

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΤΟΥ ΜΙΧΑΛΟΒΙΤΣ ΖΑΝΝΗ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ

ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΚΟΥΤΑΣ ΛΑΜΠΡΟΣ

ΘΕΜΑ:

**ΚΑΜΠΤΙΚΗ ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΔΟΚΩΝ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΜΕ  
ΙΝΟΠΛΕΓΜΑΤΑ ΣΕ ΑΝΟΡΓΑΝΗ ΜΗΤΡΑ:**

**ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΕΠΙΡΡΟΗΣ ΤΗΣ ΜΗΤΡΑΣ**

ΒΟΛΟΣ 2020

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια απόκτησης διπλώματος πολιτικού μηχανικού, από το τμήμα πολιτικών μηχανικών του πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Αντικείμενο της εργασίας είναι η καμπτική ενίσχυση δοκών οπλισμένου σκυροδέματος με ινοπλέγματα σε ανόργανα μήτρα.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τους καθηγητές Κούτα Λάμπρο και Παπακωνσταντίνου Χρήστο για τη συνεχή υποστήριξη, εμπιστοσύνη και ουσιαστική καθοδήγηση κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιστημονικό συνεργάτη του πανεπιστημίου κ. Κουτσελίνη Αλέκο για την πολύτιμη βοήθεια που προσέφερε σε όλη τη διάρκεια των πειραμάτων. Τέλος, ευχαριστώ και τον υπάλληλο του εργαστηρίου κ. Παπαθεοχάρη Χάρη για τις πολύτιμες και εύστοχες συμβουλές του.

Ευχαριστώ τον συμφοιτητή Δελή Τριαντάφυλλο για τη στήριξη και τη βοήθειά του. Τέλος, ευχαριστώ τους συμφοιτητές Καράμπελα Χαρά, Μπακάλη Αντιγόνη και Πατσιαντά Βλάσιο με τους οποίους συνυπήρξαμε για την εκπόνηση των διπλωματικών μας εργασιών στον χώρο του εργαστηρίου, για την βοήθειά τους και τη δημιουργία ευχάριστου κλίματος.

Μιχάλοβιτς Ζαννής

Βόλος 2020

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η πειραματική διερεύνηση της επιρροής της μήτρας σε καμπτικά ενισχυμένες ορθογωνικές δοκούς οπλισμένου σκυροδέματος με ινοπλέγματα σε ανόργανη μήτρα. Το πειραματικό πρόγραμμα περιλάμβανε τη σκυροδέτηση 9 δοκών, την ενίσχυση με IAM 8 εξ' αυτών και την υποβολή όλων των δοκών σε δοκιμή 4 σημείων κάμψης. Η πειραματική διερεύνηση των ενισχυμένων διατάξεων έγινε με σύγκριση ενός δοκιμίου αναφοράς που δεν είχε ενίσχυση.

Όσον αφορά τη δομή της διπλωματικής, αυτή αποτελείται από πέντε κεφάλαια τα οποία υποδιαιρούνται σε κατάλληλες ενότητες, υποενότητες και παραγράφους. Ακολουθεί συνοπτική περιγραφή κάθε κεφαλαίου.

Το κεφάλαιο 1, με τίτλο «Εισαγωγή», περιέχει πέντε ενότητες στις οποίες γίνεται ιστορική αναδρομή των σύνθετων υλικών, ορίζονται τα διάφορα στοιχεία τους και κατηγοριοποιούνται. Επιπλέον, περιγράφονται η ανάγκη ενίσχυσης κτιρίων οπλισμένου σκυροδέματος και το αντικείμενο της παρούσας εργασίας.

Το κεφάλαιο 2, με τίτλο «Βιβλιογραφική ανασκόπηση», περιέχει τέσσερις ενότητες στις οποίες γίνεται λόγος για τα υλικά των συστημάτων IAM, τις εφαρμογές τους και τη μηχανική συμπεριφορά τους σε ενίσχυση μελών οπλισμένου σκυροδέματος σε κάμψη.

Το κεφάλαιο 3, με τίτλο «Πειραματική διαδικασία», περιέχει επτά ενότητες στις οποίες περιγράφονται όλα τα στάδια του πειράματος και οι ιδιότητες των υλικών της ενίσχυσης.

Το κεφάλαιο 4, με τίτλο «Πειραματικά αποτελέσματα και ανάλυση», περιλαμβάνει τέσσερις ενότητες στις οποίες παρατίθενται τα αποτελέσματα των πειραμάτων και γίνεται σχολιασμός τους και διερεύνηση συγκεκριμένων παραμέτρων.

Το κεφάλαιο 5, με τίτλο «Συμπεράσματα και προτάσεις για έρευνα», περιλαμβάνει δύο ενότητες στις οποίες περιγράφονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την ανάλυση των αποτελεσμάτων και γίνονται προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

|  | Σελ.      |
|--|-----------|
| <b>ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ</b>   | <b>2</b>  |
| <b>ΠΕΡΙΛΗΨΗ</b>  | <b>3</b>  |
| <b>ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ</b>   | <b>4</b>  |
| <b>ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ</b>   | <b>6</b>  |
| <b>ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ</b>   | <b>10</b> |
| <b>1. Εισαγωγή</b>   | <b>10</b> |
| 1.1 Ιστορική αναδρομή χρήσης υλικών  | 10        |
| 1.2 Σύνθετα υλικά: ορισμός και κατηγορίες  | 11        |
| 1.3 Εφαρμογές και τεχνολογίες σύνθετων υλικών                                      | 12        |
| 1.4 Περιγραφή ανάγκης ενίσχυσης υφιστάμενων κατασκευών από<br>οπλισμένο σκυρόδεμα. | 15        |
| 1.5 Αντικείμενο της παρούσας εργασίας  | 17        |
| <b>2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση</b>   | <b>18</b> |
| 2.1 Ιστορική αναδρομή και χαρακτηριστικά TRM                                       | 18        |
| 2.2 Πρώτες ύλες TRM  | 19        |
| 2.3 Τοποθέτηση και εφαρμογές TRM   | 25        |
| 2.3.1 Εφαρμογή TRM σε δεξαμενές  | 27        |
| 2.3.2 Εφαρμογή TRM σε ηχοπετάσματα   | 28        |
| 2.3.3 Εφαρμογή TRM σε γέφυρες  | 29        |
| 2.3.4 Εφαρμογή TRM σε ενίσχυση κτηρίου   | 30        |
| 2.3.5 Καμπτική ενίσχυση με TRM   | 31        |
| <b>3. Πειραματική διαδικασία</b>   | <b>38</b> |
| 3.1 Γενικά   | 38        |
| 3.2 Φιλοσοφία και σχεδιασμός δοκιμών   | 38        |
| 3.2.1 Γεωμετρία δοκιμίου   | 38        |
| 3.2.2 Στατικό σύστημα και κατανομή έντασης   | 41        |
| 3.2.3 Υπολογισμός σπλισμού δοκιμίων  | 46        |
| 3.3 Περιγραφή και ονοματολογία δοκιμών-παράμετροι διερεύνησης                      | 47        |

|  |           |
|--|-----------|
| 3.4 Κατασκευή δοκιμών και προετοιμασία υλικών ενίσχυσης                                  | 47        |
| 3.4.1 Κατασκευή δοκών οπλισμένου σκυροδέματος  | 47        |
| 3.4.2 Παρασκευή κονιαμάτων   | 51        |
| 3.3.3 Προετοιμασία ινοπλεγμάτων ενίσχυσης  | 53        |
| 3.5 Διαδικασία ενίσχυσης δοκιμών   | 53        |
| 3.6 Πειραματική διάταξη και πρωτόκολλο δοκιμής   | 56        |
| 3.7 Ιδιότητες σκυροδέματος και υλικών ενίσχυσης  | 58        |
| <b>4. Πειραματικά αποτελέσματα και ανάλυση</b>   | <b>63</b> |
| 4.1 Εισαγωγή   | 63        |
| 4.2 Διαγράμματα δύναμης-βύθισης δοκών  | 63        |
| 4.3 Ανάλυση διαγραμμάτων δύναμης-βύθισης και περιγραφή<br>μηχανισμών αστοχίας κάθε δοκού | 64        |
| 4.4 Σχολιασμός δυσκαμψιών δοκιμών  | 83        |
| <b>5. Συμπεράσματα και προτάσεις για έρευνα</b>  | <b>87</b> |
| 5.1 Συμπεράσματα   | 87        |
| 5.2 Προτάσεις για έρευνα   | 88        |
| <b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ:ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</b>  | <b>89</b> |

## **ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ**

|  | Σελ. |
|--|------|
| 1.1 Γενική ταξινόμηση των σύνθετων υλικών  | 10   |
| 1.2 Τμήματα αεροπλάνου κατασκευασμένα από ινοπλισμένα πολυμερή                                   | 12   |
| 1.3 Φωτογραφίες κατεστραμμένων κτιρίων μετά από σεισμούς σε περιοχές<br>της Ελλάδας              | 15   |
| 1.4 Δομικά μέλη κατασκευής, όπου το σκυρόδεμα έχει ενανθρακωθεί και ο<br>οπλισμός έχει διαβρωθεί | 16   |
| 2.1 Πρώτες ύλες του TRM [2]  | 19   |
| 2.2 Διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων σύνθετων υλικών και δομικού χάλυβα                            | 20   |
| 2.3 Ινοπλέγματα δύο διευθύνσεων πηγή [8]   | 22   |
| 2.4 Ινοπλέγματα τεσσάρων διευθύνσεων [2]   | 22   |
| 2.5 Χωρικά Ινοπλέγματα [2]   | 22   |

|      |  |    |
|------|--|----|
| 2.6  | Χρήση τσιμεντοκονιάματος ως μήτρα ινοπλέγματος [8]   | 23 |
| 2.7  | Προετοιμασία επιφάνειας σκυροδέματος με τροχό ,Raooof et al. (2017)[13]  | 26 |
| 2.8  | Εμποτισμός του TRM με κονία μέσω σπάτουλας, Δερουκάκη (2020)[2]  | 28 |
| 2.9  | Δεξαμενή υγρών αποβλήτων στο Άαχεν της Γερμανίας ,<br>Παπαντωνίου (2007)[14]   | 29 |
| 2.10 | Ηχοπετάσματα ανάκλασης από TRM στην Ολλανδία ,<br>Παπαντωνίου (2007)[14]   | 30 |
| 2.11 | Πεζογέφυρα από ινοπλέγματα στη Γερμανία , Raupach et al. (2016)[16]  | 31 |
| 2.12 | Ενίσχυση κελύφους με TRM ,Raupach et al. (2016)[17]  | 31 |
| 2.13 | (a) Καμπτική ενίσχυση με TRM σε δοκούς και (b) πλάκες ,<br>Triantafillou (2016)[18]  | 32 |
| 2.14 | Διάγραμμα φορτίου-παραμόρφωσης με χρήση ινοπλέγματος για<br>καμπτική ενίσχυση, μπλε το ενισχυμένο δοκίμιο και κόκκινο το δοκίμιο<br>χωρίς Koutas et al. (2019)[25]   | 34 |
| 2.15 | Διάγραμμα φορτίου-παραμόρφωσης για πλάκες δύο<br>διευθύνσεων ενισχυόμενες με TRM ,Paranicolaou et al. (2009)[26]   | 36 |
| 2.16 | Διάγραμμα φορτίου-παραμόρφωσης για πλάκες δύο διευθύνσεων<br>ενισχυόμενες με TRM ,Bournas et al. (2017)[27]  | 37 |
| 3.1  | Γεωμετρία δοκού  | 39 |
| 3.2  | Σκαρίφημα πειραματικής διάταξης δοκού  | 40 |
| 3.3  | Στατικό σύστημα  | 40 |
| 3.4  | Διαγράμματα εντατικών μεγεθών  | 41 |
| 3.5  | Δικτύωμα Morsche, ή ισοδύναμο δικτύωμα προσομοίωσης δοκού<br>οπλισμένου σκυροδέματος   | 43 |
| 3.6  | 1 <sup>η</sup> εικόνα πάνω και αριστερά είναι τα καλούπια χωρίς οπλισμό, 2 <sup>η</sup> εικόνα<br>πάνω και δεξιά αριστερά είναι τα καλούπια με οπλισμό και η κάτω<br>εικόνα είναι τα καλούπια με την προσθήκη γάτζων | 48 |
| 3.7  | (α) έκχυση του σκυροδέματος σε καρότσι για τη μεταφορά του και<br>(β) “άπλωμα” σκυροδέματος στα καλούπια πριν τη δόνησή του  | 49 |
| 3.8  | Μεταλλικές και ξύλινες κυβικές μήτρες πρότυπων διαστάσεων  | 49 |
| 3.9  | (α) σκυρόδεμα μετά τη δόνηση και (β) σκυρόδεμα μετά την επιπέδωση της  |    |

|   |    |
|---|----|
| ελεύθερης επιφάνειας  | 50 |
| 3.10 Διαδικασία εφαρμογής τεστ καθίσεως   | 50 |
| 3.11 Συσκευή μέτρησης πορώδους του σκυροδέματος   | 51 |
| 3.13 (α)το κοινό και για τα 2 μίγματα υλικό,(β) υλικό με ίνες του κονιάματος 1 και (γ) υλικό του κονιάματος 2   | 52 |
| 3.14 (α),(β)Μήτρες που χρησιμοποιήθηκαν και (γ) επιφάνεια σκυροδέματος εφαρμογής δοκιμαστικού κονιάματος με ινόπλεγμα   | 52 |
| 3.15 Στιγμιότυπα τροχίσματος επιφάνειας ενίσχυσης   | 54 |
| 3.16 (α) επιφάνεια ενίσχυσης προ τροχίσματος και (β) επιφάνεια ενίσχυσης μετά   | 54 |
| 3.17 (α) στιγμιότυπο ανάμιξης και δημιουργίας κονιάματος 1 και (β) δοχείο κονιάματος και εργαλείο επίστρωσής του  | 54 |
| 3.18 Στιγμιότυπα επάλειψης κονιάματος στην επιφάνεια ενίσχυσης πριν την τοποθέτηση ινοπλεγμάτων   | 55 |
| 3.19 Εφαρμογή 1 <sup>ης</sup> στρώσης ενίσχυσης (α) γυαλιού και (β) βασάλτη   | 56 |
| 3.20 Στιγμιότυπα επάλειψης κονιάματος   | 57 |
| 3.21 Πειραματική διάταξη δοκιμών  | 58 |
| 3.22 (α)μεταλλικά πλακίδια και σφικτήρας για την καλύτερη επίδραση της κόλλας (β)ευθυγράμμιση του εμβόλου ως προς το μέσο του πλάτους της δοκού,(γ) γύψος στα μεταλλικά πλακίδια και (δ) “κούμπωμα” της μεταλλικής διάταξης επιβολής του φορτίου στα πλακίδια | 59 |
| 3.23 (α) μηχανή σύνθλιψης δοκιμίων σκυροδέματος, (β) τυπική μορφή αστοχίας κυβικού δοκιμίου σε μονοαξονική θλίψη  | 60 |
| 3.24 (α) ινόπλεγμα βασάλτη και (β) ινόπλεγμα γυαλιού  | 60 |
| 3.25 (α)Δοκιμή τριών σημείων κάμψης για τον προσδιορισμό εφελκυστικής αντοχής κονιάματος και (β) δοκιμή μονοαξονικής θλίψης για τον προσδιορισμό θλιπτικής αντοχής κονιάματος   | 61 |
| 3.26 Μορφή αστοχίας πρίσματος του κονιάματος 1, σε δοκιμή 3 σημείων κάμψης  | 62 |
| 4.1 Διαγράμματα δύναμης-μετακίνησης του δοκιμίου χωρίς ενίσχυση και 4 δοκών 4δοκών ενισχυμένων με ινοπλέγματα βασάλτη   | 63 |
| 4.2 Διαγράμματα δύναμης-μετακίνησης του δοκιμίου χωρίς ενίσχυση και 4 δοκών ενισχυμένων με ινοπλέγματα γυαλιού  | 64 |
| 4.3 (α)Δοκίμιο αναφοράς πριν την έναρξη του πειράματος,(β)αστοχία δοκού   |    |

|  |    |
|--|----|
| λόγω σύνθλιψης σκυροδέματος και (γ) αποκόλληση μεταλλικών πλακιδίων<br>εξαιτίας της εκτεταμένης σύνθλιψης του σκυροδέματος   | 65 |
| 4.4 (α)δοκίμιο M1_B3 πριν την έναρξη του πειράματος, (β) και (γ)<br>διαστρωματική αποκόλληση,(δ) γλίστρημα ινών και (ε) παραμένουσα<br>στρώση ινοπλέγματος βασάλτηστην επιφάνεια σκυροδέματος                              | 67 |
| 4.5 (α)εμφάνιση καπτικο-διατμητικού τύπου ρηγμών, (β)αποκολλημένη ενίσχυση<br>με λεπτή στρώση σκυροδέματος, (γ)επιφάνεια σκυροδέματος που συνέβη<br>η αποκόλληση και (δ) αστοχία ενίσχυσης και θραύση σκυροδέματος         | 69 |
| 4.6 (α) αστοχία ενίσχυσης, (β) λεία σχετικά επιφάνεια σκυροδέματος μετά την<br>αποκόλληση και (γ) επιφάνεια ενίσχυσης χωρίς την εμφάνιση ρηγματώσεων<br>παρά μόνο τοπικών αστοχιών   | 70 |
| 4.7 (α) αποκόλληση ενίσχυσης, (β) λεία ενισχυμένη επιφάνεια σκυροδέματος<br>μετά την αποκόλληση και (γ) επιφάνεια ενίσχυσης χωρίς ρηγματώσεις<br>και τοπικές αστοχίες  | 72 |
| 4.8 (α) εμφάνιση καμπτο-διατμητικού τύπου ρηγμών, (β) επιφάνεια ενίσχυσης μετά<br>την αστοχία, (γ) και (δ) θραυσμένες ίνες γυαλιού στο μέσο της δοκού  | 73 |
| 4.9 (α) αστοχία δοκιμίου M1_G6, (β),(γ)αποκόλληση ενίσχυσης και σκυροδέματος,<br>(δ) και (ε) αποκολλημένη επιφάνεια ενίσχυσης  | 74 |
| 4.10 (α) Δοκίμιο M2_G3 στην αστοχία, (β) ρηγματώσεις κονιάματος και θραύση ινών<br>και (γ) περιοχή ενίσχυσης με συγκεντρωμένη βλάβη  | 75 |
| 4.11 (α) Δοκίμιο M2_G6 λίγο πριν την αστοχία, (β) κρίσιμο μήκος της δοκού,<br>μετά την αστοχία, (γ)αποκολλημένη ενίσχυση και λεία επιφάνεια<br>σκυροδέματος και (δ) επιφάνειας ενίσχυσης χωρίς ρωγμές και τοπικές αστοχίες | 76 |
| 4.12 Ποσοστιαία αύξηση της αντοχής των ενισχυμένων δοκών σε σχέση με το<br>δοκίμιο αναφοράς  | 77 |
| 4.13 3-γραμμικός κλάδος διαγράμματος δύναμης-βύθισης   | 78 |



**ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ**

|   |          |
|---|----------|
| 1.1 Ιστορική ανάπτυξη των υλικών  | 10       |
| 3.1 Χαρακτηριστικές τιμές αντοχής καμπτικής ροπής, τέμνουσας δύναμης και ροπής που αντιστοιχεί στο φορτίο διατμητικής αστοχίας για δεδομένο εμβαδό εφελκόμενου σπλισμού | 31<br>47 |
| 3.3 Διαστάσεις κυβικών δοκιμίων, φορτίο και τάση αστοχίας τους  | 58       |
| 3.4 Μηχανικές και φυσικές ιδιότητες των ινών και των ινοπλεγμάτων   | 59       |
| 3.5 Αποτελέσματα δοκιμής κάμψης πρισμάτων κονιάματος 1  | 61       |
| 3.6 Αποτελέσματα δοκιμής κάμψης πρισμάτων κονιάματος 2  | 61       |
| 3.7 Αποτελέσματα σύνθλιψης κύβων κονιάματος 1   | 62       |
| 3.8 Αποτελέσματα σύνθλιψης κύβων κονιάματος 2   | 62       |
| 4.1 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα πειραματικής διαδικασίας   | 81       |
| 4.2 Τιμές δυσκαμψιών των τριών σταδίων  | 83       |

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### 1.1 Ιστορική αναδρομή χρήσης υλικών

Κάνοντας μια ανασκόπηση στην ιστορία του ανθρώπινου πολιτισμού, οι συνεχώς αυξανόμενες ανάγκες και απαιτήσεις για καλύτερη διαβίωση των ανθρώπων, σε συνδυασμό με την πρόοδο της τεχνολογίας, είχε ως αποτέλεσμα την κατασκευή νέων υλικών με βελτιωμένες ιδιότητες. Ειδικότερα κατά τη διάρκεια του δεύτερου μισού του 20<sup>ου</sup> αιώνα, υπήρξε έντονο ενδιαφέρον για τη δημιουργία νέων υλικών. Η τάση αυτή επιβεβαιώνεται από την προοδευτικά αυξανόμενη και συστηματική ασχολία με την εφεύρεση υλικών – σημαντική αύξηση ερευνητικών προγραμμάτων– και από τη μεγάλη παραγωγή καινούριων υλικών. Ένα επιστημονικό πεδίο που συνετέλεσε στην ανάπτυξη του παραπάνω τομέα, είναι αυτό των πολυμερών. Για αυτό και σήμερα υπάρχει τεράστια ποικιλία υλικών, τα οποία έχουν πολλές εφαρμογές.

Η δημιουργία σύνθετων υλικών ξεκίνησε από την αρχαιότητα. Ο άνθρωπος ήξερε από εκείνα τα χρόνια ότι μπορούσε να συνδυάσει δύο ή περισσότερα υλικά για να πετύχει κάποιες ιδιαίτερες ιδιότητες που τον εξυπηρετούσαν, βελτιώνοντας ταυτόχρονα το βιοτικό επίπεδο. Αυτές είχαν συνήθως εφαρμογή στις κατασκευές, στη δημιουργία μέσων μεταφοράς στη θάλασσα, στη γραφική ύλη και στη κατασκευή όπλων.

Πίνακας 1.1: Ιστορική ανάπτυξη των υλικών.

| Χρονολογία | Υλικά   |
|------------|---|
| 5000 π.Χ.  | Πάπυρος/πίσσα (βάρκες)                                    |
| 1500 π.Χ.  | Ξύλινα επιστρώματα  |
| 1909 μ.Χ.  | Φαινολικό σύνθετο   |
| 1928 μ.Χ.  | Σύνθετο ουρίας φορμαλδεΐδης                               |
| 1938 μ.Χ.  | Σύνθετο μελαμίνης φορμαλδεΐδης                            |
| 1942 μ.Χ.  | Πολυεστέρας ενισχυμένος με γυαλί                          |
| 1946 μ.Χ.  | Σύνθετα εποξειδικών ρητινών<br>Νάυλον ενισχυμένο με γυαλί |
| 1951 μ.Χ.  | Πολυστερένιο ενισχυμένο με γυαλί                          |
| 1956 μ.Χ.  | Σύνθετα φαινόλης αμιάντου                                 |
| 1964 μ.Χ.  | Πολυμερή ενισχυμένα με ίνες άνθρακα                       |
| 1965 μ.Χ.  | Πολυμερή ενισχυμένα με ίνες βορίου                        |
| 1969 μ.Χ.  | Υβριδικά συστήματα ινών άνθρακα, γυαλιού                  |
| 1972 μ.Χ.  | Πολυμερή ενισχυμένα με αραμιδικές ίνες                    |
| 1975 μ.Χ.  | Υβριδικά συστήματα αραμιδικών ινών και ινών άνθρακα       |

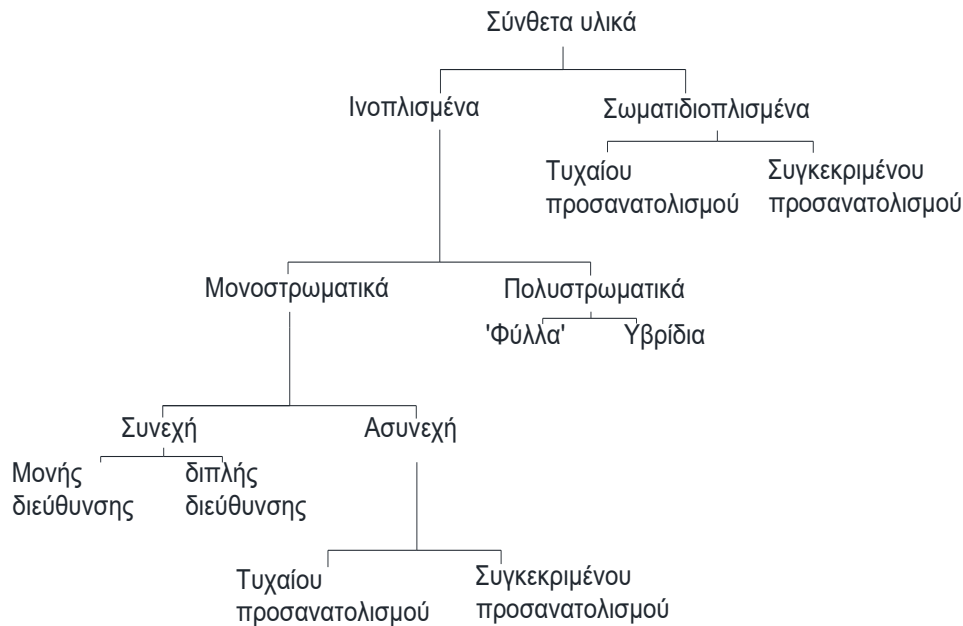
## 1.2 Σύνθετα υλικά: ορισμός και κατηγορίες

Σύνθετο υλικό ονομάζεται ένα σύστημα που αποτελείται από δύο ή περισσότερα υλικά-πρώτες ύλες, τα οποία έχουν μεταξύ τους διαφορετικές χημικές, φυσικές και μηχανικές ιδιότητες. Το τελικό προϊόν του συνδυασμού τους έχει επίσης διαφορετικές ιδιότητες από αυτά. Συνεπώς τα υλικά αυτά είναι διακριτά στη μορφή τους και στις ιδιότητες τους. Επιπλέον, είναι ένα σύστημα πολυφασικό καθώς τα διάφορα υλικά μπορεί να είναι σε ρευστή, υγρή, στερεή ή ημιστερεή κατάσταση. Συνήθως η διαφορετική φυσική κατάσταση που βρίσκεται κάθε συντελεστής δεν αποτελεί προϊόν σύνθεσης τους.

Τα σύνθετα υλικά αποτελούνται από δύο φάσεις. Η κύρια φάση είναι η μήτρα και ο εκτελεί διάφορες κρίσιμες λειτουργίες. Ειδικότερα προστατεύει τις ίνες από το περιβάλλον, τις συγκρατεί μεταξύ τους, διαμορφώνει τη γεωμετρία του συστήματος και αποτελεί μέσο μεταφοράς τάσεων από το σώμα ενίσχυσης στις ίνες. Επιπλέον η μήτρα ενισχύει την κατανομή των συστατικών μέσα στο σύνθετο υλικό και προστατεύει τη φάση διασποράς από την τριβή και τους περιβαλλοντικούς παράγοντες που προκαλούν την αποδόμησή της.

Η δευτερεύουσα φάση καλείται φάση διασποράς ή ενισχυμένη φάση ή έγκλεισμα. Η φάση διασποράς που είναι σφηνωμένη στη μήτρα είναι συνήθως ανθεκτικότερη από αυτήν. Η ενισχυμένη φάση προσδίδει την αντοχή και την ακαμψία στο σύνθετο υλικό.

Τα σύνθετα υλικά μπορούν να ταξινομηθούν με διαφορετικούς τρόπους και σε διάφορες κατηγορίες ανάλογα με το κριτήριο που θα επιλεγεί κάθε φορά. Έτσι, διακρίνονται σε φυσικά ή τεχνητά, ανάλογα με τον <τύπο> του υλικού, σε μακροσύνθετα, μικροσύνθετα και νανοσύνθετα, όπου το μέγεθος των συστατικών στο υλικό της μήτρας είναι πολύ μεγαλύτερο, περίπου ίσο και πολύ μικρότερο από  $10^{-6}$  m αντίστοιχα. Επίσης κατηγοριοποιούνται ανάλογα με το υλικό που χρησιμοποιείται στη μήτρα σε σύνθετα υλικά μεταλλικής, κεραμικής, πολυμερικής, άνθρακα/άνθρακα και πυριτικής μήτρας. Τέλος, διακρίνονται σε κοκκώδη, ινώδη και στρωματικά σύνθετα με βάση τον τύπο του υλικού πλήρωσης.



Εικόνα 1.1: Γενική ταξινόμηση των σύνθετων υλικών.

### 1.3 Εφαρμογές και τεχνολογίες σύνθετων υλικών

Τα σύνθετα υλικά έχουν τύχει ευρείας εφαρμογής κατά τις τελευταίες δεκαετίες στην παραγωγή τεράστιας ποικιλίας προϊόντων, που σχετίζονται σε μεγάλο ποσοστό με την αυτοκινητοβιομηχανία, τη ναυσιπλοΐα, την αεροναυπηγική, τα είδη σπορ, μέρη ηλεκτρονικών συσκευών κλπ. Για αυτό και παραδοσιακά η μελέτη των συνθέτων υλικών αποτελούσε ένα από τα γνωστικά πεδία μηχανολόγων μηχανικών, αεροναυπηγών, χημικών μηχανικών, ηλεκτρολόγων κλπ.

