



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

Διπλωματική Εργασία

**ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΣΥΝΑΦΕΙΑΣ ΑΝΑΜΕΣΑ ΣΤΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΚΑΙ ΣΤΟ
ΣΥΝΘΕΤΟ ΥΛΙΚΟ ΙΑΜ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΜΗΤΡΑΣ ΓΕΩΠΟΛΥΜΕΡΟΥΣ**

ΣΕΒΑΣΤΗ ΠΑΠΑΔΟΠΟΥΛΟΥ

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των απαιτήσεων για την απόκτηση του
Διπλώματος Πολιτικού Μηχανικού

ΒΟΛΟΣ 2022

© 2022 Σεβαστή Παπαδοπούλου

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 της διπλωματικής μου εργασίας, κ. Κούτα Λάμπρο, Επίκουρο Καθηγητή του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας και τον κ. Παπακωνσταντίνου Χρήστο, Αναπληρωτή Καθηγητή του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση που μου προσέφεραν καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Κουτσελίνη Αλέξανδρο, μέλος ΕΤΕΠ του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών και την κ. Σκυριανού Ιωάννα, υποψήφια διδάκτωρ του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών, για την βοήθειά τους κατά την διεκπεραίωση του πειραματικού προγράμματος και τον συμφοιτητή μου, Καρακίτσο Κωνσταντίνο, για τη συνεργασία του στο χώρο του εργαστηρίου. Πάνω απ' όλα, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τους γονείς μου, Φώτη και Δέσποινα, και τα αδέρφια μου, Νίκο και Μαρία, για την αγάπη και την υποστήριξη που μου προσφέρουν όλα αυτά τα χρόνια και τους φίλους μου για την ψυχολογική υποστήριξη κατά τη διάρκεια της διπλωματικής μου.

ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΣΥΝΑΦΕΙΑΣ ΑΝΑΜΕΣΑ ΣΤΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΚΑΙ ΣΤΟ ΣΥΝΘΕΤΟ ΥΛΙΚΟ ΙΑΜ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΜΗΤΡΑΣ ΓΕΩΠΟΛΥΜΕΡΟΥΣ

Σεβαστή Παπαδοπούλου

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, 2022

Επιβλέποντες Καθηγητές: Κούτας Λάμπρος, Επίκουρος Καθηγητής Π.Θ.

Παπακωνσταντίνου Χρήστος, Αναπληρωτής
Καθηγητής Π.Θ

Περίληψη

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας διερευνάται η συνάφεια μεταξύ σκυροδέματος και Ινοπλεγμάτων σε Ανόργανη Μήτρα (IAM), των οποίων η μήτρα είναι γεωπολυμερικής σύστασης. Κύριες παράμετροι διερεύνησης συνιστούν τα διαφορετικά μήκη συνάφειας, τα οποία μελετώνται για δύο ακραίες τιμές των 50 mm και 300 mm, καθώς και το είδος της μήτρας (γεωπολυμερικής ή τσιμεντοειδούς σύστασης). Συνολικά, παρασκευάστηκαν έξι πρισματικά δοκίμια με διαστάσεις 385 x 200 x 120 mm, στα οποία επικολλήθηκαν εξωτερικά δύο στρώσεις πλέγματος βασάλτη, ενώ το είδος της μήτρας ήταν είτε τσιμεντοειδούς είτε γεωπολυμερικής σύστασης. Ο χαρακτηρισμός της συνάφειας πραγματοποιήθηκε μέσω δοκιμής κάμψης δύο ανεξάρτητων πρισματικών δοκιμίων (modified beam test). Η πειραματική ανάλυση έδειξε ότι το κονίαμα γεωπολυμερούς επέφερε καλύτερα αποτελέσματα σε σύγκριση με το τσιμεντοειδές κονίαμα, καθώς κατεγράφησαν υψηλότερα μέγιστα φορτία αστοχίας, συνεπώς, και μεγαλύτερες τάσεις συνάφειας. Παράλληλα, ο μηχανισμός αστοχίας για τα πρίσματα με ινοπλέγματα σε μήτρα γεωπολυμερούς ήταν η θραύση των ινών, σε αντίθεση με τα πρίσματα με ινοπλέγματα σε τσιμεντοειδές κονίαμα, τα οποία αστόχησαν μέσω διαστρωματικής αποκόλλησης και θραύσης των ινών.

Λέξεις Κλειδιά: *κονίαμα γεωπολυμερούς, συνάφεια, σκυρόδεμα, τσιμεντοειδές κονίαμα, μήκος συνάφειας, IAM, δοκιμή έμμεσης κάμψης, πλέγμα βασάλτη.*

Abstract

The main goal of this thesis was to investigate the bond between concrete and externally bonded layers of geopolymer-based Textile Reinforced Mortar (TRM). The main parameters investigated were the bond length (50mm and 300mm were studied), as well as the type of the matrix (geopolymer versus cementitious). In total, six concrete prisms with dimensions of 385 x 200 x 120 were prepared, on which two layers of basalt textile were applied using either a cementitious or geopolymer matrix. The bond behavior was assessed through a modified beam test. The results showed that the geopolymer mortar had improved behavior compared to the cementitious mortar, as higher maximum failure loads were recorded. The failure mode of the strip using a geopolymer matrix was due to fiber rupture. In contrast, when cementitious mortar was used the failure mode was associated either with interlaminar debonding at the textile-mortar interface or with fiber rupture.

Keywords: *geopolymer mortar, bond, concrete, cementitious mortar, bond length, TRM, modified beam test, basalt textile.*

Περιεχόμενα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1.....	12
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	12
1.1 Ανάγκη ενίσχυσης κατασκευών ΟΣ.....	12
1.2 Χρήση σύνθετων υλικών για την ενίσχυση κατασκευών ΟΣ	13
1.3 Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας.....	14
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2.....	15
ΣΥΝΤΟΜΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ.....	15
2.1 Ινοπλισμένα Πολυμερή (ΙΟΠ)	15
2.2 Ινοπλέγματα σε Ανόργανη Μήτρα (IAM)	17
2.2.1 Πλεονεκτήματα IAM έναντι ΙΟΠ.....	20
2.3 Μορφές αστοχίας στοιχείων ΟΣ ενισχυμένων με εξωτερικά επικολλούμενα IAM.....	21
2.4 Πεδίο εφαρμογής των IAM	23
2.5 Γεωπολυμερή	26
2.5.1 Γενικά.....	26
2.5.2 Χρήση γεωπολυμερών σε εφαρμογές του πολιτικού μηχανικού	28
2.6 Προηγούμενες μελέτες σχετικά με τη συνάφεια IAM – σκυροδέματος.....	29
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3.....	38
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ.....	38
3.1 Γενικά.....	38
3.2 Περιγραφή πειραματικών δοκιμών	38
3.3 Ιδιότητες υλικών.....	41
3.3.1 Σκυρόδεμα.....	41
3.3.2 Ινοπλέγματα	43
3.3.3 Μήτρα ενίσχυσης	44
3.4 Προετοιμασία δοκιμών	47
3.4.1 Κατασκευή πρισματικών δοκιμών σκυροδέματος.....	47
3.5 Διαδικασία εφαρμογής IAM	48
3.5.1 Προετοιμασία επιφάνειας εφαρμογής.....	48
3.5.2 Εφαρμογή IAM	49
3.6 Πειραματική διάταξη.....	51
3.7 Γεωμετρικός προσδιορισμός αξονικής δύναμης IAM	54
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4.....	57
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ.....	57
4.1 Γενικά – Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων	57

4.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων ανά δύο πανομοιότυπα δοκίμια	59
4.2.1 Δοκίμια GP_2B_300-1 και GP_2B_300-2	59
4.2.2 Δοκίμια GP_2B_50-1 και GP_2B_300-2	62
4.2.3 Δοκίμια CM_2B_300-1 και CM_2B_300-2.....	65
4.3 Σύγκριση και σχολιασμός αποτελεσμάτων	68
4.3.1 Σύγκριση δοκιμίων με διαφορετικό τύπο κονιάματος και ίδιο μήκος συνάφειας	68
4.3.2 Σύγκριση δοκιμίων με διαφορετικό μήκος συνάφειας και ίδιο τύπο κονιάματος....	71
4.4 Σύγκριση διαφόρων μεγεθών	73
4.4.1 Καμπτική και θλιπτική αντοχή κονιαμάτων.....	73
4.4.2 Ολίσθηση στη μέγιστη δύναμη για το εκάστοτε δοκίμιο	75
4.4.3 Μέγιστο φορτίο.....	76
4.4.4 Ορθές τάσεις πλέγματος.....	76
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5.....	79
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ	79
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	81

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1.2.1: Σχηματική απεικόνιση σύνθετου υλικού [2]	13
Σχήμα 2.1.1: Σύσταση ΙΟΠ [3].....	15
Σχήμα 2.1.2: Αντοχή ινών άνθρακα, βασάλτη, αραμιδίου και υάλου [3]	16
Σχήμα 2.1.3: Ενδεικτικοί τύποι υφασμάτων ΙΟΠ συνεχών ινών α) γυαλιού, β) άνθρακα, γ) αραμιδίου [9].....	16
Σχήμα 2.1.4: Ενίσχυση δομικού στοιχείου με ΙΟΠ [5]	17
Σχήμα 2.2.1: Τύποι ινοπλεγμάτων α) γυαλιού, β) βασάλτη και γ) PBO [7]	18
Σχήμα 2.2.2: Ενδεικτικές φωτογραφίες πλεγμάτων ινών α) άνθρακα, β) βασάλτη και γ) υάλου [4]	19
Σχήμα 2.2.3: Τύποι ινοπλέγματος με κλώνους α) δύο διευθύνσεων, β) τεσσάρων διευθύνσεων και γ) τριών διαστάσεων [9].....	19
Σχήμα 2.2.1.1: Διάγραμμα της αντοχής του κονιάματος σε κάμψη και εφελκυσμό συναρτήσει της υψηλής θερμοκρασίας [12].....	21
Σχήμα 2.3.1: Σχηματική απεικόνιση των μορφών αστοχίας [6]	23
Σχήμα 2.4.1: Κάλυψη εξωτερικής επιφάνειας με στοιχεία ΙΑΜ [13]	24
Σχήμα 2.4.2: Ενίσχυση με ΙΑΜ α) δοκού, β) υποστυλώματος και γ) τοιχοποιίας [8].....	24
Σχήμα 2.4.3: Ενίσχυση δοκού έναντι διάτμησης με χρήση μανδύα ΙΑΜ [14]	25
Σχήμα 2.4.4: Ενίσχυση τοιχοποιίας με μανδύα ΙΑΜ [15].....	25
Σχήμα 2.5.1.1: Συνήθη συστατικά γεωπολυμερούς α) ιπτάμενη τέφρα [17], β) μετακαολίνη, γ) σκωρία καμίνου [18].....	27
Σχήμα 2.5.1.2: Σύσταση γεωπολυμερούς (1) [19]	28
Σχήμα 2.5.1.3: Σύσταση γεωπολυμερούς (2) [20]	28
Σχήμα 2.6.1: Προετοιμασία επιφάνειας σκυροδέματος με α) πλέγμα αυλακώσεων και β) αμμοβολή [11]	30
Σχήμα 2.6.2: Στάδια εφαρμογής ΙΑΜ α) εφαρμογή πρώτης στρώσης κονιάματος, β) εφαρμογή πλέγματος και γ) εφαρμογή τελικής στρώσης κονιάματος [11]	31
Σχήμα 2.6.3: Λεπτομέρειες της πειραματικής διάταξης υπό double lap shear test [11]	32
Σχήμα 2.6.4: Πειραματική διάταξη [11]	32
Σχήμα 2.6.5: Σχηματική διάταξη του πειράματος [10]	34
Σχήμα 2.6.6: Οι τρεις μορφές αστοχίας που παρατηρήθηκαν, όπως περιγράφονται παραπάνω [10]	35
Σχήμα 2.6.7: Οι δύο διαφορετικές γεωμετρίες α) με τρία μπλοκ τοιχοποιίας και β) με ένα μπλοκ αντίστοιχα [22]	36
Σχήμα 2.6.8: Σύγκριση αποτελεσμάτων αξονικής τάσης και ολικής ολίσθησης για τα δοκίμια από α) ίνες άνθρακα και β) ίνες PBO [22].....	37
Σχήμα 3.2.1: Σχηματική απεικόνιση των πρισματικών δοκιμίων.....	39
Σχήμα 3.2.2: Πλάγια όψη της τελικής μορφής των δοκιμίων	39
Σχήμα 3.2.3: Εγκάρσιος σπλισμός 2Φ8 α) σε όψη και β) σε τρισδιάστατη απεικόνιση.....	40
Σχήμα 3.3.1.1: Τελική μορφή του νωπού σκυροδέματος στα καλούπια	42
Σχήμα 3.3.1.2: Λήψη κυβικών δοκιμίων	42
Σχήμα 3.3.2.1: Πλέγμα ινών βασάλτη	43
Σχήμα 3.3.3.1: α) Μηχανή κάμψης τριών σημείων, β) Μηχανή σύνθλιψης	46
Σχήμα 3.3.3.2: Δοκίμιο κονιάματος γεωπολυμερούς πριν και μετά τη δοκιμή κάμψης.....	46
Σχήμα 3.4.1.1: α) Ξυλότυπος χωρίς σπλισμούς, β) Ξυλότυπος με σπλισμούς και γ) Λεπτομέρειες σπλισμού	48

Σχήμα 3.5.1.1: Εκτραχυμένη επιφάνεια πρισματικού δοκιμίου	49
Σχήμα 3.5.2.1: Διαδικασία εφαρμογής IAM με μήτρα γεωπολυμερούς	51
Σχήμα 3.5.2.2: Διαδικασία εφαρμογής IAM με τσιμεντοειδή μήτρα	51
Σχήμα 3.6.1: Πειραματική διάταξη λίγο πριν την έναρξη του πειράματος. Τα δύο ορθογωνικά πρίσματα είναι διατεταγμένα και αποτελούν επίπεδη επιφάνεια	52
Σχήμα 3.6.2: Προετοιμασία σταθερού δοκιμίου	52
Σχήμα 3.6.3: Μηχανική αγκύρωση πλέγματος.....	53
Σχήμα 3.6.4: Διάγραμμα Ελευθέρου Σώματος πρισματικού δοκιμίου [22]	54
Σχήμα 4.2.1.1: Τυπική διάταξη λίγο πριν την έναρξη της πειραματικής δοκιμής.....	55
Σχήμα 4.2.1.2: Θραύση ινών βασάλτη ως μορφή αστοχίας του δοκιμίου GP_2B_300-1	60
Σχήμα 4.2.1.3: Θραύση ινών βασάλτη ως μορφή αστοχίας του δοκιμίου GP_2B_300-2	60
Σχήμα 4.2.1.4: Κοινό διάγραμμα φορτίου- ολίσθησης για τα δοκίμια GP_2B_300-1 και GP_2B_300-2	61
Σχήμα 4.2.2.1: Θραύση ινών βασάλτη ως μορφή αστοχίας του δοκιμίου GP_2B_50-1	61
Σχήμα 4.2.2.2: Θραύση ινών βασάλτη ως μορφή αστοχίας του δοκιμίου GP_2B_50-2	63
Σχήμα 4.2.2.3: Κοινό διάγραμμα φορτίου- ολίσθησης για τα δοκίμια GP_2B_50-1 και GP_2B_50-2	64
Σχήμα 4.2.3.1: Θραύση ινών βασάλτη ως μορφή αστοχίας του δοκιμίου CM_2B_300-1	64
Σχήμα 4.2.3.2: Διαστρωματική αποκόλληση στη διεπιφάνεια πλέγματος- κονιάματος ως μορφή αστοχίας του δοκιμίου CM_2B_300-2	66
Σχήμα 4.2.3.3: Κοινό διάγραμμα φορτίου- ολίσθησης για τα δοκίμια CM_2B_300-1 και CM_2B_300-2	67
Σχήμα 4.3.1.1: Κοινό διάγραμμα φορτίου- ολίσθησης για τα τέσσερα πρίσματα	67
Σχήμα 4.3.2.1: Κοινό διάγραμμα φορτίου- ολίσθησης για τα τέσσερα πρίσματα	69
Σχήμα 4.4.1.1: Καμπτική αντοχή των δύο κονιαμάτων	71
Σχήμα 4.4.1.2: Θλιπτική αντοχή των δύο κονιαμάτων	73
Σχήμα 4.4.2.1: Ολίσθηση στη μέγιστη δύναμη για το εκάστοτε πρίσμα	74
Σχήμα 4.4.3.1: Μέγιστο φορτίο για τα εκάστοτε πρίσμα	75
Σχήμα 4.4.4.1: Ορθές τάσεις πλέγματος για το εκάστοτε πρίσμα	76
Σχήμα 4.4.4.2: Ορθές τάσεις πλέγματος ως ποσοστό επί τοις εκατό σε σχέση με την τιμή που δίνεται για το πλέγμα από τον κατασκευαστή	77

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 3.2.1: Ονοματολογία δοκιμών	41
Πίνακας 3.3.1.1: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά και θλιπτική αντοχή δοκιμών κύβου	42
Πίνακας 3.3.2.1: Μηχανικές ιδιότητες πλέγματος	43
Πίνακας 3.3.3.1: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά και αντοχές δοκιμών κονιάματος γεωπολυμερούς	45
Πίνακας 3.3.3.2: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά και αντοχές δοκιμών τσιμεντοειδούς κονιάματος	58
Πίνακας 4.1.1: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα ορθογωνικών πρισμάτων	59

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Ανάγκη ενίσχυσης κατασκευών ΟΣ

Τις τελευταίες δεκαετίες η ανάγκη συντήρησης ή/και ενίσχυσης των υφιστάμενων κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος (ΟΣ) απασχολεί ολοένα και περισσότερο τον κλάδο των πολιτικών μηχανικών και των τεχνικών έργων. Η αναγκαιότητα για ενίσχυση προκύπτει λόγω της έντονης οικοδόμησης που είχε προηγηθεί τις τελευταίες δεκαετίες, η οποία εντοπίζεται κυρίως στα μεγάλα αστικά κέντρα και έχει γίνει βάσει παλαιότερων κανονισμών, οι οποίοι δεν βρίσκονται πλέον σε ισχύ. Κατά συνέπεια, εμφανίζονται μεγάλες ανεπάρκειες στις υποδομές που επηρεάζουν σημαντικά την ασφάλεια των πολιτών και την ανθεκτικότητα σε διάρκεια ζωής των δομημάτων.

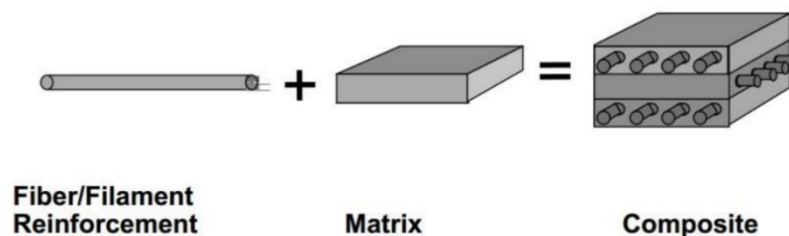
Πιο συγκεκριμένα, εντοπίζονται προβλήματα που σχετίζονται με τον ανεπαρκή αρχικό σχεδιασμό, καθώς αυτός έχει πραγματοποιηθεί πριν τη θέσπισή των σύγχρονων προδιαγραφών (Ευρωκώδικες), οι οποίοι εξασφαλίζουν αντισεισμική συμπεριφορά. Ορισμένα από τα ζητήματα που προκύπτουν σχετίζονται με χαμηλά ποσοστά οπλισμού, χρήση σκυροδέματος χαμηλής αντοχής, χαμηλή αντοχή δομικού χάλυβα, ανεπαρκείς αγκυρώσεις συνδετήρων και μικρές επικαλύψεις. Επιπρόσθετα, η φυσική φθορά – γήρανση των επιμέρους υλικών και κατά συνέπεια των κατασκευών εντείνει την ανάγκη ενίσχυσης των κτιριακών δομών.

Τα ζητήματα που αναφέρθηκαν παραπάνω καθιστούν έντονη την ανάγκη για ενίσχυση, ειδικά σε μια χώρα που χαρακτηρίζεται από έντονο σεισμογενή χαρακτήρα, όπως η Ελλάδα. Οι στρατηγικές μέσω των οποίων επιτυγχάνεται επαρκής ενίσχυση των κατασκευών ΟΣ είναι ποικίλες, με την επιστημονική κοινότητα να ερευνά διαρκώς νέες τεχνικές και υλικά. Αναλυτικότερα, η προσθήκη τοιχωμάτων (εμφαννούμενων ή εξωτερικών), η κατασκευή δικτυωτών συστημάτων, η προσθήκη πτερυγίων στα υποστυλώματα και η κατασκευή μανδυνών είτε οπλισμένου σκυροδέματος, είτε μεταλλικών στοιχείων, είτε σύνθετων υλικών συνιστούν αποτελεσματικές μεθόδους για την αύξηση της αντοχής, της δυσκαμψίας και της πλαστιμότητας του εκάστοτε φορέα.

1.2 Χρήση σύνθετων υλικών για την ενίσχυση κατασκευών ΟΣ

Τα τελευταία χρόνια η ανάγκη της επιστημονικής κοινότητας για εύρεση υλικών τα οποία καλύπτουν τις απαιτήσεις για ασφαλείς κατασκευές έχουν συμβάλει στην εύρεση καινοτόμων τεχνικών και μεθόδων ενίσχυσης των κατασκευών. Η ραγδαία ανάπτυξη που έχει πραγματοποιηθεί στον τεχνολογικό κλάδο συνέβαλε στη δημιουργία νέων υλικών υψηλών προδιαγραφών, τα οποία έχουν εφαρμογή και στον κατασκευαστικό τομέα, διευκολύνοντας κατ' αυτόν τον τρόπο το έργο των πολιτικών μηχανικών.

Μια σύγχρονη τεχνική ενίσχυσης που χρησιμοποιείται και έχει γίνει ευρέως αποδεκτή τις τελευταίες δεκαετίες είναι η ενίσχυση με σύνθετα υλικά. Ως σύνθετα ορίζονται τα υλικά τα οποία σε μακροσκοπικό επίπεδο αποτελούνται από δύο ή περισσότερα χημικά ευδιάκριτα συστατικά μέρη που έχουν μία ορισμένη διαχωριστική επιφάνεια μεταξύ τους. Το ένα από τα συστατικά μέρη χαρακτηρίζεται ως συστατικό ενίσχυσης και προσδίδει στο σύνθετο βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες. Το δεύτερο συστατικό καλείται μήτρα, είναι συνήθως χαμηλής πυκνότητας και η συμμετοχή του στο σύνθετο εξασφαλίζει τη μέγιστη δυνατή εκμετάλλευση των ιδιοτήτων της ενίσχυσης [1]. Στο Σχήμα 1.2.1 παρουσιάζονται τα συνδετικά μέρη του σύνθετου υλικού.



Σχήμα 1.2.1: Σχηματική απεικόνιση σύνθετου υλικού [2].

Τα σύνθετα υλικά που χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο στον τομέα των κατασκευών είναι τα Ινοπλισμένα Πολυμερή (ΙΟΠ), ενώ τα τελευταία χρόνια πραγματοποιείται σημαντική αύξηση στη χρήση των Ινοπλεγμάτων σε Ανόργανη Μήτρα (IAM) που αποτελεί μια πιο φιλική προς το περιβάλλον εναλλακτική και παρουσιάζει ποικίλα πλεονεκτήματα.

Τα Ινοπλέγματα σε Ανόργανη Μήτρα (IAM) αποτελούν καινοτόμα τεχνική μέθοδο ενίσχυσης, η οποία έχει κεντρίσει το ενδιαφέρον των ερευνητών τις τελευταίες

δεκαετίες. Το νέο αυτό υλικό είναι γνωστό στην Ευρώπη με την ονομασία «Textile Reinforced Mortar» (TRM), ενώ στις ΗΠΑ έχει επικρατήσει η ονομασία «Fabric Reinforced Cementitious Matrix» (FRCM). Στην ονομασία FRCM η μήτρα είναι τσιμεντοειδούς μορφής, κάτι που περιορίζει τη χρήση αυτού του ακρωνύμιου. Η χρήση μήτρας διαφορετικής σύστασης στα IAM εξετάζεται σε μεγάλο βαθμό από την επιστημονική κοινότητα με επικρατέστερη εναλλακτική τη χρήση μήτρας γεωπολυμερούς.

1.3 Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας

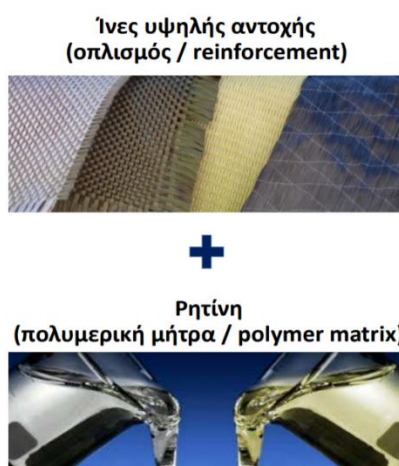
Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί η μελέτη της συνάφειας ανάμεσα στο σκυρόδεμα και στο σύνθετο υλικό IAM με χρήση μήτρας γεωπολυμερούς. Αναλυτικότερα, η πειραματική διαδικασία περιλαμβάνει την κατασκευή έξι πρισματικών δοκιμών σκυροδέματος διαστάσεων 385 x 200 x 120 mm, στα οποία επικολλήθηκαν εξωτερικά δύο στρώσεις πλέγματος βασάλτη. Βασικές παράμετροι προς μελέτη αποτελούν το μήκος συνάφειας του σύνθετου υλικού, το οποίο εξετάζεται για δύο ακραίες περιπτώσεις των 50 mm και 300 mm, καθώς και η σύσταση της μήτρας, η οποία είναι είτε γεωπολυμερικής είτε τσιμεντοειδούς σύστασης. Ο χαρακτηρισμός της συνάφειας πραγματοποιήθηκε μέσω δοκιμών έμμεσης κάμψης δύο ανεξάρτητων πρισματικών δοκιμών (modified beam test). Ζητούμενο αποτελεί η σύγκριση των αποτελεσμάτων που θα προκύψουν κατά την εκπόνηση της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας, ώστε να εξαχθούν συμπεράσματα για την αποτελεσματικότητα της κάθε παραμέτρου προς διερεύνηση.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΣΥΝΤΟΜΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

2.1 Ινοπλισμένα Πολυμερή (ΙΟΠ)

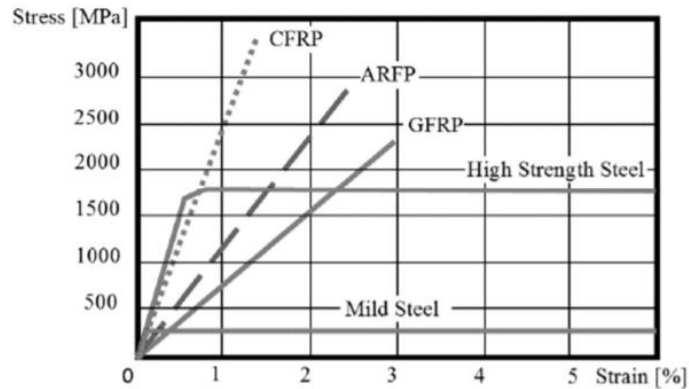
Τα Ινοπλισμένα Πολυμερή (ΙΟΠ), σε αγγλική ορολογία Fiber Reinforced Polymers (FRP), αποτελούνται από ίνες υψηλής αντοχής που λειτουργούν ως οπλισμός και από την ρητίνη, δηλαδή την πολυμερική μήτρα, η οποία λειτουργεί ως συγκολλητικό υλικό. Στο Σχήμα 2.1.1 παρουσιάζονται τα συστατικά που συνθέτουν τα Ινοπλισμένα Πολυμερή.



