ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ (Δ.Π.Μ.Σ.)

"ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΛΙΚΩΝ"

ΣΥΝΘΕΣΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΤΣΙΜΕΝΤΟΚΟΝΙΑΜΑΤΟΣ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΩΝ ΜΕ ΝΑΝΟΣΩΛΗΝΕΣ ΚΑΙ ΙΝΕΣ ΑΝΘΡΑΚΑ: ΜΕΛΕΤΗ ΤΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ/ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΤΟΥΣ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΧΡΥΣΑΝΘΟΠΟΥΛΟΥ ΑΘΑΝΑΣΙΑ
Πτυχιούχος Επιστήμων των Υλικών

ΕΠΙΒΛΕΨΗ:
Κ. Χαριτίδης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, Ιούνιος 2019

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ (Δ.Π.Μ.Σ.)

"ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΛΙΚΩΝ"

ΣΥΝΘΕΣΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΤΣΙΜΕΝΤΟΚΟΝΙΑΜΑΤΟΣ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΩΝ ΜΕ ΝΑΝΟΣΩΛΗΝΕΣ ΚΑΙ ΙΝΕΣ ΑΝΘΡΑΚΑ: ΜΕΛΕΤΗ ΤΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ/ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΤΟΥΣ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΧΡΥΣΑΝΘΟΠΟΥΛΟΥ ΑΘΑΝΑΣΙΑ
Πτυχιούχος Επιστήμων των Υλικών

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:
Κ. ΧΑΡΙΤΙΔΗΣ, Καθηγητής Ε.Μ.Π.
Ε. ΚΟΝΤΟΥ-ΔΡΟΥΓΚΑ, Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.
Λ. ΖΟΥΜΠΟΥΛΑΚΗΣ, Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, Ιούνιος 2019

Ευχαριστίες

Στον κ. Χαριτίδη Κωνσταντίνο, καθηγητή Νανομηχανικής & Νανοτεχνολογίας, στη σχολή Χημικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, που ήταν ο επιβλέπων της εργασίας, για την βοήθειά του, τις συμβουλές και υποδείξεις του.

Στον κ. Καρτσωνάκη Ιωάννη, μεταδιδακτορικό ερευνητή ΕΜΠ, για την πολύτιμη βοήθειά του στην πραγματοποίηση των μετρήσεων και για τις συμβουλές και τις υποδείξεις του στην εκπόνηση της εργασίας.

Στην κ. Κοντού Ευαγγελία , καθηγήτρια ΕΜΠ, για την πολύτιμη βοήθειά της και την διάθεση εργαστηριακού εξοπλισμού για τις μετρήσεις των μηχανικών και ηλεκτρικών ιδιοτήτων.

Στον κ. Κυρίτση Απόστολο, επίκουρο καθηγητή ΕΜΠ, για την πολύτιμη βοήθειά του και την διάθεση εργαστηριακού εξοπλισμού για τις μετρήσεις της διηλεκτρικής φασματοσκοπίας εναλλασσόμενου πεδίου .

Στην κ. Κανελλοπούλου Ειρήνη, ειδικό τεχνικό εργαστηριακό προσωπικό (ΕΤΕΠ), για τη βοήθειά της στην πραγματοποίηση των πειραμάτων και τον χειρισμό του εργαστηριακού εξοπλισμού των μετρήσεων μηχανικής.

Στην κ. Καραξή Ευαγγελία, υποψήφια διδάκτορα ΕΜΠ, για τη βοήθειά της στην πραγματοποίηση των πειραμάτων και τον χειρισμό του εργαστηριακού εξοπλισμού των μετρήσεων.

Στον κ. Γεώργιο Γεωργούση, μεταδιδακτορικό ερευνητή ΕΜΠ, για τη βοήθειά του στην πραγματοποίηση των πειραμάτων και τον χειρισμό του εργαστηριακού εξοπλισμού των ηλεκτρικών/πιεζοηλεκτρικών μετρήσεων.

«Φτάνει ένα αλέτρι να βρεθεί κι ένα δρεπάνι κοφτερό σ' ένα χαρούμενο χέρι,

Φτάνει ν' ανθίσει μόνο λίγο σιτάρι για τις γιορτές λίγο κρασί για τη θύμηση λίγο νερό για τη σκόνη.....»

Νίκος Γκάτσος- Αμοργός

Στους γονείς μου, Ιωάννη και Αγγελική
Στον αδερφό μου, Ευθύμιο

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι η παρασκευή σύνθετων υλικών τσιμέντου ενισχυμένων με ίνες άνθρακα (Carbon Fibers, CFs) και νανοσωλήνες άνθρακα (Carbon Nanotubes, CNTs), αντίστοιχα, με στόχο τη μελέτη των μηχανικών τους και ηλεκτρικών / πιεζοηλεκτρικών τους ιδιοτήτων. Κατασκευάστηκαν δοκίμια τσιμεντοκονιάματος ενισχυμένα με CFs ή CNTs σύμφωνα με το πρότυπο EN 196-1 χρησιμοποιώντας τσιμέντο τύπου Portland (CEM I 52.5 N), ενώ για την ενίσχυση της διασποράς τους χρησιμοποιήθηκαν εμπορικά διαθέσιμα πρόσθετα. Επίσης, χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικές συγκεντρώσεις CNTs και CFs που κυμαίνονταν από 0.02-1% και 0.05-1% (κατά βάρος του τσιμέντου, bwoc), αντίστοιχα. Τα βέλτιστα αποτελέσματα μηχανικών ιδιοτήτων για τα δοκίμια ενισχυμένα με CFs βρέθηκαν για συγκεντρώσεις CFs από 0.1-0.4% bwoc. Με βάση τα αποτελέσματα της αντοχής στην κάμψη και στην θλίψη χυτεύθηκαν δοκίμια που περιείχαν τον συνδυασμό των CFs και των CNTs. Κατόπιν, προσδιορίστηκε εκ νέου η αντοχή σε, κάμψη και θλίψη των συνθέτων υλικών και η αντίστασή τους. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι τα σύνθετα υλικά τσιμεντοκονιάματος που περιείχαν CNTs και CFs παρουσίασαν βελτιωμένη αντοχή τόσο στην κάμψη όσο και στην θλίψη συγκρινόμενα με τα δοκίμια αναφοράς (χωρίς πρόσθετα), ενώ η ηλεκτρική αντίσταση μειωνόταν με την φόρτιση και αυξανόταν κατά την εκφόρτωση των δοκιμίων προσδίδοντας πιεζο-ηλεκτρικές ιδιότητες στα τελικά προϊόντα.

ABSTRACT

The purpose of this study is to develop mortar specimens reinforced with carbon fibers (CFs) and carbon nanotubes (CNTs), respectively, aiming to evaluate their mechanical strength as well as their piezoresistive properties. Commercial CNTs and CFs were used. Portland (CEM I 52.5 N) cement was utilized for the preparation of the samples, reinforced with CFs and CNTs, separately, according to EN 196-1 standard. The samples were molded at various concentrations of CNTs and CFs ranging from 0.02 to 1% and 0.05 to 1%, respectively (by weight of cement, bwoc). The composites containing 0.1 - 0.4% CFs bwoc presented enhanced mechanical properties and according to these results, the specimens containing a combination of CFs and CNTs were selected. The mechanical integrity was investigated and the obtained reveal that the addition of both CNTs and CFs resulted to an increase of the flexural and compressive strength compared to the reference samples (no additives), while the electrical resistance of the specimens was changed under cyclic compressive loading, imparting piezoelectric properties to the reinforced specimens with carbon-based materials.

Περιεχόμενα

Εισαγωγικό Κεφάλαιο: Σκυρόδεμα με ιδιότητες αυτο-ανίχνευσης 9

Ι. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ 10

Κεφάλαιο 1 – Τσιμέντο (Δομή και Ιδιότητες) 10

1.1 Η Επιστήμη του Τσιμέντου 10

1.2 Τα Συστατικά του Υδραυλικού Τσιμέντου 11

1.3 Τσιμεντοπολτός 12

1.3.1. Τα Κενά του Ενυδατωμένου Τσιμεντοπολτού 15

1.3.2. Τα Κυριότερα Χαρακτηριστικά του Σκυροδέματος 16

1.3.3 Συνθήκες Συντήρησης Σκυροδέματος 16

Κεφάλαιο 2 - Πρόσθετα Σκυροδέματος και Ενισχυτικά Υλικά 19

2.1 Πυριτική Παιπάλη – Silica Fume 19

2.2 CFs – Carbon Fibers 21

2.3 Νανοσωλήνες Άνθρακα – Carbon Nanotubes (CNTs) 25

2.4 Αγώγιμα Ενισχυτικά Υλικά – Θεωρία Διαφυγής 27

Κεφάλαιο 3 - Πειραματικές Μέθοδοι 29

3.1 Σκληρυμένο Σκυρόδεμα – Εισαγωγικά Στοιχεία. 29

3.2 Αντοχή στην κάμψη – Flexural Strength 30

3.3 Αντοχή στην θλίψη – Compressive Strength 32

3.4 Ηλεκτρικές Μετρήσεις 33

3.5 Πιεζοαντίσταση (Piezoresistivity) 35

Κεφάλαιο 4 – Είδη Φασματοσκοπίας 36

4.1 DRS -Διηλεκτρική φασματοσκοπία εναλλασσόμενου πεδίου 36

4.2 Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης, SEM 42

Κεφάλαιο 5 - Υλικά 42

5.1 Portland Cement, CEM I 52.5 N 42

5.2 Αδρανή 43

5.3 Νερό 43

5.4 Πυριτική Παιπάλη 43

5.5 Πρόσμικτα 44

5.6 CFs (Carbon Fibers, CFs) 45

5.7 CNTs (Carbon Nanotubes, CNTs) 45
Κεφάλαιο 6 - Εξοπλισμός 46
6.1 Συσκευή Υπερήχων - Elmasonic S 30 (H) 46
6.2 Αναμικτήρας Κονιάματος – Mortar Mixer 46
6.3 Ηλεκτρόδια 47
6.4 Καλούπια 47
6.5 Συσκευή Συμπύκνωσης Σκυροδέματος - Jolting Apparatus 47
6.6 Συνθήκες Συντήρησης Σκυροδέματος 47
6.7 Συσκευή Κάμψης και Θλίψης– INSTRON 48
6.8 Μετρητικό-Πηγή Keithley 2400 49
6.9 Συσκευή Εφελκυσμού θλίψης Instron 1121 50
6.10 Οπτικό μηκυνσιόμετρο Fiedler Optoelektronik K-100 50
6.11 Διηλεκτρική φασματοσκοπία εναλλασσόμενου πεδίου (DRS) 51
II. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ 52
Κεφάλαιο 7 - Προετοιμασία των δοκιμίων 52
7.1 Πρώτη Σειρά Πειραμάτων – Χύτευση Σκυροδέματος με CNTs 52
7.2 Δεύτερη Σειρά Πειραμάτων – Χύτευση Σκυροδέματος με CFs 54
7.3 Τρίτη Σειρά Πειραμάτων – Χύτευση δοκιμίων με CFs και CNTs για δοκιμή κάμψης και θλίψης 55
7.4 Τέταρτη Σειρά Πειραμάτων – Χύτευση δοκιμίων με CFs και CNTs για μέτρηση ηλεκτρικών και πιεζοηλεκτρικών ιδιοτήτων. 56
Κεφάλαιο 8 - Αποτελέσματα Ηλεκτρονικού Μικροσκοπίου Σάρωσης, SEM 56
Κεφάλαιο 9 - Αποτελέσματα Μηχανικών Μετρήσεων 57
9.1 Αποτελέσματα Μηχανικών Μετρήσεων Δοκιμίων Ενισχυμένων με CNTs 57
9.2 Αποτελέσματα Μηχανικών Μετρήσεων Δοκιμίων Ενισχυμένων με CFs 59
9.3 Αποτελέσματα Μηχανικών Μετρήσεων Δοκιμίων Ενισχυμένων με CNTs 61
9.4 Αποτελέσματα Μηχανικών Μετρήσεων Δοκιμίων Ενισχυμένων με CNTs και CFs 62
Κεφάλαιο 10 - Αποτελέσματα Πιεζοηλεκτρικών και Διηλεκτρικών Μετρήσεων 64
10.1 Αποτελέσματα Πιεζοηλεκτρικών Μετρήσεων Δοκιμίων Ενισχυμένων με CNTs 64
10.2 Αποτελέσματα Πιεζοηλεκτρικών Μετρήσεων Δοκιμίων Ενισχυμένων με CNTs και CFs 74
10.3 Αποτελέσματα Διηλεκτρικών Μετρήσεων 77
Κεφάλαιο 11 - Συμπεράσματα 78
Βιβλιογραφία 80

Εισαγωγικό Κεφάλαιο: Σκυρόδεμα με ιδιότητες αυτο-ανίχνευσης

Η εξέλιξη της νανοτεχνολογίας τα τελευταία χρόνια έχει επηρεάσει και τον τομέα των δομικών υλικών όπως είναι το σκυρόδεμα. Το σκυρόδεμα, παγκοσμίως, θεωρείται το κορυφαίο υλικό στην κατασκευαστική βιομηχανία και αποτελείται από τσιμέντο, αδρανή υλικά, νερό, και χημικά πρόσθετα. Χρησιμοποιείται εκτενώς για κτίρια, συστήματα υποδομής, γεωτεχνικά έργα, βιομηχανικά εργοστάσια, οδοστρώματα, φράγματα νερού και άλλα. Όμως, τα τελευταία χρόνια έχει παρατηρηθεί πως ένα μεγάλο ποσοστό των κατασκευών από σκυρόδεμα χρήζουν επέμβασης ή επισκευής. Οι κυριότεροι λόγοι είναι περιπτώσεις βλάβης από υπερκαταπόνηση (π.χ. σεισμός), αρχικά κατασκευαστικά λάθη και ανάγκη αναβάθμισης του φέροντα οργανισμού (π.χ. κέλυφος κτηρίου) λόγω παλαιότητας. Η ανάπτυξη στην τεχνολογία των τσιμέντων τις τελευταίες δεκαετίες έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη καινοτόμων σύνθετων υλικών με βάση το τσιμέντο τα οποία έχουν βελτιωμένες ιδιότητες (A.Chaipanich, 2017). Η δυνατότητα κατασκευής δομικών υλικών τα οποία παρουσιάζουν μία ή και περισσότερες μη δομικές λειτουργίες έχει διερευνηθεί από διάφορες μελέτες και έχει αποδειχθεί πως η χρήση πολυλειτουργικών δομικών υλικών μπορεί να μειώσει το κόστος κατασκευής, να αυξήσει την ικανότητα αποκατάστασης της εκάστοτε κατασκευής και επομένως να συμβάλλει στην ανθεκτικότητα των υλικών (Guoxing Sun, 2016). Τα κονιάματα με πυρήνα το τσιμέντο και το σκυρόδεμα είναι τα πιο διαδεδομένα ως προς την χρήση τους σε δομικές κατασκευές κάνοντας την έρευνα να στραφεί προς στις λειτουργικές τους ιδιότητες με το πέρασμα του χρόνου. Η προσθήκη αγώγιμων υλικών όπως είναι οι CFs, οι ίνες χάλυβα, η σκόνη γραφίτη, ή οι CNTs στα κονιάματα με βάση το τσιμέντο μπορεί να αυξήσει σημαντικά την ηλεκτρική τους αγωγιμότητα και παράλληλα να διατηρήσει τις αυξημένες τους μηχανικές ιδιότητες. Τα τσιμεντοειδή αυτά σύνθετα υλικά που δημιουργούνται είναι ιδιαίτερα ελκυστικά για την υλοποίηση ηλεκτρικών συστημάτων γείωσης, δομών προστασίας από τους κεραυνούς, στοιχείων θέρμανσης, ή κονιάματα για ηλεκτρομαγνητική θωράκιση (Chung D. D., 2004).

Στόχος της παρούσας μελέτης είναι η παρασκευή σύνθετων υλικών τσιμεντοκονιάματος ενισχυμένων με CFs και CNTs, και τον συνδυασμό τους, η μελέτη των μηχανικών και ηλεκτρικών/ πιεζοηλεκτρικών ιδιοτήτων τους καθώς και η διερεύνηση της ικανότητας αυτό-ανίχνευσης (self-sensing) τους. Ο έλεγχος στις μηχανικές ιδιότητες των σύνθετων υλικών έγινε μέσω τον μετρήσεων αντοχής κάμψης (flexural strength) και θλίψης (compressive strength). Οι πιεζοηλεκτρικές ιδιότητες και η ικανότητα ανίχνευσης των συνθέτων υλικών ερευνήθηκαν υπό την επίδραση κυκλικού θλιπτικού φορτίου μέσω κατάλληλης οργανολογίας. Μέσω της διηλεκτρικής φασματοσκοπίας εναλλασσόμενου πεδίου, DRS (Dielectric Resonance Spectroscopy, Novocontrol Alpha Analyzer) μετρήθηκε η αγωγιμότητα συναρτήσει της συχνότητας. Επιπλέον, εκτιμήθηκε η διασπορά των CFs και CNTs στο εσωτερικό του σκυροδέματος μέσω της ηλεκτρονικής μικροσκοπίας σάρωσης (Scanning Electron Microscopy, SEM). Τέλος, επειδή τα CNTs αποτελούν μια επιλογή υψηλού κόστους ως ενισχυτικό υλικό το οποίο μειώνει την ικανότητα κατεργασίας του σκυροδέματος όταν βρίσκεται σε μεγάλες συγκεντρώσεις εντός αυτού, η παρούσα έρευνα επικεντρώνεται στο να εκμεταλλευτεί και τις ιδιότητες των CFs τα οποία έχουν πολύ χαμηλότερο κόστος και μεγαλύτερη ευκολία στην χρήση τους κατά την χύτευση του σκυροδέματος (Baoguo Han, Chapter 1 - Structures of Self-Sensing Concrete, 2014).

Ι. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Κεφάλαιο 1 – Τσιμέντο (Δομή και Ιδιότητες)

1.1 Η Επιστήμη του Τσιμέντου

Το τσιμέντο, είναι μία υδραυλική κονία, δηλαδή ένα υδραυλικό συνδετικό υλικό για την παραγωγή κονιαμάτων. Είναι λεπτά διαμερισμένο ανόργανο υλικό (σκόνη) που σε ανάμειξη με νερό σχηματίζει παχύρρευστο μείγμα, το οποίο σταδιακά στερεοποιείται μέσω αντιδράσεων και των διεργασιών ενυδάτωσης. Για την παρασκευή του τσιμέντου χρειάζεται ασβέστης (ασβεστόλιθος) και άργιλος που λαμβάνονται από τη φύση σε λατομεία. Αλέθονται σε άλευρο, ξηραίνονται, αναμειγνύονται και ψήνονται. Το προϊόν της όπτησης λέγεται κλίνκερ (εκβολάδα) και αποτελεί το βασικό συστατικό του τσιμέντου. Αλέθεται τέλος και αναμειγνύεται με γύψο. Αποθηκεύεται και σταδιακά αποστέλλεται για χρήση χύμα ή συσκευασμένο.

Το τσιμέντο ανάλογα με τη σύνθεση του, τον βαθμό άλεσης και τα πρόσθετα υλικά, κατατάσσεται σε διάφορους τύπους και κατηγορίες αντοχών. Σύμφωνα με τον ελληνικό κανονισμό τσιμέντων (ΕΝ 196-1) τα τσιμέντα χωρίζονται στους εξής τύπους:

• Τύπος Ι (Τσιμέντο Portland): Χαρακτηρίζονται τα αμιγή τσιμέντα που προέρχονται από την άλεση του κλίνκερ με προσθήκη γύψου 2-3% και filler < 3% κ.β.

• Τύπος ΙΙ (Τσιμέντο Portland με ποζολάνες): Χαρακτηρίζονται τα τσιμέντα που περιέχουν ποζολάνες φυσικές ή τεχνητές. Στην Ελλάδα χρησιμοποιείται θηραϊκή γη. Το αδιάλυτο υπόλειμμα ανέρχεται σε ποσοστό 20% κ.β

• Τύπος ΙΙΙ (Ποζολανικά τσιμέντα Portland): Περιέχουν ποζολάνη σε ποσοστό μεγαλύτερο από εκείνα του τύπου ΙΙ. Το αδιάλυτο υπόλειμμα ανέρχεται σε ποσοστό 20-40%. Παρουσιάζουν χαμηλότερη θερμότητα ενυδάτωσης, και ενδείκνυνται σε ογκώδη έργα (πχ. υπερχειλιστές ΔΕΗ, φράγματα κλπ)

• Τύπος IV (SR) (Τσιμέντο Portland ανθεκτικό στα θειικά άλατα): Δεν περιέχουν ποζολάνες αλλά το αργιλικό τριασβέστιο (C_3A) πρέπει να είναι μικρότερο του 3,5% και η περιεκτικότητα σε τριοξείδιο του θείου (SO_3) να μην υπερβαίνει το 2,5%. Χρησιμοποιείται στην παρασκευή σκυροδέματος για κατασκευές που βρίσκονται σε πολύ διαβρωτικό περιβάλλον (πχ. Μονάδες βιολογικού καθαρισμού, σωλήνες αποχέτευσης, κλπ.).

Το τσιμέντο από άποψη αντοχής χωρίζεται στις εξής κατηγορίες:

•Κατηγορία 35 (με αντοχή σε θλίψη 28ημερών από 25-45 Mpa)

•Κατηγορία 45 (με αντοχή σε θλίψη 28ημερών από 35-55 Mpa)

•Κατηγορία 55 (με αντοχή σε θλίψη 28ημερών άνω των 45 Mpa)

Οι παραγόμενοι όμως τύποι στην Ελλάδα είναι λιγότεροι από όσους θεωρητικά μπορούν να κατασκευαστούν (μέχρι 27) γιατί είτε δεν είναι όλοι οι συνδυασμοί πρακτικά εφικτοί, είτε δεν είναι απαραίτητοι στην πράξη (Σ., 2001).

1.2 Τα Συστατικά του Υδραυλικού Τσιμέντου

Ένα παράδειγμα ενός υδραυλικού τσιμέντου είναι το τσιμέντο Portland, το οποίο είναι ο πιο κοινός τύπος τσιμέντου σε χρήση για σκυρόδεμα, κονίαμα, και στόκο. Το τσιμέντο Portland συντίθεται από ενώσεις οξειδίου του ασβεστίου (άσβεστου) αναμειγμένες με οξείδια του πυριτίου, του αργιλίου και του σιδήρου. Η άσβεστος παράγεται από ασβεστούχο πρώτη ύλη και τα άλλα οξείδια από αργιλούχο υλικό, που αναμιγνύονται στις κατάλληλες αναλογίες. Πρόσθετες πρώτες ύλες όπως άμμος, οξείδιο σιδήρου και βωξίτης μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μικρότερες ποσότητες για να επιτευχθεί η επιθυμητή σύνθεση. Οι κοινότερες ασβεστούχες πρώτες ύλες είναι ο ασβεστόλιθος και η κρητίδα (κιμωλία). Μπορούν ωστόσο να χρησιμοποιηθούν και άλλα πετρώματα, όπως κοραλλιογενείς ή οστρακογενείς αποθέσεις. Πηλός, σχιστόλιθοι και λάσπη εκβολών αποτελούν τις κοινότερες αργιλούχες πρώτες ύλες. Η μάργα, συμπαγής ασβεστούχος άργιλος και η τσιμεντόπετρα περιέχουν τόσο τα ασβεστούχα όσο και τα αργιλούχα συστατικά σε αναλογίες που μερικές φορές προσεγγίζουν τις αναλογίες του τσιμέντου. Άλλη πρώτη ύλη είναι η σκωρία των υψικαμίνων, που συνίσταται κυρίως από οξείδιο του ασβεστίου, οξείδιο του πυριτίου και οξείδιο του αργιλίου και αναμιγνύεται με ασβεστούχο υλικό υψηλής περιεκτικότητας σε οξείδιο του ασβεστίου. Ο καολίνης, που περιέχει μικρή ποσότητα οξειδίου του σιδήρου, χρησιμοποιείται ως αργιλούχο συστατικό για το λευκό τσιμέντο Portland. Βιομηχανικά απόβλητα, όπως η ιπτάμενη τέφρα και το ανθρακικό ασβέστιο από τη χημική βιομηχανία, αποτελούν άλλη δυνητική πρώτη ύλη. Η χρήση τους όμως είναι μικρή σε σύγκριση προς την χρήση των φυσικών υλικών. Η περιεκτικότητα των πρώτων υλών σε οξείδιο του μαγνησίου πρέπει να είναι μικρή, γιατί το επιτρεπόμενο όριο στο τσιμέντο Πόρτλαντ ανέρχεται σε 4% έως 5%. Άλλες ακαθαρσίες των πρώτων υλών που πρέπει να τηρούνται σε αυστηρά όρια είναι οι ενώσεις φθορίου, τα φωσφορικά άλατα, τα μεταλλικά οξείδια και σουφλίδια και υπερβολικές ποσότητες αλκαλίων (Τριανταφύλλου, 2013).

Άλλη ουσιώδης πρώτη ύλη είναι ο γύψος που προστίθεται σε αναλογία περίπου 5% στις καιγόμενες εκβολάδες (clinker) του τσιμέντου κατά την άλεση, ως ρυθμιστικός παράγοντας της ταχύτητας πήξης του τσιμέντου. Το τσιμέντο Portland μπορεί επίσης να παρασκευαστεί δια συνδυασμένης μεθόδου με θειικό ασβέστιο ή ανυδρίτη αντί ανθρακικού ασβεστίου. Το ελκυόμενο στα καυσαέρια διοξείδιο του θείου μετατρέπεται σε θειικό οξύ δια των συνήθων μεθόδων. Η ποσοστιαία σύνθεση μερικών από τις τυπικές πρώτες ύλες που χρησιμοποιούνται για την παρασκευή του τσιμέντου Portland εμφανίζεται στον παρακάτω Πίνακα 1:

Πίνακας 1: Οι πρώτες ύλες του τσιμέντου Portland

Πρώτη ύλη	Άσβεστος %κ.β.	Οξείδιο πυριτίου %κ.β.	Οξείδιο αργιλίου %κ.β.	Οξείδιο σιδήρου %κ.β.	Οξείδιο μαγνησίου %κ.β.	Απώλεια φρύξεως %κ.β.
Ασβεστόλιθος	52	3	1	0.5	0.5	42
Κρητίδα	54	1	0.5	0.2	0.3	43
Τσιμεντόπετρα	43	11	3	1	2	36
Άργιλος	1	57	16	7	1	14

Σκωρία	42	34	15	1	4	0

1.3 Τσιμεντοπολτός

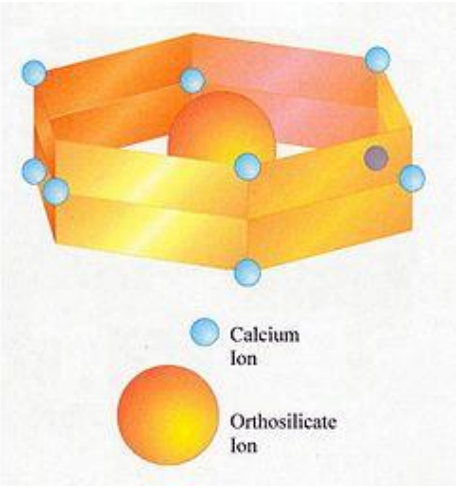
Ο τσιμεντοπολτός είναι το προϊόν της αντίδρασης του τσιμέντου με το νερό. Το τσιμέντο τύπου Portland που χρησιμοποιείται στην Ελλάδα είναι βιομηχανικό προϊόν σε μορφή γκριζοπράσινης σκόνης που αποτελείται από κόκκους διαστάσεων 1-50 μm. Παρασκευάζεται με άλεσμα σβώλων διαμέτρου λίγων εκατοστών που λέγονται κλίνκερ με μικρή ποσότητα προσμίξεων (π.χ. γύψος, μηλαϊκή γη, θηραϊκή γη, ιπτάμενη τέφρα κ.τ.λ.). Το κλίνκερ αποτελείται κυρίως από τέσσερεις βασικές σύνθετες χημικές ενώσεις (άλατα) σε ποσοστά που πρέπει να βρίσκονται στα παρακάτω όρια και με την εξής χημική σύσταση: 40-80% C_3S (πυριτικό τριασβέστιο, άσπρο), 0-30% C_2S (πυριτικό διασβέστιο, άσπρο), 7-15% C_3A (αργιλικό τριασβέστιο, άσπρο), και 4-15% C_4AF (αργιλοσιδηρικό τετρασβέστιο, σκούρο καφέ ή γκριζοπράσινο), όπου χρησιμοποιούνται οι συντομογραφίες C = CaO, S = SiO_2, A = Al_2O_3, F = Fe_2O_3. Μερικά μόλις λεπτά μετά την ανάμιξη του τσιμέντου με το νερό κάνουν την εμφάνιση τους οι βελονοειδείς κρύσταλλοι του ένυδρου θειοαργιλικού ασβεστίου (κρύσταλλοι ετρινγκίτη) και μερικές ώρες αργότερα σχηματίζονται οι μεγάλοι πρισματικοί κρύσταλλοι υδροξειδίου του ασβεστίου, ενώ οι πολύ μικροί κρύσταλλοι ινώδους μορφής των ένυδρων του πυριτικού ασβεστίου αρχίζουν να γεμίζουν τον κενό χώρο που καλυπτόταν από νερό και κόκκους τσιμέντου. Μερικές ημέρες αργότερα οι κρύσταλλοι ετρινγκίτη είναι πιθανόν να διασπαστούν σχηματίζοντας θειικά ένυδρα εξαγωνικής πλακοειδούς μορφής. Η ίδια πλακοειδής μορφή είναι χαρακτηριστική και των ένυδρων φάσεων του αργιλικού ασβεστίου, τα οποία σχηματίζονται σε τσιμεντοπολτούς που προήλθαν από την ενυδάτωση τσιμέντου αυξημένου σε περιεκτικότητα C_3A ή μειωμένου σε περιεκτικότητα θειικών (Τριανταφύλλου, 2013).

Θα πρέπει να τονιστεί πως η ενυδάτωση του τσιμέντου χαρακτηρίζεται από μεγάλο βαθμό πολυπλοκότητας καθώς οι διάφορες αντιδράσεις ενυδάτωσης γίνονται ταυτόχρονα επηρεάζοντας η μία την άλλη. Το κλίνκερ του τσιμέντου Portland αποτελείται από πέντε βασικά συστατικά τα οποία έρχονται σε επαφή με το νερό, αντιδρούν και σχηματίζουν τα προϊόντα ενυδάτωσης (Νταφαλιάς Ευστάθιος, 2009).

Πίνακας 2: Τα πέντε κύρια συστατικά του κλίνκερ του τσιμέντου Portland

Ένωση	Περιεκτικότητα % κ.β.	Χημικός Τύπος	Συντομογραφία
Πυριτικό Τριασβέστιο (alite)	50%	$3CaO \cdot SiO_2$	C_3S
Πυριτικό διασβέστιο (belite)	25%	$2CaO \cdot SiO_2$	C_2S
Αργιλικό Τριασβέστιο	10%	$3\ CaO \cdot Al_2O_3$	C_3A
Σιδηροαργιλικό τετρασβέστιο	10%	$4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$	C_4AF
Διένυδρο θειικό ασβέστιο (γύψος)	5%	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$	CSH_2

Στον Πίνακα 2 παρουσιάζονται τα πέντε κύρια συστατικά του κλίνκερ του τσιμέντου Portland. Το πυριτικό τριασβέστιο C_3S και διασβέστιο C_2S είναι υπεύθυνα για τις μηχανικές ιδιότητες και μάλιστα το πρώτο πρέπει να βρίσκεται σε όσο το δυνατόν μεγαλύτερη περιεκτικότητα.



Εικόνα 1: Η κρυσταλλική δομή του πυριτικού δυασβεστίου (belite) (Mabaha, 2019)

Με την προσθήκη νερού οι ενώσεις αυτές (C_3S, C_2S, C_3A, C_4AF, CSH_2) συμμετέχουν σε πολύπλοκες αντιδράσεις ενυδάτωσης σχηματίζοντας σειρά προϊόντων με κυριότερα τις ένυδρες ασβεστοπυριτικές ενώσεις (C-S-H) και πορτλαντίτη, $Ca(OH)_2$ που οδηγούν στην πήξη και σκλήρυνση της τσιμεντιτικής πάστας (δηλ. σχηματισμός ενυδατωμένης τσιμεντιτικής πάστας) και στην επακόλουθη ανάπτυξη αντοχών. Η ενυδατωμένη τσιμεντιτική πάστα αποτελείται από τα στοιχεία που παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.

Πίνακας 3: Συστατικά ενυδατωμένη τσιμεντιτική πάστας.

Στερεά	Κενά	Νερό
C-S-H	Εγκλωβισμένος αέρας (πόροι > 1mm)	Τριχοειδές νερό
CH	Εγκλωβισμένος αέρας (πόροι 75-500μm)	Προσροφημένο νερό
AFt (Εττριγκίτης)	Τριχοειδείς πόροι	Νερό ενσωματωμένο στη δομή του C-S-H
AFm (Μονοθειϊκό άλας)	Μικροπόροι	Φυσικά προσροφημένο νερό
Υπόλοιπο μη ενυδατωμένο τσιμέντο		

Οι κόκκοι του άνυδρου τσιμέντου αποτελούνται από διάφορες φάσεις (π.χ. C_3S, C_2S, C_3A, C_4AF). Με την προσθήκη νερού, οι θειικές φάσεις του κλίνκερ και ο γύψος (CSH_2) διαλύονται, παράγοντας ένα αλκαλικό, πλούσιο σε θειϊκά, διάλυμα. Στη συνέχεια, το αργιλικό τριασβέστιο C_3A των κόκκων αντιδρά με το διάλυμα και δημιουργεί στην επιφάνεια των κόκκων μια πλούσια σε αργιλικά γέλη (gel), που συμβολίζεται ως C-A-S-H, ενώ πυρηνοποιούνται στην επιφάνεια της γέλης και στο διάλυμα οι στερεές φάσεις τύπου AFt με την μορφή μικρού μήκους κρυσταλλικών ράβδων (~250nm μήκος – 100nm πάχος). Η

ενυδάτωση του C_3A είναι έντονα εξώθερμη και οδηγεί σε αύξηση της θερμοκρασίας του διαλύματος κατά αρκετούς βαθμούς. Η αντίδραση αυτή, όμως, διαρκεί μόνο για μερικά λεπτά καθώς η δημιουργία της γέλης C-A-S-H στην επιφάνεια των κόκκων παρεμποδίζει την πρόσβαση του διαλύματος στις αργιλικές περιοχές των κόκκων, με αποτέλεσμα οι αντιδράσεις αυτές να επιβραδύνονται. Ακολουθεί μια περίοδος 2 μέχρι 4 ωρών, γνωστή ως στάδιο ωρίμανσης, κατά το οποίο το σκυρόδεμα διατηρεί πλαστικές ιδιότητες. Κατά το στάδιο αυτό, το μίγμα έχει χαμηλή θερμοκρασία, είναι πλαστικό και παρουσιάζει χαμηλό ιξώδες (εργασιμότητα). Κατά την διάρκεια του σταδίου αυτού το σκυρόδεμα μεταφέρεται συνήθως υπό ανάδευση στο εργοτάξιο και διαστρώνεται, προτού όμως αρχίσει να πήζει σημαντικά και να σκληρύνεται.

Το κύριο προϊόν της ενυδάτωσης του τσιμέντου είναι μια σχεδόν άμορφη, ελάχιστα κρυσταλλική, ένυδρη ασβεστοπυριτική ενώση (C-S-H) σε μορφή γέλης, με λόγο Ca/Si που κυμαίνεται από 1.2 έως 2.1, με μέση τιμή περίπου 1.7 και η οποία είναι προϊόν ενυδάτωσης των φάσεων C_3S και C_2S του τσιμέντου. Η δομή του C-S-H είναι σχεδόν άμορφη, θεωρείται ότι έχει φυλλώδη δομή, σχεδόν άμορφη, αλλά δεν είναι εφικτή η ακριβής περιγραφή της καθώς δεν το C-S-H δεν παρουσιάζει μακροκρυσταλλικότητα και επομένως δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν τεχνικές περίθλασης ακτίνων X (I. G Richardson, G. W Groves, 1997).

Με την έναρξη της μέσης περιόδου (3-24 ώρες) πραγματοποιείται υδρόλυση του C_3S, απελευθερώνονται ιόντα Ca^+ και $(OH)^-$ μέχρι το διάλυμα γύρω από τους κόκκους να γίνει κορεσμένο οπότε και λαμβάνει χώρα η κρυστάλλωση των ελεύθερων ιόντων Ca^+ και $(OH)^-$ σε $Ca(OH)_2$ σχηματίζοντας μεγάλους κρυστάλλους στον χώρο που καταλάμβανε το διάλυμα. Οι θέσεις πυρηνοποίησης είναι λίγες και η ανάπτυξη των κρυστάλλων μπορεί ακόμα και να ενσωματώσει μικρούς κόκκους. Επίσης, δημιουργείται C-S-H στο εξωτερικό τμήμα του κόκκου, πάνω στο «δίκτυο» των μικρών κρυστάλλων AFt (εττρινγκίτης) οι οποίοι ίσως δρουν ως θέσεις πυρηνοποίησης. Σημαντική ποσότητα σχηματίζεται μέχρι τις 3 ώρες, ενώ μέχρι τις 4 ώρες οι κόκκοι έχουν καλυφθεί πλήρως. Το «κέλυφος» αυτό του C-S-H αναπτύσσεται προς τα έξω, και για το λόγο αυτό ονομάζεται «outer» product και συμβολίζεται με Op. Μέχρι περίπου τις 12 ώρες το κέλυφος C-S-H έχει αποκτήσει πάχος περίπου 0.5- 1.0μm, με αποτέλεσμα τα κελύφη C-S-H γειτονικών κόκκων να έρχονται σε επαφή και να συνδέονται, δημιουργώντας ένα συνεκτικό δίκτυο. Το σημείο αυτό ταυτίζεται με το μέγιστο του ρυθμού έκλυσης θερμότητας και αντιστοιχεί περίπου στο σημείο της λήξης της πήξης. Σημειώνεται ότι υπάρχει διαχωριστικός χώρος πάχους περίπου 1 μm μεταξύ του κόκκου και του ενυδατωμένου κελύφους C-S-H πληρωμένος με κολλοειδές διάλυμα. Το κέλυφος C-S-H είναι ακόμα διαπερατό από ιόντα, και η ενυδάτωση του C_3S προχωράει, αλλά ελέγχεται από το ρυθμό διάχυσης. Προς το τέλος της μέσης περιόδου, παρατηρείται νέα ανάπτυξη κρυστάλλων εττρινγκίτη, AFt. Οι κρύσταλλοι αυτοί είναι σαφώς πιο επιμήκεις σε σχέση με αυτούς που είχαν αναπτυχθεί στο προηγούμενο στάδιο και μπορούν να φθάσουν σε μήκος ακόμα και τα 10μm. Η ανάπτυξη τους σχετίζεται με το μικρό πλατό στην καμπύλη έκλυσης θερμότητας και υποδηλώνει αύξηση του ρυθμού αντίδρασης του αργιλικού τριασβεστίου C_3A και του αργιλοσιδηρικού τετρασβεστίου C_4AF. Καθώς η διαπερατότητα του κελύφους C-S-H μειώνεται, νέο C-S-H αρχίζει να εναποτίθεται στο εσωτερικό του κελύφους προς το εσωτερικό του κόκκου και για το λόγο αυτό ονομάζεται «inner» product και συμβολίζεται με Ip. Το εσωτερικό προϊόν, Ip C-S-H έχει μορφολογία που δεν παρουσιάζει κανένα χαρακτηριστικό σε επίπεδο μικροκλίμακας. Το εσωτερικό προϊόν C-S-H αναπτύσσεται καθώς το «μέτωπο» του μη-ενυδατωμένου C_3S υποχωρεί προς το εσωτερικό. Μέχρι περίπου τις 7 ημέρες το κενό ανάμεσα στο κέλυφος και τον μη-ενυδατωμένο πυρήνα του κόκκου έχει

εξαφανισθεί και η ζώνη αυτή του εσωτερικού προϊόντος, C-S-H έχει πάχος περίπου 8μm (σε μεγάλους κόκκους - οι μικρότεροι κόκκοι εξαφανίζονται πλήρως) Παράλληλα, καθώς η συγκέντρωση SO_4^{2-} πέφτει δραματικά στο εσωτερικό του κελύφους C-S-H, η ενυδάτωση των αργιλικών φάσεων C_3A και C_4AF οδηγεί πλέον στον σχηματισμό φάσης μονοθειϊκού άλατος, AFm, κυρίως μονοθειϊκού άλατος ($C_4AŠH_{12}$) που περιέχει ένα μόριο ανυδρίτη όταν γράφεται ως $C_3A{\cdot}CaSO_4{\cdot}12H_2O$. Όση ποσότητα στερεής φάσης τύπου AFt (εττρινγκίτης) έχει παραμείνει στο κέλυφος αντιδρά και αυτή με τις αργιλικές φάσεις και σχηματίζεται μονοθειϊκό άλας AFm. Μετά την πλήρωση του κενού μεταξύ του κελύφους C-S-H και υπολοίπου μη ενυδατωμένου κόκκου, η αντίδραση ενυδάτωσης των C_3S και C_2S προχωράει αλλά με αργό ρυθμό (Α. Μοροπούλου, Κ. Λαμπρόπουλος).

1.3.1. Τα Κενά του Ενυδατωμένου Τσιμεντοπολτού

- **Ενδοστρωσιακά κενά στο C-S-H.**

Όπως προαναφέρθηκε, τα κενά μεταξύ των διαφόρων στρώσεων C-S-H έχουν εξαιρετικά μικρές διαστάσεις και συνεπώς δεν επηρεάζουν την αντοχή και τη διαπερατότητα του τσιμεντοπολτού. Είναι όμως πιθανό τα κενά αυτά να δεσμεύσουν νερό μέσω δεσμών υδρογόνου, που όταν απομακρυνθεί μπορεί να συμβάλλει στη συστολή ξήρανσης και στον ερπυσμό του σκυροδέματος (Ε. Βιντζηλαίου).

