



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

**ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ  
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ (Δ.Π.Μ.Σ.)**

**"ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΛΙΚΩΝ"**

**ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΕΚΤΥΠΩΣΙΜΩΝ  
ΤΣΙΜΕΝΤΟΕΙΔΩΝ ΚΟΝΙΑΜΑΤΩΝ (3D  
PRINTED) ΣΕ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ  
ΚΛΙΜΑΚΑ**

**ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΑΙΚΑΤΕΡΙΝΗ ΧΑΪΝΤΟΥΤΗ**

Διπλωματούχου Μηχανικού Ορυκτών Πόρων Π.Κ.

**ΕΠΙΒΛΕΨΗ:**

Σ. ΤΣΙΒΙΛΗΣ, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

**ΑΘΗΝΑ, Οκτώβριος 2022**



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ  
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ (Δ.Π.Μ.Σ.)

**"ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΛΙΚΩΝ"**

**ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΕΚΤΥΠΩΣΙΜΩΝ  
ΤΣΙΜΕΝΤΟΕΙΔΩΝ ΚΟΝΙΑΜΑΤΩΝ (3D  
PRINTED) ΣΕ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ  
ΚΛΙΜΑΚΑ**

**ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΑΙΚΑΤΕΡΙΝΗ ΧΑΪΝΤΟΥΤΗ**

Διπλωματούχου Μηχανικού Ορυκτών Πόρων Π.Κ.

**ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:**

Σ. ΤΣΙΒΙΛΗΣ, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Ε. ΜΠΑΔΟΓΙΑΝΝΗΣ, Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Π. ΤΣΑΚΙΡΙΔΗΣ, Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

**ΑΘΗΝΑ, Οκτώβριος 2022**

## **Ευχαριστίες**

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κύριο Σωτήριο Τσιβιλή καθηγητή της Σχολής Χημικών Μηχανικών, του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, για την ανάθεση και την επίβλεψη της παρούσας εργασίας, αλλά και για την εμπιστοσύνη και τη στήριξη που μου παρείχε.

Την ερευνήτρια της Σχολής Χημικών Μηχανικών, του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου κυρία Αγγελική Σκαροπούλου για την αμέριστη βοήθεια και συμπαράσταση. Χωρίς την συμβολή της δεν θα ήταν εφικτό να φέρουμε εις πέρας το σημαντικότερο κομμάτι της εργασίας αυτής.

Τον Διδάκτορα της Σχολής Χημικών Μηχανικών, του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, κύριο Κωνσταντίνο Ασπιώτη για την υποστήριξη, την βοήθεια και το ειλικρινές ενδιαφέρον.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής επιτροπής κύριο Ε. Μπαδογιάννη, Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ και Π. Τσακιρίδη, Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ για το χρόνο που διέθεσαν για την αξιολόγηση της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας.

## Περίληψη

Αντικείμενο της εν λόγω μεταπτυχιακής εργασίας είναι η μελέτη της επίδρασης των ρεολογικών ιδιοτήτων νωπών τσιμεντοκονιαμάτων στη δυνατότητα εκτύπωσής τους καθώς και η μέτρηση των μηχανικών αντοχών των σκληρυμένων δοκιμίων τους. Για τη μελέτη των ρεολογικών ιδιοτήτων πραγματοποιήθηκε έλεγχος της ποιότητας εκτύπωσης (extrudability), της κατασκευασιμότητας (buildability) και του χρόνου πήξης (open time). Παρασκευάστηκαν διαφορετικές συνθέσεις τσιμεντοκονιαμάτων με χρήση τσιμέντου τύπου CEM I, ασβεστολιθικής άμμου, πυριτικής παιπάλης, νερού και τριών διαφορετικών εμπορικών προσθέτων (υπερρρευστοποιητή, επιβραδυντή και επιταχυντή). Ο λόγος άμμου προς συνδετικά υλικά (S/B) και οι ποσότητες χημικών πρόσθετων βελτιστοποιήθηκαν μέσω παρασκευής πολλών δοκιμαστικών συνθέσεων. Αρχικά, πραγματοποιήθηκε έλεγχος και αξιολόγηση της εκτύπωσης. Κατόπιν ακολούθησαν οι μετρήσεις της κατασκευασιμότητας και του χρόνου πήξης. Οι συγκεκριμένες ρεολογικές ιδιότητες συσχετίζονται άμεσα με την ποιότητα της εκτύπωσης. Στη συνέχεια, έγινε καταγραφή των μετρήσεων των μηχανικών αντοχών στα παραχθέντα σκληρυμένα δοκίμια στις 2, 7 και 28 ημέρες. Στόχος είναι η αξιολόγηση της διαδικασίας, των συνθέσεων των κονιαμάτων καθώς και των χημικών πρόσθετων (υπερρρευστοποιητή, επιβραδυντή και επιταχυντή) που χρησιμοποιήθηκαν. Από τον έλεγχο των ρεολογικών ιδιοτήτων και τη μέτρηση μηχανικών αντοχών, βρέθηκε ο βέλτιστος λόγος άμμου προς συνδετικά υλικά. Διατηρώντας σταθερό το βέλτιστο λόγο S/B εξετάστηκαν εκ νέου συνθέσεις με την προσθήκη χημικών πρόσθετων. Από τον έλεγχο της κατασκευασιμότητας και της ικανότητας εξώθησης βρέθηκαν τα βέλτιστα στα οποία πραγματοποιήθηκε μέτρηση μηχανικών αντοχών και έλεγχος πήξης. Συμπεραίνεται ότι η προσθήκη χημικών προσθέτων βελτίωσε τις ρεολογικές ιδιότητες του νωπού τσιμεντοκονιάματος. Ο λόγος άμμου προς συνδετικά υλικά είναι καθοριστικής σημασίας για την ικανοποιητική εξώθηση του μίγματος. Όσο μεγαλύτερος ο λόγος S/B τόσο μικρότερη η εργασιμότητα του μίγματος. Επιπλέον, η μείωση του λόγου οδηγεί σε πιο υδαρή μίγματα ενώ η αύξηση του μειώνει την υψομετρική και πλευρική παραμόρφωση. Ο βέλτιστος λόγος S/B βρέθηκε ίσος με 1.9. Η προσθήκη χημικών πρόσθετων βελτιώνει σε μεγάλο βαθμό την ικανότητα εκτύπωσης και την κατασκευασιμότητα της τσιμεντοκονίας. Ως βέλτιστα ποσοστά χημικών προσθέτων προέκυψαν 0.15% κ.β. υπερρρευστοποιητή, 1% κ.β. επιβραδυντή και 1% κ.β. επιταχυντή.

## **Abstract**

The subject of this master's thesis is the study of the effect of the rheological properties of fresh cement mortars on their printability as well as the measurement of the mechanical strengths of their hardened samples. In order to study the rheological properties, the printing quality (extrudability), the buildability and the setting time were examined. Different compositions of cement mortars were prepared using cement CEM I, limestone sand, water and three different chemical additives such as superplasticizer, retarder, and accelerator. The ratio of sand to binders and the amount of chemical additives were optimized by preparing several trial compositions. First, the printability was examined and evaluated. Then followed the buildability and setting time measurements. Those specific rheological properties are directly related to the quality of the print. Then the measurements of the mechanical strength of the samples were recorded at 2, 7, 28 days. The aim is to evaluate the process, the compositions of the mortars as well as the chemical additives that are used. From rheological properties and the measurement of mechanical strengths, optimal ratio sand to binders were found. Keeping the optimum S/B ratio stable, the optimum percentages of chemical additives were examined. To those optimum percentages of chemical additives were measured the strength and setting time. It is concluded that the addition of chemical additives improves the rheological properties of fresh cement mortar. The ratio of sand to binders is extremely important for the correct extrusion of the mixture. The higher the S/B ratio, the lower the workability of the mixture. In addition, decreasing the ratio leads to more fluid mixtures while increasing it reduces the altitude and lateral deformation. The optimum S/B ratio was found to be 1.9. Therefore, the addition of chemical additives (superplasticizer, retarder, and accelerator) greatly improves the printability and buildability of cement mortar. The optimal percentages were 0.15% wt. superplasticizer, 1% wt. retarder and 1% wt. accelerator.

## Περιεχόμενα

<b>1. Εισαγωγή</b> .....	8
<b>2. Τσιμεντοειδή υλικά</b> .....	10
2.1. Ιστορική Αναδρομή κονιαμάτων .....	10
2.2. Διάκριση Κονιαμάτων .....	11
2.3. Τσιμέντο .....	12
2.4. Παρασκευή τσιμέντου .....	13
2.5. Τύποι και κατηγορίες τσιμέντου .....	14
2.6. Σκυρόδεμα .....	17
2.6.1. Γενικά στοιχεία σκυροδέματος .....	17
2.6.2. Ιδιότητες και κατηγορίες σκυροδέματος .....	25
<b>3. Προσθετική κατασκευή</b> .....	26
3.1. Εισαγωγικά στοιχεία .....	26
3.2. Κατηγορίες προσθετικής κατασκευής .....	27
3.2.1. Vat Photopolymerisation .....	28
3.2.2. Material Extrusion .....	30
3.2.3. Binder jetting process .....	31
3.2.4. Directed energy deposition DED .....	32
3.2.5. Material jetting .....	33
3.2.6. Powder bed fusion .....	34
3.2.7. Sheet lamination .....	35
3.3. Προσθετική κατασκευή στον κατασκευαστικό τομέα .....	36
3.3.1. Extrusion Printing (Extrusion based process) .....	37
3.3.2. Inkjet Printing (Binder jetting) .....	38
3.3.3. Selective Laser Sintering (SLS) .....	39
3.4. Σχεδιασμός εκτυπώσιμων τσιμεντοειδών υλικών .....	40
3.5. Εφαρμογές της τρισδιάστατης εκτύπωσης .....	42
3.6. Περιβαλλοντικές και οικονομικές επιδόσεις .....	45
3.7. Προκλήσεις και βελτιώσεις της τρισδιάστατης εκτύπωσης .....	47
3.8. Μελλοντικές δυνατότητες .....	49
<b>4. Πειραματικό μέρος</b> .....	51
4.1. Πρώτες ύλες .....	51
4.2. Τεχνικές ελέγχου ρεολογικών ιδιοτήτων .....	53
4.2.1. Έλεγχος κατασκευασιμότητας .....	53
4.2.2. Έλεγχος εξώθησης υλικού .....	54

4.2.3.	Έλεγχος χρόνου πήξης .....	57
4.2.4.	Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη .....	58
	<b>5. Αποτελέσματα και συζήτηση αποτελεσμάτων</b> .....	<b>60</b>
5.1.	Εύρεση λόγου Άμμου προς Συνδετικά Υλικά .....	60
5.2.	Εύρεση βέλτιστου ποσοστού Υπερρευστοποιητή .....	67
5.3.	Εύρεση βέλτιστου ποσοστού Επιβραδυντή .....	74
5.4.	Εύρεση βέλτιστου ποσοστού Επιταχυντή.....	82
	<b>6. Συμπεράσματα</b> .....	<b>89</b>
	Βιβλιογραφία .....	92

## Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2.1: Βασικοί τύποι τσιμέντου [3].....	15
Πίνακας 2.2: Προτυποποίηση Τσιμέντων. ....	15
Πίνακας 2.3: Μηχανικές και φυσικές απαιτήσεις σύμφωνα με το EN 197-1. Κατηγορίες τσιμέντων (EN 197-1). ....	16
Πίνακας 2.4: Είδη Σκυροδέματος.....	18
Πίνακας 2.5: Επίδραση στις ιδιότητες του σκυροδέματος μετά από την προσθήκη χημικών βελτιωτικών.....	21
Πίνακας 2.6: Κατηγορίες καθίσεως. ....	25
Πίνακας 3.1:Προκλήσεις και Βελτιώσεις.....	50
Πίνακας 4.1: Χρόνοι Ανάμιξης. ....	53
Πίνακας 5.1: Τιμές υψομετρικής και πλευρικής παραμόρφωσης ( $\Delta h$ , $\Delta d$ ) για τις συνθέσεις S/B: 1.4, S/B: 1.9 και S/B: 2.3.....	60
Πίνακας 5.2: Προσδιορισμός χρόνου αρχής πήξης για τις τρεις συνθέσεις. ....	62
Πίνακας 5.3:Μετρήσεις αντοχής σε θλίψη των σκληρυμένων δοκιμίων για όλες τις συνθέσεις. ....	66
Πίνακας 5.4: Τιμές υψομετρικής και πλευρικής παραμόρφωσης ( $\Delta h$ , $\Delta d$ ) για τις συνθέσεις με προσθήκη υπερρευστοποιητή.....	68
Πίνακας 5.5: Προσδιορισμός χρόνου αρχής πήξης για τις τρεις συνθέσεις με την προσθήκη υπερρευστοποιητή. ....	71
Πίνακας 5.6: Μετρήσεις αντοχής σε θλίψη των σκληρυμένων δοκιμίων για όλες τις συνθέσεις με προσθήκη υπερρευστοποιητή. ....	73
Πίνακας 5.7: Τιμές υψομετρικής και πλευρικής παραμόρφωσης ( $\Delta h$ , $\Delta d$ ) για τις συνθέσεις με προσθήκη επιβραδυντή. ....	75
Πίνακας 5.8: Προσδιορισμός χρόνου αρχής πήξης για τις τρεις συνθέσεις με την προσθήκη επιβραδυντή.....	79
Πίνακας 5.9: Μετρήσεις αντοχής σε θλίψη των σκληρυμένων δοκιμίων για όλες τις συνθέσεις με προσθήκη επιβραδυντή.....	80
Πίνακας 5.10: Τιμές υψομετρικής και πλευρικής παραμόρφωσης ( $\Delta h$ , $\Delta d$ ) για τις συνθέσεις με προσθήκη επιταχυντή. ....	82
Πίνακας 5.11: Προσδιορισμός χρόνου αρχής πήξης για τις τρεις συνθέσεις με την προσθήκη επιβραδυντή.....	86



Πίνακας 5.12: Μετρήσεις αντοχής σε θλίψη των σκληρυμένων δοκιμίων για όλες τις συνθέσεις με προσθήκη επιταχυντή. ....	87
---	----

## Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 2.1: Σχηματικό διάγραμμα παρασκευής τσιμέντου. ....	14
Σχήμα 2.2: Συμβολισμός των διαφόρων τύπων τσιμέντου του ευρωπαϊκού προτύπου. ....	16
Σχήμα 2.3: α) Τσιμέντο και προσθήκη νερού. β) Τσιμέντο με προσθήκη νερού και υπερρευστοποιητή. ....	23
Σχήμα 2.4: Διάγραμμα ροής συναρτήσει αναλογίας νερού/τσιμέντο. ....	23
Σχήμα 2.5: Τρόπος επίδρασης του υπερρευστοποιητή. ....	24
Σχήμα 2.6: Σύσταση του κονιάματος. ....	24
Σχήμα 3.1: Διάγραμμα ταχείας εκτύπωσης. ....	26
Σχήμα 3.2: Οι 7 κατηγορίες της προσθετικής κατασκευής ανάλογα με την τεχνολογία που χρησιμοποιείται κατά ISO/ASTM52900-15 [8] ....	27
Σχήμα 3.3: Σχηματική αναπαράσταση της μεθόδου Vat photopolymerization [8]. ....	28
Σχήμα 3.4: Σχηματική αναπαράσταση της μεθόδου Material extrusion [8]. ....	30
Σχήμα 3.5: Σχηματική αναπαράσταση της μεθόδου Binder jetting [8]. ....	31
Σχήμα 3.6: Σχηματική αναπαράσταση της μεθόδου Directed energy deposition [8]. ....	32
Σχήμα 3.7: Σχηματική αναπαράσταση της μεθόδου Material jetting [8]. ....	33
Σχήμα 3.8: Σχηματική αναπαράσταση της μεθόδου Powder bed fusion [8]. ....	34
Σχήμα 3.9: Σχηματική αναπαράσταση της μεθόδου Sheet lamination [8]. ....	35
Σχήμα 3.10: Γραφική απεικόνιση της μεθόδου extrusion printing [10]. ....	38
Σχήμα 3.11: Σχηματική απεικόνιση της μεθόδου inkjet 3D printing process. ....	39
Σχήμα 3.12: Σχηματική απεικόνιση της μεθόδου Selective Laser Sintering. ....	40
Σχήμα 3.13 Σχηματικό σύστημα εκτύπωσης σκυροδέματος [24]. ....	42
Σχήμα 3.14: Πρώτο εκτυπώσιμο σπίτι από την εταιρεία Dus Architects. ....	44
Σχήμα 3.15: Εκτυπώσιμο σπίτι από την εταιρεία WinSun. ....	44
Σχήμα 3.16: 3DPrinted κτιριακές κατασκευές ανά τον κόσμο. α) Andy Rudenko’s Garden (2014) β) Lewis Grand Hotel Philippines (2015) γ) five-story apartment building China (2015) δ) Two-story building China (2016) ε) Office building UAE (2016) ζ) Gaia house Massa Lombarda [31]. ....	44
Σχήμα 3.17: Διάγραμμα ροής βιωσιμότητας της τεχνικής 3DP. ....	45

Σχήμα 3.18: Σχηματικό διάγραμμα 3DP setup: 0. Σύστημα εντολών 1. Έλεγχος 2. Ελεγκτής εκτύπωσης 3. Ρομποτικός βραχίονας 4. Κεφαλή εκτύπωσης 5. Επιταχυντικός παράγοντας 6. Αντλία 7. Αντλία για επιπλέον ανάμιξη 8. Αναμικτήρας 9. 3D εκτυπώσιμο αντικείμενο [37]. .....	46
Σχήμα 4.1 Συσκευή ανάμειξης. ....	52
Σχήμα 4.2: Ειδικά διαμορφωμένος μεταλλικός κύλινδρος για την μέτρηση παραμόρφωσης του υλικού. ....	54
Σχήμα 4.3: Αρχική και τελική παραμόρφωση υλικού ( πριν και μετά την εφαρμογή βάρους). .....	54
Σχήμα 4.4:Σχηματική απεικόνιση ενός τσιμεντοειδούς σύστημα εξώθησης υλικού [33]. ....	55
Σχήμα 4.5: Μηχάνημα εξώθησης τσιμεντοκονίας. ....	56
Σχήμα 4.6:a) Λαιμός κατά την εξώθηση.β) Έντονες ρωγμές και δυσκολία εξώθησης . γ) Καλή εικόνα εξώθησης. ....	56
Σχήμα 4.7:Συσκευή μέτρησης χρόνου πήξης Vicatronic ( www.ele.com/). ....	58
Σχήμα 4.8: Οθόνη καταγραφής ρυθμού διείδυσης βελόνας συναρτήσε του χρόνου.....	58
Σχήμα 4.9: Μηχάνημα μονοαξονικής θλίψης δοκιμίου. ....	59
Σχήμα 4.10: Μεταλλικές μήτρες με νωπό τσιμεντοκονίαμα τοποθετημένες σε θάλαμο συντήρησης με σταθερές συνθήκες θερμοκρασίας και υγρασίας. ....	59
Σχήμα 5.1: Ποσοστό υψομετρικής παραμόρφωσης για τους λόγους S/B : 1.4, S/B: 1.9 και S/B: 2.3. ....	61
Σχήμα 5.2: Ποσοστό πλευρικής παραμόρφωσης για τους λόγους S/B: 1.4, S/B: 1.9 και S/B: 2.3. ....	61
Σχήμα 5.3: Διάγραμμα χρόνου αρχής πήξης για τους λόγους S/B: 1.4, S/B: 1.9 και S/B: 2.3. ....	63
Σχήμα 5.4: Διείδυση βελόνας συναρτήσε του χρόνου για την σύνθεση S/B:1.4. ....	63
Σχήμα 5.5: Σύνθεση με λόγο S/B: 1.4 κατά τη διαδικασία της εξώθηση. ....	64
Σχήμα 5.6 Σύνθεση με λόγο S/B : 1.9 κατά τη διαδικασία της εξώθηση. ....	65
Σχήμα 5.7 Σύνθεση με λόγο S/B:2.3 κατά τη διαδικασία της εξώθηση. ....	65
Σχήμα 5.8:Αντοχή σε θλίψη σκληρυμένων δοκιμίων στις 2, 7 και 28 ημέρες για τις συνθέσεις με λόγο S/B: 1.4, S/B: 1.9 και S/B: 2.3. ....	67
Σχήμα 5.9: Ποσοστό υψομετρικής παραμόρφωσης συνθέσεων με προσθήκη υπερρευστοποιητή. ....	69
Σχήμα 5.10: Ποσοστό πλευρικής παραμόρφωσης συνθέσεων με προσθήκη υπερρευστοποιητή. ....	69

Σχήμα 5.11: α) Σύνθεση 1 <sup>η</sup> με προσθήκη 0.05% υπερρευστοποιητή κατά τη διαδικασία της εξώθησης. β) Σύνθεση 3 <sup>η</sup> με προσθήκη 0.15% υπερρευστοποιητή κατά τη διαδικασία της εξώθησης. ....	70
Σχήμα 5.12: Διάγραμμα χρόνου αρχής πήξης για τις τρεις συνθέσεις με την προσθήκη υπερρευστοποιητή. ....	72
Σχήμα 5.13: Αντοχή σε θλίψη σκληρυμένων δοκιμίων στις 2, 7 και 28 ημέρες για τις συνθέσεις με προσθήκη υπερρευστοποιητή. ....	73
Σχήμα 5.14: Ποσοστό υψομετρικής παραμόρφωσης συνθέσεων με προσθήκη επιβραδυντή. ....	75
Σχήμα 5.15: Ποσοστό πλευρικής παραμόρφωσης συνθέσεων με προσθήκη επιβραδυντή. ....	76
Σχήμα 5.16: Παραμόρφωση υλικού με προσθήκη ποσοστού 0.75% κ.β. επιβραδυντή. ....	76
Σχήμα 5.17: Σύνθεση 3 <sup>η</sup> με προσθήκη 0.75% επιβραδυντή. κατά τη διαδικασία της εξώθησης. ....	77
Σχήμα 5.18: Σύνθεση 4 <sup>η</sup> με προσθήκη 1% επιβραδυντή κατά τη διαδικασία της εξώθησης. ..	78
Σχήμα 5.19: Σύνθεση 5 <sup>η</sup> με προσθήκη 1.25% επιβραδυντή κατά τη διαδικασία της εξώθησης. ....	78
Σχήμα 5.20: Διάγραμμα χρόνου αρχής πήξης για τις τρεις συνθέσεις με την προσθήκη επιβραδυντή. ....	79
Σχήμα 5.21: Αντοχή σε θλίψη σκληρυμένων δοκιμίων στις 2, 7 και 28 ημέρες για τις συνθέσεις με προσθήκη επιβραδυντή. ....	81
Σχήμα 5.22: Ποσοστό υψομετρικής παραμόρφωσης συνθέσεων με προσθήκη επιταχυντή. ..	83
Σχήμα 5.23: Ποσοστό πλευρική παραμόρφωσης συνθέσεων με προσθήκη επιταχυντή. ....	83
Σχήμα 5.24: α) Σύνθεση 1 <sup>η</sup> με προσθήκη 0.25% επιταχυντή κατά τη διαδικασία της εξώθησης. β) Σύνθεση 2 <sup>η</sup> με προσθήκη 0.50% επιταχυντή κατά τη διαδικασία της εξώθησης. ....	84
Σχήμα 5.25: α) Σύνθεση 4 <sup>η</sup> με προσθήκη 1% επιταχυντή κατά τη διαδικασία της εξώθησης. β) Σύνθεση 5 <sup>η</sup> με προσθήκη 1.25% επιταχυντή κατά τη διαδικασία της εξώθησης. ....	85
Σχήμα 5.26: Σύνθεση 6 <sup>η</sup> με προσθήκη 1.5% επιταχυντή κατά τη διαδικασία της εξώθησης. ....	85
Σχήμα 5.27: Διάγραμμα χρόνος αρχής πήξης για τις τρεις συνθέσεις με την προσθήκη επιταχυντή. ....	87
Σχήμα 5.28: Αντοχή σε θλίψη σκληρυμένων δοκιμίων στις 2, 7 και 28 ημέρες για τις συνθέσεις με προσθήκη επιταχυντή. ....	88

## 1. Εισαγωγή

Τα τσιμεντοειδή υλικά αποτελούν τα πιο ευρέως διαδεδομένα κατασκευαστικά υλικά στον κόσμο. Με την ταχεία πρόοδο της αστικοποίησης και της εκβιομηχάνισης δημιουργήθηκαν νέες ανάγκες στον κατασκευαστικό τομέα. Τα αυτόματα κατασκευαστικά συστήματα έχουν γίνει το επίκεντρο της κατασκευαστικής βιομηχανίας και των ερευνητών παγκοσμίως. Η μέθοδος τρισδιάστατης εκτύπωσης (3D Printing, 3DP) αποτελεί μια καινοτόμα ιδέα. Η 3DP έχει το πλεονέκτημα της υψηλής απόδοσης της κατασκευής, του χαμηλού κόστους εργασίας και των λιγότερων κατασκευαστικών αποβλήτων σε σύγκριση με την παραδοσιακή τεχνολογία. Στην παρούσα διπλωματική μελετάται η επίδραση των ρεολογικών ιδιοτήτων νωπών τσιμεντοκονιαμάτων στη δυνατότητα εκτύπωσής τους καθώς και οι μηχανικές αντοχές των σκληρυμένων δοκιμών τους. Στις συνθέσεις που παράχθηκαν έγινε μελέτη της ικανότητας εξώθησης του υλικού (extrudability), της κατασκευασιμότητας (buildability) και του αρχικού και τελικού χρόνου αρχής πήξης (open time) καθώς επίσης και της αντοχής σε μοναξονική θλίψη.

Πραγματοποιήθηκαν διαφορετικές συνθέσεις με τις βασικές πρώτες ύλες (τσιμέντο, πυριτική παιπάλη, άμμο και νερό). Σκοπός ήταν η εύρεση της βέλτιστης αναλογίας άμμου προς συνδετικά υλικά (Sand/Binder, S/B). Τα κριτήρια για την επιλογή της βέλτιστης αναλογίας έγιναν με βάση τις ρεολογικές ιδιότητες και την αντοχή σε θλίψη των σκληρυμένων δοκιμών. Στη συνέχεια, κρατώντας σταθερή την βέλτιστη αναλογία, πραγματοποιήθηκαν πολλαπλές δοκιμές σε νέες συνθέσεις για τα χημικά πρόσθετα (υπερρρευστοποιητή, επιβραδυντή, επιταχυντή).

Για την εύρεση του βέλτιστου ποσοστού υπερρρευστοποιητή, παράχθηκαν 6 διαφορετικοί συνδυασμοί συνθέσεων τσιμεντοκονιαμάτων. Με βάση τα αποτελέσματα της εξώθησης και της κατασκευασιμότητας, έγινε η επιλογή των τριών καλύτερων ποσοστών του υπερρρευστοποιητή. Στη συνέχεια ακολούθησε η μέτρηση του αρχικού και τελικού χρόνου πήξης και της αντοχής σε θλίψη στα δοκίμια των τριών καλύτερων συνθέσεων. Όμοια διαδικασία ακολούθηθηκε και για την εύρεση του βέλτιστου ποσοστού του επιβραδυντή και επιταχυντή.

Η δομή της διπλωματικής εργασίας διαμορφώθηκε ως εξής:

Κεφάλαιο 1 «Εισαγωγή»: Παρατίθενται εισαγωγικά στοιχεία για την εργασία.

Κεφάλαιο 2 «Τσιμεντοειδή Υλικά»: Παρουσιάζονται αναλυτικά τα κύρια στοιχεία του κονιάματος, του τσιμέντου και του σκυροδέματος .

Κεφάλαιο 3 «Θεωρητική επισκόπηση στην έννοια του 3DP και των εκτυπώσιμων τσιμεντοειδών»: Παρουσιάζονται οι μέθοδοι και οι τεχνικές της τρισδιάστατης εκτύπωσης. Εστίαση σε εφαρμογές του 3DP καθώς και στις περιβαλλοντικές και οικονομικές επιδόσεις. Τέλος, αναφέρονται προκλήσεις και βελτιώσεις της τρισδιάστατης εκτύπωσης.

Κεφάλαιο 4 «Πειραματικό Μέρος»: Αναλυτική περιγραφή της πειραματικής διαδικασίας που ακολουθήθηκε.

Κεφάλαιο 5 «Αποτελέσματα και συζήτηση αποτελεσμάτων»: Παρουσιάζονται και αξιολογούνται τα αποτελέσματα.

Κεφάλαιο 6 «Συμπεράσματα»: Παρουσιάζονται τα κύρια συμπεράσματα της εργασίας.

Τέλος, παρατίθεται η βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε για την εκπόνηση της συγκεκριμένης μεταπτυχιακής εργασίας

## 2. Τσιμεντοειδή υλικά

### 2.1. Ιστορική Αναδρομή κονιαμάτων

Για χρόνια η αρχιτεκτονική και η κατασκευή κτιρίων ήταν άμεσα συνδεδεμένη με την χρήση ορυκτών κονιαμάτων. Το ασβεστοκονίαμα ήταν γνωστό για περισσότερα από 8000 χρόνια και τα κονιάματα γύψου χρησιμοποιούνταν από τους Βαβυλώνιους πριν από 6000 χρόνια. Τα κονιάματα υδραυλικής πήξης με βάση τις ποζολάνες ήταν γνωστά για πάνω από 3000 χρόνια και χρησιμοποιήθηκαν κατά κύριο λόγο από τους αρχαίους Φοίνικες, Έλληνες και Ρωμαίους. Κατά την αρχαιότητα και τον μεσαίωνα πρόσθεταν στα κονιάματα διάφορα συστατικά όπως σαπούνια, ρητίνη, πρωτεΐνες και στάχτη με στόχο τη βελτίωση των τεχνικών χαρακτηριστικών και της αποτελεσματικότητά τους. Γενικότερα, τα κονιάματα με βάση τα ορυκτά συνδετικά όπως το ασβέστη, το τσιμέντο ή τη γύψος χρησιμοποιούνται πάνω από 8000 χρόνια στην κατασκευή κτιρίων. Τα κονιάματα αυτά έχουν χρησιμοποιηθεί κυρίως για την τοποθέτηση λίθων και τούβλων (κονιάματα τοιχοποιίας) και για επίστρωση τοίχων (κονιάματα επιχρίσματος) [1].

Τα πρωταρχικά κονιάματα αποτελούνταν από μίγμα πηλοκονίας και άμμου, στην πορεία έγινε εναλλαγή σε ασβέστη, νερό και άμμο. Η κατασκευή κτιρίων με αυτή τη «λάσπη» αποτελούσε προφανώς μεγάλο πρόβλημα αφού ήταν μια εξαιρετικά επίπονη διαδικασία. Με την αύξηση των αναγκών για βελτιωμένη ποιότητα των κατασκευών, αυξάνονταν και η ποιότητα των κονιαμάτων. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι μέχρι τη δεκαετία του 1950 τα κονιάματα με βάση το τσιμέντο παράγονταν και εφαρμόζονταν αποκλειστικά με τη λεγόμενη τεχνολογία ανάμειξης στο εργοτάξιο. Η ανάμειξη στο εργοτάξιο πρακτικά σημαίνει την μεταφορά των πρώτων υλών στο εργοτάξιο και την επί τόπου ανάμειξη. Επομένως, το τσιμέντο, το πιο κοινό συνδετικό υλικό, αναμειγνύεται με πληρωτικά όπως η άμμος πριν προστεθεί νερό για να δημιουργηθεί το υγρό κονίαμα για εφαρμογή.

Κατά την δεκαετία του 1950 και του 1960 στη Δυτική Ευρώπη και στις Η.Π.Α. υπήρξε αυξημένη ζήτηση στον κατασκευαστικό κλάδο για νέα δομικά υλικά και νέες τεχνολογίες [1]. Οι κυριότεροι λόγοι ήταν η έλλειψη ειδικευόμενων εργατών μαζί με την ανάγκη για μείωση του χρόνου και του κόστους της κατασκευής, την αύξηση κόστους της εργασίας και την διαφοροποίηση των δομικών υλικών κατάλληλων για συγκεκριμένες εφαρμογές με στόχο την καλύτερη ποιότητα της εκάστοτε κατασκευής. Όλη αυτή η διαδικασία ανάμειξης που λάμβανε χώρα στο εργοτάξιο αντικαταστάθηκε από εργοστασιακά αναμειγμένα ξηρά κονιάματα.

Αυτή η εργοστασιακή διαδικασία επιτρέπει επίσης να προστεθούν και διάφορα πρόσθετα και πρόσμικτα με σκοπό τη βελτίωση της απόδοσης των κονιαμάτων [1]. Με βάση αυτήν την τεχνολογία, σταδιακά ήταν πλέον εφικτή η παραγωγή μεμονωμένων ξηρών κονιαμάτων για συγκεκριμένη εφαρμογή. Η μηχανοποίηση της εφαρμογής του κονιάματος και η τροποποίηση με προσμίξεις για την βελτίωση της ποιότητας των προϊόντων και την κάλυψη των απαιτήσεων της σύγχρονης οικοδομικής βιομηχανίας οδήγησε σε δραστική βελτίωση της παραγωγικότητας αναφορικά με εφαρμογές μεγάλου όγκου όπως κονιάματα τοιχοποιίας και επιχρίσματος.

