνέχεια ξεκίνησε η διαδικασία εκτύπωσης της εξωτερικής και εσωτερικής τοιχοποιίας από τον 3D Printer.

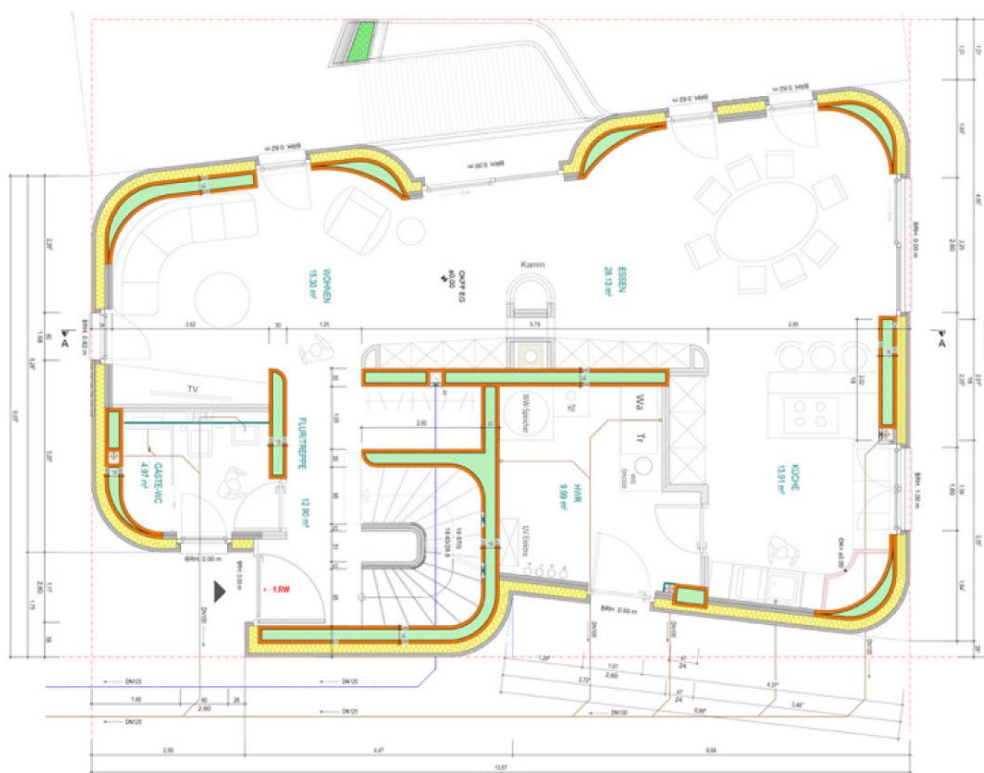


Εικόνα 41: Η κατασκευή της πλάκας θεμελίωσης του κτιρίου

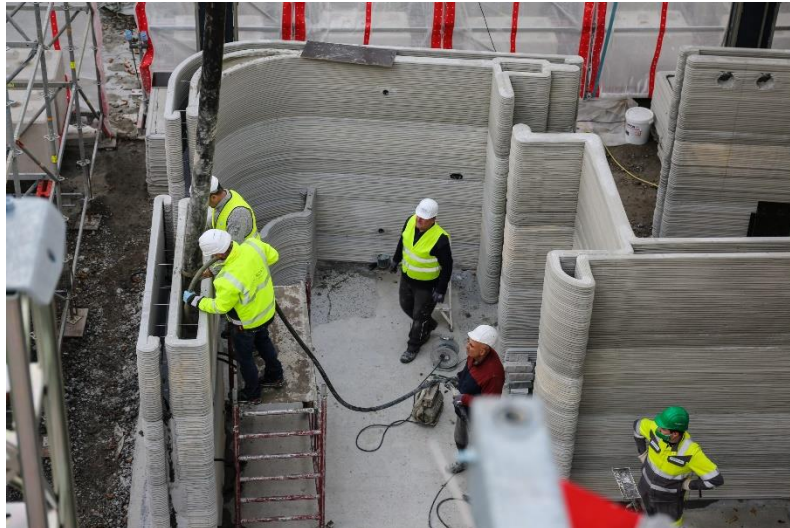
Για την εκτύπωση της τοιχοποιίας χρησιμοποιήθηκε το έτοιμο τσιμεντοειδές κονίαμα i.tech 3D της εταιρείας Heidelberg Cement. Υπήρξε αυστηρός έλεγχος ποιότητας του υλικού με την διενέργεια ελέγχων τόσο κατά τη νωπή κατάσταση του (έλεγχος κάθισης, έλεγχος χρόνου σκλήρυνσης) όσο και κατά τη σκληρυμένη κατάσταση, με λήψη δοκιμίων (προσδιορισμός θλιπτικής και εφελκυστικής αντοχής). Η κατασκευή υλοποιήθηκε με τη μέθοδο Contour Crafting και η διατομή των εκτυπωμένων στρώσεων υλικού ήταν 60x20mm². Στο εσωτερικό

κενό των τοίχων δεν κατασκευάστηκε τρίτη στρώση εκτυπωμένου υλικού σε σχήμα ζιγκ-ζαγκ, όπως πραγματοποιείται συνήθως για την αύξηση της αντοχής και της σταθερότητας της κατασκευής, αλλά πραγματοποιήθηκε πλήρωση είτε από θερμομονωτικό υλικό είτε από επιτόπου έγχυτο σκυρόδεμα για στατικούς λόγους (Bos, et al., 2022).

Στο συγκεκριμένο έργο επιλέχθηκε οι τοίχοι από 3DPC να είναι φέροντες. Όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο οι φέροντες τοίχοι της κατασκευής είναι δύο ειδών: ένα τοίχος με περίγραμμα από δύο στρώσεις 3DPC και πλήρωση με θερμομονωτικό υλικό και ένας τοίχος με τρεις στρώσεις 3DPC, στον οποίο το ένα κενό πληρώθηκε με θερμομονωτικό υλικό και το δεύτερο με άοπλο έγχυτο σκυρόδεμα (εικ. 42).

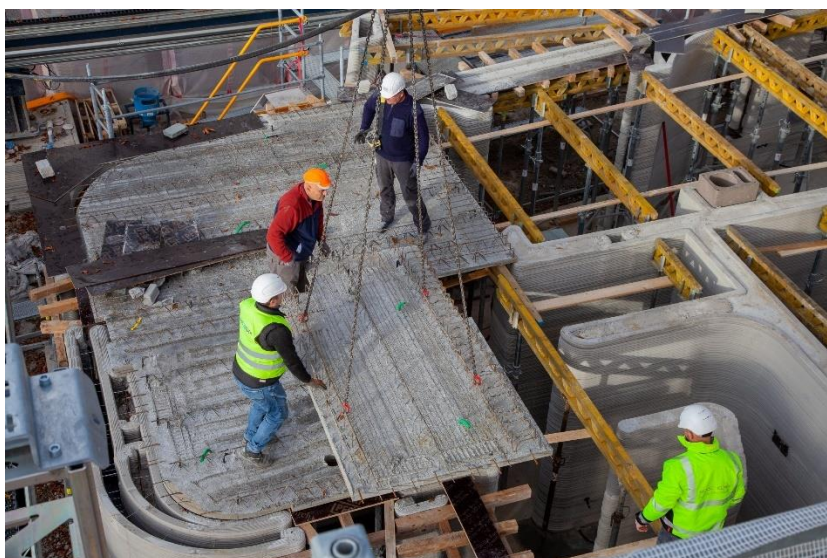


Εικόνα 42: Οι φέρουσες τοιχοποιίες της κατασκευής. Με κίτρινο χρώμα είναι οι τοίχοι οι οποίοι πληρώθηκαν με θερμομονωτικό υλικό, ενώ με πράσινο οι τοίχοι που πληρώθηκαν με άοπλο σκυρόδεμα (πηγή: Mense-Korte ingenieure + architekten)



Εικόνα 43: Φωτογραφία κατά τη διάρκεια της επί τόπου σκυροδέτησης τμήματος της τοιχοποιίας (πηγή: Mense-Korte ingenieure + architekten)

Μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής των τοίχων του ισογείου ακολούθησε η κατασκευή της πλάκας οροφής ισογείου με συμβατικό τρόπο, με τοποθέτηση προκατασκευασμένων πλακών, τοποθέτηση χαλύβδινων οπλισμών και επιτόπου σκυροδέτηση. Αντί για κατασκευή ξυλοτύπου, όπως και στην πλάκα θεμελίωσης, η εξωτερική παρειά της πλάκας διαμορφώθηκε με 3DPC. Στη συνέχεια η ίδια διαδικασία επαναλήφθηκε για την κατασκευή και του Α' ορόφου του κτιρίου.



