



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ
ΣΠΟΥΔΩΝ (Δ.Π.Μ.Σ.)

"ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΛΙΚΩΝ"

**ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ
ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΚΑΙ
ΤΣΙΜΕΝΤΟΚΟΝΙΑΜΑΤΟΣ ΜΕ
ΝΑΝΟΣΩΛΗΝΕΣ ΑΝΘΡΑΚΑ**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΓΕΩΡΓΑΝΤΖΑΚΟΣ

Διπλωματούχος Πολιτικός Μηχανικός Ε.Μ.Π.

ΕΠΙΒΛΕΨΗ:

Α.ΜΑΡΚΟΠΟΥΛΟΣ

Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, Φεβρουάριος 2021



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ (Δ.Π.Μ.Σ.)

"ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΛΙΚΩΝ"

**ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ
ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΚΑΙ
ΤΣΙΜΕΝΤΟΚΟΝΙΑΜΑΤΟΣ ΜΕ
ΝΑΝΟΣΩΛΗΝΕΣ ΑΝΘΡΑΚΑ**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΓΕΩΡΓΑΝΤΖΑΚΟΣ

Διπλωματούχος Πολιτικός Μηχανικός Ε.Μ.Π.

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

Δ. ΜΑΝΩΛΑΚΟΣ, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Γ.ΜΠΑΤΗΣ, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Α.ΜΑΡΚΟΠΟΥΛΟΣ, Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, Φεβρουάριος 2021

Ευχαριστίες

Ευχαριστώ πολύ την οικογένειά μου και όλους τους κοντινούς μου ανθρώπους που με στήριξαν κατά την διάρκεια των σπουδών μου και πιστεύουν σε εμένα. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ.Μαρκόπουλο καθώς και τον κ.Μπατή γιατί χωρίς αυτούς η εκπόνηση της συγκεκριμένης εργασίας θα ήταν αδύνατη, καθώς και την Αγγελική Ζαχαροπούλου και Νίκο Χουσίδη, αλλά και τον Δημήτρη από το ΕΩΣ για την απεριόριστη βοήθεια που μου παρείχαν. Τέλος, αυτή η εργασία πραγματοποιήθηκε και συγγράφθηκε για την Νενέ.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα υλικά με βάση το τσιμέντο έχουν γίνει τα πιο διαδεδομένα δομικά υλικά στον τομέα του πολιτικού μηχανικού λόγω του χαμηλού κόστους και της σταθερής απόδοσής τους. Το τσιμέντο Portland είναι ένα από τα ευρέως χρησιμοποιούμενα προϊόντα που καταναλώνει η ανθρωπότητα. Οι σημαντικότερες ιδιότητες του ως δομικό υλικό είναι η αντοχή, η ακαμψία, η αντοχή στη θραύση, η ικανότητα απορρόφησης ενέργειας και η ολκιμότητα. Ωστόσο, τα υλικά αυτά έχουν μερικές αδυναμίες, συμπεριλαμβανομένης της σχετικά χαμηλής αντοχής σε εφελκυσμό, την ευκολία σχηματισμού ρωγμών, οι οποίες επιτρέπουν στο θαλασσινό νερό και σε επιβλαβείς χημικές ουσίες να διεισδύουν και στη συνέχεια υποβαθμίζουν το υλικό και τον ενισχυτικό χάλυβα που χρησιμοποιούνται συνήθως στο σκυρόδεμα, οδηγώντας έτσι σε μια σειρά ζητημάτων που επηρεάζουν την αντοχή τους. Λόγω της προόδου της νανοτεχνολογίας γενικά και ειδικότερα των νανοϋλικών άνθρακα, οι ερευνητές προσπαθούν να ενσωματώσουν αυτά τα υλικά για την ενίσχυση των υλικών με βάση το τσιμέντο έτσι ώστε να ξεπεραστούν οι περιορισμοί των υλικών αυτών. Επί του παρόντος, οι νανοσωλήνες άνθρακα (CNTs) και νανοϊνες άνθρακα (CNFs) είναι τα δύο πιο εκτεταμένα μελετημένα νανοϋλικά άνθρακα. Η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στην ενσωμάτωση CNTs και CNFs ως ενισχυτικά υλικά στο οπλισμένο σκυρόδεμα ενώ υπογραμμίζει περαιτέρω τη σημαντική βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων του οπλισμένου σκυροδέματος που έχουν τροποποιηθεί με CNTs / CNFs καθώς και την ανθεκτικότητά τους στην διάβρωση.

ABSTRACT

Cement-based materials have become the most common building materials in the field of civil engineering due to their low cost and consistent performance. Portland cement is one of the most widely used products consumed by mankind. Its most important properties as a building material are strength, rigidity, fracture toughness, energy absorption capacity and ductility. However, these materials have some weaknesses, including their relatively low tensile strength, their ease of forming cracks, which allow seawater and harmful chemicals to penetrate and then degrade the reinforcing steel commonly used in concrete leading to a number of issues affecting their endurance. Due to advances in nanotechnology in general and carbon nanomaterials in particular, researchers are trying to incorporate these materials to reinforce cement-based materials so that the limitations of these materials can be overcome. Currently, carbon nanotubes (CNTs) and carbon nanofibers (CNFs) are the two most extensively studied carbon nanomaterials. The present work focuses on the integration of CNTs and CNFs as reinforcing materials in reinforced concrete while further emphasizing the significant improvement of the mechanical properties of reinforced concrete modified with CNTs / CNFs as well as their corrosion resistance.

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες.....	2
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	3
ABSTRACT	4
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	8
1.1. Σύνθεση και ιδιότητες νανοϋλικών και νανοϊνών (CNTs & CNFs)	8
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	11
2.1. Μέθοδοι διασποράς νανοσωλήνων και νανοϊνών	11
2.1.1. Μηχανική διασπορά.....	12
2.1.2. Διασπορά με υπέρηχους.....	12
2.1.3. Μέθοδος επαγωγής ηλεκτρικού πεδίου	13
2.1.4. Τροποποίηση επιφάνειας	13
2.1.4.1 Φυσική τροποποίηση	13
2.1.4.2. Ομοιοπολική χημική τροποποίηση	14
2.1.4.3. Μη ομοιοπολική χημική τροποποίηση	14
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	17
3.1. Εφαρμογές νανοσωλήνων άνθρακα στον κατασκευαστικό τομέα	17
3.1.1. Σύνθετα υλικά με CNT	17
3.1.1.1. Σύνθετα πολυμερή / CNT	18
3.1.1.2. Γυαλί ενισχυμένο με CNT	19
3.1.1.3. Σύνθετα τσιμέντου/ CNT	19
3.1.2. Σχοινιά από CNT ως δομικά στοιχεία.....	19
3.1.3. Συστήματα μεταφοράς θερμότητας	20
3.1.4. Αισθητήρες.....	20
3.1.5. Περιβαλλοντικές επιπτώσεις	22
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	23
4.1. Ιδιότητες υλικών από τσιμέντο εμπλουτισμένων με νανοϋλικά	23
4.1.1. Ενυδάτωση τσιμέντου και θερμότητα ενυδάτωσης	23
4.1.2. Εργασιμότητα	26
4.1.3. Πυκνότητα	27
4.1.4. Συρρίκνωση	28
4.1.5. Ολκιμότητα.....	30
4.1.6. Πορώδες	31

4.1.7. Αντοχές	34
4.1.7.1. Νανοσωλήνες άνθρακα.....	34
4.2. Συμπεράσματα / Μηχανισμοί.....	39
4.3. Μέτρο Ελαστικότητας	42
4.4. Μικροδομή υλικών από τσιμέντο που περιέχουν νανοϋλικά	44
4.4.1. Επιρροή των νανοϋλικών στην μικροδομή	44
4.5. Ηλεκτρικές και πιεζοηλεκτρικές ιδιότητες	46
4.5.1. Ηλεκτρική αγωγιμότητα	46
4.5.2. Ηλεκτρική αντίσταση.....	46
4.5.3. Πιεζοηλεκτρική ευαισθησία.....	47
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5	48
5.1. Ανθεκτικότητα και αντοχή στην διείδυση γλωριόντων σε κονιάματα ενισχυμένα με νανοϋλικά.....	48
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6	50
6.1. Μεταλλικές ίνες.....	50
6.1.1. Ορισμός	50
6.1.2. Ιδιότητες	51
6.1.3. Εφαρμογές.....	54
6.2. Συνδυασμός μεταλλικών ινών και CNTs στο σκυρόδεμα	55
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ	58
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7	58
7.1. Σκοπός	58
7.2. Πρώτες ύλες	59
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8	62
8.1. Περιγραφή πειραματικής διαδικασίας (Μέρος Α – Ηλεκτροχημικές μέθοδοι προσδιορισμού διάβρωσης)	62
8.1.1. Καθαρισμός χαλύβων και καλουπιών.....	62
8.1.2. Κατασκευή δοκιμίων τσιμεντοκονιάματος	63
8.1.3. Μόνωση σπλισμού	65
8.1.4. Εμβάπτιση δοκιμίων σε διαβρωτικό περιβάλλον.....	66
8.2. Μέτρηση δυναμικού διάβρωσης (OCP)	67
8.2.1. Αρχή μεθόδου	67
8.2.3. Ηλεκτρόδια αναφοράς	68
8.2.4. Κατάσταση σπλισμού σκυροδέματος συναρτήσει δυναμικού διάβρωσης	68

8.3. Περιγραφή πειραματικής διαδικασίας (Μέρος Β – Προσδιορισμός μηχανικών αντοχών)	70
8.3.1. Ζύγιση υλικών για την σύνθεση των δοκιμίων	70
8.3.2. Σκυροδέτηση	70
8.3.3. Δοκιμή κάθισης	72
8.3.4 Μέτρηση καθαρού βάρους σκυροδέματος	76
8.3.5. Χύτευση και Δόνηση	77
8.3.6. Εξαγωγή δοκιμίων από τις μήτρες (Ξεκαλούπωμα)	78
8.3.7 Συντήρηση δοκιμίων	78
8.4. Εργαστηριακές δοκιμές σε σκληρυμένο σκυρόδεμα	78
8.4.1. Δοκιμή θλίψης	78
8.4.2. Δοκιμή Έμμεσου Εφελκυσμού (Brazilian test)	82
8.4.3. Δοκιμή κάμψης τριών σημείων	85
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9	87
9.1. Αποτελέσματα δυναμικού διάβρωσης (Μέρος Α)	87
9.2. Αποτελέσματα μηχανικών δοκιμών (Μέρος Β)	89
9.2.1. Δοκιμή μονοαξονικής θλίψης	89
9.2.2. Δοκιμή έμμεσου εφελκυσμού (Brazilian test)	92
9.2.3. Δοκιμή κάμψης	95
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10	96
10.1. Συμπεράσματα	96

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

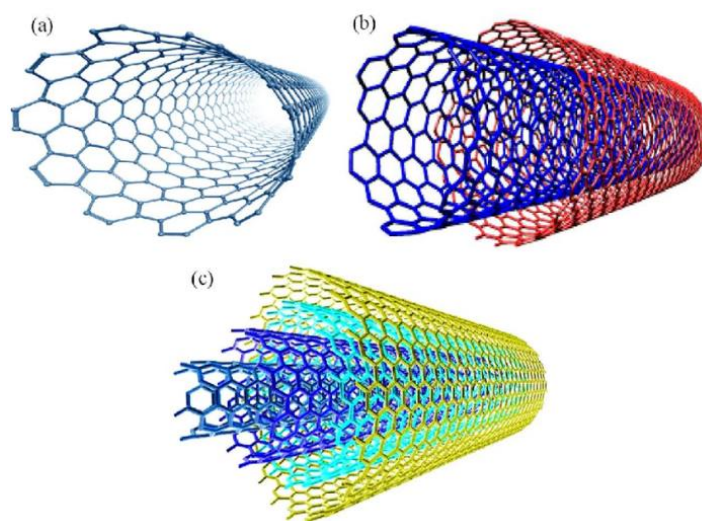
1.1. Σύνθεση και ιδιότητες νανοϋλικών και νανοϊνών (CNTs & CNFs)

Τα CNTs αποτελούν ένα ανθρακικό νανοκρυσταλλικό υλικό αποτελούμενο από φύλλα γραφενίου με διάσταση νανομέτρου και κοίλη δομή. Ο κοίλος ανθρακικός σωλήνας είναι κλειστός και στα δύο άκρα με δύο σφαιρικά καλύμματα και έχει ομόκεντρη στρογγυλή διατομή. Για την παραγωγή CNT χρησιμοποιήθηκαν αρχικά τεχνικές προετοιμασίας υψηλών θερμοκρασιών, όπως arc discharge laser ablation, αλλά σήμερα αυτές οι μέθοδοι έχουν αντικατασταθεί από χαμηλής θερμοκρασίας τεχνικές χημικής εναπόθεσης με ατμό (CVD) (<800 C), δεδομένου ότι με αυτές ο προσανατολισμός, η ευθυγράμμιση, το μήκος των νανοσωλήνων, η διάμετρος, η καθαρότητα και η πυκνότητα των CNTs μπορεί να ελεγχθεί με ακρίβεια. Μερικές άλλες μη τυποποιημένες τεχνικές είναι η υγρή πυρόλυση και η προσέγγιση με bottom-up. Οι περισσότερες από αυτές τις μεθόδους απαιτούν αέρια στήριξης και κενό, αλλά ορισμένες αναπτύσσονται υπό ατμοσφαιρική πίεση.[1-4]. Ωστόσο, οι μέθοδοι με φάση αερίου είναι ογκομετρικές και ως εκ τούτου είναι κατάλληλες για εφαρμογές όπως σύνθετα υλικά που απαιτούν μεγάλες ποσότητες νανοσωλήνων και βιομηχανικής κλίμακας συνθέσεις για να καταστούν οικονομικά εφικτές. Από την άλλη πλευρά, τα μειονεκτήματα των μεθόδων σύνθεσης με φάση αερίου έχουν να κάνουν με τις χαμηλές αποδόσεις καταλύτη, όπου μόνο ένα μικρό ποσοστό καταλυτών σχηματίζουν νανοσωλήνες, μικρούς χρόνους ζωής καταλύτη και χαμηλή αριθμητική πυκνότητα καταλύτη.[5]

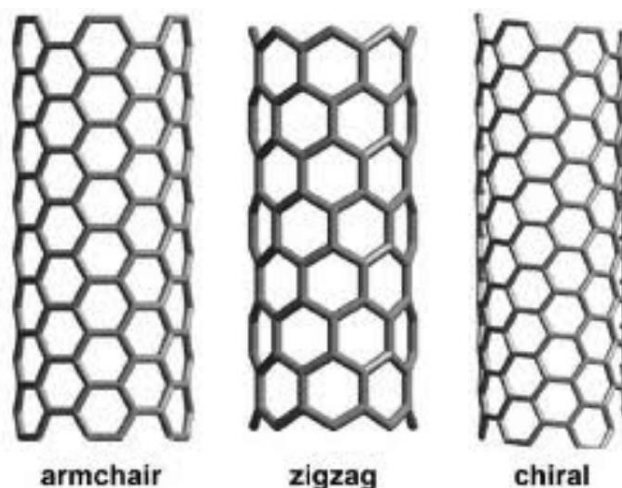
Η δομή των CNTs επηρεάζει σημαντικά την απόδοσή τους ενώ παράλληλα παρουσιάζουν μία από τις μεγαλύτερες ποικιλίες μεταξύ των νανοϋλικών όσον αφορά στις σχέσεις δομής-ιδιοτήτων. Ειδικότερα, ανάλογα με τον αριθμό των τυλιγμένων στρωμάτων του γραφενίου, τα CNT μπορούν να χωριστούν σε CNTs με μονό τοίχωμα (SWCNTs) και CNT πολλαπλών τοιχωμάτων (MWCNTs). Τα SWCNTs αποτελούνται από έναν κοίλο σωλήνα χωρίς ραφή με διάμετρο 0.4-2 nm, δηλαδή τυλιγμένο από ένα μόνο στρώμα γραφενίου [6] ενώ μπορούν να χωριστούν περαιτέρω σύμφωνα με τη διαφορά τους στον σταθερό τους φορέα (δηλ, στον χειραλικό φορέα), στους ακόλουθους τρεις τύπους [7]: armchair (30), zigzag(0) και χειραλικούς (0-30) τύπους. Λεπτομέρειες παρουσιάζονται στο σχήμα 1. Τα MWCNTs είναι ένας ομοκεντρικός κύλινδρος αποτελούμενος από δύο ή περισσότερα στριμμένα φύλλα γραφενίου, με εξωτερική διάμετρο μεταξύ μερικών νανομέτρων έως μεγαλύτερη από δέκα νανόμετρα, με εύρος διαμέτρου που κυμαίνεται μεταξύ μισού νανομέτρου έως αρκετών νανομέτρων και το διάστημα μεταξύ των στρώσεων περίπου 0,34 nm [8].

Οι βασικές ιδιότητες των CNT παρατίθενται στον Πίνακα 1 ενώ αξίζει να αναφερθεί ότι η τους ειδική επιφάνεια (EE) κυμαίνεται γενικά μεταξύ 50-1315 m² g⁻¹ και έχει στενή σχέση με τον αριθμό των στρωμάτων γραφενίου [9]. Ωστόσο, εκτός από τις βασικές ιδιότητες, οι CNT έχουν επίσης μοναδικές οπτικές ιδιότητες όπως η υψηλή ευαισθησία στην υπέρυθη ακτινοβολία, τα μη γραμμικά οπτικά χαρακτηριστικά και

υψηλή οπτική ανισοτροπία για υπεριώδη ακτινοβολία. Λόγω της μεγάλης ΕΕ τους και της παρουσίας μεγάλου αριθμού μικροπόρων, τα CNT έχουν εξαιρετική απόδοση αποθήκευσης υδρογόνου και απορρόφησης κύματος [10].

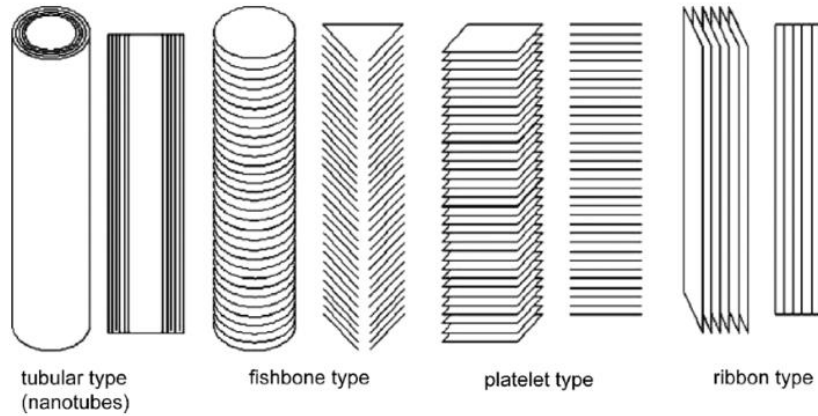


Εικόνα 1.1. (α) CNT μονού τοιχώματος, (β) CNT διπλού τοιχώματος, (γ) CNT πολλαπλού τοιχώματος



Εικόνα 1.2. Οι διαφορετικές δομές CNTs

Οι νανοϊνες άνθρακα (CNFs) μπορούν να θεωρηθούν ως ένα ινώδες υλικό σε διαστάσεις νανοκλίμακας με μήκος που κυμαίνεται μεταξύ 50 nm και 200 nm, διάμετρο μεταξύ 0,5 nm και 100 nm, και αναλογία διαστάσεων εύρους από 100 έως 1000. Μικροσκοπικά, τα CNFs είναι ένα υλικό μεταξύ γραφίτη και C60 ενώ σύμφωνα με το μοτίβο διαρρύθμισης του στρώματος γραφενίου, τα CNF μπορούν να χωριστούν σε CNFs των αιμοπεταλίων (P-CNFs), CNFs ψαροκόκκαλου (FCNFs) και σε σωληνοειδή CNFs (T-CNFs) [11] (Εικόνα 1.3)



Εικόνα 1.3. Διάφοροι τύποι CNFs.

Τα CNF έχουν επιτύχει σημαντική επιστημονική προσοχή και ενδεδειγμένη επιστημονική έρευνα λόγω των εξαιρετικών και χρήσιμων ιδιοτήτων τους, όπως εξαιρετικά υψηλή αντοχή σε εφελκυσμό, υψηλό μέτρο ελαστικότητας καθώς και ηλεκτρική και θερμική αγωγιμότητα. Περισσότερες λεπτομέρειες για τις βασικές ιδιότητες των CNFs παρατίθενται στον Πίνακα 1.2.

Βασικές Ιδιότητες	Μηχανικές	Ιδιότητες	Ηλεκτρικές	Ιδιότητες	Θερμική Αγωγιμότητα
Παράμετρος	Μέτρο Ελαστικότητας	Αντοχή σε Εφελκυσμό	Ηλεκτρική Αγωγιμότητα	Περιορισμός Πυκνότητας Ρεύματος	Ποσοστό θέρμανσης οδηγού άξονα
Τιμές	>1TPa	50– 200GPa	>1000S/cm	10^6 A/cm ²	6600W/(mk)

Πίνακας 1.1. Βασικές Ιδιότητες CNTs.

	Αντοχή Εφελκυσμού (GPa)	Tensile Modulus (GPa)	Fracture Strain (%)	Πυκνότητα (g/cm ³)	Ηλεκτρική Αντίσταση (Ωcm)	Θερμική Αγωγιμότητα (W/(mk))
Πριν την θερμική επεξεργασία	2.7	400	1.5	1.5	1000	20
Μετά την θερμική επεξεργασία	7.0	600	0.5	2.1	55	1950

Πίνακας 1.2. Βασικές Ιδιότητες CNFs.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

2.1. Μέθοδοι διασποράς νανοσωλήνων και νανοϊνών

Η διασπορά νανοσωλήνων άνθρακα (CNTs) σε υδατικό διάλυμα ή άλλους διαλύτες είναι πολύ κακή λόγω της τεράστιας ειδικής επιφάνειας, των ισχυρών δεσμών Van der Waals μεταξύ των σωλήνων και την εμπλοκή με τη δέσμη. Έχει διαπιστωθεί [12] ότι η ενέργεια συνοχής των SWCNTs με μήκος 100 nm θα μπορούσε να φτάσει μέχρι και 2,9 keV. Οι νανοϊνες άνθρακα (CNFs) έχουν επίσης κακή διασπορά λόγω των παρόμοιων χαρακτηριστικών τους με πυκνή δομή, μεγάλη ειδική επιφάνεια και μεγάλο λόγο διαστάσεων. Η διασπορά των CNTs / CNFs είναι ο αποφασιστικός παράγοντας που επηρεάζει τη βελτιστοποίηση της απόδοσης των συνθέτων με βάση το τσιμέντο. Η ενσωμάτωση των CNT / CNF που δεν έχουν διασπαστεί αποτελεσματικά μήτρα τσιμέντου, όχι μόνο παίζει αρνητικό ρόλο στην απόδοση του αλλά επηρεάζει επίσης την διαδικασία ενυδάτωσης του τσιμέντου και την ανάπτυξη της δύναμής του στο μετέπειτα στάδιο. Ακόμα, συγκέντρωση τάσεων δημιουργείται γύρω από τα συσσωματώματα, δημιουργώντας έτσι την εμφάνιση τοπικών ρωγμών και την εμφάνιση δυσμενών επιπτώσεων στη λειτουργικότητα των συστατικών του τσιμέντου [13,14]. Ως εκ τούτου, η βελτίωση της διασποράς των CNTs / CNFs είναι ένα σημαντικό βήμα στην εφαρμογή νανοϊνικών άνθρακα. Για να επιτευχθεί ομοιόμορφη διασπορά των CNTs / CNFs, πρέπει να ικανοποιηθούν τρεις όροι: απομάκρυνση των εμπλεκόμενων CNT / CNF, να ξεπεραστεί η ισχυρή ικανότητα προσρόφησης μεταξύ των σωλήνων και η σταθεροποίηση της κατάστασης διασποράς των CNTs / CNFs [15]. Επί του παρόντος, οι μέθοδοι διασποράς CNTs / CNFs περιλαμβάνουν κυρίως την μηχανική διασπορά, την υπερηχητική διασπορά, την επαγωγή ηλεκτρικού πεδίου, την τροποποίηση επιφάνειας, και τον συνδυασμό ορισμένων μεθόδων.

2.1.1. Μηχανική διασπορά

Η μέθοδος μηχανικής διασποράς έγκειται στην εφαρμογή μιας μεγάλης δύναμης διάτμησης που δημιουργείται από μηχανική τριβή, σύγκρουση και συντριβή των CNTs / CNFs για να επιτευχθεί το αποτέλεσμα διασποράς. Υπάρχουν δύο βασικές μέθοδοι μηχανικής διασποράς, δηλαδή η άλεση με μπάλα υψηλής ταχύτητας και η μηχανική ανάδευση. Η άλεση με μπάλα υψηλής ταχύτητας είναι μια μέθοδος που χρησιμοποιείται συνήθως για τη σύνθλιψη στερεών. Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας άλεσης με μπάλα, μπορεί να δημιουργηθεί τεράστια δύναμη διατμήσεως. Κάτω υπό την επίδραση αδρανούς αερίου, η δύναμη διάτμησης μπορεί να σπάσει CNTs και να αυξήσει την επιφάνεια τους, επιτυγχάνοντας έτσι ένα αποτέλεσμα διασποράς σε έκταση. Η διασπορά με άλεση από μπάλα έχει χρησιμοποιηθεί σε έρευνες για την απόδοση των CNTs για αποθήκευση υδρογόνου με τα αποτελέσματα να δείχνουν αύξηση απόδοσης κατά περισσότερο από έξι φορές [16]. Η μηχανική ανάδευση είναι η πιο συνηθισμένη μέθοδος διασποράς σωματιδίων και σκονών σε υγρά. Η διασπορά του μίγματος επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας τον συνδυασμό διάχυσης υγρού και μηχανικής ανάμιξης. Το αποτέλεσμα της διασποράς με μηχανική ανάδευση μπορεί να ελεγχθεί με τον ρυθμό ανάδευσης, το σχήμα και το μέγεθος του αναδευτήρα καθώς επίσης και τη στρατηγική αναταραχής. Διατμητικές μηχανές υψηλής ταχύτητας με ρυθμό ανάδευσης πάνω από 1000 rpm χρησιμοποιούνται συνήθως για υλικά στα οποία η διασπορά τους είναι δύσκολη [17]. Για παράδειγμα, διασπορά με μηχανική ανάδευση CNF σε εποξειδική ρητίνη σε ταχύτητα 2000 rpm, βελτίωσαν σημαντικά την ηλεκτρική αγωγιμότητα της εποξειδικής ρητίνης [18]. Ωστόσο, η μηχανική διασπορά είναι μία μακροσκοπική μέθοδος αφού μπορεί να διασπείρει τα συσσωματώματα CNTs σε μεσαίο μέγεθος, αλλά δεν μπορεί να επιτύχει προφανή επίδραση στη διασπορά των ίδιων των CNTs στα συσσωματώματα. Επιπλέον, καταστρέφει τη δομή των CNTs και μειώνει σημαντικά τον λόγο των διαστάσεων τους με συνέπεια να επηρεάζεται το αποτέλεσμα βελτιστοποίησης των CNTs σε μήτρα τσιμέντου.

2.1.2. Διασπορά με υπέρηχους

Η μέθοδος διασποράς με υπέρηχους χρησιμοποιεί έναν υπερηχητικό πομπό για να εκπέμπει υπερηχητικά κύματα και να παράγει τεράστια υπερηχητική ενέργεια, η οποία μπορεί να απολέσει τα CNTs / CNFs και να τα διασπείρει σε ένα υδατικό διάλυμα. [19] Έρευνες έκριναν ότι η υπερηχητική επεξεργασία ήταν απαραίτητη για την επίτευξη μιας καλής βέλτιστης διασποράς των CNTs. Ωστόσο, η διασπορά που δημιουργήθηκε με υπερηχητική επεξεργασία παρουσίασε αντίστροφη σχέση με το χρόνο. [20] Διαπιστώθηκε ότι τα CNTs/CNFs διασκορπίστηκαν με υπέρηχους επανεμπλοκής μαζί με τον μεγαλύτερο χρόνο παραμονής, και τότε σχηματίζονται συσσωματώματα. Ως εκ τούτου, κρίθηκε απαραίτητη η προσθήκη διασκορπιστικού για να αυξηθεί η απολέπιση των εμπλοκών CNTs / CNFs και να παραταθεί ο χρόνος που απαιτείται για την επανασυσσώματωση. Επιπλέον, η επίδραση της υπερηχητικής διασποράς στον λόγο των διαστάσεων των CNTs / CNFs χρειάζεται περισσότερη προσοχή αφού η υψηλή ενέργεια που παράγεται από το υπερηχητικό κύμα καταστρέφει τη δομή των CNTs / CNFs σε ένα ορισμένο βαθμό και ελαττώνει την αναλογία των διαστάσεων τους. Κατά συνέπεια, μπορεί να επηρεάσει τη σύνδεση γεφύρωσης των

CNTs / CNFs και την εξασθένιση της βελτίωσής τους σε υλικά με βάση το τσιμέντο. Έρευνες [21] έδειξαν ότι η υπερηχητική ενέργεια των 2800 kJ L1 ήταν οι πιο ευνοϊκές για αποτελεσματική διασπορά.

2.1.3. Μέθοδος επαγωγής ηλεκτρικού πεδίου

Η αρχή της μεθόδου επαγωγής ηλεκτρικού πεδίου αναφέρεται στη διασπορά των αγώγιμων ινών μέσω της κατευθυντικότητας τόσο της δύναμης όσο και της γραμμής του ηλεκτρικού πεδίου. Τα CNTs / CNFs ενσωματώνονται μέσα σε έναν οργανικό διαλύτη έτσι ώστε να σχηματιστεί ένα λεπτό στρώμα διαλύματος με μια μικρή περιοχή διατομής. Έπειτα, στο λεπτό αυτό στρώμα είναι ενσωματωμένο ένα μεταλλικό φύλλο ή μεταλλικό πλέγμα το οποίο λειτουργεί ως ηλεκτρόδιο δύο ακροδεκτών. Στη συνέχεια, κάποιο άμεσο (dc) ή εναλλασσόμενο ρεύμα (ac) επιβάλλεται στο ηλεκτρόδιο για την έναρξη ηλεκτρικής πολικότητας των CNTs / CNFs και να τα μετατρέψει σε ηλεκτρικά δίπολα. Κάτω από τη δράση της δύναμης του ηλεκτρικού πεδίου, αυτά τα ηλεκτρικά δίπολα σχηματίζουν μια κανονική κίνηση και τελικά τείνουν να διευθετηθούν κατά μήκος της κατεύθυνσης της γραμμής του ηλεκτρικού πεδίου [22]. Η συγκεκριμένη μέθοδος όχι μόνο μπορεί να διασπείρει τα CNTs / CNFs ομοιόμορφα στη βάση του οργανικού διαλύτη έτσι ώστε να σχηματίσουν μια αγώγιμη δομή δικτύου, αλλά είναι επίσης σε θέση να προετοιμάσει σύνθετα υλικά από ανθρακονήματα με καλή αγωγιμότητα. Ερευνητές [23] χρησιμοποίησαν επιτυχώς τη μέθοδο επαγωγής ηλεκτρικού πεδίου για τη διασπορά των MWCNTs στη μήτρα εποξειδικής ρητίνης και στη συνέχεια ελήφθησαν σύνθετα υλικά με εξαιρετική ηλεκτρική αγωγιμότητα. Βρέθηκε επίσης ότι το πεδίο AC ήταν πιο αγώγιμο στην απόκτηση ομοιόμορφης διασποράς από το πεδίο DC.

2.1.4. Τροποποίηση επιφάνειας

Η μέθοδος τροποποίησης της επιφάνειας αναφέρεται στην αλλαγή στην επιφάνεια της δομής και τις φυσικοχημικές ιδιότητες των ινών με φυσικές ιδιότητες και χημικά μέσα, ενισχύοντας έτσι την αντιδραστικότητα του νανουλικού. Αυτό μπορεί να προκαλέσει βελτίωση της συμβατότητας των ινών με άλλα θέματα που έχουν ως αποτέλεσμα μια ομοιόμορφη διασπορά. Η συγκεκριμένη μέθοδος διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στη διασπορά των CNTs / CNFs, επομένως είναι ένα από τα πιο σημαντικά περιεχόμενα της έρευνας όσον αφορά τα CNTs. Οι μέθοδοι τροποποίησης της επιφάνειας μπορούν να διαχωριστούν στις ακόλουθες δύο κατηγορίες: (I) φυσική τροποποίηση και (II) χημική τροποποίηση, ενώ η τελευταία μπορεί να διαιρεθεί σε (α) ομοιοπολική χημική τροποποίηση και (β) μη ομοιοπολική χημική τροποποίηση [24-28].

2.1.4.1 Φυσική τροποποίηση

Η φυσική τροποποίηση της επιφάνειας CNTs / CNFs περιλαμβάνει την μεταβολή της δομής της επιφάνειας και των φυσικών ιδιοτήτων των CNTs / CNFs μέσω υπερήχων, άλεσης με μπάλα, φούρνων μικροκυμάτων και υπεριώδη ακτινοβολία, τα οποία ενισχύουν περαιτέρω τη διασπορά τους στους διάφορους διαλύτες και ουσίες. Μεταξύ

των προαναφερθέντων μέτρων, η άλεση σφαίρας μπορεί να ενισχύσει τη διασπορά των CNTs / CNFs μέσω της φυσικής μεθόδου. Η προσθήκη προσθέτων στη διαδικασία σφαιροποίησης μπορεί να εισαγάγει ορισμένες λειτουργικές ομάδες στην επιφάνεια των CNTs / CNFs, οι οποίες βοηθούν στην επίτευξη περισσότερο ευεργετικών αποτελεσμάτων διασποράς. Επομένως, η φυσική τροποποίηση είναι μία συνδυασμένη μέθοδος διασποράς η οποία συνδυάζει χημικές και μηχανικές μεθόδους [29].

2.1.4.2. Ομοιοπολική χημική τροποποίηση

Η κύρια ραχοκοκαλιά των CNTs αποτελείται από πολυάριθμους δακτυλίους έξι μελών, με μερικές δομές ελαττωμάτων όπως για παράδειγμα πενταμελή δακτυλίους, δακτυλίους επτά μελών και προεξοχών φουλλερενικού δακτυλίου. Αυτές οι θέσεις ελαττωμάτων έχουν μεγαλύτερη καμπυλότητα και υψηλότερη αντιδραστικότητα, επομένως είναι ευκολότερο να οξειδώνονται και να εμβολιάζονται με οργανικές λειτουργικές ομάδες. Οι λειτουργικές ομάδες μπορούν να συνδυαστούν με CNTs μέσω ομοιοπολικού δεσμού και στη συνέχεια να παρουσιάσουν αποτέλεσμα τροποποίησης, δηλαδή την ομοιοπολική χημική τροποποίηση. Η μέθοδος μπορεί επίσης να είναι αποτελεσματική και χρησιμοποιείται για τη διασπορά των CNFs. Οι παρούσες έρευνες δείχνουν ότι, ορισμένες πολικές μονάδες όπως -COH και -COOH μπορούν να ενισχύσουν διαβρεξιμότητα των CNT / CNF στο νερό. Οι λειτουργικές ομάδες που εισάγονται στην επιφάνεια των CNTs / CNF μέσω ομοιοπολικού χημικού όχι μόνο βελτιώνουν τη διασπορά των νανοϋλικών άνθρακα στη μήτρα τσιμέντου, αλλά μπορεί επίσης να αντιδράσουν με τα C-S-H και C-H για να δημιουργηθεί ισχυρή ομοιοπολική δύναμη μεταξύ της ίνας και της μήτρας τσιμέντου [30]. Είναι η πιο κοινή μέθοδος τροποποίησης για επεξεργασία CNTs / CNFs χρησιμοποιώντας μείγμα θεικού (H₂SO₄) και νιτρικού οξέος (HNO₃). Στο ισχυρό όξινο περιβάλλον, τα άτομα οξυγόνου από το οξύ μπορούν να αντιδράσουν με τα άτομα άνθρακα που βρίσκονται στις ακραίες θέσεις, στις θέσεις κάμψης καθώς και στις ελαττωματικές θέσεις των CNTs / CNFs. Με αυτό τον τρόπο τα άκρα των CNTs / CNFs ανοίγουν και η αντιδραστικότητα των θέσεων αντίδρασης ενισχύεται περαιτέρω. Παρόλο που αυτό οδηγεί σε τοπικές δομικές βλάβες των CNTs / CNFs, η διασπορά των CNTs / CNFs με μοσχεύματα λειτουργικής ομάδας καθίσταται ευκολότερη σε υδατικό διάλυμα υπό ηλεκτροστατική απώθηση και οι ακαθαρσίες του συστήματος CNTs / CNFs διαγράφονται [31].

