

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ**  
**ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ**  
**ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**



**Διπλωματική Εργασία**

**ΜΕΛΕΤΗ ΣΥΝΑΦΕΙΑΣ ΜΕΤΑΞΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΣΥΝΘΕΤΩΝ  
ΥΛΙΚΩΝ ΜΕ ΤΣΙΜΕΝΤΟΕΙΔΗ ΜΗΤΡΑ**

**ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΚΑΡΑΚΙΤΣΟΣ**

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των απαιτήσεων για την απόκτηση του

Διπλώματος Πολιτικού Μηχανικού

**ΒΟΛΟΣ 2022**

© 2022 Κωνσταντίνος Καρακίτσος

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).

## **Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:**

Πρώτος Εξεταστής (Επιβλέπων)	Δρ. Κούτας Λάμπρος Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
Δεύτερος Εξεταστής (Συνεπιβλέπων)	Δρ. Παπακωνσταντίνου Χρήστος Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
Τρίτος Εξεταστής	Δρ. Γουργιώτης Παναγιώτης Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

## Ευχαριστίες

Πρώτα απ' όλα θα ήθελα να ευχαριστήσω τους επιβλέποντες καθηγητές της διπλωματικής μου εργασίας κ. Κούτα Λάμπρο, Επίκουρο Καθηγητή του τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας και κ. Παπακωνσταντίνου, Αναπληρωτή Καθηγητή του τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας για την πολύτιμη επιστημονική καθοδήγηση και εμπιστοσύνη, τη βοήθεια, τις χρήσιμες συμβουλές και τις χρήσιμες υποδείξεις που μου παρείχαν κατά την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Επιπρόσθετα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Κουτσελίνη Αλέξανδρο, μέλος ΕΤΕΠ του τμήματος Πολιτικών μηχανικών του πανεπιστημίου Θεσσαλίας, ο οποίος με βοήθησε σε τεχνικά θέματα στο εργαστηριακό κομμάτι. Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δρ. Παπαθεοχάρη Χάρη για τις πολύτιμες συμβουλές στον τεχνικό κομμάτι, καθώς και όλα τα μέλη του εργαστηρίου οπλισμένου σκυροδέματος για τη βοήθειά τους.

Ξεχωριστές ευχαριστίες θα ήθελα να εκφράσω στην προπτυχιακή φοιτήτρια και κοπέλα μου Αναστασία Γεωργίου για την πολύτιμη και σημαντική βοήθεια και τη συμπαράστασή της, καθώς και την ψυχολογική υποστήριξη που μου παρείχε τις δύσκολες και πιεστικές ημέρες.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τα μέλη της οικογένειάς μου. Πιο συγκεκριμένα ευχαριστώ ιδιαίτερα τους γονείς μου, Πέτρο και Χριστίνα, και τον αδερφό μου Δημήτρη για την ολόψυχη αγάπη και υποστήριξή τους όλα αυτά τα χρόνια.

Κωνσταντίνος Καρακίτσος

# ΜΕΛΕΤΗ ΣΥΝΑΦΕΙΑΣ ΜΕΤΑΞΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΜΕ ΤΣΙΜΕΝΤΟΕΙΔΗ ΜΗΤΡΑ

Κωνσταντίνος Καρακίτσος

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, 2022

Επιβλέποντες Καθηγητές: Κούτας Λάμπρος, Επίκουρος Καθηγητής Π.Θ., Παπακωνσταντίνου Χρήστος, Αναπληρωτής Καθηγητής Π.Θ.

## Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετάται η συνάφεια μεταξύ σκυροδέματος και σύνθετων υλικών με τσιμεντοειδή μήτρα. Το σύνθετο αυτό υλικό είναι το ινόπλεγμα ανόργανης μήτρας (IAM), όπου αναλύεται λεπτομερώς. Έπειτα, γίνεται περιγραφή του πειραματικού προγράμματος που πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο σκυροδέματος του τμήματος πολιτικών μηχανικών, όπου γίνεται πειραματική διερεύνηση της συνάφειας μεταξύ σκυροδέματος και IAM με τσιμεντοειδή μήτρα. Συνολικά συμμετείχαν έξι δοκίμια τα οποία ενισχύθηκαν με ινόπλεγμα IAM και υποβλήθηκαν σε δοκιμή Modify Beam Test. Η παράμετρος που διερευνήθηκε ήταν το μήκος συνάφειας και μεταβαλλόταν από δοκιμή σε δοκιμή. Οι στρώσεις ινοπλέγματος IAM που χρησιμοποιήθηκαν για την ενίσχυση κάθε δοκιμίου ήταν δύο. Επιπλέον, τα μήκη συνάφειας ήταν 100 mm, 200 mm και 300 mm. Μετά το τέλος των πειραμάτων πραγματοποιείται ανάλυση και σχολιασμός των αποτελεσμάτων. Τέλος, παρατίθενται τα συμπεράσματα και γίνεται αναφορά σε διάφορες προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

**Λέξεις Κλειδιά:** *Ινοπλέγματα σε ανόργανη μήτρα, σύνθετα υλικά, συνάφεια, οπλισμένο σκυρόδεμα, ανόργανη μήτρα, ΙΟΠ, μήκος συνάφειας.*

# STUDY OF BOND BETWEEN CONCRETE AND COMPOSITE MATERIALS WITH CEMENTITIOUS MATRIX

Konstantinos Karakitsos

University of Thessaly, Department of Civil Engineering, 2022

Supervising Professors: Koutas Lambros, Assistant Professors U.T.H., Papakonstantinou Christos, Associate Professor U.T.H.

## Abstract

In this thesis, the bond between concrete and composite materials with a cementitious matrix is studied. This composite material is the textile reinforced mortar (TRM), which is analyzed in detail. Then, there is a description of the experimental program carried out in the concrete laboratory of the civil engineering department, where experimentally investigated the bond between concrete and TRM with a cementitious matrix. A total of six specimens were involved which were reinforced with TRM fiber mesh and subjected to the Modify Beam Test. The parameter investigated was bond length and it varied from test to test. The layers of TRM fiber mesh used to reinforce each specimen. In addition, the bond lengths were 100 mm, 200 mm and 300 mm. After the end of experiments the results are analyzed and commented. Finally, the conclusions are listed and various suggestions for future research are mentioned.

**Keywords:** *Textile reinforced mortars, composite materials, bond, reinforced concrete, inorganic matrix, FRP, bond length.*

## Πίνακας Περιεχομένων

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1.....	1
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΙΝΟΠΛΕΓΜΑΤΑ ΣΕ ΑΝΟΡΓΑΝΗ ΜΗΤΡΑ.....	1
1.1 Εισαγωγή στις ενισχύσεις .....	1
1.2 Πρωτοποριακά σύνθετα υλικά.....	1
1.3 Αντικείμενο της παρούσας εργασίας.....	1
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2.....	2
2. ΙΝΟΠΛΕΓΜΑΤΑ ΑΝΟΡΓΑΝΗΣ ΜΗΤΡΑΣ.....	2
2.1 Θεωρητικό υπόβαθρο .....	2
2.2 Σύνθετα υλικά από ινοπλισμένα πολυμερή (ΙΟΠ).....	3
2.2.1 Τα πλεονεκτήματα των ινοπλισμένων πολυμερών (ΙΟΠ).....	4
2.2.2 Τα μειονεκτήματα των ινοπλισμένων πολυμερών (ΙΟΠ).....	4
2.3 Ινοπλέγματα σε Ανόργανη Μήτρα.....	5
2.3.1 Τα πλεονεκτήματα του ινοπλέγματος σε ανόργανη μήτρα (IAM).....	5
2.3.2 Ινοπλέγματα.....	6
2.3.3 Ανόργανη μήτρα.....	8
2.3.4 Συνάφεια μεταξύ πλέγματος και ανόργανης μήτρας.....	8
2.3.5 Περιγραφή του τρόπου εφαρμογής IAM.....	9
2.4 Δοκιμές συνάφειας μεταξύ IAM και σκυροδέματος.....	11
2.4.1 Μήκος συνάφειας του IAM.....	12
2.4.2 Αριθμός στρώσεων IAM.....	13
2.4.3 Προετοιμασία της επιφάνειας του σκυροδέματος.....	13
2.4.4 Μεταβολή της θερμοκρασίας.....	13
2.4.5 Modify Beam Test.....	14
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3.....	15
3. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ IAM.....	15
3.1 Εφαρμογή IAM σε ενίσχυση κτηρίου.....	15
3.2 Εφαρμογή IAM σε ενίσχυση τοιχοποιίας.....	16
3.3 Εφαρμογή IAM σε γέφυρες.....	16
3.4 Στοιχεία κάλυψης επιφανειών από IAM.....	17

3.5 Εφαρμογή IAM σε παραπετάσματα.....	17
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4.....	18
4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ.....	18
4.1 Δοκίμια: γεωμετρία και παράμετροι διερεύνησης.....	18
4.2 Δημιουργία σκυροδέματος.....	22
4.3 Κατασκευή καλουπιών.....	24
4.4 Προετοιμασία των δοκιμών.....	26
4.4.1 Μήκος συνάφειας.....	26
4.4.2 Εκτράχυνση της επιφάνειας των δοκιμών.....	26
4.4.3 Εξομάλυνση γωνιών κάθε δοκιμίου.....	27
4.5 Ενίσχυση δοκιμών.....	28
4.5.1 Προετοιμασία ινοπλεγμάτων IAM.....	28
4.5.2 Παρασκευή και μηχανικές ιδιότητες κονιάματος.....	29
4.5.3 Διαδικασία ενίσχυσης δοκιμών.....	30
4.6 Πειραματική διάταξη και διαδικασία εκτέλεσης του πειράματος.....	32
4.7 Πειραματικά Αποτελέσματα.....	35
4.8 Σχολιασμός Αποτελεσμάτων.....	47
4.8.1 Επιρροή του μήκους συνάφειας.....	47
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5.....	49
5. ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ.....	49
5.1 Συμπεράσματα.....	49
5.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα.....	49
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	51



## Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 4.1 Λεπτομέρειες των δοκιμίων, θλιπτική αντοχή σκυροδέματος και ιδιότητες του κονιάματος την ημέρα της πειραματικής δοκιμής α) και β).....	21
Πίνακας 4.2 Ιδιότητες μείγματος.....	22
Πίνακας 4.3 Θλιπτικές αντοχές σκυροδέματος για κάθε κύλινδρο.....	23
Πίνακας 4.4 Η θλιπτική αντοχή σκυροδέματος που προήλθε από τον υπολογισμό του μέσου όρου των θλιπτικών αντοχών των τριών κυλίνδρων.....	23
Πίνακας 4.5 Τυπική απόκλιση.....	23
Πίνακας 4.6 Τεχνικές προδιαγραφές του ινοπλέγματος.....	28
Πίνακας 4.7 Διαστάσεις ινοπλέγματος IAM για κάθε μήκος συνάφειας.....	29
Πίνακας 4.8 Ιδιότητες του κονιάματος (θλιπτική και καμπτική αντοχή).....	30
Πίνακας 4.9 Χαρακτηριστικά και μηχανικές ιδιότητες των δοκιμίων, του κονιάματος και του ινοπλέγματος IAM α) και β).....	35
Πίνακας 4.10 Πειραματικά αποτελέσματα α) και β).....	46

## Πίνακας Σχημάτων

<b>Σχήμα 1.1</b> Περιγραφή του σύνθετου υλικού ενίσχυσης που ονομάζεται Ινοπλέγματα σε Ανόργανη Μήτρα (IAM). (Κούτας, 2015).....	2
<b>Σχήμα 2.1</b> Υφάσματα ΙΟΠ συνεχών ινών από (α) υάλου, (β) άνθρακα και (γ) αραμιδίου.....	3
<b>Σχήμα 2.2</b> Ενίσχυση δομικών μελών με ελάσματα από σύνθετα υλικά από ινοπλισμένα πολυμερή.....	4
<b>Σχήμα 2.3</b> (α) ινόπλεγμα IAM και (β) ινόπλεγμα με κονίαμα.....	5
<b>Σχήμα 2.4</b> Πλέγματα ινών (α) δύο διευθύνσεων, (β) τεσσάρων διευθύνσεων (Μπουρνάς, 2008, Raouf et al, 2016).....	6
<b>Σχήμα 2.5</b> Διάφορα ινοπλέγματα: (α) πλέγμα ινών άνθρακα, (β) πλέγμα ινών υάλου, (γ) πλέγμα ινών PBO, (δ) πλέγμα ινών βασάλτη (Raouf et al, 2016, Koutas and Bournas, 2020).....	7
<b>Σχήμα 2.6</b> Ιδιότητες των πλεγμάτων με ίνες: α) ελαφρού άνθρακα, β) βαρύτρου άνθρακα, γ) υάλου, δ) βασάλτη (Koutas and Bournas, 2020).....	7
<b>Σχήμα 2.7</b> Κλώνος ινών με μερικώς εμποτισμένες ίνες (Bartos, 1987).....	9
<b>Σχήμα 2.8</b> Διαδικασία εφαρμογής ινοπλέγματος IAM σε διάφορα μέλη οπλισμένου σκυροδέματος: α) διαμόρφωση ινοπλέγματος IAM, β) παρασκευή κονιάματος, γ) τοποθέτηση στρώσης ινοπλέγματος, δ) εφαρμογή τελικής στρώσης κονιάματος, ε) τοποθέτηση στρώσης ινοπλέγματος.....	10
<b>Σχήμα 2.9</b> Διάταξη δοκιμών άμεσης συνάφειας (α) Single-lap και (β) Double-lap για τη μελέτη της συνάφειας μεταξύ IAM και υποστρώματος από σκυρόδεμα. (Koutas et al, 2019).....	11
<b>Σχήμα 2.10</b> Περιγραφή του μήκους συνάφειας (Lb). (Raouf, 2017).....	13
<b>Σχήμα 2.11</b> Πειραματική διάταξη της δοκιμής Modified beam test με το ινόπλεγμα IAM από κάτω από το block δοκιμίων: α) πλάγια όψη και β) όψη από της κάτω πλευρά του μπλοκ. (Calabrese et al, 2020).....	14
<b>Σχήμα 3.1</b> Ενίσχυση τοιχοποιίας με ινόπλεγμα IAM (Παπαντωνίου, 2007).....	16
<b>Σχήμα 3.2</b> Εφαρμογή στοιχείων κάλυψης από IAM στο πολυτεχνείο του Aachen (Παπαντωνίου, 2007).....	17
<b>Σχήμα 3.3</b> Παραπετάσματα από IAM (Παπαντωνίου, 2007).....	18
<b>Σχήμα 4.1</b> Πειραματική διάταξη.....	19
<b>Σχήμα 4.2</b> Διάγραμμα ελευθέρου σώματος ενός μπλοκ της δοκιμής MhBT.....	20
<b>Σχήμα 4.3</b> Γεωμετρία δοκιμίων: α) όψη, β) κάτοψη.....	20
<b>Σχήμα 4.4</b> Κουρμπαδόρος μαζί με ράβδους Φ8 και Φ6.....	24

<b>Σχήμα 4.5</b> Κατασκευή καλουπιών.....	25
<b>Σχήμα 4.6</b> Τα καλούπια μετά το τέλος της σκυροδέτησης.....	25
<b>Σχήμα 4.7</b> Δοκίμια μετά το ξεκαλούπωπα.....	26
<b>Σχήμα 4.8</b> Εκτράχυνση της επιφάνειας του δοκιμίου στο μήκος συνάφειάς του.....	27
<b>Σχήμα 4.9</b> Εξομάλυνση της γωνίας κάθε δοκιμίου.....	28
<b>Σχήμα 4.10</b> Πλέγμα ινών βασάλτη.....	29
<b>Σχήμα 4.11</b> Διαδικασία ενίσχυσης: α) τοποθέτηση 1 <sup>ης</sup> στρώσης κονιάματος, β) τοποθέτηση 1 <sup>ης</sup> στρώσης ινοπλέγματος, γ) τοποθέτηση 2 <sup>ης</sup> στρώσης κονιάματος, δ) τοποθέτηση 3 <sup>ης</sup> στρώσης ινοπλέγματος, ε) τοποθέτηση τελικής στρώσης κονιάματος.....	31
<b>Σχήμα 4.12</b> Η τελική μορφή όλων των ενισχυμένων δοκιμίων με δύο στρώσεις IAM για μήκη συνάφειας 300mm, 200mm και 100mm.....	31
<b>Σχήμα 4.13</b> Τοποθέτηση σφικτήρων στο μπλοκ αναφοράς.....	32
<b>Σχήμα 4.14</b> Διαμόρφωση οπών, όπου θα τοποθετηθούν τα LVDt's.....	33
<b>Σχήμα 4.15</b> Τοποθέτηση των LVDt's α) και β).....	33
<b>Σχήμα 4.16</b> Πειραματική διάταξη.....	34
<b>Σχήμα 4.17</b> Διάγραμμα ελευθέρου σώματος ενός μπλοκ της δοκιμής MhBT.....	36
<b>Σχήμα 4.18</b> Καμπύλες φορτίου – μετατόπισης για τα δοκίμια L100_2.....	37
<b>Σχήμα 4.19</b> Καμπύλες φορτίου – μετατόπισης για τα δοκίμια L200_2.....	38
<b>Σχήμα 4.20</b> Καμπύλες φορτίου – μετατόπισης για τα δοκίμια L300_2.....	38
<b>Σχήμα 4.21</b> Καμπύλες φορτίου – μετατόπισης για όλα τα δοκίμια L100_2, L200_2 και L300_2.....	39
<b>Σχήμα 4.22</b> Διαστρωματική αποκόλληση μεταξύ πλέγματος και κονιάματος για το δοκίμιο L100_2_1 α) και β).....	40
<b>Σχήμα 4.23</b> Διαστρωματική αποκόλληση μεταξύ πλέγματος και κονιάματος για το δοκίμιο L100_2_2 α) και β).....	41
<b>Σχήμα 4.24</b> Θραύση ινών για το δοκίμιο L200_2_1.....	42
<b>Σχήμα 4.25</b> Θραύση ινών για το δοκίμιο L200_2_2 α) και β).....	43
<b>Σχήμα 4.26</b> Θραύση ινών για το δοκίμιο L300_2_1 α) και β).....	44
<b>Σχήμα 4.27</b> Διαστρωματική αποκόλληση μεταξύ πλέγματος και κονιάματος για το δοκίμιο L300_2_2 α) και β).....	45
<b>Σχήμα 4.28</b> Διάγραμμα φορτίου – μήκους συνάφειας.....	47
<b>Σχήμα 4.29</b> Μεταβολή της διατμητική τάσης του ινοπλέγματος με το μήκος συνάφειας....	48
<b>Σχήμα 4.30</b> Μεταβολή της ορθής τάσης του ινοπλέγματος με το μήκος συνάφειας.....	48

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΙΝΟΠΛΕΓΜΑΤΑ ΣΕ ΑΝΟΡΓΑΝΗ ΜΗΤΡΑ

### 1.1 Εισαγωγή στις ενισχύσεις

Την τελευταία δεκαετία παρατηρείται έντονη δραστηριότητα στις ενισχύσεις κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος με ινοπλέγματα ανόργανης μήτρας (IAM). Αυτή η δραστηριότητα παρατηρείται σε όλες τις περιοχές σεισμογενής και μη. Ο λόγος για τον οποίο οι μηχανικοί και οι ερευνητές οδηγούνται στην ενίσχυση των κατασκευών και δομικών μελών οπλισμένου σκυροδέματος είναι κυρίως εξαιτίας της παλαιώσης των κατασκευών, της ανεπαρκούς έως κακής συντήρησης καθώς και σε παράγοντες που προέρχονται από το περιβάλλον. Σε πολλές περιπτώσεις έχει παρατηρηθεί ενίσχυση των κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος, έτσι ώστε να συμμορφώνονται με τις οδηγίες του Ευρωκώδικα.

### 1.2 Πρωτοποριακά σύνθετα υλικά

Την τελευταία δεκαετία σύνθετα υλικά έχουν χρησιμοποιηθεί για την ενίσχυση δομικών μελών οπλισμένου σκυροδέματος. Πολύ σημαντικό είναι ότι πολύ συχνά προτείνονται νέες τεχνολογικά προηγμένες λύσεις για καλύτερη απόδοση των σύνθετων υλικών ενίσχυσης αλλά και μείωση του κόστους κατασκευής.

Παλαιότερα για την αποκατάσταση και την ενίσχυση των κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος γινόταν χρήση απλών, ευρέως γνωστών τεχνικών. Αυτές οι τεχνικές που χρησιμοποιούνταν για ενίσχυση κατασκευών καθώς και δομικών μελών οπλισμένου σκυροδέματος είχαν ως βάση ένα πλέγμα, το οποίο διέθετε χαλύβδινο οπλισμό. Πολλές φορές χρησιμοποιούσαν μανδύες οπλισμένου σκυροδέματος ή απλού κονιάματος. Με το πέρασμα των ετών αυτές οι τεχνικές αντικαταστάθηκαν από πιο σύγχρονες, χρησιμοποιώντας νέα σύνθετα υλικά. Αυτά τα σύνθετα υλικά έχουν ως βάση κονιάματα οπλισμένα με ίνες υάλου, χάλυβα ή πολυβινυλίου. Τις τελευταίες δεκαετίες κυριαρχούν τα σύνθετα υλικά από ινοπλισμένα πολυμερή (ΙΟΠ ή κατά τον αγγλικό όρο FRP – fiber reinforced polymers), καθώς και σύνθετα υλικά από ινοπλέγματα σε ανόργανη μήτρα (IAM ή κατά τον αγγλικό TRM - Textile Reinforced Mortars) τα οποία εφαρμόζονται εξωτερικά στα δομικά μέλη οπλισμένου σκυροδέματος.