## 2.2. Διάκριση Κονιαμάτων

Τα κονιάματα είναι μίγματα μίας ή περισσοτέρων συνδετικών μέσων (κονιών), λεπτόκοκκων αδρανών π.χ. άμμος (<4 mm), νερού καθώς και με δυνατότητα προσθήκης διάφορων βελτιωτικών. Αρχικά τα νωπά κονιάματα έχουν εξαιρετική ρευστότητα και πλαστικότητα ενώ μετά από την πήξη και τη σκλήρυνση της συνδετικής ύλης παρατηρείται έντονα η αύξηση των μηχανικών αντοχών καθώς και των φυσικών και χημικών ιδιοτήτων τους. Οι κονίες γενικά χρησιμοποιούνται είτε μόνες τους είτε σε συνδυασμό. Τα αδρανή που χρησιμοποιούνται πρέπει να είναι καθαρά και απαλλαγμένα από βλαβερές ουσίες. Επιπλέον, το νερό που χρησιμοποιείται πρέπει να είναι διαυγές απαλλαγμένο από χημικές ουσίες [2]. Αναφορικά με τα βελτιωτικά πρόσθετα παρατηρείται ότι χρησιμοποιούνται εξαιρετικά μικρές ποσότητες και επηρεάζουν βασικές ιδιότητες των κονιαμάτων όπως την αντοχή, την πλαστιμότητα, την ρευστότητα, την πηκτικότητα κτλ.

Μερικές από τις ταξινομήσεις των κονιαμάτων είναι οι εξής :

- Με βάση την χρήση τους (κονιάματα τοιχοποιίας, επιχρίσματα, δαπέδων, επισκευαστικά αρμοκονιάματα, στεγανωτικά, θερμομονωτικά, πυρίμαχα).
- Με βάση την σύνθεσή τους (πηλοκονιάματα, ασβεστοκονιάματα, τσιμεντοκονιάματα, ασβεστοτσιμεντοκονιάματα, γυψοκονιάματα, ασβεστογυψοκονιάματα, μαρμαροκονιάματα, κονιάματα ρητινών).
- Με βάση την κοκκομετρία τους.
- Με βάση την συνεκτικότητά τους (ρευστό, σφιχτό, πεταχτά, ενέματα).
- Με βάση την αντοχή τους ( Μικρή αντοχή <5 Mpa, Μεσαία αντοχή > 5 και <15 Mpa και Υψηλής αντοχής >15 Mpa).

- Ανάλογα με τη φάση εφαρμογής (ξηρό κονίαμα, νωπό κονίαμα, σκληρυμένο κονίαμα).
- Ανάλογα με την πυκνότητά τους (ελαφριά  $<1500\text{kg/m}^3$  και βαριά  $>1500\text{kg/m}^3$ )

#### Ποιοτικά χαρακτηριστικά του κονιάματος

Χρόνος εργασιμότητας: Αποτελεί το χρονικό διάστημα από την πλήρη ανάμειξη του νωπού κονιάματος ως το κονίαμα να διατηρείται εργάσιμο και να μπορεί να εφαρμοστεί στην κατασκευή.

Συνεκτικότητα: Αποτελεί το μέτρο ρευστότητας του νωπού μέσα στη μάζα του και σχετίζεται άμεσα με το ποσοστό νερού.

Περιεχόμενος αέρας: Κατά την ανάμειξη ο αέρας εγκλωβίζεται στο νωπό κονίαμα σε μορφή φυσαλίδων με αποτέλεσμα να κάνει το νωπό κονίαμα πιο «αφράτο». Επίσης, αυξάνει τη δυνατότητα προσθήκης επιπλέον πρόσθετων.

Κατακράτηση νερού: Τα δομικά υλικά που βρίσκονται μέσα στο νωπό κονίαμα έχουν τη δυνατότητα είτε να κατακρατούν είτε να εξατμίζουν το νερό. Η ρύθμιση γίνεται με βάση την κατάλληλη σύσταση του κονιάματος.

Πυκνότητα νωπού κονιάματος: Για να υπολογιστεί η κατανάλωση καταμετράτε η τιμή της πυκνότητας (g/l).

Περιεκτικότητα σε χλωριόντα: Συνδέεται άμεσα με την προστασία του οπλισμένου σκυροδέματος. Κατά το ξηρό κονίαμα δεν πρέπει να υπάρχει υπέρβαση του ποσοστού 0.1% Cl.

### 2.3. Τσιμέντο

Το τσιμέντο είναι μία υδραυλική συνδετική ύλη, αποτελείται από λεπτότατο αλεσμένο ανόργανο υλικό το οποίο όταν αναμειχθεί με νερό σχηματίζει ένα πολτό που πήζει και σκληραίνει δια μέσου αντιδράσεων και μηχανισμών ενυδάτωσης. Μετά τη σκλήρυνση, διατηρεί την αντοχή και τη σταθερότητά του ακόμη και μέσα στο νερό .

$$\text{Τσιμέντο} = \text{Κλίνκερ} + \text{Γύψος} + \text{Πρόσθετα}$$



Όπου Κλίνκερ (Κ) ονομάζεται το προϊόν που προκύπτει μετά από έψηση στους 1380-1450 °C μίγματος 75%-25% ασβεστολιθικών και αργιλοπυριτικών υλικών (φαρίνα). Το κλίνκερ του τσιμέντου Πόρτλαντ είναι ένα υδραυλικό υλικό που συνίσταται τουλάχιστον κατά τα 2/3 κ.β. από  $C_3S$  και  $C_2S$  ενώ το υπόλοιπο κατά κύριο λόγο συνίσταται από τις αργλικές και σιδηραργλικές φάσεις του κλίνκερ [3].

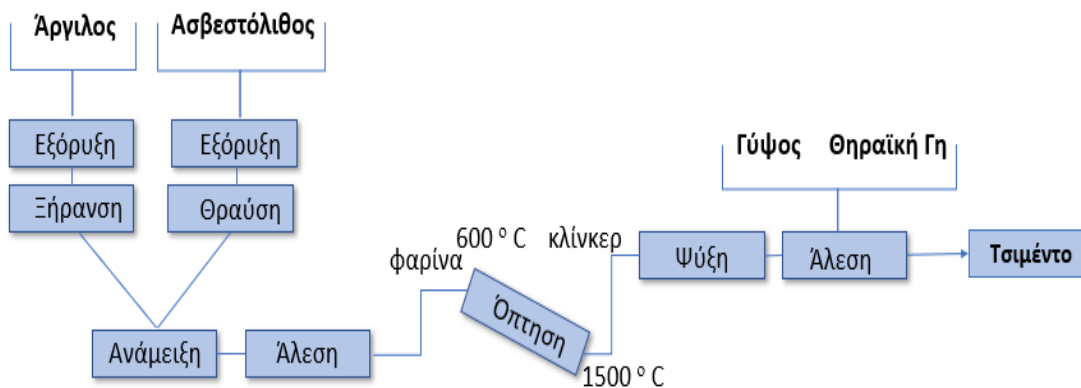
Η υδραυλική σκλήρυνση του τσιμέντου οφείλεται στην ενυδάτωση των ασβεστοπυριτικών, μπορούν όμως και άλλες χημικές ενώσεις να έχουν καθοριστικό ρόλο στον μηχανισμό σκλήρυνσης (πχ. αργλικές ενώσεις).

Η ανάμιξη του τσιμέντου με άμμο και νερό δημιουργεί την κονία του τσιμέντου (cement mortar). Η ανάμιξη του τσιμέντου με άμμο, χαλίκια (σκύρα) και νερό δημιουργεί το σκυρόδεμα. Ο συνδυασμός του χάλυβα με το σκυρόδεμα ονομάζεται οπλισμένο σκυρόδεμα.

#### 2.4. Παρασκευή τσιμέντου

Ο ασβεστόλιθος και τα αργιλικά πετρώματα αποτελούν την κύρια πρώτη ύλη για την παραγωγή του τσιμέντου. Η συλλογή τους γίνεται έπειτα από εξόρυξη σε λατομείο. Στη συνέχεια γίνεται θραύση των πρώτων υλών και ακολουθεί η μεταφορά του προϊόντος στο εργοστάσιο. Οι πρώτες ύλες, όπως ο θραυσμένος ασβεστόλιθος, αργιλικά πετρώματα, οξείδιο του σιδήρου, οξείδιο του πυριτίου, χαλαζιακά πετρώματα, σιδηρομεταλλεύματα, βωξίτης κτλ, αναμειγνύονται σε κατάλληλη αναλογία έτσι ώστε να ομοιογενοποιηθούν. Το επόμενο στάδιο είναι η άλεση του υλικού με την βοήθεια χαλύβδινων σφαιρών που περιέχονται μέσα στους αναμεικτήρες. Η νέα μορφή του προϊόντος μοιάζει με λεπτή πούδρα (φαρίνα). Η φαρίνα οδηγείται σε μια περιστρεφόμενη κεκλιμένη κυλινδρική κάμινο. Η θερμότητα παράγεται στο κάτω άκρο από την καύση του πετρελαίου ή του άνθρακα. Η θερμοκρασία που φτάνει στην κάμινο είναι περίπου στους 1500°C. Στη συνέχεια, οι πρώτες ύλες λιώνουν με αποτέλεσμα να σχηματίζεται σκούρο μαύρο-πράσινο κλίνκερ. Στο τελικό στάδιο για την παραγωγή του τσιμέντου, το κλίνκερ αναμειγνύεται με τη γύψο και άλλα πρόσθετα υλικά. Η επιλογή των πρόσθετων υλικών γίνεται πάντα με γνώμονα την επιθυμητή ποιότητα του τσιμέντου. Τέλος, το τσιμέντο αποθηκεύεται σε σιλό ώστε να μεταφερθεί χύμα ή συσκευασμένο. Στο Σχήμα 2.1 παρουσιάζεται διαγραμματικά η διαδικασία παραγωγής τσιμέντου.

Η παραγωγή του τσιμέντου θεωρείται ως η κύρια αιτία για την έκλυση CO<sub>2</sub> στην ατμόσφαιρα, σε ποσοστό ~7% παγκοσμίως .



Σχήμα 2.1: Σχηματικό διάγραμμα παρασκευής τσιμέντου.

## 2.5. Τύποι και κατηγορίες τσιμέντου

Τα κύρια συστατικά του τσιμέντου είναι το κλίνκερ, σκωρία υψικαμίνων, πυριτική παιπάλη, ποζολάνες, ιπτάμενη τέφρα, ψημένος σχιστόλιθος και ασβεστόλιθος ενώ επίσης γίνεται προσθήκη δευτερευόντων συστατικών, θειικού ασβεστίου και προσθέτων. Για την παραγωγή του τσιμέντου χρησιμοποιούνται πρώτες ύλες που απαντούν σε κάθε χώρα ενώ με βάση τη διαθεσιμότητα των υλικών αλλά και τις απαιτήσεις των εφαρμογών, δημιουργήθηκαν οι διάφοροι τύποι τσιμέντων που παράγονται παγκοσμίως, όπως καθαρό ή αμιγές τσιμέντο, τσιμέντο με ποζολάνη, ιπτάμενη τέφρα, σκωρία υψικαμίνου, ασβεστόλιθο, πυριτική παιπάλη κλπ. Προβλέπονται συνολικά 27 τύποι τσιμέντων τα οποία όμως δεν παράγονται ή δεν κυκλοφορούν κατ' ανάγκη σε κάθε χώρα λόγω των ιδιοτήτων που προαναφέρθηκαν.

Το τσιμέντο που καλύπτεται από το πρότυπο EN 197-1 ονομάζεται CEM. Οι βασικοί τύποι αναφέρονται στον Πίνακα 2.1 .

Πίνακας 2.1: Βασικοί τύποι τσιμέντου [3].

Τύπος	Περιγραφή
CEM I	Τσιμέντο Πόρτλαντ
CEM II	Σύνθετο Τσιμέντο Πόρτλαντ
CEM III	Σκωριοτσιμέντο
CEM IV	Ποζολανικό Τσιμέντο
CEM V	Σύνθετο Τσιμέντο

Οι βασικοί τύποι κατά EN 197-1 καθώς και πολλές υποδιαιρέσεις παρουσιάζονται στο Πίνακα 2.2.

Πίνακας 2.2: Προτυποποίηση Τσιμέντων.

ΤΥΠΟΣ	Ονομασία	Κύρια συστατικά										Δευτ. συστ.
		Κλίνκερ	Σκωρία υφικαμίνου	Πυριτική παιπάλη	Ποζολάνη	Ιπτάμενες τέφρες			Ψημένος σχιστόλιθος	Λαβαστόλιθος		
		K	S	D	P	Q	V	W	T	L	LL	
<b>ΤΣΙΜΕΝΤΑ PORTLAND</b>												
<b>CEM I</b>	CEM I	95-100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
<b>ΣΥΝΘΕΤΑ ΤΣΙΜΕΝΤΑ PORTLAND</b>												
<b>CEM II</b>	CEM II/A-S	80-94	6-20	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	CEM II/B-S	65-79	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	CEM II/A-D	90-94	-	6-10	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	CEM II/A-P	80-94	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	0-5
	CEM II/B-P	65-79	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	0-5
	CEM II/A-Q	80-94	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	0-5
	CEM II/B-Q	65-79	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	0-5
	CEM II/A-V	80-94	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	0-5
	CEM II/B-V	65-79	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	0-5
	CEM II/A-W	80-94	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	0-5
	CEM II/B-W	65-79	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	0-5
	CEM II/A-T	80-94	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	0-5
	CEM II/B-T	65-79	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	0-5
	CEM II/A-L	80-94	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	0-5
	CEM II/B-L	65-79	-	-	-	-	-	-	-	21-35	-	0-5
	CEM II/A-LL	80-94	-	-	-	-	-	-	-	-	6-20	0-5
	CEM II/B-LL	65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	21-35	0-5
CEM II/A-M	80-94				6-20						0-5	
CEM II/B-M	65-79				21-35						0-5	
<b>ΣΚΩΡΙΟΤΣΙΜΕΝΤΑ</b>												
<b>CEM III</b>	CEM III/A	35-64	36-65	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	CEM III/B	20-34	66-80	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	CEM III/C	5-19	81-95	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
<b>ΠΟΖΟΛΑΝΙΚΑ ΤΣΙΜΕΝΤΑ</b>												
<b>CEM IV</b>	CEM IV/A	65-89	-	11-35			-	-	-	-	-	0-5
	CEM IV/B	45-64	-	36-55			-	-	-	-	-	0-5
<b>ΣΥΝΘΕΤΑ ΤΣΙΜΕΝΤΑ</b>												
<b>CEM V</b>	CEM V/A	40-64	18-30	-	18-30			-	-	-	-	0-5
	CEM V/B	20-39	31-50	-	31-50			-	-	-	-	0-5
α) Οι τιμές του πίνακα αναφέρονται στο σύνολο των κυρίων και δευτερευόντων συστατικών												
β) Το ποσοστό της πυριτικής παιπάλης περιορίζεται στο 10%												
γ) Στα σύνθετα τσιμέντα Πόρτλαντ CEM II/A-M και CEM II/B-M, στα ποζολανικά τσιμέντα CEM IV/A και CEM IV/B και στα σύνθετα τσιμέντα CEM V/A και CEM V/B τα κύρια συστατικά πλην του κλίνκερ πρέπει να δηλώνονται στην ονομασία του τσιμέντου												

Για να γίνει πιο κατανοητός ο συμβολισμός από τον Πίνακα 2.2, παρακάτω παρουσιάζεται ένα σχεδιάγραμμα με αναλυτικά την αποκωδικοποίηση του συμβολισμού του τσιμέντου (Σχ.2.2).



Σχήμα 2.2: Συμβολισμός των διαφόρων τύπων τσιμέντου του ευρωπαϊκού προτύπου.

Κατηγορίες τσιμέντων (EN 197-1) παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.3.

Πίνακας 2.3: Μηχανικές και φυσικές απαιτήσεις σύμφωνα με το EN 197-1. Κατηγορίες τσιμέντων (EN 197-1).

Κατηγορία αντοχής	Αντοχή στη θλίψη (Μρα)			Χρόνος αρχής πήξης (min)	
	Αρχική αντοχή		Τυπική αντοχή		
	2 ημέρες	7 ημέρες	28 ημέρες		
32.5 N	-	≥16	≥32.5	≤52.5	≥75
32.5 R	≥10	-			
42.5 N	≥10	-	≥42.5	≤62.5	≥60
42.5 R	≥20	-			
52.5 N	≥20	-	≥52.5	-	≥45
52.5 R	≥30	-			

Η τυπική αντοχή ενός τσιμέντου είναι η αντοχή σε θλίψη που προσδιορίζεται με το πρότυπο ΕΛΟΤ EN 196-1 στην ηλικία 28 ημερών. Η πρώιμη αντοχή ενός τσιμέντου είναι η αντοχή σε

θλίψη που προσδιορίζεται σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ EN 196-1 σε ηλικία είτε 2, είτε 7 ημερών [4].

## 2.6. Σκυρόδεμα

### 2.6.1. Γενικά στοιχεία σκυροδέματος

Σκυρόδεμα είναι το υλικό που σχηματίζεται από την ανάμιξη τσιμέντου χονδρόκοκκων και λεπτόκοκκων αδρανών και νερού (με ή χωρίς την ενσωμάτωση των υλικών που χαρακτηρίζονται πρόσθετα και βελτιωτικά), το οποίο αναπτύσσει τις ιδιότητες του με τη σκλήρυνση της πάστας του τσιμέντου EN 206 [3]. Το σκυρόδεμα είναι ένα ιδιαίτερα ανθεκτικό υλικό. Η κύρια προϋπόθεση για την ανάπτυξη των αντοχών του είναι ο σωστός σχεδιασμός του μίγματος, του σωστού ποιοτικού ελέγχου και του σωστού τρόπου σκυροδέτησης και ωρίμανσης του. Με αυτό τον τρόπο το σκυρόδεμα είναι σε θέση να έρχεται αντιμέτωπο με διαφόρων ειδών καταπονήσεις που του επιβάλλονται. Οι κτιριακές κατασκευές και τα έργα υποδομής από σκυρόδεμα εκτίθενται σε ένα ιδιαίτερα ευρύ φάσμα καταπονήσεων και μηχανικών/φυσικοχημικών τάσεων. Αυτές οι καταπονήσεις ξεκινούν σε πολύ πρώιμο στάδιο με την ενυδάτωση του τσιμέντου σε ποικίλες κάθε φορά περιβαλλοντικές συνθήκες και συνεχίζουν καθ'όλη τη διάρκεια ζωής της κατασκευής [5]. Οι διάφορες δυνάμεις, τα φορτία, οι θερμικές καταπονήσεις καθώς και το νερό, μαζί με τη διάβρωση είναι μερικές από τις απαιτήσεις που έρχεται αντιμέτωπο το σκυρόδεμα. Για την αντιμετώπιση όλων αυτών των παραγόντων που επιφέρουν την υποβάθμισή του, το σκυρόδεμα έχει ως άμυνα του τους μειωτές νερού, οι οποίοι ως πρόσμικτα σκυροδέματος έχουν καθοριστική σημασία.

Η αντοχή σε εξωγενείς παράγοντες είναι ανάλογη των υψηλότερων αντοχών και της πυκνότερης δομής του σκυροδέματος. Η αντοχή στο σκυρόδεμα εκφράζεται μέσω του λόγου νερό προς τσιμέντο (N/T). Οι υψηλές αντοχές επιτυγχάνονται μειώνοντας το ποσοστό σε νερό. Επομένως, γίνεται κατανοητό ότι το χαμηλό νερό και το συνδετικό υλικό αποτελούν τους δύο πιο κρίσιμους παράγοντες για υψηλότερης αντοχής και απόδοσης σκυρόδεμα [5].

Αξιοσημείωτο είναι επίσης ότι το σκυρόδεμα είναι ένα κατασκευαστικό υλικό που προέρχεται από μη εύφλεκτα συστατικά όπως τσιμέντο, αδρανή και νερό. Η θερμική αγωγιμότητα του σκυροδέματος είναι περίπου 1.5-3.0 W/m°C [5]. Το γεγονός αυτό το καθιστά κατάλληλο προστατευτικό εναντίον της φωτιάς ενώ παράλληλα είναι ικανό να αντέξει τις επιπτώσεις της

άμεσης θερμότητας με αποτέλεσμα ο χάλυβας ο οποίος βρίσκεται εσωτερικά να μην μαλακώνει μέχρις σημείου πιθανής δομικής κατάρρευσης [5].

Οι κατηγορίες του νωπού σκυροδέματος ταξινομούνται με βάση:

- Τη συνεκτικότητα, η οποία αποτελεί τη φυσική ιδιότητα του σκυροδέματος που καθορίζει τη συνοχή του νωπού μίγματος. Η συνεκτικότητα είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με τις μετρήσεις εργασιμότητας. Η εργασιμότητα αφορά το έργο που απαιτείται για τη μεταφορά, διάσπρωση και συμπύκνωση του υλικού και εκτιμάται έμμεσα με τις αριθμητικές ενδείξεις που δίνουν οι σχετικές τυποποιημένες δοκιμές κάθισης, δονητικής τράπεζας, εξάπλωσης.
- Την ονομαστική διάσταση του μέγιστου κόκκου αδρανούς στο σκυρόδεμα  $D_{max}$  όπως αυτή καθορίζεται στο EN 12620.

Στον Πίνακα 2.4 παρουσιάζονται διάφορα είδη του σκυροδέματος.

*Πίνακας 2.4: Είδη Σκυροδέματος.*

Είδος	Περιγραφή
Σκυρόδεμα	Υλικό που προέρχεται από ανάμιξη τσιμέντου, χοντρών και λεπτών αδρανών και νερού, με ή χωρίς προσθήκη πρόσθετων, το οποίο αναπτύσσει τις ιδιότητες του μέσω της ενυδάτωσης του τσιμέντου.
Νωπό σκυρόδεμα	Πλήρως αναμεμιγμένο σκυρόδεμα το οποίο μπορεί να συμπυκνωθεί με κατάλληλη επιλεγμένη μέθοδο.
Σκληρυμένο Σκυρόδεμα	Σκυρόδεμα σε στερεή κατάσταση το οποίο έχει αναπτύξει μετρήσιμη αντοχή.
Συμβατικό Σκυρόδεμα	Σκυρόδεμα πυκνότητας $2000 \text{ kg/m}^3 < d < 2600 \text{ kg/m}^3$
Σκυρόδεμα Μεγάλου Ειδικού Βάρους	Σκυρόδεμα πυκνότητας $d > 2600 \text{ kg/m}^3$
Ελαφροσκυρόδεμα	Σκυρόδεμα πυκνότητας $800 \text{ kg/m}^3 < d < 2000 \text{ kg/m}^3$

Εκτός από το τσιμέντο στις πρώτες ύλες του σκυροδέματος περιλαμβάνονται τα αδρανή, το νερό ανάμειξης, τα βελτιωτικά (χημικά) πρόσθετα και τα πρόσθετα συστατικά.

#### Αδρανή υλικά:

Τα αδρανή υλικά προέρχονται συνήθως από την εξόρυξη κατάλληλων πετρωμάτων. Η συμμετοχή των αδρανών στα σκυροδέματα καταλαμβάνει το 75-80% της μάζας τους. Επομένως, ο ρόλος των αδρανών είναι καθοριστικός αφού συντελούν στη δημιουργία ενός ανθεκτικού και συνεκτικού ιστού. Αδρανή υλικά ονομάζονται τα λίθινα υλικά που δεν επιφέρουν χημικές μεταβολές στις σύνθετες τεχνητές ύλες των οποίων αποτελούν συστατικά.

Οι ιδιότητες που πρέπει να πληρούν τα αδρανή, ελέγχονται ως προς τα εξής χαρακτηριστικά:

- Γεωμετρικά χαρακτηριστικά, τα οποία επηρεάζουν την σύνθεση και την αντλησιμότητα του σκυροδέματος.
- Φυσικά χαρακτηριστικά, τα οποία επηρεάζουν την αντοχή και την ανθεκτικότητα του σκυροδέματος.
- Αντοχή μητρικού πετρώματος.
- Αντοχή σε επιφανειακή φθορά και κρούση.
- Η σταθερότητα του όγκου και η μη απώλεια υλικού λόγω ύγρυνσης, ξήρανσης, ψύξης-απόψυξης είναι προϋποθέσεις για τα αδρανή στο σκυρόδεμα.
- Πορώδες, μια σημαντική ιδιότητα που είναι αντιστρόφως ανάλογο με την αντοχή και την ανθεκτικότητα τους. Η τιμή του προσδιορίζεται με την μέτρηση της υδατοαπορροφητικότητάς τους.
- Κοκκομετρική διαβάθμιση, δηλαδή το ποσοστό της σύνθεσης του αδρανούς σε κόκκους διάφορων μεγεθών.

Τα αδρανή ανάλογα με το μέγεθος τους κατατάσσονται σε 4 βασικές κατηγορίες:

- Άμμος (0-4mm)
- Ρυζάκι (4-8mm)
- Γαρμπίλι (8-16mm)
- Χαλίκια (16-31,5mm)

### Νερό ανάμειξης:

Η καταλληλότητα του νερού ανάμειξης για παραγωγή σκυροδέματος εξαρτάται από την προέλευσή του. Τα χημικά συστατικά που υπάρχουν στο νερό μπορεί να συμμετέχουν ενεργά στις χημικές αντιδράσεις και να επηρεάσουν την πήξη, τη σκλήρυνση και την ανάπτυξη αντοχής. Οι ακαθαρσίες στο νερό ενδέχεται να επηρεάσουν την πήξη του τσιμέντου και μπορεί να επηρεάσει αρνητικά την αντοχή και την ανθεκτικότητα του σκυροδέματος.

Το Πρότυπο ΕΛΟΤ EN 1008:2002 το κατηγοριοποιεί ως ακολούθως:

Πόσιμο νερό: Κατάλληλο για σκυρόδεμα, δεν απαιτείται έλεγχός του.

Νερό που έχει ανακτηθεί μετά από επεξεργασία σε βιομηχανίες παραγωγής σκυροδέματος (π.χ. νερά εκπλύσεων): Γενικώς κατάλληλο για σκυρόδεμα, αλλά πρέπει να ικανοποιηθούν ορισμένοι περιορισμοί βάση του προτύπου.

Υπόγεια ύδατα: Πρέπει πρώτα να ελεγχθεί η καταλληλότητά τους.

Νερό φυσικών πόρων και νερό βιομηχανικών διεργασιών: Μπορεί να είναι κατάλληλα για σκυρόδεμα, αλλά πρέπει πρώτα να ελεγχθεί η καταλληλότητά τους.

Θαλασσινό ή υφάλμυρο νερό: Μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε άοπλο σκυρόδεμα, αλλά δεν είναι κατάλληλο για οπλισμένο.

### Βελτιωτικά (χημικά) πρόσθετα:

Τα πρόσθετα ή χημικά πρόσθετα είναι χημικές ουσίες, που προστίθενται στο μίγμα του σκυροδέματος κατά την ανάμειξη.

Ως προς τα βελτιωτικά διακρίνονται οι εξής βασικές κατηγορίες:

- Ρευστοποιητές-υπερρευστοποιητές:  
Η πιο συνηθισμένη επίδραση των ρευστοποιητικών είναι η μείωση του ενεργού νερού μέχρι 12 % (συνήθεις τιμές 5 % - 10 %). Σχετικά με τους υπερρευστοποιητικές παρατηρείται μείωση του ενεργού νερού > 12 % (μέχρι και > 30 %).
- Επιβραδυντές
- Επιταχυντές
- Στεγανοποιητικά
- Αερακτικά: Είναι τα χημικά πρόσθετα που δημιουργούν πλήθος μικροσκοπικών φυσαλίδων με  $d < 0.3 \text{ mm}$ .



Στον παρακάτω συγκεντρωτικό Πίνακα 2.5 παρουσιάζονται μερικές από τις επιδράσεις στις ιδιότητες του σκυροδέματος μετά την προσθήκη των χημικών βελτιωτικών.

*Πίνακας 2.5: Επίδραση στις ιδιότητες του σκυροδέματος μετά από την προσθήκη χημικών βελτιωτικών.*

	<b>Ρευστοποιητές</b>	<b>Υπερρευστοποιητές</b>
<b>Αντοχή</b>	Αύξηση αν και εφόσον ο λόγος N/T μειώνεται.	Αύξηση αν και εφόσον ο λόγος N/T μειώνεται.
	Αύξηση/μείωση της πρώιμης αντοχής ανάλογα με την δοσολογία και τον τύπο.	Αύξηση της πρώιμης αντοχής.
<b>Κάθιση</b>	Αύξηση έως και 60 mm	Αύξηση >120 min
<b>Απώλεια κάθισης</b>	Μεγαλύτερη από το αμιγές	Μεγαλύτερη από το αμιγές
<b>Χρόνος πήξης</b>	Αύξηση <90 min για Θερμοκρασία= 15-20 °C αναλόγως του τύπου τσιμέντου.	Αύξηση <120 min για Θερμοκρασία = 15-20 °C αναλόγως του τύπου τσιμέντου.
<b>Ανθεκτικότητα</b>	Βελτιώνεται.	Βελτιώνεται.
<b>Περιεχόμενος αέρας</b>	Αύξηση.	Πρέπει να είναι <2 %. Γενικά μειώνεται.
<b>Εξίδρωση</b>	Γενικά αυξάνει. Μειώνεται μόνο εξαιτίας της αύξησης του περιεχόμενου αέρα.	Γενικά αυξάνεται.
<b>Παραμορφώσεις</b>	Αύξηση συγκριτικά για το σκυρόδεμα σταθερού N/T. Μείωση όταν N/T μειώνεται.	Δεν επηρεάζεται.

### Πρόσθετα συστατικά

Ως πρόσθετα στην παραγωγή του σκυροδέματος ονομάζονται τα λεπτόκοκκα ανόργανα υλικά.

Η χρήση των πρόσθετων στο σκυρόδεμα έχει ως σκοπό τη βελτίωση των ιδιοτήτων του.

Σύμφωνα με το πρότυπο EN 206-1 τα πρόσθετα χωρίζονται στις εξής κατηγορίες:

Τύπου I : Αδρανή πρόσθετα όπως τα filler αδρανών και τα χρώματα.

Τύπου II: Τα πρόσθετα τα οποία εμπεριέχουν ποζολανικές ή λανθάνουσες υδραυλικές ιδιότητες όπως οι ιπτάμενες τέφρες, η πυριτική παιπάλη και σκωρία υψικαμίνου.

### Ασβεστολιθική Άμμος

Ως αδρανές υλικό για την παραγωγή της τσιμεντοκονίας έγινε χρήση ασβεστολιθικής άμμου.

Το αδρανές υλικό το οποίο προστίθενται πρέπει να έχει ικανοποιητική μηχανική αντοχή και να μην αποσαθρώνεται.

### Πυριτική παιπάλη

Η ποζολάνη είναι ένα ανόργανο υλικό το οποίο έχει ιδιότητες παρεμφερείς με αυτές του τσιμέντου (υδραυλικές ιδιότητες). Το ποζολανικά υλικά είναι φυσικές ουσίες με πυριτική ή αργυροπυριτική σύνθεση ή συνδυαστικά. Τα ποζολανικά υλικά δεν σκληρύνονται από μόνα τους όταν αναμειχθούν με νερό. Παρατηρείται ότι όταν λεπτοαλεστούν και με την παρουσία νερού αντιδρούν σε κανονική θερμοκρασία περιβάλλοντος με διαλυμένο υδροξείδιο του ασβεστίου ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) για να σχηματίσουν ενυδατωμένες ασβεστοπυριτικές και ασβεστοαργλικές ενώσεις που αναπτύσσουν αντοχή [6].

Η πυριτική παιπάλη συμπεριλαμβάνεται στις ποζολάνες και ο βασικός λόγος της προσθήκης της στο σκυρόδεμα είναι η αντίδρασή της με τον ελεύθερο ασβέστη και κατά συνέπεια την βελτίωση της απόδοσής του. Η πυριτική παιπάλη εξαιτίας της λεπτής διάσπασης και του μεγάλου ποσοστού του άμορφου πυριτίου, αποδείχθηκε ότι είναι απαραίτητη για την ανάπτυξη σκυροδέματος πολύ υψηλής αντοχής .

Χημικά πρόσθετα που αντιδρούν με τις φάσεις του κλίνκερ ή τα προϊόντα ενυδάτωσης του τσιμέντου και επηρεάζουν το χρόνο πήξης του τσιμέντου.

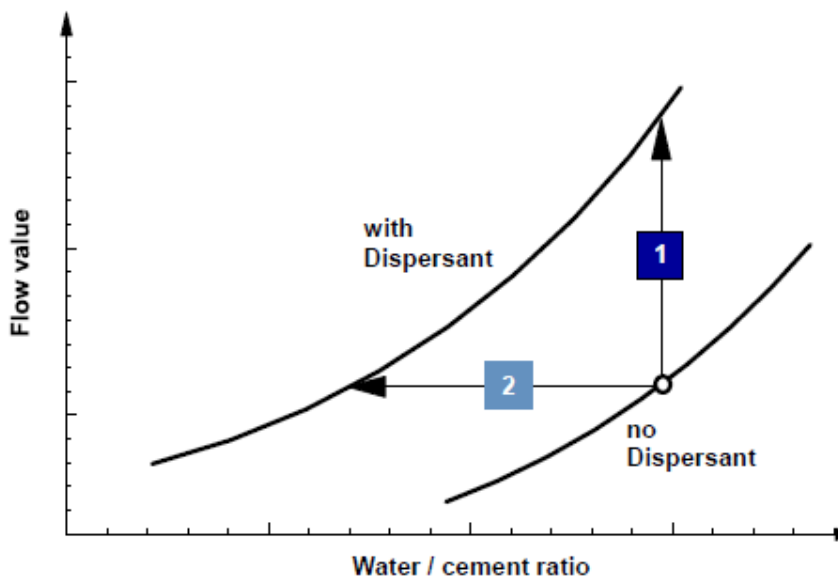
## Υπερρευστοποιητής

Η κύρια ιδιότητα του υπερρευστοποιητή είναι ότι προσδίδουν στο μίγμα μεγαλύτερη ρευστότητα. Επιπλέον παρατηρείται έντονα την επιτάχυνση της πήξης. Οι υπερρευστοποιητές χωρίζονται σε 3 γενιές με βάση τον μηχανισμό που δρουν.

Στο Σχήμα 2.3 παρατηρούμε τη συμπεριφορά του μίγματός με την προσθήκη υπερρευστοποιητή. Η προσθήκη υπερρευστοποιητής μειώνει το ποσοστό νερού σε μεγάλο βαθμό.