2.1.4.3. Μη ομοιοπολική χημική τροποποίηση

Η μέθοδος μη-ομοιοπολικής τροποποίησης αναφέρεται στην τροποποίηση της επιφάνειας των CNTs με την ενθυλάκωση ή την προσρόφηση επιφανειοδραστικών μορίων στην επιφάνεια των CNTs. Η μέθοδος ούτε βλάπτει τη δομή των CNT, ούτε μειώνει τις μηχανικές ιδιότητες και καταστρέφει την ηλεκτρονική δομή τους. Τα επιφανειοδραστικά αποτελούνται από δύο τύπους, δηλαδή τα ιοντικά και τα μη ιοντικά. Το αμφιπαθικό μόριο ιοντικής επιφανειοδραστικής ουσίας μπορεί να προσροφηθεί

στην επιφάνεια των CNT και να το ενθυλακώσουν. Στη δομή του, οι υδρόφοβες αλυσίδες μπορούν να προσροφούν CNT, ενώ οι υδρόφιλες ομάδες μπορούν να σχηματίσουν ηλεκτροστατική απόθεση σε μόρια πολικού διαλύματος, τα οποία μπορούν να διασπείρουν τα συσσωματώματα ινών. Τα μη ιοντικά επιφανειοδραστικά έχουν ισχυρότερη αλληλεπίδραση με τον δεσμό π-π των CNTs. Ως εκ τούτου, έχουν την δυνατότητα να εγκλωβίζουν την επιφάνεια των CNTs, μειώνουν τη δύναμη Van der Waals μεταξύ των σωλήνων, με συνέπεια να επιτευχθεί ο σκοπός της διασποράς των CNT. Σε πολλές μελέτες, τα CNTs / CNFs διασκορπίστηκαν πρώτα σε υδατικό διάλυμα χρησιμοποιώντας επιφανειοδραστικό και στη συνέχεια το προϊόν αυτό αναμείχθηκε με τσιμέντο για να επιτευχθεί η αποτελεσματική διασπορά των CNTs / CNFs στο υλικό με βάση το τσιμέντο [32]. Ωστόσο, υπάρχουν ορισμένα προβλήματα κατά τη χρήση αυτών των επιφανειοδραστικών ουσιών. Για παράδειγμα, ενώ πολλοί τύποι επιφανειοδραστικών μπορούν να διασπείρουν CNTs / CNFs σε υδατικό διάλυμα, είναι ασυμβίβαστα με τα προϊόντα ενυδάτωσης του τσιμέντου, με αποτέλεσμα την αργή διαδικασία ενυδάτωσης του. Άλλα θέματα περιλαμβάνουν την εισαγωγή αέρα στην κολλοειδή διασπορά και την ανασυγκρότηση CNTs / CNFs με άλλα πρόσθετα [33]. Ως εκ τούτου, απαιτείται η επιλογή ενός κατάλληλου επιφανειοδραστικού, όταν χρησιμοποιείται μη-ομοιοπολική τροποποίηση για τη διασπορά των CNTs / CNFs.

Μια μέθοδος διασποράς δύσκολα μπορεί να επιτύχει το βέλτιστο αποτέλεσμα διασποράς του συστήματος CNTs / CNFs και προκαλεί εύκολα την ανασυγκρότηση των διασκορπισμένων CNTs / CNFs. Ως εκ τούτου, μια μέθοδος που συνδυάζει διάφορες μεθόδους μπορεί να μεγεθύνει το αποτέλεσμα διασποράς των CNTs / CNFs, οδηγεί σε αύξηση της αποτελεσματικότητας της διαδικασίας και συντομεύει το χρόνο διασποράς [29]. Για παράδειγμα, η μέθοδος διασποράς υπερήχων από μόνη της δεν χρησιμοποιείται καθόλου για διασπορά CNTs / CNFs επειδή δημιουργεί μικρότερη σταθερότητα μετά τη διαδικασία με αποτέλεσμα την επαναδημιουργία νέου συσσωματώματος. Σε διάφορες έρευνες, η οξείδωση με ισχυρό οξύ και η επιφανειακή τροποποίηση με επιφανειοδραστικό συνδυάστηκαν με την μέθοδο της υπερηχητικής διασποράς [34]. Μεταξύ αυτών των ολοκληρωμένων μεθόδων, η πιο λογική μέθοδος διασποράς των CNT / CNF θεωρήθηκε αυτή που συνδυάζει τη χρήση επιφανειοδραστικού και υπερηχητικού κύματος διότι αυτό οδήγησε σε ελάχιστη ζημιά στα πρωτότυπα CNTs / CNFs, συνοδευόμενη από χαμηλό κόστος και υψηλότερη δυνατότητα ελέγχου [35]. Ερευνητές [36],[37] ανέπτυξαν μερικές ολοκληρωμένες μεθόδους διασποράς συμπεριλαμβανομένων των επιφανειοδραστικών ουσιών και οξείδωσης με ισχυρό οξύ, τον συνδυασμό σκόνης πυριτίου και οξείδωσης με ισχυρό οξύ και τέλος τον συνδυασμό της άλεσης με σφαιρίδια και επιφανειοδραστικής ουσίας [38]. Η περιήληψη και η σύγκριση μεταξύ των μεθόδων διασποράς για τα CNT / CNF παρατίθενται στον Πίνακα 2.1.

Μέθοδος	Αρχή μεθόδου	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Μηχανική διασπορά	Προκαλεί διασπορά χρησιμοποιώντας τη δύναμη διάτμησης που παράγεται με μηχανική μέθοδο	Λιγότερες απαιτήσεις για τις συσκευές και απλή λειτουργία	Ανήκει στη μακροσκοπική διασπορά. Το αποτέλεσμα διασποράς είναι φτωχότερο και φέρνει ορισμένες βλάβες στην ίνα
Διασπορά με υπέρηχους	Χρησιμοποιεί τον αντίκτυπο και την υψηλή θερμοκρασία που δημιουργείται από το υπερηχητικό κύμα δημιουργώντας κοιλότητα των συσσωματωμένων ινών	Ανήκει στη μικροσκοπική μηχανική διασποράς. Όχι μόνο παράγει υψηλή δύναμη διατμήσεως, αλλά επίσης σπάει τους εσωτερικούς δεσμούς, με αποτέλεσμα πολυλειτουργικό αποτέλεσμα	Χρειάζεται ειδική συσκευή υπέρηχων. Σπάει τις ίνες και μειώνει το μήκος τους. Εφόσον η πιθανότητα επαναδημιουργίας συσσωματώματος είναι μεγάλη, η πλήρης διασπορά είναι δύσκολο να επιτευχθεί επομένως χρησιμοποιείται συνήθως ως βοηθητική μέθοδος.
Μέθοδος επαγωγής ηλεκτρικού πεδίου	Χρησιμοποιείται ηλεκτρική δύναμη πεδίου	Διασπείρει τις ίνες κατά μήκος της κατεύθυνσης της γραμμής του ηλεκτρικού πεδίου. Αποκτούνται σύνθετα με καλή ηλεκτρική αγωγιμότητα.	Σύνθετες διατάξεις και συσκευές. Η κατάσταση διασποράς δεν μπορεί να διατηρηθεί μετά την αφαίρεση του ηλεκτρικού πεδίου.
	Επωφελείται από τα εγγενή δομικά ελαττώματα των ινών, εισάγοντας	Διασπείρει τις συσσωματωμένες ίνες εκ φύσεως, δημιουργεί καλή δύναμη συγκόλλησης μεταξύ των ινών και των	Χρησιμοποιεί διαβρωτικές χημικές ουσίες όπως ισχυρά οξέα, η διαδικασία εξαγωγής μετά την οξείδωση είναι

Ομοιοπολική χημική τροποποίηση	λειτουργικές ομάδες για την ενίσχυση της αντιδραστικότητας και διαβροχής με χημικές μεθόδους	προϊόντων ενυδάτωσης υλικού με βάση το τσιμέντο, εξαλείφει τις προσμείξεις και παρέχει τις προϋποθέσεις για την περαιτέρω αντίδραση των ιών	περίπλοκη και η θεραπεία μπορεί να προκαλέσει κάποια ζημιά στις ίνες
Μη ομοιοπολική χημική τροποποίηση	Κάνει χρήση της υδροφιλίας των επιφανειοδραστικών για τη μείωση των δυνάμεων Van der Waals μεταξύ των ιών	Δεν βλάπτει τη δομή και τις μηχανικές και ηλεκτρικές ιδιότητες της ίνας, το αποτέλεσμα διασποράς είναι το καλύτερο, έτσι είναι η συνηθέστερα χρησιμοποιούμενη μέθοδος	Ασυμβατότητα μεταξύ επιφανειοδραστικού και μήτρα τσιμέντου, η οποία μπορεί να επηρεάσει την αντίδραση ενυδάτωσης της μήτρας τσιμέντου
Συνδυασμός μεθόδων	Συνδυάζει την εφαρμογή των παραπάνω μεθόδων	Πιο προφανές αποτέλεσμα διασποράς, πιο υψηλή αποδοτικότητα και μικρότερος χρόνος διασποράς	Απαιτεί διάφορες μεθόδους διασποράς έτσι ώστε να υπάρξει αποτέλεσμα

Πίνακας 2.1. Σύνοψη και σύγκριση μεταξύ των μεθόδων διασποράς.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

3.1. Εφαρμογές νανοσωλήνων άνθρακα στον κατασκευαστικό τομέα

Η αναγκαιότητα συνεχόμενης εξέλιξης του κατασκευαστικού τομέα σε συνδυασμό με τις πολλές ιδιότητες των νανοσωλήνων άνθρακα (CNT) έχουν οδηγήσει στην εκτεταμένη μελέτη για χρήση και εφαρμογή των υλικών αυτών στον συγκεκριμένο τομέα. Υπάρχουν τουλάχιστον τέσσερις ευρείες περιοχές έρευνας που θα οδηγήσουν σε προϊόντα που προορίζονται ειδικά για τον κατασκευαστικό κλάδο. Αυτές οι περιοχές περιλαμβάνουν σύνθετα CNT κατασκευασμένα με υπάρχοντα δομικά υλικά, σχοινιά CNT για χρήση ως δομικά στοιχεία και συστήματα μεταφοράς θερμότητας βασισμένα σε CNT αλλά και εφαρμογές που αφορούν τις ηλεκτρικές ιδιότητές τους .

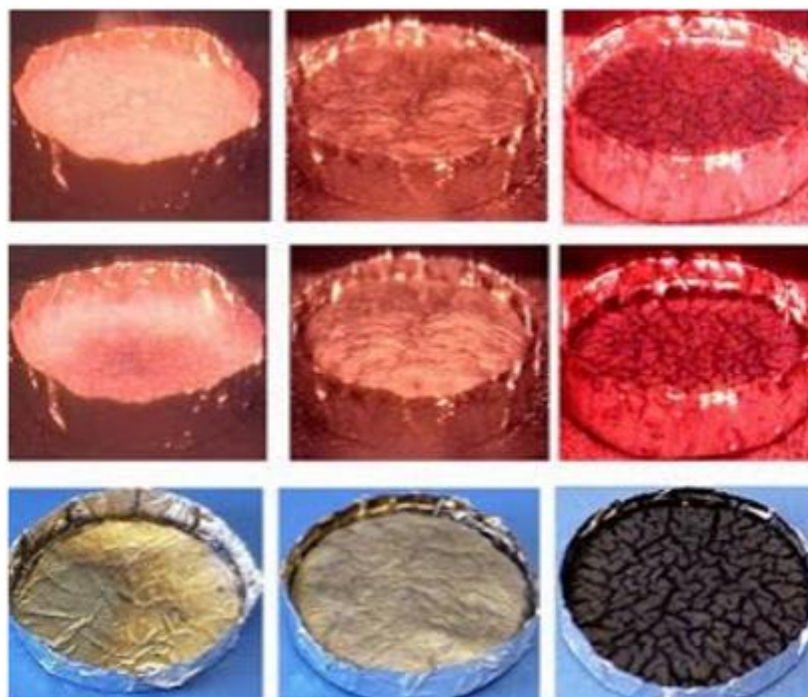
3.1.1. Σύνθετα υλικά με CNT

Όπως σημειώθηκε νωρίτερα, οι CNT είναι εξαιρετικά ενισχυτικά υλικά εξαιτίας της εξαιρετικά υψηλής αντοχής τους, της σκληρότητά τους και της αναλογίας των

διαστάσεών τους. Τα πολυμερή, το τσιμέντο και το γυαλί αποτελούν πιθανούς υποψήφιους για υλικά μήτρας.

3.1.1.1. Σύνθετα πολυμερή / CNT

Πολυμερή χρησιμοποιούνται ιδιαίτερα σε θερμομονώσεις και θερμοπροσόψεις με πολλά πλεονεκτήματα, ωστόσο έχουν το μειονέκτημα στην ευρεία διάδοση της φλόγας και στην δημιουργία πυρκαγιάς στο υφιστάμενο κτίριο. Για την αποφυγή του προβλήματος αυτού χρησιμοποιούνται επιβραδυντικά φλόγας στα υλικά αυτά. Έχει αποδειχθεί ότι οι CNTs μπορούν να αποτελέσουν συστατικά για επιβραδυντικά με εξαιρετικές αποδόσεις. Ένα μικρό παράδειγμα της απόδοσης αυτής φαίνεται στις παρακάτω εικόνες.



Εικόνα 3.1. Επίδραση προσθέτων στη συμπεριφορά του πλαστικού PMMA υπό θέρμανση.

Οι ακολουθίες βίντεο αποκαλύπτουν τον τρόπο με τον οποίο διαφορετικά πρόσθετα επηρεάζουν τη συμπεριφορά ενός πλαστικού υλικού (PMMA) όταν θερμαίνεται υπό συνθήκες πυρκαγιάς. Οι δύο πρώτες σειρές δείχνουν την συμπεριφορά κατά τη διάρκεια της θέρμανσης και στο κάτω μέρος εμφανίζεται το τελικό υπόλειμμα. Το μη τροποποιημένο PMMA (αριστερά) συμπεριφέρεται σαν υγρό, αναβλύζει δυνατά και δεν αφήνει σχεδόν καθόλου υπολείμματα. Η προσθήκη μιας ποσότητας (0,5% κατά βάρος) SWCNT (κέντρο) σχεδόν εξάλειψε την εμφάνιση φυσαλίδων ενώ το υπόλειμμα ήταν ελαφρώς λεπτότερο από το αρχικό δείγμα και είχε μία ομαλή κυματοειδή επιφάνεια. Πολλά μικρά "νησιά" σχηματίστηκαν κατά τη θέρμανση του υλικού με νανοσωλήνες άνθρακα πολλαπλών τοιχωμάτων (MWCNTs) και παρατηρήθηκε έντονη διοχέτευση μεταξύ τους. Με τη συνεχή θέρμανση, τα νησιά τελικά στερεοποιήθηκαν, σχηματίζοντας μεγάλα νησιά χωριζόμενα από βαθιές ρωγμές.[39]

3.1.1.2. Γυαλί ενισχυμένο με CNT

Οι νανοϊνες ή οι σωλήνες μπορεί να είναι σε θέση να παρέχουν ενίσχυση χωρίς να παρεμποδίζουν τη μετάδοση του φωτός. Ωστόσο, έχει γίνει ελάχιστη δουλειά σε αυτό το θέμα ενώ η οπτική συμπεριφορά των νανοϊνών και η επιτυχία αυτής της προσέγγισης παραμένει προς συζήτηση [39,40].

3.1.1.3. Σύνθετα τσιμέντου/ CNT

Το σκυρόδεμα είναι το πιο συνηθισμένο δομικό υλικό στον κόσμο. Ωστόσο, η πολύ χαμηλή αντοχή σε εφελκυσμό, η ικανότητα παραμόρφωσης καθώς και η σχέση ανθεκτικότητας- χρόνου θέτει περιορισμούς στην χρήση του σκυροδέματος. Μάρτυρες της προόδου της νανοτεχνολογίας γενικά και των CNT ειδικότερα, οι ερευνητές προσπαθούν να ενσωματώσουν υλικά που έχουν κατασκευαστεί σε νανο επίπεδο, όπως τα CNTs, ως μέσο για να ξεπεραστούν αυτοί οι πολύ καλά αναφερόμενοι περιορισμοί των τσιμεντοειδών υλικών που χρησιμοποιούνται στο σκυρόδεμα. Για αυτό, είναι απαραίτητο να κατανοήσουμε το επίπεδο (τόσο σε μακρο-όσο και σε μικρο-επίπεδο) των τροποποιημένων σύνθετων υλικών CNT. Ερευνητές χρησιμοποιούν διακριτές μακρο- έως μικρο-ίνες ως μέσα για τον έλεγχο της ανάπτυξης ρωγμών στα τσιμεντοειδή υλικά.[39,41,42]

Αυτές οι νανο-ίνες, τόσο οι νανοσωλήνες άνθρακα (CNTs) όσο και οι νανοϊνες άνθρακα (CNFs), μπορεί να αποδειχθούν ανώτερες εναλλακτικές λύσεις στις παραδοσιακές ίνες και να αποτελέσουν υποσχόμενους υποψήφιους για την επόμενη γενιά υψηλής απόδοσης και πολυλειτουργικών υλικών με βάση το τσιμέντο. Προκειμένου να υλοποιηθούν οι πιθανές εφαρμογές αυτών των σύνθετων υλικών, έχει προταθεί να συνεχίσουν τις περαιτέρω έρευνες που θα οδηγήσουν στην ανάπτυξη πιο οικονομικών τρόπων για τις μαζικές τεχνικές παραγωγής CNTs [43].

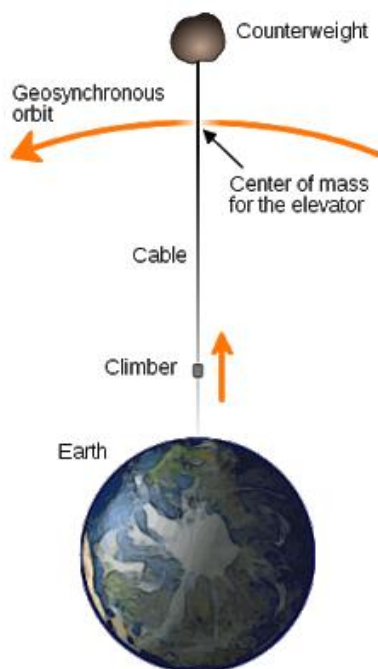
Σε αντίθεση με άλλα σημαντικά υλικά μήτρας, έχει γίνει περιορισμένη εργασία σχετικά με τη χρήση τσιμέντων για την παραγωγή σύνθετων υλικών CNT. [44, 45].

Διαφορετικές μηχανικές δοκιμές σε τσιμέντο / σκυρόδεμα τροποποιημένο με CNT (με μεταβαλλόμενη συγκέντρωση CNT) διεξήχθησαν από αρκετούς ερευνητές [46-50]. Όσον αφορά την ενσωμάτωση των CNF στο τσιμεντοειδών υλικών, έχουν πραγματοποιηθεί ακόμη λιγότερες μελέτες σε σύγκριση με εκείνες των CNT. Έχουν διεξαχθεί μελέτες εστιάζοντας στην επίδραση των CNFs-CNTs στις μηχανικές ιδιότητες των τσιμεντοειδών σύνθετων υλικών οι οποίες αναλύονται σε επόμενο κεφάλαιο.

3.1.2. Σχοινιά από CNT ως δομικά στοιχεία

Η παραγωγή μεγαλύτερων CNT που μπορούν να διαμορφωθούν σε σχοινιά θα δημιουργούσε προφανείς δυνατότητες για εφαρμογές όπως γέφυρες ανάρτησης, όπου τα πλεονεκτήματα και το μέτρο ελαστικότητας των CNT θα επέτρεπε τον σχεδιασμό σημαντικά μεγαλύτερων διαστημάτων από ό, τι τα ήδη υπάρχοντα. Ομοίως, η χρήση των σχοινιών CNT μπορεί να συμβάλει σε βελτιωμένες δομές σκυροδέματος πριν ή μετά την τάνυση. Οι νανοσωλήνες άνθρακα επίσης συζητούνται και μελετώνται ως

υλικά για την κατασκευή υπερκατασκευών όπως οι διαστημικοί ανελκυστήρες. Αυτά τα καλωδιακά συστήματα είναι θεωρητικά ικανά να φτάσουν σε γεωσύγχρονες τροχιές. Τα δωμάτια του ανελκυστήρα κινούνται ταυτόχρονα προς τα πάνω και προς τα κάτω και το καλώδιο μεταφέρει το φορτίο από το χώρο στο έδαφος και τον κώνο με τη χαμηλότερη δυνατή κατανάλωση ενέργειας. Φαίνεται ότι οι νανοσωλήνες άνθρακα είναι τα μόνα υλικά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για το σκοπό αυτό[42].



Εικόνα 3.2. Σκαρίφημα μελλοντικού διαστημικού ανελκυστήρα με σχοινί από CNTs.

3.1.3. Συστήματα μεταφοράς θερμότητας

Η θερμική αγωγιμότητα των νανοσωλήνων άνθρακα δίνει την δυνατότητα για περεταίρω εφαρμογές, όπως για παράδειγμα βελτιωμένα θερμοανθεκτικά σύνθετα υλικά. Με απαραίτητη προϋπόθεση την επαρκή πυκνότητα των νανοσωλήνων άνθρακα θα μπορούσε να επιτραπεί η γρήγορη διεξαγωγή της θερμότητας μακριά από την επιφάνεια επαφής για την ψύξη των νεροχυτών. Μακροπρόθεσμα, μπορεί επίσης να αναπτυχθούν μονωτικά υλικά και σωλήνες θερμότητας, εκμεταλλευόμενοι τις διαφορές θερμοκρασίας στην αγωγιμότητα στους σωλήνες και κατά μήκος τους. Μια εφαρμογή θα είναι η θέρμανση των κτιρίων μέσω της αντικατάστασης υπάρχοντων συστημάτων υγρών για τη θέρμανση διαφορετικών ορόφων.

3.1.4. Αισθητήρες

Οι κατασκευές από σκυρόδεμα υφίστανται βλάβης που εκδηλώνονται με τη μορφή ρωγμών λόγω φόρτισης ή/και κόπωσης από το περιβάλλον. Προκειμένου να επιτευχθεί μακροπρόθεσμη βιωσιμότητα και απόδοση, χρειάζονται συνεχή συστήματα παρακολούθησης της υγείας για τις συγκεκριμένες δομές για να λαμβάνουν κρίσιμες

αποφάσεις σχετικά με τη λειτουργία, τη συντήρηση και τις επισκευές. Παραδοσιακοί αισθητήρες παραμόρφωσης όπως οι μετρητές τάσης, που χρησιμοποιούνται ευρέως για την παρακολούθηση της δομικής υγείας, είναι ευαίσθητοι, σταθεροί, χαμηλού κόστους και εύχρηστοι. Ωστόσο, οι μετρητές μπορούν να μετρήσουν μόνο τα στελέχη της δομικής επιφάνειας σε συγκεκριμένες κατευθύνσεις και θέσεις. Ως εκ τούτου, υπάρχει ανάγκη ανάπτυξης νέων τύπων αισθητήρων καταπόνησης οι οποίοι μπορούν να εφαρμοστούν τόσο σε μικρο-όσο και σε μακρο-κλίμακα, είτε στην επιφάνεια είτε ενσωματωμένα στη δομή, και θα είναι σε θέση να συνεισφέρουν και σε άλλα επίπεδα, όπως η ενίσχυση της δομής ή η απόσβεση δομών, συμπεριφερόμενα ουσιαστικά ως πολυλειτουργικά υλικά / συστατικά.

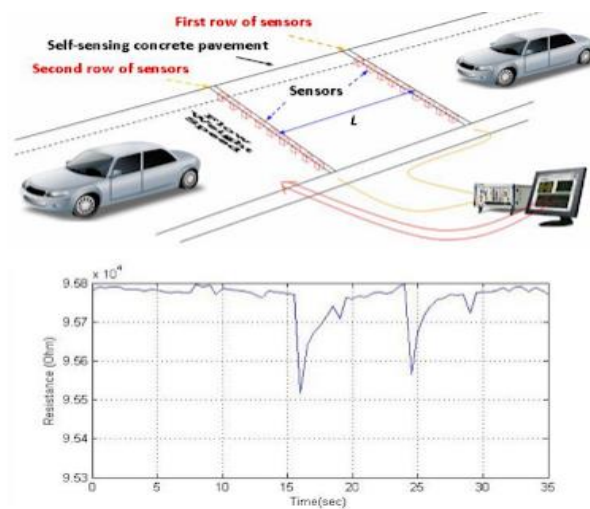
Οι αλλαγές στην αγωγιμότητα των CNTS προκύπτουν από αλλαγές στη δομή κατά μήκος του σωλήνα μέσω των ελαττωμάτων ή των αλλαγών της διαμέτρου. Οι CNT θεωρούνται επίσης ότι είναι τόσο από τους καλύτερους θερμικούς αγωγούς όσο και για τις ιδιαίτερες ηλεκτρικές τους ιδιότητες [51]. Μπορεί να μεταφέρουν την πυκνότητα ρεύματος που μπορεί να επιτευχθεί με οποιοδήποτε γνωστό συμβατικό μεταλλικό σύρμα, καθιστώντας τους ως δυνητικούς υποψήφιους για καλώδια νανο-κλίμακας [52].

Αρκετοί ερευνητές έχουν αναδείξει τη χρήση της πιεζοηλεκτρικής ευαισθησίας και της ηλεκτρικής αγωγιμότητας των CNT για σκοπούς ανίχνευσης [54,53]. Η εξαιρετικά υψηλή αναλογία διαστάσεων των CNTs τους καθιστά εύκολο να σχηματίσουν ένα αγωγίμο δίκτυο με μόλις 0,1% wt CNTs [55-57] προετοιμάζοντας τον δρόμο για διεξαγωγή εκτεταμένης έρευνας στον τομέα της αυτό-ανίχνευσης / αυτοεπιθεώρησης / αυτοδιάγνωσης συστημάτων με βάση τον άνθρακα. Έρευνα [58] χρησιμοποίησε εξελιγμένες μεμβράνες σύνθετων πολυμερών νανοσωλήνων άνθρακα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως αισθητήρες καταπόνησης με προσαρμοσμένη ευαισθησία. Οι ταινίες ήταν κατασκευασμένες είτε με κατεργασία τήγματος είτε με χύτευση διαλύματος πολυ (μεθακρυλικού μεθυλίου) (PMMA) με MWNT.

Για την παρακολούθηση της υγείας δομικών κατασκευών [59] αναπτύχθηκαν επιφανειακοί συναρμολογημένοι σύνθετοι αισθητήρες απλού τοιχώματος νανοσωλήνα-άνθρακα-πολυηλεκτρολύτη (SWNTPE) για τη μέτρηση της καταπόνησης στις δομές σκυροδέματος. Τα CNTs χρησιμοποιήθηκαν επίσης για να ανιχνεύσουν την έναρξη βλάβης σε σύνθετα υλικά υλικά όπως μικροσυσσωμάτωση μήτρας και αποκόλληση. Σε άλλη έρευνα [60] επεξεργάστηκαν σύνθετα υλικά εποξειδικών ινών από ύαλο με ενσωματωμένα CNTs για την αξιολόγηση της εμφάνισης και της αξιολόγησης των ζημιών. Αποδεικνύεται περαιτέρω ότι συνδυάζοντας μετρήσεις φορτίου σε πραγματικό χρόνο μαζί με μέτρηση ηλεκτρικής αντίστασης συνεχούς ρεύματος του δικτύου CNT, τότε υπάρχει η δυνατότητα εξέλιξης και πρόβλεψης της συσσώρευσης της ζημιάς σε σύνθετες δομές [61]. Αυτοί οι ερευνητές χρησιμοποίησαν επίσης CNT για την παρακολούθηση της υγείας μηχανικά στερεωμένων σύνθετων συνδέσμων [62], όπου οι CNTs ενσωματώθηκαν σε αυτούς τους συνδέσμους για την ανίχνευση τοπικών βλαβών όπως η αποκόλληση, η ρηγματώση και η χαλάρωση των συνδετήρων. Επιπρόσθετα, [63] μελετήθηκε η ιδέα

χρήσης ασύρματων και ενσωματωμένων αισθητήρων νανοσωλήνων σε δομές από σκυρόδεμα για παρακολούθηση της δομικής ακεραιότητάς του. Τα δίκτυα CNTs ενσωματώθηκαν σε μια μήτρα τσιμέντου και χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη ενός in situ, ασύρματου και ενσωματωμένου αισθητήρα για την ανίχνευση βλαβών σε δομές σκυροδέματος.

Τέλος, σύνθετα με CNTs μπορούν να εφαρμοστούν ως αντιδιαβρωτικοί σύνδεσμοι γείωσης, για προστασία από ηλεκτροπληξία και ως ηλεκτρικά υλικά θέρμανσης οδοστρώματος για απόψυξη οδών[42].



Εικόνα 3.3. Ανιχνευτές CNTs σε οδόστρωμα από σκυρόδεμα.

3.1.5. Περιβαλλοντικές επιπτώσεις

Η νανοτεχνολογία μπορεί επίσης να διαδραματίσει σημαντικό ρόλο στη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και της ενεργειακής έντασης που σχετίζεται με τα κτίρια και τις υποδομές. Για παράδειγμα, τα πρόσθετα CNTs μπορούν να μετριάσουν τις δυσμενείς επιπτώσεις στις φυσικές ιδιότητες του σκυροδέματος που μπορούν να έχουν τα πρόσθετα τσιμέντου που χρησιμοποιούνται με βάση τα βιομηχανικά απόβλητα. Αυτό αυξάνει το εύρος εφαρμογών στις οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν αυτά τα πιο φιλικά προς το περιβάλλον σκυροδέματα. Οι αισθητήρες που βασίζονται στη νανοτεχνολογία μπορούν να αντικαταστήσουν τις παραδοσιακές μεθόδους οπτικής επιθεώρησης για να βελτιώσουν την ακρίβεια της διαρθρωτικής παρακολούθησης της υγείας και να μειώσουν το κόστος εργασίας. Τα ηλιακά κύτταρα, τα χρώματα και τα τζάμια που βασίζονται στη νανοτεχνολογία μπορούν να διευρύνουν το εύρος των περιοχών όπου μπορεί να εφαρμοστεί η τεχνολογία συλλογής ηλιακής ενέργειας με συνέπεια την μείωση του κόστους και την βελτίωση της αποδοτικότητας των πιο παραδοσιακών προϊόντων ηλιακών κυψελών. Η νανοτεχνολογία μπορεί επίσης να διαδραματίσει ρόλο στη βελτίωση των φυσικών ιδιοτήτων και της

αποτελεσματικότητας των αντιδιαβρωτικών επικαλύψεων και στη μείωση των επιπέδων τοξικών ενώσεων που ξεπλένονται από επικαλύψεις στο περιβάλλον.

Τα προϊόντα και οι λύσεις που βασίζονται στη νανοτεχνολογία για τον κατασκευαστικό κλάδο βρίσκονται σε διάφορα στάδια ανάπτυξης, από εννοιολογικές ιδέες έως προϊόντα που διατίθενται στο εμπόριο. Το άλμα από τις επιτυχίες της εργαστηριακής κλίμακας σε μια πραγματική εφαρμογή είναι συχνά μια δύσκολη και δαπανηρή πρόκληση για τους μηχανικούς. Αυτοί που καταφέρνουν και φτάνουν στην εμπορική αγορά, συχνά παρεμποδίζονται από την περιορισμένη γνώση των προϊόντων στον κλάδο, τον συντηρητισμό της κατασκευαστικής βιομηχανίας και την κοινή άποψη για μέγιστη προτεραιότητα στο αρχικό κόστος κατασκευής πάνω από το μακροπρόθεσμο κόστος, την απόδοση, τη βιωσιμότητα και την ασφάλεια. Ωστόσο, είναι σαφές ότι ο κατασκευαστικός κλάδος θα είναι υποχρεωμένος να αγκαλιάσει νέες τεχνολογίες προκειμένου να προσφέρει ασφαλέστερα, πιο βιώσιμα και καλύτερης απόδοσης κτίρια και υποδομές που απαιτούνται από τους ενδιαφερόμενους και αυτό θα οδηγήσει σε συνεχή έρευνα για την ανάπτυξη κατάλληλων νανοτεχνολογιών για τον κατασκευαστικό τομέα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

4.1. Ιδιότητες υλικών από τσιμέντο εμπλουτισμένων με νανοϋλικά

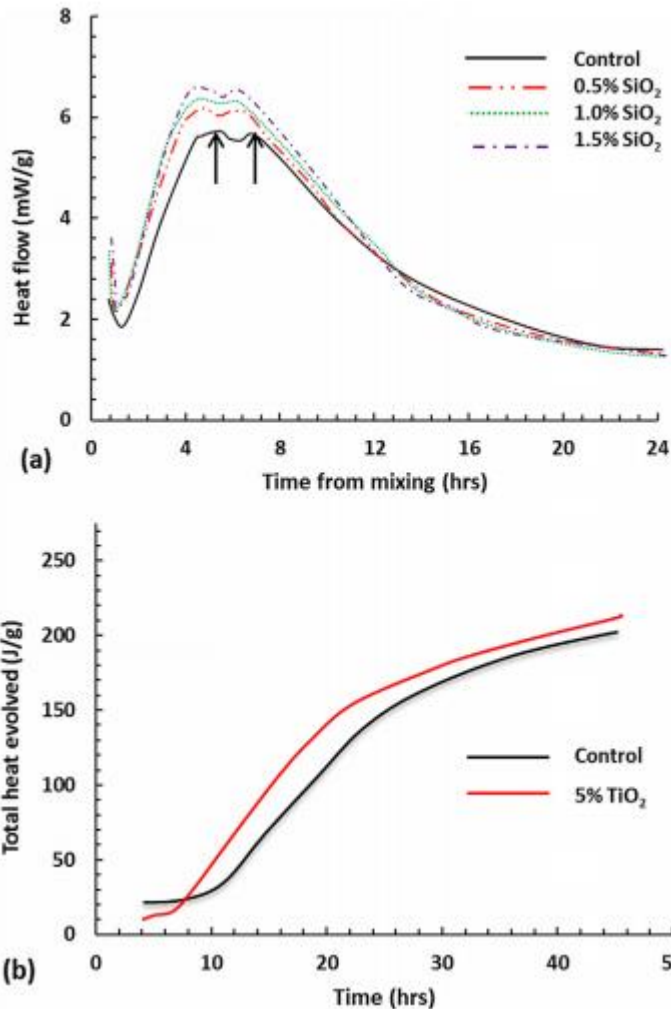
4.1.1. Ενυδάτωση τσιμέντου και θερμότητα ενυδάτωσης

Η ενυδάτωση του τσιμέντου είναι μια εξώθερμη χημική αντίδραση ενώ η θερμοκρασία που δημιουργείται κατά τη διάρκεια της διαδικασίας ενυδάτωσης εξαρτάται από τη συνολική θερμότητα που εξελίχθηκε, το ρυθμό εξέλιξης και την θερμική απόδοση του συστήματος [64]. Πολλές διαφορετικές αντιδράσεις συμβαίνουν συχνά ταυτόχρονα στη διαδικασία ενυδάτωσης. Καθώς οι αντιδράσεις συνεχίζονται, τα προϊόντα της διαδικασίας ενυδάτωσης σταδιακά συνδέονται μαζί με τα συσσωματώματα και άλλα συστατικά του σκυροδέματος, για να σχηματίσουν μια στερεή μάζα. Στην άνυδρη κατάσταση του τσιμέντου σχηματίζονται τυπικά τέσσερις τύποι ορυκτών, δηλαδή αλίτης, μπελίτης, αργιλικό άλας (C3A) και φερρίτης (C4AF). Όταν προστίθεται νερό, η εξώθερμη αντίδραση μεταξύ του (C3S) και του νερού δημιουργεί θερμότητα και μια πρώτη κορυφή ροής θερμότητας μπορεί να φανεί λόγω της αρχικής διάλυσης των στερεών και του γρήγορου σχηματισμού του ετρινγκίτη [65]. Θεϊκό ασβέστιο, γενικά προστίθεται στο τσιμέντο με τη μορφή γύψου για να επιβραδύνει την εξώθερμη διαδικασία και για να μειώσει τη θερμότητα ενυδάτωσης, και καταναλώνεται κατά τη διάρκεια αυτής της φάσης αντίδρασης. Όταν καταναλώνεται όλο το θεϊκό ασβέστιο, ο ρυθμός αργιλικού άλατος αυξάνεται και πάλι, το οποίο φαίνεται από μία άλλη εξώθερμη κορυφή. Αυτό δείχνει με ποιο ρυθμό τα ορυκτά αντιδρούν

παρακολουθώντας τη θερμότητα χρησιμοποιώντας ένα θερμιδόμετρο όπως απεικονίζεται στο σχήμα 4.1.α.

Το Σχήμα 4.1.β δείχνει τη συνολική θερμότητα που εξελίσσεται και τη ροή θερμότητας στα τσιμεντοειδή υλικά με νανο- TiO_2 μετά την προσθήκη ύδατος [66]. Αν και η συνολική θερμότητα αυξάνεται με το χρόνο, η ροή θερμότητας μειώνεται μετά από μια ορισμένη χρονική περίοδο, όπως φαίνεται στο σχήμα 3α. Η προσθήκη των νανοϋλικών έχει σαφή επίδραση στην επιτάχυνση της ενυδάτωσης, αφού η μέγιστη ροή θερμότητας αυξάνεται, αλλά ο χρόνος για την επίτευξη του πυριτικού άλατος και οι κορυφές της αντίδρασης αργιλίου μειώνονται όπως φαίνεται στο σχήμα 3α [67]. Παρόμοια συμπεριφορά μικρότερου χρόνου αιχμής και υψηλότερης ροής θερμότητας παρατηρήθηκε [66], [68], [69], για διαφορετικά ποσοστά νανοϋλικών όπως το νανο- TiO_2 , nano- Al_2O_3 , νανο- SiO_2 και νανοσωλήνες άνθρακα (CNT) σε υλικά με βάση το τσιμέντο.

Ερευνητές [70] παρακολούθησαν την απελευθέρωση θερμότητας στο σκυρόδεμα όπου νανοσωματίδια Al_2O_3 χρησιμοποιήθηκαν σε διαφορετικά ποσοστά (0,5%, 1%, 1,5% και 2%) και παρατήρησαν ότι η συνολική θερμότητα που παράχθηκε αυξήθηκε με την αύξηση της ποσότητας των νανοσωματιδίων. Ωστόσο, ο χρόνος αιχμής (όπως υποδεικνύεται από το βέλος στο Σχήμα 3α για SiO_2) βρέθηκε να είναι χαμηλότερος όσο τα νανοσωματίδια Al_2O_3 αυξήθηκαν μέχρι 1,5%. Στο 2%, η κορυφή ήταν παρόμοια με το δείγμα ελέγχου. Γενικά, μία κορυφή σχετίζεται με την καθίζηση των C-S-H και CH που αντιστοιχεί στην περίοδο επιτάχυνσης. Οι προσθήκες των νανοσωματιδίων βοηθούν στην ανάπτυξη περαιτέρω περιοχών καθίζησης του C-S-H (σχηματισμός νέας κορυφής) και προκαλούν την ανάπτυξη νέων περιοχών C-S-H [65].



