

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

**Αθανασία Ι. Χρυσανθοπούλου<sup>1</sup>, Ειρήνη Κανελλοπούλου<sup>1</sup>, Ευαγγελία Κ. Καραξή<sup>1</sup>,  
Ιωάννης Α. Καρτσωνάκης<sup>1</sup>, Κωνσταντίνος Α. Χαριτίδης<sup>1,\*</sup>**

<sup>1</sup>Εργαστήριο Προηγμένων και Συνθέτων Υλικών, Νανοϋλικών, Να-  
νοδιεργασιών και Νανοτεχνολογίας, R Nanolab, Σχολή Χημικών Μηχανικών, ΕΜΠ  
(\*[charitidis@chemeng.ntua.gr](mailto:charitidis@chemeng.ntua.gr))

### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Μελέτες αποδεικνύουν πως η εισαγωγή νανοσωλήνων άνθρακα (Carbon Nanotubes, CNTs) και ινών άνθρακα (Carbon Fibers, CFs) στο σκυρόδεμα αυξάνει τις μηχανικές ιδιότητες, καθώς και την ηλεκτρική αγωγιμότητά τους. Συνέπεια της υψηλής αγωγιμότητάς τους, είναι η διερεύνηση αυτών των υλικών στον κατασκευαστικό τομέα με σκοπό την έγκαιρη ανίχνευση φθοράς. Στην παρούσα εργασία παρασκευάζονται σύνθετα υλικά τσιμέντου ενισχυμένα με CFs και CNTs, αντίστοιχα, με στόχο τη μελέτη των μηχανικών τους και ηλεκτρικών/πιεζοηλεκτρικών τους ιδιοτήτων. Χρησιμοποιήθηκαν εμπορικά διαθέσιμα CNTs καθώς και CFs. Κατασκευάστηκαν δοκίμια τσιμεντοκονιάματος ενισχυμένα με CFs ή CNTs, ενώ για την ενίσχυση της διασποράς τους χρησιμοποιήθηκαν εμπορικά διαθέσιμα πρόσθετα. Χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικές συγκεντρώσεις CNTs και CFs που κυμαίνονταν από 0,02-1% και 0,05-1% (ως προς την μάζα του τσιμέντου), αντίστοιχα.

### ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα τελευταία χρόνια έχει παρατηρηθεί πως ένα μεγάλο ποσοστό των κατασκευών από σκυρόδεμα χρήζουν επέμβασης και επισκευής. Οι κυριότεροι λόγοι είναι σε περιπτώσεις βλάβης από υπερκαταπόνηση (π.χ. σεισμός), σε αρχικά κατασκευαστικά λάθη και στην ανάγκη αναβάθμισης του φέροντα οργανισμού λόγω παλαιότητας. Η ανάπτυξη στην τεχνολογία των τσιμέντων τις τελευταίες δεκαετίες έχουν οδηγήσει στην ανάπτυξη καινοτόμων σύνθετων υλικών με βάση τις τσιμέντο με βελτιωμένες ιδιότητες <sup>1</sup>. Η δυνατότητα της 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 <sup>2</sup>. 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 αγωγικών υλικών όπως είναι οι ίνες άνθρακα, οι ίνες χάλυβα, η σκόνη γραφίτη, ή οι νανοσωλήνες άνθρακα 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 <sup>3</sup>.

## ΣΤΟΧΟΙ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι η παρασκευή σύνθετων υλικών τσιμέντου ενισχυμένων με CFs και CNTs, αντίστοιχα, 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 των μετρήσεων αντοχής κάμψης (flexural strength) και θλίψης (compressive strength). Οι πιεζοηλεκτρικές ιδιότητες και η ικανότητα ανίχνευσης των συνθέτων υλικών ερευνηθήκαν υπό την επίδραση κυκλικού θλιπτικού φορτίου μέσω των κατάλληλων συσκευών. Μέσω της διηλεκτρικής φασματοσκοπίας εναλλασσόμενου πεδίου, DRS (Dielectric Resonance Spectroscopy, Novocontrol Alpha Analyzer) μετρήθηκε η αγωγιμότητα και η διηλεκτρική σταθερά συναρτήσει της συχνότητας. Τέλος, επειδή τα CNTs αποτελούν μια επιλογή υψηλού κόστους ως ενισχυτικό υλικό το οποίο μειώνει την εργασιμότητα 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 <sup>4</sup>.

## ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε τσιμέντο τύπου Portland (CEM I 52.5 N), σύμφωνα με το πρότυπο EN 196-1 <sup>5</sup>. Κάθε παρτίδα αποτελείται από τρία δοκίμια και συνίσταται (405 ± 2) g τσιμέντο, (45 ± 2) g πυριτική παιπάλη (silica fume) σε ποσοστό 10% κατά βάρος του τσιμέντου (ποζολανικό τσιμεντοκονίαμα), (1350 ± 5) g άμμο και (315 ± 1) g νερό, στην περίπτωση των CNTs και (225 ± 1) g νερό στην περίπτωση των CFs. Χρησιμοποιήθηκαν καλούπια από τεφλόν διαστάσεων 4 x 4 x 16 cm<sup>3</sup> (κατά το πρότυπο EN 196). Οι χαρακτηριστικές ιδιότητες του των ενισχυτικών υλικών (CNTs) και των CFs βρίσκονται στον **Πίνακα 1**. Οι συγκεντρώσεις των CNTs που ενσωματώθηκαν στα δοκίμια ήταν 0,02%, 0,05%, 0,1%, 0,2%, 0,5% και 1%. Επίσης, οι συγκεντρώσεις των CFs ήταν 0,05%, 0,1%, 0,2%, 0,25%, 0,3%, 0,4% και 1%. Παρασκευάστηκαν 3 δοκίμια για κάθε μία από τις επιλεγμένες συγκεντρώσεις.

**Πίνακας 1.** Ιδιότητες των CNTs και CFs που χρησιμοποιήθηκαν ως μέσο ενίσχυσης στα δοκίμια τσιμέντου.

Δείγμα	Διάμετρος	Μήκος	Ποσοστό επιφανειακών οξυγονούχων ομάδων (%at)	Θερμική σταθερότητα	Χρονική σταθερότητα αιωρήματος στο νερό
CNT	20-40 nm	>1μm	>13%	>600 °C	>6μήνες
Δείγμα	Διάμετρος	Μήκος	Πυκνότητα	Αντοχή εφελκυσμού	Ειδικό βάρος
CF	7 μm	3mm	450 g / dm <sup>3</sup>	3500 MPa	1,7 g / cm <sup>3</sup>

Η διαδικασία περιλάμβανε την τοποθέτηση των CNTs σε ποτήρια ζέσεως με 315ml H<sub>2</sub>O και για την ομοιογενή διασπορά τους προστέθηκε στάγδην Sika Stabilizer SI -100. Ο stabilizer προστέθηκε ενώ το αιώρημα ήταν υπό ισχυρή ανάδευση για 15 sec. Εν συνεχεία κάθε ποτήρι ζέσεως αφέθηκε για 45 sec σε λουτρό υπερήχων και κατόπιν προστέθηκε στην ποσότητα τσιμέντου και άμμου οι οποίες έχουν προ-ζυγισθεί και προστεθεί στο μίξερ. Στην περίπτωση των δοκιμών με τα CFs η διαδικασία

τοποθέτησης τους στο ποτήρι ζέσεως με την ζυγισμένη ποσότητα νερού είναι η ίδια με την μόνη διαφορά πως για την ομοιόμορφη διασπορά τους στην πάστα του τσιμέντου χρησιμοποιήθηκε υγρό πρόσμιξης σκυροδέματος Sika® ViscoCrete®-3082 σε ποσότητα 1% κατά βάρος του τσιμέντου.