Τα σύνθετα υλικά που εφαρμόζονται στο πεδίο των ενισχύσεων προκύπτουν από το συνδυασμό συνεχών ινών, συνήθως μίας διεύθυνσης, και πολυμερικής ή ανόργανης μήτρας (γι'αυτό ονομάζονται και ινοπλισμένα πολυμερή). Οι ίνες στα σύνθετα υλικά, αποτελούν τον φορέα ανάληψης δυνάμεων, κατά κανόνα εφελκυστικών, παράλληλα στη διεύθυνσή τους. Κύριο χαρακτηριστικό τους είναι η εξαιρετικά υψηλή εφελκυστική αντοχή και η γραμμικά ελαστική συμπεριφορά μέχρι τη θραύση τους.

Έχουν αναπτυχθεί διάφορες τεχνικές που αποσκοπούν στην αύξηση της δύναμης ή/και ικανότητα παραμόρφωσης υφιστάμενων κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος (ΟΣ). Σε αυτές περιλαμβάνονται η δημιουργία επικαλύψεων με

εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (shotcrete), χωρίς σημαντική αλλαγή της γεωμετρίας, μανδύες χάλυβα και εξωτερικά συνδεδεμένο ινοπλισμένο πολυμερές (FRP, όπως εποξειδικές ταινίες ή in situ εμποτισμένα υφάσματα). Οι τεχνικές κατασκευής έχουν καθιερωθεί στην κοινότητα των πολιτικών μηχανικών λόγω των ευνοϊκών ιδιοτήτων που προσφέρονται από αυτά τα υλικά. Ορισμένες από τις μηχανικές ιδιότητες αυτών, είναι η υψηλή εφελκυστική αντοχή και αντοχή σε αναλογία βάρους, αντοχή στη διάβρωση, ευκολία και ταχύτητα εφαρμογής και διατήρηση της γεωμετρίας.

Παρά τα πλεονεκτήματα αυτά σε σχέση με άλλες μεθόδους, η τεχνική ενίσχυσης συνεπάγεται ορισμένα μειονεκτήματα, τα οποία εντοπίζονται στη συμπεριφορά οργανικών ρητινών που χρησιμοποιούνται για να δεσμεύουν και να εμποτίζουν τις ίνες. Η αντικατάσταση οργανικών συνδετικών με ανόργανα πολυμερή, δηλαδή τροποποιημένα κονιάματα με βάση το τσιμέντο, ήταν η λογική πορεία δράσης. Αυτή στόχευε στην ανακούφιση όλων των προβλημάτων που σχετίζονται με τη ρητίνη. Ωστόσο, η υποκατάσταση του FRP με ινοπλέγματα σε ανόργανη μήτρα παρεμποδίζεται από τις σχετικά φτωχές συνθήκες που προκύπτουν στο τσιμεντοειδές σύνθετο. Αναλυτικότερα, λόγω της κοκκιότητας των στοιχείων που υπάρχουν στο κονίαμα, η διείσδυση και ο εμποτισμός των φύλλων ινών είναι αρκετά δύσκολο να επιτευχθεί.

Οι ενισχυμένες αλληλεπιδράσεις ινών-μήτρας θα μπορούσαν να επιτευχθούν όταν τα συνεχή φύλλα ινών αντικαθίστανται από τα κλωστοϋφαντουργικά προϊόντα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα μια νέα γενιά υλικών, τα οποία μπορεί να θεωρείται ως εναλλακτική λύση για τα FRP στον τομέα της ενίσχυσης και της σεισμικής μετασκευής. Τα υλικά αυτά έχουν λάβει την ονομασία «κονίαμα ενισχυμένο με υφαντικά προϊόντα» (TRM) Τριανταφύλλου (2006), «σκυρόδεμα ενισχυμένο από υφαντικές ύλες» (TRC) από Γερμανούς ερευνητές (π.χ. Curbach και Jesse, 1999· Brameshuber, 2001) και «ινοπλισμένα υφάσματα σε ανόργανη μήτρα» της ACI (2013). Αυστηρά μιλώντας, η ανόργανη μήτρα των σύνθετων υλικών με βάση τα κλωστοϋφαντουργικά προϊόντα δεν ταξινομείται ως «σκυρόδεμα», λόγω του πολύ μικρού μεγέθους των αδρανών υλικών, και δεν περιέχει απαραίτητα τσιμέντο. Ως εκ τούτου, ο όρος TRM μπορεί να είναι πιο κατάλληλος.

Τα ινοπλισμένα πολυμερή σε ανόργανη μήτρα είναι μία νέα σχετικά τεχνολογία που δυνητικά μπορεί να ανταποκριθεί στα αναφερθέντα προβλήματα της προηγούμενης ενότητας. Πρόκειται για πλέγματα, αποτελούμενα από ίνες σύνθετων υλικών υψηλής αντοχής, δύο ή τεσσάρων διευθύνσεων, εμποτισμένα συνήθως με συνδετικό υλικό οργανικής σύστασης, τα οποία συνδέονται με κάποιο δομικό στοιχείο οπλισμένου σκυροδέματος, με ένα τσιμεντοειδές κονίαμα.

Επιπλέον αυτή η τεχνολογία παρέχει τη δυνατότητα παρασκευής δομικών στοιχείων με διάφορες σχεδιαστικές απαιτήσεις, έχοντας εφαρμογή στην κατασκευή καταστρωμάτων γεφυρών, τμημάτων σηράγγων, μελών τρένων, κ.ά. Επίσης παρέχει προστασία των ενισχυμένων τμημάτων έναντι υψηλών θερμοκρασιών, υγρασίας και χλωριδίων.



Εικόνα 1.2: Τμήματα αεροπλάνου κατασκευασμένα από ινοπλισμένα πολυμερή,<sup>1ο</sup> συνέδριο στρατηγικής και τεχνολογίας, ένωση απόστρατων αξιωματικών αεροπορίας (2019)

Τα συστήματα ενίσχυσης στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος με σύνθετα υλικά είναι γενικά δύο τύπων: (α) “υγρής εφαρμογής” (ή “επί τόπου σκλήρυνσης” της μήτρας) και (β) “προκατασκευασμένα” (η σκλήρυνση της μήτρας έχει προηγηθεί της εφαρμογής). Η βασική τεχνική, η οποία είναι και η πλέον συνηθισμένη (και

εφαρμόζεται ουσιαστικά κατ' αποκλειστικότητα στη χώρα μας), περιλαμβάνει την διαχειρὸς επικόλληση είτε υφασμάτων (προεμποτισμένων με ρητίνη ή μη προεμποτισμένων), είτε σκυροδέματος ή τοιχοποιίας, μέσω εποξειδικών ρητινών.

#### 1.4 Περιγραφή ανάγκης ενίσχυσης υφιστάμενων κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα.

Μια πιεστική κοινωνική ανάγκη σε όλες τις χώρες που υποφέρουν από υψηλή σεισμικότητα είναι ο έλεγχος της ακεραιότητας και λειτουργικότητας των υφιστάμενων κτιρίων έναντι μέτριων και ισχυρών σεισμών. Η Ελλάδα αντιμετωπίζει σημαντικό πρόβλημα στη διαχείριση του σεισμικού κινδύνου των υφιστάμενων κτιρίων, μεταξύ των οποίων πάνω από το 75% αποτελείται από παλιά, οπλισμένου σκυροδέματος (ΟΣ) κτίρια, χτισμένα μέχρι τις αρχές της δεκαετίας του 1980, όπως αναφέρουν και οι Παρδαλόπουλος και Λεκίδης (2019). Αυτά τα κτίρια κατασκευάστηκαν με κώδικες σχεδιασμού μιας προηγούμενης εποχής, όταν οι επιπτώσεις των φιλοσοφιών σχεδιασμού δυναμικότητας ήταν ανεπαρκείς και επίπεδα σεισμικής επικινδυνότητας κάτω από τα σημερινά. Παρά το γεγονός ότι τα υπάρχοντα κτίρια ΟΣ διαθέτουν σημαντικό ποσό αποθεμάτων αντοχής, εξαιτίας των υπεραντοχών εμονωμένων μελών, είναι ευάλωτα σε σεισμούς. Ισχυροί σεισμοί που σημειώθηκαν στο παρελθόν σε διάφορες τοποθεσίες σε όλη την Ελλάδα (Καλαμάτα 1987, Κοζάνη & Γρεβενά 1995, Αιγίου 1995, Αθήνα 1999, Λευκάδα 2003 & 2015, Δυτική Πελοπόννησος 2008, Κεφαλονιά 2014 και Ήπειρος 2016) αποδεικνύουν ελλείψεις σε πολλά από τα υπάρχοντα κτίρια.



<https://www.athensmagazine.gr/article/ne 1>



<https://www.messinialive.gr/tous-seismou 1>

Εικόνα1.3: Φωτογραφίες κατεστραμμένων κτιρίων μετά από σεισμούς, σε περιοχές της Ελλάδας

Επιπλέον, πολλά από αυτά τα κτίρια υποφέρουν από έκθεσή τους σε διαβρωτικούς παράγοντες (είτε λόγω ρύπανσης είτε λόγω έκθεσης σε αερομεταφερόμενα χλωρίδια στις τεράστιες παράκτιες περιοχές της χώρας) θέτοντας ένα πολύ αρνητικό υπόβαθρο όσον αφορά δομικές συνθήκες, για σεισμική αναβάθμιση και μετασκευή.

Όσον αφορά το φαινόμενο της φθοράς, όπως αναφέρει και η Δερουκάκη (2019) , είτε είναι τμηματική, δηλαδή συγκεντρωμένες βλάβες σε κάποιο δομικό μέλος, είτε συνολική, αυτή ορίζεται ως η βαθμιαία μείωση στη δυνατότητα παραλαβής φορτίων, ενδεχόμενο αποτέλεσμα της οποίας είναι η καταστροφικότερη συμπεριφορά-απόκριση της κατασκευής έναντι δυναμικών φορτίσεων και είναι απόρροια διαφόρων μηχανικών, φυσικών, χημικών-βιομηχανικών διεργασιών. Στην κατηγορία των μηχανικών διεργασιών ανήκουν οι συστολές, οι καθιζήσεις, οι φορτίσεις και οι επιβαλλόμενες οριζόντιες εδαφικές μετακινήσεις (σεισμός). Στις φυσικές διεργασίες περιλαμβάνονται οι θερμοκρασιακές διαφορές, η συστολή ξήρανσης και η επίδραση παγετού. Στην τελευταία κατηγορία, η επίδραση οξέων και η ανάπτυξη μικροοργανισμών οδηγούν σε σταδιακή διάβρωση των υλικών (π.χ. ενανθράκωση).





<http://enanthrakosi.blogspot.com/2011/04/1>

Εικόνα 1.4: Δομικά μέλη κατασκευής, όπου το σκυρόδεμα έχει ενανθρακωθεί και ο οπλισμός έχει διαβρωθεί

### 1.5 Αντικείμενο της παρούσας εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία αφορά την καμπτική ενίσχυση δοκών οπλισμένου σκυροδέματος με ινοπλισμένα πολυμερή σε ανόργανη μήτρα. Αναλυτικότερα, πρόκειται για μια πειραματική και διερευνητική διαδικασία, στην οποία ενισχύθηκαν 8 δοκοί οπλισμένου σκυροδέματος, με ινοπλέγματα βασάλτη και γυαλιού. Σκοπός της εργασίας είναι η εις βάθος περιγραφή και ο σχολιασμός της μηχανικής συμπεριφοράς των ινοπλεγμάτων σε ανόργανη μήτρα σε εφελκυσμό και σε συνάφεια με υπόστρωμα σκυροδέματος, βάση των πειραματικών εφαρμογών. Ο ορισμός και η παραμετροποίηση των στοιχείων που εξετάστηκαν πραγματοποιήθηκε με τη μελέτη διατριβών που αφορούσαν πειράματα ενίσχυσης δοκών έναντι κάμψης με ΙΑΜ.

## 2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

### 2.1 Ιστορική αναδρομή και χαρακτηριστικά TRM

Σε συνέχεια του προηγούμενου κεφαλαίου, στο παρόν κεφάλαιο θα γίνει εκτενέστερη αναφορά για το TRM. Συγκεκριμένα θα δοθούν μερικά ιστορικά στοιχεία και η αιτία για την παραγωγή του. Στη συνέχεια γίνεται λόγος για τα υλικά από τα οποία αποτελείται, διάφορες εφαρμογές του σε έργα και ποιες τεχνικές χρησιμοποιούνται. Επίσης, μιας και αποτελεί αντικείμενο της συγκεκριμένης εργασίας, θα παρουσιαστούν κάποια αποτελέσματα από πειραματικές διατάξεις μέσω των οποίων μελετήθηκαν εφαρμογές του TRM για καμπτική ενίσχυση στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος.

Το TRM ή textile-reinforced mortar όπως αναφέρεται στη διεθνή βιβλιογραφία εμφανίστηκε στη Γερμανία κατά τη δεκαετία του 1980. Ήταν αποτέλεσμα της ανάπτυξης της τεχνολογίας της χρήσης των ινών στον κατασκευαστικό κλάδο και ερχόταν να αντιμετωπίσει το μεγαλύτερο μειονέκτημα που είχαν τα FRP, ήτοι οι οργανικές εποξικές ρητίνες τους. Οι συγκεκριμένες μήτρες έχουν μια σειρά από μειονεκτήματα όπως:

- Μειωμένη αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες
- Υψηλό κόστος και κίνδυνος του εργατικού προσωπικού
- Αδυναμία εφαρμογής σε υγρές επιφάνειες
- Χαμηλή διαπερατότητα επομένως κακή “αναπνοή” των ενισχυόμενων στοιχείων
- Δυσκολία αποτίμησης πιθανών βλαβών δίχως την καταστροφή της ενίσχυσης

Όπως αναφέρεται παραπάνω οι οργανικές μήτρες είναι ιδιαίτερα ευαίσθητες σε υψηλές θερμοκρασίες άνω των 70°C, όπως απέδειξαν πληθώρα πειράματα στο παρελθόν. Ένα παράδειγμα αποτελεί το πείραμα των Myers et al. (2019) που μελέτησαν την επίδραση της υψηλής θερμοκρασίας σε δοκούς οπλισμένου σκυροδέματος ενισχυμένους με ίνες FRP από γυαλί και άνθρακα. Οι ερευνητές παρατήρησαν ότι για υψηλές θερμοκρασίες, ανεξαρτήτως του υλικού των ινών, η

συνάφεια του FRP με την ρητίνη μειωνόταν κατά 48%. Κατά συνέπεια παρατηρήθηκαν φαινόμενα αποκόλλησης στη διεπιφάνειά τους.

Για να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα της συνάφειας μεταξύ της μήτρας, που λειτουργεί σαν συνδετικό υλικό, και ινών σύνθετων υλικών, αλλά και των προαναφερθέντων μειονεκτημάτων της εποξικής ρητίνης, αποφασίστηκε η χρήση ανόργανης κονιάς και συγκεκριμένα εξαιρετικά λεπτόκοκκου τσιμέντου (fine grained cement) με μέγιστο κόκκο αδρανών 2mm που δεν εμφανίζει ευαισθησία σε υψηλές θερμοκρασίες τόσο σε αντοχή όσο και σε συνάφεια Πλαμαντούρας (2015) . Ο λόγος που επιλέγεται τόσο μικρός κόκκος αδρανών είναι για να μην εμφανίζονται φαινόμενα εμπλοκής του σκυροδέματος όταν αυτό καλείται να διεισθεί μέσα από το ινοπλέγμα. Επομένως το TRM αποτελείται από δύο μέρη, δηλαδή τα ινοπλέγματα και η ανόργανη κονία (εικόνα 2.1).



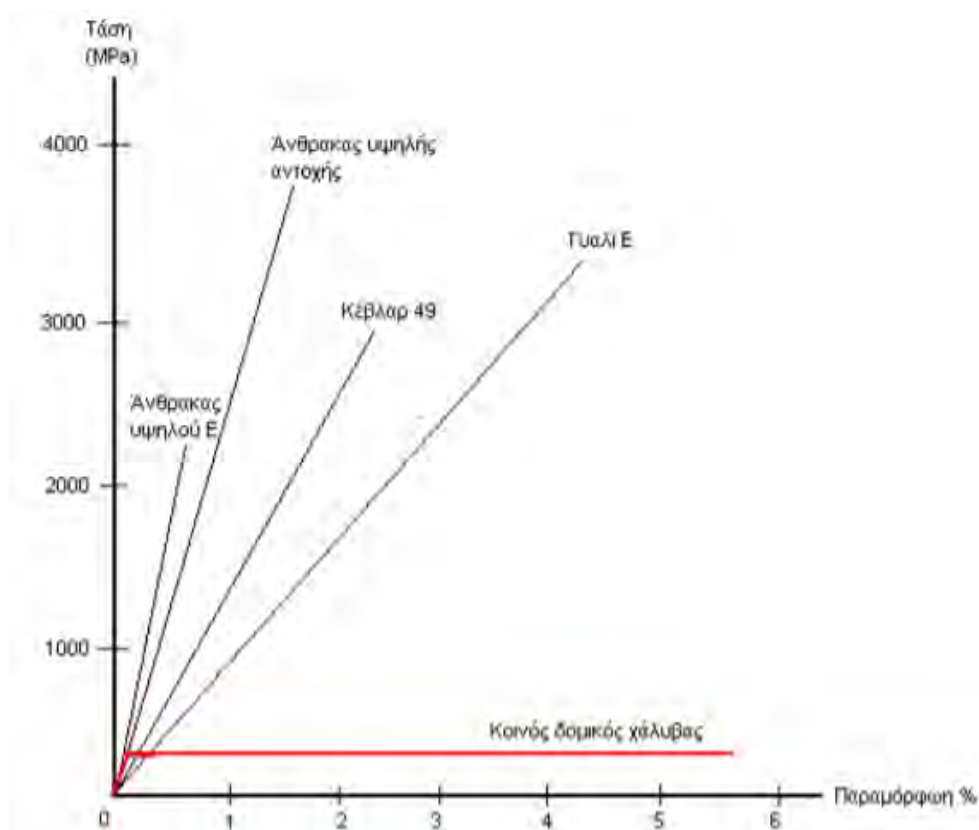
Εικόνα 2.1: Πρώτες ύλες του TRM, Κούτας (2015)

## 2.2 Πρώτες ύλες TRM

Στη προηγούμενη παράγραφο έγινε αναφορά για τα μειονεκτήματα των οργανικών ρητίνων επομένως και τους λόγους δημιουργίας του TRM. Στη παρούσα παράγραφο θα δοθούν περισσότερα στοιχεία σχετικά με τις πρώτες ύλες του TRM, δηλαδή τα ινοπλέγματα και την ανόργανη κονία.

Αρχικά όσον αφορά τα ινοπλέγματα, αυτά αποτελούνται από ίνες συνήθως άνθρακα, γυαλί και σπανιότερα αραμίδιο ή βασάλτη που έχουν διάμετρο 5-25μm. Κοινώς χρησιμοποιούνται ίδιες ίνες με το FRP, με τη βασική διαφορά ότι είναι σε μορφή πλεγμάτων αντί συνεχούς υφάσματος.

Οι ίνες άνθρακα, σύμφωνα με τον Τριανταφύλλου (2004) έχουν συγκριτικά με τα υπόλοιπα υλικά το μεγαλύτερο μέτρο ελαστικότητας και υπερτερούν σε μηχανικά χαρακτηριστικά. Συγκεκριμένα το μέτρο ελαστικότητάς τους κυμαίνεται μεταξύ 215-235 GPa, αν και υπάρχουν ειδικές ίνες με ακόμα υψηλότερο μέτρο ελαστικότητας που αγγίζει τιμές μεταξύ 500-700 GPa. Όπως φαντάζει λογικό τέτοιες ίνες είναι αρκετά ακριβές και χρησιμοποιούνται σε ειδικές περιπτώσεις. Από την άλλη οι ίνες γυαλιού και αραμιδίου έχουν χαμηλότερα μέτρα ελαστικότητας της τάξης των 70-90 GPa, αλλά σε σχέση με τον άνθρακα εμφανίζουν μεγαλύτερο ποσοστό οριακής παραμόρφωσης σε εφελκυστική αστοχία και είναι πιο φτηνές στο εμπόριο. Οι τάσεις-παραμορφώσεις που αναπτύσσουν τα διαφορετικά είδη ινών συγκριτικά με το δομικό χάλυβα δίνονται παρακάτω (εικόνα 2.2).



Εικόνα 2.2: Διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων σύνθετων υλικών και δομικού χάλυβα, Τριανταφύλλου (2004)

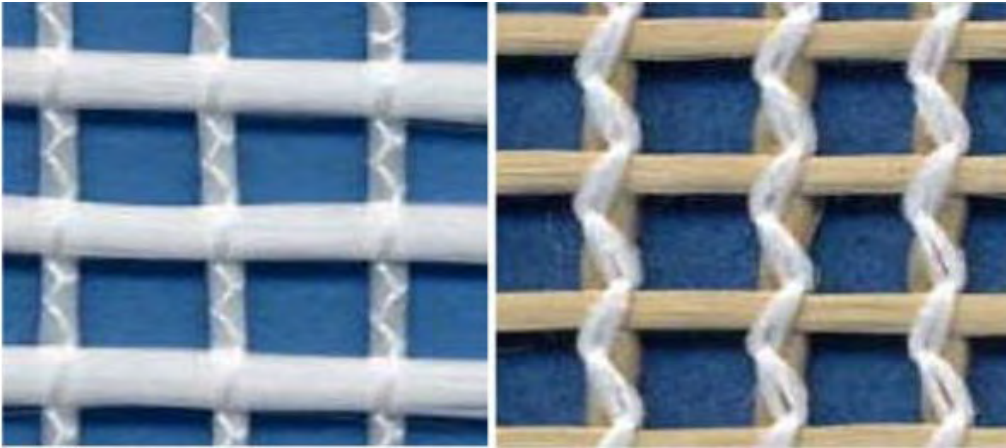
Όπως φαίνεται από το παραπάνω διάγραμμα οι ίνες αστοχούν ψαθυρά και έχουν καθολικά μικρότερη μέγιστη δυνατή παραμόρφωση, ωστόσο μπορούν να αναπτύξουν υψηλότερες τάσεις από το κοινό δομικό χάλυβα.

Ένα χαρακτηριστικό των ινών αραμιδίου, που διακρίνονται σε αρωματικά πολυαμιδία και αρωματικά πολυαιθεραμίδια, είναι η εξαιρετική τους συμπεριφορά σε κρουστικά φορτία. Για αυτό το λόγο χρησιμοποιούνται επιτυχημένα σε διάφορες χώρες, όπως η Μ.Βρετανία, ως ενίσχυση υποστυλωμάτων σε γέφυρες και αυτοκινητοδρόμων, όπου τα φαινόμενα πρόσκρουσης οχημάτων είναι συχνά.

Οι ίνες υάλου λόγω της ευαισθησίας τους σε αλκαλικό περιβάλλον, όπως αυτό του κονιάματος με τσιμεντοειδή σύσταση με συνήθεις τιμές pH άνω του 9, πρέπει να υποβάλλονται σε ειδική προεπεξεργασία, ώστε να αποκτήσουν υψηλή ανθεκτικότητα. Αυτή η προεπεξεργασία είναι κάτι που επιφέρει αύξηση του κόστους τους.

Πρέπει να τονιστεί ότι οι ίνες παραλαμβάνουν δυνάμεις μόνο όταν αυτές ασκούνται παράλληλα με τη διεύθυνση τους. Επομένως αναλόγως με τις απαιτήσεις της ενίσχυσης αποφασίζεται και πόσες διευθύνσεις θα έχει το πλέγμα, το οποίο θα χρησιμοποιηθεί από τον κατασκευαστή. Λεπτομέρειες για τις διευθύνσεις δίνονται παρακάτω. Η διαφορά των πλεγμάτων με το ύφασμα είναι οι βροχίδες, δηλαδή κενά μεταξύ των ινών, μεγέθους 6-20mm γύρω από τις οποίες καλείται να διεισδύσει το σκυρόδεμα. Μιας και το TRM είναι νεότερη τεχνολογία και τα τεχνικά χαρακτηριστικά των πλεγμάτων δεν έχουν εξεταστεί τόσο όσο αυτά των υφασμάτων, αρκετά πρόσφατα εκδόθηκαν οδηγίες για το σχεδιασμό τους από τη τεχνική επιτροπή 549 του Αμερικανικού Ινστιτούτου Σκυροδέματος (ACI 549.4R-13, 2013) [6].

Επίσης γίνεται μια επιπλέον διακριτοποίηση των ινοπλεγμάτων βάσει του αριθμού των διευθύνσεων των ινών τους. Έτσι για παράδειγμα έχουμε ινοπλέγματα δύο (εικόνα 2.3) ή τεσσάρων διευθύνσεων (εικόνα 2.4) στο επίπεδο ή και στο χώρο (εικόνα 2.5). Οι τρόποι παραγωγής των ινοπλεγμάτων ποικίλουν. Ορισμένοι τρόποι παρασκευής των πλεγμάτων είναι μέσω ύφανσης των οριζόντιων και των κατακόρυφων κλώνων ινών (woven textiles) και μέσω συγκράτησης των οριζόντιων με τους κατακόρυφους κλώνους με πρόσθετα νήματα που υφαίνονται με ειδικό τρόπο (non woven ή stitched textiles). Με τον πρώτο τρόπο η δομή του πλέγματος καθίσταται συνήθως πιο σταθερή, αντιθέτως με τον δεύτερο τρόπο η σταθερότητα της δομής εξαρτάται αποκλειστικά από την ποιότητα των πρόσθετων νημάτων ύφανσης, στην οποία πρέπει να δίνεται και μεγαλύτερη βαρύτητα.



Εικόνα 2.3: Ινοπλέγματα δύο διευθύνσεων, Μπαλιούκος (2008)



Εικόνα 2.4: Ινοπλέγματα τεσσάρων, Δερουκάκη (2019)



Εικόνα 2.5: Χωρικά Ινοπλέγματα, Δερουκάκη (2019)

Γενικά η μήτρα αποτελεί το συνδετικό υλικό μεταξύ του ινοπλέγματος και της επιφάνειας του στοιχείου που προορίζεται να ενισχυθεί. Μέσω αυτής διαβιβάζονται



οι εφελκυστικές δυνάμεις στο ινόπλεγμα, ενώ παράλληλα αυξάνεται η διατμητική και η θλιπτική αντοχή της στρώσης ενίσχυσης. Επιπροσθέτως η μήτρα προσφέρει προστασία στις ίνες από εξωτερικούς διαβρωτικούς παράγοντες, επιτρέποντας ταυτόχρονα την αναπνοή τους μιας και το πορώδες του λεπτόκοκκου τσιμεντοκονιάματος, που χρησιμοποιείται ως μήτρα στο TRM, είναι μεγαλύτερο σε σχέση με τις οργανικές εποξικές ρητίνες.

Ο κατάλληλος σχεδιασμός και η κοκκομετρία του τσιμεντοκονιάματος (εικόνα 2.5) καθορίζει σε σημαντικό βαθμό την απόκριση του TRM ως σύνθετο υλικό και ειδικότερα τη δυνατότητα ανάληψης φορτίων όπως και την ανθεκτικότητά του σε βάθος χρόνου. Επίσης όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως θα πρέπει αυτό το υλικό να πληροί όλες τις απαιτήσεις του ΚΤΣ (2016) και κυρίως να μπορεί να διεισδύει μέσα από το πλέγμα των ιών. Απαραίτητα πρέπει να θεωρούνται τα ικανοποιητικά ρεολογικά χαρακτηριστικά, με ταυτόχρονη αποφυγή φαινομένων εμπλοκής και επίτευξη της καλύτερης δυνατής συνάφειας με το ινόπλεγμα.



Εικόνα 2.6: Χρήση τσιμεντοκονιάματος ως μήτρα ινοπλέγματος, Μπαλιούκος (2008)

Συνοπτικά, οι απαιτήσεις που πρέπει να ικανοποιεί το ανόργανο μητρικό υλικό είναι οι εξής:

- ανθεκτικότητα έναντι των δυσμενών περιβαλλοντικών συνθηκών
- υψηλή εργασιμότητα και ρεολογία
- υψηλό ιξώδες για εύκολες εφαρμογές σε κατακόρυφες ή κεκλιμένες επιφάνειες
- ευκολία εφαρμογής νέας στρώσης όσο η προηγούμενη βρίσκεται σε νωπή κατάσταση
- μεγάλη διατμητική αντοχή για την αποφυγή μορφών αστοχίας πρόωρης αποκόλλησης του σύνθετου υλικού από τη προϋπάρχουσα επιφάνεια (σκυρόδεμα ή τοιχοποιία)
- συμβατή χημική δομή με τη χημική δομή του πλέγματος των ινών

Ο πιο διαδεδομένος τύπος τσιμέντου που χρησιμοποιείται στην περίπτωση των ενισχύσεων κατασκευών με TRM είναι το τσιμέντο τύπου Portland. Σύμφωνα με την Δερουκάκη (2020), η προσθήκη μικροποσότητας πολυμερών στο κονιάμα βελτιώνει τις μηχανικές του ιδιότητες και ειδικότερα εκείνες που σχετίζονται με τη διατμητική τάση συνάφειας που αναπτύσσεται μεταξύ κονιάματος και υποστρώματος. Ταυτόχρονα η προσθήκη πολυμερών αυξάνει την εφελκυστική αντοχή του κονιάματος, καθώς και βελτιώνει τη συνάφεια μεταξύ των ινών και της μήτρας. Η τελευταία οφείλεται στην ικανότητα διείσδυσης των πολυμερών μέσα από τους βρόχους, δηλαδή τα κενά μεταξύ των ινών, και χάρη στο φαινόμενο της μηχανικής εμπλοκής. Επιπλέον αξίζει να σημειωθεί πως σε περιπτώσεις χρήσης ανόργανων μητρικών υλικών σε συνδυασμό με ινόπλεγμα από γυαλί, επιβάλλεται το τελευταίο να είναι τύπου AR (Alkali Resistant), ή να χρησιμοποιείται κάποιο πολυμερές χαμηλού κόστους που να μειώνει την αλκαλικότητα του σκυροδέματος. Η χρήση του γίνεται μέσω προεμποτισμού των κλώνων του πλέγματος. Με αυτόν τον τρόπο αποφεύγεται η πρόωμη αστοχία των ινών γυαλιού εξαιτίας της υψηλής αλκαλικότητας (Τριανταφύλλου κ.α., 2006).

