



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΤΟΜΕΑΣ ΙΙΙ:  
«ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ»

**ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ ΠΟΛΥΜΕΡΙΚΗΣ  
ΜΗΤΡΑΣ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΑ ΜΕ ΙΝΕΣ,  
ΚΑΤΑΛΛΗΛΑ ΓΙΑ ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΦΕΡΟΝΤΟΣ  
ΟΡΓΑΝΙΣΜΟΥ ΑΠΟ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟ  
ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ (ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ,  
ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ, ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ)**

*ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ*

***ΓΕΩΡΓΙΟΥ ΣΟΥΠΙΩΝΗ***

Διπλωματούχου Μηχανολόγου Μηχανικού Ε.Μ.Π.

MSc Επιστήμη και Τεχνολογία των Υλικών

**ΕΠΙΒΛΕΨΗ:**

**Λ. ΖΟΥΜΠΟΥΛΑΚΗΣ**

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

**ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΝΙΟΣ 2024**



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

**ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΤΟΜΕΑΣ ΙΙΙ :  
«ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ»**

**ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ ΠΟΛΥΜΕΡΙΚΗΣ  
ΜΗΤΡΑΣ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΑ ΜΕ ΙΝΕΣ,  
ΚΑΤΑΛΛΗΛΑ ΓΙΑ ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΦΕΡΟΝΤΟΣ  
ΟΡΓΑΝΙΣΜΟΥ ΑΠΟ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟ  
ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ (ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ,  
ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ, ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ)**

*ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ*

***ΓΕΩΡΓΙΟΥ ΣΟΥΠΙΩΝΗ***

Διπλωματούχου Μηχανολόγου Μηχανικού Ε.Μ.Π.

MSc Επιστήμη και Τεχνολογία των Υλικών

**ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:**

Λ. ΖΟΥΜΠΟΥΛΑΚΗΣ, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Κ. ΧΑΡΙΤΙΔΗΣ Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Δ. ΜΑΝΩΛΑΚΟΣ, Ομότιμος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

**ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΝΙΟΣ 2024**

*Η έγκριση της διδακτορικής διατριβής από την Ανωτάτη Σχολή Χημικών Μηχανικών του Ε.Μ.Πολυτεχνείου δεν υποδηλώνει αποδοχή των γνώμων του συγγραφέα. (Ν. 5343/1932, Άρθρο 202).*

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η εκπόνηση της παρούσας διδακτορικής διατριβής έλαβε χώρα στην εργαστηριακή μονάδα «Προηγμένων και Συνθέτων Υλικών» του τομέα III «Επιστήμης και Τεχνικής των Υλικών της Σχολής Χημικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου κατά το χρονικό διάστημα 2018-2023.

Η ανωτέρω διατριβή αποτελεί κομμάτι του ερευνητικού κλάδου των συνθέτων δομικών υλικών και πραγματοποιήθηκε υπό την καθοδήγηση του Καθηγητή της Σχολής Χημικών Μηχανικών κ. Λουκά Ζουμπουλάκη. Η εκπόνησή της ως άνω ερευνητικής εργασίας οδήγησε στην λήψη χρήσιμων αποτελεσμάτων και σημαντικών συμπερασμάτων που εν συνεχεία κοινοποιήθηκαν στο πλαίσιο επιστημονικών συνεδρίων και περιοδικών στην ευρύτερη επιστημονική και ακαδημαϊκή κοινότητα διαμέσου των απαραίτητων ανακοινώσεων, παρουσιάσεων και επιστημονικών δημοσιεύσεων αντίστοιχα.

Σε συνέχεια της ολοκλήρωσης της θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή της Σχολής Χημικών Μηχανικών ΕΜΠ και επιβλέποντα της διατριβής μου, κ. Λουκά Ζουμπουλάκη, για την επιλογή και ανάθεση του θέματος και την πολύτιμη βοήθεια, τις συμβουλές και την υποστήριξη που μου παρείχε κατά την διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας εργασίας.

Ευχαριστίες εκφράζονται επίσης προς τον κ. Κωνσταντίνο Χαριτίδη καθηγητή της Σχολής Χημικών Μηχανικών και τον καθηγητή της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών κ. Δημήτριο Μανωλάκο, οι οποίοι διετέλεσαν μέλη της τριμελούς συμβουλευτικής επιτροπής της διατριβής μου, για την υποστήριξη και στις συμβουλές που μου παρείχαν ως μέλη της ανωτέρω επιτροπής καθόλη τη διάρκεια της εκπόνησης της ερευνητικής μου εργασίας.

Την Δρ. Παντελίτσα Γεωργίου, Εργαστηριακό Διδακτικό προσωπικό του Τομέα Επιστήμης και Τεχνικής των Υλικών-Τομέας III της Σχολής Χημικών Μηχανικών, για τις συμβουλές, την άφογη συνεργασία μας καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της

διδασκαλικής αυτής εργασίας και για την βοήθειά της σε ότι αφορά στην επιμέλεια των κειμένων των δημοσιεύσεων.

Θα ήθελα ακόμα να ευχαριστήσω όλους τους εργαζόμενους, τους φοιτητές, μεταπτυχιακούς φοιτητές, τους διδάκτορες και όλους όσους μοιράστηκα κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της διδακτορικής μου διατριβής τους χώρους των εργαστηρίων, για τη στήριξη που μου παρείχαν κατά τα έτη υλοποίησης της διδακτορικής μου διατριβής.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τη σύζυγο μου Έλενα για την αμέριστη συμπαράσταση και υπομονή της, κατά την διάρκεια της εκπόνησης της διδακτορικής μου διατριβής, η οποία χωρίς την δική της κατανόηση, παρότρυνση αλλά και την έμπρακτη και ουσιαστική αναπλήρωση της οικογενειακής μου απουσίας εκ μέρους της, θα ήταν ανέφικτο να ολοκληρωθεί.

Αθήνα, Ιούνιος 2024

Σουπιώνης Γεώργιος

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα σύνθετα υλικά πολυμερικής μήτρας είναι στις μέρες μας ευρέως διαδεδομένα και χρησιμοποιούνται σε πολλών ειδών εφαρμογές λόγω του συνδυασμού των εξαιρετικών ιδιοτήτων που μπορούν να προσδώσουν. Από τα πλέον διαδεδομένα σε χρήση σύνθετα υλικά είναι τα θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή με ίνες διαφόρων ειδών (λ.χ. ίνες υάλου ή ίνες άνθρακα) στο ρόλο του μέσου ενισχύσεως. Υπάρχει πλήθος εφαρμογών (ναυπηγική, αεροναυπηγική, αυτοκινητοβιομηχανία, κατασκευαστικός τομέας, ιατρική, ηλεκτρονικοί υπολογιστές, κλπ.) στις οποίες τα παραπάνω σύνθετα υλικά πλεονεκτούν έναντι των συμβατικών υλικών κυρίως λόγω των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών γνωρισμάτων τους (λ.χ. χαμηλό ιξώδες, πυκνότητα). Στην περίπτωση πρακτικών εφαρμογών υψηλότερων απαιτήσεων από την άποψη των μηχανικών αντοχών χρησιμοποιούνται διαφόρων ειδών ίνες, με τις ίνες άνθρακα και τις αραμιδικές, να αποτελούν δύο εκ των πλέον διαδεδομένων τύπων ίνας. Σε ότι αφορά στις πολυμερικές ρητίνες, εκείνες που απαντώνται σε ποικίλες εφαρμογές στις κατασκευές είναι οι εποξειδικές ρητίνες. Η χρήση τους είναι ιδιαιτέρως εκτεταμένη στην περίπτωση των κατασκευών από σκυρόδεμα που έχουν υποστεί φθορές (σεισμοί, καιρικά φαινόμενα, γήρανση κ.α.) και η ανάγκη επισκευής τους είναι ζωτικής σημασίας, ειδικότερα σε ότι αφορά στις μη ενισχυμένες δομές, όπως οι τοιχοποιίες επί παραδείγματι, οι οποίες υφίστανται ευκολότερα και αμεσότερα καταπονήσεις.

Τα τελευταία χρόνια τα υλικά μήτρας τσιμεντοκονιάματος ενισχυμένα με σύνθετα υλικά έχουν αρχίσει να κάνουν την εμφάνισή τους και φαίνεται να αποτελούν μια πολλά υποσχόμενη εναλλακτική λύση με τεράστιες προοπτικές στις κατασκευές. Ειδικότερα τα σύνθετα υλικά εποξειδικής ρητίνης με ίνες άνθρακα αποτελούν συχνή επιλογή σε εφαρμογές στον κατασκευαστικό τομέα, κυρίως λόγω των εξαιρετικών αντοχών που παρουσιάζουν στις διαμητικές και θλιπτικές καταπονήσεις αλλά και εξαιτίας της απλότητας της εφαρμογής η οποία χαρακτηρίζει τα εν λόγω υλικά και ως αποτέλεσμα προκρίνει τη χρήση τους σε περίπλοκες δομές.

Σκοπός αυτής της ερευνητικής διατριβής είναι να διερευνήσει και να αποτυπώσει τις δυνατότητες ανάπτυξης εναλλακτικών υλικών από σκυρόδεμα που θα είναι ενισχυμένα κατόπιν εφαρμογής συνθέτων υλικών στην εξωτερική τους επιφάνεια. Οι ανωτέρω διαπιστώσεις θα προκύψουν και θα τεκμηριωθούν σε συνέχεια πραγματοποίησης σειράς πειραματικών δοκιμών επί των μηχανικών ιδιοτήτων των υπό μελέτη υλικών.

Η καινοτομία της παρούσας διατριβής είναι σημαντική. Στο πλαίσιο της διερευνώνται για πρώτη φορά οι δυνατότητες χρήσης υφασμάτων διαφορετικού τύπου και πλέξης, στην ανάπτυξη συνθέτων υλικών ενίσχυσης. Επίσης εξετάζεται η επίδραση που επέρχεται από τη χρήση διαφορετικών τύπων ινών στη μηχανική συμπεριφορά συνθέτων ενισχυτικών υλικών. Πέραν των όσων αναλύθηκαν προηγούμενα η συγκεκριμένη ερευνητική εργασία εισάγει μια εναλλακτική εκδοχή της πλέον διαδεδομένης σε χρήση μεθόδου ενίσχυσης στον κατασκευαστικό τομέα, η οποία είναι άμεσα και εύκολα εφαρμόσιμη και δεν απαιτεί παρά μόνο εξωτερικές επεμβάσεις.

Η χρήση των υπό μελέτη υλικών δύναται να αποφέρει σημαντική εξοικονόμηση χρηματικών πόρων και εργασιακού χρόνου. Επιπλέον των παραπάνω τα υπό εξέταση υλικά παρέχουν μια διαφορετική από μεθοδολογικής απόψεως λύση σε περιπτώσεις όπου απαιτούνται άμεσες και αποτελεσματικές ενέργειες (ενίσχυση μετά από φυσικές καταστροφές) ώστε να καταστεί εφικτή η άμεση επαναχρησιμοποίηση των προβληματικών υποδομών.

Οι ενισχυμένες μηχανικές ιδιότητες από τις οποίες χαρακτηρίζονται τα υλικά αυτά συμβάλλουν σημαντικά αφενός στην ενίσχυση της αντοχής και στην παράταση της ζωής των επιμέρους δομικών στοιχείων και αφετέρου στην παράταση του κύκλου της χρηστικής ζωής των κατασκευών (υποδομής ή κτιριακών) στις οποίες χρησιμοποιούνται.

Για τις ανάγκες της παρούσας διατριβής κατασκευάστηκαν δοκίμια καθαρού τσιμεντοκονιάματος και δοκίμια τσιμεντοκονιάματος ενισχυμένα με ψιλοκομμένες ίνες άνθρακα, σύμφωνα με τις απαιτήσεις του προτύπου EN 196-1:1995, τα οποία εν συνεχεία επενδύθηκαν-με σκοπό την περαιτέρω ενίσχυσή τους-από υφάσματα ινών άνθρακα, υάλου, Kevlar σε μήτρα από εποξειδική ρητίνη. Κατασκευάστηκαν επίσης σύνθετα υλικά μήτρας εποξειδικής ρητίνης στα οποία ως ενισχυτικό μέσο χρησιμοποιήθηκαν υφάσματα ινών άνθρακα, υάλου και Kevlar. Τα εν λόγω σύνθετα υλικά υποβλήθηκαν σε πειραματικές δοκιμές εξέτασης των μηχανικών τους ιδιοτήτων και με σκοπό τον προσδιορισμό της αντοχής αυτών σε κάμψη, διάτμηση και θλίψη.

Επί των ανωτέρω συνθέτων υλικών τσιμεντοκονιάματος με ενίσχυση από υφάσματα ινών άνθρακα και μήτρα εποξειδικής ρητίνης, πραγματοποιήθηκαν επιπρόσθετες πειραματικές μετρήσεις για τον προσδιορισμό των μηχανικών τους χαρακτηριστικών. Πιο συγκεκριμένα μελετήθηκε η επίδραση της γήρανσης στην μηχανική συμπεριφορά των υπό εξέταση υλικών και ειδικότερα, η αντοχή τους στις θλιπτικές καταπονήσεις.

Τα υπό εξέταση υλικά επέδειξαν αντοχές σε κάμψη ( $\sigma_b$ ) οι οποίες κυμαίνονται μεταξύ 136.2 και 405.1MPa. Σε ότι αφορά την αντοχή σε διάτμηση ( $\tau_b$ ) παρουσίασαν τιμές μεταξύ 21.2 και 33.54MPa.

Αντιστοίχως η θλιπτική αντοχή των ανωτέρω συνθέτων υλικών επέδειξε τιμές μεταξύ 47.3-81.0MPa, οι οποίες περιορίστηκαν περαιτέρω όταν αυτά υπεβλήθησαν σε τεχνητή γήρανση, παραμένοντας παρόλα αυτά σε ικανοποιητικά επίπεδα.

Μέσω της Ηλεκτρονικής Μικροσκοπίας Σάρωσης (SEM) πραγματοποιήθηκε ο απαιτούμενος μορφολογικός χαρακτηρισμός ώστε να εξαχθούν συμπεράσματα ως προς το βαθμό συνοχής στην διεπιφάνεια μεταξύ του συνθέτου ενισχυτικού υλικού και του προς ενίσχυση δομικού στοιχείου. Στο πλαίσιο του ανωτέρω χαρακτηρισμού, μελετήθηκε η δομή των τελικών συνθέτων με σκοπό τον εντοπισμό τυχόν ελαττωματικών θέσεων (κενά, σημεία περιορισμένης συνοχής μεταξύ ινών και



ρητίνης κλπ). Τα αποτελέσματα των μελετών που διεξήχθησαν υποδεικνύουν ότι η ενίσχυση υλικών τσιμεντοκονιάματος με την χρήση υφασμάτων ινών άνθρακα, υάλου και Kevlar μέσα σε μήτρες εποξειδικής ρητίνης έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή υλικών με αρκετά καλές μηχανικές ιδιότητες. Η εισαγωγή στα δομικά στοιχεία τσιμέντου ψιλοκομμένων ινών άνθρακα πριν την ενίσχυση τους με υφάσματα ινών έχει ως αποτέλεσμα υλικά περαιτέρω ενισχυμένων αντοχών. Σε ότι αφορά στα ενισχυμένα με υφάσματα ινών άνθρακα υλικά, η κατεργασία που εφαρμόστηκε με σκοπό την τεχνητή γήρανση τους, οδήγησε στην υποβάθμιση των αντοχών των ανωτέρω υλικών η οποία ανήλθε στο 40% σε σχέση με τα μη γηρασμένα υλικά

Το χαμηλό κόστος, η εύκολη και χωρίς επεμβατικές απαιτήσεις εφαρμογή και η κατεργασιμότητά που συνδέονται με τη χρήση τους σε συνδυασμό με την τεράστια εξοικονόμηση χρόνου που επιτυγχάνεται με την τοποθέτησή τους σε σύγκριση με τα κλασικά υλικά, τα καθιστούν κατάλληλα, ακόμα και σε δομικές εφαρμογές υψηλών απαιτήσεων από πλευράς αντοχής.

## ABSTRACT

Polymeric matrix composites are nowadays widespread and used in many kinds of applications due to the combination of excellent properties they can provide. Among the most widely used composite materials are thermosetting polymers with fibers of various kinds (e.g. glass fibers or carbon fibers) in the role of reinforcement. Many applications are recorded (shipbuilding, aeronautical, automotive, construction, medicine, electronic computers, etc.), in which the above composite materials are advantageous over conventional materials mainly due to their special characteristics (e.g. low viscosity, density).

In the case of practical applications with higher requirements in terms of mechanical strength, different types of fibers are used, with carbon and aramid fibers being two of the most common fiber types. As far as polymeric resins are concerned, those that are usually found in various construction applications are epoxy resins. In recent years cement matrix materials reinforced with composites have started to make their appearance and appear to be a promising alternative with huge prospects. In particular, the composite materials of epoxy resin with carbon fibers are widely used in the construction sector, mainly due to their excellent resistance to shear and compressive stresses but also due to the ease of application which characterizes the materials in question and as a result favors their use in complex structures. The purpose of this research thesis is to investigate and capture the possibilities of developing alternative concrete materials that will be strengthened by applying composite materials to their outer surface. The above findings will arise following the realization of a series of experimental tests on the mechanical properties of the materials under study.

The innovation of the present thesis is significant. In its context, the possibilities of using carbon fabrics of different weaves, as well as other types of carbon fibers in the development of composite reinforcement materials are investigated for the first time.

The effect caused by the use of different types of carbon fibers on the mechanical behavior of composite reinforcing materials is also examined. In addition to what was analyzed previously, this specific research introduces an alternative version of the most widespread reinforcement method used in the construction sector, which is immediately and easily applicable and requires only external interventions.

The use of the materials under study can bring significant savings in financial resources and working time. In addition to the above, the materials under consideration provide a different methodological solution in cases where immediate and effective actions are required (reinforcement after natural disasters) in order to enable the immediate reuse of problematic infrastructures.

The enhanced mechanical properties that characterize these materials contribute significantly on the one hand, to strengthening the strength and extending the life of the individual structural elements, and on the other hand, to extending the useful life of the structures in which they are used.

For the needs of this research work, specimens of pure cement mortar and cement mortar reinforced with chopped carbon fibers were manufactured according to the requirements of EN 196-1:1995 which were then coated-in order to further strengthen them-by carbon fiber, glass, Kevlar fabrics and matrix made of epoxy resin. Epoxy resin matrix composites were also manufactured, in which carbon, glass and Kevlar fiber fabrics were used as a reinforcing agent. These composites have undergone experimental tests to examine their mechanical properties and to determine their bending strength, shear and compression.

Additional experimental measurements were carried out composite cement mortar materials with carbon fiber fabric reinforcement and epoxy resin matrix to determine their mechanical characteristics. More specifically, the effect of aging on the mechanical behavior of the materials under examination and in particular, their

resistance to compressive stresses was studied. The materials under consideration demonstrated bending strengths ( $\sigma_b$ ) ranging between 136.2 and 405.1MPa. Respectively, in terms of shear strength ( $\tau_b$ ), they showed values between 21.2 and 33.54MPa.

Accordingly, the compressive strength of the previously discussed composites with showed values between 47.3-81.0MPa, which were further reduced when they underwent artificial ageing, while remaining at satisfactory levels.

By means of Scanning Electron Microscopy (SEM) the required morphological characterization was carried out in order to draw conclusions regarding the degree of cohesion at the interface between the composite reinforcing material and the structural element to be reinforced. In the context of the above characterization, the structure of the final composites was studied in order to identify any defective positions (gaps, points of limited cohesion between fibers and resin, etc.).

The results of the studies conducted indicate that the reinforcement of cementitious materials using carbon fiber, glass and Kevlar fabrics within epoxy resin matrices results in the production of materials with fairly good mechanical properties. The use of chopped carbon fibers, into the cement structural elements, before reinforcing them with fiber fabrics results in materials with further enhanced mechanical strengths. As far as carbon fiber fabrics are concerned, the treatment applied for their artificial aging led to the degradation of the strength of the above materials, which amounted to 40% compared to non-artificially aged materials.

The low cost, the easy and non-invasive application and the workability that their use requires in combination with the limitation of their installation time compared to classic materials, make them suitable, even in structural applications with high requirements in terms of strength.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	4
ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....	6
ABSTRACT .....	10
A. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ .....	17
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1ο .....	17
1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	17
Βιβλιογραφία 1 <sup>ου</sup> Κεφαλαίου.....	19
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2ο- ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ ΠΟΛΥΜΕΡΙΚΗΣ ΜΗΤΡΑΣ.....	20
2.1 Χαρακτηριστικά - Ιδιότητες συνθέτων υλικών.....	20
2.2 Κατηγορίες συνθέτων υλικών .....	21
2.3 Θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή σύνθετα .....	23
2.4 Εποξειδικές Ρητίνες.....	23
2.5 Σύνθετα υλικά με ενίσχυση ινών .....	24
2.6 Εφαρμογές σύνθετων ενισχυμένων υλικών .....	25
Βιβλιογραφία 2 <sup>ου</sup> Κεφαλαίου.....	27
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3ο- ΙΝΕΣ ΑΝΘΡΑΚΑ.....	29
3.1 Ιστορική αναδρομή .....	29
3.2 Δομή Ινών Άνθρακα.....	31
3.3 Παραγωγή Ινών Άνθρακα.....	35
3.3.1 1 <sup>ο</sup> Στάδιο-Οξειδωση/Σταθεροποίηση .....	37
3.3.2 2 <sup>ο</sup> Στάδιο- Ανθρακοποίηση .....	41
3.3.3 3 <sup>ο</sup> Στάδιο- Γραφίτιοποίηση.....	43
3.4 Κατηγορίες ινών άνθρακα.....	44
3.4.1 Κατάταξη βάσει της τελικής θερμοκρασίας θερμικής επεξεργασίας.....	44
3.4.2 Κατάταξη βάσει των ιδιοτήτων των ινών (άνθρακα).....	45
3.4.3 Κατάταξη βάσει των πρόδρομων υλικών κατασκευής τους.....	46
3.4.4 Κατάταξη βάσει της παραγωγικής τους διαδικασίας .....	47
3.4.5 Κατάταξη βάσει της γενικής κατάταξης και του χαρακτηρισμού των ινών.....	48
3.4.6 Κατάταξη βάσει των μηχανικών ιδιοτήτων.....	49
3.5 Ιδιότητες ινών άνθρακα .....	50
3.6 Μορφές ινών άνθρακα.....	51
3.6.1 Ίνες άνθρακα μονής διεύθυνσης.....	51
3.6.2 Ίνες άνθρακα υπό τύπο υφάσματος .....	52
3.7 Άλλα είδη ινών .....	55

Βιβλιογραφία 3 <sup>ου</sup> Κεφαλαίου.....	61
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4ο-Σύνθετα ινοπλισμένα υλικά (FRP) και ενίσχυση των κατασκευών.....	64
4.1 Εισαγωγή .....	64
4.2 Χαρακτηριστικά συνθέτων FRP .....	64
4.2.1 Φθορά προκαλούμενη εξαιτίας θερμοκρασιακής διαφοράς.....	66
4.2.2 Φθορά προκαλούμενη εξαιτίας της υγρασίας.....	67
4.2.3 Φθορά προκαλούμενη από την επίδραση όξινων/αλκαλικών παραγόντων .....	67
4.2.4 Φθορά προκαλούμενη εξαιτίας της υπερϊώδους ακτινοβολίας .....	68
4.2.5 Φθορά προκαλούμενη εξαιτίας φαινομένων γαλβανικής διάβρωσης .....	68
4.2.6 Φθορά προκαλούμενη εξαιτίας φαινομένων Ψύξης-Απόψυξης .....	68
4.2.7 Φθορά προκαλούμενη από τάσεις ερπυσμού.....	68
4.2.8 Φθορά προκαλούμενη από φορτίσεις κρούσης.....	69
4.2.9 Φθορά λόγω κοπώσεως.....	69
4.3 Τύποι βλαβών όπου αξιοποιούνται τα ινοπλισμένα σύνθετα υλικά .....	69
4.4 Τοποθέτηση και συστήματα FRP υλικών .....	72
4.5 Εισαγωγή στην περίσφιγξη .....	76
4.6 Τεχνικές ενίσχυσης δομικών στοιχείων σκυροδέματος .....	78
4.7 Ενίσχυση δομικών στοιχείων με την τεχνική περίσφιγξης .....	78
4.8 Διαδικασίες επιβολής εξωτερικής περίσφιγξης.....	78
4.8.1 Με χρήση επικολητών κολάρων .....	79
4.8.2 Με χρήση προεντεταμένων κολάρων.....	79
4.8.3 Με χρήση σπειροειδούς σπλισμού.....	79
4.8.4 Με χρήση μεταλλικού κλωβού .....	80
4.8.5 Με χρήση ολόσωμου μανδύα.....	81
4.8.6 Με χρήση μανδύων από σπλισμένο σκυρόδεμα.....	81
4.9 Μανδύες ινοπλισμένων πολυμερών (FRP) .....	82
Βιβλιογραφία 4 <sup>ου</sup> Κεφαλαίου.....	84
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5ο- Σκοπός διδακτορικής διατριβής.....	87
Βιβλιογραφία 5 <sup>ου</sup> Κεφαλαίου.....	95
Β. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ.....	100
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6ο-Σύνθετα υλικά πολυμερικής μήτρας ενισχυμένα με ίνες για την ενίσχυση φέροντος οργανισμού από σπλισμένο σκυρόδεμα.....	100
6.1 Διαδικασία κατασκευής δοκιμίων .....	100
6.1.1 Κατασκευή δοκιμίων τσιμέντου.....	100

6.1.2 Κατασκευή δοκιμών τσιμέντου (ενίσχυση με εποξειδική ρητίνη ξηρού τύπου και ίνες άνθρακα) .....	106
6.1.3 Κατασκευή δοκιμών τσιμέντου (ενίσχυση με εποξειδική ρητίνη υγρού τύπου και ίνες άνθρακα) .....	110
6.1.4 Κατασκευή συνθέτων υλικών εποξειδικής ρητίνης ξηρού τύπου και ίνες άνθρακα .....	112
6.1.5 Κατασκευή συνθέτων υλικών εποξειδικής ρητίνης υγρού τύπου και ίνες άνθρακα .....	117
6.1.6 Κατασκευή δοκιμών τσιμέντου (ενίσχυση με εποξειδική ρητίνη ξηρού τύπου και ίνες γυαλιού και Kevlar) .....	120
6.1.7 Κατασκευή δοκιμών τσιμέντου (ενίσχυση με εποξειδική ρητίνη υγρού τύπου και ίνες γυαλιού και Kevlar) .....	122
6.1.8 Κατασκευή συνθέτων υλικών εποξειδικής ρητίνης ξηρού τύπου και ίνες υάλου .....	123
6.1.9 Κατασκευή συνθέτων υλικών εποξειδικής ρητίνης υγρού τύπου και ίνες υάλου .....	125
6.1.10 Κατασκευή συνθέτων υλικών εποξειδικής ρητίνης ξηρού και ίνες Kevlar .....	128
6.2 Γήρανση δοκιμών .....	130
Βιβλιογραφία 6 <sup>ου</sup> Κεφαλαίου .....	133
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7ο-Μελέτη και προσδιορισμός μηχανικών ιδιοτήτων συνθέτων υλικών πολυμερικής μήτρας ενισχυμένων με ίνες για ενίσχυση φέροντος οργανισμού από οπλισμένο σκυρόδεμα .....	135
7.1 Μεθοδολογία προσδιορισμού μηχανικών ιδιοτήτων συνθέτων FRP υλικών .....	135
7.2 Μηχανικές ιδιότητες συνθέτων FRP υλικών-Εφαρμοζόμενη πειραματική μεθοδολογία ανά ιδιότητα .....	136
7.2.1 Αντοχή σε θλίψη .....	136
7.2.2 Αντοχή σε Κάμψη .....	137
7.2.3 Αντοχή σε Διάτμηση .....	139
7.3 Μελέτη μηχανικών ιδιοτήτων συνθέτων FRP υλικών- Αντοχή σε θλίψη-Σχολιασμός αποτελεσμάτων .....	140
7.3.1 Αποτελέσματα μετρήσεων αντοχής σε θλίψη συνθέτων υλικών τσιμέντου (ενίσχυση με εποξειδική ρητίνη και ίνες άνθρακα) .....	140
7.3.2 Αποτελέσματα μετρήσεων αντοχής σε θλίψη συνθέτων υλικών τσιμέντου (ενίσχυση με εποξειδική ρητίνη και ίνες υάλου και Kevlar) .....	143
7.3.3 Συγκριτική ανάλυση αποτελεσμάτων αντοχής σε θλίψη συνθέτων υλικών τσιμέντου (ενίσχυση με εποξειδική ρητίνη και ίνες) .....	147

7.3.4 Συγκριτική ανάλυση αποτελεσμάτων αντοχής σε θλίψη συνθέτων υλικών τσιμέντου και συνθέτων υλικών τσιμέντου με προσθήκη ινών άνθρακα μικρού μήκους (ενίσχυση με εποξειδική ρητίνη και ίνες) .....	150
7.3.5 Αποτελέσματα μετρήσεων αντοχής σε θλίψη συνθέτων υλικών τσιμέντου (ενίσχυση με εποξειδική ρητίνη και ίνες άνθρακα) που υπεβλήθησαν σε τεχνητή γήρανση.....	154
7.3.6 Αποτελέσματα μετρήσεων αντοχής σε κάμψη συνθέτων υλικών εποξειδικής ρητίνης και ενίσχυση από υφάσματα με ίνες άνθρακα .....	164
7.3.7 Αποτελέσματα μετρήσεων αντοχής σε κάμψη συνθέτων υλικών εποξειδικής ρητίνης και ενίσχυση από υφάσματα με ίνες υάλου και Kevlar .....	166
7.3.8 Αποτελέσματα μετρήσεων αντοχής σε διάτμηση συνθέτων υλικών εποξειδικής ρητίνης και ενίσχυση από υφάσματα με ίνες άνθρακα .....	168
7.3.9 Αποτελέσματα μετρήσεων αντοχής σε διάτμηση συνθέτων υλικών εποξειδικής ρητίνης και ενίσχυση από υφάσματα με ίνες υάλου και Kevlar .....	170
7.4 Συσχετισμός μηχανικών χαρακτηριστικών συνθέτων υλικών εποξειδικής μήτρας με ενίσχυση υφασμάτων ινών με πανομοιότυπα σύνθετα υλικά. ....	172
Βιβλιογραφία 7 <sup>ου</sup> Κεφαλαίου.....	176
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8ο-Χαρακτηρισμός συνθέτων ινοπλισμένων υλικών πολυμερικής μήτρας για ενίσχυση φέροντος οργανισμού από οπλισμένο σκυρόδεμα μέσω Ηλεκτρονικής Μικροσκοπίας Σάρωσης (SEM) .....	178
8.1 Ηλεκτρονική Μικροσκοπία Σάρωσης (SEM) .....	178
8.1.1 Θεωρητικό Πλαίσιο Ηλεκτρονικής Μικροσκοπίας Σάρωσης.....	178
8.1.2 Πειραματική διαδικασία .....	180
8.1.3 Σχολιασμός αποτελεσμάτων SEM.....	182
Βιβλιογραφία 8 <sup>ου</sup> Κεφαλαίου.....	192
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9ο- Γενικά Συμπεράσματα- Προτάσεις μελλοντικής ερευνητικής δραστηριότητας .....	194
9.1 Γενικά Συμπεράσματα.....	194
9.1.1 Υλικά από σκυρόδεμα ενισχυμένα με σύνθετα υλικά πολυμερικής μήτρας και ίνες άνθρακα, υάλου και Kevlar.....	194
9.1.2 Σύνθετα υλικά πολυμερικής μήτρας ενισχυμένα με ίνες άνθρακα, υάλου και Kevlar.....	197
9.1.3 Χαρακτηρισμός υλικών σκυροδέματος με ενίσχυση από σύνθετα υλικά πολυμερικής μήτρας και ίνες άνθρακα, υάλου και Kevlar .....	199
9.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα .....	200
ΒΙΟΓΡΑΦΙΚΟ ΣΗΜΕΙΩΜΑ .....	203



## **A. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ**

### **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1ο**

#### **1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Η τεχνολογική εξέλιξη των κατασκευαστικών πρακτικών και μεθόδων τις τελευταίες δεκαετίες είναι αξιοσημείωτη. Σε αυτό συνέβαλε σε μεγάλο βαθμό η ραγδαία πρόοδος της επιστήμης και της τεχνολογίας των υλικών και πιο συγκεκριμένα της ανάπτυξης και της χρήσης των σύνθετων υλικών στις κτιριακές κατασκευές και στις επισκευές, οι οποίες αφορούν κατά βάση στις ενισχυτικές εργασίες με σκοπό τη βελτίωση της στατικότητάς των υπό επισκευή κτιριακών υποδομών [1-5, 7]. Η χρήση συνθέτων υλικών στον οικοδομικό κλάδο και ειδικότερα σε ότι αφορά το κομμάτι των ενισχυτικών παρεμβάσεων αναπτύσσεται συνεχώς και έχει ήδη αρχίσει να κυριαρχεί έναντι άλλων κλασικών μεθόδων ενίσχυσης.

Η εφαρμογή της μεθόδου γίνεται μέσω της επίστρωσης ή της επένδυσης σύνθετων υλικών στην εξωτερικές επιφάνειες των δομικών στοιχείων που απαιτούν ενισχυτικές ενέργειες. Τα ενισχυτικά υλικά που χρησιμοποιούνται συνήθως έχουν τη μορφή ελασμάτων, φύλλων (υφασμάτων) ή πλεγμάτων.

Το συνηθέστερο είδος υλικών που απαντώνται σε αυτού του τύπου τις εργασίες είναι τα ινοπλισμένα πολυμερή (Fibre Reinforced Polymers, FRP). Τα ανωτέρω συνίστανται από ένα στρώμα ινών. Οι ίνες ενδέχεται να είναι κατασκευασμένες από γυαλί, άνθρακα ή σε κάποιες ειδικές περιπτώσεις και αραμίδιο. Είναι τοποθετημένες εντός πολυμερικής μήτρας, δημιουργώντας με αυτόν τον τρόπο ένα σύνθετο το οποίο χαρακτηρίζεται από υψηλές μηχανικές αντοχές [1-5]. Είναι κατανεμημένες σε μία ή περισσότερες διευθύνσεις μέσα στην πολυμερική μήτρα έτσι ώστε να αυξάνουν

την εφελκυστική αντοχή και τη δυσκαμψία του συνθέτου, χαρακτηριστικές ιδιότητες που αποτελούν ζητούμενα στην περίπτωση υλικών ενίσχυσης.

Οι πιο διαδεδομένες σε χρήση πολυμερικές μήτρες στις κατασκευαστικές εφαρμογές είναι οι μήτρες εποξειδικής ρητίνης [1].

Η χρήση των ανωτέρω συνθέτων έχει αποκλειστικό σκοπό τη βελτίωση της μηχανικής απόκρισης των στοιχείων του φέροντος οργανισμού στις ασκούμενες φορτίσεις. Αναλυτικότερα μέσω της εφαρμογής των εν λόγω ενισχυτικών ενεργειών επιδιώκεται η βελτίωση των αντοχών των δομικών στοιχείων στην κάμψη, τη διάτμηση και τη θλίψη, βασικά μεγέθη σε ότι αφορά την στατική επάρκεια οικοδομών. Οι χαρακτηριστικές ιδιότητες των συγκεκριμένων υλικών, ήτοι το χαμηλό τους βάρος, η υψηλή τους αντοχή και η εξαιρετική αντοχή αυτών σε διάβρωση, η εξαιρετική τους συμπεριφορά στην κόπωση και την κρούση, οι σχετικά εύκολες διαδικασίες παραγωγής και το μικρό κόστος συντήρησης είναι μόνοι κάποιοι από τους λόγους που καθιστούν τα σύνθετα υλικά ως κορυφαία μεταξύ των κατασκευαστικών υλικών σε μεγάλη γκάμα εφαρμογών [6].

Επιπροσθέτως η αξιοποίηση των υλικών συγκεκριμένου τύπου σε εφαρμογές ενίσχυσης μεταξύ άλλων δύναται να συμβάλει στην ενίσχυση της συνάφειας των επιμέρους συστατικών των δομικών στοιχείων όπου απαιτείται, περιορίζοντας με αυτόν τον τρόπο το ενδεχόμενο αστοχίας.

Η περαιτέρω διερεύνηση των δυνατοτήτων και η επέκταση της χρήσης των σύνθετων πολυμερών ενισχυμένων με υφάσματα ινών άνθρακα υλικών στην ενίσχυση και επισκευή κατασκευών, αλλά και στην ανέγερση νέων κτιριακών εγκαταστάσεων και υποδομών, αρχίζει να αποτελεί πρόκληση.

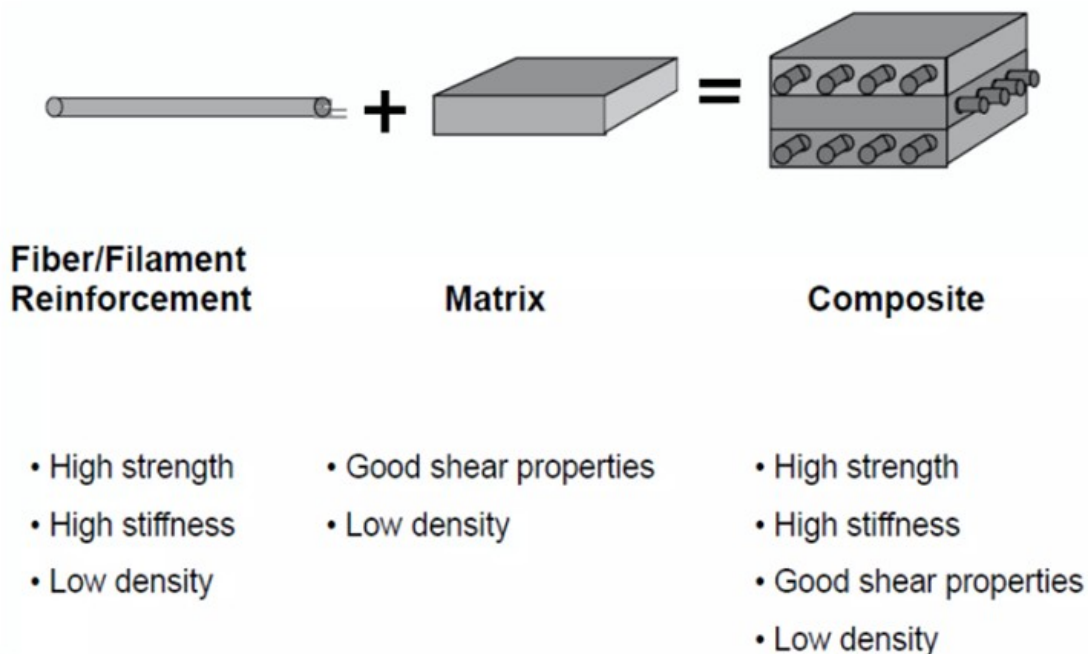
## Βιβλιογραφία 1<sup>ου</sup> Κεφαλαίου

1. Ι. Χρ. Σιμιτζής, «Πολυμερή και Σύνθετα Υλικά», Σημειώσεις Κατεύθυνσης 8<sup>ου</sup> Εξαμήνου Χημικών Μηχανικών – ΜΕΡΟΣ Α , Αθήνα 2010.
2. S. Goodman, «*Handbook of thermoset plastics*», Noyes Publications, 2<sup>nd</sup> edition, 1998.
3. J. P. Pascault, H. Sautereau, J. Verdu, R. Williams, «*Thermosetting polymers*», Marcel Dekker, 2002.
4. K. Forsdyke, T. Starr, «*Thermoset resins*», Rarpa Technology, 2002.
5. M. O. W. Richardson, «*Polymer Engineering Composites*», Applied Science Publishers, London, 1977.
6. Α. Δραμηλαράκης, Ι. Αντωνογιαννάκης, «*Χρήση Συνθέτων Υλικών στην Επισκευή Κατασκευών*», Πτυχιακή εργασία, ΤΕΙ Πειραιά, 2013.
7. M. Z. Naser, R. A. Hawileh, J. A. Abdalla, (2019), «*Fiber-reinforced polymer composites in strengthening reinforced concrete structures: A critical review*», Engineering Structures, 198, 109542.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2ο- ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ ΠΟΛΥΜΕΡΙΚΗΣ ΜΗΤΡΑΣ

### 2.1 Χαρακτηριστικά - Ιδιότητες συνθέτων υλικών

Ως σύνθετο υλικό (Εικόνα 2.1-1) ορίζεται το σύστημα εκείνο που αποτελείται από δύο ή περισσότερες φάσεις, οι ιδιότητες και οι επιδόσεις των οποίων, θα είναι βελτιωμένες σε σχέση με τις αντίστοιχες των επιμέρους συστατικών υλικών από τα οποία αποτελείται. Στα σύνθετα πολυμερή υλικά οι επιλογή των δύο φάσεων γίνεται ώστε η μία εξ' αυτών να είναι ανθεκτικότερη από πλευράς μηχανικών αντοχών σε καταπονήσεις, η οποία και ονομάζεται «ενίσχυση» με συνηθέστερο ενισχυτικό υλικό τις ίνες. Η δε άλλη φάση θα είναι ασθενέστερη, λιγότερο ανθεκτική σε καταπονήσεις και θα αναλάβει το ρόλο να εμπεριέχει την «ενίσχυση». Η δεύτερη αυτή φάση είναι γνωστή ως «μήτρα».



Εικόνα 2.1-1. Δομή συνθέτων υλικών (Πηγή: <https://www.slideshare.net/>).

Τα πολυμερή και πιο συγκεκριμένα οι πολυμερικές μήτρες κατατάσσονται σε τρεις κατηγορίες, **α.) τις θερμοπλαστικές, β.) τις θερμοσκληρυνόμενες και γ.) τις ελαστομερείς μήτρες** [1-3] οι οποίες προκύπτουν κατ' αντιστοιχία των υλικών που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή τους.

Οι ιδιότητες των συνθετικών υλικών είναι αποτέλεσμα ποικίλων παραμέτρων οι οποίες κατά κόρον σχετίζονται με την διαδικασία κατασκευής με την οποία τα υλικά αυτά παρήχθησαν και με τις ιδιότητες των επιμέρους υλικών που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή τους [1,2].

Η κατανομή των διαφορετικών μερών (φάσεων) του συνθέτου και πιο συγκεκριμένα ο προσανατολισμός, εντός της μήτρας, του υλικού που έχει χρησιμοποιηθεί ως ενισχυτικό αποτελεί κομβικό παράγοντα στον καθορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων του τελικού συνθέτου. Κατά συνέπεια η όποια ανομοιογένεια και ανομοιομορφία αυξάνει τις πιθανότητες εμφάνισης αστοχιών στο υλικό.

Υψίστης επίσης σημασίας παράμετρο όσον αφορά στην ποιότητα του τελικώς παραγόμενου υλικού αποτελεί η συνοχή μεταξύ των δύο μερών/φάσεων. Ελαττωματικά σημεία στην διεπιφάνεια μεταξύ των επιμέρους συστατικών ενδεχομένως να έχουν αρνητικό αντίκτυπο στις τελικώς προσδοκώμενες μηχανικές ιδιότητες. Αντιθέτως η διασφάλιση της απαιτούμενης συνάφειας μεταξύ του ενισχυτικού μέσου και της μήτρας, έχει ως αποτέλεσμα την ομαλή μεταφορά των ασκούμενων τάσεων μεταξύ των επιμέρους φάσεων του υλικού και κατά συνέπεια την αυξημένη μηχανική απόδοση του συνθέτου [4].

## 2.2 Κατηγορίες συνθέτων υλικών

Τα σύνθετα υλικά (Εικόνα 2.2-1) δύνανται να κατηγοριοποιηθούν με τους ακόλουθους τρόπους [1,2,5,15]:

- με βάση το υλικό της μήτρας τους

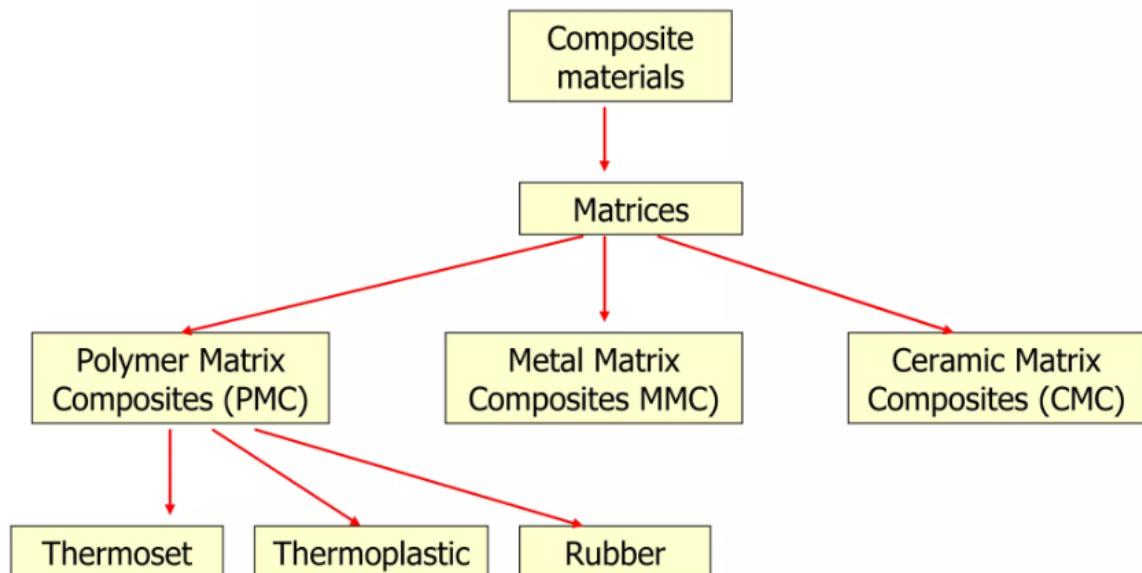
- με βάση το υλικό που εμπεριέχεται σε αυτά ως μέσο ενίσχυσεως.

Στην περίπτωση που ο διαχωρισμός τους πραγματοποιείται με βάση το υλικό από το οποίο κατασκευαστεί η μήτρα χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες:

- Σύνθετα υλικά κεραμικής μήτρας (CMCs)
- Σύνθετα υλικά μεταλλικής μήτρας (MMCs)
- Σύνθετα υλικά πολυμερικής μήτρας (PMCs).

Ομοίως η κατηγοριοποίηση των συνθέτων υλικών με βάση το είδος του μέσου ενίσχυσης που χρησιμοποιείται στην κατασκευή τους διαμορφώνεται ως ακολούθως [1,2,5,15]:

- Ινώδη Σύνθετα Υλικά
- Πολυστρωματικά Σύνθετα Υλικά
- Κοκκώδη Σύνθετα Υλικά.



Εικόνα 2.2-1. Κατάταξη συνθέτων υλικών (Πηγή: <https://www.slideshare.net/> ).

## 2.3 Θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή σύνθετα

Αποτελούν ίσως την ευρύτερα διαδεδομένη σε χρήση κατηγορία συνθέτων υλικών. Συνίστανται από μια μήτρα αποτελούμενη από θερμοσκληραινόμενη πολυμερική ρητίνη συνδυασμένη με μέσο ή συνδυασμό ενισχυτικών υλικών όπως αυτά που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο. Το χαμηλό μοριακό βάρος και ιξώδες από τα οποία χαρακτηρίζονται, η απλή κατεργασία τους, το μικρό κόστος τους, η ευκολία των μεθόδων μορφοποίησής τους, αποτελούν μερικά εκ των πλεονεκτημάτων των θερμοσκληρυνόμενων πολυμερών. Τα πιο διαδεδομένα (σε χρήση) θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή είναι ο ακόρεστοι πολυεστέρες, οι εποξειδικές ρητίνες και οι ρητίνες φαινόλης-φορμαλδεΐδης. Εξαιτίας των εμφανώς περιορισμένων μηχανικών χαρακτηριστικών τους, χρησιμοποιούνται κατά κόρον με τη μορφή μητρών στην παραγωγή συνθέτων υλικών τα οποία εν συνεχεία ενισχύονται με την εισαγωγή υαλονημάτων. Σε ότι αφορά στις εφαρμογές υψηλών απαιτήσεων επιλέγονται εποξειδικές ρητίνες, λόγω του ότι επιδεικνύουν καλύτερες ιδιότητες σε σχέση με τις λοιπές κατηγορίες θερμοσκληρυνόμενων ρητινών [1-6,15].

## 2.4 Εποξειδικές Ρητίνες

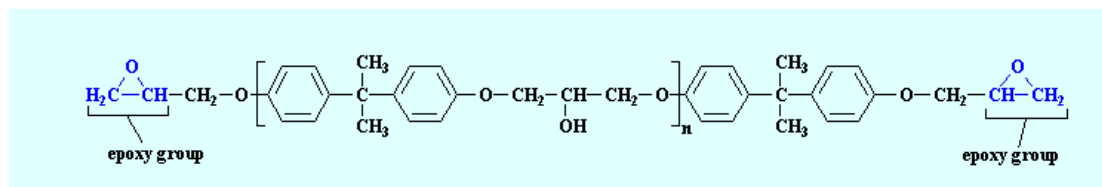
Οι εποξειδικές ρητίνες, παρουσιάζουν αρκετά μεγάλο εύρος σε ότι αφορά στις φυσικές και μηχανικές τους ιδιότητές, γεγονός που συχνά τις καθιστά καταλληλότερες ως επιλογή σε σχέση με άλλο τύπου πολυμερικές ρητίνες όπως για παράδειγμα οι πολυεστερικές παρά το χαρακτηριστικά υψηλότερο κόστος τους.

Χαρακτηριστικές ιδιότητες των συγκεκριμένων ρητινών όπως, η ανθεκτικότητα στη χημική διάβρωση, η θερμοανθεκτικότητα και οι καλές θερμομονωτικές τους ιδιότητες σε συνδυασμό με τις καλές μηχανικές ιδιότητες που διαθέτουν συγκριτικά με άλλου τύπου ρητίνες (όπως οι πολυεστερικές) τις καθιστούν κατάλληλες σε σημαντικό αριθμό πρακτικών εφαρμογών [1,11,12]. Οι εποξειδικές ρητίνες πέραν όλων των άλλων παρουσιάζουν υψηλό βαθμό συνάφειας σε εφαρμογές στις οποίες εισάγονται

σε αυτές ινώδεις ενισχύσεις. Ενδείκνυται λόγω της συμπεριφοράς τους κατά το στάδιο της σκλήρυνσης, για εφαρμογές στις οποίες έχουν επιλεγεί ίνες άνθρακα [13].

Εκ των κύριων μειονεκτημάτων τους, όπως συμβαίνει για το σύνολο των θερμοσκληρυνόμενων ρητινών, η ψαθυρότητα τους [14,15].

Σε ότι αφορά στη σύνθεσή τους, αρχικά λαμβάνει χώρα η παρασκευή πολυμερούς υλικού με χαμηλό μοριακό βάρος (προπολυμερές) το οποίο προκύπτει από το συνδυασμό επιχλωρυδρίνης με αλειφατικές ή αρωματικές διόλες (κατά κόρον χρησιμοποιείται η διφαινόλη Α). Στη συνέχεια σε αυτό το μίγμα προστίθενται τα κατάλληλα αλκάλια που έχουν το ρόλο του καταλύτη στην αντίδραση σχηματισμού των ανωτέρω πολυμερών [1,17,18] (Εικόνα 2.4-1). Ο μηχανισμός πολυμερισμού είναι τύπου προσθήκης-απόσπασης. Για να καθίσταται εφικτή η χρησιμοποίησή τους, απαιτείται η σκλήρυνση των παραπάνω υλικών για αυτό και στο πλαίσιο της πρακτικής εφαρμογής τους απαιτείται η προσθήκη κατάλληλων σκληρυντών [18].



Εικόνα 2.4-1. Χημικός Τύπος εποξειδικής ρητίνης διφαινόλης Α (Πηγή: <https://pslc.ws/>).

## 2.5 Σύνθετα υλικά με ενίσχυση ινών

Σε αυτή την κατηγορία συνθέτων υπάγονται τα υλικά εκείνα των οποίων η φάση ενίσχυσης διαθέτει τη μορφή ινών. Παρουσιάζουν εξαιρετικά καλές χαρακτηριστικές ιδιότητες όπως η υψηλή εφελκυστική αντοχή και το μεγάλο μέτρο ελαστικότητας για αυτό το λόγο και αποτελούν πρωταρχική επιλογή στην περίπτωση απαιτητικών εφαρμογών από άποψης μηχανικών αντοχών. Οι ίνες άνθρακα ως μέσο ενίσχυσης χρησιμοποιούνται κυρίως στην κατασκευή προηγμένων σύνθετων υλικών. Η

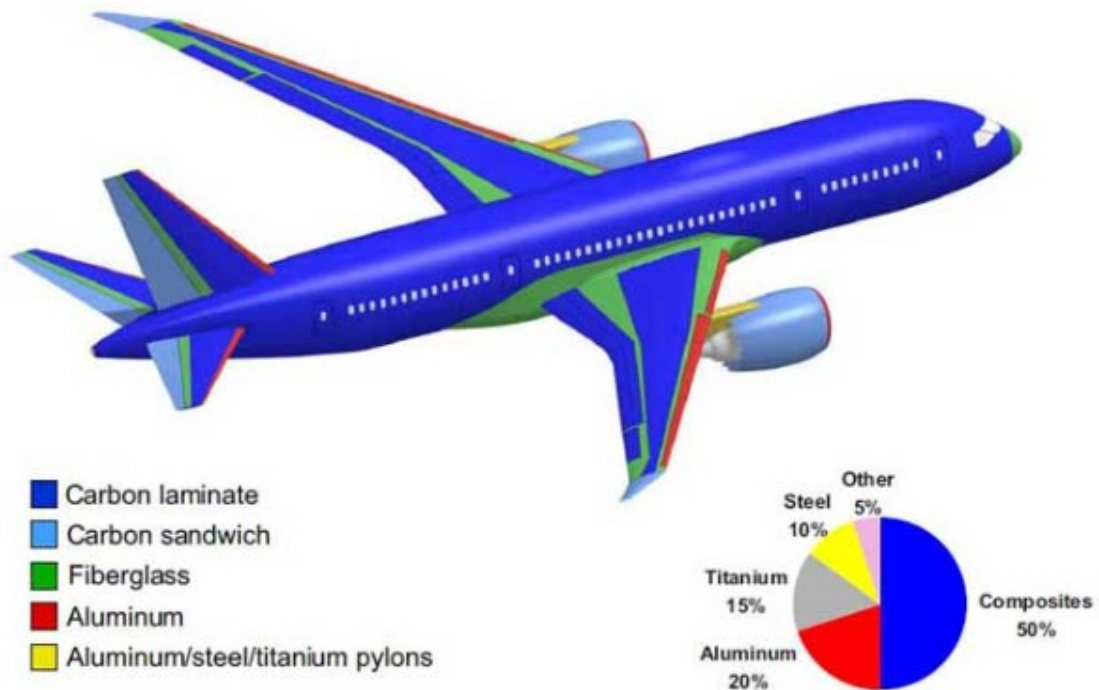


σημαντική θέση των ανωτέρω υλικών είναι συνέπεια του συνόλου των ιδιοτήτων που παρουσιάζουν. Οι ίνες άνθρακα έχουν χαμηλό βάρος, εξαιρετικά υψηλή αντοχή, ευκαμψία και αντοχή στην κόπωση. Η χρήση μεγάλης γκάμας ινών στην παραγωγή συνθέτων υλικών, και ειδικότερα στην ενίσχυση πλαστικών, μεταλλικών και κεραμικών υλικών με σκοπό την ενίσχυση της μηχανικής τους απόδοσης είναι αρκετά διαδεδομένη. Συγκεκριμένες κατηγορίες ινών έχουν επιπλέον ιδιότητες. (λ.χ. ηλεκτρική αγωγιμότητα, θερμική αγωγιμότητα κ.α.). Οι συνηθέστερες σε χρήση ίνες που απαντώνται στην κατασκευή προηγμένων σύνθετων υλικών σε διάφορους επιστημονικούς και τεχνολογικούς τομείς όπως η αεροναυπηγικής, η ναυπηγική, η αυτοκινητοβιομηχανίας και αρκετοί άλλοι είναι οι ίνες υάλου, βορίου, αρωματικού πολυαμιδίου και άνθρακα. Άλλα είδη ινών που ενδεχομένως δεν έχουν τόσο ευρεία χρήση είναι οι ίνες πολυαιθυλενίου, πυριτίου και χαλαζία. Σε ότι αφορά στις τεχνολογικές και κατασκευαστικές εφαρμογές αιχμής κατά κόρον επιλέγονται οι ίνες άνθρακα, συνδυαζόμενες και με άλλους τύπους ινών κατά περίπτωση [4,7,8,16].

## **2.6 Εφαρμογές σύνθετων ενισχυμένων υλικών**

Εδώ και αρκετές δεκαετίες τα σύνθετα υλικά κατακλύζουν την ανθρώπινη καθημερινότητα βρίσκοντας πρόσφορο έδαφος σε αρκετές πτυχές της καθημερινότητας. Σε αυτό συνέβαλε σε μεγάλο βαθμό η απαίτηση για την ανάπτυξη και χρήση νέων υλικών τα οποία θα έπρεπε να είναι ικανά να αντικαταστήσουν επάξια τα συμβατικά παραδοσιακά υλικά, που πλέον δεν επαρκούσαν για να καλύψουν τις σύγχρονες ανθρωπογενείς ανάγκες. Υπό την δημιουργική πίεση της απαίτησης νέων υλικών η εξέλιξη των κλάδων της τεχνολογίας και της επιστήμης των υλικών, ανέπτυξε σύνθετα υλικά τα οποία συνεχίζει να εξελίσσει και να βελτιώνει ακόμα και σήμερα. Τα υλικά αυτά χρησιμοποιούνται σε πλήθος εφαρμογών [1,3,4,7,9,16]. Αναλυτικότερα σύνθετα υλικά με την κατάλληλη ενίσχυση αξιοποιούνται στους κλάδους της αεροναυπηγικής, της αεροδιαστημικής, των ειδών αθλητικού εξοπλισμού, στην κατασκευή ενισχυμένου τύπου σωλήνων, στην

αυτοκινητοβιομηχανία, στην παραγωγή ναυτιλιακού εξοπλισμού κ.α.. Η ενσωμάτωση διαφορετικού τύπου ενισχυτικών μέσων οδηγεί στην δημιουργία συνθέτων υλικών με αντιδιαβρωτικές, διηλεκτρικές, ηλεκτροστατικές και άλλες ιδιότητες, δημιουργώντας κατάλληλα υλικά για ακόμα περισσότερες κατασκευαστικές και επιστημονικές εφαρμογές [10,12,18].



Εικόνα 2.5-1. Σύνθετα υλικά αεροπλάνου (Πηγή: [www.1001crash.com](http://www.1001crash.com) ).

## Βιβλιογραφία 2<sup>ου</sup> Κεφαλαίου

1. Ι. Χρ. Σιμιτζής, «Τεχνολογία Προηγμένων Πολυμερών» και Σύνθετων Υλικών, 64, 2002.
2. Π. Βαρελίδης, «Πολυμερικές επικαλύψεις ενισχύοντος μέσου σε σύνθετα υλικά Θερμοσκληρυνόμενης μήτρας», Διδακτορική διατριβή, ΕΜΠ, Αθήνα, 1999.
3. W.D. Callister, D.G. Rethwisch, «*Materials Science and Engineering*», 9<sup>th</sup> edition, John Wiley & Sons 2015, pp. 117-142, 541-587.
4. Γ. Σουπιώνης, «Σύνθετα Υλικά στην Θερμοσκληρυνόμενων Ρητινών με Περίληψη και Ενισχυμένων με Ίνες Άνθρακα ως Θερμομονωτικών Υλικών Υψηλών Θερμοκρασιών», Μεταπτυχιακή εργασία, ΕΜΠ, 2017.
5. Ν. Χατζηχρηστίδης, Μ. Πιτσικάλης, Ε. Ιατρού, *Βιομηχανική Χημεία -Πολυμερή*, Σημειώσεις Μαθήματος, Εθνικό Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο, Αθήνα 2008.
6. Κ. Μπογιατζίδης, «Κατασκευή Συνθέτων Υλικών Πολυμερικής Μήτρας με την Προσθήκη Ανακυκλούμενων Υλικών από Απόβλητα Κατεδάφισης Κτιρίων και Μελέτη Μηχανικών και Θερμικών ιδιοτήτων τους», Διδακτορική διατριβή, ΕΜΠ, Αθήνα, 2022.
7. Ε. Γκέρου, «Σύνθετα Υλικά Εποξειδικής Ρητίνης-Ινών Άνθρακα-Μεταλλικών Κόνεων Ψευδαργύρου: Κατασκευή, Μηχανικές και Ηλεκτρικές Ιδιότητες», Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ, Αθήνα, 2011.
8. Ε. Ρακόπουλος, «Κατασκευή, Μοντελοποίηση και Μελέτη της Φυσικής και Μηχανικής Συμπεριφοράς Συνθέτων Υλικών Πολυμερικής Μήτρας Ενισχυμένης με νανοσωλήνες άνθρακα», Μεταπτυχιακή Εργασία, Πάτρα 2010.
9. Ι. Α. Ασημακόπουλος, «Κατασκευή, Χαρακτηρισμός και Ιδιότητες συνθέτων Διηλεκτρικών Υλικών Πολυμερικής Μήτρας», Διδακτορική Διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2015.
10. J. J. Morena, «*Advanced Composite Mold Making*», Van Norstrand Reinhold Co. Inc., New York, 1988, pp.124-125.
11. K. K. Chawla, «*Composite Materials*», Springer-Verlag New York Inc., Germany, 1987.
12. T. Vigo, B. Kinzig, «*Composite Applications. The Role of Matrix, Fiber, and Interface*», VCH, New York, 1992.
13. C. Bogiatzidis, D. Semitekolos, L. Zoumpoulakis, «*Recycling and Exploitation of Construction and Demolition Wastes as Additives in Unsaturated Polyester Composite Building and Insulation Materials*», *Mechanical and Thermal*

*Properties Investigation*, Journal of Materials Science Research and Reviews, 2018, 1.

14. I. Asimakopoulos, L. Zoumpoulakis, G. C. Psarras, «*Development and Characterization of a Novolac Resin/BaTiO<sub>3</sub> Nanoparticles Composite System*», Journal of Applied Polymer Science, 2012.
15. I. Χρ. Σιμιτζής, *Επιστήμη και Τεχνική των Πολυμερών και Σύνθετων Υλικών*, Αθήνα Φεβρουάριος 2017.
16. M. M. Schwartz, *Composite Materials Handbook*, McGraw-Hill Book Company.
17. I. Χρ. Σιμιτζής, Α. Μοροπούλου, «*Υλικά*», ΕΜΠ, Αθήνα, 2003.
18. Ε. Μ. Πιζάνια, «*Κατασκευή - Ιδιότητες - Κατευθύνσεις Εφαρμογών Συνθέτων Υλικών Ινών Άνθρακα - Νανοσωλήνων Άνθρακα – Άμορφού Άνθρακα*», Διδακτορική Διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2015.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3ο- ΙΝΕΣ ΑΝΘΡΑΚΑ

### 3.1 Ιστορική αναδρομή

Οι πρώτες αναφορές σε ίνες άνθρακα εντοπίζονται στον 19<sup>ο</sup> αιώνα με την πρώτη χρήση τους υπό τη μορφή νήματος λαμπτήρων πυρακτώσεως. Τα εν λόγω νήματα ήταν στην ουσία ίνες άνθρακα υποβαθμισμένων μηχανικών χαρακτηριστικών. Η παραγωγή τους πραγματοποιούνταν αρχικά με τη μέθοδο εξανθράκωσης νημάτων φυτικής προελεύσεως (κυτταρίνη). Η ιδέα και η πρώτη πρακτικά επιτυχημένη προσπάθεια παρασκευής τους ανήκει στον Άγγλο χημικό και εφευρέτη Sir J. W. Swan (1860) [1] και όχι στον γνωστό Αμερικανό εφευρέτη T. Edison (1847-1931) [2]. Οι τεχνολογικές εξελίξεις και η πρόοδος στις επιστημονικές έρευνες έχουν ως αποτέλεσμα την αντικατάσταση των νημάτων άνθρακα από τα νήματα βολφραμίου. Η έρευνα γύρω από τη βελτιστοποίηση των ιδιοτήτων των ινών άνθρακα ξεκινά αρχικά περίπου γύρω στο 1950 [3] και εξελίσσεται μέχρι τις μέρες μας. Μεμονωμένοι επιστήμονες και ερευνητικές ομάδες από όλο τον κόσμο, από τα τέλη της δεκαετίας του 1950 κι εντεύθεν, συνεισέφεραν σε μεγάλο βαθμό μέσω του έργου τους στο να επιβεβαιώσουν πρακτικά τις μέχρι τότε θεωρητικές διατυπώσεις αναφορικά με την απόδοση των ανωτέρω υλικών. Ταυτόχρονα, αρχίζουν να παράγονται ίνες πολυακρυλονιτριλίου (PAN) στις ΗΠΑ και στην Δυτική Γερμανία την ίδια περίοδο. Περί τα τέλη της δεκαετίας (1958) ο Αμερικανός R. Bacon διεξάγοντας πειράματα για λογαριασμό της εταιρίας Union Carbide, οδηγήθηκε τυχαία στην παραγωγή ινιδίων από γραφίτη με αξιοσημείωτες για την εποχή μηχανικές ιδιότητες ( $E=700 \text{ GPa}$  και  $\sigma_b=20 \text{ GPa}$ ). Η διαδικασία της παραγωγής εκ του αποτελέσματος κρίθηκε αναποτελεσματική εξαιτίας της μικρής περιεκτικότητας του τελικού προϊόντος σε άνθρακα [4]. Αργότερα το 1961 ο Ιάπωνας ο Akio Shindo παρήγαγε συνεχείς ίνες άνθρακα χρησιμοποιώντας πολυακρυλονιτρίλιο και αναπτύσσοντας μια νέα εν θερμώ διαδικασία (εξανθράκωση PAN). Οι ίνες που παραλαμβάνονταν παρουσίαζαν

αυξημένη περιεκτικότητα σε άνθρακα σε σχέση με τις ίνες που είχαν έως τώρα κατασκευαστεί.