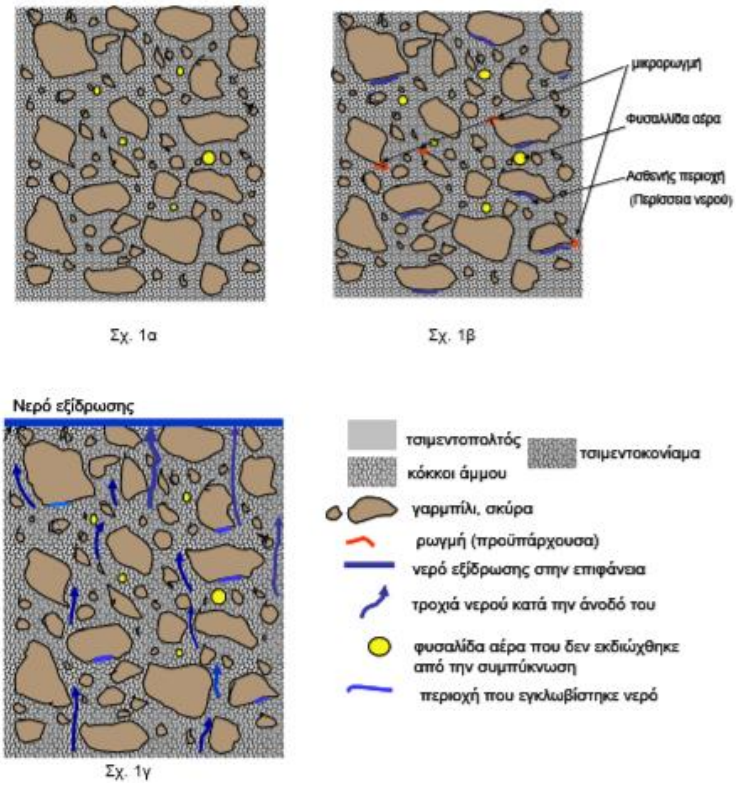
- **Τριχοειδή κενά.**

Αντιπροσωπεύουν το πορώδες, δηλαδή χώρο που δεν καταλαμβάνεται από τα στερεά συστατικά του τσιμεντοπολτού, και εξαρτώνται σε όγκο και μέγεθος από την αρχική απόσταση μεταξύ των άνυδρων κόκκων τσιμέντου (αμέσως μετά την ανάμιξη του νερού με το τσιμέντο), δηλαδή από το λόγο νερού προς τσιμέντο κατά βάρος (N/T), και από το βαθμό ενυδάτωσης. Η διάμετρος των πόρων σε τσιμεντοπολτούς που βρίσκονται σε προχωρημένα στάδια ενυδάτωσης και χαρακτηρίζονται από μικρό λόγο N/T είναι περίπου 10-50 nm. Σε τσιμεντοπολτούς που βρίσκονται σε αρχικά στάδια ενυδάτωσης και έχουν μεγάλο λόγο N/T, η διάμετρος των πόρων μπορεί να φθάσει τα 3-5 μm. Οι πόροι κατατάσσονται σε μακροπόρους (>50 nm) οι οποίοι παρουσιάζουν αντοχή και υδατοστεγανότητα και μικροπόρους (<50 nm) που επιτρέπουν την συστολή ξήρανσης και τον ερπυσμό. Τονίζεται ότι αυτό που επηρεάζει σημαντικές ιδιότητες του σκυροδέματος είναι η κατανομή των πόρων και όχι το συνολικό πορώδες: οι τριχοειδείς πόροι μεγέθους άνω των 50 nm, δηλαδή οι μακροπόροι, επιδρούν δυσμενώς στην αντοχή και στην υδατοστεγανότητα του σκυροδέματος, ενώ πόροι μεγέθους κάτω των 50 nm, οι μικροπόροι, είναι καθοριστικής σημασίας για τη συστολή ξήρανσης και τον ερπυσμό.

- **Κενά αέρα.**

Σε αντίθεση με τα τριχοειδή κενά που έχουν ακανόνιστο σχήμα, τα κενά αέρα (φυσαλίδες) είναι περίπου σφαιρικά. Τέτοια κενά είτε παγιδεύονται κατά την ανάμιξη του σκυροδέματος (αυτά έχουν διάμετρο έως 3 nm), είτε εισάγονται εσκεμμένα, όπως θα εξηγηθεί παρακάτω, για να βελτιωθεί η ανθεκτικότητα του σκυροδέματος μακροπρόθεσμα (σε αυτή την περίπτωση η διάμετρος τους είναι 50-200 μm). Τα κενά αέρα είναι κατά πολύ μεγαλύτερα από τα τριχοειδή, γι' αυτό και έχουν αρνητικές επιπτώσεις στην αντοχή και στη διαπερατότητα του τσιμεντοπολτού.

1.3.2. Τα Κυριότερα Χαρακτηριστικά του Σκυροδέματος



Εικόνα 2: Αναπαράσταση τομής σκληρυμένου σκυροδέματος: Σχήμα 1α: όψη με γυμνό οφθαλμό, Σχήμα 1β: ασθενείς περιοχές λόγω συγκέντρωσης νερού και προϋπάρχουσες μικρορωγμές σε περιοχές της διεπιφάνειας μεγάλων αδρανών τσιμεντοπολτού, Σχήμα 1γ: φαινόμενο εξίδρωσης (Κόλλιας, 2014).

Στην Εικόνα 2 παρουσιάζεται σχηματικά μια τομή σκληρυμένου σκυροδέματος. Τα αδρανή υλικά (άμμος, γαρμπίλι, χαλίκια) είναι διασκορπισμένα στη μάζα του τσιμεντοπολτού, αλλά από την οπτική παρατήρηση συμπεραίνεται ότι τα χονδρότερα αδρανή περιβάλλονται από ένα μίγμα τσιμέντου και λεπτόκοκκων αδρανών. Επίσης, είναι ορατά και μικρά κενά (κίτρινες περιοχές) που είναι οι φυσαλίδες εγκλωβισμένου αέρα στο νωπό μίγμα του σκυροδέματος, οι οποίες δεν έφυγαν με την συμπύκνωση. Το μίγμα του τσιμέντου με τα λεπτόκοκκα αδρανή (τσιμεντοκονίαμα) φαίνεται μακροσκοπικά ότι είναι ομοιογενές ενώ το σκυρόδεμα παρουσιάζεται ως ένα ανομοιόμορφο υλικό δύο φάσεων: το τσιμεντοκονίαμα (μέσο διασποράς) μέσα στο οποίο είναι διασκορπισμένα τα χονδρότερα αδρανή κατά τυχαίο τρόπο. Ο εγκλωβισμός του νερού οφείλεται στο φαινόμενο της εξίδρωσης δηλαδή στην άνοδο του νερού (που είναι το ελαφρύτερο συστατικό του σκυροδέματος) προς την επιφάνεια κατά το διάστημα που το σκυρόδεμα είναι νωπό και δεν έχει πήξει (Κόλλιας, 2014).

1.3.3 Συνθήκες Συντήρησης Σκυροδέματος

Με τον όρο συντήρηση εννοούμε τις διαδικασίες που αποσκοπούν στη διατήρηση του σκυροδέματος, αμέσως μετά την τοποθέτησή του σε καλούπια, κάτω από συνθήκες ελεγχόμενου χρόνου, υγρασίας και θερμοκρασίας που ευνοούν την ενυδάτωση.

1. Χρόνος.

Για δεδομένο λόγο Ν/Τ και υγρές συνθήκες συντήρησης υπό σταθερή υγρασία η αντοχή του σκυροδέματος αυξάνεται με το χρόνο όσο διαρκεί η ενυδάτωση. Ο Πρότυπος Κανονισμός της Ευρω-διεθνούς Επιτροπής Σκυροδέματος (Comite EuroInternational du

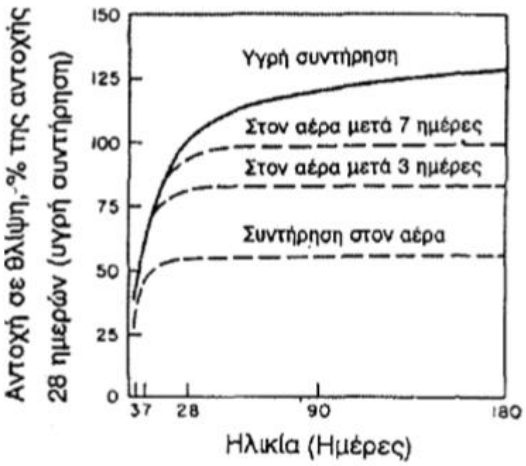
Beton, CEB) έχει δώσει την παρακάτω σχέση για την εξέλιξη της αντοχής σκυροδέματος (σε συντήρηση στους 20 °C) με το χρόνο (CEB-FIP 1990):

$$f_{cm}(t) = \beta_{cc}(t) \cdot f_{cm} = e^{-s \cdot (1-\sqrt{28\, t/t_1}\,)\, i\omega t} \cdot f_{cm} \quad (1)$$

όπου $f_{cm}(t)$ = μέση θλιπτική αντοχή σε ηλικία f ημερών, f_{cm} = μέση θλιπτική αντοχή σε ηλικία 28 ημερών, s = σταθερά που εξαρτάται από τον τύπο τσιμέντου, έτσι ώστε s = 0.20 για ταχύπηκτο τσιμέντο υψηλής αντοχής, s = 0.25 για κανονικό ή ταχύπηκτο τσιμέντο και s = 0.38 για βραδύπηκτο τσιμέντο, και t_1 = 1 ημέρα. Για παράδειγμα, η αντοχή σκυροδέματος με κανονικό ή ταχύπηκτο τσιμέντο στις 3, 7, 90 και 360 ημέρες είναι 60%, 78%, 112% και 120%, αντίστοιχα, της αντοχής 28 ημερών.

2. Υγρασία.

Απαραίτητη προϋπόθεση για την αύξηση της αντοχής του σκυροδέματος με το χρόνο είναι η συντήρηση κάτω από συνθήκες υγρασίας (π.χ. πλημμύρισμα των στοιχείων, συνεχής διαβροχή, τύλιγμα με πλαστικές μεμβράνες κ.τ.λ.). Αυτό φαίνεται στην Εικόνα 3 η οποία δίνει επίσης την επίδραση του χρόνου υγρής συντήρησης στην εξέλιξη της αντοχής.



Εικόνα 3: Επίδραση του χρόνου υγρής συντήρησης στην αντοχή του σκυροδέματος(Κόλλιας, 2014).

Έτσι, για παράδειγμα, σκυρόδεμα μετά από υγρή συντήρηση 7 ημερών, που αποτελεί και τον ελάχιστο χρόνο που συνιστάται από όλους τους σύγχρονους κανονισμού, έχει αντοχή 28 ημερών περίπου διπλάσια από το αντίστοιχο με μηδενική υγρή συντήρηση.

3. Θερμοκρασία.

Η αύξηση της θερμοκρασίας κατά τη συντήρηση του σκυροδέματος έχει γενικά ως αποτέλεσμα την αύξηση της ταχύτητας των αντιδράσεων ενυδάτωσης, με αποτέλεσμα την αύξηση του ρυθμού ανάπτυξης της αντοχής του. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι η αντοχή 28 ημερών σκυροδέματος που διαστρώνεται και συντηρείται στους 5 °C είναι περίπου ίση με το 80% της αντίστοιχης αντοχής σκυροδέματος για διάστρωση και συντήρηση στους 20-40 °C. Διάστρωση ονομάζεται η διαδικασία μέσω της οποίας το σκυρόδεμα παίρνει το σχήμα του τύπου, περιβάλλοντας τους οπλισμούς και αποβάλλοντας τον αέρα που έχει εγκλωβισθεί στη μάζα του κατά την ανάμιξη (Ζέρης, 2014). Η διαφορά αυτή βέβαια δεν υφίσταται για την

αντοχή σε μεγαλύτερες ηλικίες, οπότε έχει σχεδόν ολοκληρωθεί η ενυδάτωση. Αντίθετα μάλιστα, πολλοί ερευνητές έχουν δείξει ότι η τελική αντοχή αυξάνεται με τη μείωση της θερμοκρασίας διάστρωσης και συντήρησης. Για παράδειγμα, δοκίμια που παρασκευάστηκαν στους 5°C και 20°C, συντηρήθηκαν στις θερμοκρασίες αυτές για 2-3 ώρες και κατόπιν συντηρήθηκαν σε υγρασία και θερμοκρασία 20 °C μέχρις ελέγχου της αντοχής τους, έδωσαν μεγαλύτερες τελικές αντοχές κατά 20% και 15%, αντίστοιχα, από την αντοχή δοκιμίων που παρασκευάστηκαν στους 40 °C, συντηρήθηκαν στη θερμοκρασία αυτή για 2-3 ώρες και μετά ακολούθησαν τη διαδικασία συντήρησης των προηγούμενων δοκιμίων. Η αύξηση αυτή οφείλεται στο ότι οι χαμηλότερες θερμοκρασίες συντήρησης επιφέρουν αύξηση της ομοιομορφίας της δομής (και ιδιαίτερα του πορώδους) του ενυδατωμένου τσιμεντοπολτού. Δοκίμια που παρασκευάστηκαν στους 20°C και κατόπιν συντηρήθηκαν σε θερμοκρασίες -10°C, 5°C και 12°C για 28 ημέρες, έδωσαν αντοχές (28 ημερών) περίπου 5%, 50% και 60%, αντίστοιχα, της αντοχής δοκιμίων που συντηρήθηκαν στους 20 °C. Είναι λοιπόν προφανές ότι μείωση της θερμοκρασίας συντήρησης επιφέρει μείωση της αντοχής, ενώ για ιδιαίτερα χαμηλές θερμοκρασίες οι ρυθμοί ενυδάτωσης είναι σχεδόν μηδενικοί. (Τριανταφύλλου, 2013)

4. Συντήρηση

Σκοπός της συντήρησης είναι η προστασία του σκυροδέματος κατά τα αρχικά στάδια της ενυδάτωσης κυρίως από πρόωρη ξήρανση (π.χ. λόγω ηλιακής ακτινοβολίας, ανέμου), αλλά και από άλλες επιρροές όπως ο παγετός, η απόπλυση λόγω βροχής ή τρεχούμενου νερού, και τυχόν βλαβερές χημικές ουσίες. Έτσι η συντήρηση αποσκοπεί βασικά στο να εξασφαλίσει στο σκυρόδεμα το νερό που απαιτείται για την ενυδάτωση, είτε με αναπλήρωση του νερού που εξατμίζεται, είτε με παρεμπόδιση της εξάτμισης. Αυτό επιτυγχάνεται όπως περιγράφεται παρακάτω:

(α) Με λινάτσες, (πλεκτό ύφασμα από χοντρό λινάρι), που αμέσως μετά το τέλος της διάστρωσης καλύπτουν τις ελεύθερες επιφάνειες του σκυροδέματος και διατηρούνται υγρές για 7 τουλάχιστον ημέρες. Αυτό μπορεί να γίνει με πλαστικούς σωλήνες μικρής διαμέτρου που απλώνονται πάνω στις λινάτσες και τις διαβρέχουν με νερό που ρέει από μικρές τρύπες στο πλάι τους. Αν οι λινάτσες αφαιρεθούν πριν από 14 ημέρες μετά τη διάστρωση, για το διάστημα από 7-14 ημέρες το σκυρόδεμα θα πρέπει να διαβρέχεται μέχρι κορεσμού της επιφάνειας δύο φορές την ημέρα, για δε το διάστημα από 14-28 ημέρες μία φορά την ημέρα. Τα παραπάνω ισχύουν και για τις κατακόρυφες επιφάνειες, αφού αφαιρεθούν τα καλούπια. Η μέθοδος είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική, ιδίως το καλοκαίρι, γιατί αφενός διατηρεί το σκυρόδεμα υγρό, αφετέρου το προφυλάσσει από τον ήλιο.

(β) Με πλημμύρισμα οριζόντιων ελεύθερων επιφανειών (π.χ. πλάκες πατωμάτων, δάπεδα, οδοστρώματα κ.τ.λ.) με νερό βάθους 10-20 mm, που συγκρατείται με δρομικό μονότουβλο ή με μικρό ανάχωμα από άμμο, χώμα κ.τ.λ. στο όριο της επιφάνειας,

(γ) Με βύθισμα προκατασκευασμένων στοιχείων σε δεξαμενές νερού,

(δ) Με ψεκασμό της ελεύθερης επιφάνειας του σκυροδέματος με περιστροφικούς ψεκαστήρες συνεχούς λειτουργίας (όπως αυτοί που χρησιμοποιούνται για πότισμα),

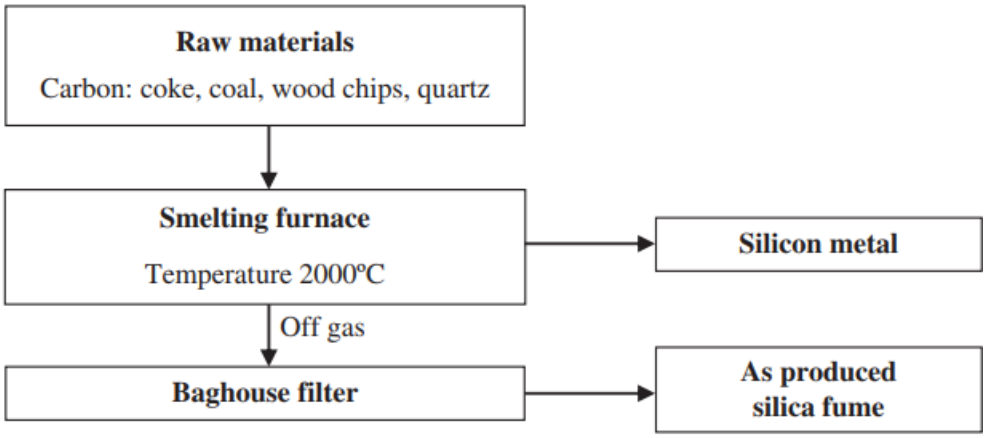
(ε) Με επικάλυψη της ελεύθερης επιφάνειας με πλαστικές μεμβράνες ώστε να παρεμποδίζεται η εξάτμιση του νερού,

(στ) Με επάλειψη των ελεύθερων επιφανειών με υγρό που σχηματίζει λεπτή και μη διαπερατή από το νερό μεμβράνη, παρεμποδίζοντας την εξάτμιση και προστατεύοντας συγχρόνως το σκυρόδεμα από τον ήλιο. Σημειώνεται ότι για το νερό συντήρησης ισχύουν οι ίδιες απαιτήσεις με το νερό ανάμιξης (Πρότυπο ΕΛΟΤ345) (Μιχαήλ Ν.Φαρδής, 1996).

Κεφάλαιο 2 - Πρόσθετα Σκυροδέματος και Ενισχυτικά Υλικά

2.1 Πυριτική Παιπάλη – Silica Fume

Το σκυρόδεμα είναι το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο υλικό στον κόσμο και λόγω των τεράστιων ποσοτήτων που επεξεργάζονται ετησίως, αποτελεί ένα υλικό το οποίο έχει ένα μεγάλο αποτύπωμα άνθρακα στο περιβάλλον. Το βασικό συστατικό του σκυροδέματος είναι το τσιμέντο. Η παραγωγή του τσιμέντου συμβάλλει με ποσοστό 5% στην ετήσια ανθρωπογενή παγκόσμια παραγωγή διοξειδίου του άνθρακα (CO_2). Τα τελευταία χρόνια για την αντιμετώπιση των προβλημάτων που σχετίζονται με το περιβάλλον και με σκοπό την αύξηση της περιβαλλοντικής συνείδησης σε παγκόσμιο επίπεδο η έρευνα και η παραγωγή έχει στραφεί στην χρήση και μετέπειτα επεξεργασία των βιομηχανικών παραπροϊόντων. Τα νέα πρόσθετα που χρησιμοποιούνται στο σκυρόδεμα το καθιστούν ανθεκτικότερο στην προσβολή από χημικές ουσίες και βελτιστοποιούν τις μηχανικές του ιδιότητες. Ένα από αυτά τα πρόσθετα που παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον είναι η πυριτική παιπάλη (silica fume). Η πυριτική παιπάλη είναι ένα παραπροϊόν από την διαδικασία της τήξης του μεταλλικού πυριτίου και κραμάτων σιδηροπυριτίου που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή χάλυβα και αλουμινίου. Σε ειδικά σχεδιασμένα καμίνια οι πρώτες ύλες όπως ο χαλαζίας και ο άνθρακας τήκονται σε υψηλές θερμοκρασίες με αποτέλεσμα την δημιουργία μια λεπτής σκόνης που έχει την μορφή καπνού γνωστή και ως πυριτική παιπάλη (Silica Fume Association, 2005). Η μέθοδος παραγωγής της πυριτικής παιπάλης παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.



Εικόνα 4 : Μέθοδος παραγωγής πυριτικής παιπάλης (Khan, 2011)

Οι φυσικές ιδιότητες της πυριτικής παιπάλης παρουσιάζονται στον Πίνακα 4. Περισσότερο από το 95% των σωματιδίων έχουν μέγεθος μικρότερο από 1 μm. Τα σωματίδια της είναι σφαιρικού σχήματος. Η πυκνότητα της πυριτικής παιπάλης που παράγεται ως έχει

είναι πολύ χαμηλή, γεγονός που την καθιστά ασύμφορη ως προς την μεταφορά της. Το ειδικό βάρος της είναι χαμηλότερο από αυτό του τσιμέντου Portland με αποτέλεσμα να είναι πολύ πιο ελαφριά από αυτό. Επίσης, λόγω πολύ λεπτών σωματιδίων, το εμβαδόν επιφάνειας της είναι πολύ μεγάλο. Η σκόνη της πυριτικής παιπάλης είναι εμπορικά διαθέσιμη σε λευκό και γκρι χρώμα.

Πίνακας 4: Φυσικές Ιδιότητες Πυριτικής Παιπάλης

Μέγεθος σωματιδίου	Πυκνότητα (kg/m^3)			Ειδικό βάρος	Ειδική επιφάνεια (m^2/kg)
<1 μm	Όπως παράγεται	Συμπυκνωμένη	Σε μορφή λάσπης	2.2	15000 - 30000
	130 - 430	480 - 720	1320-1440		

Η πυριτική παιπάλη έχει πολυάριθμες ειδικές εφαρμογές στον τομέα των κατασκευών (MDA Thomas, 1998). Το σκυρόδεμα υψηλής αντοχής (High strength concrete - HSC) παράγεται χρησιμοποιώντας πυριτική παιπάλη και αναπτύχθηκε για ειδικού τύπου κατασκευές, όπου απαιτείται πολύ μεγάλη αντοχή. Επίσης, η πυριτική παιπάλη είναι ένα πρόσθετο του τσιμέντου που μπορεί να βελτιώσει την δομή των πόρων του αυξάνοντας παράλληλα την αντοχή του στην θλίψη (Pu-Woei Chen, 1993) και μειώνοντας την συρρίκνωση του κατά την διάρκεια της ξήρανσης (Haque, 1996). Επιπλέον, λόγω της μεγάλης περιοχής σύνδεσης κόκκων τσιμέντων και σφαιριδίων παιπάλης έχει ως αποτέλεσμα την απόσβεση των κραδασμών η οποία δημιουργείται κατά την διάρκεια της δόνησης (J.G.Cabrera, 1990). Ακόμη, έρευνες έχουν αποδείξει ότι η προσθήκη της πυριτικής παιπάλης στο μίγμα του τσιμεντοπολτού είναι απαραίτητη σε συνθήκες ξήρανσης σε κλίβανο (autoclave oven) καθότι αποφεύγεται το φαινόμενο της αύξησης των πόρων και της μείωσης των τιμών της θλιπτικής αντοχής (Mehran Khan, 2019) (A.Chaipanich, 2017). Εν ολίγοις, η πυριτική παιπάλη συνεισφέρει στο σκυρόδεμα με δύο κύριους τρόπους:

1. Ενίσχυση των ρεολογικών χαρακτηριστικών του τσιμέντου μέσω των μορφολογικών χαρακτηριστικών των κόκκων της.

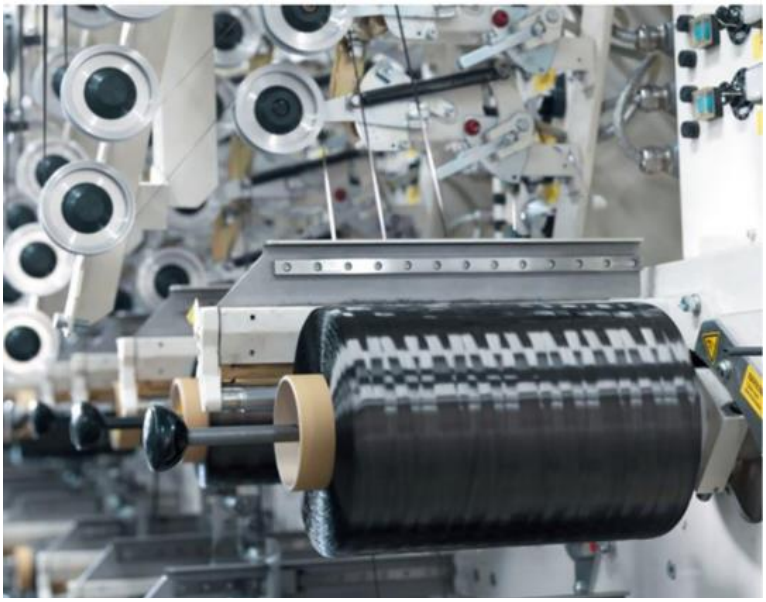
2. Παραγωγή δευτερογενών αντιδράσεων ενυδάτωσης από την ποζολανική αντίδραση του ασβέστη που προκύπτει από την πρωτογενή ενυδάτωση του τσιμέντου.

Η παραγωγή τσιμέντου είναι μια ενεργειακά εντατική διαδικασία, η οποία χρησιμοποιεί τους φυσικούς πόρους ως πρώτες ύλες. Μια ανάλυση κόστους-οφέλους για τη χρήση των παραπροϊόντων ως πρόσθετα στο σκυρόδεμα είναι πολύ σημαντική για την αξιολόγηση των οικονομικών και ωφέλιμων πτυχών τους. Αυτή η ανάλυση περιλαμβάνει παραμέτρους όπως η κατανάλωση ενέργειας, οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα και η εξοικονόμηση κόστους. Συγκεκριμένα, το 2016 διεξήχθη ειδική μελέτη για το οφέλη της πυριτικής παιπάλης όταν αυτή εισάγεται στο σκυρόδεμα και αναφέρθηκε ότι μπορούν να γίνουν σημαντικές εξοικονομήσεις χρημάτων με μερική αντικατάσταση τσιμέντου με πυριτική παιπάλη σε μεγάλα έργα. Στην σύγκριση της τιμής ενός κυβικού μέτρου τυπικού σκυροδέματος με βάση το τσιμέντο και ενός κυβικού μέτρου σκυροδέματος με 90% τσιμέντο και 10% πυριτική παιπάλη απεδείχθη ότι η εξοικονόμηση 3% - 3.5% είναι δυνατή στο σκυρόδεμα με την πυριτική παιπάλη (Ankit Kuma, 2016) (Khan, 2018).

2.2 CFs – Carbon Fibers

2.2.1 Εισαγωγή

Οι CFs παρασκευάστηκαν αρχικά από τον T. Edison το 1879 μέσω της πυρόλυσης των κυτταρινικών ινών. Οι ίνες αυτές διέθεταν πολύ μικρή αντοχή αλλά χρησιμοποιήθηκαν σαν νήματα πυρακτώσεως σε ηλεκτρικούς λαμπτήρες. Οι πρώτες εύκαμπτες CFs παρασκευάστηκαν το 1959 και είχαν πάλι βάση την κυτταρίνη ενώ το 1961 ο A. Shindo παρασκεύασε ίνες με μήτρα πολυακρυνολονιτριλίου (PAN), προχωρώντας την έρευνα μερικά βήματα παραπάνω. Παλαιότερα, χρησιμοποιούνταν οι ίνες γυαλιού οι οποίες είχαν υψηλή μηχανική αντοχή, αλλά οι αυξανόμενες ανάγκες στην διαστημική και στην αεροναυπηγική από το 1960 και έπειτα οδήγησε στην ανάγκη για εύρεση άλλων λύσεων, με αποτέλεσμα την δημιουργία των CFs. Η επιφάνεια των CFs παρουσιάζει δομή τύπου γραφίτη. Οι CFs παράγονται με θερμική μετατροπή πολυμερικών προδρόμων ινών που περιέχουν άνθρακα όπως PAN, πίσσα ή κυτταρίνη. Η θερμική μετατροπή είναι μια σχετικά έντονη διαδικασία. Επί του παρόντος, οι ίνες με βάση το PAN διαδραματίζουν σημαντικό εμπορικό ρόλο. Για την παραγωγή PAN, χρησιμοποιούνται μόνο ορυκτοί πόροι, αλλά υπόκεινται σε έρευνα και οι βιώσιμες πηγές βιομάζας ακρυλονιτριλίου. Επίσης, έντονη ερευνητική δραστηριότητα γίνεται τα τελευταία χρόνια για να βρεθούν υλικά αντικατάστασης του PAN που κατασκευάζονται από ανανεώσιμες πηγές, όπως η λιγνίνη (Peebles, 1995). Το μεγαλύτερο ποσοστό των CFs που παράγονται έχουν ως βάση το PAN. Ενώ, με το πέρασμα των χρόνων αναπτύχθηκαν και CFs με βάση την πίσσα. Όμως, οι CFs με βάση το PAN έχουν υψηλότερες μηχανικές ιδιότητες και χαμηλότερο κόστος, ειδικότερα σε σχέση με αυτές που παρασκευάζονται από μεσοφασική πίσσα (Ι.Σημιτζής, 2002) (Chung D. , 2012).



Εικόνα 5: Παραγωγή CFs (Peebles, 1995)

Ο συνδυασμός των μοναδικών και χρήσιμων χαρακτηριστικών των CFs όπως δυναμικές, θερμικές, ηλεκτρομαγνητικές, ηλεκτρικές και χημικές ιδιότητες τις καθιστά ιδανική επιλογή για μια ποικιλία εφαρμογών υψηλής απόδοσης. Σε μοριακό επίπεδο, οι CFs έχουν κρυσταλλική δομή τύπου γραφίτη. Ο δεσμός άνθρακα-άνθρακα είναι ο ισχυρότερος στη φύση και έχει ως αποτέλεσμα την εξαιρετικά υψηλή αντοχή και μεγάλο μέτρο ελαστικότητας. Μεταξύ των στρώσεων του βασικού επιπέδου υπάρχει μόνο ο δεσμός Van

der Waals, ο οποίος είναι πολύ ασθενέστερος με αποτέλεσμα μια πολύ χαμηλότερη αντοχή και μέτρο ελαστικότητας κατά μήκος αυτού του άξονα και κατ' επέκταση η πολύ υψηλή αντοχή και το μέτρο ελαστικότητας να μην μπορεί να επιτευχθεί ταυτόχρονα. Η τυπική αντοχή εφελκυσμού των σύγχρονων ινών υψηλής απόδοσης κυμαίνεται μεταξύ 3000 MPa και 6000 MPa. Το μέτρο ελαστικότητας αυτών των ινών βρίσκεται στην περιοχή των 250-500 GPa (Erich Fitzer, 2008). Οι κύριες ιδιότητες των ινών παρουσιάζονται στον παρακάτω Πίνακα 5.

Πίνακας 5: Σημαντικές ιδιότητες των κοινών τύπων CFs.

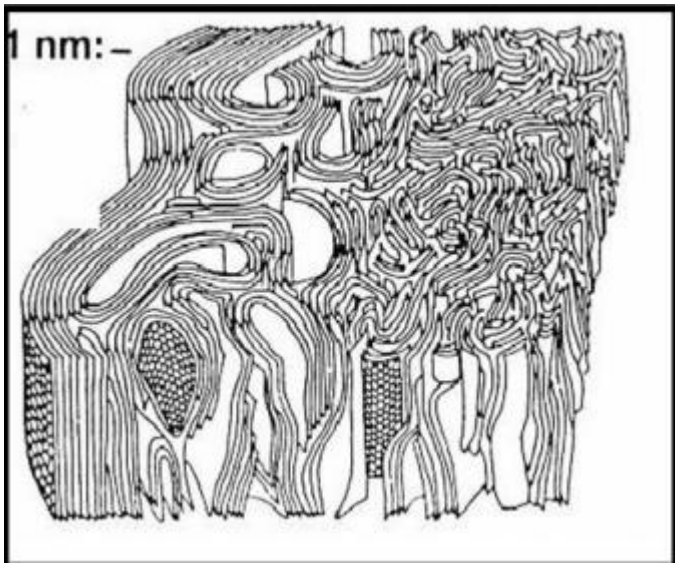
Κατηγορία	Αντοχή εφελκυσμού (GPa)	Μέτρο (GPa)
Υψηλής αντοχής	3 - 5	200-250
Μέσου Μέτρου Ελαστικότητας	4 - 5	250-350
Υψηλού Μέτρου Ελαστικότητας	2 - 4.5	350-450
Υπερύψηλου Μέτρου Ελαστικότητας	3	>700

Το τυπικό εύρος στην πυκνότητα των ινών βρίσκεται μεταξύ 1.7-2.0 g/cm^3. Η χαμηλή πυκνότητα σε συνδυασμό με τις ισχυρές μηχανικές ιδιότητες σε σύνθετα υλικά τις καθιστούν ιδανική αντικατάσταση των μετάλλων. Επιπρόσθετα, οι θερμικές ιδιότητες των CFs τις καθιστούν ελκυστικές για ορισμένες εφαρμογές όπου απαιτείται έκθεση σε ένα ευρύ φάσμα θερμοκρασιών. Όσον αφορά τις ηλεκτρομαγνητικές και ηλεκτρικές ιδιότητες οι CFs έχουν χαμηλή απορρόφηση ακτινών X, είναι μη μαγνητικές και έχουν υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα (Jens Pusch, Bernd Wohlmann, 2018).

2.2.2 Ίνες Πολυακρυλονιτριλίου

Οι ίνες πολυακρυλονιτριλίου (PAN) θεωρούνται το πιο κατάλληλο υλικό για την παραγωγή των CFs από πλευράς συνολικού περιεχομένου άνθρακα (67%), υψηλότερης απόδοσης σε άνθρακα (~54% περισσότερο από το 80% με βάση τον περιεχόμενο άνθρακα), κατεργασίας, δομής, ιδιοτήτων και κόστους. Το PAN παρουσιάζει μεγάλες αντοχές σε δοκιμές θλίψης, σχετική ακαμψία και χαμηλό κόστος. Το PAN παράγεται από το ακρυλονιτρίλιο το οποίο χρησιμοποιείται ως πρώτη ύλη για την παραγωγή ακρυλικών ινών, ρητινών, συνθετικών ελαστικών και ακρυλοαμιδίων. Το 1950 έγινε η πρώτη αναφορά των ινών PAN ως αντιπυρικές ίνες όταν αυτές υπόκεινται σε θερμική κατεργασία στους 200 ^{0}C σε αδρανή ατμόσφαιρα ή αέρα. Επίσης, το 1959 ο Shindo στην Ιαπωνία έκανε την πρώτη διεξοδική μελέτη για την ανθρακοποίηση και την γραφιτοποίηση του PAN και μέσω αυτής φανερώθηκε η αξία της οξειδωτικής θερμικής επεξεργασίας πριν την ανθρακοποίηση (Bradley A.Newcomb, 2018). Το 1965 η ομάδα των Watt, Johnson, στο Royal Aircraft Establisment (RAE) στην Βρετανία απέδειξε ότι για την παραγωγή CFs μεγάλης αντοχής και υψηλού μέτρου ελαστικότητας είναι απαραίτητος ο τανυσμός των ακρυλικών ινών κατά την σταθεροποίηση. Η θερμική σταθεροποίηση των πρόδρομων ινών πολυακρυλονιτριλίου πραγματοποιείται σε θερμοκρασία 200-300°C. Η διαδικασία προκαλεί την διάσπαση πολλών από τους υφιστάμενους δεσμούς υδρογόνου, οξειδώνει το υλικό και θέτει τις βάσεις για τη δημιουργία της εξαγωνικής δομής (Σιμιτζής, 1978). Επιπλέον, η ίδια ομάδα ονόμασε τις CFs που επεξεργάζονται στους 2500 ^{0}C, τύπου I και αυτές που επεξεργάζονται στους 1000-1500 ^{0}C και έχουν μεγαλύτερη αντοχή σε εφελκυσμό ονομάστηκαν τύπου II (L.M., 2001) (Jean-Baptiste Donnet, 1998) .

Οι CFs από PAN διαθέτουν μακροσκοπικά ινώδη δομή, παρόμοια με αυτή της πρόδρομης ίνας, αλλά αποτελούμενη από στρώματα άνθρακα ενώ από την κρυσταλλική δομή των CFs απουσιάζει η τρισδιάστατη τάξη όπως φαίνεται στην Εικόνα 6. Οι ατέλειες του πλέγματος στην γραφιτική δομή ευθύνονται για την αύξηση σε κάμψη των CFs σε σχέση με τον κρυσταλλικό γραφίτη (P. Rajalingam, 2006). Οι μηχανικές ιδιότητες των CFs μεταβάλλονται ανάλογα με την τελική θερμοκρασία ανθρακοποίησης και το είδος της πρώτης ύλης. Οι ίνες PAN παρουσιάζουν αντοχή σε εφελκυσμό μέχρι μια θερμοκρασία επεξεργασίας, σχεδόν δηλαδή τους 1500 ^{0}C. Ακόμη, το μέτρο ελαστικότητας στις συγκεκριμένες ίνες στους 600 ^{0}C παρουσιάζει ένα σημείο καμπής, πριν από αυτήν την θερμοκρασία η αύξηση του μέτρου ελαστικότητας είναι σταδιακή ενώ μετά από αυτή η αύξηση είναι ραγδαία (J. Liu, 1994).



Εικόνα 6: Μοντέλο δομής CFs με βάση το PAN κατά Johnson. (L.M., 2001)

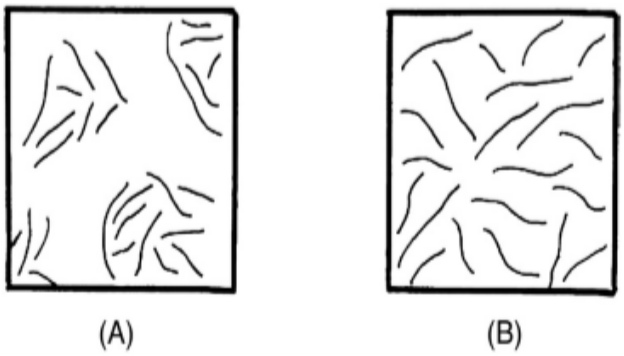
2.2.3 CFs ως Ενισχυτικό Υλικό

Η ελαφρότητα και η ευκαμψία των CFs τις καθιστά κατάλληλες για δημιουργία ηλεκτρικά αγώγιμων τσιμεντοκονιαμάτων. Καθώς η οξείδωση του άνθρακα καταλύεται από ένα αλκαλικό περιβάλλον δεν προτιμάται μια αλκαλική μήτρα. Παρ 'όλα αυτά, οι CFs χρησιμοποιούνται στο σκυρόδεμα το οποίο είναι αλκαλικό γιατί οι ίνες από διαφορετικά υλικά όπως το γυαλί (ακόμη και οι ίνες γυαλιού με αντίσταση στο αλκαλικό περιβάλλον) ή τα οργανικά πολυμερή είναι πιο ασταθή μέσα στο σκυρόδεμα (Bradley A.Newcomb, 2018). Η προσθήκη CFs στο μίγμα βελτιώνει τόσο την αντοχή σε θλίψη όσο και την κάμψη του σκυροδέματος. Η πιο διαδομένες ίνες στην ενίσχυση του τσιμέντου είναι οι ίνες χάλυβα οι οποίες βελτιώνουν την αντοχή του τσιμέντου. Όμως, με το πέρασμα του χρόνου το σκυρόδεμα με ίνες χάλυβα είναι εκτεθειμένο στην διάβρωση του χάλυβα και η υψηλή τους πυκνότητα δημιουργεί ένα υλικό με αυξημένο ειδικό βάρος. Το πλεονέκτημα της αντοχής των ινών χάλυβα προσπάθησαν να επιλύσουν άλλες συνθετικές ίνες αλλά το ειδικό βάρος και το μέτρο ελαστικότητας των περισσότερων από αυτές τις ίνες βρίσκεται στην περιοχή 7 kN/mm^2, ενώ οι τιμές για τις CFs κυμαίνονται μεταξύ 21 και 40 kN/mm^2 . Συνεπώς, η προσθήκη CFs στο μείγμα οδηγεί σε αύξηση του μέτρου ελαστικότητας του σκυροδέματος και εξαλείφει τις κύριες αδυναμίες του προϊόντος, δηλαδή το βάρος και την ανθεκτικότητα (Pu-Woei Chen, 1993).Επιπρόσθετα, η προσθήκη CFs σε μίγματα σκυροδέματος δεν

επηρεάζει μόνο στις μηχανικές ιδιότητες αλλά και την ηλεκτρική συμπεριφορά του σκυροδέματος, καθιστώντας το ένα ηλεκτρικά αγώγιμο υλικό λόγω της καλής αγωγιμότητας των CFs (Pu-Woei Chen D. C., 1996).

Η επιφάνεια των CFs είναι υδρόφοβη και το βάρος τους είναι λιγότερο από το ήμισυ του ειδικού βάρους του κόκκου του τσιμέντου. Η διάμετρος των CFs είναι πολύ μικρότερη από το σωματίδιο του τσιμέντου (Jie Gao, 2017) (Jie Gao A. S., 2018). Κατά συνέπεια, είναι δύσκολο για τις ίνες άνθρακα να διασκορπιστούν ομοιόμορφα στην πάστα τσιμέντου. Η ομοιογενής διασπορά των CFs στη μήτρα τσιμέντου είναι ένας παράγοντας που λειτουργεί υπέρ της χαμηλότερης αντίστασης, της υψηλότερης αντοχής σε κάμψη και της ανθεκτικότητας των παραγόμενων κονιαμάτων. Επιπλέον, σύμφωνα με την βιβλιογραφία ένας κοινός αναμικτήρας σκυροδέματος βλάπτει τις CFs και μειώνει δραστικά την αντοχή τους (Zeyu Lu, 2018).

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 7, η κατάσταση της κακής διασποράς (Εικόνα A) συνδέεται με σχετικά υψηλή ηλεκτρική αντίσταση, λόγω των διακεκριμένων περιοχών χωρίς ίνες. Για το ίδιο κλάσμα όγκου ινών, η κατάσταση της καλής διασποράς (Εικόνα B) συνδέεται με σχετικά χαμηλή ειδική αντίσταση, παρόλο που οι ίνες δεν έρχονται σε επαφή μεταξύ τους. Στην πραγματικότητα, η μέτρηση της ηλεκτρικής αντίστασης είναι ένας αποτελεσματικός τρόπος για τον ποσοτικό προσδιορισμό του βαθμού διασποράς των ινών κάτω από το κατώφλι αγωγιμότητας. Πάνω από το κατώφλι αγωγιμότητας, οι ίνες αγγίζουν η μία την άλλη και οι δομές που απεικονίζονται στις παρακάτω εικόνες παύουν να ισχύουν (D.L.Chung, 2017).



Εικόνα 7: Διασπορά CFs σε τσιμέντο κάτω από το κατώφλι αγωγιμότητας. (A) Κακή διασπορά. (B) Καλή διασπορά. Το κλάσμα όγκου ινών είναι το ίδιο στις (A) και (B) (D.L.Chung, 2017).

Η προσθήκη CFs σε ποσότητα που υπερβαίνει το 0.5% bwoc στο μίγμα του τσιμέντου τείνει να μειώσει τη θλιπτική αντοχή του. Ωστόσο, αυτό το αποτέλεσμα μειώνεται όταν το μήκος της ίνας είναι μικρότερο (π.χ. 6 mm αντί για 12 mm), δηλαδή όταν πρόκειται για τεμαχισμένες ίνες άνθρακα. Για μήκος ινών 3 mm, αυτό το φαινόμενο μπορεί να απουσιάζει. Επιπλέον, η καθίζηση που σχετίζεται με την εργασιμότητα (ιδιότητα του νωπού σκυροδέματος που χαρακτηρίζει την ευκολία με την οποία αυτό μεταφέρεται, διαστρώνεται και συμπυκνώνεται) του σκυροδέματος μειώνεται με την αύξηση της περιεκτικότητας σε ίνες (F.J.Baeza, 2013). Για τους λόγους αυτούς, συνιστάται η χρήση χαμηλής περιεκτικότητας σε CFs στο μίγμα του τσιμέντου. Στην παρούσα εργασία η διασπορά των CFs έγινε με την

βοήθεια του πλαστικοποιητή Sika® ViscoCrete®-3082. Το Sika® ViscoCrete®-3082 είναι ένας παράγων επιβράδυνσης/ ροής τελευταίας γενιάς για σκυρόδεμα υψηλής απόδοσης. Δεν περιέχει χλωριόντα ούτε άλλες χημικές ουσίες που μπορούν να προσβάλλουν το σκυρόδεμα αν σε αυτό εισαχθεί οπλισμός χάλυβα.