Στο TRM κάθε κλώνος αποτελείται από ένα πλήθος ινών οι οποίες διακρίνονται σε δύο κατηγορίες: τις περιφερειακές ίνες και τις ίνες του πυρήνα. Πρακτικά μόνο οι περιφερειακές ίνες έρχονται άμεσα σε επαφή με τη μήτρα σχηματίζοντας την απαραίτητη συνάφεια. Το αποτέλεσμα είναι η αποφυγή της ολίσθησης τους, φαινόμενο μη επιθυμητό, και η συμμετοχή τους σε μεγάλο βαθμό στην ανάληψη



των φορτίων. Αντιθέτως οι ίνες του πυρήνα έχουν μειωμένη συνάφεια με το μητρικό υλικό, καθώς δεν να διεισδύει σε αυτές επαρκής ποσότητα μήτρας, με αποτέλεσμα τη σημαντική τους ολίσθηση.

Σύμφωνα με τους Kruger et al. (2003) η ενέργεια για τη θραύση ενός κλώνου σε δοκιμές εξόλκευσης είναι ίδια είτε γίνεται προεμποτισμένος του κλώνου με πολυμερή είτε όχι. Συγκεκριμένα, όταν ο κλώνος ινών είναι προεμποτισμένος με πολυμερή τότε η θραύση του είναι ψαθυρή και η πτώση του φορτίου είναι απότομη. Στην αντίθετη περίπτωση συμβαίνει ανακατανομή της έντασης και παρόλο που το μέγιστο φορτίο είναι μικρότερο, η αστοχία συμβαίνει σε μεγαλύτερη παραμόρφωση, γεγονός που είναι θετικό. Σχετικά με την ενέργεια θραύσης υπολογίστηκε και στις δύο περιπτώσεις ως ίση.

### 2.3 Τοποθέτηση και εφαρμογές TRM

Στη παρούσα παράγραφο παρουσιάζεται η διαδικασία που ακολουθείται για τη τοποθέτηση του TRM σε ένα στοιχείο καθώς και διάφορες εφαρμογές του. Το πρώτο βήμα αφορά την προετοιμασία μέσω εξομάλυνσης της επιφάνειας του στοιχείου προς ενίσχυση με ταυτόχρονη αφαίρεση της σκόνης. Οι συνηθισμένοι τρόποι γίνονται κυρίως με χρήση τροχού για λείανση της εξωτερικής επιφάνειας και λάξευση των γωνιών για να εξασφαλίζεται η ομαλότητα της επιφάνειας επαφής του ινοπλέγματος με το στοιχείο. Ειδικότερα μια νέα τεχνική που εφαρμόζεται αποκλειστικά στο TRM αφορά τη χρήση του τροχού για χάραξη εγκοπών (εικόνα 2.7) στην επιφάνεια του σκυροδέματος. Η τοποθέτηση του ινοπλέγματος γίνεται παράλληλα με τη κλίση των εγκοπών για να βελτιώνεται η συνάφεια του με το σκυρόδεμα. Άλλος τρόπος για τη λείανση της εξωτερικής επιφάνειας του σκυροδέματος είναι μέσω αμμοβολής.



Εικόνα 2.7: Προετοιμασία επιφάνειας σκυροδέματος με τροχό ,Raouf et al. (2017)

Στη συνέχεια αφότου έχει προετοιμαστεί η επιφάνεια του στοιχείου προς ενίσχυση, τοποθετείται η πρώτη στρώση κονιάματος που θα λειτουργήσει σαν μήτρα για την πρώτη στρώση του ινοπλέγματος. Αμέσως μετά και την τοποθέτηση του ινοπλέγματος και τον κατάλληλο εμποτισμό όλων των πλεγμάτων γίνεται επικάλυψή του με δεύτερη στρώση κονιάματος. Αν σύμφωνα με τις απαιτήσεις του κατασκευαστή χρησιμοποιηθούν και άλλες στρώσεις ινοπλέγματος τότε η διαδικασία επαναλαμβάνεται με τα ίδια βήματα. Τόσο η επικάλυψη του πλέγματος όσο και η επιπέδωση της τελικής επιφάνειας γίνεται από το εργατικό προσωπικό μέσω της χρήσης σπάτουλας (εικόνα 2.8).



Εικόνα 2.8: Εμποτισμός του TRM με κονία μέσω σπάτουλας, Δερουκάκη (2019)

Το TRM προσδίδει ορισμένα πλεονεκτήματα, ως δομικό υλικό, σε αρκετές κατασκευές έναντι του συμβατικά οπλισμένου σκυροδέματος. Το αποτέλεσμα είναι

η ολοένα και αυξανόμενη χρήση του στο τομέα των ενισχύσεων. Στα πλεονεκτήματα συγκαταλλέγονται η μείωση του βάρους των στοιχείων, του πάχους και του κόστους. Η τελευταία οφείλεται στην απουσία χαλύβδινου οπλισμού και στο κίνδυνο της διάβρωσής του. Επίσης υπάρχει η δυνατότητα τοποθέτησης των πλεγμάτων οπλισμού υπό οποιαδήποτε διεύθυνση, αναλόγως και της προετοιμασίας που γίνεται στην εξωτερική επιφάνεια του στοιχείου, όπως είδαμε και παραπάνω. Η ενίσχυση των κατασκευών, η προκατασκευή αλλά και η εφαρμογή των TRM για αρχιτεκτονικούς λόγους είναι μερικά μόνο από τα πεδία ανάπτυξης και εφαρμογής τους.

### 2.3.1 Εφαρμογή TRM σε δεξαμενές

Το πρώτο παράδειγμα εφαρμογής του TRM σε αυτήν την εργασία έγινε στο Άαχεν της Γερμανίας σε κατασκευή δεξαμενής επεξεργασίας υγρών αποβλήτων (εικόνα 2.9). Σε τέτοιες δεξαμενές λαμβάνουν χώρα χημικές διεργασίες για τη διάσπαση διάφορων μικροοργανισμών που οδηγούν σε παραγωγή θειικών και χλωριούχων αλάτων. Τέτοιες ουσίες είναι ιδιαίτερα επιβλαβής σε συνηθισμένες δεξαμενές από οπλισμένο σκυρόδεμα. Ο λόγος είναι ότι μπορούν να διεισδύσουν μέσα από το πορώδες και να διαβρώσουν τον οπλισμό. Το πρόβλημα αυτό μπορεί να αντιμετωπιστεί εφόσον γίνει επαρκής επικάλυψη του οπλισμού σε σκυρόδεμα, κάτι το οποίο αυξάνει τόσο το μέγεθος τόσο της δεξαμενής όσο και του συνολικού της κόστους. Η χρήση ινοπλεγμάτων από ίνες άνθρακα εξάλειψε περισσότερο τον κίνδυνο διάβρωσης και ταυτόχρονα μείωσε το κόστος και το μέγεθος της κατασκευής. Ενδεικτικά, υπολογίστηκε ότι χωρίς τα πλέγματα το πάχος των τοιχωμάτων θα ήταν αυξημένο κατά 40 με 60 mm.



Εικόνα 2.9: Δεξαμενή υγρών αποβλήτων στο Άαχεν της Γερμανίας , Παπαντωνίου (2007)

### 2.3.2 Εφαρμογή TRM σε ηχοπετάσματα

Τα ηχοπετάσματα χρησιμοποιούνται ευρέως στους αυτοκινητοδρόμους της Βόρειας Ευρώπης που κινούνται κοντά και μέσα σε αστικές περιοχές. Ο βασικός τους ρόλος είναι να αντανακλούν τον ήχο που παράγεται από την κίνηση των οχημάτων, προστατεύοντας έτσι το πληθυσμό από το φαινόμενο της ηχορύπανσης που μειώνει το βιωτικό επίπεδο. Όπως προαναφέρθηκε το TRM είναι ιδιαίτερα ευέλικτο λόγω του μικρού του βάρους και πάχους. Έτσι μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σαν υλικό κατασκευής ηχοπετασμάτων (εικόνα 2.10). Αναλόγως του τρόπου κατασκευής τους τα ηχοπετάσματα από TRM έχουν την δυνατότητα να ανακλούν ή να απορροφάνε μέρος αυτού του ήχου.



Εικόνα 2.10: Ηχοπετάσματα ανάκλασης από TRM στην Ολλανδία ,Παπαντωνίου (2007)

### 2.3.3 Εφαρμογή TRM σε γέφυρες

Ένα μεγάλο πλεονέκτημα που προσφέρουν τα TRM είναι η ικανότητα προσαρμογής τους στις επιφάνειες που ενισχύουν λόγω του μικρού τους πάχους και βάρους. Η εφαρμογή τους σε παλιές γέφυρες στοχεύει στην ενίσχυση και ταυτόχρονη προστασία του χαλύβδινου οπλισμού, χωρίς σημαντικό κόστος. Η διάβρωση του τελευταίου είναι συχνό φαινόμενο που οφείλεται σε φαινόμενα όπως η ενανθράκωση σε αστικές τοποθεσίες και η παρουσία χλωριόντων που επιταχύνεται αν χρησιμοποιείται αλάτι κατά τους χειμερινούς μήνες για αποφυγή σχηματισμού πάγου στο οδόστρωμα. Ωστόσο σε περιπτώσεις όπου κρίνεται ότι η διάβρωση του οπλισμού έχει προχωρήσει σημαντικά και μια γέφυρα πρέπει να επανασχεδιαστεί μπορεί να επιλεγούν τα ινοπλέγματα ως υλικό ενίσχυσης του σκυροδέματος.

Ένα τέτοιο παράδειγμα είναι στην πόλη Albstadt της Γερμανίας, όπου το 2010 παρατηρήθηκαν έντονα φαινόμενα διάβρωσης του οπλισμού. Αποφασίστηκε η καθίζηση και η κατασκευή μιας νέας πεζογέφυρας (εικόνα 2.11) στην ίδια θέση, η οποία αποτέλεσε την μεγαλύτερη πεζογέφυρα από TRM στον κόσμο με συνολικό μήκος 97m. Επιλέχθηκαν, ως υλικά ενίσχυσης, ινοπλέγματα από γυαλί, ανθεκτικά στην αλκαλικότητα του σκυροδέματος και σύμφωνα με τους Hegger et al. (2010) το

βάρος της νέας γέφυρας άρα και η ανάληψη φορτίων μειώθηκαν, ενώ αυξήθηκε και ο ωφέλιμος χρόνος ζωής του έργου.



Εικόνα 2.11: Πεζογέφυρα από ινοπλέγματα στη Γερμανία , Raupach et al. (2016)

#### 2.3.4 Εφαρμογή TRM σε ενίσχυση κτηρίου

Όπως ειπώθηκε σε προηγούμενες παραγράφους το TRM χρησιμοποιείται για την ενίσχυση κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα. Το 2006 αποφασίστηκε η ενίσχυση ενός σύνθετα γεωμετρικού κτηρίου μορφής κελύφους στο Schweinfurt της Γερμανίας για να μην προκληθούν ζημιές από τα φορτία ανέμου και χιονιού. Για το συγκεκριμένο κτήριο (εικόνα 2.12) ήταν απαγορευτικό να αναπτυχθούν μεγαλύτερες τάσεις και παραμορφώσεις, εξαιτίας της υπερβολικής/παραβολικής μορφής του.

Ο σχεδιασμός της ενίσχυσης βασίστηκε στην τοποθέτηση όσο το δυνατόν μικρότερου πρόσθετου βάρους, που αποτελεί ένα από τα βασικότερα πλεονεκτήματα των TRM ,Curbach et al. (2007). Το λεπτόκοκκο σκυρόδεμα που χρησιμοποιήθηκε παράχθηκε κατευθείαν στο εργοτάξιο, καθώς κανένας κατασκευαστής δεν πληρούσε τις προϋποθέσεις για τη χρήση του. Συγκεκριμένα υπήρχαν απαιτήσεις για καλή συνάφεια με τα ινοπλέγματα, με το προϋπάρχον τσιμέντο και ταυτόχρονα να μην εμφανίζει έντονη συρρίκνωση.



Για την προετοιμασία της επιφάνειας εφαρμόστηκε αμμοβολή στο παλιό σκυροδέμα για την επιπέδωσή του. Στη συνέχεια το εργατικό προσωπικό προχώρησε σε εκτοξευόμενη σκυροδέτηση πριν την τοποθέτηση της πρώτης στρώσης TRM. Η εκτόξευση του σκυροδέματος με αντλία επιτάχυνε το χρόνο σκυροδέτησης, το πάχος της τελικής στρώσης ήταν μόλις 15mm και η χρήση των ινοπλεγμάτων υπολογίστηκε ότι μείωσε κατά 80% το επιπλέον βάρος που θα παραλάμβανε το κέλυφος, αν είχε χρησιμοποιηθεί συμβατικός χαλύβδινος οπλισμός.



Εικόνα 2.12: Ενίσχυση κελύφους με TRM ,Raupach et al. (2016)

#### 2.4 Καμπτική ενίσχυση με TRM

Στοιχεία οπλισμένου σκυροδέματος, όπως δοκοί και πλάκες μπορούν να ενισχυθούν έναντι κάμψης με χρήση TRM, το οποίο τοποθετείται στο εφελκυσμένο πέλμα (εικόνα 2.13). Η διεύθυνση τοποθέτησης του TRM για τις δοκούς είναι παράλληλη στον άξονα του μέλους, ενώ για τις πλάκες η τοποθέτηση γίνεται σε δύο κάθετες μεταξύ τους διευθύνσεις.



Εικόνα 2.13: (a) Καμπτική ενίσχυση με TRM σε δοκούς και (b) πλάκες, Triantafyllou (2016)

Οι παράμετροι που μελετώνται στις πειραματικές διατάξεις είναι η προετοιμασία της επιφάνειας, το υλικό των πλεγμάτων και ο αριθμός των στρώσεων που χρησιμοποιούνται. Μελέτες που έχουν γίνει μέχρι στιγμής για την αποτελεσματικότητα του TRM μελετούν συστηματικά την εφαρμογή τους σε πειράματα κάμψης 3 ή 4 σημείων σε δοκούς μικρών μεγεθών, συνήθως 2m, και πλάκες μιας διεύθυνσης, όπου υπάρχει απουσία συνδετήρων. Η πλειονότητα των πειραμάτων έγιναν με ινοπλέγματα από άνθρακα, γυαλί και βασάλτη, αν και πρόσφατα χρησιμοποιήθηκαν μεταλλικά πλέγματα σε συνδυασμό με τσιμεντοκονία. Narpoli et al. (2015).

Για να γίνει κατανοητή η επιρροή των παραμέτρων στη καμπτική συμπεριφορά ενισχυόμενων θα αναφερθούν ορισμένα αποτελέσματα από προϋπάρχοντα πειράματα ως εξής:

- Η αύξηση του αριθμού των στρώσεων ινοπλέγματος ενισχύει την καμπτική συμπεριφορά των δοκών και των πλακών, αλλά και αλλάζει τον τρόπο αστοχίας της ενίσχυσης. Η αύξηση μπορεί να είναι γραμμικώς ανάλογη με τον αριθμό των στρώσεων Elsanadedy et al. (2013) , αλλά παρατηρήθηκε και μη-γραμμική συμπεριφορά D'Ambrisi et al. (2011) .



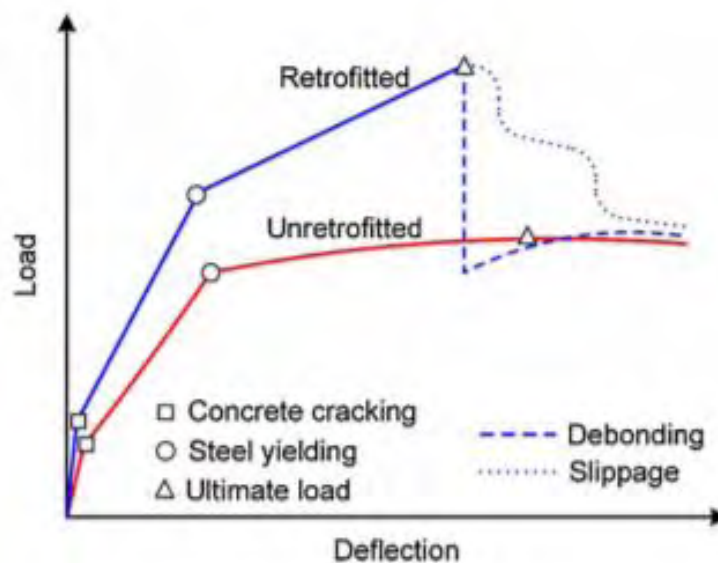
- Η αύξηση της καμπτικής αντοχής ήταν σημαντικά μεγαλύτερη όταν η ποσότητα του οπλισμού του ενισχυόμενου στοιχείου ήταν μικρότερη ,Bösche et al. (2008).
- Η προετοιμασία της επιφάνειας του σκυροδέματος παίζει μεγάλο ρόλο, ανεξαρτήτως του μέσου (αμμοβολή,τροχός κ.α). Όσο πιο επίπεδη είναι η τελική επιφάνεια τόσο καλύτερη είναι και η συνάφεια με το ινόπλεγμα ,Ebead et al. (2017).
- Το TRM προσφέρει καλύτερη αντοχή έναντι κάμψης σε σχέση με το FRP σε υψηλές θερμοκρασίες (150 °C). Συγκεκριμένα η πρόσθετη αντοχή του δοκιμίου ενισχυόμενου με TRM μειώθηκε κατά 45%, ενώ το FRP έχασε παντελώς τη λειτουργικότητά του αφού αποκολλήθηκε εξαιτίας της οργανικής ρητίνης που έλιωσε κάτω από τις δυσμενείς αυτές συνθήκες ,Raouf et al. (2017).
- Τέλος όσον αφορά το κατάλληλο υλικό για το ινόπλεγμα παρατηρήθηκε ότι ο βασάλτης έχει καλύτερη συμπεριφορά για κάμψη έναντι του άνθρακα και του υαλού ,Raouf et al. (2017).

Αναφορικά με την εμφάνιση ρωγμών κατά την αστοχία τονίζεται ότι εμφανίζεται πρώτα στις περιοχές όπου λαμβάνουν χώρα τα φορτία από το πείραμα κάμψης. Συνήθως οι ρωγμές για τα TRM ήταν μικρότερες σε μέγεθος από προηγούμενα αντίστοιχα πειράματα με FRP, αν και ήταν περισσότερες σε αριθμό. Η αστοχία, όπως συμβαίνει και στις περισσότερες ενισχύσεις με σύνθετα υλικά, είναι ψαθυρή και συμβαίνει συνήθως με αποκόλληση μεταξύ του TRM και του σκυροδέματος. Σύμφωνα με τους Koutas et al. (2019), μια δοκός που έχει ενισχυθεί έναντι κάμψης με TRM μπορεί να αστοχήσει με μερικούς από τους παρακάτω τρόπους:

- Διαρροή χαλύβδινου οπλισμού ακολουθούμενη από αστοχία λόγω θλίψης του σκυροδέματος.
- Διαρροή χαλύβδινου οπλισμού ακολουθούμενη από αστοχία του TRM.
- Ολίσθηση του ινοπλέγματος μέσα από τη μήτρα εξαιτίας κακής συνάφειας που μπορεί να οφείλεται σε κακή ποιότητα του κονιάματος ή σε κάποιο λάθος από το εργατικό προσωπικό. Η χρήση αγκυρώσεων στα άκρα είναι το καλύτερο μέτρο για την αντιμετώπιση αυτού του τρόπου αστοχίας.

- Σύνθλιψη αστοχία σκυροδέματος, ύστερα από διαρροή χαλύβδινου οπλισμού και επακόλουθη αποκόλληση του πλέγματος.

Ο τελευταίος τρόπος είναι και ο πιο συχνός, καθώς το TRM θα φτάσει τη μέγιστη εφελκυστική τάση που μπορεί να παραλάβει πριν από τη θραύση του σκυροδέματος. Σε αντίθετη περίπτωση ο τρόπος αστοχίας δεν είναι η αποκόλληση, αλλά η θραύση του πλέγματος. Η θραύση του πλέγματος είναι ψαθυρή και οδηγεί σε απότομη πτώση του φορτίου παραλαβής (εικόνα 2.14).



Εικόνα 2.14: Διάγραμμα φορτίου-παραμόρφωσης με χρήση ινοπλέγματος για καμπτική ενίσχυση, μπλε το ενισχυμένο δοκίμιο και κόκκινο το δοκίμιο χωρίς, Koutas et al. (2019).

Όπως φαίνεται και στο σχήμα για ίδιες τιμές παραμορφώσεις η δοκός που έχει ενισχυθεί με ινοπλέγματα μπορεί να παραλάβει μεγαλύτερα καμπτικά φορτία, μέχρι τη στιγμή που η ενίσχυση θα αστοχήσει. Για τη περίπτωση της αποκόλλησης του ινοπλέγματος, η αστοχία ήταν ψαθυρή και η πτώση φορτίου απότομη. Ωστόσο δεν συμβαίνει το ίδιο στη περίπτωση για την ολίσθηση του πλέγματος, όπου η πτώση του φορτίου δεν είναι απότομη και το ίδιο το πλέγμα συνεισφέρει μερικώς στην αναλαβή του φορτίου.

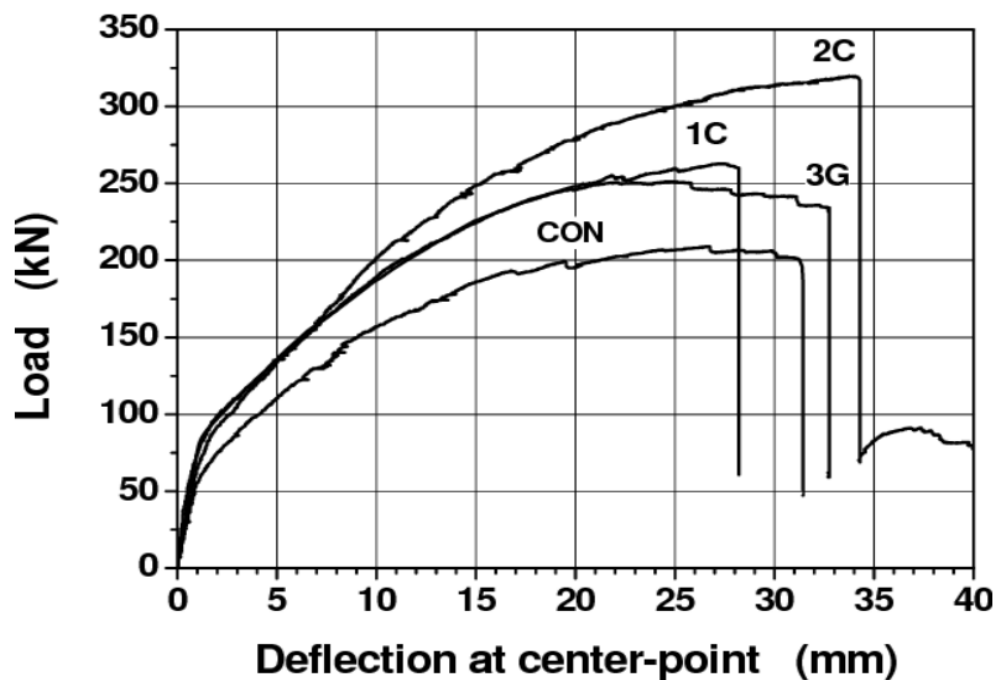
Όταν το κονίαμα που χρησιμοποιείται ως μήτρα για το TRM έχει υψηλότερη διατμητική αντοχή από το παλιό σκυροδέμα της ενισχυόμενης επιφάνειας, τότε η απώλεια της συνάφειας θα γίνει εξαιτίας του τελευταίου. Μερικοί τρόποι αστοχίας που παρατηρούνται εξαιτίας αυτού του χαρακτηριστικού είναι:

- Αποκόλληση του TRM εξαιτίας εμφάνισης ρωγμών στο μέσο της δοκού. Η αποκόλληση μπορεί να πραγματοποιηθεί στη διεπιφάνεια μεταξύ παλιού και νέου σκυροδέματος.
- Αποκόλληση του TRM εξαιτίας εμφάνισης ρωγμών στα άκρα της δοκού. Σε αυτή την περίπτωση η αποκόλληση προκαλείται εξαιτίας της αστοχίας των αγκυρώσεων στα άκρα της δοκού.
- Στην περίπτωση όπου η μήτρα έχει χαμηλή διατμητική αντοχή, τότε η αποκόλληση γίνεται μεταξύ των στρώσεων του TRM (interlaminar shear failure) ή μεταξύ της πρώτης στρώσης και του κονιάματος.

Κοινός παρανομαστής για όλους τους παραπάνω τρόπους αστοχίας είναι ότι η αστοχία της ενίσχυσης γίνεται πριν από τη θραύση του σκυροδέματος. Έχοντας αναφερθεί στους τρόπους αστοχίας της ενίσχυσης στις δοκούς, θα γίνει λόγος και για τους τρόπους αστοχίας στις πλάκες. Καταρχήν οι πρώτες καμπτικές ρωγμές εμφανίζονται, όπως είναι αναμενόμενο, κάτω από τη περιοχή όπου ασκείται το φορτίο στο πείραμα κάμψης. Όσο μεγαλώνει το τόξο παραμόρφωσης της πλάκας τόσο πληθαίνουν οι κάθετες ρωγμές, ενώ ταυτόχρονα αναπτύσσονται και διατμητικές ρωγμές υπό κλίση περίπου  $45^\circ$ , με κατεύθυνση από το κέντρο προς τα άκρα της πλάκας.

Δυστηχώς οι πειραματικές μελέτες που αφορούν τις πλάκες δύο διεθύνσεων είναι περιορισμένες μέχρι και σήμερα. Η σημαντικότερη μελέτη έγινε από τους Paranicolaou et al (2009) που μελέτησαν 4 διαφορετικές πλάκες δύο διεθύνσεων, εκ των οποίων οι 3 ενισχύθηκαν με πλέγματα από γυαλί και άνθρακα. Στις πλάκες επιβλήθηκε συγκεντρωμένο φορτίο και παρατηρήθηκε ότι όλες αστόχησαν διατμητικά (ψαθυρά) στους κόμβους τους, πριν προλάβουν να αναπτύξουν πλαστικό μηχανισμό για κάμψη. Ωστόσο υπήρξε ξεκάθαρη ενίσχυση της ικανότητας παραλαβής του φορτίου από τα ινοπλέγματα και μάλιστα για τις περιπτώσεις

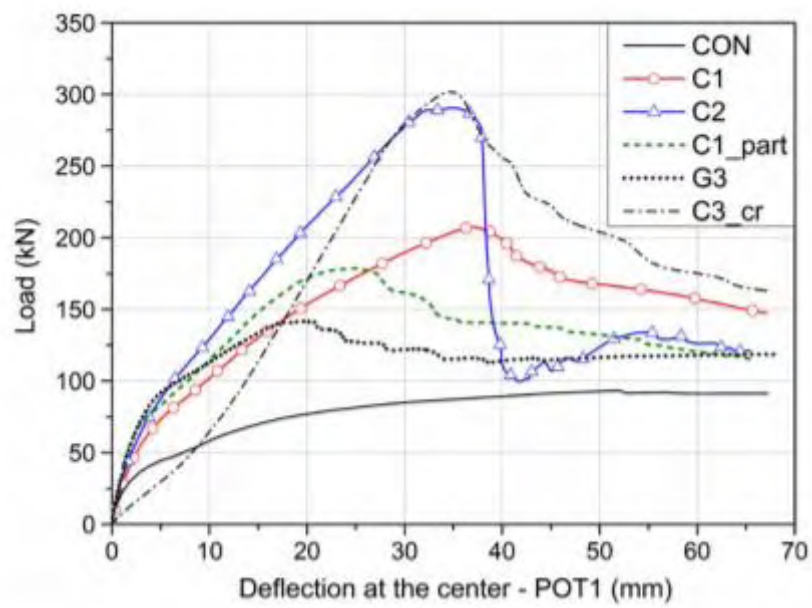
ενίσχυσης με 2 στρώσεις ινοπλεγμάτων άνθρακα και 3 στρώσεις ινοπλεγμάτων υάλου, αυξήθηκε η μέγιστη δυνατή παραμόρφωση πριν την αστοχία της πλάκας (σχήμα 2.3).



