

Δυνατότητες και Περιορισμοί Μεθόδων 3D Printing στον Τομέα των Κατασκευών

Νταντής Ιωάννης

Διπλ. Πολιτικός Μηχανικός και

Μεταπτ. Φοιτητής ΔΧΤ/ΣΘΕΤ, ΕΑΠ

jntantis@gmail.com, std138487@ac.eap.gr

Μπισκίνης Διονύσιος

Διπλ. Πολιτικός Μηχανικός

Μέλος ΣΕΠ ΔΧΤ/ΣΘΕΤ ΕΑΠ

biskinis.dionysios@ac.eap.gr

Περίληψη – Στην παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιείται διερεύνηση των δυνατοτήτων, που μπορεί να προσφέρει η εφαρμογή μεθόδων 3D Printing στον τομέα των κατασκευών, καθώς και των περιορισμών της συγκεκριμένης τεχνολογίας. Παρουσιάζονται οι μέθοδοι, οι οποίες μπορούν να αποδώσουν αντικείμενα μεγάλων διαστάσεων, επομένως βρίσκουν εφαρμογή στον τομέα των κατασκευών, τα χρησιμοποιούμενα υλικά, οι διατάξεις εκτύπωσης και μελετώνται κατασκευαστικά έργα, τα οποία έχουν πρόσφατα υλοποιηθεί, εφαρμόζοντας μεθόδους 3D Printing.

Λέξεις – κλειδιά: Τρισδιάστατη εκτύπωση, αυτοματοποίηση, κατασκευαστικός τομέας

I. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι κατασκευές αποτελούν έναν από τους σημαντικότερους βιομηχανικούς τομείς παγκοσμίως, με συνολική αξία παραγωγής ύψους 11,6 τρισ. δολαρίων το έτος 2020, ο οποίος όμως, παρά τη συνεχή 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 (Khoshnevis, 2004), (Vasilca, et al., 2021). Μια πιθανή λύση στα παραπάνω προβλήματα αποτελεί η προσπάθεια αυτοματισμού της διαδικασίας παραγωγής ενός οικοδομικού έργου. Στα πλαίσια της προσπάθειας αυτής, εξετάζονται οι δυνατότητες, που μπορούν να προσφέρουν στον κατασκευαστικό τομέα οι μέθοδοι 3D Printing, καθώς και οι περιορισμοί, που τίθενται από την εφαρμογή τους.

Η τεχνολογία 3D Printing ξεκίνησε να αναπτύσσεται από τις αρχές της δεκαετίας του 1980', με την κατασκευή αντικειμένων μικρής κλίμακας, κυρίως από πολυμερή. Μέσα στα επόμενα χρόνια η τεχνολογία βρήκε εφαρμογή σε διάφορους τομείς, όπως η αυτοκινητοβιομηχανία, η αεροδιαστημική βιομηχανία, η ιατρική και το εμπόριο. Η έρευνα για την εφαρμογή της τεχνολογίας 3D Printing στον τομέα των κατασκευών ξεκινά στα μέσα της δεκαετίας του 1990', από τον J. Pegna (Exploratory investigation of solid freeform construction, 1997) και ακολουθεί η ανάπτυξη της μεθόδου Contour Crafting από τον B. Khoshnevis στις αρχές της τρέχουσας χιλιετίας και λίγο αργότερα της μεθόδου Concrete Printing από το Πανεπιστήμιο Loughborough. Οι πρώτες κατασκευές με εφαρμογή μεθόδων 3D Printing ξεκίνησαν να υλοποιούνται πριν από περίπου μια δεκαετία.

II. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Επειδή η υιοθέτηση των μεθόδων 3D Printing στον τομέα των κατασκευών αποτελεί μια πρόσφατη προσέγγιση, η οποία αριθμεί λίγα μόνο χρόνια εφαρμογής σε παγκόσμιο επίπεδο, η έρευνα για την ανάπτυξη του θέματος της εργασίας βασίστηκε κυρίως σε κριτική ανάλυση διεθνούς βιβλιογραφίας. Μέσω αυτής παρουσιάστηκε η ανάπτυξη των τριών σπουδαιότερων μεθόδων 3D Printing για απόδοση κατασκευών μεγάλης κλίμακας, της Contour Crafting, της Concrete Printing και της D-Shape, πραγματοποιήθηκε σύγκριση μεταξύ τους, εξετάστηκαν τα χρησιμοποιούμενα υλικά και οι απαιτούμενες ιδιότητές τους και διερευνήθηκαν οι δυνατότητες και οι περιορισμοί, που προκύπτουν από την εφαρμογή της νέας αυτής τεχνολογίας