### 1.3 Αντικείμενο της παρούσας εργασίας

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της συνάφειας μεταξύ σκυροδέματος και σύνθετων υλικών με τσιμεντοειδή μήτρα. Τα σύνθετα υλικά με τσιμεντοειδή μήτρα είναι τα ινοπλέγματα σε ανόργανη μήτρα (IAM). Όπως θα περιγραφεί αναλυτικά στις επόμενες ενότητες τα IAM είναι ένα σύγχρονο, πολύ καλά μελετημένο σύνθετο υλικό που χρησιμοποιείται σε έργα του πολιτικού μηχανικού με απώτερο στόχο την

ενίσχυση υφιστάμενων δομικών στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται η περιγραφή του σύνθετου υλικού ενίσχυσης που ονομάζεται Ινοπλέγματα σε Ανόργανη Μήτρα (IAM), (Κούτας, 2015).



**Σχήμα 1.1** Περιγραφή του σύνθετου υλικού ενίσχυσης που ονομάζεται Ινοπλέγματα σε Ανόργανη Μήτρα (IAM). (Κούτας, 2015)

Το θέμα αυτής της εργασίας είναι εκτενής μελέτη της συνάφειας μεταξύ σκυροδέματος και IAM εστιάζοντας στους τρόπους αστοχίας του IAM, λαμβάνοντας υπόψιν διαφορετικά μήκη συνάφειας 100mm – 300mm. Επιπρόσθετα, τα ινοπλέγματα σε ανόργανη μήτρα (IAM ή TRM – αγγλικός όρος), που χρησιμοποιούνται για την ενίσχυση συντίθενται από ίνες βασάλτη.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### 2. ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ ΣΕ ΕΝΙΣΧΥΣΕΙΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

#### 2.1 Θεωρητικό υπόβαθρο

Η ολοένα και αυξανόμενη ρυθμική ζωή και η ραγδαία τεχνολογική ανάπτυξη έχουν οδηγήσει στη δημιουργία σύνθετων υλικών με σκοπό την ενίσχυση των κατασκευών.

Αρχικά, αναπτύχθηκε ένα σύνθετο υλικό το οποίο είχε ως βάση τη ρητίνη και ονομάστηκε σύνθετο υλικό από ινοπλισμένα πολυμερή (ΙΟΠ). Εφαρμόζεται στο εξωτερικό των δομικών στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος. Όταν δημιουργήθηκε αυτό το σύνθετο υλικό είχε μεγάλο κόστος και η χρήση του ήταν περιορισμένη. Ο κυριότερος λόγος δημιουργίας του ήταν οι επιπτώσεις των σεισμικών δράσεων στις κατασκευές. Με αυτό το σύνθετο υλικό δόθηκε μία λύση στην επισκευή των δομικών στοιχείων που είχαν πληγεί από σεισμούς ή διάφορες καταπονήσεις.

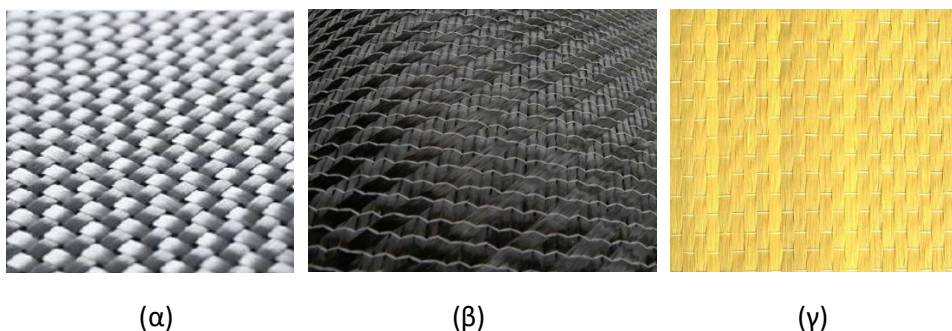
Όμως, όπως αναφέρθηκε η τεχνολογία συνεχώς εξελίσσεται και έτσι εφευρέθηκε ένα σύνθετο υλικό το οποίο αντικατέστησε την ρητίνη, που ήταν το συνδετικό υλικό μεταξύ των

ινών των ινοπλισμένων πολυμερών (ΙΟΠ), με υλικά από ανόργανη μήτρα. Τα σύνθετα αυτά υλικά ονομάστηκαν ινοπλέγματα σε ανόργανη μήτρα (IAM).

Παρακάτω παρουσιάζονται λεπτομερώς τα προαναφερόμενα σύνθετα υλικά και γίνεται η σύγκριση μεταξύ τους.

## 2.2 Σύνθετα υλικά από ινοπλισμένα πολυμερή (ΙΟΠ)

Τα ινοπλισμένα πολυμερή (ΙΟΠ ή κατά τον αγγλικό όρο FRP – Fiber Reinforced Polymers) είναι σύνθετα υλικά, τα οποία συντίθενται από ίνες, υάλου, αραμιδίου ή άνθρακα, με πολύ υψηλή αντοχή στον εφελκυσμό. Η μήτρα τους, δηλαδή το συνδετικό υλικό μεταξύ των ινών, είναι η ρητίνη. Επιπλέον, έχουν τη μορφή υφασμάτων ή ελασμάτων. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζονται υφάσματα ΙΟΠ (FRP κατά τον αγγλικό όρο) αποτελούμενα από ίνες (α) υάλου, (β) άνθρακα και (γ) αραμιδίου.



**Σχήμα 2.1** Υφάσματα ΙΟΠ συνεχών ινών από (α) υάλου, (β) άνθρακα και (γ) αραμιδίου.

([https://www.alibaba.com/product-detail/Zccy-frp-glass-fiber-E-type\\_60535707110.html](https://www.alibaba.com/product-detail/Zccy-frp-glass-fiber-E-type_60535707110.html)),  
(<https://www.ruregold.com/product/c-quadriwrap/>) (<https://ctech-llc.com/en/products/aramid-fiber>)

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται ο τρόπος ενίσχυσης δομικών στοιχείων με εξωτερικά επικολλούμενα υφάσματα από σύνθετα υλικά από ινοπλισμένα πολυμερή (ΙΟΠ).



**Σχήμα 2.2** Ενίσχυση δομικών μελών με ελάσματα από σύνθετα υλικά από ινοπλισμένα πολυμερή.

(<https://blog.strongtie.com/five-frp-advantages-contractors-structure-owners/>),

(<https://wallingford.com.my/index.php/training/frp-shear-strengthening/>)

### **2.2.1 Τα πλεονεκτήματα των ινοπλισμένων πολυμερών (ΙΟΠ)**

Σύμφωνα με τους Triantafyllou et al, 2006, η ενίσχυση με σύνθετα υλικά από ινοπλισμένα πολυμερή (ΙΟΠ) παρουσιάζει τα εξής πλεονεκτήματα:

- Υψηλή εφελκυστική αντοχή
- Γρήγορη εφαρμογή
- Χαμηλό βάρος
- Ανθεκτικότητα στις περιβαλλοντικές συνθήκες
- Ανθεκτικότητα στον χρόνο

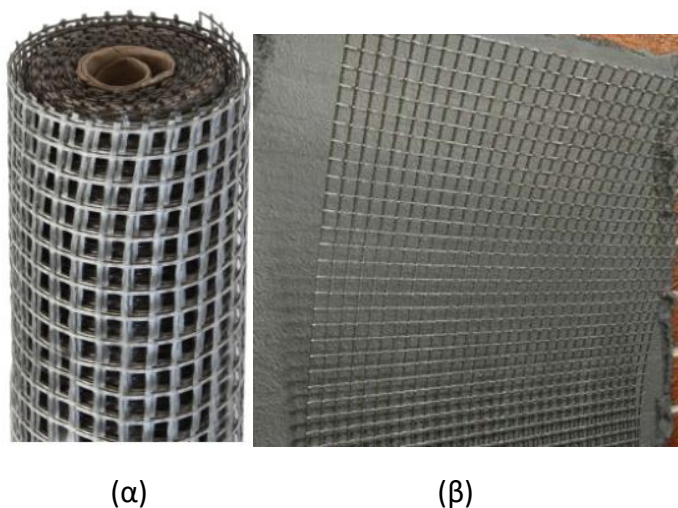
### **2.2.2 Τα μειονεκτήματα των ινοπλισμένων πολυμερών (ΙΟΠ)**

Σύμφωνα με τους Tetta et al, 2015 και τους Τριανταφύλλου et al, 2006, Μπουρνάς, 2008, Κούτας, 2015 το αξιοσημείωτο μειονέκτημα των ΙΟΠ εντοπίζεται στη μήτρα του σύνθετου υλικού, δηλαδή στην ρητίνη. Υπενθυμίζεται ότι η ρητίνη αποτελεί το συνδετικό υλικό μεταξύ των συνεχών ινών. Ειδικότερα, τα μειονεκτήματα της ενίσχυσης με σύνθετα υλικά από ινοπλισμένα πολυμερή συγκεντρώνονται παρακάτω:

- Αδυναμία εφαρμογής σε υγρές επιφάνειες
- Μεγάλο κόστος
- Δυσλειτουργία σε υψηλές θερμοκρασίες
- Αδυναμία καταγραφής των βλαβών σε περιπτώσεις σεισμικής δραστηριότητας
- Ανεπανόρθωτες βλάβες στον ανθρώπινο οργανισμό σε περιπτώσεις επαφής με το δέρμα

## 2.3 Ινοπλέγματα σε Ανόργανη Μήτρα

Σύμφωνα με τον Κούτας, 2015 τα τελευταία χρόνια η επιστημονική κοινότητα – ερευνητές, στην προσπάθεια τους να εξαλείψουν τα προβλήματα που προκαλούν οι ρητίνες, εφεύραν ένα νέο σύνθετο υλικό, τα ινοπλέγματα σε ανόργανη μήτρα (IAM ή κατά τον αγγλικό όρο Textile Reinforced Mortars – TRM). Το IAM είναι ένα νέο σύνθετο υλικό, το οποίο χρησιμοποιείται για ενισχύσεις των κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος. Αποτελείται από δύο υλικά και συγκεκριμένα από το ινόπλεγμα και από το κονίαμα ανόργανης σύστασης, δηλαδή τη μήτρα, η οποία στην παρούσα διπλωματική εργασία είναι το τσιμέντο. Σύμφωνα με τους Τριανταφύλλου et al, 2006, Κούτας, 2015 και Μπουρνάς, 2008, τα ινοπλέγματα διαθέτουν βροχίδες. Αποτελούνται από ίνες, σε μία ή περισσότερες διευθύνσεις, επιτυγχάνοντας εξαιρετική συνάφεια μεταξύ ινοπλέγματος και μήτρας (τσιμέντο). Η συνάφεια γίνεται με μηχανική εμπλοκή. Στο σχήμα 2.4 (α) παρουσιάζεται το ινόπλεγμα και στο σχήμα 2.3 (β) το ινόπλεγμα με το κονίαμα (τσιμέντο) με μηχανική εμπλοκή.



**Σχήμα 2.3** (α) ινόπλεγμα IAM και (β) ινόπλεγμα με κονίαμα

(<https://grc.sika.com/el/construction/domitikh-enisxysh/domhtikh-enisxysh-toixopoiias/sikawrap-350-g-grid.html>), ([https://grc.sika.com/content/dam/dms/gr01/y/HE\\_00182\\_TRM\\_System\\_gr.pdf](https://grc.sika.com/content/dam/dms/gr01/y/HE_00182_TRM_System_gr.pdf))

### **2.3.1 Τα πλεονεκτήματα του ινοπλέγματος σε ανόργανη μήτρα (IAM)**

Σύμφωνα με τους Τριανταφύλλου Χ. Αθανάσιος και Μπουρνάς, 2006, Κούτας, 2015, η ενίσχυση δομικών στοιχείων με ινοπλέγματα ανόργανης μήτρας έχει πολλά πλεονεκτήματα. Παρακάτω παρουσιάζονται τα πλεονεκτήματα της χρήσης IAM:

- Δυνατότητα εφαρμογής του IAM σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή και σε οποιαδήποτε περιβαλλοντική συνθήκη
- Ευκολία και ταχύτητα στην εφαρμογή
- Υψηλή εφελκυστική αντοχή
- Υψηλή αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες

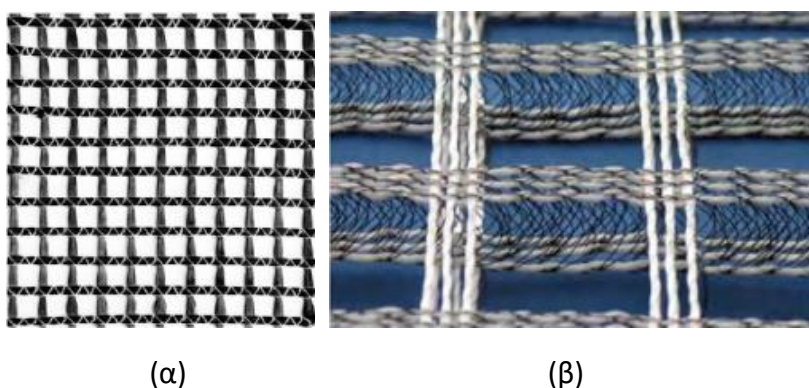


- Εξαιρετική συμπεριφορά σε περιβάλλον με υγρασία.
- Καλή εφαρμογή σε υγρές επιφάνειες.

Όπότε, εύκολά προκύπτει το συμπέρασμα ότι η χρήση IAM διορθώνει μερικά προβλήματα που συνδέονται με τη χρήση ΙΟΠ.

### 2.3.2 Ινοπλέγματα

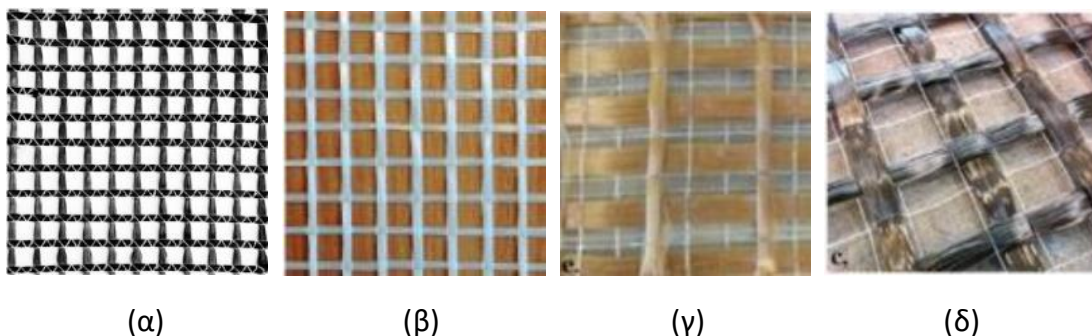
Όπως αναφέρθηκε παραπάνω τα ινοπλέγματα είναι το ένα από τα δύο επιμέρους υλικά που συνθέτουν το σύνθετο υλικό IAM. Τα ινοπλέγματα αποτελούν τον οπλισμό του σύνθετου υλικού (IAM). Επίσης, σύμφωνα με τους Τριανταφύλλου et al, 2006, Κούτας, 2015, Μπουρνάς, 2008 τα ινοπλέγματα έχουν την μορφή πλέγματος με βροχίδες. Τα πλέγματα περιέχουν κλώνους ινών, οι οποίοι είναι ευθύγραμμοι σε δύο ή περισσότερες διευθύνσεις (Σχήμα 2.5). Επιπλέον, μεταξύ των κλώνων υπάρχουν κενά. Έτσι, το κονίαμα (τσιμέντο) μπορεί να διεισδύσει ανάμεσα επιτυγχάνοντας μηχανική εμπλοκή.



**Σχήμα 2.4** Πλέγματα ινών (α) δύο διευθύνσεων, (β) τεσσάρων διευθύνσεων (Μπουρνάς, 2008, Raof et al, 2016)

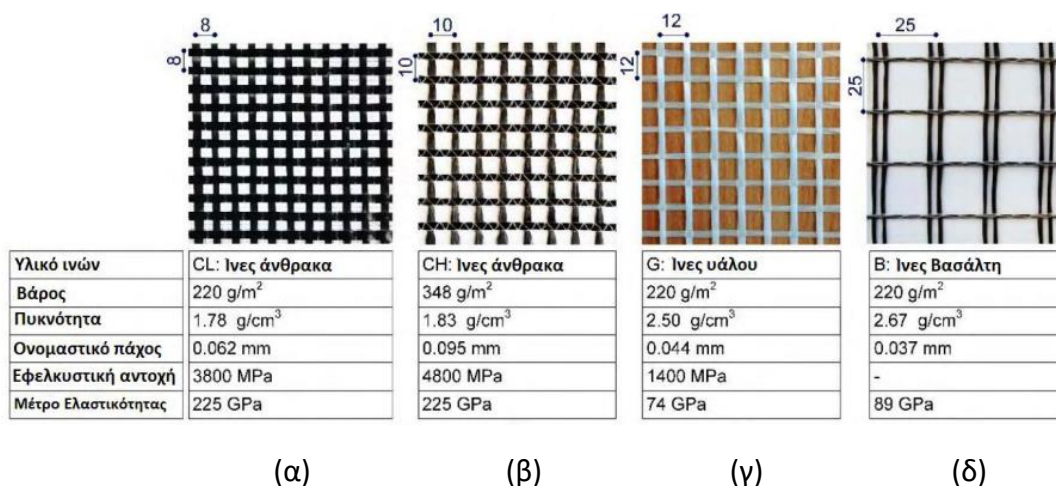
Στο σημείο αυτό σύμφωνα με τον Κούτα, 2015 είναι απαραίτητο να αναφερθεί από τι υλικό είναι κατασκευασμένες οι ίνες του ινοπλέγματος. Το υλικό των ινών αποτελείται από ίνες άνθρακα, υάλου ή βασάλτη. Οι ίνες άνθρακα κερδίζουν τον ανταγωνισμό έναντι των υπολοίπων, όσον αφορά τα μηχανικά χαρακτηριστικά. Επιπρόσθετα, είναι εξαιρετικά υψηλής αντοχής (>3000 MPa), έναντι των ινών υάλου και βασάλτη (>1500 MPa). Επιπλέον, οι ίνες άνθρακα έχουν και το υψηλότερο μέτρο ελαστικότητας (230 GPa), σε σύγκριση με τις ίνες υάλου και βασάλτη με 70 GPa και 80 GPa, αντίστοιχα. Αξιοσημείωτο είναι, όμως, το υψηλό κόστος των ινών άνθρακα, κάτι το οποίο αποτελεί ανασταλτικό παράγοντα στο να επιλεγούν. Στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία επιλέχθηκαν ίνες βασάλτη. Στο σχήμα 2.5 παρουσιάζονται ινοπλέγματα ΡΒΟ, χάλυβα, υάλου, άνθρακα, καθώς και ινών βασάλτη και στο σχήμα 2.6 παρουσιάζονται οι ιδιότητες των ινοπλεγμάτων σύμφωνα με τις τεχνικές

προδιαγραφές των κατασκευαστών, όπως το βάρος των ινοπλεγμάτων, το ονομαστικό πάχος, η πυκνότητα, η εφελκυστική αντοχή και το μέτρο ελαστικότητας.



**Σχήμα 2.5** Διάφορα ινοπλέγματα: (α) πλέγμα ινών άνθρακα, (β) πλέγμα ινών υάλου, (γ) πλέγμα ινών PBO, (δ) πλέγμα ινών βασάλτη (Raouf et al, 2016, Koutas and Bournas, 2020)

(<https://blog.msc-sahc.org/experimental-characterization-of-steel-and-basalt-fiber-reinforcements-for-masonry-walls/>)



**Σχήμα 2.6** Ιδιότητες των πλεγμάτων με ίνες: α) ελαφρού άνθρακα, β) βαρύτερου άνθρακα, γ) υάλου, δ) βασάλτη (Koutas and Bournas, 2020).

Επιπρόσθετα, σύμφωνα με τον Κούτα, 2015 ορισμένα από τα πιο βασικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά ενός ινοπλέγματος αναφέρονται παρακάτω:

- Το μέγεθος το κενών που είναι η απόσταση μεταξύ δυο κλώνων ινών ανά διεύθυνση.
- Το επιφανειακό βάρος του πλέγματος ινών, το οποίο εκφράζεται σε g/m<sup>2</sup> και ορίζει την συνολική ποσότητα των ινών ανά διεύθυνση και ανά μέτρο πλάτους του πλέγματος.
- Το ονομαστικό πάχος του πλέγματος ινών ανά διεύθυνση, το οποίο υπολογίζεται πολύ εύκολα έχοντας ως δεδομένα την κατανομή της συνολικής ποσότητας ινών ανά διεύθυνση και το επιφανειακό βάρος του πλέγματος ινών, αλλά και την

πυκνότητα μιας ίνας, η οποία διαφέρει από υλικό σε υλικό. Οπότε, ο υπολογισμός του ονομαστικού πάχους ορίζεται ως το πηλίκο της επιφανειακής μάζας του πλέγματος προς την πυκνότητα της ίνας.

