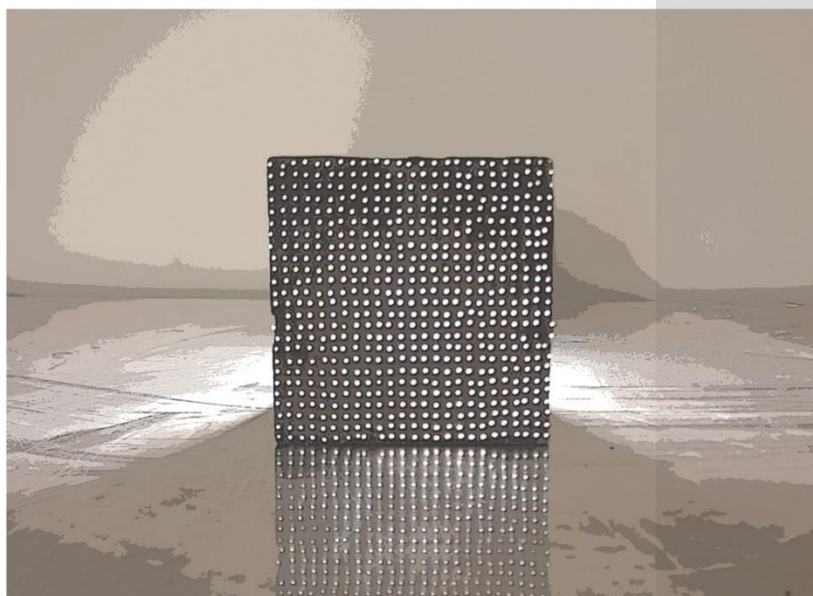


Ερευνητική εργασία :

« Εφαρμογές διάφανου σκυροδέματος
στην αειφορία των κατασκευών »



Τσιτσάνος Παναγιώτης Γρηγόριος

Επιβλέπων καθηγητής: Προβιδάκης Κωνσταντίνος

Πίνακας περιεχομένων

I. ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΟ ΜΕΡΟΣ	1
A. Εισαγωγή	1
B. Δομή εργασίας	1
Γ. Σκοπός εργασίας	2
Δ. Μέθοδος εργασίας	2
Ε. Ευχαριστίες	3
II. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ	4
A. Εισαγωγή	4
1) Γενικά	4
2) Έξυπνα υλικά	5
3) Διάφανο σκυρόδεμα	6
4) Βιβλιογραφική έρευνα	7
5) Ορολογίες	8
B. Ιστορικά στοιχεία	9
Γ. Υλικά	10
Δ. Κατασκευή	13
Ε. Λειτουργία	15
ΣΤ. Εφαρμογές	17
Ζ. Πλεονεκτήματα	22
Η. Μειονεκτήματα	23
Θ. Περιβαλλοντικός αντίκτυπος	24
Ι. Κοστολόγηση	25
III. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ	26
A. Εισαγωγή	26
1) Γενικά	26
2) Άξονες πειραματικής διαδικασίας	27
3) Υπόθεση	27
4) Πειραματική διαδικασία	27
B. Πρώτη φάση	29
1) Κατασκευή καλουπιού	29
2) Υλικά	30
3) Εξοπλισμός	35
4) Διαδικασία σκυροδέτησης πρώτης φάσης	36

5) Κριτήρια επιλογής σύστασης υλικών	38
6) Συστάσεις υλικών	39
7) Σύγκριση αποτελεσμάτων	43
Γ. Δεύτερη φάση	44
1) Πειραματική διαδικασία	44
2) Κατασκευή καλουπιού	44
3) Κατασκευή συσκότισης	46
4) Αναλογίες – Ποσοστά	47
5) Σχήμα τοποθέτησης του μέσου διάδοσης	48
6) Διαδικασία σκυροδέτησης δεύτερης φάσης	49
Δ. Μετρήσεις ιδιοτήτων	50
1) Μέτρηση φωτοδιαπερατότητα	51
2) Μέτρηση θλιπτικής αντοχής	53
Ε. Αποτελέσματα μετρήσεων και ερμηνεία αποτελεσμάτων	55
1) Αποτελέσματα μετρήσεων φωτοδιαπερατότητας	55
2) Αποτελέσματα μετρήσεων θλιπτικής αντοχής	60
ΣΤ. Συμπεράσματα	64
Ζ. Συνέχιση της έρευνας	68
IV. ΠΗΓΕΣ	70
Α. Βιβλιογραφική έρευνα θεωρητικού μέρους	70
1) Δημοσιευμένες διατριβές	70
2) Διαδικτυακές πηγές	71
3) Βιβλιογραφικές πηγές	71
Β. Βιβλιογραφική έρευνα πειραματικού μέρους	71
Γ. Πηγή εικόνων & φωτογραφιών	72
1) Πηγές εικόνων	72
2) Πηγές φωτογραφιών	74

Πρόλογος

Είναι αρκετά κοινότυπο στις σχολές αρχιτεκτονικής να ακούγονται εκφράσεις όπως: "όταν ήμουν μικρός ζωγράφιζα". Κάπως έτσι είναι και η δική μου περίπτωση. Από πολύ παλιά θυμάμαι να φτιάχνω κατασκευές με παλιές κούτες, χαρτόνια και άλλα υλικά. Καθώς μεγάλωνα εγώ, εξελίσσονταν και «οι κατασκευές» μου με αποτέλεσμα να μπω στην αρχιτεκτονική σχολή. Τι πιο κατάλληλο. Αλλά και μέσα στην σχολή αυτό που κατάλαβα σχετικά γρήγορα ήταν ότι είμαι της υλοποίησης και όχι της θεωρίας. Απολάμβανα περισσότερο μαθήματα με μακέτες και σχέδια σε σχέση με γραπτές εργασίες. Έτσι αποφάσισα, ολοκληρώνοντας την σχολή, να ασχοληθώ με κάτι σχετικό. Η ιδέα του διάφανου σκυροδέματος δεν ήταν δική μου αλλά του κ. Προβιδάκη στον οποίον και απευθύνθηκα. Η ιδέα γρήγορα εξελίχθηκε σε υπόθεση και πείραμα. Προέκυψαν δυσκολίες που αντιμετωπίστηκαν και αρκετές αποτυχίες που με απογοήτευσαν αλλά το τελικό αποτέλεσμα με ικανοποίησε απόλυτα. Και αυτό είναι που επιλέγω να κρατήσω τώρα που τόσο οι ευκολίες όσο και οι δυσκολίες που συνάντησα στο ταξίδι αυτό γίνανε όμορφες αναμνήσεις...

Περίληψη

Η παρούσα ερευνητική εργασία γίνεται στα πλαίσια των υποχρεώσεων για την απόκτηση πτυχίου από την Σχολή Αρχιτεκτόνων Μηχανικών του Πολυτεχνείου Κρήτης. Αφορά την μελέτη και την κατασκευή διάφανου σκυροδέματος. Διαρθρώνεται σε εισαγωγή και δύο κύρια μέρη.

Στην εισαγωγή περιγράφονται τα στοιχεία που δομούν την εργασία, για ποιον λόγο πραγματοποιείται η έρευνα, τα επιδιωκόμενα αποτελέσματα και η μέθοδος που ακολουθήθηκε.

Στο θεωρητικό μέρος γίνεται μια συγκεντρωτική παράθεση των τεκμηρίων που ερευνήθηκαν. Αναλυτικότερα, αναφέρονται σύντομα ιστορικά στοιχεία, τα υλικά και ο τρόπος κατασκευής, η λειτουργία και οι εφαρμογές του νέου υλικού, πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα καθώς και ο περιβαλλοντικός αντίκτυπος. Τέλος παρατίθενται στοιχεία για το κόστος του διάφανου σκυροδέματος τα οποία προέκυψαν από την βιβλιογραφική έρευνα.

Στο πειραματικό μέρος, γίνεται περιγραφή της διαδικασίας η οποία πραγματοποιήθηκε. Το πείραμα αφορούσε στην κατασκευή στοιχείων διάφανου σκυροδέματος και στην προσπάθεια αντικατάστασης του μέσου διάδοσης φωτός (οπτική ίνα) με οικονομικότερο μέσο (ράβδους σιλικόνης). Πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις και διεξήχθησαν τα ανάλογα συμπεράσματα. Στο τέλος του μέρους αυτού προτείνονται θεματικές για πιθανή συνέχιση της έρευνας.

I. ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

A. Εισαγωγή

Αρχιτεκτονική υπάρχει παντού γύρω μας. Το ίδιο και κατασκευές. Η οικουμενικότητα της τέχνης αυτής και το γεγονός ότι συναντάται παντού όπου υπάρχει ο άνθρωπος την καθιστά προσαρμόσιμη σε οποιαδήποτε πτυχή της ανθρώπινης ζωής και κοινωνίας. Σε κάθε κλίμακα, από τον σχεδιασμό ενός επίπλου μέχρι τον σχεδιασμό και την οργάνωση μιας πόλης και σε κάθε τομέα από τον τεχνικό μέχρι τον καλλιτεχνικό, η αρχιτεκτονική μπορεί να δώσει απαντήσεις σε πολλά ζητήματα. Πρακτικό και υλοποιήσιμο, το τεχνικό μέρος κρίνεται από πολλούς ως το σημαντικότερο. Υπακούει στους κανόνες της πραγματικότητας και είναι κάτι απτό και ορατό. Περνά από την θεωρία στην πράξη και από το σχέδιο στην κατασκευή, προσφέροντας ασύγκριτη ικανοποίηση στον δημιουργό αλλά και χειροπιαστά αποτελέσματα στον χρήστη.

Ο τεχνικός τομέας στην αρχιτεκτονική μπορεί να χωριστεί με την σειρά του σε επιμέρους αντικείμενα. Στους κανόνες σχεδιασμού και διαστασιολόγησης, στον τρόπο κατασκευής, στα κατάλληλα κάθε φορά υλικά ανάλογα με τις ιδιότητες τους, στην σωστή συντήρηση κ.ο.κ.

Στην παρούσα ερευνητική εργασία επιλέχτηκε η μελέτη ενός νέου υλικού στον τομέα των κατασκευών. Συγκεκριμένα, η παρούσα εργασία μελετά το διάφανο σκυρόδεμα. Ο αναγνώστης θα έρθει σε επαφή με το καινοτόμο υλικό μέσω της βιβλιογραφικής προσέγγισης που γίνεται και στην συνέχεια θα παρακολουθήσει αναλυτικά την πειραματική διαδικασία που πραγματοποιήθηκε (υπόθεση – πείραμα - αποτελέσματα πειράματος - συμπεράσματα).

B. Δομή εργασίας

Η παρούσα ερευνητική εργασία οργανώνεται σε δύο μέρη. Αρχικά γίνεται μια θεωρητική προσέγγιση του θέματος στην οποία παρουσιάζεται το διάφανο σκυρόδεμα. Η ιστορία του, τα υλικά που το συνθέτουν και η μέθοδος παραγωγής που απαιτούνται αλλά και εφαρμογές. Στο τέλος του πρώτου μέρους θα γίνει αναφορά στα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα του καθώς και στο κόστος σύμφωνα με την βιβλιογραφία. Στο δεύτερο μέρος καταγράφεται αναλυτικά η πειραματική διαδικασία. Αναφέρονται όλα τα στάδια από την κατασκευή καλουπιών μέχρι την διαδικασία μέτρησης των ιδιοτήτων. Ακολουθούν τα αποτελέσματα που προέκυψαν και τα συμπεράσματα που

διεξήχθησαν. Τέλος προτείνονται κατευθύνσεις – θεματικές στις οποίες θα μπορούσε να συνεχιστεί η έρευνα.

Γ. Σκοπός εργασίας

Η εργασία κινείται σε δύο άξονες. Σχετικά με τον θεωρητικό, αποσκοπεί στην εξοικείωση του αναγνώστη με το νέο υλικό και στην πρόκληση του ενδιαφέροντος του για περαιτέρω ενασχόληση και έρευνα. Ακόμη, το πρώτο μέρος της εργασίας θα μπορούσε να λειτουργήσει σαν σύντομος και συγκεντρωτικός κατάλογος της κεκτημένης τεχνογνωσίας πάνω στο νέο υλικό που έχει δημοσιευτεί μέχρι στιγμής.

Στο δεύτερο μέρος της εργασίας οργανώνεται πείραμα με σκοπό αφενός την δημιουργία στοιχείων διάφανου σκυροδέματος και αφετέρου την διερεύνηση πιθανών εναλλακτικών υλικών, παρόμοιων ιδιοτήτων, με σημαντικά μικρότερο κόστος από το ήδη χρησιμοποιούμενο ως μέσο διάδοσης του φωτός (ράβδοι σιλικόνης έναντι οπτικής ίνας που χρησιμοποιείται κατά κύριο λόγο).

Δ. Μέθοδος εργασίας

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, στο πρώτο μέρος γίνεται θεωρητική προσέγγιση του θέματος για την καλύτερη κατανόηση του νέου υλικού. Έχοντας ξεκινήσει σαν ιδέα το 2001, δεν έχουν μελετηθεί πλήρως η συμπεριφορά και οι ιδιότητες του. Με την βιβλιογραφική έρευνα, γίνεται προσπάθεια συμπύκνωσης της μέχρι στιγμής, κεκτημένης τεχνογνωσίας γύρω από το υλικό αφενός για την αρτιότερη μορφή της ερευνητικής εργασίας και αφετέρου για την αλίευση χρήσιμων στοιχείων στην ακόλουθη διεξαγωγή του πειράματος.

Στο δεύτερο μέρος (πειραματική διαδικασία) τέθηκαν πρακτικοί στόχοι όπως θα αναφερθεί αναλυτικά σε επόμενη ενότητα. Περιληπτικά, πραγματοποιήθηκαν δοκιμές για την διασφάλιση καταλληλότερης σύστασης υλικών του μείγματος, κατασκευή δοκιμών διάφανου σκυροδέματος και δοκιμή αντικατάστασης της οπτικής ίνας με οικονομικότερο μέσο διάδοσης φωτός. Από τα αποτελέσματα των δοκιμών αυτών διεξήχθησαν τα ανάλογα συμπεράσματα για τον τρόπο κατασκευής και συμπεριφοράς του διάφανου σκυροδέματος.

Ε. Ευχαριστίες

Λόγω της πρακτικής εφαρμογής που είχε το θέμα της εργασίας, προέκυψαν ζητήματα τα οποία επιλύθηκαν χάρη στην βοήθεια ορισμένων ατόμων. Τα ζητήματα αφορούσαν την συστηματική βιβλιογραφική έρευνα, την χρήση εργαστηριακού εξοπλισμού, και την αναζήτηση υλικών και τεχνικών καταλλήλων για την κάθε περίπτωση.

Η εργασία αυτή δεν θα μπορούσε να είχε υλοποιηθεί άρτια χωρίς την συνεισφορά των παρακάτω, για αυτό και τους οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ!

Αναλυτικά, ευχαριστώ:

τον κ. Δουλαβεράκη Χαράλαμπο στο Εργαστήριο Αρχιτεκτονικών Προπλασμάτων και Τεχνολογικών Εφαρμογών με επιστημονικό υπεύθυνο τον κ. Βαζάκα Αλέξανδρο, για την βοήθεια του στον χειρισμό των κατάλληλων μηχανημάτων αλλά και για την ανοχή του στην φάση κατασκευής των καλουπιών.

τον κ. Μαυριγιαννάκη Στέλιο στο Εργαστήριο Μηχανικής Πετρωμάτων με Διευθυντή Εργαστηρίου τον κ. Γαλετάκη Μ., για την κοπή των δοκιμίων τόσο κατά την διάρκεια του πειράματος όσο και κατά την προετοιμασία των τεκμηρίων της παρουσίασης της εργασίας.

την οικογένεια αλλά και αρκετούς από τους συμφοιτητές μου στους οποίους απευθύνθηκα για βοήθεια στην αναζήτηση υλικών αλλά και κατασκευαστικών οδηγιών.

Και τέλος, ιδιαίτερα ευχαριστώ τον κ. Προβιδάκη Κωνσταντίνο που από την πρώτη στιγμή μέχρι και την παρουσίαση της εργασίας, η βοήθεια του ήταν καθοριστική, τόσο ακαδημαϊκά όσο και ανθρώπινα. Η καθοδήγηση, οι συμβουλές, οι επισημάνσεις και οι παροχές που εξασφάλισε αποτελούν τον κορμό της εργασίας, ενώ ο ενθουσιασμός, και πολλές φορές η ψυχολογική στήριξη που παρείχε αποτελούν την ψυχή της.

II. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

A. Εισαγωγή ^{[1],[2],[3],[4]}

1) Γενικά

Στο πρώτο μέρος της εργασίας, γίνεται μια σύντομη θεωρητική προσέγγιση γύρω από το διάφανο σκυρόδεμα, η οποία κρίνεται απαραίτητη για την πληρέστερη συγκρότηση της, αλλά και για την εξοικείωση του αναγνώστη με το νέο αυτό υλικό.



Εικόνα 1 | Δάπεδο κατασκευασμένο από πλάκες διάφανου σκυροδέματος. Κάτω από την επιφάνεια βρίσκεται η φωτεινή πηγή όπου δημιουργεί το αποτέλεσμα αυτό.

^[1] Patil Gaurao S., Patil Swapnal V., (2015), «*Light Transmitting Concrete- A New Innovation*», (δημοσιευμένη διατριβή), Imperial college of Engineering, Pune, India, σελίδα 1

^[2] M.N.V. Padma Bhushan, D. Johnson, Md. Afzal Basheer Pasha & Ms. K. Prasanthi, (2013), «*Optical Fibres in the Modeling of Translucent Concrete Blocks*», (δημοσιευμένη διατριβή), International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA), σελίδα 1

^[3] Bhavin K. Kashiyani, Varsha Raina, Jayeshkumar Pitroda, Dr. Bhavnaben K. Shah, (2013), «*A Study on Transparent Concrete: A Novel Architectural Material to Explore Construction Sector*», (δημοσιευμένη διατριβή), International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT), σελίδες 1-2

^[4] Goyal, A. και Patel, J., (2018), «*Smart Materials in Construction Technology*», International Conference on Smart City and Emerging Technology (ICSCET), Mumbai, India, 5 January 2018. pp. 1-9. Διαθέσιμο στο: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8537256>, [Πρόσβαση στις 10 Ιουλίου 2022], σελίδες 1-2 και 7

Ο τομέας των κατασκευών και του δομημένου χώρου καταλαμβάνει ολοένα και μεγαλύτερο χώρο στο περιβάλλον - ολοένα και μεγαλύτερη θέση στην ανθρώπινη κοινωνία. Ο άνθρωπος πλέον περνάει μεγάλο μέρος της ζωής του σε εσωτερικούς χώρους, με αποτέλεσμα μικρές και μεγάλες αλλαγές τόσο στην κοινωνία όσο και στον τρόπο ζωής του. Με διαδοχικές εξελίξεις, ο άνθρωπος έχει οδηγηθεί μπροστά σε μια περιβαλλοντική κρίση η οποία και απαιτεί άμεσες ενέργειες προς αποφυγή καταστροφικών και μη αναστρέψιμων καταστάσεων. Οι απαντήσεις πρέπει να είναι από το σύνολο της κοινωνίας ιδιαίτερα δε από τους επιβαρυντικότερους τομείς, όπως αυτός των κατασκευών. Μεταξύ αρκετών κατευθύνσεων που μελετώνται (φυσική δόμηση, ανακύκλωση υλικών, νέα μοντέλα κατοίκησης κ.α.) μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα έξυπνα υλικά.

