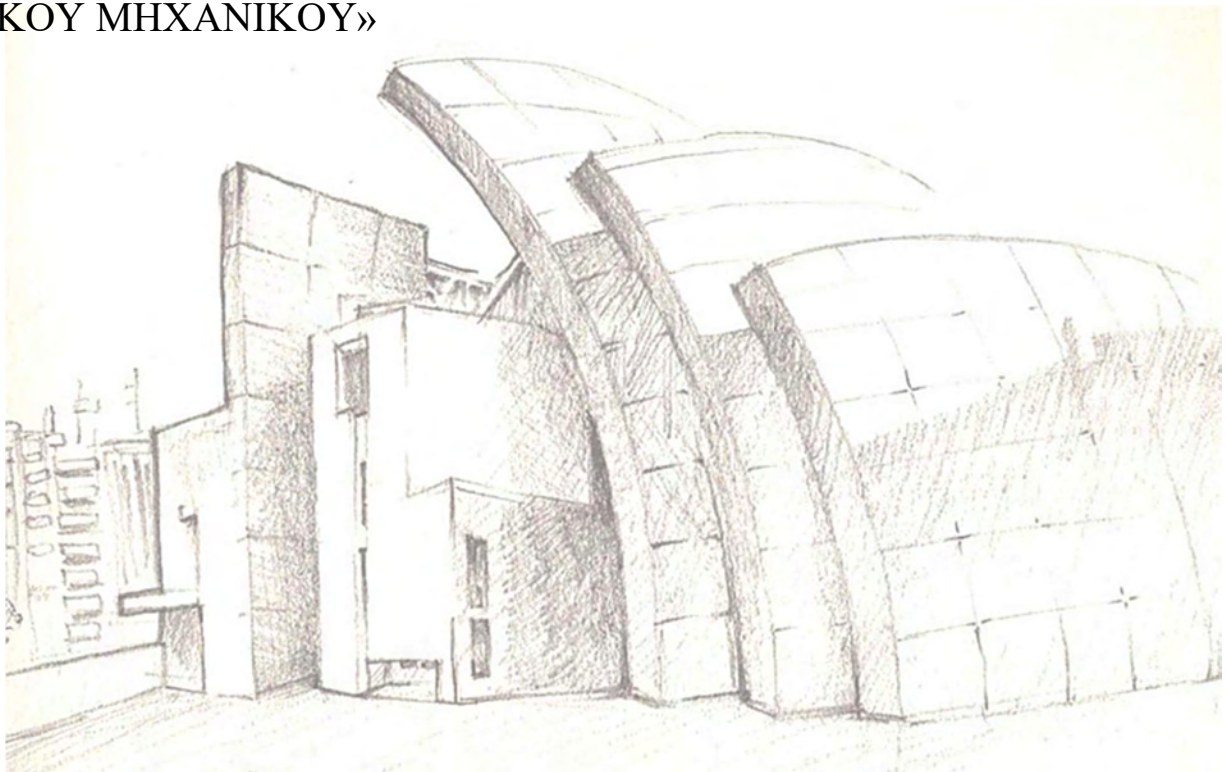


ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ



ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ:

«ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΩΝ ΝΑΝΟΎΛΙΚΩΝ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ ΤΟΥ ΠΟΛΙΤΙΚΟΥ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ»



ΤΗΣ ΦΟΙΤΗΤΡΙΑΣ
ΓΚΙΣΓΚΙΝΗ ΕΙΡΗΝΗ
ΑΡ. ΜΗΤΡΩΟΥ: 01431

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ
ΚΑΡΑΚΑΣΙΔΗΣ ΘΕΩΔΩΡΟΣ

Περίληψη

Η παρούσα εργασία εκπονήθηκε με σκοπό τη βαθύτερη έρευνα πάνω στο πεδίο της νανοτεχνολογίας και ειδικότερα στον κατασκευαστικό κλάδο. Όπως φαίνεται η νανοτεχνολογία μπορεί να διαδραματίσει ένα πολύ σημαντικό ρόλο, με ένα τεράστιο εύρος εφαρμογών για τους μηχανικούς. Παρακάτω αναλύονται, στο μέτρο του δυνατού, μερικές από τις εφαρμογές των νανοϋλικών στον κλάδο του πολιτικού μηχανικού. Βέβαια, θεωρούνται ένα σχετικά πρόσφατο εύρημα, δηλαδή χρειάζεται αρκετή ακόμα έρευνα ώστε να καθιερωθούν ως βασικό υλικό, αλλά να διερευνηθούν οι συνέπειες από τη χρήση τους στον άνθρωπο και το περιβάλλον.

Λέξεις κλειδιά: Νανοτεχνολογία, νανοϋλικά, νανοπρόσθετα, νανοκλίμακα, νανοσκυρόδεμα, κατασκευές,

Περιεχόμενα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	6
1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	6
1.2 ΔΟΜΗ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	7
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΝΑΝΟΎΛΙΚΑ.....	9
2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	9
2.1.1 ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗΣ ΝΑΝΟΥΛΙΚΩΝ	11
2.2 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΝΑΝΟΥΛΙΚΩΝ.....	15
2.2.1 ΜΗΔΕΝΙΚΗΣ ΔΙΑΣΤΑΣΗΣ (0-D) - ΝΑΝΟΣΩΜΑΤΙΔΙΑ	15
2.2.2 ΜΙΑΣ ΔΙΑΣΤΑΣΗΣ (1-D) - ΝΑΝΟΣΩΛΗΝΕΣ, ΝΑΝΟΦΛΟΙΩΜΑΤΑ ΚΑΙ ΝΑΝΟΪΝΕΣ.....	15
2.2.3 ΔΥΟ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ (2-D) - ΝΑΝΟΦΙΛΜ ΚΑΙ ΝΑΝΟΕΠΙΚΑΛΥΨΕΙΣ	16
2.2.4 ΤΡΙΩΝ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ (3-D) - ΝΑΝΟΚΡΥΣΤΑΛΛΟΙ ΚΑΙ ΝΑΝΟΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ.....	16
2.3 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ.....	17
2.3.1 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΛΟΓΩ ΜΕΓΕΘΟΥΣ.....	18
2.3.2 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΛΟΓΩ ΣΧΗΜΑΤΟΣ	19
2.6 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΠΟΥ ΕΞΑΡΤΩΝΤΑΙ ΑΠΟ ΤΟ ΜΕΓΕΘΟΣ	20
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 - ΕΠΙΣΤΡΩΣΕΙΣ ΜΕ ΝΑΝΟΣΩΜΑΤΙΔΙΑ	24
3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	24
3.2 ΔΙΟΞΕΙΔΙΟ ΤΟΥ ΠΥΡΙΤΙΟΥ	25
3.3 ΔΙΟΞΕΙΔΙΟ ΤΟΥ ΤΙΤΑΝΙΟΥ	26
3.4 ΑΡΓΥΡΟΣ.....	26
3.5 ΝΑΝΟΎΛΙΚΑ ΜΕ ΑΝΘΡΑΚΑ	26
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 - ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ	30
4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	30
4.2 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ ΝΑΝΟΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ.....	32
4.3 ΝΑΝΟΠΡΟΣΘΕΤΑ ΣΤΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ.....	34
4.5 ΤΣΙΜΕΝΤΟ ΥΨΗΛΗΣ ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΗΤΑΣ.....	38
4.6 ΑΥΤΟΘΕΡΑΠΕΥΟΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ (SELF-HEALING CONCRETE)	39
4.8 ΑΥΤΟΣΥΜΠΥΚΝΟΥΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ (S.C.C.).....	41
4.9 ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΩΝΤΑΣ ΝΑΝΟ-ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΣΤΗΝ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ (ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΚΑΙ ΜΕΛΕΤΕΣ)	44
4.10 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΓΙΑ ΤΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ.....	55
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 - ΘΕΡΜΟΜΟΝΩΣΗ	57
5.1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ - ΑΕΡΟΤΖΕΛ.....	57

5.1.2	ΑΕΡΟΤΖΕΛ ΠΥΡΙΤΙΟΥ ΣΕ ΠΑΡΑΘΥΡΑ	57
5.1.3	ΔΟΜΗ ΤΟΥ ΑΕΡΟΤΖΕΛ.....	59
5.1.4	ΦΥΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ.....	60
5.1.5	ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ.....	61
5.1.6	ΑΠΟΔΟΣΗ ΠΑΡΑΘΥΡΩΝ ΜΕ ΑΕΡΟΤΖΕΛ.....	61
5.1.6.1	ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΦΩΤΟΣ	62
5.1.6.2	ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ.....	62
5.1.7	ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ.....	65
5.1.7.1	ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ LUMIRA.....	66
5.2.1	ΜΟΝΩΤΙΚΟΙ ΠΙΝΑΚΕΣ ΚΕΝΟΥ (VACUUM INSULATION PANELS VIPS)	69
5.2.2	ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ.....	70
5.2.3	ΔΟΜΗ ΘΕΡΜΟΜΟΝΩΤΙΚΩΝ ΠΙΝΑΚΩΝ ΚΕΝΟΥ	71
5.2.4	ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΟΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΟ ΤΟΜΕΑ	75
5.2.4.1	ΤΟΙΧΟΠΟΙΑ	75
5.2.4.2	ΓΥΑΛΙΝΗ ΠΡΟΣΟΨΗ.....	76
5.2.4.3	ΣΤΕΓΗ/ΔΩΜΑ	76
5.2.4.4	ΔΑΠΕΔΟ.....	77
	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 – ΥΛΙΚΑ ΜΕΤΑΒΑΛΛΟΜΕΝΗΣ ΦΑΣΗΣ	78
6.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ -ΡΥΘΜΙΣΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ: ΥΛΙΚΑ ΜΕΤΑΒΑΛΛΟΜΕΝΗΣ ΦΑΣΗΣ (PHASE CHANGING MATERIALS, PCMS).....	78
6.2	ΙΣΤΟΡΙΚΑ.....	79
6.2.1	ΑΝΑΛΥΤΙΚΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΡΕΥΝΑ ΠΑΝΩ ΣΤΑ PCM	79
6.3	ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ.....	81
6.5	ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ	85
	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 – ΝΑΝΟΎΛΙΚΑ ΚΑΙ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ	90
7.1	ΚΙΝΔΥΝΟΙ ΓΙΑ ΤΗΝ ΥΓΕΙΑ ΚΑΙ ΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΝΑΝΟΎΛΙΚΩΝ.....	90
7.2	ΚΙΝΔΥΝΟΙ ΓΙΑ ΤΗΝ ΥΓΕΙΑ – ΠΡΟΛΗΨΗ.....	90
7.2.1	ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΜΕΝΑ ΝΑΝΟΥΛΙΚΑ	91
7.3	ΑΠΕΛΕΥΘΕΡΩΣΗ ΝΑΝΟΎΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΟΥΣ.....	92
7.4	ΑΠΕΛΕΥΘΕΡΩΣΗ ΝΑΝΟΎΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΚΑΤΕΔΑΦΙΣΗ	92
7.5	ΑΠΕΛΕΥΘΕΡΩΣΗ ΝΑΝΟΎΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΑΠΟΣΥΝΘΕΣΗ	93
7.6	ΜΑΚΡΟΠΡΟΘΕΣΜΕΣ ΕΚΛΥΣΕΙΣ	94
7.7	ΑΝΑΓΚΗ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ ΤΗΣ ΠΡΟΛΗΨΗΣ ΚΙΝΔΥΝΩΝ ΑΠΟ ΝΑΝΟΥΛΙΚΑ.....	94

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	97
ΑΝΑΦΟΡΕΣ.....	101

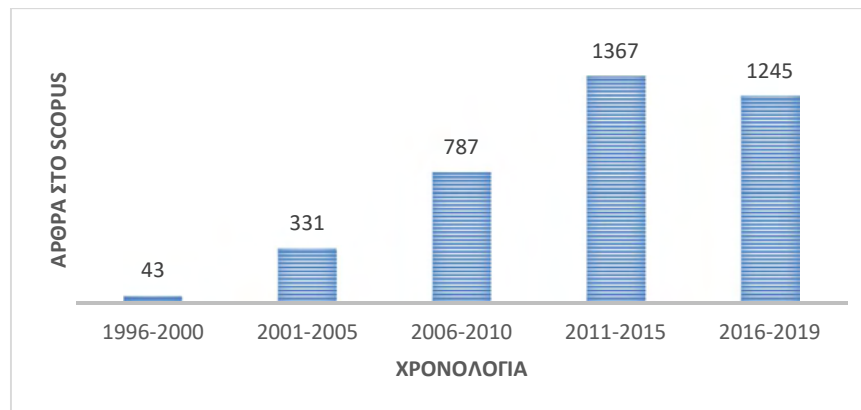
Ευχαριστίες

Πρώτα απ' όλα, θέλω να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας μου, Καθηγητή κ. Καρακασίδη Θεόδωρο, για την βοήθεια και καθοδήγησή του κατά τη διάρκεια της δουλειάς μου. Πάνω απ' όλα, ευχαριστώ την οικογένεια μου για την κατανόηση και υποστήριξή τους όλα αυτά τα χρόνια.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε με σκοπό την εμβάθυνση στον τομέα της νανοτεχνολογίας και ειδικότερα σε σχέση με τον τομέα των κατασκευών. Η νανοτεχνολογία είναι ένας ανερχόμενος κλάδος στον τομέα των κατασκευών, το οποίο εκφράστηκε με την εύρεση αρθρογραφίας μέσω της αναζήτησης στο Scopus. Την περίοδο 1990-1995 καταγράφονται μόνο 10 άρθρα με τις εξής περιγραφές: “Nanomaterials in construction, Nanomaterials in civil engineering, Nanotechnology in construction, Nanotechnology in civil engineering”. Με τις ίδιες περιγραφές την περίοδο 1996-2000 καταγράφονται 43 άρθρα, την περίοδο 2001-2005 καταγράφονται 331 άρθρα, το 2006-2010 καταγράφονται 787 άρθρα, το 2011-2015 καταγράφονται 1367 άρθρα, ενώ από το 2016 μέχρι σήμερα καταγράφονται 1245 άρθρα. Έχει ιδιαίτερα ενδιαφέρον να δει κανείς την εκθετική πρόοδο που έχει σημειωθεί τα τελευταία 30 χρόνια στην ανάπτυξη νέων νανοϋλικών αλλά και την βελτιστοποίηση των ήδη υπαρχόντων με την περαιτέρω εξέλιξη των επιστημών σε γενική βάση. Τα παραπάνω φανερώνουν το έντονο ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας αλλά και τις αυξημένες πιθανότητες δημιουργίας προϊόντων και διαδικασιών βασισμένων στη νανοτεχνολογία. Παρ’ όλα αυτά η χρήση τους δεν είναι ακόμα ευρέως διαδεδομένη αφού πολλοί παράγοντες μπαίνουν μπροστά, όπως το σχετικά υψηλό κόστος, τα σχετικά λίγα πειραματικά δεδομένα και αναλύσεις κλπ. Είναι όμως φανερό η τάση και το ενδιαφέρον στην επιστημονική κοινότητα, το οποίο θα μπορούσε να εκδηλωθεί σε μία αύξηση των πιθανοτήτων δημιουργίας προϊόντων βασισμένων στη νανοτεχνολογία.



1.2 ΔΟΜΗ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η δομή αυτής εργασίας οργανώνεται στα εξής κεφάλαια:

Το *Κεφάλαιο 1* είναι μια μικρή εισαγωγή για την παρούσα εργασία.

Το *Κεφάλαιο 2* αποτελείται από μια γενική εισαγωγή στην επιστήμη της νανοτεχνολογίας. Αναφέρονται στοιχεία για το μέγεθος, την κλίμακα και το σχήμα, και πως αυτά επηρεάζουν τη συμπεριφορά του κάθε υλικού στην νανοκλίμακα.

Το *Κεφάλαιο 3* είναι βασισμένο σε βιβλιογραφία που αφορά τις επιστρώσεις με νανοϋλικά και τις ιδιότητες που αυτά προσδίδουν στις επικαλύψεις. Συγκεκριμένα αναφέρονται τα εξής νανοϋλικά: διοξείδιο του πυριτίου, διοξείδιο του τιτανίου, άργυρος και επιστρώσεις με άνθρακα.

Το *Κεφάλαιο 4* αξιοποιείται για την ανάλυση της προσθήκης νανοσωματιδίων στο σκυρόδεμα, και το πως η προσθήκη αυτή βελτιώνει αισθητά την απόδοση του σκυροδέματος. Η προσθήκη νανοσωματιδίων μπορεί να δώσει διάφορες μορφές στο σκυρόδεμα όπως το τσιμέντο υψηλής αποδοτικότητας, το αυτοθεραπευόμενο σκυρόδεμα και το αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα. Νανοσωματίδια χρησιμοποιούνται και ως προσμίξεις στο συμβατικό σκυρόδεμα, τέτοια είναι τα : πυρίτιο, τιτάνιο και άνθρακα. Τέλος παρατίθενται κάποιες εφαρμογές του σκυροδέματος με τα νανοϋλικά.

Το *Κεφάλαιο 5* αναφέρεται στη θερμομόνωση, και ειδικότερα στη μόνωση επιφανειών με αεροτξέλ πυριτίου, τη δομή του, τις ιδιότητες του και τον τρόπο λειτουργίας του. Στη συνέχεια αναφέρεται η μόνωση με θερμομονωτικά πάνελ κενού, όπως επίσης η δομή και η λειτουργία τους.

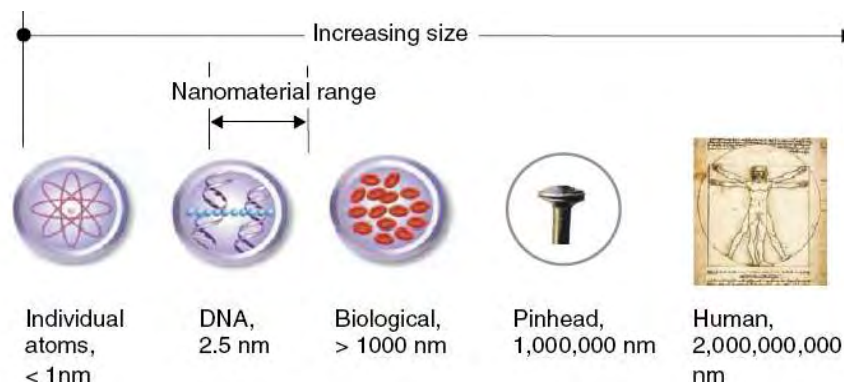
Το *Κεφάλαιο 6* είναι αφιερωμένο στα υλικά μεταβαλλόμενης φάσης. Αναφέρεται η δομή, η λειτουργία αλλά και η χρήση τους στο σήμερα.

Το *Κεφάλαιο 7* έχει να κάνει με την έκθεση του ανθρώπου στα νανοϋλικά. Παρ' όλο που όπως φαίνεται και από τα παραπάνω κεφάλαια έχουν ιδιότητες ιδιαίτερες ευεργετικές για τις κατασκευές, είναι πιθανό να είναι αρκετά επικίνδυνα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΝΑΝΟΎΛΙΚΑ

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η νανοτεχνολογία είναι η επιστήμη που έχει να κάνει με τη μελέτη και την ανάπτυξη νέων τεχνητών υλικών ή συστημάτων των οποίων οι δομές και τα συστατικά παρουσιάζουν νέες, σημαντικά βελτιωμένες φυσικές, χημικές και βιολογικές ιδιότητες, λόγω του μεγέθους της νανοκλίμακας. Με την ανάπτυξη ισχυρών τεχνικών μέσων χαρακτηρισμού όπως το ηλεκτρονικό μικροσκοπιο, σάρωτικό μικροσκοπιο (SEM), μικροσκόπιο με μαγνητισμό και το μικροσκόπιο ατομικής δύναμης, έδωσε νέο έδαφος για να παρατηρήσουμε την άνθιση της νανοτεχνολογίας την τελευταία δεκαετία. (Εικόνα 1)



Εικόνα 2.1 Σύγκριση από το μεμονωμένο άτομο στον άνθρωπο. (Science and Technology Council Committee on Technology, “Nanotechnology: Shaping the World Atom by Atom.” Sept.1999.)

Ο όρος ‘νάνο’ προέρχεται από την ελληνική λέξη νάνος. Χρησιμοποιείται σαν πρόθεμα για οποιαδήποτε μονάδα όπως δευτερόλεπτα ή μέτρα. Ο Drexler (1981) ορίζει ως νάνο την κατασκευή προϊόντων με διαστάσεις και ακρίβεια μεταξύ 0,1 και 100 nm ($1 \text{ nm} = 1 \times 10^{-9} \text{ m}$). Στο διεθνές σύστημα μονάδων (SI), το νάνο- είναι το πρόθεμα που χρησιμοποιείται όταν πολλαπλασιάζεται μια μονάδα κατά 10^{-9} . Όταν συνδέεται με μέτρηση μονάδων μήκους στο SI, αυτό υποδηλώνει ένα το δισεκατομμυριοστό ενός μέτρου, δηλαδή 10^{-9} m , που είναι το μήκος δέκα ατόμων υδρογόνου ή πέντε ατόμων πυριτίου ευθυγραμμισμένα. Μια ανθρώπινη τρίχα έχει πλάτος περίπου 10.000nm, η οποία είναι η μικρότερη διάσταση που μπορούμε να δούμε με γυμνό μάτι.

Αλλά τι σημαίνει να έχουμε μια κλίμακα νανομέτρων;

Αυτό σημαίνει ότι το αντικείμενο (nano) έχει τουλάχιστον μία διάσταση (ύψος, μήκος, πλάτος) κάτω από 100 nm (1-100 nm). Σύμφωνα με τον αριθμό των διαστάσεων που δεν περιορίζονται στη νανοκλίμακα, τα νανοϋλικά μπορούν να ταξινομηθούν ως 0D (νανοσωματίδια), 1D (νανοσωλήνες, νανοφλοιώματα και νανοϊνες), 2D (νανοφίλμ και νανοεπικάλυψη) και 3D (όγκος).

Στις 29 Δεκεμβρίου 1959, ο βραβευμένος με το Νόμπελ Φυσικής, Ρίτσαρντ Φέινμαν, έδωσε την κλασική του ρήση “Υπάρχει άφθονος χώρος στο κάτω μέρος” (There’s Plenty of Room at the Bottom), όπου ήταν και η πρώτη φορά που κάποιος οραματίστηκε τη δυνατότητα δημιουργίας ατόμων ή μορίων για να κατασκευαστούν νέα υλικά με απρόσμενες αλλά ταυτόχρονα και εξαιρετικές ιδιότητες.

Ομιλία του Feynman:

What I want to talk about is the problem of manipulating and controlling things on a small scale ... What are the limitations as to how small a thing has to be before you can no longer mold it? How many times when you are working on something frustratingly tiny like your wife's wrist watch have you said to yourself, "If I could only train an ant to do this!" What I would like to suggest is the possibility of training an ant to train a mite to do this ... A friend of mine (Albert R. Hibbs) suggests a very interesting possibility for relatively small machines. He says that, although it is a very wild idea, it would be interesting in surgery if you could swallow the surgeon. You put the mechanical surgeon inside the blood vessel and it goes into the heart and "looks" around. It finds out which valve is the faulty one and takes a little knife and slices it out.

Παρ’ όλο που ο Feynman δε θα μπορούσε σε καμία περίπτωση να προβλέψει ότι η ομιλία του αυτή θα γινόταν ο κεντρικός άξονας για να αναπτυχθεί το πεδίο της νανοτεχνολογίας, το όραμα του Feynman έδωσε νέα οπτική στην ανάπτυξη της επιστήμης και της μηχανικής.

Πλέον έχουν ανοίξει νέα πολυεπιστημονικά πεδία έρευνας και διατίθεται ένα ευρύ φάσμα νέων υλικών. Ο όρος "νανοτεχνολογία" χρησιμοποιείται για πρώτη φορά το 1974 από τον Norio Taniguchi, όπου αναφέρθηκε στην ακρίβεια της ανεκτικότητας των μηχανημάτων, σε μια επιστήμη στην οποία παρουσιάστηκε μια προσέγγιση από τη κορυφή προς τα κάτω. Το 1981 ο

K. Eric Drexler περιγράφει μια νέα προσέγγιση «από τα κάτω προς τα πάνω», σε αντίθεση με την ήδη υπάρχουσα «από πάνω προς τα κάτω» προσέγγιση που οι Feynman και Taniguchi είχαν συζητήσει νωρίτερα. Αργότερα, το 1986, ο K. Eric Drexler, περιγράφει τις τελικές προσεγγίσεις από τη βάση προς τα πάνω, χρησιμοποιώντας για δεύτερη φορά αυτόν τον όρο.