Το 1960 ωστόσο ο R. Millington ανέπτυξε μια διαδικασία για την οποία έλαβε δίπλωμα Ευρεσιτεχνίας (ΗΠΑ, Αριθ. Διπλώματος Ευρεσιτεχνίας 3,294,489). Μέσω αυτής της μεθόδου κατέστη δυνατή η παραγωγή ινών υψηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα (99%). Οι αντοχές των εν λόγω ινών σε όρους μέτρου ελαστικότητας και αντοχής σε εφελκυσμό επαρκούσαν ώστε αυτές να αξιοποιηθούν ως ενίσχυση στην κατασκευή σύνθετων υλικών υψηλής αντοχής. Οι προσπάθειες παραγωγής ακόμα πιο βελτιωμένων ινών συνεχίζονται. Το 1964, ο Βρετανός, William Watt καταφέρνει να παράξει ίνες με μεγαλύτερο μέτρο ελαστικότητας. Η μέθοδος παραγωγής που χρησιμοποιείται είναι και εδώ η εξανθράκωση του πολυακρυλονιτριλίου.

Περαιτέρω έρευνα που έλαβε χώρα στην Ιαπωνία έως το 1970 οδήγησε στην παραγωγή συνεχών ινών, κατασκευαζόμενων και σε αυτή την περίπτωση χρησιμοποιώντας ως πρόδρομο υλικό το πολυακρινλονιτρίλιο, με σαφώς υψηλότερο μέτρο ελαστικότητας σε σχέση με από αυτό των ινών Βορείου, τις οποίες και αντικαθιστούν αφού πλέον η ζήτηση τους περιορίζεται σε ότι αφορά τη χρήση τους σε εφαρμογές υψηλών απαιτήσεων. Παράλληλα διερευνώνται οι δυνατότητες αξιοποίησης και άλλων τύπων πολυμερών (αναγεννημένη κυτταρίνη, PVC, κ.α.) μέσω των οποίων κατόπιν εξανθράκωσης παρασκευάστηκαν υλικά υψηλής αντοχής [5].

Στις μέρες μας οι έρευνες προσανατολίζονται στη βελτίωση των ιδιοτήτων των ινών άνθρακα περιορίζοντας παράλληλα το σχετιζόμενο με αυτές κόστος παραγωγής.

Για την κατασκευή σύνθετων υλικών επιλέγονται συνήθως ίνες που είναι κατασκευασμένες από πολυακρινλονιτρίλιο και δευτερευόντως αυτές που είναι κατασκευασμένες από ασφαλικά υλικά. Η επιλογή αυτή αποδίδεται στις υψηλές μηχανικές ιδιότητες των συγκεκριμένων τύπων ινών. Σε ότι αφορά στα σύνθετα υλικά συμβατικής τεχνολογίας και χρήσης εκεί χρησιμοποιούνται ίνες συμβατικού τύπου όπως είναι οι ίνες υάλου, πολυεστέρα και πολυαμιδίου.

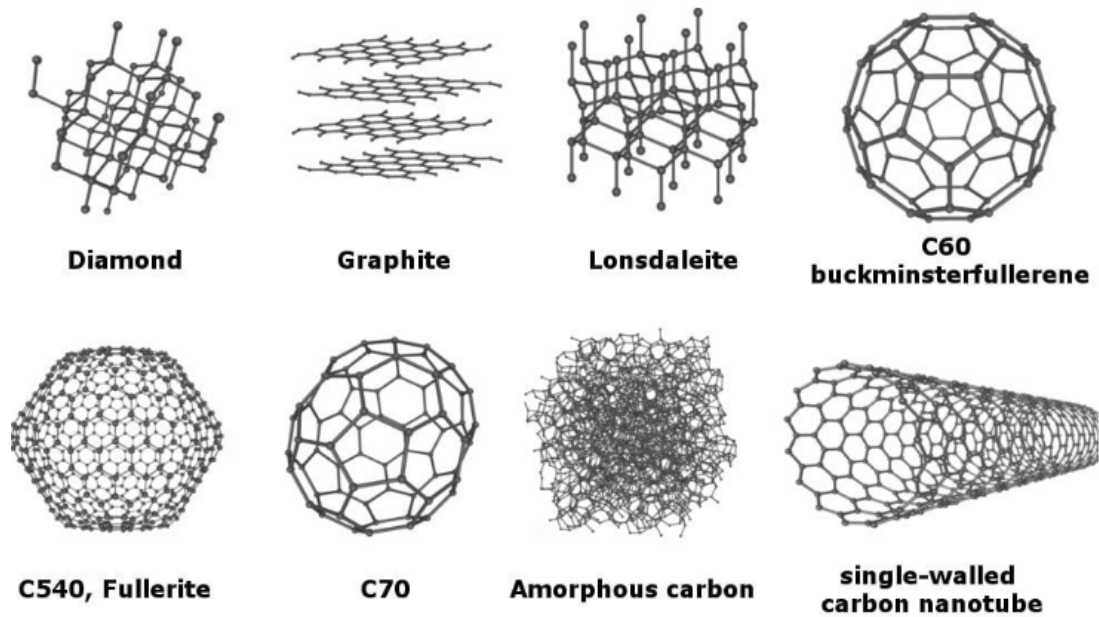
### 3.2 Δομή Ινών Άνθρακα

Διακρίνονται όπως έχει ήδη αναλυθεί προηγούμενα λόγω των αξιοσημείωτων εφελκυστικών αντοχών, της χαμηλής τους πυκνότητάς, της καλής θερμικής και ηλεκτρικής αγωγιμότητάς που διαθέτουν, της εξαιρετικής τους αντίστασης σε φαινόμενα ερπυσμού και σειράς άλλων χαρακτηριστικών γνωρισμάτων.

Απαντώνται και χρησιμοποιούνται στην κατασκευή συνθέτων σε ποικίλων ειδών μορφές, μερικές εκ των οποίων είναι οι συνεχείς ίνες μίας διεύθυνσης, οι μικρού μήκους ίνες (chopped) και τα υφάσματα [6].

Ο μορφολογικός χαρακτηρισμός και η ανάλυση της δομής τους δύνανται να πραγματοποιηθούν με αρκετές τεχνικές, όπως η περίθλαση ακτίνων X (XRD), η ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης (SEM), η οπτική μικροσκοπία (OM) κ.α.. Μέσω της διαδικασίας του χαρακτηρισμού έχουν συγκεντρωθεί πολύ χρήσιμα στοιχεία αναφορικά με συγκεκριμένα κατασκευαστικά (κυρίως) χαρακτηριστικά των ινών όπως το μέγεθος των ινιδίων, ο προσανατολισμός τους, η διάμετρος και η κρυσταλλικότητά τους.

Οι πλέον διαδεδομένες αλλοτροπικές μορφές του άνθρακα που συναντάμε στη φύση, είναι το διαμάντι και ο γραφίτης. Επίσης ο άνθρακας μπορεί να βρεθεί και στην άμορφη κατάσταση [7,8]. Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 3.2-1, η δομή του αδάμαντα λόγω της  $sp^3$  υβριδοποίησης είναι κυβικού τύπου, ενώ η  $sp^2$  υβριδοποίηση των ατόμων άνθρακα στην περίπτωση του γραφίτη παρουσιάζεται με τη μορφή στοιβάδων. Κάθε μια από αυτές τις στοιβάδες αποτελείται από σειρά εξαγώνων συνδεδεμένων μεταξύ τους. Είναι δε τοποθετημένες η μια επί της άλλης σύμφωνα με τη διάταξη που φαίνεται στην περίπτωση του γραφίτη στην ακόλουθη εικόνα, ήτοι κατά τη σειρά ABA.....



Εικόνα 3.2-1. Αλλοτροπικές μορφές άνθρακα (Πηγή: <https://www.scienceabc.com>).

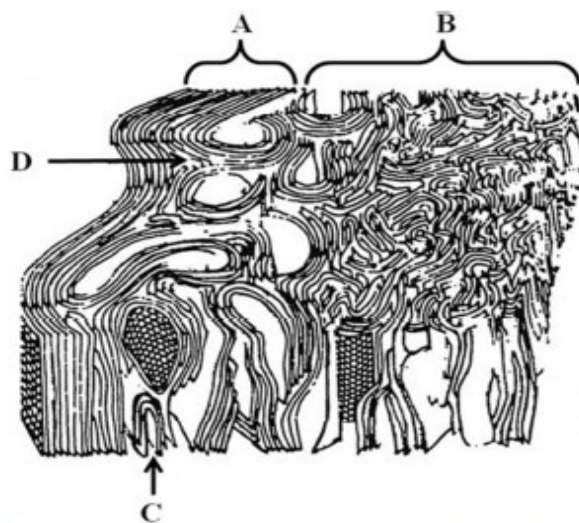
Οι ανθρακικές ίνες αποτελούνται από προσανατολισμένα με συγκεκριμένο τρόπο επίπεδα γραφενίου. Πιο συγκεκριμένα τα επίπεδα από τα οποία αυτές αποτελούνται είναι αξονικά προσανατολισμένα. Συνίστανται από βασικές δομικές μονάδες στροβιλοστρωματικών ανθρακικών επιπέδων. Η απόσταση μεταξύ αυτών των επιπέδων υπολογίζεται κατ' ελάχιστον στα 0.34nm, με την ιδανική τιμή να ορίζεται στα 0.3345nm (Εικόνα 3.2-1, graphite) [9,10,11].

Η χαρακτηριστική δομή που παρουσιάζουν είναι αποτέλεσμα του τανυσμού των ινών άνθρακα που λαμβάνει χώρα κατά το στάδιο της γραφίτοποίησης σε συνδυασμό με την αύξηση της θερμοκρασίας η οποία με τη σειρά της λαμβάνει χώρα κατά τη φάση της θερμικής επεξεργασίας των ινών. Ως αποτέλεσμα της εφαρμογής των ανωτέρω σταδίων, οι παραγόμενες ίνες χαρακτηρίζονται από αυξημένη δυσκαμψία κατά τη διεύθυνσή του άξονά τους [11].

Στην περίπτωση των ινών άνθρακα για την παραγωγή των οποίων ως πρώτη ύλη χρησιμοποιήθηκαν ίνες πολυακρυλονιτριλίου (PAN), τα τελικά προϊόντα εμφανίζουν μια ινοειδούς μορφής μικρο-δομή η οποία προσομοιάζει σε αυτή των πρόδρομων



ινών [12] εμφανίζοντας πανομοιότυπα γραφικά επίπεδα από τα οποία απουσιάζει η οιαδήποτε τάξη στις τρεις διαστάσεις του χώρου (Εικόνα 3.2-1).



Εικόνα 3.2-2. Απεικόνιση της δομής ινών άνθρακα (Πηγή: Σουπιώνης, 2017).

Η προηγουμένως αναλυθείσα μικρο-δομή προσδίδει (στις ίνες αυτού του τύπου) αξιοσημείωτη αντοχή κατά τις περιπτώσεις πρώιμης αστοχίας σε τάσεις εφελκυσμού. Έτσι οι ίνες άνθρακα στην κατασκευή των οποίων έχουν χρησιμοποιηθεί πρόδρομες ίνες πολυακρυλονιτριλίου μπορούν να υφίστανται υψηλές εφελκυστικές τάσεις χωρίς ωστόσο να κινδυνεύουν από αστοχίες που παρατηρούνται σε αντίστοιχα προϊόντα τα οποία παρήχθησαν βασιζόμενα σε διαφορετικής κατηγορίας πρόδρομα υλικά (λ.χ. μεσοφασική πίσσα).

Στον αντίποδα, οι ίνες άνθρακα με βάση την πίσσα αποτελούνται από προσανατολισμένα κατά την αξονική διεύθυνση γραφικά επίπεδα που χαρακτηρίζονται από διαφορετικές μικρο-δομές (Εικόνα 3.2-3) [13]. Η ανάπτυξη των εν λόγω τύπων ίνας πραγματοποιείται κατά την ινοποίηση της μεσοφάσης και παραμένουν αμετάβλητοι κατά τα στάδια της σταθεροποίησης και της θερμικής επεξεργασίας.



Εικόνα 3.2-3. Εγκάρσια μικρο-δομή ινών άνθρακα από πίσσα (Πηγή: Ruland, 1990).

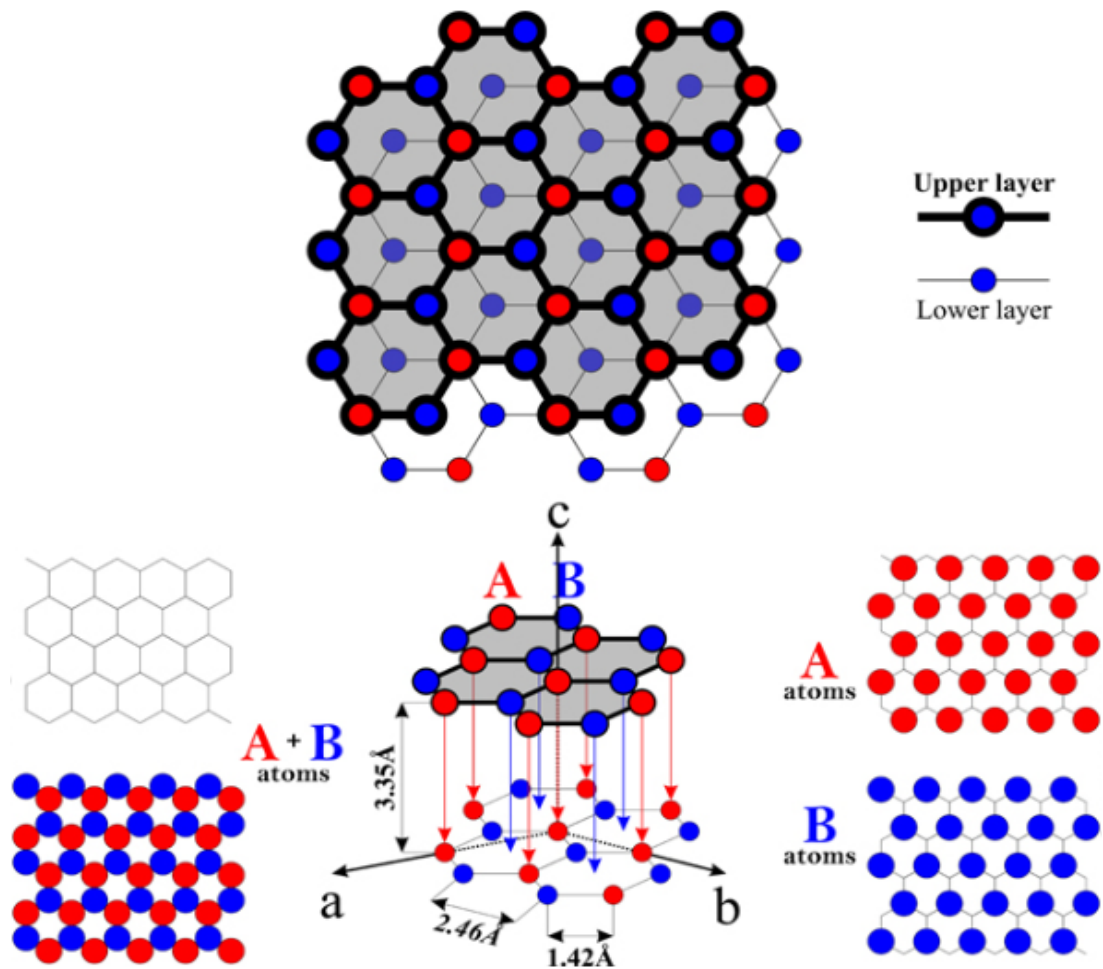
Μετά από κατάλληλες τροποποιήσεις στην διαδικασία εξώθησης της τηγμένης πίσσας δίνεται η δυνατότητα να επιτευχθούν διαφορετικές μορφές ίνας. Μέσω της μεταβολής της γεωμετρίας του οργάνου εξώθησης και την επιλογή υψηλής θερμοκρασίας κατά την ινοποίηση ευνοείται η δημιουργία ακτινικής μορφής μικρο-δομών. Αντίστοιχα η επιλογή μέσων θερμοκρασιών οδηγεί στο σχηματισμό τυχαίων μορφολογικά δομών στις τελικώς παραγόμενες ίνες. Η δομή των παραπάνω ινών τις καθιστά περισσότερο επιρρεπείς σε φθορές [10].

Ερευνητές μελέτησαν τη δομική μορφολογία των ινών άνθρακα PAN, οι οποίες έχουν υποστεί επεξεργασία στους 2.500°C και διαπίστωσαν ότι οι χαρακτηριστικές διαστάσεις των κρυσταλλικών στρωμάτων ( $L_c$ , ύψος κρυσταλλίτη και  $L_a$ , πλάτος κρυσταλλίτη) τείνουν να αυξανόμενες ως αποτέλεσμα της αύξησης της θερμοκρασίας επεξεργασίας [14]. Στο πλαίσιο της γραφίτοποίησης σταθεροποιημένων ινών με βάση το PAN η κρυσταλλικότητα μπορεί να επιτευχθεί μέσω δύο διαφορετικών εσωτερικών διεργασιών που λαμβάνουν χώρα κατά την παραγωγή των ινών. Είτε μέσω της συγχώνευσης των γειτονικών κρυσταλλιτών, είτε μέσω της ενσωμάτωσης με άμορφο άνθρακα. Τα γραφίτικά επίπεδα εντός των

κρυσταλλινών είναι δυνατό να μετατοπίζονται μέσω μετακίνησης ή και περιστροφής. Στην περίπτωση που το επιθυμητό είναι οι ίνες άνθρακα να επιδεικνύουν υψηλές τιμές σε ότι αφορά στο μέτρο ελαστικότητας και αντοχής, η διάταξη των ανωτέρω γραφικών επιπέδων θα πρέπει να γίνεται κατά την αξονική διεύθυνση της ίνας [15]. Οι πολύ μικρές διαστάσεις των κρυσταλλινών σε συνδυασμό με την άναρχη διάταξη, τις δομικές ατέλειες και τον τρόπο παραγωγής των ινών που αποτελεί την κύρια παράμετρο καθορισμού του προσανατολισμού των γραφικών επιπέδων και κατά συνέπεια του προσδιορισμού των χαρακτηριστικών μηχανικών μεγεθών (λ.χ. μέτρο ελαστικότητας) της τελικής ίνας, έχουν ως αποτέλεσμα την δημιουργία κενών αέρα (bubbles) τα οποία παρατηρούνται κατά μήκος των ινών (Εικόνα 3.2.-2). Τα εν λόγω κενά συνιστούν θέσεις συσσώρευσης τάσεων οι δράση των οποίων συντελεί ουσιαστικά στον περιορισμό της αντοχής των ινών επί των οποίων αυτές εντοπίζονται. Οι εν λόγω τοπικές κατασκευαστικές αστοχίες συνήθως δημιουργούνται κατά την παραγωγή των ινών [16].

### **3.3 Παραγωγή Ινών Άνθρακα**

Οι ίνες άνθρακα είναι υλικά πολυμερικής μορφής που προσομοιάζουν στον γραφίτη. Όπως αναλύθηκε σε προηγούμενη παράγραφο τα άτομα άνθρακα του γραφίτη είναι διατεταγμένα με την μορφή επιπέδων τα οποία περιλαμβάνουν εξαγωνικούς δακτυλίους [Εικόνα 3.3-1]. Οι ίνες άνθρακα αποτελούνται από γραφίτη τα φύλλα του οποίου συνίστανται από λωρίδες μεγάλου μήκους και μικρού πάχους. Αρκετές τέτοιες λωρίδες συγκεντρωμένες μαζί συμπεριλαμβάνονται εντός μιας ίνας άνθρακα. Οι ίνες αυτές χρησιμοποιούνται στην ενίσχυση και άλλων υλικών πολυμερικής φύσεως, όπως για παράδειγμα οι εποξειδικές ρητίνες. Τα ενισχυμένα με ίνες άνθρακα υλικά παρουσιάζουν σε κάποιες περιπτώσεις αντοχές εφάμιλλες των μετάλλων [17].



Εικόνα 3.3-1. Απεικόνιση κρυσταλλικής δομής του γραφίτη (Πηγή: <https://physicsopenlab.org/>).

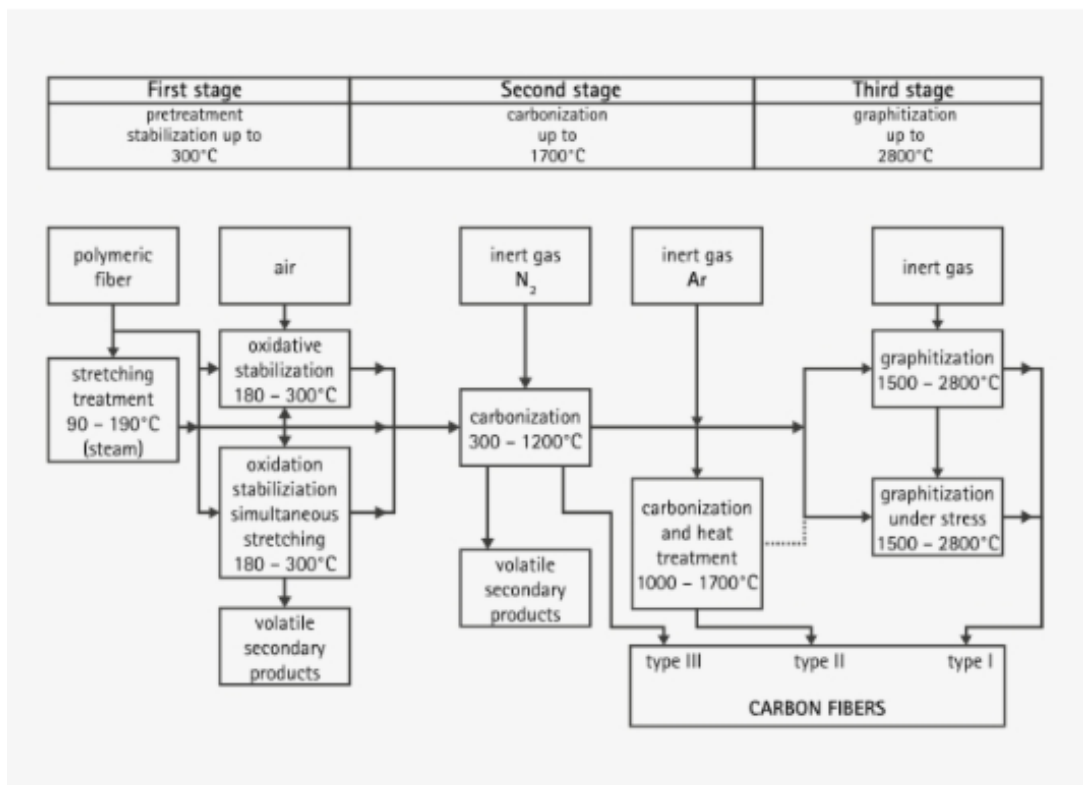
Παραγωγή ινών άνθρακα μπορεί πραγματοποιηθεί με βάση:

- Ίνες πολυακρυλονιτριλίου (PAN),
- Ίνες κυτταρίνης (Rayon),
- Πίσσας η οποία έχει αρχικώς υποβληθεί σε κατάλληλες διαδικασίες επεξεργασίας (νηματοποίηση)
- Πολύ(βινυλική αλκοόλη).
- Βουταδιένιο [6].

Σήμερα η παραγωγή ινών πραγματοποιείται κυρίως με βάση τις ίνες PAN. Η βασική διαδικασία παραγωγής ινών άνθρακα από ίνες PAN περιλαμβάνει τα εξής στάδια (Εικόνα 3.3.2) [6]:

- Οξειδωση / σταθεροποίηση,

- Ανθρακοποίηση
- Γραφίτοποίηση.



Εικόνα 3.3-2. Παραγωγική διαδικασία ινών άνθρακα (Πηγή: <https://www.scienceabc.com/> [23]).

### 3.3.1 1ο Στάδιο-Οξειδωση/Σταθεροποίηση

Η διαδικασία της οξειδωσης/σταθεροποίησης αποτελεί ένα ουσιαστικό βήμα για την παραγωγή ινών άνθρακα υψηλής ποιότητας καθώς επηρεάζει σε καθοριστικό βαθμό τις τελικές ιδιότητες των παραγόμενων ινών. Συνήθως το στάδιο αυτό αποτελείται από την θερμική επεξεργασία των ινών πολυακρυλονιτριλίου (ομοπολυμερούς ή συμπολυμερούς) σε αέρα ή (οξυγόνο) και σε θερμοκρασία έως 300°C με οξειδωση. Η επεξεργασία αυτή μπορεί να πραγματοποιηθεί σε δυο φάσεις. Η πρώτη φάση υλοποιείται έως τους 240°C (σε θερμοκρασίες χαμηλότερες από εκείνη στην οποία εμφανίζεται η εξώθερμη αντίδραση της κυκλοποίησης των ομάδων νιτριλίου). Εν συνεχεία η δεύτερη φάση για θερμοκρασίες περίπου έως τους 300°C, κατόπιν του οποίου επέρχεται η κυκλοποίηση των κυανομάδων, καθώς και ο

μετασχηματισμός του τριπλός δεσμός  $C\equiv N$  σε διπλό δεσμό  $C=N$  με τη χαρακτηριστική μορφολογική ανεμόσκαλας (ladder polymer) συνιστώμενης από δακτυλίου πυριδίνης [6,8].

Σε αυτό το σημείο λαμβάνουν χώρα οι πιο σημαντικές αντιδράσεις που γίνονται σε αυτό το στάδιο, ήτοι: **α) η αντίδραση κυκλοποίησης** των ομάδων νιτριλίου συνοδευόμενη (ως εξώθερμης φύσης αντίδραση) από έκλυση θερμότητας και **β) η αντίδραση αφυδρογόνωσης** μέσω της οποίας σχηματίζεται ο δεσμός  $C=C$  στον κορμό του μακρομορίου [6,8].

Υπό το ρόλο της κύριας αντίδρασης σταθεροποίησης, η κυκλοποίηση, επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες, όπως επί παραδείγματι οι φυσικές ιδιότητες του πολυμερούς, τα πρόσθετα και τα συμπολυμερή που ενδεχομένως συμμετέχουν στη δομή της αρχικής ίνας κ.α.. Η αντίδραση της κυκλοποίησης συνοδεύεται από ελάττωση του βάρους και αντιδράσεις σχάσεως δεσμών με δημιουργία μικρών ποσοτήτων υδροκυανίου, η εμφάνιση του οποίου οφείλεται σε απόσπαση ομάδων νιτριλίου που δεν έχουν κυκλοποιηθεί και αμμωνίας που προέρχεται από την απόσπαση αμινομάδων, οι οποίες βρίσκονται στις άκρες του κυκλοποιημένου μακρομορίου [6,9].

Κατά τη διάρκεια της οξειδωσης, λαμβάνει χώρα η ενσωμάτωση οξυγόνου στο μακρομόριο υποκαθιστώντας το υδρογόνο και σχηματίζοντας αλκυλικές ομάδες υδροϋπεροξειδίων, οι οποίες εν συνεχεία αποσυντίθενται σε καρβονύλια. Οι δεσμοί υδρογόνου, που σχηματίζονται μεταξύ των καρβονυλικών ομάδων και των δευτεροταγών αμινομάδων των γειτονικών μακρομορίων, συνεισφέρουν στη σταθεροποίηση της δομής του πολυμερούς. Επιπλέον, το οξυγόνο διεγείρει την αντίδραση κυκλοποίησης σε χαμηλότερες θερμοκρασίες, χωρίς όμως να συμπεριφέρεται ως καταλύτης της αντίδρασης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της εξώθερμης αντίδρασης. Οι παραπάνω αντιδράσεις οδηγούν στο σχηματισμό τμημάτων μικρού μήκους που έχουν τη μορφή ανεμόσκαλας μέσα στο μακρομόριο.

Σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες από 250°C λαμβάνουν χώρα αντιδράσεις σχάσης, κυρίως διαρροή μη συμπυκνωμένων μακρομορίων [19].

Κατά τη διάρκεια της οξειδωσης/σταθεροποίησης παρατηρείται ισχυρό εξώθερμο (6 - 7 Kcal/mol μονομερούς AN) με έντονη έκλυση θερμότητας, ιδιαίτερα σε θερμοκρασία 200 – 400°C, με κίνδυνο οι ομάδες κυανίου να γίνουν εκρηκτικές και η ίνα να καεί. Για την αποφυγή τέτοιου τύπου φαινομένων θα πρέπει να διασφαλίζεται η παραμονή της ίνας σε ήπιες συνθήκες, περίπου 200°C για αρκετό χρόνο, ώστε να σταθεροποιηθεί και να αποκτήσει χαρακτηριστικό μαύρο χρώμα και ανθεκτικότητα στη φλόγα. Θερμοκρασίες χαμηλότερες των 200°C θεωρούνται ακατάλληλες διότι απαιτούν μεγαλύτερους χρόνους οξειδωσης, ενώ αντίστοιχα θερμοκρασίες υψηλότερες των 300°C οδηγούν σε έντονες εξώθερμες αντιδράσεις με αποτέλεσμα τη σημαντική μείωση του βάρους της ίνας. Έχει επίσης προταθεί η εισαγωγή στη σύνθεση της αρχικής ίνας των αμμωνιακών αλάτων  $\text{NH}_4\text{Br}$ ,  $\text{NH}_4\text{I}$ , ή  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  ή υδραζίνης. Η χρήση των εν λόγω αντιδραστηρίων παρέχει τη δυνατότητα παραγωγής ινών άνθρακα που χαρακτηρίζονται από πολύ καλές μηχανικές ιδιότητες ακόμα και από χαμηλής τάξης PAN, ενώ ακόμα καλύτερα αποτελέσματα προκύπτουν από τον συνδυασμό της υδραζίνης με  $\text{FeCl}_2$  και  $\text{NH}_4\text{Cl}$ . Ο ρυθμός σταθεροποίησης αυξάνει σημαντικά με μια διαδικασία οξειδωσης σε υγρή φάση παρουσία υπερμαγγανικού αμμωνίου ή φθοριούχου βορίου. Προκαταρκτική διαβροχή της ίνας σε διαλύματα οξέων (θειικού, νιτρικού, οξικού και φορμικού) αυξάνει το ρυθμό κυκλοποίησης και την αντοχή της τελικώς παραγόμενης ίνας άνθρακα, ενώ παράλληλα μειώνει την έκλυση αερίων, τα οποία είναι διαβρωτικά, όπως το τοξικό  $\text{HCN}$ . Τέλος, ενώσεις φωσφόρου και βορίου προσδίνουν στην ίνα αυξημένη σταθεροποίηση κατά την οξειδωση καθώς και υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα. Κομβικός και ο ρόλος του οξυγόνου, το οποίο αφενός προκαλεί την έναρξη της αντίδρασης σε χαμηλές θερμοκρασίες μειώνοντας έτσι τον κίνδυνο του εξώθερμου φαινομένου και αφετέρου επαναπροσδιορίζει την αντίδραση, βοηθώντας με αυτόν τον τρόπο στη σταθεροποίηση της δομής του πολυμερούς [9].

### Μέθοδοι οξειδωσης / σταθεροποίησης

Μεγάλη γκάμα οξειδωτικών μέσων έχουν προταθεί για τη διεργασία σταθεροποίησης τόσο σε υγρή όσο και σε αέρια φάση [9].

- Αέρια μέσα οξειδωσης: ατμοσφαιρικός αέρας, οξυγόνο, μίγμα όζοντος – οξυγόνου – αζώτου, αζωτούχος ατμόσφαιρα π.χ. NO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O, ατμόσφαιρα οξυγόνου – βρωμίου, θειούχος ατμόσφαιρα π.χ. SO<sub>2</sub>, SO<sub>3</sub>.
- Υγρά μέσα οξειδωσης: οξειδωτικά υγρά π.χ. νιτροβενζόλιο, διαλύματα οξέων κατά Lewis π.χ. διφαινυλοξειδίο με SnCl<sub>4</sub>, λουτρό ελαίου - σιλικόνης μέσα στο οποίο μπορεί να διοχετεύεται ένα αέριο που περιέχει οξυγόνο, λουτρά μετάλλων όπως (Cu, Fe, Ni) με επακόλουθη οξείδωση στον αέρα.

Στην πράξη η σταθεροποίηση των ινών PAN γίνεται κατά κόρον με οξείδωση σε ατμοσφαιρικό αέρα (αντίδραση με οξυγόνο). Ταυτόχρονα επιδιώκεται η παρεμπόδιση της συστολής των ινών αυτών ή και η κατάλληλη επιμήκυνσή τους έτσι ώστε να αυξηθεί ο προσανατολισμός των μακρομορίων [9].

Ενδεχόμενη προεπεξεργασία των ινών με διχλωριούχο χαλκό (CuCl<sub>2</sub>) μπορεί να βελτιώσει την ποιότητα της τελικής ίνας. Επεξεργασία με βενζοϊκό οξύ, βελτιώνει το μέτρο ελαστικότητας της ίνας άνθρακα, ενώ προεπεξεργασία των ινών PAN με υπερμαγγανικό κάλλιο (KMnO<sub>4</sub>) μπορεί να μειώσει το χρόνο σταθεροποίησης και να βελτιώσει την αντοχή εφελκυσμού. Με την ίδια επεξεργασία αυξάνονται οι επιθυμητές ιδιότητες των γραφικών ινών, όπως η πυκνότητα και ο προσανατολισμός τους, ενώ σημαντική είναι η μείωση της ηλεκτρικής τους αντίστασης κατά 20 - 40% [9].

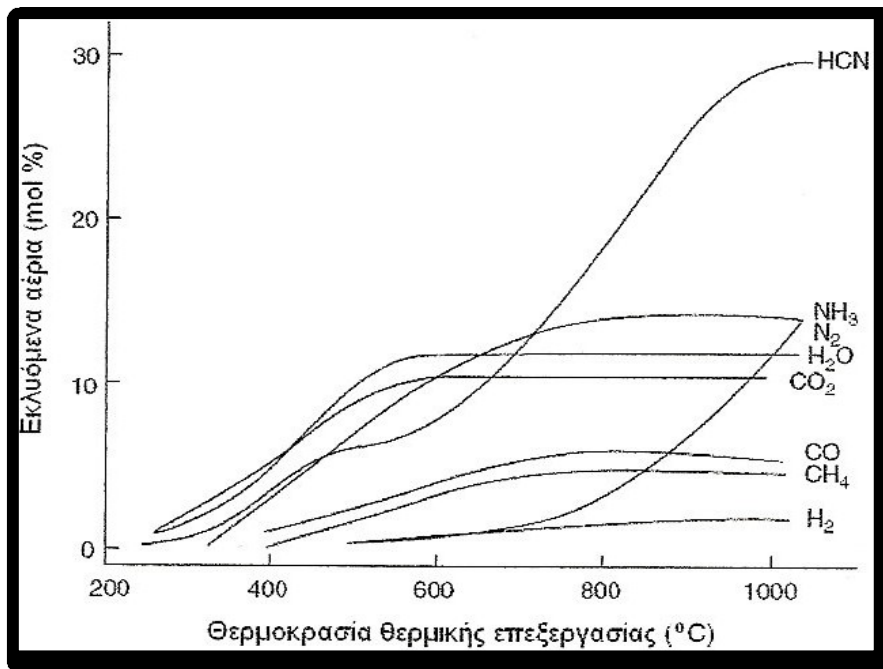
Ο σχηματισμός της δομής τύπου ανεμόσκαλας στο πολυμερές, είναι απαραίτητος ώστε να γίνει η ίνα άτηκτη. Έχει σαν αποτέλεσμα την συστολή των ινιδίων, η οποία εξαρτάται τόσο από τη θερμική επεξεργασία όσο και από τις ιδιότητες των ινών PAN (σύνθεση και έκταση της τάσης της ίνας που ασκήθηκε κατά την ινοποίηση). Όταν οι ίνες θερμαίνονται σε θερμοκρασία πάνω από τη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης (T<sub>g</sub> ~ 80°C) και ταυτόχρονα χαμηλότερη από αυτή της κυκλοποίησης,



συστέλλονται εξαιτίας της χαλάρωσης των πολυμερικών αλυσίδων. Βάσει μιας άλλης άποψης η αυξημένη συστολή κατά την οξειδωση οφείλεται στο σχηματισμό 'κόμπων' στη δομή της ανεμόσκαλας. Οξειδωση με ταυτόχρονο τανυσμό μπορεί να οδηγήσει σε ελαχιστοποίηση ή ακόμα και την εξάλειψη της συστολής και σε άλλες περιπτώσεις σε συνολική αύξηση του μήκους της ίνας, όπως έχει ήδη αναφερθεί. Η χρήση κατάλληλου βάρους κατά τη διάρκεια της οξειδωσης, με σκοπό την ελαχιστοποίηση της συστολής της ίνας, μπορεί να βελτιώσει σημαντικά την αντοχή εφελκυσμού και το μέτρο ελαστικότητας της. Η τιμή του φορτίου θα πρέπει να διασφαλίζει την μη φθορά της ίνας λόγω υπερβολικού βάρους. Τυπικές τιμές κυμαίνονται μεταξύ 0.5 και 1 kg [6, 9].

### 3.3.2 2<sup>ο</sup> Στάδιο- Ανθρακοποίηση

Η ανθρακοποίηση γίνεται σε αδρανή ατμόσφαιρα συνήθως αζώτου ή και άλλων αερίων (π.χ. H<sub>2</sub>, αργού, υδρατμών, ατμών HCl, σε κενό) και σε θερμοκρασίες μεταξύ 300°C έως και 1600°C. Σε αυτές τις συνθήκες, το πολυμερές πυρολύεται και μετατρέπεται σε άνθρακα με δομή που προσομοιάζει σε εκείνη του γραφίτη. Οι συνθήκες της ανθρακοποίησης και κυρίως η θερμοκρασία επιλέγονται λαμβάνοντας υπόψη τις επιθυμητές ιδιότητες του τελικού προϊόντος. Σε χαμηλές θερμοκρασίες πυρόλυσης συνεχίζονται οι αντιδράσεις κυκλοποίησης και αφυδρογόνωσης. Μέχρι περίπου τους 500°C, από τις οξειδωμένες ίνες PAN παράγονται κυρίως NH<sub>3</sub> και HCN, με το τελευταίο να αποτελεί παράγωγο των μη κυκλοποιημένων μερών των ινών, ενώ παράλληλα αρχίζει ο σχηματισμός H<sub>2</sub>. Στους 700°C σχηματίζεται περαιτέρω H<sub>2</sub> και HCN αμφότερα εκ της διαμοριακής συμπύκνωσης αρωματικών δομών. Σε θερμοκρασίες άνω των 800°C σχηματίζεται N<sub>2</sub>, το οποίο προέρχεται από ετεροκυκλικές ενώσεις. Επίσης, κατά τη διάρκεια της ανθρακοποίησης εκλύονται H<sub>2</sub>O, CO και CO<sub>2</sub> όπως και μικρές ποσότητες CH<sub>4</sub> [18,19], (Εικόνα 3.3.2-1).



Εικόνα 3.3.2-1. Εκλυόμενα αέρια κατά την πυρόλυση (Πηγή: Allcock et al., 2003.)

Ο ρυθμός θέρμανσης και η χρονική διάρκεια της διαδικασίας ανθρακοποίησης ποικίλουν ανάλογα με τον τύπο ινών που χρησιμοποιούνται ως πρόδρομα υλικά και την προηγουμένως εφαρμοσθείσα διαδικασία σταθεροποίησης. Σε αυτή τη φάση όλα τα ετεροάτομα αποσπώνται και αποβάλλονται με αποτέλεσμα η περιεκτικότητα της τελικής ίνας σε άνθρακα υπερβαίνει το 99%. Η ανωτέρω διαδικασία, συνοδεύεται από τον περιορισμό του βάρους του άνθρακα, καθώς κατά την απομάκρυνση των ανωτέρω (ετεροατόμων) σχηματίζονται και εκλύονται (υπό τη μορφή αερίων) πτητικές ενώσεις όπως HCN, CO<sub>2</sub>, CO και CH<sub>4</sub>. Σύμφωνα με την βιβλιογραφία, μόνο το 50% του αρχικού βάρους των πρόδρομων υλικών (ίνες) καταλήγει σε ίνα άνθρακα (η περιεκτικότητα της ίνας PAN σε άνθρακα είναι 68%). Για την επίτευξη της ανθρακοποίησης απαιτούνται μικροί χρόνοι σε σχέση με τη σταθεροποίηση, για την οποία χρειάζεται χαρακτηριστικά περισσότερος χρόνος ο οποίος συνήθως κυμαίνεται μεταξύ 4-24 ωρών. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι μια διαδικασία συνεχούς παραγωγής με τη θερμοκρασία ορισμένη στους 1400°C ο απαιτούμενος χρόνος είναι περίπου 30 λεπτά [9,19].

Για την παραγωγή ινών άνθρακα υψηλής αντοχής επιλέγονται θερμοκρασίες που ανέρχονται μέχρι και 1300°C. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι στην περίπτωση επιλογής μεγαλύτερων θερμοκρασιών έχει διαπιστωθεί μείωση της αντοχής των τελικών ινών. Λαμβάνοντας υπόψη το βαθμό τανυσμού των ινών κατά το στάδιο της σταθεροποίησης, πραγματοποιείται ελεγχόμενη συρρίκνωση ή συμπεριλαμβάνεται ένα επιπλέον στάδιο τανυσμού κατά την ανθρακοποίηση. Η ανθρακοποίηση μέχρι τους 1000°C έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή ινών άνθρακα τύπου A με χαμηλό μέτρο ελαστικότητας και χαμηλή αντοχή σε εφελκυστικές τάσεις. Αντίστοιχα από την ανθρακοποίηση μέχρι τους 1600°C αποκτώνται ίνες τύπου II οι οποίες διαθέτουν υψηλή αντοχή σε εφελκυσμό και παράλληλα μέσο μέτρο ελαστικότητας. Γενικά, το στάδιο αυτό χαρακτηρίζεται από την αφαίρεση ετεροατόμων από τα μακρομόρια και την ανάπτυξη δομής που προσομοιάζει με αυτή του γραφίτη [20].

Καθόλη τη διάρκεια της διεργασίας της ανθρακοποίησης οι πλήρως σταθεροποιημένες ίνες υφίστανται συρρίκνωση η οποία φτάνει έως και 10% σε σχέση με το αρχικό μήκος αυτής. Αν στο πλαίσιο της ως άνω διαδικασίας προστεθεί το προαναφερθέν στάδιο τανυσμού (επιπλέον τανυσμός κατά την ανθρακοποίηση), αποφεύγεται η επερχόμενη συρρίκνωση με αποτέλεσμα οι μηχανικές ιδιότητες της τελικής ίνας να βελτιώνονται [21].

### 3.3.3 3<sup>ο</sup> Στάδιο- Γραφίτοποίηση

Η γραφίτοποίηση λαμβάνει χώρα αποκλειστικά προκειμένου για την παραγωγή ινών άνθρακα υψηλού μέτρου ελαστικότητας. Η θερμική επεξεργασία πραγματοποιείται σε θερμοκρασίες οι οποίες ανέρχονται έως και τους 3000°C (η γραφίτοποίηση στους 2500°C) σε συνθήκες κενού ή υπό την παρουσία αδρανούς αερίου. Συνηθέστερο σε χρήση (σε αυτές τις διεργασίες) αδρανές αέριο είναι το αργό, εξαιτίας της ιδιάζουσας συμπεριφοράς του αζώτου {το άζωτο πάνω από τους 2500°C παρουσία άνθρακα σχηματίζει δυκυάνιο (CN)<sub>2</sub>}. Συχνά η γραφίτική επεξεργασία γίνεται υπό κενό. Η γραφίτοποίηση σε θερμοκρασίες πάνω από 2500°C δίνει ίνες τύπου I με πολύ υψηλό μέτρο ελαστικότητας. Παράλληλα με αυτή τη διαδικασία περιορίζεται η αντοχή

εφελκυσμού των ινών. Περαιτέρω αύξηση του μέτρου ελαστικότητας δύναται να επιτευχθεί μόνο κατόπιν επιπλέον τανυσμού ή έκτασης των ινών άνθρακα, οι οποίες σε αυτή τη θερμοκρασιακή περιοχή μπορούν να υποστούν πλαστική μορφοποίηση (κυρίως για ίνες άνθρακα από πρόδρομο υλικό την κυτταρίνη). Οι γραφιοποιημένες ίνες άνθρακα που έχουν ονομάζονται και γραφιτικές ίνες (μόνο η δομή τους όμως προσομοιάζει προς τη δομή του γραφίτη). Η χρονική διάρκεια του σταδίου γραφιοποίησης είναι μικρότερη των υπολοίπων δύο σταδίων της παραγωγικής διαδικασίας των ινών [6,9,19].

Ένα εκ των βασικών πλεονεκτημάτων των ινών άνθρακα με βάση το πολυακριλονιτρίλιο είναι η υψηλή επιμήκυνση θραύσεως που παρουσιάζουν ( $\epsilon \approx 3\%$ , για  $E=220 \text{ kN/mm}^2$ ) η οποία είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη των κυτταρινικών ινών (μέγιστο  $\epsilon=0.8\%$ ). Το εν λόγω χαρακτηριστικό συμβάλει σημαντικά στην αντοχή κρούσεως του ενισχυμένου πολυμερούς με ίνες άνθρακα. Επιπλέον χαρακτηριστικό των παραπάνω ινών είναι το αρκετά υψηλό μέτρο ελαστικότητας ( $>450 \text{ kN/mm}^2$ ) και η αρκετά υψηλή αντοχή εφελκυσμού ( $>3 \text{ kN/mm}^2$ ) χωρίς να απαιτείται επιμήκυνση των ινών κατά την ανθρακοποίηση (περίπτωση ινών άνθρακα από κυτταρίνη) [9].

### 3.4 Κατηγορίες ινών άνθρακα

Η κατάταξη των ινών άνθρακα μπορεί να γίνει με βάση ένα εκ των τους ακόλουθων χαρακτηριστικών τους [6,9,19,22]:

#### 3.4.1 Κατάταξη βάσει της τελικής θερμοκρασίας θερμικής επεξεργασίας

Με βάση την τελική θερμοκρασία στην οποία υλοποιείται η θερμική επεξεργασία κατά την παραγωγή τους, οι ίνες κατηγοριοποιούνται ως εξής:

- **Τύπου I:** πρόκειται για ίνες υψηλής θερμικής επεξεργασίας ίνες (HTT), με τις θερμοκρασίες της τελικής θερμικής τους επεξεργασίας να ξεπερνούν τους  $2000^\circ\text{C}$ , συσχετιζόμενες με ίνες τύπου υψηλού συντελεστή.

- **Τύπου II:** στην συγκεκριμένη κατηγορία συμπεριλαμβάνονται ίνες ενδιάμεσης θερμικής επεξεργασίας (IHT), κατά την κατασκευή των οποίων η τελική θερμική επεξεργασία πραγματοποιείται σε θερμοκρασίες που ανέρχονται σε περίπου  $\geq 1500^{\circ}\text{C}$ . Οι τελικές ίνες είναι αντίστοιχες των ινών τύπου υψηλής αντοχής.
- **Τύπου III:** ίνες άνθρακα χαμηλής θερμικής επεξεργασίας, η παραγωγή των οποίων λαμβάνει χώρα σε τελικές θερμοκρασίες θερμικής επεξεργασίας χαμηλότερες των  $1000^{\circ}\text{C}$ . Τα παράγωγα υλικά της κατηγορίας αυτής χαρακτηρίζονται εν γένει από χαμηλούς συντελεστές και χαμηλές αντοχές.

Type	Name	Treatment Temperature	Modulus/Strength
Type-I	High heat treated (HHT)	above 2000 °C	High-modulus
Type-II	Intermediate heat treated (IHT)	above 1500 °C	High-strength
Type-III	Low heat treated	1000 °C	Low modulus and low strength materials

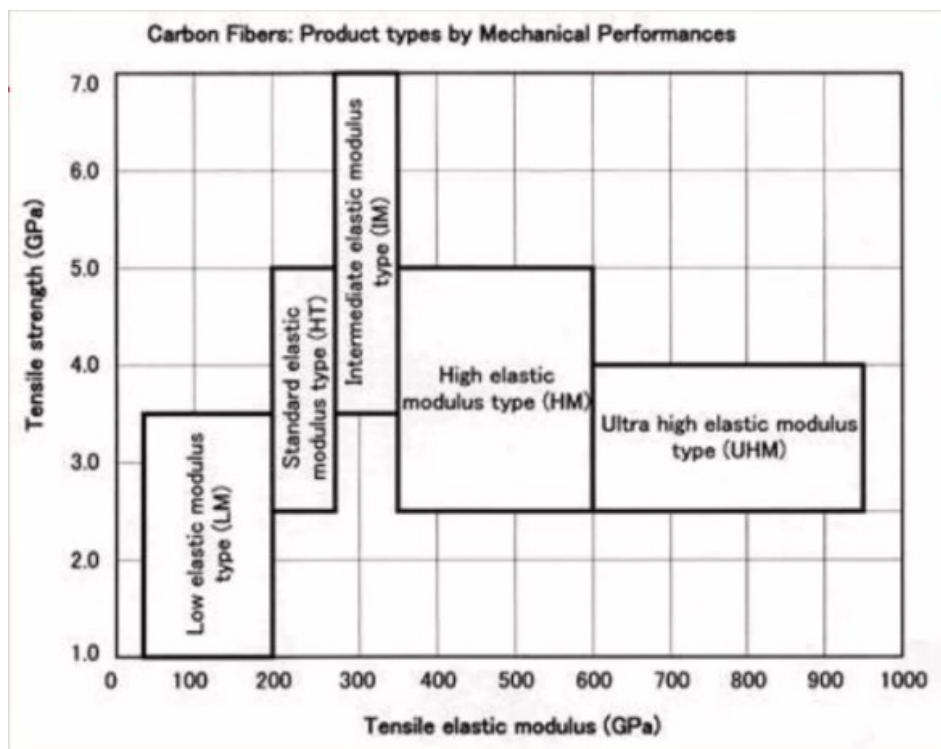
Εικόνα 3.4.1-1. Κατάταξη ινών άνθρακα βάσει τελικής θερμοκρασίας θερμικής επεξεργασίας (Πηγή: <https://www.slideshare.net/> ).

### 3.4.2 Κατάταξη βάσει των ιδιοτήτων των ινών (άνθρακα)

Λαμβάνοντας υπόψη τις ιδιότητες των ινών και ειδικότερα το μέτρο ελαστικότητας και την αντοχή εφελκυσμού, οι ίνες άνθρακα (Εικόνα 3.4.2-1) ταξινομούνται σε:

- **Ίνες Εξαιρετικά Υψηλού Μέτρου ελαστικότητας (Ultra High Modulus, τύπου UHM)** με τιμές μέτρου ελαστικότητας  $>450\text{GPa}$ .
- **Ίνες Υψηλού Μέτρου Ελαστικότητας (High Modulus, τύπου HM)** με τιμές σε ότι αφορά στο μέτρο ελαστικότητας της τελικής ίνας οι οποίες κυμαίνονται μεταξύ  $350\text{-}450\text{GPa}$ .

- Ίνες Ενδιάμεσου μέτρου Ελαστικότητας (Intermediate Modulus, τύπου IM) οι χαρακτηριστικές τιμές του μέτρου ελαστικότητας αυτής της κατηγορίας κυμαίνονται μεταξύ 200-350GPa.
- Ίνες Χαμηλού Μέτρου ελαστικότητας αλλά Υψηλής εφελκυστικής αντοχής (High Tensile, τύπου HT) με το μέτρο ελαστικότητας να παίρνει τιμές μικρότερες των 100GPa και τιμές αντοχής σε εφελκυσμό μεγαλύτερες των 3.0GPa.
- Ίνες Εξαιρετικά υψηλής εφελκυστικής αντοχής (Super High Tensile, τύπου SHT) με την αντοχή εφελκυσμού των εν λόγω ινών να υπερβαίνει τα 4.5GPa.

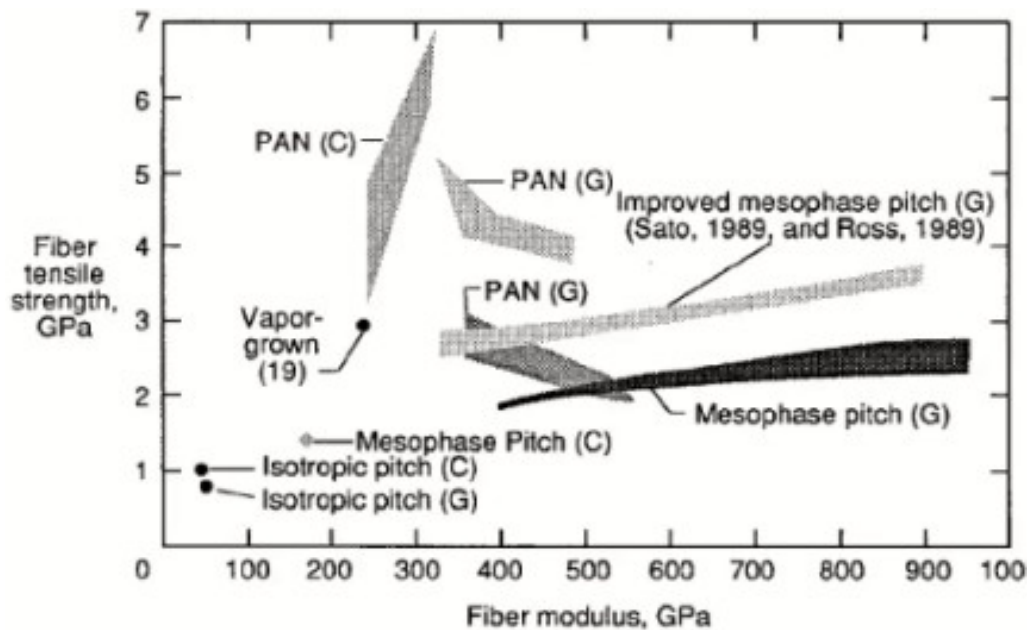


Εικόνα 3.4.2-1. Κατάταξη ινών άνθρακα βάσει μέτρου ελαστικότητας και αντοχής σε εφελκυσμό (Πηγή: <https://www.slideshare.net/>).

### 3.4.3 Κατάταξη βάσει των πρόδρομων υλικών κατασκευής τους

Ως προς το πρόδρομο υλικό κατασκευής τους, οι ίνες άνθρακα διακρίνονται στις κάτωθι:

- Ίνες άνθρακα με πρόδρομο υλικό με βάση το πολυακριλονιτρίλιο (PAN)
- Ίνες άνθρακα με πρόδρομο υλικό με βάση την πίσσα (Pitch)
- Ίνες άνθρακα πρόδρομου υλικού που βασίζεται στη μεσοφασική πίσσα (Mesophase Pitch)
- Ίνες άνθρακα βασισμένες σε πρόδρομα υλικά ισοτροπικής πίσσας
- Ίνες άνθρακα με βάση την κυτταρίνη (Rayon)
- Ίνες άνθρακα που αναπτύσσονται σε αέρια φάση (Gas phase grown carbon fibers).



Εικόνα 3.4.3-1. Κατάταξη ινών άνθρακα βάσει του πρόδρομου υλικού κατασκευής τους (Πηγή: <https://www.slideshare.net/> ).

#### 3.4.4 Κατάταξη βάσει της παραγωγικής τους διαδικασίας

Οι ίνες άνθρακα μπορούν να παραχθούν με μία γκάμα διαφορετικών μεθόδων. Έτσι με βάση τη διαδικασία παραγωγής διαχωρίζονται σε:

- **Ίνες υψηλών θερμοκρασιών τύπου HHT (High-heat treated):** Θερμικά επεξεργασμένες μετά την ανθρακοποίηση σε θερμοκρασίες άνω των 2300K με σκοπό τη βελτιστοποίηση του προσανατολισμού της ίνας.
- **Ίνες άνθρακα ενδιάμεσων θερμοκρασιών τύπου IHT (Intermediate-heat treated):** Σε συνέχεια της ανθρακοποίησης υποβάλλονται σε θερμική επεξεργασία τελικής θερμοκρασίας άνω των 1550K, αλλά σε θερμοκρασίες χαμηλότερες από 2300K. Σκοπός της διαδικασίας αυτής είναι η ελαφρά βελτίωση του μέτρου ελαστικότητας διατηρώντας κατά το μέγιστο δυνατό σταθερή την αντοχή των τελικών ινών σε εφελκυσμό.
- **Ίνες άνθρακα χαμηλών θερμοκρασιών τύπου LHT (Low-heat treated):** Οι τελικές ίνες της κατηγορίας αυτής είναι ανθρακοποιημένες σε θερμοκρασίες που ανέρχονται έως τους 1500K ώστε να ολοκληρωθεί η αφυδρογόνωση αποτρέποντας το σχηματισμό κρυσταλλικών (lattice) δομών διασφαλίζοντας με αυτόν τον τρόπο υψηλές τιμές αντοχής. Η χρήση των ινών αυτού του τύπου είναι ιδιαίτερως διαδεδομένη σε εφαρμογές ενίσχυσης υλικών πολυμερικής μήτρας.
- **Ίνες οργανικών πρόδρομων υλικών:** Πρόκειται για ίνες που έχουν αποκτηθεί κατόπιν σταθεροποίησης με αποτέλεσμα να είναι πλέον άφλεκτες και άτηκτες. Χρησιμοποιούνται εκτεταμένα στην παραγωγή ινών άνθρακα.
- **Ενεργός ινώδης άνθρακας (Fibrous activated carbon):** Διατίθεται σε ποικίλες μορφές (ίνες, νήματα, υφάσματα). Οι ιδιότητες του δεν τον καθιστούν κατάλληλο για εφαρμογές υψηλών μηχανικών απαιτήσεων.

#### 3.4.5 Κατάταξη βάσει της γενικής κατάταξης και του χαρακτηρισμού των ινών

Η κατηγοριοποίηση βάσει των γενικών χαρακτηριστικών κατατάσσει τις ίνες σε:

- **Ίνες άνθρακα:** Ινίδια ή νημάτια μη γραφίτικού άνθρακα. Παρασκευάζονται κυρίως από οργανικές πρόδρομες ίνες, οι οποίες έχουν



καταστεί μέσω διαδικασιών σταθεροποίησης, οξείδωσης και τέλος ανθρακοποίησης, στις κατάλληλες συνθήκες, άτηκτες και άφλεκτες.

- **Ίνες γραφίτη:** Αποτελούνται από ινίδια και περιέχουν μερικώς γραφίτοποιημένο άνθρακα. Η παραγωγή τους περιλαμβάνει την ανθρακοποίηση και εν συνεχεία τη γραφίτοποίηση και την επιπλέον γραφίτοποίηση που ακολουθεί την ανθρακοποίηση σε υψηλότερες θερμοκρασίες.
- **Μη συνεχής ίνες άνθρακα (μικρού μήκους):** Μικρού μήκους ίνες (felt). Κυρίως ίνες άνθρακα που παρασκευάζονται με ανθρακοποίηση οργανικών ινών ή ίνες άνθρακα μικρού μήκους.
- **Υφάσματα:** Εδώ ανήκουν τα υφάσματα ινών άνθρακα.

#### 3.4.6 Κατάταξη βάσει των μηχανικών ιδιοτήτων

Με σημείο αναφοράς τις μηχανικές τους ιδιότητες οι ίνες άνθρακα κατατάσσονται σε:

- **Κανονικός τύπος-Normal-Type** (N-Type ή A-Type)
- **Τύπος υψηλής αντοχής εφελκυσμού-High Tensile** (HT-Type ή Type-II),  
( $\rho = 1.7 \text{ g/cm}^3$ ,  $\sigma > 3\text{GPa}$  και  $E = 200 - 250\text{GPa}$ )
- **Τύπος υψηλού μέτρου ελαστικότητας-High Modulus** (HM-Type ή Type-I),  
( $\rho = 1.85 \text{ g/cm}^3$ ,  $\sigma = 2000 - 2500\text{MPa}$  και  $E = 300 - 700\text{GPa}$ )
- **Τύπος υψηλού μέτρου ελαστικότητας και υψηλής αντοχής εφελκυσμού-High Modulus High Tensile** (HMT), ( $\sigma = 1700 - 2500\text{MPa}$  και  $E = 400 - 450\text{GPa}$ )
- **Τύπος χαμηλού μέτρου ελαστικότητας-Low Modulus** (LM-Type), ( $\sigma = 500\text{MPa}$  και  $E = 50 - 150\text{GPa}$ )
- **HT-υψηλής αντοχής εφελκυσμού:** Πολύ δυνατές και με μεγάλες ανοχές σε επιμηκύνσεις.
- **IM-ενδιάμεσου μέτρου ελαστικότητας:** Ίνες με υψηλό μέτρο ελαστικότητας και ένα αξιοσημείωτο ποσοστό επιμήκυνσης.

- **HM-υψηλού μέτρου ελαστικότητας:** Ίνες υψηλού μέτρου ελαστικότητας και σημαντικά περιορισμένη αντοχή σε επιμηκύνσεις.

### 3.5 Ιδιότητες ινών άνθρακα

Μεταξύ άλλων παραμέτρων, η θερμοκρασία επεξεργασίας κατά το στάδιο της ανθρακοποίησης επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τις μηχανικές ιδιότητες των ινών άνθρακα. Σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση των τελικών ιδιοτήτων κατέχει το πρόδρομο υλικό που επιλέγεται και αξιοποιείται για την κατασκευή των ινών.

Έτσι για τις ίνες που χρησιμοποιούν ως βάση το πολυακριλονιτρίλιο έχει, κατόπιν διεξαγωγής σχετικών μελετών, διαπιστωθεί μεγιστοποίηση της εφελκυστικής αντοχής για τιμές θερμοκρασίας έως την τελική θερμοκρασία επεξεργασίας που ανέρχεται περί τους 1500°C. Αν η συγκεκριμένη τιμή θερμοκρασίας ξεπεραστεί κατά τη διάρκεια της παραγωγικής διαδικασίας, οι εφελκυστικές αντοχές των υπό διαμόρφωση ινών υφίστανται υποβάθμιση.

Αντίστοιχα, η παράμετρος η μεταβολή της οποίας επιδρά ενισχυτικά στην εφελκυστική αντοχή των ινών με πρόδρομο υλικό την πίσσα, είναι η θερμοκρασία της ανθρακοποίησης. Συγκεκριμένα η εφελκυστική αντοχή στις πισσώδεις ίνες αυξάνεται σε συνάρτηση με την θερμοκρασία στην οποία λαμβάνει χώρα η άνω διαδικασία (ανθρακοποίηση), παραμένοντας ωστόσο σε μικρότερες τιμές συγκριτικά με αυτές που απαντώνται συνήθως στις πολυακρυλονιτριλικές ίνες [24,25,26].

Σε ότι αφορά στο μέτρο ελαστικότητας των ινών άνθρακα, όπως μπορεί να διαπιστωθεί βελτιώνεται ανεξαρτήτως από το πρόδρομο υλικό κατασκευής τους [24,25,26].

Η πρόοδος των τελευταίων δεκαετιών επί των παραγωγικών διαδικασιών κατασκευής ανθρακο-ινών, σε συνδυασμό με τα ερευνητικά επιτεύγματα της περιόδου αυτής στην επιστήμη και την τεχνολογία των πρώτων υλών που χρησιμοποιούνται ως πρόδρομες στην βιομηχανία ινών, οδήγησαν σε σημαντικά συμπεράσματα ως προς τον τρόπο, το βαθμό και τα ακριβή χαρακτηριστικά της

επίδρασης που έχει η διαδικασία που εφαρμόζεται στην παραγωγή, στις χαρακτηριστικές ιδιότητες των τελικώς παραγόμενων ινών. Η επισταμένη έρευνα των επιμέρους σταδίων και παραμέτρων της παραγωγικής διαδικασίας, οδήγησε στην καλύτερη κατανόηση των χημικών διεργασιών. Κατέστη έτσι εφικτή η βελτιστοποίηση των δομικών χαρακτηριστικών των πρόδρομων ινών, με ότι αυτό συνεπάγεται ως προς τις μηχανικές αντοχές αυτών και κατεπέκταση των παραγόμενων εξ' αυτών ινών (ισχύει για κάποιες εκ των ινών πίσσας) [28].

Πέραν των εξαιρετικών μηχανικών ιδιοτήτων τους οι ίνες του συγκεκριμένου τύπου χαρακτηρίζονται επίσης από αξιοσημείωτες ηλεκτρικές αλλά και θερμικές ιδιότητες, χημική αδράνεια, μεγάλη αντοχή έναντι στη διάβρωση κ.α. [27,28].

### **3.6 Μορφές ινών άνθρακα**

Η χρήση των ινών, όπως ήδη αναλύθηκε σε προηγούμενες παραγράφους, είναι αρκετά διαδεδομένη στη βιομηχανία των συνθέτων υλικών.

Επιλέγονται κυρίως σε εφαρμογές που αποσκοπούν στην ενίσχυση και βελτιστοποίηση των μηχανικών ιδιοτήτων των πλαστικών, μεταλλικών και κεραμικών υλικών. Όλα τα είδη ινών, πλην των ινών βορίου, παράγονται με τη μορφή νημάτων μικρής διατομής (λεπτά). Αυτά στη συνέχεια είναι δυνατό να μετατραπούν σε ταινίες μιας διεύθυνσης, σωληνοειδείς πλεξούδες, ποικίλων μορφών υφάσματα (υφαντά, πλεκτά), χαρτιών και φαθών ή κομμένα σε μικρά κομμάτια. Η διαπότισή τους με ρητινούχα διαλύματα έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή μιας ακόμη μορφής, αυτής των προεμποτισμένων ινών γνωστών και ως pre-preg.