2.3 Νανοσωλήνες Άνθρακα – Carbon Nanotubes (CNTs)

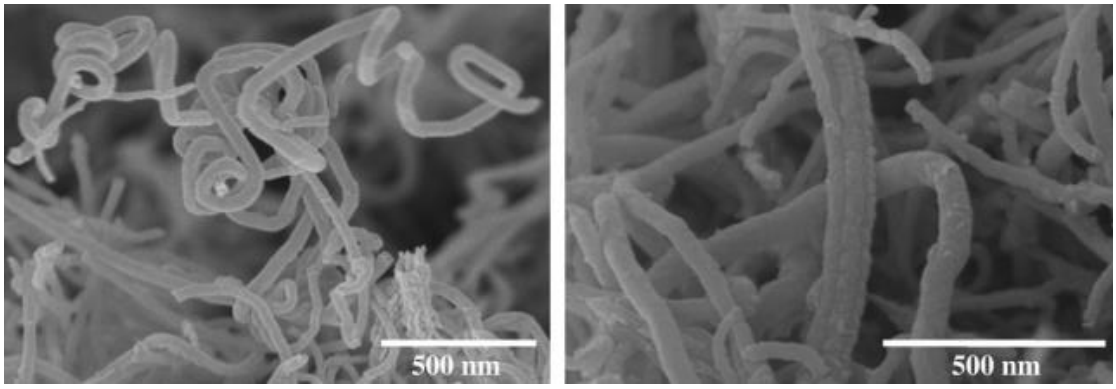
2.3.1 Εισαγωγή

Οι CNTs έχουν δύο κύρια γεωμετρικά χαρακτηριστικά: μέγεθος στην νανοκλίμακα και μια υψηλή ειδική επιφάνεια. Τα CNTs είναι υλικά άνθρακα με κοίλη κυλινδρική γεωμετρία με διάμετρο λίγων nm και μήκους αρκετών μm. Κατηγοριοποιούνται ως CNTs μονού τοιχώματος (SWCNTs) και πολλαπλών τοιχωμάτων (MWCNTs). Τα τελευταία χρόνια, τα CNTs έχουν εφαρμοστεί ευρέως σε ποικίλες εφαρμογές λόγω των εξαιρετικών φυσικών ιδιοτήτων τους. Συγκεκριμένα, διαθέτουν, υψηλή αντοχή και μέτρο ελαστικότητας του Young, 10 φορές μεγαλύτερη ικανότητα πρόσφυσης μέσα σε άλλο υλικό σε σχέση με τις CFs και 18% υψηλότερη ολκιμότητα σε σχέση με τις CFs. Επίσης, διαθέτουν μεγάλη αναλογία διαστάσεων (aspect ratio) (> 500) και εξαιρετική ηλεκτρική αγωγιμότητα. Ο εξαιρετικά υψηλός λόγος διαστάσεων, η κοίλη γεωμετρία και η χαμηλή πυκνότητα των CNTs τα καθιστούν ιδανικά για να σχηματίσουν ένα μηχανικό και αγώγιμο δίκτυο ενίσχυσης μέσα σε μια μήτρα σκυροδέματος (Han, 2016).

2.3.2 CNTs ως Ενισχυτικό Υλικό

Τα τροποποιημένα υλικά νανοκλίμακας διαθέτουν βελτιωμένες μηχανικές, ηλεκτρικές και θερμικές ιδιότητες σε σύγκριση με εκείνες που ισχύουν στην μικροκλίμακα. Αυτό οφείλεται στο σχετικά μεγάλο εμβαδόν επιφάνειας που διαθέτουν τα υλικά στην νανοκλίμακα, με αποτέλεσμα αυτά είναι περισσότερο χημικώς ενεργά επηρεάζοντας την δύναμη και τις ηλεκτρικές τους ιδιότητες. Τα κβαντικά φαινόμενα κυριαρχούν στη συμπεριφορά της ύλης στη νανοκλίμακα, επηρεάζοντας την οπτική, ηλεκτρική και μαγνητική συμπεριφορά των υλικών. Ομοίως, πολλές ιδιότητες των τσιμεντοειδών υλικών, όπως η ηλεκτρική αγωγιμότητά επηρεάζονται από τη μικροσκοπική και τη νανοκατευθυντική συμπεριφορά των υλικών. Η προσθήκη μικρο- και νανο- υλικών σε τσιμεντοειδείς μήτρες επιτρέπει τη μεταβολή των ιδιοτήτων των υλικών (Geng Ying Li, 2007). Συγκεκριμένα, οι CNTs αποτελούν ιδανική λύση για τη χύτευση τσιμεντοειδών σύνθετων υλικών, λόγω των πιεζοηλεκτρικών τους χαρακτηριστικών τα οποία ευθύνονται για τις μεταβολές στην ηλεκτρική αντίσταση κάτω από μηχανική τάση. Όταν η ποσότητα των CNTs στη σύνθετη μήτρα φθάσει σε μια κρίσιμη τιμή, αρχίζει το φαινόμενο της διαφυγής (percolation) και αυξάνεται η αγωγιμότητα του υλικού. Προκειμένου το τελικό προϊόν να γίνει αγωγός, είναι ζωτικής σημασίας η κατάλληλη διασπορά των αγώγιμων σωματιδίων εντός της μήτρας. Έτσι η ιδιότητα του αυτοελέγχου (self – monitoring) επιτυγχάνεται στα υλικά με την συσχέτιση της μεταβολής των εφαρμοζόμενων τάσεων και των κατάλληλων παραμέτρων και ιδιοτήτων των υλικών, ιδιαίτερα της ηλεκτρικής αντίστασης (Panagiotis A.Danoglidis M. S.-G., 2019). Η μεταβολή της ηλεκτρικής αντίστασης μπορεί να μετρηθεί με βάση την εκτίμηση της μηχανικής παραμόρφωσης, και αυτές οι πληροφορίες μπορούν να αξιοποιηθούν για το σκοπό της δομικής διάγνωσης. Για παράδειγμα, ένα «έξυπνο» υλικό από τσιμέντο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παρακολούθηση της εμφάνισης και της εξέλιξης της βλάβης, όπως είναι τα μικρομορφοπλαστικά.

Οι CNTs παρουσιάζουν μοναδικές μηχανικές, ηλεκτρικές και χημικές ιδιότητες και κατά συνέπεια το ενδιαφέρον για χρήση τους σε εφαρμογές νανοσύνθετων υλικών συνεχώς αυξάνεται. Μερικά από τα χαρακτηριστικά που κάνουν τους CNTs εστία επιστημονικού ενδιαφέροντος είναι το υψηλό μέτρο ελαστικότητας (≅1 TPα), η εξαιρετικά υψηλή αντοχή σε θλίψη (100 φορές μεγαλύτερη της αντοχής του χάλυβα), η υψηλή εφελκυστική αντοχή (65-93 GPa), η ικανότητα παραμόρφωσης της τάξεως του 6%, η υψηλή θερμική αγωγιμότητα και το μικρό ειδικό βάρος. Οι μοναδικές μηχανικές, ηλεκτρικές και χημικές ιδιότητες των CNTs τα καθιστούν έναν ελκυστικό υποψήφιο για την ενίσχυση των σύνθετων υλικών. Η πυκνότητά των CNTs κυμαίνεται στο 1.33 g / cm^3 (J.-P. Salvetat, 1999). Η τιμή του aspect ratio (μήκος/ διάμετρο) είναι γενικά πέραν του 1000. Παλαιότερα, έγιναν προσπάθειες έγιναν για την προσθήκη CNTs σε τσιμεντοειδείς μήτρες σε ποσότητα κυμαινόμενη από 0.5 έως 2.0% bwoc (Makar, 2005) (Geng Ying Li, 2005). Ωστόσο, τα CNTs σχηματίζουν συσσωματώματα που συνδέονται στενά λόγω του τρόπου που αυτά συνδέονται, συγκεκριμένα με δυνάμεις Van der Waals. Το κύριο πρόβλημα λοιπόν, που χρήζει αντιμετώπισης συνδέεται με την διασπορά των CNTs σε υλικά με βάση το τσιμέντο (Grobert, 2007). Η κακή διασπορά των CNTs οδηγεί στο σχηματισμό πολλών ελαττωμάτων στο νανοσύνθετο και περιορίζει την αποτελεσματικότητα των CNTs στη μήτρα του τσιμέντου (Xiao-Lin Xie, 2005). Στις παρακάτω εικόνες από το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης SEM παρουσιάζονται CNTs πολλαπλών τοιχωμάτων που σχηματίζουν συσσωματώματα σε πάστα τσιμέντου 18 ωρών.

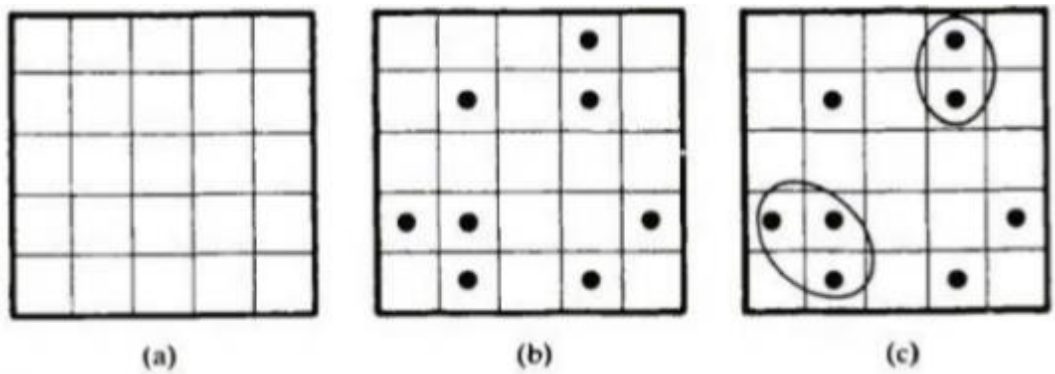


Εικόνα 8: SEM απεικόνιση των ανεπαρκώς διεσπαρμένων MWCNT που σχηματίζουν συσσωματώματα σε πάστα τσιμέντου 18 ωρών.

Πριν τη χρησιμοποίηση των CNTs ως ενισχυτικό υλικό του σκυροδέματος, πρέπει να εξουδετερωθούν οι δυνάμεις Van der Waals με σκοπό την ομοιόμορφη διασπορά τους στο νωπό μίγμα. Η βιβλιογραφία προτείνει 3 μεθόδους για την εκπλήρωση αυτού του στόχου. Η πιο συνηθισμένη μέθοδος είναι η διάλυση του πολυκαρβοξυλικού αιθέρα σε νερό, στη συνέχεια η προσθήκη των CNTs και τέλος την ανάμειξη του αιωρήματος με υψηλή ταχύτητα μεγαλύτερη από 500 rpm (LI, 2003). Κάποιοι άλλοι ερευνητές, (A. Cwirzen, 2008), πρότειναν πολυακρυλικό οξύ για ομοιόμορφη διασπορά. Και ο τελευταίος τρόπος είναι η χρήση υπερήχων (Maria S. Konsta-Gdoutos, 2010). Στην παρούσα εργασία η διασπορά των CNTs υποβοηθήθηκε με τη προσθήκη Sika Stabilizer SI -100. Το συγκεκριμένο προϊόν λόγω των χαρακτηριστικών του καθιστά το σκυρόδεμα πιο συνεκτικό και πιο ανθεκτικό στην επίθεση από θειικά και χλωριώντα. Συγκεκριμένα, η πυκνότητα είναι 1.14 kg / l. Το Sika® Stabilizer-100 εισέρχεται στο σκυρόδεμα μέσω της ανάμειξης με νερό, και συνιστάται από τους κατασκευαστές του προϊόντος να χορηγείται σε ποσοστό μεταξύ 0.1% μέχρι 1.5% bwoc (https://www.sika.com/).

2.4 Αγώγιμα Ενισχυτικά Υλικά – Θεωρία Διαφυγής

Με τον όρο «διαφυγή (percolation)» εννοούμε τη φυσική διαδικασία που περιγράφει τη μετάβαση ενός συστήματος από μια κατάσταση σε μια άλλη (Π. Πίσσης, 2008). Στις περισσότερες περιπτώσεις προσομοιώνεται με την εμφάνιση ενός συσσωματώματος (cluster), που ανταποκρίνεται σε σημαντικές αλλαγές των φυσικών ιδιοτήτων ενός συστήματος (Dietrich Stauffer, 1994). Για την καλύτερη κατανόηση της θεωρίας διαφυγής θα χρησιμοποιήσουμε το παράδειγμα του τετραγώνου ως δισδιάστατο πλέγμα όπως αυτό στην παρακάτω Εικόνα 9.



Εικόνα 9: Σχηματική αναπαράσταση για την κατανόηση της θεωρίας διαφυγής (Π. Πίσσης, 2008).

Ως συστάδα θέσεων (cluster) ορίζεται το σύνολο των γειτονικών τετραγώνων που έχουν στο κέντρο τους μια τελεία. Στο σχήμα 9(b) βλέπουμε τα τετράγωνα που έχουν μια κοινή πλευρά, τα οποία ονομάζονται κοντινότεροι γείτονες, ενώ αυτά που έχουν μόνο μια κοινή κορυφή ονομάζονται επόμενοι κοντινότεροι γείτονες. Όλες οι θέσεις τετραγώνων σε μια συστάδα θέσεων αποτελούν μια συνεχή αλυσίδα κοντινότερων γειτόνων, δηλαδή τετραγώνων που στο κέντρο τους έχουν μια τελεία και διακρίνονται καλύτερα στο σχήμα (c). Επομένως, η θεωρία διαφυγής περιγράφει τις ιδιότητες και τον αριθμό αυτής της συστάδας θέσεων. Ας υποθέσουμε ότι η πιθανότητα ένα τετράγωνο να έχει τελεία είναι p (και 1-p να μην έχει τελεία). Τότε αν είχαμε N τετράγωνα τα pN θα είχαν τελεία και (1-p)N δεν θα είχαν. Για μικρό αριθμό τετραγώνων με τελεία (δηλαδή μικρό p), οι σχηματιζόμενες συστάδες θα είχαν πεπερασμένο αριθμό μελών. Το πλήθος τετραγώνων με τελεία πάνω από το οποίο σχηματίζονται συστάδες με άπειρο πλήθος μελών καλείται κατώφλι διαφυγής ή διαγωγιμότητας θέσης (Site Percolation Threshold, p_{cs}). Μερικοί παράγοντες από τους οποίους εξαρτάται είναι η διαστατικότητα του συστήματος και η συνδετικότητα των θέσεων. Εκτός από τη διαγωγιμότητα θέσης ορίζεται παρόμοια και το κατώφλι διαφυγής ή διαγωγιμότητα δεσμού (Bond Percolation Threshold, p_{cb}). Τώρα ας θεωρήσουμε ένα άπειρο σύνολο ισαπέχοντων σημείων. Δεσμός καλείται η ευθεία που συνδέει δυο γειτονικά σημεία. Στην διαγωγιμότητα δεσμού, ο κάθε δεσμός μπορεί να είναι συνδεδεμένος (πιθανότητα p) ή μη συνδεδεμένος (πιθανότητα 1-p). Σε ένα πολυπληθές τυχαίο σύστημα η πιθανότητα κάθε δεσμού να είναι συνδεδεμένος είναι ανεξάρτητη από την κατάσταση του γειτονικού δεσμού. Αντίστοιχα η πιθανότητα κάθε θέσης να είναι κατειλημμένη είναι ανεξάρτητη από την κατάσταση της γειτονικής θέσης. Για ένα καθορισμένο δίκτυο η διαγωγιμότητα θέσης είναι πάντα μεγαλύτερη ή ίση της διαγωγιμότητας δεσμού ($p_{cb} \leq p_{cs}$). Η περιοχή κοντά στο κατώφλι διαφυγής ονομάζεται κρίσιμη περιοχή (όταν $| p- p_c | << 1$) και ανάλογα με την απόσταση από την περιοχή αυτή επηρεάζονται μερικές μακροσκοπικές ιδιότητες του δικτύου όπως η αγωγιμότητα (σ) και η διηλεκτρική σταθερά (ε΄): Η γενική σχέση που συνδέει την αγωγιμότητα με την περιεκτικότητα των αγώγιμων εγκλεισμάτων κοντά στο κατώφλι διαφυγής και πάνω είναι :

$$\sigma_{DC} = A\cdot(p - p_c)^t \quad (2)$$

όπου σ_{DC} (S/m) είναι η ειδική αγωγιμότητα σε συνεχές ρεύμα, *A (S/m)* είναι μία σταθερά αναλογίας, p είναι η κατ' όγκο περιεκτικότητα σε έγκλεισμα και p_c είναι το κατώφλι διαφυγής. Ο εκθέτης t είναι μία σταθερά που εξαρτάται από τη διαστατικότητα του συστήματος (J.J. Hernández, 2009).

Τα νανοσύνθετα υλικά που παρασκευάστηκαν για την εργασία αυτή αποτελούνται από ηλεκτρικά μονωτική μήτρα με αγώγιμο έγκλεισμα και ο μηχανισμός ηλεκτρικής τους αγωγιμότητας περιγράφεται κυρίως από τη θεωρία διαφυγής (percolation theory). Σύμφωνα με τη θεωρία διαφυγής, καθώς αυξάνεται η κατ' όγκο περιεκτικότητα σε έγκλεισμα, τότε από ένα σημείο και μετά η ποσότητά του είναι αρκετή ώστε να δημιουργηθεί μία διαδρομή από αγώγιμο έγκλεισμα μέσα στη μονωτική μήτρα, με αποτέλεσμα το σύνθετο υλικό να παρουσιάζει ηλεκτρική αγωγιμότητα. Από εκεί και πάνω, καθώς αυξάνεται η ποσότητα εγκλείσματος αυξάνονται και οι αγώγιμες διαδρομές δημιουργώντας ένα αγώγιμο δίκτυο μέσα στη μονωτική μήτρα. Συνεπώς παρατηρείται αύξηση της αγωγιμότητας του υλικού. Ωστόσο, περαιτέρω αύξηση της συγκέντρωσης του εγκλείσματος πέραν από το κατώφλι διαφυγής έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του ρυθμού αύξησης της αγωγιμότητας.

Ο Sandler και η ερευνητική του ομάδα διερεύνησαν αρχικά το κατώφλι διαφυγής εποξειδικών σύνθετων ενισχυμένων με CNTs πολλαπλών τοιχωμάτων οι οποίοι είχαν παραχθεί με την διαδικασία της χημικής εναπόθεσης ατμών (Chemical Vapor Deposition). Οι συγγραφείς παρατήρησαν ότι τα πειραματικά δεδομένα ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης ακολουθούν ένα νόμο κλιμάκωσης της διείσδυσης (J.K.W. Sandler, 2003). Η χρήση των CNTs οδηγεί σε ένα μοναδικά χαμηλό κατώφλι διαφυγής, το οποίο είναι μια τάξη μεγέθους μικρότερου από το κατώτατο όριο που εκτίθεται από σύνθετα υλικά με εμπλεγμένα CNTs. Επίσης, ο Lopanov και η επιστημονική του ομάδα ανέπτυξαν ένα μοντέλο για την ηλεκτρική αγωγιμότητα των ενισχυμένων με CNT υλικών με βάση το τσιμέντο (A.N. Lopanov, 2013). Οι συγγραφείς κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η συγκέντρωση κατωφλίου διαφυγής των ηλεκτρικά αγώγιμων CNTs και του γραφίτη ισούται με 0.15% bwoc. Τέλος, σύμφωνα με την πρόσφατη μελέτη που πραγματοποίησε ο Panagiotis A. Danoglidis μαζί με άλλους ερευνητές για το κρίσιμο σημείο διαφυγής, δηλαδή τον προσδιορισμό της κρίσιμης ποσότητας των CNTs για την δημιουργία ενός συνεχούς και αγώγιμου δικτύου εντός του κονιάματος απέδειξαν πως η συγκέντρωση αυτή βρίσκεται μεταξύ του 0.1% και 0.15% κατά βάρος του κονιάματος (Panagiotis A.Danoglidis, 2019).

Η ηλεκτρική αντίσταση του αποξηραμένου σκυροδέματος κυμαίνεται συνήθως από 6.54 έως 11.4 × 10^5 Ω·cm, γεγονός που δείχνει ότι το σκυρόδεμα δεν είναι ούτε καλός μονωτής ούτε καλός αγωγός (Wenkui Dong, 2019). Η προσθήκη αγώγιμων υλικών στο σκυρόδεμα, όπως CFs, γραφίτη και ίνες χάλυβα, μπορούν να βελτιώσουν σημαντικά την ηλεκτρική αγωγιμότητα του σκυροδέματος διατηρώντας παράλληλα τις καλές μηχανικές του ιδιότητες. Η αύξηση των αγώγιμων υλικών διευκολύνει το σχηματισμό αγώγιμων δικτύων, τα οποία αλληλεπικαλύπτονται μεταξύ τους για να μειωθεί η ηλεκτρική αντίσταση του σκυροδέματος. Καθώς το ποσοστό του αγώγιμου συστατικού αυξάνεται σε μια κρίσιμη τιμή, τα αγώγιμα δίκτυα επεκτείνονται σε ένα ορισμένο εύρος για να σχηματίσουν αγώγιμες διαδρομές, μειώνοντας έτσι την αντίσταση του αγώγιμου σκυροδέματος.

Όσον αφορά τις CFs, η παγκόσμια κατανάλωσή τους αυξάνεται σταθερά και η χρήση τους σε πολλούς τομείς εφαρμογής γίνεται ολοένα και περισσότερο διαδεδομένη χάριν των

εξαιρετικών μηχανικών ιδιοτήτων τους και την εξαιρετική ελαφρότητα τους. Επιπλέον, η ελαφρότητα και η ευκαμψία των CFs τις καθιστά ιδιαίτερα κατάλληλες για την πραγματοποίηση ηλεκτρικά αγώγιμων μητρών τσιμέντου. Στην πραγματικότητα, ο υψηλός όγκος ινών που μπορούν να προστεθούν μέσα στις μήτρες τσιμέντου και επομένως η δυνατότητα δημιουργίας αγώγιμων διαδρομών μόλις ξεπεραστεί το όριο διαφυγής (το όριο πέρα από το οποίο οι ίνες αγγίζουν η μία την άλλη) καθιστά τις CFs πιο χρήσιμες από άλλες ίνες (A. Al-Dahawi, 2016). Σύμφωνα με την βιβλιογραφία, CFs έχουν προστεθεί σε μήτρες τσιμέντου σε συγκεντρώσεις μέχρι 4% κατ 'όγκο και η ηλεκτρική αντίσταση μελετήθηκε στις 7 ημέρες ωρίμανσης. Η αντίσταση μειώθηκε αυξάνοντας το κλάσμα όγκου ινών και τελικά η υψηλότερη αγωγιμότητα βρέθηκε σε δείγματα ενισχυμένα με συγκέντρωση CFs μεταξύ 1% και 3%, ανάλογα με την παρουσία πυριτικής παιπάλης και άμμου μέσα στο μίγμα (D.D.L.Chung, 2000). Η αγωγιμότητα του σκυροδέματος από CFs δεν σχετίζεται μόνο με τη δοσολογία των CFs, αλλά επίσης εξαρτάται από την ομοιομορφία διασποράς των CFs. Το κατώφλι διήθησης της δοσολογίας CFs θα πρέπει να προσδιορίζεται με βάση την ομοιομορφία διασποράς του άνθρακα που επιτυγχάνεται με τον παράγοντα διασποράς ινών. Τα αποτελέσματα των δοκιμών σύμφωνα με μελέτες που έγιναν από το 2015 δείχνουν ότι η καλύτερη περιεκτικότητα για το κλάσμα όγκου των CFs είναι περίπου 0.4% και ότι ο χρόνος ανάμιξης θα πρέπει να ελέγχεται για να αποφεύγεται η φθορά των CFs (Jianmin Wu, 2015). Τέλος, σε πρόσφατη έρευνα που διεξήχθη από τον Jacopo Donnini και την επιστημονική του ομάδα αποδείχθηκε ότι η ηλεκτρική αντίσταση φθάνει στο ελάχιστο όταν η περιεκτικότητα σε ίνες είναι 3% bwoc. Αυτή η τιμή μπορεί να θεωρηθεί ως το κατώφλι αγωγιμότητας που εγγυάται την αλληλοσύνδεση εντός της μήτρας και επομένως τη δυνατότητα διατήρησης μιας υψηλής ενεργειακής ελαστικότητας. Η προσθήκη μιας υψηλότερης ποσότητας από CFs προκαλεί το σχηματισμό πόρων αέρα μέσα στο κονίαμα μειώνοντας την ειδική του αντίσταση (Jacopo Donnini, 2018).

Κεφάλαιο 3 - Πειραματικές Μέθοδοι

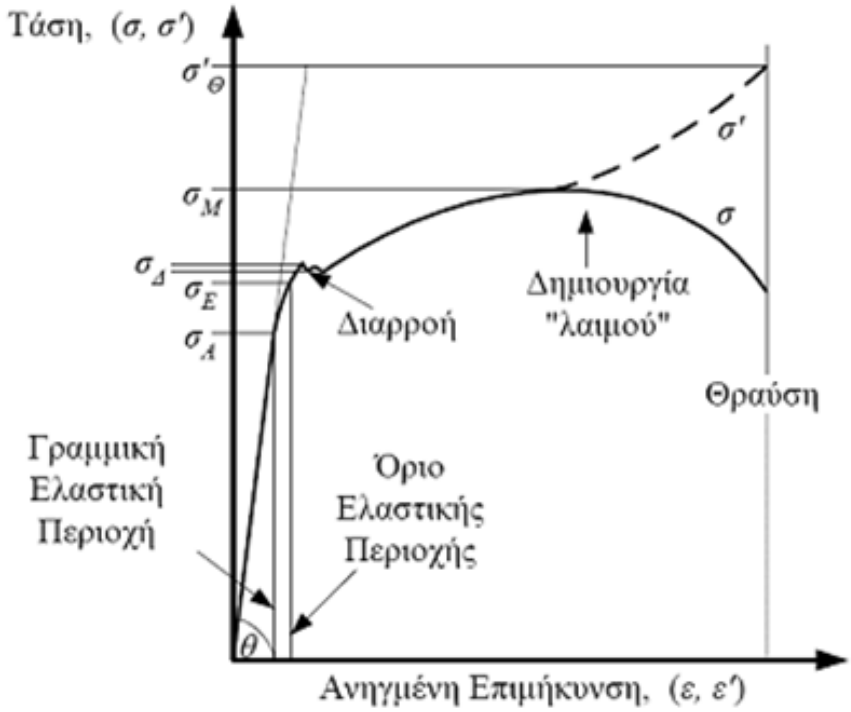
3.1 Σκληρυμένο Σκυρόδεμα – Εισαγωγικά Στοιχεία.

Κατά την διάρκεια της ενυδάτωσης, το σκυρόδεμα θα αλλάξει από την ρευστή σε μια πλαστική κατάσταση, και τελικά σε μια στερεά σκληρυμένη κατάσταση**.** Στην σκληρυμένη κατάσταση, το σκυρόδεμα είναι έτοιμο να υποστεί εξωτερικά φορτία ως δομικό υλικό.

Για να κατανοήσουμε την έννοια της δύναμης, είναι απαραίτητο να οριστούν η τάση (stress, σ) και η παραμόρφωση (strain, ε). Η ονομαστική τάση ορίζεται ως το φορτίο διαιρούμενο από την αρχική περιοχή διατομής. Αυτός ο ορισμός της τάσης μπορεί να εκφραστεί ως:

$$\sigma = \frac{F}{L^2} \quad (3)$$

Οι μονάδες που χρησιμοποιούνται για την μέτρηση της τάσης στο σύστημα SI είναι Pa, και περιγράφονται από τον παρακάτω ορισμό. Η παραμόρφωση του δοκιμίου είναι $\varepsilon = \Delta l/l$, όπου, l είναι το αρχικό μήκος του δοκιμίου και Δl είναι η αλλαγή στο μήκος του λόγω της παραμόρφωσης. Η σχέση μεταξύ των συμβατικών σ & ε φαίνεται στη Εικόνα 10 «τάσης-παραμόρφωσης» (σ-ε), που ακολουθεί.



Εικόνα 10 : Διάγραμμα «τάσεων-παραμορφώσεων» συμβατικών (σ-ε) & πραγματικών (σ'-ε') (CALLISTER D. WILLIAM, 2016).

Η αντοχή σε θλιπτικό φορτίο ορίζεται ως η ικανότητα ενός υλικού να αντιστέκεται στην τάση που παράγεται από μια εξωτερική δύναμη χωρίς να αστοχεί, στην περίπτωση του σκυροδέματος να δημιουργεί ρωγμές.

3.2 Αντοχή στην κάμψη – Flexural Strength

Στις κατασκευές από μη οπλισμένο σκυρόδεμα, όπως στην παρούσα εργασία, σημαντικό ρόλο έχει η αντοχή στον εφελκυσμό. Η εφελκυστική αντοχή εξαρτάται από την αντοχή του σκληρυμένου τσιμεντοπολτού, την αντοχή των αδρανών και την συνάφεια του τσιμεντοπολτού με τα αδρανή και τα ενισχυτικά μέσα (CFs, CNTs). Συγκεκριμένα, η καμπτική αντοχή είναι ευκολότερο να μετρηθεί διότι αντιπροσωπεύει τις πραγματικές συνθήκες καταπόνησης. Μπορεί να διεξαχθεί είτε με την επιβολή φορτίου σε ένα σημείο είτε σε δύο σημεία που ισαπέχουν από τα άκρα του δοκιμίου. Η αντοχή σε κάμψη για τις δύο περιπτώσεις δίνεται από τους τύπους:

1. $f_{t,fl} = \frac{3 \cdot P \cdot L}{b \cdot d^2}$ (4)

2. $f_{t,fl} = \frac{P \cdot L}{b \cdot d^2}$ (5)

$f_{t,fl}$: η αντοχή σε κάμψη

F: το επιβαλλόμενο φορτίο

L: η απόσταση μεταξύ των δύο στηριγμάτων

d: το ύψος του δοκιμίου

b: το πλάτος του δοκιμίου

Ο P. J. F. Wright, το 1952, πραγματοποίησε δοκιμές σε δείγματα σκυροδέματος με σκοπό την εξέταση της επιρροής του ύψους και του λόγου μήκους/ύψους του δείγματος, καταλήγοντας στο συμπέρασμα ότι η αύξηση του δοκιμίου από τα 7.62 cm (3in) σε 20,32 cm (8in) για σταθερό λόγο μήκους/ύψους έχει αποτέλεσμα την μείωση της αντοχής κατά 28% στην περίπτωση των δύο σημειακών φορτίσεων και 33% στην περίπτωση που το δείγμα φορτίζεται στο κέντρο. Με βάση τα αποτελέσματα αυτά θεωρήθηκε πως η δοκιμή με ένα σημείο επιβολής φόρτισης έχει 20-25% μεγαλύτερη αντοχή σε σχέση με την φόρτιση σε δύο σημεία, καθώς στην περίπτωση των δύο σημείων το δοκίμιο βρίσκεται σε μέγιστη καταπόνηση και άρα είναι πιθανότερο να βρεθεί σε περιοχή με μικρότερη αντοχή και να ξεκινήσει η θραύση (P. J. F. Wright, 2015). Σε γενικές γραμμές η δοκιμή της κάμψης δίνει μεγαλύτερες τιμές αντοχής του σκυροδέματος καθώς ο συνολικός όγκος του δοκιμίου που υπόκειται στην μέγιστη ένταση είναι μικρότερος και άρα η πιθανότητα να βρίσκεται ατέλεια στην συγκεκριμένη περιοχή είναι μικρότερη.

Οι δύο συνηθέστερες μορφές δοκιμής κάμψης είναι η δοκιμή κάμψης τριών η δοκιμή κάμψης τεσσάρων σημείων.

- Δοκιμή Κάμψης Τριών Σημείων

  Κατά την δοκιμή κάμψης τριών σημείων το δοκίμιο φορτίζεται με συγκεντρωμένο το P φορτίο στο μέσον του και η κατανομή της ροπής κάμψης κατά μήκος του δοκιμίου είναι γραμμική.

- Δοκιμή Κάμψης Τεσσάρων Σημείων

  Κατά την δοκιμή κάμψης τεσσάρων σημείων το δοκίμιο φορτίζεται με δύο συγκεντρωμένα φορτία τα οποία ισαπέχουν από τα άκρα του δοκιμίου. Το διάγραμμα κατανομής των ροπών κάμψης γίνεται τραπεζοειδές.

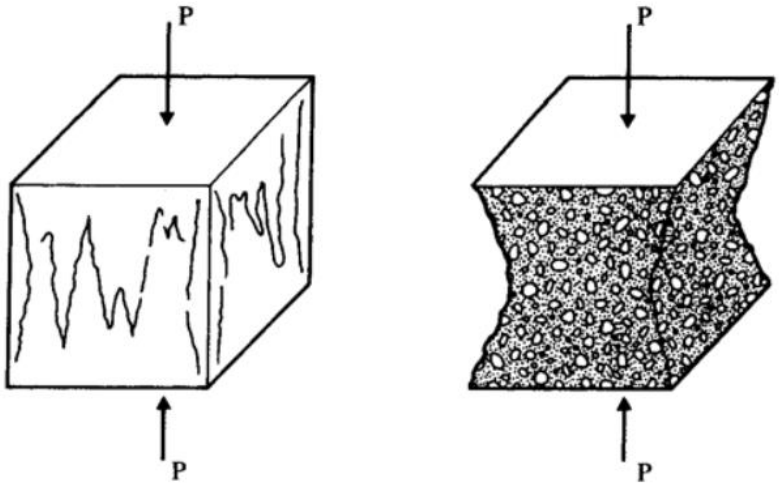
Κατά τη διάρκεια της κάμψης στη φορτιζόμενη (άνω) περιοχή του δοκιμίου αναπτύσσεται θλιπτική εντατική κατάσταση (βράχυνση μήκους, μέγιστη στην ακρότατη ίνα και βαθμιαία αυξανόμενη προς το εσωτερικό του δοκιμίου). Στην αφόρτιστη (κάτω) περιοχή του δοκιμίου αναπτύσσεται εφελκυστική εντατική κατάσταση (επιμήκυνση, μέγιστη στην ακρότατη ίνα και βαθμιαία μειούμενη προς το εσωτερικό του δοκιμίου). Στο διαμήκη ουδέτερο άξονα του δοκιμίου (διάμηκες επίπεδο συμμετρίας) δεν παρατηρείται μεταβολή (επιμήκυνση ή βράχυνση) μήκους. Η πιο επικίνδυνη περιοχή ως προς την πιθανότητα αστοχίας του υλικού είναι η εφελκυστική περιοχή (Μοροπούλου, 2017).

Στην παρούσα εργασία για την διεξαγωγή των πειραμάτων εφελκυσμού χρησιμοποιήθηκε μηχανή εφελκυσμού Instron 1121 και οι μετρήσεις διεξήχθηκαν με την μέθοδο κάμψης τριών σημείων. Συγκεκριμένα η μηχανή Instron 1121 διαθέτει μέγιστη ικανότητα επιβολής φορτίου 10kN για αξονικό εφελκυσμό ή για αξονική θλίψη και κυκλική φόρτιση μεταξύ προκαθορισμένων ορίων μετατόπισης. Η δοκιμή σε εφελκυσμό περιλαμβάνει την πάκτωση ενός κατάλληλου δοκιμίου στις αρπάγες της μηχανής εφελκυσμού, και τη φόρτιση του σε μονοαξονικό προοδευτικά αυξανόμενο φορτίο, μέχρι την τελική θραύση. Τα δοκίμια για την δοκιμή εφελκυσμού έχουν επίπεδο σχήμα και διακρίνονται από το επίμηκες τμήμα τους, το οποίο χρησιμεύει για την μέτρηση της επιμήκυνσης αλλά και για την παρατήρηση της τελικής μορφής του δοκιμίου μετά την θραύση. Τα ακραία μέρη

χρησιμεύουν για την πάκτωση του δοκιμίου στις αρπάγες της μηχανής. Η συμμετρική μετάβαση και η κατανομή του φορτίου από την πάκτωση προς την εφελκυόμενη επιμήκη περιοχή είναι πολύ σημαντική για να αποφευχθεί το φαινόμενο της έκκεντρης φόρτισης.

3.3 Αντοχή στην θλίψη – Compressive Strength

Ένα υλικό όπως το σκυρόδεμα περιέχει στο εσωτερικό του κενά διαφόρων μεγεθών και σχημάτων λόγω των διαφορετικών συστατικών που το αποτελούν. Θεωρείται ότι το σκυρόδεμα είναι υλικό δύο φάσεων και συγκεκριμένα την φάση του τσιμεντοπολτού και αυτήν των αδρανών υλικών. Τα κοινά αδρανή που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή σκυροδέματος έχουν πολύ μεγαλύτερο μέτρο ελαστικότητας από τον τσιμεντοπολτό, εκτός από την περίπτωση των ελαφριών αδρανών, με αποτέλεσμα την συγκέντρωση τάσεων στην διεπιφάνεια αδρανών και τσιμεντοπολτού τόσο στην αφόρτιστη όσο και στην φορτισμένη κατάσταση του σκυροδέματος. Η τοπική προμικρορηγμάτωση του σκυροδέματος οφείλεται στην επιβολή επιβεβλημένων παραμορφώσεων από θερμική ή χημική αιτία όταν το σκυρόδεμα βρίσκεται στην αφόρτιστη κατάσταση. Στην φορτισμένη κατάσταση οι ρηγματώσεις αποκόλλησης του τσιμεντοπολτού από τα αδρανή που μπορεί να οδηγήσουν σε αστοχία του υλικού οφείλονται στην διαφορά στα μέτρα ελαστικότητας των συστατικών του σκυροδέματος. Εφόσον λοιπόν το σκυρόδεμα παρουσιάζει αυτήν την συμπεριφορά πρέπει να ελεγθούν τα χαρακτηριστικά του. Αυτό επιτυγχάνεται με τις μηχανικές δοκιμές. Όμως, πρέπει να γνωρίζουμε πως καμία από τις δοκιμές που καταπονούν το σκυρόδεμα δεν ανταποκρίνεται πλήρως στην πραγματικότητα. Η πιο διαδεδομένη δοκιμή για το σκυρόδεμα είναι η δοκιμή αντοχής σε θλίψη, διότι είναι εξαιρετικά απλή στην διεξαγωγή της και μας παρέχει τις απαραίτητες πληροφορίες για τα χαρακτηριστικά του σκυροδέματος με αποτέλεσμα να μπορέσουμε να προχωρήσουμε σε περαιτέρω υπολογισμούς. Βέβαια, τα αποτελέσματα των μετρήσεων επηρεάζονται από διάφορους δευτερογενείς παράγοντες όπως είναι το μέγεθος του δοκιμίου, η υγρασία και το τυπικό σφάλμα του μηχανήματος. Τα δοκίμια υπόκεινται πρώτα σε δοκιμή κάμψης και στην συνέχεια υποβάλλονται σε θραύση μονοαξονικής ή διαξονικής θλίψης. Στην μονοαξονική θλίψη σχηματίζονται ρωγμές παράλληλες με τα επιβαλλόμενα φορτία και το δοκίμιο καταλήγει σε θραύση αστοχώντας συνήθως σε 3 τμήματα. Στην διαξονική θλίψη σχηματίζονται ρωγμές παράλληλες στην κατεύθυνση που ορίζουν οι δύο επιβαλλόμενες δυνάμεις και το δοκίμιο αστοχεί σε πλακοειδή στοιχεία. Υπάρχει και η περίπτωση της τριαξονικής θλίψης κατά την οποία το δοκίμιο συνθλίβεται και το σκυρόδεμα συμπεριφέρεται ως ψαθυρό υλικό (Κυριακόπουλος, 2012).



Εικόνα 11: Τύποι αστοχίας κυβικών δοκιμίων σε μονοαξονική θλίψη. (Κυριακόπουλος Β. , 2012)

Η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη fc προσδιορίζεται σύμφωνα με τον τύπο:

$$Fc = \frac{Pmax}{b \times d} \quad (6)$$

P: μέγιστο φορτίο που ασκήθηκε στο δοκίμιο μέχρι την αστοχία του

b, d: διαστάσεις του δοκιμίου, δηλαδή η επιφάνεια που ασκήθηκε φορτίο.

3.4 Ηλεκτρικές Μετρήσεις

Η ανιχνευτική ικανότητα του σκυροδέματος προκύπτει από την αλλαγή του αγώγιμου δικτύου στο εσωτερικό του, και κατ' επέκταση σύμφωνα με την ένταση της ηλεκτρικής αντίστασης χαρακτηρίζεται η ικανότητα ανίχνευσης που διαθέτει. Σύμφωνα με το νόμο του ohm, η ένταση ηλεκτρικής αντίστασης ρ μπορεί να εκφραστεί ως:

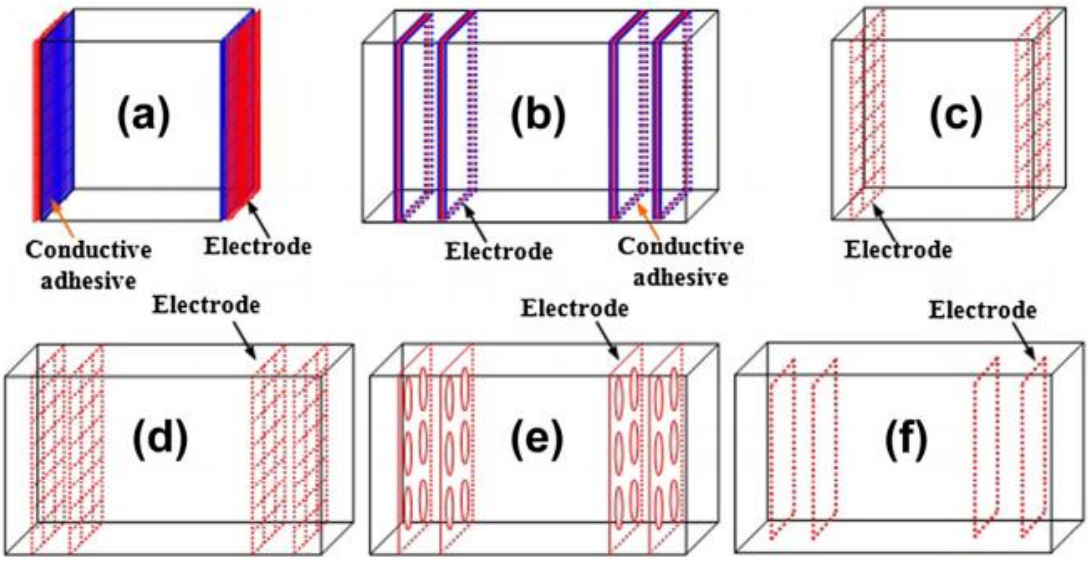
$$\rho = R \cdot \frac{S}{L} \quad (7)$$

όπου το *R* είναι η ηλεκτρική αντίσταση του σκυροδέματος, *S* είναι η περιοχή διατομής και *L* είναι ο χώρος μεταξύ δύο ηλεκτροδίων τάσης. Μετά από διαφορικό υπολογισμό, μπορούμε να λάβουμε:

$$\frac{d\rho}{\rho} = \frac{dR}{R} - (1 + 2\mu) \cdot \frac{dL}{L} \quad (8)$$

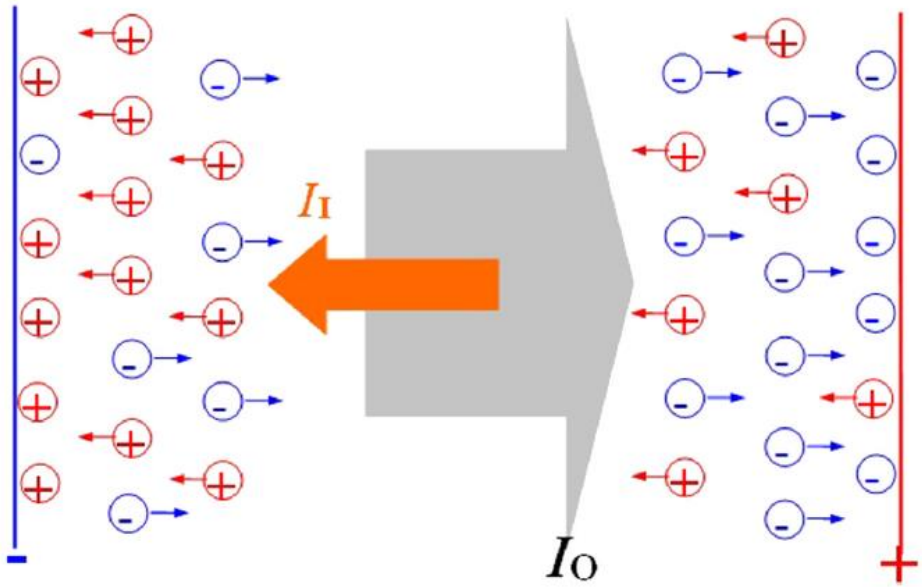
Όπου μ είναι ο λόγος Poisson του σκυροδέματος.