Εικόνα 44: Κατασκευή της πλάκας οροφής ισογείου (πηγή: Mense-Korte ingenieure + architekten)

Τόσο για τους εσωτερικούς όσο και για τους εξωτερικούς τοίχους επιλέχθηκε από τους μελετητές η τελική επιφάνεια να μην διαμορφωθεί με επίχρισμα, αλλά να παραμείνουν

εμφανείς οι στρώσεις του 3DPC. Επιχρίσματα κατασκευάστηκαν μόνο στις οροφές των ορόφων. Επιπλέον, εκτός από τους τοίχους, με 3DPC κατασκευάστηκαν επίσης λειτουργικά στοιχεία της κατοικίας, όπως το τζάκι του ισόγειου, η μπανιέρα στο κυρίως WC του Α' ορόφου και η κατασκευή έδρασης του νιπτήρα στο WC φιλοξενούμενων. Τα τελικά δάπεδα διαμορφώθηκαν με ξύλινο πάτωμα, εκτός από τους χώρους υγιεινής στους οποίους πραγματοποιήθηκε επιστροφή πλακιδίων ή τσιμεντοκονίας.



Εικόνα 45: Ο χώρος της τραπεζαρίας στο ισόγειο (πηγή: 360ο tour από τον ιστότοπο <https://www.peri3dconstruction.com/en/360-touren>)



Εικόνα 46: Ο χώρος του σαλονιού με το τζάκι στο ισόγειο (πηγή: 360ο tour από τον ιστότοπο <https://www.peri3dconstruction.com/en/360-touren>)



Εικόνα 47: Χώρος δωματίου στον Α' όροφο (πηγή: 360ο tour από τον ιστότοπο <https://www.peri3dconstruction.com/en/360-touren>)



Εικόνα 48: Ο χώρος του κυρίως WC στον Α' όροφο (πηγή: 360ο tour από τον ιστότοπο <https://www.peri3dconstruction.com/en/360-touren>)

Για τον περιορισμό της συστολής ξηράνσεως κατά τη σκλήρυνση του υλικού πραγματοποιήθηκε ψεκασμός με νερό στις εκτυπωμένες επιφάνειες της τοιχοποιίας. Επιπλέον, πραγματοποιήθηκε τοπική επικάλυψη με προστατευτική μεμβράνη. Παρ' όλα αυτά μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής παρατηρήθηκε η ανάπτυξη ρηγματώσεων στην τοιχοποιία, η

οποία αποδόθηκε σε συστολή ξηράνσεως λόγω ισχυρών ανέμων. Σύμφωνα με την οικοδομική άδεια του κτιρίου, για τα 5 πρώτα έτη από την ολοκλήρωσή του είναι υποχρεωτική η διενέργεια ενός ετήσιου οπτικού ελέγχου της κατασκευής (Bos, et al., 2022).

Τα επίσημα εγκαίνια του κτιρίου πραγματοποιήθηκαν τον Ιούλιο του 2021, παρουσία της υπουργού εσωτερικών και δημοτικών υποθέσεων, κατασκευών και ισότητας της Περιφέρειας Βόρειας Ρηνανίας-Βεστφαλίας. Μάλιστα το έργο έλαβε επιδότηση ύψους 200.000€ από την Περιφέρεια Βόρειας Ρηνανίας-Βεστφαλίας, ως μέρος του προγράμματος χρηματοδότησης «Καινοτόμος Κατασκευή» (Peri 3D Construction). Επιπλέον, το έργο κέρδισε το βραβείο German Innovation Award 2021 ως η πρώτη κατοικία στη Γερμανία κατασκευασμένη από τρισδιάστατο εκτυπωτή (Mense-Korte ingenieure + architekten).

6.2 Κατασκευή διώροφου κτιρίου γραφείων στο Dubai

Τον Ιούνιο του 2019 ξεκίνησε η κατασκευή ενός διώροφου κτιρίου γραφείων στη περιοχή Al Warsan του Dubai. Ο γενικός εργολάβος του έργου ήταν η εταιρεία Engineering Contracting Company LLC (ECC) με έδρα τα Ηνωμένα Αραβικά Εμιράτα, ενώ το κομμάτι της τρισδιάστατης εκτύπωσης ανέλαβε η εταιρεία Apis Cor, με έδρα τη Florida στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής. Το εν λόγω κτίριο θεωρείται ως το μεγαλύτερο που έχει κατασκευαστεί με τεχνολογία 3D Printing στον κόσμο μέχρι στιγμής, αποτελείται από δύο ορόφους, έχει συνολική επιφάνεια 640m² και ύψος 9,50m.



Εικόνα 49: Το διώροφο κτίριο γραφείων στο Dubai ολοκληρωμένο

Η κατασκευή του κτιρίου με χρήση της τεχνολογίας 3D Printing εντάσσεται στη «Στρατηγική 3D Printing του Dubai», η οποία ξεκίνησε το 2016 και έχει ως στόχο το 25% των κτιρίων της χώρας να βασίζονται στην τεχνολογία 3D Printing μέχρι το 2030. Σημαντικό κίνητρο της κυβέρνησης για την υιοθέτηση αυτής της στρατηγικής είναι η μείωση του απαιτούμενου εργατικού δυναμικού, μιας και οι κατασκευές στο Dubai εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από μετανάστες εργαζόμενους, οι οποίοι αποτελούν περίπου το 90% του εργατικού δυναμικού της χώρας (Hossain, Zhumabekova, Chandra Paul, & Kim, 2020). Είχε προηγηθεί η κατασκευή ενός μικρότερου κτιρίου γραφείων, εμβαδού 250m², με χρήση τεχνολογίας 3D Printing το 2016 από την κινέζικη εταιρεία Winsun. Οι δύο κατασκευές διαφέρουν σημαντικά ως προς τον τρόπο κατασκευής, καθώς η κατασκευή της Apis Cor πραγματοποιήθηκε με επί τόπου εκτύπωση των δομικών στοιχείων του κτιρίου, ενώ η κατασκευή της Winsun πραγματοποιήθηκε με εκτύπωση των επιμέρους τμημάτων του κτιρίου στην Κίνα και επί τόπου συναρμολόγησή τους στον τόπο του έργου.

