

	Τίτλος Αναφορά προδιαγραφών τελικού κονιάματος	Αριθμός Παραδοτέου Π 2.1
		Έκδοση 1η

Παραδοτέο Π 2.1

Αναφορά προδιαγραφών τελικού κονιάματος

Ενότητα Εργασίας 1



Συγγραφείς
Συντονιστής Ενότητας
Προθεσμία Υποβολής
Επίπεδο Διάχυσης
Τύπος

Μαυρατζώτης Μανώλης, Didier Lootens
 ΣΙΚΑ ΕΛΛΑΣ ΑΒΕΕ
 28 Οκτωβρίου 2019
 Για χρήση μόνο μεταξύ των φορέων
 Αναφορά

	Τίτλος Αναφορά προδιαγραφών τελικού κονιάματος	Αριθμός Παραδοτέου Π 2.1
		Έκδοση 1η

Περιεχόμενα

1	Εισαγωγή: Το κονίαμα (ως μελάνι) για την τρισδιάστατη (3D) εκτύπωση	3
2	Τεχνικές προδιαγραφές κονιάματος 3D	4
3	Πρώιμες ιδιότητες : Αντλησιμότητα και δυνατότητα ανέγερσης	5
3.1	Ρεολογία: Θιξοτροπία και Αντλησιμότητα	6
3.2	Ρύθμιση πήξης: η αρχή της πήξης “on demand”	7
3.3	Συρρίκνωση.....	8
4	Δοκιμές μηχανικών ιδιοτήτων και ανθεκτικότητας.....	10
5	Εργαστήριο τρισδιάστατων (3D) εκτυπώσεων: Η κλιμάκωση της διαδικασίας εκτύπωσης.	11
5.1	Συστήματα άντλησης	11
5.2	Συστήματα εκτύπωσης 3D	12
6	Συμπεράσματα.....	14

	Τίτλος Αναφορά προδιαγραφών τελικού κονιάματος	Αριθμός Παραδοτέου Π 2.1
		Έκδοση 1η

1 Εισαγωγή: Το κονίαμα (ως μελάνι) για την τρισδιάστατη (3D) εκτύπωση

Η τρισδιάστατη εκτύπωση (3D), έχει ήδη εφαρμοστεί στους τομείς της αυτοκινητοβιομηχανίας, της αεροναυτικής, των καταναλωτικών προϊόντων, της ιατρικής, της αρχιτεκτονικής ή ακόμη και των τροφίμων. Έχει όμως βραδύτερη πρόοδο στον τομέα των κατασκευών, κυρίως λόγω της απαιτούμενης μεγάλης κλίμακας εφαρμογής αλλά και της πολυπλοκότητας της φυσικής και της χημείας των οικονομικά αποδοτικών υλικών που χρησιμοποιούνται. Στην συγκεκριμένη περίπτωση οι επιστήμες πολιτικού μηχανικού, αρχιτεκτονικής, μηχανολογίας πρέπει να συνδυαστούν με την χημεία, για την ταχύτερη υλοποίηση υλικών φιλικών προς το περιβάλλον για την τρισδιάστατη εκτύπωση κατασκευών. Και ενώ παρατηρείται σημαντική πρόοδος τα τελευταία χρόνια στην ρομποτική, ο σχεδιασμός του «μελανιού» εξακολουθεί να παρουσιάζει τεράστια πρόκληση καθώς το υλικό πρέπει να ακολουθεί αντικρουόμενες απαιτήσεις, όπως : (α) θα πρέπει να αντλείται από μια δεξαμενή αποθήκευσης/παραγωγής προς την κεφαλή εκτύπωσης και στη συνέχεια να εξωθείται μέσα από ένα ακροφύσιο, (β) μετά την εναπόθεση, το υλικό δεν πρέπει να ρέει κάτω από το βάρος του, (γ) το τσιμεντοειδές υλικό θα πρέπει να προσκολλάται στις προηγούμενες εναποτιθέμενες στρώσεις, (δ) η κάθε στρώση υλικού θα πρέπει να είναι σε θέση να στηρίζει τις επακόλουθες ανώτερες στρώσεις, (ε) η επιφάνεια θα πρέπει να είναι ομοιόμορφη και το υλικό πρέπει να έχει μειωμένη συρρίκνωση για να αποφευχθούν τυχόν ρωγμές. Αυτό σημαίνει ότι οι βασικές ιδιότητες του υλικού σε πρώιμη κατάσταση, όπως η ρεολογία, η συρρίκνωση, η ταχύτητα πήξης και η αντοχή, πρέπει να βρίσκονται υπό πλήρη έλεγχο.

	Τίτλος Αναφορά προδιαγραφών τελικού κονιάματος	Αριθμός Παραδοτέου Π 2.1
		Έκδοση 1η

2 Τεχνικές προδιαγραφές κονιάματος 3D

Σε αυτή την αναφορά περιγράφονται οι τεχνικές προδιαγραφές και χαρακτηριστικές ιδιότητες που πρέπει να έχει το κονίαμα εκτύπωσης ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αποδοτική τρισδιάστατη εκτύπωση για συγκεκριμένο τύπο εκτυπωτή και συνθήκες εκτύπωσης αλλά και να συμβάλει σε μία ανθεκτική κατασκευή. Για το σκοπό αυτό πρέπει να εκτελεστούν μια μεγάλη σειρά εργαστηριακών δοκιμών για τον χαρακτηρισμό ενός ευρέως φάσματος ιδιοτήτων : από τις μηχανικές ιδιότητες, όπως αντοχές σε θλίψη, κάμψη, εφελκυσμό, μέτρο ελαστικότητας, πρόσφυσης, κλπ, έως και ιδιότητες φρέσκου κονιάματος όπως, ρεολογία, θιξοτροπία, ταχύτητα πήξης, πυκνότητα, αεροπεριεκτικότητα, κλπ. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι έχουν αναπτυχθεί εσωτερικές μέθοδοι από την Σίκα για την συνεχή παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο της εξέλιξης σημαντικών ιδιοτήτων των υλικών εκτύπωσης από την αρχική ανάμιξη τους μέχρι και μέρες μετά την εκτύπωση. Επιπλέον η μελέτη και περιγραφή ιδιοτήτων όπως η αντίσταση σε κύκλους ψύξης-απόψυξης, η αντίσταση σε ενανθράκωση, η τριχοειδής απορρόφηση, η πυκνότητα και αεροπεριεκτικότητα του κονιάματος εκτύπωσης είναι κρίσιμες για την διασφάλιση της ανθεκτικότητας της εκτυπωμένης κατασκευής. Η μελέτη και περιγραφή της κοκκομετρικής διαβάθμισης των αδρανών που χρησιμοποιούνται για το κονίαμα εκτύπωσης επιδρά στις μηχανικές ιδιότητες όπως αντοχές, συρρίκνωση, τάση εμφάνισης ελεύθερων ρωγμών αλλά επιδρά και στην αισθητική του εκτυπωμένου δοκιμίου. Οι ιδιότητες, ο χρόνος μέτρησης, οι τιμές τους και τα αντίστοιχα ευρωπαϊκά πρότυπα μετρήσεων για τον χαρακτηρισμό του κονιάματος 3D, συνοψίζονται στον ακόλουθο πίνακα.