Σχήμα 2.3: α) Τσιμέντο και προσθήκη νερού. β) Τσιμέντο με προσθήκη νερού και υπερρευστοποιητή.



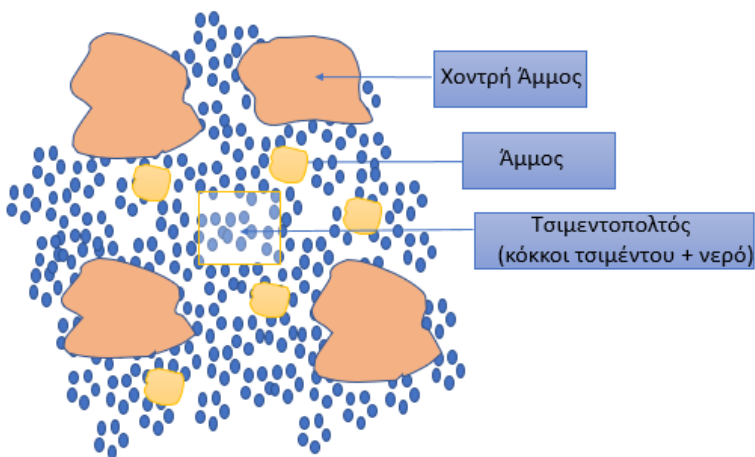
Σχήμα 2.4: Διάγραμμα ροής συναρτήσει αναλογίας νερού/τσιμέντο.

Από το Σχήμα 2.4 παρατηρείται ότι η καλύτερη εργασιμότητα επιτυγχάνεται με τη προσθήκη διασπορέα κρατώντας σταθερή την αναλογία νερού/τσιμέντου. Επίσης, παρουσιάζεται αύξηση της αντοχής λόγω της μείωσης της αναλογίας νερού/τσιμέντο. Στο Σχήμα 2.5 παρουσιάζεται ο τρόπος επίδρασης του υπερρυστοποιητή. Στην πρώτη εικόνα το νερό συμπιέζεται με μικρές δυνάμεις διάτμησης, ο συνολικός όγκος παραμένει σταθερός. Στη δεύτερη εικόνα το νερό βρίσκεται πλέον ανάμεσα στο σωματίδια, παρατηρείται αύξηση της απόστασης μεταξύ των σωματιδίων.



Σχήμα 2.5: Τρόπος επίδρασης του υπερρυστοποιητή.

Τα σωματίδια μπορούν εύκολα να μετακινηθούν, ως αποτέλεσμα δημιουργείται πιο ρευστή πάστα. Τέλος, στο σχήμα 2.6 αναφέρεται οπτικά η σύσταση του κονιάματος.



Σχήμα 2.6: Σύσταση του κονιάματος.

### Επιβραδυντής

Με την ρύθμιση του χρόνου αρχής πήξης του τσιμέντου επιβραδύνεται η εξέλιξη της ενυδάτωσης και διατηρείται η εργασιμότητα.

## Επιταχυντής

Τα χημικά πρόσθετα τα οποία επιταχύνουν την διαδικασία της ενυδάτωσης του τσιμέντου έχουν ως αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας του μίγματος και την αύξηση της συστολής ξήρανσης.

### 2.6.2. Ιδιότητες και κατηγορίες σκυροδέματος

Το σκυρόδεμα διακρίνεται σε διάφορες κατηγορίες αναλόγως της αντοχής του σε θλίψη σε ηλικία 28 ημερών, της εργασιμότητάς του, της ανθεκτικότητάς του κ.λ.π.. Με βάση των ειδικών απαιτήσεων που μπορεί να υπάρχουν ανάλογα με τις ανάγκες και τις συνθήκες του έργου υπάρχουν και οι ανάλογες κατηγορίες.

Τρεις γενικές κατηγορίες με βάση την θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος:

- Σκυρόδεμα χαμηλής αντοχής: αντοχή σε θλίψη μικρότερη από 20 Mpa
- Σκυρόδεμα μέτριας αντοχής: αντοχή σε θλίψη 20 έως 40 Mpa
- Σκυρόδεμα υψηλής αντοχής : πάνω από 40 Mpa

#### Κατηγορίες κάθισης (workability classes):

Οι κατηγορίες κάθισης ορίζονται στον Πίνακα 2.6 και ύστερα από την αναθεώρησή του της Υ.Α. Δ14/50504/12-4-2002 (ΦΕΚ 537/1-5-2002), είναι οι εξής :

*Πίνακας 2.6: Κατηγορίες καθίσεως.*

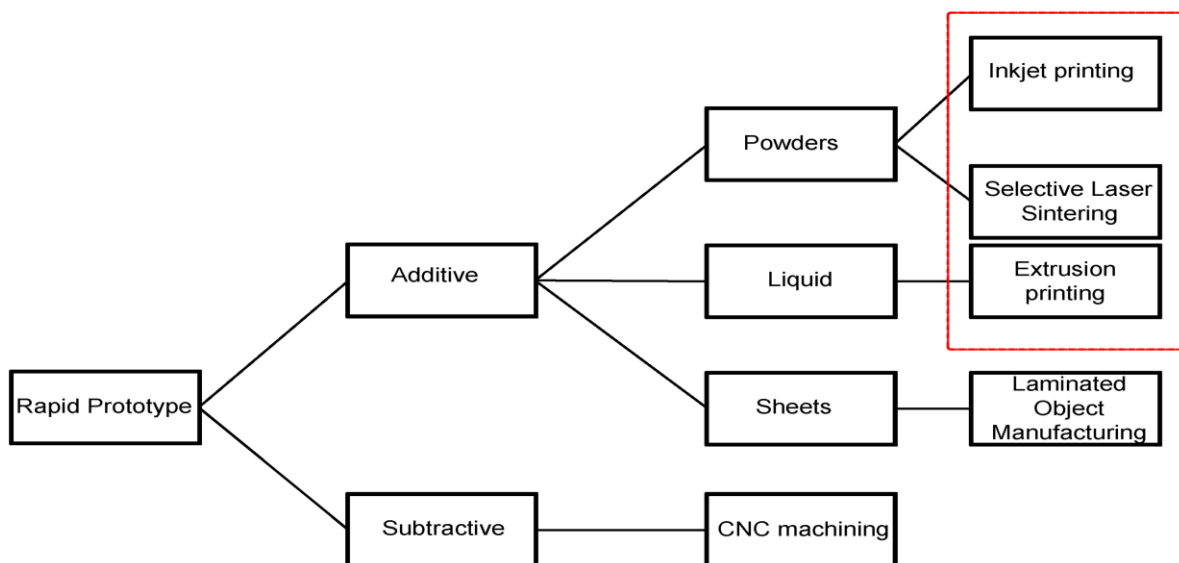
Κατηγορία	Κάθιση σε mm
S1	10-40
S2	50-90
S3	100-150
S4	160-210
S5	>220

Η κατάταξη αυτή επιβλήθηκε από το ΕΛΟΤ EN 206-1.

### 3. Προσθετική κατασκευή

#### 3.1. Εισαγωγικά στοιχεία

Η προσθετική κατασκευή (additive manufacturing - AM) ή τρισδιάστατη εκτύπωση (3D Printing – 3DP) είναι μια τεχνική για την κατασκευή πολύπλοκων γεωμετριών σχημάτων. Η διαδικασία βασίζεται στη διαδοχική εκτύπωση στρώματα υλικού που εναποτίθεται το ένα πάνω στο άλλο. Η ελευθερία σχεδιασμού, η ελαχιστοποίηση των απορριμμάτων, η δυνατότητα κατασκευής πολύπλοκων κατασκευών, καθώς και η γρήγορη δημιουργία πρωτοτύπων, είναι τα κύρια οφέλη της τρισδιάστατης εκτύπωσης. Η τεχνολογία αναπτύχθηκε από τον Charles Hull το 1986 σε μια διαδικασία γνωστή ως στερεολιθογραφία (SLA), την οποία ακολούθησαν οι μεταγενέστερες εξελίξεις όπως η σύντηξη σε σκόνη, η μοντελοποίηση λιωμένης εναπόθεσης (FDM), inkjet printing και contour crafting (CC) [7]. Η τρισδιάστατη εκτύπωση, η οποία περιλαμβάνει διάφορες μεθόδους, υλικά και εξοπλισμό, έχει εξελιχθεί ανά τα χρόνια και έχει πολλαπλές δυνατότητες αναφορικά με την κατασκευή και την εφοδιαστική διαδικασία. Η παραγωγή προσθέτων έχει εφαρμοστεί ευρέως σε διάφορες βιομηχανίες, συμπεριλαμβανομένων των κατασκευών, των πρωτοτύπων και της εμβιομηχανικής. Η υιοθέτηση της τρισδιάστατης εκτύπωσης, ειδικότερα, στον κατασκευαστικό κλάδο είναι μια εξαιρετικά αργή και περιορισμένη διαδικασία παρά τα πλεονεκτήματα π.χ. λιγότερα απόβλητα, ελευθερία του σχεδιασμού και αυτοματισμό. Επισκόπηση των τεχνολογιών ταχείας δημιουργίας πρωτοτύπων (rapid prototype) παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.1.

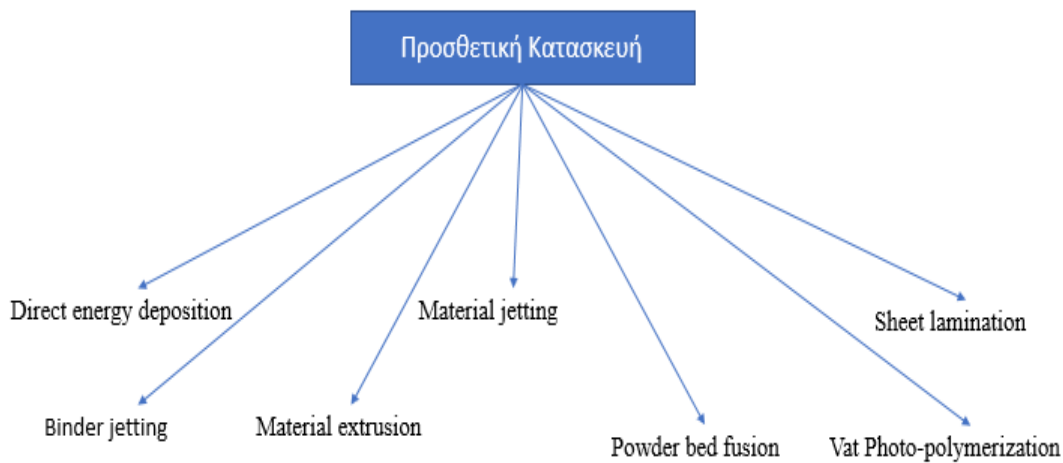


Σχήμα 3.1: Διάγραμμα ταχείας εκτύπωσης.

Έχει αποδειχθεί ότι οι γρήγορες πρωτότυπες τεχνολογίες (rapid prototype) πχ. 3DP έχουν ως κύριο πλεονέκτημα την άμεση και εύκολη δημιουργία κατασκευών. Για παράδειγμα, η χρήση τρισδιάστατης εκτύπωσης θα μπορούσε να μειώσει το 35-60% του συνολικού κόστους, αφού αφαιρείται η ανάγκη για ξυλότυπους.

### 3.2. Κατηγορίες προσθετικής κατασκευής

Παρακάτω αναλύονται οι 7 κατηγορίες της προσθετικής κατασκευής ανάλογα με την τεχνολογία που χρησιμοποιείται κατά ISO/ASTM52900-15, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.2. Η ορολογία που χρησιμοποιείται παρακάτω προσπαθεί να συμμορφωθεί με την καθιερωμένη ορολογία ASTM F42 για τεχνολογίες παραγωγής προσθέτων διαχωρίζονται με βάση το πώς στερεοποιείται το υλικό.

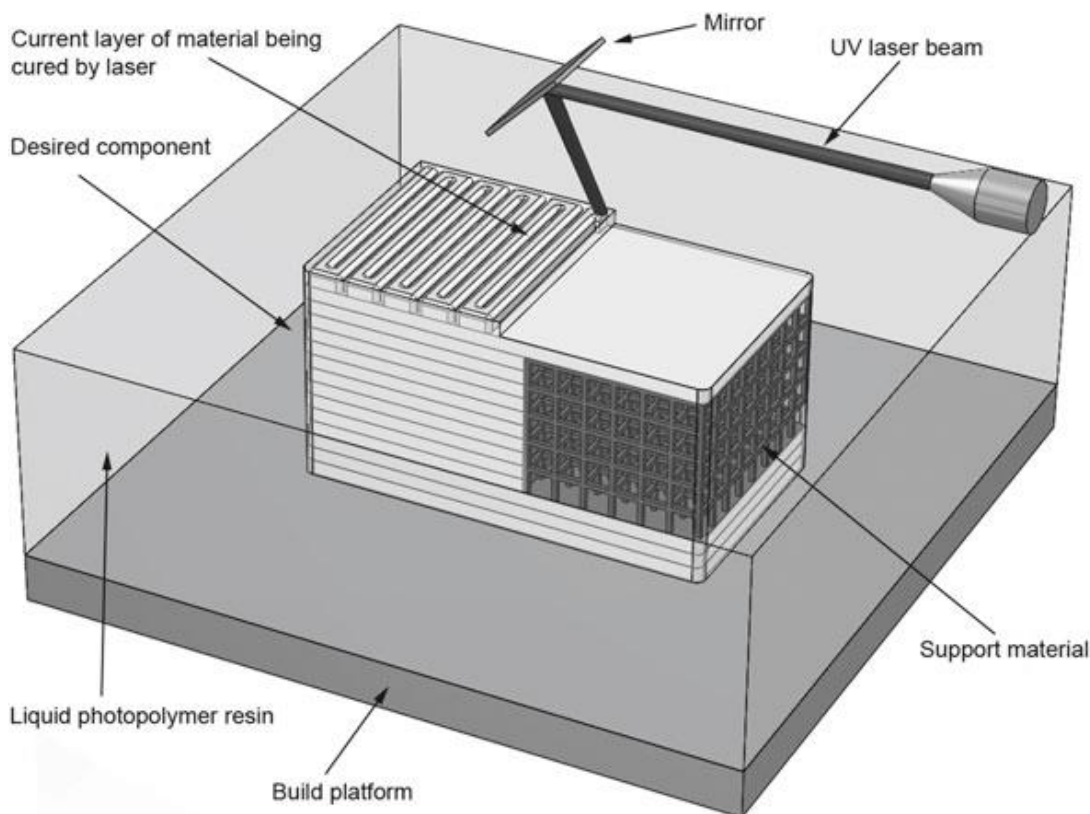


Σχήμα 3.2: Οι 7 κατηγορίες της προσθετικής κατασκευής ανάλογα με την τεχνολογία που χρησιμοποιείται κατά ISO/ASTM52900-15 [8].

### 3.2.1. Vat Photopolymerisation

Ο φωτοπολυμερισμός Vat χρησιμοποιεί μια δέσμη UV φωτός λέιζερ για να ωριμάσει στρώματα ρητίνης για κάθε στρώμα του εκτυπώσιμου μοντέλου. Η δέσμη υπεριώδους φωτός σαρώνει την επιφάνεια της υγρής φωτοπολυμερούς ρητίνης και όπου η δέσμη προσκρούει στην επιφάνεια της ρητίνης, σκληραίνει. Στη συνέχεια, η πλατφόρμα κατασκευής κατεβαίνει κατά ένα κλάσμα του χιλιοστού, ένα νέο στρώμα ρητίνης απλώνεται στην κορυφή του προηγούμενου στρώματος και ξεκινά η διαδικασία σάρωσης με λέιζερ για την επόμενη στρώση. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται, με το εξάρτημα να κατεβαίνει σταδιακά, ενώ στο επάνω μέρος προστίθενται νέες στρώσεις, μέχρι να κατασκευαστεί το εξάρτημα (Σχ.3.3).

Όταν εκτίθονται στην υπεριώδη ακτινοβολία τα υλικά υφίσταται χημική αντίδραση και γίνονται στερεά. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται κατά κόρον με αυτήν την τεχνική είναι πλαστικά.



Σχήμα 3.3: Σχηματική αναπαράσταση της μεθόδου Vat photopolymerization [8].



Υπάρχουν άλλες τρεις κατηγορίες οι οποίες υπάγονται στην τεχνική Vat Photopolymerisation, οι οποίες είναι οι εξής:

#### Στερεογραφία (Stereography, SLA)

Η στερεογραφία χρησιμοποιεί μια πλατφόρμα βυθισμένη σε μια διαφανή κατασκευή υγρής φωτοπολυμερούς ρητίνης. Μετά την δημιουργία φουσαλίδων στην πλατφόρμα, ένα λέιζερ ενός σημείου μέσα στο μηχάνημα χαρτογραφεί μια περιοχή διατομής μέσω του πυθμένα της δεξαμενής σκληραίνοντας το υλικό. Η πλατφόρμα ανεβαίνει και επιτρέπει σε ένα νέο στρώμα ρητίνης να ρέει κάτω από το αντικείμενο. Αυτή η τεχνική γίνεται στρώμα - στρώμα μέχρι να σχηματιστεί ένα συμπαγές τμήμα. Έπειτα, τα εξαρτήματα ωριμάζουν με την χρήση ακτινοβολίας UV για να βελτιώσουν τις μηχανικές τους ιδιότητες.

#### Ψηφιακή επεξεργασία φωτός (DPL)

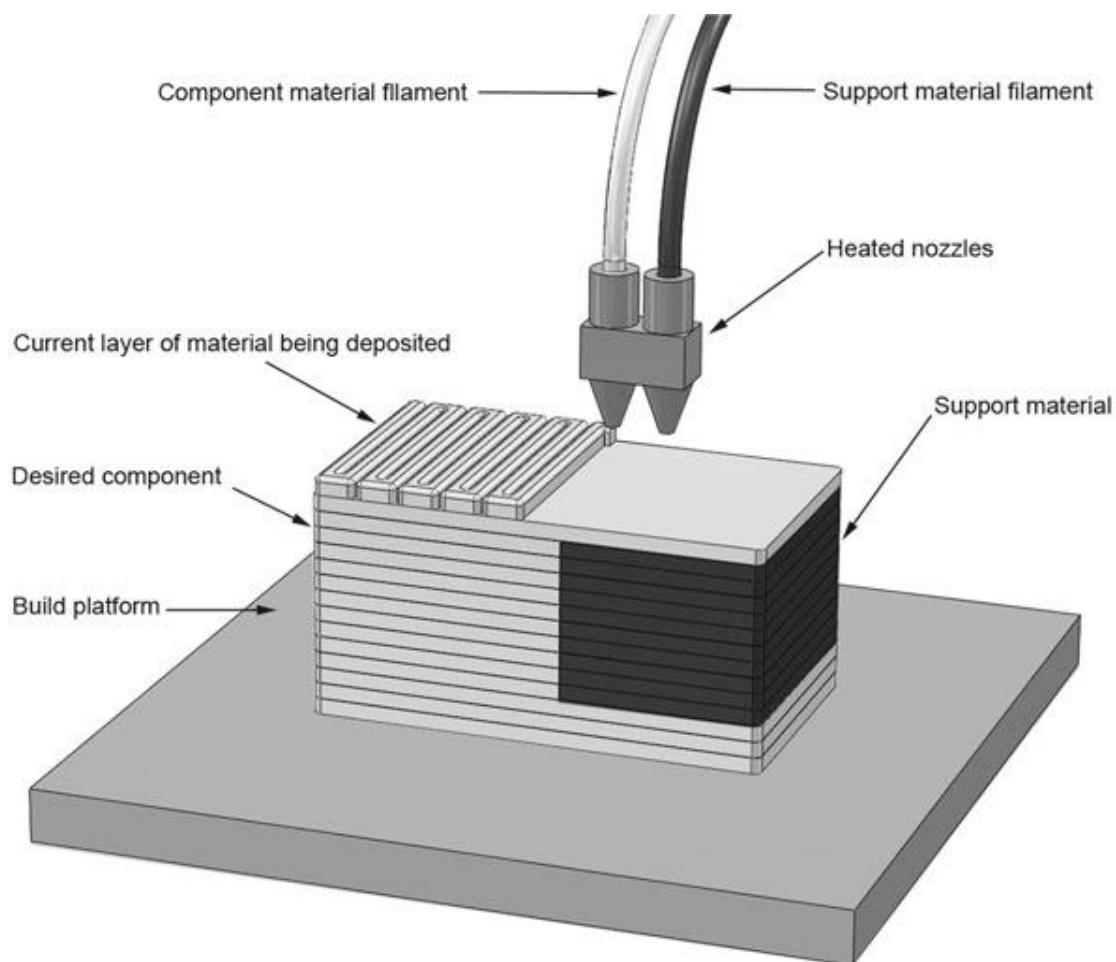
Σε σύγκριση με την SLA, η DPL χρησιμοποιεί μια αρκετά παρόμοια διαδικασία δημιουργίας στερεών στοιχείων. Η κύρια διάκριση είναι ότι το DLP χρησιμοποιεί μια οθόνη ψηφιακού προβολέα φωτός για να εμφανίζει μια μεμονωμένη εικόνα κάθε στρώματος ταυτόχρονα. Δεδομένου ότι ο προβολέας είναι μια ψηφιακή οθόνη, η εικόνα σε κάθε στρώμα αποτελείται από pixel με αποτέλεσμα ένα στρώμα να αποτελείται από μικρά ορθογώνια τούβλα γνωστά ως voxels. Για ορισμένα στοιχεία η μέθοδος DLP μπορεί να επιτύχει πιο γρήγορες ταχύτητες εκτύπωσης από την μέθοδο SLA καθώς κάθε πλήρες στρώμα εκτίθεται ταυτόχρονα αντί να ανιχνεύεται η περιοχή διατομής με λέιζερ.

#### Συνεχής ψηφιακή επεξεργασία φωτός (Continuous Direct Light Processing)

Η Συνεχής ψηφιακή επεξεργασία φωτός, CDLP, κατασκευάζει εξαρτήματα με τον ίδιο τρόπο όπως η DLP. Ωστόσο βασίζεται στη σταθερή κίνηση της πλάκας κατασκευής προς την κατεύθυνση Z. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ταχύτερους χρόνους κατασκευής. Ο εκτυπωτής δεν χρειάζεται να σταματήσει και να εξάγει το στοιχείο από την πλάκα κατασκευής μετά τη δημιουργία κάθε στρώσης. Αυτή η διαδικασία είναι επίσης γνωστή ως συνεχής παραγωγή διασύνδεσης υγρών Continuous Liquid Interface Production (CLIP).

### 3.2.2. Material Extrusion

Η εξώθηση υλικού είναι μια τεχνική κατασκευής προσθέτων που χρησιμοποιεί ένα συνεχές νήμα από θερμοπλαστικό ή σύνθετο υλικό για την κατασκευή τρισδιάστατων μερών. Η εξώθηση υλικού είναι η πιο κοινή τεχνολογία κατασκευής πρόσθετων. Η πιο γνωστή ονομάζεται Fused Deposition Modelling (FDM), η οποία λειτουργεί με την εξώθηση ενός λεπτού νήματος υλικού, συνήθως πολυμερούς. Αναπτύχθηκε αρχικά και κατοχυρώθηκε με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας από τον S. Scott Crump τη δεκαετία του 1980. Σε αυτήν την τεχνική κατασκευής πρόσθετων, το συνεχές νήμα θερμοπλαστικής τροφοδοτείται μέσω ενός θερμαινόμενου ακροφυσίου πριν εναποτεθεί στρώμα-στρώμα στην πλατφόρμα κατασκευής για τη δημιουργία του αντικειμένου (Σχ. 3.4).

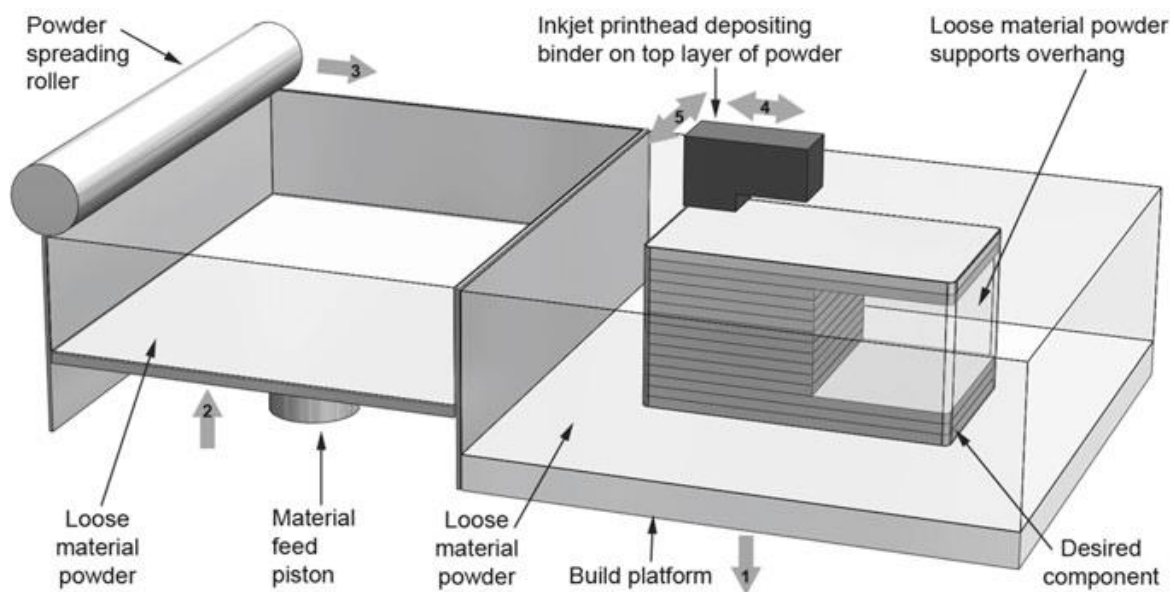


Σχήμα 3.4: Σχηματική αναπαράσταση της μεθόδου Material extrusion [8].

### 3.2.3. Binder jetting process

Το binder jetting ήταν η πρώτη τεχνολογία που επινόησε τον όρο 3D printing. Είναι μια τεχνολογία AM με βάση την σκόνη που αναπτύχθηκε το MIT γύρω στο 1993. Στη συνέχεια διατέθηκε στο εμπόριο από την ZCorp, η οποία αργότερα αποκτήθηκε από την 3D Systems. Στη διαδικασία αυτή γίνεται επιλεκτική εναπόθεση του συνδετικού παράγοντα, ένα συνδετικό υγρό, για να ενώσει το υλικό (σκόνη) και να σχηματιστεί ένα τρισδιάστατο μέρος. Αυτή η διαδικασία είναι διαφορετική από οποιαδήποτε άλλη τεχνολογία AM καθώς δε χρησιμοποιεί θερμότητα κατά την διάρκεια της διαδικασίας για τη σύντηξη του υλικού. Η κεφαλή εκτύπωσης διοχετεύει την πούδρα και εναλλασσόμενα στρώματα συνδετικού και δομικού υλικού για να σχηματίσουν ένα τρισδιάστατο αντικείμενο (Σχ. 3.5).

Ουσιαστικά ένα στρώμα σκόνης εναποτίθεται σε μια πλατφόρμα κατασκευής και εφαρμόζεται υγρό συνδετικό υλικό στα κατάλληλα μέρη του στρώματος χρησιμοποιώντας μια κεφαλή εκτύπωσης. Όπου εφαρμόζεται το συνδετικό στη σκόνη, η σκόνη στερεοποιείται. Η πλατφόρμα κατασκευής στη συνέχεια χαμηλώνεται, μια άλλη στρώση σκόνης απλώνεται πάνω στην πρώτη και η διαδικασία επαναλαμβάνεται.



Σχήμα 3.5: Σχηματική αναπαράσταση της μεθόδου Binder jetting[8].

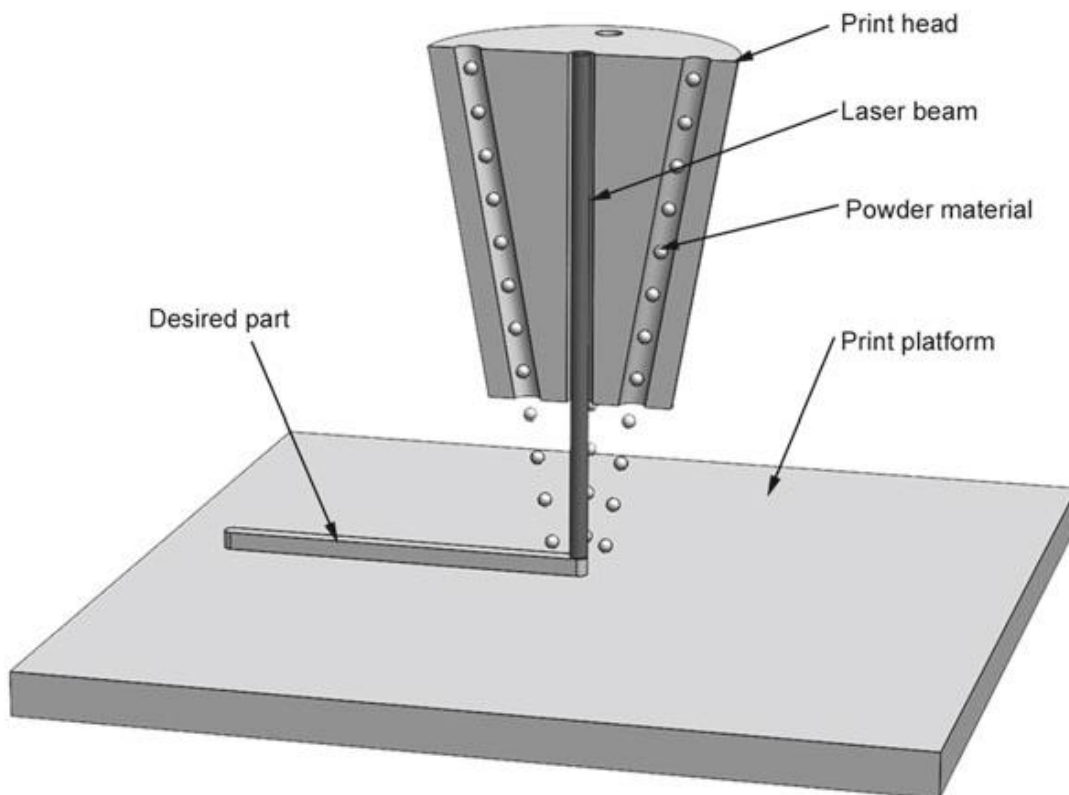
### 3.2.4. Directed energy deposition DED

Η Directed Energy Deposition (DED) καλύπτει μια σειρά τεχνολογιών, όπως LENS (Laser engineered net shaping), DMD (άμεση εναπόθεση μετάλλων), CLAD (3D laser cladding). Είναι μια διαδικασία εκτύπωσης σχεδόν σε σχήμα δικτυού που χρησιμοποιείται συνήθως για την επισκευή ή την προσθήκη πρόσθετου υλικού σε υπάρχοντα εξαρτήματα. Αν και όλες οι διεργασίες AM μπορούν να θεωρηθούν "σχεδόν σε σχήμα δικτυού" (near net-shape), το DED παράγει πολύ λιγότερο ακριβή εξαρτήματα και φτωχότερο φινίρισμα επιφάνειας, από τις περισσότερες άλλες τεχνολογίες AM, επομένως, στην πλειονότητα των περιπτώσεων, θα απαιτηθεί μια κατεργασία μετά την επεξεργασία (Σχ. 3.6).

Στην κατηγορία αυτή ανήκουν και οι τεχνικές:

#### Laser Engineered Net Shape LENS

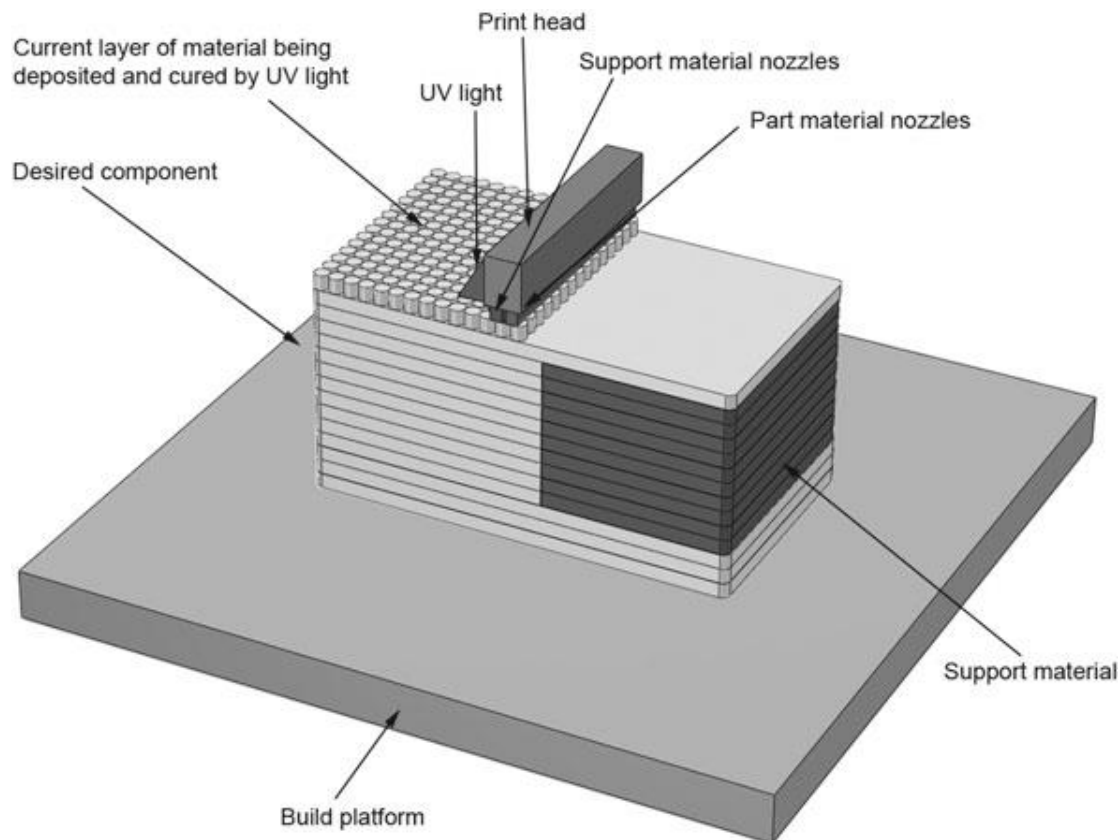
- Electron Beam Direct Manufacturing (EBDM).
- Laser Engineered Net Shape (LENS).