Η θεμελίωση του κτιρίου κατασκευάστηκε με συνδυασμό παραδοσιακών μεθόδων και 3D Printing, καθώς το περίγραμμα του κορμού των πεδילוδοκών εκτυπώθηκε επί τόπου και χρησιμοποιήθηκε ως ενσωματωμένος ξυλότυπος. Έπειτα τοποθετήθηκε με χειρωνακτικό τρόπο ο απαιτούμενος οπλισμός και πραγματοποιήθηκε σκυροδέτηση. Στη συνέχεια ακολούθησε η εκτύπωση της τοιχοποιίας του κτιρίου, η οποία αποτελείται από δύο παράλληλες στρώσης υλικού και ανάμεσά τους γέμισμα με μια τρίτη στρώση σε σχήμα ζιγκ-ζαγκ. Αντίθετα με την κατασκευή της εταιρείας Peri στο Beckum της Γερμανίας, οι εκτυπωμένες τοιχοποιίες του κτιρίου δεν είναι φέρουσες, αλλά ο φέρων οργανισμός του κτιρίου αποτελείται από στοιχεία οπλισμένου σκυροδέματος. Για την κατασκευή των υποστυλωμάτων και των δοκών έγινε επίσης χρήση της τεχνολογίας 3D Printing, καθώς εκτυπώθηκε το περίγραμμά τους ταυτόχρονα με την εκτύπωση της τοιχοποιίας, το οποίο και σε αυτή την περίπτωση χρησιμοποιήθηκε ως ενσωματωμένος ξυλότυπος. Έπειτα τοποθετήθηκε ο απαιτούμενος χαλύβδινος οπλισμός και πραγματοποιήθηκε πλήρωση με έγχυτο σκυρόδεμα. Οι πλάκες των οροφών είναι προκατασκευασμένες από οπλισμένο σκυρόδεμα. Καθώς ο φέρων οργανισμός του κτιρίου αποτελείται από οπλισμένο σκυρόδεμα, ο στατικός σχεδιασμός του πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τους ισχύοντες κανονισμούς της περιοχής και λήφθηκε κανονικά η απαιτούμενη οικοδομική άδεια από τις αρμόδιες υπηρεσίες (Bos, et al., 2022).



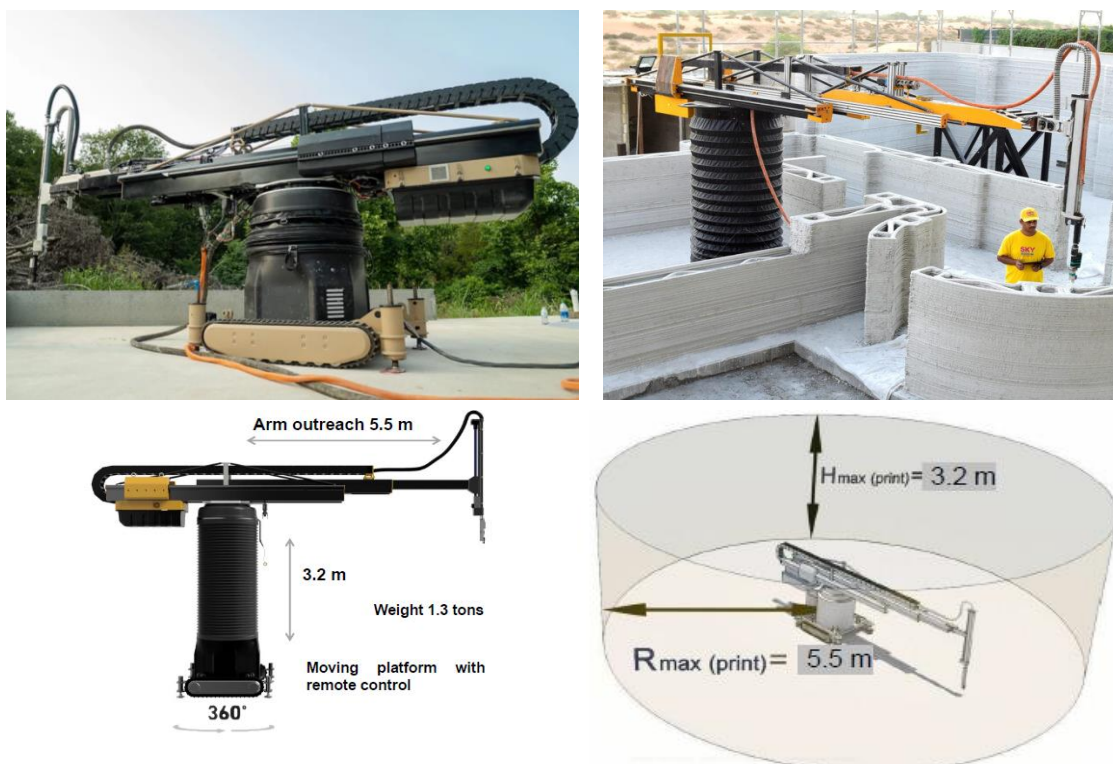
Εικόνα 50: Η κατασκευή των πεδιλοδοκόν της θεμελίωσης του κτιρίου με εκτύπωση του περιγράμματος με τεχνολογία 3D Printing και τοποθέτηση του απαιτούμενου οπλισμού



Εικόνα 51: Φωτογραφία κατά τη διάρκεια εκτύπωσης της τοιχοποιίας του κτιρίου. Εμφανή είναι επίσης τα εκτυπωμένα περιγράμματα των υποστυλωμάτων, στα οποία έχουν τοποθετηθεί οι απαιτούμενοι οπλισμοί και πρόκειται να ακολουθήσει πλήρωση με σκυρόδεμα

Για την κατασκευή του κτιρίου χρησιμοποιήθηκε ο 3D Printer της εταιρείας Apis Cor, ο οποίος αποκαλείται «Frank» (Apis Cor Website). Πρόκειται για έναν μικρό, κινούμενο εκτυπωτή, ο οποίος αποτελείται από ένα ρομποτικό βραχίονα, συνδεδεμένο με τον κυλινδρικό κορμό, γύρω

από τον οποίο περιστρέφεται. Σημαντικά πλεονεκτήματα αυτού του τύπου εκτυπωτή είναι ότι δεν θέτει περιορισμό στο μέγεθος της προς εκτύπωση κατασκευής, καθότι είναι κινούμενος και μπορεί να στηθεί σε διάφορες θέσεις στο εργοτάξιο, είναι εύκολος στη μεταφορά με φορτηγό όχημα, λόγω μικρού μεγέθους και βάρους και δεν απαιτεί χρόνο συναρμολόγησης. Ο ρομποτικός βραχίονας μπορεί να επεκτείνεται σε απόσταση μέχρι 5,50m, ενώ ο κορμός μπορεί να επεκταθεί μέχρι ύψος 3,20m. Η παροχή του υλικού στον «Frank» πραγματοποιείται μέσω μιας επίσης κινούμενης μονάδας ανάμιξης και άντλησης υλικού, αποκαλούμενη «Gary». Για τη λειτουργία του «Frank» και του «Gary» απαιτείται προσωπικό αποτελούμενο από 2 εργαζομένους. Για την εκτύπωση της τοιχοποιίας του κτιρίου στο Dubai ο εκτυπωτής «Frank» χρειάστηκε να στηθεί σε 22 διαφορετικές θέσεις, 12 για το ισόγειο και 10 για τον Α' όροφο. Επιπλέον, λόγω του ύψους των ορόφων, απαιτήθηκε τροποποίηση στο μηχανισμό του, ώστε να είναι δυνατή η εκτύπωση μέχρι ύψος 4,70m αντί για 3,20m (Bos, et al., 2022).