Εικόνα 2.15: Διάγραμμα φορτίου-παραμόρφωσης για πλάκες δύο διευθύνσεων ενισχυόμενες με TRM, Papanicolaou et al. (2009).

Παρόμοια μελέτη πραγματοποιήθηκε από τους Bournas et al. (2017), οι οποίοι επιβεβαιώθηκαν τα συμπεράσματα του προηγούμενου πειράματος. Για τις ανάγκες του πειράματος που πραγματοποίησαν, κατασκεύασαν έξι τετράγωνες πλάκες μήκους 1800mm και πάχους 100mm. Για όλες τις πλάκες που ενισχύθηκαν ο τρόπος αστοχίας, που πραγματοποιήθηκε μετά τη διαρροή του χαλύβδινου σπλισμού, των ινοπλεγμάτων ήταν συνδυασμός ολίσθησης και θραύσης τους. Οι ερευνητές παρατήρησαν σημαντικά αύξηση της δυσκαμψίας πριν και μετά την εμφάνιση των ρωγμών που οφείλεται στη καμπτική ενίσχυση των πλακών με TRM άνθρακα και υάλου, ενώ παράλληλα αυξήθηκε το μέγιστο καμπτικό φορτίο (σχήμα 2.4). Σύμφωνα με το σχήμα η αύξηση του αριθμού των στρώσεων των πλεγμάτων οδήγησε σε γραμμική αύξηση της καμπτικής αντοχής. Συγκεκριμένα για τις πλάκες C1 και C2, που ενισχύθηκαν με 1 και 2 στρώματα ινοπλεγμάτων από άνθρακα η αύξηση της καμπτικής αντοχής ήταν 115% και 206% αντίστοιχα. Συμπερασματικά τα TRM

μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως ένας εναλλακτικός τρόπος για καμπτική ενίσχυση στοιχείων από οπλισμένο σκυρόδεμα, έναντι των FRP.



Εικόνα 2.16: Διάγραμμα φορτίου-παραμόρφωσης για πλάκες δύο διευθύνσεων ενισχυμένες με TRM ,Bournas et al. (2017)

### 3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

#### 3.1 Γενικά

Το πείραμα έλαβε χώρα στο Εργαστήριο Μηχανικής και Τεχνολογίας Υλικών του πανεπιστημίου Θεσσαλίας του τμήματος των πολιτικών μηχανικών, το διάστημα Ιούνιος 2020 – Σεπτέμβριος 2020. Συγκεκριμένα, αφορούσε την κατασκευή 8 δοκών οπλισμένου σκυροδέματος ορθογωνικής διατομής και την καμπτική ενίσχυση 8 εξ' αυτών, με χρήση ινοπλισμένων πολυμερών σε ανόργανη μήτρα. Οι συνηθέστερες αστοχίες που συναντώνται στη συγκεκριμένη κατηγορία ενισχύσεων ορθογωνικών μελών ΟΣ, είναι αυτή του κονιάματος στη διεπιφάνεια που ορίζεται από το σκυρόδεμα και την πρώτη στρώση ενίσχυσης και η διαστρωματική αποκόλληση, δηλαδή η αστοχία του κονιάματος μεταξύ δύο στρώσεων ενίσχυσης. Ωστόσο, ο σχεδιασμός των δοκιμών πραγματοποιήθηκε με γνώμονα τη δυνατότητα εμφάνισης ποικιλίας μορφών αστοχίας.

Στις παρακάτω ενότητες, υπάρχει αναλυτική περιγραφή της πειραματικής διαδικασίας, η οποία συνίσταται από τον σχεδιασμό και την παρασκευή των δοκιμών, την πειραματική διάταξη και τις ιδιότητες των υλικών.

#### 3.2 Φιλοσοφία και σχεδιασμός δοκιμών

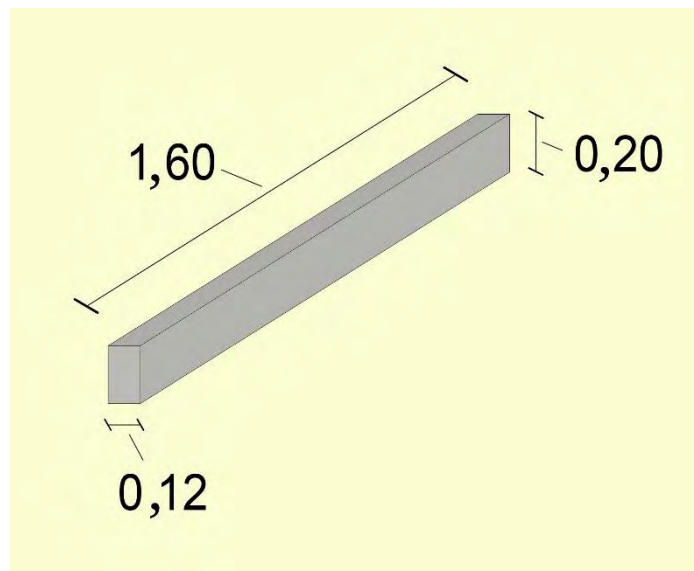
##### 3.2.1 Γεωμετρία δοκιμίου

Όπως αναφέρθηκε, η γεωμετρία του δοκιμίου είναι ορθογωνική και σταθερή σε όλο το μήκος του. Ο τελικός σχεδιασμός, δηλαδή ο καθορισμός των διαστάσεων της δοκού διαμορφώθηκε από διάφορους παράγοντες. Αυτοί ήταν:

- ο χώρος που διαμορφώνεται από τη διάταξη του άκαμπτου μεταλλικού πλαισίου είναι περίπου 2,5 μέτρα επί 2,5 μέτρα. Επίσης το υδραυλικό έμβολο βρίσκεται σε κατακόρυφη θέση, σε σχέση με το επίπεδο που ορίζεται από το μεταλλικό πλαίσιο, τέτοια που απέχει περίπου 2 μέτρα από το μέσο της μιας πλευράς και 0,5 μέτρα από το μέσο της άλλης. Συνεπώς, το μήκος του δοκιμίου δεν είναι δυνατόν, χωρίς τον σχεδιασμό και τοποθέτηση κάποιας ειδικής διάταξης, να είναι μεγαλύτερο από 2,4 μέτρα

- όσον αφορά τις διαστάσεις της διατομής, σε περίπτωση που οριστούν έτσι ώστε να προσεγγίζουν αυτές που έχουν δοκοί συνήθων οικοδομικών έργων, π.χ. πλάτος 0,25 μέτρα και ύψος 0,5 μέτρα, είναι πιθανό η καμπτική αντοχή του δοκίμιου να ξεπερνούσε τη φορτοϊκανότητα του υδραυλικού εμβόλου
- η συνολική μάζα του δοκίμιου δε θα έπρεπε να είναι μεγάλη, γιατί η μεταφορά και ανύψωσή του, για την περάτωση συγκεκριμένων διαδικασιών, θα γινόταν δια χειρός από τους φοιτητές

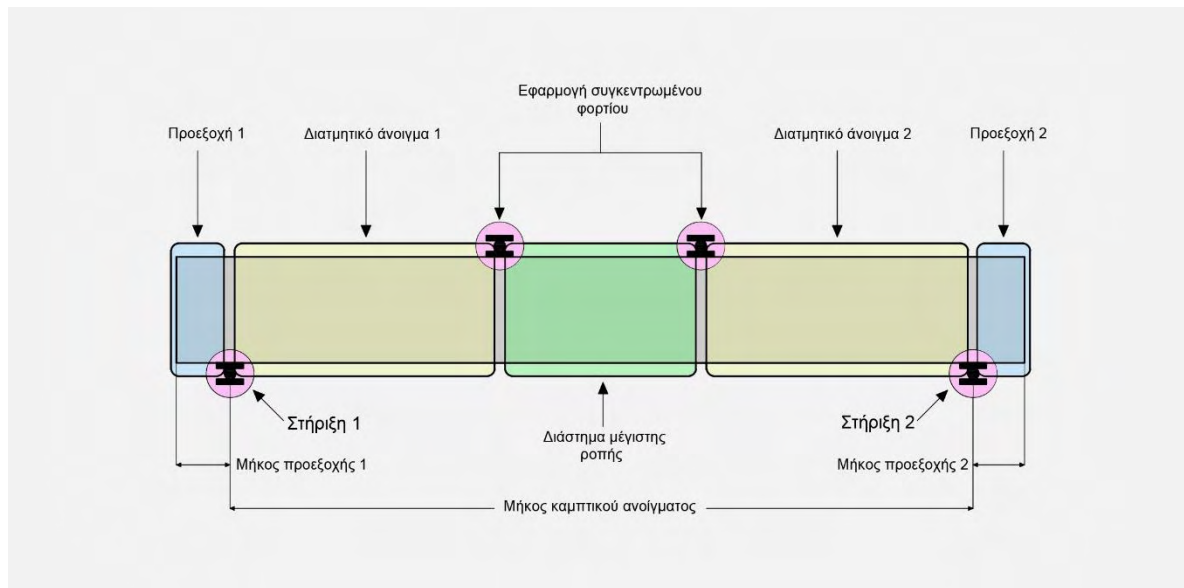
Λαμβάνοντας υπόψιν τα παραπάνω, οι διαστάσεις που επιλέχθηκαν για το δοκίμιο ήταν: 1,60m μήκος, 0,20m ύψος και 0,12m μέτρα πλάτος. Η συνολική μάζα του δοκίμιου ανέρχεται στα 97,87 κιλά, υποθέτοντας ότι το ειδικό βάρος σκυροδέματος είναι  $25 \text{ KN/m}^3$  και το μέτρο της επιτάχυνσης της βαρύτητας είναι  $9,81 \text{ m/s}^2$ .



Εικόνα 3.1:Γεωμετρία δοκού.

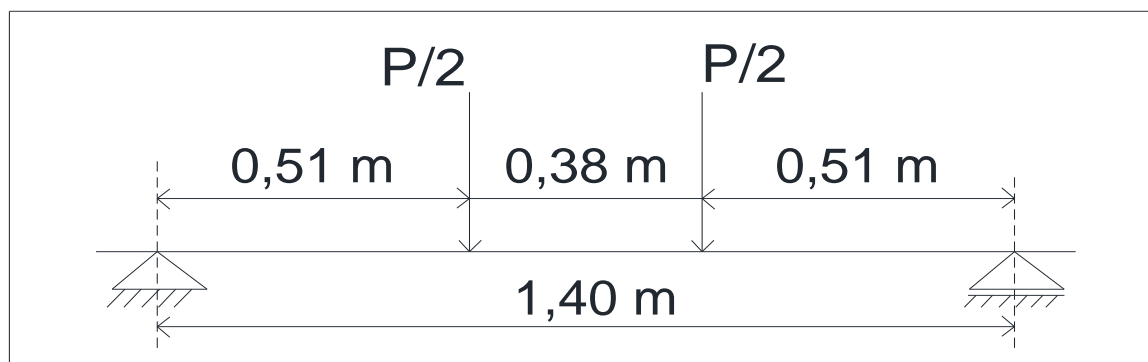
### 3.2.2 Στατικό σύστημα και κατανομή έντασης

Το στατικό σύστημα, όπως φαίνεται και στην εικόνα 3.3, είναι αυτό της αμφιέριστης δοκού με εφαρμογή δύο κατακόρυφων συγκεντρωμένων φορτίων σε απόσταση 0,19 μέτρων εκατέρωθεν του μέσου της δοκού. (Στην πραγματικότητα τα φορτία που ασκούνται στη δοκό δεν είναι συγκεντρωμένα. Χρησιμοποιούνται μεταλλικά πλακίδια στα οποία το έμβολο ασκεί τη δύναμη και μέσω των πλακιδίων μεταφέρεται στη δοκό. Αυτό συμβαίνει για την αποφυγή συγκέντρωσης θλιπτικών τάσεων στο σημείο εφαρμογής της φόρτισης).



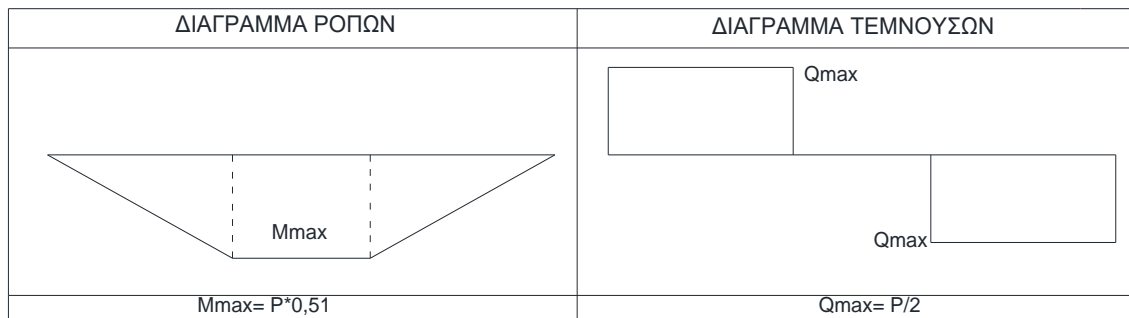
Εικόνα 3.2: Σκαρίφημα πειραματικής διάταξης δοκού.

Όσον αφορά την κατανομή της έντασης στη δοκό, όπως φαίνεται και από τα διαγράμματα τεμνουσών δυνάμεων και ροπών στην εικόνα 3.1, στο μήκος της δοκού που ορίζεται από τα φορτία εφαρμογής, η καμπτική ροπή λαμβάνει τη μέγιστη τιμή ίση με  $M \text{ (KN}\cdot\text{m)} = P/2 \text{ (KN)} \cdot 0,51 \text{ (m)}$ , όπου  $M$  ροπή λόγω κάμψης και  $P$  το συνολικό φορτίο που ασκείται από το υδραυλικό έμβολο στη δοκό. Στα διαστήματα που ορίζονται από τις στηρίξεις και τα σημεία εφαρμογής των φορτίων οι τέμνουσες δυνάμεις είναι μέγιστες και ίσες με  $Q \text{ (KN)} = P/2 \text{ (KN)}$ , όπου  $Q$  η τέμνουσα δύναμη και  $P$  το συνολικό φορτίο που ασκείται από το υδραυλικό έμβολο στη δοκό. Στο διάστημα της δοκού όπου η ροπή είναι μέγιστη, η τέμνουσα δύναμη μηδενίζεται.



Εικόνα 3.3: Στατικό σύστημα.





Εικόνα 3.4: Διαγράμματα εντατικών μεγεθών.

### 3.2.3 Υπολογισμός σπλισμού δοκίμων

Ο προσδιορισμός του χαλύβδινου σπλισμού για τα δοκίμια του πειράματος, έγινε συναρτήσει της ανεπιθύμητης μορφής αστοχίας δοκού σπλισμένου σκυροδέματος και τη δημιουργία κατάλληλων συνθηκών για την αποδοτικότερη μηχανική λειτουργία του συστήματος ενίσχυσης . Αναλυτικότερα:

- Η διατμητικού τύπου αστοχία δεν είναι επιθυμητή σε καμία δοκό. Το πείραμα αφορά την καμπτική ενίσχυση δοκών σπλισμένου σκυροδέματος με ινοπλέγματα σε ανόργανη μήτρα. Για αυτό, ο διατμητικός σπλισμός πρέπει να είναι επαρκής, ειδικά στις δύο κρίσιμότερες περιοχές, όπου οι διατμητικές τάσεις μεγιστοποιούνται.
- Η καμπτικού τύπου αστοχία είναι η επιθυμητή. Η ποσότητα του διαμήκους σπλισμού θα πρέπει να είναι τέτοια ώστε η δοκός να μην είναι ισχυρά σπλισμένη. Ειδικότερα, σε περίπτωση τοποθέτησης ράβδων μεγάλου εμβαδού ή/και μεγάλου αριθμού, μειώνεται η πλαστιμότητα της δοκού, δηλαδή η ικανότητα ανάπτυξης παραμορφώσεων. Αυτό οδηγεί στην ανάπτυξη μικρού βέλου κάμψης. Η αστοχία ενδέχεται να ψαθυρού τύπου, λόγω του μεγάλου βάθους της θλιβόμενης ζώνης της ανάπτυξης μεγάλων θλιπτικών παραμορφώσεων στην ακραία ίνα και κατά συνέπεια εξάντληση της θλιπτικής δύναμης του σκυροδέματος και τελικώς θραύσης του. Αυτός ο μηχανισμός αστοχίας δεν είναι επιθυμητός καθώς δεν ενεργοποιείται το σύστημα ενίσχυσης και θα αποτελούσε κακό πειραματικό σχεδιασμό

- Η ποσότητα του οπλισμού στην εφελκυσμένη ζώνη δε θα πρέπει να είναι ασθενής. Αυτό θα οδηγούσε επίσης σε ψαθυρή μορφή αστοχία, καθώς μετά τη διαρροή ο οπλισμός αδυνατεί να παραλάβει τις αναπτυσσόμενες εφελκυστικές τάσεις. Έτσι, με την εμφάνιση των πρώτων ρηγματών ο οπλισμός διαρρέει και η δοκός καταρρέει, χωρίς καμία προειδοποίηση. Ο μηχανισμός αστοχίας δεν είναι επιθυμητός καθώς σε αυτήν την περίπτωση το σύστημα ενίσχυσης δεν ενεργοποιείται επαρκώς, διότι αναπτύσσονται έντονες ρηγματώσεις για μικρές εφελκυστικές παραμορφώσεις και αυξάνεται το ενδεχόμενο της αποκόλλησης χωρίς να προκύπτουν δεδομένα για την ποιότητα του κονιάματος και τη μηχανική συμπεριφορά της συνάφειας των στρώσεων ενίσχυσης με την επιφάνεια σκυροδέματος
- η επιθυμητή ποσότητα χαλύβδινου οπλισμού είναι τέτοια, έτσι ώστε η δοκός να έχει πλάστιμη συμπεριφορά, δηλαδή να έχει την ικανότητα ανάπτυξης μεγάλων παραμορφώσεων. Τέτοιου είδους μηχανική απόκριση της δοκού ευνοεί τη μελέτη της μηχανικής συμπεριφοράς του ΙΑΜ, διότι οι μορφές αστοχίας είναι πιθανότερο να εμφανίζονται στη ζώνη της εξωτερικής ενίσχυσης.

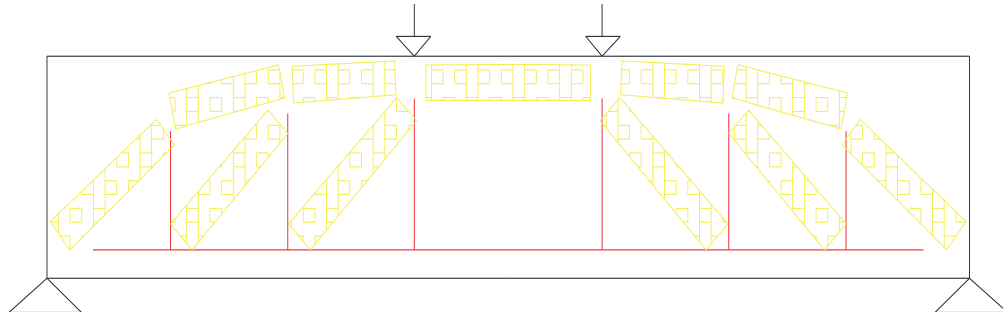
Αρχικά θεωρήθηκε ως ποιότητα σκυροδέματος C16/20, ποιότητα χάλυβα B500C, προσδιορίστηκε ο οπλισμός διάτμησης,  $\Phi 10/10$  και έπειτα ο διαμήκης. Για να οδηγηθεί σε καμπτική αστοχία η δοκός, ενδείκνυται το φορτίο διατμητικής αστοχίας του φορέα να είναι μεγαλύτερο από αυτό της καμπτικής.

Ο προσδιορισμός του τρόπου κατανομής των δυνάμεων στο εσωτερικό της δοκού, έγινε βάση του μοντέλου του ισοδύναμου δικτύωματος. Όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα οι κίτρινες διαγώνιες λωρίδες είναι θλιπτήρες, περιοχές δηλαδή που αναπτύσσονται θλιπτικές δυνάμεις και οι κόκκινες γραμμές ελκυστήρες, περιοχές δηλαδή που αναπτύσσονται εφελκυστικές δυνάμεις.

Η φυσική ερμηνεία του προσομοιώματος είναι:

- Η λοξή θλιβόμενη ζώνη αντιστοιχεί στην κύρια ροή του φορτίου (της διατάραξης) προς τις κατακόρυφες στηρίξεις, ενώ

- Η διαμήκης εφελκόμενη ράβδος αντιπροσωπεύει τον μηχανισμό επαναφοράς, λόγω της απόκλισης της ροής από τη φυσική της διεύθυνση (την κατακόρυφη).



Εικόνα 3.5 : Δικτύωμα Morsche, ή ισοδύναμο δικτύωμα προσομοίωσης δοκού οπλισμένου σκυροδέματος

Βάση όλων των παραπάνω ο υπολογισμός της διατμητικής αντοχής της δοκού πραγματοποιείται σε δύο μέρη. Το 1<sup>ο</sup> σκέλος αφορά τη διατμητική αντοχή άοπλου σκυροδέματος. Οι δυνάμεις και μηχανισμοί που συμβάλλουν στην αντοχή του φορέα είναι οι ακόλουθοι:

- Η συνολική διατμητική τάση του σκυροδέματος που αναπτύσσεται στη θλιβόμενη ζώνη
- Ο διαμήκης καμπτικός εφελκόμενος οπλισμός δρα ως βλήτρο. Συνεπώς, εξαιτίας της καμπύλωσης του οπλισμού στο σημείο της ρωγμής αναπτύσσεται μια κεκλυμένη δύναμη της οποίας η κατακόρυφη συνιστώσα συμβάλλει στη διατμητική αντοχή του φορέα
- Ο μηχανισμός διεμπλοκής των αδρανών, ενεργοποιείται στη διεπιφάνεια της ρωγμής λόγω της τραχύτητάς τους και έτσι αναπτύσσεται μια κατακόρυφη δύναμη τριβής.
- Η αντοχή σε διάτμηση υπολογίζεται από τον τύπο, βάση του ΕΚΩΣ 2000:

$$V_{RC,1} = [\tau_{RD} * k * (1,2 + 40 * \rho_l) + \sigma_{cp}] * b_w * d \quad (3.1)$$

όπου  $\tau_{RD} = 0,22$  (MPa) η εφελκυστική αντοχή σκυροδέματος για C16/20,  $k = 1,6 - d$  (m) ,  $\rho_l$  το γεωμετρικό ποσοστό του διαμήκους εφελκόμενου οπλισμού,  $b_w$  το πλάτος,  $d$  το στατικό ύψος,  $\sigma_{cp}$  θλιπτική τάση σκυροδέματος.

Επίσης, στη διατμητική αντοχή συνεισφέρει και η κάθετη συνιστώσα της δύναμης του λοξού θλιπτήρα, η οποία σύμφωνα με τον ΕΚΩΣ είναι:

$$V_{RC,2} = b * d * f_{ck} * v * 0,45 = 5,58 \text{ KN} \quad (3.2)$$

όπου  $v = 0,7 - 16/200$  (MPa) και  $f_{ck}$  η θλιπτική αντοχή σκυροδέματος, ίση με 16 MPa

Η διατμητική αντοχή λόγω εγκάρσιου οπλισμού, σύμφωνα με τον ΕΚΩΣ 2000 είναι:

$$V_{wd} = A_{sf}/s * f_{yd} 2,50 * \tau_{RD} * 0,9 * d = 78,54 \text{ KN} \quad (3.3)$$

όπου  $A_{sf}$  το εμβαδόν των σκελών του συνδετήρα,  $f_{yd}$  η τάση διαρροής του χαλύβδινου εγκάρσιου οπλισμού. Οι συνδετήρες είναι τα χαλύβδινα στοιχεία οπλισμού που συμβάλλουν περισσότερο στην αύξηση της διατμητικής αντοχής της δοκού. Για τον τελικό υπολογισμό της αντοχής είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός του διαμήκους εφελκυσμένου οπλισμού.

Σημαντικό επίσης να αναφερθεί είναι, ότι για φορτίο 120 KN (αναμενόμενη τελική τιμή της διατμητικής αντοχής του σκυροδέματος) αντιστοιχεί σε μέγιστη ροπή ίση με 30,6 KN\* m.

Όπως έχει αναφερθεί, η ποσότητα του διαμήκους οπλισμού πρέπει να είναι τέτοια, ώστε να αποφευχθεί η θραύση σκυροδέματος πριν τη διαρροή των εφελκυσμένων ράβδων όπως και η αστοχία τους με ανάπτυξη μικρών παραμορφώσεων. Είναι δηλαδή σημαντικό ο οπλισμός να προσδίδει αντοχή και πλαστιμότητα στη δοκό. Επίσης, οι ράβδοι ενδείκνυται να είναι τέτοιας διαμέτρου έτσι ώστε η διέλευση του σκυροδέματος κατά τη σκυροδέτηση και δόνησή του να είναι ομαλή και να αποφευχθεί το φαινόμενο της σπηλαιώσης, δηλαδή της δημιουργίας κενών στο εσωτερικό της δοκού. Τέλος, για την καλύτερη μηχανική συμπεριφορά της δοκού αποφασίστηκε ότι ο αριθμός των ράβδων είναι τέσσερις, δύο για κάθε πέλμα.

Ο προσδιορισμός του διαμήκους οπλισμού, (θλιβόμενου και εφελκυσμένου) έγινε για το δοκίμιο ελέγχου, δηλαδή για τη δοκό χωρίς ενίσχυση με ΙΑΜ και θα χρησιμεύει ως σημείο αναφοράς και σύγκρισης για τις καμπτικές ενισχυμένες δοκούς. Αρχικά, χρησιμοποιήθηκε μια απλή μέθοδος για την εύρεση της καμπτικής αντοχής της δοκού ελέγχου. Αναλυτικότερα, για τον αρχικό υπολογισμό έγιναν οι παρακάτω παραδοχές:

- ο χαλύβδινος οπλισμός ακολουθεί ελαστικό-τέλεια πλαστικό καταστατικό νόμο τάσεων παραμορφώσεων (χάλυβας χωρίς κράτυνση)
- μόνο ο εφελκόμενος οπλισμός συνεισφέρει στην καμπτική αντοχή του δοκιμίου και αγνοούνται οι θλιπτικές τάσεις που αναπτύσσει το σκυρόδεμα και ο θλιβόμενος οπλισμός.

Έτσι, ο υπολογισμός της αντοχής του δοκιμίου ελέγχου έγινε ως εξής:

$M_{cr} = A_s \cdot f_y \cdot z$ , όπου  $A_s$  το εμβαδό του εφελκόμενου οπλισμού,  $f_y$  η τάση διαρροής του χάλυβα και  $z$  ο μοχλοβραχίονας της δύναμης.

Πίνακας 3.1: Χαρακτηριστικές τιμές αντοχής καμπτικής ροπής, τέμνουσας δύναμης και ροπής που αντιστοιχεί στο φορτίο διατμητικής αστοχίας για δεδομένο εμβαδό εφελκόμενου οπλισμού.

| $A_s$ | $M_u$<br>(KN*m) | $V_u$ (KN) | $M_{u,v}$ (KN *m) |
|-------|-----------------|------------|-------------------|
| 2Φ8   | 7,54            | 118,57     | 30,23             |
| 2Φ10  | 11,78           | 118,77     | 30,29             |
| 2Φ12  | 16,96           | 118,97     | 30,34             |
| 2Φ14  | 23,1            | 119,05     | 30,36             |

Αρχικά επιλέχθηκαν 2 ράβδοι διαμέτρου 12 χιλιοστών για εφελκόμενο οπλισμό και 2Φ10 για θλιβόμενο. Στη συνέχεια δημιουργήθηκε στο excel αναλυτικότερη διαδικασία υπολογισμού της ροπής αντοχής. Ειδικότερα, σε αυτή την διαδικασία επίλυσης συνυπολογίστηκαν οι θλιπτικές δυνάμεις που αναπτύσσουν το σκυρόδεμα και ο χαλύβδινος οπλισμός. Οι παραδοχές που έγιναν είναι οι εξής:

- οι παραμορφώσεις ακολουθούν γραμμική κατανομή σύμφωνα με την αρχή της επιτεδότητας των διατομών του Bernoulli
- ο χαλύβδινος οπλισμός ακολουθεί ελαστικό-τέλεια πλαστικό καταστατικό νόμο τάσεων παραμορφώσεων (χάλυβας χωρίς κράτυνση)
- θεωρήθηκε απλοποιημένη ορθογωνική κατανομή θλιπτικών τάσεων του σκυροδέματος, ύψους ίσου με  $0,8 \cdot x$ , όπου  $x$  το ύψος της θλιβόμενης ζώνης.

Με τη χρήση της νέας και ακριβέστερης υπολογιστικής διαδικασίας, η ροπή αντοχής ανήλθε στα 16,93 KN \* m. Οι διαμήκεις οπλισμοί παραλήφθηκαν

συγκολλημένοι με τους συνδετήρες και το μήκος της αγκύρωσης τους υπολογίστηκε εμπειρικά και θεωρήθηκε ότι ήταν επαρκές. Ωστόσο, πριν τη σκυροδέτηση των δοκιμών αποφασίστηκε ο εφελκόμενος οπλισμός να είναι 2Φ10 και ο θλιβόμενος 2Φ12, με την τελική τιμή της ροπής αντοχής να είναι 11,73 KN \* m.