#### **3.6.1 Ίνες άνθρακα μονής διεύθυνσης**

Διατίθενται σε ρολά (Εικόνα 3.6.1-1). Υπάρχουν διαφορετικές κατηγορίες ταινιών άνθρακα με βάση την πυκνότητα, τον αριθμό των μονοϊνών που διαθέτουν κλπ. Αποσκοπώντας στην κατά το δυνατόν βέλτιστη κατεργασιμότητα και παράλληλα για την βελτιστοποίηση της συνάφειας μεταξύ αυτών και της μήτρας στην οποία

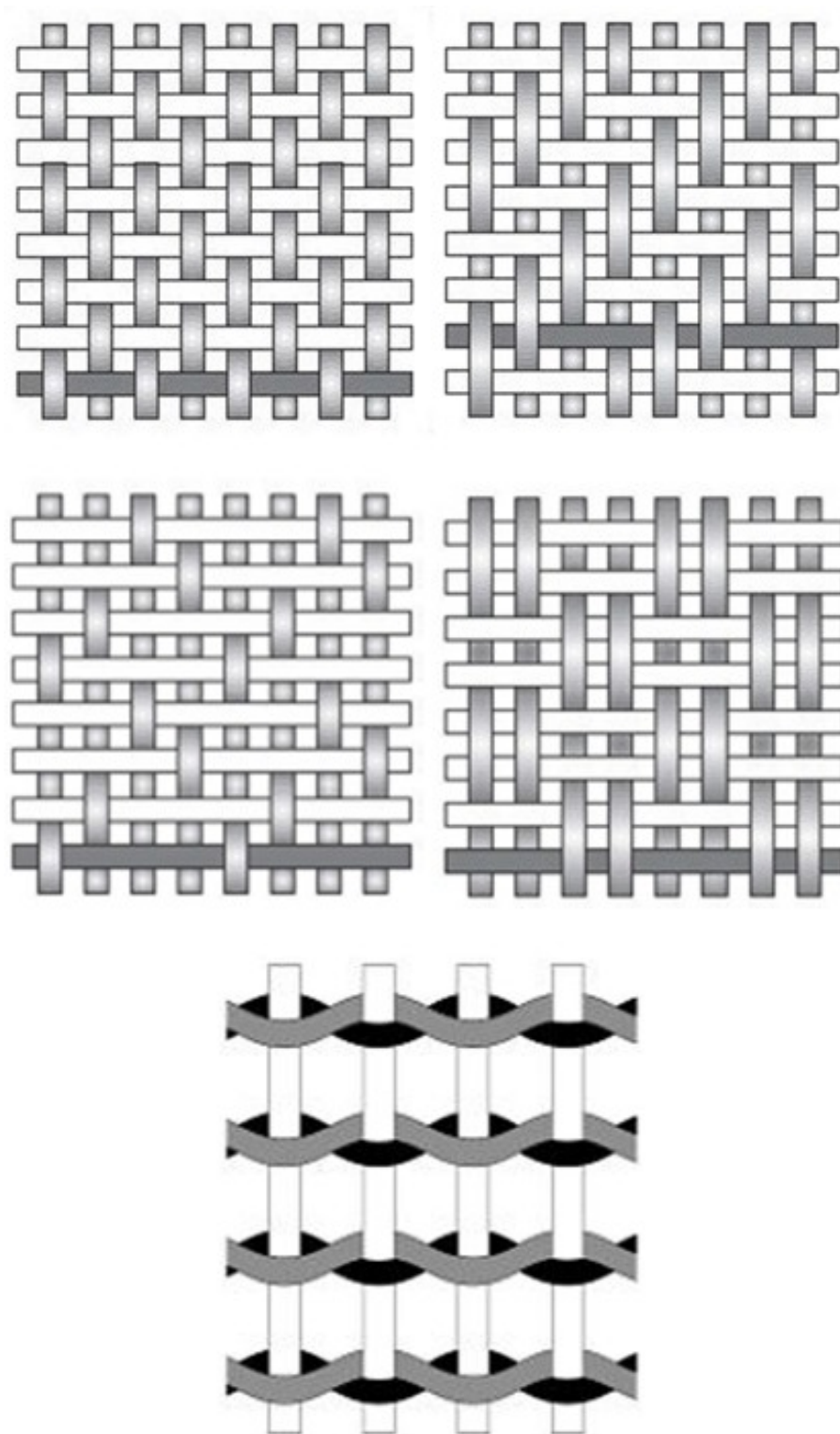
πρόκειται να εισαχθούν, προεμπιοτίζονται με την αντίστοιχη ρητίνη, έτσι ώστε να αυξηθεί το ιξώδες τους.



Εικόνα 3.6.1-1. Ίνες άνθρακα μονής κατεύθυνσης (Πηγή: <https://www.harperintl.com/>).

### 3.6.2 Ίνες άνθρακα υπό τύπο υφάσματος

Σε αυτήν την κατηγορία συγκαταλέγονται αρκετοί τύποι υλικών. Οι εξαιρετικές ιδιότητες που προσδίδονται στα σύνθετα μέσω των υφασμάτων, σε όρους μηχανικών αντοχών, έχει συνεισφέρει σημαντικά ώστε η χρήση τους να έχει πλέον διαδοθεί σε αρκετές εφαρμογές. Τα τελικώς παραγόμενα υφάσματα μπορούν να έχουν διαφορετικές διευθύνσεις πλέξεων. Η διαφοροποίηση της πλέξης εξυπηρετεί σε περιπτώσεις που απαιτείται ενίσχυση των μηχανικών ιδιοτήτων σε διαφορετικές ή σε περισσότερες από μία διευθύνσεις. Οι πλέον γνωστοί και διαδεδομένοι σε χρήση τύποι υφασμάτων ινών άνθρακα παρουσιάζονται στην Εικόνα 3.6.2-1 [29].



Εικόνα 3.6.2-1. Πλέξεις υφασμάτων ινών άνθρακα [αριστερά επάνω: απλή πλέξη, δεξιά επάνω: διαγώνια πλέξη, αριστερά κάτω: πλέξη satin, δεξιά κάτω: καλαθωτή πλέξη, κάτω στη μέση: πλέξη LENO (Πηγή: Σουπιώνης, 2017).

#### **3.6.2.1 Απλή πλέξη (Plain)**

Είναι ο πιο συνηθισμένος τύπος πλέξης που χρησιμοποιείται στα υφάσματα ινών άνθρακα. Στη συγκεκριμένη πλέξη παρατηρείται η με κάθετο τρόπο διασταύρωση των ινών μεταξύ τους. Επιπλέον και με σκοπό τον περιορισμό της μετακίνησης των ινών και την ενίσχυση της συνοχής του υφάσματος και κατεπέκταση της αντοχής αυτού, οι ίνες τοποθετούνται εναλλάξ η μία πάνω από την άλλη. Εξαιτίας αυτού του εναλλασσόμενου μοτίβου (Εικόνα 3.6.2-1, επάνω αριστερά) η συγκεκριμένη πλέξη έχει χαρακτηριστεί ως σταθερή [30].

#### **3.6.2.2 Διαγώνια πλέξη (Twill)**

Στη διαγώνια πλέξη χρησιμοποιούνται ίνες μεγαλύτερης πυκνότητας ανά μονάδα επιφάνειας σε σύγκριση με τα υφάσματα της απλής πλέξης. Η χαρακτηριστική διαγώνια γραμμή που φέρουν τα υφάσματα αυτής της πλέξης (Εικόνα 3.6.2-1, επάνω δεξιά), είναι ο λόγος που απέκτησαν την συγκεκριμένη ονομασία [30].

#### **3.6.2.3 Πλέξη Satin**

Ο τρόπος πλέξης των ινών έχει πραγματοποιηθεί κατά τρόπον ώστε, κάθε δέσμη ινών να περνάει πάνω από έναν καθορισμένο αριθμό δεσμίδων και στη συνέχεια κάτω από μία δέσμη κ.ο.κ (Εικόνα 3.6.2-1, κάτω αριστερά) μέχρι την ολοκλήρωση της πλέξης. Ο συνολικός αριθμός των ινών που χρησιμοποιούνται είναι ευρύτερα γνωστός με την ονομασία «Harness».

Συγκεκριμένα στην πλέξη *Satin* ακολουθώντας το παραπάνω μοτίβο μια ίνα περνάει πάνω από άλλες επτά, στη συνέχεια κάτω από μία, ξανά πάνω από επτά κ.ο.κ ( $7+1=8$ , 8-harness). Η εν λόγω ιδιαιτερότητα καθιστά τα υφάσματα που κατασκευάζονται με την συγκεκριμένη πλέξη κατάλληλα προς χρήση για πολύ εξειδικευμένες εφαρμογές [30].

#### **3.6.2.4 Καλαθωτή πλέξη (Basket)**

Η πλέξη αυτή αποτελεί παραλλαγή της απλής πλέξης. Στην καλαθωτή πλέξη ή άλλως πλέξη *Basket*, δύο ή περισσότερες διαμήκεις ίνες διασταυρώνονται αντίστοιχα με δύο ή περισσότερες εγκάρσιες ίνες (Εικόνα 3.6.2-1, κάτω δεξιά). Η μεγαλύτερη

απόσταση που δημιουργείται μεταξύ των διασταυρώσεων έχει ως αποτέλεσμα των περιορισμό της σταθερότητας και συνεπώς της αντοχής των εν λόγω υφασμάτων σε σχέση με τα αντίστοιχα απλής πλέξης [30].

#### **3.6.2.5 Πλέξη LENO**

Η πλέξη αυτού του τύπου παρουσιάζει μια ιδιαίτερη μορφή πλέξης η οποία χαρακτηρίζεται "κλειδωμένη" πλέξη. Η εν λόγω πλέξη περιορίζει κατά το μέγιστο δυνατό τις εσωτερικές μετατοπίσεις των ινών στο ύφασμα. Τα υφάσματα τύπου LENO απαντώνται κυρίως σε εφαρμογές που απαιτούν το συνδυασμό με άλλα υφάσματα, καθώς οι ενισχυτικές του ιδιότητες δεν είναι επαρκείς αν χρησιμοποιηθεί σε σύνθετα υλικά μεμονωμένα [30].

### **3.7 Άλλα είδη ινών**

#### **3.7.1 Ίνες Υάλου**

Τα υαλονήματα (Εικόνα 3.7.1-1 και 3.7.1.2) εμφανίστηκαν για πρώτη φορά στο εμπόριο το 1939. Το κύριο χαρακτηριστικό του υάλου είναι ότι δεν παρουσιάζει ούτε πλήρως κρυσταλλική δομή αλλά ούτε και ιδιότητες ρευστού. Ανάλογα με το είδος της εφαρμογής για το οποίο αναπτύχθηκαν, υπάρχουν έξι διαφορετικοί τύποι υαλονημάτων. Από αυτούς, οι δύο τύποι που χρησιμοποιούνται για την επισκευή και ενίσχυση κατασκευών είναι ο ύαλος-E και ο ύαλος-S. Ο ύαλος-S έχει μεγαλύτερη εφελκυστική αντοχή και μέτρο ελαστικότητας από τον ύαλο-E, λόγω όμως του υψηλού του κόστους έχει περιορισμένη εφαρμογή σε σχέση με το δεύτερο.



Εικόνα 3.7.1-1. Ύφασμα ινών υάλου (Πηγή: <https://www.azom.com/> ).



Εικόνα 3.7.1-2. Νήματα ινών υάλου (Πηγή: <https://shtextiles.en.made-in-china.com/> ).

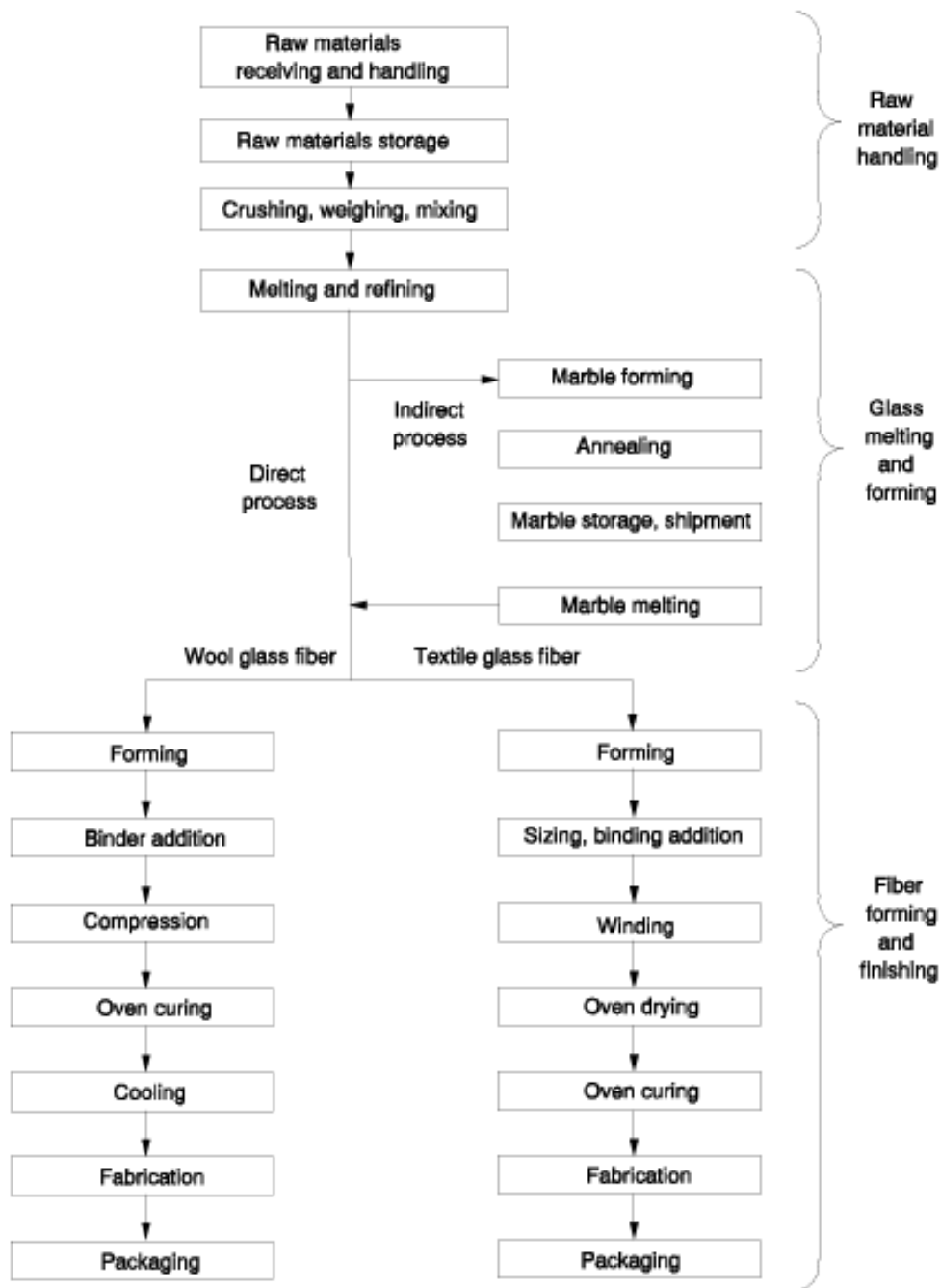
Παρουσιάζουν τις τυπικές ιδιότητες του γυαλιού, χαρακτηριζόμενες από ιδιαίτερη σκληρότητα και αντοχές σε διάβρωση. Επιδεικνύουν αξιοσημείωτη ευκαμψία, έχουν χαμηλό βάρος και κόστος. Τα ανωτέρω χαρακτηριστικά γνωρίσματα μεταξύ άλλων τις καθιστούν κατάλληλες σε ποικίλες βιομηχανικές εφαρμογές. Παράγονται κατά βάση από E-γυαλί ελεύθερου αλκαλίων καθώς επίσης και από R- και C- γυαλί προκειμένου για ίνες ειδικών εφαρμογών. Ως πρώτες ύλες στην κατασκευή τους χρησιμοποιούνται η χαλαζιακή άμμος ( $\text{SiO}_2$ ), ασβεστόλιθος ( $\text{CaCO}_3$ ), δολομίτης



(CaMg(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>), οξειδίο βορίου (B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) και φθοριούχο ασβέστιο (CaF<sub>2</sub>). Για την παραγωγή ινών υάλου (Εικόνα 3.7.1-3), κατάλληλες ποσότητες των ανωτέρω υλικών αναμειγνύονται, καθαρίζονται για μεγάλο χρονικό διάστημα (αρκετές ημέρες) και κατόπιν τοποθετούνται σε φούρνους υψηλών θερμοκρασιών όπου τήκονται σε θερμοκρασίες της τάξεως των 1400°C. Εν συνεχεία σε ρευστή μορφή (τήγμα) διοχετεύονται μέσω κατάλληλων καναλιών και καταλήγουν στα ακροφύσια ινοποιήσεως [6].

Τα προαναφερθέντα ακροφύσια είναι κατασκευασμένα από κράμα λευκόχρυσου. Διαθέτουν έκαστο περί τις 200 οπές. Μέσω των οπών των ακροφυσίων τα οποία και βρίσκονται συνεχώς υπό θέρμανση σε υψηλή θερμοκρασία ούτως ώστε το γυαλί να ρέει αργά και κατά την έξοδό του να ψύχεται, αποκτώντας τη μορφή νήματος. Ακολούθως τα ρευστής μορφής νήματα επιμηκύνονται με τη βοήθεια διατάξεων περιέλιξης και έτσι προσδίδεται σε αυτά η επιθυμητή διάμετρος. Οι σχετικά υψηλές μηχανικές αντοχές τους τις προκρίνουν για χρήση σε εφαρμογές ενίσχυσης θερμοσκληρυνόμενων, θερμοπλαστικών και αφρωδών πολυμερών [6].

Είναι ανθεκτικές στους περισσότερους διαλύτες, αντιδρούν όμως με ορισμένες αλκαλικές ενώσεις και ισχυρά οξέα. Το γυαλί διαθέτει εξαιρετικές θερμομονωτικές και ηλεκτρομονωτικές ιδιότητες. Σε αντιστοιχία με τον άνθρακα το γυαλί δεν παρουσιάζει παραμορφώσεις λόγω τάσεων ερπυσμού. Παράλληλα είναι ευπαθές στη διάβρωση. Σημαντικό ρόλο σε ότι αφορά στις παραπάνω ιδιότητες κατέχουν οι περιβαλλοντικές συνθήκες όπως επίσης και η μήτρα που επιλέγεται για την παραγωγή του σύνθετου υλικού [31].



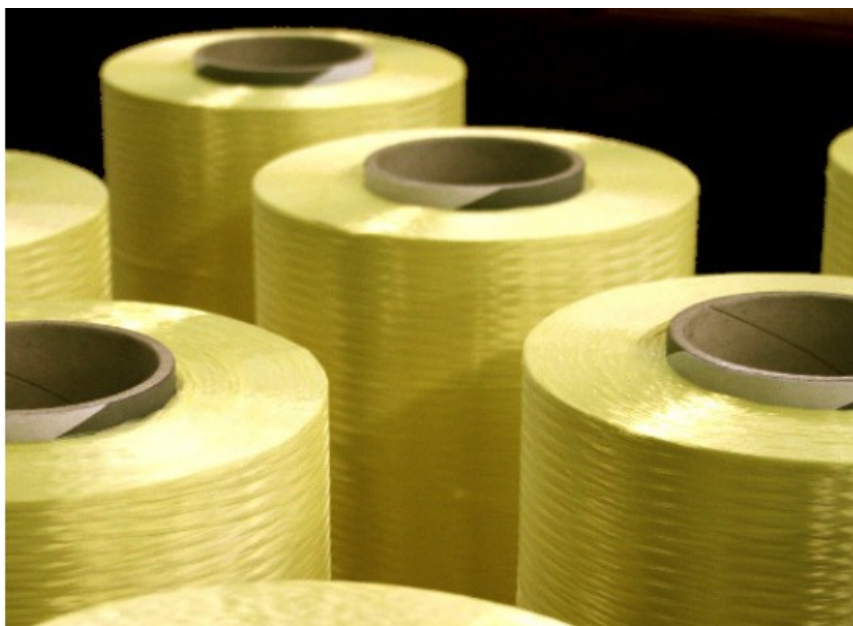
Εικόνα 3.7.1-3. Διάγραμμα ροής παραγωγής ινών υάλου.

(Πηγή: <https://hastingslearns.org/dixie/glass-fiber-manufacturing-process-pdf.php> ).

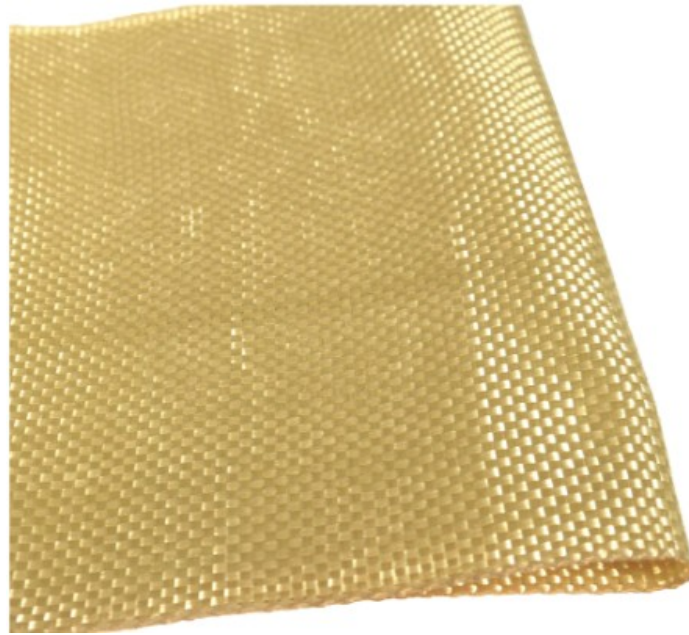
### 3.7.2 Ίνες Πολυαραμίδης (Kevlar)

Η εμπορική ονομασία των πρώτων ινών πολυαραμίδης που κυκλοφόρησαν στην αγορά στις αρχές της δεκαετίας του 1970 είναι Kevlar. Η χρήση των σύνθετων υλικών από ίνες πολυαραμίδης σε δομικά έργα είναι περιορισμένη σε σχέση με τα υαλονήματα και τα ανθρακονήματα. Κύρια εφαρμογή τους αποτελεί η θωράκιση κατασκευών από κρουστικά φορτία. Λόγω της χημικής δομής του πολυμερούς από

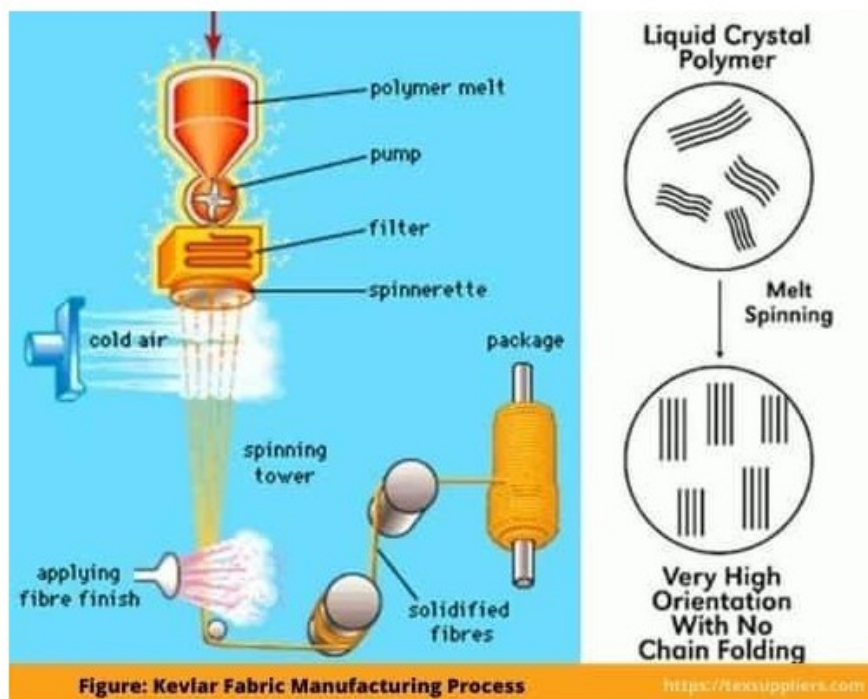
το οποίο παράγονται (Εικόνα 3.7.2-3), οι ίνες πολυαραμιδίου έχουν μεγάλο μέτρο ελαστικότητας και υψηλή πυκνότητα. Παρόλο που ορισμένες από τις ίνες της κατηγορίας αυτής παρουσιάζουν υψηλή εφελκυστική αντοχή της τάξεως των 3500-4100MPa και μέτρο ελαστικότητας το οποίο ανέρχεται έως και 175GPa και σε εξαιρετικές περιπτώσεις μπορεί να φτάσει μέχρι και τα 210GPa, η συνήθης τιμή για την εφελκυστική αντοχή δεν ξεπερνά τα 3800MPa, ενώ το μέτρο ελαστικότητας κυμαίνεται μεταξύ 70 και 130GPa. Επιπροσθέτως οι εν λόγω ίνες χαρακτηρίζονται από μεγάλη αντοχή σε κόπωση και τριβή και είναι εν γένει ανθεκτικές στους διαλύτες, με εξαίρεση τα ισχυρά οξέα και βάσεις. Εξαιτίας της υδρόφιλης φύσης τους, παρουσιάζουν μερική απώλεια αντοχής σε θερμά περιβάλλοντα με υψηλό ποσοστό υγρασίας. Παρουσιάζουν επίσης θλιπτική αντοχή σημαντικά μικρότερη της αντίστοιχης εφελκυστικής τους αντοχής ( $\approx 20\%$ ), ενώ υπό συγκεκριμένες τάσεις, εμφανίζουν ερπυστικές παραμορφώσεις [31].



Εικόνα 3.7.2-1. Νήματα ινών αραμιδίου (Πηγή: <https://imattec.com/> ).



Εικόνα 3.7.2-2. Ύφασμα ινών αραμιδίου (Πηγή: <https://www.jamestowndistributors.com/>).



Εικόνα 3.7.2-3. Παραγωγή ινών πολυαραμιδης (Kevlar) (Πηγή: <https://textsuppliers.com/>).

## Βιβλιογραφία 3<sup>ου</sup> Κεφαλαίου

1. J.W. Swan, «*Swan's electric light Transactions*», North of England Institute of Mining and Mechanical Engineers 30, 1881, 149–159.
2. E. Kenneth Hendrickson III, «*The Encyclopedia of the Industrial Revolution in World History*», Volume 3, Rowman & Littlefield - 2014, page 564.
3. R.C. Houtz, «*Orlon acrylic fiber: chemistry and properties*», J Text Res, 20:86-801, 1950.
4. <https://www.acs.org/content/acs/en/education/whatischemistry/landmarks/carbonfibers.html>
5. R. Bacon, M.M. Tang, «*Carbonization of cellulose fibers 2, Physical property study*», Carbon 2(3), 221-225, 1964.
6. Ι. Χρ. Σιμιτζής, *Επιστήμη και Τεχνική των Πολυμερών και Σύνθετων Υλικών*, Αθήνα Φεβρουάριος 2017 pp. 433-446.
7. W. D. Callister, D.G. Rethwisch, «*Materials Science and Engineering*», 9<sup>th</sup> edition, John Wiley & Sons 2015, pp. 91.
8. Ι. Χρ. Σιμιτζής, «*Θερμοαναλυτικές μέθοδοι και θερμικές ιδιότητες υλικών (Σημειώσεις)*», Αθήνα, 2004 ,σελ 18-23.
9. M. L. Minus, S. Kumar, Carbon Fibers, Kirk-Othmer, «*Encyclopedia of Materials: Science and Technology*», 26, John Willey & Sons, Inc., New York 2004, pp.729-749.
10. A. Mortensen, «*Concise Encyclopedia of composite materials*», Elsevier, 2007, pp. 86-96.
11. Ι. Χρ. Σιμιτζής, «*Τεχνολογία Προηγμένων Πολυμερών και Συνθέτων υλικών, Σημειώσεις ΔΠΜΣ, «Επιστήμη και Τεχνολογία Υλικών»*, Αθήνα 2002, σελ. 28-62.
12. X. Huang, «*Fabrication and Properties of Carbon Fiber*», Materials, 2009, 16; 2(4), pp. 2369–2403.
13. W. Ruland, «*Carbon Fibers*», Advanced Materials, 1990, 2(11), pp. 528–536.
14. M. S. Morales, A. A. Ogale, J. Appl. Polym. Sci., 2013, 130, 2494.
15. Γ. Σουπιώνης, «*Σύνθετα Υλικά Θερμοσκληρυνόμενων Ρητινών με Περίληψη και Ενισχυμένων με Ίνες Άνθρακα ως Θερμομονωτικών Υλικών Υψηλών Θερμοκρασιών*», Μεταπτυχιακή εργασία, ΕΜΠ, 2017.

16. W. N. Reynolds, R. Moreton, Philos. Trans. R. Soc. A294, 451, 1980.
17. S.T. Peters, «*Handbook of Composites*», Second Edition, Chapman and Hall.
18. H.R. Allcock, F.W. Lampe, J.E. Mark, «*Contemporary polymer chemistry*» 3<sup>rd</sup>ed, Pearson Education, Inc., USA, 2003, pp.717-728.
19. J. Simitzis, «*Polyacrylonitrile*», in Handbook of Thermoplastics, O. Olabisi, ed. Marcel Dekker, New York, 1997, pp. 177-191.
20. D. Hull, «*An introduction to composite materials*», Cambridge University Press, Cambridge 1981.
21. S. Iijima, «*Helical microtubules of graphitic carbon*», Nature, 1991, 354, 354-356.
22. P. Bhatt, A. Goe, «*Carbon Fibres: Production, Properties and Potential Use*», Materials Science Research, India, 14(1).
23. <https://www.scienceabc.com/>
24. L. H. Peebles, «*Carbon Fibers: Formation, Structure, and Properties*», CRC Press, Boca Raton, 1995.
25. Ε. Μ. Πιζάνια, «*Κατασκευή - Ιδιότητες - Κατευθύνσεις Εφαρμογών Συνθέτων Υλικών Ινών Άνθρακα - Νανοσωλήνων Άνθρακα – Άμορφού Άνθρακα*», Διδακτορική Διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2015.
26. E. Frank, L. M. Steudle, D. Ingildeev, J. M. Spörl, M. R. Buchmeiser, «*Carbon Fibers: Precursor Systems, Processing, Structure, and Properties*». Angewandte Chemie International Edition, 2014, 53(21), 5262–5298.
27. S. P. Jones, C. C. Fain, D. D. Edie, «*Structural development in mesophase pitch based carbon fibers produced from naphthalene*», Carbon, 1997, 35(10-11), 1533–1543.
28. D. D. Edie, «*The effect of processing on the structure and properties of carbon fibers*», Carbon, 1998 36(4), 345–362.
29. <http://blog.fibreglast.com/fiberglass/the-ins-and-outs-choosing-composite-fabric-byweave/>
30. Γ. Παπανικολάου, Δ. Μουχάκης, «*Σύνθετα Υλικά*», Κλειδάριθμος, Αθήνα, 2007.

31. Κ. Σπυράκος, Ενίσχυση Κατασκευών για Σεισμικά Φορτία, ΤΕΕ, Αθήνα, 2004.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4ο-Σύνθετα ινοπλισμένα υλικά (FRP) και ενίσχυση των κατασκευών**

### **4.1 Εισαγωγή**

Τα σύνθετα υλικά τύπου υφασμάτων ή ελασμάτων είναι πλέον αρκετά διαδεδομένα ως προς της χρήση τους στις κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα. Η εφαρμογή τους παρόλα αυτά περιορίζεται σε τοπικές ενισχυτικού τύπου παρεμβάσεις (επισκευές επιλεγμένων δομικών στοιχείων) χωρίς να έχει έως και σήμερα αξιοποιηθεί στο πλαίσιο εργασιών ολοκληρωμένης στατικής θωράκισης κατασκευών. Επιλέγονται κατά κύριο λόγο όταν στην υπό ενίσχυση (ή υπο επισκευή) κατασκευή επίκεινται τροποποιήσεις οι οποίες επηρεάζουν τη στατικότητα της. Πέραν αυτού είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν και σε περίπτωση υλοποίησης προληπτικών παρεμβάσεων με σκοπό την ενίσχυση κατασκευών που εδράζονται σε περιοχές με έντονη σεισμική δραστηριότητα.

Τα σύνθετα υλικά επιλέγονται και χρησιμοποιούνται εν γένει σε κατασκευαστικές εφαρμογές, η υλοποίηση των οποίων αποσκοπεί κατά βάση στην δομική ενίσχυση τους έναντι διατμητικής, καμπτικής και θλιπτικής φύσεως φορτίσεων.

### **4.2 Χαρακτηριστικά συνθέτων FRP**

Ο σχεδιασμός αλλά και η ανάπτυξη των συνθέτων υλικών ενίσχυσης που χρησιμοποιούνται στις κατασκευές, γίνεται με γνώμονα ώστε τα ανωτέρω να μην υφίστανται σημαντική υποβάθμιση ως προς τις ιδιότητές τους, καθ' όλο τον κύκλο χρηστικής ζωής τους. Ειδικότερα οι χαρακτηριστικές ιδιότητες των εν λόγω συνθέτων υλικών θα πρέπει να τους προσδίδουν ανθεκτικότητα έναντι μίας σειράς διεργασιών οι οποίες λαμβάνουν χώρα, επί της σκυροδετημένης κατασκευής ή και επί του εμπειριεχόμενου (σε αυτήν) οπλισμού για την ενίσχυση της οποίας χρησιμοποιούνται και οι οποίες δύνανται να προκαλέσουν την φθορά της. Σημαντική συμβολή στο είδος και το βαθμό επίδρασης των παραπάνω διεργασιών έχουν και οι εκάστοτε περιβαλλοντικές συνθήκες στις οποίες είναι εκτεθειμένη η κάθε κατασκευή.



Ως **ανθεκτικότητα** (durability) μιας κατασκευής (και κατεπέκταση των επιμέρους συστατικών της) σε διάρκεια ορίζεται, η ικανότητά της να αντιστέκεται σε περιβαλλοντικές επιδράσεις χωρίς η επιτελεστικότητά της, να υποχωρεί κάτω από ένα ελάχιστο αποδεκτό όριο. Ειδικότερα σε ότι αφορά στις κατασκευές από σκυρόδεμα, τρεις κύριοι παράγοντες καθορίζουν την ανθεκτικότητά τους στο πέρας του χρόνου: η σύνθεση σκυροδέματος, ο σχεδιασμός, η υλοποίηση και η συντήρηση της κατασκευής και οι περιβαλλοντικές συνθήκες στις οποίες εκτίθεται. Ως **φθορά** (deterioration) μιας κατασκευής στον χρόνο ορίζεται κάθε απώλεια επιτελεστικότητας και είναι αποτέλεσμα διαφόρων μηχανικών, φυσικών, χημικών και βιοχημικών διεργασιών. Το τελικό αποτέλεσμα του συνόλου αυτών των μηχανισμών είναι συνήθως η ρηγμάτωση ή/και η διάβρωση του σκυροδέματος.

Στις **μηχανικές διεργασίες** που προκαλούν ρηγμάτωση περιλαμβάνονται η αρχική συστολή, η αρχική καθίζηση, η άμεση φόρτιση και οι επιβαλλόμενες παραμορφώσεις. Η μηχανική απόξεση ή σπηλαίωση προκαλεί διάβρωση του σκυροδέματος.

Στις **φυσικές διεργασίες** από τη δράση των οποίων προκαλείται ρηγμάτωση περιλαμβάνονται οι θερμοκρασιακές διαφορές, η συστολή ξήρανσης και η επίδραση του παγετού.

Οι **χημικές διεργασίες** που προκαλούν φθορά του σκυροδέματος διακρίνονται σε δύο κατηγορίες. Στην πρώτη συγκαταλέγονται αυτές που επιδρούν στο σκυρόδεμα και στην δεύτερη όσες επιδρούν στον οπλισμό δηλαδή στον χάλυβα (χαλύβδινες βέργες) του σκυροδέματος. Αναλυτικότερα, στην πρώτη υποκατηγορία ανήκει η χημική δράση επιβλαβών ουσιών (μορίων ή ιόντων) στο σκυρόδεμα. Οι συνηθέστερες εξ' αυτών είναι: η επίδραση οξέων (συμπεριλαμβανομένων των αλάτων αμμωνίου και μαγνησίου καθώς και του μαλακού νερού), η επίδραση θειικών και τέλος η αλκαλοπυριτική αντίδραση.

Οι εμπειροχόμενες ράβδοι οπλισμού στο σκυρόδεμα είναι προστατευμένες έναντι της διάβρωσης χάρη στην παρουσία ενός λεπτού στρώματος οξειδίου του σιδήρου στην επιφάνειά τους (παθητικοποίηση χάλυβα). Το εν λόγω στρώμα δημιουργείται λόγω

της υψηλής αλκαλικότητας (pH περίπου 12.6) του περιβάλλοντος σκυροδέματος. Η διάβρωση αρχίζει να εμφανίζεται ως αποτέλεσμα της φθοράς αυτού του προστατευτικού στρώματος εξαιτίας:

- της διείσδυσης χλωριόντων (Cl<sup>-</sup>) και υπέρβασης μιας κρίσιμης συγκέντρωσης,
- της ελάττωσης της τιμής του pH του νερού των πόρων σε τιμές κάτω του 9 (ενανθράκωση σκυροδέματος).

Σε θαλάσσιο περιβάλλον, παράκτιες περιοχές και όπου αλλού γίνεται χρήση αλάτων τήξης χιονιού, η διείσδυση χλωριόντων είναι ο κύριος μηχανισμός έναρξης και συντήρησης της διάβρωσης του οπλισμού. Σε όλες τις άλλες περιπτώσεις, και ιδίως σε αστικές και βιομηχανικές περιοχές πλούσιες σε εκπομπές CO<sub>2</sub>, η ενανθράκωση του σκυροδέματος είναι ο κύριος μηχανισμός που οδηγεί σε «αποπαθητικοποίηση» του οπλισμού. Και στις δύο περιπτώσεις η διεργασία της διάβρωσης απαιτεί την παρουσία τόσο υγρασίας όσο και οξυγόνου για να εξελιχθεί.

Τέλος, αρκετές **βιοχημικές διεργασίες**, όπως η ανάπτυξη μικροοργανισμών στις επιφάνειες σκυροδέματος, με εξέχουσα την βιολογική δράση σε συστήματα αποχέτευσης, οδηγούν σε βαθμιαία διάβρωση του σκυροδέματος [1-6].

Ακολούθως θα παρουσιαστούν συνοπτικά οι βασικοί παράγοντες φθοράς των συνθέτων ινωδών υλικών [7-14].

#### **4.2.1 Φθορά προκαλούμενη εξαιτίας θερμοκρασιακής διαφοράς**

Υπό συνηθισμένες θερμοκρασιακές συνθήκες, η συμπεριφορά των ενισχυμένων με ίνες πολυμερών υλικών δεν εμφανίζει ιδιαίτερες μεταβολές. Κατά συνέπεια οι χαρακτηριστικές τους ιδιότητες παραμένουν σχεδόν αμετάβλητες. Για την βέλτιστη απόδοσή τους ωστόσο θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη τόσο η καταλληλότητα τους να χρησιμοποιηθούν σε συγκεκριμένες εφαρμογές όσο και η ορθή από τεχνικής πλευράς τοποθέτησή τους. Οι δυσμενείς επιδράσεις στα υλικά εντοπίζονται σε θερμοκρασιακά εύρη τα οποία κυμαίνονται μεταξύ 50°C και 80°C. Τούτο συμβαίνει διότι σε αυτές τις θερμοκρασίες έχει διαπιστωθεί ότι οι εν λόγω σύνθετα υλικά τείνουν

να παρουσιάζουν περιορισμένη ικανότητα αντοχής σε φορτίσεις εξαιτίας της ρητίνης με αποτέλεσμα να επηρεάζεται αρνητικά η συμπεριφορά των κατασκευών στις οποίες τα σύνθετα αυτά έχουν τοποθετηθεί. Στην περίπτωση υψηλότερων θερμοκρασιών, όπως επί παραδείγματι οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται κατά τη διάρκεια πυρκαγιών, τα ρητινούχα υλικά υφίστανται ολική αποσύνθεση εξαιτίας της ανάφλεξης, με αποτέλεσμα να υποβαθμίζεται η ικανότητα τους να υπόκεινται σε φορτίσεις.

Πέραν των όσων αναφέρθηκαν η έκθεση των ρητινούχων υλικών σε υψηλές θερμοκρασίες για μεγάλα χρονικά διαστήματα, έχει ως αποτέλεσμα την έκλυση αερίων τα οποία είναι επιβλαβή για τον άνθρωπο.

#### **4.2.2 Φθορά προκαλούμενη εξαιτίας της υγρασίας**

Η συμπεριφορά των συνθέτων υλικών σε υγρά περιβάλλοντα χαρακτηρίζεται ως καλή. Η παρατεταμένη επαφή τους ωστόσο με το νερό, σε κάποιες περιπτώσεις οδηγεί σε φαινόμενα υδατοαπορόφησης, και συνεπώς σε υποβάθμιση μιας σειράς ιδιοτήτων των υλικών αυτών, μεταξύ των οποίων, η δυσκαμψία, η θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης κ.α.. Για την επίτευξη βέλτιστων αποτελεσμάτων συστήνεται η επιλογή υλικών και μεθόδων που διασφαλίζουν την στεγανότητα και την πλήρη μόνωση από νερό και αέρα.

#### **4.2.3 Φθορά προκαλούμενη από την επίδραση όξινων/αλκαλικών παραγόντων**

Η χρήση συνθέτων υλικών με ίνες άνθρακα σε όξινα και αλκαλικά περιβάλλοντα δεν επηρεάζει τα εν λόγω σύνθετα. Στον αντίποδα η ευπάθεια των ινών υάλου σε παρόμοιες συνθήκες έχει ως αποτέλεσμα την μείωση των μηχανικών αντοχών των αντίστοιχων (με ίνες υάλου) συνθέτων. Επιτελικό ρόλο στην προστασία των ινών αναλαμβάνει η πολυμερική μήτρα μέσω της οποίας οι ίνες πρακτικά στεγνώνονται και παραμένουν ανέπαφες από την επίδραση ενδεχόμενων αλκαλικών και όξινων παραγόντων.

#### **4.2.4 Φθορά προκαλούμενη εξαιτίας της υπεριώδους ακτινοβολίας**

Τα σύνθετα ινώδη πολυμερή υλικά παρουσιάζουν υποβάθμιση των αντοχών τους ως αποτέλεσμα της επίδρασης της υπεριώδους ακτινοβολίας. Η εν λόγω υποβάθμιση διαπιστώνεται αρχικά από την σταδιακά επερχόμενη επιφανειακή χρωματική αλλοίωση (κιτρίνισμα) η οποία συνοδεύεται από μικροριγματώσεις οι οποίες εντοπίζονται στην επιφάνεια της ρητίνης της μήτρας. Η συνηθέστερη πρακτική που εφαρμόζεται σε περιπτώσεις κατασκευών οι οποίες τελούν υπό την επίδραση υπεριώδους ακτινοβολίας είναι η τοποθέτηση ειδικών προστατευτικών επιχρισμάτων ή βαφών.

#### **4.2.5 Φθορά προκαλούμενη εξαιτίας φαινομένων γαλβανικής διάβρωσης**

Το εν λόγω φαινόμενο λαμβάνει χώρα κατά την επαφή των ινών άνθρακα με τα χαλύβδινα στοιχεία οπλισμού των κατασκευών. Αντιμετωπίζεται με τη χρήση συνθέτων υλικών ενίσχυσης με διαφορετικού τύπου ίνες.

#### **4.2.6 Φθορά προκαλούμενη εξαιτίας φαινομένων Ψύξης-Απόψυξης**

Η εμφάνιση ρηγματώσεων μεταξύ των επιφανειών επαφής της τσιμεντοκατασκευής και των σύνθετων ενισχυτικών υλικών δύναται να παρουσιάσει αστοχίες (αποκολλήσεις τμημάτων ή του συνόλου της ενισχυτικής επένδυσης). Για την αποφυγή τέτοιων φαινομένων θα πρέπει να λαμβάνεται μέριμνα ώστε να ελαχιστοποιείται το ενδεχόμενο εγκλωβισμού νερού το οποίο σε συνθήκες χαμηλών θερμοκρασιών παγώνει και διαστέλλεται φθείροντας κατ' αυτόν τον τρόπο αφενός το δομικό στοιχείο, αφετέρου δε την ενισχυτική φάση με αποτέλεσμα την υποβάθμιση της αντοχής (των υλικών αυτών) σε φορτίσεις.

#### **4.2.7 Φθορά προκαλούμενη από τάσεις ερπυσμού**

Οι παραμορφώσεις που υφίστανται τα σύνθετα ενισχυτικά υλικά λόγω ερπυσμού και οποίες είναι αποτέλεσμα σταθερών τάσεων κατά την πάροδο της χρηστικής ζωής μιας κατασκευής, είναι μηδενικές στην περίπτωση συνθέτων με ίνες άνθρακα. Τα μεγέθη των οφειλόμενων σε ερπυσμό παραμορφώσεων μεγαλώνουν σταδιακά, στην

περίπτωση αντικατάστασης των ινών άνθρακα με ίνες υάλου (πολύ μικρές τιμές παραμορφώσεων) ή ίνες αραμιδίου (αξιοσημείωτες τιμές παραμορφώσεων).

#### **4.2.8 Φθορά προκαλούμενη από φορτίσεις κρούσης**

Ως προς την αντοχή τους σε κρούση τα σύνθετα υλικά με ίνες αραμιδίου παρουσιάζουν τις βέλτιστες τιμές, ακολουθούμενα από τα σύνθετα υλικά με ίνες υάλου και τέλος τις ίνες άνθρακα.

#### **4.2.9 Φθορά λόγω κοπώσεως**

Τα σύνθετα υλικά αποκρίνονται καλύτερα συγκριτικά με το σκυρόδεμα και το χάλυβα των σύνθετων υλικών σε συνθήκες κυκλικής φόρτισης. Πιο συγκεκριμένα και σε ότι αφορά στα ανθρακονήματα, επιδεικνύουν εξαιρετικά υψηλή αντοχή σε κόπωση. Σε σχέση με τα ανθρακονήματα, στα αντίστοιχα υλικά από γυαλί διακρίνονται από μεγάλη ευπάθεια σε κόπωση. Αυτό οφείλεται στην αλληλεπίδραση που λαμβάνει χώρα μεταξύ των ινών. Η αντοχή των ινών αραμιδίου κυμαίνεται σε ενδιάμεσες τιμές αυτών που καταγράφονται για τις ίνες άνθρακα και τις ίνες υάλου αντίστοιχα. Τέλος η κατάταξη ως προς την ανθεκτικότητα σε κόπωση των πολυμερικών ρητινών (των συνθέτων υλικών που χρησιμοποιούνται στις κατασκευές) ακολουθεί την ευρέως γνωστή κατάταξη που παρουσιάζουν οι ανωτέρω με βάση τις μηχανικές τους αντοχές με τις εποξειδικές να παρουσιάζουν τις μέγιστες τιμές ακολουθούμενες από τις ρητίνες πολυεστέρα και τις βινυλεστερικές ρητίνες [15-20].

### **4.3 Τύποι βλαβών όπου αξιοποιούνται τα ινοπλισμένα σύνθετα υλικά**

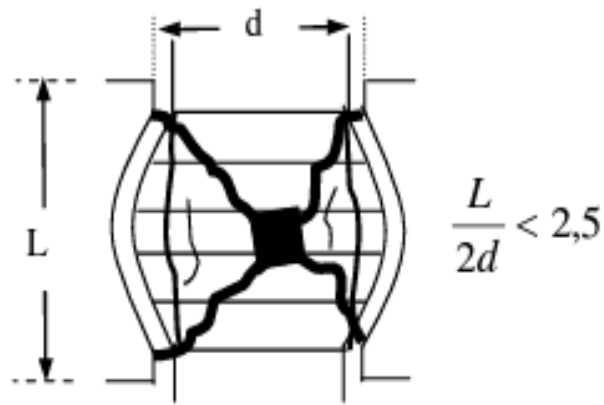
Οι πλέον συνηθισμένοι τύποι βλαβών που εκδηλώνονται στις κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα, διακρίνονται στους παρακάτω τύπους [21-25]:

Καμπτικού τύπου βλάβες: Απαντώνται συνήθως στην κορυφή ή και στη βάση υποστυλωμάτων, αφού σε αυτές κυρίως τις περιοχές παρουσιάζονται συνήθως οι μεγαλύτερες καμπτικές φορτίσεις. Στις περιπτώσεις αξονικών φορτίσεων, όπως επί παραδείγματι στα περιμετρικά υποστυλώματα των τελευταίων ορόφων ενός

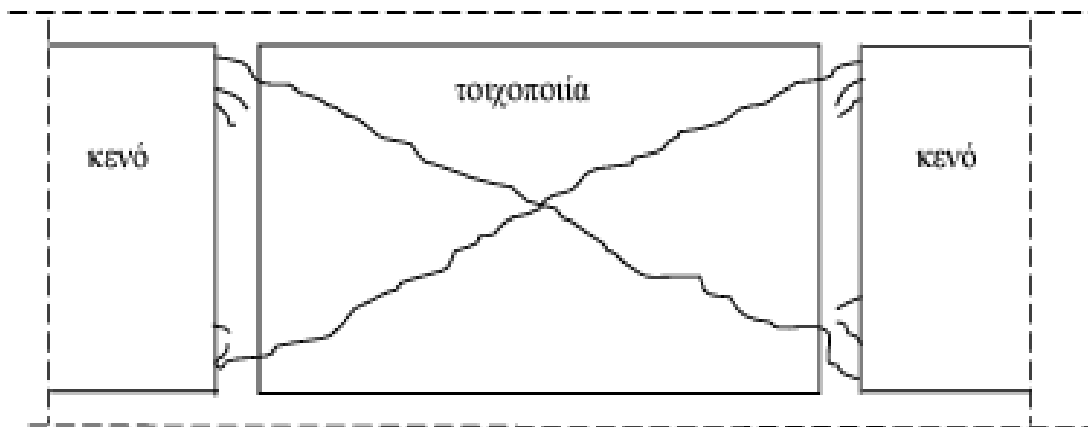
κτίσματος, η βλάβη εμφανίζεται με τη μορφή οριζόντιας καμπτικής ρωγμής. Η δημιουργία αυτής της ρωγμής είναι προϊόν της υπέρβασης του ορίου διαρροής του χαλύβδινου οπλισμού του υποστυλώματος σε εφελκυσμό. Οι καμπτικού τύπου βλάβες αποδίδονται κατά κύριο λόγο στην ανεπάρκεια των διαμήκων ράβδων οπλισμού. Εναλλακτικά δύναται να εκδηλωθεί και ως αποφλοίωση του εξωτερικού σκυροδέματος στο σημείο επικάλυψης των οπλισμών, όπου ασκούνται οι καμπτικές τάσεις, εξαιτίας της υπέρβασης της θλιπτικής αντοχής του υπό φόρτιση δομικού στοιχείου. Σε σύγκριση με τις διατμητικού τύπου βλάβες δεν θεωρείται σοβαρή, εφόσον η δράση της περιορίζεται στην εκτός πυρήνα περιοχή [7,24,25].

Διατμητικού τύπου βλάβες: Συνήθως οι βλάβες αυτής της μορφής εκδηλώνονται σε υποστυλώματα με χαμηλό λόγο διάτμησης στις περιοχές με τη μεγαλύτερη διατμητική αδυναμία, όχι όμως υποχρεωτικά στα άκρα των υποστυλωμάτων. Στα δομικά στοιχεία με χαμηλό αξονικό φορτίο (λ.χ. περιμετρικά υποστυλώματα τελευταίων ορόφων μιας οικοδομής), τα άκρα τείνουν να είναι περισσότερο ευάλωτα. Τούτο συμβαίνει επειδή σε αυτές τις θέσεις είναι πιθανή η διαρροή των διαμήκων ράβδων οπλισμού, λόγω υψηλών καμπτικών ροπών με αποτέλεσμα να αναμένεται μειωμένη διατμητική αντίσταση. Για τιμές του λόγου διάτμησης μικρότερες του 2,5 (υποστυλώματα μικρού ύψους), οι βλάβες αυτής της μορφής είναι συχνότερες. Λόγω της ψαθυρής τους φύσης οι διατμητικού τύπου βλάβες θεωρούνται σοβαρές. Εκδηλώνονται με την εμφάνιση λοξών ρωγμών που εξαιτίας της αντιστρόφου σεισμικής δράσης έχουν αρκετές φορές χιαστί μορφή (Εικόνα 4.3-1) [7,24,25].

Μια ξεχωριστή κατηγορία των διατμητικής φύσεως βλαβών θα πρέπει να θεωρούνται και οι περιπτώσεις στις οποίες η αστοχία της τοιχοπλήρωσης επεκτείνεται στα υποστυλώματα από τα οποία πλαισιώνεται (Εικόνα 4.3-2).



Εικόνα 4.3-1. Διαμητική αστοχία κοντού υποστυλώματος (Πηγή: Δρίτσος, 2005).

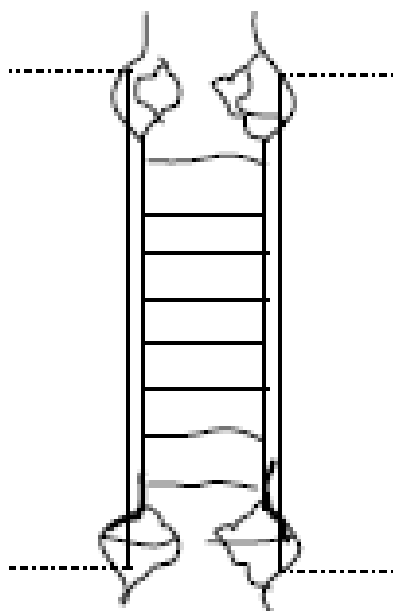


Εικόνα 4.3-2. Βλάβη επεκτεινόμενη από τα υποστυλώματα στην τοιχοποιία (Πηγή: Δρίτσος, 2005).

Βλάβες που οφείλονται στη συνδυασμένη δράση καμπτο-διαμητικών φορτίσεων:

Πρόκειται για βλάβες που υφίστανται τα δομικά στοιχεία τα οποία υπόκεινται σε μεγάλες θλιπτικές φορτίσεις. Οι φορτίσεις αυτές είναι αποτέλεσμα ταυτόχρονης δράσης κάμψης και διάτμησης. Επιφέρουν σύνθλιψη και αποδιοργάνωση της θλιβόμενης ζώνης η οποία, εξαιτίας της αντιστροφής της σεισμικής δράσης μπορεί να εμφανιστεί και στις δυο πλευρές του υποστυλώματος. Στις εκ συνδυασμού καμπτικών και διαμητικών φορτίων αστοχίες, εντοπίζονται συνήθως εγκάρσιες διογκώσεις του σκυροδέματος, συνοδευόμενες από διαρροή ή ακόμα και θραύση των συνδετήρων στην περιοχή της βλάβης και ενδεχομένως σε λυγισμό του οπλισμού, στη διεύθυνση της άσκησης του καμπτικού φορτίου (Εικόνα 4.3-3). Οι

βλάβες αυτές είναι συνήθεις σε δομικά στοιχεία με μικρότερη διατομή από την απαιτούμενη, κοντά σε κόμβους που συντρέχουν ισχυρές δοκοί. Η ελλιπής περίσφιγξη και η χαμηλή ποιότητα σκυροδέματος είναι στις περισσότερες από αυτές τις βλάβες εμφανείς. Οι βλάβες καμποδοιαμητικής φύσεως είναι από τις πλέον σοβαρές. Πέραν της ψαθυρής αστοχίας και της σημαντικής μείωσης στη δυσκαμψία των δομικών στοιχείων στα οποία λαμβάνουν χώρα, ενδέχεται λόγω της αδυναμίας μεταφοράς των κατακόρυφων φορτίων (που επιφέρουν) σε συνδυασμό με την συμπεριφορά των γειτονικών δομικών στοιχείων να οδηγήσουν στην κατάρρευση του κτίσματος [7,24,25].



Εικόνα 4.3-3. Αξονική σύνθλιψη και εναλλασσόμενη καμπτική ροπή (Πηγή: Δρίτσος, 2005).

#### 4.4 Τοποθέτηση και συστήματα FRP υλικών

Η διασφάλιση της βέλτιστης απόδοσης των σύνθετων υλικών σε όρους ενισχυτικής αποτελεσματικότητας είναι συνυφασμένη σε αρκετά μεγάλο βαθμό με την ορθή (από πλευράς τεχνικής) τοποθέτησή τους. Η σωστή προετοιμασία των επιφανειών εργασίας των υπό ενίσχυση δομικών στοιχείων, η ορθή επιλογή των επιμέρους υλικών (ρητίνη, υφάσματα κλπ), οι περιβαλλοντικές συνθήκες αποτελούν μεταξύ άλλων κρίσιμες παραμέτρους σε ότι αφορά στην αποτελεσματική εγκατάσταση των



υπό εξέταση ενισχύσεων. Παραλείψεις στα επιμέρους στάδια προετοιμασίας των υλικών ή της διαδικασίας τοποθέτησης, έχουν ως αποτέλεσμα την υποβάθμιση ή ακόμα και την πρακτική αναστολή της υλοποιούμενης ενίσχυσης.

Τα σύνθετα υλικά που χρησιμοποιούνται σε εργασίες ενίσχυσης δομικών στοιχείων σε κατασκευές οπλισμένου σκυροδέματος χωρίζονται σε: α. υλικά υγρής εφαρμογής κατά την χρησιμοποίηση των οποίων λαμβάνει χώρα ή επί τόπου προετοιμασία των επιμέρους συστατικών, η παρασκευή και η σκλήρυνση της μήτρας και β. προκατασκευασμένα υλικά, των οποίων η εφαρμογή απαιτεί απλά την τοποθέτησή τους αφού η σκλήρυνση τη μήτρας των συγκεκριμένων υλικών έχει ήδη πραγματοποιηθεί (πριν την τοποθέτηση). Σήμερα για τις εφαρμογές ενίσχυσης στις ως άνω κατασκευές είναι τα εξής:

Τα πλέον διαδεδομένα συστήματα υγρής (Εικόνα 4.4-1) εφαρμογής διατίθενται στην αγορά σε:

- Φύλλα ή υφάσματα συνεχών ινών μονής διεύθυνσης,
- Υφάσματα συνεχών ινών τουλάχιστον δυο ή και περισσότερων διευθύνσεων,
- Φύλλα ή υφάσματα συνεχών ινών μονής διεύθυνσης προεμποτισμένα με ρητίνη έτοιμα για σκλήρυνση,
- Φύλλα ή υφάσματα συνεχών ινών δύο η και περισσότερων διευθύνσεων, προεμποτισμένα με ρητίνη έτοιμα για σκλήρυνση,
- Συνεχείς ίνες χωρίς μήτρα σε μορφή νήματος, το οποίο εμποτίζεται με ρητίνη ενώ τοποθετείται με περιτύλιξη στο υπό ενίσχυση δομικό στοιχείο.
- Προεμποτισμένες συνεχείς ίνες σε μορφή νήματος το οποίο ενώ τυλίγεται στο υπό ενίσχυση δομικό μέλος δύναται να εφαρμόζεται επί αυτού επιπρόσθετος οπλισμός.

Η διαδικασία τοποθέτησης τους περιλαμβάνει τα ακόλουθα στάδια:

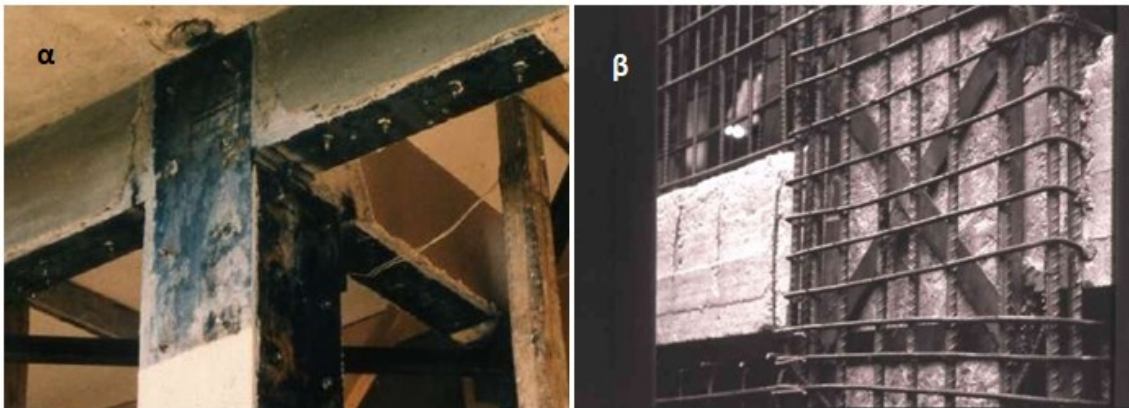
1. Καθαίρεση του επιχρίσματος,
2. Αποκατάσταση των ενδεχόμενων βλαβών με χρήση κατάλληλης μεθόδου (πλήρωση με κατάλληλα κονιάματα ή ρητινενέσεις),
3. Προετοιμασία της επιφάνειας του δομικού στοιχείου (εξομάλυνση της επιφάνειας, λάξευση γωνιών κτλ.). Επάλειψη της επιφάνειας του δομικού στοιχείου με ρητίνη ή άλλη κατάλληλη συγκολλητική ουσία,
4. Τοποθέτηση αρχικής στρώσης του ινοπλισμένου πολυμερούς στην επιφάνεια του δομικού στοιχείου. Για την μεγιστοποίηση της απόδοσης της ενίσχυσης απαιτείται η επίτευξη πλήρους επαφής του σύνθετου υλικού με την επιφάνεια του δομικού στοιχείου. Στην περίπτωση που επιλέγονται υλικά τύπου ελάσματος απαιτείται η επένδυση του δομικού στοιχείου με μία μόνο στρώση,
5. Τοποθέτηση ειδικών αγκυρίων όπου απαιτείται (τοιχία, άνω παρειές δοκών),
6. Τοποθέτηση επιπλέον στρώσεων σύνθετου υλικού σύμφωνα με τη μελέτη επισκευής/ενίσχυσης,
7. Μετά την ολοκλήρωση της σκλήρυνσης του συστήματος (περίπου μετά από 24 ώρες), εφαρμόζεται κατάλληλο επίχρισμα και βαφή της επιφάνειας του δομικού στοιχείου σύμφωνα με τις αρχιτεκτονικές και αισθητικές απαιτήσεις [7,9].



Εικόνα 4.4-1. Ενίσχυση σκυροδέματος με επένδυση ανθρακούφασματος (Πηγή: <https://dynamochrom.gr/>).

Αντίστοιχα στην κατηγορία των προκατασκευασμένων υλικών συγκαταλέγονται:

- Τα προκατασκευασμένα ελάσματα (Εικόνα 4.4-2)
- Οι εύκαμπτες ταινίες και σύνθετα υφάσματα,
- Σύνθετοι μανδύες



Εικόνα 4.4-2. (α) Ενίσχυση δοκών και κόμβου με χαλύβδινα επικολλητά ελάσματα (β) κόμβου με χιαστί λάμες και μανδύα από οπλισμένο σκυρόδεμα (Πηγή: <http://www.episkeves2.civil.upatras.gr/>).

Στην περίπτωση επεμβάσεων που αφορούν στην καμπτική ενίσχυση δομικών στοιχείων όπως δοκοί, πλάκες και τοιχοποιίες, τα προκατασκευασμένα υλικά τύπου

ελασμάτων προτιμώνται έναντι των συστημάτων υγρής μορφής (υφασμάτων, φύλλων, κλπ). Σε άλλου τύπου ενισχυτικές εργασίες όπως επί παραδείγματι στην ενίσχυση υποστυλωμάτων και δοκών έναντι διατμητικών και θλιπτικών τάσεων επιλέγονται και χρησιμοποιούνται συστήματα υγρής μορφής (φύλλα, υφάσματα).

Η εν λόγω κατασκευαστική/επισκευαστική τεχνική είναι γνωστή ως περίσφιγξη και τα βασικά χαρακτηριστικά αυτής αναλύονται ακολούθως.

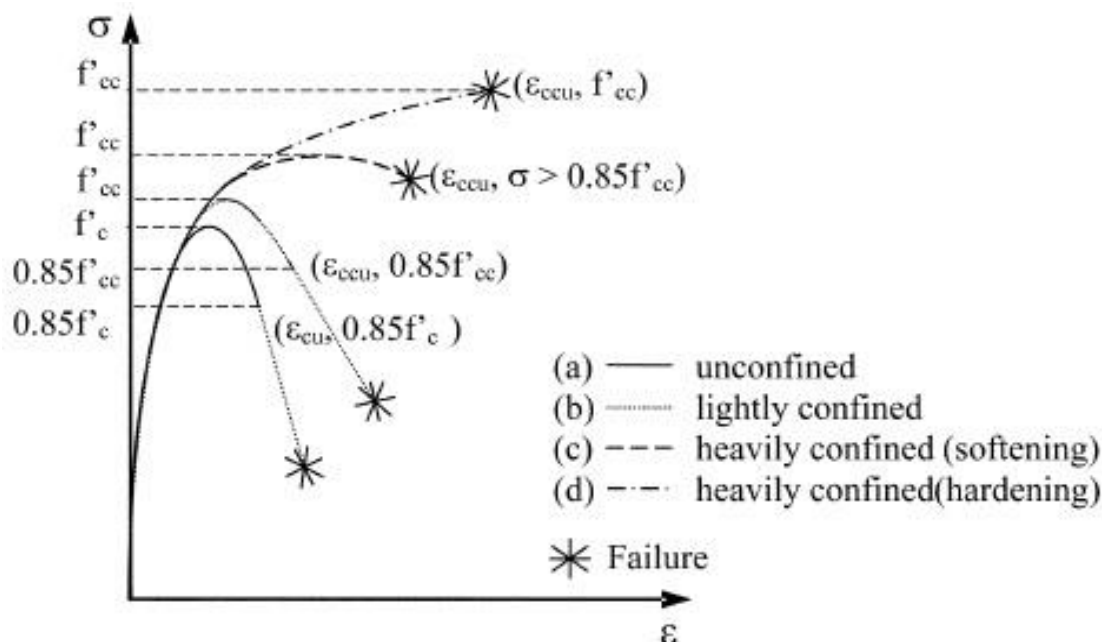
#### 4.5 Εισαγωγή στην περίσφιγξη

Η χαρακτηριστικού τύπου ένταση (τριαξονική ένταση) στην οποία υπόκεινται οι κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα, αποτελεί τη βασική αιτία ενίσχυσης αφενός της αντοχής και αφετέρου της ικανότητας παραμόρφωσης αυτών των κατασκευών.