Πολύ λίγες εφαρμογές νανοτεχνολογίας χρησιμοποιούνται επί του παρόντος στον κατασκευαστικό τομέα, πράγμα που φαίνεται ότι έχει παραμεληθεί κάπως από την έρευνα νανοτεχνολογίας μέχρι σήμερα. Μια αναζήτηση των όρων «νανοτεχνολογία» και σε περιοδικά που απαριθμούνται στο Scopus αποκάλυψε μόνο άρθρα σχετικά με τσιμέντο και σκυρόδεμα. Ωστόσο, ο αριθμός είναι πολύ χαμηλός σε σύγκριση με άλλους σημαντικούς τομείς της τρέχουσας έρευνας. Επιπλέον, απαιτούνται πολύ περισσότερες επεξεργασίες για να εξασφαλιστεί ότι οι υψηλής ποιότητας έρευνες σχετικά με τη χρήση της νανοτεχνολογίας στις εφαρμογές τσιμέντου και σκυροδέματος μπορούν να φτάσουν στην παγκόσμια αγορά. Είναι κατανοητό ότι η έρευνα σχετικά με τα νανοτεχνολογικά προϊόντα στην σημερινή οικονομικά καθοδηγούμενη κοινωνία έχει επικεντρωθεί μέχρι τώρα σε περιοχές υψηλού κέρδους.

2.1.1 ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗΣ ΝΑΝΟΥΪΚΩΝ

Από την αρχή της εμφάνισης της νανοτεχνολογίας στα τέλη της δεκαετίας του '60, αναπτύχθηκε η ιδέα και η έννοια της παραγωγής νανοϋλικών. Το μέγεθος στα νανοσωματίδια έχει μεγαλύτερη επίδραση στο υλικό σε σύγκριση με τα υλικά της κλίμακας 'μικρο'. Ο Gutierrez ανέφερε ότι όλα τα υλικά μπορούν να μετατραπούν σε νανοσωματίδια. Οι πρόσφατες εξελίξεις σχετικά με τα συστήματα ανίχνευσης και μέτρησης για τον χαρακτηρισμό και τη δοκιμή υλικών σε νανοκλίμακα οδήγησαν σε ραγδαία ανάπτυξη υλικών με βάση τη νανοτεχνολογία σε τομείς όπως πολυμερή, πλαστικά, ηλεκτρονικά, αυτοκινητοβιομηχανία και ιατρική. Η επιτυχία του σχηματισμού σωματιδίων είναι όταν μπορεί να επηρεάσει την καθαρότητα ή τη βασική χημική σύνθεση των αρχικών υλικών. Από αυτό, αναπτύχθηκαν δύο μέθοδοι (Εικόνα 2.5).

I. ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗΣ ΑΠΟ ΤΑ ΠΑΝΩ ΠΡΟΣ ΤΑ ΚΑΤΩ (TOP TO DOWN)

Η πρώτη προσέγγιση είναι από πάνω προς την κάτω -top to down- στην οποία η βασική ιδέα είναι ότι από το αρχικό μέγεθος του νανοϋλικού φτιάχνεται ένα ακριβές αντίγραφο του εαυτού του αλλά μικρότερο. Συνεπώς αυτή η διαδικασία θα παράγει συνεχώς το ίδιο υλικό σε δομή αλλά σε συνεχώς μικρότερο μέγεθος μέχρι το υλικό να φτάσει τη νανοκλίμακα. Η ιδέα της προσέγγισης αυτής εφαρμόζεται στα νανο- και μικρο-ηλεκτρομηχανικά συστήματα (NEMS και MEMS) όπου παράγονται συσκευές μικρότερες από 1 mm^2 , που έχουν την δυνατότητα να αλληλοεπιδρούν με μικροσένσορες. Ένα ενδιαφέρον παράδειγμα είναι η παραγωγή, από την Nirpondenso Co. ενός αυτοκινήτου (Εικόνα 2.2) με διαστάσεις 4800 μm μήκους, 1800 μm πλάτους, and 1800 μm ύψους. Κάθε λάστιχο έχει διάμετρο 690 μm και πλάτος 170 μm , ενώ η πινακίδα έχει πάχος 10 μm . Το αυτοκίνητο αποτελείται από 24 μέρη, λαμβάνοντας υπόψιν τις ρόδες, τους άξονες, τις αντλίες και όλα τα άλλα μικρομηχανικά μέρη. Το αυτοκίνητο κινείται κανονικά με ταχύτητα 1cm/s με τάση 3V και 20 mA.



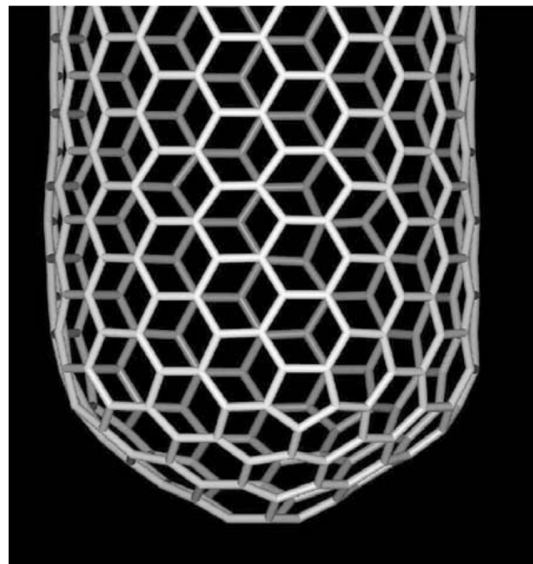
Εικόνα 2.2 Αυτοκίνητο σε διαστάσεις μερικών μm από την Nirpondenso Co. (Schodek, Ferreira, Ashby (2009))

II. ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΑΠΟ ΤΑ ΚΑΤΩ ΠΡΟΣ ΤΑ ΠΑΝΩ (BOTTOM TO UP)

Η δεύτερη από την προσέγγιση από κάτω προς τα πάνω -bottom to up-στην οποία τα υλικά κατασκευάζονται από άτομα ή μόρια και συναρμολογούνται μεγαλύτερες δομές. Υπάρχουν

τρεις θεωρίες που λειτουργούν με βάση αυτό το μοντέλο: η υπερμοριακή (1) και μοριακή χημεία (2) και η βιοτεχνολογία (3). Οι πρώτες δύο τεχνολογίες βασίζονται στην αυτοσυναρμολόγηση. Αυτό το στάδιο παραγωγής νανοϋλικών περιλαμβάνει τον σχεδιασμό των μορίων ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή δομή. Το πλεονέκτημα της αυτοσυναρμολόγησης είναι ότι επιλύει το δύσκολο κομμάτι της σύνθεσης των μορίων, αφού οι σύνδεσμοι κατασκευάζονται με βιολογικό τρόπο σε ανόργανες, όμως, δομές.

Ένα από τα καλύτερα παραδείγματα σε αυτή την προσέγγιση με αυτοσυναρμολόγηση είναι οι νανοσωλήνες άνθρακα. (Εικόνα 2.3) Οι νανοδομές αυτές έχουν συντεθεί από άτομα άνθρακα (C) και πετυχαίνουν ένα κυλινδρικό σχήμα, με διάμετρο περίπου 1,4 nm.



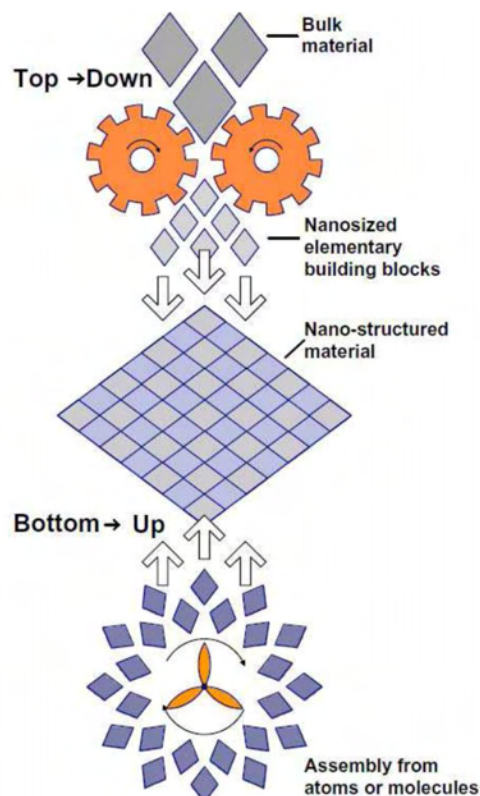
Εικόνα 2.3 Προσομοίωση σε υπολογιστή νανοσωλήνα άνθρακα διαμέτρου 1.4nm (Schodek, Ferreira, Ashby (2009))

Άλλο ένα σημαντικό παράδειγμα με τέτοια προσέγγιση είναι η δημιουργία κβαντικών κουκίδων (quantum dots). Κβαντικές κουκίδες είναι κρύσταλλοι που συντίθενται από μερικές εκατοντάδες άτομα. Λόγω των ηλεκτρονίων, οι κβαντικές κουκίδες χαρακτηρίζονται από διαφορετικά επίπεδα ενέργειας και υπάρχουν σε ένα μόνο μήκος κύματος φωτός (Εικόνα 2.4). Η τυπική διαδικασία περιλαμβάνει μια χημική αντίδραση μεταξύ μεταλλικών ιόντων, κάδμιο για παράδειγμα, και μορίων που έχουν την ικανότητα να δίνουν ιόντα σεληνίου. Η αντίδραση αυτή παράγει

κρυστάλλους σεληνιακού καδμίου (CdSe). Το μέγεθος και το σχήμα των κρυστάλλων καθορίζεται από την ακτίνα των μορίων και είναι σημαντικά γιατί καθορίζουν τις ηλεκτρονικές, μαγνητικές και οπτικές ιδιότητες.



Εικόνα 2.4 Κρύσταλλοι σεληνιακού καδμίου σε διαφορετικό μέγεθος και σχήμα εκθέτονται σε φως διαφορετικών μηκών κύματος. (Schodek, Ferreira, Ashby (2009))



Εικόνα 2.5 Top-down και bottom-up προσεγγίσεις, (Sanchez, Sobolev (2010)).

2.2 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΝΑΝΟΥΛΙΚΩΝ

Για να γίνει αντιληπτή η διαφορετικότητα των νανοϋλικών, είναι χρήσιμο να κατηγοριοποιηθούν με βάση τις διαστάσεις τους. Ταξινομούνται στις εξής κατηγορίες:

2.2.1 ΜΗΔΕΝΙΚΗΣ ΔΙΑΣΤΑΣΗΣ (0-D) - ΝΑΝΟΣΩΜΑΤΙΔΙΑ

Τα μηδενικής διάστασης νανοϋλικά είναι υλικά όπου όλες οι διαστάσεις τους μετριοούνται στην νανοκλίμακα. Τα πιο συχνά μηδενικής διάστασης νανοϋλικά είναι τα νανοσωματίδια, τα οποία έχουν τις εξής ιδιότητες:

- Είναι άμορφα ή έχουν κρυσταλλική δομή
- Έχουν απλή κρυσταλλική ή πολυκρυσταλλική δομή
- Συντίθενται από απλά πολυχημικά στοιχεία
- Υπάρχουν σε ποικιλία σχημάτων και μορφών
- Υπάρχουν ξεχωριστά ή σε πλέγμα
- Μπορεί να είναι μεταλλικά, κεραμικά ή πολυμερικά

2.2.2 ΜΙΑΣ ΔΙΑΣΤΑΣΗΣ (1-D) - ΝΑΝΟΣΩΛΗΝΕΣ, ΝΑΝΟΦΛΟΙΩΜΑΤΑ ΚΑΙ ΝΑΝΟΪΝΕΣ

Τα μίας διάστασης νανοϋλικά διαφέρουν από τα μηδενικής, στο ότι έχουν μία διάσταση εκτός νανοκλίμακας. Αυτή η διαφορά οδηγεί σε μακρόστενα νανοϋλικά σχήματος 'βελόνας'. Περιλαμβάνει νανοσωλήνες, νανοφλοιώματα και νανοϊνες. Ωστόσο, όπως και τα μηδενικής διάστασης έχουν τις εξής ιδιότητες:

- Είναι άμορφα ή έχουν κρυσταλλική δομή
- Έχουν απλή κρυσταλλική ή πολυκρυσταλλική δομή
- Χημικά απλά ή σύνθετα
- Αυτόνομα υλικά ή ενσωματωμένα σε άλλο μέσο

- Μπορεί να είναι μεταλλικά, κεραμικά ή πολυμερικά

2.2.3 ΔΥΟ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ (2-D) - ΝΑΝΟΦΙΛΜ ΚΑΙ ΝΑΝΟΕΠΙΚΑΛΥΨΕΙΣ

Τα νανοϋλικά δύο διαστάσεων είναι πιο δύσκολο να κατηγοριοποιηθούν, αλλά αν υποθέσουμε ότι χαρακτηρίζονται όπως τα προηγούμενα, είναι υλικά με τις δύο διαστάσεις εκτός της νανοκλίμακας. Έτσι επιτυγχάνεται ένα σχήμα 'πιάτου'. Νανοϋλικά δύο διαστάσεων είναι τα νανοφίλμ και οι νανοεπικαλύψεις. Έχουν τις εξής ιδιότητες :

- Είναι άμορφα ή έχουν κρυσταλλική δομή
- Συντίθενται από διάφορες χημικές ενώσεις
- Χρησιμοποιούνται ως μονή επίστρωση ή για πολλαπλές επιστρώσεις
- Ενσωματώνεται σε υλικό περιβάλλοντος πλέγματος
- Μπορεί να είναι μεταλλικά, κεραμικά ή πολυμερικά

2.2.4 ΤΡΙΩΝ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ (3-D) - ΝΑΝΟΚΡΥΣΤΑΛΛΟΙ ΚΑΙ ΝΑΝΟΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ

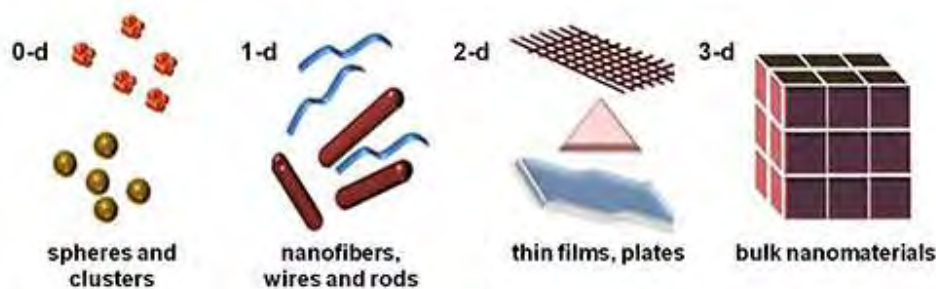
Τα τριών διαστάσεων νανοϋλικά είναι επίσης γνωστά και ως νανοϋλικά όγκου, και είναι σχετικά δύσκολο να κατηγοριοποιηθούν. Οι παράμετροι που εφαρμόστηκαν και παραπάνω ισχύουν και εδώ. Άρα, τα τριών διαστάσεων νανοϋλικά είναι υλικά που δεν έχουν καμία καθορισμένη διάσταση στη νανοκλίμακα. Αυτά τα υλικά έχουν διαστάσεις πάνω από 100 nm.

Αλλά αναρωτιέται κανείς γιατί τα υλικά αυτά λέγονται νανοϋλικά;

Ο λόγος που ταξινομούνται ακόμα στα νανοϋλικά είναι ο εξής: Παρά τις διαστάσεις τους, τα υλικά αυτά έχουν μια νανοκρυσταλλική δομή ή περιέχουν στοιχεία σε νανοκλίμακα. Η νανοκρυσταλλική δομή συντίθεται από ένα αριθμό από κρυστάλλους που βρίσκονται σε νανοκλίμακα, αλλά διαφέρουν στον προσανατολισμό. Τα τριών διαστάσεων νανοϋλικά περιλαμβάνουν νανοκαλώδια, νανοσωλήνες, όπως και πολυεπιφανειακές επικαλύψεις. (Εικόνα 3)

Έχουν τις εξής ιδιότητες :

- Είναι άμορφα ή έχουν κρυσταλλική δομή
- Είναι χημικά απλά ή σύνθετα
- Συνθέτουν υλικά
- Συνθέτουν νανοεπιστρώσεις
- Μπορεί να είναι μεταλλικά, κεραμικά ή πολυμερικά



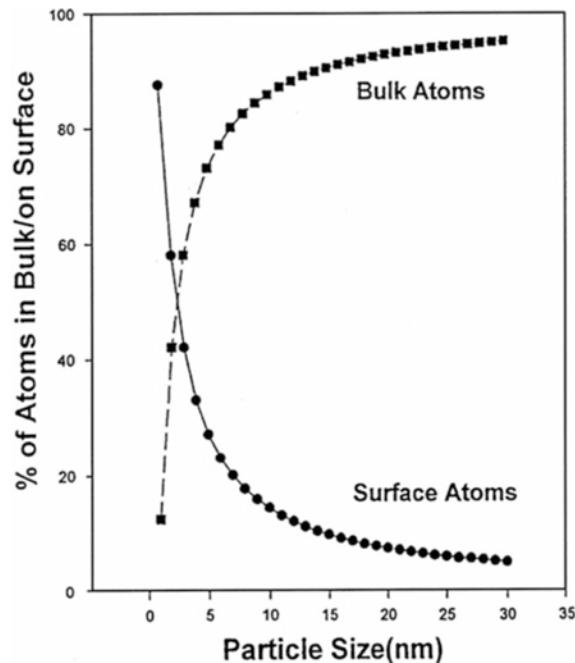
Εικόνα 2.6 Ταξινόμηση νανοϋλικών βάσει των διαστάσεων
(<https://shodhganga.inflibnet.ac.in/bitstream/10603/119265/3/chapter%20i.pdf>)

2.3 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ

Τα νανοσωματίδια έχουν τουλάχιστον τη μία από τις διαστάσεις τους στην κλίμακα μεγέθους 1-100 nm. Καθώς το μέγεθος των σωματιδίων μειώνεται, μια μεγαλύτερη αναλογία ατόμων βρίσκεται στην ελεύθερη επιφάνεια συγκριτικά με εκείνα τα άτομα στον όγκο του, με αποτέλεσμα οι ιδιότητες να είναι σημαντικά διαφορετικές από τις αντίστοιχες μεγαλύτερες κλίμακες. Πολλά σωματίδια νανοκλίμακας θεωρούνται επί του παρόντος ως πρόσθετα νανοκλίμακας με στόχο τη βελτίωση της μακροσκοπικής απόδοσης ή την προσθήκη λειτουργικότητας στο υλικό. Μεταξύ των υποψηφίων είναι η νανοπυρίτιο, το διοξείδιο του τιτανίου, οι νανοσωλήνες άνθρακα, ο ασβεστόλιθος νανοκλίμακας, τα νανοσωματίδια αιματίτη, οι χρωστικές ουσίες, τα σωματίδια αργίλου κλπ.

2.3.1 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΛΟΓΩ ΜΕΓΕΘΟΥΣ

Οι νανοδομές και τα νανοϋλικά έχουν μεγάλο κλάσμα ατόμων επιφάνειας ανά μονάδα όγκου. Εάν κάποιος διαχωρίσει διαδοχικά ένα μακροσκοπικό αντικείμενο στη νανοκλίμακα, η αναλογία των επιφανειακών ατόμων προς τα εσωτερικά άτομα αυξάνεται εκθετικά (Εικόνα 2.7). Ας εξετάσουμε ένα σφαιρικό μικροσωματίδιο με διάμετρο 10 nm. Αν τώρα το διασπάσουμε σε πολλά νανοσωματίδια με διάμετρο 10 nm, θα έχουμε 10^9 νανοσωματίδια. Η αναλογία των ακτινών είναι 10^3 , ενώ η αναλογία των επιφανειών είναι 10^6 και η ειδική επιφάνεια αυξάνεται κατά ένα συντελεστή 10^3 !



Εικόνα 2.7 Η αναλογία όγκου / επιφάνειας των ατόμων με τη διάμετρο του μεγέθους των σωματιδίων (Goncalves (2015))

2.3.2 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΛΟΓΩ ΣΧΗΜΑΤΟΣ

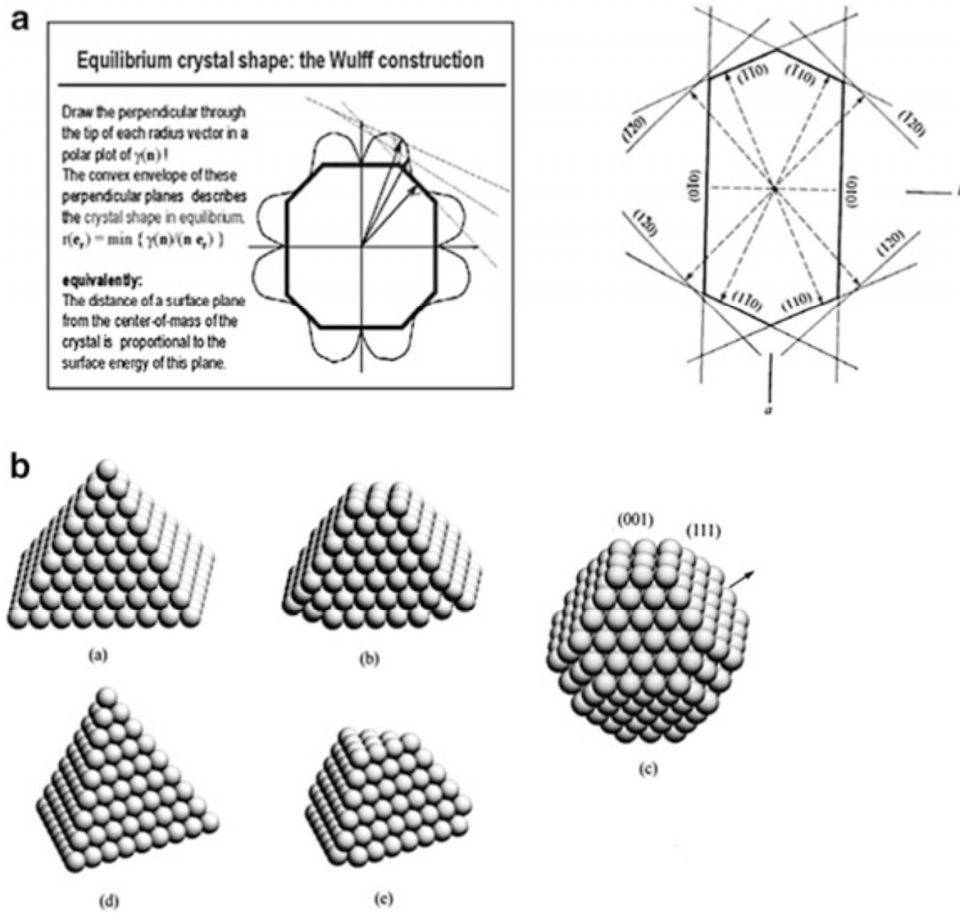
Κατά την εξέταση των νανοϋλικών, πρέπει επίσης να ληφθεί υπόψη το σχήμα, δεδομένου ότι συμβάλλει στην αξία της συγκεκριμένης επιφάνειας. Είναι γεγονός ότι οι ιδιότητες των νανοϋλικών εξαρτώνται από το μέγεθος και το σχήμα (διατηρώντας σταθερή τη σύνθεση και τον αριθμό ατόμων / μορίων), που τους δίνει μεγάλες δυνατότητες.

Μία από τις κύριες έννοιες στην επιφανειακή επιστήμη και τη νανοτεχνολογία είναι η επιφανειακή ενέργεια ή η επιφανειακή τάση, γ . Σε οποιοδήποτε υλικό, οι δεσμοί επηρεάζονται από το σχηματισμό νέων επιφανειών, όπου ορισμένοι δεσμοί σπάζονται ή τροποποιούνται. Ως αποτέλεσμα, η μέση ενέργεια των επιφανειακών ατόμων θα αυξηθεί με την επιφάνεια. Η επιφανειακή ενέργεια ορίζεται ως η ενέργεια που παρέχεται για να φτιάξουμε μια επιφάνεια μονάδας, A , σε θερμοκρασία T , όγκο V , και χημικό δυναμικό μ , σταθερές:

$$\gamma = \left(\frac{\partial H}{\partial A}\right)_{T,V,\mu} \quad (1)$$

όπου H είναι η ελεύθερη ενέργεια του Helmholtz.