Η μελέτη των μηχανικών ιδιοτήτων των σύνθετων δοκιμών έγινε μετά από το πέρας των 28 ημερών ενυδάτωσής τους. Η δοκιμή κάμψης πραγματοποιήθηκε σε συσκευή θλίψης-εφελκυσμού Instron 1121 με μέγιστη εφελκυστική ή θλιπτική αξονική δύναμη έως 10 kN, αφού συνδέθηκε κατάλληλη κεφαλή και βάση για τη δοκιμή κάμψης 3 σημείων. Η δοκιμή θλίψης των δοκιμών που προέκυψαν από τη δοκιμή κάμψης πραγματοποιήθηκε σε υδραυλική συσκευή. Εν συνεχεία υπολογίστηκαν οι τιμές της αντοχής σε κάμψη και θλίψη σύμφωνα με τις παρακάτω εξισώσεις:

$$R_f = \frac{1,5 \times F_f \times l}{b^3} \quad (1)$$

όπου:  $R_f$ : η αντοχή σε κάμψη ( $\text{MPa} = \text{N/mm}^2$ ),  $F_f$ : το επιβαλλόμενο φορτίο (N),  $l$ : η απόσταση μεταξύ των δύο στηριγμάτων (mm),  $b$ : το μήκος της πλευράς της τετραγωνικής διατομής (mm).

Η αντοχή σε θλίψη δίνεται από τον τύπο:

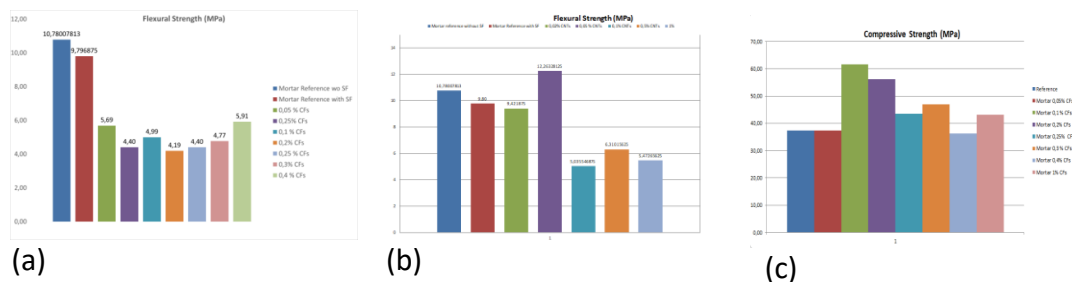
$$R_c = \frac{F_c}{A_c} \quad (2)$$

όπου:  $R_c$ : η θλιπτική αντοχή ( $\text{MPa} = \text{N/mm}^2$ ),  $F_c$ : το μέγιστο φορτίο (N),  $A_c$ : το εμβαδόν του δοκιμίου που έρχεται σε επαφή με την πλάκα φόρτισης ( $\text{mm}^2$ ).

Με τον ίδιο τρόπο παρασκευάστηκαν επιπλέον δοκίμια για τη μελέτη της επίδρασης της συγκέντρωσης των CNTs στις ηλεκτρικές και πιεζοηλεκτρικές ιδιότητές τους. Για την διεξαγωγή των ηλεκτρικών μετρήσεων στα πειράματα εφελκυσμού χρησιμοποιήθηκαν δύο βολτόμετρα (Keithley 6517B και Keithley 2182A) και μια πηγή συνεχούς ρεύματος που λειτουργεί και ως βολτόμετρο (Keithley 2400). Η ένταση του ρεύματος της πηγής ήταν σταθερή 1mA. Η μέτρηση έγινε κάνοντας χρήση τεσσάρων ηλεκτροδίων εκ των οποίων τα δυο εξωτερικά χρησιμεύουν, ώστε να περνά το συνεχές ρεύμα και τα δυο εσωτερικά, ώστε να μετρούν τη διαφορά δυναμικού σε Volt. Οι πιεζοηλεκτρικές ιδιότητες και η ικανότητα ανίχνευσης των συνθέτων με βάση το τσιμέντο ερευνηθήκαν υπό την επίδραση κυκλικού θλιπτικού φορτίου μέχρι 5 kN. Η μέτρηση της σχετικής επιμήκυνσης έγινε με την βοήθεια laser επιμηκυνσιόμετρου (Fiedler Optoelektronik K-100), το οποίο απεικονίζεται παρακάτω, ενώ κατάλληλος εξοπλισμός ήταν απαραίτητος για την εφαρμογή ηλεκτρικού ερεθίσματος (σταθερή ηλεκτρική τάση ή ένταση) και μέτρηση αντίστασης.