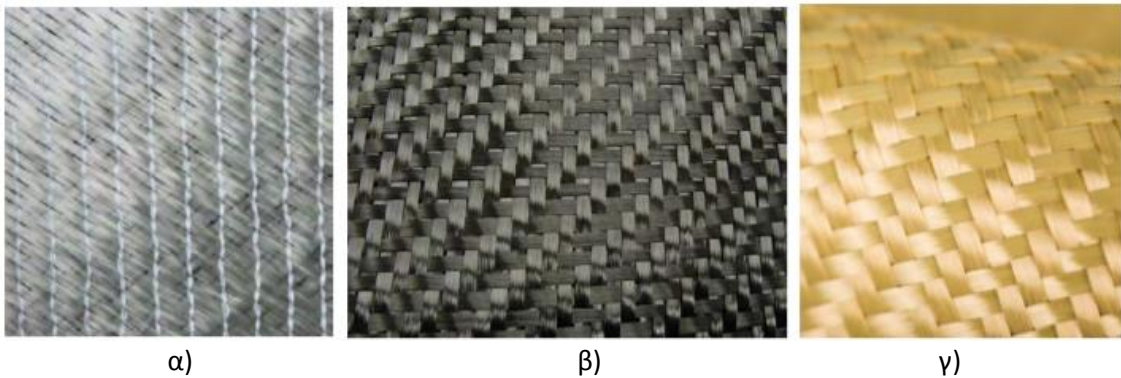
Σχήμα 2.1.1: Σύσταση ΙΟΠ [3].

Οι ίνες που χρησιμοποιούνται χαρακτηρίζονται από υψηλή εφελκυστική αντοχή και είναι κατασκευασμένες από διάφορα υλικά με πιο συνηθισμένες τις ίνες από άνθρακα, γυαλί, βασάλτη ή αραμίδιο (Kevlar). Κάθε είδος ίνας διαθέτει διαφορετική αντοχή και μέτρο ελαστικότητας, όπως φαίνεται στο διάγραμμα 2.1.2. Οι βασικές ιδιότητες των ινών είναι η εφελκυστική τους αντοχή, το μέτρο ελαστικότητας, και η πυκνότητα. Τα ΙΟΠ συνίστανται από πλεγμένες συνεχόμενες ίνες (υφάσματα) χαρακτηριστική ιδιότητα των οποίων θεωρείται το ονομαστικό πάχος, το οποίο κυμαίνεται στα 0,1- 0,8mm [9]. Επιπλέον, στο Σχήμα 2.1.3 παρουσιάζονται ορισμένοι τύποι υφασμάτων που χρησιμοποιούνται στην ενίσχυση με ΙΟΠ.

Γυαλί Βασάλτης Αραμίδιο Άνθρακας
GFRP BFRP AFRP CFRP



Σχήμα 2.1.2: Αντοχή ινών άνθρακα, βασάλτη, αραμιδίου και υάλου [3].



Σχήμα 2.1.3: Ενδεικτικοί τύποι υφασμάτων ΙΟΠ συνεχών ινών α) γυαλιού, β) άνθρακα, γ) αραμιδίου [9].

Η μήτρα αποτελείται από θερμοσκληρυνόμενο πολυμερές, το οποίο συνήθως είναι εποξειδική ρητίνη δύο συστατικών (ρητίνη + σκληρυντής). Η εποξειδική ρητίνη χαρακτηρίζεται από υψηλή αντοχή, υψηλή συγκολλητική ικανότητα, χαμηλή χημική διάβρωση και χαμηλή συστολή ξηράνσεως. Η συνάφεια ανάμεσα στη ρητίνη και τις ίνες θεωρείται αναγκαία με στόχο την ανάπτυξη ισχυρών χημικών και μηχανικών δεσμών. Η μήτρα ρητίνης συμβάλει στην συνοχή και συνεκτικότητα του σύνθετου υλικού, καθώς

μεταφέρει τα φορτία και κατανέμει τις τάσεις στις ίνες, ώστε να λειτουργούν ως ομογενές υλικό [3].

Τα ΙΟΠ βρίσκονται σε διάφορες μορφές, όπως ταινίες, ράβδοι και υπάρχει η δυνατότητα χρήσης τους ως σπλισμός σε κάμψη, διάτμηση, προένταση ή και τοπική ενίσχυση δομικών στοιχείων. Στο Σχήμα 2.1.4 παρουσιάζεται στιγμιότυπο από την ενίσχυση ενός δομικού στοιχείου με Ινοπλισμένα Πολυμερή.



Σχήμα 2.1.4: Ενίσχυση δομικού στοιχείου με ΙΟΠ [5].

Τα ΙΟΠ ως μέθοδος ενίσχυσης παρουσιάζουν ποικίλα πλεονεκτήματα με σημαντικότερα την υψηλή εφελκυστική αντοχή, το χαμηλό βάρος, την ανθεκτικότητα σε βάθος χρόνου και την ευκολία εφαρμογής τους.

Ωστόσο, τα ινοπλισμένα πολυμερή χαρακτηρίζονται και από μειονεκτήματα, τα οποία σχετίζονται με την εποξειδική ρητίνη, δηλαδή τη μήτρα. Ορισμένα από αυτά είναι η αδυναμία εφαρμογής τους σε υγρές επιφάνειες, η μειωμένη απόδοση σε υψηλές θερμοκρασίες και το υψηλό κόστος. Για να αντιμετωπιστούν επαρκώς τα άνωθεν μειονεκτήματα των ΙΟΠ, η επιστημονική κοινότητα οδηγήθηκε στην ανάπτυξη ενός νέου σύνθετου υλικού: τα Ινοπλέγματα σε Ανόργανη Μήτρα (IAM).

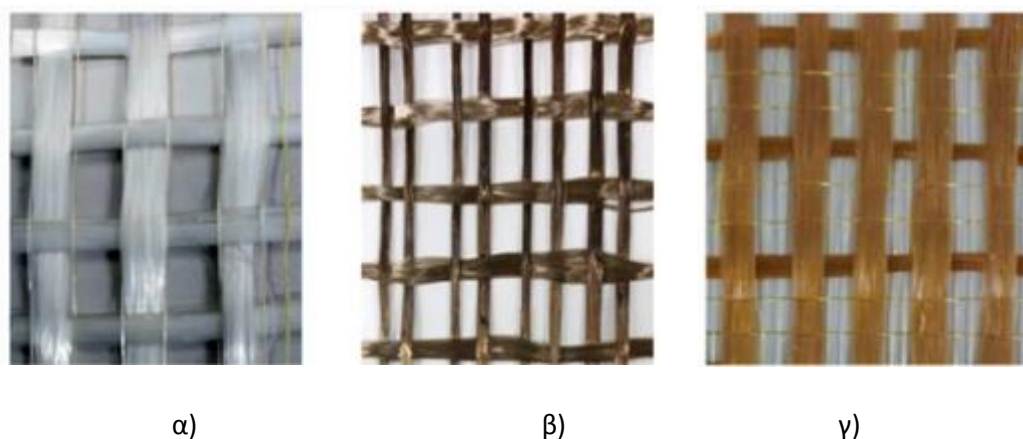
2.2 Ινοπλέγματα σε Ανόργανη Μήτρα (IAM)

Η ολοένα και αυξανόμενη επιστημονική έρευνα σχετικά με τη χρήση των ινοπλεγμάτων σε ανόργανη μήτρα (IAM) ως τεχνική ενίσχυσης κατασκευών σπλισμένου σκυροδέματος προκύπτει λόγω των μειονεκτημάτων που παρουσιάζουν τα ινοπλισμένα

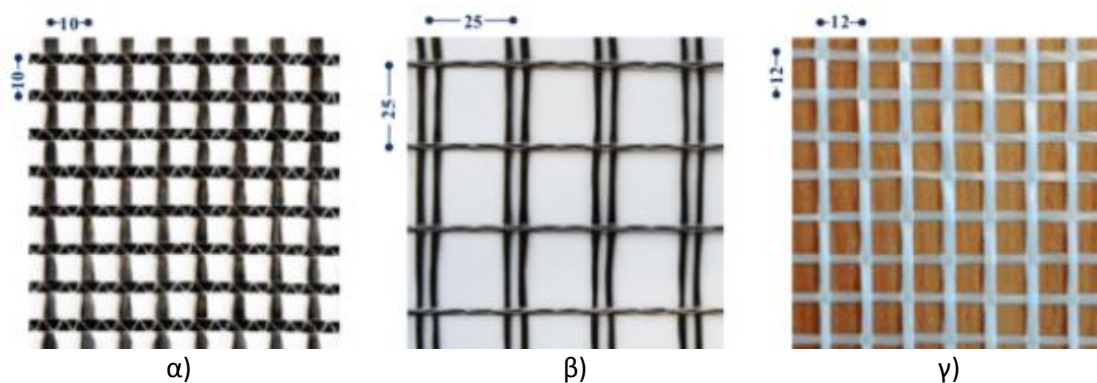
πολυμερή (ΙΟΠ). Τα μειονεκτήματα αυτά οφείλονται κυρίως στην οργανική μήτρα, δηλαδή τη ρητίνη, η οποία συνιστά κύριο συστατικό μέρος του σύνθετου υλικού.

Τα ΙΑΜ, σε αγγλική ορολογία Textile Reinforced Mortar (TRM), αποτελούνται από πλέγματα ινών υψηλής αντοχής (ινοπλέγματα) και από το κονίαμα ανόργανης σύστασης. Τα ινοπλέγματα λειτουργούν ως τον οπλισμό του σύνθετου υλικού, ενώ το κονίαμα ως μήτρα.

Οι ίνες μπορεί να είναι διαφόρων ειδών, με κυριότερες τις ίνες άνθρακα, υάλου, βασάλτη, αραμιδίου και PBO [poly(*p*-phenylene-2,6-benzobisoxazole)]. Οι εμπορικά διαθέσιμες ίνες άνθρακα και PBO έχουν τη μεγαλύτερη εφελκυστική αντοχή και το μεγαλύτερο μέτρο ελαστικότητας, με τα μεγέθη αυτά να έχουν τιμές >3000 MPa και 230 GPa αντίστοιχα. Αντίθετα, οι ίνες βασάλτη και υάλου διαθέτουν εφελκυστική αντοχή >1500 MPa και μέτρο ελαστικότητας στα 70-80 GPa. Από άποψη μηχανικής συμπεριφοράς οι ίνες άνθρακα και PBO είναι πιο αποτελεσματικές, ωστόσο το αυξημένο κόστος τους καθιστά σε ορισμένες εφαρμογές προτιμότερη τη χρήση ινών υάλου ή βασάλτη [6]. Στο Σχήμα 2.2.1 και στο Σχήμα 2.2.2 απεικονίζονται μερικοί εμπορικά διαθέσιμοι τύποι ινοπλεγμάτων.

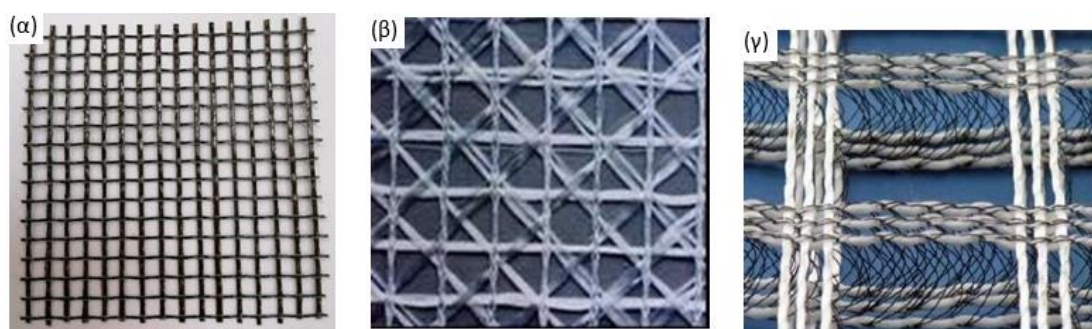


Σχήμα 2.2.1: Τύποι ινοπλεγμάτων: α) γυαλιού β) βασάλτη και γ) PBO [7].



Σχήμα 2.2.2: Ενδεικτικές φωτογραφίες πλεγμάτων ινών α) άνθρακα, β) βασάλτη, γ) υάλου. [4]

Πολλές ίνες συνιστούν έναν κλώνο ινών και με τα σειρά τους κλώνοι διατεταγμένοι σε δύο ή και περισσότερες διευθύνσεις αποτελούν τα ινοπλέγματα. Τα πλέγματα κατασκευάζονται με τέτοιο τρόπο, ώστε οι κλώνοι ινών να έχουν ίσες αποστάσεις μεταξύ τους, σχηματίζοντας βροχίδες. Αυτό έχει ως απότοκο την αποτελεσματική διείσδυση του κονιάματος ανάμεσα στα διάκενα και τη διασφάλιση της συνάφειας ανάμεσα στη μήτρα ανόργανης σύστασης και το πλέγμα [8]. Στο Σχήμα 2.2.3 παρουσιάζονται ινοπλέγματα διαφόρων γεωμετριών με κλώνους δύο, τεσσάρων διευθύνσεων και τριών διαστάσεων.



Σχήμα 2.2.3: Τύποι ινοπλέγματος με κλώνους α) δύο διευθύνσεων, β) τεσσάρων διευθύνσεων, γ) τριών διαστάσεων [9].

Η ανόργανη μήτρα λειτουργεί ως μέσο ανάληψης και μεταβίβασης των εφελκυστικών τάσεων στις ίνες, ενώ παράλληλα πρέπει να έχει τη δυνατότητα να διεισδύσει στα ινοπλέγματα, ώστε να επιτευχθεί η μέγιστη συνάφεια μεταξύ μήτρας και ινοπλέγματος.

Η σύσταση της μήτρας συνήθως είναι τσιμεντοειδής με χρήση τσιμέντου τύπου Portland. Ωστόσο, τα τελευταία χρόνια, λόγω της μεγάλης έκλυσης διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) στην ατμόσφαιρα, η οποία συνδέεται άμεσα με την παραγωγή του τσιμέντου τύπου Portland και κατ'επέκταση με την αύξηση των εκπομπών ρυπογόνων αερίων, παρατηρείται μία προσπάθεια εύρεσης άλλων υλικών, τα οποία θα είναι πιο φιλικά προς το περιβάλλον [10]. Η χρήση μήτρας γεωπολυμερούς αποτελεί μία τέτοια εναλλακτική μέθοδο, την οποία ερευνά ο κατασκευαστικός τομέας ως οικολογική λύση.

2.2.1 Πλεονεκτήματα IAM έναντι ΙΟΠ

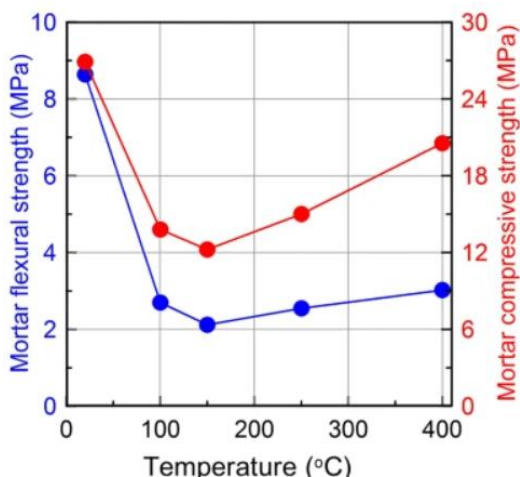
Η χρήση των ΙΟΠ τα τελευταία χρόνια αποτελεί εξαιρετικά δημοφιλή μέθοδο ενίσχυσης των υφιστάμενων κατασκευών ΟΣ. Το γεγονός αυτό σχετίζεται με την υψηλή αντοχή έναντι διαβρωτικού περιβάλλοντος, την υψηλή αντοχή αναλογικά με το βάρος τους και την ταχύτητα και ευκολία εφαρμογής τους.

Τα μειονεκτήματα που παρουσιάζουν τα ΙΟΠ προκύπτουν λόγω της εποξειδικής ρητίνης, δηλαδή της μήτρας. Αυτά είναι η χαμηλή αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες, η αδυναμία εφαρμογής των ΙΟΠ σε υγρές επιφάνειες, η επικινδυνότητα που έγκειται για το εργατικό δυναμικό λόγω της άμεσης επαφής των ρητινών με το δέρμα και των αναθυμιάσεων που προκαλούνται κατά την εφαρμογή τους, καθώς και το υψηλό κόστος [11]. Με στόχο την άρση των προβλημάτων που προκύπτουν από την εφαρμογή των οργανικών συνδετικών υλικών, γίνεται προσπάθεια εμπέδωσης των ανόργανων.

Συγκριτικά με τα ΙΟΠ, τα κυριότερα πλεονεκτήματα των IAM σχετίζονται με τη σύσταση του μητρικού υλικού, το οποίο αποτελείται από ανόργανα στοιχεία και παρατίθενται παρακάτω [11]:

- Υψηλή αντοχή λόγω των ινών που αποτελούν τα ινοπλέγματα.
- Χαμηλό βάρος και μηδαμινή αλλαγή στη γεωμετρία των κατασκευών, λόγω του ότι η εφαρμογή τους πραγματοποιείται σε στρώσεις πολύ μικρού πάχους.
- Υψηλή αντίσταση σε διαβρωτικό περιβάλλον.
- Υψηλή αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες (πυραντοχή). Στα ΙΟΠ, εξαιτίας της ρητίνης η οποία συνιστά το μητρικό υλικό, παρατηρείται δραματική μείωση της

αντοχής και της δυσκαμψίας τους ακόμη και σε θερμοκρασίες των 60-80°C. Στο Σχήμα 2.2.1.1 παρουσιάζονται η αντοχή σε κάμψη και θλίψη του κονιάματος συναρτήσει της θερμοκρασίας. Με κόκκινο αναπαρίσταται η αντοχή σε θλίψη, ενώ με μπλε η αντοχή σε κάμψη.



Σχήμα 2.2.1.1: Διάγραμμα της αντοχής του κονιάματος σε κάμψη και εφελκυσμό συναρτήσει της υψηλής θερμοκρασίας [12].

- Δυνατότητα εφαρμογής σε υγρές επιφάνειες και σε χαμηλές θερμοκρασίες. Αντίθετα, στα ΙΟΠ σε θερμοκρασία μικρότερη των 15°C παρατηρείται μείωση της εφελκυστικής αντοχής και δυσκαμψίας τους.
- Εύκολη και γρήγορη εφαρμογή.
- Αποτελούν εναλλακτική και προσφιλή προς το περιβάλλον μέθοδο, καθώς τα ΙΟΠ λόγω της οργανικής μήτρας συντελούν στην έκλυση μεγάλων ποσοστών CO₂.
- Χαμηλό κόστος.

2.3 Μορφές αστοχίας στοιχείων ΟΣ ενισχυμένων με εξωτερικά επικολλούμενα ΙΑΜ

Οι τρόποι αστοχίας που μπορούν να προκύψουν σε δοκό σπλισμένου σκυροδέματος ενισχυμένου με ΙΑΜ είναι βάσει βιβλιογραφίας οι εξής:

- α) Ολίσθηση του ινοπλέγματος μέσα από την ανόργανη μήτρα: Σχετίζεται με το μη επαρκή εμποτισμό των ινών με κονίαμα και με την πτωχή σύνδεση στη διεπιφάνεια

μήτρας και ινών. Η ολίσθηση συμβαίνει εκεί όπου εμφανίζεται η μέγιστη ροπή και είναι πιθανό να συνοδευτεί από μερική θραύση των ινών [6].

β) Αποκόλληση στη διεπιφάνεια σκυροδέματος – μήτρας: Οφείλεται στην έλλειψη συνάφειας ανάμεσα στο σκυρόδεμα και το κονίαμα και το ΙΑΜ αποκολλάται από το μέσο μέχρι και το τέλος της ενίσχυσης. Αποτελεί ψαθυρό τρόπο αστοχίας [6].

γ) Αποκόλληση των άκρων του ΙΑΜ: Οφείλεται σε ανεπαρκές μήκος αγκύρωσης και αποτελεί και αυτή ψαθυρό τρόπο αστοχίας [6].

δ) Διαστρωματική αποκόλληση: Παρατηρείται αποκόλληση δύο διαδοχικών στρώσεων σε κατασκευή πολλών στρώσεων ή ανάμεσα στο πλέγμα και την μήτρα. Οφείλεται σε ανεπαρκή κόλληση κατά την εφαρμογή του ΙΑΜ [6].

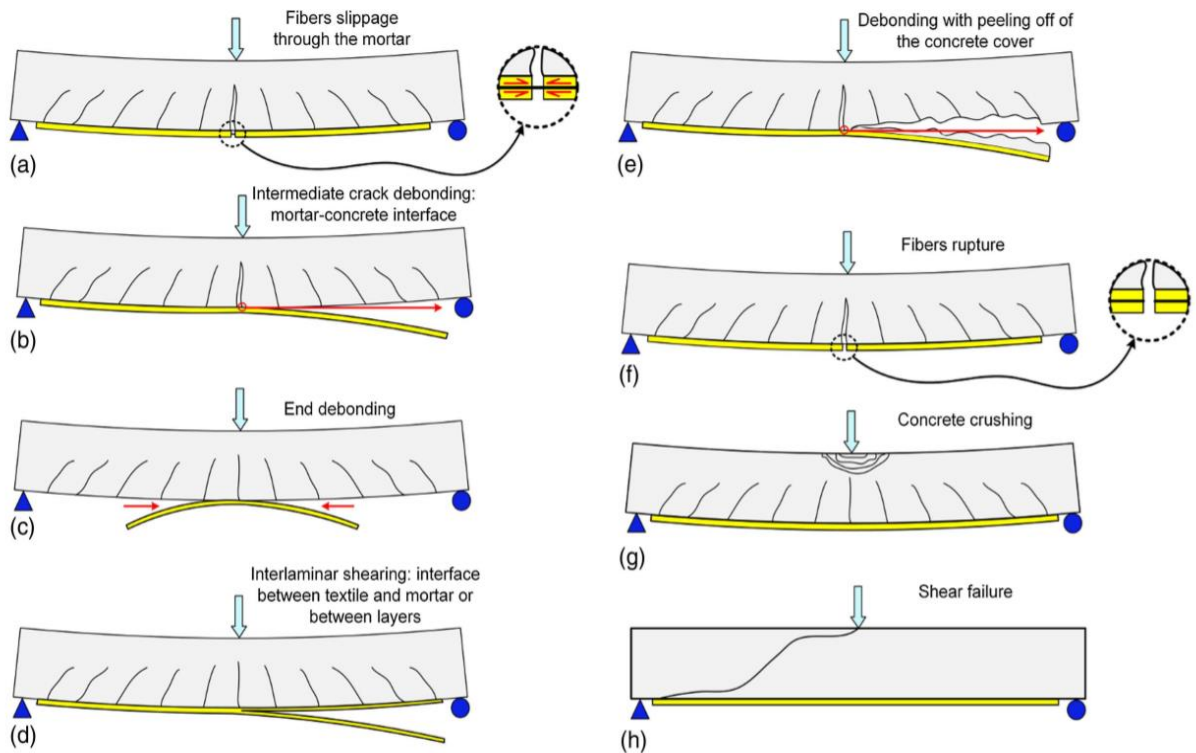
ε) Αποκόλληση του ΙΑΜ μαζί με ποσότητα σκυροδέματος στην αποκολλημένη επιφάνεια: Η ρωγμή ξεκινά από το μέσο της ενίσχυσης και καταλήγει στο τέλος της. Μέρος του σκυροδέματος αποκολλάται μαζί με το σύνθετο υλικό, κάτι που υποδηλώνει ισχυρή συνάφεια ανάμεσα στο κονίαμα και το σκυρόδεμα [6].

στ) Θραύση των ινών: Συμβαίνει μετά τη διαρροή του εφελκόμενου χάλυβα με τις ίνες να έχουν εξαντλήσει την εφελκυστική τους ικανότητα. Παρατηρείται ξαφνική πτώση φορτίου κατά την αστοχία στο σημείο μέγιστης καμπτικής ροπής [6].

ζ) Σύνθλιψη σκυροδέματος: Αστοχία μη επιθυμητής μορφής, καθώς δεν σχετίζεται με το σύνθετο υλικό. Οφείλεται σε υψηλό ποσοστό οπλισμού και χαμηλό ποσοστό ενίσχυσης με σύνθετο υλικό [6].

η) Διατμητική αστοχία: Παρατηρείται σε κοντές δοκούς με χαμηλά ποσοστά διατμητικής ενίσχυσης. Συνιστά ψαθυρή μορφή αστοχίας [6].

Στο Σχήμα 2.3.1 παρουσιάζονται σχηματικά οι άνωθεν μορφές αστοχίας των δοκιμίων.



Σχήμα 2.3.1: Σχηματική απεικόνιση των μορφών αστοχίας [6].