Το πιο χαρακτηριστικό γνώρισμα των νανο-σύνθετων υλικών είναι ότι είναι ικανά να ανιχνεύσουν την καταπόνηση, τη βλάβη (π.χ. ρωγμή ή κόπωση) ή τις αλλαγές που υφίστανται στην θερμοκρασία. Η συμπεριφορά ανίχνευσης των σύνθετων νανο-σύνθετων υλικών ερμηνεύεται με τη σχέση μεταξύ της κλασματικής μεταβολής της ηλεκτρικής αντίστασης $\Delta R/R_o$ και της εξωτερικής δύναμης *F* (συμπεριλαμβανομένης της τάσης σ και της παραμόρφωσης ε). Όταν τα σύνθετα υλικά παραμορφωθούν, καταπονηθούν ή μεταβληθούν οι περιβαλλοντικές τους συνθήκες, τότε το εσωτερικό αγώγιμο δίκτυο μεταβάλλεται, πράγμα που επηρεάζει τις ηλεκτρικές ιδιότητες τους. Τα ηλεκτρόδια γεφυρώνουν το σκυρόδεμα και τον εξοπλισμό μέτρησης. Η κατασκευή τους αποτελεί βασικό πεδίο ενδιαφέροντος στην έρευνα του σκυροδέματος με αυτό-ανιχνευτικές ιδιότητες, καθώς τα ηλεκτρόδια έχουν άμεση σχέση με την ακρίβεια της μέτρησης του σήματος ανίχνευσης. Η κατασκευή των ηλεκτροδίων για το σκυρόδεμα περιλαμβάνει τρεις παραμέτρους: επιλογή υλικών, στερέωση και διάταξη ηλεκτροδίων. Τα υλικά των ηλεκτροδίων πρέπει να έχουν δύο βασικά χαρακτηριστικά: χαμηλή ηλεκτρική αντίσταση και σταθερή ηλεκτρική αγωγιμότητα. Μέχρι τώρα, τα υλικά που χρησιμοποιούνται ως ηλεκτρόδια αποτελούνται κυρίως μεταλλικά φύλλα (π.χ. χαλκός, ανοξείδωτος χάλυβας και φύλλα μολύβδου) με ή χωρίς οπές. Ο τρόπος στήριξης και η διάταξη των ηλεκτροδίων έχουν άμεση σχέση με την κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου στο σκυρόδεμα με αποτέλεσμα να επηρεάζουν τα αποτελέσματα μέτρησης της ηλεκτρικής αντίστασης. Επί του παρόντος, υπάρχουν έξι τρόποι στήριξης και διάταξης ηλεκτροδίων, όπως φαίνεται στην παρακάτω Εικόνα 12 (Baoguo Han X. Y., 2015) .



Εικόνα 12: Τα πιο διαδεδομένα στυλ στερέωσης και διάταξης των ηλεκτροδίων σε σκυρόδεμα με αυτό-ανιχνευτικές ιδιότητες (Baoguo Han X. Y., 2015).

Τα δύο πρώτα σχήματα έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως στην εργαστηριακή μέτρηση της ιδιότητας ανίχνευσης του σκυροδέματος επειδή δεν επηρεάζουν τη μηχανική ιδιότητα του. Αντιστοίχως, με τις διατάξεις των ηλεκτροδίων, οι μέθοδοι μέτρησης ηλεκτρικής αντίστασης του σκυροδέματος με αυτό-ανιχνευτικές ικανότητες περιλαμβάνουν τη μέθοδο των δύο, τριών και τεσσάρων ανιχνευτών. Η μέθοδος των τριών ανιχνευτών σπάνια χρησιμοποιείται λόγω πολυπλοκότητας στην ρύθμιση των ηλεκτροδίων (Baoguo Han S. D., 2015). Αν και η μέθοδος των δύο ανιχνευτών είναι πιο απλή στην διαδικασία μέτρησης συνήθως προτιμάται η μέθοδος τεσσάρων ανιχνευτών διότι μπορεί να εξαλείψει την αντίσταση επαφής μεταξύ των ηλεκτροδίων και του σκυροδέματος που έχουν τοποθετηθεί. Το γεγονός αυτό έχει διαπιστωθεί σε πολλά πειράματα, όπως για παράδειγμα αυτό της ερευνητικής ομάδας του Baoguo Han. Συγκεκριμένα, πρότειναν μια μέθοδο για τον υπολογισμό της αντίστασης στην επαφή ηλεκτροδίων και σκυροδέματος και διαπίστωσαν ότι η συγκεκριμένη αντίσταση είναι αρκετά υψηλότερη από την ηλεκτρική αντίσταση συνολικά του σκυροδέματος με αυτό-ανιχνευτικές ικανότητες (Baoguo Han X. G., 2007). Κατά τη μέτρηση της ηλεκτρικής αντίστασης του σκυροδέματος με αυτό-ανιχνευτικές ικανότητες χρησιμοποιώντας είτε τη μέθοδο των τεσσάρων ανιχνευτών είτε τη μέθοδο των δύο δειγμάτων, η μέθοδος δοκιμής συνεχούς ρεύματος (DC) είναι ο απλούστερος τρόπος, με σταθερή τάση που εφαρμόζεται στο δοκίμιο. Ωστόσο, καθώς εφαρμόζεται σταθερό ηλεκτρικό πεδίο κατά τη διάρκεια της μέτρησης ηλεκτρικής αντίστασης, η κίνηση και η συσσωμάτωση των ιόντων στη μήτρα σκυροδέματος οδηγεί σε ηλεκτρική πόλωση στο εσωτερικό του όπως παρουσιάζεται στην παρακάτω Εικόνα 13.



Εικόνα 13: Η πόλωση εντός του σκυροδέματος (Baoguo Han X. Y., 2015).

Λόγω της εκθετικής αύξησης που παρουσιάζεται στην μετρηθείσα αντίσταση που προκαλείται από την επίδραση της πόλωσης είναι δύσκολο να μετρηθεί με ακρίβεια η μεταβολή της ηλεκτρικής αντίστασης του σκυροδέματος. Το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίζεται με την καταγραφή της μεταβολής της αντίστασης που προκαλείται από την πόλωση σε ένα δείγμα το οποίο δεν έχει στο εσωτερικό του αγώγιμο δίκτυο. Στη μέθοδο των δύο ανιχνευτών, το σήμα ηλεκτρικής αντίστασης μπορεί να συλλεχθεί απευθείας χρησιμοποιώντας πολύμετρα ή έμμεσα με τη μέθοδο γέφυρας Wheatstone. Στη μέθοδο DC τεσσάρων ανιχνευτών, η οποία χρειάζεται σύγχρονη συλλογή σημάτων ρεύματος και τάσης, η αντίσταση υπολογίζεται από την τάση που διαιρείται με το ρεύμα. Το σήμα τάσης μπορεί να συλλεχθεί απευθείας χρησιμοποιώντας μια κάρτα λήψης δεδομένων A/D ή ένα πολύμετρο. Τα ηλεκτρικά σήματα του αποκτώνται συμβατικά χρησιμοποιώντας ένα ενσύρματο σύστημα. Η σύνδεση των συρμάτων είναι χρονοβόρος και δαπανηρή και τα σύρματα ενδέχεται επίσης να επηρεάσουν την αξιοπιστία της μετάδοσης σήματος και να καταστραφούν εύκολα κατά την εγκατάσταση ή τη λειτουργία. Επιπλέον, μπορεί να υπάρχουν περιπτώσεις στις οποίες τα ηλεκτρόδια δεν μπορούν να τοποθετηθούν σε συγκεκριμένες θέσεις του δοκιμίου ή ακόμα και σε ολόκληρη τη δομή. Με την ταχεία ανάπτυξη της τεχνολογίας ασύρματων επικοινωνιών, η τεχνική της ασύρματης μέτρησης έχει χρησιμοποιηθεί ήδη για την απόκτηση σήματος από σκυρόδεμα με αυτό-ανιχνευτικές ιδιότητες σε μια προσπάθεια επίλυσης των προαναφερθέντων προβλημάτων (Tsung-Chin Hou, 2005).

3.5 Πιεζοαντίσταση (Piezoresistivity)

Πιεζοαντίσταση ονομάζεται το φαινόμενο κατά το οποίο η ηλεκτρική αντίσταση του υλικού αλλάζει σύμφωνα με την παραμόρφωση και το ασκούμενο φορτίο (Πλαμαντούρας, 2015). Αυτή η διαδικασία επιτρέπει στο υλικό να λειτουργεί σαν αισθητήρας παραμόρφωσης και το εντάσσει στην κατηγορία των υλικών με ιδιότητες αυτό–ανίχνευσης. Έτσι, το υλικό είναι ικανό να ανιχνεύει τη δική του παραμόρφωση και βλάβη μέσω των αποτελεσμάτων της ηλεκτρικής του αντίστασης. Αυτή η ικανότητα της ανίχνευσης είναι χρήσιμη για τον έλεγχο και της δομικής ακεραιότητας του υλικού. Οι αισθητήρες με βάση το τσιμέντο έχουν

σχεδιαστεί για να λειτουργούν με βάση την αρχή του πιεζοηλεκτρικού φαινομένου. Ακόμη και μια μικρή αλλαγή στο ασκούμενο φορτίο του υλικού θα άλλαζε την ηλεκτρική αντίσταση ανάλογα. Προκειμένου ένα τσιμεντοειδές υλικό να έχει τη λειτουργία της πιεζοαντίστασης, ένας αγώγιμο ενισχυτικό υλικό πρέπει να συμπεριληφθεί στην τσιμεντόπαστα ή στο τσιμεντοκονίαμα. Το αγώγιμο υλικό μπορεί να είναι CFs, CNTs ή ένας συνδυασμός αυτών όπως ακριβώς γίνεται στην παρούσα μελέτη. Το σκυρόδεμα είναι ένα ψαθυρό υλικό με χαμηλή εφελκυστική αντοχή και μικρή ικανότητα παραμόρφωσης. Η ενίσχυσή του με ίνες βελτιώνει την εφελκυστική αντοχή του, μειώνει τη θράυση του (κατά περιπτώσεις) και αυξάνει την αντοχή του σε κρούση. Η προσθήκη ινών μπορεί να έχει επίσης ισχυρή επίδραση στις ηλεκτρικές ιδιότητες του σύνθετου υλικού (DC αγωγιμότητα και AC επαγωγική αντίσταση), αλλά μόνον όταν οι ίνες είναι αρκετά πιο αγώγιμες από την μήτρα. Το σκυρόδεμα, ακόμα κι αν περιέχει χαμηλό ποσοστό κοντών CFs (0.2% bwoc), διατηρεί κάποια ικανότητα αυτό-ανίχνευσης (Chung D. D., 2002). Μάλιστα, επειδή οι ίνες είναι λιγότερο αποτελεσματικές στον έλεγχο της ρωγμής όταν ένα μεγάλο αδρανές είναι παρόν, όπως συμβαίνει στο σκυρόδεμα, οι μεταβολές στην ηλεκτρική αντίσταση είναι κατά πολύ μεγαλύτερες για τσιμεντοκονιάματα και τσιμεντοπολτούς σε σχέση με το σκυρόδεμα. Σύμφωνα με την D.D.L Chung, η ειδική αντίσταση τόσο στη διεύθυνση της τάσης, όσο και στην εγκάρσια διεύθυνση αυξάνεται κατά τον εφελκυσμό, λόγω της ελαφράς εξόλκευσης των ινών που συνοδεύει το άνοιγμα των ρωγμών και μειώνεται σε θλίψη, λόγω της επανάταξης των ινών κατά το κλείσιμο των ρωγμών. Αυτό το ηλεκτρομηχανικό φαινόμενο καλείται πιεζοαντίσταση (piezoresistivity) και μέσω της μέτρησης της ηλεκτρικής αντίστασης (DC ή AC) επιτρέπει την παρακολούθηση της παραμόρφωσης του τσιμεντοειδούς υλικού. Τέλος, έχουν γίνει πολλές μελέτες γύρω από την πιεζοαντίσταση που προσδίδουν οι CNTs σε υλικά με βάση το τσιμέντο ώστε εν τέλει τα υλικά αυτά να είναι πολυλειτουργικά κι έξυπνα υλικά. Ο Saafi 2009 μελέτησε την πιεζοαντίσταση υλικών με βάση το τσιμέντο ενισχυμένα με μονοστρωματικούς CNTs (Single Walled Carbon Nanotubes – SWCNTs) ώστε το υλικό που θα προκύψει να έχει την ικανότητα, μέσω της μεταβολής της ηλεκτρικής αντίστασης, να ανιχνεύει την παραμόρφωση και την βλάβη (M.Saafi).

Κεφάλαιο 4 – Είδη Φασματοσκοπίας

4.1 DRS -Διηλεκτρική φασματοσκοπία εναλλασσόμενου πεδίου

4.1.1. Θεωρητικό Υπόβαθρο

Η διηλεκτρική σταθερά $\varepsilon = \varepsilon' - i\varepsilon''$ είναι το μέγεθος που περιγράφει την διηλεκτρική συμπεριφορά του υλικού. Σχεδόν σε όλες τις μεθόδους μέτρησης της μιγαδικής διηλεκτρικής σταθεράς ε, δηλαδή των μεγεθών ε' και ε'', το υπό μελέτη υλικό τοποθετείται μεταξύ των οπλισμών ενός πυκνωτή ή σ' ένα κυματοδηγό ή γενικά σε μια κυψελίδα που αποτελεί τμήμα ενός ηλεκτρικού κυκλώματος. Στο κύκλωμα εφαρμόζεται τάση (γενικά ημιτονοειδής ή βηματική). Από την μέτρηση διαφόρων μεγεθών που χαρακτηρίζουν το ηλεκτρικό κύκλωμα (αγωγιμότητα, χωρητικότητα κ.λ.π.) προκύπτουν ε' και ε''. Η εκλογή της μεθόδου καθορίζεται κατά πρώτο λόγο από την συχνότητα και κατά δεύτερο από την θερμοκρασία. Το πραγματικό μέρος της διαπερατότητας ή της διηλεκτρικής σταθεράς ε' και του φανταστικού μέρος ε'' ή του παράγοντα απώλειας $tan\delta$, που υπόκεινται σε εναλλακτική (AC) ημιτονοειδή τάση τροφοδοσίας, μπορούν να προσδιοριστούν από τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$\varepsilon' = \frac{Cp \cdot d}{\varepsilon_0 \cdot A} \quad (9)$$

$$tan\delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} = \frac{1}{Rp \cdot Cp \cdot \omega} \quad (10)$$

όπου το ε_0 αντιπροσωπεύει τη διαπερατότητα του κενού, το d αντιπροσωπεύει το πάχος του υλικού δείγματος, το A είναι η περιοχή του ηλεκτροδίου, το ω δείχνει τη γωνιακή συχνότητα και τα C_p και R_p αντιπροσωπεύουν τις μετρήσεις χωρητικότητας και αντίστασης αντίστοιχα. Σε χαμηλή συχνότητα, η στατική (DC) αγωγιμότητα μπορεί να εξαχθεί από τις μετρήσεις αγωγιμότητας AC χρησιμοποιώντας τον τύπο:

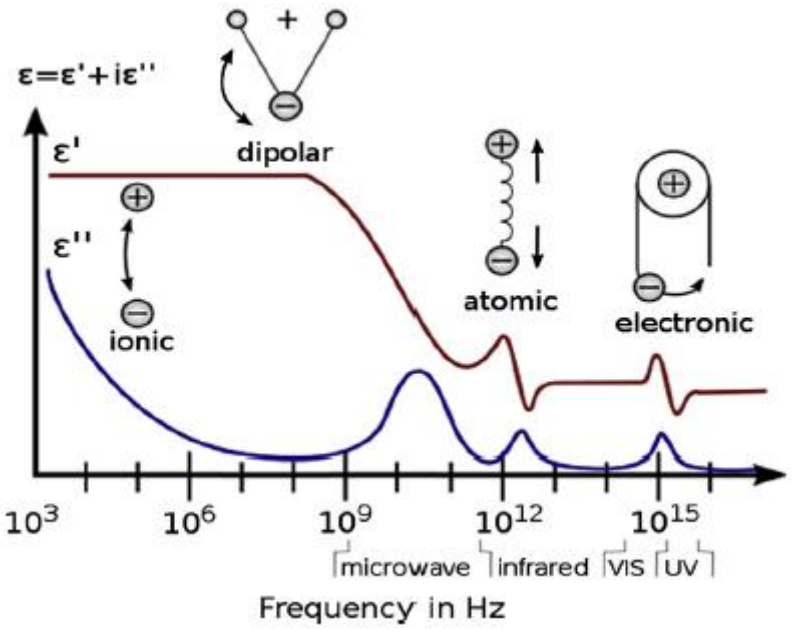
$$\sigma_{ac}(\omega) = \omega \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon''(\omega) = \sigma_{dc} + K \cdot \omega'' \quad (11)$$

όπου το K αντιπροσωπεύει μία εμπειρική παράμετρο και το n αντιπροσωπεύει την κλίση υψηλής συχνότητας της αγωγιμότητας εναλλασσόμενου ρεύματος κυμαινόμενη από 0 έως 1 (R. Khazaka, 2011). Η διηλεκτρική φασματοσκοπία μπορεί επίσης να μελετήσει τις δυναμικές αλλαγές στη διηλεκτρική σταθερά και τη συχνότητα σάρωσης. Μπορεί να παρέχει τεράστιες πληροφορίες σχετικά με τη δομή της ύλης, την εκτόνωση ιόντων, τον ηλεκτρικό προσανατολισμό κ.λπ.

Τα διηλεκτρικά είναι μη μεταλλικά υλικά, με μόνιμα ή επαγόμενα δίπολα. Τα ηλεκτρόνια μέσα στο υλικό περιορίζονται σε κίνηση κρατώντας το αρχικό μόριο. Τέτοια υλικά έχουν ένα υψηλό ενεργειακό κενό, περισσότερο από 3 eV. Έτσι δεν υπάρχει πιθανότητα ένα ηλεκτρόνιο να μεταπηδήσει από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας, ακόμα και με την μετάδοση θερμικής ενέργειας και τάσης. Γενικά, υπάρχουν δύο τύποι διηλεκτρικών υλικών, ενεργά και παθητικά διηλεκτρικά υλικά. Τα ενεργά διηλεκτρικά μπορούν να οριστούν ως υλικά που μπορούν να δέχονται τα ηλεκτρικά φορτία όταν διατηρούνται σε ένα ηλεκτρικό πεδίο και έτσι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για εφαρμογές αποθήκευσης ενέργειας. Τα παθητικά διηλεκτρικά υλικά είναι μονωτές, οι οποίοι δεν επιτρέπουν τη ροή ηλεκτρισμού. Υλικά όπως το καουτσούκ και το γυαλί μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως παθητικά διηλεκτρικά υλικά.

Η διαδικασία αναδιοργάνωσης των φορτίων μέσα σε ένα διηλεκτρικό υλικό κάτω από ένα εξωτερικό ηλεκτρικό πεδίο είναι γνωστή ως πόλωση. Η πόλωση προκύπτει από την ανομοιογένεια της κατανομής του ηλεκτρικού φορτίου στο χώρο και γίνεται με δύο διαφορετικούς τρόπους. Όταν ένα ουδέτερο άτομο τοποθετείται σε ένα εξωτερικό ηλεκτρικό πεδίο, η καθαρή δύναμη είναι κανονικά μηδενική. Είναι γνωστό ότι το άτομο αποτελείται από ένα θετικά φορτισμένο πυρήνα με ακτίνα 10^{-15} m και ένα αρνητικά φορτισμένο νέφος ηλεκτρονίων περιβάλλει τον πυρήνα. Παρουσία ενός ηλεκτρικού πεδίου, μια δύναμη επενεργεί επί του θετικού μέρους του ατόμου και τείνει να τον προσανατολίσει προς την ίδια κατεύθυνση του εφαρμοζόμενου ηλεκτρικού πεδίου. Ομοίως, μια δύναμη επενεργεί στο αρνητικό μέρος του ατόμου που το κατευθύνει προς την αντίθετη κατεύθυνση του εφαρμοσμένου ηλεκτρικού πεδίου. Στη θέση ισορροπίας, δεν θα υπάρξει καμία μετακίνηση ατόμων λόγω του αποτελέσματος ακύρωσης αντίθετων φορτίων και η καθαρή δύναμη θα είναι μηδενική. Υπάρχουν διάφοροι μηχανισμοί που εμπλέκονται στη δημιουργία πόλωσης και τα περισσότερα μόρια παρουσιάζουν πόλωση κάτω από ένα ισχυρό εξωτερικό ηλεκτρικό πεδίο. Ο τύπος πόλωσης μπορεί να διακριθεί από τον μηχανισμό που εμπλέκεται στη

διαδικασία (Kalim Deshmukh S. S., 2017). Οι γνωστοί τύποι μηχανισμών πόλωσης είναι ηλεκτρονική πόλωση, πόλωση προσανατολισμού και ιονική πόλωση. Η Εικόνα 14 δείχνει τη μεταβολή αυτών των μηχανισμών πόλωσης ως συνάρτηση της συχνότητας.



Εικόνα 14 : Μηχανισμοί πόλωσης σε σχέση με την περιοχή συχνοτήτων (Kalim Deshmukh S. S., 2017).

- Ηλεκτρονική πόλωση

Η ηλεκτρονική πόλωση συνήθως εμφανίζεται σε υψηλές συχνότητες στα ουδέτερα άτομα, όπου το ηλεκτρικό πεδίο προκαλεί μια μικρή μετατόπιση των ηλεκτρονίων οποιουδήποτε ατόμου σε σχέση με τον θετικό πυρήνα. Σε χαμηλές συχνότητες, υπάρχει παραμόρφωση της διάταξης των ατομικών πυρήνων σε ένα μόριο ή πλέγμα, που αναφέρεται ως ατομική πόλωση. Γενικά, τα ηλεκτρόνια περιστρέφονται γύρω από τον πυρήνα σε μια συμμετρική διαδρομή χωρίς ηλεκτρικές επιδράσεις. Όταν ένα διηλεκτρικό υλικό τοποθετείται σε ένα εξωτερικό ηλεκτρικό πεδίο, δημιουργείται μια προσωρινή διπολική ροπή και ασύμμετρο σχήμα σε όλα τα άτομα του υλικού. Η ατομική πόλωση είναι επίσης γνωστή ως δονητική πόλωση και σχετίζεται στενά με την ηλεκτρονική πόλωση. Η ατομική πόλωση έχει χαμηλότερες συχνότητες συντονισμού, καθώς πρέπει να μετακινηθεί μεγαλύτερη μάζα. Η ηλεκτρονική πόλωση βρίσκεται στην οπτική ζώνη, ενώ η ατομική πόλωση βρίσκεται στην υπέρυθρη ζώνη. Επομένως, η ηλεκτρονική πόλωση συνάγεται ως φαινόμενο επαγόμενης πόλωσης και είναι ανεξάρτητη από τη θερμοκρασία, βρισκόμενη σε όλα τα διηλεκτρικά υλικά.

- Ιοντική πόλωση

Η ιοντική πόλωση, επίσης γνωστή ως πόλωση μετατόπισης, εμφανίζεται σε ιωνικά στερεά. Αυτός ο τύπος πόλωσης παρατηρείται όταν υπάρχει μια ασύμμετρη κατανομή ηλεκτρονίων μεταξύ διαφορετικών ατόμων που περιλαμβάνονται σε ένα μόριο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μετατόπιση του νέφους ηλεκτρονίων προς το ισχυρότερα δεσμευτικό άτομο

και τελικά τα άτομα αποκτούν φορτία αντίθετης πολικότητας. Τα ιοντικά είδη γενικά μετατοπίζονται στην εφαρμογή ενός ηλεκτρικού πεδίου, οδηγώντας σε μια πολύ υψηλή διηλεκτρική σταθερά. Αυτός ο τύπος πόλωσης δεν εξαρτάται από τη θερμική ενέργεια και συνήθως ανιχνεύεται σε κεραμικά, ανόργανους κρυστάλλους και γυαλιά.

- Πόλωση Προσανατολισμού ή Διπολική πόλωση

Η πόλωση του προσανατολισμού εμφανίζεται για διπολικά υλικά που έχουν μόνιμη διπολική ροπή. Η μεταφορά ορισμένων ηλεκτρονίων σθένους δημιουργεί ιοντικούς δεσμούς μεταξύ δύο μορίων, τα οποία προέρχονται από μόνιμη διπολική ροπή. Στα διπολικά υλικά, αρχικά όλα τα δίπολα προσανατολίζονται τυχαία στο χώρο και με την εφαρμογή ενός ηλεκτρικού πεδίου τείνουν να ευθυγραμμίζονται στην ίδια κατεύθυνση με το εφαρμοζόμενο πεδίο για να δώσουν μια καθαρή πόλωση προς αυτή την κατεύθυνση. Επιπλέον, μπορεί να φανεί ότι ο ρυθμός του διπολικού προσανατολισμού βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στις ενδο- και διαμοριακές αλληλεπιδράσεις. Έτσι, το μοριακό δίπολο μπορεί να προσανατολιστεί σε ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων, το οποίο βασίζεται καθαρά στην ευκολία με την οποία τα δίπολα περιστρέφονται. Στα μικροκύματα ή γενικά στις υψηλές συχνότητες, τα δίπολα προσπαθούν να ακολουθήσουν το ταχέως μεταβαλλόμενο πεδίο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την πόλωση προσανατολισμού, η οποία αναφέρεται στη διάταξη δίπολων στην κατεύθυνση του ηλεκτρικού πεδίου. Αυτή η πόλωση επηρεάζεται από τη θερμοκρασία, επειδή η θερμική ενέργεια επηρεάζει την ευθυγράμμιση των μορίων.

- Διεπαφανειακή πόλωση

Αυτός ο τύπος πόλωσης παρατηρείται συνήθως σε διηλεκτρικά υλικά που έχουν φορείς φορτίου οι οποίοι είναι ικανοί να μεταναστεύσουν σε κάποια απόσταση μέσω του όγκου του υλικού και έτσι δημιουργούν μακροσκοπική παραμόρφωση πεδίου.

Με βάση τα όσα προαναφέραμε, η συνολική συμπεριφορά του υλικού εξαρτάται από τα είδη των δίπολων και των ελεύθερων φορέων που έχει. Κάθε είδος δίπολων αναμένεται να έχει την συνεισφορά του στην διηλεκτρική σταθερά που όμως θα εκδηλώνεται από μια συχνότητα και κάτω (Kasap, 2004).

4.1.2 Ανάλυση Μηχανισμού

Η φασματοσκοπία διηλεκτρικής αποκατάστασης (Dielectric Relaxation Spectroscopy, DRS) αποτελεί μια μέθοδο που μετρά την σύνθετη διηλεκτρική συνάρτηση της συχνότητας, καλύπτοντας συμπληρωματικά ένα φάσμα από 10^{-5} ως 10^{12} Hz. Η μέθοδος αυτή καλύπτει συχνότητες 10^{-5} ως 10^{7} Hz. Στους οπλισμούς του πυκνωτή παράλληλων επίπεδων οπλισμών τοποθετείται το υπό μελέτη υλικό και εφαρμόζεται μια εναλλασσόμενη τάση μερικών Volt. Η εφαρμοζόμενη τάση υπολογίζεται από τον τύπο:

$$V(t) = R \cdot (V \cdot e^{i\omega t}) \quad (12)$$

Η απόκριση στο ρεύμα έχει την μορφή:

$$I(t) = \frac{dD}{dt} = R \cdot (I \cdot e^{i\omega t + \varphi}) \quad (13)$$

Δηλαδή, το ρεύμα «προπορεύεται» κατά γωνία φ. Η σύνθετη αντίσταση υπολογίζεται από τον τύπο:

$$Z(\omega) = \frac{V \cdot e^{i\omega\tau}}{I \cdot e^{i(\omega\tau+\varphi)}} = \frac{V}{I} \cdot e^{-i\varphi} \qquad (14)$$

Η σύνθετη μακροσκοπική αγωγιμότητα υπολογίζεται από τον τύπο:

$$Y(\omega) = \frac{I \cdot e^{i(\omega\tau+\varphi)}}{V \cdot e^{i\omega\tau}} = \frac{I}{V} \cdot e^{i\varphi} \qquad (15)$$

Η σύνθετη διηλεκτρική συνάρτηση του υλικού $\varepsilon^*(\omega)$ και η σύνθετη ειδική αγωγιμότητα του σ (ω) υπολογίζονται από τις σχέσεις:

$$\varepsilon(\omega) = \frac{1}{i \cdot \omega \cdot Z(\omega) \cdot C_0} \qquad (16)$$

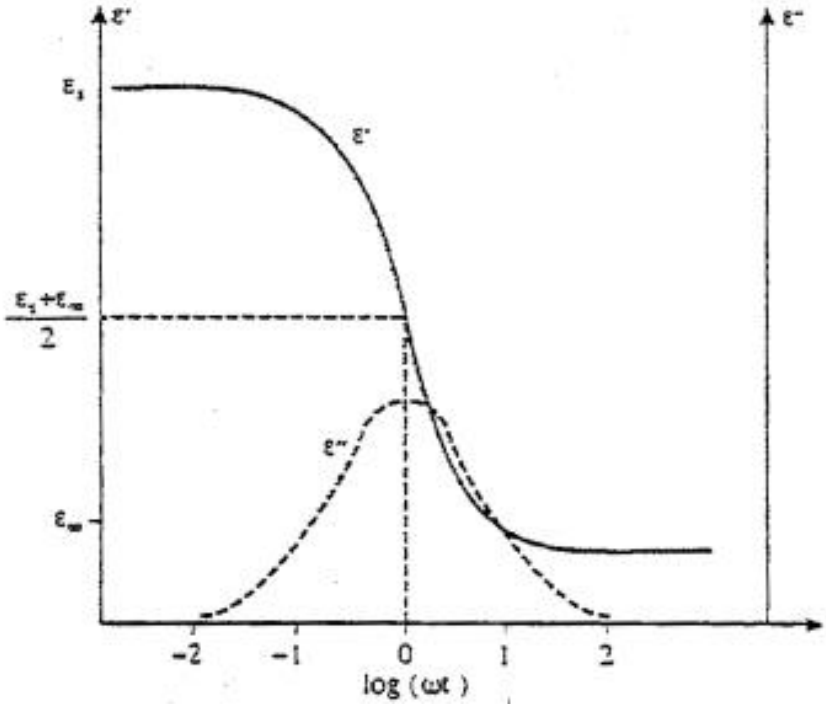
Όπου $C_0 = \varepsilon_0 \cdot \frac{A}{d}$, (17) είναι η χωρητικότητα του κενού πυκνωτή και $\sigma(\omega) = Y(\omega) \cdot \frac{d}{A}$ (18)

Στην DRS τεχνική το υπό μελέτη δείγμα τοποθετείται ανάμεσα σε δύο κυκλικά μεταλλικά ηλεκτρόδια και σχηματίζεται πυκνωτής. Ο πυκνωτής κατόπιν τοποθετείται σε μια κυψελίδα, μέλος ενός ηλεκτρικού κυκλώματος. Στην κυψελίδα αυτή εφαρμόζεται ροή υγρού αζώτου για την ρύθμιση του επιθυμητού εύρους θερμοκρασιών και ημιτονοειδής τάση. Το υλικό υποβάλλεται σε εναλλασσόμενο ηλεκτρικό πεδίο και εμφανίζεται το φαινόμενο της πόλωσης λόγω της τάσης των δίπολων να μετακινηθούν. Η διαδικασία αυτή απαιτεί την μεσολάβηση ενός χρονικού διαστήματος τόσο έτσι ώστε να προσανατολιστούν τα δίπολα και το σύστημα να φτάσει σε ισορροπία. Ο χρόνος αυτός ονομάζεται χρόνος αποκατάστασης και εξαρτάται από τον μηχανισμό κίνησης, την μοριακή δομή και την θερμοκρασία. Έχει παρατηρηθεί πως με την αύξηση της θερμοκρασίας ο χρόνος αυτός μειώνεται. Η προκύπτουσα πόλωση, από την εφαρμογή του ηλεκτρικού πεδίου έχει ως αποτέλεσμα τον αναπροσανατολισμό των διπόλων και εκφράζεται μέσω της διηλεκτρικής σταθεράς ή αγωγιμότητας. Για την διηλεκτρική σταθερά θα έχουμε τις εξισώσεις Debye:

$$\varepsilon'(\omega) = \varepsilon_\infty + \varepsilon_s - \frac{\varepsilon_\infty}{1+\omega^2 \cdot \tau^2} \qquad (19)$$

$$\varepsilon''(\omega) = \left(\varepsilon_s - \frac{\varepsilon_\infty}{1+\omega^2 \cdot \tau^2}\right)\omega \cdot \tau \qquad (20)$$

Όπου το ε_s είναι η στατική διηλεκτρική σταθερά. Η παρακάτω Εικόνα 15 δείχνει την συμπεριφορά της διηλεκτρικής σταθεράς από τις σχέσεις Debye σε μια περιοχή συχνοτήτων γύρω από την τιμή $\omega_{max} = 1/\tau$. Το πραγματικό μέρος συμβολίζει την ενέργεια που αποθηκεύεται στο υλικό παρουσιάζει μια σιγμοειδή καμπύλη σκαλοπατιού ενώ το φανταστικό παρουσιάζει μια κορυφή στη συχνότητα ω_{max}. Η διαφορά $\Delta\varepsilon = \varepsilon_s - \varepsilon_\infty$ λέγεται ένταση του μηχανισμού. Οι εξισώσεις Debye παρουσιάζουν ποιοτικά τη συμπεριφορά της διηλεκτρικής σταθεράς αλλά δεν περιγράφουν ικανοποιητικά τις πειραματικές μετρήσεις (Δ. Παπαδημητριου, 2002).



Εικόνα 15: Ο μηχανισμός Debye. (Δ. Παπαδημητριου, 2002)

Η εξίσωση Havriliak-Negami δίνει την καλύτερη εμπειρική περιγραφή της καμπύλης ε''.

$$\varepsilon'' = \left[\frac{\Delta\varepsilon}{[1+(i\omega t)^{a}]^{\beta}} \right] \quad (21)$$

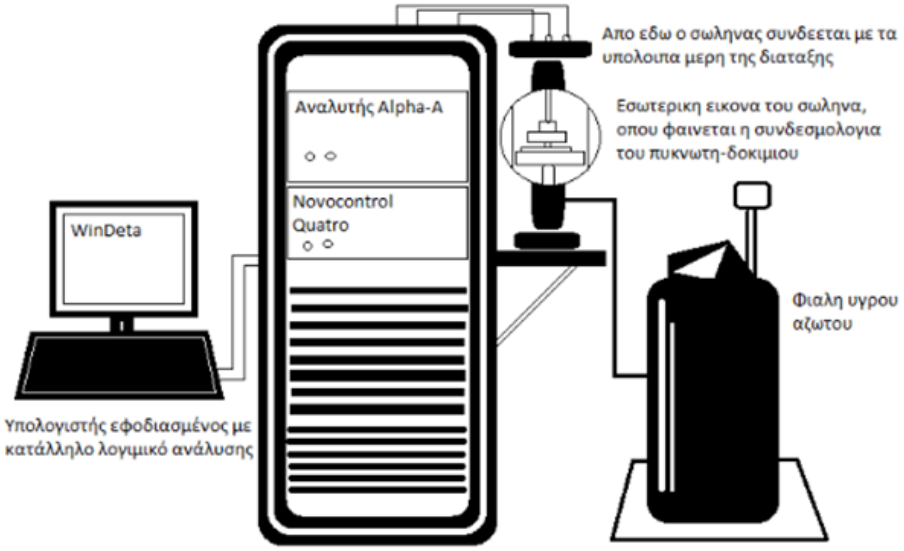
Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε σε αυτή την εργασία αποτελείται από τα εξής μέρη: (Σοβατζόγλου, 2012)

1.Έναν κυλινδρικό σωλήνα, μέσα στον οποίον τοποθετείται ο πυκνωτής που προέκυψε όπως περιγράφηκε νωρίτερα

2.Ένα Dewar υγρού αζώτου,

3.Ένα Novocontrol Quatro που διαχειρίζεται την ψύξη και εν γένει την θερμοκρασία που εφαρμόζεται εντός του κυλινδρικού σωλήνα

4.Έναν αναλυτή Alpha-A συνδεδεμένο με τον πυκνωτή



Εικόνα 16: Πειραματική διάταξη Διηλεκτρικής Φασματοσκοπίας Εναλλασσόμενου Πεδίου (DRS) (Σοβατζόγλου, 2012)

.

4.2 Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης, SEM

Το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο SEM έχει την ικανότητα να παίρνει εικόνες με ανάλυση αρκετών nm. Έτσι χρησιμοποιήθηκε για να παρθούν εικόνες των δοκιμίων, μετά τη θραύση. Το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο έχει ένα θάλαμο κενού όπου τοποθετείται το δείγμα. Ένα πυροβόλο ηλεκτρονίων δημιουργεί μία δέσμη ηλεκτρονίων η οποία σαρώνει την επιθυμητή περιοχή του δείγματος. Ανιχνεύοντας τα σκεδαζόμενα ηλεκτρόνια που προέρχονται από το κάθε σημείο που στοχεύει η δέσμη μπορούν να δημιουργηθούν οι φωτογραφίες της περιοχής που σαρώθηκε. Ανιχνεύονται δύο ειδών ηλεκτρόνια, τα οπισθοσκεδαζόμενα ή ελαστικά σκεδαζόμενα και τα δευτερογενή. Τα οπισθοσκεδαζόμενα ηλεκτρόνια είναι αυτά που σκεδάζονται από το δείγμα χωρίς να χάσουν ενέργεια και προέρχονται κυρίως από επιφανειακές στρώσεις δίνοντας πληροφορία κυρίως για το ατομικό βάρος του υλικού, καθότι όσο πιο πολλά πρωτόνια έχει ο πυρήνας τόσο πιο πολλά είναι και τα ελαστικά σκεδαζόμενα ηλεκτρόνια. Τα δευτερογενή ηλεκτρόνια έχουν πολύ μικρότερη ενέργεια από τα πρωτογενή και προέρχονται κυρίως από μη ελαστικές συγκρούσεις με πρωτογενή ηλεκτρόνια δηλαδή, με αυτά της δέσμης. Δίνουν πληροφορίες για τη μορφολογία του υλικού και προέρχονται από μεγαλύτερο βάθος από ότι τα οπισθοσκεδαζόμενα.

Κεφάλαιο 5 - Υλικά

5.1 Portland Cement, CEM I 52.5 N

Το τσιμέντο τύπου Portland CEM I 52.5 N, αποτελείται από κλίνκερ τύπου Portland, ασβεστόλιθο και γύψο. Παρουσιάζει χαμηλή απαίτηση σε νερό, υψηλές τελικές αντοχές και

πολύ υψηλές πρώιμες αντοχές. Συνιστάται για την κατασκευή προκατασκευασμένων στοιχείων σκυροδέματος, παραγωγή κονιαμάτων υψηλής απόδοσης και παρασκευή σκυροδέματος υψηλής κατηγορίας αντοχής και εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Στα πλαίσια της παρούσας μελέτης εξετάστηκε η επίδραση προσθήκης CNTs και CFs στις μηχανικές και ηλεκτρικές ιδιότητες σκυροδέματος με τσιμέντο τύπου CEM I 52.5N που παρήχθη σε βιομηχανική κλίμακα. Η χημική σύσταση του τσιμέντου τύπου Portland CEM I 52.5 N συνοψίζεται στον Πίνακα 6.

Πίνακας 6: Χημική σύσταση του τσιμέντου τύπου Portland CEM I 52.5 N

Σύνθεση% (κατά βάρος)	Τσιμέντο
SiO_2	19.47
Al_2O_3	4.75
Fe_2O_3	3.43
CaO	63.16
MgO	1.43
SO_3	2.68
Na_2O	0.28
K_2O	0.62
Ειδική επιφάνεια (cm^2/g)	3635

5.2 Αδρανή

Τα χρησιμοποιούμενα αδρανή πρέπει να είναι σύμφωνα με την προδιαγραφή EN 12620, εφ' όσον πρόκειται για κανονικά ή βαριά αδρανή και την προδιαγραφή EN 13055-1, εφ' όσον πρόκειται για ελαφροβαρή αδρανή. Στην παρούσα εργασία ως αδρανές υλικό χρησιμοποιήθηκε άμμος, η οποία πληρεί όλες τις απαιτούμενες προδιαγραφές και επιλέχθηκε ως πρόσθετο του σκυροδέματος λόγω του χαμηλού κόστους και της ευρείας διαθεσιμότητάς της.

5.3 Νερό

Το νερό αναμείξεως και συντηρήσεως του σκυροδέματος θα πρέπει να είναι αποσταγμένο. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι απαγορεύεται η χρήση του θαλασσινού νερού για την παρασκευή και την συντήρηση του σκυροδέματος.

5.4 Πυριτική Παιπάλη

Η πυριτική παιπάλη αποτελείται από πολύ λεπτά σφαιρικά σωματίδια που περιέχουν τουλάχιστον 85% κατά μάζα άμορφο διοξείδιο του πυριτίου. Στην παρούσα διατριβή χρησιμοποιήθηκε το προϊόν Sika® Silicoll P. Το Sika® Silicoll P είναι ένα εξαιρετικά λεπτό ποζολανικό πρόσθετο που προσφέρει ανθεκτικό σκυρόδεμα υψηλής αντοχής σύμφωνα με το DIN 1045. Οι ιδιότητές του παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.

Πίνακας 7: Ιδιότητες της πυριτικής παιπάλης Sika® Silicoll P

Χημική βάση: Άμορφο διοξείδιο του πυριτίου
Σχήμα / Χρώμα Σκόνη / Γκρι
Διάρκεια ζωής: Για τουλάχιστον 1 χρόνο σε κλειστά δοχεία.
Συνθήκες φύλαξης: Αποθηκεύεται σε ξηρό μέρος όπως τσιμέντο.
Πυκνότητα 2,2 g / cm^3
Επιφάνεια (BET) 18 - 22 m^2 / g
Κύριο μέγεθος κόκκων : 0,1 - 0,3 μm
Δευτερογενή σωματίδια > 1μm 30%
Παράγοντας φωτεινότητας L * 54 – 65

Η μέγιστη επιτρεπόμενη δόση 11% bwoc, στην συγκεκριμένη μελέτη χρησιμοποιείται 5%. Το Sika® Silicoll P εισάγεται ταυτόχρονα με το τσιμέντο. Πριν από τη χρήση απαιτείται αρχική δοκιμή σύμφωνα με το DIN EN 206-1 / DIN 1045-2.