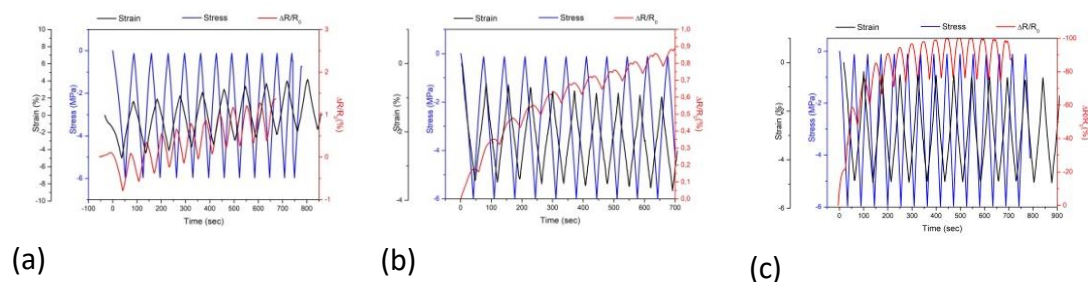
## ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

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 υγρό περιβάλλον. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 1, μελετήθηκαν οι μηχανικές αντοχές των τσιμεντοκοκονιαμάτων που περιέχουν CNTs και CFs αντίστοιχα. Η εισαγωγή συγκεντρώσεων 0,02% - 0,1% CNTs και CFs επέφερε την υψηλότερη αντοχή των δοκιμών στην κάμψη και στην θλίψη.



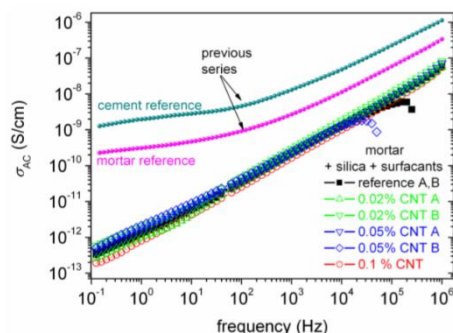
**Σχήμα 1.** Αποτελέσματα αντοχής στην κάμψη δοκιμίων βασισμένων στο τσιμέντο και ενισχυμένων με (a) CFs και (b) CNTs. Αποτελέσματα αντοχής στην θλίψη δοκιμίων βασισμένων στο τσιμέντο και ενισχυμένων με (c) CFs.

Στα διαγράμματα στο Σχήμα 2 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  $10^6 - 10^7 \Omega \cdot \text{cm}$ , καθώς και στον λόγο νερό/τσιμέντο <sup>6</sup>. Όπως φαίνεται στα παρακάτω διαγράμματα η ηλεκτρική αντίσταση των CNTs μειώνεται κατά την φόρτωση και αυξάνεται κατά την εκφόρτωση σε κάθε κύκλο υπό θλιπτική φόρτωση, εκφράζοντας συμπεριφορά πιεζοηλεκτρισμού.



**Σχήμα 2.** Σχέση τάσης, παραμόρφωσης και σχέση κλασματικής μεταβολής αντίστασης ( $\Delta R/R_0$ ) σε σχέση με τον χρόνο (sec), για (a) χωρίς CNTs, (b) 0,02 % CNTs και (c) 0,05% CNTs.