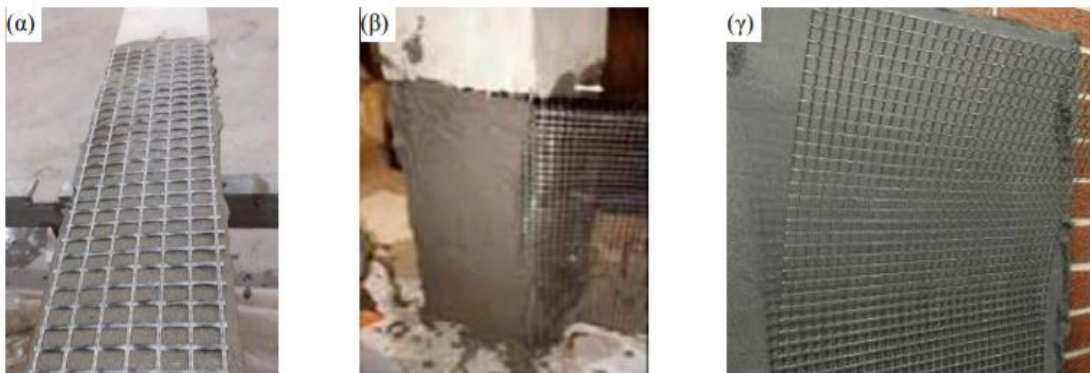
2.4 Πεδίο εφαρμογής των IAM

Η χρήση ινοπλεγμάτων σε ανόργανη μήτρα στον τομέα των κατασκευών αποτελεί ανερχόμενη και καινοτόμα τεχνική, καθώς παρουσιάζει ευρύ φάσμα πλεονεκτημάτων και βρίσκει εφαρμογή σε ποικίλες περιπτώσεις. Πιο συγκεκριμένα, τα IAM μπορούν να χρησιμοποιηθούν τόσο στον τομέα των ενισχύσεων, όσο και σε νέες κατασκευές και τεχνικά έργα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι υπάρχει η δυνατότητα κατασκευής στοιχείων εξαιρετικά μικρού πάχους, ακόμα και πάχους ίσου με 10 mm, παραλαμβάνοντας και μεταφέροντας επαρκώς τα φορτία που ασκούνται. Ορισμένα παραδείγματα εφαρμογής των IAM σε νέα έργα είναι ως στοιχεία κάλυψης επιφανειών, καθώς προσφέρουν υψηλή αντοχή και ανθεκτικότητα έναντι διάβρωσης, συνδυάζοντας το αρχιτεκτονικό ενδιαφέρον και ως συστήματα εξωτερικής θερμομόνωσης, συνιστώντας μια οικονομική και άκρως αποτελεσματική λύση [13]. Στο Σχήμα 2.4.1 παρουσιάζεται κατασκευή, η οποία καλύπτεται εξωτερικά με στοιχεία IAM.



Σχήμα 2.4.1: Κάλυψη εξωτερικής επιφάνειας με στοιχεία IAM [13].

Όσον αφορά στον τομέα της ενίσχυσης ήδη υπαρχόντων κατασκευών τα IAM χρησιμοποιούνται ευρέως στην ενίσχυση σε κάμψη δοκών και πλαισίων ΟΣ, αυξάνοντας εξαιρετικά την καμπτική αντοχή, κάτι το οποίο πραγματοποιείται ειδικά μέσω της αύξησης των στρώσεων του σύνθετου υλικού. Ακόμη, η χρήση των IAM είναι διαδεδομένη στην ενίσχυση έναντι διάτμησης και στην περίσφιγξη στοιχείων ΟΣ, κυρίως μέσω μανδυνών IAM, αυξάνοντας την θλιπτική αντοχή και την πλαστιμότητα. Επίσης, τα IAM διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην αύξηση της πλαστιμότητας και στην ενίσχυση τοιχοποιίας για φορτίσεις εντός και εκτός επιπέδου. Στο Σχήμα 2.4.2, Σχήμα 2.4.3 και στο Σχήμα 2.4.4 παρουσιάζονται παραδείγματα ενίσχυσης δοκού, υποστρώματος και τοιχοποιίας με χρήση IAM.



Σχήμα 2.4.2: Ενίσχυση με IAM α) δοκού, β) υποστρώματος και γ) τοιχοποιίας [8].



Σχήμα 2.4.3: Ενίσχυση δοκού έναντι διάτμησης με χρήση μανδύα IAM [14].



Σχήμα 2.4.4: Ενίσχυση τοιχοποιίας με μανδύα IAM [15].

Συνοψίζοντας τα IAM διαδραματίζουν θετικό ρόλο στον τομέα των τεχνικών έργων, προκατασκευασμένων και υφισταμένων, λόγω των πολλαπλών πλεονεκτημάτων που παρουσιάζουν και των αποτελεσμάτων που επιφέρουν. Ωστόσο, αποτελούν μία τεχνική η οποία απαιτεί περαιτέρω έρευνα μέσω διεξαγωγής πειραμάτων, ώστε να εξαχθούν αδιαμφισβήτητα συμπεράσματα για τη χρήση και συμπεριφορά των IAM σε μακροχρόνιο επίπεδο και σε πιο διευρυμένο πλαίσιο περιπτώσεων.

2.5 Γεωπολυμερή

2.5.1 Γενικά

Τα τελευταία χρόνια ο επιστημονικός κλάδος διενεργεί πειραματικές διαδικασίες και μελέτες σχετικά με την εφαρμογή των γεωπολυμερών στον τομέα των κατασκευών, προσδίδοντας μία νέα και καινοτόμα προοπτική στο έργο των πολιτικών μηχανικών. Ειδικότερα, η χρήση γεωπολυμερών αποτελεί μία εναλλακτική του τσιμέντου που δρα ως συγκολλητική ουσία στα ΙΑΜ, καθώς θεωρείται μία πιο οικολογική και φιλική προς το περιβάλλον λύση. Το τσιμέντο, παρά τις υψηλές μηχανικές ιδιότητες που προσφέρει, όπως αύξηση της αντοχής και της διαπερατότητας, αποτελεί μία μη βιώσιμη λύση. Αυτό συμβαίνει, καθώς κατά την παραγωγή 1tn τσιμέντου παράγονται 0,9tn διοξειδίου του άνθρακα (CO₂), ενισχύοντας την εκπομπή ρυπογόνων αερίων που προκαλούν ποικίλα περιβαλλοντικά προβλήματα. Συνεπώς, με στόχο τη διαφύλαξη του περιβάλλοντος και τον περιορισμό περιττής δαπάνης ενέργειας μελετάται η αντικατάσταση της τσιμεντοειδούς μήτρας με μήτρα γεωπολυμερούς [16].

Τα γεωπολυμερή είναι ανόργανα κονιάματα που παράγονται μέσω χημικών πολυμερικών αντιδράσεων αργιλοπυριτικών πρώτων υλών με αλκαλικά διαλύματα. Οι αργιλοπυριτικές πρώτες ύλες συνήθως προέρχονται από φυσικά πετρώματα, όπως μετακαολίνες, ή παραπροϊόντα, όπως η ιπτάμενη τέφρα και η σκωρία καμίνου. Τα αλκαλικά διαλύματα συνήθως είναι υδροξείδια ή υδατικά διαλύματα πυριτικών οξειδίων αλκαλικών μετάλλων (νάτριο Na, κάλιο K) [27]. Τα γεωπολυμερή παρουσιάζουν εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες, υψηλή αντοχή σε συνθήκες υψηλών θερμοκρασιών (πυρκαγιά), χαμηλό βάρος, ανθεκτικότητα σε διαβρωτικό περιβάλλον και δυνατότητα εφαρμογής σε υγρές επιφάνειες και σε χαμηλές θερμοκρασίες. Όλα αυτά σε συνδυασμό με το χαμηλό κόστος και το γεγονός ότι αποτελούν προσφιλή λύση για το περιβάλλον καθιστούν τα γεωπολυμερή το σημαντικότερο ανταγωνιστή των κοινών δομικών υλικών [10]. Σύμφωνα με μελέτες, τα γεωπολυμερή θεωρούνται πιο βιώσιμη εναλλακτική, καθώς η παραγωγή τους παρουσιάζει μείωση των αέριων ρύπων κατά 80% και χαμηλότερο κόστος κατά 30% συγκριτικά με το τσιμέντο. Στο Σχήμα 2.5.1 παρουσιάζονται η ιπτάμενη τέφρα, η μετακαολίνη και η σκωρία καμίνου που αποτελούν συνήθη συστατικά του γεωπολυμερούς.



α)

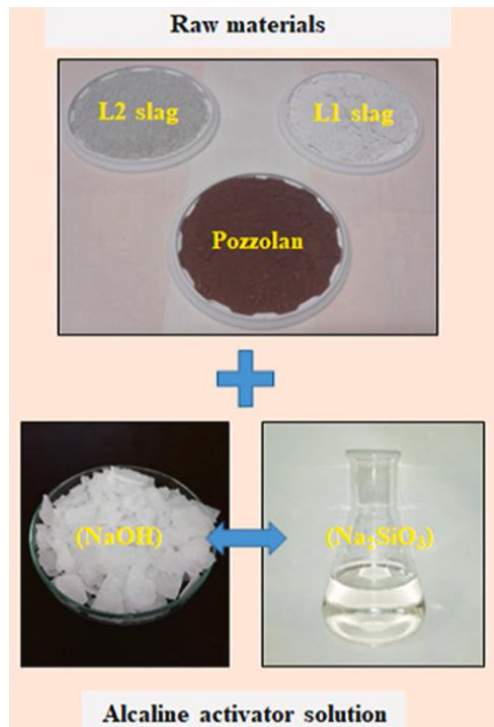
β)

γ)

Σχήμα 2.5.1.1: Συνήθη συστατικά γεωπολυμερούς: α) ιπτάμενη τέφρα [17], β) μετακαολίνη, γ) σκωρία καμίνου [18].

Τα γεωπολυμερή είναι αποτέλεσμα της χημικής αντίδρασης ανάμεσα σε στερεές αργιλοπυριτικές ενώσεις και υψηλής περιεκτικότητας διάλυμα υδροξειδίου αλκαλίου ή πυριτικού άλατος. Στις αργιλοπυριτικές ενώσεις περιλαμβάνονται τα φυσικά παραπροϊόντα (καολίνη, μετακαολίνη) και τα βιομηχανικά παραπροϊόντα (ιπτάμενη τέφρα, σκωρία καμίνου). Έρευνες έχουν αποδείξει ότι τα γεωπολυμερή με βασικό συστατικό τη μετακαολίνη ή την ιπτάμενη τέφρα παρουσιάζουν αύξηση της θλιπτικής αντοχής, βελτίωση των υδραυλικών και θερμικών ιδιοτήτων και υψηλή αντοχή στα οξέα και στη θειική διάβρωση. Τα πλεονεκτήματα αυτά σε συνδυασμό με το χαμηλό κόστος παραγωγής τους και οικολογική τους συμπεριφορά καθιστούν τα γεωπολυμερή δομικό υλικό του μέλλοντος [16].

Στο Σχήμα 2.5.2 και στο Σχήμα 2.5.3 παρουσιάζονται δύο διαφορετικές χημικές συστάσεις γεωπολυμερούς. Η πρώτη σύσταση αποτελείται από σκωρία καμίνου δύο διαφορετικών βιομηχανικών διεργασιών (L1 slag, L2 slag), ποζολάνη και υδροξείδιο του νατρίου (NaOH) τα οποία παράγουν το μεταπυριτικό νάτριο (Na_2SiO_3) και η δεύτερη συνίσταται από ιπτάμενη τέφρα (fly ash), μετακαολίνη, μεταπυριτικό νάτριο και υδροξείδιο του νατρίου.



Σχήμα 2.5.1.2: Σύσταση γεωπολυμερούς (1) [19].



Σχήμα 2.5.1.3: Σύσταση γεωπολυμερούς (2) [20].

2.5.2 Χρήση γεωπολυμερών σε εφαρμογές του πολιτικού μηχανικού

Οι εφαρμογές των γεωπολυμερών στον τομέα των κατασκευών του πολιτικού μηχανικού βρίσκουν προσοδοφόρο έδαφος σε ποικίλες περιπτώσεις. Ορισμένες από αυτές είναι:

- Σταθεροποίηση του εδάφους [16].
- Χρήση ως πρόσθετο στο σκυρόδεμα (τσιμέντο γεωπολυμερούς). Προσδίδει στο σκυρόδεμα υψηλή αντοχή και ανθεκτικότητα, βελτιώνει την εργασιμότητα και συμβάλει στη μείωση της διαπερατότητας και της πλαστικής συρρίκνωσης [16].
- Χρήση σε παράκτια έργα και θαλάσσιες κατασκευές. Το σκυρόδεμα γεωπολυμερούς, λόγω της μικρής διαπερατότητας, δεν επιτρέπει την εισροή θαλασσινού ύδατος στις κατασκευές προστατεύοντάς τες από τη διάβρωση.
- Χρήση του σκυροδέματος γεωπολυμερούς ως υλικό με υψηλή πυραντοχή [16].
- Εφαρμογή στα Ινοπλέγματα σε Ανόργανη Μήτρα (IAM) ως κονίαμα, έναντι του τσιμέντου. Η χρήση μήτρας γεωπολυμερούς διαθέτει εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες και συνιστά μία οικολογική και φιλική προς το περιβάλλον εναλλακτική [16].

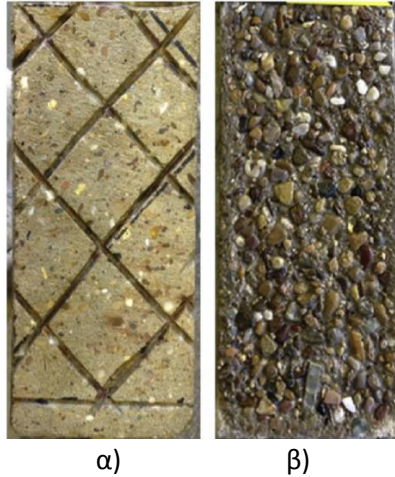
Φυσικά, οι άνωθεν εφαρμογές των γεωπολυμερών χρήζουν περαιτέρω μελέτης, ώστε να διαλευκανθούν οι πλήρεις δυνατότητες αυτού του καινοτόμου δομικού υλικού.

2.6 Προηγούμενες μελέτες σχετικά με τη συνάφεια IAM – σκυροδέματος

Το ερευνητικό υπόβαθρο που σχετίζεται με τη μελέτη της συνάφειας του ινοπλέγματος σε ανόργανη μήτρα (IAM) με το σκυρόδεμα βρίσκεται ακόμη σε σχετικά πρώιμο στάδιο. Ο κατασκευαστικός τομέας, λόγω της αυξανόμενης ανάγκης για εύρεση οικολογικών υλικών, έχει στρέψει το ενδιαφέρον του τα τελευταία έτη στα IAM, χωρίς, ωστόσο, να έχει αποσαφηνιστεί πλήρως η συμπεριφορά τους. Κάποιες πειραματικές μελέτες που έχουν διεξαχθεί που ασχολούνται με το συγκεκριμένο αντικείμενο είναι: Falore κ.α. (2018) [21], Calabrese κ.α. (2020) [22], Shadravan κ.α. (2017) [23], Carvahlo κ.α. (2017) [24], Sneed κ.α. (2015) [25], Raoof κ.α. (2017) [26]. Παρακάτω θα παρουσιαστούν ορισμένες μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί τα τελευταία χρόνια, οι οποίες εξετάζουν τη συνάφεια σκυροδέματος–IAM υπό διαφορετικές συνθήκες και διαφορετικές παραμέτρους.

Σύμφωνα με πειραματική έρευνα των Raoof κ.α. (2016) [11], εξετάστηκε η συνάφεια IAM- σκυροδέματος βάσει διαφορετικών παραμέτρων. Οι παράμετροι ήταν:

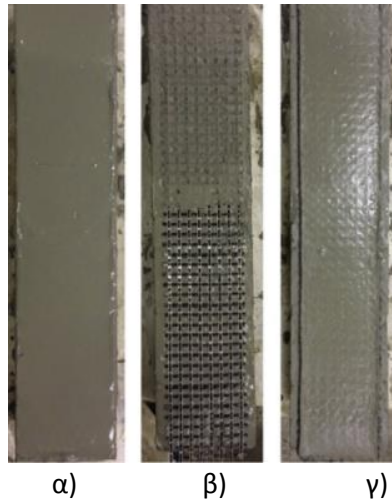
- ❖ Το μήκος επικόλλησης (κυμάνθηκε από 50 έως 450 mm).
- ❖ Ο αριθμός των στρώσεων ινοπλέγματος (από 1 έως 4 στρώσεις).
- ❖ Η προετοιμασία της επιφάνειας του σκυροδέματος. Στη μία περίπτωση σχηματίστηκαν αυλακώσεις με μηχανικά μέσα, ενώ στην άλλη πραγματοποιήθηκε αμμοβολή. Οι δύο διαφορετικές επιφάνειες φαίνονται στο Σχήμα 2.6.1.



Σχήμα 2.6.1: Προετοιμασία επιφάνειας σκυροδέματος με α) πλέγμα αυλακώσεων και β) αμμοβολή [11].

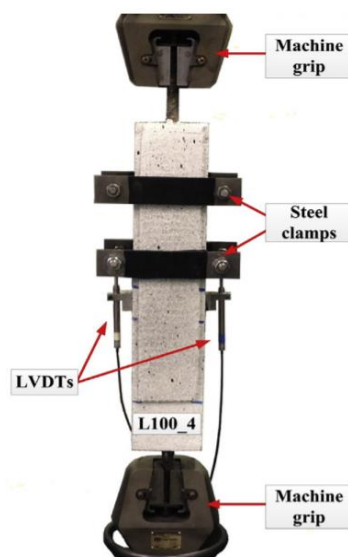
- ❖ Η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος (15MPa, 30MPa).
- ❖ Η επικάλυψη ή όχι του ινοπλέγματος.
- ❖ Η αγκύρωση με μανδύα IAM.

Το IAM αποτελούνταν από ίνες άνθρακα με εφελκυστική αντοχή ίση με 3800 MPa και μέτρο ελαστικότητας $E=225\text{GPa}$ και μήτρα τσιμεντοειδούς σύστασης. Τα στάδια εφαρμογής του IAM παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.6.2. Η διεξαγωγή των πειραμάτων έλαβε χώρα έπειτα από περίοδο ωρίμανσης των δοκιμίων διάρκειας έξι εβδομάδων.



Σχήμα 2.6.2: Στάδια εφαρμογής IAM: α) εφαρμογή πρώτης στρώσης κονιάματος β) εφαρμογή πλέγματος γ) εφαρμογή τελικής στρώσης κονιάματος [11].

Με στόχο να διασφαλιστεί το γεγονός ότι η αστοχία θα πραγματοποιούνταν στην πλευρά που ήταν υπό παρακολούθηση, τοποθετήθηκαν δύο χαλύβδινοι σφιγκτήρες στη μία πλευρά του δοκιμίου. Επίσης, τοποθετήθηκαν δύο Linear Variable Transformer (LVDT) στα άκρα των μη ενισχυμένων πλευρών του δοκιμίου, ώστε να καταγράφεται η μετατόπιση, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.6.3. Στο Σχήμα 2.6.4 παρουσιάζεται η διάταξη του πειράματος με τα δύο δοκίμια να συνδέονται μέσω ακριλικών κυλίνδρων διαμέτρου 10 mm, διασφαλίζοντας κατά αυτόν τον τρόπο την ευθύγραμμη τοποθέτηση των δύο δοκιμίων.



Σχήμα 2.6.3: Λεπτομέρειες της πειραματικής διάταξης υπό double lap shear test [11].



Σχήμα 2.6.4: Πειραματική διάταξη [11].

Τα αποτελέσματα του πειράματος ήταν τα εξής:

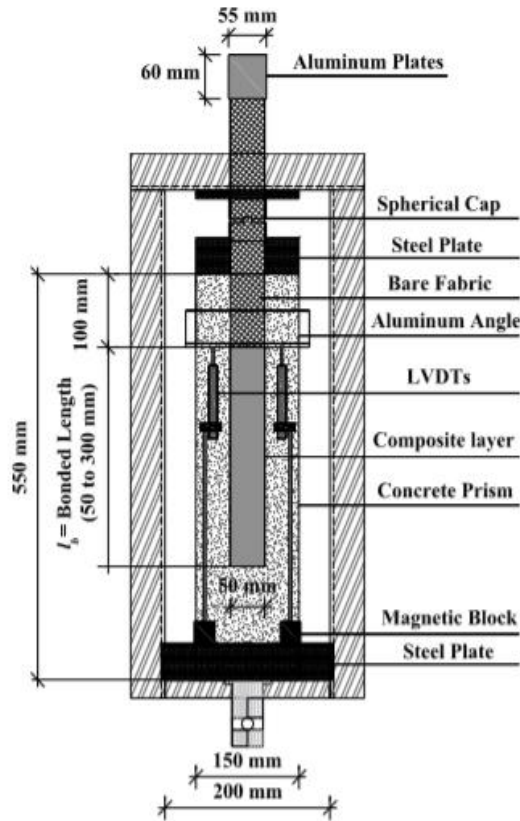
- ❖ Όσον αφορά στο μήκος επικόλλησης, που κυμάνθηκε από 50mm έως 450mm, όσο αυξάνεται αυτό παρατηρείται αύξηση της ικανότητας του δεσμού να παραλάβει φορτία με το ενεργό (συνεργαζόμενο) μήκος να υπολογίζεται στα 200 - 300 mm.
- ❖ Με την αύξηση των στρώσεων του σύνθετου υλικού παρατηρείται μη αναλογική αύξηση της ικανότητας του δεσμού, η οποία είναι αλματώδης με την αύξηση από 1 σε 2 στρώσεις, ενώ με την περαιτέρω αύξηση των στρώσεων παρουσιάζει περισσότερο ομαλή αύξηση. Επιπλέον, για στρώσεις IAM από μία έως δύο πραγματοποιήθηκε αστοχία λόγω ολίσθησης των ινών μέσα στη μήτρα, ενώ για τρεις και τέσσερις στρώσεις πραγματοποιήθηκε αποκόλληση στη διεπιφάνεια κονιάματος- σκυροδέματος με μικρή ποσότητα σκυροδέματος.
- ❖ Η διαφορετική προετοιμασία της επιφάνειας του σκυροδέματος δεν διαδραμάτισε ιδιαίτερο ρόλο, καθώς τα αποτελέσματα ήταν όμοια.
- ❖ Η μείωση της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος συντέλεσε στη μείωση της μέσης ικανότητας του δεσμού, χωρίς να επηρεάσει τον τρόπο αστοχίας.
- ❖ Η χρήση επικάλυψης με ρητίνη εποξειδικής σύστασης συνέβαλε στην αλλαγή του τρόπου αστοχίας από ολίσθηση των ινών μέσα στη μήτρα σε αποκόλληση του IAM στη διεπιφάνεια πλέγματος – μήτρας.
- ❖ Η αγκύρωση μέσω της χρήσης μανδύα IAM προκάλεσε δραματική αύξηση της αντοχής του δεσμού.

Επιπλέον, διεξήχθη πείραμα το οποίο συγκρίνει τα αποτελέσματα που προκύπτουν σχετικά με τη συνάφεια των IAM με μήτρα τσιμεντοειδούς σύστασης και με μήτρα γεωπολυμερούς από τους Obaida κ.α. (2021) [10]. Η χρήση IAM μη μήτρα γεωπολυμερούς συνιστά εξαιρετικά καινοτόμο μέθοδο με πολλαπλά οφέλη στον τομέα του περιβάλλοντος και η διεξαγωγή περισσότερων πειραμάτων με όμοια θεματολογία κρίνεται αναγκαία, ώστε να αποσαφηνιστούν πλήρως οι ιδιότητες του γεωπολυμερούς.

Βασικές παράμετροι της πειραματικής μελέτης θεωρούνται η χρήση μητρών διαφορετικής σύστασης (τσιμεντοειδής και γεωπολυμερούς) και τα διαφορετικά μήκη δεσμού, τα οποία κυμαίνονται από 50mm έως 300mm. Για την πραγμάτωση του πειράματος κατασκευάστηκαν 18 δοκίμια τα οποία υποβλήθηκαν σε δοκιμή άμεσης διάτμησης (single lap shear test). Τα IAM αποτελούνταν από εμπορικά διαθέσιμες ίνες άνθρακα με μηχανικές ιδιότητες που ορίζονται εκ κατασκευής. Η τσιμεντοειδής μήτρα αποτελούνταν από τσιμέντο τύπου Portland, ενώ η μήτρα γεωπολυμερούς αποτελούνταν από λεπτόκοκκα αδρανή, αλκαλικό ενεργοποιητή (πυριτικό νάτριο SS και υδροξείδιο του νατρίου SH) και ως συνδετικό υλικό χρησιμοποιήθηκαν σκωρία και ιπτάμενη τέφρα.

Σύμφωνα με τον πειραματικό προσδιορισμό των μηχανικών χαρακτηριστικών των δύο διαφορετικών μητρών προέκυψε ότι η θλιπτική αντοχή της τσιμεντοειδούς μήτρας βρέθηκε ίση με 42 MPa, ενώ η αντίστοιχα αντοχή για τη γεωπολυμερική μήτρα βρέθηκε ίση με 43 MPa. Επιπλέον, η εφελκυστική αντοχή υπολογίστηκε ίση με 2.4 MPa για το τσιμεντοειδές κονίαμα και 3 MPa για το κονίαμα γεωπολυμερούς. Τέλος, το μέτρο ελαστικότητας υπολογίστηκε ίσο με 28 GPa για το κονίαμα τσιμεντοειδούς σύστασης και 7 GPa για το γεωπολυμερικό κονίαμα.

Στο Σχήμα 2.6.5 παρουσιάζεται σχηματικά η πειραματική διάταξη για τη δοκιμή της άμεσης διάτμησης στην οποία υποβλήθηκαν τα δοκίμια.

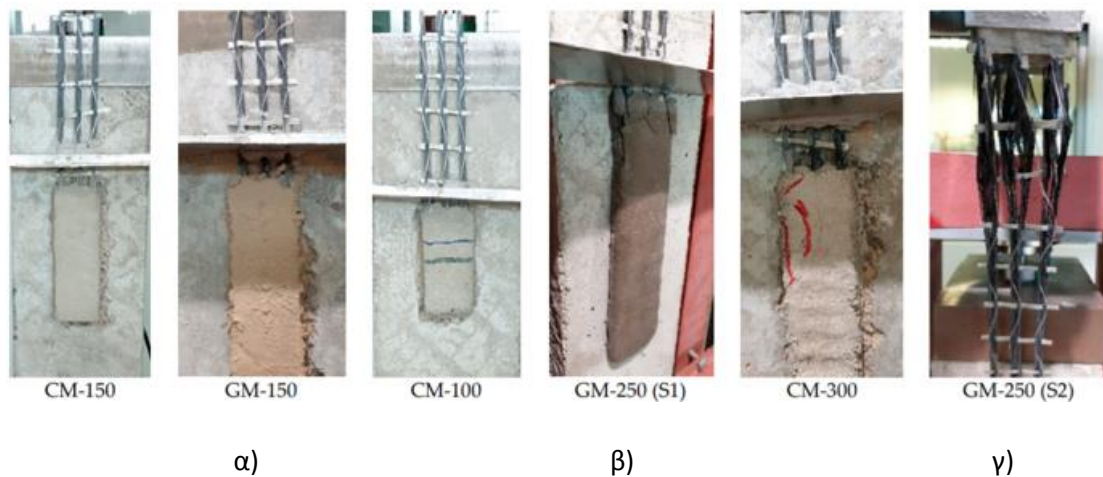


Σχήμα 2.6.5: Σχηματική διάταξη του πειράματος [10].