Σχήμα 3.6: Σχηματική αναπαράσταση της μεθόδου Directed energy deposition [8].

### 3.2.5. Material jetting

Στην εκτόξευση υλικού, τα σταγονίδια δομικού υλικού εναποτίθενται επιλεκτικά στρώμα προς στρώμα στην πλατφόρμα για να σχηματίσουν ένα τρισδιάστατο μέρος. Αυτή η τεχνική κατασκευής πρόσθετων είναι αρκετά παρόμοια με τους τυπικούς εκτυπωτές Inkjet, όπου τα σταγονίδια υλικού εναποτίθενται στρώμα προς στρώμα επιλεκτικά για να δημιουργήσουν ένα τρισδιάστατο αντικείμενο. Μόλις ολοκληρωθεί το στρώμα, σκληραίνεται με υπεριώδες φως (Σχ. 3.7). Οι εκτυπωτές εκτόξευσης υλικού παράγουν εξαρτήματα υψηλής ανάλυσης από διάφορα πλαστικά και ελαστομερή υλικά ενώ η νεότερη γενιά μπορεί επίσης να χρησιμοποιήσει πολλαπλά υλικά στο ίδιο εξάρτημα, γεγονός που τα καθιστά χρήσιμα για την παραγωγή έγχρωμων εξαρτημάτων όπως για παράδειγμα πλαστικά εξαρτήματα με καουτσούκ.

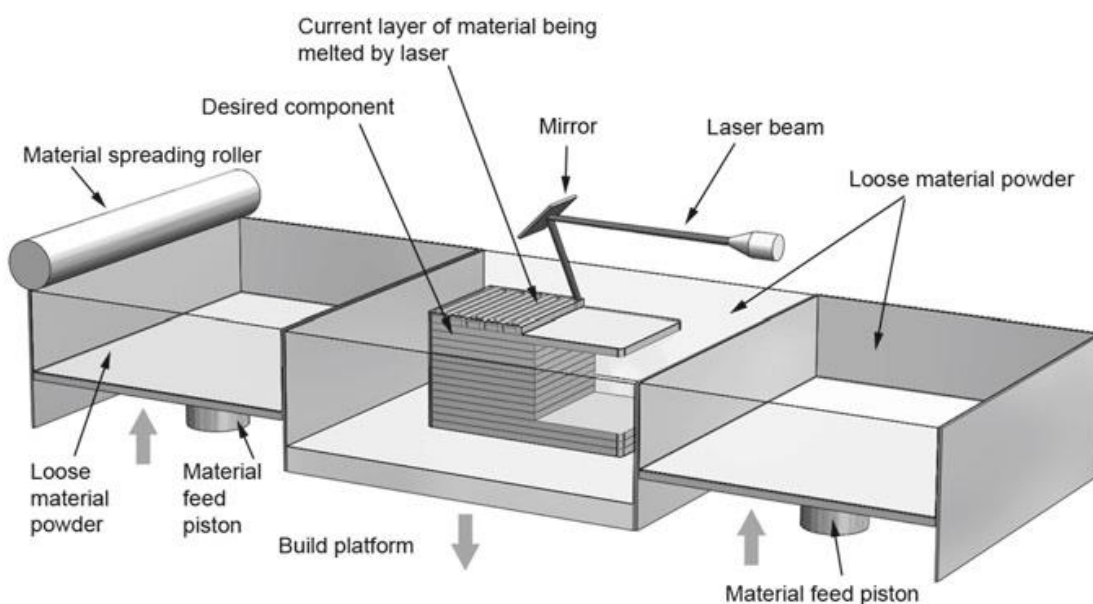


Σχήμα 3.7: Σχηματική αναπαράσταση της μεθόδου Material jetting [8].

### 3.2.6. Powder bed fusion

Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιεί μια δέσμη λέιζερ ή ηλεκτρονίων για να λιώσει το υλικό σε σκόνη και να το συντήξει για να δημιουργήσει ένα στερεό αντικείμενο. Περιλαμβάνει τις ακόλουθες τεχνικές: Multi Jet Fusion (MJF), Direct metal laser sintering (DMLS), Electron beam melting (EBM), Selective heat sintering (SHS), Selective laser melting (SLM) και Selective laser sintering (SLS).

Όλες αυτές οι τεχνολογίες λειτουργούν απλώνοντας ένα λεπτό στρώμα του δομικού υλικού, σε μορφή σκόνης, σε όλη την πλατφόρμα κατασκευής και στη συνέχεια χρησιμοποιώντας μια δέσμη ενέργειας (ένα λέιζερ στην περίπτωση του LS και του SLM και μια δέσμη ηλεκτρονίων στην περίπτωση του EBM) για να σαρώσει τη στρώση του συστατικού και να λιώσει τη σκόνη. Στη συνέχεια, η πλατφόρμα κατασκευής πέφτει κατά ένα κλάσμα του χιλιοστού και το επόμενο στρώμα σκόνης απλώνεται σε όλη την πλατφόρμα και η διαδικασία τήξης επαναλαμβάνεται, λιώνοντας το τρέχον στρώμα και, ταυτόχρονα, κολλώντας το με το προηγούμενο στρώμα (Σχ. 3.8).



Σχήμα 3.8: Σχηματική αναπαράσταση της μεθόδου Powder bed fusion [8].

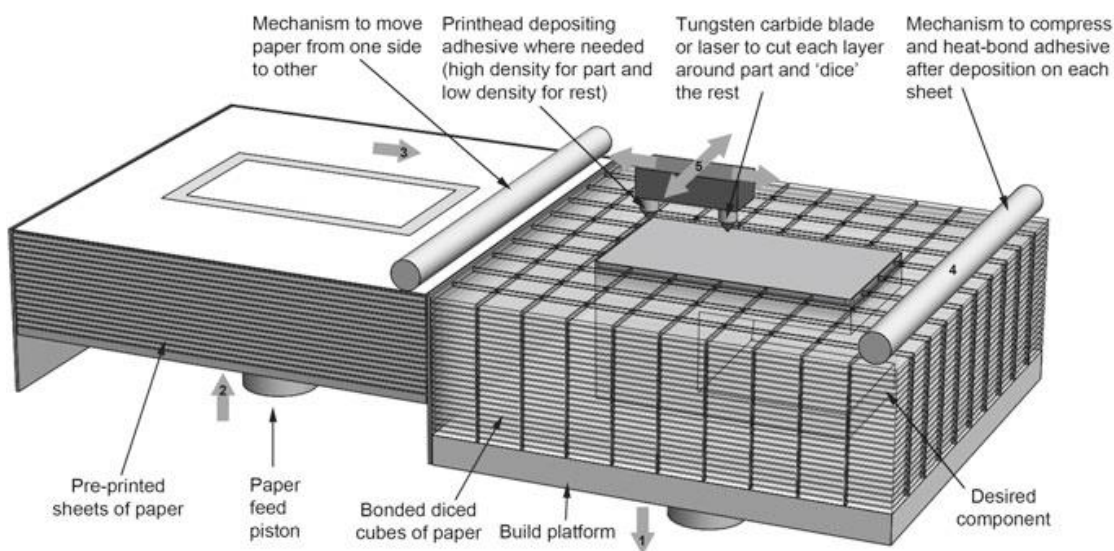
### 3.2.7. Sheet lamination

Οι τεχνολογίες πλαστικοποίησης φύλλων χρησιμοποιούν φύλλα υλικού για τη δημιουργία τρισδιάστατων αντικειμένων στοιβάζοντάς τα και πλαστικοποιώντας τα χρησιμοποιώντας συγκόλληση είτε με κόλλα είτε με υπερήχους. Μόλις κατασκευαστεί το αντικείμενο, οι ανεπιθύμητες περιοχές των τμημάτων αφαιρούνται στρώμα προς στρώμα (Σχ. 3.9).

Οι διαδικασίες πλαστικοποίησης φύλλων περιλαμβάνουν την κατασκευή πολυστρωματικών αντικειμένων (LOM) και την κατασκευή πρόσθετων υπερήχων (UAM).

Με το LOM, καθώς χρησιμοποιείται χαρτί, η διαδικασία δεν απαιτεί εξειδικευμένα εργαλεία και είναι χρονικά αποδοτική. Ενώ η δομική ποιότητα των εξαρτημάτων είναι περιορισμένη, η προσθήκη κόλλας, βαφής και λείανσης μπορεί να βελτιώσει την εμφάνιση, καθώς και περαιτέρω κατεργασία.

Η διαδικασία παραγωγής πρόσθετων υπερήχων (UAM) χρησιμοποιεί φύλλα μετάλλου, τα οποία συνδέονται μεταξύ τους χρησιμοποιώντας συγκόλληση με υπερήχους. Σε αντίθεση με το LOM, το μέταλλο δεν μπορεί να αφαιρεθεί εύκολα με το χέρι και το ανεπιθύμητο υλικό πρέπει να αφαιρεθεί με μηχανική κατεργασία.



Σχήμα 3.9: Σχηματική αναπαράσταση της μεθόδου Sheet lamination [8].



### 3.3. Προσθετική κατασκευή στον κατασκευαστικό τομέα

Με την ταχεία πρόοδο της αστικοποίησης και της εκβιομηχάνισης δημιουργήθηκαν νέες ανάγκες στον κατασκευαστικό τομέα. Αρχικά, η έλλειψη εργατικού δυναμικού, η βαθμιαία μείωση των πρώτων υλών και τα ζητήματα γύρω από τις συνθήκες υγιεινής και ασφάλειας αποτέλεσαν μεγάλο τροχοπέδη για την ανάπτυξη και εξέλιξη του κατασκευαστικού κλάδου. Η πρόοδος της τεχνολογίας έχει ως φυσικό επακόλουθο την δημιουργία σύγχρονων και καινοτόμων ιδεών.

Τα αυτόματα κατασκευαστικά συστήματα αποτέλεσαν τα τελευταία χρόνια το επίκεντρο της κατασκευαστικής βιομηχανίας και των ερευνητών παγκοσμίως. Έχουν αναπτυχθεί πολυάριθμες τεχνολογίες που περιλαμβάνουν την τρισδιάστατη εκτύπωση στοιχείων (3DP) από σκυρόδεμα ενώ η εφαρμογή της μεθόδου σε κατασκευαστικά έργα ολοένα και αυξάνεται. Η μέθοδος 3DP αποτελεί μια καινοτόμα ιδέα αφού τα τελευταία χρόνια πολλοί ερευνητές και μηχανικοί εστίασαν τις μελέτες τους γύρω από αυτήν. Έχει χρησιμοποιηθεί σε πολλούς τομείς όπως στην αεροδιαστημική, στη βιοιατρική και θεωρείται επι του παρόντος ως μια αξιόλογη μέθοδος κατασκευής στον κατασκευαστικό τομέα [9]. Η τεχνολογία 3DP έχει το πλεονέκτημα της υψηλής απόδοσης της κατασκευής, του χαμηλού κόστους εργασίας και των λιγότερων κατασκευαστικών αποβλήτων σε σύγκριση με την παραδοσιακή τεχνολογία. Οι παραδοσιακές τεχνικές που χρησιμοποιούνται στον κατασκευαστικό κλάδο είναι η χύτευση και η εξώθηση [7]. Η μέθοδος 3DP καταργεί την ανάγκη για συμβατικά καλούπια αφού στερεοποιεί συγκεκριμένους όγκους υλικού σε διαδοχικά στρώματα. Έχοντας εκτυπώσει το δείγμα σε 2D μπορεί να γίνει στοίβαξη των εκτυπωμένων επιπέδων για να δημιουργηθεί η επιθυμητή τρισδιάστατη κατασκευή. Τα τρισδιάστατα εκτυπώσιμα τσιμεντοειδή εναποτίθενται μέσω ενός τρισδιάστατου εκτυπωτή κατά στρώματα χωρίς καμία υποστήριξη. Τα κρίσιμα σημεία για αυτό το εγχείρημα είναι η εργασιμότητα, ο χρόνος πήξης και σκλήρυνσης, η ρευστότητα καθώς και οι μηχανικές ιδιότητες. Όλοι αυτοί οι σημαντικοί παράγοντες απόδοσης μπορούν να βελτιωθούν με την σωστή επιλογή υλικών.

Μερικά από τα οφέλη που παρέχει το 3DP είναι η ελευθερία στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της κατασκευής, η επιτάχυνση των διαδικασιών και ταχύτητα των εργασιών. Επιπλέον, δεν χρειάζεται η άσκοπη χρήση ξυλότυπου. Ως ξυλότυπος ορίζονται τα προσωρινά ή μόνιμα καλούπια στα οποία εναποτίθενται το σκυρόδεμα ή παρόμοια υλικά. Ένας ακόμα εξαιρετικά σημαντικός παράγοντας της αναγκαιότητας του 3DP είναι το χαμηλό του οικολογικό



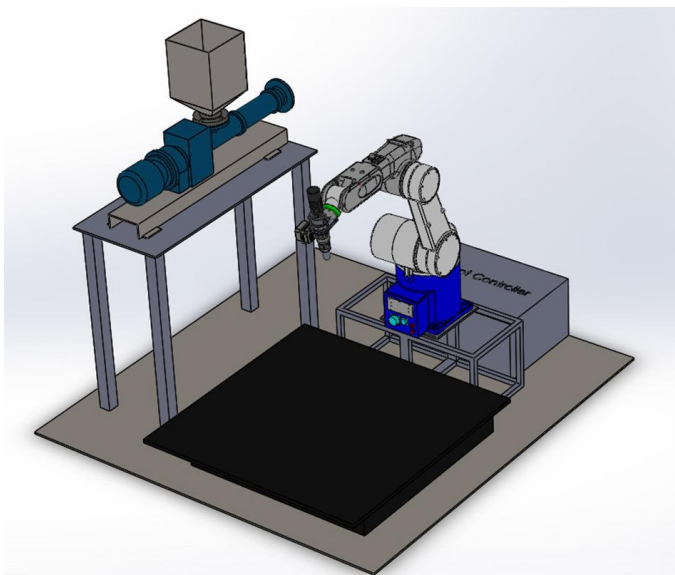
αποτύπωμα αφού είναι μια εξαιρετικά οικολογική διαδικασία συγκριτικά με τον παραδοσιακό τρόπο εφαρμογής. Το 3DP παρέχει αναμφίβολα υψηλή ακρίβεια στις κατασκευές ενώ παράλληλα επιτρέπει την ελευθερία στο σχεδιασμό και ειδικότερα για πολυσύνθετες κατασκευές. Αξιοσημείωτο αποτελεί επίσης και το γεγονός ότι το 3DP είναι αρκετά οικονομική λύση, από άποψη κόστους και από άποψη πρώτων υλών. Τέλος, το 3DP αποτελεί μια άκρως ασφαλή διαδικασία.

Συμπερασματικά η ελευθερία σχεδιασμού, η ελαχιστοποίηση των απορριμμάτων και η δυνατότητα κατασκευής πολύπλοκων κατασκευών καθώς και η γρήγορη δημιουργία προτύπων είναι τα κύρια πλεονεκτήματα της τρισδιάστατης εκτύπωσης.

Παρακάτω αναλύονται AM τεχνικές που έχουν τη δυνατότητα να χρησιμοποιηθούν στον κατασκευαστικό τομέα [10].

### 3.3.1. Extrusion Printing (Extrusion based process)

Η διαδικασία εκτύπωσης με εξώθηση κατασκευάζει τρισδιάστατα αντικείμενα από ένα μοντέλο που δημιουργείται από υπολογιστή, όπως σε μια τυπική ταχεία διαδικασία πρωτοτύπου. Λεπτομερή μοντέλα μπορούν να προκύψουν από σαρώσεις υπολογιστικής τομογραφίας, σαρώσεις μαγνητικής τομογραφίας ή δεδομένα μοντέλων που δημιουργούνται από συστήματα ψηφιοποίησης 3D αντικειμένων και χρησιμοποιούνται σε αυτήν την τεχνική. Στο Σχήμα 3.10 παρουσιάζεται πως δημιουργείται κάθε στρώμα, η βάση της πλατφόρμας χαμηλώνει και το επόμενο στρώμα στοιβάζεται πάνω από ένα άλλο όπως ορίζεται από τον υπολογιστή (Zein et al.,2002) [11]. Επομένως, η τρισδιάστατη εκτύπωση σκυροδέματος μέσω εξώθησης βασίστηκε στη διαδικασία FDM. Η αρχική ιδέα της μεθόδου προσφέρθηκε στα τέλη της δεκαετίας του 1990 από την Pegna (1997) [12]. Αργότερα, η τεχνική αυτή χρησιμοποιήθηκε στο πανεπιστήμιο της Νότιας Καλιφόρνιας με ορισμένες προσαρμογές και τροποποιήσεις. Η διαδικασία ονομάστηκε contour crafting από τους Khoshnevis και Dutton (1998) και Hwang και Khoshnevis (2004) [13,14].



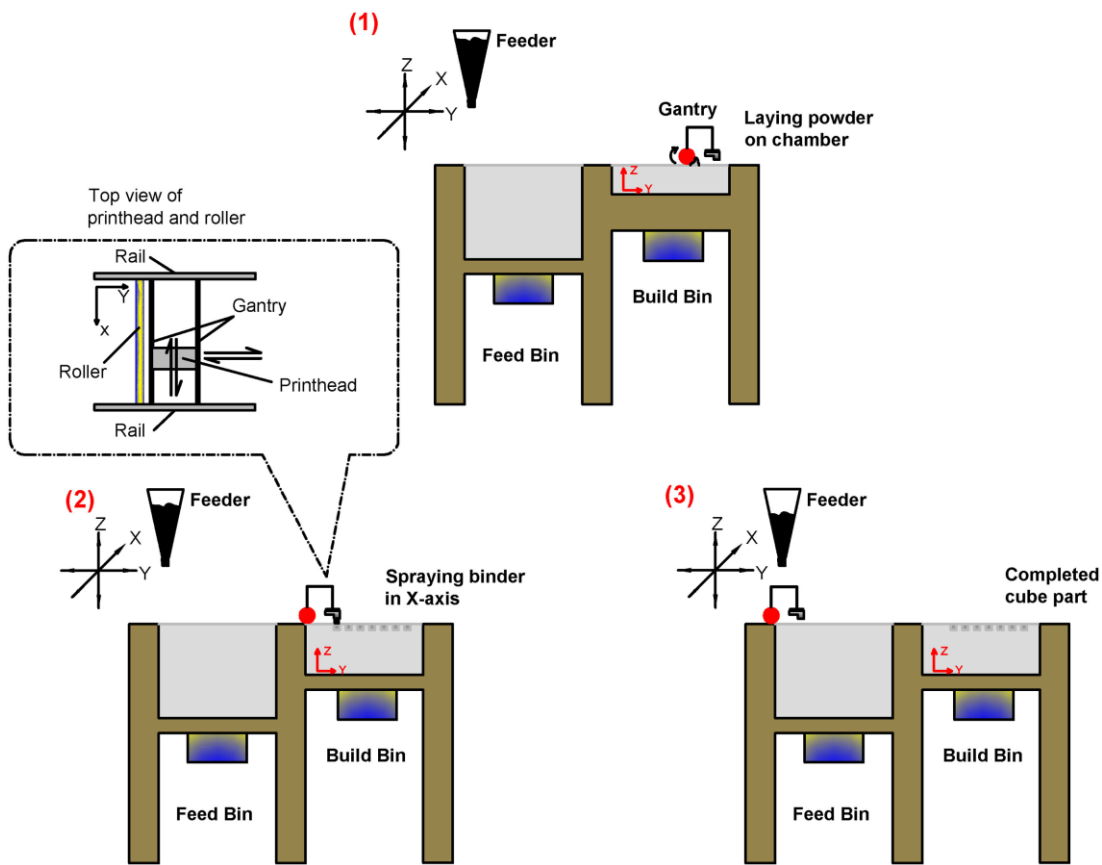
Σχήμα 3.10: Γραφική απεικόνιση της μεθόδου *extrusion printing* [10].

### 3.3.2. Inkjet Printing (Binder jetting)

Η μέθοδος Inkjet Printing γνωστή και ως εκτόξευση συνδετικού είναι μια από τις πιο κοινές μεθόδους εκτύπωσης που χρησιμοποιούνται για τα τρισδιάστατα μέρη εκτύπωσης σε διάφορες βιομηχανίες. Σε αυτή την μέθοδο ένα λεπτό στρώματος εκτυπωτικού υλικού, συχνά σε μορφή σκόνης, εξαπλώνεται (πχ. με κύλινδρο) σε μια στερεή πλατφόρμα. Στη συνέχεια ένα συνδετικό υγρό εναποτίθεται πάνω από το στρώμα σκόνης. Το συνδετικό υλικό κολλά τη σκόνη ενδιάμεσα με σκοπό την δημιουργία ενός στερεού μέρους. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται αρκετές φορές και τα στρώματα εκτυπώνονται το ένα πάνω στο άλλο για να σχηματίσουν ένα τρισδιάστατο αντικείμενο.

Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι ορισμένα υλικά εκτύπωσης μπορεί να απαιτούν σκλήρυνση [15] ή ψήσιμο σε κλίβανο [16] στο φούρνο ως πρόσθετο στάδιο μετα-επεξεργασίας. Το γεγονός αυτό καθιστά την μέθοδο Inkjet Printing μια εξαιρετικά ενεργοβόρα τεχνική για τη δημιουργία μεγάλων κατασκευών (Σχ. 3.11). Ένας από τους κυριότερους ρόλους της σκόνης είναι η στήριξη του τμήματος ενώ το συνδετικό εναποτίθεται πάνω από το επάνω στρώμα που τυπώθηκε στο προηγούμενο βήμα [17]. Με την μέθοδο αυτή υπάρχει η δυνατότητα εκτύπωσης γεωμετρικά πολύπλοκων κατασκευών. Παρόλα αυτά, συχνά περιέχονται κενά που υποβαθμίζουν την ποιότητα του εξαρτήματος και επομένως η συγκεκριμένη μέθοδος είναι καλύτερο να εφαρμοστεί σε περιπτώσεις που προτιμάται η υψηλή ταχύτητα εκτύπωσης έναντι

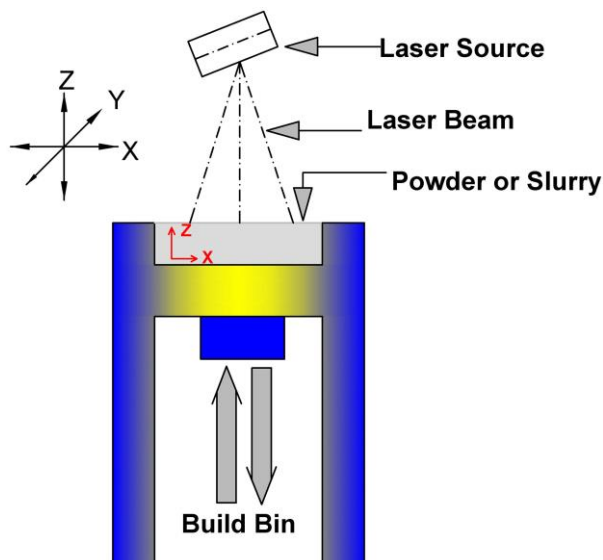
της ακρίβειας εκτύπωσης [15]. Οι ερευνητές έχουν αναφέρει ότι χρησιμοποιούν διάφορους συνδυασμούς σκόνης και συνδετικού υλικού. Για παράδειγμα, μερικοί ερευνητές χρησιμοποίησαν γύψο και νερό ως σκόνη και συνδετικό υλικό αντίστοιχα [18].



Σχήμα 3.11: Σχηματική απεικόνιση της μεθόδου inkjet 3D printing process.

### 3.3.3. Selective Laser Sintering (SLS)

Η επιλεκτική πυροσυσσωμάτωση με λέιζερ είναι η διαδικασία πυροσυσσωμάτωσης σκόνης στρώμα προς στρώμα [29]. Το στρώμα σκόνης εκτίθενται στη θερμική ενέργεια δέσμης λέιζερ (Σχ.3.12). Αυτή η τεχνολογία εισήχθη το 1986 από τους Carl Deckard και Joe Beaman στο Πανεπιστήμιο του Τέξας [20]. Ο Canete Vela ισχυρίστηκε ότι η πυροσυσσωμάτωση με λέιζερ μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή μεταλλικών και πολυμερών αντικειμένων. Οι σκόνες αυτές θα μπορούσαν να απαρτίζονται από διάφορων ειδών υλικά όπως κράματα, κεραμικά, νάιλον, συνδετικό γυαλί, μέταλλο, χάλυβα και ανθρακικό [21].



Σχήμα 3.12: Σχηματική απεικόνιση της μεθόδου *Selective Laser Sintering*.

#### 3.4. Σχεδιασμός εκτυπώσιμων τσιμεντοειδών υλικών

Σε σύγκριση με τα παραδοσιακά υλικά με βάση το τσιμέντο, τα υλικά για τρισδιάστατη εκτύπωση απαιτούν κατάλληλη δυνατότητα εκτύπωσης (π.χ. ρεολογική ιδιότητα και καλή κατασκευασιμότητα). Επιπλέον, το νωπό τσιμεντοκονίαμα μετά την εκτύπωση θα πρέπει να παρουσιάζει υψηλό ιξώδες και τάση διαρροής για να διατηρήσει το τυπωμένο σχήμα [22, 29].

Ο σχεδιασμός της τσιμεντοκονίας αποτελεί καθοριστικό παράγοντα τόσο στη διαδικασία της τρισδιάστατης εκτύπωσης του τσιμεντοειδούς όσο και στην απόδοση των τυπωμένων στοιχείων (π.χ. στατικότητα). Τα υλικά της τρισδιάστατης εκτύπωσης εκτυπώνονται το ένα στρώμα πάνω στο άλλο ενώ τα κατώτερα στρώματα συγκρατούν το στρώμα πάνω τους. Ορισμένες μελέτες τα τελευταία χρόνια επικεντρώθηκαν στις διαφορετικές αναλογίες χημικών προσμείξεων και αναλογίες νερού/τσιμέντου [10].

Πιο πρόσφατες μελέτες επιχείρησαν να χρησιμοποιήσουν λιγότερα χοντρόκοκκα αδρανή δεδομένου ότι είναι εξαιρετικά δύσκολη διαδικασία να διαπεράσουν τα χοντρόκοκκα αδρανή μέσα από την αντλία και το μικρό ακροφύσιο του εκτυπωτή. Επιπλέον, τα στρώματα με χοντρόκοκκα αδρανή αδυνατούν να συγκρατήσουν το αρχικό σχήμα των εκτυπωμένων στρωμάτων [23].

Οι Le et al. σε μελέτες τους προετοίμασαν τα μίγματα σκυροδέματος για την εκτύπωση τρισδιάστατο ινοπλισμένο σκυρόδεμα με τα λεπτά αδρανή. Ο στόχος των πειραματικών

μελετών ήταν η διερεύνηση της δυνατότητας εξώθησης και δυνατότητα δόμησης για τα μίγματα σκυροδέματος. Η διάμετρος παροχής ακροφυσίων ήταν 9 mm για την παροχή υψηλής ανάλυσης εκτύπωσης. Ασχολήθηκαν πιο έντονα με τη διατμητική αντοχή για την εργασιμότητα του σκυροδέματος καθώς και τη θλιπτική αντοχή για τα τυπωμένα δείγματα. Η βέλτιστη αντοχή σε θλίψη που επιτεύχθηκε μετά το πέρας 28 ημερών ήταν 110 MPa [24].

Οι Malaeb et al. δοκίμασαν σκυρόδεμα με διαφορετικές αναλογίες νερού προς τσιμέντου (w/c) για την εκτύπωση ευθείων γραμμών. Έγινε επιλογή αναλογίας νερού προς τσιμέντο περίπου 0.4. Η χαμηλότερη αναλογία w/c αυξάνει την αντοχή του σκυροδέματος. Η συγκεκριμένη αναλογία βοήθησε για τη διατήρηση της μεγαλύτερης οικοδομησιμότητας του τυπωμένου σκυροδέματος. Κατά προσέγγιση η αντοχή σε θλίψη τέτοιων μιγμάτων είναι 42 MPa [10].

Οι Hambach και Volkmer ετοίμασαν και τύπωσαν δείγματα χρησιμοποιώντας το μηχάνημα WASP Clay Extruder Kit με διάμετρο ακροφυσίου 2mm. Οι δοκιμές διερεύνησαν την πυκνότητα, το πορώδες και την αντοχή στα τριδιάστατα εκτυπωμένα δείγματα με τις κοντές ίνες (άνθρακας, γυαλί και ίνες βασάλτη). Οι ίνες χρησιμοποιήθηκαν σε διαφορετικές κατευθύνσεις και η μέγιστη αντοχή σε κάμψη ήταν 30 MPa για το περιεκτικότητα 1% όγκου σε ανθρακονήματα. Η βέλτιστη αντοχή σε θλίψη για τον άνθρακα 1% όγκου με ίνες παράλληλες με το τυπωμένο μέρος έφτασαν τα 80 MPa [25].

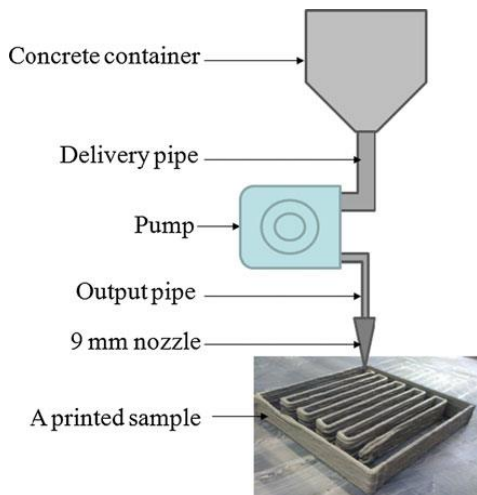
Οι Kazemian et al. ανέπτυξε διαφορετικές μίξεις για σκυρόδεμα σε 3DP. Οι διαφορετικοί τύποι συμπεριλάμβαναν PPM (μόνο τσιμέντο Portland), SFPM (που περιέχει πυριτική παιπάλη), FRPM (που περιέχει ίνες), NCPM (που περιέχει νανο-άργίλο). Δύο μέθοδοι έχουν προταθεί, το «στρώμα μορφοποίησης καθίζησης» και η «σταθερότητα κυλίνδρου». Τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξε ότι η νανο-άργίλος και πυριτική παιπάλη ενίσχυσαν την μορφοποίηση του φρέσκου μίγματος, ενώ μικρή βελτίωση παρατηρήθηκε στο τυπωμένο μέρος με την προσθήκη ίνας πολυπροπυλενίου [26].

Σύμφωνα με άλλη μελέτη η προσθήκη μικρότερης ίνας στο σκυρόδεμα οδήγησε στο συμπέρασμα ότι δεν μειώθηκε η ρευστότητα του υλικού ενώ τέλος στις περισσότερες περιπτώσεις η ίνα ενίσχυσε τη σταθερότητα του σχήματος του σκυροδέματος [27].

Επιπλέον, έρευνα που πραγματοποιήθηκε από τους Shakor et al., η αναλογία του μίγματος θα μπορούσε να παρασκευαστεί με βάση κριτηρίων όπως οι δοκιμές ροής συμπίεσης (squeeze flow tests), αντοχή σε θλίψη, δοκιμή καθίζησης και Vicat δοκιμή. Διεξήχθησαν δοκιμές σε τσιμεντοειδή μίγματα με διάφορες αναλογίες νερού και χημικά πρόσμειξης [28].

Με βάση τις παραπάνω μελέτες παρατηρείται ότι παρουσιάζονται διαφορετικές αναλογίες ανάμειξης, οι οποίες έχουν ως αποτέλεσμα ποικιλομορφία όσον αφορά τα τελικά σχήματα των δομικών στοιχείων.

Το βασικό σχηματικό σύστημα εκτύπωσης σκυροδέματος παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.13.



Σχήμα 3.13 Σχηματικό σύστημα εκτύπωσης σκυροδέματος [24].

### 3.5. Εφαρμογές της τρισδιάστατης εκτύπωσης

Ο κατασκευαστικός κλάδος έχει αναγνωριστεί ότι καταναλώνει σημαντικούς πόρους και αποτελεί σημαντική απειλή για το περιβάλλον [30]. Η αυτοματοποιημένη κατασκευή κτιρίων με τρισδιάστατης εκτύπωσης μπορεί δυνητικά να φέρει επανάσταση στον κατασκευαστικό κλάδο. Οι αρχιτεκτονικές εφαρμογές αντιπροσωπεύουν μόνο το 3% της συνολικής βιομηχανίας του 3DP, ωστόσο αυτός ο τομέας βρίσκεται εν εξελίξει καθώς άρχισε να χρησιμοποιείται για κατασκευές μόλις το 2014 και από τότε παρουσιάζει μεγάλες δυνατότητες. Προσφέρει σημαντική μείωση του χρόνου κατασκευής και του ανθρώπινου δυναμικού. Μέχρι σήμερα πολλές κτηριακές κατασκευές έχουν εκτυπωθεί με επιτυχία χρησιμοποιώντας την τεχνολογία του τρισδιάστατου εκτυπώσιμου σκυροδέματος [36].