στον τομέα των κατασκευών. Επιπλέον, πραγματοποιήθηκε έρευνα μέσω του διαδικτύου, για την παρουσίαση της ιστορικής αναδρομής της τεχνολογίας 3D Printing γενικώς, καθώς και για την αναφορά στα σημαντικότερα κατασκευαστικά έργα, που έχουν υλοποιηθεί μέχρι σήμερα σε παγκόσμιο επίπεδο. Τέλος, μελετήθηκαν οι περιπτώσεις δύο κατασκευαστικών έργων, τα οποία ολοκληρώθηκαν πρόσφατα, ύστερα από επικοινωνία με τις αντίστοιχες κατασκευαστικές εταιρείες.

III. ΕΠΙΛΕΓΜΕΝΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Όσον αφορά τις τρεις μεθόδους 3D Printing, που έχουν εφαρμογή στις κατασκευές, οι Contour Crafting και Concrete Printing υιοθετούν τη μέθοδο εξώθησης υλικού (material extrusion), ενώ η D-Shape χρησιμοποιεί τη μέθοδο σύντηξης στρώματος σκόνης (Powder Bed Fusion). Λόγω της μορφής του χρησιμοποιούμενου υλικού, οι δύο πρώτες περιγράφονται ως «υγρές» διαδικασίες, ενώ η τρίτη ως «ξηρή» διαδικασία. Επιπλέον, η Contour Crafting αναπτύχθηκε με τέτοιο τρόπο ώστε να μπορεί να εφαρμοστεί στον τόπο του έργου, ενώ οι άλλες δύο κατά βάση χρησιμοποιούνται για εφαρμογές σε εσωτερικές εγκαταστάσεις, αν και με κατάλληλες τροποποιήσεις είναι δυνατόν να εφαρμοστούν και επί τόπου σε ένα έργο. Άλλη διαφορά μεταξύ των μεθόδων είναι ο τρόπος κατασκευής των υπερθύρων των ανοιγμάτων της τοιχοποιίας και η τελική «ανάλυση» του εκτυπωμένου αντικειμένου. Επιπροσθέτως, τόσο στην Contour Crafting όσο και στην Concrete Printing, η εναπόθεση του υλικού πραγματοποιείται από μία κεφαλή εκτύπωσης, η οποία θα πρέπει να διατρέξει ολόκληρη την επιφάνεια εκτύπωσης προκειμένου να κατασκευάσει μια πλήρη στρώση της προς εκτύπωση κατασκευής, ενώ στην D-Shape χρησιμοποιείται μεγάλος αριθμός ακροφυσίων, τα οποία εκτυπώνουν μια στρώση της προς εκτύπωση κατασκευής με ένα πέρασμα. (S. Lim, 2012).

Σχετικά με τα χρησιμοποιούμενα υλικά, το πλέον διαδεδομένο, αντίστοιχα με τις παραδοσιακές μεθόδους κατασκευής, είναι το σκυρόδεμα τριδιάστατης εκτύπωσης (3D Printing Concrete – 3DPC). Βεβαίως, στην περίπτωση της τριδιάστατης εκτύπωσης, το σκυρόδεμα θα πρέπει να διαθέτει διαφορετικές ιδιότητες και διαφορετική σύσταση, σε σύγκριση με το κοινό σκυρόδεμα. Οι σημαντικότερες παράμετροι, που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη

κατά το σχεδιασμό ενός μίγματος σκυροδέματος κατάλληλου για μεθόδους εξώθησης υλικού, στην νωπή του κατάσταση είναι (Le, et al., 2012):

- Η δυνατότητα εξώθησης (Extrudability) ή δυνατότητα εκτύπωσης (Printability), η οποία 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.
- Η εργασιμότητα (Workability), η οποία όπως και στο κοινό σκυρόδεμα, είναι η ιδιότητα του νωπού σκυροδέματος που χαρακτηρίζει την ευκολία, με την οποία αυτό μεταφέρεται, διαστρώνεται και συμυκνώνεται
- Η οικοδομησιμότητα (Buildability), η οποία 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), ο οποίος προσδιορίζεται ως η χρονική περίοδος κατά την οποία τόσο η δυνατότητα εκτύπωσης όσο και η οικοδομησιμότητα του μίγματος βρίσκονται εντός των αποδεκτών ορίων.

