



**ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ  
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΥΛΙΚΩΝ  
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ  
«ΠΡΟΗΓΜΕΝΑ ΥΛΙΚΑ»**

**ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ**

**ΠΑΠΠΑΣ Δ. ΧΡΗΣΤΟΣ**

**« ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΩΝ  
ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΩΝ ΝΑΝΟ-ΕΓΚΛΕΙΣΜΑΤΩΝ ΣΤΙΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ  
ΚΑΙ ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΜΕΝΩΝ  
ΚΟΝΙΑΜΑΤΩΝ »**

**ΙΩΑΝΝΙΝΑ, Ιούνιος 2018**

## **Εσώφυλλο:**

Η παρούσα Μεταπτυχιακή Διατριβή εκπονήθηκε στο πλαίσιο των σπουδών για την απόκτηση του Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης στην εξειδίκευση:

## **ΥΛΙΚΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ & ΔΟΜΕΣ - ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ**

που απονέμει το Τμήμα Μηχανικών Επιστήμης Υλικών του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων.

Εγκρίθηκε την 27/06/2018 από την εξεταστική επιτροπή:

**Επιβλέπων :** κ. Θεόδωρος Ματίκας, Καθηγητής του ΤΜΕΥ της Πολυτεχνικής Σχολής του Παν/μίου Ιωαννίνων

**Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή :**

1. κ. Θεόδωρος Ματίκας, Καθηγητής του ΤΜΕΥ της Πολυτεχνικής Σχολής του Παν/μίου Ιωαννίνων
2. κ. Νεκταρία – Μαριάνθη Μπάρκουλα, Αναπληρώτρια Καθηγητής του ΤΜΕΥ της Πολυτεχνικής Σχολής του Παν/μίου Ιωαννίνων
3. κ. Κωνσταντίνος Δάσιος, Επικουρος Καθηγητής του ΤΜΕΥ της Πολυτεχνικής Σχολής του Παν/μίου Ιωαννίνων

### **ΥΠΕΥΘΥΝΗ ΔΗΛΩΣΗ**

*"Δηλώνω υπεύθυνα ότι η παρούσα διατριβή εκπονήθηκε κάτω από τους διεθνείς ηθικούς και ακαδημαϊκούς κανόνες δεοντολογίας και προστασίας της πνευματικής ιδιοκτησίας. Σύμφωνα με τους κανόνες αυτούς, δεν έχω προβεί σε ιδιοποίηση ξένου επιστημονικού έργου και έχω πλήρως αναφέρει τις πηγές που χρησιμοποίησα στην εργασία αυτή."*

(Υπογραφή υποψηφίου)

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή εκπονήθηκε στα πλαίσια της ολοκλήρωσης του προγράμματος μεταπτυχιακών σπουδών «Προηγμένα Υλικά», του τμήματος Μηχανικών Επιστήμης Υλικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων. Το θέμα αυτής, ήταν η συγκριτική μελέτη της επίδρασης των διαφορετικών νάνο-εγκλείσματος στις ηλεκτρικές και θερμικές ιδιότητες τροποποιημένων κονιαμάτων.

Αρχικά, θα ήθελα να εκφράσω τις βαθύτερες ευχαριστίες μου στον καθηγητή του τμήματος και επιβλέπων της εργασίας, κ. Θεόδωρο Ματίκα, για την ανάθεση του θέματος και για τη συνεχή βοήθειά του σε όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας μου.

Συνεχίζοντας, να ευχαριστήσω θερμά όλα τα μέλη του εργαστηρίου Μηχανικής, Ευφών Αισθητήρων και Μη - Καταστροφικής Αξιολόγησης Υλικών, για τη δυνατότητα που μου έδωσαν να εκτελέσω την μεταπτυχιακή μου εργασία στο εργαστήριο αυτό. Πιο συγκεκριμένα, θα ήθελα να ευχαριστήσω την υποψήφια διδάκτωρ του τμήματος κ. Παναγιώτα - Αικατερίνη Δάλλα, καθώς και τον υποψήφιο διδάκτωρ του τμήματος κ. Δημήτριο Έξαρχο, για την καθοδήγηση, τη συνεχή βοήθειά και τις συμβουλές κατά την διάρκεια εκτέλεσης των πειραμάτων.

Τέλος, να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στη γυναίκα μου για την αγάπη και τη στήριξη που μου έδειξε σε όλη την διάρκεια του μεταπτυχιακού προγράμματος και ειδικά στην προσπάθεια εκπόνησης της εργασίας μου.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή, έχει ως θέμα τη συγκριτική μελέτη της επίδρασης των διαφορετικών νανο-εγκλείσματος στις ηλεκτρικές και θερμικές ιδιότητες τροποποιημένων κονιαμάτων.

Σκοπός της εργασίας είναι αρχικά η επιτυχημένη παρασκευή νανο-ενισχυμένων δοκιμίων με διαφορετικά ποσοστά νανοσωλήνων άνθρακα και γραφενίου (μέχρι 2% κατά βάρος τσιμέντου) και μετέπειτα η συγκριτική μελέτη της επίδρασης της νανο-ενίσχυσης στις ηλεκτρικές και θερμικές ιδιότητες των δοκιμίων σε σχέση με πρότυπα δοκίμια αναφοράς.

Στο πρώτο κεφάλαιο, που είναι το θεωρητικό μέρος της εργασίας, γίνεται αναλυτική αναφορά στο τσιμέντο, τα αδρανή καθώς και στα υλικά με βάση στο τσιμέντο και συγκεκριμένα στο κονίαμα, αφού είναι αυτό το υλικό από το οποίο παρασκευάζονται τα δοκίμια. Στη συνέχεια, γίνεται λόγος για τις αλλοτροπικές μορφές άνθρακα εστιάζοντας στους νανοσωλήνες άνθρακα και το γραφένιο. Παρατίθενται η δομή, οι ιδιότητες, οι μέθοδοι σύνθεσης καθώς και οι εφαρμογές τους σε διάφορους τομείς. Επιπλέον, εισάγεται η έννοια της μη καταστροφικής αξιολόγησης υλικών και κατασκευών και αναφέρονται οι περισσότερες μέθοδοι. Δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στις ηλεκτρικές μετρήσεις (ηλεκτρική αγωγιμότητα) και στη θερμογραφία, διότι είναι οι μέθοδοι με τις οποίες θα γίνουν οι διαδικασίες εξαγωγής των αποτελεσμάτων και των συμπερασμάτων.

Στο δεύτερο κεφάλαιο, στο πειραματικό μέρος, αναπτύσσεται διεξοδικά όλη η πειραματική διαδικασία, από τη διαδικασία μίξης και κατασκευής των νανο-ενισχυμένων δοκιμίων, μέχρι τις διαδικασίες που πραγματοποιήθηκαν για την εξαγωγή και καταγραφή των αποτελεσμάτων, που είναι οι ηλεκτρικές μετρήσεις και οι μετρήσεις θερμικής συμπεριφοράς.

Στο τρίτο κεφάλαιο, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων με τη μορφή διαγραμμάτων και στο τέταρτο και τελευταίο κεφάλαιο της παρούσης εργασίας, αναφέρονται συμπεράσματα που εξάγονται από αυτά.

## **ABSTRACT**

This postgraduate dissertation is concerned with the comparative study of the effect of different nano-inclusions on the electrical and thermal properties of modified mortars.

The purpose of the work is initially the successful preparation of nano-amplified specimens with different percentages of carbon and graphite nanotubes (up to 2% by weight of cement) and then the comparative study of the effect of nano-amplification on the electrical and thermal properties of the specimens in relation to standard specimens reference.

In the first chapter, which is the theoretical part of the thesis, a detailed reference is made to cement, aggregates as well as to cement-based materials and concrete mortars, since they are the material from which the samples are prepared. Subsequently, allotropic forms of carbon are discussed, focusing on carbon nanotubes and graphene. The structure, properties, synthesis methods and their applications in various fields are listed. In addition, the concept of non-destructive evaluation of materials and structures is introduced and most methods are mentioned. Particular emphasis is placed on electrical measurements (electrical conductivity) and thermography, because they are the methods by which the processes for the extraction of results and conclusions will be made.

In the second chapter, in the experimental part, the whole experimental process, from the process of mixing and constructing the nano-amplified specimens, to the procedures for the extraction and recording of the results, which are the electrical measurements and the thermal behavior measurements.

In the third chapter, the results of the measurements are presented in the form of diagrams and in the fourth and final chapter of this paper, conclusions are drawn from them.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ Ι: ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

<b>1. ΤΣΙΜΕΝΤΟ</b> .....	<b>1</b>
1.1 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ .....	1
1.2 ΟΡΙΣΜΟΣ .....	4
1.3 ΣΥΝΘΕΣΗ .....	4
1.4 ΠΑΡΑΓΩΓΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ .....	4
1.5 ΠΡΟΣΜΙΚΤΑ ΔΕΥΤΕΡΕΥΟΝΤΑ ΣΥΣΤΑΤΙΚΑ.....	7
1.6 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ .....	10
1.6.1 Κοκκομετρία ή λεπτότητα (Finenes) .....	11
1.6.2 Υγεία (Soundness) .....	11
1.6.3 Χρόνος πήξης (Setting time) .....	11
1.6.4 Συνεκτικότητα ή συνάφεια (Consistency) .....	12
1.6.5 Θερμότητα ενυδάτωσης (Heat of hydration) .....	12
1.6.6 Αντοχή σε θλίψη (Compressive strength) .....	13
1.7 ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΣ .....	13
<b>2. ΑΔΡΑΝΗ</b> .....	<b>17</b>
2.1 ΠΡΟΕΛΕΥΣΗ .....	14
2.2 ΜΟΡΦΗ ΚΟΚΚΩΝ .....	14
2.3 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ .....	15
2.4 ΧΡΗΣΕΙΣ .....	15
<b>3. ΥΛΙΚΑ ΒΑΣΙΣΜΕΝΑ ΣΤΟ ΤΣΙΜΕΝΤΟ</b> .....	<b>15</b>
3.1 ΤΣΙΜΕΝΤΟΠΑΣΤΑ .....	15
3.2 ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ .....	16
3.2.1 Γενικά στοιχεία .....	16
3.2.2 Μέθοδοι παραγωγής .....	19
3.2.3 Πρόσθετα .....	19
3.2.4 Είδη .....	21
3.2.5 Ιδιότητες .....	22
3.2.6 Χρήσεις .....	24
3.3 ΚΟΝΙΑΜΑ.....	24
3.3.1 Ορισμός .....	24
3.3.2 Επιμέρους συστατικά .....	25
3.3.3 Ιδιότητες.....	25
3.3.4 Χρήσεις και εφαρμογές .....	26
<b>4. ΝΑΝΟΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ</b> .....	<b>33</b>
4.1 ΟΡΙΣΜΟΣ .....	27
4.2 Ο ΑΝΘΡΑΚΑΣ ΚΑΙ ΟΙ ΑΛΛΟΤΡΟΠΙΚΕΣ ΜΟΡΦΕΣ ΤΟΥ .....	28
4.2.1 Διαμάντι .....	29
4.2.2 Γραφίτης .....	30
4.2.3 Φουλερένια.....	30
4.2.4 Άμορφος Άνθρακας .....	31
4.2.5 Νανοσωλήνες Άνθρακα .....	31
4.2.6 Γραφένιο .....	32

4.3	NANOΣΩΛΗΝΕΣ ΑΝΘΡΑΚΑ .....	33
4.3.1	Δομικά χαρακτηριστικά .....	33
4.3.2	Ιδιότητες .....	36
4.3.2.1	Μηχανικές .....	36
4.3.2.2	Οπτικές .....	37
4.3.2.3	Ηλεκτρονικές .....	37
4.3.2.4	Θερμικές.....	37
4.3.3	Τρόποι σύνθεσης .....	38
4.3.3.1	Ηλεκτρική εκκένωση παρουσία γραφίτη (carbon arc ή arc-discharge)	38
4.3.3.2	Εξάχνωση γραφίτη μέσω παλμικού laser (laser ablation ή pulsed laser vaporization).....	39
4.3.3.3	Χημική εναπόθεση αερίων (chemical vapor deposition) .....	39
4.3.3.4	Μετατροπή μονοξειδίου του άνθρακα υπό υψηλή πίεση (high pressure CO Conversion) .....	40
4.3.4	Χημική τροποποίηση .....	41
4.3.5	Εφαρμογές .....	41
4.4	ΓΡΑΦΕΝΙΟ .....	42
4.4.1	Δομή .....	42
4.4.2	Τρόποι Σύνθεσης .....	43
4.4.2.1	Μικρομηχανική αποφλοίωση ή διάσπαση .....	44
4.4.2.2	Ανοδική συγκόλληση .....	45
4.4.2.3	Φωτοαποφλοίωση με laser .....	46
4.4.2.4	Κρυσταλλική ανάπτυξη σε καρβίδιο του πυριτίου (SiC) .....	46
4.4.2.5	Χημική εναπόθεση ατμών (CVD) .....	47
4.4.2.6	Κρυσταλλική ανάπτυξη σε μεταλλικό υπόστρωμα.....	48
4.4.3	Ιδιότητες.....	49
4.4.3.1	Μηχανικές.....	50
4.4.3.2	Οπτικές .....	50
4.4.3.3	Χημικές .....	50
4.4.3.4	Ηλεκτρικές .....	51
4.4.3.5	Θερμικές .....	51
4.4.4	Εφαρμογές.....	52
5.	ΜΗ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΟΙ ΕΛΕΓΧΟΙ .....	53
5.1	ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ .....	53
5.2	ΜΕΘΟΔΟΙ .....	54
5.2.1	Οπτικός Έλεγχος– Επιθεωρήσεις .....	54
5.2.2	Κρουσιμέτρηση .....	54
5.2.3	Υπέρηχοι .....	55
5.2.4	Μαγνητικά σωματίδια .....	56
5.2.5	Ραδιογραφία.....	56
5.2.6	Ακουστική Εκπομπή .....	57
5.2.7	Ραντάρ .....	58
5.2.8	Δινορεύματα .....	59
5.2.9	Διεισδυτικά υγρά .....	59
5.2.10	Ηλεκτρικές Μετρήσεις.....	59
5.2.11	Θερμογραφία .....	60

<b>6. ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ (ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ)</b>	<b>61</b>
6.1 ΓΕΝΙΚΑ	61
6.2 ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΣΤΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ	61
6.2.1 Οπτικός Έλεγχος– Επιθεωρήσεις	61
6.2.2 Διάφορες μέθοδοι μέτρησης	62
6.2.3 Παράμετροι αλλοίωσης αποτελεσμάτων	63
6.2.4 Επιφανειακή ειδική ηλεκτρική αντίσταση	63
6.2.5 Πλεονεκτήματα και περιορισμοί	64
<b>7. ΘΕΡΜΟΓΡΑΦΙΑ</b>	<b>64</b>
7.1 Η ΕΝΝΟΙΑ ΤΗΣ ΥΠΕΡΥΘΡΗΣ ΘΕΡΜΟΓΡΑΦΙΑΣ	64
7.2 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ	66
7.2.1 Αγωγή	66
7.2.2 Συναγωγή	66
7.2.3 Ακτινοβολία	67
7.2.4 Συντελεστής εκπομπής	68
7.3 ΜΕΘΟΔΟΙ ΥΠΕΡΥΘΡΗΣ ΘΕΡΜΟΓΡΑΦΙΑΣ	68
7.3.1 Παθητική θερμογραφία	68
7.3.2 Ενεργητική θερμογραφία	69
7.3.2.1 Θερμογραφία παλμού	70
7.3.2.2 Θερμογραφία lock-in	71
7.3.2.3 Θερμογραφία φάσης παλμού	72
7.3.2.4 Θερμογραφία με κλιμακωτή θέρμανση	72
7.3.2.5 Θερμογραφία με δονήσεις	72
7.3.2.6 Επαγωγική θερμογραφία	73
7.4 ΥΠΕΡΥΘΡΕΣ ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΚΑΜΕΡΕΣ	73
7.4.1 Παραδείγματα θερμογραφημάτων	75
7.5 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ	76
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ II: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ</b>	
<b>8. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ</b>	<b>77</b>
8.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	77
8.2 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΜΙΞΗΣ	77
8.2.1 Υλικά	77
8.2.2 Ξήρανση Αδρανών	77
8.2.3 Κοσκίνισμα Αδρανών	78
8.2.4 Ζύγισμα Αδρανών	79
8.2.5 Παρασκευή Αιωρημάτων νανοσωλήνων άνθρακα και γραφενίου	79
8.2.6 Μίξη	81
8.3 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΞΑΓΩΓΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	84
8.3.1 Ξήρανση Δοκιμίων	84
8.3.2 Έλεγχοι ηλεκτρικών μετρήσεων (ηλεκτρικής αγωγιμότητα)	85
8.3.3 Έλεγχοι Μετρήσεων υπέρυθρης Θερμογραφίας	87
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ III: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ</b>	
<b>9. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ</b>	<b>95</b>



9.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ .....	95
9.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ .....	96
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ IV: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ</b>	
<b>10. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....</b>	<b>100</b>
10.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ .....	100
10.2 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ .....	100

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

### **ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ**

<b>Εικόνα 1.1</b> Το τείχος του Αδριανού ανατολικά των Housesteads, Αγγλία .....	<b>1</b>
<b>Εικόνα 1.2</b> Δεξαμενή νερού στην περιοχή της αρχαίας Καμείρου στην Ρόδο .....	<b>2</b>
<b>Εικόνα 1.3</b> Πρώτες ύλες, ενδιάμεσα προϊόντα, προσθήκες και τελικό προϊόν στη διεργασία παραγωγής τσιμέντο .....	<b>5</b>
<b>Εικόνα 1.4</b> Σφαιρίδια μεγέθους 15-25mm του κλίνκερ τσιμέντου (προϊόν της διεργασίας πυροσυσσωμάτωσης στην περιστροφική κάμινο) .....	<b>6</b>
<b>Εικόνα 3.1</b> Το σκυρόδεμα σε μια εφαρμογή εδαφόπλακας .....	<b>24</b>
<b>Εικόνα 3.2</b> Εφαρμογή κονιάματος στην επιπέδωση δαπέδων .....	<b>27</b>
<b>Εικόνα 4.1</b> Διάφορες αλλοτροπικές μορφές άνθρακα .....	<b>29</b>
<b>Εικόνα 4.2</b> Η κρυσταλλική δομή (a) του διαμαντιού και (b) του γραφίτη .....	<b>30</b>
<b>Εικόνα 4.3</b> Η δομή SWCNTs αριστερά, και MWCNTs δεξιά .....	<b>31</b>
<b>Εικόνα 4.5</b> Σχηματική αναπαράσταση των πιθανών δομών των MWCNTs. Αριστερά, η διαμόρφωση Russian-doll και δεξιά η διαμόρφωση Swiss-roll .....	<b>36</b>
<b>Εικόνα 4.6</b> Κυματισμοί στην επιφάνεια του μονοστρωματικού γραφενίου .....	<b>43</b>
<b>Εικόνα 7.1</b> Υπέρυθρη θερμική κάμερα .....	<b>74</b>
<b>Εικόνα 7.2</b> Θερμογράφημα όψης κτιρίου .....	<b>75</b>
<b>Εικόνα 7.3</b> Θερμογράφημα τοιχοποιίας με εμφανή ίχνη υγρασίας .....	<b>75</b>
<b>Εικόνα 7.4</b> Αγωγοί θερμού νερού μέσα σε δάπεδο μπάνιου .....	<b>76</b>
<b>Εικόνα 8.1</b> Εργαστηριακός φούρνος ξήρανσης με τα αδρανή στο εσωτερικό του ....	<b>78</b>
<b>Εικόνα 8.2</b> Τα κόσκινα του εργαστηρίου (επάνω), και η αυτόματη κοσκινιέρα (κάτω)	<b>79</b>
<b>Εικόνα 8.3</b> Ζυγαριά ακριβείας .....	<b>79</b>
<b>Εικόνα 8.4</b> Το εργαστηριακό Sonicator tip (Hielscher UP 100H) .....	<b>80</b>
<b>Εικόνα 8.5</b> Εφαρμογή του Sonicator tip στον απαγωγό .....	<b>80</b>
<b>Εικόνα 8.6</b> Διαδικασία απαέρωσης των αιωρημάτων .....	<b>81</b>
<b>Εικόνα 8.7</b> Μήτρα-καλούπι 16 δοκιμίων διαστάσεων 40*40*10mm .....	<b>82</b>
<b>Εικόνα 8.8</b> Η μήτρα μετά την έκχυση του κονιάματος για τα δοκίμια αναφοράς ....	<b>82</b>
<b>Εικόνα 8.9</b> Η μήτρα μετά τη σταδιακή έκχυση του νανο-ενισχυμένου κονιάματος συγκεκριμένου ποσοστού νανοσωλήνων άνθρακα κατά βάρος τσιμέντου .....	<b>82</b>
<b>Εικόνα 8.10</b> Τα οκτώ δοκίμια αναφοράς μετά την εξαγωγή τους από τη μήτρα .....	<b>83</b>
<b>Εικόνα 8.11</b> Η εξαγωγή και η σημείωση των νανο-ενισχυμένων δοκιμίων κονιαμάτων με νανοσωλήνες άνθρακα.....	<b>83</b>
<b>Εικόνα 8.12</b> Η εξαγωγή και η σημείωση των νανο-ενισχυμένων δοκιμίων κονιαμάτων με γραφένιο.....	<b>84</b>
<b>Εικόνα 8.13</b> Ο εργαστηριακός θάλαμος των δεξαμενών, στις οποίες παρέμειναν για 28 ημέρες τα δοκίμια που παρήχθησαν. ....	<b>84</b>

<b>Εικόνα 8.14</b> Ο εργαστηριακός φούρνος ξήρανσης .....	<b>85</b>
<b>Εικόνα 8.15</b> Η εφαρμογή πίεσεως στο μοχλό της ιδιοσυσκευής .....	<b>86</b>
<b>Εικόνα 8.16</b> Η επιφάνεια του εξεταζόμενου δοκιμίου επαπτόμενη με τον δακτύλιο των ηλεκτροδίων της ιδιοσυσκευής .....	<b>86</b>
<b>Εικόνα 8.17</b> Η ιδιοσυσκευή χωρίς τη μονωτική βάση για τη μέτρηση της ηλεκτρικής αντίστασης σε όλο τον όγκο του δοκιμίου .....	<b>87</b>
<b>Εικόνα 8.18</b> Διάταξη καταγραφής της αποθέρμανσης των δοκιμίων μέχρι 35°C .....	<b>88</b>
<b>Εικόνα 8.19</b> Η εργαστηριακή υπέρυθρη κάμερα Cedip Jade 510.....	<b>88</b>

## **ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ**

<b>Σχήμα 1.1</b> Διάγραμμα ροής παραγωγικής διαδικασίας τσιμέντου .....	<b>7</b>
<b>Σχήμα 1.2</b> Συμβολισμός διαφόρων τύπων τσιμέντου του ευρωπαϊκού προτύπου .....	<b>10</b>
<b>Σχήμα 4.1</b> Γραφικό επίπεδο → τύλιγμα → SWCNTs .....	<b>34</b>
<b>Σχήμα 4.2</b> Σχηματικό διάγραμμα που δείχνει πως το εξαγωνικό επίπεδο γραφίτη τυλίγεται και σχηματίζει έναν νανοσωλήνα άνθρακα .....	<b>34</b>
<b>Σχήμα 4.3</b> Zig-zag, armchair και chiral (ενδιάμεσοι) νανοσωλήνες ανάλογα με τον άξονα τυλίγματος του γραφίτη επιπέδου. ....	<b>35</b>
<b>Σχήμα 4.4</b> Μέθοδος ηλεκτρικής εκκένωσης παρουσία γραφίτη .....	<b>38</b>
<b>Σχήμα 4.5</b> Μέθοδος εξάχνωσης γραφίτη μέσω παλμικού laser .....	<b>39</b>
<b>Σχήμα 4.6</b> Μέθοδος χημικής εναπόθεσης αερίων .....	<b>40</b>
<b>Σχήμα 4.7</b> Διάταξη μετατροπής μονοξειδίου του άνθρακα υπό υψηλή πίεση .....	<b>40</b>
<b>Σχήμα 4.8</b> Οι δεσμοί $sp^2$ (γκρι χρώμα) που δημιουργούν τα γειτονικά άτομα άνθρακα στο κρυσταλλικό πλέγμα του γραφενίου και τα τροχιακά $2p_z$ στα οποία κινείται το τέταρτο ηλεκτρόνιο κάθε ατόμου άνθρακα .....	<b>42</b>
<b>Σχήμα 4.9</b> Αναπαράσταση μεθόδων σύνθεσης γραφενίου .....	<b>44</b>
<b>Σχήμα 4.10</b> Απεικόνιση μεθόδου σύνθεσης γραφενίου με μικρομηχανική αποφλοίωση ...	<b>45</b>
<b>Σχήμα 4.11</b> Απεικόνιση μεθόδου σύνθεσης γραφενίου με ανοδική συγκόλληση .....	<b>45</b>
<b>Σχήμα 4.12</b> Απεικόνιση της σύνθεσης γραφενίου a) ως πειραματική διάταξη και b) μοριακά με τη μέθοδο της φωτοαποφλοίωσης .....	<b>46</b>
<b>Σχήμα 4.13</b> Απεικόνιση γραφενίου από καρβίδιο του πυριτίου .....	<b>47</b>
<b>Σχήμα 4.14</b> Απεικόνιση της μεθόδου .....	<b>48</b>
<b>Σχήμα 4.15</b> Αναπαράσταση της ανάπτυξης γραφενίου σε μεταλλικό υπόστρωμα .....	<b>49</b>
<b>Σχήμα 5.1</b> Αρχή λειτουργίας μεθόδου .....	<b>54</b>
<b>Σχήμα 5.1</b> Έλεγχος οικοδομικών στοιχείων με ραδιογραφία .....	<b>60</b>
<b>Σχήμα 7.1</b> Αρχή της θερμογραφίας .....	<b>65</b>
<b>Σχήμα 7.2</b> Απεικόνιση των τριών τρόπων μεταφοράς θερμότητας .....	<b>66</b>

## **ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ**

<b>Πίνακας 1.1</b> Τσιμέντα Ευρωπαϊκού Προτύπου (EN 197-1) .....	<b>8</b>
<b>Πίνακας 1.2</b> Βασικοί τύποι τσιμέντων ευρωπαϊκού προτύπου .....	<b>9</b>

Πίνακας 1.3 Απαιτήσεις μηχανικές - φυσικές οριζόμενες ως χαρακτηριστικές τιμές .....	9
--	---

## **ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ**

<b>Διάγραμμα 1.</b> Διάγραμμα επιφανειακής αντίστασης συναρτήσει του επί τοις εκατό ποσοστού νανοσωλήνων άνθρακα κατά βάρος τσιμέντου των νάνο-ενισχυμένων δοκιμίων. ....	89
<b>Διάγραμμα 2.</b> Διάγραμμα ηλεκτρικής αγωγιμότητας συναρτήσει του επί τοις εκατό ποσοστού νανοσωλήνων άνθρακα κατά βάρος τσιμέντου των νάνο-ενισχυμένων δοκιμίων. ....	90
<b>Διάγραμμα 3.</b> Διάγραμμα επιφανειακής αντίστασης συναρτήσει του επί τοις εκατό ποσοστού γραφενίου κατά βάρος τσιμέντου των νάνο-ενισχυμένων δοκιμίων. ....	91
<b>Διάγραμμα 4.</b> Διάγραμμα ηλεκτρικής αγωγιμότητας συναρτήσει του επί τοις εκατό ποσοστού γραφενίου κατά βάρος τσιμέντου των νάνο-ενισχυμένων δοκιμίων.....	91
<b>Διάγραμμα 5.</b> Διάγραμμα θερμοκρασίας ως προς τον χρόνο (Sec) καταγραφής της θερμικής κάμερας. Οι καμπύλες αποθέρμανσης των νανο-ενισχυμένων δοκιμίων νανοσωλήνων άνθρακα. ....	92
<b>Διάγραμμα 6.</b> Διάγραμμα θερμοκρασίας ως προς τον χρόνο (Sec) καταγραφής της θερμικής κάμερας. Οι καμπύλες αποθέρμανσης των νανο-ενισχυμένων δοκιμίων γραφενίου. ....	93

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ Ι: ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

## 1. ΤΣΙΜΕΝΤΟ

### 1.1 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

Το τσιμέντο αποτελεί το πιο διαδεδομένο υλικό παγκοσμίως με εκτεταμένη χρήση. Στη φύση, χρονολογείται εδώ και πάρα πολλές χιλιετίες. Η ιστορία του άρχισε, όταν ο άνθρωπος επικεντρώθηκε στην ανάγκη κατασκευής κατοικιών, για να προστατεύεται από τις καιρικές συνθήκες. Καθ' όλη τη διάρκεια της ιστορίας, τα τσιμεντοειδή υλικά έπαιξαν ζωτικό ρόλο και χρησιμοποιήθηκαν ευρέως στον αρχαίο κόσμο. Οι Αιγύπτιοι χρησιμοποίησαν ασβεστοποιημένο γύψο ως τσιμέντο και οι Έλληνες και οι Ρωμαίοι χρησιμοποιούσαν ασβέστη από ασβεστόλιθο και πρόσθεσαν άμμο για να κάνουν κονίαμα, με χοντρότερες πέτρες για σκυρόδεμα [1].



**Εικόνα 1.1** Το τείχος του Αδριανού ανατολικά των Housesteads, Αγγλία [1]

Το 1985, κατά τη διάρκεια κατασκευών, ανακαλύφθηκε στην περιοχή της Γαλιλαίας του Ισραήλ, το αρχαιότερο γνωστό σήμερα σκυρόδεμα (από ασβέστη και πέτρες), χρονολογούμενο περίπου από το 7000 π.Χ. Γύρω στο 3000 π.Χ., οι Αιγύπτιοι αρχίζουν να χρησιμοποιούν λάσπη με άχυρα για την κατασκευή τούβλων. Έτσι, φαίνεται ότι ανακαλύπτουν τον ασβέστη και τη γύψο χρησιμοποιώντας τα σε κονιάματα εκείνης της εποχής. Παράλληλα, οι Κινέζοι χρησιμοποιούν τσιμεντοειδή

υλικά για την κατασκευή του Σινικού Τείχους. Επίσης, από το 800 π.Χ. οι Έλληνες χρησιμοποιούσαν λάσπη αποτελούμενη από διάφορα μίγματα ασβέστη, για κτίσιμο διαφόρων κατασκευών [2].

Ο Ρωμαίος αρχιτέκτονας-συγγραφέας Βιτρούβιος (1<sup>ος</sup> αιώνας π.Χ), αποτελεί μία σημαντική πηγή πληροφοριών για την αρχαία Ελληνική αρχιτεκτονική και οικοδομική. Σε χειρόγραφό του (τα δέκα βιβλία της αρχιτεκτονικής), φαίνεται ότι έδινε οδηγίες στους αρχιτέκτονες για την παρασκευή κονιάματος που πήζει τόσο στον αέρα όσο και στο νερό. Οι αρχαίοι Έλληνες ήταν ίσως οι πρώτοι που χρησιμοποίησαν υδραυλικές κονίες, δηλαδή κονίες που όταν ανακατευτούν με το νερό μπορούν να πήξουν και να σκληρυνθούν τόσο στον αέρα όσο και μέσα στο νερό. Το μίγμα ασβέστη και ηφαιστειακής γης είχε τη δυνατότητα να πήζει και να σκληραίνει μέσα στο νερό (υδραυλική κονία) χωρίς να διαλύεται όπως τα ασβεστοκονιάματα. Από την άποψη αυτή, το μίγμα ασβέστη και ηφαιστειακής γης είναι πολύ συγγενές με το τσιμέντο και θα μπορούσε να θεωρηθεί ως πρόδρομο υλικό του σημερινού τσιμέντου. Τέτοιο μίγμα φαίνεται ότι χρησιμοποιήθηκε για να γίνει υδατοστεγανή δεξαμενή χωρητικότητας 600m<sup>3</sup> στο ναό της Αθηνάς στην αρχαία Κάμειρο στη Ρόδο το 500 π.Χ, που σώζεται ως σήμερα [1-2].



**Εικόνα 1.2** Δεξαμενή νερού στην περιοχή της αρχαίας Καμείρου στην Ρόδο [3]

Οι Ρωμαίοι φαίνεται ότι πήραν τις γνώσεις αυτές από τους Έλληνες και από το 300 π.Χ. τις ανέπτυξαν σε μεγάλο βαθμό τόσο ως προς τα ασβεστοκονιάματα (αερικά κονιάματα) όσο και ως προς τη χρήση μίγματος ασβέστη και ηφαιστειακής γης (υδραυλικά κονιάματα). Την ηφαιστειακή γη την προμηθεύονταν από το χωριό Pozzuoli κοντά στο Βεζούβιο. Το χωριό αυτό έδωσε το όνομα «Ποζολάνη» στα

ηφαιστειακά υλικά αλλά και σε τεχνητά υλικά με τις ίδιες περίπου ιδιότητες (ορισμένες ιπτάμενες τέφρες), που χρησιμοποιούνται σε μεγάλη έκταση σήμερα (ποζολανικά τσιμέντα). Ένα από τα πρώτα σημαντικά έργα των Ρωμαίων είναι το Κολοσσιαίο (82 μ.Χ.), το Πάνθεον (123 μ.Χ.) και διάφορα υδραγωγεία (150 μ.Χ.). Είναι επίσης γνωστό, ότι οι Ρωμαίοι προσέθεταν μερικές φορές στο σκυρόδεμα διάφορα υλικά για να βελτιώσουν ορισμένες ιδιότητές του, και τα υλικά αυτά μπορούν να θεωρηθούν κατά κάποιο τρόπο ως πρόδρομα των σημερινών προσθέτων [2-4].

Η Αναγέννηση και η Εποχή του Διαφωτισμού έφεραν νέους τρόπους σκέψης που οδήγησαν στη βιομηχανική επανάσταση. Στον 18ο αιώνα, η Βρετανία συμφώνησε τα συμφέροντα της βιομηχανίας και της αυτοκρατορίας, με την ανάγκη να χτιστούν φάρoi σε εκτεθειμένους βράχους ώστε να αποφευχθούν οι απώλειες στη ναυτιλία. Η συνεχής απώλεια εμπορικών πλοίων και πολεμικών πλοίων οδήγησε την τεχνολογία τσιμέντου προς τα εμπρός [1].

Ο Smeaton, κατασκευάζοντας τον τρίτο φάρο Eddystone (1759) στα ανοικτά των ακτών της Κορνουάλης στη Νοτιοδυτική Αγγλία, διαπίστωσε ότι ένα μείγμα άσβεστου, πηλού και θρυμματισμένης σκωρίας από την παραγωγή σιδήρου παρήγαγε ένα κονίαμα που σκληρύνθηκε κάτω από το νερό. Ο Joseph Aspdin έβγαλε ένα δίπλωμα ευρεσιτεχνίας το 1824 για το "Portland Cement", ένα υλικό που παρήγαγε με το ψήσιμο λεπτώς λειασμένου πηλού και ασβεστόλιθου έως ότου ασβεστοποιήθηκε ο ασβεστόλιθος. Το ονόμασε Πόρτλαντ Τσιμέντο επειδή το σκυρόδεμα που φτιάχτηκε από αυτό έμοιαζε με πέτρα Portland, μια ευρέως χρησιμοποιούμενη οικοδομική πέτρα στην Αγγλία. Λίγα χρόνια αργότερα, το 1845, ο Isaac Johnson έκανε το πρώτο σύγχρονο τσιμέντο Portland, βάζοντας ένα μίγμα κιμωλίας και πηλού σε πολύ υψηλότερες θερμοκρασίες (1400°C-1500°C), παρόμοιες με αυτές που χρησιμοποιούνται σήμερα [1].

Έκτοτε, η παραγωγή του τσιμέντου εξαπλώθηκε σε όλο τον κόσμο και παρουσίασε σημαντικές εξελίξεις για να φθάσει στο σημερινό επίπεδο. Η πρόοδος της τεχνολογίας ήταν στη συνέχεια μεγάλη, τόσο σε ότι αφορά τα δομικά συστήματα κατασκευής όσο και σε ότι αφορά το σκυρόδεμα με την εξέλιξη των μεθόδων παραγωγής και ποιοτικού ελέγχου και την χρήση βελτιωτικών χημικών προσθέτων. Στις μέρες μας, παράγονται ετησίως σε όλο τον κόσμο πάνω από 1,5 δισεκατομμύρια τόνοι τσιμέντου. Το γεγονός αυτό καθιστά το τσιμέντο ένα από τα σπουδαιότερα και πλέον διαδεδομένα δομικά υλικά της εποχής μας [2].

## 1.2 ΟΡΙΣΜΟΣ

Κατά το ευρωπαϊκό πρότυπο EN 197-1, το τσιμέντο είναι μία υδραυλική συνδετική κονία η οποία σε ανάμιξη με το νερό δημιουργεί μια πάστα που πήζει και σκληραίνει μέσω αντιδράσεων ενυδάτωσης και η οποία μετά την σκλήρυνση διατηρεί την αντοχή και την σταθερότητά της ακόμη και κάτω από το νερό. Τα υδραυλικά τσιμέντα, αποτελούνται ουσιαστικά από το τσιμέντο Portland και τις διάφορες τροποποιήσεις του. Το αμερικανικό πρότυπο ASTM C150, καθορίζει το τσιμέντο Portland ως υδραυλικό τσιμέντο προϊόν της κονιοποίησης των κλίνκερ, τα οποία αποτελούνται από τα υδραυλικά πυριτικά άλατα ασβεστίου και ένα μικρό ποσοστό μιας ή περισσότερων μορφών θειικού άλατος ασβεστίου ως αλεσμένη σε λεπτό διαμερισμό προσθήκη. Το κλίνκερ έχει διάμετρο 5-25mm και παράγεται όταν ένα ακατέργαστο μίγμα προκαθορισμένης σύνθεσης θερμαίνεται σε υψηλές θερμοκρασίες [2-4].

## 1.3 ΣΥΝΘΕΣΗ

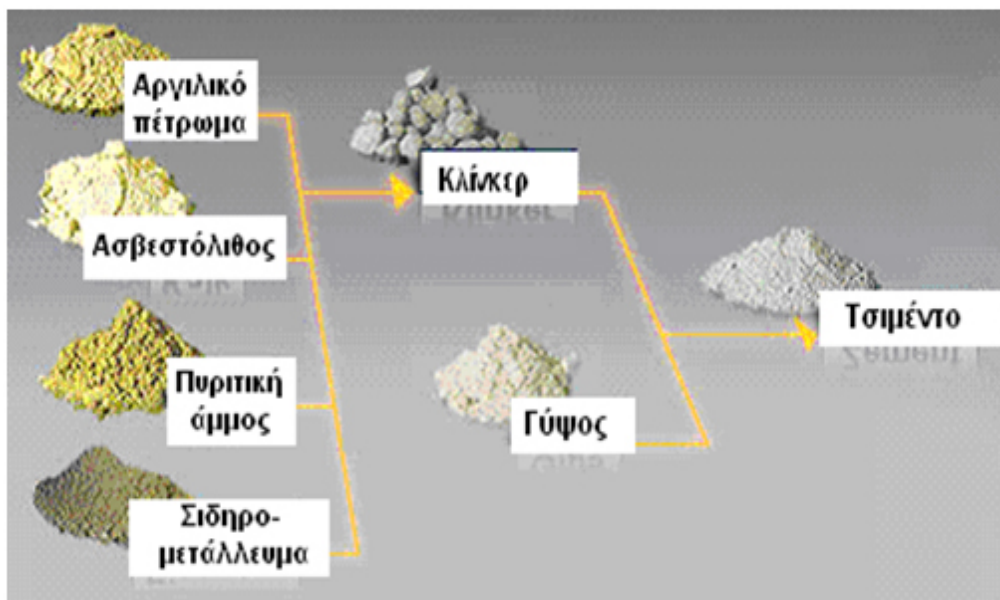
Η σύνθεση του τσιμέντου εξαρτάται από τη χημική σύνθεση των πετρωμάτων που χρησιμοποιούνται ως πρώτες ύλες, από τον τρόπο παραγωγής και κυρίως από το χρόνο και τη θερμοκρασία οπτήσεως. Οι επικρατέστερες ενώσεις του τσιμέντου είναι το οξείδιο του ασβεστίου ( $\text{CaO}$ ), το οξείδιο του πυριτίου ( $\text{SiO}_2$ ) και το οξείδιο του αργιλίου ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Ακολουθούν σε μικρότερες ποσότητες το οξείδιο του σιδήρου ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), του μαγνησίου ( $\text{MgO}$ ), του νατρίου ( $\text{Na}_2\text{O}$ ) και του καλίου ( $\text{K}_2\text{O}$ ). Οι παραπάνω ενώσεις βρίσκονται ενωμένες στα ακόλουθα τέσσερα κύρια συστατικά που αποτελούν τις τέσσερις κύριες φάσεις του τσιμέντου.

- Πυριτικό τριασβέστιο, που συμβολίζεται με  $\text{C}_3\text{S}$  (54% κατά βάρος)
- Πυριτικό διασβέστιο, που συμβολίζεται με  $\text{C}_2\text{S}$  (17% κατά βάρος)
- Αργλικό τριασβέστιο, που συμβολίζεται με  $\text{C}_3\text{A}$  (19% κατά βάρος)
- Αργλικό τετρασβέστιο, που συμβολίζεται με  $\text{C}_4\text{AF}$  (9% κατά βάρος)

Η αναλογία των παραπάνω συστατικών έχει επίδραση στην ταχύτητα αναπτύξεως της αντοχής, δηλαδή στην ταχύτητα της χημικής αντιδράσεως του τσιμέντου με το νερό [2].

#### 1.4 ΠΑΡΑΓΩΓΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Το κοινό τσιμέντο είναι ένα γκρίζο λεπτομερές υλικό, που προκύπτει από τη λειοτρίβηση του κλίνκερ τσιμέντου. Ο λόγος τιμή (αξία) προς βάρος είναι πολύ μικρός για το τσιμέντο γεγονός που το κάνει να είναι πολύ ακριβό για μεταφορά σε μεγάλες αποστάσεις. Επίσης, επειδή οι πρώτες ύλες (θραυσμένος ασβεστόλιθος, αργιλικά πετρώματα, χαλαζιακά πετρώματα, σιδηρομετάλλευμα, βωξίτης) για την παραγωγή του τσιμέντου είναι ακόμη χαμηλότερης αξίας, για την ελαχιστοποίηση του κόστους μεταφοράς των πρώτων υλών οι μονάδες παραγωγής τσιμέντου τοποθετούνται πολύ κοντά στις πηγές πρώτων υλών (ιδιαίτερα κοντά στο λατομείο ασβεστολιθικού πετρώματος). Η μεγαλύτερη ποσότητα του παραγόμενου τσιμέντου, για τους παραπάνω λόγους, πρέπει να διατίθεται σε περιοχές και μονάδες παραγωγής σκυροδέματος σχετικώς κοντά στα εργοστάσια παραγωγής του [5].

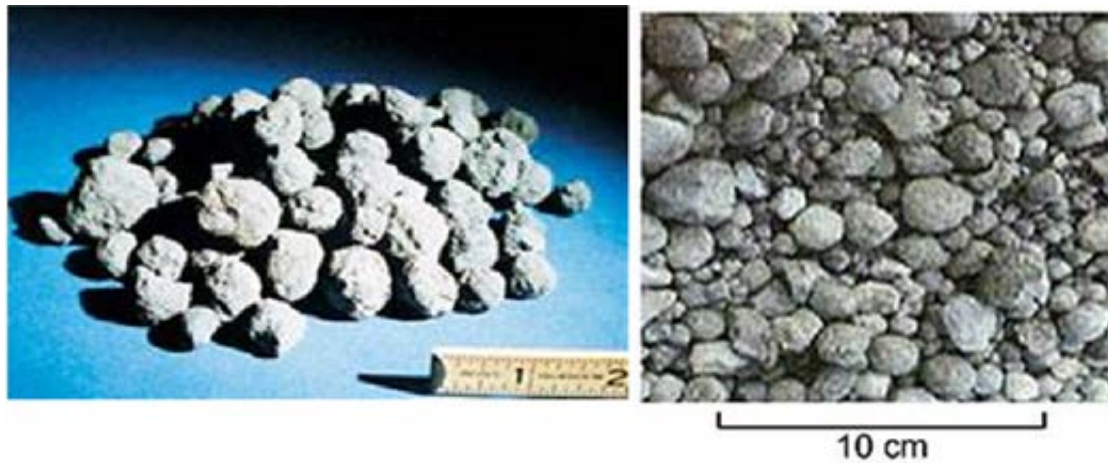


**Εικόνα 1.3** Πρώτες ύλες, ενδιάμεσα προϊόντα, προσθήκες και τελικό προϊόν στη διεργασία παραγωγής τσιμέντο [5]

Η σημαντικότερη πρώτη ύλη για την παραγωγή του κλίνκερ τσιμέντου είναι τα ασβεστολιθικά πετρώματα, που εξορύσσονται επιφανειακά κοντά στη μονάδα παραγωγής του τσιμέντου. Το μείγμα των πρώτων υλών (θραυσμένος ασβεστόλιθος, αργιλικά πετρώματα, χαλαζιακά πετρώματα, σιδηρομετάλλευμα, βωξίτης, κ.α.) αναμειγνύονται σε κατάλληλη αναλογία και λειοτριβούνται. Το κονιοποιημένο μείγμα (φαρίνα) υφίσταται πυρομεταλλουργική κατεργασία μέσα σε περιστροφική κάμινο.

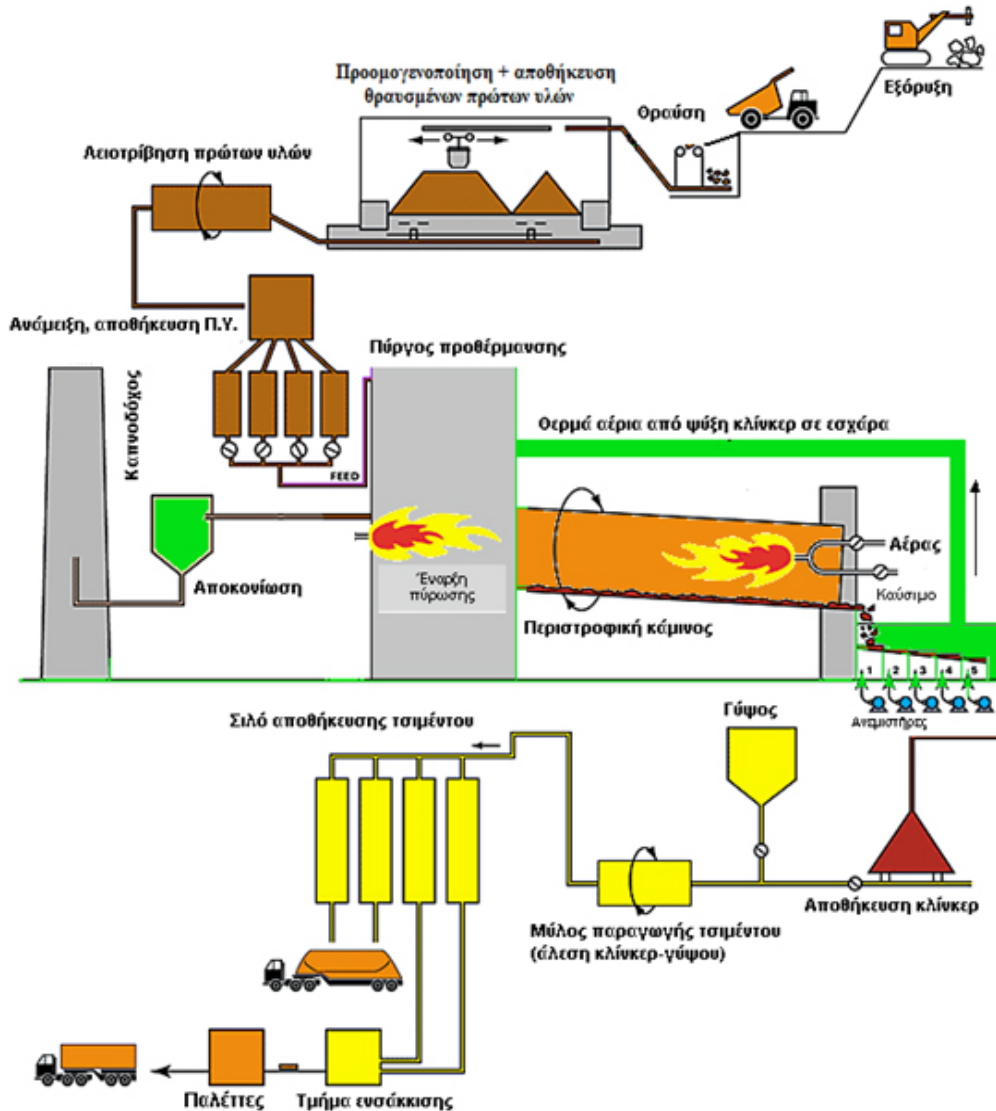


Στην περιστροφική κάμινο οι κονιορτοποιημένες πρώτες ύλες, με χρήση καυσίμων (πετρέλαιο, γαιάνθρακες ή και εναλλακτικά καύσιμα), θερμαίνονται σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες (~1450°C). Έτσι, με φυσικοχημικές διεργασίες, μετατρέπονται σε ένα υλικό γκριζοπράσινου χρώματος μορφής σφαιριδίων διαμέτρου 10-25 mm, το οποίο ονομάζεται κλίνκερ τσιμέντου [5].



**Εικόνα 1.4** Σφαιρίδια μεγέθους 15-25mm του κλίνκερ τσιμέντου (προϊόν της διεργασίας πυροσυσσωμάτωσης στην περιστροφική κάμινο) [5]

Το κλίνκερ αποτελεί το βασικό συστατικό του τσιμέντου και από την ποσότητα του εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό η ποιότητα του. Μετά την παραγωγή του κλίνκερ στην περιστροφική κάμινο, αυτό ψύχεται και κατόπιν αναμειγνύεται με 5% περίπου κατά βάρος γύψο. Τέλος για την δημιουργία τσιμέντου απαιτείται συνάλεση με άλλα φυσικά (π.χ. ποζολάνες) ή τεχνητά πρόσθετα υλικά που προσδίδουν στο τσιμέντο τις ωφέλιμες ιδιότητες. Το αναλυτικό διάγραμμα ροής των διεργασιών παραγωγής τσιμέντου παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα [2].



Σχήμα 1.1 Διάγραμμα ροής παραγωγικής διαδικασίας τσιμέντου[5]

## 1.5 ΤΥΠΟΙ ΚΑΙ ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ

Οι τύποι των τσιμέντων που παρασκευάζονται σε κάθε χώρα της Ευρωπαϊκής Ένωσης εξαρτώνται από τις διαθέσιμες πρώτες ύλες, όπως επίσης από τη ζήτηση κάθε τύπου τσιμέντου. Έτσι, ανάλογα με τις διαθέσιμες και χρησιμοποιούμενες πρώτες ύλες, δημιουργήθηκαν οι διάφοροι τύποι τσιμέντων που μπορούν να παραχθούν. Οι τύποι αυτοί είναι το κοινό τσιμέντο Portland, τα τσιμέντα με ποζολάνη, ιπτάμενη τέφρα (πυριτική ή ασβεστιτική), τσιμέντα με σκωρία υψικαμίνου, τσιμέντα με πυριτική παιπάλη, με ασβεστόλιθο κλπ. Γι' αυτό το λόγο, το πρότυπο προβλέπει μεγάλο αριθμό προϊόντων τσιμέντου τα οποία, για προφανείς λόγους, όμως δεν κυκλοφορούν κατ' ανάγκη όλα σε κάθε χώρα μέλος. Στον πίνακα

που ακολουθεί δίνονται αναλυτικά, σύμφωνα με το πρότυπο, το είδος και το ποσοστό των συστατικών του τσιμέντου, τα οποία χρησιμοποιούνται για την παραγωγή και καθορίζουν τα 27 διαφορετικά είδη τσιμέντων του πίνακα [5].

**Πίνακας 1.1** Τσιμέντα Ευρωπαϊκού Προτύπου (EN 197-1) [5]

Κριότεροι Τύποι Τσιμέντου	Σύνθεση (% μέρη κατά βάρος) <sup>1</sup>												
	-Ονομασία	Τύπος Τσιμέντου	Κύρια συστατικά									Δευτερεύοντα συστατικά	
			Κλίμακας τσιμέντου Portland	Σκυρία	Πυριτική Παπάλη	Ποζολάνη		Ιπτάμενη Τέφρα		Ψημένο σχιστόλιθο	Ασβεστόλιθος		
						Φυσική	Τεχνητή	Πυριτική	Ασβετούχος				
K	S	D <sup>2</sup>	P	Q	V	W	T	L <sup>4</sup>	LL <sup>5</sup>				
CEM I	Τσιμέντο Portland	CEM I	95-100	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
CEM II	Τσιμέντο Portland με σκυρία υφικαμίνων	CEM II/A-S	80-94	6-20	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
		CEM II/B-S	65-79	21-35	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
	Τσιμέντο Portland με πυριτική παπάλη	CEM II/A-D	90-94	—	6-10	—	—	—	—	—	—	—	0-5
Τσιμέντο Portland με ποζολάνη		CEM II/A-P	80-94	—	—	6-20	—	—	—	—	—	—	0-5
		CEM II/B-P	65-79	—	—	21-35	—	—	—	—	—	—	0-5
		CEM II/A-Q	80-94	—	—	—	6-20	—	—	—	—	—	0-5
		CEM II/B-Q	65-79	—	—	—	21-35	—	—	—	—	—	0-5
Τσιμέντο Portland με ιπτάμενη τέφρα		CEM II/A-V	80-94	—	—	—	—	6-20	—	—	—	—	0-5
		CEM II/B-V	65-79	—	—	—	—	21-35	—	—	—	—	0-5
		CEM II/A-W	80-94	—	—	—	—	—	6-20	—	—	—	0-5
		CEM II/B-W	65-79	—	—	—	—	—	21-35	—	—	—	0-5
Τσιμέντο Portland με ψημένο σχιστόλιθο		CEM II/A-T	80-94	—	—	—	—	—	—	6-20	—	—	0-5
		CEM II/B-T	65-79	—	—	—	—	—	—	21-35	—	—	0-5
Τσιμέντο Portland με ασβεστόλιθο		CEM II/A-L	80-94	—	—	—	—	—	—	—	6-20	—	0-5
		CEM II/B-L	65-79	—	—	—	—	—	—	—	21-35	—	0-5
		CEM II/A-LL	80-94	—	—	—	—	—	—	—	—	6-20	0-5
		CEM II/B-LL	65-79	—	—	—	—	—	—	—	—	21-35	0-5
Τσιμέντο Portland - σύνθετο <sup>3</sup>		CEM II/A-M	80-94	6-20								0-5	
		CEM II/B-M	65-79	21-35								0-5	
CEM III	Σκυριοτσιμέντο	CEM III/A	35-64	36-65	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
		CEM III/B	20-34	66-80	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
		CEM III/C	5-19	81-95	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
CEM IV	Ποζολανικό Τσιμέντο <sup>3</sup>	CEM IV/A	65-89	—	11-35						—	—	0-5
		CEM IV/B	45-64	—	36-55						—	—	0-5
CEM V	Σύνθετο Τσιμέντο	CEM V/A	40-64	18-30	—	18-30		—	—	—	—	—	0-5
		CEM V/B	20-39	31-50	—	31-50		—	—	—	—	—	0-5

Σε γενική μορφή όμως, το πρότυπο EN 197-1 προδιαγράφει τους εξής πέντε τύπους τσιμέντου (Πίνακας 1.2).

**Πίνακας 1.2** Βασικοί τύποι τσιμέντων ευρωπαϊκού προτύπου

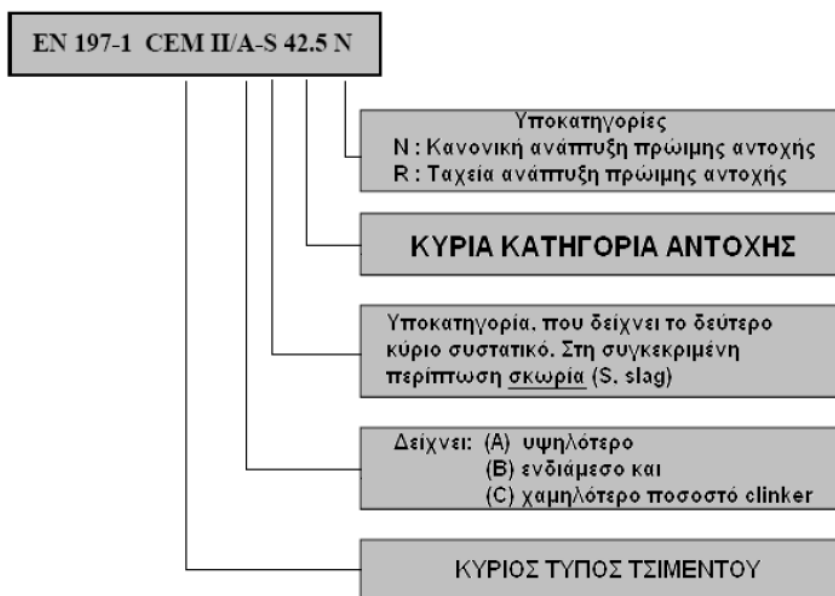
ΤΥΠΟΣ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ
CEM I	Κοινό τσιμέντο Portland
CEM II	Σύνθετο τσιμέντο Portland
CEM III	Σκωριοτσιμέντο
CEM IV	Ποζολανικό τσιμέντο Portland
CEM V	Σύνθετο τσιμέντο

Επίσης, προδιαγράφονται και έξι κατηγορίες αντοχών, στις οποίες κατατάσσονται τα τσιμέντα, ανάλογα με την αντοχή σε θλίψη τσιμεντοκονιάματος, σύμφωνα με το πρότυπο **ΕΛΟΤ EN 197-1**. Κάθε κατηγορία ορίζεται από ένα κατώτερο και ένα ανώτερο όριο αντοχής. Το κατώτερο όριο αντοχής των 28 ημερών χαρακτηρίζει την συγκεκριμένη κατηγορία. Κάθε μία από τις παραπάνω περιλαμβάνει δύο υποκατηγορίες ανάλογα με τον χρόνο ανάπτυξης της αντοχής, κανονική (**N**) ή ταχεία (**R**) [5].

**Πίνακας 1.3** Απαιτήσεις μηχανικές - φυσικές οριζόμενες ως χαρακτηριστικές τιμές [5]

Κατηγορία αντοχής	Αντοχή σε θλίψη, MPa (N/mm <sup>2</sup> )			Αρχικός χρόνος πήξης min	Διόγκωση (Διαστολή) mm
	Αρχική αντοχή		Τυπική αντοχή (όρια)		
	2 ημέρες	7 ημέρες	28 ημέρες		
32.5 N	-	≥ 16.0	≥ 32.5    ≤ 52.5	≥ 75	≤ 10
32.5 R	≥ 10.0	-			
42.5 N	≥ 10.0	-	≥ 42.5    ≤ 62.5	≥ 60	
42.5 R	≥ 20.0	-			
52.5 N	≥ 20.0	-	≥ 52.5    -	≥ 45	
52.5 R	≥ 30.0	-			

Η συμμόρφωση των τσιμέντων ως προς τα όρια αντοχών είναι στατιστική και περιγράφεται στο πρότυπο. Ο συμβολισμός των διαφόρων τσιμέντων, σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ EN 197-1, καθορίζεται από τον κύριο τύπο τσιμέντου, το ποσοστό κλίνκερ, τον τύπο του δεύτερου κύριου συστατικού, την κατηγορία αντοχής και το επίπεδο της πρώιμης αντοχής, όπως παραστατικά φαίνεται στο παρακάτω σχήμα [5].



**Σχήμα 1.2** Συμβολισμός διαφόρων τύπων τσιμέντου του ευρωπαϊκού προτύπου [5]

Τα κύρια δευτερεύοντα συστατικά, που χρησιμοποιούνται στην παραγωγή σύνθετων τσιμέντων και εμφανίζονται στον αναλυτικό πίνακα του ευρωπαϊκού προτύπου EN 197-1 δίνονται παρακάτω με το χαρακτηριστικό κεφαλαίο λατινικό γράμμα που αναφέρεται σε κάθε ένα από αυτά [5]:

- S – blastfurnace slag (σκωρία υψικαμίνων)
- D – silica fume (ατμοί πυριτίας)
- P – natural pozzolana (φυσική ποζολάνη)
- Q – natural calcined pozzolana (φυσική ποζολάνη μετά από πύρωση)
- V – siliceous fly ash (πυριτική ιπτάμενη τέφρα)
- W – calcareous fly ash (ασβεστιτική ιπτάμενη τέφρα)
- L, LL – limestone (ασβεστόλιθος)
- T – burnt shale (τέφρα καύσης βιτουμενιούχων σχιστολίθων)
- M – two or more of the above (μείγμα των παραπάνω)

## 1.6 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

Οι βασικές ιδιότητες των τσιμέντων που επηρεάζουν τη συμπεριφορά τους στις διάφορες χρήσεις (π.χ. παρασκευή σκυροδέματος, κονιαμάτων κλπ.), όπως επίσης και τα διάφορα πρότυπα που έχουν καθιερωθεί και εφαρμόζονται για τον έλεγό τους, περιγράφονται παρακάτω [5].

### 1.6.1 Κοκκομετρία ή λεπτότητα (Finenes)

Η λεπτότητα του τσιμέντου επιδρά στη θερμότητα που απελευθερώνεται καθώς επίσης και στο ρυθμό (ταχύτητα) ενυδάτωσης. Σήμερα η λεπτότητα του τσιμέντου εκφράζεται από την κοκκομετρική του ανάλυση και από τον αριθμό Blaine (ειδική επιφάνεια) σε μονάδες  $m^2/kg$  ή  $cm^2/g$  και αντιπροσωπεύει τη συνολική εξωτερική επιφάνεια των τεμαχιδίων που περιέχονται σε μάζα 1kg ή 1g τσιμέντου. Είναι προφανές ότι, όσο μεγαλύτερη είναι η λεπτότητα του τσιμέντου τόσο μεγαλύτερη είναι η ποσότητα της ενέργειας που έχει καταναλωθεί για την παραγωγή του (μεγαλύτερη διάρκεια άλεσης του κλίνκερ, άρα και κατανάλωση ενέργειας στο μύλο). Η μεγαλύτερη λεπτότητα τσιμέντου αυξάνει την ταχύτητα ενυδάτωσης, λόγω μεγαλύτερης επιφάνειας αντίδρασης με το νερό, και έτσι επιταχύνεται η ταχύτητα ανάπτυξης αντοχής, ιδιαιτέρως τις πρώτες 7 ημέρες. Η λεπτότητα του τσιμέντου προσδιορίζεται με τις παρακάτω μεθόδους [5]:

- Wagner turbidimeter σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C 115
- Blaine air-permeability test (σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C 204)
- Με προσδιορισμό μέσω κοσκίνισματος του κλάσματος  $-45\mu m$  (325 mesh), [σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C 430]

### 1.6.2 Υγεία (Soundness)

Υγεία είναι η ικανότητα της σκληρυμένης τσιμεντόπαστας να διατηρεί τον όγκο της μετά την πήξη. Ένα τσιμέντο χαρακτηρίζεται ως μη «υγιές» εάν, μετά την πάροδο κάποιου χρόνου από τη χρήση του, εμφανίσει καταστροφική για το σκυρόδεμα διόγκωση που προκαλεί διάρρηξη της κατασκευής. Η διόγκωση οφείλεται στην παρουσία περίσσειας οξειδίων του ασβεστίου και μαγνησίου (ελεύθερη άσβεστος, CaO και μαγνησία, MgO) που κατά την ενυδάτωση δημιουργούν υδροξείδια με παράλληλη αύξηση του όγκου της τσιμεντοκονίας [5].

### 1.6.3 Χρόνος πήξης (Setting time)

Το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί μεταξύ της έναρξης ανάμιξης του τσιμέντου με το νερό και της σκλήρυνσης της τσιμεντόπαστας (χρόνος «απώλειας» της πλαστικότητάς της) καλείται χρονικό διάστημα πήξης (setting time period). Ανάλογα με τον τύπο του χρησιμοποιούμενου τσιμέντου και με τις ιδιότητές του, το χρονικό διάστημα πήξης της τσιμεντόπαστας κυμαίνεται μεταξύ 2 και 10 ωρών. Η

πήξη του τσιμέντου προκαλείται από την ανάπτυξη αλληλοεμπλεκόμενων δομών των προϊόντων ενυδάτωσης του τσιμέντου μετά την περίοδο ωρίμανσης [5].

#### **1.6.4 Συνεκτικότητα ή συνάφεια (Consistency)**

Περιγράφει την ιδιότητα της τσιμεντοκονίας να ρέει. Προσδιορίζεται με τη συσκευή Vicat και δίνει το επί τοις εκατό ποσοστό του προστιθέμενου νερού για την παρασκευή τσιμεντόπαστας (τσιμεντοκονίας), η οποία επιτρέπει τη βύθιση του εμβόλου της συσκευής κατά ~10 mm [5].

#### **1.6.5 Θερμότητα ενυδάτωσης (Heat of hydration)**

Η θερμότητα ενυδάτωσης, είναι η θερμότητα που απελευθερώνεται κατά την αντίδραση τσιμέντου και νερού. Η ποσότητα αυτή εξαρτάται κυρίως από τον λόγο νερού τσιμέντου (W/C), την λεπτότητα του τσιμέντου και τη θερμοκρασία συντήρησης. Αύξηση των παραπάνω παραγόντων αυξάνει τη θερμότητα ενυδάτωσης. Σε ογκώδη έργα (μεγάλος όγκος σκυροδέματος), ο ρυθμός και η ποσότητα της θερμότητας που εκλύεται είναι καθοριστικής σημασίας επειδή, αν η εκλυόμενη θερμότητα δεν απάγεται γρήγορα, προκαλεί αύξηση της θερμοκρασίας της μάζας του σκυροδέματος. Επίσης, ο μη ελεγχόμενος ρυθμός μείωσης της θερμοκρασίας του σκληρυμένου σκυροδέματος στη θερμοκρασία περιβάλλοντος δημιουργεί ανεπιθύμητες εσωτερικές τάσεις στη μάζα του σκυροδέματος και τελικώς ρωγματώσεις, λόγω θερμικής συστολής. Αφ' ετέρου όμως, η αύξηση της θερμοκρασίας εξαιτίας των αντιδράσεων ενυδάτωσης έχει ευεργετικά αποτελέσματα σε εξωτερικό περιβάλλον χαμηλών θερμοκρασιών, επειδή εξασφαλίζει ευνοϊκές συνθήκες συντήρησης (αύξησης της αντοχής με την πάροδο του χρόνου, δηλαδή συνέχιση των αντιδράσεων ενυδάτωσης του τσιμέντου). Η θερμότητα ενυδάτωσης ελέγχεται σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C 186. Κατά προσέγγιση οι ποσότητες θερμότητας που εκλύονται κατά τις πρώτες 7 ημέρες για τους διάφορους τύπους τσιμέντων, συγκρινόμενες με αυτή (100%) του κοινού τσιμέντου Portland (τύπου I) είναι [5]:

- Τύπου I: κοινό 100%
- Τύπου II: ενδιάμεσο 80-85%
- Τύπου III: υψηλής αρχικής αντοχής έως 150%
- Τύπου IV: χαμηλής θερμότητας ενυδάτωσης 40-60%
- Τύπου V: ανθεκτικό σε θειικά 60-75%

### 1.6.6 Αντοχή σε θλίψη (Compressive strength)

Η αντοχή σε θλίψη είναι σημαντική ιδιότητα του τσιμέντου και προσδιορίζεται σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C 109 σε κύβους πλευράς 2 ιντσών (50.8 mm), που παρασκευάζονται από τσιμεντοκονία και άμμο συγκεκριμένου τύπου και συντηρούνται με προκαθορισμένο τρόπο. Η αντοχή σε θλίψη εξαρτάται από τον τύπο τσιμέντου και από τη λεπτότητά του. Γενικώς, οι αντοχές του τσιμέντου που υπολογίζονται σε κύβους τσιμεντοκονίας δεν αντιστοιχούν στις αντοχές του σκυροδέματος, εξαιτίας των διαφορών στα χαρακτηριστικά των αδρανών του σκυροδέματος, της σύνθεσης του σκυροδέματος και των διαδικασιών παρασκευής των δοκιμίων [5].

### 1.7 ΧΡΗΣΕΙΣ

Στην Ελλάδα, χρησιμοποιούνται ευρέως τα γνωστά τσιμέντα Portland, που αναφέρονται παρακάτω [6].

- Τσιμέντο Portland I/45: Παρουσιάζει γρήγορη ανάπτυξη αντοχών και είναι κατάλληλο για την κατασκευή σκυροδεμάτων υψηλών κατηγοριών και δομικών στοιχείων που απαιτούν γρήγορο ξεκαλούπωμα.
- Τσιμέντο Portland I/55: Η χρήση του στο εσωτερικό είναι περιορισμένη. Οι ποιότητες και οι χρήσεις του είναι ανάλογες με το τσιμέντο I/45 με επιδόσεις καλύτερες, κυρίως στην ανάπτυξη αντοχών.
- Τσιμέντο Portland με Ποζολάνη II/35: Στην αγορά είναι γνωστό με την ονομασία «κοινό τσιμέντο». Χρησιμοποιείται για τα σκυροδέματα των συνήθων κατασκευών. Η ανάπτυξη των αντοχών του είναι βραδύτερη συγκριτικά με τους τύπους I, αλλά λόγω της παρουσίας ποζολανικών υλικών στη σύνθεσή του, συνεχίζονται να αυξάνονται μακροχρόνια οι αντοχές του σκυροδέματος με αποτέλεσμα την αύξηση της ανθεκτικότητάς του.
- Τσιμέντο Portland με Ποζολάνη II/45: Χρησιμοποιείται κυρίως σε έργα της ΔΕΗ (φράγματα, σήραγγες). Είναι τσιμέντο ανάλογο του II/35 και έχει βελτιωμένα τα ειδικά χαρακτηριστικά και το ρυθμό ανάπτυξης των αντοχών έναντι του II/35.
- Τσιμέντο Portland ανθεκτικό στα θειικά IV/55: Το σκυρόδεμα που παρασκευάζεται με το τσιμέντο αυτό, παρουσιάζει ισχυρή αντίσταση στις προσβολές από τα θειικά άλατα και το θαλασσινό νερό.



- Τσιμέντο Portland Λευκό – I/55: Κύριο χαρακτηριστικό του είναι η λευκότητα. Έχει ιδιότητες και επιδόσεις αντίστοιχες με αυτές του τσιμέντου I/55 και χρησιμοποιείται στην πλακοποιία, στην κατασκευή διακοσμητικών στοιχείων, μωσαϊκών δαπέδων κλπ.

## 2. ΑΔΡΑΝΗ

### 2.1 ΠΡΟΕΛΕΥΣΗ

Γενικά τα αδρανή, που ονομάζονται έτσι γιατί είναι από χημική άποψη αδρανή προς το τσιμέντο, προέρχονται απευθείας από τη φύση ή με συλλογή από ρέματα κλπ (φυσικά ή συλλεκτά) ή από θραύση πετρωμάτων (θραυστά). Για τα κοινά σκυροδέματα και τις ελληνικές συνθήκες, τα καλύτερα αδρανή προέρχονται από ασβεστολιθικά ή πυριτικά πετρώματα [6].

### 2.2 ΜΟΡΦΗ ΚΟΚΚΩΝ

Οι κόκκοι μπορεί να είναι στρογγυλοί, κυβόμορφοι, γωνιώδεις, πλακόμορφοι ή επιμήκεις. Από πλευράς εργασιμότητας καλύτεροι είναι οι στρογγυλοί ή κυβόμορφοι κόκκοι ενώ από πλευράς μηχανικής αντοχής του σκυροδέματος, οι κόκκοι με ανώμαλη επιφάνεια. Συνολικά, καλύτερα είναι τα θραυστά αδρανή με κόκκους που δεν είναι επιμήκεις και πλακοειδείς. Τα αδρανή υλικά ανάλογα με το μέγεθος των κόκκων κατατάσσονται στις εξής κατηγορίες [6]:

- Άμμος, με μέγεθος κόκκων μέχρι 2.5 mm
- Λεπτόκοκκα σκύρα, (ρυζάκι 2.5-7 mm, γαρμπίλι 7-14 mm, σκύρα 14-30 mm)
- Χονδρόκοκκα σκύρα, με μέγεθος κόκκων από 30 έως 70 mm

### 2.3 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

Όλα τα αδρανή είναι προϊόντα ελάττωσης μεγέθους από μεγαλύτερα τεμάχια μητρικού πετρώματος μέσω διαφόρων φυσικών (π.χ. αποσάθρωση, απόξεση, απολέπιση) ή τεχνητών μεθόδων (π.χ. θραύση ή κατάτμηση πετρωμάτων και ταξινόμηση κατά μέγεθος). Ως εκ τούτου, οι ιδιότητες των αδρανών εξαρτώνται κατά κύριο λόγο από τις ιδιότητες του μητρικού πετρώματος δηλαδή από [5]:

- Χημική και ορυκτολογική σύσταση
- Προέλευση πετρωμάτων, που εκφράζεται με την πετρογραφική περιγραφή του
- Ειδικό βάρος

- Σκληρότητα
- Αντοχή γενικώς
- Φυσικοχημική σταθερότητα (συμπεριφορά)
- Πορώδες
- Χρώμα

## 2.4 ΧΡΗΣΕΙΣ

Ως γνωστόν τα αδρανή έχουν εκτεταμένη χρήση στη καθημερινή ζωή. Για παράδειγμα, αδρανή χρησιμοποιούνται στη παρασκευή σκυροδέματος, ασφαλτομίγματος, κονιάματος, σε διάφορα έργα οδών, οδοστρωμάτων, λιμανιών κ.α.

## 3. ΥΛΙΚΑ ΒΑΣΙΣΜΕΝΑ ΣΤΟ ΤΣΙΜΕΝΤΟ

### 3.1 ΤΣΙΜΕΝΤΟΠΑΣΤΑ

Η τσιμεντόπαστα, είναι ένα υλικό που προκύπτει από την ανάμιξη νερού και τσιμέντου χωρίς τα αδρανή. Χρησιμοποιείται κυρίως για τη στεγανοποίηση ορισμένων κατασκευών. Με πυκνή τσιμεντόπαστα καλύπτονται αρμοί πλακόστρωτων δαπέδων, γίνεται επάλειψη δεξαμενών ή άλλων επιφανειών. Ωστόσο, η χρήση της τσιμεντόπαστας είναι περιορισμένης κλίμακας [2].

### 3.2 ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ

#### 3.2.1 Γενικά στοιχεία

Το σκυρόδεμα ορίζεται ως τεχνητό στερεό, που παράγεται με την ανάμιξη τσιμέντου, νερού με χονδρά αδρανή και λεπτότερα. Επιπλέον, μερικές φορές για την βελτίωση ορισμένων ιδιοτήτων του νωπού ή του σκληρυμένου σκυροδέματος εισάγονται στο μίγμα σε κατάλληλες αναλογίες, ορισμένες χημικές ουσίες που ονομάζονται πρόσθετα. Το μίγμα αυτό σκληρύνεται χάρη στη χημική αντίδραση τσιμέντου - νερού. Το νερό, όταν ενώνεται με το τσιμέντο, σχηματίζει τον τσιμεντοπολλτό, που σημαίνει μια μορφή κόλλας που συγκολλά τα αδρανή και έτσι βοηθά στην λήψη ενός ισχυρού λιθώματος. Επομένως, ο ρόλος του είναι να συνδέει τα κενά μεταξύ των αδρανών, οπότε και να συνδέει τα αδρανή μεταξύ τους,

μετατρέποντας τα έτσι, από σύνολο ισχυρών αλλά ασύνδετων κόκκων σε ενιαίο τεχνητό πέτρωμα. Επιπρόσθετα, λειτουργεί σαν λιπαντικό μεταξύ των κόκκων των αδρανών, έτσι ώστε το νωπό σκυρόδεμα να είναι μια ρευστή, αλλά ταυτόχρονα συνεκτική μάζα. Η σκλήρυνση αυτή πραγματοποιείται τόσο στον αέρα όσο και μέσα στο νερό, οπότε τα αδρανή συγκολλούνται σε ενιαία μάζα. Ένας από τους πιο σημαντικούς λόγους, που το σκυρόδεμα, είναι πλέον το πιο διαδεδομένο δομικό υλικό, είναι η πλαστικότητα του [8]

Το σκυρόδεμα, λοιπόν, είναι εξαιρετικά εύπλαστο υλικό, αφού όσο είναι νωπό, μπορεί να λάβει οποιαδήποτε μορφή. Ακόμη, χαρακτηρίζεται από ιδιαίτερες ιδιότητες που προσφέρουν ανθεκτικότητα και προστασία από διάφορα επιθετικά περιβάλλοντα έκθεσης. Χάρη στη μεγάλη ευελιξία του είναι το πιο εύχρηστο δομικό υλικό, παρουσιάζει τη μοναδική ιδιότητα να περνάει σε μικρό χρονικό διάστημα από τη ρευστή κατάσταση (νωπό), στην στερεά (σκληρυμένο), παρέχοντας τη δυνατότητα να μορφωθεί σε καλούπια οποιουδήποτε επιθυμητού σχήματος, πριν στερεοποιηθεί και αποκτήσει τις τελικές αντοχές του [8].

Στην αρχή το σκυρόδεμα, είναι σε κατάσταση πλαστική, εύκολα κατεργάσιμο, όμως όσο περνάει η ώρα και προχωράει η ενυδάτωση, όπως είναι φυσικό, αρχίζει και γίνεται άκαμπτο, καταλήγοντας σε ένα σκληρό πέτρωμα, δηλαδή μια τεχνητή πέτρα. Όμως, η ιδιότητα αυτή του σκυροδέματος, να πήζει με αρκετά μεγάλη ταχύτητα, μπορεί να δημιουργήσει προβλήματα, καθώς πρέπει να χρησιμοποιηθεί το αργότερο εντός μιας ώρας και τριάντα λεπτών από την παραγωγή του. Εφόσον έχει πήξει, το επόμενο στάδιο που περνάει, είναι η σκλήρυνση, κατά την οποία αποκτά την τελική μηχανική του αντοχή. Όσον αφορά, το ρυθμό σκλήρυνσης του σκυροδέματος, σε γενικές γραμμές, σε μία εβδομάδα έχει αποκτήσει το 70% της τελικής αντοχής του και σε είκοσι οχτώ μέρες το 90%. Ενώ το 100% το αποκτά μετά από παρέλευση πολλών ετών. Πολύ σημαντικό πλεονέκτημα αποτελεί το γεγονός, ότι υπό καλές συνθήκες περιβάλλοντος, το όριο ηλικίας του σκυροδέματος μπορεί να ξεπεράσει κατά πολύ τα 100 χρόνια, χωρίς σημαντικές αλλοιώσεις στη μάζα του και στον οπλισμό [8].

Το κλειδί για να παραχθεί ένα δυνατό και ανθεκτικό στο χρόνο σκυρόδεμα είναι η σωστή αναλογία και ανάμιξη των συστατικών του. Σε περίπτωση που δεν υπάρχει αρκετή τσιμεντόπαστα για να γεμίσει τα κενά μεταξύ των αδρανών το σκυρόδεμα θα είναι και δυσκατέργαστο, ενώ υπάρχει και σοβαρή πιθανότητα να δημιουργηθούν πόροι και κενά. Όμως από την άλλη πλευρά, μεγάλη αναλογία τσιμεντόπαστας, είναι

και αντιοικονομική και θα προκαλέσει ρωγμές, γιατί έχει τη φυσική τάση να συρρικνώνεται [8].

Οι πολύπλοκες χημικές αντιδράσεις μεταξύ του νερού και των κόκκων του τσιμέντου αποτελούν τη βάση για τη δημιουργία του σκυροδέματος. Είναι γεγονός ότι η ποιότητα του τσιμεντοπολτού (τσιμεντόπαστας), ορίζει και την ποιότητα του σκυροδέματος. Η ποσότητα του νερού που εισάγεται, ή καλύτερα λόγος νερού/τσιμέντου αποτελεί θεμελιώδη παράγοντα για την ποιότητα του τσιμεντοπολτού, συνεπώς και του σκυροδέματος. Όπως είναι λογικό, όταν προστίθεται πολύ νερό στο μείγμα του σκυροδέματος, γίνεται πιο εργάσιμο. Βέβαια αυτό έχει και αρνητική συνέπεια, όταν το περίσσιο νερό (δηλαδή αυτό που δε συμμετέχει στις χημικές αντιδράσεις), εξατμίζεται, αφήνοντας έτσι πίσω του, πόρους αέρα που καθιστούν το μπετόν πιο αδύναμο. Επομένως, το ζητούμενο είναι να εισάγονται οι ελάχιστες δυνατές ποσότητες νερού που να εγγυώνται όμως τη σωστή κατεργασία και τοποθέτηση του. Γενικά, όπως προαναφέρθηκε, είναι απαραίτητο, να υπάρχει μεγάλη προσοχή στις αναλογίες, γιατί ακόμη και μια μικρή διαφορά μπορεί να προκαλέσει αστοχία [8].

Οι διαφορετικές ιδιότητες των πρώτων υλών που αναμιγνύονται στην παραγωγή του σκυροδέματος (μάζα, όγκος, φυσικοχημικά χαρακτηριστικά), την ανάγουν σε μια εξαιρετικά πολύπλοκη και σύνθετη διαδικασία. Οι αυστηρές διατάξεις του Κανονισμού Τεχνολογίας Σκυροδέματος, προβλέπουν τις ελάχιστες δοσολογίες των πρώτων υλών, ανάλογα με τις ιδιαιτερότητες της προβλεπόμενης εφαρμογής του σκυροδέματος, όπως η εργασιμότητα, η αντοχή, η πλαστικότητα, το περιβάλλον στο οποίο εκτίθεται, η διαμόρφωση και διάρκεια της κατασκευής. Ιδιαίτερα, όμως στην Ελλάδα εξαιτίας της έντονης σεισμικής δραστηριότητας που σημειώνεται, τόσο η διαδικασία παράγωγής, όσο και η τελική ενσωμάτωση του σκυροδέματος στις κατασκευές διέπονται από αυτό τον εξαιρετικά απαιτητικό κανονισμό, ο οποίος ισχύει μέχρι και σήμερα, καλύπτοντας τις απαιτήσεις για σύγχρονες, ασφαλείς και αντισεισμικές κατασκευές [8].