Οι προϋποθέσεις για την εμφάνιση της ανωτέρω μορφής φορτίσεως σε κατασκευές σκυροδέματος ωστόσο δημιουργούνται σχεδόν αποκλειστικά στην περίπτωση που οι εγκάρσιοι οπλισμοί περιορίζουν τη δυνατότητα των μονοαξονικά θλιβόμενων δομικών στοιχείων να διογκωθούν πλευρικά μεταφέροντας και εκτονώνοντας το φορτίο που υφίστανται λόγω της ασκούμενης θλιπτικής καταπόνησης. Το συγκεκριμένο φαινόμενο δύναται να λάβει χώρα στο σκυρόδεμα της θλιβόμενης ζώνης τη χρονική στιγμή που σε αυτό εμφανίζεται η (εκ θλιπτικής φορτίσεως) αστοχία, με την προϋπόθεση ότι, η πλευρική διόγκωση του σκυροδέματος εκδηλώνεται πάντοτε πριν την αστοχία και στην διεύθυνση εγκάρσια της θλίψης.

Αντίστοιχη συμπεριφορά παρουσιάζουν και άλλου τύπου οπλισμοί (λ.χ. συνδετήρες), όπως επίσης και οι επενδύσεις τύπου «μανδύα» από σύνθετα ινώδη υλικά (FRP) που τοποθετούνται περιμετρικά των δομικών στοιχείων με σκοπό την ενίσχυσή τους. Στην περίπτωση που η αντιμετώπιση των φαινομένων πλευρικής διόγκωσης επιτυγχάνεται μέσω εγκάρσιων οπλισμών ή μανδύα FRP, η ενισχυτική παρέμβαση ονομάζεται περίσφιγξη του σκυροδέματος.

Η συμβολή των FRP υλικών στην ενίσχυση δομικών στοιχείων από σκυροδέμα είναι τεράστια. Ειδικότερα, μέσω της περίσφιγξης με FRP, επιτυγχάνεται η διόγκωση (στην εγκάρσια διεύθυνση) του σκυροδέματος. Στη συνέχεια και ως αποτέλεσμα της διόγκωσης, αναπτύσσονται εφελκυστικές τάσεις οι οποίες ενεργοποιούν την επένδυση (σύνθετο υλικό) που περιβάλλει το υπό ενίσχυση δομικό στοιχείο, δημιουργώντας εγκάρσιες θλιπτικές τάσεις (περίσφιγξης) κάθετα στον άξονα του και σε αντίθετη διεύθυνση από αυτή της θλίψης. Οι περισφιγκτικές τάσεις συντελούν στην ενίσχυση της θλιπτικής αντοχής και της ικανότητας παραμόρφωσης του σκυροδέματος (Σχήμα 4.5-1) και παράλληλα στην αύξηση της πλαστιμότητας, τη βελτίωση των συνθηκών συνάφειας μεταξύ ράβδων οπλισμού και σκυροδέματος σε περιοχές όπου υπάρχουν ενώσεις στον οπλισμό (ματίσεις) και άρα, παρεμπόδιση της ολίσθησης των διαμηκών ράβδων στις περιοχές αυτές, καθώς και καθυστέρηση της εμφάνισης λυγισμού των διαμηκών ράβδων σε περιοχές με αραιή διάταξη συνδετήρων [7,26,28].



Εικόνα 4.5-1. Διάγραμμα Τάσης-Παραμόρφωσης σε δομικό στοιχείο σκυροδέματος χωρίς ενίσχυση και ενισχυμένο με μανδύας συνθέτων υλικών (Πηγή: Rocca et al., 2006 [28]).

## 4.6 Τεχνικές ενίσχυσης δομικών στοιχείων σκυροδέματος

Οι τεχνικές ενίσχυσης δομικών στοιχείων από σκυρόδεμα διακρίνονται σε δύο κατηγορίες. Ο διαχωρισμός αυτός γίνεται με βάση το αν εκ του αποτελέσματος της εφαρμογής τους επέρχεται η αύξηση ή όχι της διατομής του υπό επιδιόρθωση στοιχείου. Η πρώτη εκ των κατηγοριών περιλαμβάνει τεχνικές μέσω των οποίων δεν οδηγούμαστε σε αυξήσεις διατομών και στο πλαίσιο των οποίων οι ενισχυτικές παρεμβάσεις πραγματοποιούνται μέσω περίσφιγξης. Στον αντίποδα, η δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνει τεχνικές στις οποίες η ενίσχυση επιτυγχάνεται με την αύξηση της διατομής μέσω της εφαρμογής νέων επιπλέον στρώσεων σκυροδέματος ή ακόμα και τοποθέτηση νέων επιπέδων οπλισμού δημιουργώντας πρακτικά ένα περιτύλιγμα (μανδύα) περιφερειακά του υπό επέμβαση δομικού στοιχείου.

## 4.7 Ενίσχυση δομικών στοιχείων με την τεχνική περίσφιγξης

Η ενίσχυση και επισκευή δομικών στοιχείων υποστυλωμάτων με εξωτερική περίσφιγξη επιλέγεται όταν στο πλαίσιο των παρεμβάσεων απαιτείται να επιτευχθεί [7]:

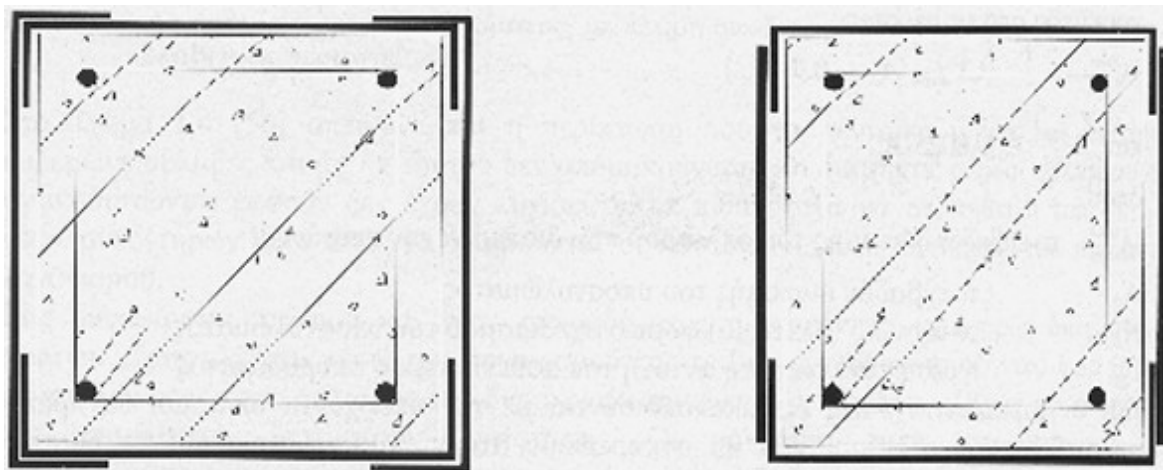
- Αύξηση της πλαστιμότητας του δομικού στοιχείου,
- Αύξηση της διατμητικής αντοχής του δομικού στοιχείου,
- Αύξηση της θλιπτικής αντοχής του δομικού στοιχείου σε ποσοστά έως και 30%,
- Ενίσχυση της συνάφειας των κατακόρυφων οπλισμών του δομικού στοιχείου, στην περιοχή υπερκάλυψής τους ώστε να αποφευχθούν τοπικές αλλά και ευρύτερες αστοχίες,
- Μεταφορά μέρους των κατακόρυφων φορτίων του δομικού στοιχείου.

## 4.8 Διαδικασίες επιβολής εξωτερικής περίσφιγξης

Οι εναλλακτικές μέθοδοι επιβολής περίσφιγξης αναλύονται ακολούθως [7]:

#### 4.8.1 Με χρήση επικολλητών κολάρων

Τα εν θέματι επικολλητά κολάρα μπορεί να είναι μεταλλικού τύπου ελάσματα με πάχος 1-2 mm, σχήματος Π και μήκος του κάθε σκέλους (κάθε πλευράς του Π) αυτών των ελασμάτων που ανέρχεται σε 5cm. Η εφαρμογή τους γίνεται με επικόλληση τους στο σκυρόδεμα. Ένα διαφορετικό είδος επικολλητών κολάρων είναι οι λωρίδες από ινοπλισμένα πολυμερή (FRPs).



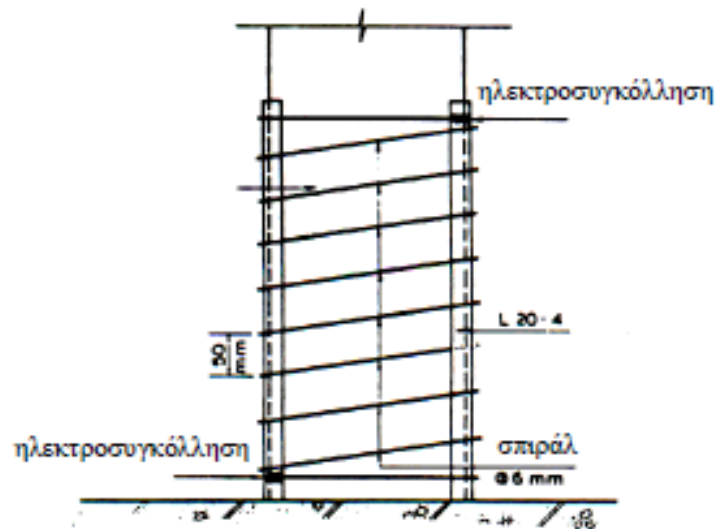
Εικόνα 4.8.1-1. Περίσφιξη με μεταλλικά επικολλητά ελάσματα (Πηγή: Δρίτσος, 2005).

#### 4.8.2 Με χρήση προεντεταμένων κολάρων

Η συγκεκριμένη τεχνική περίσφιξης βασίζεται στη χρήση προεντεταμένων (που φέρουν τάση αναλόγως του τύπου ενισχυτικής παρέμβασης που απαιτείται) κολάρων κατασκευασμένων από χάλυβα ή FRP που σε κάποιες περιπτώσεις προσομοιάζουν ως προς την μορφή σε ταινίες πακεταρίσματος.

#### 4.8.3 Με χρήση σπειροειδούς σπλισμού

Ο σπλισμός προσαρμόζεται καλά ώστε να διασφαλιστεί η βέλτιστη απόδοσή του σε ότι αφορά στην ενισχυτική του δράση επικολλώμενος υπό γωνία (Εικόνα 4.8.3-1). Είναι κατασκευασμένος συνήθως είτε από μεταλλικό έλασμα είτε από ινοπλισμένα πολυμερή.



Εικόνα 4.8.3-1. Περίσφιξη με σπειροειδή οπλισμό (Πηγή: Δρίτσος, 2005).

#### 4.8.4 Με χρήση μεταλλικού κλωβού

Στην συγκεκριμένη τεχνική εφαρμογής ενίσχυσης χρησιμοποιείται ένας ολόσωμος μεταλλικός κλωβός. Συνήθως η διάταξη αποτελείται από κατακόρυφα γωνιακά ελάσματα και εναλλακτικά από οριζόντια μεταλλικά κολάρα, είτε ολόκληρα φύλλα χάλυβα (Εικόνα 4.8.4-1).

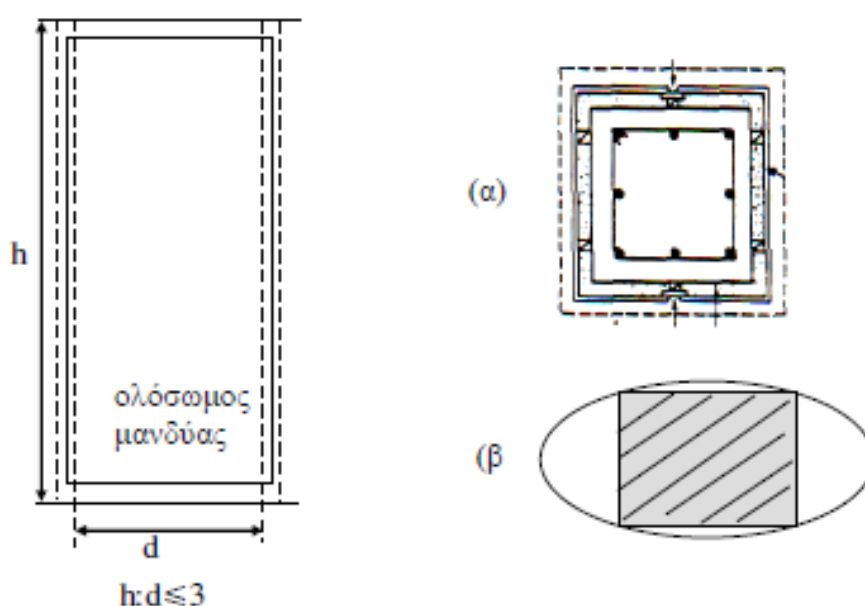


Εικόνα 4.8.4-1. Περίσφιξη με μεταλλικό κλωβό από φύλλα χάλυβα (Πηγή: <https://daskalakis-xania.gr/> ).



#### 4.8.5 Με χρήση ολόσωμου μανδύα

Περιμετρική επένδυση που αποτελείται από φύλλα χάλυβα ή φύλλα ινοπλισμένου πολυμερούς (FRP) τα οποία είναι επικολλημένα στις πλευρές του υπό ενίσχυση δομικού στοιχείου. Στην περίπτωση χρήσης μανδύα χαλύβδινων φύλλων, η επικόλληση των επιμέρους τμημάτων του πραγματοποιείται με επίστρωση ειδικού μη συρρικνούμενου κονιάματος. Ιδιαίτερα αποτελεσματική ως τεχνική στην περίπτωση που ο υπό τοποθέτηση ενισχυτικός μανδύας είναι ελλειπτικής ή κυκλικής διατομής (Εικόνα 4.8.5-1).



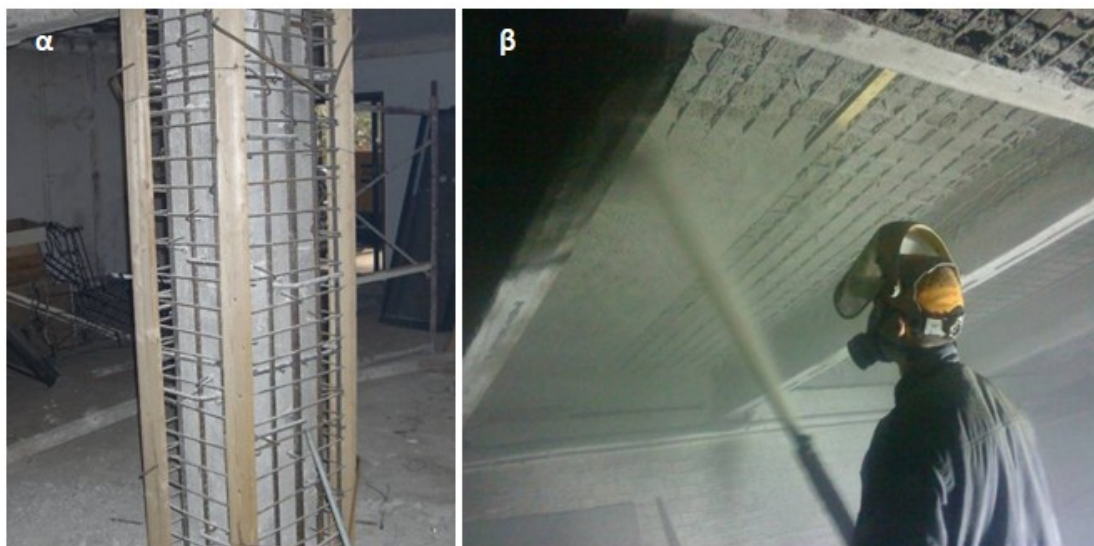
Εικόνα 4.8.5-1. Περίσφιγξη με μεταλλικό μανδύα (α) μεταλλικός μανδύας ορθογωνικής διατομής (β) μεταλλικός μανδύας ελλειπτικής διατομής (Πηγή: Δρίτσος, 2005).

#### 4.8.6 Με χρήση μανδυών από οπλισμένο σκυρόδεμα

Η παλαιότερη και πλέον ενδεδειγμένη τεχνική ενίσχυσης της αντοχής, της δυσκαμψίας και της πλαστιμότητας δομικών στοιχείων σκυροδέματος. Εφαρμόζεται σε περιπτώσεις δομικών στελεχών τα οποία έχουν υποστεί σημαντικές βλάβες. Στο πλαίσιο της εν λόγω επισκευαστικής τεχνικής λαμβάνει χώρα η αύξηση της διατομής του ενισχυόμενου δομικού στελέχους με την προσθήκη νέου οπλισμού (στην κάθετη αλλά και στη διαμήκη διεύθυνση) του αρχικού στοιχείου (Εικόνα 4.8.6-1 α, β). Οι παρεμβάσεις μπορούν να καλύπτουν τμήμα (τοπική ενίσχυση) ή το σύνολο του δομικού στοιχείου σε όλο το μήκος του μανδύα (ολική ενίσχυση). Οι μανδύες

σκυροδέματος προκύπτουν με βάση τον τύπο σκυροδέματος που χρησιμοποιείται στην κατασκευή τους. Έτσι χωρίζονται σε:

- Μανδύες εγχεόμενου σκυροδέματος,
- Μανδύες Εκτοξευόμενου σκυροδέματος (Εικόνα 4.8.6-1 β),
- Μανδύες Σκυροτσιμεντοπήγματος από ειδικά σκυροδέματα,
- Μανδύες ειδικών σκυροδεμάτων ή τσιμεντοκονιαμάτων.



Εικόνα 4.8.6-1. Περίσφιγξη με μανδύα οπλισμένου σκυροδέματος: α. περιμετρική ενίσχυση υποστυλώματος, β. ενίσχυση οροφής με εκτοξευόμενο σκυροδέμα.

#### 4.9 Μανδύες ινοπλισμένων πολυμερών (FRP)

Είναι η πλέον διαδεδομένη τεχνική περίσφιγξης. Αυτό οφείλεται κυρίως στην απλότητα από την οποία η εν λόγω τεχνική χαρακτηρίζεται σε ότι αφορά στην προετοιμασία των επιφανειών προς ενίσχυση και των υλικών ενίσχυσης και παράλληλα στην εξοικονόμηση χρόνου που επιτυγχάνεται μέσω της συγκεκριμένης διαδικασίας τοποθέτησης. Η τοποθέτηση των δομικών στοιχείων από σκυροδέμα μέσα σε μανδύα οδηγεί στην ενίσχυση της ικανότητας παραμόρφωσης και της θλιπτικής αντοχής των υπό ενίσχυση στελεχών. Επιπλέον των παραπάνω περιορίζει σημαντικά την πιθανότητα εμφάνισης τοπικού λυγισμού στα στελέχη του οπλισμού και βελτιώνει τη συνάφεια στα σημεία των οπλισμών όπου υπάρχουν ματίσεις. Η τοποθέτηση των φύλλων ενίσχυσης γίνεται σε οριζόντια διεύθυνση στις περιπτώσεις που η παρέμβαση αποσκοπεί στην ενίσχυση των διατμητικών αντοχών. Αν η

ενισχυτική παρέμβαση αποσκοπεί στην παράλληλη βελτίωση διατμητικών και καμπτικών αντοχών, τότε πρέπει να χρησιμοποιούνται και φύλλα ινοπλισμένων πολυμερών με ίνες κατάλληλης διεύθυνσης (κατακόρυφη).

Η εφαρμογή της περίσφιγξης όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενη παράγραφο είναι αποδοτικότερη σε δομικά στοιχεία κυκλικής διατομής. Εφαρμόζεται αντίστοιχα και σε στελέχη ορθογωνικής διατομής, τα οποία προηγουμένως έχουν υποστεί την κατάλληλη επεξεργασία (εξομάλυνση γωνιών και επιφανειακών ανωμαλιών) ώστε να αποκτήσουν καμπυλότητα ακτίνας τουλάχιστον 30 χιλιοστών. Η μηχανική απόκριση των ενισχυμένων δομικών στελεχών είναι πανομοιότυπη με εκείνη του αρχικώς κατασκευασμένου σε ότι αφορά στα μηχανικά του χαρακτηριστικά (μηχανική αντοχή, ακαμψία). Η αποτελεσματικότητά της δύναται να βελτιωθεί μέσω της προέντασης των τοποθετούμενων φύλλων ινοπλισμού, πρακτική που υιοθετείται λόγω του υψηλού βαθμού τεχνικής δυσκολίας που παρουσιάζει μόνο σε ειδικές εφαρμογές.

## Βιβλιογραφία 4<sup>ου</sup> Κεφαλαίου

1. Ε. Γ. Παπαδάκης «ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΔΙΑΡΚΕΙΑΣ ΖΩΗΣ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΛΟΓΩ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΟΠΛΙΣΜΟΥ», Εισήγηση στην ημερίδα του ΤΕΕ «ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΧΑΛΥΒΩΝ», 4 Δεκεμβρίου 2004.
2. CEB, «*Durable Concrete Structures - CEB Design Guide*», *Bulletin d' Information*, **182**, Lausanne (1989).
3. Mehta, P.K., «*Durability- Critical Issues for the Future*», *Concr. Intern.*, **19**(7), 27 (1997).
4. Neville, A.M., *Properties of Concrete*, 4th ed., Longman, Essex (1995).
5. Richardson, M.G., *Fundamentals of Durable Reinforced Concrete*, Spon Press, London (2002).
6. Illston, J.M. and P.L.J. Domone, «*Construction Materials – Their Nature and Behaviour*», 3<sup>rd</sup> ed., Spon Press, London (2001).
7. Σ. Η. Δρίτσος, «*Τα σύνθετα υλικά στις κατασκευές*», 15ο Συνέδριο Σκυροδέματος, ΤΕΕ, ΕΤΕΚ, Αλεξανδρούπολη, Οκτώβριος 2006.
8. Α. Φωτάκη, «*Μελέτη Περίσφιγξης Υποστηλωμάτων Ορθογωνικής Διατομής Μεγάλου Λόγου Πλευρών με Ινοπλισμένα Πολυμερή (FRP) και Ινοπλέγματα σε Ανόργανη Μήτρα (TRM)*», Μεταπτυχιακή Εργασία, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα, 2014.
9. Α. Ε. Κουτσοπούλου, Α. Παπαϊωάννου, «*Πειραματική και Αναλυτική Διερεύνηση Καμπτικής Συμπεριφοράς Δοκών από Οπλισμένο Σκυρόδεμα Ενισχυμένες με Ινοπλισμένα Πολυμερή*», Μεταπτυχιακή Εργασία, ΕΜΠ, 2011.
10. S. Li, J. Hu, H. Ren, «*The Combined Effects of Environmental Conditioning and Sustained Load on Mechanical Properties of Wet Lay-Up Fiber Reinforced Polymer*», *Polymers*, 2017, 9(12), 244.
11. S. Agrawal, K.K. Sigh, P. Sarkar, «*Impact damage on fibre-reinforced polymer matrix composite – A review*», *Journal of Composite Materials*, 2013, 48(3), 317–332.
12. R. Selzer, K. Friedrich, «*Mechanical properties and failure behaviour of carbon fibre-reinforced polymer composites under the influence of moisture*», *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 1997, 28(6), 595–604.

13. G. Plizzari, P. Serna, «*Structural effects of FRC creep*», *Materials and Structures*, 2018, 51(6).
14. J. D. Ortiz, S.S.K. Dolati, P. Malla, A. Nanni, A. Mehrabi, «*FRP-Reinforced/Strengthened Concrete: State-of-the-Art Review on Durability and Mechanical Effects*», *Materials*, 2023, 16(5):1990.
15. Ι. Χ. Σιμιτζής, *Επιστήμη και Τεχνική των Πολυμερών και Σύνθετων Υλικών*, Αθήνα Φεβρουάριος 2017, pp. 12-42, 513-516, 628-633.
16. W. D. Callister, D.G. Rethwisch, *Materials Science and Engineering*, 9<sup>th</sup> edition, John Wiley & Sons 2015, pp. 117-142, 541-587.
17. Ν. Χατζηχρηστίδης, Μ. Πιτσικάλης, Ε. Ιατρού, *Βιομηχανική Χημεία – Πολυμερή*, Σημειώσεις Μαθήματος, Εθνικό Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο, Αθήνα 2008.
18. H. Staudinger, *Die Hochmolekularen Organischen Verbindungen: Kautschuk und Cellulose*, Springer, Berlin, 1932.
19. P. C. Hiemenz, T.P. Lodge, *Polymer Chemistry*, Second Edition, CRC Press, Boca Raton, 2007, pp. 43-117.
20. Γ. Καραγιαννίδης, Ε. Σιδερίδου, *Χημεία Πολυμερών*, Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη, 2010, pp.17-49.
21. T. C. Triantafillou, «*Strengthening of Masonry Structures Using Epoxy-Bonded FRP Laminates*», *Journal of Composites for Construction*, 1998, 2(2), 96–104.
22. T. C. Triantafillou, C.P. Antonopoulos, «*Design of Concrete Flexural Members Strengthened in Shear with FRP*». *Journal of Composites for Construction*, 2000, 4(4), 198–205.
23. T. C. Triantafillou, «*Composites: a new possibility for the shear strengthening of concrete, masonry and wood*», *Composites Science and Technology*, 1998, 58(8), 1285–1295.
24. Σ. Η. Δρίτσος, «*Επισκευές και Ενισχύσεις Κατασκευών από Οπλισμένο Σκυρόδεμα*», Πάτρα 2005.
25. Σ. Η. Δρίτσος, «*Τεχνικές ενίσχυσης υποστυλωμάτων με περίσφιγξη*», 2006, Δελτίο ΣΠΜΕ/No 338.
26. Α. Χ. Τριανταφύλλου Αθανάσιος (2006), «*Νέα Γενιά Δομικών Υλικών για την Ενίσχυση Κατασκευών: Ινοπλισμένα σε Ανόργανη Μήτρα*» (IAM).

27. Κ. Γ. Παπανικολάου, Α. Χ. Τριανταφύλλου, Κ. Κάρλος, Μ. Παπαθανασίου, «Νέα γενιά συνθέτων υλικών ανόργανης μήτρας (TRM) για την ενίσχυση φέρουσας τοιχοποιίας», 15ο Συνέδριο Σκυροδέματος, ΤΕΕ, ΕΤΕΚ, Αλεξανδρούπολη, Οκτώβριος 2006.
28. S. Rocca, N. Galat, A. Nanni, «*Experimental evaluation of FRP strengthening of large-size reinforced concrete columns*», Report CIES 06-63, University of Missouri Rolla, 2006.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5ο- Σκοπός διδακτορικής διατριβής

Το οπλισμένο σκυρόδεμα χρησιμοποιείται ευρέως στον τομέα των κατασκευών, και ιδιαίτερα στην Ελλάδα, λόγω του συνδυασμού του χαμηλού κόστους του σκυροδέματος, της υψηλής μηχανικής αντοχής από την οποία χαρακτηρίζεται και της μεγάλης διαθεσιμότητάς των πρώτων υλών για την κατασκευή του [1].

Παρ' όλα αυτά, οι κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα τείνουν να παρουσιάζουν ρωγμές όταν υπόκεινται σε φορτίσεις. Επιπροσθέτως, το σκυρόδεμα υφίσταται συρρίκνωση λόγω ξηράνσεως και ο εμπεριεχόμενος σε αυτό χαλύβδινος οπλισμός διογκώνεται όταν οι τσιμεντοκατασκευές βρίσκονται εγκατεστημένες σε περιβάλλοντα με έντονες θερμικές συνθήκες και σε περιπτώσεις κατά τις οποίες, επί ή εντός της δομής αυτών, λαμβάνουν χώρα φυσικοχημικές αντιδράσεις ή φαινόμενα διάβρωσης του οπλισμού [2,3]. Οι μικρορωγμές που εντοπίζονται (πλάτος  $\leq 0,05$  mm) και οι οποίες συνήθως έχουν προκληθεί από φυσικοχημικές αντιδράσεις, διάβρωση οπλισμού και κατ' επέκταση την διόγκωσή του, συνήθως αντιμετωπίζονται με την έγχυση/ενεμάτωση λεπτόρρευστης εποξειδικής ρητίνης, με σκοπό την συγκόλληση της ρωγμής και παράλληλα την προστασία του σιδήρου [4].

Σε ότι αφορά σε μεγαλύτερου μεγέθους επισκευαστικού ή ενισχυτικού τύπου παρεμβάσεις επί των κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα οι οποίες στοχεύουν να επαναφέρουν την φέρουσα ικανότητα στα αρχικά της επίπεδα, αποτελούσαν και σε κάποιες περιπτώσεις συνεχίζουν να αποτελούν υψίστης σημασίας ζήτημα λαμβάνοντας υπόψη ότι η αποτελεσματικά ορθή αντιμετώπισή αυτών των φαινομένων, είναι συνυφασμένη με ποικίλες προϋποθέσεις.

Οι μεθοδολογικές πρακτικές που χρησιμοποιούνται σε αυτού του τύπου τις εργασίες ενίσχυσης υποστρωμάτων σε υφιστάμενες κατασκευές κατατάσσονται σε δύο επιμέρους κατηγορίες. Η κατηγοριοποίηση γίνεται βάσει της μεταβολής της διατομής

που επέρχεται στο υπό επισκευή ή ενίσχυση δομικό στοιχείο ως αποτέλεσμα της παρέμβασης.

Έτσι υπάρχουν τεχνικές η εφαρμογή των οποίων δεν οδηγεί σε μεταβολή, ήτοι αύξηση της διατομής του υπό παρέμβαση δομικού στοιχείου. Στην περίπτωση αυτή η ενίσχυση πραγματοποιείται με τη μέθοδο της ενεργής περίσφιξης του ανωτέρου στελέχους.

Η δεύτερη κατηγορία αφορά σε ενισχυτικές παρεμβάσεις κατά τις οποίες η ενίσχυση προσδίδεται με την επένδυση της εξωτερικής επιφάνειας του υπό επισκευή δομικού στοιχείου με νέες στρώσεις σκυροδέματος και την εφαρμογή επί αυτών επιπλέον οπλισμού μέσω της κατασκευής ενός κελύφους (κλωβού) γύρω από το αρχικό στοιχείο [5,6].

Η ανάγκη της παράτασης του χρόνου ζωής του οπλισμένου σκυροδέματος, αποτέλεσε το έναυσμα της εισαγωγής των ρητινούχων συστημάτων στον χώρο της κατασκευής, με την ανάπτυξη των εν λόγω υλικών να είναι ραγδαία τις τελευταίες δεκαετίες. Ρητίνες παντός τύπου χρησιμοποιούνται πλέον για την προστασία και την ενίσχυση κατασκευαστικών και κτιριακών υποδομών [20,21]. Η αξιοποίηση των συνθέτων υλικών βοηθά σημαντικά στην αναβάθμιση της στατικότητας των κατασκευών ενώ παράλληλα διατηρεί ανεπηρέαστη τη μηχανική αποτελεσματικότητα των υλικών της υφιστάμενης υποδομής [7].

Οι ενισχυτικές παρεμβάσεις με την εφαρμογή συνθέτων υλικών υπάγονται στην πρώτη κατηγορία. Αποτελούν επεμβατικές πρακτικές ενισχυτικής μορφής στις οποίες χρησιμοποιούνται ίνες άνθρακα, υάλου και σε κάποιες ειδικές περιπτώσεις ίνες αραμιδίου. Η εφαρμογή των προαναφερθέντων ενισχυτικών μέσων απαιτεί τον συνδυασμό τους με συστήματα εποξειδικής ρητίνης ή αντίστοιχο ρητινούχου συστάσεως κονίαμα.



Η ενισχυτική δράση των ανωτέρω συνθέτων προσδίδεται με την εξωτερική επικόλληση τους σε δομικά στοιχεία. Ο κατάλληλος προσανατολισμός των επικολλώμενων ενισχύσεων είναι απαραίτητος ώστε η αποδοτικότητα τους ως προς την απορρόφηση των επιβλαβών φορτίσεων να είναι η βέλτιστη δυνατή. Ο τύπος των υλικών που συχνά χρησιμοποιούνται είναι τα ινοπλισμένα πολυμερή-FRP (Fiber Reinforced Polymers) αποτελούμενα από κατάλληλα επεξεργασμένες ίνες (pre-preg) υψηλής αντοχής σε εφελκυσμό.

Για περίπου τέσσερις δεκαετίες, τα ενισχυμένα με ίνες πολυμερή υλικά (FRP) βρίσκονται στο κέντρο του επιστημονικού ενδιαφέροντος. Αυτό οφείλεται κυρίως στην απλότητα και την ευκολία εφαρμογής τους αλλά παράλληλά και στις εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητές τους για τις οποίες και διακρίνονται. Ως αποτέλεσμα των παραπάνω, η έρευνα γύρω από τις δυνατότητες αξιοποίησης τους στην ανάπτυξη καινοτόμων υλικών και μεθόδων ενίσχυσης των κατασκευών έχει να επιδείξει σημαντικό έργο [7-13].

Τα σύνθετα υλικά εποξειδικής ρητίνης με ίνες άνθρακα, αποτελούν εδώ και αρκετά χρόνια τη συνηθέστερη επιλογή σε ότι αφορά σε εφαρμογές στον κατασκευαστικό τομέα. Αυτό αποδίδεται στις εξαιρετικές αντοχές που παρουσιάζουν στις διατμητικές και θλιπτικές καταπονήσεις αλλά και στην μεγάλη ευκολία που εμπεριέχεται στην εν γένει χρησιμοποίησή τους. Ως αποτέλεσμα η αξιοποίησή των υλικών αυτών σε περίπλοκες δομές αποτελεί συνήθως μονόδρομο [14-19]. Η χρήση τους είναι ιδιαίτερος εκτεταμένη στην περίπτωση των κατασκευών που έχουν υποστεί φθορές (σεισμοί, καιρικά φαινόμενα, γήρανση κ.α.) και η ανάγκη επισκευής τους είναι ζωτικής σημασίας, ειδικότερα σε ότι αφορά στις μη ενισχυμένες δομές, όπως οι τοιχοποιίες, οι οποίες γίνονται ευκολότερα και αμεσότερα δέκτες καταπονήσεων.

Η πλειοψηφία των δημοσιευμένων ερευνών αφορά σε ενισχυτικές εφαρμογές κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος με ινοπλισμένα πολυμερή μέσω περίσφιξης [14, 15, 23, 24].

Η περίσφιξη δομικών στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος με FRP αποτελεί σήμερα μια ευρύτατα εφαρμοζόμενη πρακτική. Μέσω αυτής αφενός διασφαλίζεται η αύξηση της αξονικής ικανότητας παραλαβής φορτίου των στηλών σε μη σεισμικές περιοχές, καθώς και η αύξηση της ολκιμότητας και αφετέρου η αποφυγή αστοχιών κατά την περίδεση του οπλισμού. Τέλος παρατείνεται η δυνατότητα του λυγισμού (χρόνος αντοχής φόρτισης) των ράβδων σε περίπτωση εκδήλωσης σεισμικών γεγονότων. Η εξωτερική περίσφιξη με υλικά FRP εφαρμόζεται και απαντάται σε στήλες κυκλικής ή και ορθογωνικής διατομής, οι οποίες είναι συνήθως επενδυμένες (με περιτύλιξη) με εποξειδικού τύπου συστήματα που φέρουν ενίσχυση υφασμάτων μίας κατεύθυνσης από ίνες άνθρακα.

Η περίσφιξη σε ορθογωνικής διατομής στήλες ωστόσο, αποδεικνύεται λιγότερο αποτελεσματική σε σχέση με την αντίστοιχη σε κυκλικές κυρίως εξαιτίας της αναλογίας διαστάσεων της διατομής. Η περιορισμένη αποτελεσματικότητα των ενισχυτικών δράσεων περίσφιξης στα ορθογωνικής διατομής δομικά στοιχεία, ώθησε τους επιστήμονες να εστιάσουν την έρευνά τους στη μελέτη της μηχανικής απόδοσης των αντίστοιχων κυκλικής διατομής [5,6,22].

Σε εθνικό αλλά και διεθνές επίπεδο, μεγάλο μέρος των εν χρήση κτιρίων και υποδομών οπλισμένου σκυροδέματος, όντας κατασκευασμένα εδώ και πολλά χρόνια έχουν διανύσει το μεγαλύτερο μέρος της χρηστικής τους ζωής. Λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός ότι η ανοικοδόμηση τους έχει ακολουθήσει την εφαρμογή παλαιότερων οικοδομικών κανονισμών και προτύπων και η χρήση τους (με τα περισσότερα εκ των ανωτέρω να αξιοποιούνται σε χρήσεις κατοικίας, δομών στέγασης και παροχής υπηρεσιών, δομών υγείας και εκπαίδευσης κ.α.), συνεχίζεται, είναι προφανές ότι οι

ενισχυτικού και επισκευαστικού τύπου παρεμβάσεις καθίστανται απαιτούμενες, ώστε να αποφευχθούν πιθανά φαινόμενα κατάρρευσης με ότι αυτό συνεπάγεται.

Η παλαιότητα των εν λόγω κατασκευών σε συνδυασμό με τις ισχύουσες και θεσμοθετημένες κατά την περίοδο οικοδόμησής τους κατασκευαστικές πρακτικές, οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η πλειοψηφία τους έχει ενδεχομένως κατασκευαστεί με δομικά στοιχεία ορθογωνικής διατομής.

Ως εκ τούτου και σε συνδυασμό με την έντονη σεισμογενή δραστηριότητα που παρατηρείται σε αρκετές χώρες παγκοσμίως, είναι απαραίτητο να αναπτυχθούν αποτελεσματικές στρατηγικές αποκατάστασης για την δομική ενίσχυση τους, έτσι ώστε να αποφευχθεί ή να περιοριστεί η έκταση των επερχόμενων φθορών.

Λαμβάνοντας υπόψη όλα όσα αναλύθηκαν προηγούμενα, τις τελευταίες δεκαετίες αρκετοί ερευνητές κι επιστήμονες στράφηκαν στην μελέτη, την ανάπτυξη μεθόδων και τη διερεύνηση της μηχανικής απόδοσης νέων υλικών ενίσχυσης για δομές οι οποίες αποτελούνται από στοιχεία ορθογωνικού τύπου. Σκοπός των εν λόγω ερευνητικών δράσεων ήταν η βελτίωση της αποδοτικότητας των FRP συνθέτων υλικών σε ορθογωνικά υποστυλώματα και δοκούς [26-34].

Μεταξύ αυτών των ερευνητικών πονημάτων, συγκαταλέγεται σημαντικός αριθμός εργασιών που αφορούν στην χρήση υφασμάτων ινών άνθρακα σε εργασίες ενίσχυσης της φέρουσας ικανότητας κατασκευών από σκυρόδεμα [16,35-39]. Στο πλαίσιο τους μελετώνται τα αποτελέσματα της εφαρμογής υφασμάτων κυρίως μονής κατεύθυνσης στην βελτίωση της ανθεκτικότητας δομών και κατασκευών.

Μεγάλος αριθμός επιστημονικών ερευνών, έχει επίσης εστιάσει στη μελέτη της ενισχυτικής αποτελεσματικότητας της χρήσης μικρού μεγέθους ινών ως υλικά πλήρωσης στο τσιμέντο και κατεπέκταση στα τσιμεντένια δομικά στοιχεία [43-49].

Στον αντίποδα και σε ότι αφορά στη μελέτη της αποδοτικότητας υφασμάτων ενίσχυσης εναλλακτικού τύπου αλλά και πλέξης στα δομικά στοιχεία σκυροδέματος, η έρευνα είναι περιορισμένη. Αν και οι διαθέσιμοι τύποι υφασμάτων ποικίλουν, δεν εντοπίζονται στη βιβλιογραφία εργασίες στις οποίες να μελετώνται οι επιπτώσεις της χρήσης διαφορετικών ειδών και υφασμάτων διαφορετικής πλέξης. Αν και έχει διεξαχθεί εκτεταμένη έρευνα στο πεδίο της εφαρμογής και αξιοποίησης των συνθέτων υλικών από ίνες εν γένει, τα διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα και στοιχεία που αφορούν στη βελτίωση που προσδίδεται μέσω των συγκεκριμένων υλικών στις κατασκευές είναι περιορισμένα [42].

Στόχος της παρούσας διατριβής είναι να διερευνήσει περαιτέρω τις ήδη εφαρμοζόμενες πρακτικές ενίσχυσης δομικών στοιχείων ορθογωνικής διατομής με υλικά FRP. Στο πλαίσιο της έρευνας που διεξάγεται, εξετάζονται εκτενώς οι επιπτώσεις της ενίσχυσης με υφάσματα ινών διαφορετικού τύπου και πλέξεων στα μηχανικά χαρακτηριστικά των υπό ενίσχυση δομικών στοιχείων όπως επίσης και της εναλλακτικής ενίσχυσης δομικών στοιχείων τσιμέντου με εισαγωγή μικρού μήκους ινών άνθρακα ως πληρωτικό υλικό. Δευτερευόντως, η συγκεκριμένη διατριβή αποσκοπεί στην αναβάθμιση της πειραματικής βάσης δεδομένων σχετικά με την βελτιστοποίηση της αντοχής και συνεπώς την παράταση της χρηστικής ζωής των κατασκευών από σκυρόδεμα, ως αποτέλεσμα της επένδυσής τους με σύνθετα ενισχυτικά υλικά.

Για τους σκοπούς της παρούσης κατασκευάστηκαν α.) δοκίμια καθαρού τσιμεντοκονιάματος και β.) δοκίμια τσιμεντοκονιάματος με ίνες άνθρακα μικρού μήκους σύμφωνα με τις απαιτήσεις του προτύπου EN 196-1:1995 στα οποία εν συνεχεία τοποθετήθηκε επένδυση-για την περαιτέρω ενίσχυσή τους-από υφάσματα ινών άνθρακα, υάλου και Kevlar συνδυασμένα με εποξειδική ρητίνη. Χρησιμοποιήθηκαν δυο διαφορετικοί τύποι υφασμάτων άνθρακα ως προς τον τύπο πλέξης, ήτοι ύφασμα μονής (unidirectional) και διπλής κατεύθυνσης, διαγώνιας

πλέξης (twill) αντίστοιχα και υφάσματα διαγώνιας πλέξης (twill) σε ότι αφορά στα υφάσματα ινών υάλου και Kevlar. Επίσης κατασκευάστηκαν σύνθετα υλικά μήτρας εποξειδικής ρητίνης στα οποία ως ενισχυτικό μέσο χρησιμοποιήθηκαν υφάσματα ινών άνθρακα, υάλου και Kevlar αντίστοιχων τύπων και πλέξεων με τα παραπάνω. Εκ των ανωτέρω τα επενδυμένα με εποξειδική ρητίνη και υφάσματα ινών υλικά από τσιμεντοκονίαμα υπεβλήθησαν σε πειραματικές δοκιμές εξέτασης της μηχανικής τους αντοχής σε θλιπτικά φορτία. Αντιστοίχως τα σύνθετα υλικά που κατασκευάστηκαν από εποξειδική ρητίνη με υφάσματα ινών άνθρακα, γυαλιού Kevlar και υπεβλήθησαν σε πειραματικές δοκιμές με σκοπό τον προσδιορισμό της αντοχής αυτών σε κάμψη και διάτμηση. Επί των δοκιμών με εξωτερική ενίσχυση από υφάσματα ινών άνθρακα και εποξειδική ρητίνη, πραγματοποιήθηκαν επιπρόσθετες πειραματικές μετρήσεις για τον προσδιορισμό των μηχανικών τους χαρακτηριστικών. Πιο συγκεκριμένα σε παρόμοια δοκίμια, μελετήθηκε η επίδραση της τεχνητής γήρανσης στην μηχανική συμπεριφορά των υπο εξέταση υλικών και ειδικότερα, η αντοχή τους στις θλιπτικές καταπονήσεις.

Τα ανωτέρω σύνθετα υλικά υπεβλήθησαν σε δομικό και μορφολογικό χαρακτηρισμό μέσω Ηλεκτρονικής Μικροσκοπίας Σάρωσης (SEM).

Από την μελέτη και την επεξεργασία των αποτελεσμάτων του μηχανικού και του μορφολογικού χαρακτηρισμού θα προκύψουν χρήσιμα συμπεράσματα σε ότι αφορά στην ανάπτυξη και την περαιτέρω ενίσχυση της αποτελεσματικότητας των υπό εξέταση υλικών.

Στην Εικόνα 5.1 παρατίθεται διαγραμματικά και συνοπτικά η ροή του πειραματικού σκέλους της διατριβής, βασιζόμενη στην ανάλυση των κεφαλαίων που ακολουθούν.



Εικόνα 5.1. Πειραματικό σκέλος διδακτορικής διατριβής.

## Βιβλιογραφία 5<sup>ου</sup> Κεφαλαίου

1. M. Araújo, S. van Vlierberghe, J. Feiteira, G.J Graulus, K. van Tittelbooma, J. C. Martins, P. Dubruel, N. de Belie, «*Cross-linkable polyethers as healing/sealing agents for self-healing of cementitious materials*», Materials and Design, 2016, 98, 215-222.
2. <https://www.chemeng.ntua.gr/courses/dpm/pdf-files/07-oplismeno-skyrodema-givalou.pdf>
3. Γ. Μπατής, «*ΧΡΗΣΗ ΝΕΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΥΞΗΣΗ ΤΗΣ ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ*», Εισήγηση στην ημερίδα του ΤΕΕ «*ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΚΤΙΡΙΩΝ ΜΕ ΣΥΓΧΡΟΝΑ ΥΛΙΚΑ*», 6 Νοεμβρίου 2007.
4. S. Griffin, A. Hossein, B. Farrant, «*Evaluation of Epoxy Injection Method for Concrete Crack Repair*», International Journal of Structural and Civil Engineering Research, 2017,(6),3.
5. Σ. Η. Δρίτσος, «*Τα σύνθετα υλικά στις κατασκευές*», 15ο Συνέδριο Σκυροδέματος, ΤΕΕ, ΕΤΕΚ, Αλεξανδρούπολη, 2006.
6. Σ. Η. Δρίτσος, «*Τεχνικές ενίσχυσης υποστυλωμάτων με περίσφιγξη*», 2006, Δελτίο ΣΠΜΕ/No 338.
7. A. de Luca, F. Nardone, G. P. Lignola, A. Prota, A. Nanni, «*Wall-Like Reinforced Concrete Columns Externally Confined by Means of Glass FRP Laminates*», Adv. Struct. Eng, 2012, 16, 593–603.
8. P. Foraboschi, «*Effectiveness of novel methods to increase the FRP-masonry bond capacity*», Compos. Part B 2016, 107, 214–232.
9. P. Foraboschi, «*Analytical model to predict the lifetime of concrete members externally reinforced with FRP*», Theor. Appl. Fract. Mech, 2015, 75, 137–145.
10. G. Aktas, S. E. Gunaslan, «*Strengthening methods for reinforced concrete sections with Fiber reinforced polymers*». IOSR J. Mech. Civ. Eng., 2017, 14, 17–22.
11. R. Al-Rousan, «*Predicting the Optimum Shear Capacity of Reinforced Concrete Beams Externally Strengthened With CFRP Composites*», Procedia Manuf, 2020, 44, 631–638.
12. Y. Zhou, J. Zhang, W. Li, B. Hu, X. Huang, «*Reliability-based design analysis of FRP Shear Strengthened Reinforced Concrete Beams considering different FRP configurations*», Compos. Struct, 2020, 237,111957.
13. R. Jain, L. Luke, «*Fiber Reinforced Polymer (FRP) Composites for Infrastructure Applications: Focusing on Innovation, Technology*

- Implementation and Sustainability (Strategies for Sustainability)*», Springer, Berlin, Germany, 2012, pp.163–190.
14. T. C. Triantafillou, E. Choutopoulou, E. Fotaki, M. Skorda, M. Stathopoulou, K. Karlos, «*FRP confinement of wall-like reinforced concrete columns*», *Mater. Struct.* 2016, 49, 651–664.
  15. T. Hassan, s. Rizkalla, «*Investigation of Bond in Concrete Structures Strengthened with Near Surface Mounted Carbon Fiber Reinforced Polymer Strips*», *Journal of Composites for Construction*, 2003 7(3), 248–257.
  16. T. Tanaka, K. Yagi, N. Kojima, K. Kimura, H. Katsumata, «*Retrofit method with carbon fiber for reinforced concrete structures*», *Advanced Composite Materials*, 1994, 4(2), 183–195.
  17. B. Kromoser, P. Preinstorfer, J. Kollegger, «*Building lightweight structures with carbon-fiber-reinforced polymer-reinforced ultra-high-performance concrete: Research approach, construction materials, and conceptual design of three building components*», *Structural Concrete*, 2018, pp. 1-15.
  18. Z. Deng, «*The fracture and fatigue performance in flexure of carbon fiber reinforced concrete*», *Cement and Concrete Composites*, 2005, 27(1), 131–140.
  19. M. Jing, W. Raongjant, Z. Li, «*Torsional strengthening of reinforced concrete box beams using carbon fiber reinforced polymer*», *Composite Structures*, 2007, 78(2), 264–270.
  20. O. J. Rescher, «*Importance of cracking in concrete*». *dam. Eng Mech* 1990; 35(1):23–29.
  21. G. Pons, S.A. Ramoda, J.C. Maso, «*Influence of the loading history on fracture mechanics parameters of micro-concrete: effects of low-frequency cyclic loading*» *ACI Mater J* 1988, (5):341–346.
  22. M. Harajli, E. Hantouche, K. Soudki, «*Stress-strain model for fiber-reinforced polymer jacketed concrete columns*», *ACI Struct J*, 2006 103(5):672–682.
  23. D. I. Chang, W.K. Chai, «*Flexural fracture and fatigue behavior of steel-fiber-reinforced concrete structures*», *Nuclear Engineering and Design*, 1995, 156(1-2), 201–207.
  24. A. Orbe, J. Cuadrado, R. Losada, E. Rojí, «*Framework for the design and analysis of steel fiber reinforced self-compacting concrete structures*». *Construction and Building Materials*, 2012, 35, 676–686.
  25. V.M.C.F. Cunha, «*Steel fibre reinforced self-compacting concrete (from micromechanics to composite behavior)* », Ph.D. thesis, Universidade do



- Minho, Departamento de Engenharia Civil, Azurim, 4800-058 Guimaraes, Portugal, 2010.
26. T. Ibell, A. Darby, S. Denton, «*Research issues related to the appropriate use of FRP in concrete structures*», *Construction and Building Materials*, 2009, 23(4), 1521–1528.
  27. B. A. Sundaram, K. Kesavan, S. Parivallal, K. Ravisankar, «*TECHNIQUE FOR INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT OF INTERFACIAL STRAINS IN FRP STRENGTHENED CONCRETE STRUCTURES USING FBG SENSORS*», *Experimental Techniques*, 2010, 35(4), 35–38.
  28. A. Belarbi, B. Acun, *FRP Systems in Shear Strengthening of Reinforced Concrete Structures. Procedia Engineering*, 2013, 57, 2–8.
  29. M. Ming Zhao, Y. Dong, Y. Zhao, A. Tennant, F. Ansari, «*Monitoring of Bond in FRP Retrofitted Concrete Structures*», *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2007, 18(8), 853–860.
  30. H. Kaiser, V. M. Karbhari, «*Identification of potential defects in the rehabilitation of concrete structures with FRP composites*», *International Journal of Materials and Product Technology*, 2003, 19(6), 498.
  31. M. F. Green, «*FRP repair of concrete structures: performance in cold regions*», *International Journal of Materials and Product Technology*, 2007, 28(1/2), 160.
  32. A. Raghu, J.J. Myers, A. Nanni, «*An Assessment of In-Situ FRP Shear and Flexural Strengthening of Reinforced Concrete Joists*», *Advanced Technology in Structural Engineering*, 2000.
  33. D. Dan, T. Nagy-György, V. Stoian, A. Fabian, I. Demeter, «*FRP composites for seismic retrofitting of steel-concrete shear walls with steel encased profiles*», *Behaviour of Steel Structures in Seismic Areas*, 2011, 1071–1076.
  34. A. Parghi, M.S. Alam, «*A review on the application of sprayed-FRP composites for strengthening of concrete and masonry structures in the construction sector*», *Composite Structures*, 2018, 187, 518–534.
  35. M. Tavakkolizadeh, H. Saadatmanesh, «*Strengthening of Steel-Concrete Composite Girders Using Carbon Fiber Reinforced Polymers Sheets*», *Journal of Structural Engineering*, 2003, 129(1), 30–40.
  36. T. Ueda, R. Yamaguchi, K. Shoji, Y. Sato, «*Study on Behavior in Tension of Reinforced Concrete Members Strengthened by Carbon Fiber Sheet*», *Journal of Composites for Construction*, 2002,6(3), 168–174.

37. K. Kimura, Y. Kobatake, «*Long-term performance of reinforced concrete beams with carbon-fiber sheet*», *Composite Interfaces*, 1997, 5(4), 297–303.
38. L. Ye, Q. Yue, S. Zhao, Q. Li, «*Shear Strength of Reinforced Concrete Columns Strengthened with Carbon-Fiber-Reinforced Plastic Sheet*», *Journal of Structural Engineering*, 2002, 128(12), 1527–1534.
39. J. G. Dai, B. L. Wan, H. Yokota, T. Ueda, «*Fracture Criterion for Carbon Fiber Reinforced Polymer Sheet to Concrete Interface Subjected to Coupled Pull-Out and Push-Off Actions*», *Advances in Structural Engineering*, 2009, 12(5), 663–682.
40. D. S. Vijayan, A. Sivasuriyan, P. Devarajan, A. Stefańska, Ł. Wodzyński, E. Koda, «*Carbon Fibre-Reinforced Polymer (CFRP) Composites in Civil Engineering Application - A Comprehensive Review*», *Buildings*, 2023, 13(6):1509.
41. A. Sayam, A. N. M. M. Rahman, M.S. Rahman, Md. S. Rahman, S. A. Smriti A. Faisal, Md. F. Rabbi, Md. Hossain, Md. O. Faruque, «*A review on carbon fiber-reinforced hierarchical composites: mechanical performance, manufacturing process, structural applications and allied challenges*» *Carbon Lett*, 2022, 32, 1173–1205.
42. W. K. M. Frhaan, B. H. Abu Bakar, N. Hilal, I. Al-Hadithi, «*CFRP for strengthening and repairing reinforced concrete: a review*». *Innov. Infrastruct. Solut.* 2021, 6, 49.
43. Y. Ghernouti, B. Rabehi, T. Bouziani, H. Ghezraoui, A. Makhloufi, «*Fresh and hardened properties of self-compacting concrete containing plastic bag waste fibers (WFSCC)* ». *Construction and Building Materials*, 2015, 82, 89–100.
44. A. R. Khaloo, A. Esrafil, M. Kalani, M. H. Mobini, «*Use of polymer fibres recovered from waste car timing belts in high performance concrete*». *Construction and Building Materials*, 2015, 80, 31–37.
45. M. Mastali, A. Dalvand, A. R. Sattarifard, «*The impact resistance and mechanical properties of reinforced self-compacting concrete with recycled glass fibre reinforced polymers*», 2016, *Journal of Cleaner Production*, 124, 312-324.
46. N. Lamba, R. Raj, P. Singh, «*Mechanical response of recycled carbon fiber reinforced polymer fibers in high-strength concrete*», 2022, *Mater Today Proc.*, 78: 603–607.
47. A. Tibebe, E. Mekonnen, L. Kumar, J. Chimdi, H. Hailu, N. Fikadu, «*Compression and workability behavior of chopped glass fiber reinforced concrete*», 2022, *Materials Today: Proceedings*, 62:5087–5094.

48. V. S. Vairagade, S. A. Dhale, «*Hybrid fibre reinforced concrete – A state of the art review*», Hybrid Advances, 2023, 3:100035.
49. L. Ferrara, «Fibre-reinforced cementitious composites with adapted rheology: From state-of-the-art knowledge towards new boundaries for structural concrete applications», 2017, fib Bulletins 79, 91–102.

## Β. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6ο-Σύνθετα υλικά πολυμερικής μήτρας ενισχυμένα με ίνες για την ενίσχυση φέροντος οργανισμού από οπλισμένο σκυρόδεμα

#### 6.1 Διαδικασία κατασκευής δοκιμών

##### 6.1.1 Κατασκευή δοκιμών τσιμέντου

Η κατασκευή των δοκιμών τσιμεντοκονιάματος που χρησιμοποιήθηκαν για τους σκοπούς της διατριβής και πιο συγκεκριμένα για τη μελέτη των θλιπτικών αντοχών των συνθέτων υλικών πολυμερικής μήτρας με ίνες για την ενίσχυση κατασκευών από σκυρόδεμα, κατασκευάστηκαν σύμφωνα με τις απαιτήσεις του προτύπου EN196-1 [1]. Για την παραγωγή τους χρησιμοποιήθηκε καλούπι ορθογωνικής διατομής και διαστάσεων 40mm×40mm×160mm από λαμαρίνα (Εικόνα 6.1-1). Οι εσωτερικές επιφάνειες της κάθε θέσης στο καλούπι επαλειφθήκαν με αντικολλητικό υλικό ώστε να διασφαλιστεί η ομαλή αποκόλληση του τελικώς παραγόμενου υλικού από το καλούπι και να περιοριστεί το ενδεχόμενο πρόκλησης επιφανειακών φθορών ή και καταστροφής των πειραματικών τσιμεντοδοκιμών.



Εικόνα 6.1.1-1. Καλούπι κατασκευής δοκιμών τσιμέντου βάσει EN196-1(αριστερά) τοποθέτηση μίγματος εντός καλουπιού παραγωγής δοκιμών (δεξιά).

Οι κατά βάρος αναλογίες των επιμέρους συστατικών του σκυροδέματος που παρασκευάστηκε και χρησιμοποιήθηκε στα υπό κατασκευή υλικά επελέγησαν σύμφωνα με τις απαιτήσεις του προαναφερθέντος προτύπου, ήτοι ένα μέρος τσιμέντου ( $450g \pm 2$ ) 3 μέρη άμμου ( $1.350g \pm 5$ ) και μισό μέρος νερού ( $225g \pm 1$ ). Τα επιμέρους συστατικά επίσης επελέγησαν σε συμμόρφωση με τις τεχνικές προδιαγραφές που τίθενται για κάθε ένα από αυτά στα σχετικά πρότυπα. Κατόπιν ζύγισης και ετοιμασίας των απαιτούμενων υλικών για το σκυρόδεμα, λαμβάνει χώρα η προετοιμασία του μίγματος. Αρχικά το νερό αδειάζεται στον περιέκτη (κουβά) υλοποίησης της παρασκευής του σκυροδέματος μαζί με το τσιμέντο. Το μίγμα νερού-τσιμέντου αναδεύεται χρησιμοποιώντας αναμεικτήρα (mixer) σε χαμηλή ταχύτητα για χρόνο 30 δευτερολέπτων. Εν συνεχεία προστίθεται στο ανωτέρω προϊόν σταδιακά η άμμος. Με την ολοκλήρωση της μεταφοράς όλης της απαιτούμενης ποσότητας άμμου στον περιέκτη παρασκευής, επιλέγεται η υψηλή ταχύτητα στον αναμεικτήρα και πραγματοποιείται εκ νέου ανάμειξη για άλλα 30 δευτερόλεπτα. Μετά το πέρας του απαιτούμενου χρόνου, η λειτουργία του αναμεικτήρα διακόπτεται και με τη βοήθεια αποξεστικού εργαλείου απομακρύνονται σχολαστικά από τα πλευρικά τοιχώματα και τον πάτο του σκεύους ανάμειξης πιθανά υπολείμματα μίγματος. Το αποξεσθέν υλικό τοποθετείται εκ νέου στο μίγμα. Πραγματοποιείται εκ νέου ανάμειξη στην υψηλή ταχύτητα για 60 δευτερόλεπτα, σκοπός του οποίου είναι η ομογενοποίηση του παραγόμενου σκυροδέματος.

Το τελικώς παραχθέν σκυρόδεμα αποχύνεται στο καλούπι κατασκευής αμέσως μετά την ολοκλήρωση της προετοιμασίας του (Εικόνα 6.1-3) και κατανέμεται ισομερώς στις θυρίδες αυτού.

Αφού ολοκληρωθεί η μεταφορά του μίγματος στις θυρίδες του καλουπιού, η περίσσια του υλικού απομακρύνεται με ένα μυστρί. Το ίδιο εργαλείο χρησιμοποιείται για τη διαμόρφωση των επιφανειών των δοκιμίων ώστε να είναι επίπεδες.

Επί των καλουπωμένων δοκιμίων τοποθετήθηκε μεταλλική πλάκα. Η συνολική διάταξη (καλούπι+δοκίμια+μεταλλική πλάκα προστασίας) τοποθετείται άμεσα σε

οριζόντια θέση σε χώρο με επαρκείς συνθήκες αερισμού και υγρασίας ώστε να μην εξελιχθεί ομαλά η σκλήρυνσή τους. Η χρονική διάρκεια της σκλήρυνσης και κατά συνέπεια παραμονής των τσιμεντένιων δοκιμίων στο καλούπι ανήλθε σε 24 ώρες.

Μετά την ολοκλήρωση της φάσης σκληρύνσεώς τα δοκίμια απομακρύνονται από το καλούπι (Εικόνα 6.1-2) και τοποθετούνται σε οριζόντια θέση μέσα σε δοχείο με αποσταγμένο νερό, θερμοκρασίας περίπου 20°C με την άνω (κατά τη χύτευση και απομάκρυνση από το καλούπι) πλευρά τους να είναι τοποθετημένη με κατεύθυνση προς την επιφάνεια του νερού εμβάπτισης. Η εμβάπτισή τους στο εν λόγω δοχείο διήρκεσε 28 ημέρες.



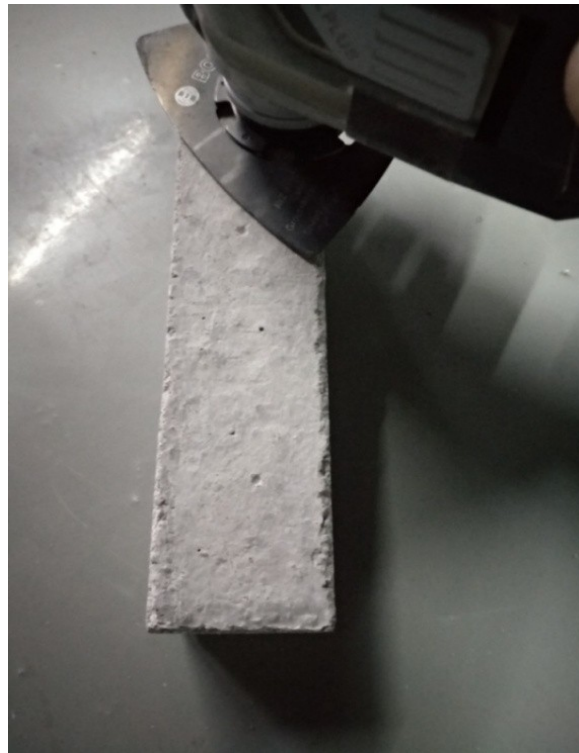
Εικόνα 6.1.1-2. Δοκίμια τσιμέντου για το πειραματικό μέρος της διατριβής (αριστερά) δοκίμια τσιμέντου τοποθετημένα σε νερό (δεξιά).



Εικόνα 6.1.1-3. Μεταφορά και κατανομή του σκυροδέματος στο καλούπι παραγωγής δοκιμίων.

Η τοποθέτησή τους μέσα στο δοχείο εμφάνισης γίνεται κατά τρόπο ώστε να μην βρίσκονται σε επαφή το ένα με το άλλο. Αυτό γίνεται σκοπίμως ώστε να διασφαλιστεί η δυνατότητα ελεύθερης πρόσβασης του υδάτινου στοιχείου στο σύνολο των επιφανειών του κάθε δοκιμίου [1]. Μετά την πάροδο των 28 ημερών τα δοκίμια απομακρύνθηκαν από το νερό και αφέθηκαν σε συνθήκες περιβάλλοντος μέχρις ότου επέλθει η πλήρης ξήρανσή τους (στέγνωμα). Εν συνεχεία υπεβλήθησαν σε εργασίες επιφανειακής βελτιστοποίησης. Αρχικά έλαβε χώρα η λείανση των επιφανειών τους. Η συγκεκριμένη διαδικασία εφαρμόζεται για να ενισχύσει την επιφανειακή πρόσφυση των ανωτέρω υλικών αποβλέποντας μέσω της επεξεργασίας της επιφάνειας στην επίτευξη της κατά το δυνατόν βέλτιστης συνάφειας μεταξύ δομικού στοιχείου και των υπό εξέταση συνθέτων υλικών. Στο πλαίσιο της επιφανειακής λείανσης συμπεριελήφθη και αντίστοιχη διαδικασία εξομάλυνσης των ακμών των δοκιμίων (Εικόνα 6.1-4). Μέσω αυτής «στρογγυλεύθηκαν» οι ακμές, ήτοι οι περιοχές στις οποίες συνήθως εμφανίζονται οι μεγαλύτερες τάσεις. Το

στρογγύλεμα πραγματοποιήθηκε για να καταστήσει εφικτή την αποτελεσματικότερη εφαρμογή του ενισχυτικού υφάσματος.



Εικόνα 6.1.1-4. Λείανση επιφανειών και εξομάλυνση γωνιών δοκιμών τσιμέντου.



Εικόνα 6.1.1-5. Δοκίμια τσιμέντου (αριστερά: σκέτο, δεξιά: με chopped CF).