Επιπλέον, το χρησιμοποιούμενο υλικό θα πρέπει να παρουσιάζει διαφορετικές ιδιότητες κατά τη φάση της εξώθησης και ύστερα από την εναπόθεση: κατά τη φάση εξώθησης/εκτύπωσης κρίσιμες παράμετροι είναι η δυνατότητα εξώθησης και η εργασιμότητα, καθώς το υλικό θα πρέπει να είναι ρευστό, «μαλακό» και εύκολα αντλήσιμο, ενώ μετά την εναπόθεση κρίσιμη παράμετρος είναι η οικοδομησιμότητα, καθώς το υλικό θα πρέπει πλέον να παρουσιάζει σταθερότητα σχήματος και να έχει την ικανότητα να φέρει το φορτίο των υπερκείμενων στρώσεων.

Τα επιμέρους υλικά, που συνθέτουν το 3DPC είναι το τσιμέντο, τα ορυκτά πρόσθετα, τα αδρανή και τα χημικά πρόσμικτα. Όσον αφορά το τσιμέντο, απαιτείται μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε σύγκριση με το κοινό σκυρόδεμα, καθώς με αυτό τον τρόπο αυξάνεται η δυνατότητα εκτύπωσης. Εναλλακτικά, επειδή η παραγωγή του τσιμέντου συνεπάγεται μεγάλη ποσότητα εκπομπών CO₂ είναι δυνατή η χρησιμοποίηση ορυκτών προσθέτων ή συμπληρωματικών τσιμεντοειδών υλικών, όπως η ιπτάμενη τέφρα, η σκωρία υψικαμίνου, η πυριτική στάχτη, η μετακαολίνη και η σκόνη ασβεστόλιθου (Sahin & Mardani-Aghabaglou, 2022).

Μια ακόμα περισσότερο φιλική προς το περιβάλλον εναλλακτική είναι η αντικατάσταση του κοινού τσιμέντου με γεωπολυμερή. Ο όρος

«γεωπολυμερή» δημιουργήθηκε από τον J. Davidovits το 1978 και αναφέρεται σε υλικά που προκύπτουν από τη δράση ενός αλκαλικού ενεργοποιητή, ο οποίος προκαλεί τον πολυμερισμό ενός αργιλοπυριτικού συνδετικού υλικού (Thomas, et al., 2022).

Σχετικά με τα αδρανή, υπάρχει περιορισμός ως προς το μέγεθός τους, καθώς μεγάλη διάμετρος αδρανών μπορεί να προκαλέσει έμφραξη στο ακροφύσιο κατά την εξώθηση του υλικού. Οι Cheikh et al. προτείνουν η τιμή του λόγου της μέγιστης διαμέτρου των αδρανών προς το άνοιγμα του ακροφυσίου να μην υπερβαίνει το 1/4, για αποτροπή του ενδεχόμενου έμφραξης (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). Στην πλειοψηφία των ερευνών χρησιμοποιούνται λεπτόκοκκα αδρανή ($d < 5\text{mm}$), αν και η χρήση χονδρόκοκκων αδρανών μπορεί να προσφέρει οφέλη, όπως η μείωση της πιθανότητας εμφάνισης ρηγματώσεων, λόγω μείωσης της θερμότητας ενυδάτωσης και της συστολής ξηράνσεως, βελτίωση της οικοδομησιμότητας, μειωμένο κόστος και ενίσχυση της βιωσιμότητας, υπό την έννοια ότι απαιτείται μικρότερη ποσότητα συνδετικού υλικού, όπως το τσιμέντο, η παραγωγή του οποίου είναι ενεργοβόρος και έχει αποτέλεσμα υψηλές εκπομπές CO_2 (Bhattacharjee, και συν., 2021).