Εικόνα 52: Ο 3D Printer της Apis Cor, αποκαλούμενος «Frank», ο οποίος χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή του κτιρίου

Ο συνολικός χρόνος εκτύπωσης για την υλοποίηση της κατασκευής ήταν περίπου 500 ώρες (Zherebtsov, 2020). Για την εκτύπωση του κτιρίου χρησιμοποιήθηκε ένα μίγμα με βάση το γύψο, αποτελούμενο από τοπικά οικοδομικά υλικά, λαμβάνοντας υπόψη τις ιδιαίτερες

κλιματολογικές συνθήκες της περιοχής. Την ανάπτυξη του υλικού ανέλαβε η εταιρεία Prime Ready Mix, η οποία ανήκει στον όμιλο εταιρειών της ECC Group. Επιπλέον, λόγω των πολύ υψηλών θερμοκρασιών κατά τη διάρκεια της ημέρας (της τάξης των 50°C) το μεγαλύτερο μέρος της κατασκευής πραγματοποιήθηκε τη νύχτα (Bos, et al., 2022). Οι κλιματολογικές συνθήκες της περιοχής προκάλεσαν ένα ακόμα πρόβλημα στο έργο, καθώς λόγω των μεταβολών της θερμοκρασίας κάτω από το σημείο δρόσου, εμφανίστηκε σκουριά στις μεταλλικές επιφάνειες του 3D Printer. Για την αντιμετώπιση του προβλήματος πραγματοποιήθηκε εφαρμογή αντισκωριακού λιπαντικού. Όμως, επειδή η κατασκευή βρίσκεται στην έρημο, οι δυνατοί άνεμοι που επικρατούν μετέφεραν μεγάλες ποσότητες άμμου στον 3D Printer, η οποία κολλούσε στα μηχανικά μέρη του λόγω ύπαρξης του λιπαντικού. Οι μηχανικοί της εταιρείας δοκίμασαν πολλές εναλλακτικές, προτού καταλήξουν σε ένα κατάλληλο λιπαντικό, σε μορφή σπρέι, στο οποίο δεν κολλούσε η άμμος (Zherebtson, 2020).



Εικόνα 53: Φωτογραφία της εξωτερικής τοιχοποιίας από το εσωτερικό του κτιρίου, στην οποία είναι εμφανείς οι στρώσεις του εκτυπωμένου υλικού

Συμπεράσματα

Ο κατασκευαστικός τομέας αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους βιομηχανικούς κλάδους παγκοσμίως, ο οποίος παρέχει εργασία σε μεγάλο αριθμό ανθρώπων. Όμως ακόμα και σήμερα, παρά την αλματώδη πρόοδο της τεχνολογίας, χαρακτηρίζεται από προβλήματα όπως χαμηλή παραγωγικότητα, η οποία συνεπάγεται αύξηση του κόστους και του χρόνου υλοποίησης ενός έργου, υψηλό αριθμό εργατικών ατυχημάτων, πολλές φορές θανατηφόρων και παραγωγή μεγάλου όγκου αποβλήτων. Μια πιθανή λύση στα παραπάνω προβλήματα είναι η προσπάθεια αυτοματοποίησης της διαδικασίας παραγωγής ενός κατασκευαστικού έργου. Στα πλαίσια της προσπάθειας αυτής, στα προηγούμενα κεφάλαια επιχειρήθηκε η διερεύνηση των δυνατοτήτων που μπορεί να προσφέρει στον τομέα των κατασκευών η τεχνολογία 3D Printing, καθώς και των περιορισμών που απορρέουν από την εφαρμογή της. Αρχικά παρουσιάστηκαν οι επτά κατηγορίες προσθετικής κατασκευής και ύστερα πραγματοποιήθηκε εστίαση στις μεθόδους, που βρίσκουν εφαρμογή στον κατασκευαστικό τομέα, τα χρησιμοποιούμενα υλικά και τις διατάξεις εκτύπωσης. Στη συνέχεια καταγράφηκαν οι σημαντικότερες δυνατότητες και οι περιορισμοί από την εφαρμογή της τεχνολογίας 3D Printing, όπως προκύπτουν από διεθνή βιβλιογραφία αλλά και υλοποιημένα στην πράξη έργα σε ολόκληρο τον κόσμο. Πραγματοποιήθηκε επίσης εκτενής παρουσίαση δύο πρόσφατων κατασκευαστικών έργων μεγάλης κλίμακας, τα οποία υλοποιήθηκαν με χρήση μεθόδων 3D Printing: μιας διώροφης κατοικίας στη Γερμανία και ενός διώροφου κτιρίου γραφείων στο Dubai. Βάσει των όσων αναλυτικά αναφέρονται στα προηγούμενα κεφάλαια, τα σημαντικότερα συμπεράσματα, που μπορούν να εξαχθούν, είναι τα εξής:

- Αρχικά, η τεχνολογία 3D Printing είναι κατάλληλη για χρήση στον τομέα των κατασκευών, όπως αποδεικνύεται από το πλήθος των υλοποιημένων έργων σε όλο τον κόσμο εδώ και περίπου μία δεκαετία. Οι σημαντικότερες μέθοδοι, οι οποίες μπορούν να αποδώσουν αντικείμενα μεγάλης κλίμακας και είναι επομένως κατάλληλες για τον τομέα των κατασκευών, είναι η Contour Crafting, η Concrete Printing και η D-Shape. Οι δύο πρώτες βασίζονται στην εξώθηση υλικού, ενώ η D-Shape βασίζεται στη σύντηξη στρώματος σκόνης με επιλεκτική ενεργοποίηση συνδετικού υλικού. Για το λόγο αυτό οι Contour Crafting και Concrete Printing αναφέρονται ως «υγρές» διαδικασίες, ενώ η D-Shape «ξηρή».
- Το σημαντικότερο υλικό που χρησιμοποιείται στις κατασκευές με εφαρμογή τεχνολογίας 3D Printing με βάση την εξώθηση υλικού είναι, όπως και στις

παραδοσιακές κατασκευές το σκυρόδεμα (3DPC – 3D Printing Concrete). Στην περίπτωση της τρισδιάστατης εκτύπωσης το σκυρόδεμα θα πρέπει να έχει διαφορετικές ιδιότητες και σύνθεση από το κοινό σκυρόδεμα και στη νωπή κατάστασή του θα πρέπει να ικανοποιεί τις παραμέτρους της δυνατότητας εξώθησης (ή δυνατότητας εκτύπωσης), της οικοδομησιμότητας, της εργασιμότητας και του ανοιχτού χρόνου. Γενικά ένα μίγμα, προκειμένου να είναι κατάλληλο για χρήση θα πρέπει πριν την εξώθησή του από το ακροφύσιο του 3D Printer να είναι εύκολα αντλήσιμο, να διαθέτει χαμηλό ιξώδες και υψηλή εργασιμότητα, ενώ αμέσως μετά την εναπόθεσή του θα πρέπει να παρουσιάζει υψηλό ιξώδες, χαμηλή εργασιμότητα και σύντομο χρόνο σκλήρυνσης, ώστε να ικανοποιεί τις απαιτήσεις οικοδομησιμότητας. Το 3DPC αποτελείται από κοινό τσιμέντο, αδρανή και χημικά πρόσμικτα για τη βέλτιστη ρύθμιση των ιδιοτήτων του, όπως υπερρρευστοποιητές, τροποποιητές ιξώδους και επιταχυντές ή επιβραδυντές πήξεως. Στη σκληρυμένη κατάσταση του μίγματος οι βασικότερες παράμετροι που πρέπει να ελέγχονται είναι η προσκόλληση των στρώσεων του υλικού μεταξύ τους, η πυκνότητα του υλικού, η θλιπτική αντοχή, η εφελκυστική αντοχή και ο περιορισμός της συρρίκνωσης. Ειδικά ως προς την εφελκυστική αντοχή, προκειμένου η κατασκευή να μπορεί να ανταποκριθεί στις αναπτυσσόμενες εφελκυστικές τάσεις, σε πολλές περιπτώσεις είναι απαραίτητη η ενίσχυση με χαλύβδινους οπλισμούς ή με προσθήκη ινών στο μίγμα. Η απαίτηση ικανοποίησης όλων των παραπάνω καθιστά την ανάπτυξη του σκυροδέματος τρισδιάστατης εκτύπωσης πολύ πιο πολύπλοκη, σε σύγκριση με το κοινό σκυρόδεμα. Η απουσία προτύπων και κανονισμών αποτελεί μια επιπλέον πρόκληση στη δημιουργία ενός κατάλληλου μίγματος.