5.5 Πρόσμικτα

Σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Ομοσπονδία Εταιριών Χημικών Πρόσμικτων (EFCA) πρόσμικτα είναι οι χημικές ενώσεις οι οποίες προστίθενται στο σκυρόδεμα κατά την διαδικασία ανάμειξης με στόχο τη βελτίωση των ιδιοτήτων και της συμπεριφοράς του σκυροδέματος (EN 934). Τα κυριότερα χημικά πρόσμικτα είναι μειωτές ύδατος, επιταχυντές, επιβραδυντές και αερακτικά. Τα αερακτικά είναι υλικά που σταθεροποιούν μικρού & ομοιόμορφου μεγέθους φυσαλίδες αέρα στη μάζα του νωπού σκυροδέματος, δίνοντας τη δυνατότητα και για βελτίωση της ρεολογίας του μείγματος στη νωπή φάση, αλλά και ανθεκτικότητα του σκληρυμένου σκυροδέματος σε κύκλους πήξης-τήξης και παγολυτικά άλατα (Ε. Βιντζηλαίου). Τα χημικά πρόσμικτα έχουν ως στόχο την μεταβολή (βελτιώση) των ιδιοτήτων του σκυροδέματος, συγκεκριμένα:

1. Εργασιμότητα, μεταβολή της σύστασης και του χρόνου εφαρμογής
2. Ποιότητα, μεταβολή ανθεκτικότητας
3. Διαχείριση, βελτίωση των συνθηκών μεταφοράς και διάστρωσης
4. Ανθεκτικότητα, επιμήκυνση του χρόνου ζωής του σκυροδέματος
5. Μείωση απαιτήσεων σε νερό και ενέργεια

Στην παρούσα μελέτη χρησιμοποιήθηκαν τα προϊόντα Sika® Stabilizer-100 για την διασπορά των CNTs, και Sika®ViscoCrete®-3082 για την διασπορά των CFs. Το Sika® Stabilizer-100 βελτιώνει την αντοχή του σκυροδέματος, μειώνει τη διαπερατότητα στο νερό και στα χλωριόντα και βελτιώνει την συνεκτικότητα του. Η πυκνότητα του είναι 1.14 g/cm^3 και συνιστάται να χορηγείται σε δόση μεταξύ 0.1% και 1.5% bwoc. Το Sika® ViscoCrete®-

3082 είναι ένας παράγων επιβράδυνσης/ ροής τελευταίας γενιάς για σκυρόδεμα υψηλής απόδοσης. Δεν περιέχει χλωριόντα ούτε άλλες χημικές ουσίες που μπορούν να προσβάλλουν το σκυρόδεμα αν σε αυτό εισαχθεί οπλισμός χάλυβα.

5.6 CFs (Carbon Fibers, CFs)

Οι ιδιότητες των εμπορικών CFs που χρησιμοποιήθηκαν ως μέσο ενίσχυσης στα δοκίμια τσιμέντου παρουσιάζονται στον παρακάτω Πίνακα 8 και απεικονίζονται παρακάτω.

Πίνακας 8: Οι ιδιότητες των εμπορικών CFs που χρησιμοποιήθηκαν ως μέσο ενίσχυσης στα δοκίμια τσιμέντου.

Δείγμα	**Διάμετρος**	**Μήκος**	**Πυκνότητα**	**Αντοχή εφελκυσμού**	**Ειδικό βάρος**
CF	7 μm	3mm	450 g / dm^3	3500 MPa	1.7 g / cm^3

Εικόνα 17: Απεικόνιση των CFs που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα μελέτη.

5.7 CNTs (Carbon Nanotubes, CNTs)

Οι ιδιότητες των CNTs παρουσιάζονται στον παρακάτω Πίνακα. Το ποσοστό σε ομάδες COOH είναι 5% wt. και η καθαρότητα > 99% , προσδιορισμένα μέσω θερμοσταθμικής και στοιχειακής ανάλυσης.

Πίνακας 9: Ιδιότητες των CNTs που χρησιμοποιήθηκαν ως μέσο ενίσχυσης στα δοκίμια τσιμέντου.

Δείγμα	**Διάμετρος**	**Μήκος**	**Ποσοστό επιφανειακών οξυγονούχων ομάδων (%)**	**Θερμική σταθερότητα**	**Χρονική σταθερότητα αιωρήματος στο νερό**
CNT	40-60 nm	1-2μm	>13%	>600 ^{o}C	>6μήνες

Κεφάλαιο 6 - Εξοπλισμός

6.1 Συσκευή Υπερήχων - Elmasonic S 30 (H)

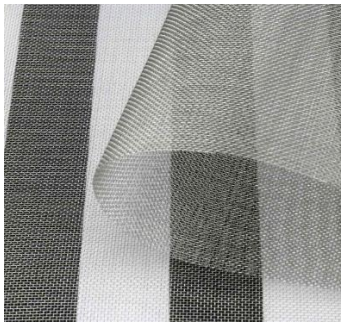
Οι υπερηχητικές συσκευές Elmasonic S είναι εξοπλισμένες με υπερηχητική συχνότητα 37 kHz και στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν για διασπορά των ειδικών αιωρημάτων που παρήχθησαν με σκοπό την εισαγωγή τους στην πάστα του τσιμέντου.

Εικόνα 18: Συσκευή υπερήχων.

6.2 Αναμικτήρας Κονιάματος – Mortar Mixer

Για την παρασκευή των δοκιμίων σκυροδέματος χρησιμοποιήθηκε η υγρή μέθοδος σύνθεσης. Κατά την υγρή μέθοδο παρασκευής οι ακριβείς ποσότητες όλων των συστατικών του σκυροδέματος (τσιμέντο ή υποκατάστατά του, αδρανή υλικά, νερό, χημικά πρόσθετα, πρόσμικτα και ενισχυτικά υλικά) τροφοδοτούνται στον μηχανικό αναμικτήρα κονιάματος. Το προϊόν της διεργασίας ανάμιξης, που είναι το έτοιμο σκυρόδεμα, μεταφέρεται κατόπιν σε ειδικά κατασκευασμένα καλούπια και δονείται ώστε να συμπυκνωθεί και να πάρει τη επιθυμητή μορφή (Εικόνα 19).

Εικόνα 19: Αναμικτήρας κονιάματος – Mortar Mixer



Εικόνα 20: Φύλλο ηλεκτροδίων.

6.3 Ηλεκτρόδια

Τα ηλεκτρόδια γεφυρώνουν το σκυρόδεμα και τον εξοπλισμό μέτρησης. Στα δοκίμια προσδιορισμού της ηλεκτρομηχανικής συμπεριφοράς αμέσως μετά τη χύτευση ενσωματώθηκαν ηλεκτρόδια ανοξείδωτου χάλυβα πάχους 0,3 mm και σκεπάστηκαν με γυάλινη πλάκα για τη συντήρηση τους. Τα ηλεκτρόδια κόβονται στο εργαστήριο σε διαστάσεις 6cm ύψος και 4cm πλάτος με σκοπό την εφαρμογή τους στα καλούπια (Εικόνα 20).

6.4 Καλούπια

Μετά την ανάμιξη, το ρευστό μίγμα του σκυροδέματος τοποθετείται καλούπια ειδικά διαμορφωμένα από Teflon, μεγέθους 40 mm x 40 mm x 160 mm. Σε κάθε καλούπι εισάγεται και στις τρεις του θέσεις σκυρόδεμα με όμοια σύσταση και με αποτέλεσμα να προκύπτουν από αυτό 3 δοκίμια με ίδια συγκέντρωση. Τα δοκίμια ξεκαλουπώνονται 24 ώρες μετά τη παρασκευή τους και συντηρούνται σε ειδικά πλαστικά δοχεία, τα οποία περιέχουν αποσταγμένο νερό για 28 ημέρες (Εικόνα 21).

Εικόνα 21: Καλούπι από Teflon.

Εικόνα 22: Συσκευή συμπύκνωσης σκυροδέματος - Jolting Apparatus

6.5 Συσκευή Συμπύκνωσης Σκυροδέματος - Jolting Apparatus

Με τον όρο συμπύκνωση ορίζεται η διαδικασία κατά την οποία το σκυρόδεμα υποβάλλεται σε δόνηση (με δονητές) ή (σπανιότερα) σε κοπάνισμα (π.χ. με ράβδους, πήχεις κ.τ.λ.) ώστε να ελαττωθεί το ποσοστό των πόρων στη μάζα του και να αποβληθεί ο αέρας έχει εγκλωβιστεί. Αν ληφθεί υπόψη ότι για κάθε 1% φυσαλίδων αέρα που εγκλωβίζεται στο σκυρόδεμα έχουμε μείωση της αντοχής κατά περίπου 4-5%, η συμπύκνωση αποτελεί ιδιαίτερα σημαντική εργασία για το νωπό σκυρόδεμα. Η συσκευή αποτελείται από μια επιφάνεια που συγκρατεί το καλούπι και είναι τοποθετημένη σε ένα περιστρεφόμενο έκκεντρο που κινείται με 60 στροφές ανά λεπτό (Εικόνα 22).

6.6 Συνθήκες Συντήρησης Σκυροδέματος

Στην παρούσα μελέτη για την ωρίμανση των δοκιμίων σκυροδέματος για 28 ημέρες μέχρι αυτά να υποβληθούν σε μηχανικό και ηλεκτρικό χαρακτηρισμό παρέμειναν σε δύο διαφορετικής νοοτροπίας συντήρησης δοχεία. Η Εικόνα 25 αναφέρεται στην γυάλινη συσκευή η οποία είναι αεροστεγώς κλεισμένη και στον πυθμένα της τοποθετήθηκε υπέρκορο διάλυμα κατάλληλου άλατος νιτρικού καλίου, KNO_3 με σκοπό να επιτευχθεί κορεσμός σε υγρασία σε ποσοστό 95%. Από την άλλη, στην δεύτερη Εικόνα 26 παρουσιάζεται ένας παραδοσιακός τρόπος συντήρησης του σκυροδέματος όπου αυτό τοποθετείται σε αεροστεγώς

κλεισμένο δοχείο το οποίο είναι γεμισμένο τόσο ώστε να καλύπτει πλήρως τα δοκίμια με αποσταγμένο νερό (Εικόνες 23, 24).

Εικόνα 23: Δοχείο συντήρησης του σκυροδέματος (υάλινο).

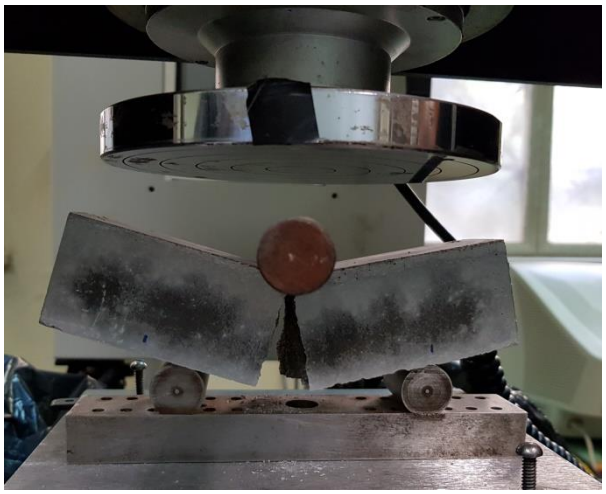
Εικόνα 24: Δοχείο συντήρησης του σκυροδέματος (πλαστικό).

6.7 Συσκευή Κάμψης και Θλίψης– INSTRON

6.7.1 Δοκιμή Κάμψης

Η κάμψη είναι ευρύτατα δημοφιλής ως μηχανική δοκιμή εφόσον η γεωμετρία του δοκιμίου είναι η απλούστερη δυνατή (Εικόνα 25). Στην παρούσα μελέτη υλοποιήθηκε η κάμψη τριών σημείων (Εικόνα 26). Πριν από τη δοκιμή κάμψης, προσδιορίζεται το μέσο μήκος του δείγματος δοκιμής από δύο μετρήσεις έως το πλησιέστερο χιλιοστό του άξονα μεταξύ των κυλίνδρων στηρίξεως και στις δύο πλευρές του δείγματος (Εικόνα 27).

Εικόνα 25: Συσκευή κάμψης και θλίψης.



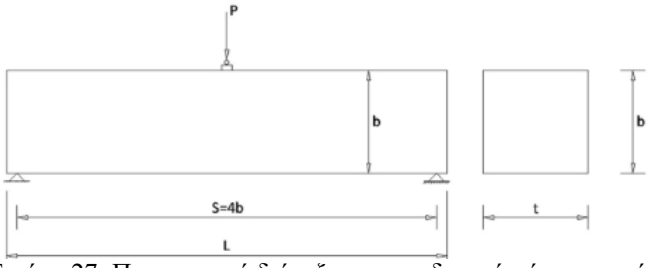
Εικόνα 26: Πειραματική διάταξη για την δοκιμή κάμψης τριών σημείων.

6.7.2 Δοκιμή Θλίψης

Από κάθε δοκίμιο που υποβάλλεται σε δοκιμή κάμψης προκύπτουν δύο κομμάτια τα οποία με την σειρά τους εξετάζονται ως προς την αντοχή τους σε θλίψη στην ίδια συσκευή αλλά με διαφορετική πειραματική διάταξη. Στο δοκίμιο εφαρμόζεται θλιπτικό αξονικό φορτίο με βαθμιαία και σταθερή ταχύτητα φόρτισης. Η επιβολή του φορτίου συνεχίζεται μέχρι την θραύση του δοκιμίου (Εικόνα 28).

Για την μονοαξονική θλίψη στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν χαλύβδινες πλάκες ανάμεσα στις κεφαλές επιβολής φορτίου με σκοπό την ομοιόμορφη κατανομή φορτίου στην πάνω επιφάνεια του δοκιμίου. Το δοκίμιο φορτίζεται μέχρι να αστοχήσει και

παραμορφώνεται εγκάρσια λόγω της επαφής του με τις χαλύβδινες πλάκες και οι οριζόντιες τάσεις εξασθενούν καθώς κινούμαστε προς το μέσον του δοκιμίου.



Εικόνα 27: Πειραματική διάταξη για την δοκιμή κάμψης τριών σημείων.

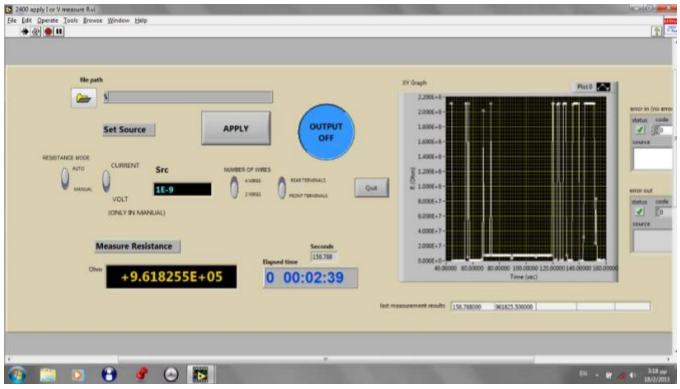
Εικόνα 28: Πειραματική διάταξη για την δοκιμή θλίψης.

6.8 Μετρητικό-Πηγή Keithley 2400

Το Keithley 2400 είναι πηγή ρεύματος και μετρητικό. Εφαρμόζει σταθερό ρεύμα, που καθορίζεται από τον χρήστη, μέχρι 1 A με μεγάλη ακρίβεια και ταυτόχρονα μετράει είτε ένταση του ρεύματος είτε τάση. Ομοίως, εφαρμόζει σταθερή ηλεκτρική τάση μέχρι 20 V με μεγάλη ακρίβεια και την ένταση του ρεύματος. Έτσι, με μία απλή διαίρεση της τιμής της τάσης με αυτή του ρεύματος μπορούμε να έχουμε την τιμή της αντίστασης. Όταν δουλεύει σαν πηγή ρεύματος, η μέγιστη τάση που μπορεί να εφαρμόσει για να έχουμε την επιθυμητή ένταση είναι 20 V. Συνεπώς, για πολύ μεγάλες αντιστάσεις μπορεί η μέγιστη τιμή του ρεύματος που μπορεί να εφαρμόσει να είναι μικρότερη από 1 A, καθώς και για περιπτώσεις ανοιχτού κυκλώματος όπου προφανώς η ένταση θα είναι 0. Αντίστοιχα, όταν δουλεύει σαν πηγή τάσης, η ένταση του ρεύματος που προκύπτει δεν πρέπει να υπερβαίνει το 1 A. Οπότε, για πάρα πολύ μικρές αντιστάσεις μπορεί η μέγιστη τιμή της ηλεκτρικής τάσης που μπορεί να εφαρμόσει να είναι μικρότερη από 20 V.

Επιπλέον μπορεί να μετράει κατευθείαν την τιμή της ωμικής αντίστασης. Δηλαδή, ο χρήστης του ζητάει να εφαρμόσει συγκεκριμένη και σταθερή τάση ή ένταση ηλεκτρικού ρεύματος, και αυτό κάνει την ανάλογη μέτρηση, έντασης ή τάσης αντίστοιχα, κάνει τους απαιτούμενους υπολογισμούς και δίνει την τιμή της ωμικής αντίστασης. Σ' αυτή την περίπτωση ο χρήστης μπορεί να του ζητήσει να μετράει αυτοματοποιημένα. Δηλαδή επιλέγει το ίδιο το μηχάνημα από μόνο του ποια είναι η κατάλληλη τιμή της έντασης που θα εφαρμόσει για να έχει το ελάχιστο δυνατό σφάλμα και αναγράφει στην οθόνη του την τιμή που επέλεξε και την μετρούμενη αντίσταση. Σ' αυτή την περίπτωση η πηγή μπορεί να εφαρμόσει μόνο ένταση και όχι τάση. Έχει τη δυνατότητα να μετράει είτε με τη χρήση δύο ηλεκτροδίων (two wire sensing mode) είτε με τη χρήση τεσσάρων (four wire sensing mode), όπου τα δύο είναι για την πηγή, να βάζει το ρεύμα ή την τάση, και τα άλλα δύο για τη μέτρηση, του ρεύματος ή της τάσης. Έτσι με τη χρήση τεσσάρων ηλεκτροδίων αυξάνεται η ακρίβεια των μετρήσεων, κυρίως όταν η ωμική αντίσταση του δοκιμίου που μετριέται είναι πολύ μικρή και συγκρίσιμη με εκείνη των ηλεκτροδίων και των επαφών.

Τέλος, έχει τη δυνατότητα να συνδεθεί με ηλεκτρονικό υπολογιστή για τον χειρισμό του και την καταγραφή των δεδομένων σε ηλεκτρονική μορφή. Γι' αυτό το σκοπό μπορεί να συνεργαστεί με το πρόγραμμα LabView. Στην Εικόνα 29 παρατηρείται ότι μπορούμε να ελέγξουμε τη συσκευή από το λογισμικό, καθώς και να πάρουμε τιμές μετρούμενου μεγέθους συναρτήσει του χρόνου οι οποίες καταγράφονται.



Εικόνα 29: Το περιβάλλον του Labview κατά τη μέτρηση ωμικής αντίστασης. Παρατηρούμε ενδείξεις ohm, χρόνου και το αντίστοιχο γράφημα.

6.9 Συσκευή Εφελκυσμού θλίψης Instron 1121

Η Instron 1121 έχει μέγιστη ικανότητα επιβολής φορτίου 10kN είτε για αξονικό εφελκυσμό είτε για αξονική θλίψη ή κυκλική φόρτιση μεταξύ προκαθορισμένων ορίων μετατόπισης. Πριν από την έναρξη κάθε εφελκυσμού γίνεται προφόρτιση του δοκιμίου και ελέγχεται η τιμή του φορτίου ώστε να ξεκινά από το μηδέν Αυτό γίνεται γιατί παρατηρήθηκε ότι η τοποθέτηση του δοκιμίου στις αρπάγες επιφέρει μικρό λυγισμό του δοκιμίου. Η τιμή του φορτίου καταγράφεται και τα δεδομένα στέλνονται σε ηλεκτρονικό υπολογιστή. Η καταγραφή της σχετικής παραμόρφωσης γίνεται με οπτικό μηκυνσιόμετρο οι τιμές στέλνονται σε ηλεκτρονικό υπολογιστή όπου γίνεται ο συγχρονισμός των μετρήσεων φορτίου παραμόρφωσης με κατάλληλο software.

Εικόνα 30: Η Instron 1121 που χρησιμοποιήθηκε για τον εφελκυσμό των δοκιμίων και το οπτικό μηκυνσιόμετρο K-100 Fiedler Optoelektronik (μπλε συσκευή).

6.10 Οπτικό μηκυνσιόμετρο Fiedler Optoelektronik K-100

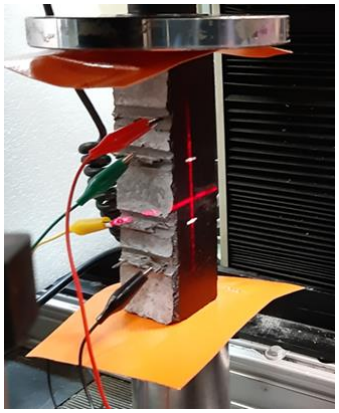
Το οπτικό μηκυνσιόμετρο Fiedler Optoelektronik K-100 έχει τη δυνατότητα να μετράει την επιμήκυνση του δοκιμίου με ακρίβεια μερικών μικρών. Μία δέσμη κόκκινου λέιζερ σαρώνει το δοκίμιο και ανιχνεύοντας την ανακλώμενη ακτινοβολία μετράει την επιμήκυνση. Για το σκοπό αυτό πάνω στο δοκίμιο επικολλούνται λευκές ρίγες από λευκό χαρτί ικανό να παραμορφώνεται πολύ με ελάχιστή τάση ώστε να παρακολουθεί την παραμόρφωση του δοκιμίου και να μην επηρεάζει την μέτρηση (Εικόνα 31). Εναλλακτικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν κατάλληλες λευκές βαφές. Κατά την σάρωση του δοκιμίου, με την ανίχνευση της ανακλώμενης δέσμης, το μηκυνσιόμετρο υπολογίζει την απόσταση μεταξύ

δύο γειτονικών ριγών. Έτσι παίρνει μία αρχική τιμή του μήκους της περιοχής μεταξύ δύο ριγών στην εκκίνηση των μετρήσεων και τη θεωρεί σαν αρχικό μήκος ή μήκος αναφοράς. Καθώς εξελίσσεται το πείραμα, υπολογίζεται η επιμήκυνση της περιοχής αυτής μετρώντας την αύξηση της απόστασης μεταξύ των ριγών. Έτσι υπολογίζεται και καταγράφεται, με τη βοήθεια κατάλληλου συνοδευτικού λογισμικού, κάθε στιγμή η σχετική επιμήκυνση. Ομοίως και όταν η απόσταση μειώνεται αντί να μεγαλώνει, π.χ. θλίψη. Μπορούν να καταγράφονται πολλές περιοχές πάνω στο δοκίμιο ταυτόχρονα. Έτσι αν χρησιμοποιηθούν τρεις ρίγες, τότε το δοκίμιο χωρίζεται σε δύο περιοχές, για 4 ρίγες σε 3 περιοχές. Επιπλέον, παρέχεται η δυνατότητα να υπολογίζεται και η παραμόρφωση κατά το πλάτος του δοκιμίου, δηλαδή κάθετα στον άξονα φόρτισης. Στα πειράματα που έγιναν, μετρήθηκε μόνο η κατά μήκος παραμόρφωση, δηλαδή παράλληλα με τον άξονα φόρτισης.

Η καταγραφή των μετρήσεων, οι απαιτούμενοι υπολογισμοί καθώς και ο χειρισμός του οπτικού μηκυνσιόμετρου γίνονται από ηλεκτρονικό υπολογιστή με το κατάλληλο λογισμικό που το συνοδεύει. Το λογισμικό αυτό έχει τη δυνατότητα να συνεργάζεται και με την Instron 1121 για να καταγράφει την τιμή του φορτίου σε διάφορες χρονικές στιγμές. Στο λογισμικό αυτό εισάγονται από το χρήστη οι διαστάσεις της διατομής του δοκιμίου, πλάτος και πάχος, οπότε μπορεί να υπολογίζεται και να καταγράφεται η τάση του δοκιμίου για διάφορες χρονικές στιγμές. Έτσι, για κάθε χρονική στιγμή καταγράφεται σε ηλεκτρονικό αρχείο η χρονική στιγμή, η τάση, η σχετική επιμήκυνση για κάθε περιοχή, δηλαδή μεταξύ δύο γειτονικών ριγών, και η συνολική σχετική επιμήκυνση του δοκιμίου, δηλαδή μεταξύ των δύο ακραίων ριγών. Μπορούν λοιπόν να εξαχθούν διαγράμματα τάσης-σχετικής επιμήκυνσης, τάσης-χρόνου, σχετικής επιμήκυνσης-χρόνου.

6.11 Διηλεκτρική φασματοσκοπία εναλλασσόμενου πεδίου (DRS)

Με τη βοήθεια της διηλεκτρικής φασματοσκοπίας εναλλασσόμενου πεδίου μετρήθηκε η αγωγιμότητα και η διηλεκτρική σταθερά συναρτήσει της συχνότητας (Εικόνα 32).



Εικόνα 31: Το οπτικό μηκυνσιόμετρο K-100 Fiedler Optoelektronik.

Εικόνα 32: Novocontrol Alpha Analyzer

ΙΙ. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Κεφάλαιο 7 - Προετοιμασία των δοκιμίων

7.1 Πρώτη Σειρά Πειραμάτων – Χύτευση Σκυροδέματος με CNTs

Όπως αναφέρθηκε και στο θεωρητικό μέρος της παρούσας μελέτης τα πρόσμικτα σκυροδέματος που χρησιμοποιήθηκαν για την παρασκευή των κονιαμάτων έχουν συγκεκριμένες προδιαγραφές και γι' αυτό τον λόγο έπρεπε αρχικά να ελεγχθεί η αλληλεπίδραση τους με τα CNTs και τα CFs αντίστοιχα. Αρχικά, τοποθετήθηκαν οι συγκεντρώσεις των CNTs σε ποτήρια ζέσεως μαζί με τα 225 ml αποσταγμένο νερό υπό ανάδευση και κατόπιν αφέθηκαν σε ηρεμία. Αργότερα προστέθηκε στο αιώρημα με τα CNTs, Sika® Stabilizer-100 στην μικρότερη συγκέντρωση των CNTs με την οποία κατόπιν φτιάχτηκαν τα κονιάματα, αυτή των 0.02%. Έπειτα, εισήχθηκαν στο αιώρημα 5 σταγόνες (0.125 g προϊόντος), μετά τοποθετήθηκε στους υπερήχους για 30 min και τέλος αφέθηκε σε ηρεμία. Κατόπιν, παρατηρήθηκε ότι τα CNTs δεν διαχωρίστηκαν πλήρως με αποτέλεσμα το αιώρημα να είναι διαυγές και γι' αυτό το λόγο τοποθετήθηκαν επιπλέον 5 σταγόνες (0.25 g συνολικά στο διάλυμα με 0.09 g CNTs) και επανατοποθετήθηκε για 15 min στους υπερήχους. Κατόπιν, το αιώρημα αφέθηκε σε ηρεμία για 2 ημέρες. Σημειώνεται ότι στις προδιαγραφές του προϊόντος αναγράφεται ότι το προτεινόμενο ποσοστό για το τσιμέντο είναι από 0.05% μέχρι 0.50% bwoc. Στο Πίνακα 10 παρουσιάζονται οι ποσότητες της πρώτης σειράς τσιμεντοκονιαμάτων που παρασκευάστηκαν.

Πίνακας 10: Συγκεντρώσεις υλικών για την παρασκευή των τσιμεντοκονιαμάτων.

Δείγμα	Τσιμέντο (g)	Πυριτική Παιπάλη (g)	Άμμος (g)	Αναλογία νερό/τσιμέντο (N/T)	H_2O (ml)	Συγκέντρωση CNTs (% bwoc)	CNTs (g)	Sika®Stabilizer-100 (g)
Δοκίμιο Αναφοράς χωρίς Πυριτική Παιπάλη	450	-	1350	0.5	225	-	-	-
Δοκίμιο Αναφοράς με Πυριτική Παιπάλη	405	45	1350	0.5	225	-	-	-
Κονίαμα-0.02% CNT	405	45	1350	0.5	225	0.02	0.09	0.25
Κονίαμα-0.05% CNT	405	45	1350	0.5	225	0.05	0.225	0.625
Κονίαμα-0.1% CNT	405	45	1350	0.7	315	0.1	0.45	1.25
Κονίαμα-0.2% CNT	405	45	1350	0.7	315	0.2	0.9	2.5
Κονίαμα-0.5% CNT	405	45	1350	0.7	315	0.5	2.25	6.25

Κονίαμα-1% CNT	405	45	1350	0.7	315	1	4.5	12.5

Η παρασκευή των κονιαμάτων έγινε σύμφωνα με τον κανονισμό The European Standard EN 196-1:1994. Οι αναλογίες είναι, ένα μέρος τσιμέντο, τρία μέρη της τυποποιημένης άμμου και το μισό μέρος του νερού (λόγος ύδατος / τσιμέντου = 0.50). Κάθε παρτίδα για τρία δοκίμια συνίσταται από (450 ± 2) g τσιμέντο (1350 ± 5) g άμμο και (225 ± 1) g νερό. Τα βήματα που ακολουθούνται για την χύτευση των τσιμεντοκονιαμάτων είναι τα εξής:

α) Αρχικά, τοποθετείται το νερό στο μπολ του αναμίκτη (mortar mixer) και προστίθεται το τσιμέντο.

β) Στη συνέχεια τίθεται αμέσως σε λειτουργία ο αναμίκτης σε χαμηλό σημείο ταχύτητας και, μετά από 30 sec προστίθεται η άμμος σταθερά κατά τη διάρκεια των επόμενων 30 sec. Κατόπιν, ο αναμίκτης αλλάζει στην υψηλή ταχύτητα και συνεχίζεται η ανάμιξη για επιπλέον 30 sec. Στον Πίνακα 11 παρουσιάζονται οι ταχύτητες του αναμίκτη.

γ) Αμέσως μετά, ο αναμίκτης απενεργοποιείται για 1 min και 30 sec. Κατά τη διάρκεια των πρώτων 15 sec, αφαιρούνται όλα τα υπολείμματα του μίγματος από τα τοιχώματα του αναμίκτη ακόμη και από το κάτω μέρος και τοποθετούνται στο κέντρο του μπολ.

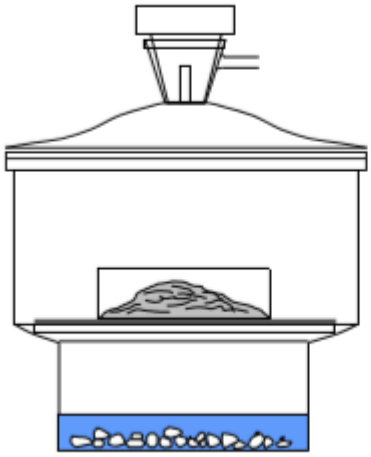
δ) Τέλος, η ανάμειξη συνεχίζεται με υψηλή ταχύτητα για 60 sec μέχρι την τοποθέτηση του μίγματος στα καλούπια και αργότερα στην συσκευή δόνησης όπου το μίγμα θα χτυπηθεί για 120 φορές έτσι ώστε να απομακρυνθούν ο αέρας και οι πόροι που υπάρχουν στο εσωτερικό του.

Πίνακας 11: Ταχύτητες αναμίκτη (mortar mixer)

	Περιστροφές min^{-1}
Χαμηλή Ταχύτητα	140 ± 5
Υψηλή Ταχύτητα	285 ± 10

Η εύρεση της αναλογίας των διαφόρων συστατικών στο σκυρόδεμα, δηλαδή η μελέτη σύνθεσης του σκυροδέματος, αποτελεί μία περισσότερο εμπειρική και λιγότερο επιστημονική διαδικασία, σύμφωνα με την οποία υπολογίζονται οι σωστές ποσότητες τσιμέντου, αδρανών υλικών, νερού και πρόσμικτων ή πρόσθετων (αν χρειάζονται), ώστε να προκύψει σκυρόδεμα με το ελάχιστο δυνατό κόστος, ικανοποιώντας ταυτόχρονα συγκεκριμένες απαιτήσεις. Τηρώντας το ίδιο ποσοστό νερού bwoc στα δοκίμια, παρατηρήθηκε ότι με την αύξηση της συγκέντρωσης των CNTs/ Sika® Stabilizer-100 η ποσότητα του νερού δεν ήταν επαρκής ώστε να έχει το μείγμα τη σωστή κατεργασιμότητα. Συγκεκριμένα, το φαινόμενο παρατηρήθηκε έντονα στο δοκίμιο Mortar-0.1% CNT το οποίο καταργήθηκε και κατασκευάστηκε από την αρχή προσθέτοντας 315 ml H_20. Για το λόγο αυτό, στα υπόλοιπα αιωρήματα των CNT προστέθηκε κατάλληλη ποσότητα νερού ώστε να ισχύει: N/T = 0.7. Οι παραπάνω ποσότητες παρασκευάστηκαν σε τσιμεντοκονιάματα δύο φορές, για την μέτρηση μηχανικών, ηλεκτρικών και πιεζοηλεκτρικών ιδιοτήτων, αντίστοιχα. Για την μέτρηση των ηλεκτρικών ιδιοτήτων στα δοκίμια τοποθετήθηκαν ηλεκτρόδια σε 4 σημεία.

Βασιζόμενοι στον τρόπο συντήρησης σκυροδέματος με επικάλυψη της ελεύθερης επιφάνειας με πλαστικές μεμβράνες, ώστε να παρεμποδίζεται η εξάτμιση του νερού και στην μείωση της κατανάλωσης νερού για την συντήρηση των δοκιμίων στην παρούσα εργασία για την πρώτη σειρά δειγμάτων που δημιουργήθηκαν χρησιμοποιήθηκε ένας διαφορετικός τρόπος συντήρησης. Με αφορμή την μέτρηση τριχοειδούς απορρόφησης η οποία αποτελεί μια καλή ένδειξη της ανθεκτικότητας του, διότι όσο πιο αναπτυγμένο είναι το δίκτυο των τριχοειδών πόρων, τόσο ευκολότερη είναι η διείσδυση των διαβρωτικών ουσιών στο εσωτερικό του υλικού, και την μεγάλη τάση ατμών του υπέρκορου διαλύματος $KNO_3 + H_2O$ κάναμε το εξής πείραμα (Girum Urgessa, 2018), (Hayri UN, 2011). Τα δείγματα του τσιμεντοκονιάματος τοποθετήθηκαν σε γυάλινα δοχεία αεροστεγώς κλεισμένα και στον πυθμένα τοποθετήθηκε υπέρκορο διάλυμα νιτρικού καλίου KNO_3 (συνυπάρχουν υδαρές διάλυμα και στερεοί κόκκοι από άλας). Με την επιλογή αυτού του είδους του άλατος είναι δυνατόν να ρυθμιστεί η υγρασία μέσα στο δοχείο όπως φαίνεται στην παρακάτω Εικόνα 33.



Άλας	$RH_{20°C}$
LiCl	12 %
CH_3COOK	23 %
K_2CO_3	43 %
$Mg(NO_3)_2$	54 %
$NaNO_3$	66 %
NaCl	75 %
$(NH_4)_2SO_4$	81 %
KCl	85 %
$BaCl_2$	91 %
KNO_3	95 %
K_2SO_4	98 %

Εικόνα 33: Σχηματική αναπαράσταση πειράματος (Κόλιας).

Τα δείγματα που προορίζονταν για μηχανικές, ηλεκτρικές και πιεζοηλεκτρικές μετρήσεις παρέμειναν στα δοχεία για 28 ημέρες. Τέλος, χρησιμοποιώντας τις ίδιες ακριβώς ποσότητες χυτεύθηκαν τσιμεντοκονιάματα ενισχυμένα με CNTs. Τα συγκεκριμένα δοκίμια αφού αφαιρέθηκαν από τα καλούπια στις 24 ώρες μετά την χύτευσή τους συντηρήθηκαν για 28 μέρες βυθισμένα στο νερό μέχρι την μέτρηση των μηχανικών τους ιδιοτήτων. Η συγκεκριμένη μέθοδος συντήρησης αναφέρεται διεξοδικά στην ενότητα 1.3.3 (Συνθήκες Συντήρησης Σκυροδέματος).

7.2 Δεύτερη Σειρά Πειραμάτων – Χύτευση Σκυροδέματος με CFs

Για την παρασκευή των δοκιμίων σκυροδέματος με CFs χρησιμοποιήθηκε για την ομοιογενή διασπορά τους Sika®ViscoCrete®-3082. Το Sika®ViscoCrete®-3082 χρησιμοποιήθηκε σε δοσολογία 1% bwoc. Αρχικά, για τα δοκίμια χρησιμοποιήθηκαν 315ml αποσταγμένο νερό αλλά στην πράξη το σκυρόδεμα είχε περισσότερο νερό απ' ότι χρειαζόταν γι' αυτό και στα επόμενα εισήχθησαν 225ml νερού. Τηρώντας το ίδιο ποσοστό νερού bwoc στα δοκίμια, δεν παρατηρήθηκε ότι με την αύξηση της συγκέντρωσης των CFs/ Sika®ViscoCrete®-3082, όπως στην περίπτωση των CNTs/ Sika® Stabilizer-100, πρόβλημα στην κατεργασιμότητα του δείγματος, με αποτέλεσμα να χρησιμοποιηθούν 225ml νερό. Τα δοκίμια αφού χυτεύθηκαν, αφέθηκαν σε θερμοκρασία περιβάλλοντος για 24 ώρες. Οι ακριβείς δοσολογίες παρουσιάζονται στον Πίνακα 12.

Πίνακας 12: Συγκεντρώσεις υλικών για την παρασκευή των τσιμεντοκονιαμάτων

Δείγμα	Συγκέντρωση CFs (% bwoc)	CFs (g)	Τσιμέντο(g)	Πυριτική Παιπάλη (g)	Άμμος (g)	Sika®ViscoCrete®-3082 (g)	Νερό (g)
1	0.05 %	0.225	405	45	1350	0.405	225
2	0.2%	0.9	405	45	1350	0.405	225
3	0.25%	1.125	405	45	1350	0.405	225
4	0.3%	1.35	405	45	1350	0.405	225
5	0.4%	1.8	405	45	1350	0.405	225
6	1%	4.5	405	45	1350	0.405	225

Τα δείγματα μετά την χύτευση, παρέμειναν στα καλούπια για 24 ώρες και κατόπιν αφαιρέθηκαν και τοποθετήθηκαν στα αεροστεγώς κλεισμένα γυάλινα δοχεία που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη ενότητα όπου και παρέμειναν για 28 ημέρες μέχρι την έναρξη των μηχανικών μετρήσεων.

7.3 Τρίτη Σειρά Πειραμάτων – Χύτευση δοκιμίων με CFs και CNTs για δοκιμή κάμψης και θλίψης

Χυτεύθηκαν σε καλούπια οι συγκεντρώσεις που φαίνονται στον παρακάτω Πίνακα 13. Η διασπορά των CNTs υποβοηθήθηκε με τη προσθήκη Sika® Stabilizer-100. Ο stabilizer προστέθηκε στάγδην ενώ το αιώρημα ήταν υπό ισχυρή ανάδευση για 15 λεπτά. Εν συνεχεία κάθε ποτήρι ζέσεως αφέθηκε για 45 λεπτά σε λουτρό υπερήχων και αποθηκεύτηκε μέχρι τη χρήση. Στη πρώτη σειρά πειραμάτων, αναφέρεται ότι γίνεται αλλαγή της αναλογίας τσιμέντου/νερού από το 0.5 του προτύπου The European Standard EN 196-1:1994 σε 0.7 στις περιπτώσεις που το ποσοστό των CNTs ίσο ή μεγαλύτερο του 0.1%. Αιτία είναι η μη σωστή κατεργασιμότητα του τσιμέντου. Ωστόσο, για την αντιμετώπιση του προβλήματος στην σειρά πειραμάτων CFs και CNTs μειώθηκε η ποσότητα του Sika® Stabilizer-100 με αποτέλεσμα η αναλογία τσιμέντου/νερού 0.5 μέχρι και το δείγμα 0.1% CNTs να μην παρουσιάσει πρόβλημα κατεργασιμότητας.

Πίνακας 13: Συγκεντρώσεις υλικών για την παρασκευή των τσιμεντοκονιαμάτων.

Δείγμα	Τσιμέντο (g)	Πυριτική Παιπάλη (g)	Άμμος (g)	Αναλογία νερό/μίγμα	H_20(g)	Συγκέντρωση CNTs (% bwoc)	CNTs (g)	Συγκέντρωση CFs (% bwoc)	CFs(g)	Sika Stabilizer SI-100 (g)
Δοκίμιο Αναφοράς με Πυριτική Παιπάλη	405	45	1350	0.5	225	-	-	-	-	-
Κονίαμα-0.4% CFs+ 0.02% CNTs	405	45	1350	0.5	225	0,02	0.081	0.4	1.62	0.225

Κονίαμα-0.4% CFs +0.05% CNTs	405	45	1350	0.5	225	0,05	0.2025	0.4	1.62	0.5625
Κονίαμα-0.4% CFs+ 0.1% CNTs	405	45	1350	0.5	225	0,1	0.405	0.4	1.62	1.125

Τα δοκίμια παρέμειναν για 24 ώρες στα καλούπια και κατόπιν σε αντίθεση με τις προηγούμενες σειρές πειραμάτων τοποθετήθηκαν για συντήρηση και ανάπτυξη μηχανικών ιδιοτήτων σε αεροστεγώς κλεισμένα δοχεία και βυθίστηκαν στο νερό για 28 ημέρες.

7.4 Τέταρτη Σειρά Πειραμάτων – Χύτευση δοκιμίων με CFs και CNTs για μέτρηση ηλεκτρικών και πιεζοηλεκτρικών ιδιοτήτων.

Χυτεύθηκαν σε καλούπια οι συγκεντρώσεις που φαίνονται στον παρακάτω Πίνακα 14 αφού πρώτα είχαν στερεωθεί τα ηλεκτρόδια. Η διασπορά των CNTs υποβοηθήθηκε με τη προσθήκη Sika Stabilizer SI -100. Ο stabilizer προστέθηκε στάγδην ενώ το αιώρημα ήταν υπό ισχυρή ανάδευση για 15 λεπτά. Εν συνεχεία κάθε ποτήρι ζέσεως αφέθηκε για 45 λεπτά σε λουτρό υπερήχων και αποθηκεύτηκε μέχρι τη χρήση.

Πίνακας 14: Συγκεντρώσεις υλικών για την παρασκευή των τσιμεντοκονιαμάτων.