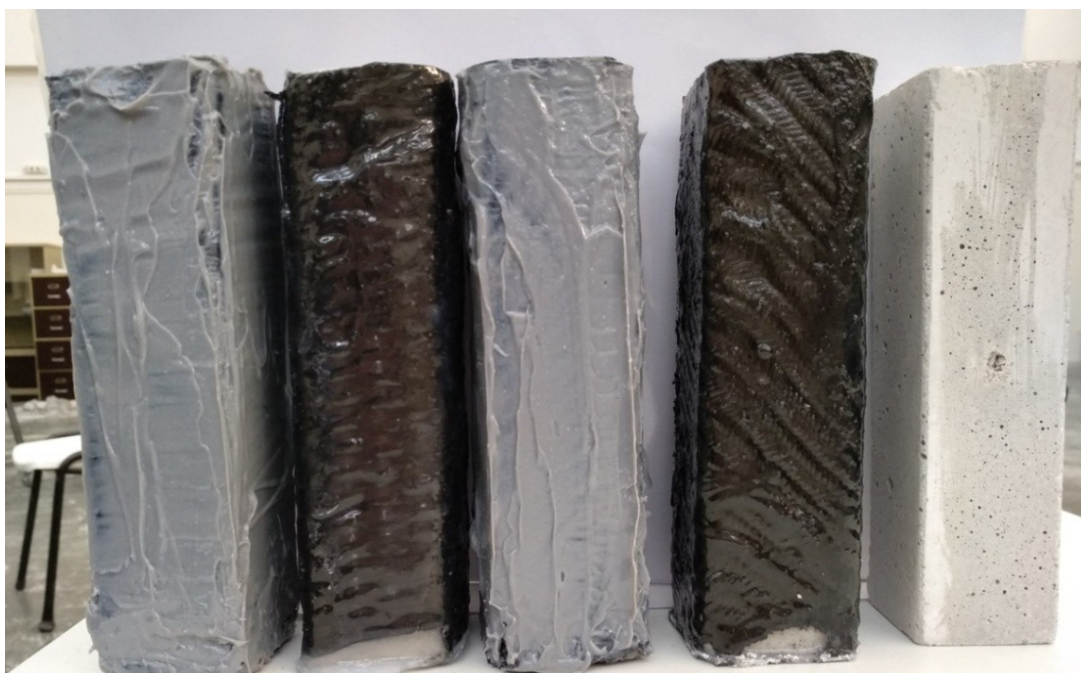


Η παραπάνω παραγωγική διαδικασία εκτελέστηκε επαναλαμβανόμενα. Αυτό κρίθηκε σκόπιμο αφενός ώστε να είναι εφικτή η εκτέλεση του ελάχιστου αριθμού δοκιμών που απαιτούνται σύμφωνα με τα εν ισχύ πρότυπα. Αφετέρου ώστε να υπάρχουν διαθέσιμα δοκίμια για να μπορούν να μελετηθούν ως προς τα μηχανικά τους χαρακτηριστικά τα υλικά στα οποία εφαρμόζονται συγκεκριμένοι συνδυασμοί ενισχυτικών υλικών.

Με την διαδικασία που αναλύθηκε στις προηγούμενες παραγράφους κατασκευάστηκαν παρτίδες δοκιμών τσιμέντου στα οποία, χρησιμοποιήθηκαν ψιλοκομμένες (chopped) ίνες μήκους  $\approx 0.6\text{cm}$ , ως ενισχυτικό υλικό πλήρωσης (Εικόνα 6.1.1-6). Το πληρωτικό συστατικό από ίνες άνθρακα που χρησιμοποιήθηκε, εισήχθη στο μίγμα παραγωγής των δοκιμών σε ποσοστό 10% κατά βάρος. Τα δοκίμια που κατασκευάστηκαν και μελετώνται στην συγκεκριμένη ερευνητική διατριβή όπως επίσης και τα τεχνικά χαρακτηριστικά τους παρατίθενται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 6.1.1-1 και την Εικόνα 6.1.1-5 ακολούθως.

Πίνακας 6.1.1-1. Σύνθετα υλικά τσιμέντου, εποξειδικής ρητίνης και ινών άνθρακα.

Composite Material Code	Cement (% w/w) (Cem)	Carbon Fibers (% v/v)			Epoxy Resin (% w/w)	
		Od	Twill	Chopped	Liq	Paste
Cem	100	0	0	0	0	0
Rcem	90	0	0	10	0	0
Cem_od_paste	80	10	0	0	0	10
Cem_od_liq	80	10	0	0	10	0
Cem_twill_paste	80	0	10	0	0	10
Cem_twill_liq	80	0	10	0	10	0
Od_paste	0	50	0	0	0	50
Od_liq	0	50	0	0	50	0
Twill_paste	0	0	50	0	0	50
Twill_liq	0	0	50	0	50	0
Rcem_od_paste	70	10	0	10	0	10
Rcem_od_liq	70	10	0	10	10	0
Rcem_twill_paste	70	0	10	10	0	10
Rcem_twill_liq	70	0	10	10	10	0



Εικόνα 6.1.1-5. Σύνθετα υλικά ενίσχυσης σκυροδέματος με ινοπλισμένα πολυμερή.



Εικόνα 6.1.1-6. Ψιλοκομμένες (chopped) ίνες άνθρακα.

#### 6.1.2 Κατασκευή δοκιμών τσιμέντου (ενίσχυση με εποξειδική ρητίνη ξηρού τύπου και ίνες άνθρακα)

Μετά την ολοκλήρωση της λείανσης και της ομαλοποίησης των επιφανειακών ατελειών τους, το σύνολο των δοκιμών αυτής της κατηγορίας καθαρίστηκαν

σχολαστικά ώστε να απομακρυνθούν η σκόνη και άλλα υπολείμματα της ανωτέρω επεξεργασίας. Ακολούθως τα δοκίμια ελέγχθηκαν μακροσκοπικά έτσι ώστε να εντοπιστούν τυχόν ελαττωματικές θέσεις επί της επιφανείας τους και υποβλήθηκαν σε επιδιορθωτικού τύπου παρεμβάσεις. Πιο συγκεκριμένα τα κενά και οι τρύπες (ελαττωματικές θέσεις) στις επιφάνειες των πλευρών τους καλύφθηκαν με ειδική εποξειδική ρητίνη στερεού τύπου στην οποία εμπεριέχονται συγκεκριμένου τύπου πρόσθετα (πούδρα χαλαζία). Συγκεκριμένα επιλέχθηκε το σύστημα εποξειδικής ρητίνης SINMAST P103 (SINTECNO, Hellas, Εικόνα 6.1.2-1).



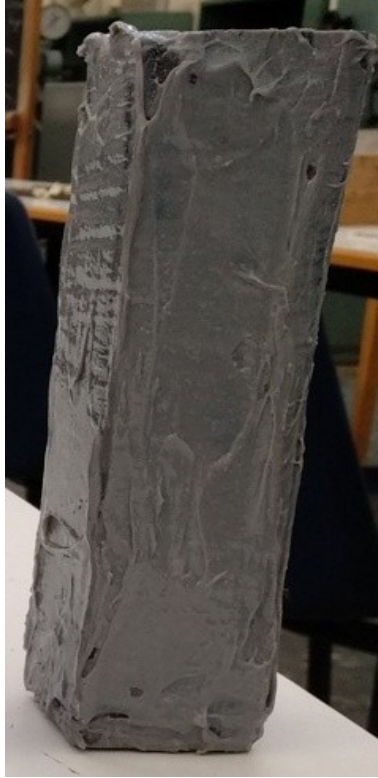
Εικόνα 6.1.2-1. Σύστημα εποξειδικής ρητίνης ξηρού τύπου, SINTECNO SINMAST P103.

Πρόκειται για θιξοτροπική εποξειδική πάστα 2 συστατικών, χωρίς διαλύτες, με βάση εποξειδικές ρητίνες και ειδικά υλικά πλήρωσης. Χρησιμοποιείται κυρίως ως άκαμπτο συγκολλητικό υλικό και συγκολλητικό σε εφαρμογές δομικής ενίσχυσης FRP ή Beton-πλάκας όπως επίσης και σε εργασίες επένδυσης σε δομικά στοιχεία σκυροδέματος (κολώνες, δοκοί, επιπεδωμένες πλάκες κλπ).

Μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί ως συγκολλητικό μέσο (κόλλα) σε εφαρμογές συγκόλλησης διαφορετικών ειδών υλικών, πορώδη όπως το σκυρόδεμα, το μάρμαρο, τα πλακάκια, οι πέτρες, το ξύλο, ο φελλός κ.α., μη πορώδη, όπως επί παραδείγματι τα μέταλλα (χάλυβας, σίδηρος χάλυβας, αλουμίνιο κ.λπ.) και συνθετικά

υλικά (νεοπρένιο, καουτσούκ, πολυεστέρας, άνθρακας κ.α.). Παρασκευάζεται μέσω ανάμειξης των δύο συστατικών του συστήματος, δίνοντας μια εποξειδική πάστα μεσαίου ιξώδους, η οποία είναι κατάλληλη και για εργασίες επισκευής και αγκύρωσης χαλύβδινων ράβδων και ράβδων με σπείρωμα σε κατασκευές από σκυρόδεμα. Αποτελεί ουσιαστικά ένα κονίαμα εποξειδικής ρητίνης που είναι ιδανικό για εργασίες μπαλώματος και στερέωσης επικαλύψεων σε δάπεδα και πλάκες από σκυρόδεμα. Τέλος το συγκεκριμένο σύστημα μπορεί να αξιοποιηθεί ως υλικό επικάλυψης για την επούλωση ρωγμών, τριχωτών ρωγμών, πριν από την έγχυση σε στοιχεία σκυροδέματος και σε ποικιλία αντίστοιχων εφαρμογών [2].

Τα επικαλυμμένα με εποξειδική πάστα δοκίμια αφήνονται για 24 ώρες ώστε να ολοκληρωθεί η σκλήρυνση του υλικού επικάλυψης. Μετά το πέρας του ανωτέρω χρόνου, στα δοκίμια τοποθετείται η επένδυση υφάσματος ινών άνθρακα. Κατασκευάζονται δοκίμια με υφάσματα ινών άνθρακα μονής (Εικόνα 6.1.2-2) και διαγώνιας πλέξης (twill) (Εικόνα 6.1.2-3). Μετά την εφαρμογή των υφασμάτων ενίσχυσης τα ανωτέρω υλικά επικαλύπτονται με ένα επιπλέον στρώμα εποξειδικής πάστας, έτσι ώστε να δημιουργηθεί δομή τύπου sandwich αποσκοπώντας στην επίτευξη της βέλτιστης δυνατής στεγάνωσης και μηχανικής απόδοσης της ενισχυτικής διάταξης.



Εικόνα 6.1.2-2. Δοκίμιο σκυροδέματος ενισχυμένο με ύφασμα ινών μονής πλέξης εποξειδική ρητίνη ξηρού τύπου.



Εικόνα 6.1.2-3. Δοκίμιο σκυροδέματος ενισχυμένο με ύφασμα ινών άνθρακα διαγώνιας πλέξης (twill) μια εποξειδική ρητίνη ξηρού τύπου.

### 6.1.3 Κατασκευή δοκιμών τσιμέντου (ενίσχυση με εποξειδική ρητίνη υγρού τύπου και ίνες άνθρακα)

Ακολουθώντας πανομοιότυπη μεθοδολογία με αυτή που εφαρμόστηκε στα υλικά της παραγράφου 6.1.2 μετά την ολοκλήρωση της λειαντικής επεξεργασίας, τα δοκίμια καθαρίστηκαν σχολαστικά ώστε να απομακρυνθούν η σκόνη και άλλα υπολείμματα της ανωτέρω επεξεργασίας. Εν συνεχεία υπεβλήθησαν σε μακροσκοπικό (οπτικό) έλεγχο. Οι ελαττωματικές θέσεις που εντοπίστηκαν μέσω της ελεγκτικής διαδικασίας επιδιορθώθηκαν με το ίδιο σύστημα εποξειδικής ρητίνης στερεού τύπου το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την επούλωση των επιφανειακών ατελειών στα υλικά της προηγούμενης κατηγορίας.

Σε συνέχεια της επίστρωσης με την εποξειδική πάστα, τα δοκίμια παραμένουν σε συνθήκες περιβάλλοντος για 24 ώρες μέχρι την πλήρη σκλήρυνσή της ρητινούχου επίστρωσης. Κατόπιν οι επιστρωμένες επιφάνειες τους λειαίνονται με μηχανικά μέσα αποσκοπώντας μέσω της ομαλοποίησης (των επιφανειών) να καταστεί δυνατή η βέλτιστη εφαρμογή των ενισχυτικών υφασμάτων και κατεπέκταση η μέγιστη δυνατή αποτελεσματικότητά τους σε όρους μηχανικών αντοχών. Οι λειασμένες επιφάνειες καθαρίζονται επιμελώς και επάνω σε αυτές εφαρμόζεται μια στρώση αστάρι εποξειδικής βάσης ούτως ώστε, να ενισχυθεί η συγκόλληση του υφάσματος στο δοκίμιο (Εικόνα 6.1.3-1). Το σύστημα που χρησιμοποιήθηκε είναι το SINMAST S2W (SINTECNO, Hellas, Εικόνα 6.1.3-3). Πρόκειται για ρητινούχο προϊόν και συγκεκριμένα για διάφανη εποξειδική ρητίνη 2 συστατικών χωρίς διαλύτες. Χρησιμοποιείται ως αστάρι για τον εμποτισμό του σκυροδέματος. Η εφαρμογή του γίνεται ως προστάδιο της τοποθέτησης υφασμάτων άνθρακα ή γυαλιού (FRPs) πάνω σε δομικά στοιχεία σκυροδέματος. Η χρήση του σε δάπεδα από σκυρόδεμα προσδίδει στις επιφάνειες προστασία έναντι στη σκόνης (anti-dust) [3]. Η κατασκευή των εν λόγω δοκιμών ολοκληρώνεται με την τοποθέτηση επί της ασταρωμένης επιφάνειας της ενισχυτικής επένδυσης από υφάσματα ινών άνθρακα μονής (Εικόνα 6.1.3-2) και διαγώνιας πλέξης (twill) (Εικόνα 6.1.3-2). Μετά την εφαρμογή των

υφασμάτων ενίσχυσης τα ανωτέρω υλικά επικαλύπτονται με ένα επιπλέον στρώμα υγρής εποξειδικής ρητίνης, έτσι ώστε να δημιουργηθεί δομή τύπου sandwich αποσκοπώντας στη βέλτιστη δυνατή στεγάνωση και μηχανική απόδοση της ενισχυτικής διάταξης. Το σύστημα που χρησιμοποιείται στο τελικό αυτό στάδιο είναι το SINMAST S2WV (SINTECNO, Hellas, Εικόνα 6.1.3-4). Το ανωτέρω προϊόν αποτελείται από εποξειδική ρητίνη εμποτισμού, 2 συστατικών η οποία δεν περιέχει διαλύτες. Χρησιμοποιείται κατά κόρον σε δομικές εφαρμογές ως κόλλα επικόλλησης και ως ρητίνη «κλεισίματος» κατά την εφαρμογή και προσαρμογή υφασμάτων από Πολυμερικά Υλικά Ενίσχυσης (FRPs), άνθρακα ή ύαλου, πάνω σε δομικά μέλη και στοιχεία σκυροδέματος [3].



Εικόνα 6.1.3-1. Επίστρωση επιφανειών δοκιμίου με αστάρι.



Εικόνα 6.1.3-2. Δοκίμιο σκυροδέματος ενισχυμένο με ύφασμα ινών μονής πλέξης με υγρού τύπου εποξειδική ρητίνη (αριστερά), δοκίμιο σκυροδέματος ενισχυμένο με ύφασμα ινών άνθρακα διαγώνιας πλέξης (twill) με εποξειδική υγρού τύπου εποξειδική ρητίνη (δεξιά).



Εικόνα 6.1.3-3. Αστάρι εμποτισμού σκυροδέματος, SINTECNO SINMAST S2W.



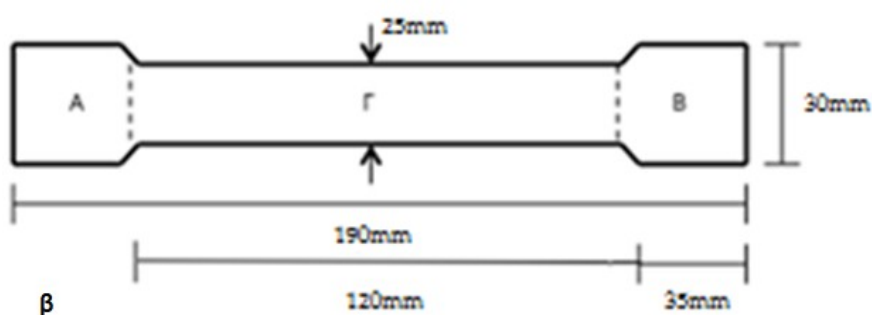
6.1.3-4. Εποξειδική ρητίνη εμποτισμού, προσαρμογής, επικόλλησης & σφράγισης υφασμάτων FRPs, SINTECNO SINMAST S2WV.

#### 6.1.4 Κατασκευή συνθέτων υλικών εποξειδικής ρητίνης ξηρού τύπου και ίνες άνθρακα

Η κατασκευή των δοκιμών που χρησιμοποιήθηκαν για την εξέταση και την καταγραφή των μηχανικών χαρακτηριστικών, ήτοι της αντοχής των υπό διερεύνηση συνθέτων υλικών πολυμερικής μήτρας με ίνες για την ενίσχυση κατασκευών από σκυρόδεμα σε κάμψη και διάτμηση, πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τις απαιτήσεις των σχετικών προτύπων και ειδικότερα του ASTM-D 790 ή ISO 178 ή DIN 53452 και του ASTM-NORM.D 2344-65T [5,6]. Για την παραγωγή των δοκιμών χρησιμοποιήθηκε καλούπι με 2 θυρίδες (παρτίδα 2 δοκιμών) κατασκευασμένο από



Teflon, κατάλληλου σχήματος και διαστάσεων διαμορφωμένο σε πλήρη συμμόρφωση με τα οριζόμενα στα προαναφερθέντα πρότυπα (Εικόνα 6.1.4-1 α και β). Το καλούπι καθαρίστηκε επιμελώς με ακετόνη και στη συνέχεια τοποθετήθηκε σε αυτό αντικολλητικό spray Teflon έτσι ώστε να είναι ευκολότερη η απομάκρυνση των τελικών δοκιμίων από τις θυρίδες του χωρίς αυτά να φθαρούν. Εν συνεχεία έλαβε χώρα η προετοιμασία αφενός του μίγματος εποξειδικής ρητίνης ξηρού τύπου και αφετέρου η ενσωμάτωση σε αυτό των ενισχυτικών υφασμάτων ινών άνθρακα.



6.1.4-1. α) Καλούπι κατασκευής δοκιμίων για δοκιμές κάμψης και διάτμησης β) διαστάσεις δοκιμίου.

Κατασκευάστηκαν σύνθετα υλικά πολυμερικής μήτρας εποξειδικής ρητίνης ξηρού τύπου SINMAST P103 (SINTECNO, Hellas, Εικόνα 6.1.4-2) με ενίσχυση υφασμάτων ινών άνθρακα μονής κατεύθυνσης (Εικόνα 6.1.4-3) αλλά και δύο κατευθύνσεων διαγώνιας πλέξης γνωστή και ως twill (Εικόνα 6.1.4-4). Τα υπό κατασκευή σύνθετα παραμένουν στο καλούπι σε συνθήκες δωματίου για 24 ώρες και μετά

απομακρύνονται από αυτό (Εικόνα 6.1.4-5). Τα άκρα των παραχθέντων δοκιμίων Α και Β απομακρύνονται με κατάλληλο εργαλείο και διατηρείται το μεταξύ αυτών τμήμα, ήτοι το μεταξύ των διακεκομμένων γραμμών, (Εικόνα 6.1.4-1β) το οποίο και χρησιμοποιείται για την υλοποίηση των πειραματικών δοκιμών. Σύμφωνα με τα οριζόμενα στα σχετικά πρότυπα (ASTM-D 790 ή ISO 178 ή DIN 53452 και του ASTM-NORM.D 2344-65) το πάχος των δοκιμίων ανέρχεται στα 3 χιλιοστά. Βάσει αυτού καθορίζεται το πάχος του ενισχυτικού υφάσματος από ίνες άνθρακα που πρέπει να εμπεριέχεται στα εν λόγω σύνθετα υλικά [10]. Ο αριθμός των στρώσεων του ανθρακούφασματος στα σύνθετα καθορίζεται από τον τύπο:

$$\text{Αριθμός στρώσεων ανθρακούφασματος} = \frac{\text{πάχος δοκιμίου}}{\text{επιφανειακό βάρος ανθρακούφασματος}} \quad (1)$$

Σύνθετα υλικά εποξειδικής ρητίνης ξηρού τύπου με ίνες άνθρακα (μονής κατεύθυνσης) Με γνωστά το πάχος του δοκιμίου 3 χιλιοστά και το επιφανειακό βάρος του υφάσματος ινών άνθρακα μονής κατεύθυνσης  $0.630\text{g/m}^2$  προκύπτει ότι κάθε στρώμα θα συνεισφέρει στο πάχος του τελικού δοκιμίου κατά  $0.630\text{mm}$ . Από την σχέση (1) μπορεί να καθοριστεί ο αριθμός των ενισχυτικών στρώσεων των συνθέτων υλικών εποξειδικής ρητίνης ξηρού τύπου με υφάσματα ινών άνθρακα μονής κατεύθυνσης ο οποίος υπολογίζεται σε:

$$\text{Στρώσεις} = \frac{\text{πάχος δοκιμίου}}{\text{επιφανειακό βάρος ανθρακούφασματος}} = \frac{3}{0.630} = 4.762 = 5 \text{ στρώσεις}$$

Οι πέντε στρώσεις πριν την τοποθέτησή τους στο καλούπι μορφοποίησης ζυγίστηκαν και το βάρος τους προσδιορίστηκε και καταγράφηκε στα 358g. Ο προσδιορισμός του βάρους έγινε έτσι ώστε αναλογικά να εκτιμηθεί η ποσότητα της ρητίνης που θα χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή των εν λόγω υλικών. Αντίστοιχη ποσότητα εποξειδικής ρητίνης κατά συνέπεια χρησιμοποιήθηκε στην κατασκευή έκαστου δοκιμίου.



6.1.4-2. Μίγμα Εποξειδικής ρητίνης ξηρού τύπου SINTECNO SINMAST P103.



6.1.4-3. Ύφασμα ινών άνθρακα μονής κατεύθυνσης.

Σύνθετα υλικά εποξειδικής ρητίνης ξηρού τύπου με ίνες άνθρακα (διπλής κατεύθυνσης/twill)

Στην περίπτωση που ως ενισχυτικό υλικό χρησιμοποιούνται τα ανθρακουφάσματα δύο κατευθύνσεων διαγώνιας πλέξης (twill) το επιφανειακό βάρος του συγκεκριμένου υφάσματος ανέρχεται στα 285g/m<sup>2</sup>. Κατά συνέπεια η κάθε στρώση υφάσματος θα συνεισφέρει στο πάχος του τελικού δοκιμίου κατά 0.285mm. Ο συνολικός αριθμός στρώσεων ενίσχυσης μπορεί και εδώ να υπολογιστεί με βάση τον παραπάνω τύπο.

Αναλυτικότερα:

$$\text{Στρώσεις} = \frac{\text{πάχος δοκιμίου}}{\text{επιφανειακό βάρος ανθρακουφάσματος}} = \frac{3}{0.285} = 10.53 = 11 \text{ στρώσεις}$$

Οι έντεκα στρώσεις πριν την τοποθέτησή τους στο καλούπι μορφοποίησης ζυγίστηκαν και το βάρος τους προσδιορίστηκε και καταγράφηκε στα 405g. Ο προσδιορισμός του βάρους έγινε έτσι ώστε αναλογικά να εκτιμηθεί η ποσότητα της ρητίνης που θα χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή των εν λόγω υλικών. Αντίστοιχη ποσότητα εποξειδικής ρητίνης κατά συνέπεια χρησιμοποιήθηκε στην κατασκευή έκαστου δοκιμίου.



6.1.4-4. Ύφασμα ινών άνθρακα διπλής κατεύθυνσης (twill).

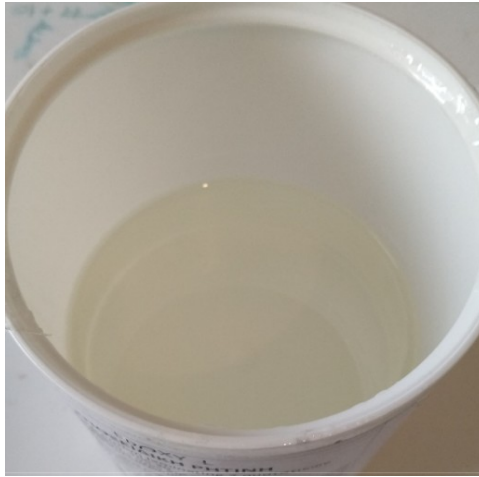


6.1.4-5. Ενδεικτικά δοκίμια συνθέτων υλικών εποξειδικής ρητίνης-ινών άνθρακα.

### 6.1.5 Κατασκευή συνθέτων υλικών εποξειδικής ρητίνης υγρού τύπου και ίνες άνθρακα

Αντιστοίχως στο πλαίσιο της μελέτης των αντοχών των υπό μελέτη συνθέτων υλικών κατασκευάστηκαν δοκίμια με μήτρα υγρής εποξειδικής ρητίνης και υφάσματα ινών άνθρακα με σκοπό την διερεύνηση των αντοχών των ανωτέρω υλικών σε κάμψη και διάτμηση. Η πειραματικές δοκιμές έγιναν βάσει των απαιτήσεων των αντίστοιχων προτύπων με αυτά που λήφθηκαν υπόψη στην παράγραφο 6.1.4 ήτοι, του ASTM-D 790 ή ISO 178 ή DIN 53452 για τον προσδιορισμό καμπτικής αντοχής και του ASTM-NORM.D 2344-65T για τον προσδιορισμό της διατμητικής αντοχής αντίστοιχα [5,6]. Χρησιμοποιήθηκε το ίδιο καλούπι με αυτό που επιλέχθηκε για την παραγωγή των συνθέτων υλικών ρητίνης ξηρού τύπου με ίνες, το οποίο όπως προαναφέρθηκε φέρει θυρίδες μορφοποίησης κατάλληλου σχήματος και διαστάσεων σύμφωνα με τα οριζόμενα στα προαναφερθέντα πρότυπα (Εικόνα 6.1.4-1). Κατόπιν και αφού προετοιμάστηκε το μίγμα υγρής εποξειδικής ρητίνης, τοποθετήθηκε προσεκτικά στο καλούπι, ώστε να μην υποστεί φθορές που θα αλλοιώσουν τα μηχανικά του χαρακτηριστικά, το ενισχυτικό ύφασμα ινών. Με την ολοκλήρωση της εισαγωγής του υφάσματος αποχύθηκε ως την πλήρη κάλυψη του ενισχυτικού μέσου η εποξειδική ρητίνη.

Κατασκευάστηκαν σύνθετα υλικά πολυμερικής μήτρας εποξειδικής ρητίνης υγρού τύπου SINMAST S2WV (SINTECNO, Hellas, Εικόνα 6.1.5-1) με υφάσματα ινών άνθρακα μονής κατεύθυνσης (Εικόνα 6.1.5-2) αλλά και δύο κατευθύνσεων διαγώνιας πλέξης (twill) (Εικόνα 6.1.5-3). Τα υπό κατασκευή σύνθετα παραμένουν στο καλούπι σε συνθήκες δωματίου για 24 ώρες για να ολοκληρωθεί η σκλήρυνση της ρητίνης. Μετά το πέρας του 24ώρου τα δοκίμια αποκολλώνται προσεκτικά από τις θυρίδες μορφοποίησης του καλουπιού.



#### 6.1.5-1. Μίγμα Εποξειδικής ρητίνης υγρού τύπου SINTECNO SINMAST S2WV.

Ακολουθώντας και πάλι τα πρότυπα που αναφέρθηκαν στην παράγραφο 6.1.4 και για δοκίμια ίδιου πάχους (3mm) καθορίστηκε ο αριθμός των στρώσεων υφάσματος ινών άνθρακα που θα χρησιμοποιηθεί στην κατασκευή των υπό εξέταση συνθέτων υλικών [10]. Ο προσδιορισμός των στρώσεων του ανθρακοϋφάσματος στα σύνθετα γίνεται από τη σχέση:

$$\text{Αριθμός στρώσεων ανθρακοϋφάσματος} = \frac{\text{πάχος δοκιμίου}}{\text{επιφανειακό βάρος ανθρακοϋφάσματος}} \quad (1)$$

Σύνθετα υλικά εποξειδικής ρητίνης υγρού τύπου με ίνες άνθρακα (μονής κατεύθυνσης) Για το ανωτέρω πάχος των 3 χιλιοστών και επιφανειακό βάρος του υφάσματος ινών άνθρακα μονής κατεύθυνσης ίσο με  $0.630\text{g/m}^2$  προκύπτει ότι το κάθε στρώμα θα συνεισφέρει στο πάχος του τελικού δοκιμίου κατά  $0.630\text{mm}$ . Από την σχέση (1) μπορεί να καθοριστεί ο αριθμός των ενισχυτικών στρώσεων των συνθέτων υλικών εποξειδικής ρητίνης ξηρού τύπου με υφάσματα ινών άνθρακα μονής κατεύθυνσης ο οποίος υπολογίζεται σε:

$$\text{Στρώσεις} = \frac{\text{πάχος δοκιμίου}}{\text{επιφανειακό βάρος ανθρακοϋφάσματος}} = \frac{3}{0.630} = 4.762 = 5 \text{ στρώσεις}$$

Οι πέντε στρώσεις πριν την τοποθέτησή τους στο καλούπι μορφοποίησης ζυγίστηκαν και το βάρος τους προσδιορίστηκε στα 358g. Αντίστοιχη ποσότητα εποξειδικής ρητίνης κατά συνέπεια χρησιμοποιήθηκε στην κατασκευή έκαστου δοκιμίου.



6.1.5-2. Ύφασμα ινών άνθρακα μονής κατεύθυνσης.

Σύνθετα υλικά εποξειδικής ρητίνης υγρού τύπου με ίνες άνθρακα (διπλής κατεύθυνσης/twill)

Αντίστοιχα στην περίπτωση που ως ενισχυτικό υλικό χρησιμοποιούνται τα ανθρακουφάσματα δύο κατευθύνσεων διαγώνιας πλέξης (twill) το επιφανειακό βάρος του συγκεκριμένου υφάσματος κατόπιν ζύγισης υπολογίστηκε στα 285g/m<sup>2</sup> με την κάθε στρώση υφάσματος να συνεισφέρει στο πάχος του τελικού δοκιμίου κατά 0.285mm. Ο συνολικός αριθμός στρώσεων ενίσχυσης μπορεί και εδώ να υπολογιστεί με βάση τον παραπάνω τύπο. Αναλυτικότερα:

$$\text{Στρώσεις} = \frac{\text{πάχος δοκιμίου}}{\text{επιφανειακό βάρος ανθρακουφάσματος}} = \frac{3}{0.285} = 10.53 = 11 \text{ στρώσεις}$$

Οι έντεκα στρώσεις ζυγίστηκαν (προ τοποθέτησεως στο καλούπι) και το βάρος τους προσδιορίστηκε στα 405g. Σε αντιστοιχία με τη διαδικασία που ακολουθήθηκε στην κατασκευή των υλικών της παραγράφου 6.1.4 ισοβαρής ποσότητα εποξειδικής ρητίνης ζυγίστηκε και χρησιμοποιήθηκε στην κατασκευή έκαστου δοκιμίου. Δείγματα όλων των συνθέτων που κατασκευάστηκαν και μελετήθηκαν παρουσιάζονται στην Εικόνα 6.1.5-4.



6.1.5-3. Ύφασμα ινών άνθρακα διπλής κατεύθυνσης (twill).



6.1.5-4. Σύνθετα εποξειδικής ρητίνης-ινών άνθρακα (από αριστερά προς τα δεξιά: υγρή και ξηρή εποξειδική ρητίνη με υφάσματα διπλής κατεύθυνσης (twill) και σύνθετα ξηρής και υγρής εποξειδικής ρητίνης- με φάσματα μονής κατεύθυνσης).

#### 6.1.6 Κατασκευή δοκιμών τσιμέντου (ενίσχυση με εποξειδική ρητίνη ξηρού τύπου και ίνες γυαλιού και Kevlar)

Μετά την ολοκλήρωση των διαδικασιών που περιγράφονται στις παραγράφους 6.1.1 και 6.1.2 ήτοι της λείανσης, της ομαλοποίησης των επιφανειακών ατελειών και του σχολαστικού καθαρισμού τους, τα δοκίμια τσιμέντου καλύφθηκαν με την ίδια ειδική εποξειδική ρητίνη ξηρού τύπου στην οποία εμπεριέχονται συγκεκριμένου τύπου



πρόσθετα (πούδρα χαλαζία). Και εδώ επιλέχθηκε το σύστημα εποξειδικής ρητίνης SINMAST P103 (SINTECNO, Hellas, Εικόνα 6.1.2-1).

Το εν λόγω εποξειδικό σύστημα είναι όπως προαναφέρθηκε θιζοτροπική εποξειδική πάστα 2 συστατικών και χρησιμοποιείται συνήθως σε εφαρμογές δομικής ενίσχυσης FRP ή Βετον-πλάκας και σε εργασίες επένδυσης σε δομικά στοιχεία σκυροδέματος (κολώνες, δοκοί, επιπεδωμένες πλάκες κλπ).

Δύναται επίσης να εφαρμοστεί ως συγκολλητικό μέσο (κόλλα) σε εφαρμογές συγκόλλησης διαφορετικών ειδών υλικών, μεταξύ των οποίων συγκαταλέγονται πορώδη (σκυρόδεμα, μάρμαρο, πλακάκια, πέτρες, ξύλο και φελλό κ.α.), μη πορώδη, όπως επί παραδείγματι τα μέταλλα (χάλυβας, σίδηρος χάλυβας, αλουμίνιο κ.λπ.) και αρκετά συνθετικά υλικά (νεοπρένιο, καουτσούκ, πολυεστέρας, άνθρακας κ.α.). Η παρασκευή του βασίζεται στην ανάμειξη των δύο επιμέρους συστατικών του συστήματος. Από την ανάμειξη παράγεται εποξειδική πάστα μεσαίου ιξώδους, κατάλληλη και για εργασίες επισκευής και αγκύρωσης χαλύβδινων ράβδων και ράβδων με σπείρωμα σε κατασκευές από σκυρόδεμα, κατακόρυφα ή πάνω. Πρόκειται για εποξειδική ρητίνη τύπου κονιάματος, ιδανική για εργασίες μπαλώματος και στερέωσης επικαλύψεων σε δάπεδα και πλάκες από σκυρόδεμα. Δύναται όπως αναλύθηκε και προηγούμενα να αξιοποιηθεί και ως υλικό επικάλυψης για την επούλωση ρωγμών, τριχωτών ρωγμών, πριν από την έγχυση σε στοιχεία σκυροδέματος και σε ποικιλία αντίστοιχων εφαρμογών [2].

Τα επικαλυμμένα με εποξειδική πάστα δοκίμια παραμένουν σε συνθήκες δωματίου για 24 ώρες ώστε να ολοκληρωθεί η σκλήρυνση της ενισχυτικής/επισφραγιστικής τους δράσης. Μετά το πέρας του 24ώρου, τοποθετείται σε αυτά η επένδυση υφάσματος ινών. Κατασκευάζονται δοκίμια δυο διαφορετικών παρτίδων εκ των οποίων η μία με υφάσματα ινών γυαλιού και η δεύτερη με ίνες αραμιδίου (Kevlar). Η πλέξη των υφασμάτων που χρησιμοποιήθηκαν και στις δυο παρτίδες είναι η διαγώνια πλέξη (twill). Μετά την εφαρμογή των υφασμάτων ενίσχυσης τα σύνθετα

υλικά επικαλύπτονται με ένα επιπλέον στρώμα εποξειδικής ρητίνης τύπου πάστας, έτσι ώστε να δημιουργηθεί δομή τύπου sandwich με σκοπό την επίτευξη της βέλτιστης δυνατής στεγάνωσης και μηχανικής απόδοσης.

#### **6.1.7 Κατασκευή δοκιμών τσιμέντου (ενίσχυση με εποξειδική ρητίνη υγρού τύπου και ίνες γυαλιού και Kevlar)**

Ακολουθώντας πανομοιότυπη μεθοδολογία με αυτή που εφαρμόστηκε στα υλικά της παραγράφου 6.1.2, οι ελαττωματικές θέσεις που εντοπίστηκαν μέσω της ελεγκτικής διαδικασίας επιδιορθώθηκαν με την εφαρμογή ξηρής εποξειδικής ρητίνης.

Σε συνέχεια της επίστρωσης με την ξηρή εποξειδική ρητίνη, τα δοκίμια παραμένουν σε συνθήκες περιβάλλοντος για 24 ώρες μέχρι την πλήρη σκλήρυνσή της ρητινούχου επίστρωσης. Κατόπιν οι επιστρωμένες επιφάνειες τους λειαίνονται με μηχανικά μέσα ώστε να καταστεί δυνατή η βέλτιστη εφαρμογή των ενισχυτικών υφασμάτων και κατεπέκταση η μέγιστη δυνατή αποτελεσματικότητά τους σε όρους μηχανικών αντοχών. Οι λειασμένες επιφάνειες καθαρίζονται επιμελώς και επάνω σε αυτές εφαρμόζεται μια στρώση αστάρι εποξειδικής βάσης ούτως ώστε, να ενισχυθεί η συγκόλληση του υφάσματος στο δοκίμιο. Το σύστημα που χρησιμοποιήθηκε είναι το SINMAST S2W (SINTECNO, Hellas, Εικόνα 6.1.3-3). Πρόκειται για διάφανη εποξειδική ρητίνη 2 συστατικών όπως ήδη αναλύθηκε στις προηγούμενες παραγράφους. Η κατασκευή των εν λόγω δοκιμών ολοκληρώνεται με την τοποθέτηση επί της ασταρωμένης επιφάνειας της ενισχυτικής επένδυσης από υφάσματα ινών υάλου και Kevlar διαγώνιας πλέξης (twill). Μετά την εφαρμογή των υφασμάτων ενίσχυσης τα δοκίμια επικαλύπτονται με μια ακόμη στρώση υγρής εποξειδικής ρητίνης, έτσι ώστε να επιτευχθεί η βέλτιστη δυνατή στεγάνωση και μηχανική απόδοση της ενισχυτικής διάταξης. Το σύστημα που χρησιμοποιείται σε αυτό το στάδιο είναι το SINMAST S2WV (SINTECNO, Hellas, Εικόνα 6.1.3-4). Τα υλικά που κατασκευάστηκαν και μελετώνται στην συγκεκριμένη ερευνητική εργασία όπως επίσης και τα τεχνικά χαρακτηριστικά τους παρατίθενται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 6.1.7-1 και την Εικόνα 6.1.7-1.



Εικόνα 6.1.7-1. Σύνθετα υλικά ενίσχυσης σκυροδέματος με ενίσχυση υφασμάτων ινών υάλου (αριστερά) και Kevlar (δεξιά).

Πίνακας 6.1.7-1. Σύνθετα υλικά τσιμέντου, εποξειδικής ρητίνης και ινών υάλου και Kevlar.

Composite Material Code	Cement (% w/w) (Cem)	Carbon Fibers (% v/v)		Epoxy Resin (% w/w)	
		Twill	Chopped	Liq	Paste
Cem	100	0	0	0	0
Rcem	90	0	10	0	0
Cem_Glass_paste	80	0	0	0	10
Cem_Glass_liq	80	0	0	10	0
Cem_Kevlar_paste	80	10	0	0	10
Cem_Kevlar_liq	80	10	0	10	0
Glass_paste	0	0	0	0	50
Glass_liq	0	0	0	50	0
Kevlar_paste	0	50	0	0	50
Kevlar_liq	0	50	0	50	0
RCem_Glass_paste	70	10	10	0	10
RCem_Glass_liq	70	10	10	10	0
Rcem_Kevlar_paste	70	10	10	0	10
Rcem_Kevlar_liq	70	10	10	10	0

### 6.1.8 Κατασκευή συνθέτων υλικών εποξειδικής ρητίνης ξηρού τύπου και ίνες υάλου

Η κατασκευή των δοκιμών που χρησιμοποιήθηκαν για την εξέταση και την καταγραφή των μηχανικών χαρακτηριστικών, ήτοι της αντοχής των υπό διερεύνηση

συνθέτων υλικών πολυμερικής μήτρας με ίνες για την ενίσχυση κατασκευών από σκυρόδεμα σε κάμψη και διάτμηση, πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τις απαιτήσεις των σχετικών προτύπων και ειδικότερα του ASTM-D 790 ή ISO 178 ή DIN 53452 και του ASTM-NORM.D 2344-65T [5,6]. Για την παραγωγή τους χρησιμοποιήθηκε καλούπι 2 θέσεων από Teflon, κατάλληλου σχήματος και διαστάσεων διαμορφωμένο σε πλήρη συμμόρφωση με τα οριζόμενα στα προαναφερθέντα πρότυπα (Εικόνα 6.1.4-1 α και β). Το καλούπι καθαρίστηκε με ακετόνη και στη συνέχεια τοποθετήθηκε σε αυτό αντικολλητικό spray (Teflon) έτσι ώστε να είναι ευκολότερη η απομάκρυνση των τελικών δοκιμών από τις θυρίδες του καλουπιού παρασκευής χωρίς αυτά να φθαρούν. Εν συνεχεία έλαβε χώρα η προετοιμασία αφενός του μίγματος εποξειδικής ρητίνης ξηρού τύπου και αφετέρου η ενσωμάτωση σε αυτό των ενισχυτικών υφασμάτων ινών υάλου.

Κατασκευάστηκαν σύνθετα υλικά πολυμερικής μήτρας εποξειδικής ρητίνης ξηρού τύπου SINMAST P103 (SINTECNO, Hellas, Εικόνα 6.1.4-2) με ενίσχυση υφασμάτων ινών υάλου (Εικόνα 6.1.8-1) δύο κατευθύνσεων διαγώνιας πλέξης. Τα υπό κατασκευή σύνθετα παραμένουν στο καλούπι σε συνθήκες δωματίου για 24 ώρες και μετά απομακρύνονται από αυτό (Εικόνα 6.1.4-5). Σύμφωνα με τα οριζόμενα στα σχετικά πρότυπα (ASTM-D 790 ή ISO 178 ή DIN 53452 και του ASTM-NORM.D 2344-65) το πάχος των δοκιμών ανέρχεται στα 3 χιλιοστά. Βάσει αυτού καθορίζεται το πάχος του ενισχυτικού υφάσματος από ίνες άνθρακα που πρέπει να εμπεριέχεται στα εν λόγω σύνθετα υλικά [10]. Ο αριθμός των στρώσεων του υαλοϋφάσματος στα σύνθετα καθορίζεται από τον τύπο:

$$\text{Αριθμός στρώσεων υαλοϋφάσματος} = \frac{\text{πάχος δοκιμίου}}{\text{επιφανειακό βάρος υαλοϋφάσματος}} \quad (1)$$

Σύνθετα υλικά εποξειδικής ρητίνης ξηρού τύπου με ίνες υάλου (διπλής κατεύθυνσης/twill)

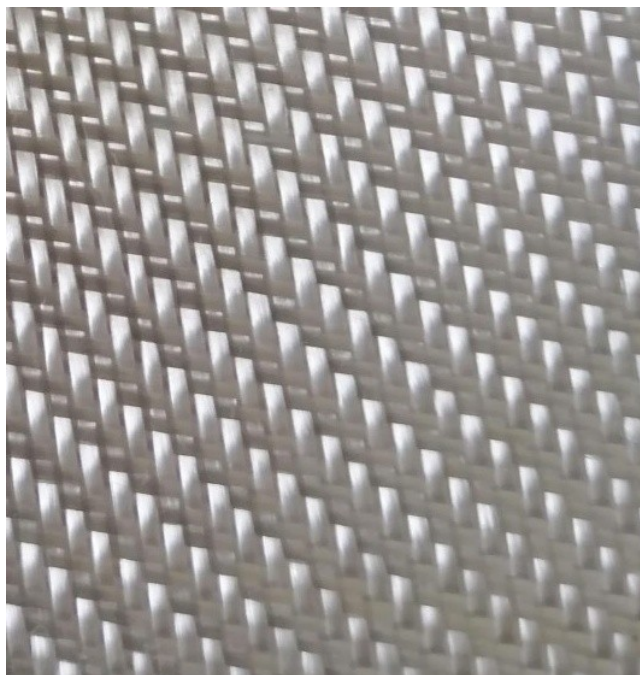
Στην περίπτωση που ως ενισχυτικό υλικό χρησιμοποιούνται τα υαλοϋφάσματα δύο κατευθύνσεων διαγώνιας πλέξης (twill) το επιφανειακό βάρος του συγκεκριμένου

υφάσματος ανέρχεται στα 200gr/m<sup>2</sup>. Κατά συνέπεια η κάθε στρώση υφάσματος θα συνεισφέρει στο πάχος του τελικού δοκιμίου κατά 0.2mm. Ο συνολικός αριθμός στρώσεων ενίσχυσης μπορεί και εδώ να υπολογιστεί με βάση τον παραπάνω τύπο.

Αναλυτικότερα:

$$\text{Στρώσεις} = \frac{\text{πάχος δοκιμίου}}{\text{επιφανειακό βάρος υαλουφάσματος}} = \frac{3}{0.2} = 15 \text{ στρώσεις}$$

Οι δεκαπέντε στρώσεις πριν την τοποθέτησή τους στο καλούπι μορφοποίησης ζυγίστηκαν και το βάρος τους προσδιορίστηκε και καταγράφηκε στα 380g. Ο προσδιορισμός του βάρους έγινε έτσι ώστε αναλογικά να εκτιμηθεί η ποσότητα της ρητίνης που θα χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή των εν λόγω υλικών. Αντίστοιχη ποσότητα εποξειδικής ρητίνης κατά συνέπεια χρησιμοποιήθηκε στην κατασκευή έκαστου δοκιμίου.



6.1.8-1. Ύφασμα ινών υάλου διπλής κατεύθυνσης (twill).

#### 6.1.9 Κατασκευή συνθέτων υλικών εποξειδικής ρητίνης υγρού τύπου και ίνες υάλου

Αντιστοίχως στο πλαίσιο της μελέτης των αντοχών των υπό μελέτη συνθέτων υλικών κατασκευάστηκαν δοκίμια με σκοπό την διερεύνηση των αντοχών των ανωτέρω

υλικών σε κάμψη και διάτμηση. Η πειραματικές δοκιμές και για αυτά τα υλικά έγιναν βάσει των απαιτήσεων των αντίστοιχων προτύπων με αυτά που λήφθηκαν υπόψη στην παράγραφο 6.1.7 ήτοι, του ASTM-D 790 ή ISO 178 ή DIN 53452 για τον προσδιορισμό καμπτικής αντοχής και του ASTM-NORM.D 2344-65T για τον προσδιορισμό της διατμητικής αντοχής αντίστοιχα [5,6]. Χρησιμοποιήθηκε το ίδιο καλούπι με αυτό που επιλέχθηκε για την παραγωγή των συνθέτων υλικών ρητίνης ξηρού τύπου με ίνες, το οποίο όπως προαναφέρθηκε φέρει θυρίδες μορφοποίησης κατάλληλου σχήματος και διαστάσεων σύμφωνα με τα οριζόμενα στα προαναφερθέντα πρότυπα (Εικόνα 6.1.4-1). Εν συνεχεία και μετά την παρασκευή του μίγματος εποξειδικής ρητίνης, τοποθετήθηκε προσεκτικά στο καλούπι, ώστε να μην υποστεί φθορές που θα αλλοιώσουν τα μηχανικά του χαρακτηριστικά, το ενισχυτικό ύφασμα. Με την ολοκλήρωση της εισαγωγής του υφάσματος αποχύθηκε ως την πλήρη κάλυψη του ενισχυτικού μέσου η εποξειδική ρητίνη.

Κατασκευάστηκαν σύνθετα υλικά πολυμερικής μήτρα εποξειδικής ρητίνης υγρού τύπου SINMAST S2WV (SINTECNO, Hellas, Εικόνα 6.1.5-1) με υφάσματα ινών υάλου δύο κατευθύνσεων διαγώνιας πλέξης (Εικόνα 6.1.8-1). Τα υπό κατασκευή σύνθετα παραμένουν στο καλούπι σε συνθήκες δωματίου για 24 ώρες για να ολοκληρωθεί η σκλήρυνση της ρητίνης. Μετά το πέρας του 24ώρου τα τελικά δοκίμια αποκολλώνται προσεκτικά από τις θυρίδες μορφοποίησης του καλουπιού.

Ακολουθώντας και πάλι τα πρότυπα που παρατέθηκαν στην παράγραφο 6.1.7 και για δοκίμια ιδίου πάχους (3mm) καθορίστηκε ο αριθμός των στρώσεων υφάσματος που θα χρησιμοποιηθεί στην κατασκευή των υπό εξέταση συνθέτων υλικών [10]. Ο προσδιορισμός των στρώσεων του υφάσματος στα σύνθετα γίνεται από τη σχέση:

$$\text{Αριθμός στρώσεων υαλό – υφάσματος} = \frac{\text{πάχος δοκιμίου}}{\text{επιφανειακό βάρος υαλο-υφάσματος}} \quad (1)$$

Σύνθετα υλικά εποξειδικής ρητίνης υγρού τύπου με ίνες υάλου (διπλής κατεύθυνσης/twill)

Στην περίπτωση που ως μήτρα χρησιμοποιείται η υγρή εποξειδική ρητίνη και ως ενισχυτική φάση υφάσματα ινών υάλου, το επιφανειακό βάρος του συγκεκριμένου υφάσματος κατόπιν ζύγισης υπολογίστηκε στα 200g/m<sup>2</sup> με την κάθε στρώση υφάσματος να συνεισφέρει στο πάχος του τελικού δοκιμίου κατά 0.2mm. Ο συνολικός αριθμός στρώσεων ενίσχυσης μπορεί και εδώ να υπολογιστεί με βάση τον παραπάνω τύπο. Αναλυτικότερα:

$$\text{Στρώσεις} = \frac{\text{πάχος δοκιμίου}}{\text{επιφανειακό βάρος υαλο - υφάσματος}} = \frac{3}{0.2} = 15 \text{ στρώσεις}$$

Οι δεκαπέντε στρώσεις ζυγίστηκαν (προ τοποθετήσεως στο καλούπι) και το βάρος τους προσδιορίστηκε στα 380g. Σε αντιστοιχία με τη διαδικασία που ακολουθήθηκε στην κατασκευή των υλικών της παραγράφου 6.1.7 ισοβαρής ποσότητα εποξειδικής ρητίνης ζυγίστηκε και χρησιμοποιήθηκε στην κατασκευή έκαστου δοκιμίου. Τα τελικά σύνθετα παρουσιάζονται στην Εικόνα 6.1.9-1.



6.1.9-1. Σύνθετα ξηρής (δεξιά) και υγρής (αριστερά) εποξειδικής ρητίνης-ινών υάλου διπλής κατεύθυνσης (twill).

#### 6.1.10 Κατασκευή συνθέτων υλικών εποξειδικής ρητίνης ξηρού και ίνες Kevlar

Ακολουθώντας πανομοιότυπη, ως προς τα επιμέρους στάδια και τα υλικά διαδικασία, κατασκευάστηκαν σύνθετα υλικά εποξειδικής ρητίνης και ενίσχυση αποτελούμενη από υφάσματα ινών Kevlar. Κατασκευάστηκαν δοκίμια με εποξειδική ρητίνη ξηρού τύπου (πάστα) και υγρή με υφάσματα ινών Kevlar διαγώνιας πλέξης.

Σύνθετα υλικά εποξειδικής ρητίνης ξηρού τύπου με ίνες Kevlar (διπλής κατεύθυνσης/twill)

Στην περίπτωση που ως ενισχυτικό υλικό χρησιμοποιούνται τα υφάσματα Kevlar διαγώνιας (Εικόνα 6.1.10-2), το επιφανειακό βάρος του συγκεκριμένου υφάσματος να ανέρχεται στα 340g/m<sup>2</sup>. Κατά συνέπεια η κάθε στρώση υφάσματος θα συνεισφέρει στο πάχος του τελικού δοκιμίου κατά 0.34mm. Ο συνολικός αριθμός στρώσεων ενίσχυσης μπορεί και εδώ να υπολογιστεί με βάση τον παραπάνω τύπο.

Αναλυτικότερα:

$$\text{Στρώσεις} = \frac{\text{πάχος δοκιμίου}}{\text{επιφανειακό βάρος υφάσματος Kevlar}} = \frac{3}{0.34} = 8.82 = 9 \text{ στρώσεις}$$

Οι εννέα στρώσεις πριν την τοποθέτησή τους στο καλούπι μορφοποίησης ζυγίστηκαν και το βάρος τους προσδιορίστηκε και καταγράφηκε στα 607g. Ο προσδιορισμός του βάρους έγινε έτσι ώστε αναλογικά να εκτιμηθεί η ποσότητα της ρητίνης που θα χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή των εν λόγω υλικών. Αντίστοιχη ποσότητα εποξειδικής ρητίνης κατά συνέπεια χρησιμοποιήθηκε στην κατασκευή έκαστου δοκιμίου.

Σύνθετα υλικά εποξειδικής ρητίνης υγρού τύπου με ίνες Kevlar (διπλής κατεύθυνσης/twill)

Στην περίπτωση που ως μήτρα χρησιμοποιείται η υγρή εποξειδική ρητίνη και ως ενισχυτική φάση υφάσματα ινών Kevlar πλέξης twill το επιφανειακό βάρος του συγκεκριμένου υφάσματος κατόπιν ζύγισης υπολογίστηκε στα 340g/m<sup>2</sup> με την κάθε στρώση υφάσματος να συνεισφέρει στο πάχος του τελικού δοκιμίου κατά 0.34mm. Ο



συνολικός αριθμός στρώσεων ενίσχυσης μπορεί και εδώ να υπολογιστεί με βάση τον παραπάνω τύπο. Αναλυτικότερα:

$$\text{Στρώσεις} = \frac{\text{πάχος δοκιμίου}}{\text{επιφανειακό βάρος υφάσματος Kevlar}} = \frac{3}{0.34} = 8.82 = 9 \text{ στρώσεις}$$

Οι εννέα στρώσεις ζυγίστηκαν (προ τοποθέτησής τους στο καλούπι) και το βάρος τους προσδιορίστηκε στα 607g. Σε αντιστοιχία με τη διαδικασία που ακολουθήθηκε στην κατασκευή των υλικών της παραγράφου 6.1.7 ισοβαρής ποσότητα εποξειδικής ρητίνης ζυγίστηκε και χρησιμοποιήθηκε στην κατασκευή έκαστου δοκιμίου. Τα τελικά σύνθετα παρουσιάζονται στην Εικόνα 6.1.10-1.



6.1.10-1. Σύνθετα ξηρής (δεξιά) και υγρής (αριστερά) εποξειδικής ρητίνης-ινών Kevlar διπλής κατεύθυνσης (twill).



6.1.10-2. Ύφασμα ινών Kevlar διπλής κατεύθυνσης (twill).

## 6.2 Γήρανση δοκιμών

Τα σύνθετα υλικά τσιμέντου και ενίσχυσης από υφάσματα ινών άνθρακα μονής και διπλής πλέξης η παραγωγική διαδικασία των οποίων αναλύθηκε στις παραγράφους 6.1.2 και 6.1.3, υπεβλήθησαν σε θερμική επεξεργασία τεχνητής γήρανσης σύμφωνα με τα πρότυπα ISO 4892-1 και ISO 4892-2 [11,12] με σκοπό της μελέτη της επίδρασης της διαδικασίας αυτής στην μηχανική τους συμπεριφορά. Ειδικότερα μελετήθηκαν οι επιπτώσεις της παραμονής των ανωτέρω υλικών σε συγκεκριμένες συνθήκες και για συγκεκριμένους χρόνους στην αντοχή των υπό εξέταση συνθέτων υλικών σε θλίψη.

Επιλεγμένα δοκίμια εκ των συνθέτων υλικών που κατασκευάστηκαν, ήτοι δοκίμια τσιμέντου με υφάσματα ινών άνθρακα μονής κατεύθυνσης και εποξειδική ρητίνη υγρής μορφής, σύνθετα υλικά τσιμέντου με υφάσματα ινών άνθρακα διπλής κατεύθυνσης (twill) και εποξειδική ρητίνη υγρής μορφής και αντιστοίχως σύνθετα υλικά τσιμέντου με υφάσματα μονής και διπλής κατεύθυνσης (twill) με εποξειδική ρητίνη ξηράς μορφής, επελέγησαν για να υποβληθούν στην παραπάνω διεργασία. Το στάδιο της τεχνητής γήρανσεως πραγματοποιήθηκε σε θάλαμο τύπου SUNSET CPS ATLAS (Εικόνα 6.2-1). Μέσω του παραπάνω εξοπλισμού τα δοκίμια εκτίθενται

σε υπεριώδη ακτινοβολία  $550\text{W/m}^2$  (295-800nm) και σε θερμοκρασιακό εύρος το οποίο κυμαίνεται μεταξύ  $65\text{-}75^\circ\text{C}$ . Η διαδικασία επαναλαμβάνεται σε τρεις διαφορετικούς κύκλους με χρονική διάρκεια 8, 12 και 16 ημερών αντίστοιχα [7]. Μετά την ολοκλήρωση του κάθε κύκλου δοκιμών τα τεχνητώς γηρασμένα σύνθετα υλικά (Εικόνα 6.2-2) υποβάλλονται σε πειραματικές δοκιμές προσδιορισμού της θλιπτικής τους αντοχής. Οι λόγοι για τους οποίους στην ανωτέρω διαδικασία υπεβλήθησαν μόνο τα CFRP δοκίμια αναλύονται σε επόμενο κεφάλαιο.



6.2-1. Θάλαμος τεχνητής γήρανσης SUNSET CPS ATLAS.



6.2-2. Τεχνητώς γηρασμένα δοκίμια τσιμέντου με υφάσματα ινών άνθρακα.

Λόγω της μεγάλης ροής ακτινοβολίας μικρού μήκους κύματος, οι πηγές UVB προκαλούν ταχύτερη αποδόμηση από την ηλιακή ακτινοβολία, γεγονός που καθιστά τις πηγές UVB ιδανικές για επιταχυνόμενες δοκιμές αντοχής των υλικών, όπως τα πολυμερή που είναι κυρίως ευαίσθητα στα βραχύτερα μήκη κύματος [8,9].

## Βιβλιογραφία 6<sup>ου</sup> Κεφαλαίου

1. CEN - EN 196-1 Methods of testing cement - Part 1: Determination of strength.
2. <https://sintecno.gr/index.php/en/beton-contact-systems-adhesives-binders/product/243-sinmast-p103-2-syst-epokseidiki-pasta-gia-episkevi-skyrodematos-agkyrosi-epikollisi-elasmaton-k-a>
3. <https://sintecno.gr/index.php/el/statikes-enisxyseis-me-synthetaylika/proionta-prosarmogis-syntheton-epikolliton-systimaton-frps-iop/product/245-sinmast-s2w%20-2-syst-diafani-epokseidiki-ritini-astari-empotismoy-skyrodematos-prin-tin-xrisi-yfasmaton-frps>
4. <https://sintecno.gr/index.php/el/statikes-enisxyseis-me-synthetaylika/proionta-prosarmogis-syntheton-epikolliton-systimaton-frps-iop/product/246-sinmast-s2wv%20-2-syst-epokseidiki-ritini-gia-empotismo-prosarmogi-epikollisi-sfragisi-yfasmaton-frps>
5. ASTM D 790-71. *American Society of Testing and Material, Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials*; ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2003.
6. ASTM D 2344-65T. *American Society of Testing and Material, Standard Test Method for Short-Beam Strength of Polymer Matrix Composite Materials and Their Laminates*; ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2000.
7. H.A. Al-Turaif, «*Surface morphology and chemistry of epoxy-based coatings after exposure to ultraviolet radiation*», *Progress in Organic Coatings*, 2013, 76(4), 677–681.
8. H. Kaczmarek, A. Szalla, H. Chaberska, J. Kowalonek, «*Changes of surface morphology in UV-irradiated poly(acrylic acid)/poly(ethylene oxide) blends*», *Surf. Sci.*, 566/568, 2004 560-565.
9. H. Kaczmarek, D. Oldak, P. Malanowski, H. Chaberska, «*Effect of short wavelength UV-irradiation on aging of polypropylene/cellulose compositions*», *Polym. Degrad. Stab.*, 2005, 88,189.
10. Δ. Σεμιπέκολος, «*Κατασκευή και Μηχανικές Ιδιότητες Συνθέτων Υλικών Νεολάκης με Ίνες Άνθρακα και Νανοσωλήνες Άνθρακα ως Πρόδρομων*

Υλικών για Σύνθετα Υλικά Άνθρακα-Άνθρακα», Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ, 2016.

11. BS EN ISO 4892-1. *Plastics - Methods of exposure to laboratory light sources - Part 1: General guidance*, ISO, 2016
12. BS EN ISO 4892-2. *Plastics - Methods of exposure to laboratory light sources - Part 2: Xenon-arc sources*, ISO, 2013.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7ο-Μελέτη και προσδιορισμός μηχανικών ιδιοτήτων συνθέτων υλικών πολυμερικής μήτρας ενισχυμένων με ίνες για ενίσχυση φέροντος οργανισμού από οπλισμένο σκυρόδεμα**

### **7.1 Μεθοδολογία προσδιορισμού μηχανικών ιδιοτήτων συνθέτων FRP υλικών**

Η μελέτη και ο προσδιορισμός των μηχανικών ιδιοτήτων πραγματοποιείται μέσω της διεξαγωγής (ανάλογα την υπό εξέταση ιδιότητα) δοκιμών πειραματικής μορφής επί καταλλήλως διαμορφωμένων πειραματικών υλικών, ήτοι δοκιμίων. Στη συγκεκριμένη διατριβή τα υπό διερεύνηση σύνθετα υλικά υπεβλήθησαν σε πειραματικές δοκιμές προσδιορισμού των θλιπτικών, καμπτικών και διατμητικών τους αντοχών. Η μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό των ανωτέρω χαρακτηριστικών μηχανικών ιδιοτήτων για τα υπό εξέταση σύνθετα ακολούθησε τις επιταγές των σχετικών προτύπων, όπως αναλύεται στις ακόλουθες παραγράφους.

Σε ότι αφορά στα πειράματα προσδιορισμού της αντοχής σε θλίψη, αυτές πραγματοποιήθηκαν σύμφωνα με τα οριζόμενα στο πρότυπό EN-196:1-1995. Αντίστοιχα οι πειραματικές μετρήσεις για τον προσδιορισμό της αντοχής των εν λόγω υλικών σε κάμψη πραγματοποιήθηκαν με βάση το πρότυπο ASTM D790, DIN-53452, ενώ οι μετρήσεις προσδιορισμού της αντοχής σε διάτμηση ακολούθησαν τα οριζόμενα στο ASTM-NORM. D2344-65T [1-4]. Στις επόμενες παραγράφους περιγράφονται αναλυτικά οι μεθοδολογικές διαδικασίες που εφαρμόστηκαν για την διερεύνηση της μηχανικής συμπεριφοράς των συνθέτων υλικών που αναπτύσσονται και μελετώνται στην παρούσα διατριβή.

## 7.2 Μηχανικές ιδιότητες συνθέτων FRP υλικών-Εφαρμοζόμενη πειραματική μεθοδολογία ανά ιδιότητα

### 7.2.1 Αντοχή σε θλίψη

Οι δοκιμές μέτρησης της θλιπτικής αντοχής των υπό μελέτη συνθέτων υλικών πραγματοποιήθηκαν μετά το πέρας 28 ημερών, διάστημα για το οποίο τα δοκίμια βρίσκονταν εμβαπτισμένα σε νερό. Οι πειραματικές μετρήσεις έλαβαν χώρα μετά την απομάκρυνσή από το νερό, το πλήρες στέγνωμά τους και αφού υπεβλήθησαν στις απαιτούμενες εργασίες ώστε να αποκτηθούν τα τελικά σύνθετα (λείανση, στοκάρισμα εφαρμογή ενισχυτικών υφασμάτων). Κατασκευάστηκαν και μελετήθηκαν ως προς την θλιπτική τους αντοχή, για κάθε μία από τις προτεινόμενες κατηγορίες ενίσχυσης, τουλάχιστον 3 δοκίμια πρισματικής μορφής, διαστάσεων 40mm×40mm×160mm όπως έχει περιγραφεί αναλυτικά και στην παράγραφο 6.1.1 (Κατασκευή δοκιμίων τσιμέντου). Κάθε ένα από τα δοκίμια ζυγίστηκε και το προοισασδήποτε κατεργασίας, το βάρος του προσδιορίστηκε και κατεγράφη. Σε συνέχεια της ζύγισης τους τα δοκίμια υποβάλλονται σε μονοαξονική θλιπτική φόρτιση ούτως ώστε να υπολογιστεί η θλιπτική του αντοχή  $f_c$ .

Η θλιπτική αντοχή των υπό εξέταση υλικών δίνεται από τον τύπο:

$$f_c = P_{\max} / A$$

Όπου:

$P_{\max}$  = Μέγιστο φορτίο κατά τη θραύση (kN),

$A$  = Εμβαδόν επιφάνειας του δοκιμίου που έρχεται σε επαφή με την πρέσα σε (mm<sup>2</sup>).

Ο προσδιορισμός της θλιπτικής αντοχής των ανωτέρω υλικών πραγματοποιήθηκε σε εργαστηριακή διάταξη πρέσας INSTRON τύπου HTM-HYD, 300kN (Εικόνα 7.2.1-1). Επί των τιμών που προκύπτουν από τις δοκιμές της αντοχής σε θλίψη, εμπεριέχεται σφάλμα το οποίο προσδιορίζεται στο +/- 5%.





7.2.1-1. Εργαστηριακή διάταξη μέτρησης θλιπτικής αντοχής Instron.