Η επιφανειακή ενέργεια είναι ανάλογη του αριθμού των διατομικών δεσμών που διασπώνται στην επιφάνεια, σε σχέση με την ατομική επίπεδη πυκνότητα. Στην περίπτωση των κρυσταλλικών στερεών, η ατομική επίπεδη πυκνότητα εξαρτάται από το κρυσταλλογραφικό σχέδιο, δηλαδή την επιφανειακή ενέργεια. Σε πολυκρυσταλλικά υλικά η ανισοτροπία είναι τέτοια ώστε η ισορροπημένη μορφή ενός κρυστάλλου να καθορίζεται από τις επιφανειακές ενεργειακές τιμές των διαφορετικών επιφανειών. Η ανισοτροπία ενός κρυστάλλου μπορεί να μελετηθεί μέσα από το διάγραμμα της επιφανειακής ενέργειας γ . Αν το γ είναι ισοτροπικό, η μορφή ισορροπίας είναι προφανώς σφαίρα. Όταν το γ είναι ανισότροπο, η μορφή ισορροπίας δεν είναι σφαίρα, αλλά πολύεδρο. Το ακριβές σχήμα πολυέδρου μπορεί να ληφθεί μέσω του διαγράμματος Wulff. (Εικόνα 2.8)

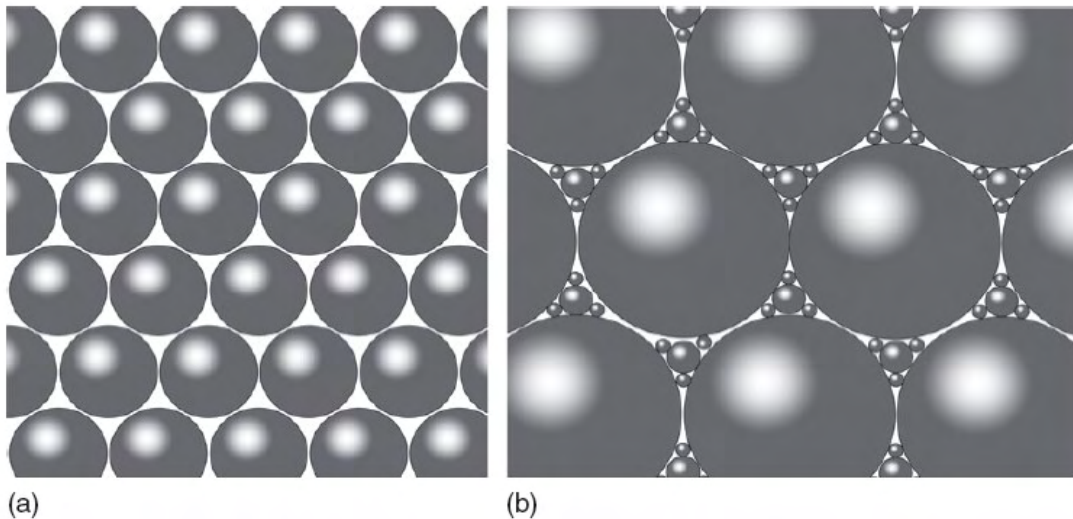


Εικόνα 2.8 Wulff διάγραμμα κατασκευής (α) και εξωτερικό σχήμα του επιταξιακής σωματιδίων (β): (β, α) (001) επιταξιακή σωματίδιο με σχήμα πυραμίδας, (β, b) κολοβωμένη (001) επιταξιακή σωματιδίου, (β, γ) Wulff πολύεδρο, (b, d) (111) επιταξιακό σωματίδιο με κανονικό. (Goncalves (2015))

2.6 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΠΟΥ ΕΞΑΡΤΩΝΤΑΙ ΑΠΟ ΤΟ ΜΕΓΕΘΟΣ

Αν και τα μικροϋλικά χρησιμοποιούνται καθημερινά, δεν δημιουργούν το ενδιαφέρον που κάνουν τα νανοϋλικά. Ο λόγος για αυτό είναι ότι οι ιδιότητες των μικροϋλικών είναι ουσιαστικά οι κοινές ιδιότητες. Τα νανοϋλικά αντιπροσωπεύουν την σύνδεση μεταξύ της παραδοσιακής φυσικής και της κβαντικής μηχανικής. Σε αυτή την κλίμακα, οι φυσικές, χημικές και βιολογικές ιδιότητες των υλικών διαφέρουν κατά θεμελιώδη τρόπο από τις ιδιότητες είτε του μεμονωμένου

ατόμου είτε του κοινού υλικού. Αυτό καθιστά πολύ πιο δύσκολη την πρόβλεψη των σχέσεων αιτίας-αποτελέσματος και εισάγει φαινόμενα όπως η κβαντική σήραγγα, η υπέρθεση και η εμπλοκή. Ως αποτέλεσμα, το υλικό στη νανοκλίμακα μπορεί να παρουσιάζει εκπληκτικά χαρακτηριστικά που δεν είναι εμφανή σε μεγάλες κλίμακες (Εικόνα 2.9).

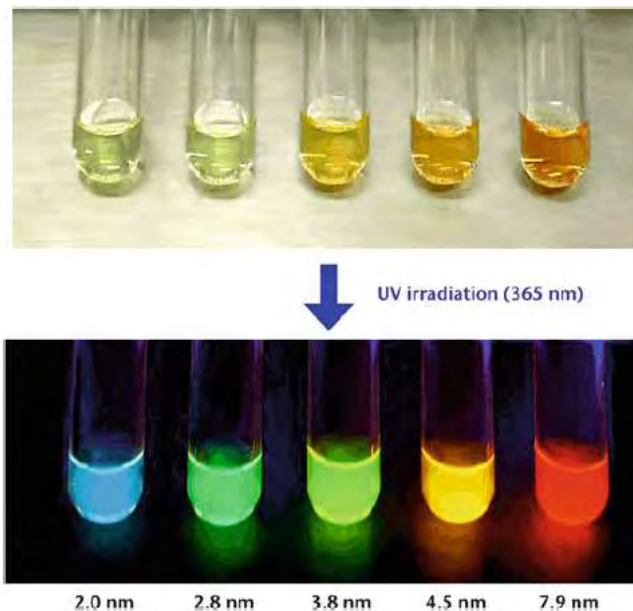


Εικόνα 2.9 a) Σφαίρες ενός μεγέθους. b) Η πυκνότητα του συστήματος μπορεί να αυξηθεί σημαντικά χρησιμοποιώντας ένα αρχικό μείγμα με κατανομή μεγέθους των σωματιδίων. (Pacheco-Torgal, Diamanti, Nazari et al. (2013))

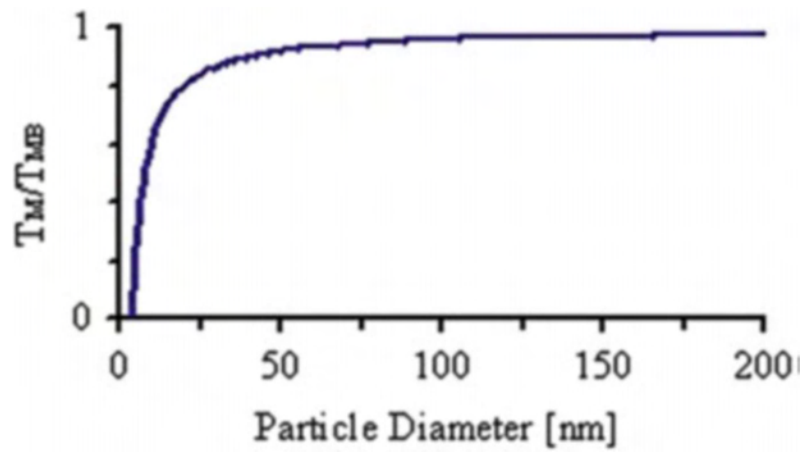
Οι κρυσταλλικές δομές που υπάρχουν στα μακρομόρια είναι επίσης παρούσες σε νανοκλίμακα, αλλά τα σιδηροηλεκτρικά και σιδηρομαγνητικά υλικά μπορούν να χάσουν την σιδηροηλεκτρική και τη σιδηρομαγνητισμό τους όταν μειώνονται σε νανοκλίμακα (κάτι που συμβαίνει με νανοσωματίδια χαλκού με μεγέθη κάτω των 70 nm ή νανοσωματίδια σιδήρου κάτω των 15 nm). Οι αγωγοί και οι ημιαγωγοί μπορούν να γίνουν μονωτήρες όταν μία από τις χαρακτηριστικές τους διαστάσεις είναι της τάξης των νανομέτρων (ο χαλκός είναι ένα από αυτά τα παραδείγματα).

Τα άτομα άνθρακα με τη μορφή ενός νανοσωλήνα εμφανίζουν αντοχές εφελκυσμού 100 φορές μεγαλύτερες από εκείνες του κελύφους και μπορούν να είναι μεταλλικές ή ημιαγωγικές ανάλογα με τη διαμόρφωσή τους. Ο στερεός χρυσός δεν παρουσιάζει καταλυτικές ιδιότητες, αλλά οι νανοκρύσταλλοι Au είναι εξαιρετικοί καταλύτες σε χαμηλές θερμοκρασίες (όταν η ακτίνα τους είναι ίση ή μικρότερη από 5 nm).

Τα νανოსωματίδια χρυσού και CdSe μπορεί να εμφανιστούν πορτοκαλί, πορφυρό, κόκκινο ή πρασινωπό, ανάλογα με το συγκεκριμένο μέγεθος των σωματιδίων (Εικόνα 2.10). Το σημείο τήξης των νανοκρύσταλλων είναι σημαντικά χαμηλότερο από το σημείο τήξης του στερεού χρυσού (η μείωση μπορεί να φθάσει τα 1.000C!) . Το σημείο τήξης του χρυσού (σε όγκο) 1.064 C πέφτει στους 750- 800 C για νανოსωματίδια των 5 nm (Εικόνα 2.11). Η σταθερά του πλέγματος μπορεί να πέσει και ακόμη και το χρώμα του υλικού μπορεί να αλλάξει ανάλογα με τη νανοδιασπορά (για παράδειγμα, τα νανოსωματίδια χρυσού μπορεί να εμφανιστούν πορτοκαλί, πορφυρό, κόκκινο ή πρασινωπό, ανάλογα με το συγκεκριμένο μέγεθος σωματιδίων). Το διοξείδιο του τιτανίου και το οξείδιο του ψευδαργύρου εμφανίζονται λευκά όταν είναι κατασκευασμένα από μακροσκοπικά σωματίδια, αλλά γίνονται ημιδιαφανή όταν γειώνονται στη νανοκλίμακα.



Εικόνα 2.10 Μέγεθος επίδρασης στην φωτοφωταύγεια μήκος κύματος του CdSe νανοςωματιδίων (λ_{ex} :365 nm). (Goncalves (2015))



Εικόνα 2.11 Μια κανονικοποιημένη καμπύλη τήξης για το χρυσό ως συνάρτηση της διαμέτρου των νανοσωματιδίων. Η χύδη θερμοκρασία τήξεως και η θερμοκρασία τήξεως του σωματιδίου υποδηλώνουν T_{MB} και T_m , αντιστοίχως (Goncalves (2015))

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 - ΕΠΙΣΤΡΩΣΕΙΣ ΜΕ ΝΑΝΟΣΩΜΑΤΙΔΙΑ

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η εφαρμογή της νανοτεχνολογίας επέτρεψε στον κατασκευαστικό κλάδο να προχωρήσει σημαντικά σε θέματα που μέχρι πριν από μερικά χρόνια θεωρήθηκαν τελειωμένα και ολοκληρωμένα. Αυτό ισχύει για συστήματα επικάλυψης και τη διακόσμηση. Τα τελευταία χρόνια σημειώθηκε σημαντική πρόοδος στην ανάπτυξη νέων σχεδίων και τεχνολογιών, τα οποία παλιότερα θεωρήθηκαν αδύνατα να επιτευχθούν.

Όσον αφορά το επιφανειακό επίχρισμα των δομικών προϊόντων όπως το τσιμέντο, το σκυρόδεμα, το κεραμικό, το ξύλο και άλλα φυσικά προϊόντα, χρησιμοποιήθηκαν ορισμένα νανοσωματίδια ως πρόσθετα. Τα σωματίδια αυτά προστίθενται σε μικρές ποσότητες και δίνουν ξεχωριστές ιδιότητες στα χρώματα και τα βερνίκια που χρησιμοποιούνται. Η προσθήκη νανοσωματιδίων οξειδίου του ψευδαργύρου (ZnO) βελτιώνει σημαντικά την απόδοση της επίστρωσης έναντι της υπεριώδους ακτινοβολίας, ενώ η προσθήκη αλουμίνιου (Al_2O_3) και πυριτίου (SiO_2) βελτιώνει την ποιότητα των επιστρώσεων με αυτοκαθαριζόμενες και αντι-γκράφιτι ιδιότητες (Εικόνα 3.1) και οικολογικό διαλύτη που στεγνώνει σε περίπου τρία δευτερόλεπτα, αποδεικνύονται πολύ φθηνότερα από τα συμβατικά χρώματα



Εικόνα 3.1 Το ιστορικό μνημείο στο Βερολίνο (Brandenburg Gate) προστατεύεται με αντι-γκράφιτι ιδιότητες με μια επίστρωση νανοϋλικών (Leydecker (2008))

Τα επιχρίσματα με χρήση νανοϋλικών είναι ευρέως διαθέσιμα, τόσο στην αγορά για οικιακή χρήση όσο και για τους επαγγελματίες. Επιπλέον, μπορούν να αγοραστούν έτοιμα προϊόντα όπως δάπεδα, τουαλέτες και στέγες που έχουν προεπεξεργαστεί με νανοεπιστρώσεις. Κατά τους Lippy και West το 2015 ,τους van Broekhuizen κ.α. το 2011 και τους West κ.α. το 2016 , οι επιστρώσεις είναι τα κυρίαρχα και πιο πολυάριθμα νανοπροϊόντα, που αντιπροσωπεύουν πάνω από τις μισές τρέχουσες και προβλεπόμενες δαπάνες για δομικά νανοϋλικά. Ωστόσο, η πραγματική χρήση σε σχέση με τα προϊόντα που δεν περιέχουν νανοϋλικά παραμένει χαμηλή, με εκτιμήσεις που υποδηλώνουν ότι δεν αντιπροσωπεύουν περισσότερο από το 1% της αγοράς επικαλύψεων στην Ευρώπη. Τα πιο συνήθη νανοϋλικά που χρησιμοποιούνται στις επικαλύψεις περιλαμβάνουν διοξείδιο του πυριτίου, διοξείδιο τιτανίου, άργυρο και άνθρακα.

3.2 ΔΙΟΞΕΙΔΙΟ ΤΟΥ ΠΥΡΙΤΙΟΥ

Το διοξείδιο του πυριτίου χρησιμοποιείται σε διάφορες μορφές για να παρέχει υδρόφοβη ικανότητα, αντοχή στην τριβή και υπεριώδη προστασία. Οι Grebler κ.α. το 2010 περιγράφουν την επίδραση των φύλλων του λωτού, όπου μια επιφάνεια που φαίνεται ομαλή καλύπτεται στην πραγματικότητα με μικροσκοπικές προεξοχές που εμποδίζουν την προσκόλληση σταγόνων νερού στην επιφάνεια . Άλλες επικαλύψεις με βάση το διοξείδιο του πυριτίου έχουν διαφορετικούς τρόπους δράσης. Η Εικόνα 3.2 απεικονίζει την υψηλή γωνία επαφής των σταγόνων ύδατος σε μια επιφάνεια σκυροδέματος που έχει επικαλυφθεί και είναι πλέον υπερευδροφοβική.



Εικόνα 3.2 Σταγόνες νερού σε υπερευδροφοβική επιφάνεια σκυροδέματος (Arabzadeha, Ceylan, Kimc et al. (2017))

3.3 ΔΙΟΞΕΙΔΙΟ ΤΟΥ ΤΙΤΑΝΙΟΥ

Το διοξείδιο του τιτανίου χρησιμοποιείται για τις φωτοκαταλυτικές του επιδράσεις (Εικόνα 3.3). Υπό την παρουσία υπεριώδους φωτός, οι ρύποι και τα σωματίδια καθώς και οι ρύποι όπως τα οξείδια του αζώτου διασπώνται σε νερό, διοξείδιο του άνθρακα και νιτρικά άλατα. Ταυτόχρονα, η υδρόφιλη επίδραση της επικάλυψης επιτρέπει να διασκορπιστεί το νερό πάνω στην επιφάνεια και να απομακρυνθούν τα απορρίμματα . Με αυτόν τον τρόπο, και σύμφωνα με τους Chen και Roop το 2009 και Shen κ.α. το 2012 , οι επιφάνειες γίνονται «αυτοκαθαριζόμενες» και υπάρχει επίσης η δυνατότητα μείωσης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης.



Εικόνα 3.3 Σταγόνες νερού σε ένα τούβλο από σκυρόδεμα με επίστρωση από νάνο-υλικό, που δείχνει πως οι σταγόνες σχηματίζουν σχεδόν σφαιρικό σχήμα (Jones, Gibb, Goodier et al. (2017))

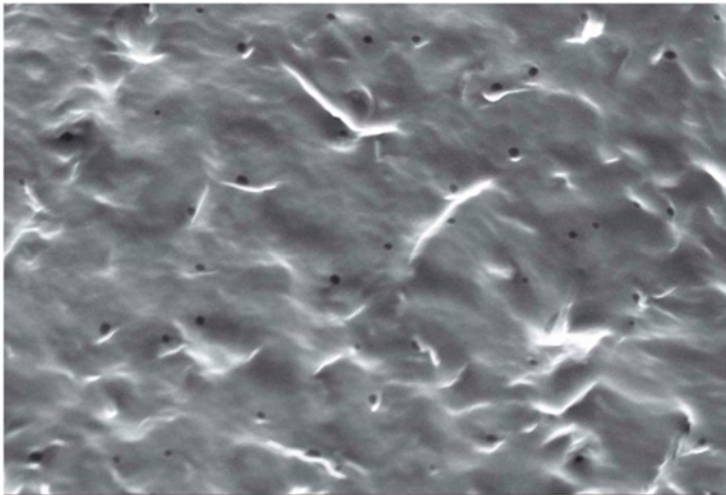
3.4 ΑΡΓΥΡΟΣ

Ο άργυρος προστίθεται στις επικαλύψεις για τα αντιμικροβιακά αποτελέσματά του και διατίθεται στην αγορά ιδιαίτερα για χρήση σε περιβάλλοντα προετοιμασίας και παρασκευής τροφίμων καθώς και στην υγεία. Είναι το νανοϋλικό που αναγράφεται πιο συχνά ως το ενεργό συστατικό των εμπορικών προϊόντων , καθώς επίσης και το νανοϋλικό που συνήθως αναφέρεται ή και αναγνωρίζεται από τους εργάτες στον τομέα των κατασκευών.

3.5 ΝΑΝΟΎΛΙΚΑ ΜΕ ΑΝΘΡΑΚΑ

Τα νανοϋλικά με άνθρακα μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε επικαλύψεις. Έχει αναγνωριστεί μία επικάλυψη με βάση το CNT (νανοσωλήνες άνθρακα) που διατίθεται στην αγορά για την

ικανότητά της να μειώνει τη διάβρωση. Είναι ακριβό και πιθανό να χρησιμοποιηθεί μόνο σε εξειδικευμένες εφαρμογές. Τα CNTs μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για την αντοχή τους στη φωτιά και την ικανότητά τους να μειώνουν τη ρύπανση σε θαλάσσια περιβάλλοντα, αλλά είναι δύσκολο να βρεθούν αποδείξεις για εμπορικά διαθέσιμα προϊόντα αυτού του είδους. Άλλα νανοϋλικά με βάση τον άνθρακα χρησιμοποιούνται ευρύτερα, όπως ο μαύρος άνθρακας διατίθεται για ηλεκτρομαγνητική θωράκιση. Επίσης, χρησιμοποιείται το γραφένιο, αν και, όπως δείχνει το SEM ενός προϊόντος επικάλυψης στην Εικόνα 3.4, τα σωματίδια είναι σχετικά μεγάλα, πάχους περίπου 40 nm και μερικά μικρά στα άλλα δύο επίπεδα. Επομένως, εμπίπτουν στον τυπικό ορισμό του εξαιρετικά λεπτού γραφίτη και όχι στο πραγματικό γραφένιο, το οποίο τυπικά



δεν θα πάει πάνω από 3 ή 4 nm.

Εικόνα 3.4 SEM εικόνα ενός προϊόντος που διατίθεται στο εμπόριο ως «graphene», αλλά περιγράφεται με μεγαλύτερη ακρίβεια ως εξαιρετικά λεπτός γραφίτης ή νανογραφίτης (Scho-dek, Ferreira, Ashby (2009))

Η έλλειψη σχετικών πληροφοριών στα αρχεία δεδομένων ασφαλείας καθιστά εξαιρετικά δύσκολη την ταυτοποίηση του ακριβούς νανοϋλικού που χρησιμοποιείται σε μεμονωμένα προϊόντα. Ο πίνακας 3.1 παρέχει ορισμένα παραδείγματα επικαλύψεων με νανοϋλικά χρησιμοποιώντας πληροφορίες που είναι διαθέσιμες δημοσίως, παρόλο που δεν είναι πάντα εύκολο να εντοπιστούν. Δεν υπάρχουν πληροφορίες ελεύθερα διαθέσιμες για τις αναλογίες των νανοϋλικών που χρησιμοποιούνται. Για παράδειγμα, μια επισκόπηση από τους Munafò et al. (2015) των επικαλύψεων με βάση το τιτάνιο που χρησιμοποιούνται στη διατήρηση της πέτρας παρουσιάζει συγκεντρώσεις που κυμαίνονται από 0,3 έως 10% (κατά βάρος) και επίσης δείχνει ότι τα προϊόντα διαφέρουν ως προς την αποτελεσματικότητά τους όσον αφορά τις αυτοκαθαριζόμενες, τις μικροβιοκτόνες επιδράσεις, τις αντιρρυπαντικές επιδράσεις και μακροζωία. Άλλες μελέτες

έχουν δείξει μεταβολές στην αποτελεσματικότητα των επικαλύψεων στη συντήρηση του ξύλου και στο βακτηριοκτόνο αποτέλεσμα του νανοάργυρου. Αυτή η έλλειψη συνέπειας δεν περιορίζεται στην κατασκευή – ο νανοάργυρος προστίθεται στις κάλτσες για να παρέχει αντιμυκητικές και αντιμικροβιακές ιδιότητες, αλλά οι ποσότητες που χρησιμοποιήθηκαν έχουν αποδειχθεί, σύμφωνα με τους Benn και Westerhoff, το 2008, ότι ποικίλουν 700 φορές μεταξύ διαφορετικών εμπορικών σημάτων .