Σχήματα 4.1.a, b. Ρυθμός αντίδρασης ορυκτών. Συνολική θερμότητα που εξελίσσεται και τη ροή θερμότητας στα τσιμεντοειδή υλικά με νανο-TiO₂ μετά την προσθήκη ύδατος.

Σε ό,τι αφορά τα CNTs, έρευνες έδειξαν ότι μπορούν να επηρεάσουν την πρόοδο της πρόωρης ενυδάτωσης του τσιμέντου, παράγοντας υψηλότερες τιμές ενυδάτωσης. Αποδείχθηκε [71] ότι η προσθήκη 0,02% CNTs σε πάστες τσιμέντου επηρέασε άμεσα την αρχική διαδικασία ενυδάτωσης, παράγοντας υψηλότερο ρυθμό ενυδάτωσης. Άλλοι [72] ανέφεραν ότι η προσθήκη 0,05% MWCNTs (διάμετρος 20-40 nm και μήκος 0,5-40 mm), κατ'όγκο, στο τσιμέντο δεν προκάλεσε σημαντική μετατόπιση στις θερμιδομετρικές καμπύλες έως και 35 ώρες ενώ στο τέλος της περιόδου επιτάχυνσης, το προηγούμενο τσιμέντο που περιείχε MWCNTs έφθασε σε μέγιστη ροή θερμότητας 3% νωρίτερα από τον έλεγχο. Ωστόσο, σε άλλες έρευνες [73] προστέθηκαν 0,25%, 0,5% και 1% υδροξύλιο MWCNTs (διάμετρος 20-50 nm και μήκος 10-30 mm) κατά βάρος, σε πάστες τσιμέντου και διασκορπιζόμενοι με ξηρή ανάμειξη στο τσιμέντο με νερό και υπερπλαστικοποιητή (SP) επιτάχυναν την ενυδάτωση του τσιμέντου πέρα από 3 ώρες από τον χρόνο ενυδάτωσης. Αντίστοιχη επιτάχυνση στην αντίδραση ενυδάτωσης του C3S παρατηρήθηκε κατά την προσθήκη 1% SWCNT κατά βάρος σε τσιμέντο όπου είχαν διανεμηθεί ως δέσμες με υπερήχους σε ισοπροπανόλη σε κόκκους τσιμέντου [74]. Επίσης, διαπιστώθηκε ότι η μορφολογία των αρχικών προϊόντων

ενυδάτωσης C3A και C3S επηρεάζεται από την προσθήκη SWCNTs ενώ φάνηκε να ενεργούν ως θέσεις πυρήνωσης για τα προϊόντα ενυδάτωσης C3S, αφού επικαλύφθηκαν γρήγορα με CSH. Επιπρόσθετα, στη διάρκεια των πρώτων 24 ωρών ενυδάτωσης, ο σχηματισμός Ca (OH) 2 κατά τη διάρκεια της αντίδρασης ενυδάτωσης αυξήθηκε και κατ' επέκταση η θερμότητα ενυδάτωσης. Ακόμα, [75] προσθήκη 2% SWCNT κατά βάρος σε τσιμέντο διασκορπισμένα με υπερήχηση παράγουν υψηλότερο ρυθμό ενυδάτωσης από το δείγμα ελέγχου.

Από την άλλη πλευρά, ερευνητές [76] έδειξαν ότι η προσθήκη MWCNTs (διάμετρος 10-40 nm και μήκος 5-10 mm) στο τσιμέντο δεν επηρέασε τον ρυθμό ενυδάτωσης ενώ άλλοι [77] με την προσθήκη 1% MWCNTs (διάμετρος 10-30 nm και μήκος 1-10 mm) σε πάστες τσιμέντου διασκορπισμένων με επιφανειοδραστικό και υπερήχηση δεν άλλαξε τη συνολική ποσότητα CH που απελευθερώθηκε κατά τη διάρκεια της ενυδάτωσης, παρά μόνο κάποια επιρροή στην κρυσταλλικότητά τους.

Συμπερασματικά, από όλα τα παραπάνω είναι ασφαλές να συμπεράνουμε ότι η προσθήκη CNTs στη μήτρα τσιμέντου επιτάχυνε την ενυδάτωσή του όπως αναφέρθηκε από το 78% περίπου των αναφερόμενων μελετών. Η επιτάχυνση της ενυδάτωσης του τσιμέντου έχει κάποια οφέλη όπως γρηγορότερο φινίρισμα των επιφανειών, μείωση της υδραυλικής πίεσης, περαιτέρω αποτελεσματική σύνδεση των διαρροών σε σχέση με την υδραυλική πίεση, τη μείωση του χρόνου ωρίμανσης και την αποζημίωση για το φαινόμενο της χαμηλής θερμοκρασίας στην ανάπτυξη της αντοχής.[78]

4.1.2. Εργασιμότητα

Σύμφωνα με τα διεθνή πρότυπα, η εργασιμότητα είναι η ιδιότητα που καθορίζει την προσπάθεια που απαιτείται για το χειρισμό μιας πρόσφατα αναμειγμένης ποσότητας σκυροδέματος με ελάχιστη απώλεια ομοιογένειας (ASTM C 125-93) είτε αποτελεί την ιδιότητα του προσφάτως επεξεργασμένου σκυροδέματος ή κονιάματος που καθορίζει την ευκολία και την ομοιογένεια με την οποία μπορεί να αναμιχθεί, τοποθετηθεί, ενοποιηθεί και τελειώσει. (Αμερικανικό Ινστιτούτο Σκυροδέματος (ACI) Πρότυπο 116R-90 (ACI 1990b))

Με απλά λόγια, η εργασιμότητα σημαίνει την ευκολία τοποθέτησης και το επεξεργάσιμο σκυρόδεμα σημαίνει το σκυρόδεμα που μπορεί να τοποθετηθεί και μπορεί να συμπιεστεί εύκολα χωρίς διαχωρισμό. Συνεπώς, αποτελεί μια ζωτική ιδιότητα του σκυροδέματος και σχετίζεται με την συμπύκνωση καθώς και τη δύναμη. Η επιθυμητή δυνατότητα επεξεργασίας δεν είναι ίδια για όλους τους τύπους σκυροδέματος αφού απαιτείται περισσότερη εργασιμότητα για ένα λεπτό μη προσβάσιμο τμήμα ή για ένα ενισχυμένο τμήμα, αντί για μία απλή μάζα σκυροδέματος.

Σύμφωνα με έρευνες, με την προσθήκη [79] 0,038% και 0,075% MWCNTs (διάμετρος 9,5 nm και μήκος 1,5 mm), κατά βάρος σε πάστες τσιμέντου τα οποία διασκορπίστηκαν με υπερπλαστικοποιητή υπό υπερηχητική ενέργεια 50 J / ml ανά μονάδα MWCNTs διαπιστώθηκε μείωση της εργασιμότητας η οποία αυξήθηκε με την αύξηση του περιεχομένου των MWCNTs. Άλλες έρευνες έδειξαν το ίδιο αποτέλεσμα

όπως για παράδειγμα [80] πρόσθηκε 0,75% MWCNTs (διάμετρος 10-30 nm και μήκους 1-2 nm), κατά βάρος ως προς το μίγμα τσιμέντου διασκορπισμένα με υπερήχους, [81] προσθήκη 0,1% MWCNTs (διάμετρος <8 nm και μήκος 10-30 nm), κατά βάρος, σε μίγματα κονιάματος διασκορπισμένα σε επιφανειοδραστικό, συγκεκριμένα το Pluronic και το αντιαφριστικό (αντιαφριστικό: Pluronic 1: 2), προσθήκη 0.1% MWCNTs [82] (διάμετρος 20 nm και μήκος 1-25 nm), κατά βάρος, σε μίγμα που περιέχει 90% τσιμέντο και 10% διοξείδιο του πυριτίου (SF) τα οποία είχαν υποβληθεί σε επεξεργασία με θειικό οξύ (H₂SO₄) και νιτρικό οξύ (HNO₃) και διασκορπίστηκαν με υπερπλαστικοποιητή και υπερήχηση. [83] προσθήκη 0,045-0,15% MWCNTs (διάμετρος 10 nm και μήκος 2- 4 nm), κατά βάρος, σε μίγματα τσιμέντου συγχωνευμένα με COOH συζευγμένα χωρίς πολυμερές και διασκορπισμένα με ανάδευση και υπερήχηση, προσθήκη [84] 0.1%, 0.3% και 0.5% MWCNTs (διάμετρος 5-15 nm και μήκος 10 nm), κατά βάρος σε μίγματα κονιάματος με 3 διαφορετικούς λόγους w / c από 0,4, 0,5 και 0,6 με χρήση σταθερής δόσης SP.

Ωστόσο, έρευνα [85] με προσθήκη 0,022% MWCNTs (διάμετρος 8 nm και λόγος διαστάσεων 104), κατά βάρος, σε μίγματα σκυροδέματος διασκορπισμένα σε πολυηλεκτρολύτη και ηχητική επεξεργασία ανέφερε ότι δεν επηρεάζουν δυσμενώς την εργασιμότητα ενώ άλλη [83] η οποία περιλαμβάνει προσθήκη 0,045-0,15% MWCNTs (διάμετρος 10 nm και μήκος 2-4 nm), κατά βάρος, σε μίγματα τσιμέντου. λειτουργώντας με συζευγμένο COOH με πολυμερές και διασκορπισμένα με ανάδευση και υπερήχηση έδειξαν καλή εργασιμότητα.

Από όλα τα παραπάνω, μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι αυτό το θέμα εξακολουθεί να χρειάζεται περαιτέρω μελέτη. Ωστόσο, σύμφωνα με τις διαθέσιμες μελέτες μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι η προσθήκη CNTs στο τσιμέντο μείωσε την εργασιμότητα όπως αναφέρθηκε από αρκετούς ερευνητές (περίπου 77,8%). Η μείωση αυτή αυξήθηκε με την αύξηση του περιεχομένου σε CNT, αλλά αυτό εξαρτάται κυρίως από πολλούς παράγοντες όπως ο τύπος τροποποίησης, η μέθοδος διασποράς καθώς και ο τύπος της επιφανειοδραστικής ουσίας.

4.1.3. Πυκνότητα

Η πυκνότητα του σκυροδέματος είναι ένα μέτρο του μοναδιαίου βάρους του. Ένα κανονικό βάρος σκυροδέματος ζυγίζει 2400 κιλά ανά κυβικό μέτρο. Το βάρος μονάδας του σκυροδέματος (πυκνότητα) ποικίλλει ανάλογα με την ποσότητα και την πυκνότητα των αδρανών, την ποσότητα του παγιδευμένου αέρα καθώς και την περιεκτικότητα σε νερό και τσιμέντο. Αρκετές έρευνες έχουν διεξαχθεί για να διαπιστωθεί η επίδραση των νανοϋλικών στην πυκνότητα υλικών από τσιμέντο. Παρακάτω παρατίθενται ορισμένα συμπεράσματα εντατικών ερευνών για την συγκεκριμένη ιδιότητα κυρίως για την επίδραση των νανοσωλήνων άνθρακα.

Πιο συγκεκριμένα, σε έρευνα [86] προστέθηκαν 0,05%, 0,1%, 0,25% και 0,5% MWCNTs (διάμετρος 13 nm και μήκος > 1 nm), κατά βάρος, σε κονιάματα, τα οποία αναμείχθηκαν με νερό, κατεργάστηκαν χρησιμοποιώντας υπερήχους ενώ

χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικές δοσολογίες υπερπλαστικοποιητή. Εκεί διαπιστώθηκε ότι η προσθήκη των MWCNTs δεν επηρέασε σημαντικά την φαινόμενη πυκνότητα των 28 ημερών. Επιπρόσθετα, σε άλλη έρευνα [87] με προσθήκη 0.05% και 0.1% MWCNTs (διάμετρος 10-20 nm και μήκος 10-30 nm), κατά βάρος, σε πάστες τσιμέντου τα οποία διασκορπίστηκαν με την εφαρμογή υπερηχητικής ενέργειας σε συνδυασμό με επιφανειοδραστικό, αναφέρθηκε ότι η πυκνότητα των 28 ημερών μειώθηκε κατά 2,64% και 5,29% με την προσθήκη 0,05% και 1% MWCNTs, αντίστοιχα. Χρησιμοποιήθηκαν επίσης MWCNTs (διάμετρος <8 και μήκος 10-30 nm) που περιείχαν 3.86% COOH και στα οποία η πυκνότητα των 28 ημερών μειώθηκε κατά 0,88% με την προσθήκη 0,05% και 0,1% MWCNTs.

Αντίθετα, άλλη έρευνα [88] ανέφερε κατά 4,57% υψηλότερη πυκνότητα ξηρού κονιάματος 28 ημερών (80% τσιμέντο σε συνδυασμό με 20% FA) με την προσθήκη 1% CNTs, κατά βάρος ενώ άλλη [89] με την προσθήκη διαφορετικών περιεχομένων MWCNTs (διάμετρος 15-20 nm και μήκος 0.1-10 nm), κατά βάρος, σε μη εξουδετερωμένα και σε αυτόκλειστα αεριζόμενα σκυροδέματα, τα οποία ήταν διασκορπισμένα με επιφανειοδραστικό και υπερήχους έδειξαν 4,1%, 3,26%, 3,67%, 4,9% και 5,1% αύξηση της πυκνότητας των 28 ημερών σε μη-αυτόκλειστα σκυροδέματα με προσθήκη 0,4%, 1%, 2%, 4% και 6% MWCNTs, αντίστοιχα ενώ στα αυτόκλειστα σκυροδέματα είχαμε αύξηση κατά 4,43% και 10,42% με την προσθήκη 0,2% και 2% MWCNTs, αντίστοιχα.

Από τις παραπάνω παραπομπές στις οποίες αναφέρονται οι επιδράσεις των CNT σχετικά με την πυκνότητα της μήτρας, μπορεί να σημειωθεί ότι είναι δύσκολο εξάγουμε ένα συμπέρασμα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι υπάρχουν δύο μελέτες [88,89] που ανέφεραν αύξηση της πυκνότητας, ενώ άλλοι ανέφεραν μείωση [87] και άλλη δεν ανέφερε κανένα αποτέλεσμα [86]. Συνεπώς, είναι ένα θέμα το οποίο χρήζει παραπάνω έρευνας και μελέτης.

4.1.4. Συρρίκνωση

Το σκυρόδεμα υπόκειται σε μεταβολές όγκου, είτε αυτογενείς είτε προκαλούμενες. Η αλλαγή όγκου είναι μία από τις πιο επιζήμιες ιδιότητες του σκυροδέματος, η οποία επηρεάζει τη μακροχρόνια αντοχή και ανθεκτικότητα. Για τον μηχανικό, η πτυχή της αλλαγής του όγκου στο σκυρόδεμα είναι σημαντική από την άποψη ότι προκαλεί αντισταθμητικές ρωγμές στο σκυρόδεμα και αποκαλείται συρρίκνωση σκυροδέματος.

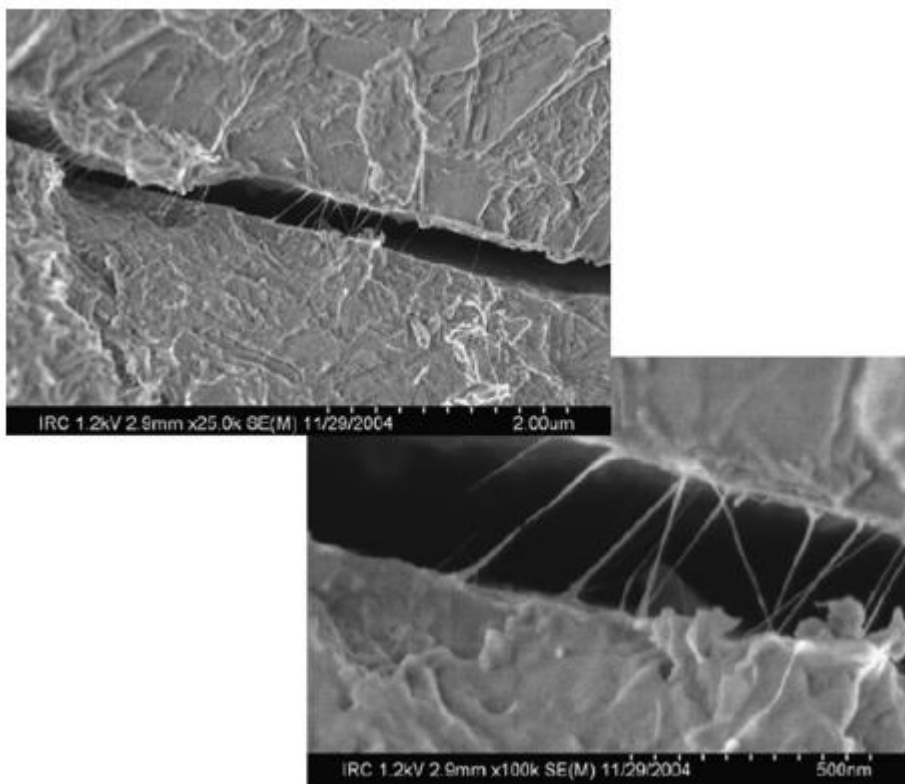
Η συρρίκνωση σκυροδέματος είναι η μεταβολή του μήκους ανά μονάδα μήκους και ως εκ τούτου είναι ένας διαστατικός αριθμός εκφρασμένος ως ποσοστό. Η συρρίκνωση εξαρτάται από το χρόνο ενώ αποτελεί έναν από τους σημαντικούς παράγοντες που συμβάλλουν στις ρωγμές στα δάπεδα και τα πεζοδρόμια. Τώρα το ερώτημα είναι πώς να μειωθεί η συρρίκνωση και οι ρωγμές συρρίκνωσης στις δομές σκυροδέματος. Ο όρος συρρίκνωση χρησιμοποιείται για να περιγράψει τις διάφορες πτυχές των μεταβολών του όγκου στο σκυρόδεμα λόγω της απώλειας υγρασίας σε διαφορετικά

στάδια λόγω διαφορετικών λόγων ενώ χωρίζεται σε ορισμένες κατηγορίες από τις οποίες η προσθήκη νανοϋλικών επηρεάζει την αυτογενή συρρίκνωση και την ξήρανση.

Η αυτογενής συρρίκνωση, επίσης γνωστή ως "βασική συρρίκνωση", είναι η συρρίκνωση που οφείλεται σε χημικές αντιδράσεις μεταξύ τσιμέντου και νερού, γνωστή ως ενυδάτωση, και δεν περιλαμβάνει περιβαλλοντικές επιπτώσεις όπως αλλαγές θερμοκρασίας και υγρασίας. Το μέγεθός της αγνοείται συνήθως στα σκυροδέματα με w/c πάνω από 0,40 ενώ σε ένα συντηρητικό σύστημα δηλ. όπου δεν επιτρέπεται κίνηση υγρασίας προς ή από την πάστα, όταν η θερμοκρασία είναι σταθερή μπορεί να συμβεί κάποια συρρίκνωση. Η συρρίκνωση ενός τέτοιου συντηρητικού συστήματος είναι γνωστή ως αυτογενής συρρίκνωση.

Όσον αφορά την προσθήκη νανοσωλήνων, αποτελέσματα έρευνας έδειξαν [90] ότι με περιεχόμενο ποσοστό 0,025% και 0,048% MWCNTs (διάμετρος 20-40 nm και μήκος 10-100 nm), κατά βάρος, σε πάστες, η μέτρηση της αυτογενής συρρίκνωσης έως και 96 ώρες από τη χύτευση έδειξε μείωσή της η οποία μάλιστα αυξανόταν με αύξηση του ποσοστού σε MWCNTs. Πιο συγκεκριμένα, η προσθήκη 0,025% και 0,048% MWCNTs προκάλεσε περίπου 23,6% και 39% μείωση στην 96ωρη συρρίκνωση, αντίστοιχα. Άλλη έρευνα [91] με προσθήκη 0,3% καρβοξυλίου MWCNTs (διάμετρος 10-20 nm και μήκος 10-30 nm), κατά βάρος, σε κονιάματα τα οποία αλέστηκαν με τσιμέντο για μισή ώρα για καλή διασπορά, μετρήθηκε η συρρίκνωση ξήρανσης έως 6 ημέρες τα αποτελέσματα έδειξαν μείωση στη συρρίκνωση της ξήρανσης με την προσθήκη 0,3% MWCNTs. Στο τέλος του σταδίου ξήρανσης η συρρίκνωση της ξήρανσης μειώθηκε κατά 31,9%.

Συμπερασματικά, σύμφωνα με τις παραπάνω διαθέσιμες μελέτες η προσθήκη CNTs μείωσε τη συρρίκνωση. Όπως αναφέρθηκε από συμπεράσματα ερευνητών, [92], [93] η ανάπτυξη συρρίκνωσης είναι ανάλογη με την ποσότητα των λεπτών πόρων στο συνδετικό υλικό σε πρώιμες ηλικίες. Υψηλότερες ποσότητες μικρών πόρων στο συνδετικό υλικό σε πρώιμες ηλικίες οδήγησε σε αύξηση της αυτογενής συρρίκνωσης. Εξαιτίας των νανο-μεγέθους τους, τα CNT μπορούν να γεμίσουν μερικούς από αυτούς τους λεπτούς πόρους. Αυτό οδήγησε σε μείωση των τριχοειδών τάσεων, με αποτέλεσμα μικρότερα αυτογενή στελέχη [90].



Εικόνα 4.1. Οι νανοσωλήνες λειτουργούν σαν γέφυρες μεταξύ των ρωγμών.

4.1.5. Ολκιμότητα

Η ολκιμότητα είναι η ικανότητα των μελών οπλισμένου σκυροδέματος να υποστούν σημαντική απόκλιση πριν από την αποτυχία. Αυτό το χαρακτηριστικό των δομικών μελών από οπλισμένο σκυρόδεμα είναι ζωτικής σημασίας καθώς παρέχει σημάδια αποτυχίας και αποτρέπει την ολική κατάρρευση. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε σεισμικές περιοχές όπως για παράδειγμα η Ελλάδα.

Σε έρευνες [64] προστέθηκαν διαφορετικά περιεχόμενα MWCNTs με διαφορετικές αναλογίες διαστάσεων (μικρού και μεγάλου μήκους), κατά βάρος, σε πάστες τσιμέντου. Τα μικρά MWCNTs είχαν λόγο διαστάσεων 157 (διάμετρος 9,5 nm και μήκος 1,5 mm), ενώ τα μεγάλα είχαν μέσο όρο αναλογίας διαστάσεων 1250-1375 (διάμετρος <8 nm και μήκος 10- 30 mm). Για τα μικρά MWCNTs ενσωματώθηκαν 0,04%, 0,1% και 0,2%, ενώ 0,04% και 0,1% ενσωματώθηκαν για τα μεγάλα. Τα MWCNTs διασκορπίστηκαν με αναμικτήρα κύματος υπερήχων. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η ολκιμότητα 7 ημερών αυξήθηκε με την προσθήκη των MWCNTs. Τα δείγματα που περιέχουν 0.2% MWCNTs έδειξαν την υψηλότερη ολκιμότητα σε ηλικίες 7 και 14 ημερών με αύξηση 130% και 72%, αντίστοιχα, σε σχέση με αυτή του δείγματος ελέγχου. Στις 28 ημέρες, οι περισσότερες συνθέσεις έδειξαν υποβάθμιση στην ολκιμότητα σε σύγκριση με την ηλικία των 14 ημερών, αλλά παρόλ' αυτά ήταν ακόμη υψηλότερη από αυτή του ελέγχου. Τα δείγματα που περιέχουν 0.1% και 0.2% μικρών MWCNTs παρουσίασαν την υψηλότερη ολκιμότητα, ενώ αυτά που περιέχουν

0,04% και 0,1% μεγάλων MWCNTs εμφάνισαν μικρότερη ολκιμότητα από τα αντίστοιχα μικρά.

Συμπερασματικά, σύμφωνα με τη διαθέσιμη μελέτη, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η προσθήκη CNTs αύξησε την ολκιμότητα της μήτρας στην ηλικία των 28 ημερών. Παρατηρήθηκε, ότι ο βαθμός ολκιμότητας εξαρτάται κυρίως από τις αναλογίες διαστάσεων, τις συγκεντρώσεις των CNTs καθώς και τον χρόνο σκλήρυνσης. Σύνθετα που περιέχουν CNTs με μεγάλο βαθμό αναλογίας εμφάνισαν μικρότερη ολκιμότητα από ό, τι τα αντίστοιχα βραχείας αναλογίας CNTs σε ηλικία 28 ημερών.

4.1.6. Πορώδες

Το σκυρόδεμα, όπως και οι φυσικοί λίθοι, δεν είναι υλικό απόλυτα συμπαγές και πλήρες, αλλά περιέχει πλήθος από εσωτερικές κοιλότητες. Οι κοιλότητες αυτές είναι κενές από στερεό υλικό και το σύνολό τους αποτελεί το πορώδες του σκυροδέματος. Οι κοιλότητες αυτές μπορεί να περιέχουν αέρα ή να είναι γεμάτες με νερό. Το ολικό πορώδες, που χαρακτηρίζει την έκταση του πορώδους, εκφράζει το % ποσοστό ή το κλάσμα του όγκου ενός υλικού που καταλαμβάνουν οι πόροι του και δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$p = \frac{V_k}{V} = \frac{\rho - \rho_\phi}{\rho}$$

όπου: p: ολικό πορώδες του υλικού,

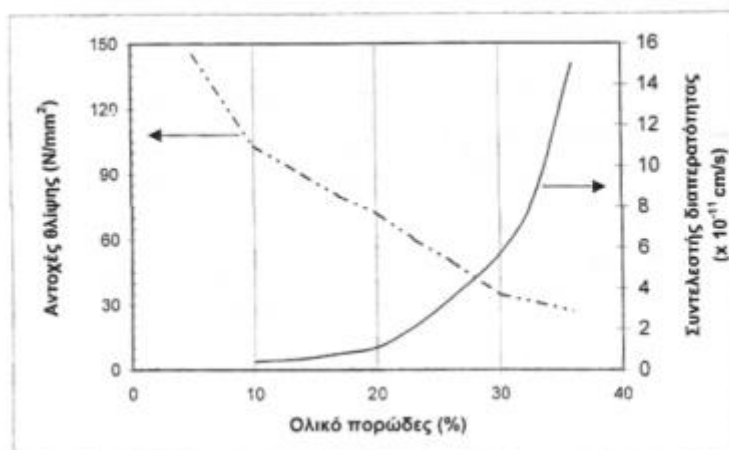
V_k : ο όγκος των πόρων (κενών)

V : ο φαινόμενος όγκος του υλικού

ρ_ϕ : το φαινόμενο ειδικό βάρος του υλικού

ρ : το ειδικό βάρος του υλικού

Το πορώδες του σκυροδέματος επηρεάζει τις ιδιότητές του, κυρίως επιδρώντας στις αντοχές και στη διαπερατότητα αυτού. Η επίδραση αυτή φαίνεται στην εικόνα που ακολουθεί:



Διάγραμμα 4.1. Συσχέτιση αντοχών θλίψης και διαπερατότητας με το πορώδες.

Επιπλέον, το πορώδες επηρεάζει τη χρόνια συστολή, τον ερπυσμό, την υδατοαπορροφητικότητα, την υδατοστεγανότητα, καθώς και την ανθεκτικότητα του υλικού στον παγετό. Οι περισσότερες από τις ιδιότητες του σκυροδέματος βελτιώνονται όταν, για το ίδιο ολικό πορώδες, το μέγεθος των πόρων είναι μικρότερο (επομένως το πλήθος των πόρων, για τον ίδιο όγκο, είναι μεγαλύτερο), είναι περισσότερο ομοιόμορφα κατανομημένοι μέσα στο υλικό και το σχήμα τους πλησιάζει το σφαιρικό.

Παρακάτω παρατίθενται τα αποτελέσματα πολλών ερευνών σχετικά με την σχέση πορώδους σε υλικά από τσιμέντο και κυρίως στο σκυρόδεμα και προσθήκη CNTs. Πιο συγκεκριμένα, [94] προσθήκη 0,015%, 0,03% και 0,045% MWCNTs (διάμετρος 20-40 nm και μήκος 1-10 mm), κατά βάρος, σε σκυροδέματα, διασκορπισμένα με επιφανειοδραστικό και υπερήχους οδήγησε σε μείωση της απορρόφησης νερού στις 28 ημέρες και μάλιστα η μείωση αυτή αυξήθηκε με την αύξηση του περιεχομένου σε MWCNTs. Η μείωση στην απορρόφηση νερού ήταν 10,22%, 14,41% και 17,76% με την προσθήκη 0,015%, 0,03% και 0,045% MWCNTs, αντίστοιχα. Σε άλλη έρευνα [95] η προσθήκη 0,1% MWCNTs (διάμετρος 10-20 nm και μήκος 10-30 mm), κατά βάρος, σε πάστες τσιμέντου, διασκορπισμένα με εφαρμογή υπερηχητικής ενέργειας σε συνδυασμό με επιφανειοδραστικό ανέφερε ότι η προσθήκη 0,1% MWCNTs αύξησε το πορώδες των 28 ημερών κατά 14,7%, ενώ η προσθήκη 0,1% MWCNTs που περιέχουν 3,86% COOH οδήγησε σε αύξησή του κατά 27,52%. Επιπρόσθετα, [96] σε προσθήκη 0,1% MWCNTs (διάμετρος 20 nm και μήκος 1-25 mm), κατά βάρος, σε μίγμα που περιέχει 90% τσιμέντο και 10% SF επεξεργασμένα με θειικό οξύ (H₂SO₄) και νιτρικό οξύ (HNO₃) και διασκορπισμένα με συνδυασμό υπερπλαστικοποιητή και υπερήχησης, διαπιστώθηκε παρόμοιο πορώδες μεταξύ των δειγμάτων που περιέχουν MWCNTs και αυτών του ελέγχου. Ωστόσο, μειωμένο πορώδες παρατηρήθηκε όταν χρησιμοποιήθηκαν μη επεξεργασμένα MWCNTs. Ακόμα, η προσθήκη [97] 0,12% MWCNTs (διάμετρος 20-40 nm και μήκος 5-15 mm), κατά βάρος, σε πάστες τσιμέντου, τα οποία διασκορπίστηκαν χρησιμοποιώντας επιφανειοδραστική-υπερηχητική μέθοδο με Arabic gum είχε ως αποτέλεσμα την μείωση του πορώδους των

28 ημερών. Το δείγμα ελέγχου παρουσίασε συνολικό πορώδες 15,49%, ενώ αυτό για το δείγμα που περιείχε 0,12% MWCNTs ήταν 12,25%.

Επιπρόσθετα, [98] με προσθήκη 0.2% MWCNTs με καρβοξύλιο (διάμετρος <8 nm και μήκος 10-30 nm), κατά βάρος, σε κονιάματα, διασκορπισμένα με εφαρμογή υπερηχητικής ενέργειας σε συνδυασμό με επιφανειοδραστικό οδήγησαν σε μείωση της απορρόφησης του νερού στις 28 ημέρες, μείωση διαπερατότητας νερού και αερίου. Ειδικότερα, στο απλό μίγμα εμφανίστηκε διπλάσια απορροφητικότητα σε σύγκριση με εκείνη που περιέχει MWCNTs γεγονός το οποίο οφείλεται κυρίως στην τροποποίηση των προϊόντων ενυδάτωσης, στην ομοιόμορφη κατανομή του μεγέθους των πόρων, στην μείωση του πορώδους καθώς και στην μείωση της αυτογενούς συρρίκνωσης. Σε άλλη έρευνα [91] με την προσθήκη 0,3% MWCNTs με καρβοξύλιο (διάμετρος 10-20 nm και μήκος 10-30 nm), κατά βάρος, σε κονιαμάτα, κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι πόροι με διάμετρο μεγαλύτερη από 200 nm μετατρέπονται σε 50-100 nm ενώ βελτιώνονται αισθητά οι αποσυνδεδεμένοι πόροι. Από την άλλη πλευρά, [99] παρατηρήθηκε ότι με προσθήκη 0,05%, 0,1%, 0,25% και 0,5% MWCNTs (διάμετρος 13 nm και μήκος > 1 nm), κατά βάρος, σε πάστες τσιμέντου και κονιάματα, οι οποίοι αναμειχθηκαν με νερό και κατεργάστηκαν χρησιμοποιώντας συσκευή υπερήχων και διαφορετικές δοσολογίες υπερπλαστικοποιητών, αύξηση του πορώδους 7 και 28 ημερών μεταξύ 7% και 13%.

Ορισμένες άλλες έρευνες που παρατίθενται περιεκτικά παρακάτω καταδεικνύουν την επίδραση των CNTs σε πάστες τσιμέντου, κονιάματα και στο σκυρόδεμα. Ειδικότερα, [100] προσθήκη 0,5% MWCNTs (διάμετρος 10-30 nm και μήκος 0,5-500 nm) κατεργασμένων με H₂SO₄ και HNO₃, σε κονιάματα, οδήγησαν σε μείωση κατά 64% στο συνολικό πορώδες στις 28 ημέρες ενώ με την προσθήκη 0,5% MWCNTs [40] (διάμετρος 50 nm και μήκος 500 nm) μέχρι 1% κ.β. σε τσιμεντόπαστες, οι οποίοι ήταν διασκορπισμένοι με ανάμιξη με νερό και υπερήχους για 1 ώρα συνέβαλλαν επίσης στην μείωση του πορώδους και της συνολικής επιφάνειας στις 28 ημέρες. Το συνολικό πορώδες του δείγματος ελέγχου ήταν 27,2%, ενώ με την προσθήκη 0,5% και 1% MWCNTs ήταν 25,5% και 22,7%, αντίστοιχα. Η συνολική επιφάνεια του δείγματος ελέγχου ήταν 31,4%, ενώ με την προσθήκη 0,5% και 1% MWCNTs ήταν 25,4% και 24,3% αντίστοιχα. Ακόμα, σε έρευνα [101] όπου το περιεχόμενο των MWCNTs ήταν 0,5%, 1% και 1,5% (διάμετρος 50 nm και μήκος 500 nm), κατά βάρος, σε πάστες που περιέχουν 10% ή 20% ίνες ζαχαροκάλαμου συνδυασμένες με 3% CaCl₂ για αντικατάσταση τσιμέντου, κατά βάρος, και οι οποίοι ήταν αναμειγμένοι με ακετόνη σε μία γεννήτρια υπερήχων για να επιτευχθεί ομοιόμορφη διασπορά, οδήγησαν σε μείωση του ποσοστού απορρόφησης νερού. Η μείωση αυτή αυξήθηκε με αύξηση του περιεχομένου του MWCNT. Τέλος, [102] με προσθήκη διαφορετικών περιεχομένων MWCNTs (διάμετρος 40-80 nm και μήκος 5-15 nm), κατά βάρος, σε πάστες τσιμέντου, διασκορπισμένοι με επιφανειοδραστικό, παρατηρήθηκε μείωση της τιμής του πορώδους στις 28 ημέρες καθώς και του ολικού όγκου πόρων της πάστας. Η προσθήκη από 0,025%, 1% και 2% MWCNTs μείωσε το συνολικό εισαγόμενο όγκο

κατά 2,33%, 4,83% και 5,96% αντίστοιχα, ενώ το πορώδες μειώθηκε κατά 1,54%, 3,9% και 4,5% αντίστοιχα.

Από όλες τις παραπάνω αναφορές, εξάγεται το συμπέρασμα ότι η προσθήκη CNTs στη μήτρα μείωσε το πορώδες της, καθώς επίσης και την απορρόφηση και διαπερατότητα του νερού όπως φαίνεται από την πλειονότητα των μελετών. Η μείωση του πορώδους με την προσθήκη CNT μπορεί να σχετίζεται με την επίδραση πλήρωσης των CNTs, αφού λόγω νανομεγέθους μπορούν να συμπληρώσουν τους πόρους μεταξύ των προϊόντων ενυδάτωσης του τσιμέντου. Με αυτόν τον τρόπο το πορώδες των συνθέτων υλικών μπορεί να μειωθεί αφού ουσιαστικά τα νανοϋλικά γεμίζουν τα κενά.

4.1.7. Αντοχές

Η αντοχή (strength) του σκυροδέματος σε μηχανική καταπόνηση θεωρείται ως η σημαντικότερη ιδιότητά του και δίνει μια συνολική εικόνα της ποιότητας του σκυροδέματος, επειδή συνδέεται άμεσα με τη δομή της ενυδατωμένης τσιμεντόπαστας.

Η αντοχή του σκυροδέματος σε συγκεκριμένη ηλικία, συντήρηση και θερμοκρασία θεωρείται ότι εξαρτάται κατά βάση από δύο παράγοντες: το λόγο νερού προς τσιμέντο (w/c) και το βαθμό συμπίκνωσης (degree of compaction). Και οι δύο αυτοί παράγοντες επιδρούν στο πορώδες του σκυροδέματος και σε καλά συμπτυκνωμένα σκυροδέματα το ποσοστό των κενών μειώνεται σημαντικά. Επομένως, η αντοχή του σκυροδέματος είναι συνάρτηση του όγκου των κενών χώρων του (voids).

4.1.7.1. Νανοςωλήνες άνθρακα

Πολλές έρευνες έχουν διεξαχθεί για την διερεύνηση της θλιπτικής και καμπτικής αντοχής υλικών από τσιμέντο συναρτήσει της προσθήκης περιεχομένου CNTs. Παρόλ' αυτά οι πιο πολλές από αυτές ασχολούνται με μήτρες από τσιμεντόπαστες και κονιάματα και πολύ λιγότερο με μήτρες από σκυρόδεμα. Παρακάτω παρατίθενται συμπεράσματα ερευνών και για τις τρεις αυτές κατηγορίες χωρισμένες σε υποκατηγορίες με βάση το ποσοστό περιεχομένου σε νανοςωλήνες άνθρακα .