Από τα αποτελέσματα της αγωγιμότητας μέσω μετρήσεων διηλεκτρικής φασματοσκοπίας εναλλασσόμενου πεδίου (DRS) που εμφανίζονται στο Σχήμα 3 παρατηρούμε ότι για συχνότητα 1 Hz, η ηλεκτρονική 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 104 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 <sup>7</sup>.



**Σχήμα 3.** Σχέση ηλεκτρικής αγωγιμότητας συναρτήσει της συχνότητας για κάθε δοκίμιο.

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, το 2018 ο Donnini και οι συνεργάτες του, δημοσίευσαν έρευνα για την επίδραση των CFs στις μηχανικές ιδιότητες των κονιαμάτων του σκυροδέματος. Οι συγκεντρώσεις των CFs που χρησιμοποίησαν ήταν 2%, 3% και 4% κατά βάρος του τσιμέντου. Στην συγκέντρωση 0,2% CFs η αντοχή στην θλίψη μετρήθηκε στα 37,9 MPa, ενώ στην παρούσα έρευνα ήδη από την συγκέντρωση 0,1% CFs κατά βάρος του τσιμέντου η αντοχή στην θλίψη (compressive strength) μετρήθηκε στα 61,65 MPa καθώς και στην συγκέντρωση 0,2% CFs στα 56,16 MPa<sup>8</sup>. Ο Chairanich και η ερευνητική του ομάδα το 2017 δημοσίευσαν έρευνα σχετικά με την επίδραση των CNTs και της πυριτικής παιπάλης στην αντοχή στην θλίψη και στην κάμψη των τσιμεντοκονιαμάτων. Τα αποτελέσματα της μελέτης τους στην αντοχή στην κάμψη (flexural strength) για το δοκίμιο που περιείχε μόνο πυριτική παιπάλη κυμαίνονται στα 5 MPa ενώ στην παρούσα έρευνα το αντίστοιχο δοκίμιο είχε αντοχή 9 MPa. Επίσης, σε ότι αφορά τις συγκεντρώσεις 0,5 % CNTs κατά βάρος του τσιμέντου τα αποτελέσματα της δοκιμής κάμψης κυμαίνονται στα 5 MPa ενώ στην συγκεκριμένη μελέτη ήδη από την συγκέντρωση 0,05 % η αντοχή στην κάμψη κυμαίνεται στα 12,26 MPa<sup>9</sup>.

Το 2016 η ερευνητική ομάδα του Panagioti A. Danoglidi δημοσίευσε αποτελέσματα αντοχής, ικανότητας απορρόφησης ενέργειας και αυτό-ανίχνευσης (self-sensing) σε κονιάματα ενισχυμένα με MWCNTs (multi-wall carbon nanotubes). Καταγράφηκαν κύκλοι φόρτισης και εκφόρτισης σε δοκίμια ενισχυμένα με MWCNTs σε συγκεντρώσεις 0,08%, 0,1% και 0,5% κατά βάρος του τσιμέντου και συγκεκριμένα στο δοκίμιο με συγκέντρωση 0,1% καταγράφηκε η υψηλότερη κλασματική μεταβολή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης σε ποσοστό 10,6%. Στην παρούσα μελέτη ήδη από την συγκέντρωση 0,02% CNTs καταγράφεται μεταβολή της ηλεκτρικής αντίστασης καθώς και στην συγκέντρωση 0,05 % CNTs κατά βάρος του τσιμέντου εμφανίζεται η μεγαλύτερη κλασματική αλλαγή με ποσοστό 20% στην ειδική ηλεκτρική αντίσταση<sup>10</sup>. Επίσης, σε σχέση με την έρευνα που δημοσιεύτηκε το 2016 με θέμα το ηλεκτρικό κατώφλι διήθησης (percolation threshold) τσιμεντοειδών σύνθετων υλικών που διαθέτουν λειτουργία αυτόματης ανίχνευσης ενσωματώνοντας διαφορετικά υλικά με βάση τον άνθρακα, από τους Ali Al-Dahawi μαζί με άλλους ερευνητές, στην παρούσα εργασία αποδείχθηκε πως ακόμη και σε χαμηλότερες συγκεντρώσεις των CNTs κατά βάρος του τσιμέντου εμφανίζεται ομοιογενές αγώγιμο δίκτυο εντός του σκυροδέματος. Τα δοκίμια εμφάνισαν υψηλότερη απόκριση της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης όταν υποβλήθηκαν σε παραμόρφωση<sup>11</sup>.