Πίνακας 3.1 Νανοϋλικά επικαλύψεων

Νανοϋλικό	Ιδιότητες	Διαθεσιμότητα και διάδοση
Πυρίτιο (διοξείδιο του πυριτίου, άλλες μορφές εμφάνισης)	<ul style="list-style-type: none"> • Υδρόφοβη ικανότητα • Εύκολος καθαρισμός • Σκληρότητα • Αντοχή στην τριβή • Προστασία από υπεριώδη ακτινοβολία 	<p>Πολλά προϊόντα διατίθενται με αυτές τις ιδιότητες. Ορισμένα είναι σαφείς σχετικά με το νανο-ενεργοποιημένο υλικό, αν και μπορεί να μην είναι συγκεκριμένα σχετικά με την ουσία που χρησιμοποιείται. Αυτά περιλαμβάνουν τα «Nanoclean cleaner» (Adseal), «ThermoSan» (Caparol), «Surfapore» (Nanofos), «Nansulate» (Nanotech) και «Nanostone και Nanowood» (Nanoprotect).</p> <p>Άλλα προϊόντα έχουν παρόμοιες ιδιότητες και είναι με νανο-ενεργοποιημένα υλικά, αλλά δεν έχουν διευκρινιστεί πλήρως οι ιδιότητές τους , όπως ‘Emcephob nanowax, Emcephob LE’ (MC Bauchemie); ‘Nanoshell’ (Nanoshell); ‘Nanoguard’ (Nanogate); ‘Wondergliss’ (Nanogate); ‘NewGuard; Nanopool; Lotusan’ (Sto)</p>
Διοξείδιο του τιτανίου	<ul style="list-style-type: none"> • Προστασία από υπεριώδη ακτινοβολία • Αντιβακτηριακές ιδιότητες • Αντιρρυπαντικές ιδιότητες • Αυτοκαθαρισμός 	<p>Πολλά προϊόντα είναι διαθέσιμα με αυτές τις ιδιότητες και περιέχουνε νανο-ενεργοποιημένα υλικά, για παράδειγμα ‘FN coating’ (FN Nanoinc), ‘KNOxOut’ (Boysen), ‘P and T-230’ (nanoprotect) and ‘Surfashield’ (nanophos).</p>

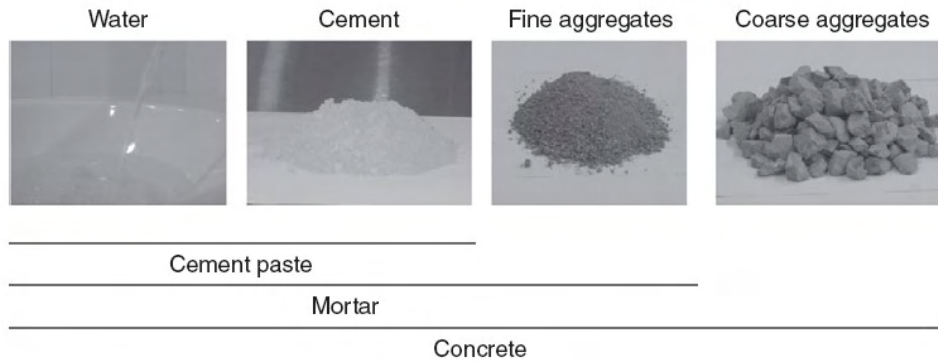
		Άλλα προϊόντα είναι διαθέσιμα με αυτές τις ιδιότητες ,αν και δεν προωθούνται ότι είναι με νανο-ενεργοποιημένα υλικά, για παράδειγμα ‘NOxer’ (Eurovia); ‘Climasan’ (Sto)
Άργυρος	<ul style="list-style-type: none"> • Αντιμικροβιακές ιδιότητες 	Πολλά προϊόντα είναι διαθέσιμα με αυτές τις ιδιότητες και περιέχουνε νανο-ενεργοποιημένα υλικά, για παράδειγμα ‘NPS 100, 200’ (Nanoprotect), ‘Bioni roof, Bioni hygienic, Bioni nature’
CNT-Νανοςωλήνες άνθρακα	<ul style="list-style-type: none"> • Αντιδιαβρωτικές ιδιότητες • Αντοχή 	Το ‘Teslan’ (Tesla nano) προωθείται ως υλικό επικάλυψης που περιέχει CNT. Άλλα CNT προϊόντα προστίθενται στις επικαλύψεις αλλά δεν είναι απαραίτητα διαθέσιμα στις πιο κοινές επικαλύψεις
Άλλο είδος άνθρακα	<ul style="list-style-type: none"> • Ηλεκτρομαγνητική θωράκιση • Αντίσταση στη συμπύκνωση • Θέρμανση βαφής 	Τα προϊόντα που είναι πιθανό να βασίζονται σε αιθάλη είναι σχετικά φτηνά και είναι διαθέσιμα εδώ και πολλά χρόνια. Περιλαμβάνουν τα ‘Carbo etherm’, ‘Carboshield’ (Future carbon) and ‘Bloc paint’ (Craig and Rose) ‘Graphenstone’ προϊόντα που προωθούνται στις αγορές και περιέχουν γραφένιο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 - ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ

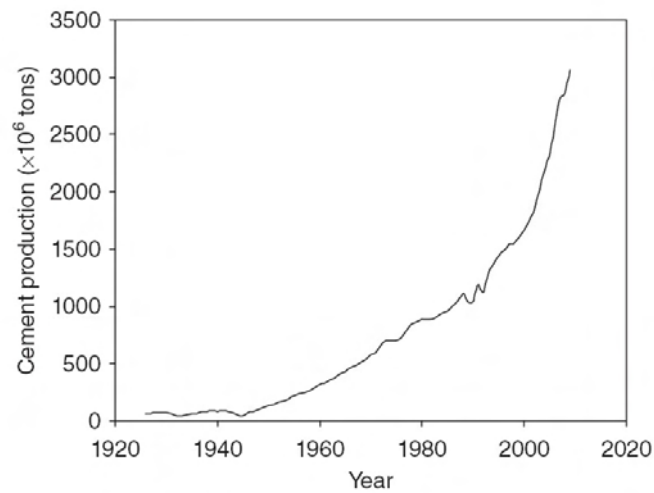
4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το σκυρόδεμα είναι από τα ευρύτερα χρησιμοποιούμενα κατασκευαστικά υλικά και δεδομένης της τρέχουσας αύξησης του πληθυσμού, της οικονομικής ανάπτυξης και της ανάγκης για επισκευή / αντικατάσταση της γήρανσης της υποδομής, αναμένεται αύξηση της κατανάλωσης. Δυστυχώς, όμως, η παραγωγή ενός από τα σημαντικότερα συστατικά του, τσιμέντου, συνδέεται με περίπου το 5-10% των συνολικών ανθρωπογενών εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα και ως εκ τούτου η βιομηχανία και το συγκεκριμένο υλικό χρειάζονται επειγόντως επανεξέταση. Οι χημικές αντιδράσεις και τα προκύπτοντα προϊόντα που παράγονται όταν το τσιμέντο αναμειγνύεται με νερό δημιουργούν ένα πολύ περίπλοκο υλικό. Το κυρίαρχο συστατικό, C-S-H, έχει μια τοπική δομή ενός ιζήματος με χαρακτηριστικά νανοκλίμακας που είναι δύσκολο να μοντελοποιηθούν και να κατανοηθούν. Κατά συνέπεια, η ανάπτυξη του υλικού στηρίχθηκε κυρίως στην εμπειρική γνώση που αποκτήθηκε μέσω μακροσκοπικών πειραμάτων και λίγα είναι γνωστά για τους υποκείμενους μηχανισμούς που ελέγχουν την απόκριση του υλικού όταν χρησιμοποιείται σε εφαρμογές μηχανικής. Οι πρόσφατες πειραματικές και θεωρητικές εξελίξεις στον τομέα της νανοεπιστήμης και της νανοτεχνολογίας προσφέρουν αισιόδοξες προσδοκίες για μια κατανοητή κατανόηση του υλικού που θα δημιουργήσει την επιστημονική βάση για μια πιο βιώσιμη και οικολογικά αποδοτική κατασκευή.

Το τσιμέντο είναι μια κονιοποιημένη σκόνη που αναπτύσσεται σε ισχυρό συνδετικό όταν αναμειγνύεται με νερό (Εικόνα 4.1). Το πιο γνωστό υδραυλικό τσιμέντο είναι το τυπικό τσιμέντο Portland (OPC). Η σημερινή παραγωγή τσιμέντου (το κύριο συστατικό του σκυροδέματος και όλων των άλλων υλικών με βάση το τσιμέντο) είναι περίπου 3 δισεκατομμύρια τόνοι ετησίως, γεγονός που το καθιστά το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο στερεό στη γη (Εικόνα 12). Αυτή η ποσότητα επαρκεί για την παραγωγή πάνω από 30 δισεκατομμύρια σκυροδέματα ή πάνω από 4 τόνους για κάθε άτομο που ζει σήμερα. Δεδομένης της αφθονίας των κυριότερων φυσικών συστατικών (ασβέστιο και πυριτίου) στο φλοιό της γης (που είναι υπεύθυνα για την τρέχουσα χαμηλή τιμή τους) και τεχνικά πλεονεκτήματα έναντι άλλων δομικών υλικών (ξυλεία, χάλυβας, σύνθετα υλικά κλπ.), είναι πολύ απίθανο άλλο υλικό να εκτοπίσει το σκυρόδεμα από τον κατασκευαστικό κλάδο, τουλάχιστον στο άμεσο μέλλον.



Εικόνα 4.1 Σχηματική σύνθεση της τσιμεντόπαστας (νερό + τσιμέντο), κονίαμα (πάστα τσιμέντου + λεπτά αδρανή) και σκυρόδεμα (κονίαμα + χοντρά αδρανή). (Schodek, Ferreira, Ashby (2009))



Εικόνα 4.2 Παγκόσμια ετήσια παραγωγή τσιμεντόπαστας την περίοδο 1925-2009 (Pacheco-Torgal, Diamanti, Nazari et al. (2013))

4.2 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ ΝΑΝΟΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Οι ιδιότητες του σκυροδέματος εμφανίζονται σε κλίμακες πολλαπλού μήκους (nano to micro to macro) όπου οι ιδιότητες κάθε κλίμακας προέρχονται από τις ιδιότητες της επόμενης μικρότερης κλίμακας (Εικόνα 4.3). Κατά τον Garboczi, το 2009, η νανομηχανική του σκυροδέματος μπορεί να λάβει χώρα σε μία ή περισσότερες από τις τρεις φάσεις όπως (α) στις στερεές φάσεις, (β) στις υγρές φάσεις, ή (γ) στις διεπαφές μεταξύ υγρού-στερεού και στερεού-στερεού.

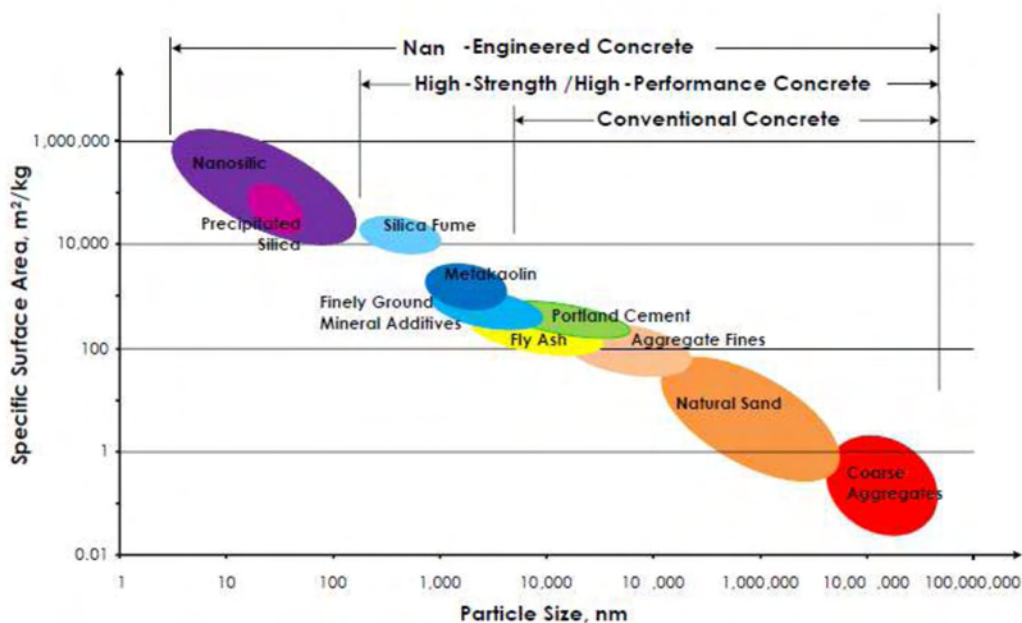
Οι Birgisson κ.α. (2010) εντόπισαν τα ακόλουθα βασικά επιτεύγματα σε συγκεκριμένη τεχνολογία που είναι πιθανότερο να προκύψουν από τη χρήση της νανοτεχνολογίας:

- Ανάπτυξη τσιμέντου και υλικών από σκυρόδεμα υψηλής απόδοσης, μετρούμενα με τις μηχανικές και ανθεκτικές ιδιότητες τους.
- Ανάπτυξη βιώσιμων υλικών και δομών από σκυρόδεμα μέσω μηχανικής για διαφορετικά αντίξοα περιβάλλοντα, μείωση της κατανάλωσης ενέργειας κατά την παραγωγή τσιμέντου και ενίσχυση της ασφάλειας.
- Ανάπτυξη έξυπνων υλικών από σκυρόδεμα μέσω της ενσωμάτωσης τεχνολογιών που βασίζονται στην αυτοματοποιημένη και αυτοκινητοβιομηχανική τεχνολογία που βασίζονται στη νανοτεχνολογία και τεχνολογιών υποδομής στον κυβερνοχώρο.
- Ανάπτυξη καινοτόμων υλικών από σκυρόδεμα μέσω καινοτόμων επεξεργασιών τσιμέντου και πάστας τσιμέντου με βάση τη νανοτεχνολογία. Και
- Ανάπτυξη θεμελιωδών πολυκλωνικών μοντέλων για σκυρόδεμα μέσω προχωρημένου χαρακτηρισμού και μοντελοποίησης του σκυροδέματος στα νανο-, μικρο-, μεσο- και μακρο-κλίμακα.

Τα νανოსωματίδια χρησιμοποιούνται ειδικά στην οικοδομική βιομηχανία ως πρόσθετα στο σκυρόδεμα. Η προσθήκη ενός νανოსωματιδίου, μπορεί να αλλάξει τις ιδιότητες του σκυροδέματος. Το νανοσκυρόδεμα ορίζεται ως σκυρόδεμα, αποτελούμενο από σωματίδια τσιμέντου Portland, τα οποία είναι μικρότερα από 500 nm. Επί του παρόντος, τα σωματίδια τσιμέντου κυμαίνονται από μερικά nm μέχρι ένα μέγιστο των 100 μm. Η παραγωγή νανοτσιμέντου είναι απαραίτητη για τη μείωση του μεγέθους των σωματιδίων. Η προσθήκη των νανოსωματιδίων στο τσιμέντο Portland μπορεί να βελτιώσει τις ιδιότητες όπως:

- Θερμική επεξεργασία σε θερμοκρασία
- Μείωση της συρρίκνωσης,
- Αντοχή θερμοκρασίας μέχρι 600 ° C,
- Συμβατότητα με πολλές ίνες, όπως ο άνθρακας
- Δυνατότητα αντίδρασης με διαθέσιμα νανοϋλικά όπως νανοπυρίτιο,
- Περιορισμός των τοξικών ιδιοτήτων.

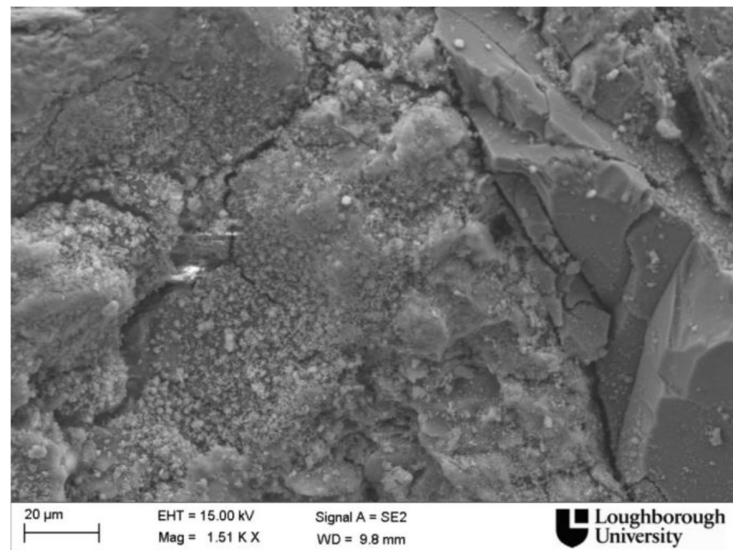
Ήδη υπάρχουν πολλά άρθρα που περιγράφουν τη χρήση των CNT σε εργαστηριακό περιβάλλον για τη βελτίωση της αντοχής των υλικών ή για την παροχή ηλεκτρικής. Τα CNTs μπορούν να προστεθούν στο σκυρόδεμα, αλλά οι εφαρμογές τους στην αγορά είναι λιγότερο προηγμένη από ό, τι θα μπορούσε αρχικά να φαίνεται από τη βιβλιογραφία. Τα CNT είναι δαπανηρά, ιδιαίτερα όταν εξετάζονται οι ποσότητες που απαιτούνται για προσθήκη στο μπετόν, αν και οι συνιστώμενες αναλογίες είναι μόνο 1% κατά βάρος. Οι Raki κ.α. (2010) αναφέρουν ότι είναι επίσης πολύ δύσκολο να διασκορπιστούν ομοιόμορφα στο σκυρόδεμα. Πολύ λίγα προϊόντα εμφανίζονται στο εμπόριο, αν και υπάρχει ένα πρόσφατο παράδειγμα έγκρισης για χρήση από το Υπουργείο Μεταφορών της Γεωργίας στις ΗΠΑ.

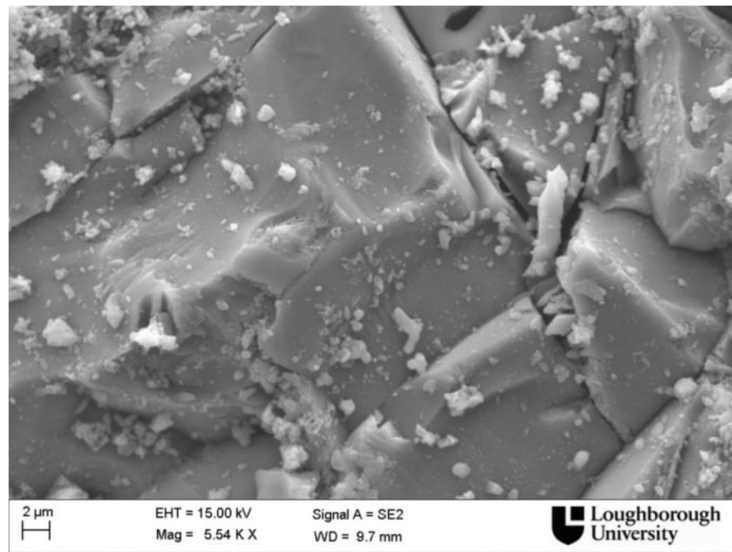


Εικόνα 4.3 Μέγεθος σωματιδίων και συγκεκριμένη επιφάνεια που σχετίζεται με υλικά από σκυρόδεμα (Sobolev, 2005)

4.3 ΝΑΝΟΠΡΟΣΘΕΤΑ ΣΤΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ

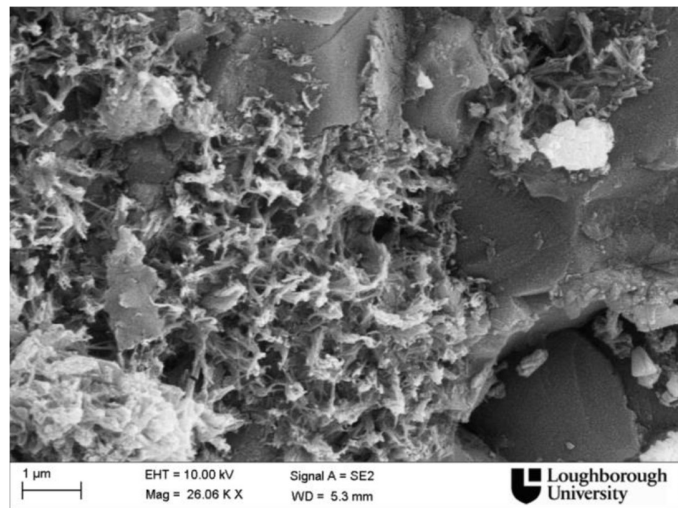
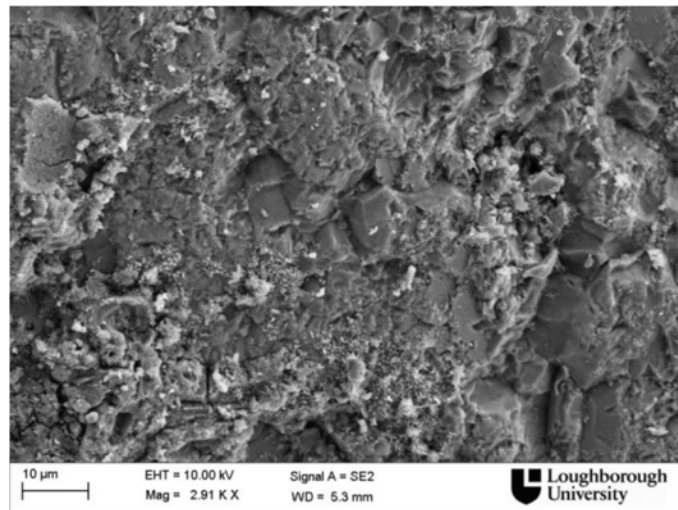
Το υλικό που χρησιμοποιείται ευρύτερα στο σκυρόδεμα είναι το πυρίτιο. Ο καπνός πυριτίου είναι ένα άμορφο (μη κρυσταλλικό) πολύμορφο διοξείδιο του πυριτίου. Πρόκειται για μια εξαιρετικά λεπτή σκόνη (με τυπικό μέσο μέγεθος σωματιδίων 150 nm) που συλλέγεται ως υποπροϊόν της παραγωγής κράματος πυριτίου και κράματος σιδηροπυριτίου. Διατίθεται ως πρόσθετο σκυροδέματος σε νανοκλίμακα για πάνω από 30 χρόνια και μπορεί να χρησιμοποιηθεί όταν απαιτείται αυξημένη αντοχή, επιφανειακό φινίρισμα ή πρόιμη υψηλή αντοχή. Οι Sanchez και Sobolev(2010) αναφέρουν ότι το νανοπυρίτιο είναι πρόσθετο σκυροδέματος, με μέγεθος σωματιδίων περίπου το ένα δέκατο του σωματιδιακού στρώματος καπνού διοξειδίου του πυριτίου, και χρησιμοποιείται για την παραγωγή σκυροδέματος πολύ υψηλής αντοχής. Είναι ακριβό και σπάνια χρησιμοποιείται σε εμπορικές εργασίες σκυροδέματος (Εικόνα 4.4).





Εικόνα 4.4 SEM Νανοσπυρίτιο (Pacheco-Torgal, Diamanti, Nazari et al. (2013))

Το νανοτιτάνιο (Εικόνα 4.5), που περιεγράφηκε νωρίτερα για το φωτοκαταλυτικό του αποτέλεσμα σε επικαλύψεις, ωστόσο μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί ως πρόσθετο σκυροδέματος, είτε στο ίδιο το σκυρόδεμα είτε ως ξεχωριστό στρώμα. Σύμφωνα με τους Grebler και Gázsó (2012), οι λευκές επιφάνειες παραμένουν λευκές ως αποτέλεσμα του αυτοκαθαριζόμενου αποτελέσματος και υπάρχουν κάποιες ενδείξεις βελτίωσης της ποιότητας του αέρα μέσω της χρήσης του σε πεζοδρόμια, σήραγγες και τοίχους, εφόσον υπάρχει διαθέσιμο κατάλληλο φως. Κατά τους Zhu κ.α., (2004), παρόλο που τα προϊόντα αυτά ήταν εμπορικά διαθέσιμα για πολλά χρόνια, η χρήση τους είναι περιορισμένη στην πράξη με εξαίρεση έργα κατασκευής βιτρινών και ερευνητικές μελέτες.