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν ήταν τα εξής:

- Τα μέγιστα φορτία της γεωπολυμερικής μήτρας ήταν μεγαλύτερα κατά 70% συγκριτικά με αυτά της τσιμεντοειδούς.
- Το αποτελεσματικό μήκος δεσμού βρέθηκε στα 150 mm για τη μήτρα γεωπολυμερούς και 170 mm για την τσιμεντοειδή μήτρα.
- Παρατηρήθηκαν τρεις μορφές αστοχίας οι οποίες είναι:
 - α) Η ολίσθηση των ινών χωρίς ρωγμή στη μήτρα.
 - β) Η εμφάνιση εγκάρσιων και διαμηκών ρωγμών και η επακόλουθη ολίσθηση του πλέγματος με αποκόλληση στη διεπιφάνεια πλέγματος- μήτρας.
 - γ) Η θραύση των ινών.

Οι τρόποι αστοχίας παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.6.6.



Σχήμα 2.6.6: Οι τρεις μορφές αστοχίας που παρατηρήθηκαν όπως περιγράφονται παραπάνω [10].

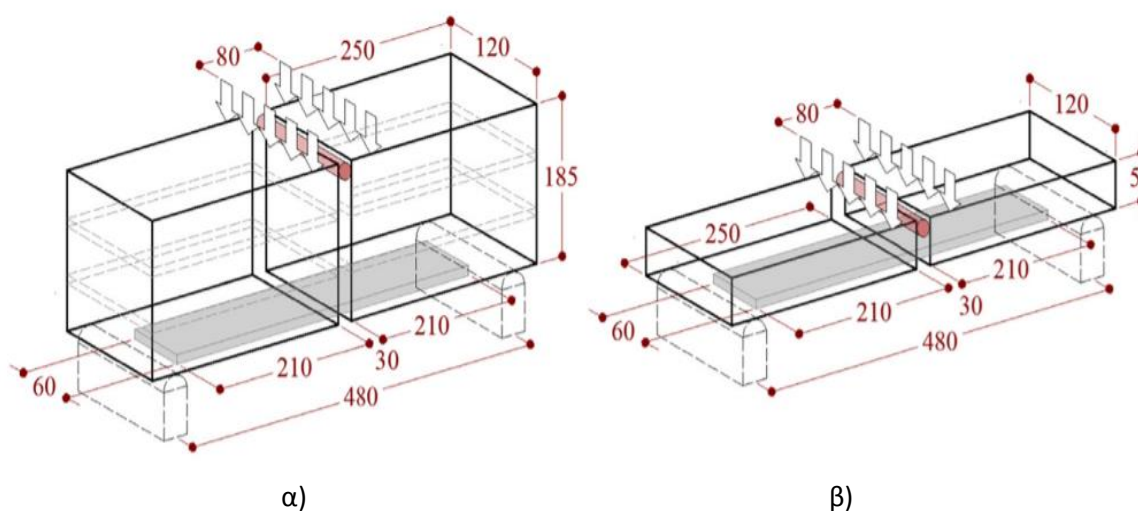
- Η μήτρα γεωπολυμερούς αποτελεί μια βιώσιμη εναλλακτική λύση συγκριτικά με τη μήτρα τσιμεντοειδούς σύστασης με ποικίλα πλεονεκτήματα σε περιβαλλοντικό και μηχανικό πλαίσιο. Ωστόσο, κρίνεται απαραίτητη η διεξαγωγή μελετών με θέμα των συμπεριφορών των γεωπολυμερών σε διαφορετικές περιπτώσεις, ώστε να υπάρχει πλήρης εικόνα των δυνατοτήτων τους.

Σε πειραματική έρευνα που πραγματοποιήθηκε από τους Calabrese κ.α. (2020) [22], εξετάστηκε η επίδραση των ορθών τάσεων στη διεπιφάνεια σχετικά με τη συνάφεια των IAM χρησιμοποιώντας δοκιμές άμεσης διάτμησης (single lap shear test) και μέσω δοκιμών έμμεσης κάμψης δύο ανεξάρτητων πρισματικών δοκιμών (modified beam test). Αναλυτικότερα, κατασκευάστηκαν δοκίμια τοιχοποιίας τα οποία ενισχύθηκαν με IAM. Τα πλέγματα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν δύο ειδών, άνθρακα και PBO, και η ενίσχυση πραγματοποιήθηκε για δύο στρώσεις πλέγματος. Για την διεξαγωγή της δοκιμής έμμεσης κάμψης πραγματοποιήθηκε σύνδεση δύο δοκιμών τοιχοποιίας με άρθρωση κυλινδρικού σχήματος στο πάνω μέρος τους, ενώ στην κάτω πλευρά τοποθετήθηκε η ενίσχυση με σύνθετο υλικό IAM. Χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικά είδη γεωμετριών για το πείραμα:

α) Δοκίμια τοιχοποιίας τα οποία αποτελούνται από τρία τούβλα και δύο αρμούς κονιάματος.

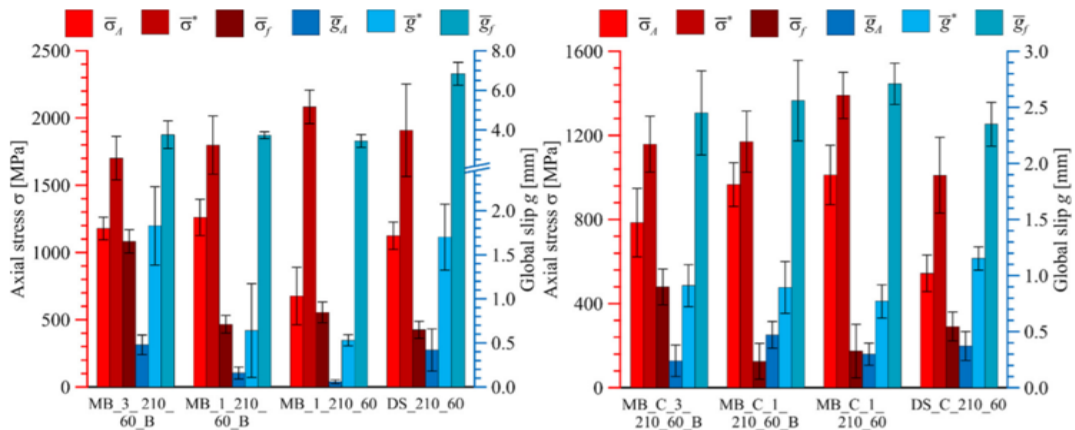
β) Δοκίμια τοιχοποιίας τα οποία αποτελούνται από τα δύο μονά τούβλα χωρίς αρμούς κονιάματος.

Οι δύο διαφορετικές γεωμετρίες που περιγράφονται παραπάνω φαίνονται σχηματικά στο Σχήμα 2.6.7.



Σχήμα 2.6.7: Οι δύο διαφορετικές γεωμετρίες α) με τρία μπλοκ τοιχοποιίας, β) με ένα μπλοκ αντίστοιχα [22].

Οι παράμετροι που εξετάστηκαν στο πείραμα ήταν οι διαστάσεις των δοκιμών τοιχοποιίας, δηλαδή τα δύο διαφορετικά είδη γεωμετρίας που χρησιμοποιήθηκαν, τα οποία φαίνονται στο Σχήμα 2.6.7 και η ύπαρξη ή όχι εμποτισμένων ινών στο διάκενο ανάμεσα στα δοκίμια τοιχοποιίας. Στο Σχήμα 2.6.8 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας υπό τη μορφή ραβδογράμματος σχετικά με την αξονική τάση και την ολική ολίσθηση για τα δοκίμια τοιχοποιίας με ίνες α) άνθρακα β) ΡΒΟ. Όπως φαίνεται από το συγκριτικό ραβδόγραμμα τα μεγέθη της αξονικής τάσης και της ολικής ολίσθησης δεν παρουσιάζουν μεγάλη απόκλιση για τους δύο διαφορετικούς τύπους πλέγματος που χρησιμοποιούνται στη συγκεκριμένη πειραματική μελέτη (άνθρακα και ΡΒΟ), αλλά ούτε και για τα δύο διαφορετικά είδη δοκιμών που διεξάγονται (άμεση διάτμηση και έμμεση κάμψη).



Σχήμα 2.6.8: Σύγκριση αποτελεσμάτων αξονικής τάσης και ολικής ολίσθησης για τα δοκίμια α) ίνες άνθρακα β) ίνες PBO. [22]

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν ήταν τα εξής:

- ❖ Οι δοκιμές άμεσης διάτμησης (direct single lap shear test) και έμμεσης κάμψης (modified beam test) παρουσιάζουν όμοια αποτελέσματα, όσον αφορά τις ορθές τάσεις και τις μέγιστες αποκρίσεις φορτίων.
- ❖ Στις δοκιμές έμμεσης κάμψης παρατηρείται συμμετρική συμπεριφορά των δύο πλευρών μέχρι και το μέγιστο φορτίο, ενώ μετά από αυτό παρατηρείται μη συμμετρική εικόνα.
- ❖ Τα δοκίμια που αποτελούνταν από πλήρως εμποτισμένες ίνες (είτε άνθρακα, είτε PBO) επέδειξαν καλύτερη συνάφεια και μεγαλύτερη παραμένουσα διατμητική τάση.
- ❖ Η γεωμετρία που αποτελούνταν από τρία μπλοκ τοιχοποιίας και υπεβλήθη σε δοκιμή έμμεσης κάμψης έδειξε ότι οι ορθές τάσεις αυξάνονται με την απόκλιση του δείγματος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ

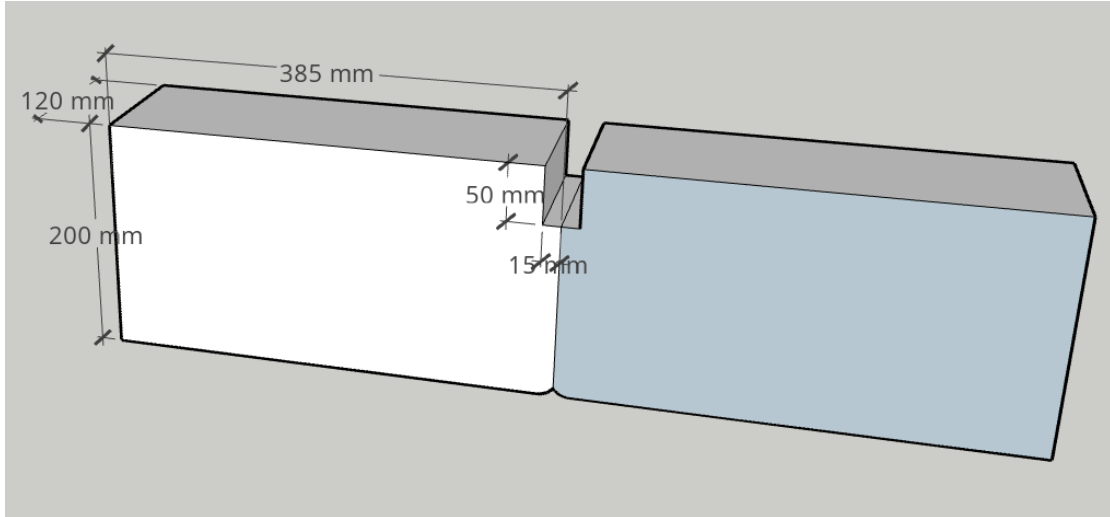
3.1 Γενικά

Το πειραματικό πρόγραμμα διεξήχθη στο Εργαστήριο Τεχνολογίας και Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών κατά την χρονική περίοδο Ιουνίου-Νοεμβρίου 2021. Το περιεχόμενο της πειραματικής μελέτης περιελάμβανε τη διερεύνηση της συνάφειας ανάμεσα στο σκυρόδεμα και στο σύνθετο υλικό ΙΑΜ με μήτρα γεωπολυμερούς. Ειδικότερα, κατασκευάστηκαν έξι ορθογωνικά πρίσματα οπλισμένου σκυροδέματος (ΟΣ) διαστάσεων 385 x 200 x 120 mm, στα οποία επικολλήθηκαν εξωτερικά δύο στρώσεις πλέγματος βασάλτη. Κύριες παραμέτρους προς διερεύνηση αποτέλεσαν τα διαφορετικά μήκη επικόλλησης, τα οποία έλαβαν δύο ακραίες τιμές των 50 mm και των 300 mm, καθώς και το διαφορετικό είδος μήτρας (γεωπολυμερικής και τσιμεντοειδούς προέλευσης). Ο χαρακτηρισμός της συνάφειας προσδιορίστηκε μέσω της δοκιμής έμμεσης κάμψης δύο ανεξάρτητων δοκιμών (modified beam test). Ακολουθεί η αναλυτική περιγραφή της πειραματικής διαδικασίας που έλαβε χώρα.

3.2 Περιγραφή πειραματικών δοκιμών

Για την πραγμάτωση του πειραματικού προγράμματος κατασκευάστηκαν έξι ορθογωνικά πρίσματα στα οποία πραγματοποιήθηκε εφαρμογή του ινοπλέγματος σε ανόργανη μήτρα (ΙΑΜ) με δύο στρώσεις πλέγματος βασάλτη. Επίσης, κατασκευάστηκε ένα επιπλέον πρίσμα με διαστάσεις όμοιες με αυτές των υπόλοιπων δοκιμών, το οποίο εξυπηρετούσε τις ανάγκες της πειραματικής διάταξης και διατηρούνταν σταθερό καθ' όλη τη διάρκεια των πειραμάτων. Τα δοκίμια αποτελούσαν ορθογωνικά πρίσματα με μήκος $L=385$ mm, πλάτος $b=120$ mm και ύψος $d=200$ mm. Το άνω τμήμα των δοκών κατασκευάστηκε με τέτοιο τρόπο, ώστε να δημιουργείται εγκοπή με μήκος 15 mm και ύψος 50 mm. Στο κάτω μέρος των δοκιμών τοποθετήθηκε κατά την κατασκευή πλαστική φαλτσογωνία μήκους 2 cm και πραγματοποιήθηκε καμπύλωση των άκρων τους με χρήση τροχού σε ακτίνα ίση με 20 mm ($R=20$ mm). Η τελική μορφή των

δοκιμίων φαίνεται στο Σχήμα 3.2.1, όπου έχει γίνει ο σχεδιασμός της πειραματικής διάταξης στο περιβάλλον εμπορικά διαθέσιμου λογισμικού και στο οποίο αναγράφονται οι διαστάσεις των ορθογωνικών πρισμάτων. Στο Σχήμα 3.2.2 παρουσιάζονται τα πρισματικά δοκίμια, όπως παρασκευάστηκαν στο χώρο του εργαστηρίου.

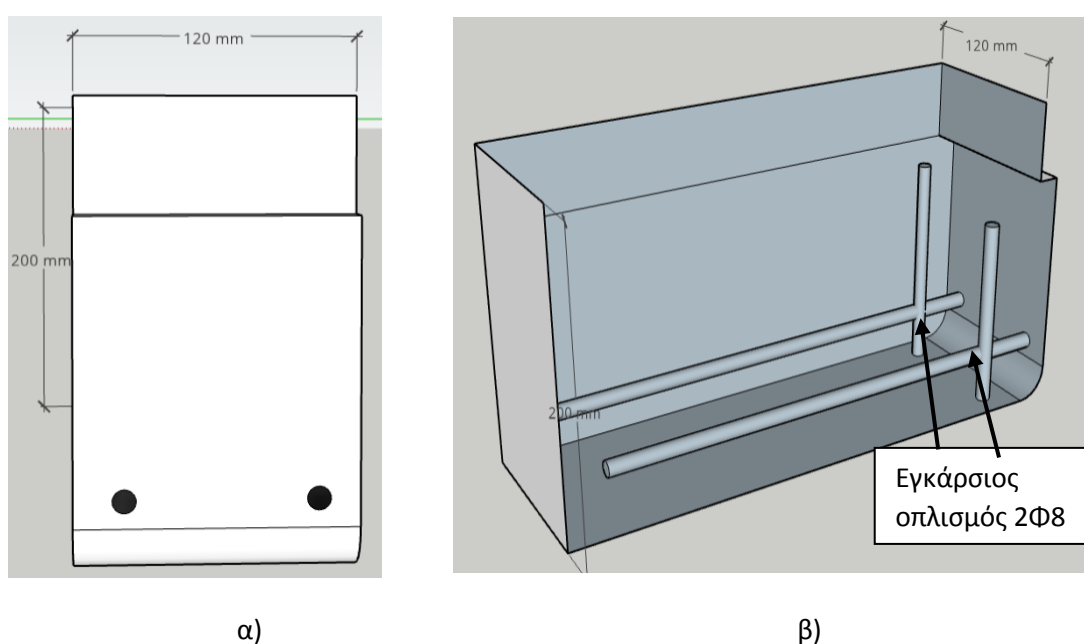


Σχήμα 3.2.1: Σχηματικά απεικόνιση των πρισματικών δοκιμίων.



Σχήμα 3.2.2: Πλάγια όψη της τελικής μορφής των δοκιμίων.

Επιπλέον, σχετικά με τον χαλύβδινο οπλισμό τοποθετήθηκε εγκάρσιος οπλισμός 2Φ8 κάτω, ποιότητας B500C. Στο Σχήμα 3.2.3 παρουσιάζεται ο χαλύβδινος οπλισμός σε όψη, αλλά και σε τρισδιάστατη απεικόνιση, η σχεδίαση του οποίου πραγματοποιήθηκε σε εμπορικά διαθέσιμο σχεδιαστικό πρόγραμμα. Ο οπλισμός τοποθετήθηκε σε απόσταση 20 mm από το κάτω τμήμα των δοκών. Ο οπλισμός επιλέχθηκε με στόχο την αποφυγή της διατμητικής αστοχίας και της θραύσης του σκυροδέματος, συμβάλλοντας στην ανάπτυξη πλαστικής συμπεριφοράς. Κατά αυτόν τον τρόπο, διασφαλίζεται ότι θα προηγηθεί η αστοχία της ενίσχυσης πριν την διαρροή του εφελκόμενου χάλυβα.



Σχήμα 3.2.3: Εγκάρσιος οπλισμός 2Φ8 όπως φαίνεται α) σε όψη και β) τρισδιάστατη απεικόνιση.

Η ονοματολογία των δοκιμών ορίστηκε με βάση τη μορφή K_AI_MΣ (χ), όπου το K αντιστοιχεί στον τύπο κονιάματος, A ο αριθμός των στρώσεων του σύνθετου υλικού, I το είδος του ινοπλέγματος, MΣ το μήκος συνάφειας σε mm και (χ) ο αριθμός που αντιστοιχεί στα πανομοιότυπα δοκίμια (χ=1 ή 2). Συνεπώς, τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν στην πειραματική διαδικασία με βάση την ονοματολογία που δόθηκε συνοψίζονται στον Πίνακα 3.2.1.

Πίνακα 3.2.1: Ονοματολογία δοκιμών.

Ονοματολογία	Είδος κονιάματος	Υλικό ινοπλέγματος	Αριθμός στρώσεων	Μήκος συνάφειας (mm)
CM_2B_300-1	Τσιμεντοειδές	Βασάλτης	2	300
CM_2B_300-2	Τσιμεντοειδές	Βασάλτης	2	300
GP_2B_300-1	Γεωπολυμερές	Βασάλτης	2	300
GP_2B_300-2	Γεωπολυμερές	Βασάλτης	2	300
GP_2B_50-1	Γεωπολυμερές	Βασάλτης	2	50
GP_2B_50-2	Γεωπολυμερές	Βασάλτης	2	50

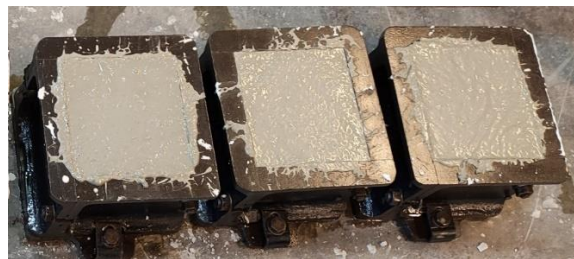
3.3 Ιδιότητες υλικών

3.3.1 Σκυρόδεμα

Για την κατασκευή των υπό μελέτη δοκιμών πραγματοποιήθηκε σκυροδέτηση από εταιρεία παρασκευής σκυροδέματος με έδρα την πόλη του Βόλου. Το σκυρόδεμα που χρησιμοποιήθηκε ήταν κατηγορίας C12/15 με μέγιστο κόκκο αδρανών ίσο με 16 mm. Παρακάτω παρατίθεται το Σχήμα 3.3.1.1, όπου παρουσιάζεται η τελική μορφή του νωπού σκυροδέματος στα καλούπια, στα οποία έχει πραγματοποιηθεί επιπέδωση των ελεύθερων επιφανειών και το Σχήμα 3.3.1.2, όπου παρουσιάζεται η λήψη δοκιμών κύβου με στόχο τον πειραματικό προσδιορισμό της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος.



Σχήμα 3.3.1.1: Τελική μορφή του νωπού σκυροδέματος στα καλούπια.



Σχήμα 3.3.1.2: Λήψη κυβικών δοκιμίων.

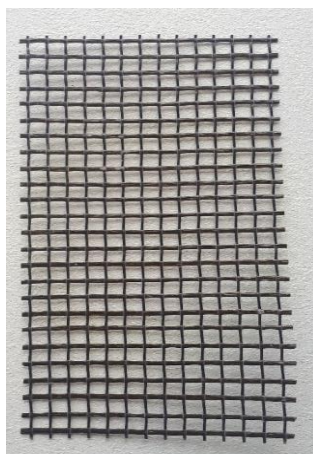
Στον Πίνακα 3.3.1.1 παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά και η θλιπτική αντοχή των δοκιμίων κύβου που ελήφθησαν κατά τη σκυροδέτηση, όπως αυτή προσδιορίστηκε πειραματικά. Η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος υπολογίστηκε κατά μέσο όρο ίση με 20,60 MPa.

Πίνακας 3.3.1.1: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά και θλιπτική αντοχή δοκιμίων κύβου.

ID	Χρόνος ωρίμανσης (ημέρες)	Μήκος L (mm)	Πλάτος b (mm)	Ύψος d (mm)	Μέγιστο φορτίο P- θλίψη (kN)	Θλιπτική αντοχή (MPa)
C_1	134	150	150	150	458,177	20,3634
C_2	134	150	150	150	476,937	21,1972
C_3	134	150	150	150	455,444	20,2420
Μέσος όρος						20,60

3.3.2 Ινοπλέγματα

Για την ενίσχυση των δοκιμίων χρησιμοποιήθηκαν πλέγματα από ίνες βασάλτη δύο διευθύνσεων κάθετων μεταξύ τους εμπορικά διαθέσιμο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.3.2.1. Το εμβαδόν του κάθε κλώνου, όπως υπολογίστηκε, είναι ίσο με $0,232 \text{ mm}^2$, συνεπώς το εμβαδόν του πλέγματος για 14 κλώνους και 2 στρώσεις πλέγματος είναι ίσο με $6,5 \text{ mm}^2$. Οι μηχανικές ιδιότητες, όπως δίνονται από τον κατασκευαστή παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.3.2.1.



Σχήμα 3.3.2.1: Πλέγμα ινών βασάλτη.

Πίνακας 3.3.2.1: Μηχανικές ιδιότητες του ινοπλέγματος

Τύπος ίνας	Βασάλτης
Βάρος (g/m^2)	250
Μέγεθος βρόγχου (mm)	6x6
Πυκνότητα ινών (g/cm^3)	2,75
Εφελκυστική αντοχή ινοπλέγματος (MPa)	1542
Μέτρο ελαστικότητας (GPa)	89
Ονομαστικό πάχος κύριας διεύθυνσης t_f (mm)	0,039
Επιμήκυνση κατά την αστοχία (%)	1,8

3.3.3 Μήτρα ενίσχυσης

Για την διαδικασία της εφαρμογής του IAM χρησιμοποιήθηκαν δύο ειδών κονιάματα, ένα γεωπολυμερικής και ένα τσιμεντοειδούς σύστασης. Πιο συγκεκριμένα, το κονίαμα γεωπολυμερούς αναπτύχθηκε στο Εργαστήριο Τεχνολογίας και Κατασκευών ΟΣ του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Για την παρασκευή του χρησιμοποιήθηκε εμπορικά διαθέσιμη μετακαολίνη, ίνες πολυπροπυλενίου, άμμος διαμέτρου μικρότερης του 1 mm και η ενεργοποίηση πραγματοποιήθηκε μέσω διαλύματος πυριτικού καλίου εμπορικά διαθέσιμου (υδρύαλος). Όσον αφορά το τσιμεντοειδές κονίαμα, χρησιμοποιήθηκε εμπορικά διαθέσιμο κονίαμα το οποίο αναμείχθηκε με νερό με λόγο N/T ίσο με 0,24 και αναδεύτηκε επαρκώς, ώστε να αποκτήσει την επιθυμητή σύσταση.

Κατά την παρασκευή των κονιαμάτων πραγματοποιήθηκε δειγματοληψία λαμβάνοντας μέρος και των δύο ειδών κονιάματος σε μεταλλικές μήτρες διαστάσεων 40 mm x 40 mm x 160 mm , ώστε να γίνει πειραματικός προσδιορισμός των μηχανικών ιδιοτήτων τους. Στον Πίνακα 3.3.3.1 αναγράφονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και οι αντοχές των δοκιμών της γεωπολυμερικής μήτρας σε κάμψη και σε θλίψη και τα αντίστοιχα μεγέθη για το τσιμεντοειδές κονίαμα παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.3.3.2. Η καμπτική αντοχή του κονιάματος γεωπολυμερούς υπολογίστηκε κατά μέσο όρο ίση με 6,63 MPa, ενώ η θλιπτική βρέθηκε ίση με 53,08 MPa. Επιπλέον, υπολογίστηκε η πυκνότητα ρ του κονιάματος γεωπολυμερούς ίση με 1950,06 kg/m³. Σχετικά με το κονίαμα τσιμεντοειδούς σύστασης οι τιμές της καμπτικής και θλιπτικής αντοχής υπολογίστηκαν κατά μέσο όρο ίσες με 2,18 MPa και 8,04 MPa αντίστοιχα, ενώ η πυκνότητα βρέθηκε ίση με 1678,15 kg/m³.