2) Έξυπνα υλικά

Με τον όρο «έξυπνα υλικά» αναφερόμαστε στα υλικά εκείνα που έχουν την ικανότητα να ανταποκρίνονται σε ερεθίσματα και αλλαγές στην κατάσταση τους με επαναλαμβανόμενο τρόπο. Τέτοια ερεθίσματα μπορεί να είναι η διαφορά θερμοκρασίας, η πίεση, η υγρασία, η έκθεση στο φως, μηχανικές καταπονήσεις κ.α.



Εικόνα 2 | Αεροπήκτωμα (aerogel), έξυπνο υλικό με μικρή θερμική αγωγιμότητα.

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα της χρήσης έξυπνων υλικών είναι η μεγαλύτερη διάρκεια ζωής του έργου, η αποδοτικότερη λειτουργία της κατασκευής συνεπαγόμενη μικρότερο κόστος σε πόρους και η ανθεκτικότητα σε ακραίες

περιβαλλοντικές συνθήκες. Κυρίαρχο πλεονέκτημα των έξυπνων υλικών είναι η δυνατότητα για δομικό έλεγχο, εύκολη διάγνωση και αυτοθεραπεία από το ίδιο το στοιχείο.

Με κύριο γνώμονα την ομαλή συνύπαρξη λειτουργικότητας και αισθητικής στις κατασκευές κρίνεται απαραίτητη η δημιουργία υλικών που να συνδυάζουν κριτήρια ασφαλείας του κτιρίου, εξοικονόμηση ενέργειας και αισθητικής. Ένα από τα υλικά αυτά αποτελεί και το διάφανο σκυρόδεμα.



Εικόνα 3 | Τοίχος κατασκευασμένος από διάφανο σκυρόδεμα. Όπως φαίνεται, στοιχεία του εξωτερικού περιβάλλοντος αποτυπώνονται στο κέλυφος του κτιρίου με την χρήση φωτός και σκιάς.

3) Διάφανο σκυρόδεμα

Με την κύρια λειτουργία του (μειώνοντας τις απαιτήσεις για τεχνητό φωτισμό), το διάφανο σκυρόδεμα εξοικονομεί μεγάλα ποσά ενέργειας και πόρων στις κατασκευές προσφέροντας παράλληλα την δυνατότητα για ένα αρκετά ενδιαφέρον αισθητικό αποτέλεσμα.

Συνδυάζοντας την μεγάλη θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος με την ιδιότητα της οπτικής ίνας να μεταφέρει φως από το ένα της άκρο στο άλλο, το νέο αυτό υλικό βρίσκει ολοένα και περισσότερες εφαρμογές στις ανθρώπινες κατασκευές. Από υλικό πλήρωσης εξωτερικών τοίχων μέχρι διακοσμητικά αντικείμενα, οι δυνατότητες του διευρύνονται καθώς μελετώνται οι ιδιότητες του από μηχανικούς ανά τον κόσμο.



Εικόνα 4 | Τοιχοποιία από διάφανο σκυρόδεμα. Το νέο υλικό δίνει στους σχεδιαστές την δυνατότητα δημιουργίας εντυπωσιακών στοιχείων στις κατασκευές.



Εικόνα 5 | Φωτιστικό – διακοσμητικό από διάφανο σκυρόδεμα. Ενδιαφέροντα αποτελέσματα τόσο στην μεγάλη όσο και στην μικρή κλίμακα.

4) Βιβλιογραφική έρευνα

Το θεωρητικό μέρος στηρίχτηκε σε βιβλιογραφική έρευνα κυρίως μέσω επιστημονικών αναφορών αναρτημένων στο διαδίκτυο, οι οποίες έκαναν μια γενικότερη παρουσίαση του διάφανου σκυροδέματος. Παρά το πλήθος των αναφορών αυτών, έγινε σύντομα αντιληπτό ότι επαναλαμβάνονταν οι ίδιες πληροφορίες με μικρές διαφοροποιήσεις από πηγή σε πηγή. Εξαίρεση αποτελούσαν εργαστηριακές αναφορές και τεχνικές εκθέσεις οι οποίες ασχολούνταν κυρίως με την μέθοδο κατασκευής διάφανου σκυροδέματος και τις ιδιότητες του. Όσο αφορά τις πρώτες, επιλέχτηκαν οι αρτιότερες αυτών και αφού μελετήθηκαν παρουσιάζονται στην ενότητα αυτή. Αντίστοιχα οι τεχνικές

εκθέσεις αποτέλεσαν την βάση πάνω στην οποία στήθηκε το πειραματικό μέρος της εργασίας.

5) Ορολογίες

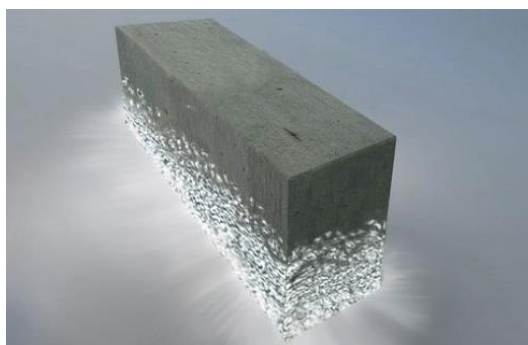
Για την καλύτερη κατανόηση του θεωρητικού μέρους της εργασίας αναλύονται παρακάτω δύο όροι που χρησιμοποιούνται ευρέως στο κείμενο και κρίνεται απαραίτητη η επεξήγηση – διευκρίνιση τους.

Διάφανο σκυρόδεμα | Στην διεθνή βιβλιογραφία αναφέρεται ως transparent concrete, translucent concrete και light-transmitting concrete. Η πιο συνηθισμένη ελληνική εκδοχή είναι «Διάφανο Σκυρόδεμα». Με βάση την λειτουργία του, σωστότερη (και κυριολεκτική) μετάφραση κρίνεται το «Φωτοδιαπερατό Σκυρόδεμα». Παρόλα αυτά στην παρούσα εργασία επιλέγεται η ονομασία «Διάφανο Σκυρόδεμα» αφενός λόγω της εκτεταμένης χρήσης και αφετέρου λόγω της ψευδαίσθησης που προσφέρει.



Εικόνα 6 | Τοιχοποιία από διάφανο σκυρόδεμα. Μπορούν να διακριθούν τα επί μέρους τμήματα (πλάκες διάφανου σκυροδέματος) ως μοναδικά δομικά στοιχεία που στο σύνολο τους αποτελούν τον φωτοδιαπερατό τοίχο.

Φωτοδιαπερατότητα | Η ιδιότητα υλικού (στην συγκεκριμένη περίπτωση της οπτικής ίνας) να διαπερνιέται από το φως. Από σύντομη έρευνα διαπιστώθηκε ότι ο όρος -παρότι μη οικείος- υφίσταται με τον παραπάνω ορισμό.



Εικόνα 7 | Διακοσμητικό στοιχείο από διάφανο σκυρόδεμα με ενσωματωμένη την φωτεινή πηγή. Το φως διαπερνώντας την οπτική ίνα φωτίζει τον χώρο γύρω του.

B. Ιστορικά στοιχεία ^[5]

Η ιστορία του διάφανου σκυροδέματος δεν μας μεταφέρει πολλά χρόνια πίσω. Συγκεκριμένα, δύο δεκαετίες πριν, το 2001, ο Ούγγρος Αρχιτέκτονας Aron Losonczy είχε την ιδέα να κατασκευάσει ένα δοκίμιο διάφανου σκυροδέματος ενσωματώνοντας οπτικές ίνες σε κοινό σκυρόδεμα. Ονόμασε την κατασκευή LiTraCon και την κατοχύρωσε ως ευρεσιτεχνία. Το δοκίμιο αποτελούνταν από 95% σκυρόδεμα και 5% οπτική ίνα. Έκτοτε το διάφανο σκυρόδεμα έχει εξελιχθεί από αρκετούς μηχανικούς. Πλέον, μελετάται και κατασκευάζεται σε διάφορες μορφές καταλαμβάνοντας όλο και πιο ενεργό ρόλο στον τομέα των κατασκευών.



Εικόνα 8 | Ο εμπνευστής του διάφανου σκυροδέματος, Aron Losonczy, είχε την ιδέα το 2001, η οποία και κατέληξε στο LiTraCon.

^[5] Bhavin K. Kashiyani, Varsha Raina, Jayeshkumar Pitroda, Dr. Bhavnaben K. Shah, (2013), ο.π., σελίδα 1

Γ. Υλικά ^{[6],[7],[8],[9],[10],[11]}

Η σύσταση του διάφανο σκυροδέματος είναι ίδια με του συμβατικού (τσιμέντο – νερό - αδρανή), μόνο που επιπλέον προστίθεται κάποιο μέσο διάδοσης του φωτός (συνήθως οπτικές ίνες). Και στις δύο περιπτώσεις μπορούν να προστεθούν πρόσμικτα επηρεάζοντας τις ιδιότητες του μίγματος (π.χ. ρευστοποιητές).

Οπτικές ίνες | Το υλικό που δίνει στο διάφανο σκυρόδεμα την χαρακτηριστική του ιδιότητα είναι η οπτική ίνα. Υπάρχουν διάφορα υλικά που μπορούν να δράσουν ως μέσω μεταφοράς φωτός αλλά η οπτική ίνα έχει τις λιγότερες απώλειες και για αυτό χρησιμοποιείται εκτεταμένα. Κατασκευασμένη από γυαλί ή πλαστικό, οι πιο συνηθισμένες διατομές που χρησιμοποιούνται κυμαίνονται από 4mm έως και 4μm και τοποθετούνται στο καλούπι σε αποστάσεις 2 έως 5mm. Λόγω του μικρού της μεγέθους η κάθε ίνα ενσωματώνεται στον τσιμεντοπολτό και λειτουργεί ως αδρανές.



Εικόνα 9 | Το φως διαπερνά την οπτική ίνα και φτάνει στο άλλο της άκρο σχεδόν αναλλοίωτο.

^[6] Bhavin K. Kashiyani, Varsha Raina, Jayeshkumar Pitroda, Dr. Bhavnaben K. Shah, (2013), ο.π., σελίδα 2

^[7] Akshaya B Kamdi, (2013), «Transparent concrete as a green material for building», (δημοσιευμένη διατριβή), International Journal of Structural and Civil Engineering Research, σελίδες 1-2

^[8] Patil Gaurao S., Patil Swapnal V., (2015), ο.π., σελίδες 2-3

^[9] M.N.V. Padma Bhushan, D. Johnson, Md. Afzal Basheer Pasha & Ms. K. Prasanthi, (2013), ο.π., σελίδα 3

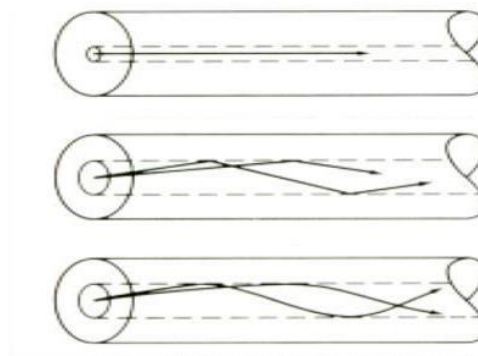
^[10] Χουλιάρας, Ι.Γ., (2003), «Κατασκευές οπλισμένου σκυροδέματος», Αθήνα, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, σελίδες 11 - 18

^[11] Τριανταφύλλου, Α., (2017), «Δομικά υλικά», Πάτρα, Εκδόσεις Gotsis σελίδα 71



Εικόνα 10 | Οι οπτικές ίνες αποτελούν από μόνες τους ένα εντυπωσιακό υλικό με πληθώρα τεχνικών και καλλιτεχνικών εφαρμογών.

Η λειτουργία της οπτικής ίνας είναι απλή. Το φως εισέρχεται από την μία πλευρά και μέσω συνεχών προσκρούσεων – ανακλάσεων στα τοιχώματα της καταλήγει στο άλλο άκρο. Το φαινόμενο ονομάζεται ολική ανάκλαση και έχει ελάχιστες διακυμάνσεις ανάλογα με την διεύθυνση που το φως εισέρχεται στην ίνα.



Εικόνα 11 | Διάγραμμα του τρόπου με τον οποίο το φως διαπερνά την κάθε οπτική ίνα ανάλογα με το είδος της. Το φως μεταφέρεται μέσω διαδοχικών ανακλάσεων παράλληλα ή υπό γωνία σε σχέση με τον άξονα της ίνας.

Υπάρχουν διάφορα είδη οπτικής ίνας με διαφορετικές ιδιότητες αλλά δεν κρίνεται σκόπιμο να αναλυθούν στην παρούσα εργασία.

Τσιμεντοπολτός | Για την συγκόλληση των υλικών σε ομογενοποιημένο μείγμα απαιτείται ο τσιμεντοπολτός όπως και στο συμβατικό σκυρόδεμα. Νερό αναμειγνύεται με τσιμέντο στην κατάλληλη αναλογία για να επιτευχθεί η

επιθυμητή αντοχή. Κυκλοφορούν διάφορες κατηγορίες τσιμέντου προσδίδοντας και τις ανάλογες ιδιότητες στο τελικό αποτέλεσμα.



Εικόνα 12| Μείγμα τσιμεντοπολτού αποτελούμενο από νερό και τσιμέντο στην κατάλληλη κάθε φορά αναλογία.

Αδρανή| Εξαιτίας της λεπτής διατομής των οπτικών ινών και του μεγάλου πλήθους ανά μονάδα επιφάνεια, αφήνεται ελάχιστο κενό για την ροή του τσιμεντοπολτού. Για τον λόγο αυτό, χρησιμοποιείται λεπτόκοκκο αδρανές (άμμος). Η χρήση χοντρόκοκκου αδρανούς εκτός του ότι καθιστά την διαδικασία της σκυροδέτησης εξαιρετικά δύσκολη έως και αδύνατη, ενέχει τον κίνδυνο καταστροφής των οπτικών ινών (σε περίπτωση αποκοπής ή τσάκισης η ίνα χάνει την ικανότητα της να διαπερνιέται από το φως). Τόσο σχετικά με το διάφανο σκυρόδεμα όσο και με το συμβατικό, στην πορεία προς πιο βιώσιμες κατασκευές η ποταμίσια άμμος τείνει να αντικατασταθεί από βιομηχανοποιημένη και γενικότερα άλλης μορφής αδρανή.



Εικόνα 13| Λεπτόκοκκο αδρανές, συνήθως κοσκινίζεται για να διαχωριστούν οι επιμέρους κοκκομετρίες.

Πρόσθετα | Τόσο στο συμβατικό σκυρόδεμα όσο και στο διάφανο μπορούν να αναμειχθούν πρόσμικτα τα οποία και προσδίδουν ιδιότητες στο μίγμα. Αναφορικά, υπάρχουν ρευστοποιητές, επιβραδυντές, επιταχυντές κ.α.

Οπλισμός | Στην πιο συνηθισμένη του μορφή το σκυρόδεμα φέρει οπλισμό και άρα έχει φέρουσα ικανότητα. Ωστόσο το διάφανο σκυρόδεμα δεν έχει αυτή την ικανότητα. Η σκυροδέτηση με οπλισμό καθίσταται αδύνατη περιορίζοντας τις πιθανές εφαρμογές του υλικού στον στατικό τομέα.

Δ. Κατασκευή ^{[12],[13],[14],[15]}

Ως νέο υλικό, το οποίο βρίσκεται ακόμη σε πρώιμο στάδιο κατανόησης, το διάφανο σκυρόδεμα δεν χρησιμοποιείται ευρέως. Απαιτούνται αργές και πειραματικές διαδικασίες μικρής κλίμακας με τις οποίες ασχολούνται συγκεκριμένοι κατασκευαστές ανά τον κόσμο.

Η κατασκευή του διάφανου σκυροδέματος είναι σχετικά απλή και διαφέρει από αυτή του συμβατικού σε ορισμένα σημεία. Γίνεται σε εργοστάσια με ειδική διαδικασία και όχι στο εργοτάξιο. Πιο συγκεκριμένα, απαιτείται ειδικό καλούπι, στο οποίο διανοίγονται οπές στο κατάλληλο μέγεθος και επιθυμητό σχήμα. Η διάμετρος της οπής δεν θα πρέπει να ξεπερνάει την διάμετρο της οπτικής ίνας παρά ελάχιστα (απόκλιση λιγότερο του 1mm). Η τοποθέτηση τους, μπορεί να είναι σε μορφή κανάβου, σε ακανόνιστη – τυχαία μορφή ή σε κάποιο σχέδιο της επιλογής του κατασκευαστή. Το καλούπι μπορεί να έχει οποιεσδήποτε διαστάσεις. Στην παραγωγή, τα καλούπια έχουν σταθερή διατομή και μεγάλο μήκος, κατασκευάζοντας ένα μακρόστενο δοκίμιο το οποίο στην συνέχεια τεμαχίζεται σε τμήματα ίσου πάχους.

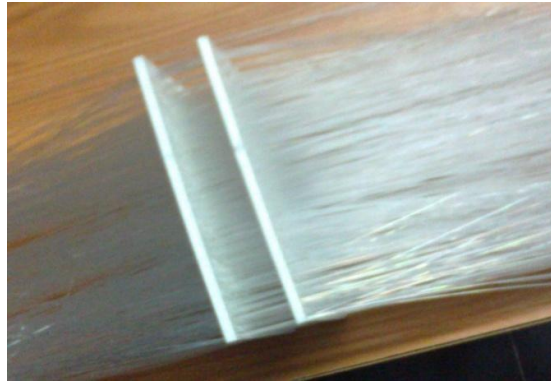
Στην συνέχεια τοποθετούνται οι οπτικές ίνες στις οπές. Δεδομένου του πλήθους ινών η διαδικασία απαιτεί αρκετό χρόνο. Για τον λόγο αυτό, πλέον οι ίνες τοποθετούνται σε προκατασκευασμένες συστοιχίες. Το τελικό αποτέλεσμα θυμίζει τόσο κánaβο όσο και τυχαίες μορφές.

^[12] Akshaya B Kamdi, (2013), ο.π., σελίδα 2

^[13] Bhavin K. Kashiyani, Varsha Raina, Jayeshkumar Pitroda, Dr. Bhavnaben K. Shah, (2013), ο.π., σελίδα 2

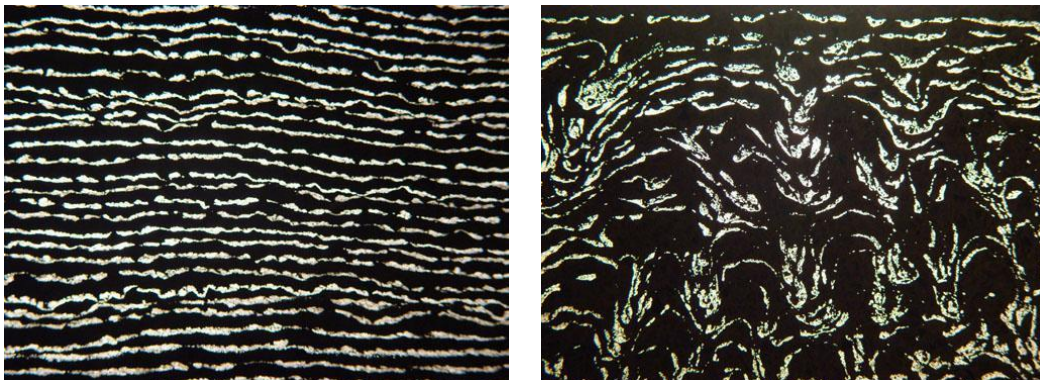
^[14] M.N.V. Padma Bhushan, D.Johnson, Md. Afzal Basheer Pasha & Ms. K. Prasanthi, (2013), ο.π., σελίδες 1-2

^[15] Sara McGillivray, (2011), «Translucent Concrete: An Emerging Material», (Δημοσιευμένη διατριβή), USC Bachelor's of Architecture Program, σελίδα 2



Εικόνα 14 | Διάταξη οπτικών ινών σε τεμάχια με οπές στο επιθυμητό πλήθος και σχήμα.