Η βέλτιστη ρύθμιση των ιδιοτήτων του μίγματος επιτυγχάνεται με την προσθήκη χημικών προσμίκτων, όπως υπερρευστοποιητές, τροποποιητές ιξώδους, επιταχυντές και επιβραδυντές πήξεως. Επιπλέον, επειδή στο σκυροδέμα τριδιάστατης εκτύπωσης ο κίνδυνος συρρίκνωσης είναι αυξημένος, λόγω απουσίας ξυλοτύπων, σε συνδυασμό με τη απουσία χονδρόκοκκων αδρανών, είναι δυνατή η προσθήκη προσμίκτων μείωσης ή αντιστάθμισης της συρρίκνωσης (Souza, Ferreira, de Moraes, Senff, & de Oliveira, 2020).

Όσον αφορά τη σκληρυμένη κατάσταση του σκυροδέματος, θα πρέπει να εξασφαλίζεται επαρκής προσκόλληση ανάμεσα στις διαδοχικές στρώσεις υλικού και να αποφεύγεται η εμφάνιση «κρύων ενώσεων» (cold joints) ή κενών (under-filling), προκειμένου το υλικό να παρουσιάζει ισοτροπία. Κρίσιμες παραμέτρους αποτελούν επίσης η θλιπτική αντοχή, η εφελκυστική αντοχή και η συρρίκνωση (Buswell, Leal de Silva, Jones, & Dirrenberger, 2018).

Ως προς την εφελκυστική αντοχή, επειδή όπως και στο κοινό σκυροδέμα η τιμή της αντιστοιχεί σε ένα μικρό μόνο ποσοστό της θλιπτικής αντοχής,

σε πολλές περιπτώσεις, ιδιαίτερα όταν πρόκειται για εκτύπωση φερόντων στοιχείων, είναι απαραίτητη η ενίσχυση με χαλύβδινους οπλισμούς. Η ενσωμάτωση των οπλισμών στο 3DPC μπορεί να πραγματοποιηθεί με διάφορους τρόπους, όπως α) η εκτύπωση του περιγράμματος των υποστρωμάτων, με τρόπο ανάλογο με την κατασκευή του ξυλοτύπου σε μια συμβατική κατασκευή, η τοποθέτηση των απαιτούμενων οπλισμών (με χειρωνακτικό τρόπο) και ύστερα η πλήρωση με κοινό σκυροδέμα, β) η τοποθέτηση οριζόντιου εγκάρσιου οπλισμού ανάμεσα στις στρώσεις του υλικού, με χειρωνακτικό ή αυτόματο τρόπο, αμέσως μετά την εκτύπωση και γ) η τοποθέτηση δομικού πλέγματος κατακόρυφα και η εκτύπωση σκυροδέματος και από τις δύο πλευρές του, με χρήση ειδικά διαμορφωμένου ακροφυσίου. Εναλλακτικά, είναι δυνατή η προσθήκη ινών στο μίγμα, οι οποίες μπορεί να αποτελούνται από χάλυβα, γυαλί, άνθρακα, πολυπροπυλένιο ή πολυαιθυλένιο. Μια τυπική τιμή περιεκτικότητας ινών κατ' όγκο είναι το 2% (Souza, Ferreira, de Moraes, Senff, & de Oliveira, 2020).

Στα πλαίσια της ενίσχυσης της βιωσιμότητας, μια ενδιαφέρουσα εναλλακτική αποτελεί η χρήση γαιώδους κατασκευαστικού υλικού. Κατάλληλο για χρήση στην τριδιάστατη εκτύπωση 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. Σύμφωνα με εργαστηριακές δοκιμές 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).

Όταν χρησιμοποιείται η μέθοδος της σύντηξης στρώματος σκόνης, οι ιδιότητες του σκυροδέματος δεν εξαρτώνται μόνο από τις ιδιότητες των υλικών από τα οποία αποτελείται, 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). Τα συνηθέστερα υλικά που χρησιμοποιούνται σε αυτή την περίπτωση 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) (Jakupovic, 2016).