Το σκυρόδεμα είναι το πλέον διαδεδομένο δομικό υλικό παγκοσμίως. Ουσιαστικά, πρόκειται για ένα τεχνητό υλικό – είναι κατά βάση ένας τεχνητός λίθος - με πολλαπλές και συνεχώς βελτιούμενες και διευρυνόμενες ιδιότητες. Επίσης, θεωρείται το οικονομικότερο και ασφαλέστερο οικοδομικό υλικό, με εξαιρετική σχέση κόστους - παρεχόμενων ιδιοτήτων και για το λόγο αυτό είναι αναντικατάστατο. Είναι εξαιρετικά εύπλαστο υλικό, αφού μπορεί, όταν είναι νωπό,

να λάβει οποιαδήποτε μορφή, χαρακτηρίζεται δε από ιδιαίτερες ιδιότητες που προσφέρουν ανθεκτικότητα και προστασία από διάφορα επιθετικά περιβάλλοντα έκθεσης. Χάρη στη μεγάλη ευελιξία του είναι το πιο εύχρηστο δομικό υλικό, αλλά ταυτόχρονα με τη μικρότερη διάρκεια ζωής καθώς πρέπει να χρησιμοποιηθεί το αργότερο εντός μίας ώρας και τριάντα λεπτών από τη παραγωγή του [7-8].

Τέλος, το σκυρόδεμα έχει αντοχή στη δράση του νερού που δεν παρέχεται από άλλα δομικά υλικά. Δεν είναι τυχαίο άλλωστε ότι οι πρώτες εφαρμογές του (που συνεχίζονται και μέχρι σήμερα) ήταν για την κατασκευή έργων διαχείρισης του νερού, όπως δεξαμενές και κανάλια. Λόγω των θιξοτροπικών του ιδιοτήτων σε πρώιμη ηλικία παρέχει τεράστια ευελιξία στην εφαρμογή (μεταφορά, διακίνηση και διάστρωση), ενώ έχει τη δυνατότητα να μορφώνεται σε οποιοδήποτε επιθυμητό σχήμα. Έτσι, αντίθετα με άλλα δομικά υλικά, έχει ένα ευρύτατο φάσμα κατασκευαστικών εφαρμογών, όπως κάθε είδους κτιριακά και έργα υποδομής, καθώς και έργα προστασίας του κοινωνικού συνόλου. Είναι ένα ιδιαίτερα φθηνό και ευέλικτο δομικό υλικό που είναι εύκολο να παραχθεί και να διαμορφωθεί επί τόπου, κάτω από οποιοδήποτε συνθήκες και σε οποιοδήποτε περιβάλλον δόμησης, ακόμη και μέσα στη θάλασσα, είτε σε συνθήκες ελεγχόμενης βιομηχανικής παραγωγής είτε όχι. Έχει μεγάλη θερμική αδράνεια, γεγονός που το καθιστά αποδοτικότερο από άλλα δομικά υλικά σε ότι αφορά το ενεργειακό κόστος λειτουργίας των κατασκευών. Επιπλέον οι ιδιότητές του, το καθιστούν το βέλτιστο υλικό σε συνθήκες πυρκαγιάς [7].

### **3.2.2 Μέθοδοι παραγωγής**

Υπάρχουν δύο κύριες μέθοδοι παρασκευής έτοιμου σκυροδέματος, η υγρή αυτοτελής και η ξηρή αυτοτελής μέθοδος [5]:

- Κατά την υγρή μέθοδο παρασκευής, ακριβείς ποσότητες όλων των συστατικών του σκυροδέματος (τσιμέντο ή υποκατάστατά του, αδρανή υλικά, νερό και χημικά πρόσθετα) τροφοδοτούνται σε μηχανικό αναμκτήρα. Το προϊόν της διεργασίας ανάμιξης, που είναι το έτοιμο σκυρόδεμα μεταφέρεται κατόπιν με ειδικά φορτηγά (συνεχώς αναδευόμενο ως ρευστό μεγάλου ιξώδους) στη θέση (έργο), όπου θα χρησιμοποιηθεί. Εκεί το σκυρόδεμα χύνεται σε καλούπια και δονείται ώστε να συμπυκνωθεί και να πάρει τη μορφή του στοιχείου του έργου.

- Κατά την ξηρή μέθοδο παρασκευής, οι ακριβώς υπολογισμένες ποσότητες των στερεών πρώτων υλών τροφοδοτούνται μαζί με την αναγκαία (λόγος W/C) ποσότητα νερού στο περιστρεφόμενο τύμπανο του οχήματος (π.χ. φορτηγού) παρασκευής-μεταφοράς. Ταυτόχρονα επίσης, προστίθενται στο τύμπανο οι αναγκαίες ποσότητες χημικών πρόσθετων και η ανάμιξη όλων των συστατικών γίνεται εντός του περιστρεφόμενου κάδου, κατά τη μετακίνηση του οχήματος και τη μεταφορά του σκυροδέματος στο κατασκευαζόμενο έργο.

### 3.2.3 Πρόσθετα

Τα πρόσθετα του σκυροδέματος είναι διάφορες ουσίες ανόργανες ή οργανικές, οι οποίες προστίθενται στα βασικά συστατικά του σκυροδέματος σε μικρές ποσότητες στο παρασκευαζόμενο σκυρόδεμα (το πολύ μέχρι 5% κατά βάρος του τσιμέντου) και βελτιώνουν, κατά περίπτωση κάποια ιδιότητα του. Τα πρόσθετα μπορεί να είναι ανόργανης προέλευσης, όπως η θηραϊκή γη, η άσβεστος, οι τέφρες, τα χρώματα κ.α. Γενικά, σκοπός τους είναι να βελτιώσουν ή να προσδώσουν συγκεκριμένες ιδιότητες στο νωπό ή στο σκληρυμένο σκυρόδεμα. Έτσι έχουν τη δυνατότητα αύξησης της εργασιμότητας και της συνεκτικότητας, αύξησης ή μείωσης του χρόνου πήξεως, αύξησης της εξίδρωσης, μείωσης της θερμότητας ενυδατώσεως, μείωσης της διαπερατότητας, αύξησης της ανθεκτικότητας σε παγοπληξία και άλλους διαβρωτικούς παράγοντες. Επιπλέον, μερικά από αυτά έχουν τη δυνατότητα ακόμα και να συμβάλλουν στην ανάπτυξη πρώιμων μηχανικών αντοχών [8].

Κατά τη διάρκεια των τελευταίων ετών οι απαιτήσεις για το σκυρόδεμα, στον χώρο της κατασκευής αυξήθηκαν. Νέες τεχνολογίες εφαρμόζονται στην δόμηση και απαιτούν μεταβολές των ιδιοτήτων του σκυροδέματος. Ταυτόχρονα όμως και άλλοι λόγοι, όπως η συμπίεση του κόστους, η αυξανόμενη ρύπανση του περιβάλλοντος με επακόλουθο την αύξηση της διαβρωτικής επίδρασης στις κατασκευές (όξινη βροχή), οι απαιτήσεις για αυξημένα φορτία επιβάλλουν την μεταβολή των ιδιοτήτων του νωπού και σκληρυμένου σκυροδέματος. Προκειμένου να ανταποκριθεί το σκυρόδεμα στις νέες απαιτήσεις εμφανίζεται ένας μεγάλος αριθμός χημικών υλών που προστίθενται κατά την ανάμιξη του σκυροδέματος και μεταβάλλουν σημαντικά τις ιδιότητες του. Τα υλικά αυτά καλούνται χημικά πρόσμικτα και χωρίς την χρήση τους, δε θα ήταν δυνατή η κατασκευή σημαντικών έργων από σκυρόδεμα. Με τις

δυνατότητες αυτές το σκυρόδεμα μπορεί να ανταποκρίνεται σε υψηλότερες κατασκευαστικές απαιτήσεις, επιτυγχάνοντας ταυτόχρονα μικρή αύξηση του κόστους, έτσι ώστε να παραμένει το κυρίαρχο δομικό υλικό. Τα κύρια χημικά πρόσμικτα αναφέρονται παρακάτω [8]:

- **Επιταχυντικά.** Τα επιταχυντικά πρόσμικτα αυξάνουν την ταχύτητα ενυδάτωσης του τσιμέντου, επιταχύνουν την πήξη και την σκλήρυνση του σκυροδέματος και αυξάνουν την αρχική αντοχή του. Χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις όπου απαιτείται να αναπτυχθούν αυξημένες πρώιμες αντοχές στο δομικό έργο.
- **Επιβραδυντικά.** Τα επιβραδυντικά επιβραδύνουν την ενυδάτωση του τσιμέντου και συνεπώς την πήξη και τη σκλήρυνση του σκυροδέματος. Επίσης, συμβάλλουν στην διατήρηση του εργάσιμου και χρησιμοποιούνται για να αυξηθεί ο διαθέσιμος χρόνος, για τη μεταφορά αλλά και τη διάστρωση του σκυροδέματος. Στην περίπτωση τους, η αρχική αντοχή του σκυροδέματος εμφανίζεται μειωμένη, σε αντίθεση με την τελική αντοχή, η οποία δεν επηρεάζεται από τα επιβραδυντικά πρόσμικτα. Συνήθως, χρησιμοποιούνται όταν επικρατούν υψηλές θερμοκρασίες, γιατί επιβραδύνουν το ρυθμό ανάπτυξης της θερμοκρασίας, καθώς και για την παρασκευή μεγάλων έργων χωρίς αρμούς εργασίας.
- **Αερακτικά.** Τα αερακτικά πρόσμικτα δημιουργούν μέσα στη μάζα του νωπού σκυροδέματος μικρές φυσαλίδες, με αποτέλεσμα να αυξηθεί το πορώδες του. Συνεπώς, αυξάνεται η αντοχή του στον παγετό και βελτιώνεται σημαντικά το εργάσιμο του. Όμως απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή, γιατί σε περίπτωση που η περιεκτικότητα σε αέρα ξεπεράσει τα καθορισμένα όρια, κινδυνεύει να μειωθεί η τελική αντοχή του σκυροδέματος. Επομένως, η χρήση αερακτικού επιβάλλεται να ληφθεί υπόψη στη μελέτη σύνθεσης, με αποτέλεσμα η διαδικασία να περιπλέκεται σημαντικά. Εφόσον τελικά, χρησιμοποιηθεί αερακτικό πρόσμικτο, είναι απαραίτητο να προστεθεί στο ανάμιγμα, επιπλέον ποσότητα τσιμέντου έτσι ώστε να αποφευχθεί η μείωση των μηχανικών αντοχών. Ενώ καθώς το αερακτικό αυξάνει το εργάσιμο, θα πρέπει να μειωθεί η συνολική ποσότητα νερού που θα χρησιμοποιηθεί, άρα πιθανότατα τα παραπάνω θα συνοδεύονται από αύξηση των μηχανικών αντοχών, οι οποίες θα πρέπει να σημειωθούν στον έλεγχο των μηχανικών αντοχών των δοκιμών που θα ληφθούν.

- Ρευστοποιητικά. Τα ρευστοποιητικά πρόσμικτα αυξάνουν τη ρευστότητα και την ομοιομορφία του σκυροδέματος και επιτρέπουν τη μείωση του νερού ανάμιξης, με αποτέλεσμα την αύξηση του εργάσιμου και της αντοχής του σκυροδέματος. Επιπλέον, βελτιώνουν την υδατοπερατότητα και την αντοχή του στον παγετό. Ωστόσο, είναι πιθανό, να εμφανιστεί αύξηση της συστολής ξήρανσης, καθώς και ανεπιθύμητη, αύξηση των πόρων, με συνέπεια καθυστέρηση της πήξης και μείωση της αντοχής.
- Στεγανοποιητικά. Τα στεγανοποιητικά πρόσμικτα μειώνουν την ποσότητα του νερού, το οποίο απορροφάται ή εισχωρεί στο σκυρόδεμα, αυξάνοντας τη στεγανότητα του. Αποφεύγεται η δημιουργία μικροκοιλοτήτων στη μάζα του σκυροδέματος, καθώς και οι μικρορηγματώσεις, ενώ μειώνεται σημαντικά το ποσοστό των πόρων και των τριχοειδών αγγείων. Όμως, είναι δυνατό, να μεταβληθεί η χρονική εξέλιξη της πήξης και να μειωθεί η αντοχή του σκυροδέματος.

### 3.2.4 Είδη

Το σκυρόδεμα, ανάλογα με τον τρόπο ενίσχυσης του με οπλισμό, διακρίνεται σε άοπλο, οπλισμένο και προεντεταμένο. Το άοπλο σκυρόδεμα είναι αυτό που δεν είναι ενισχυμένο με ράβδους οπλισμού. Παρασκευάζεται από κοινό τσιμέντο και αδρανή υλικά. Η περιεκτικότητα του σε τσιμέντο είναι χαμηλή, γι' αυτό και ονομάζεται ισχνό σκυρόδεμα ή γκρομπετόν. Χρησιμοποιείται συνήθως σε δάπεδα, σε υποστρώματα για τα πέδιλα και σε πρόχειρες κατασκευές. Το οπλισμένο σκυρόδεμα είναι αυτό που ενισχύεται με ράβδους από χάλυβα. Τα στοιχεία από οπλισμένο σκυρόδεμα κατασκευάζονται στο εργοτάξιο, δηλαδή απ' ευθείας στην τελική θέση ή στο εργοστάσιο, οπότε και ονομάζονται προκατασκευασμένα στοιχεία. Από το εργοστάσιο μεταφέρονται και τοποθετούνται στην οριστική θέση τους στο έργο. Τέλος, στο προεντεταμένο σκυρόδεμα εφαρμόζεται άλλος τρόπος χρησιμοποίησης του χαλύβδινου οπλισμού. Ο χάλυβας, σε μορφή συρμάτων ή καλωδίων, τοποθετείται μέσα σε σωλήνες, ώστε κατά την διάστρωση, να μην έρχεται σε επαφή με το σκυρόδεμα. Μετά τη σκλήρυνση του σκυροδέματος, εφαρμόζονται δυνάμεις εφελκυσμού στα χαλύβδινα καλώδια και με την κατάλληλη διάταξη, συγκρατούνται σε κατάσταση τάσης. Με τη μέθοδο αυτή, διευρύνθηκαν οι δυνατότητες κατασκευής έργων από οπλισμένο σκυρόδεμα [8].



### 3.2.5 Ιδιότητες

Το σκυρόδεμα μέχρι να αποκτήσει την τελική του αντοχή, περνά από δύο καταστάσεις συνεκτικότητας τη νωπή και τη σκληρυμένη. Συνεπώς οι ιδιότητές του αφορούν τις ιδιότητες του νωπού αλλά και του σκληρυμένου σκυροδέματος. Οι ιδιότητες του νωπού σκυροδέματος αναφέρονται παρακάτω [8]:

- Απόμειξη. Απόμειξη είναι το φαινόμενο εκείνο, κατά το οποίο τα στερεά συστατικά, όχι μόνο σαν σύνολο διαχωρίζονται από το νερό, αλλά και μεταξύ τους, κατά την κίνηση του προς τα κάτω, ανάλογα με το βάρος τους. Το φαινόμενο της απομείξεως είναι από τα πιο καταστρεπτικά για την αντοχή και γενικά για την ποιότητα του σκυροδέματος, γιατί όπως είναι φανερό δημιουργούνται περιοχές με μειωμένη αντοχή, καθώς επίσης και μειωμένη πρόσφυση μεταξύ οπλισμού και σκυροδέματος.
- Εξίδρωση. Εξίδρωση καλείται το φαινόμενο του διαχωρισμού του νερού από τα στερεά συστατικά του σκυροδέματος, το οποίο παρουσιάζεται στην περίοδο που ακολουθεί τη διάστρωση και τη συμπύκνωση, αλλά προηγείται λίγο της πήξης. Τα στερεά συστατικά καθιζάνουν λόγω της βαρύτητας, ενώ το νερό, λόγω των τριχοειδών δυνάμεων, έχει τη διάθεση να κινηθεί προς τα επάνω. Οπότε, εμφανίζεται στην επιφάνεια του σκυροδέματος λεπτό σώμα νερού που μοιάζει με εξίδρωση.
- Εργασιμότητα. Με τον όρο εργασιμότητα χαρακτηρίζουμε γενικά την ευκολία με την οποία μπορούμε να μεταφέρουμε, διαστρώσουμε και συμπυκνώσουμε το σκυρόδεμα. Το εργάσιμο είναι μια πολλή σημαντική έννοια στην πράξη, γιατί αποδίδει ακριβώς αυτό που ενδιαφέρει τον κατασκευαστή κατά το χρόνο της σκυροδετήσεως, είναι όμως ιδιότητα σύνθετη που συνδέεται με άλλες ρεολογικές ιδιότητες και που δύσκολα μπορεί να αποδοθεί ποσοτικά

Οι πιο ενδιαφέρουσες από τις ιδιότητες του σκληρυμένου σκυροδέματος είναι η θλιπτική αντοχή, η ανθεκτικότητα, το πορώδες και η στεγανότητα [8].

- Η αντοχή στη θλίψη είναι η πιο σπουδαία ιδιότητα του σκληρυμένου σκυροδέματος, βασικά γιατί επηρεάζει και άλλες ιδιότητες. Από αυτή εξάλλου χαρακτηρίζεται κατά βάση και η ποιότητα του σκυροδέματος. Κατά τον ΚΤΣ η αντοχή του σκυροδέματος σε θλίψη ελέγχεται δια της θραύσεως δοκιμίων

που λαμβάνονται στην έξοδο του υλικού από την μπετονιέρα. Με τα δοκίμια που λαμβάνουμε, πραγματοποιούμε δύο ειδών ελέγχους. Ο ένας είναι ο έλεγχος της αντοχής του σκυροδέματος σε μικρή ηλικία και ο άλλος είναι ο έλεγχος συμμόρφωσης των δοκιμίων σε ορισμένα κριτήρια που θέτει ο κανονισμός. Η αντοχή σε θλίψη που θα προκύψει από τη θραύση των τυπικών δοκιμίων θα ονομάζεται συμβατική αντοχή.

- Με τον όρο ανθεκτικότητα σκυροδέματος, εννοούμε τη δυνατότητα του οπλισμένου σκυροδέματος να αντιστέκεται για όλη τη διάρκεια ζωής του, στις δυσμενείς επιδράσεις του περιβάλλοντος, έτσι ώστε να μην εμφανίζονται ζημιές, οι οποίες μειώνουν την ικανότητα του να αναλαμβάνει φορτία (σεισμικά και άλλα), για τα οποία σχεδιάστηκε.
- Το πορώδες και η στεγανότητα. Το σκυρόδεμα είναι υλικό πορώδες, δηλαδή περιέχει κενά και τριχοειδείς πόρους στη μάζα του. Κατά βάση τα κενά και οι πόροι διαμορφώνονται εξ αιτίας των αδρανών υλικών (καθώς είναι πορώδη υλικά), τα κενά που μένουν μεταξύ των κόκκων της άμμου (δεν είναι δυνατό να γεμίσουν εντελώς με τσιμεντόπαστα) και τέλος, όσο καλά να γίνει η διάστρωση και η δόνηση, πάντα θα παρουσιάζονται περιοχές με ελαττωμένη συμπύκνωση. Το μεγάλο πορώδες, μειώνει την ποιότητα του σκυροδέματος, διότι ελαττώνει τη μηχανική αντοχή του και αυξάνει την αεροπερατότητα και υδροπερατότητα του. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, ο αέρας και το νερό να εισχωρούν εύκολα στη μάζα του σκυροδέματος και να οξειδώνουν τον οπλισμό. Ενώ, επιπλέον, ελαττώνεται και η στεγανότητα η οποία σε μερικά έργα είναι απαραίτητη. Για την επίτευξη στεγανότητας πρέπει να χρησιμοποιούνται βοηθητικά υλικά, που προστίθενται στο νωπό σκυρόδεμα και κλείνουν τους πόρους του.

### 3.2.6 Χρήσεις

Όπως προαναφέρθηκε, το σκυρόδεμα είναι το πλέον διαδεδομένο υλικό παγκοσμίως. Δεν υφίσταται έργο δίχως την παρουσία σκυροδέματος. Έτσι, συναντάται σε οικοδομικές κατασκευές, λιμάνια, φράγματα, γέφυρες, σήραγγες, δρόμους κ.α.



**Εικόνα 3.1** Το σκυρόδεμα σε μια εφαρμογή εδαφόπλακας [11]

### 3.3 ΚΟΝΙΑΜΑ

#### 3.3.1 Ορισμός

Σήμερα ο όρος κονίαμα αναφέρεται για μίγμα μίας ή περισσότερων συνδετικών υλών, νερού, λεπτόκοκκων αδρανών και ενδεχομένως ειδικών προσθέτων, τα οποία έχουν αξιόλογη ρευστότητα και πλαστικότητα όταν είναι νωπά, ενώ μετά την πήξη και σκλήρυνση της συνδετικής ύλης αποκτούν, μηχανική αντοχή και άλλες φυσικές και χημικές ιδιότητες. Οι ιδιότητες των κονιαμάτων εξαρτώνται από το είδος και τις αναλογίες των πρώτων υλών, από τον τρόπο ανάμιξης και μορφοποίησης καθώς και από τις συνθήκες που επικρατούν και εφαρμόζονται κατά την διάρκεια της σκλήρυνσης [9].

#### 3.3.2 Επιμέρους συστατικά

Το νερό με την κονία και τα αδρανή αποτελούν τα συστατικά του κονιάματος. Το νερό παίρνει μέρος σε μια σειρά χημικών αντιδράσεων που οδηγούν στην πήξη και σκλήρυνση του μίγματος. Για τον λόγο αυτό, το νερό πρέπει να είναι τόσο καθαρό ώστε να περιέχει όσο το δυνατόν λιγότερα συστατικά που μπορεί να επηρεάσουν τις χημικές αντιδράσεις. Η συνολική ποσότητα νερού, παίζει σημαντικό ρόλο και στη μηχανική αντοχή και στις υπόλοιπες ιδιότητες του κονιάματος. Όταν γενικά δεν είναι επαρκής, παραμένει μια ποσότητα κονιάς ανενεργή με αποτέλεσμα να έχουμε μερική μόνο σύνδεση των αδρανών. Ενώ όταν η ποσότητα του νερού είναι μεγαλύτερη από την συνολικά απαιτούμενη, δεν απορροφάται από την κονία και τα αδρανή, αλλά μένει ελεύθερη μέσα στη μάζα του υλικού. Το αρνητικό σε αυτή την περίπτωση είναι ότι μετά την εξάτμιση του νερού δημιουργούνται πόροι και

κοιλότητες, μειώνοντας έτσι τη συνοχή και τις αντοχές του κονιάματος. Από την άλλη μεριά, η ποσότητα νερού είναι αναγκαία ώστε να επιτυγχάνεται η επιθυμητή πλαστικότητα και εργασιμότητα [2-10].

Το συνηθέστερο αδρανές υλικό που χρησιμοποιείται στα κονιάματα είναι η άμμος. Δεν πρέπει να περιέχει προσμίξεις που να είναι ικανές να προκαλέσουν μείωση της αντοχής και της σταθερότητας των κονιαμάτων, να επηρεάσουν δυσμενώς άλλες ιδιότητες των και να προκαλέσουν επιβλαβείς χημικές αντιδράσεις με την εκάστοτε συνδετική ύλη. Η προσθήκη των αδρανών στα κονιάματα συνιστάται για οικονομικούς και τεχνικούς λόγους. Τα κονιάματα που παράγονται χωρίς προσθήκη αδρανών, συστέλλονται κατά την πήξη και την σκλήρυνση, με αποτέλεσμα την δημιουργία επιφανειακών ρηγματώσεων. Από οικονομική άποψη τα αδρανή υλικά είναι πιο φθηνά από τις κονίες [10].

### 3.3.3 Ιδιότητες

Το κονίαμα για να είναι κατάλληλο για εφαρμογή θα πρέπει να εμφανίζει τις παρακάτω βασικές ιδιότητες [10]:

- Πλαστικότητα
- Εργασιμότητα που έχει να κάνει με το σύνολο των ιδιοτήτων του ξώδους που έχει το νωπό κονίαμα. Έτσι, δε διασπάται η μάζα του κατά τους διάφορους χειρισμούς
- Ικανή εσωτερική τριβή, ώστε να μην φεύγει από αρμούς της τοιχοποιίας και προκειμένου για επιχρίσματα, να συγκρατείται στις κατακόρυφες επιφάνειες.
- Ογκοσταθερότητα, ώστε να μην υπόκειται σε μεγάλες συστολές και διαστολές και έτσι να μην προκαλούνται ρωγμές.
- Υψηλή μηχανική αντοχή, ικανή να φέρει το ίδιο βάρος της κατασκευής, αλλά και των φορτίων αυτής.
- Αδράνεια στο νερό και τις ατμοσφαιρικές συνθήκες.

### 3.3.4 Χρήσεις και εφαρμογές

Κατά τη δόμηση τοίχων από φυσικούς ή τεχνητούς λίθους τα κονιάματα παρεμβάλλονται μεταξύ των οριζόντιων και κατακόρυφων αρμών και έτσι γεμίζουν τα κενά μεταξύ των λίθων. Όσον αφορά στην προσφορά του κονιάματος στην αντοχή

ενός τοίχου, αυτή εντοπίζεται μόνο στην αντοχή σε θλίψη, που και πάλι είναι μικρή [10].

Επίσης, το κονίαμα μπορεί να λειτουργήσει ως συνδετικό υλικό τούβλων. Μέχρι αρκετά χρόνια πριν, η επιλογή του συνδετικού υλικού περιοριζόταν ανάμεσα στην άσβεστο και το τσιμέντο ή σε μίγματα αυτών των δύο. Πλέον, κονιάματα που έχουν ως συνδετικό μόνο άσβεστο δεν χρησιμοποιούνται στην οικοδομική, εκτός από ειδικές εφαρμογές που αφορούν στην επισκευή ιστορικών κτιρίων [10].

Επιπλέον, τα κονιάματα χρησιμοποιούνται ευρέως και για την επένδυση διαφόρων επιφανειών, που σκοπό έχει την προφύλαξη, μόνωση και την αισθητική εμφάνιση. Τα κονιάματα, που χρησιμοποιούνται για επενδύσεις ονομάζονται επιχρίσματα και αποτελούν ουσιώδη παράγοντα ποιότητας και διάρκειας του έργου [10].

Επιπρόσθετα, υπάρχουν και τα κονιάματα πλακόστρωσης που χρησιμοποιούνται δηλαδή για την κατασκευή ενός στρώματος κονιάματος που τοποθετείται πάνω σε οροφές ή δάπεδα σκελετού και το οποίο προβλέπεται άμεσα για βάδισμα ή ως υπόστρωμα για επίστρωση δαπέδου [10].

Τέλος, υπάρχουν χρήσεις ισχυρών κονιαμάτων για στεγανοποίηση ειδικών έργων, ή άλλα που καλύπτουν αρμούς μεταξύ πλακών για την παρεμπόδιση της διέλευσης του νερού ή άλλων υγρών. Επίσης, όπου απαιτείται, χρησιμοποιούνται ειδικά κονιάματα για ακουστικές ή θερμικές μονώσεις [10].



**Εικόνα 3.2** Εφαρμογή κονιάματος στην επιπέδωση δαπέδων [11]

#### **4. NANOTEΧΝΟΛΟΓΙΑ**

#### 4.1 ΟΡΙΣΜΟΣ

Η νανοτεχνολογία είναι ένας ευρύς όρος ο οποίος χρησιμοποιείται για να περιγράψει τη δημιουργία και χρήση λειτουργικών δομών μεγέθους μεταξύ 1 και 100 νανομέτρων (nm) , της τάξεως δηλαδή του  $10^{-9}$  m. Οι διαστάσεις γίνονται ευκολότερα αντιληπτές αναφέροντας πως ένα νανόμετρο ισούται περίπου με το 1/80000 μιας ανθρώπινης τρίχας ή με το μήκος 10 ατόμων υδρογόνων σε σειρά. Κατά παρόμοιο τρόπο ορίζεται και ο όρος νανοεπιστήμη αναφερόμενος σε επιστήμες οι οποίες μελετούν φαινόμενα στην κλίμακα αυτή [13].

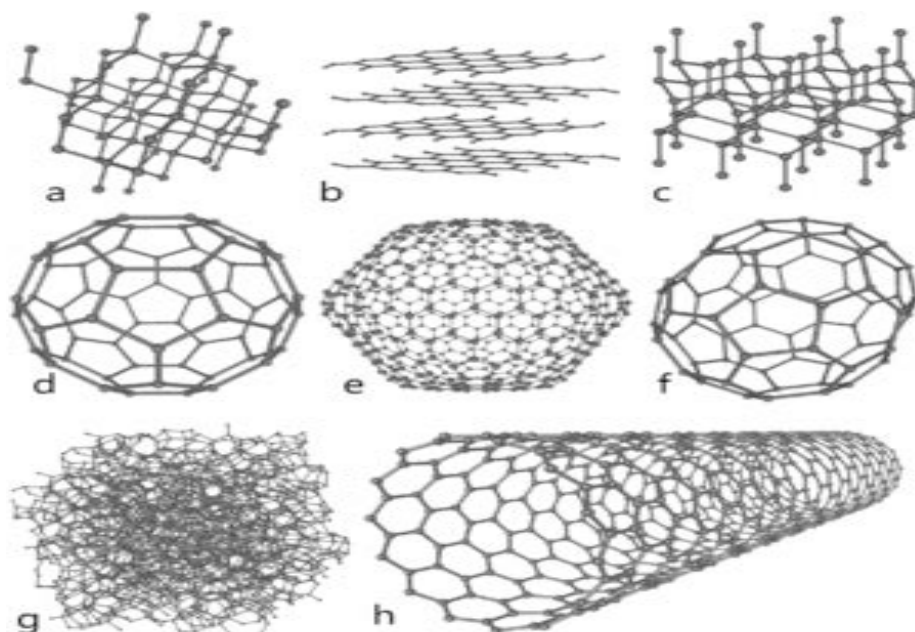
Αν και το πεδίο της νανοτεχνολογίας μόλις πρόσφατα άρχισε να αναπτύσσεται ουσιαστικά, οι δυνατότητές της είχαν αρχίσει να γίνονται εμφανείς ήδη από την εποχή που ο φυσικός Φάινμαν μίλησε για τα μεγάλα περιθώρια που αφήνουν οι νόμοι της φύσης για τον έλεγχο της ύλης σε ατομικό επίπεδο. Στη μέχρι τώρα ανάπτυξή της, σημαντικό ρόλο έπαιξαν η σημαντική βελτίωση του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου ενώ σταθμοί μπορούν να θεωρηθούν οι ανακαλύψεις δομών άνθρακα σε μορφή σφαίρας γνωστές ως φουλερένια καθώς και σε μορφή σωλήνα γνωστές ως νανοσωλήνες άνθρακα με ιδιαίτερες ιδιότητες το καθένα που θα παρουσιασθούν παρακάτω [13].

Ο όρος νανοτεχνολογία χαρακτηρίζεται από μεγάλη ευρύτητα όντας πολύ γενικός για να περιγράψει οτιδήποτε συμβαίνει στις διαστάσεις του ενός nm. Κατά συνέπεια, μπορεί να χωριστεί σε πιο ειδικά θέματα όπως αυτό της νανοηλεκτρονικής, των νανοϋλικών καθώς και άλλων. Οι εφαρμογές της είναι αναρίθμητες ενώ οι επιπτώσεις γίνονται αντιληπτές σε πολλαπλά επίπεδα κατά κύριο λόγο στον οικονομικό τομέα επηρεάζοντας παγκόσμιες βιομηχανίες και οικονομίες, αλλά και στο κοινωνικό βελτιώνοντας το επίπεδο ζωής μας [13].

Ωστόσο, κανείς δεν θα πρέπει να φανταστεί πως η νανοτεχνολογία πρόκειται για επιστημονική επανάσταση. Τα περισσότερα θέματα όπου αυτή περικλείει προκύπτουν σαν λογική συνέπεια της εξέλιξης της ικανότητας της επιστήμης και της τεχνολογίας να ερευνά και να εργάζεται σε όλο και μικρότερη κλίμακα. Εξάλλου, η κατάλυση, ένα φαινόμενο που ανέκαθεν χαρακτηριζόταν από νανομετρικές διαστάσεις αποτελεί επιστημονικό κλάδο ο οποίος αναπτύσσεται πολλές δεκαετίες. Επιπλέον, ολόκληρα επιστημονικά πεδία όπως η χημεία ή η βιολογία ανέκαθεν δούλευαν σε τέτοιες διαστάσεις παρόλο που ο όρος νανοεπιστήμη εισήχθη μόλις πρόσφατα [13].

## 4.2 Ο ΑΝΘΡΑΚΑΣ ΚΑΙ ΟΙ ΑΛΛΟΤΡΟΠΙΚΕΣ ΜΟΡΦΕΣ ΤΟΥ

Το χημικό στοιχείο άνθρακας (C), είναι ένα από τα λίγα χημικά στοιχεία γνωστά από την αρχαιότητα. Τόσο ελεύθερος, όσο και κάτω από τη μορφή πολυάριθμων ενώσεών του, είναι ευρύτατα διαδεδομένος στη φύση. Αποτελεί το τέταρτο χημικό στοιχείο σε αφθονία ως προς τη μάζα του. Ο άνθρακας είναι ικανός να σχηματίζει πολλές αλλοτροπικές μορφές λόγω του σθένους του. Στις γνωστές μορφές άνθρακα περιλαμβάνονται το διαμάντι και ο γραφίτης. Τις τελευταίες δεκαετίες ανακαλύφθηκαν και ερευνήθηκαν πολλές άλλες, όπως τα φουλερένια, οι νανοσωληνές άνθρακα το γραφένιο κ.α. [14-15].



**Εικόνα 4.1** Διάφορες αλλοτροπικές μορφές άνθρακα [14]

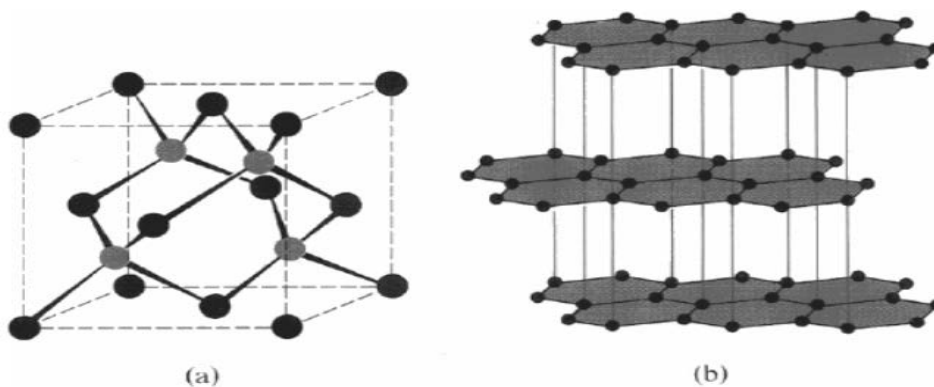
### 4.2.1 Διαμάντι

Το διαμάντι, είναι μια πασίγνωστη αλλοτροπική μορφή άνθρακα. Η σκληρότητα και η υψηλή διασπορά του φωτός του διαμαντιού το καθιστούν χρήσιμο τόσο για βιομηχανικές εφαρμογές όσο και για κοσμήματα. Το διαμάντι είναι το πιο γνωστό φυσικό ορυκτό. Αυτό το καθιστά εξαιρετικό λειαντικό μέσο. Καμία γνωστή ουσία που απαντάται στη φύση δεν μπορεί να κόψει (ή ακόμη και να χαράξει) ένα διαμάντι, εκτός από ένα άλλο διαμάντι. Κάθε άτομο άνθρακα σε ένα διαμάντι είναι ομοιοπολικά συνδεδεμένο με τέσσερις άλλους άνθρακες σε

ένα τετράεδρο. Αυτά τα τετράεδρα μαζί σχηματίζουν ένα τρισδιάστατο δίκτυο δακτυλίων άνθρακα, επιτρέποντας τη μηδενική καταπόνηση της γωνίας δεσμού. Αυτό το σταθερό δίκτυο ομοιοπολικών δεσμών και εξαγωνικών δακτυλίων είναι ο λόγος που το διαμάντι είναι τόσο ισχυρό. Η κυρίαρχη βιομηχανική χρήση του διαμαντιού είναι η κοπή, η διάτρηση (τρυπάνια), η λείανση (κοπτικά μέσα με διαμάντι) και η στίλβωση. Επίσης, άλλες εξειδικευμένες εφαρμογές περιλαμβάνουν τη χρήση του σε εργαστήρια ως περίβλημα για πειράματα υψηλής πίεσης κ.α. [14]

#### 4.2.2 Γραφίτης

Ο γραφίτης, που ονομάστηκε έτσι από τον Abraham Gottlob Werner το 1789, από το ελληνικό γράφειν ("να σχεδιάζει/γράφει" για χρήση σε μολύβια), είναι μία από τις πιο γνωστές αλλοτροπικές μορφές άνθρακα. Σε αντίθεση με το διαμάντι, ο γραφίτης είναι ένας ηλεκτρικός αγωγός. Έτσι, μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ηλεκτρόδια λαμπτήρων ηλεκτρικού τόξου. Υπό κανονικές συνθήκες, ο γραφίτης είναι η πιο σταθερή μορφή άνθρακα. Ως εκ τούτου, χρησιμοποιείται στη θερμοχημεία ως πρότυπη κατάσταση για τον προσδιορισμό της θερμότητας σχηματισμού των ενώσεων άνθρακα. Όσον αφορά τη χημική δραστηριότητα του γραφίτη, είναι λίγο πιο δραστική από το διαμάντι. Αυτό συμβαίνει επειδή τα αντιδραστήρια είναι ικανά να διεισδύσουν μεταξύ των εξαγωνικών στρωμάτων των ατόμων άνθρακα στον γραφίτη [14].



**Εικόνα 4.2** Η κρυσταλλική δομή (a) του διαμαντιού και (b) του γραφίτη [16]



### **4.2.3 Φουλερένια**

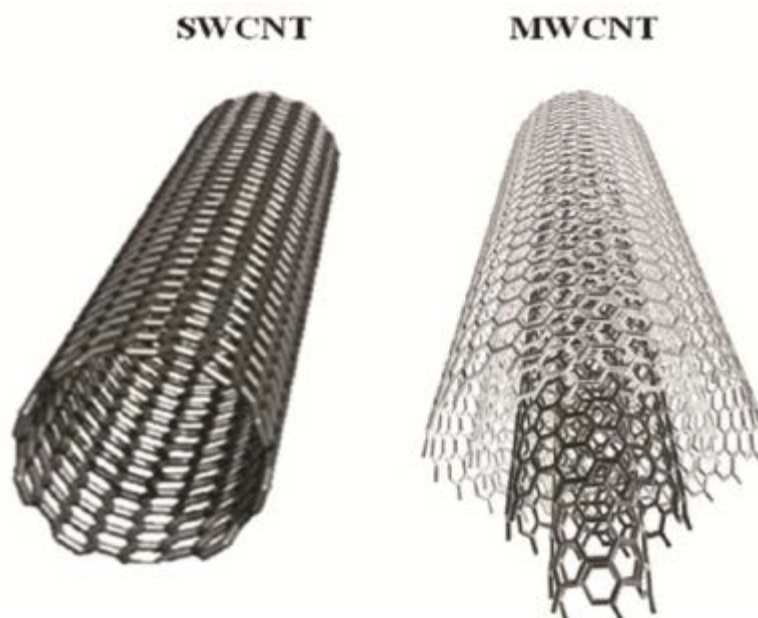
Η ανακάλυψη των φουλερενίων έγινε το 1985 και ήταν αιτία απονομής βραβείου νόμπελ χημείας το 1996 στους Curl, Kroto και Smalley. Η ονομασία αυτή αποδόθηκε προς τιμή του R. Buckminster Fuller, γνωστού αρχιτέκτονα. Η βασική δομή  $C_{60}$  η οποία χαρακτηρίζεται από υψηλή συμμετρία, είναι μια πρωτότυπη νανοδομή. Στο μόριο του φουλερενίου, ο κάθε άνθρακας βρίσκεται σε κορυφή που ανήκει σε δύο εξάγωνα και ένα πεντάγωνο και είναι ομοιοπολικά συνδεδεμένος με άλλα τρία άτομα άνθρακα. Δεν υπάρχουν ελεύθερα σθένη και έτσι το μόριο του φουλερενίου έχει μεγάλη φυσική και χημική σταθερότητα και είναι ικανό να εμφανίζει μεγάλη αντίσταση σε ισχυρές πιέσεις και υψηλές θερμοκρασίες [15-17].

### **4.2.4 Άμορφος άνθρακας**

Ο άμορφος άνθρακας, η αιθάλη, το κάρβουνο, είναι μονοκρυσταλλικές μορφές του γραφίτη. Οι φυσικές ιδιότητες εξαρτώνται από τη φύση και το μέγεθος της επιφάνειας. Εμφανίζουν ηλεκτρική αγωγιμότητα, έχουν υψηλή χημική δραστηριότητα και εύκολα μπορούν να ενσωματωθούν σε άλλα μόρια. Ο γραφίτης και ο άμορφος άνθρακας χρησιμοποιούνται ευρέως στην κατάλυση [17].