### **2.3.3 Ανόργανη μήτρα**

Σύμφωνα με τους Μπουρνά, 2008 και Κούτα, 2015, η ανόργανη μήτρα είναι το συνδεδετικό υλικό μεταξύ του ινοπλέγματος και της επιφάνειας που προορίζεται για ενίσχυση.

Παρακάτω αναφέρονται ορισμένα από τα πλεονεκτήματα της ανόργανης μήτρας:

- Προστασία του ινοπλέγματος από τις περιβαλλοντικές συνθήκες.
- Αύξηση της θλιπτικής και διατμητικής αντοχής του IAM.

Παρακάτω αναφέρονται περιεκτικά ορισμένες βασικές προϋποθέσεις που πρέπει να πληροί η ανόργανη μήτρα:

- Ικανότητα διείσδυσης στο ινόπλεγμα
- Ανθεκτικά στις μεταβολές του περιβάλλοντος
- Υψηλή εργασιμότητα
- Ικανοποιητική διατμητική αντοχή

Επιπλέον, στη παρούσα διπλωματική εργασία επιλέχθηκε ως ανόργανη μήτρα το κονίαμα με βάση το τοιμένο.

### **2.3.4 Συνάφεια μεταξύ πλέγματος και ανόργανης μήτρας**

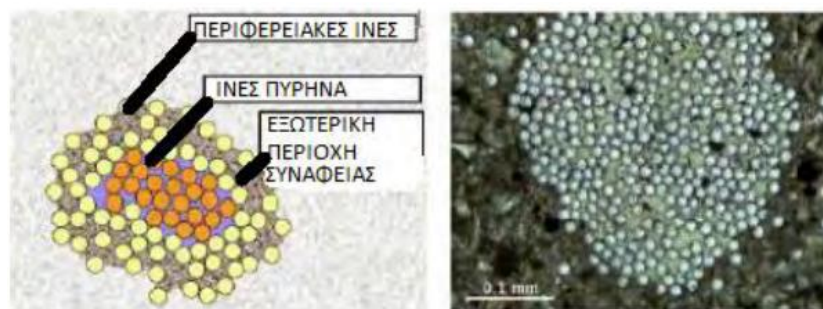
Στο σημείο αυτό θα ήταν παράλειψη αν δεν γινόταν αναφορά στη συνάφεια μεταξύ πλέγματος και ανόργανης μήτρας. Η συνάφεια μεταξύ πλέγματος και ανόργανης μήτρας καθορίζει τη μηχανική συμπεριφορά του IAM (Μπουρνάς, 2008).

Όσον αφορά τους κλώνους των IAM, κάθε κλώνος διαθέτει πολλές ίνες. Οι ίνες αυτές ονομάζονται περιφερειακές ίνες ή ίνες πυρήνα αναλόγως την περίπτωση. Οι περιφερειακές ίνες χαρακτηρίζονται από την ικανότητά τους να αναπτύσσουν πολύ καλή συνάφεια με την ανόργανη μήτρα και έτσι δεν επιτρέπεται η ολίσθηση των ινών. Αντίθετα οι ίνες του πυρήνα παρουσιάζουν κακή συνάφεια με την ανόργανη μήτρα επιτρέποντας την ολίσθηση των ινών.

Προκειμένου να αυξηθεί η συνάφεια μεταξύ IAM και ανόργανης μήτρας είναι πολύ σημαντικό να προεμποτιστούν οι κλώνοι του πλέγματος με πολυμερή. Ένα τέτοιο πολυμερές είναι η ρητίνη η οποία έχει την ικανότητα να διεισδύει μέσα από τους βρόγχους, δηλαδή τα κενά μεταξύ ινών και μήτρας, με μηχανική εμπλοκή. Έτσι οι εσωτερικές ίνες δεν ολισθαίνουν,

αυξάνεται η διατμητική τάση συνάφειας μεταξύ κονιάματος και υποστρώματος και αυξάνεται η εφελκυστική αντοχή του κονιάματος.

Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί ότι ο Bartos το 1987, χρησιμοποίησε ένα σύνθετο μηχανισμό συνάφειας μεταξύ των ινών και της ανόργανης μήτρας. Αυτός ο μηχανισμός επιτυγχάνεται όταν παρατηρείται τηλεσκοπικά ολίσθηση μεταξύ ινών και κλώνου κατά την αστοχία. Δηλαδή, οι περιφερειακές ίνες αστοχούν και οι εσωτερικές ίνες ολισθαίνουν πολύ ελεγχόμενα, απορροφώντας ενέργεια (Μπουρνάς, 2008).



**Σχήμα 2.7** Κλώνος ινών με μερικώς εμποτισμένες ίνες (Bartos, 1987).

### **2.3.5 Περιγραφή του τρόπου εφαρμογής IAM**

Παρακάτω συγκεντρώνονται τα βήματα για την εφαρμογή του σύνθετου υλικού IAM:

- Προετοιμασία της επιφάνειας
- Εφαρμογή της πρώτης στρώσης κονιάματος στο μήκος συνάφειας στην επιφάνεια του σκυροδέματος
- Τοποθέτηση της πρώτης στρώσης του ινοπλέγματος. Αυτή η διαδικασία σταματάει όταν εφαρμοστούν όλες οι στρώσεις του ινοπλέγματος
- Επικάλυψη της τελικής στρώσης του κονιάματος.

Στη συνέχεια, παρουσιάζεται η ενίσχυση διάφορων δομικών μελών με IAM.



α)



β)



γ)



δ)



ε)

**Σχήμα 2.8** Διαδικασία εφαρμογής ινοπλέγματος IAM σε διάφορα μέλη οπλισμένου σκυροδέματος: α) διαμόρφωση ινοπλέγματος IAM, β) παρασκευή κονιάματος, γ) τοποθέτηση στρώσης ινοπλέγματος, δ) εφαρμογή τελικής στρώσης κονιάματος, ε) τοποθέτηση στρώσης ινοπλέγματος

(<https://www.sika.com/content/dam/dms/corporate/0/glo-Sika-CarboDur-Grid-patented-carbon-grid-reinforcement-system.pdf>), (<https://www.sika.com/en/construction/structural-strengthening/fiber-reinforced-cementitious-matrix.html>)

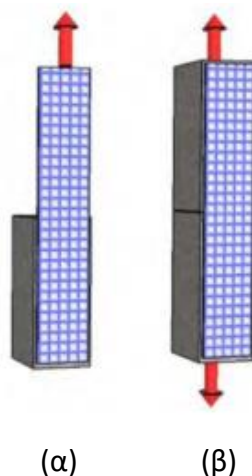
## 2.4 Δοκιμές συνάφειας μεταξύ IAM και σκυροδέματος

Προκειμένου να γίνει μία σωστή μελέτη πάνω στην συνάφεια μεταξύ IAM και σκυροδέματος έχουν πραγματοποιηθεί πολλές πειραματικές δοκιμές πάνω σε αυτό. Είναι αναγκαίο να πραγματοποιούνται πειράματα πάνω στο σύνθετο αυτό υλικό, έτσι ώστε να γίνεται κατανοητή η συμπεριφορά του ινοπλέγματος IAM όταν εφαρμόζεται στο σκυρόδεμα. Με αυτό τον τρόπο η λειτουργία του IAM θα γίνεται όλο και πιο κατανοητή και έτσι η ενίσχυση δομικών μελών οπλισμένου σκυροδέματος θα είναι ακόμα πιο αποτελεσματική.

Στα πειραματικά προγράμματα της βιβλιογραφίας όπου μελετάται η συνάφεια του IAM με το σκυρόδεμα έχουν μελετηθεί οι παρακάτω παράμετροι:

- Το μήκος συνάφειας
- Ο αριθμός των στρώσεων IAM
- Η προετοιμασία του υποστρώματος
- Το υλικό της ανόργανης μήτρας
- Το υλικό των ινών του πλέγματος IAM

Τα περισσότερα πειραματικά προγράμματα πραγματοποιούνται με άμεσες δοκιμές διάτμησης διάταξης Single – Lap και Double – Lap, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.1.



**Σχήμα 2.9** Διάταξη δοκιμών άμεσης συνάφειας (α) Single-lap και (β) Double-lap για τη μελέτη της συνάφειας μεταξύ IAM και υποστρώματος από σκυρόδεμα. (Koutas et al, 2019)

Πιο αναλυτικά, σύμφωνα με τους Koutas et al, 2019, Sneed et al, 2014, D'Antino et al, 2015, Sneed et al, 2015 στις δοκιμές διάτμησης Single – Lap, μία στρώση του σύνθετου υλικού IAM είναι κολλημένη στην μία πλευρά μιας περιοχής του σκυροδέματος και η άλλη πλευρά του IAM, δηλαδή η ελεύθερη εφελκύεται. Στις δοκιμές διάτμησης Double – Lap, μία στρώση του σύνθετου υλικού IAM είναι κολλημένη με δύο πρίσματα σκυροδέματος και εφελκύνονται μέχρι την αστοχία του σύνθετου υλικού IAM (Ortlepp et al, 2006, D'Ambrisi et al, 2012, Awani et al, 2015, Raouf et al, 2016, Raouf and Bournas 2017c).

Μετά το πέρας των δοκιμών Single – Lap και Double – Lap, ο Sneed et al, 2015 παρατήρησε ότι οι δοκιμές αυτές είχαν ομοιότητες ως προς τα αποτελέσματα. Δύο σημαντικές ομοιότητες που παρατηρήθηκαν ήταν ότι τα διαγράμματα φορτίου – μετατόπισης είχαν την ίδια μορφή και ότι οι τρόποι αστοχίας ήταν ίδιοι. Από την άλλη πλευρά, όμως, παρατηρήθηκαν και ορισμένα μειονεκτήματα της δοκιμής διάτμησης Single – Lap σε σχέση με τη Double – Lap. Τα σημαντικότερα από αυτά είναι τα εξής:

- Θραύση του ινοπλέγματος IAM εκτός του μήκους συνάφειας.
- Ανακρίβεια αποτελεσμάτων.

Έπειτα, παρατίθενται οι τρόποι αστοχίας που έχουν παρατηρηθεί σε δοκιμές συνάφειας:

- Αποκόλληση του IAM στη διεπιφάνεια σκυροδέματος – κονιάματος
- Ολίσθηση των ινών
- Θραύση ινών εκτός του μήκους συνάφειας
- Θραύση ινών εντός του μήκους συνάφειας

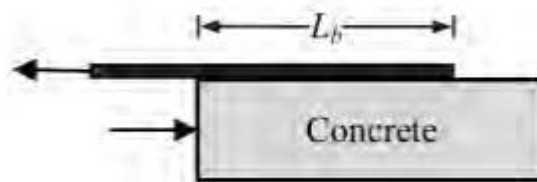
Υπάρχουν πολλοί παράμετροι που λαμβάνονται υπόψιν για τη μελέτη της συνάφειας μεταξύ IAM και υποστρώματος σκυροδέματος. Ορισμένες από αυτές συνοψίζονται παρακάτω:

- Το μήκος συνάφειας του IAM
- Η προετοιμασία της επιφάνειας του σκυροδέματος
- Ο αριθμός των στρώσεων των IAM
- Η μεταβολή της θερμοκρασίας

Στη συνέχεια, γίνεται μία εκτενής περιγραφή των προαναφερόμενων παραμέτρων.

#### **2.4.1 Μήκος συνάφειας του IAM**

Το μήκος συνάφειας είναι μία πολύ σημαντική παράμετρος που πρωταγωνιστεί στις περισσότερες μελέτες (D'Antino et al, 2014, 2015, Sneed et al, 2014, Awani et al, 2015, Ombres, 2015a, Sneed et al, 2015, Raouf et al, 2016). Το συμπέρασμα που προέκυψε από αυτές τις μελέτες ήταν ότι αυξάνοντας το μήκος συνάφειας, το φορτίο αστοχίας και η αντοχή συνάφειας αυξάνονται μη αναλογικά. Όμως, μετά από ένα μήκος συνάφειας η αντοχή συνάφειας παρουσίαζε πολύ μικρή αύξηση. Σε αυτήν την περίπτωση το μήκος συνάφειας ονομάζεται ενεργό μήκος συνάφειας (L<sub>eff</sub>). (Koutas et al, 2019, Raouf, 2017). Παρακάτω στο σχήμα 3.2 περιγράφεται το μήκος συνάφειας.



**Σχήμα 2.10** Περιγραφή του μήκους συνάφειας ( $L_b$ ). (Raouf, 2017)

#### **2.4.2 Αριθμός στρώσεων IAM**

Σύμφωνα με τους Ombres, 2015a, Raouf et al, 2016, βγήκε το συμπέρασμα ότι αυξάνοντας τον αριθμό των στρώσεων IAM, αυξάνεται η ικανότητα συνάφειας. Επίσης, με την αύξηση των αριθμών των στρώσεων IAM ο τρόπος αστοχίας μεταβάλλεται. Δηλαδή, από ολίσθηση των ινών παρατηρείται διαστρωματική αποκόλληση μεταξύ σκυροδέματος και κονιάματος.

#### **2.4.3 Προετοιμασία της επιφάνειας του σκυροδέματος**

Ο D'Antino et al, 2015 έκανε αρκετές δοκιμές με δοκίμια που είχαν υποστεί επεξεργασία στην επιφάνεια τους και με δοκίμια που δεν είχαν υποστεί καμία επεξεργασία. Μετά το πέρας των δοκιμών κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η προετοιμασία της επιφάνειας σκυροδέματος δεν είναι μία παράμετρος που θα παίξει καθοριστικό ρόλο στη συμπεριφορά του IAM και στον τρόπο αστοχίας, καθώς δεν άλλαξε τον τρόπο αστοχίας.

#### **2.4.4 Μεταβολή της θερμοκρασίας**

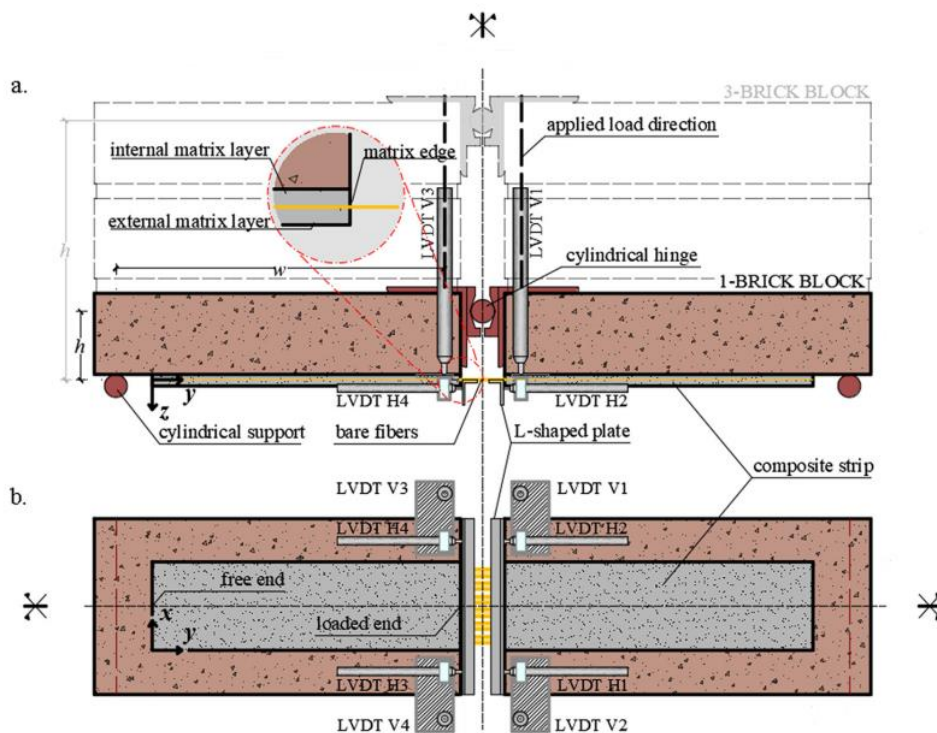
Οι Raouf, 2017 και Bournas, 2017 εκτέλεσαν πείραμα δοκιμής διάτμησης διάταξης Double – Lap και ήθελαν να μελετήσουν την παράμετρο της μεταβολής της θερμοκρασίας και να δουν πως θα ανταποκριθεί το ινόπλεγμα IAM, δηλαδή τη συνάφεια μεταξύ IAM και σκυροδέματος. Έτσι, εκτέλεσαν πειράματα υποβάλλοντας τα δοκίμια που είχαν ενισχυθεί με ινόπλεγμα IAM σε θερμοκρασίες που ολοένα και αυξάνονταν. Η πρώτη δοκιμή πραγματοποιήθηκε για θερμοκρασία 200 °C και από δοκιμή σε δοκιμή προσπαθούσαν να αυξάνουν τη θερμοκρασία κατά 100 °C, φτάνοντας, λοιπόν, στην τελευταία πειραματική δοκιμή με θερμοκρασία 500 °C. Μετά το πέρας των πειραματικών δοκιμών παρατήρησαν και κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι το ινόπλεγμα IAM παρουσιάζει μία πάρα πολύ καλή συνάφεια σε υψηλές θερμοκρασίες, κάτι το οποίο το καθιστά μία εξαιρετική λύση για ενισχύσεις κατασκευών.



### 2.4.5 Modify Beam Test

Επιπρόσθετα, για τη μελέτη της συνάφειας μεταξύ σκυροδέματος και ΙΑΜ, εφαρμόζονται έμμεσες δοκιμές που ονομάζονται Modify Beam Test (MhBT). Σύμφωνα με τον Falore et al, 2018 η διαφορά των δοκιμών Modify Beam Test σε σχέση με τις άμεσες δοκιμές διάτμησης Single – Lap και Double – Lap είναι ότι η δοκιμή Modify Beam Test είναι πιο σύνθετη. Για αυτό το λόγο ανταποκρίνονται καλύτερα σε πραγματικές συνθήκες.

Σύμφωνα με τους Calabrese et al, 2020, η πειραματική διάταξη της δοκιμής Modify Beam Test έχει ως εξής. Δύο δοκίμια με μία εσωτερική άρθρωση στο πάνω μέρος και το ινοπλέγμα ΙΑΜ στο κάτω μέρος. Τα δύο δοκίμια ονομάζονται μπλοκ, το οποίο στηρίζεται πάνω σε δύο κυλινδρικές στηρίξεις. Επιπρόσθετα, στο κάτω μέρος του μπλοκ, στην περιοχή του ινοπλέγματος εφαρμόζονται δύο οριζόντια LVDT's (Linear Variable Differential Transformer), για την καταγραφή της ολισθησης (μετατόπισης) του πλέγματος κατά τη διεξαγωγή του πειράματος, καθώς και δύο κατακόρυφα για την καταγραφή της κατακόρυφης μετατόπισης. Έτσι, για την εκτέλεση της δοκιμής εφαρμόζεται μία κατακόρυφη δύναμη από έμβολο στο μέσο του άνω μέρους του μπλοκ και η δύναμη μοιράζεται ισόποσα στα δύο δοκίμια. Δηλαδή, κάθε δοκίμιο δέχεται τη μισή δύναμη ( $P/2$ ). Παρακάτω απεικονίζεται μία τυπική πειραματική διάταξη για την εκτέλεση της δοκιμής Modify Beam Test (MhBT).



**Σχήμα 2.11** Πειραματική διάταξη της δοκιμής modify beam test με το ινοπλέγμα ΙΑΜ από κάτω από το block δοκιμίων: a) πλάγια όψη και b) όψη από της κάτω πλευρά του μπλοκ. (Calabrese et al, 2020)

Σύμφωνα με τον Ghen et al, 2001, δημιουργήθηκε η ανάγκη για σύγκριση των άμεσων δοκιμών με τις έμμεσες δοκιμές. Για τον σκοπό αυτό δημιουργήθηκε μια αριθμητική προσομοίωση. Έτσι, προέκυψε η σημαντικότερη διαφορά μεταξύ των έμμεσων δοκιμών διάτμησης Modify Beam Test και των άμεσων δοκιμών διάτμησης Single – Lap, Double – Lap, η οποία ήταν ότι η αντοχή συνάφειας ήταν μεγαλύτερη στις δοκιμές Modify Beam Test απ’ ότι στις δοκιμές Single – Lap και Double – Lap.

Μετά από πολλά πειραματικά προγράμματα βγήκε το συμπέρασμα ότι μετά από ένα ορισμένο μήκος συνάφειας το φορτίο συνάφειας τείνει να φτάσει σε μία σταθερή τιμή. Τότε, σε αυτή την περιοχή τιμών το μήκος συνάφειας ονομάζεται ενεργό μήκος συνάφειας (Falore et al, 2018).