### 7.2.2 Αντοχή σε Κάμψη

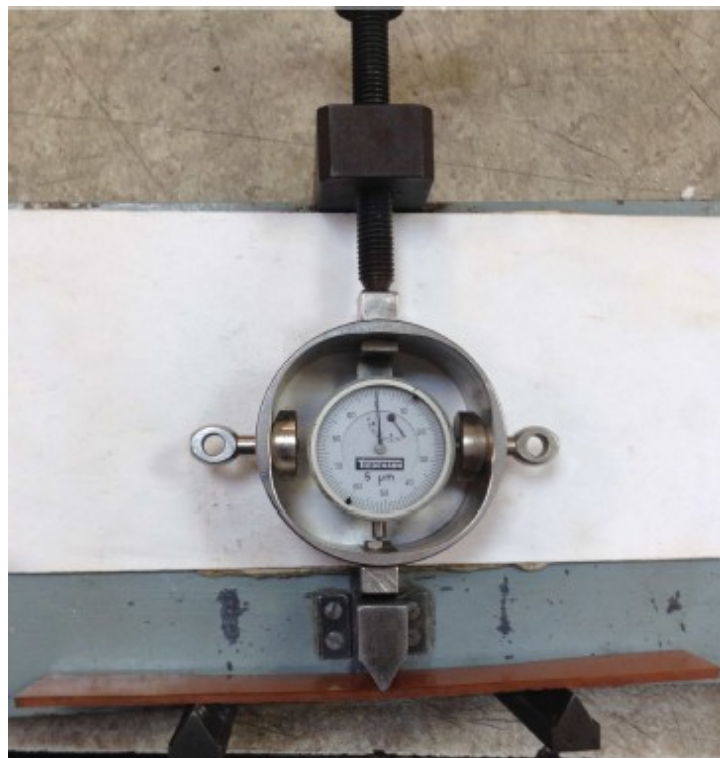
Η αντοχή των συνθέτων πολυμερικής μήτρας και ενισχυμένων με ίνες άνθρακα υλικών σε κάμψη, ακολούθησαν τις προδιαγραφές που ορίζει το πρότυπο ASTM-D 790 ή ISO 178 ή DIN 53452 [2,4]. Στο πλαίσιο αυτό, έγιναν πειραματικές δοκιμές κάμψης «3 σημείων» σε δοκίμια με τις απαιτούμενες (βάσει προτύπων) διαστάσεις. Οι πειραματικές μετρήσεις των μηχανικών αντοχών διεξήχθησαν χρησιμοποιώντας (Εικόνα 7.2.2-1) επιμηκυνσιομέτρο τύπου Tiedemann. Το συγκεκριμένο όργανο, λειτουργεί με την εφαρμογή πίεσης στο τοποθετημένο στα σημεία στήριξης δοκίμιο. Το μέγεθος της ασκούμενης πίεσεως παρέχει μέσω του καταγραφικού οργάνου της εργαστηριακής διάταξης χαρακτηριστικές μετρήσεις της εκ της προηγούμενης αναφερθείσας πίεσεως παραμόρφωσης, δηλαδή του βέλους κάμψης.

Η μέτρηση των αντοχών γίνεται μέσω δυναμόμετρου ακριβείας 1Kp (9,81N) και το βέλος κάμψης με βελόμετρο ακρίβειας εκατοστού του mm (1Kp/mm =10MPa). Με την άσκηση πίεσης το δυναμόμετρο μετράει την παραμόρφωση δηλαδή το βέλος κάμψης.

Η τελική ένδειξη του επιμηκυνσιομέτρου αντιστοιχεί σε δύναμη της οποίας το μέγεθος υπολογίζεται μέσω μαθηματικής αναγωγής της εκάστοτε ένδειξης του αναλογικού καταγραφικού οργάνου της διάταξης με βάση τον πίνακα ενδεικτικών τιμών του κατασκευαστή (Πίνακας 7.2.2-1).

Πίνακας 7.2.2-1 Ενδεικτικές τιμές δυναμόμετρου.

$\epsilon$ ( $\mu\text{m}$ )	P (N)
0	0
31.1	500
62.6	1000
94.2	1500
126.2	2000
158.5	2500
191.1	3000
224	3500
257.3	4000
290.8	4500
324.6	5000



7.2.2-1. Διάταξη εκτέλεσης δοκιμών κάμψης με τη μέθοδο «3 σημείων».

Τα δοκίμια τοποθετήθηκαν στην εργαστηριακή διάταξη μέτρησης σε κατάλληλες θέσεις (σημεία στήριξης δοκιμίου). Η απόσταση μεταξύ αυτών ορίστηκε για τις εν λόγω δοκιμές στα 10cm. Επί των τιμών που προκύπτουν από τις δοκιμές της αντοχής σε κάμψη, υπολογίζεται εμπειροχόμενο σφάλμα το οποίο προσδιορίζεται στο +/- 5%.

Ο υπολογισμός της αντοχής σε κάμψη  $\sigma_b$  γίνεται μέσω της σχέσης:

$$\sigma_b = 1,5 \frac{P_{max} L_s}{b \times d^2}$$

Όπου:

$\sigma_b$  = Αντοχή σε κάμψη (MPa)

$P_{max}$  = Μέγιστη δύναμη φόρτισης (N)

$L_s$  = Απόσταση σημείων στήριξης (mm)

$b$  = Πλάτος δοκιμίου (mm)

$d$  = Πάχος δοκιμίου (mm).

### 7.2.3 Αντοχή σε Διάτμηση

Η αντοχή σε διάτμηση προσδιορίστηκε βάσει του προτύπου ASTM-NORM. D 2344-65 [3,4]. Και στην περίπτωση προσδιορισμού των διατμητικών αντοχών εκτελέστηκαν δοκιμές με τη μέθοδο κάμψης «3 σημείων» λαμβάνοντας υπόψη τις απαιτήσεις του ήδη αναφερθέντος προτύπου ως προς τις χαρακτηριστικές διαστάσεις των δοκιμίων. Μοναδική διαφοροποίηση η απόσταση μεταξύ των σημείων στήριξης η οποία κατά τις δοκιμές της αντοχής σε διάτμηση ήταν ελαττωμένη σε σχέση με την αντίστοιχη των δοκιμών κάμψης και ανερχόταν στο 1cm. Το αντίστοιχο εμπειροχόμενο σφάλμα επί των υπολογιζόμενων τιμών αντοχής σε διάτμηση να προσδιορίστηκε στο +/- 5%.

Και εδώ οι μετρήσεις διεξήχθησαν με το επιμηκυνσιόμετρο τύπου Tiedemann.

Ο υπολογισμός της αντοχής σε διάτμηση  $\tau_b$  γίνεται μέσω της σχέσης:

$$\tau_b = 0,75 \frac{P_{max}}{b \times d}$$

Όπου:

$\tau_b$  = Αντοχή σε διάτμηση (MPa)

$P_{max}$  = Μέγιστη δύναμη φόρτισης (N)

b = Πλάτος δοκιμίου (mm)

d = Πάχος δοκιμίου (mm).

### 7.3 Μελέτη μηχανικών ιδιοτήτων συνθέτων FRP υλικών- Αντοχή σε θλίψη-Σχολιασμός αποτελεσμάτων

#### 7.3.1 Αποτελέσματα μετρήσεων αντοχής σε θλίψη συνθέτων υλικών τσιμέντου (ενίσχυση με εποξειδική ρητίνη και ίνες άνθρακα)

Ακολούθως (Γράφημα 7.3.1-1) αποτυπώνονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων της αντοχής σε θλίψη για τα σύνθετα υλικά τσιμεντοκονιάματος ενισχυμένα με εποξειδική ρητίνη και υφάσματα ινών άνθρακα μονής και διπλής, διαγώνιας πλέξης (twill) αντίστοιχα. Στις Εικόνες 7.3.1-1 και 7.3.1-2 παρουσιάζονται τα θραυσμένα μέσω μονοαξονικής θλιπτικής φόρτισης δοκίμια. Όπως μπορεί να επιβεβαιωθεί από την εξέταση τους η επένδυση υλικών από τσιμέντο με υφάσματα ινών άνθρακα και εποξειδική ρητίνη οδηγούν σε υλικά ενισχυμένης θλιπτικής αντοχής.

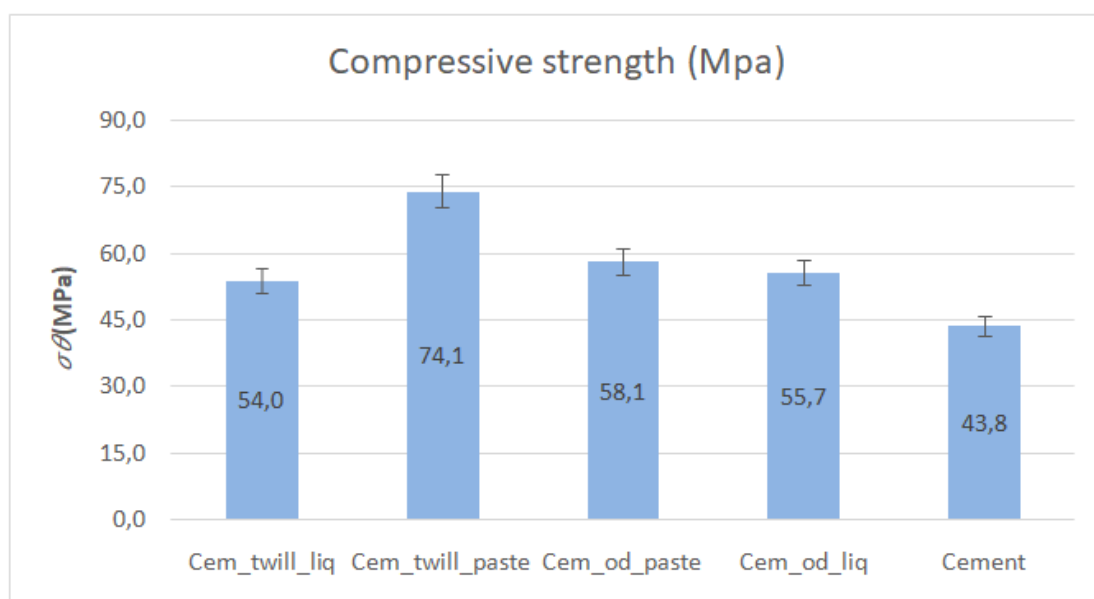
Κατά σειρά ενισχυτικής αποτελεσματικότητας έναντι θλιπτικής μορφής φορτίσεων πρώτα κατατάσσονται τα σύνθετα υλικά με υφάσματα ινών άνθρακα διπλής κατεύθυνσης (twill) και ξηρού τύπου εποξειδική ρητίνη με θλιπτική αντοχή της τάξεως των 74.05MPa ακολουθούμενα από τα αντίστοιχα υλικά με υφάσματα μονής κατεύθυνσης με αντοχή στα 58.08MPa, τα σύνθετα FRP υλικά με υφάσματα μονής κατεύθυνσης και υγρή εποξειδική ρητίνη με 55.66MPa και τέλος με 53.95MPa τα ενισχυτικά σύνθετα υλικά αποτελούμενα από υφάσματα πλέξης twill και εποξειδική ρητίνη υγρής σύνθεσης.

Τα ενδεδυμένα με υφάσματα ινών άνθρακα τύπου twill υλικά εμφανίζονται βελτιωμένα σε σχέση με τα αντίστοιχα από σκέτο τσιμεντοκονίαμα ως προς την θλιπτική τους αντοχή σε ποσοστό της τάξεως του 18.81% για τα σύνθετα FRP υλικά με ύφασμα διαγώνιας πλέξης με υγρή εποξειδική ρητίνη και 40.85% για τα σύνθετα

FRP υλικά με ύφασμα twill και εποξειδική ρητίνη τύπου πάστας (ξηρή). Τα αντίστοιχα υλικά στην κατασκευή των οποίων ως ενισχυτικό μέσο χρησιμοποιήθηκε ύφασμα μονής κατεύθυνσης (unidirectional) επίσης χαρακτηρίζονται από ενισχυμένες θλιπτικές αντοχές. Συγκεκριμένα τα σύνθετα υλικά υφάσματος ινών άνθρακα μονής πλέξης και εποξειδική ρητίνη υγρού τύπου παρουσιάζουν βελτιωμένες, κατά 21.31%, αντοχές σε θλίψη συγκριτικά με τα υλικά από καθαρό τσιμεντοκονίαμα. Τα δε αντίστοιχα υλικά FRP με ύφασμα μίας κατεύθυνσης και ξηρού τύπου εποξειδική ρητίνη επιδεικνύουν υψηλότερες τιμές θλιπτικών αντοχών σε σχέση με τα υλικά που κατασκευάστηκαν αποκλειστικά από τσιμεντοκονίαμα σε ποσοστό που ανέρχεται σε 24.59%. Από τα αποτελέσματα επιβεβαιώνεται η σαφής υπεροχή των συνθέτων FRP υλικών τσιμεντοκονιάματος με εποξειδική ρητίνη ξηρού τύπου έναντι αυτών με την υγρή εποξειδική ρητίνη. Ειδικότερα και βάσει του κατωτέρω γραφήματος η αντοχή σε θλίψη των προαναφερθέντων συνθέτων υλικών με ενίσχυση υφάσματος twill βελτιώνεται σημαντικά κατά 27.14% αν σε αντικατάσταση της υγρής εποξειδικής ρητίνης χρησιμοποιηθεί εποξειδική ρητίνη τύπου πάστας. Παρομοίως στα υλικά με ίνες άνθρακα μίας κατεύθυνσης, η χρήση ξηρής εποξειδικής ρητίνης οδηγεί σε υλικά με ενισχυμένες, κατά 4%, τιμές θλιπτικών αντοχών σε σύγκριση με τα αντίστοιχα υλικά στα οποία ως τελικό στρώμα επένδυσης χρησιμοποιήθηκε η υγρή εποξειδική ρητίνη.

Σε ότι αφορά στο συσχετισμό των θλιπτικών αντοχών των υπό εξέταση υλικών με βάση το τελικό στρώμα ενίσχυσης, στην περίπτωση που ως τελικό στρώμα χρησιμοποιείται η ξηρού τύπου εποξειδική ρητίνη, τα υφάσματα ινών άνθρακα διπλής κατεύθυνσης είναι αποτελεσματικότερα (σε όρους αντοχής σε θλίψη) κατά 21.57% συγκριτικά με τα υφάσματα μονής κατεύθυνσης. Αντίστοιχα όταν η τελική επίστρωση γίνεται με εποξειδική ρητίνη υγρού τύπου αποδοτικότερα, κατά 3.07% από πλευράς ενισχυτικής απόψεως για την αντιμετώπιση θλιπτικών τάσεων σε

δομικά στοιχεία τσιμεντοκονιάματος, εμφανίζονται τα υφάσματα μονής κατεύθυνσης (πλέξης).



Γράφημα 7.3.1-1. Αντοχή σε θλίψη συνθέτων CFRP υλικών τσιμεντοκονιάματος με εποξειδική ρητίνη.



Εικόνα 7.3.1-1. Θραυσμένα με μονοαξονική θλίψη σύνθετα FRP υλικά τσιμεντοκονιάματος με ενίσχυση υφασμάτων ινών άνθρακα μονής κατεύθυνσης και εποξειδική ρητίνη.



Εικόνα 7.3.1-2. Θραυσμένα με μονοαξονική θλίψη σύνθετα FRP υλικά τσιμεντοκονιάματος με ενίσχυση υφασμάτων ινών άνθρακα διπλής κατεύθυνσης και εποξειδική ρητίνη.

### 7.3.2 Αποτελέσματα μετρήσεων αντοχής σε θλίψη συνθέτων υλικών τσιμέντου (ενίσχυση με εποξειδική ρητίνη και ίνες υάλου και Kevlar)

Στο ακόλουθο Γράφημα (Γράφημα 7.3.2-1) παρατίθενται τα αποτελέσματα της αντοχής σε θλίψη για τα σύνθετα υλικά τσιμεντοκονιάματος με μήτρα εποξειδικής ρητίνης και υφάσματα ινών υάλου και Kevlar διαγώνιας πλέξης (twill). Αντίστοιχα Στις Εικόνες 7.3.2-1 και 7.3.2-2 παρουσιάζονται τα θραυσμένα μέσω μονοαξονικής θλιπτικής φόρτισης δοκίμια. Όπως μπορεί να διαπιστωθεί, η επένδυση υλικών από τσιμεντοκονίαμα με υφάσματα ινών από γυαλί και Kevlar ενσωματωμένα σε μήτρα εποξειδικής ρητίνης έχουν ως αποτέλεσμα την παραγωγή υλικών με ενισχυμένη θλιπτική αντοχή.

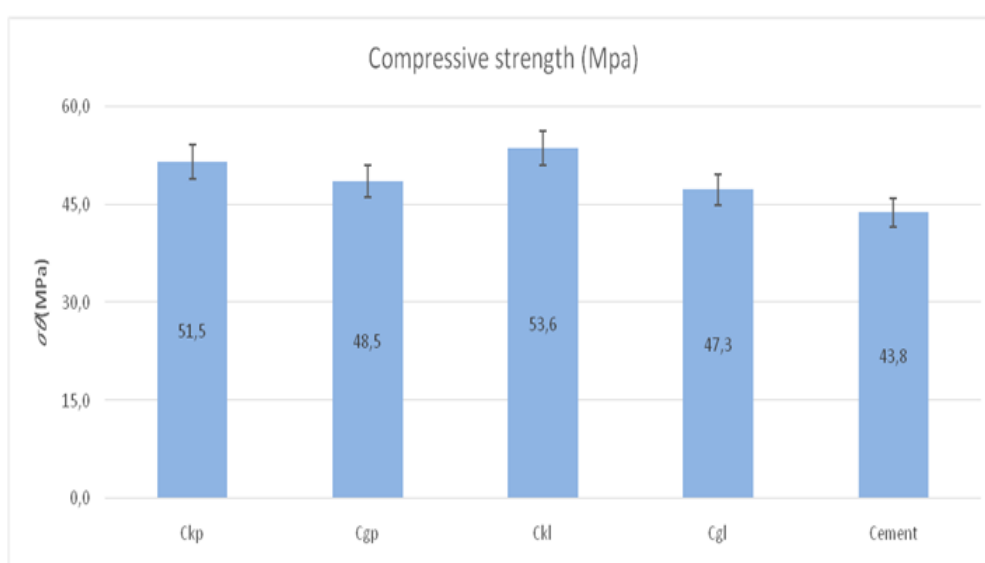
Επικρατέστερα έναντι θλιπτικών καταπονήσεων εμφανίζονται τα σύνθετα υλικά με ενίσχυση υφασμάτων από ίνες Kevlar και μήτρα υγρής εποξειδικής ρητίνης με θλιπτική αντοχή στα 53.60MPa ακολουθούμενα από τα σύνθετα με ενίσχυση αποτελούμενη από υφάσματα ινών Kevlar και εποξειδική ρητίνη τύπου πάστας με

αντοχή στα 51.50MPa, τα σύνθετα με ενισχυτική φάση από υφάσματα ινών υάλου και ξηρή εποξειδική ρητίνη με θλιπτική αντοχή της τάξεως των 48.50MPa και τέλος με 47.30MPa τα σύνθετα υλικά με ενίσχυση υαλοϋφάσματος και εποξειδική ρητίνη υγρής σύνθεσης.

Η περαιτέρω ανάλυση των αποτελεσμάτων αναδεικνύει ότι τα σύνθετα στα οποία έχει εφαρμοστεί ενίσχυση υφάσματος ινών υάλου παρουσιάζουν βελτιωμένες θλιπτικές αντοχής συγκριτικά με τα αντίστοιχα από σκέτο τσιμέντο κατά 7.04% για τα σύνθετα με μήτρα υγρής εποξειδικής ρητίνης και 9.07% για τα σύνθετα υλικά με μήτρα εποξειδικής ρητίνης τύπου πάστας. Αντιστοίχως και τα υλικά στην κατασκευή των οποίων ως ενισχυτικό μέσο χρησιμοποιήθηκε ύφασμα Kevlar χαρακτηρίζονται από βελτιωμένες θλιπτικές αντοχές σε σύγκριση με τα κατασκευασμένα από καθαρό τσιμεντοκονίαμα υλικά. Αναλυτικότερα τα σύνθετα υλικά υφάσματος ινών Kevlar και εποξειδική ρητίνη υγρής σύνθεσης παρουσιάζουν βελτιωμένες, κατά 18.28%, αντοχές σε θλίψη συγκριτικά με τα υλικά από καθαρό τσιμεντοκονίαμα. Τα αντίστοιχα υλικά με ίδιου τύπου ενίσχυση και ξηρού τύπου εποξειδική ρητίνη επίσης χαρακτηρίζονται από υψηλότερες τιμές θλιπτικών αντοχών σε σχέση με τα υλικά που κατασκευάστηκαν αποκλειστικά από τσιμεντοκονίαμα σε ποσοστό που ανέρχεται σε 14.96%. Διακρίνεται η υπεροχή των συνθέτων FRP υλικών τσιμέντου με εποξειδική ρητίνη ξηρού τύπου έναντι αυτών με την υγρή εποξειδική ρητίνη στην περίπτωση που ως ενισχυτικό μέσο στα εν λόγω υλικά χρησιμοποιούνται υαλοϋφάσματα. Έτσι σύμφωνα με το Γράφημα 7.3.2-1 η αντοχή σε θλίψη των εν λόγω υλικών με ενισχύεται ελαφρώς κατά 2.47% αν σε αντικατάσταση της υγρής εποξειδικής ρητίνης χρησιμοποιηθεί εποξειδική ρητίνη τύπου πάστας. Στον αντίποδα και σε ότι αφορά στα υλικά με ενίσχυση Kevlar, η χρήση ξηρής εποξειδικής ρητίνης οδηγεί σε υλικά υποβαθμισμένης, κατά 3.92%, θλιπτικής αντοχής σε σύγκριση με τα αντίστοιχα υλικά με μήτρα υγρής εποξειδικής ρητίνης.



Από τη μελέτη των ανωτέρω συνθέτων υλικών με βάση την τελική ενισχυτική φάση διαπιστώνεται ότι, στην περίπτωση που ως τελικό στρώμα χρησιμοποιείται η ξηρού τύπου εποξειδική ρητίνη, τα υφάσματα ινών Kevlar παρουσιάζονται ανθεκτικότερα σε θλιπτικές καταπονήσεις σε ποσοστό που ανέρχεται σε 5.83% συγκριτικά με τα αντίστοιχα υφάσματα ινών υάλου. Αντίστοιχα και στην περίπτωση που η τελική επίστρωση αποτελείται από υγρή εποξειδική ρητίνη αποδοτικότερα, κατά 11.75%, από πλευράς ενισχυτικής απόψεως για την αντιμετώπιση θλιπτικών καταπονήσεων εμφανίζονται τα υφάσματα ινών Kevlar.



Γράφημα 7.3.2-1. Αντοχή σε θλίψη συνθέτων FRP υλικών τσιμεντοκονιάματος με εποξειδική ρητίνη.



Εικόνα 7.3.2-1. Θραυσμένα με μονοαξονική θλίψη σύνθετα FRP υλικά τσιμεντοκονιάματος με ενίσχυση υφασμάτων υάλου διπλής κατεύθυνσης και εποξειδική ρητίνη.



Εικόνα 7.3.2-2. Θραυσμένα με μονοαξονική θλίψη σύνθετα FRP υλικά τσιμεντοκονιάματος με ενίσχυση υφασμάτων Kevlar διπλής κατεύθυνσης και εποξειδική ρητίνη.

### 7.3.3 Συγκριτική ανάλυση αποτελεσμάτων αντοχής σε θλίψη συνθέτων υλικών τσιμέντου (ενίσχυση με εποξειδική ρητίνη και ίνες)

Ακολούθως παρατίθενται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα των πειραματικών δοκιμών προσδιορισμού της αντοχής, των συνθέτων υλικών που αναπτύχθηκαν στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής, σε θλίψη (Γράφημα 7.3.3-1). Σε συνέχεια της επεξεργασίας των όσων αποτυπώνονται στο παρακάτω γράφημα, διαπιστώνεται ότι τα ενισχυμένα με ίνες άνθρακα σε μορφή υφάσματος υλικά χαρακτηρίζονται από μεγαλύτερες αντοχές σε θλιπτικές καταπονήσεις, υπερτερώντας όλων των άλλων υλικών που κατασκευάστηκαν. Σε ότι αφορά στην κατάταξή τους βάσει θλιπτικής αντοχής πρώτα κατατάσσονται τα σύνθετα υλικά τσιμεντοκονιάματος ενδεδυμένα με υφάσματα ινών άνθρακα διαγώνιας πλέξης τοποθετημένα σε μήτρα από εποξειδική ρητίνη τύπου πάστας με αντοχή σε θλίψη 74.10MPa. Ακολουθούν τα αντίστοιχου σύνθεσης υλικά στα οποία ως ενισχυτική φάση έχουν επιλεγεί τα υφάσματα ινών άνθρακα μονής κατεύθυνσης μέσα σε μήτρα ρητίνης ίδιου τύπου (ξηρή) και αντοχή που ανέρχεται στα 58.10MPa, τα σύνθετα με επένδυση υφασμάτων ινών άνθρακα μονής κατεύθυνσης και μήτρα από υγρή εποξειδική ρητίνη με θλιπτική αντοχή στα 55.70MPa, τα φέροντα ενίσχυση υφασμάτων ινών άνθρακα διαγώνιας πλέξης και μήτρα υγρής εποξειδικής ρητίνης με αντοχή σε θλίψη της τάξεως των 54.00MPa, τα σύνθετα υλικά με ενίσχυση υφασμάτων Kevlar και υγρή εποξειδική ρητίνη με θλιπτική αντοχή στα 53.60MPa και τα σύνθετα στα οποία ως μέσο ενισχύσεως έχουν ενσωματωθεί σε μήτρα ξηρής εποξειδικής ρητίνης υφάσματα ινών Kevlar με αντοχή η οποία ανέρχεται στα 51.50MPa. Στις δυο τελευταίες θέσεις σε όρους αντοχών σε θλιπτικές καταπονήσεις βρίσκονται σύμφωνα με τα αποτελέσματα τα σύνθετα με ενίσχυση αποτελούμενη από υαλοϋφάσματα τοποθετημένα σε μήτρα εποξειδικής ρητίνης ξηρού τύπου με αντοχή σε θλίψη στα 48.50MPa και τα αντίστοιχης ενισχύσεως υλικά με τα υφάσματα να βρίσκονται εγκιβωτισμένα σε υγρή εποξειδική ρητίνη, με τιμή αντοχής σε θλίψη στα 47.3MPa.

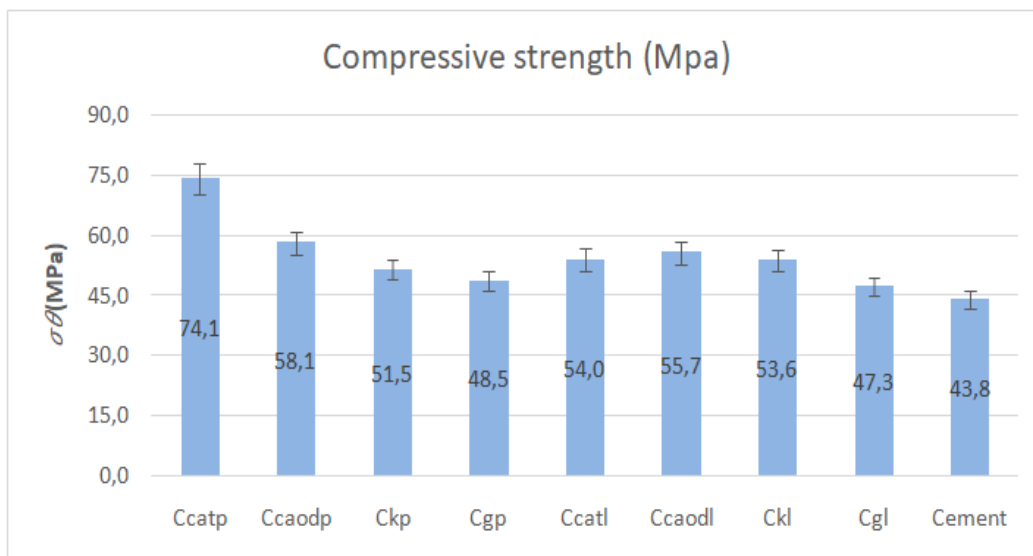
Στο πλαίσιο της μελέτης της μηχανικής συμπεριφοράς των υπό εξέταση υλικών με βάση την εποξειδική ρητίνη της μήτρας, παρατηρείται ότι στην περίπτωση που για την κατασκευή της χρησιμοποιείται ρητίνη τύπου πάστας η θλιπτική αντοχή στο τελικό σύνθετο βελτιώνεται συγκριτικά με τα δοκίμια από καθαρό τσιμεντοκονίαμα, κατά 9.69% όταν ως ενισχυτική φάση στα δοκίμια τσιμέντου εφαρμοστούν υφάσματα ινών υάλου. Η βελτίωση είναι ακόμα μεγαλύτερη αν ως ενίσχυση στη θέση των υφασμάτων από ίνες υάλου χρησιμοποιηθούν υφάσματα ινών Kevlar. Σε αυτή την περίπτωση η θλιπτική αντοχή των τελικών συνθέτων παρουσιάζεται ενισχυμένη, σε σχέση με τα σύνθετα υλικά με ίνες υάλου, κατά 5.83%. Η εκ νέου αντικατάσταση της ενίσχυσης Kevlar με ίνες άνθρακα μονής κατεύθυνσης τύπου υφάσματος οδηγεί σε υλικά με ενισχυμένη θλιπτική αντοχή κατά 16.52% ως προς την αντοχή των συνθέτων με υφάσματα υαλο-ινών και κατά 11.36% ως προς την αντοχή των συνθέτων με υφάσματα Kevlar αντίστοιχα. Τέλος η χρήση υφάσματος άνθρακα διαγώνιας πλέξης στη θέση του υφάσματος μονής κατεύθυνσης, ενισχύει ακόμα περισσότερο τη μηχανική απόδοση των τελικών συνθέτων, οδηγώντας σε υλικά με θλιπτική αντοχή που υπερτερεί, σε σχέση με τα υλικά ενίσχυσης με υαλονήματα, κατά 34.55% και ως προς τα αντίστοιχα υλικά με ενίσχυση Kevlar κατά 30.50%.

Στη περίπτωση που για την κατασκευή της μήτρας χρησιμοποιείται υγρής σύνθεσης εποξειδική ρητίνη η θλιπτική αντοχή του τελικού συνθέτου βελτιώνεται συγκριτικά με τα δοκίμια από καθαρό τσιμέντο, κατά 7.4% όταν τα δοκίμια τσιμεντοκονιάματος ενισχυθούν με υφάσματα ινών υάλου. Η βελτίωση που παρατηρείται και εδώ είναι μεγαλύτερη αν στη θέση των υφασμάτων (με ίνες) υάλου χρησιμοποιηθούν πανομοιότυπα υφάσματα Kevlar. Εν προκειμένω, η θλιπτική αντοχή των τελικών συνθέτων παρουσιάζεται ενισχυμένη, σε σχέση με τα σύνθετα υλικά με ίνες υάλου, κατά 11.75%. Η εκ νέου αντικατάσταση του Kevlar με ύφασμα ινών άνθρακα μονής κατεύθυνσης οδηγεί σε υλικά ενισχυμένης θλιπτικής αντοχής κατά 15.08% ως προς την αντοχή των συνθέτων με υφάσματα υαλο-ινών και σε κατά 3.77% ως προς την

αντοχή των συνθέτων με υφάσματα Kevlar αντίστοιχα. Κλείνοντας, η ενίσχυση με ύφασμα άνθρακα διαγώνιας πλέξης στη θέση του αντίστοιχου μονής, έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή υλικών με ενισχυμένες αντοχές, οι οποίες όμως είναι ελαφρώς περιορισμένες σε σχέση με αυτές των συνθέτων με ενίσχυση υφασμάτων ινών άνθρακα μονής πλέξης. Πιο συγκεκριμένα η θλιπτική αντοχή των παραγόμενων συνθέτων σε σχέση με τα υλικά με ενίσχυση αποτελούμενη από υαλονήματα, παρουσιάζεται βελτιωμένη κατά 12.41% και σε σύγκριση με τα υλικά με ενίσχυση Kevlar βελτιωμένη κατά 0.74% αντίστοιχα.

Λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός ότι οι μηχανικές ιδιότητες των δομικών υλικών επηρεάζονται από την επίδραση των περιβαλλοντικών συνθηκών με την πάροδο του χρόνου, καθίσταται σαφές ότι τα υποδεέστερα από πλευράς θλιπτικών αντοχών σύνθετα με ίνες γυαλιού και Kevlar, θα υποβαθμιστούν ακόμη περισσότερο αν υποβληθούν σε διαδικασία γήρανσης και εν συνεχεία εκ νέου σε πειραματικές δοκιμές προσδιορισμού της θλιπτικής τους αντοχής.

Κατά συνέπεια η μελέτη των επιπτώσεων της γήρανσης που λαμβάνει χώρα στις επόμενες παραγράφους αφορά αποκλειστικά στα υλικά με ενίσχυση υφασμάτων από ίνες άνθρακα.



Γράφημα 7.3.3-1. Αντοχή σε θλίψη συνθέτων υλικών τσιμεντοκονιάματος με ενίσχυση υφασμάτων ινών διαφόρων τύπων και πλέξεων και εποξειδική ρητίνη.

#### 7.3.4 Συγκριτική ανάλυση αποτελεσμάτων αντοχής σε θλίψη συνθέτων υλικών τσιμέντου και συνθέτων υλικών τσιμέντου με προσθήκη ινών άνθρακα μικρού μήκους (ενίσχυση με εποξειδική ρητίνη και ίνες)

Στο Γράφημα 7.3.4-1, παρατίθεται η συγκριτική ανάλυση των αποτελεσμάτων των θλιπτικών αντοχών των συνθέτων υλικών τσιμέντου με ενίσχυση υφασμάτων ινών διαφόρων ειδών και πλέξεων σε συσχέτισμό με τα αντίστοιχα υλικά στο πλαίσιο της κατασκευής των οποίων, χρησιμοποιήθηκαν, ως πληρωτικό υλικό ενίσχυσης στα αρχικά δοκίμια από τσιμεντοκονίαμα, μικρού μήκους ίνες άνθρακα (chopped CCF).

Από την επεξεργασία των εν λόγω αποτελεσμάτων, διαπιστώνεται ότι η προσθήκη ινών άνθρακα μικρού μήκους στο μίγμα από το οποίο κατασκευάστηκαν τα αρχικά (άνευ εξωτερικής ενισχυτικής επένδυσης) δοκίμια, οδηγεί σε υλικά με βελτιωμένη αντοχή [17] σε σχέση με τα υλικά από καθαρό τσιμέντο, η οποία ανέρχεται σε ποσοστό 8.34%.

Σε ότι αφορά στην κατάταξη των υπό διερεύνηση υλικών βάσει της θλιπτικής τους αντοχής, επικρατέστερα εμφανίζονται τα σύνθετα υλικά τσιμεντοκονιάματος στο οποίο εμπεριέχονται CCF και επιπροσθέτως είναι ενδεδυμένα με υφάσματα ινών άνθρακα διαγώνιας πλέξης σε μήτρα από εποξειδική ρητίνη τύπου πάστας. Τα συγκεκριμένα υλικά επιδεικνύουν αντοχή σε θλίψη 81.40MPa, τιμή αυξημένη κατά

8.52% συγκριτικά με τα αντιστοίχου ενίσχυσης σύνθετα υλικά, στην κατασκευή των οποίων δεν ενσωματώθηκαν μικρού μήκους ίνες άνθρακα στα αρχικά δοκίμια από τσιμεντοκονιάμα. Εν συνεχεία, ακολουθούν τα αντίστοιχου σύνθεσης-ως προς τη σύσταση των αρχικών δοκιμίων-υλικά με ενισχυτική φάση αποτελούμενη από υφάσματα ινών άνθρακα μονής κατεύθυνσης μέσα σε μήτρα υγρής εποξειδικής ρητίνης, με αντοχή 76.50MPa, βελτιωμένη κατά 27.28% σε σχέση με τα κατασκευασμένα χωρίς προσθήκη ινών άνθρακα μικρού μήκους σύνθετα. Ακολουθούν τα σύνθετα με ενισχυτική φάση υφάσματος Kevlar και ξηρή εποξειδική ρητίνη, με αντοχή της τάξεως των 68.90MPa (βελτίωση κατά 24.25%), τα σύνθετα με επένδυση υφασμάτων ινών άνθρακα μονής κατεύθυνσης και μήτρα ξηρής εποξειδικής ρητίνης με θλιπτική αντοχή στα 68.60MPa, βελτιωμένη κατά 15.8% ως προς την αντοχή των άνευ προσθήκης (στα δοκίμια) ινών μικρού μήκους υλικών, τα ενισχυμένα με υφάσματα ινών άνθρακα διαγώνιας πλέξης και μήτρα υγρής εποξειδικής ρητίνης με αντοχή που ανέρχεται σε 62.30MPa, ενισχυμένη κατά 25.36% σε σχέση με τα αντίστοιχου δομής αλλά άνευ ινών μικρού μήκους, στα δοκίμια τσιμεντοκονιάματος υλικά, τα σύνθετα με ενισχυτική επένδυση υφασμάτων Kevlar και υγρή εποξειδική ρητίνη με θλιπτική αντοχή στα 57.70MPa, ήτοι βελτιωμένα σε σχέση με τα χωρίς ενισχυτική φάση από CCF (στα δοκίμια) σύνθετα, κατά 7.59% και τα σύνθετα με ενισχυτική φάση αποτελούμενη από μήτρα εποξειδικής ρητίνης τύπου πάστας στην οποία βρίσκονται εγκιβωτισμένα υφάσματα ινών υάλου με αντοχή που ανέρχεται στα 55.90MPa. Η συγκεκριμένη τιμή είναι βελτιωμένη κατά 8.33% συγκρινόμενη με την αντοχή των αντίστοιχου σύνθεσης, και άνευ ενίσχυσης από μικρού μήκους ίνες άνθρακα στα αρχικά δοκίμια, υλικών. Τελευταία με βάση τα αποτελέσματα έρχονται τα σύνθετα που φέρουν ενίσχυση υαλοϋφασμάτων σε μήτρα ξηρής εποξειδικής ρητίνης με θλιπτική αντοχή στα 51.60MPa. Παρά τη χαμηλή θλιπτική τους αντοχή σε σχέση με τα υπόλοιπα υπό εξέταση υλικά, παρουσιάζονται βελτιωμένα κατά 8.34% συγκριτικά με τα αντίστοιχου ενίσχυσης, αλλά άνευ προσθήκης ινών άνθρακα (στα δοκίμια) υλικά.

Η περαιτέρω μελέτη της μηχανικής συμπεριφοράς των ανωτέρω υλικών με βάση την εποξειδική ρητίνη της μήτρας, αναδεικνύει την σαφή, σε όρους θλιπτικής αντοχής, υπεροχή των συνθέτων υλικών με ρητίνη τύπου πάστας συγκριτικά με τα αντιστοιχού σύνθεσης υλικά των οποίων η μήτρα αποτελείται από υγρής σύνθεσης ρητίνη. Μοναδική εξαίρεση αποτελούν τα σύνθετα υλικά με υφάσματα ινών άνθρακα μονής κατεύθυνσης και προσθήκη ινών μικρού μήκους στα αρχικά δοκίμια, κατηγορία στην οποία επικρατέστερα εμφανίζονται τα υλικά για την κατασκευή της μήτρας των οποίων χρησιμοποιήθηκε υγρή εποξειδική ρητίνη.

Αναλυτικότερα σε ότι αφορά στα ενισχυμένα με υφάσματα ινών άνθρακα πλέξης twill, προσθήκη μικρού μήκους ινών και εποξειδική ρητίνη, επικρατέστερα ως προς την θλιπτική τους αντοχή με βάση τα αποτελέσματα του Γραφήματος 7.3.4-1, εμφανίζονται τα υλικά στα οποία έχει χρησιμοποιηθεί ξηρή ρητίνη. Τα εν λόγω σύνθετα επιδεικνύουν θλιπτική αντοχή 81.40MPa, βελτιωμένη κατά 23.47% ως προς αυτή των υλικών με μητρική φάση κατασκευασμένη από υγρή ρητίνη.

Αντιστοιχώς, τα σύνθετα με επένδυση υφασμάτων Kevlar, εποξειδική ρητίνη και ενσωματωμένες ίνες άνθρακα μικρού μήκους στα δοκίμια τσιμεντοκονιάματος, παρουσιάζουν βελτίωση των θλιπτικών αντοχών τους κατά 16.26%, σε περίπτωση αντικατάστασης της υγρού τύπου ρητίνης της μητρικής φάσης με ξηρής σύνθεσης αντίστοιχή της.

Τα ενισχυμένα με υφάσματα ινών υάλου υλικά χαρακτηρίζονται από μηχανικές αντοχές σε θλιπτικές καταπονήσεις οι οποίες βελτιώνονται κατά 7.69% εάν για την κατασκευή της μήτρας της ενισχυτικής φάσης επιλεγεί η ρητίνη τύπου πάστας αντί της υγρής αντίστοιχής της.

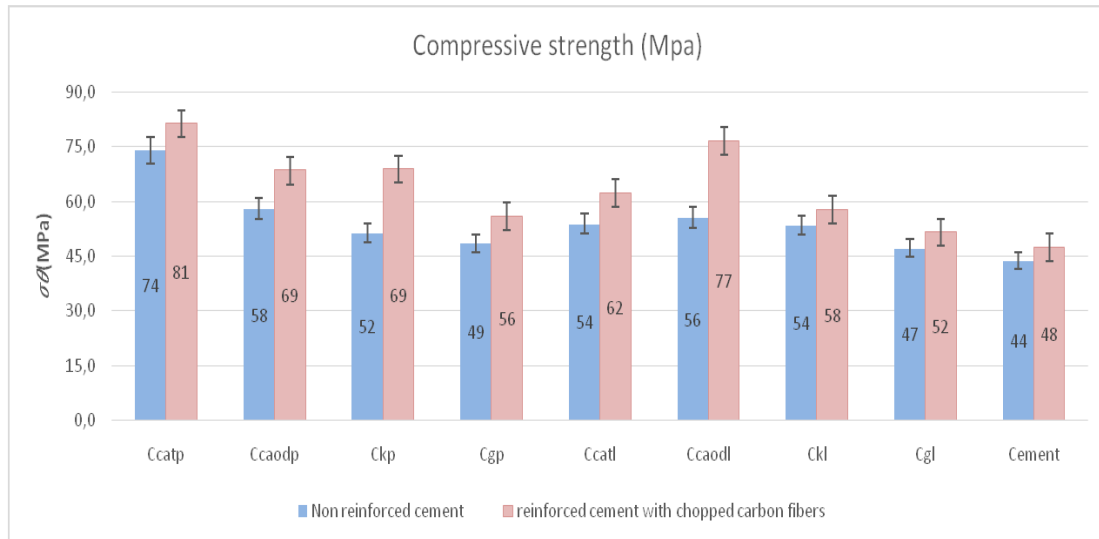
Τα ενδεδυμένα με υφάσματα ινών άνθρακα πλέξης twill και ενισχυμένα με μικρού μήκους ίνες άνθρακα υλικά, εμφανίζονται αποτελεσματικότερα σε σχέση με τα υλικά από σκέτο τσιμεντοκονίαμα ως προς την θλιπτική τους αντοχή σε ποσοστό της



τάξεως του 29.70% σε ότι αφορά στα σύνθετα υλικά με ύφασμα διαγώνιας πλέξης με υγρή εποξειδική ρητίνη και 46.19% για τα σύνθετα υλικά με ύφασμα twill και εποξειδική ρητίνη τύπου πάστας.

Αντιστοίχως τα υλικά με ενίσχυση από ύφασμα μονής κατεύθυνσης (unidirectional) επίσης χαρακτηρίζονται από ενισχυμένες θλιπτικές αντοχές συγκριτικά με τα υλικά από καθαρό τσιμεντοκονίαμα. Οι ανωτέρω αντοχές αφενός και σε ότι αφορά στα σύνθετα υλικά υφάσματος ινών άνθρακα μονής πλέξης και εποξειδική ρητίνη υγρού τύπου παρουσιάζονται βελτιωμένες κατά 42.75%, και αφετέρου για τα υλικά με ύφασμα μονής κατεύθυνσης και ξηρού τύπου εποξειδική ρητίνη κατά 36.43% αντίστοιχα.

Βάσει των αποτελεσμάτων που παρουσιάζονται στο ακόλουθο γράφημα αντίστοιχα συμπεράσματα και διαπιστώσεις προκύπτουν και επί της μηχανικής συμπεριφοράς των υπολοίπων συνθέτων υλικών που μελετήθηκαν κατά την παρούσα ερευνητική διατριβή. Στο πλαίσιο αυτό διαπιστώνεται ότι, τα σύνθετα στα οποία που φέρουν ενίσχυση υφάσματος ινών υάλου επιδεικνύουν αντοχές σε θλιπτικές καταπονήσεις που είναι βελτιωμένες, συγκριτικά με τις αντίστοιχες αντοχές των κατασκευασμένων από σκέτο τσιμεντοκονίαμα υλικών κατά 15.11% για τα σύνθετα με μήτρα υγρής εποξειδικής ρητίνης και 21.65% για τα σύνθετα υλικά με μήτρα εποξειδικής ρητίνης τύπου πάστας. Παρομοίως και σε ότι αφορά στα υλικά με ενισχυτική φάση από ύφασμα Kevlar. Τα ανωτέρω σύνθετα υλικά παρουσιάζουν βελτίωση στις θλιπτικές αντοχές, σε σύγκριση με τα υλικά από καθαρό τσιμεντοκονίαμα, η οποία, αφενός για τα σύνθετα υλικά με ενίσχυση υφάσματος Kevlar και εποξειδική ρητίνη υγρού τύπου ανέρχεται σε ποσοστό 24.09% και αφετέρου για τα αντιστοίχου ενισχύσεως (ύφασμα Kevlar) και ξηρού τύπου εποξειδική ρητίνη σε αντικατάσταση της υγρής ανέρχεται σε 36.43%.



Γράφημα 7.3.4-1. Αντοχή σε θλίψη συνθέτων υλικών τσιμεντοκονιάματος (μπλε στήλες) τσιμεντοκονίαμα με chopped carbon fibres (κόκκινες στήλες) με ενίσχυση υφασμάτων ινών διαφόρων τύπων και πλέξεων και εποξειδική ρητίνη.

### 7.3.5 Αποτελέσματα μετρήσεων αντοχής σε θλίψη συνθέτων υλικών τσιμέντου (ενίσχυση με εποξειδική ρητίνη και ίνες άνθρακα) που υπεβλήθησαν σε τεχνητή γήρανση

Σύμφωνα με τα όσα αναλύθηκαν προηγούμενα, δοκίμια συνθέτων υλικών τσιμέντου με ενίσχυση υφασμάτων διαφορετικών πλέξεων (μονής και διπλής κατεύθυνσης τύπου twill) και εποξειδική ρητίνη ξηρού και υγρού τύπου, υπεβλήθησαν σε θερμική επεξεργασία με σκοπό την ταχεία, τεχνητή γήρανση τους ώστε εν συνεχεία να μελετηθούν διεξοδικά οι επιπτώσεις της στα μηχανικά χαρακτηριστικά των υλικών αυτών. Εξετάστηκαν ενδελεχώς και κατεγράφησαν τα αποτελέσματα της ως άνω θερμικής διεργασίας στην μηχανική αποτελεσματικότητά τους σε όρους αντοχής σε θλίψη.

Τα αποτελέσματα των πειραματικών δοκιμών παρατίθενται ακολούθως στο Γράφημα 7.3.5-1. Βάσει αυτών εξάγονται τα αξιοσημείωτα συμπεράσματα και διαπιστώσεις.

Εν γένει παρατηρείται ότι η διεργασία της γήρανσης επιδρά αρνητικά σε όλα τα υπό εξέταση υλικά, περιορίζοντας την αντοχή αυτών σε θλίψη [8,10,11]. Έτσι η αντοχή των συνθέτων υλικών τσιμεντοκονιάματος με ενίσχυση υφασμάτων ινών άνθρακα μονής κατεύθυνσης και εποξειδική ρητίνη ξηράς μορφής μειώνεται μετά από

γήρανση χρονικής διάρκειας 8 ημερών κατά 10.45% σε σχέση με την αντοχή των αντίστοιχων υλικών που δεν υπεβλήθησαν σε τεχνητή γήρανση. Παρομοίως και σε ότι αφορά τα σύνθετα υλικά με υφάσματα πλέξης twill και ξηρή εποξειδική ρητίνη, παρατηρείται υποβάθμιση της αντοχής αυτών σε θλίψη σε ποσοστό που ανέρχεται σε 7.29% ως αποτέλεσμα της θερμικής επεξεργασίας της γήρανσης για 8 ημέρες σε σύγκριση με τα μη γηρασμένα, αλλά αντίστοιχων κατασκευαστικών χαρακτηριστικών υλικά.

Παραμεφερή συμπεράσματα προκύπτουν και ως προς τη μηχανική συμπεριφορά των συνθέτων στα οποία ως ενισχυτική φάση πέραν των υφασμάτων μονής ή διπλής κατεύθυνσης χρησιμοποιήθηκε υγρής μορφής εποξειδική ρητίνη. Αναλυτικότερα η γήρανση χρονικής διάρκειας 8 ημερών οδηγεί σε υλικά η θλιπτική αντοχή των οποίων υποβαθμίζεται κατά 15.77% (σύνθετα τσιμεντοκονιάματος με υφάσματα ινών μονής κατεύθυνσης και υγρό εποxy) σε σύγκριση με την αντοχή των όμοιων αλλά μη γηρασμένων υλικών. Τα με θερμικά μέσα (σε κύκλο επεξεργασίας διάρκειας 8 ημερών) γηρασμένα σύνθετα υλικά με ενίσχυση υφασμάτων twill και υγρή εποξειδική ρητίνη, υποβαθμίζονται ως προς την θλιπτική τους αντοχή, σε σύγκριση με τα μη γηρασμένα υλικά, κατά 19.05%. Ωστόσο οι τιμές που καταγράφονται όπως μπορεί να διαπιστωθεί και από το Γράφημα 7.3.5-1 είναι μεγαλύτερες της μέγιστης τιμής της αντοχής σε θλίψη που προσδιορίστηκε πειραματικά στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής για τα υλικά από καθαρό τσιμεντοκονίαμα.

Η επέκταση της χρονικής διάρκειας της γήρανσης των υπο εξέταση υλικών έχει ως αποτέλεσμα την περαιτέρω υποβάθμιση των θλιπτικών τους αντοχών. Ειδικότερα σε ότι αφορά στην πρώτη κατηγορία υλικών, δηλαδή τα σύνθετα υλικά τσιμέντου με ενίσχυση υφασμάτων μονής κατεύθυνσης και ξηρή εποξειδική ρητίνη, η επέκταση της θερμικής επεξεργασίας από τις 8 στις 12 ημέρες δρα περιοριστικά στην θλιπτική τους αντοχή υποβαθμίζοντας την σε ποσοστό που ανέρχεται σε 5.9% αυτής που επιδεικνύουν τα με τεχνητά μέσα γηρασμένα σύνθετα υλικά κατόπιν κύκλου

γήρανσης 8 ημερών. Τα υλικά της δεύτερης κατηγορίας (σύνθετα υλικά με υφάσματα twill και ξηρή εποξειδική ρητίνη) κατά της επέκτασης της χρονικής διάρκειας της διαδικασίας της τεχνητής γήρανσης στις 12 ημέρες υποβαθμίζονται ως προς τις αντοχές τους σε θλίψη κατά 23.22% συγκριτικά με τα όμοια τους και γηρασμένα επί 8 ημέρες σύνθετα υλικά.

Σε ότι αφορά στα σύνθετα υλικά τσιμεντοκονιάματος ενισχυμένα με υφάσματα ινών μονής κατεύθυνσης και εποξειδική ρητίνη υγρού τύπου η χρονική επιμήκυνση της γήρανσης από τις 8 στις 12 ημέρες έχει ως συνέπεια την παραγωγή υλικών με περιορισμένη κατά 6.68% θλιπτική αντοχή σε σύγκριση με τα υλικά που υπεβλήθησαν σε αντίστοιχη επεξεργασία διάρκειας 8 ημερών. Τέλος η επέκταση του χρόνου γήρανσης στις 12 ημέρες στα υλικά με υγρή εποξειδική ρητίνη και υφάσματα διαγώνιας πλέξης (twill) προκαλεί επιπλέον περιορισμό της θλιπτικής αντοχής, η οποία συγκριτικά με την αντίστοιχη αντοχή των γηρασμένων, σε κύκλο 8 ημερών, υλικών μειώνεται κατά 6.96%.

Περαιτέρω επέκταση του χρόνου γήρανσης στις 16 ημέρες οδηγεί σε ακόμα μεγαλύτερη υποβάθμιση της αντοχής των συνθέτων υλικών σε θλίψη, με τα σύνθετα με ενίσχυση από υφάσματα ινών άνθρακα μονής κατεύθυνσης και εποξειδική ρητίνη ξηράς σύνθεσης να παρουσιάζουν αντοχές μειωμένες κατά 5.54%, τα σύνθετα με ενίσχυση από υφάσματα ινών άνθρακα μονής κατεύθυνσης και υγρή εποξειδική ρητίνη με αντοχές μειωμένες κατά 7.13%, τα σύνθετα με ενίσχυση από υφάσματα ινών άνθρακα διπλής κατεύθυνσης και ξηρή εποξειδική ρητίνη να παρουσιάζουν αντοχές μειωμένες κατά 14.85% και τα σύνθετα με υφάσματα ινών άνθρακα διπλής κατεύθυνσης και υγρή εποξειδική ρητίνη να επιδεικνύουν αντοχές μειωμένες κατά 14.85%, σε σύγκριση με τα αντίστοιχα υλικά που υπεβλήθησαν σε κύκλο θερμικής επεξεργασίας (γήρανση) 12 ημερών.

Αποδοτικότερα ως προς την θλιπτική τους αντοχή παρουσιάζονται τα σύνθετα υλικά τσιμεντοκονιάματος με υφάσματα πλέξης twill και επιπλέον ενισχυτική στεγάνωση με εποξειδική ρητίνη ξηρού τύπου. Η θλιπτική αντοχή των ανωτέρω υλικών παραμένει ανεξαρτήτως της χρονικής διάρκειας της θερμικής επεξεργασίας, μεγαλύτερη αυτής των μη ενισχυμένων σε σύγκριση με τα αντιστοιχών χαρακτηριστικών δοκίμια που δεν υπεβλήθησαν σε διεργασίες γήρανσης (σε επίπεδο απόλυτων τιμών).

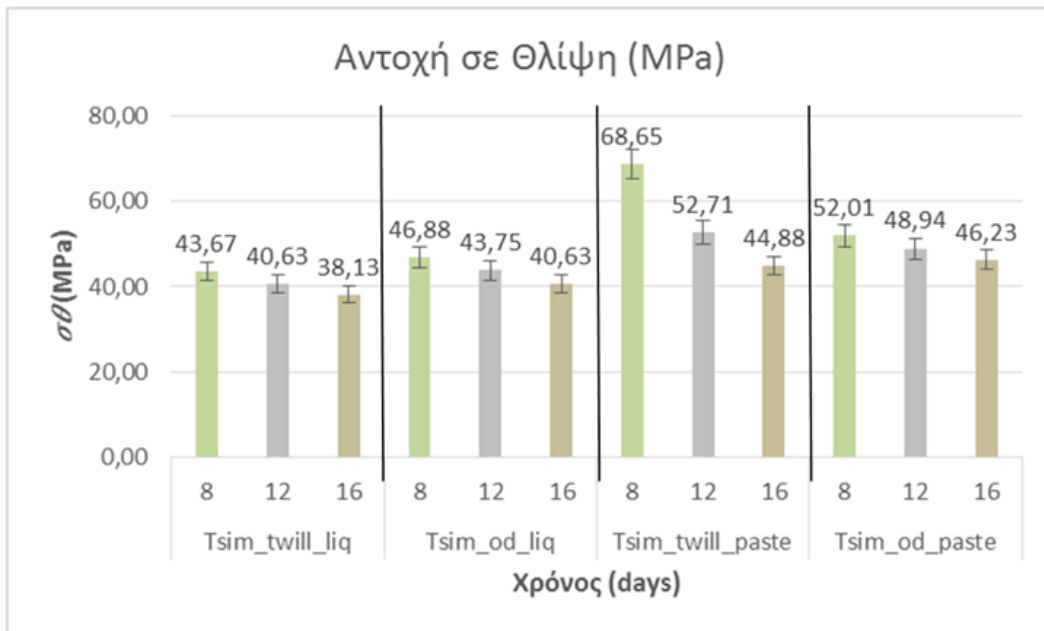
Ακολουθούν τα υλικά στην κατασκευή των οποίων χρησιμοποιήθηκαν υφάσματα μονής κατεύθυνσης και παρόμοιου τύπου ρητίνη (ξηρή εποξειδική) των οποίων η μηχανική συμπεριφορά σε όρους θλιπτικών αντοχών είναι πανομοιότυπη.

Στον αντίποδα η μηχανική συμπεριφορά των αντίστοιχων υλικών στα οποία ως τελικό στρώμα ενίσχυσης χρησιμοποιήθηκε εποξειδική ρητίνη υγρού τύπου διαφοροποιείται αρκετά. Η θερμική επεξεργασία στην οποία τα υλικά αυτά υπεβλήθησαν στο πλαίσιο της γήρανσης είχε αρνητικό αντίκτυπο στα μηχανικά τους χαρακτηριστικά. Λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός ότι γενικά τα θερμοσκληρυνόμενα υλικά επιδεικνύουν εκ φύσεως ψαθυρότητα [5,6] είναι προφανές ότι η, μετά τη σκλήρυνσή, παρατεταμένη παραμονή τέτοιων υλικών σε ιδιαίτερως θερμό περιβάλλον έχει ως αποτέλεσμα την περαιτέρω υποβάθμιση των μηχανικών τους χαρακτηριστικών και κατά συνέπεια της ενισχυτικής τους αποτελεσματικότητας. Όπως ευκρινώς αποτυπώνεται και στα πειραματικά αποτελέσματα σχεδόν το σύνολο των συνθέτων στα οποία ως μήτρα χρησιμοποιήθηκε η υγρή εποξειδική ρητίνη και εν συνεχεία υπεβλήθησαν σε τεχνητή γήρανση ανεξαρτήτως της χρονικής διάρκειας αυτής της διεργασίας, χαρακτηρίζονται από θλιπτικές αντοχές οι οποίες είναι υποδεέστερες αυτών που επέδειξαν τα μη ενισχυμένα υλικά [4,8,9,11].

Η συνολική υποβάθμιση των θλιπτικών αντοχών στο πλαίσιο ενός κύκλου θερμικής επεξεργασίας/τεχνητής γήρανσης χρονικής διάρκειας 16 ημερών σε σύγκριση με τις αντίστοιχες αντοχές των μη γηρασμένων συνθέτων υλικών ανέρχεται σε 20% για τα

υλικά με ενίσχυση υφασμάτων ινών άνθρακα μονής πλέξης και πάστα εποξειδικής ρητίνης, σε 27% για τα σύνθετα υφασμάτων μονής πλέξης με υγρή εποξειδική ρητίνη, 39.39% για τα σύνθετα υλικά με ενίσχυση υφασμάτων πλέξης twill και ξηρή εποξειδική ρητίνη και 29.32% για τα σύνθετα με ενίσχυση υφασμάτων twill και υγρή εποξειδική ρητίνη αντίστοιχα.

Ο μακροσκοπικός έλεγχος των υλικών που υπεβλήθησαν σε τεχνητή γήρανση για χρονικό διάστημα 16 ημερών και κατόπιν σε θλιπτική καταπόνηση ανέδειξε επιφανειακές σημειακές φθορές (σημειακή αποκόλληση τμημάτων του φλοιού της εξωτερικά τοποθετημένης ρητίνης) κατά τα αρχικά στάδια των πειραμάτων προσδιορισμού της θλιπτικής αντοχής και υπό την άσκηση φορτίσεων μικρής κλίμακας. Το εν λόγω φαινόμενο αποδίδεται στην παρατεταμένη χρονικά θερμική επεξεργασία. Η επίδραση της ανωτέρω διαδικασίας στην εποξειδική μήτρα επιφέρει αλλοίωση με αποτέλεσμα τον περιορισμό του βαθμού συνοχής μεταξύ των επιμέρους φάσεων του συνθέτου, ήτοι της ενισχύσεως (ύφασμα) και της μήτρας (εποξειδική ρητίνη) όπως επίσης και στην συνοχή μεταξύ της ενισχυτικής φάσης και το προς ενίσχυση δομικού στοιχείου. Στα σημεία τα οποία εκδηλώνεται η προαναφερθείσα αλλοίωση εντοπίζονται και οι χαρακτηριστικές επιφανειακές φθορές που αναφέρθηκαν παραπάνω (Εικόνα 7.3.5-1). Εξίσου σημαντική διαπίστωση που προκύπτει από τον οπτικό έλεγχο των γηρασμένων συνθέτων υλικών είναι ο αποχρωματισμός της εξωτερικής επιφάνειας τους ο οποίος οφείλεται στην παρατεταμένη παραμονή σε ιδιαίτερες περιβαλλοντικές συνθήκες (θερμοκρασίας, υγρασίας κλπ) στο πλαίσιο της γήρανσης. Ο βαθμός αποχρωματισμού είναι στενά συνδεδεμένος με της χρονική διάρκεια της θερμικής επεξεργασίας και τις χημικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα κατά την πραγματοποίησή της [7,8,10,11].



Γράφημα 7.3.5-1. Αντοχή σε θλίψη συνθέτων FRP υλικών τσιμεντοκονιάματος με εποξειδική ρητίνη που υπεβλήθησαν σε τεχνητή γήρανση 8,12 και16 ημερών.



Εικόνα 7.3.5-1. Επιφανειακές αποκολλήσεις σε δοκίμια με τεχνητή μέθοδο γηρασμένα επί 16 ημέρες.

Επιπλέον των παραπάνω μέσω η τεχνητή γήρανση εκτός από την υποβάθμιση των μηχανικών χαρακτηριστικών των νέων αυτών συνθέτων υλικών, συνετέλεσε και στην απώλεια μάζας [11]. Ο προσδιορισμός της απώλειας έγινε μέσω της καταγραφής και της παρακολούθησης του βάρους των υπό γήρανση δοκιμίων καθόλη τη διάρκεια του κύκλου της διαδικασίας. Η εν λόγω μείωση στο βάρος των δειγμάτων μπορεί να αποδοθεί στην αποβολή (έκλυση) των πτητικών αερίων και παράλληλα της εμπεριεχόμενης σε αυτά υγρασίας, διαδικασίες που λαμβάνουν χώρα κατά τα πρώιμα στάδια της έκθεσης τους στην υπεριώδη ακτινοβολία σε θερμοκρασία περίπου 60°C [11]. Τα αποτελέσματα που αφορούν στην απώλεια βάρους που υπέστη κάθε ένα εκ των υπό διερεύνηση σύνθετων υλικών παρατίθενται στο Γράφημα 7.3.5-2 και στον Πίνακα 7.3.5-1. Βάσει της γραφικής απεικόνισης της απώλειας μάζας των υπό εξέταση υλικών είναι σαφές ότι, αυτή λαμβάνει χώρα με σταθερό ρυθμό ως την ολοκλήρωση του κάθε κύκλου θερμικής επεξεργασίας. Η έναρξή της τοποθετείται κατά τις πρώτες μέρες πραγματοποίησης της διαδικασίας. Διαπιστώνεται δε, εξαιτίας της έντονης αναδυσόμενης οσμής της θερμαινόμενης ρητίνης. Η οσμή αυτή είναι στενά συνδεδεμένη με τις χημικές διεργασίες που περιγράφηκαν παραπάνω (εκπομπές πτητικών, οξειδωση κλπ). Κάθε ένα από τα δοκίμια πριν τοποθετηθεί στον κλίβανο θερμικής επεξεργασίας ζυγίστηκε με σκοπό τον προσδιορισμό και την καταγραφή του προ επεξεργασίας βάρους του. Η ζύγιση επαναλαμβάνεται μόλις ολοκληρωθεί χρονικά ο κύκλος επεξεργασίας για την κάθε παρτίδα υλικών. Κατόπιν τα υλικά ξανά ζυγίζονται και η νέα τιμή του βάρους τους καταγράφεται. Η διαφορά που προκύπτει, αν από την αρχική μάζα αφαιρεθεί η αντίστοιχη μάζα που προκύπτει από τη ζύγιση κατόπιν της ολοκλήρωσης ενός εκ των επιλεγμένων κύκλων επεξεργασίας των 8, 12 και 16 ημερών, αντιπροσωπεύει τη απολεσθείσα, λόγω της θερμικής επεξεργασίας μάζα. Σε γενικές γραμμές κι όπως παρατηρείται στο Γράφημα 7.3.5-2 η απώλεια μάζας των συνθέτων υλικών είναι μεγαλύτερη για τα ενισχυμένα υλικά. Η χρήση εποξειδικής ρητίνης σε ρόλο μήτρας για την ενισχυτική φάση στα δοκίμια τσιμεντοκονιάματος έχει ως αποτέλεσμα την



επιτάχυνση της ανωτέρω διαδικασίας σε σχέση με τα μη ενισχυμένα υλικά. Η δε ταχύτητα απώλειας μάζας όπως μπορεί να διαπιστωθεί από την εξέταση των αποτελεσμάτων είναι ακόμη μεγαλύτερη στην περίπτωση που για την κατασκευή της μήτρας χρησιμοποιηθεί υγρή αντί της ξηρής εποξειδικής ρητίνης. Σε ότι αφορά στην επιφανειακή φθορά που επέρχεται δε στα δοκίμια ως αποτέλεσμα της θερμικής επεξεργασίας της γήρανσης, είναι όπως μπορεί να διαπιστωθεί μεγαλύτερη στην περίπτωση που ως μήτρα για την ενισχυτική φάση των συνθέτων χρησιμοποιείται η εποξειδική ρητίνη τύπου πάστας (Εικόνα 7.3.5-1).

