

3-9 July 2023

Ευαγγελία Φραγγεδάκη, αρχιτέκτων μηχανικός,
ΕΔΙΠ, ΕΜΠ

1. Εισαγωγή

Η 3D εκτύπωση στον κατασκευαστικό κλάδο (μέθοδος προσθετικής κατασκευής -Additive Manufacturing) είναι μία τεχνολογία που τα τελευταία χρόνια πρωταγωνιστεί, καθώς προστίθενται ολοένα και περισσότερες εφαρμογές στην υλοποίηση ποιοτικών και συνάμα πιο χαμηλού κόστους κτιρίων. Πλέον κτίρια, αλλά και ολόκληρες συνοικίες, υλοποιούνται από εξελιγμένα ρομποτικά συστήματα, ικανά να παράγουν δομές υψηλών προδιαγραφών. Η διαδικασία γίνεται σε ένα αυστηρά ελεγχόμενο εργασιακό περιβάλλον, γεγονός που **μειώνει τα σφάλματα και μειώνει αισθητά τον χρόνο κατασκευής**, με αποτέλεσμα κτίρια με **μικρότερο κόστος**. Η μεθοδολογία αυτή εφαρμόζεται σταδιακά για την μαζική παραγωγή κτιρίων με εντυπωσιακά αποτελέσματα.

Τα κύρια χαρακτηριστικά των μεθόδων τρισδιάστατης εκτύπωσης είναι: η **ελευθερία στη γεωμετρία της μορφής**, η **ταχύτητα ολοκλήρωσης των έργων**, η **αποφυγή χρήσης ξυλότυπων**, η **μειωμένη παραγωγή απορριμμάτων**, ο **φιλικός εν γένει χαρακτήρας τους ως προς το περιβάλλον**, τη φύση και την ασφάλεια (Sanjayan, et al., 2019). Εκτός από κατοικίες, έχουν («τυπωθεί») γέφυρες, υποστυλώματα, στοιχεία ύδρευσης και αποχέτευσης και αστικός εξοπλισμός.

Η ευρεία εφαρμογή της τρισδιάστατης εκτύπωσης σκυροδέματος στον κατασκευαστικό τομέα είναι προς το παρόν περιορισμένη κυρίως σε σεισμογενείς περιοχές λόγω έλλειψης προτύπων και οδηγιών, τα οποία αποτελούν πεδίο έρευνας στα επόμενα χρόνια.



Εικ1, α. Εκτυπωτής σκυροδέματος, Eindhoven-University-of-Technology



β. Apis Cor (American company from Melbourne) printer with nicknamed 'Frank'.

2. Η ιστορία της τρισδιάστατης εκτύπωσης

Οι ρίζες της τρισδιάστατης εκτύπωσης χρονολογούνται από τα μέσα της δεκαετίας του 1980, όταν επινοήθηκε η στερεολιθογραφία ή SLA. Το SLA λειτουργεί ως λέιζερ υψηλής ισχύος και μετατρέπει την υγρή ρητίνη σε στερεό υλικό, σταδιακά στρώμα – στρώμα. Ως τρισδιάστατη εκτύπωση θεωρείται γενικά κάθε τεχνολογία που δημιουργεί εξαρτήματα με πρόσθετο τρόπο. Ακόμη και σήμερα, η SLA εξακολουθεί να είναι μια από τις πιο δημοφιλείς τεχνολογίες τρισδιάστατης εκτύπωσης, ωστόσο έχουν αναδειχθεί και άλλες τεχνολογίες 3D printing όπως η επιλεκτική πυροσυσσωμάτωση με λέιζερ (SLS), η μοντελοποίηση λιωμένης εναπόθεσης (FDM) και η άμεση εναπόθεση μετάλλων (DMD).