Προδιαγραφή	Χρόνος	Τιμή	Πρότυπο
Αντοχή σε θλίψη	1 ημέρα	20-25 MPa	EN 12190
Αντοχή σε θλίψη	28 ημέρες	60-110 MPa	EN 12190
Αντοχή σε κάμψη	1 ημέρα	3-7 MPa	EN 196-1
Αντοχή σε κάμψη	28 ημέρες	8-12 MPa	EN 196-1
Μέτρο Ελαστικότητας E	28 ημέρες	20-40 GPa	EN 13412
Αντοχή σε πρόσφυση	28 ημέρες	> 1.5 MPa	EN1542
Αρχικός χρόνος πήξης		60-90min	EN 480-2
Τελικός χρόνος πήξης		150-210min	EN 480-2
Συρρίκνωση πρώιμη	1 ημέρα	Max 700μm/m	Μέθοδος Σίκα
Συρρίκνωση	28 ημέρες	Max 1200μm/m	EN 12617-4
Μέγιστος κόκκος αδρανούς		Max. 2mm	EN12192.01
Πυκνότητα φρέσκου	10 min	~2,2-2,3 kg/lt	EN1015-6
Αεροπεριεκτικότητα	10 min	3-6%	EN13395-1
Πυκνότητα	28 ημέρες	~ 2,0-2,1 kg/lt	EN 12190
Τριχοειδής απορρόφηση		Less than 0.5 kg.m ⁻² .h ^{-0.5}	EN13057
Αντίσταση σε ψύξη/απόψυξη		Εντός εύρους	EN 13687-1
Αντίσταση σε ενανθράκωση	3 μήνες	Μικρότερο από αναφορά	EN13295
Λειτουργικό σε καιρικές συνθήκες		10-30°C	
Χρώμα		Γκρί/Άλλα χρώματα	

	Τίτλος Αναφορά προδιαγραφών τελικού κονιάματος	Αριθμός Παραδοτέου Π 2.1
		Έκδοση 1η

Οι τυποποιημένες δοκιμές βάση ευρωπαϊκών προτύπων εξασφαλίζουν την ποιότητα του 3D κονιάματος αλλά δεν είναι αρκετές για την πλήρη ανάπτυξή του:

- Ο συνεχής έλεγχος της αντλησιμότητας (pumpability) και της θιξοτροπίας είναι απαραίτητα για την δυνατότητα ανέγερσης (buildability) του υπό εκτύπωση δοκιμίου
- Επίσης λόγω της ταχείας εξάτμισης του νερού του 3D κονιάματος κατά την διάρκεια της εκτύπωσης αλλά και στην πρώιμη ηλικία του εκτυπωμένου δοκιμίου, θα υπάρξει σημαντική συρρίκνωση ξηράνσεως (drying shrinkage) και γι αυτό είναι απαραίτητο να μετράται συνεχώς η συρρίκνωση από τα πρώτα στάδια εκτύπωσης του δοκιμίου.

Οι μη προτυποποιημένες δοκιμές που έχουν αναπτυχθεί από τη Sika, θα χρησιμοποιηθούν στα πλαίσια του παρόντος ερευνητικού προγράμματος για την μελέτη, παρακολούθηση των παραμέτρων αυτών που είναι κρίσιμες για τον σχεδιασμό και χαρακτηρισμό του κατάλληλου 3D κονιάματος που απαιτείται.

Προκειμένου να επιτευχθούν οι απαιτούμενες επιδόσεις του ζητούμενου 3D κονιάματος, ένας μεγάλος αριθμός από σύνθετες και δαπανηρές συνθέσεις θα δοκιμαστούν στο ερευνητικό κέντρο της Sika Hellas. Η εμπειρία τουλάχιστον 20 χρόνων πάνω στην ανάπτυξη τεχνικών κονιαμάτων υψηλών απαιτήσεων, θα επιτρέψει την ανάπτυξη ενός τέτοιου πολύπλοκου υλικού. Επιπλέον η Sika Hellas διαθέτει μία εξελιγμένη μονάδα βιομηχανικής παραγωγής, για την παραγωγή υψηλών προδιαγραφών και ποιότητας κονιαμάτων, η οποία θα είναι σε θέση να παράγει σε μεγάλη κλίμακα και τις απαιτούμενες από το έργο δοκιμαστικές παρτίδες 3D κονιάματος.

Τέλος, και για να μελετηθούν η αντλησιμότητα και η εκτυπωσιμότητα του 3D κονιάματος θα πρέπει να λάβουν χώρα ένας μεγάλος αριθμός διαφοροποιημένων τρισδιάστατων εκτυπώσεων. Για το σκοπό αυτό, η Sika Hellas θα δημιουργήσει ένα ειδικό εργαστήριο (3D), το οποίο θα είναι πλήρως αφιερωμένο στην ανάπτυξη και την εκτύπωση των υπό ανάπτυξη κονιαμάτων 3D. Σε αυτή την αναφορά γίνεται μια περιγραφή επίσης της νέας εργαστηριακής εγκατάστασης.