4.1.7.1.1. Τσιμεντόπαστες

Ποσοστό μέχρι και 0.1%

[103] Έρευνα ανέλυσε την προσθήκη 0,048% και 0,08% κατά βάρος MWCNTs με διαφορετικές αναλογίες διαστάσεων (βραχείοι και μακριοί), σε πάστες τσιμέντου, με τους βραχείους να έχουν λόγο διαστάσεων 700 (διάμετρος 20-40 nm και μήκος 10-30 nm), ενώ τους μακριούς να έχουν μια μέση αναλογία διαστάσεων 1600 (διάμετρο 20-40 nm και μήκος 10-100 nm). Όλοι διασκορπίστηκαν σε υδατικό διάλυμα που περιείχε επιφανειοδραστικό και που μετέπειτα υποβλήθηκε σε υπερήχους. Τα αποτελέσματα εμφάνισαν βελτίωση στην αντοχή κάμψης 3, 7 και 28 ημερών και το συντελεστή Young. Ειδικότερα, στην ηλικία των 3 ημερών, τα δείγματα που περιείχαν υψηλότερη συγκέντρωση βραχέων MWCNTs εμφάνισαν μεγαλύτερη αντοχή στην κάμψη και συντελεστή Young, ενώ εκείνα που περιείχαν χαμηλή συγκέντρωση μακριών

εμφάνισαν μεγαλύτερη αντοχή στην κάμψη και συντελεστή Young. Η προσθήκη 0.08% βραχέων MWCNTs επέδειξαν την μέγιστη αντοχή σε κάμψη 3 και 7 ημερών ακολουθούμενη από τα 0,048% των μακριών. Σε ηλικία 28 ημερών, η προσθήκη βραχέων MWCNTs με 0,08% και με 0,048% εμφάνισαν την ίδια αντοχή σε κάμψη. Η προσθήκη βραχέων MWCNTs 0,08% παρουσίασαν τον υψηλότερο συντελεστή Young και ακολούθησαν οι 0,048% MWCNTs. Σε άλλη έρευνα [104] η προσθήκη 0,75% MWCNTs (διάμετρος 10-30 nm και μήκους 1-2 nm), κατά βάρος, διασκορπισμένοι με υπερήχους οδήγησε σε βελτίωση 33,66% και 20,55%, 120% και 46% στην αντοχή σε θλίψη 28 ημερών, στην αντοχή σε κάμψη, στον συντελεστή κάμψης και στο δείκτη σκληρότητας αντίστοιχα ενώ [87] με την χρησιμοποίηση MWCNTs (διάμετρο <8 και μήκος 10-30 nm) που περιέχουν 3.86% COOH παρατηρήθηκε αύξηση της θλιπτικής αντοχής των 28 ημερών κατά 5,31% και 5% με περιεχόμενο ποσοστό 0,05% και 0,1% MWCNTs, αντίστοιχα. Η ενέργεια θραύσης αυξήθηκε κατά 22,52% και 42,86% με περιεχόμενο 0,05% και 1% αντίστοιχα, ενώ η ενίσχυση στην σκληρότητα ήταν 6,87% και 19,22% αντίστοιχα.

Ποσοστό μέχρι και 0.2%

[105] Προσθήκη 0,15% MWCNTs (διάμετρος 10-20 nm και μήκος 10-30 nm), κατά όγκο, οδήγησε σε βελτίωση κατά 38% στην αντοχή σε θλίψη ενώ άλλη έρευνα [106] χρησιμοποίησε διαφορετικά περιεχόμενα MWCNTs κατά βάρος με διαφορετικές αναλογίες διαστάσεων (μικρού και μεγάλου μήκους) οι οποίοι ήταν διασκορπισμένοι με επιφανειοδραστικό και αναμικτήρα υπερήχων. Οι μικροί MWCNTs έχουν λόγο διαστάσεων 157 (διάμετρος 9,5 nm και μήκος 1,5 nm), ενώ οι μακριοί έχουν μέσο όρο αναλογίας διαστάσεων 1250-1375 (διάμετρος <8 nm και μήκος 10-30 nm). Για τους μικρούς MWCNT, το ποσοστό ενσωμάτωσης ήταν 0,04%, 0,1% και 0,2% ενώ για τους μακριούς ήταν 0,04% και 0,1%. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι σε ηλικία 7 ημερών, τα περισσότερα δείγματα παρουσίασαν αύξηση της αντοχής στην κάμψη και του συντελεστή σκληρότητας. Πιο συγκεκριμένα, η προσθήκη 0,04% βραχέων MWCNTs εμφάνισε τη μεγαλύτερη βελτίωση, με 66% και 154% βελτίωση της αντοχής στην κάμψη και του μέτρου σκληρότητας αντίστοιχα. Από την άλλη, τα δείγματα με 0,2% έδειξαν 38% μείωση στην αντοχή στην κάμψη, αλλά έδειξαν την υψηλότερη βελτίωση στο μέτρο της ανθεκτικότητας (130%). Επίσης, σε ηλικία 14 ημερών τα MWCNTs με 0,2% εμφάνισαν την υψηλότερη αντοχή (72%) ενώ σε ηλικία 28 ημερών η αντοχή στην κάμψη των δειγμάτων που περιέχουν 0,2% αυξήθηκε κατά 269%. Ακόμα, τα ίδια δείγματα επέδειξαν το υψηλότερο μέτρο ελαστικότητας και μέτρο σκληρότητας. Τέλος, [107] με προσθήκη 0,2% MWCNTs (διάμετρος 8-20 nm), κατά βάρος, διασκορπισμένα με υπερήχους εμφάνισαν αύξηση 19,71%, 20%, 17,77% και 17,44% στη θλιπτική αντοχή 7, 14, 28 και 35 ημερών αντίστοιχα.

Ποσοστό μέχρι και 2%

Έρευνα [107] στην οποία χρησιμοποιήθηκαν 0,25%, 0,5% και 1% κατά βάρος MWCNTs με υδροξύλιο (διάμετρος 20-50 nm και μήκος 10-30 nm) διασκορπισμένοι με ξηρή ανάμειξη με τσιμέντο και εν συνεχεία με προσθήκη νερού και υπερπλαστικοποιητή εμφάνισαν αύξηση αντοχής σε θλίψη στις 3 ημέρες κατά 3,8%, 7,7% και 1% αντίστοιχα, ενώ η θλιπτική αντοχή των 28 ημερών αυξήθηκε κατά 4,8%, 3% και 1,8%, αντίστοιχα. Η αντοχή σε κάμψη των 3 ημερών ενισχύθηκε κατά 20,3%, 31,8% και 26,6% ενώ αυτή των 28 ημερών αυξήθηκε κατά 24,4%, 40,8% και 27,7% αντίστοιχα. Ακόμα, [108] η προσθήκη MWCNTs (διάμετρος 60-100 nm και μήκος 0.5-50 nm) σε επίπεδα 0,5%, 0,75% και 1%, κατά βάρος κατεργασμένα με υπερήχους MWCNTs με νερό για 30 λεπτά οδήγησαν σε αύξηση στις 7, 28, 60, 90 και 180 ημέρες της θλιπτικής αντοχής και της αντοχής κάμψης με την προσθήκη 0,5% MWCNTs, ενώ η προσθήκη 0,75% και 1% μείωσε τη θλιπτική αντοχή και τη αντοχή κάμψης των 28 ημερών. Παρατηρήθηκε ότι η προσθήκη 0,5% MWCNTs εμφάνισε τη βέλτιστη συμπεριφορά, της οποίας η ενίσχυση της θλιπτικής αντοχής στις 7, 28, 60, 90 και 180 ημέρες ήταν 21,41%, 12,16%, 8,17%, 11,62% και 12,68%, αντίστοιχα, ενώ η αύξηση στη αντοχή εφελκυσμού ήταν 17,84%, 36,33%, 9,86%, 9,85% και 9,85% αντίστοιχα. Τέλος, [109] αναφέρθηκε μείωση στη θλιπτική αντοχή των 28 ημερών των παστών με την προσθήκη MWCNTs 0,5%, 1% και 2% (διάμετρος 3-8 nm), κατά βάρος. Παρατηρήθηκε ότι η αντοχή στη θλίψη μειώθηκε με την αύξηση του περιεχομένου σε νανοσωλήνες.

4.1.7.1.2. Κονιάματα

Ποσοστό μέχρι και 0.15%

Σε έρευνα [110] προστέθηκαν 0,01% MWCNTs (διάμετρος 10-20 nm και μήκος 5-15 nm), κατά βάρος τα οποία υποβλήθηκαν σε επεξεργασία με H₂SO₄ και HNO₃ ενώ χρησιμοποιήθηκαν δύο διασπορές που ονομάστηκαν καρβονυλιακή και υδατική διασπορά. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η χρήση της υδατικής διασποράς αύξησε τη θλιπτική αντοχή και την αντοχή στην κάμψη των 59 ημερών κατά 8,4% και 5,4% αντίστοιχα, ενώ η χρήση της διασποράς καρβονυλίου οδήγησαν σε αύξηση κατά 15,9% και 20,7% αντίστοιχα. Άλλη έρευνα [111] ανέφερε αύξηση κατά 21% και 29% της αντοχής σε θλίψη των 90 ημερών και της αντοχής σε κάμψη αντιστοίχως, με την προσθήκη 0,01% MWCNTs, κατά βάρος. Για κονιάματα που περιέχουν 2,1% ίνες κάρναβης, η προσθήκη 0,01% MWCNTs βελτίωσε την αντοχή σε θλίψη και κάμψη των 90 ημερών κατά 24,44% και 6,48% αντίστοιχα ενώ έγιναν [112] συγκρίσεις της αντοχής σε θλίψη κονιαμάτων που περιέχουν καθαρούς και τροποποιημένους MWCNTs (HNO₃ και H₂SO₄) σε ποσοστό 0,05% (διάμετρος 30-60 nm και μήκος από 100 nm έως αρκετά μικρά). Τα αποτελέσματα έδειξαν αύξηση 22,73% , 6,38% και 21,57% στη θλιπτική αντοχή 1, 7 και 28 ημερών με την προσθήκη καθαρών MWCNTs, αντίστοιχα, ενώ στους τροποποιημένους MWCNTs αυξήθηκαν κατά 29,54%, 10,64% και 11,76% αντίστοιχα. Επιπρόσθετα, η χρησιμοποίηση καθαρών MWCNT οδήγησε σε αύξηση 25% και 10% στις 7 και 28 ημέρες της αντοχής σε εφελκυσμό, αντίστοιχα, ενώ η προσθήκη τροποποιημένων οδήγησαν σε ενίσχυση 8,93% και 7,14% αντίστοιχα.

Ποσοστό μέχρι και 0.5%

[100] Η προσθήκη 0,5% MWCNTs (διάμετρος 10-30 nm και μήκος 0,5-500 nm) τροποποιημένοι με H₂SO₄ και HNO₃, κατά βάρος οδήγησαν σε αύξηση της θλιπτικής αντοχής των 28 ημερών και της αντοχής σε κάμψη κατά 18,86% και 25,11% αντίστοιχα. Άλλη έρευνα [33] με 0,5% MWCNTs, εφάρμοσε και συνέκρινε διαφορετικές μεθόδους τροποποίησης. Αυτές οι μέθοδοι ήταν παρθένες (όπως καλλιεργούνται) (διάμετρος 40-80 nm και μήκος 400-1000 nm), ανόπτηση (διάμετρος 40- 80 nm και μήκος 200-400 nm) και καρβοξύλιο (διάμετρος 10- 20 nm και μήκος 0,1-10 nm). Τα MWCNTs διασκορπίστηκαν με ακετόνη και υπερήχους. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η προσθήκη παρθένων και τροποποιημένων MWCNTs αύξησαν την αντοχή σε εφελκυσμό των 28 ημερών κατά 34% και 9% αντίστοιχα, ενώ η προσθήκη καρβοξυλίου επέφερε μείωση κατά 61,33%. Η προσθήκη των παρθένων νανοσωλήνων και αυτοί με την ανόπτηση αύξησαν τη θλιπτική αντοχή 28 ημερών κατά 10,58% και 17,31% αντίστοιχα, ενώ η προσθήκη καρβοξυλίου την μείωσε κατά 85,57%. Ακόμα, [113] η προσθήκη 0.5% κατά βάρος τροποποιημένων MWCNTs (διάμετρος 8-15 nm και μήκος 50 nm), διασκορπισμένων με υπερήχους επέφεραν βελτίωση 23,73% και 30,19% στην αντοχή κάμψης και θλίψης των 28 ημερών, αντίστοιχα ενώ η χρησιμοποίηση [91] MWCNTs με καρβοξύλιο (διάμετρος 10-20 nm και μήκος 10-30 nm) σε επίπεδα 0,1%, 0,3% και 0,5%, κατά βάρος, οδήγησαν σε αύξηση της αντοχής στη θλίψη και αντοχής κάμψης των 28 ημερών. Ειδικότερα, η προσθήκη 0,3% MWCNTs αποτέλεσε το βέλτιστο περιεχόμενο, αφού παρατηρήθηκε αύξηση κατά 21,1% και 23,4% στην αντοχή στη θλίψη και αντοχή στην κάμψη αντίστοιχα. Τέλος, [114] προσθήκη 0,05- 0,5% MWCNTs (διάμετρος 10-20 nm και μήκος 10-30 nm), κατά βάρος με εφαρμογή της τεχνικής υπερήχων για τη διασπορά μαζί με την προσθήκη πλαστικοποιητή επέφερε ενίσχυση της αντοχής στη θλίψη για 0,05%, 0,1%, 0,2% και 0,3% ενώ για 0,5% σχεδόν μειώθηκε. Πιο συγκεκριμένα, η προσθήκη 0,3% MWCNTs παρουσίασε την υψηλότερη αντοχή σε θλίψη αφού τα ποσοστά αύξησης της θλιπτικής αντοχής για τις 3, 7, 28 και 100 ημέρες ήταν 8,81%, 23,43%, 17,38% και 10,36%, αντίστοιχα ενώ η αντοχή σε κάμψη αυξήθηκε περισσότερο για προσθήκη 0.1%. Όσον αφορά την αντοχή σε διάτμηση, αυξήθηκε για 0,1% και 0,3% ενώ ειδικότερα κατά την προσθήκη 0.1% ενισχύθηκε η διατμητική αντοχή των 3, 7 και 28 ημερών κατά 20%, 23% και 22%, αντίστοιχα.

Ποσοστό μέχρι και 10%

Η προσθήκη [115] 0,3%, 0,5% και 0,7% MWCNTs (διάμετρος 20-55 nm), κατά βάρος, διασκορπισμένων με υπερπλαστικοποιητή οδήγησαν σε ενίσχυση της θλιπτικής αντοχής 2 και 14 ημερών ενώ παρατηρήθηκε ότι με αύξηση του περιεχόμενου σε νανοσωλήνες έχουμε και αύξηση της αντοχής. Ειδικότερα, η αύξηση της αντοχής σε θλίψη 2 ημερών ήταν περίπου 4,6%, 8% και 11,5% με την προσθήκη 0,3%, 0,5% και 0,7% MWCNTs, αντίστοιχα, ενώ αύξηση αυτής στις 14 ημέρες ήταν περίπου 5,33%, 12,9% και 12,67% αντίστοιχα. Παρόμοια τάση των αποτελεσμάτων παρατηρήθηκε για

την αντοχή σε κάμψη. Σε άλλη έρευνα [99] χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικά περιεχόμενα MWCNTs (διάμετρος 10-100 nm και μήκος 800-900 nm) κατά βάρος, οι οποίοι είχαν υποβληθεί σε επεξεργασία με εισαγωγή καρβοξυλικών ομάδων (COOH) στις επιφάνειες MWCNTs χρησιμοποιώντας HNO₃. Τα αποτελέσματα έδειξαν 21,89%, 12,1% και 5,55% ενίσχυση της αντοχής σε θλίψη σε ηλικία 3 ημερών με την προσθήκη 0,3%, 0,5% και 0,75% αντίστοιχα, ενώ αύξηση παρατηρήθηκε κατά 12,1%, 8,45% και 0,91% σε ηλικία 28 ημερών, αντίστοιχα. Η θλιπτική αντοχή 7 ημερών αυξήθηκε κατά 7,96% με την προσθήκη 0,3% MWCNTs, ενώ η προσθήκη 0,5% και 0,75% επέφερε μείωση κατά 7,46% και 13,18%, αντίστοιχα. Τέλος, [95] χρησιμοποίηση 0,5%, 2%, 5% και 10% MWCNTs (διάμετρος 3-8 nm), κατά βάρος, σε κονιάματα που περιέχουν 6% νανο-μετακαολίνη ως αντικατάσταση τσιμέντου, διασκορπισμένοι σε οργανικό διάλυμα χλωριούχου αμμωνίου οδήγησαν σε αύξηση της θλιπτικής αντοχής των 28 ημερών με την προσθήκη 0,5%, 2% και 5% MWCNTs, ενώ αντίθετα η προσθήκη 10% την μείωσε. Η προσθήκη 2% MWCNTs παρουσίασε την υψηλότερη αντοχή σε θλίψη.

4.1.7.1.3. Σκυρόδεμα

Η χρησιμοποίηση [116] 0,003%, 0,006% και 0,01% CNTs, κατά βάρος, επέφερε βελτίωση στην θλιπτική αντοχή 90 ημερών. Παρατηρήθηκε ότι η προσθήκη 0,003% CNTs αποτέλεσε το βέλτιστο περιεχόμενο ακολουθούμενο από 0,006% και 0,01% CNTs, αντίστοιχα ενώ προσθήκη [117] 0,022% MWCNTs (διάμετρος 8 nm και λόγος διαστάσεων 104) διασκορπισμένοι με πολυηλεκτρολύτη και υπερήχους δεν φάνηκε να επηρεάζουν τη θλιπτική αντοχή 28 ημερών. Επιπρόσθετα, [94] προσθήκη 0,015%, 0,03% και 0,045% MWCNTs (διάμετρος 20-40 nm και μήκος 1-10 nm), κατά βάρος, οδήγησαν σε υψηλότερη αντοχή σε θλίψη 28 ημερών και αντοχή σε κάμψη. Αυτή η βελτίωση αυξήθηκε με την αύξηση του περιεχομένου του MWCNT. Ειδικότερα, η αντοχή σε θλίψη ήταν 2,75%, 16,38% και 26,69% με την προσθήκη 0,015%, 0,03% και 0,045% MWCNTs, αντίστοιχα, ενώ η ενίσχυση στην αντοχή κάμψης ήταν 30,84%, 45,37% και 66,3%, αντίστοιχα. Ακόμα, [118] η προσθήκη 0,05% CNTs (διάμετρος έως 100 nm και μήκος έως 20 nm) σε μη-αυτόκλειστα σκυροδέματα αφρού αύξησαν την αντοχή σε θλίψη κατά 70% ενώ [119] η χρησιμοποίηση διαφορετικών περιεχομένων MWCNTs σε bone cements (διάμετρος 40-60 nm και μήκος 0.5-40 nm), κατά βάρος οδήγησαν σε ενίσχυση της αντοχής σε θλίψη και κάμψης. Αναλυτικότερα, η προσθήκη 0,1%, 0,2%, 0,27%, 0,43%, 0,59% και 0,75% αύξησαν τη θλιπτική αντοχή κατά 23,42%, 23,57%, 20,81%, 23,44%, 22,53% και 21,36%, αντίστοιχα, ενώ η αντοχή σε εφελκυσμό ενισχύθηκε κατά 18,62%, 19,44%, 18,57%, 12,49%, 13,26% και 15% αντίστοιχα.

Άλλη έρευνα [120] με προσθήκη 0,1% MWCNTs (διάμετρος 8-25 nm και μέσο μήκος 120 nm), κατά βάρος διασκορπισμένοι με υπερήχους οδήγησαν σε βελτίωση στην αντοχή σε θλίψη 7, 14, 28 και 35 ημερών ενώ η προσθήκη [121] διαφορετικού περιεχομένου ποσοστού μη επεξεργασμένων MWCNTs (διάμετρος 9,5 nm και μήκος 1,5 nm), κατά βάρος επέφερε βελτίωση κατά 13%, 20% και 9% στην αντοχή σε θλίψη στις 28 ημέρες με την προσθήκη 0,05%, 0,1% και 0,2% αντίστοιχα, ενώ η βελτίωση

στην αντοχή σε θλίψη στις 28 ημέρες ήταν 29%, 18% και 25% αντίστοιχα. Επιπλέον, η χρησιμοποίηση [122] 2% MWCNTs (διάμετρος 10-15 nm και μήκος 1-15 mm), κατά βάρος, διασκορπισμένοι μαζί με καρβοξυμεθυλοκυτταρίνη σε υδατικό μέσο σε μύλο σφαιρών υψηλής ταχύτητας οδήγησαν σε αύξηση της αντοχής στη θλίψη και της σκληρότητας. Τέλος, [89] η προσθήκη διαφορετικών περιεχόμενων ποσοστών MWCNTs (διάμετρος 15-20 nm και μήκος 0.1-10 mm), κατά βάρος, σε μη αυτόκλειστα και σε αυτόκλειστα αεριοθούμενα σκυροδέματα, διασκορπισμένων με επιφανειοδραστικό και υπερήχους επέφεραν ενίσχυση στη θλιπτική αντοχή 28 ημερών και στην αντοχή κάμψης. Στα μη αυτόκλειστα αεριοθούμενα σκυροδέματα, η αντοχή στη θλίψη αυξήθηκε κατά 7,35%, 4,41%, 11,03% και 8,08% με την προσθήκη 0,4%, 1%, 2% και 4% MWCNTs, αντίστοιχα, ενώ η προσθήκη 6% MWCNTs την μείωσε κατά 7,35%. Η αντοχή σε κάμψη αυξήθηκε κατά 11,23%, 5,61%, 6,74% και 8,99% με την προσθήκη 0,4%, 1%, 2% και 4% MWCNTs, αντίστοιχα, ενώ η προσθήκη 6% των MWCNTs μείωσε κατά 11,23%. Για τα αυτόκλειστα αεριοθούμενα σκυροδέματα, η αντοχή σε θλίψη αυξήθηκε κατά 3,57%, 10,7% 14,7% και 24,5% με την προσθήκη 0,08%, 0,1%, 0,2% και 2% MWCNTs, αντίστοιχα, ενώ η αντοχή στην κάμψη αυξήθηκε κατά 7,4%, 19,4%, 25% και 24,1% αντίστοιχα.

4.2. Συμπεράσματα / Μηχανισμοί

Από τις παραπάνω αναφορές γίνεται αντιληπτό ότι η προσθήκη CNTs αύξησε την αντοχή, αλλά αυτό εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως η επεξεργασία των CNT, η μέθοδος διασποράς, η ποιότητα των CNT, η διάμετρος των CNTs, ο λόγος διαστάσεων καθώς και οι συγκεντρώσεις των CNTs. Αυτή η ενίσχυση της αντοχής μπορεί να σχετίζεται με την ικανότητα των CNTs να δρουν ως γέφυρες σε ρωγμές και κενά (Εικ.), δηλαδή στην φυσική συμβολή [88] των CNTs να έχουν την δυνατότητα να γεμίσουν περαιτέρω τους πόρους των προϊόντων ενυδάτωσης ενώ [103] CNT μπορούν να μειώσουν το νανοπορώδες της πάστας τσιμέντου γεμίζοντας τα κενά του CSH. Ορισμένες μελέτες [100,123] συμπέραναν ότι η επίδραση των CNT στην δομή πόρων του τσιμέντου λειτουργούν με δύο κύριους μηχανισμούς ενίσχυσης, οι οποίοι είναι η γεφύρωση των τριχοειδών πόρων σε μέγεθος μικρο και η πλήρωση πόρων νανομεγέθους. Τα CNTs μπορεί να γεφυρώσουν τους τριχοειδείς πόρους (σε νανο / επίπεδο μικρομέτρου), παρέχοντας έτσι μεγαλύτερη ικανότητα φέρουσας ικανότητας στο πλέγμα ενώ έχουν την δυνατότητα να γεμίσουν τους πόρους πηκτώματος μεταξύ των προϊόντων CSH με αποτέλεσμα τη μείωση του πορώδους και την αύξηση του μέσου όρου ακαμψίας [103,100,123].

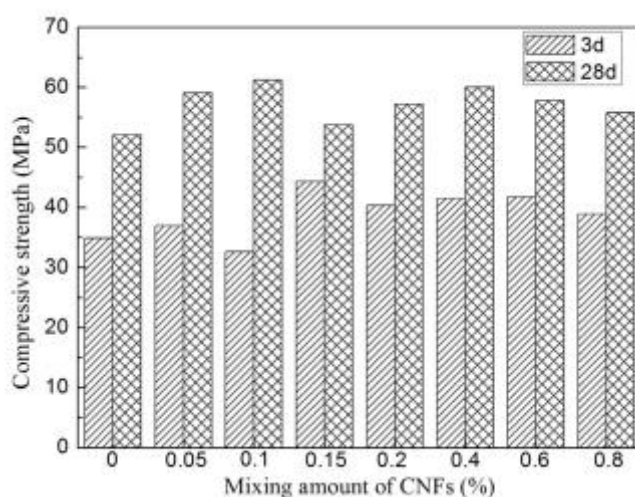
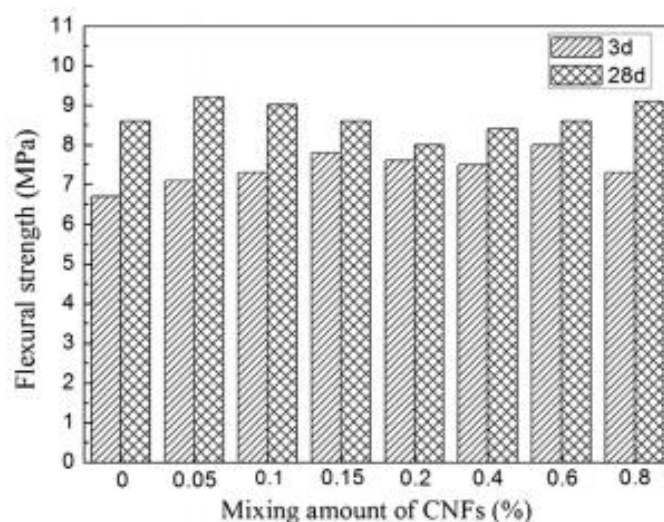
Έχει [95] αναφερθεί ότι σύνθετα υλικά CNT παρουσίασαν βελτιωμένες ιδιότητες, των οποίων οι τιμές CSH ακαμψίας και σκληρότητας είναι μεγαλύτερες από αυτές της ίδιας μήτρας τσιμέντου χωρίς CNT. Οι [96] CNT μπορούν να δράσουν ως παράγοντες πυρήνωσης για το CSH, οι οποίοι κατά προτίμηση σχηματίζονται στην επιφάνεια των CNTs σε αντίθεση με την επιφάνεια των παρακείμενων μη ενυδατωμένων κόκκων τσιμέντου. Το αποτέλεσμα είναι ένας πυκνός σχηματισμός CSH που συνδέεται στενά με τα CNTs, παράγοντας έτσι ενισχυτική συμπεριφορά [96]. Επιπλέον, άλλες ενισχυτικές συμπεριφορές όπως η απομάκρυνση των ινών, η αποκόλληση των ινών και

η μείωση των ρωγμών μπορούν να συμβάλουν στη βελτίωση της μηχανικής αντοχής. Η ενίσχυση αυτή [95] συσχετίζεται με την διασταύρωση των CNT με προϊόντα ενυδάτωσης που οδήγησαν στην αντοχή στο σχηματισμό μικρορωγμών.

Από την άλλη πλευρά, υψηλές συγκεντρώσεις CNTs δεν είναι επωφελείς αφού μπορούν να οδηγήσουν σε πιθανή συσσωμάτωση των CNT. Αυτή η συσσωμάτωση επηρεάζει σημαντικά τα προϊόντα ενυδάτωσης και τη δομική απόδοση των CNTs [11] ενώ [102] σχετίζεται με τον εντοπισμό υψηλής ποσότητας CNTs και δυνάμεων van der Waals. Μάλιστα το υπερβολικό περιεχόμενο CNT δεν βελτίωσε την αντοχή αλλά μερικές φορές την μείωσε. Παρατηρήθηκε ότι τα συσσωματώματα των CNTs γύρω από τους κόκκους τσιμέντου οδήγησαν σε μερική ενυδάτωση αυτών των κόκκων και δημιούργησαν προϊόντα ασθενούς ενυδατωμένου δεσμού. Επιπλέον, οι CNTs δεν υγραίνονται σωστά, πράγμα που προκαλεί έλξη μεταξύ τους. Αυτά έχουν ως αποτέλεσμα τον σχηματισμό και την διάδοση των μικρορωγμών [95] με συνέπεια την μείωση της αντοχής.

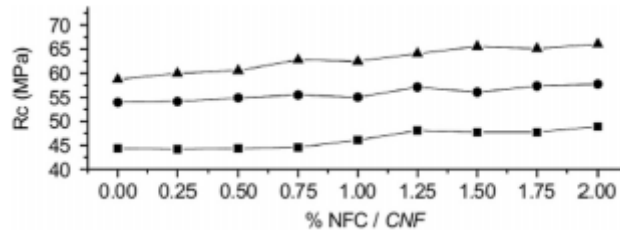
Νανοϊνες άνθρακα

Οι νανοϊνες άνθρακα (CNFs) συνεισφέρουν επίσης στην σημαντική βελτίωση στην αντοχή των σύνθετων υλικών με βάση το τσιμέντο. Η παρασκευή [56] σύνθετου κονιάματος τσιμέντου με διαφορετικό περιεχόμενο σε CNF και η μελέτη στην επίδραση της περιεκτικότητας σε CNF στην αντοχή σε θλίψη και κάμψη του υλικού σε διαφορετικές ηλικίες σκλήρυνσης (Εικ. 4.1.α και b) έδειξαν αύξηση στις αντοχές των 3 και 28 ημερών. Ειδικότερα, όταν η περιεκτικότητα ήταν 0,05% κατά βάρος, η αντοχή σε κάμψη 28 ημερών παρουσίασε την υψηλότερη βελτίωση ενώ όταν το περιεχόμενο ήταν 0,1% κατά βάρος, η θλιπτική αντοχή στην 28^η μέρα ήταν προφανώς υψηλότερη από εκείνη του τσιμεντοκονιάματος χωρίς CNF. Τα συμπεράσματα που εξάχθηκαν ήταν ότι η αντοχή σε κάμψη της 3^{ης} μέρας τείνει να αυξάνεται αρχικά και στη συνέχεια μειώνεται με την αύξηση του περιεχομένου των CNF. Ωστόσο, η αντοχή σε κάμψη των 28 ημερών τείνει να μειώνεται αρχικά και στη συνέχεια να αυξάνεται με την αύξηση του περιεχομένου CNF. Όταν το περιεχόμενο σε CNF ήταν χαμηλότερο (0,05, 0,10 και 0,15% κ.β.), η αντοχή σε θλίψη και κάμψη της τσιμεντοκονίας αυξήθηκαν. Ωστόσο, όταν το ενσωματωμένο περιεχόμενο ήταν υψηλότερο, οι βελτιώσεις στις συγκεκριμένες αντοχές έγιναν πιο σταθερές.



Διάγραμμα 4.1.a,b Αντοχές σε θλίψη και κάμψη 3 και 28 ημερών τσιμεντοκονιάματος συναρτήσει περιεκτικότητας σε CNFs.

Άλλη έρευνα [57] παρουσίασε την καμπύλη μεταβολής των 7, 28 και 120 ημερών της θλιπτικής αντοχής τσιμεντοκονίας με διαφορετικά περιεχόμενα σε CNF. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι όταν το περιεχόμενο σε CNF είναι εντός της περιοχής από 0,00-2,00% κατά βάρος, η αντοχή σε θλίψη αυξάνεται σταδιακά με την αύξηση του περιεχομένου CNF. Όταν το περιεχόμενο είναι 2,0% κατά βάρος, η αντοχή σε θλίψη του κονιάματος τσιμέντου είναι σημαντικά υψηλότερη από αυτή των δειγμάτων ελέγχου. Επιπλέον, παρατηρείται περίπου γραμμική σχέση μεταξύ του περιεχομένου του CNF και της αντοχής σε θλίψη. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι 1% αύξηση της περιεκτικότητας σε CNF σε τσιμεντοκονία αντιστοιχεί σε αύξηση κατά 5,3% στην αντοχή σε θλίψη του σύνθετου υλικού.



Διάγραμμα 4.2. Επίδραση των δοσολογιών CNF στην αντοχή σε θλίψη σε τσιμεντοκονιάματα σε διαφορετικούς χρόνους ωρίμανσης.

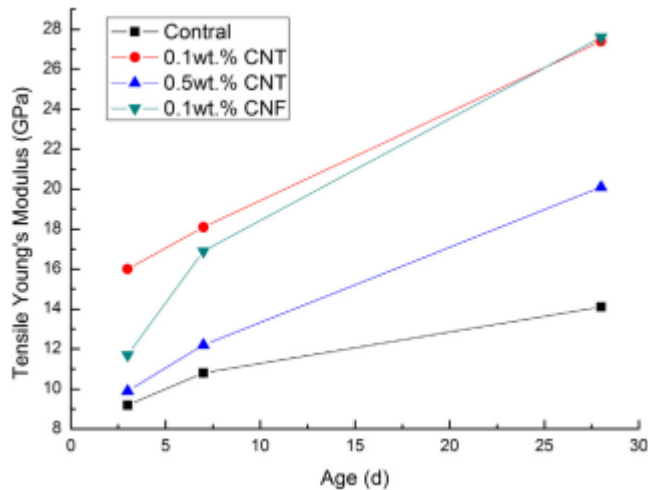
4.3. Μέτρο Ελαστικότητας

Το μέτρο ελαστικότητας είναι ένας σημαντικός δείκτης για την αξιολόγηση των μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών. Οι έρευνες αποδεικνύουν ότι το έμφυτο μέτρο ελαστικότητας των CNTs είναι μεταξύ 2,8 και 3,6 TPa [90,102], ενώ αυτό των CNFs είναι εντός της περιοχής 25- 200 GPa [97]. Με την ενσωμάτωση των CNTs / CNFs σε υλικά από τσιμέντο, το μέτρο ελαστικότητας των υλικών αυτών μπορεί να ενισχυθεί σημαντικά.

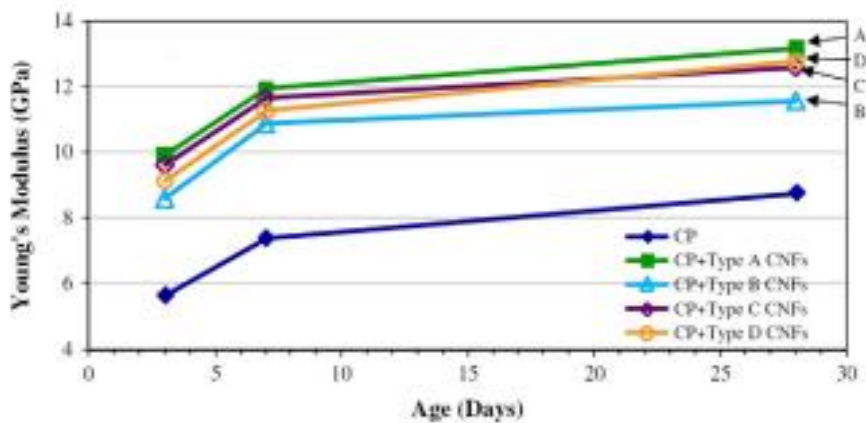
Έρευνα [105] ενσωμάτωσε διαφορετικά περιεχόμενα CNT και CNF σε κονίαμα τσιμέντου και σύγκρινε το εφελκυστικό και το θλιπτικό μέτρο ελαστικότητας του υλικού. Τα πειραματικά περιεχόμενα ποσοστά σε CNT ήταν 0,1 και 0,5% κατά βάρος, ενώ η περιεκτικότητα σε CNF ήταν 0,1% κατά βάρος. Τα πειραματικά αποτελέσματα φαίνονται στα Σχ. 8 και 9. Το εφελκυστικό και το θλιπτικό μέτρο ελαστικότητας του δείγματος τσιμεντοκονίας με CNT και CNF είναι υψηλότερα από αυτά των δειγμάτων ελέγχου. Το μέτρο ελαστικότητας των δειγμάτων με 0.1% κ.β. CNTs και των CNF είναι 2 και 2,1 φορές μεγαλύτερα από εκείνων της ομάδας ελέγχου αντίστοιχα.

Άλλη έρευνα [128] ενσωμάτωσε 0,048% κατά βάρος τεσσάρων τύπων CNF σε σύνθετα με βάση το τσιμέντο προκειμένου να μελετηθεί η μεταβολή του μέτρου ελαστικότητας. Τα πειραματικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 10. Σε σύγκριση με την ομάδα αναφοράς, τα δείγματα με βάση το τσιμέντο τα οποία είχαν ενσωματωμένα CNF τύπου A εμφάνισαν μια αύξηση περίπου 75% στο μέτρο ελαστικότητας. Επιπλέον, τα μέτρα ελαστικότητας των δειγμάτων που είχαν ενσωματωμένα CNF τύπου B, τύπου C και τύπου D ήταν όλα μεγεθυμένα σε μεγάλο βαθμό.

Συνοπτικά, η ενσωμάτωση CNTs / CNFs μπορεί να ενισχύσει το μέτρο ελαστικότητας των υλικών με βάση το τσιμέντο ενώ ο βαθμός ενίσχυσης σχετίζεται με το περιεχόμενο και τον τύπο των CNT / CNF.