- Εναλλακτικά, αντί για χρήση κοινού τσιμέντου Portland, είναι δυνατή η προσθήκη συμπληρωματικών τσιμεντοειδών υλικών, όπως η ιπτάμενη τέφρα, η σκωρία υφικαμίνου, η πυριτική στάχτη, η μετακαολίνη και η σκόνη ασβεστόλιθου, τα οποία βελτιώνουν τις ιδιότητες του μίγματος τόσο στη νωπή όσο και τη σκληρυμένη κατάσταση. Επιπλέον για τη βελτίωση της βιωσιμότητας της κατασκευής είναι δυνατή η χρήση γεωπολυμερών.
- Για τις μεθόδους με βάση τη σύντηξη στρώματος σκόνης δεν παρατηρείται η ίδια πολυπλοκότητα ως προς τις ιδιότητες και τη σύνθεση του χρησιμοποιούμενου σκυροδέματος. Σε αυτή την περίπτωση το σκυρόδεμα μπορεί να αποτελείται από άμμο, κοινό τσιμέντο Portland και νερό ως ενεργοποιητή του μίγματος, ενώ

εναλλακτικά το τσιμέντο Portland μπορεί να αντικατασταθεί από τσιμέντο με βάση το οξείδιο του μαγνησίου (MgO). Επιπλέον και σε αυτή τη μέθοδο είναι εφικτή η χρήση γεωπολυμερών υλικών, με τη μορφή ξηρού μίγματος αποτελούμενου από ψιλή άμμο, σκωρία και άνυδρο μεταπυριτικό νάτριο και χρήση κοινού διαλύτη ως ενεργοποιητή.

- Στα πλαίσια της υλοποίησης όλο και περισσότερο φιλικών στο περιβάλλον κατασκευών, μια ενδιαφέρουσα εναλλακτική είναι η τρισδιάστατη εκτύπωση με χρήση γαιώδους υλικού. Τα γαιώδη υλικά παρουσιάζουν περιβαλλοντικά πλεονεκτήματα, καθώς είναι πλήρως ανακυκλώσιμα, έχουν χαμηλή ενσωματωμένη ενέργεια και δεν παράγουν απόβλητα, ενώ επιπλέον, λόγω υψηλής θερμικής μάζας, δημιουργούν κατασκευές με βελτιωμένη ενεργειακή συμπεριφορά. Επιπλέον το κόστος του γαιώδους υλικού είναι σημαντικά μικρότερο από το κόστος των συμβατικών υλικών κατασκευής. Το γαιώδες υλικό που χρησιμοποιείται για τρισδιάστατη εκτύπωση είναι ένα πηλοκονίαμα γνωστό ως cob και αποτελείται από εδαφικό υλικό, νερό και ίνες από άχυρο. Παραδείγματα υλοποιημένων κατασκευών από γαιώδη υλικά με χρήση τεχνολογίας 3D Printing είναι τα έργα «Gaia» και «TECLA» της εταιρείας WASP στην Ιταλία.
- Οι σημαντικότερες δυνατότητες, που μπορεί να προσφέρει η τεχνολογία 3D Printing στον τομέα των κατασκευών είναι:
 - Μείωση του κόστους κατασκευής. Η μείωση αυτή προκύπτει από τη μείωση του κόστους εργασίας, λόγω ελαχιστοποίησης του απαιτούμενου εργατικού δυναμικού, τη μη απαίτηση κατασκευής ξυλοτύπων και τη βέλτιστη κατανάλωση οικοδομικών υλικών. Η εκτίμηση της μείωσης του κόστους κατασκευής όταν γίνεται χρήση μεθόδων 3D Printing είναι ένα αντικείμενο που χρήζει περαιτέρω μελέτης, όμως σύμφωνα με την υπάρχουσα βιβλιογραφία το ποσοστό της μείωσης του κόστους μπορεί να ανέλθει σε 58% για την κατασκευή μιας μικρής ισόγειας κατοικίας. Η επίτευξη τόσο σημαντικών μειώσεων στο κόστος κατασκευής μπορεί να οδηγήσει σε πιο προσιτές οικονομικά κατοικίες, ειδικά σε χώρες με μεγάλο πληθυσμό συγκεντρωμένο στα μεγάλα αστικά κέντρα, όπως η Κίνα και η Ινδία.
 - Μείωση των εργατικών ατυχημάτων, λόγω μείωσης του απαιτούμενου εργατικού προσωπικού.

- Μείωση του χρόνου κατασκευής, η οποία σύμφωνα με την υπάρχουσα βιβλιογραφία μπορεί να ανέλθει σε ποσοστό 67%. Οι σημαντικότερες δραστηριότητες, που οδηγούν στην αύξηση του χρόνου κατασκευής στις παραδοσιακές μεθόδους έναντι των μεθόδων 3D Printing είναι η κατασκευή και αφαίρεση των ξυλοτύπων του σκυροδέματος και η αναμονή για την πήξη του σκυροδέματος, για επαρκή χρόνο μέχρι να μπορούν να συνεχιστούν με ασφάλεια οι δραστηριότητες που έπονται. Ο συνολικός χρόνος κατασκευής ενός έργου προκύπτει από το άθροισμα του καθαρού χρόνου εκτύπωσης και των διαφόρων καθυστερήσεων/παύσεων, οι οποίες μπορεί να είναι ιδιαίτερα χρονοβόρες, λόγω του ότι η τεχνολογία 3D Printing στις κατασκευές βρίσκεται ακόμα σε πολύ πρώιμο στάδιο. Η ελαχιστοποίηση των καθυστερήσεων αυτών, καθώς η εφαρμογή της τεχνολογίας αυτής θα γίνεται όλο και περισσότερο διαδεδομένη, θα οδηγήσει σε περαιτέρω μείωση του χρόνου κατασκευής.
- Επίτευξη κατασκευών με υψηλή ακρίβεια και μικρές αποκλίσεις διαστάσεων, λόγω εξάλειψης του παράγοντα του ανθρωπίνου λάθους. Οι αποκλίσεις, που παρατηρήθηκαν σε υλοποιημένα έργα, οφείλονται στις ιδιότητες του υλικού και τις συνθήκες φόρτισης της εκτυπωμένης τοιχοποιίας και βρίσκονται εντός αποδεκτών ορίων.
- Ευελιξία στον αρχιτεκτονικό σχεδιασμό. Λόγω της απουσίας ξυλοτύπων, είναι δυνατή η απόδοση πολύπλοκων γεωμετριών οι οποίες θα ήταν ιδιαίτερα δύσκολο, κοστοβόρο ή και αδύνατο να υλοποιηθούν με παραδοσιακές μεθόδους κατασκευής.
- Βιωσιμότητα. Σύμφωνα με βιβλιογραφικές αναφορές η κατασκευή ενός έργου με επιτόπου σκυροδέτηση παράγει 25% μεγαλύτερες ποσότητες CO₂ σε σύγκριση με την τεχνολογία 3D Printing. Στη μείωση των εκπομπών CO₂ συμβάλλει και το γεγονός ότι οι τρισδιάστατοι εκτυπωτές λειτουργούν με ηλεκτρικό ρεύμα. Επιπλέον, επειδή κατά την τρισδιάστατη εκτύπωση πραγματοποιείται εναπόθεση ακριβώς της απαιτούμενης ποσότητας κατασκευαστικού υλικού, επιτυγχάνεται μεγάλη μείωση των παραγόμενων αποβλήτων, της τάξης του 86%.
- Οι βασικότεροι περιορισμοί, που θα πρέπει να ξεπεραστούν προκειμένου να υιοθετηθούν ευρύτερα οι μέθοδοι 3D Printing στον τομέα των κατασκευών είναι:

- Το κόστος του εξοπλισμού εκτύπωσης. Το κόστος ενός εκτυπωτή αποτελούμενου από ρομποτικό σύστημα γερανογέφυρας μπορεί να ξεκινάει από 422.760,00€ για δυνατότητα εκτύπωσης επιφάνειας περίπου 17m², ενώ ανεβαίνει στις 850.200,00€ για δυνατότητα εκτύπωσης επιφάνειας περίπου 197m². Αντίστοιχα ένας 3D Printer, ο οποίος λειτουργεί με τη μέθοδο της επιλεκτικής ενεργοποίησης συνδετικού υλικού κοστίζει περίπου 250.000,00€ και μπορεί να εκτυπώσει κατασκευές διαστάσεων έως 5,00x5,00x2,50m. Το υψηλό κόστος απόκτησης του εκτυπωτή μπορεί να αναιρέσει τη μείωση του κατασκευαστικού κόστους, που μπορεί να εξασφαλίσει η χρήση μεθόδων 3D Printing, καθιστώντας τη ασύμφορη.
- Το γεγονός ότι οι διαστάσεις των έργων εξαρτώνται από τις διαστάσεις του 3D Printer. Στην περίπτωση εκτυπωτή με σύστημα γερανογέφυρας είναι προφανές ότι οι διαστάσεις του θα πρέπει να είναι μεγαλύτερες από αυτές του προς εκτύπωση κτιρίου. Σε περίπτωση επιλογής 3D Printer με τη μορφή κινούμενου ρομποτικού βραχίονα, όπως ο εκτυπωτής «Frank» της εταιρείας Apis Cor, ο περιορισμός του μεγέθους της εκτυπώσιμης επιφάνειας παύει να υπάρχει, όμως προκύπτουν επιπλέον καθυστερήσεις λόγω των απαιτούμενων αλλαγών θέσης και την απαίτηση επαναρρύθμισης του εκτυπωτή.
- Το εύρος των εκτελούμενων εργασιών. Στη φάση που βρίσκεται αυτή τη στιγμή η εξέλιξη της τεχνολογίας 3D Printing, το πεδίο εφαρμογής της στις κατασκευαστικές εργασίες περιορίζεται στην κατασκευή της εξωτερικής και εσωτερικής τοιχοποιίας ενός κτιρίου, φέρουσας ή μη. Εργασίες όπως η κατασκευή της θεμελίωσης, των πλακών, της στέγης των επιχρισμάτων, των ηλεκτρομηχανολογικών εγκαταστάσεων και των τελειωμάτων δαπέδων και οροφών εξακολουθούν να εκτελούνται με παραδοσιακές μεθόδους. Τα πλεονεκτήματα των μεθόδων 3D Printing προφανώς αφορούν μόνο τις εργασίες που εκτελούνται με χρήση της συγκεκριμένης τεχνολογίας. Επομένως, προκειμένου ο κατασκευαστικός τομέας να αποκομίσει όσο το δυνατόν περισσότερα οφέλη από την εφαρμογή μεθόδων 3D Printing θα πρέπει να διευρυνθεί το πεδίο εφαρμογής τους σε όσο το δυνατόν περισσότερες κατασκευαστικές εργασίες.
- Η ενσωμάτωση οπλισμού. Επειδή το εκτυπωμένο σκυρόδεμα, όπως και το κοινό σκυρόδεμα, διαθέτει χαμηλή εφελκυστική αντοχή, παρουσιάζει

ψαθυρή συμπεριφορά όταν υπόκειται σε εφελκυσμό. Επομένως στις περιπτώσεις φερόντων εκτυπωμένων στοιχείων, στα οποία αναμένεται να αναπτυχθούν σημαντικές εφελκυστικές τάσεις, είναι απαραίτητη η ενσωμάτωση χαλύβδινων οπλισμών. Η εργασία αυτή πραγματοποιείται με χειρωνακτικό τρόπο, περιορίζοντας έτσι τα οφέλη από την εφαρμογή της μεθόδου 3D Printing.

- Η έλλειψη κανονισμών και προτύπων. Επειδή η χρήση της τεχνολογίας 3D Printing σε κατασκευαστικά έργα έγινε πραγματικότητα σχετικά πρόσφατα, δεν έχουν ακόμα αναπτυχθεί κανονισμοί και πρότυπα, τα οποία θα μπορούσαν να καθοδηγήσουν τους μελετητές και κατασκευαστές σε θέματα ανάπτυξης των καταλλήλων υλικών και τον ασφαλή και ορθό τρόπο δόμησης, εξασφαλίζοντας τη στατική επάρκεια των κατασκευών και την ανθεκτικότητα σε φαινόμενα, όπως η ενανθράκωση, η διάβρωση και οι κύκλοι ψύξης-απόψυξης.
- Η επίδραση στην αγορά εργασίας. Η ευρύτερη εφαρμογή των μεθόδων 3D Printing στις κατασκευές θα έχει και κοινωνικό αντίκτυπο, καθώς πρόκειται να οδηγήσει σε απώλεια πολλών θέσεων εργασίας, ειδικά όσον αφορά τους ανειδίκευτους εργάτες. Παράλληλα θα δημιουργήσει την ανάγκη απασχόλησης πιο εξελιγμένου και εξειδικευμένου προσωπικού.
- Η μελέτη των κατασκευών που έχουν ήδη ανεγερθεί με εφαρμογή μεθόδων 3D Printing δείχνει ότι, επειδή η ενσωμάτωση της τεχνολογίας αυτής στον κατασκευαστικό τομέα βρίσκεται σε πολύ πρώιμο στάδιο ακόμα, το βασικό κίνητρο πίσω από την υλοποίηση των έργων αυτών είναι η διερεύνηση και η επίδειξη των δυνατοτήτων που μπορεί να προσφέρει αυτή η κατασκευαστική μέθοδος και όχι ακόμα η πλήρης εκμετάλλευση των δυνατοτήτων αυτών (Bos, et al., 2022). Οι δυνατότητες που μπορούν να προσφέρουν οι μέθοδοι 3D Printing στον τομέα των κατασκευών φαίνεται ότι μπορούν να δώσουν λύση στα σημαντικότερα προβλήματα που αντιμετωπίζει ο κατασκευαστικός κλάδος, επομένως μπορούν να υπερσχύσουν των αντίστοιχων περιορισμών. Η διαρκής εξέλιξη της έρευνας, καθώς και η αύξηση του αριθμού των κατασκευών, που θα κατασκευάζονται με χρήση μεθόδων 3D Printing, θα οδηγήσει σε ολοένα και μεγαλύτερο ποσοστό εκμετάλλευσης των δυνατοτήτων αυτών και απόκτηση της απαραίτητης τεχνογνωσίας παγκοσμίως, ώστε κάποια στιγμή στο όχι πολύ μακρινό μέλλον η

τεχνολογία 3D Printing να αποτελέσει έναν ευρέως διαδεδομένο και αποδοτικό τρόπο κατασκευής οικοδομικών έργων.