Για περισσότερο από μια δεκαετία, η τρισδιάστατη εκτύπωση έχει χρησιμοποιηθεί με αντιπροσωπευτικά έργα στον τομέα των κατασκευών, όπως:

- **To 2004**, στο University of Southern California (USC) ξεκίνησε η 3Dεκτύπωση για μία τοιχοποιία, γεγονός που αποτέλεσε την είσοδο της τεχνολογίας στον κατασκευαστικό κλάδο.
- **To 2014**, ολοκληρώθηκε στο Άμστερνταμ μια κατοικία (First 3D Printed House to Be Built In Amsterdam, Archdaily, 2014).
- **To 2016**, ολοκληρώθηκε ένα πολυώροφο κτίριο στην Κίνα από την WinSun (Starr, M., 2015), ενώ την ίδια χρονιά, το Dubai Future Foundation έχτισε το «Γραφείο του Μέλλοντος», ένα σημαντικό ορόσημο για την τεχνολογία στον τομέα των εμπορικών κατασκευών, με ένα κτίριο 250τ.μ. που κατασκευάστηκε από έναν μεγάλο τρισδιάστατο εκτυπωτή με διαστάσεις 36,5 x 12 x 6μ., ενώ η κατασκευή διήρκεσε μόλις 17 ημέρες. Σήμερα, η αγορά κατασκευών τρισδιάστατης εκτύπωσης αναπτύσσεται γρήγορα και αναμένεται να φτάσει το 1,5 δισεκατομμύριο δολάρια μέχρι το 2024.



Εικ. 2 α. XtreeE co-designed this structure with Marc Dalibard architect and EZCT Architecture & Design Research, διαστάσεων: 4 x 1 x 1 m. β. The longest 3D-printed concrete bridge from the Tsinghua University School of Architecture, dezeen.com, γ. Jipa, A., designboom, 2022, NEST Research Building by ETH Zurich, Dübendorf, Switzerland.

3. Είδη εκτύπωσης σκυροδέματος και Προσθήκη οπλισμού

Οι δύο βασικές μέθοδοι που υιοθετήθηκαν στην τεχνολογία προσθετικής κατασκευής (AM) με τιμηνοειδή υλικά είναι η εναπόθεση με βάση την τεχνική της εξώθησης (επιλεκτική απόθεση υλικού με εξώθηση (3DCP) και είναι παρόμοια τεχνική με το μοντέλο εναπόθεσης που χρησιμοποιείται σε τεχνολογίες πολυμερών και μετάλλων, αλλά και οι μέθοδοι κλίνη σε σκόνη (επιλεκτική σύνδεση, χρησιμοποιώντας τιμηνοειδή υλικά ή με πλήρωση του τυπωμένου ξυλότυπου, όπου ένα στρώμα άμμου ως μήτρα, καλύπτεται επιλεκτικά από τιμνέτο το οποίο αποτελεί τον δραστικό παράγοντα, ο οποίος ενεργοποιείται χρησιμοποιώντας υδρατμούς) (Lowke, et al., 2018).