### **4.2.5 Νανοσωλήνες άνθρακα (CNTs)**

Οι νανοσωλήνες άνθρακα (CNTs) ανακαλύφθηκαν το 1991 από τον Ιάπωνα φυσικό S. Iijima. Ουσιαστικά, αποτελούν ομόκεντρους κυλίνδρους γραφίτη. Οι νανοσωλήνες άνθρακα, διαχωρίζονται ανάλογα με τη δομή τους σε μονού τοιχώματος (μονοφλοιικούς - SWCNTs) και σε πολλαπλού τοιχώματος (πολυφλοιικούς - MWCNTs), όπως θα αναλυθεί παρακάτω σε άλλη ενότητα [2-16]



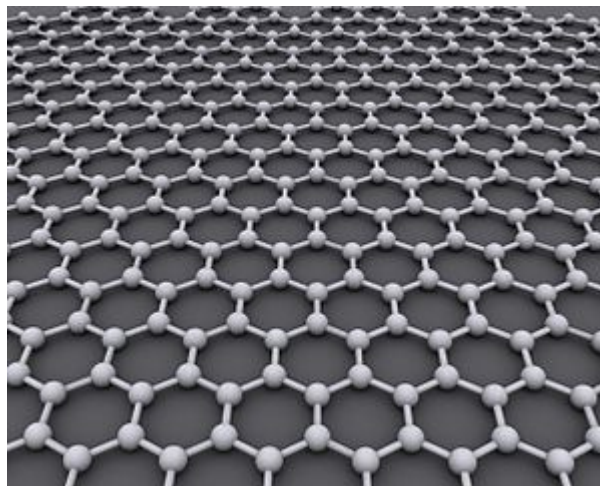
**Εικόνα 4.3** Η δομή SWCNTs αριστερά, και MWCNTs δεξιά [18]

Επίσης, οι νανοσωλήνες άνθρακα, αποτελούν καινοτόμα υλικά τα οποία μπορούν να έχουν διάμετρο μικρότερη από 1nm. Ένας νανοσωλήνας άνθρακα μπορεί να είναι 10.000 φορές μικρότερος από μια ανθρώπινη τρίχα. Το μήκος τους μπορεί να φτάσει τα αρκετά μικρόμετρα ( $1\mu\text{m} = 10.000\text{nm}$ ) και συνεπώς ο λόγος μήκος προς διάμετρο, είναι τυπικά πολύ μεγάλος και συνήθως στην τάξη των χιλιάδων. Οι νανοσωληνες άνθρακα έχουν στεφθεί βασιλιάς της νανοτεχνολογίας εξαιτίας των μοναδικών και εκπληκτικών τους ιδιοτήτων. Εκτός από τη μοναδική τους μικροδομή, οι νανοσωληνες άνθρακα επιδεικνύουν εξαιρετικά χρήσιμες δομικές, ηλεκτρικές, θερμικές και χημικές ιδιότητες και έτσι επιτρέπουν σε πολλά υλικά να γίνουν πιο ελαφρά, πιο ανθεκτικά, φθηνότερα, καθαρότερα και πιο αποδοτικά. Με απλά λόγια, υπάρχουν δυο τύποι αγωγιμότητας στους CNTs, ανάλογα με τη διεύθυνση των εξάγωνων του γραφιτικού επιπέδου που τους αποτελούν [16].

#### 4.2.5 Γραφένιο (Graphene)

Το γραφένιο, το οποίο αποτελεί μια ακόμη αλλοτροπική μορφή άνθρακα, είναι ένας δισδιάστατος κρύσταλλος αποτελούμενος αποκλειστικά από άτομα άνθρακα ισχυρώς συνδεδεμένα μεταξύ τους. Μέχρι το 2004, εθεωρείτο ότι οι αυστηρώς δισδιάστατοι κρύσταλλοι δεν μπορούν να υπάρξουν ελεύθεροι στη φύση γιατί είναι θερμοδυναμικά ασταθείς. Αυτό υποστηρίχθηκε από το γεγονός ότι σε μικρών διαστάσεων κρυσταλλικό πλέγμα, οι θερμικές διακυμάνσεις μπορούν να οδηγήσουν

σε τέτοιες μετατοπίσεις των ατόμων του πλέγματος, οι οποίες είναι συγκρίσιμες με τις ενδοατομικές αποστάσεις. Το 2004, στο πανεπιστήμιο του Μάντσεστερ, οι Andre Geim και Kostya Novoselov, κατάφεραν να απομονώσουν μέσω συγκολλητικής ταινίας, μονατομικού πάχους δισδιάστατο κρυσταλλίτη, ο οποίος φέρει το όνομα γραφένιο. Η ανακάλυψη αυτή τιμήθηκε με το βραβείο Νόμπελ Φυσικής το 2010. Στον δισδιάστατο αυτό κρύσταλλο, οι ισχυροί ενδοατομικοί δεσμοί δεν επιτρέπουν στις θερμικές διακυμάνσεις να οδηγήσουν σε σχετικά μεγάλες μετατοπίσεις των ατόμων στο πλέγμα, ακόμα και σε υψηλές θερμοκρασίες. Το γραφένιο αποτελεί το γεννήτορα δομών μηδενικών διαστάσεων (φουλερένια), μονοδιάστατων δομών (νανοσωλήνες άνθρακα) και τρισδιάστατων δομών (γραφίτης). Το γραφένιο διακρίνεται σε τρεις τύπους, ανάλογα με την πολυπλοκότητα του ηλεκτρονικού φάσματος που εμφανίζει: Στο μονοστρωματικό γραφένιο πάχους ενός ατόμου άνθρακα, στο διστρωματικό γραφένιο πάχους δύο ατόμων άνθρακα και στο πολυστρωματικό γραφένιο πάχους από τρία έως δέκα άτομα άνθρακα. Για πάχη μεγαλύτερα από 10 άτομα άνθρακα θεωρείται ότι έχουμε τρισδιάστατη δομή γραφίτη [19].



**Εικόνα 4.4** Δισδιάστατη διάταξη κρυσταλλικού πλέγματος γραφενίου [20]

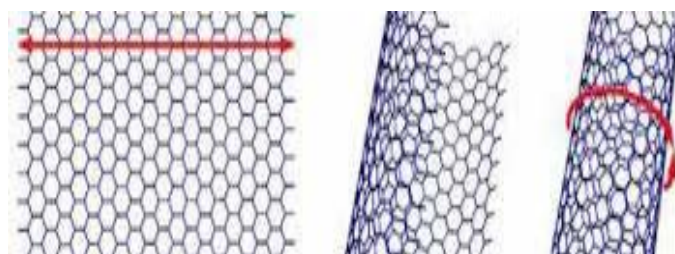
### 4.3 NANOΣΩΛΗΝΕΣ ΑΝΘΡΑΚΑ

Οι νανοσωλήνες άνθρακα (CNTs), όπως μαρτυρά τ' όνομά τους, είναι σωληνοειδή «μόρια» των οποίων οι δύο διαστάσεις ανήκουν στη νάνο-κλίμακα ενώ η τρίτη αντιπροσωπεύει το μήκος των νανοσωλήνων που φτάνει μέχρι και κάποια μm. Επίσης, προέρχονται από την ιδεατή αναδίπλωση φύλλων γραφίτη. Παρακάτω θα

αναλυθούν τα δομικά χαρακτηριστικά, οι ιδιότητές τους, κάποιες από τις μεθόδους παρασκευής, καθώς και μερικές από τις εφαρμογές τους [21].

### 4.3.1 Δομικά χαρακτηριστικά

Αντίθετα με την τετραεδρική δομή του διαμαντιού, όπου κάθε άνθρακας γειτονεύει με τέσσερις άλλους άνθρακες, στη δυδιάστατη δομή του γραφίτη, όπου τα άτομα σχηματίζουν εξάγωνα, κάθε άτομο άνθρακα γειτονεύει με αλλά τρία άτομα. Έτσι, τυλίγοντας το επίπεδο αυτό σε κύλινδρο όπως φαίνεται στο σχήμα 4.1, δομούνται νανοσωληνες, δηλαδή, οι νανοσωληνες άνθρακα μπορούν να παρασταθούν ως γραφιτικά επίπεδα που έχουν τυλιχθεί σε κύλινδρο. Όπως έχει προαναφερθεί, οι νανοσωληνες άνθρακα διακρίνονται σε απλού τοιχώματος (μονοφλουικοί - SWCNTs) και σε πολλαπλού τοιχώματος (πολυφλουικοί - MWCNTs) [16]

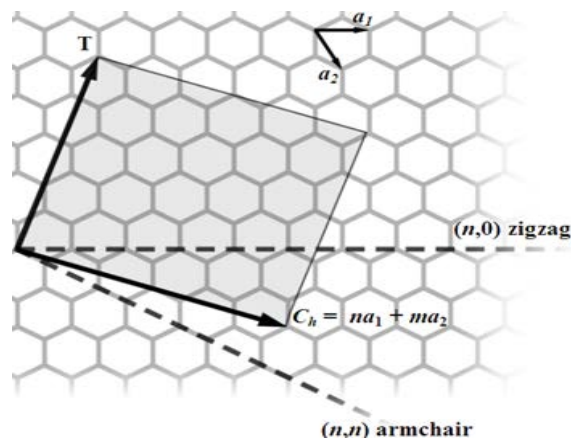


Σχήμα 4.1 Γραφιτικό επίπεδο → τύλιγμα → SWCNTs [16]

Η ατομική δομή των μονοφλουικών νανοσωληνών άνθρακα περιγράφεται με όρους χειρομορφίας ή ελίκωσης των σωληνών, η οποία καθορίζεται από το διάνυσμα ελίκωσης, και τη γωνία χειρομορφίας,  $C_h$  και τη γωνία χειρομορφίας  $\theta$ . Στο σχήμα 4.2 φαίνεται το διάνυσμα χειρομορφίας ή πιο απλά διάνυσμα τυλίγματος, το οποίο περιγράφεται από την εξίσωση:

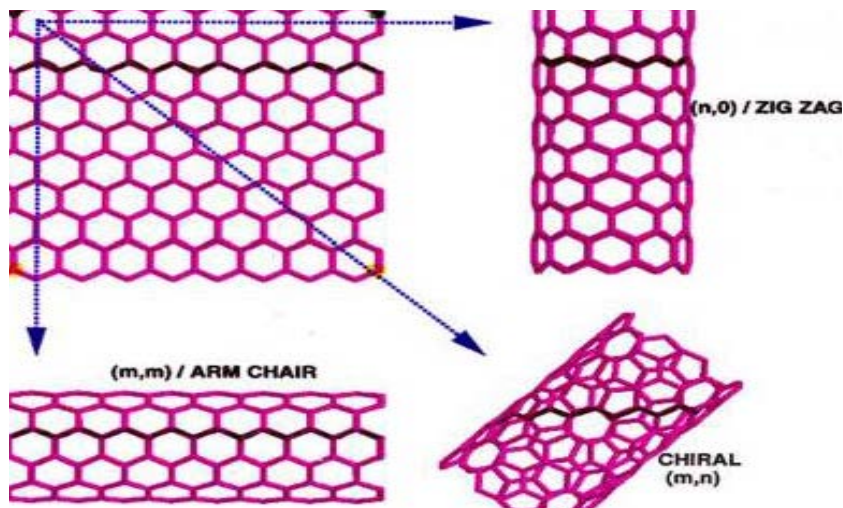
$$C_h = n \cdot a_1 + m \cdot a_2 \quad (1.1)$$

Όπου οι ακέραιοι  $n$ ,  $m$  είναι οι αριθμοί των βημάτων κατά μήκος των δεσμών “zig-zag” του άνθρακα του εξαγωνικού πλέγματος και τα  $a_1$   $a_2$  είναι τα μοναδιαία διανύσματα. Υπάρχουν δυο ακραίες περιπτώσεις: στην πρώτη η γωνία χειρομορφίας είναι  $0^\circ$  (“zig-zag” περίπτωση) και στη δεύτερη είναι  $30^\circ$  (“armchair” περίπτωση) [16].



**Σχήμα 4.2** Σχηματικό διάγραμμα που δείχνει πως το εξαγωνικό επίπεδο γραφίτη τυλίγεται και σχηματίζει έναν νανοσωλήνα άνθρακα [22]

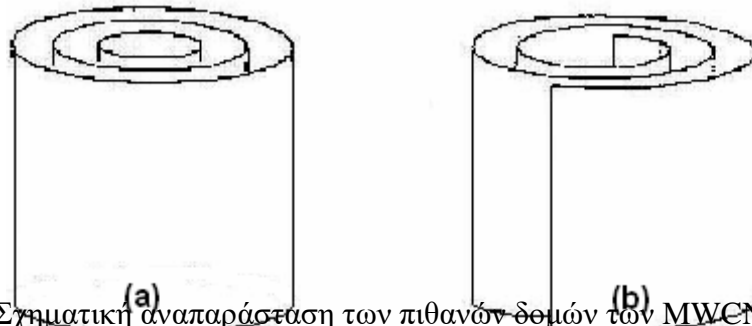
Η χειρομορφία των νανοσωληνων παίζει μεγάλο ρόλο στις ιδιότητες τους, και ιδιαίτερα στις ηλεκτρονικές. Ο γραφίτης λαμβάνεται ως ημι-μέταλλο, όμως οι νανοσωληνες μπορούν να έχουν μεταλλική ή ημιαγωγίμη συμπεριφορά, ανάλογα με το είδος χειρομορφίας τους. Έτσι, οι “armchair” CNTs έχουν τα χαρακτηριστικά του μετάλλου στην ηλεκτρική αγωγή, οι τύπου “zig-zag” έχουν ιδιότητες που εξαρτώνται από τη διάμετρο τους (περίπου το 1/3 αυτών είναι μεταλλικοί και τα 2/3 συμπεριφέρονται ως ημιαγωγοί), οι “spiral” ή αλλιώς “chiral” CNTs έχουν κι αυτοί ιδιότητες που εξαρτώνται από τη διάμετρο τους καθώς και από τη διεύθυνση τυλίγματος [16].



**Σχήμα 4.3** Zig-zag, armchair και chiral (ενδιάμεσοι) νανοσωλήνες ανάλογα με τον άξονα τυλίγματος του γραφιτικού επιπέδου.

Οι νανοσωλήνες πολλαπλού τοιχώματος (MWCNTs) αποτελούν συνάθροιση ομοαξονικών SWCNTs. Έχουν διάμετρο που κυμαίνεται από 3 έως 250nm και η απόσταση μεταξύ των τοιχωμάτων τους προσεγγίζει την απόσταση μεταξύ δύο

γραφιτικών φύλλων (0.335nm). Θεωρητικά, στους MWCNTs υπάρχουν δύο διαφορετικοί τρόποι για την αναδίπλωση του γραφιτικού πλέγματος, οι Russian-doll και Swiss-roll, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα. Επιπλέον, τα τελευταία χρόνια έχουν παρουσιάσει ιδιαίτερο ενδιαφέρον οι MWCNTs με δύο γραφιτικά φύλλα (double-walled CNTs DWCNTs). Οι ιδιότητές τους είναι παρόμοιες με αυτές των SWCNTs με το πλεονέκτημα ότι τροποποιούνται χημικά πιο εύκολα διατηρώντας τις ιδιότητές τους [15].



**Εικόνα 4.5** Σχηματική αναπαράσταση των πιθανών δομών των MWCNTs. Αριστερά, η διαμόρφωση Russian-doll και δεξιά η διαμόρφωση Swiss-roll.

Ένα ακόμη δομικό χαρακτηριστικό των νανοσωλήνων άνθρακα είναι ότι εντοπίζονται πληθώρα από ατέλειες, οι οποίες είναι δυνατόν να εντοπιστούν με διάφορες τεχνικές, όπως της ηλεκτρονικής μικροσκοπίας. Ατέλειες μπορούν να υφίστανται με τη μορφή ατομικών κενών και από ακαθαρσίες που ενσωματώνονται στη δομή τους κατά τη διάρκεια της ανάπτυξης των νανοσωλήνων, όπως είναι τα καταλυτικά σωματίδια. Επίσης, μπορούν να παρατηρηθούν νέες δομές, όπως Y- ή T-διακλαδώσεις, καθώς και αλλοίωση του κυλινδρικού σχήματός τους, όταν αντικαθίστανται εξάγωνα με επτάγωνα ή πεντάγωνα στο πλέγμα των νανοσωλήνων. Τέλος, μια ακόμη μορφή ατελειών αποτελεί η παρουσία άμορφου άνθρακα στα τοιχώματα. Η προσπάθεια περιορισμού των ατελειών είναι ιδιαίτερα σημαντική, αφού η παρουσία τους επηρεάζει έντονα τις ιδιότητες του νανοσωλήνα [15].

## 4.3.2 Ιδιότητες

### 4.3.2.1 Μηχανικές

Οι νανοσωλήνες άνθρακα είναι τα πιο ελαφριά, ισχυρά και ανθεκτικά υλικά. Πολύ σημαντικό είναι το γεγονός ότι μπορούν να αντέξουν πάνω από 15% παραμόρφωση σε τάση εφελκυσμού πριν τη θραύση, ενώ τα περισσότερα από τα σκληρά υλικά καταστρέφονται με παραμόρφωση της τάξης του 1% ή και λιγότερο. Εντυπωσιακό είναι ότι η τιμή της αντοχής σε εφελκυσμό ενός νανοσωλήνα, 150GPa,

μεταφράζεται στην ικανότητα ενός καλωδίου με διατομή  $1\text{mm}^2$  να αντέχει 15000 Kg. Βέβαια η ύπαρξη σημαντικού ποσοστού ατελειών στο πλέγμα μπορεί να ελαττώσει την αντοχή σε εφελκυσμό ακόμη και 85%. Επίσης, αξιοσημείωτο είναι ότι το μέτρο ελαστικότητας των MWCNTs φτάνει 1200GPa και των SWCNTs 1060GPa, τη στιγμή που το διαμάντι εμφανίζει γύρω στα 600GPa [15].

#### 4.3.2.2 Οπτικές

Σε γενικές γραμμές, οι οπτικές ιδιότητες των νανοσωλήνων άνθρακα αναφέρονται στην απορρόφηση, στο φθορισμό και στη σκέδαση Raman. Εφόσον η ηλεκτρονιακή δομή εξαρτάται από τη χειρομορφία των νανοσωλήνων άνθρακα, τα πειράματα πάνω στις οπτικές ιδιότητες μπορούν να φανερώσουν πληροφορίες για τη διάμετρο, τη χειρομορφία και τον μεταλλικό ή ημιαγωγικό χαρακτήρα των νανοσωλήνων [15].

#### 4.3.2.3 Ηλεκτρονικές

Στους νανοσωλήνες άνθρακα τα ηλεκτρόνια μπορούν να διαδίδονται ελεύθερα, όπως ακριβώς συμβαίνει σε ένα συνηθισμένο μέταλλο. Ο γραφίτης από την άλλη μεριά μπορεί να άγει τον ηλεκτρισμό επειδή ένα από τα ηλεκτρόνια σθένους που φέρει κάθε άτομο άνθρακα είναι απεντοπισμένο και γι' αυτό το λόγο μπορεί να μοιράζεται από όλα τα άτομα άνθρακα. Όμως, προκύπτει ότι ένα μόνο φύλλο γραφίτη είναι ένα ηλεκτρονικό υβρίδιο. Είναι ένα ημι-μέταλλο ή διαφορετικά ένας ημιαγωγός μηδενικού ενεργειακού χάσματος. Αυτή η ιδιαιτερότητα σημαίνει ότι οι ηλεκτρονικές καταστάσεις του γραφίτη είναι πολύ ευαίσθητες σε επιπρόσθετες οριακές συνθήκες, όπως αυτές οι οποίες επιβάλλονται από το τύλιγμα του γραφιτικού φύλλου σε σωλήνα [17].

Οι νανοσωλήνες άνθρακα μπορούν να έχουν είτε μεταλλικό χαρακτήρα είτε ημιαγωγικό, όπως προαναφέρθηκε. Έχει δειχθεί στους SWCNTs, ότι αν η περιφέρεια του νανοσωλήνα είναι πολλαπλάσιο του ηλεκτρονιακού μήκους κύματος, τότε ο νανοσωλήνας είναι είτε πραγματικά μεταλλικός ή ένας ημιαγωγός. Ουσιαστικά, ένας τέλειος μεταλλικός νανοσωλήνας θα έπρεπε να είναι ένας βαλλιστικός αγωγός στον οποίο κάθε ηλεκτρόνιο εισάγεται στο ένα άκρο και εξέρχεται από το άλλο άκρο [15-17].

#### 4.3.2.4 Θερμικές

Όλοι οι νανοσωλήνες άνθρακα θεωρούνται πολύ καλοί αγωγοί κατά μήκος τους και καλοί μονωτές πλευρικά του άξονά τους. Η μέγιστη θερμική τους ευστάθεια είναι περίπου 2800°C στο κενό και 750°C στον αέρα. Οι υψηλής συχνότητας δονήσεις του δεσμού C-C, παρέχουν θερμική αγωγιμότητα μεγαλύτερη και από αυτήν του διαμαντιού. Η θερμική αγωγιμότητα σε SWCNTs έχει υπολογιστεί σε θερμοκρασία δωματίου ίση με 6600 W/m\*K. Στους MWCNTs η θερμική αγωγιμότητα είναι της τάξης των 3000 W/m\*K. Όπως και οι υπόλοιπες ιδιότητες των νανοσωλήνων άνθρακα έτσι και η θερμική τους σταθερότητα μειώνεται με την ύπαρξη ατελειών στη δομή τους, καθώς επίσης και με τη μείωση της διαμέτρου τους [15].

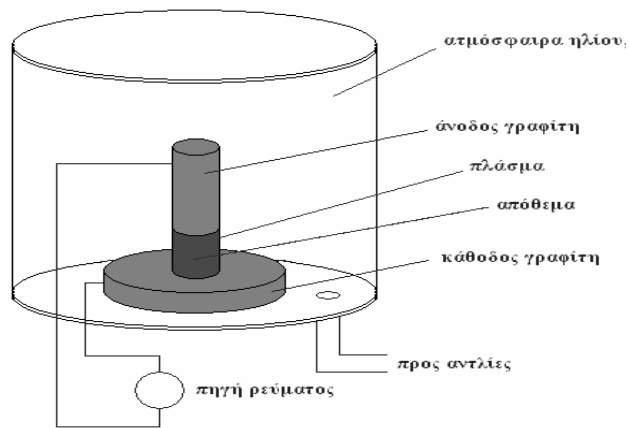
### 4.3.3 Τρόποι σύνθεσης

Τέσσερις μέθοδοι κυριαρχούν στην σύνθεση νανοσωλήνων άνθρακα. Οι μέθοδοι αυτές λαμβάνουν χώρα στην αέρια φάση. Πρόκειται για την ηλεκτρική εκκένωση παρουσία γραφίτη (Carbon Arc ή Arc-Discharge), την εξαέρωση γραφίτη μέσω παλμικού laser (Laser Ablation ή Pulsed Laser Vaporization-PLV), την εναπόθεση αερίων υδρογονανθράκων (Chemical Vapor Deposition-CVD) και την μετατροπή μονοξειδίου του άνθρακα υπό υψηλή πίεση (High-Pressure CO Conversion-HiPCO) [21].

#### 4.3.3.1 Ηλεκτρική εκκένωση παρουσία γραφίτη (carbon arc ή arc-discharge)

Η μέθοδος αυτή οδηγεί στην παραγωγή πολύ καλής ποιότητας SWCNTs και MWCNTs. Για την παραγωγή των νανοσωλήνων χρησιμοποιούνται δύο ηλεκτρόδια γραφίτη για την ηλεκτρική εκκένωση παρουσία συνεχούς ρεύματος υψηλής εντάσεως. Για την παραγωγή νανοσωλήνων απλού τοιχώματος, η άνοδος ενισχύεται συνήθως με Νικέλιο ή Κοβάλτιο. Κατόπιν, και κατά την διάρκεια της αποφόρτισης, μία ράβδος άνθρακα δημιουργείται στην κάθοδο οδηγώντας στον σχηματισμό τόσο νανοσωλήνων όσο και άμορφου άνθρακα. Η πίεση του αερίου ηλίου, που χρησιμοποιείται για να επιταχυνθεί η εναπόθεση του άνθρακα, αποτελεί μία από κρίσιμες παραμέτρους της μεθόδου, μαζί με την ένταση του συνεχούς ρεύματος και τη θερμοκρασία [21].





**Σχήμα 4.4** Μέθοδος ηλεκτρικής εκκένωσης παρουσία γραφίτη [21]

#### 4.3.3.2 Εξάχνωση γραφίτη μέσω παλμικού laser (laser ablation ή pulsed laser vaporization)

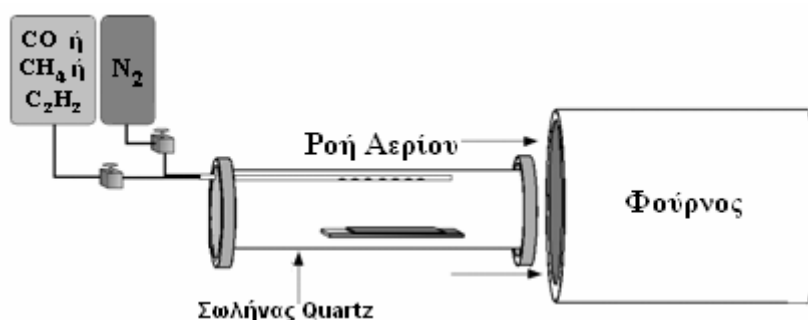
Η μέθοδος της εξάχνωσης γραφίτη μέσω παλμικού laser παρουσία καταλύτη και κάποιου αδρανούς αερίου, οδηγεί στο σχηματισμό SWCNTs. Η παρουσία του καταλύτη κρίνεται απαραίτητη δεδομένου ότι χωρίς αυτήν η μέθοδος θα οδηγούσε στο σχηματισμό φουλερενίων. Η μέθοδος αυτή οδηγεί σε καθαρότερο προϊόν, ενώ παράγοντες που επηρεάζουν την ποσότητα των νανοσωλήνων που παράγεται είναι η ποσότητα και το είδος του καταλύτη, η ισχύς και το μήκος κύματος εκπομπής του laser, η θερμοκρασία, η πίεση και το είδος του αδρανούς αερίου, καθώς και η δυναμική ρευστών κοντά στον γραφιτικό στόχο [21].



**Σχήμα 4.5** Μέθοδος εξάχνωσης γραφίτη μέσω παλμικού laser [21]

#### 4.3.3.3 Χημική εναπόθεση αερίων (chemical vapor deposition)

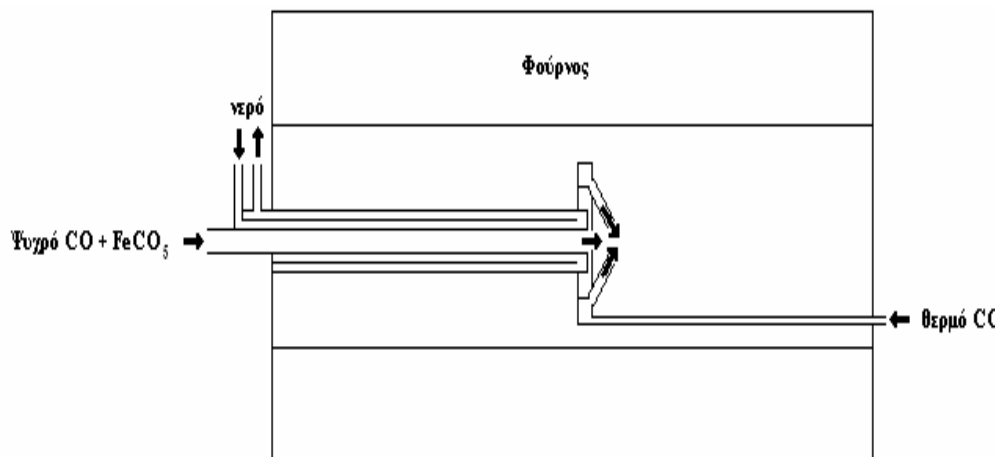
Η μέθοδος CVD χρησιμοποιεί ως πηγή άνθρακα υδρογονάνθρακες, κυρίως μεθάνιο και ακετυλένιο αλλά και μονοξειδίο του άνθρακα. Τα αέρια οδεύουν προς τον καταλύτη μέσα σε ένα quartz σωλήνα, οδηγούμενα από ροή αζώτου, ενώ θερμαίνονται σε υψηλές θερμοκρασίες. Στην επιφάνεια του καταλύτη αποικοδομούνται με διάσπαση του δεσμού άνθρακα-υδρογόνου προς καθαρό άνθρακα, ο οποίος σε υψηλές θερμοκρασίες οδηγεί στο σχηματισμό νανοσωλήνων. Για την παραγωγή νανοσωλήνων απλού τοιχώματος απαιτούνται υψηλότερες θερμοκρασίες. Πλεονεκτήματα της μεθόδου αποτελούν οι χαμηλές απαιτήσεις σε ενέργεια και θερμοκρασίες, καθώς επίσης και η υψηλή καθαρότητα των προϊόντων [21].



Σχήμα 4.6 Μέθοδος χημικής εναπόθεσης αερίων [21]

#### 4.3.3.4 Μετατροπή μονοξειδίου του άνθρακα υπό υψηλή πίεση (high pressure CO Conversion)

Η μέθοδος HiPCO δίνει τη δυνατότητα παραγωγής μεγάλων ποσοτήτων νανοσωλήνων κάτι που την καθιστά εν δυνάμει ικανή για τη μαζική παραγωγή SWCNTs. Οι καταλύτες που χρησιμοποιούνται κατά την εφαρμογή της μεθόδου σχηματίζονται in-situ από τη θερμική αποικοδόμηση του πεντακαρβονυλικού ιόντος υπό θερμή ροή μονοξειδίου του άνθρακα, σε πίεση 1-10atm και θερμοκρασία 800-1200°C. Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούν υδρογονάνθρακες ως πηγή άνθρακα οδηγούν αναπόφευκτα στον ανεπιθύμητο σχηματισμό άμορφου άνθρακα και γραφίτη, λόγω της θερμικής διάσπασης των παραπάνω σε υψηλές θερμοκρασίες. Έτσι απαιτείται ένα στάδιο καθαρισμού για την απομάκρυνση του άμορφου άνθρακα. Η μέθοδος HiPCO χρησιμοποιεί CO ως πηγή άνθρακα και  $\text{Fe}(\text{CO})_5$  ως πρόδρομο καταλύτη. Η ποσότητα των νανοσωλήνων που παράγεται καθώς και η διάμετρός τους διαφέρει ανάλογα με τις συνθήκες και την γεωμετρία της συσκευής [21].



**Σχήμα 4.7** Διάταξη μετατροπής μονοξειδίου του άνθρακα υπό υψηλή πίεση [21]

#### 4.3.4 Χημική τροποποίηση

Οι νανοσωλήνες άνθρακα μπορούν να ενεργοποιηθούν μέσω της χημικής τροποποίησης για να επιτύχουν τις επιθυμητές ιδιότητες ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μια ευρεία ποικιλία εφαρμογών. Η τροποποίηση μπορεί να γίνει είτε ομοιοπολικά μεταξύ του νανοσωλήνα και του αντιδρώντος μορίου είτε μη ομοιοπολικά. Η σημασία της χημικής τροποποίησης των νανοσωλήνων άνθρακα είναι μεγάλη για διάφορους λόγους. Αρχικά, ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά των πρωτογενών νανοσωλήνων άνθρακα είναι η υδροφοβικότητά τους που οδηγεί σε συσσωματώματα και εμποδίζει τη διασπορά τους σε διαλύματα και η δυσκολία επεξεργασίας τους στο καθαρό νερό και σε οργανικούς διαλύτες καθώς αποτελούν στοιχεία ανθεκτικά στη διαβροχή, εμποδίζοντας έτσι την εφαρμογή τους σε διάφορες τεχνολογίες. Η τροποποίηση των νανοσωλήνων άνθρακα με διάφορες ομάδες μπορεί να αυξήσει τη διαλυτότητά τους, να βελτιώσει την επεξεργασιμότητά τους και να προσφέρει νέες ιδιότητες, ανάλογα με τα μόρια της τροποποίησης [15].

#### 4.3.5 Εφαρμογές

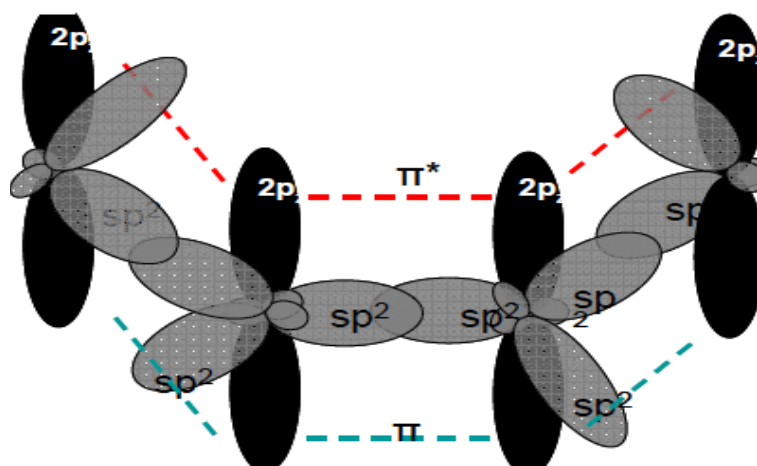
Λόγω των εξαιρετικών τους ιδιοτήτων, όπως αναλύθηκε παραπάνω, οι νανοσωλήνες μελετώνται με σκοπό τη χρήση τους σε ποικίλες εφαρμογές όπως σε οθόνες εκπομπής πεδίου. Οι ιδιαίτερες ιδιότητες των νανοσωλήνων άνθρακα τους καθιστούν πιθανούς υποψήφιους για την επόμενη γενιά συσκευών εκπομπής. Οι οθόνες εκπομπής πεδίου βασίζονται στη δημιουργία ισχυρού ηλεκτρικού πεδίου για την παραγωγή ηλεκτρονίων. Η αποδοτικότητα της συσκευής εξαρτάται ευθέως από την ισχύ του πεδίου και αντιστρόφως από τη διάμετρο του καλωδίου, με αποτέλεσμα

οι νανοσωλήνες να αποτελούν ελκυστική επιλογή. Επίσης, οι νανοσωλήνες άνθρακα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή μοριακών transistors επίδρασης πεδίου, αλλά και μονοηλεκτρονικών transistors αντίστοιχα. Μια άλλη ενδιαφέρουσα εφαρμογή είναι η χρήση νανοσωλήνων άνθρακα για αποθήκευση υδρογόνου. Οι νανοσωλήνες έχουν τη δυνατότητα γρήγορης απορρόφησης ποσοτήτων υδρογόνου υψηλής πυκνότητας σε θερμοκρασία δωματίου και ατμοσφαιρική πίεση. Έχει αναφερθεί πως οι SWCNTs έχουν τη δυνατότητα αποθήκευσης υδρογόνου σε πυκνότητα μεγαλύτερη από  $63\text{kg/m}^3$ . Επιπλέον, οι νανοσωλήνες άνθρακα μπορούν να χρησιμεύσουν και ως αισθητήρες αερίων. Η ηλεκτρική αντίσταση των ημιαγωγικών SWCNTs μεταβάλλεται δραματικά όταν εκτίθενται σε αέρια. Πρόσφατα οι νανοσωλήνες άνθρακα έχουν χρησιμοποιηθεί ως ακίδα στη μικροσκοπία σάρωσης. Τέλος, οι νανοσωλήνες άνθρακα μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως ενισχυτικά υλικά σε πολυμερικές μήτρες καθώς και σε μήτρες σκυροδέματος ή κονιάματος [21].

## 4.4 ΓΡΑΦΕΝΙΟ

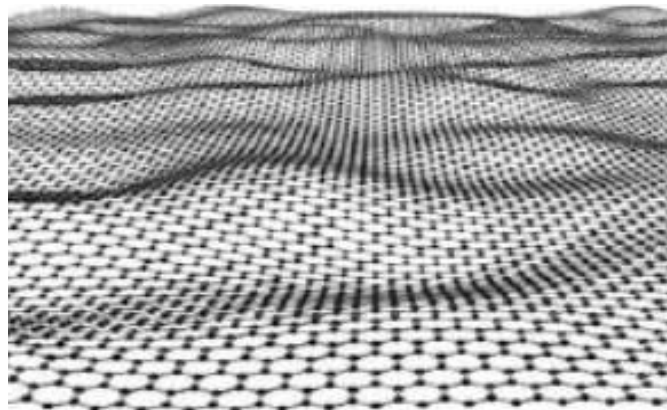
### 4.4.1 Δομή

Ο δισδιάστατος κρύσταλλος του γραφενίου, όπως προαναφέρθηκε, αποτελείται από άτομα άνθρακα ισχυρώς συνδεδεμένα μεταξύ τους, τα οποία είναι τοποθετημένα πάνω στις κορυφές κανονικών εξαγώνων, δημιουργώντας κυψελοειδή δομή. Το κάθε άτομο άνθρακα δημιουργεί τρεις ομοιοπολικούς δεσμούς υβριδισμού  $sp^2$  με τα γειτονικά άτομα άνθρακα του ίδιου επιπέδου, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα [19].



**Σχήμα 4.8** Οι δεσμοί  $sp^2$  (γκρι χρώμα) που δημιουργούν τα γειτονικά άτομα άνθρακα στο κρυσταλλικό πλέγμα του γραφενίου και τα τροχιακά  $2p_z$  στα οποία κινείται το τέταρτο ηλεκτρόνιο κάθε ατόμου άνθρακα [19]

Το εξαγωνικό πλέγμα του γραφενίου δεν είναι πλέγμα Bravais και έτσι, η δομή του γραφενίου προκύπτει από τη σύνθεση δύο υποπλεγμάτων A και B. Κάθε άτομο άνθρακα στο πλέγμα ενώνεται με τα γειτονικά του μέσω ισχυρών  $\sigma$  δεσμών στο επίπεδο του γραφενίου, οι οποίοι σχηματίζουν γωνία  $120^\circ$  μεταξύ τους. Δύο οποιαδήποτε γειτονικά άτομα άνθρακα αποτελούν την μονάδα εξαγωνικού κελιού και απέχουν μεταξύ τους  $0.142\text{nm}$ . Στο διστρωματικό και πολυστρωματικό γραφένιο τα επίπεδα απέχουν μεταξύ τους  $0.335\text{nm}$ . Στην επιφάνεια του μονοστρωματικού γραφενίου εμφανίζονται κυματισμοί πλάτους περίπου  $1\text{nm}$ . Αυτοί οι κυματισμοί, μπορεί να είναι είτε ενδογενείς, λόγω της αστάθειας των διαστάσεων κρυστάλλων είτε εξωγενείς, προερχόμενοι από το θόρυβο ο οποίος εμφανίζεται σε όλες τις εικόνες ηλεκτρονικού μικροσκοπίου διέλευσης του γραφενίου. Επίσης, το γραφένιο μπορεί να επισκευάσει τυχόν ατέλειες στον κρύσταλλό του, όταν εκτίθεται σε μόρια που περιέχουν άτομα άνθρακα, όπως οι υδρογονάνθρακες. Επιπλέον, όταν βομβαρδίζεται με άτομα άνθρακα, τα σημεία του κρυστάλλου όπου υπάρχει έλλειψη άνθρακα, συμπληρώνονται από άτομα άνθρακα τα οποία ευθυγραμμίζονται σε κανονικά εξάγωνα [19].