Σχήμα 4.2. Επίδραση του ποσοστού CNTs και CNFs στο θλιπτικό μέτρο Young νανοενισχυμένων κονιαμάτων.



Σχήμα 4.3. Επίδραση του τύπου CNF στο μέτρο Young των τσιμεντοειδών νανοςύνθετων που ενισχύονται με CNFs.

Παράμετροι επιρροής

Σύμφωνα με τις προαναφερθείσες αναφορές, οι μηχανικές ιδιότητες των υλικών με βάση το τσιμέντο ενισχυμένων με CNTs / CNFs επηρεάζονται από διάφορους παράγοντες. Ωστόσο, η μέθοδος διασποράς, η ποσότητα του ενσωματωμένου υλικού, και ο τύπος CNTs / CNFs έχουν σε μεγαλύτερο βαθμό το πιο άμεσο αποτέλεσμα.

4.4. Μικροδομή υλικών από τσιμέντο που περιέχουν νανοϋλικά

Η καλύτερη κατανόηση της ανάπτυξης της μικροδομής των τσιμεντοειδών υλικών είναι πολύ σημαντική καθώς σχετίζεται άμεσα με τις φυσικές και μηχανικές συμπεριφορές τους. Τυπικά, η μικροδομική ανάλυση περιλαμβάνει λεπτομερή εξέταση των κύρια συστατικών της πάστας του τσιμέντου, δηλαδή του $\text{Ca}(\text{OH})_2$, του C-S-H, των πόρων και των μη ενυδατωμένων σωματιδίων τσιμέντου. Παρακάτω περιγράφεται η επίδραση διαφορετικών νανοϋλικών στη μικροδομή τσιμεντοειδών υλικών.

4.4.1. Επιρροή των νανοϋλικών στην μικροδομή

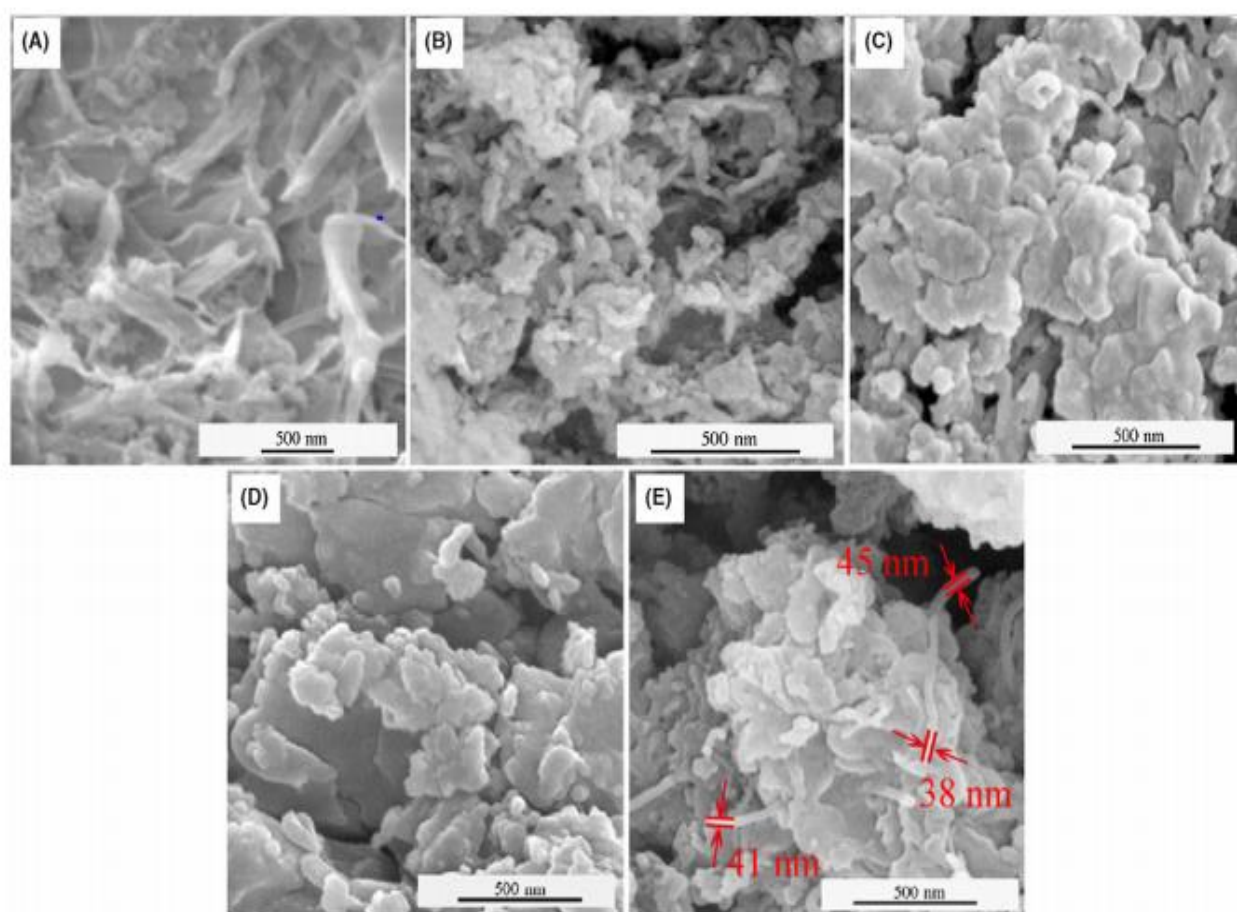
Η μικροδομική ανάλυση των τσιμεντοειδών σύνθετων υλικών τροποποιημένων από νανοϋλικά έχει διερευνηθεί από διάφορους ερευνητές. Όπως ήδη αναφέρθηκε, η προσθήκη νανοϋλικών έχει σημαντικές επιπτώσεις στην κινητική ενυδάτωσης καθώς και στην μικροδομή της πάστας του τσιμέντου λόγω του γεγονότος ότι τα νανοϋλικά συμβάλλουν στην έγκαιρη ενυδάτωση και στην παραγωγή περισσότερου C-S-H.

Το ποσοστό επί τοις εκατό των μη ενυδατωμένων σωματιδίων τσιμέντου σε δείγματα κονιαμάτων που ενισχύθηκαν με διαφορετικά ποσοστά GO ερευνήθηκε χρησιμοποιώντας τη μικροσκοπία ηλεκτρονικής σάρωσης (SEM) και (BSEM) από [102]. Το κλάσμα της περιοχής των μη ενυδατωμένων σωματιδίων τσιμέντου υπολογίστηκε από την περιοχή των μη ενυδατωμένων σωματιδίων τσιμέντου (μετράται από τις εικόνες SEM) διαιρούμενο με τη συνολική επιφάνεια της διατομής. Βρέθηκε ότι η μη ενυδατωμένη περιοχή σωματιδίων τσιμέντου ήταν 1,0%, 0,8%, 0,5%, 0,4%, που αντιστοιχούσαν στην διαφορετική προσθήκη GO επιπέδων 0,0%, 0,05%, 0,10% και 0,20% αντίστοιχα. Αυτό σημαίνει ότι με την προσθήκη των GO, το κλάσμα της περιοχής των σωματιδίων τσιμέντου που δεν έχουν υποστεί ενυδάτωση μειώθηκε. Το γεγονός αυτό μπορεί να εξηγηθεί από την επιτάχυνση ενυδάτωσης στην μήτρα λόγω του σχηματισμού πυρήνων για ενυδάτωση λόγω της προσθήκης νανοσωματιδίων.

Οι μορφολογίες των ενυδατωμένων τσιμентаνών (C-S-H) με και χωρίς νανοσωματίδια απεικονίζονται στο Σχήμα 11. Η εικόνα SEM του σχήματος 11a δείχνει ότι το καθαρό C-S-H έχει δομή σχήματος φύλλου με ανώμαλα μεγέθη. Ωστόσο, όταν προστίθεται νανο- TiO_2 στο μείγμα, τότε παρατηρείται ότι στοιβάζονται μικρές ράβδοι με πλάτος περίπου 40 nm. Στο σχήμα 11β, αυτές οι ράβδοι πιστεύεται ότι είναι οι ράβδοι C-S-H που αναπτύσσεται με τον πυρήνα των νανοσωματιδίων TiO_2 . Ομοίως, το C-S-H μετατρέπεται σε κοκκώδεις συσσωματώσεις όταν τα σωματίδια νανο- SiO_2 χρησιμοποιούνται όπως φαίνεται στο σχήμα 11c. Η μορφολογία του C-S-H μπορεί να είναι επίπεδη με το GO (βλέπε σχήμα 11d) αλλά και για προσθήκη CNT. Στο σχήμα 11e, δείχνει ότι το C-S-H αναπτύσσεται γύρω από τη νανο-ενίσχυση του CNT. Από τις SEM εικόνες στο σχήμα 11, είναι σαφές ότι τα νανοϋλικά μπορούν να αλλάξουν την μορφολογία του C-S-H [129].

Άλλες έρευνες [87] δήλωσαν επίσης ότι η μικροδομή του σκυροδέματος μπορεί να συμπιεστεί χρησιμοποιώντας νανο- TiO_2 και nanoSiO_2 στο μείγμα. Η προσθήκη νανο-

TiO₂ και νανο-SiO₂ αύξησε το σχηματισμό C-S-H, το οποίο μπορεί να πυκνώσει τη μήτρα τσιμέντου και τελικά να βελτιώσει τη ζώνη μεταβατικής διαπαφής (ITZ) μεταξύ των αδρανών υλικών και της πάστας τσιμέντου. Η αντίδραση μεταξύ αυτών των νανοϋλικών και το υδροξείδιο του ασβεστίου μπορούν να συμβάλλουν στη δημιουργία περισσότερου C-S-H, να γεμίσουν τα κενά και να βελτιώσουν την ITZ και την δεσμευτική μήτρα πάστας [87]. Ωστόσο, η υπερβολική ενίσχυση των νανοσωματιδίων μπορεί επίσης να έχει αρνητική επίδραση στη μήτρα, αφού υπάρχει μεγάλη πιθανότητα συσσώρευσης και σχηματισμού αδύναμων ζωνών. Παρομοίως, η κακή διασπορά των νανοσωματιδίων μπορούν να επηρεάσει σημαντικά τη μικροδομή υλικών από τσιμέντο [97].



Εικόνα 4.2. Εικόνες SEM μορφολογιών ένυδρου τσιμέντου (C-S-H) με διαφορετικά περιεχόμενα νανοσωματιδίων (α) C-S-H χωρίς νανοσωματίδια. (β) C-S-H με 2% νανο-TiO₂. (γ) C-S-H με 2% κατά βάρος νανο-SiO₂ (δ) C-S-H με 0,5% GO. και (ε) C-S-H με 0,5% CNT. [116]

4.5. Ηλεκτρικές και πιεζοηλεκτρικές ιδιότητες

4.5.1. Ηλεκτρική αγωγιμότητα

Έρευνες [130],[131] έδειξαν ότι η προσθήκη CNT σε πάστες τσιμέντου αύξησε την ηλεκτρική αγωγιμότητα έως 40 φορές περισσότερο. Άλλη [132] πρόσθεσαν 0,1% MWCNTs (διάμετρος <8 nm και μήκος 10-30 nm), κατά βάρος, σε πάστες τσιμέντου και τους διασκόρπισαν με επιφανειοδραστικό. Παρατηρήθηκε ότι η ηλεκτρική αγωγιμότητα των νανοσυνθετών αυξάνεται με την αυξανόμενη περιεκτικότητα σε νερό ενώ με την [133] προσθήκη 0.1% MWCNTs (διάμετρος 10-20 nm και μήκος 10- 30 nm), σε βάρος, διασκορπισμένη με υπερπλαστικοποιητή σε συνδυασμό με 15% ίνες αυξήθηκε σημαντικά η ηλεκτρική αγωγιμότητα. Τέλος, [134] η προσθήκη διαφορετικών περιεχομένων MWCNTs (διάμετρος 60 nm και μήκος 15 nm) έως 15%, κατά βάρος, σε πάστες τσιμέντου οδήγησε σε αύξηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας καθώς τα MWCNTs αυξάνονταν, εκ των οποίων διαφορά τάσης στην αγωγιμότητα παρατηρήθηκε στα δείγματα ελέγχου σε σύγκριση με αυτά που περιείχαν 15% MWCNTs.

Από τις παραπάνω μελέτες, μπορεί να συναχθεί το συμπέρασμα ότι η προσθήκη CNTs στη μήτρα αύξησε την ηλεκτρική αγωγιμότητά της. Σε χαμηλή συγκέντρωση CNTs, η αγωγιμότητα των σύνθετων υλικών παραμένει πολύ κοντά σε εκείνο της απλής μήτρας. Όταν χρησιμοποιείται συγκέντρωση CNTs μέχρι κάποιο συγκεκριμένο βέλτιστο ποσοστό, η αγωγιμότητα των σύνθετων υλικών γίνεται εξαιρετικά αυξημένη. Αυτό συμβαίνει λόγω του εξαιρετικά υψηλού λόγου διαστάσεων και της χαμηλής πυκνότητας των CNTs, τα οποία τους καθιστούν εύκολο να διαμορφώσουν ένα αγωγίμο δίκτυο ενώ το πόσο έντονη θα είναι η ηλεκτρική αγωγιμότητα είναι εξαρτάται από τη συγκέντρωση των CNTs.

4.5.2. Ηλεκτρική αντίσταση

Σε έρευνα [135] η ενίσχυση παστών τσιμέντου με 0,1% MWCNTs (διάμετρος 20-40 nm και μήκος 10-100 nm), κατά βάρος, διασκορπισμένων με επιφανειοδραστική και υπερήχους μείωσαν την ηλεκτρική αντίσταση. Σε άλλη έρευνα [136] η προσθήκη 0,15% και 0,3% MWCNTs (διάμετρος 12-40 nm και μήκος 10 nm), κατά βάρος, σε κονιάματα , διασκορπισμένων σε μίγμα βασισμένο σε πολυκαρβοξυλικό οξύ, παρουσίασαν ασημαντη επίδραση στην ηλεκτρική αντίσταση η οποία κυμάνθηκε σε σχετικά περιορισμένο εύρος των 106 -108 Ohm. Επιπλέον, [137] με την προσθήκη 0,1% και 0,5% καρβοξυλικών MWCNTs, κατά βάρος, σε πάστες τσιμέντου, διασκορπισμένων με επιφανειοδραστικό και επεξεργασμένων με υπερήχους παρατηρήθηκε μείωση της ηλεκτρικής αντίστασης η οποία αυξήθηκε με την αύξηση των MWCNTs.

Επιπρόσθετα, [138] σε άλλη έρευνα πραγματοποιήθηκε ενίσχυση παστών τσιμέντου με 0,5% MWCNTs (διάμετρος 10-30 nm και μήκος 0,5-500 nm), κατά βάρος. Χρησιμοποιήθηκαν απλοί νανοσωλήνες ή με κατεργασία με H₂SO₄ και HNO₃. Τα MWCNTs αναμίχθηκαν με νερό και υπέστησαν επεξεργασία με υπερήχους. Τα αποτελέσματα έδειξαν μείωση της ηλεκτρικής αντίστασης με την προσθήκη MWCNTs

ενώ η προσθήκη επεξεργασμένων MWCNTs στο πλέγμα οδήγησε σε χαμηλότερη ηλεκτρική αντίσταση από εκείνη των μη επεξεργασμένων. Ακόμα, [139] η προσθήκη 0,1% και 1% MWCNTs (διάμετρος 10-20 nm και μήκος 5-15 nm), κατά βάρος, σε τσιμέντοπάστες διασκορπισμένων με επιφανειοδραστικό επέφερε σημαντική μείωση της ηλεκτρικής αντίστασης με αυτήν των 1% MWCNTs ενώ [140] μείωση παρατηρήθηκε στην ηλεκτρική αντίσταση των σύνθετων υλικών με την προσθήκη 0,5%, 1% και 1,5% SWCNTs. Η μείωση αυτή αυξήθηκε με την αύξηση του περιεχομένου των SWCNTs. Σε άλλη έρευνα [141] η προσθήκη 0.1%, 0.5% και 2% MWCNTs (διάμετρος <8 nm και μήκος 10-30 nm), κατά βάρος, σε πάστες τσιμέντου, διασκορπισμένων από πολυκαρβοξυλικό SP, οδήγησε σε μείωση της ηλεκτρικής αντίστασης με την αύξηση των ποσοστών ενώ η [142] πρόσθηκη 0.1-0.2% MWCNTs σε πάστες τσιμέντου επέφεραν μείωση της ηλεκτρικής αντίστασης. Η μείωση αυτή αυξήθηκε με την αύξηση των MWCNTs. Τέλος, [143] η προσθήκη 1% SWCNTs και 1% ή 3% MWCNTs σε πάστες τσιμέντου μείωσε την ηλεκτρική αντίσταση.

4.5.3. Πιεζοηλεκτρική ευαισθησία

Ερευνητές [133] πρόσθεσαν 0,1% MWCNTs (διάμετρος 10-20 nm και μήκος 10-30 nm), σε βάρος, σε συνδυασμό με 15% ίνες άνθρακα σε πάστες τσιμέντου, διασκορπισμένους σε υπερπλαστικοποιητή. Παρατηρήθηκε ότι η προσθήκη MWCNTs σχημάτισε αγωγίμα υλικά με βάση το τσιμέντο τα οποία ήταν πιεζοηλεκτρικά και μπορούν να παράγουν εξαιρετικούς αισθητήρες. Επιπρόσθετα, [132] ενίσχυση 0.1% MWCNTs (διάμετρος <8 nm και μήκος 10-30 nm), κατά βάρος, σε πάστες τσιμέντου, διασκορπισμένων με επιφανειοδραστικό, οδήγησαν στο συμπέρασμα ότι η πιεζοηλεκτρική ευαισθησία των σύνθετων υλικών εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από το περιεχόμενο σε νερό. Ειδικότερα, η πιεζοηλεκτρική ευαισθησία των σύνθετων τσιμέντων με περιεκτικότητα σε νερό 0,1%, 1,3%, 3,3%, 5,7%, 7,6% και 9,9% ήταν 0,0, 0,61, 0,73, 0,68, 0,34 και 0,06 kΩ / MPa, αντίστοιχα. Αυτό σημαίνει ότι η πιεζοηλεκτρική ευαισθησία αρχικά αυξήθηκε και στη συνέχεια μειώθηκε με την αύξηση της περιεκτικότητας σε νερό. Σε άλλη έρευνα, [100] η προσθήκη 0,5% μη τροποποιημένων και τροποποιημένων MWCNTs (διάμετρος 10-30 nm και μήκος 0.5-500 nm) επέφεραν βελτίωση της πιεζοηλεκτρικής ιδιότητας η οποία ήταν υψηλότερη στην περίπτωση χρήσης τροποποιημένων MWCNTs. Ακόμα, [144] με την προσθήκη 0,1%, 0,3% και 0,5% MWCNTs (διάμετρος 5-15 nm και μήκος 10 nm), κατά βάρος σε κονιάματα, όπου χρησιμοποιήθηκαν τρεις διαφορετικές αναλογίες w / b των 0,4, 0,5 και 0,6, εξάχθηκε το συμπέρασμα ότι μειώνοντας τον λόγο w / b, τόσο η σταθερότητα της πιεζοηλεκτρικής ευαισθησίας υπό κυκλική φόρτιση όσο και η χρονική ευαισθησία τους θα μπορούσαν να βελτιωθούν. Αυτό θα μπορούσε να αποδοθεί στην ταχεία συμπεριφορά ανάκαμψης-ανάκτησης των καλά διασκορπισμένων δικτύων MWCNTs με την μήτρα τσιμέντου όταν τα σύνθετα υλικά ήταν υπό κυκλική φόρτωση. Τέλος, [141] η προσθήκη 0,1%, 0,5% και 2% MWCNTs (διάμετρος <8 nm και μήκος 10-30 nm), κατά βάρος, σε πάστες τσιμέντου διασκορπισμένων με πολυκαρβοξυλικό υπερπλαστικοποιητή, οδήγησε σε αύξηση της πιεζοηλεκτρικής ευαισθησίας με την αύξηση του περιεχομένου σε MWCNTs.

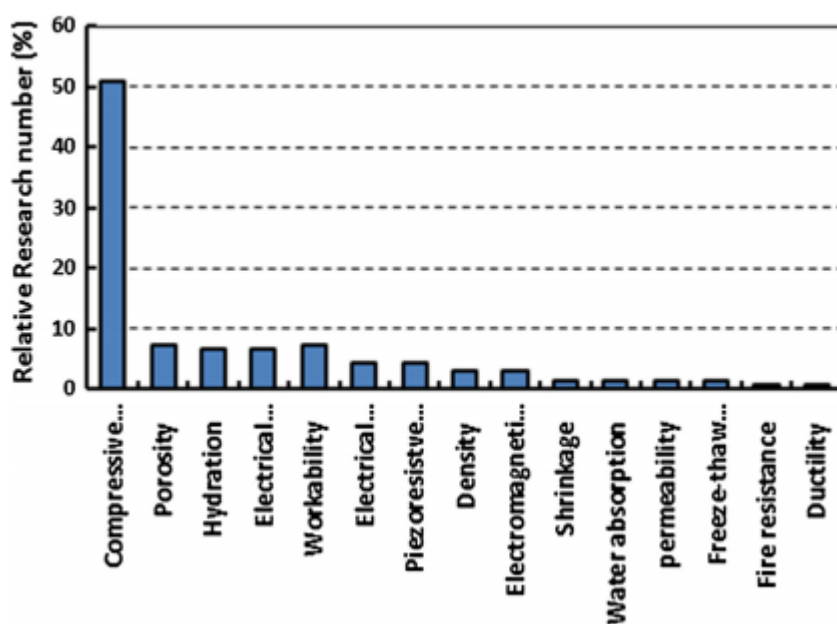
Από τις προαναφερθείσες παραπομπές, μπορεί να συναχθεί το συμπέρασμα ότι η προσθήκη CNT στην μήτρα αύξησε την πιεζοηλεκτρική ευαισθησία της. Αυτό το αποτέλεσμα είναι αναμενόμενο επειδή η προσθήκη CNT στην μήτρα αύξησε την ηλεκτρική αγωγιμότητά της και μείωσε την ηλεκτρική της αντίσταση. Στην πραγματικότητα, οι CNTs έχουν ενδιαφέρουσες πιεζοηλεκτρικές ιδιότητες αφού όταν τα CNT εκτίθενται σε καταπόνηση, οι ηλεκτρικές τους ιδιότητες άλλαξαν ανάλογα με το επίπεδο καταπόνησης, σχηματίζοντας μία γραμμική και αντιστρέψιμη πιεζοηλεκτρική ανταπόκριση ακόμη και για μεγάλο φορτίο της τάξης του 3,4% [145]. Επομένως, τα σύνθετα υλικά από τσιμέντο/ CNTs έχουν τη δυνατότητα να αντληθούν μικροσκοπικά δομικά ελαττώματα πριν αυτά γίνουν σημαντικά, η οποία θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την παρακολούθηση της εσωτερικής κατάστασης των δομών [143]. Οι πιεζοηλεκτρικές ιδιότητες των νανοσύνθετων υλικών εξαρτώνται από πολλούς παράγοντες όπως ο τύπος CNT, η συγκέντρωση, η επιφανειακή κατάσταση, η περιεκτικότητα σε νερό κλπ. Παρατηρήθηκε ότι η πιεζοηλεκτρική αντίσταση αυξήθηκε με υψηλή περιεκτικότητα αλλά και με τροποποιημένα CNT. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι η προσθήκη λεπτών αδρανών όπως η άμμος μείωσε την ευαισθησία της πιεζοηλεκτρικής απόκρισης των νανοσύνθετων ακόμη αν και χρησιμοποιήθηκε υψηλότερη συγκέντρωση CNTs.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

5.1. Ανθεκτικότητα και αντοχή στην διείσδυση χλωριόντων σε κονιάματα ενισχυμένα με νανοϋλικά

Η ανθεκτικότητα είναι ένα θέμα μείζονος σημασίας και παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην εφαρμογή των υλικών με βάση το τσιμέντο, αφού επηρεάζει ιδιαίτερα την ασφάλεια και τη διάρκεια ζωής διαφόρων κτιρίων και κατασκευών. Περιλαμβάνει κυρίως την αντοχή στην ψυξη-απόψυξη καθώς και την αντοχή στην διάβρωση, δηλαδή την ενανθράκωση και την διάβρωση από διείσδυση χλωριόντων (πχ. θαλασσινό νερό). Θεωρητικά είναι εφικτό να χρησιμοποιηθούν CNTs / CNFs για να βελτιωθεί η ανθεκτικότητα των υλικών με βάση το τσιμέντο αφού αυτή επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες, μεταξύ των οποίων οι σημαντικότεροι είναι το πορώδες και τα χαρακτηριστικά των πόρων του τσιμέντου. Τα CNTs / CNFs έχουν το φαινόμενο πλήρωσης για τους μικροπόρους και μπορούν να βελτιώσουν και να βελτιστοποιήσουν αποτελεσματικά την πορώδη δομή των υλικών με βάση το τσιμέντο. Επιπλέον, η δύναμη και η συμπύκνωση των υλικών αυτών ενισχυμένων με CNTs / CNFs μπορεί επίσης να μειώσει τη φθορά και τη διαπερατότητά τους επιτυγχάνοντας βελτίωση της ανθεκτικότητας [94]. Ωστόσο, επί του παρόντος, οι έρευνες για το συγκεκριμένο θέμα εξακολουθούν να είναι σπάνιες και τα αποτελέσματα των ερευνών αυτών δεν είναι ακριβώς συνεπείς.

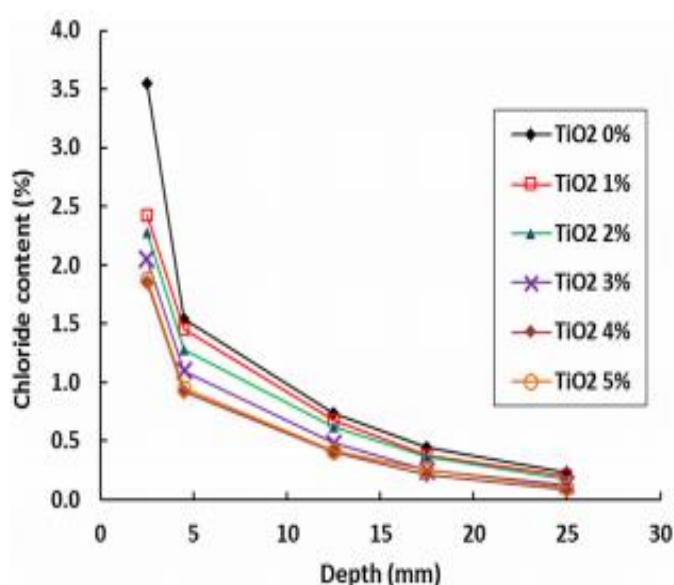
Πιο συγκεκριμένα, ερευνητές [120] διαπίστωσαν ότι τα MWCNT θα μπορούσαν να μειώσουν την απορρόφηση νερού, τη διαπερατότητα του νερού και τη διαπερατότητα του αέρα των υλικών από τσιμέντο ενώ άλλοι [121] [89] βρήκαν ότι τα CNT θα μπορούσαν να μειώσουν τη διαπερατότητα και τη διάβρωση από επιβλαβή ιόντα. Ωστόσο, άλλοι ερευνητές ανέφεραν διαφορετικά συμπεράσματα. Ειδικότερα, [122] σχεδίασαν μια επιταχυνόμενη δοκιμή διείσδυσης ιόντων χλωρίου για την αξιολόγηση της ανθεκτικότητας του τσιμεντοκονιάματος που έχουν τροποποιηθεί με CNTs. Το πείραμα αναπτύχθηκε με βάση τα γνήσια πρότυπα της δοκιμής διαπερατότητας και επιτάχυνε τη διαδικασία διαπερατότητας. Τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι οι CNTs δεν κατέδειξαν προφανή βελτίωση της αντοχής έναντι της διείσδυσης του χλωριούχου ιόντος στην τσιμεντοκονία. Παρομοίως, [123] διαπιστώθηκε ότι η ενσωμάτωση των CNTs αύξησε ελαφρώς το πορώδες του τσιμέντου γεγονός που επιδείνωσε τη μείωση της απόδοσης του μετά την ενανθράκωση και προήγαγε την εισβολή ιόντων χλωριδίου. Τέλος, σε πρόσφατη έρευνα που διεξήχθει, παρατηρήθηκε ότι η ενσωμάτωση των CNTs είχε μικρή επίδραση στην αντοχή διείσδυσης των χλωριόντων σε σκυρόδεμα, ανεξάρτητα από τον τύπο τους. Η μείωση του συντελεστή διάχυσης ήταν μόνο έως 12% σε σύγκριση με το σκυρόδεμα αναφοράς. Αυτή η μείωση ήταν σύμφωνη με τα αποτελέσματα απορρόφησης, στην οποία ο μηχανισμός γεφύρωσης των CNTs ήταν λιγότερο σημαντικός. Τα αποτελέσματα μπορεί να αποδοθούν στην ενσωμάτωση υπερβολικής ποσότητας CNTs στη μήτρα τσιμέντου.



Σχήμα 5.1. Σχετικός αριθμός έρευνας έναντι της επίδρασης των CNTs σε κάθε ιδιότητα των παραδοσιακών τσιμεντοειδών υλικών.

Όσον αφορά την ενίσχυση υλικών από τσιμέντο με άλλου είδους νανοϋλικά, μελετήθηκε η επίδραση νανο-TiO₂ σε δείγματα σκυροδέματος σε σχέση με την διείσδυση χλωριόντων σε διαφορετικά βάθη [87]. Μετά από 90 ημέρες σκλήρυνσης, κυβικά δοκίμια 150 mm X 150 mm X 150mm βυθίστηκαν σε διάλυμα NaCl 3% για 90

ημέρες. Για τη δημιουργία του προφίλ των χλωριόντων, δείγματα συλλέχθηκαν με διάτρηση σε διαφορετικά βάθη δειγμάτων. Η σύσταση ASTM C114 ακολουθήθηκε για τον προσδιορισμό της συνολικής περιεκτικότητας σε χλωριόντα (% βάρους όγκου σκυροδέματος) στα δείγματα σκόνης. Χαμηλότερη περιεκτικότητα βρέθηκε στα δείγματα που έγιναν με υψηλότερα ποσοστά νανοσωματιδίων TiO_2 όπως φαίνεται στο σχήμα 13. Οι ερευνητές κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι τα νανοσωματίδια στην πάστα τσιμέντου ενεργούν ως πυρήνες που προάγουν την ενυδάτωση με αποτέλεσμα την πυκνότερη μικροδομή στη μήτρα. Συνεπώς, παρατηρήθηκε ότι με την αύξηση της περιεκτικότητας σε νανοσωματίδια είχαμε μικρότερη διείσδυση χλωριόντων στα δείγματα. Άλλοι ερευνητές [124] διεξήγαγαν δοκιμές ταχείας διείσδυσης χλωριόντων (RCPT) σε δείγματα από σκυρόδεμα με νάνο ζεόλιθο (NZ30) και σε σκυρόδεμα αναφοράς (NZ0). Στην περίπτωση εκτέλεσης της δοκιμής μετά από 28 ημέρες ο συντελεστής διαπερατότητας για το NZ30 καταγράφηκε μόνο ως 27% σε σχέση με αυτόν του NZ0 και μόλις το 8,2% της τιμής NZ0 μετά από 90 ημέρες της σκλήρυνσης.



Σχήμα 5.2. Επίδραση των νανοσωματιδίων TiO_2 στην διείσδυση χλωριόντων σε σκυρόδεμα.

Ως εκ τούτου, τα αποτελέσματα της προσθήκης νανοϋλικών σχετικά με την ανθεκτικότητα των υλικών με βάση το τσιμέντο χρήζουν περαιτέρω έρευνας και συζήτησης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

6.1. Μεταλλικές ίνες

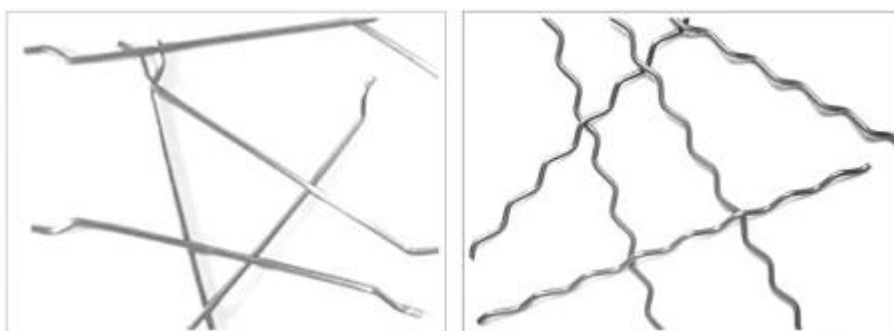
6.1.1. Ορισμός

Οι μεταλλικές ίνες αποτελούν ένα είδος οπλισμού ενώ ειδικότερα για οπλισμό σκυροδέματος ορίζονται ως μικρού, διακριτού μήκους χαλύβδινες ίνες με αναλογία διαστάσεων (αναλογία μήκους προς διάμετρο) από περίπου 20 έως 100, με διαφορετικές διατομές οι οποίες είναι αρκετά μικρές για να διασκορπίζονται τυχαία σε

ένα μη σκληρυμένο μείγμα σκυροδέματος χρησιμοποιώντας τις συνήθεις διαδικασίες ανάμιξης. Μια συγκεκριμένη ποσότητα χαλύβδινων ινών σε σκυρόδεμα μπορεί να προκαλέσει ποιοτικές αλλαγές στις φυσικές ιδιότητες του σκυροδέματος, αυξάνοντας σημαντικά την αντοχή σε ρωγμές, κρούσεις, κόπωση και κάμψη, ανθεκτικότητα καθώς και άλλες ιδιότητες (όπως φαίνεται στην Εικόνα 6.1.). Βασικά, οι χαλύβδινες ίνες μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε πέντε ομάδες, ανάλογα με τη διαδικασία κατασκευής και το σχήμα και / ή το τμήμα της: σύρμα ψυχρής απόρριψης, φύλλο κοπής, εκχύλισμα τήγματος, κομμάτι μύλου και τροποποιημένο ψυχρό σύρμα (όπως φαίνεται στην Εικόνα 6.2.).[147]



Εικόνα 6.1. Μακροσκοπική συμπεριφορά άοπλου σκυροδέματος ενισχυμένου με μεταλλικές ίνες.



Εικόνα 6.2. Είδη μεταλλικών ινών.

6.1.2. Ιδιότητες

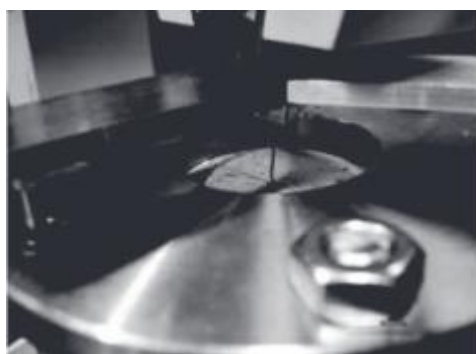
Τα οφέλη που παρέχονται από την προσθήκη τέτοιου είδους μεταλλικών ινών σε υλικά με βάση το τσιμέντο προέρχονται από τους μηχανισμούς ενίσχυσης που αναπτύσσονται κατά τη διάρκεια της διαδικασίας απόσυρσης (pull out) του συστήματος μετά την

έναρξη της ρωγμάτωσης, καθώς μια σημαντική ενέργεια διασκορπίζεται σε αυτήν τη διαδικασία. Η μέγιστη δύναμη απόσυρσης (pull out) και η ενέργεια που διασκορπίζεται κατά τη διάρκεια της διαδικασίας απόσυρσης εξαρτώνται από αρκετές παραμέτρους, όπως: μηχανικές ιδιότητες και γεωμετρικά χαρακτηριστικά των στοιχείων, κλίση της λειτουργίας, μήκος εφαρμογής και ιδιότητες σκυροδέματος. Σε γενικές γραμμές, η μέγιστη δύναμη απόσυρσης και η απορρόφηση ενέργειας αυξάνονται με κλίση (έως περίπου 30 °), την ύπαρξη μηχανισμών συγκόλλησης, κόλλας και αγκύρωσης για τις ίνες (μηχανικές και χημικές επεξεργασίες), το μήκος των ινών, καθώς και την αντοχή της μικροδομής του υλικού που τις περιβάλλουν.

Ωστόσο, εάν προκύψει ρήξη κατά τη διάρκεια της διαδικασίας απόσυρσης (pull out), τα οφέλη που μπορεί να προσφέρει η προσθήκη τέτοιων ινών σε υλικά με βάση το τσιμέντο μπορεί να είναι οριακά, υποδεικνύοντας ότι ο τύπος λειτουργίας πρέπει να επιλεγεί λαμβάνοντας υπόψη τις ιδιότητες του σκυροδέματος. Η επιρροή του προσανατολισμού των ινών στην απόδοση των ινών κατά την διάρκεια του pull out αποκαλύπτει ότι για να εκτιμηθεί η αποτελεσματικότητα της ενίσχυσης από τις πειραματικές δοκιμές είναι υποχρεωτικό οι συνθήκες χύτευσης, γεωμετρίας και φόρτισης των δειγμάτων να είναι αντιπροσωπευτικές της πραγματικής εφαρμογής, όσο το δυνατόν περισσότερο.



Εικόνα 6.3. Διάταξη για δοκιμή pull out.



Εικόνα 6.4. Διάταξη για δοκιμή pull out.