Οι μηχανές στις οποίες πραγματοποιήθηκαν οι δοκιμές της κάμψης τριών σημείων και της σύνθλιψης των δοκιμών του κονιάματος γεωπολυμερούς παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.3.3.1. Ειδικότερα, μέσω της υδραυλικής πρέσας έγινε η καταγραφή του μέγιστου φορτίου F (N) σε κάμψη και μέσω της σχέσης (3.1) πραγματοποιήθηκε ο υπολογισμός της μέγιστης καμπτικής αντοχής. Η ταχύτητα της μηχανής κάμψης ορίστηκε στα 0,05 kN/sec, ενώ στην πρέσα σύνθλιψης ορίστηκε στα 0,5 MPa/sec.

Πίνακας 3.3.3.1: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά και αντοχές δοκιμών κονιάματος γεωπολυμερούς

Δοκίμιο	Χρόνος ωρίμανσης	Μάζα(g)	Μήκος L (mm)	Πλάτος b (mm)	Ύψος d (mm)	Μέγιστο φορτίο κάμψης F (N)	Καμπτική αντοχή (MPa)	Θλιπτική αντοχή (MPa)
GP_(a)	46	494.8	159.5	40.36	39.70	2670	6.30	46.33
GP_(b)	46	500.1	159	40.22	39.85	2844	6.68	55.78
GP_(c)	46	497.4	158.5	40.37	39.83	2950	6.91	57.14
Μέσος όρος	46	497.43	159	40.32	39.79	2821.33	6.63	53.08
Τυπική απόκλιση							0.31	5.89

Πίνακας 3.3.3.2: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά και αντοχές δοκιμών κονιάματος τσιμεντοειδούς σύστασης.

Δοκίμιο	Χρόνος ωρίμανσης	Μάζα(g)	Μήκος L (mm)	Πλάτος b (mm)	Ύψος d (mm)	Μέγιστο φορτίο κάμψης F (N)	Καμπτική αντοχή (MPa)	Θλιπτική αντοχή (MPa)
CM_(a)	49	420.0	159	40.02	39.70	906	2.15	7.81
CM_(b)	49	415.8	159.5	39.20	39.85	905	2.20	8.42
CM_(c)	49	422.3	159	40.37	39.38	913	2.20	7.89
Μέσος όρος	49	419.37	159.17	39.86	39.64	908	2.18	8.04
Τυπική απόκλιση							0.28	0.3

Ακόμη, στο Σχήμα 3.3.3.2 παρουσιάζεται ένα δοκίμιο κονιάματος γεωπολυμερούς πριν και μετά τη δοκιμή της κάμψης τριών σημείων. Οι δοκιμές της κάμψης τριών σημείων και της σύνθλιψης πραγματοποιήθηκαν σύμφωνα με τα πιστοποιημένα πρότυπα κατά EN1015-11.

$$\sigma_k = 1,5 \frac{P * l}{b * h^2} \quad (3.1)$$

Όπου,

P: Το μέγιστο φορτίο που εφαρμόζεται στο δοκίμιο σε Newton

L : Η απόσταση μεταξύ των κυλίνδρων στήριξης σε mm (στη συγκεκριμένη περίπτωση 100 mm)

b : Το πλάτος του δείγματος σε mm

d : Το ύψος του δείγματος σε mm



α)

β)

Σχήμα 3.3.3.1: α) Μηχανή κάμψης τριών σημείων, β) Μηχανή σύνθλιψης.



Σχήμα 3.3.3.2: Δοκίμιο κονιάματος γεωπολυμερούς πριν και μετά τη δοκιμή κάμψης τριών σημείων.

3.4 Προετοιμασία δοκιμών

3.4.1 Κατασκευή πρισματικών δοκιμών σκυροδέματος

Σε αυτήν την υποενότητα αναλύεται η διαδικασία κατασκευής των ξυλοτύπων (καλουπιών), γεγονός που συνιστά το πρώτο βήμα για την παρασκευή των δοκιμών. Ειδικότερα, οι ξυλότυποι κατασκευάστηκαν στο χώρο του εργαστηρίου. Τα κομμάτια που αποτελούσαν τους ξυλότυπους καθαρίστηκαν πρωτίτερα από υπολείμματα σκυροδέματος και σκόνης, ώστε να είναι δημιουργηθεί όσο το δυνατόν πιο λεία επιφάνεια. Τα καλούπια κατασκευάστηκαν κατά τέτοιο τρόπο, ώστε να μην είναι εφικτή η διαρροή νωπού σκυροδέματος από τους αρμούς και ήταν άκαμπτα, καθώς δεν ήταν επιτρεπτή η παραμόρφωσή τους κατά τη σκυροδέτηση. Επιπρόσθετα, τοποθετήθηκαν πλαστικές φαλτσογωνίες μήκους 12 cm στο κάτω μέρος των καλουπιών, ώστε να δημιουργηθεί ένα διαγώνιο τμήμα, το οποίο στη συνέχεια της πειραματικής διαδικασίας με χρήση τροχού καμπυλώθηκε σε ακτίνα $R=2$ cm. Στο άνω μέρος των ξυλοτύπων τοποθετήθηκε κομμάτι ξύλου με στόχο τη δημιουργία εγκοπής, η οποία αποτελεί μέρος της επιθυμητής μορφολογίας των δοκιμών προς μελέτη. Πραγματοποιήθηκε τοποθέτηση εγκάρσιου οπλισμού 2Φ8 στο κάτω μέρος των δοκιμών, ώστε να αποτραπεί η διατμητική αστοχία. Στο Σχήμα 3.4.1.1 παρουσιάζονται οι ξυλότυποι που κατασκευάστηκαν και οι λεπτομέρειες οπλισμού που τοποθετήθηκαν.



Σχήμα 3.4.1.1: α) Ξυλότυπος χωρίς οπλισμούς, β) Ξυλότυπος με προσθήκη οπλισμών γ) Λεπτομέρειες οπλισμού.

Μετά το πέρας της διαδικασίας της σκυροδέτησης πραγματοποιήθηκε η συντήρηση του σκυροδέματος η οποία περιελάμβανε τη διαβροχή του κατά τις επτά πρώτες ημέρες, μετά από τις οποίες αφαιρέθηκαν τα καλούπια. Παρόμοια συντήρηση έγινε και στα κυβικά δοκίμια.

3.5 Διαδικασία εφαρμογής IAM

3.5.1 Προετοιμασία επιφάνειας εφαρμογής

Προτού πραγματοποιηθεί η διαδικασία της εφαρμογής του IAM προηγήθηκε μία σειρά από προεργασίες που σχετίζονται με την προετοιμασία της επιφάνειας των δοκιμίων και την ετοιμασία και κοπή του ινοπλέγματος. Πιο συγκεκριμένα, όσον αφορά στην προετοιμασία της επιφάνειας των δοκών έλαβαν χώρα τα ακόλουθα βήματα:

- 1) Πρώτο βήμα συνιστά ο καθαρισμός της πλευράς των δοκιμίων στην οποία θα τοποθετηθεί μετέπειτα η ενίσχυση από τυχόν ακαθαρσίες και σκόνες. Επιπλέον, το τμήμα των ορθογωνικών πρισμάτων στο οποίο θα εφαρμοστεί το IAM ελέγχεται, ώστε να μην υπάρχουν ανώμαλες επιφάνειες, όπως εξογκώματα σκυροδέματος, που προκλήθηκαν λόγω μη επαρκούς δόνησης κατά τη σκυροδέτηση, και αν αυτά υπάρχουν λειαινόνται προσεκτικά.
- 2) Έπειτα, σχεδιάστηκαν σημάδια στα δοκίμια, τα οποία όριζαν το πλαίσιο στο οποίο θα επιβληθεί η ενίσχυση. Αναλυτικότερα, μετρήθηκε από το καμπύλο τμήμα των δοκιμίων απόσταση ίση με 0,5 cm και από τα πλαϊνά μέρη απόσταση ίση με 1,5 cm και από τις δύο μεριές και μετρήθηκαν τα αντίστοιχα μήκη συνάφειας (30 cm, 5 cm).
- 3) Το τμήμα της δοκού στο οποίο σχεδιάστηκε το πλαίσιο που θα πραγματοποιηθεί η εφαρμογή του IAM εκτραχύνθηκε με τέτοιο τρόπο όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.5.1.1 , ώστε να γίνουν εμφανή τα αδρανή του σκυροδέματος με στόχο την επίτευξη καλύτερης συνάφειας μεταξύ κονιάματος και σκυροδέματος.



Σχήμα 3.5.1.1: Εκτραχυμένη επιφάνεια πρισματικού δοκιμίου.

3.5.2 Εφαρμογή IAM

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε κατά την εφαρμογή των ινοπλεγμάτων σε ανόργανη μήτρα περιγράφεται λεπτομερώς από τα παρακάτω βήματα:

- Πραγματοποιήθηκε κοπή του ινοπλέγματος βασάλτη στις κατάλληλες διαστάσεις, ώστε να ταιριάζει επακριβώς στα σημάδια που σχεδιάστηκαν στα ορθογωνικά πρίσματα κατά τη διαδικασία της προετοιμασίας της επιφάνειάς τους. Ειδικότερα, το πλάτος των τμημάτων ινοπλέγματος που χρησιμοποιήθηκαν στην εφαρμογή των IAM μετρήθηκε ίσο με 14 κλώνους, μήκος που αντιστοιχεί σε 9 cm.
- Έπειτα, ακολούθησε η διαβροχή των επιφανειών των δοκιμίων στα οποία εφαρμόστηκε κονίαμα τσιμεντοειδούς σύστασης, γεγονός το οποίο παραλήφθηκε για τα δοκίμια που προορίζονταν για εφαρμογή IAM με κονίαμα γεωπολυμερούς.
- Επόμενο βήμα αποτέλεσε η παρασκευή του εκάστοτε κονιάματος με τις κατάλληλες αναλογίες. Η ζύγιση των ποσοτήτων που απαιτούνταν για κάθε

κονίαμα έγινε με ζυγαριά ακριβείας, ενώ η ανάμιξη πραγματοποιήθηκε με χρήση αναδευτήρα.

- Στη συνέχεια εφαρμόστηκε μικρή ποσότητα κονιάματος στην επιφάνεια των ορθογωνικών πρισμάτων, η οποία απλώθηκε ομοιόμορφα στη τμήμα που είχε οριστεί για το καθένα από αυτά. Ακολούθησε η εφαρμογή της πρώτης στρώσης ινοπλέγματος βασάλτη, όπου με ελαφρά πίεση επιτεύχθηκε η εισχώρηση του κονιάματος στους βρόχους του ινοπλέγματος. Έπειτα, πραγματοποιήθηκε η προσθήκη επιπλέον κονιάματος και η τοποθέτηση δεύτερου πλέγματος με τον ίδιο τρόπο που περιεγράφηκε παραπάνω. Η διαδικασία αυτή ακολουθήθηκε για την εφαρμογή δύο στρώσεων ινοπλέγματος για το εκάστοτε ορθογωνικό πρίσμα. Τέλος, τοποθετήθηκε τελική ποσότητα κονιάματος και πραγματοποιήθηκε η επιπέδωση της τελικής επιφάνειας. Στο Σχήμα 3.5.2.1 και στο Σχήμα 3.5.2.2 παρουσιάζεται η διαδικασία εφαρμογής του IAM που περιγράφεται παραπάνω με κονίαμα γεωπολυμερικής και τσιμεντοειδούς σύστασης αντίστοιχα.



3.5.2.1: Διαδικασία εφαρμογής IAM με μήτρα γεωπολυμερούς.



Σχήμα 3.5.2.2: Διαδικασία εφαρμογής IAM με τσιμεντοειδή μήτρα.

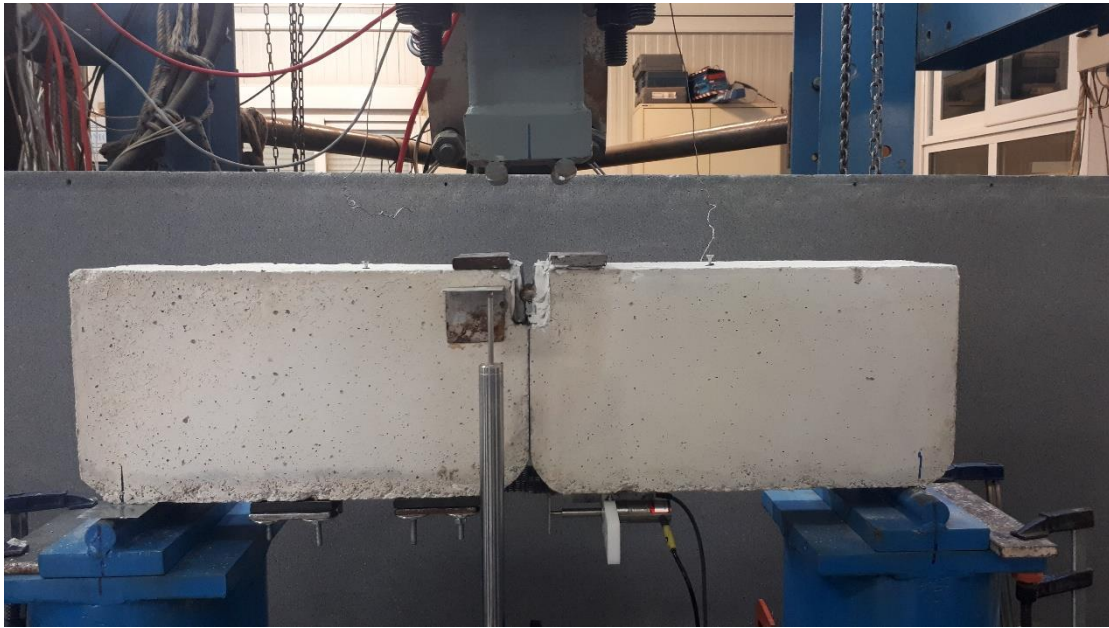
Για τα ορθογωνικά πρίσματα στα οποία εφαρμόστηκε κονίαμα τσιμεντοειδούς σύστασης ακολούθησε ως τελικό βήμα η διαβροχή τους για διάρκεια ίση με επτά ημέρες. Αντιθέτως, τα ορθογωνικά πρίσματα στα οποία έγινε εφαρμογή κονιάματος γεωπολυμερούς δεν πραγματοποιήθηκε διαβροχή σε κανένα στάδιο, καθώς το νερό δρα ανασταλτικά στην ανάπτυξη της αντοχής του κονιάματος.

3.6 Πειραματική διάταξη

Η διαδικασία της πειραματικής διάταξης περιγράφεται από μία αλληλουχία βημάτων τα οποία αναφέρονται παρακάτω.

- Αρχικά, τοποθετήθηκαν δύο ορθογωνικά πρίσματα, ένα στο οποίο είχε πραγματοποιηθεί εφαρμογή IAM και ένα σταθερό το οποίο ήταν χωρίς ενίσχυση, με τρόπο ώστε να συμπίπτουν οι πλευρές τους, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.6.1. Το δοκίμιο που διατηρήθηκε σταθερό καθ' όλη την πειραματική διαδικασία είχε προετοιμαστεί κατάλληλα για την καλύτερη συγκράτηση του πλέγματος. Η προετοιμασία του σταθερού δοκιμίου περιελάμβανε την επάλειψή του με εποξειδική κόλλα με τρόπο που φαίνεται στο Σχήμα 3.6.2,

δημιουργώντας ανώμαλη και τραχιά επιφάνεια, ώστε να γίνει καλύτερα η μηχανική αγκύρωση του πλέγματος βασάλτη.

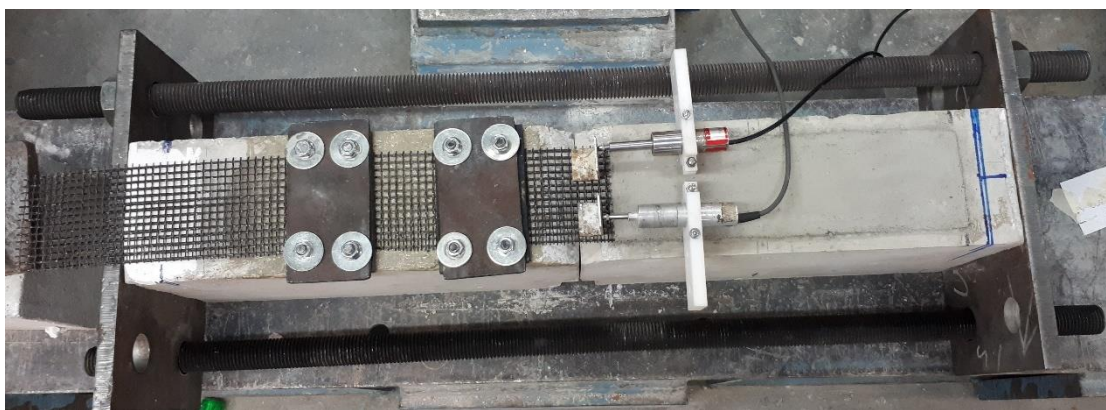


Σχήμα 3.6.1: Πειραματική διάταξη λίγο πριν την έναρξη του πειράματος. Τα δύο ορθογωνικά πρίσματα είναι διατεταγμένα και αποτελούν επίπεδη επιφάνεια.



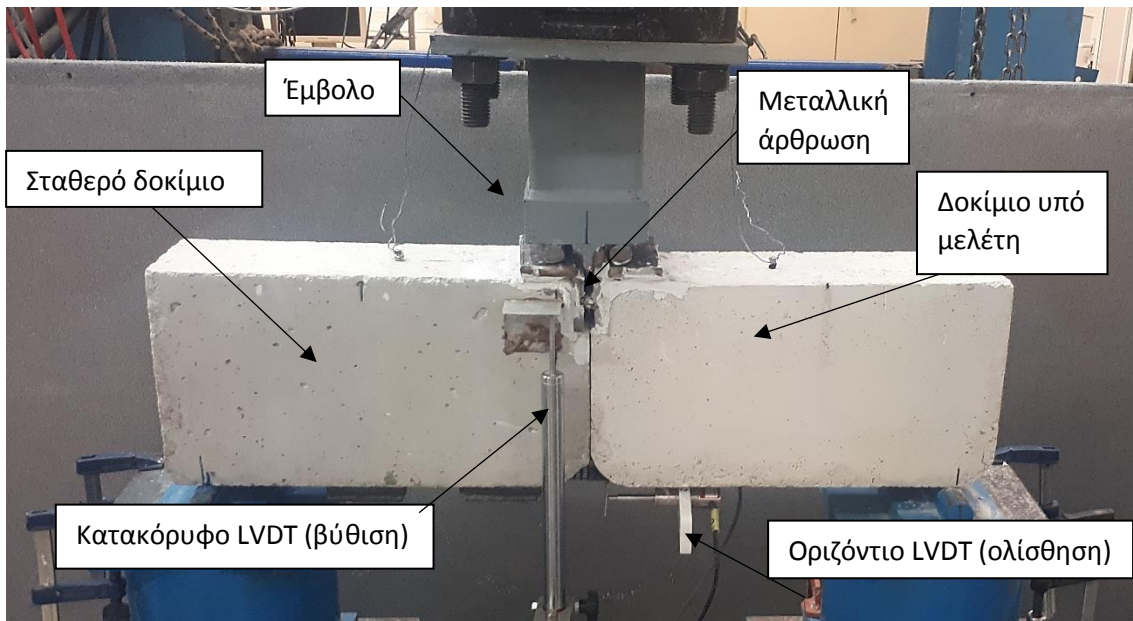
Σχήμα 3.6.2: Προετοιμασία σταθερού δοκιμίου.

- Στο πρισματικό δοκίμιο στο οποίο δεν είχε εφαρμοστεί IAM πραγματοποιήθηκε μηχανική αγκύρωση, με στόχο να μην πραγματοποιηθεί αστοχία στο πρίσμα αυτό, καθώς ζητούμενο συνιστά ο προσδιορισμός της συνάφειας. Στο Σχήμα 3.6.3 φαίνεται το κάτω τμήμα της δοκού και η μηχανική αγκύρωση του πλέγματος.



Σχήμα 3.6.3: Μηχανική αγκύρωση του πλέγματος.

- Το τμήμα των πλεγμάτων που περισσεύει κόπηκε, ώστε να είναι εμφανής η τυχόν ολίσθηση τους σε περίπτωση αστοχίας με ολίσθηση του πλέγματος εντός της μήτρας.
- Ακολούθησε η τοποθέτηση των LVDT's. Συνολικά τοποθετήθηκαν τρία LVDT's, δύο στο κάτω μέρος της "δοκού" από την πλευρά του πλέγματος και ένα στο πλαϊνό τμήμα της, ώστε να μετρηθεί η ολίσθηση και η βύθιση αντίστοιχα.
- Στο τμήμα της "δοκού" που ήταν σε επαφή με το έμβολο τοποθετήθηκαν με τη βοήθεια γύψου μεταλλικά πλακίδια, των οποίων η επιπεδότητα ελέγχθηκε με αλφάδι, ώστε να διασφαλιστεί η επίπεδη επιφάνεια κατά την εκτέλεση του πειράματος και να ληφθούν αξιόπιστες μετρήσεις.
- Επίσης, τοποθετήθηκε άρθρωση στο τμήμα της δοκού που σχηματίζεται εγκοπή. Στο Σχήμα 3.6.4 παρουσιάζεται η πειραματική διάταξη ολοκληρωμένη και έτοιμη για την έναρξη του πειράματος.

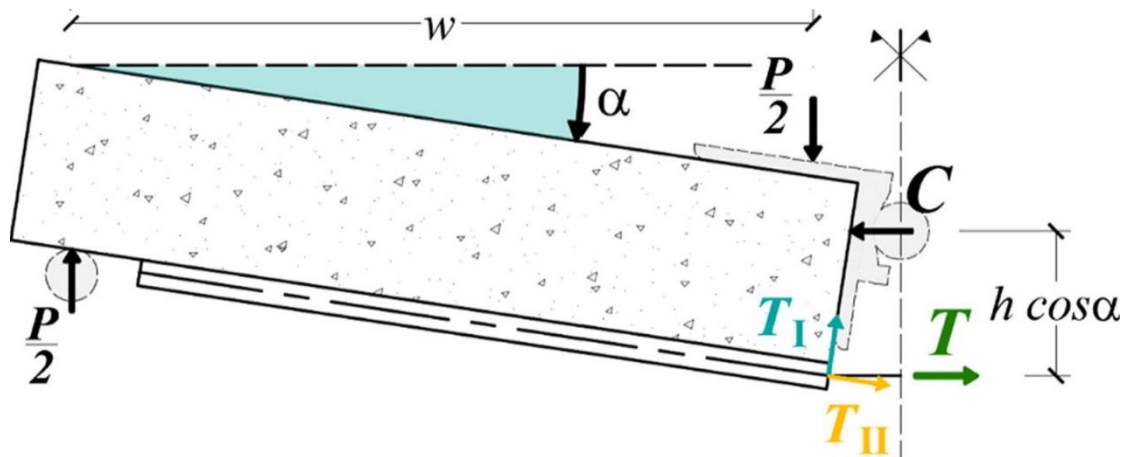


Σχήμα 3.6.4: Η πειραματική διάταξη ολοκληρωμένη.

Τα ορθογωνικά πρίσματα υποβλήθηκαν σε δοκιμή έμμεσης κάμψης (modified beam test), ώστε να προσδιοριστεί η συνάφεια του IAM με το σκυρόδεμα. Η διαδικασία που περιεγράφηκε παραπάνω πραγματοποιήθηκε για τα έξι δοκίμια που προετοιμάστηκαν. Ο ρυθμός επιβολής του φορτίου είχε ρυθμιστεί να είναι ίσος με $0,02 \text{ mm/s}$ και οι μετρήσεις καταγράφονταν αυτόματα μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή.

3.7 Γεωμετρικός προσδιορισμός αξονικής δύναμης IAM

Για τον υπολογισμό των δυνάμεων και των ορθών τάσεων στο πλέγμα ακολουθήθηκε η διαδικασία που περιγράφεται παρακάτω. Αναλυτικότερα, στο Σχήμα 3.7.1 παρουσιάζεται το Διάγραμμα Ελευθέρου Σώματος (Δ.Ε.Σ) για το ένα εκ των δύο ορθογωνικών πρισμάτων που συμμετέχουν στην πειραματική διάταξη δοκιμών έμμεσης κάμψης (modified beam test).



Σχήμα 3.7.1: Διάγραμμα Ελευθέρου Σώματος πρισματικού δοκίμιου [22].

Οι δυνάμεις T και T_{II} υπολογίζονται από τις εξισώσεις (3.2) και (3.3) αντίστοιχα.

$$T = \frac{P \cdot w}{2 \cdot h \cdot \cos \alpha} \quad (3.2)$$

$$T_{II} = T \cdot \cos \alpha = \frac{P \cdot w}{2 \cdot h} \quad (3.3)$$

Όπου:

P είναι η δύναμη που ασκείται στο πρισματικό δοκίμιο κατά το πείραμα,

w είναι η απόσταση ανάμεσα στο σημείο που ασκείται το φορτίο και την κοντινότερη στήριξη,

h είναι η απόσταση ανάμεσα στη στρώση του πλέγματος και τον άξονα της στήριξης,

α είναι η γωνία περιστροφής του πρίσματος, η οποία υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{\delta}{w} \right) \quad (3.4)$$

όπου δ η βύθιση του κατακόρυφου LVDT.

Οι ορθές τάσεις του πλέγματος υπολογίζονται βάσει της εξίσωσης (3.5):

$$\sigma_f = \frac{T u}{A_f} \quad (3.5)$$

όπου A_f θεωρείται το εμβαδόν του πλέγματος, το οποίο υπολογίζεται από τη σχέση (3.6):

$$Af = bf * tf * n \quad (3.6)$$

Όπου $b_f = 1000$ mm, $t_f = 0.039$ mm (πάχος πλέγματος σύμφωνα με τον κατασκευαστή) και n θεωρείται ο αριθμός των στρώσεων πλέγματος.