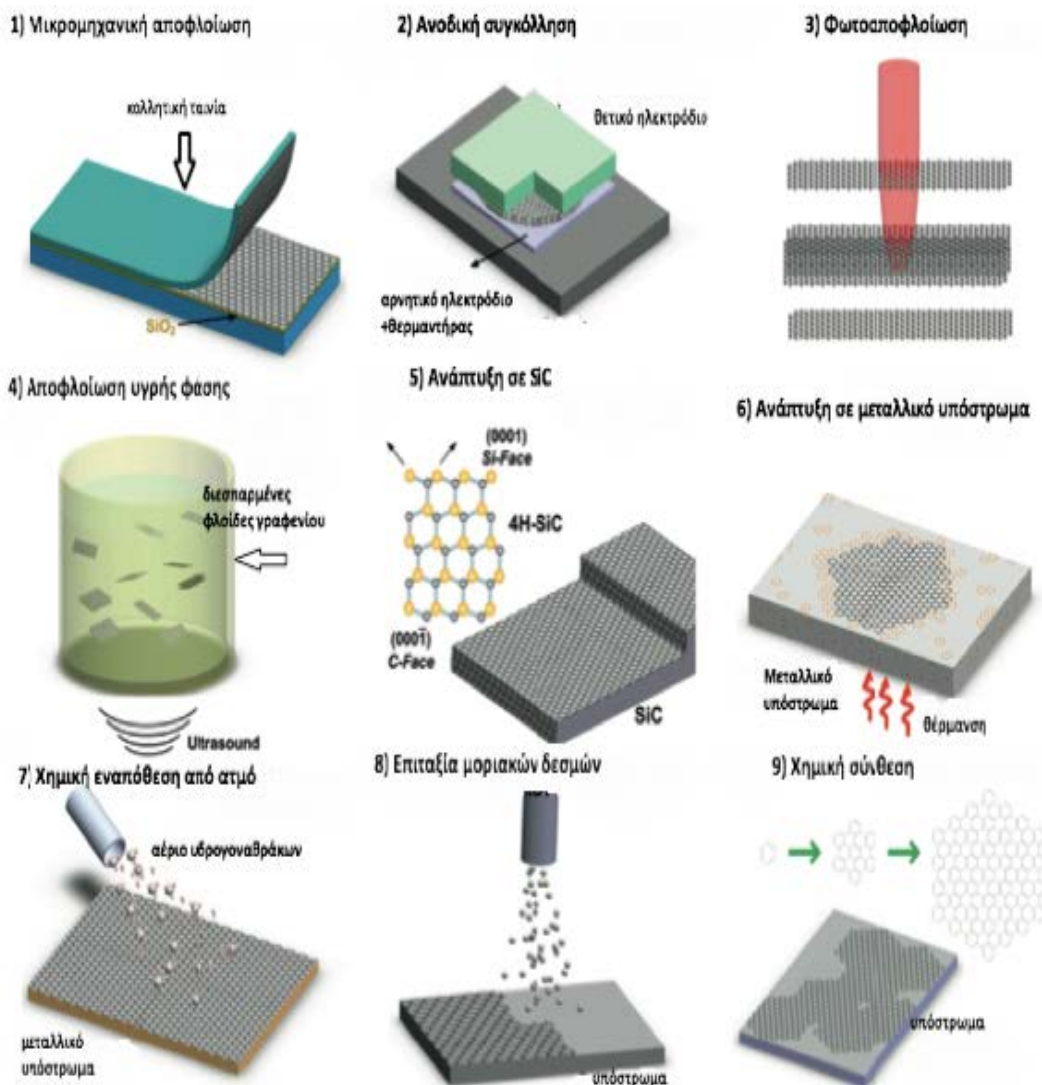


**Εικόνα 4.5** Κυματισμοί στην επιφάνεια του μονοστρωματικού γραφενίου [19]

#### 4.4.2 Τρόποι σύνθεσης

Όσον αφορά τη σύνθεση του γραφενίου, κύριος στόχος είναι η ανάπτυξη, όσο το δυνατό, μεγαλύτερων σε επιφάνεια, και παχύτερων φύλλων. Η «πρώτη» ύλη για τη

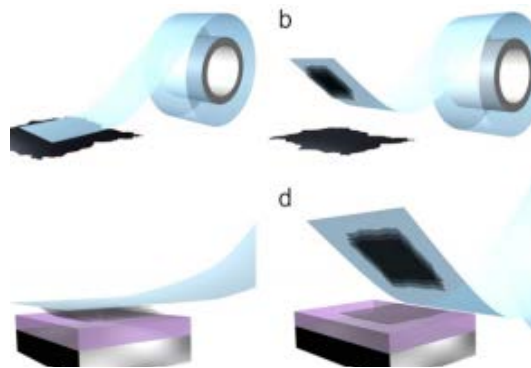
σύνθεση γραφενίου είναι ο γραφίτης ο οποίος μπορεί να βρεθεί σε διάφορες μορφές όπως, συμπαγής μορφή (μολύβι), σε μορφή πούδρας και σε μορφή φλοιδών (η πιο αποτελεσματική). Τα φύλλα γραφενίου, τα οποία παράγονται επιδιώκεται να είναι όσο το δυνατό πιο κοντά το ένα με το άλλο, προκειμένου να άγουν τον ηλεκτρισμό, και όσο παχύτερα γίνεται προκειμένου να είναι ανθεκτικότερα. Στη περίπτωση, που δεν έχουν μεγάλη επιφάνεια, και δεν είναι αρκετά μεγάλα σε πάχος, θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν περισσότερα φύλλα για το ίδιο αποτέλεσμα, γεγονός που αποτελεί μειονέκτημα. Επομένως, με βάση τα παραπάνω διαμορφώθηκαν διάφοροι τρόποι παραγωγής με τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά τους και ξεχωρίζουν περισσότερο οι μέθοδοι σύνθεσης που έχουν τη μεγαλύτερη και καλύτερη ποιότητα παραγωγής με το χαμηλότερο κόστος. Οι κυριότερες μέθοδοι παραγωγής διακρίνονται στο παρακάτω σχήμα και αναλύονται στη συνέχεια [23].



#### Σχήμα 4.9 Αναπαράσταση μεθόδων σύνθεσης γραφενίου [23]

##### 4.4.2.1 Μικρομηχανική αποφλοΐωση ή διάσπαση

Η μικρομηχανική διάσπαση, ή διαφορετικά μικρομηχανική αποφλοΐωση, χρησιμοποιήθηκε για δεκαετίες στο τομέα της κρυσταλλογραφίας. Το 1999, για πρώτη φορά γίνεται αναφορά για ανεύρεση μίας νέας ελεγχόμενης μεθόδου διαχωρισμού του γραφίτη σε ανθρακικά φιλμ, που αποτελούνταν από αρκετές στρώσεις γραφενίου. Αυτή η επαναστατική μέθοδος αποτελεί την πρώτη και την απλούστερη συνθετική οδό γραφενίου. Το εκτεταμένο τρίψιμο της επιφάνειας του γραφίτη σε μία επίπεδη επιφάνεια (για παράδειγμα σε μία κολλητική ταινία) μπορεί να αποδώσει πολλαπλές, αλλά ακόμα και ατομικές στρώσεις, από πλάκες γραφενίου. Συγκεκριμένα, τα στρώματα του γραφενίου που συνθέτουν το γραφίτη είναι συνδεδεμένα μεταξύ τους με ασθενείς δυνάμεις van der Waals ενέργειας περίπου  $2 \text{ eV/nm}^2$ . Επομένως, με δύναμη της τάξεως των  $300 \text{ nN}/\mu\text{m}^2$  επιτυγχάνεται η αποκόλληση τους. Αυτό αποτέλεσε την πρώτη επιτυχημένη προσπάθεια διαχωρισμού του γραφίτη προς μονές στρώσεις γραφενίου, με χρήση κολλητικής ταινίας. Η μικρομηχανική αποφλοΐωση, αποτέλεσε τη μέθοδο που χρησιμοποιήθηκε από τους Geim και Novoselov και που τους χάρισε το Nobel Φυσικής. Ωστόσο, σήμερα έχει βελτιστοποιηθεί σε μεγάλο βαθμό, με στόχο την αύξηση της ποιότητας των προϊόντων που προκύπτουν [23].

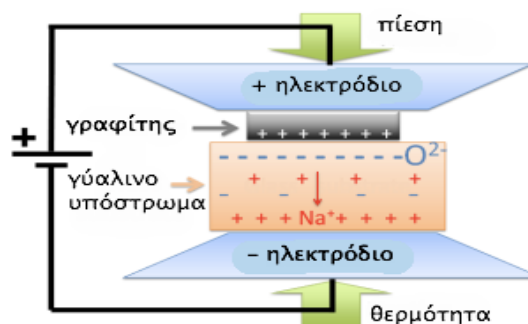


Σχήμα 4.10 Απεικόνιση μεθόδου σύνθεσης γραφενίου με μικρομηχανική αποφλοΐωση [23]

##### 4.4.2.2 Ανοδική συγκόλληση

Η ανοδική συγκόλληση αποτελεί μία απλή και αξιόπιστη μέθοδο για τη σύνθεση μονών φύλλων γραφενίου (SLG). Το πυρίτιο αντικαταστήθηκε από γραφίτη

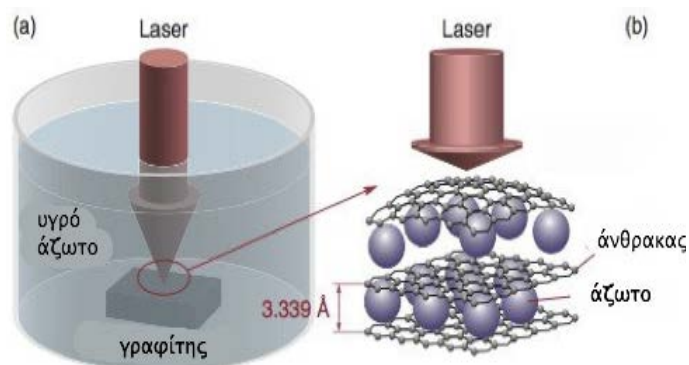
σε μορφή πούδρας, και στη βέλτιστη θερμοκρασία και τάση, προκύπτει ηλεκτροστατική συγκόλληση του γραφίτη στο γυαλί, όπου με μηχανική απομάκρυνση του γραφίτη λαμβάνεται γραφένιο. Το κύριο πλεονέκτημα της μεθόδου είναι το γεγονός ότι επιτρέπει τη συγκόλληση δύο μακροσκοπικώς, οπτικών και λείων επιφανειών, η μία εκ των οποίων είναι το βοριοπυριτικό γυαλί χωρίς τη χρήση κάποιου κολλητικού μέσου [23].



**Σχήμα 4.11** Απεικόνιση μεθόδου σύνθεσης γραφενίου με ανοδική συγκόλληση [23]  
4.4.2.3 Φωτοαποφλοίωση με Laser

Η μέθοδος αυτή αποτελεί τη χρήση μιας ακτίνας laser για την απομάκρυνση υλικού από μία στερεή επιφάνεια. Εάν η διαδικασία της ακτινοβολίας έχει ως αποτέλεσμα την απόσπαση μερικής ή ολόκληρης στοιβάδας από το υλικό, τότε ονομάζεται φωτοαποφλοίωση. Οι παλμοί του laser μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αποφλοίωση νιφάδων γραφίτη. Πράγματι, διαμορφώνοντας την ιδανική ενέργεια στην ακτίνα του laser, είναι δυνατή η διαμόρφωση γραφενίου. Η διαδικασία λαμβάνει χώρα υπό κενό καθώς το γραφένιο έχει τη τάση να οξειδώνεται όταν έρθει σε επαφή με τον αέρα. Πιο συγκεκριμένα, ο γραφίτης τοποθετείται σε υγρό άζωτο και εκτίθεται στην ακτινοβολία. Μετά από την ακτινοβολία, το υγρό άζωτο έχει εξατμιστεί και ο κενός χώρος συμπληρώνεται με απιονισμένο νερό. Το απιονισμένο νερό βοηθάει στον διαχωρισμό των φύλλων γραφενίου σαν εναιωρήματα. Λόγω του ότι η μέθοδος είναι σχετικά πρωτοεμφανιζόμενη συνεχώς γίνονται βελτιστοποιήσεις στα διάφορα στάδιά της [23].

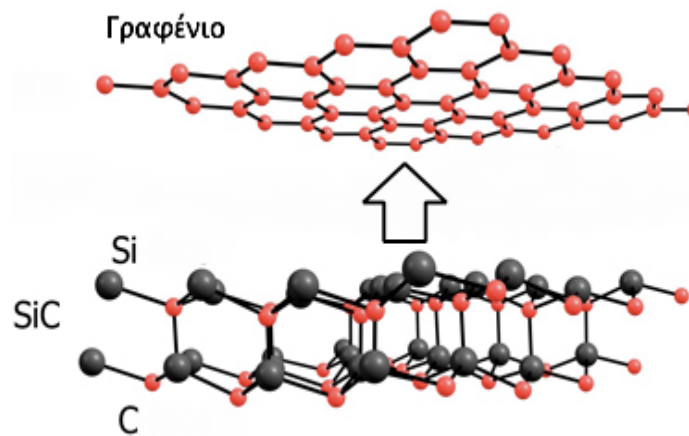




**Σχήμα 4.12** Απεικόνιση της σύνθεσης γραφενίου a) ως πειραματική διάταξη και b) μοριακά με τη μέθοδο της φωτοαποφλοιώσης [23]

#### 4.4.2.4 Κρυσταλλική ανάπτυξη σε καρβίδιο του πυριτίου (SiC)

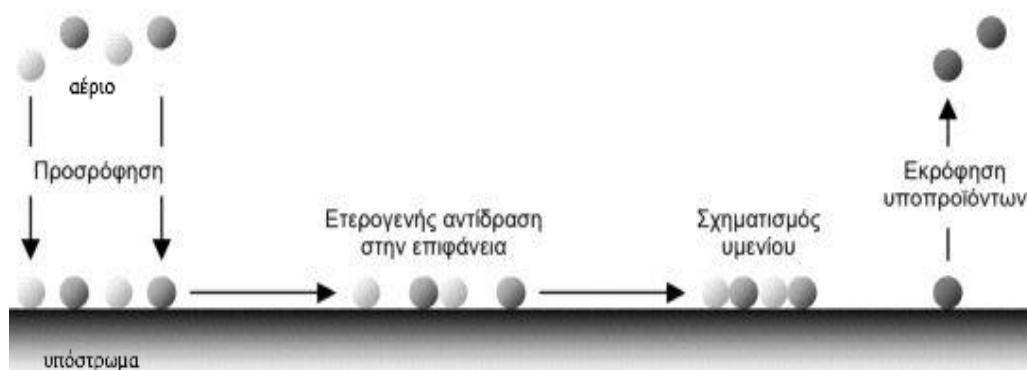
Στη μέθοδο αυτή, το υπόστρωμα πυριτίου και καρβιδίου θερμαίνεται σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες των  $1000^{\circ}\text{C}$  σε ενισχυμένο κενό αέρος με αποτέλεσμα το πυρίτιο να εξατμίζεται. Κατά τη διάρκεια της θέρμανσης τα άτομα του άνθρακα αναδιοργανώνονται στο χώρο και τελικά για πολύ υψηλές θερμοκρασίες δύναται να σχηματίσουν δομή γραφενίου. Ο σχηματισμός λίγων φύλλων γραφενίου συνήθως απαιτεί μερικά λεπτά απόπτωσης στους  $1200^{\circ}\text{C}$ . Επίσης, το πάχος των φύλλων γραφενίου που παράγονται, εξαρτάται από τον χρόνο απόπτωσης και της θερμοκρασίας. Επιπλέον, η ανάπτυξη του γραφενίου σε SiC συνήθως αναφέρεται ως επιταξιακή ανάπτυξη. Τέλος, πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής, αποτελεί μία σημαντική προσέγγιση ειδικά για την βιομηχανία των ημιαγωγών, καθώς τα προϊόντα που λαμβάνονται δεν χρειάζεται να μεταφερθούν σε άλλη επιφάνεια ώστε να ενσωματωθούν σε διατάξεις. Με αυτό τον τρόπο αποφεύγονται τυχόν οξειδώσεις που θα οδηγούσαν σε μείωση ή καταστροφή του προϊόντος. Παρά τα πλεονεκτήματα χρήσης αυτής της μεθόδου, υπάρχουν και ορισμένα μειονεκτήματα που θα πρέπει να αντιμετωπιστούν. Για παράδειγμα, υπάρχει η δυσκολία στο να ελεγχθεί το πάχος των υμενίων που παράγονται, όπως επίσης και ο διαφορετικός επιταξιακός ρυθμός ανάπτυξης μεταξύ του πυριτικού και ανθρακικού τομέα του SiC [23].



**Σχήμα 4.13** Απεικόνιση γραφενίου από καρβίδιο του πυριτίου [23]

#### 4.4.2.5 Χημική εναπόθεση ατμών (CVD)

Η συγκεκριμένη μέθοδος, αποτελεί μία τεχνική η οποία δύναται να χρησιμοποιηθεί για μαζικότερη παραγωγή λίγων (ακόμη και ενός) και λεπτών φύλλων γραφενίου. Γενικότερα, μία τυπική διαδικασία CVD περιλαμβάνει την εναπόθεση αερίου μίγματος αντιδρώντων πάνω σε υπόστρωμα, όπου τα αέρια αρχικά τοποθετούνται σε κλίβανο σε αρχική θερμοκρασία δωματίου, η οποία στη συνέχεια αυξάνεται ώσπου να συμβεί η επιθυμητή αντίδραση, καθώς τα αέρια έρχονται σε επαφή με το υπόστρωμα. Συγκεκριμένα, η παραγωγή γραφενίου περιλαμβάνει διάλυση άνθρακα σε μία επιφάνεια υποστρώματος, ακολουθούμενη από κατακρήμνιση του άνθρακα πάνω στο υπόστρωμα, με ψύξη νικελίου. Ως πηγή άνθρακα χρησιμοποιείται κυρίως το μεθάνιο  $\text{CH}_4$ , ενώ ως υποστρώματα προτιμούνται πλακίδια νικελίου Ni και χαλκού Cu. Έπειτα, το υπόστρωμα τοποθετείται σε ένα θάλαμο CVD που βρίσκεται υπό κενό και σε θερμοκρασία περίπου στους  $1000^\circ\text{C}$  (η θερμοκρασία δρα καταλυτικά στην όλη διαδικασία). Στη συνέχεια, πραγματοποιείται ροή αερίου υδρογονάνθρακα μέσα από ένα οριακό στρώμα, στην επιφάνεια του υποστρώματος. Μετά την προσρόφηση του αερίου από το υπόστρωμα, πραγματοποιείται ετερογενής αντίδραση των αερίων με τη στερεή επιφάνεια. Τέλος, αφού πραγματοποιηθεί εκρόφιση των προϊόντων της αντίδρασης από την επιφάνεια του υποστρώματος, γίνεται μεταφορά τους μακριά από τον χώρο της αντίδρασης. Θα πρέπει να σημειωθεί πως σημαντικό ρόλο στην ποιότητα, στο πάχος και τη κρυσταλλικότητα του γραφενίου παίζει το είδος του υδρογονάνθρακα που θα χρησιμοποιηθεί στο θάλαμο και ο ρυθμός ψύξης και η συγκέντρωση του άνθρακα, που διαλύεται στην επιφάνεια του καταλυτικού υποστρώματος [23].

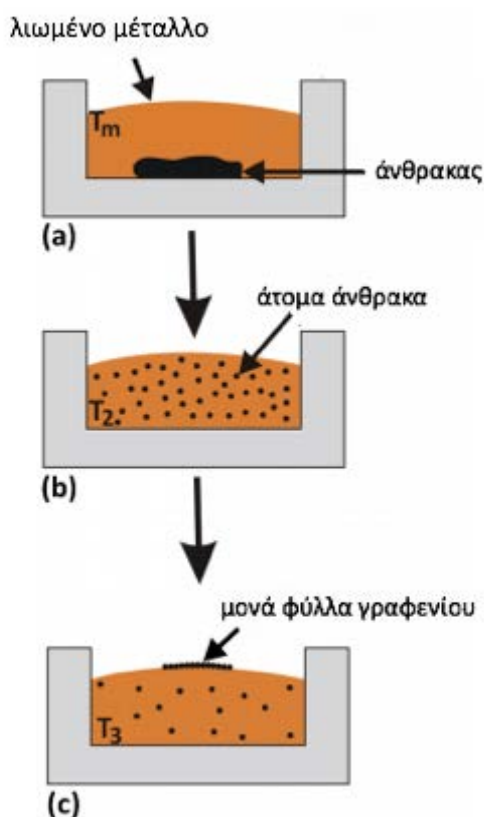


**Σχήμα 4.14** Απεικόνιση της μεθόδου CVD [23]

Η χημική εναπόθεση ατμών προς σχηματισμό γραφενίου είναι η πιο διαδεδομένη μέθοδος, αφού συμβιβάζει χαμηλό κόστος με υψηλό βαθμό καθαρότητας και διαθέτει προοπτικές για μαζική παραγωγή. Μειονεκτήματα της μεθόδου αποτελούν, η σχετικά ανομοιόμορφη εναπόθεση στρώματος και η έντονη εξάρτηση της ποιότητας του τελικού προϊόντος από τις συνθήκες διεξαγωγής της διεργασίας, όπως για παράδειγμα το ρυθμό ψύξης του υποστρώματος μετά το στάδιο της εναπόθεσης [23].

#### 4.4.2.6 Κρυσταλλική ανάπτυξη σε μεταλλικό υπόστρωμα

Η κρυσταλλική ανάπτυξη σε μεταλλικό υπόστρωμα αποτελεί μία νέα μέθοδο ανάπτυξης φύλλων γραφενίου μεγάλης επιφάνειας που θα μπορούσε εν δυνάμει να αποτελεί μία μέθοδο υψηλής απόδοσης και οικονομικής παραγωγής γραφενίου. Η συγκεκριμένη μέθοδος βασίζεται στη λογική της διάλυσης άνθρακα σε μεταλλική επιφάνεια. Το πάχος το οποίο θα έχουν τα υμένια, εξαρτάται από το μέταλλο, τον βαθμό διαλυτότητας που εμφανίζει ο άνθρακας στο συγκεκριμένο μέταλλο, το πάχος του μετάλλου και τον ρυθμό ψύξης. Η ανάπτυξη γραφενίου σε μεταλλικό υπόστρωμα πολλές φορές έχει παρομοιαστεί με τη μέθοδο της χημικής εναπόθεσης με ατμό ονομαζόμενη και ως CVD σε υψηλή θερμοκρασία. Ωστόσο, στην πραγματικότητα αυτές οι δύο μέθοδοι βασίζονται σε τελείως διαφορετική λογική. Επίσης, η εν λόγω μέθοδος αναπτύχθηκε κυρίως για οικονομικούς λόγους και στην πράξη, γίνεται κυρίως χρήση μετάλλων όπως Ni και Co [23].



**Σχήμα 4.14** Αναπαράσταση της ανάπτυξης γραφενίου σε μεταλλικό υπόστρωμα [23]

### 4.4.3 Ιδιότητες

Οι ιδιότητες του γραφενίου είναι ποικίλες και μοναδικές, πράγμα που το καθιστά συναρπαστικό για εφαρμογές. Αποτελούν το βασικό λόγο για τον οποίο το γραφένιο έχει επικεντρώσει το μεγαλύτερο επιστημονικό ενδιαφέρον πάνω του από τομείς όπως η φυσική, η χημεία και η επιστήμη των υλικών, μετά από την πρόσφατη ανακάλυψή του. Επίσης, λόγω του ότι είναι ένα υλικό το οποίο είναι σχετικά καινούργιο στο επιστημονικό τομέα, συνεχώς ανακαλύπτονται και νέα στοιχεία για αυτό, με αποτέλεσμα να διευρύνονται οι γνώσεις για τις ιδιότητές του. Παρακάτω ακολουθεί μια σύντομη περιγραφή των βασικών ιδιοτήτων του γραφενίου [23].

#### 4.4.3.1 Μηχανικές

Το γραφένιο πρόκειται για το πιο λεπτό (με πάχος ενός ατόμου) και το πιο ανθεκτικό υλικό που έχει μετρηθεί έως σήμερα. Είναι ισχυρότερο από το διαμάντι και 300 φορές ανθεκτικότερο από τον χάλυβα. Συγκεκριμένα, το μέτρο του Young παίρνει τιμές περίπου 1TPa, ενώ η αντοχή του σε θραύση υπολογίζεται στα 130GPa. Το γεγονός του ότι το γραφένιο είναι τόσο ανθεκτικό, οφείλεται στους δεσμούς του. Ο δεσμός  $sp^2$  μεταξύ άνθρακα-άνθρακα είναι ο πιο ισχυρός δεσμός που έχει μετρηθεί.

Αυτό εξηγεί το μέγεθος της ανθεκτικότητας του ως υλικό. Εκτός από πολύ ανθεκτικό το γραφένιο, είναι μη διαπερατό από τα αέρια, παρουσιάζει πολύ μεγάλη ειδική επιφάνεια που προσεγγίζει τα  $2630\text{m}^2\cdot\text{g}^{-1}$  και θα μπορούσε να χαρακτηριστεί ως ένα αρκετά ευλύγιστο υλικό. Τέλος, έχει την ιδανική ισορροπία μεταξύ ολκιμότητας και ευθραυστότητας, ιδιότητα η οποία είναι πολύ σημαντική, καθώς αναμένεται να χρησιμοποιηθεί αρκετά σε τεχνολογικές εφαρμογές όπως smartphones και tablets με καμπύλες οθόνες [23].

#### 4.4.3.2 Οπτικές

Το γραφένιο αποτελεί ένα υλικό με εξαιρετική οπτική διαπερατότητα (97.7%) το οποίο απορροφά περίπου το 2.3% του προσπίπτοντος φωτός, για ένα ευρύ φάσμα μήκους κύματος από το υπέρυθρο έως και το ορατό. Έτσι υπάρχουν σοβαρές ενδείξεις ότι το γραφένιο είναι άχρωμο. Επίσης, η απορρόφηση που παρατηρείται στο γραφένιο αυξάνεται γραμμικά με την ταυτόχρονη αύξηση του αριθμού των φύλλων του γραφενίου, τα οποία στοιβάζονται προσεγγίζοντας ένα τρισδιάστατο μοτίβο. Συνεπώς, όσο περισσότερα φύλλα γραφενίου περιέχει το υλικό, τόσο μεγαλύτερη απορρόφηση θα παρουσιάσει [23-24].

#### 4.4.3.3 Χημικές

Όσον αφορά τη χημική συμπεριφορά του γραφενίου, θα πρέπει να αναφερθεί πως λόγω του ότι πρόκειται για μία δισδιάστατη δομή τα άτομα τα οποία το απαρτίζουν, είναι εκτεθειμένα και από τις δύο πλευρές. Το γεγονός αυτό κάνει το γραφένιο να είναι εξαιρετικά πιο εύκολο να αντιδράσει, συγκριτικά με υλικά που βρίσκονται σε τρισδιάστατη δομή. Ωστόσο, παρόλο που η φυσική του γραφενίου έχει μελετηθεί κατά πολύ και παραμένει στο επίκεντρο της προσοχής, η χημεία του και συγκεκριμένα η δραστηκότητα (reactivity) και η ομοιοπολική χημική τροποποίηση του (covalent functionalization) είναι ένα πεδίο που έχει μείνει ακόμα σχετικά ανεξερεύνητο, πιθανώς λόγω της έλλειψης δειγμάτων κατάλληλων για εφαρμογές και λόγω της δυσκολίας χαρακτηρισμού των προϊόντων [23].

#### 4.4.3.4 Ηλεκτρικές

Το μεγαλύτερο ενδιαφέρον στο γραφένιο παρουσιάζουν οι ηλεκτρικές του ιδιότητες. Στο γραφένιο συναντώνται χαρακτηριστικά τα οποία δεν έχουν παρατηρηθεί προηγουμένως σε παχύτερα ανθρακικά φιλμ ή άλλες ανθρακικές

νανοδομές και για αυτό το λόγο οι επιστήμονες βρίσκονται ακόμα στο στάδιο της μελέτης προκειμένου να αποσαφηνιστούν ασάφειες. Μια από τις πιο σημαντικές ηλεκτρικές ιδιότητες του γραφενίου είναι το γεγονός ότι πρόκειται για ημιαγωγό μηδενικού χάσματος. Οι ημιαγωγοί μηδενικού χάσματος αφορούν μία ειδική κατηγορία ημιαγωγών που σε αντίθεση με τους κλασσικούς ημιαγωγούς δεν περιλαμβάνουν ενεργειακό χάσμα. Επιπλέον, το γραφένιο χαρακτηρίζεται από σωματίδια αγωγιμότητας τα οποία ταξιδεύουν με ταχύτητες κοντά στην ταχύτητα του φωτός και έχουν μηδενική μάζα (φερμιόνια Dirac). Τέλος, στο γραφένιο έχει παρατηρηθεί το φαινόμενο της ηλεκτρονιακής βαλλιστικής μεταφοράς (electronic ballistic transport). Συγκεκριμένα, σε ένα κλασσικό αγωγό οι μεταφορείς φορτίου (ηλεκτρόνια ή οπές) θα διαχέονταν μέσα στο υλικό κατά τη διάρκεια της κίνησής τους, με αποτέλεσμα την διάχυση της ορμής τους. Αντίθετα, στο γραφένιο οι μεταφορείς φορτίου μπορούν να ταξιδέψουν μέχρι 0,3μm χωρίς να υποστούν διασπορά [23].

#### 4.4.3.5 Θερμικές

Όλες οι αλλοτροπικές μορφές του άνθρακα εξαιτίας του ισχυρού δεσμού C-C παρουσιάζουν υψηλή θερμική αγωγιμότητα. Έτσι, και το γραφένιο αποτελεί ένα πολύ καλό αγωγό της θερμότητας της τάξης των  $5000 \text{ Wm}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  (μέτρηση που προέκυψε από χώρο σε θερμοκρασία δωματίου). Επίσης έχει την υψηλότερη θερμική αγωγιμότητα από τις περισσότερες γραφιτικές μορφές, όπως τους νανοσωλήνες άνθρακα και το διαμάντι. Η διάδοση της θερμότητας στο γραφένιο πραγματοποιείται αποκλειστικά από φωνόνια και η βαλλιστική θερμική αγωγιμότητα του γραφενίου είναι ιστροπική. Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να αναφερθεί το γεγονός ότι στον γραφίτη και συγκεκριμένα στον άξονα z, η θερμική αγωγιμότητα είναι 100 φορές μικρότερη σε σχέση με τους άλλους δύο άξονες. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι δεσμοί μεταξύ ατόμων άνθρακα διαφορετικών επιπέδων γραφενίου είναι πιο ασθενείς, αφού τα άτομα άνθρακα απέχουν μεγαλύτερες αποστάσεις μεταξύ τους, σε σχέση με τις ενδοατομικές αποστάσεις άνθρακα στο κυψελοειδές κρυσταλλικό πλέγμα [19-24].

#### 4.4.4 Εφαρμογές

Το γραφένιο, όπως προαναφέρθηκε, παρουσιάζει μια σειρά από εξαιρετικές ιδιότητες. Όλες αυτές οι ιδιότητες μπορούν να οδηγήσουν σε μια ευρεία γκάμα

δυναμικών εφαρμογών του γραφενίου στην ιατρική, στη χημεία, στην τεχνολογία ηλεκτρονικών και στη βιομηχανία. Αρκετές από τις εφαρμογές του γραφενίου βρίσκονται ήδη υπό έρευνα, ενώ ακόμη περισσότερες έχουν προταθεί για μελλοντική χρήση καθώς το γραφένιο είναι πρόσφατα ανακαλυφθέν υλικό[19].

Μια από τις πλείστες εφαρμογές του γραφενίου, αποτελεί η δημιουργία ολοκληρωμένων κυκλωμάτων καθώς επίσης και ταχύτερων, μικρότερων και οικονομικότερων, από μεριάς κατανάλωσης ενέργειας, τρανζίστορ, τα οποία λειτουργούν σε περιοχή συχνοτήτων της τάξης των GHz. Ήδη η εταιρία IBM, το 2008, ανακοίνωσε την κατασκευή τρανζίστορ γραφενίου το οποίο λειτουργεί σε αυτή την περιοχή συχνοτήτων. Το πρόβλημα που συναντάται έγκειται στο γεγονός ότι μονοστρωματικό γραφένιο είναι δύσκολο να παραχθεί, και ακόμη πιο δύσκολο να τοποθετηθεί πάνω σε μεταλλικό υπόστρωμα. Επίσης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί στη κατασκευή πολλαπλασιαστών συχνότητας, οι οποίοι δέχονται στην είσοδο τους ένα σήμα και στην έξοδό τους εξάγουν ένα σήμα πολλαπλάσιας συχνότητας [19].

Οι οπτικές ιδιότητες του γραφενίου το καθιστούν έναν εξαιρετικό υποψήφιο για την κατασκευή διαφανών αγωγίμων ηλεκτροδίων, τα οποία βρίσκουν εφαρμογή σε εύκαμπτες οθόνες αφής, σε οθόνες υγρών κρυστάλλων (LCD), σε οργανικά φωτοβολταικά κύτταρα και σε οργανικές διόδους εκπομπής φωτός [19].

Το κύριο συστατικό για την κατασκευή ηλιακών κυττάρων είναι το πυρίτιο. Νέες έρευνες όμως από το Ινστιτούτο Φωτονικών Ερευνών στην Ισπανία, έδειξαν ότι η χρήση γραφενίου αντί του πυριτίου, οδηγεί σε καλύτερη απόδοση όσον αφορά την μετατροπή της φωτεινής ενέργειας σε ηλεκτρική. Η έρευνα έδειξε ότι αντίθετα με το πυρίτιο, το οποίο παράγει ένα μόνο ηλεκτρόνιο για κάθε φωτόνιο που απορροφά, το γραφένιο παράγει περισσότερα του ενός ηλεκτρόνια για κάθε προσπίπτον φωτόνιο [19].

Μια άλλη εφαρμογή που βρίσκει το γραφένιο, είναι στην ποτοποιεία και συγκεκριμένα στην απόσταξη αιθανόλης. Σε αυτή την περίπτωση κατασκευάζονται μεμβράνες οξειδίου του γραφενίου, οι οποίες επιτρέπουν τους ατμούς του νερού να τις διαπεράσουν, ενώ δείχνουν να είναι αδιαπέραστες από άλλα υγρά και αέρια συμπεριλαμβανομένου και του ηλίου. Χρήση τέτοιων μεμβρανών έχει γίνει για την περαιτέρω απόσταξη της βότκας, ώστε να επιτευχθεί μεγαλύτερη συγκέντρωση αλκοόλ, σε κανονικές συνθήκες πίεσεως και θερμοκρασίας [19].

Επίσης, η μεγάλη αναλογία επιφάνειας προς μάζα και η υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα του γραφενίου, το καθιστούν σοβαρό υποψήφιο για την δημιουργία

ηλεκτρικών μπαταριών. Επιπροσθέτως, το γραφένιο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πυκνωτές μεγάλης χωρητικότητας, στην κατασκευή σύνθετων υλικών υψηλής αντοχής και βιοδιατάξεων ανίχνευσης βακτηρίων, και ως αισθητήρες DNA για αντιβακτηριδιακή δράση [19].

Τέλος το γραφένιο θα μπορούσε να αντικαταστήσει το ακριβό και άκαμπτο οξείδιο του τιτανίου και να οδηγήσει στην κατασκευή εύκαμπτων οθονών. Όταν τελειοποιηθούν οι τεχνικές για την παραγωγή ποιοτικών φύλλων γραφενίου, οι επιστήμονες θεωρούν ότι θα αντικαταστήσει το πυρίτιο σε όλες τις εφαρμογές τις ηλεκτρονικής [19].

## **5. ΜΗ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΟΙ ΕΛΕΓΧΟΙ**

### **5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ**

Οι έλεγχοι που πραγματοποιούνται για την αξιολόγηση των υλικών και των δομών διακρίνονται σε καταστροφικούς (ΚΕ), όπως θλίψη, εφελκυσμός, κ.α, και σε μη καταστροφικούς (ΜΚΕ), όπως θα αναφερθεί ακολούθως. Οι ΜΚΕ, διαφέρουν με τους ΚΕ, διότι ΚΕ επιφέρουν σημαντικές ζημιές στα εξεταζόμενα αντικείμενα, η αποκατάσταση των οποίων πολλές φορές είναι πολύ δύσκολη και δαπανηρή. Όλα αυτά τα προβλήματα αντιμετωπίζονται με την εφαρμογή μεθόδων ΜΚΕ των υλικών που μπορεί να γίνουν ακόμη και κατά την διάρκεια της λειτουργίας μιας δομής (μηχανή σε λειτουργία κτλ.). Ως μη καταστροφικός έλεγχος (ΜΚΕ), χαρακτηρίζεται ο ποιοτικός έλεγχος για την αξιολόγηση των ιδιοτήτων ενός υλικού, μιας κατασκευής, τμημάτων αυτής ή στοιχείων της, με τεχνολογίες που δεν επιφέρουν καμιά ζημιά σε αυτή και δεν επηρεάζουν τη μελλοντική της χρησιμότητα. Ο ρόλος των ΜΚΕ βασίζεται σε δύο κύριους άξονες. Ο πρώτος έχει να κάνει με την αποτροπή της καταστροφικής αστοχίας των κατασκευών και ο δεύτερος με την ασφαλή και οικονομική διαχείριση των κατασκευών [2-25].

Οι μη καταστροφικές μέθοδοι παρουσιάζουν αξιόλογες δυνατότητες ανίχνευσης διαφόρων τύπων ασυνεχειών στα υλικά, και μπορούν να αποκαλύψουν σημαντικές πληροφορίες σχετικά με το σχήμα, τη θέση και τον προσανατολισμό τους. Η γνώση τέτοιων δεδομένων, μπορεί να αποβεί καταλυτική στη λήψη αποφάσεων σχετικά με τη συνολική αποδοτικότητα των δομών. Η λήψη τέτοιων αποφάσεων γίνεται με βάση πρότυπα που περιέχουν κριτήρια για την αποδοχή ή όχι των ελαττωμάτων και τη χρήση αναλυτικών τεχνικών στο εργαστήριο για αποτίμηση φυσικοχημικών και



μηχανικών ιδιοτήτων. Παρακάτω αναφέρονται οι βασικές από τις μεθόδους ΜΚΕ [2-25].

## 5.2 ΜΕΘΟΔΟΙ

### 5.2.1 Οπτικός Έλεγχος – Επιθεωρήσεις

Μία γρήγορη και άμεση εκτίμηση της επιφανειακής κατάστασης των κατασκευών μπορεί να γίνει οπτικά. Χρησιμοποιείται κατά κανόνα για τον προσδιορισμό ρηγματώσεων, αποφλοιώσεων, και άλλων επιφανειακών ατελειών. Η εφαρμογή του ελέγχου είναι απλή και μικρού κόστους. Επίσης, ο οπτικός έλεγχος μπορεί να εντοπίσει τις προβληματικές περιοχές και έτσι σε συνδυασμό με άλλες μεθόδους ελέγχου, πολύ αποδοτικός. Πάντως δεν μπορεί να ανιχνεύσει προβλήματα κάτω από την επιφάνεια του σκυροδέματος, δίνει υποκειμενικά αποτελέσματα και απαιτεί εξαιρετικά πεπειραμένο συνεργείο. Η επιθεώρηση (αυτοψία) είναι ο αρχικός έλεγχος για την αποτίμηση της υφιστάμενης κατάστασης μιας δομής ανεξάρτητα από το υλικό που έχει κατασκευασθεί [26].

### 5.2.2 Κρουσιμέτρηση

Η κρουσιμέτρηση είναι μια συνηθισμένη μη καταστροφική μέθοδος, η οποία βασίζεται στο συσχετισμό της σκληρότητας της επιφάνειας του σκυροδέματος με τη θλιπτική αντοχή του. Με τη μέθοδο αυτή προσδιορίζεται η σκληρότητα της επιφάνειας του σκυροδέματος ανάλογα με το ύψος αναπήδησης του κρουσίμετρου. Η μέτρηση του δείκτη επιφανειακής σκληρότητας του σκυροδέματος έχει μικρότερο ποσοστό σφάλματος για ηλικίες σκυροδέματος μεταξύ 14 ημερών και 3 μηνών. Τα κρουσίμετρα είναι εύκολα στην χρήση και η μέθοδος σχετικά απλή και αξιόπιστη. Μειονέκτημα της μεθόδου είναι ότι απαιτούνται συχνές βαθμονομήσεις του οργάνου ανάλογα με τον τύπο τσιμέντου που πρόκειται να χρησιμοποιήσουμε καθώς και την ποιότητα των αδρανών (σκληρά, μαλακά, κλπ.). Επίσης τα αποτελέσματα μπορούν να επηρεαστούν από τις επιφανειακές συνθήκες και τις διαστάσεις του σκυροδέματος. Συνήθως, η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων είναι επαρκής μέχρι βάθος χιλιοστών. Γενικά πάντως, συνιστάται η μέθοδος της κρουσιμέτρησης να συνδυάζεται με κάποια άλλη μέθοδο διάγνωσης βλαβών, όπως π.χ. με την μέθοδο λήψης πυρήνων. Οι επιφάνειες που ελέγχονται με την μέθοδο της κρουσιμέτρησης πρέπει να είναι απολύτως λείες, αφού έχει παρατηρηθεί ότι η αξιοπιστία του κρουσίμετρου είναι αυξημένη στις λείες επιφάνειες. Εκτός από τις ανώμαλες επιφάνειες, ακατάλληλες

είναι επίσης αυτές που προκύπτουν από κοπή. Επίσης, συνιστάται οι μετρήσεις να γίνεται σε ξηρά στοιχεία, γιατί η παρουσία υψηλού ποσοστού υγρασίας στο σκυρόδεμα του δοκιμίου έχει σαν αποτέλεσμα την σημαντική μείωση της αξιοπιστίας του οργάνου. Ένας πρόσθετος παράγοντας που μπορεί να φέρει μεγάλες αποκλίσεις μεταξύ της πραγματικής αντοχής του σκυροδέματος και αυτής που υπολογίζεται με την μέθοδο της κρουσιμέτρησης είναι το βάθος ενανθράκωσης. Για την αντιμετώπιση του προβλήματος συνιστάται η αφαίρεση μιας επιφανειακής στρώσης πάχους 5mm από την επιφάνεια του δοκιμίου. Κρουσίμετρα απλούστερης μορφής χρησιμοποιούνται επίσης για τον προσδιορισμό περιοχών του σκυροδέματος που έχουν μεγάλα εσωτερικά κενά. Οι περιοχές αυτές εντοπίζονται από τις αλλαγές στον ήχο που παράγει η αναπήδηση του οργάνου πάνω στην επιφάνεια του σκυροδέματος. Οι έλεγχοι αυτού του είδους συνοδεύουν κατά κανόνα οπτικούς ελέγχους αλλά τα αποτελέσματά τους δεν είναι ιδιαίτερα ακριβή, για αυτό και έχουν εκτοπιστεί από άλλες μεθόδους [26].