- **Ενεργό μήκος συνάφειας**

Σύμφωνα με τους Yuan et al, 2001 ενεργό μήκος συνάφειας ονομάζεται το μήκος που απαιτείται για να καλυφθεί το 97% του τελικού φορτίου.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3**

### **3. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ IAM**

Στο παρών κεφάλαιο θα παρουσιαστούν οι εφαρμογές των IAM σε διάφορες κατασκευές των διάφορων έργων του πολιτικού μηχανικού. Λόγων των προαναφερόμενων πλεονεκτημάτων της χρήσης IAM ως μέσο ενίσχυσης υφιστάμενων κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος, τα ινοπλέγματα IAM καθίστανται η καλύτερη επιλογή εφαρμόζοντας τα σε διάφορες κατασκευές. Η υψηλή εφελκυστική αντοχή, η υψηλή αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες, η ευκολία στην εφαρμογή καθώς και η εξαιρετική εφαρμογή σε υγρές επιφάνειες είναι μερικοί από τους λόγους, που επιλέγεται το IAM για ενίσχυση υφιστάμενων κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος. Έτσι, η χρήση ινοπλεγμάτων σε ανόργανη μήτρα καθίσταται η πρώτη επιλογή σε ότι αφορά ενισχύσεις κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος. Επιπρόσθετα, η χρήση ινοπλεγμάτων ανόργανης μήτρας, συναντάται και στην κατασκευή προκατασκευασμένων δομικών στοιχείων. Σύμφωνα με τον Μπουρνά, 2008 μερικά προκατασκευασμένα δομικά στοιχεία είναι τα στοιχεία κάλυψης επιφανειών, τα στοιχεία τύπου σάντουιτς, δομικά στοιχεία για κατασκευές τεχνικών έργων, καθώς και στοιχεία παραλαβής φορτίων υψηλών περιβαλλοντικών και αισθητικών απαιτήσεων. Παρακάτω παρουσιάζονται μερικά παραδείγματα εφαρμογών IAM, όπως εφαρμογή IAM σε ενίσχυση κατασκευών, σε προκατασκευές αλλά και στην εφαρμογή του IAM για αρχιτεκτονικούς λόγους.

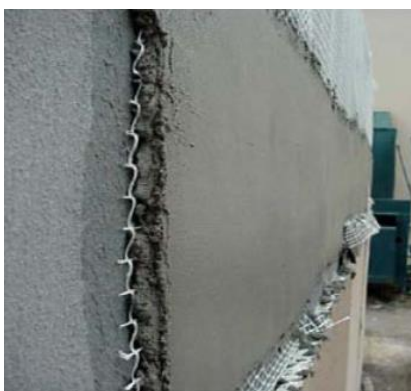
#### **3.1 Εφαρμογή IAM σε ενίσχυση κτηρίου**

Το 2006 στο Schweinfurt της Γερμανίας προέκυψε η ανάγκη προστασίας του κτηρίου που είχε μορφή κελύφους, από φορτία χιονιού και ανέμου. Για να επιτευχθεί αυτή η ανάγκη το κτήριο ενισχύθηκε με ινοπλέγματα IAM. Υπήρξε προετοιμασία της επιφάνειας

σκυροδέματος με αμμοβολή και στη συνέχεια παράχθηκε το σκυρόδεμα. Η σκυροδέτηση επιτεύχθηκε με εκτόξευση σκυροδέματος με αντλία έτσι ώστε να μειωθεί ο χρόνος σκυροδέτησης. Με την ενίσχυση του κτηρίου με IAM επιτεύχθηκε 80% μείωση του συνολικού βάρους που θα παραλάμβανε η κατασκευή αν είχε ενισχυθεί με χαλύβδινο οπλισμό.

### 3.2 Εφαρμογή IAM σε ενίσχυση τοιχοποιίας

Τα ινοπλέγματα IAM συναντώνται και στις ενισχύσεις κατασκευών φέρουσας τοιχοποιίας. Τα ινοπλέγματα IAM ενισχύουν την τοιχοποιία έναντι κάμψης και διάτμησης. Η διαδικασία ενίσχυσης περιλαμβάνει λείανση και διαβροχή της επιφάνειας που προορίζεται για ενίσχυση. Εφαρμογή μια στρώσης κονιάματος και αμέσως μετά τοποθέτηση του ινοπλέγματος IAM. Τέλος, προστίθενται μία στρώση κονιάματος. Στο σχήμα 3.1 παρουσιάζεται η ενίσχυση τοιχοποιίας με ινόπλεγμα IAM.



**Σχήμα 3.1** Ενίσχυση τοιχοποιίας με ινόπλεγμα IAM (Παπαντωνίου, 2007).

### 3.3 Εφαρμογή IAM σε γέφυρες

Τα ινοπλέγματα σε ανόργανη μήτρα IAM εξαιτίας των πλεονεκτημάτων τους (χαμηλό βάρος και μικρό πάχος) μπορούν αν προσαρμοστούν και να είναι πλήρως λειτουργικά σε επιφάνειες οπλισμένου σκυροδέματος. Οι παλιές γέφυρες παρουσιάζουν διάβρωση στον χαλύβδινο οπλισμό, η οποία αναπτύσσεται έντονα τους χειμερινούς μήνες με την χρήση αλατιού για αποφυγή δημιουργίας πάγου στο οδόστρωμα. Σε τέτοιες περιπτώσεις μπορεί να επιλεγούν τα ινοπλέγματα IAM ως υλικό ενίσχυσης του σκυροδέματος.

### 3.4 Στοιχεία κάλυψης επιφανειών από IAM

Τα στοιχεία κάλυψης επιφανειών από IAM είναι μια πολύ διαδεδομένη εφαρμογή ινοπλεγμάτων ανόργανης μήτρας IAM κυρίως στη Βόρεια Ευρώπη. Τα στοιχεία κάλυψης επιφανειών από IAM χρησιμοποιούνται κυρίως για αρχιτεκτονικούς λόγους για κάλυψη της όψης ενός κτηρίου. Σύμφωνα με τον Παπαντωνίου, 2007 εξαιτίας των πλεονεκτημάτων των IAM, όπως της καλής ανάληψης φορτίων, πολλές είναι οι φορές που χρησιμοποιούνται για ανάληψη φορτίων ανέμου. Έτσι προκύπτει ένα όμορφο αισθητικά αποτέλεσμα, το οποίο έχει εξαιρετικά υψηλή αντοχή.

Η πρώτη πειραματική εφαρμογή διεξάχθηκε με επιτυχία στο πολυτεχνείο του Aachen (RWTH Aachen) και αφορούσε την κάλυψη εξωτερικών επιφανειών. Αργότερα, πραγματοποιήθηκε κάλυψη εξωτερικών επιφανειών με στοιχεία από IAM σε διάφορες χώρες, όπως στο Αρnhem της Ολλανδίας, στο Ντίσελτορφ και το Ντόρτμουντ της Γερμανίας.



**Σχήμα 3.2** Εφαρμογή στοιχείων κάλυψης από IAM στο πολυτεχνείο του Aachen (Παπαντωνίου, 2007).

### 3.5 Εφαρμογή IAM σε παραπετάσματα

Σύμφωνα με τον Παπαντωνίου, 2007 το πολυτεχνείο της Δρέσδης (TU Dresden), πραγματοποίησε μια εφαρμογή σε παραπετάσματα από IAM. Πιο αναλυτικά οι διαστάσεις του παραπετάσματος ήταν  $2.50 \times 1.50 \text{ m}^2$  και το πάχος ήταν 20 mm. Όσον αφορά τον ινόπλεγμα IAM επιλέχθηκε και χρησιμοποιήθηκε πλέγμα ινών υάλου με επικάλυψη ζirkονίου, έτσι ώστε να επιτευχθεί υψηλή αντοχή στο αλκαλικό περιβάλλον. Στα άκρα του στοιχείου τοποθετήθηκε οπλισμός που αποτελούνταν από ράβδους ινών υάλου έτσι ώστε να αυξηθεί η δυσκαμψία των άκρων. Στο σχήμα 3.3 παρουσιάζεται το παραπέτασμα από IAM όπως κατασκευάστηκε στο πολυτεχνείο της Δρέσδης.



**Σχήμα 3.3** Παραπετάσματα από ΙΑΜ (Παπαντωνίου, 2007).

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

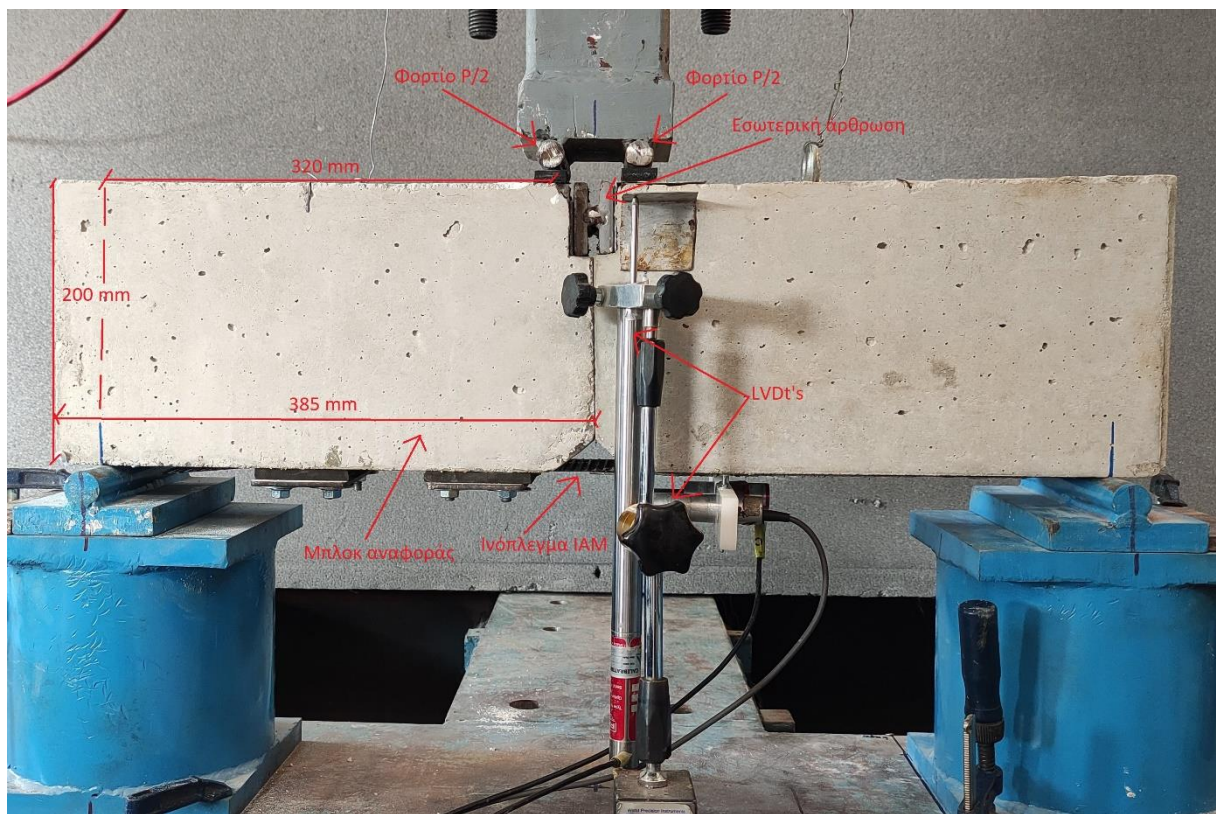
### 4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ

#### 4.1 Δοκίμια: γεωμετρία και παράμετροι διερεύνησης

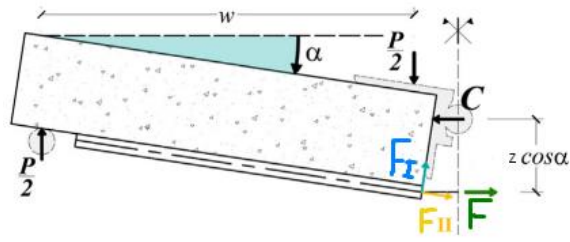
Προκειμένου να μελετηθεί στην πράξη η συνάφεια μεταξύ σκυροδέματος και ΙΑΜ ήταν αναγκαίο να εκτελεστούν αρκετές πειραματικές έμμεσες δοκιμές Modify Beam Test. Για το λόγο αυτό κατασκευάστηκαν επτά δοκίμια εκ των οποίων τα έξι ενισχύθηκαν με δύο στρώσεις ΙΑΜ με τσιμεντοειδή μήτρα. Το δοκίμιο που δεν ενισχύθηκε αποτέλεσε το μπλοκ αναφοράς και δεν άλλαζε από πείραμα σε πείραμα. Οι διαστάσεις κάθε δοκιμίου ήταν 120 x 200 x 385mm (b x h x L). Η παράμετρος που άλλαζε ήταν ότι υπήρχαν διαφορετικά μήκη συνάφειας που κυμαίνονταν από 100mm – 300mm.

Πιο συγκεκριμένα, τα δοκίμια κατασκευάστηκαν μέσα σε καλούπια, έτσι ώστε να έχουν όλα τα δοκίμια τις επιθυμητές διαστάσεις. Το υλικό των δοκιμών ήταν σκυρόδεμα που κατασκευάστηκε στο εργαστήριο από τσιμέντο του εμπορίου και αδρανή που πέρασαν από τη διαδικασία του κοσκινίσματος. Αξίζει να σημειωθεί ότι τα δοκίμια διέθεταν εσωτερικό χαλύβδινο οπλισμό. Κατασκευάστηκαν καλούπια με διαστάσεις 120 x 200 x 385mm (b x h x L), τα οποία διέθεταν εσωτερικά χαλύβδινο οπλισμό, έτσι ώστε μόλις εισχωρούσε μέσα στα καλούπια το σκυρόδεμα να γινόταν και ο οπλισμός των δοκιμών που δημιουργούνται. Ο λόγος που τα δοκίμια οπλίστηκαν με χαλύβδινο οπλισμό ήταν για να μην αστοχήσουν λόγω θραύσης σκυροδέματος κατά τη διάρκεια της πειραματικής δοκιμής. Στο σημείο αυτό πρέπει να τονιστεί ότι ο οπλισμός αποτελούνταν από δύο ράβδους χάλυβα Φ8 και μία χαλύβδινη ράβδος Φ6 ειδικά διαμορφωμένες και τοποθετημένες αντικριστά στα άκρα κάθε δοκιμίου. Οι δύο ράβδοι Φ8 και η μία ράβδος Φ6 ήταν ειδικά διαμορφωμένες μεταξύ τους, έτσι ώστε να αποτελέσουν τον οπλισμό των δοκιμών. Στη συνέχεια, κάθε δοκίμιο υπέστη εκτράχυνση, με

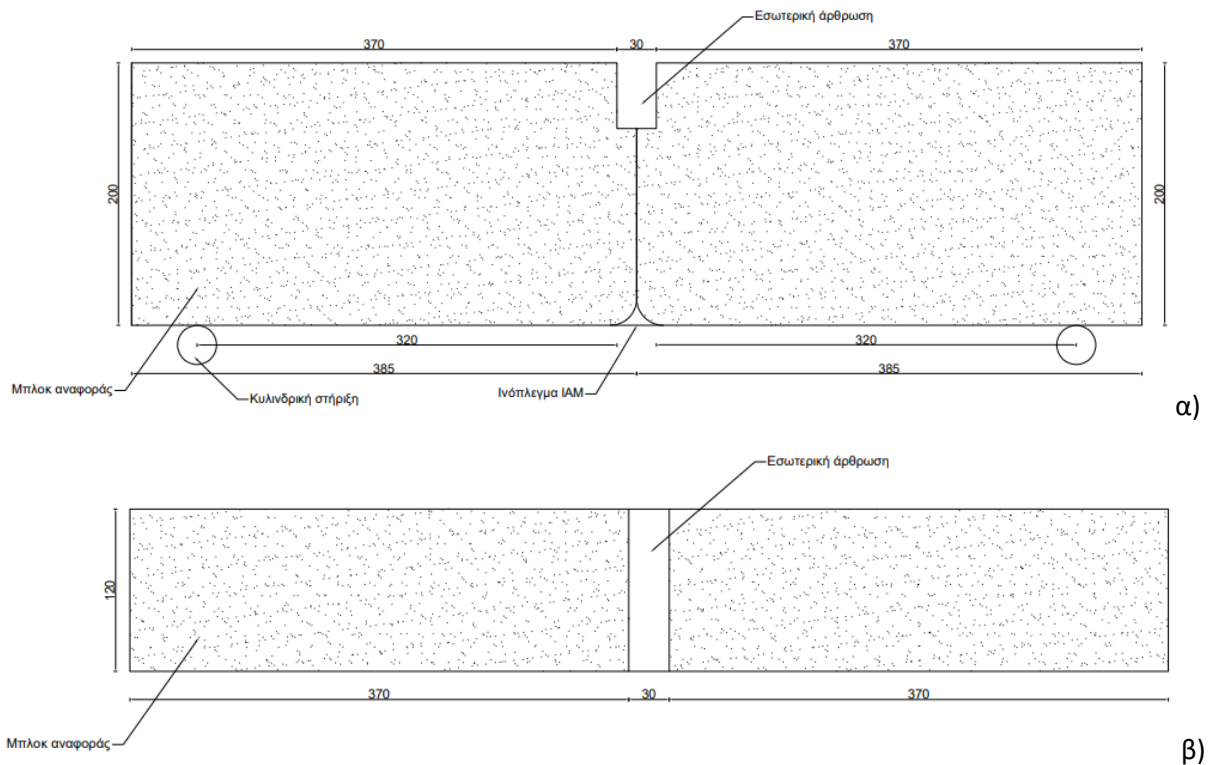
ειδικό εργαλείο που ονομάζεται ματσακόνι, στη επιφάνεια του σκυροδέματος κάθε δοκιμίου και του αντίστοιχου μήκους συνάφειας. Έπειτα, τα δοκίμια ενισχύθηκαν με δύο στρώσεις IAM (TRM). Έπειτα, τα δοκίμια για να οδηγηθούν προς την εκτέλεση του πειράματος υποβάλλοντάς τα σε δοκιμή Modify Beam Test, έτσι ώστε να μελετηθεί η συνάφεια μεταξύ σκυροδέματος και IAM, ήταν αναγκαίο να τοποθετηθούν πάνω σε αυτά τρία LVDT, έτσι ώστε να υπολογιστούν οι μετατοπίσεις. Επιπλέον, τα δοκίμια τοποθετήθηκαν ανά δύο κρατώντας ένα δοκίμιο σταθερό, το οποίο δεν είχε ενισχυθεί με ινόπλεγμα IAM και δεν είχε υποστεί εκτράχυνση στην επιφάνειά του και ονομάστηκε μπλοκ αναφοράς και αλλάζοντας σε κάθε δοκιμή το ενισχυμένο δοκίμιο. Ανάμεσα σε αυτά τα δύο δοκίμια (ζεύγος δοκιμών) τοποθετήθηκε εσωτερική άρθρωση. Το ζεύγος των δοκιμών ονομάζεται μπλοκ, το οποίο στηριζόταν πάνω σε δύο κυλινδρικές στηρίξεις, τοποθετημένες στα άκρα του μπλοκ. Το παρακάτω σχήμα 4.1 απεικονίζει την πειραματική διάταξη και το σχήμα 4.2 το διάγραμμα ελευθέρου σώματος. Επιπλέον το σχήμα 4.3 απεικονίζει την γεωμετρία των δοκιμών σε όψη και σε κάτοψη.



**Σχήμα 4.1** Πειραματική διάταξη.



Σχήμα 4.2 Διάγραμμα ελευθέρου σώματος ενός μπλοκ της δοκιμής MhBT.



Σχήμα 4.3 Γεωμετρία δοκιμών: α) όψη, β) κάτοψη.

Η παράμετρος που άλλαζε ήταν το μήκος συνάφειας. Από τα έξι δοκίμια ανά δύο δοκίμια άλλαζε το μήκος συνάφειας, το οποίο κυμαινόταν από 100 mm – 300 mm. Ο αριθμός των στρώσεων IAM ήταν ίδιος σε όλα τα δοκίμια. Επίσης, η επιφάνεια του σκυροδέματος είχε εκτραχυνθεί σε όλο το μήκος συνάφειας κάθε δοκιμίου. Η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος ήταν 18.67 MPa, η οποία προέκυψε από δοκιμή θλίψης κύβων σκυροδέματος. Αξίζει να σημειωθεί, ότι η εφελκυστική αντοχή του ινοπλέγματος IAM ήταν 1540 MPa. Ο συμβολισμός LX\_N\_Y που αναγράφεται στα δοκίμια αναφέρεται στο μήκος συνάφειας και στον αριθμό των στρώσεων, με το X να δηλώνει το μήκος συνάφειας (Bond Length), το N τον αριθμό των στρώσεων των IAM (Number of layers) και Y τον αριθμό του δοκιμίου.

Λεπτομέρειες για τις διάφορες διαμορφώσεις ενίσχυσης και του αριθμού των εξεταζόμενων δοκιμών για κάθε παράμετρο παρατίθενται στον πίνακα 4.1.