Ακολουθεί η προετοιμασία του τσιμεντοπολτού αναμειγνύοντας τα αδρανή με τσιμέντο και νερό στις κατάλληλες αναλογίες ώστε να επιτευχθεί η απαιτούμενη κάθε φορά αντοχή και το μίγμα εκχύνεται στο καλούπι.



Εικόνες 15-16 | Μοτίβο διάφανου σκυροδέματος, αριστερά σε μορφή κανάβου και δεξιά σε οργανική μορφή.

Αφού στερεοποιηθεί το σκυρόδεμα (2-3 ημέρες μετά την σκυροδέτηση) το δοκίμιο ξεκαλουπώνεται. Στο τελικό στάδιο, πιθανόν να απαιτείται κάποιο φινιρίσμα όπως κόψιμο των ινών εάν περισσεύουν ή τρίψιμο για την δημιουργία λείας εξωτερικής επιφάνειας.



Εικόνα 17 | Δοκίμιο διάφανου σκυροδέματος με οπτική ίνα πολύ μικρής διατομής. Λόγω της μικροσκοπικής κλίμακας η τοποθέτηση των ινών σε οργανική μορφή κρίνεται η καταλληλότερη.

Ε. Λειτουργία ^{[16],[17],[18],[19]}

Υπάρχουν δύο τύποι διάφανου σκυροδέματος ανάλογα με τον τρόπο κατασκευής τους και τον διαφορετικό τρόπο λειτουργίας τους.

Στην πιο διαδεδομένη μορφή διάφανου σκυροδέματος, ενσωματώνονται στο δοκίμιο οπτικές ίνες οι οποίες λειτουργούν ως μέσω διάδοσης του φωτός. Παραλαμβάνουν μια φωτεινή δέσμη από το ένα άκρο και την μεταφέρουν με ελάχιστες έως και μηδενικές απώλειες στο άλλο. Ακόμη και το χρώμα του φωτός αλλοιώνεται στον ελάχιστο βαθμό. Με αυτό το τρόπο δίνεται η ψευδαίσθηση ότι το φως διαπερνά το κύριο σώμα του σκυροδέματος καθιστώντας το διάφανο. Οι οπτικές ίνες μπορούν να τοποθετηθούν σε κάναβο ή ακανόνιστα δημιουργώντας τυχαίες κάθε φορά μορφές. Στην περίπτωση του κανάβου, ο αριθμός των οπτικών ινών είναι εύκολα υπολογίσιμος και άρα η τοποθέτηση αυτή ενδείκνυται για σχετικούς πειραματισμούς.

^[16] Akshaya B Kamdi, (2013), ο.π., σελίδα 1

^[17] Patil Gaurao S., Patil Swapnal V., (2015), ο.π., σελίδα 2

^[18] Bhavin K. Kashiyani, Varsha Raina, Jayeshkumar Pitroda, Dr. Bhavnaben K. Shah, (2013), ο.π., σελίδα 2

^[19] M.N.V. Padma Bhushan, D.Johnson, Md. Afzal Basheer Pasha & Ms. K. Prasanthi, (2013), ο.π., σελίδα 1



Εικόνα 18 | Επιφάνεια διάφανου σκυροδέματος. Διακρίνονται οι γραμμές τοποθέτησης των ινών.



Εικόνα 19 | Πέρα από την ένταση του φωτός, οι οπτικές ίνες και άρα το διάφανο σκυρόδεμα μεταφέρουν και το χρώμα διευρύνοντας ακόμη περισσότερο το πεδίο εφαρμογής τους.



Εικόνα 2016 | Το τζαμί Al Aziz, στο Άμπου Ντάμπι. Στην όψη του έχουν τοποθετηθεί ανάγλυφες πλάκες με στοιχεία αραβικής γραφής, κατασκευασμένα από διάφανο σκυρόδεμα.

Υπάρχει μια ακόμη μορφή διάφανου σκυροδέματος, στην οποία η διαφάνεια επιτυγχάνεται με αντικατάσταση των αδρανών με διαφανή (π.χ. κομμάτια ανακυκλωμένου γυαλιού) και ανάμειξη ρητινών στον τσιμεντοπολτό. Τα τελικά αποτελέσματα είναι δύσκολα προβλέψιμα και μετρήσιμα καθώς το ποσοστό φωτοδιαπερατότητας καθορίζεται από την διαφάνεια των υλικών κάθε φορά.

Για την παρούσα εργασία αυτή, επιλέχτηκε η πρώτη μέθοδος, καθώς αποτελούσε την πιο κοινή μορφή διάφανου σκυροδέματος και η διαδικασία κατασκευής ήταν λιγότερο σύνθετη. Η δυνατότητα υπολογισμού των ποσοστών της οπτικής ίνας, με μεγάλη ακρίβεια, συνέβαλε στην διεξαγωγή αρτιότερων συμπερασμάτων.

ΣΤ. Εφαρμογές ^{[20],[21],[22],[23],[24]}

Το διάφανο σκυρόδεμα συνδυάζει ιδιότητες τόσο του σκυροδέματος (μεγάλη θλιπτική αντοχή), όσο και του γυαλιού (φωτοδιαπερατότητα). Χάρη στη σύσταση του μπορεί να αντικαταστήσει το ίδιο εύκολα τόσο το σκυρόδεμα όσο και το γυαλί.



Εικόνα 21 | Εγκατάσταση με την χρήση διάφανου σκυροδέματος. Στην τοιχοποιία μπορούν να διακριθούν οι φωτεινές πηγές πίσω από την φωτοδιαπερατή επιφάνεια.

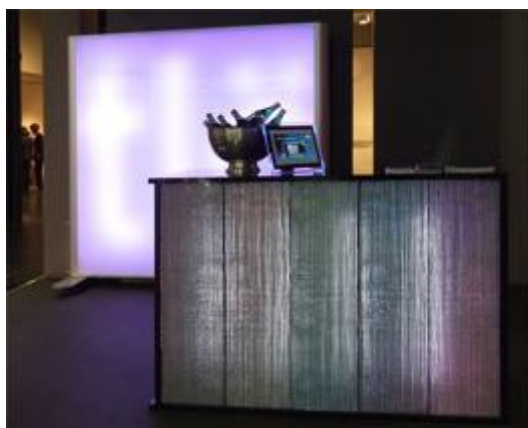
^[20] Akshaya B Kamdi, (2013), ο.π., σελίδα 3

^[21] Goyal A. & Patel J., (2018), ο.π., σελίδα 5

^[22] Patil Gaurao S., Patil Swapnal V., (2015), ο.π., σελίδα 4

^[23] Bhavin K. Kashiyan, Varsha Raina, Jayeshkumar Pitroda, Dr. Bhavnaben K. Shah, (2013), ο.π., σελίδα 3

^[24] M.N.V. Padma Bhushan, D.Johnson, Md. Afzal Basheer Pasha & Ms. K. Prasanthi, (2013), ο.π., σελίδα 3



Εικόνα 22 | Έπιπλο κατασκευασμένο από διάφανο σκυρόδεμα σε χώρο υποδοχής

Η τεχνογνωσία των μηχανικών επιτρέπει μόνο την κατασκευή προκατασκευασμένων τεμαχίων και ειδικών κατασκευών μέχρι στιγμής. Η χύτευση φερόντων στοιχείων στο εργοτάξιο θεωρείται αδύνατη εξαιτίας δυσεπίλυτων κατασκευαστικών ζητημάτων.



Εικόνα 23 | Πάγκκος κατασκευασμένος από διάφανο σκυρόδεμα. Λόγω της κοινότυπης μορφής του, το έπιπλο θα μπορούσε να κατασκευαστεί μαζικά.

Η μέθοδος μορφοποίησης (χύτευση), δίνει αρκετές δυνατότητες για πρωτότυπες μορφές και λειτουργίες ανάλογα με την φαντασία και την τεχνογνωσία των κατασκευαστών.



Εικόνα 174 | Παγκάκι σε πάρκο. Από απλή κατασκευή μετατρέπεται σε σημείο αναφοράς.

Ενδεικτικά, θα αναφερθούν ορισμένες εφαρμογές, κατηγοριοποιημένες σε τρεις βασικές ομάδες:

Διαφανείς (φωτοδιαπερατοί) τοίχοι | Τοποθετημένοι στο κέλυφος του κτιρίου, λειτουργούν τόσο την ημέρα, μεταφέροντας φυσικό φωτισμό στο εσωτερικό όσο και την νύχτα με τον τεχνητό φωτισμό να δημιουργεί ενδιαφέρουσες συνθέσεις στις όψεις του κτιρίου.



Εικόνες 185-26 | Το τζαμί Al Aziz, στο Άμπου Ντάμπι. Την ημέρα το φως του ηλίου εισέρχεται στο εσωτερικό, ενώ την νύχτα ο τεχνητός φωτισμός του κτιρίου δημιουργεί στην όψη το παραπάνω αποτέλεσμα.



Εικόνα 27 | Ενιαία επιφάνεια πλήρωσης (χωρίς ανοίγματα), στην οποία το φως μεταφέρεται ανενόχλητο και προς τις δύο κατευθύνσεις.

Αυτόφωτα στοιχεία | Ειδικές κατασκευές με οπτικές ίνες, οι οποίες έχουν το ένα τους άκρο στην εξωτερική επιφάνεια του στοιχείου, και το άλλο σε κάποια φωτεινή πηγή (π.χ. λαμπτήρα, συσκευή μετάδοσης φωτός μέσω οπτικών ινών κ.α.). Η κατασκευή δεν λειτουργεί ως μέσω διάδοσης αλλά ως πηγή φωτός και απαιτείται συγκεκριμένη μελέτη και σχεδιασμός για την παραγωγή της. Ορισμένα παραδείγματα πρακτικών εφαρμογών μέσα από την μελετηθείσα βιβλιογραφία είναι αυτόφωτοι τοίχοι / οροφές / δάπεδα με αρχιτεκτονικό -διακοσμητικό χαρακτήρα, διαγραμμίσεις αυτοκινητόδρομων ή πλευρικές μπάρες οι οποίες γίνονται ευκολότερα αντιληπτές, αυτόφωτα πεζοδρόμια κ.α..



Εικόνες 28-29 | Αυτόφωτο στοιχείο. Το ένα άκρο της οπτικής ίνας βρίσκεται στην φωτεινή πηγή ενώ το άλλο μεταφέρει το φως στην εξωτερική επιφάνεια.

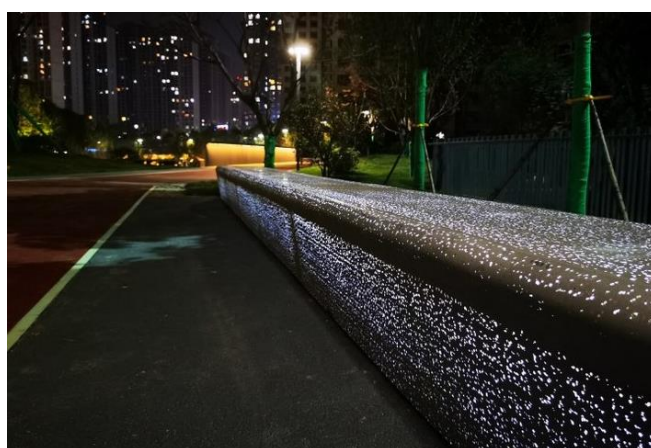


Εικόνα 3019 | Είσοδος ανελκυστήρων με χρήση αυτόφωτων επιφανειών.



Εικόνα 31 | Αυτόφωτα σκαλοπάτια. Σύμφωνα με την βιβλιογραφία, δομικά στοιχεία αντίστοιχης λειτουργίας συμβάλουν στην ασφάλεια των χρηστών.

Ειδικές κατασκευές | Συνθέσεις όπως φωτιστικά, διακοσμητικά στοιχεία, φωτιζόμενα έπιπλα, επιγραφές – λογότυπα και σχηματισμός εικόνων σε επιφάνειες.



Εικόνες 32-34 | Κατασκευές διακοσμητικού και χρηστικού χαρακτήρα.

Ζ. Πλεονεκτήματα [25],[26],[27],[28]

Τα κύρια πλεονεκτήματα του διάφανου σκυροδέματος προκύπτουν από τις ιδιότητες του και κυρίως την ικανότητα του να διαπερνιέται από το φως, συνδυάζοντας λειτουργικότητα και αισθητική σε πολλές από τις εφαρμογές του.

Φυσικός φωτισμός στο εσωτερικό των κτιρίων | Μέχρι στιγμής ο φωτισμός των εσωτερικών χώρων γινόταν είτε με την χρήση ανοιγμάτων είτε με τεχνητά μέσα. Με την χρήση του διάφανου σκυροδέματος το φως του ηλίου διαπερνά ολόκληρα δομικά στοιχεία προσφέροντας διάχυτο έμμεσο φωτισμό.



Εικόνα 35 | Πίσω από την επιφάνεια υπάρχει τεχνητή πηγή φωτισμού και το φως διαχέεται σε όλο τον χώρο χάρη στην χρήση διάφανου σκυροδέματος.

Εξοικονόμηση ενέργειας | Με την κατάλληλη χρήση στοιχείων διάφανου σκυροδέματος και την κατάλληλη μελέτη, η ανάγκη για τεχνητό φωτισμό μειώνεται σημαντικά, εξοικονομώντας ενέργεια και πόρους στον τομέα των κατασκευών.

Πλήθος δημιουργικών – κατασκευαστικών δυνατοτήτων | Λόγω της διαδικασίας χύτευσης που απαιτείται, οι μορφές που μπορούν να κατασκευαστούν είναι πολλές. Τόσο ως χαρακτηριστική ιδιότητα του στοιχείου αλλά και ως απλό διακοσμητικό στοιχείο, μπορούν να κατασκευαστούν ευφάνταστες δημιουργίες με διάφανο σκυρόδεμα.

[25] Goyal A. & Patel J., (2018), ο.π., σελίδα 5

[26] Akshaya B Kamdi, (2013), ο.π., σελίδα 2

[27] Bhavin K. Kashiyani, Varsha Raina, Jayeshkumar Pitroda, Dr. Bhavnaben K. Shah, (2013), ο.π., σελίδα 4

[28] M.N.V. Padma Bhushan, D.Johnson, Md. Afzal Basheer Pasha And Ms. K. Prasanthi, (2013), ο.π., σελίδα 4



Εικόνα 36 | Καλλιτεχνικές δημιουργίες από διάφανο σκυρόδεμα.

Θερμομονωτικές ιδιότητες | Μια ακόμη ιδιότητα των οπτικών ινών εκτός της μεταφοράς φωτός είναι και η υψηλή θερμομονωτική ικανότητα η οποία προσδίδεται στο στοιχείο διάφανου σκυροδέματος με την ενσωμάτωσή τους.

Ισχυρή πυροπροστασία | Υψηλή αντοχή στην φωτιά παρουσιάζουν τόσο το σκυρόδεμα όσο και οι οπτικές ίνες προσδίδοντας στο διάφανο σκυρόδεμα μεγάλη αντοχή σε περίπτωση πυρκαγιάς.

Η. Μειονεκτήματα ^{[29],[30]}

Όπως όλα τα υλικά, έτσι και το διάφανο σκυρόδεμα έχει σημεία που απαιτούν βελτίωση και εξέλιξη. Αυτό προκύπτει κυρίως λόγω της μικρής έκτασης έρευνας που έχει γίνει μέχρι τώρα. Λογικό ακόλουθο είναι καθώς το νέο υλικό μελετάται περαιτέρω, οι αδυναμίες του θα επιλύονται με τον καιρό.

Άγνωστη τεχνολογία | Τόσο οι ιδιότητες όσο και ο τρόπος κατασκευής του υλικού βρίσκονται υπό έρευνα, η εξέλιξη της οποίας είναι σχετικά αργή. Μέχρι στιγμής δεν έχουν καθοριστεί με ακρίβεια οι ιδιότητες του διάφανου σκυροδέματος.

^[29] Patil Gaurao S., Patil Swapnal V., (2015), ο.π., σελίδα 5

^[30] Bhavin K. Kashiyani, Varsha Raina, Jayeshkumar Pitroda, Dr. Bhavnaben K. Shah, (2013), ο.π., σελίδα 4

Απαιτητική διαδικασία | Λόγω των μικρών διαστάσεων των οπτικών ινών απαιτείται ακρίβεια για την παραγωγή του σκυροδέματος. Η διαδικασία είναι χρονοβόρα και αρκετά απαιτητική.



Εικόνα 37 | Λόγω της μικρής διατομής και του πλήθους των οπτικών ινών που απαιτούνται για την κατασκευή διάφανου σκυροδέματος, η διαδικασία καθίσταται ιδιαίτερα απαιτητική.

Υψηλό κόστος κατασκευής | Η κοστολόγηση των οπτικών ινών, αλλά και της εξειδικευμένης διαδικασίας που απαιτείται, καθιστούν το διάφανο σκυρόδεμα αρκετά ακριβό σαν υλικό.

Ευαίσθησία των οπτικών ινών | Απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή κατά την τοποθέτηση των οπτικών ινών καθώς σε περίπτωση που κοπούν ή σπάσουν χάνουν την ιδιότητα τους να διαπερνώνται από το φως.

Θ. Περιβαλλοντικός αντίκτυπος ^[31]

Στην βιβλιογραφία που μελετήθηκε, τονίζεται ιδιαίτερα ο περιβαλλοντικός αντίκτυπος του διάφανου σκυροδέματος. Πέρα από ενδιαφέροντα αποτελέσματα που προσφέρει, οι εφαρμογές του μπορούν να συμβάλουν στην εξοικονόμηση ενέργειας και πόρων από τον τομέα των κατασκευών. Πιο συγκεκριμένα, με την μεταφορά φυσικού φωτός στο εσωτερικό του κτιρίου εξοικονομείται ενέργεια που σε αντίθετη περίπτωση θα καταναλωνόταν για τον τεχνητό φωτισμό. Ακόμη, λόγω της υψηλής του θερμομονωτικής ικανότητας η χρήση του υλικού εξοικονομεί και πόρους από τον κλιματισμό του κτιρίου. Τέλος,

^[31] Akshaya B Kamdi, (2013), ο.π., σελίδες 3-4

η αντικατάσταση αδρανών με θρυμματισμένο ανακυκλώσιμο γυαλί καθιστά το υλικό αρκετά πιο βιώσιμο.