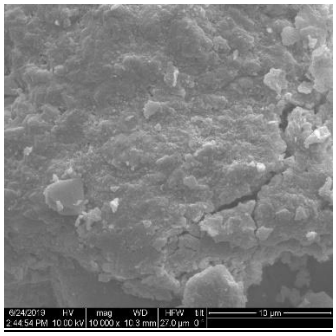
Δείγμα	**Τσιμέντο (g)**	**Πυριτική Παιπάλη (g)**	**Άμμος (g)**	**Αναλογία νερό/μίγμα**	**H_20(g)**	**Συγκέντρωση CNTs (% bwoc)**	**CNTs (g)**	**Συγκέντρωση CFs (% bwoc)**	**CFs (g)**	**Sika Stabilizer SI -100 (g)**
Δοκίμιο Αναφοράς με Πυριτική Παιπάλη	405	45	1350	0.5	225	-	-	-	-	-
Κονίαμα - 0.4%CFs + 0.02% CNTs	405	45	1350	0.5	225	0.02	0.081	0.4	1.62	0.225
Κονίαμα-0.4%CFs +0.05% CNTs	405	45	1350	0.5	225	0.05	0.2025	0.4	1.62	0.5625
Κονίαμα-0.4%CFs+0.1%CNTs	405	45	1350	0.5	225	0.1	0.405	0.4	1.62	1.125

Τα δοκίμια παρέμειναν για 24 ώρες στα καλούπια και κατόπιν σε αντίθεση με τις προηγούμενες σειρές πειραμάτων τοποθετήθηκαν για συντήρηση και ανάπτυξη μηχανικών ιδιοτήτων σε αεροστεγώς κλεισμένα δοχεία και βυθίστηκαν στο νερό για 28 ημέρες.

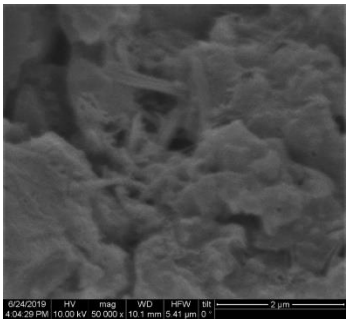
Κεφάλαιο 8 - Αποτελέσματα Ηλεκτρονικού Μικροσκοπίου Σάρωσης, SEM

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης SEM. Συγκεκριμένα, η Εικόνα 34 απευθύνεται στο δοκίμιο αναφοράς το οποίο δεν

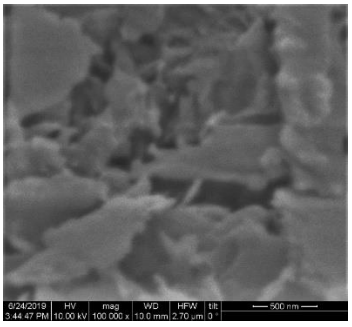
έχει ενισχυθεί (reference). Η Εικόνα 35 η οποία απεικονίζει το δοκίμιο 0.4% CFs και 1% CNTs bwoc και αποδεικνύει πως οι CFs ακουμπούν η μία πάνω στην άλλη δημιουργώντας ένα αγώγιμο δίκτυο εντός του σκυροδέματος. Η καλή διασπορά των CFs όχι μόνο ωφελεί τις μηχανικές ιδιότητες αλλά και τις ηλεκτρικές επιδόσεις λόγω της πιθανής επαφής των CFs, ενώ η κακή διασπορά ασκεί αρνητικές επιδράσεις στις μηχανικές και ηλεκτρικές ιδιότητες των σύνθετων υλικών. Επίσης, η προσθήκη CFs στην τσιμεντόπαστα σταματάει την ελεύθερη επέκταση ρωγμών, και έτσι ενισχύεται η αντοχή στην θλίψη αλλά και συνολικά η ανθεκτικότητα των παραγόμενων τσιμεντοκονιαμάτων (Panagiota T. Dalla, 2016) (Josef Foldyna, 2016). Όμως εκτός από την επιρροή της ομοιογενούς διασποράς των αγώγιμων υλικών στο τσιμεντοκονίαμα ρόλο παίζει και το μήκος των CFs το οποίο στην παρούσα μελέτη είναι 3 mm και σε συνδυασμό με την χαμηλή συγκέντρωση τους τα CFs καλύπτονται από τα λεπτά στρώματα τσιμέντου και των αδρανών υλικών και δεν μπορούν να έρθουν σε επαφή μεταξύ τους όπως φαίνεται στην Εικόνα 36 επηρεάζοντας έτσι την ηλεκτρική αγωγιμότητα του τσιμεντοκονίαματος. (Wang Chuang, 2017).



Εικόνα 34: Εικόνα SEM για το δοκίμιο αναφοράς.



Εικόνα 35: Εικόνα SEM για το δοκίμιο με 0.4% CFs και 0.1% CNTs.



Εικόνα 36: Εικόνα SEM για το δοκίμιο με 0.4% CFs και 0.02% CNTs.

Κεφάλαιο 9 - Αποτελέσματα Μηχανικών Μετρήσεων

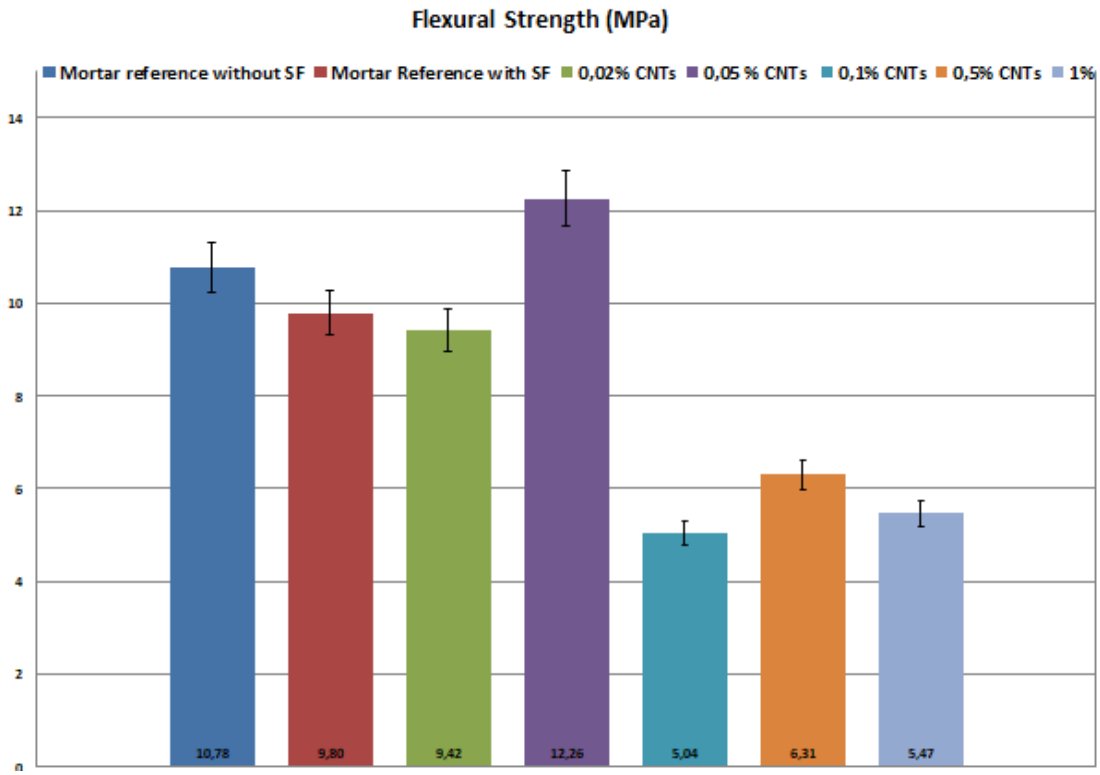
Στην παρούσα εργασία, για την διερεύνηση των μηχανικών και αυτο-ανιχνευτικών ιδιοτήτων (self-sensing) πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις κάμψης, θλίψης και πιεζοηλεκτρικής απόκρισης στα δοκίμια που είχαν συμπληρώσει 28 ημέρες σε περιβάλλον υγρασίας. Τα αποτελέσματα δοκιμών κάμψης τριών σημείων και της αντοχής σε θλίψη παρουσιάζονται στις επόμενες ενότητες.

9.1 Αποτελέσματα Μηχανικών Μετρήσεων Δοκιμίων Ενισχυμένων με CNTs

Στο Σχήμα 9.1 απεικονίζονται τα αποτελέσματα της δοκιμής κάμψης των δοκιμίων τσιμεντοκονιάματος ενισχυμένων με CNTs. Η συντήρηση των συγκεκριμένων δειγμάτων έγινε για 28 ημέρες μέσα σε γυάλινα αεροστεγώς κλεισμένα δοχεία όπου στην βάση τους είχαν υπέρκορο διάλυμα νιτρικού καλίου (KNO_3). Τα δοκίμια τοποθετήθηκαν πάνω σε μια ειδική διαπερατή επιφάνεια έτσι ώστε να έρχονται σε επαφή με τους ατμούς του διαλύματος και να επιτευχθεί 95% υγρασία σ’ αυτά.

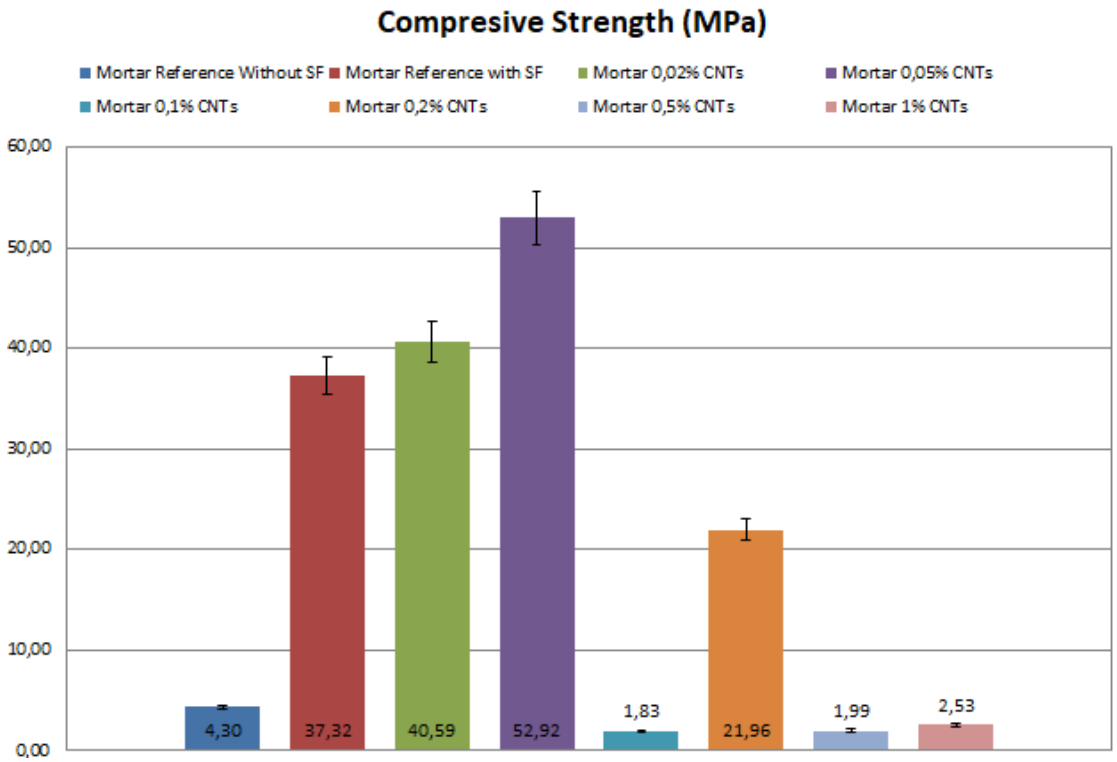
Η δοκιμή κάμψης 3 σημείων πραγματοποιήθηκε σε συσκευή θλίψης-εφελκυσμού Instron 1121 με μέγιστη εφελκυστική ή θλιπτική αξονική δύναμη έως 10 kN και ρυθμό μετατόπισης 1mm/min. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 9.1 το τσιμεντοκονίαμα εμφανίζει καλύτερα αποτελέσματα στην περίπτωση της συγκέντρωσης 0.05% CNTs bwoc. Η δοκιμή θλίψης των δοκιμίων που προέκυψαν από τη δοκιμή κάμψης πραγματοποιήθηκε σε

υδραυλική συσκευή INSTRON 300DX-B1-C4-G6C με ρυθμό μετατόπισης 5 mm/min και μέγιστη εφελκυστική ή θλιπτική αξονική δύναμη 300kN.



Σχήμα 9.1: Αποτελέσματα αντοχής στην κάμψη δοκιμίων σκυροδέματος ενισχυμένων με 0%, 0.02%, 0.05%,0.2%,0.5% και 1% CNTs bwoc.

Αρχικά, στο Σχήμα 9.2 παρατηρούμε την θετική επίδραση της πυριτικής παιπάλης στην αντοχή του δοκιμίου ως προς την θλίψη. Το τσιμεντοκονίαμα εμφανίζει 13.7% αύξηση της αντοχής στην κάμψη στην περίπτωση της συγκέντρωσης 0.05% CNTs bwoc σε σχέση με το δοκίμιο αναφοράς. Είναι εμφανές πως στα αρχικά πειράματα με τα CNTs και τα CFs επιλέχθηκαν διάφορες συγκεντρώσεις για να εκτιμηθεί το σημείο στο οποίο εμφανίζονται οι βέλτιστες μηχανικές ιδιότητες και παρατηρήθηκε ότι όσο μεγαλύτερη η συγκέντρωση των CNTs bwoc από τις δύο προαναφερόμενες τιμές τόσο πιο πολύ μειώνεται η αντοχή των δοκιμίων ως προς την κάμψη και την θλίψη, αντίστοιχα. Μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζεται στην επίδραση της αντοχής στην θλίψη των δοκιμίων τα οποία έχουν ενισχυθεί με CNTs σε σχέση με τα δοκίμια αναφοράς. Η διαφορά αυτή οφείλεται στην δράση των CNTs στις αντιδράσεις ενυδάτωσης του τσιμέντου οι οποίες καθορίζουν την εξέλιξη των μηχανικών ιδιοτήτων του κονιάματος. Συγκεκριμένα έχει αποδειχθεί ότι τα CNTs είναι ικανά να επιταχύνουν την αντίδραση ενυδάτωσης του πυριτικού τριασβεστίου του τσιμέντου Portland. Συγκεκριμένα, τα CNTs δρουν ως θέσεις πυρήνωσης για τα προϊόντα ενυδάτωσης C_3S, και επικαλύπτονται ταχέως με το κύριο προϊόν της ενυδάτωσης του τσιμέντου, μια σχεδόν άμορφη - ελάχιστα κρυσταλλική - ένυδρη ασβεστοπυριτική ένωση (C-S-H). (Jonathan M. Makar, 2009). Τέλος, στα Σχήματα 9.1 και 9.2 παρατηρούνται αυξομειώσεις αντοχών μετά την συγκέντρωση 0.05% CNTs χωρίς να υπάρχει σταθερή πτωτική τάση. Τέτοιες αυξομειώσεις δεν παρατηρούνται τόσο έντονα στα δοκίμια με CNTs που έχουν συντηρηθεί σε βυθισμένα στο νερό. Το γεγονός αυτό οφείλεται στον τρόπο συντήρησης των δοκιμίων, καθώς τα δοκίμια δεν είχαν την απαραίτητη υγρασία για να αναπτύξουν μηχανικές ιδιότητες, ανεξαρτήτως της σταθερής υγρασίας που διέθεταν τα αεροστεγώς κλεισμένα δοχεία.



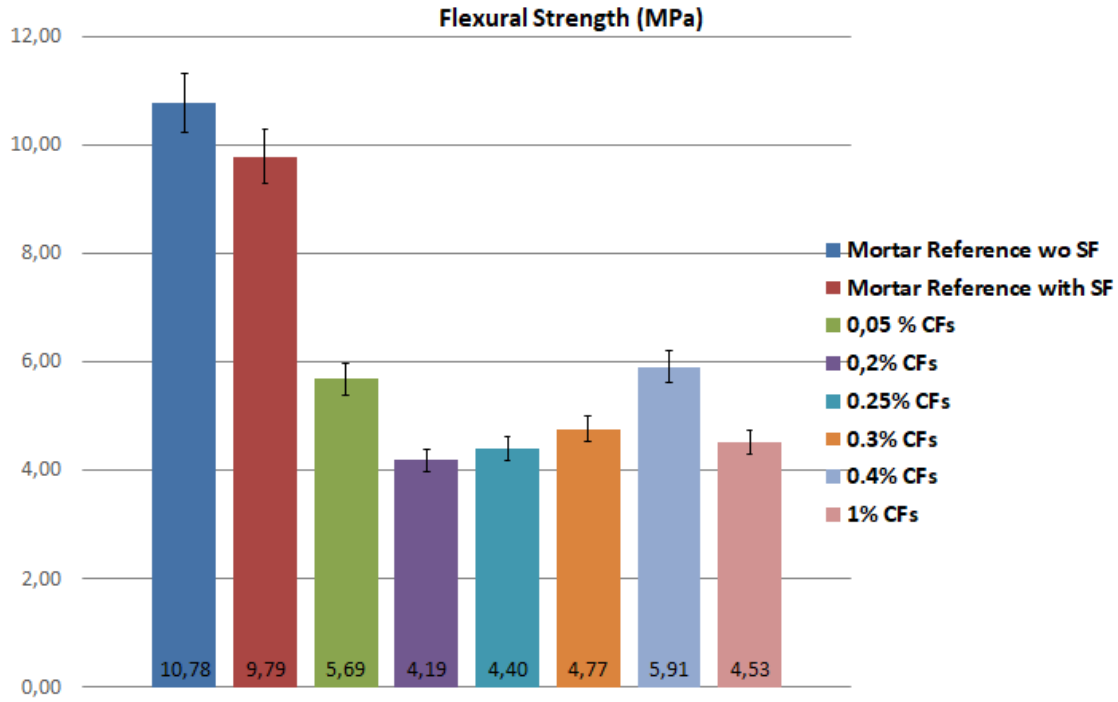
Σχήμα 9.2: Αποτελέσματα αντοχής στην θλίψη δοκιμίων σκυροδέματος ενισχυμένων με 0%, 0.02%, 0.05%, 0.2%, 0.5% και 1% CNTs bwoc.

9.2 Αποτελέσματα Μηχανικών Μετρήσεων Δοκιμίων Ενισχυμένων με CFs

Στο Σχήμα 9.3 απεικονίζονται τα αποτελέσματα της δοκιμής κάμψης των δοκιμίων τσιμεντοκονιάματος ενισχυμένων με CFs. Η συντήρηση των συγκεκριμένων δειγμάτων έγινε για 28 ημέρες μέσα σε γυάλινα αεροστεγώς κλεισμένα δοχεία όπου στην βάση τους είχαν υπέρκορο διάλυμα KNO_3. Τα δοκίμια τοποθετήθηκαν πάνω σε μια διαπερατή επιφάνεια έτσι ώστε να έρχονται σε επαφή με τους ατμούς του διαλύματος και να επιτευχθεί 95% υγρασία σε αυτά.

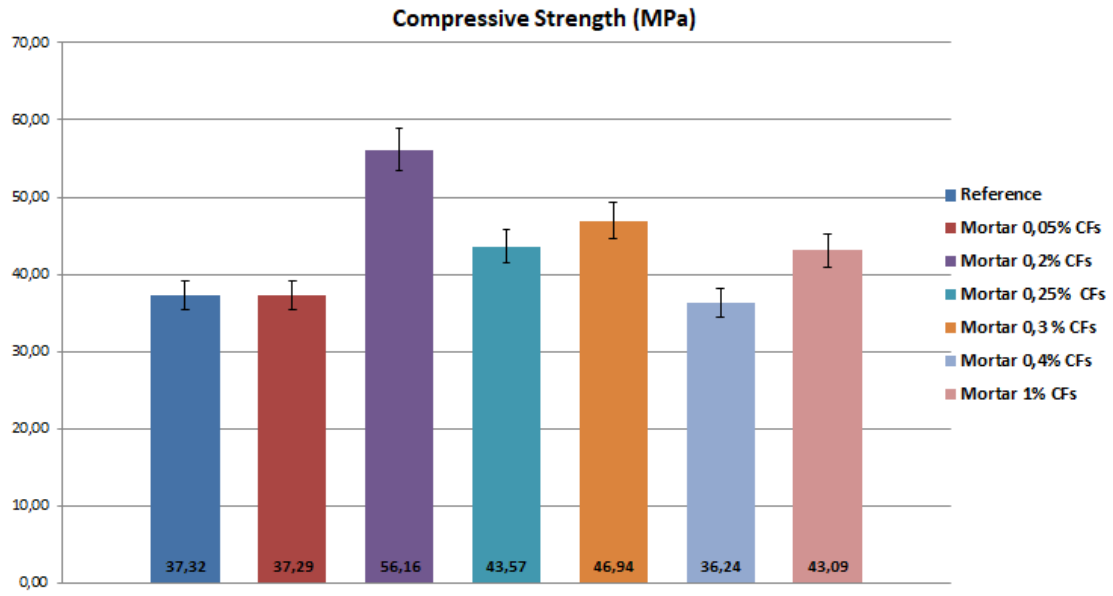
Καθώς φαίνεται από τα αποτελέσματα αντοχής στην κάμψη (Σχήμα 9.3) και στην θλίψη (Σχήμα 9.4) παρουσιάζονται μεγάλες διαφορές ανάμεσα στα δοκίμια αναφοράς και στα δοκίμια που είναι ενισχυμένα με CFs. Όπως αναλύεται στην ενότητα 2.2.3 οι CFs τα τελευταία χρόνια χρησιμοποιούνται ως ενισχυτικό υλικό του σκυροδέματος διότι βελτιώνουν τόσο την αντοχή σε θλίψη όσο και την κάμψη του παραγόμενου υλικού (Peigang He, 2010). Στην περίπτωση αυτή, οι χαμηλές τιμές στα αποτελέσματα των μετρήσεων αντοχής σε κάμψη και θλίψη οφείλονται στην πιθανώς ανομοιογενή διασπορά των CFs στην μήτρα του σκυροδέματος καθώς επίσης και στον τρόπο ωρίμανσης των δοκιμίων. Υπάρχουν δύο στάδια για τη διασπορά των CFs στην μήτρα του τσιμέντου. Το πρώτο βήμα γίνεται όταν οι CFs διασκορπίζονται ομοιόμορφα στο διάλυμα διασποράς και το δεύτερο μέθοδος όταν το αιώρημα διοχετεύεται ομοιόμορφα στη μήτρα του τσιμέντου. Και τα δύο βήματα είναι στην πραγματικότητα πολύπλοκες φυσικές, χημικές και μηχανικές διαδικασίες, διότι η ανάμιξη του μείγματος, η μέθοδος ανάδευσης και η διαδικασία χύτευσης με δόνηση έχουν όλα μεγάλη επίδραση στη διασπορά των CFs στη μήτρα του τσιμέντου καθώς και στην πυκνότητα των παραγόμενων δοκιμίων. (Wang Chuang P. L.-l.-p.-z., 2018) Σύμφωνα με την βιβλιογραφία ποσοστό του νερού εξατμίζεται στην φάση της σκλήρυνσης του κονιάματος με αποτέλεσμα την δημιουργία φυσαλίδων αέρα μέσα στη μήτρα. Η παρουσία κενών εντός της μήτρας τσιμέντου σε συνδυασμό με την ύπαρξη των CFs προκάλεσε ελαφρά μείωση των μηχανικών

ιδιοτήτων του κονιάματος (Jacopo Donnini, 2018), (Chung D. , 2000). Παρ' όλ' αυτά, αντλήθηκαν πληροφορίες σύμφωνα με τις υπάρχουσες συνθήκες συγκρίνοντας τα δοκίμια με τις διαφορετικές συγκεντρώσεις των CFs. Όπως λοιπόν φαίνεται στο Σχήμα 9.3 μεγαλύτερη αντοχή στην κάμψη έχει το δοκίμιο με συγκέντρωση 0.4% CFs bwoc. Με βάση αυτά τα αποτελέσματα συνδυάστηκαν οι ιδιότητες των CFs και των CNTs στα επόμενα πειράματα. Δηλαδή, διατηρήθηκε η συγκέντρωση των CFs σταθερή στο 0.4% bwoc και μεταβάλλονταν οι συγκεντρώσεις των CNTs τα οποία όπως θα αποδεικνύεται στα παρακάτω διαγράμματα έχουν μεγαλύτερη επίδραση στις ιδιότητες του σκυροδέματος.



Σχήμα 9.3: Αποτελέσματα αντοχής στην κάμψη δοκιμίων σκυροδέματος ενισχυμένων με 0%, 0.05%, 0.1%, 0.2%, 0.25%, 0.3%, 0.4% και 1% CFs bwoc.

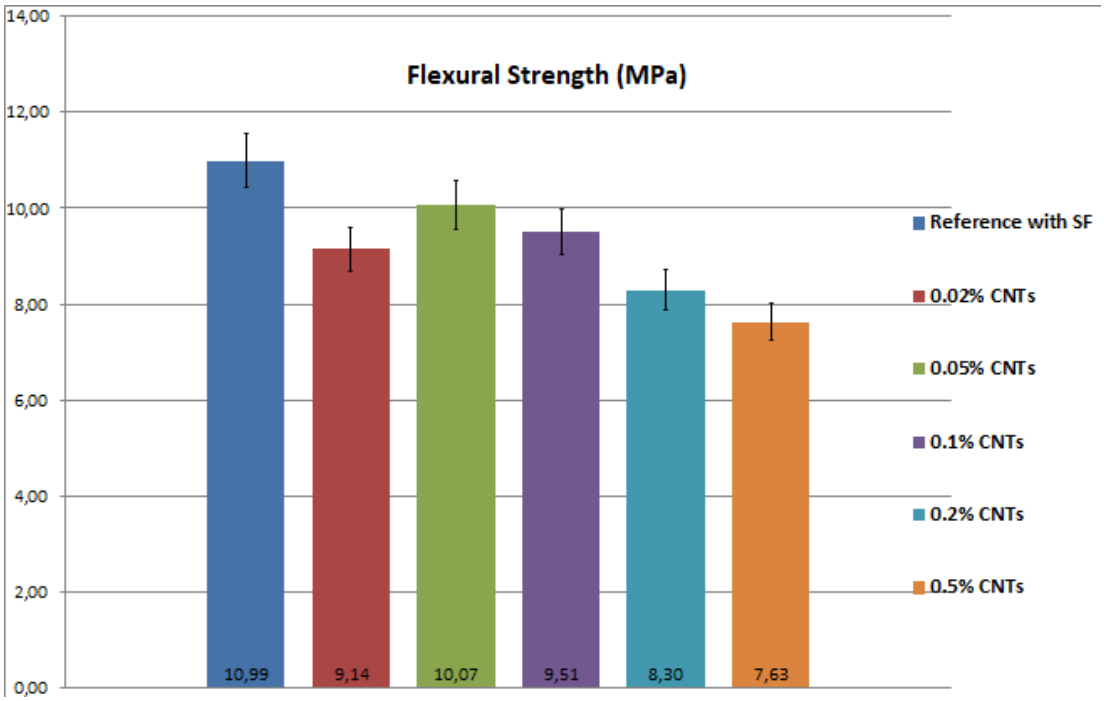
Στο Σχήμα 9.4 παρατηρείται 50.48% αύξηση στην αντοχή στην θλίψη στο δοκίμιο με 0.2% CFs bwoc σε σχέση με το δοκίμιο αναφοράς και στις υπόλοιπες συγκεντρώσεις μειώνεται εκτός από μικρές αυξομειώσεις. Το γεγονός αυτό οφείλεται όχι μόνο στον τρόπο ωρίμανσης του σκυροδέματος αλλά και στην διαδικασία χύτευσης του σκυροδέματος. Αν οι ίνες δεν διαβρέχουν κατάλληλα και δεν διασπαρθούν ομοιογενώς εντός του κονιάματος μπορούν να δημιουργήσουν και να διαδώσουν μικρορωγμές επηρεάζοντας τις μηχανικές ιδιότητες του τελικού προϊόντος (Morsy, 2011).



Σχήμα 9.4: Αποτελέσματα αντοχής στην θλίψη δοκιμίων σκυροδέματος ενισχυμένων με 0%, 0.05%, 0.1%, 0.2%, 0.25%, 0.3%, 0.4% και 1% CFs bwoc.

9.3 Αποτελέσματα Μηχανικών Μετρήσεων Δοκιμίων Ενισχυμένων με CNTs

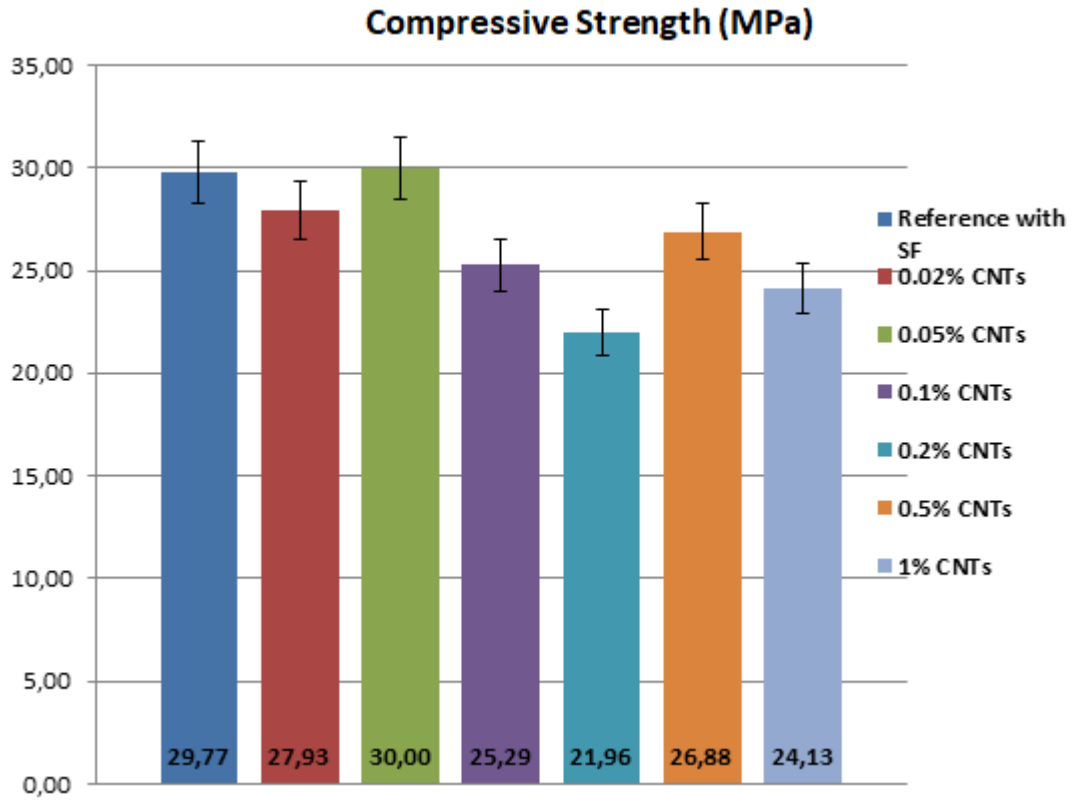
Στο Σχήμα 5 απεικονίζονται τα αποτελέσματα της δοκιμής κάμψης των δοκιμίων τσιμεντοκονιάματος ενισχυμένων με CNTs. Η συντήρηση των συγκεκριμένων δειγμάτων έγινε για 28 ημέρες μέσα σε αεροστεγώς κλεισμένα δοχεία. Τα δοκίμια αυτήν την φορά ήταν βυθισμένα μέσα στο νερό.



Σχήμα 9.5: Αποτελέσματα αντοχής στην κάμψη δοκιμίων σκυροδέματος ενισχυμένων με CNTs.

Στα Σχήματα 9.5 και 9.6, απεικονίζονται τα αποτελέσματα των δοκιμίων των οποίων η συντήρηση έγινε εντός του νερού. Συγκεκριμένα, στο Σχήμα 5 παρατηρείται πάλι η αύξηση

της αντοχής σε κάμψη στην συγκέντρωση 0.05% CNTs bwoc σε σχέση με τα τσιμεντοκονιάματα με τις υψηλότερες συγκεντρώσεις CNTs. Αξίζει να σημειωθεί ότι σύμφωνα με την βιβλιογραφία σε υψηλότερες συγκεντρώσεις, τα CNTs συσσωματώνονται γύρω από τους κόκκους τσιμέντου οδηγώντας στην μερική ενυδάτωση αυτών, με αποτέλεσμα την παραγωγή ενός ενυδατωμένου προϊόντος με ασθενείς δεσμούς (Morsy, 2011).

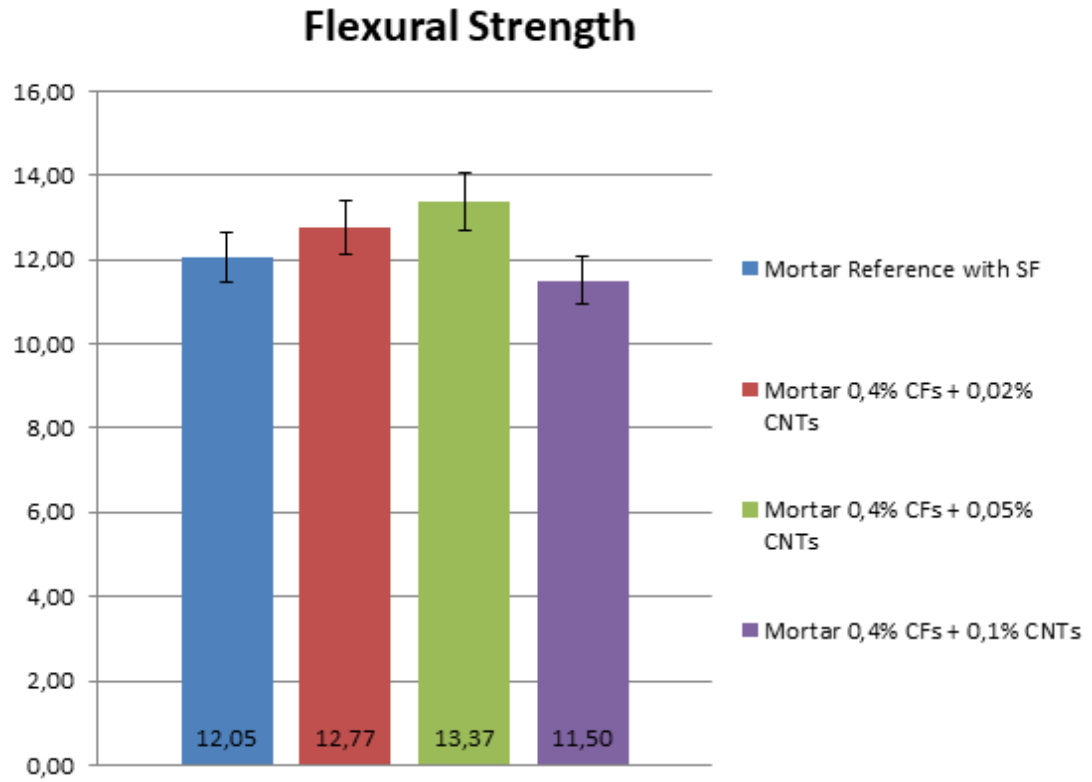


Σχήμα 9.6: Αποτελέσματα αντοχής στην θλίψη δοκιμίων σκυροδέματος ενισχυμένων με CNTs.

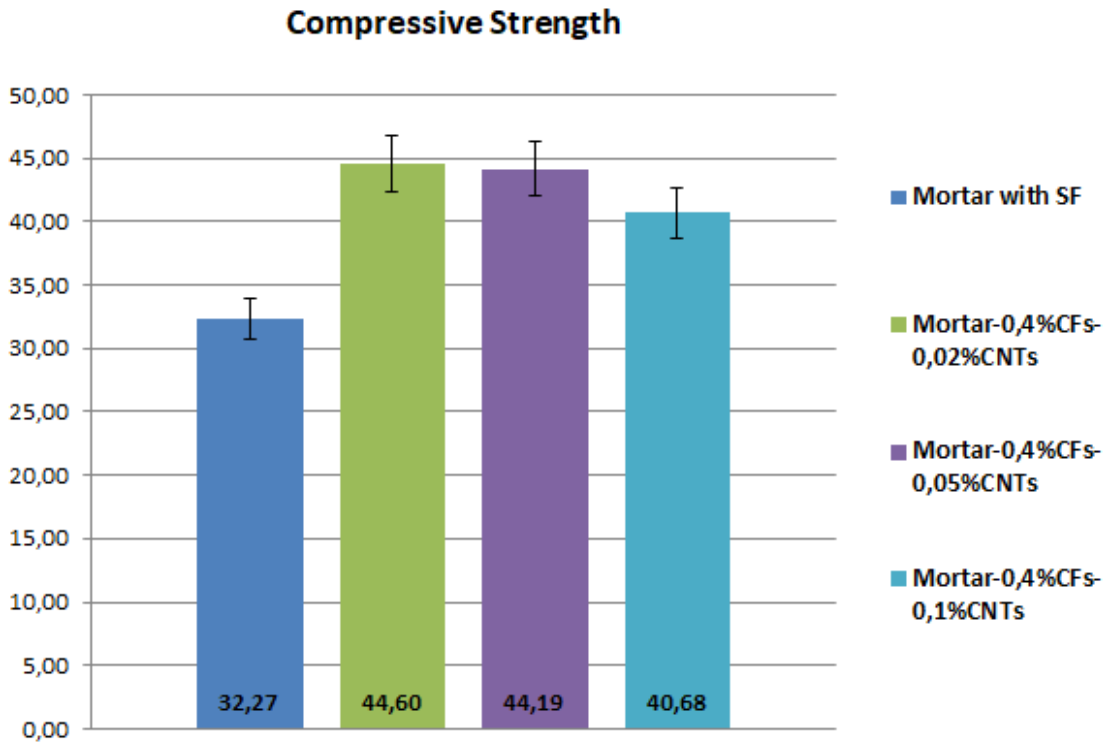
Είναι προφανές ότι η αντοχή σε θλίψη των κονιαμάτων δεν επηρεάζεται από τον βαθμό της διασποράς των CNTs με τον ίδιο τρόπο που επηρεάζεται η αντοχή στην κάμψη. Στο Σχήμα 9.6 παρατηρείται αύξηση της αντοχής στην θλίψη στην συγκέντρωση 0.05% bwoc ενώ σε μεγαλύτερες συγκεντρώσεις όπως για παράδειγμα στην 1% bwoc το δοκίμιο παρουσιάζει χαμηλότερες μηχανικές ιδιότητες.

9.4 Αποτελέσματα Μηχανικών Μετρήσεων Δοκιμίων Ενισχυμένων με CNTs και CFs

Στην παρούσα μελέτη έγινε η υβριδική σύνδεση των CFs μαζί με CNTs εντός του τσιμεντοκονιάματος. Παρατηρώντας τα αποτελέσματα των μηχανικών μετρήσεων των κονιαμάτων ενισχυμένων με CFs θεωρήθηκε ότι η συγκέντρωση 0.4% CFs bwoc είναι η καταλληλότερη για την χύτευση κονιαμάτων με τον συνδυασμό των CFs και των CNTs. Επίσης, όπως αναφέρθηκε στο θεωρητικό μέρος της μελέτης σύμφωνα με την βιβλιογραφία η προσθήκη μιας υπερβολικής ποσότητας CFs (που υπερβαίνει το 0.5% bwoc) στο μίγμα του τσιμέντου τείνει να μειώσει τη θλιπτική αντοχή του. Στο Σχήμα 9.7 απεικονίζονται τα αποτελέσματα της δοκιμής κάμψης των δοκιμίων τσιμεντοκονιάματος ενισχυμένων με CNTs και σταθερής συγκέντρωσης 0.4% CFs bwoc. Η συντήρηση των συγκεκριμένων δειγμάτων έγινε για 28 ημέρες μέσα σε αεροστεγώς κλεισμένα δοχεία. Τα δοκίμια αυτήν την φορά ήταν βυθισμένα μέσα στο νερό.



Σχήμα 9.7: Αποτελέσματα αντοχής στην κάμψη δοκιμίων σκυροδέματος ενισχυμένων με CNTs και CFs.



Σχήμα 9.8: Αποτελέσματα αντοχής στην θλίψη δοκιμίων σκυροδέματος ενισχυμένων με CNTs και CFs.

Στις μετρήσεις αντοχής σε κάμψη παρατηρείται αύξηση κατά 10.95% της αντοχής στην κάμψη του κονιάματος στην συγκέντρωση 0.4% CFs και 0.05% CNTs bwoc σε σχέση με το

δοκίμιο αναφοράς, ενώ σε μεγαλύτερες συγκεντρώσεις η αντοχή του κονιάματος ακολουθεί φθίνουσα πορεία. Παρατηρείται ότι η συγκέντρωση 0.05% CNTs δεν επηρεάζεται από την προσθήκη των CFs επιφέροντας αυξημένες μηχανικές ιδιότητες στο τσιμεντοκονίαμα. Ακόμη, αποδεικνύεται ότι σε μεγαλύτερες συγκεντρώσεις τα CNTs δημιουργούν συσσωματώματα εμποδίζοντας τις αντιδράσεις ενυδάτωσης με αποτέλεσμα την μείωση της αντοχής του τελικού προϊόντος. Τέλος, στο Σχήμα 9.8 παρατηρείται αύξηση της αντοχής σε θλίψη κατά 38.2% στην συγκέντρωση 0.4% CFs + 0.02% CNTs bwoc και 36.9% στην συγκέντρωση 0.4% CFs + 0.05% CNTs bwoc σε σχέση με το δοκίμιο αναφοράς.

Κεφάλαιο 10 - Αποτελέσματα Πιεζοηλεκτρικών και Διηλεκτρικών Μετρήσεων

Η πιεζοηλεκτρική συμπεριφορά των ενισχυμένων κονιαμάτων με αγώγιμα υλικά αξιολογείται σύμφωνα με την μέτρηση της ηλεκτρικής τους απόκρισης κατά τη διάρκεια της κυκλικής συμπιεστικής φόρτισης ενός μέγιστου φορτίου 5 kN προς την κατεύθυνση κάθετη προς τα ενσωματωμένα ηλεκτρόδια. Κάθε κύκλος φόρτισης-εκφόρτισης είχε διάρκεια περίπου 100 sec ενώ εφαρμόστηκαν τουλάχιστον έξι κύκλοι σε κάθε δείγμα με ταχύτητα 1mm / min. Κατά τη διάρκεια της κυκλικής φόρτισης, το ηλεκτρικό ρεύμα των δειγμάτων βρίσκεται στο 1mA. Η μεταβολή της ηλεκτρικής αντίστασης DC υπολογίστηκε ως

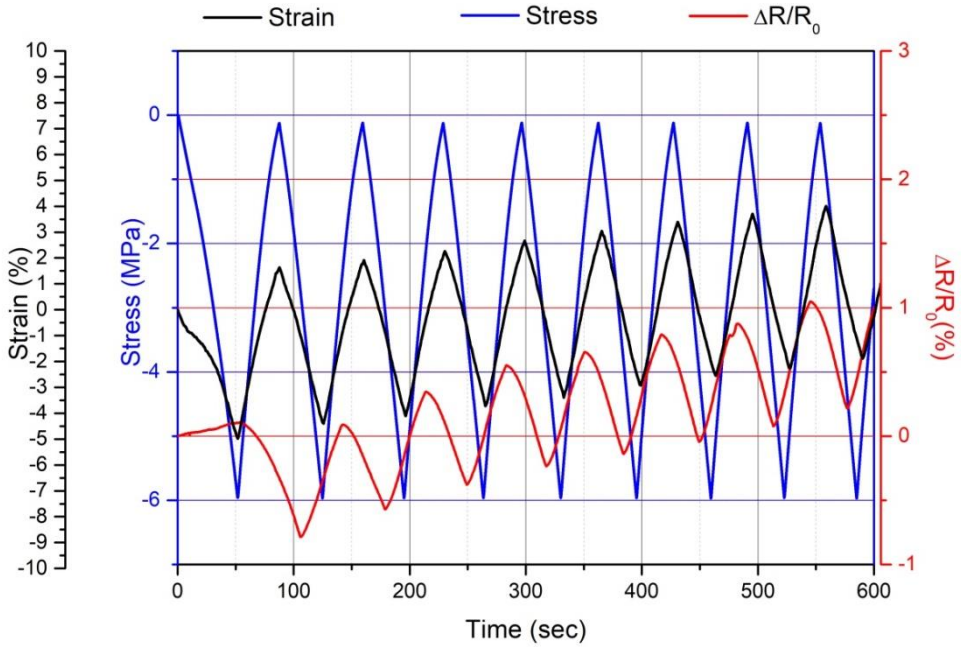
$$\Delta R = \frac{R-R_0}{R_0} \quad (22)$$

όπου R είναι η στιγμιαία ηλεκτρική αντίσταση στο δοκίμιο που υποβάλλεται σε φόρτιση και R_0 είναι η αρχική ηλεκτρική αντίσταση πριν από την εφαρμογή του φορτίου. Όταν το δοκίμιο υποβάλλεται σε καταπόνηση τότε δημιουργούνται ρωγμές με που οδηγούν στην κατάρρευση του αγώγιμου δικτύου που έχει δημιουργηθεί στο εσωτερικό τους με αποτέλεσμα την αύξηση της τιμής της ηλεκτρικής αντίστασης.