ID	Ημ/μα ενίσχυσης	Ημ/μα δοκιμής	Θλιπτική αντοχή σκυροδέματος (MPa)	Τύπος κονιάματος	Καμπτική αντοχή κονιάματος (MPa)	Θλιπτική αντοχή κονιάματος(MPa)	Τύπος πλέγματος
L100_2_1	11/6/2021	15/9/2021	18,67	τσιμεντοειδη	4	20	Basalt
L100_2_2	11/6/2021	16/9/2021	18,67	τσιμεντοειδη	4	20	Basalt
L200_2_1	11/6/2021	14/9/2021	18,67	τσιμεντοειδη	4	20	Basalt
L200_2_2	11/6/2021	15/9/2021	18,67	τσιμεντοειδη	4	20	Basalt
L300_2_1	11/6/2021	10/9/2021	18,67	τσιμεντοειδη	4	20	Basalt
L300_2_2	11/6/2021	10/9/2021	18,67	τσιμεντοειδη	4	20	Basalt

α)

Αριθμός στρώσεων	Εμβαδόν κλώνου (mm <sup>2</sup> )	αριθμός κλώνων ανά στρώση	Εμβαδόν υφάσματος (mm <sup>2</sup> )	Εφελκυστική αντοχή πλέγματος (MPa)	Μήκος συνάφειας (mm)
2	0,234	14	6,552	1540	100
2	0,234	14	6,552	1540	100
2	0,234	14	6,552	1540	200
2	0,234	14	6,552	1540	200
2	0,234	14	6,552	1540	300
2	0,234	14	6,552	1540	300

β)

**Πίνακας 4.1** Λεπτομέρειες των δοκιμών, θλιπτική αντοχή σκυροδέματος και ιδιότητες του κονιάματος την ημέρα της πειραματικής δοκιμής α) και β).



#### **4.2 Δημιουργία σκυροδέματος**

Η δημιουργία του σκυροδέματος επιτεύχθηκε στο εργαστήριο οπλισμένου σκυροδέματος των Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Αρχικά, για τη παρασκευή του σκυροδέματος ήταν απαραίτητο να γίνει περισυλλογή αδρανών (άμμος, γαρμπίλι χοντρό και λεπτό) και να περαστούν από τη διαδικασία του κοσκινίσματος.

Το κοσκίνισμα των αδρανών έγινε με τη βοήθεια του μηχανήματος που ήταν διαθέσιμο στο εργαστήριο. Το μηχάνημα αυτό διέθετε ένα κενό στο πάνω μέρος, από όπου εισέρχονταν τα αδρανή και μέσα από τη λειτουργία του μηχανήματος περνούσαν στη διαδικασία του κοσκινίσματος. Επίσης, το μηχάνημα διέθετε “συρτάρια”, τα οποία συλλέγανε τα αδρανή από τη διαδικασία του κοσκινίσματος. Κάθε “συρτάρι” έγραφε το μέγεθος των αδρανών που συγκρατούσε, δηλαδή 8mm – 16mm, 4mm – 8mm, 2mm – 4mm, 1mm – 2mm, 0.5mm – 1mm και πούδρα. Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζεται το μηχάνημα που χρησιμοποιήθηκε για τη διαδικασία του κοσκινίσματος.

Για την παρασκευή του σκυροδέματος χρειαζόταν 0.16m<sup>3</sup> μείγμα τσιμέντου – αδρανών εκ των οποίων χρειαζόταν τσιμέντο 56kg, από τα αδρανή 8mm – 16mm 77.76kg, από τα αδρανή 4mm – 8mm 66.24kg, από τα αδρανή 2mm – 4mm 54.72kg, από τα αδρανή 1mm – 2mm 25.92kg, από τα αδρανή 0.5mm – 1mm 25.92kg, καθώς και από την πούδρα 37.44kg. Αξίζει να σημειωθεί ότι για την παραγωγή του μείγματος στην προσθήκη των αδρανών 8mm – 16mm χρειάστηκαν 77.76 kg εκ των οποίων τα 23.328 kg (30% του 77.76Kg) ήταν χαλίκι και τα 54.832kg (70% του 77.76kg) ήταν γαρμπίλι. Στον παρακάτω πίνακα φαίνεται αναλυτικά η ποσότητα του μείγματος που χρειάστηκε για την παραγωγή του σκυροδέματος καθώς και των επιμέρους συστατικών του.

Μείγμα (m <sup>3</sup> )	Αδρανή (kg)	
0,16 m <sup>3</sup>	Τσιμέντο	56
	8 - 16 mm	77,76
	4 - 8 mm	66,24
	2 - 4 mm	54,72
	1 - 2 mm	25,92
	0,5 - 1 mm	25,92
	Πούδρα	37,44

**Πίνακας 4.2** Ιδιότητες μείγματος.

Επιπρόσθετα, για την παρασκευή του σκυροδέματος μία πολύ σημαντική παράμετρος ήταν το νερό. Για τον υπολογισμό του νερού ήταν απαραίτητο να υπολογισθεί η αναλογία νερού προς τσιμέντο για μείγμα 0.16m<sup>3</sup>. Υπολογίσθηκε ότι η αναλογία νερού προς τσιμέντο

έπρεπε να είναι 0.65. Οπότε, η ποσότητα του νερού υπολογίσθηκε στα 36.4kg, όπως φαίνεται παρακάτω:

$$\frac{N}{T} = 0.65 \Rightarrow N = 36.4kg$$

Για την παραγωγή του σκυροδέματος προστέθηκε και η ποσότητα του ρευστοποιητή στα 32gr. Η σκυροδέτηση έγινε με τη βοήθεια ενός μηχανήματος που ονομάζεται μπετονιέρα.

Μετά το τέλος της σκυροδέτησης δημιουργήθηκαν δοκίμια κύβων προκειμένου να υπολογισθεί η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος. Η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος από τους κυλίνδρους με διαστάσεις 150 x 300mm μετρήθηκε την ημέρα της πειραματικής δοκιμής και προέκυψε από τη μέση τιμή της θλιπτικής αντοχής των τριών κυλίνδρων, με τιμή 18.67 MPa, όπως φαίνεται παρακάτω:

Θλιπτική αντοχή 1 <sup>ου</sup> κυλίνδρου (MPa)	Θλιπτική αντοχή 2 <sup>ου</sup> κυλίνδρου (MPa)	Θλιπτική αντοχή 3 <sup>ου</sup> κυλίνδρου (MPa)
22,732	16,099	17,178

**Πίνακας 4.3** Θλιπτικές αντοχές σκυροδέματος για κάθε κύλινδρο.

Θλιπτική αντοχή (MPa) (MO)
18,67

**Πίνακας 4.4** Η θλιπτική αντοχή σκυροδέματος που προήλθε από τον υπολογισμό του μέσου όρου των θλιπτικών αντοχών των τριών κυλίνδρων.

Τυπική απόκλιση
3,56

**Πίνακας 4.5** Τυπική απόκλιση.

### 4.3 Κατασκευή καλουπιών

Η κατασκευή καλουπιών είναι πάρα πολύ σημαντική, διότι με αυτή τη διαδικασία κατασκευάζεται το δοκίμιο και παίρνει την τελική του μορφή με τις καθορισμένες διαστάσεις του.

Αρχικά, για την κατασκευή των καλουπιών κόπηκαν έξι φαλτσογωνίες των 12cm. Κάθε καλούπι είχε διαστάσεις 120 x 200 x 350 mm (b x h x L). Έπειτα, για τη δημιουργία του οπλισμού κόπηκαν χαλύβδινες ράβδοι Φ8 και λυγίστηκαν με τη βοήθεια του κουρμπαδόρου. Έπειτα κόπηκαν λεπτές ράβδοι Φ6 μήκους 113 mm. Σε επόμενο βήμα οι χαλύβδινες ράβδοι Φ8 και Φ6 διαμορφώθηκαν κατάλληλα, τοποθετήθηκαν μέσα στα καλούπια και αποτέλεσαν τον οπλισμό των δοκιμίων. Σε κάθε καλούπι τοποθετήθηκαν δυο χαλύβδινες ράβδοι Φ8 και Φ6 αντικριστά. Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί ότι οι διαστάσεις των λυγισμένων χαλύβδινων ράβδων ήταν 250 x 170 mm. Στη συνέχεια, τα καλούπια καθαρίστηκαν και λαδώθηκαν για να προετοιμαστούν να δεχθούν το σκυρόδεμα. Στα παρακάτω σχήματα απεικονίζονται τα καλούπια μαζί με τον οπλισμό λίγο πριν δεχθούν το σκυρόδεμα, καθώς και το μηχάνημα (κουρμπαδόρος) που χρησιμοποιήθηκε για τον λυγισμό των χαλύβδινων ράβδων Φ8.



**Σχήμα 4.4** Κουρμπαδόρος μαζί με ράβδους Φ8 και Φ6.



**Σχήμα 4.5** Κατασκευή καλούπιών.

Μετά το τέλος της σκυροδέτησης και της εισαγωγής του σκυροδέματος στα καλούπια, πραγματοποιήθηκε διαβροχή του σκυροδέματος των δοκιμίων που ήταν μέσα στα καλούπια. Μετά από δύο μέρες διαβροχής πραγματοποιήθηκε το ξεκαλούπωμα και τα δοκίμια είχαν πλέον κατασκευαστεί. Στα παρακάτω σχήματα απεικονίζονται τα καλούπια μετά το τέλος της σκυροδέτησης, καθώς και τα δοκίμια μετά το ξεκαλούπωμα.



**Σχήμα 4.6** Τα καλούπια μετά το τέλος της σκυροδέτησης.



**Σχήμα 4.7** Δοκίμια μετά το ξεκαλούπωμα.

#### **4.4 Προετοιμασία των δοκιμών**

##### **4.4.1 Μήκος συνάφειας**

Όταν τελείωσε η διαδικασία του ξεκαλουπώματος και ήταν διαθέσιμα τα δοκίμια ξεκίνησε η προετοιμασία τους. Αρχικά, σε κάθε από τα έξι δοκίμια οριοθετήθηκε η περιοχή του μήκους συνάφειας. Παρακάτω αναφέρονται συγκεντρωτικά τα μήκη συνάφειας των δοκιμών:

- 100mm (δύο δοκίμια)
- 200mm (δύο δοκίμια)
- 300mm (δύο δοκίμια)

Αυτή η διαδικασία έγινε για να πραγματοποιηθεί με ευκολία και ακρίβεια το επόμενο βήμα που ήταν η εκτράχυνση της επιφάνειας στην περιοχή του μήκους συνάφειας κάθε δοκιμίου. Στο σημείο αυτό να αναφερθεί ότι το έβδομο δοκίμιο δεν υπέστη κάποια επεξεργασία στην επιφάνεια του και ονομάστηκε μπλοκ αναφοράς.

##### **4.4.2 Εκτράχυνση της επιφάνειας των δοκιμών**

Η εκτράχυνση της επιφάνειας του σκυροδέματος των δοκιμών είναι πάρα πολύ σημαντική, διότι μέσω αυτής επιτυγχάνεται η μεταφορά των διατμητικών τάσεων από το ΙΑΜ στο σκυρόδεμα. Με αυτή τη διαδικασία επιτυγχάνεται μία καλύτερη συνάφεια μεταξύ

σκυροδέματος και ΙΑΜ. Στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζεται η εκτράχυνση της επιφάνειας ενός δοκιμίου στην περιοχή του μήκους συνάφειάς του.



**Σχήμα 4.8** Εκτράχυνση της επιφάνειας του δοκιμίου στο μήκος συνάφειάς του.

#### **4.4.3 Εξομάλυνση γωνιών κάθε δοκιμίου**

Για να ολοκληρωθεί η γεωμετρία των δοκιμών χρειάστηκε να εξομαλυνθεί (καμπυλωθεί) η γωνία της σε κάθε δοκίμιο, σε ακτίνα 20mm. Αυτό πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του τροχού. Αξίζει να σημειωθεί ότι στο εργαστήριο ήταν διαθέσιμα ειδικά προστατευτικά γυαλιά, ρούχα και γάντια προκειμένου να διασφαλιστεί η ασφάλεια, έτσι ώστε να ολοκληρωθεί με επιτυχία η εργασία με τον τροχό. Στα παρακάτω σχήματα απεικονίζεται ένα δοκίμιο που υπέστη καμπύλωση της γωνίας του με τροχό.



**Σχήμα 4.9** Εξομάλυνση της γωνίας κάθε δοκιμίου.

#### **4.5 Ενίσχυση δοκιμίων**

##### **4.5.1 Προετοιμασία ινοπλεγμάτων IAM**

Τα πλέγματα ινών που χρησιμοποιήθηκαν στην ενίσχυση των δοκιμίων αποτελούνταν από ίνες βασάλτη. Η εφελκυστική αντοχή, το μέτρο ελαστικότητας και το ονομαστικό πάχος του ινοπλέγματος από ίνες βασάλτη δινόταν από τον κατασκευαστή και παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα 4.5. Επιπρόσθετα, στο σχήμα 4.10 παρουσιάζεται το πλέγμα ινών βασάλτη.

Τύπος πλέγματος	Εφελκυστική αντοχή πλέγματος (MPa)	Μέτρο ελαστικότητας (MPa)	Ονομαστικό πάχος (mm)
Basalt	1540	89	0,039

**Πίνακας 4.6** Τεχνικές προδιαγραφές του ινοπλέγματος.



**Σχήμα 4.10** Πλέγμα ινών βασάλτη.

Όσον αφορά την προετοιμασία των ινοπλεγμάτων, έτσι ώστε να επιτευχθεί η διαδικασία ενίσχυσης των δοκιμίων, ακολουθήθηκε η παρακάτω διαδικασία. Για κάθε δοκίμιο από τα έξι δοκίμια που επρόκειτο να ενισχυθούν, χρειάστηκαν δύο πλέγματα με ίνες βασάλτη, διότι κάθε δοκίμιο έπρεπε να ενισχυθεί με δύο στρώσεις ινοπλεγμάτων. Οπότε, χρειάστηκαν δώδεκα πλέγματα ινών βασάλτη. Κάθε πλέγμα χρειάστηκε να κοπεί κατάλληλα και να διαμορφωθεί, έτσι ώστε να εφαρμόζει στα διαφορετικά μήκη συνάφειας των δοκιμίων.

Πιο αναλυτικά, για τα δύο δοκίμια L100\_2, με μήκος συνάφειας 100mm χρειάστηκαν να κοπούν τέσσερα πλέγματα IAM με ίνες βασάλτη, τα οποία είχαν μήκος (500 + 100)mm και πλάτος 90mm. Επιπλέον, για τα δύο δοκίμια L200\_2, με μήκος συνάφειας 200mm χρειάστηκαν να κοπούν τέσσερα πλέγματα με ίνες βασάλτη, τα οποία είχαν μήκος (500 + 200)mm και πλάτος 90mm. Τέλος, για τα δύο δοκίμια L300\_2, με μήκος συνάφειας 300mm χρειάστηκαν να κοπούν τέσσερα πλέγματα με ίνες βασάλτη, τα οποία είχαν μήκος (500 + 300)mm και πλάτος 90mm. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται αναλυτικά οι διαστάσεις των ινοπλεγμάτων στα αντίστοιχα δοκίμια.

Διαστάσεις ινοπλέγματος IAM για κάθε μήκος συνάφειας					
Δοκίμια					
L100_2		L200_2		L300_2	
μήκος IAM (mm)	πλάτος IAM (mm)	μήκος IAM (mm)	πλάτος IAM (mm)	μήκος IAM (mm)	πλάτος IAM (mm)
600	90	700	90	800	90

**Πίνακας 4.7** Διαστάσεις ινοπλέγματος IAM για κάθε μήκος συνάφειας.

#### **4.5.2 Παρασκευή και μηχανικές ιδιότητες κονιάματος**

Το συνδετικό υλικό που χρησιμοποιήθηκε για την ενίσχυση των ινοπλεγμάτων IAM ήταν ένα ανόργανο συνδετικό υλικό, το οποίο αποτελούνταν από τσιμέντο. Στο σημείο αυτό αξίζει να αναφερθεί ότι το τσιμέντο που χρησιμοποιήθηκε ήταν τσιμέντο εμπορίου. Για την παρασκευή του κονιάματος, χρησιμοποιήθηκε τσιμέντο που ζύγιζε 2700 kg και υπολογίσθηκε



ότι ο λόγος νερού προς τσιμέντο ήταν 0.24, καταλήγοντας σε πλαστική συνοχή και καλή εργασιμότητα. Άρα χρειάστηκε 0.23 lt νερό. Δηλαδή,

$$\frac{N}{T} = 0.24 \Rightarrow N = 0.23 \text{ lt}$$

Μετά την παρασκευή του κονιάματος, το κονίαμα μπήκε σε μήτρες με διαστάσεις 40 x 40 x 160 mm και δημιουργήθηκαν τρία πρίσματα. Η καμπτική και η θλιπτική αντοχή μετρήθηκε την ημέρα της πειραματικής δοκιμής και υπολογίσθηκε ως η μέση τιμή των αντοχών των τριών πρισμάτων. Επομένως, η θλιπτική αντοχή του κονιάματος ήταν ίση με 20 MPa και η καμπτική ίση με 4 MPa, όπως φαίνεται και στον πίνακα 4.7.

Καμπτική αντοχή κονιάματος (MPa)	Θλιπτική αντοχή κονιάματος (MPa)
4	20

**Πίνακας 4.8** Ιδιότητες του κονιάματος (θλιπτική και καμπτική αντοχή).

#### **4.5.3 Διαδικασία ενίσχυσης δοκιμίων**

Από τα επτά δοκίμια που κατασκευάστηκαν τα έξι ενισχύθηκαν με δύο στρώσεις IAM στο μήκος συνάφειας τους. Πιο αναλυτικά, μετά τον καθαρισμό της επιφάνειας σκυροδέματος κάθε δοκιμίου, τοποθετήθηκε η πρώτη στρώση κονιάματος (τσιμέντο) χρησιμοποιώντας μία μεταλλική σπάτουλα. Αμέσως μετά εφαρμόστηκε η πρώτη στρώση ινοπλέγματος ινών βασάλτη, η οποία πιέστηκε ελαφρά μέσα στο κονίαμα, προκειμένου να επιτευχθεί η μηχανική εμπλοκή κονιάματος – πλέγματος. Σε επόμενο βήμα τοποθετήθηκε η δεύτερη στρώση κονιάματος, χρησιμοποιώντας μία μεταλλική σπάτουλα και αμέσως μετά εφαρμόστηκε η δεύτερη στρώση ινοπλέγματος αποτελούμενη από ίνες βασάλτη, η οποία πιέστηκε ελαφρά μέσα στο κονίαμα. Μετά την τοποθέτηση και της δεύτερης στρώσης εφαρμόστηκε μία εξωτερική στρώση κονιάματος και απλώθηκε με μία μεταλλική σπάτουλα. Στο σχήμα 4.11 απεικονίζεται η διαδικασία ενίσχυσης. Επιπλέον, στο σχήμα 4.12 φαίνονται όλα τα δοκίμια τα οποία έχουν ενισχυθεί με δύο στρώσεις ινοπλέγματος IAM. Μετά το τέλος της ενίσχυσης των δοκιμίων τα δοκίμια δε χρησιμοποιήθηκαν έως ότου να περάσουν έξι εβδομάδες, έτσι ώστε να επιτευχθεί η σκλήρυνση. Επίσης, πολύ σημαντικό είναι να τονιστεί ότι καθ' όλη τη διαδικασία της ενίσχυσης το εργαστήριο σκυροδέματος παρείχε ειδικά γάντια για προστασία του δέρματος.



(α)

(β)

(γ)

(δ)

(ε)

**Σχήμα 4.11** Διαδικασία ενίσχυσης: α) τοποθέτηση 1<sup>ης</sup> στρώσης κονιάματος, β) τοποθέτηση 1<sup>ης</sup> στρώσης ινοπλέγματος, γ) τοποθέτηση 2<sup>ης</sup> στρώσης κονιάματος, δ) τοποθέτηση 3<sup>ης</sup> στρώσης ινοπλέγματος, ε) τοποθέτηση τελικής στρώσης κονιάματος

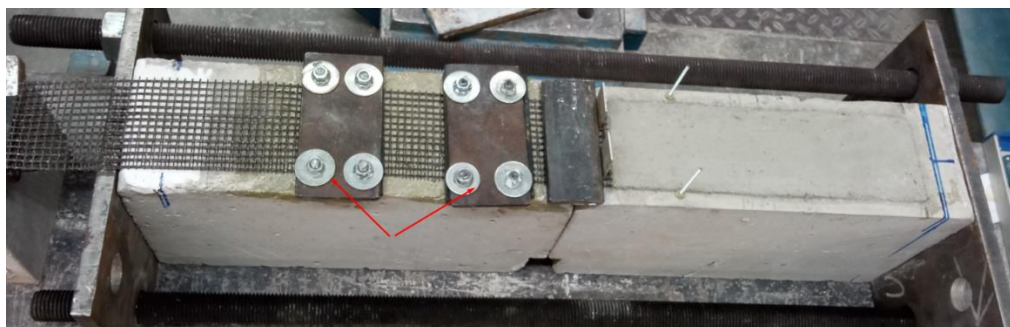


**Σχήμα 4.12** Η τελική μορφή όλων των ενισχυμένων δοκιμίων με δύο στρώσεις IAM για μήκη συνάφειας 300mm, 200mm και 100mm.