I. Κοστολόγηση ^[32]

Μέχρι στιγμής, το διάφανο σκυρόδεμα έχει μεγάλο κόστος κατασκευής. Αυτό προκύπτει εξαιτίας της μικρής σχετικά τεχνογνωσίας και της υψηλής αξίας ορισμένων υλικών (οπτικές ίνες). Σύμφωνα με την βιβλιογραφία η κοστολόγηση είναι ακόμη μη ακριβής αλλά προσδιορίζεται ότι ένα προκατασκευασμένο τεμάχιο 1m² με πάχος 25mm κοστίζει περίπου 1000 δολάρια.

^[32] M.N.V. Padma Bhushan, D. Johnson, Md. Afzal Basheer Pasha & Ms. K. Prasanthi, (2013), ο.π., σελίδα 4

III. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

A. Εισαγωγή

1) Γενικά

Στο δεύτερο μέρος της εργασίας θα αναλυθεί το πείραμα που πραγματοποιήθηκε με σκοπό να μελετηθούν ο τρόπος κατασκευής και οι κυριότερες ιδιότητες του διάφανου σκυροδέματος. Ξεκινώντας την μελέτη ενός νέου υλικού είναι λογικό να υπάρχουν αρκετά κενά γύρω από αυτό. Ακόμη περισσότερο όταν η έρευνα βρίσκεται σε πρωταρχικά στάδια ανά τον κόσμο. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω η βιβλιογραφία ανακύκλωνε τις ίδιες πληροφορίες, με εξαίρεση ορισμένες τεχνικές εκθέσεις εργαστηρίων τα οποία ασχολούνταν με πρακτικά ζητήματα (εξέλιξη του τρόπου κατασκευής, διερεύνηση ιδιοτήτων κ.α.). Από την μελέτη των τεχνικών αναφορών ορίστηκε πειραματική διαδικασία, η πραγματοποίηση της οποίας θα συνέβαλε στην διεξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με το υλικό.



Φωτογραφία 1 | Σε κάθε πειραματική διαδικασία η αποτυχία είναι αναμενόμενη...

2) Άξονες πειραματικής διαδικασίας

Το πειραματικό μέρος της εργασίας κινήθηκε σε δύο κύριους άξονες. Πρώτος στόχος ήταν η κατασκευή δοκιμίων από διάφανο σκυρόδεμα. Συγκεκριμένα μελετήθηκε η κατάλληλη μορφή των καλουπιών, οι κατάλληλες αναλογίες των υλικών, η διαδικασία κατασκευής, το τελικό αποτέλεσμα (γενική εικόνα / ιδιότητες) και πιθανές δυσκολίες που θα προέκυπταν. Στον δεύτερο άξονα, έγινε δοκιμή εναλλακτικού υλικού το οποίο θα λειτουργούσε ως μέσο μεταφοράς φωτός, αλλά λιγότερο δύσχρηστο και με μικρότερο κόστος από ότι η οπτική ίνα.

3) Υπόθεση

Στην πρώτη περίπτωση, η διαδικασία στήθηκε σχεδόν από το μηδέν. Αποσπάσματα από τις τεχνικές εκθέσεις οδήγησαν στα βήματα της κατασκευής διάφανου σκυροδέματος (π.χ. μορφή του καλουπιού, αναλογίες υλικών). Τα κενά που υπήρξαν καθώς και τα προβλήματα που προέκυψαν στην πορεία αντιμετωπίστηκαν κατά περίπτωση. Αντίστοιχα στην αναζήτηση υλικού με τις ιδιότητες της οπτικής ίνας αλλά με χαμηλότερο κόστος, έγινε υπόθεση η οποία διαμόρφωσε το πείραμα με σκοπό την επαλήθευση ή διάψευση της. Πιο συγκεκριμένα η υπόθεση ήταν ότι οι κοινές ράβδοι σιλικόνης (θερμόκολλας) μπορούν να αντικαταστήσουν την οπτική ίνα. Το ζήτημα τίθεντο στην διατήρηση των ιδιοτήτων. Έτσι, όπως θα αναφερθεί και παρακάτω, στήθηκε πειραματική διαδικασία με την κατασκευή δοκιμίων (με την χρήση ράβδων σιλικόνης), έλεγχο των ιδιοτήτων τους και τρόπους αντιμετώπισης των διαφορών που προέκυπταν. Ακόμη, θεωρήθηκε ότι η ενσωμάτωση των ράβδων θα αποδυνάμωνε αρκετά την θλιπτική αντοχή του δοκιμίου. Προς αντιμετώπιση αυτού, θα γινόταν και δοκιμή με ενσωμάτωση μεταλλικού fiber στον τσιμεντοπολτό προς ενίσχυση της θλιπτικής αντοχής στα δοκίμια.

4) Πειραματική διαδικασία

Συνοπτικά θα παρατεθεί η διαδικασία του πειράματος αποτελούμενη από δύο φάσεις. Στην πρώτη φάση που αφορά την κατασκευή, έγιναν δοκιμές με διάφορες συστάσεις υλικών με σκοπό την βρεθεί η καταλληλότερη (τήρηση ορισμένων κριτηρίων) ώστε να ακολουθήσει η διαδικασία της σκυροδέτησης δοκιμίων διάφανου σκυροδέματος.

Όσο αφορά την δεύτερη φάση, με την διερεύνηση της καταλληλότητας του εναλλακτικού υλικού (ράβδοι σιλικόνης), κατασκευάστηκαν 4 σειρές (τριάδες) δοκιμίων. Αναλυτικά, κατασκευάστηκε μια σειρά δοκιμίων από συμβατικό σκυρόδεμα (χωρίς την ενσωμάτωση μέσου διάδοσης φωτός). Η σειρά αυτή θα λειτουργούσε ως μέσω σύγκρισης της θλιπτικής αντοχής των υπολοίπων δοκιμίων. Κατασκευάστηκαν δοκίμια με αντικατάσταση της οπτικής ίνας από σιλικόνη. Κατασκευάστηκε ακόμη μια σειρά δοκιμίων με ράβδους σιλικόνης και ενσωμάτωση μεταλλικού fiber στον τσιμεντοπολτό με σκοπό την ενίσχυση της θλιπτικής αντοχής. Τέλος κατασκευάστηκε μια σειρά δοκιμίων με οπτική ίνα ως μέσω σύγκρισης για τις μετρήσεις φωτοδιαπερατότητας των δοκιμίων.

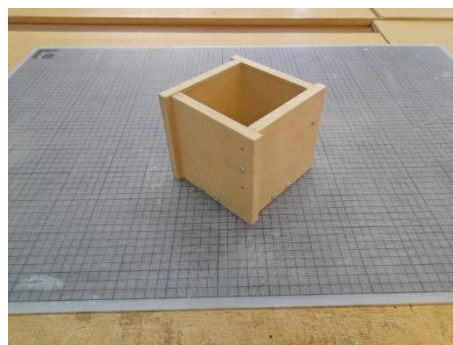
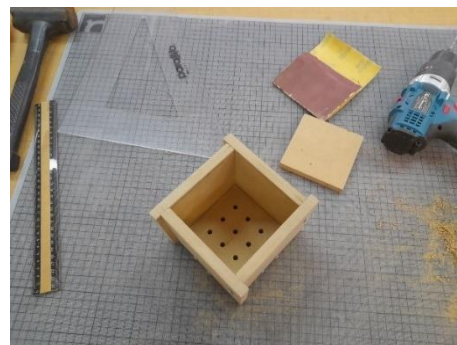
Στην συνέχεια τα δοκίμια μετρήθηκαν ως προς διάφορες ιδιότητες τους (συγκεκριμένα ως προς το ποσοστό φωτοδιαπερατότητας και στην συνέχεια ως προς την θλιπτική αντοχή). Από την ανάλυση των αποτελεσμάτων διεξήχθησαν ορισμένα συμπεράσματα τα οποία παρατίθενται στο τέλος της εργασίας.

B. Πρώτη φάση.

Η αρχική φάση αφορούσε στην κατασκευή διάφανου σκυροδέματος. Αρχικά έγιναν δοκιμές ώστε να οριστεί η κατάλληλη σύσταση υλικών και στην συνέχεια η διαδικασία της σκυροδέτησης.

1) Κατασκευή καλουπιού

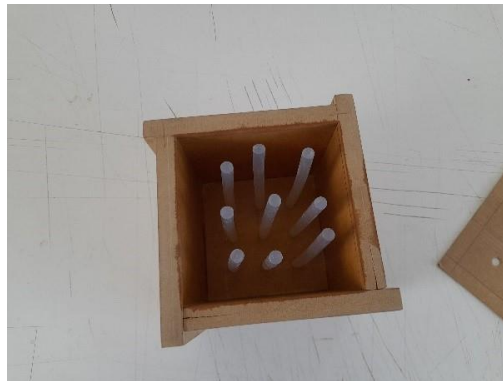
Για να δοκιμαστούν οι διάφορες αναλογίες υλικών έπρεπε να κατασκευαστεί καλούπι στο οποίο να γίνονται οι χυτεύσεις. Καταλληλότερο υλικό ήταν το ξύλο. Αφού σχεδιάστηκε, τα κομμάτια του κόπηκαν στο Εργαστήριο Αρχιτεκτονικών Προπλασμάτων και Τεχνολογικών Εφαρμογών του Πολυτεχνείου και συναρμολογήθηκαν. Οι διαστάσεις της μήτρας ήταν 10cm x 10cm x 10cm. Το καλούπι αποτελούνταν από 4 πλευρικά τμήματα ίδιων διαστάσεων και μια βάση στην οποία διανοίχτηκαν οπές.



Φωτογραφία 2 | Φωτογραφίες από τις φάσεις κατασκευής του πρώτου καλουπιού

Στην πορεία του πειράματος παρατηρήθηκαν προβλήματα τόσο ως προς την ποιότητα του ξύλου όσο και ως προς την μορφή και αποφασίστηκε η αλλαγή

του σε επόμενη φάση. Οι κύριες αστοχίες ήταν ότι εξαιτίας της χρήσης κοχλία στο πάχος του ξύλου προκλήθηκαν αποκολλήσεις. Ακόμη λόγω της χρήσης MDF ξυλείας, μετά από ορισμένες σκυροδετήσεις προκλήθηκε κύρτωση των τεμαχίων καθιστώντας δύσκολη την επανασυναρμολόγηση. Τέλος όσο αφορά την λειτουργία του καλουπιού, το μέσο διάδοσης τοποθετούνταν κατακόρυφα με το ένα μόνο άκρο σταθερό, με αποτέλεσμα κατά την διαδικασία της σκυροδέτησης το άλλο άκρο να μετακινείται κάμπτοντας τον άξονα της κάθε ράβδου και αλλοιώνοντας το τελικό αποτέλεσμα.



Φωτογραφία 3 | Οι ράβδοι σιλικόνης τοποθετήθηκαν κατακόρυφα στο καλούπι με αποτέλεσμα το χοντρόκοκκο αδρανές να κάμψει τον άξονα τους προκαλώντας προβλήματα στις μετρήσεις.

2) Υλικά

Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν βρίσκονταν συγκεντρωμένα σε μεγάλες ποσότητες στο Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Μηχανικής και Αντοχής Υλικών του Πολυτεχνείου. Τόσο για την πρώτη φάση όσο και στην συνέχεια χρησιμοποιήθηκαν τσιμέντοπολτός, αδρανή (χοντρόκοκκα και λεπτόκοκκα), μέσο διάδοσης του φωτός (οπτική ίνα και ράβδοι σιλικόνης) και μεταλλικό fiber για την ενίσχυση της θλιπτικής αντοχής.



Φωτογραφία 4 | Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στις σκυροδετήσεις. Από αριστερά προς τα δεξιά: κουβάς ανάμιξης μείγματος, τσιμέντο, λεπτόκοκκο αδρανές, χοντρόκοκκο αδρανές και νερό.

Τσιμεντοπολτός | Αποτελούμενος από καθαρό νερό βρύσης και τσιμέντο η αναλογία που χρησιμοποιήθηκε νερό/τσιμέντο ήταν σε όλες τις δοκιμές 0,5.



Φωτογραφία 5 | Σακί με τσιμέντο. Αφού ζυγιζόταν η επιθυμητή ποσότητα αναμειγνύονταν με νερό δημιουργώντας τον τσιμεντοπολτό (συνδετική ουσία του σκυροδέματος)

Αδρανή | Στις δοκιμές χρησιμοποιήθηκαν δύο διατομών αδρανή. Για την διασφάλιση της σωστής κοκκομετρίας η ποσότητα που θα χρησιμοποιούνταν περνούσε από τα κατάλληλα κόσκινα και στην συνέχεια ζυγίζονταν.



Φωτογραφία 6 | Τα κόσκινα που χρησιμοποιήθηκαν. Αριστερά το κόσκινο Νο5 της σειράς με μάτι 1,18mm και δεξιά το κόσκινο Νο8 της σειράς με μάτι 9,5mm.

Χοντρόκοκκα αδρανή | Χρησιμοποιήθηκε γαρμπίλι και ο διαχωρισμός του πραγματοποιήθηκε με το κόσκινο Νο8 με μάτι (μέγιστη διάμετρο αδρανούς) 9,5mm.



Φωτογραφία 7 | Χοντρόκοκκο αδρανές – γαρμπίλι. Χρησιμοποιήθηκε στις πρώτες δοκιμές και λόγω των προβλημάτων που δημιούργησε απορρίφθηκε η χρήση του.

Λεπτόκοκκα αδρανή | Χρησιμοποιήθηκε άμμος και ο διαχωρισμός της πραγματοποιήθηκε με το κόσκινο Νο5 με μάτι (μέγιστη διάμετρο αδρανούς) 1,18mm.



Φωτογραφία 8 | Λεπτόκοκκο αδρανές – άμμος

Οπτική ίνα | Τα χαρακτηριστικά και ο τρόπος λειτουργίας των οπτικών ινών αναφέρθηκαν παραπάνω. Για το πείραμα χρησιμοποιήθηκε οπτική ίνα διαμέτρου 1mm, η οποία αγοράστηκε σε ρολό των 1500m. Ενδεικτικά για κάθε δοκίμιο με επιφάνειες 10cm x 10cm χρησιμοποιήθηκαν 625 κομμάτια οπτικής ίνας. Συνολικά κατασκευάστηκαν 9 δοκίμια και χρησιμοποιήθηκαν 5625 κομμάτια οπτικής ίνας. Κάθε κομμάτι κόπηκε και τοποθετήθηκε ξεχωριστά...



Φωτογραφία 9 | Οπτικές ίνες. Σε κάθε δοκίμιο τοποθετούνταν 625 κομμάτια.

Ράβδοι σιλικόνης | Χρησιμοποιήθηκαν ράβδοι κοινής θερμόκολλας που κυκλοφορεί στο εμπόριο. Απαραίτητο χαρακτηριστικό ήταν το διάφανο / διαυγές χρώμα. Αρχικά το πείραμα ξεκίνησε με ράβδους διατομής 8mm και μήκος 300mm. Στην συνέχεια όμως η συγκεκριμένη διατομή έπαψε να κυκλοφορεί οπότε έγινε αντικατάσταση σε ράβδους διαμέτρου 7mm και μήκους 101mm. Η αλλαγή αυτή πήγε την διαδικασία πίσω χρονικά καθώς έπρεπε να προσαρμοστούν τα καλούπια και να κατασκευαστούν εκ νέου δοκίμια που

είχαν ήδη κατασκευαστεί με άλλο μέγεθος. Αξίζει να σημειωθεί ότι το πιο κοινό και εύκολα ανευρέσιμο υλικό ήταν αυτό που δυσκόλεψε και τελικά διαμόρφωσε, σύμφωνα με τα δικά του μέτρα, ολόκληρη την διαδικασία.



Φωτογραφία 10 | Οι αρχικές ράβδοι σιλικόνης που χρησιμοποιήθηκαν στο στάδιο ανεύρεσης κατάλληλης σύστασης υλικών.

Μεταλλικό fiber | Προστέθηκε σε μία από τις τέσσερις κατηγορίες σκυροδέματος που κατασκευάστηκαν με σκοπό την ενίσχυση της θλιπτικής αντοχής των δοκιμίων. Με μήκος 20mm και διάμετρο μικρότερη του 1mm, αποτέλεσε ένα από τα δυσκολότερα υλικά της διαδικασίας. Λόγω του σχήματος του δημιουργούσε συστάδες δυσχεραίνοντας την διαδικασία της σκυροδέτησης όπου αυτή ήταν δυνατή.



Φωτογραφία 11 | Το μεταλλικό fiber το οποίο χρησιμοποιήθηκε.

3) Εξοπλισμός

Εκτός των υλικών, χρησιμοποιήθηκαν και ορισμένα μέσα και εργαλεία για την κατασκευή των δοκιμίων διάφανου σκυροδέματος.



Φωτογραφία 12 | Σύνεργα τα οποία χρησιμοποιήθηκαν καθ' όλη την πειραματική διαδικασία.

Συνοπτικά θα αναφερθούν ζυγαριά για την ακριβή ποσότητα των υλικών, λεκάνες και δοχεία για την μεταφορά, κουβάδες, ράβδος και μυστρί για την ανάμιξη. Άξιο αναφοράς είναι το γεγονός ότι λόγω της λεπτής διατομής της οπτικής ίνας αλλά και των ράβδων σιλικόνης η χύτευση γινόταν σε μικρές ποσότητες με κοινό κουτάλι ώστε αυτές να μην τραυματιστούν.

4) Διαδικασία σκυροδέτησης πρώτης φάσης



Φωτογραφία 13 | Μετά από κάθε σκυροδέτηση απαιτούνταν καλό καθάρισμα τόσο στα ρούχα όσο και στον χώρο του εργαστηρίου...

Λόγω της μικρής ποσότητας που παράγονταν κάθε φορά όλη η διαδικασία γινόταν χειροκίνητα. Αρχικά προετοιμάζονταν το καλούπι. Στην παρούσα φάση χρησιμοποιήθηκαν ράβδοι σιλικόνης και όχι οπτική ίνα για λόγους ευκολίας. Οι ράβδοι αφού τεμαχίζονταν στις επιθυμητές διαστάσεις τοποθετούνταν στις οπές του καλουπιού. Όσο αφορά το μείγμα, πρώτο βήμα ήταν η κοσκίνιση των υλικών, η ζύγιση και η συγκέντρωση όλων των υπολοίπων υλικών.



Φωτογραφία 14 | Διαδικασία ζύγισης των απαιτούμενων ποσοτήτων των υλικών

Στην συνέχεια αναδεύονταν το τσιμέντο με τα αδρανή μέχρι να μην υπάρχουν συμπαγείς μάζες. Προστίθονταν το νερό και ανακατεύονταν καλά μέχρι να ομογενοποιηθεί πλήρως.



Φωτογραφία 15 | Ο τσιμεντοπολτός και τα αδρανή αναμειγνύονταν μέχρι να προκύψει ομοιογενές μείγμα έτοιμο για σκυροδέτηση.

Σειρά είχε η διαδικασία της χύτευσης στο καλούπι. Για την στερεοποίηση του σκυροδέματος απαιτούνταν 2 με 3 μέρες μετά τις οποίες τα δοκίμια ξεκαλουπώνονταν και παρέμεναν σε δεξαμενή νερού για άλλες 28 μέρες.



Φωτογραφία 16 | Δεξαμενή στην οποία τα δοκίμια παρέμεναν για 28 μέρες μετά το ξεκαλούπωμα.



Φωτογραφία 17 | Τα τελικά δοκίμια αριθμούνται ώστε να είναι γνωστά τα χαρακτηριστικά τους.