Τα αποτελέσματα της πιεζοηλεκτρικότητας των δοκιμίων που συντηρήθηκαν σε υγρό περιβάλλον για 28 ημέρες ενισχυμένα με CNTs παρουσιάζονται στις επόμενες ενότητες. Καταγράφονται κύκλοι φόρτισης και εκφόρτισης και υπολογίζεται η αντίστοιχη μεταβολή της αντίστασης. Οι τιμές του θλιπτικού φορτίου εφαρμόζονται σε συνάρτηση του χρόνου που απεικονίζονται στον αριστερό κάθετο άξονα. Ο άξονας από την δεξιά πλευρά αναπαριστά την αντίστοιχη κλασματική μεταβολή της αντίστασης $\Delta R/R_0$(%).

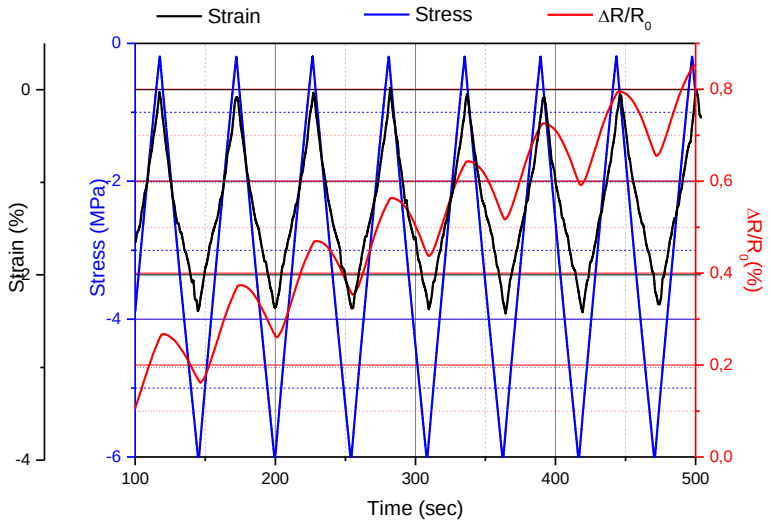
10.1 Αποτελέσματα Πιεζοηλεκτρικών Μετρήσεων Δοκιμίων Ενισχυμένων με CNTs

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των πιεζοηλεκτρικών μετρήσεων σε συγκεντρώσεις, 0.02%, 0.05%, 0.2%, 0.5% και 1%. Στα διαγράμματα απεικονίζεται η τάση (Stress) και η παραμόρφωση (Strain) η οποία επιβάλλεται μέσω κύκλων φόρτισης στην ελαστική περιοχή του δοκιμίου σε συνάρτηση με την μεταβολή της ηλεκτρικής αντίστασης. Στο δοκίμιο που δεν περιέχει CNTs (Reference) εμφανίζονται διαφορές στην ηλεκτρική αντίσταση οι οποίες οφείλονται στην φύση του ίδιου του τσιμέντου το οποίο έχει ειδική ηλεκτρική αντίσταση $10^6 – 10^7$ Ω·cm, καθώς και στον λόγο νερό/τσιμέντο.

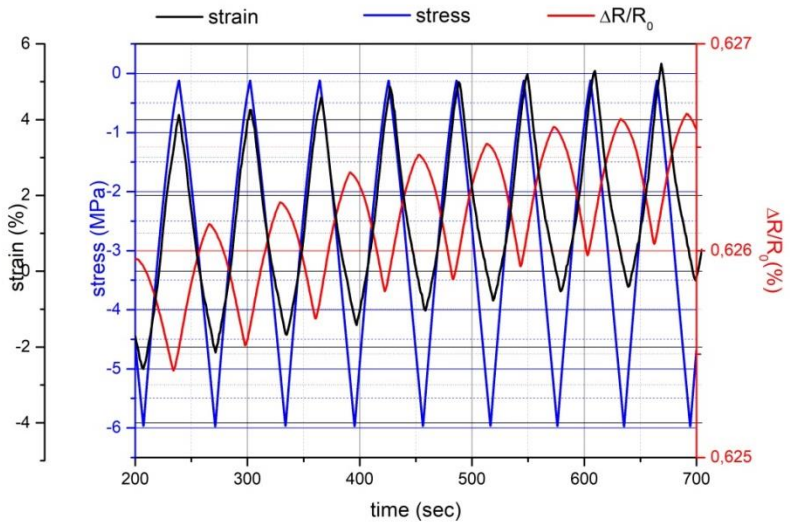


Σχήμα 10.1: Διάγραμμα μηχανικής τάσης, παραμόρφωσης και μεταβολής της αντίστασης συναρτήσει του χρόνου για το δοκίμιο αναφοράς (Δοκίμιο 1). Με μαύρο χρώμα η παραμόρφωση, με μπλε η τάση και με κόκκινο η κλασματική μεταβολή της αντίστασης.

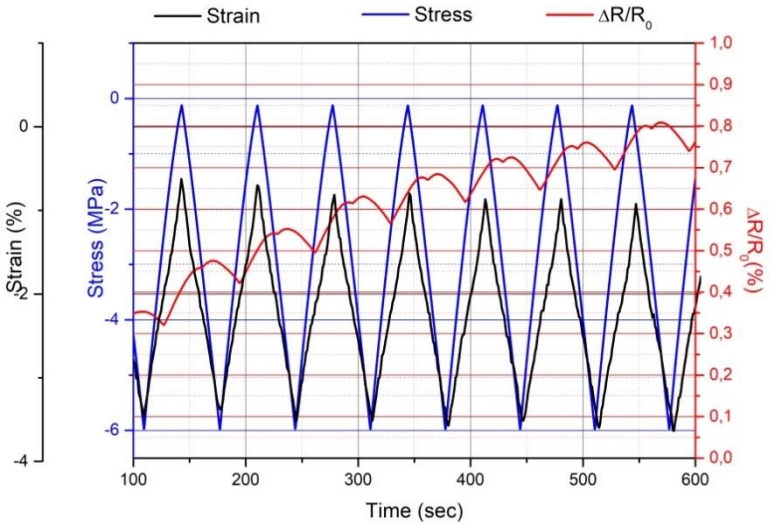
Όπως φαίνεται στα παρακάτω διαγράμματα η ηλεκτρική αντίσταση των CNTs μειώνεται κατά την φόρτιση και αυξάνεται κατά την εκφόρτιση σε κάθε κύκλο υπό θλιπτική φόρτιση, εκφράζοντας συμπεριφορά πιεζοηλεκτρισμού.



Σχήμα 10.2: Διάγραμμα μηχανικής τάσης, παραμόρφωσης και μεταβολής της αντίστασης συναρτήσει του χρόνου για το δοκίμιο αναφοράς (Δοκίμιο 2). Με μαύρο χρώμα η παραμόρφωση, με μπλε η τάση και με κόκκινο η κλασματική μεταβολή της αντίστασης.

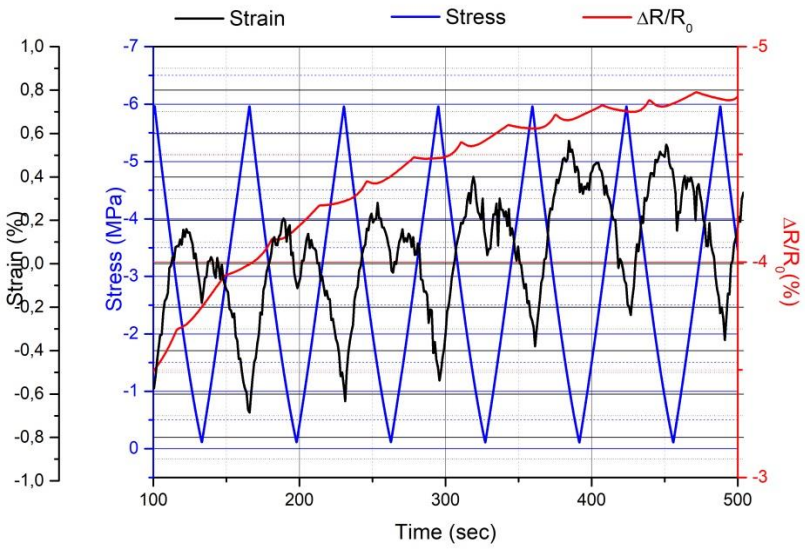


Σχήμα 10.3: Διάγραμμα μηχανικής τάσης, παραμόρφωσης και μεταβολής της αντίστασης συναρτήσει του χρόνου για το δοκίμιο αναφοράς (Δοκίμιο 3). Με μαύρο χρώμα η παραμόρφωση, με μπλε η τάση και με κόκκινο η κλασματική μεταβολή της αντίστασης.



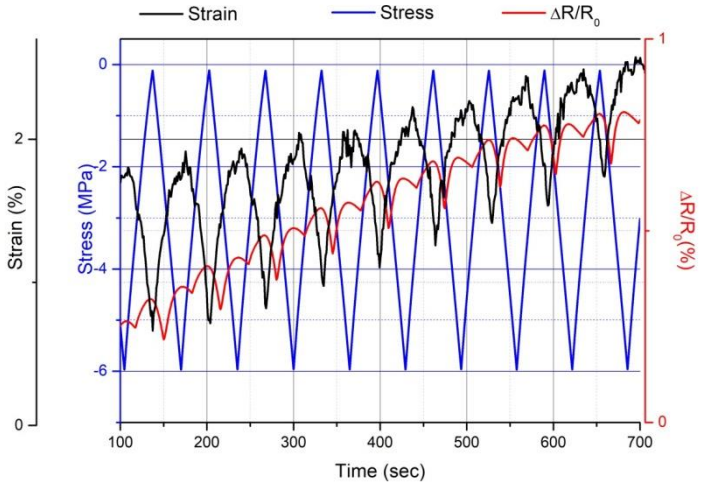
Σχήμα 10.4: Διάγραμμα μηχανικής τάσης, παραμόρφωσης και μεταβολής της αντίστασης συναρτήσει του χρόνου για το δοκίμιο με συγκέντρωση 0.02% CNTs (Δοκίμιο 1). Με μαύρο χρώμα η παραμόρφωση, με μπλε η τάση και με κόκκινο η κλασματική μεταβολή της αντίστασης.

Στα δοκίμια των κονιαμάτων που είναι ενισχυμένα με 0.02% CNTs παρατηρείται ότι οι τιμές ηλεκτρικής αντίστασης κινούνται προς τα αρνητικά καθ 'όλη τη διάρκεια της δοκιμής, ενώ η ιδιότητα μειώνεται κατά τη φάση φόρτισης και αυξάνεται κατά την εκφόρτισης. Κατά την εκφόρτιση, το δοκίμιο επιστρέφει στην φυσική του κατάσταση και ανακτά την αρχική του αντίσταση. Η δυνατότητα αλλαγής της ηλεκτρικής αντίστασης με την παραμόρφωση ονομάζεται πιεζοηλεκτρισμός.

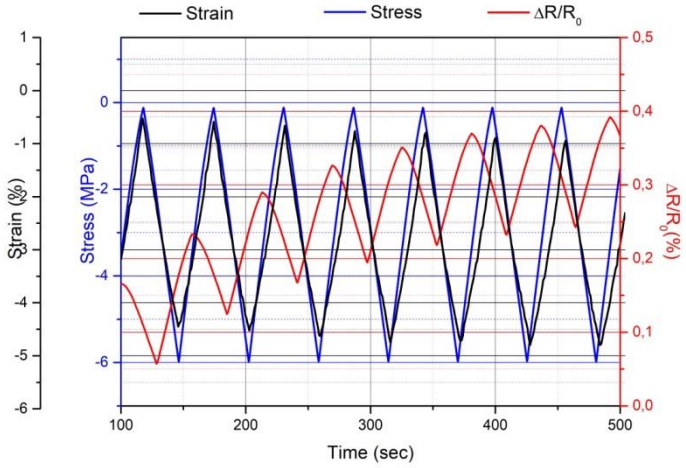


Σχήμα 10.5 : Διάγραμμα μηχανικής τάσης, παραμόρφωσης και μεταβολής της αντίστασης συναρτήσει του χρόνου για το δοκίμιο με συγκέντρωση 0.02% CNTs (Δοκίμιο 2). Με μαύρο χρώμα η παραμόρφωση, με μπλε η τάση και με κόκκινο η κλασματική μεταβολή της αντίστασης.

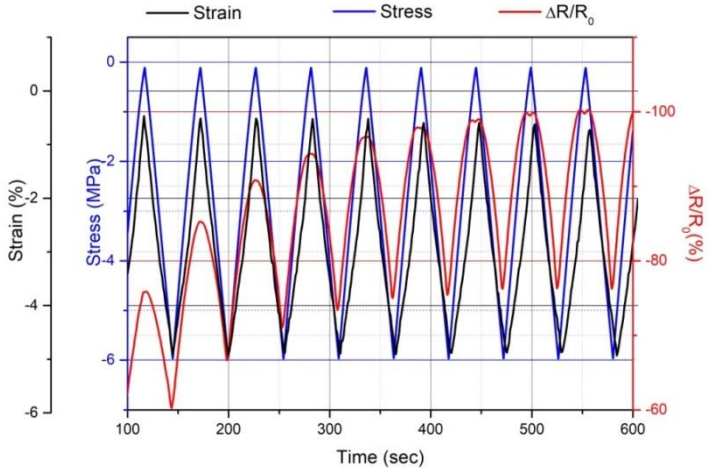
Αυτό το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό είναι σημαντικό επειδή επικυρώνει τα CNTs ως αισθητήρες καταπόνησης με μια αξιοσημείωτη ευαισθησία στην εξωτερική φόρτιση, και ως εκ τούτου αποδίδει τον όρο "έξυπνο" υλικό. Η παρατηρούμενη συμπεριφορά μπορεί να εξηγηθεί μέσω του επίπεδου συμπίεσης που προκαλείται στο δείγμα. Κατά τη διάρκεια της θλιπτικής φόρτισης διευκολύνεται η φυσική επαφή των ηλεκτρικά αγώγιμων CNTs και έτσι γίνεται πιο εύκολη η διέλευση του ρεύματος. Το αντίθετο φαινόμενο συμβαίνει κατά την εκφόρτιση, η οποία προκαλεί αύξηση της ηλεκτρικής αντίστασης. Το κατώφλι αγωγιμότητας μπορεί να θεωρηθεί περίπου στο 0.02% και 0.05% CNTs bwoc καθώς μια περαιτέρω αύξηση τις συγκέντρωσης των CNTs μειώνει την ειδική αντίσταση του κονιάματος και αυτό φαίνεται στην μορφή που παίρνουν τα διαγράμματα στις ποσότητες 0.2% , 0.5 % και 1% bwoc. Τέλος, με τους συνεχείς κύκλους φόρτισης δημιουργούνται ρωγμές εντός του τσιμεντοκονιάματος με αποτέλεσμα να αυξάνεται η κλασματική μεταβολή της αντίστασης. Κατά την πρώτη φόρτωση, αυξάνεται η κλασματική μεταβολή της αντίστασης λόγω δημιουργίας ρωγμών εντός του τσιμεντοκονιάματος. Κατά τη διάρκεια της επόμενης εκφόρτισης, η κλασματική μεταβολή της αντίστασης συνεχίζει να αυξάνεται, λόγω της επιδείνωσης του ρωγμών. (Chung D. , 2003)



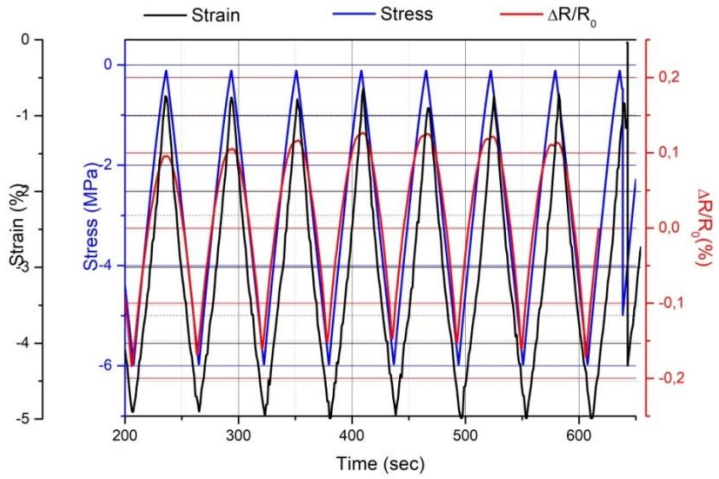
Σχήμα 10.6 : Διάγραμμα μηχανικής τάσης, παραμόρφωσης και μεταβολής της αντίστασης συναρτήσει του χρόνου για το δοκίμιο με συγκέντρωση 0.02% CNTs (Δοκίμιο 3). Με μαύρο χρώμα η παραμόρφωση, με μπλε η τάση και με κόκκινο η κλασματική μεταβολή της αντίστασης.



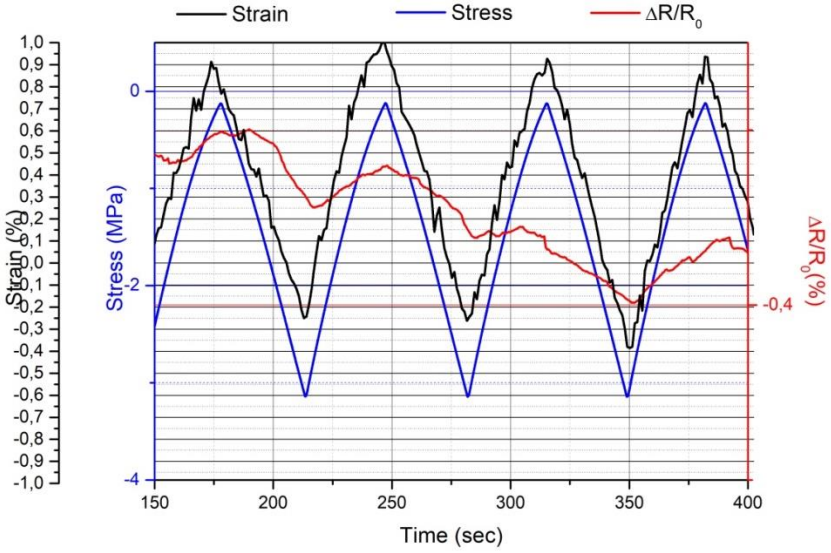
Σχήμα 10.7: Διάγραμμα μηχανικής τάσης, παραμόρφωσης και μεταβολής της αντίστασης συναρτήσει του χρόνου για το δοκίμιο με συγκέντρωση 0.05% CNTs (Δοκίμιο 1). Με μαύρο χρώμα η παραμόρφωση, με μπλε η τάση και με κόκκινο η κλασματική μεταβολή της αντίστασης.



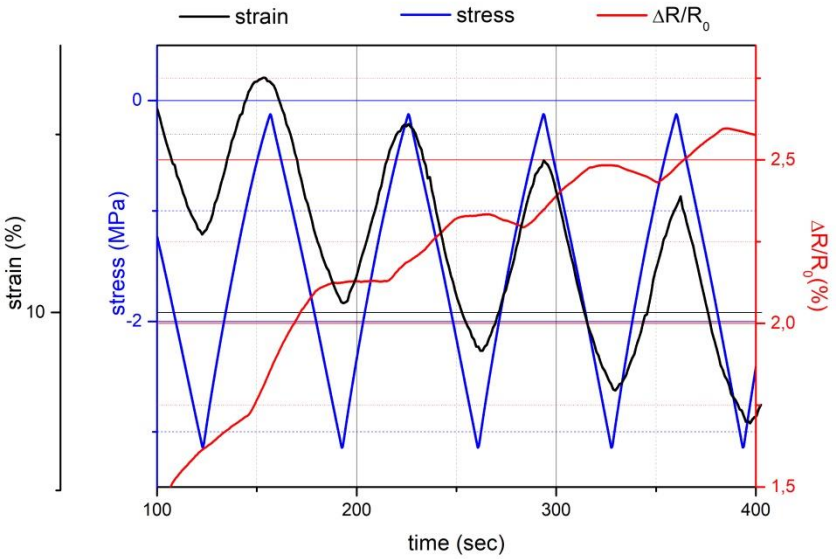
Σχήμα 10.8: Διάγραμμα μηχανικής τάσης, παραμόρφωσης και μεταβολής της αντίστασης συναρτήσει του χρόνου για το δοκίμιο με συγκέντρωση 0.05% CNTs (Δοκίμιο 2). Με μαύρο χρώμα η παραμόρφωση, με μπλε η τάση και με κόκκινο η κλασματική μεταβολή της αντίστασης.



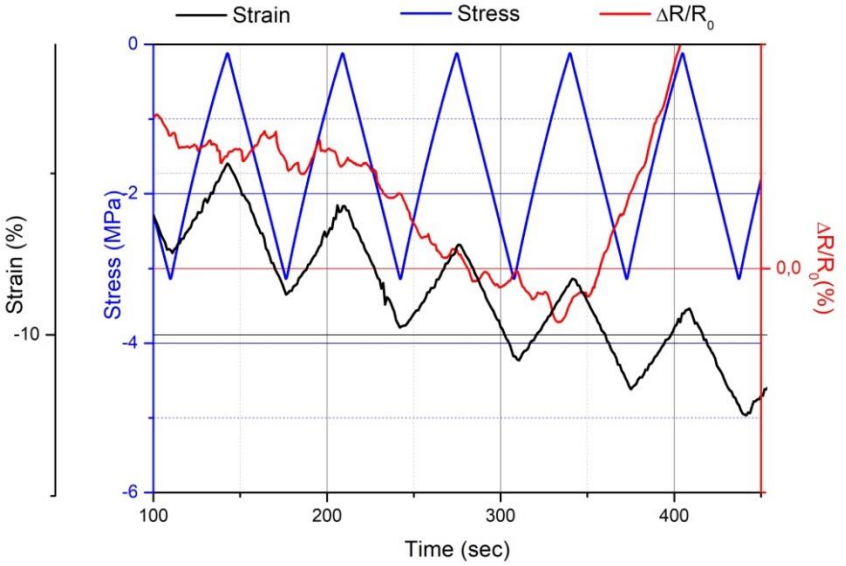
Σχήμα 10.9: Διάγραμμα μηχανικής τάσης, παραμόρφωσης και μεταβολής της αντίστασης συναρτήσει του χρόνου για το δοκίμιο με συγκέντρωση 0.05% CNTs (Δοκίμιο 3). Με μαύρο χρώμα η παραμόρφωση, με μπλε η τάση και με κόκκινο η κλασματική μεταβολή της αντίστασης.



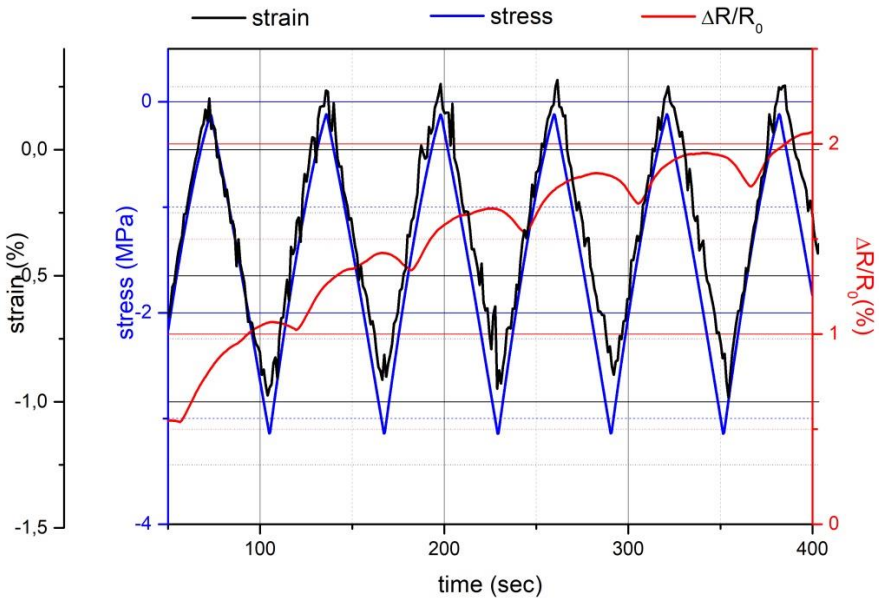
Σχήμα 10.10: Διάγραμμα μηχανικής τάσης, παραμόρφωσης και μεταβολής της αντίστασης συναρτήσει του χρόνου για το δοκίμιο με συγκέντρωση 0.2% CNTs (Δοκίμιο 1). Με μαύρο χρώμα η τάση, με μπλε η παραμόρφωση και με κόκκινο η κλασματική μεταβολή της αντίστασης.



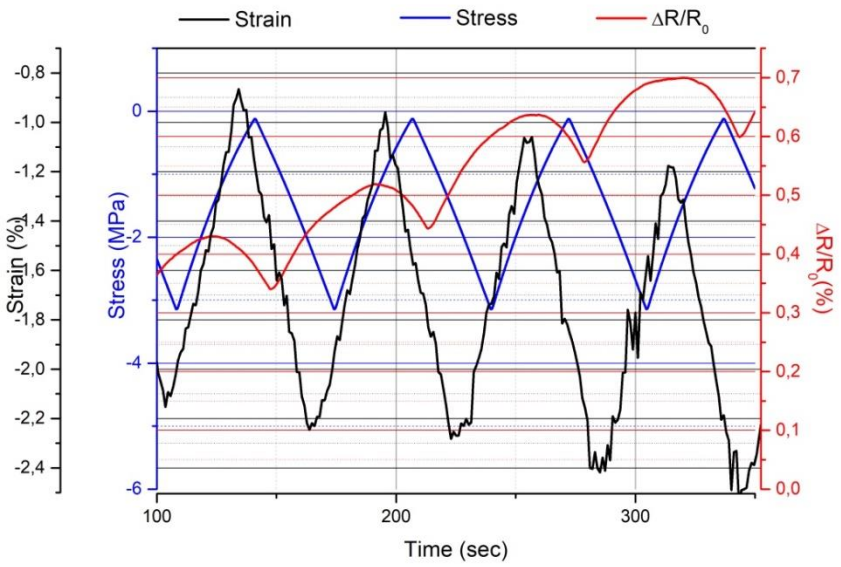
Σχήμα 10.11: Διάγραμμα μηχανικής τάσης, παραμόρφωσης και μεταβολής της αντίστασης συναρτήσει του χρόνου για το δοκίμιο με συγκέντρωση 0.2% CNTs (Δοκίμιο 2). Με μαύρο χρώμα η παραμόρφωση, με μπλε η τάση και με κόκκινο η κλασματική μεταβολή της αντίστασης.



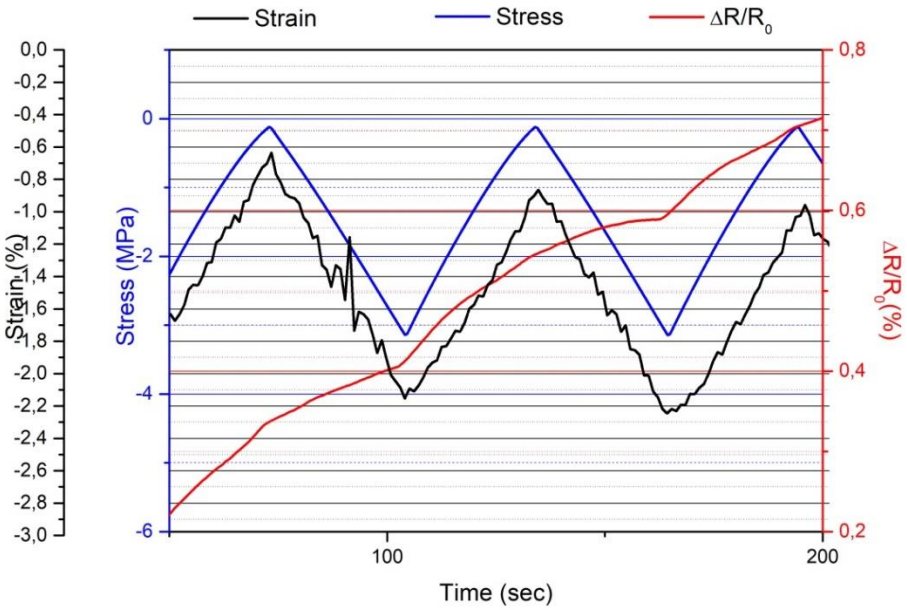
Σχήμα 10.12: Διάγραμμα μηχανικής τάσης, παραμόρφωσης και μεταβολής της αντίστασης συναρτήσει του χρόνου για το δοκίμιο με συγκέντρωση 0.5% CNTs (Δοκίμιο 2). Με μαύρο χρώμα η παραμόρφωση, με μπλε η τάση και με κόκκινο η κλασματική μεταβολή της αντίστασης.



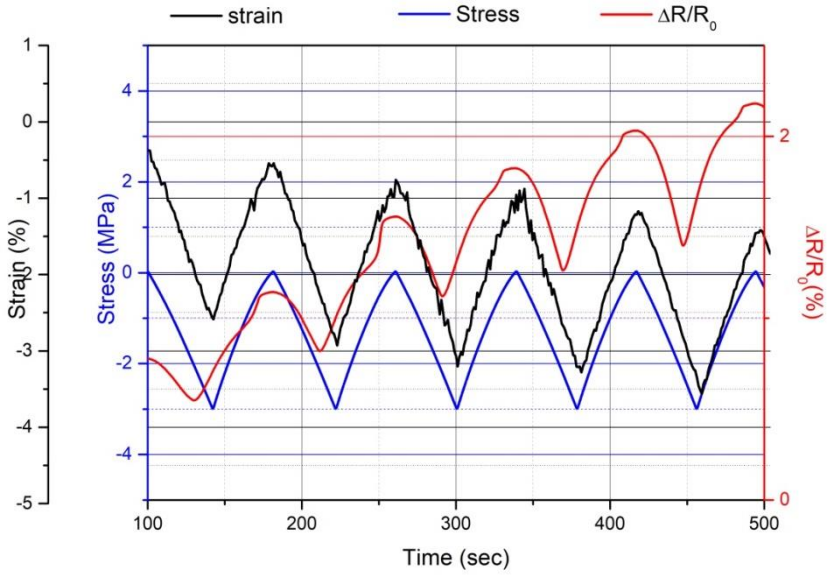
Σχήμα 10.13: Διάγραμμα μηχανικής τάσης, παραμόρφωσης και μεταβολής της αντίστασης συναρτήσει του χρόνου για το δοκίμιο με συγκέντρωση 0.5% CNTs (Δοκίμιο 3). Με μαύρο χρώμα η παραμόρφωση, με μπλε η τάση και με κόκκινο η κλασματική μεταβολή της αντίστασης.



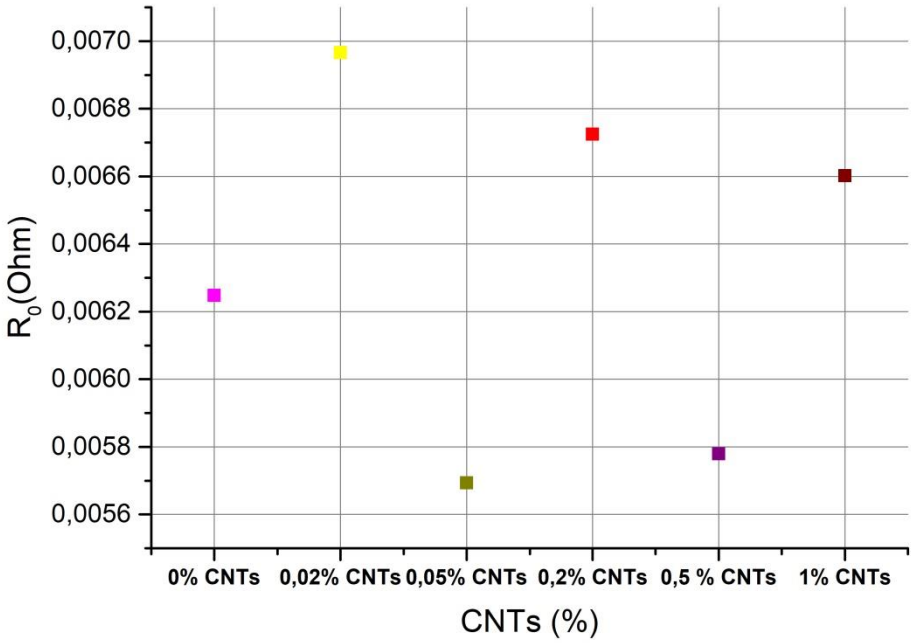
Σχήμα 10.14: Διάγραμμα μηχανικής τάσης, παραμόρφωσης και μεταβολής της αντίστασης συναρτήσει του χρόνου για το δοκίμιο με συγκέντρωση 1% CNTs (Δοκίμιο 1). Με μαύρο χρώμα η παραμόρφωση, με μπλε η τάση και με κόκκινο η κλασματική μεταβολή της αντίστασης.



Σχήμα 10.15: Διάγραμμα μηχανικής τάσης, παραμόρφωσης και μεταβολής της αντίστασης συναρτήσει του χρόνου για το δοκίμιο με συγκέντρωση 1% CNTs (Δοκίμιο 2). Με μαύρο χρώμα η παραμόρφωση, με μπλε η τάση και με κόκκινο η κλασματική μεταβολή της αντίστασης.



Σχήμα 10.16: Διάγραμμα μηχανικής τάσης, παραμόρφωσης και μεταβολής της αντίστασης συναρτήσει του χρόνου για το δοκίμιο με συγκέντρωση 1% CNTs (Δοκίμιο 3). Με μαύρο χρώμα η παραμόρφωση, με μπλε η τάση και με κόκκινο η κλασματική μεταβολή της αντίστασης.



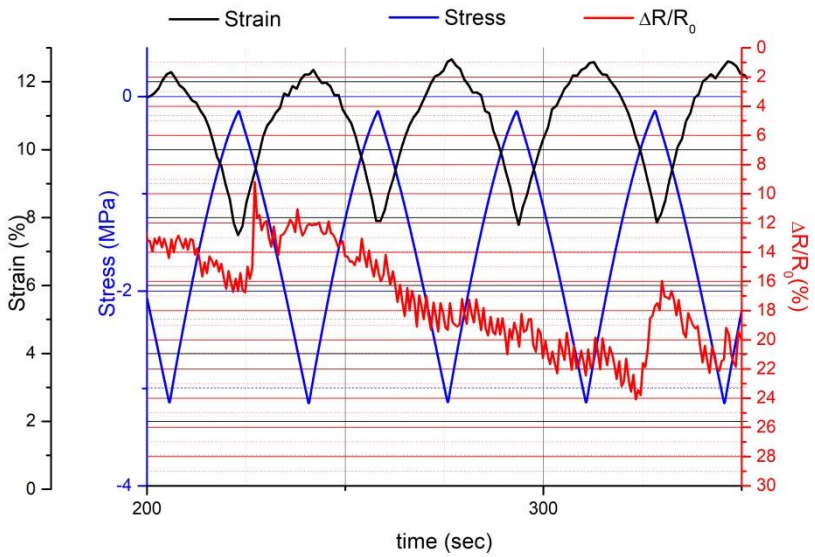
Σχήμα 10.17: Διάγραμμα της αντίστασης R_0 για t=0 συναρτήσει της συγκέντρωσης των CNTs bwoc. Δοκίμια με συγκεντρώσεις, 0%, 0.02%, 0.05%, 0.2%, 0.5% και 1% CNTs bwoc.

Στο Σχήμα 10.17 απεικονίζονται οι διαφορές στην ηλεκτρική αντίσταση συναρτήσει των συγκεντρώσεων, 0.02%, 0.05%, 0.2%, 0.5% και 1% που χρησιμοποιήθηκαν για την παραγωγή των νανο-ενισχυμένων κονιαμάτων. Όσο μικρότερη η αντίσταση του δοκιμίου που υποβάλλεται σε μέτρηση τόσο μεγαλύτερη η αγωγιμότητά του. Στο Σχήμα 10.17

παρατηρείται ότι διαφορές στην αντίσταση των τσιμεντοκονιαμάτων παρουσιάζουν διακυμάνσεις με αποτέλεσμα την μη εφικτή ακριβή εύρεση του κατωφλιού διαφυγής. Όμως, παρατηρείται πως η αντίσταση μειώνεται απότομα στην συγκέντρωση 0.05% bwoc υποδηλώνοντας πως ανάμεσα στην συγκέντρωση 0,05% και 0,2% υπάρχει η περίπτωση να βρίσκεται το κατώφλι διαφυγής και το υλικό να παρουσιάζει ιδιότητες αγωγού.

10.2 Αποτελέσματα Πιεζοηλεκτρικών Μετρήσεων Δοκιμίων Ενισχυμένων με CNTs και CFs

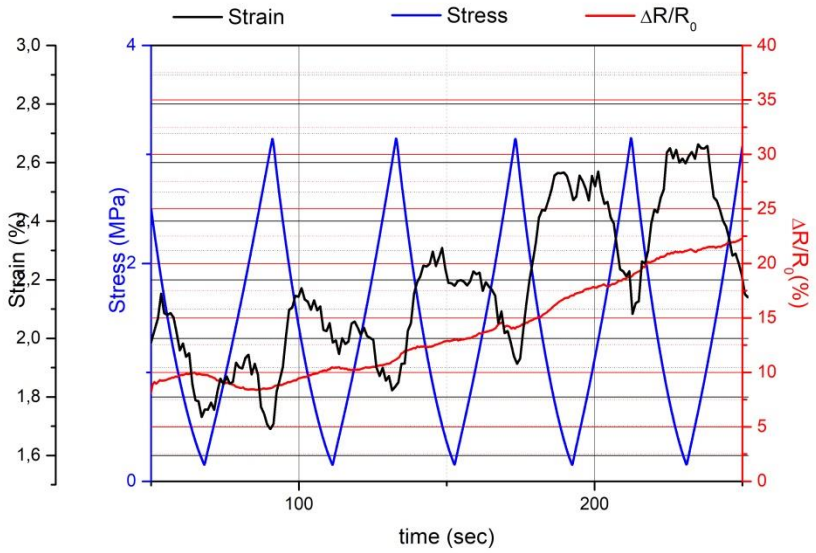
Τα αποτελέσματα της πιεζοηλεκτρικότητας των δοκιμίων που συντηρήθηκαν σε υγρό περιβάλλον για 28 ημέρες ενισχυμένα με CNTs και CFs και των συνδυασμό τους παρουσιάζονται στα επόμενα σχήματα. Καταγράφονται κύκλοι φόρτισης και εκφόρτισης και υπολογίζεται η αντίστοιχη μεταβολή της αντίστασης. Οι τιμές του συμπιεστικού φορτίου εφαρμόζονται σε συνάρτηση του χρόνου που απεικονίζονται στον αριστερό κάθετο άξονα. Ο άξονας από την δεξιά πλευρά αναπαριστά την αντίστοιχη κλασματική αλλαγή της αντίστασης ΔR/Ro(%).



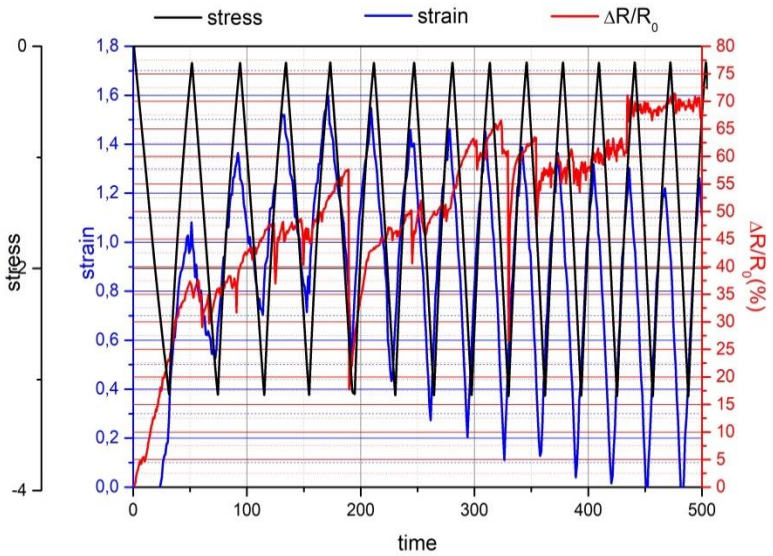
Σχήμα 10.18: Διάγραμμα μηχανικής τάσης, παραμόρφωσης και σχετικής μεταβολής της αντίστασης συναρτήσει του χρόνου για το δοκίμιο αναφοράς. Με μαύρο χρώμα η παραμόρφωση, με μπλε η τάση και με κόκκινο η κλασματική μεταβολή της αντίστασης.

Παρατηρώντας, τα σχήματα 10.18, 10.19, 10.20 και 10.21 διακρίνεται η διαφορά στην συνάφεια των διαγραμμάτων της τάσης και της παραμόρφωσης σε σχέση με την καμπύλη της αντίστασης (κόκκινο χρώμα). Τα περιθώρια σφάλματος θα μπορούσαν να μειωθούν σημαντικά χρησιμοποιώντας πιο αποτελεσματικές τεχνικές διασποράς των CNTs, καθώς και χρησιμοποιώντας ένα καλύτερο σύστημα ελέγχου ποιότητας για να διασφαλιστεί ότι τα υλικά και οι μέθοδοι κατασκευής δεν επηρεάζουν δυσμενώς τις ιδιότητες του αισθητήρα. Εκτιμάται ότι αν τα CNTs ήταν διασκορπισμένα με έναν πιο ομοιόμορφο τρόπο, χωρίς να σχηματίζουν συσσωματώματα, οι υβριδικοί αισθητήρες θα είχαν επιδείξει ακόμη καλύτερα αποτελέσματα (Panagiotis A.Danoglidis M. S.-G., 2019). Μάλιστα, είναι γνωστό ότι τα CNTs έχουν διαμέτρους παρόμοιες σε κλίμακα με τις ασβεστοπυριτικές ενώσεις (C-S-H) οι οποίες αποτελούν προϊόντα ενυδάτωσης του τσιμέντου με αποτέλεσμα όταν ενσωματώνονται τα CNTs στην τσιμεντοειδή μήτρα να περιτυλίσσονται γύρω από αυτές τις

ενώσεις και να εμποδίζουν την αναμενόμενη αύξηση της αγωγιμότητας (Panagiota T.Dalla, 2016).