#### 4.6 Πειραματική διάταξη και διαδικασία εκτέλεσης του πειράματος

Στο σημείο αυτό θα γίνει λεπτομερής περιγραφή της πειραματικής διάταξης και της διαδικασίας εκτέλεσης του πειράματος. Αξίζει να σημειωθεί ότι τα έξι δοκίμια δοκιμάστηκαν μετά από μία περίοδο σκλήρυνσης έξι εβδομάδων. Συνολικά έξι δοκίμια υποβλήθηκαν σε δοκιμή Modified Beam Test. Επίσης, δύο δοκίμια αποτελούσαν ένα μπλοκ δοκιμίων. Το μπλοκ δοκιμίων αποτελούνταν από το δοκίμιο αναφοράς, που δεν άλλαζε από πείραμα σε πείραμα, και από το δοκίμιο που είχε ενισχυθεί με ΙΑΜ. Όπως, προαναφέρθηκε κάθε μπλοκ αποτελούνταν από δύο δοκίμια, το δοκίμιο αναφοράς και το δοκίμιο που είχε ενισχυθεί, τα οποία ανάμεσά τους διέθεταν μία άρθρωση, με διαστάσεις (15 x 50)mm, τοποθετημένη στη πάνω πλευρά του μπλοκ. Επίσης, πρέπει να αναφερθεί ότι η άρθρωση στερεώθηκε με λίγο γύψο. Στην κάτω μεριά του μπλοκ υπήρχε το TRM. Επιπρόσθετα, στο κάτω μέρος του μπλοκ, στα άκρα του, υπήρχαν δύο κυλινδρικές στηρίξεις. Η απόσταση μεταξύ των αξόνων των δύο στηρίξεων ήταν 700mm. Επιπλέον, η απόσταση μεταξύ της στήριξης και του σημείου που θα υποβαλλόταν η φόρτιση ήταν 320mm.

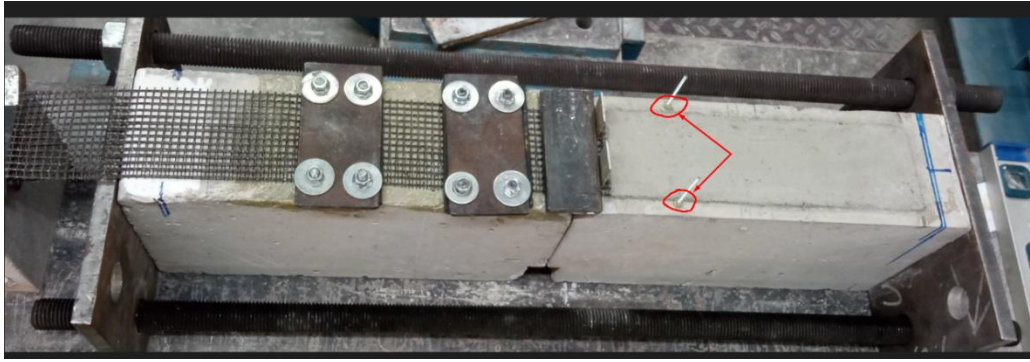
Επίσης, το μπλοκ αναφοράς, το οποίο ήταν το δοκίμιο που έμενε σταθερό από πείραμα σε πείραμα και δεν είχε ενισχυθεί με ΙΑΜ και δεν είχε υποβληθεί σε εκτράχυνση της επιφάνειάς του, διέθετε από την κάτω μεριά δύο χαλύβδινους σφικτήρες, έτσι ώστε να μείνει τεντωμένο και σταθερό το πλέγμα με ίνες βασάλτη, όπως απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα 4.13.



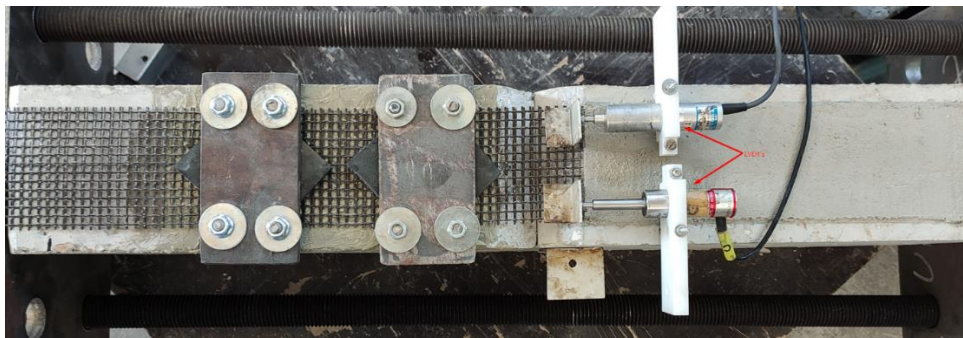
**Σχήμα 4.13** Τοποθέτηση σφικτήρων στο μπλοκ αναφοράς.

Επιπλέον, σε κάθε δοκίμιο, που είχε ενισχυθεί με ινόπλεγμα ινών βασάλτη, δημιουργήθηκαν δύο οπές διαμέτρου 2mm στην κάτω πλευρά του δοκιμίου, δηλαδή στην πλευρά που είχε ενισχυθεί με ΙΑΜ. Σε αυτές τις οπές είχαν τοποθετηθεί ντίζες, όπου θα εφαρμόζονταν τα δύο οριζόντια LVDt's (Linear Variable Differential Transformer), για την καταγραφή της ολίσθησης (μετατόπισης) του πλέγματος κατά τη διεξαγωγή του πειράματος. Επίσης, χρησιμοποιήθηκε και ένα ακόμα LVDt, το οποίο εφαρμόστηκε στο άνω μέρος του μπλοκ για την καταγραφή της μετατόπισης του μπλοκ κατά τη διάρκεια του πειράματος.

Στα παρακάτω σχήματα απεικονίζονται οι οπές που ανοίχτηκαν πριν την εφαρμογή των LVDt's, καθώς και τα LVDt's όταν τοποθετήθηκαν.



Σχήμα 4.14 Διαμόρφωση σπών, όπου θα τοποθετηθούν τα LVDT's.



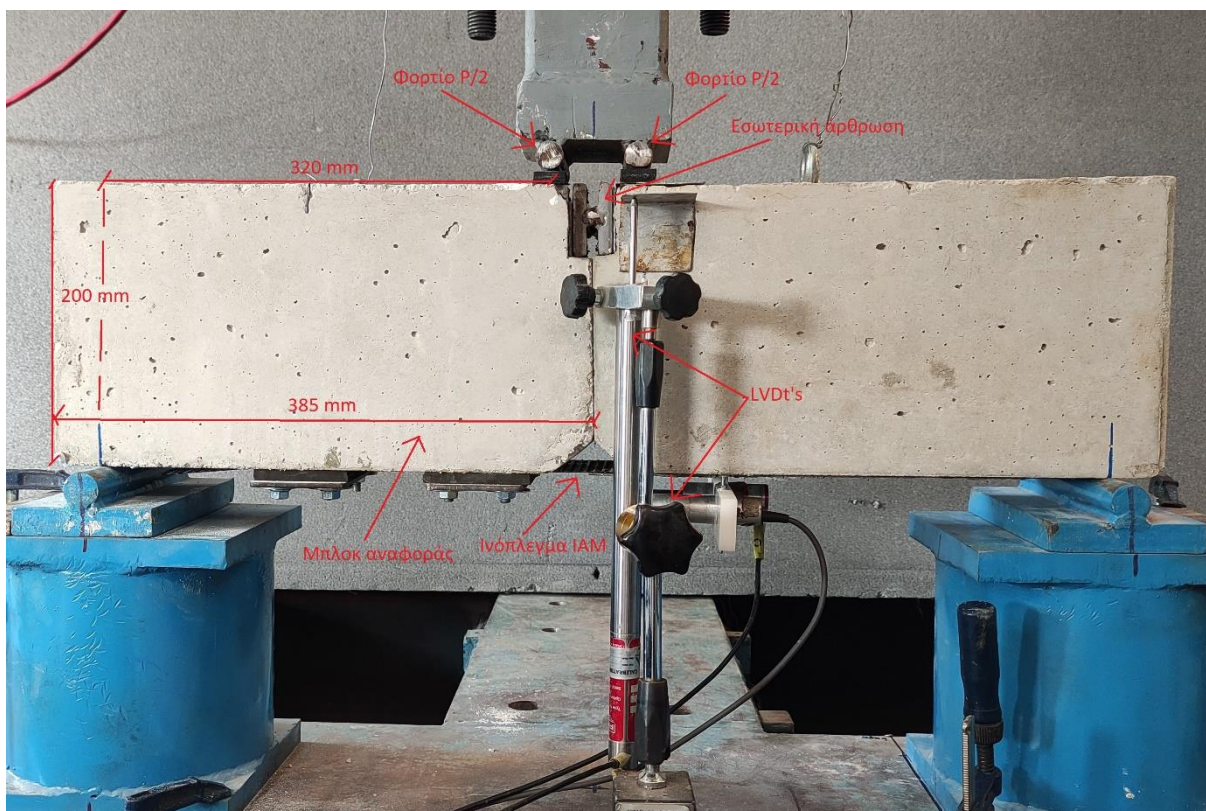
α)



β)

Σχήμα 4.15 Τοποθέτηση των LVDT's α) και β).

Επιπλέον, το μπλοκ των δύο δοκιμίων ήταν τοποθετημένο στο κέντρο κάτω από το έμβολο το οποίο κατά τη διάρκεια του πειράματος μετακινούταν κατακόρυφα (προς τα κάτω) και ασκούσε δύναμη  $P$  στο μπλοκ, δηλαδή και στα δύο δοκίμια, όπου μοιραζόταν ισόποσα ( $P/2$ ) στα άκρα των δύο δοκιμίων, δηλαδή δεξιά και αριστερά της εσωτερικής άρθρωσης. Επιπρόσθετα, κατά τη διάρκεια του πειράματος ο ρυθμός επιβολής της φόρτισης ήταν  $0.2\text{mm/sec}$ . Παρακάτω στο σχήμα 4.16 απεικονίζεται η πειραματική διάταξη.



Σχήμα 4.16 Πειραματική διάταξη.

Παρακάτω στον πίνακα 4.8 απεικονίζονται λεπτομερώς τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των δοκιμών, οι μηχανικές τους ιδιότητες και τα λοιπά δεδομένα τους πριν την εκτέλεση του πειράματος.

ID	Ημ/να ενίσχυσης	Ημ/να δοκιμής	Θλιπτική αντοχή σκυροδέματος (MPa)	Τύπος κονιάματος	Καμπτική αντοχή κονιάματος (MPa)	Θλιπτική αντοχή κονιάματος (MPa)	Τύπος πλέγματος	Αριθμός στρώσεων	Εμβαδόν κλώνου (mm <sup>2</sup> )	αριθμός κλώνων ανά στρώση
L100_2_1	11/6/2021	15/9/2021	18,67	τσιμεντοειδη	4	20	Basalt	2	0,234	14
L100_2_2	11/6/2021	16/9/2021	18,67	τσιμεντοειδη	4	20	Basalt	2	0,234	14
L200_2_1	11/6/2021	14/9/2021	18,67	τσιμεντοειδη	4	20	Basalt	2	0,234	14
L200_2_2	11/6/2021	15/9/2021	18,67	τσιμεντοειδη	4	20	Basalt	2	0,234	14
L300_2_1	11/6/2021	10/9/2021	18,67	τσιμεντοειδη	4	20	Basalt	2	0,234	14
L300_2_2	11/6/2021	10/9/2021	18,67	τσιμεντοειδη	4	20	Basalt	2	0,234	14

α)

Εμβαδόν υφάσματος (mm <sup>2</sup> )	Εφελκυστική αντοχή πλέγματος (MPa)	Μέτρο ελαστικότητας πλέγματος (MPa)	Ονομαστικό πάχος πλέγματος (mm)	Μήκος συνάφειας (mm)	w (mm)	z (mm)
6,552	1540	89	0,039	100	320	175
6,552	1540	89	0,039	100	320	175
6,552	1540	89	0,039	200	320	175
6,552	1540	89	0,039	200	320	175
6,552	1540	89	0,039	300	320	175
6,552	1540	89	0,039	300	320	175

β)

**Πίνακας 4.9** Χαρακτηριστικά και μηχανικές ιδιότητες των δοκιμών, του κονιάματος και του ινοπλέγματος IAM α) και β).

#### **4.7 Πειραματικά Αποτελέσματα**

Μετά το τέλος του πειράματος για κάθε δοκίμιο προέκυψαν τα πειραματικά αποτελέσματα. Προκειμένου να αναλυθούν τα πειραματικά αποτελέσματα είναι αναγκαίο να διατυπωθούν οι εξισώσεις που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό των δυνάμεων  $F_f$  και  $F_{f,ii}$  που αναπτύσσονται στο ινόπλεγμα IAM, καθώς και των ορθών και διατμητικών τάσεων. Οι υπολογισμοί των δυνάμεων  $F_f$  και  $F_{f,ii}$  καθώς και οι υπολογισμοί των ορθών ( $\sigma_f$ ) και διατμητικών τάσεων ( $\tau_f$ ) πραγματοποιήθηκαν σύμφωνα με τις παρακάτω εξισώσεις:

$$F_f = \frac{P \cdot w}{2 \cdot z \cdot \cos a} \quad (4.1)$$

$$F_{II} = F_f \cdot \cos a \quad (4.2)$$

$$a = \tan^{-1}(\delta/w) \quad (4.3)$$

$$\sigma_f = \frac{F_{II}}{A_f} \quad (4.4)$$

$$\tau_f = \frac{F_{II}}{b_f * l} \quad (4.5)$$

Όπου, P, το φορτίο αστοχίας

w, η απόσταση ανάμεσα στην στήριξη και στο φορτίο

z, η απόσταση ανάμεσα στο ινοπλέγμα IAM και στην εσωτερική άρθρωση

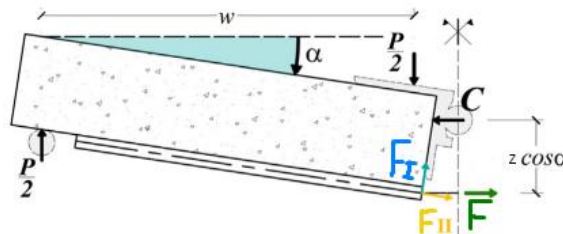
$\alpha$ , η γωνία περιστροφής του μπλοκ

$\delta$ , η βύθιση

$A_f$ , το εμβαδόν του πλέγματος IAM

$b_f$ , το πλάτος συνάφειας

Όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



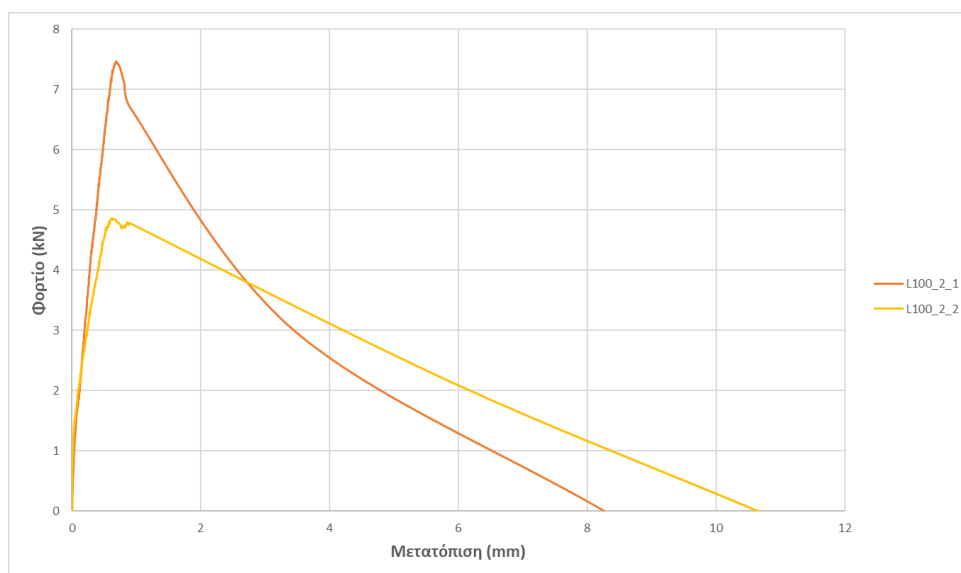
**Σχήμα 4.17** Διάγραμμα ελευθέρου σώματος ενός μπλοκ της δοκιμής MhBT.

Τα πειραματικά αποτελέσματα αφορούσαν κυρίως τα παρακάτω:

- Τον τρόπο αστοχίας του ινοπλέγματος
- Το μέγιστο φορτίο P που επιβλήθηκε στο πλέγμα ιών IAM βασάλτη
- Τη μετατόπιση (μέσος όρος των δύο μετρήσεων LVDt's) που αντιστοιχεί στο μέγιστο φορτίο
- Τη μετατόπιση του IAM (μέσος όρος των δύο μετρήσεων LVDt's) σε κάθε στιγμή
- Το μέγιστο φορτίο P που επιβλήθηκε στο πλέγμα ιών IAM σε κάθε στιγμή
- Τη μέγιστη παραμόρφωση του ινοπλέγματος
- Τη βύθιση ( $\delta$ ) στη μέγιστη δύναμη
- Δυνάμεις  $F_f$  και  $F_{f,ii}$  που αναπτύσσονται στο ινοπλέγμα IAM
- Οι ορθές τάσεις του ινοπλέγματος IAM
- Οι διατμητικές τάσεις του ινοπλέγματος IAM

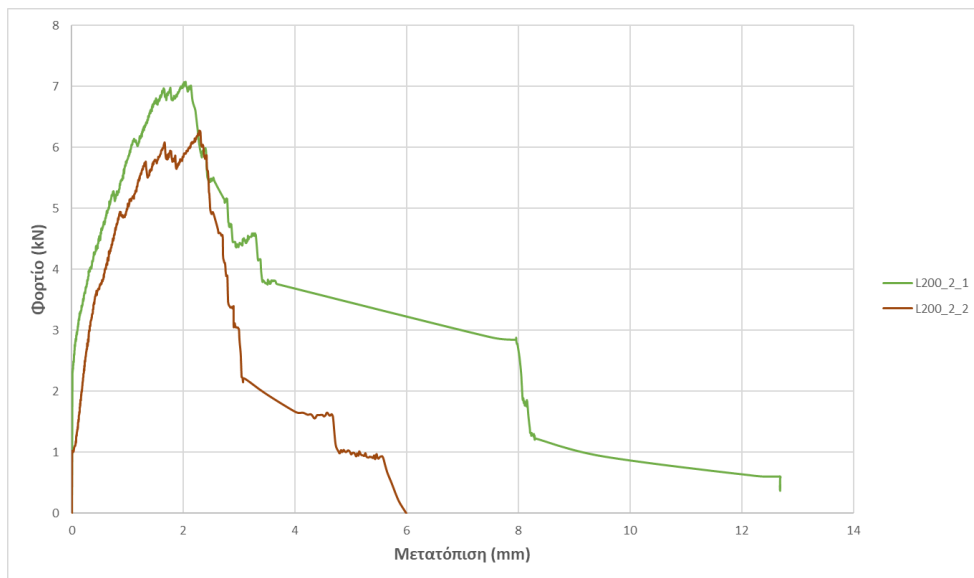
Στο σημείο αυτό είναι αναγκαίο να τονιστεί ότι η τιμή που λήφθηκε ως παραμόρφωση, προέκυψε από τον μέσο όρο των παραμορφώσεων που κατέγραψαν τα δύο LVDT's που είχαν εφαρμοστεί στον ινοπλέγμα IAM στο κάτω μέρος του δοκίμιου. Τα παρακάτω διαγράμματά απεικονίζουν τη σχέση φορτίου που ασκείται από το έμβολο και μετατόπισης του ινοπλέγματος IAM. Παρατηρείται πολύ εύκολα ότι τα δοκίμια με ίδιο μήκος συνάφειας έχουν παρόμοια συμπεριφορά με εξαίρεση ένα δοκίμιο, το L300\_2\_2 που αστόχησε με διαστρωματική αποκόλληση μεταξύ πλέγματος και κονιάματος, εξαιτίας κακής μηχανικής αγκύρωσης του ινοπλέγματος στο μπλοκ αναφοράς.

Τα παρακάτω διαγράμματά απεικονίζουν τη σχέση φορτίου που ασκείται από το έμβολο και μετατόπισης του ινοπλέγματος IAM. Παρατηρείται πολύ εύκολα ότι τα δοκίμια με ίδιο μήκος συνάφειας έχουν παρόμοια συμπεριφορά με εξαίρεση ένα δοκίμιο, το L300\_2\_2 που αστόχησε με διαστρωματική αποκόλληση μεταξύ πλέγματος και κονιάματος, εξαιτίας κακής μηχανικής αγκύρωσης του ινοπλέγματος στο μπλοκ αναφοράς.