Η πρώτη εκτυπωμένη κτιριακή δομή αναπτύχθηκε στο Άμστερνταμ το 2014 (Σχ. 3.14). Το έργο προωθήθηκε από τους αρχιτέκτονες της εταιρείας Dus Architects οι οποίοι ήθελαν να δείξουν την ελάχιστη σπατάλη υλικών και κόστους μεταφοράς, ανοίγοντας έτσι το δρόμο για μια πιο οικοδομική βιομηχανία. Επίσης το 2014, η WinSun company, ένα αρχιτεκτονικό γραφείο στην Κίνα εκτύπωσε μαζικά κατοικίες στη Σαγκάη σε λιγότερο από 24 ώρες (Σχ. 3.15) [7].

Ένα ακόμα παράδειγμα αποτελεί ο κήπος του Andy Rubenko (Σχ. 3.16 α), ο οποίος κατασκευάστηκε με την χρήση της τεχνολογίας contour crafting το 2014, χρησιμοποιήθηκε άμμος και τσιμέντο για να εκτυπωθεί η εν λόγω κατασκευή ενώ η μοντελοποίηση πραγματοποιήθηκε με RepRap 3DP (open-source project).

Αξιοσημείωτο είναι και το Lewis Grand Hotel (Σχ. 3.16 β) που βρίσκεται στις Φιλιππίνες. Μια βίλα του ξενοδοχείου αυτού δημιουργήθηκε με τρισδιάστατους εκτυπωτές χρησιμοποιώντας τοπικά υλικά.

Το πρώτο πεντάροφο κτίριο στον κόσμο με τρισδιάστατη εκτύπωση εκτυπώθηκε στην Κίνα από την WinSun company το 2015 σε έκταση 1100m<sup>2</sup> (Σχ.3.16 γ). Ο τοίχος αυτού του κτιρίου ήταν εκτυπωμένος κούλος για θερμομόνωση με ζιγκ-ζαγκ μοτίβο (zig-zag pattern) στο εσωτερικό για ενίσχυση. Χρειάστηκαν μόνο 17 ημέρες για την εκτύπωση.

Πολλά πολυώροφα κτίρια, όπως αυτό του Σχήματος 3.16 δ), έχουν επίσης εκτυπωθεί με επιτυχία. Ένα ακόμα παράδειγμα γρήγορης 3D εκτύπωσης κτιρίου αποτελεί και το κτιριακό συγκρότημα γραφείων 250m<sup>2</sup> στο Ντουμπάι το 2016 για την κατασκευή του οποίου χρειάστηκαν 48 ώρες (Σχ.3.16 ε). Εκτυπώθηκε χρησιμοποιώντας ένα ειδικό μίγμα τσιμεντοπολτού με προσθήκη γύψου ο οποίος ήταν ενισχυμένος με ίνες (fiber-reinforced gypsum). επίσης, καταφύγια σε διάφορες περιοχές εκτυπώνονται για διάρκεια ζωής 4-6 έτη με ελάχιστο κόστος και προσπάθεια.

Επιπλέον, όπως προκύπτει και από το σπίτι της Gaia, (Σχ.3.16 ζ) τα υλικά χαμηλού κόστους που παράγονται από απόβλητα είναι αισθητά εμφανή σε 3DP κατασκευές.

Μια ακόμα αξιόλογη εφαρμογή της τεχνολογίας 3DP είναι ότι σχεδιάζεται για μελλοντική χρήση στο διάστημα από την Ευρωπαϊκή Διαστημική υπηρεσία και την NASA. Όλες αυτές οι σημαντικές εφαρμογές διερευνούν την τρέχουσα ανάπτυξη της τεχνολογίας 3DP στις κατασκευές από σκυρόδεμα [31].





Σχήμα 3.14: Πρώτο εκτυπώσιμο σπίτι από την εταιρεία Dus Architects.



Σχήμα 3.15: Εκτυπώσιμο σπίτι από την εταιρεία WinSun.



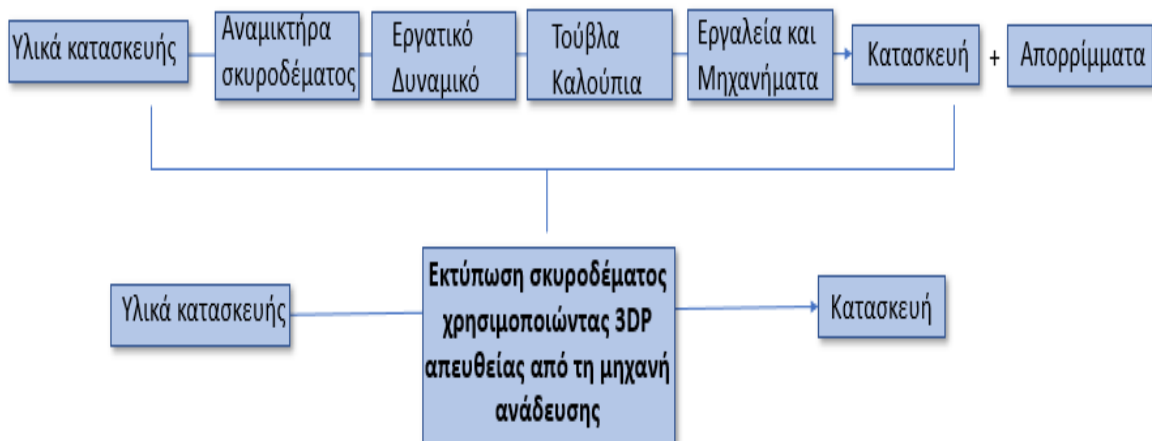
Σχήμα 3.16: 3DPrinted κτιριακές κατασκευές ανά τον κόσμο. α) Andy Rudenko's Garden (2014) β) Lewis Grand Hotel Philippines (2015) γ) five-story apartment building China (2015) δ) Two-story building China (2016) ε) Office building UAE (2016) ζ) Gaia house Massa Lombarda [31].



### 3.6. Περιβαλλοντικές και οικονομικές επιδόσεις

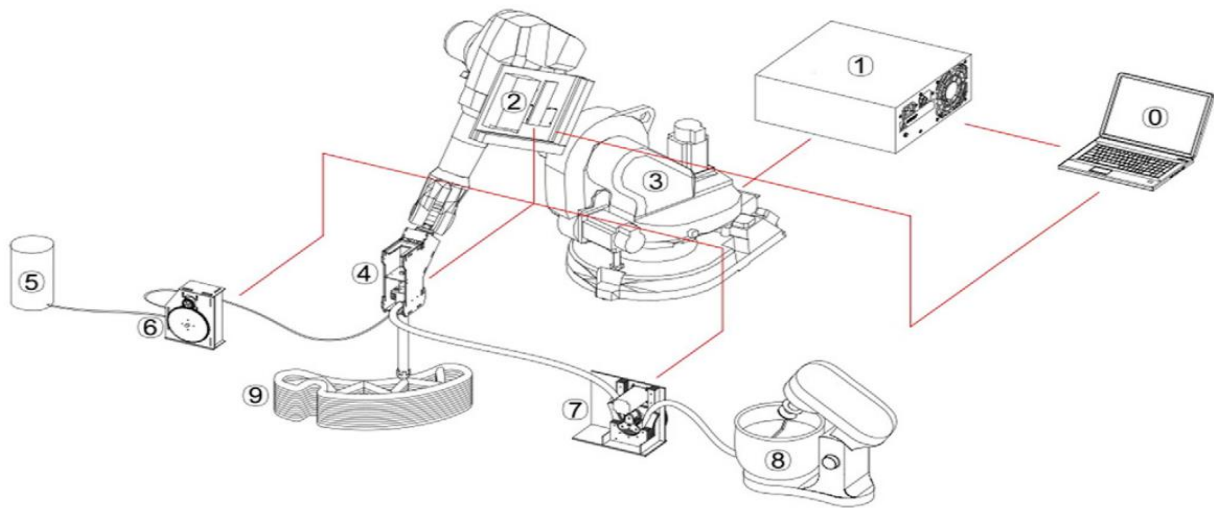
Αρκετές μελέτες έχουν δείξει ότι η κατασκευή με τεχνολογία 3DP μπορεί να μειώσει τα απορρίμματα μια κατασκευής, το κόστος της εργασίας και το κόστος παραγωγής. Η εφαρμογή 3DP τεχνικών μειώνει την απαίτηση σε πρώτες ύλες κατά 70%, την παραγωγή απορριμμάτων και φέρνει οικονομική και περιβαλλοντική ανάπτυξη στον κατασκευαστικό τομέα. Με την χρήση αυτής της τεχνολογίας μπορεί να μειωθεί 30%-60% των απορριμμάτων, 50%-70% του απαιτούμενου χρόνου και 40%-80% του κόστους εργασίας.

Το διάγραμμα ροής, στο Σχήμα 3.17, δείχνει τη βιωσιμότητα της τεχνολογίας τρισδιάστατων κατασκευών όσον αφορά την μειωμένη απαίτηση εργασίας, την απουσία απαιτήσεων ξυλότυπου και τη μειωμένη παραγωγή απορριμμάτων [31].



Σχήμα 3.17: Διάγραμμα ροής βιωσιμότητας της τεχνικής 3DP.

Στο Σχήμα 3.18 παρουσιάζονται αναλυτικά σχηματικά όλα τα στάδια της μεθόδου 3DP.



Σχήμα 3.18: Σχηματικό διάγραμμα 3DP setup: 0. Σύστημα εντολών 1. Έλεγχος 2. Ελεγκτής εκτύπωσης 3. Ρομποτικός βραχίονας 4. Κεφαλή εκτύπωσης 5. Επιταχυντικός παράγοντας 6. Αντλία 7. Αντλία για επιπλέον ανάμιξη 8. Αναμικτήρας 9. 3D εκτυπώσιμο αντικείμενο [37].

Η εταιρεία WinSun ισχυρίζεται ότι έχουν εκτυπώσει και πουλήσει πάνω από 100 κατοικίες με κόστος στα 30.000\$ το καθένα. Στην Κίνα μια εταιρεία εκτύπωσε σχετικά φτηνά σπίτια μέσα σε 24 ώρες. Το πλεονέκτημα του συστήματος 3DP είναι ότι η διαδικασία δεν χρειάζεται ξυλότυπο, το γεγονός αυτό εξοικονομεί χρήματα, εργασία και χρόνο. Περίπου το 35-60% του συνολικού κόστους κατασκευής του σκυροδέματος και το 50-60% του χρόνου κατασκευής καταναλώνεται για την προετοιμασία των ξυλοτύπων και για το καλούπωμα αν και τα στοιχεία ποικίλουν για την κάθε χώρα. Ως μια πιο αυτοματοποιημένη μέθοδο, το 3DP μειώνει την βαριά εργασία των εργαζομένων και την πιθανότητα ατυχήματος ενώ παράλληλα ενισχύει την ασφάλεια των κατασκευών [31].

Η μειωμένη παραγωγή θορύβου, η ελάττωση των απορριμμάτων και η εξοικονόμηση χρόνου αυξάνουν την αξιοπιστία των συστημάτων 3DP. Επιπλέον, τα προβλήματα κακής απόδοσης και παραγωγικότητας που εντοπίζονται στα περισσότερα συμβατικά κατασκευαστικά συστήματα προκύπτουν κυρίως από τη βαριά εργασία και καταπόνηση των εργατών. Αυτό το πρόβλημα είναι έντονο ακόμα και σε αναπτυγμένες χώρες όπως το Ηνωμένο βασίλειο, οι ΗΠΑ, η Σιγκαπούρη και το Χονγκ Κονγκ.

Ένας ακόμα θετικός παράγοντας της μεθόδου 3DP είναι ότι τροφοδοτείται από ηλεκτρική ενέργεια με αποτέλεσμα να μειώνονται οι εκπομπές ρύπων κατά την διάρκεια υλοποίησης της εκάστοτε κατασκευής. Με αυτό τον τρόπο προκύπτει η διασφάλιση περιβαλλοντικής ασφάλειας αφού το οικολογικό αποτύπωμα μειώνεται. Τα απορρίμματα που προκύπτουν από

μια κατασκευή είναι επικίνδυνα για το περιβάλλον και απαιτούν χώρο και εργασία για την εναπόθεσή τους. Δεδομένου ότι περίπου το 80% των παγκόσμιων απορριμμάτων παράγονται από κατασκευές γίνεται αντιληπτή η σπουδαιότητα του 3DP [31]. Επιπλέον, τα μηχανήματα που χρησιμοποιούνται στο 3DP πρέπει να είναι φιλικά προς το περιβάλλον έτσι ώστε η ανακύκλωση και αντικατάσταση παλαιότερων εξαρτημάτων να μπορεί να πραγματοποιηθεί χωρίς κανένα περιβαλλοντικό κίνδυνο [31].

### 3.7. Προκλήσεις και βελτιώσεις της τρισδιάστατης εκτύπωσης

Αναμφίβολα τα οφέλη που προκύπτουν από την εφαρμογή της τρισδιάστατη εκτύπωση στον κατασκευαστικό τομέα είναι πολύ σημαντικά. Υπάρχουν όμως και αρκετές προκλήσεις που έρχεται αντιμέτωπος ο κλάδος.

#### Υψηλό Κόστος Εκτύπωσης

Γενικά η τεχνολογία 3DP απαιτεί εξειδικευμένη και λεπτομερειακή λειτουργία των μηχανημάτων. Η λειτουργία αυτή καταναλώνει περισσότερη ενέργεια και κόστος από την συμβατική μέθοδο. Καθώς αυξάνεται η πολυπλοκότητα και η κλίμακα τις εκτύπωσης, αυξάνονται και οι απαιτήσεις για ακριβότερα μηχανήματα. Επιπλέον, για την σωστή λειτουργία των μηχανημάτων χρειάζονται ειδικά εκπαιδευμένο προσωπικό κάτι το οποίο προαπαιτεί χρόνο. Η μέθοδος 3DP όταν εφαρμόζεται σε κατασκευές με μεγάλη κλίμακα απαιτεί μαζικότερη παραγωγή η οποία είναι χρονοβόρα και δαπανηρή. Μια πιθανή λύση αυτού το προβλήματος θα μπορούσε να είναι η βελτιστοποίηση των μηχανών και των τεχνολογιών που εφαρμόζονται στο σχεδιασμό. Το πιο κρίσιμο σημείο είναι η επιλογή όλων των παραμέτρων που μπορεί να προκαλέσουν δυσκολίες ή σφάλματα κατά την διάρκεια και μετά των εφαρμογών [31].

Η ρωσική εταιρεία APis Cor κατασκεύασε ένα σπίτι 38,11m<sup>2</sup> με κόστος περίπου 10.150\$ και ισχυρίστηκε ότι αυτό το κόστος είναι απίστευτα χαμηλό από αυτό της κατασκευής ενός σπιτιού με συμβατικό τρόπο. Περίπου 60% του κόστους απαιτήθηκε για την κατασκευή ενώ το υπόλοιπο δαπανήθηκε για καλωδιώσεις, πόρτες ,παράθυρα και φινιρίσματα. Συμπερασματικά, προκύπτει ότι, με την χρήση φθηνότερων και τοπικά διαθέσιμων πρώτων υλών, εργαλείων υποστήριξης καθώς και αντικατάσταση των ακριβότερων μηχανημάτων, το 3DP μπορεί να αποτελέσει τη βέλτιστη λύση ώστε να μειωθεί το κόστος μια κατασκευής [31].

Συνεπώς το κόστος της εκτύπωσης μπορεί να βελτιστοποιηθεί ανάλογα με την τεχνολογία, τα υλικά και τη θέση της κατασκευής. Η εφαρμογή του 3DP είναι στα πρώιμα στάδια ακόμα και για τις πιο αναπτυγμένες χώρες. Η έλλειψη προτύπων, κανονισμών και κατευθυντήριων γραμμών εμποδίζει τις τοπικές κατασκευαστικές εταιρείες να υιοθετήσουν αυτήν την τεχνολογία [31].

Μια ακόμα από τις κύριες προκλήσεις για την εφαρμογή της τεχνολογίας στο συμβατικό σκυρόδεμα είναι η χαμηλή δύναμη των δεσμών (bond strength) και η ανισότροπη συμπεριφορά των στοιχείων του 3DP. Για την βελτίωση της ικανότητας συγκόλλησης του εκτυπώσιμου σκυροδέματος μπορεί να βοηθήσει η ενσωμάτωση ινών. Αυτές οι δυο επιπλοκές δημιουργούνται λόγω της φύσης του συστήματος εκτύπωσης χωρίς ξυλότυπο.

Το πρότυπο σχεδιασμού για κάθε τύπο υλικών, εκτύπωση και τεχνολογία εκτύπωσης πρέπει να καθιερωθεί καθώς οι τρέχουσες προδιαγραφές είναι κάπως αυθαίρετες. Τα συστήματα εγκατάστασης οπλισμού και οι σχετικές οδηγίες είναι ανεπαρκείς ενώ η ζήτηση για τεχνολογία 3DP αυξάνεται. Πρέπει να αναπτυχθεί σύστημα εκτύπωσης για κτιριακές κατασκευές μεγάλης κλίμακας με σύνθετα υλικά. Το σκυρόδεμα εξαιρετικά υψηλής απόδοσης αναμεμιγμένο με ίνες μεγάλου όγκου μπορεί να εφαρμοστεί σε μεγάλες κατασκευές το οποίο προτείνεται ως λύση για την εκτύπωση πολύπλοκων και λεπτομερών κατασκευών με επαρκή αντοχή. Ωστόσο, η ρεολογία και η απόδοση εκτύπωσης αυτών των τύπων σκυροδέματος πρέπει να διερευνηθούν σε βάθος.

Οι διεξαγωγή κατάλληλων έρευνών θα προσφέρουν σημαντικές πληροφορίες και θα ανοίξουν τον δρόμο για καλύτερη επιλογή υλικών για το 3DP. Οι κατασκευές οι οποίες εκτυπώνονται έρχονται αντιμέτωπες με σοβαρές συνθήκες φόρτωσης. Επομένως θα πρέπει να ληφθεί υπόψη η πρόσκρουση, η κόπωση και η δυναμική συμπεριφορά των στοιχείων του 3DPC. Η συμπεριφορά ερπυσμού και μακροπρόθεσμης εκτροπής του 3DPC δεν είναι πολύ ικανοποιητική λόγω του λεπτού μεγέθους των αδρανών. Η ανθεκτικότητα των δομών του 3DPC με διακυμάνσεις στις συνθήκες έκθεσης όπως νερό, όξινο ή αλκαλικό μέσο, αυξημένη θερμοκρασία, φωτιά, υπεριώδης ακτινοβολία κτλ πρέπει να λαμβάνονται σοβαρά υπόψη κατά την αξιολόγηση της απόδοσης και της αντοχής των εκτυπωμένων στοιχείων [31].

### 3.8. Μελλοντικές δυνατότητες

Αν και η τεχνολογία 3DP είναι ευρέως αποδεκτή ως μια καινοτόμα, άκρως ψηφιακή και αυτοματοποιημένη τεχνολογία, παραμένει ακόμα και σήμερα ένα δύσκολο κατόρθωμα για τον κατασκευαστικό τομέα. Η τεχνολογία αυτή μόλις εισήλθε σε ανεπτυγμένες βιομηχανίες και θα απαιτηθεί μεγάλο χρονικό διάστημα έτσι ώστε να εδραιωθεί. Κύριο τροχοπέδη είναι η πολυπλοκότητα της τεχνολογίας μιας και αποτελεί μια πολυπαραγοντική διαδικασία. Αν και οι μελέτες για την αγορά κατασκευών 3DP είναι λίγες, αρκετές από αυτές αποκάλυψαν ότι ο αναμενόμενος ρυθμός αύξησης της παγκόσμιας αξίας των υλικών 3DP είναι 20% ετησίως. Εκτιμάται ότι η παγκόσμια αγοραία αξία του 3DP θα φτάσει περίπου τα 32,78 δις. δολάρια έως το 2023 με αναμενόμενο ρυθμό ανάπτυξης 25,76% από το 2018 [31].

Η μέθοδος 3DP δεν περιορίζεται μόνο για κατασκευές στην Γη, αλλά και σε άλλους πλανήτη χρησιμοποιώντας τοπικούς πόρους. Το γεγονός αυτό καθιστά την μέθοδο τρισδιάστατης εκτύπωσης μια πρόκληση για εντατική μελέτη. Στο Πίνακα 3.1 αναφέρονται συγκεντρωτικά προκλήσεις και οι αντίστοιχες βελτιώσεις σχετικά με την μέθοδο 3DP.

Πίνακας 3.1: Προκλήσεις και Βελτιώσεις.

Προκλήσεις	Τεχνικές βελτίωσης
Χαμηλή αντοχή του δεσμού μεταξύ των διαδοχικών στρωμάτων.	Εφαρμογή με παραδοσιακές μεθόδους προετοιμασίας επιφανειών όπως αμμοβολή και τρίψιμο. Μείωση της βάσης του ακροφυσίου. Συντόμευση του χρόνου εκτύπωσης. Προσθήκη ινών, κόλλες/ epoxy
Παραμόρφωση και πολυπλοκότητα λόγω έλλειψης ξυλότυπου	Δημιουργία δομών σε σχήμα θόλων όπου αυτό είναι εφικτό. Μείωση της αναλογίας νερού/τσιμέντου. Αύξηση της αναλογίας άμμου/τσιμέντου. Προσθήκη ενισχυτικών ινών. Προσθήκη γύψου, ιπτάμενης τέφρας και calcium sulfoaluminate cement.
Υψηλό κόστος	Χρήση τοπικών διαθέσιμων πρώτων υλών.

## 4. Πειραματικό μέρος

### 4.1. Πρώτες ύλες

Οι πρώτες ύλες που χρησιμοποιήθηκε είναι οι εξής:

- Τσιμέντο τύπου CEM I 42.5 N
- Πυριτική παιπάλη SIKA (Silica Fume)
- Ασβεστολιθική Άμμος
- Υπερρευστοποιητής (SP): SIKA viscocrete ultra 600
- Επιβραδυντής (RET): HyCon R 7200 F BASF
- Επιταχυντής (ACC): HyCon S 3200 F BASF
- Νερό αντίστροφης ώσμωσης

Τα βήματα που ακολουθήθηκαν για την πειραματική διαδικασία είναι τα παρακάτω:

- Παρασκευή εκτυπώσιμων κονιαμάτων.
- Εκτύπωση νωπών κονιαμάτων και αξιολόγηση του εκτυπώσιμου υλικού.
- Μέτρηση ρεολογικών ιδιοτήτων των παρασκευασθέντων κονιαμάτων.
- Μέτρηση μηχανικών αντοχών των σκληρυμένων δοκιμιών.
- Έλεγχος και συσχέτιση ποιότητας εκτύπωσης με τις ρεολογικές ιδιότητες.

Στις συνθέσεις που παράχθηκαν έγινε μελέτη της ικανότητας εξώθησης του υλικού (extrudability), της κατασκευασιμότητας (buildability), έλεγχος του χρόνου αρχής πήξης (initial setting time) και της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη.

Αρχικά χρησιμοποιήθηκαν τα βασικά υλικά όπως τσιμέντο, πυριτική παιπάλη, άμμος και νερό. Το ποσοστό της πυριτικής παιπάλης προέκυψε από προηγούμενη μελέτη που διεξάχθηκε σε πάστες [35]. Παρασκευάστηκαν δοκίμια και έγιναν δοκιμές έτσι ώστε να επιλεγθεί η βέλτιστη αναλογία άμμου προς συνδετικά υλικά (Sand/Binder S/B). Οι αναλογίες που δοκιμάστηκαν ήταν S/B:1.4, S/B:1.9, S/B:2.3. Ο λόγος νερού προς συνδετικά υλικά W/B:0.28 και το ποσοστό προσθήκης πυριτικής παιπαλης 10% επί των συνδετικών [35].

Στη συνέχεια, με σταθερή την βέλτιστη αναλογία S/B παράχθηκαν νέες συνθέσεις με προσθήκη κάθε φορά διαφορετικών ποσοστών πρόσθετων (υπερρευστοποιητή, επιβραδυντή και επιταχυντή). Σκοπός των νέων δοκιμών είναι η εύρεση του βέλτιστου ποσοστού πρόσθετου λαμβάνοντας υπόψη τις ρεολογικές ιδιότητες και τη θλιπτική αντοχή.

Τα ποσοστά των πρόσθετων που δοκιμάστηκαν για την κάθε σύνθεση ήταν τα εξής:

- Υπερρευστοποιητής : 0.05%, 0.1%, 0.15%, 0.2%, 0.25%, 0.3% κ.β..
- Επιβραδυντής : 0.25%, 0.5%, 0.75%, 1 %, 1.25% κ.β..
- Επιταχυντής : 0.25%, 0.5%, 0.75%, 1%, 1.25%,1.5% κ.β.

Από τη δοκιμή της κατασκευασιμότητας και της εξώθησης προέκυψαν τα 3 καλύτερα ποσοστά. Έπειτα στις συνθέσεις αυτές έγιναν οι μετρήσεις των αντοχών και ο έλεγχος χρόνου αρχής πήξης.

### Παραγωγή τσιμεντοκονίας

Πραγματοποιήθηκε η συλλογή και η ζύγιση των βασικών υλικών, τσιμέντο, πυριτική παιπάλη, άμμος και νερό. Για την ορθή ομογενοποίηση των στερεών, πρώτα έγινε προσθήκη της άμμου μαζί με το τσιμέντο και την πυριτική παιπάλη. Έπειτα προστέθηκε όλη η ποσότητα του νερού, σε αυτό το σημείο γίνεται και η προσθήκη των προσθέτων (υπερρευστοποιητή, επιβραδυντή και επιταχυντή) εάν το απαιτεί η σύνθεση. Για την παρασκευή των κονιαμάτων χρησιμοποιήθηκε νερό αντίστροφης ώσμωσης.

### Στάδιο ανάδευσης

Η ανάμιξη των πρώτων υλών έγινε σε μίξερ της Matest Mod. E094, Σχήμα 4.1.



*Σχήμα 4.1 Συσκευή ανάμειξης.*



Στον Πίνακα 4.1 παρουσιάζονται αναλυτικά οι χρόνοι ανάμιξης.

Πίνακας 4.1: Χρόνοι Ανάμιξης.

Χρόνοι Ανάμιξης για την παρασκευή Πάστας Τσιμέντου	
Χαμηλή Ταχύτητα για 60 sec	00:00-01:00 min
Υψηλή Ταχύτητα για 30 sec	01:00-1:30 min
Στάση για 1 min & 30 sec	01:30-3:00 min
Υψηλή Ταχύτητα για 60 sec	03:00-04:00 min

#### 4.2. Τεχνικές ελέγχου ρεολογικών ιδιοτήτων

Σκοπός είναι η μέτρηση των ρεολογικών ιδιοτήτων της τσιμεντοκονίας όπως της της ικανότητας εξώθησης του υλικού, της κατασκευασιμότητα, του χρόνου αρχής πήξης καθώς και οι μετρήσεις μηχανικών ιδιοτήτων όπως η μονοαξονική θλίψη.

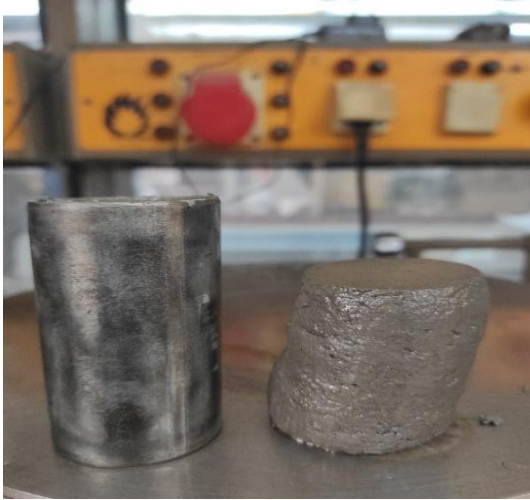
Για να πραγματοποιηθούν οι παραπάνω μετρήσεις ακολουθήθηκαν τα εξής βήματα:

##### 4.2.1. Έλεγχος κατασκευασιμότητας

Σε ειδικά διαμορφωμένο μεταλλικό κύλινδρο, ύψους 8 cm και εσωτερική διαμέτρου 3.8 cm, προστέθηκε το μίγμα της τσιμεντοκονίας. Αρχικά, έγινε η προσθήκη του υλικού μέχρι την μέση, χτυπήθηκε με ράβδο 10 φορές και στη συνέχεια προστέθηκε και το υπόλοιπο υλικό. Η επιφάνεια λειάνθηκε με την βοήθεια σπάτουλας και έγινε προσεκτική αφαίρεση του μεταλλικού κυλίνδρου (Σχ. 4.2).

Με σκοπό την αξιολόγηση της κατασκευασιμότητας της τσιμεντοκονίας έγινε η καταγραφή του αρχικού ύψους και της αρχικής διαμέτρου του υλικού. Στη συνέχεια, τοποθετήθηκε για 1 λεπτό πάνω στο υλικό πλάκα η οποία ζύγιζε 600 γραμμάρια. Μετά την αφαίρεση της πλάκας πραγματοποιήθηκε εκ νέου η καταγραφή του τελικού ύψους και της τελικής διαμέτρου. Όσο μικρότερη είναι η διαφορά της κάθισης και εξάπλωσης του υλικού τόσο καλύτερα τα αποτελέσματα που λαμβάνονται σχετικά με την κατασκευασιμότητα. Στο Σχήμα 4.2 και 4.3

παρατηρείται η έντονη παραμόρφωση που υπέστη το μίγμα έπειτα από την τοποθέτηση της πλάκας.



Σχήμα 4.2: Ειδικά διαμορφωμένος μεταλλικός κύλινδρος για την μέτρηση παραμόρφωσης του υλικού.



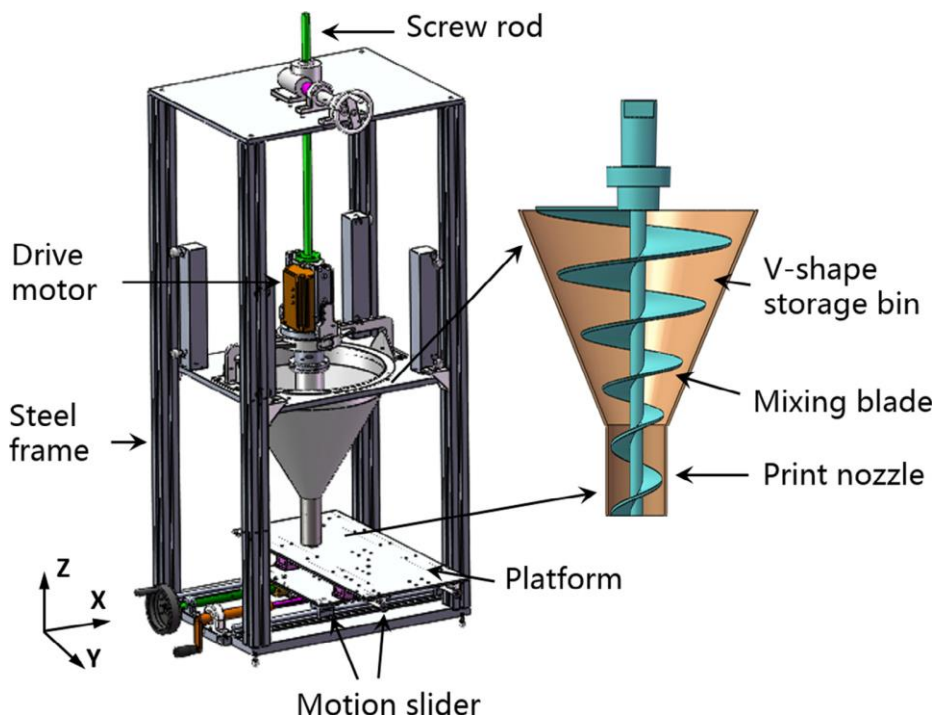
Σχήμα 4.3: Αρχική και τελική παραμόρφωση υλικού ( πριν και μετά την εφαρμογή βάρους).

#### 4.2.2. Έλεγχος εξώθησης υλικού

Η δυνατότητα εξώθησης είναι μια κρίσιμη παράμετρος και συνδέεται άμεσα με τα υλικά και την ικανότητά τους να εξωθούνται ως συνεχές νήμα μέσα από τα ακροφύσιο του εκτυπωτή. Κατά βάση επηρεάζεται κυρίως από τις ποσότητες και τις κατανομές των ξηρών συστατικών

του μίγματος [33]. Η δυνατότητα εξώθησης ορίζεται ως η ικανότητα του σκυροδέματος να διέρχεται με ευκολία από ακροφύσια, δηλαδή από την κεφαλή εκτύπωσης.

Η εξώθηση πραγματοποιήθηκε με την βοήθεια μοτέρ με ελικοειδές πτερύγιο (Σχ.4.4) τοποθετημένο σε ειδικά διαμορφωμένη χοάνη που προσομοιάζει 3D Printer όπως το Σχήμα 4.5. Η αξιολόγηση της εξώθησης του τσιμεντοκονιάματος έγινε με βάση την δυνατότητα του υλικού να εξωθηθεί από την χοάνη, την συνοχή που παρουσίασε το υλικό και την αποφυγή εμφάνισης μικρό-ρωγμών. Επιπλέον, ένα ακόμα σημαντικό κριτήριο είναι η έλλειψη παρουσίας «λαιμού», το υλικό πρέπει να εξωθείται ομοιόμορφα, να μην αποκολλάται και να διατηρεί το σχήμα του όταν πλέον έχει εξέλθει από τον εξωθητή.



Σχήμα 4.4: Σχηματική απεικόνιση ενός τσιμεντοειδούς σύστημα εξώθησης υλικού [33].



Σχήμα 4.5: Μηχάνημα εξώθησης τσιμεντοκονίας.