Οι σημαντικότερες δυνατότητες που μπορούν να παρέχουν οι μέθοδοι 3D Printing είναι:

- Μείωση του κόστους κατασκευής. Οι κύριοι λόγοι, που συμβάλλουν στην μείωση του κόστους κατασκευής είναι η μείωση του εργατικού κόστους, λόγω περιορισμού του απαιτούμενου εργατικού προσωπικού, η μη απαίτηση ξυλοτύπων και η βέλτιστη κατανάλωση οικοδομικών υλικών. Οι Pandit και Kumari συνέκριναν το κόστος κατασκευής μιας ισόγειας κατοικίας εμβαδού 56m², η οποία κατασκευάστηκε με μεθόδους 3D Printing, με το αντίστοιχο κόστος εφόσον είχε κατασκευαστεί με παραδοσιακές μεθόδους και κατέληξαν ότι προκύπτει μείωση της τάξης του 32% (Pandit & Kumari, 2021). Αντίστοιχα, οι Pan et al. συνέκριναν το κόστος κατασκευής ενός μικρού κτιρίου εμβαδού 16m² και εκτίμησαν ότι προκύπτει μείωση του κόστους κατασκευής κατά 58% στην περίπτωση της κατασκευής με μεθόδους 3D Printing (Pan, Zhang, Zhang, & Song, 2021). Επιπλέον, οι Allouzi et al. συνέκριναν το κόστος κατασκευής μιας Αίθουσας Πολλαπλών Χρήσεων εμβαδού 350m², που υλοποιήθηκε με παραδοσιακές μεθόδους, με το κόστος που θα είχε προκύψει αν γινόταν χρήση μεθόδων 3D Printing και κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι το συνολικό κόστος θα προέκυπτε μειωμένο κατά 7,2% (Allouzi, Al-Azhari, & Allouzi, 2020).
 - Μείωση εργατικών ατυχημάτων. Ο περιορισμός του απαιτούμενου εργατικού προσωπικού σε 2-3 άτομα, τα οποία απασχολούνται κυρίως με το χειρισμό και την επίβλεψη της διαδικασίας εκτύπωσης και αποφεύγουν επικίνδυνες εργασίες, όπως οι εργασίες σε ύψη, συμβάλλει στη σημαντική μείωση των εργατικών ατυχημάτων.
 - Μείωση χρόνου κατασκευής. Οι Rouhana et al. συνέκριναν το χρόνο κατασκευής ενός ισόγειου κτιρίου εμβαδού 200m² με τη μέθοδο Contour Crafting και παραδοσιακές μεθόδους κατασκευής, μέσω του προγράμματος EZStrobe και κατέληξαν ότι στην περίπτωση της Contour Crafting προκύπτει μείωση του χρόνου κατασκευής κατά 67%. Η σύγκριση αφορούσε τις εργασίες σκυροδέτησης και τοποθέτησης οπλισμών και όχι εργασίες όπως η κατασκευή της θεμελίωσης, ηλεκτρομηχανολογικές εγκαταστάσεις και εργασίες τελειωμάτων (Rouhana, El Jazzar, Faek, & Hamzeh, 2014). Επιπλέον οι Diggs-McGee et al. μελέτησαν το χρόνο κατασκευής ενός κτιρίου εμβαδού 47,5m² με εξώθηση τσιμεντοειδούς υλικού, εκτελώντας ανάλυση χρονοσειρών και συμπέραναν ότι ο συνολικός απαιτούμενος χρόνος κατασκευής ήταν 9 ημέρες, ο οποίος με την κατάλληλη εκπαίδευση του προσωπικού, τη βελτίωση των ιδιοτήτων των υλικών και την εφαρμογή κατάλληλης κάλυψης από τις καιρικές συνθήκες θα μπορούσε να μειωθεί σε 24 ώρες (Diggs-McGee, Kreiger, Kreiger, & Case, 2019).
 - Ακρίβεια κατασκευής - μείωση αποκλίσεων. Η αφαίρεση του ανθρώπινου παράγοντα εξαλείφει την πιθανότητα λάθους και εξασφαλίζει υψηλή ακρίβεια στην κατασκευή, με αποκλίσεις λίγων μόνο χιλιοστών (Bos, et al., 2022).
 - 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).
 - Περιβαλλοντικά οφέλη-βιωσιμότητα. Οι Batikha et al. συνέκριναν την κατασκευή μιας διώροφης κατοικίας εμβαδού 219,3m² με πέντε διαφορετικές κατασκευαστικές μεθόδους και κατέληξαν ότι με τη μέθοδο 3D Printing προκύπτουν οι λιγότερες εκπομπές CO₂, οι οποίες στην περίπτωση της επιτόπου έγχυσης οπλισμένου σκυροδέματος με παραδοσιακό τρόπο προκύπτουν αυξημένες κατά 25% (Batikha, Jotangia, Baaj, & Mousleh, 2022). Επιπλέον με τη μέθοδο 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).
- Οι σημαντικότεροι περιορισμοί των μεθόδων 3D Printing είναι:
- Υψηλό κόστος εξοπλισμού. Το κόστος ενός 3D Printer της εταιρείας COBOD με μορφή ρομποτικής διάταξης γερανογέφυρας, ανάλογα με τις μέγιστες διαστάσεις εκτύπωσης, μπορεί να ανέλθει σε 850.200,00€ (<https://cobod.com>), ενώ ο 3D Printer της εταιρείας D-Shape κοστίζει 250.000€ (Jakupovic, 2016). Το υψηλό κόστος απόκτησης του απαραίτητου εξοπλισμού ενδέχεται να ξεπερνά το