3 Πρώιμες ιδιότητες : Αντλησιμότητα και δυνατότητα ανέγερσης

Οι πρώιμες ιδιότητες των προς εκτύπωση υλικών είναι πρωταρχικές για την ομαλή και επιτυχής διαδικασία της τρισδιάστατης εκτύπωσης. Από αυτές, οι σημαντικότερες είναι οι ρεολογικές ιδιότητες, ο ρυθμός πήξης και οι πρώιμες αντοχές και η πρώιμη συρρίκνωση. Όλες αυτές οι ιδιότητες θα πρέπει να ελέγχονται συστηματικά ώστε να είναι δυνατή η εκτύπωση 3D υψηλής ποιότητας. Ο στοχευμένος σχεδιασμός του κονιάματος 3D αποτελεί μια κρίσιμη διαδικασία καθώς αντιφατικές απαιτήσεις πρέπει να πληρούνται ταυτόχρονα από αυτό, όπως:

(α) θα πρέπει να αντλείται από μια δεξαμενή προς την κεφαλή εκτύπωσης και στη συνέχεια να εξωθείται μέσω ενός ακροφυσίου; θα πρέπει λοιπόν να είναι αρκετά ρευστό αλλά δεν πρέπει να επιδεικνύει διαχωρισμό σωματιδίων, ούτε κατά την ροή του, ούτε μετά την εναπόθεσή του λόγω βαρύτητας,

(β) μόλις εναποτεθεί, το υλικό δεν θα πρέπει να ρέει πλέον με το βάρος του; Δηλαδή το κονίαμα θα πρέπει να είναι αρκετά ρευστό σε όλη τη διαδικασία μεταφοράς του μέσω αντλίας, σωληνώσεων,

	Τίτλος Αναφορά προδιαγραφών τελικού κονιάματος	Αριθμός Παραδοτέου Π 2.1
		Έκδοση 1η

κεφαλής εκτυπωτή και ακροφυσίου, αλλά θα πρέπει να ακυρώνεται η ρευστότητά του αμέσως μετά την εναπόθεσή του σε στρώσεις ,

(γ) το τσιμεντοειδές κονίαμα θα πρέπει να προσκολλάται στις προηγούμενες εναποτιθέμενες στρώσεις του και να δημιουργεί ισχυρούς δεσμούς συνοχής,

(δ) η κάθε στρώση κονιάματος θα πρέπει να είναι σε θέση να στηρίζει τις επακόλουθες ανώτερες στρώσεις, και τέλος

(ε) ο όγκος του εναποθέμενου κονιάματος πρέπει να διατηρείται σταθερός, δηλαδή να έχει την μικρότερη δυνατή συρρίκνωση. Δηλαδή παρά το γεγονός ότι όλα τα τσιμεντοειδή υλικά παρουσιάζουν συρρίκνωση λόγω των μηχανισμών υδάτωσης και εξάτμισης, το κονίαμα 3D θα πρέπει να παρουσιάζει πολύ μικρή συρρίκνωση και παρά το γεγονός ότι κονίαμα δεν καλουπώνεται και η τάση προς εξάτμιση είναι πολύ μεγαλύτερη

Όλες αυτές οι απαιτήσεις θεωρούνται σοβαρά ανταγωνιστές στην τεχνολογία των τσιμεντοειδών μιγμάτων. Η πρόκληση της τρισδιάστατης εκτύπωσης με τσιμεντοειδή προϊόντα έγκειται στην εντατική μελέτη και σχεδιασμό του τσιμεντοειδούς κονιάματος ώστε να συνδυαστούν όλες αυτές οι απαιτούμενες ιδιότητες.

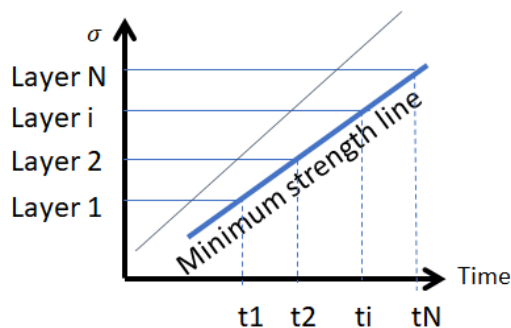
3.1 Ρεολογία: Θιξοτροπία και Αντλησιμότητα

Οι ρεολογικές ιδιότητες του κονιάματος που παρασκευάζεται με κοινό τσιμέντο τύπου Portland (OPC) ελέγχονται και ρυθμίζονται με τις νέες γενιάς υπερρευστοποιητές της Σίκα. Παράλληλα ένας σημαντικός αριθμός υψηλής τεχνολογίας χημικών προσθέτων όπως ρευστοποιητές, επιβραδυντές, θιξοτροπικοί παράγοντες και ειδικοί επιταχυντές που έχει αναπτύξει η Σίκα θα χρησιμοποιηθούν για το έλεγχο της θιξοτροπίας και της κινητικής υδάτωσης. Οι κατάλληλοι συνδυασμοί επιταχυντών που έχουν αναπτυχθεί για την πήξη «κατά παραγγελία» (setting on demand) σε συνδυασμό με τα ειδικά σχεδιασμένα προϊόντα οδηγούν στην σύνθεση ειδικών τσιμεντοκονιαμάτων ικανών για την ταχεία εναπόθεση επάλληλων στρώσεων καθ ύψος. Η σύνδεση μεταξύ των ρεολογικών ιδιοτήτων και της αντλησιμότητας έγινε εφικτή με ειδικά ρεόμετρα που ανέπτυξε η Σίκα. Κάθε σύνθεση κονιάματος έχει ένα ρεολογικό «δακτυλικό» αποτύπωμα. Αυτό χρησιμοποιείται για την ποσοτικοποίηση των ρεολογικών ιδιοτήτων που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της πίεσης ως συνάρτηση της ροής των υλικών για δεδομένο μήκος και διαμέτρου σωλήνα. Ως μια δεύτερη οπτική των ρεολογικών ιδιοτήτων αποτελεί η θιξοτροπία, η οποία είναι η εξέλιξη του ιξώδους ως συνάρτηση του χρόνου. Λόγω της αναδιάρθρωσης των σωματιδίων τσιμέντου και άλλων αδρανών σωματιδίων, αλλά και λόγω της καθίζησης των προϊόντων ενυδάτωσης του τσιμέντου στις επιφάνειές τους, η θιξοτροπία του κονιάματος εξελίσσεται με την πάροδο του χρόνου. Αυτό μπορεί να έχει δραματική επίδραση στην αντλησιμότητα, αλλά θα μπορούσε επίσης να χρησιμοποιηθεί για τον έλεγχο αυτής. Η ελάχιστη τάση που απαιτείται για να επιτύχουμε διαδοχικές στρώσεις εκτύπωσης μπορεί να προσομοιωθεί αλλά και επίσης να προσδιοριστεί σε μια πρώτη προσέγγιση με τον βασικό τύπο:

	Τίτλος Αναφορά προδιαγραφών τελικού κονιάματος	Αριθμός Παραδοτέου
		Π 2.1 Έκδοση 1η

$$\sigma = \rho gh$$

Όπου σ είναι η τάση σε Pa που προκύπτει από τη δύναμη που παράγεται από το βάρος του υλικού, η οποία ισοδυναμεί με την πυκνότητά του (ρ) πολλαπλασιασμένη με το ύψος (h) της εναποθήσας στρώσης του κονιάματος και την επιτάχυνση βαρύτητας g . Η τάση παραμόρφωσης του υλικού θα πρέπει να είναι βασικά μόνο υψηλότερη από την τάση που προκαλείται από το βάρος του. Κατά συνέπεια, δεν θα παρατηρηθεί παραμόρφωση του N τυπωμένου στρώματος ύψους h εάν η τάση παραμόρφωσης του κονιάματος είναι υψηλότερη από $N\rho gh$. Η εξέλιξη της τάσης παραμόρφωσης του 3D κονιάματος εξαρτάται στη συνέχεια από τον αριθμό των στρώσεων που τυπώνονται όπως φαίνεται στο γράφημα της εικόνας 3.1



Εικόνα 3.1 : Εξέλιξη της τάσης παραμόρφωσης ως συνάρτηση του χρόνου και των προς εκτύπωση στρώσεων

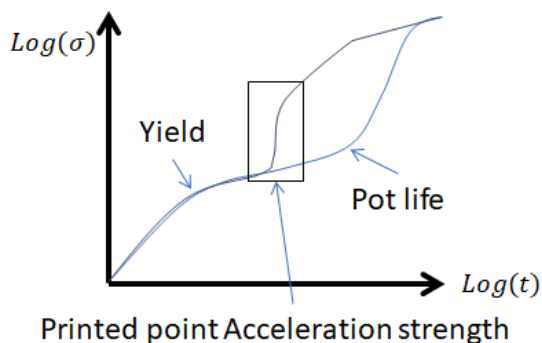
Ένα ύψος 10 cm θα απαιτούσε τάση παραμόρφωσης 2 kPa, που αντιστοιχεί σε μελάνι που είναι μετα δυσκολίας εκτυπώσιμο, και που αντιστοιχεί σε μηδενική κάθιση! Ενώ ένα ύψος 1m σημαίνει ότι μια τάση παραμόρφωσης 20kPa δεν είναι εφικτή χωρίς την πήξη του υλικού. Για το λόγο αυτό, οι περισσότερες εταιρείες που ασχολούνται με την εκτύπωση 3D κονιαμάτων εκτυπώνουν μόνο 10 εκατοστά ύψος κάθε φορά, περιμένοντας τη πήξη του υλικού πριν μπορέσουν να εκτυπώσουν περαιτέρω στρώματα. Τότε αναπτύχθηκε η αρχή της πήξης “on demand” , ώστε να είναι δυνατή η γρήγορη και συνεχής εκτύπωση.

3.2 Ρύθμιση πήξης: η αρχή της πήξης “on demand”

Καθώς η τάση παραμόρφωσης ενός απλού 3D κονιάματος δεν επαρκεί για να κρατήσει περισσότερο από ύψος 20 cm, η σκλήρυνσή του πρέπει να πραγματοποιείται μέσω της πήξης του συνδετικού του υλικού. Η πήξη του τσιμέντου είναι αποτέλεσμα της κατακρίμνησης των προϊόντων ενυδάτωσης πυριτικού ασβεστίου (CSH) τα οποία σχηματίζουν ένα ζελ που σκληραίνει με την πάροδο του χρόνου. Πιο συγκεκριμένα, σε ένα πρώτο στάδιο, η CSH κατακρημνίζεται μέχρι το σημείο όπου έχει συλληφθεί του τσιμεντομίγματος. Αυτή η δομή σκληραίνει με τον χρόνο, οδηγώντας στις τελικές μηχανικές ιδιότητες του τσιμέντου. Ο έλεγχος της επιφανειακής ενέργειας του ιζήματος, είτε με αλλαγή της ανόργανης σύνθεσής του είτε με την προσθήκη οργανικών προσθέτων, όπως πολυμερών, στην επιφάνειά τους, επιτρέπει τον έλεγχο τόσο της κινητικής της πήξης όσο και της ανάπτυξης αντοχών του τσιμέντου.

	Τίτλος Αναφορά προδιαγραφών τελικού κονιάματος	Αριθμός Παραδοτέου
		Π 2.1 Έκδοση 1η

Επιπλέον, η επίτευξη επαρκούς καμπτικής αντοχής του τσιμεντοπολτού απαιτεί την προσθήκη οπλισμού που κατά την διάρκεια της τρισδιάστατης εκτύπωσης δεν είναι εύκολο να συμπεριληφθεί. Η χρήση των ινών μαζί με τον προσεκτικά σχεδιασμό του εκτυπωμένου δοκιμίου μπορεί να συμβάλει στην βελτιωμένη αντοχή του. Ο έλεγχος της κινητικής ενυδάτωσης των διαφόρων συνδετικών υλικών που συνθέτουν το κονίαμα είναι αποτέλεσμα εξειδικευμένης έρευνας από έμπειρους επιστήμονες. Η ανάπτυξη της τεχνολογίας ρύθμισης πήξης “on demand” επιτρέπει ταυτόχρονα τον έλεγχο τόσο των ρεολογικών όσο και των μηχανικών ιδιοτήτων. Έχουν αναπτυχθεί πολλές καινοτόμες χημικές διεργασίες για να επιταχυνθεί η ενυδάτωση του συνδετικού υλικού είτε κατά τη διάρκεια ανάμιξης με νερό, δίνοντας ένα συγκεκριμένο χρόνο πριν από την έναρξη ενυδάτωσης και στη συνέχεια σκλήρυνσης είτε ν’ αλλάξει ο χρόνος πήξης στην κεφαλή εκτύπωσης και να δημιουργήσει σε λίγα δευτερόλεπτα την έναρξη της πήξης λίγο μετά την εκτύπωση του υλικού όπως φαίνεται στο γράφημα της εικόνας 3.2.