Εικόνα 4.5 SEM Νανοτιπάνιο (Pacheco-Torgal, Diamanti, Nazari et al. (2013))

Πίνακας 4.1 Συνοπτικά τα νανουλικά στο σκυρόδεμα και οι χρήσεις τους

Νανοϋλικό	Ιδιότητες για τη νανοσωματιδιακή χρήση	Διαθεσιμότητα και χρήση
<p>Πυρίτιο – καπνός πυριτίου (μέγεθος κόκκων 20nm-1μm, μέσο μέγεθος 150nm), -νανοπυρίτιο (5-10nm)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Αυτοδιάχυση • Υψηλή αντοχή • Άμεση λήψη της μέγιστης αντοχής • Επιφανειακό τελείωμα • Καπνός πυριτίου χρησιμοποιείται για επίτευξη μεγαλύτερη αντοχής σκυροδέματος 	<p>Ο καπνός πυριτίου χρησιμοποιείται για πάνω από 30 χρόνια και είναι ευρέως διαδεδομένο στους κύριους προμηθευτές σκυροδέματος. Παραδείγματα στο Ηνωμένο Βασίλειο είναι ‘Chronolia’ (Lafarge), ‘Rapidcrete’ (Breedon), ‘Diamondcrete’ (Aggregate Industries) and ‘Easy-flow’ (Hanson). Ωστόσο, είναι δύσκολο να προσδιοριστεί με βεβαιότητα, επειδή δεν διατίθενται στο εμπόριο ως νανοϋλικά από τους κατασκευαστές.</p> <p>Ο καπνός πυριτίου δεν είναι αρκετά ακριβός, ενώ και άλλα πρόσθετα σκυροδέματος μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την επίτευξη παρόμοιων ιδιοτήτων. Δεν έχει ευρεία χρήση.</p> <p>Το σκυρόδεμα με πρόσθετα νανοσωματίδια πυριτίου είναι ακριβότερο και είναι δύσκολο να βρεθούν παραδείγματα εφαρμογών.</p>
<p>Τιτάνιο</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Αυτοκαθαρισμός που απορροφά και ρυπαντές 	<p>Είναι διαθέσιμο σε αρκετές εταιρείες, όπως για παράδειγμα ‘TioCem’ (Hanson) και ‘Ti Active’ (Italcementi).</p> <p>Οι κατασκευαστές προσδιορίζουν γενικά ότι το προϊόν περιέχει νανοτιτάνιο.</p> <p>Παρόλο που υπάρχουν παραδείγματα αυτού στη βιβλιογραφία σε παραδείγματα εφαρμογών ή</p>

		δοκιμαστικά έργα, φαίνεται ότι χρησιμοποιείται σπάνια σε τυποποιημένα έργα κατασκευής
CNT	<ul style="list-style-type: none"> • Αύξηση αντοχής και αντίστασης • Μείωση ρωγμών • Ηλεκτρική αγωγιμότητα 	Δεν φαίνεται να είναι διαθέσιμο για ευρεία χρήση. Πρόσφατα στις ΗΠΑ έγιναν δοκιμές για επικαλύψεις δρόμων από την εταιρεία Eden Energy, που σχεδιάζει να το βγάλει στην κυκλοφορία (EdenCrete) τα επόμενα χρόνια.

4.5 ΤΣΙΜΕΝΤΟ ΥΨΗΛΗΣ ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΗΤΑΣ

Οι Porro κ.ά. (2005) αναφέρεται στη χρήση σωματιδίων νανοπυριτίου ως αύξηση της αντοχής σε συμπίεση της πάστας τσιμέντου. Οι ίδιοι οι συγγραφείς δηλώνουν ότι το φαινόμενο αυτό δεν οφείλεται στην ποζολανική αντίδραση, καθώς η κατανάλωση υδροξειδίου του ασβεστίου είναι πολύ χαμηλή, αλλά στην αύξηση των ενώσεων πυριτίου που συμβάλλουν στην πυκνότερη μικροδομή.

Οι Sobolev et al (2008) ανέφεραν ότι η προσθήκη νανοπυριτίου παρήγαγε αύξηση της αντοχής του 15-20%. Άλλοι συγγραφείς πιστεύουν ότι το νανοπυρίτιο προκαλεί αύξηση της διάστασης της C-S-H αλυσίδας και της δυσκαμψίας. Οι Nasibulin et al (2009) ανέφεραν διπλάσια αύξηση της δύναμης. Οι Chairanich et al (2010) καταγράφουν ότι το 1% των νανοϊνών άνθρακα (με μάζα συνδετικού υλικού) μπορεί να αντισταθμίσει τη μείωση της αντοχής που συνδέεται με την αντικατάσταση της ιπτάμενης τέφρας 20%. Οι Konsta-Gdoutos et al (2010a) μελέτησαν επίσης την επίδραση των νανοϊνών άνθρακα στις πάστες τσιμέντου (0,08% με μάζα συνδετικού υλικού) και παρατηρήθηκε αύξηση της αντοχής.

Οι Nazari και Riahi (2011a) χρησιμοποίησαν νανοσωματίδια ZrO_2 με μέσο μέγεθος σωματιδίων 15nm και ανέφεραν βελτίωση της πυκνότητας του αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος έως 4% κατά βάρος. Η αύξηση της περιεκτικότητας σε νανοσωματίδια προκάλεσε μείωση της εφελκυστικής αντοχής εξαιτίας της ανεπαρκούς διασποράς των νανοσωματιδίων εντός της μήτρας

σκυροδέματος. Οι Givi et al. (2010) μελέτησε τις επιδράσεις διαφορετικών μεγεθών σωματιδίων νανο-SiO₂ (15 και 80 nm) και ανέφερε ότι το βέλτιστο επίπεδο αντικατάστασης νανο-SiO₂ σωματιδίων αποκτήθηκε στο 1,0% και 1,5%, αντίστοιχα.

Η επίδραση της προσθήκης νανοσωματιδίων είναι τριπλή:

1. Καθώς η μέση διάμετρος της πάστας C-S-H είναι περίπου 10 nm, τα νανοσωματίδια φτιάχνουν τα κενά στη δομή CHS, παράγοντας έτσι ένα πυκνότερο σκυρόδεμα.
2. Τα νανοσωματίδια ενεργούν ως κέντρα σχηματισμού πυρήνων, που συμβάλλουν στην ανάπτυξη της ενυδάτωσης στο τσιμέντο Portland
3. Τα νανοσωματίδια αντιδρούν με τους κρυστάλλους Ca(OH)₂ και παράγουν πάστα C-S-H. Δρουν επίσης ως πυρήνες στην πάστα τσιμέντου που μειώνει το μέγεθος των κρυστάλλων Ca(OH)₂.

4.6 ΑΥΤΟΘΕΡΑΠΕΥΟΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ (SELF-HEALING CONCRETE)

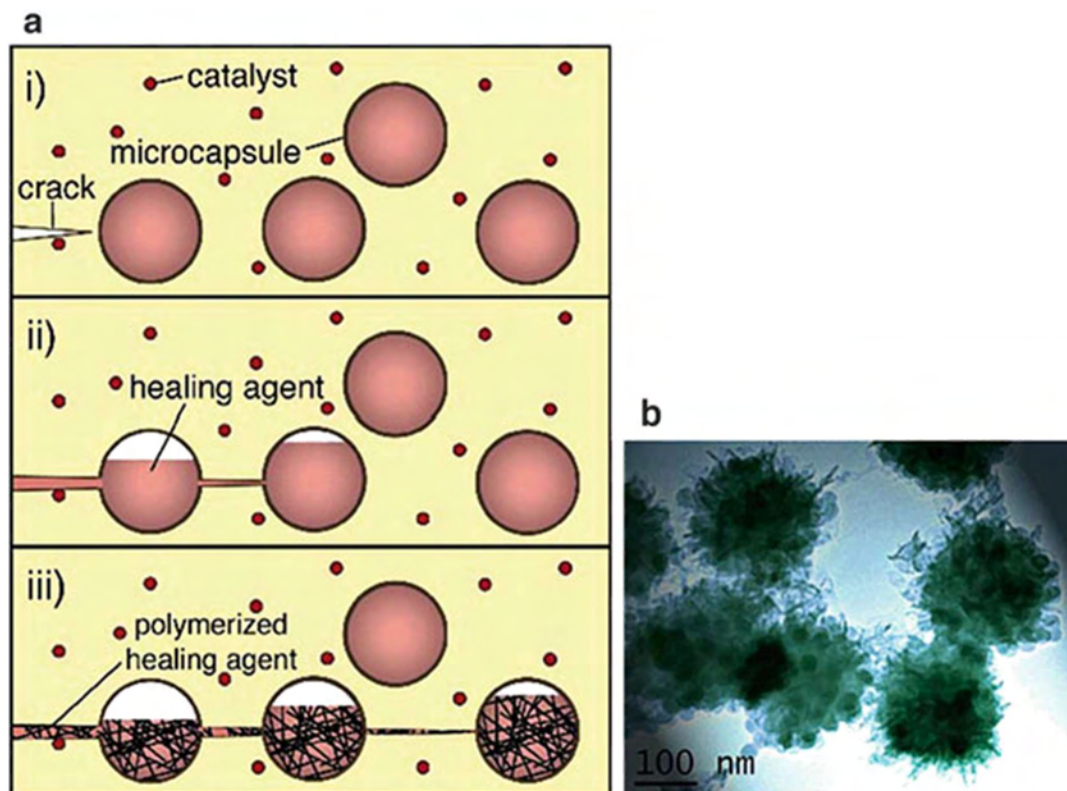
Η μίμηση των βιολογικών διεργασιών έχει οδηγήσει στη μέθοδο της αυτοθεραπείας στη μηχανική. Η αυτοθεραπεία είναι η δυνατότητα να επισκευαστούν και να αποκατασταθούν οι αρχικές ιδιότητες υλικών, μετά από θερμική, μηχανική ή άλλες μορφές αλλοίωσης. Η δυνατότητα αυτοθεραπείας ενσωματώνεται σε πολυμερή, μεταλλικά, κεραμικά ή σύνθετα υλικά. Ανάλογα με τον τύπο του υλικού και την αιτία της υποβάθμισης, έχουν προταθεί αρκετοί αυτοθεραπευτικοί μηχανισμοί.

Τα πρόσθετα που αποδεδειγμένα ενισχύουν την αυτοαίσθηση σε σκυροδέματα (δηλαδή πρόσθετα σε «έξυπνα σκυροδέματα») είναι συνήθως τα νανοσωματίδια Fe₂O₃ και νανοσωματίδια άνθρακα. Όταν εφαρμόζεται μια θλιπτική δύναμη σε σκυρόδεμα που περιέχει νανοσωματίδια Fe₂O₃ το κενό των σωματιδίων μειώνεται, βελτιώνοντας έτσι την αγωγιμότητα. Με την εφαρμογή της θλιπτικής δύναμης, τα νανοσωματίδια υποχρεώνονται να πλησιάζουν το ένα στο άλλο, γεγονός που καθιστά τις ροές πιο έντονες και ως εκ τούτου η ηλεκτρική αγωγιμότητα του κοινάματος του σκυροδέματος αυξάνεται σταδιακά.

Οι Howser κ.α. διαπίστωσαν ότι τα μέγιστα και τα ελάχιστα στις μετρήσεις ηλεκτρικής αντίστασης ταιριάζουν με τα μέγιστα και τα ελάχιστα της εφαρμοζόμενης δύναμης και του στελέχους σκυροδέματος που περιέχει καλά διασκορπισμένα CNF. Αυτό επέτρεψε την εύκολη ανίχνευση και αξιολόγηση του βαθμού βλάβης σε κολώνες οπλισμένου σκυροδέματος και την παρακολούθηση της στατικότητας σε πραγματικό χρόνο.

Όπως ορίζουν οι Chen και Chung, τα αυτοθεραπεύόμενα σκυροδέματα που παράγονται με την προσθήκη νανοσωματιδίων, όπως τα νανοσωματίδια Fe_2O_3 και τα CNF, ανταποκρίνονται στις απαιτήσεις δομικών αισθητήρων. Επιτρέπουν την ανίχνευση ευρέος φάσματος τάσεων / στελεχών και η ανταπόκριση είναι αντιστρέψιμη. Οι μετρήσεις μπορούν να πραγματοποιηθούν εύκολα χωρίς ακριβό εξοπλισμό. Η παρουσία των νανοσωματιδίων Fe_2O_3 και των CNFs όχι μόνο δεν έχει αρνητική επίδραση στις δομικές ιδιότητες του σκυροδέματος, αλλά ενισχύονται ιδιότητες όπως η αντοχή σε θλίψη, η αντοχή στην κάμψη και η ολκιμότητα

Μια από τις πιο πρόσφατες μεθόδους είναι η έννοια της αυτόνομης αυτοθεραπείας. Ένας αυτοθεραπευτικός παράγοντας είναι μικροενθυλακωμένος (και όχι νανοκαψυλιωμένος) και εισάγεται σε μια εποξική μήτρα (για σύνθετα υλικά με πολυμερή μήτρα). Η σύνθετη μήτρα περιέχει τον καταλύτη για τον πολυμερισμό του αυτοθεραπευτικού υγρού. Μετά την πρώτη μορφή ρωγμών, μέσω της αλλοίωσης των υλικών, για παράδειγμα, οι μικροκάψουλες στη μήτρα σπάζουν και απελευθερώνουν τον παράγοντα αυτοθεραπείας, ο οποίος γεμίζει τις ρωγμές μέσω της τριχοειδούς δράσης. Μόλις ο αυτοθεραπευτικός παράγοντας έρθει σε επαφή με τον καταλύτη (διασκορπισμένος σε όλη την μήτρα), αρχίζουν οι αντιδράσεις πολυμερισμού, οι οποίες θα οδηγήσουν στην επούλωση της επιφάνειας νανο- ή μικρο-ρωγμής και στην ανάκτηση των αρχικών ιδιοτήτων του υλικού (Εικόνα 4.6).



Εικόνα 4.6 Αυτοθεραπευτικός μηχανισμός: (α) σκίτσο και (β) φωτογραφία SEM ενός πολυμερούς αυτοελαστικού προϊόντος μέσα σε ένα πλέγμα. (Goncalves (2015))

4.8 ΑΥΤΟΣΥΜΠΥΚΝΟΥΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ (S.C.C.)

Το αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα S.C.C., αναπτύχθηκε για πρώτη φορά στην Ιαπωνία στις αρχές της δεκαετίας του 1990. Το κύριο ζήτημα προσπαθεί να αντιμετωπίσει και να καταστήσει ευκολότερο, ήταν η έλλειψη χώρου. Σύμφωνα με τον Walraven ήταν ένα επαναστατικό βήμα προς τα εμπρός στη σύγχρονη βιομηχανία κατασκευών. Η ιδέα του S.C.C. είναι να έχει συγκεκριμένο υλικό που όταν ρέει, διαχέεται στον ξυλότυπο και συμπυκνώνεται μόνο του υπό την επίδραση μόνο του βάρους του, χωρίς την ανάγκη δόνησης.

Τα S.C.C., αφού καταφέρνουν να πετυχαίνουν την αυτοσυμπύκνωση, έχουν επίσης και περαιτέρω πλεονεκτήματα όπως η υψηλή ποιότητα του σκυροδέματος όσον αφορά το φινίρισμα της επιφάνειας και την αντοχή του. Ως εκ τούτου, το συνηθισμένο σκυρόδεμα τσιμέντου Portland θα μπορούσε να αντικατασταθεί με μικρότερη ποσότητα S.C.C. . Το S.C.C., ενώ είναι ακόμα υγρό, μπορεί να γεμίσει πολύπλοκα γεωμετρικά σχήματα με πυκνή ενίσχυση. Το στάδιο

σκλήρυνσης είναι το κλειδί για την επίτευξη ομαλού φινιρίσματος επιφανειών. Αντλώντας το S.C.C. στο σκελετό μπορεί να προσφέρει ομοιόμορφο χρώμα και υφή για τις πιο πολύπλοκες μορφές.



Εικόνα 4.7 Λεπτομέρεια προκατασκευασμένου στοιχείου με αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα. (https://www.theconcreteinitiative.eu/images/ECP_Documents/EuropeanGuidelinesSelfCompactingConcrete.pdf (2005))

Σύμφωνα με το Birgisson, ένας αποτελεσματικός τρόπος για την παραγωγή του S.C.C. είναι με την προσθήκη νανοϋλικών όπως το νανοπυρίτιο στο μίγμα σκυροδέματος. Αυτό το πρόσθετο θα βελτιώσει τη θλιπτική τάση του σκυροδέματος, καθιστώντας έτσι πιο ισχυρό από τα συνηθισμένα μίγματα σκυροδέματος. Επιπλέον, το S.C.C. πετυχαίνει βελτιωμένες επιδόσεις όσον αφορά τις ενισχυμένες δομές με περίπλοκη γεωμετρία και ως εκ τούτου μπορεί να εξαλείψει την ανάγκη για ειδικευμένους εργαζόμενους και δονητές που συνήθως χρησιμοποιούνται σε τέτοιες περιπτώσεις (Εικόνα 4.7). Η προσθήκη S.C.C είναι κατάλληλη για την παραγωγή άριστων λευκών επιφανειών με μαρμάρينو τελείωμα, που απαιτείται σε μερικές αρχιτεκτονικές μελέτες χωρίς την ανάγκη επιπλέον φινιρίσματος.

Τα πλεονεκτήματα του S.C.C. μπορούν να συνοψιστούν ως τα εξής:

- *Βιωσιμότητα:* Το S.C.C. αυξάνει την αειφορία μέσω της αύξησης της ανθεκτικότητας στο σκυρόδεμα και της αισθητικής εμφάνισης μειώνοντας έτσι την ποσότητα υλικού που απαιτείται στα κτίρια.
- *Δυνατότητα πλήρωσης:* Το S.C.C. έχει την ικανότητα να ρέει σε πλήρεις ομοιογενείς ξυλότυπους.
- *Δυνατότητα περάσματος:* Το S.C.C. μπορεί να ρέει μέσα από στενά τμήματα, χωρίς να εμποδίζεται από μεγάλα σωματίδια συσσωματωμάτων.
- *Αντοχή στον διαχωρισμό:* Το S.C.C. μπορεί να ρέει χωρίς να διαχωρίζεται κατά τη μεταφορά ή τη χύτευση του.
- *Ικανότητα άντλησης:* Το S.C.C. μπορεί να αντληθεί στα υψηλότερα τμήματα του κτιρίου κατά τη διάρκεια της κατασκευής.
- *Περιβάλλον εργασίας:* Η χρήση του S.C.C. μειώνει τον θόρυβο κατά τη διάρκεια της κατασκευής ειδικά του θορύβου προκαλείται από τη δόνηση. Μειώνει επίσης την ανάγκη λήψης μέτρων προφύλαξης από ηλεκτρικά καλώδια και δονητές.
- *Αντοχή σκυροδέματος:* Το S.C.C. βελτιώνει την αντοχή σε σύγκριση με το συνηθισμένο σκυρόδεμα όταν σκληρύνεται.
- *Εξάλειψη της ανάγκης για δόνηση:* Το S.C.C. έχει μια ιξώδης σύνθεση, έτσι δεν χρειάζεται καμία δόνηση. Θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί σε ενισχυμένα δομικά στοιχεία χωρίς την ανάγκη δόνησης για την παραγωγή πολύπλοκων μορφών.
- *Μείωση του κόστους εργασίας:* Το S.C.C. μπορεί να εξοικονομήσει μέχρι και 50% του κόστους εργασίας. Αυτό συμβαίνει επειδή θα μπορούσε να χυθεί μέχρι 80% ταχύτερα από τα συνηθισμένα μίγματα σκυροδέματος.
- *Ποιότητα των επιφανειών:* Το S.C.C. μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή μαρμάρινων επιφανειών εάν απαιτείται σε σχεδιασμό που είναι σχεδόν αδύνατο με τα συνηθισμένα μίγματα σκυροδέματος. Επιπλέον, τα S.C.C. παράγουν επιφάνειες χωρίς πορώδες.

4.9 ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΩΝΤΑΣ NANO-ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΣΤΗΝ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ (ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΚΑΙ ΜΕΛΕΤΕΣ)

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως σε αυτή την εργασία, το σκυρόδεμα είναι ένα από τα ευρέως χρησιμοποιούμενα δομικά υλικά. Αυτό το δομικό υλικό έχει πολλά πλεονεκτήματα που εξηγούν γιατί είναι το πιο χρήσιμο στο κατασκευαστικό υλικό, ωστόσο η παραγωγή και χρήση αυτού του υλικού έχει ορισμένους περιορισμούς και μειονεκτήματα που περιορίζουν τη χρήση του στη σύγχρονη αρχιτεκτονική. Τέτοιοι περιορισμοί είναι οι υψηλές εκπομπές CO₂, η ανάγκη για δονητές για σύνθετες μορφές, τραχιές επιφάνειες που συνήθως απαιτούν φινίρισμα και πολλά άλλα. Στις αρχές του 21ου αιώνα σημειώθηκαν τεράστιες εξελίξεις που οδήγησαν στην εφεύρεση και τη χρήση του νανοσκυροδέματος, μιας μορφής σκυροδέματος με νανοπρόσθετα για τη βελτίωση της απόδοσής του στη δομή της ναοκλίμακας. Το νανοσκυρόδεμα έχει πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με τα παραδοσιακά μίγματα σκυροδέματος όπως αυτοσυμπυκνούμενο, τα αυτοκαθαριζόμενα, τα φιλικά προς το περιβάλλον, με ιδιότητες απορρόπανσης με βελτιωμένη αντοχή και αντοχή, υψηλή ρευστότητα και άλλες ιδιότητες. Οι ιδιότητες αυτές είχαν τεράστια επιρροή στους αρχιτέκτονες σε όλο τον κόσμο, καθώς τους έδινε περισσότερη ευελιξία και έκαναν το σκυρόδεμα να συμβαδίζει με τις νέες αρχιτεκτονικές και κατασκευαστικές απαιτήσεις και φιλοδοξίες.

Σε αυτή την ενότητα αναφέρονται μερικά από τα αρχιτεκτονικά έργα στα οποία χρησιμοποιήθηκε το νανοσκυρόδεμα. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι το μεγαλύτερο μέρος του νανοσκυροδέματος που χρησιμοποιείται στην κατασκευή κτιρίων είναι η αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα, επομένως τα περισσότερα έργα που συζητούνται εδώ χρησιμοποιούν S.C.C. Άλλοι τύποι νανοσκυροδέματος είναι λιγότερο συχνές στην κατασκευή κτιρίων και ορισμένοι από αυτούς εξακολουθούν να βρίσκονται σε πειραματικές φάσεις.

- *Εθνικό Μουσείο Τέχνης του 21ου Αιώνα (MAXXI) στη Ρώμη, Ιταλία, Zaha Hadid (Εικόνα 4.8)*



Εικόνα 4.8 Εθνικό Μουσείο Τέχνης του 21ου Αιώνα (MAXXI) στη Ρώμη, Ιταλία, Zaha Hadid (https://faculty.arch.tamu.edu/media/cms_page_media/4433/TheMaxxi_CaseStudyPresentation.pdf)

Σε αυτό το έργο, χρησιμοποιήθηκε ένα ενισχυμένο S.C.C. για να παράγει τα απαιτούμενα τοιχώματα με εξαιρετική ποιότητα, συνέχεια, ομοιογένεια και λεπτή υφή επιφάνειας.

Η εκτεταμένη χρήση καμπύλων επιφανειών από σκυρόδεμα και κεκλιμένα τοιχώματα απαιτούσε ένα μείγμα που θα μπορούσε να σταθεί ακόμα και με μία σημαντικά επιβαρυσμένη ενίσχυση από ράβδους. Η αρχιτέκτονας Ζάχα Χαντιντ (Zaha Hadid) θεώρησε το Αυτοσυμπυκνωμένο Σκυρόδεμα (S.C.C.) μία λύση που θα επέτρεπε εύκολη ροή και συμπίεση γύρω από τη συμφορημένη περιοχή. Ωστόσο, αυτό το μίγμα αυτό ήταν επιρρεπές σε ρωγμές λόγω της συνεχιζόμενης επιδιόρθωσής του με την πάροδο του χρόνου.

Πώς θα μπορούσε να λυθεί η ρωγμή χωρίς την προσθήκη αρμών συστολής;

Με την προσθήκη τριών ειδών νανοσκυροδέματος:

- Αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα(Self-Compacting Concrete), προσθέτοντας έναν ακρυλικό πλαστικοποιητή και ένα πληρωτικό ασβεστόλιθου για ρευστότητα
- Αυτοδιαχεόμενο σκυρόδεμα (Self-Consolidating Concrete), με την προσθήκη οξειδίου του ασβεστίου (CaO) που χρησιμοποιείται ως επεκτατικός παράγοντας
- Αυτοθεραπευόμενο σκυρόδεμα (Self-Healing Concrete) με ένα μείγμα για μειωμένη συστολή για να αποφευχθεί η δημιουργία ρωγμών λόγω κάθαρσης

➤ **Επιστημονικό Κέντρο Phaeno, Wolfsburg, Γερμανία, από Zaha Hadid, 2005 (Εικόνα 4.9)**



Εικόνα 4.9 Επιστημονικό Κέντρο Phaeno, Wolfsburg, Γερμανία, από Zaha Hadid, 2005 (<https://arcSPACE.com/feature/phaeno-science-center/>)

Πρόκειται για μια κατασκευή από οπλισμένο σκυρόδεμα που καλύπτεται από μια δομή οροφής από χάλυβα. Μέρη της κατασκευής οπλισμένου σκυροδέματος θα μπορούσαν να κατασκευαστούν μόνο με τη χρήση ενός πρόσφατα αναπτυγμένου τύπου αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος. Αυτό βέβαια απαιτούσε εκτεταμένες δοκιμές δομικών στοιχείων στο Πανεπιστήμιο του Brunswick.