### 3.3 Περιγραφή δοκιμών και ονοματολογία- παράμετροι διερεύνησης

Το πειραματικό πρόγραμμα αποτελούταν από την κατασκευή και θραύση 9 συνολικά δοκιμών. Οι διαστάσεις των δοκών ήταν θεωρητικά ίδιες. Ωστόσο, εντοπίζονται διαφορές λίγων χιλιοστών. Εκτιμήθηκε ότι αυτές οι διαφορές ήταν σε ανεκτές τιμές. Κάτι τέτοιο είναι αναπόφευκτο να συμβεί αφού είναι πρακτικά αδύνατο όλες οι δοκοί να έχουν ακριβώς τις ίδιες διαστάσεις με ακρίβεια χιλιοστού. Το 1<sup>ο</sup> δοκίμιο ονομάζεται “control” και είναι η μοναδική δοκός χωρίς ενίσχυση. Αυτό το δοκίμιο θα χρησιμοποιείται ως δοκός αναφοράς για την ανάλυση των αποτελεσμάτων. Οι 8 δοκοί ενισχύθηκαν εξωτερικά με σύνθετα υλικά. Το σύστημα ενίσχυσης για όλα τα δοκίμια και οι διαφορές τους εντοπίζονται στο υλικό, τον αριθμό στρώσεων και το κονίαμα ενίσχυσης. Αναλυτικότερα, τα υλικά των ινοπλισμένων πολυμερών ήταν κατασκευασμένα από ίνες βασάλτη εμποτισμένων με ρητίνη και από ίνες υάλου. Οι διαφορετικοί τύποι κονιαμάτων που παρασκευάστηκαν ήταν 2. Οι αριθμοί στρώσεων ενίσχυσης που εφαρμόστηκαν ήταν 3 και 6. Η λογική της ονοματολογίας των δοκιμών ακολουθεί την εξής λογική:

- το 1<sup>ο</sup> γράμμα αναφέρεται στη λέξη “mortar”, στα αγγλικά είναι το κονίαμα και συμβολίζεται με “M”
- ο 1<sup>ος</sup> αριθμός αναφέρεται στο είδος κονιάματος που χρησιμοποιήθηκε για την ενίσχυση
- Το 2<sup>ο</sup> γράμμα αναφέρεται στο υλικό των ινών από τα οποία αποτελούνται τα ινοπλέγματα 2 διευθύνσεων και είναι B, για βασσάλτη και G για γυαλί
- ο 2<sup>ος</sup> αριθμός αναφέρεται στον αριθμό στρώσεων των ινοπλεγμάτων και είναι 3 ή 6.

Πίνακας 3.2: Ονοματολογία δοκιμών και χαρακτηριστικά ενίσχυσης.

| ΟΝΟΜΑΣΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ | ΤΥΠΟΣ ΚΟΝΙΑΜΑΤΟΣ | ΥΛΙΚΟ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ | ΑΡΙΘΜΟΣ ΣΤΡΩΣΕΩΝ |
|-------------------|------------------|-----------------|------------------|
| CON               | -                | -               | -                |
| M1_B3             | 1                | Βασάλτης        | 3                |
| M1_B6             | 1                | Βασάλτης        | 6                |
| M2_B3             | 2                | Βασάλτης        | 3                |
| M2_B6             | 2                | Βασάλτης        | 6                |
| M1_G3             | 1                | Γυαλί           | 3                |
| M1_G6             | 1                | Γυαλί           | 6                |
| M2_G3             | 2                | Γυαλί           | 3                |
| M2_G6             | 2                | Γυαλί           | 6                |

Οι παράμετροι που διερευνήθηκαν είναι συνοπτικά οι παρακάτω:

- Η απόδοση του συστήματος ενίσχυσης για κάθε δοκό, χρησιμοποιώντας ως σημείο αναφοράς τη μηχανική συμπεριφορά και αντοχή του δοκιμίου control
- Η σύγκριση απόδοσης μεταξύ των IAM, όσον την αφορά τις διαφορές των στοιχείων από τις οποίες συνίσταται το σύστημα ενίσχυσης, δηλαδή τον τύπο κονιάματος, το υλικό ενίσχυσης και τον αριθμό στρώσεων

### 3.4 Κατασκευή δοκιμών και προετοιμασία των υλικών ενίσχυσης

#### 3.4.1 Κατασκευή δοκών οπλισμένου σκυροδέματος

Αυτή η υποενότητα αφορά τη διαδικασία κατασκευής των 9 δοκών οπλισμένου σκυροδέματος χωρίς την εφαρμογή των εξωτερικών ενισχύσεών τους, διαδικασία η οποία θα αναφερθεί σε παρακάτω ενότητα αυτού του κεφαλαίου. Η περιγραφή ακολουθεί την πραγματική χρονική εξέλιξη του συγκεκριμένου σταδίου του πειράματος και υπάρχει φωτογραφικό υλικό για την καλύτερη εποπτεία της διαδικασίας.

Τα 9 δοκίμια κατασκευάστηκαν ταυτόχρονα. Αρχικά, ήταν απαραίτητη η δημιουργία ξυλότυπου ή καλουπιών για τη σκυροδέτηση των δοκών. Πρόκειται για ξύλινες φόρμες στις οποίες χύνεται το σκυρόδεμα και αποκτά την επιθυμητή γεωμετρία. Τα καλούπια που κατασκευάστηκαν είχαν τις ακόλουθες ιδιότητες:



- ήταν καθαρά με λείες επιφάνειες και δεν υπήρχαν κενά ή σχισμές μεταξύ των επιφανειών που είχαν συνενωθεί, έτσι ώστε να μην επιτρέπεται η διαρροή του σκυροδέματος
- ήταν αρκετά άκαμπτα ώστε να μην παραμορφώνονται, δηλαδή να διατηρούν τις διαστάσεις τους, υπό την πίεση του νωπού σκυροδέματος και κατά τη δόνησή του
- χρησιμοποιήθηκαν κατάλληλοι πλαστικοί αποστάτες για τη δημιουργία των επικαλύψεων
- τοποθετήθηκαν επιπλέον οπλισμοί, “γάτζοι”, εκτός του καμπτικού ανοίγματος, για την ανάρτηση των δοκιμίων

Ακολουθούν φωτογραφίες των καλούπιών, με και χωρίς οπλισμούς.



Εικόνα 3.6 : 1<sup>η</sup> εικόνα πάνω και αριστερά είναι τα καλούπια χωρίς οπλισμό, 2<sup>η</sup> εικόνα πάνω και δεξιά αριστερά είναι τα καλούπια με οπλισμό και η κάτω εικόνα είναι τα καλούπια με την προσθήκη γάτζων.



Όσον αφορά τη σκυροδέτηση των δοκιμών, πραγματοποιήθηκε ορισμένες ημέρες μετά την κατασκευή των ξυλότυπων. Χρησιμοποιήθηκε σκυρόδεμα από τοπική βιομηχανία με μέγιστο κόκκο αδρανών 12 χιλιοστά, ή κοινώς “γαρμπλοσκυρόδεμα”. Η παραγγελία ήταν περίπου 2,23 κυβικά μέτρα σκυροδέματος. Η σκυροδέτηση έγινε στο χώρο του εργαστηρίου, σε θερμοκρασία κάτω των 30°C, συνθήκες κατάλληλες για σκυροδέτηση. Το όχημα μεταφοράς και ανάμιξης του σκυροδέματος, έριχνε το προϊόν σε ένα καρότσι και έπειτα μεταφερόταν στα καλούπια.



(α)

(β)

Εικόνα 3.7 : (α) έκχυση του σκυροδέματος σε καρότσι για τη μεταφορά του και (β) “άπλωμα” σκυροδέματος στα καλούπια πριν τη δόνησή του.

Για τον προσδιορισμό των ιδιοτήτων του σκυροδέματος χρησιμοποιήθηκαν ξύλινες, μεταλλικές και πλαστικές κυβικές μήτρες πρότυπων διαστάσεων.



Εικόνα 3.8 : Μεταλλικές και ξύλινες κυβικές μήτρες πρότυπων διαστάσεων.

Μετά την έκχυση, γινόταν δόνηση του σκυροδέματος και επιπέδωση της ελεύθερης επιφάνειας.



(α)

(β)

Εικόνα 3.9 : (α) σκυρόδεμα μετά τη δόνηση και (β) σκυρόδεμα μετά την επιπέδωση της ελεύθερης επιφάνειας.

Επιπλέον, έγιναν τεστ κάθισης του σκυροδέματος. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε είναι η εξής: τοποθετήθηκε ποσότητα σκυροδέματος, αφού πρώτα “χτυπήθηκε” με μεταλλική ράβδο, σε κατάλληλο δοχείο. Στη συνέχεια μετρήθηκε το ύψος του δοχείου, το οποίο ανυψώθηκε για την κάθιση του σκυροδέματος. Τέλος μετρήθηκε η μείωση που υπήρχε στο ύψος. Ακολουθούν σχετικές φωτογραφίες.



Εικόνα 3.10 : Διαδικασία εφαρμογής τεστ καθίσεως

Επίσης μετρήθηκε και το πορώδες του σκυροδέματος, με τη μέθοδο απορρόφησης νερού.



Εικόνα 3.11: Συσκευή μέτρησης πορώδους του σκυροδέματος

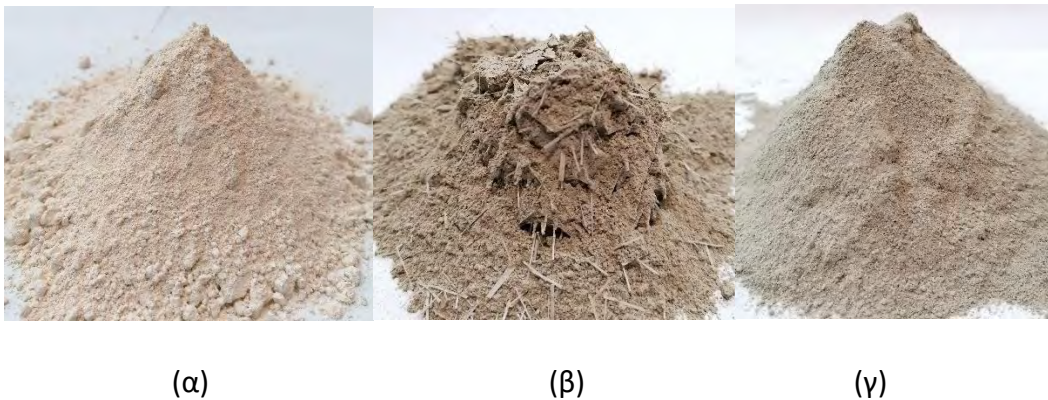
Μετά το πέρας της διαδικασίας της σκυροδέτησης όλα τα δοκίμια συντηρήθηκαν για περίπου 20 ημέρες. Την 1<sup>η</sup> εβδομάδα η συντήρηση γινόταν με διαβροχή των ελεύθερων επιφανειών. Στη συνέχεια αφαιρέθηκαν τα καλούπια και τοποθετήθηκαν λινάτσες, υφάσματα με υψηλή υδατοαπορροφητικότητα, σε κάθε δυνατή επιφάνεια του σκυροδέματος των δοκών. Για 2 εβδομάδες η συντήρηση γινόταν με διαβροχή των λινατσών. Τα δοκίμια των μητρών, που θα χρησιμοποιούνταν για τον προσδιορισμό της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος συντηρήθηκαν με διαβροχή της ελεύθερης επιφάνειας για 28 ημέρες, όπως ορίζεται από τον κανονισμό.

#### 3.4.2 Παρασκευή κονιαμάτων

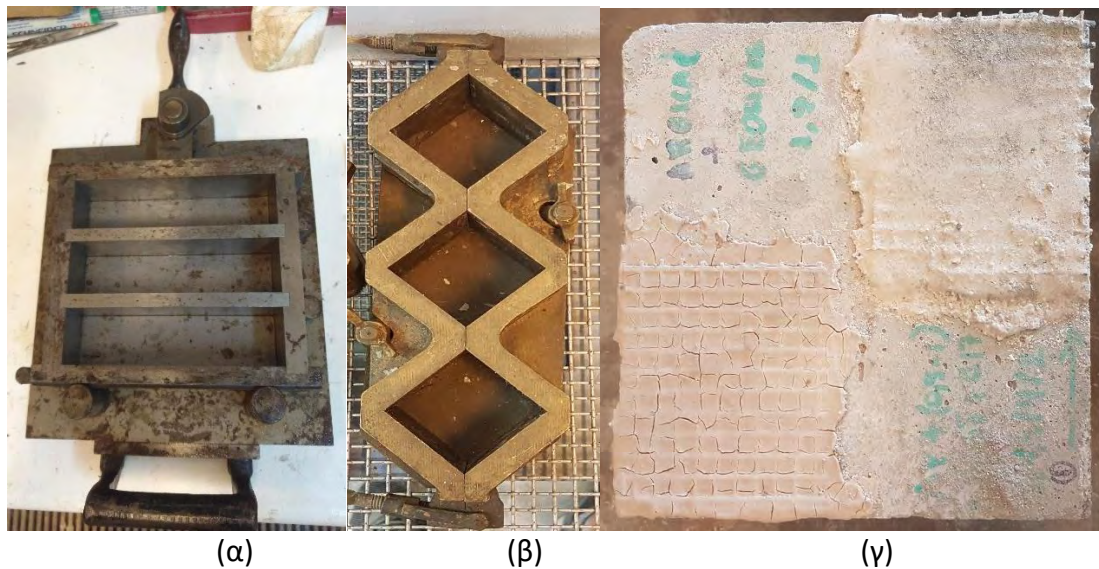
Σε αυτό το σημείο της ενότητας γίνεται αναφορά στην προετοιμασία των υλικών ενίσχυσης. Ειδικότερα, παράλληλα με την κατασκευή των καλουπιών, παρασκευάστηκαν και τα κονιάματα των ενισχύσεων. Τα κονιάματα προέκυπταν από την παρασκευή αλκαλικών μιγμάτων. Η σύνθεσή τους συνίστατο από από την προσθήκη ενός στερεού υλικού με πηκτικές ιδιότητες, ενός ρευστού, κόκκων 0,5-1 και 1-2 χιλιοστών και νερού. Η σημαντική διαφορά του κονιάματος 1 με το 2 είναι η ύπαρξη ινών στο στερεό υλικό με πηκτικές ιδιότητες. Δημιουργήθηκαν πολλά δοκιμαστικά μίγματα, τα οποία προέκυπταν από τις αλλαγές των ποσοτήτων των υλικών σύνθεσης των μιγμάτων. Όλες οι αναλογίες καταγράφονταν, με σκοπό τον αποκλεισμό ή την επιλογή κονιαμάτων και επί της ουσίας τη δημιουργία μιας “βιβλιοθήκης” κονιαμάτων. Η διαδικασία παρασκευής και επιλογής ή απόρριψης κονιαμάτων είχε ως εξής: αρχικά, επιλέγονταν συγκεκριμένες ποσότητες συστατικών



και αναμιγνύοταν, δημιουργώντας ένα μίγμα. Το μίγμα τοποθετούταν σε μήτρες και εφαρμοζόταν σε κύβους σκυροδέματος με τα επιλεγμένα ινοπλέγματα για τις ενισχύσεις. Οι παραπάνω διαδικασίες αποσκοπούσαν στον ποιοτικό προσδιορισμό των ιδιοτήτων των μιγμάτων. Συγκεκριμένα, την εργασιμότητα του μίγματος, τον χρόνο πήξης και ποιότητα εφαρμογής του, δηλαδή την εμφάνιση ή μη ρηγματώσεων. Ακολουθούν φωτογραφίες σχετικές με τα υλικά του μίγματος, τις μήτρες και τις επιφάνειες εφαρμογής των δοκιμαστικών μιγμάτων.



Εικόνα 3.13 : (α)το κοινό και για τα 2 μίγματα υλικό,(β) υλικό με ίνες του κονιάματος 1 και (γ) υλικό του κονιάματος 2



Εικόνα 3.14 : (α),(β)Μήτρες που χρησιμοποιήθηκαν και (γ) επιφάνεια σκυροδέματος εφαρμογής δοκιμαστικού κονιάματος με ινοπλέγμα

### 3.4.3 Προετοιμασία ινοπλεγμάτων ενίσχυσης

Το τελευταίο στάδιο πριν την ενίσχυση ήταν η προετοιμασία των ινοπλεγμάτων. Αναλυτικότερα, επειδή τα πλέγματα 2 διευθύνσεων παραλήφθηκαν σε ρολό, έπρεπε να κοπούν στις κατάλληλες διαστάσεις πριν την εφαρμογή τους. Έτσι, κόπηκαν 36 λωρίδες, όπου η καθεμία είχε μήκος 1,25 μέτρων και πλάτος 0,12 μέτρα. Οι λωρίδες βασάλτη ήταν 18, όσες και οι λωρίδες γυαλιού. Ο αριθμός των βρόγχων στη διάσταση του πλάτους ήταν 18 και 6 αντίστοιχα.

### 3.5 Διαδικασία ενίσχυσης δοκιμίων

Η εφαρμογή του εξωτερικού συστήματος ενίσχυσης δεν έγινε ταυτόχρονα για όλες τις δοκούς και περιλάμβανε τα ακόλουθα βήματα:

- προετοιμασία επιφάνειας σκυροδέματος που θα εφαρμοστεί η ενίσχυση
- παρασκευή ικανοποιητικής ποσότητας κονιάματος
- επίστρωση κονιάματος στην προετοιμασμένη επιφάνεια και τοποθέτηση των ινοπλεγμάτων
- συντήρηση των ενισχυμένων δοκών με διαβροχή των κονιαμάτων για 2 περίπου ημέρες

Όσον αφορά την προετοιμασία της επιφάνειας ενίσχυσης, με χρήση τροχού απομακρύνθηκε μια λεπτή στρώση σκυροδέματος, η οποία εκτιμάται ότι είναι περίπου 3 χιλιοστά. Το πάχος τροχίσματος εκτιμήθηκε εμπειρικά και χρησιμοποιήθηκε σαν οδηγία να διακόπτεται η διαδικασία όταν εμφανίζονται τα αδρανή του σκυροδέματος. Το μήκος ορίστηκε στα 1,25 μέτρα. Στην αρχή της διαδικασίας ο τροχός είχε μεγαλύτερη κλίση με την επιφάνεια του σκυροδέματος για τη γρηγορότερη απομάκρυνση του φλοιού και στο τέλος, ο τροχός είχε μικρή κλίση για την εξομάλυνση της επιφάνειας. Η λεπτή αυτή στρώση έχει χαμηλή εφελκυστική αντοχή και ουσιαστικά δε συμβάλλει στη ροπή αντοχής της δοκού. Με τη διαδικασία λειάνθηκαν οι επιφάνειες ενίσχυσης με σκοπό τη βελτίωση της συνάφειας του σκυροδέματος και του κονιάματος.



Εικόνα 3.15 : Στιγμιότυπα τροχίσματος επιφάνειας ενίσχυσης.



(α)

(β)

Εικόνα 3.16 : (α) επιφάνεια ενίσχυσης προ τροχίσματος και (β) επιφάνεια ενίσχυσης μετά  
Στη συνέχεια της διαδικασίας ενίσχυσης παρασκευαζόταν επαρκής ποσότητα κονιάματος.



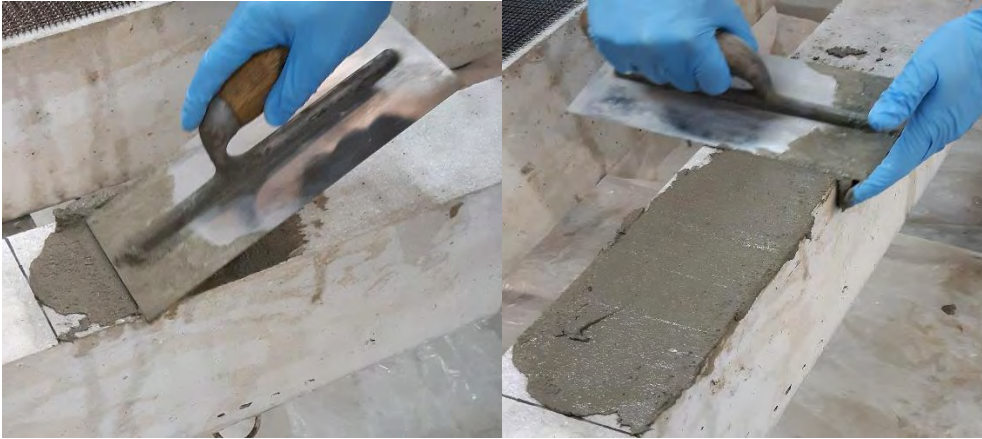
(α)

(β)

Εικόνα 3.17 : (α) στιγμιότυπο ανάμιξης και δημιουργίας κονιάματος 1 και (β) δοχείο κονιάματος και εργαλείο επίστρωσής του

Έπειτα γινόταν επάλειψη του κονιάματος στην επιφάνεια ενίσχυσης.





Εικόνα 3.18 : Στιγμιότυπα επάλειψης κονιάματος στην επιφάνεια ενίσχυσης πριν την τοποθέτηση ινοπλεγμάτων

Στη συνέχεια τοποθετούνται η 1<sup>η</sup> στρώση ενίσχυσης.



(α)

(β)

Εικόνα 3.19 : Εφαρμογή 1<sup>ης</sup> στρώσης ενίσχυσης (α) γυαλιού και (β) βασάλτη

Μετά τοποθετούνται επαρκής ποσότητα κονιάματος και με κυκλικές κινήσεις γινόταν επάλειψή του στην επιφάνεια.



Εικόνα 3.20 : Στιγμιότυπα επάλειψης κονιάματος

Η διαδικασία επαναλαμβανόταν μέχρι την εφαρμογή του επιθυμητού αριθμού στρώσεων ινοπλεγμάτων.

### 3.6 Πειραματική διάταξη και πρωτόκολλο δοκιμής

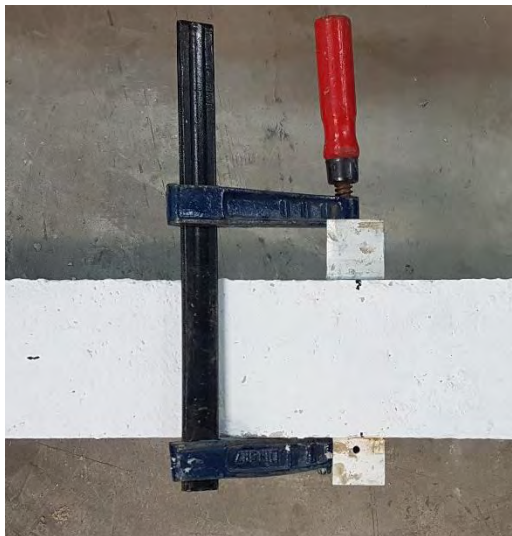
Οι καταγραφές των τιμών διαφόρων μεγεθών (δύναμης και μετακίνησης) έγιναν με ένα ειδικό καταγραφικό σύστημα. Αναλυτικότερα, η μέτρηση και καταγραφή της δύναμης άσκησης του εμβόλου στη δοκό, έγινε μέσω μιας ενσωματωμένης κατάλληλα βαθμονομημένης δυναμοκυψέλης. Ουσιαστικά ένα βραχύ και συμπαγές μέταλλο, δέχεται πίεση από το έμβολο και μετακινείται. Η σχέση δύναμης μετακίνησης του μετάλλου είναι γραμμική. Για τη μέτρηση των μετακινήσεων κάθε δοκού τοποθετήθηκαν 2 ηλεκτρονικοί αισθητήρες μεταβλητής αντίστασης ή “Invt’s”, στο μέσο του καμπτικού ανοίγματος. Θεωρείται ότι οι τιμές αυτές ταυτίζονται με τις βυθίσεις στο μέσο της δοκού.



Εικόνα 3.21: Πειραματική διάταξη δοκιμών.



Όσον αφορά το πρωτόκολλο δοκιμής, μετά την ενίσχυση της δοκού τοποθετούνται μεταλλικά πλακίδια στο μέσο του της δοκού και σε απόσταση 20 χιλιοστών από την άνω παρειά. Στη συνέχεια η δοκός τοποθετούνται στις μεταλλικές στηρίξεις και προσαρμολογούνται η θέση της στις στηρίξεις έτσι ώστε τα φορτία να επιβάλλονται σε στο κατάλληλο μήκος του καμπτικού ανοίγματος. Ευθυγραμμίζονται το έμβολο, ώστε να μην υπάρχει εκκεντρότητα στην εφαρμογή της φόρτισης. Έπειτα τοποθετούνται τα Ιντ'ς κάτω από τα κολλημένα στη δοκό μεταλλικά πλακίδια. Παρασκευάζονται γύψος, με τον οποίο γινόταν επάλειψη άλλων μεταλλικών πλακιδίων. Ο γύψος συνέβαλε στην ομοιόμορφη κατανομή της φόρτισης, αφού η επιφάνεια του σκυροδέματος ήταν τραχειά. Τα μεταλλικά πλακίδια χρησιμοποιήθηκαν για την καλύτερη κατανομή του φορτίου και την αποφυγή συγκέντρωσης τοπικών θλιπτικών τάσεων. Ο ρυθμός επιβολής της φόρτισης ήταν 0,02 χιλιοστά ανά δευτερόλεπτο.



(α)



(β)



(γ)



(δ)

Εικόνα 3.22 : (α)μεταλλικά πλακίδια και σφικτήρας για την καλύτερη επίδραση της κόλλας,(β) ευθυγράμμιση του εμβόλου ως προς το μέσο του πλάτους της δοκού,(γ) γύψος στα μεταλλικά πλακίδια και (δ) “κούμπωμα” της μεταλλικής διάταξης επιβολής του φορτίου στα πλακίδια

### 3.7 Ιδιότητες σκυροδέματος και υλικών ενίσχυσης

Για τον προσδιορισμό της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος, πραγματοποιήθηκαν τεστ μονοαξονικής θλίψης στους κύβους των μητρών, 28 ημέρες μετά τη σκυροδέτηση. Ακολουθεί πίνακας με τις διαστάσεις τους και τα αποτελέσματα.

Πίνακας 3.3: Διαστάσεις κυβικών δοκιμών, φορτίο και τάση αστοχίας τους

| Δοκίμιο    | Διαστάσεις (m <sup>2</sup> ) | Φορτίο αστοχίας (KN) | Τάση αστοχίας (Mpa) |
|------------|------------------------------|----------------------|---------------------|
| 1          | 0,025                        | 750                  | 33,33               |
| 2          | 0,025                        | 795                  | 35,33               |
| 3          | 0,025                        | 760                  | 33,78               |
| Μέσος όρος |                              | 768                  | 34,15               |

Ακολουθεί φωτογραφικό υλικό σχετικό της διαδικασίας σύνθλιψης των κυβικών δοκιμών.



(α)

(β)

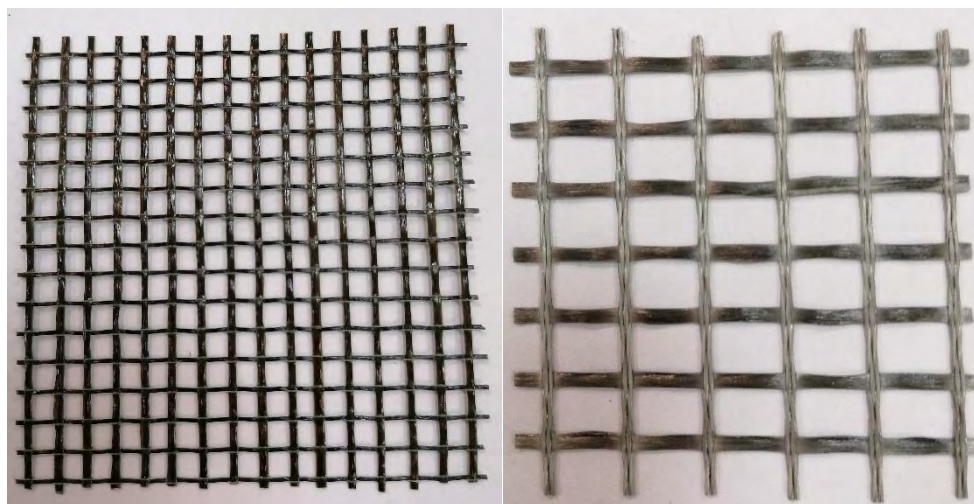
Εικόνα 3.23 : (α) μηχανή σύνθλιψης δοκιμών σκυροδέματος, (β) τυπική μορφή αστοχίας κυβικού δοκιμίου σε μονοαξονική θλίψη

Οι μηχανικές και φυσικές ιδιότητες των ινών και των ινοπλεγμάτων παρατίθενται σε ακόλουθο πίνακα.