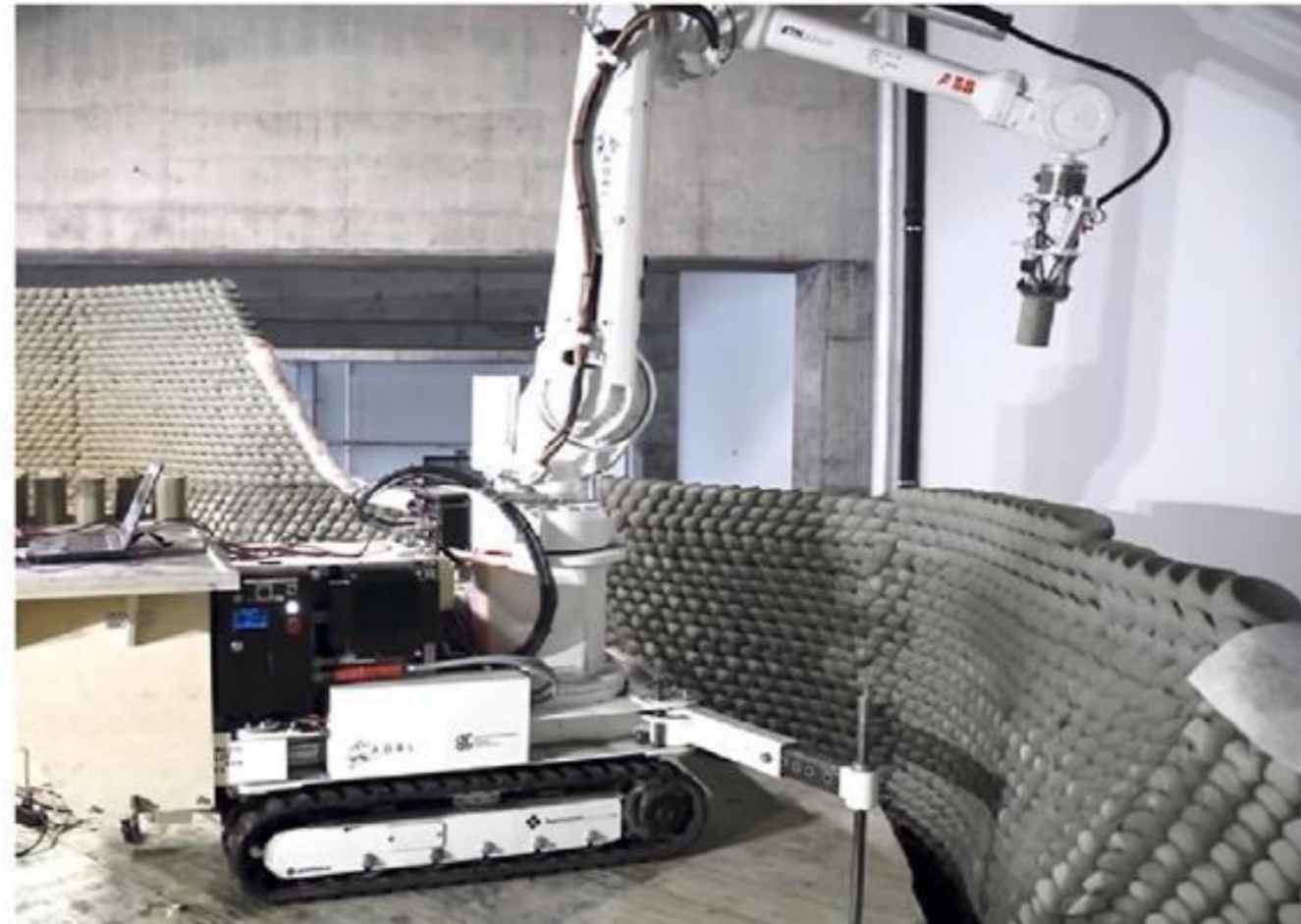
Σε ορισμένες περιπτώσεις ενσωματώνεται οπλισμός για την ενίσχυση των τυπωμένων τμημάτων σκυροδέματος προκειμένου να βελτιωθεί η δομική τους απόδοση στην κατασκευή (Nerella, V. N., et al. 2018). Οι μέθοδοι ενίσχυσης μπορούν να ταξινομηθούν ανάλογα με τη θέση του οπλισμού, εξωτερικός ή εσωτερικός καθώς και αν έχει εγκατασταθεί πριν ή μετά την εκτύπωση σκυροδέματος. Ο οπλισμός μπορεί να εισαχθεί είτε χειροκίνητα στα κοίλα μέρη που ετοιμάζονται στην κατασκευή, είτε ρομποτικά (Wangler, et al., 2016). Η ταυτόχρονη εκτύπωση οπλισμού και σκυροδέματος δεν είναι εφικτή τελικά λόγω της υψηλής θερμοκρασίας που δημιουργείται από την εκτύπωση χάλυβα. Επίσης έχει εφαρμοστεί η διαδικασία εκτύπωσης «lost formwork», όπου τυπώθηκε αρχικά το εξωτερικό κέλυφος και στη συνέχεια έγινε χύτευση με σκυρόδεμα. Το Institute for Advanced Architecture of Catalonia (IAAC, 2019), σε συνεργασία με την WASP (Ιταλική εταιρεία με 3d εκτυπωτές), εφάρμοσε 3DP με μείγμα πηλοκονιάματος. (Εικ. 3). Στη συνέχεια κατασκευάστηκε το έργο "Γαία", εκτύπωση με πηλοκονίαμα χώρου κυκλικής κάτοψης (Gomaa, M, et. Al. 2022).