Τέλος, οι διατμητικές τάσεις του πλέγματος υπολογίζονται βάσει της εξίσωσης (3.7):

$$\tau = \frac{T_{ii}}{A} \quad (3.7)$$

,όπου

$$A = b \times d \quad (3.8)$$

,όπου ισχύει b το μήκος επικόλλησης σε mm και d το πλάτος του πλέγματος το οποίο σύμφωνα με την πειραματική διάταξη ορίζεται στα 90mm.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ

4.1 Γενικά – Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται και αναλύονται τα αποτελέσματα όπως αυτά προέκυψαν από τις πειραματικές διαδικασίες που έλαβαν χώρα στο Εργαστήριο Τεχνολογίας και Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Πιο συγκεκριμένα, μελετώνται οι παράμετροι που έχουν οριστεί, οι οποίες είναι:

- Το μήκος συνάφειας, το οποίο λαμβάνει τις ακραίες τιμές των 50 mm και των 300 mm.
- Η διαφορετική μητρική σύσταση του ΙΑΜ (μήτρα γεωπολυμερούς και τσιμεντοειδής) και η σύγκριση τους ως προς τη συνάφεια.

Στον Πίνακα 4.1.1 παρουσιάζονται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα για τα έξι πρισματικά δοκίμια, όπου αναγράφονται για το καθένα από αυτά το μέγιστο φορτίο που έλαβε, η ολίσθηση στη μέγιστη δύναμη, η μέγιστη βύθιση και η μορφή αστοχίας που παρατηρήθηκε. Ακόμη, στον Πίνακα 4.1.2 παρουσιάζονται τα μεγέθη που αναπτύχθηκαν κατά τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας και περιγράφονται από τις εξισώσεις (3.2), (3.3), (3.4), (3.5) και (3.7) που ορίστηκαν στην ενότητα 3.7.

Πίνακας 4.1.1: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα ορθογωνικών πρισμάτων.

Ονοματολογία	Μέγιστη δύναμη (kN)	Ολίσθηση στη μέγιστη δύναμη (mm)	Μέγιστη βύθιση δ(mm)	w (mm)	z (mm)	Μορφή αστοχίας
GP_2B_300-1	4,90	0,80	2,43	320	180	Θραύση ινών με μερική ολίσθηση
GP_2B_300-2	5,53	0,87	2,32	320	183	Θραύση ινών
Μέσος όρος	5.22	0.84	2.38			
GP_2B_50-1	6.36	0,83	3,65	320	185	Θραύση ινών
GP_2B_50-2	8,73	1,26	6,35	320	185	Θραύση ινών
Μέσος όρος	7.55	1.05	5.00			
CM_2B_300-1	6,99	2,39	4,81	320	175	Θραύση ινών
CM_2B_300-2	6,64	3,04	4,50	320	175	Διαστρωματική αποκόλληση μεταξύ πλέγματος-κονιάματος
Μέσος όρος	6.82	2.72	4.66			

Για τα γεωμετρικά δεδομένα της πειραματικής μελέτης που αναλύεται σε αυτήν τη διπλωματική εργασία οι τιμές των μεγεθών που ορίζονται παραπάνω από τις εξισώσεις (3.2), (3.3), (3.4), (3.5) και (3.7) περιγράφονται στον Πίνακα 4.1.2 και είναι οι εξής:

Πίνακας 4.1.2: Τιμές μεγεθών που ορίζονται από το πειραματικό υπόβαθρο της πειραματικής μελέτης.

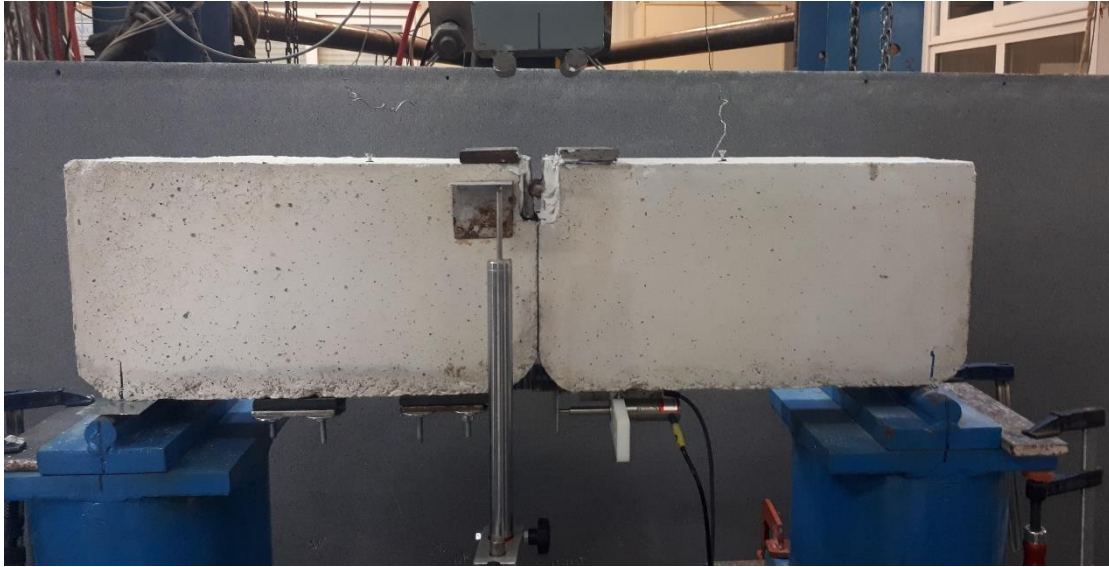
Ονοματολογία δοκιμίου	Δύναμη T (kN)	Δύναμη T _{ii} (kN)	Γωνία περιστροφής α (rad)	Ορθές τάσεις του πλέγματος σ _i (MPa)	Διατμητικές τάσεις του πλέγματος τ (MPa)
GP_2B_300-1	4.35	4.36	0.0076	669.68	0.17
GP_2B_300-2	4.84	4.84	0.0072	744.20	0.21
GP_2B_50-1	4.94	4.95	0.0114	759.19	1.41
GP_2B_50-2	7.55	7.54	0.0199	1161.39	1.79
CM_2B_300-1	6.40	6.39	0.0150	983.10	0.36
CM_2B_300-2	6.07	6.07	0.0140	933.86	0.32

4.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων ανά δύο πανομοιότυπα δοκίμια

4.2.1 Δοκίμια GP_2B_300-1 και GP_2B_300-2

Στα δοκίμια GP_2B_300-1 και GP_2B_300-2 επικολλήθηκε IAM με δύο στρώσεις ινοπλέγματος βασάλτη, κονίαμα γεωπολυμερικής σύστασης και το μήκος συνάφειάς τους ήταν 300 mm. Το μέγιστο φορτίο που έλαβε πριν αστοχήσει το πρώτο πανομοιότυπο δοκίμιο ήταν 4,90 kN, η ολίσθηση στη μέγιστη δύναμη ήταν 0,80 mm και η μέγιστη βύθιση μετρήθηκε ίση με 2,43 mm. Ο μηχανισμός αστοχίας ήταν η θραύση των ινών με ταυτόχρονη μερική ολίσθηση του ινοπλέγματος. Οι ορθές τάσεις του πλέγματος υπολογίστηκαν βάσει αριθμητικών σχέσεων ίσες με 669,68 MPa και οι διατμητικές τάσεις ίσες με 0,17 MPa. Σύμφωνα με τη πειραματική δοκιμή που πραγματοποιήθηκε το μέγιστο φορτίο που έλαβε πριν αστοχήσει το δεύτερο πανομοιότυπο δοκίμιο ήταν ίσο με 5,53 kN, η ολίσθηση στη μέγιστη δύναμη μετρήθηκε ίση με 0,87 mm και η μέγιστη ολίσθηση βρέθηκε ίση με 2,32 mm. Ο τρόπος αστοχίας που σημειώθηκε ήταν η θραύση ινών του ινοπλέγματος, ενώ οι ορθές τάσεις υπολογίστηκαν ίσες με 744,20 MPa και οι διατμητικές ίσες με 0,21 MPa. Στο Σχήμα 4.2.1.1 παρουσιάζεται η τυπική πειραματική διάταξη για το εκάστοτε πρισματικό δοκίμιο πριν την έναρξη του πειράματος. Επιπρόσθετα, στο Σχήμα 4.2.1.2 και στο Σχήμα 4.2.1.3 φαίνεται ο μηχανισμός αστοχίας για τα δοκίμια GP_2B_300-1 και

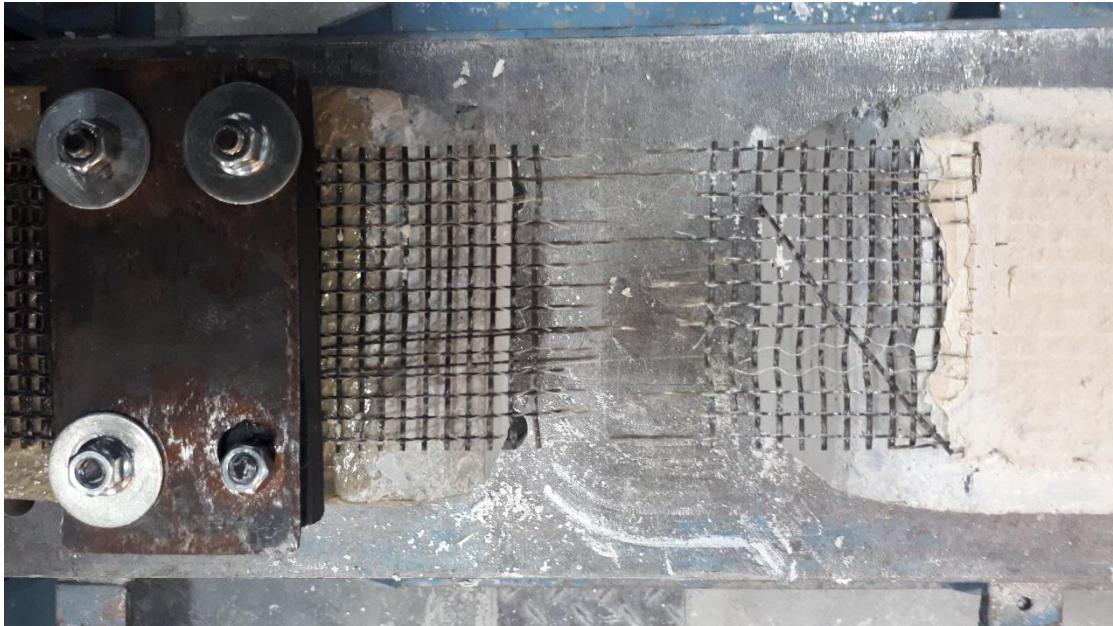
GP_2B_300-2 αντίστοιχα, ενώ επιπρόσθετα, στο Σχήμα 4.2.1.4 παρουσιάζεται το κοινό διάγραμμα φορτίου-ολίσθησης για τα δύο όμοια δοκίμια. Με τον όρο φορτίο θεωρείται το φορτίο που ασκείται μέσω του εμβόλου σύμφωνα με τις σχέσεις της ενότητας 3.7.



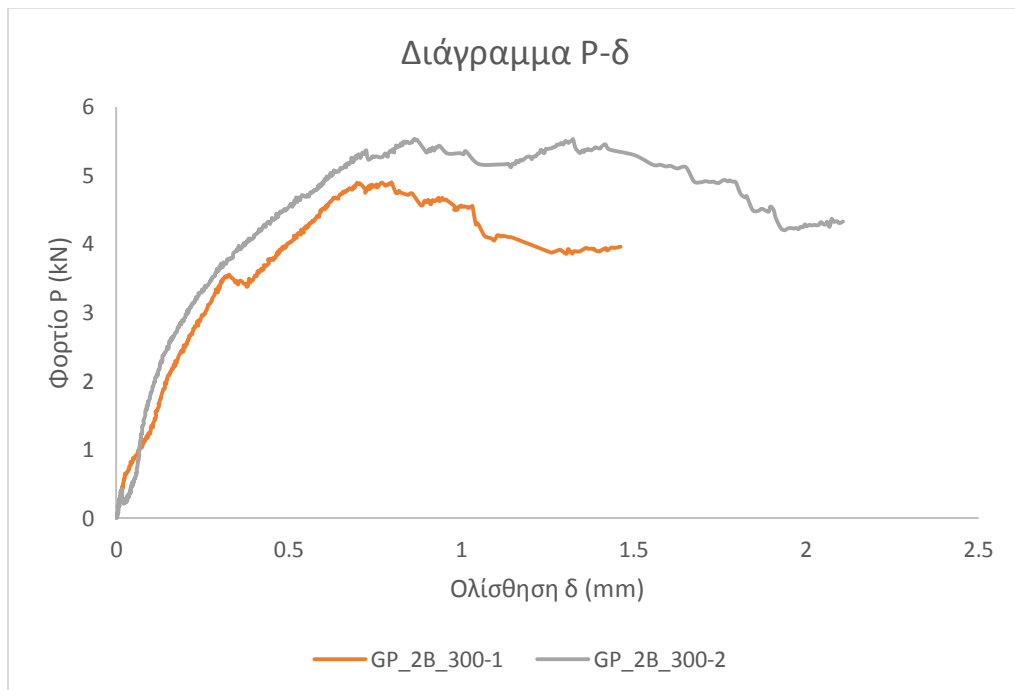
Σχήμα 4.2.1.1: Τυπική διάταξη λίγο πριν την έναρξη της πειραματικής δοκιμής.



Σχήμα 4.2.1.2: Θραύση ινών βασάλτη ως μορφή αστοχίας του δοκίμιου GP_2B_300-1.



Σχήμα 4.2.1.3: Θραύση ινών βασάλτη ως μορφή αστοχίας του δοκιμίου GP_2B_300-2.



Σχήμα 4.2.1.4: Κοινό διάγραμμα Φορτίου- Ολίσθησης για τα δοκίμια GP_2B_300-1 και GP_2B_300-2.

Όπως φαίνεται από το Σχήμα 4.2.1.4 το πρίσμα GP_2B_300-2 παρουσιάζει καλύτερη συμπεριφορά συγκριτικά με το GP_2B_300-1, καθώς λαμβάνει μεγαλύτερο φορτίο πριν αστοχήσει με διαφορά σχεδόν ίση με 0,6 kN. Η ολίσθηση στη μέγιστη δύναμη και η μέγιστη βύθιση που παρουσιάζουν τα δύο πανομοιότυπα δοκίμια είναι σχεδόν όμοιες μεταξύ τους. Επιπρόσθετα, ο τρόπος αστοχίας για το πρώτο όμοιο δοκίμιο είναι η θραύση των ινών με ταυτόχρονη μερική ολίσθηση των ινών, ενώ για το δεύτερο δοκίμιο είναι η θραύση των ινών. Οι διαφορές που παρατηρήθηκαν ως προς τη συμπεριφορά των δύο όμοιων πρισμάτων σχετίζονται κατά κύριο λόγο με τη διαδικασία που ακολουθήθηκε κατά τη διεξαγωγή του πειράματος. Πιο συγκεκριμένα, στο GP_2B_300-1 δεν είχε πραγματοποιηθεί ορθή εφαρμογή του IAM στη φάση της ενίσχυσης με αποτέλεσμα να μην γίνει και σωστή προένταση του πλέγματος κατά την εκτέλεση της πειραματικής διαδικασίας. Το γεγονός αυτό δικαιολογεί το μηχανισμό αστοχίας που παρατηρήθηκε για το πρώτο δοκίμιο, το οποίο συνδυάζει τη θραύση των ινών με τη μερική ολίσθηση του ινοπλέγματος. Η θραύση των ινών, λόγω του μεγέθους του μήκους συνάφειας των ορθογωνικών πρισμάτων συνιστά αναμενόμενη μορφή αστοχίας βάσει της βιβλιογραφίας.

4.2.2 Δοκίμια GP_2B_50-1 και GP_2B_300-2

Στα ορθογωνικά πρίσματα GP_2B_50-1 και GP_2B_50-2 εφαρμόστηκε IAM με δύο στρώσεις πλέγματος βασάλτη, κονίαμα γεωπολυμερικής σύστασης και το μήκος επικόλλησής τους ήταν ίσο με 50 mm. Κατά την εκτέλεση του πειράματος το πρώτο πρίσμα πριν αστοχήσει έλαβε μέγιστο φορτίο ίσο με 6,36 kN, η ολίσθηση στη μέγιστη δύναμη βρέθηκε ίση με 0,83 mm και η μέγιστη βύθιση μετρήθηκε ίση με 3,65 mm. Η μορφή αστοχίας του δοκιμίου που παρατηρήθηκε ήταν η θραύση των ινών του βασάλτη. Οι ορθές τάσεις του ινοπλέγματος υπολογίστηκαν ίσες με 759,19 MPa και οι διατμητικές τάσεις βρέθηκαν ίσες με 1,41 MPa. Το μέγιστο φορτίο δύναμης που έλαβε προτού αστοχήσει το δεύτερο όμοιο δοκίμιο ήταν ίσο με 8,73 kN, η ολίσθηση στη μέγιστη δύναμη μετρήθηκε ίση με 1,26 mm και η μέγιστη βύθιση ήταν ίση με 6,35 mm. Οι ορθές τάσεις υπολογίστηκαν ίσες με 1161,39 MPa και οι διατμητικές ίσες με 1,79

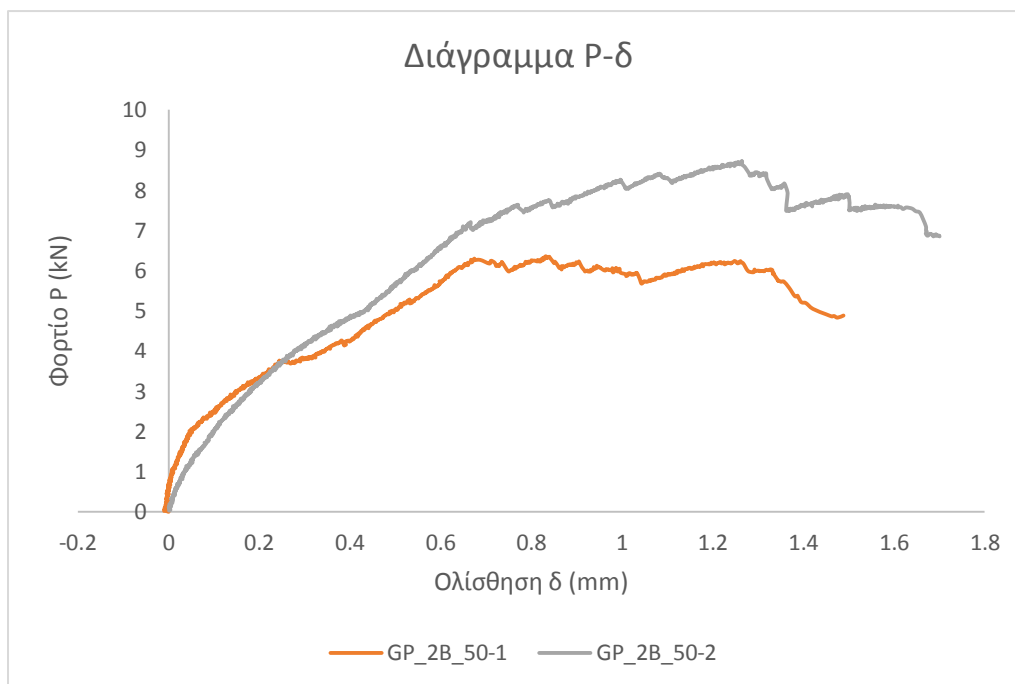
MPa, ενώ ο μηχανισμός αστοχίας που παρατηρήθηκε ήταν η θραύση των ινών. Στο Σχήμα 4.2.2.1 και στο Σχήμα 4.2.2.2 παρουσιάζεται ο τρόπος με τον οποίο αστόχησαν τα δοκίμια GP_2B_50-1 και GP_2B_50-2 αντίστοιχα. Ακόμη, στο Σχήμα 4.2.2.3 παρουσιάζεται το κοινό διάγραμμα του φορτίου συναρτήσει της ολίσθησης για τα δύο πανομοιότυπα πρίσματα.



Σχήμα 4.2.2.1: Θραύση ινών βασάλτη ως μορφή αστοχίας του δοκιμίου GP_2B_50-1.



Σχήμα 4.2.2.2: Θραύση ινών βασάλτη ως μορφή αστοχίας του δοκιμίου GP_2B_50-2.



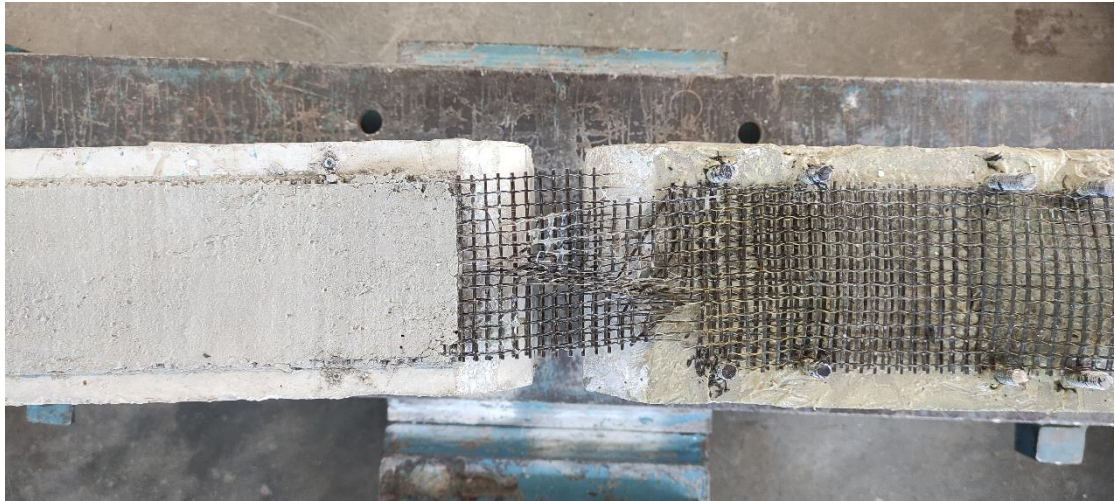
Σχήμα 4.2.2.3: Κοινό διάγραμμα Φορτίου- Ολίσθησης για τα δοκίμια GP_2B_50-1 και GP_2B_50-2.

Με βάση το Σχήμα 4.2.2.3 το ορθογωνικό πρίσμα GP_2B_50-2 παρουσιάζει καλύτερη συμπεριφορά συγκριτικά με το GP_2B_50-1, καθώς λαμβάνει αρκετά μεγαλύτερο φορτίο προτού αστοχήσει κατά περίπου 2,4 kN παραπάνω. Η ολίσθηση στη μέγιστη δύναμη και η μέγιστη βύθιση για το δεύτερο πανομοιότυπο δοκίμιο είναι μεγαλύτερες κατά 0,4 mm και 2,7 mm αντίστοιχα. Η μορφή αστοχίας για τα δύο πρίσματα είναι η θραύση των ινών, γεγονός το οποίο δεν είναι συμβατό με τη βιβλιογραφία λόγω το μικρού μήκους συνάφειας. Με βάση τις έρευνες που έχουν διεξαχθεί σε πρωτύπες μελέτες για το μήκος συνάφειας των 50 mm αναμενόμενο μηχανισμό αστοχίας συνιστά η αποκόλληση του ινοπλέγματος στη διεπιφάνεια κονιάματος- ινοπλέγματος. Η διαφορετική μορφή αστοχίας των δύο όμοιων πρισμάτων σε σύγκριση με αυτή που θεωρήθηκε αναμενόμενη βάσει βιβλιογραφίας οφείλεται κατά κύριο λόγο στο κονίαμα γεωπολυμερικής σύστασης που χρησιμοποιήθηκε κατά την εφαρμογή του IAM, το οποίο χαρακτηρίζεται από υψηλή αντοχή σε κάμψη και θλίψη σύμφωνα με τις πειραματικές δοκιμές που διεξήχθησαν για την εξακρίβωσή τους. Επιπλέον, πραγματοποιήθηκε πολύ καλή εφαρμογή του IAM για το δεύτερο πανομοιότυπο

πρίσμα σε σύγκριση με το πρώτο διευκολύνοντας σε μεγάλο βαθμό την ορθή προένταση του πλέγματος κατά τη φάση της προετοιμασίας του πειράματος.