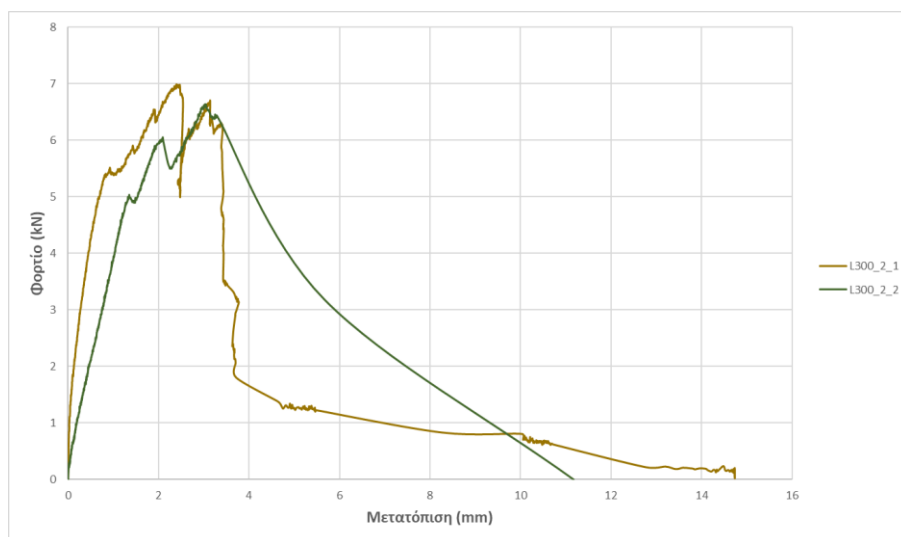


**Σχήμα 4.18** Καμπύλες φορτίου – μετατόπισης για τα δοκίμια L100\_2.

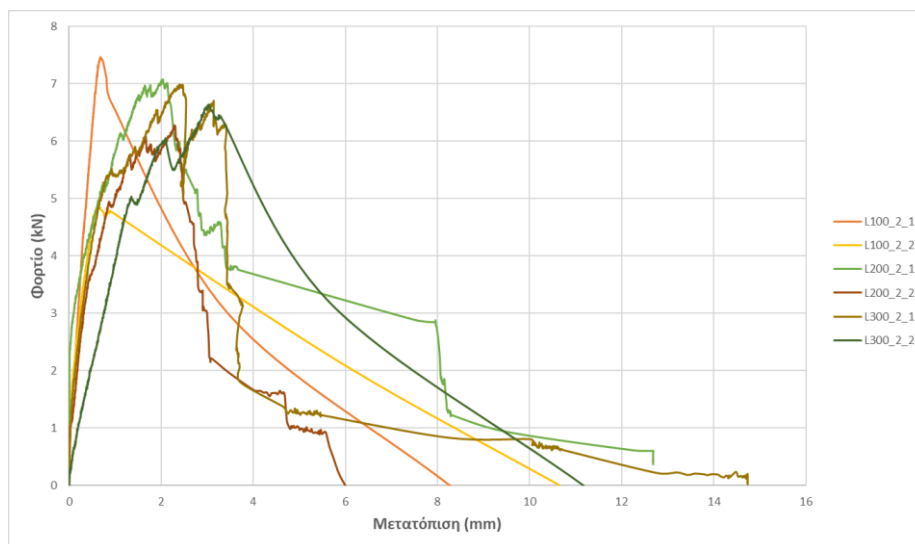




**Σχήμα 4.19** Καμπύλες φορτίου – μετατόπισης για τα δοκίμια L200\_2.



**Σχήμα 4.20** Καμπύλες φορτίου – μετατόπισης για τα δοκίμια L300\_2.



**Σχήμα 4.21** Καμπύλες φορτίου – μετατόπισης για όλα τα δοκίμια L100\_2, L200\_2 και L300\_2.

Από τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρείται ότι η συμπεριφορά μέχρι το μέγιστο φορτίο είναι παρόμοια ανεξάρτητα του τρόπου αστοχίας. Μετά όμως από το μέγιστο φορτίο η συμπεριφορά αλλάζει. Για μήκος συνάφειας 200mm και 300mm πλην ενός δοκιμίου με μήκος συνάφειας 300mm, παρατηρείται αργή πτώση φορτίου καθώς αυξάνεται η μετατόπιση. Από την άλλη πλευρά, για μήκη συνάφειας 100mm και ενός δοκιμίου με μήκος συνάφειας 300mm, το φορτίο μειώνεται πολύ γρήγορα.

Οι τρόποι αστοχίας που παρατηρήθηκαν ήταν διαστρωματική αποκόλληση μεταξύ πλέγματος και κονιάματος, καθώς και θραύση ινών του IAM. Τα δοκίμια που αστόχησαν με θραύση ινών είχαν μήκος συνάφειας 100mm και ενός δοκιμίου με μήκος συνάφειας 300mm. Επιπρόσθετα, τα δοκίμια που αστόχησαν με διαστρωματική αποκόλληση μεταξύ πλέγματος και κονιάματος είχαν μήκος συνάφειας 200mm και 300mm.

Στο σημείο αυτό αξίζει να τονιστεί ότι ο λόγος για τον οποίο το ένα εκ των δύο δοκιμών, με μήκος συνάφειας 300mm, αστόχησε με διαστρωματική αποκόλληση μεταξύ πλέγματος IAM και κονιάματος ήταν διότι δεν επιτεύχθηκε σωστή μηχανική αγκύρωση του ινοπλέγματος με το μπλοκ αναφοράς.

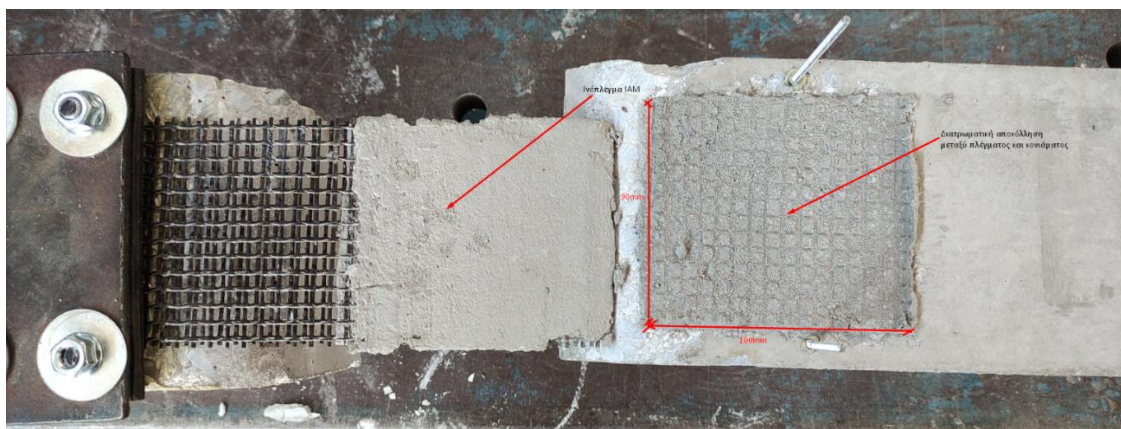
Επιπρόσθετα παρατηρήθηκε ότι με την αύξηση του μήκους συνάφειας παρατηρήθηκε αύξηση του μέγιστου φορτίου, ανεξαρτήτως του τρόπου αστοχίας.

Για το δοκίμιο L100\_2\_1, δηλαδή για το πρώτο δοκίμιο με μήκος συνάφειας 100mm και με δύο πλέγματα IAM με ίνες βασάλτη, μετά το τέλος του πειράματος λήφθηκαν τα εξής αποτελέσματα:

- Ο τρόπος αστοχίας του ινοπλέγματος IAM ήταν αποκόλληση διαστρωματική μεταξύ πλέγματος και κονιάματος

- Το μέγιστο φορτίο που επιβλήθηκε ήταν 7.46 kN.
- Στο μέγιστο φορτίο η παραμόρφωση ήταν 0.69mm.
- Η μέγιστη παραμόρφωση του ινοπλέγματος ήταν 8.80mm.
- Η βύθιση στο μέγιστο φορτίο ήταν 2.76mm.
- Δυνάμεις  $F_f$  και  $F_{f,ii}$  που αναπτύσσονται στο ινοπλέγμα IAM ήταν 6.82 kN και οι δύο δυνάμεις.
- Οι ορθές τάσεις του ινοπλέγματος IAM ήταν 1040.99 MPa.
- Οι διατμητικές τάσεις του ινοπλέγματος IAM ήταν 0.76 MPa.

Στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζεται ο τρόπος αστοχίας του ινοπλέγματος αμέσως μετά το τέλος του πειράματος.



α)



β)

**Σχήμα 4.22** Διαστρωματική αποκόλληση μεταξύ πλέγματος και κονιάματος για το δοκίμιο L100\_2\_1 α) και β).

Για το δοκίμιο L100\_2\_2, δηλαδή για το δεύτερο δοκίμιο με μήκος συνάφειας 100mm και με δύο πλέγματα IAM με ίνες βασάλτη, μετά το τέλος του πειράματος λήφθηκαν τα εξής αποτελέσματα:

- Ο τρόπος αστοχίας του ινοπλέγματος IAM ήταν αποκόλληση διαστρωματική μεταξύ πλέγματος και κονιάματος
- Το μέγιστο φορτίο που επιβλήθηκε ήταν 4.86 kN.
- Στο μέγιστο φορτίο η παραμόρφωση ήταν 1.06mm.
- Η μέγιστη παραμόρφωση του ινοπλέγματος ήταν 11.85mm.
- Η βύθιση στο μέγιστο φορτίο ήταν 1.97mm.
- Δυνάμεις  $F_f$  και  $F_{f,ii}$  που αναπτύσσονται στο ινοπλέγμα IAM ήταν 4.44 kN και οι δύο δυνάμεις.
- Οι ορθές τάσεις του ινοπλέγματος IAM ήταν 678.18 MPa.
- Οι διατμητικές τάσεις του ινοπλέγματος IAM ήταν 0.49 MPa.

Στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζεται ο τρόπος αστοχίας του ινοπλέγματος αμέσως μετά το τέλος του πειράματος.



α)



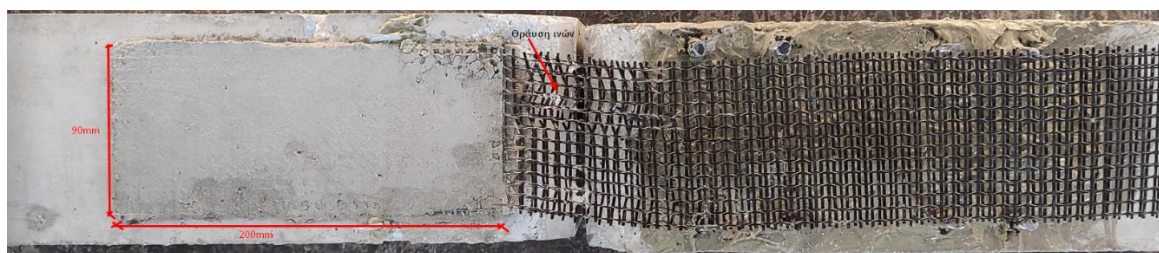
β)

**Σχήμα 4.23** Διαστρωματική αποκόλληση μεταξύ πλέγματος και κονιάματος για το δοκίμιο L100\_2\_2 α) και β).

Για το δοκίμιο L200\_2\_1, δηλαδή για το πρώτο δοκίμιο με μήκος συνάφειας 200mm και με δύο πλέγματα IAM με ίνες βασάλτη, μετά το τέλος του πειράματος λήφθηκαν τα εξής αποτελέσματα:

- Ο τρόπος αστοχίας του ινοπλέγματος IAM ήταν θραύση ινών.
- Το μέγιστο φορτίο που επιβλήθηκε ήταν 7 kN.
- Στο μέγιστο φορτίο η παραμόρφωση ήταν 2.31mm.
- Η μέγιστη παραμόρφωση του ινοπλέγματος ήταν 12mm.
- Η βύθιση στο μέγιστο φορτίο ήταν 4.17mm.
- Δυνάμεις  $F_f$  και  $F_{f,ii}$  που αναπτύσσονται στο ινόπλεγμα IAM ήταν 6.40 kN και οι δύο δυνάμεις.
- Οι ορθές τάσεις του ινοπλέγματος IAM ήταν 796.80 MPa.
- Οι διατμητικές τάσεις του ινοπλέγματος IAM ήταν 0.36 MPa.

Στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζεται ο τρόπος αστοχίας του ινοπλέγματος αμέσως μετά το τέλος του πειράματος.

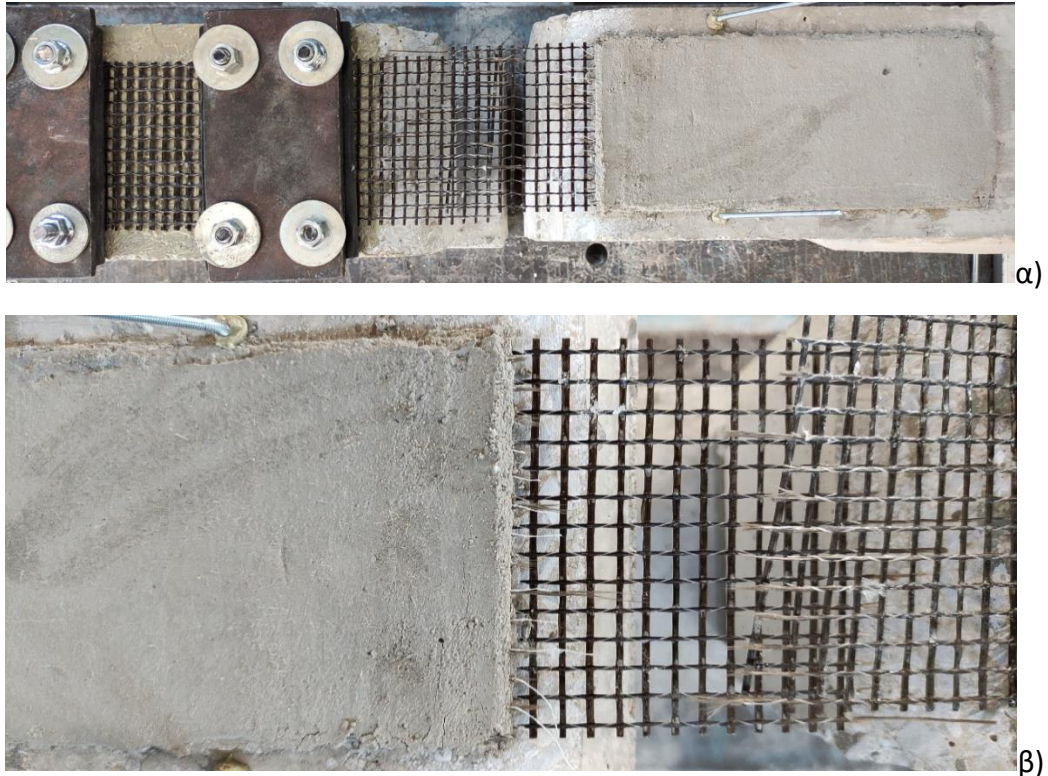


**Σχήμα 4.24** Θραύση ινών για το δοκίμιο L200\_2\_1.

Για το δοκίμιο L200\_2\_2, δηλαδή για το δεύτερο δοκίμιο με μήκος συνάφειας 200mm και με δύο πλέγματα IAM με ίνες βασάλτη, μετά το τέλος του πειράματος λήφθηκαν τα εξής αποτελέσματα:

- Ο τρόπος αστοχίας του ινοπλέγματος IAM ήταν θραύση ινών.
- Το μέγιστο φορτίο που επιβλήθηκε ήταν 6.27 kN.
- Στο μέγιστο φορτίο η παραμόρφωση ήταν 2.95mm.
- Η μέγιστη παραμόρφωση του ινοπλέγματος ήταν 7.66mm.
- Η βύθιση στο μέγιστο φορτίο ήταν 4.39mm.
- Δυνάμεις  $F_f$  και  $F_{f,ii}$  που αναπτύσσονται στο ινόπλεγμα IAM ήταν 5.73 kN και οι δύο δυνάμεις.
- Οι ορθές τάσεις του ινοπλέγματος IAM ήταν 874.93 MPa.
- Οι διατμητικές τάσεις του ινοπλέγματος IAM ήταν 0.32 MPa.

Στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζεται ο τρόπος αστοχίας του ινοπλέγματος αμέσως μετά το τέλος του πειράματος.

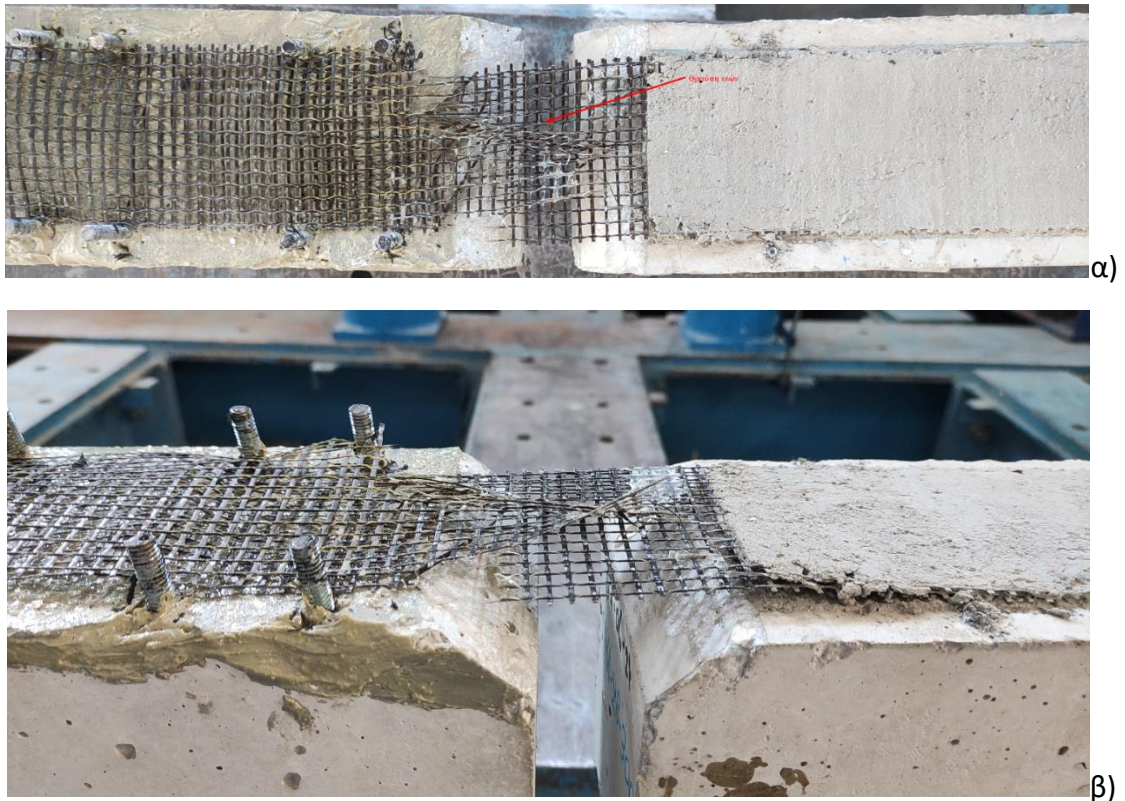


**Σχήμα 4.25** Θραύση ινών για το δοκίμιο L200\_2\_2 α) και β).

Για το δοκίμιο L300\_2\_1, δηλαδή για το πρώτο δοκίμιο με μήκος συνάφειας 300mm και με δύο πλέγματα IAM με ίνες βασάλτη, μετά το τέλος του πειράματος λήφθηκαν τα εξής αποτελέσματα:

- Ο τρόπος αστοχίας του ινοπλέγματος IAM ήταν θραύση ινών.
- Το μέγιστο φορτίο που επιβλήθηκε ήταν 7 kN.
- Στο μέγιστο φορτίο η παραμόρφωση ήταν 3.13mm.
- Η μέγιστη παραμόρφωση του ινοπλέγματος ήταν 14.64mm.
- Η βύθιση στο μέγιστο φορτίο ήταν 4.8mm.
- Δυνάμεις  $F_f$  και  $F_{f,ii}$  που αναπτύσσονται στο ινοπλέγμα IAM ήταν 6.4 kN και οι δύο δυνάμεις.
- Οι ορθές τάσεις του ινοπλέγματος IAM ήταν 976.80 MPa.
- Οι διατμητικές τάσεις του ινοπλέγματος IAM ήταν 0.24 MPa.

Στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζεται ο τρόπος αστοχίας του ινοπλέγματος αμέσως μετά το τέλος του πειράματος.