Το S.C.C. χρησιμοποιείται για την κατασκευή γωνιών, καμπυλών που εκτείνονται, παραμορφωμένων σχεδίων και τολμηρών προεξοχών. Το Phaeno είναι μια συνέχεια πολλαπλών συστημάτων, δυσπροσάρμοστοι βαριοί κώνοι, προκατασκευασμένα στοιχεία και χυτοί in situ S.C.C.

τοίχοι, μεταλλικές κολώνες σε συγκεκριμένες θέσεις. Το αποτέλεσμα είναι η κομψότητα της πολυπλοκότητας.

Το Phaeno είναι το μεγαλύτερο κτίριο που κατασκευάζεται από το αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα (S.C.C.) μέχρι σήμερα στην Ευρώπη. Χωρίς αυτό τον τύπο σκυροδέματος θα ήταν δύσκολο να επιτευχθούν οι ποικίλες μορφές του Phaeno.

➤ **Πανεπιστήμιο Εφαρμοσμένων Επιστημών, Σαλτσμπουργκ (Εικόνα 4.10)**



Εικόνα 4.10 Η εξωτερική όψη του κτιρίου (Formwork Technology for Architectural Concrete (2010))

Το φουτουριστικό συγκρότημα με τις καθαρές γραμμές και μορφές του, παρέχει τις καλύτερες συνθήκες για τους περίπου 1.500 μαθητές να ολοκληρώσουν τις οκτώ εξάμηνες σπουδές τους. Χωρίς αμφιβολία, το αρχιτεκτονικό αποκορύφωμα είναι η βιβλιοθήκη που στηρίζεται σε κολώνες ύψους 14μ. Οι τεράστιες κολώνες από σπλισμένο σκυρόδεμα παρουσιάζουν κεκλιμένες διατομές μαζί με κλίσεις και στους δύο άξονες, και είναι ισχυρά ενισχυμένες για λόγους στατικής επάρκειας. Ως εκ τούτου, ο ξυλότυπος έπρεπε να συναρμολογηθεί χωρίς δεσμούς και αιχμηρές άκρες. Σαν υλικό, επιλέχθηκε ένα ελαφρώς απορροφητικό φύλλο από κόντρα πλακέ.



Λόγω του υψηλού οπλισμού ενίσχυσης των στηριγμάτων και της κεκλιμένης θέσης, απαιτήθηκε η χρήση S.C.C. (αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα) και αυτό έπρεπε να ληφθεί υπόψη κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού του ξυλότυπου (Εικόνα 4.11). Μέσω της χρήσης του SCC, ο ξυλότυπος σχεδιάστηκε για να χειρίζεται την υδροστατική πίεση του σκυροδέματος που είχε ως αποτέλεσμα πολύ μικρές αποστάσεις μεταξύ των δοκών. Ως επίστρωση, επιλέχθηκε το S.C.C. με μια ελαφρώς απορροφητική επίστρωση MDO (Machine-direction orientation) . Έτσι ήταν δυνατό να επιτευχθεί ένα ομαλό αλλά ματ σκυρόδεμα με χαμηλό πορώδες.

Εικόνα 4.11 Εσωτερικά του κτηρίου φαίνεται η χρήση του SCC και ως υλικό επίστρωσης (Formwork Technology for Architectural Concrete(2010))

- *Αεροδρόμιο της Arlanda, Πύργος Ελέγχου, Στοκχόλμη, Σουηδία από την Wingårdh Arkitektkontor AB (Εικόνα 4.12)*



Εικόνα 4.12 Ο πύργος ελέγχου του αεροδρομίου της Αρλάντα, Στοκχόλμη (<http://manchesterhistory.net/architecture/2000/arlandatower.html>)

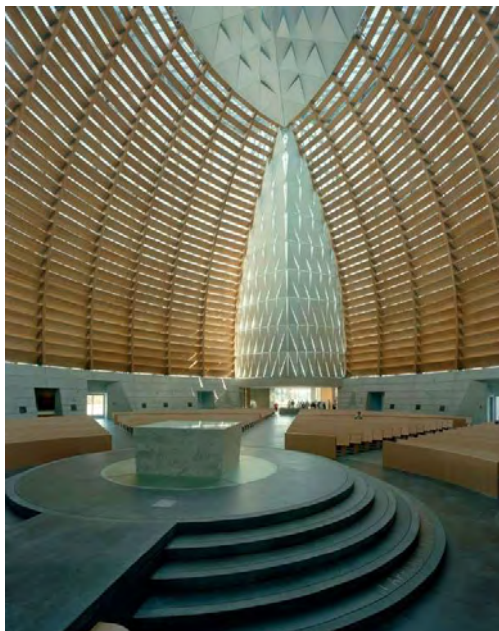
Ο πύργος ελέγχου του αεροδρομίου της Arlanda σχεδιάστηκε από τους αρχιτεκτονες της Wingårdh Arkitektkontor AB και χτίστηκε από το 1999 έως το 2001. Το ύψος του είναι 83 μέτρα ύψος, το οποίο ισοδυναμεί με 24 ορόφους πάνω από το έδαφος. Ο λόγος χρήσης του S.C.C. είναι η επίτευξη γρήγορης σκλήρυνσης και ταχύτητας ανύψωσης βάρους, θέλοντας να επιτευχθεί ένα χτισμένο ύψος 3,27 μ. για κάθε τέσσερις ημέρες. Επιπλέον, επιτυγχάνεται υψηλής ποιότητας σκυρόδεμα χωρίς δονήσεις ενώ μειώνεται ο θόρυβος και επιτρέπει τη συνεχή χύτευση σκυροδέματος κατά τη διάρκεια της νύχτας.

➤ *Ο καθεδρικός ναός του Χριστού, το φως, το Όκλαντ της Καλιφόρνια. (Εικόνα 4.13)*



Εικόνα 4.13 Εξωτερική όψη του καθεδρικού ναού (Daczko (2012))

Τα τοιχώματα από κυρτό σκυρόδεμα που λειτουργούσαν δομικά και ως εκτεθειμένες επιφάνειες χυτεύθηκαν με S.C.C.. Το S.C.C. χρησιμοποιήθηκε για την επίτευξη των καμπυλωμένων τοίχων, για τις απότομες λεπτομέρειες και ομοιόμορφη εμφάνιση (Εικόνα 4.14). Εφαρμόζοντας το



S.C.C. στη χύτευση αυτών των κρίσιμων αρχιτεκτονικών τοίχων, ο εργολάβος χρησιμοποίησε το μείγμα για να χυτεύσει τα τοιχώματα του υπόγειου μασωλείου σε μια προσπάθεια εξοικείωσης με την τεχνολογία. Το μίγμα είχε μια ροή κατάρρευσης 610-690mm και τοποθετήθηκε με άντληση.

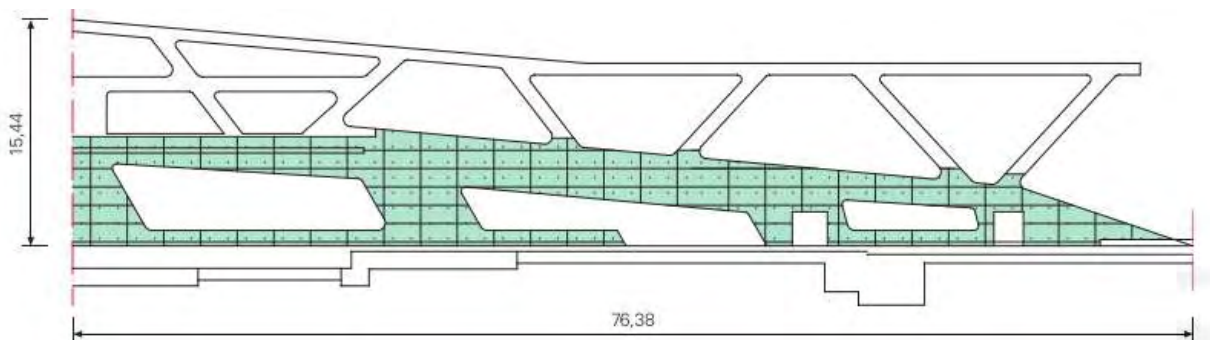
Εικόνα 4.14 Στην εσωτερική όψη του ναού είναι επίσης εμφανής η χρήση SCC(<https://www.arch2o.com/cathedral-of-christ-the-light-som/>)

➤ *BMW Κεντρικό κτίριο Zaha Hadid, Λειψία, Γερμανία 2003 (Εικόνα 4.15).*



Εικόνα 4.15 Κεντρικό κτίριο της BMW της Zaha Hadid, Λειψία (Formwork Technology for Architectural Concrete (2010))

Οι υψηλές απαιτήσεις ποιότητας στις επιφάνειες του σκυροδέματος, καθώς και η απαιτητική γεωμετρία του κτιρίου, απαιτούσαν έναν τρόπο το οποίο θα μπορούσε να προσαρμοστεί για να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις. Ως αποτέλεσμα, σχηματίστηκαν 32.500 m² επιφάνειες τοίχων με ύψος έως 18m από αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα μέσα σε διάστημα επτά μηνών. Η δομή του συστήματος του πατώματος κατασκευάστηκε με S.C.C. ενώ η οροφή συναρμολογήθηκε με σειρά χαλύβδινων δοκών (Εικόνα 4.16).



Εικόνα 4.16 Τομή του κτιρίου (Formwork Technology for Architectural Concrete (2010))

➤ *Σύγχρονο Κέντρο Τεχνών, Σινσινάτι, Οχάιο Zaha Hadid, 2003 (Εικόνα 4.17)*

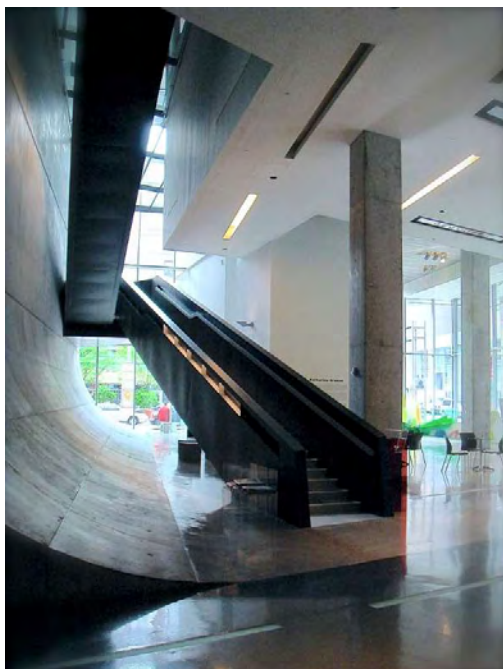


Εικόνα 4.17 Εξωτερική όψη του Σύγχρονου Κέντρου Τεχνών στο Σινσινάτι του Οχάιο (<https://www.archdaily.com/786968/ad-classics-rosenthal-center-for-contemporary-art-zaha-hadid-architects-usa>)

Η διεθνούς φήμης αρχιτέκτονας Zaha Hadid δημιούργησε μια συναρπαστική δομή ανοιχτού τύπου που "σχεδιάστηκε ως ένα μεγάλο πλωτό αεροπλάνο που κλίνει ελαφρώς προς τα πάνω στο πίσω μέρος του κτιρίου, ενώ το επίπεδο του πατώματος μετατρέπεται σε μια σειρά ραμπών που οδηγούν στις γκαλερί . Ο χώρος των 80.000 τετραγωνικών ποδιών (7.430 τ.μ.) έχει ύψος πέντε ορόφων και βρίσκεται μεταξύ των υπάρχουσών κατασκευών του κέντρου της πόλης.

Η πρόκληση

Ένα στοιχείο του σχεδιασμού αυτού του κτιρίου ήταν ένα 'roll-up' που έμοιαζε με μια ράμπα σκέιτμπορντ μήκους 96 ποδιών (29,3m) (Εικόνα 4.18), η οποία συνδέει τον τοίχο με το πάτωμα. Η μορφή αυτή του καμπύλου στοιχείου δεν άφηνε περιθώρια για εσωτερικούς κραδασμούς. Οι μεταλλικές κατασκευές για κολώνες με σχήμα διαμαντιού αποτελούνται από τετράγωνες στήλες με ένθετα κόντρα πλακέ για να δημιουργήσουν το σχήμα διαμαντιού τους. Η λεπτομέρεια της φόρμας είχε σαν αποτέλεσμα "νεκρές περιοχές" σε δύο πλευρές που περιορίζουν τη δυνατότητα για σωστή δόνηση του σκυροδέματος.

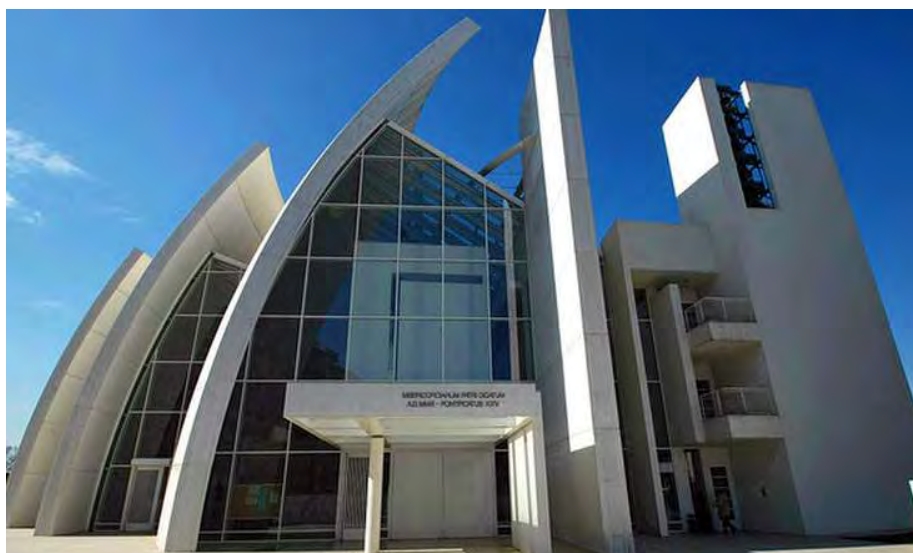


Η λύση

Προκειμένου να διασφαλιστεί η σωστή δόνηση και να ελαχιστοποιηθούν οι ατέλειες στην επιφάνεια, επιλέχθηκε το αυτοδιαχεόμενο σκυρόδεμα, χρησιμοποιώντας ένα μείγμα αδρανών, τόσο για το καμπύλο τμήμα όσο και για τις κολώνες σε σχήμα διαμαντιού.

Εικόνα 4.18 Εσωτερική όψη του κτιρίου όπου είναι ορατή η ‘ράμπα’ (https://assets.mbs.basf.com/en-us/project_profile-rosenthal.pdf)

- **Η πρόσοψη της εκκλησίας Jublee στη Ρώμη από τον Richard Meirs & Partners. (2002)**
(Εικόνα 4.19)



Εικόνα 4.19 Η πρόσοψη της εκκλησίας (Cardellicchio (2019))



Η εκκλησία Jubilee στα νοτιοανατολικά προάστια της Ρώμης είναι ένα από τα πρώτα κτίρια που κατασκευάζονται με λευκό σκυρόδεμα με αυτοκαθαριζόμενο φωτοκαταλυτικό τσιμέντο. Το τσιμέντο με νανοσωματίδια TiO_2 χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή τοιχωμάτων που διατηρούν τα αισθητικά χαρακτηριστικά τους με την πάροδο του χρόνου επιτυγχάνοντας ταυτόχρονα αυτοκαθαριζόμενο αποτέλεσμα. Ωστόσο, 16 χρόνια αργότερα, οι ιδιότητες αυτοκαθαρισμού και συντήρησης χρώματος που προκύπτουν από τα σωματίδια τιτανίου (TiO_2) στο μείγμα σκυροδέματος δεν πληρούν τις απαιτήσεις σχεδιασμού και το σκυρόδεμα παρουσιάζει πρόωρες ενδείξεις αποσύνθεσης (Εικόνα 4.20).

Εικόνα 4.20 Η πρόσοψη της εκκλησίας 16 χρόνια αργότερα δεν ήταν η αναμενόμενη (Cardellicchio (2019))

➤ *Το κτίριο της New Enexis στο Zwolle (Ολλανδία) (Εικόνα 4.21).*



Εικόνα 4.21 Το κτίριο της New Enexis στο Zwolle (Jalil, Kahachi (2018))

Οι νανοσωλήνες άνθρακα (CNTs) έχουν χρησιμοποιηθεί στο σκυρόδεμα για την κατασκευή στοιχείων πρόσοψης με μεγάλες επιφάνειες που μπορούν να τοποθετηθούν σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα, για την κατασκευή του νέου κτιρίου Enexis. Το χαμηλό βάρος των στοιχείων οδήγησε σε μια γρήγορη και εύκολη εγκατάσταση. Επιπλέον, το συγκεκριμένο σχήμα των πλαισίων θα συμβάλει σημαντικά στη χαμηλή κατανάλωση ενέργειας αυτού του ενεργειακά ουδέτερου κτιρίου.

4.10 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΓΙΑ ΤΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ

Το νανοσκυρόδεμα είναι σημαντικό όχι μόνο γιατί βελτιώνεται ως δομικό υλικό αλλά και στο πλαίσιο της προσπάθειας για εξοικονόμηση ενέργεια. Οι σύγχρονοι αρχιτέκτονες χρησιμοποιούν το νανοσκυρόδεμα ως υλικό κατασκευής λόγω των εξαιρετικών του ιδιοτήτων. Έτσι επιτρέπεται η κατασκευή πιο δημιουργικών μορφών που ήταν αδύνατο να κατασκευαστούν με τη χρήση των συνηθισμένων μιγμάτων σκυροδέματος.

Το αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα (S.C.C.) που παράγεται μέσω της προσθήκης μικρής ποσότητας νανοπυριτίου (SiO_2) έχει ως αποτέλεσμα το σκυρόδεμα να έχει υψηλή αντοχή και ανθεκτικότητα. Ως εκ τούτου, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή σύνθετων σχημάτων και βελτιωμένης μηχανικής αντοχής σκυροδέματος.

Το αυτοκαθαριζόμενο σκυρόδεμα επιτυγχάνεται με την προσθήκη νανοτιτανίου (TiO_2). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το αυτοκαθαριζόμενο σκυρόδεμα με την ειδική φωτοκαταλυτική του ιδιότητα να μετατρέπει τους ατμοσφαιρικούς ρύπους σε αβλαβείς ουσίες με τη βοήθεια του ηλιακού φωτός. Επίσης προκαλείται στο τσιμέντο γρήγορη ενυδάτωση.

Οι νανοσωλήνες άνθρακα (CNTs) μπορούν να βελτιώσουν τη μηχανική αντοχή του σκυροδέματος και να αποτρέψουν τις ρωγμές μετά τη σκλήρυνση. Με την προσθήκη νανοσωλήνων άνθρακα επέρχεται η βελτίωση της αντοχής στη διάβρωση, την κόπωση, τη φθορά και την τριβή. Επιπλέον, συμβάλλει έμμεσα στην εξοικονόμηση ενέργειας, η οποία συνήθως απαιτείται για την επισκευή ή την αντικατάσταση της υποβαθμισμένης υποδομής.

Όλα αυτά τα νέα χαρακτηριστικά που προστίθενται στα χαρακτηριστικά και τις ιδιότητες του σκυροδέματος, καθιστούν το νανοσκυρόδεμα ως νέο αγαπημένο δομικό υλικό των αρχιτεκτόνων, καθώς επιτρέπει μεγάλες διαστάσεις, ασυνήθιστες και πολύπλοκες μορφές, σταθερή εμφάνιση και πολλές άλλες ιδιότητες.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 - ΘΕΡΜΟΜΟΝΩΣΗ

5.1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ - ΑΕΡΟΤΖΕΛ

Οι κατασκευές τείνουν τα τελευταία χρόνια να βελτιώνουν την ποιότητα μόνωσης, η οποία όμως εξαρτάται από διάφορους παράγοντες. Τα επίπεδα θερμοκρασιών δίνονται από παραμέτρους και δεν μπορούν να διαφέρουν πολύ μεταξύ τους. Σε κάποιες κατασκευές χρησιμοποιήθηκαν πορώδη υλικά ώστε να επιτευχθεί αυτός ο σκοπός. Η χρήση νανοπορώδων υλικών μπορεί προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα, στα οποία η μεταφορά ανάμεσα στους πόρους είναι σε μεγάλο βαθμό αμελητέα λόγω του μικρού χώρου που διατίθεται για την κίνηση των μορίων. Ιδανικά, ένα κενό μέσα στους πόρους παράγει τις καλύτερες μονωτικές ιδιότητες. Πρακτικά, όσο μικρότεροι είναι οι πόροι, τόσο μικρότερο είναι το κενό που πρέπει να επιτευχθεί για τις ίδιες μονωτικές ιδιότητες. Βγαίνει το συμπέρασμα, δηλαδή, ότι η αξία χρήσης νανοδομών είναι σημαντική. Ο στόχος είναι να δημιουργηθούν πολύ μικροί πόροι και να εκκενωθούν, πράγμα που θα μειώσει σημαντικά την αγωγιμότητα των αερίων, θα μειώσει την ακτινοβολία και θα μειώσει την επίδραση της αγωγιμότητας στα στερεά λόγω του μεγάλου πορώδους.

Υπάρχουν αρκετοί τρόποι με τη βοήθεια της νανοτεχνολογίας για να δημιουργηθεί ένα είδος νανοαφρού. Ο στόχος είναι να δημιουργηθεί μια πορώδης δομή ώστε να εγκλωβίζεται ο αέρας. Ένα αρκετά γνωστό παράδειγμα τέτοιας δομής υλικού με μονωτικές ιδιότητες είναι το αεροτζέλ.

Τα αεροτζέλ έχουν ανακαλυφθεί εδώ και αρκετά χρόνια, όμως είναι ακριβά, εύθραυστα και είναι δύσκολα να δουλευτούν. Οι βελτιώσεις στις διαδικασίες παραγωγής στο πέρας του χρόνου απέδωσαν καλύτερα και οικονομικότερα αεροτζέλ. Η πυκνότητα κάποιων νέων αεροτζέλ μπορεί να είναι εξαιρετικά μικρή, αφού είναι και τα ελαφρύτερα υλικά που γνωρίζει ο άνθρωπος, με τιμές : 99.8% αέρα και 0.2% πυρίτιο .

5.1.2 ΑΕΡΟΤΖΕΛ ΠΥΡΙΤΙΟΥ ΣΕ ΠΑΡΑΘΥΡΑ

Τα παράθυρα έχουν διπλό ρόλο στη θερμική κάλυψη του κελύφους του κτιρίου, και αυτός είναι:

- Οι ιδιότητες θερμικής μετάδοσης πρέπει να είναι όσο το δυνατόν χαμηλότερες ώστε να μειώνεται η κατανάλωση ενέργειας για τη θέρμανση και τον κλιματισμό.

- Τα χαρακτηριστικά μετάδοσης φωτός πρέπει να είναι όσο το δυνατόν ψηλότερα για οπτική άνεση και εξοικονόμηση ηλεκτρικής ενέργειας σε εγκαταστάσεις φωτισμού, χάρη στον φυσικό φωτισμό. Επιπλέον, τα παράθυρα θα πρέπει να εγγυώνται φυσικό αερισμό, κυρίως σε κτίρια κατοικιών. Τέλος, πρέπει επίσης να εξασφαλίζουν επαρκή ακουστική ισορροπία

Τα μεγάλα ενεργειακά αποδοτικά παράθυρα όπως τα παράθυρα με αεροτζέλ (με αεροτζέλ διοξειδίου του πυριτίου στον ενδιάμεσο χώρο) θα μπορούσαν να ικανοποιήσουν και τις δύο αυτές απαιτήσεις λόγω του υψηλού συντελεστή θερμικής μόνωσης τους (η θερμική αγωγιμότητα του αεριούχου πυριτίου είναι τόσο χαμηλή όσο $0,010 \text{ W/mK}$) και της υψηλής διαπερατότητας. Υαλοπίνακες κενού, έξυπνα παράθυρα, υαλοπίνακες ηλιακών κυψελών, ηλεκτροχρωμικά παράθυρα και παράθυρα αεροτζέλ εξετάστηκαν και ερευνήθηκαν τελικά ως οι καλύτερες λύσεις.