4.2.3 Δοκίμια CM_2B_300-1 και CM_2B_300-2

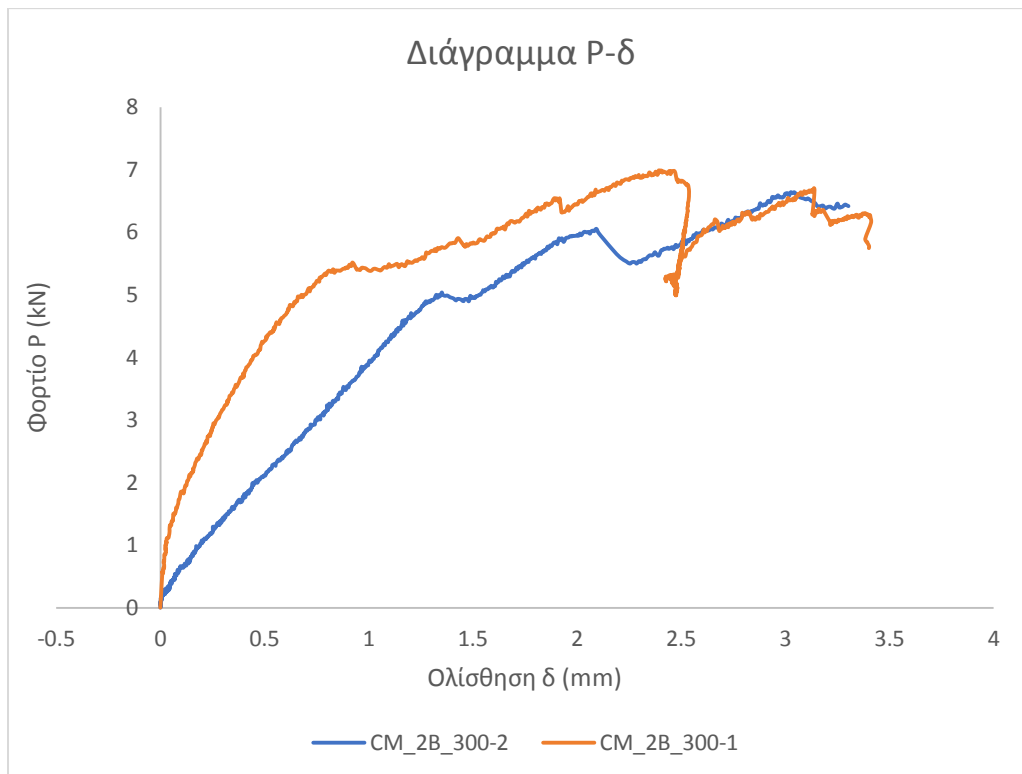
Στο ορθογωνικό πρίσμα CM_2B_300-1 επικολλήθηκε IAM με δύο στρώσεις πλέγματος βασάλτη και τσιμεντοειδές κονίαμα εμπορικά διαθέσιμο. Το μήκος συνάφειάς τους ήταν ίσο με 300 mm. Κατά τη διεξαγωγή του πειράματος το μέγιστο φορτίο που έλαβε το δοκίμιο CM_2B_300-1 προτού αστοχήσει ήταν 6,99 kN, η ολίσθηση στη μέγιστη δύναμη ήταν ίση με 2,39 mm και η μέγιστη βύθιση που μετρήθηκε βρέθηκε ίση με 4,81 mm. Οι ορθές τάσεις υπολογίστηκαν ίσες με 983,10 MPa, ενώ οι διατμητικές τάσεις του πλέγματος βρέθηκαν ίσες με 0,36 MPa και η μορφή αστοχίας του πρίσματος ήταν η θραύση των ινών. Το μέγιστο φορτίο δύναμης που έλαβε το δοκίμιο CM_2B_300-2 ήταν ίσο με 6,64 kN, η ολίσθηση στη μέγιστη δύναμη βρέθηκε ίση με 3,04 mm και η μέγιστη βύθιση μετρήθηκε ίση με 4,50 mm. Οι ορθές τάσεις υπολογίστηκαν ίσες με 933,86 MPa, οι διατμητικές τάσεις βρέθηκαν ίσες με 0,32 MPa και ο μηχανισμός αστοχίας που έλαβε χώρα ήταν η διαστρωματική αποκόλληση στη διεπιφάνεια πλέγματος- κονιάματος. Στο Σχήμα 4.2.3.1 παρουσιάζεται η θραύση των ινών βασάλτη ως μηχανισμός αστοχίας του δοκιμίου CM_2B_300-1 από δύο διαφορετικές όψεις, ενώ στο Σχήμα 4.2.3.2 παρουσιάζεται η μορφή αστοχίας για το δοκίμιο CM_2B_300-2. Τέλος, στο Σχήμα 4.2.3.3 παρουσιάζεται το κοινό διάγραμμα φορτίου συναρτήσει της ολίσθησης για τα δύο πανομοιότυπα δοκίμια.



Σχήμα 4.2.3.1: Θραύση ινών βασάλτη ως μορφή αστοχίας του δοκιμίου CM_2B_300-1.



Σχήμα 4.2.3.2: Διαστρωματική αποκόλληση στη διεπιφάνεια πλέγματος- κονιάματος ως μορφή αστοχίας του δοκιμίου CM_2B_300-2.



Σχήμα 4.2.3.3: Κοινό διάγραμμα Φορτίου- Ολίσθησης για τα δοκίμια CM_2B_300-1 και CM_2B_300-2.

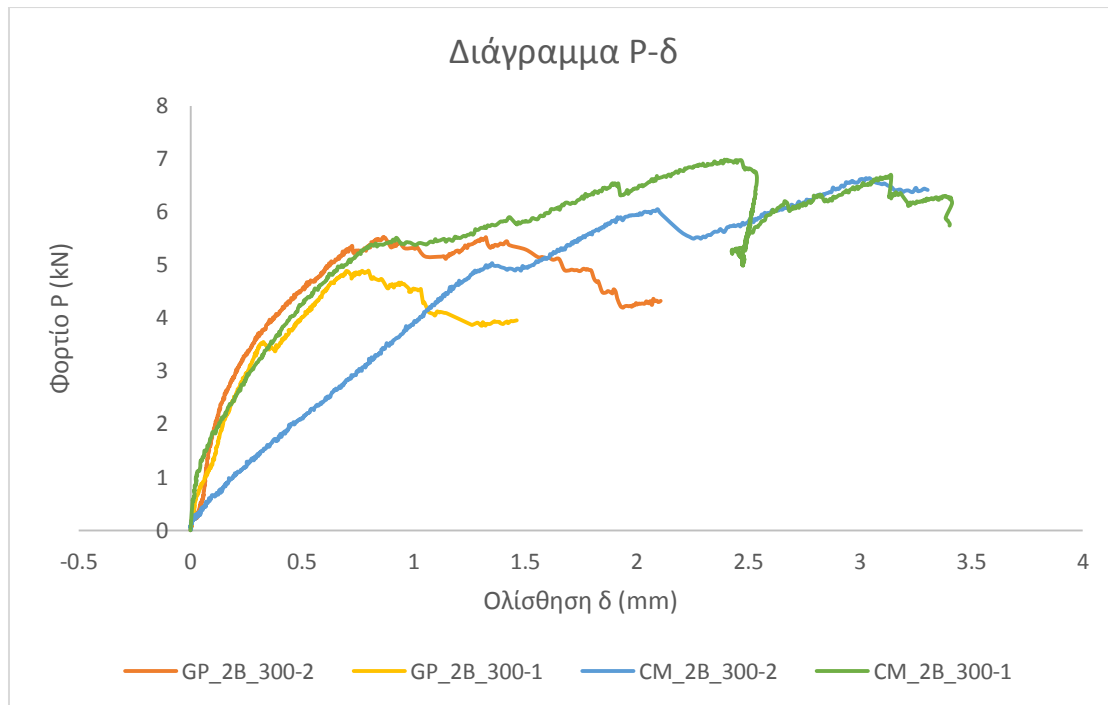
Όπως φαίνεται από το Σχήμα 4.3.3.1 τα μέγιστα φορτία πριν αστοχήσουν τα δύο όμοια πρίσματα είναι αρκετά κοντινά με το πρώτο να αγγίζει τα 6,99 kN και το δεύτερο τα 6,64 kN. Η ολίσθηση στη μέγιστη δύναμη για το δεύτερο δοκίμιο είναι μεγαλύτερη κατά 0,65 mm, ενώ η μέγιστη βύθιση είναι σχεδόν ίδια για τα δύο ορθογωνικά πρίσματα. Ωστόσο, η αστοχία συμβαίνει με διαφορετικό τρόπο για το εκάστοτε πανομοιότυπο δοκίμιο με το πρώτο να αστοχεί υπό το μηχανισμό της θραύσης των ινών, η οποία συνδυάζεται με ταυτόχρονη ολίσθηση των ινών και μερική αποκόλληση του IAM και το δεύτερο να αστοχεί μέσω διαστρωματικής αποκόλλησης στη διεπιφάνεια πλέγματος- κονιάματος. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι υπήρξαν αστοχίες κατά την προετοιμασία της πειραματικής διάταξης, καθώς τα ορθογωνικά πρίσματα που σχολιάζονται σε αυτήν την υποενότητα ελέγχθηκαν πρώτα, κάτι το οποίο δικαιολογεί τυχόν ατοπήματα που συνέβησαν. Πιο συγκεκριμένα, η συμπεριφορά του

δοκιμίου CM_2B_300-1 εξηγείται λόγω της μη ορθής μηχανικής αγκύρωσης που πραγματοποιήθηκε, καθώς το καουτσούκ τοποθετήθηκε με διαφορετικό τρόπο συγκριτικά με τα υπόλοιπα δοκίμια, οδηγώντας σε μη επαρκή συγκράτηση του ινοπλέγματος. Συνεπώς, στο πρώτο πανομοιότυπο δοκίμιο παρατηρήθηκε εκτός από θραύση ινών, ολίσθηση αλλά και μερική αποκόλληση του ΙΑΜ. Ταυτόχρονα, η πτωχή αντοχή του τσιμεντοειδούς κονιάματος σε κάμψη και θλίψη δεν επέτρεψε στα δοκίμια να λάβουν μεγαλύτερα φορτία. Η μειωμένη αντοχή του κονιάματος δε συνάδει με τα χαρακτηριστικά που του προσδίδονται σύμφωνα με τον κατασκευαστή, κάτι το οποίο συμβαίνει εξαιτίας του μακρόχρονου ανοίγματός του, υπερβαίνοντας την ημερομηνία που αναγράφεται στη συσκευασία.

4.3 Σύγκριση και σχολιασμός αποτελεσμάτων

4.3.1 Σύγκριση δοκιμών με διαφορετικό τύπο κονιάματος και ίδιο μήκος συνάφειας

Τα δοκίμια που εξετάζονται σε αυτήν την υποενότητα είναι τα εξής: GP_2B_300-1, GP_2B_300-2, CM_2B_300-1 και CM_2B_300-2, τα οποία χαρακτηρίζονται από όμοιο μήκος συνάφειας το οποίο είναι ίσο με 300 mm και διαφορετικό είδος κονιάματος (γεωπολυμερές και τσιμεντοειδές αντίστοιχα). Στο Σχήμα 4.3.4.1 παρουσιάζεται το διάγραμμα Φορτίου P – Ολίσθησης δ για τα τέσσερα πρίσματα που αναφέρονται παραπάνω.



Σχήμα 4.3.1.1: Κοινό διάγραμμα Φορτίου P- Ολίσθησης δ για τα τέσσερα πρίσματα.

Σύμφωνα με το Σχήμα 4.3.1.1 τα ορθογωνικά πρίσματα που έχουν ενισχυθεί με κονίαμα γεωπολυμερούς παρουσιάζουν μικρότερα μέγιστα φορτία κατά την στιγμή της αστοχίας με το μέσο όρο του μέγιστου φορτίου να λαμβάνει την τιμή των 5,22 kN. Ο μηχανισμός αστοχίας που προκύπτει για τα δοκίμια με μήτρα γεωπολυμερικής σύστασης είναι η θραύση των ινών με το πρώτο εκ των δύο πανομοιότυπων δοκιμίων να συνδυάζει και τη μερική ολίσθηση του πλέγματος. Σχετικά με τα πρίσματα που ενισχύθηκαν με κονίαμα τσιμεντοειδούς προέλευσης το μέγιστο φορτίο είναι μεγαλύτερο με το μέσο όρο αυτού να είναι ίσο με 6,82 kN. Ωστόσο, η μορφή αστοχίας δεν θεωρείται η προβλεπόμενη βάσει βιβλιογραφίας, καθώς το πρώτο πανομοιότυπο δοκίμιο αστοχεί μέσω θραύσης των ινών με ταυτόχρονη ολίσθηση και μερική αποκόλληση του IAM, ενώ το δεύτερο αστοχεί μέσω διαστρωματικής αποκόλλησης του IAM στη διεπιφάνεια κονιάματος- πλέγματος. Οι διαφορετικοί μηχανισμοί αστοχίας οφείλονται σε ποικίλους λόγους με τους κυριότερους εξ' αυτών να είναι:

- Η υψηλή αντοχή της μήτρας γεωπολυμερούς τόσο σε κάμψη, όσο και σε θλίψη. Αναλυτικότερα, η μήτρα γεωπολυμερούς είχε αντοχή σε κάμψη 3 φορές

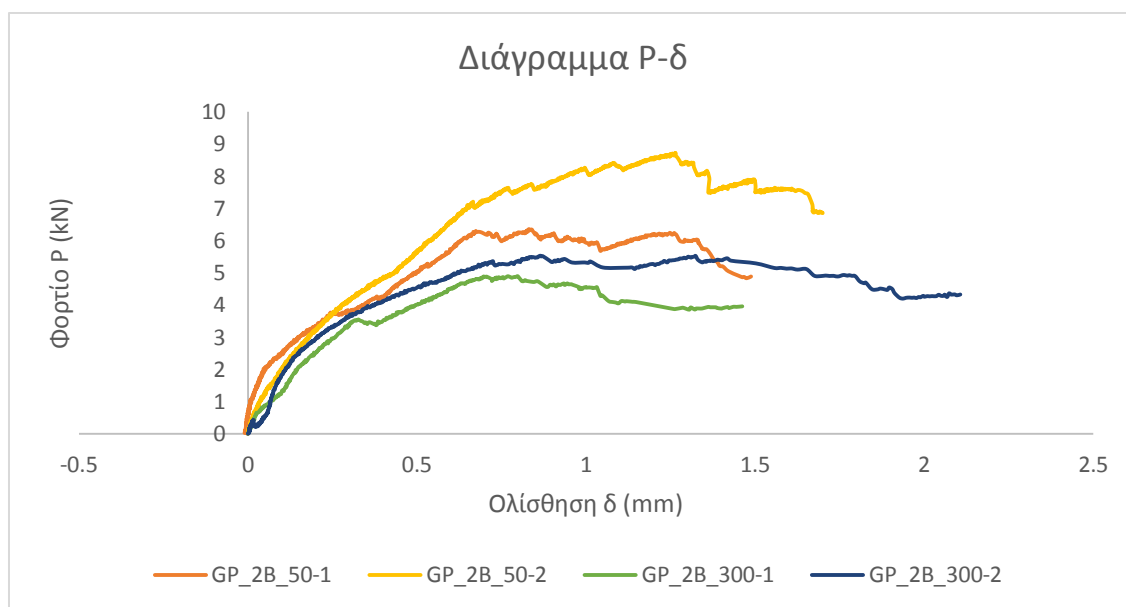
μεγαλύτερη σε σχέση με τη τσιμεντοειδή μήτρα και θλιπτική αντοχή σχεδόν 6,5 φορές υψηλότερη.

- Η ύπαρξη αστοχιών κατά την εφαρμογή του IAM για τα δοκίμια με κονίαμα γεωπολυμερούς συντέλεσαν στο να μη λάβουν μεγαλύτερα φορτία πριν την αστοχία, όπως αναμενόταν εξαιτίας της μεγάλης διαφοράς σε αντοχή των κονιαμάτων. Πιο συγκεκριμένα, οι αστοχίες αυτές περιλαμβάνουν τη μη ορθή εφαρμογή της ενίσχυσης με αποτέλεσμα να μην είναι εφικτή η ορθή προένταση κατά τη διεξαγωγή του πειράματος. Παρόλα αυτά, τα δοκίμια με μήτρα γεωπολυμερούς αστόχησαν κατά τον προβλεπόμενο τρόπο, επιβεβαιώνοντας πρωτότερες μελέτες.
- Καταλήγοντας, τα ατοπήματα που συνέβησαν κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων των πρισμάτων με τσιμεντοειδή μήτρα συντέλεσαν στο γεγονός να μην αστοχήσουν με τη μορφή της θραύσης των ινών. Τα ατοπήματα αυτά περιλαμβάνουν την ελλιπή αγκύρωση και τη μη ορθή προένταση του πλέγματος και γενικότερα, την μη ορθή προετοιμασία του πειράματος, καθώς αποτέλεσαν τα πρίσματα που ελέγχθηκαν πρώτα.

Σε γενικές γραμμές, τα δοκίμια με μήτρα γεωπολυμερούς παρουσίασαν καλύτερη συμπεριφορά ως προς τη μορφή αστοχίας τους. Ωστόσο, η ορθή εφαρμογή του IAM και η καλύτερη προένταση του πλέγματος σε συνδυασμό με την υψηλή αντοχή του κονιάματος γεωπολυμερούς πιθανόν να προσέδιδαν υψηλότερο μέγιστο φορτίο κατά την αστοχία. Το γεγονός ότι τα πρίσματα με κονίαμα γεωπολυμερούς φέρουν μικρότερα φορτία σε σχέση με αυτά που ενισχύθηκαν με τσιμεντοειδή μήτρα οφείλεται αποκλειστικά στα ατοπήματα που συνέβησαν σε πρωτότερα βήματα της πειραματικής διαδικασίας.

4.3.2 Σύγκριση δοκιμών με διαφορετικό μήκος συνάφειας και ίδιο τύπο κονιάματος

Στην υποενότητα αυτή συγκρίνονται και σχολιάζονται τα δοκίμια GP_2B_300-1, GP_2B_300-2, GP_2B_50-1 και GP_2B_50-2, τα οποία χαρακτηρίζονται από το κοινό κονίαμα γεωπολυμερούς, ενώ διαφέρουν στο μήκος συνάφειας, το οποίο λαμβάνει τις ακραίες τιμές των 300 mm και 50 mm. Στο Σχήμα 4.3.2.1 παρουσιάζεται το διάγραμμα Φορτίου P συναρτήσει της Ολίσθησης δ για τα τέσσερα πρισματικά δοκίμια.



Σχήμα 4.3.2.1: Κοινό διάγραμμα Φορτίου P- Ολίσθησης δ για τα τέσσερα πρίσματα.

Με βάση το Σχήμα 4.3.2.1 τα ορθογωνικά πρίσματα με μήκος συνάφειας ίσο με 50 mm παρουσιάζουν μεγαλύτερα μέγιστα φορτία πριν προβούν σε αστοχία με το μέσο όρο αυτών να είναι ίσος με 7,55 kN. Η μορφή αστοχίας που παρατηρείται για τα δύο πανομοιότυπα πρίσματα είναι η θραύση των ινών, γεγονός το οποίο αντιτίθεται με τη βιβλιογραφία, βάσει της οποίας λόγω του μικρού μήκους συνάφειας αναμενόταν να πραγματοποιηθεί αστοχία μέσω του μηχανισμού της διαστρωματικής αποκόλλησης. Σχετικά με τα πρίσματα με μήκος συνάφειας ίσο με 300 mm ο μέσος όρος του μέγιστου φορτίου είναι ίσος με 5,22 kN και μορφή αστοχίας των δύο όμοιων πρισμάτων αποτελεί η θραύση των ινών, η οποία για το πρώτο πανομοιότυπο πρίσμα συμβαίνει με ταυτόχρονη μερική ολίσθηση του πλέγματος. Παρά το γεγονός ότι ο μηχανισμός αστοχίας που παρατηρείται είναι επιθυμητός, καθώς η θραύση των ινών υπονοεί και

πλήρη εξάντληση της αντοχής του ενισχυτικού υλικού, προκαλεί εντύπωση η σημαντική διαφορά που σχετίζεται με τα μέγιστα φορτία για τα δύο διαφορετικά μήκη συνάφειας. Ειδικότερα, τα ορθογωνικά πρίσματα με μήκος συνάφειας ίσο με 300 mm αναμενόταν να παρουσιάσουν υψηλότερα μέγιστα φορτία συγκριτικά με τα δοκίμια με μήκος συνάφειας ίσο με 50 mm. Το παράδοξο αυτό οφείλεται σε ορισμένους λόγους, οι οποίοι συνοψίζονται παρακάτω:

- Στα πρίσματα με μήκος συνάφειας ίσο με 50 mm πραγματοποιήθηκε εξαιρετική εφαρμογή του IAM, ακολουθώντας πλήρως τη θεωρητική διαδικασία. Το γεγονός αυτό συνέβαλε στην επιτυχημένη προένταση του πλέγματος και κατ' επέκταση στην ορθή διεξαγωγή του πειράματος.
- Αντίθετα, τα δοκίμια με μήκος συνάφειας ίσο με 300 mm απέκλιναν της ορθής εφαρμογής IAM με συνέπεια την μη ορθή εκτέλεση της πειραματικής διαδικασίας.
- Επίσης, το υψηλό σε αντοχή κονίαμα γεωπολυμερούς οδήγησε και τα τέσσερα υπό σύγκριση πρίσματα να αστοχήσουν με το μηχανισμό της θραύσης.
- Η υψηλής αντοχής μήτρα γεωπολυμερούς σε συνδυασμό με την τέλεια εφαρμογή του IAM και την επιτυχή και δίχως ατοπήματα εκτέλεση της πειραματικής διαδικασίας για τα δοκίμια με μήκος συνάφειας ίσο με 50 mm, οδήγησαν τόσο σε υψηλά μέγιστα φορτία, αλλά και σε θραύση ινών ως τρόπο αστοχίας.

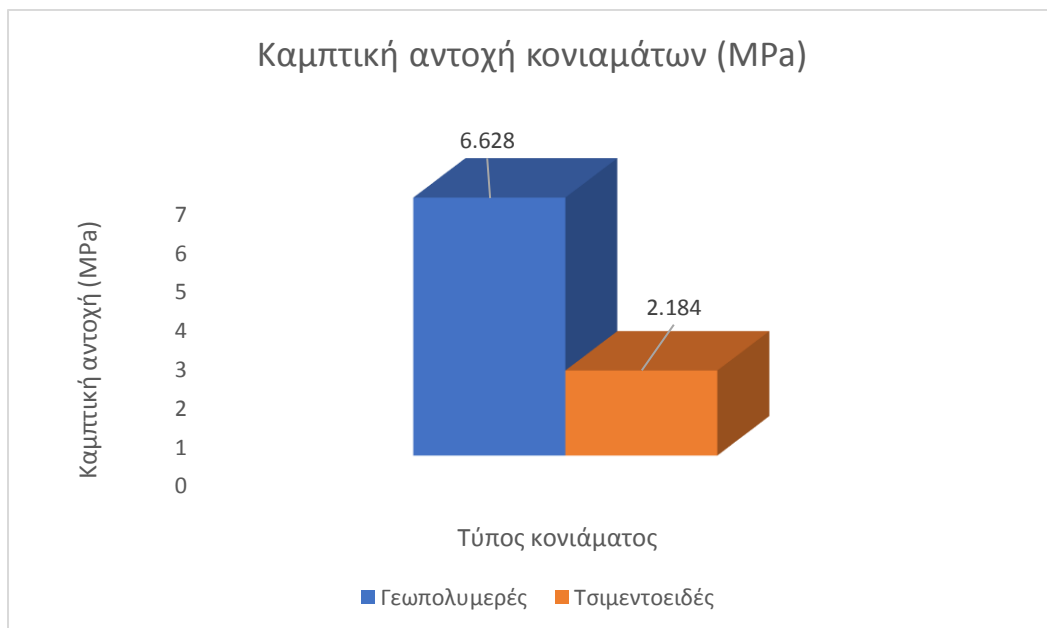
Καταλήγοντας, τα πρίσματα με μήκος συνάφειας ίσο με 50 mm παρουσίασαν καλύτερη συμπεριφορά ως προς τα μέγιστα φορτία τους, καθώς η μορφή αστοχίας για τα τέσσερα δοκίμια ήταν όμοια. Το γεγονός ότι τα δοκίμια αυτά ελέγχθηκαν τελευταία δικαιολογεί την εξοικείωση με τα βήματα της προετοιμασίας του πειράματος και την τελειοποίηση αυτών. Ατοπήματα και αστοχίες που προέκυψαν στα προηγούμενα πειράματα αμβλύθηκαν κατά την εκτέλεση των τελευταίων πειραμάτων, οδηγώντας σε λήψη εξαιρετικών αποτελεσμάτων. Ταυτόχρονα, στα πρίσματα αυτά είχε προηγηθεί ορθή εφαρμογή του IAM στη φάση της ενίσχυσης και συνδυάζοντας το κονίαμα γεωπολυμερούς υψηλών προδιαγραφών τα αποτελέσματα χαρακτηρίζονται προσοδοφόρα και επικερδή για το επιστημονικό έργο.

4.4 Σύγκριση διαφόρων μεγεθών

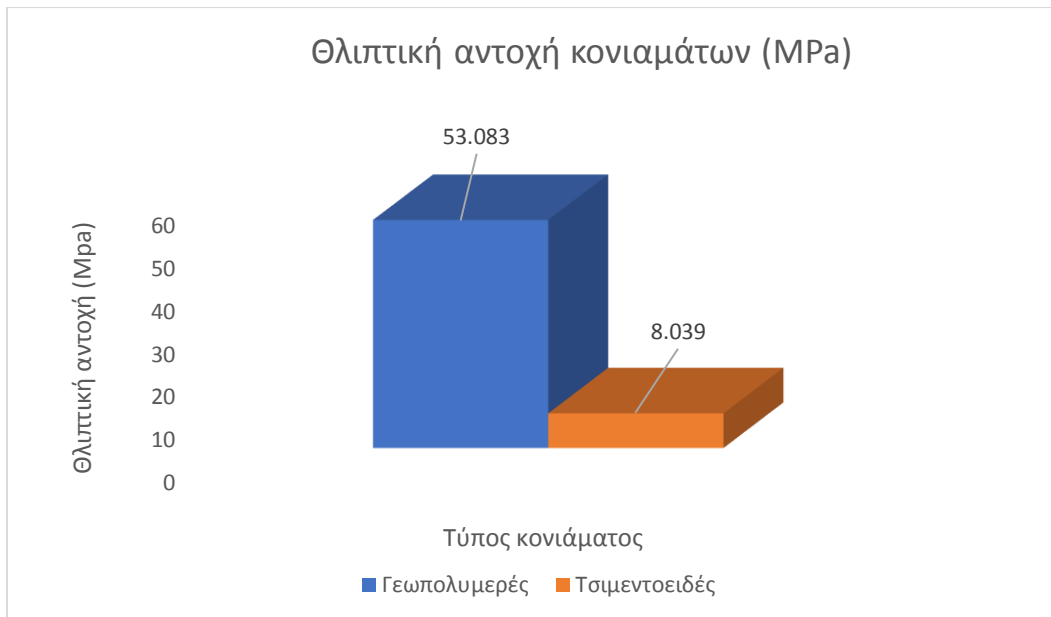
Στην ενότητα αυτή συγκρίνονται και σχολιάζονται διάφορα μεγέθη που σχετίζονται με τις παραμέτρους της πειραματικής διάταξης, όπως τα δύο είδη κονιάματος που χρησιμοποιούνται για την ενίσχυση των πρισμάτων και τα μεγέθη που προκύπτουν κατά τις μετρήσεις (μέγιστο φορτίο, ολίσθηση στη μέγιστη δύναμη, μέγιστη βύθιση, ορθές τάσεις πλέγματος). Τα μεγέθη αυτά παρουσιάζονται με τη μορφή ραβδογράμματος και σχολιάζονται στις επόμενες υποενότητες.

4.4.1 Καμπτική και θλιπτική αντοχή κονιαμάτων

Στην πειραματική μελέτη χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικά είδη κονιάματος, γεωπολυμερούς και τσιμεντοειδές. Η αντοχή τους σε κάμψη και θλίψη μετρήθηκε με χρήση ειδικών πρεσών και τα αποτελέσματα φαίνονται με τη μορφή ραβδογράμματος στο Σχήμα 4.4.1.1 και στο Σχήμα 4.4.1.2 αντίστοιχα.



Σχήμα 4.4.1.1: Καμπτική αντοχή των δύο κονιαμάτων.