Τα δοκίμια χωρίς ενίσχυση, παρουσιάζουν την μικρότερη απώλεια μάζας ως αποτέλεσμα της τεχνητής γήρανσης. Πιο συγκεκριμένα, η μάζα των ως άνω περιορίζεται κατά 0.54% ως αποτέλεσμα της θερμικής επεξεργασίας για χρονικό διάστημα 8 ημερών, κατά 0.75% ως αποτέλεσμα της επεξεργασίας για χρονικό διάστημα 12 ημερών και κατά 1.15% ως αποτέλεσμα της θερμικής επεξεργασίας για διάστημα 16 ημερών αντιστοίχως σε σχέση με τα μη τεχνητώς γηρασμένα δοκίμια από τσιμέντο. Οι συγκεκριμένες απώλειες είναι αποτέλεσμα της εξάτμισης της εμπεριεχόμενης στο τσιμεντοκονίαμα υγρασίας.

Σε ότι αφορά στα ενισχυμένα με υφάσματα ινών άνθρακα υλικά πλέξης twill και εποξειδική ρητίνη η μεταβολή της μάζας που παρουσιάζουν ανέρχεται σε 4.00% για τα γηρασμένα σε 8ήμερο κύκλο σύνθετα, σε 5.71% για τα 12ήμερου κύκλου σύνθετα και σε 6.29% για τα 16ήμερου κύκλου σύνθετα υλικά σε σύγκριση με τα μη γηρασμένα υλικά. Η μεταβολή στη μάζα, των με την ανωτέρω ενίσχυση υλικών, είναι ακόμα μεγαλύτερη στην περίπτωση που ως μητρική φάση στην ενίσχυσή τους χρησιμοποιηθεί υγρή εποξειδική ρητίνη σε αντικατάσταση της εποξειδικής ρητίνης τύπου πάστας (ξηρή). Στην περίπτωση αυτή, η μάζα των θερμικώς επεξεργασμένων δοκιμίων περιορίζεται κατά 4.95% κατόπιν 8ήμερης γήρανσης, κατά 6.03% μετά από 12ήμερη γήρανση και κατά 8.04% μετά από κύκλο γήρανσης 16 ημερών σε σχέση με τη μάζα των αντιστοίχου ενίσχυσης αλλά μη γηρασμένων συνθέτων.

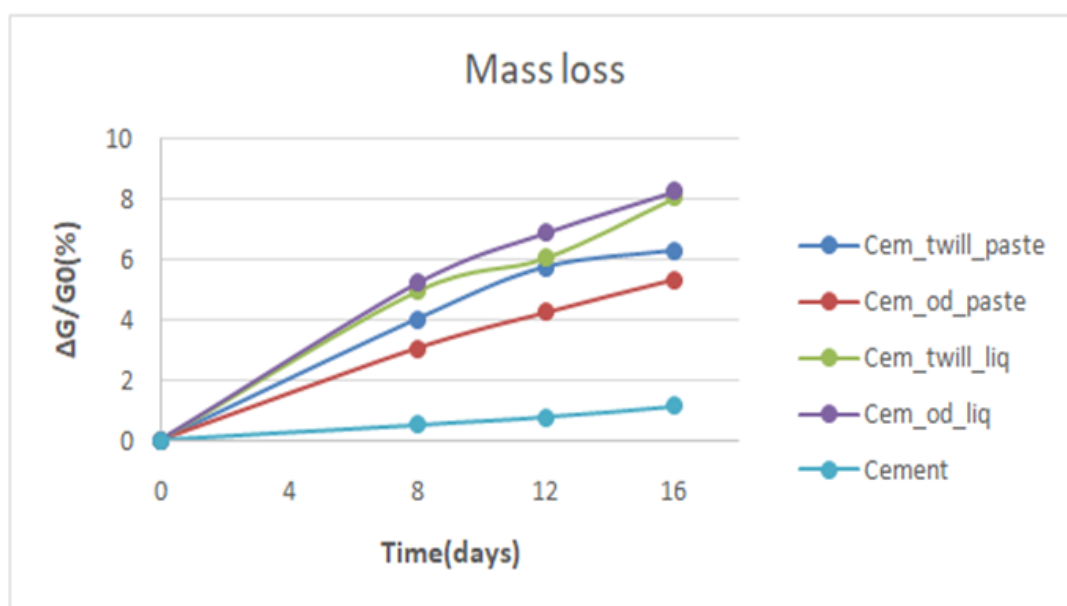
Αντίστοιχα, τα δοκίμια με ενίσχυση από υφάσματα από ίνες άνθρακα μονής πλέξης και μήτρα από εποξειδική ρητίνη, παρουσιάζουν μεταβολή στη μάζα, σε σύγκριση με τα μη γηρασμένα υλικά, η οποία ανέρχεται σε 3.03% για τα υλικά που έχουν υποβληθεί σε γήρανση 8 ημερών, σε 4.24% για τα σύνθετα που έχουν υποβληθεί σε κύκλο γήρανσης 12 ημερών και 5.30% για τα γηρασμένα σε κύκλο θερμικής επεξεργασίας διάρκειας 16 ημερών αντίστοιχα. Και εδώ, στην περίπτωση που ως ενισχυτική φάση χρησιμοποιούνται τα υφάσματα μονής πλέξης, η μεταβολή, ήτοι η μείωση της μάζας των συνθέτων είναι μεγαλύτερη αν ως μητρική φάση χρησιμοποιηθεί η υγρής μορφής εποξειδική ρητίνη αντί της ξηρού τύπου αντίστοιχης της. Πιο συγκεκριμένα, η μάζα των εν λόγω υλικών περιορίζεται κατά 5.20% κατόπιν 8ήμερης γήρανσης, κατά 6.89% μετά από 12ήμερη γήρανση και κατά 8.26% μετά από κύκλο γήρανσης 16 ημερών σε σχέση με τη μάζα των αντιστοίχου ενίσχυσης μη θερμικώς επεξεργασμένων υλικών.

Με βάση το χρόνο του κύκλου θερμικής επεξεργασίας διαπιστώνεται ότι κατά τον 8ήμερο κύκλο θερμικής επεξεργασίας τα υλικά που παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη απώλεια μάζας είναι τα φέροντα ενίσχυση υφασμάτων άνθρακα μονής πλέξης με μήτρα από υγρή εποξειδική ρητίνη με απώλειες της τάξεως του 5.20%. Αντιστοίχως και όσον αφορά στους υπόλοιπους κύκλους θερμικής επεξεργασίας, στο πλαίσιο των πειραματικών δοκιμών του 12ήμερου κύκλου τη μεγαλύτερη απώλεια παρουσίασαν τα υλικά με υφάσματα μονής πλέξης και υγρή εποξειδική ρητίνη με απώλειες 6.89% και στο πλαίσιο του 16ήμερου κύκλου τα σύνθετα με υφάσματα ίδιου τύπου και υγρή εποξειδική ρητίνη με απώλειες 8.26%. Στον αντίποδα τη μικρότερη απώλεια μάζας στο πλαίσιο των ανωτέρω κύκλων θερμικής επεξεργασίας, επέδειξαν, τα σύνθετα με ενίσχυση υφασμάτων μονής κατεύθυνσης και μήτρα από ξηρή εποξειδική ρητίνη (8ήμερη γήρανση) με απώλεια μάζας που ανέρχεται στο 3.03%, τα σύνθετα με υφάσματα ινών άνθρακα μονής πλέξης και εποξειδική ρητίνη τύπου πάστας (12ήμερη γήρανση) με απώλεια μάζας της τάξεως του 4.24% και τέλος τα σύνθετα με

ενίσχυση ίδιου τύπου υφασμάτων και ρητίνης με απολεσθείσα μάζα της τάξεως του 5.30% (16ήμερος κύκλος γήρανσης).

Ένα ποσοστό μεταξύ 3% και 6% από τις απώλειες αυτές, αποδίδεται στην εποξειδική ρητίνη της ενισχυτικής φάσης των συνθέτων, η οποία όπως αναλύθηκε προηγουμένα επιταχύνει την φθορά των υπό πειραματική διερεύνηση υλικών. Το υπολειπόμενο μέρος αυτών των απωλειών αποδίδεται στην εξάτμιση της εμπεριεχόμενης στα δοκίμια, λόγω του τσιμεντοκονιάματος, υγρασίας [4].

Από τη συγκριτική ανάλυση των αποτελεσμάτων που αφορούν στην απώλεια μάζας και στην αντοχή σε θλίψη των υποβληθέντων σε γήρανση συνθέτων υλικών, διαπιστώνεται ότι, η υποβάθμιση των θλιπτικών αντοχών από την οποία χαρακτηρίζονται επέρχεται λόγω των μεταβολών στη μάζα τους. Πιο συγκεκριμένα, στο πλαίσιο των θερμοχημικών διεργασιών της γήρανσης, τα δοκίμια υφίστανται δομικής φύσεως αλλαγές, οι οποίες έχουν ως τελικό αποτέλεσμα την εν γένει υποβάθμιση των μηχανικών τους χαρακτηριστικών, ήτοι της θλιπτικής τους αντοχής, σε σύγκριση με τα μη γηρασμένα υλικά.



Γράφημα 7.3.5-2. Μεταβολές βάρους των ΣΥΤ με ενίσχυση FRP και εποξειδική ρητίνη συναρτήσεσι του χρόνου έκθεσης τους σε υπεριώδη ακτινοβολία.

Πίνακας 7.3.5-1. Μεταβολή μάζας συναρτήσει του χρόνου γήρανσης.

Ονομασία συνθέτου/μάζα (g)	Χρονική Διάρκεια Γήρανσης (days)			
	0	8	12	16
Cement	557	554	552.8	550.6
Cem_twill_paste	700	672	660	656
Cem_od_paste	660	640	632	625
Cem_twill_liq	647	615	608	595
Cem_od_liq	654	620	609	600

### 7.3.6 Αποτελέσματα μετρήσεων αντοχής σε κάμψη συνθέτων υλικών εποξειδικής ρητίνης και ενίσχυση από υφάσματα με ίνες άνθρακα

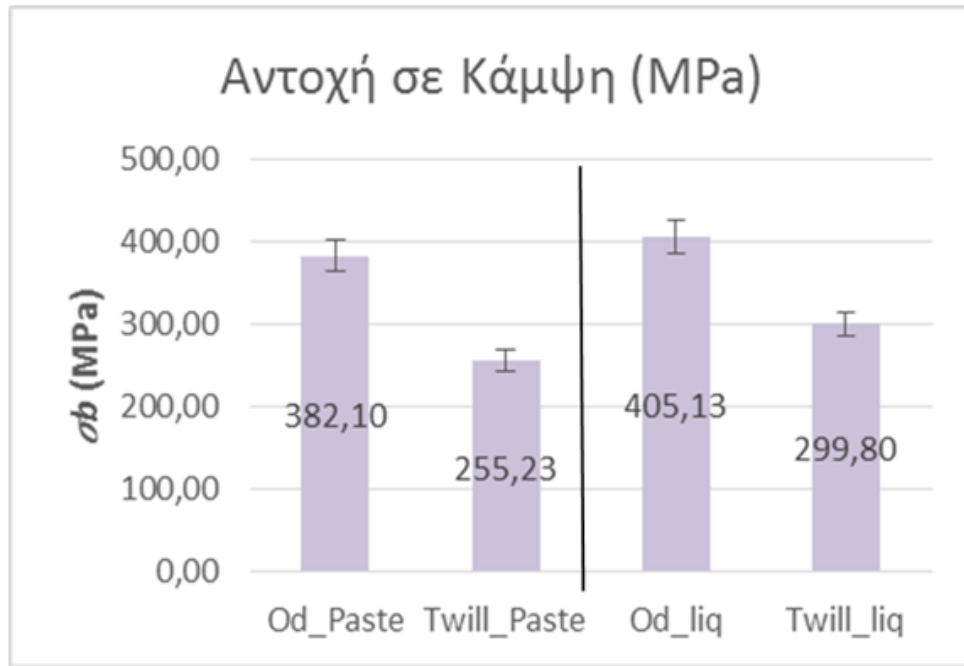
Στο Γράφημα 7.3.6-1 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας προσδιορισμού της αντοχής των συνθέτων υλικών με ενίσχυση υφασμάτων ινών άνθρακα διαφορετικών πλέξεων (μονής και διπλής κατεύθυνσης) και εποξειδική ρητίνη υγρού και ξηρού τύπου. Από την ανάλυση των αποτελεσμάτων προκύπτει η σαφής υπέροχη, έναντι των λοιπών υλικών, ως προς την καμπτική αντοχή των συνθέτων στα οποία ως ενισχυτικό μέσο χρησιμοποιήθηκαν υφάσματα μονής κατεύθυνσης και εποξειδική ρητίνη υγρού τύπου με τιμή που ανέρχεται στα 405.13MPa. Ακολουθούν τα αντίστοιχα ως προς την πλέξη των υφασμάτων σύνθετα στα οποία η υγρή εποξειδική ρητίνη έχει αντικατασταθεί με αντίστοιχη ρητίνη ξηρής σύνθεσης με αντοχή σε κάμψη στα 382.10MPa. Στη συνέχεια και σε ότι αφορά στα υλικά με υφάσματα τύπου twill, με αντοχή σε κάμψη 299.80MPa έρχονται τα σύνθετα υλικά με υφάσματα διαγώνιας πλέξης και εποξειδική ρητίνη σε υγρή μορφή και τέλος με 255.23MPa τα αντίστοιχα ως προς τα υφάσματα ενίσχυσης αλλά με εποξειδική ρητίνη τύπου πάστας.

Με βάση το ανθρακοϋφασμα που έχει χρησιμοποιηθεί στην κατασκευή των συνθέτων διαπιστώνεται σαφώς η ενισχυμένη μηχανική αντοχή των υλικών στα οποία ως μήτρα έχει χρησιμοποιηθεί το σύστημα υγρής εποξειδικής ρητίνης. Έτσι αποδοτικότερα ως προς την αντοχή τους σε κάμψη παρουσιάζονται τα σύνθετα με ύφασμα μονής κατεύθυνσης σε ποσοστό 5.68% σε σύγκριση με αυτά στα οποία έχει

χρησιμοποιηθεί ως μήτρα εποξειδική ρητίνη ξηρού τύπου. Αντίστοιχη συμπεριφορά εμφανίζουν και τα υλικά με υφάσματα twill. Πιο συγκεκριμένα τα σύνθετα με μήτρα κατασκευασμένη από υγρή εποξειδική ρητίνη επιδεικνύουν βελτιωμένες αντοχές σε κάμψη κατά 14.86% σε σχέση με τα πανομοιότυπης ενίσχυσης υλικά για την κατασκευή της μήτρας των οποίων επελέγη ξηρού τύπου ρητίνη.

Λαμβάνοντας υπόψη το σύστημα εποξειδικής ρητίνης που χρησιμοποιήθηκε για να παίξει το ρόλο της μήτρας στα σύνθετα, επικρατέστερα σε όρους αντοχής σε κάμψη εμφανίζονται τα σύνθετα για την ενίσχυση των οποίων επελέγησαν τα υφάσματα ινών άνθρακα μονής κατεύθυνσης. Έτσι η καμπτική συμπεριφορά των συνθέτων με μήτρα αποτελούμενη από εποξειδική ρητίνη υγρής μορφής βελτιώνεται κατά 26% όταν αντί των υφασμάτων διπλής κατεύθυνσεως χρησιμοποιηθούν ως ενισχυτική φάση υφάσματα μονής κατεύθυνσης. Σε παρόμοιο πλαίσιο η αντικατάσταση των υφασμάτων διπλής κατεύθυνσης από αντίστοιχα μονής κατεύθυνσεως σε σύνθετα με μήτρα εποξειδικής ρητίνης ξηρού τύπου, έχει ως αποτέλεσμα την ενίσχυση της καμπτικής αντοχής των ανωτέρω σε ποσοστό το οποίο ανέρχεται στο 33.2%.

Σε ότι αφορά στο χαρακτηριστικό μοτίβο θραύσης, το σύνολο των συνθέτων που μελετήθηκαν επέδειξαν ψαθυρή θραύση όπως αναμενόταν έχοντας υπόψη ότι η ψαθυρότητα αποτελεί χαρακτηριστική ιδιότητα για την πλειοψηφία των θερμοσκληρυνόμενων υλικών [12].



Γράφημα 7.3.6-1. Αντοχή συνθέτων FRP και εποξειδική ρητίνη σε κάμψη.

### 7.3.7 Αποτελέσματα μετρήσεων αντοχής σε κάμψη συνθέτων υλικών εποξειδικής ρητίνης και ενίσχυση από υφάσματα με ίνες υάλου και Kevlar

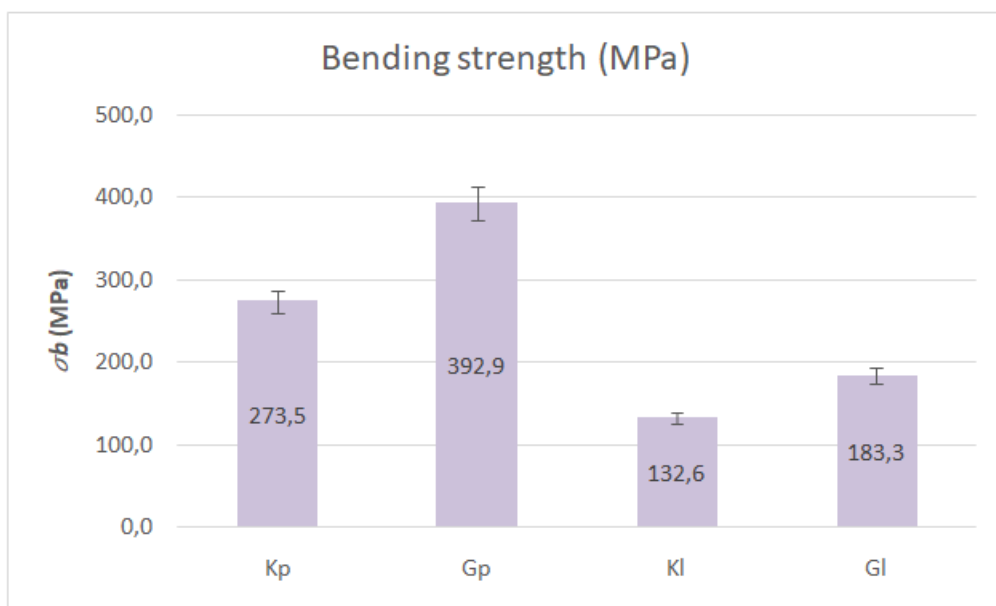
Στο Γράφημα 7.3.7-1 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας προσδιορισμού της αντοχής των συνθέτων υλικών με ενίσχυση υφασμάτων ινών υάλου και Kevlar διπλής κατεύθυνσης (twill) και εποξειδική ρητίνη υγρού και ξηρού τύπου. Από την ανάλυση των αποτελεσμάτων προκύπτει η σαφής υπεροχή, έναντι των υπολοίπων, των συνθέτων υλικών στα οποία ως ενισχυτικό μέσο χρησιμοποιήθηκαν υφάσματα ινών υάλου και ως μήτρα εποξειδική ρητίνη ξηρού τύπου με αντοχή σε κάμψη που ανήλθε στα 392.90MPa. Ακολουθούν τα σύνθετα με ρητίνη ξηράς μορφής και υφάσματα ινών Kevlar με τιμή αντοχής σε κάμψη στα 273.50MPa. Στη συνέχεια κατατάσσονται τα υλικά με υφάσματα ινών υάλου διαγώνιας πλέξης και μήτρα εποξειδικής ρητίνης υγρής σύνθεσης με καμπτική αντοχή της τάξεως των 183.30MPa και τέλος τα σύνθετα υλικά με υφάσματα ινών Kevlar και υγρή εποξειδική ρητίνη με αντοχή σε κάμψη με τιμή στα 132.60MPa.

Με βάση το ενισχυτικό μέσο που έχει χρησιμοποιηθεί στην κατασκευή των ανωτέρω συνθέτων υλικών διαπιστώνεται η σαφής υπεροχή αυτών στα οποία ως μήτρα έχει χρησιμοποιηθεί η ξηρής σύνθεσης εποξειδική ρητίνη. Αναλυτικότερα, σε ότι αφορά

στα υλικά με ενίσχυση υφάσματος ινών υάλου, αποδοτικότερα ως προς την αντοχή τους σε κάμψη εμφανίζονται τα σύνθετα μήτρας εποξειδικής ρητίνης τύπου πάστας σε ποσοστό 53.35% σε σύγκριση με αυτά στα οποία έχει χρησιμοποιηθεί ως μήτρα εποξειδική ρητίνη ξηρού τύπου. Αντίστοιχη συμπεριφορά εμφανίζουν και τα υλικά με υφάσματα ινών Kevlar. Συγκεκριμένα τα σύνθετα με μήτρα από ξηρή εποξειδική ρητίνη επιδεικνύουν βελτιωμένες αντοχές σε κάμψη κατά 51.52% σε σχέση με τα πανομοιότυπης ενίσχυσης υλικά για την κατασκευή της μήτρας των οποίων επελέγη υγρού τύπου εποξειδική ρητίνη.

Λαμβάνοντας ως σημείο αναφοράς το σύστημα εποξειδικής ρητίνης που χρησιμοποιήθηκε στην κατασκευή της μήτρας στα σύνθετα, επικρατέστερα σε όρους αντοχής σε κάμψη εμφανίζονται τα σύνθετα για την ενίσχυση των οποίων επελέγησαν τα υφάσματα ινών υάλου. Έτσι η καμπτική αντοχή των συνθέτων με μήτρα εποξειδικής ρητίνης υγρής μορφής ενισχύεται κατά 27.66% όταν αντί των υφασμάτων Kevlar χρησιμοποιηθούν ως ενισχυτική φάση υφάσματα ινών υάλου. Στο αντίστοιχο σκεπτικό η αντικατάσταση των υφασμάτων Kevlar από υφάσματα ινών υάλου στα σύνθετα μήτρας εποξειδικής ρητίνης ξηρού τύπου, έχει ως αποτέλεσμα την ενίσχυση της καμπτικής αντοχής των ανωτέρω συνθέτων υλικών σε ποσοστό το οποίο ανέρχεται στο 30.39%.

Σε ότι αφορά στα χαρακτηριστικά της θραύσης, το σύνολο των συνθέτων που μελετήθηκαν χαρακτηρίζονται από ψαθυρή θραύση, η οποία και αποτελεί χαρακτηριστική ιδιότητα για την πλειοψηφία των θερμοσκληρυνόμενων υλικών [12].



Γράφημα 7.3.7-1. Αντοχή συνθέτων με FRP (υάλου και Kevlar) και εποξειδική ρητίνη σε κάμψη.

### 7.3.8 Αποτελέσματα μετρήσεων αντοχής σε διάτμηση συνθέτων υλικών εποξειδικής ρητίνης και ενίσχυση από υφάσματα με ίνες άνθρακα

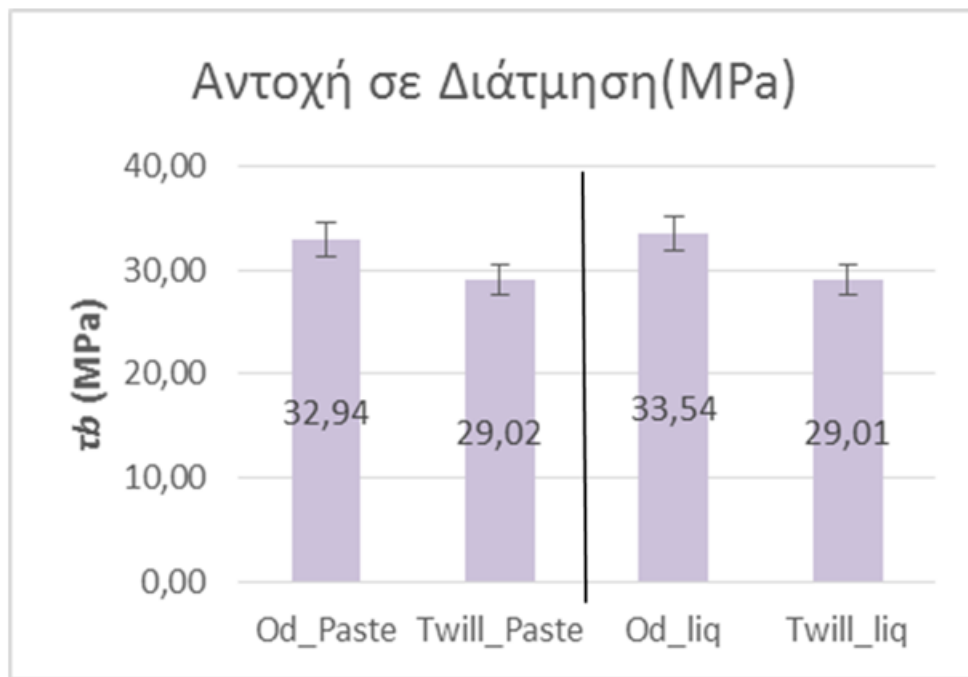
Τα αποτελέσματα των συνθέτων υλικών με ενίσχυση υφασμάτων ινών άνθρακα διαφορετικών πλέξεων (μονής και διπλής κατεύθυνσης) και εποξειδική ρητίνη υγρού και ξηρού τύπου παρατίθενται συγκεντρωτικά στο Γράφημά 7.3.8-1. Όπως και στην περίπτωση της κάμψης, από την εξέταση των αποτελεσμάτων της αντοχής σε διάτμηση επιβεβαιώνεται η ανωτερότητα των συνθέτων με ενίσχυση από υφάσματα ινών άνθρακα μονής κατεύθυνσης και εποξειδική ρητίνη υγρού τύπου έναντι των υπολοίπων εξετασθέντων υλικών με  $\tau_b=33.54\text{MPa}$ . Ακολουθούν τα σύνθετα υλικά με ίδιου τύπου υφάσματα ως ενίσχυση και με μήτρα ξηρής εποξειδικής ρητινούχου πάστας σε αντικατάσταση της υγρής εποξειδικής ρητίνης με αντοχή σε διάτμηση ίση με  $32.94\text{MPa}$ , τα υλικά με υφάσματα twill και ρητίνη εποξειδικής φύσεως ξηρού τύπου με τιμή διατμητικής αντοχής η οποία ανέρχεται στα  $29.02\text{MPa}$  και τέλος τα σύνθετα υλικά με υφάσματα διπλής κατεύθυνσης και εποξειδική ρητίνη σε υγρή μορφή με  $\tau_b=29.01\text{MPa}$ . Στο σύνολό τους τα σύνθετα υλικά που εξετάστηκαν επιδεικνύουν εφάμιλλες τιμές διατμητικών αντοχών.



Σε παρόμοιο πλαίσιο με αυτό στο οποίο διεξήχθη η μελέτη των καμπτικών αντοχών των υπό μελέτη υλικών και με βάση το ενισχυτικό μέσο, δηλαδή το ανθρακοϋφασμα που έχει χρησιμοποιηθεί στην κατασκευή των συνθέτων, διαπιστώνεται η ενισχυμένη μηχανική αντοχή των υλικών στα οποία ως μήτρα έχει χρησιμοποιηθεί σύστημα υγρής εποξειδικής ρητίνης. Ελαφρώς αποδοτικότερα ως προς την αντοχή τους σε διάτμηση παρουσιάζονται τα σύνθετα με υφάσματα μονής κατεύθυνσης κατά 1.79% σε σύγκριση με τα αντίστοιχα, ως προς την ενίσχυση, με μήτρα εποξειδικής ρητίνης ξηρού τύπου. Αντιθέτως τα σύνθετα υλικά με υφάσματα twill παρουσιάζουν διαφοροποιημένη μηχανική συμπεριφορά από αυτή που κατεγράφη κατά τη μελέτη των καμπτικών τους αντοχών. Πιο συγκεκριμένα τα υλικά μήτρας ξηρής (πάστας) εποξειδικής ρητίνης υπερσχύουν οριακά σε όρους διατμητικής αντοχής των αντίστοιχων με μήτρα κατασκευασμένη από υγρή ρητίνη κατά 0.99%.

Αντίστοιχα εξετάζοντας τη μηχανική συμπεριφορά των συνθέτων με βάση το σύστημα εποξειδικής ρητίνης το οποίο αποτέλεσε τη μήτρα των δοκιμών βελτιωμένη ανθεκτικότητα κατά την υποβολή τους σε διατμητικές τάσεις παρουσιάζουν τα υλικά στην ενίσχυση των οποίων χρησιμοποιήθηκαν υφάσματα ινών άνθρακα μονής κατεύθυνσης. Η αντοχή σε διάτμηση αυτών των υλικών βελτιώνεται κατά 13.51% εάν τα υφάσματα ινών άνθρακα διπλής κατευθύνσεως αντικατασταθούν από υφάσματα μονής κατεύθυνσης. Κατά παρόμοιο τρόπο η χρήση υφασμάτων μονής κατεύθυνσης αντί των υφασμάτων twill σε σύνθετα με μήτρα εποξειδικής ρητίνης ξηρού τύπου, ενισχύει την διατμητική αντοχή των υλικών αυτών κατά 11.9%.

Οι παρατηρήσεις που διατυπώθηκαν ως προς το μοντέλο θραύσης που παρουσίασαν (ψαθυρή θραύση) τα υλικά κατά τα πειράματα προσδιορισμού της διατμητικής αντοχής ισχύουν και εδώ όσα αναλύθηκαν στην παράγραφο 7.3.7.



Γράφημα 7.3.8-1. Αντοχή συνθέτων FRP και εποξειδική ρητίνη σε διάτμηση.

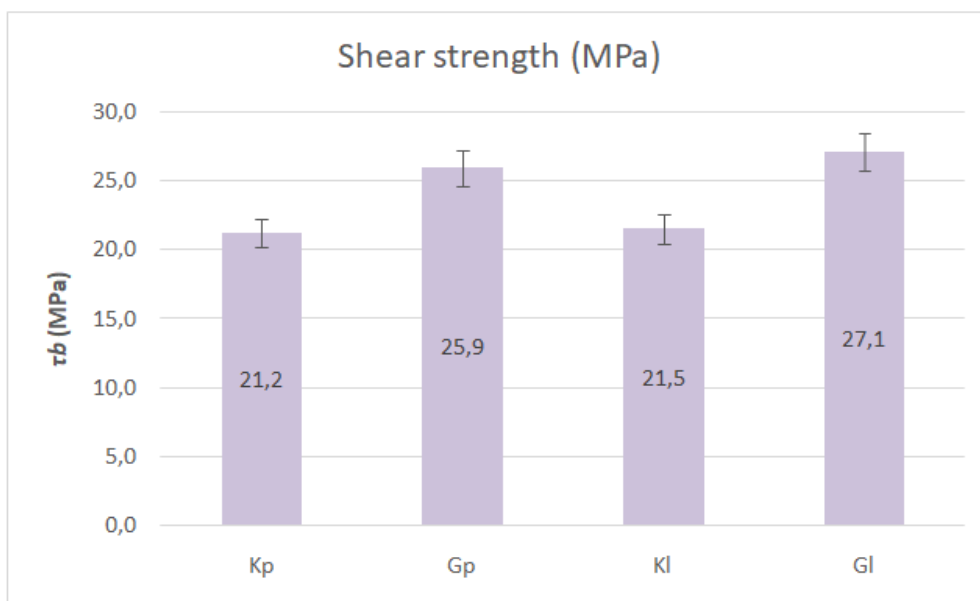
### 7.3.9 Αποτελέσματα μετρήσεων αντοχής σε διάτμηση συνθέτων υλικών εποξειδικής ρητίνης και ενίσχυση από υφάσματα με ίνες υάλου και Kevlar

Τα αποτελέσματα των συνθέτων υλικών με ενίσχυση υφασμάτων ινών υάλου και Kevlar διπλής κατεύθυνσης (twill) και εποξειδική ρητίνη υγρού και ξηρού τύπου παρατίθενται συγκεντρωτικά στο Γράφημά 7.3.9-1. Από τα αποτελέσματα της αντοχής σε διάτμηση επιβεβαιώνεται η ανωτερότητα των συνθέτων με ενίσχυση από υφάσματα ινών γυαλιού και εποξειδική ρητίνη υγρού τύπου έναντι των υπολοίπων εξετασθέντων υλικών με  $\tau_b=27.10\text{MPa}$ . Ακολουθούν τα σύνθετα υλικά με ίδιου τύπου υφάσματα ως ενίσχυση και μήτρα ξηρής εποξειδικής ρητινούχου πάστας σε αντικατάσταση της υγρής εποξειδικής ρητίνης με αντοχή σε διάτμηση ίση με  $25.90\text{MPa}$ , τα υλικά με υφάσματα ινών Kevlar και ρητίνη εποξειδικής φύσεως υγρού τύπου με τιμή διατμητικής αντοχής που ανέρχεται στα  $21.50\text{MPa}$  και τέλος τα σύνθετα υλικά με υφάσματα Kevlar και εποξειδική ρητίνη σε μορφή πάστας με  $\tau_b=21.20\text{MPa}$ . Όπως και στην περίπτωση των συνθέτων με ενίσχυση υφασμάτων από ίνες άνθρακα, τα σύνθετα υλικά με αντίστοιχη ενίσχυση υφασμάτων από ίνες γυαλιού και Kevlar που μελετήθηκαν χαρακτηρίζονται από σχεδόν εφάμιλλες διατμητικές αντοχές.

Λαμβάνοντας υπόψη το ενισχυτικό μέσο, δηλαδή, τον τύπο υφάσματος που έχει χρησιμοποιηθεί στην κατασκευή των συνθέτων υλικών, διαπιστώνεται (όπως και στην περίπτωση των συνθέτων με υφάσματα ινών άνθρακα), η ενισχυμένη μηχανική αντοχή των υλικών στα οποία ως μήτρα έχει χρησιμοποιηθεί σύστημα υγρής εποξειδικής ρητίνης. Ελαφρώς αποδοτικότερα ως προς την αντοχή τους σε διάτμηση παρουσιάζονται τα σύνθετα με υφάσματα ινών υάλου κατά 4.43% σε σύγκριση με τα αντίστοιχα, ως προς την ενίσχυση, και μήτρα εποξειδικής ρητίνης ξηρού τύπου. Σε ότι αφορά στα σύνθετα υλικά με υφάσματα Kevlar, παρουσιάζουν διαφοροποιημένη μηχανική συμπεριφορά από αυτή που κατεγράφη κατά τη μελέτη της αντοχής τους σε κάμψη. Πιο συγκεκριμένα τα υλικά υγρής εποξειδικής μήτρας υπερσχύουν οριακά σε όρους διατμητικής αντοχής των αντίστοιχων με μήτρα κατασκευασμένη από ξηρή εποξειδική ρητίνη κατά 1.44%.

Εξετάζοντας τη μηχανική συμπεριφορά των συνθέτων με βάση το σύστημα εποξειδικής ρητίνης της μήτρας, βέλτιστη ανθεκτικότητα, ως προς την υποβολή τους σε διατμητικές τάσεις, παρουσιάζουν τα υλικά στην ενίσχυση των οποίων χρησιμοποιήθηκαν υφάσματα ινών υάλου. Ειδικότερα η αντοχή σε διάτμηση των υλικών με υγρής σύνθεσης εποξειδική μήτρα βελτιώνεται κατά 20.66% εάν τα υφάσματα ινών Kevlar αντικατασταθούν από υφάσματα ινών υάλου. Κατά παρόμοιο τρόπο η χρήση υφασμάτων υάλου αντί των υφασμάτων Kevlar σε σύνθετα με μήτρα εποξειδικής ρητίνης ξηρού τύπου, ενισχύει την διατμητική αντοχή των υλικών αυτών κατά 18.15%.

Ως προς τη θραύση ισχύουν όσα αναλύθηκαν στην παράγραφο 7.3.7.



Γράφημα 7.3.9-1. Αντοχή συνθέτων με FRP (υάλου και Kevlar) και εποξειδική ρητίνη σε διάτμηση.

#### 7.4 Συσχετισμός μηχανικών χαρακτηριστικών συνθέτων υλικών εποξειδικής μήτρας με ενίσχυση υφασμάτων ινών με πανομοιότυπα σύνθετα υλικά.

Στη παρούσα παράγραφο πραγματοποιείται η συγκριτικής φύσεως μελέτη των υπό εξέταση συνθέτων υλικών πολυμερικής μήτρας εποξειδικής ρητίνης με υφάσματα ινών άνθρακα μονής και διπλής κατεύθυνσης, υφάσματα ινών υάλου και υφάσματα ινών Kevlar διπλής κατεύθυνσης με αντίστοιχου τύπου σύνθετα υλικά, για την κατασκευή των οποίων επιλέχθηκαν και χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικά είδη ενισχυτικών υλικών. Στο πλαίσιο της συγκριτικής αυτής ανάλυσης τα υπό διερεύνηση στη συγκεκριμένη διατριβή σύνθετα υλικά, υπόκεινται σε συσχετισμό σε όρους μηχανικών αντοχών για τα σύνθετα εποξειδικής ρητίνης (ξηρού ή υγρού τύπου) με υφάσματα ινών διαφορετικών ειδών (ίνες άνθρακα, ίνες υάλου, ίνες Kevlar) και πλέξεων (μονής και διπλής κατεύθυνσης) με υλικά που αναπτύχθηκαν και μελετήθηκαν στο πλαίσιο άλλων ερευνητικών διατριβών αλλά και μεταπτυχιακών εργασιών της σχολής Χημικών Μηχανικών του ΕΜΠ [13,14,15,16].

Σύμφωνα με τα δεδομένα που παρατίθενται στους Πίνακες 7.4-1, 7.4-2 τα σύνθετα υλικά πολυμερικής μήτρας εποξειδικής ρητίνης με ενίσχυση υφασμάτων ινών

χαρακτηρίζονται από μηχανικές αντοχές που εμπίπτουν στο γενικότερο πεδίο των τιμών αντοχής των συνθέτων υλικών με μήτρα ρεζίτη και ίνες άνθρακα και των συνθέτων με μήτρα εποξειδικής ρητίνης και νανοσωλήνες άνθρακα. Σε ότι αφορά στην αντοχή τους σε διάτμηση τα υπό εξέταση υλικά υπερτερούν έναντι όλων των άλλων όπως μπορεί να διαπιστωθεί από τη συγκριτική μελέτη των αποτελεσμάτων που παρατίθενται στους παρακάτω πίνακες.

Στον αντίποδα τα σύνθετα υλικά εποξειδικής ρητίνης, υγρής και ξηρής φύσεως, με ενίσχυση υφασμάτων ινών άνθρακα διαφορετικών πλέξεων που μελετήθηκαν στο πλαίσιο της παρούσας ερευνητικής διατριβής παρουσιάζονται υποδεέστερα σε όρους καμπτικής αντοχής σε σχέση με τα σύνθετα υλικά με ενίσχυση ινών άνθρακα και μήτρα νεολάκης και τα σύνθετα με νανοσωλήνες άνθρακα και μήτρα εποξειδικής ρητίνης. Παρουσιάζονται ωστόσο αποδοτικότερα από τα σύνθετα υλικά με μήτρα από ρεζίτη και ενίσχυση ινών άνθρακα, τα οποία επιδεικνύουν τη χαμηλότερη αντοχή σε κάμψη από όλα τα υλικά που εξετάστηκαν.

Η χρήση ενισχυτικού μέσου τύπου υφάσματος μονής κατεύθυνσης, όπως μπορεί να διαπιστωθεί από τα κάτωθι αποτελέσματα, προσδίδει στα σύνθετα υλικά καμπτικές και διατμητικές αντοχές σχεδόν εφάμιλλες αυτών που επιδεικνύονται από τα σύνθετα στα οποία ως ενισχυτική φάση έχουν ενσωματωθεί νανοσωλήνες άνθρακα. Αντιστοίχως σε όρους καμπτικής αντοχής η ενίσχυση με υφάσματα ινών άνθρακα διπλής κατεύθυνσης έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή υλικών με περιορισμένες μηχανικές ιδιότητες, σε σύγκριση με τα ενισχυμένα με μεμονωμένες ίνες άνθρακα υλικά με εξαίρεση τα υλικά με μήτρα από ρεζίτη των οποίων η αντοχές σε κάμψη είναι κατά πολύ χαμηλότερες. Στον αντίποδα τα εν λόγω υλικά (ενισχυμένα με υφάσματα ινών άνθρακα διπλής κατεύθυνσης) επιδεικνύουν καλύτερες διατμητικές αντοχές σε σύγκριση με τα ενισχυμένα με μεμονωμένες ίνες άνθρακα και νανοσωλήνες άνθρακα υλικά.

Σε ότι αφορά στα υλικά με υφάσματα από ίνες υάλου και Kevlar, οι καμπτικές τους αντοχές τοποθετούνται μεταξύ των τιμών των συνθέτων μήτρας εποξειδικής ρητίνης με νανοσωλήνες άνθρακα και των συνθέτων υλικών με μήτρα ρεζίτη και ίνες άνθρακα. Σε αντιστοιχία με τα παραπάνω τα σύνθετα εποξειδικής ρητίνης και ίνες γυαλιού και Kevlar χαρακτηρίζονται από διατμητικές αντοχές που είναι μεγαλύτερες από αυτές όλων των άλλων υλικών που παρατίθενται στον Πίνακα 7.4.2, πλην των συνθέτων με ενίσχυση υφασμάτων με ίνες άνθρακα ανεξάρτητα από τον τύπο του υφάσματος και το είδος της εποξειδικής ρητίνης που χρησιμοποιείται ως μήτρα στην κατασκευή τους.

Παρόλο που οι μηχανικές ιδιότητες με βάση τα όσα αναλύθηκαν παραπάνω, παρουσιάζονται υποβαθμιζόμενες ή βελτιούμενες σε σύγκριση με σύνθετα υλικά τα οποία αναπτύχθηκαν και μελετήθηκαν στο πλαίσιο άλλων εργασιών, παραμένουν ωστόσο εντός των ορίων των μηχανικών αντοχών των γνωστών και ευρέως χρησιμοποιούμενων σε δομικές εφαρμογές υλικών.

Πίνακας 7.4-1. Αντοχή σε κάμψη ΣΥΠΜ με διαφορετικές φάσεις ενίσχυσης.

Σύνθετα Υλικά πολυμερικής ρητίνης	
Ονομασία συνθέτου	Αντοχή σε κάμψη σ <sub>b</sub> (MPa)
S-N-CF15 <sup>[16]</sup>	366.62
S-E-CF15 <sup>[16]</sup>	371.76
N-CF15 <sup>[13]</sup>	540
R-CF7.5 <sup>[15]</sup>	115.12
E-CNT-2.5 <sup>[14]</sup>	≈420
Twill_paste epoxy	255.23
Twill_liq epoxy	299.80
Od_paste epoxy	382.10
Od_liq epoxy	405.13
Glass paste epoxy	392.90
Kevlar paste epoxy	273.50
Glass liquid epoxy	183.30
Kevlar liquid epoxy	132.60

Πίνακας 7.4-2. Αντοχή σε διάτμηση ΣΥΓΜ με διαφορετικές φάσεις ενίσχυσης.

Σύνθετα Υλικά πολυμερικής ρητίνης	
Όνομασία συνθέτου	Αντοχή σε διάτμηση $\tau_b$ (MPa)
S-N-CF15 <sup>[16]</sup>	15.69
S-E-CF15 <sup>[16]</sup>	17.27
N-CF15 <sup>[13]</sup>	10.94
R-CF7.5 <sup>[15]</sup>	18.19
E-CNT-2.5 <sup>[14]</sup>	≈27
Twill_paste epoxy	29.02
Twill_liq epoxy	29.01
Od_paste epoxy	32.94
Od_liq epoxy	33.54
Glass paste epoxy	25.90
Kevlar paste epoxy	21.20
Glass liquid epoxy	27.10
Kevlar liquid epoxy	21.50

## Βιβλιογραφία 7<sup>ου</sup> Κεφαλαίου

1. CEN - EN 196-1 Methods of testing cement - Part 1: Determination of strength.
2. ASTM D 790-71. *American Society of Testing and Material, Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials*; ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2003.
3. ASTM D 2344-65T. *American Society of Testing and Material, Standard Test Method for Short-Beam Strength of Polymer Matrix Composite Materials and Their Laminates*; ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2000.
4. G. Soupionis, P. Georgiou, L. Zoumpoulakis, «*Polymer Composite Materials Fiber-Reinforced for the Reinforcement/Repair of Concrete Structures*», 2020, *Polymers*, 12, 2058.
5. J. Simitzis, «*Correlation between the production parameters and the mechanical properties of novolac resins reinforced with carbon fibers*», *Angewandte Makromolekulare Chemie*, 1989, 165, 21–34.
6. G.Kallergis, M. Pisania, J. Simitzis, «*Manufacture and Characterization of Heat Resistant and Insulating New Composites Based on Novolac Resin-Carbon-Perlite*», *Macromolecular Symposia*, 2013, 331, 137–143.
7. V. S. Chevali, D. R. Dean, G. M. Janowski, «*Effect of environmental weathering on flexural creep behavior of long fiber-reinforced thermoplastic composites*», *Polymer Degradation and Stability*, 2010, 95(12), 2628–2640.
8. Y. Chen, J. F. Davalos, I. Ray, H. Y. Kim, «*Accelerated aging tests for evaluations of durability performance of FRP reinforcing bars for concrete structures*», *Composite Structures*, 2007, 78(1), 101–111.
9. F. S. Imani, A. Chen, J. F. Davalos, I. Ray, «*Model II Fracture Evaluation of CFRP-Concrete Interface Using Accelerated Aging Test*», *Earth and Space*, 2010, (doi: 10.1061/41096(366)62).



10. S. Marouani, L. Curtil, P. Hamelin, «*Ageing of carbon/epoxy and carbon/vinylester composites used in the reinforcement and/or the repair of civil engineering structures*», *Composites Part B: Engineering*, 2012, 43(4), 2020–2030.
11. B. G. Kumar, R. P. Singh, T. Nakamura, «*Degradation of Carbon Fiber-Reinforced Epoxy Composites by Ultraviolet Radiation and Condensation*», *Journal of Composite Materials*, 2002, 36(24), 2713–2733.
12. C. Bogiatzidis, L. Zoumpoulakis, «*Thermoset Polymer Matrix Composites of Epoxy, Unsaturated Polyester, and Novolac Resin Embedding Construction and Demolition Wastes powder: A Comparative Study*», *Polymers*, 2021, 13, 737.
13. J. Simitzis, L. Zoumpoulakis, S. Soulis, D. Triantou, C. Pinaka, «*Electrical conductivity and mechanical strength of composites consisting of phenolic resin, carbon fibers, and metal particles*», *Journal of Applied Polymer Science*, 2011, 121(4), 1890–1900.
14. Ε. Μ. Πιζάνια, «*Κατασκευή - Ιδιότητες - Κατευθύνσεις Εφαρμογών Συνθέτων Υλικών Ίνων Άνθρακα - Νανοσωλήνων Άνθρακα – Άμορφού Άνθρακα*», Διδακτορική Διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2015.
15. Γ. Σουπιώνης, «*Σύνθετα Υλικά Θερμοσκληρυνόμενων Ρητινών με Περλίτη και Ενισχυμένων με Ίνες Άνθρακα ως Θερμομονωτικών Υλικών Υψηλών Θερμοκρασιών*», Μεταπτυχιακή εργασία, ΕΜΠ, 2017.
16. Β. Σύκας, «*Σύνθετα Υλικά Πολυμερικής Μήτρας Ενισχυμένα με Ίνες Άνθρακα, Εφαρμοζόμενα στην Αεροναυπηγική με Έμφαση στη Συντήρησή τους*», Μεταπτυχιακή εργασία, ΕΜΠ, 2019.
17. G. Soupionis, L. Zoumpoulakis, «*Reinforced Concrete Structures Containing Chopped Carbon Fibers with Polymer Composite Materials*», 2021, *Polymers*, 13, 3812.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8ο-Χαρακτηρισμός συνθέτων ινοπλισμένων υλικών πολυμερικής μήτρας για ενίσχυση φέροντος οργανισμού από οπλισμένο σκυρόδεμα μέσω Ηλεκτρονικής Μικροσκοπίας Σάρωσης (SEM)**

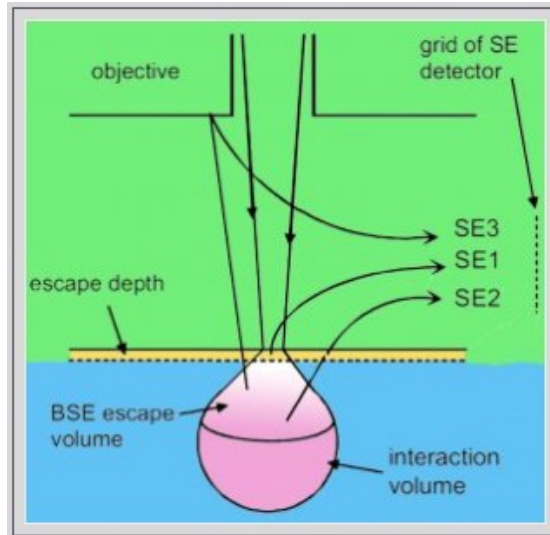
### **8.1 Ηλεκτρονική Μικροσκοπία Σάρωσης (SEM)**

#### **8.1.1 Θεωρητικό Πλαίσιο Ηλεκτρονικής Μικροσκοπίας Σάρωσης**

Η πλέον διαδεδομένη εκ των υφιστάμενων μεθόδων που χρησιμοποιείται για την απεικόνιση και ανάλυση των μορφολογικών και δομικών χαρακτηριστικών στοιχείων στην επιστήμη των υλικών είναι η Ηλεκτρονική Μικροσκοπία Σάρωσης (Scanning Electron Microscopy). Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται στο πλαίσιο της συγκεκριμένης μεθοδολογικής πρακτικής, λόγω των αξιοσημείωτων δυνατοτήτων του σε ότι αφορά στην ανάλυση, καθιστά την επιλογή και κατεπέκταση τη χρήση της απαραίτητη σε πλήθος εφαρμογών. Η λειτουργική αρχή της Ηλεκτρονικής Μικροσκοπίας Σάρωσης βασίζεται στις αλληλεπιδράσεις που δημιουργούνται μεταξύ της προσπίπτουσας δέσμης ηλεκτρονίων και του προς χαρακτηρισμό δείγματος επί του οποίου η προαναφερθείσα ακτινοβολούμενη δέσμη εκπέμπεται (Εικόνα 8.1.1-1). Οι αλληλεπιδράσεις αυτές διαχωρίζονται ως εξής [3,5]:

1. Στις αποδιδόμενες σε ελαστικές σκεδάσεις
2. Στις αποδιδόμενες σε μη ελαστικές σκεδάσεις

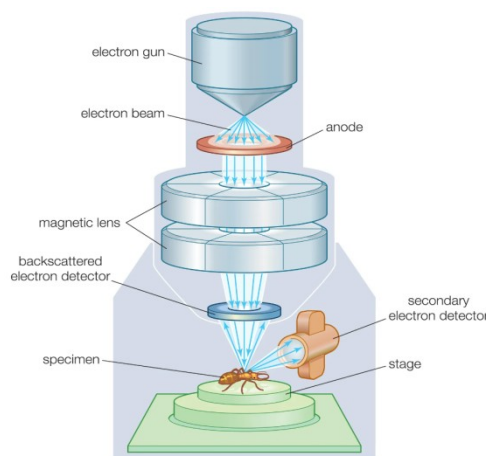
Πιο συγκεκριμένα, μια καλά εστιασμένη δέσμη ηλεκτρονίων υψηλής ενέργειας εκπέμπεται πάνω σε δείγμα του μελετώμενου υλικού, πραγματοποιώντας τρόπον τινά, σάρωση (scanning) της επιφάνειάς του. Από τη διαδικασία αυτή δημιουργούνται ποικίλες αλληλεπιδράσεις μεταξύ δείγματος και δέσμης ηλεκτρονίων, ο εντοπισμός και η καταγραφή των οποίων παρέχει σημαντικές πληροφορίες αναφορικά με χαρακτηριστικά του υπό εξέταση υλικού όπως η δομή, το σχήμα, η χημική σύσταση, και αρκετά άλλα [1-6,8] .



Εικόνα 8.1.1-1. Γενική Διάταξη Ηλεκτρονικού Μικροσκοπίου Σάρωσης (Πηγή: <https://www.britannica.com>).

Ένα ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (Εικόνα 8.1.1-2) συνήθως αποτελείται από τα εξής επιμέρους συστήματα [7]:

- Σύστημα παραγωγής δέσμης ηλεκτρονίων
- Σύστημα δημιουργίας και εστίασης της δέσμης ηλεκτρονίων
- Σύστημα ανίχνευσης, καταγραφής και επεξεργασίας των αποτελεσμάτων των αλληλεπιδράσεων μεταξύ ακτινοβολίας και δείγματος
- Σύστημα κενού για το σύνολο των υποσυστημάτων του μικροσκοπίου



Εικόνα 8.1.1-2. Γενική Διάταξη Ηλεκτρονικού Μικροσκοπίου Σάρωσης (Πηγή: <https://www.britannica.com>).

### 8.1.2 Πειραματική διαδικασία

Για το χαρακτηρισμό των συνθέτων ινοπλισμένων πολυμερών υλικών από τσιμεντοκονιάμα μέσω ηλεκτρονικού μικροσκοπίου, τα σύνθετα δοκίμια υπεβλήθησαν σε συγκεκριμένες διαδικασίες προετοιμασίας. Η υλοποίηση της εν λόγω προεργασίας αποτελεί προϋπόθεση ούτως ώστε σε συνδυασμό με την σωστή χρήση του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου να αποφέρει τα βέλτιστα δυνατά αποτελέσματα ως προς την απεικονιστική ποιότητα και κατά συνέπεια την απόκτηση χρήσιμων πληροφοριών σε ότι αφορά στα δομικά χαρακτηριστικά των ανωτέρω υλικών.

Αρχικά αφαιρείται με μηχανικά μέσα τμήμα μιας εκ των κορυφών από κάθε ένα από τα πειραματικά δοκίμια που πρόκειται να υποβληθούν σε χαρακτηρισμό. Από την διαδικασία αυτή προκύπτουν δείγματα κατάλληλου μεγέθους και διαστάσεων ώστε να είναι δυνατή η ασφαλής τοποθέτησή τους στην θέση παρατήρησης (δειγματοφορέα) του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου (Εικόνα 8.1.2-1 και 8.1.2-2).



Εικόνα 8.1.2-1. Δείγματα συνθέτων υλικών τσιμεντοκονιάματος με ενίσχυση ιών άνθρακα (αριστερά) και Kevlar και ξηρή εποξειδική ρητίνη (δεξιά).



Εικόνα 8.1.2-2. Δείγματα συνθέτων υλικών τσιμεντοκονιάματος με ενίσχυση ινών άνθρακα και υγρή εποξειδική ρητίνη (αριστερά) και τσιμέντου με ίνες άνθρακα μικρού μήκους (δεξιά).

Εν συνεχεία λαμβάνει χώρα η επιφανειακή επικάλυψη με ηλεκτρικά αγώγιμα υλικά. Με την εναπόθεση των υλικών επικάλυψης (χρυσός, γραφίτης ή λευκόχρυσος) στο δείγμα, είτε με τη μέθοδο επίστρωσης χαμηλού κενού ή με τη μέθοδο εξάτμισης υπό κενό, επιτυγχάνεται η βελτίωση της ευκρίνειας και της ανάλυσης των εικόνων που θα προκύψουν από τη σάρωση τους μέσω SEM.

Για την απεικόνιση μέσω ηλεκτρονικής μικροσκοπίας σάρωσης η αγωγιμότητα των εξεταζόμενων δειγμάτων ή τουλάχιστον της επιφάνειάς τους αποτελεί προϋπόθεση. Επιπλέον προαπαιτούμενη είναι η διασφάλιση της ηλεκτρικής γείωσης των υπό χαρακτηρισμό υλικών. Η γείωση των δειγμάτων αποτρέπει τη συσσώρευση φορτίων ηλεκτροστατικής φύσεως η παρουσία των οποίων συχνά έχει ως αποτέλεσμα την υποβάθμιση της απεικονιστικής ποιότητας [2].

Αφού ολοκληρωθούν όλα τα βήματα, ήτοι η προετοιμασία του κάθε δείγματος, ακολουθεί η τοποθέτησή του στη θυρίδα παρατήρησης (δειγματοφορέα) του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου. Για την βελτιστοποίηση της στερέωσης του δείγματος επί της θυρίδας παρατήρησης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ταινία συγκόλλησης η

οποία τοποθετείται στην πλευρά του υπό εξέταση υλικού που έρχεται σε επαφή με το δειγματοφόρο. Αποσκοπώντας στον περιορισμό του απαιτούμενου χρόνου και παράλληλα του οικονομικού κόστους η «αγωγιμοποίηση» θα μπορούσε να επιτευχθεί μέσω της συνολικής επένδυσης των δειγμάτων με την αγώγιμου τύπου ταινία [2,10].

Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν κάνοντας χρήση του Ηλεκτρονικού Μικροσκοπίου Σάρωσης (SEM) της εταιρίας THERMO SCIENTIFIC, μοντέλο Phenom XL (Εικόνα 8.1.2-3). Μέσω της σάρωσης αποκτήθηκαν οι απαραίτητες σε αριθμό και ποιοτικά χαρακτηριστικά απεικονίσεις (ανάλυση, ευκρίνεια κλπ) για τα υπό διερεύνηση σύνθετα υλικά ενίσχυσης δομικών στοιχείων σκυροδέματος από εποξειδική ρητίνη και υφάσματα ινών με τις βέλτιστες μηχανικές αντοχές σύμφωνα με τα αποτελέσματα των πειραματικών δοκιμών του Κεφαλαίου 7.

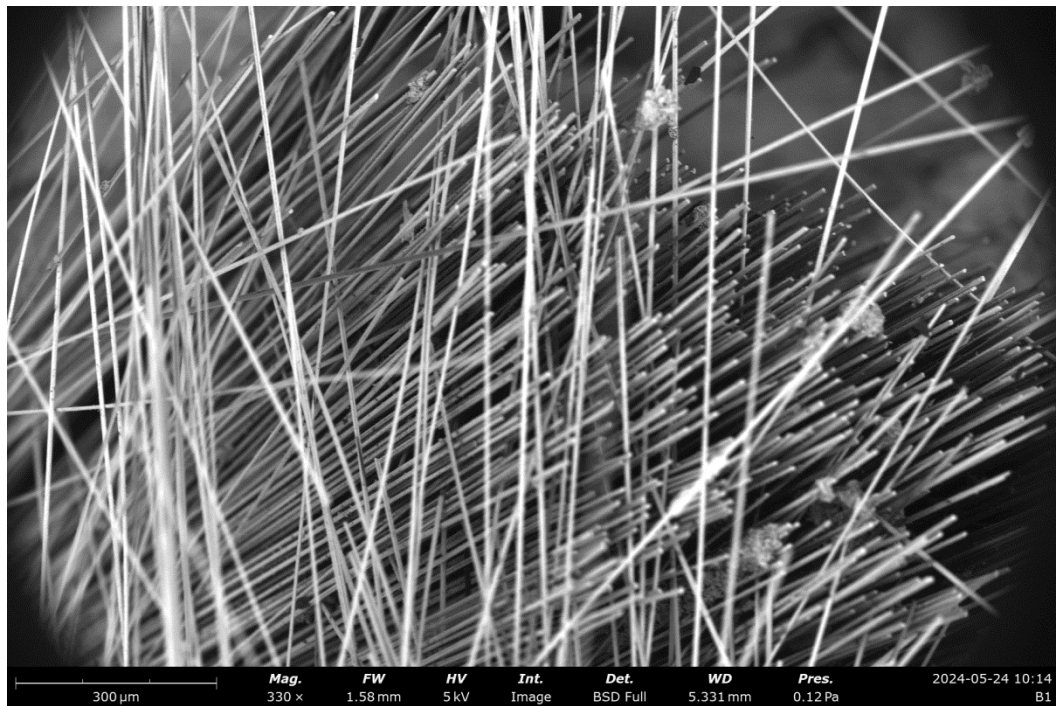


Εικόνα 8.1.2-3. Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο σάρωσης THERMO SCIENTIFIC, Phenom XL.

### 8.1.3 Σχολιασμός αποτελεσμάτων SEM

Ακολούθως παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την σάρωση των συνθέτων υλικών πολυμερικής μήτρας με υφάσματα ινών για την ενίσχυση δομικών στοιχείων από τσιμεντοκονίαμα, για τις πλέον αντιπροσωπευτικές περιπτώσεις, ήτοι αυτές με τις βέλτιστες μηχανικές αντοχές.

Δοκίμια τσιμέντου με ενίσχυση ινών άνθρακα μικρού μήκους  
Όπως διαπιστώνεται από τις απεικονίσεις του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης, η διασπορά των ινών άνθρακα στα δοκίμια τσιμεντοκονιάματος (Εικόνες 8.1.3-1, 8.1.3-2 και 8.1.3-3), είναι αρκετά καλή. Λόγω της διαφορετικής φύσης των υλικών του δοκιμίου και των ινών, η συνοχή μεταξύ του ενισχυτικού μέσου, δηλαδή του συνθέτου, και του τσιμεντοκονιάματος είναι περιορισμένη. Η ενσωμάτωση ωστόσο των ινών στο στάδιο της κατασκευής των πειραματικών δοκιμίων ως επιμέρους υλικό του μίγματος, οδήγησε στην διασπορά των ινών κατά τρόπο ώστε αυτές να καλύπτουν ταυτόχρονα πολλαπλές διευθύνσεις (Εικόνα 8.1.3-1), γεγονός στο οποίο οφείλονται οι ενισχυμένες μηχανικές ιδιότητες των υλικών αυτών σε σύγκριση με τα αντίστοιχα που κατασκευάστηκαν από καθαρό τσιμεντοκονίαμα.



Εικόνα 8.1.3-1. Απεικόνιση SEM σε μεγέθυνση×330 δοκίμιο τσιμεντοκονιάματος με ίνες άνθρακα μικρού μήκους.



Εικόνα 8.1.3-2. Απεικόνιση SEM σε μεγέθυνση×940 για το δοκίμιο τσιμεντοκονιάματος με ίνες άνθρακα μικρού μήκους.

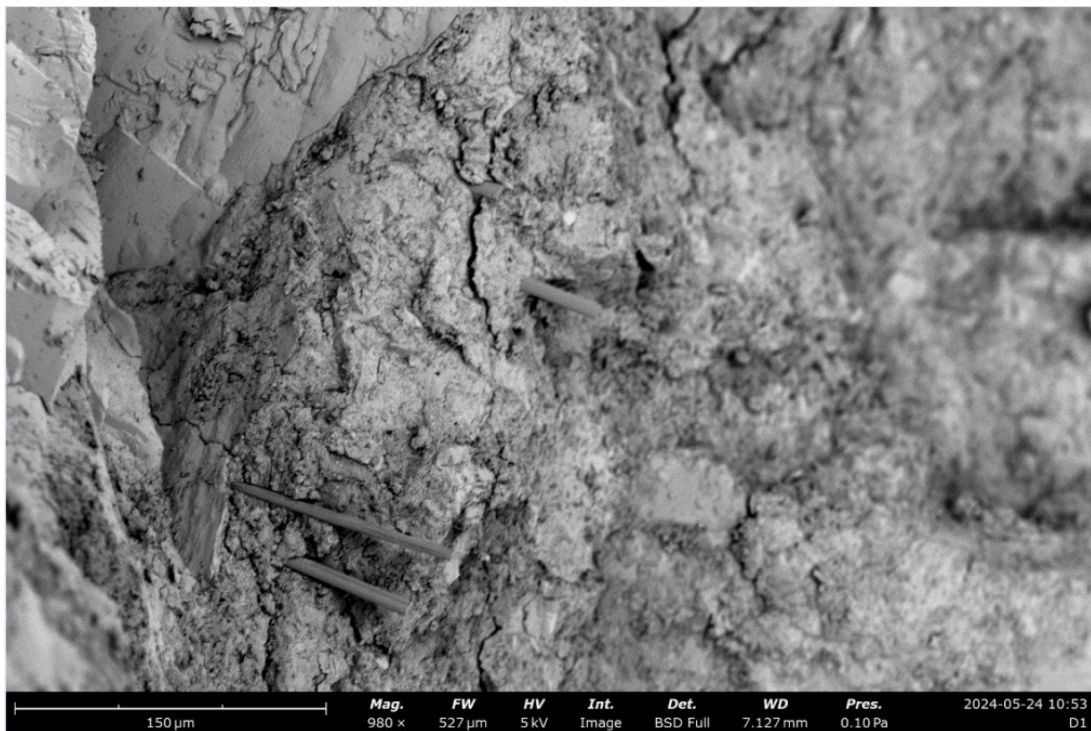


Εικόνα 8.1.3-3. Απεικόνιση (SEM) σε μεγέθυνση×690 για το δοκίμιο τσιμεντοκονιάματος με ίνες άνθρακα μικρού μήκους.