Εικόνα 3.2: Εξέλιξη της τάσης παραμόρφωσης ως συνάρτηση του χρόνου.

3.3 Συρρίκνωση

Η συρρίκνωση είναι μία από τις πιο σημαντικές παραμέτρους που πρέπει να ελέγχονται για την ανάπτυξη σκυροδέματος και κονιάματος. Τόσο η χημική όσο και η φυσική συρρίκνωση συμβαίνουν κατά τη διάρκεια πήξης των τσιμεντοειδών υλικών με αποτέλεσμα το σχηματισμό ρωγμών σε νεαρή ηλικία. Η συρρίκνωση μετράται με διάφορες μεθόδους και μεταξύ άλλων για τα επισκευαστικά κονιάματα σύμφωνα με το πρότυπο EN 12617-4. Όλα τα πρότυπα περιγράφουν την μέθοδο μετρώντας την μεταβολή διάστασης για ορισμένο χρονικό διάστημα ξεκινώντας μετά τις πρώτες 24 ώρες. Με αυτή την διαδικασία, ένα σημαντικό μέρος της πρώιμης συρρίκνωσης δεν καταγράφεται. Προκειμένου να μετρηθεί η εξέλιξη της συρρίκνωσης από την αρχή της διαδικασίας πήξης, η Sika ανέπτυξε μια ειδική μέθοδο δοκιμής που καλύπτει τον προσδιορισμό των μεταβολών μήκους που παράγονται από αιτίες διαφορετικές από εξωτερικά εφαρμοζόμενες δυνάμεις και μεταβολές θερμοκρασίας, σε τσιμεντοκονίαμα και σκυρόδεμα. Η μέθοδος εφαρμόζεται σε δείγματα που παρασκευάζονται στο εργαστήριο και μπορούν να εκτίθενται σε διαφορετικές αλλά ελεγχόμενες συνθήκες θερμοκρασίας και υγρασίας. Είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για τη συγκριτική αξιολόγηση μεταξύ των διαφορετικών συνταγών κονιαμάτων που προορίζονται για τρισδιάστατη εκτύπωση σε διαφορετικά υδραυλικά

	Τίτλος Αναφορά προδιαγραφών τελικού κονιάματος	Αριθμός Παραδοτέου
		Π 2.1 Έκδοση 1η

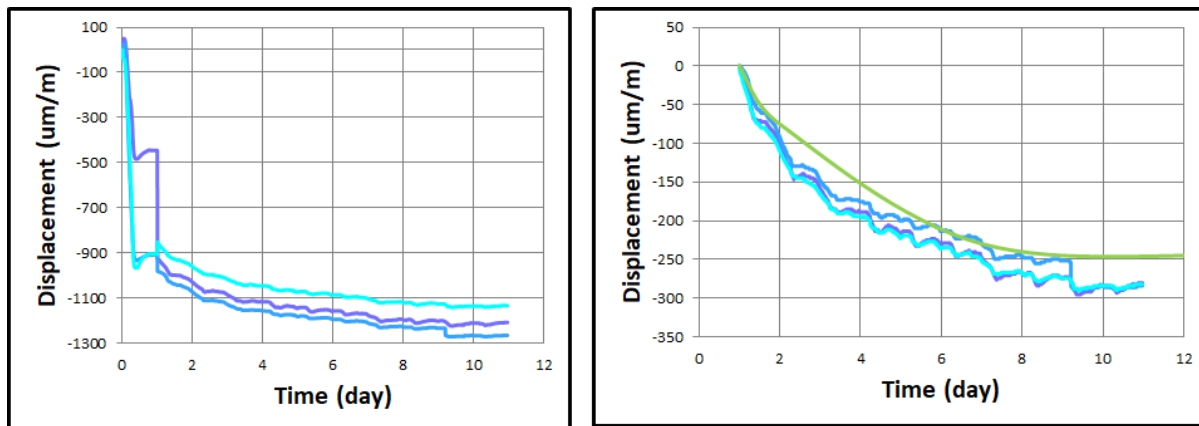
τσιμεντοκονιάματα ή μίγματα σκυροδέματος. Το δείγμα δοκιμής για κονίαμα πρέπει να είναι πρίσμα σταθερού μεγέθους 40 x 40 x 160 mm όπως φαίνεται στην εικόνα 3.3



Εικόνα 3.3 : Συσκευή μέτρησης πρώιμης συρρίκνωσης της Σίκα σε πρίσματα 40x40x160 cm.