Αφού απομακρύνονταν από εκεί, τα δοκίμια ήταν έτοιμα για τις τελικές τους μετρήσεις.

5) Κριτήρια επιλογής σύστασης υλικών

Βασικό κριτήριο για την επιλογή κατάλληλης αναλογίας υλικών ήταν η εργασιμότητα του μείγματος. Τόσο κατά την ανάμειξη (λόγω της μικρής ποσότητας γινόταν χειροκίνητα, χωρίς μηχανικά μέσα) όσο και κατά την χύτευση, το μείγμα έπρεπε να έχει συγκεκριμένη εργασιμότητα ώστε να

ρέει στο καλούπι και να μην αφήνει κενά. Ακόμη, η ομοιογενής μορφή του θα έδινε ένα πιο όμορφο αισθητικό αποτέλεσμα.

Στην φάση αυτή, εστιάζοντας στην σύνθεση του μείγματος και όχι τόσο στην ικανότητα του δοκιμίου να διαπερνιέται από το φως, επιλέχτηκε η ενσωμάτωση ράβδων σιλικόνης και όχι οπτικών ινών ως πιο οικονομικό και εύχρηστο υλικό.

6) Συστάσεις υλικών

Οι δοκιμές ξεκίνησαν με σύσταση υλικών που, με βάση την βιβλιογραφία, παράγουν σκυρόδεμα ποιότητας C25/30 . Παρόλα αυτά, λόγω προβλημάτων που προέκυψαν με την εργασιμότητα του μείγματος έγιναν αλλαγές και δοκιμάστηκαν και άλλες αναλογίες.

6.1. Σύσταση 1^η

Η πρώτη σύσταση που δοκιμάστηκε αποτελούνταν από χοντρόκοκκο αδρανές 9,5mm (γαρμπίλι), λεπτόκοκκο αδρανές 1,18mm (άμμος), τσιμέντο και νερό. Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται οι αναλογίες αλλά και οι ποσότητες κάθε υλικού που χρησιμοποιήθηκαν.

Σύσταση 1 ^η		
	Αναλογία	Ποσότητα
Χοντρόκοκκο αδρανές (γαρμπίλι)	3	6 Kg
Λεπτόκοκκο αδρανές (άμμος)	1,5	3 Kg
Τσιμέντο	1	2 Kg
Νερό	0,5	1 Kg

Ως πρώτη σκυροδέτηση, δεν υπήρχε εικόνα της συνολικής ποσότητας σκυροδέματος που θα χρειαστεί. Για τον λόγο αυτό έγινε υπερδοσολόγηση ώστε να υπάρχει η βεβαιότητα ότι αρκεί να γεμίσει τα καλούπια. Στις επόμενες δοκιμές η ποσότητα περιορίστηκε στην απαιτούμενη κάθε φορά ανάλογα με τον αριθμό και το μέγεθος των καλουπιών.

Από την πρώτη στιγμή έγινε αντιληπτό ότι η συγκεκριμένη σύσταση των υλικών ήταν ακατάλληλη για την πείραμα. Τόσο η ανάμειξη, όσο και η χύτευση του τελικού μείγματος στο καλούπι γινόταν με μεγάλη δυσκολία. Λόγω της ποσότητας αλλά και της διατομής του χοντρόκοκκου αδρανούς το μείγμα δεν έρρεε, αφήνοντας μεγάλα κενά μέσα στο καλούπι. Ακόμη, οι ράβδοι σιλικόνης εκτοπίστηκαν από την οριζόντια θέση τους, κάτι που όπως φάνηκε στην συνέχεια προκάλεσε σημαντικό πρόβλημα στις μετρήσεις. Για τους λόγους αυτούς, η παραπάνω σύσταση υλικών απορρίφθηκε πριν ακόμη ολοκληρωθεί η διαδικασία της σκυροδέτησης.



Φωτογραφία 18 | Το μείγμα της πρώτης δοκιμής ήταν ακατάλληλο λόγω της μεγάλης κοκκομετρίας των αδρανών που περιείχε.



Φωτογραφία 19 | Φωτογραφίες του δοκιμίου της πρώτης σύστασης. Η εικόνα απέχει πολύ από το αναμενόμενο.

6.2. Σύσταση 2^η

Και η δεύτερη σύσταση που δοκιμάστηκε αποτελείτο από τα ίδια υλικά. Χοντρόκοκκο αδρανές, λεπτόκοκκο αδρανές, τσιμέντο και νερό. Η διαφορά της ήταν στην ποσότητα χοντρόκοκκου αδρανούς, η οποία είχε περιοριστεί στο μισό.

Σύσταση 2 ^η		
	Αναλογία	Ποσότητα
Χοντρόκοκκο αδρανές (γαρμπίλι)	1,5	1,5 Kg
Λεπτόκοκκο αδρανές (άμμος)	1,5	1,5 Kg
Τσιμέντο	1	1 Kg
Νερό	0,5	0,5 Kg

Παρότι η εργασιμότητα του μείγματος ήταν εμφανώς βελτιωμένη και πλησιέστερα στην επιθυμητή, υπήρχαν αντίστοιχες δυσκολίες στην ανάμειξη και χύτευση του σκυροδέματος.



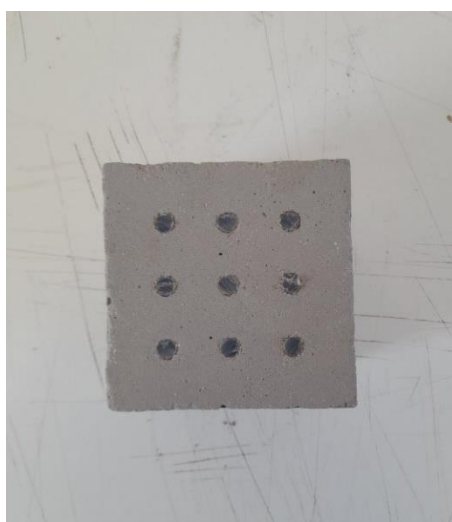
Φωτογραφία 20 | Το δοκίμιο της δεύτερης σύστασης. Διακρίνεται το χοντρόκοκκο αδρανές σε μικρότερη (ανεκτή, αυτή την φορά) ποσότητα.

6.3. Σύσταση 3^η

Από τις δύο προηγούμενες προσπάθειες έγινε κατανοητό ότι οι δυσκολίες παρουσιάζονταν εξαιτίας της διατομής και της ποσότητας του χοντρόκοκκου αδρανούς. Έτσι η τρίτη δοκιμή έγινε χωρίς το συγκεκριμένο υλικό.

Σύσταση 3 ^η		
	Αναλογία	Ποσότητα
Λεπτόκοκκο αδρανές (άμμος)	1,5	1,5 Kg
Τσιμέντο	1	1 Kg
Νερό	0,5	0,5 Kg

Όπως ήταν αναμενόμενο, η εργασιμότητα του μείγματος αυτού ήταν η βέλτιστη δυνατή μέχρι στιγμής. Αφενός η ανάμειξη και η χύτευση γινόταν με πολύ πιο εύκολο τρόπο και αφετέρου λόγω της ρευστότητας του δεν άφηνε κενά χωρίς την παρουσία του υλικού. Ακόμη, οι ράβδοι σιλικόνης παρέμεναν στην θέση τους χωρίς να μετακινηθούν ή να λυγίσουν.

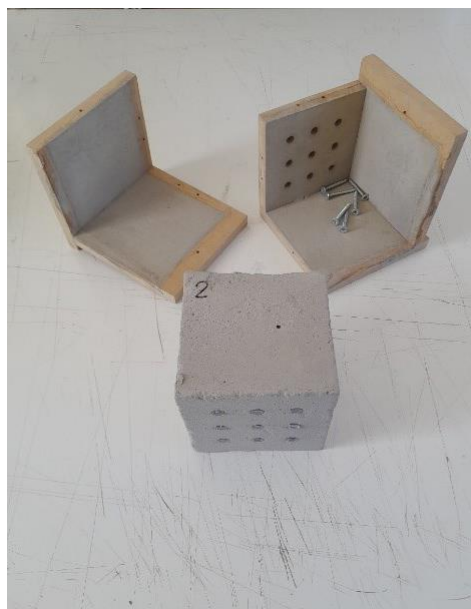


Φωτογραφία 21 | Το δοκίμιο της τρίτης και τελικά επιλεγμένης σύστασης υλικών. Παρατηρείται η ομοιογένεια του σκυροδέματος.

7) Σύγκριση αποτελεσμάτων

Αφότου κατασκευάστηκαν τρία δοκίμια, ένα από κάθε σύσταση, συγκρίθηκαν με κριτήρια την εργασιμότητα του μείγματος και την τελική εικόνα του δοκιμίου. Καταλληλότερη κρίθηκε η τελευταία (χωρίς καθόλου γαρμπίλι στο μείγμα) τόσο λόγω της απαγορευτικής εργασιμότητας και ομοιογένειας των άλλων δύο όσο και λόγω της συνολικότερης εικόνας των δοκιμίων. Οι αναλογίες της τελικά επιλεγμένης σύστασης υπενθυμίζονται στον παρακάτω πίνακα.

Τελική σύσταση σκυροδέματος, (σύσταση 3 ^η)		
	Αναλογία	Ποσότητα
Λεπτόκοκκο αδρανές (άμμος)	1,5	1,5 Kg
Τσιμέντο	1	1 Kg
Νερό	0,5	0,5 Kg



Φωτογραφία 22 | Δοκίμιο αμέσως μετά το ξεκαλούπωμα του.

Γ. Δεύτερη φάση

Η δεύτερη φάση του πειράματος είχε να κάνει με την κατασκευή διάφανου σκυροδέματος και την δοκιμή των ράβδων σιλικόνης προς αντικατάσταση των οπτικών ινών, ως οικονομικότερο και ευχερέστερο μέσο διάδοσης φωτός. Για τον λόγο αυτό, κατασκευάστηκαν διάφορες κατηγορίες δοκιμών τα οποία στην συνέχεια υποβλήθηκαν σε μετρήσεις. Από τα αποτελέσματα των μετρήσεων αλλά και άλλων παρατηρήσεων προέκυψαν τα τελικά συμπεράσματα της εργασίας.

1) Πειραματική διαδικασία

Υπενθυμίζεται ότι για την πειραματική διαδικασία έπρεπε να κατασκευαστούν 4 σειρές δοκιμών:

- με συμβατικό σκυρόδεμα, χωρίς την ενσωμάτωση μέσου διάδοσης (μέτρο σύγκρισης θλιπτικής αντοχής),
- με οπτική ίνα (μέτρο σύγκρισης φωτοδιαπερατότητας),
- με ράβδους σιλικόνης αντί οπτικής ίνας
- με ράβδους σιλικόνης και μεταλλικό fiber με σκοπό την ενίσχυση της θλιπτικής αντοχής που πιθανότατα να είχε εξασθενήσει με την ενσωμάτωση των ράβδων σιλικόνης.

Όλες οι σειρές δοκιμών που αναφέρθηκαν, κατασκευάστηκαν με την σύσταση υλικών που επιλέχτηκε στην πρώτη φάση.

2) Κατασκευή καλουπιού

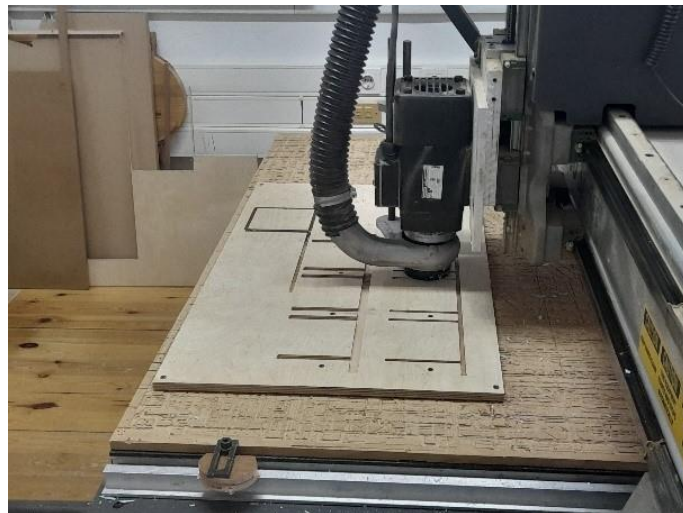
Στο στάδιο των μετρήσεων απαιτούνταν τρία δοκίμια από κάθε κατηγορία, ίδιας σύστασης και κατασκευής. Ο μέσος όρος των τιμών, τριών δοκιμών, αποτελεί ασφαλέστερο αποτέλεσμα από μια και μόνο δοκιμή. Με τον τρόπο αυτό μειώνεται αρκετά η πιθανότητα λανθασμένων συμπερασμάτων λόγω αστοχίας του δοκιμίου.



Φωτογραφία 23 | Πλέον κάθε κατηγορία αποτελούνταν από τρία δοκίμια ίδιων ιδιοτήτων.

Προς ικανοποίηση της παραπάνω συνθήκης, κατασκευάστηκε δεύτερο καλούπι με τρεις μήτρες. Με τον τρόπο αυτό τα δοκίμια θα κατασκευάζονταν από το ίδιο ακριβώς μείγμα, προς αποφυγή σφάλματος.

Για την κατασκευή του καλουπιού ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία σχεδίασης, κοπής και συναρμολόγησης στο εργαστήριο του Πολυτεχνείου.



Φωτογραφία 24 | Τα τμήματα των καλουπιών κόπηκαν με την βοήθεια μηχανήματος CNC στο εργαστήριο του Πολυτεχνείου.

Εξαιτίας, αδύναμων σημείων που εντοπίστηκαν στο πρώτο καλούπι, έγινε προσπάθεια βελτίωσης του επόμενου. Συγκεκριμένα, αυτή την φορά χρησιμοποιήθηκε ξυλεία κόντρα πλακέ θαλάσσης (σημύδα) με μεγάλη αντοχή στην υγρασία. Παρατηρήθηκαν ακόμη αστοχίες στα κομμάτια του ξύλου από

την χρήση βιδών. Όλη η κατασκευή άλλαξε και η συναρμολόγηση και περίσφυξη του γινόταν με την χρήση ράβδων και περικόχλιων.



Φωτογραφία 25 | Νέο καλούπι αποτελούμενο από 3 μήτρες, για ταυτόχρονη σκυροδέτηση από το ίδιο μείγμα.

3) Κατασκευή συσκότισης

Για τις ανάγκες των μετρήσεων φωτοδιαπερατότητας, δημιουργήθηκε ειδική κατασκευή συσκότισης. Με την μορφή ορθογωνίου παραλληλεπιπέδου διατομής ίσης με αυτή των δοκιμίων και με μια πλευρά ανοιχτή, στο ένα άκρο της κατασκευής τοποθετούνταν το φωτόμετρο και στο άλλο η φωτεινή πηγή. Στο ενδιάμεσο τους, πάντα στην ίδια θέση, τοποθετούνταν το δοκίμιο. Με αυτό το τρόπο γινόταν βέβαιο πως η ποσότητα φωτός που είχε καταγράψει το φωτόμετρο είχε διαπεράσει μόνο το δοκίμιο και δεν προέρχονταν από άλλες πηγές.





Φωτογραφία 26 | Συναρμολόγηση και λειτουργία της κατασκευής συσκότισης που χρησιμοποιήθηκε.

4) Αναλογίες – Ποσοστά

Μέσα από την βιβλιογραφία αλιεύτηκαν διάφορες πληροφορίες για τις αναλογίες τόσο του μείγματος αλλά και του μέσου διάδοσης του φωτός. Σε παραπάνω ενότητα παρουσιάστηκε ο τρόπος επιλογής κατάλληλης σύστασης υλικών για το μείγμα. Σχετικά με την ποσότητα οπτικών ινών, ράβδων σιλικόνης και μεταλλικού fiber το ποσοστό δόθηκε από την βιβλιογραφία. Αναλυτικά, ανά μονάδα επιφάνειας, το ποσοστό του μέσου διάδοσης φωτός έπρεπε να είναι μέγιστο 5% και αντίστοιχα το ποσοστό κατά όγκο του μεταλλικού fiber έπρεπε να είναι 3%.

Για τον υπολογισμό του πλήθους ράβδων σιλικόνης και οπτικής ίνας που χρησιμοποιήθηκαν στο κάθε δοκίμιο ακολουθήθηκε η παρακάτω διαδικασία:

- Ποσοστό ανά επιφάνεια μέσου διάδοσης φωτός _ 5%
- Επιφάνεια δοκιμίου = $10\text{cm} \times 10\text{cm} = 100\text{cm}^2$
- Επιφάνεια μέσου διάδοσης φωτός = $5\% \times 100\text{cm}^2 = 5\text{cm}^2$

Άρα ανά δοκίμιο, το μέσο διάδοσης πρέπει να καταλαμβάνει επιφάνεια 5cm^2

Για τις ράβδους σιλικόνης:

- Διάμετρος = $0,7\text{cm}$
- Εμβαδόν ράβδου = $\pi \times r^2 = 3,14 \times (0,35)^2 = 3,14 \times 0,1225 = 0,38\text{cm}^2$
- Αριθμός ράβδων = Εμβαδόν επιφάνειας / Εμβαδόν ράβδου
 $= 5\text{cm}^2 / 0,38\text{cm}^2 = 13$ σημεία

Άρα ανά δοκίμιο, τοποθετήθηκαν 13 ράβδοι σιλικόνης

Για τις οπτικές ίνες:

- Διάμετρος = 0,1cm
- Εμβαδόν ράβδου = $\pi \times r^2 = 3,14 \times (0,05)^2 = 3,14 \times 0,0025 = 0,008\text{cm}^2$
- Αριθμός ράβδων = Εμβαδόν επιφάνειας / Εμβαδόν ράβδου
= $5\text{cm}^2 / 0,008\text{cm}^2 = 625$ σημεία

Άρα ανά δοκίμιο, τοποθετήθηκαν 625 κομμάτια οπτικής ίνας

Για τον υπολογισμό της ποσότητας μεταλλικού fiber που χρησιμοποιήθηκε στο κάθε δοκίμιο ακολουθήθηκε η παρακάτω διαδικασία:

Ποσοστό ανά όγκο μεταλλικού fiber _ 3%

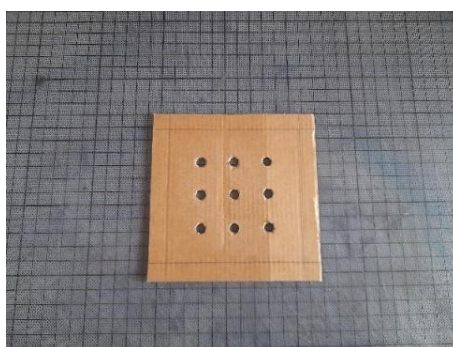
Όγκος δοκιμίου = $10\text{cm} \times 10\text{cm} \times 10\text{cm} = 1000\text{cm}^3$

Όγκος μεταλλικού fiber ανά δοκίμιο = $3\% \times 1000\text{cm}^3 = 30\text{cm}^3 = 30\text{ml}$

Εξαιτίας του μικρού και περίπλοκου σχήματος του μεταλλικού fiber, ήταν δύσκολος ο υπολογισμός του απαιτούμενου όγκου. Για αυτό, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος του εκτοπίσματος. Συγκεκριμένα, σε ένα ογκομετρικό δοχείο τοποθετήθηκε νερό μέχρι συγκεκριμένη στάθμη και στην συνέχεια τοποθετήθηκε το fiber μέχρι η ένδειξη να έχει ανέβει κατά 30ml.