Πίνακας 3.4: Μηχανικές και φυσικές ιδιότητες των ινών και των ινοπλεγμάτων

| Ιδιότητες ινών                           |                              | Γυαλί       | Βασάλτης |
|--|------------------------------|-------------|----------|
| Μέτρο Ελαστικότητας                      | $E_f$ (GPa)                  | 80          | 89       |
| Εφελκυστική Αντοχή                       | $f_{fu}$ (MPa)               | 2600        | 3000     |
| Εφελκυστική Παρ/ση Θραύσης               | $\epsilon_{fu}$              | 0,018       | 0,018    |
| Πυκνότητα                                | Density (g/cm <sup>3</sup> ) | 2,6         | 2,75     |
| Ιδιότητες ινοπλεγμάτων                   |                              |             |          |
| Επιφανειακό βάρος χωρίς επικάλυψη        | $m^*$ (g/m <sup>2</sup> )    | 280         | 214      |
| Επιφανειακό βάρος με την επικάλυψη       | $m^*$ (g/m <sup>2</sup> )    | 360         | 250      |
| Ποσοστό βάρους στην κύρια δ/νση          | %                            | 51,78       | 50       |
| Ονομαστικό πάχος κύριας δ/νσης           | mm                           | 0,056       | 0,0389   |
| Διαστάσεις πλέγματος (μόνο για textiles) | mm x mm                      | 18.1 x 14.2 | 6 x 6    |
| $\rho_f$ για κύλινδρο διαμέτρου 100mm    | %                            | 0,224       | 0,1556   |

Ακολουθεί φωτογραφικό υλικό των ινοπλεγμάτων.



(α)

(β)

Εικόνα 3.24 : (α) ινόπλεγμα βασάλτη και (β) ινόπλεγμα γυαλιού

Για τον προσδιορισμό των ιδιοτήτων των παρασκευασμένων κονιαμάτων (εφελκυστική και θλιπτική αντοχή) πραγματοποιήθηκαν δοκιμές σύνθλιψης και



κάμψης τριών σημείων στα δοκίμια των μητρών. Η διαδικασία αυτή έγινε σε ένα τοπικό κρατικό εργαστήριο, 41 ημέρες μετά την παρασκευή των κονιαμάτων.

Οι δοκιμές βασίζονταν στο άρθρο EN-1015, όπου ορίζονται και περιγράφονται οι προδιαγραφές δοκιμών για τον προσδιορισμό εφελκυστικής και θλιπτικής αντοχής σκληρυμένων κονιαμάτων τοιχοποιίας. Η ταχύτητα φόρτισης ήταν 50 N/s. Η πρώτη δοκιμή ήταν αυτή των 3 σημείων κάμψης. Η αστοχία ήταν ψαθυρή και το δοκίμιο ουσιαστικά χωριζόταν σε 2 κομμάτια. Αυτά τα κομμάτια τροχίζονταν και μετά τοποθετούνταν στην πρέσα για τη δοκιμή σύνθλιψης. Η διαδικασία αυτή έγινε επειδή δεν υπήρχαν αρκετές κυβικές μήτρες στο εργαστήριο.



(α)

(β)

Εικόνα 3.25 : (α) Δοκιμή τριών σημείων κάμψης για τον προσδιορισμό εφελκυστικής αντοχής κονιάματος και (β) δοκιμή μονοαξονικής θλίψης για τον προσδιορισμό θλιπτικής αντοχής κονιάματος



Εικόνα 3.26 : Μορφή αστοχίας πρίσματος του κονιάματος 1, σε δοκιμή 3 σημείων κάμψης



Εικόνα 3.27 : Μορφή αστοχίας πρίσματος του κονιάματος 2, σε δοκιμή 3 σημείων κάμψης  
 Να σημειωθεί ότι οι διαστάσεις ήταν σε χιλιοστά: 160 το μήκος, 40 το πλάτος και ύψος. Οι διαστάσεις των κυβικών δοκιμίων σε χιλιοστά: 40 το πλάτος και μήκος

Πίνακας 3.5 : Αποτελέσματα δοκιμής κάμψης πρισμάτων κονιάματος 1

| Δοκιμή κάμψης πρισμάτων κονιάματος 1 |                      |                         |
|--------------------------------------|----------------------|-------------------------|
| Δοκίμιο                              | Φορτίο αστοχίας (KN) | Εφελκυστική αντοχή(Mpa) |
| 1                                    | 3,2                  | 7,5                     |
| 2                                    | 3,1                  | 7,3                     |
| 3                                    | 2,9                  | 6,8                     |
| 4                                    | 3,2                  | 7,5                     |
| 5                                    | 3                    | 7                       |
| Μέσος όρος                           |                      | 7,2                     |
| Τυπική απόκλιση                      |                      | 0,3                     |

Πίνακας 3.6 : Αποτελέσματα δοκιμής κάμψης πρισμάτων κονιάματος 2

| Δοκιμή κάμψης πρισμάτων κονιάματος 2 |                      |                         |
|--------------------------------------|----------------------|-------------------------|
| Δοκίμιο                              | Φορτίο αστοχίας (KN) | Εφελκυστική αντοχή(Mpa) |
| 1                                    | 3,3                  | 7,83                    |
| 2                                    | 2,6                  | 6,5                     |
| 3                                    | 2,2                  | 6,43                    |
| 4                                    | -                    | -                       |
| 5                                    | 2,6                  | 6,77                    |
| Μέσος όρος                           |                      | 6,51                    |
| Τυπική απόκλιση                      |                      | 0,61                    |

Πίνακας 3.7 : Αποτελέσματα σύνθλιψης κύβων κονιάματος 1

| Δοκιμή σύνθλιψης κύβων κονιάματος 1 |                      |                      |
|-------------------------------------|----------------------|----------------------|
| Δοκίμιο                             | Φορτίο αστοχίας (KN) | Θλιπτική αντοχή(Mpa) |
| 1                                   | 24,7                 | 15,4                 |
| 2                                   | 42                   | 26,3                 |
| 3                                   | 32                   | 20                   |
| 4                                   | 38,9                 | 24,3                 |
| 5                                   | 42,7                 | 26,7                 |
| 6                                   | 38,9                 | 24,3                 |
| Μέσος όρος                          |                      | 22,8                 |
| Τυπική απόκλιση                     |                      | 4,3                  |

Πίνακας 3.8 : Αποτελέσματα σύνθλιψης κύβων κονιάματος 2

| Δοκιμή σύνθλιψης κύβων κονιάματος 2 |                      |                      |
|-------------------------------------|----------------------|----------------------|
| Δοκίμιο                             | Φορτίο αστοχίας (KN) | Θλιπτική αντοχή(Mpa) |
| 1                                   | 21,5                 | 13,4                 |
| 2                                   | 23,4                 | 14,6                 |
| 3                                   | 24,1                 | 15,1                 |
| 4                                   | 33,7                 | 21,1                 |
| 5                                   | 32,7                 | 20,4                 |
| 6                                   | 30                   | 18,8                 |
| Μέσος όρος                          |                      | 17,2                 |
| Τυπική απόκλιση                     |                      | 3,3                  |

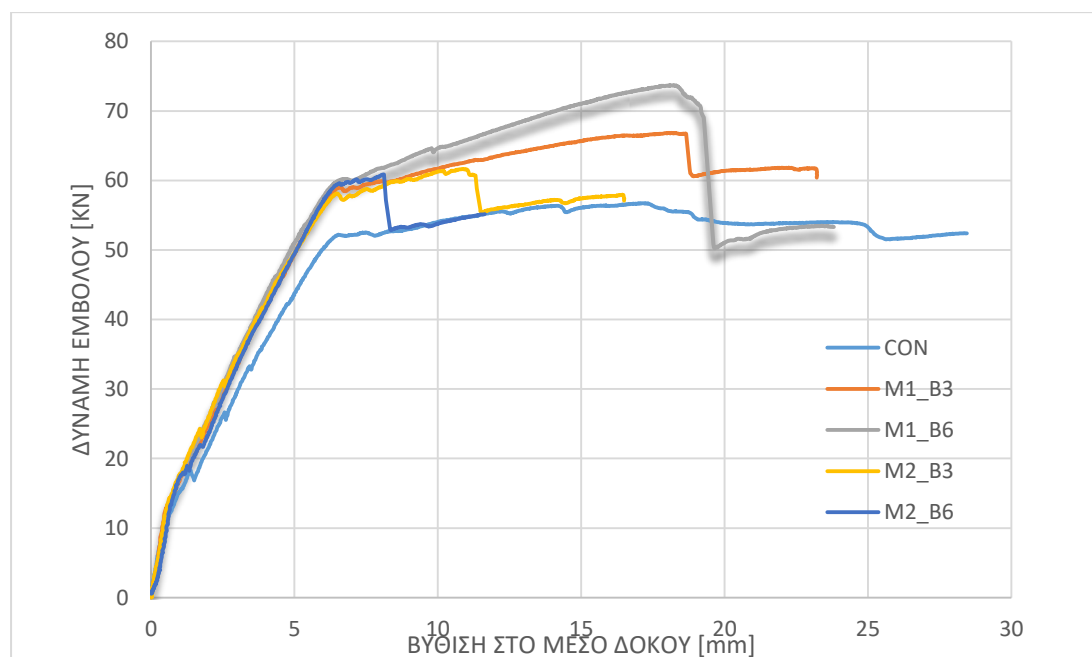
## 4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ

### 4.1 Εισαγωγή

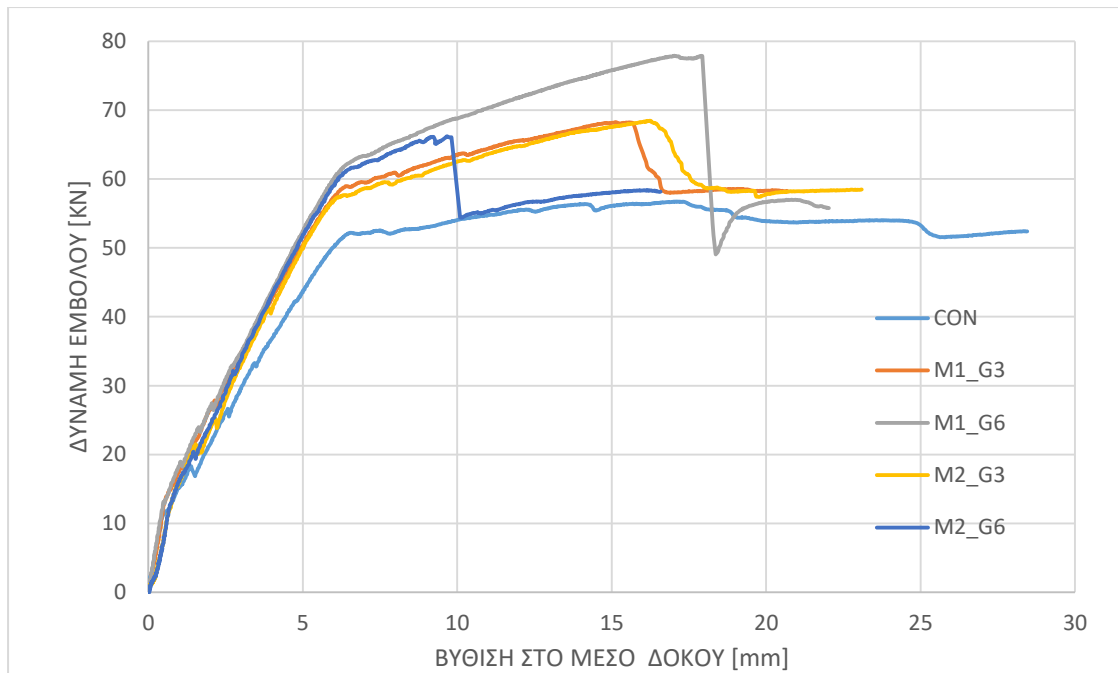
Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας, όπως αυτά προκύπτουν από τις καταγραφές και πραγματοποιείται ανάλυση και κατηγοριοποίησή τους. Συγκεκριμένα, γίνεται περιγραφή του μηχανισμού αστοχίας συστήματος ενίσχυσης για κάθε δοκό ξεχωριστά, σχολιάζονται τα διαγράμματα δύναμης-μετακίνησης και δυσκαμψίας, ενώ κατηγοριοποιούνται τα αποτελέσματα για την εξαγωγή συμπερασμάτων.

### 4.2 Διαγράμματα δύναμης-βύθισης δοκών

Σε αυτή την ενότητα παρατίθενται τα διαγράμματα δύναμης μετακίνησης των δοκών. Τα διαγράμματα προέκυψαν από την καταγραφή των μεγεθών κατά τη διάρκεια κάθε πειράματος. Ακολουθούν δύο εικόνες, με 5 διαγράμματα η καθεμία. Στη 1<sup>η</sup> απεικονίζονται τα αποτελέσματα του δοκιμίου χωρίς ενίσχυση και 4 δοκών ενισχυμένων με ινοπλέγματα βασάλτη. Στη 2<sup>η</sup> γράφημα απεικονίζονται τα αποτελέσματα του δοκιμίου control και 4 ενισχυμένων δοκών με ινοπλέγματα γυαλιού.



Εικόνα 4.1: Διαγράμματα δύναμης-μετακίνησης του δοκιμίου χωρίς ενίσχυση και 4 δοκών ενισχυμένων με ινοπλέγματα βασάλτη.



Εικόνα 4.2: Διαγράμματα δύναμης-μετακίνησης του δοκιμίου χωρίς ενίσχυση και 4 δοκών ενισχυμένων με ινοπλέγματα γυαλιού.

### 4.3 Ανάλυση διαγραμμάτων δύναμης-μετακίνησης και περιγραφή μηχανισμών αστοχίας κάθε δοκού

Σε αυτή την ενότητα γίνεται ανάλυση των διαγραμμάτων δύναμης-μετακίνησης και περιγραφή μηχανισμών αστοχίας κάθε δοκού.

#### Δοκίμιο αναφοράς "CON"

Η μέγιστη τιμή δύναμης που άσκησε το έμβολο στη δοκό ισούται με 56,72 KN και αντιστοιχεί σε κατακόρυφη μετακίνηση στο μέσο του καμπτικού ανοίγματος ίση με 17,08mm. Η ροπή που αντιστοιχεί σε αυτή τη δύναμη, η οποία είναι σταθερή στο μήκος του δοκιμίου που ορίζεται από τις θέσεις επιβολής του φορτίου, είναι ίση με  $56,72/2 \text{ KN} \times 0,51\text{m} = 13,45 \text{ KNm}$ . Στα 11,78KN και για βύθιση 0,57mm περίπου, εμφανίστηκαν οι πρώτες καμπτικές κάθετες ρωγμές. Αυτό οδηγεί σε μείωση της δυσκαμψίας της δοκού και ανακατανομή της έντασης. Αυτό φαίνεται και στην παραπάνω εικόνα, καθώς υπάρχει μείωση της κλίσης του διαγράμματος. Στα 18KN και για βύθιση 1,4mm σχηματίστηκαν και άλλες κάθετες καμπτικές ρωγμές, ενώ υπήρξε διάδοση καθ' ύψος της δοκού των 1<sup>ων</sup> ρωγμών, οδηγώντας σε περαιτέρω μείωση της δυσκαμψίας του δοκιμίου. Στα 26KN και για βύθιση 2,5mm περίπου



εμφανίστηκαν οι 1<sup>ες</sup> καμπτο-διατμητικού τύπου ρωγμές και στα 33,11 kN και 3,5mm αντίστοιχα, επεκτάθηκαν. Όταν καταγράφηκε δύναμη ίση με 52kN και υπήρχε βύθιση 6,5mm, ο εφελκόμενος χάλυβας διέρρηξε. Στα 57kN και μετακίνηση που αντιστοιχεί σε 17,5mm περίπου, η δοκός αστόχησε λόγω θραύσης σκυροδέματος (εικ. 4.3β). Ωστόσο, το πείραμα συνεχίστηκε μέχρι τη θραύση του εφελκόμενου χάλυβα. Η καταγραφή των μετακινήσεων σταμάτησε όταν η βύθιση της δοκού έλαβε τιμή 26,4mm, καθώς αποκολλήθηκαν τα μεταλλικά πλακίδια λόγω της εκτεταμένης σύνθλιψης του σκυροδέματος(εικ. 4.3γ). Ουσιαστικά, η δοκός μετά τη θραύση του σκυροδέματος, παρουσίασε μια ψευδοπλαστικότητα εξαιτίας της αντοχής του περισφυγμένου σκυροδέματος, όπου οι θλιπτικές δυνάμεις παραλαμβάνονται κυρίως από τον θλιβόμενο οπλισμό και το περισφυγμένο σκυρόδεμα, ενώ οι εφελκυστικές από τον εφελκόμενο διαμήκη χάλυβα.



(α)



(β)

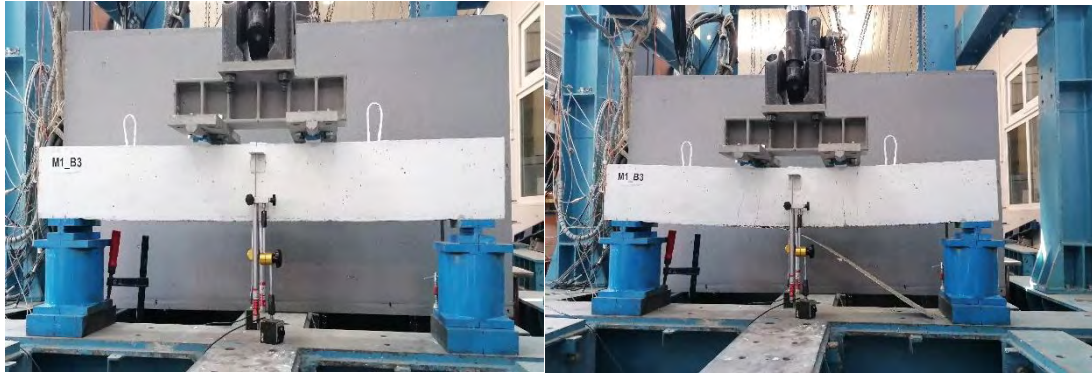
(γ)

Εικόνα 4.3:(α)Δοκίμιο αναφοράς πριν την έναρξη του πειράματος,(β)αστοχία δοκού λόγω σύνθλιψης σκυροδέματος και (γ) αποκόλληση μεταλλικών πλακιδίων εξαιτίας της εκτεταμένης σύνθλιψης του σκυροδέματος

### Δοκίμιο M1\_B3

Το δοκίμιο M1\_B3 ήταν ενισχυμένο με κονίαμα τύπου 1 και 3 στρώσεις ινοπλεγμάτων βασάλτη. Η μέγιστη δύναμη που καταγράφηκε ισούται με 66,85KN και αντιστοιχεί σε κατακόρυφη μετακίνηση ίση με 18,01mm. Η ροπή που αντιστοιχεί σε αυτή τη δύναμη είναι  $66,85\text{KN}/2 \times 0,51\text{m}=17,05\text{KNm}$ . Στα 12,86KN και βύθιση ίση με 0,52 mm, σχηματίστηκαν οι πρώτες καμπτικές κάθετες ρωγμές στο διάστημα της δοκού όπου η ροπή είναι μέγιστη. Αυτό φαίνεται από και την εικόνα 4.1, αφού υπάρχει μείωση της κλίσης στο διάγραμμα δύναμης-μετακίνησης. Στα 21,2 KN και κατακόρυφη μετακίνηση ίση με 1,6mm εμφανίστηκαν οι 1<sup>ες</sup> καμπτο-διατμητικού τύπου ρωγμές, εκατέρωθεν του διαστήματος όπου η ροπή είναι σταθερή, μειώνοντας περαιτέρω τη δυσκαμψία της δοκού. Με την αύξηση του φορτίου οι καμπτο-διατμητικού τύπου ρωγμές επεκτείνονταν και καινούριες σχηματίζονταν, μειώνοντας περισσότερο τη δυσκαμψία. Να σημειωθεί ότι οι μεταβολές της κλίσης στο διάγραμμα δύναμης μετακίνησης του δοκιμίου είναι μικρότερες και λιγότερες από αυτές της δοκού αναφοράς. Επιπλέον, οι διακυμάνσεις των τιμών του φορτίου σε αυτές τις θέσεις είναι πιο ομαλές και μικρότερου εύρους. Δηλαδή γίνεται γρηγορότερη και ομαλότερη ανακατανομή της έντασης στη δοκό M1\_B3. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας της αυξημένης δυσκαμψίας, καθώς δεν “επιτρέπει” τη δημιουργία πολλών σε αριθμό και μεγάλου ανοίγματος ρωγμών και διάδοσή τους καθ’ ύψος της δοκού. Στα 58,88KN και βύθιση ίση με 6,66mm ο εφελκόμενος οπλισμός διέρρηξε και η δυσκαμψία του δοκιμίου μειώθηκε σημαντικά. Στα 66,8KN και αντίστοιχη κατακόρυφη μετακίνηση ίση με 18,6mm, έγινε διαστρωματική αποκόλληση μεταξύ των στρώσεων ινοπλεγμάτων βασάλτη. Ο μηχανισμός είναι ψαθυρός, δηλαδή δεν υπάρχει προοδευτική και τοπική ρηγμάτωση του κονιάματος και συνοδεύεται από απότομη πτώση του φορτίου. Αυτή η μορφή αστοχίας, η οποία έχει παρατηρηθεί και αναφερθεί από τους Τριανταφύλλου (2007), D’Ambrisi και Focacci (2011), Napoli και Realfonzo (2015), Sneed et al. (2016) και Raoof et al. (2017), οφείλεται στη διατμητική αστοχία του κονιάματος μεταξύ των στρώσεων ενίσχυσης. Αυτό συμβαίνει επειδή η συνάφεια κονιάματος σκυροδέματος είναι ισχυρότερη από αυτή μεταξύ των ινοπλεγμάτων. Για αυτό και η 1<sup>η</sup> στρώση παρέμεινε κολλημένη με την επιφάνεια σκυροδέματος. Η αστοχία επήλθε έπειτα από τη διάδοση οριζόντιας ρωγμής, η οποία δημιουργήθηκε από κάθετη καμπτική ρωγμή στο διάστημα της μέγιστης ροπής. Επίσης

παρατηρήθηκε σχετικό γλίστρημα των ινών της 1<sup>ης</sup> στρώσης βασάλτη. Αυτό συνέβη εξαιτίας της επίδρασης δυνάμεων τριβής από το κονίαμα στις ίνες. Η χρήση σχετικά χαμηλής διατμητικής αντοχής κονιάματος και χρήση υψηλής εφελκυστικής αντοχής ινοπλεγμάτων που έχουν μικρά πλέγματα, οδηγεί σε τέτοιου τύπου αστοχία όπως αναφέρουν και οι Κούτας et al.. Ακολουθεί φωτογραφικό υλικό.



(α)

(β)



(γ)

(δ)



(ε)

Εικόνα 4.4: (α)δοκίμιο M1\_B3 πριν την έναρξη του πειράματος, (β) και (γ)διαστρωματική αποκόλληση,(δ) γλίστρημα ινών και (ε) παραμένουσα στρώση ινοπλέγματος βασάλτηστην επιφάνεια σκυροδέματος

### Δοκίμιο M1 B6

Το δοκίμιο M1\_B6 ήταν ενισχυμένο με 6 στρώσεις ινοπλέγματος βασάλτη και κονίαμα τύπου 1. Το μέγιστο φορτίο που καταγράφηκε ισούται με 73,69KN και αντιστοιχεί σε βύθιση ίση με 18,23mm. Η ροπή που αντιστοιχεί σε αυτή τη δύναμη είναι  $73,69\text{KN}/2 \times 0,51\text{m}=18,79\text{KNm}$ . Στα 13,94KN και βύθιση ίση με 0,64mm, σχηματίστηκε η 1<sup>η</sup> καμπτική κάθετη ρωγμή στο διάστημα που η ροπή είναι μέγιστη, μειώνοντας τη δυσκαμψία του δοκιμίου. Αυτό επαληθεύεται από το διάγραμμα δύναμης-μετακίνησης της δοκού, αφού υπάρχει μείωση της κλίσης. Στα 27,79KN και κατακόρυφη μετακίνηση ίση με 2,27mm εμφανίζονται οι 1<sup>ες</sup> καμπτο-διατμητικού ρωγμές, οι οποίες είναι λοξές και βρίσκονται αριστερά και δεξιά του μήκους της δοκού όπου η ροπή είναι σταθερή. Με την αύξηση του φορτίου οι ήδη υπάρχουσες καμπτο-διατμητικού τύπου ρωγμές επεκτείνονταν και καινούριες σχηματίζονταν, μειώνοντας περισσότερο τη δυσκαμψία του δοκιμίου. Να σημειωθεί ότι οι μεταβολές της κλίσης στο διάγραμμα δύναμης-μετακίνησης του δοκιμίου, στην περιοχή του διαγράμματος που ορίζεται από την 1<sup>η</sup> ρωγμή και από τη διαρροή του χάλυβα, είναι μικρότερες και λιγότερες από αυτές της δοκού αναφοράς και του δοκιμίου M1\_B3. Επιπλέον, οι διακυμάνσεις των τιμών του φορτίου σε αυτές τις θέσεις είναι πιο ομαλές και μικρότερου εύρους. Αυτό συμβαίνει επειδή αφενός έχει αυξηθεί το στατικό ύψος της δοκού, διότι το πάχος του κονιάματος είναι μεγαλύτερο από αυτό του M1\_B3 και αφετέρου υπάρχει διπλάσια ποσότητα εφελκυσμένου οπλισμού και κατά συνέπεια μεγαλύτερη δυσκαμψία. Η αύξηση της δυσκαμψίας συμβάλλει στην αποτροπή δημιουργίας μεγάλων και πολλών ρηγματώσεων. Στα 35 KN και βύθιση περίπου 3 mm παρατηρήθηκε τοπική αποφλοίωση σκυροδέματος κάτω από το αριστερό μεταλλικό πλακίδιο στο οποίο επιβάλλεται το φορτίο. Στα 60KN και κατακόρυφη μετακίνηση ίση με 6,6mm ο εφελκυσμένος οπλισμός διέρρευσε, μειώνοντας σημαντικά τη δυσκαμψία του δοκιμίου. Μετά τη διαρροή του χάλυβα ουσιαστικά η ενίσχυση της δοκού παραλαμβάνει το επιπρόσθετο φορτίο. Να σημειωθεί επίσης ότι η κλίση του διαγράμματος δύναμης-μετακίνησης παρουσιάζει μεγαλύτερη σταθερότητα σε σχέση με αυτή του προηγούμενου δοκιμίου. Δεν υπάρχει δηλαδή βαθμιαία απομείωση της δυσκαμψίας με την αύξηση του φορτίου, ούτε τοπικές διακυμάνσεις των τιμών της δύναμης, εκτός ενός σημείου στα 64,02KN και βύθισης 9,38mm, όπου υπάρχει πιθανότατα μια τοπική εσωτερική ρηγμάτωση



του κονιάματος κοντά στο μέσο της δοκού. Η ανακατανομή της έντασης γίνεται γρήγορα και το διάγραμμα δύναμης-μετακίνησης “συνεχίζει” με την ίδια κλίση. Όταν το φορτίο λάβει τη μέγιστη τιμή, 73,69KN, ακολουθεί μια πτώση της δύναμης μέχρι τα 70KN και μετακίνηση 19mm περίπου, όπου και υπάρχει αποκόλληση. Κατά την αρχική πτώση της δύναμης το κονίαμα ρηγματώνεται. Στα 70KN υπάρχει ξαφνική πτώση του φορτίου, περίπου 20KN. Το πείραμα συνεχίστηκε μέχρι τη σύνθλιψη του σκυροδέματος η οποία συνέβη στα 53KN και 28mm βύθιση. Η αποκόλληση συνέβη μεταξύ της διεπιφάνειας σκυροδέματος-κονιάματος, ήταν ψαθυρή και συνοδεύτηκε με αποκόλληση λεπτής στρώσης σκυροδέματος η οποία παρέμεινε πάνω στα ενισχυμένα ινοπλέγματα. Η αστοχία επήλθε από την οριζόντια διάδοση μιας κάθετης καμπτικής ρωγμής, που δημιουργήθηκε στο μέσο περίπου του ανοίγματος της δοκού και συνεχίστηκε προς τη στήριξη. Αυτή η μορφή αστοχίας οφείλεται στη διατμητική αστοχία του κονιάματος μεταξύ της επιφάνειας του σκυροδέματος και της 1<sup>ης</sup> στρώσης και είναι αρκετά ισχυρός ο δεσμός μεταξύ των επιφανειών ώστε να αποκολλάται μια λεπτή στρώση σκυροδέματος. Ο μηχανισμός αυτό έχει παρατηρηθεί και αναφερθεί από τους Loreto et al. (2013), Ebead et al. (2017), Raouf et al. (2017). Ακολουθεί φωτογραφικό υλικό.