Εικ.3 α. Εκτύπωση με πηλό (WASP, 2019)



β. Ολοκλήρωση κτίσματος στο IAAC



γ. τοποθέτηση ωμόπλιθων (adobe) (WASP,2019),



δ. Κτίριο Γαία, Ιταλία, WASP 2019,



ε. Εκτύπωση κτίσματος Γαί από τη WASP

4. Σύγκριση παραδοσιακής δόμησης και 3d εκτύπωσης

Τα δεδομένα σύγκρισης της παραδοσιακής κατασκευής με σκυρόδεμα και της τρισδιάστατης εκτύπωσης βασίζονται στην εμπειρία που αποκτήθηκε από το έργο στην Aix-en-Provence. Μελετήθηκαν οι περιπτώσεις με την τεχνική χύτευσης με χρήση χαλύβδινων καλουπιών και της εκτύπωσης, με αποτέλεσμα **συνολικό κέρδος 62,5%** (βάση ρεαλιστικών τιμών στο ίδιο κοινωνικο-οικονομικό περιβάλλον της Δυτικής Ευρώπης).

Κύριος λόγος για τη διαφορά κόστους (εκτός από το κέρδος που προσδιορίστηκε στο χρόνο, τα υλικά και το εργατικό δυναμικό) είναι η μη χρήση εξειδικευμένου υλικού και εξειδικευμένης διαμόρφωσης καλουπιού, γεγονός που επιτυγχάνεται με χρήση της μεθόδου lost formwork.

Συγκριτικά ως προς την κατανάλωση υλικών:

3d printing/ Σκυρόδεμα 3D Εκτύπωσης: 650 kg και Σκυρόδεμα Χύτευσης UHPC: 1600 kg, Χαλύβδινες Ενισχύσεις (Iνες_): 50 kg

Παραδοσιακή κατασκευή/ Σκυρόδεμα Χύτευσης UHPC: 2250 kg, Χαλύβδινες Ενισχύσεις (Iνες): 50 kg

Σύγκριση ως προς το χρόνο εργασιών

3d printing/ : Βελτιστοποίηση ψηφιακού σχεδιασμού και το σχεδιασμός διεργασιών: 3 ημέρες, Δημιουργία Μοντέλου: 3 ημέρες,

Τρισδιάστατη εκτύπωση του εξωτερικού κελύφους σε σκυρόδεμα: 2 ημέρες

Παραδοσιακή κατασκευή/: Ρυθμίσεις: 1 ημέρα Δημιουργία Ατσάλινου Καλουπιού: 3 ημέρες, Χύτευση Σκυροδέματος στο Κέλυφος: 1 ημέρα Χύτευση Σκυροδέματος στο Καλούπι: 1 ημέρα,

Οι υπόλοιπες εργασίες όπως ρυθμίσεις, μεταφορά στο σημείο εγκατάστασης, σύνδεση, επικάλυψη (φινιρίσμα) είχαν κοινή διάρκεια και στις δύο περιπτώσεις.

Σύνολο 15.5 ημέρες με **3d printing** και 18.5 ημέρες στην **Παραδοσιακή κατασκευή**, οπότε ο κατασκευαστικός χρόνος μειώθηκε 16.2%.