5) Σχήμα τοποθέτησης του μέσου διάδοσης

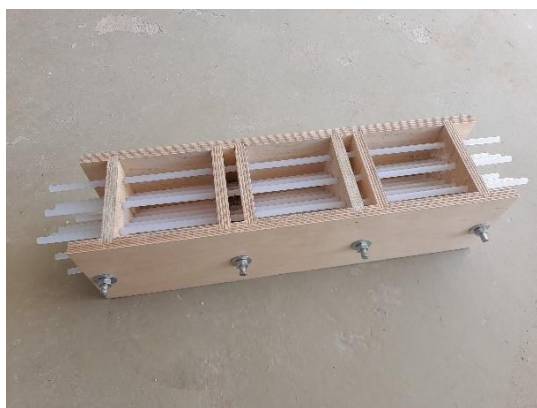
Η τοποθέτηση τόσο των ράβδων σιλικόνης, όσο και των οπτικών ινών έγινε με συμμετρικό τρόπο, ώστε να μην επηρεαστεί η ομοιογένεια του δοκιμίου και πιθανόν η θλιπτική του αντοχή.



Φωτογραφία 27 | Αρχικά χρησιμοποιήθηκαν 9 ράβδοι διαμέτρου 8mm και κατόπιν έλλειψης που προέκυψε, αλλάξαν σε 13 ράβδους 7mm. Και στις δύο περιπτώσεις η τοποθέτηση γινόταν το μέγιστο δυνατό συμμετρικά.

6) Διαδικασία σκυροδέτησης δεύτερης φάσης

Η διαδικασία της σκυροδέτησης ήταν όπως αυτή της πρώτης φάσης. Αφού υπολογίστηκαν οι απαιτούμενες ποσότητες, τα υλικά ζυγίστηκαν και αναμείχθηκαν. Το ομογενοποιημένο μείγμα χυτεύτηκε στα καλούπια, στα οποία είχαν ήδη τοποθετηθεί ράβδοι σιλικόνης ή οπτικές ίνες κατά περίπτωση. Μετά την στερεοποίηση του σκυροδέματος τα δοκίμια τοποθετούνταν σε δεξαμενή γεμάτη με νερό όπου παρέμεναν 28 ημέρες. Μετά την χρονική περίοδο αυτή, τα δοκίμια ήταν έτοιμα για τις μετρήσεις.



Φωτογραφία 28 | Αρχικά τοποθετούνταν το μέσο διάδοση φωτός και στην συνέχεια εγχεόταν το σκυρόδεμα.

Δ. Μετρήσεις ιδιοτήτων

Οι ιδιότητες που συνδυάζει το διάφανο σκυρόδεμα είναι αρκετές. Στην παρούσα εργασία επιλέχτηκαν προς μελέτη αφενός η ποσότητα φωτός που διαπερνά το δοκίμιο και αφετέρου η θλιπτική του αντοχή. Πρώτα μετρήθηκε η φωτοδιαπερατότητα του δοκιμίου και στην συνέχεια η θλιπτική αντοχή καθώς η μέθοδος μέτρησης ουσιαστικά το κατέστρεψε.



Φωτογραφία 29 | Δοκίμιο αμέσως μετά την μέτρηση της θλιπτικής του αντοχής. Το δοκίμιο καταστρεφόταν κατά την διαδικασία της μέτρησης.

1) Μέτρηση φωτοδιαπερατότητα



Φωτογραφία 30 | Το φως περνά μέσα από το δοκίμιο διάφανου σκυροδέματος.

Χαρακτηριστική ιδιότητα του διάφανου σκυροδέματος είναι να διαπερνιέται από το φως. Πιο συγκεκριμένα, καθώς το φως προσπίπτει στο ένα άκρο του δοκιμίου, εισέρχεται στο μέσο διάδοσης και λόγω των συνεχών ανακλάσεων καταλήγει στο άλλο.

Η παραπάνω λειτουργία παίζει καθοριστικό ρόλο στο τελικό αποτέλεσμα του σκυροδέματος καθώς επηρεάζονται και οι εφαρμογές του.

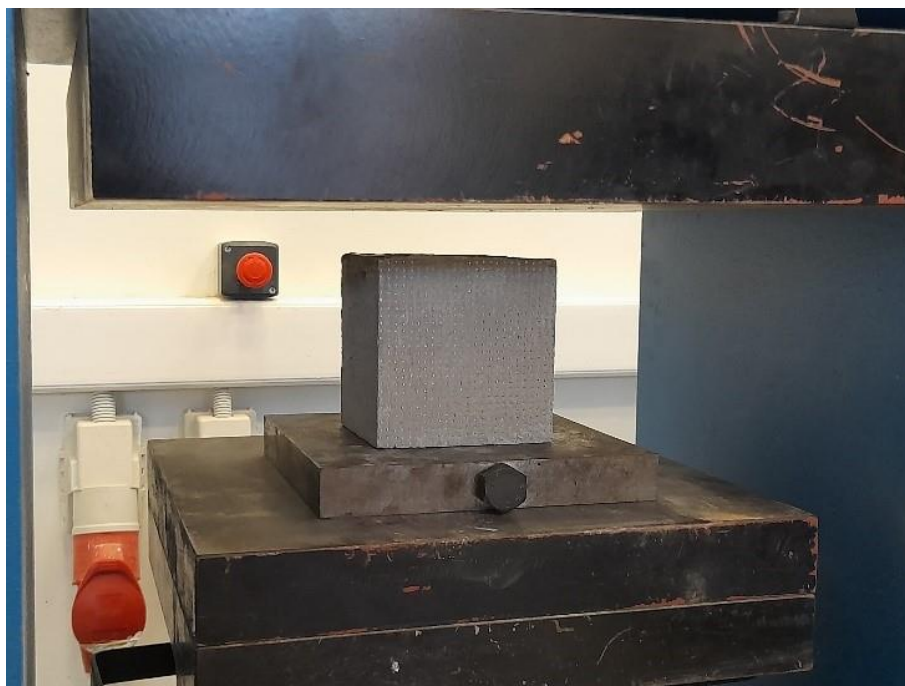
Η ποσότητα φωτός που διαπερνά κάθε δοκίμιο μετρείται με το φωτόμετρο, ειδικό όργανο μέτρησης εντάσεως φωτός. Μονάδα μέτρησης της έντασης του φωτός είναι το lux και μεταφράζεται ως το μέτρο της έντασης του φωτός που πέφτει ή διαπερνά μια επιφάνεια συγκεκριμένης διάστασης. Για να τεθεί μια τάξη μεγέθους, η βιβλιογραφία αναφέρει ότι 1 lux είναι το φως μιας νύχτας με πανσέληνο και 400 lux είναι ο φωτισμός μιας λάμπας γραφείου.^[33] (οι μετρήσεις στα δοκίμια με ράβδους σιλικόνης έδωσαν αποτελέσματα που κυμαίνονταν στα 3 lux, ενώ τα δοκίμια με την οπτική ίνα έδωσαν αποτελέσματα κοντά στα 400 lux).

^[33] Blog Leditnow, (2017), LEDITNOW, Διαθέσιμο στο: <https://www.leditnow.gr/ti-einai-i-fotometria--ti-onomazetai-lux-lumen-kai-candela-pou-vlepourme-pano-stis-lampes.html>, [Πρόσβαση στις 17 Ιουλίου 2023]



Φωτογραφία 31 | Η διάταξη μέτρησης της φωτοδιαπερατότητας

2) Μέτρηση θλιπτικής αντοχής



Φωτογραφία 32 | Δοκίμιο έτοιμο για μέτρηση της θλιπτικής του αντοχής.

Η δεύτερη χαρακτηριστική ιδιότητα του διάφανου σκυροδέματος η οποία μετρήθηκε ήταν η θλιπτική αντοχή. Είναι γενικά αποδεκτό ότι το σκυρόδεμα φέρει μεγάλη αντοχή σε θλίψη κάτι που το καθιστά ιδανικό για κατασκευές σημαντικών απαιτήσεων σε θλίψη.

Η θλιπτική αντοχή μετριέται σε ειδική πρέσα, η οποία ασκεί μεγάλες δυνάμεις στα δοκίμια μέχρι αυτά να ξεπεράσουν το όριο ελαστικής παραμόρφωσης και τελικά να θρυμματιστούν. Κατά την τοποθέτηση των δοκιμίων στην πρέσα ζητούνται από το λογισμικό οι ακριβείς διαστάσεις ώστε εκτός των τιμών της ασκούμενης δύναμης να καταγραφούν και αυτές της εφαρμοζόμενης τάσης. Μεγαλύτερης σημασίας είναι η μέτρηση της τάσης, καθώς έχει ληφθεί υπόψιν η επιφάνεια και άρα δεν επηρεάζεται η τάξη μεγέθους. Αντίθετα στην μέτρηση της δύναμης πρέπει να διευκρινιστεί το μέγεθος της καταπονούμενης επιφάνειας για ασφαλέστερα συμπεράσματα.

Μονάδα μέτρησης της θλιπτικής δύναμης είναι το N (Newton)

Αντίστοιχα μονάδα μέτρησης της τάσης είναι το Pa (Pascal)

Για την τάξη μεγέθους να αναφερθεί ότι 10 kN είναι η το βάρος ενός οχήματος 1 τόνου. (οι μετρήσεις στα δοκίμια με ράβδους σιλικόνης έδωσαν αποτελέσματα

που κυμαίνονταν στα 150 kN, ενώ τα δοκίμια με την οπτική ίνα έδωσαν 250 kN περίπου).

Οι μετρήσεις θλιπτικής αντοχής των δοκιμίων έγιναν στο Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Μηχανικής και Αντοχής Υλικών του Πολυτεχνείου με την πρέσα που φαίνεται παρακάτω.



Φωτογραφία 33 | Πρέσα η οποία μετρά την θλιπτική αντοχή κάθε δοκιμίου, στο εργαστήριο του Πολυτεχνείου.

Ε. Αποτελέσματα μετρήσεων και ερμηνεία αποτελεσμάτων

1) Αποτελέσματα μετρήσεων φωτοδιαπερατότητας

Μετρήσεις αρχικών δοκιμίων (επαλήθευση επιλεγμένης σύστασης υλικών)

Όπως αναλύεται στην πρώτη φάση της πειραματικής διαδικασίας, τα πρώτα δοκίμια κατασκευάστηκαν με σκοπό την εύρεση κατάλληλης σύστασης υλικών για την συνέχεια. Τα δοκίμια αυτά κρίθηκαν για την εργασιμότητα τους, τόσο από την επεξεργασία όσο και από την τελική τους εικόνα. Παρόλα αυτά, μετρήθηκαν ως προς την ποσότητα φωτός που τα διαπερνά. Υπενθυμίζεται ότι στα δοκίμια αυτά δεν χρησιμοποιήθηκε οπτική ίνα αλλά ράβδοι σιλικόνης. Τα αποτελέσματα μπορούν να δώσουν μετρήσιμα στοιχεία τα οποία και επαληθεύουν την αρχική υποκειμενική επιλογή σύστασης υλικών.

Μετρήσεις φωτοδιαπερατότητας αρχικών δοκιμίων			
Φωτεινή πηγή	Σύσταση υλικών		
	Χοντρ. αδρανές, λεπτ. αδρανές, τσιμεντοπολτός	1/2 χοντρ. αδρανές, λεπτ. αδρανές, τσιμεντοπολτός	Λεπτ. αδρανές, τσιμεντοπολτός
3820 lux	2,5 lux	4,3 lux	4,1 lux

Έκπληξη προκαλεί το κενό μεταξύ φωτεινής πηγής και ποσότητας που διαπερνά τα δοκίμια, το οποίο όμως θα αναλυθεί στην συνέχεια. Η προσοχή στρέφεται στις απόλυτες τιμές των τριών δοκιμίων. Και συγκεκριμένα στην διαφορά μεταξύ του δοκιμίου με πλήρη ποσότητα χοντρόκοκκου αδρανούς και τα υπόλοιπα δύο. Η διαφορά αυτή ωφείλεται στο γεγονός ότι τα μεγάλης διαμέτρου αδρανή επηρέασαν την θέση και τον προσανατολισμό των ράβδων σιλικόνης, παρεμποδίζοντας σε μεγάλο βαθμό την πορεία του φωτός. Λόγω της μη γραμμικής πορείας του, αυτό απορροφάται από τα τοιχώματα της ράβδου στα οποία προσπέφτει. Άρα πλέον μπορεί να επαληθευτεί και ποσοτικά η ακατάλληλότητα της σύστασης αυτής.

Στις άλλες δύο αναλογίες παρατηρούνται παρόμοιες τιμές, αναμενόμενο αποτέλεσμα μιας και κατά την διαδικασία της σκυροδέτησης τα δύο αυτά δοκίμια ήταν αρκετά κοντά στην συμπεριφορά τους. Το μείγμα είχε ικανοποιητική εργασιμότητα και δεν επηρέασε την θέση ή τον προσανατολισμό των ράβδων.

Μετρήσεις δοκιμών με τα επιλεγμένα μέσα διάδοσης φωτός

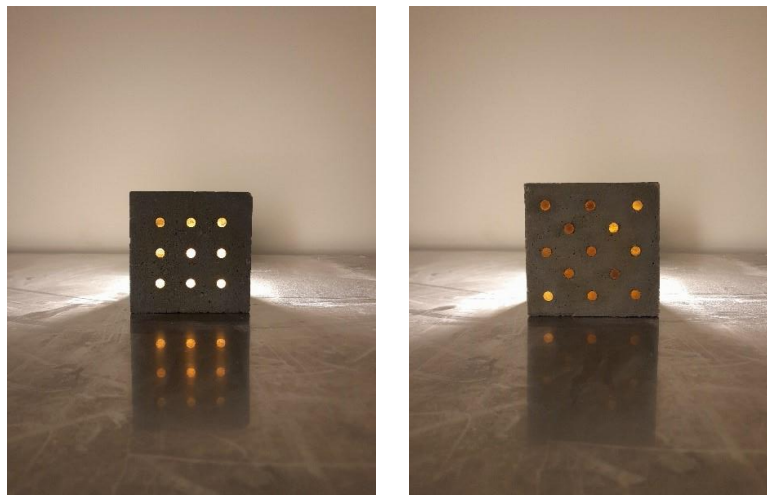
Μετρήσεις φωτοδιαπερατότητας δοκιμών					
Δοκίμια	Φωτεινή πηγή	Μέσο διάδοσης φωτός			
		Χωρίς μέσο διάδοσης	Ράβδοι σιλικόνης	Ράβδοι σιλικόνης & μεταλλικό fiber	Οπτική ίνα
A	3820 lux	-	3,70 lux	3,20 lux	374 lux
B	3820 lux	-	2,60 lux	2,70 lux	493 lux
Γ	3820 lux	-	3,00 lux	2,90 lux	403 lux

Τα αποτελέσματα θα ερμηνευτούν αναλυτικά παρακάτω, παρόλα αυτά κρίνεται κατάλληλη μια συγκεντρωτική ερμηνεία. Παρατηρείται μεγάλο χάσμα μεταξύ της κάθε κατηγορίας. Οι τάξεις μεγέθους δίνουν μια γενική εικόνα. Η φωτεινή πηγή μετριέται στα 3820 lux ενώ στα δοκίμια με οπτική ίνα (καλύτερο μέσο διάδοσης φωτός μέχρι στιγμής) οι μετρήσεις είναι της τάξης του 370 lux – 490 lux. Η διαφοροποίηση από το 370 στο 490 φαίνεται μεγάλη αλλά παραμένει ασήμαντη μπροστά στην σχεδόν 10πλάσια μέτρηση της φωτεινής πηγής. Το χάσμα μεγαλώνει ακόμη περισσότερο κοιτώντας τις μετρήσεις των δοκιμών με τις ράβδους σιλικόνης. Συγκεκριμένα το δοκίμιο διαπερνάται από ποσότητα φωτός 1200 φορές λιγότερη από όσο εκπέμπει η φωτεινή πηγή!

Μετρήσεις δοκιμών με την χρήση ράβδων σιλικόνης

Μετρήσεις φωτοδιαπερατότητας δοκιμών			
Δοκίμια	Φωτεινή πηγή	Μέσο διάδοσης φωτός	
		Ράβδοι σιλικόνης	Ράβδοι σιλικόνης & μεταλλικό fiber
1	3820 lux	3,70 lux	3,20 lux
2	3820 lux	2,60 lux	2,70 lux
3	3820 lux	3,00 lux	2,90 lux

Παρατηρείται ότι η ποσότητα φωτός που διαπερνά τις ράβδους σιλικόνης είναι μηδαμινή σε σχέση με την ποσότητα στην οποία το δοκίμιο εκτίθεται. Ακόμη, παρά το γεγονός ότι σε κάθε δοκίμιο χρησιμοποιήθηκαν ράβδοι από τον ίδιο κατασκευαστή, από την ίδια συσκευασία, υπήρχαν αποκλίσεις στην ποσότητα φωτός που διαπερνούσε την κάθε ράβδο. Η διαφορά γινόταν αισθητή χωρίς μέτρηση.



Φωτογραφία 34 | Τα δοκίμια με τις ράβδους σιλικόνης. Αρχικά χρησιμοποιήθηκαν 9 ράβδοι διαμέτρου 8mm και στην συνέχεια, λόγω έλλειψης, αντικαταστάθηκαν από 13 ράβδους διαμέτρου 7mm. Οι παραπάνω μετρήσεις αφορούν τα δοκίμια 13 σημείων.

Μετρήσεις δοκιμών με την χρήση οπτικής ίνας

Μετρήσεις φωτοδιαπερατότητας δοκιμών		
Δοκίμια	Φωτεινή πηγή	Μέσο διάδοσης φωτός
		Οπτική ίνα
1	3820 lux	374 lux
2	3820 lux	493 lux
3	3820 lux	403 lux

Αμέσως φαίνεται ότι οι τιμές είναι κατά πολύ υψηλότερες. Εύκολα γίνεται πιστευτό ότι αυτό οφείλεται στο πλήθος των σημείων της οπτικής ίνας (625), παρόλα αυτά ας υπενθυμιστεί ότι το ποσοστό επιφάνειας του μέσου διάδοσης του φωτός παραμένει ίδιο (5%). Η μεγάλη αυτή διαφορά κλίμακας σε σχέση με τις

τιμές των ράβδων σιλικόνης οφείλεται στο ίδιο το υλικό του μέσου διάδοσης φωτός ,και την λειτουργία του και όχι στο πλήθος των στοιχείων.