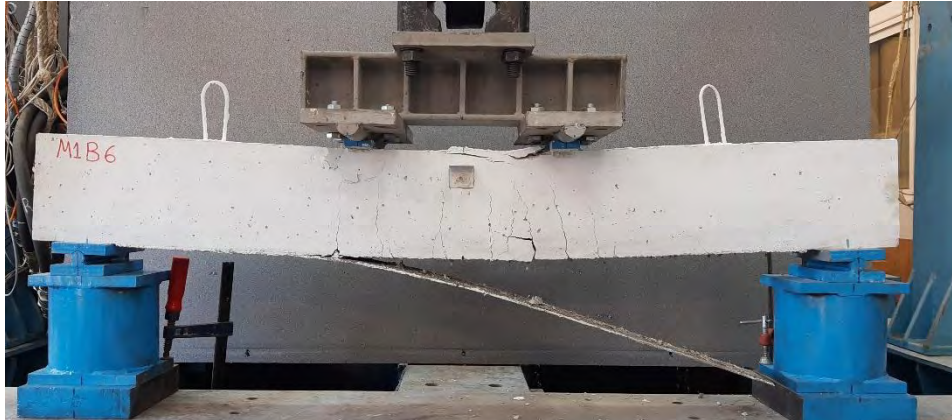
(α)



(β)



(γ)



(δ)

Εικόνα 4.5:(α)εμφάνιση καμπτικο-διατμητικού τύπου ρηγμών, (β)αποκολλημένη ενίσχυση με λεπτή στρώση σκυροδέματος, (γ)επιφάνεια σκυροδέματος που συνέβη η αποκόλληση και (δ) αστοχία ενίσχυσης και θραύση σκυροδέματος

#### Δοκίμιο M2 B3

Το δοκίμιο M2\_B3 ήταν ενισχυμένο με 3 στρώσεις ινοπλεγμάτων βασάλτη και κονίαμα τύπου 2. Το μέγιστο φορτίο που καταγράφηκε ισούται με 61,64kN και αντιστοιχεί σε βύθιση ίση με 10,91mm. Η ροπή που αντιστοιχεί σε αυτή τη δύναμη είναι  $61,64\text{kN}/2 \times 0,51\text{m}=15,72\text{kNm}$ . Στα 14,31kN και βύθιση ίση με 0,64mm, σχηματίστηκε η 1<sup>η</sup> καμπτική κάθετη ρωγμή στο διάστημα που η ροπή είναι μέγιστη, μειώνοντας τη δυσκαμψία του δοκιμίου. Αυτό επαληθεύεται από το διάγραμμα δύναμης-μετακίνησης της δοκού, αφού υπάρχει μείωση της κλίσης. Στα 24,19kN και κατακόρυφη μετακίνηση ίση με 1,9mm εμφανίζονται οι 1<sup>ες</sup> καμπτο-διατμητικού ρωγμές, οι οποίες είναι λοξές και βρίσκονται αριστερά και δεξιά του μήκους της δοκού όπου η ροπή είναι σταθερή. Με την αύξηση του φορτίου οι ήδη υπάρχουσες καμπτο-διατμητικού τύπου ρωγμές επεκτείνονταν και καινούριες σχηματίζονταν, μειώνοντας περισσότερο τη δυσκαμψία του δοκιμίου. Να σημειωθεί ότι οι μεταβολές της κλίσης στο διάγραμμα δύναμης-μετακίνησης του δοκιμίου, στην περιοχή του διαγράμματος που ορίζεται από την 1<sup>η</sup> ρωγμή μέχρι τη διαρροή του χάλυβα, είναι

λιγότερες από αυτές του δοκιμίου M1\_B3. Ωστόσο, οι μεταπτώσεις στην τιμή της δύναμης κατά τη δημιουργία νέων ρωγμών, είναι μεγαλύτερες. Στα 58,33KN και κατακόρυφη μετακίνηση ίση με 6,52mm ο εφελκυστικός οπλισμός διέρρευσε, μειώνοντας σημαντικά τη δυσκαμψία του δοκιμίου. Η διαρροή του οπλισμού συνέβη για μικρότερο φορτίο και μετακίνηση σε σχέση με τη δοκό M1\_B3. Στα 61,47KN και βύθιση ίση με 11,06mm σημειώθηκε απότομη πτώση του φορτίου κατά 0,7KN περίπου, προμηνύοντας την αστοχία της ενίσχυσης. Στα 60,71KN και βύθιση ίση με 11,32mm έγινε αποκόλληση της ενίσχυσης από το σκυρόδεμα, η οποία συνοδεύτηκε από απότομη πτώση του φορτίου. Το πείραμα συνεχίστηκε και σταμάτησε σε τιμή φορτίου 57KN και μετακίνησης 16,5. Ουσιαστικά, μετά την αποκόλληση η κατανομή της δύναμης συνάρτηση της μετατόπισης ακολουθεί αυτή του δοκιμίου αναφοράς. Η διαφορά της τιμής του φορτίου και βύθισης κατά την αστοχία του δοκιμίου είναι σημαντική συγκριτικά με τις τιμές του M1\_B3. Συγκεκριμένα, παρατηρείται 8,7% μείωση σε δύναμη και 62% μείωση σε βύθιση. Η δοκός M1\_B3 έχει μεγαλύτερη αντοχή και παρουσιάζει πολύ μεγαλύτερη πλαστιμότητα. Όσον αφορά τη μορφή αστοχίας, ήταν ψαθυρή και απότομη. Η αστοχία οφείλεται στη διατμητική αστοχία του κονιάματος στη διεπιφάνεια σκυροδέματος και ενίσχυσης. Μετά τη διαρροή, όπως φαίνεται στο διάγραμμα δύναμης-βύθισης, υπάρχουν πολλές και σχετικά ομαλές μεταπτώσεις του φορτίου. Αυτό μπορεί να οφείλεται στη ρηγμάτωση του κονιάματος, στο γλίστρημα ινών ή/και τη θραύση περιφερειακών ινών, δηλαδή των ινών που είναι σε επαφή με το κονίαμα. Ωστόσο, η επικρατέστερη ερμηνεία, βάση της αυτοψίας της αποκολλημένης ενίσχυσης, της αιτίας της αστοχίας, είναι αυτή της τοπικής αστοχίας του κονιάματος στη διεπιφάνεια σκυροδέματος-ενίσχυσης. Η επιφάνεια του σκυροδέματος μετά την αποκόλληση ήταν λεία και η επιφάνεια της ενίσχυσης δεν εμφάνισε ρωγμές παρά μόνο τοπικές αστοχίες στις θέσεις που η ροπή είναι η μέγιστη, όπως φαίνεται στις παρακάτω φωτογραφίες. Ουσιαστικά, δεν υπήρξε πλήρης ενεργοποίηση του συστήματος της ενίσχυσης, εξαιτίας της χαμηλής συνάφειας σκυροδέματος κι ενίσχυσης. Η μορφή αστοχίας σε συνδυασμό με τη χαμηλότερη απόδοση του δοκιμίου αυτού έναντι του M1\_B3, όπου η μόνη διαφορά θεωρητικά είναι ο τύπος κονιάματος, οδηγεί στο συμπέρασμα ότι το κονίαμα 2 είναι σχετικά χαμηλής ποιότητας.



(α)

(β)



(γ)

Εικόνα 4.6:(α) ασοχία ενίσχυσης, (β) λεία σχετικά επιφάνεια σκυροδέματος μετά την αποκόλληση και (γ) επιφάνεια ενίσχυσης χωρίς την εμφάνιση ρηγματώσεων παρά μόνο τοπικών ασοχιών.

#### Δοκίμιο M2\_B6

Το δοκίμιο M2\_B6 ήταν ενισχυμένο με 6 στρώσεις ινοπλεγμάτων βασάλτη και κονίαμα τύπου 2. Το μέγιστο φορτίο που καταγράφηκε ισούται με 60,67KN και αντιστοιχεί σε βύθιση ίση με 8,12mm. Οι τιμές αυτές είναι μικρότερες από τις αντίστοιχες του προηγούμενου δοκιμίου, παρόλο που η συγκεκριμένη δοκός είχε διπλάσια ποσότητα ινοπλεγμάτων. Η ροπή που αντιστοιχεί σε αυτή τη δύναμη είναι  $60,67\text{KN}/2 \times 0,51\text{m}=15,47\text{KNm}$ . Στα 13,35KN και βύθιση ίση με 0,71mm, σχηματίστηκε η 1<sup>η</sup> καμπτική κάθετη ρωγή στο διάστημα που η ροπή είναι μέγιστη, μειώνοντας τη δυσκαμψία του δοκιμίου. Αυτό επαληθεύεται από το διάγραμμα δύναμης-μετακίνησης της δοκού, αφού υπάρχει μείωση της κλίσης. Στα 18,53KN και κατακόρυφη μετακίνηση ίση με 1,3mm εμφανίζονται οι 1<sup>ες</sup> καμπτο-διατμητικού ρωγμές. Ωστόσο, συγκριτικά με τη δοκό M2\_B3 εμφανίστηκαν λιγότερες και μικρότερων ανοιγμάτων ρωγμές. Στα 59KN και βύθιση ίση με 6,5mm περίπου ο



εφελκυσμένος χαλύβδινος οπλισμός διέρρευσε. Στη συνέχεια υπάρχουν σχετικά ομαλές μεταπτώσεις στις τιμές του φορτίου, που όπως έχει αναφερθεί μπορεί να οφείλονται στη ρηγμάτωση του κονιάματος, στο γλίστρημα ινών ή/και τη θραύση περιφερειακών ινών. Στα 60,86kN και κατατακόρυφη μετακίνηση ίση με 8,13mm έγινε αποκόλληση της ενίσχυσης και υπήρξε μεγάλη πτώση του φορτίου. Το πείραμα διακόπηκε στα 55kN και για βύθιση ίση με 11,65mm. Ουσιαστικά, μετά την αποκόλληση της ενίσχυσης η απόκριση της δοκού είναι ίδια με αυτή του δοκιμίου αναφοράς, όπως φαίνεται από τα διαγράμματα δύναμης-βύθισης. Το δοκίμιο αυτό είχε τη μικρότερη αντοχή από όλα τα δοκίμια που υπεβλήθησαν σε δοκιμή κάμψης. Επίσης, παρουσίασε τη χαμηλότερη αύξηση δύναμης και μετατόπισης στο διάστημα που ορίζεται από τη διαρροή του χάλυβα και της αστοχίας. Όσον αφορά τη μορφή αστοχίας, ήταν ψαθυρή και απότομη και οφείλεται στη διατμητική αστοχία κονιάματος, παρατηρήθηκε ότι ήταν παρόμοια με αυτή της δοκού M2\_B3. Η επιφάνεια του σκυροδέματος μετά την αποκόλληση ήταν λεία και η επιφάνεια της ενίσχυσης δεν εμφάνισε ρωγμές ούτε τοπικές αστοχίες στις θέσεις που η ροπή είναι η μέγιστη, όπως φαίνεται στις παρακάτω φωτογραφίες. Δεν υπήρξε πλήρης ενεργοποίηση του συστήματος της ενίσχυσης, εξαιτίας της χαμηλής συνάφειας σκυροδέματος και της ενίσχυσης. Ουσιαστικά, η ενίσχυση αποκολλήθηκε ως ενιαίο και ακέραιο κομμάτι. Όλα τα παραπάνω δείχνουν ότι το κονίαμα 1 είναι πιθανώς καλύτερης ποιότητας.



(α)



(β)



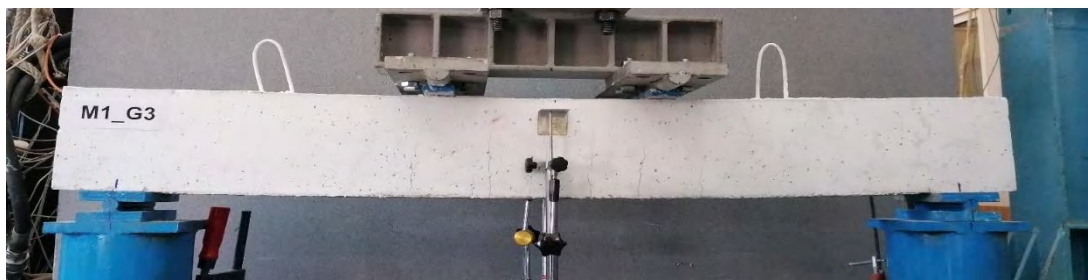
(γ)

Εικόνα 4.7:(α) αποκόλληση ενίσχυσης, (β) λεία ενισχυμένη επιφάνεια σκυροδέματος μετά την αποκόλληση και (γ) επιφάνεια ενίσχυσης χωρίς ρηγματώσεις και τοπικές αστοχίες.

### Δοκίμιο M1\_G3

Το δοκίμιο M1\_G3 ήταν ενισχυμένο με 3 στρώσεις ινοπλέγματος γυαλιού και κονίαμα τύπου 1. Το μέγιστο φορτίο που καταγράφηκε ισούται με 68,25KN και αντιστοιχεί σε βύθιση ίση με 15,12mm. Η ροπή που αντιστοιχεί σε αυτή τη δύναμη είναι  $68,25\text{KN}/2 \times 0,51\text{m}=17,4\text{KNm}$ . Στα 12,77KN και βύθιση ίση με 0,46mm, σχηματίστηκε η 1<sup>η</sup> καμπτική κάθετη ρωγμή στο διάστημα που η ροπή είναι μέγιστη, μειώνοντας τη δυσκαμψία του δοκιμίου. Αυτό επαληθεύεται από το διάγραμμα δύναμης-μετακίνησης της δοκού, αφού υπάρχει μείωση της κλίσης. Η δοκός παρουσίασε αυξημένη αντοχή αλλά μειωμένη πλαστιμότητα συγκριτικά με το δοκίμιο M1\_B3, αφού παρατηρήθηκε αύξηση του μέγιστου φορτίου κατά 1,6KN και μείωση της βύθισης στην αστοχία κατά 2,6mm. Το διάγραμμα δύναμης-μετακίνησης παρουσιάζει λιγότερες μεταπτώσεις στις τιμές του φορτίου σε σχέση με τη δοκό M1\_B3, στο διάστημα που ορίζεται από την 1<sup>η</sup> ρηγματώση μέχρι τη διαρροή του χάλυβα. Τα παραπάνω στοιχεία είναι ενδεικτικά της αυξημένης δυσκαμψίας που προδίδει η ενίσχυση, ωστόσο αυτό θα συζητηθεί περαιτέρω σε παρακάτω ενότητα. Στα 58,95KN και κατακόρυφη μετακίνηση ίση με 6,40mm υπάρχει διαρροή του χαλύβδινου εφελκυσμένου σπλισμού, η οποία συνοδεύεται από σημαντική μείωση της δυσκαμψίας της δοκού. Στα 67,86KN και βύθιση ίση με 15,71mm υπάρχει θραύση ινών του γυαλιού στο διάστημα της μέγιστης ροπής. Επίσης υπάρχει απότομη πτώση του φορτίου. Η κατανομή του φορτίου σε συνάρτηση της βύθισης είναι παρόμοια με αυτή της δοκού M1\_B3 για το διάστημα που ορίζεται από τη διαρροή του χάλυβα έως την αστοχία. Το πείραμα συνεχίστηκε μέχρι τα 58KN και βύθιση ίση με 20,5mm.

Μετά την αστοχία το διάγραμμα δύναμης-μετακίνησης είναι μετατοπισμένο κατά 2 περίπου KN πάνω από το αντίστοιχο της δοκού αναφοράς. Ο μηχανισμός της αστοχίας είναι ψαθυρός και απότομος, πρώτα σπάνε οι περιφερειακές ίνες και στη συνέχεια οι ίνες του πυρήνα. Συμπερασματικά, εξασφαλίστηκε από το κονίαμα επαρκής συνάφεια μεταξύ του σκυροδέματος και της εξωτερικής ενίσχυσης, ώστε να εξαντληθεί η εφελκυστική αντοχή του ινοπλέγματος γυαλιού. Αυτός ο μηχανισμός έχει παρατηρηθεί και αναφερθεί από τους Bösch et al. (2008), Jesse και άλλοι (2008), Schladitz et al. (2012), Elsanadedy και άλλοι (2013), και Raof et al. (2017). Ακολουθεί σχετικό φωτογραφικό υλικό.



(α)



(β)



(γ)

(δ)

Εικόνα 4.8: (α) εμφάνιση καμπτο-διατμητικού τύπου ρηγμών, (β) επιφάνεια ενίσχυσης μετά την αστοχία, (γ) και (δ) θραυσμένες ίνες γυαλιού στο μέσο της δοκού.



### Δοκίμιο M1\_G6

Το δοκίμιο M1\_G6 ήταν ενισχυμένο με 6 στρώσεις ινοπλέγματος γυαλιού και κονιάμα τύπου 1. Το μέγιστο φορτίο που καταγράφηκε ισούται με 77,9kN και αντιστοιχεί σε βύθιση ίση με 17,01mm. Η ροπή που αντιστοιχεί σε αυτή τη δύναμη είναι  $77,9\text{kN}/2 \times 0,51\text{m}=19,86\text{kNm}$ . Στα 12,92kN και βύθιση ίση με 0,53mm, σχηματίστηκε η 1<sup>η</sup> καμπτική κάθετη ρωγμή στο διάστημα που η ροπή είναι μέγιστη, μειώνοντας τη δυσκαμψία του δοκιμίου. Αυτό επαληθεύεται από το διάγραμμα δύναμης-μετακίνησης της δοκού, αφού υπάρχει μείωση της κλίσης. Το δοκίμιο αυτό παρουσίασε τη μεγαλύτερη ροπή αντοχής από όλα τα δοκίμια. Επίσης, παρατηρήθηκε αύξηση της μέγιστης τιμής του φορτίου σε σχέση με τη δοκό M1\_B6 κατά 4,3kN. Στα 62,66kN και βύθιση ίση με 6,64mm ο εφελκυσμένος χαλύβδινος οπλισμός διέρρευσε. Στο διάγραμμα δύναμης-μετακίνησης δεν παρατηρείται κάποια μετάπτωση στις τιμές του φορτίου, εκτός από ένα σημείο στα 77,8kN, λίγο πριν την αστοχία της ενίσχυσης. Η πτώση που γίνεται είναι αρκετά ομαλή και οφείλεται στη θραύση ορισμένων περιφερειακών ινών γυαλιού. Η επαλήθευση αυτού του μηχανισμού συνέβη κατά την αυτοψία του συστήματος ενίσχυσης μετά την αστοχία. Στα 77,9kN και κατακόρυφη μετακίνηση ίση με 17,9mm υπάρχει αποκόλληση της ενίσχυσης από την επιφάνεια σκυροδέματος με αποκόλληση στρώσης σκυροδέματος. Μάλιστα ο δεσμός μεταξύ σκυροδέματος και ενίσχυσης ήταν τόσο ισχυρός, που αποκολλήθηκε μεγάλη ποσότητα σκυροδέματος όπως φαίνεται στην εικόνα 4.9. Η αποκόλληση έγινε εξαιτίας της οριζόντιας διάδοσης ρωγμής, καμπτοδιατμητικού τύπου, προς το μέσο του ανοίγματος. Ο μηχανισμός είναι ψαθυρός και απότομος, συνοδεύεται από απότομη πτώση του φορτίου και οφείλεται στη διατμητική αστοχία κονιάματος. Το πείραμα συνεχίστηκε μέχρι τα 55,77kN και βύθιση ίση με 22,1mm.



(α)



(β)

(γ)



(δ)

(ε)

Εικόνα 4.9:(α) αστοχία δοκιμίου M1\_G6, (β),(γ)αποκόλληση ενίσχυσης και σκυροδέματος, (δ) και (ε) αποκολλημένη επιφάνεια ενίσχυσης.

### Δοκίμιο M2\_G3

Το δοκίμιο M2\_G3 ήταν ενισχυμένο με 3 στρώσεις ινοπλέγματος γυαλιού και κονίαμα τύπου 2. Το μέγιστο φορτίο που καταγράφηκε ισούται με 68,45KN και αντιστοιχεί σε βύθιση ίση με 16,22mm. Η ροπή που αντιστοιχεί σε αυτή τη δύναμη είναι  $68,45\text{KN}/2 \times 0,51\text{m}=17,45\text{KNm}$ . Στα 15,38KN και βύθιση ίση με 0,96mm, σχηματίστηκε η 1<sup>η</sup> καμπτική κάθετη ρωγμή στο διάστημα που η ροπή είναι μέγιστη, μειώνοντας τη δυσκαμψία του δοκιμίου. Αυτό επαληθεύεται από το διάγραμμα δύναμης-μετακίνησης της δοκού, αφού υπάρχει μείωση της κλίσης. Επίσης, παρατηρήθηκε αύξηση της μέγιστης τιμής του φορτίου και της βύθισης σε αυτό το σημείο, σε σχέση

με τη δοκό M2\_B3 κατά 6,89kN και 4,9mm αντίστοιχα. Η ενίσχυση με 3 ινοπλέγματα γυαλιού προσδίδει μεγαλύτερη αντοχή και δυσκαμψία στη δοκό σε σχέση με τα 3 ινοπλέγματα βασάλτη. Επιπλέον η συγκεκριμένη δοκός παρουσίασε αύξηση του μέγιστου φορτίου σε σχέση με το δοκίμιο M1\_G3 ίση με 0,25kN. Αυτό σημαίνει ότι το κονίαμα 2 προσέφερε καλύτερη συνάφεια σε σχέση με το 1. Αυτή είναι παρατήρηση που αντικρούεται με αυτή που έγινε προηγουμένως. Στα 57,38kN και βύθιση ίση με 6,22mm ο εφελκόμενος χαλύβδινος σπλισμός διέρρευσε και υπήρξε σημαντική μείωση της δυσκαμψίας. Να σημειωθεί ότι δεν υπήρξαν σημαντικές μεταπτώσεις του φορτίου από τη διαρροή μέχρι την αστοχία. Όταν το φορτίο έλαβε τη μέγιστη τιμή, ίνες γυαλιού άρχισαν να σπάνε. Παρατηρείται μια σχετικά ομαλή αλλά μεγάλη πτώση στο διάγραμμα δύναμης-μετακίνησης, η οποία οφείλεται στην προοδευτική θραύση των ινών και όχι στην απότομη. Συμπερασματικά, εξασφαλίστηκε από το κονίαμα επαρκής συνάφεια μεταξύ του σκυροδέματος και της ενίσχυσης, ώστε να εξαντληθεί η εφελκυστική αντοχή του ινοπλέγματος γυαλιού. Το πείραμα συνεχίστηκε μέχρι τα 58kN και βύθιση ίση με 23mm. Η αστοχία ήταν ψαθυρή και η θραύση των ινών συνέβη στο διάστημα της μέγιστης ροπής και είναι συγκεντρωμένη σε ένα σημείο. Ακολουθεί φωτογραφικό υλικό.



(α)



(β)

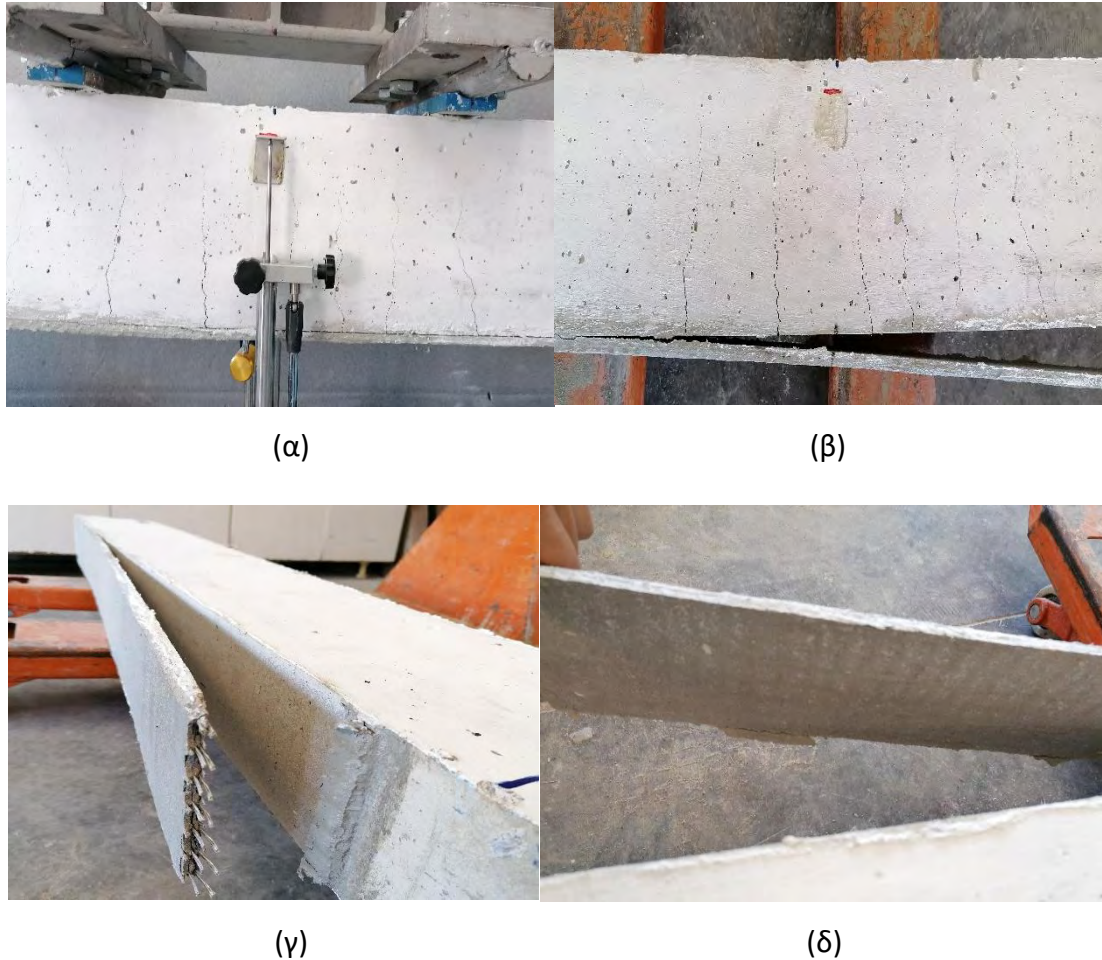
(γ)

Εικόνα 4.10: (α) Δοκίμιο M2\_G3 στην αστοχία, (β) ρηγματώσεις κονιάματος και θραύση ινών και (γ) περιοχή ενίσχυσης με συγκεντρωμένη βλάβη.



### Δοκίμιο M2\_G6

Το δοκίμιο M2\_G6 ήταν ενισχυμένο με 6 στρώσεις ινοπλέγματος γυαλιού και κονιάμα τύπου 2. Το μέγιστο φορτίο που καταγράφηκε ισούται με 66,19KN και αντιστοιχεί σε βύθιση ίση με 9,69mm. Η ροπή που αντιστοιχεί σε αυτή τη δύναμη είναι  $66,19\text{KN}/2 \times 0,51\text{m} = 16,88\text{KNm}$ . Στα 12,86KN και βύθιση ίση με 0,73mm, σχηματίστηκε η 1<sup>η</sup> καμπτική κάθετη ρωγμή στο διάστημα που η ροπή είναι μέγιστη, μειώνοντας τη δυσκαμψία του δοκιμίου. Αυτό επαληθεύεται από το διάγραμμα δύναμης-μετακίνησης της δοκού, αφού υπάρχει μείωση της κλίσης. Παρατηρείται αύξηση της μέγιστης τιμής του φορτίου συγκριτικά με το δοκίμιο M2\_B6 ίση με 5,5KN. Ωστόσο, παρατηρείται μείωση της μέγιστης τιμής του φορτίου σε σχέση με τις δοκούς M1\_B6 και M1\_G6 ίση με 11,71KN και 10,5KN αντίστοιχα. Επίσης η μέγιστη δύναμη που καταγράφηκε για αυτό το δοκίμιο είναι κατά 2,24KN μικρότερη από αυτή της δοκού M2\_G3. Παρόλο που το δοκίμιο είχε 2 φορές περισσότερο οπλισμό γυαλιού είχε μικρότερη ροπή αντοχής. Αυτό παρατηρήθηκε και στο δοκίμιο M2\_B6, όπου είχε επίσης χαμηλότερη αντοχή από αυτή του M2\_B3. Στα 61,49KN και βύθιση ίση με 6,49mm ο χαλύβδινος εφελκόμενος οπλισμός διέρρευσε και μειώθηκε σημαντικά η δυσκαμψία του δοκιμίου. Στα 66KN και βύθιση ίση με 9,81mm αποκολλήθηκε η ενίσχυση από το σκυρόδεμα και υπήρξε απότομη πτώση του φορτίου. Το πείραμα συνεχίστηκε μέχρι τα 58KN και για μετακίνηση 18mm. Η μορφή της αστοχίας ήταν ψαθυρή και οφείλεται στη διατμητική αστοχία του κονιάματος στη διεπιφάνεια σκυροδέματος και ενίσχυσης. Όπως και στην αστοχία της δοκού M2\_B6, έτσι και σε αυτή τη δοκό δεν υπήρξε πλήρης ενεργοποίηση του συστήματος της ενίσχυσης, εξαιτίας της χαμηλής συνάφειας σκυροδέματος και της ενίσχυσης. Η επιφάνεια του σκυροδέματος μετά την αποκόλληση ήταν λεία και η επιφάνεια της ενίσχυσης δεν εμφάνισε ρωγμές ούτε τοπικές αστοχίες στις θέσεις που η ροπή είναι η μέγιστη. Η αποκόλληση αρχικά συνέβη στο μέσο και διαδόθηκε προς τη στήριξη. Ουσιαστικά, η ενίσχυση αποκολλήθηκε ως ενιαίο και ακέραιο κομμάτι. Ακόμη μία ένδειξη της χαμηλής ποιότητας του κονιάματος. Ακολουθεί φωτογραφικό υλικό.



Εικόνα 4.11: (α) Δοκίμιο M2\_G6 λίγο πριν την αστοχία, (β) κρίσιμο μήκος της δοκού, μετά την αστοχία, (γ) αποκολλημένη ενίσχυση και λεία επιφάνεια σκυροδέματος και (δ) επιφάνειας ενίσχυσης χωρίς ρωγμές και τοπικές αστοχίες.