Βιβλιογραφία

- Huang, L., Krigsvoll, G., Johansen, F., Liu, Y., & Zhang, X. (2018). Carbon emission of global construction sector. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, Elsevier, 81-part 2*, pp. 1906-1916.
- Adaloudis, M., & Roca, J. (2021). Sustainability tradeoffs in the adoption of 3D Concrete Printing in the construction industry. *Journal of Cleaner Production, Elsevier, 307, 127201*.
- Allouzi, R., Al-Azhari, W., & Allouzi, R. (2020, 5 1). Conventional Construction and 3D Printing: A Comparison Study on Material Cost in Jordan. *Journal of Engineering, Hindawi, 1424682*.
- Almutairi, A., Tayeh, B., Adesina, A., Isleem, H., & Zeyad, A. (2021). Potential applications of geopolymer concrete in construction: A review. *Case Studies in Construction Materials, Elsevier, 15, e00733*.
- Apis Cor. (2022). *The world's largest 3d printed building*. Ανάκτηση από [apis-cor.com](https://www.apis-cor.com): <https://www.apis-cor.com/dubai-project>
- Apis Cor Website*. Ανάκτηση από <https://www.apis-cor.com/>
- ASTM. (2013). *Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies*.
- Batikha, M., Jotangia, R., Baaj, M., & Mousleh, I. (2022). 3D concrete printing for sustainable and economical construction: A comparative study. *Automation in Construction, Elsevier, 143*.
- Bhattacharjee, S., Basavaraj, A., Rahul, A., Santhanam, M., Gettu, R., Panda, B., Schlangen E., Chen Y., Copuroglou O., Ma G., Wang L., Basit Beigh M., Mechtcherine, V. (2021). Sustainable materials for 3D concrete printing. *Cement and Concrete Composites, Elsevier, 122, 104156*.
- Bos, F., Menna, C., Pradena, M., Kreiger, E., Leal da Silva, W., Rehman, A., Weger D., Wolfs R.J.M., Zhang Y., Ferrara L., Mechtcherine, V. (2022). The realities of additively manufactured concrete structures in practice. *Cement and Concrete Research, Elsevier, 156, 106746*.
- Bos, F., Wolfs, R., Ahmed, Z., & Salet, T. (2016). Additive manufacturing of concrete in construction: potentials and challenges of 3D concrete printing. *Virtual and Physical Prototyping, Taylor & Francis, 11(3)*, pp. 209-225.
- Buswell, R., Leal de Silva, W., Jones, S., & Dirrenberger, J. (2018). 3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research. *Cement and Concrete Research, Elsevier, 112*, σσ. 37-49.
- Carolo, L. (2020, 7 19). *3D Printed House: 20 Most Important Projects*. Retrieved from All3DP: <https://all3dp.com/2/3d-printed-house-3d-printed-building/>

- Cheikh, K., Remond, S., Khalil, N., & Aouad, G. (2017, 8 1). Numerical and experimental studies of aggregate blocking in mortar extrusion. *Construction and Building Materials, Elsevier, 145*, pp. 452-463.
- Chiusoli, A. (2018, 9 29). *The first 3D printed House with earth | Gaia*. Ανάκτηση από 3DWASP.com: <https://www.3dwasp.com/en/3d-printed-house-gaia/>
- Deloitte. (2021). *Global Powers of Construction 2020*. Marketing and Brand Department.
- Diggs-McGee, B., Kreiger, E. L., Kreiger, M. A., & Case, M. P. (2019). Print time vs. elapsed time: A temporal analysis of a continuous printing operation for additive constructed concrete. *Additive Manufacturing, Elsevier, 28*, pp. 205-214.
- Edison, T. (1917). *USA Ευρεσιτεχνία Αρ. 1219272*.
- ENVITERRA I.K.E. (2020). *Βελτίωση πλαισίου διαχείρισης αποβλήτων εκσκαφών, κατασκευών & κατεδαφίσεων (ΑΕΚΚ) στην Ελλάδα*. Αθήνα: Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH.
- Eurostat: Statistics explained*. (2020). Ανάκτηση από https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Accidents_at_work_statistics
- Fairs, M. (2013, 1 24). *Architect explains how he will 3D print a "whole building in one go"*. Retrieved from <https://www.dezeen.com/2013/01/24/3d-printed-house-interview/>
- Favier, A., Hot, J., Habert, G., Roussel, N., & d'Espinose de Lacaillerie, J.-B. (2014). Flow properties of MK-based geopolymer pastes. A comparative study with standard Portland cement pastes. *Soft Matter, 10*(8), σσ. 1134-1141.
- Gebhardt, A., Kessler, J., & Thurn, L. (2019). *3D Printing: Understanding Additive Manufacturing, 2nd Edition*. Munich: Hanser Publishers.
- Gomaa, M., Vaculik, J., Soebarto, V., Griffith, M., & Jabi, W. (2021, 9 27). Feasibility of 3DP cob walls under compression loads in low-rise construction. *Construction and Building Materials, Elsevier, 301*, 124079.
- Hamidi, F., & Aslani, F. (2019, 9 10). Additive manufacturing of cementitious composites: Materials, methods, potentials, and challenges. *Construction and Building Materials, Elsevier, 218*, pp. 582-609.
- Holt, C., Edwards, L., Keyte, L., Moghaddam, F., & Townsend, B. (2019). Chapter 17: Construction 3D Printing. In *3D Concrete Printing Technology* (pp. 349-370). Elsevier.
- Hossain, A., Zhumabekova, A., Chandra Paul, S., & Kim, J. (2020, 10 15). A Review of 3D Printing in Construction and its Impact on the Labor Market. *Sustainability, MDPI, 12*(20).
- Hou, S., Duan, Z., Xiao, J., & Ye, J. (2021, 3 1). A review of 3D printed concrete: Performance requirements, testing measurements and mix design. *Construction and Building Materials, Elsevier, 273*, 121745.
- <https://cobod.com>. Ανάκτηση από COBOD: <https://cobod.com/bod2>

- Hu, Y., Tang, Z., Li, W., Li, Y., & Tam, W. (2019, 11 30). Physical-mechanical properties of fly ash/GGBFS geopolymer composites with recycled aggregates. *Construction and Building Materials, Elsevier*, 226, σσ. 139-151.
- Hull, C. (1986). *USA Ευρεσιτεχνία Αρ. 4575330*.
- Iıcan, H., Sahin, O., Kul, A., Yildirim, G., & Sahmaran, M. (2022, 4 18). Rheological properties and compressive strength of construction and demolition waste-based geopolymer mortars for 3D-Printing. *Construction and Building Materials, Elsevier*, 328, 127114.
- Jakupovic, A. (2016, 4). *D-Shape Report*. Ανάκτηση από D-Shape Enterprises L.L.C.: <https://dshape.wordpress.com/>
- Khorramshahi, M. R., & Mokhtari, A. (2017, 6). Automatic Construction by Contour Crafting Technology. *Italian Journal of Science & Engineering*, 1(1), pp. 28-33.
- Khoshnevis, B. (2003). *Toward Total Automation of On-Site Construction - An Integrated Approach Based on Contour Crafting*. Eindhoven, Holland: Proceedings of the 20th ISARC.
- Khoshnevis, B. (2004, 1). Automated construction by contour crafting—related robotics and information technologies. *Automation in Construction, Elsevier*, 13(1), pp. 5-19.
- Khoshnevis, B. (2004, 1). Automated construction by contour crafting—related robotics and information technologies. *Automation in Construction, Elsevier*, 13(1), σσ. 5-19.
- Khoshnevis, B., Hwang, D., Yao, K.-T., & Yeh, Z. (2006, 5 15). Mega-scale fabrication by contour crafting. *Int. J. Industrial and Systems Engineering*, 1(3), σσ. 301-320.
- Kodama, H. (1981). Automatic method for fabricating a three-dimensional plastic model with photo-hardening polymer. *Review of Scientific Instruments*, 52(11).
- Le, T., Austin, S., Lim, S., Buswell, R., Gibb, A., & Thorpe, T. (2012, 1 19). Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete. *Materials and Structures, Springer*, 45, pp. 1221-1232.
- Le, T., Austin, S., Lim, S., Buswell, R., Law, R., Gibb, A., & Thorpe, T. (2012, 3). Hardened properties of high-performance printing concrete. *Cement and Concrete Research, Elsevier*, 42(3), pp. 558-566.
- Levy, K. (2014, 4 15). *A Chinese Company 3-D Printed 10 Houses In A Day*. Ανάκτηση από Business Insider: <https://www.businessinsider.com/a-chinese-company-3d-printed-10-houses-in-a-day-2014-4>
- Lim, S., Le, T. T., Buswell, R., & Austin, S. A. (2009). *Fabricating construction components using layer manufacturing technology*. Leicestershire: Loughborough University.
- Loughborough University . (χ.χ.). *The 7 Categories of Additive Manufacturing*. Ανάκτηση από <https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/>
- Lowke, D., Dini, E., Perrot, A., Weger, D., Gehlen, C., & Dillenburger, B. (2018, 10). Particle-bed 3D printing in concrete construction – Possibilities and challenges. *Cement and Concrete Research, Elsevier*, 112, σσ. 50-65.