Συγκριτικές δοκιμές μεταξύ της πρότυπης μεθόδου (EN 12617-4) και της μεθόδου Σίκα που επιδεικνύει τη συσχέτιση μεταξύ των δύο τεχνολογιών, φαίνεται στη δεξιά γράφημα της εικόνας 5. Εδώ φαίνεται ότι τόσο η αυτόματη εσωτερική μέθοδος Σίκα, όσο και η χειροκίνητη πρότυπη μέθοδος σε δοκίμια 40x40x160 καταγράφουν αντιστοιχη εξέλιξη συρρίκνωσης στις ίδιες συνθήκες όταν ξεκινά η μέτρηση 24 ώρες μετά την χύτευση. Στο αριστερό γράφημα φαίνεται η καταγραφή συρρίκνωσης επί των δειγμάτων ακριβώς μετά την χύτευση. Η μέθοδος της Σίκα επιτρέπει την ποσοτικοποίηση της εξέλιξης συρρίκνωσης τις πρώτες 24 ώρες. Όπως φαίνεται στο γράφημα, ένα μεγάλο μέρος της συρρίκνωσης συμβαίνει στις πρώτες 24 ώρες με αποτέλεσμα την εσωτερική καταπόνηση του κονιάματος που μπορεί να προκαλέσει την δημιουργία ρωγματώσεων στα πρώτα στάδια ωρίμανσής του. Όπως υπόθηκε ένα σημαντικό μέρος της συρρίκνωσης οφείλεται στην εξάτμιση του νερού. Στην περίπτωση της τρισδιάστασης εκτύπωσης, ένα πολύ μεγάλο μέρος της επιφάνειας του δοκιμίου που παρασκευάζεται εκτίθεται στις εξωτερικές συνθήκες με αποτέλεσμα το φαινόμενο εξάτμισης να είναι πολύ έντονο. Είναι λοιπόν καθοριστικής σημασίας η μελέτη της πρώιμης συρρίκνωσης των κονιαμάτων από τα πρώτα λεπτά της εκτύπωσής τους για την πρόβλεψη μεταβολής όγκου και την πιθανή τάση για δημιουργία ρωγμών.

	Τίτλος Αναφορά προδιαγραφών τελικού κονιάματος	Αριθμός Παραδοτέου
		Π 2.1 Έκδοση 1η



Σχήμα 3.4: Εξέλιξη της συρρίκνωσης ως συνάρτηση του χρόνου για ένα κονίαμα επιπέδωσης. Το δεξί γράφημα παρουσιάζει την εξέλιξη της συρρίκνωσης που μετράται ξεκινώντας μετά από την πρώτη μέρα όπου τα δοκίμια έχουν ήδη ωριμάσει σε κάποιο βαθμό; η πράσινη γραμμή αφορά την μέτρηση με την πρότυπη μέθοδο, ενώ οι άλλες κυανές γραμμές προκύπτουν από μετρήσεις που έγιναν με τη συσκευή Sika. Αριστερά, η μέτρηση άρχισε αμέσως μετά τη χύτευση με τη συσκευή πρώιμης συρρίκνωσης Sika.

4 Δοκιμές μηχανικών ιδιοτήτων και ανθεκτικότητας

Σύμφωνα με την τεχνογνωσία της Σίκα, το κονίαμα τρισδιάστατης εκτύπωσης, όσο αφορά τις μηχανικές ιδιότητες προσομοιάζεται με αυτές των υψηλής απόδοσης επισκευαστικών κονιαμάτων δομητικής ενίσχυσης. Τα επισκευαστικά αυτά κονιάματα ενσωματώνονται σε δομικές κατασκευές σκυροδέματος και αποτελούν μετά την ωρίμανσή τους αναπόσπαστο μέρος της δομητικής κατασκευής, δηλαδή είναι ικανά να φέρουν φορτία και να συμπεριφέρονται ακριβώς όπως και το σκυρόδεμα της εκάστοτε κατασκευής. Με βάση αυτό το συμπέρασμα το κονίαμα τρισδιάστατης εκτύπωσης μπορεί να θεωρηθεί ως ένα επισκευαστικό κονίαμα δομητικών κατασκευών. Ως εκ τούτου οι μηχανικές ιδιότητες που το χαρακτηρίζουν μπορούν να μετρηθούν με βάση τα σχετικά ευρωπαϊκά πρότυπα.

Οι βασικές μηχανικές ιδιότητες όπως αντοχή σε θλίψη, αντοχή σε κάμψη, μέτρο ελαστικότητας, συρρίκνωση και διόγκωση θα μελετηθούν σε χρόνους από μία έως και 28 ημέρες σε πρισματικά δοκίμια 40x40x160 που θα συντηρηθούν σε διαφορετικές αλλά σταθερές συνθήκες θερμοκρασίας και υγρασίας.

Το κονίαμα τρισδιάστατης εκτύπωσης που θ' αναπτυχθεί στα πλαίσια του παρόντος ερευνητικού προγράμματος αποσκοπεί στην κατασκευή κτιρίου που θα εκτίθεται σε πραγματικές περιβαλλοντικές συνθήκες. Γι αυτό το λόγο, εκτός από τις βασικές μηχανικές ιδιότητες το εκτυπωμένο 3D κονίαμα θα υποβληθεί σε μία σειρά από δοκιμές που θα χαρακτηρίσουν την ανθεκτικότητά του στο χρόνο σε πραγματικές περιβαλλοντικές συνθήκες. Οι δοκιμές αυτές συνιστούν σε μετρήσεις ανθεκτικότητας του ώριμου κονιάματος σε επαναλαμβανόμενους κύκλους ψύξης/απόψυξης, σε δοκιμές αντίστασης σε ενανθράκωση και σε δοκιμές αντίστασης σε φαινόμενα τριχοειδούς απορρόφησης. Μέρος των δοκιμών

	Τίτλος Αναφορά προδιαγραφών τελικού κονιάματος	Αριθμός Παραδοτέου Π 2.1
		Έκδοση 1η

ανθεκτικότητας αποτελούν και οι μετρήσεις πυκνότητας και αεροπεριεκτικότητας τα σταθερά αποτελέσματα των οποίων μπορούν να δώσουν ενδείξεις για την σταθερότητα των υπόλοιπων δοκιμών ανθεκτικότητας.

Τέλος εκτός από τις μηχανικές αντοχές και αντοχές ανθεκτικότητας θα πραγματοποιηθούν και σειρές δοκιμών μέτρησης πρόσφυσης που θα περιγράψουν την αντοχή συνοχής του κονιάματος μεταξύ των επάλληλων στρώσεων κατά την διάρκεια της εκτύπωσης όπως επίσης και την πρόσφυσή των σε σκυρόδεμα αναφοράς.

5 Εργαστήριο τρισδιάστατων (3D) εκτυπώσεων: Η κλιμάκωση της διαδικασίας εκτύπωσης.