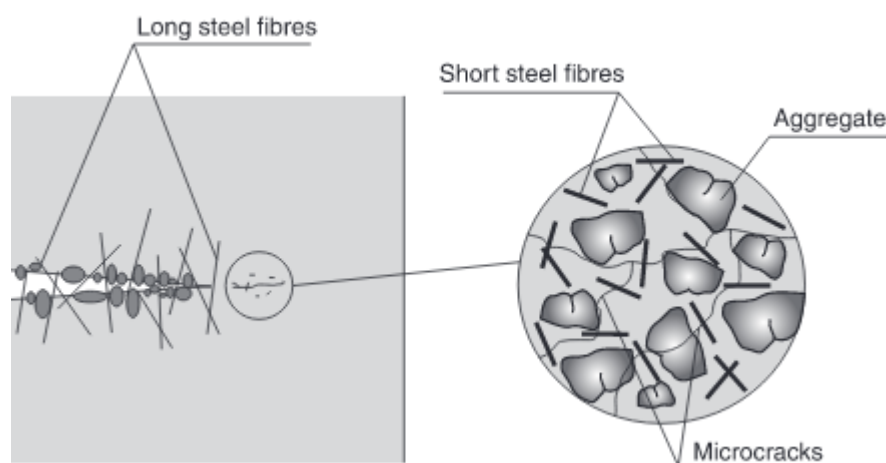
Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας φόρτισης μιας δομής σκυροδέματος με μεταλλικές ίνες, οι ίνες προσφέρουν αντίσταση στο άνοιγμα της ρωγμής, προωθώντας την ανάπτυξη διάχυτων μοτίβων ρωγμών. Ως αποτέλεσμα, η ικανότητα μεταφοράς ενός φορτίου μιας δομής μπορεί να υπερβεί σημαντικά το φορτίο θραύσης, λόγω της ανακατανομής της τάσης που συμβαίνει κατά τη διαδικασία σχηματισμού διάχυτων μοτίβων ρωγμών. Μια άλλη σημαντική πτυχή της εξέλιξης των διάχυτων μοτίβων ρωγμών σχετίζεται με την ανθεκτικότητα των κατασκευών από σκυρόδεμα, καθώς αντιστοιχούν σε ρωγμές μικρότερου πλάτους για επίπεδα φορτίου σε οριακές καταστάσεις συντήρησης.

Η διαφορά μεταξύ του μέγιστου φορτίου (F_u) και του φορτίου ρωγμής (F_{cr}) μιας δομής αυξάνεται με τον πλεονασμό στήριξης αυτής της δομής. Σε δομικά καθορισμένες δομές σκυροδέματος με μεταλλικές ίνες (FRC), τα $F_{cr,i}$ και F_u , είναι πανομοιότυπα στην περίπτωση ανεπαρκούς προσανατολισμού ή το F_u , μπορεί να είναι σημαντικά υψηλότερο από το $F_{cr,i}$ στην περίπτωση του κατάλληλου προσανατολισμού της πορείας. Ο δείκτης i χρησιμοποιείται για να συσχετίσει την οντότητα με στατικό προσδιορισμό δομών. Σε δομές με υψηλή (high) ικανότητα υποστήριξης (ο δείκτης h χρησιμοποιείται για τη σύνδεση της οντότητας με αυτόν τον τύπο δομής) όπως για παράδειγμα με τις πλάκες που υποστηρίζονται στο έδαφος, με υποστυλώματα, κλπ, η διαφορά μεταξύ των $F_{u,h}$ και $F_{cr,h}$ (ΔF_h) είναι, γενικά, πολύ υψηλότερη από το ΔF_i που παρατηρείται σε στατικά καθορισμένες δομές [148,149]

Ο συνδυασμός των ινών με το συμβατικό ατσάλινο οπλισμό χρησιμοποιείται κυρίως για την αύξηση της ικανότητας μεταφοράς φορτίου σε οριακές καταστάσεις συντήρησης και για τη διασφάλιση μοτίβων ρωγμών μικρότερου πλάτους, σε μια προσπάθεια σχεδιασμού δομών υψηλότερης αντοχής. Η υψηλή ροπή κάμψης της διατομής που παρέχεται από τον συγκεκριμένο οπλισμό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για το σχεδιασμό κατασκευών με μεγαλύτερη ολκιμότητα και ικανότητα μεταφοράς φορτίου.

Η ενίσχυση της ανθεκτικότητας σε κάταγμα (χωρητικότητα ενεργειακής απόσβεσης μετά το σπάσιμο) του σκυροδέματος μπορεί να επιτευχθεί είτε με την προσθήκη άλλων στοιχείων διάσπασης ενέργειας στο σκυρόδεμα είτε με την αλλαγή των υφιστάμενων μηχανισμών σκλήρυνσης, προκειμένου να αυξηθεί η ενεργειακή τους ικανότητα. Η προσθήκη μεταλλικών ινών στο σκυρόδεμα ανήκει στην πρώτη εναλλακτική λύση. Η αύξηση της αντοχής του σπασίματος στο FRC είναι συνέπεια της μεγάλης ποσότητας ενεργειακής απόσβεσης μέσω μηχανισμών σκλήρυνσης, όπως η γεφύρωση των ρωγμών και η κάμψη. Η επιρροή των επιπέδων μπορεί να προσεγγιστεί σε δύο διαφορετικά επίπεδα παρατήρησης που βρίσκονται στο μεσο- και στο μακρο-επίπεδο (βλ. Εικόνα 6.5.). Στο μεσοεπίπεδο, κατά τη διάρκεια του σπασίματος και με το σχηματισμό των τυχαία κατανεμημένων μικρορωγμών, οι ίνες συμβάλλουν στην καθυστέρηση των φαινομένων βλάβης, ενισχύοντας την αντίσταση και την ολκιμότητα μέσω της αύξησης της απαγωγής ενέργειας στους προαναφερθέντες μηχανισμούς σκλήρυνσης. Στο μακρο επίπεδο, όταν οι μικρορωγμές αρχίζουν να εντοπίζονται σε μακρορωγμές που διαδίδονται σε μέγεθος κλίμακας κατασκευής, οι ίνες γεφυρώνουν

τις αντίθετες όψεις των ρωγμών και μεταφέρουν δυνάμεις εφελκυσμού μεταξύ τους, βελτιώνοντας την φέρουσα ικανότητα και την ολκιμότητα της κατασκευής. Η βελτιστοποίηση της γεωμετρίας των ινών λαμβάνει υπόψη τις διαφορετικές απαιτήσεις για την παρακολούθηση αυτών των δύο λειτουργιών. Εάν επιδιώκεται η βελτιστοποίηση της υλικής συμπεριφοράς (σε μεσοεπίπεδο), οι ίνες πρέπει να ενεργούν σε επίπεδο μικρορωγμών και συνεπώς πρέπει να είναι πολυάριθμες, με μικρή διάμετρο και αρκετά κοντές, έτσι ώστε η εργασιμότητα και η δυνατότητα τοποθέτησης να μην διακυβεύονται σοβαρά. Εάν η πρόθεση είναι να προσφέρουμε περισσότερη δύναμη και ολκιμότητα από την άποψη της δομικής συμπεριφοράς (σε μακρο-επίπεδο), οι μακρορωγμές πρέπει να γεφυρωθούν με μεγαλύτερες βάσεις, έτσι ώστε να διασφαλιστεί ένα επαρκές μήκος αγκύρωσης. Ένας πολύ μεγάλος λόγος διαστάσεων των υλικών επηρεάζει αρνητικά την εργασιμότητα και τη δυνατότητα τοποθέτησης του σκυροδέματος.



Εικόνα 6.5. Προσέγγιση μέσο και μάκρο επιπέδου.

6.1.3. Εφαρμογές

Οι μεταλλικές ίνες εξακολουθούν να έχουν ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών σε υλικά πολιτικού μηχανικού. Υπάρχουν ορισμένες δομικές εφαρμογές όπου έχουν χρησιμοποιηθεί σε σκυρόδεμα χωρίς συμβατικές ράβδους οπλισμού. Αυτές ήταν βραχείες, υπερυψωμένες πλάκες, για παράδειγμα ένα γκαράζ στάθμευσης στο αεροδρόμιο Heathrow (Λονδίνο, Ηνωμένο Βασίλειο) με πλάκες (1,07 m) τετράγωνες με πάχος (10 cm), υποστηριζόμενες από τέσσερις πλευρές. Σε τέτοιες περιπτώσεις, θα πρέπει να πραγματοποιούνται δοκιμές φορτίου και η κατασκευή των στοιχείων πρέπει να χρησιμοποιεί αυστηρό ποιοτικό έλεγχο (έκθεση ACI, 2002). Το σκυρόδεμα από χάλυβα από ίνες (SFC) έχει επίσης χρησιμοποιηθεί ως πλάκες, σε καταστρώματα γεφυρών, πεζοδρόμια αεροδρομίου, χώρους στάθμευσης και περιβάλλοντα διάβρωσης, καθώς και παγκοσμίως για την παραγωγή πλακών. Το σκυρόδεμα υψηλής αντοχής από ίνες χάλυβα (SFHSC) είναι μια επιλογή για το σχεδιασμό κρίσιμων περιοχών σε αντισεισμικές κατασκευές που εκτίθενται σε κρούση και κόπωση (Brandt, 2008). Αναφέρθηκε ότι η ολκιμότητα και η κατάλληλη δομική σεισμική απόκριση

μπορούσαν να επιτευχθούν χωρίς πρόσθετη λεπτομέρεια σεισμικής ενίσχυσης. Ωστόσο, παιτούνται περεταίρω μελέτες, ώστε οι αξιωματούχοι του κτιρίου να δέχονται το FRC ως δομικό υλικό [150].

6.2. Συνδυασμός μεταλλικών ινών και CNTs στο σκυρόδεμα

Ύστερα από μελέτη που πραγματοποιήθηκε [151],[152], εξετάστηκαν οι επιδράσεις των χαλύβδινων ινών και των CNT στις μηχανικές ιδιότητες, στις ηλεκτρικές ιδιότητες και στην ικανότητα αυτοανίχνευσης του UHPC (ultra high performance concrete). Για την συγκεκριμένη μελέτη χρησιμοποιήθηκαν, τέσσερις διαφορετικοί τύποι χαλύβδινων ινών, δηλ. S65, S97.5, S100 και T100, σε 2% κατ' όγκο ενώ ενσωματώθηκαν και 0,5% CNTs. Επιπλέον, το απλό UHPC με μόνο CNTs κατασκευάστηκε ως δείγμα ελέγχου. Με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα και τις αναλύσεις δεδομένων, εξάχθηκαν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

1. Η αντοχή σε θλίψη και το μέτρο ελαστικότητας του UHPC με CNTs βελτιώθηκαν σημαντικά ενσωματώνοντας χαλύβδινες ίνες 2%.
2. Οι αρχικές ρωγμές και οι τελικές αντοχές εφελκυσμού του UHPC βελτιώθηκαν με την προσθήκη χαλύβδινων ινών. Επιπλέον, η απόλυτη αντοχή σε εφελκυσμό και η ικανότητα καταπόνησης του UHPFRC αυξήθηκαν αυξάνοντας τον λόγο διαστάσεων των χαλύβδινων ινών και χρησιμοποιώντας στριμμένες ίνες.
3. Η υβριδική χρήση χαλύβδινων ινών και CNT βελτίωσε σημαντικά την απόδοση εφελκυσμού μετά την ρηγμάτωση του UHPC, συμπεριλαμβανομένης της αντοχής σε εφελκυσμό και της ολκιμότητας μετά την αιχμή, σε σύγκριση με τη χρήση μόνο των CNT. Επίσης, η προσθήκη μόνο 0,5% CNTs στο μίγμα UHPC δεν έδωσε ξεκάθαρη ικανότητα γεφύρωσης των ρωγμών σε σχέση με αυτό όπου χρησιμοποιήθηκαν και τα δύο υλικά. Συνεπώς, η προσθήκη CNTs και χαλύβδινων ινών δίνει την δυνατότητα γεφύρωσης των ρωγμών και συνεπώς μείωση του ρυθμού διάβρωσης του υλικού.
4. Παρατηρήθηκε ότι το μίγμα UHPC με μόνο CNTs είχε μεγάλη ηλεκτρική αντίσταση ενώ αντίθετα στο μίγμα στο οποίο είχαν προστεθεί οι χαλύβδινες ίνες παρατηρήθηκε μεγάλη μείωση της ηλεκτρικής αντίστασης. Συνεπώς, η υβριδική χρήση ινών χάλυβα και CNT μπορεί να βελτιώσει την αγωγιμότητα του UHPC με συνέπεια την δημιουργία της ικανότητας αυτοανίχνευσης για καταστροφές στον συγκεκριμένο τύπο σκυροδέματος.

Άλλη έρευνα [153] διερεύνησε τη σκοπιμότητα χρήσης υβριδικού πολυαιθυλενίου (PE) και ενισχυμένου με ίνες χάλυβα τσιμέντου (Hy-FRCC) με την προσθήκη νανοσωλήνων άνθρακα πολλαπλών τοιχωμάτων (MWCNT) ως αισθητήρες καταπόνησης. Το έξυπνο δομικό υλικό που παρουσιάζεται στη μελέτη είναι ένας νέος τύπος σύνθετου τσιμέντου πολλαπλών λειτουργιών με νέες ιδιότητες τόσο δομικά όσο και στον τομέα της αυτοανίχνευσης. Στην συγκεκριμένη έρευνα μελετήθηκε η επίδραση της δοσολογίας MWCNT (1 και 2% κατά βάρος τσιμέντου) και το μέγεθος της επαναλαμβανόμενης θλιπτικής πίεσης σε σχέση με την λειτουργία ανίχνευσης της πίεσης και το μέτρο ελαστικότητας. Τα εφαρμοζόμενα φορτία θλίψης αποτελούνται

από πέντε διαδοχικά επίπεδα (30, 50, 60, 70 και 80% της αντοχής σε θλίψη) του πλάτους πίεσης έτσι ώστε να αξιολογηθεί η επαναλαμβανόμενη ικανότητα ανίχνευσης πίεσης του Hy-FRCC. Τα αποτελέσματα των δοκιμών αποκάλυψαν ότι η ενσωμάτωση του MWCNT εντός 2% έχει μικρή επίδραση στη θλιπτική αντοχή του Hy-FRCC στις 28 ημέρες ενώ υπό επαναλαμβανόμενη συμπίεση, το MWCNT είναι αποτελεσματικό για τη μείωση του μέτρου ελαστικότητας στο Hy-FRCC. Τα πειράματα πιεζοστατικότητας έδειξαν ότι η αλλαγή στην αντίσταση του δείγματος Hy-FRCC-2 (με 2% MWCNT) μπορεί να προσομοιώσει τις αλλαγές στο μετρούμενο στέλεχος κατά τη διάρκεια επαναλαμβανόμενου φορτίου θλίψης σε αυξανόμενα πλάτη τάσης έως και 80% της αντοχής σε θλίψη. Συνεπώς, διαπιστώθηκε ότι το μείγμα Hy-FRCC-2 που προτείνεται στην παρούσα μελέτη είναι πιθανό να χρησιμοποιηθεί ως αισθητήρας πίεσης για την παρακολούθηση της υγείας (SHM) των πολιτικών υποδομών.

Τέλος, άλλη μελέτη [154] εξέτασε για πρώτη φορά τις επιπτώσεις της περιεκτικότητας σε ίνες χάλυβα, του προσανατολισμού των ινών και του νερού πόρων στις ηλεκτρικές και πιεζοανθεκτικές ιδιότητες του UHPFRC. Για αυτό, εξετάστηκαν τρία κλάσματα όγκου ινών χάλυβα (1%, 2% και 3%), δύο μέθοδοι χύτευσης και δύο συνθήκες ξήρανσης (ξηρανση περιβάλλοντος και ξηραντήρα). Επιπλέον, για να διερευνηθεί η επίδραση του περιεχομένου CNT στις ηλεκτρικές και ικανότητες αυτοανίχνευσης του UHPFRC τόσο σε συμπίεση όσο και σε κάμψη, ενσωματώθηκαν επιπλέον τρία κλάσματα όγκου CNTs (0,1%, 0,3% και 0,5%). Με βάση τις παραπάνω συζητήσεις, μπορούν να εξαχθούν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

1. Η αύξηση της ποσότητας χαλύβδινων ινών και νερού πόρων στο UHPFRC αυξάνει την αγωγιμότητά του. Η ηλεκτρική αντίσταση του UHPFRC επηρεάστηκε αισθητά από τον προσανατολισμό των ινών και την περιεκτικότητα σε νερό πόρων, αλλά αυτές οι επιδράσεις έγιναν ασήμαντες υπό συνθήκες υψηλότερης περιεκτικότητας σε ίνες χάλυβα. Έτσι, η αντίσταση του UHPFRC δεν επηρεάστηκε αισθητά από τη μέθοδο χύτευσης και το περιεχόμενο πόρων σε νερό σε κλάσμα όγκου ινών 3%.
2. Η προσθήκη μόνο χαλύβδινων ινών ήταν ανεπαρκής για να προσδώσει πιεζοηλεκτρικές ιδιότητες στο UHPFRC, αν και επέτρεψε την ανίχνευση της τελικής αστοχίας.
3. Η ηλεκτρική αντίσταση του UHPFRC μειώθηκε ουσιαστικά συμπεριλαμβάνοντας CNTs. Παρόλο που η χρήση υπερήχων βελτίωσε την ηλεκτρική αγωγιμότητα του UHPFRC με 0,5% vol CNTs, η βελτίωση δεν ήταν αρκετή για να δικαιολογήσει τη χρήση της συγκεκριμένης μεθόδου
4. Η αντοχή σε θλίψη του UHPFRC μειώθηκε ενσωματώνοντας CNTs. Ωστόσο, η προσθήκη CNTs στο UHPFRC προσέδωσε μια ικανότητα αυτοανίχνευσης η οποία ενεργοποιήθηκε από το σχηματισμό ρωγμών. Επιπλέον, παρατηρήθηκε ότι με την προσθήκη μεγαλύτερης ποσότητας CNTs αυξήθηκε η παραπάνω ιδιότητα.

5. Τέλος, η ικανότητα αυτοανίχνευσης προ ρωγμάτωσης του UHPFRC με CNTs ήταν πιο αποτελεσματική σε κατάσταση εφελκυσμού σε σχέση με αυτήν της θλίψης.

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

7.1. Σκοπός

Είναι γνωστή η δυνατότητα των νανοσωλήνων άνθρακα να μεταβάλλουν τόσο τις μηχανικές ιδιότητες του σκυροδέματος όσο και την συμπεριφορά σε διάβρωση του οπλισμένου σκυροδέματος.

Η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία έχει ως στόχο την εξαγωγή συμπερασμάτων τόσο για την διάβρωση του οπλισμού μιας κατασκευής με προσθήκη προϊόντων νανοτεχνολογίας και πιο συγκεκριμένα με νανοσωλήνες άνθρακα, σε διαβρωτικό περιβάλλον όσο και για ορισμένες βασικές μηχανικές ιδιότητες του άοπλου σκυροδέματος.

Αναλυτικότερα, η προσθήκη νανοσωλήνων άνθρακα προβλέπεται ότι θα προκαλέσει αύξηση αντοχής και μείωση του πορώδους στο κονίαμα με αποτέλεσμα την μείωση της διάβρωσης των οπλισμών. Όμως, ταυτόχρονα προβλέπεται ότι η επαφή χάλυβα με άνθρακα οδηγεί σε γαλβανικό στοιχείο με αποτέλεσμα την διάβρωση του χάλυβα.

Είναι σημαντικό να εξεταστεί ποιο από τα προαναφερθέντα αποτελέσματα θα καθορίσει την πορεία της διάβρωσης του οπλισμού.

Με άλλα λόγια, η πειραματική διαδικασία της συγκεκριμένης μεταπτυχιακής χωρίζεται σε 2 ξεχωριστά μέρη. Το ένα είναι η εξέταση της επίδρασης των νανοσωλήνων άνθρακα στην διάβρωση του οπλισμού τσιμεντοκονιαμάτων και το δεύτερο η μεταβολή του συγκεκριμένου πρόσθετου στις μηχανικές ιδιότητες του άοπλου σκυροδέματος.

Ο έλεγχος της ανθεκτικότητας των οπλισμένων κονιαμάτων μελετήθηκε με τους εξής τρόπους:

- Μέτρηση του δυναμικού διάβρωσης του χάλυβα και κατασκευή καμπυλών δυναμικού-χρόνου.

Ο έλεγχος της μεταβολής των μηχανικών ιδιοτήτων του άοπλου σκυροδέματος λόγω προσθήκης νανοσωλήνων άνθρακα μελετήθηκε με τους εξής τρόπους:

- Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη
- Αντοχή σε εφελκυσμό
- Αντοχή σε κάμψη

7.2. Πρώτες ύλες

Το πρώτο μέρος (Α) της πειραματικής διαδικασίας της εργασίας περιλάμβανε την κατασκευή 18 δοκιμίων οπλισμένου τσιμεντοκονιάματος αναφοράς (REF) και 18 δοκιμίων οπλισμένου τσιμεντοκονιάματος τα οποία περιείχαν 0,2 % νανοσωλήνες άνθρακα (CNTs). Οι πρώτες ύλες για την παρασκευή των τσιμεντοκονιαμάτων καθώς και τα τεχνικά χαρακτηριστικά των νανοσωλήνων άνθρακα που χρησιμοποιήθηκαν δίνονται αναλυτικά παρακάτω.

(Α) Οπλισμένα Τσιμεντοκονιάματα

Για την διεξαγωγή της πειραματικής διαδικασίας κατασκευάστηκαν δοκίμια, τα οποία αποτελούνταν από τσιμέντο, αδρανή και νερό σε αναλογία 1 : 3 : 0.5. Η ακριβής σύσταση, καθώς και οι προδιαγραφές που τηρήθηκαν για κάθε υλικό αναφέρονται στις επόμενες ενότητες αναλυτικότερα.

Τσιμέντο

Το τσιμέντο το οποίο χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία είναι τύπου CEM II 32.5N και η ακριβής σύστασή του δίνεται στον παρακάτω πίνακα.

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	CaO _(f)	LOI
20.67	4.99	3.18	63.60	2.73	0.37	0.29	2.414	2.41	2.52

Πίνακας 7.1. Χημική σύσταση τσιμέντου.

Σύμφωνα με τον Ελληνικό κανονισμό τσιμέντου που ισχύει με σχετικό προεδρικό διάταγμα (ΠΔ) από το 1980 προβλέπεται ότι το τσιμέντο τύπου II αποτελείται από τσιμέντο Portland με έως 20% φυσική ή τεχνητή ποζολάνη. Ο αριθμός 32.5 αναφέρεται στις μηχανικές ιδιότητες. Συγκεκριμένα, αναφέρεται ότι αναπτύσσει αντοχές σε θλίψη μεγαλύτερες από 15 N/mm² μετά το πέρας 7 ημερών, ενώ μετά από 28 ημέρες κυμαίνεται από 25 έως 45 N/mm². Σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C 150 ο συγκεκριμένος τύπος τσιμέντου είναι γενικής χρήσης και προτιμάται όταν απαιτείται ενδιάμεση αντοχή στην επίδραση θειϊκών αλάτων ή ενδιάμεση θερμότητα ενυδάτωσης.

Αδρανή

Τα χρησιμοποιούμενα αδρανή πρέπει να είναι σύμφωνα με την προδιαγραφή EN 12620, εφόσον πρόκειται για κανονικά ή βαριά αδρανή και την προδιαγραφή EN 13055-1, εφόσον πρόκειται για ελαφροβαρύ αδρανή. Στην παρούσα εργασία ως αδρανές υλικό χρησιμοποιήθηκε άμμος, η οποία πληρεί όλες τις απαιτούμενες

προδιαγραφές. Η κοκκομετρική διαβάθμιση της άμμου που χρησιμοποιήθηκε δίδεται στον παρακάτω πίνακα.

Διάμετρος κόκκων	% Σύσταση
4 mm < d	2.80
2 mm < d < 4 mm	30.60
1 mm < d < 2 mm	25.43
500 μm < d < 1 mm	14.22
250 μm < d < 500 μm	9.42
d < 250 μm	16.53

Πίνακας 7.2. Κοκκομετρική διαβάθμιση άμμου.

Νερό

Για το νερό που χρησιμοποιείται για την παρασκευή του τσιμεντοκονιάματος υπάρχει μια ανοχή σχετικά με την ποιότητά του, σε αντίθεση με τα νερά που δρουν εξωτερικά και μόνιμα. Και αυτό γιατί η ποσοστιαία αναλογία του νερού ανάμιξης, και συνεπώς και κάθε ξένη ουσία μέσα σε αυτό, είναι μικρή και εξάλλου οι ουσίες αυτές δρουν μέχρι να εξαντληθούν.

Το χρησιμοποιούμενο νερό πρέπει να ανταποκρίνεται στην προδιαγραφή EN 1008, ενώ η χρησιμοποίηση νερού από ανακύκλωση πρέπει να γίνεται με βάση το παράρτημα Α της ίδιας προδιαγραφής.

Στην παρούσα εργασία, για την παρασκευή των δοκιμίων τσιμεντοκονιάματος και την συντήρησή τους, χρησιμοποιήθηκε νερό της Πολυτεχνιούπολης Ζωγράφου το οποίο θεωρείται κατάλληλο για παρασκευή σκυροδέματος σύμφωνα με το ΕΛΟΤ 452 (Hellenic Organization for Standardization ELOT 452).

Οπλισμός

Τα τσιμεντοκονιάματα που κατασκευάστηκαν στα πλαίσια της πειραματικής διαδικασίας ήταν ενισχυμένα με χαλύβδινες ράβδους. Ο χάλυβας που χρησιμοποιήθηκε ήταν τύπου B500C με διάμετρο 10mm, ύψος 100mm σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ 1421-3 (ΕΛΟΤ1421-3). Η χημική σύσταση του δομικού χάλυβα που χρησιμοποιήθηκε φαίνεται στον παρακάτω πίνακα.

C	Mn	S	P	Si	Ni	Cr	Cu	V	Mo
0.18	0.99	0.047	0.023	0.15	0.09	0.09	0.21	0.002	0.021

Πίνακας 7.3. Χημική σύσταση δομικού χάλυβα.

Νανοσωλήνες άνθρακα (CNTs)

Οι νανοσωλήνες άνθρακα που χρησιμοποιήθηκαν στην πειραματική διαδικασία ήταν πολλαπλών τοιχωμάτων (Multi-Walled CNTs) και τροποποιημένοι ή αλλιώς χημικά επεξεργασμένοι με COOH.

Στον παρακάτω πίνακα δίνονται αναλυτικά τα χαρακτηριστικά των εν λόγω νανοσωλήνων άνθρακα (MWCNTs – COOH).

MWCNT-COOH powder 98%

Test Item	Test Result
Inner Diameter	2-10nm
Out Diameter	<8nm
Length	10-30um
Appearance	Black powder
Surface Specific Area	>500m ² /g
Ash	<2%
COOH	≥0.6000mmol/g
Fe	0.4%
Al	0.5%
M	0.08%

Πίνακας 7.4. Χαρακτηριστικά νανοσωλήνων άνθρακα

Το δεύτερο μέρος (B) της πειραματικής διαδικασίας περιλάμβανε την κατασκευή δοκιμίων άοπλου σκυροδέματος κυβικής και κυλινδρικής διατομής έτσι ώστε να μετρηθεί η αντοχή τους σε θλίψη και εφελκυσμό. Η μία παρτίδα δοκιμίων αφορούσε

τα δοκίμια αναφοράς (REF) ενώ η δεύτερη δοκίμια με 0,2% κ.β. νανοσωλήνες άνθρακα (CNTs).

Σχεδιάστηκε σκυρόδεμα C20/25 χρησιμοποιώντας CEM I 42.5N, θραυστά ασβεστολιθικά αδρανή διάφορης κοκκομετρίας και νερό δικτύου.

Τα χαρακτηριστικά των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν στην παραπάνω διαδικασία παρατίθενται παρακάτω. Να σημειωθεί ότι χρησιμοποιήθηκαν νανοσωλήνες άνθρακα με ακριβώς ίδια χαρακτηριστικά με αυτά του πρώτου μέρους.

<i>physical properties of raw materials</i>							
Materials	Dry Density	Apparent Density	Density in SSD	Dry-rodded density	Water Absorption	Finess Modulus	Moisture Content
	(ρ_{rd})	(ρ_a)	(ρ_{ssd})		(WA24)		
	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[%]	[%]	[%]
Cement	3100	-	-	-	-	-	-
8/20	2381	2670	2471	1560	0,6	-	0
4/10	2300	2670	2418	1560	0,6	-	0
ΑΜΜΟΣ 1	2634	2650	2667	-	2	2,8	0
ΑΜΜΟΣ 2	2616	2650	2687	-	2	2,8	0

Πίνακας 7.5. Φυσικές ιδιότητες πρώτων υλών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

8.1. Περιγραφή πειραματικής διαδικασίας (Μέρος Α – Ηλεκτροχημικές μέθοδοι προσδιορισμού διάβρωσης)

8.1.1. Καθαρισμός χαλύβων και καλουπιών

Πριν ξεκινήσει η διαδικασία κατασκευής των δοκιμών τσιμεντοκονιάματος απαιτείται ο καθαρισμός των ράβδων χάλυβα που θα χρησιμοποιηθούν ως ενίσχυση καθώς και ο καθαρισμός των καλουπιών μέσα στα οποία θα τοποθετηθεί ο τσιμεντοπολτός μέχρι την σκλήρυνση.

Σε ότι αφορά τα καλούπια, απαιτείται πριν από κάθε χρήση τους, καθαρισμός και λείανση της εσωτερικής επιφάνειας έτσι ώστε να αποκολλούνται εύκολα τα δοκίμια μετά την σκλήρυνση του τσιμεντοκονιάματος αλλά και να αποφεύγονται ανωμαλίες στην επιφάνειά τους.

Ο καθαρισμός των ράβδων του χάλυβα είναι χρονοβόρα αλλά απαραίτητη διαδικασία και πραγματοποιείται σε κάθε χάλυβδινη ράβδο πριν από την χρήση της. Αρχικά, οι ράβδοι του χάλυβα τοποθετούνται σε διάλυμα υδροχλωρικού οξέος με αναστολέα διάβρωσης και παραμένουν σε αυτό περίπου 10-15 λεπτά. Στη συνέχεια, ξεπλένονται διαδοχικά με νερό βρύσης, απιονισμένο νερό και τέλος εμβαπτίστηκαν σε ακετόνη. Οι χάλυβες δεν έρχονται σε επαφή με το περιβάλλον και φυλάγονται σε ξηραντήρα αν δεν χρησιμοποιηθούν άμεσα. Η διαδικασία του καθαρισμού του χάλυβα είναι πολύ

σημαντική και γίνεται με σκοπό την ενεργοποίηση της επιφάνειάς του , έτσι ώστε να πραγματοποιηθεί καλύτερη πρόσδεση με το τσιμεντοκονίαμα όταν ο χάλυβας θα τοποθετηθεί μέσα σε αυτό. Τέλος, με την διαδικασία αυτή απομακρύνονται σκόνες και οξειδία από την επιφάνειά του καθώς και άλλα ανεπιθύμητα σωματίδια. Μετά τον καθαρισμό της επιφάνειας κάθε ράβδος ζυγίζεται σε ζυγό ακριβείας και καταγράφεται το βάρος της με ακρίβεια τέταρτου δεκαδικού ψηφίου (ISO/DIS8407.3, 1986).

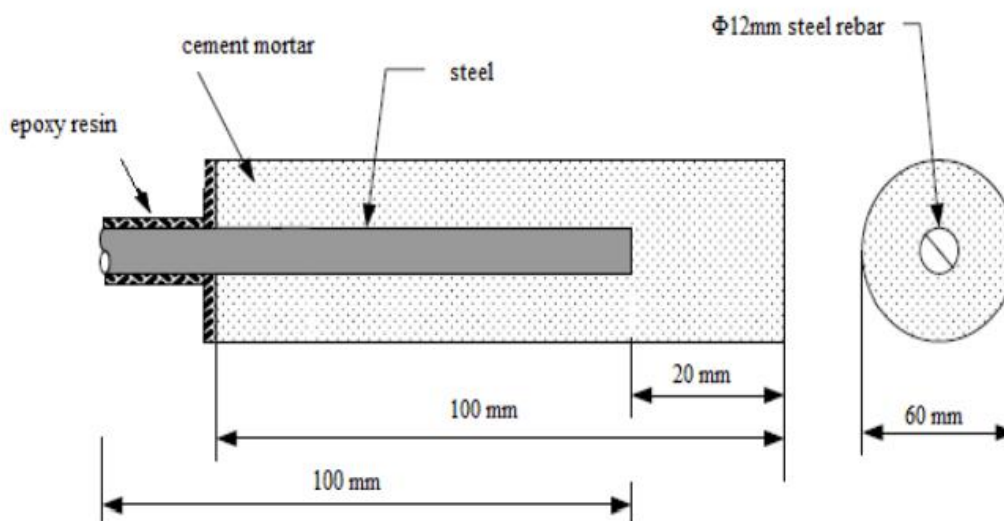


Εικόνα 8.1. Καλούπια από πολυμερές μετά από καθαρισμό για κατασκευή δοκιμίων τσιμεντοκονιάματος.

8.1.2. Κατασκευή δοκιμίων τσιμεντοκονιάματος

Για την κατασκευή δοκιμίων οπλισμένου τσιμεντοκονιάματος χρησιμοποιήθηκε τσιμέντο τύπου CEM II 32,5N, λάμμος θραυστή λατομείου κοκκομετρίας 250 μ m – 4mm και νερό Πολυτεχνειούπολης Ζωγράφου, το οποίο θεωρείται κατάλληλο για παρασκευή σκυροδέματος σύμφωνα με τον ΕΛΟΤ 452. Οι οπλισμοί που χρησιμοποιήθηκαν ήταν τύπου B500C με διάμετρο 10mm, ύψος 100mm και είναι σύμφωνοι με το ΕΛΟΤ 1421-3. Η αναλογία άμμου/τσιμέντου/νερού ήταν 1/3/0,5 και τα δοκίμια ήταν κυλινδρικά με διαστάσεις 40mm διαμέτρου και 100 mm μήκους. Η ανάμιξη των υλικών πραγματοποιήθηκε για 15' με φυσικό μηχανικό τρόπο (χέρια). Εδώ να παρατηρηθεί ότι η ανάμιξη με τα CNTs έγινε πολύ πιο δύσκολα προφανώς λόγω των φυσικών χαρακτηριστικών τους, δηλαδή της απορροφητικότητάς τους. Στην συνέχεια, πραγματοποιήθηκε η χύτευση στα καλούπια τα οποία είναι κατασκευασμένα από πολυμερές ενώ αμέσως μετά πραγματοποιήθηκε το πολύ σημαντικό στάδιο της δόνησης το οποίο δεν έγινε σε τράπεζα αλλά με μικρά, γρήγορα χτυπήματα με εργαλεία. Τέλος, οι χαλύβδινοι οπλισμοί τοποθετήθηκαν ομοαξονικά, όπως φαίνεται

στο Σχήμα 8.1. και πριν από τον εγκιβωτισμό τους καθαρίστηκαν σύμφωνα με το ISO/DIS 8407.310 και ζυγίστηκαν με ακρίβεια 0,1 mg.



Σχήμα 8.1. Εγκιβωτισμός οπλισμών.

Οι οπλισμοί τοποθετήθηκαν κατά 20mm από την βάση του δοκιμίου. Τα δοκίμια παρέμειναν στα καλούπια για 24 ώρες σε περιβάλλον 25°C και στην συνέχεια μετά την απομάκρυνσή τους από αυτά τοποθετήθηκαν για ενυδάτωση 7 ημερών έτσι ώστε να αναπτυχθούν όλες οι αντοχές του τσιμεντού.



Εικόνα 8.2. Νανοςωλήνες άνθρακα διαλυμένοι σε νερό λίγο πριν την ανάμειξη για την κατασκευή ενισχυμένου τσιμεντοκονιάματος.



Εικόνα 8.3. Δοκίμια τσιμεντοκονιάματος με νανοσωλήνες άνθρακα αμέσως μετά την χύτευση στα καλούπια.



Εικόνα 8.4. Δοκίμια αναφοράς τσιμεντοκονιαμάτων (REF) μετά την αφαίρεσή τους από το καλούπι.

8.1.3. Μόνωση οπλισμού

Η αποτελεσματικότητα των νανοσωλήνων άνθρακα θα μελετηθεί με ηλεκτροχημικές μεθόδους στις οποίες μετριέται το δυναμικό διάβρωσης του χάλυβα. Είναι απαραίτητο λοιπόν να δημιουργηθεί ηλεκτρική γέφυρα ανάμεσα στον οπλισμό και στο ηλεκτρόδιο μέτρησης. Η γέφυρα αυτή δημιουργείται περιτυλίγοντας ένα μικρό κομμάτι χάλκινου σύρματος γύρω από τον οπλισμό. Η μέτρηση του δυναμικού επιτυγχάνεται συνδέοντας κάθε φορά το ηλεκτρόδιο μέτρησης με το ελεύθερο άκρο του σύρματος. Ο οπλισμός

όμως πρέπει να μονωθεί από το περιβάλλον και έτσι τοποθετείται πλαστικό υλικό μικρής διαμέτρου γύρω από το προεξέχον άκρο του οπλισμού. Μέσα στο πλαστικό κομμάτι περιχύνεται μίγμα από 2 κόλλες από εποξειδικές ρητίνες σε αναλογία 1:1. Για να μην υπάρχει ροή της κόλλας στην περίμετρο των δοκιμίων τοποθετείται χαρτοταινία γύρω από κάθε δοκίμιο. Η διαδικασία της κόλλας επαναλαμβάνεται 2 ή και 3 φορές, μέχρις ότου υπάρχει πλήρης μόνωση του οπλισμού.