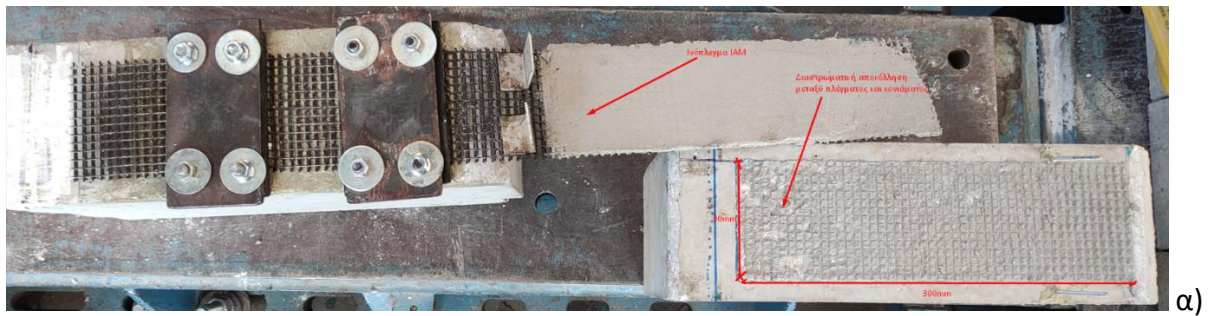


**Σχήμα 4.26** Θραύση ινών για το δοκίμιο L300\_2\_1 α) και β).

Για το δοκίμιο L300\_2\_2, δηλαδή για το δεύτερο δοκίμιο με μήκος συνάφειας 300mm και με δύο πλέγματα IAM με ίνες βασάλτη, μετά το τέλος του πειράματος λήφθηκαν τα εξής αποτελέσματα:

- Ο τρόπος αστοχίας του ινοπλέγματος IAM ήταν διαστρωματική αποκόλληση μεταξύ πλέγματος και κονιάματος.
- Το μέγιστο φορτίο που επιβλήθηκε ήταν 6.64 kN.
- Στο μέγιστο φορτίο η παραμόρφωση ήταν 3.51mm.
- Η μέγιστη παραμόρφωση του ινοπλέγματος ήταν 11.87mm.
- Η βύθιση στο μέγιστο φορτίο ήταν 4.47mm.
- Δυνάμεις  $F_f$  και  $F_{f,ii}$  που αναπτύσσονται στο ινοπλέγμα IAM ήταν 6.07 kN και οι δύο δυνάμεις.
- Οι ορθές τάσεις του ινοπλέγματος IAM ήταν 926.57 MPa.
- Οι διατμητικές τάσεις του ινοπλέγματος IAM ήταν 0.22 MPa.

Στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζεται ο τρόπος αστοχίας του ινοπλέγματος αμέσως μετά το τέλος του πειράματος.



**Σχήμα 4.27** Διαστρωματική αποκόλληση μεταξύ πλέγματος και κονιάματος για το δοκίμιο L300\_2\_2 α) και β).

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα πειραματικά αποτελέσματα για κάθε δοκίμιο:



ID	Ημ/μα ενίσχυσης	Ημ/μα δοκιμής	Τύπος πλέγματος	Αριθμός στρώσεων	Μήκος συνάφειας (mm)	w (mm)	z (mm)	Μετατόπιση στο μέγιστο φορτίο (mm)	Μέγιστο φορτίο (kN)	Μέγιστη μετατόπιση (mm)
L100_2_1	11/6/2021	15/9/2021	Basalt	2	100	320	175	0,69	7,46	8,8
L100_2_2	11/6/2021	16/9/2021	Basalt	2	100	320	175	1,06	4,86	11,85
L200_2_1	11/6/2021	14/9/2021	Basalt	2	200	320	175	2,31	7	12
L200_2_2	11/6/2021	15/9/2021	Basalt	2	200	320	175	2,95	6,27	7,66
L300_2_1	11/6/2021	10/9/2021	Basalt	2	300	320	175	3,13	7	14,64
L300_2_2	11/6/2021	10/9/2021	Basalt	2	300	320	175	3,51	6,64	11,87

α)

Βύθιση δ στη μέγιστη δύναμη (mm)	Γωνία α (rad)	Δύναμη Ff (kN)	Force Ff,ii (kN)	Ορθές τάσεις του πλέγματος (MPa)	Διατμητικές τάσεις του πλέγματος (MPa)	Τρόπος αστοχίας
2,76	0,01	6,82	6,82	1040,99	0,76	Διαστρωματική αποκόλληση μεταξύ πλέγματος και κονιάματος
1,97	0,01	4,44	4,44	678,18	0,49	Διαστρωματική αποκόλληση μεταξύ πλέγματος και κονιάματος
4,17	0,01	6,40	6,40	976,80	0,36	Θραύση ιών
4,39	0,01	5,73	5,73	874,93	0,32	Θραύση ιών
4,80	0,02	6,40	6,40	976,80	0,24	Θραύση ιών
4,47	0,01	6,07	6,07	926,57	0,22	Διαστρωματική αποκόλληση μεταξύ πλέγματος και κονιάματος

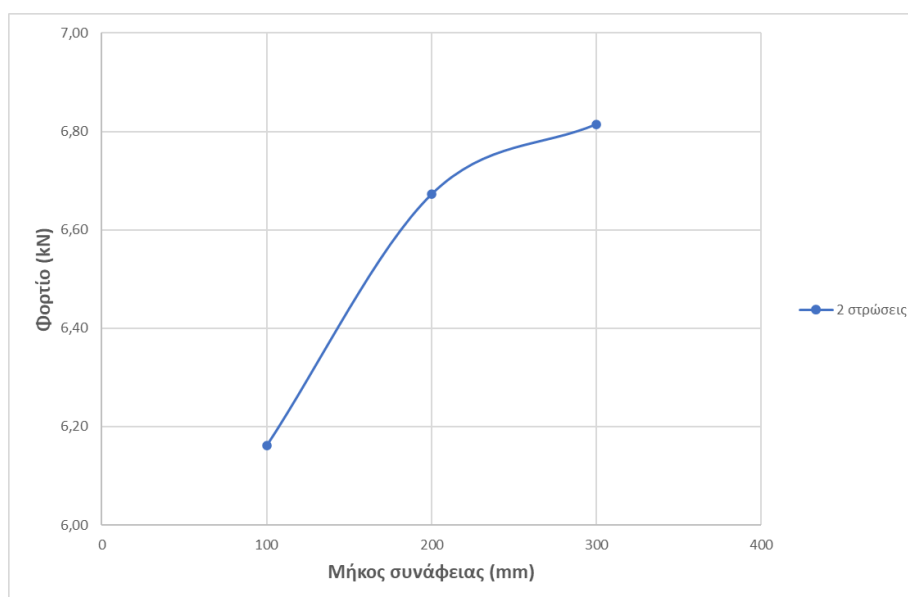
β)

Πίνακας 4.10 Πειραματικά αποτελέσματα α) και β).

## 4.8 Σχολιασμός Αποτελεσμάτων

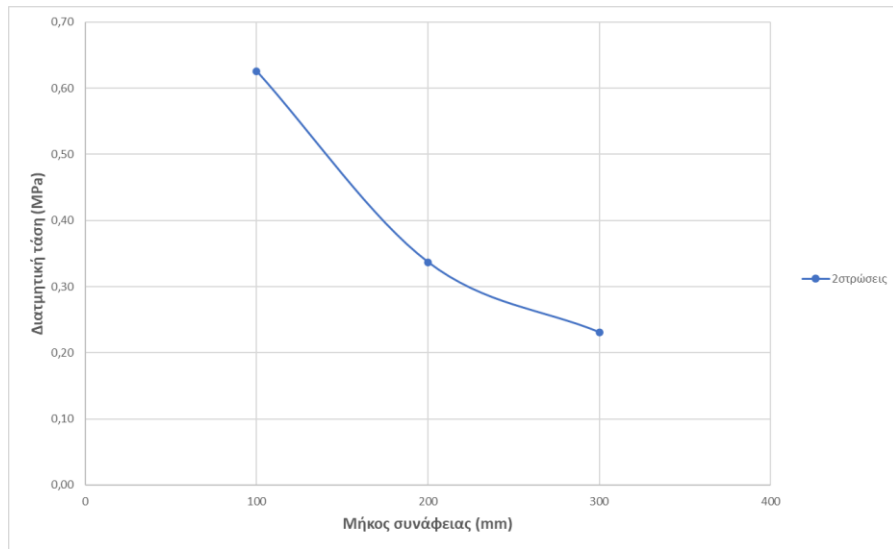
### 4.8.1 Επίδραση του μήκους συνάφειας

Στο παρακάτω σχήμα 4.28 απεικονίζεται το διάγραμμα φορτίου – μήκους συνάφειας. Παρατηρείται ότι αυξάνοντας το μήκος συνάφειας το φορτίο αυξάνεται μη αναλογικά. Όμως, μετά από μήκος συνάφειας 200mm, το φορτίο τείνει να φτάσει σε μια σταθερή τιμή. Αυτό το μήκος ονομάζεται ενεργό μήκος συνάφειας και βρίσκεται στην περιοχή 200mm – 300mm.



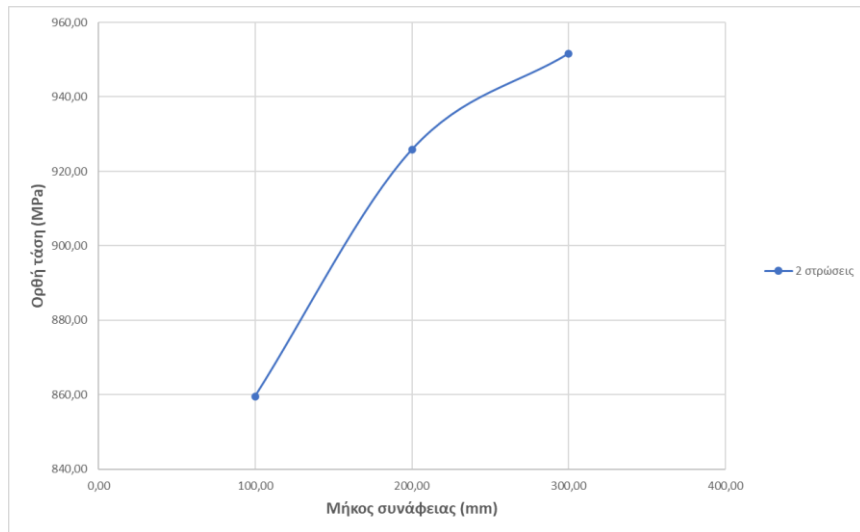
Σχήμα 4.28 Διάγραμμα φορτίου – μήκους συνάφειας.

Επιπλέον, το μήκος συνάφειας είχε επιρροή στις διατμητικές τάσεις του ινοπλέγματος IAM όπως υπολογίστηκαν από την εξίσωση 4.5. Όπως φαίνεται στο σχήμα 4.30, καθώς το μήκος συνάφειας αυξάνεται, οι διατμητικές τάσεις που αναπτύσσονται στο ινόπλεγμα IAM μειώνονται.



**Σχήμα 4.29** Μεταβολή της διαμητική τάσης του ινοπλέγματος με το μήκος συνάφειας.

Επιπρόσθετα, το μήκος συνάφειας είχε επιρροή στις ορθές τάσεις του ινοπλέγματος IAM, όπως υπολογίστηκαν από την εξίσωση 4.4. Όπως φαίνεται στο σχήμα 4.31, καθώς το μήκος συνάφειας αυξάνεται, οι ορθές τάσεις που αναπτύσσονται στο ινόπλεγμα IAM αυξάνονται.



**Σχήμα 4.30** Μεταβολή της ορθής τάσης του ινοπλέγματος με το μήκος συνάφειας.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

### 5. ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

#### 5.1 Συμπεράσματα

Σύμφωνα με τα προαναφερόμενα βγαίνει το συμπέρασμα ότι τα ινοπλέγματα σε ανόργανη μήτρα είναι μία εξαιρετικά καλή επιλογή για ενισχύσεις δομικών στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος. Το IAM αλλάζει όλα τα δεδομένα σχετικά με τις ενισχύσεις και τις αποκαταστάσεις κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος.

Παρακάτω παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την μελέτη της συνάφειας μεταξύ σκυροδέματος και IAM:

- Η μηχανική αγκύρωση του ινοπλέγματος με το μπλοκ αναφοράς έχει σημαντική επίπτωση στον τρόπο αστοχίας. Μία κακή μηχανική αγκύρωση του ινοπλέγματος IAM στο μπλοκ αναφοράς επιφέρει έναν λανθασμένο τρόπο αστοχίας που στην προκειμένη περίπτωση ήταν διαστρωματική αποκόλληση μεταξύ πλέγματος και κονιάματος στο ένα από τα δύο δοκίμια L300\_2 με μήκος συνάφειας 300mm.
- Με την αύξηση του μήκους του συνάφειας το φορτίο αυξάνεται μη αναλογικά. Ωστόσο, μετά από ένα ορισμένο μήκος συνάφειας, το φορτίο αστοχίας τείνει να φτάσει σε μια σταθερή τιμή. Αυτό το μήκος συνάφειας ονομάζεται ενεργό μήκος συνάφειας και κυμαίνεται από 200 mm έως 300 mm.
- Το μήκος συνάφειας έχει σημαντική επίπτωση στον τρόπο αστοχίας. Για μήκος συνάφειας 100mm, ο τρόπος αστοχίας ήταν διαστρωματική αποκόλληση μεταξύ πλέγματος και κονιάματος, ενώ για μήκος συνάφειας 200mm και 300mm ο τρόπος αστοχίας ήταν θραύση ινών.
- Με την αύξηση του μήκους συνάφειας, οι ορθές τάσεις που αναπτύσσονται στο ινόπλεγμα IAM αυξάνονται
- Με την αύξηση του μήκους συνάφειας, οι διατμητικές τάσεις που αναπτύσσονται στο ινόπλεγμα IAM μειώνονται.
- Οι διατμητικές τάσεις δεν κατανέμονται ομοιόμορφα στη επιφάνεια του σύνθετου υλικού IAM.

#### 5.2 Προτάσεις μελλοντική έρευνα

Παρακάτω παρατίθενται ορισμένες προτάσεις για περαιτέρω έρευνα:

- Στις πειραματικές δοκιμές χρησιμοποιήθηκε ινόπλεγμα IAM με ίνες βασάλτη. Μία πρόταση για μελλοντική έρευνα είναι να μελετηθεί η συνάφεια μεταξύ σκυροδέματος και IAM με ίνες άνθρακα, υάλου ή PBO.

- Στις πειραματικές δοκιμές χρησιμοποιήθηκε το τσιμέντο ως ανόργανη μήτρα. Οπότε μια ακόμη πρόταση είναι να χρησιμοποιηθεί γεωπολυμερές ως ανόργανη μήτρα και να πραγματοποιηθεί σύγκριση μεταξύ τους.
- Στις πειραματικές δοκιμές συνάφειας μεταξύ του IAM και του υποστρώματος σκυροδέματος, οι παράμετροι που άλλαζαν ήταν μόνο το μήκος συνάφειας. Προτείνεται περαιτέρω διερεύνηση της συνάφειας του IAM με το σκυρόδεμα, λαμβάνοντας υπόψιν την μεταβολή και άλλων παραμέτρων, όπως για παράδειγμα την ενίσχυση με IAM με μία, δύο, τρεις ή και περισσότερες στρώσεις, καθώς η συγκεκριμένη παράμετρος στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία δεν άλλαζε, διότι όλα τα δοκίμια ενισχύθηκαν με δύο στρώσεις. Άλλοι παράμετροι που μπορούν να ληφθούν υπόψιν εξαιτίας της μεταβολής τους είναι η προετοιμασία των επιφανειών σκυροδέματος (ήπια εκτράχυνση και σχηματισμός πλέγματος αυλάκων ή αμμοβολής), η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος, η επικάλυψη του ινοπλέγματος IAM με ρητίνη, καθώς και η αγκύρωση μέσω περιτύλιξης με κλειστούς μανδύες IAM (TRM jackets)

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

### **➤ ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

Κούτας Ν. Λ. (2015), *Νέες τεχνικές και υλικά για την ενίσχυση πλαισίων οπλισμένου σκυροδέματος μέσω εμφατνούμενης τοιχοποιίας: Πειραματική και αναλυτική μελέτη. Διατριβή Διδακτορικού Διπλώματος*, Πάτρα: Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών.

Μπουρνάς Δ. Α. (2008), *Ενίσχυση υποστυλωμάτων οπλισμένου σκυροδέματος με νέα υλικά: Ινοπλέγματα Ανόργανης Μήτρας, οπλισμοί σύνθετων υλικών ή ανοξείδωτου χάλυβα σε εγκοπές*, Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα.

Παπαντωνίου Ι, (2007), *Πειραματική διερεύνηση στοιχείων σκυροδέματος επί/εντός προκατασκευασμένων τύπων από ινοπλέγματα ανόργανης μήτρας*, Διατριβή μεταπτυχιακού διπλώματος, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα.

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*, Πρακτικά Συνεδρίου 15ου Συνεδρίου Σκυροδέματος, 25-27 Οκτ. 2006, Αλεξανδρούπολη.

Τριανταφύλλου Αθ., Χ., (2013), *Δομικά Υλικά*, 10η έκδοση Πάτρα.

### **➤ ΔΙΕΘΝΗΣ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

Awani O., El Refai A., El-Maaddawy T., (2015), *Bond characteristics of carbon fabric-reinforced cementitious matrix in double shear tests*, Construction and Building Materials, Volume 101, Part 1, pages 39-49.

Bartos, P., (1987), *Brittle Matrix Composites Reinforced with Bundles of Fibers*, In From Material Science to Construction Materials Engineering, J. Maso, Ed., Chapman and Hall, pp.539-546.

Calabrese A. S., D'Antino T., Colombi P., Poggi C., (2020), *Study of the influence of interface normal stresses on the bond behavior of FRCM composites using direct shear and modified beam tests*, Construction and Building Materials, Volume 262.

Dalalbashi A., Ghiassi B., Oliveira D. V., Freitas A., (2018), *Fiber-to-mortar bond behavior in TRM composites: Effect of embedded length and fiber configuration*, Composites Part B: Engineering, Volume 152, Pages 43-57.

D'Ambrisi A., Feo L., Focacci F., (2013), *Experimental analysis on bond between PBO-FRCM strengthening materials and concrete*, Composites Part B: Engineering, Volume 44, Issue 1, Pages 524-532.

- D'Antino T., Carloni C., Sneed L.H., Pellegrino C., (2014), *Matrix–fiber bond behavior in PBO FRCM composites: A fracture mechanics approach*, Engineering Fracture Mechanics, Volume 117, Pages 94-111.
- D'Antino, T., Sneed L.H., Carloni C., Pellegrino C., (2015), *Influence of the substrate characteristics on the bond behaviour of PBO FRCM – concrete joints*, Construction Building Materials, Volume 101, Pages 838–850.
- Falope F.O., Lanzoni L., Tarantinol A.M., (2018), *Modified hinged beam test on steel fabric reinforced cementitious matrix (SFRCM)*, Composites Part B: Engineering, Volume 146, Pages 232-243.
- Ghen J, Yang Z, Holt G., (2001), *FRP or steel plate-to-concrete bonded joints: effect of test methods on experimental bond strength*. Steel Composites Structures, Volume 1, Issue 2, Pages 231 – 244.
- Koutas L. N., Tetta Z., Bournas D. A., Triantafillou T. C., P.E., M.ASCE, (2019), *Strengthening of Concrete Structures with Textile Reinforced Mortars: State-of-the-Art Review*, Journal of Composites for Construction, Volume 23, Issue 1
- Koutas L. N, Bournas D. A., (2020), *Confinement of masonry columns with textile-reinforced mortar jackets*, Construction and Building Materials, Volume 258
- Ombres L. (2015a). *Analysis of the bond between Fabric Reinforced Cementitious Mortar (FRCM) strengthening systems and concrete*, Compos. Part B: Volume 69: pp. 418–426
- Ortlepp R., Hampel U., Curbach M. (2006). *A new approach for evaluating bond capacity of TRC strengthening*, Cement & Concrete Composites 28, pp. 589-597
- Raof S. M., Koutas L. N., Bournas D. A., (2016), *Bond between textile-reinforced mortar (TRM) and concrete substrates: Experimental investigation*, Composites Part B: Part B: Engineering, Volume 98, Pages 350-361.
- Raof S. M., (2017), *Bond between Textile Reinforced Mortar (TRM) and Concrete Substrate*. Doctor of Philosophy in Civil and structural Engineering: The University of Nottingham
- Raof S. M., Bournas D. A., (2017), *Bond between TRM versus FRP composites and concrete at high temperatures*, Composites Part B Engineering, Volume 127, pp. 150 – 165.
- Sneed L. H., D'Antino T., Carloni C., (2014), *Investigation of Bond Behavior of PBO Fiber-Reinforced Cementitious Matrix Composite-Concrete Interface*, ACI Materials Journal, V. 111, No. 1-6, January-December 2014
- Sneed L.H., D'Antino T., Carloni C., Pellegrino C., (2015), *A comparison of the bond behavior of PBO-FRCM composites determined by double-lap and single-lap shear tests*, Cement and Concrete Composites, Volume 64, pages 37-48.
- Triantafillou T., Papanicolaou C., Zissimopoulos P., Laourdekis T., (2006), *Concrete Confinement with Textile-Reinforced Mortar Jackets*, ACI Structural Journal, V. 103, No. 1.
- Younis A., Ebead U., (2018), *Bond characteristics of different FRCM systems*, Construction and Building Materials, Volume 175, Pages 610-620.

Yuan H, Wu W, Yoshizawa H., (2001), *Theoretical solutions on interfacial stress transfer of externally bonded steel/composite laminates*, Journal of Structural Mechanics Earthquake Engineering, Volume 2001, Issue 675, Pages 27–39.