Προκειμένου να πραγματοποιηθούν δοκιμές εκτυπωσιμότητας (printability) και δυνατότητας ανέγερσης (buildability) του 3D κονιάματος, απαιτούνται επιπλέον εργαστηριακοί εξοπλισμοί: (α) αντλία συνεχούς άντλησης και (β) μεγάλος εργαστηριακός 3D εκτυπωτής. Η εργαστηριακή εγκατάσταση πρέπει να προσομοιάζει ως ένα μεγάλο βαθμό τις πραγματικές συνθήκες εκτύπωσης με αντιπροσωπευτικές παραμέτρους εκτύπωσης. Η Sika Hellas θα εγκαταστήσει ένα εξειδικευμένο εργαστήριο τρισδιάστατων εκτυπώσεων (3D laboratory), προκειμένου να αναπτυχθούν, μελετηθούν και να χαρακτηριστούν σειρά από αντιπροσωπευτικά κονιάματα 3D εκτυπώσεων. Επιπλέον στόχος του εργαστηρίου είναι η επιτυχής κλιμάκωση της τρισδιάστατης εκτύπωσης από μικρά δοκίμια σε σταδιακά μεγαλύτερα δοκίμια ώστε να μελετηθούν οι παράμετροι που επιδρούν σε αυτή τη κλιμάκωση. Με αυτό τον τρόπο θ αναπτυχθεί η τεχνογνωσία της μετάβασης από εργαστηριακή σε πιλοτική και σταδιακά σε εκτύπωση πραγματικής κλίμακας.

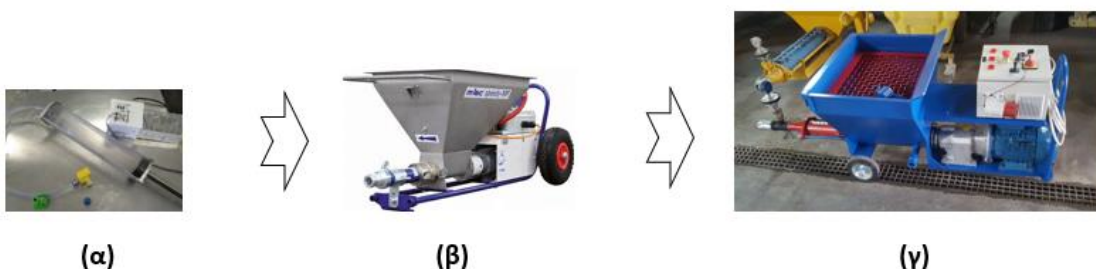
Η κλιμάκωση από το εργαστήριο στην εφαρμογή πεδίου είναι η επιτυχία της ανάπτυξης ψηφιακών δομικών υλικών. Σύμφωνα με τις προτάσεις του παρόντος ερευνητικού έργου θα διερευνηθεί η δυνατότητα ανάπτυξης κατάλληλου εκτυπωτή, ο σχεδιασμός ειδικού κονιάματος αλλά και ο σχεδιασμός κατάλληλης εγκατάστασης για την ανέγερση ενός σπιτιού 80-100 μ² σε χρόνους που μπορεί να εκτείνονται από 24 έως 72 ώρες. Δεδομένου ότι οι εργαστηριακές δοκιμές πρέπει να προσομοιάζουν τις συνθήκες πραγματικής εφαρμογής, απαιτείται η μελέτη διαφορετικών εγκαταστάσεων άντλησης και εκτύπωσης.

5.1 Συστήματα άντλησης

Δύο διαφορετικά συστήματα άντλησης σχεδιάζεται να εγκατασταθούν και μελετηθούν στο εργαστήριο 3D της Sika Hellas ενώ ένα τρίτο μεγαλύτερης κλίμακας θα μελετηθεί στα εργαστήρια της Σικα για να να

	Τίτλος Αναφορά προδιαγραφών τελικού κονιάματος	Αριθμός Παραδοτέου Π 2.1
		Έκδοση 1η

χρησιμοποιηθεί για τις εκτυπώσεις πιλοτικής κλίμακας στις εγκαταστάσεις του Εθνικού Μετσόβειου Πολυτεχνείου (τμήμα μηχανολόγων μηχανικών) (βλ. Εικόνα 5.1). Το σύστημα άντλησης/προώθησης πιστονιού της Sika, θα χρησιμοποιηθεί στα πρώτα στάδια δοκιμών εκτυπώσεων μικρής κλίμακας με χρήση 2-4 κιλών κονιάματος και ρυθμούς περίπου 0,1 lt/min (εικόνα 6α). Για μεγαλύτερους όγκους κονιάματος και ρυθμούς άντλησης η Σίκα θα επενδύσει στην εγκατάσταση της αντλίας Speedy MP (της Mtec). Η αντλία αυτή θα μας δώσει την δυνατότητα άντλησης μεγάλων ποσοτήτων 3D κονιάματος με ρυθμούς άντλησης από 0,5 μέχρι και 2-3 lt/min (εικόνα 6β) Στην συνέχεια θα μελετηθεί η κλιμάκωση άντλησης του υπό ανάπτυξη 3D κονιάματος με την αντλία Εκτοξευτή MM20, με ρυθμούς άντλησης που θα κοιμανθούν από 3-10 lt/min (εικόνα 6γ)



Εικόνα 6. α) αντλία πιστονιού σχεδιασμένη από την Σίκα με δυνατότητα άντλησης ~ 0,1 lt/min
 β) αντλία Speedy MP (mtec) με δυνατότητα άντλησης 0,5 έως 2-3 lt/min
 γ) αντλία Εκτοξευτής MM20 με δυνατότητα άντλησης > 3 lt/min
 για τη συνεχή άντληση του 3D κονιάματος