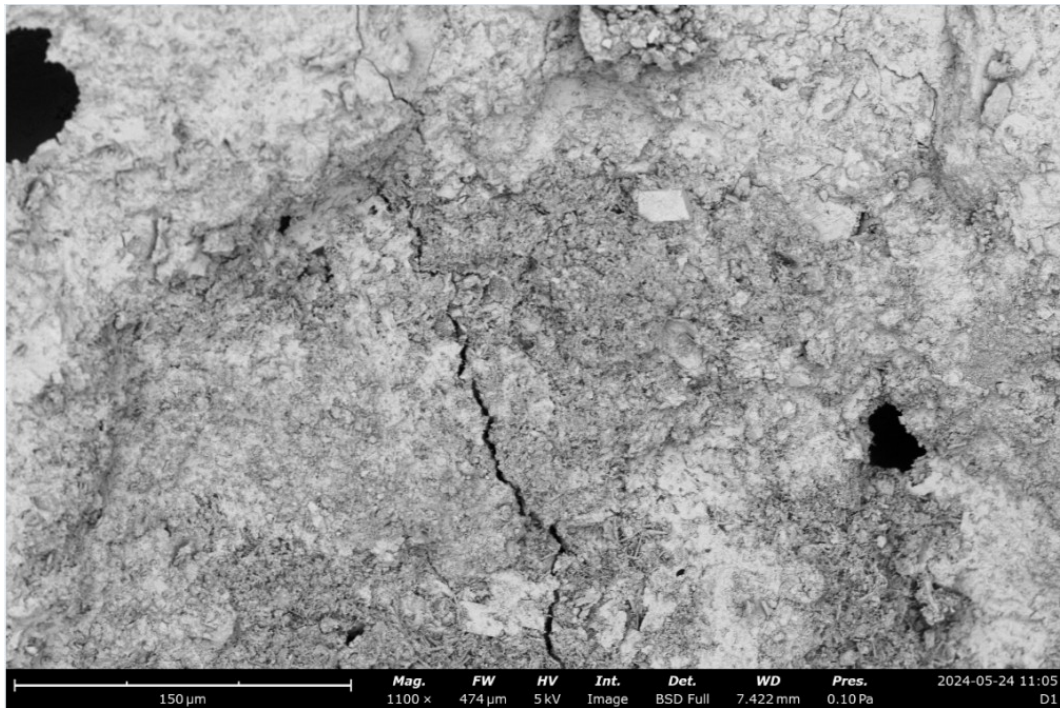
Σύνθετα υλικά με ενίσχυση υφασμάτων ινών άνθρακα και ξηρή εποξειδική ρητίνη  
Τα δείγματα, όπως μπορεί να διαπιστωθεί από τις ακόλουθως παρατιθέμενες λήψεις του SEM, τα υπό εξέταση σύνθετα χαρακτηρίζονται από την παρουσία ρωγμών οι



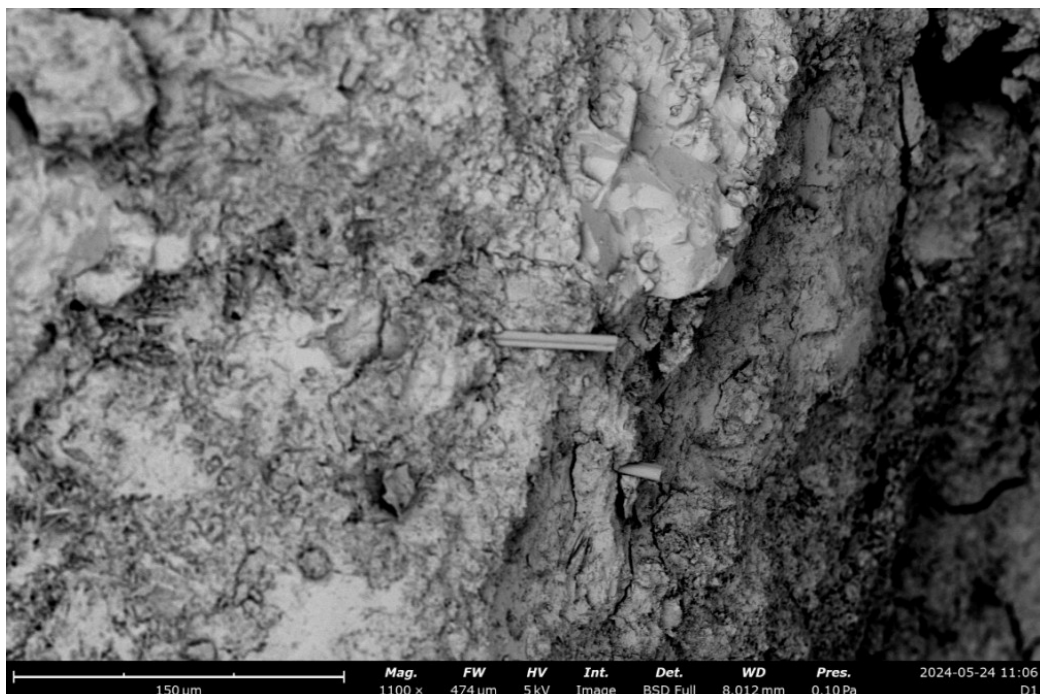
οποίες δημιουργήθηκαν κατά την θλιπτική καταπόνηση τους (Εικόνες 8.1.3-4 και 8.1.3-5). Παράλληλα είναι εμφανής η περιορισμένη συνοχή μεταξύ της μητρικής φάσης του συνθέτου και του δοκιμίου (Εικόνες 8.1.3-1 και 8.1.3-6). Τα όσα αναλύθηκαν παραπάνω αποδίδονται κατά κύριο λόγο στην ξηρή φύση της ρητίνης της μήτρας της ενίσχυσης και ευθύνονται για τις χαμηλές μηχανικές αντοχές των υλικών αυτών.



Εικόνα 8.1.3-4. Απεικόνιση (SEM) σε μεγέθυνση×980 για το σύνθετα υλικά τσιμεντοκονιάματος με ενίσχυση υφάσματος ινών άνθρακα (twill) και ξηρή ρητίνη.

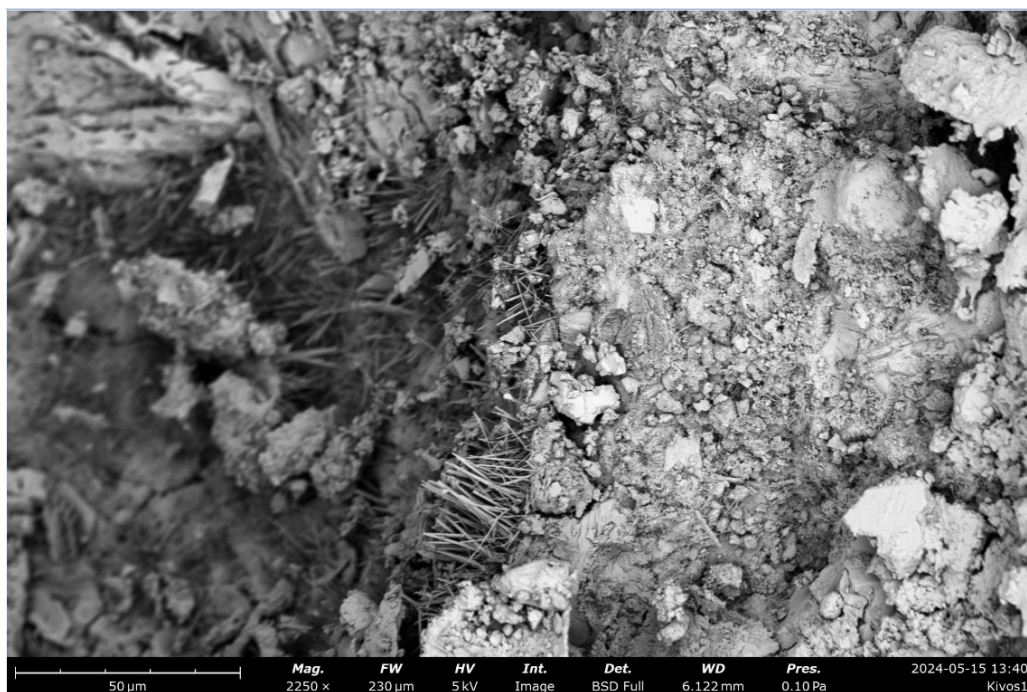


Εικόνα 8.1.3-5. Απεικόνιση (SEM) σε μεγέθυνση×1100 για το σύνθετα υλικά τσιμεντοκονιάματος με ενίσχυση υφάσματος ινών άνθρακα (twill) και ξηρή ρητίνη.

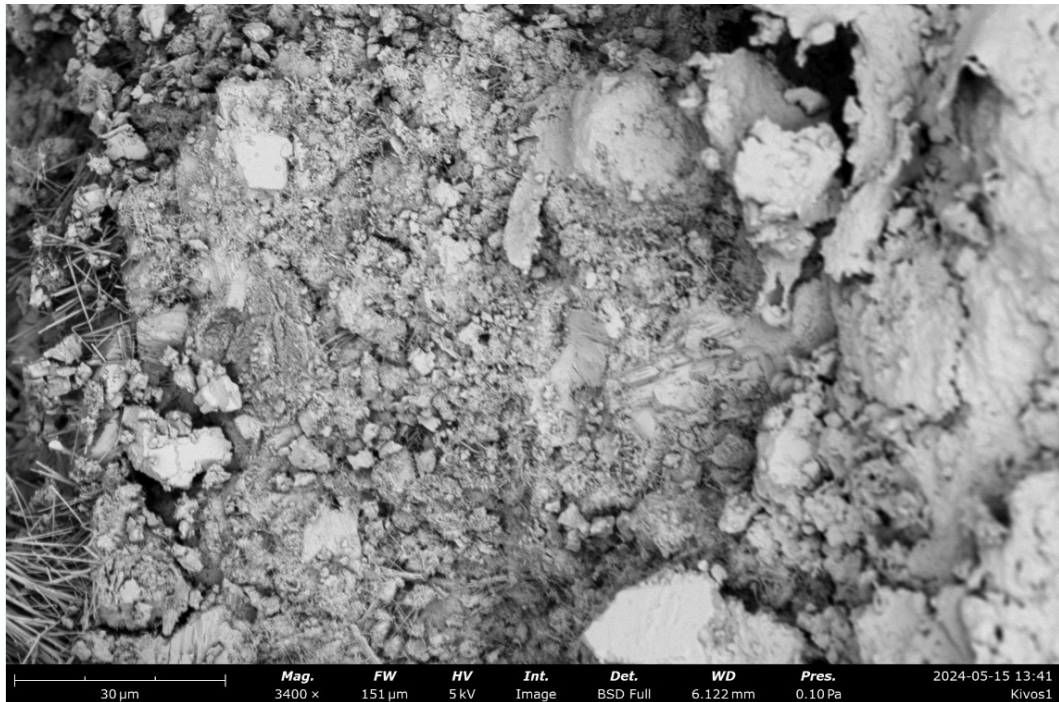


Εικόνα 8.1.3-6. Απεικόνιση (SEM) σε μεγέθυνση×1100 για το σύνθετα υλικά τσιμεντοκονιάματος με ενίσχυση υφάσματος ινών άνθρακα (twill) και ξηρή ρητίνη.

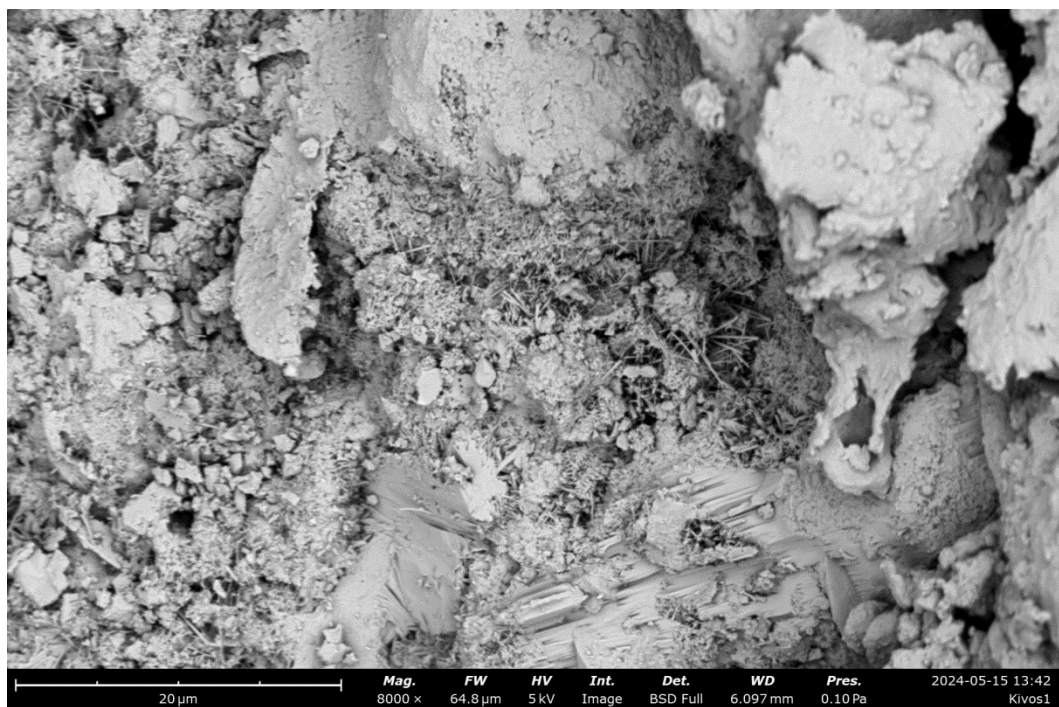
Σύνθετα υλικά με ενίσχυση υφασμάτων ινών άνθρακα και υγρή εποξειδική ρητίνη  
Σε ότι αφορά στα σύνθετα υλικά με ενίσχυση αποτελούμενη από υφάσματα ινών άνθρακα διαγώνιας πλέξης και μήτρα από υγρή εποξειδική ρητίνη, όπως παρατηρείται από τις αντίστοιχες απεικονίσεις του SEM (Εικόνες 8.1.3-7, 8.1.3-8 και 8.1.3-9) χαρακτηρίζονται από βελτιωμένη συνοχή μεταξύ του συνθέτου και του τσιμέντου συγκριτικά με τα αντίστοιχα υλικά στα οποία ως μήτρα χρησιμοποιήθηκε η εποξειδική ρητίνη ξηρής φύσεως. Αναλυτικότερα, η διαποτιστική ικανότητα που χαρακτηρίζει την υγρή εποξειδική ρητίνη, της επιτρέπει να περικλείει συνολικά (ως προς τον όγκο του) το σύνθετο. Αυτό συμβάλει στην επίτευξη υψηλής συνεκτικότητας στην διεπιφάνεια μεταξύ του συνθέτου και του υπό ενίσχυση δομικού στοιχείου των τελικώς παραγόμενων υλικών. Κατά συνέπεια τα εν λόγω υλικά, όπως προκύπτει και από την επεξεργασία των πειραματικών αποτελεσμάτων (Κεφάλαιο 7) επιδεικνύουν τις πλέον ενισχυμένες μηχανικές ιδιότητες, σε σχέση με τα υπόλοιπα υλικά που αναπτύχθηκαν και μελετήθηκαν.



Εικόνα 8.1.3-7. Απεικόνιση (SEM) σε μεγέθυνση×2250 για το σύνθετα υλικά τσιμεντοκονιάματος με ενίσχυση υφάσματος ινών άνθρακα (twill) και υγρή ρητίνη.



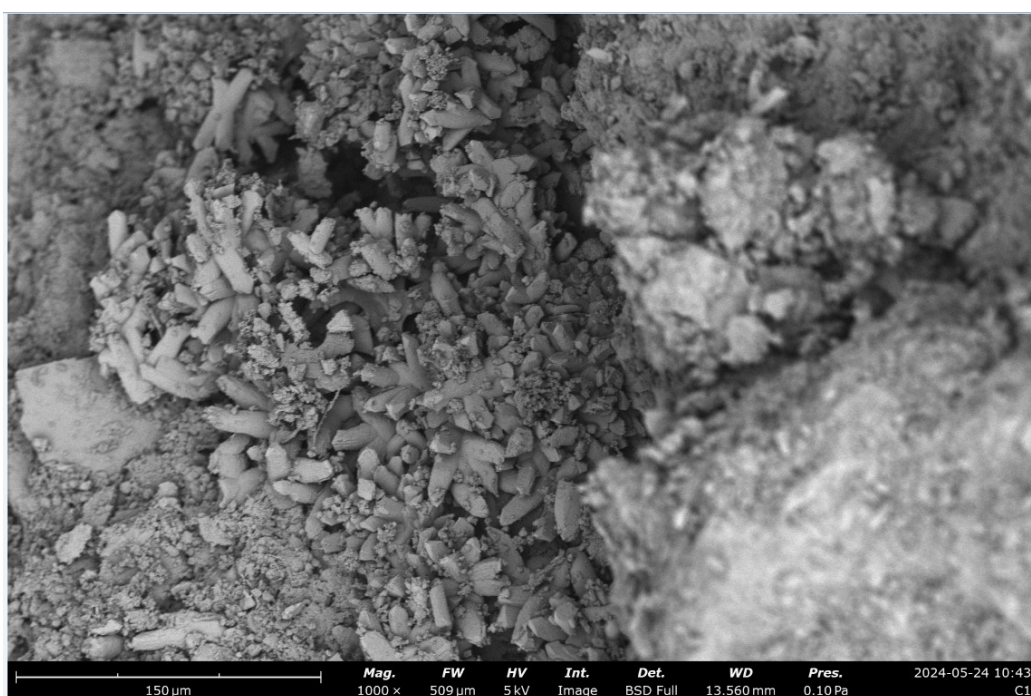
Εικόνα 8.1.3-8. Απεικόνιση (SEM) σε μεγέθυνση×3400 για το σύνθετα υλικά τσιμεντοκονιάματος με ενίσχυση υφάσματος ινών άνθρακα (twill) και υγρή ρητίνη.



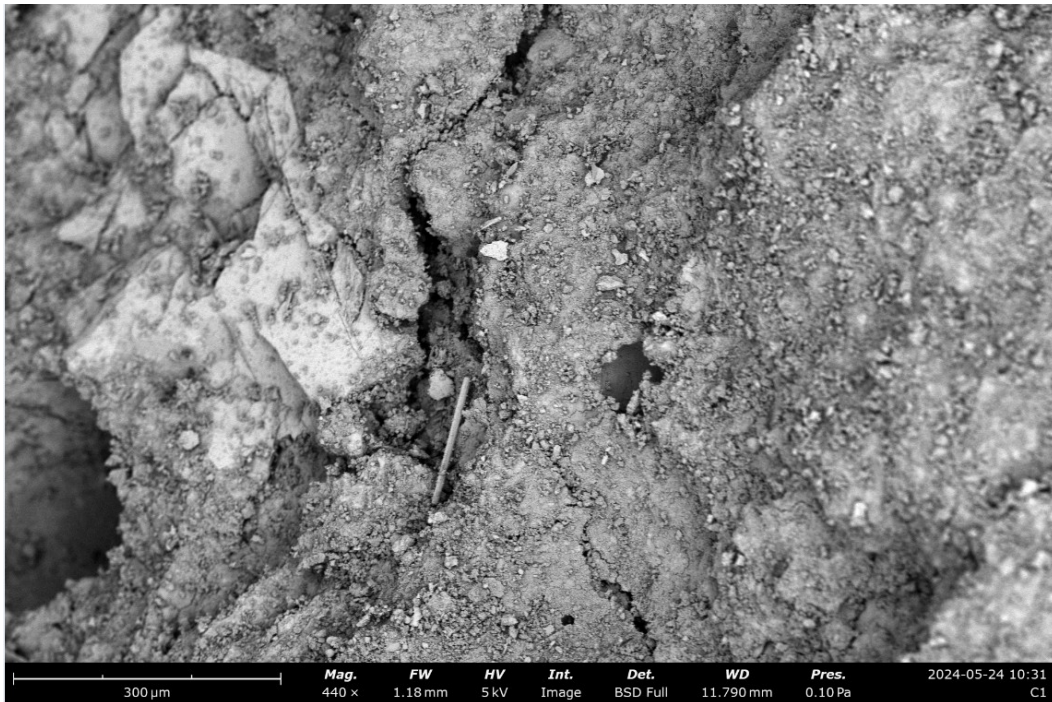
Εικόνα 8.1.3-9. Απεικόνιση (SEM) σε μεγέθυνση×3400 για το σύνθετα υλικά τσιμεντοκονιάματος με ενίσχυση υφάσματος ινών άνθρακα (twill) και υγρή ρητίνη.

Σύνθετα υλικά με ενίσχυση υφασμάτων ινών Kevlar και ξηρή εποξειδική ρητίνη  
 Και στην περίπτωση των συνθέτων υλικών τσιμέντου με ενίσχυση ινών Kevlar και  
 εποξειδική ρητίνη τύπου πάστας, η συνοχή του σύνθετου ενισχυτικού υλικού με το

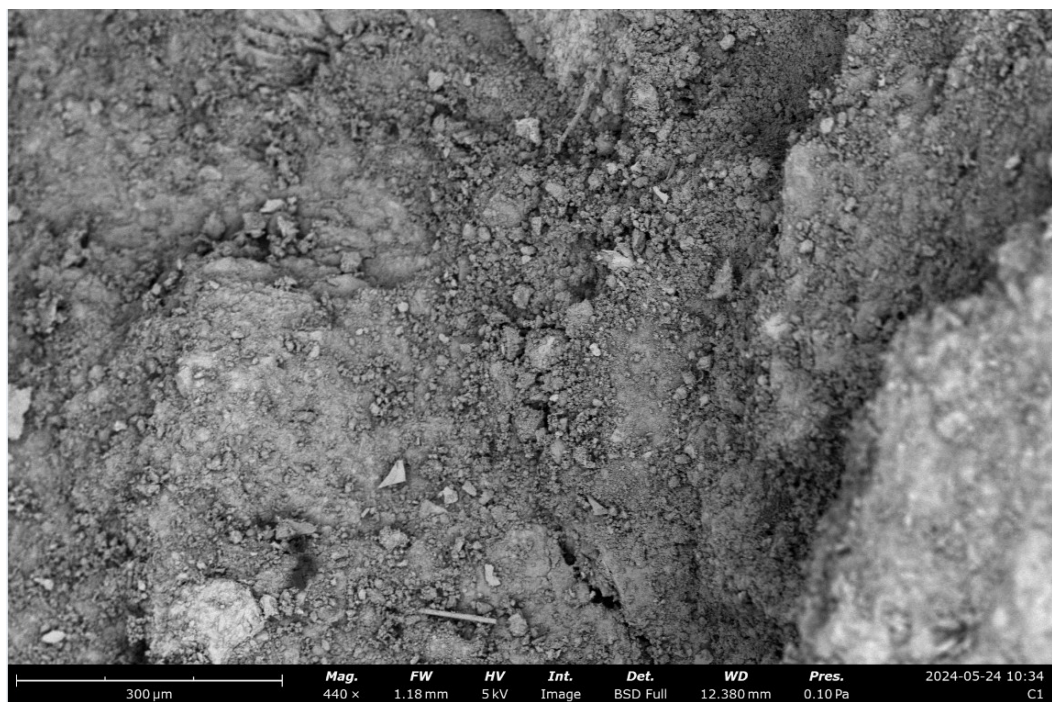
προς ενίσχυση δομικό στοιχείο όπως μπορεί να διαπιστωθεί από τις σχετικές λήψεις (Εικόνες 8.1.3-10, 8.1.3-11 και 8.1.3-12) δεν είναι καλή με αποτέλεσμα τα υλικά αυτά να επιδεικνύουν περιορισμένες μηχανικές αντοχές. Το φαινόμενο αυτό αποδίδεται και σε αυτή την περίπτωση στην σύνθεση της ρητίνης που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή της μήτρας. Στον αντίποδα, ο συνδυασμός ενός πολυμερούς υφάσματος ινών και της πολυμερικής ρητίνης στην κατασκευή του συνθέτου, διευκολύνει όπως προκύπτει και από τις οπτικές απεικονίσεις του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου, την κατά το δυνατόν βέλτιστη τοποθέτηση του υφάσματος στο υπό ενίσχυση δομικό στοιχείο.



Εικόνα 8.1.3-10. Απεικόνιση (SEM) σε μεγέθυνση×1000 για το σύνθετα υλικά τσιμεντοκονιάματος με ενίσχυση υφάσματος ινών Kevlar και ξηρή ρητίνη.

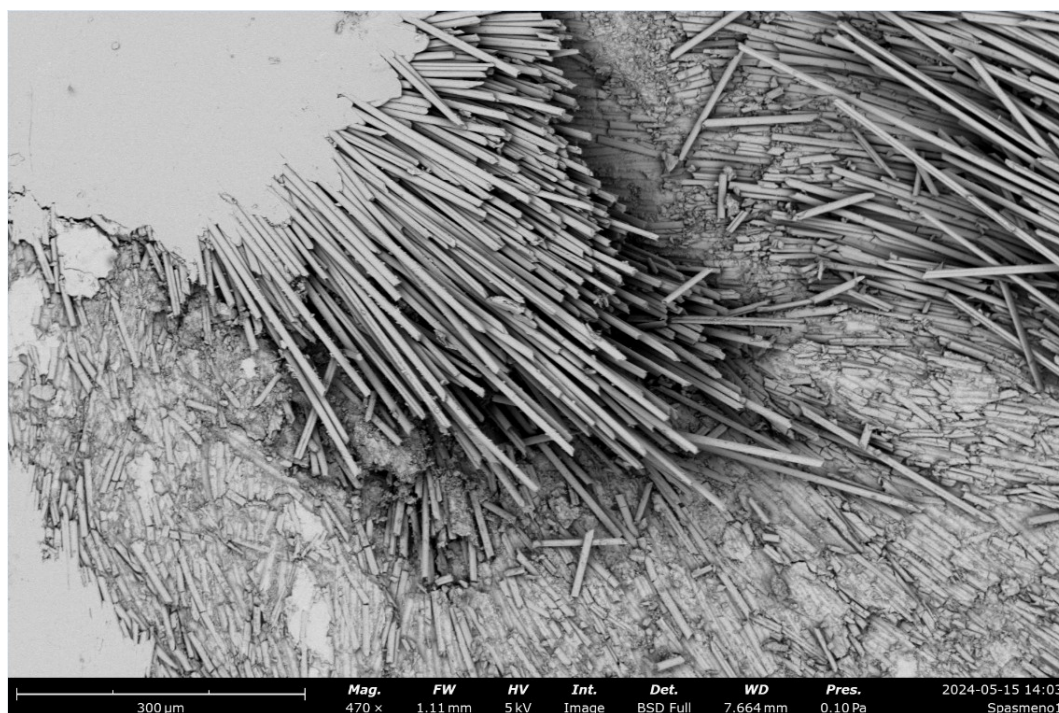


Εικόνα 8.1.3-11. Απεικόνιση (SEM) σε μεγέθυνση×440 για το σύνθετα υλικά τσιμεντοκονιάματος με ενίσχυση υφάσματος ινών Kevlar και ξηρή ρητίνη.

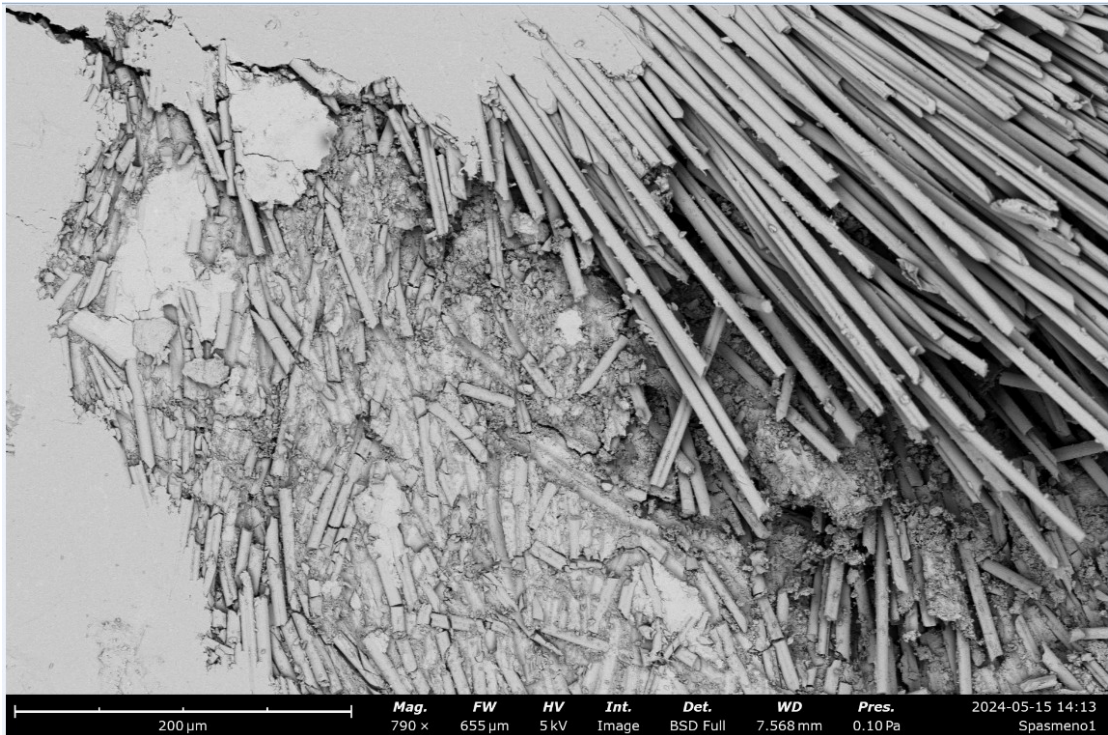


Εικόνα 8.1.3-12. Απεικόνιση (SEM) σε μεγέθυνση×440 για το σύνθετα υλικά τσιμεντοκονιάματος με ενίσχυση υφάσματος ινών Kevlar και ξηρή ρητίνη.

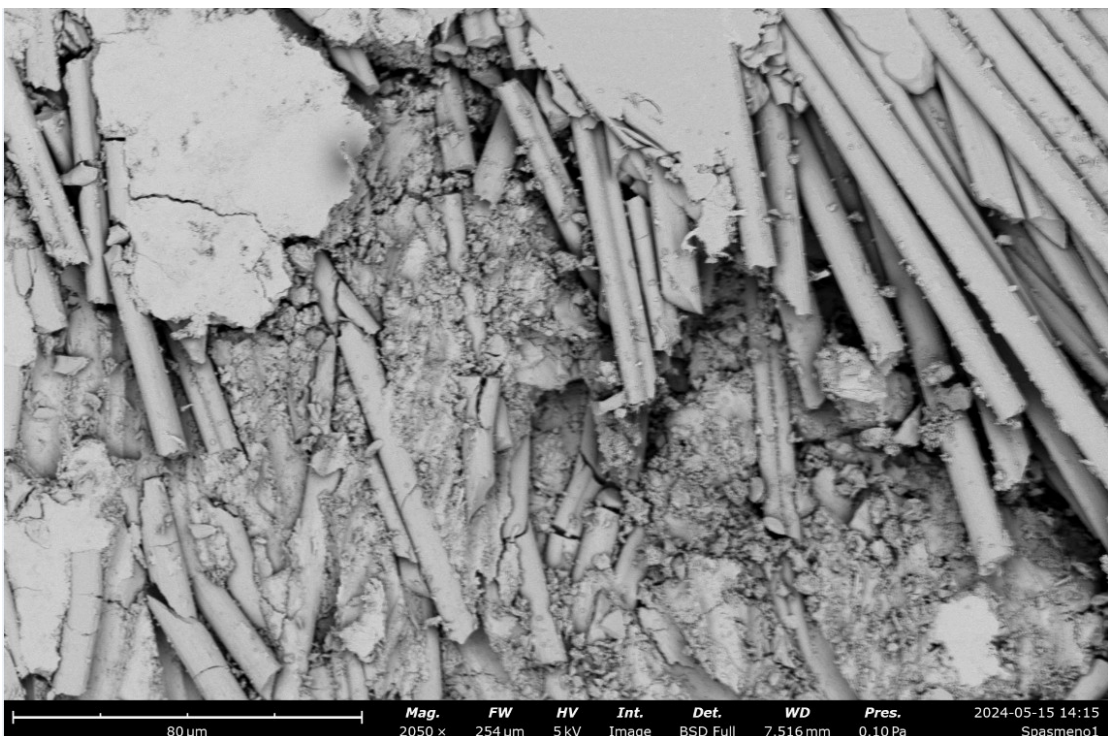
Σύνθετα υλικά με ενίσχυση υφασμάτων ινών υάλου και υγρή εποξειδική ρητίνη  
Από την παρατήρηση του δείγματος (Εικόνες 8.1.3-13, 8.1.3-14 και 8.1.3-15) του  
συνθέτου υλικού τσιμεντοκονιάματος με ενίσχυση ινών υάλου και εποξειδική ρητίνη  
υγρής σύνθεσης. είναι ευδιάκριτη η πολύ καλή συνοχή του συνθέτου, ήτοι της  
ενίσχυσης με το δομικό στοιχείο από σκυρόδεμα. Σε ότι αφορά στην τοποθέτηση του  
υφάσματος στα εν λόγω υλικά, διαπιστώνεται μέσω της παρατήρησης των ινών η  
καλύτερη, συγκριτικά με τα αντίστοιχα υλικά με ίνες Kevlar και εποξειδική ρητίνη  
τύπου πάστας, τοποθέτηση του υφάσματος επί του προς ενίσχυση δομικού  
στοιχείου.



Εικόνα 8.1.3-13. Απεικόνιση (SEM) σε μεγέθυνση×470 για το σύνθετα υλικά τσιμεντοκονιάμα με ενίσχυση υφάσματος ινών υάλου και υγρή ρητίνη.



Εικόνα 8.1.3-14. Απεικόνιση (SEM) σε μεγέθυνση×440 για το σύνθετα υλικά τσιμεντοκονίαμα με ενίσχυση υφάσματος ινών υάλου και υγρή ρητίνη.



Εικόνα 8.1.3-15. Απεικόνιση (SEM) σε μεγέθυνση×2050 για το σύνθετα υλικά τσιμεντοκονίαμα με ενίσχυση υφάσματος ινών υάλου και υγρή ρητίνη.



## Βιβλιογραφία 8<sup>ου</sup> Κεφαλαίου

1. Ε. Μ. Πιζάνια, «Κατασκευή - Ιδιότητες - Κατευθύνσεις Εφαρμογών Συνθέτων Υλικών Ινών Άνθρακα - Νανοσωλήνων Άνθρακα – Άμορφου Άνθρακα», Διδακτορική Διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2015.
2. Ι. Α. Ασημακόπουλος, Κατασκευή, Χαρακτηρισμός και Ιδιότητες συνθέτων Διηλεκτρικών Υλικών Πολυμερικής Μήτρας, Διδακτορική Διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2015.
3. D.A. Skoog, J.F. Holler, S.R. Crouch, *Principles of Instrumental Analysis*, Cengage Learning, 2016, pp. 279-297.
4. Κ. Μπογιατζίδης, «Κατασκευή Συνθέτων Υλικών Πολυμερικής Μήτρας με την Προσθήκη Ανακυκλούμενων Υλικών από Απόβλητα Κατεδάφισης Κτιρίων και Μελέτη Μηχανικών και Θερμικών ιδιοτήτων τους», Διδακτορική διατριβή, ΕΜΠ, Αθήνα, 2022.
5. W. Zhou, R.P. Apkarian, Z.L. Wang, D. Joy, *Fundamentals of Scanning Electron Microscopy, Scanning Microscopy for Nanotechnology*. 2007, pp.1-40.
6. D.A. Skoog, J.F. Holler, S.R. Crouch, *Principles of Instrumental Analysis*, Cengage Learning, 2016, pp. 279-297.
7. J. I. Goldstein, D.E. Newbury, J.R. Michael, N.W.M. Ritchie, J.H.J. Scott, D.C. Joy, *Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis*, United States, Springer, 2018, pp. vii-xiv.
8. Σ. Καραγιοβαννάκη, Κατασκευή Συνθέτων Μαγνητικών Υλικών Πολυμερικής Μήτρας και Εφαρμογές τους, Διδακτορική Διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2013.
9. Γ. Δ. Χρυσουλάκης, Δ.Ι. Παντελής, *Επιστήμη και Τεχνολογία των Μεταλλικών Υλικών*, 2<sup>η</sup> Έκδοση, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα 2008.
10. Μ. Κούη, Θ. Λυμπεροπούλου, Εργαστηριακή Άσκηση, *Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης με Φασματόμετρο Ενεργειακής Διασποράς Ακτίνων-Χ*, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9ο- Γενικά Συμπεράσματα- Προτάσεις μελλοντικής ερευνητικής δραστηριότητας

### 9.1 Γενικά Συμπεράσματα

Μεταξύ των στόχων της διδακτορικής διατριβής ήταν η περαιτέρω διερεύνηση των ήδη υιοθετημένων και εφαρμοζόμενων πρακτικών ενίσχυσης δομικών στοιχείων από τσιμέντο τα οποία έχουν ορθογωνική διατομή με ενισχυτικά μέσα του τύπου FRP. Στο πλαίσιο των ερευνητικών της εργασιών, έλαβε χώρα η ενδελεχής μελέτη των επιπτώσεων της ενίσχυσης με υφάσματα ινών άνθρακα διαφορετικών πλέξεων και υφασμάτων ινών υάλου και Kevlar διαγώνιας πλέξης στα μηχανικά χαρακτηριστικά των υπό ενίσχυση δομικών στοιχείων. Επιπλέον των όσων προαναφέρθηκαν η παρούσα ερευνητική διατριβή είχε σκοπό την αναβάθμιση της πειραματικής βάσης δεδομένων που αφορούν στην αποτελεσματικότητα, την ανθεκτικότητα και την χρονική επέκταση της χρηστικής ζωής των κατασκευών από σκυρόδεμα σε όρους μηχανικών αντοχών ως αποτέλεσμα της επένδυσής τους με σύνθετα ενισχυτικά υλικά.

#### 9.1.1 Υλικά από σκυρόδεμα ενισχυμένα με σύνθετα υλικά πολυμερικής μήτρας και ίνες άνθρακα, υάλου και Kevlar

Για την υλοποίηση του πειραματικού σκέλους της παρούσας ερευνητικής διατριβής κατασκευάστηκαν α.) δοκίμια τσιμεντοκονιάματος και β.) δοκίμια τσιμεντοκονιάματος με προσθήκη ινών άνθρακα μικρού μήκους, σύμφωνα με τις απαιτήσεις του προτύπου EN 196-1:1995 στα οποία εν συνεχεία τοποθετήθηκε-με σκοπό την ενίσχυσή τους-εξωτερική επένδυση από υφάσματα ινών άνθρακα, ινών υάλου και Kevlar και εποξειδική ρητίνη. Σε ότι αφορά στα υφάσματα ινών άνθρακα χρησιμοποιήθηκαν δυο διαφορετικοί τύποι υφασμάτων ως προς την πλέξη, ήτοι ύφασμα μονής (unidirectional) και διπλής κατεύθυνσης, διαγώνιας πλέξης (twill). Αντίστοιχα σε ότι αφορά στην υφάσματα ινών υάλου και Kevlar χρησιμοποιήθηκαν υφάσματα διαγώνιας πλέξης (twill).

Τέλος χρησιμοποιήθηκαν δυο διαφορετικοί τύποι εποξειδικής ρητίνης, ξηρού και υγρού τύπου.

Σύμφωνα με τα αναφερόμενα στο Κεφάλαιο 7 μελετήθηκε η μηχανική συμπεριφορά των συνθέτων υλικών που περιγράφηκαν συνοπτικά στην προηγούμενη παράγραφο. Συγκεκριμένα πραγματοποιήθηκε μέσω της διεξαγωγής κατάλληλων πειραματικών δοκιμών, η μελέτη της αντοχής των εν λόγω υλικών σε θλίψη. Σε ότι αφορά στα υλικά με ενίσχυση υφασμάτων από ίνες άνθρακα και εποξειδική ρητίνη μελετήθηκαν επιπροσθέτως οι επιπτώσεις της γήρανσης, μέσω θερμικής επεξεργασίας, στα μηχανικά χαρακτηριστικά των υλικών αυτών.

- Η εισαγωγή μικρού μήκους ινών άνθρακα έχει ως αποτέλεσμα τη βελτίωση της μηχανικής αντοχής των παραγόμενων δοκιμίων σε σχέση με τα δοκίμια που κατασκευάστηκαν αποκλειστικά από τσιμέντο.
- Η τοποθέτηση, σε δομικά στοιχεία από τσιμεντοκονίαμα και τσιμεντοκονίαμα με μικρού μήκους ίνες άνθρακα, υφασμάτων από ίνες άνθρακα, ίνες υάλου, ίνες Kevlar και εποξειδική ρητίνη έχουν ως αποτέλεσμα την ενίσχυση των ανωτέρω δομικών στοιχείων σε όρους μηχανικών αντοχών.
- Η ενίσχυση των μηχανικών αντοχών είναι μεγαλύτερη στην περίπτωση των υλικών στα οποία εμπεριέχονται ίνες άνθρακα μικρού μήκους στο τσιμέντο.
- Σε ότι αφορά στην θλιπτική αντοχή των συνθέτων υλικών χωρίς προσθήκη ινών άνθρακα στα αρχικά δοκίμια και σύμφωνα με τις τα αποτελέσματα των πειραματικών δοκιμών, ανθεκτικότερα παρουσιάζονται τα σύνθετα υλικά με υφάσματα ινών άνθρακα διπλής κατεύθυνσης (twill) και ξηρού τύπου εποξειδική ρητίνη ακολουθούμενα από τα σύνθετα υλικά με υφάσματα μονής κατεύθυνσης και εποξειδική ρητίνη αντιστοίχου σύνθεσης, εν συνεχεία τα σύνθετα υλικά με υφάσματα μονής κατεύθυνσης και υγρή εποξειδική ρητίνη και τέλος τα αποτελούμενα από υφάσματα διαγώνιας πλέξης και εποξειδική ρητίνη υγρού τύπου σύνθετα υλικά.

- Αντιστοίχως σε ότι αφορά στα υλικά με ίνες άνθρακα μικρού μήκους, ανθεκτικότερα σε θλιπτικές καταπονήσεις παρουσιάζονται τα υλικά με υφάσματα ινών άνθρακα διπλής κατεύθυνσης (twill) και ξηρού τύπου εποξειδική ρητίνη ακολουθούμενα από τα σύνθετα υλικά με υφάσματα μονής κατεύθυνσης και εποξειδική ρητίνη υγρού τύπου, τα σύνθετα υλικά με υφάσματα μονής κατεύθυνσης και ξηρή εποξειδική ρητίνη και τα σύνθετα με υφάσματα ινών Kevlar και εποξειδική ρητίνη τύπου πάστας.
- Η ενίσχυση με υφάσματα ινών άνθρακα μονής και διπλής κατεύθυνσης (τύπου twill) και η ενίσχυση με υφάσματα διπλής κατεύθυνσης ινών υάλου και ινών Kevlar σε μήτρα εποξειδικής ρητίνης οδηγούν στην βελτίωση της θλιπτικής αντοχής του αρχικού δομικού στοιχείου.
- Η βέλτιστη ενισχυτική απόδοση σε όρους θλιπτικής αντοχής για τα σύνθετα με υφάσματα ινών άνθρακα διπλής και μονής πλέξης επιτυγχάνεται όταν η εφαρμογή τους επί του προς ενίσχυση δομικού στελέχους γίνει σε συνδυασμό με τη χρήση εποξειδικής ρητίνης ξηρού τύπου.
- Σχεδόν το σύνολο των συνθέτων στα οποία χρησιμοποιήθηκε η υγρή εποξειδική ρητίνη και που εν συνεχεία υπεβλήθησαν σε τεχνητή γήρανση, ανεξαρτήτως της χρονικής διάρκειας αυτής, χαρακτηρίζονται από θλιπτικές αντοχές οι οποίες είναι υποδεέστερες αυτών που επέδειξαν τα μη ενισχυμένα υλικά.
- Η επέκταση της χρονικής διάρκειας της διαδικασίας της γήρανσης, έχει ως αποτέλεσμα την περαιτέρω υποβάθμιση των θλιπτικών αντοχών των υπό εξέταση συνθέτων υλικών.
- Οι θλιπτικές αντοχές του συνόλου σχεδόν των συνθέτων υλικών που υπεβλήθησαν σε τεχνητή γήρανση είναι μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες των μη ενισχυμένων υλικών από τσιμεντοκονίαμα.

- Η επίδραση της γήρανσης και ο περαιτέρω περιορισμός των μηχανικών χαρακτηριστικών των υπό διερεύνηση συνθέτων υλικών που παρατηρήθηκαν είναι αναμενόμενα και αποδίδονται στην ενισχυτική φάση των συνθέτων και ειδικότερα στη μήτρα της, η οποία και αποτελείται από θερμοσκληρυνόμενα συστατικά (εποξειδική ρητίνη). Τα εν λόγω υλικά είναι εκ της φύσεως τους ψαθυρά. Η θερμική τους επεξεργασία οδηγεί στην «ενίσχυση» αυτής τους της ιδιότητας, στην υποβάθμιση των μηχανικών τους αντοχών και συνεπώς της ενισχυτικής τους αποτελεσματικότητας. Τα προαναφερθέντα ενισχύονται από τα αποτελέσματα της ανάλυσης της μεταβολής στη μάζα των υπό εξέταση υλικών ως αποτέλεσμα της θερμικής επεξεργασίας, μέσω των οποίων αναδεικνύεται σαφώς η αυξημένη μεταβολή στη μάζα των υλικών που φέρουν ενίσχυση σε σχέση με τα μη ενισχυμένα δομικά στοιχεία.
- Ο μακροσκοπικός έλεγχος των συνθέτων υλικών τα οποία υπεβλήθησαν σε πειραματικές δοκιμές προσδιορισμού της αντοχής, μετά την ολοκλήρωση του σταδίου της τεχνητής γήρανσης, ανέδειξε επιφανειακές σημειακές φθορές που δημιουργήθηκαν ως αποτέλεσμα της θερμικής επεξεργασίας. Οι εν λόγω αλλοιώσεις επέρχονται ως αποτέλεσμα ποικίλων χημικών διεργασιών που πραγματοποιούνται κατά την γήρανση και οι οποίες επιφέρουν αλλαγές στα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά του υπό θερμική επεξεργασία υλικού.

### **9.1.2 Σύνθετα υλικά πολυμερικής μήτρας ενισχυμένα με ίνες άνθρακα, υάλου και Kevlar**

Κατασκευάστηκαν σύνθετα υλικά πολυμερικής μήτρας από εποξειδική ρητίνη ξηρού και υγρού τύπου και ενίσχυση υφασμάτων ινών άνθρακα μονής κατεύθυνσης και δύο κατευθύνσεων και υφασμάτων ινών υάλου και Kevlar διπλής κατεύθυνσης.

Στο Κεφάλαιο 7 αναλύθηκαν οι πειραματικές δοκιμές που διεξήχθησαν με σκοπό τον προσδιορισμό της μηχανικής συμπεριφοράς των ανωτέρω συνθέτων υλικών. Αναλυτικότερα πραγματοποιήθηκαν πειράματα διερεύνησης της μηχανικής αντοχής

των συνθέτων υλικών εποξειδικής ρητίνης με υφάσματα ινών σε κάμψη και διάτμηση αντίστοιχα.

- Αποδοτικότερα ως προς την μηχανική τους αντοχή σε κάμψη παρουσιάζονται τα σύνθετα υλικά που ως ενίσχυση φέρουν υφάσματα ινών άνθρακα μονής κατεύθυνσης και μήτρα εποξειδικής ρητίνης υγρού τύπου ακολουθούμενα από τα σύνθετα με υφάσματα ινών υάλου και σύστημα εποξειδικής ρητίνης ξηρού τύπου, τα σύνθετα υλικά με ανθρακουφάσματα μονής κατευθύνσεως και ξηρή εποξειδική ρητίνη, τα σύνθετα υλικά με υφάσματα ινών άνθρακα διπλής κατεύθυνσης και εποξειδική ρητίνη σε υγρή μορφή, τα ενισχυμένα με ίνες Kevlar και παρομοίου συνθέσεως μήτρα (εποξειδική ρητίνη, ξηρή), τα σύνθετα υλικά με ενίσχυση υφασμάτων διπλής κατεύθυνσης και μήτρα εποξειδικής ρητίνης τύπου πάστας και τελευταία τα σύνθετα με ίνες υάλου και Kevlar και μήτρα υγρής εποξειδικής ρητίνης.
- Το σύνολο των υλικών που εξετάστηκαν, παρουσίασαν σχεδόν εφάμιλλες τιμές διατμητικής αντοχής.
- Επικρατέστερα, βάσει των αποτελεσμάτων, σε ότι αφορά στις μηχανικές τους αντοχές σε διατμητικές τάσεις παρουσιάζονται τα σύνθετα με υφάσματα ινών άνθρακα μονής κατεύθυνσης και εποξειδική ρητίνη υγρού τύπου. Ακολουθούν τα σύνθετα υλικά με ίδιου τύπου υφάσματα ως ενίσχυση και μήτρα ξηρής εποξειδικής ρητινούχου πάστας, τα υλικά με υφάσματα twill και ξηρού τύπου εποξειδική ρητίνη και τέλος τα σύνθετα υλικά ενισχυμένα με υφάσματα διπλής κατεύθυνσης και υγρή εποξειδική ρητίνη. Συνεχίζοντας στις υπόλοιπες κατηγορίες των συνθέτων της παρούσας ερευνητικής διατριβής, ακολουθούν τα σύνθετα ινών υάλου με υγρή και τα αντιστοίχου ενίσχυσης και ξηρή εποξειδική ρητίνη σύνθετα και τέλος τα σύνθετα υλικά με ίνες Kevlar με υγρή και ξηρή εποξειδική μήτρα αντίστοιχα.

- Το σύνολο των συνθέτων υλικών τα οποία υπεβλήθησαν σε δοκιμές προσδιορισμού της μηχανικής αντοχής επέδειξαν ψαθυρή θραύση η οποία αποδίδεται στο θερμοσκληραινόμενο σύστημα εποξειδικής ρητίνης που επελέγη για την κατασκευή της μήτρας αυτών.

### 9.1.3 Χαρακτηρισμός υλικών σκυροδέματος με ενίσχυση από σύνθετα υλικά πολυμερικής μήτρας και ίνες άνθρακα, υάλου και Kevlar

Στο Κεφάλαιο 8 πραγματοποιήθηκε μέσω της Ηλεκτρονικής Μικροσκοπίας Σάρωσης (SEM) ο μορφολογικός και δομικός χαρακτηρισμός των συνθέτων υλικών του Κεφαλαίου 7. Η διεξαγωγή των σχετικών μετρήσεων πραγματοποιήθηκε μέσω του Ηλεκτρονικού Μικροσκοπίου Σάρωσης της εταιρίας THERMO SCIENTIFIC, μοντέλο Phenom XL. Ο χαρακτηρισμός πραγματοποιήθηκε για τα σύνθετα που επέδειξαν τη βέλτιστη αντοχή σε θλιπτικές καταπονήσεις. Η διεξαγωγή των απαιτούμενων αναλύσεων έγινε επί κατάλληλων, ως προς την προεπεξεργασία και τις διαστάσεις, δειγμάτων.

Με βάση τις ως άνω αναλύσεις προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- Η ενσωμάτωση ινών μικρού μήκους στην κατασκευή δομικών στοιχείων από τσιμεντοκονίαμα ενισχύει τις μηχανικές αντοχές των εν λόγω δομικών στοιχείων.
- Οι χαμηλές μηχανικές αντοχές των συνθέτων υλικών με ίνες άνθρακα και ξηρή εποξειδική ρητίνη αποδίδονται στις ρωγμές που εμφανίζουν τα συγκεκριμένα υλικά, τις οποίες απέκτησαν ως αποτέλεσμα των πειραματικών δοκιμών αντοχής σε θλίψη και στην φύση της εποξειδικής ρητίνης της μήτρας του σύνθετου ενισχυτικού υλικού η οποία και ευθύνεται για την περιορισμένη συνοχή μεταξύ ενισχυτικής φάσης και δομικού στοιχείου.
- Η ενίσχυση με σύνθετα υλικά από υφάσματα ινών άνθρακα διαγώνιας πλέξης και υγρή εποξειδική ρητίνη, οδηγεί σε υλικά με βελτιωμένη συνοχή μεταξύ του συνθέτου και του προς ενίσχυση στοιχείου και κατεπέκταση ενισχυμένες

μηχανικές αντοχές. Τα εν λόγω χαρακτηριστικά αποδίδονται στη φύση και την υψηλή διαποτιστική ικανότητα της υγρής εποξειδικής ρητίνης.

- Σε ότι αφορά στα σύνθετα υλικά τσιμέντου με ενίσχυση ινών Kevlar και εποξειδική ρητίνη ξηρής σύνθεσης, επιδεικνύουν περιορισμένη συνοχή στην περιοχή της διεπιφάνειας μεταξύ της ενισχυτικής φάσης και του δομικού στοιχείου, εξαιτίας της φύσης της ρητίνης, και υποβαθμισμένες μηχανικές αντοχές σε σύγκριση με τα υπόλοιπα υπό εξέταση υλικά.
- Τα αντίστοιχα σύνθετα υλικά με ενίσχυση ινών υάλου και εποξειδική ρητίνη υγρού τύπου χαρακτηρίζονται από πολύ καλή συνοχή στη διεπιφάνεια που σχηματίζεται μεταξύ της ενίσχυσης και του δομικού στοιχείου η οποία κατά κύριο λόγο αποδίδεται στην καλή εφαρμογή του υφάσματος επί του προς ενίσχυση δομικού στοιχείου.

## 9.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Τα σύνθετα υλικά πολυμερικής μήτρας με υφάσματα ινών διαφόρων τύπων και εποξειδική ρητίνη που πραγματεύτηκε η παρούσα ερευνητική διατριβή, βρίσκουν ήδη εφαρμογή στις κατασκευές κτιρίων αλλά και έργων υποδομής με τη μορφή κυρίως παρεμβάσεων ενισχυτικού ή και επισκευαστικού χαρακτήρα. Η έρευνα που πραγματοποιήθηκε ωστόσο, προχώρησε ένα επίπεδο παραπάνω μελετώντας τις δυνατότητες ανάπτυξης αντίστοιχων υλικών εναλλακτικής πλέξης και τύπου υφάσματα ινών ως ενισχυτικό μέσο. Πιο συγκεκριμένα διερευνήθηκε η δυνατότητα ανάπτυξης συνθέτων υλικών με ενίσχυση υφασμάτων ινών άνθρακα μονής και διπλής κατεύθυνσης (πλέξης twill) και υφασμάτων ινών υάλου και Kevlar διπλής κατεύθυνσης για τις οποίες δεν εντοπίζονται καταγεγραμμένες βιβλιογραφικές αναφορές. Επιπρόσθετα διερευνήθηκαν οι δυνατότητες αξιοποίησης διαφορετικών τύπων θερμοσκληρυνόμενης πολυμερικής ρητίνης και συγκεκριμένα εποξειδικής ρητίνης ξηράς και υγρής μορφής για την κατασκευή της μήτρας των ανωτέρω υλικών,



για την χρήση της οποίας επίσης δεν εντοπίζονται αναφορές στην διεθνή βιβλιογραφία.

Στο πλαίσιο της έρευνας σε ότι αφορά στην ανάπτυξη νέων μεθοδολογικών εργαλείων, εξετάστηκαν οι δυνατότητες πρακτικής εφαρμογής του συνδυασμού δυο διαφορετικών πρακτικών, ήτοι των εξωτερικών ενισχυτικών παρεμβάσεων και της ενσωμάτωσης πληρωτικής φύσεως ενισχυτικών υλικών στα δομικά στοιχεία ενδιαφέροντος.

Μελλοντικά δύναται να διεξαχθεί περαιτέρω έρευνα αναφορικά με την χρήση και άλλων τύπων υφασμάτων ως προς την πλέξη και των τύπων ινών. Ξεχωριστή ενότητα στο πλαίσιο της εν λόγω έρευνας μπορεί να αποτελέσει η διερεύνηση της μηχανικής συμπεριφοράς υλικών η κατασκευή των οποίων βασίζεται στη συνδυασμένη χρήση υφασμάτων ινών διαφορετικών υλικών ή και πλέξεων. Σε αντίστοιχο πλαίσιο θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί επιπλέον έρευνα όσον αφορά στη δυνατότητα αξιοποίησης διαφορετικών πολυμερικών ρητινών στην ανάπτυξη υλικών αντίστοιχου τύπου.

Τεράστιο ερευνητικό ενδιαφέρον εμπεριέχει ο κλάδος των τεχνικών (μεθόδων) εφαρμογής και τοποθέτησης. Πιο συγκεκριμένα οι εφαρμογές στις οποίες οι εξωτερικού τύπου επεμβατικές δράσεις σαν αυτές που μελετήθηκαν στην παρούσα διατριβή, συνδυαζόμενες με παρεμβάσεις και κατά το στάδιο της κατασκευής των αρχικών δομικών στελεχών (π.χ. CFRP σκυρόδεμα με ενσωμάτωση τεμαχισμένων ινών άλλων τύπων και μεγεθών, ενσωμάτωση άλλων υλικών ή παραπροϊόντων), ή κατά την υλοποίηση (επί των εν λόγω δομικών στοιχείων) επισκευαστικών ή επιδιορθωτικών ή ενισχυτικών παρεμβάσεων (CFRP τσιμέντο σε ενισχυτικές παρεμβάσεις περίσφιγξης με μανδύα σκυροδέματος, εξωτερική ενίσχυση με μανδύα σκυροδέματος με ίνες μικρού μήκους ή άλλα παρεμφερούς μεγέθους υλικά κ.α.).

Πέραν των όσων ήδη αναφέρθηκαν προηγούμενα, προτείνεται η περαιτέρω διερεύνηση των δυνατοτήτων ενίσχυσης της μηχανικής αποτελεσματικότητας των ανωτέρω υλικών μέσω της εφαρμογής εναλλακτικών πρακτικών κατά την κατασκευή και τοποθέτησή τους όπως για παράδειγμα η εφαρμογή επί δομικών στοιχείων υπό κενό, η βελτιστοποίηση της παρασκευαστικής διαδικασίας για περιορισμό φυσαλίδων στο μίγμα εποξειδικής ρητίνης της μήτρας κ.α..

Τέλος ένα ακόμα πεδίο στο οποίο θα μπορούσε να επεκταθεί η έρευνα σε ότι αφορά στην ανάπτυξη των εν λόγω υλικών, είναι οι πιθανοί εναλλακτικοί τρόποι αξιοποίησης αυτών στο τέλος του κύκλου ζωής τους και η επαναχρησιμοποίηση τους κατόπιν κατάλληλης επεξεργασίας στη κατασκευή νέων υλικών δομικών και κατασκευαστικών ή και άλλου τύπου εφαρμογών.

## ΒΙΟΓΡΑΦΙΚΟ ΣΗΜΕΙΩΜΑ

<b>ΠΡΟΣΩΠΙΚΕΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ</b>	<p>Όνοματεπώνυμο: Γεώργιος Σουπιώνης</p> <p>Ημερομηνία γέννησης: 22/11/1986</p> <p>Τόπος γέννησης:</p> <p>Υπηκοότητα: Ελληνική</p> <p>Οικογενειακή κατάσταση: Παντρεμένος</p> <p>Τέκνα: 2</p> <p>Διεύθυνση κατοικίας: 5, Αγίου Ανδρέου, Νέα Σμύρνη , Αθήνα, 17122, Ελλάδα</p> <p>Τηλέφωνα: +30 210 93 53 340 (εργασίας) : +30 693 77 88 061(Κινητό)</p> <p>e-mail : <a href="mailto:g.soupionis@live.com">g.soupionis@live.com</a></p>
<b>ΣΠΟΥΔΕΣ</b>	<p>2018 - 2024 <b>Σχολή Χημικών Μηχανικών, Τομέας ΙΙΙ, Επιστήμη και Τεχνική των Υλικών, Διδακτορικές Σπουδές</b></p> <p>10/2015 - 7/2017 <b>Σχολή Χημικών Μηχανικών, ΔΠΜΣ «Επιστήμη και Τεχνολογία Υλικών», Ε.Μ.Π. Αθήνα</b></p> <p>31/1/2011 - 12/6/2014 <b>Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Ε. Μ. Π. Αθήνα</b></p> <p>27/9/2004 - 21/5/2009 <b>Τμήμα Μηχανολογίας, Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα (ΤΕΙ), Δυτικής Μακεδονίας, Κοίλα, Κοζάνη, 50100, Ελλάδα</b></p>
<b>ΤΙΜΗΤΙΚΕΣ ΔΙΑΚΡΙΣΕΙΣ</b>	<p><u>2007-2008</u>:Υποτροφία Ι.Κ.Υ. στο 3ο έτος σπουδών ΤΕΙ Δυτικής Μακεδονίας.</p>
<b>ΕΡΓΑΣΙΕΣ/ΔΙΑΤΡΙΒΕΣ</b>	<p>Διδακτορική διατριβή (2018-2024): <i>Σύνθετα Υλικά Πολυμερικής Μήτρας Ενισχυμένα με Ίνες, Κατάλληλα για Ενίσχυση Φέροντος Οργανισμού από Οπλισμένο Σκυρόδεμα (Κατασκευή, Χαρακτηρισμός, Ιδιότητες).</i></p> <p>Μεταπτυχιακή διατριβή (2017): <i>Σύνθετα Υλικά Θερμοσκληρυνόμενων Ρητινών με Περλίτη και Ενισχυμένων με Ίνες Άνθρακα ως Θερμομονωτικών Υλικών Υψηλών Θερμοκρασιών, ΕΜΠ, 2017.</i></p> <p>Διπλωματική εργασία:</p>
<b>ΞΕΝΕΣ ΓΛΩΣΣΕΣ</b>	<p>Αγγλικά: (B2)</p>
<b>ΕΡΓΑΣΙΑΚΗ ΕΜΠΕΙΡΙΑ</b>	<p><u>2/2012 – σήμερα</u>: <b>Γ. Σουπιώνης και ΣΙΑ ΟΕ, Τεχνική/Ενεργειακή,</b></p>

	<p>Αγίου Ανδρέου 5, Νέα Σμύρνη, 171 22, Αθήνα, Ελλάδα (ΙΔΙΟΚΤΗΤΗΣ)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Κύρια δραστηριότητα εταιρείας εξειδικευμένες εργασίες για την επισκευή και</li> <li>• αποκατάσταση δομικών στοιχείων με χρήση ειδικών υλικών σε κάθε περίπτωση.</li> <li>• Συγκόλληση ρωγμών με εποξειδικές ρητίνες</li> <li>• Συντήρηση οπλισμένου σκυροδέματος με αναστολές διάβρωσης</li> <li>• Υγρομονώσεις με υαλοπίλημα (ελαστομερή υλικά με ίνες υάλου)</li> </ul> <p>Συνεργασία με οργανισμούς όπως: Εκκλησία της Ελλάδος, Βουλή των Ελλήνων, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Άλφα τράπεζα κ.α.</p> <p><u>11/2008 – 5/2009: Βοηθός Μηχανολόγου Μηχανικού (Πρακτική Άσκηση)</u></p> <p>ΑΚΤΩΡ ΑΤΕ, 25, Ερμού, Νέα Κηφισιά, 145 64, Εθνική Οδός Αθηνών – Λαμίας, Ελλάδα, <a href="http://www.aktor.gr">http://www.aktor.gr</a></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Συγκέντρωση συνεργείων και εργοταξιακή επίβλεψη στο έργο Ανάπλαση Πλατείας Μεταξουργείου</li> </ul> <p><u>9/2004-12/2004: Τηλεφωνητής</u></p> <p>NewsPhone, 280, Λεωφόρος Θησέως, Καλλιθέα, 176 75, Αθήνα, Ελλάδα, <a href="http://www.newsphone.gr">http://www.newsphone.gr</a></p>
<b>ΟΡΓΑΝΩΣΕΙΣ</b>	<p>Μέλος Τ.Ε.Ε</p> <p>Μέλος Ινστιτούτου Ενέργειας Νοτιοανατολικής Ευρώπης (IENE)</p>
<b>ΓΝΩΣΕΙΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ</b>	<p>Άριστος χειρισμός των εργαλείων Microsoft Office</p> <p>Άριστος χειρισμός περιβάλλοντος Microsoft Windows</p> <p>Άριστος χειρισμός περιβάλλοντος MAC OSX</p> <p>Πολύ Καλός χειρισμός εργαλείου Gnuplot, Origin</p> <p>Πολύ Καλός χειρισμός σχεδιαστικού προγράμματος SolidWorks</p> <p>Πολύ Καλός χειρισμός προγραμμάτων πεπερασμένων στοιχείων MSC Marc και LS-Dyna</p>
<b>ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ</b>	<p>ΠΑΝΕΛΛΗΝΙΑ ΣΥΝΕΔΡΙΑ (1):</p> <p>Γ. Σουπιώνης, Λ. Ζουμπουλάκης, «Σύνθετα Υλικά Πολυμερικής Μήτρας</p>

	<p><i>Ενισχυμένα με Ίνες για Ενίσχυση/Επισκευή Φέροντος Οργανισμού από Σκυρόδεμα», 2019, 12<sup>ο</sup> ΠΕΣΧΜ, Αθήνα, Ελλάδα, No PN0028.</i></p> <p>ΔΙΕΘΝΗ ΠΕΡΙΟΔΙΚΑ (2):</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. G. Soupionis, L. Zoumpoulakis, «<i>Reinforced Concrete Structures Containing Chopped Carbon Fibers with Polymer Composite Materials</i> 2021, Polymers, 13, 3812.</li> <li>2. G. Soupionis, P. Georgiou, L. Zoumpoulakis, «<i>Polymer Composite Materials Fiber-Reinforced for the Reinforcement/Repair of Concrete Structures</i>», 2020, Polymers, 12, 2058.</li> </ol>
<p><b>ΛΟΙΠΑ ΕΝΔΙΑΦΕΡΟΝΤΑ- ΔΕΞΙΟΤΗΤΕΣ</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Εποχική εργασία στην οικογενειακή επιχείρηση «SUNFLOWER BUNGALOWS» στην περιοχή Άγιος Γόρδης, Κέρκυρα</li> <li>• Ενόργανη Γυμναστική, Μπάσκετ και τέσσερα χρόνια Ποδοσφαίρο στις ακαδημίες του Πανιωνίου και συμμετοχή στις ομάδες Ολυμπιακός Κοζάνης και Νίκης Αλίμου</li> <li>• Μαθήματα Μουσικής (Κιθάρα, Μπουζούκι)</li> <li>• Συμμετοχή σε σύλλογο σκακιού Α.Σ ΠΕΡΑ</li> <li>• Ταξίδια (Η.Π.Α., Ηνωμένο Βασίλειο, Ισπανία, Ιταλία, Βόρεια Αφρική)</li> <li>• Ανάγνωση (Γεωπολιτική, Ενεργειακή Ασφάλεια, Διεθνής Πολιτική Ιστορία, Φιλοσοφία, Κοινωνιολογία, Θεολογία)</li> </ul>