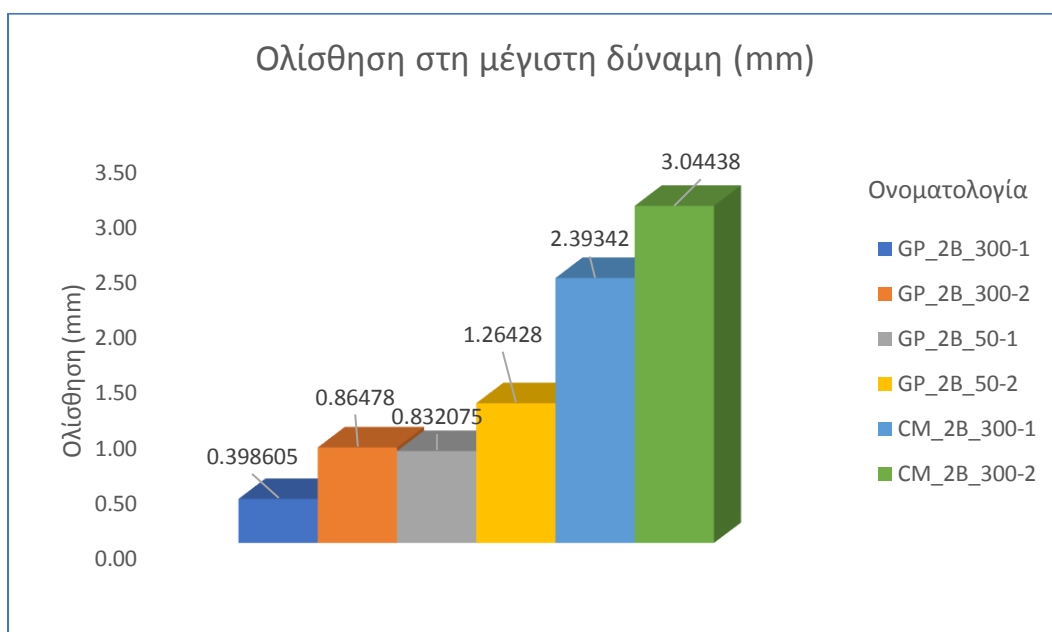


Σχήμα 4.4.1.2: Θλιπτική αντοχή των δύο κονιαμάτων.

Όπως φαίνεται από το Σχήμα 4.4.1.1 και το Σχήμα 4.4.1.2 το κονίαμα της γεωπολυμερικής σύστασης παρουσιάζει εμφανώς πολύ μεγαλύτερες αντοχές τόσο σε κάμψη, όσο και σε θλίψη. Το γεγονός αυτό εξηγεί εν μέρει το λόγο για τον οποίο τα δοκίμια που έχουν ενισχυθεί με το κονίαμα γεωπολυμερούς αστοχούν με θραύση των ινών, εξαντλώντας σε μεγάλο βαθμό την αντοχή του πλέγματος. Αυτό παρατηρείται ακόμη και στα δοκίμια με μήκος συνάφειας 50 mm, τα οποία θεωρητικά θα αστοχούσαν με τη μορφή της διαστρωματικής αποκόλλησης του IAM. Αντίθετα, τα πρίσματα που ενισχύθηκαν με κονίαμα τσιμεντοειδούς σύστασης αστοχούν με τους μηχανισμούς της αποκόλλησης, της ολίσθησης των ινών και της θραύσης, παρά το μεγάλο μήκος συνάφειάς τους. Αυτό εξηγείται λόγω της μικρής αντοχής του κονιάματος σε κάμψη και θλίψη, η οποία οφείλεται στη χρήση του εμπορικά διαθέσιμου μείγματος μετά το άνοιγμά του που ξεπερνούσε το προκαθορισμένο διάστημα που ορίζει ο κατασκευαστής.

4.4.2 Ολίσθηση στη μέγιστη δύναμη για το εκάστοτε δοκίμιο

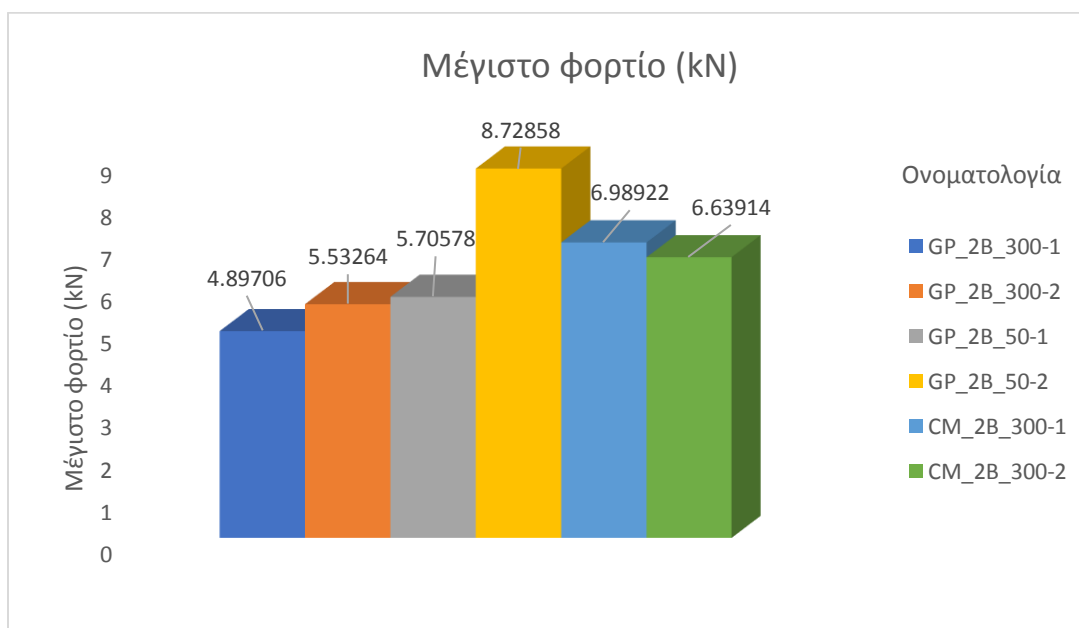
Η ολίσθηση στη μέγιστη δύναμη αποτελεί μέγεθος το οποίο μετρήθηκε μέσω των δύο LVDT's που είχαν τοποθετηθεί στην κάτω πλευρά της πειραματικής διάταξης με τρόπο που εξηγείται στην αντίστοιχη ενότητα του 3^{ου} Κεφαλαίου. Το αποτέλεσμα που προκύπτει θεωρείται ο μέσος όρος των μετρήσεων από τα δύο LVDT's με μονάδα μέτρησης τα mm και οι τιμές αυτές παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.4.2.1 με τη μορφή ραβδογράμματος για το κάθε πρισματικό δοκίμιο.



Σχήμα 4.4.2.1: Ολίσθηση στη μέγιστη δύναμη για το εκάστοτε πρίσμα.

4.4.3 Μέγιστο φορτίο

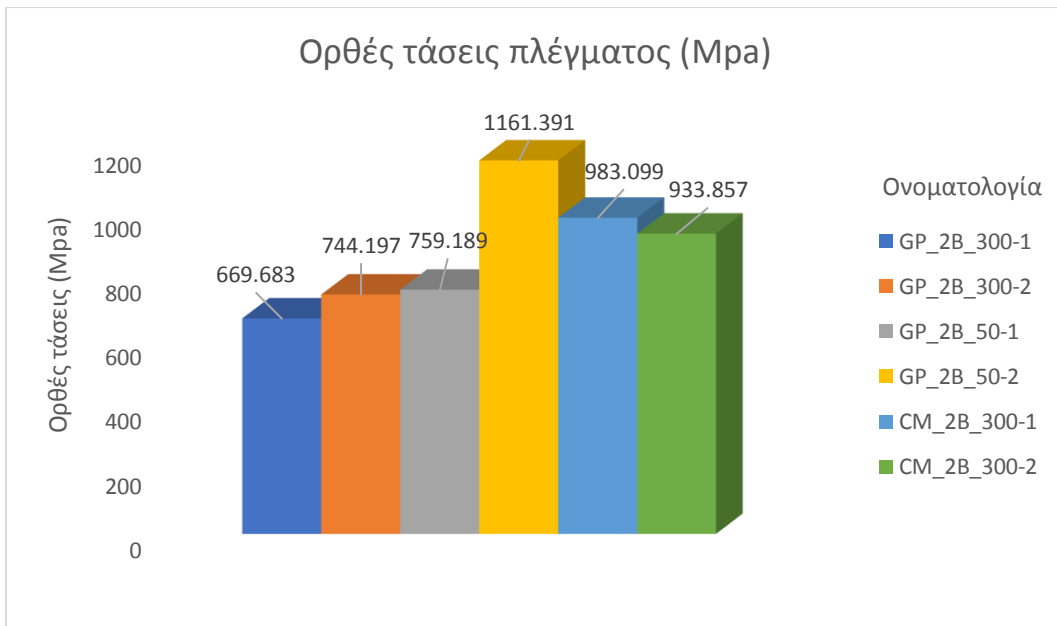
Το μέγιστο φορτίο, με μονάδα μέτρησης το kN, καταγράφηκε μέσω του υπολογιστή με τη βοήθεια των LVDT's και σηματοδοτεί την αστοχία του ορθογωνικού πρίσματος. Τα μέγιστα φορτία όπως καταγράφηκαν παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.4.3.1.



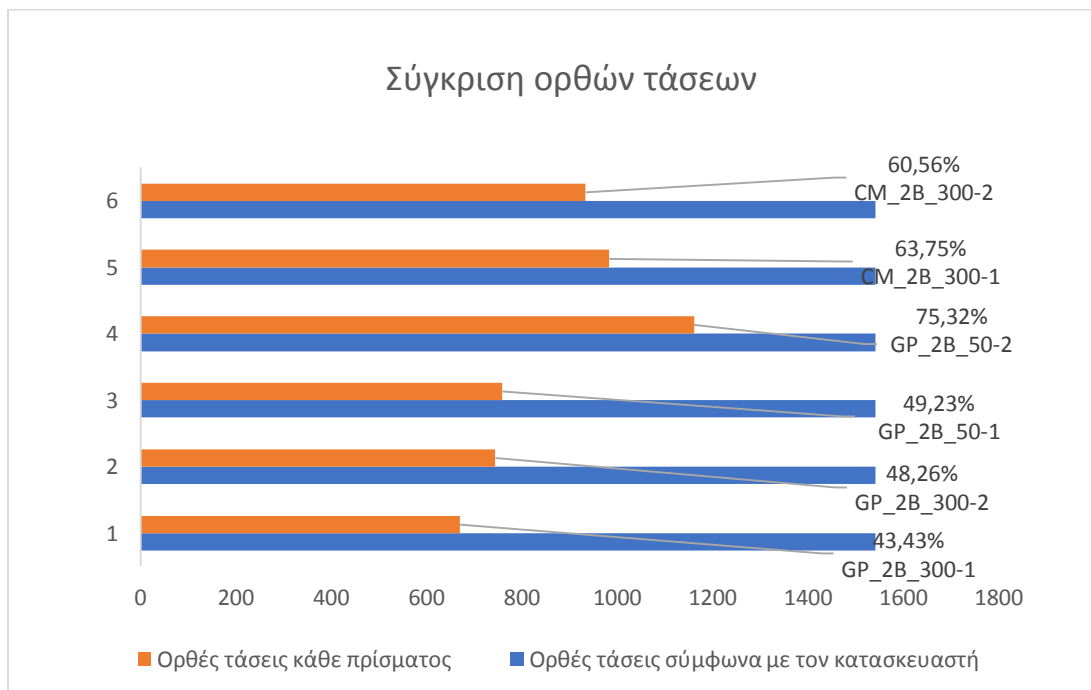
Σχήμα 4.4.3.1: Μέγιστο φορτίο για το εκάστοτε πρίσμα.

4.4.4 Ορθές τάσεις πλέγματος

Οι ορθές τάσεις του πλέγματος (MPa) υπολογίστηκαν με βάση το τυπολόγιο που καθορίζει την πειραματική διάταξη ως πηλίκο της δύναμης $F_{f,ii}$ (kN) διά το εμβαδόν του πλέγματος (mm). Περισσότερες λεπτομέρειες παρουσιάζονται στην ενότητα 3.7 του 3^{ου} Κεφαλαίου. Στο Σχήμα 4.4.4.1 φαίνονται οι τιμές των ορθών τάσεων που αναπτύχθηκαν κατά τη διεξαγωγή του πειράματος για το κάθε δοκίμιο, ενώ στο Σχήμα 4.4.4.2 παρουσιάζονται οι ορθές τάσεις που υπολογίστηκαν ως ποσοστό επί τοις εκατό των ορθών τάσεων που δίνονται από τον κατασκευαστή για το εμπορικά διαθέσιμο ινόπλεγμα βασάλτη που χρησιμοποιήθηκε στην πειραματική μελέτη.



Σχήμα 4.4.4.1: Ορθές τάσεις πλέγματος για το εκάστοτε πρίσμα.



Σχήμα 4.4.4.2: Ορθές τάσεις πλέγματος ως ποσοστό επί τοις εκατό σε σχέση με την τιμή που δίνεται για το πλέγμα από τον κατασκευαστή.

Σύμφωνα με τα παραπάνω το πρίσμα που ανέπτυξε τις υψηλότερες ορθές τάσεις είναι το GP_2B_50-2 ξεπερνώντας το 75% της τιμής που δίνεται από τον κατασκευαστή του πλέγματος και η οποία είναι ίση με 1542 MPa. Το γεγονός ότι το συγκεκριμένο δοκίμιο ανέπτυξε τόσο υψηλές τιμές ορθών τάσεων σχετίζεται με το ότι πραγματοποιήθηκε άριστη εφαρμογή του IAM κατά τη διαδικασία της ενίσχυσης και ακολούθησε πολύ καλή προένταση του πλέγματος κατά την εκτέλεση του πειράματος. Επίσης, η χρήση του κονιάματος γεωπολυμερούς συνεισέφερε σε μεγάλο βαθμό στην ανάπτυξη υψηλών ορθών τάσεων, οδηγώντας στην αστοχία με τη μορφή της θραύσης των ινών, εξαντλώντας, όπως φαίνεται και από την τιμή των τάσεων, την αντοχή των ινών.

Ακόμη, πολύ καλή συμπεριφορά σχετικά με την ανάπτυξη των ορθών τάσεων παρουσιάζουν τα πρίσματα CM_2B_300-1 και CM_2B_300-2, ξεπερνώντας το 60% των τάσεων που δίνονται από τον κατασκευαστή, τα οποία παρά το γεγονός των υψηλών τάσεων, λόγω ατοπημάτων τόσο στην εφαρμογή του ενισχυτικού υλικού, όσο και στην περαίωση του πειράματος αλλά και στο χαμηλής αντοχής τσιμεντοειδές κονίαμα, αστοχούν με το μηχανισμό της αποκόλλησης του πλέγματος συνδυαστικά με ολίσθηση των ινών.

Τα δοκίμια GP_2B_300-1, GP_2B_300-2 και GP_2B_50-1 παρουσιάζουν πολύ καλή συμπεριφορά, με τις ορθές τάσεις να κυμαίνονται από 40%-49% συγκριτικά με αυτές του κατασκευαστή. Η συμπεριφορά αυτή σίγουρα θα βελτιωνόταν αν πραγματοποιούνταν προσεκτικότερη εφαρμογή του IAM και καλύτερη προένταση του πλέγματος, αξιοποιώντας σε μεγαλύτερο βαθμό την υψηλή αντοχή του κονιάματος γεωπολυμερούς. Παρόλα αυτά, τα πρίσματα που αναφέρονται παραπάνω αστοχούν με τη μορφή της θραύσης των ινών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

Η παρούσα διπλωματική είχε ως αντικείμενο τη μελέτη της συνάφειας του σκυροδέματος με το σύνθετο υλικό Ινοπλέγματος σε Ανόργανη Μήτρα (IAM). Ως παράμετροι διερευνήθηκαν δύο διαφορετικά είδη μήτρας, γεωπολυμερούς και τσιμεντοειδούς σύστασης, και το μήκος συνάφειας, το οποίο έλαβε τις ακραίες τιμές των 50 mm και 100 mm. Με βάση τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την ανάλυση και τον σχολιασμό των αποτελεσμάτων εξάγονται τα εξής συμπεράσματα:

- Το κονίαμα γεωπολυμερούς παρουσίασε πολύ υψηλότερη καμπτική και θλιπτική αντοχή σε σχέση με το τσιμεντοειδές κονίαμα, καθιστώντας το καταλληλότερο και αποτελεσματικότερο για την ενίσχυση των πρισματικών δοκιμίων.
- Το κονίαμα γεωπολυμερικής σύστασης συνιστά μια πολύ καλή εναλλακτική έναντι του τσιμεντοκονιάματος, καθώς αποτελεί μία βιώσιμη, οικολογική λύση συνδυάζοντας την υψηλή αντοχή και τις καλές μηχανικές ιδιότητες.
- Τα δύο πανομοιότυπα δοκίμια που ενισχύθηκαν με μήτρα τσιμεντοειδούς σύστασης (CM_2B_300-1, CM_2B_300-2) αστόχησαν με διαφορετικούς μηχανισμούς, οι οποίοι ήταν για το πρώτο η θραύση των ινών με ταυτόχρονη ολίσθηση του ινοπλέγματος και μερική αποκόλληση του IAM, ενώ για το δεύτερο ήταν η διαστρωματική αποκόλληση του IAM στη διεπιφάνεια πλέγματος- κονιάματος.
- Η μη ορθή εφαρμογή του IAM κατά τη διαδικασία της ενίσχυσης των πρισμάτων σε συνδυασμό με την πραγματοποίηση αποπημάτων που συνδέονται με την ελλιπή προένταση του πλέγματος, καθώς και η χρήση του χαμηλής αντοχής τσιμεντοκονιάματος, συντέλεσαν στην αστοχία των δοκιμίων υπό μη αναμενόμενες μορφές που δε συνάδουν με τη βιβλιογραφία.
- Τα δοκίμια που ενισχύθηκαν με κονίαμα γεωπολυμερούς παρουσίασαν καλύτερη συμπεριφορά συγκριτικά με αυτά που ενισχύθηκαν με τσιμεντοειδές

κονίαμα, καθώς αστόχησαν με το μηχανισμό της θραύσης των ινών, εξαντλώντας την αντοχή των ινών.

- Τα πρίσματα με μήκος συνάφειας ίσο με 50 mm (GP_2B_50-1, GP_2B_50-2) εμφάνισαν καλύτερη συμπεριφορά, καθώς κατέγραψαν αρκετά υψηλά μέγιστα φορτία πριν αστοχήσουν και συνακόλουθα υψηλές ορθές τάσεις με το δεύτερο πανομοιότυπο δοκίμιο να ξεπερνά το 75% των τάσεων που δίνονται από τον κατασκευαστή.
- Τα δοκίμια GP_2B_50-1 και GP_2B_50-2 παρουσίασαν την καλύτερη συμπεριφορά σε σχέση με τα υπόλοιπα, καθώς πραγματοποιήθηκε άριστη εφαρμογή του IAM κατά την ενίσχυση, χρησιμοποιήθηκε το κονίαμα γεωπολυμερούς υψηλής αντοχής, πραγματοποιήθηκε πολύ καλή εφαρμογή και αγκύρωση του πλέγματος στο σταθερό δοκίμιο και γενικότερα η προετοιμασία του πειράματος περαιώθηκε χωρίς αστοχίες.
- Τα ορθογωνικά πρίσματα GP_2B_300-1 και GP_2B_300-2 ήταν εφικτό να παρουσιάσουν υψηλότερα μέγιστα φορτία, λόγω του κονιάματος γεωπολυμερούς και του μήκους συνάφειας που ήταν ίσο με 300 mm. Το γεγονός αυτό δε συνέβη, εξαιτίας των αστοχιών που έγιναν κατά την εφαρμογή του IAM, έχοντας ως επακόλουθο τη μη ορθή προένταση του πλέγματος κατά τη διεξαγωγή της πειραματικής διαδικασίας

Με βάση τα παραπάνω ακολουθούν ορισμένες προτάσεις για περαιτέρω έρευνα:

- Ενίσχυση των πρισμάτων με περισσότερες στρώσεις ινοπλέγματος και χρήση του κονιάματος γεωπολυμερούς που παράχθηκε στο εργαστήριο.
- Χρήση διαφορετικών ειδών πλέγματος υψηλότερης αντοχής, όπως για παράδειγμα του πλέγματος με ίνες άνθρακα.
- Εξέταση της διαφορετικής προετοιμασίας των δοκιμίων σκυροδέματος, όπου εκτός από εκτράχυνση της επιφάνειας να μελετάται και η αμμοβολή και η χάραξη πλέγματος αυλακώσεων.
- Διερεύνηση διαφορετικών μηκών συνάφειας.
- Ενίσχυση των δοκιμίων με μήτρες διαφορετικής σύστασης με άξονα την εύρεση οικολογικών εναλλακτικών φιλικών προς το περιβάλλον.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Οικονομάκη Χ. (2016). Ενισχύσεις Κατασκευών με Σύνθετα Υλικά (Πρόγραμμα FRPs), Πτυχιακή Εργασία, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Τ.Ε., Πάτρα 2016.
- [2] Mrazova, M. (2013). Advanced composite materials of the future in aerospace industry. *Incas bulletin*, 5(3), 139.
- [3] Κούτας Λ. (2019), «Αποτίμηση και Ενίσχυση Κατασκευών Ο.Σ.», Πανεπιστημιακές Σημειώσεις, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.
- [4] Raoof, S. M., Koutas, L. N., & Bournas, D. A. (2017). Textile-reinforced mortar (TRM) versus fibre-reinforced polymers (FRP) in flexural strengthening of RC beams. *Construction and Building Materials*, 151, 279-291.
- [5] <https://schnellcontractors.com/concrete-repair/carbon-fiber-strengthening/#jp-carousel-343>
- [6] Koutas, L. N., Tetta, Z., Bournas, D. A., & Triantafillou, T. C. (2019). Strengthening of concrete structures with textile reinforced mortars: state-of-the-art review. *Journal of Composites for Construction*, 23(1), 03118001.
- [7] Signorini, C., & Nobili, A. (2021). Comparing durability of steel reinforced grout (SRG) and textile reinforced mortar (TRM) for structural retrofitting. *Materials and Structures*, 54(3), 1-15.
- [8] Σκαρμούτσος, Χ. (2019). *Χαρακτηρισμός μηχανικών ιδιοτήτων διαφορετικών συστημάτων ινοπλεγμάτων ανόργανης μήτρας (IAM)* (Doctoral dissertation).
- [9] Δερουκάκη, Μ. Β. (2020). *Ινοπλέγματα σε ανόργανη μήτρα: μηχανική συμπεριφορά σε εφελκυσμό και σε συνάφεια με το σκυρόδεμα* (Bachelor's thesis).
- [10] Abu Obaida, F., El-Maaddawy, T., & El-Hassan, H. (2021). Bond Behavior of Carbon Fabric-Reinforced Matrix Composites: Geopolymeric Matrix versus Cementitious Mortar. *Buildings*, 11(5), 207.

- [11] Raouf, S. M., Koutas, L. N., & Bournas, D. A. (2016). Bond between textile-reinforced mortar (TRM) and concrete substrates: Experimental investigation. *Composites Part B: Engineering*, *98*, 350-361.
- [12] Cerniauskas, G., Tetta, Z., Bournas, D. A., & Bisby, L. A. (2020). Concrete confinement with TRM versus FRP jackets at elevated temperatures. *Materials and Structures*, *53*, 1-14.
- [13] Μπουρνάς, Δ. (2008). *Ενίσχυση υποστυλωμάτων οπλισμένου σκυροδέματος με νέα υλικά: ινοπλέγματα ανόργανης μήτρας, οπλισμοί σύνθετων υλικών* (Doctoral dissertation).
- [14] Tzoura, E., & Triantafyllou, T. C. (2016). Shear strengthening of reinforced concrete T-beams under cyclic loading with TRM or FRP jackets. *Materials and Structures*, *49*(1), 17-28.
- [15] Bournas, D. (2018). Innovative materials for seismic and energy retrofitting of the existing EU buildings. *Publications Office of the European Union: Luxembourg*.
- [16] Nawaz, M., Heitor, A., & Sivakumar, M. (2020). Geopolymers in construction-recent developments. *Construction and Building Materials*, *260*, 120472.
- [17] Lazorenko, G., Kasprzhitskii, A., & Mischinenko, V. (2021). Rubberized geopolymer composites: Effect of filler surface treatment. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, *9*(4), 105601.
- [18] Samnur, S., Husain, H., Zulfi, A., & Sujiono, E. H. (2016). Study on physical-chemical properties of furnace-nickel-slag powder for geopolymer application. *Jurnal Pendidikan Fisika Indonesia*, *12*(2), 177-182.
- [19] Aziz, A., Stocker, O., El Hassani, I. E. E. A., Laborier, A. P., Jacotot, E., El Khadiri, A., & El Bouari, A. (2021). Effect of blast-furnace slag on physicochemical properties of pozzolan-based geopolymers. *Materials Chemistry and Physics*, *258*, 123880.
- [20] Kalaiyarrasi, A. R. R., Partheeban, P., & Muthupandi, V. (2018). Metakaolin Geopolymer Composite Concrete with High Durability. *International Journal of Applied Engineering Research*, *13*(14), 11466-11470.

- [21] Falope, F. O., Lanzoni, L., & Tarantino, A. M. (2018). Modified hinged beam test on steel fabric reinforced cementitious matrix (SFRCM). *Composites Part B: Engineering*, *146*, 232-243.
- [22] 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*, *262*, 120029.
- [23] Shadravan, B., & Tehrani, F. M. (2017). A review of direct shear testing configurations for bond between fiber-reinforced polymer sheets on concrete and masonry substrates. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, *61*(4), 740-751.
- [24] Carvalho, E. P., Ferreira, E. G., Cunha, J. C. D., Rodrigues, C. D. S., & Maia, N. D. S. (2017). Experimental investigation of steel-concrete bond for thin reinforcing bars. *Latin American Journal of Solids and Structures*, *14*, 1932-1951.
- [25] 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*, *64*, 37-48.
- [26] Raoof, S. M., & Bournas, D. A. (2017). Bond between TRM versus FRP composites and concrete at high temperatures. *Composites Part B: Engineering*, *127*, 150-165.
- [27] Davidovits, J. (2017). Geopolymers: Ceramic-like inorganic polymers. *J. Ceram. Sci. Technol*, *8*(3), 335-350.