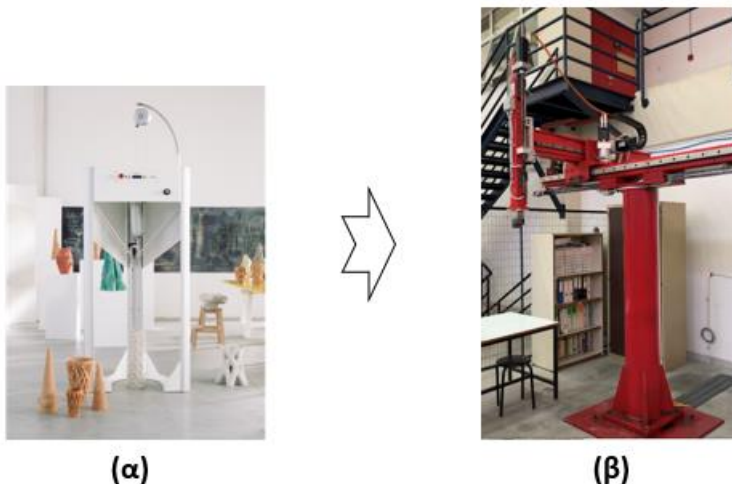
5.2 Συστήματα εκτύπωσης 3D

Διαφορετικά μεγέθη δοκιμών εκτύπωσης θα πρέπει να δοκιμαστούν σε εργαστηριακή κλίμακα για να μελετηθούν οι προαναφερθείσες και πολύ πρωταρχικής σημασίας ιδιότητες της εκτυπωσιμότητας και της δυνατότητας ανέργεσης του 3D κονιάματος. Η Sika Hellas θα επενδύσει στην εγκατάσταση τρισδιάστατου εμπορικού εκτυπωτή, τον WASP 40100 της DELTA (εικόνα 7). Παρά το γεγονός ότι ο εκτυπωτής έχει σχεδιαστεί για χρήση «μελανιού» με βάση τον πηλό, η Σίκα έχει την δυνατότητα να το τροποποιήσει για τις ανάγκες εκτύπωσης τσιμεντοειδούς κονιάματος. Ο εκτυπωτής διαθέτει όλες τις απαραίτητες τεχνολογίες κίνησης με βάση τα δεδομένα ανάλυσης G-Code των προς εκτύπωση δοκιμών. Μπορεί να εκτυπώσει δοκίμια με μέγιστες διαστάσεις 40 cm διαμέτρου και ύψους 100 cm και μπορεί να φτάσει ταχύτητες εκτύπωσης μέχρι 150 mm/s. μπορούμε να εκτυπώσουμε στοιχεία από σκυρόδεμα

	Τίτλος Αναφορά προδιαγραφών τελικού κονιάματος	Αριθμός Παραδοτέου Π 2.1
		Έκδοση 1η

μέχρι 50kg. Ο έλεγχος της ταχύτητας του εκτυπωτή μας επιτρέπει να ελέγχουμε τη ροή του 3D κονιάματος, προσομοιάζοντας τις παραμέτρους εκτύπωσης πραγματική εφαρμογής.

Η έρευνα θα συνεχιστεί και με τον 3D εκτυπωτή τύπου Gantry, στα εργαστήρια του ΕΜΠ. Εκεί θα εκτυπωθούν τα 3D κονιάματα που σχεδιάστηκαν στα εργαστήρια της Sika Hellas καθώς και οι μέθοδοι όπου αναπτύχθηκαν για την κλιμάκωση της διαδικασίας εκτύπωσης σε πιλοτική πλέον κλίμακα.



Εικόνα 5.1. (α) Εργαστηριακός εκτυπωτής 3D. Μέγεθος δοκιμών εκτύπωσης έως 40cm διάμ. x 100cm ύψος

(β) Εκτυπωτής 3D τύπου Gantry. Μέγεθος δοκιμών εκτύπωσης έως 2m x 0,6 x 1 m ύψος

	Τίτλος Αναφορά προδιαγραφών τελικού κονιάματος	Αριθμός Παραδοτέου Π 2.1
		Έκδοση 1η

6 Συμπεράσματα

Μια σειρά πρότυπων δοκιμών έχουν προσδιοριστεί ως κρίσιμες για την ανάπτυξη και τον χαρακτηρισμό του ανόργανου τρισδιάστατου «μελανιού» (3D κονίαμα). Ξεκινώντας από τον ρεολογικό χαρακτηρισμό που απαιτείται για να μελετηθούν η εκτύπωσιμότητα και η δυνατότητα ανέργερσης των υλικών, μέχρι και τις εκτεταμένες μηχανικές αντοχές που περιγράφουν το εκτυπωμένο πλέον υλικό. Τέλος μία εκτεταμένη σειρά μακροχρόνιων δοκιμών θα λάβει χώρα για να μελετηθεί η ανθεκτικότητα του σχεδιασμένου 3D κονιάματος. Για την μελέτη των υλικών εκτύπωσης στα πολύ πρώιμα στάδια παραγωγής και εκτύπωσης, η Σικα έχει αναπτύξει ειδικές μεθόδους δοκιμών που επιτρέπουν τις μετρήσεις σε πραγματικό χρόνο κρίσιμων παραμέτρων για την τρισδιάστατη εκτύπωση, όπως η πρώιμη συρρίκνωση και η εξέλιξη του ρυθμού πήξης και ανάπτυξης πρώιμων αντοχών. Η Sika Hellas θα επενδύσει στην εγκατάσταση ενός πλήρους εξοπλισμένου εργαστηρίου μελέτης και υλοποίησης τρισδιάστατων εκτυπώσεων με σκοπό την ανάπτυξη κατάλληλων 3D κονιαμάτων και τον σχεδιασμό μεθόδων εκτύπωσης για τις ανάγκες του παρόντος ερευνητικού προγράμματος 3BUILD.

Είναι πολύ σημαντικό να γνωρίζουμε ότι η υλοποίηση της μεγάλης κλίμακας 3D εκτυπώσεων δομικών υλικών είναι ένα πολυσύνθετο πεδίο που μπορεί να επιλυθεί μόνο από ειδικούς επιστήμονες. Γιατί απαιτείται ένας συνδυασμός από ευρεία γνώση όχι μόνο στη χημεία και φυσική των δομικών υλικών αλλά και σε διαφορετικών ειδών διαδικασίες (κατασκευής, παραγωγής υλικών, ανάμιξης, αντλησης, κλπ), προγραμματισμού, δομικού σχεδιασμού αλλά και μεθόδους κλιμάκωσης από το εργαστήριο στο πεδίο πραγματικών εφαρμογών. Τέλος με την εξέλιξη της ρομποτικής, είναι πλέον δυνατή η τρισδιάστατη εκτύπωση μεγάλων αντικειμένων με μεγάλη ταχύτητα και ακρίβεια ξεκινώντας πάντα από την μελέτη στο εργαστήριο.