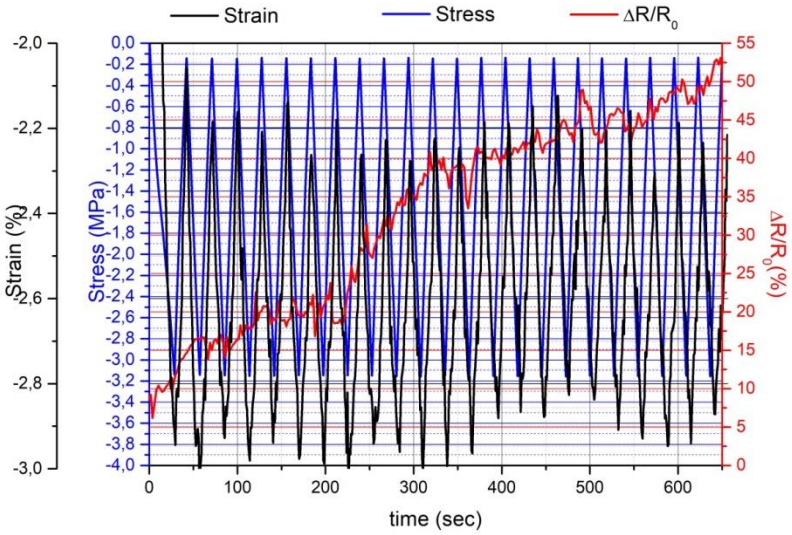
Σχήμα 10.19: Διάγραμμα μηχανικής τάσης, παραμόρφωσης και σχετικής μεταβολής της αντίστασης συναρτήσει του χρόνου για το δοκίμιο με συγκέντρωση 0,4% CFs + 0,02% CNTs (Δοκίμιο 1). Με μαύρο χρώμα η παραμόρφωση, με μπλε η τάση και με κόκκινο η κλασματική μεταβολή της αντίστασης.



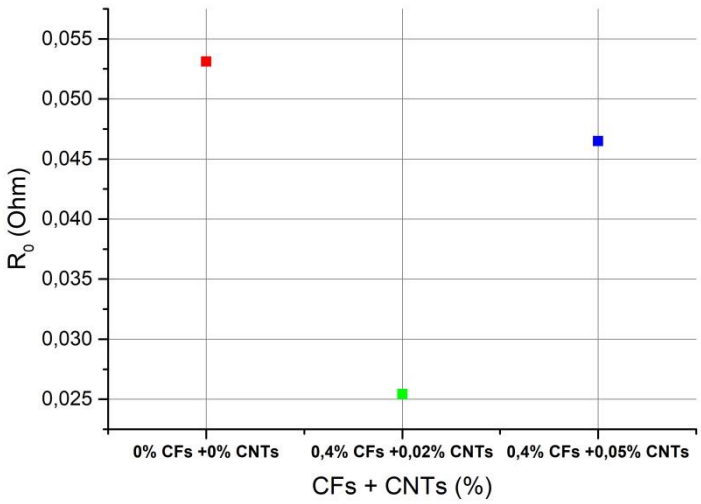
Σχήμα 10.20: Διάγραμμα μηχανικής τάσης, παραμόρφωσης και σχετικής μεταβολής της αντίστασης συναρτήσει του χρόνου για το δοκίμιο με συγκέντρωση 0,4% CFs + 0,05% CNTs (Δοκίμιο 1). Με μαύρο χρώμα η τάση, με μπλε η παραμόρφωση και με κόκκινο η κλασματική μεταβολή της αντίστασης.

Επιπροσθέτως, πρέπει να επισημανθεί ότι οι αισθητήρες με βάση το τσιμέντο είναι εξαιρετικά ευαίσθητοι και οι μετρήσεις τους επηρεάζονται εύκολα από πολλούς εσωτερικούς και εξωτερικούς παράγοντες, συμπεριλαμβανομένου του τύπου και του περιεχομένου των αγώγιμων υλικών και των μη αγώγιμων, της διαδικασίας κατασκευής (μέθοδοι διασποράς),

των μεθόδων μέτρησης ηλεκτρικής αντίστασης και τις περιβαλλοντικές συνθήκες (θερμοκρασία και υγρασία) (Panagiotis A.Danoglidis M. S.-G., 2019).



Σχήμα 10.21: Διάγραμμα μηχανικής τάσης, παραμόρφωσης και σχετικής μεταβολής της αντίστασης συναρτήσει του χρόνου για το δοκίμιο με συγκέντρωση 0,4% CFs + 0,05% CNTs (Δοκίμιο 2). Με μαύρο χρώμα η παραμόρφωση, με μπλε η τάση και με κόκκινο η κλασματική μεταβολή της αντίστασης.



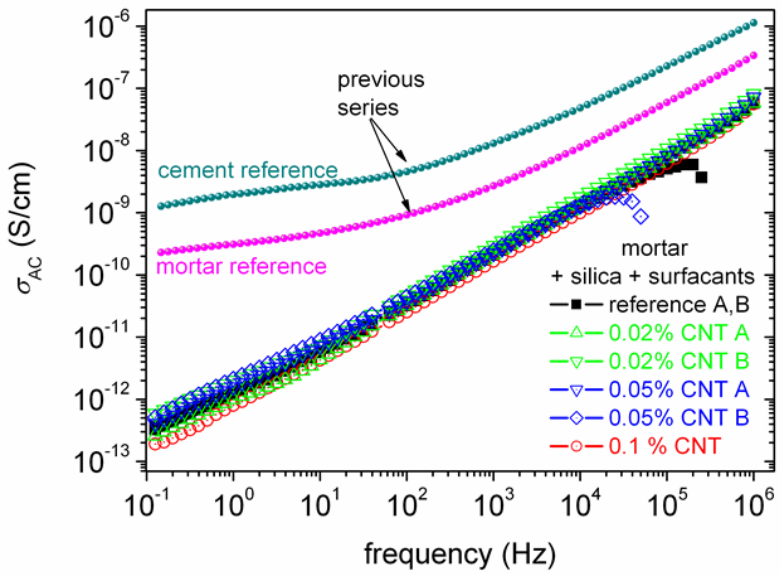
Σχήμα 10.22: Διάγραμμα της αντίστασης R_0 για t=0 συναρτήσει της συγκέντρωσης των CFs+CNTs bwoc. Δοκίμια με συγκεντρώσεις, 0%, 0.4% CFs + 0.02% CNTs και 0.4% CFs + 0.05% CNTs bwoc.

Στο Σχήμα 10.22 απεικονίζονται οι διαφορές στην ηλεκτρική αντίσταση συναρτήσει των συγκεντρώσεων, 0% CFs + 0%CNTs, 0.4% CFs + 0.02% CNTs και 0.4% CFs + 0.05% CNTs bwoc και παρατηρείται μια μεγάλη πτώση, σε σχέση με το διάγραμμα στο Σχήμα 10.17, της ηλεκτρικής αντίστασης. Η συγκέντρωση 0.4% CFs + 0.02% CNTs bwoc σημείωσε πτώση της ηλεκτρικής αντίστασης της τάξης του 40% σε σύγκριση με το δοκίμιο αναφοράς. Αυτή η συμπεριφορά οφείλεται στην ομοιογενή διασπορά των CNTs και των CFs (Wang Chuang, 2017) όπως φαίνεται στην Εικόνα 35 από το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης

SEM, αλλά και ιδιότητα των CFs να σχηματίζουν ένα ηλεκτρικό δίκτυο εντός της μήτρας του σκυροδέματος προσδίδοντας στο τσιμεντοκονίαμα αγώγιμη συμπεριφορά.

10.3 Αποτελέσματα Διηλεκτρικών Μετρήσεων

Η αγωγιμότητα και οι διηλεκτρικές ιδιότητες των τσιμεντοκονιαμάτων έχουν μετρηθεί χρησιμοποιώντας Novocontrol Alpha Analyzer.



Σχήμα 10.3: Σχέση ηλεκτρικής αγωγιμότητας συναρτήσει της συχνότητας για κάθε δοκίμιο.

Με τη βοήθεια της διηλεκτρικής φασματοσκοπίας εναλλασσόμενου πεδίου μετρήθηκε η αγωγιμότητα συναρτήσει της συχνότητας. Σύμφωνα με την θεωρία διαφυγής η οποία εξηγήθηκε εκτενώς στο κεφάλαιο 2, το αγώγιμο λειτουργικό πληρωτικό υλικό (CNT) αφού φθάσει σε μια συγκεκριμένη τιμή % bwoc θα σχηματίσει ένα τρισδιάστατο δίκτυο μέσα στην ετερογενή μήτρα. Το ποσοστό κατά το οποίο η αγωγιμότητα αυξάνεται μερικές τάξεις είναι γνωστό ως κατώφλι αγωγιμότητας. Στο Σχήμα 10.3 απεικονίζεται η σχέση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας συναρτήσει της συχνότητας για κάθε δοκίμιο που κατασκευάστηκε. Παρατηρώντας το διάγραμμα διαπιστώνεται ότι η ηλεκτρική αγωγιμότητα του νανο-σύνθετου δεν αυξάνεται με την αύξηση των CNTs, λόγω της συσσωμάτωσης των CNTs στο εσωτερικό του κονιάματος και εμποδίζοντας έτσι την ελεύθερη κίνηση των ηλεκτρονίων στο εσωτερικό του. Αποδεικνύεται, λοιπόν ότι για συχνότητα 1 Hz, η ηλεκτρονιακή αγωγιμότητα που σχετίζεται με τα CNTs και τα CFs δεν αυξήθηκε σε σχέση με τα δοκίμια του τσιμέντου και του σκυροδέματος. Παρατηρείται ότι σε όλα τα δείγματα, μετά τα 10^4 Hz υπάρχει μείωση της αγωγιμότητας. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στην αδράνεια των φορέων αγωγιμότητας σε αυτή τη συχνότητα. Τα μόνιμα ή επαγόμενα δίπολα, δεν μπορούν να ακολουθήσουν τις μεταβολές της διεύθυνσης του ηλεκτρικού πεδίου με αποτέλεσμα να μην κινούνται εντός του υλικού και το δείγμα να παρουσιάζει μείωση της αγωγιμότητας (Toton Haldar, 2019).

Κεφάλαιο 11 - Συμπεράσματα

Βασικός στόχος της παρούσας εργασίας ήταν να επιτευχθεί η μετατροπή του σκυροδέματος σε ένα «έξυπνο» υλικό με δυνατότητα αυτό-ανίχνευσης λόγω ελεγχόμενης ηλεκτρικής αγωγιμότητας, μέσω της ενσωμάτωσης CNTs και CFs στην δομή του. Πρακτικά, ο ίδιος ο σκελετός μιας κατασκευής θα μπορεί να λειτουργεί σαν αισθητήρας και να παρέχει πληροφορίες για τα φορτία και τις παραμορφώσεις του. Η έρευνα βασίζεται στη βασική υπόθεση ότι υπάρχει ένα όριο αγωγιμότητας πάνω από το οποίο μπορούμε να λαμβάνουμε ηλεκτρικά σήματα από το υλικό και να παίρνουμε πληροφορίες σχετικά με τις καταπονήσεις τις οποίες υφίσταται. Για την ανάπτυξη αισθητήρων υψηλής ακρίβειας, τόσο τα αγώγιμα όσο και τα μη-αγώγιμα υλικά, οι διαδικασίες κατασκευής, οι μηχανικές και περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις, οι μετρήσεις ηλεκτρικής αντίστασης και οι περιβαλλοντικές συνθήκες αποτελούν βασικούς παράγοντες για την επίτευξη αποτελεσματικής πιεζοηλεκτρικότητας. Κατά την διάρκεια της παρούσας μελέτης καταλήξαμε στα παρακάτω συμπεράσματα.

Αρχικά, η χρήση της πυριτικής παιπάλης είχε ως αποτέλεσμα τη βελτίωση τόσο της αντοχής σε θλίψη όσο και σε κάμψη λόγω της επίδρασης της ως υλικό πλήρωσης και λόγω της ποζολανικής της αντίδρασης. Μάλιστα, τα αποτελέσματα των μετρήσεων μέσω της κάμψης τριών σημείων απέδειξαν πως η ενίσχυση του τσιμεντοκονιάματος με CNTs αυξάνει την αντοχή του. Κατόπιν σύγκρισης των αποτελεσμάτων αποδείχθηκε πως η συγκέντρωση 0.05% bwoc παρουσίασε την καλύτερη απόδοση ακόμα και στην περίπτωση του υβριδικού τσιμεντοκονιάματος με CNTs και CFs.

Κατά την διάρκεια της χύτευσης των τσιμεντοκονιαμάτων και την διασπορά των CNTs εντός τους παρατηρήθηκε η επίδρασή τους στο φρέσκο μίγμα καταναλώνοντας περισσότερο νερό σε σχέση με το πρότυπο σύνθεσης σκυροδέματος. Αυτά τα ευρήματα υποδεικνύουν την επιρροή της προσθήκης CNTs στο σχηματισμό των προϊόντων ενυδάτωσης τσιμέντου και στον χρόνο που το τελικό κονίαμα αναπτύσσει μηχανικές ιδιότητες.

Επίσης, οι συγκεντρώσεις 0.05% CNTs και 0.02% CNTs προσέδωσαν στα δοκίμια υψηλή αντοχή στην θλίψη ακόμη και στην περίπτωση που συνδυάστηκαν με τα CFs. Στην περίπτωση των CF, τα δοκίμια που ενισχύθηκαν μόνο με αυτά και υποβλήθηκαν σε έλεγχο της αντοχής τους στην κάμψη δεν παρουσίασαν ικανοποιητικά αποτελέσματα σε σχέση με τα δοκίμια αναφοράς και αυτό οφείλεται στον τρόπο συντήρησης των δοκιμίων για τις 28 ημέρες αλλά και στην διασπορά των CFs εντός της μήτρας του κονιάματος. Αυξήθηκε όμως η αντοχή στην θλίψη και συγκεκριμένα η συγκέντρωση 0.2% CFs παρουσίασε τα καλύτερα αποτελέσματα. Το γεγονός αυτό οφείλεται όχι μόνο στον τρόπο συντήρησης του σκυροδέματος αλλά και στην διαδικασία χύτευσης του σκυροδέματος. Αν οι ίνες δεν διαβρεχθούν κατάλληλα και δεν διασπαρθούν ομοιογενώς εντός του κονιάματος μπορούν να δημιουργήσουν και να διαδώσουν μικρορωγμές επηρεάζοντας τις μηχανικές ιδιότητες του τελικού προϊόντος. Οι υπόλοιπες συγκεντρώσεις δεν εμφανίζουν ικανοποιητικά αποτελέσματα λόγω πιθανής συσσωμάτωσης ινών και σχηματισμού φυσαλίδων αέρα μέσα στο κονίαμα. Η αντοχή στην κάμψη των δοκιμίων ενισχυμένα με CFs αυξάνεται καθώς αυξάνεται και η % περιεκτικότητα των ινών bwoc.

Επιπλέον, τα CNTs είναι πολύ αποτελεσματικά για τη βελτίωση της ηλεκτρικής συμπεριφοράς των τσιμεντοειδών κονιαμάτων. Τα δοκίμια του τσιμεντοκονιάματος υποβλήθηκαν σε εξωτερικό θλιπτικό φορτίο με αποτέλεσμα το αγώγιμο δίκτυο να αλλάξει στο εσωτερικό τους και να μεταβληθεί η ηλεκτρική τους αντίσταση παρουσιάζοντας

πιεζοηλεκτρική συμπεριφορά. Με την παρατήρηση των διαγραμμάτων μηχανικής τάσης, παραμόρφωσης και σχετικής μεταβολής της ηλεκτρικής αντίστασης παρατηρήθηκε ότι η μεταβολή της ηλεκτρικής αντίστασης μειώνεται δραστικά με την αύξηση του περιεχομένου των CNTs. Η μεταβολή της ηλεκτρικής αντίστασης φθάνει στο ελάχιστο στις συγκεντρώσεις 0.02% και 0.05% CNTs bwoc και μπορεί να θεωρηθεί πως σε αυτές τις συγκεντρώσεις εμφανίζεται το κατώφλι αγωγιμότητας καθώς μετά από αυτές τα CNTs έχουν την ικανότητα να σχηματίζουν συσσωματώματα με αποτέλεσμα την φυσική επαφή τους και κατ' επέκταση την καταστροφή του αγώγιμου δικτύου εντός του τσιμεντοκονιάματος.

Επιπροσθέτως, παρατηρήθηκε πως η αντίσταση μειώνεται απότομα στην συγκέντρωση 0.05% bwoc υποδηλώνοντας πως ανάμεσα στην συγκέντρωση 0.05% και 0.2% υπάρχει η περίπτωση να βρίσκεται το κατώφλι αγωγιμότητας και το υλικό να παρουσιάζει ιδιότητες αγωγού. Ακόμη, η συγκέντρωση 0.4% CFs + 0.02% CNTs bwoc σημείωσε πτώση της ηλεκτρικής αντίστασης της τάξης του 40% σε σύγκριση με το δοκίμιο αναφοράς προσδίδοντας στο τσιμεντοκονίαμα αγώγιμη συμπεριφορά. Ορμώμενοι από τα αποτελέσματα της αντίστασης της παρούσας εργασίας, δίνεται το έναυσμα για τις επόμενες μελέτες να εξεταστούν τις συγκεντρώσεις μεταξύ 0.05% και 0.2% έτσι ώστε να βρεθεί με ακρίβεια η συγκέντρωση στην οποία μέσα στο τσιμεντοκονίαμα θα δημιουργείται ένα αγώγιμο δίκτυο.

Βέβαια, εκτός από την επιρροή της ομοιογενούς διασποράς των αγώγιμων υλικών στο τσιμεντοκονίαμα σημαντική επίδραση έχει και το μήκος των CFs το οποίο στην παρούσα μελέτη είναι 3 mm. Το μήκος των CFs σε συνδυασμό με την χαμηλή συγκέντρωση τους επιτρέπουν την κάλυψή τους από λεπτά στρώματα τσιμέντου και αδρανών υλικών με αποτέλεσμα να μην μπορούν να έρθουν σε επαφή μεταξύ τους επηρεάζοντας έτσι αρνητικά την ηλεκτρική αγωγιμότητα του τσιμεντοκονίαματος καθώς αδυνατούν να σχηματίσουν ένα αγώγιμο ηλεκτρικό δίκτυο. Σε κάθε περίπτωση εφόσον ο βαθμός διασποράς των CNTs και CFs είναι το βασικό κριτήριο που τεκμηριώνει τις μηχανικές και πιεζοηλεκτρικές ιδιότητες σε μελλοντική έρευνα θα πρέπει να γίνει περαιτέρω διερεύνηση των τεχνικών για την σωστή διασπορά των CNTs/CFs στο τσιμεντοκονίαμα καθώς και των τεχνικών χαρακτηρισμού για την εκτίμηση του βαθμού διασποράς των CNTs/CFs στα δοκίμια.

Τέλος, σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, στην συγκέντρωση 0.2% CFs της παρούσας μελέτης, η αντοχή στην θλίψη σημείωσε 48% αύξηση σε σχέση με την βιβλιογραφία (Jacopo Donnini, 2018). Τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας για την αντοχή στην κάμψη (flexural strength) στο δοκίμιο που περιείχε μόνο πυριτική παιπάλη σημείωσαν αύξηση 80% σε σχέση με τα αποτελέσματα της βιβλιογραφίας του 2017. (Arnon Chaipanich. Rattiyakorn Rianyoi, 2017). Ακόμη, στην παρούσα εργασία αποδείχθηκε πως ακόμη και σε χαμηλότερες συγκεντρώσεις των CNTs κατά βάρος του τσιμέντου εμφανίζεται ομοιογενές αγώγιμο δίκτυο εντός του σκυροδέματος (A. Al-Dahawi, 2016). Τέλος, σε σχέση με την πρόσφατη βιβλιογραφία τα τσιμεντοκονιάματα ενισχυμένα με CNTs στην παρούσα μελέτη παρουσίασαν αυξημένη αντοχή σε κάμψη(Arash Sedaghatdoost, 2018).

Βιβλιογραφία

1. A. Al-Dahawi, M. S. (2016, September). Electrical percolation threshold of cementitious composites possessing self-sensing functionality incorporating different carbon-based materials. *Smart Materials and Structures, 25*(10).

2. A. Cwirzen, K. H.-C. (2008). Surface decoration of carbon nanotubes and mechanical properties of cement/carbon nanotube composites. *Advances in Cement Research, 20*(2), pp. 65-73.

3. A.Chaipanich, R. T. (2017). The effect of carbon nanotubes and silica fume on compressive strength and flexural strength of cement mortar. *Materials Today: Proceedings, 4*(5), pp. 6065–6071.

4. A.N. Lopanov, E. A. (2013). Electrical conductivity and aggregation of carbon nanotubes in a heterogeneous system based on cement. *Middle East Journal of Scientific Research, 17*(8), pp. 1194-1199.

5. Ankit Kuma, N. K. (2016). Effect of Silica Fume and Fly Ash as Partial. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology, 5*(10).

6. Arash Sedaghatdoost, K. B. (2018). Mechanical properties of Portland cement mortar containingmulti-walled carbon nanotubes at elevated temperatures. *Construction and Building Materials, 176*, pp. 482-489.

7. Arnon Chaipanich. Rattiyakorn Rianyoi, T. N. (2017). The effect of carbon nanotubes and silica fume on compressive strength and flexural strength of cement mortars. *Materials Today: Proceedings, 4*(5), pp. 6065-6071.

8. Baoguo Han, S. D. (2015, January). Intrinsic self-sensing concrete and structures: A review. *Measurement, 59*, pp. 110-128.

9. Baoguo Han, X. G. (2007). Electrode design, measuring method and data acquisition system of carbon fiber cement paste piezoresistive sensors. *Sensors and Actuators A: Physical, 135*(2).

10. Baoguo Han, X. Y. (2014). Chapter 1 - Structures of Self-Sensing Concrete. In X. Y. Baoguo Han, *Self-Sensing Concrete in Smart Structures* (pp. 1-11).

11. Baoguo Han, X. Y. (2015). Chapter 4 , Measurement of Sensing Signal of Self-Sensing Concrete. In *Self-Sensing Concrete in Smart Structures.*

12. Baoguo Han, X. Y. (n.d.). Measurement of Sensing Signal of Self-Sensing Concrete. In *Self-Sensing Concrete in Smart Structures* (pp. 67-93).

13. Bradley A.Newcomb, H. G. (2018). 21 - The properties of carbon fibers. In *Handbook of Properties of Textile and Technical Fibres (Second Edition)* (pp. 841-871).

14. CALLISTER D. WILLIAM, R. G. (2016). *ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ.*

15. Chung, D. (2012). *Carbon Fiber Composites.*

16. Chung, D. (2000). Cement reinforced with short carbon fibers: a multifunctional material. *Composites: Part B, 31*, pp. 511- 526.

17. Chung, D. (2003). Damage in cement-based materials, studied by electrical resistance measurement. *Materials Science and Engineering, 42*, pp. 1-40.

18. Chung, D. D. (2001). Functional properties of cement-matrix composites. *Journal of Materials Science*.

19. Chung, D. D. (2002). Electrical conduction behavior of cement-matrix composites. *Journal of Materials Engineering and Performance, 11*(2), pp. 194–204.

20. Chung, D. D. (2004, October). Electrically conductive cement-based materials. *Advances in Cement Research, 16*(4), pp. 167-176.

21. D.D.L.Chung. (2000, October). Cement reinforced with short carbon fibers: a multifunctional material. *Composites Part B: Engineering, 31*(6-7), pp. 511-526.

22. D.L.Chung, D. (2017). 6 - Cement-Matrix Composites. In D. D.L.Chung, *Carbon Composites (Second Edition), Composites with Carbon Fibers, Nanofibers and Nanotubes* (pp. 333-386).

23. Dietrich Stauffer, A. A. (1994). *Introduction To Percolation Theory: Revised Second Edition.* Taylor & Francis.

24. EDIE, D. D. (n.d.). THE EFFECT OF PROCESSING ON THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF CARBON FIBERS. *Carbon*.

25. Erich Fitzer, R. K. (2008, April 15). Fibers, 5. Synthetic Inorganic. *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*.

26. F.J.Baeza, O. E. (2013). Effect of aspect ratio on strain sensing capacity of carbon fiber reinforced cement composites. *Materials and Design, 51*, pp. 1085-1094.

27. Geng Ying Li, P. M. (2005, May). Mechanical behavior and microstructure of cement composites incorporating surface-treated multi-walled carbon nanotubes. *Carbon, 43*(6), pp. 1239–1245.

28. Geng Ying Li, P. M. (2007, May). Pressure-sensitive properties and microstructure of carbon nanotube reinforced cement composites. *Cement and Concrete Composites, 29*(5), pp. 377-382.

29. Girum Urgessa, K.-B. C. (2018). Internal Relative Humidity, Autogenous Shrinkage,and Strength of Cement Mortar Modified with Superabsorbent Polymers. *polymers*.

30. Grobert, N. (2007). Carbon nanotubes –becoming clean. *Materials Today, 10*(1-2), pp. 28–35.

31. Guoxing Sun, R. L. (2016). Mechanism of cement/carbon nanotube composites with enhanced mechanical properties achieved by interfacial strengthening. *Construction and Building Materials, 115*, pp. 87-92.

32. Han, B. (2014). Measurement of Sensing Signal of Self-Sensing Concrete.

33. Han, B. (2016). 8- Nano carbon material–filled cementitious composites: Fabrication, properties, and application. In S. S. Baoguo Han, *Innovative Developments of Advanced Multifunctional Nanocomposites in Civil and Structural Engineering* (pp. 153-181).

34. Haque, M. (1996). Strength Development and Drying Shrinkage of High-Strength Concretes. *Cement & Concrete Composites, 18*(5), pp. 333-342.

35. Hayri UN, B. B. (2011). The effect of curing temperature and relative humidity on the strength development of Portland cement mortar. *Academic Journals, 6*(12), pp. 2504-2511.

36. https://en.wikipedia.org/wiki/Belite. (n.d.).

37. (n.d.). *https://www.sika.com/.*

38. I. G Richardson, G. W Groves. (1997, September 1). The structure of the calcium silicate hydrate phases present in hardened pastes of white Portland cement/blast-furnace slag blends. *Journal of Materials Science, 32*(18), pp. 4793–4802.

39. J. Liu, P. H. (1994, May 16). Continuous carbonization of polyacrylonitrile-based oxidized fibers: Aspects on mechanical properties and morphological structure. *Journal of Applied Polymer Science, 52*(7).

40. J.G.Cabrera, P. (1990). Measurement of Chloride Penetration into Silica Fume Concrete. *Cement and Concrete Composites, 12*(3), pp. 157-161.

41. J.J. Hernández, M. G.-G. (2009, September). Influence of preparation procedure on the conductivity and transparency of SWCNT-polymer nanocomposites. *Composites Science and Technology, 69*(11-12), pp. 1867-1872.

42. J.K.W. Sandler, J. K. (2003, September). Ultra-low electrical percolation threshold in carbon-nanotube-epoxy composites. *Polymer, 44*(19), pp. 5893-5899.

43. J.-P. Salvetat, J. B. (1999). Mechanical properties of carbon nanotubes. *Applied Physics A, 69*(3), pp. 255–260.

44. Jacopo Donnini, T. B. (2018, November). Mechanical, electrical and self-sensing properties of cementitious mortars containing short carbon fibers. *Journal of Building Engineering, 20*, pp. 8-14.

45. Jean-Baptiste Donnet, R. C. (1998). *Carbon Fibers, Third Edition.*

46. Jens Pusch, Bernd Wohlmann. (2018). Chapter 2 - Carbon Fibers. In B. W. Jens Pusch, *Inorganic and Composite Fibers, Production, Properties, and Applications, The Textile Institute Book Series* (pp. 31-51).

47. Jianmin Wu, J. L. (2015, January). Three-phase composite conductive concrete for pavement deicing. *Construction and Building Materials, 75*, pp. 129-135.

48. Jie Gao, A. S. (2018). Characterization of carbon fiber distribution in cement-based composites by Computed Tomography. *Construction and Building Materials, 177*(7), pp. 134-147.

49. Jie Gao, Z. W. (2017). Dispersion of carbon fibers in cement-based composites with different mixing methods. *Construction and Building Materials, 134*, pp. 220-227.

50. Jonathan M. Makar, G. W. (2009, June 9). Growth of cement hydration products on single-walled carbon nanotubes. *Journal of the American Ceramic Society, 92*(6), pp. 1303-1310.

51. Josef Foldyna, V. F. (2016). Dispersion of carbon nanotubes for application in cement composites. *Procedia Engineering, 149*, pp. 94 – 99.

52. Kalim Deshmukh, S. S. (2017). Chapter 10 - Dielectric Spectroscopy. In *Spectroscopic Methods for Nanomaterials Characterization, Micro and Nano Technologies* (pp. 237-299).

53. Kalim Deshmukh, S. S. (2017). Dielectric Spectroscopy. In *Spectroscopic Methods for Nanomaterials Characterization.*

54. Kasap, S. O. (2004). *Αρχές ηλεκτρονικών υλικών και διατάξεων.* Παπασωτηρίου.

55. Khan, M. I. (2011). Utilization of silica fume in concrete: Review of durability properties. *Resources Conservation and Recycling, 57*, pp. 30-35.

56. Khan, M. I. (2018). 14 - Nanosilica/silica fume. In *Waste and Supplementary Cementitious Materials in Concrete, Characterisation, Properties and Applications* (pp. 461-491).

57. Konsta-Gdoutos, M. S. (2010). Highly dispersed carbon nanotube reinforced cement based materials. pp. https://www.scholars.northwestern.edu/en/publications/highly-dispersed-carbon-nanotube-reinforced-cement-based-material.

58. L.M., M. (2001). *Carbon Fibers in Encyclopedia of Materials: Science and Technology.*

59. LI, X. Y. (2003). Microstructure of Cement Mortar With Nano-particles. pp. https://www.scribd.com/document/122813787/LI-XIAU-YUAN-OU-2003-Microstructure-of-Cement-Mortar-With-Nano-particles.

60. M.Saafi. (n.d.). *Wireless and embedded carbon nanotube networks for damage detection in concrete structures.* Department of Construction Engineering and Management, North Dakota State University, Fargo, ND 58108, USA.

61. Mabaha, D. E. (2019). Design of low cost semi-crystalline calcium silicate from biomass for the improvement of the mechanical and microstructural properties of metakaolin-based geopolymer cements. *Materials Chemistry and Physics, 223*, pp. 98-108.

62. Makar, J. M. (2005). *Carbon nanotube/cement composites - early results and potential applications.* National Research Council Canada.

63. Maria S. Konsta-Gdoutos, Z. S. (2010). Highly dispersed carbon nanotube reinforced cement based materials. *Cement and Concrete Research, 40*(7), pp. 1052-1059.

64. MDA Thomas, ,. K. (1998). Development and field applications of silica fume concrete in Canada: a retrospective. *Canadian Journal of Civil Engineering, 3*(25), pp. 391-400.

65. Mehran Khan, M. A. (2019). Improvement in concrete behavior with fly ash, silica-fume and coconut fibres. *Construction and Building Materials, 203*, pp. 174-187.

66. Morsy, M. S. (2011, January). Hybrid effect of carbon nanotube and nano-clay on physico-mechanical properties of cement mortar. *Construction and Building Materials, 25*(1), pp. 145-149.

67. Neville A M and Brooks J J. (2010). *Concrete Technology.*

68. P. J. F. Wright, F. G. (2015). The effect of the method of test on the flexural. *Magazine of Concrete Research, 4*(11), pp. 67-76.

69. P. Rajalingam, G. R. (2006). POLYACRYLONITRILE PRECURSOR FOR CARBON FIBERS. *Journal of Macromolecular Science, Part C , 3*(2-3), pp. 301-310.

70. Panagiota T. Dalla, K. G. (2016). Carbon nanotubes and nanofibers as strain and damage sensors for smart cement. *Materials Today Communications, 8*, pp. 196–204.

71. Panagiota T.Dalla, K. G. (2016). Carbon nanotubes and nanofibers as strain and damage sensors for smart cement. *Materials Today Communications, 8*, pp. 196–204.

72. Panagiotis A.Danoglidis, M. S.-G. (2016). Strength, energy absorption capability and self-sensing properties of multifunctional carbon nanotube reinforced mortars. *Construction and Building Materials, 120*(1), pp. 265-274.

73. Panagiotis A.Danoglidis, M. S.-G. (2019). Relationship between the carbon nanotube dispersion state, electrochemical impedance and capacitance and mechanical properties of percolative nanoreinforced OPC mortars. *Carbon, 145*, pp. 218-228.

74. Peebles, L. H. (1995). *Carbon Fibers, Formation, Structure, and Properties.*

75. Peigang He, D. J. (2010). Effects of high-temperature heat treatment on the mechanical properties of unidirectional carbon fiber reinforced geopolymer composites. *Ceramics International, 36*(4), pp. 1447-1453.

76. Pu-Woei Chen, D. C. (1993). Concrete reinforced with up to 0.2 vol% of short carbon fibres. *Composites, 24*(1), pp. 33-52.

77. Pu-Woei Chen, D. C. (1996). Concrete as a new strain/stress sensor. *Composites Part B: Engineering, 27*(1), pp. 11-23.

78. R. Khazaka, M.-L. L. (2011). *Conductivity spectroscopy and conduction current measurements of polyimide thin films during high temperature aging.* IEEE.

79. Raki, L. (n.d.).

80. Sihai Wen, D. (2006). Model of piezoresistivity in carbon fiber cement. *Cement and Concrete Research*, p. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884606001372.

81. Silica Fume Association, 2. S. (n.d.).

82. Silica Fume Association, 2. S. (n.d.).

83. Toton Haldar, V. R. (2019). Broadband dielectric behavior of the multiwall carbon nanotube-bismuth silicate glass-nanocomposites. *Journal of Alloys and Compounds, 772*, pp. 218-229.

84. Tsung-Chin Hou, J. P. (2005, May). Conductivity-based strain monitoring and damage characterization of fiber reinforced cementitious structural components. *Smart Structures and Materials*.

85. Wang Chuang, J. G.-s.-l. (2017). Dispersion of carbon fibers and conductivity of carbon fiber-reinforced cement-based composites. *Ceramics International, 43*(17), pp. 15122-15132.

86. Wang Chuang, P. L.-l.-p.-z. (2018). Influences of molding processesand different dispersants on thedispersion of chopped carbonfibers in cement matrix. *Heliyon, 4*(10).

87. Wenkui Dong, W. L. (2019). Piezoresistive properties of cement-based sensors: Review and perspective. *Construction and Building Materials, 203*, pp. 146-163.

88. Xiao-Lin Xie, Y.-W. M.-P. (2005, May). Dispersion and alignment of carbon nanotubes in polymer matrix: A review. *Materials Science and Engineering: R: Reports, 49*(4), pp. 89-112.

89. Yue, H. (2018, March). Mechanical Property and Electromagnetic Interference Shielding Effectiveness of Mortar Produced with Radiation-Proof Cloths. *Journal of Materials in Civil Engineering*.

90. Zeyu Lu, A. H. (2018). Highly dispersed graphene oxide electrodeposited carbon fiber reinforced cement-based materials with enhanced mechanical properties. *Cement and Concrete Composites, 87*(3), pp. 220-228.

91. Α. Μοροπούλου, Κ. Λαμπρόπουλος. (n.d.). *Δομικά Υλικά Τσιμέντο & Σκυρόδεμα.* Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα, Χημικών Μηχανικών, ΕΜΠ.

92. ΓΙΑΖΙΤΖΟΓΛΟΥ. (2012). http://dspace.lib.ntua.gr/dspace2/bitstream/handle/123456789/6348/giazitzogloum_melt.pdf?sequence=5.

93. Δ. Παπαδημητριου, Π. Π. (2002). *Σημειώσεις για το μάθημα: Μέθοδοι Χαρακτηρισμού Υλικών. ΕΜΠ.* Αθήνα.

94. Ε. Βιντζηλαίου, Ε. Β. (n.d.). *6η Ενότητα, ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ: ΔΟΜΗ.* ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ,ΤΕΧΝΙΚΑ ΥΛΙΚΑ, ΕΜΠ.

95. Ε. Βιντζηλαίου, Ε. Β. (n.d.). *Σημειώσεις Μαθήματος ΤΕΧΝΙΚΑ ΥΛΙΚΑ, ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ: ΝΩΠΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ, ΠΡΟΣΘΕΤΑ, ΠΡΟΣΜΙΚΤΑ.* ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ, ΕΜΠ.

96. Ζέρης, Χ. (2014). *Στοιχεία Τεχνολογίας Σκυροδέματος (Σκυροδέτηση και Συντήρηση), ΕΜΠ.*

97. Ι.Σημιτζής. (2002). *Τεχνολογία προηγμένων πολυμερών και συνθέτων υλικών.* Αθήνα.

98. Κόλιας, Σ. (n.d.). *Σημειώσεις Μαθήματος Προχωρημένη Τεχνολογία Σκυρόδεματος.* ΔΠΜΣ, Δομοστατικός Σχεδιασμός και Ανάλυση Κατασκευών.

99. Κόλλιας, Σ. (2014). *Σημειώσεις Μαθήματος, (Δ.Π.Μ.Σ.) "Προχωρημένη Τεχνολογία Σκυροδέματος" .* Πολιτικών Μηχανικών, ΕΜΠ.

100. Κυριακόπουλος, Β. (2012). *"Σχέση Αντοχής Σκυροδέματος σε Θλίψη και Κάμψη".* Διπλωματική Εργασία, Δ.Π.Μ.Σ." Δομοστατικός Σχεδιασμός και Ανάλυση Κατασκευών", ΕΜΠ, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Αθήνα, Ιανουάριος 2012.

101. Κυριακόπουλος, Β. (2012). *Σχέση Αντοχής Σκυροδέματος σε Θλίψη και Κάμψη .* Αθήνα: ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ, ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ, ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ, ΕΜΠ.

102. Μιχαήλ Ν.Φαρδής. (1996). *Μαθήματα Οπλισμένου Σκυροδέματος.*

103. Μοροπούλου, Α. (2017). *Σημειώσεις Μαθήματος ΔΟΜΙΚΑ ΥΛΙΚΑ, 9ου εξαμ. Σχολή Χημικών Μηχανικών, ΕΜΠ.*

104. Νταφαλιάς Ευστάθιος. (2009). *Έλεγχος Υδατοπερατότητας Τσιμέντου.* Διδακτορική Διατριβή , Πανεπιστημίο Πάτρων , Τμήμα Χημικών Μηχανικών, Πάτρα.

105. Π. Πίσσης, Λ. Μ.–Σ. (2008). *Percolation Theory, Θεωρίες και μέθοδοι διαφυγής, 8ο εξάμηνο ΣΕΜΦΕ.*

106. Πλαμαντούρας, Β. (2015). *ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΒΛΑΒΗΣ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΑΠΟ ΙΝΟΠΛΕΓΜΑΤΑ, ΔΙΑΤΡΙΒΗ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟΥ ΔΙΠΛΩΜΑΤΟΣ ΕΙΔΙΚΕΥΣΗΣ.* ΠΑΤΡΑ: ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ, ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ, ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ.

107. Σ., Κ. (2001). *Δομική τεχνολογία Υλικά και εφαρμογές.*

108. Σιμιτζής, Ι. (1978). Ίνες Άνθρακα Παρασκευή – Ιδιότητες – Τεχνολογικές Εφαρμογές.

109. Σοβατζόγλου, Σ. (2012). *Μελέτη θερμικών και διηλεκτρικών/ηλεκτρικών ιδιοτήτων νανοσύνθετων πολυβινυλιδενοδιφθοριδίου-νανοσωλήνων άνθρακα, Διπλωματική Εργασία.* Αθήνα: ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ, ΤΟΜΕΑΣ ΦΥΣΙΚΗΣ, ΕΜΠ.

110. Σπυρίδων, Σ. (2012). Μελέτη θερμικών και διηλεκτρικών/ηλεκτρικών ιδιοτήτων νανοσύνθετων πολυβινυλιδενοδιφθοριδίου-νανοσωλήνων άνθρακα.

111. Τριανταφύλλου, Α. (2013). *Δομικά Υλικά.*

Βιογραφικό σημείωμα – Χρυσανθοπούλου Αθανασία

Γ. Ολυμπίου 10 Πάτρα,26222
ΤΗΛ: 6974621931|
ΗΜ. ΓΕΝΝΗΣΗΣ: 28/06/1994
athanasiachrysanthopoulou@gmail.com

ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ ΚΑΙ ΚΑΤΑΡΤΙΣΗ

2017-2019: Μεταπτυχιακός Τίτλος - Επιστήμη και Τεχνολογία Υλικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
2012 - 2017: Προπτυχιακός Τίτλος - Τμήμα Επιστήμης Υλικών, Πανεπιστήμιο Πατρών
2012: Απόφοιτη του 13ο Γενικού Λυκείου Πάτρών

ΕΡΓΑΣΙΑΚΗ ΚΑΙ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΕΜΠΕΙΡΙΑ

CBL PATRAS -ΧΗΜΙΚΑ ΚΑΙ ΒΙΟΦΑΡΜΑΚΕΥΤΙΚΑ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑ ΠΑΤΡΩΝ Α.Ε. κατά την διάρκεια της πρακτικής άσκησης στο τμήμα Διασφάλισης και Ποιότητας (Quality Assurance System)

Συνεργασία σαν εργαστηριακό μέλος με το την Ερευνητική Μονάδα Προηγμένων, Σύνθετων, Νάνο Υλικών και Νανοτεχνολογίας, R-NanoLab, Σχολή Χημικών Μηχανικών (Τομέας Επιστήμης και Τεχνολογίας Υλικών) του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (ΕΜΠ), 2018 - 2019.

Συνεργασία σαν εργαστηριακό μέλος με το Εργαστήριο Υψηλής Τεχνολογίας Υλικών (Laboratory of High-Tech Materials), της Πολυτεχνικής Σχολής, του Πανεπιστημίου Πατρών, από τον Οκτώβριο του 2015- 2017.

ΕΡΓΑΣΙΕΣ

Μεταπτυχιακή Εργασία :"Σύνθεση Δοκιμίων Τσιμεντοκονιάματος Ενισχυμένων με Νανοσωλήνες και Ίνες Άνθρακα: Μελέτη των Μηχανικών, Ηλεκτρικών/Πιεζοηλεκτρικών τους Ιδιοτήτων."

Διπλωματική Εργασία: "Νανοσύνθετα λεπτά υμένια οξειδίων μεταβατικών μετάλλων και χρυσού".

ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ

Poster στο 12^0 Πανελλήνιο Επιστημονικό Συνέδριο Χημικής Μηχανικής Αθήνα, 29-31 Μαΐου 2019 με τίτλο: "Σύνθεση Δοκιμίων Τσιμεντοκονιάματος Ενισχυμένων με Νανοσωλήνες και Ίνες Άνθρακα: Μελέτη των Μηχανικών, Ηλεκτρικών/Πιεζοηλεκτρικών τους Ιδιοτήτων.", Α. Χρυσανθοπούλου, Ε. Καραξή, Ε. Κανελλοπούλου, Ι. Καρτσωνάκης, Κ. Χαριτίδης, Σχολή Χημικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

"Growth of Au Nanoparticles in NiO via Short Annealing of Precursor Material Thin Film and Optimization of Plasmonics", S. Grammatikopoulos, A. Stamatelatos, A. Delimitis, A. Sousanis, A. Chrisanthopoulou, D. Trachylis, C. Politis, P. Poulopoulos, Physica Status Solidi (A) Applications and Materials 214(11), August 2017.

ΞΕΝΕΣ ΓΛΩΣΣΕΣ

Αγγλικά: Lower Michigan (ECCE) - Επίπεδο Γνώσης - «Πολύ Καλό» Γαλλικα: Sorbonne B1 - Επίπεδο Γνώσης - «Πολύ Καλό»

ΕΝΔΙΑΦΕΡΟΝΤΑ

Αθλητισμός (Πετοσφαίρηση)
Μουσική συντάκτης στο ηλεκτρονικό περιοδικό https://www.rocking.gr/