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σε αυτή τη μελέτη, ερευνήθηκε αρχικά η χρήση CFs σε κονιάματα με βάση το τσιμέντο. Η αντοχή σε κάμψη αυξάνεται στις συγκεντρώσεις 0,05% και 0,2% CFs κατά βάρος του τσιμέντου. Οι υπόλοιπες συγκεντρώσεις δεν εμφανίζουν ικανοποιητικά αποτελέσματα λόγω πιθανής συσσωμάτωσης ινών και σχηματισμού φυσαλίδων αέρα μέσα στο κονίαμα. Η αντοχή στην κάμψη των δοκιμών ενισχυμένα με CFs αυξάνεται καθώς αυξάνεται και η % περιεκτικότητα των ινών κατά βάρος τσιμέντου. Επιπλέον, οι μετρήσεις αντοχής σε κάμψη των δοκιμών ενισχυμένα με CNTs απέδειξαν πως σε συγκεντρώσεις πάνω από 0,05 % CNTs κατά βάρος του τσιμέντου μειώνεται η αντίσταση τους στην ελαστική παραμόρφωση. Τέλος, διερευνήθηκε η κρίσιμη ποσότητα (percolation threshold) που είναι ικανή να σχηματίσει ένα ηλεκτρικά αγώγιμο δίκτυο εντός του σκυροδέματος με ηλεκτρικές και πιεζοηλεκτρικές μετρήσεις κατά τις οποίες τα δείγματα παρουσίασαν αυξημένη ικανότητα αυτό-ανίχνευσης (self – sensing).

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Τα αποτελέσματα της εργασίας αυτής ελήφθησαν στα πλαίσια του Ευρωπαϊκού Προγράμματος: **HORIZON 2020 Collaborative project “LORCENIS”** (Long Lasting Reinforced Concrete for Energy Infrastructure under Severe Operating Conditions, Grant agreement no.: 685445).

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] S. Guoxing, R. Liang, L. Zeyu, J. Zhang, L. Zongjin. CABM115 (2016) 87-92.
- [2] D. D. L. Chung, JOMS 36 (2001) 1315–1324
- [3] Y. Hongya, Z. Hongbo, M. Honglu, S. Xiuguang. JOMICE 30 (2018)
- [4] D.Y.IYoo, I. You, S.J. Lee. ACME (18 ) (2018) 371-384
- [5] A. Hawreen, J.A.Bogas, A.P.S.Dias. CABM168 (2018) 459-470
- [6] D. Wenkui, L. Wengui, T. Zhong, W. Kejin. CABM 203 (2019) 146-163
- [7] L. Zhang, S. Ding, B. Hanc, X. Yu, Y. Q. Ni Comp. Part A: Ap.Sc.and Man. 119 (2019) 8-20
- [8] J. Donnini, T. Bellezze, V. Corinaldesi. JBE 20 (2018) 8-14
- [9] A. Chaipanich R, Rianyo, T. Nochaiya. Mat. Tod. 4 (2017) 6065-6071
- [10] P.Danoglidis, M.Konsta-Gdoutos, E.Gdoutos, S. Shah. . CABM 120 (2016) 265-274
- [11] A.Dahawi, M Haroon Sarwary , O. Öztürk, G. Yıldırım, A. Akin, M. Şahmaran, M. Lachem. Smart Mater. Struct. 25 (2016) 105005