Τα παράθυρα με αεροτζέλ, για τα οποία βρέθηκε μια από τα χαμηλότερες συγκεντρώσεις του Συντελεστή Θερμικής Αγωγιμότητας U ($0,30 \text{ W/m}^2 \text{ K}$), φαίνεται ότι έχουν καλύτερες προοπτικές για τη βελτίωση της θερμικής απόδοσης, του φωτός ημέρας και των ηλιακών ιδιοτήτων στον τομέα των παραθύρων. Το αεροτζέλ είναι ένα εξαιρετικά πορώδες και ελαφρύ υλικό, με πολλές ιδιότητες που προσελκύουν την προσοχή των ερευνητών σε διάφορους τομείς της επιστήμης και της τεχνολογίας, αλλά και για εφαρμογές κτιρίων. Ο όρος «αεροτζέλ» εισήχθη για πρώτη φορά πριν από 80 χρόνια, όπου το υγρό αντικαταστάθηκε με αέριο, χωρίς να καταρρεύσουν οι στερεές ενώσεις του τζελ.

Στη συνέχεια, η χημική σύνθεση του υλικού και οι εφαρμογές διαφοροποιήθηκαν προοδευτικά, αλλά ένα μεγάλο μέρος των εφαρμογών επικεντρώθηκε στην ανάπτυξη θερμομονωτικών υλικών υψηλής απόδοσης. Οι πιο ελπιδοφόρες εφαρμογές σε κτίρια περιλάμβαναν κοκκώδεις ημιδιαφανείς αεροτζέλ και διαφανή μονολιθικά αεροτζέλ πυριτίου. Οι διαφανείς μονολιθικοί υαλοπίνακες αναπτύχθηκαν από μια σουηδική εταιρεία τη δεκαετία του 1990, αλλά τα προηγμένα συστήματα υαλοπινάκων με μονολιθικό αεροτζέλ στο ενδιάμεσο χώρο δεν χρησιμοποιούνταν ακόμη στη μαζική παραγωγή.

Ταυτόχρονα, κατασκευάστηκαν κοκκώδεις ημιδιαφανείς αεροτζέλ με αποδεκτή διαπερατότητα και από το 2005 εμφανίστηκαν στην αγορά πολλά συστήματα φωτισμού ημέρας (πολυκαρμπονικά πάνελ, δομικά πλαίσια για συνεχείς προσόψεις, μονωμένα γυαλιά) με ημιδιαφανή κοκκώδη αεροτζέλ στον ενδιάμεσο χώρο (Εικόνα 5.1), προσφέροντας εξαιρετικές θερμικές επιδόσεις,

υψηλή ποιότητα του διάχυτου φωτός, καλή απορρόφηση ηλιακής θερμότητας και καλά χαρακτηριστικά ηχομόνωσης.

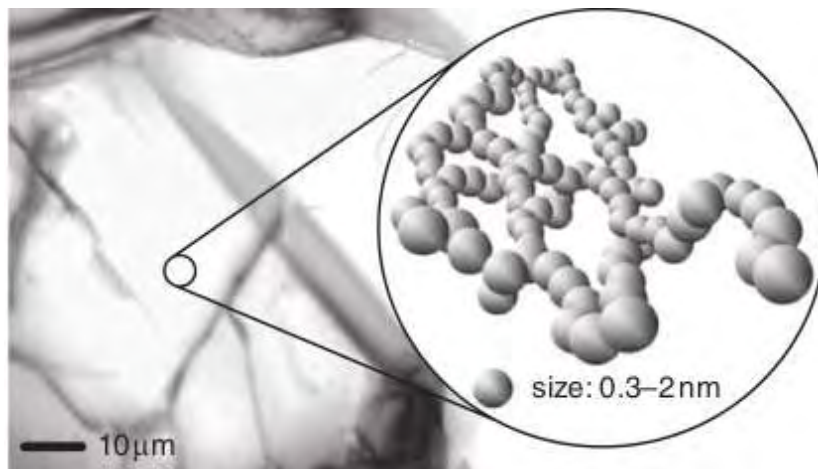


Εικόνα 5.1 Η ορατότητα μέσω ενός δείγματος αεροτζέλ (Pacheco-Torgal, Diamanti, Nazari et al. (2013))

5.1.3 ΔΟΜΗ ΤΟΥ ΑΕΡΟΤΖΕΛ

Γενικά κατασκευάζονται ως καλύμματα που τυλίγονται γύρω από σωλήνες ή άλλες κατασκευές ή εφαρμόζονται σε γυψοσανίδες. Μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν ως μόνωση σε ημιδιαφανή τοιχώματα όπως το Kalwall.

Συχνά περιγράφονται στη βιβλιογραφία των κατασκευαστών και της ακαδημαϊκής βιβλιογραφίας ως «νανοπορώδεις» ή νανοδομημένες επιφάνειες και δεν περιέχουν γενικά νανοσωματίδια (Εικόνα 5.2). Η νανοποριακή δομή τους (οι κατασκευαστές δηλώνουν ότι δεν περιέχουν νανοσωματίδια) παρέχει αντίσταση στη ροή θερμότητας (Hanus and Harris, 2013).



Εικόνα 5.2 Δομή του νανοπορώδεις δικτύου SiO_2 του αεροτζέλ πυριτίου. (Pacheco-Torgal, Diamanti, Nazari et al. (2013))

Είναι πολύ λεπτότερα και ελαφρύτερα από τα παραδοσιακά υλικά για ισοδύναμο επίπεδο θερμομόνωσης και επομένως είναι χρήσιμα όταν υπάρχει περιορισμένος χώρος, για παράδειγμα, στα έργα αναβάθμισης και ανακαίνισης. Χρησιμοποιούνται επίσης σε βιομηχανίες πετρελαιοϋ και φυσικού αερίου. Ωστόσο, τα προϊόντα είναι ακριβά, 6-10 φορές μεγαλύτερο κόστος σε σχέση με παραδοσιακά μονωτικά προϊόντα και, ως εκ τούτου, δεν χρησιμοποιούνται συχνά σε συνηθισμένα κτίρια.

5.1.4 ΦΥΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

Τα αεροτζέλ πυριτίου είναι άμορφο υλικό, όπου η πυκνότητα του σκελετού είναι περίπου 2200 kg/m^3 , ενώ το υλικό είναι εξαιρετικά ελαφρύ (η πυκνότητα είναι στην περιοχή των $50\text{-}200 \text{ kg/m}^3$), λόγω του πολύ υψηλού πορώδους (ο όγκος των πόρων υπερβαίνει το 90% συνολικός όγκος). Το μέγεθος των πόρων είναι τυπικά στην περιοχή των $5\text{-}100 \text{ nm}$. Τα τρέχοντα αεροτζέλ για εφαρμογές κτιρίων έχουν συνολική πυκνότητα $70\text{-}150 \text{ kg/m}^3$. Οι ακουστικές ιδιότητες είναι πολύ ενδιαφέρουσες: η ακουστική διάδοση μέσω αερίων εξαρτάται από τη φύση και την πίεση του διάμεσου αερίου, από την πυκνότητα του αεροτζελ και περισσότερο από την υφή, αλλά η ταχύτητα του ήχου στα αεροτζέλ πυριτίου είναι χαμηλότερη από τον αέρα περίπου 40 m/s μέσω μονολιθικών αερίων και περίπου 100 m/s μέσω κοκκωδών. Μπορούν επίσης να βελτιώσουν την

ηχομόνωση στα παράθυρα. Οι ιδιότητες οπτικής και σκέδασης συζητούνται στις επόμενες παραγράφους.

5.1.5 ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

Τα αεροτζέλ είναι πολύ εύθραυστα υλικά: η αντοχή εφελκυσμού είναι αμελητέα, η αντοχή σε θλίψη και το μέτρο ελαστικότητας είναι πολύ χαμηλά και εξαρτώνται από τη συνδεσιμότητα του δικτύου και την πυκνότητα. Η αντοχή σε θλίψη είναι στην περιοχή 1-2 MPa. Το μέτρο Young (E) είναι συνάρτηση της φαινόμενης πυκνότητας. Διαφέρει στην κλίμακα 10⁻³-10 GPa, όταν η φαινόμενη πυκνότητα ποικίλει στα 10² - 2 × 10³ kg / m³. Οι Aegerter κ.α. (2011) βρήκαν μια τιμή E στην περιοχή 2,7-8,6 MPa, όταν η πυκνότητα είναι περίπου 150-200 kg / m³. Το μέτρο διάτμησης G βρίσκεται στην κλίμακα 5-40 MPa όταν η πυκνότητα κυμαίνεται μεταξύ 150 και 400 kg / m³.

Επιπλέον, η επαφή με το νερό πρέπει να αποφεύγεται για μονολιθικά αεροτζελ: σε εμπορικές εφαρμογές, τα αεροτζελ μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συνθήκες κενού, με προφανή πλεονεκτήματα όσον αφορά τη θερμομόνωση. Παρ'όλα αυτά, τα εμπορικά κοκκώδη αεροτζελ (Cabot) είναι υδρόφοβα.

5.1.6 ΑΠΟΔΟΣΗ ΠΑΡΑΘΥΡΩΝ ΜΕ ΑΕΡΟΤΖΕΛ

Η απόδοση των καινοτόμων παραθύρων αεροτζέλ, σε σύγκριση με τα συμβατικά συστήματα υαλοπινάκων, μπορεί να αξιολογηθεί λαμβάνοντας υπόψη μερικές σημαντικές παραμέτρους:

- ✓ Μετάδοση φωτός: η ικανότητα του συστήματος υαλοπίνακα να διαχέει το φυσικό φως σε εσωτερικό χώρο είναι σημαντική καθώς το φυσικό φως παίζει ενεργό ρόλο στην εξοικονόμηση ηλεκτρικής ενέργειας κατά τη διάρκεια της ημέρας και επηρεάζει τη γενική υγεία των ανθρώπων. απαιτούνται υψηλές τιμές, προκειμένου να διασφαλιστεί η οπτική άνεση και η εξοικονόμηση ενέργειας.
- ✓ Ο συντελεστής ηλιακού συντελεστή g και η θερμικής αγωγιμότητας U, επηρεάζουν τη θερμότητα που μεταφέρεται μέσω των συστημάτων υαλοπινάκων και τον υπολογισμό

των φορτίων θέρμανσης και ψύξης. Απαιτούνται χαμηλές τιμές, προκειμένου να διασφαλιστεί η θερμική άνεση και η εξοικονόμηση ενέργειας.

- ✓ Δείκτης μείωσης ήχου, R, ο οποίος επηρεάζει τον θόρυβο που μεταδίδεται από τα παράθυρα. απαιτούνται υψηλές τιμές προκειμένου να εξασφαλιστεί επαρκής ακουστική άνεση στα κτίρια.

5.1.6.1 ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΦΩΤΟΣ

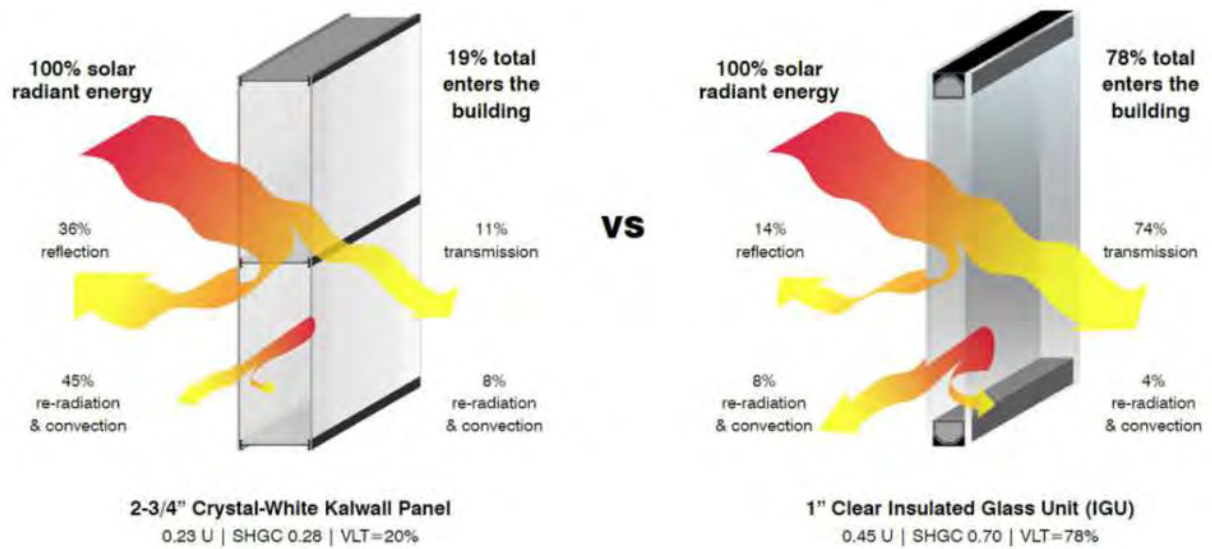
Σε αντίθεση με τους διαφανής υαλοπίνακες, το αεροτζέλ διασκορπίζει τα ορατά κύματα φωτός παρέχοντας ομοιόμορφο, διάχυτο φως ημέρας σε εσωτερικούς χώρους ανεξάρτητα από τη θέση του ήλιου. Το αεροτζέλ πληροί επίσης τα απαιτούμενα επίπεδα φωτός, ενώ μεταδίδει χαμηλότερα ποσοστά ορατού φωτός, σε σύγκριση με τα συμβατικά γυαλιά, λόγω μιας διαδικασίας που ονομάζεται λαμπερτιανή διάχυση (Lambertian diffusion). Αυτό το φαινόμενο είναι επίσης γιατί οι αρχιτέκτονες προτιμούν συνήθως το βόρειο φως που διαχέεται φυσικά από την ατμόσφαιρα. Το αεροτζέλ προσφέρει μουσειακής ποιότητας φωτισμού, που είναι ισορροπημένο χωρίς περιοχές υψηλής αντίθεσης, 'καυτά' σημεία ή λάμψη, εξαλείφοντας την ανάγκη για πρόσθετες συσκευές ανακατεύθυνσης ή σκίασης σε όλα τα ύψη του κτιρίου. Επίσης, έχει την ικανότητα να διαχέει το φως της ημέρας και εισχωρεί πολύ βαθύτερα στους εσωτερικούς χώρους, μειώνοντας έτσι την τεχνητή χρήση φωτός κατά τη διάρκεια της ημέρας.

5.1.6.2 ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

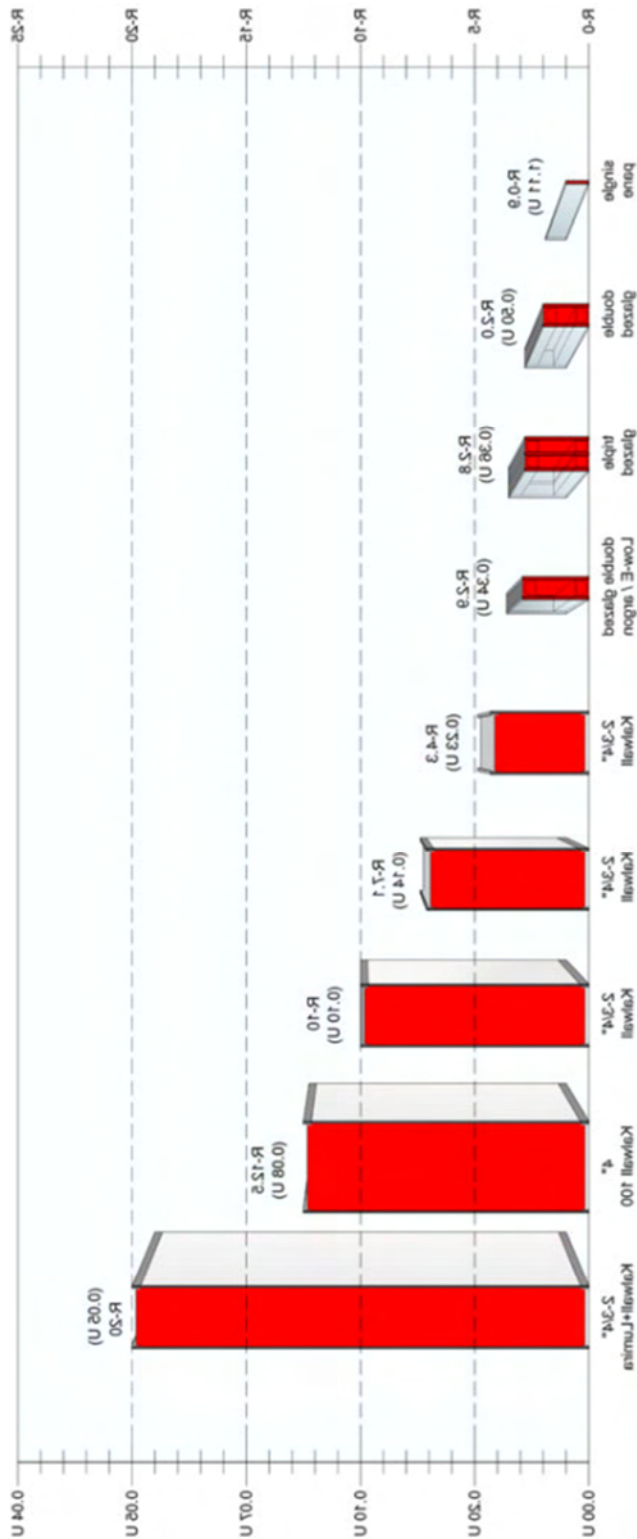
Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα του αεροτζέλ σε σχέση με άλλους τύπους υαλοπινάκων είναι η ικανότητά του να ελέγχει τη μεταφορά θερμότητας χωρίς την ανάγκη ειδικών αποχρώσεων ή επικαλύψεων. Αυτό επιτυγχάνεται ελέγχοντας τόσο τη μεταφορά λόγω ηλιακού ενέργειας όσο και λόγω αγωγιμότητας. Το συνολικό κέρδος θερμότητας που εισέρχεται σε ένα κτίριο από τον ήλιο είναι γνωστό ως κέρδος ηλιακής θερμότητας. Το μέτρο της αύξησης της ηλιακής θερμότητας καλείται Συντελεστής ηλιακής θερμότητας (Solar Heat gain Coefficient, SHGC) και εκφράζεται ως δεκαδικό ψηφίο μεταξύ 0 και 1. Όσο χαμηλότερο είναι το SHGC, τόσο λιγότερο ηλιακό κέρδος εισάγεται σε ένα κτίριο. Το αεροτζέλ μπορεί να προσφέρει μια σειρά από SHGCs κατάλληλα για μια συγκεκριμένη εφαρμογή και κλίμα.

Στο παράδειγμα που παρουσιάζεται κατωτέρω, ένα τυπικό πάνελ αεροτζέλ (Crystal-White | 0,23 U-factor) συγκρίνεται με μια διάφανη μονωμένη γυάλινη μονάδα (IGU) 1 "για να απεικονίσει

την εγγενή ικανότητα του αεροζέλ να διαχειριστεί την ηλιακή θερμότητα, με ανώτερη θερμική απόδοση.



Εικόνα 5.3 Έλεγχος στη μεταφορά ηλιακής θερμότητας σε υαλοπίνακες της εταιρείας Kalwall με τη χρήση αεροζέλ και με ένα κοινό υαλοπίνακα (<https://www.kalwall.com/technology/performance/solar-heat-gain-control/>)



Εικόνα 5.4 Θερμική απόδοση παραθύρων της εταιρεία Kalwall με τη χρήση αεροτζέλ σε σχέση με άλλου είδους παράθυρα (<https://www.kalwall.com/technology/performance/thermal-performance/>)

5.1.7 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Τα αεροτζέλ πυριτίου είναι μια καινοτόμος εναλλακτική στα ήδη υπάρχοντα προϊόντα μόνωσης λόγω των θερμικών ιδιοτήτων τους, παρόλα αυτά το κόστος τους είναι ακόμα υψηλό για την κατασκευαστική βιομηχανία. Το 2008 το αεροτζέλ αποτελούσαν το 0,3% της παγκόσμια αγοράς προϊόντων μόνωσης, με 83 εκατομμύρια δολάρια να έχουν δοθεί για προϊόντα αεροτζέλ στο σύνολο των 29 δισεκατομμυρίων της παγκόσμιας αγοράς. Με ετήσιο βαθμό αύξησης περίπου στο 50%, με ταυτόχρονη αύξηση των προϊόντων μόνωσης μόλις του 5%, τα αεροτζέλ φτάνουν περίπου το 1 δισεκατομμύριο έως το 2018.

Νανοϋλικό	ιδιότητες	Διαθεσιμότητα και χρήση
Αεροτζέλ πυριτίου σε ημιδιαφανή σωματίδια	Τα σωματίδια «Lumira» (Cabot) διατίθενται μόνα τους ή ενσωματώνονται σε προϊόντα τοίχου / οροφής όπως «Ecosky, Kalwall, Solera». Επιτρέπουν τη μετάδοση του φωτός ενώ παράλληλα παρέχουν υψηλά επίπεδα θερμομόνωσης	Αυτά τα προϊόντα είναι άμεσα διαθέσιμα στην αγορά, αλλά η χρήση τους περιορίζεται σε μεγάλο βαθμό σε εξειδικευμένα έργα, καθώς είναι πολύ πιο ακριβό από τα παραδοσιακά προϊόντα
Αεροτζέλ πυριτίου σε διάφανη μορφή	Αυτά είναι διαθέσιμα από διάφορους κατασκευαστές: ορισμένα είναι ειδικά σχεδιασμένα για προστασία από το κρύο, άλλα έχουν υψηλή αντοχή στη θερμότητα. Τέτοια προϊόντα είναι τα «Pyrogel, cryogel, space loft» (αεροτζέλ Aspen), «Thermal wrap» (Cabot) και «Thermablok» (Acoustiblok)	
Σωματίδια αεροτζελ πυριτίου σε πάνελ με μόνωση κενού	Τα πάνελ με μόνωση κενού είναι διαθέσιμα για τοποθέτηση σε τοίχους, δάπεδα και στέγες, τα προϊόντα περιλαμβάνουν τα 'Optim-R' (Kingspan) και τα 'Kevothermal'	

Πίνακας 1.1 Νανοϋλικά με μορφή αεροτζέλ, ως μόνωση

5.1.7.1 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ LUMIRA



Εικόνα 5.5 Πανεπιστήμιο του San Francisco, Κέντρο Επιστημών και Καινοτομίας (<https://www.tgpamerica.com/gallery/university-of-san-francisco-john-lo-schiavo-s-j-center-for-science-and-innovat>)



Εικόνα 5.6 Βιβλιοθήκη Queens στο Glen Oaks, New York (<https://www.tgpamerica.com/gallery/queens-library-at-glen-oaks>)



5.7 Burlington Library, Ontario, Canada (<https://www.tgpamerica.com/gallery/burlington-library>)



Εικόνα 5.8 Building 115, Seattle, WA (<https://www.tgpamerica.com/gallery/building-115>)



Εικόνα 5.9 Smithsonian Conservation Biology Institute Genetics Laboratory at the National Zoo, Washington D.C. (<https://www.tgpamerica.com/gallery/smithsonian-conservation-biology-institute-genetics-laboratory-at-the-national-zo>)

5.2.1 ΜΟΝΩΤΙΚΟΙ ΠΙΝΑΚΕΣ ΚΕΝΟΥ (VACUUM INSULATION PANELS VIPS)

Τα θερμομονωτικά πάνελ κενού είναι ένα θερμομονωτικό προϊόν, το οποίο παρουσιάζει 3 με 6 φορές καλύτερες θερμομονωτικές ιδιότητες από τον αέρα. Αυτό επιτυγχάνεται εφαρμόζοντας συνθήκες κενού σε ένα έγκλειστο πορώδες υλικό. Η τοποθέτηση του στο κτιριακό κέλυφος μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική μείωση των θερμικών φορτίων και κατά επέκταση και της καταπόνησης ενέργειας για θέρμανση, καθώς και σε εξοικονόμηση χώρου μέσω λεπτότερων κατασκευών, λόγω του μικρότερου απαιτούμενου πάχους των πάνελ.