- Ma, G., Wang, L., & Ju, Y. (2017, 9 14). State-of-the-art of 3D printing technology of cementitious material—An emerging technique for construction. *Science China Technological Sciences*, 61, pp. 475–495.
- Malaeb, Z., Al Sakka, F., & Hamzeh, F. (2019). 3D Concrete Printing: Machine Design, Mix Proportioning, and Mix Comparison Between Different Machine Setups. Στο *3D Concrete Printing Technology* (σσ. 115-136). Elsevier.
- Mense-Korte ingenieure + architekten.* (χ.χ.). Ανάκτηση από <https://mense-korte.de/>
- Pan, Y., Zhang, Y., Zhang, D., & Song, Y. (2021, 5 15). 3D printing in construction: state of the art and applications. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 115, pp. 1329–1348.
- Panda, B., & Jen Tan, M. (2018, 6 15). Experimental study on mix proportion and fresh properties of fly ash based geopolymer for 3D concrete printing. *Ceramics International*, Elsevier, 44(9), σσ. 10258-10265.
- Pandit, A., & Kumari, A. (2021, 6). Effectiveness of 3D Printing In Construction Industry over the Old Conventional Method Regarding Time and Cost: A Review. *International Journal of Innovative Science and Research Technology*, 6(6), pp. 983-987.
- Pegna, J. (1997, 2). Exploratory investigation of solid freeform construction. *Automation in Construction*, Elsevier, 5(5), σσ. 427-437.
- Peri 3D Construction.* (n.d.). Retrieved from <https://www.peri3dconstruction.com/>
- Peri Group. (2022, 1). Price List 3D Construction Printing. Germany.
- Perkins, I., & Skitmore, M. (2015, 3 20). Three-dimensional printing in the construction industry: A review. *International Journal of Construction Management*, Taylor & Francis, 5(1), pp. 1-9.
- Perrot, A., Rangeard, D., & Courteille, E. (2018, 5 30). 3D printing of earth-based materials: Processing aspects. *Construction and Building Materials*, Elsevier, 172, σσ. 670-676.
- Petrillo, A., Cioffi, R., Ferone, C., Colangelo, F., & Borrelli, C. (2016). Eco-sustainable Geopolymer concrete blocks production process. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, Elsevier, 8, pp. 408-418.
- Rahul, A., & Santhanam, M. (2020, 5). Evaluating the printability of concretes containing lightweight coarse aggregates. *Cement and Concrete Composites*, Elsevier, 109, 103570.
- Rahul, A., Mohan, M. K., De Schutter, G., & Van Tittelboom, K. (2022, 1). 3D printable concrete with natural and recycled coarse aggregates: Rheological, mechanical and shrinkage behaviour. *Cement and Concrete Composites*, Elsevier, 125, 104311.
- Rahul, A., Santhanam, M., Meena, H., & Ghani, Z. (2019, 3). 3D printable concrete: Mixture design and test methods. *Cement and Concrete Composites*, Elsevier, 97, pp. 13-23.

- Rouhana, C., El Jazzer, M., Faek, F., & Hamzeh, F. (2014, 6). The Reduction of Construction Duration by Implementing Contour Crafting (3D Printing). *Proceedings for the 22nd Annual Conference of the International Group for Lean Construction*. Oslo, Norway.
- S. Lim, R. B. (2012, 1). Developments in construction-scale additive manufacturing processes. *Automation in Construction, Elsevier, 21*, pp. 262-268.
- Sachs, E. M., Haggerty, J. S., Cima, M. J., & Williams, P. A. (1993). *USA Ευρεσιτεχνία Αρ. 5204055*.
- Sahin, H., & Mardani-Aghabaglou, A. (2022, 1 17). Assessment of materials, design parameters and some properties of 3D printing concrete mixtures; a state-of-the-art review. *Construction and Building Materials, Elsevier, 316*, 125865.
- Sanjayan, J., & Nematollahi, B. (2019). Chapter 1: 3D Concrete Printing for Construction Applications. In *3D Concrete Printing Technology* (pp. 1-11). Elsevier.
- Shakor, P., Sanjayan, J., Nazari, A., & Nejadi, S. (2017, 5 1). Modified 3D printed powder to cement-based material and mechanical properties of cement scaffold used in 3D printing. *Construction and Building Materials, Elsevier, 138*, pp. 398-409.
- Souza, M., Ferreira, I., de Moraes, E., Senff, L., & de Oliveira, A. (2020, 11). 3D printed concrete for large-scale buildings: An overview of rheology, printing parameters, chemical admixtures, reinforcements, and economic and environmental prospects. *Journal of Building Engineering, Elsevier, 32*, 101833.
- SQ4D. (2020). *Largest 3D printed home*. Ανάκτηση από sq4d.com: <https://www.sq4d.com/largest-3d-printed-home/>
- Starr, M. (2015, 1 19). *World's first 3D-printed apartment building constructed in China*. Retrieved from Cnet: <https://www.cnet.com/news/worlds-first-3d-printed-apartment-building-constructed-in-china/>
- Starr, M. (2016, 5 25). *Dubai unveils world's first 3D-printed office building*. Retrieved from <https://www.cnet.com/culture/dubai-unveils-worlds-first-3d-printed-office-building/>
- The United Arab Emirates' Government portal*. (2021, 8 25). Retrieved from <https://u.ae/en/about-the-uae/strategies-initiatives-and-awards/local-governments-strategies-and-plans/dubai-3d-printing-strategy>
- Thomas, B., Yang, J., Bahurudeen, A., Chinnu, S., Abdalla, J., Hawileh, R., & Hamada, H. (2022, 3). Geopolymer concrete incorporating recycled aggregates: A comprehensive review. *Cleaner Materials, Elsevier, 3*, 100056.
- Vasilca, I.-S., Nen, M., Chivu, O., Radu, V., Simion, C.-P., & Marinescu, N. (2021, 4 27). The Management of Environmental Resources in the Construction Sector: An Empirical Model. *Energies, MDPI, 14*(9).
- What is 3D Printing?* Retrieved from <https://3dprinting.com/what-is-3d-printing/>
- Wohlers, T., & Gornet, T. (2016). *History of Additive Manufacturing*. Wohlers Associates Inc.

- Wu, P., Wang, J., & Wang, X. (2016, 8). A critical review of the use of 3-D printing in the construction industry. *Automation in Construction, Elsevier*, 68, pp. 21-31.
- Xia, M., & Sanjayan, J. (2016, 11 15). Method of formulating geopolymers for 3D printing for construction applications. *Materials and Design, Elsevier*, 110, pp. 382-390.
- Zherebtsov, N. (2020, 1). *Manufacturing Tomorrow*. Ανάκτηση από <https://www.manufacturingtomorrow.com/article/2020/01/the-largest-in-the-world-3d-printed-building-was-made-in-dubai/14634>
- Ko, C.-H. (2022). Constraints and limitations of concrete 3D printing in architecture. *Journal of Engineering, Design and Technology*, 20(5), pp. 1334-1348.
- Υπουργείο Υποδομών, Μεταφορών και Δικτύων. (2016). *Κανονισμός Τεχνολογίας Σκυροδέματος*.

Υπεύθυνη Δήλωση Συγγραφέα:

Δηλώνω ρητά ότι, σύμφωνα με το άρθρο 8 του Ν.1599/1986, η παρούσα εργασία αποτελεί αποκλειστικά προϊόν προσωπικής μου εργασίας, δεν προσβάλλει κάθε μορφής δικαιώματα διανοητικής ιδιοκτησίας, προσωπικότητας και προσωπικών δεδομένων τρίτων, δεν περιέχει έργα/εισφορές τρίτων για τα οποία απαιτείται άδεια των δημιουργών/δικαιούχων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον και πληρούν τους κανόνες της επιστημονικής παράθεσης.