Εικ. 4. α.Συνεδριακό Κέντρο της Ντόχα (Donofrio, M., 2016)



β. Qatar National Convention Centre / Arata Isozaki (Arch daily, 2011)



5. Ευκαιρίες και προκλήσεις για τους Μηχανικούς

Οι συμβατικές διαδικασίες κατασκευής όπως, η εγκατάσταση οπλισμού, η χύτευση σκυροδέματος και η πλινθοδομή συνεπάγονται βαριά χειρωνακτική εργασία και εμπιέχουν πολλούς παράγοντες επικινδυνότητας. Αυξάνοντας τον βαθμό αυτοματοποίησης, η προσθετική κατασκευή μπορεί να μειώσει τη χειρωνακτική εργασία και να βελτιώσει την ασφάλεια στο χώρο εργασίας (Keating, et al., 2017). Οι τεχνικές προσθετικής κατασκευής θα μπορούσε επίσης να χρησιμοποιηθούν για κατασκευαστικά έργα σε ακραίες περιβαλλοντικές συνθήκες, όπως για παράδειγμα σε μέρη που έχουν πληγεί από φυσικές καταστροφές, πολεμικές ζώνες ή σε άλλους πλανήτες. Άλλοι παράγοντες που χρειάζονται περαιτέρω μελέτη είναι :

- Κίνδυνος συρρίκνωσης του ξηρού εκτυπωμένου στοιχείου σε θερμό κλίμα.
- η προστασία από δυσμενείς περιβαλλοντικές συνθήκες, όπως υπερϊώδη ακτινοβολία, έκθεση σε νερό, χημικά αλλά και υψηλές θερμοκρασίες.

Η προσθετική κατασκευή προσφέρει μεγάλη ελευθερία σχεδιασμού στη μορφολογία του κτιρίου, ενώ παράλληλα μπορούν να συνδυαστούν ποικίλες πρώτες ύλες. Επίσης κατά την εκτύπωση υπάρχει η δυνατότητα να παραχθούν τμήματα που αποτελούνται από αξιολογημένα υλικά-διαδικασίες, π.χ. αυξημένη αντοχή σε περιοχές της εκτύπωσης με έντονη φόρτιση ή σε περιοχές με κενά διαφόρων σχημάτων και μεγεθών, όπως τις περιοχές για Η/Μ εγκαταστάσεις (Zhang B., et al., 2018).

6. Βιβλιογραφία

- Gomaa, M., Jabi, W., Soebarto, V., & Xie, Y. M. (2022). Digital manufacturing for earth construction: A critical review. *Journal of Cleaner Production*, 338, 130630.
- Jamie D., The Manufacturers of 3D Printed Houses, Published on October 20, 2022 by 3dnatives. Visited 02 June 2023, <https://www.3dnatives.com/en/3d-printed-house-companies-120220184/#/>
- Donofrio, M. (2016).Topology optimization and advanced manufacturing as a means for the design of sustainable building components. *Procedia Engineering*, 145, 638-645.
- Lowke, D., και συν. 2018. Particle-bed 3D printing in concrete construction –Possibilities and challenges. *Cement and Concrete Research* (42), March 2018, σσ. 558-566.
- Keating, S., και συν. 2017. Toward site-specific and self-sufficient robotic fabrication on architectural scales. *Science Robotics*. April 2017.
- Killa Design, Gensler, Office of the Future, July 25, 2017, visited 01 June, 2023https://www.architectmagazine.com/project-gallery/office-of-the-future_o
- Nerella, V. N., Ogura, H., & Mechtcherine, V. (2018, July). Incorporating reinforcement into digital concrete construction. In *Proceedings of IAASS annual symposia* (Vol. 2018, No. 7, pp. 1-8). International Association for Shell and Spatial Structures (IASS).
- Starr, M., World's first 3D-printed apartment building constructed in China, Cnet, Jan. 19, 2015, <https://www.cnet.com/culture/worlds-first-3d-printed-apartment-building-constructed-in-china/>, visited 03 June 2023.
- Van Es, K., IAAC designs and constructs Spain's first 3D printed building using earth and Crane WASP, Avontuura, September 9, 2022, <https://www.avontuura.com/iaac-designs-and-constructs-spains-first-3d-printed-building-using-earth-and-crane-wasp/>, visited June 2023.