### 5.2.3 Υπέρηχοι

Η μέθοδος αυτή βασίζεται στην ηχώ (αντήχηση) εξ' αντανάκλασης υπερηχητικών κυμάτων και κατατάσσεται στη κατηγορία έμμεσων μη καταστροφικών μεθόδων. Με τη μέθοδο των υπερήχων υπάρχει η δυνατότητα να εντοπιστούν ανωμαλίες του σκυροδέματος (φθορές, ρωγμές, κενά κ.α.), να ελεγχθεί η ποιότητα και να εκτιμηθεί η αντοχή του σκυροδέματος μετά από την κατάλληλη βαθμονόμηση του οργάνου (συσκευή υπερήχων). Η συσκευή των υπερήχων αποτελείται από μια γεννήτρια παραγωγής υπερηχητικών κυμάτων δυο κρυστάλλους, το πομπό και το δέκτη όπου τοποθετούνται αντικριστά στις δυο παράλληλες επιφάνειες του υπό εξέταση στοιχείου. Ο πομπός και ο δέκτης είναι κατασκευασμένοι από πιεζοηλεκτρικά κεραμικά στοιχεία. Το μέγεθος τους αλλάζει εφαρμόζοντας τους ηλεκτρικό ρεύμα ή όταν παράγουν αυτοί ηλεκτρικό ρεύμα. Ο πομπός πάλλεται, η ταλάντωση του παράγει τασικά κύματα όπου διαδίδονται δια μέσου του σκυροδέματος, ενώ παράλληλα τίθεται σε λειτουργία ένα χρονόμετρο ακριβείας και σταματά μόλις ο παλμός φτάσει στο δέκτη. Επίσης για τη καλύτερη επαφή των κρυστάλλων με την επιφάνεια του εξεταζόμενου δείγματος χρησιμοποιείτε λιπαντική ουσία (π.χ. γράσο) για να καλύπτει τα κενά της εξωτερικής επιφάνειας του στοιχείου. Για να γίνονται ακριβέστερα αποτελέσματα πρέπει το μήκος όπου θα τοποθετηθούν οι κρυστάλλοι να είναι μικρό και προσδιορισμό. Στα πλεονεκτήματα της μεθόδου

συμπεριλαμβάνονται το χαμηλό κόστος των οργάνων και η ευκολία στη χρήση τους, ενώ στα μειονεκτήματα συγκαταλέγεται το γεγονός ότι η πυκνότητα και οι διαβαθμίσεις στο μέγεθος των αδρανών του σκυροδέματος μπορούν να επηρεάσουν το αποτέλεσμα [26].

#### **5.2.4 Μαγνητικά σωματίδια**

Η μέθοδος αυτή βασίζεται στον εντοπισμό των απωλειών της μαγνητικής ροής λόγω των ατελειών που εμφανίζει το υλικό και στο ότι τα μαγνητικά σωματίδια τείνουν να συσσωρεύονται κοντά σε μία υπό-επιφανειακή ατέλεια. Ο έλεγχος αυτός είναι αξιόπιστος για την ανίχνευση επιφανειακών ατελειών, ή ατελειών που βρίσκονται κοντά στην επιφάνεια του υλικού και μπορεί να δώσει μια ένδειξη της τοποθεσίας και του μεγέθους της. Το βασικότερο μειονέκτημα του, είναι ότι μπορεί να εφαρμοστεί μόνο σε σιδηρομαγνητικά υλικά και η ανίχνευση των ασυνεχειών συμβαίνει πιο αποτελεσματικά όταν οι γραμμές του πεδίου είναι κάθετες στη μεγαλύτερη διάσταση των ρωγμών [2-25].

#### **5.2.5 Ραδιογραφία**

Η ραδιογραφία είναι μια από τις πιο πρόσφατες τεχνικές ΜΚΕ η οποία χρησιμοποιείται για τη λήψη μιας εικόνας ανακλώμενου ειδώλου με τη χρήση ακτινοβολίας εισχώρησης, όπως ακτίνες X ή  $\gamma$  παραγόμενες από ηλεκτρικές λυχνίες ακτίνων X ή ραδιενεργά ισότοπα, αντίστοιχα. Οι εκπεμφθείσες ακτίνες προσκρούουν στον ανιχνευτή που είναι γενικά ένα φωτογραφικό φιλμ και το εκθέτουν με τον ίδιο τρόπο όπως εκτίθεται το φιλμ μιας κάμερας. Η εικόνα που λαμβάνεται είναι στη μορφή μιας δισδιάστατης προβολής η οποία παρέχει πληροφορίες σχετικά με τα φυσικά χαρακτηριστικά του σκυροδέματος, όπως η πυκνότητα, η σύνθεση και για ατέλειες μέσω του βαθμού εξασθένησης. Πάντως, η εικόνα δεν παρέχει καμιά πληροφόρηση σχετικά με το βάθος των ατελειών μέσα στο υλικό. Οι μέθοδοι των ακτίνων X και  $\gamma$  είναι ικανές να παράγουν ακριβείς δισδιάστατες εικόνες του εσωτερικού του σκυροδέματος. Πάντως, η χρήση τους στη δοκιμή του σκυροδέματος είναι γενικά περιορισμένη εξαιτίας του υψηλού αρχικού κόστους, της σχετικά χαμηλής ταχύτητας, του βαρέως και ακριβού εξοπλισμού, της ανάγκης για εκτεταμένες προφυλάξεις ασφαλείας και τους πολύ καλά εκπαιδευμένους χειριστές, και ίσως το πιο σημαντικό από όλα, την απαίτηση για πρόσβαση και στις δυο πλευρές της κατασκευής. Η μέθοδος είναι αποτελεσματική στην περίπτωση που υπάρχουν

διαφορές πυκνότητας λόγω ύπαρξης διαφορετικών υλικών (οπλισμός – σκυρόδεμα) ή ύπαρξης πόρων ή εγκλεισμάτων στην κατασκευή [27].

### **5.2.5 Ακουστική εκπομπή**

Η τεχνική ακουστικής εκπομπής (ΑΕ) είναι μια τεχνική παθητικής κατάστασης απεικόνισης που επιτρέπει τη συνεχή εξέταση της κατασκευής ενώ αυτή είναι σε χρήση. Η ακουστική εκπομπή αναφέρεται στους παλμούς που οφείλονται στη μεταβολή της ενέργειας ελαστικής έντασης, που συμβαίνει στο υλικό τοπικά σαν αποτέλεσμα κάποιας παραμόρφωσης και θραύσης. Μέρος αυτής της ενέργειας διαδίδεται μέσω του υλικού, η οποία μπορεί να ανιχνευτεί από δέκτες υψηλής ευαισθησίας που είναι τοποθετημένοι στην επιφάνεια της κατασκευής. Η τεχνική ακουστικής εκπομπής δε χρησιμοποιείται για σκοπούς απεικόνισης, αλλά για σκοπούς εντοπισμού των ατελειών. Μία από τις ευρύτερα διαδεδομένες εφαρμογές της ΑΕ είναι ο εντοπισμός της θέσης του ελαττώματος ή της ατέλειας που παράγει τους παλμούς ΑΕ. Η τεχνική αυτή χρησιμοποιεί πολλούς αισθητήρες υπερήχων (10-20). Οι αισθητήρες τοποθετούνται στην επιφάνεια του υπό εξέταση αντικείμενου σε απόσταση μεταξύ τους ώστε να καλύπτουν όλο το αντικείμενο. Η χρονική συσχέτιση των σημάτων τους επιτρέπει τον γεωμετρικό προσδιορισμό της θέσης της πηγής κάθε παλμού ΑΕ. Για ατέλειες που βρίσκονται σε ακτίνα περίπου 1 m από τους αισθητήρες, μπορεί να εντοπιστεί η θέση τους με ακρίβεια εκατοστού (1 cm). Τα κυριότερα πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι ότι μπορεί να καλύψει μεγάλες επιφάνειες και κατασκευές, δείχνει ότι υπάρχουν ατέλειες που επεκτείνονται, εντοπίζει τις ατέλειες, ακόμη και σε απρόσιτα σημεία, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ενώ η κατασκευή λειτουργεί. Από την άλλη μεριά, η μέθοδος έχει φυσικά και μειονεκτήματα, όπως ότι δεν εκπέμπονται παλμοί ΑΕ από όλες τις ατέλειες του υλικού, η απόδοσή της εξαρτάται από τη μέθοδο φόρτισης της κατασκευής και από την ύπαρξη θορύβου, δεν καθορίζει το μέγεθος της ατέλειας και δεν είναι ακόμη πλήρως τυποποιημένη [27].

### **5.2.6 Ραντάρ**

Η τεχνική του ραντάρ, που είναι γνωστή και ως μέθοδος ραντάρ εδαφικής εισχώρησης (GPR-Ground Penetrating Radar) έχει χρησιμοποιηθεί εκτενώς σε γεωφυσικές εφαρμογές από το 1960 για τον καθορισμό του πάχους παγετού, για την εύρεση αποθεμάτων πετρελαίου, για τον εντοπισμό γραμμών οχετού, θαμμένα

αντικείμενα, για την αποτίμηση του προφίλ του πυθμένα λιμνών και ποταμών και γενικά για τον υποεπιφάνειο χαρακτηρισμό σε διαφορές περιπτώσεις. Οι εφαρμογές περιέχουν επιθεώρηση καταστρωμάτων οδών ταχείας κυκλοφορίας και γεφυρών, ανίχνευση κοιλοτήτων πίσω από τις εσωτερικές επενδύσεις σκυροδέματος σε σήραγγες και την ανίχνευση και ποσοτικοποίηση του τοπικού τριψίματος γύρω από τις βάσεις γεφυρών. Οι εφαρμογές της μεθόδου ραντάρ σε κατασκευαστικά στοιχεία σκυροδέματος, όπως δοκοί, υποστυλώματα και τοιχία είναι ακόμη σε πρώιμο στάδιο. Η αρχή της μεθόδου ραντάρ είναι η παραγωγή και η εκπομπή βραχέων ηλεκτρομαγνητικών παλμών ή κυμάτων αρμονικών με το χρόνο μέσω ενός πομπού προς ένα δοκίμιο - στόχο και η καταγραφή των διασκορπισμένων σημάτων στο δέκτη. Η διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων στον ελεύθερο χώρο και σε οποιοδήποτε μέσο, μπορεί να περιγραφεί από μια ομάδα διπλών εξισώσεων που ονομάζονται σπείρα του Maxwell και εξισώσεις απόκλισης. Ενσωματώνοντας τις ηλεκτρομαγνητικές ιδιότητες του υλικού και τις κατάλληλες οριακές συνθήκες, μπορεί να ληφθεί μια μοναδική λύση του προβλήματος με τη χρήση των εξισώσεων της σπείρας του Maxwell. Όταν τα εκπεμπόμενα ηλεκτρομαγνητικά κύματα συγκρούονται σε ένα αντικείμενο ή άλλο δείγμα με διαφορετικές ηλεκτρομαγνητικές ιδιότητες, ένα μέρος της εκπεμπόμενης ενέργειας ανακλάται από το όριο και το υπόλοιπο μεταφέρεται στο νέο δείγμα υπομένοντας κάποια διάθλαση ανάλογα με τις ιδιότητες του υλικού του νέου δείγματος και τη γωνία πρόσκρουσης. Έτσι, τα διασκορπισμένα σήματα που καταγράφηκαν από τον δέκτη περιέχουν κάποιες πληροφορίες σχετικά με τις ηλεκτρομαγνητικές ιδιότητες του υλικού που μπορούν να εξαχθούν εξελίσσοντας και ερμηνεύοντας τα καταγεγραμμένα σήματα. Τα διασκορπισμένα σήματα μπορούν να αποκτηθούν είτε με αμφιστατικό στήσιμο, όπου ο πομπός και ο δέκτης είναι δυο ξεχωριστές συσκευές, είτε με μονοστατικό στήσιμο, όπου ο πομπός και ο δέκτης συμπίπτουν. Τα δεδομένα που πάρθηκαν κινώντας το σημείο παρατήρησης εντός ενός καθορισμένου ανοίγματος είτε με μονοστατικό είτε με αμφιστατικό τρόπο, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανακατασκευή χωρικών εικόνων του στόχου μέσω αλγορίθμων απεικόνισης [27].

### **5.2.7 Δινορεύματα**

Ο έλεγχος με δινορεύματα, χρησιμοποιεί εναλλασσόμενα ρεύματα μέσω αγωγίου πηνίου και εφαρμόζεται κοντά στην εξεταζόμενη επιφάνεια. Στην επιφάνεια του υλικού δημιουργούνται εσωτερικά δινορεύματα αντίθετα με το εναλλασσόμενο ρεύμα του πηνίου. Τα παραγόμενα δινορεύματα, μπορούν να

μετρηθούν μέσω ενός πηνίου ή κατάλληλων αισθητήρων μαγνητικού πεδίου. Οι μεταβολές που παρατηρούνται στα επαγόμενα δινορεύματα μπορούν να αποδοθούν σε μεταβολές των ηλεκτρομαγνητικών ιδιοτήτων του υλικού ή και σε άλλα γεωμετρικά χαρακτηριστικά όπως ρωγμές και ασυνέχειες. Ο έλεγχος με δινορεύματα είναι αποτελεσματικός στον εντοπισμό επιφανειακών ρωγμών καθώς και για την εκτίμηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας και του πάχους των επιστρώσεων. Ωστόσο, μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο σε ηλεκτρομαγνητικά υλικά [2-29].

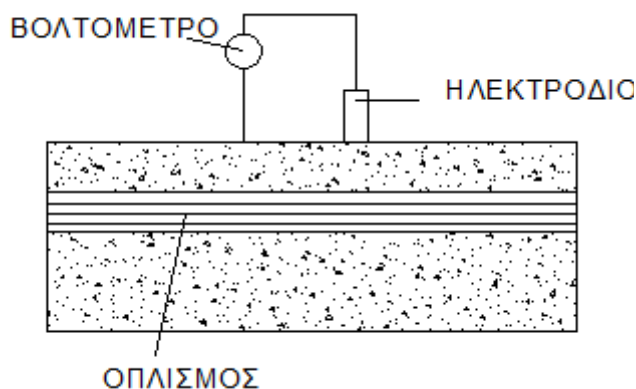
### **5.2.8 Διεισδυτικά υγρά**

Τα διεισδυτικά υγρά (ΔΥ) αποτελούν μια ταχεία, απλή, φθηνή, και ευαίσθητη μη καταστροφική μέθοδο, η οποία βασίζεται στην οπτική παρατήρηση. Επιτρέπει την επιθεώρηση μιας μεγάλης ποικιλίας υλικών, πολύπλοκης γεωμετρίας, τμήματα δομών και συστήματα για ασυνέχειες που φθάνουν στην επιφάνεια τους. Επιπρόσθετα, τα ΔΥ αυξάνουν την πιθανότητα παρατήρησης ενδείξεων επιφανειακής βλάβης που το ανθρώπινο μάτι δεν μπορεί να αντιληφθεί. Οι συγκεκριμένες βλάβες-ατέλειες μπορεί να προϋπάρχουν σε ένα υλικό ή να είναι αποτέλεσμα των διεργασιών της παρασκευής τους ή να προέρχονται από τη χρήση του. Ο έλεγχος με διεισδυτικά υγρά αποτελεί μία φορητή μέθοδο με αποτέλεσμα να χρησιμοποιείται ευρέως στο πεδίο εφαρμογής. Η διαδικασία για τον έλεγχο απαιτεί τον αρχικό καθαρισμό της επιφάνειας, την εφαρμογή του διεισδυτικού υγρού και την απομάκρυνση του πλεονάζοντος διεισδυτή. Ακολούθως εφαρμόζεται μια λευκή εμφανιστική σκόνη για την εξόγκωση του διεισδυτή και την εμφάνιση των ατελειών. Η τελική ενέργεια είναι ο μετέπειτα καθαρισμός της επιφάνειας που εξετάστηκε [2-29].

### **5.2.9 Ηλεκτρικές μετρήσεις**

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται για να ελεγχθεί αν υπάρχει κίνδυνος διάβρωσης του χάλυβα. Πρώτα, θα πρέπει να γίνουν οι μετρήσεις δυναμικού χάλυβα με ηλεκτρόδιο αναφοράς χαλκού ή αργίλου. Για τη μέτρηση υγρασίας τοποθετούνται τέσσερα ηλεκτρόδια σε μικρό βάθος όπου συνδέονται με βολτόμετρο και ρεύμα. Στη συνέχεια εφαρμόζεται ρεύμα εντάσεως, μετριέται το αντίστοιχο δυναμικό και υπολογίζετε η αντίσταση του σκυροδέματος, Η τιμή της ειδικής αντίστασης καθορίζει την υγρασία. Η μέθοδος είναι εύκολη και απλή πρέπει όμως να υπάρξει μεγάλη προσοχή ώστε τα ηλεκτρόδια να τοποθετηθούν σωστά με ακρίβεια και να αποφευχθούν την επαφή με τον οπλισμό του σκυροδέματος. Παρόλο που η

συγκεκριμένη μέθοδος είναι σχετικά απλή και οι μετρήσεις πραγματοποιούνται εύκολα στο πεδίο δεν μπορεί να δώσει πληροφορίες για το βαθμό της διάβρωσης (όπως π.χ. το ποσοστό απομείωσης της διατομής) ενώ ταυτόχρονα παρέχει ενδείξεις και όχι αποδείξεις διαβρωτικής δράσης [26].



Σχήμα 5.1 Αρχή λειτουργίας μεθόδου [26]

### 5.2.8 Θερμογραφία

Στη μέθοδο αυτή, μία πηγή υπέρυθρης ακτινοβολίας τοποθετείται στη μία πλευρά του υπό έλεγχο στοιχείου και η ροή υπέρυθρης ενέργειας καταγράφεται και αναλύεται. Τυχόν κενά ή ασυνέχειες διαταράσσουν τη ροή της ακτινοβολίας και έτσι μπορούν να εντοπιστούν. Η μέθοδος χρησιμοποιείται κυρίως για την ανίχνευση διάβρωσης, εσωτερικών ρωγμών, κενών, αυξημένου πορώδους, και αλλαγών στη σύσταση του σκυροδέματος. Αποτελεί συνήθη πρακτική για την διερεύνηση του καταστρώματος γεφυρών μέσω μετρήσεων αύξησης ή μείωσης της επιφανειακής θερμοκρασίας. Η μέθοδος δίνει τη δυνατότητα να εντοπιστούν ποικίλα υλικά πίσω από μια ενιαία επιφάνεια, εσωτερικές ανωμαλίες, ρωγμές και τέλος η ύπαρξη αλλά και η μέτρηση υγρασίας. Με τη βοήθεια της θερμικής ακτινοβολίας παράγεται ένα θερμογράφημα, δεν μετρά όμως απευθείας τη θερμοκρασία της επιφάνειας αλλά μετράει τη μεταβολή τη μεταβολή της επιφανειακής ακτινοβολίας. Όταν αυξάνεται η θερμοκρασία το μήκος του κύματος γίνεται βραχύτερο έως ορατό φάσμα σε κάποιες περιπτώσεις. Οι υποεπιφανειακές ανωμαλίες επηρεάζουν τη ροή θερμότητας, γεγονός που επηρεάζει την επιφανειακή θερμοκρασία [26].

## 6. ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ (ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ)

### 6.1 ΓΕΝΙΚΑ

Η ηλεκτρική αγωγιμότητα εκφράζεται ως η ευκολία με την οποία το ηλεκτρικό ρεύμα περνάει μέσα από κάποιο σώμα και αποτελεί το δυαδικό μέγεθος της ηλεκτρικής αντίστασης. Η ροή του ηλεκτρικού ρεύματος μέσα σε ένα υλικό σημαίνει ότι μέσα σε αυτό υπάρχουν ελεύθερα ηλεκτρικά φορτία, δηλαδή σωματίδια ή άλλες καταστάσεις, οι οποίες χαρακτηρίζονται από κάποιο ηλεκτρικό φορτίο και τα οποία έχουν τη δυνατότητα κίνησης μέσα στο υλικό. Ωστόσο, η κίνηση μέσα σε ένα υλικό είναι πιο περιορισμένη επειδή υπάρχουν εμπόδια, τα ακίνητα άτομα ή μόρια του υλικού, με τα οποία συγκρούονται οι φορείς του ηλεκτρικού ρεύματος (φαινόμενο Τζάουλ). Από την άλλη μεριά η ποσότητα των ελεύθερων φορέων που προσφέρει το υλικό αυξάνει την αγωγιμότητά του. Ανάλογα με το φορέα ηλεκτρικού φορτίου (ηλεκτρόνια ή ιόντα) η ηλεκτρική αγωγιμότητα διακρίνεται σε ιοντική και ηλεκτρονιακή αγωγιμότητα. Η αγωγιμότητα είναι ένας συντελεστής αναλογίας μεταξύ της πυκνότητας ρεύματος και της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου. Η ηλεκτρική αγωγιμότητα δείχνει την απόκριση του υλικού εάν εφαρμοστεί σε αυτό διαφορά δυναμικού. Όσο μεγαλύτερη είναι η αγωγιμότητα του υλικού τόσο περισσότερο ηλεκτρικό ρεύμα θα ρεύσει εντός του υλικού [28].

Η ειδική αγωγιμότητα, ορίζεται ως ένα μέτρο ευκολίας ή δυσκολίας με την οποία άγεται ηλεκτρικό ρεύμα δια μέσω κάποιου υλικού ανεξάρτητα από τις διαστάσεις του. Συμβολίζεται συνήθως με  $\sigma$  και είναι απλώς το αντίστροφο της ειδικής αντίστασης  $\rho$ , με μονάδες μέτρησης το  $(\Omega\text{-m})^{-1}$  [28].

Από την άλλη μεριά, η δυσκολία με την οποία το ηλεκτρικό ρεύμα περνάει μέσα από κάποιο σώμα αποτελεί την ηλεκτρική αντίσταση. Η ηλεκτρική αντίσταση μπορεί να οριστεί ως η αντίσταση έναντι της ροής του ηλεκτρικού ρεύματος.

## 6.2 ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΣΤΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ

### 6.2.1 Εισαγωγή

Δεν είναι λίγες οι ερευνητικές μελέτες που έχουν χρησιμοποιήσει ηλεκτρικές μετρήσεις, ως μία από τις μη καταστροφικές μεθόδους, για τη διερεύνηση διαφόρων φαινομένων σε υλικά με βάση το τσιμέντο. Πολλές από αυτές τις μελέτες έχουν δείξει ότι οι ηλεκτρικές μετρήσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παρακολούθηση της υγρασίας μέσα στα υλικά ή την υγεία του σκυροδέματος. Άλλοι χρησιμοποίησαν ηλεκτρικές μετρήσεις για να διεξαγάγουν διεξοδική έρευνα για τις αλλαγές της μικροδομής στην ενυδάτωση τσιμέντου. Η δοκιμή της ηλεκτρικής αντιστάσεως, είναι μια μέθοδος χαμηλού κόστους και επαναληψιμότητας που επιτρέπει τον έλεγχο στις



ιδιότητες του σκυροδέματος. Η ηλεκτρική αντίσταση του σκυροδέματος μπορεί να μετρηθεί σε λίγα λεπτά, διότι δεν απαιτούνται ειδικά παρασκευάσματα δειγμάτων. Εφαρμόζοντας μια συνεχή τάση (DC) ηλεκτρικού ρεύματος στα άκρα ενός δοκιμίου από σκυρόδεμα, μετριέται η ηλεκτρική του αντίσταση. Εντούτοις, οι μετρήσεις με συνεχές ρεύμα (DC) πολλές φορές δεν είναι ακριβείς λόγω της πολωτικής επίδρασης. Μετά από αρκετές μελέτες, οι επιστήμονες απέδειξαν ότι οι ηλεκτρικές μετρήσεις παρέχουν πολύτιμες πληροφορίες σχετικά με το πορώδες και τη μικροδομή του σκυροδέματος. Άλλες ηλεκτρικές μετρήσεις μπορεί να σχετίζονται με παράγοντες όπως η διαπερατότητα του νερού και η διάχυση των ιόντων του σκυροδέματος. Επίσης, άλλες ηλεκτρικές μετρήσεις χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση της μεταφοράς υγρασίας στο σκυρόδεμα [30].

### **6.2.2 Διάφορες μέθοδοι μέτρησης**

Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι μέτρησης της ηλεκτρικής αντίστασης στο σκυρόδεμα. Μια μέθοδος είναι η μέθοδος του δίσκου, η οποία βασίζεται στη μέτρηση της αντίστασης μεταξύ ενός ηλεκτροδίου μεταλλικού δίσκου τοποθετημένου στην επιφάνεια του σκυροδέματος και του οπλισμού. Απαιτεί σύνδεση με τον ενισχυτικό κλωβό και θα πρέπει να αποφεύγει να βρίσκεται πλησίον ενός οπλισμού εάν το πάχος του καλύμματος είναι μικρότερο από δύο φορές τη διάμετρο του δίσκου. Μία άλλη μέθοδος είναι η μέθοδος των ηλεκτροδίων, η οποία βασίζεται στη χρήση δύο παράλληλων ηλεκτροδίων ή οπλισμού που τοποθετούνται στην επιφάνεια του σκυροδέματος, αλλά αυτή η διάταξη χρειάζεται βαθμονόμηση για κάθε μέγεθος και σχήμα ηλεκτροδίου, καθώς δεν υπάρχει μια μοναδική έκφραση που θα μπορούσε γενικά να εφαρμοστεί. Τέλος, η πιο συνηθισμένη μέθοδος είναι η μέθοδος Wenner ή τεσσάρων σημείων. Αυτή η μέθοδος αποτελείται από τέσσερα ηλεκτρόδια που βρίσκονται σε ίσες αποστάσεις και πιέζονται πάνω στην επιφάνεια του σκυροδέματος. Τα δύο εξωτερικά ηλεκτρόδια χρησιμεύουν για την εφαρμογή του ρεύματος και τα δύο εσωτερικά ηλεκτρόδια μετρούν τη διαφορά στην πιθανή πτώση. Η αντίσταση είναι η αναλογία της τάσης και του ρεύματος [30].

### **6.2.3 Παράμετροι αλλοίωσης αποτελεσμάτων**

Πολλές παράμετροι, όπως ο λόγος νερού τσιμέντου (w/c), η περιεκτικότητα σε τσιμέντο, τα πρόσμικτα, οι συνθήκες σκλήρυνσης, η περιεκτικότητα σε υγρασία και ο βαθμός ενυδάτωσης ή πορώδους κατά τη διάρκεια της περιόδου σκλήρυνσης σε ένα

σύστημα ενυδάτωσης τσιμέντου, επηρεάζουν την ιδιότητα της ηλεκτρικής αντίστασης και αλλοιώνουν τα αποτελέσματα των μετρήσεων. Η τιμή της ηλεκτρικής αντίστασης μπορεί να αυξηθεί με χαμηλό w/c, μακρύ χρόνο σκλήρυνσης και επιπλέον εξαρτάται από τη θερμοκρασία. Μεταξύ όλων των παραπάνω παραμέτρων, η περιεκτικότητα σε υγρασία επηρεάζει ιδιαίτερα την ειδική αντίσταση του σκυροδέματος. Σε κορεσμένη κατάσταση, η αντίσταση του σκυροδέματος μειώνεται από την αύξηση του w/c. Όταν η περιεκτικότητα σε υγρασία μειωθεί, η ειδική αντίσταση αυξάνεται σημαντικά. Έτσι, γίνεται σαφές ότι η υγρασία των δειγμάτων σκυροδέματος πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά τη διάρκεια των μετρήσεων της αντίστασης. Προκειμένου να συγκριθεί επακριβώς η αντίσταση των διαφόρων δειγμάτων σκυροδέματος, οι μετρήσεις θα πρέπει να διεξάγονται στην ίδια κατάσταση υγρασίας [30]

#### 6.2.4 Επιφανειακή ειδική ηλεκτρική αντίσταση

Η επιφανειακή ειδική ηλεκτρική αντίσταση, που συμβολίζεται με  $\rho$ , ορίζεται ως η ηλεκτρική αντίσταση της επιφάνειας ενός μονωτικού υλικού. Μετράται από ένα κύλινδρο προσαρμοσμένων ηλεκτροδίων που εφαρμόζεται κατά μήκος της επιφάνειας του δείγματος και είναι σε συνεχή επαφή με αυτή. Δεδομένου ότι το μήκος της επιφάνειας είναι σταθερό, η μέτρηση είναι ανεξάρτητη από τις φυσικές διαστάσεις του δείγματος. Η επιφανειακή ειδική αντίσταση μετράται εφαρμόζοντας τάση στην επιφάνεια του δείγματος και μετρώντας το προκύπτον ρεύμα. Κατά τη διάρκεια της δοκιμής, το δείγμα τοποθετείται πάνω σε μονωτικό υλικό. Στη συνέχεια, γνωρίζοντας την τιμή της ειδικής αντίστασης, υπολογίζεται εύκολα η αγωγιμότητα, όπως φαίνεται παρακάτω [31].

Μια απλή μορφή του νόμου του Ohm είναι η παρακάτω. Όπου,  $R = \rho \rightarrow \rho = R$

$$V=I \cdot R \quad (6.1)$$

Με απλά λόγια, ένα ηλεκτρικό ρεύμα συνεχούς ρεύματος που διέρχεται μέσω ενός αγωγίμου δείγματος, είναι ανάλογο προς την τάση που εφαρμόζεται στο δείγμα. Στην παραπάνω εξίσωση,  $R$  είναι η ηλεκτρική αντίσταση, η οποία είναι συνάρτηση μιας ιδιότητας υλικού (η ονομαζόμενη ειδική αντίσταση), καθώς και της γεωμετρίας και των διαστάσεων του δείγματος. Με ηλεκτρικές μετρήσεις των δειγμάτων διαφορετικών διαστάσεων, μπορεί να αποδειχθεί ότι η ηλεκτρική αντίσταση είναι ανάλογη προς το μήκος του δείγματος και αντιστρόφως ανάλογη με την επιφάνεια

του δείγματος. Η ηλεκτρική αγωγιμότητα  $\sigma$ , ορίζεται ως το αντίστροφο της ειδικής αντίστασης:

$$\sigma=1/\rho \quad (6.2)$$

### 6.2.5 Πλεονεκτήματα και περιορισμοί

Η δοκιμή μέτρησης της ηλεκτρικής αντίστασης πλεονεκτεί κυρίως για την ακριβή επιτόπια δοκιμή υλικών. Είναι μία μη καταστροφική μέθοδος. Όμως, υπάρχουν και σημεία στα οποία μειονεκτεί. Ακόμη δεν έχει γίνει σαφής ο τρόπος διαφοροποίησης μεταξύ των ξεχωριστών παραγόντων που ευθύνονται για την ηλεκτρική αγωγιμότητα στο σκυρόδεμα. Τέτοιοι παράγοντες, είναι τα διαφορετικά ιόντα που διαλύονται στο διάλυμα πόρων, οι συγκεντρώσεις τους, το περιεχόμενο σε νερό και η γεωμετρία της μικροδομής. Επιπλέον, δεν υπάρχει ευρέως αποδεκτό πρότυπο διαδικασίας δοκιμής, ώστε να συγκριθούν τα αποτελέσματα ή να επαναληφθούν οι δοκιμές από διαφορετικά ερευνητικά εργαστήρια [32].

## 7. ΘΕΡΜΟΓΡΑΦΙΑ

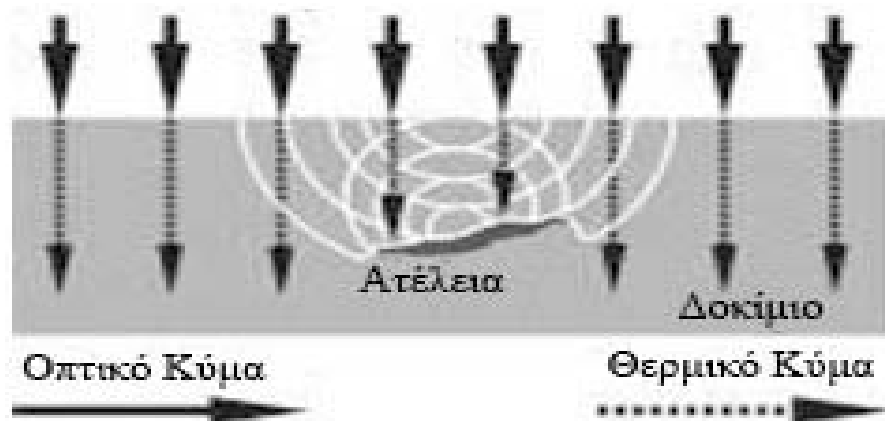
### 7.1 Η ΕΝΝΟΙΑ ΤΗΣ ΥΠΕΡΥΘΡΗΣ ΘΕΡΜΟΓΡΑΦΙΑΣ

Πάνω από το απόλυτο μηδέν, που ορίζεται στους  $0^{\circ}\text{K}$ , όλα τα υλικά εκπέμπουν συνεχώς ενέργεια ως ακτινοβολία που μεταδίδεται στο χώρο με τη μορφή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Γενικά, ο όρος θερμογραφία αναφέρεται στη μέθοδο ανίχνευσης των θερμικών εκπομπών που αναπτύσσονται στις επιφάνειες διαφόρων υλικών, ανεξάρτητα από το φυσικό φαινόμενο στο οποίο βασίζονται, και προκύπτει η οπτική απεικόνιση του θερμικού σήματος (θερμογράφημα). Με την θερμογραφία δεν γίνεται απευθείας μέτρηση της θερμοκρασίας μιας επιφάνειας, αλλά της επιφανειακής ακτινοβολίας. Η θερμογραφία βασίζεται στην θεμελιώδη αρχή ότι κάθε επιφάνεια εκπέμπει ενέργεια με την μορφή της θερμοκρασιακής ακτινοβολίας. Η ακτινοβολία ανιχνεύεται με κατάλληλες διατάξεις, τις θερμοκάμερες, οι οποίες παράγουν ηλεκτρικό σήμα ανάλογο της προσπίπτουσας ακτινοβολίας, το οποίο με κατάλληλη βαθμονόμηση εκφράζεται σε θερμοκρασία [2].

Η υπέρυθη ακτινοβολία ανακαλύφθηκε από τον Sir William Herschel. Είναι μία ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία μεγαλύτερου μήκους κύματος από αυτό του ορατού φωτός και μικρότερου από το αντίστοιχο των ραδιοκυμάτων. Η πρωταρχική πηγή της υπέρυθρης ακτινοβολίας είναι η θερμότητα ή θερμική ακτινοβολία. Την

υπέρυθρη θερμική ακτινοβολία όλων των μηκών κύματος (κοντινή, μέση και μακρινή) δεν μπορούμε να τη δούμε με τα μάτια μας, όμως, μπορούμε τη μέση και τη μακρινή να την αισθανθούμε με το δέρμα μας σαν θερμότητα. Καθημερινά παραδείγματα μέσης και μακρινής υπέρυθρης ακτινοβολίας είναι η θερμότητα, που αισθανόμαστε από την ηλιακή ακτινοβολία, από μια θερμάστρα κτλ [33].

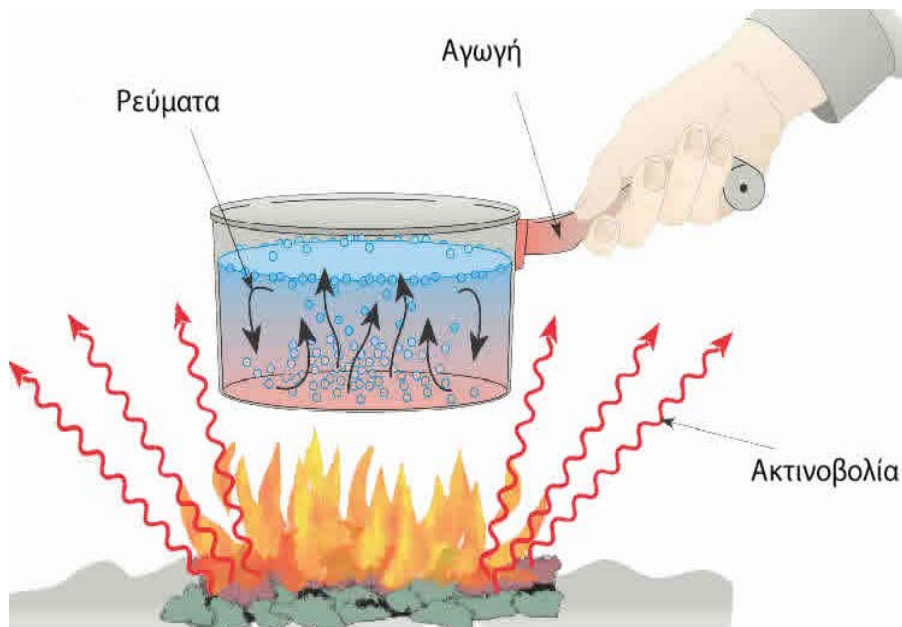
Η θεμελιώδης βάση της υπέρυθρης θερμογραφίας, είναι το γεγονός ότι οι υπο-επιφανειακές ασυνέχειες σε ένα υλικό δημιουργούν τοπικές διαφορές στην επιφανειακή θερμοκρασία ενός δοκιμίου. Οι διαφορές αυτές προκαλούνται από τις διαφορετικές βαθμίδες θερμικής μεταφοράς στις ζώνες που υπάρχουν ατέλειες. Η θερμογραφία ανιχνεύει αυτομάτως την εκπομπή της θερμικής ακτινοβολίας από την επιφάνεια του υλικού και παράγει μια οπτική εικόνα από το θερμικό σήμα η οποία μπορεί να συσχετιστεί με το μέγεθος της εσωτερικής ατέλειας. Το μήκος κύματος που εκπέμπεται εξαρτάται από την θερμοκρασία. Δηλαδή, της θερμοκρασίας το μήκος κύματος γίνεται βραχύτερο και στην περίπτωση πολύ υψηλών θερμοκρασιών βρίσκεται στο ορατό φάσμα (π.χ. πυρακτωμένη άκρη βελόνας). Στην θερμοκρασία δωματίου το μήκος κύματος της ακτινοβολίας είναι της τάξεως των 10μm, δηλαδή, στην περιοχή του υπέρυθρου φάσματος [33].



**Σχήμα 7.1** Αρχή της θερμογραφίας [35].

## 7.2 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Η θερμότητα μπορεί να μεταφερθεί από τα θερμότερα προς τα ψυχρότερα αντικείμενα με τρεις βασικούς τρόπους. Αυτοί, είναι η αγωγή, η συναγωγή (ρεύματα) και η ακτινοβολία, οι οποίοι φαίνονται στο παρακάτω σχήμα.



**Σχήμα 7.2** Απεικόνιση των τριών τρόπων μεταφοράς θερμότητας

### 7.2.1 Αγωγή

Η μεταφορά θερμότητας με αγωγή, αναφέρεται σε στερεά και ρευστά σώματα. Ουσιαστικά, πρόκειται για τη μετάδοση ενέργειας από σωματίδια υψηλότερης προς σωματίδια χαμηλότερης ενέργειας, με μεταξύ τους αλληλεπίδρασης. Η θερμότητα μεταδίδεται μέσω της μάζας των σωμάτων. Η δυσκολία μεταφοράς της θερμότητας δια μέσου των σωμάτων, εξαρτάται από την θερμική αγωγιμότητά τους. Ως παράδειγμα καλών αγωγών θερμότητας αναφέρονται τα μέταλλα, ενώ αντίστοιχα, παράδειγμα κακών αγωγών είναι τα πλαστικά, το ξύλο και ο αέρας. Η μεταφορά θερμότητας με αγωγή έχει σαν συνέπεια απώλειες θερμότητας από ένα δοκίμιο. Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας των υλικών, είναι ο δείκτης της ικανότητας μεταφοράς θερμότητας των υλικών διαμέσου της μάζας τους [2,33]

### 7.2.2 Συναγωγή

Η συναγωγή είναι, ο δεύτερος τρόπος μετάδοσης της θερμότητας από ένα σώμα/σύστημα μεγαλύτερης θερμοκρασίας σε ένα άλλο μικρότερης θερμοκρασίας. Η συναγωγή συμβαίνει ανάμεσα σε ένα στερεό και ένα ρευστό, και ειδικότερα όταν ένα ρευστό κινείται πάνω σε μια επιφάνεια στερεού. Δεν μπορεί να συμβεί μεταξύ δύο στερεών όπου εκεί η θερμότητα μεταδίδεται μέσω αγωγής. Άλλωστε όταν δύο ρευστά διαφορετικής θερμοκρασίας έρχονται σε επαφή πραγματοποιείται ανάμιξη των ουσιών (δηλαδή πιο πολύπλοκο φαινόμενο που περιλαμβάνει και μεταφορά

θερμότητας και μεταφορά μάζας). Γενικά η συναγωγή είναι ένας τρόπος μετάδοσης που περιλαμβάνει και το φαινόμενο της αγωγής και τα φαινόμενα της διάχυσης ορμής του ρευστού. Επίσης, η συναγωγή είναι εκείνος ο τρόπος μετάδοσης θερμότητας που μπορεί να μεταφέρει μεγάλες ποσότητες θερμότητας σε μικρό χρονικό διάστημα σε αντίθεση με την αγωγή και την ακτινοβολία σε μικρές θερμοκρασίες. Τέλος, παραδείγματα συναγωγής αποτελεί εκείνο το φαινόμενο που συναντάται στο πιστολάκι και ο θερμός αέρας πέφτει πάνω στα υγρά μαλλιά όπου το νερό απορροφάει την θερμότητα και εξατμίζεται, όταν φυσάει αέρας και το κρύο γίνεται αισθητό όπου μέσω συναγωγής φεύγει θερμότητα από το δέρμα, κ.α. [34].