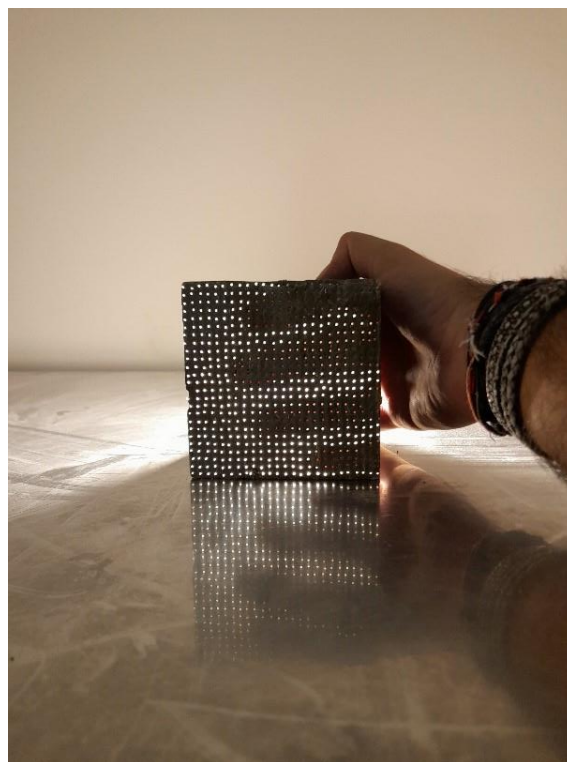
Φωτογραφία 35 | Δοκίμιο διάφανου σκυροδέματος κατασκευασμένο από οπτική ίνα.

Υποκειμενική μέτρηση (γενική εικόνα)



Φωτογραφία 36 | Οι τρεις διαφορετικές κατηγορίες φωτοδιαπερατότητας που μετρήθηκαν. Συμβατικό σκυρόδεμα / Διάφανο σκυρόδεμα με ράβδους σιλικόνης (με την χρήση μεταλλικού fiber και χωρίς) / Διάφανο σκυρόδεμα με οπτικές ίνες.

Παρά τις μετρήσεις που έγιναν με την μέγιστη δυνατή αντικειμενικότητα και τα κατάλληλα όργανα, ενδιαφέρον παρουσιάζουν και οι εντυπώσεις που αφήνουν τα δοκίμια στην γενική τους εικόνα. Μπορεί το ποσοστό επιφάνειας του μέσου διάδοσης να είναι το ίδιο, παρόλα αυτά το τελικό αποτέλεσμα παρουσιάζει σημαντική διαφοροποίηση. Στις ράβδους σιλικόνης, όπου η διατομή είναι μεγάλη, τα σημεία εφαρμογής είναι ελάχιστα (13). Αντίστοιχα στα δοκίμια με οπτική ίνα το φως διαπερνά 625 σημεία δίνοντας την αίσθηση ενός ενιαίου και ομοιογενούς αποτελέσματος. Αυτό δίνει στα συγκεκριμένα δοκίμια ένα πολύ πιο εντυπωσιακό αποτέλεσμα.



Φωτογραφία 37 | Τα δοκίμια διάφανου σκυροδέματος με οπτική ίνα έδωσαν ένα εντυπωσιακό και ικανοποιητικό αποτέλεσμα.

2) Αποτελέσματα μετρήσεων θλιπτικής αντοχής

Μετρήσεις θλιπτικής αντοχής δοκιμίων				
		Δοκίμιο	Δύναμη F (kN)	Τάση (MPa)
Μέσο διάδοσης φωτός	Χωρίς μέσο διάδοσης	A	241,4	28,5
		B	251,7	29,4
		Γ	238,0	27,6
	Ράβδοι σιλικόνης	A	160,2	18,9
		B	151,5	17,9
		Γ	146,0	17,4
	Ράβδοι σιλικόνης & μεταλλικό fiber	A	158,7	18,8
		B	179,6	21,1
		Γ	179,9	21,3
	Οπτική ίνα	A	240,4	28,2
		B	235,0	26,7
		Γ	260,6	29,9

Στις μετρήσεις της θλιπτικής αντοχής μετρήθηκε τόσο η δύναμη που ασκήθηκε όσο και η τάση. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω το μέγεθος που δίνει πιο αντικειμενικά δεδομένα (ανεξάρτητα της επιφάνειας) είναι η τάση η οποία και θα σχολιαστεί.

Μετρήσεις δοκιμίων χωρίς την χρήση μέσου διάδοσης φωτός

Τα δοκίμια αυτά έχουν μέσο όρο τιμών 28,5 MPa λίγο χαμηλότερα των 30 MPa. Αναμενόμενο μιας και η σύσταση υλικών που χρησιμοποιήθηκε προοριζόταν για κατασκευή σκυροδέματος κατηγορίας C25/30 η οποία και δίνει τάση 30 MPa σε αυτήν την κατηγορία δοκιμίων.

Σχετικά με την θραύση του δοκιμίου, όπως φαίνεται και από τις εικόνες παρακάτω, έχει αποκολληθεί υλικό από τις παρειές, αποδυναμώνοντας τον κύριο όγκο.



Φωτογραφία 38 | Δοκίμιο συμβατικού σκυροδέματος μετά την μέτρηση του ορίου θραύσης του.

Μετρήσεις δοκιμίων με την χρήση ράβδων σιλικόνης

Μετρήσεις θλιπτικής αντοχής δοκιμίων	
Μέσος όρος τιμών συμβατικού σκυροδέματος (MPa)	Μέσος όρος τιμών με χρήση ράβδων σιλικόνης (MPa)
28,5	18,0

Σύμφωνα με την αρχική υπόθεση η ενσωμάτωση ράβδων σιλικόνης στο δοκίμιο, θα μείωνε σημαντικά την θλιπτική του αντοχή. Παρατηρείται ότι οι τιμές έφτασαν μέχρι τα 18,9 MPa (μέσος όρος τιμών 18 MPa), εμφανώς πιο κάτω από την παραπάνω κατηγορία δοκιμίων, επαληθεύοντας την υπόθεση που είχε γίνει αρχικά ότι η χρήση ράβδων αποδυναμώνει την θλιπτική αντοχή.

Η κύρια ρωγμή θραύσης του δοκιμίου είναι διαγώνια και περνάει από τα σημεία που υπάρχουν ράβδοι σιλικόνης. Πρόκειται για το φαινόμενο της διάτμησης. Λόγω διαφορετικών ιδιοτήτων των υλικών τα σημεία αυτά λειτουργούν ως αδύναμα και κατεύθυναν την ρωγμή. Η συμπεριφορά αυτή παρατηρήθηκε και στα 3 δοκίμια της κατηγορίας.



Φωτογραφία 39| Τα δοκίμια με τις ράβδους σιλικόνης θρυμματίστηκαν διατμηματικά με την ρωγμή να περνά από τα σημεία των ράβδων. Η παρατήρηση αυτή οδηγεί στο συμπέρασμα ότι τα σημεία εφαρμογής είναι αδύναμα για το δοκίμιο.

Μετρήσεις δοκιμών με την χρήση ράβδων σιλικόνης και ενίσχυση από μεταλλικό fiber

Μετρήσεις θλιπτικής αντοχής δοκιμών	
Μέσος όρος τιμών συμβατικού σκυροδέματος (MPa)	Μέσος όρος τιμών με χρήση ράβδων σιλικόνης και μεταλλικού fiber (MPa)
28,5	20,4

Στην κατηγορία αυτή, η υπόθεση ήταν ότι ενσωματώνοντας μεταλλικό fiber η αποδυναμωμένη (από τις ράβδους σιλικόνης) θλιπτική αντοχή θα επανέλθει αν όχι στις ίδιες τότε σε ,συγκριτικά, υψηλότερες τιμές. Η υπόθεση αποδείχτηκε εν μέρει σωστή με λιγότερο ικανοποιητικά αποτελέσματα από τα αναμενόμενα. Πιο συγκεκριμένα ο μέσος όρος των τιμών θλιπτικής αντοχής έφτασε τα 20,4 MPa, ελαφρώς πιο πάνω από τα 18 MPa (δοκίμια χωρίς το μεταλλικό fiber). Τα δοκίμια και αυτής της κατηγορίας έσπασαν με τον ίδιο τρόπο, διατμητικά με την ρωγμή να περνάει από τα αδύναμα σημεία των ράβδων σιλικόνης.

Μετρήσεις δοκιμών με την χρήση οπτικής ίνας

Μετρήσεις θλιπτικής αντοχής δοκιμών	
Μέσος όρος τιμών συμβατικού σκυροδέματος (MPa)	Μέσος όρος τιμών με χρήση οπτικής ίνας (MPa)
28,5	28,3

Τελευταία μετρήθηκαν τα δοκίμια τα οποία ως μέσο διάδοσης του φωτός είχαν την οπτική ίνα. Τα αποτελέσματα ήταν αρκετά εντυπωσιακά καθώς οι τιμές άγγιζαν την κατηγορία C25/30 συμβατικού σκυροδέματος. Στην περίπτωση ενός δοκιμίου μάλιστα, η θλιπτική αντοχή ξεπέρασε αυτή του συμβατικού σκυροδέματος. Πιθανότατα η οπτική ίνα να λειτουργήσει ως αδρανές προσδίδοντας περισσότερη αντοχή. Σχετικά με την θραύση παρατηρήθηκε μια ιδιαίτερη μορφή καθώς 2 από τα 3 δοκίμια ρηγματώθηκαν κατακόρυφα στην δεξιά πλευρά του δοκιμίου και στην συνέχεια οριζόντια στο μέσον περίπου του υπολοίπου τμήματος. Δεν υπήρξε διάτμηση.



Φωτογραφία 40 | Τα δοκίμια με την χρήση οπτικής ίνας άντεξαν μεγάλη θλιπτική πίεση, παρόλα αυτά ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι ρωγμές που δημιουργήθηκαν.

ΣΤ. Συμπεράσματα

Μετά το τέλος της πειραματικής διαδικασίας και την καταγραφή των αποτελεσμάτων ακολουθεί η διεξαγωγή συμπερασμάτων. Για να γίνει αυτό θα πρέπει να γίνει παραπομπή στην διαδικασία και στις υποθέσεις που αρχικά έγιναν.

Το πείραμα χωρίστηκε σε δύο φάσεις. Αρχικά βρέθηκε η καταλληλότερη σύσταση για την περίπτωση, και στην συνέχεια κατασκευάστηκαν δοκίμια τα οποία υποβλήθηκαν σε μετρήσεις. Η υπόθεση έλεγε ότι η χρήση σιλικόνης θα δώσει ικανοποιητικά αποτελέσματα στις μετρήσεις της φωτοδιαπερατότητας. Σχετικά με την θλιπτική αντοχή, η χρήση μεταλλικού fiber θα συνέβαλε σημαντικά στην αύξηση της, δεδομένης της αποδυνάμωσης από τις ράβδους σιλικόνης.

- Τα δοκίμια με ράβδους σιλικόνης δεν έδωσαν ικανοποιητικά αποτελέσματα

Ήδη αναφέρθηκε ότι η ποσότητα φωτός που διαπέρασε τα δοκίμια με ενσωματωμένες τις ράβδους σιλικόνης ήταν μηδαμινή σε σχέση με αυτή της φωτεινής πηγής. Οριακά αμφισβητείται η χρήση τους στην κατασκευή διάφανου σκυροδέματος. Ακόμη, συνέβαλαν σημαντικά στην μείωση της αντοχής του δοκιμίου σε θλίψη. Αυτό φάνηκε τόσο από τις χαμηλές τιμές που υπολογίστηκαν όσο και από την ρωγμή θραύσης όπου διέτρεξε τα σημεία των ράβδων καθιστώντας τα αδύναμα σημεία του δοκιμίου. Υπεύθυνη για τα παραπάνω αποτελέσματα είναι η ποιότητα της σιλικόνης. Δοκιμάστηκαν 3 διαφορετικά είδη. Ειδικότερα, στην ποσότητα φωτός που διαπερνούσε το δοκίμιο, το χρώμα και η ποιότητα της κάθε ράβδου έπαιξε καθοριστικότατο ρόλο. Κρίνεται σκόπιμη συνέχιση της έρευνας γύρω από το θέμα αυτό. Πιθανόν διαφορετικής σύστασης ρητίνη να έδινε πολύ αποδοτικότερα αποτελέσματα.

Παρά τα αποθαρρυντικά αποτελέσματα των μετρήσεων, αξίζει να αναφερθεί η ευκολία στην προετοιμασία της σκυροδέτησης που πρόσφερε η χρήση ράβδων σιλικόνης. Υλικό το οποίο κυκλοφορεί σε αφθονία στο εμπόριο, με πολύ χαμηλό κόστος και συγκεκριμένες διαστάσεις. Δεν απαιτείται καμία ιδιαίτερη προετοιμασία και τοποθετείται απευθείας από την συσκευασία στο καλούπι. Ακόμη, λόγω του μεγάλου τους μεγέθους η διαχείρισή τους είναι σχετικά εύκολη σε σχέση με την μικροσκοπική οπτική ίνα.

Στον αντίποδα και πάλι, το τελικό αποτέλεσμα δεν είναι τόσο εντυπωσιακό. Μια επιφάνεια 625 σημείων υπερτερεί αισθητικά μιας επιφάνειας 13 σημείων. Η κλίμακα παίζει καθοριστικό ρόλο. Διατυπώνεται η πεποίθηση πως η χρήση ράβδων σιλικόνης αφορά κατασκευές μεγαλύτερης κλίμακας (προσόψεις κτιρίων) και όχι μικρές κατασκευές προσπίδες στην ανθρώπινη κλίμακα, δεδομένης πάντα της επίτευξης υψηλότερων ποσοστών μεταφοράς φωτός των ράβδων.

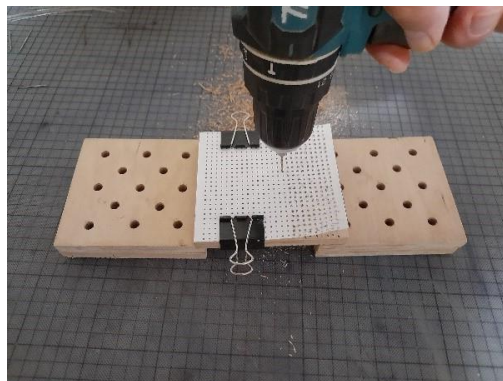
- Απαιτητική η χρήση μεταλλικού fiber χωρίς τα αναμενόμενα αποτελέσματα

Η χρήση του μεταλλικού fiber τόσο κατά τον υπολογισμό του όσο και κατά την ανάμειξη – χύτευση παρακώλυε σε μεγάλο βαθμό την συνολική διαδικασία σκυροδέτησης καθιστώντας την απαιτητική και χρονοβόρα.

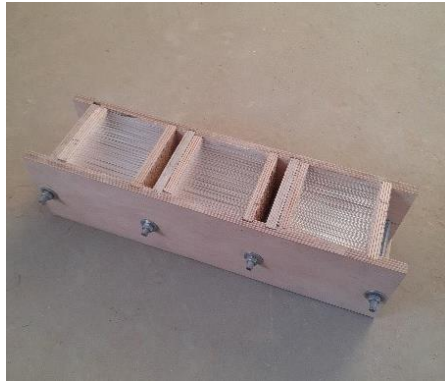
Ακόμη, η χρήση του μεταλλικού fiber δεν απέδωσε τα επιθυμητά αποτελέσματα, θέτοντας την χρήση του υπό αμφισβήτηση. Πιθανόν διαφοροποιήσεις στην μορφή των στοιχείων να εξυπηρετούσαν καλύτερα τον σκοπό χρήσης τους.

- Απαιτητική η χρήση οπτικής ίνας με ενδιαφέροντα όμως αποτελέσματα

Η οπτική ίνα κυρίως λόγω του μικρού της μεγέθους αποδείχτηκε απαιτητικό υλικό. Κυκλοφορώντας σε ρολό 1500 μέτρων κάθε ένα κομμάτι που χρησιμοποιήθηκε έπρεπε να μετρηθεί και να κοπεί στο χέρι. Χρονοβόρα διαδικασία ήταν και η κατασκευή του καλουπιού με τις απαιτούμενες οπές (3750 συνολικά) στο χέρι καθώς δεν υπήρχε τόσο μικρής διατομής ακίδα για το μηχανήμα κοπής του εργαστηρίου (οι τρύπες έγιναν στο χέρι με ηλεκτρικό τρυπάνι). Τα παραπάνω στοιχεία καθιστούν ακόμη και θεωρητικά την διαδικασία κοπιαστική, απαιτητική και κυρίως χρονοβόρα.

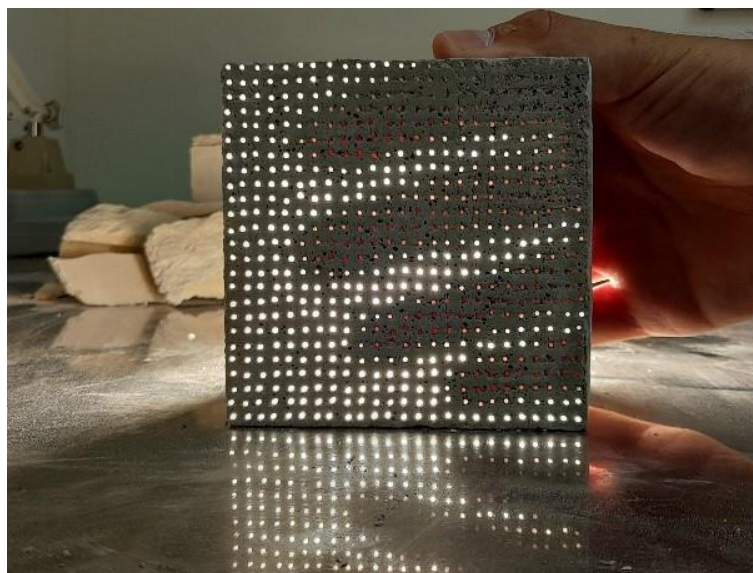


Φωτογραφία 41 | Η διάνοιξη των οπών έπρεπε να γίνει στο χέρι λόγω αδυναμίας του μηχανήματος CNC για διάτρηση της συγκεκριμένης διαμέτρου (1-1,5mm)



Φωτογραφία 42 | Αντίστοιχα και η τοποθέτηση των οπτικών ινών στο καλούπι ήταν ιδιαίτερα απαιτητική και χρονοβόρα.

Παρά τις απαιτήσεις της κατασκευής, τα αποτελέσματα ήταν αρκετά εντυπωσιακά. Τόσο η γενική εικόνα των δοκιμών όσο και οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν ήταν αρκετά εντυπωσιακές.



Φωτογραφία 43 | Το τελικό αποτέλεσμα δικαίωσε όλη την πειραματική διαδικασία.

Τέλος, λόγω των μικρών κενών που μένουν μεταξύ των οπτικών ινών (3 χιλ.) καθίσταται αδύνατη η χρήση του μεταλλικού fiber με ανθρώπινα μέσα. Λόγω της μορφής του το fiber δημιουργεί μικρές συστάδες, οι οποίες δεν περνούν μέσα από τα κενά. Με αυτό τον τρόπο δεν ήταν εφικτή η δοκιμή της παρούσας σύστασης με πιθανά αποδοτικά αποτελέσματα στην πορεία της έρευνας.

Συνοψίζοντας όλα τα παραπάνω, η χρήση ράβδων σιλικόνης στην προσπάθεια εξεύρεσης υλικού φθηνότερου από την οπτική ίνα δεν απέδωσε καθώς τα αποτελέσματα των μετρήσεων δεν ήταν ικανοποιητικά. Το ίδιο και με την χρήση μεταλλικού fiber του οποίου η ενσωμάτωση δεν έδωσε τα επιθυμητά αποτελέσματα. Αντιθέτως ισχυροποιήθηκε η καταλληλότητα της χρήσης οπτικής ίνας χάρη στα εντυπωσιακά αποτελέσματα που πρόσφερε και δημιουργήθηκαν προβληματισμοί σχετικά με την απλοποίηση της χρήσης της.