πλεονέκτημα από τη μείωση του κόστους κατασκευής, που μπορεί να προσφέρει η τεχνολογία 3D Printing, ειδικά στις αναπτυσσόμενες χώρες, όπου το κόστος εργασίας είναι ιδιαίτερα χαμηλό, καθιστώντας την επιλογή των μεθόδων 3D Printing ασύμφορη.

- Διαστάσεις έργων. 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. Η επιλογή ενός εκτυπωτή με μορφή κινούμενου ρομποτικού βραχίονα (όπως ο εκτυπωτής «Frank» της εταιρείας Apis Cor) αντιμετωπίζει τον περιορισμό του μεγέθους εκτύπωσης, όμως έχει ως αποτέλεσμα την πρόκληση καθυστερήσεων, λόγω των αλλαγών θέσης και της απαιτούμενης επαναρρύθμισης του εκτυπωτή (Peri 3D Construction).
- 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, περιορίζεται στην κατασκευή της εξωτερικής και της εσωτερικής τοιχοποιίας, οι οποίες μπορεί να είναι φέρουσες ή μη.
- Ενσωμάτωση οπλισμών. Επειδή το εκτυπωμένο σκυρόδεμα, όπως και το κοινό σκυρόδεμα, διαθέτει χαμηλή εφελκυστική αντοχή, σε πολλά έργα η ενσωμάτωση χαλύβδινων οπλισμών, αποτελεί μονόδρομο. Η εργασία αυτή δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί με αυτοματοποιημένο τρόπο και εκτελείται χειρωνακτικά.
- Έλλειψη κανονισμών και προτύπων. Επειδή η υλοποίηση κατασκευαστικών έργων με χρήση της τεχνολογίας 3D Printing αποτελεί ένα πολύ πρόσφατο γεγονός, 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. Επιπλέον, η ανάπτυξη κανονισμών και προτύπων θα διασφαλίσει 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).

- Επίδραση στην αγορά εργασίας. Η ευρύτερη εφαρμογή των μεθόδων 3D Printing στον τομέα των κατασκευών αναμένεται να έχει και κοινωνικό αντίκτυπο, καθώς θα οδηγήσει σε απώλεια πολλών θέσεων εργασίας, ειδικά όσον αφορά τους ανειδίκευτους εργάτες. Παράλληλα, η εφαρμογή της τεχνολογίας 3D Printing θα δημιουργήσει την ανάγκη απασχόλησης πιο εξειληγμένου και εξειδικευμένου προσωπικού, ύστερα φυσικά από κατάλληλη εκπαίδευση.

IV. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Οι δυνατότητες που μπορούν να προσφέρουν οι μέθοδοι 3D Printing στον τομέα των κατασκευών φαίνεται ότι μπορούν να δώσουν λύσεις στα σημαντικότερα προβλήματα που αντιμετωπίζει ο κατασκευαστικός κλάδος, επομένως μπορούν να υπερισχύσουν 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.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- 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*.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- <https://cobod.com>. Ανάκτηση από COBOD: <https://cobod.com/bod2>
- Jakupovic, A. (2016, 4). *D-Shape Report*. Ανάκτηση από D-Shape Enterprises L.L.C.: <https://dshape.wordpress.com/>
- Khoshnevis, B. (2004, 1). Automated construction by contour crafting—related robotics and information technologies. *Automation in Construction, Elsevier*, 13(1), pp. 5-19.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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/>
- 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.
- 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.
- 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.
- 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).