### **7.2.3 Ακτινοβολία**

Θερμική ακτινοβολία, ονομάζεται η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που εκπέμπεται από την επιφάνεια ενός σώματος λόγω της θερμοκρασίας του. Γενικά, η θερμική ακτινοβολία που εκπέμπει ένα σώμα αντιστοιχεί σε συχνότητες ολόκληρου του φάσματος ακτινοβολίας αφού προέρχεται από τη θερμική, τυχαία, κίνηση των συστατικών της ύλης. Μερικά παραδείγματα είναι η υπέρυθη ακτινοβολία (μη ορατή) που εκπέμπεται από ένα καλοριφέρ καθώς και η ακτινοβολία που εκπέμπεται από μία εστία φωτιάς (μέρος της οποίας, όπως είναι γνωστό ανήκει στο ορατό φάσμα). Αν και οι συσκευές αυτές ή η φωτιά ζεσταίνουν τον χώρο επίσης λόγω της δημιουργίας θερμών ρευμάτων αέρα, μέρος της θερμότητας που απελευθερώνουν είναι υπό την μορφή ακτινοβολίας. Ως αποτέλεσμα, η θερμότητα που εκπέμπεται από την φωτιά γίνεται αισθητή ακόμα και αν ο περιβάλλον αέρας είναι πολύ κρύος. Γενικά, όλα τα σώματα στη φύση χάνουν ή αποκτούν θερμότητα εκπέμποντας ή απορροφώντας ακτινοβολία. Καθώς κινούνται αδιάκοπα, τα σωματίδια που συγκροτούν ένα σώμα εκπέμπουν ακτινοβολία, χάνοντας έτσι ένα μέρος της κινητικής τους ενέργειας με συνέπεια να αρχίζουν να επιβραδύνονται και έτσι τα σώματα που συγκροτούν να ψύχονται. Τέλος, χάρη στη θερμική ακτινοβολία η Γη θερμαίνεται από τον ήλιο [35].

### **7.2.4 Συντελεστής εκπομπής**

Η ποσότητα της ενέργειας που αντιστοιχεί σε κάθε περιοχή συχνότητας εξαρτάται από τον συντελεστή εκπομπής του σώματος, ο οποίος καθορίζεται από το υλικό και την θερμοκρασία του σώματος καθώς και από την γωνία υπό την οποία γίνεται η εκπομπή ή η απορρόφηση. Ένα ιδανικό σώμα του οποίου ο συντελεστής εκπομπής

είναι σταθερός ονομάζεται φαιό σώμα, ενώ αν ο συντελεστής είναι σταθερός και ίσος με την μονάδα τότε καλείται μέλαν σώμα. Όταν το μέλαν σώμα βρίσκεται σε θερμική ισορροπία η ακτινοβολία που εκπέμπει ονομάζεται ακτινοβολία μέλανος σώματος. Τέλος, όσον αφορά τη θερμογραφία, η χρήση της οποίας είναι δύσκολη ως αδύνατη για υλικά με μικρό συντελεστή εκπομπής. Συχνά, για την επίλυση αυτού του προβλήματος καθαρίζονται καλά οι επιφάνειες εξέτασης ώστε να αποφευχθεί η μείωση του συντελεστή και εφαρμόζεται μαύρη βαφή, όπου το μαύρο χρώμα έχει υψηλό συντελεστή εκπομπής (0.9-0.98) και εμφανίζει χαμηλή ανάκλαση. Ο συντελεστής εκπομπής ενός αντικείμενου είναι ο λόγος της ενέργειας που ακτινοβολείται ως προς την ενέργεια που το αντικείμενο θα ακτινοβολούσε εάν ήταν μέλαν σώμα. Έτσι, ο συντελεστής εκπομπής (ή εκπεμπτικότητα) εκφράζεται ως ακολούθως : Εκπεμπτικότητα = Ακτινοβολία που εκπέμπεται από ένα αντικείμενο σε θερμοκρασία T / Ακτινοβολία που εκπέμπεται από ένα μέλαν σώμα σε θερμοκρασία T [25,35].

### 7.3 ΜΕΘΟΔΟΙ ΥΠΕΡΥΘΡΗΣ ΘΕΡΜΟΓΡΑΦΙΑΣ

Στις μέρες μας, η υπέρυθρη θερμογραφία έχει εξελιχθεί ως μία ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδος για μη καταστροφική αξιολόγηση υλικών και κατασκευών. Η υπέρυθρη θερμογραφία μπορεί να χωρισθεί σε δύο κατηγορίες, την παθητική και την ενεργητική.

#### 7.3.1 Παθητική θερμογραφία

Η παθητική θερμογραφία (passive thermography), αναφέρεται στην τεχνική θερμογραφίας για τον έλεγχο των υλικών και δομών χωρίς τη χρήση εξωτερικής πηγής ενέργειας ως ερέθισμα για τις θερμοκρασιακές διαφορές. Η τεχνική απαιτεί αρκετή θερμική αντίθεση ανάμεσα στο υπό έλεγχο αντικείμενο και στο περιβάλλον, ώστε να είναι ανιχνεύσιμη από ένα αισθητήρα υπερύθρων. Με την παθητική θερμογραφία απεικονίζεται λοιπόν η θερμοκρασία της υπό έλεγχο κατασκευής όταν αυτή βρίσκεται, με φυσικό τρόπο, σε μια διαφορετική θερμοκρασία από εκείνη του περιβάλλοντος. Η παθητική θερμογραφία εφαρμόζεται κυρίως σε πολλές βιομηχανικές διεργασίες, όπου η θερμοκρασία αποτελεί έναν πολύ σημαντικό παράγοντα για την αξιολόγηση της σωστή λειτουργίας. Μερικές σημαντικές εφαρμογές της παθητικής θερμογραφίας περιλαμβάνουν τις κάμερες επιτήρησης, τη προληπτική συντήρηση αεροσκαφών, την ανίχνευση πυρκαγιών, την ενεργειακή

επιθεώρηση κτιρίων, τον έλεγχο θερμομόνωσης κατασκευών και ηλεκτρικών εξαρτημάτων κ.α. Σε όλες τις παραπάνω εφαρμογές οι ασυνήθιστες, μη-φυσιολογικές θερμοκρασιακές διαφορές αποτελούν ένδειξη ύπαρξης κάποιου προβλήματος. Ένα παράδειγμα εφαρμογής της παθητικής θερμογραφίας, είναι η ανίχνευση παρουσίας υγρασίας σε μέρη του αεροσκάφους αμέσως μετά την προσγείωση, καθόσον η σημαντική θερμική διαφορά ανάμεσα στο υλικό και το νερό επιτρέπει την ανίχνευση της βλάβης. Παρόμοια, ανιχνεύεται και η παρουσία υγρασίας σε κτίρια και μνημεία πολιτιστικής κληρονομιάς [25].

### 7.3.2 Ενεργητική θερμογραφία

Η ενεργητική θερμογραφία (active thermography), βασίζεται στην ύπαρξη εξωτερικής πηγής θέρμανσης ώστε να προκύψουν, και στη συνέχεια να μετρηθούν, οι σχετικές θερμικές διακυμάνσεις. Στην περίπτωση της ενεργητικής θερμογραφίας απαιτείται η δημιουργία θερμικής αντίθεσης με τη βοήθεια εξωτερικής πηγής ενέργειας, όταν το υπό έλεγχο αντικείμενο βρίσκεται σε θερμική ισορροπία. Σχεδόν κάθε πηγή ενέργειας μπορεί να χρησιμοποιηθεί, ανάλογα με την εφαρμογή, για να ενεργοποιήσει το υπό έλεγχο αντικείμενο, με χρήση ψυχρού ή ζεστού αέρα, πίδακα νερού, ή ελαστικών κυμάτων διαφόρων συχνοτήτων και πλάτους. Σε γενικές γραμμές, τα εξωτερικά ερεθίσματα μπορεί να είναι οπτικά, μηχανικά, ηλεκτρομαγνητικά, κλπ. Η οπτική διέγερση παράγεται από εξωτερικές πηγές, όπως για παράδειγμα λαμπτήρες, δημιουργεί θερμότητα στην επιφάνεια του υλικού, η οποία στη συνέχεια μεταδίδεται ως θερμικό κύμα μέσω του δοκιμίου στις υπο-επιφανειακές ανωμαλίες, και τέλος επιστρέφει πάλι στην επιφάνεια, όπου ανιχνεύεται από τη θερμική κάμερα. Η μηχανική ενέργεια, αντίθετα, μπορεί να θεωρηθεί ως ένας εσωτερικός τρόπος διέγερσης, καθώς η θερμότητα παράγεται στη διεπιφάνεια μεταξύ ατέλειας και υλικού και στη συνέχεια διαδίδεται στην επιφάνεια του δοκιμίου [25].

Με βάση την πηγή διέγερσης, η ενεργητική θερμογραφία μπορεί να χωριστεί σε δυο βασικά είδη, τις τεχνικές θερμογραφίας παλμού (Pulsed Thermography - PT) και τις τεχνικές διαμόρφωσης (modulated). Στην κατηγορία των τεχνικών θερμογραφίας παλμού ανήκει και η θερμογραφία με κλιμακωτή θέρμανση (Step Heating – SH), η οποία αναφέρεται στην εφαρμογή μακρύ παλμού διέγερσης. Η θερμογραφία lock-in (Lock-in Thermography – LT) είναι τεχνική διαμόρφωσης πλάτους. Οι διάφορες πειραματικές τεχνικές ενεργητικής θερμογραφίας κατηγοριοποιούνται επίσης ανάλογα με το εξωτερικό ερέθισμα, δηλαδή την πηγή ενέργειας, που προκαλεί τις



θερμικές αντιθέσεις. Η θερμογραφία παλμού και η θερμογραφία lock-in αναφέρονται σε τεχνικές που χρησιμοποιούν οπτική, μηχανική, ή ηλεκτρομαγνητική διέγερση. Τα δεδομένα που λαμβάνονται όταν χρησιμοποιείται οπτική διέγερση παρουσιάζονται συνήθως σε μορφή θερμογραφημάτων, δηλαδή απεικονίσεων της θερμικής κατάστασης στην επιφάνεια του δοκιμίου. Στην περίπτωση μηχανικής διέγερσης με χρήση παλμών υπερήχων, ή με διαμορφωμένη συχνότητα, ή με διαμορφωμένα τη συχνότητα και το πλάτος, χρησιμοποιούνται οι όροι θερμογραφία υπερήχων (Ultrasonic Thermography - UT) ή θερμογραφία δονήσεων (Vibrothermography - VT). Τέλος, για τεχνικές που χρησιμοποιούν ηλεκτρομαγνητική διέγερση με δινορεύματα, χρησιμοποιούνται οι όροι επαγωγική θερμογραφία (induction thermography) ή θερμογραφία με δινορεύματα (Eddy Current Thermography - ECT) Παρακάτω παρουσιάζονται οι κυριότερες τεχνικές υπέρυθρης θερμογραφίας [25].

#### 7.3.2.1 Θερμογραφία παλμού

Στη θερμογραφία παλμού, ένας παλμός ενέργειας εφαρμόζεται στην επιφάνεια του εξεταζόμενου αντικειμένου δημιουργώντας ένα θερμικό μέτωπο το οποίο διαδίδεται στο εσωτερικό του υλικού με διάχυση. Ο παλμός αυτός μπορεί να δημιουργηθεί από λαμπτήρες αλογόνου, δέσμη λέιζερ, αέρα ή δέσμη νερού. Η θερμική διέγερση μπορεί να είναι θερμή ή ψυχρή, διότι αυτό που παίζει τον πιο σημαντικό ρόλο στη θερμογραφία παλμού είναι η θερμοκρασιακή διαφορά που προκύπτει και όχι η απόλυτη θερμοκρασία. Η διάρκεια του παλμού ποικίλει από μερικά  $\mu\text{sec}$  για υλικά μικρού πάχους και θερμικά αγωγίμα υλικά (π.χ. μέταλλα), έως λίγα δευτερόλεπτα για υλικά μεγάλου πάχους και υλικά με μικρή θερμική αγωγιμότητα (π.χ. πλαστικά). Η συμπεριφορά του δοκιμίου αναλύεται είτε κατά τη διάρκεια της θέρμανσης είτε κατά τη διάρκεια της αποθέρμανσης. Η θερμογραφία παλμού μπορεί να εφαρμοστεί με δύο τρόπους. Στο πρώτο τρόπο, η πηγή θερμικής διέγερσης και η υπέρυθρη κάμερα είναι τοποθετημένα μπροστά από το δοκίμιο και η θερμική κάμερα ανιχνεύει τη θερμότητα που ανακλάται. Στο δεύτερο τρόπο, η θερμική κάμερα ανιχνεύει τη μετάδοση της θερμότητας μέσω του δοκιμίου, καθώς η πηγή διέγερσης και η κάμερα είναι τοποθετημένες εκατέρωθεν του δοκιμίου. Κατά τη θερμογραφία παλμού είναι δυνατή η ποσοτική ανάλυση των αποτελεσμάτων, η οποία βασίζεται στη θερμική αντίθεση των θερμογραφημάτων [25].

### 7.3.2.2 Θερμογραφία lock-in

Η θερμογραφία lock-in, η οποία είναι επίσης γνωστή ως διαμορφωμένη ή συγχρονισμένη θερμογραφία, βασίζεται στη δημιουργία θερμικών κυμάτων που παράγονται από μια περιοδική θερμική διέγερση. Η περιοδική διέγερση είναι συνήθως ημιτονοειδής, παρόλο που είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν και άλλες περιοδικές μορφές. Κατά την περιοδικά διαμορφωμένη θερμική διέγερση, θερμικά κύματα διαδίδονται στο υλικό. Τα θερμικά κύματα μπορούν να παραχθούν (π.χ. με περιοδική εναπόθεση θερμότητας στην επιφάνεια του δοκιμίου με οπτικό τρόπο – λυχνία εκκένωσης, δινορεύματα, υπέρηχοι, μικροκύματα, κλπ.) και να ανιχνευθούν από απόσταση με τη βοήθεια θερμικής κάμερας. Ο όρος lock-in αναφέρεται στην ανάγκη να ελεγχθεί η ακριβής χρονική εξάρτηση μεταξύ του σήματος εξόδου και του σήματος εισόδου. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με έναν ενισχυτή lock-in. Οι εσωτερικές ατέλειες ενεργούν ως εμπόδια στη διάδοση της θερμότητας, και προκαλούν μεταβολές στο πλάτος και καθυστέρηση φάσης του σήματος απόκρισης στην επιφάνεια. Ένα από τα ισχυρά σημεία της θερμογραφίας lock-in είναι η εικόνα φάσης, η οποία δεν εξαρτάται από τα τοπικά οπτικά και υπέρυθρα χαρακτηριστικά της επιφάνειας. Μια άλλη σημαντική παράμετρος για τη θερμογραφία lock-in είναι η διάρκεια της θερμικής διέγερσης. [25]

Υπάρχουν πλεονεκτήματα, αλλά και μερικοί περιορισμοί, στην εφαρμογή της θερμογραφίας lock-in. Ο έλεγχος των υλικών με θερμοκρασία lock-in είναι γενικά αργότερος από την θερμογραφία παλμού, καθώς η τεχνική απαιτεί κάποιο χρόνο σταθεροποίησης πριν την επίτευξη κατάστασης ισορροπίας. Όμως, υπάρχει μια άμεση σχέση μεταξύ βάθους και συχνότητας ελέγχου που επιτρέπει εκτίμηση του βάθους από δεδομένα πλάτους ή φάσης χωρίς περαιτέρω επεξεργασία. Επίσης, η ενέργεια που απαιτείται για την εκτέλεση πειράματος θερμογραφίας lock-in είναι γενικά μικρότερη από ότι σε άλλες τεχνικές ενεργητικής θερμογραφίας, πράγμα το οποίο είναι ενδιαφέρον για μερικές εφαρμογές, όπου απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή, όπως για παράδειγμα στον έλεγχο μνημείων πολιτιστικής κληρονομιάς. Τυπικές εφαρμογές της θερμογραφίας lock-in περιλαμβάνουν το προσδιορισμό πάχους των επικαλύψεων, την ανίχνευση αποκολλησεων μεταξύ στρώσεων σε σύνθετα υλικά, τον προσδιορισμό τοπικού προσανατολισμού των ινών σε σύνθετα υλικά, την ανίχνευση διάβρωσης και ρωγμών, τον έλεγχο μνημείων πολιτιστικής κληρονομιάς και έργων τέχνης, ενώ σημαντικές είναι οι σύγχρονες εφαρμογές της τεχνικής στην έρευνα [25].

#### 7.3.2.3 Θερμογραφία φάσης παλμού

Η θερμογραφία φάσης παλμού συνδυάζει τα πλεονεκτήματα της θερμογραφίας παλμού αλλά και της lock-in. Κατά την τεχνική αυτή το υπό έλεγχο δοκίμιο διεγείρεται θερμικά με έναν τετραγωνικό παλμό. Όταν ένα δοκίμιο θερμαίνεται με παλμούς τότε θερμικά κύματα διαφόρων συχνοτήτων και πλάτους διαδίδονται στο εσωτερικό του. Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα της θερμογραφίας φάσης παλμού είναι ότι προκύπτουν θερμογραφήματα φάσης. Τα θερμογραφήματα φάσης επηρεάζονται ελάχιστα από τη μη ομοιόμορφη θέρμανση, πράγμα το οποίο αποτελεί ένα σημαντικό πλεονέκτημα καθώς η ανομοιόμορφη θέρμανση είναι το βασικό πρόβλημα της θερμογραφίας φάσης [25].

#### 7.3.2.4 Θερμογραφία με κλιμακωτή θέρμανση

Η θερμογραφία με κλιμακωτή θέρμανση χρησιμοποιεί μεγαλύτερους παλμούς, διάρκειας από μερικά δευτερόλεπτα έως μερικά λεπτά. Σε αυτή την περίπτωση καταγράφεται η αύξηση της θερμοκρασίας της επιφάνειας του δοκιμίου καθώς πραγματοποιείται κλιμακωτή θέρμανση με παλμούς. Οι μεταβολές της επιφανειακής θερμοκρασίας με το χρόνο συσχετίζονται με χαρακτηριστικά του υλικού, όπως και στη θερμογραφία παλμού. Παρόλο που χρησιμοποιείται συνήθως οπτική διέγερση για την κλιμακωτή θέρμανση του δοκιμίου, δεν υπάρχει περιορισμός στη χρήση άλλων μορφών διέγερσης. Η τεχνική αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αξιολόγηση του πάχους επικαλύψεων, την αποτίμηση της ακεραιότητας της διεπιφάνειας της επικάλυψης με το υπόστρωμα, το χαρακτηρισμό της διάβρωσης σε αεροναυπηγικές δομές κ.α. [25].

#### 7.3.2.5 Θερμογραφία με δονήσεις

Στη θερμογραφία με δονήσεις, προκαλούνται εξωτερικές μηχανικές δονήσεις ή διέγερση με υπερήχους (γι' αυτό συχνά ονομάζεται και θερμογραφία υπερήχων), η οποία ανιχνεύει τη θερμότητα που παράγεται από βλάβη στο εσωτερικό του υλικού. Η τεχνική αυτή, αξιολογεί τη δομική ακεραιότητα του εξεταζόμενου αντικειμένου και βασίζεται στο γεγονός ότι η μηχανική ενέργεια λόγω των εξωτερικών δονήσεων μετατρέπεται σε θερμική με αποτέλεσμα να απελευθερώνεται θερμότητα λόγω τριβής ακριβώς στις θέσεις, όπου εμφανίζονται ατέλειες, όπως ρωγμές και αποκολλήσεις στρωμάτων σε σύνθετα υλικά. Η θερμογραφία με δονήσεις μπορεί να εφαρμοστεί για την ανίχνευση ατελειών δύσκολα ανιχνεύσιμες από τις άλλες μεθόδους

θερμογραφίας, όπως κλειστές ρωγμές σε γρανάζια, βλάβη λόγω μηχανικής κόπωσης, φθορά επικαλύψεων, καθώς και για τον έλεγχο μεγάλων επιφανειών στο πεδίο. Οι μηχανισμοί διάχυσης της ενέργειας δόνησης στη βλάβη δεν έχουν γίνει ακόμη πλήρως κατανοητοί, αλλά σίγουρα εξαρτώνται από τις παραμέτρους του υλικού και τα χαρακτηριστικά της βλάβης. Συνεπώς, η ακριβής ποσότητα της θερμότητας που αναμένεται να διαχυθεί από ορισμένες ατέλειες δεν είναι γνωστή εκ των προτέρων. Όμως, είναι γνωστό ότι η παραγόμενη θερμότητα εξαρτάται από τη συχνότητα και τη θέση της πηγής θερμότητας (ασυνέχεια στο εσωτερικό του εξεταζόμενου δοκιμίου). Όπως και στην περίπτωση της οπτικής διέγερσης, η μηχανική διέγερση μπορεί να επιτευχθεί με μορφή παλμών (θερμογραφία παλμού) ή με διαμορφώσεις πλάτους (θερμογραφία lock-in) [25].

#### 7.3.2.6 Επαγωγική θερμογραφία

Η επαγωγική θερμογραφία ή θερμογραφία με δινορεύματα, είναι μια από τις πιο πρόσφατες εξελίξεις στο πεδίο της ενεργητικής θερμογραφίας. Επαγωγική διέγερση μπορεί να εφαρμοστεί εσωτερικά σε ηλεκτρικά αγωγικά υλικά, παράγοντας δινορεύματα σε συγκεκριμένο βάθος (το οποίο καθορίζεται από τη συχνότητα διέγερσης), με αποτέλεσμα τη θέρμανση του δοκιμίου και επομένως των εσωτερικών ατελειών. Οι επιφανειακές και υπο-επιφανειακές ατέλειες προκαλούν μεταβολές στην κίνηση των δινορευμάτων, μεταβάλλοντας τη θερμοκρασιακή κατανομή. Όπως και στις άλλες τεχνικές θερμογραφίας, οι μεταβολές αυτές στη θερμοκρασία μπορούν να ανιχνευτούν στην επιφάνεια του δοκιμίου με υπέρυθη κάμερα. Η επαγωγική θερμογραφία εφαρμόζεται για την ανίχνευση ρωγμών σε ηλεκτρικά αγωγικά υλικά, ανίχνευση βλάβης λόγω πρόσκρουσης σε σύνθετα υλικά, έλεγχο συγκόλλησης αρθρώσεων και αλλού [25].

#### 7.4 ΥΠΕΡΥΘΡΕΣ ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΚΑΜΕΡΕΣ

Οι περισσότερες εφαρμογές της υπέρυθρης θερμογραφίας χρησιμοποιούν μια υπέρυθη κάμερα συνδεδεμένη με ένα υπέρυθρο ανιχνευτή, ο οποίος απεικονίζει τις διαφορές θερμική ακτινοβολίας. Οι κάμερες αυτού του τύπου, χρησιμοποιούν αισθητήρες που δεν αντιλαμβάνονται το πλάνο επιτήρησης όπως παρουσιάζεται με τη βοήθεια του φωτός στο οπτικό φάσμα στο ανθρώπινο μάτι. Αντιθέτως, λαμβάνουν την εκπομπή της υπέρυθρης ακτινοβολίας στο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα της [25].

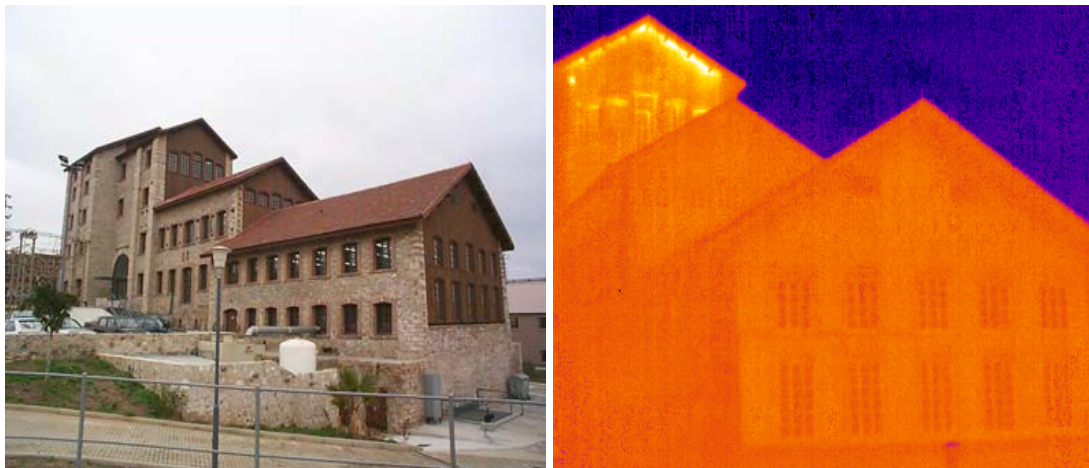
Ανάλογα με τον τύπο του αισθητήρα που χρησιμοποιούν, οι θερμικές κάμερες δρουν στις αντίστοιχες ζώνες(μήκη κύματος) του υπέρυθρου φάσματος ακτινοβολίας. Αυτές κατανέμονται ως εξής :

- SWIR (Short-Wave Infrared), από 1.0  $\mu\text{m}$  έως 3.0  $\mu\text{m}$ , με αισθητήρες που χρησιμοποιούν ως υλικό InGaAs.
- MWIR (Mid-Wave Infrared), από 3.0  $\mu\text{m}$  έως 5.0  $\mu\text{m}$ , με αισθητήρες που χρησιμοποιούν ως υλικό InSb, HgCdTe και σπανιότερα PbSe.
- LWIR (Long-Wave Infrared), από 7.0  $\mu\text{m}$  έως 14.0  $\mu\text{m}$ , με αισθητήρες που χρησιμοποιούν ως υλικό HgCdTe [25].

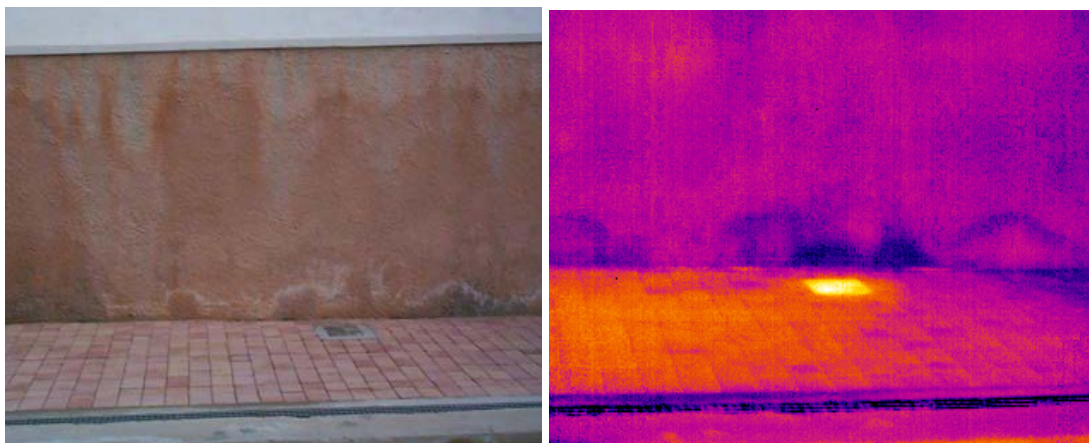


**Εικόνα 7.1** Υπέρυθρη θερμική κάμερα

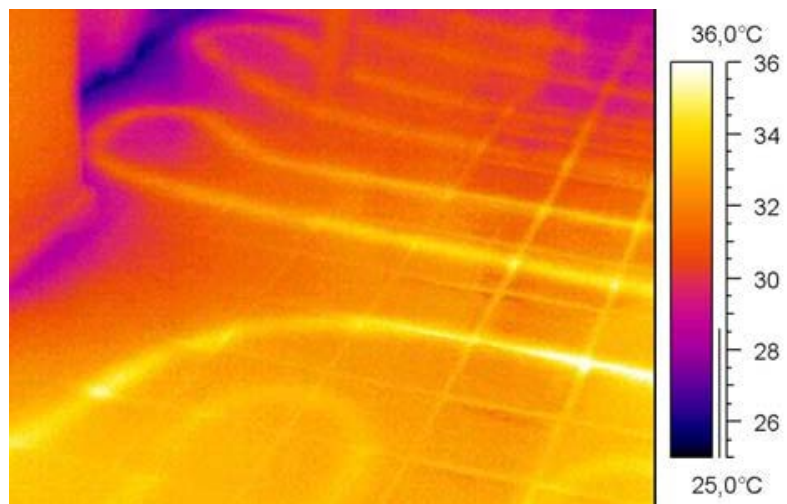
### 7.4.1 Παραδείγματα θερμογραφιών



Εικόνα 7.2 Θερμογράφημα όψης κτιρίου [36]



Εικόνα 7.3 Θερμογράφημα τοιχοποιίας με εμφανή ίχνη υγρασίας [36]



Εικόνα 7.4 Αγωγοί θερμού νερού μέσα σε δάπεδο μπάνιου [36]

## 7.5 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ

Η θερμογραφία υπέρυθρου εμφανίζει πολλά πλεονεκτήματα αλλά ορισμένα μειονεκτήματα. Στα πλεονεκτήματα της μεθόδου συγκαταλέγεται ότι αποτελεί τεχνική πλήρους πεδίου με ταχύ ρυθμό ελέγχου (μέχρι μερικά m<sup>2</sup> τη φορά), είναι τεχνική μη επαφής (δεν απαιτείται μέσο σύζευξης, αν και σε μερικές περιπτώσεις χρειάζεται η εφαρμογή μαύρης βαφής στο εξεταζόμενο δοκίμιο), είναι ασφαλής για το προσωπικό ελέγχου επειδή δεν υπεισέρχονται επιβλαβείς ακτινοβολίες, τα αποτελέσματα είναι σχετικά εύκολο να ερμηνευτούν, περιλαμβάνει μεγάλο εύρος εφαρμογών και είναι το μοναδικό εργαλείο ελέγχου για κάποιες εφαρμογές που μπορούν δύσκολα να ελεγχθούν από άλλες τεχνικές ή στην περίπτωση ορισμένων δραστηριοτήτων συντήρησης [25].

Αντίθετα, στους περιορισμούς τη εφαρμογής υπέρυθρης θερμογραφίας περιλαμβάνονται οι θερμικές απώλειες, λόγω συναγωγής ή ακτινοβολίας που μπορούν να οδηγήσουν σε ψευδείς αντιθέσεις που πλήττουν την αξιοπιστία της ερμηνείας των θερμογραφημάτων, το υψηλό κόστος εξοπλισμού, την δυνατότητα ανίχνευσης μόνο ατελειών που οφείλονται σε μετρήσιμη αλλαγή των θερμικών ιδιοτήτων, την ικανότητα ελέγχου μικρού πάχους υλικού (περίπου μέχρι 20mm) κάτω από την επιφάνεια και προβλήματα σχετικά με τον συντελεστή εκπομπής [25].

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΙΙ: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

### 8. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ

#### 8.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Όσον αφορά το πειραματικό μέρος της παρούσας εργασίας, παρήχθησαν νανο-ενισχυμένα δοκίμια κονιάματος με νανοσωλήνες άνθρακα και γραφένιο ως ενισχυτικά μέσα. Αρχικά, παρήχθησαν δέκα διαφορετικά αναμίγματα κονιάματος με διαφορετικά ποσοστά νανοσωλήνων άνθρακα (0.2 - 2.0% κατά βάρος τσιμέντου) και μετά άλλα δέκα διαφορετικά αναμίγματα κονιάματος με διαφορετικά ποσοστά γραφενίου (0.2 - 2.0 % κατά βάρος τσιμέντου). Επίσης, παρασκευάστηκαν και οκτώ δοκίμια αναφοράς χωρίς ενισχυτικά μέσα, με σκοπό τη σύγκριση των τελικών ιδιοτήτων με τα νανο-ενισχυμένα δοκίμια. Παρακάτω, παρουσιάζεται η διαδικασία

μίξης, τα υλικά, καθώς και οι πειραματικές δοκιμές που έγιναν ώστε να εξαχθούν τα αποτελέσματα.

## 8.2 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΜΙΞΗΣ

### 8.2.1 Υλικά

- Τσιμέντο. Portland τύπου-I αντοχής 42.5MPa
- Αδρανή. Άμμος κοσκινισμένη σε κόσκινα όπως θα αναλυθεί παρακάτω
- Νερό. Νερό με αναλογία νερού/τσιμέντου ( W/C) 0.5
- Μέσα ενίσχυσης. Πολλαπλού τοιχώματος νανοσωλήνες άνθρακα (MWCNTs) και γραφένιο
- Πρόσθετα. Ρευστοποιητές Sika® ViscoCrete® Ultra-300 και Sika® ViscoCrete® Ultra-600, που ρευστοποιούν την μάζα του κονιάματος ώστε να βελτιώσουν την εργασιμότητα του.. Ο ρευστοποιητής ViscoCrete300 χρησιμοποιήθηκε σαν μέσο διασποράς των νανοσωλήνων μέσα στο νερό, ενώ ο ViscoCrete600 ως ρευστοποιητής για την απόκτηση της επιθυμητής εργασιμότητας και ποσοστού αέρα στα δοκίμια.

### 8.2.2 Ξήρανση αδρανών

Με σκοπό την απομάκρυνση της ολικής υγρασίας των χρησιμοποιούμενων αδρανών, πραγματοποιήθηκε σε εργαστηριακό φούρνο (εικόνα 8.1) ξήρανση των αδρανών, σε θερμοκρασία 140°C και για χρονική διάρκεια μιας ημέρας.



**Εικόνα 8.1** Εργαστηριακός φούρνος ξήρανσης με τα αδρανή στο εσωτερικό του



### 8.2.3 Κοσκίνισμα αδρανών

Για τις ανάγκες της διαδικασίας μίξης, τα αδρανή κοσκινίστηκαν, με σκοπό την κατάλληλη κοκκομετρική διαβάθμισή τους. Το κοσκίνισμα πραγματοποιήθηκε αρχικά στα κόσκινα Νο8 με άνοιγμα 2.36mm και μετά στα κόσκινα Νο16 με άνοιγμα 1.18mm, του αμερικανικού πρότυπου ASTM, του εργαστηρίου. Στη συνέχεια, τα κόσκινα τοποθετήθηκαν στην αυτόματη κοσκιnière. Σε κάθε φάση της διαδικασίας, τοποθετούνταν περίπου 1Kg άμμου στο κόσκινο μεγαλύτερης διαμέτρου ανοίγματος προς το κόσκινο μικρότερης και παρέμεναν μέσα στην κοσκιnière περίπου πέντε λεπτά. Στο τέλος, στη βάση των δύο κόσκινων συλλέγονταν η κοσκινισμένη άμμος ώστε να χρησιμοποιηθεί έπειτα στην διαδικασία μίξης.



**Εικόνα 8.2** Τα κόσκινα του εργαστηρίου (επάνω), και η αυτόματη κοσκιnière (κάτω)

#### 8.2.4 Ζύγισμα αδρανών

Το ακριβές ζύγισμα των αδρανών πραγματοποιήθηκε στην εργαστηριακή ζυγαριά ακριβείας που φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



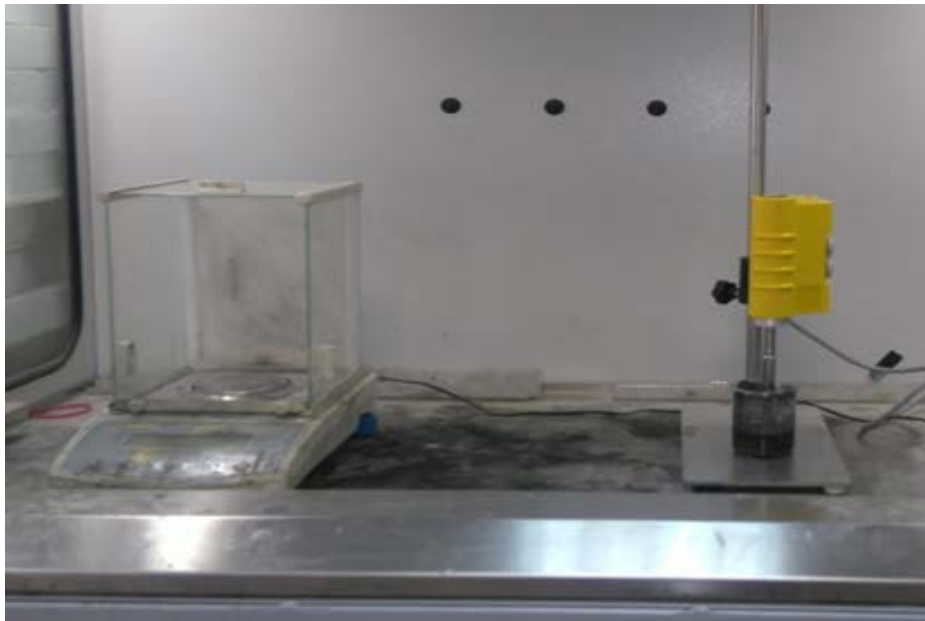
Εικόνα 8.3 Ζυγαριά ακριβείας

#### 8.2.5 Παρασκευή αιωρημάτων νανοσωλήνων άνθρακα και γραφενίου

Τα αιωρήματα που παρασκευάστηκαν στο εργαστήριο ήταν δύο. Το ένα ήταν αυτό με τους νανοσωλήνες άνθρακα, το νερό και το μέσο διασποράς (ρευστοποιητής ViscoCrete300) και το άλλο, με το γραφένιο, το νερό και το μέσο διασποράς. Πιο αναλυτικά, σε ποτήρι ζέσεως, αρχικά πραγματοποιήθηκε μαγνητική ανάδευση 1ml νερού με την αντίστοιχη ποσότητα ρευστοποιητή για περίπου δύο με τρία λεπτά. Στη συνέχεια, στον απαγωγό του εργαστηρίου, προστέθηκε σταδιακά στο διάλυμα ποσότητα MWCNTs, που είχε υπολογιστεί ακριβώς από πριν, σε αναλογία ViscoCrete300 ως προς MWCNTs 1.5/1. Μετα, άρχισε η διαδικασία υποβολής ενέργειας υπερήχων (ultrasonication), με τη βοήθεια του Sonicator tip της εικόνας 8.3. Η εφαρμογή αυτή διήρκεσε μιάμιση ώρα. Αντίστοιχα, η ίδια διαδικασία ακολουθήθηκε και για την παρασκευή του αιωρήματος με γραφένιο.



**Εικόνα 8.4** Το εργαστηριακό Sonicator tip (Hielscher UP 100H)



**Εικόνα 8.5** Υπερήχηση αιωρήματος στον απαγωγό για λόγους ασφαλείας

Μετά από μιάμιση ώρα και αφού τελείωσε η εφαρμογή του Sonicator tip , το κάθε αιώρημα τοποθετήθηκε σε μια συσκευή για απαέρωση (εικόνα 8.6). Ο σκοπός αυτού ήταν να απομακρυνθεί ο εγκλωβισμένος αέρας του αιωρήματος με τη βοήθεια της εργαστηριακής αντλίας κενού. Αυτή η διαδικασία διήρκησε 30 λεπτά.



**Εικόνα 8.6** Διαδικασία απαέρωσης των αιωρημάτων

### 8.2.6 Μίξη

Η παρασκευή των νανο-ενισχυμένων κονιαμάτων έγινε σύμφωνα με τις προδιαγραφές του διεθνώς πιστοποιημένου και αναγνωρισμένου προτύπου BS EN 196-1:2005. Οι διαστάσεις των δοκιμίων ήταν 40\*40\*10 mm. Για το λόγο αυτό, οι αναλογίες των χρησιμοποιούμενων υλικών έγιναν κατ' αντιστοιχία με αυτές που επιβάλλει το πρότυπο και το μόνο που άλλαζε κάθε φορά ήταν το ποσοστό των νανοσωλήνων άνθρακα και του γραφενίου. Τέλος, όπως προαναφέρθηκε, για την καλύτερη εργασιμότητα του τελικού προϊόντος, αλλά και τη διατήρηση του ποσοστού αέρα σε αποδεκτά επίπεδα, προστέθηκε μικρή ποσότητα ρευστοποιητή ViscoCrete600.



**Εικόνα 8.7** Μήτρα-καλούπι 16 δοκιμίων διαστάσεων 40\*40\*10mm



**Εικόνα 8.8** Η μήτρα μετά την έκχυση του κονιάματος για τα δοκίμια αναφοράς



**Εικόνα 8.9** Η μήτρα μετά τη σταδιακή έκχυση του νανο-ενισχυμένου κονιάματος συγκεκριμένου ποσοστού νανοσωλήνων άνθρακα κατά βάρος τσιμέντου. Στις εικόνες 8.7,8.8,8.9 παρατηρούμε την διαδικασία πλήρωσης των καλουπιών.

Μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας της πλήρωσης των καλουπιών, αυτές τοποθετήθηκαν στον πάγκο και καλύφθηκαν με υγρές λινάτσες για 24 ώρες μέχρι την εξαγωγή των δοκιμίων (ξεκαλούπωμα). Στα δοκίμια που εξάγονταν από τις μήτρες σημειωνόταν το είδος της ενίσχυσης, νανοσωλήνες άνθρακα (CNTs) ή γραφένιο (GR) και το κάθε ποσοστό. Μετά από αυτή τη διαδικασία, τα δοκίμια τοποθετήθηκαν σε δεξαμενή με νερό σε ξεχωριστό δωμάτιο του εργαστηρίου (εικόνα 8.13). Το νερό κάλυπτε ολοκληρωτικά τα δοκίμια και εκεί παρέμειναν για 28 ημέρες, όπως ορίζει το πρότυπο. Αυτό γίνεται για να υπάρχει συγκρισιμότητα μεταξύ των διαφόρων μετρήσεων όσο και διότι σε 28 ημέρες τα δοκίμια είναι ικανά να φέρουν όλο το φορτίο σχεδιασμού της κατασκευής. Η αντοχή δεν σταματάει να αυξάνεται, αλλά ο ρυθμός αύξησης της είναι μειωμένος.