8.1.4. Εμβάπτιση δοκιμίων σε διαβρωτικό περιβάλλον

Τα δοκίμια βυθίστηκαν σε λεκάνη που περιείχε υδατικό διάλυμα χλωριούχου νατρίου 3,5% το οποίο αποτέλεσε το διαβρωτικό τους περιβάλλον και το οποίο προσομοιάζει σε μεγάλο βαθμό συνθήκες σε θαλασσίνο νερό. Το θαλασσίνο νερό είναι κατά προσέγγιση ισοδύναμο με διάλυμα χλωριούχου νατρίου 3,5% κ.β. αλλά στην πραγματικότητα έχει πολύ πιο πολύπλοκη σύνθεση. Χαρακτηριστικά στοιχεία του είναι η αλμυρότητά του (salinity – εκφράζει το συνολικό ποσοστό των διαλυμένων αλάτων) και η περιεκτικότητά του σε χλωρίοντα (chlorinity – εκφράζει το σύνολο των αλογόνων του νερού). Από το πλήθος των οργανικών και ανόργανων μορίων που περιέχει, ορισμένα δημιουργούν σύμπλοκα, έστω και σε ίχνη, που επηρεάζουν σημαντικά τόσο το μηχανισμό της διάβρωσης, όσο και την φυσιολογία των βιολογικών οργανισμών των οποίων η παρουσία στο θαλασσίνο νερό μπορεί να ασκήσει καθοριστική επίδραση στις αντιδράσεις της διάβρωσης. Το pH του φυσικού θαλασσινού νερού κυμαίνεται από 8,1-8,3 αλλά μπορεί να πέσει στο 7 σε στάσιμες κλειστές θάλασσες με σχηματισμό υδρόθειου από αναερόβια βακτηρίδια. Η πειραματική διαδικασία διήρκεσε περίπου 5 μήνες και λαμβάνονταν μία φορά την εβδομάδα μετρήσεις δυναμικού διάβρωσης.



Εικόνα 8.5. Δοκίμια εμβαπτισμένα σε διαβρωτικό περιβάλλον.

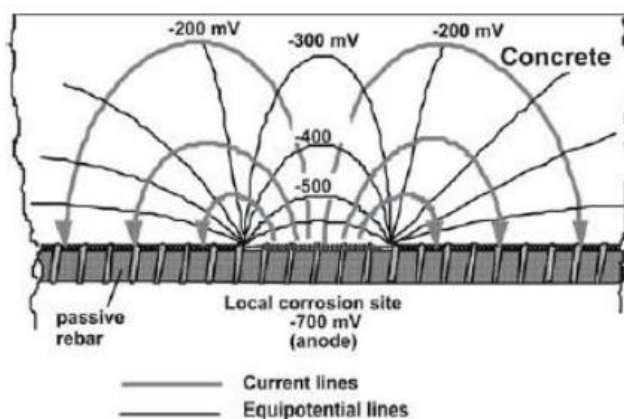
8.2. Μέτρηση δυναμικού διάβρωσης (OCP)

Η χρονική καταγραφή του δυναμικού διάβρωσης (E_{corr}) είναι από τις πλέον συνηθισμένες τεχνικές για την αποτίμηση της διαβρωτικής κατάστασης του χάλυβα και αποτελεί μέθοδο μη καταστρεπτική η οποία επιτρέπει την παρακολούθηση και τον χαρακτηρισμό της κατάστασης του οπλισμού στο σκυρόδεμα συναρτήσει του χρόνου. Μειονέκτημα της μεθόδου είναι ότι δεν δίνει πληροφορίες σχετικά με την κινητική της διάβρωσης με αποτέλεσμα να γίνεται γνωστή η κατάσταση του οπλισμού αλλά όχι ο ρυθμός με τον οποίο εξελίσσεται το φαινόμενο. Η τεχνική της αποτίμησης του δυναμικού διάβρωσης περιγράφεται αναλυτικά στο πρότυπο ASTM C876 – 09.

8.2.1. Αρχή μεθόδου

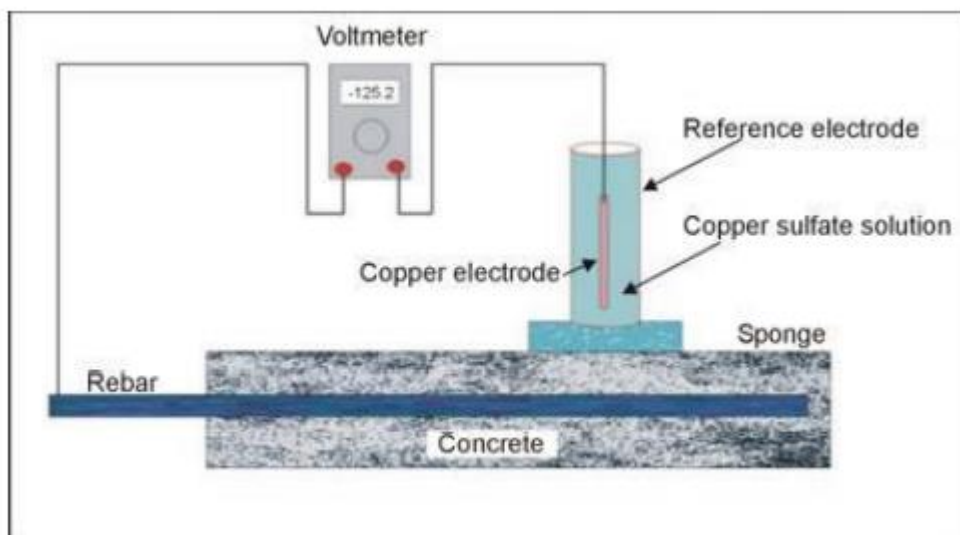
Ως δυναμικό διάβρωσης (E_{corr}) ή δυναμικό ισορροπίας ή δυναμικό ανοιχτού κυκλώματος (E_{OCP}) ορίζεται η διαφορά δυναμικού ανάμεσα στον χαλύβδινο οπλισμό (ημιστοιχείο) και σε ένα ηλεκτρόδιο αναφοράς (ημιστοιχείο). Οι προκύπτουσες τιμές εξαρτώνται από το ηλεκτρόδιο αναφοράς που χρησιμοποιείται και από την κατάσταση του εγκιβωτισμένου χάλυβα.

Οι τιμές του δυναμικού διάβρωσης δεν μετριοούνται άμεσα στην διεπιφάνεια σκυροδέματος/οπλισμού (Σχήμα) λόγω της ύπαρξης του πάχους επικάλυψης του σκυροδέματος. Σαν αποτέλεσμα οι τιμές επηρεάζονται α) από την πτώση του δυναμικού (iR_{drop}) που εμφανίζεται εξαιτίας της επικάλυψης του σκυροδέματος και β) από τα δυναμικά συνένωσης /επαγόμενα ρεύματα (junction potentials).



Σχήμα 8.2. Ηλεκτρικό πεδίο και ροή ρεύματος σε διαβρωμένο χάλυβα λόγω δημιουργίας μικρογαλβανικού στοιχείου.

Όταν επιτευχθεί ηλεκτρολυτική σύνδεση ανάμεσα στον οπλισμό και σε ένα ηλεκτρόδιο αναφοράς, το ηλεκτρικό κύκλωμα είναι κλειστό και το δυναμικό διάβρωσης μπορεί να μετρηθεί με την βοήθεια ενός βολτόμετρου μεγάλης εσωτερικής αντίστασης ώστε το ρεύμα το οποίο διέρχεται από αυτό να είναι πρακτικά μηδενικό όπως και το γινόμενο IR . Η πειραματική διάταξη στην περίπτωση αυτή του οπλισμένου σκυροδέματος για την μέτρηση δυναμικού δίνεται στο παρακάτω Σχήμα.



Εικόνα 8.6. Μέτρηση δυναμικού διάβρωσης του οπλισμού στο σκυρόδεμα

8.2.3. Ηλεκτρόδια αναφοράς

Είναι πάντα απαραίτητο να αναφέρεται το είδος του ηλεκτροδίου αναφοράς που χρησιμοποιείται για τις μετρήσεις του δυναμικού διάβρωσης. Συνήθως στην πράξη χρησιμοποιούνται τα ηλεκτρόδια που αναφέρονται στον παρακάτω Πίνακα όπου δίνεται και η τιμή τους έναντι του πρότυπου ηλεκτροδίου του υδρογόνου (SHE).

Ηλεκτρόδιο	Ονομασία	Δυναμικό έναντι πρότυπου ηλεκτροδίου υδρογόνου
Κεκορεσμένου χαλκού/θεικού χαλκού	CSE	+ 0,318 vs SHE
Κεκορεσμένου καλομέλανα (Hg/Hg ₂ Cl ₂) KCl	SCE	+ 0,241 vs SHE
Χλωριούχου αργύρου (Ag/AgCl) KCl	SSCE	+ 0,199 vs SHE

Πίνακας 8.1. Συνήθη ηλεκτρόδια αναφοράς για μετρήσεις δυναμικού διάβρωσης.

Για επί τόπου μετρήσεις χρησιμοποιείται κυρίως το ηλεκτρόδιο κεκορεσμένου χαλκού/ θεικού χαλκού εξαιτίας του ότι είναι το πιο ανθεκτικό και λόγω του ότι παρέχει μεγάλη ακρίβεια και επαναληψιμότητα στις μετρήσεις. Τα υπόλοιπα δύο ηλεκτρόδια χρησιμοποιούνται κυρίως σε εργαστηριακή κλίμακα. Στην συγκεκριμένη εργασία χρησιμοποιήθηκε αυτό του κεκορεσμένου χαλκού/ θεικού χαλκού.

8.2.4. Κατάσταση οπλισμού σκυροδέματος συναρτήσει δυναμικού διάβρωσης

Η τιμή του δυναμικού διάβρωσης του οπλισμού στο σκυρόδεμα συναρτήσει του χρόνου αποτελεί ένδειξη της κατάστασης του οπλισμού στο σκυρόδεμα, δηλαδή εάν ο

χαλύβδινος οπλισμός βρίσκεται σε ενεργή ή παθητική κατάσταση. Οι τιμές όμως του δυναμικού εξαρτώνται από πολλούς παράγοντες όπως από το πάχος της επικάλυψης, την αντίσταση του σκυροδέματος (περιεχόμενη υγρασία) και την διαθεσιμότητα του οξυγόνου. Παραδείγματα εύρους τιμών δυναμικού για διάφορες συνθήκες σκυροδέματος δίνονται στον παρακάτω Πίνακα.

Κατάσταση σκυροδέματος	Δυναμικό ως προς Cu/CuSO ₄ , sat (V)
Σκυρόδεμα κορεσμένο σε νερό σε περιβάλλον απουσίας οξυγόνου	-0,9...-1,0 V
Σκυρόδεμα με υγρασία και χλωριόντα	-0,4...-0,6 V
Σκυρόδεμα με υγρασία χωρίς χλωριόντα	+0,1...-0,2 V
Ενανθρακωμένο σκυρόδεμα με υγρασία	+0,1...-0,4 V
Ξηρό ενανθρακωμένο σκυρόδεμα	+0,2...0 V
Ξηρό σκυρόδεμα	+0,2...0 V

Πίνακας 8.2. Κατάσταση σκυροδέματος και εύρος τιμών δυναμικού διάβρωσης.

Σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C876-87 οι τιμές του μετρούμενου δυναμικού διάβρωσης αποτελούν ένδειξη για την κατάσταση στην οποία βρίσκεται ο οπλισμός στο σκυρόδεμα. Για την περίπτωση ηλεκτροδίου κεκορεσμένου καλομέλανα οι τιμές διαμορφώνονται όπως φαίνεται στον παρακάτω Πίνακα.

Δυναμικό διάβρωσης (mV) vs SCE	Πιθανότητα διάβρωσης
>-126	Παθητική κατάσταση (90% πιθανότητα, ο οπλισμός δε διαβρώνεται)
-126 to -276	Ασαφής κατάσταση
<-276	Υψηλή (90% κίνδυνος διάβρωσης)
<-426	Διάβρωση σε εκτεταμένο βαθμό

Πίνακας 8.3. Πιθανότητα διάβρωσης ανάλογα με την τιμή του δυναμικού διάβρωσης σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C876-87.

8.3. Περιγραφή πειραματικής διαδικασίας (Μέρος Β – Προσδιορισμός μηχανικών αντοχών)

8.3.1. Ζύγιση υλικών για την σύνθεση των δοκιμίων

Η ζύγιση των υλικών πραγματοποιήθηκε με ζυγό ακριβείας στις ποσότητες που θα χρειαστούν από το κάθε ένα για κάθε σύνθεση. Αφού συγκεντρώναμε όλα τα υλικά στις απαιτούμενες ποσότητες στη συνέχεια ξεκίνησε η σκυροδέτηση.

<i>mix design</i>			
Materials	Quantities for concrete volume		
	0,12	water/cement	0,54
	m (kg)		
Water	24,80		
Cement	45,56		
coarse aggregates 8/20	78,42		
coarse aggregates 4/10	39,21		
ΑΜΜΟΣ	74,38		

Πίνακας 8.4. Ποσότητες πρώτων υλών για την κατασκευή δοκιμίων άοπλου σκυροδέματος.

8.3.2. Σκυροδέτηση

Μετά τη ζύγιση όλων των υλικών πραγματοποιήθηκε η σκυροδέτηση. Κατά τη διαδικασία της σκυροδέτησης προστίθενται στον αναμεικτήρα τα υλικά με την παρακάτω σειρά:

1. Χονδρόκοκκα αδρανή
2. Λεπτόκοκκα αδρανή
3. Ποσότητα νερού αρκετή για την ανάμειξη των παραπάνω (Στην παρτίδα με τους CNTs αυτά αναμείχθηκαν με το νερό)
4. Τσιμέντο
5. Υπόλοιπη ποσότητα νερού

6. Άμμος σε δόσεις

Μετά την εισαγωγή των δύο πρώτων υλικών δηλαδή του συνόλου των αδρανών υλικών και μέρους του νερού γίνεται μια πρώτη ανάδευση και στη συνέχεια προστίθενται το τσιμέντο και το υπόλοιπο νερό και αναμειγνύονται ξανά τα υλικά. Κατά τη διάρκεια της ανάδευσης προστίθενται η άμμος. Τέλος, πραγματοποιείται η μέτρηση της κάθισης.



Εικόνα 8.7. Νανοσωλήνες άνθρακα λίγο πριν την ανάμειξή τους με νερό.



Εικόνα 8.8. Αναμεικτήρας, χαλύβδινα καλούπια και τράπεζα δόνησης λίγο πριν την σκυροδέτηση .



Εικόνα 8.9. Απόθεση υλικών στον αναμεικτήρα για την αρχή της φάσης σκυροδέτησης.

8.3.3. Δοκιμή κάθισης

Κάθιση είναι ένα μέτρο της εργασιμότητας του σκυροδέματος δηλαδή της ευκολίας με την οποία αυτό μεταφέρεται, διαστρώνεται και συμπυκνώνεται και εκφράζεται με την απώλεια ύψους, σε cm, που παρουσιάζει μια κωνική στήλη νεπού σκυροδέματος, όταν ανασυρθεί η κωνική μήτρα (κώνος κάθισης) με την οποία μορφώθηκε (§ 3.20. ΚΤΣ 97).

Εργασιμότητα του σκυροδέματος ονομάζουμε την ευκολία με την οποία το σκυρόδεμα μεταφέρεται, τοποθετείται, δονείται και φινίρεται. Εξαρτάται σαφώς από το λόγο νερού/τσιμέντου και μεταβάλλεται αναλογικά με αυτόν. Η περίσσια νερού, ωστόσο, δημιουργεί πόρους που μειώνουν την αντοχή του μπετόν. Επομένως, επιζητούμε και μεγάλη εργασιμότητα αλλά ταυτόχρονα και υψηλές αντοχές. Για το λόγο αυτό, χρησιμοποιούνται υπερρυστοποιητές ή μεταβολές στον λόγο του νερού/ τσιμέντο.

Για τη μέτρηση που πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C143, χρειαστήκαμε έναν κώνο κάθισης συγκεκριμένων διαστάσεων (διάμετρο κάτω βάσεως 200 ± 2 mm, διάμετρο άνω βάσεως 100 ± 2 mm, ύψος 300 ± 2 mm), μια σέσουλα, μία ράβδο συμπυκνώσεως κυκλικής διατομής $\Phi 16$ mm με στρογγυλεμένα άκρα με την οποία πραγματοποιήθηκαν 25 χτύποι για τις τρεις διαδοχικές ισοπαχείς στρώσεις σκυροδέματος στον κώνο και ένα μέτρο για τη μέτρηση της κάθισης.



Εικόνα 8.10. Εργαλεία για την δοκιμή της κάθισης

Η διαδικασία μέτρησης της τιμής της κάθισης του σκυροδέματος έχει ως εξής:

- Ο κώνος κάθισης τοποθετείται πάνω σε επίπεδη, άκαμπτη, οριζόντια, μη απορροφητική επιφάνεια και διαβρέχεται εσωτερικά, αυτός και η επιφάνεια έδρασης.
- Ο κώνος γεμίζεται με τη σέσουλα σε τρεις στρώσεις ίσου ύψους, με σκυροδέμα από το δείγμα που έχει ληφθεί σύμφωνα με την Προδιαγραφή ΣΚ-350.
- Κάθε στρώση συμπυκνώνεται με 25 κτυπήματα της ράβδου συμπυκνώσεως, που κατανέμονται κατά το δυνατόν ομοιόμορφα στην επιφάνεια του σκυροδέματος. Τα κτυπήματα ξεκινούν από την περίμετρο της μήτρας και με σπειροειδή κίνηση φθάνουν στο κέντρο. Κατά την συμπύκνωση της κατώτερης (πρώτης) στρώσης, η ράβδος βυθίζεται σε όλο το βάθος του σκυροδέματος και, κατά την έμπηξή της, έχει στην αρχή μια μικρή κλίση που βαθμιαία ελαττώνεται, τείνοντας προς την κατακόρυφο. Στη δεύτερη και τρίτη στρώση η ράβδος βυθίζεται σε όλη τη στρώση, εισερχόμενη λίγο (περίπου 1 - 2cm) και στην αμέσως από κάτω της, Στην ανώτερη (τρίτη) στρώση ο κώνος γεμίζεται με περίσσεια σκυροδέματος, που συμπληρώνεται συνεχώς κατά τη διάρκεια συμπύκνωσης
- Ύστερα από τη συμπύκνωση και της ανώτερης στρώσης, αφαιρείται το σκυροδέμα που πλεονάζει και επιπεδώνεται η άνω επιφάνεια του, με παλινδρομική κύλιση της ράβδου συμπυκνώσεως στα χείλη του κώνου.

- Αμέσως μετά το γέμισμα του κώνου και τη συμπύκνωση του σκυροδέματος, καθαρίζεται η περιοχή γύρω από τη βάση του και ο κώνος ανασύρεται αργά, από τις πλευρικές χειρολαβές. Η ανασύρση πρέπει να γίνεται ομαλά, με σταθερή ταχύτητα και κατακόρυφη προς τα πάνω κίνηση, χωρίς στροφή και τραντάγματα, και να ολοκληρώνεται μέσα σε 5 -10 sec (ο παρασκευαστής μετράει αργά από το 1001 έως το 1005). Ολόκληρη η διαδικασία της δοκιμής από την έναρξη του γεμίματος μέχρι την αφαίρεση του κώνου πρέπει να ολοκληρώνεται σε χρόνο μικρότερο των 150 sec.
- Η διαφορά ανάμεσα στο ύψος του κώνου και του υψηλότερου σημείου του σκυροδέματος, που ελευθερούμενο από το μεταλλικό περίβλημα "κάθισε", μετριέται με προσέγγιση 5 mm, εκφράζεται σε ακέραια εκατοστά του μέτρου και αποτελεί την κάθιση του σκυροδέματος που ελέγχεται.
- Αν η κάθιση είναι μικρότερη από 10 mm, το σκυρόδεμα είναι τόσο ύφυγρο ώστε η μέθοδος ελέγχου να μην είναι κατάλληλη -δεν υπάρχει αποτελεσμα- απαιτείται η δοκιμή Vebe . Αν διαπιστωθεί κατάρρευση του σκυροδέματος από διάτμηση (κατάρρευση τμήματος του κώνου κατά μήκος κεκλιμένου επιπέδου), η μέτρηση δεν λαμβάνεται υπ' όψη, η δοκιμή πρέπει να επαναληφθεί σε νέο τμήμα του δείγματος. Αν και η δεύτερη δοκιμή δείξει την ίδια συμπεριφορά δοκιμίου, θεωρείται ότι το σκυρόδεμα δεν έχει την αναγκαία πλαστικότητα και συνοχή για την εφαρμογή της δοκιμής κάθισης. Αν η κάθιση είναι μεγαλύτερη από 175 mm , τότε η δοκιμή κάθισης δεν είναι κατάλληλη για τη μέτρηση της εργασιμότητας αυτού του σκυροδέματος και πρέπει να αντικατασταθεί από τη δοκιμή εξαπλώσεως.

Αν γίνει προσθήκη ρευστοποιητή ακολουθεί και δεύτερη δοκιμή κάθισης. Αφού η δοκιμή κάθισης γίνει αποδεκτή το δείγμα που χρησιμοποιήθηκε για αυτό το σκοπό επανατοποθετείται στον αναδευτήρα και ακολουθεί ανάδευση για σύντομο χρονικό διάστημα.



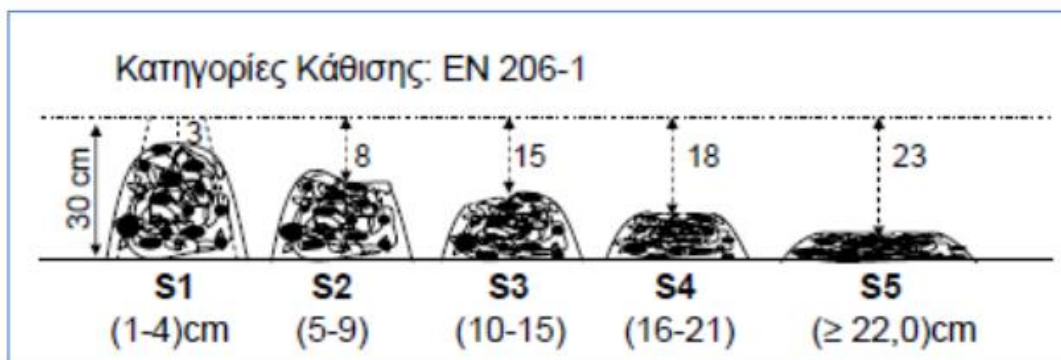
Εικόνα 8.11. Δοκιμή κάθισης

Παρακάτω φαίνονται τα αποτελέσματα των δοκιμών κάθισης για κάθε μια από τις πραγματοποιούμενες συνθέσεις. (Η μετρούμενη κάθιση πρέπει να στρογγυλεύεται στα πλησιέστερα 5 mm.)

	S (cm)
REF	12,2
CNTs	13,3

Πίνακας 8.5. Κάθιση δοκιμίων.

Σύμφωνα με το πρότυπο EN 206-1 οι κατηγορίες κάθισης είναι πέντε και φαίνονται στην παρακάτω εικόνα και στον παρακάτω πίνακα.



Εικόνα 8.11. Μετρούμενη κάθιση σύμφωνα με το πρότυπο EN 206-1.

Κατηγορία	Κάθιση (mm)
S1	10-40
S2	50-90
S3	100-150
S4	160-210
S5	≥ 220

Πίνακας 8.6. Κατηγορίες κάθισης.

Όπως φαίνεται και από τον πίνακα οι κατηγορίες κάθισης που προέκυψαν και από τις δύο συνθέσεις ήταν οι ίδιες και πιο συγκεκριμένα κατατάσσονται σε κατηγορία ενδιάμεσης πλαστιμότητας.

8.3.4 Μέτρηση καθαρού βάρους σκυροδέματος

Μετά το πέρας της ανάδευσης ακολουθεί η μέτρηση του καθαρού βάρους του σκυροδέματος σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C138. Αυτή πραγματοποιείται με την βοήθεια κατάλληλου δοχείου με συγκεκριμένο όγκο και βάρος. Αφού γεμίσουμε το δοχείο μέχρι το μέσον του δονείται στην τράπεζα δόνησης και στη συνέχεια δονείται ξανά αφού γεμίσει μέχρι το χείλος του. Τέλος, μετράται σε ζυγαριά ακριβείας ουσιαστικά το μεικτό βάρος του σε κιλά και αφού αφαιρέσουμε το βάρος του δοχείου που είναι γνωστό προκύπτει το καθαρό βάρος του σκυροδέματος του κάθε μείγματος. Το φαινόμενο βάρος του νωπού σκυροδέματος συνήθως κυμαίνεται από 2350 έως 2400 kg στο κυβικό μέτρο.

8.3.5. Χύτευση και Δόνηση

Μετά και την μέτρηση του καθαρού βάρους και την επανατοποθέτηση της ποσότητας του σκυροδέματος που χρειαστήκαμε για αυτή μέτρηση στην μπετονιέρα και μετά από μία τελική ανάμειξη, το μίγμα είναι έτοιμο για να το εισάγουμε στις μήτρες. Στην παρούσα εργασία, όπως έχει ήδη αναφερθεί, χρησιμοποιήθηκαν κυβικές μήτρες διαστάσεων 100x100x100mm και κυλινδρικές διαστάσεων 500x100x100mm.

Οι μήτρες πρέπει να είναι καθαρισμένες από τυχόν υπολείμματα από προηγούμενες σκυροδετήσεις και να είναι περασμένες με ειδικό λάδι που βοηθάει στην εξαγωγή των δοκιμίων από αυτές. Η κάθε μήτρα αρχικά γεμίζεται με υλικό έως το μέσον της και δονείται στην τράπεζα δόνησης για 20 δευτερόλεπτα και αφού πληρωθεί για άλλα 20. Κατά τη διάρκεια της δόνησης, οι μήτρες συγκρατούνται ώστε να μην αναπηδούν ανεξέλεγκτα και να έχουμε την επιθυμητή δόνηση του μίγματος. Έπειτα μετά και την ολοκλήρωση της διαδικασίας πλήρωσης του απαιτούμενου αριθμού μητρών, τοποθετούνται σε κατάλληλο χώρο στο εργαστήριο όπου και καλύπτονται με υγρές λινάτσες έως ότου γίνει η αφαίρεση των καλουπιών.



Εικόνα 8.12. Δοκίμια άοπλου σκυροδέματος λίγο μετά τη χύτευση.



Εικόνα 8.13. Σκυρόδεμα σε καλούπια αμέσως μετά τα στάδια της χύτευσης και δόνησης.

8.3.6. Εξαγωγή δοκιμίων από τις μήτρες (Ξεκαλούπωμα)

Μετά το πέρας 24 ωρών από τη σκυροδέτηση οι μήτρες λύνονται ώστε να εξαχθούν από αυτές τα δοκίμια, καθαρίζονται και λαδώνονται για να είναι έτοιμες την επόμενη σκυροδέτηση.

8.3.7 Συντήρηση δοκιμίων

Στα δοκίμια που εξάγονται από τις μήτρες αναγράφεται το όνομα της σύνθεσης και η ημερομηνία σκυροδέτησης και τοποθετούνται σε δεξαμενή με νερό το οποίο καλύπτει ολοκληρωτικά τα δοκίμια. Τα δοκίμια θα παραμείνουν στη δεξαμενή έως ότου έρθουν στην επιθυμητή ηλικία δηλαδή είτε για 7 ημέρες είτε για 28 ημέρες.

8.4. Εργαστηριακές δοκιμές σε σκληρυμένο σκυρόδεμα

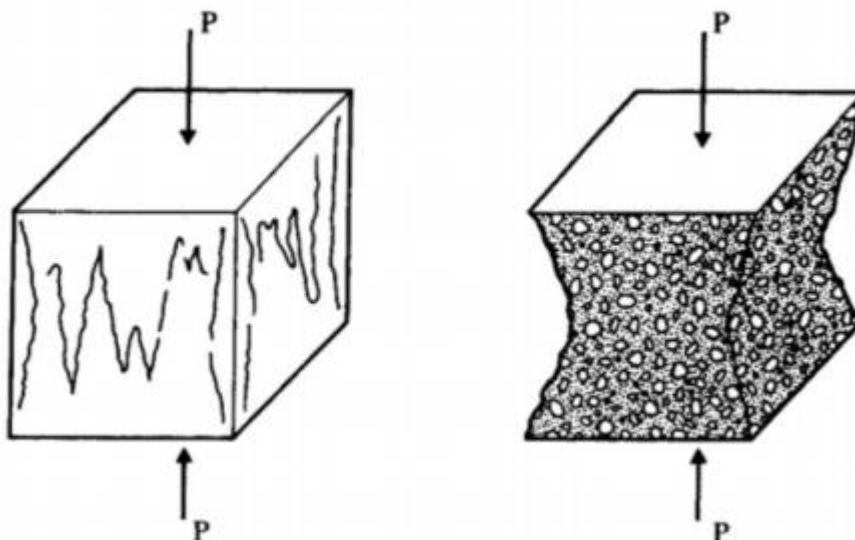
Οι εργαστηριακές δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Ωπλισμένου Σκυροδέματος του τμήματος Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π αφορούσαν κυλινδρικά δοκίμια διαστάσεων 10x10x50mm και κυβικά δοκίμια διαστάσεων 10x10x10mm από κάθε σύνθεση δηλαδή συνολικά σε δοκιμές θλίψης και έμμεσου εφελκυσμού και τα αποτελέσματα των δοκιμών παρουσιάζονται στο κεφάλαιο . Τα δοκίμια αυτά αφού παρέμειναν για ένα 24ωρο μέσα στο νερό μεταφέρθηκαν στο εργαστήριο για δοκιμές.

8.4.1. Δοκιμή Θλίψης

Η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος που αποτελεί και βασικό δείκτη της ποιότητας του σκληρυμένου σκυροδέματος προσδιορίζεται με επιπόνηση σε μονοαξονική θλίψη δοκιμίων από σκυρόδεμα οριζόμενη ως η μέγιστη τάση θραύσεων των δοκιμίων. Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν την 28^η μέρα μετά από την σκυροδέτηση, αφού αυτό είναι το κρίσιμο χρονικό διάστημα ανάπτυξης αντοχών του σκυροδέματος. Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο θλίψης της φωτογραφίας με τις παραμέτρους που φαίνονται στον παρακάτω πίνακα. Για την μονοαξονική θλίψη χρησιμοποιήθηκαν χαλύβδινες πλάκες ανάμεσα στις κεφαλές επιβολής φορτίου έτσι ώστε να κατανέμεται ομοιόμορφα το φορτίο στην πάνω επιφάνεια του δοκιμίου με το δοκίμιο τοποθετημένο στο κέντρο των πλακών σύμφωνα με οδηγούς πάνω σε αυτές.

Τα δοκίμια τοποθετήθηκαν έτσι ώστε το φορτίο να επιβάλλεται σε κάποια λεία πλευρά και όχι στην ελεύθερη επιφάνεια κατά τη σκυροδέτηση. Ειδικότερα, στα κυλινδρικά δοκίμια, η επιφάνεια η οποία κατά την σκυροδέτηση είναι εκτεθειμένη, λειάνθηκε με χρήση ειδικής μηχανής του ΕΩΣ, με σκοπό την αποφυγή τοπικής συγκέντρωσης τάσεων και εκκεντροτήτων φόρτισης. Η διαδικασία αυτή επιφέρει μικρή μείωση στο μήκος των δοκιμίων κατά περίπου 8-10 mm. Ο λόγος μήκους προς διάμετρο προκύπτει κατ' ελάχιστο 1.9 και δεν χρειάζεται διόρθωση με μειωτικό συντελεστή σύμφωνα με το Πρότυπο ASTM C39.

Τα δοκίμια φορτίζονται έως ότου αστοχήσουν. Το δοκίμιο κατά την θλίψη παραμορφώνεται εγκάρσια λόγω της επαφής του με τις χαλύβδινες πλάκες. Οι οριζόντιες τάσεις εξασθενούν καθώς κινούμαστε προς το μέσον του δοκιμίου. Η εικόνα, επομένως, των δοκιμίων κατά την αστοχία είναι ο σχηματισμός κατακόρυφων ρωγμών δηλαδή παράλληλων στο επιβαλλόμενο φορτίο ενώ ο πυρήνας παραμένει πρακτικά άθικτος.



Εικόνα 8.14. Μορφές αστοχίας κυβικών δοκιμίων σε μονοαξονική θλίψη

Η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη f_c προσδιορίζεται σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$f_c = \frac{P_{max}}{b \cdot d}$$

όπου P είναι το μέγιστο φορτίο που ασκήθηκε στο δοκίμιο μέχρι την αστοχία του και b, d οι διαστάσεις του δοκιμίου δηλαδή η επιφάνεια που ασκήθηκε το φορτίο.



Εικόνα 8.15. Κυβικό δοκίμιο αναφοράς (REF) υποβαλλόμενο σε δοκιμή μονοαξονικής θλίψης.



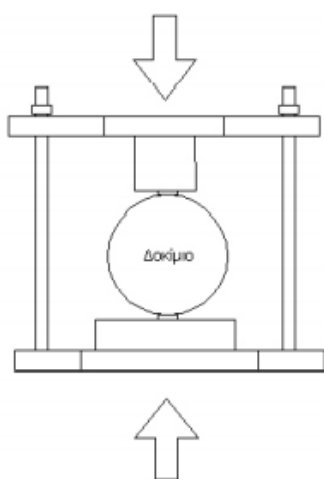
Εικόνα 8.16. Κυβικό δοκίμιο με νανωσωλήνες άνθρακα (CNT) υποβαλλόμενο σε δοκιμή μονοαξονικής θλίψης.



Εικόνα 8.17. Δοκίμια σε αστοχία αμέσως μετά την δοκιμή μονοαξονικής θλίψης

8.4.2. Δοκιμή Έμμεσου Εφελκυσμού (Brazilian test)

Η πειραματική διαδικασία που επιλέχτηκε ήταν του έμμεσου εφελκυσμού από διάρρηξη. Η μέθοδος αυτή είναι και γνωστή με το όνομα Brazilian Split test. Είναι η πλέον συνηθισμένη δοκιμή της αντοχής του σκυροδέματος σε εφελκυσμό. Στη δοκιμή αυτή το κυλινδρικό δοκίμιο υποβάλλεται σε θλίψη υπό ομοιόμορφα κατανεμημένη δύναμη P κατά μήκος δύο αντιδιαμετρικών γενέτειρων της παράπλευρης επιφάνειάς του. Προκειμένου να εξασφαλιστεί η ομοιόμορφη κατανομή της δύναμης κατά μήκος των δύο γενέτειρων, χρησιμοποιήθηκε ειδικό μεταλλικό εξάρτημα που κατασκευάστηκε ειδικά για αυτό το σκοπό. Το εξάρτημα αυτό χρησιμοποιήθηκε ειδικά για τα μεγαλύτερα δοκίμια των οποίων το μήκος ήταν μεγαλύτερο από το πλάτος του εμβόλου της πρέσας. Στα σημεία επαφής του εξαρτήματος με το δοκίμιο τοποθετήθηκαν λεπτές λωρίδες πλάτους του ενός εκατοστού (1cm) από μέταλλο. Ο λόγος τοποθέτησης αυτών των λωρίδων είναι ότι η άμεση επαφή του δοκιμίου με τη μεταλλική πλάκα του εξαρτήματος θα προκαλούσε ισχυρές θλιπτικές δυνάμεις στα σημεία επαφής με πιθανό αποτέλεσμα την αστοχία σε θλίψη πριν από την αστοχία σε εφελκυσμό λόγω συγκεντρωμένων τάσεων. Η παρουσία της λωρίδας εξασφαλίζει μια σχετικά ομοιόμορφη κατανομή των θλιπτικών τάσεων στις περιοχές αυτές. Στη περίπτωση παρουσίας τυχόν ανωμαλίας κατά μήκος των δύο αντιδιαμετρικών γενέτειρων θα προκαλούνταν πρόωρη αστοχία του δοκιμίου από συγκέντρωση τάσεων στην περιοχή. Η παρουσία όμως των δύο λωρίδων μειώνει κατά πολύ την πιθανότητα πρόωρης αστοχίας. Στα πειράματα έμμεσου εφελκυσμού καταγράφηκε η δύναμη P που επιβάλλονταν στο δοκίμιο καθώς και η μετακίνηση του εμβόλου. Με την εμφάνιση της ρωγμής η αστοχία ήταν άμεση και απόλυτη με την ακαριαία κοπή του δείγματος στη μέση.



Σχήμα 8.3. Σκαρίφημα πειραματικής διάταξης Brazilian test.



Εικόνα 8.18. Δοκίμιο σκυροδέματος με CNTs υποβαλλόμενο σε δοκιμή έμμεσου εφελκυσμού (Brazilian test)





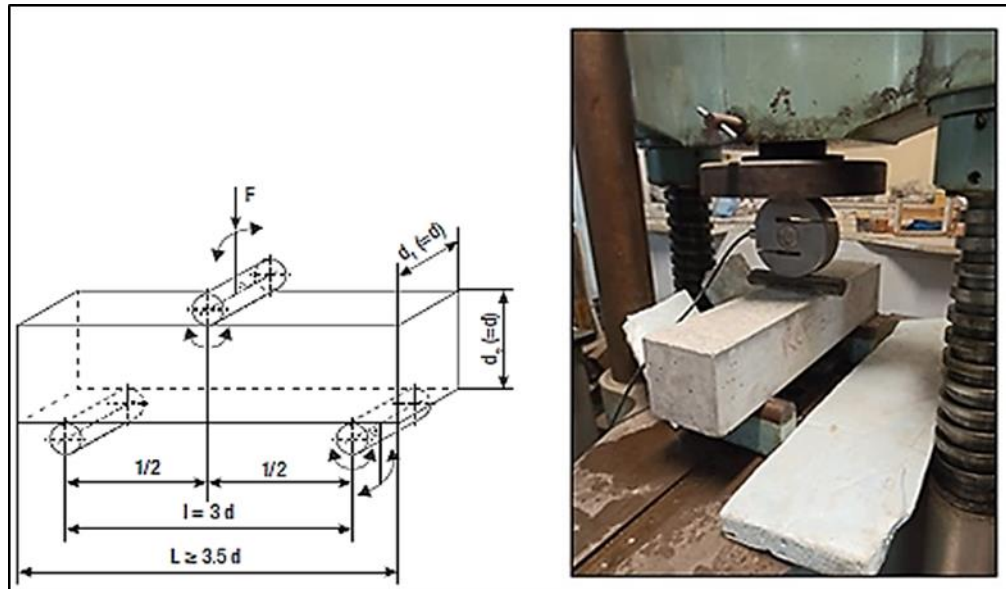
Εικόνες 8.19.a,b. Δοκίμια σκυροδέματος με CNTs σε αστοχία ύστερα από την δοκιμή εφελκυσμού (Brazilian test).