Στο παρακάτω Σχήμα 4.6 εμφανίζονται ενδεικτικά μερικά παραδείγματα από τα παραχθέντα τσιμεντοκονιάματα κατά τη διαδικασία της εξώθησης. Στο Σχήμα 4.6 α) το υλικό παρουσιάζει «λαιμό» και αποκολλάται πολύ εύκολα από την χοάνη, στο Σχήμα 4.6 β) το υλικό δεν εξωθείται με ευκολία ενώ παράλληλα παρουσιάζονται έντονες ρωγμές, τέλος στο Σχήμα 4.6 γ) παρατηρείται μια αρκετά καλή ποιότητα εξώθησης με συνοχή και ομοιομορφία.



Σχήμα 4.6: α) Λαιμός κατά την εξώθηση. β) Έντονες ρωγμές και δυσκολία εξώθησης. γ) Καλή εικόνα εξώθησης.

#### 4.2.3. Έλεγχος χρόνου πήξης

Ο ανοιχτός χρόνος υποδηλώνει το χρονικό διάστημα εντός του οποίου το υλικό διατηρεί καλή εργασιμότητα για εκτύπωση [33]. Ο ανοιχτός χρόνος ενός τσιμεντοειδούς υλικού έχει άμεση σχέση με τον χρόνο πήξης του. Η μέτρηση για τον χρόνο πήξης του υλικού γίνεται με την βοήθεια μιας συσκευής Vicat. Ωστόσο, αυτός ο εξοπλισμός είναι σχεδιασμένος να προσδιορίζει τον αρχικό και τον τελικό χρόνο πήξης που δεν βοηθάει ιδιαίτερα στον χαρακτηρισμό της εργασιμότητας με το χρόνο του νωπού σκυροδέματος [24]. Για την μέτρηση του χρόνου πήξης χρησιμοποιήθηκε η συσκευή Vicatronic, και έγινε σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C191 ή EN 196-3. Η συσκευή αυτή παρέχει μια αυτόματη μέθοδο για τον προσδιορισμό του αρχικού και τελικού χρόνου πήξης τσιμεντοειδών υλικών. Η αυτοματοποιημένη λειτουργία του παρέχει ακριβή και επαναλαμβανόμενα αποτελέσματα τα οποία εκτυπώνονται από τον ενσωματωμένο εκτυπωτή. Η διαδικασία μέτρησης γίνεται με τη χρήση βελόνας διαμέτρου 1,3 mm η οποία διεισδύει στο τσιμεντοπολτό. Χρόνος μηδέν θεωρείται η στιγμή ανάμιξης των υλικών του εκάστοτε μίγματος.

Αρχικά, έγινε η ρύθμιση της βελόνας με σημείο αναφοράς την γυάλινη πλάκα στήριξης. Το υλικό τοποθετήθηκε στην κυλινδρική μήτρα και στην συνέχεια μαζί με την γυάλινη πλάκα στη συσκευή VICAT. Πραγματοποιήθηκαν επαναλαμβανόμενες μετρήσεις κατακόρυφες διεισδύσεις της βελόνας ανά 3 λεπτά περίπου. Ο ρυθμός της διείσδυσης της βελόνας φθίνει, όταν παρατηρηθεί απότομη διαφορά της διείσδυσης στην κεντρική οθόνη τότε η μέτρηση τερματίζεται (Σχ. 4.7 και Σχ. 4.8).



Σχήμα 4.7: Συσκευή μέτρησης χρόνου πήξης Vicatronic ( [www.ele.com/](http://www.ele.com/)).



Σχήμα 4.8: Οθόνη καταγραφής ρυθμού διείδυσης βελόνας συναρτήσεϊ του χρόνου.

#### 4.2.4. Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη

Οι μετρήσεις έγιναν με βάση το πρότυπο ASTM C109. Το πρότυπο αυτό αποτελεί μια δοκιμή συμπίεσης που προσδιορίζει τη θλιπτική αντοχή του υδραυλικού τσιμέντου και άλλων κονιαμάτων. Για τον έλεγχο των μηχανικών ιδιοτήτων της κάθε σύνθεσης παρασκευάστηκαν κυβικά δοκίμια (50x50x50 mm). Το μίγμα των συνθέσεων τοποθετήθηκε σε μήτρες για 24 ώρες. Η συντήρηση των μητρών έγινε σε θάλαμο στους 25 °C και με σχετική υγρασία 99% όπως παρουσιάζεται και στο Σχήμα 4.10. Μετά το πέρας των 24 ωρών τα δοκίμια



ξεκαλουπώθηκαν και συντηρήθηκαν σε νερό μέχρι και την ημέρα που υποβλήθηκαν σε δοκιμή μονοαξονικής θλίψης. Οι μετρήσεις για την αντοχή σε θλίψη πραγματοποιήθηκαν στις 2, 7 και 28 μέρες. Πριν την θραύση πραγματοποιήθηκε η ζύγιση και η καταγραφή των διαστάσεων τους (πλάτος, μήκος, ύψος). Τέλος, τα δοκίμια τοποθετήθηκαν στο μηχάνημα θλίψης με τις επιπεδωμένες πλευρές τους να εφάπτονται στο μηχάνημα και πραγματοποιήθηκε η μονοαξονική θλίψη (Σχ. 4.9). Η παραπάνω διαδικασία ακολουθήθηκε για την παραγωγή και μέτρηση όλων των δοκιμίων.



Σχήμα 4.9: Μηχάνημα μονοαξονικής θλίψης δοκιμίου.



Σχήμα 4.10: Μεταλλικές μήτρες με νωπό τσιμεντοκονίαμα τοποθετημένες σε θάλαμο συντήρησης με σταθερές συνθήκες θερμοκρασίας και υγρασίας.

## 5. Αποτελέσματα και συζήτηση αποτελεσμάτων

Ακολουθεί η αξιολόγηση των μετρήσεων και των αποτελεσμάτων για την κάθε σύνθεση ξεχωριστά.

### 5.1. Εύρεση λόγου Άμμου προς Συνδετικά Υλικά

Για την εύρεση του βέλτιστου λόγου άμμου προς συνδετικά υλικά παράχθηκαν 3 διαφορετικά σετ συνθέσεων με αναλογίες S/B: 1.4, S/B: 1.9 και S/B: 2.3.

#### Κατασκευασιμότητα

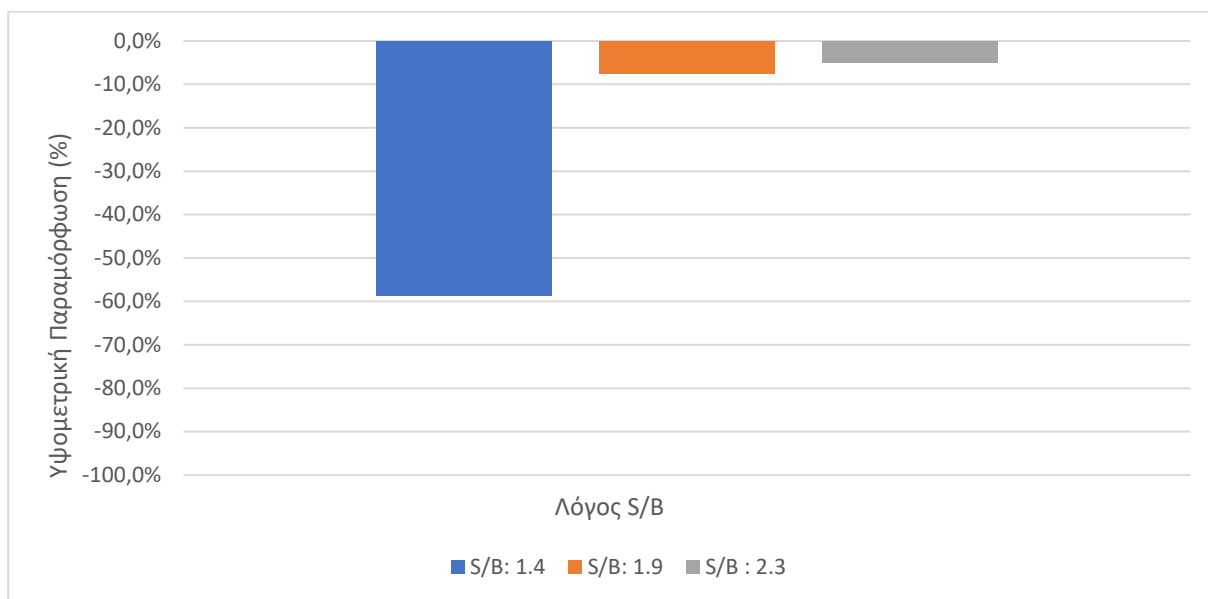
Στον Πίνακα 5.1 παρουσιάζονται αναλυτικά για κάθε σύνθεση οι αρχικές και τελικές τιμές του ύψους  $h$  (cm) και των διάμετρο  $d$  (cm) του ξεκαλουπωμένου κυλινδρικού σχήματος υλικού. Οι μετρήσεις αυτές πραγματοποιήθηκαν πριν και μετά το πρόσθετο βάθος των 600 γραμμαρίων. Σκοπός αυτών των μετρήσεων ήταν να διαπιστωθεί πόσο εύκολα αλλάζουν οι προκαθορισμένες διαστάσεις του υλικού συναρτήσει των αναλογιών άμμου προς συνδετικά υλικά. Με βάση τη διακύμανση αυτών των τιμών έγινε αξιολόγηση της κατασκευασιμότητας.

*Πίνακας 5.1: Τιμές υψομετρικής και πλευρικής παραμόρφωσης ( $\Delta h$ ,  $\Delta d$ ) για τις συνθέσεις S/B: 1.4, S/B: 1.9 και S/B: 2.3.*

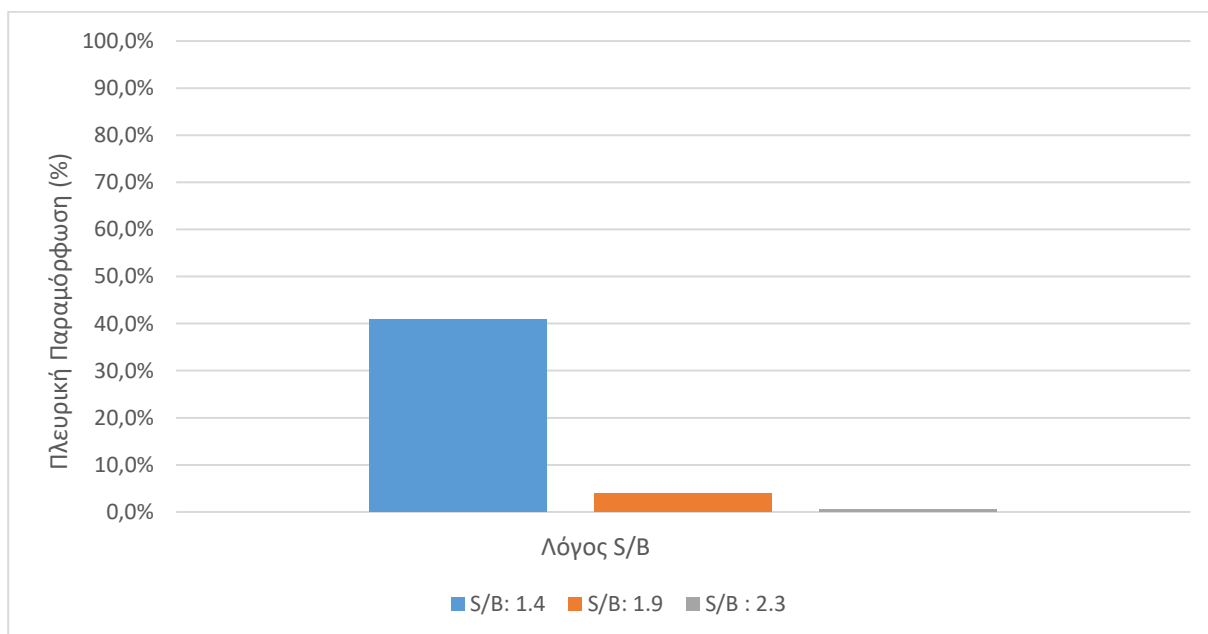
<b>Buildability</b>	Κωδικός δείγματος	Αρχικό d M.O. (cm)	Αρχικό h (cm)	Τελικό d M.O. (cm)	Τελικό h (cm)	$\Delta h$	$\Delta d$
	S/B : 1.4	3.80	8.00	5.35	3.30	-58.8%	40.8%
	S/B : 1.9	3.75	8.00	3.90	7.40	-7.5%	4.0%
	S/B : 2.3	3.80	8.00	3.82	7.60	-5.0%	0.5%

Στο Σχήμα 5.1 και 5.2 παρουσιάζεται το διάγραμμα ποσοστού υψομετρικής και πλευρικής παραμόρφωσης αντίστοιχα για τις συνθέσεις S/B : 1.4, S/B: 1.9 και S/B: 2.3.





Σχήμα 5.1: Ποσοστό υψομετρικής παραμόρφωσης για τους λόγους S/B : 1.4, S/B: 1.9 και S/B: 2.3.



Σχήμα 5.2: Ποσοστό πλευρικής παραμόρφωσης για τους λόγους S/B: 1.4, S/B: 1.9 και S/B: 2.3.

Συμπερασματικά, οι συνθέσεις S/B:1.9 και S/B: 2.3 έχουν μειωμένα ποσοστά παραμόρφωσης, Δδ και Δη. Διατηρούν σε ικανοποιητικά επίπεδα το σχήμα τους ακόμα και υπό την επίδραση συγκεκριμένου βάρους. Επομένως, οι συνθέσεις S/B:1.9 και S/B: 2.3 έχουν καλή κατασκευασιμότητα.

Όσο αυξάνεται ο λόγος S/B δηλαδή όσο αυξάνεται η άμμος παρατηρείται ότι η υψομετρική και πλευρική παραμορφωση μειώνεται.

Η επιλογή του βέλτιστου λόγου S/B είναι μια πολυπαραγοντική διαδικασία, επομένως πριν γίνει η τελική επιλογή πρέπει να ληφθούν υπόψη και οι υπόλοιπες ρεολογικές ιδιότητες.

Στη συνέχεια εξετάστηκε ο χρόνος αρχής πήξης για την κάθε σύνθεση.

#### Χρόνος αρχής πήξης

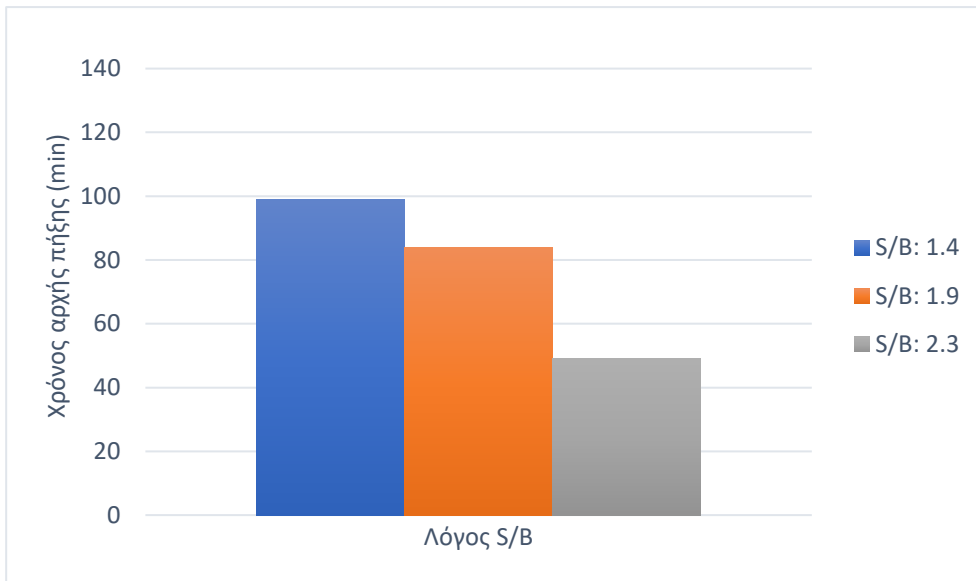
Στον Πίνακα 5.2 παρουσιάζονται οι τιμές του χρόνου (min) που καταγράφηκαν για τις τρεις συνθέσεις.

*Πίνακας 5.2: Προσδιορισμός χρόνου αρχής πήξης για τις τρεις συνθέσεις.*

Open time	
Κωδικός Δείγματος	Χρόνος (min)
S/B : 1.4	99
S/B : 1.9	84
S/B : 2.3	49

Η σύνθεση S/B: 1.4 και S/B: 1.9 έχουν σχετικά κοντινούς χρόνους, 99 και 84 λεπτά αντίστοιχα. Ο συγκεκριμένος χρόνος αρχής πήξης είναι αρκετά ικανοποιητικός αφού παρέχει μεγάλο περιθώριο για την επεξεργασία του υλικού. Αντίθετα η σύνθεση S/B : 2.3, με 49 λεπτά, έχει τον χειρότερο χρόνο πήξης, είναι οριακός για την διαχείριση του υλικού.

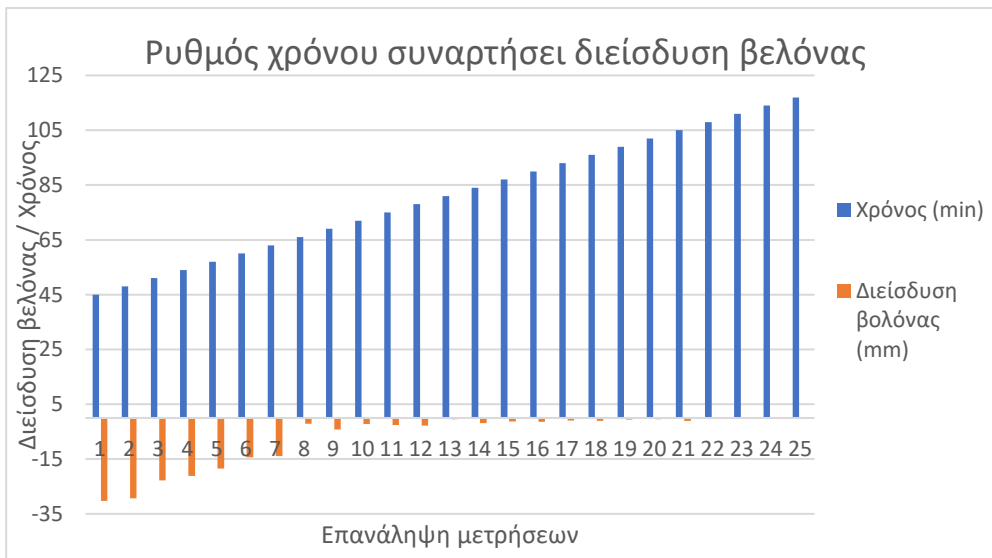
Στο Σχήμα 5.3 παρουσιάζεται το διάγραμμα για τις τιμές χρόνου πήξης για τους λόγους S/B : 1.4, S/B: 1.9 και S/B: 2.3.



Σχήμα 5.3: Διάγραμμα χρόνου αρχής πήξης για τους λόγους S/B: 1.4, S/B: 1.9 και S/B: 2.3.

Παρακάτω παραθέτετε ενδεικτικά το διάγραμμα του χρόνου συναρτήσεως του ρυθμού διείδυσης της βελόνας του μηχανήματος Vicatronic, για την σύνθεση S/B: 1.4 (Σχ.5.4).

Πιο συγκεκριμένα, στο διάγραμμα παρουσιάζονται οι επαναλαμβανόμενες μετρήσεις ανά συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα (γραμμικότητα του χρόνου) συναρτήσεως των χιλιοστών που διεισδύει κάθε φορά η βελόνα.



Σχήμα 5.4: Διείδυση βελόνας συναρτήσεως του χρόνου για την σύνθεση S/B:1.4.

Όσο αυξάνεται ο λόγος S/B παρατηρείται και έντονη μείωση του χρόνου αρχής πήξης. Εστιάζοντας στο λόγο S/B: 2.3 γίνεται αντιληπτό ότι η μικρή παραμόρφωση που παρατηρήθηκε στις προηγούμενες μετρήσεις ήταν εξαιτίας του γρήγορου χρόνου διαχείρισης που παρείχε το υλικό. Το γεγονός αυτό αποτελεί απαγορευτικό παράγοντα για την επιλογή της συγκεκριμένης αναλογίας. Αναφορικά με τις άλλες 2 συνθέσεις, αν και έχουν μια διαφορά της τάξης των 15 λεπτών αυτό δεν αποτελεί αποτρεπτικό παράγοντα αφού και οι δυο χρόνοι είναι επαρκείς για την διαχείριση του υλικού.

### Ικανότητα Εξώθησης

Η εξώθηση για τις παραχθείσες συνθέσεις S/B: 1.4, S/B: 1.9, S/B: 2.3 πραγματοποιήθηκε σε μηχάνημα το οποίο προσομοιάζει την μέθοδο 3DP. Δόθηκε έμφαση στην ευκολία και τον τρόπο με τον οποίο εξωθείται το υλικό, στην αποφυγή ρωγμών, στη συνεκτικότητα και στη διατήρηση του σχήματος.

Για την 1<sup>η</sup> σύνθεση με λόγο S/B: 1.4 προέκυψε ότι το υλικό ήταν αρκετά ρευστό και έρεε από τη χοάνη. Στο Σχήμα 5.5 παρουσιάζεται η σύσταση του υλικού κατά την διαδικασία της εξώθησης. Το υλικό χάνει εύκολα το σχήμα του και αποκολλάται πολύ γρήγορα από την χοάνη χωρίς να καταφέρει να εξωθηθεί με σταθερό και συνεχόμενο ρυθμό.



*Σχήμα 5.5: Σύσταση με λόγο S/B: 1.4 κατά τη διαδικασία της εξώθησης.*

Για την 2<sup>η</sup> σύνθεση με λόγο S/B: 1.9 παρατηρείται βελτίωση σχετικά με την ρευστότητα του υλικού. Κατά την διάρκεια της εξώθησης δεν δημιουργήθηκαν ρωγμές ενώ παράλληλα δεν

παρατηρήθηκε πρόωρη αποκόλληση. Όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.6, το υλικό έχει καλύτερη συνοχή και εξωθείται με ευκολία.



Σχήμα 5.6 Σύνθεση με λόγο S/B : 1.9 κατά τη διαδικασία της εξώθησης.

Τέλος, για την 3<sup>η</sup> σύνθεση με λόγο S/B: 2.3 ήταν εμφανές ότι αντιμετώπιζε δυσκολία να εξωθηθεί ομοιόμορφα. Το υλικό παρουσίαζε έντονες ρωγμές και ασυνέχειες (Σχ.5.7). Αν και δεν παρατηρήθηκε αποκόλληση του υλικού από τη χοάνη, η γενικότερη εικόνα ήταν κακή.



Σχήμα 5.7 Σύνθεση με λόγο S/B:2.3 κατά τη διαδικασία της εξώθησης.

Από τα παραπάνω συμπεραίνεται ότι την καλύτερη εξωθητική ικανότητα την έχει η σύνθεση με τον λόγο S/B: 1.9. Η σύνθεση εξέρχεται από το ακροφύσιο με σταθερό και συνεχές ρυθμό, εν αντιθέσει με τις συνθέσεις S/B:1.3 και S/B:2.3 που αντιμετώπισαν δυσκολία εξαιτίας της έντονης ρευστότητας και ανομοιομορφίας λόγω ρωγμών αντίστοιχα.

#### Αντοχή σε θλίψη

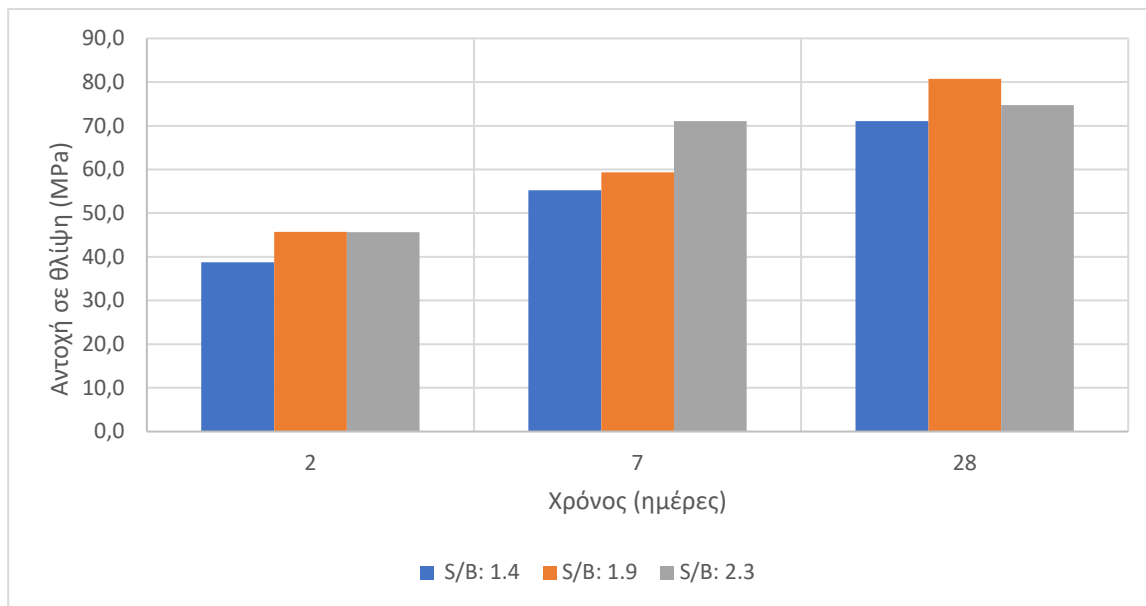
Παρακάτω στον Πίνακα 5.3 παρουσιάζονται αναλυτικά οι μετρήσεις αντοχής σε θλίψη όλων των συνθέσεων.

*Πίνακας 5.3: Μετρήσεις αντοχής σε θλίψη των σκληρυμένων δοκιμίων για όλες τις συνθέσεις.*

Κωδικός δείγματος	Αντοχή σε θλίψη (MPa)		
	2 ημερών	7 ημερών	28 ημερών
S/B:1.4	38.74	55.26	71.10
S/B:1.9	45.70	59.33	80.71
S/B:2.3	45.64	62.33	74.73

Στις 28 ημέρες παρατηρείται ότι η S/B: 1.9 συγκριτικά με τις άλλες δυο συνθέσεις με λόγο S/B: 1.4 και S/B: 2.3, παρουσίασε αυξημένες αντοχές κατά 11.91% και 7.41% αντίστοιχα.

Από το διάγραμμα του Σχήματος 5.8 παρατηρείται μια σταθερά αυξητική τάση για τις 3 συνθέσεις καθώς προχωράει η ενυδάτωση του τσιμέντου. Συγκεντρωτικά την καλύτερη εικόνα παρουσιάζει η σύνθεση με λόγο S/B: 1.9.



Σχήμα 5.8: Αντοχή σε θλίψη σκληρυμένων δοκιμίων στις 2, 7 και 28 ημέρες για τις συνθέσεις με λόγο S/B: 1.4, S/B: 1.9 και S/B: 2.3.

Παρατηρείται ότι η επιλογή του λόγου της άμμου προς συνδετικά υλικά είναι καθοριστικής σημασίας για την τελική εικόνα του μίγματος.

Με βάση των παραπάνω αποτελεσμάτων προκύπτει ότι ο **βέλτιστος λόγος άμμου προς συνδετικά είναι ο S/B: 1.9**. Η εξώθηση του S/B: 1.9 ήταν αρκετά καλύτερη σε σχέση με τις υπόλοιπες. Επίσης, η κατασκευασιμότητα ήταν ικανοποιητική αφού παρατηρήθηκε αρκετά μικρή παραμόρφωση. Επιπλέον, ο χρόνος αρχής πήξης στα 84 λεπτά προσδίδει ικανοποιητικό χρόνο διαχείρισης του υλικού.

Πιο συγκεκριμένα, οι λόγοι S/B: 1.4 και S/B: 2.3 επηρέασαν σε μεγάλο βαθμό αρνητικά τον χρόνο αρχής πήξης, την ικανότητα εξώθησης και την κατασκευασιμότητα του μίγματος.

## 5.2. Εύρεση βέλτιστου ποσοστού Υπερρευστοποιητή

Για την εύρεση του βέλτιστου ποσοστού υπερρευστοποιητή ακολουθήθηκε παρόμοια διαδικασία με τον λόγο S/B. Μελετήθηκε διεξοδικά η κατασκευασιμότητα, η εξώθηση και ο χρόνος αρχής πήξης του κάθε μίγματος.

Παρακάτω φαίνονται αναλυτικά τα αποτελέσματα των ρεολογικών μετρήσεων για τις έξι συνθέσεις S/B: 1.9 με την προσθήκη υπερρρευστοποιητή. Έγιναν έξι συνθέσεις ξεκινώντας από το ποσοστό 0.05% κ.β. με βήμα 0.05 (0.05%, 0.1%, 0.15%, 0.2%, 0.25%, 0.3%). Επιπλέον, έγινε μέτρηση και καταγραφή των μηχανικών αντοχών μονοαξονικής θλίψης στις 2, 7 και 28 ημέρες.

### Κατασκευασιμότητα

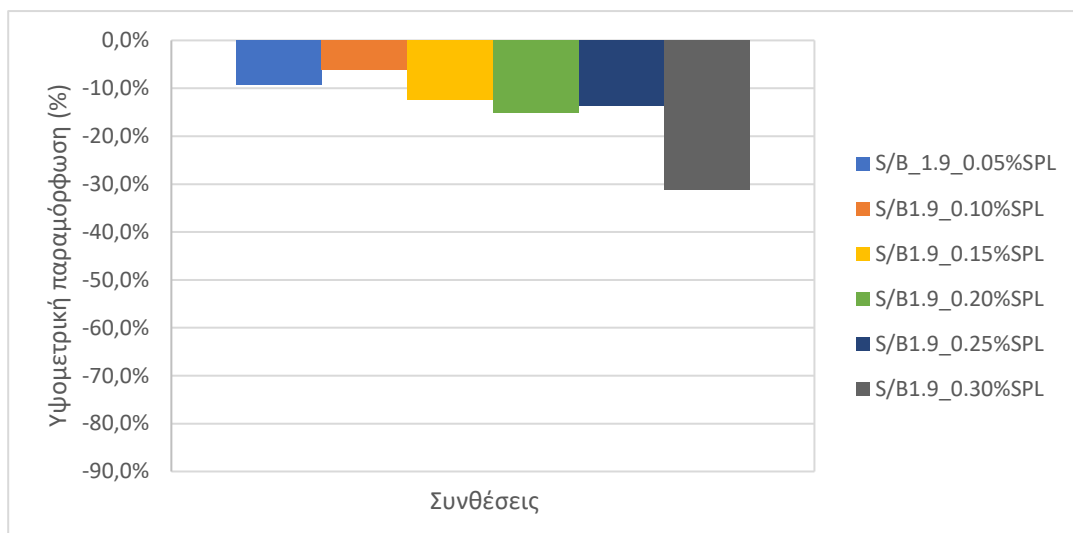
Στο Πίνακα 5.4 παρουσιάζεται το ποσοστό της υψομετρικής και πλευρικής παραμόρφωσης,  $\Delta d$  και  $\Delta h$ , για τις συνθέσεις με την προσθήκη υπερρρευστοποιητή. Με βάση τη διακύμανση αυτών των τιμών έγινε αξιολόγηση της κατασκευασιμότητας.

*Πίνακας 5.4: Τιμές υψομετρικής και πλευρικής παραμόρφωσης ( $\Delta h$ ,  $\Delta d$ ) για τις συνθέσεις με προσθήκη υπερρρευστοποιητή.*

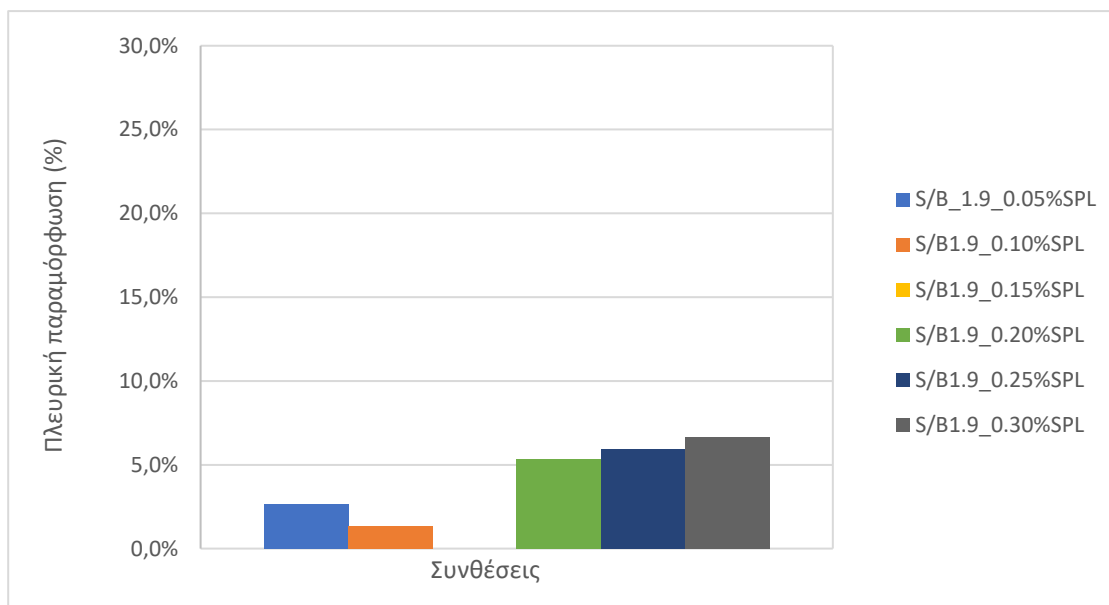
Buildability	Κωδικός δείγματος	Αρχικό d M.O. (cm)	Αρχικό h (cm)	Τελικό d M.O. (cm)	Τελικό h (cm)	$\Delta h$	$\Delta d$
	S/B: 1.9_0.05% SPL	3.75	8.00	3.85	7.25	-9.4%	2.7%
	S/B: 1.9_0.1% SPL	3.75	8.00	3.80	7.50	-6.3%	1.3%
	S/B: 1.9_0.15% SPL	3.80	8.00	3.80	7.00	-12.5%	0.0%
	S/B: 1.9_0.2% SPL	3.75	7.65	3.95	6.50	-15.0%	5.3%
	S/B: 1.9_0.25% SPL	3.85	8.10	4.08	7.00	-13.6%	5.8%
	S/B: 1.9_0.3% SPL	3.75	8.00	4.00	5.50	-31.3%	6.7%

Στο Σχήμα 5.9 και Σχήμα 5.10 παρουσιάζεται το ποσοστό υψομετρικής και πλευρικής παραμόρφωσης αντίστοιχα για όλες τις συνθέσεις ξεχωριστά.