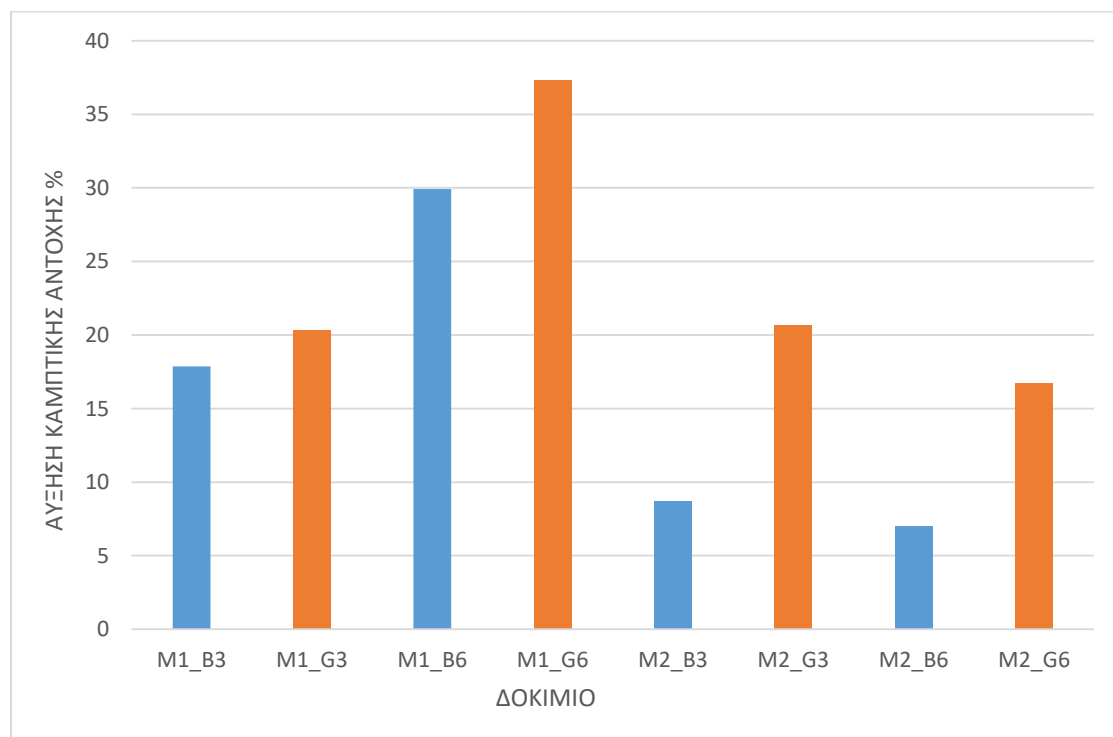
Ακολουθεί πίνακας των αποτελεσμάτων που περιέχει τις χαρακτηριστικές τιμές για κάθε δοκίμιο καθώς και τη μορφή αστοχίας τους. Συγκεκριμένα, υπάρχουν 3 τιμές φορτίου και 3 βύθισης για κάθε δοκό, οι οποίες αντιστοιχούν στις τιμές δημιουργίας 1<sup>ης</sup> ρηγμάτωσης, διαρροής εφελκόμενου χάλυβα και αστοχίας. Για τις μορφές αστοχίας χρησιμοποιούνται οι ακόλουθα χαρακτηρισμοί: για τη θραύση σκυροδέματος-Co\_Ru, για τη θραύση ιών- F\_Ru, για την αποκόλληση μεταξύ των ινοπλεγμάτων ενίσχυσης- De\_In, για την αποκόλληση από την επιφάνεια σκυροδέματος- De\_Co, για την αποκόλληση από την επιφάνεια σκυροδέματος με ξεφλούδισμα λεπτής στρώσης σκυροδέματος- De\_Co\_P και για την αποκόλληση της ενίσχυσης ως ακέραιο κομμάτι από το σκυρόδεμα- De\_Co\_M.



Πίνακας 4.1: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα πειραματικής διαδικασίας.

| Δοκίμιο | Φορτίο KN |       |       | Βύθιση mm     |            |            | Μορφή αστοχίας |
|---------|-----------|-------|-------|---------------|------------|------------|----------------|
|         | $P_{cr}$  | $P_y$ | $P_u$ | $\delta_{cr}$ | $\delta_y$ | $\delta_u$ |                |
| CON     | 11,78     | 52    | 56,72 | 0,57          | 6,5        | 17,08      | Co_Ru          |
| M1_B3   | 12,86     | 58,88 | 66,85 | 0,52          | 6,66       | 18,01      | De_In          |
| M1_B6   | 13,94     | 60    | 73,69 | 0,64          | 6,6        | 18,23      | De_Co_P        |
| M2_B3   | 14,31     | 58,33 | 61,64 | 0,64          | 6,52       | 10,91      | De_Co_M        |
| M2_B6   | 13,35     | 59    | 60,67 | 0,71          | 6,5        | 8,12       | De_Co_M        |
| M1_G3   | 12,77     | 58,95 | 68,25 | 0,46          | 6,4        | 15,12      | F_Ru           |
| M1_G6   | 12,92     | 62,66 | 77,9  | 0,53          | 6,64       | 17,17      | De_Co_P        |
| M2_G3   | 15,38     | 57,38 | 68,45 | 0,96          | 6,22       | 16,22      | F_Ru           |
| M2_G6   | 12,86     | 61,49 | 66,19 | 0,73          | 6,49       | 9,69       | De_Co_M        |

Όπως φαίνεται από τον παραπάνω πίνακα η συχνότερη μορφή αστοχίας,3 στα 8 δοκίμια αστόχησαν με αυτόν τον τρόπο, είναι η De\_Co\_M και συναντάται στις δοκούς με κονίαμα τύπου 2. Ακολουθεί γράφημα με την ποσοστιαία αύξηση της αντοχής των ενισχυμένων δοκών σε σχέση με το δοκίμιο αναφοράς.



Εικόνα 4.12: Ποσοστιαία αύξηση της αντοχής των ενισχυμένων δοκών σε σχέση με το δοκίμιο αναφοράς.

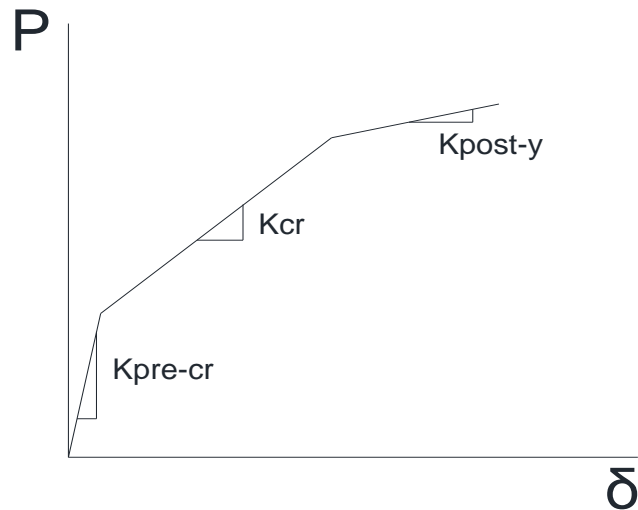
Όπως φαίνεται από το παραπάνω γράφημα, τη μεγαλύτερη αύξηση παρουσίασε το δοκίμιο M1\_G6, ενώ τη χαμηλότερη το M2\_B3. Επίσης, τα δοκίμια ενισχυμένα με ινοπλέγματα γυαλιού είχαν καλύτερη απόδοση σε σχέση με τα ινοπλέγματα βασάλτη. Ωστόσο, τα δοκίμια με βασάλτη παρουσίασαν μεγαλύτερη πλαστιμότητα έναντι των δοκών ενισχυμένων με γυαλί.

Τα δοκίμια ενισχυμένα με κονίαμα τύπου 1 παρουσιάζουν μεγαλύτερες αντοχές από αυτά με κονίαμα τύπου 2. Όπως έχει προαναφερθεί, αυτό σημαίνει ότι το κονίαμα είναι καλύτερη ποιότητας από ό,τι το 2. Δηλαδή, προσφέρει καλύτερη συνάφεια στις διεπιφάνειες σκυροδέματος-ενίσχυσης και μεταξύ των ινοπλεγμάτων.

Στις δοκούς όπου χρησιμοποιήθηκε κονίαμα τύπου 1, για αύξηση των στρώσεων παρατηρήθηκε αύξηση της αντοχής. Συγκεκριμένα, η αύξηση στρώσεων ινοπλεγμάτων από 3 σε 6, οδήγησε σε αύξηση της ροπής αντοχής κατά 68% και 84%, για βασάλτη και γυαλί αντίστοιχα. Αυτό είναι ενδεικτικό της πιθανής καλύτερης συνάφειας μεταξύ κονιάματος και των ινών γυαλιού, αφού ενεργοποιείται μεγαλύτερο ποσοστό οπλισμού της ενίσχυσης για αύξηση των στρώσεων. Επιπλέον τα δοκίμια M1\_G3 και M2\_G3 είχαν την ίδια σχεδόν αντοχή είναι ένα στοιχείο που ενισχύει την παραπάνω πρόταση. Οι διαφορές των στρώσεων εντοπίζονται κυρίως στη γεωμετρία των πλεγμάτων. Στις δοκούς όπου χρησιμοποιήθηκε κονίαμα τύπου 1, για αύξηση των στρώσεων παρατηρήθηκε μείωση της αντοχής. Συγκεκριμένα, η αύξηση στρώσεων ινοπλεγμάτων από 3 σε 6, οδήγησε σε μείωση της αντοχής κατά 20% και 21% για βασάλτη και γυαλί αντίστοιχα.

#### 4.4 Σχολιασμός δυσκαμψιών δοκιμίων

Από την πειραματική καταγραφή των τιμών δύναμης και βύθισης, υπολογίστηκαν οι δυσκαμψίες των δοκιμίων. Η κλίση του διαγράμματος εκφράζει τη δυσκαμψία. Υπολογίστηκαν 3 τύπων δυσκαμψίας κάνοντας την παραδοχή ότι το διάγραμμα έχει γραμμική κατανομή και αποτελείται από τους 3 κλάδους. Ο 1<sup>ος</sup> είναι η δυσκαμψία πριν την εμφάνιση ρηγματώσεων, ο 2<sup>ος</sup> μετά την εμφάνιση ρωγμών και πριν τη διαρροή χάλυβα και ο 3<sup>ος</sup> μετά τη διαρροή και πριν την αστοχία της ενίσχυσης.



Εικόνα 4.13: 3-γραμμικός κλάδος διαγράμματος δύναμης-βύθισης.

Ακολουθεί πίνακας με τα αποτελέσματα.

Πίνακας 4.2: Πίνακας με τιμές δυσκαμψιών των τριών σταδίων.

| Δοκίμιο | ΔΥΣΚΑΜΨΙΑ KN/mm |      |         |
|---------|-----------------|------|---------|
|         | Kpre-cr         | Kcr  | Kpost-y |
| CON     | 20,67           | 6,78 | 0,45    |
| M1_B3   | 24,73           | 7,50 | 0,70    |
| M1_B6   | 21,78           | 7,73 | 1,18    |
| M2_B3   | 22,36           | 7,49 | 0,75    |
| M2_B6   | 18,80           | 7,88 | 1,03    |
| M1_G3   | 27,76           | 7,77 | 1,07    |
| M1_G6   | 24,38           | 8,14 | 1,45    |
| M2_G3   | 16,02           | 7,98 | 1,11    |
| M2_G6   | 17,62           | 8,44 | 1,47    |

Ο σχολιασμός των τιμών των δυσκαμψιών αφορά τα 2 τελευταία και κυρίως του 3<sup>ου</sup>. Στο 1<sup>ο</sup> στάδιο είναι λιγότερο διακριτό το σημείο αλλαγής κλίσης και κατά συνέπεια λιγότερο αξιόπιστες οι τιμές που προέκυψαν. Στο 2<sup>ο</sup> στάδιο, όπου γίνεται διάδοση των ρωγμών, ο διαμήκης χαλύβδινος σπλισμός του κάτω πέλματος και το σύστημα ενίσχυσης ενεργοποιούνται σε εφελκυσμό και συνεισφέρουν στην καμπτική αντίσταση. Στο 3<sup>ο</sup> στάδιο, όπου έχει επέλθει διαρροή του χάλυβα, ο κύριος μηχανισμός ανάληψης των εφελκυστικών τάσεων είναι το ΙΑΜ.

### Δοκίμιο M1 B3

Η δυσκαμψία της δοκού M1\_B3 παρουσιάζει αύξηση 10,6% και 55,5% σε σχέση με το δοκίμιο αναφοράς, στα στάδια II και III αντίστοιχα. Η συγκεκριμένη ενίσχυση αύξησε κατά 17,9% τη ροπή αντοχής και 2,66% την πλαστιμότητα του δοκιμίου. Η μορφή αστοχίας, δηλαδή η διαστρωματική αποκόλληση μεταξύ των ινοπλεγμάτων βασάλτη, οδήγησε σε μερική ενεργοποίηση του συστήματος ενίσχυσης, για αυτό και η δυσκαμψία του σταδίου III της δοκού είναι μικρότερη από την αντίστοιχη του M1\_G3.

### Δοκίμιο M1 G3

Η δυσκαμψία της M1\_G3 παρουσιάζει αύξηση 14,6% και 137% σε σχέση με το δοκίμιο αναφοράς, στα στάδια II και III αντίστοιχα. Η συγκεκριμένη ενίσχυση αύξησε κατά 20,3% τη ροπή αντοχής, αλλά παρουσιάζει μειωμένη πλαστιμότητα συγκριτικά με το M1\_B3 περίπου ίση με 16,4%. Η μεγάλη δυσκαμψία σε συνδυασμό με το καλής ποιότητας κονίαμα είχε ως αποτέλεσμα την εξάντληση σε εφελκυσμό των ινών γυαλιού, δηλαδή την πλήρη ενεργοποίηση του συστήματος της ενίσχυσης. Όπως φαίνεται, η αύξηση της δυσκαμψίας συνοδεύεται με αύξηση του φορτίου αντοχής.

### Δοκίμιο M2 B3

Η δυσκαμψία της δοκού M2\_B3 παρουσιάζει αύξηση 10,6% και 66,7% σε σχέση με το δοκίμιο αναφοράς, στα στάδια II και III αντίστοιχα. Η συγκεκριμένη ενίσχυση αύξησε κατά 8,67% τη ροπή αντοχής. Παρόλο που αυξήθηκε η δυσκαμψία του δοκιμίου συγκριτικά με το M1\_B3 υπήρξε 8,67% αύξηση της καμπτικής αντοχής έναντι 17,9%. Από τη μορφή αστοχίας, όπου η ενίσχυση αποκολλήθηκε ως ενιαίο και ακέραιο κομμάτι είναι φανερό ότι υπήρξε μικρή ενεργοποίηση του συστήματος ενίσχυσης, οδηγώντας στην αστοχία της σε μικρές σχετικά μετακινήσεις. Η κακή ποιότητα κονιάματος οδήγησε στην αδυναμία ταυτόχρονης παραμόρφωσης του IAM με το σκυρόδεμα. Στη συγκεκριμένη περίπτωση δηλαδή, η αύξηση δυσκαμψίας δεν οδηγεί σε αύξηση της ροπής αντοχής.

### Δοκίμιο M2 G3

Η δυσκαμψία της M2\_G3 παρουσιάζει αύξηση 17,7% και 146% σε σχέση με το δοκίμιο αναφοράς, στα στάδια II και III αντίστοιχα. Η συγκεκριμένη ενίσχυση αύξησε

κατά 20,68% τη ροπή αντοχής. Σε αυτήν την περίπτωση, η μορφή αστοχίας ήταν ίδια με αυτή του M1\_G3, δηλαδή θραύση ιών γυαλιού, υπήρξε πλήρης ενεργοποίηση της ενίσχυσης. Ο συγκεκριμένος μηχανισμός αστοχίας συνοδεύεται από υψηλή αύξηση της δυσκαμψίας.

#### Δοκίμιο M1\_B6

Η δυσκαμψία της δοκού M1\_B6 παρουσιάζει αύξηση 14% και 162,2% σε σχέση με το δοκίμιο αναφοράς, στα στάδια II και III αντίστοιχα. Η συγκεκριμένη ενίσχυση αύξησε κατά 29,92% τη ροπή αντοχής. Σε αυτή την περίπτωση η αστοχία ήταν αποκόλληση της ενίσχυσης από την επιφάνεια σκυροδέματος με αποκόλληση φλοιού σκυροδέματος. Ο μηχανισμός αυτός επιβεβαιώνει την ενεργοποίηση του συστήματος ενίσχυσης για αυτό και η σημαντική αύξηση της δυσκαμψίας συνοδεύεται με αύξηση της ροπής αντοχής.

#### Δοκίμιο M1\_G6

Η δυσκαμψία της δοκού M1\_G6 παρουσιάζει αύξηση 20% και 222,2% σε σχέση με το δοκίμιο αναφοράς, στα στάδια II και III αντίστοιχα. Η συγκεκριμένη ενίσχυση αύξησε κατά 37,34% τη ροπή αντοχής. Το δοκίμιο παρουσίασε τη μεγαλύτερη αύξηση τόσο σε δυσκαμψία όσο και σε αύξηση ροπής αντοχής. Επιπλέον, είχε την ίδια μορφή αστοχίας με το δοκίμιο M1\_B6. Βάση των παραπάνω ο μηχανισμός αστοχίας είναι ενδεικτικός του βαθμού ενεργοποίησης του συστήματος ενίσχυσης, ο οποίος με τη σειρά του επηρεάζει την αύξηση αντοχής και τη δυσκαμψία του δοκιμίου. Έχοντας την παραπάνω συνθήκη ως δεδομένη, προκύπτει ότι όσο μεγαλύτερη η αύξηση της δυσκαμψίας τόσο μεγαλύτερη και η αύξηση του φορτίου αστοχίας.

#### Δοκίμιο M2\_B6

Η δυσκαμψία της δοκού M2\_B6 παρουσιάζει αύξηση 14% και 162,2% σε σχέση με το δοκίμιο αναφοράς, στα στάδια II και III αντίστοιχα. Η συγκεκριμένη ενίσχυση αύξησε κατά 6,96% τη ροπή αντοχής και ήταν η μικρότερη αύξηση που παρατηρήθηκε. Η αστοχία ήταν ίδια με αυτή της δοκού M2\_B3. Η αδυναμία παραμόρφωσης του συστήματος ενίσχυσης εξαιτίας της κακής ποιότητας κονιάματος και η μεγάλη δυσκαμψία μετά τη διαρροή οδήγησε στην αστοχία για μικρές τιμές βύθισης.

### Δοκίμιο M2\_G6

Η δυσκαμψία της δοκού M2\_G6 παρουσιάζει αύξηση 16% και 226,6% σε σχέση με το δοκίμιο αναφοράς, στα στάδια II και III αντίστοιχα. Η συγκεκριμένη ενίσχυση αύξησε κατά 16,7% τη ροπή αντοχής. Όμοια με το δοκίμιο M2\_B6, η αδυναμία παραμόρφωσης του συστήματος ενίσχυσης εξαιτίας της κακής ποιότητας κονιάματος και η μεγάλη δυσκαμψία μετά τη διαρροή οδήγησε στην αστοχία για μικρές τιμές βύθισης.



## 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΕΡΕΥΝΑ

### 5.1 Συμπεράσματα

Σε αυτή την ενότητα γίνεται ουσιαστικά κατηγοριοποίηση και ταξινόμηση των προτάσεων της προηγούμενης ενότητας που προέκυψαν από τα πειραματικά δεδομένα και την ανάλυσή τους.

#### Υλικό ενίσχυσης

Τα ινοπλέγματα γυαλιού, παρόλο που είχαν περίπου την ίδια αξονική δυστένεια, είχαν καλύτερη απόδοση σε σχέση με αυτά του βασάλτη, καθώς για ίδιο αριθμό στρώσεων και τύπο κονιάματος, τα δοκίμια ενισχυμένα με γυαλί παρουσίασαν μεγαλύτερη καμπτική αντοχή από τα αντίστοιχα με βασάλτη.

#### Τύπος κονιάματος

Το κονίαμα 1 παρουσιάζει καλύτερη συνάφεια με το σκυρόδεμα και τα ινοπλέγματα ενίσχυσης από το 2. Όπως φαίνεται από τη μορφή αστοχίας των δοκών M2\_B3, M2\_B6 και M2\_G6, ο βαθμός ενεργοποίησης του συστήματος ενίσχυσης ήταν μικρός εξαιτίας της χαμηλής συνάφειας μεταξύ της επιφάνειας του σκυροδέματος και της ενίσχυσης.

#### Καμπτική αντοχή και αριθμός στρώσεων ενίσχυσης

Τα δοκίμια ενισχυμένα με κονίαμα 1 και 6 στρώσεις ινοπλεγμάτων αύξησε της καμπτικής αντοχής. Τα δοκίμια ενισχυμένα με κονίαμα 2 και 6 στρώσεις ινοπλεγμάτων, παρουσίασαν μείωση της καμπτικής αντοχής.

#### Δυσκαμψία III σταδίου και αριθμός στρώσεων ενίσχυσης

Παρατηρήθηκε ότι με την αύξηση των ινοπλεγμάτων αυξάνεται και η δυσκαμψία του δοκιμίου.

#### Δυσκαμψία III σταδίου και καμπτική αντοχή

Παρατηρείται ότι όσο μεγαλύτερη η δυσκαμψία τόσο μεγαλύτερη η καμπτική αντοχή της δοκού. Αυτό δεν επαληθεύεται από τα δοκίμια M2\_B3, M2\_B6 και M2\_G6, που αστόχησαν όμως εξαιτίας της χαμηλής ποιότητας του κονιάματος.

### Συνάφεια και γεωμετρία πλέγματος

Τα ινοπλέγματα γυαλιού έχουν μεγαλύτερη συνάφεια με το κονίαμα της ενίσχυσης σε σχέση με αυτά του βασάλτη. Το δοκίμιο M1\_G6 παρουσιάζει μεγαλύτερη αύξηση στη ροπή αντοχής από το M1\_G3 από ό,τι το M1\_B6 σε σχέση με το M1\_B3. Ενεργοποιείται δηλαδή μεγαλύτερο ποσοστό του οπλισμού της ενίσχυσης. Επίσης η δοκός M2\_G3 παρουσιάζει 2,5 φορές μεγαλύτερη αύξηση στη ροπή αντοχής από ό,τι η M2\_B3. Τέλος, η μορφή αστοχίας του δοκιμίου M1\_B3, η διαστρωματική δηλαδή αποκόλληση, ενισχύει την παραπάνω πρόταση.

### 5.2 Προτάσεις για έρευνα

Ακολουθούν ορισμένες προτάσεις για έρευνα.

- Προτείνεται η περαιτέρω πειραματική διερεύνηση επιρροής του μήκους της δοκού. Οι μεγαλύτερες διαστάσεις της δοκού πιθανώς να επηρεάζουν τη μηχανική απόκριση του συστήματος ενίσχυσης. Για αυτό ιδιαίτερο ενδιαφέρον θα έχει η πειραματική προσομοίωση δοκιμίων σε πλήρη κλίμακα
- Προτείνεται η περαιτέρω πειραματική διερεύνηση επιρροής της μήτρας. Η ποιότητα του κονιάματος είναι κρίσιμη παράμετρος που επηρεάζει την αντοχή του δοκιμίου και η βελτιστοποίησή της είναι εξαιρετικά σημαντική και ουσιαστική
- Τέλος, προτείνεται περαιτέρω μελέτη της γεωμετρικής διάταξης των κλώνων των ινών, της πυκνότητάς τους και των διαφόρων τρόπων πλέξης των ινοπλεγμάτων

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

### **➤ ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

Παρδαλόπουλος Στυλιανός και Λεκίδης Βασίλειος (2019), «Ρύθμιση της ελληνικής διαδικασίας 2<sup>ου</sup> επιπέδου αποτίμησης σεισμικής ικανότητας»

Δερουκάκη Μαρία (2019), «Ινοπλέγματα σε ανόργανη μήτρα: μηχανική συμπεριφορά σε εφελκυσμό και σε συνάφεια με το σκυρόδεμα»

1<sup>ο</sup> συνέδριο στρατηγικής και τεχνολογίας, ένωση απόστρατων αξιωματικών αεροπορίας (2019)

Πλαμαντούρας Βασίλειος, «Χαρακτηρισμός βλάβης στοιχείων από ινοπλέγματα σε ανόργανη μήτρα μέσω διηλεκτρικών μετρήσεων» μεταπτυχιακή εργασία, Πάτρα (2015)

Τριανταφύλλου (2004) «Ενισχύσεις κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος με σύνθετα υλικά»

Μπαλιούκος Χρήστος, «Χρήση Ινοπλεγμάτων ανόργανης μήτρας για την ενίσχυση πλακών οπλισμένου σκυροδέματος δύο διευθύνσεων» διπλωματική εργασία, Πάτρα (2008)

ΚΤΣ (2016) «ελληνικός κανονισμός τεχνολογίας σκυροδεματος»

Τριανταφύλλου, Αθ., Χ., Παπανικολάου, Αικ., Γ., Μπουρνάς, Δ. και Λόντου, Π. (2006) «Νέα γενιά σύνθετων υλικών ανόργανης μήτρας (TRM) για την ενίσχυση κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος»

Παπαντωνίου Ιωάννης “Πειραματική διερεύνηση στοιχείων σκυροδέματος επί/εντός προκατασκευασμένων τύπων από ινοπλέγματα ανόργανης μήτρας” Διπλωματική εργασία Πάτρα (2007)

### **➤ ΔΙΕΘΝΗΣ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

Myers et al. (2019) “Effect of Different Temperatures on Epoxy Adhesive Used in Near Surface Mounted FRP Bars Strengthened Concrete Masonry Unit Under Direct Shear Test”

ACI 549.4R-13 “Guide to Design and Construction of Externally Bonded Fabric-Reinforced”

American Concrete Institute, “Cementitious Matrix (FRCM) Systems for Repair and Strengthening Concrete and Masonry structures” Farmington Hills, USA (2013)

Krüger, M., Ozbolt, J., Reinhardt, H. W. , RILEM, pp. 49-63 (2003) “A new 3D discrete bond model to study the influence of bond on the structural performance of thin reinforced and [12]prestressed concrete plates, High Performance Fiber Reinforced Cement Composites (HPFRCC4)”

Saad M. Raouf, Lambros N. Koutas , Dionysios A. Bournas “Textile-reinforced mortar (TRM) versus fiber-reinforced polymers (FRP) in flexural strengthening of RC beams” Construction and Building Materials 151 pp279-291

M. Raupach, C. Morales Cruz “Textile-reinforced concrete: Selected case studies”,  
Textile Fiber Composites in Civil Engineering 2016

Hegger, J., Kulas, C., Schneider, H.N., Brameshuber, W., Hinzen, M., Raupach, M., Buttner, T. ‘TRC pedestrian bridge—design, load-bearing behavior and production processes of a slender and light-weight construction’ RILEM Conference on Material Science, pp. 353–364 (2010)

Curbach, M., Hauptenbuchner, B., Ortlepp, R., Weiland, S. “Textilbewehrter Beton zur Verstärkung eines Hyparschalentragwerks” in Schweinfurt. Beton-und Stahlbetonbau 102, 353–361 (2007)

Triantafillou T. “Strengthening of existing concrete structures: Concepts and structural behavior”

Napoli, A., R. Realfonzo “Reinforced concrete beams strengthened with SRP/SRG systems: experimental investigation” Construction and Building Materials 93 pp 654–677 (2015)

Elsanadedy, H. M., T. H. Almusallam, S. H. Alsayed, and Y. A. Al-Salloum “Flexural strengthening of RC beams using textile reinforced mortar—Experimental and numerical study” Compos. Struct. 97 pp40–55 (2013)

D’Ambrisi, A., and F. Focacci “Flexural strengthening of RC beams with cement-based composites” J. Compos. Constr. 15 pp707–720 (2011)

Bösche, A., F. Jesse, R. Ortlepp, S. Weiland, and M. Curbach “Textile-reinforced concrete for flexural strengthening of RC structures—Part 1: Structural behavior and design model.” ACI Spec. Publ. 251 pp19–40 (2008)

Ebead U., Younis A., Shrestha K. C., “Effect of surface preparation on the bond behavior between concrete substrate and strengthening layer of textile reinforced mortar” (2016)

Raouf, S. M., L. N. Koutas, and D. A. Bournas “Textile-reinforced mortar (TRM) versus fibre-reinforced polymers (FRP) in flexural strengthening of RC beams” Construction Building Materials 151 pp279–291 (2017)

Koutas, L., Tetta Z., D. A. Bournas and Triantafillou T. C. “Strengthening of concrete structures with textile reinforced mortars: State-of-the-art Review” J. Compos. Constr. ASCE (2019)

Papanicolaou, C., T. C. Triantafillou, I. Papantoniou, and C. Balioukos “Strengthening of two-way slabs with textile-reinforced mortars (TRM)” In Proc., 11th Int. fib Symposium. Lausanne, Switzerland: International Federation for Structural Concrete (2009)

Koutas L.N., Bournas D.A., “Flexural Strengthening of Two-Way RC Slabs with Textile-Reinforced Mortar: Experimental Investigation and Design Equations”, J. Compos. Constr., (2017)