Ζ. Συνέχιση της έρευνας

Τελικό στάδιο της εργασίας ήταν η διεξαγωγή συμπερασμάτων ερμηνεύοντας τα αποτελέσματα του πειράματος. Με αφετηρία τα συμπεράσματα αυτά και στρέφοντας το βλέμμα προς αντίστοιχες μελλοντικές έρευνες πάνω στο διάφανο σκυροδέμα, κρίθηκε σκόπιμη μια πρόταση θεματικών για περαιτέρω διερεύνηση.

- Ανεύρεση φθηνού και εύχρηστου μέσου διάδοσης φωτός με υψηλές τιμές φωτοδιαπερατότητας

Ένας από τους στόχους του πειράματος ήταν η ανεύρεση υλικού εξίσου φωτοδιαπερατού με την οπτική ίνα, με σημαντικά μικρότερο κόστος. Έγινε υπόθεση στην χρήση ράβδων σιλικόνης (θερμόκολλας) η οποία δεν απέδωσε σε ουσιαστικό βαθμό. Ενδεχομένως μια έρευνα πάνω σε άλλου είδους ρητίνες και μέσα διάδοσης φωτός να απέφερε εντελώς διαφορετικά αποτελέσματα στις μετρήσεις φωτοδιαπερατότητας των δοκιμών, συνδυάζοντας παράλληλα χαμηλό κόστος.

- Αύξηση αντοχής σκυροδέματος (κοκκομετρία -πρόσθετα και πώς συμπεριφέρονται με το μέσω διάδοσης)

Αντικείμενο άλλης έρευνας ενδεχομένως να ήταν η μειωμένη αντοχή στην προσθήκη μέσων διάδοσης του φωτός. Οι ράβδοι σιλικόνης μείωσαν αρκετά την αντοχή σε θλίψη, ενώ μικρή διαφοροποίηση είχε η ενσωμάτωση οπτικής ίνας. Στην συγκεκριμένη εργασία έγινε μια υπόθεση σύμφωνα με την οποία η προσθήκη μεταλλικού fiber προσδίδει αντοχή, τα αποτελέσματα όμως και πάλι δεν ήταν ικανοποιητικά. Μια περαιτέρω διερεύνηση στην σύσταση των υλικών (ποσότητα αδρανών, λόγος νερού/ τσιμέντου) ίσως επέτρεπε μεγαλύτερες αντοχές. Ακόμη, η χρήση πρόσθετων (π.χ. άλλης μορφής μεταλλικό fiber) ίσως είχε ικανοποιητικότερα αποτελέσματα και πάλι όμως θα έπρεπε να μελετηθεί η συνέργεια των υλικών (ικανοποιητικό μέγεθος πρόσθετου ώστε να αναμειγνύεται με ευκολία στο μίγμα ή να διαπερνά τα κενά μεταξύ του μέσου διάδοσης του φωτός).

- Χρήση της οπτικής ίνας

Αναφέρθηκε παραπάνω ότι η τοποθέτηση οπτικής ίνας στο καλούπι ήταν ιδιαίτερα απαιτητική και χρονοβόρα εξαιτίας της μικρής διατομής της. Αυτό, λόγω της κατασκευής του διαφανού σκυροδέματος στο εργαστήριο και όχι με τεχνητά μέσα. Σε μαζικής κλίμακας παραγωγή η διαδικασία της προετοιμασίας και της τοποθέτησης των οπτικών ινών στο καλούπι είναι λιγότερο απαιτητική.

Παρόλα αυτά κρίνεται σχεδόν απαραίτητη η διερεύνηση τρόπων διευκόλυνσης της κατασκευής.

- Περαιτέρω διερεύνηση ιδιοτήτων διάφανου σκυροδέματος

Στο δεύτερο μέρος της εργασίας μελετήθηκαν δύο από τις χαρακτηριστικότερες ιδιότητες του διάφανου σκυροδέματος. Παρόλα αυτά κάθε υλικό έχει αρκετές ιδιότητες και διαφορετικούς τρόπους λειτουργίας. Έτσι και στο διάφανο σκυρόδεμα πέρα από την θλιπτική αντοχή και την φωτοδιαπερατότητα θα μπορούσαν με το ίδιο ενδιαφέρον να ερευνηθούν ιδιότητες όπως η θερμοχωρητικότητα, η υδατοαπορροφητικότητα, ο ρυθμός γήρανσης του υλικού, η πυραντοχή, ποσοστό απορρόφησης του ήχου κ.α.

IV. ΠΗΓΕΣ

A. Βιβλιογραφική έρευνα θεωρητικού μέρους

Για την συγγραφή του θεωρητικού μέρους έγινε βιβλιογραφική και κυρίως διαδικτυακή έρευνα. Η πλειοψηφία των πηγών που χρησιμοποιήθηκαν εντοπίστηκαν στο διαδίκτυο. Κατά κύριο λόγο αποτελούν δημοσιευμένες διατριβές. Όπως αναφέρθηκε, τα περισσότερα τεκμήρια επαναλάμβαναν τις ίδιες πληροφορίες με αποτέλεσμα ελάχιστα να διαφέρουν μεταξύ τους. Για τον λόγο αυτό επιλέχθηκαν οι αρτιότερες και καλύτερα τεκμηριωμένες αναφορές, οι οποίες και παρατίθενται στην συνέχεια.

1) Δημοσιευμένες διατριβές

- Akshaya B Kamdi, (2013), «*Transparent concrete as a green material for building*», (δημοσιευμένη διατριβή), International Journal of Structural and Civil Engineering Research
- Bhavin K. Kashiyani, Varsha Raina, Jayeshkumar Pitroda, Dr. Bhavnaben K. Shah, (2013), «*A Study on Transparent Concrete: A Novel Architectural Material to Explore Construction Sector*», (δημοσιευμένη διατριβή), International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT)
- Goyal, A. και Patel, J., (2018), «*Smart Materials in Construction Technology*», International Conference on Smart City and Emerging Technology (ICSCET), Mumbai, India, 5 January 2018. pp. 1-9. Διαθέσιμο στο: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8537256>, [Πρόσβαση στις 10 Ιουλίου 2022]
- M.N.V. Padma Bhushan, D. Johnson, Md. Afzal Basheer Pasha & Ms. K. Prasanthi, (2013), «*Optical Fibres in the Modeling of Translucent Concrete Blocks*», (δημοσιευμένη διατριβή), International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)
- Patil Gaurao S., Patil Swapnal V., (2015), «*Light Transmitting Concrete- A New Innovation*», (δημοσιευμένη διατριβή), Imperial college of Engineering, Pune, India
- Sara McGillivray, (2011), «*Translucent Concrete: An Emerging Material*», (Δημοσιευμένη διατριβή), USC Bachelor's of Architecture Program

2) Διαδικτυακές πηγές

- Blog Leditnow, (2017), LEDITNOW, Διαθέσιμο στο: <https://www.leditnow.gr/ti-einai-i-fotometria-.ti-onomazetai-lux-lumen-kai-candela-pou-vleroume-pano-stis-lampes.html>, [Πρόσβαση στις 17 Ιουλίου 2023]

3) Βιβλιογραφικές πηγές

- Τριανταφύλλου, Α., (2017), «Δομικά υλικά», Πάτρα, Εκδόσεις Gotsis
- Χουλιάρης, Ι.Γ., (2003), «Κατασκευές οπλισμένου σκυροδέματος», Αθήνα, Εκδόσεις Παπασωτηρίου

B. Βιβλιογραφική έρευνα πειραματικού μέρους

Το μεγαλύτερο μέρος των πηγών περιείχε γενικές πληροφορίες οι οποίες κάλυψαν το θεωρητικό μέρος. Παρόλα αυτά εντοπίστηκαν δύο επιστημονικές διατριβές – τεχνικές εκθέσεις οι οποίες αναφέρονταν στον τρόπο κατασκευής διάφανου σκυροδέματος και συνέβαλαν σημαντικά στην επίλυση ζητημάτων που προέκυψαν στην πορεία του πειράματος.

- Ge Ou, Genda Chen, Ginping Ou, (2009), «*Research and development of plastic optical fiber based smart transparent concrete*», (Δημοσιευμένη διατριβή), Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering
- M.N.V. Padma Bhushan, D. Johnson, Md. Afzal Basheer Pasha & Ms. K. Prasanthi, (2013), «*Optical Fibres in the Modeling of Translucent Concrete Blocks*», (δημοσιευμένη διατριβή), International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)

Γ. Πηγή εικόνων & φωτογραφιών

1) Πηγές εικόνων

Το σύνολο των εικόνων που παρουσιάζονται στο θεωρητικό μέρος έχουν συγκεντρωθεί από πηγές του διαδικτύου. Παρακάτω αναφέρονται οι ηλεκτρονικές διευθύνσεις και η ημερομηνία πρόσβασης για κάθε μια από αυτές.

Εικόνα 1 | Πηγή: <https://gr.pinterest.com/pin/542472717595381236/>, [Πρόσβαση στις 2 Σεπτεμβρίου 2023]

Εικόνα 2 | Πηγή: https://en.wikipedia.org/wiki/Aerogel#/media/File:Aerogelflower_filtered.jpg, [Πρόσβαση στις 2 Σεπτεμβρίου 2023]

Εικόνα 3 | Πηγή: <http://www.garciabarba.com/cppa/hormigon-translucido/?lang=en>, [Πρόσβαση στις 2 Σεπτεμβρίου 2023]

Εικόνα 4 | Πηγή: <https://www.semanticscholar.org/paper/HISTORY-AND-CASE-STUDY-ON-LIGHT-TRANSMITTING-Valambhiya-Tuvar/b015a974859770e1c6f08e63344c268ed9336ec7>, [Πρόσβαση στις 2 Σεπτεμβρίου 2023]

Εικόνα 5 | Πηγή: <https://theconstructor.org/concrete/transparent-concrete-light-transmitting-concrete/9271/>, [Πρόσβαση στις 2 Σεπτεμβρίου 2023]

Εικόνα 6 | Πηγή: https://www.researchgate.net/figure/Decorative-Wall-Design_fig4_281178537, [Πρόσβαση στις 2 Σεπτεμβρίου 2023]

Εικόνα 7 | Πηγή: <https://in.pinterest.com/pin/370350769343262075/>, [Πρόσβαση στις 2 Σεπτεμβρίου 2023]

Εικόνα 8 | Πηγή: <http://www.archplatforma.ru/?act=2&tgid=133>, [Πρόσβαση στις 2 Σεπτεμβρίου 2023]

Εικόνα 9 | Πηγή: <https://www.labmate-online.com/news/news-and-views/5/mcpherson-inc/mcpherson-appoints-titan-electro-optics-exclusive-agent-in-pr-china-and-hong-kong/45881>, [Πρόσβαση στις 2 Σεπτεμβρίου 2023]

Εικόνα 10 | Πηγή: <https://www.aliexpress.com/i/4000081020593.html>, [Πρόσβαση στις 2 Σεπτεμβρίου 2023]

Εικόνα 11 | Πηγή: <https://www.sciencedirect.com/topics/agricultural-and-biological-sciences/glass-fiber>, [Πρόσβαση στις 2 Σεπτεμβρίου 2023]

Εικόνα 12 | Πηγή: <https://wd40.gr/%CF%87%CF%81%CE%AE%CF%83%CE%B9%CE%BC%CE%B1tips/%CF%80%CF%89%CF%82%CF%86%CF%84%CE%B9%CE%AC%CF%87%CE%BD%CF%89-%CF%84%CF%83%CE%B9%CE%BC%CE%AD%CE%BD%CF%84%CE%BF/>, [Πρόσβαση στις 2 Σεπτεμβρίου 2023]

Εικόνα 13 | Πηγή: <https://www.betolit.gr/el/%CF%80%CF%81%CE%BF%CF%8A%CF%8C%>

CE%BD%CF%84%CE%B1/%CF%80%CF%81%CE%BF%CF%8A%CF%8C%CE%BD%CF%84%
CE
%B1%CE%B4%CF%8C%CE%BC%CE%B7%CF%83%CE%B7%CF%82/%CE%B1%CE%B4%CF
%81%CE%B1%CE%BD%CE%AE%CF%85%CE%BB%CE%B9%CE%BA%CE%AC/%CE%B1%CE
E%BC%CE%BC%CE%BF%CE%BD%CF%84%CE%B1%CE%BC%CE%B1%CF%81%CE%B9%CF
%83%CE%B9%CE%B1, [Πρόσβαση στις 2 Σεπτεμβρίου 2023]

Εικόνα 14 | Πηγή: <https://www.mdpi.com/2075-5309/11/10/480>, [Πρόσβαση στις 2 Σεπτεμβρίου 2023]

Εικόνα 15 | Πηγή: https://faratarjome.ir/u/media/shopping_files/store-EN-1484203693-9967.pdf, [Πρόσβαση στις 2 Σεπτεμβρίου 2023]

Εικόνα 16 | Πηγή: https://faratarjome.ir/u/media/shopping_files/store-EN-1484203693-9967.pdf, [Πρόσβαση στις 2 Σεπτεμβρίου 2023]

Εικόνα 17 | Πηγή: <https://gr.pinterest.com/pin/459648705712710278/>, [Πρόσβαση στις 2 Σεπτεμβρίου 2023]

Εικόνα 18 | Πηγή: <https://www.architonic.com/en/product/lucem-lucem-line-translucent-concrete-wall-panel/20036712>, [Πρόσβαση στις 2 Σεπτεμβρίου 2023]

Εικόνα 19 | Πηγή: <https://www.jetir.org/papers/JETIR1701004.pdf>, [Πρόσβαση στις 2 Σεπτεμβρίου 2023]

Εικόνα 20 | Πηγή: <https://inhabitat.com/unique-light-transmitting-concrete-makes-abu-dhabis-gorgeous-al-aziz-mosque-glow/al-aziz-mosque-apg-architecture-and-planning-group-2/>, [Πρόσβαση στις 2 Σεπτεμβρίου 2023]

Εικόνα 21 | Πηγή: <http://www.litracon.hu/hu/referenciak>, [Πρόσβαση στις 2 Σεπτεμβρίου 2023]

Εικόνα 22 | Πηγή: https://www.dbz.de/artikel/dbz_Durchblick-1067857.html, [Πρόσβαση στις 2 Σεπτεμβρίου 2023]

Εικόνα 23 | Πηγή: <https://www.nda.ac.uk/blog/translucent-concrete/>, [Πρόσβαση στις 2 Σεπτεμβρίου 2023]

Εικόνα 24 | Πηγή: <https://www.aalborgwhite.com/projects/translucent-concrete-city-furniture>, [Πρόσβαση στις 2 Σεπτεμβρίου 2023]

Εικόνα 25 | Πηγή: <https://inhabitat.com/unique-light-transmitting-concrete-makes-abu-dhabis-gorgeous-al-aziz-mosque-glow/al-aziz-mosque-apg-architecture-and-planning-group-2/>, [Πρόσβαση στις 2 Σεπτεμβρίου 2023]

Εικόνα 26 | Πηγή: <https://archello.com/de/product/lucem-facade>, [Πρόσβαση στις 2 Σεπτεμβρίου 2023]

Εικόνα 27 | Πηγή: <https://www.arcvision.org/italian-pavilion/?lang=en>, [Πρόσβαση στις 2 Σεπτεμβρίου 2023]

Εικόνα 28 | Πηγή: <http://www.builtconstructions.in/OnlineMagazine/Bangalore/Pages/Worlds-First-Translucent-Concrete-Facade-225.aspx>, [Πρόσβαση στις 2 Σεπτεμβρίου 2023]

Εικόνα 29 | Πηγή:

<http://www.builtconstructions.in/OnlineMagazine/Bangalore/Pages/Worlds-First-Translucent-Concrete-Facade-225.aspx>, [Πρόσβαση στις 2 Σεπτεμβρίου 2023]

Εικόνα 30 | Πηγή: <https://www.nda.ac.uk/blog/translucent-concrete/>, [Πρόσβαση στις 2 Σεπτεμβρίου 2023]

Εικόνα 31 | Πηγή: <http://www.123seminarsonly.com/Seminar-Reports/2017-04/291325891-Transparent-concrete.pdf>, [Πρόσβαση στις 2 Σεπτεμβρίου 2023]

Εικόνα 32 | Πηγή: <https://in.pinterest.com/pin/289145238571264544/>, [Πρόσβαση στις 2 Σεπτεμβρίου 2023]

Εικόνα 33 | Πηγή: <https://in.pinterest.com/pin/289145238571264544/>, [Πρόσβαση στις 2 Σεπτεμβρίου 2023]

Εικόνα 34 | Πηγή: <https://www.aalborgwhite.com/projects/translucent-concrete-city-furniture>, [Πρόσβαση στις 2 Σεπτεμβρίου 2023]

Εικόνα 35 | Πηγή: <https://trends.archiexpo.com/project-25565.html>, [Πρόσβαση στις 2 Σεπτεμβρίου 2023]

Εικόνα 36 | Πηγή: <https://gr.pinterest.com/lifanchen9485/translucent-concrete/>, [Πρόσβαση στις 2 Σεπτεμβρίου 2023]

Εικόνα 37 | Πηγή: <http://www.litracon.hu/hu/referenciak>, [Πρόσβαση στις 2 Σεπτεμβρίου 2023]

2) Πηγές φωτογραφιών

Στο πειραματικό μέρος της εργασίας το κείμενο συνοδεύουν φωτογραφίες με σκοπό την καλύτερη κατανόηση του αντικειμένου και των μέσων που χρησιμοποιήθηκαν. Υπάρχουν φωτογραφίες των υλικών και όλων των σταδίων, οι οποίες τραβήχτηκαν καθ' όλη την διάρκεια του πειράματος.

Αντί επιλόγου...

Για κλείσιμο της εργασίας επέλεξα το αγαπημένο μου κομμάτι. Όχι το ακαδημαϊκό, με τα πειράματα, τις μετρήσεις και τα συμπεράσματα. Αλλά το ανθρώπινο με τις σκέψεις και κυρίως τα συναισθήματα. Όχι στο Γ' ενικό. Τοποθετήθηκε, σκυροδετήθηκε, μετρήθηκε. Αλλά στο Α' ενικό, το προσωπικό. Ενθουσιάστηκα, απογοητεύτηκα, αγανάκτησα, εκνευρίστηκα, ικανοποιήθηκα, λερώθηκα, ευχαριστήθηκα. Για τον λόγο αυτό, πριν ολοκληρώσω την εργασία θα ξαναζήσω νοερά τις στιγμές που ένιωσα:

τον ενθουσιασμό μετά την πρώτες συναντήσεις με τον κ.Προβιδάκη...

αλλά και όταν ολοκλήρωσα την εργασία

την άγνοια της πρώτης σκυροδέτησης...

την αγωνία εκείνης της μεταμεσονύκτιας...

και την βαρεμάρα της τελευταίας...

την απογοήτευση όταν το φως δεν πέραγε...

και την ικανοποίηση όταν το φως πέραγε...

τα νεύρα όταν το πρώτο καλούπι διαλύθηκε...

και την χαρά όταν έφτιαξα το επόμενο...

την αποτυχία, όταν το δοκίμιο με την οπτική ίνα βγήκε χάλια...

και τέλος την ευχαρίστηση που ένιωσα όταν έβαλα το επόμενο δοκίμιο στο παράθυρο και είδα το διάφανο σκυρόδεμα για πρώτη φορά...