Σχήμα 5.9: Ποσοστό υψομετρικής παραμόρφωσης συνθέσεων με προσθήκη υπερρρευστοποιητή.



Σχήμα 5.10: Ποσοστό πλευρικής παραμόρφωσης συνθέσεων με προσθήκη υπερρρευστοποιητή.

Από τα παραπάνω διαγράμματα τα καλύτερα δυνατά αποτελέσματα που λήφθηκαν είναι για τις συνθέσεις με ποσοστό 0.05%, 0.1% , 0.15% , 0.2% και 0.25% κ.β..

Με την υπερβολική αύξηση του υπερρρευστοποιητή παρατηρούμε ότι υπάρχει μεγάλη αύξηση στην καθίζηση του υλικού όπως χαρακτηριστικά προκύπτει από την σύνθεση με προσθήκη υπερρρευστοποιητή 0.3% κ.β.

## Ικανότητα Εξώθησης

Κατά την εξώθηση της 1<sup>ης</sup> σύνθεσης S/B: 1.9\_0.05%SPL παρατηρήθηκαν έντονες ρωγμές (Σχ. 5.11 α). Επίσης, το μίγμα δεν μπορούσε με ευκολία να εξωθηθεί από την χοάνη.

Η 2<sup>η</sup> σύνθεση S/B: 1.9\_0.10%SPL έχει αρκετά πιο βελτιωμένη εικόνα αλλά όχι ιδανική. Το υλικό εξωθείται καλύτερα και με μεγαλύτερη ευκολία σε σχέση με την 1<sup>η</sup> σύνθεση

Αναφορικά με την εικόνα που παρουσιάζει η 3<sup>η</sup> σύνθεση με S/B: 1.9\_0.15%SPL, παρατηρήθηκε εύκολη εξώθηση με αρκετά καλή εικόνα υλικού χωρίς να παρουσιάζονται ρωγμές και «σπασίματα». Μετά από 30 λεπτά περαιτέρω ανάμιξης το S/B: 1.9\_0.15%SPL εμφάνιζε εξίσου ικανοποιητική εξώθηση (Σχ. 5.11 β).



Σχήμα 5.11: α) Σύνθεση 1<sup>η</sup> με προσθήκη 0.05% υπερρυστοποιητή κατά τη διαδικασία της εξώθησης. β) Σύνθεση 3<sup>η</sup> με προσθήκη 0.15% υπερρυστοποιητή κατά τη διαδικασία της εξώθησης.

Σχετικά με την 4<sup>η</sup> σύνθεση S/B: 1.9\_0.20%SPL η εικόνα του υλικού ήταν καλή. Παρόλα αυτά κοβόταν γρήγορα κατά την εξώθηση και ήταν λίγο πιο ρευστό συγκριτικά με τα προηγούμενα.

Τέλος, η 5<sup>η</sup> σύνθεση S/B: 1.9\_0.25%SPL και η 6<sup>η</sup> σύνθεση S/B: 1.9\_0.3%SPL κόβονται αρκετά εύκολα από την χοάνη κατά την διάρκεια της εξώθησης και ως εκ τούτου προκύπτει και αρκετά κακή κατασκευασιμότητα.

Οι τρεις καλύτερες συνθέσεις που επιλέχθηκαν ήταν εκείνες με την προσθήκη 0.1%, 0.15% και 0.2% κ.β. υπερρευστοποιητή. Οι συνθέσεις με ποσοστό 0.05% και 0.25% κ.β. αποκλείονται εξαιτίας των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τη δοκιμή εξώθησης.

Γίνεται αντιληπτό ότι με την προσθήκη υπερρευστοποιητή βελτιώνεται η ικανότητα εξώθησης και η ρευστότητα του μίγματος. Όσο αυξάνεται η προσθήκη % κ.β. υπερρευστοποιητή εντοπίζεται σταδιακή αύξηση της υψομετρικής παραμόρφωσης. Ενώ σχετικά με την πλευρική παραμόρφωση παρατηρείται ότι έως και την 3<sup>η</sup> σύνθεση S/B: 1.9\_0.15%SPL σταδιακή μείωση του φαινομένου. Αντίθετα από το ποσοστό 0.2% κ.β. και άνω εντοπίζεται απότομη αύξηση της πλευρικής παραμόρφωσης.

#### Χρόνος αρχής πήξης

Στη συνέχεια εξετάστηκε ο χρόνος αρχής πήξης για τα τρία καλύτερα μίγματα με ποσοστά 0.1%, 0.15%, 0.2% κ.β. .

Στον Πίνακα 5.5 παρουσιάζονται οι τιμές του χρόνου (min) .

*Πίνακας 5.5: Προσδιορισμός χρόνου αρχής πήξης για τις τρεις συνθέσεις με την προσθήκη υπερρευστοποιητή.*

<b>Open time</b>	
Κωδικός δείγματος	Χρόνος (min)
S/B: 1.9_0.1%SPL	72
S/B: 1.9_0.15%SPL	76
S/B: 1.9_0.2%SPL	82

Στο Σχήμα 5.12 παρουσιάζεται ο χρόνος αρχής πήξης για κάθε μια σύνθεση ξεχωριστά.



Σχήμα 5.12: Διάγραμμα χρόνου αρχής πήξης για τις τρεις συνθέσεις με την προσθήκη υπερρυστοποιητή.

Ο χρόνος αρχής πήξης των τριών συνθέσεων είναι αρκετά ικανοποιητικός και κοντινός. Με την προσθήκη υπερρυστοποιητή συμπεραίνεται ότι υπάρχει μια μικρή αύξηση του χρόνου αρχής πήξης παρέχοντας την δυνατότητα για μεγαλύτερη διάρκεια αναφορικά με την διαχειρισσιμότητα του υλικού Η σύνθεση με το ποσοστό 0.1% κ.β. έχει τον μικρότερο χρόνο με 72 λεπτά ενώ η σύνθεση με το 0.15% κ.β. ακολουθεί αμέσως μετά με χρόνο με 76 λεπτά. Η σύνθεση με 0.2% κ.β., έχει ελαφρώς μεγαλύτερο χρόνο διαχείρισης του υλικού\_από όλες τις προηγούμενες συνθέσεις, με χρόνο αρχής πήξης στα 82 λεπτά.

### Αντοχή σε θλίψη

Τα παραχθέντα κυβικά δοκίμια των τριών καλύτερων συνθέσεων υποβλήθηκαν σε αντοχή μονοαξονικής θλίψης έως και την θραύση τους.

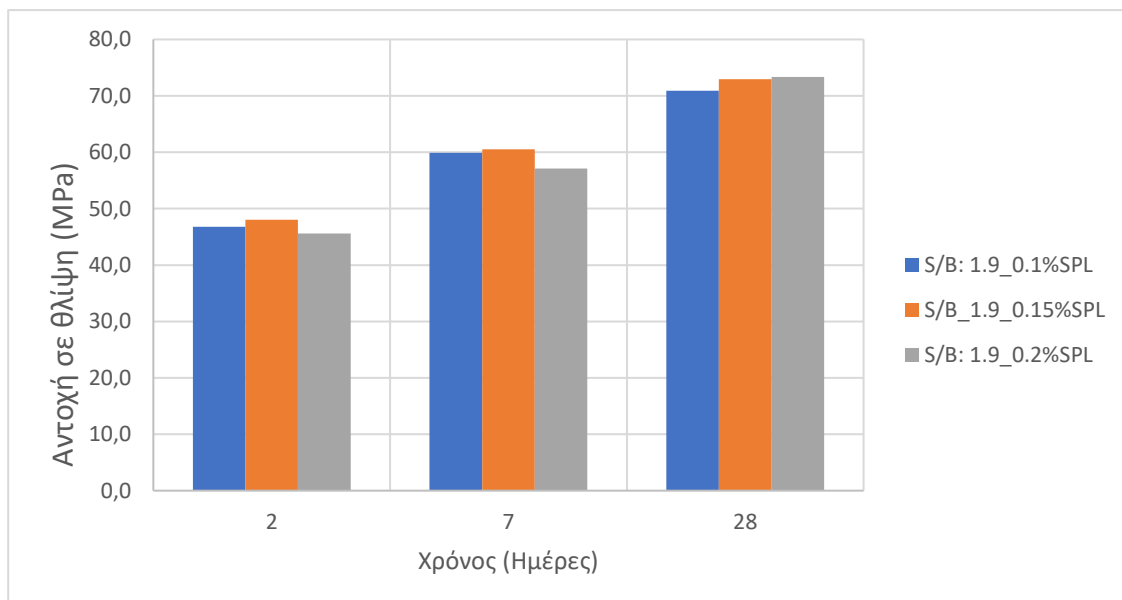
Στον Πίνακα 5.6 παρουσιάζονται αναλυτικά για όλες τις συνθέσεις οι αντοχές σε θλίψη των σκληρυμένων δοκιμίων στις 2, 7 και 28 ημέρες.

Πίνακας 5.6: Μετρήσεις αντοχής σε θλίψη των σκληρυμένων δοκιμίων για όλες τις συνθέσεις με προσθήκη υπερρρευστοποιητή.

Κωδικός δείγματος	Αντοχή σε θλίψη (MPa)		
	2 ημερών	7 ημερών	28 ημερών
S/B: 1.9_0.1%SPL	46.76	59.88	70.90
S/B: 1.9_0.15%SPL	48.04	60.53	72.98
S/B: 1.9_0.2%SPL	45.58	57.14	73.32

Διακρίνεται ότι οι αντοχές είναι όμοιες και για τις 3 συνθέσεις. Τις μεγαλύτερες αντοχές στις 28 ημέρες είχε αναπτύξει η σύνθεση S/B: 1.9\_0.2%SPL. Παρατηρείται ότι η S/B: 1.9\_0.2%SPL συγκριτικά με τις άλλες δυο συνθέσεις S/B: 1.9\_0.1%SPL και S/B: 1.9\_0.15%SPL, έχει αυξημένες αντοχές κατά 3.31% και 0.47% αντίστοιχα.

Από το διάγραμμα του Σχήματος 5.13 παρατηρείται μια σταθερά αυξητική τάση για τις 3 συνθέσεις καθώς προχωράει η ενυδάτωση του τσιμέντου. Όλες οι συνθέσεις παρατηρείται ότι έχουν κοντινές αντοχές σε θλίψη. Υπάρχει μια ελάχιστη αύξηση στην σύνθεση S/B: 1.9\_0.2%SPL. Το γεγονός αυτό δεν υποδηλώνει ότι οι υπόλοιπες συνθέσεις δεν ανταποκρίθηκαν καλά.



Σχήμα 5.13: Αντοχή σε θλίψη σκληρυμένων δοκιμίων στις 2, 7 και 28 ημέρες για τις συνθέσεις με προσθήκη υπερρρευστοποιητή.

Παρατηρείται ότι η προσθήκη υπερρρευστοποιητή δρα καθοριστικά στην πορεία της παραμόρφωση του υλικού. Κατά την αύξηση του υπερρρευστοποιητή το μίγμα γίνεται πιο υδαρές. Το γεγονός αυτό επηρεάζει έντονα τις ρεολογικές ιδιότητες του υλικού. Εάν ξεπεραστεί το βέλτιστο ποσοστό τότε παρατηρούνται ανεπιθύμητα αποτελέσματα αναφορικά με την παραμόρφωση, την εξώθηση και την κατασκευασιμότητα.

Πιο συγκεκριμένα, η σύνθεση S/B\_1.9\_0.1%SPL είχε ικανοποιητικό ανοιχτό χρόνο, στα 72 λεπτά, αλλά παρουσίασε μέτρια αποτελέσματα σχετικά με την εξώθηση και τιμές της κατασκευασιμότητας. Η σύνθεση S/B\_1.9\_0.2%SPL είχε εύκολη εξώθηση αλλά το υλικό κοβόταν αρκετά γρήγορα. Αν και ο χρόνος αρχής πήξης έφτασε τα 82 λεπτά, η εικόνα του υλικού ήταν αρκετά ρευστή και ως επακόλουθο είχε μη ικανοποιητικά αποτελέσματα κατασκευασιμότητας.

Η καλύτερη σύνθεση είναι η S/B\_1.9\_0.15%SPL με **βέλτιστο ποσοστό υπερρρευστοποιητή 0.15%** κ.β. Η εξώθηση ήταν η καλύτερη σε σχέση με τις υπόλοιπες. Η κατασκευασιμότητα ήταν ικανοποιητική αφού παρατηρήθηκε αρκετά μικρή παραμόρφωση. Επιπλέον, ο χρόνος αρχής πήξης στα 76 λεπτά ήταν επαρκής, αφού παρείχε ικανοποιητικό χρόνο διαχείρισης του υλικού.

### 5.3. Εύρεση βέλτιστου ποσοστού Επιβραδυντή

Μελετήθηκε διεξοδικά η κατασκευασιμότητα, η εξώθηση και χρόνο αρχής πήξης του κάθε μίγματος. Παρακάτω φαίνονται αναλυτικά τα αποτελέσματα των ρεολογικών μετρήσεων για τις έξι συνθέσεις S/B: 1.9 με την προσθήκη επιβραδυντή. Έγιναν 5 συνθέσεις ξεκινώντας με το ποσοστό 0.25% κ.β. με βήμα 0.25 (0.25%, 0.5%, 0.75%, 1%, 1.25%). Επιπλέον έγινε μέτρηση και καταγραφή των μηχανικών αντοχών μονοαξονικής θλίψης στις 2, 7 και 28 ημέρες.

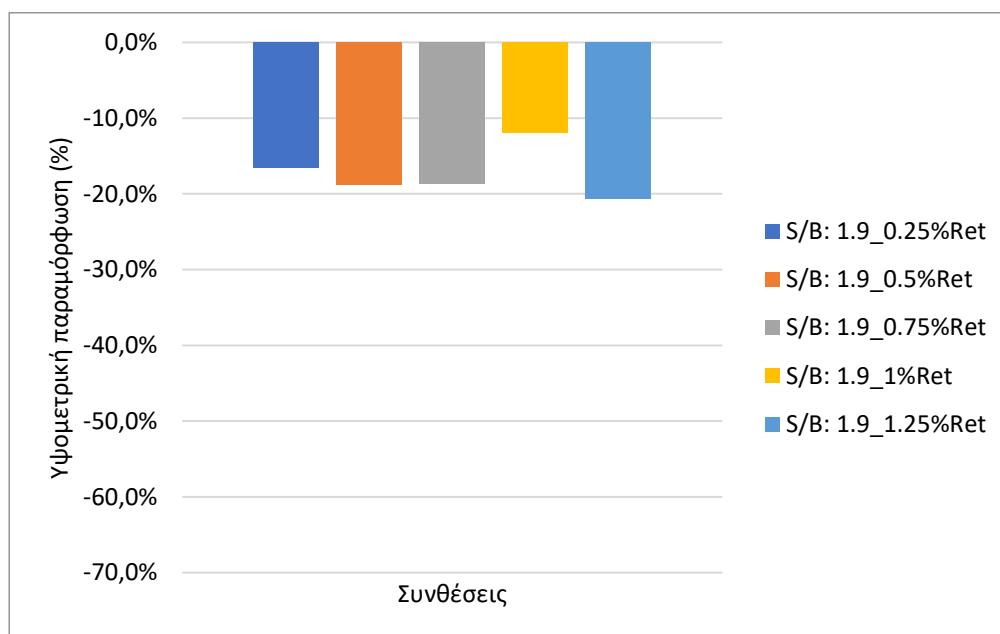
#### Κατασκευασιμότητα

Στον Πίνακα 5.7 παρουσιάζεται το ποσοστό της υψομετρικής και πλευρικής παραμόρφωσης, Δh και Δd, για τις πέντε συνθέσεις με προσθήκη επιβραδυντή. Με βάση τη διακύμανση αυτών των τιμών έγινε αξιολόγηση της κατασκευασιμότητας.

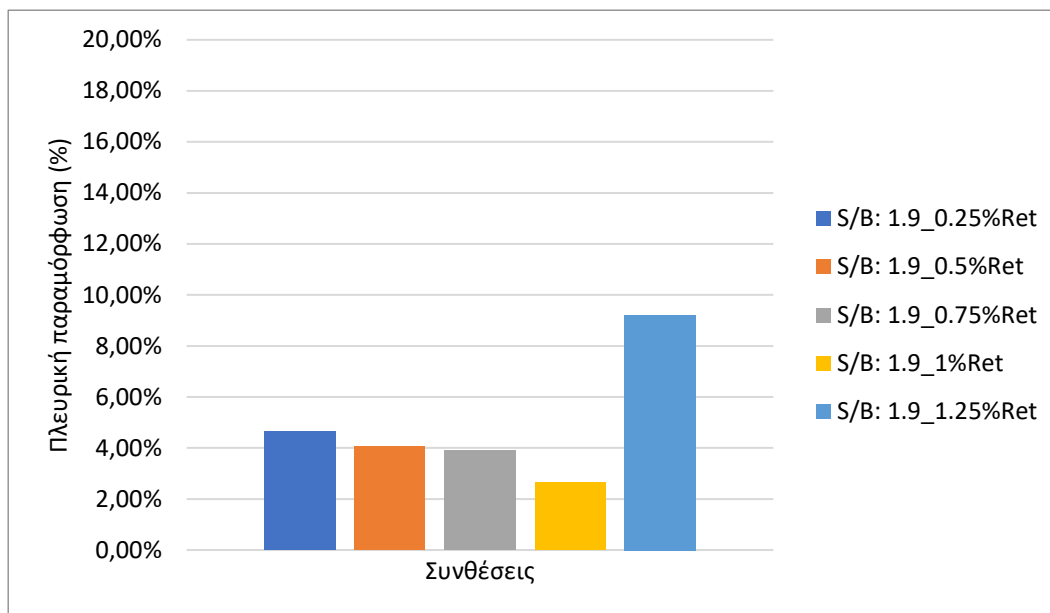
Πίνακας 5.7: Τιμές υψομετρικής και πλευρικής παραμόρφωσης ( $\Delta h$ ,  $\Delta d$ ) για τις συνθέσεις με προσθήκη επιβραδυντή.

Buildability	Κωδικός δείγματος	Αρχικό dM.O. (cm)	Αρχικό h (cm)	Τελικό dM.O. (cm)	Τελικό h (cm)	$\Delta h$	$\Delta d$
	S/B_1.9_0.25%Ret	3.78	7.83	3.95	6.53	-16.6%	4.6%
	S/B_1.9_0.5%Ret	3.7	8.00	3.85	6.5	-18.8%	4.1%
	S/B_1.9_0.75%Ret	3.83	7.93	3.98	6.45	-18.7%	3.9%
	S/B_1.9_1%Ret	3.8	7.95	3.9	7.00	-11.9%	2.6%
	S/B_1.9_1.25%Ret	3.8	7.97	4.15	6.32	-20.7%	9.2%

Στο Σχήμα 5.14 και Σχήμα 5.15 παρουσιάζεται το ποσοστό υψομετρικής και πλευρικής παραμόρφωσης αντίστοιχα για έξι συνθέσεις με προσθήκη επιβραδυντή ξεχωριστά.



Σχήμα 5.14: Ποσοστό υψομετρικής παραμόρφωσης συνθέσεων με προσθήκη επιβραδυντή.



Σχήμα 5.15: Ποσοστό πλευρικής παραμόρφωσης συνθέσεων με προσθήκη επιβραδυντή.

Παρατηρείται ότι η προσθήκη επιβραδυντή επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την υψομετρική παραμόρφωση του υλικού. Τα καλύτερα δυνατά αποτελέσματα συνδυαστικά των πλευρικών και υψομετρικών διαφορών που μετρήθηκαν είναι για τις συνθέσεις με ποσοστό 0.5% , 0.75% και 1% κ.β.

Στο Σχήμα 5.16 φαίνεται η παραμόρφωση του υλικού με προσθήκη ποσοστού 0.75% κ.β. επιβραδυντή μετά από την τοποθέτηση πρόσθετου βάρους.



Σχήμα 5.16: Παραμόρφωση υλικού με προσθήκη ποσοστού 0.75% κ.β. επιβραδυντή.



### Ικανότητα Εξώθησης

Στην 1<sup>η</sup> σύνθεση S/B: 1.9\_0.25%Ret παρατηρήθηκε έντονη δυσκολία κατά την εξώθηση. Αν και το υλικό κράταγε πολύ καλό σχήμα δεν ήταν εφικτό να εξωθηθεί με ευκολία.

Σχετικά με την 2<sup>η</sup> σύνθεση S/B: 1.9\_0.5%Ret παρουσιάστηκε δυσκολία κατά την εξώθηση διότι το υλικό δεν ήταν αρκετά ρευστό. Για τον ίδιο λόγο διατήρησε και αρκετά καλό σχήμα.

Η 3<sup>η</sup> σύνθεση S/B: 1.9\_0.75%Ret είναι εμφανώς αρκετά πιο βελτιωμένη η εξώθηση. Παρατηρήθηκε καλή ποιότητα εξώθησης και σχετικά καλή εικόνα του υλικού. Ήταν ελαφρώς πιο υδαρές από την 1<sup>η</sup> σύνθεση. Το υλικό ξανά αναδεύτηκε και εξωθήθηκε. Μετά το μισάωρο η εικόνα του δεν ήταν βελτιωμένη αφού παρατηρήθηκαν μικρό-ρωγμές και μικρή δυσκολία κατά την εξώθηση. Η επανάληψη της ανάδευσης πραγματοποιήθηκε για να εξεταστεί η πιθανότητα περαιτέρω βελτίωσης του μίγματος.(Σχ. 5.17).



*Σχήμα 5.17: Σύνθεση 3<sup>η</sup> με προσθήκη 0.75% επιβραδυντή. κατά τη διαδικασία της εξώθησης.*

Η 4<sup>η</sup> σύνθεση S/B: 1.9\_1%Ret έχει καλή εξώθηση χωρίς ρωγμές, ασυνέχειες και διατήρηση ενός καλού σχήματος. Μετά και την δεύτερη ανάδευση παρατηρήθηκε ελαφρώς καλύτερη και πιο εύκολη εξώθηση του υλικού. (Σχ.5.18).

Σχετικά με την 5<sup>η</sup> σύνθεση S/B: 1.9\_1.25% Ret (Σχ. 5.19) αν και παρατηρήθηκε καλή εξώθηση, το υλικό κοβόταν αρκετά γρήγορα κατά την διαδικασία της εξώθησης σε σχέση με τις άλλες δοκιμές. επίσης, δεν κρατούσε τόσο καλό σχήμα συγκριτικά με την 4<sup>η</sup> σύνθεση.



Σχήμα 5.18: Σύνθεση 4<sup>η</sup> με προσθήκη 1% επιβραδυντή κατά τη διαδικασία της εξώθησης.



Σχήμα 5.19: Σύνθεση 5<sup>η</sup> με προσθήκη 1.25% επιβραδυντή κατά τη διαδικασία της εξώθησης.

Από τις 5 παραπάνω συνθέσεις προκύπτει ότι οι τρεις καλύτερες συνθέσεις που επιλέχθηκαν ήταν εκείνες με την προθήκη 0.5%, 0.75% και 1% κ.β. επιβραδυντή.

### Χρόνος αρχής πήξης

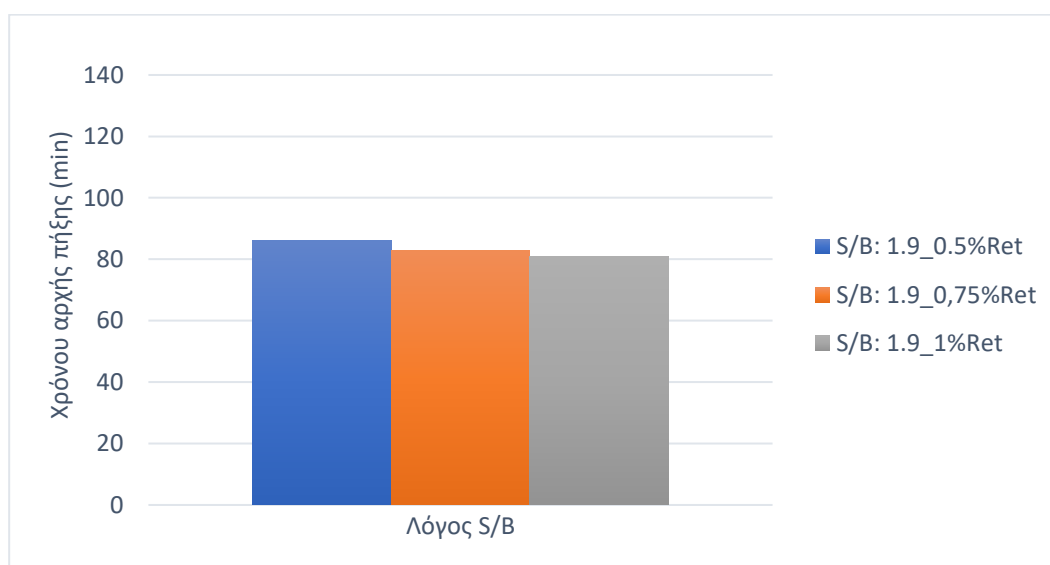
Επιλέχθηκαν τα τρία καλύτερα ποσοστά 0.5%, 0.75% και 1% κ.β. και ακολουθήθηκε η διαδικασία της μέτρησης του χρόνου αρχής πήξης. Στο παρακάτω Πίνακα 5.8 παρουσιάζεται ο χρόνος αρχής πήξης για κάθε μια σύνθεση ξεχωριστά.

Πίνακας 5.8: Προσδιορισμός χρόνου αρχής πήξης για τις τρεις συνθέσεις με την προσθήκη επιβραδυντή.

Open time	
Κωδικός δείγματος	Χρόνος (min)
S/B: 1.9_0.5%Ret	86
S/B: 1.9_0.75%Ret	83
S/B: 1.9_1%Ret	81

Όπως προκύπτει από τις τιμές, ο χρόνος αρχής πήξης των συνθέσεων είναι αρκετά κοντά. Λίγο πιο βελτιωμένη προκύπτει η πρώτη σύνθεση με 0.5% κ.β., με χρόνο αρχής πήξης στα 86 λεπτά. Παρόλα αυτά και οι υπόλοιπες συνθέσεις δίνουν ικανοποιητικό χρόνο για την διαχείριση του υλικού.

Στο Σχήμα 5.20 παρουσιάζεται διάγραμμα του χρόνου αρχής πήξης για κάθε μια σύνθεση ξεχωριστά.



Σχήμα 5.20: Διάγραμμα χρόνου αρχής πήξης για τις τρεις συνθέσεις με την προσθήκη επιβραδυντή.

Προστέθηκε επιβραδυντής προκειμένου να καθυστερήσει ο χρόνος αρχής πήξης του μίγματος. Ταυτόχρονα, το σκυρόδεμα θα πρέπει να μπορεί να σκληραίνει αρκετά γρήγορα ώστε να φέρει το φορτίο των ανώτερων στρωμάτων επομένως μικρή υψομετρική και πλευρική παραμόρφωση.

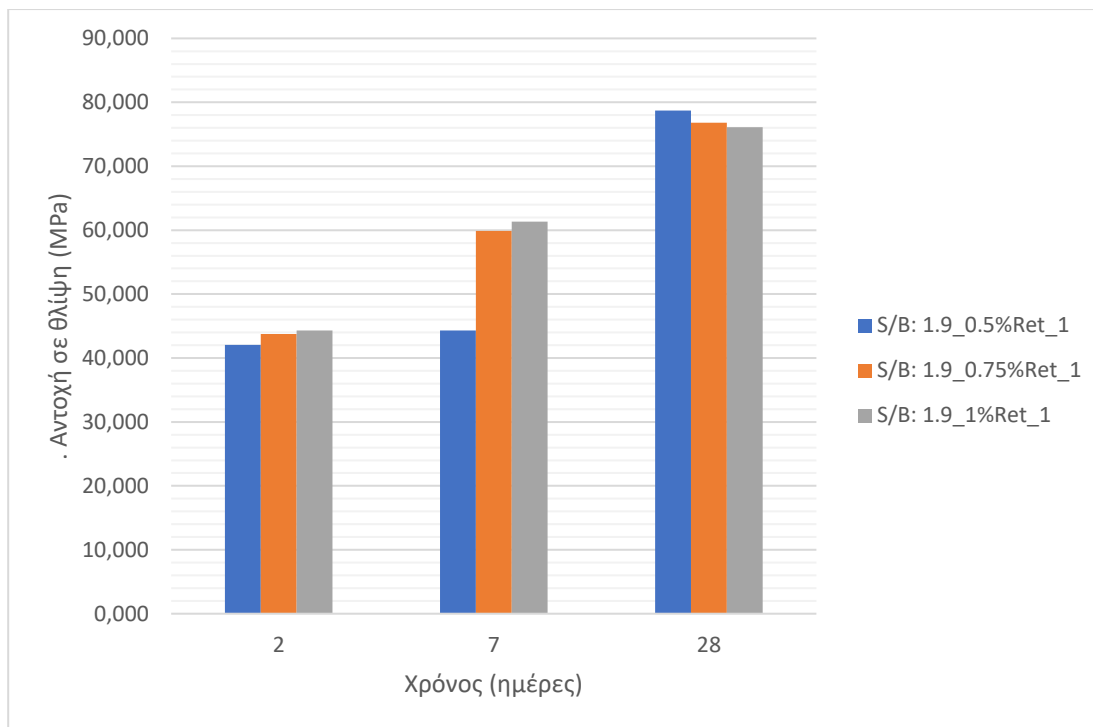
### Αντοχή σε θλίψη

Τα παραχθέντα κυβικά δοκίμια των τριών καλύτερων συνθέσεων υποβλήθηκαν σε αντοχή μονοαξονικής θλίψης έως και την θραύση τους. Στον Πίνακα 5.9 παρουσιάζονται αναλυτικά για όλες τις συνθέσεις οι αντοχές σε θλίψη των σκληρυμένων δοκιμίων στις 2, 7 και 28 ημέρες.

*Πίνακας 5.9: Μετρήσεις αντοχής σε θλίψη των σκληρυμένων δοκιμίων για όλες τις συνθέσεις με προσθήκη επιβραδυντή.*

Κωδικός δείγματος	Αντοχή σε θλίψη (MPa)		
	2 ημερών	7 ημερών	28 ημερών
S/B: 1.9_0.5%Ret	42.08	62.45	78.73
S/B: 1.9_0.75%Ret	43.74	59.90	76.82
S/B; 1.9_1%Ret	44.31	61.32	76.10

Τις μεγαλύτερες αντοχές στις 28 ημέρες ανέπτυξε η σύνθεση S/B: 1.9\_0.5%Ret (Σχ. 5.21). Παρατηρείται ότι η αντοχή της σύνθεσης S/B\_1.9\_0.5%Ret συγκριτικά με τις άλλες δυο συνθέσεις S/B: 1.9\_0.75%SPL και S/B: 1.9\_1%SPL, έχει αυξηθεί κατά 2.42% και 0.94% αντίστοιχα.



Σχήμα 5.21: Αντοχή σε θλίψη σκληρυμένων δοκιμίων στις 2, 7 και 28 ημέρες για τις συνθέσεις με προσθήκη επιβραδυντή.

Παρατηρείται ότι η σύνθεση S/B: 1.9\_0.5% Ret είχε τον καλύτερο χρόνο αρχής πήξης, στα 86 λεπτά. Οι τιμές της κατασκευασιμότητας ήταν αρκετά κακές με έντονη την εμφάνιση της υσομετρικής παραμόρφωσης. Επιπλέον, παρατηρήθηκε μεγάλη αδυναμία κατά την εξώθηση. Η σύνθεση S/B: 1.9\_0.75% Ret είχε καλή εξώθηση αλλά έχανε ελαφρώς το σχήμα διότι το μίγμα ήταν υδαρές. Η κατασκευασιμότητα της συγκεκριμένης σύνθεσης παρουσίασε, όμοια εικόνα με την προηγούμενη, έντονη υσομετρική παραμόρφωση. Ο χρόνος αρχής πήξης μειώθηκε ελάχιστα στα 83 λεπτά. Η σύνθεση S/B: 1.9\_1%Ret είχε καλή εξώθηση και διατήρηση αρκετά καλού σχήματος. Ο χρόνος αρχής πήξης έφτασε τα 81 λεπτά και θεωρείται ικανοποιητικός. Σχετικά με την κατασκευασιμότητα προέκυψε μικρότερη πλευρική και υσομετρική παραμόρφωση σε σύγκριση με τις άλλες δυο συνθέσεις. Συνεπώς, η καλύτερη σύνθεση είναι η S/B: 1.9\_1%Ret με **βέλτιστο ποσοστό επιβραδυντή 1% κ.β..**

#### 5.4. Εύρεση βέλτιστου ποσοστού Επιταχυντή

Μελετήθηκε διεξοδικά η κατασκευασσιμότητα, η εξώθηση και ο χρόνος αρχής πήξης του κάθε μίγματος. Παρακάτω φαίνονται αναλυτικά τα αποτελέσματα των ρεολογικών μετρήσεων για τις επτά συνθέσεις S/B: 1.9 με την προσθήκη επιταχυντή. Έγιναν 6 συνθέσεις ξεκινώντας με το ποσοστό επιταχυντή 0.25% κ.β. με βήμα 0.25 (0.25%, 0.5%, 0.75%, 1%, 1.25%, 1.5%). Επιπλέον έγινε μέτρηση και καταγραφή των μηχανικών αντοχών μονοαξονικής θλίψης στις 2, 14 και 28 ημέρες εμβαπτισμένα στο νερό.