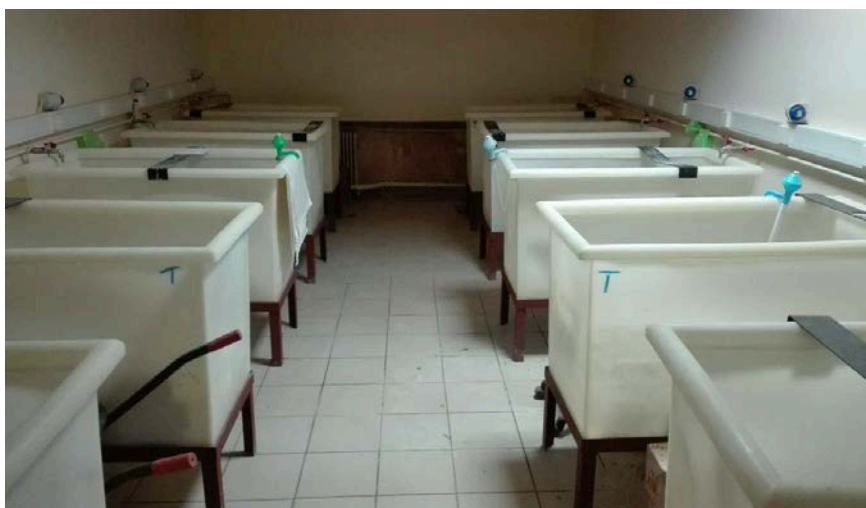
**Εικόνα 8.10** Τα οκτώ δοκίμια αναφοράς μετά την εξαγωγή τους από τη μήτρα



**Εικόνα 8.11** Η εξαγωγή και η σημείωση των νάνο-ενισχυμένων δοκιμίων  
κονιαμάτων με νανοσωλήνες άνθρακα



**Εικόνα 8.12** Η εξαγωγή και η σημείωση των νάνο-ενισχυμένων δοκιμίων  
κονιαμάτων με γραφένιο



**Εικόνα 8.13** Ο εργαστηριακός θάλαμος των δεξαμενών, στις οποίες παρέμειναν για 28 ημέρες τα δοκίμια που παρήχθησαν.

### 8.3 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΞΑΓΩΓΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

#### 8.3.1 Ξήρανση Δοκιμίων

Μετά την αφαίρεσή των δοκιμίων από τις δεξαμενές, τοποθετήθηκαν στον εργαστηριακό φούρνο (εικόνα 8.14), για τρεις ημέρες στους 60°C και για μια ημέρα στους 90°C, ώστε να απομακρυνθεί όλη η περιεχόμενη υγρασία τους. Αυτή η διαδικασία ήταν αναγκαία για τις ηλεκτρικές μετρήσεις και συγκεκριμένα για την ηλεκτρική αγωγιμότητα.



**Εικόνα 8.14** Ο εργαστηριακός φούρνος ξήρανσης

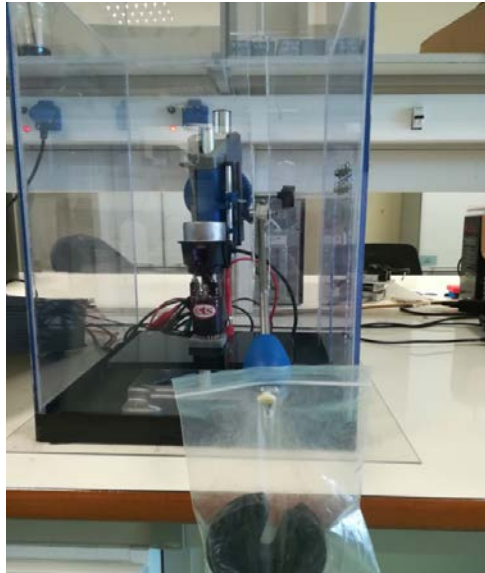
### 8.3.2 Έλεγχοι ηλεκτρικών μετρήσεων (ηλεκτρικής αγωγιμότητα)

Μετά την εξαγωγή από τον φούρνο και αφού τα δοκίμια ήταν σε κρύα κατάσταση, η επιφάνεια επαφής (κάτω επιφάνεια χωρίς ανωμαλίες) όλων των δοκιμίων καθαρίστηκε με ισοπροπυλική αλκοόλη. Στη συνέχεια, τα δοκίμια τοποθετούνταν καθένα στην ιδιοσυσκευή μέτρησης ηλεκτρικής αγωγιμότητας με την πάνω επιφάνειά τους να είναι κάθε φορά σε επαφή με τον δακτύλιο των ηλεκτροδίων της ιδιοσυσκευής. Ο δακτύλιος των ηλεκτροδίων ήταν σε επαφή με την επιφάνεια ου κάθε δοκιμίου, μέσω άσκησης πίεσεως στο μοχλό από ένα βάρος (εικόνα 8.15), προκειμένου να επιτευχθεί πάρα πολύ καλή επαφή όλων των ηλεκτροδίων ούτως ώστε να υπάρχει επαναληψιμότητα στις μετρήσεις. Στο τέλος της κάθε μέτρησης ο δακτύλιος ηλεκτροδίων καθαριζόταν με ισοπροπυλική αλκοόλη.

Σε ένα ειδικά σχεδιασμένο λογισμικό του συνδεδεμένου υπολογιστή, ορίστηκε η τάση στα 600V και το σύνολο των μετρήσεων στα 8, από τις οποίες οι 3 πρώτες δεν λαμβανόταν υπόψη για μεγαλύτερη ακρίβεια. Ο μέσος όρος των μετρήσεων έδωσε το αποτέλεσμα στην τιμή της επιφανειακής αντίστασης. Ακολούθως, το λογισμικό εξήγαγε δύο διαγράμματα. Στο ένα διακρινόταν το ρεύμα που διαρρέει το δοκίμιο σε σχέση με τον χρόνο. Το άλλο, έχοντας δηλώσει την τάση πριν την έναρξη του πειράματος, μέσω του νόμου του Ohm, δείχνει την απεικόνιση της τιμής της επιφανειακής αντίστασης σε κάθε μία από τις 8 μετρήσεις. Σε καθένα από τα ποσοστά, μετρήθηκαν και τα τρία δοκίμια και καταγράφηκε ο μέσος όρος των τριών τιμών της επιφανειακής αντίστασης.

Τέλος, για τον υπολογισμό της ηλεκτρικής αντίστασης σε όλο τον όγκο των δοκιμίων αφαιρέθηκε η μαύρη (μονωτική) βάση της ιδιοσυσκευής, όπως δείχνει η εικόνα 8.17, άλλαξε η συνδεσμολογία των καλωδίων όπως ορίζει το εγχειρίδιο και η υπόλοιπη διαδικασία έγινε με αντίστοιχο τρόπο όπως στον υπολογισμό της επιφανειακής αντίστασης.





**Εικόνα 8.15** Η εφαρμογή πίεσεως στο μοχλό της ιδιοσυσκευής



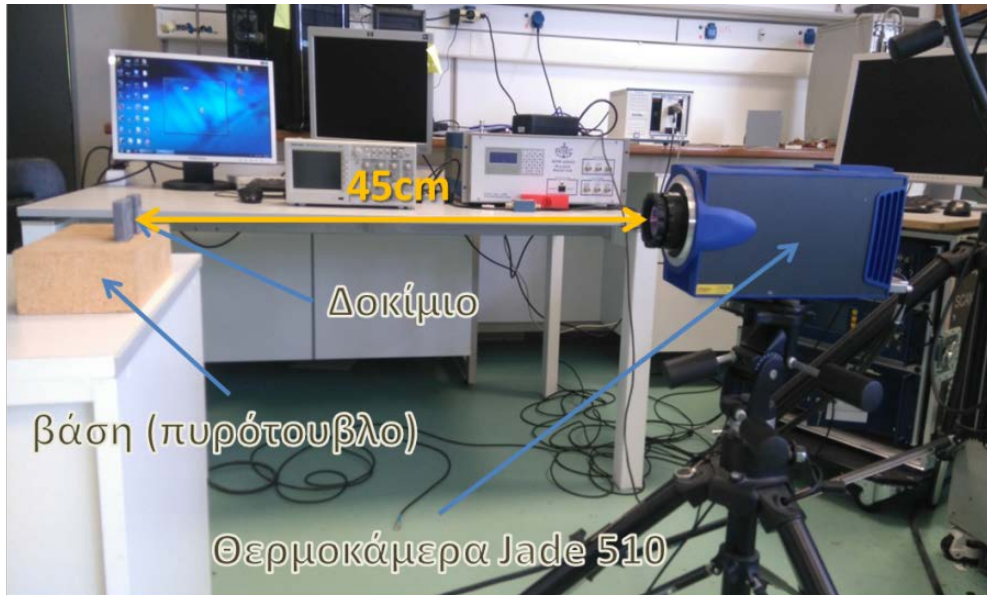
**Εικόνα 8.16** Η επιφάνεια του εξεταζόμενου δοκιμίου εφαπτόμενη με τον δακτύλιο των ηλεκτροδίων της ιδιοσυσκευής



**Εικόνα 8.17** Η ιδιοσυσκευή χωρίς τη μονωτική βάση για τη μέτρηση της ηλεκτρικής αντίστασης σε όλο τον όγκο του δοκιμίου

### **8.3.3 Έλεγχοι μετρήσεων υπέρυθρης θερμογραφίας**

Για τις θερμικές μετρήσεις, τα δοκίμια τοποθετήθηκαν αρχικά στον εργαστηριακό φούρνο ξήρανσης για 72 ώρες σε θερμοκρασία 90°C, ώστε να υπάρχει ομοιόμορφη θερμοκρασία σε όλη τη μάζα των δοκιμίων. Στη συνέχεια, τα δοκίμια τοποθετήθηκαν πάνω σε βάση (πυρότουβλο), όπως δείχνει η εικόνα 8.18 και άρχισε η καταγραφή της αποθέρμανσης τους με τη βοήθεια θερμοκάμερας (Jade 510 της εταιρίας Cedir) μέχρι η θερμοκρασία τους να πέσει λίγο κάτω από τους 35°C. Η απόσταση μεταξύ των δοκιμίων και της κάμερας ήταν 45cm.



**Εικόνα 8.18** Διάταξη καταγραφής της αποθέρμανσης των δοκιμίων μέχρι 35°C

Η υπέρυθρη κάμερα που χρησιμοποιήθηκε για την ανίχνευση και την απεικόνιση των θερμοκρασιακών διαφορών είναι μεσαίου μήκους κύματος (MWIR) με εύρος ανίχνευσης στο υπέρυθρο 3-5μm και εύρος θερμοκρασιών 5 – 120 °C.



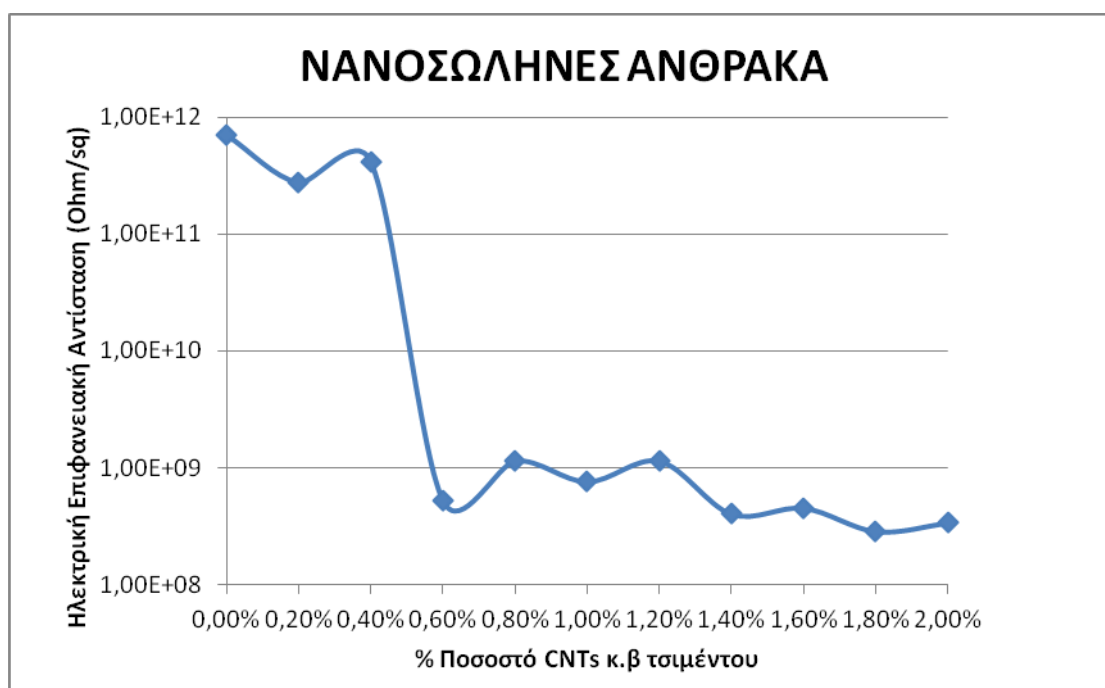
**Εικόνα 8.19** Η εργαστηριακή υπέρυθρη κάμερα Cedip Jade 510

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΙΙΙ: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

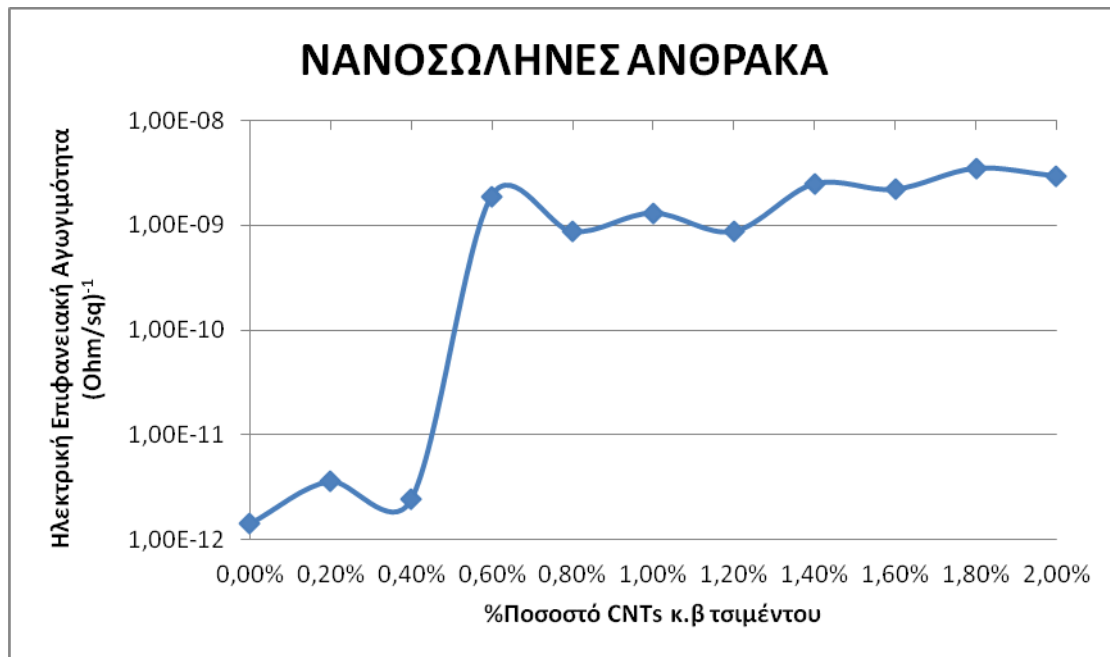
### 9. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

#### 9.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ

Σε αυτή την ενότητα, παρουσιάζονται αρχικά, τα διαγράμματα της επιφανειακής αντίστασης και της ηλεκτρικής αγωγιμότητας συναρτήσει του επί τοις εκατό ποσοστού της νάνο-ενίσχυσης των δοκιμίων (νανοσωλήνων άνθρακα, γραφενίου) κατά βάρος τσιμέντου, και έπειτα, αναφέρονται τα αποτελέσματα που εξήχθησαν από αυτά. Συνολικά, μετρήθηκαν τα δοκίμια του κάθε ποσοστού τρεις φορές και καταγράφηκε ο μέσος όρος της ηλεκτρικής επιφανειακής ειδικής αντίστασης που παρουσίαζαν. Για την εύρεση της ηλεκτρικής αγωγιμότητάς τους, αρκεί να υπολογισθεί το αντίστροφο της ειδικής αντίστασης.

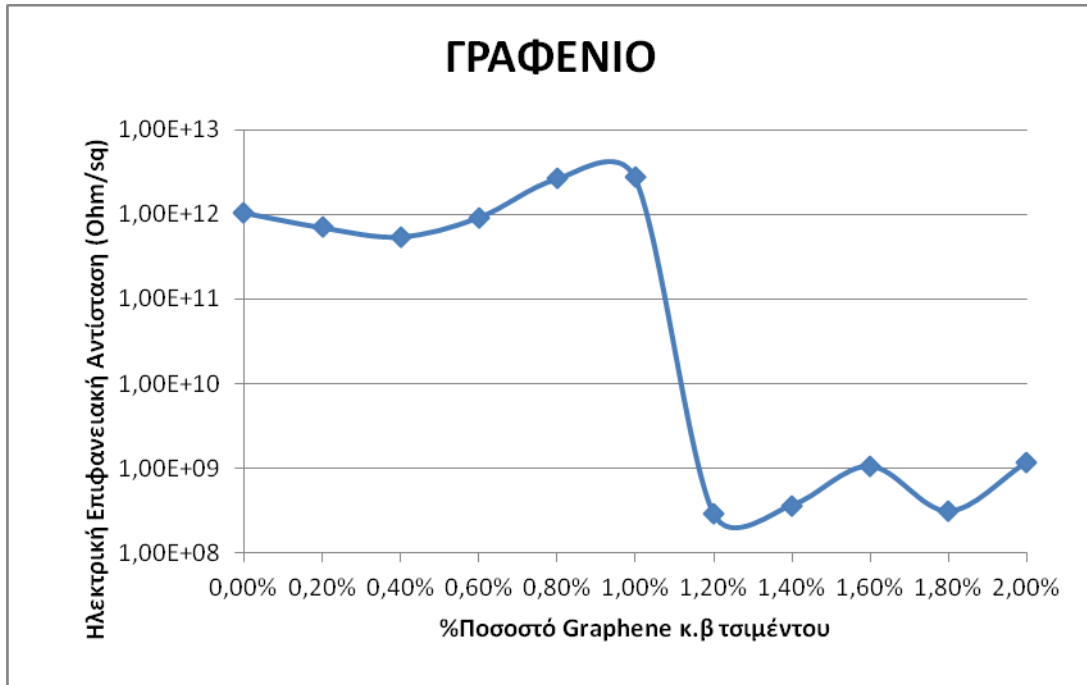


*Διάγραμμα 1. Διάγραμμα επιφανειακής αντίστασης συναρτήσει του επί τοις εκατό ποσοστού νανοσωλήνων άνθρακα κατά βάρος τσιμέντου των νάνο-ενισχυμένων δοκιμίων.*

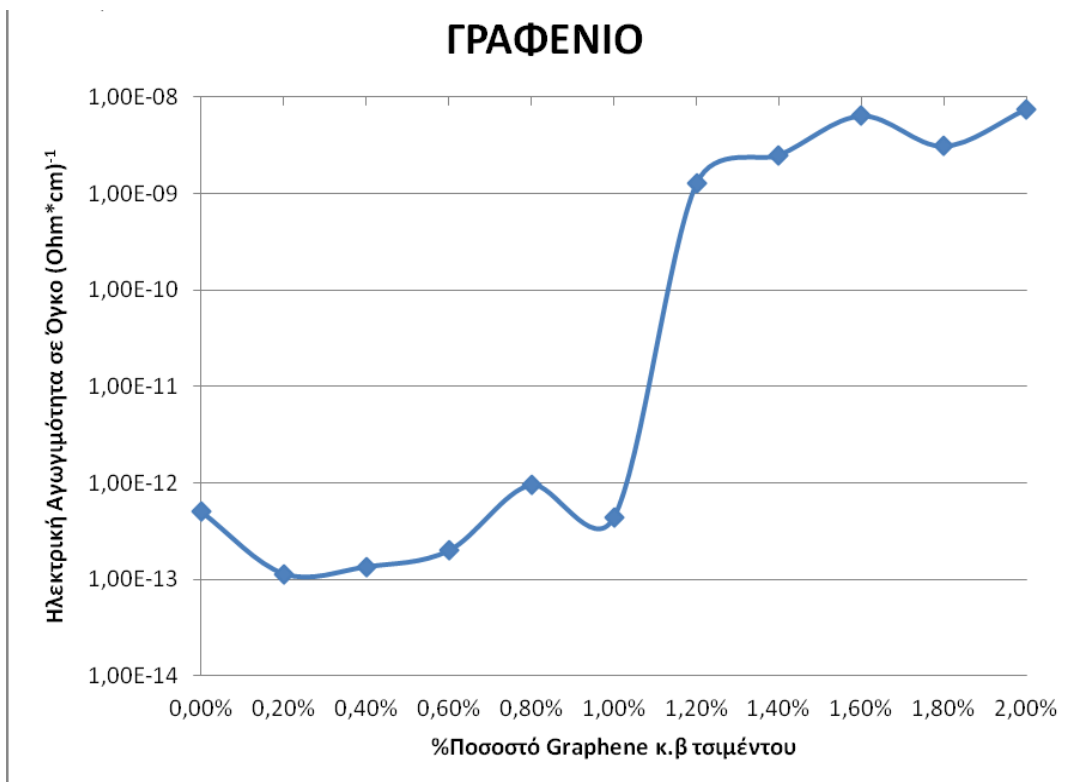


***Διάγραμμα 2.** Διάγραμμα ηλεκτρικής αγωγιμότητας συναρτήσει του επί τοις εκατό ποσοστού νανοσωλήνων άνθρακα κατά βάρος τσιμέντου των νάνο-ενισχυμένων δοκιμίων.*

Βάσει του διαγράμματος 2, γίνεται κατανοητό αρχικά, ότι μέχρι το νανο-ενισχυμένο δοκίμιο 0,4% με νανοσωλήνες άνθρακα κατά βάρος τσιμέντου, δεν παρατηρείται ουσιαστική μεταβολή στην τιμή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας, επομένως δεν έχει δημιουργηθεί αγωγίμο δίκτυο, σε σχέση με αυτή των δοκιμίων αναφοράς. Στη συνέχεια, καθώς το ποσοστό των νανοσωλήνων άνθρακα αυξάνεται και φτάνει στο 0,6%, μπορεί να διακρίνει κανείς απότομη αύξηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας έως και τρεις τάξεις μεγέθους και την δημιουργία ενός αγωγίμου δικτύου, το οποίο παραμένει σταθερό έως και το 2,0%, η παραπάνω αύξηση του ποσοστού νανοσωλήνων άνθρακα κατά βάρος τσιμέντου δεν προσδίδει περαιτέρω κάποια διάφορα στο δοκίμιο ηλεκτρικά.



*Διάγραμμα 3. Διάγραμμα επιφανειακής αντίστασης συναρτήσει του επί τοις εκατό ποσοστού γραφενίου κατά βάρος τσιμέντου των νάνο-ενισχυμένων δοκιμίων.*

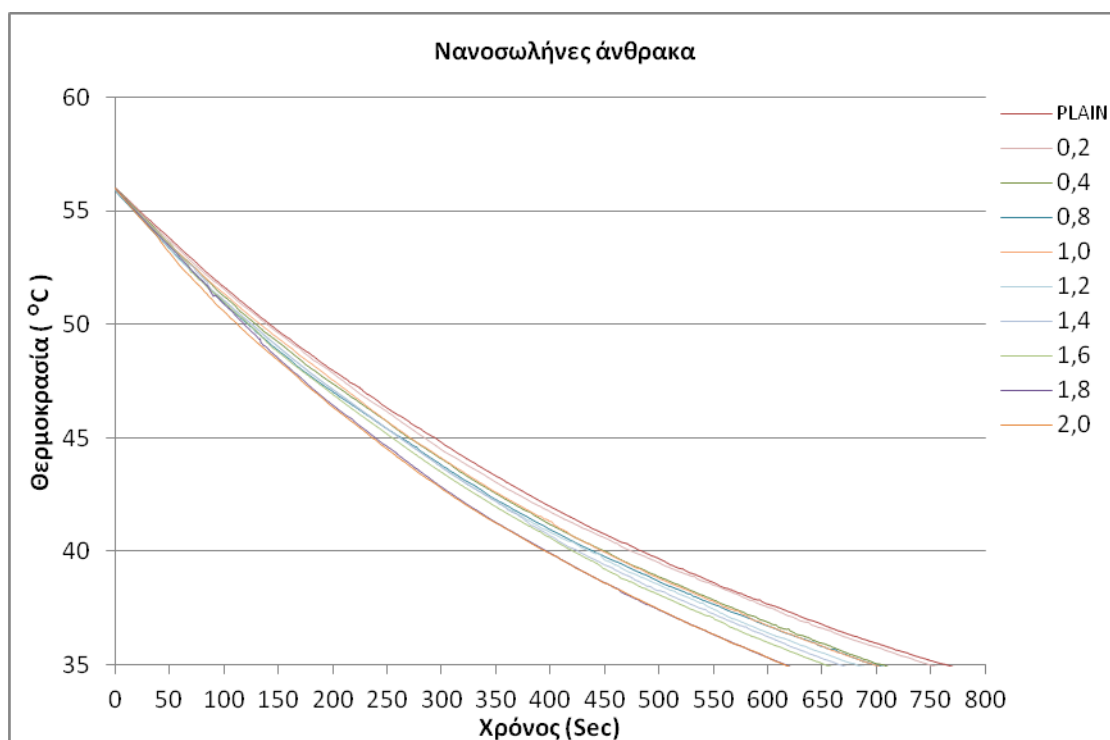


*Διάγραμμα 4. Διάγραμμα ηλεκτρικής αγωγιμότητας συναρτήσει του επί τοις εκατό ποσοστού γραφενίου κατά βάρος τσιμέντου των νάνο-ενισχυμένων δοκιμίων.*

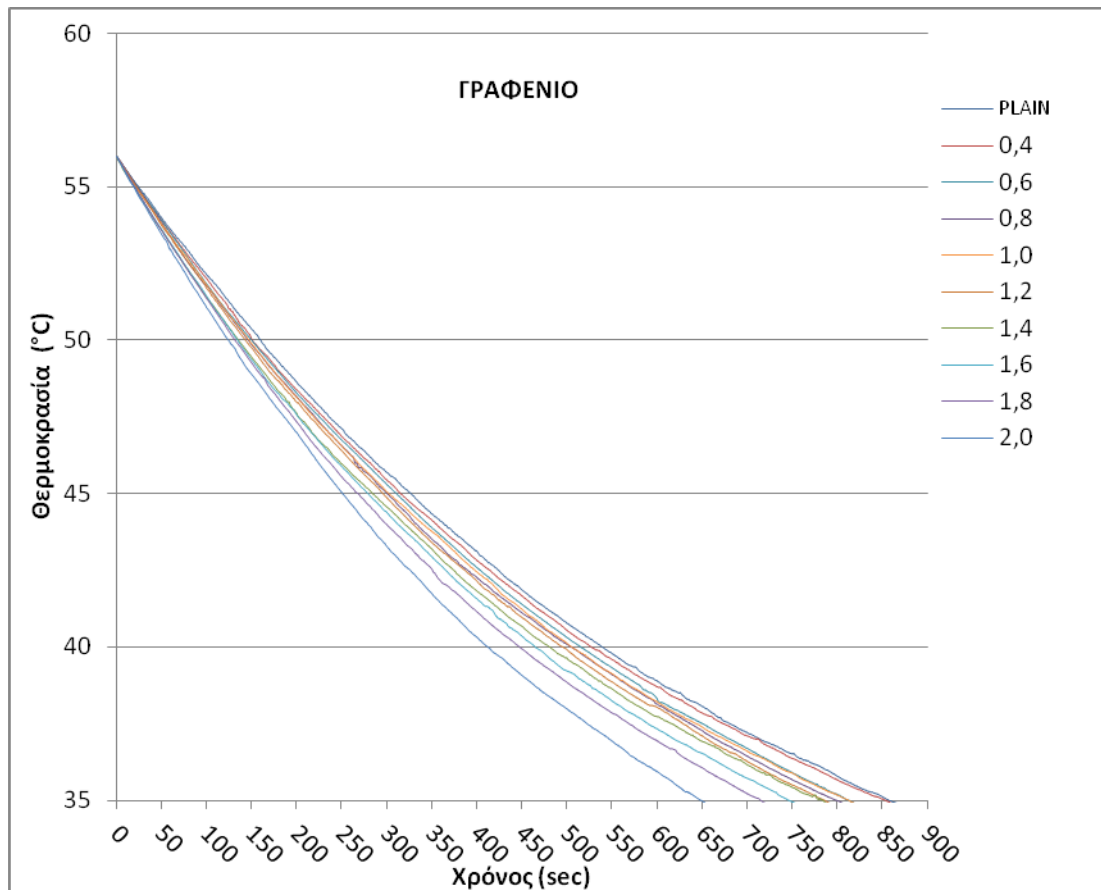
Βάσει του διαγράμματος 4, γίνεται κατανοητό αρχικά, ότι μέχρι το νανο-ενισχυμένο δοκίμιο 1,0% με γραφένιο κατά βάρος τσιμέντου, δεν παρατηρείται ουσιαστική μεταβολή στην τιμή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας, επομένως δεν έχει δημιουργηθεί αγωγίμο δίκτυο, σε σχέση με αυτή των δοκιμίων αναφοράς. Στη συνέχεια, καθώς το ποσοστό του γραφενίου αυξάνεται και φτάνει στο 1,2%, μπορεί να διακρίνει κανείς απότομη αύξηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας έως και τρεις τάξεις μεγέθους και την δημιουργία ενός αγωγίμου δικτύου, το οποίο παραμένει σταθερό έως και το 2,0%, η παραπάνω αύξηση του ποσοστού γραφενίου κατά βάρος τσιμέντου δεν προσδίδει περαιτέρω κάποια διάφορα στο δοκίμιο ηλεκτρικά.

## 9.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ

Στην παρούσα ενότητα, παρουσιάζονται τα διαγράμματα θερμικής συμπεριφοράς των νανο-ενισχυμένων δοκιμίων. Διακρίνονται οι καμπύλες αποθέρμανσης, δηλαδή η θερμοκρασία συναρτήσει του χρόνου (Sec), για κάθε ένα από τα δοκίμια με νανοσωλήνες άνθρακα και από αυτά με γραφένιο.



**Διάγραμμα 5.** Διάγραμμα θερμοκρασίας ως προς τον χρόνο (Sec) καταγραφής της θερμικής κάμερας. Οι καμπύλες αποθέρμανσης των νανο-ενισχυμένων δοκιμίων νανοσωλήνων άνθρακα.



*Διάγραμμα 6. Διάγραμμα θερμοκρασίας ως προς τον χρόνο (Sec) καταγραφής της θερμικής κάμερας. Οι καμπύλες αποθέρμανσης των νανο-ενισχυμένων δοκιμίων γραφενίου.*

Βάσει των διαγραμμάτων 5 και 6, γίνεται εμφανές, ότι με τη συνεχόμενη αύξηση του περιεχόμενου ποσοστού νανοσωλήνων άνθρακα και γραφενίου, ο χρόνος αποθέρμανσης μειώνεται. Το γεγονός αυτό, έχει ως εξήγηση ότι περιέχεται ολοένα και περισσότερη θερμικά αγωγίμη φάση. Δηλαδή, τα νανο-ενισχυμένα δοκίμια γίνονται ολοένα και πιο θερμικά αγωγίμα.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ IV: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

### 10. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα συμπεράσματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας, με βάση τις ηλεκτρικές μετρήσεις, καθώς και της μετρήσεις θερμογραφίας, των νανο-ενισχυμένων δοκιμίων, παρουσιάζονται στις επόμενες δύο παραγράφους.

#### 10.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ

Με βάση την ηλεκτρική αγωγιμότητα, μπορούν να εξαχθούν τα εξής συμπεράσματα. Αρχικά, μέχρι το νανο-ενισχυμένο δοκίμιο 0,4% με νανοσωλήνες άνθρακα κατά βάρος τσιμέντου, δεν παρατηρείται ουσιαστική μεταβολή στην τιμή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας, επομένως δεν έχει δημιουργηθεί αγωγίμο δίκτυο, σε σχέση με αυτή των δοκιμίων αναφοράς. Στη συνέχεια, καθώς το ποσοστό των νανοσωλήνων άνθρακα αυξάνεται και φτάνει στο 0,6%, μπορεί να διακρίνει κανείς απότομη αύξηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας έως και τρεις τάξεις μεγέθους και την δημιουργία ενός αγωγίμου δικτύου.

Επιπλέον, μέχρι το νανο-ενισχυμένο δοκίμιο 1,0% με γραφένιο κατά βάρος τσιμέντου, δεν παρατηρείται ουσιαστική μεταβολή στην τιμή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας, επομένως δεν έχει δημιουργηθεί αγωγίμο δίκτυο, σε σχέση με αυτή των δοκιμίων αναφοράς. Στη συνέχεια, καθώς το ποσοστό γραφενίου αυξάνεται και φτάνει στο 1,2%, μπορεί να διακρίνει κανείς απότομη αύξηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας έως και τρεις τάξεις μεγέθους και την δημιουργία ενός αγωγίμου δικτύου.

#### 10.2 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ

Βάσει των μετρήσεων θερμογραφίας, το ουσιαστικό συμπέρασμα στο οποίο μπορεί να καταλήξει κανείς, είναι ότι με τη συνεχόμενη αύξηση του περιεχόμενου ποσοστού νανοσωλήνων άνθρακα και γραφενίου, ο χρόνος αποθέρμανσης μειώνεται. Το γεγονός αυτό, έχει ως εξήγηση ότι περιέχεται ολοένα και περισσότερη θερμικά αγωγήμη φάση. Δηλαδή, τα νανο-ενισχυμένα δοκίμια γίνονται ολοένα και πιο θερμικά αγωγήμα.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Nicholas B. Winter «Understanding Cement»
2. Παπαδόπουλος Γ. Αναστάσιος «Μελέτη της επίδρασης νανο-εγκλεισμάτων στις ηλεκτρικές & θερμικές ιδιότητες δοκιμίων κονιάματος» Διπλωματική Εργασία Τ.Μ.Ε.Υ Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων, Οκτώβριος 2017
3. Περιοδικό «*Δίαυλος*» τεύχος 226
4. Ένωση Τσιμεντοβιομηχανιών Ελλάδος «*Τσιμέντο – Σκυρόδεμα*»
5. Τσακαλάκης Κώστας «Τεχνολογία παραγωγής τσιμέντου και σκυροδέματος» Ε.Μ.Π Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών, Αθήνα Μάιος 2010
6. Παναγιώτης Α. Μιχάλης, Σωτήρης Χ. Δημητρίου «Μελέτη Σύνθεσης Σκυροδέματος» Τμήμα Πολιτικών Έργων Υποδομής, Α.Τ.Ε.Ι Θεσσαλονίκης, Δεκέμβριος 2007
7. Ένωση Τσιμεντοβιομηχανιών Ελλάδος «*Τσιμέντο – Σκυρόδεμα*»
8. Μαρίνα Παπαδοπούλου Στεφανία Γκουντούρα «Αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα» Τμήμα Π.Ε.Υ 2013
9. Αναστασία Γριζιώτη «Έλεγχος συμβατότητας συνθετικών κονιαμάτων με τους δομικούς λίθους του Ενετικού Φρουρίου Κουλέ», Χανιά 2012
10. Διακρούσης Στυλιανός «Μελέτη συμπεριφοράς κονιαμάτων από συνθετικό λαρνίτη και πορτλανδίτη με διαβαθμισμένη χαλαζιακή άμμο» Πολυτεχνείο Κρήτης Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά 2011
11. [www.interbeton.gr](http://www.interbeton.gr)
12. [www.thrakon.gr/application/exomalinsi-ke-epipedosi-dapedou/](http://www.thrakon.gr/application/exomalinsi-ke-epipedosi-dapedou/)
13. [el.wikipedia.org/wiki/Νανοτεχνολογία](http://el.wikipedia.org/wiki/Νανοτεχνολογία)
14. [en.wikipedia.org/wiki/Allotropes\\_of\\_carbon](http://en.wikipedia.org/wiki/Allotropes_of_carbon)
15. ΚΟΥΡΚΟΥΛΗ Ν. ΣΟΥΖΑΝΑ «Υβριδικά νανουλικά που βασίζονται σε τροποποιημένους νανοσωλήνες άνθρακα ή/και φουλλερένια με ημιαγώγιμα πολυμερή για εφαρμογή τους σε ενεργειακές τεχνολογίες» Διδακτορική Διατριβή Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα 2013
16. Εμμανουήλ Κωνσταντίνος «Μελέτη των μηχανικών ιδιοτήτων νανοσωλήνων άνθρακα και άλλων γραφιτικών υλικών» Πανεπιστήμιο Πατρών Τμήμα Επιστήμης των Υλικών Πάτρα, Φεβρουάριος 2007
17. Ελένη Χ. Βερμίσογλου «Παρασκευή και χημική τροποποίηση νανοδομών άνθρακα με σκοπό τη βελτίωση της ικανότητας αποθήκευσης αέριων ρύπων και

ατμών» Διδακτορική Διατριβή Εθνικό & Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών  
Τμήμα Χημείας, Αθήνα 2009

**18.** [www.nanoscience.com/applications/education/overview/cnt-technology-overview/](http://www.nanoscience.com/applications/education/overview/cnt-technology-overview/)

**19.** Μίαρης Αναστάσιος «Μελέτη ιδιοτήτων εκπομπής πεδίου τρισδιάστατων καθόδων οξειδίου του γραφενίου» Ε.Μ.Π Σχολή Εφαρμοσμένων Μαθηματικών & Φυσικών Επιστημών, Αθήνα Φεβρουάριος 2014

**20.** [el.wikipedia.org/wiki/Γραφένιο](http://el.wikipedia.org/wiki/Γραφένιο)

**21.** Ραβάνη Φωτεινή «Μελέτη της επιφανειακής χημείας σύνθετων υλικών βασισμένων σε άνθρακα» Διατριβή Ειδίκευσης Πάτρα 2009

**22.** [en.wikipedia.org/wiki/Carbon\\_nanotube](http://en.wikipedia.org/wiki/Carbon_nanotube)

**23.** Νικολάου Αριάδνη «Σύνθεση και χαρακτηρισμός οξειδίου του γραφίτη, γραφένιου και παραγώγων τους» Ε.Μ.Π Σχολή Χημικών Μηχανικών, Αθήνα 2014

**24.** Ευμορφία Διαμάντη «Νέα νανοπορώδη υλικά με βάση το Γραφένιο: Σύνθεση, χαρακτηρισμός και μελέτη ιδιοτήτων» Διδακτορική Διατριβή Τ.Μ.Ε.Υ Ιωάννινα 2014

**25.** Θεόδωρος Ματίκας Δημήτριος Αγγελής «Μη Καταστροφικοί Έλεγχοι» Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών Ε.Μ.Π

**26.** Σπύρος – Γεράσιμος Σταματούλης «Μη καταστροφικοί Έλεγχοι σε Υφιστάμενες Κατασκευές» Πτυχιακή Εργασία Α.Τ.Ε.Ι Πειραιά, Σεπτέμβριος 2013

**27.** Σημειώσεις Μη Καταστροφικοί Έλεγχοι ΤΕΙ Λάρισας

**28.** [el.wikipedia.org/wiki/Ηλεκτρική\\_αγωγιμότητα](http://el.wikipedia.org/wiki/Ηλεκτρική_αγωγιμότητα)

**29.** Δημήτριος Διαμαντάρας «Η επίδραση της προσθήκης νανοσωλήνων άνθρακα ως ενίσχυση σε δοκίμια κονιάματος στις θερμικές και ηλεκτρικές ιδιότητες» Διπλωματική Εργασία Τ.Μ.Ε.Υ Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων, Ιωάννινα 2016

**30.** P.T. Dalla, P. Alafogianni, I.K. Tragazikis, D.A. Exarchos, K. Dassios, N.-M. Barkoula, T. E. Matikas «The effect of different surfactants/plasticizers on the electrical behavior of CNT nano-modified cement mortars» Department of Materials Science & Engineering, University of Ioannina

**31.** D.A. Exarchos, P.T. Dalla, I.K. Tragazikis, T.E. Matikas «The effect of CNTs reinforcement, on thermal and electrical properties, of cement based materials» Department of Materials Science & Engineering, University of Ioannina

**32.** D.A. Exarchos, P.T. Dalla, I.K. Tragazikis, P. Alafogianni, N.-M. Barkoula, A.S. Paipetis, K.G. Dassios, T.E. Matikas «Thermal and electrical behavior of nano-

modified cement mortar» Department of Materials Science & Engineering, University of Ioannina

**33.** Κορδάτος Ευάγγελος «Μη καταστροφικός χαρακτηρισμός της βλάβης προηγμένων υλικών μέσω ανάλυσης της θερμο-μηχανικής συμπεριφοράς τους με μεθόδους θερμογραφίας» Διδακτορική Διατριβή Τ.Μ.Ε.Υ Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων, Ιωάννινα 2013

**34.** [el.wikipedia.org/wiki/Συναγωγή\\_θερμότητας](http://el.wikipedia.org/wiki/Συναγωγή_θερμότητας)

**35.** [el.wikipedia.org/wiki/Θερμική\\_ακτινοβολία](http://el.wikipedia.org/wiki/Θερμική_ακτινοβολία)

**36.** ΑΙΜ. Γ. ΚΟΡΩΝΑΙΟΣ, Γ-ΦΟΙΒΟΣ ΣΑΡΓΕΝΤΗΣ «ΘΕΡΜΟΓΡΑΦΙΑ» Δημοσιεύσεις Εργαστηρίου Τεχνικών Υλικών Τεύχος 2 ΑΘΗΝΑ 2003