Εικόνα 8.20. Τομή δοκιμίου ύστερα από την αστοχία του στην δοκιμή έμμεσου εφελκυσμού.

8.4.3. Δοκιμή κάμψης τριών σημείων

Η δοκιμή κάμψης πραγματοποιήθηκε σε αμφιέριστα πρισματικά δοκίμια διαστάσεων 100x100x500mm που επιπονούνται καμπτικά με επιβολή θλιπτικών φορτίων σε δύο σημεία που χωρίζουν το άνοιγμα σε τρία ίσα τμήματα όπως φαίνεται παρακάτω.



Εικόνα 8.21. Δοκιμή κάμψης.

Λόγω της επιβαλλόμενης καμπτικής επιπόνησης αναπτύσσονται ορθές τάσεις καθ' ύψος της εγκάρσιας διατομής της δοκού, με μέγεθος στις ακραίες ίνες ίσο με $\sigma = M/S$. Όταν με την αύξηση του φορτίου η εφελκυστική τάση σ φθάσει την οριακή τιμή της η δοκός θραύεται περί τη μεσαία διατομή. Η μέγιστη αυτή οριακή τιμή f_t, f_l της εφελκυστικής τάσης, οριζόμενη ως αντοχή σε καμπτικό εφελκυσμό, δίνεται από τη σχέση:

$$M = (P/2)(S/2) = PS/4$$
$$I = bh^3/12$$
$$\sigma_{max} = 3PS/2bh^2$$

Deflection,

$$\delta_c = PS^3/48EI$$

Όπου: M η μέγιστη ροπή στη διατομή PL/6 και

I η ροπή αντίστασης (=bh³/12 για ορθογωνική διατομή)

Επομένως η αντοχή σε κάμψη δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$f_{t,fl} = \frac{3PL}{2bh^2}$$

όπου: P: το επιβαλλόμενο φορτίο

L: η απόσταση μεταξύ των δύο στηριγμάτων που είναι 300mm

b: το πλάτος του δοκιμίου (100mm)

h: το ύψος του δοκιμίου (100mm)



Εικόνα 8.22. Δοκίμια σκυροδέματος αμέσως μετά την δοκιμή κάμψης

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9

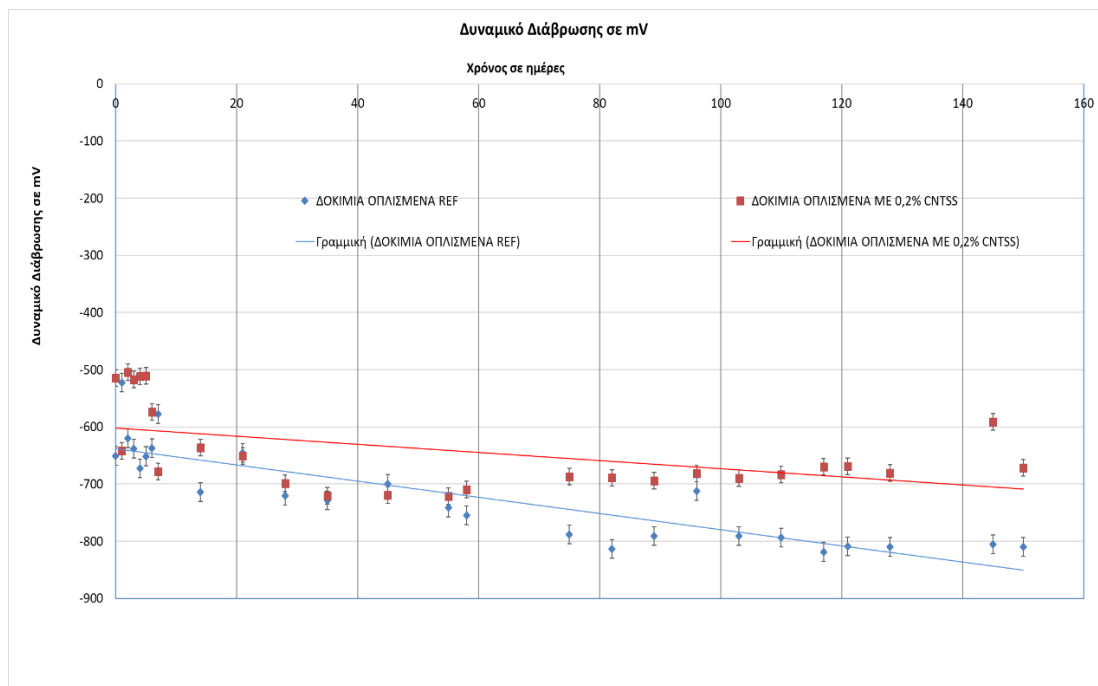
9.1. Αποτελέσματα δυναμικού διάβρωσης (Μέρος Α)

ΔΟΚΙΜΙΑ ΟΠΛΙΣΜΕΝΑ REF																															
α/α δοκιμίου	1η εβδομάδα													ΔV (mV)																	
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	21	28	35	45	55	58	75	82	89	96	103	110	117	121	128	145
1	-174	-185	-264	-374	-389	-453	-342	-352						-328	-344	-348	-352	-487	-465	-432	-415	-458	-469	-485	-469	-423	-512	-569	-574	-525	-502
2	-890	-452	-943	-912	-926	-935	-931	-923						-950	-463	-947	-941	-903	-902	-887	-842	-845	-815	-845	-862	-817	-865	-895	-896	-900	-905
3	-852	-462	-875	-834	-789	-881	-886	-882						-943	-454	-955	-947	-934	-925	-920	-901	-965	-947	-984	-895	-954	-961	-987	-965	-908	-901
4	-890	-434	-667	-659	-765	-458	-613	-384						-933	-456	-930	-928	-915	-906	-901	-854	-862	-884	-847	-824	-812	-863	-810	-841	-880	-852
5	-498	-534	-699	-703	-725	-737	-776	-584						-620	-655	-810	-859	-908	-907	-900	-965	-884	-865	-904	-841	-852	-835	-801	-814	-895	-825
6	-652	-653	-503	-553	-523	-553	-587	-483						-882	-900	-861	-866	-785	-890	-885	-841	-865	-821	-832	-884	-825	-832	-814	-823	-845	-865
7	-647	-655	-645	-768	-774	-723	-732	-636						-662	-684	-685	-679	-660	-642	-629	-625	-635	-648	-685	-601	-658	-684	-632	-621	-624	-685
8	-860	-776	-567	-598	-603	-601	-590	-553						-886	-894	-900	-910	-420	-919	-908	-854	-824	-814	-832	-802	-832	-904	-901	-887	-845	-845
9	-460	-467	-402	-421	-503	-387	-366	-358						-474	-518	-530	-543	-540	-545	-532	-514	-569	-547	-589	-598	-547	-541	-521	-625	-568	-665
10	-484	-434	-856	-883	-869	-851	-862	-786						-601	-603	-681	-818	-888	-898	-780	-884	-825	-865	-847	-852	-869	-811	-884	-857	-795	
11	-455	-427	-663	-763	-768	-801	-802	-644						-465	-498	-468	-470	-470	-457	-439	-485	-574	-521	-547	-569	-598	-584	-526	-555	-458	-498
12	-970	-886	-821	-823	-831	-762	-763	-779						-983	-980	-966	-959	-951	-942	-928	-965	-925	-902	-954	-899	-859	-914	-965	-904	-903	-901
13	-901	-859	-378	-402	-405	-389	-390	-264						-940	-950	-941	-938	-908	-897	-899	-984	-954	-965	-932	-947	-954	-921	-925	-921	-901	-905
14	-454	-348	-276	-353	-783	-563	-472	-353						-534	-654	-391	-371	-363	-340	-719	-789	-880	-801	-803	-804	-815	-865	-869	-814	-854	-865
15	-180	-187	-882	-872	-873	-893	-799	-874						-242	-241	-273	-270	-253	-245	-228	-801	-815	-825	-810	-806	-856	-845	-832	-854	-855	-865
16	-950	-556	-674	-652	-632	-631	-652	-588						-980	-975	-959	-953	-935	-926	-913	-925	-905	-954	-925	-901	-915	-916	-945	-947	-955	-936
17	-544	-432	-587	-451	-456	-653	-452	-523						-558	-485	-486	-484	-472	-742	-794	-854	-815	-816	-824	-865	-847	-865	-845	-806	-867	-885
18	-850	-657	-468	-468	-487	-453	-456	-425						-873	-860	-842	-832	-809	-794	-777	-801	-981	-817	847	-825	-865	-957	-914	-847	-854	-884
	-651	-522	-621	-638	-672	-651	-637	-577						-714	-645	-721	-729	-700	-741	-755	-789	-813	-791	-712	-791	-793	-819	-809	-810	-805	-810

ΔΟΚΙΜΙΑ ΟΠΛΙΣΜΕΝΑ ΜΕ 0,2% CNTs																															
α/α δοκιμίου	1η εβδομάδα													ΔV (mV)																	
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	21	28	35	45	55	58	75	82	89	96	103	110	117	121	128	145
19	-212	-345	-195	-183	-182	-193	-195	-270,5	0	0	0	0	0	-560	-624	-779	-827	-857	-866	-861	-745	-784	-741	-783	-714	-702	-701	-745	-784	-812	-712
20	-900	-983	-486	-523	-665	-382	-745	-925	0	0	0	0	0	-954	-466	-958	-949	-933	-919	-901	-845	-814	-824	-836	-847	-854	-825	-801	-784	-714	-768
21	-855	-887	-483	-652	-765	-542	-834	-902	0	0	0	0	0	-911	-932	-934	-927	-908	-894	-876	-814	-825	-865	-847	-858	-862	-814	-845	-804	-825	-852
22	-345	-487	-478	-541	-555	-665	-703	-916	0	0	0	0	0	-540	-615	-678	-763	-816	-836	-833	-785	-748	-813	-795	-801	-815	-769	-795	-841	-754	-798
23	-606	-689	-478	-543	-466	-503	-511	-527	0	0	0	0	0	-582	-620	-661	-712	-708	-791	-776	-784	-748	-798	-748	-784	-714	-725	-765	-799	-801	-796
24	-249	-489	-542	-544	-666	-672	-699	-805	0	0	0	0	0	-403	-445	-461	-457	-514	-491	-516	-541	-562	-584	-515	-525	-536	-541	-510	-514	-584	-501
25	-456	-764	-658	-657	-642	-645	-647	-647	0	0	0	0	0	-680	-717	-754	-776	-801	-819	-809	-784	-804	-806	-748	-784	-784	-785	-714	-817	-810	-768
26	-540	-546	-763	-749	-787	-801	-823	-869	0	0	0	0	0	-595	-587	-573	-598	-539	-530	-509	-512	-521	-562	-517	-521	-562	-525	-504	-532	-514	-510
27	-363	-389	-466	-451	-450	-467	-469	-469	0	0	0	0	0	-371	-396	-405	-406	-396	-382	-366	-365	-354	-365	-325	-354	-365	-366	-348	-387	-395	-334
28	-640	-789	-457	-459	-469	-489	-527	-549,3	0	0	0	0	0	-893	-916	-926	-932	-924	-920	-907	-895	-896	-847	-902	-958	-904	-869	-895	-920	-854	-885
29	-605	-772	-387	-403	-365	-398	-422	-459	0	0	0	0	0	-719	-780	-822	-843	-861	-873	-869	-845	-865	-825	-869	-847	-804	-845	-815	-832	-865	-802
30	-633	-872	-828	-771	-543	-655	-734	-876	0	0	0	0	0	-854	-884	-902	-904	-901	-898	-880	-845	-855	-869	-825	-847	-869	-821	-836	-895	-847	-854
31	-307	-378	-803	-745	-534	-643	-754	-921	0	0	0	0	0	-470	-465	-360	-438	-358	-354	-318	-326	-301	-365	-307	-365	-321	-365	-325	-301	-300	-304
32	-235	-653	-375	-321	-385	-398	-404	-494,2	0	0	0	0	0	-516	-626	-740	-786	-825	-846	-838	-812	-832	-862	-814	-714	-748	-769	-784	-714	798	-801
33	-835	-879	-190	-231	-177	-187	-184	-190	0	0	0	0	0	-919	-931	-932	-931	-905	-890	-877	-854	-862	-825	-845	-855	-856	-704	-741	-715	-748	-784
34	-528	-653	-555	-543	-675	-552	-469	-957	0	0	0	0	0	-606	-614	-650	-658	-697	-714	-715	-702	-698	-702	-714	-703	-702	-689	-658	-705	-703	-703
35	-555	-532	-378	-365	-370	-355	-456	-557,5	0	0	0	0	0	-490	-474	-442	-429	-414	-383	-377	-359	-369	-325	-365	-384	-395	-378	-358	-365	-366	-356
36	-400	-453	-564	-634	-541	-654	-765	-873	0	0	0	0	0	-398	-619	-605	-640	-593	-578	-542	-548	-569	-525	-514	-547	-506	-562	-596	-547	-554	-555
	-515	-642	-505	-518	-512	-511	-575	-678						-637	-651	-699	-721	-719	-721	-709	-687	-689	-695	-682	-689	-683	-670	-669	-681	-592	-671

Πίνακες 9.1.a,b. Τιμές μετρήσεων δυναμικού διάβρωσης όλων των δοκιμίων ανά εβδομάδα.

Στους παραπάνω πίνακες παρατίθενται οι τιμές των μετρήσεων του δυναμικού διάβρωσης για κάθε δοκίμιο που διεξάγονταν κάθε εβδομάδα καθώς και οι μέσοι όροι τους. Ύστερα από επεξεργασία των παραπάνω τιμών φαίνεται σε διάγραμμα η χρονική μεταβολή του δυναμικού διάβρωσης και για τα δύο είδη δοκιμίων.



Διάγραμμα 9.1. Διάγραμμα δυναμικού διάβρωσης δοκιμίων οπλισμένων τσιμεντοκονιαμάτων αναφοράς και αυτών με 0,2% CNTs.

Στο παραπάνω διάγραμμα παρατίθενται η χρονική εξέλιξη των τιμών του δυναμικού διάβρωσης και για τα δύο είδη δοκιμίων έτσι ώστε να υπάρχει η δυνατότητα άμεσης σύγκρισής τους. Παρατηρείται ότι το δυναμικό των πρώτων 7 ημερών των δοκιμίων αναφοράς είναι ήδη ηλεκτραρνητικότερο από αυτό των δοκιμίων με CNTs. Επιπλέον, με την πάροδο του χρόνου φαίνεται μία μικρή διαφορά στις τιμές των δύο ειδών δοκιμίων, με τις τιμές των δοκιμίων αναφοράς να έχουν ηλεκτραρνητικότερες τιμές δυναμικού διάβρωσης, το οποίο δείχνει υψηλότερη πιθανότητα διάβρωσης του οπλισμού από αυτά που περιέχουν CNTs. Επιπρόσθετα, στις 150 ημέρες (5 μήνες) η διαφορά αυτή των τιμών μεγαλώνει ακόμα περισσότερο, αφού το δυναμικό των δοκιμίων αναφοράς κυμαίνεται στα -840 mV ενώ αυτό των δοκιμίων που περιέχουν 0,2 % CNTs στα -700 mV. Η διαφορά αυτή της τάξης του 17,5% υποδηλώνει την ιδιότητα που έδωσαν τα CNTs στο τσιμεντοκονίαμα να μειώσουν την πιθανότητα διάβρωσης του οπλισμού σε σχέση με αυτή των δοκιμίων αναφοράς. Τέλος, οι γραμμικές σχέσεις των δύο ειδών δοκιμίων του δυναμικού διάβρωσης συναρτήσε του χρόνου δείχνει ακόμα καλύτερα την διαφορά στην διάβρωση, η οποία οφείλεται προφανώς στην προσθήκη CNTs στο τσιμεντοκονίαμα. Εδώ να τονιστεί ότι η μέθοδος αυτή δείχνει την προδιάθεση του μετάλλου προς διάβρωση και όχι την ταχύτητά της, ενώ όσο ηλεκτραρνητικότερες τιμές τόσο μεγαλύτερη και η προδιάθεση του μετάλλου για διάβρωση. Συνεπώς, στην συγκεκριμένη περίπτωση και στα δύο είδη δοκιμίων παρατηρείται αυξημένη πιθανότητα διάβρωσης του οπλισμού αλλά σε σύγκριση μεταξύ τους υπερτερεί αυτό με την προσθήκη CNTs.

9.2. Αποτελέσματα μηχανικών δοκιμών (Μέρος Β)

9.2.1. Δοκιμή μονοαξονικής θλίψης

Παρακάτω παρατίθενται σε πίνακες τα αποτελέσματα των δοκιμών μονοαξονικής θλίψης ανά δοκίμιο, τόσο των δοκιμών αναφοράς όσο και αυτών που εμπεριέχουν CNTs, στις 7, 28, 56 και 90 ημέρες.

7d	F (kN)	S cubic (Mpa)
REF1	446,80	44,68
REF2	464,00	46,40
REF3	382,90	38,29
S mean	431,2	43,12
S.D	34,9	3,49

28d	F (kN)	S cubic (Mpa)
REF1	601,70	60,17
REF2	601,90	60,19
REF3	601,60	60,16
S mean	601,7	60,17
S.D	0,1	0,01

28d	F (kN)	S cubic (Mpa)
CNT1	601,7	60,17
CNT2	506,7	50,67
CNT3	532,8	53,28
CNT4	595	59,5
CNT5	592,3	59,23
CNT6	601,1	60,11
S mean	571,60	57,16
S.D	40,07	3,76

7d	F (kN)	S cubic (Mpa)
CNT1	335,7	33,57
CNT2	482,7	48,27
CNT3	510,1	51,01
S mean	442,83	44,28

56D	F (kN)	S cubic (Mpa)
REF1	542,80	54,28
REF2	601,80	60,18
REF3	601,70	60,17
S mean	582,1	58,21
S.D	27,8	2,78

90D	F (kN)	S cubic (Mpa)
REF1	601,80	60,18
REF2	601,80	60,18
REF3	598,90	59,89
S mean	600,8	60,1
S.D	1,37	0,14

28d	F (kN)	S cubic (Mpa)
CNT1	601,6	60,16
CNT3	602,2	60,22
CNT4	505,2	50,52
CNT5	601,8	60,18
S mean	577,70	57,77
S.D	41,86	4,19

56D	F (kN)	S cubic (Mpa)
CNT1	577,1	57,71
CNT2	636,5	63,65
S mean	606,80	60,68
S.D	29,70	2,97

Πίνακες 9.2. Τιμές μέσοι όροι και τυπικές αποκλίσεις όλων των δοκιμών μονοαξονικής θλίψης

7d	F (kN)	S cubic (Mpa)
REF1	446,80	44,68
REF2	464,00	46,40
REF3	382,90	38,29
S mean	431,2	43,12
S.D	34,9	3,49
7d	F (kN)	S cubic (Mpa)
CNT1	335,7	33,57
CNT2	482,7	48,27
CNT3	510,1	51,01
S mean	442,83	44,28

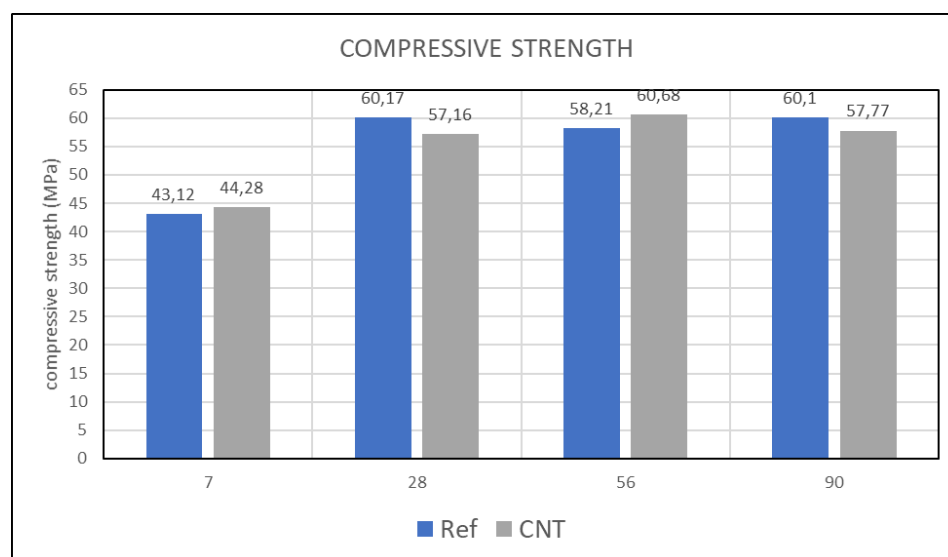
Πίνακας 9.3. Αποτελέσματα μονοαξονικής θλίψης.

Παρακάτω παρατίθενται σε πίνακα τα αποτελέσματα των μέσων όρων της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης 7, 28, 56 και 90 ημερών των δοκιμών σκυροδέματος αναφοράς και αυτών που περιέχουν νανοσωλήνες άνθρακα (CNTs).

ΘΛΙΠΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΚΥΒΩΝ		
	ΔΟΚΙΜΙΑ ΑΝΑΦΟΡΑΣ	ΔΟΚΙΜΙΑ ΜΕ CNTs
7	43.12	44.28
S.D7	3.49	7.66
28	60.17	57.16
S.D28	0.1	3.76
56	58.21	60.68
S.D56	2.78	2.97
90	60.1	57.77
S.D90	0.14	4.19

Πίνακας 9.4. ΜΟ και τυπικής απόκλισης θλιπτικής αντοχής δοκιμών σκυροδέματος αναφοράς και ενισχυμένων με νανοσωλήνες άνθρακα στις 7, 28, 56 και 90 ημέρες.

Ύστερα από επεξεργασία των παραπάνω αποτελεσμάτων προκύπτει το παρακάτω διάγραμμα:



Διάγραμμα 9.2. Θλιπτική αντοχή δοκιμών αναφοράς και ενισχυμένων με CNTs στις 7, 28, 56 και 90 ημέρες.

Από το παραπάνω διάγραμμα έχουμε την δυνατότητα να συγκρίνουμε τις αντοχές των δύο ειδών δοκιμίων:

- Παρατηρούμε ότι στις 7 ημέρες η θλιπτική αντοχή των δοκιμίων με CNTs είναι ελαφρώς μεγαλύτερη από αυτών της αναφοράς (REF) (2,62%). Συνεπώς, παρατηρούμε ότι οι νανοσωλήνες άνθρακα λειτουργούν ευεργετικά αυξάνοντας τις πρώιμες αντοχές του σκυροδέματος έστω και σε μικρό ποσοστό.
- Στις 28 ημέρες παρατηρείται μεγαλύτερη θλιπτική αντοχή στα δοκίμια αναφοράς κατά 5%. Λαμβάνοντας υπόψιν ότι η θλιπτική αντοχή των 28 ημερών σχετίζεται άμεσα με την χαρακτηριστική του αντοχή και κατ'έπекταση την κατηγορία του, σύμφωνα με τον Κανονισμό Τεχνολογίας Σκυροδέματος, οδηγούμαστε στο συμπέρασμα ότι η προσθήκη των νανοσωλήνων άνθρακα μείωσε την θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος.
- Στις 56 ημέρες παρατηρείται μεγαλύτερη θλιπτική αντοχή στα δοκίμια ενισχυμένα με νανοσωλήνες άνθρακα (CNTs) κατά 4,07%
- Στις 90 ημέρες παρατηρείται μεγαλύτερη θλιπτική αντοχή στα δοκίμια αναφοράς κατά 3,87%
- Γενικώς, παρατηρήθηκαν μικρές μεταβολές και διαφορές μεταξύ των θλιπτικών αντοχών των δοκιμίων ενώ η τυπική απόκλιση των δοκιμίων με νανοσωλήνες άνθρακα παρουσίασε μεγαλύτερες τιμές.

9.2.2. Δοκιμή έμμεσου εφελκυσμού (Brazilian test)

Παρακάτω παρατίθενται σε πίνακες τα αποτελέσματα των δοκιμών έμμεσου εφελκυσμού (Brazilian test) ανά δοκίμιο, τόσο των δοκιμίων αναφοράς όσο και αυτών που εμπεριέχουν CNTs, στις 28 και 90 ημέρες.

ΔΙΑΠΡΗΞΗ (Brazilian test)					
28 days	F (kN)	S (Mpa)	90 days	F (kN)	S (Mpa)
REF1	195	4,33	REF1	178,9	3,98
REF2	194	4,30	REF2		
REF3	165	3,66	REF3	249,3	5,54
S mean	184	4,10	S mean	214,1	4,76
S.D	14	0,31	S.D	35,2	0,78

28 days	F (kN)	S (Mpa)	90 days	F (kN)	S (Mpa)
CNT1	229	5,08	CNT1	277,5	6,17
CNT2	253	5,63	CNT2	256,7	5,70
CNT3	216	4,80	CNT3	211,9	4,71
S mean	233	5,17	S mean	248,7	5,53
S.D	16	0,35	S.D	27,37	0,61

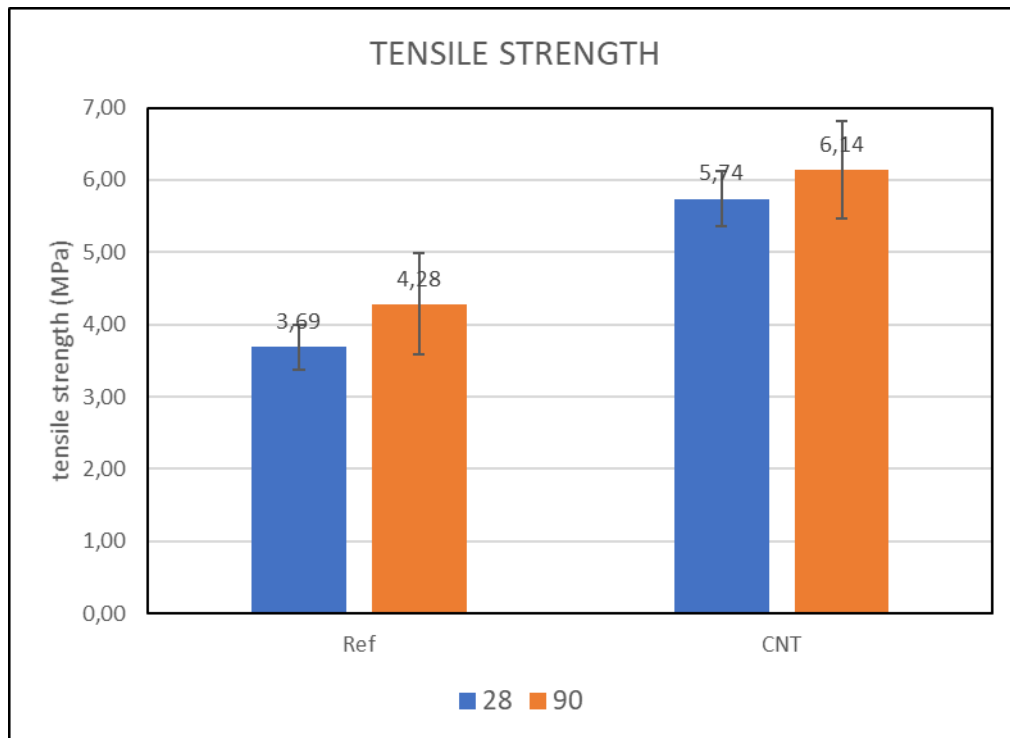
Πίνακας 9.5. Αποτελέσματα δοκιμών διάρρηξης (Brazilian test) στις 28 και 90 ημέρες.

Παρακάτω παρατίθενται σε πίνακα τα αποτελέσματα των μέσων όρων της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης 7, 28, 56 και 90 ημερών των δοκιμών σκυροδέματος αναφοράς και αυτών που περιέχουν νανοσωλήνες άνθρακα (CNTs).

	ΔΟΚΙΜΙΑ ΑΝΑΦΟΡΑΣ	ΔΟΚΙΜΙΑ ΜΕ CNTs
28	3,69	5,74
S.D28	0,31	0,38
90	4,28	6,14
S.D90	0,7	0,68

Πίνακας 9.6. ΜΟ και τυπικής απόκλισης εφελκυστικής αντοχής δοκιμών σκυροδέματος αναφοράς και ενισχυμένων με νανοσωλήνες άνθρακα στις 28 και 90 ημέρες.

Ύστερα από επεξεργασία των παραπάνω αποτελεσμάτων προκύπτει το παρακάτω διάγραμμα:



Διάγραμμα 9.3. Εφελκυστική αντοχή δοκιμίων αναφοράς και ενισχυμένων με CNTs στις 28 και 90 ημέρες.

Από το παραπάνω διάγραμμα έχουμε την δυνατότητα να συγκρίνουμε τις αντοχές των δύο ειδών δοκιμίων:

- Παρατηρείται ότι τα δοκίμια αναφοράς αναπτύσσουν εφελκυστική αντοχή 3,69 MPa στις 28 ημέρες ενώ αυτά με την προσθήκη CNTs 5,74 αντίστοιχα. Δηλαδή, υπάρχει μία μεταβολή της τάξεως του 55,55 %, η οποία είναι ιδιαίτερα σημαντική αφού συντελείται μεγάλη αύξηση της εφελκυστικής αντοχής. Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν την 28^η μέρα μετά την σκυροδέτηση, διάστημα το οποίο το σκυρόδεμα είχε αναπτύξει πλήρως τις αντοχές του.
- Στις δοκιμές των 90 ημερών παρατηρείται και πάλι μεγάλη αύξηση (43,4%) στην εφελκυστική αντοχή των δοκιμίων στα οποία έχουν προστεθεί CNTs σε σχέση με αυτή των δοκιμίων αναφοράς.
- Τα παραπάνω αποτελέσματα μπορούν να εξηγηθούν αφού από την μία το σκυρόδεμα είναι γνωστό ότι έχει σχεδόν μηδενική εφελκυστική αντοχή ενώ από την άλλη μεριά οι νανοσωλήνες άνθρακα λόγω των φυσικών ιδιοτήτων τους σχηματίζουν ισχυρές μικρο-γέφυρες μέσα στο σκυρόδεμα εμποδίζοντας σε μεγάλο βαθμό τις εφελκυστικές τάσεις που δρουν στο σκυρόδεμα.

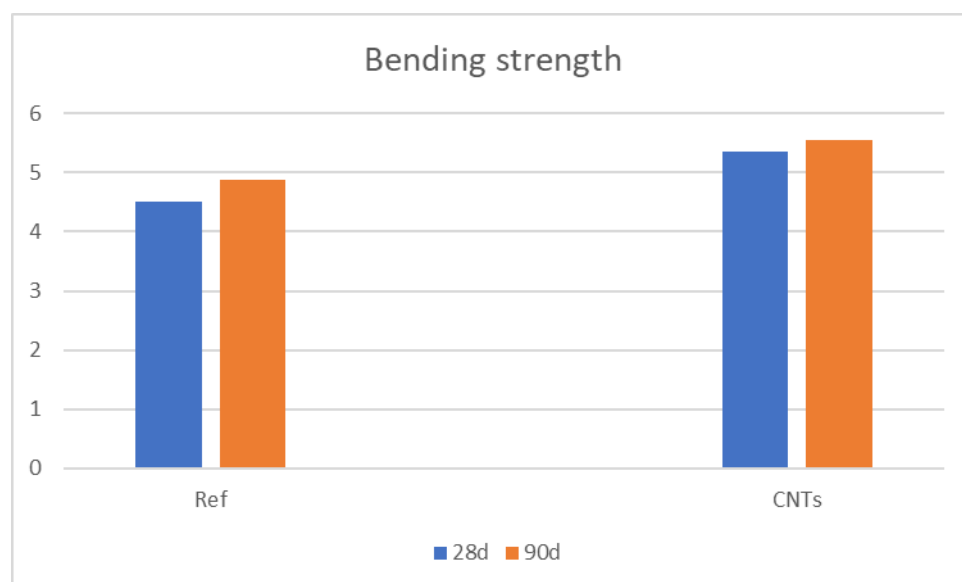
9.2.3. Δοκιμή κάμψης

Παρακάτω παρατίθενται σε πίνακες τα αποτελέσματα των δοκιμών καμπτικής αντοχής ανά δοκίμιο, τόσο των δοκιμών αναφοράς όσο και αυτών που εμπεριέχουν CNTs, στις 28 και 90 ημέρες, όπως επίσης οι μέσοι όροι τους και οι τυπικές αποκλίσεις τους.

ΚΑΜΨΗ				
90 ΗΜΕΡΕΣ				
	F (kN)	bending strength	average bending strength	stdevp
REF1	11,81	5,31	4,88	0,44
REF2	9,86	4,44		
CNT1	12,99	5,84	5,55	0,29
CNT2	11,69	5,26		
28 ΗΜΕΡΕΣ				
	F (kN)	bending strength	average bending strength	stdevp
REF1	8,57	3,86	4,51	0,65
REF2	11,47	5,16		
CNT1	12,26	5,52	5,36	0,16
CNT2	11,56	5,20		

Πίνακας 9.6. Αποτελέσματα καμπτικής αντοχής, MO και τυπικών αποκλίσεων δοκιμών αναφοράς και δοκιμών ενισχυμένων με CNTs.

Ύστερα από επεξεργασία των παραπάνω αποτελεσμάτων προκύπτει το παρακάτω διάγραμμα:



Διάγραμμα 9.4. Καμπτική αντοχή δοκιμών αναφοράς και ενισχυμένων με CNTs στις 28 και 90 ημέρες.

Από το παραπάνω διάγραμμα έχουμε την δυνατότητα να συγκρίνουμε τις αντοχές των δύο ειδών δοκιμών:

- Παρατηρείται ότι τα δοκίμια αναφοράς αναπτύσσουν καμπτική αντοχή 4,51 MPa στις 28 ημέρες ενώ αυτά με την προσθήκη CNTs 5,36 αντίστοιχα. Δηλαδή, υπάρχει μία μεταβολή της τάξεως του 18,84 %, η οποία είναι σημαντική αφού συντελείται αύξηση της καμπτικής και κατ' επέκταση της εφελκυστικής αντοχής. Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν την 28^η μέρα μετά την σκυροδέτηση, διάστημα το οποίο το σκυρόδεμα είχε αναπτύξει πλήρως τις αντοχές του.
- Στις δοκιμές των 90 ημερών παρατηρείται και πάλι αύξηση (13,72%) στην εφελκυστική αντοχή των δοκιμίων στα οποία έχουν προστεθεί CNTs σε σχέση με αυτή των δοκιμίων αναφοράς.
- Τα παραπάνω αποτελέσματα εξηγούνται από τις εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες των νανοσωλήνων άνθρακα οι οποίες επηρεάζουν αισθητά τις μηχανικές αντοχές του σκυροδέματος αφού ουσιαστικά «γεφυρώνουν» τις μικρορωγμές και τους πόρους που δημιουργούνται ενώ συντελούν με το μικρό τους μέγεθος και στην πλήρη πλήρωση των πόρων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10

10.1. Συμπεράσματα

- Σύμφωνα με την μέθοδο του δυναμικού διάβρωσης, τα δοκίμια τσιμεντοκονιάματος τα οποία περιείχαν 0,2 % CNTs κ.β τείνουν να έχουν μικρότερη προδιάθεση για διάβρωση από χλωριόντα σε σχέση με τα δοκίμια αναφοράς.
- Η θλιπτική αντοχή (στις 7,28,56,90 ημερών) των δοκιμίων άοπλου σκυροδέματος στα οποία είχαν ενσωματωθεί 0,2% CNTs σε σχέση με αυτής των δοκιμίων αναφοράς παρέμεινε περίπου στα ίδια επίπεδα.
- Η προσθήκη νανοσωλήνων άνθρακα (CNTs) κατά 0,2% κ.β οδήγησε σε σημαντική αύξηση της εφελκυστικής αντοχής (45-55%) των δοκιμίων σκυροδέματος σε σχέση με αυτής των δοκιμίων αναφοράς.
- Η προσθήκη νανοσωλήνων άνθρακα (CNTs) κατά 0,2% κ.β οδήγησε σε αύξηση της καμπτικής αντοχής (10-15%) των δοκιμίων σκυροδέματος σε σχέση με αυτής των δοκιμίων αναφοράς.

10.2. Προοπτικές συνεχίσεως της έρευνας

Από τα αποτελέσματα της εργασίας αυτής προκύπτει ότι η προσθήκη νανοσωλήνων άνθρακα (CNTs) στο σκυρόδεμα βελτιώνει τις μηχανικές του ιδιότητες. Όσον αφορά την διάβρωση ο χρόνος των 6 μηνών είναι πολύ μικρός για να έχουμε αξιόπιστα αποτελέσματα. Χρειάζεται επέκταση της διάρκειας των πειραμάτων μέχρι ο χρόνος έκθεσης των δοκιμίων να φθάσει τουλάχιστον μέχρι ενός έτους για αξιόπιστα αποτελέσματα. Μετά την πάροδο του ενός έτους θα είναι δυνατή η μέτρηση της βαρυμετρικής απώλειας μάζας των οπλισμών των δοκιμίων. Επίσης θα πρέπει να εξεταστεί η επιφάνεια των οπλισμών για πιθανές μεταβολές της μορφής της διάβρωσης.