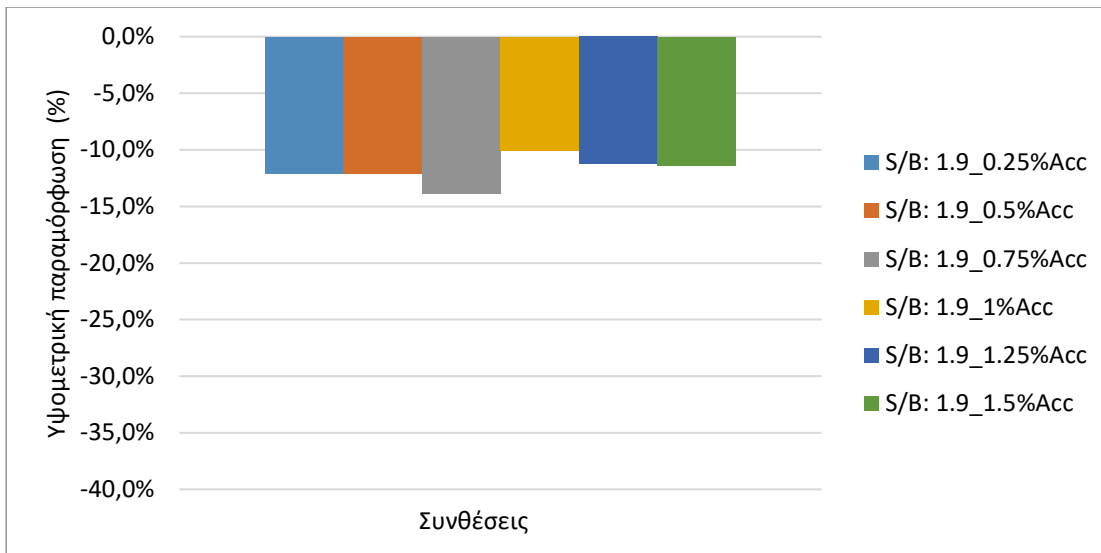
#### Κατασκευασσιμότητα

Στον Πίνακα 5.10 παρουσιάζεται το ποσοστό της υσομετρικής και πλευρικής παραμόρφωσης,  $\Delta h$  και  $\Delta d$ , για τις 6 συνθέσεις με προσθήκη επιταχυντή. Με βάση τη διακύμανση αυτών των τιμών έγινε αξιολόγηση της κατασκευασσιμότητας.

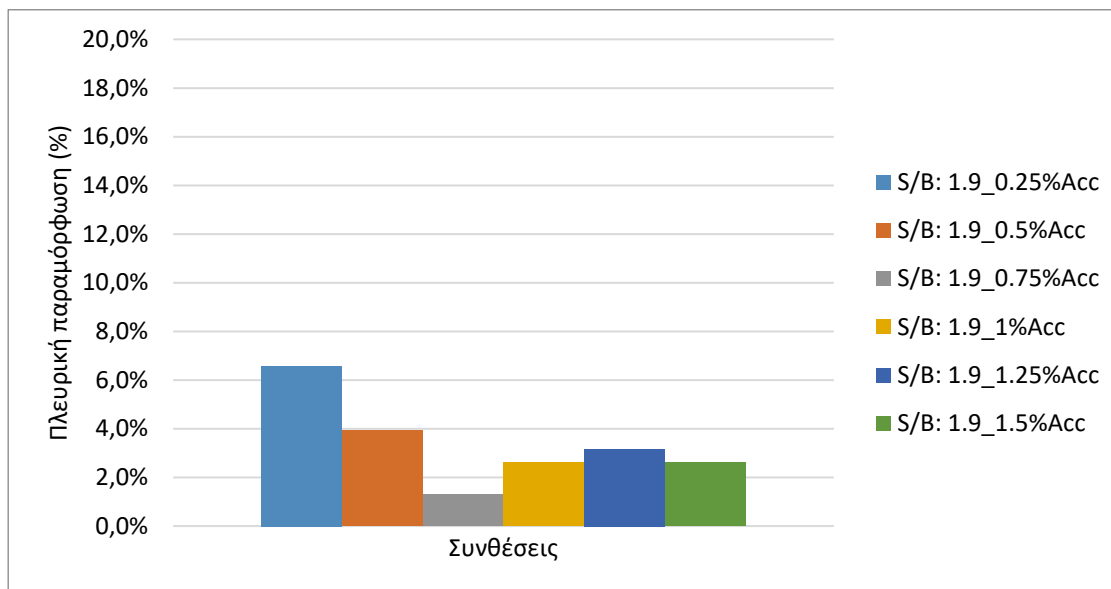
*Πίνακας 5.10: Τιμές υσομετρικής και πλευρικής παραμόρφωσης ( $\Delta h$ ,  $\Delta d$ ) για τις συνθέσεις με προσθήκη επιταχυντή.*

	Κωδικός δείγματος	Αρχικό d M.O. (cm)	Αρχικό h (cm)	Τελικό d M.O. (cm)	Τελικό h (cm)	$\Delta h$	$\Delta d$
<b>Buildability</b>	S/B: 1.9_0.25% Acc	3.80	7.85	4.05	6.90	-12.1%	6.6%
	S/B: 1.9_0.5% Acc	3.80	7.85	3.95	6.90	-12.1%	4.0%
	S/B: 1.9_0.75% Acc	3.90	7.95	3.95	6.85	-13.8%	1.3%
	S/B: 1.9_1% Acc	3.82	7.95	3.92	7.15	-10.0%	2.6%
	S/B: 1.9_1.25% Acc	3.79	8.00	3.91	7.10	-11.3%	3.2%
	S/B: 1.9_1.5% Acc	3.85	7.90	3.95	7.00	-11.4%	2.6%

Στο Σχήμα 5.22 και Σχήμα 5.23 παρουσιάζεται το ποσοστό της υσομετρικής και πλευρικής παραμόρφωσης αντίστοιχα για όλες τις συνθέσεις ξεχωριστά.



Σχήμα 5.22: Ποσοστό υψομετρικής παραμόρφωσης συνθέσεων με προσθήκη επιταχυντή.



Σχήμα 5.23: Ποσοστό πλευρική παραμόρφωσης συνθέσεων με προσθήκη επιταχυντή.

Παρατηρείται ότι τα καλύτερα δυνατά αποτελέσματα συνδυαστικά των πλευρικών και υψομετρικών διαφορών που μετρήθηκαν είναι για τις συνθέσεις με ποσοστό επιταχυντή 0.5%, 0.75% και 1% κ.β..



## Ικανότητα Εξώθησης

Κατά την 1<sup>η</sup> σύνθεση S/B: 1.9\_0.25%Acc παρατηρήθηκε καλή εξώθηση και έλλειψη ρωγμών όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.24 α). Παρόλα αυτά το μίγμα έχανε εύκολα το σχήμα του και ήταν αρκετά ρευστό.

Η 2<sup>η</sup> σύνθεση S/B: 1.9\_0.5%Acc σχετικά καλή εξώθηση. Παρατηρήθηκε μικρή βελτίωση αναφορικά με την διατήρηση του σχήματος μετά την εξώθηση. Η συνολική εικόνα ήταν πιο βελτιωμένη αλλά όχι ικανοποιητική (Σχ. 5.24 β)).



Σχήμα 5.24: α) Σύνθεση 1<sup>η</sup> με προσθήκη 0.25% επιταχυντή κατά τη διαδικασία της εξώθησης. β) Σύνθεση 2<sup>η</sup> με προσθήκη 0.50% επιταχυντή κατά τη διαδικασία της εξώθησης.

Για την 3<sup>η</sup> σύνθεση S/B: 1.9\_0.75%Acc οι παρατηρήσεις είναι όμοιες με της 2<sup>ης</sup> σύνθεσης. Δεν παρατηρήθηκαν έντονες διαφοροποιήσεις ή βελτιώσεις.

Σχετικά με την 4<sup>η</sup> σύνθεση S/B: 1.9\_1%Acc παρουσιάστηκε εξαιρετική εικόνα εξώθησης και υλικό χωρίς ρωγμές. Το υλικό δεν ήταν πλέον υδαρές όπως τα προηγούμενα. Το σχήμα του διατηρούνταν άριστα κατά τη διαδικασία και μετά την εξώθηση, Σχήμα 5.25 α).



Κατά την 5<sup>η</sup> σύνθεση S/B: 1.9\_1.25%Acc διαπιστώθηκε ότι γινόταν γρήγορη αποκόλληση του υλικού από την χοάνη ενώ κατά την πτώση έχανε το σχήμα του. Η διαδικασία της εξώθησης ήταν αρκετά δύσκολη και χρονοβόρα. Συμπερασματικά, η 5<sup>η</sup> σύνθεση δεν είχε καθόλου καλή εικόνα εξώθησης και διατήρησης καλού σχήματος όπως προκύπτει και από το Σχήμα 5.25 β) .



Σχήμα 5.25: α) Σύνθεση 4<sup>η</sup> με προσθήκη 1% επιταχυντή κατά τη διαδικασία της εξώθησης. β) Σύνθεση 5<sup>η</sup> με προσθήκη 1.25% επιταχυντή κατά τη διαδικασία της εξώθησης.

Η 6<sup>η</sup> σύνθεση S/B: 1.9\_1.5%Acc παρουσίασε πάρα πολλές ρωγμές και δεν υπήρχε ομοιογένεια στο μίγμα κατά την εξώθηση (Σχ. 5.26). Αρκετά μεγάλη δυσκολία στην εξώθηση, δεν διατηρούσε το σχήμα του και διαχωριζόταν πολύ εύκολα.



Σχήμα 5.26: Σύνθεση 6<sup>η</sup> με προσθήκη 1.5% επιταχυντή κατά τη διαδικασία της εξώθησης.

Συμπερασματικά, οι συνθέσεις με την προσθήκη επιταχυντή με ποσοστό 0.5% , 0.75% και 1% κ.β. είχε εξαιρετική εικόνα εξώθησης. Όσο αυξάνεται η ποσότητα του επιταχυντή το μίγμα γινόταν πιο υδαρές ενώ το μίγμα δεν είχε συνοχή και παρουσίαζε κακή γενική εικόνα.

#### Χρόνος αρχής πήξης

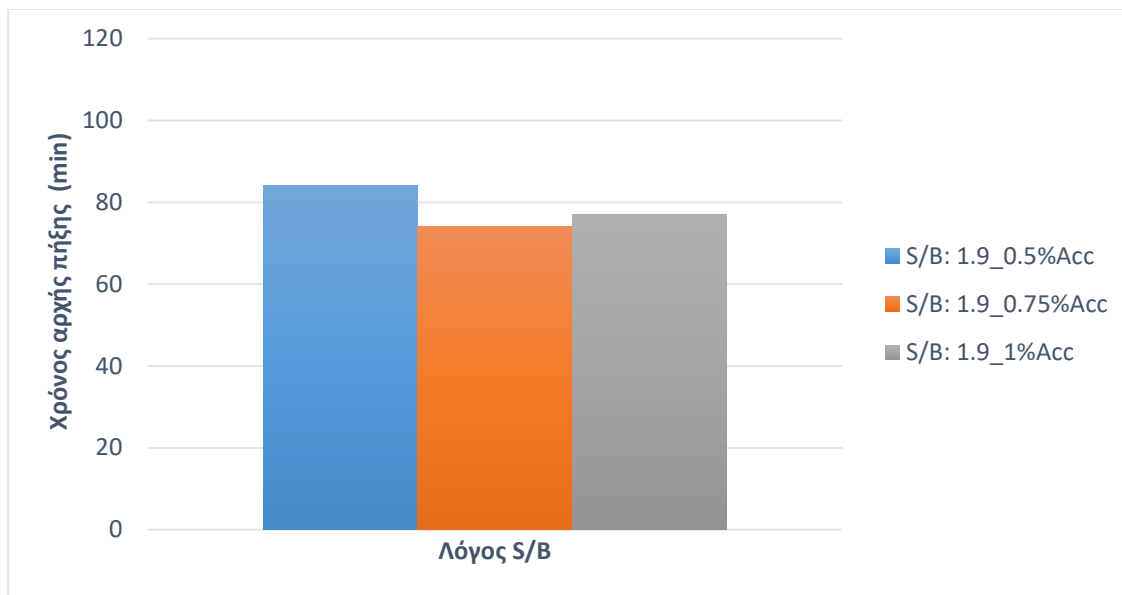
Με βάση τα παραπάνω επιλέχθηκαν τα τρία καλύτερα ποσοστά 0.5%, 0.75% και 1% κ.β. για τα οποία ακολουθήθηκε η διαδικασία της μέτρησης του χρόνου αρχής πήξης.

Στον Πίνακα 5.11 αναγράφονται οι χρόνοι αρχής πήξης.

*Πίνακας 5.11: Προσδιορισμός χρόνου αρχής πήξης για τις τρεις συνθέσεις με την προσθήκη επιβραδυντή.*

<b>Open time</b>	
Κωδικός δείγματος	Χρόνος (min)
S/B_1.9_0.5% Acc	84
S/B_1.9_0.75% Acc	74
S/B_1.9_1% Acc	77

Όπως προκύπτει από τις τιμές, ο χρόνος αρχής πήξης των συνθέσεων είναι αρκετά κοντά. Η σύνθεση με το ποσοστό 0.5% κ.β. έχει τον καλύτερο χρόνο με 84 λεπτά ενώ οι συνθέσεις με το 0.75% και 1% κ.β. ακολουθούν με 74 και 77 λεπτά αντίστοιχα. Πιο βελτιωμένη προκύπτει η πρώτη σύνθεση η οποία παρέχει καλύτερο χρόνο διαχείρισης του υλικού από όλες τις προηγούμενες.



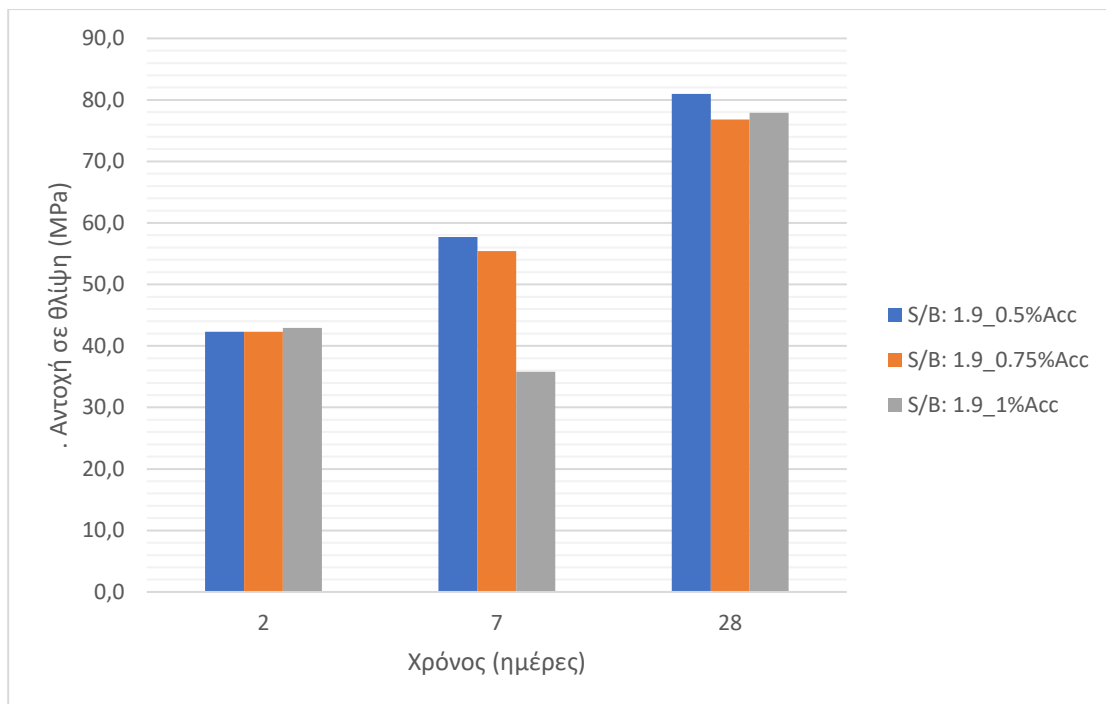
Σχήμα 5.27: Διάγραμμα χρόνος αρχής πήξης για τις τρεις συνθέσεις με την προσθήκη επιταχυντή.

### Αντοχή σε θλίψη

Παρακάτω στον Πίνακα 5.12 παρουσιάζονται αναλυτικά οι μετρήσεις αντοχής σε θλίψη των τριών καλύτερων συνθέσεων με ποσοστό επιταχυντή 0.5% , 0.75% και 1% κ.β..

Πίνακας 5.12: Μετρήσεις αντοχής σε θλίψη των σκληρυμένων δοκιμίων για όλες τις συνθέσεις με προσθήκη επιταχυντή.

Κωδικός δείγματος	Αντοχή σε θλίψη (MPa)		
	2 ημερών	7 ημερών	28 ημερών
S/B: 1.9_0.5%Acc	42.31	57.73	81.00
S/B: 1.9_0.75%Acc	42.28	55,42	76.83
S/B: 1.9_1%Acc	42.92	35.80	77.91



Σχήμα 5.28: Αντοχή σε θλίψη σκληρυμένων δοκιμίων στις 2, 7 και 28 ημέρες για τις συνθέσεις με προσθήκη επιταχυντή.

Η προσθήκη επιταχυντή αυξάνει τις αντοχές σε θλίψη στις 28 ημέρες συγκριτικά με την προσθήκη υπερρευστοποιητή ή επιβραδυντή (Σχ. 5.28).

Η καλύτερη σύνθεση είναι η S/B\_1.9\_1%Acc με **βέλτιστο ποσοστό επιταχυντή 1%** κ.β.. Η εξώθηση ήταν αρκετά καλύτερη σε σχέση με τις υπόλοιπες. Επίσης, η κατασκευασιμότητα ήταν ικανοποιητική αφού παρατηρήθηκε αρκετά μικρή διακύμανση των διαστάσεων. Επιπλέον, ο χρόνος αρχής πήξης στα 77 λεπτά είναι επαρκής, αφού προσδίδει ικανοποιητικό χρόνο διαχείρισης του υλικού.

Η σύνθεση S/B\_1.9\_0.5%Acc ήταν ρευστή και δεν διατηρούσε ικανοποιητικά το σχήμα της. Σχετικά με τα αποτελέσματα της κατασκευασιμότητας παρατηρήθηκε αυξημένη η υψομετρική παραμόρφωση. Η σύνθεση S/B\_1.9\_0.75%Acc ήταν επίσης αρκετά υδαρής και δεν διατηρούσε ικανοποιητικά το σχήμα της. Η κατασκευασιμότητα της συγκεκριμένης σύνθεσης απόφερε αρκετά παρόμοια αποτελέσματα με την S/B\_1.9\_0.5%Acc.

## 6. Συμπεράσματα

Σε αυτή την μεταπτυχιακή εργασία έγινε μελέτη της επίδρασης των ρεολογικών ιδιοτήτων νωπών τσιμεντοκονιαμάτων στη δυνατότητα εκτύπωσής τους καθώς και των μηχανικών αντοχών των σκληρυμένων δοκιμίων τους. Παρασκευάστηκαν πολυάριθμες συνθέσεις τσιμεντοκονιαμάτων με χρήση τσιμέντου τύπου CEM I, ασβεστολιθικής άμμου, πυριτικής παιπάλης, νερού και τριών διαφορετικών χημικών προσθέτων (υπερρρευστοποιητή, επιβραδυντή και επιταχυντή). Με στόχο την αξιολόγηση της διαδικασίας, των συνθέσεων των κονιαμάτων καθώς και των χημικών πρόσθετων που χρησιμοποιήθηκαν πραγματοποιήθηκε έλεγχος της ποιότητας εκτύπωσης, της κατασκευασιμότητας και του χρόνου πήξης. Επιπλέον, έγινε καταγραφή των μετρήσεων των μηχανικών αντοχών στα παραχθέντα σκληρυμένα δοκίμια στις 2, 7 και 28 ημέρες. Δόθηκε έμφαση στην εύρεση της βέλτιστης αναλογίας S/B και των ποσοστών των χημικών προσθέτων.

Συνοψίζοντας τα αποτελέσματα που προέκυψαν μέσω της παραπάνω πειραματικής διαδικασίας και αξιολόγησης των συνθέσεων συμπεραίνεται ότι:

- Η αύξηση του λόγου S/B μειώνει την υψομετρική και πλευρική παραμόρφωση.
- Ο λόγος άμμου προς συνδετικά υλικά είναι καθοριστικής σημασίας για την ικανοποιητική εξώθηση του μίγματος. Όσο μεγαλύτερος ο λόγος S/B τόσο μικρότερη η εργασιμότητα του μίγματος. Η μείωση του λόγου οδηγεί σε πιο υδαρή μίγματα.
- Βέλτιστος λόγος S/B βρέθηκε ίσος με 1.9.
- Η προσθήκη χημικών πρόσθετων (υπερρρευστοποιητή, επιβραδυντή και επιταχυντή) βελτιώνει σε μεγάλο βαθμό την ικανότητα εκτύπωσης και την κατασκευασιμότητα της τσιμεντοκονίας.
- Με την προσθήκη υπερρρευστοποιητή παρατηρείται αυξητική τάση της υψομετρικής παραμόρφωσης. Σχετικά με την πλευρική παραμόρφωση παρουσιάζονται καλύτερα αποτελέσματα με την προσθήκη μικρότερων ποσοστών. Ο χρόνος αρχής πήξης παρατηρείται ότι δεν μεταβάλλεται με την προσθήκη ποσοστού υπερρρευστοποιητή. Τέλος, ο υπερρρευστοποιητής δεν επηρεάζει σε αξιοσημείωτο βαθμό τη θλιπτική αντοχή.
- Η προσθήκη επιβραδυντή έχει ως αποτέλεσμα έντονη υψομετρική παραμόρφωση αλλά σχετικά σταθερή πλευρική παραμόρφωση. Προσδίδει πιο εύκολη εξωθητική ικανότητα στο υλικού. Η προσθήκη μεγαλύτερων ποσοστών επιβραδυντή επέφερε αρνητικές

επιπτώσεις δημιουργώντας ένα πιο υδαρές μίγμα. Επιπλέον, η προσθήκη επιβραδυντή βελτίωσε την εργασιμότητα και τον χρόνο αρχής πήξης με εύρος χρόνου 81-89 λεπτά.

- Η προσθήκη επιταχυντή παρουσιάζει παρόμοια υψομετρική παραμόρφωση και βελτιωμένη πλευρική παραμόρφωση. Ποσοστά επιταχυντή από 1.25% και άνω έχουν ως αποτέλεσμα την εμφάνιση έντονων ρωγμών και μη διατήρηση καλού σχήματος. Η προσθήκη επιταχυντή 0.5% κ.β., 0.75%κ.β. και 1% κ.β. δίνει ικανοποιητικές τιμές αναφορικά με το χρόνο αρχής πήξης, παρατηρείται μικρή ελάττωση κατά την αύξηση του ποσοστού.
- Συγκεντρωτικά, καλύτερη εικόνα παρουσιάζουν τα μίγματα με την προσθήκη ποσοστού 0.15% κ.β. υπερρευστοποιητή, 1% κ.β. επιβραδυντή και 1% κ.β επιταχυντή.

### **Επίλογος-Προτάσεις**

Στα πλαίσια της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας πραγματοποιήθηκαν πολυάριθμες μετρήσεις των ρεολογικών ιδιοτήτων των νωπών εκτυπώσιμων τσιμεντοκονιαμάτων καθώς και μετρήσεις της θλιπτικής αντοχής των σκληρυμένων δοκιμίων τους. Με την βοήθεια αυτής της επαναληπτικής διαδικασίας προκύπτει ότι η προσθήκη πρόσθετων χημικών σε συνδυασμό με την βέλτιστη αναλογία S/B έχει άμεση επίδραση στην ικανότητα εξώθησης, στην κατασκευασιμότητα και στον προσδιορισμό του χρόνου αρχής πήξης της κάθε σύνθεσης.

Η 3D Printing τεχνολογία εισήλθε πρόσφατα στις βιομηχανίες και απαιτεί μεγάλο χρονικό διάστημα δοκιμών και μελετών. Υπάρχουν ακόμα πολλά στοιχεία που πρέπει να αναλυθούν και να μελετηθούν σε βάθος σχετικά με την μέθοδο και το εκτυπώσιμο μίγμα. Μερικές μελλοντικές έρευνες πρέπει να εστιάσουν στα εξής:

#### **Νέες εργαστηριακές δοκιμές**

- Δοκιμή νέων χημικών πρόσθετων για την μελέτη περαιτέρω βελτίωσης του εκτυπώσιμου υλικού.
- Συνδυασμός χημικών προσθέτων και διερεύνηση της επίδρασης τους στις ρεολογικές ιδιότητες.
- Δοκιμή εκτύπωσης υλικού σε μεγαλύτερη κλίμακα.

### **Εργαστηριακές δομοστατικές δοκιμές**

- Η εν λόγω μεταπτυχιακή εργασία εστίασε στις ιδιότητες του νεπού εκτυπώσιμου υλικού και την μέτρηση της θλιπτικής αντοχής. Για το λόγο αυτό μελλοντικά απαιτείται διερεύνηση όσον αφορά τη στατικότητα του στεγνού εκτυπώσιμου υλικού.
- Προσθήκη ενισχυτικών ινών έτσι ώστε να βελτιωθεί η στατικότητα του υλικού. Οι ίνες σε τρισδιάστατη διασπορά μέσα στην μάζα του υλικού πιθανόν να αποτρέπουν την ανάπτυξη ρωγμών δρώντας ως γέφυρες «συρραφής» ενώ παράλληλα να βελτιώνουν τη στατικότητα της κατασκευής.
- Έλεγχος σχετικά με τα μειονεκτήματα της χρήσης των ινών. Εξέταση πιθανής ανομοιόμορφης κατανομής τους στο εκτυπώσιμο υλικό και μείωσης της εργασιμότητας.

## Βιβλιογραφία

- [1] Bayer, R., & Lutz, H. (2000). Dry mortars. Ullmann's encyclopedia of industrial chemistry..
- [2] Τσιλίκης Ι., Ανάπτυξη εκτυπώσιμων τσιμεντοειδών (3D-printed) σε εργαστηριακή κλίμακα. ΕΜΠ Αθήνα (2022)
- [3] Τσίμας Σ., Τσιβιλής Σ., 2011 Επιστήμη και Τεχνολογία Τσιμέντου, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις ΕΜΠ.
- [4] <https://ocw.aoc.ntua.gr/modules/document/file.php/CHEMENG114/Cement%20and%20Concrete.pdf>.
- [5] [https://grc.sika.com/content/dam/dms/gr01/d/HE\\_00434\\_More%20than%20100%20Years%20of%20Durability\\_gr.pdf](https://grc.sika.com/content/dam/dms/gr01/d/HE_00434_More%20than%20100%20Years%20of%20Durability_gr.pdf)
- [6] <https://thesis.ekt.gr/thesisBookReader/id/17992?lang=el#page/46/mode/1up>.
- [7] Ngo, T. D., Kashani, A., Imbalzano, G., Nguyen, K. T., & Hui, D. (2018). Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B: Engineering*, 143, 172-196.
- [8] Diegel, O., Nordin, A., & Motte, D. (2019). A practical guide to design for additive manufacturing (pp. 978-981). Singapore: Springer Singapore.
- [9] Ayesha Siddika, Md. Abdullah Al Mamun, Wahid Ferdous, Ashish Kumer Saha & Rayed Alyousef (2019): 3D-printed concrete: applications, performance, and challenges, *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*.
- [10] Shakor, P., Nejadi, S., Paul, G., & Malek, S. (2019). Review of emerging additive manufacturing technologies in 3D printing of cementitious materials in the construction industry. *Frontiers in Built Environment*, 4, 85
- [11] Zein, I., Hutmacher, D. W., Teoh, S. H., & Tan, K. C. (2002). Poly (ε-caprolactone) scaffolds designed and fabricated by fused deposition modeling. *Biomaterials*, 23(4), 1169-1185
- [12] Pegna, J. (1997). Exploratory investigation of solid freeform construction. *Automation in construction*, 5(5), 427-437
- [13] Khoshnevis, B., & Dutton, R. (1998). Innovative rapid prototyping process makes large sized, smooth surfaced complex shapes in a wide variety of materials. *Materials Technology*, 13(2), 53-56.



- [14] Hwang, D., & Khoshnevis, B. (2004, September). Concrete wall fabrication by contour crafting. In 21st International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC 2004), Jeju, South Korea (pp. 301-307)..
- [15] Wu, P., Wang, J., & Wang, X. (2016). A critical review of the use of 3-D printing in the construction industry. *Automation in Construction*, 68, 21-31
- [16] Withell, A., Diegel, O., Grupp, I., Reay, S., De Beer, D., & Potgieter, J. (2011, September). Porous ceramic filters through 3D printing. In *Innovative Developments in Virtual and Physical Prototyping: Proceedings of the 5th International Conference on Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping*, Leiria, Portugal (Vol. 28, p. 313).
- [17] Tay, Y. W. D., Panda, B., Paul, S. C., Noor Mohamed, N. A., Tan, M. J., & Leong, K. F. (2017). 3D printing trends in building and construction industry: a review. *Virtual and Physical Prototyping*, 12(3), 261-276.
- [18] Feng, P., Meng, X., & Zhang, H. (2015). Mechanical behavior of FRP sheets reinforced 3D elements printed with cementitious materials. *Composite Structures*, 134, 331-342.
- [19] Kruth, J. P., Mercelis, P., Van Vaerenbergh, J., Froyen, L., & Rombouts, M. (2005). Binding mechanisms in selective laser sintering and selective laser melting. *Rapid prototyping journal*.
- [20] Lipson, H., & Kurman, M. (2013). *Fabricated: The new world of 3D printing*. John Wiley & Sons.
- [21] Jeng, J. Y., Peng, S. C., & Chou, C. J. (2000). Metal rapid prototype fabrication using selective laser cladding technology. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 16(9), 681-687.
- [22] Roussel, N. (2018). Rheological requirements for printable concretes. *Cement and Concrete Research*, 112, 76-85.
- [23] Jeon, K. H., Park, M. B., Kang, M. K., & Kim, J. H. (2013). Development of an automated freeform construction system and its construction materials. In *ISARC. Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction* (Vol. 30, p. 1). IAARC Publications.
- [24] Le, T. T., Austin, S. A., Lim, S., Buswell, R. A., Gibb, A. G., & Thorpe, T. (2012). Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete. *Materials and structures*, 45(8), 1221-1232.

- [25] Hambach, M., Rutzen, M., & Volkmer, D. (2019). Properties of 3D-printed fiber-reinforced Portland cement paste. In *3D concrete printing technology* (pp. 73-113). Butterworth-Heinemann.
- [26] Kazemian, A., Yuan, X., Cochran, E., & Khoshnevis, B. (2017). Cementitious materials for construction-scale 3D printing: Laboratory testing of fresh printing mixture. *Construction and Building Materials*, 145, 639-647.
- [27] Rushing, T. S., Stynoski, P. B., Barna, L. A., Al-Chaar, G. K., Burroughs, J. F., Shannon, J. D., ... & Case, M. P. (2019). Investigation of concrete mixtures for additive construction. In *3D Concrete Printing Technology* (pp. 137-160). Butterworth-Heinemann.
- [28] Shakor, P., Renneberg, J., Nejadi, S., & Paul, G. (2017, January). Optimisation of different concrete mix designs for 3D Printing by utilising 6Dof industrial robot. In *ISARC 2017-Proceedings of the 34th International Symposium on Automation and Robotics in Construction*.
- [29] Le, T. T., Austin, S. A., Lim, S., Buswell, R. A., Gibb, A. G., & Thorpe, T. (2012). Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete. *Materials and structures*, 45(8), 1221-1232.
- [30] Allouhi, A., El Fouih, Y., Kousksou, T., Jamil, A., Zeraoui, Y., & Mourad, Y. (2015). Energy consumption and efficiency in buildings: current status and future trends. *Journal of Cleaner production*, 109, 118-130.
- [31] Siddika, A., Mamun, M. A. A., Ferdous, W., Saha, A. K., & Alyousef, R. (2020). 3D-printed concrete: Applications, performance, and challenges. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, 9(3), 127-164..
- [32] Perrot, A., Rangeard, D., & Pierre, A. (2016). Structural built-up of cement-based materials used for 3D-printing extrusion techniques. *Materials and Structures*, 49(4), 1213-1220.
- [33] Ma, G., Li, Z., & Wang, L. (2018). Printable properties of cementitious material containing copper tailings for extrusion based 3D printing. *Construction and building materials*, 162, 613-627.
- [34] Le, T. T., Austin, S. A., Lim, S., Buswell, R. A., Gibb, A. G., & Thorpe, T. (2012). Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete. *Materials and structures*, 45(8), 1221-1232.

- [35] Τσιλίκης Ι., Κιούπης Δ., Σκαροπούλου Α., Ασπιώτης Κ., Τσιβιλής Σ., Εργαστηριακές μέθοδοι αξιολόγησης ικανότητας εκτύπωσης μειγμάτων τσιμέντου, 13ο Πανελλήνιο Συνέδριο Χημικής Μηχανικής, Πάτρα, (2022), 1-5.
- [36] Long, W. J., Tao, J. L., Lin, C., Gu, Y. C., Mei, L., Duan, H. B., & Xing, F. (2019). Rheology and buildability of sustainable cement-based composites containing micro-crystalline cellulose for 3D-printing. *Journal of Cleaner Production*, 239, 118054.
- [37] Gosselin, R Duballet, P Roux, et al. Large-scale 3D printing of ultra-high-performance concrete - a new processing route for architects and builders. *Materials and Design*. 2016; 100: 102-109.