Τα κυριότερα προβλήματα που συναντώνται στην εφαρμογή των θερμομονωτικών πάνελ κενού στα κτίρια, έχουν να κάνουν με το χρόνο ζωής τους, την αλλοίωση των θερμομονωτικών τους ιδιοτήτων μετά το πέρας κάποιων ετών, καθώς και με το φαινόμενο των θερμογεφυρών στις ακμές τους. Επίσης, είναι πολύ εύθραυστα και δεν μπορούν να κοπούν στις ακριβείς διαστάσεις που απαιτεί η εκάστοτε εφαρμογή

Τα Θερμομονωτικά Πάνελ Κενού είναι ένα τέτοιο υλικό, το οποίο συνδυάζει μικρό πάχος με πολύ υψηλή θερμική αντίσταση (Εικόνα 5.12). Αποτελούνται από το νανοπορώδες υλικό του πυρήνα, το οποίο περικλείεται από ένα αεροστεγώς σφραγισμένο, αλουμινένιο ή πολυμερές περιβλήμα. Με την εφαρμογή συνθηκών κενού στον πυρήνα και τη μείωση των φαινομένων μεταφοράς θερμότητας, επιτυγχάνεται συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας 0,003-0,005 W/(m·K) στην αρχική τους κατάσταση και έως 0,008 W/(m·K) μετά από 25 χρόνια ζωής. Αυτές οι τιμές είναι 5- 12 φορές μικρότερες από τις αντίστοιχες των συμβατικών θερμομονωτικών υλικών. Έτσι, ένα πάνελ πάχους 20 mm, ισοδυναμεί με 120 mm αφρού πολουρεθάνης. Τα θερμομονωτικά πάνελ κενού μπορούν να τοποθετηθούν σε διάφορες περιοχές του κτιρίου, σε εσωτερικές ή εξωτερικές επιφάνειες, όπως τοιχοποιίες, στέγες, δώματα και δάπεδα, ιδίως σε περιπτώσεις ανακαίνισης υφιστάμενων κτιρίων, όπου ο χώρος είναι περιορισμένος. Ωστόσο η εφαρμογή των θερμομονωτικών πάνελ κενού στον κτιριακό τομέα, συναντάει δύο κύρια εμπόδια, το πολύ υψηλό κόστος καθώς και την απώλεια κάποιων ιδιοτήτων τους σε βάθος χρόνου.



Εικόνα 5.12 Άποψη από Θερμομονωτικά Πάνελ Κενού (<https://www.kingspan.com/meati/en-in/product-groups/insulation/knowledge-base/articles/general/what-is-a-vacuum-insulation-panel>)

5.2.2 ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ

Η ευαισθησία στις μηχανικές φθορές είναι ένας σημαντικός παράγοντας για την εφαρμογή των θερμομονωτικών πάνελ κενού στον κτιριακό τομέα, κυρίως αυτών με επιμεταλλωμένο πολυστρωματικό περίβλημα από πολυμερή υλικά. Εξαιτίας του πολύ λεπτού του πάχους, το περίβλημα είναι πολύ εύκολο να υποστεί διάτρηση από αιχμηρά αντικείμενα κατά τη διάρκεια της μεταφοράς ή της εγκατάστασης των πάνελ. Επιπλέον, οι υψηλές μηχανικές καταπονήσεις μπορούν να προκαλέσουν φθορά στο περίβλημα, κάνοντας ευκολότερη την εισχώρηση αερίων και υγρασίας διαμέσου αυτού. Η θερμική αγωγιμότητα ενός πάνελ το οποίο έχει υποστεί διάτρηση και έχει εισχωρήσει αέρας στο εσωτερικό του, εξακολουθεί να είναι πολύ χαμηλότερη από την αντίστοιχη συμβατικών υλικών ($0,020 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$), ωστόσο ο συντελεστής θερμοπερατότητας U [$\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$] του πάνελ αυξάνεται, εξαλείφοντας το πλεονέκτημα του πολύ λεπτού πάχους θερμομόνωσης που προσφέρουν τα θερμομονωτικά πάνελ κενού. Συγκεκριμένα, για ένα πάνελ πάχους 2cm με συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας $0,004 \text{ (W}/(\text{m}\cdot\text{K}))$, ο συντελεστής

θερμοπερατότητας U ($W/(m^2 \cdot K)$) αυξάνεται λόγω μηχανικής φθοράς, από $0,19$ ($W/(m^2 \cdot K)$) σε $0,85$ ($W/(m^2 \cdot K)$). Για να επιτευχθεί σωστή εγκατάσταση των θερμομονωτικών πάνελ κενού, θα πρέπει να ληφθούν τα κατάλληλα μέτρα προστασίας, ώστε να αποφευχθεί η φθορά τους. Επίσης, μπορούν να χρησιμοποιηθούν προκατασκευασμένα δομικά στοιχεία με θερμομονωτικά πάνελ κενού, τα οποία ελαχιστοποιούν τον κίνδυνο φθοράς των πάνελ κατά την εγκατάστασή τους.

5.2.3 ΔΟΜΗ ΘΕΡΜΟΜΟΝΩΤΙΚΩΝ ΠΙΝΑΚΩΝ ΚΕΝΟΥ

Τα θερμομονωτικά πάνελ κενού αποτελούνται από ένα πορώδες υλικό με ανοιχτούς πόρους, το οποίο περικλείεται από ένα πολυστρωματικό περίβλημα, το οποίο σφραγίζεται αεροστεγώς, δημιουργώντας συνθήκες κενού στο εσωτερικό του. Το περίβλημα πρέπει να μένει αδιαπέραστο ώστε να διατηρηθούν οι θερμομονωτικές ιδιότητες του πάνελ, με τον αέρα και τους υδρατμούς να παραμένουν σε βάθος χρόνου.

Τα κύρια μέρη από τα οποία αποτελείται το θερμομονωτικό πάνελ κενού είναι το πορώδες υλικό του πυρήνα, το περίβλημα καθώς και τα απορροφητικά και ξηραντικά μέσα που τοποθετούνται στο εσωτερικό του, για να απορροφούν πιθανά αέρια και υδρατμούς που έχουν εισχωρήσει διαμέσου του περιβλήματος.

Κύρια μέρη του θερμομονωτικού πάνελ κενού:

1) Πυρήνας

Το υλικό στον πυρήνα του θερμομονωτικού πάνελ κενού είναι υπεύθυνο για την παροχή των μηχανικών και θερμομονωτικών ιδιοτήτων του πάνελ. Θα πρέπει να διαθέτει όσο το δυνατό μεγαλύτερη θερμική αντίσταση και να πληροί συνοπτικά τις παρακάτω προϋποθέσεις:

1. Μικρό μέγεθος πόρων. Σε υλικά με μεγάλη διάμετρο πόρων, πρέπει να εφαρμοστούν συνθήκες πολύ χαμηλής πίεσης ώστε να επιτευχθεί χαμηλή θερμική αγωγιμότητα. Με τη χρήση νανοπορώδων υλικών είναι εφικτό να επιτευχθεί χαμηλή θερμική αγωγιμότητα με συνθήκες υψηλότερης πίεσης, που είναι ευκολότερο να εφαρμοστούν και να διατηρηθούν στο εσωτερικό του πάνελ.

2. Η δομή των πόρων του θα πρέπει να είναι ανοιχτή ώστε να μπορεί να επιτευχθεί η εκκένωση των αερίων από το εσωτερικό του πάνελ.
3. Θα πρέπει να είναι ανθεκτικό στην συμπίεση. Είναι χαρακτηριστικό πως στο εσωτερικό του πάνελ η πίεση είναι της τάξης των 0,2 mbar ενώ εξωτερικά η πίεση είναι ατμοσφαιρική.
4. Το υλικό του πυρήνα θα πρέπει να είναι αδιαπέραστο για τις υπέρυθρες ακτίνες, ώστε να μειωθεί η μετάδοση θερμότητας λόγω ακτινοβολίας.

Υλικά του πυρήνα

I. Πυρογενές πυρίτιο

Το πυρογενές πυρίτιο (fumed silica), παράγεται από την πυρόλυση του τετραχλωριδίου του πυριτίου (SiCl_4), το οποίο στη συνέχεια εξατμίζεται και αντιδρά με το οξυγόνο, σχηματίζοντας την λευκή σκόνη διοξειδίου του πυριτίου (SiO_2). Έπειτα, η συγκεκριμένη σκόνη συμπιέζεται σε μορφή πλακών και με την προσθήκη ενισχυτικών ινών για μεγαλύτερη μηχανική αντοχή, χρησιμοποιείται ως υλικό του πυρήνα στα θερμομονωτικά πάνελ κενού. Το μικρό μέγεθος των πόρων της, που κυμαίνεται από 30 έως 100 nm, επιτρέπει την επίτευξη θερμικής αγωγιμότητας 0,003-0,006 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ σε συνθήκες πίεσης 20-100 mbar, ενώ η πυκνότητά της είναι της τάξης των 200 kg/m^3 . Επιπλέον, είναι ανθεκτική στις συνθήκες συμπίεσης, πληρώνοντας έτσι τις προαναφερθείσες προϋποθέσεις για τα υλικά του πυρήνα.

Το πυρογενές πυρίτιο δεν έχει τη δυνατότητα να αποτρέπει τη μετάδοση θερμότητας μέσω ακτινοβολίας, ωστόσο οι κατασκευαστές προχωρούν στην τοποθέτηση ειδικών αδιαφανοποιητών που περιορίζουν τη μετάδοση θερμότητας μέσω ακτινοβολίας. Με αυτόν τον τρόπο, ένα θερμομονωτικό πάνελ κενού με πυρογενές πυρίτιο έχει συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας της τάξης των 0,004 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ στην αρχική του κατάσταση. Στα επιπλέον πλεονεκτήματα της πυρογενούς πυριτίου συμπεριλαμβάνεται το γεγονός πως είναι μη-τοξική, ανακυκλώσιμη, ανθεκτική στη φωτιά, δεν εκλύει επικίνδυνα προς το περιβάλλον αέρια, ενώ παράλληλα συμβάλλει στην απορρόφηση υδρατμών που εισχωρούν στο εσωτερικό του πάνελ διαμέσου του περιβλήματος. Επίσης διατηρεί πολύ χαμηλή θερμική αγωγιμότητα ακόμη και σε υψηλότερες πιέσεις σε σχέση με τα υπόλοιπα υλικά που χρησιμοποιούνται ως υλικά πυρήνα, εξαιρουμένου του αεροζέλ, το οποίο ωστόσο δεν χρησιμοποιείται λόγω υψηλού κόστους. Όλα αυτά τα πλεονεκτήματα την

καθιστούν το υλικό που χρησιμοποιείται περισσότερο από κάθε άλλο στην κατασκευή θερμομονωτικών πάνελ κενού για τον κτιριακό τομέα .

II. Αεροτζέλ

Η χρήση του αεροτζέλ ως υλικό πυρήνα για τα θερμομονωτικά πάνελ κενού, μπορεί να επιφέρει πολύ χαμηλές τιμές για το συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας. Είναι χαρακτηριστικό πώς σε συνθήκες πίεσης 50 mbar και με τη χρήση ειδικής στρώσης για τον περιορισμό της μετάδοσης θερμότητας μέσω ακτινοβολίας, ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας είναι ίσος με 0,004 W/(m·K), την ώρα που η τιμή του για συνθήκες ατμοσφαιρικής πίεσης ανεβαίνει στα 0,0135 W/(m·K). Το αεροτζέλ δεν είναι εύφλεκτο και δεν προκαλεί χημικές αντιδράσεις, ωστόσο το κόστος του είναι αρκετά υψηλό, με αποτέλεσμα να μην συναντάται συχνά η χρήση του ως υλικό πυρήνα για τα θερμομονωτικά πάνελ κενού .

III. Πολυουρεθάνη και διογκωμένη πολυστερίνη

Ο αφρός πολυουρεθάνης και η διογκωμένη πολυστερίνη αποτελούν δύο ακόμη υλικά τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν στον πυρήνα των θερμομονωτικών πάνελ κενού. Το χαμηλό κόστος, το μικρό μέγεθος των πόρων (30-250 nm) και η χαμηλή τους πυκνότητα (60-100 kg/m³), τα καθιστά κατάλληλα για τον πυρήνα των πάνελ κενού. Ο αφρός πολυουρεθάνης είναι πολύ ακριβότερος από την πολυστερίνη, αλλά διαθέτει μεγαλύτερη θερμική αντίσταση. Ωστόσο, και για τα δύο υλικά, για την επίτευξη των χαμηλών τιμών θερμικής αγωγιμότητας κατά τη χρήση τους στον πυρήνα των πάνελ κενού, απαιτούνται συνθήκες πολύ χαμηλών πιέσεων (0,1 mbar και χαμηλότερες) οι οποίες είναι δύσκολο να διατηρηθούν καθ' όλη τη διάρκεια της ζωής των πάνελ. Οι τιμές θερμικής αγωγιμότητας που προσφέρουν και τα δύο υλικά, είναι υψηλότερες από τις αντίστοιχες της πυρογενούς πυριτίου .

IV. Ίνες υάλου

Ως υλικό πυρήνα των πάνελ κενού, οι ύλες υάλου έχουν το πλεονέκτημα της δυνατότητας εφαρμογής σε υψηλές θερμοκρασίες, λόγω της πυκνότητάς τους αλλά και της δυνατότητας τους να παραμένουν ανεπηρέαστες ακόμη σε θερμοκρασίες άνω των 1000 ο C. Επίσης, η κατασκευή και η δομή των ινών υάλου οδηγεί σε μικρές επιφάνειες επαφής μεταξύ τους, ακόμη και όταν συμπίεζονται, μειώνοντας έτσι σημαντικά τη μετάδοση θερμότητας λόγω αγωγιμότητας. Θερμική αγωγιμότητα της τάξης των 0,0036 W/(m·K) θα ήταν εφικτή για την περίπτωση πάνελ

κενού με ίνες υάλου στον πυρήνα, ωστόσο όπως και στην περίπτωση της πολυουρεθάνης και της πολυστερίνης, απαιτούνται πολύ χαμηλές πιέσεις (0,1 mbar) οι οποίες είναι δύσκολο να διατηρηθούν σε βάθος χρόνου στο εσωτερικό των πάνελ .

2) Το περίβλημα

Ο σκοπός του περιβλήματος (envelope), είναι να προστατεύσει το εσωτερικό του πάνελ και να διατηρήσει τις επιθυμητές συνθήκες κενού, αποτρέποντας την εισχώρηση αέρα και υδρατμών στον πυρήνα. Η αποδοτικότητα των θερμομονωτικών πάνελ κενού εξαρτάται σε πολύ μεγάλο βαθμό από τη διατήρηση των συνθηκών κενού στο εσωτερικό τους, επομένως πιθανή εισχώρηση μαζών αέρα και υδρατμών διαμέσου του περιβλήματος, θα μειώσει σημαντικά την απόδοση και τις θερμομονωτικές τους ιδιότητες. Οι αλλαγές στην θερμοκρασία και τη σχετική υγρασία του περιβάλλοντος, επηρεάζουν σημαντικά τα φαινόμενα εισχώρησης αερίων και υδρατμών στον πυρήνα των θερμομονωτικών πάνελ κενού. Επιπλέον, το περίβλημα ευθύνεται για την απώλεια θερμότητας λόγω θερμογεφυρών που δημιουργούνται στις ακμές του.

Μια λύση στο συγκεκριμένο πρόβλημα είναι η χρήση μεγαλύτερων πάνελ κενού, που οδηγεί στη μείωση του φαινομένου των θερμογεφυρών. Το περίβλημα αποτελείται από πολύ λεπτές στρώσεις η κάθε μια από τις οποίες εξυπηρετεί συγκεκριμένους σκοπούς. Συγκεκριμένα, αποτελείται από την στρώση σφράγισης (sealing layer), την στεγανοποιητική στρώση (barrier layer) και την προστατευτική στρώση (protective layer). Η εσωτερική στρώση είναι η στρώση σφράγισης και είναι αυτή που συνδέει το υλικό του πυρήνα με το περίβλημα. Αποτελείται συνήθως από χαμηλής ή υψηλής πυκνότητας πολυαιθυλένιο (PE). Η μεσαία στρώση είναι η στεγανοποιητική στρώση, η οποία είναι υπεύθυνη για την αποφυγή εισχώρησης αέρα και υδρατμών στο πάνελ μέσω του περιβλήματος. Αποτελείται από λεπτό φύλλο αλουμινίου είτε από κάποιο πολυστρωματικό υλικό. Η εξωτερική στρώση είναι η προστατευτική στρώση, σκοπός της οποίας είναι να κάνει το πάνελ πιο ανθεκτικό στις εξωτερικές καταπονήσεις που δέχεται κατά τη μεταφορά και εγκατάστασή του, καθώς και να το προστατεύσει από τις συνθήκες του περιβάλλοντος. Τα θερμομονωτικά πάνελ κενού είναι πολύ εύθραυστα, επομένως η προστατευτική στρώση παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην αποφυγή φθορών και τη διατήρηση των υψηλών θερμομονωτικών ιδιοτήτων του πάνελ .

5.2.4 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΟΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΟ ΤΟΜΕΑ

Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα που προσφέρουν τα θερμομονωτικά πάνελ κενού είναι το μικρό απαιτούμενο πάχος θερμομόνωσης των δομικών στοιχείων του κτιρίου συγκριτικά με τα συμβατικά θερμομονωτικά υλικά, εξαιτίας της πολύ μικρότερης θερμικής τους αγωγιμότητας. Τα τελευταία χρόνια, συναντώνται πολλές περιπτώσεις χρήσης των θερμομονωτικών πάνελ κενού, τόσο σε νέα όσο και σε υφιστάμενα κτίρια. Με την εφαρμογή θερμομονωτικών πάνελ κενού, μπορούν να επιτευχθούν χαμηλοί συντελεστές θερμοπερατότητας U για τα δομικά στοιχεία του κτιριακού κελύφους, εξοικονομώντας ωφέλιμη επιφάνεια χρήσης, παράγοντας που είναι πολύ σημαντικός ειδικά στα υφιστάμενα κτίρια.

5.2.4.1 ΤΟΙΧΟΠΟΙΑ

Η κύρια εφαρμογή των θερμομονωτικών πάνελ κενού τόσο σε νέα όσο και σε υφιστάμενα κτίρια, συναντάται στην θερμομόνωση της τοιχοποιίας. Τα πάνελ κενού μπορούν να εφαρμοστούν τόσο στην εσωτερική όσο και στην εξωτερική πλευρά της τοιχοποιίας. Η τοποθέτηση των πάνελ εσωτερικά, ενδείκνυται στις περιπτώσεις υφιστάμενων κτιρίων, ιδίως όταν πρόκειται για ιστορικά κτίρια στα οποία δεν μπορεί να γίνει παρέμβαση εξωτερικά. Ωστόσο, με την εσωτερική εφαρμογή των πάνελ, ελλοχεύει ο κίνδυνος φθοράς τους λόγω φαινομένων συμπύκνωσης, εξαιτίας των χαμηλών επιφανειακών θερμοκρασιών της εξωτερικής επιφάνειας της τοιχοποιίας. Επομένως θα πρέπει να γίνει σωστός σχεδιασμός της εφαρμογής της θερμομόνωσης, λαμβάνοντας υπ' όψιν τους παραπάνω παράγοντες. Η τοποθέτηση των θερμομονωτικών πάνελ κενού στην εξωτερική πλευρά της τοιχοποιίας, είναι πρακτικά ευκολότερη και συμβάλλει στη μείωση του φαινομένου των θερμογεφυρών.



Εικόνα 5.13 Τοποθέτηση θερμομονωτικών πάνελ κενού στην εξωτερική πλευρά της τοιχοποιίας (<https://www.kingspan.com/meati/en-in/product-groups/insulation/applications/solid-concrete-blockwork-wall>)

Επίσης, όπως προαναφέρθηκε, είναι δυνατή η λύση των προκατασκευασμένων δομικών στοιχείων τα οποία περιλαμβάνουν θερμομονωτικά πάνελ κενού και χρησιμοποιούνται στην κατασκευή του κτιρίου, συμβάλλοντας έτσι στην προστασία των πάνελ από φθορές κατά την εφαρμογή τους. Η εφαρμογή που συναντάται περισσότερο στον κτιριακό τομέα, αφορά την εξωτερική θερμομόνωση τοιχοποιίας υφιστάμενων κτιρίων .

5.2.4.2 ΓΥΑΛΙΝΗ ΠΡΟΣΟΨΗ

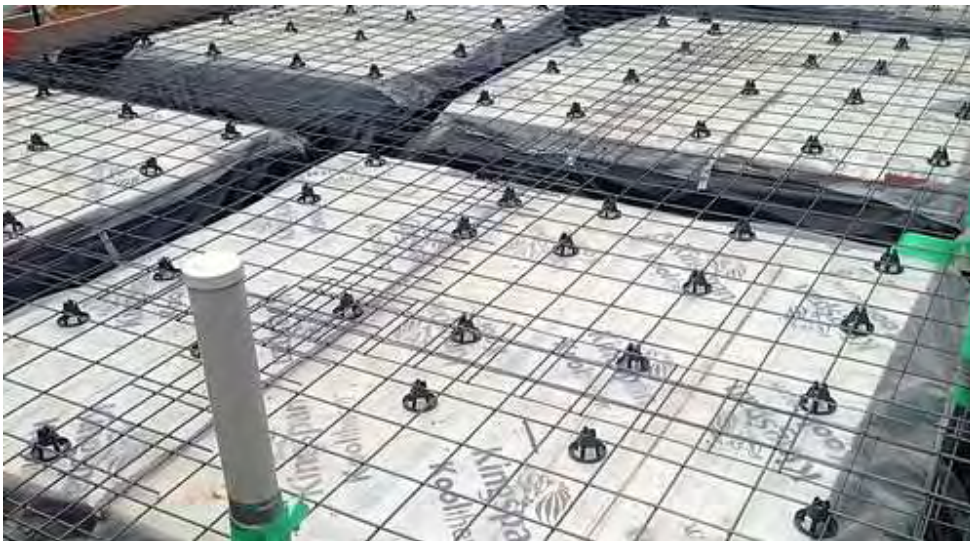
Τα θερμομονωτικά πάνελ κενού μπορούν να φανούν ιδιαίτερα χρήσιμα σε περιπτώσεις γυάλινων προσόψεων, αφού με τη χρήση τους προκύπτουν λεπτότερες κατασκευές με πολύ μεγάλη θερμική αντίσταση. Επίσης, αρχιτεκτονικά το αποτέλεσμα είναι αρτιότερο, εξαιτίας της ομαλής σύνδεσης διαφανών και αδιαφανών επιφανειών, λόγω του μικρού πάχους των πάνελ κενού .

5.2.4.3 ΣΤΕΓΗ/ΔΩΜΑ

Τα θερμομονωτικά πάνελ κενού μπορούν επίσης να τοποθετηθούν σε στέγες και δώματα αυξάνοντας τη θερμική τους αντίσταση. Μετρήσεις και πειράματα σε επίπεδες στέγες με θερμομονωτικά πάνελ κενού, έδειξαν πως τα πάνελ μπορούν να έχουν να έχουν μια διάρκεια ζωής 25 ετών, οπότε και ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητάς τους θα έχει αυξηθεί σε $0,008 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, από την αρχική τιμή των $0,0045 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$.

5.2.4.4 ΔΑΠΕΔΟ

Τα θερμομονωτικά πάνελ κενού μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μόνωση δαπέδων, σε περιπτώσεις όπου οι απαιτήσεις για υψηλή θερμική αντίσταση είναι αυξημένες, ιδιαίτερα σε δάπεδα υφιστάμενων κτιρίων με ανεπαρκή θερμομόνωση, όπου ο χώρος είναι περιορισμένος. Επίσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε περιπτώσεις δαπέδων με ενδοδαπέδια θέρμανση, αυξάνοντας την απόδοση του συστήματος θέρμανσης .



Εικόνα 5.14 Τοποθέτηση θερμομονωτικών πάνελ κενού στο δάπεδο

(<https://www.kingspan.com/meati/en-in/product-groups/insulation/applications/floor-soffit>)

5.2.4.5 ΠΟΡΤΑ

Οι απώλειες θερμότητας μέσω των θυρών του κτιρίου είναι σημαντικές για την ενεργειακή του απόδοση, ωστόσο η θερμομόνωση των θυρών είναι δύσκολη με τη χρήση συμβατικών θερμομονωτικών υλικών. Μελέτη σε ξύλινη πόρτα με θερμομονωτικό πάνελ κενού στο εσωτερικό της, έδειξε πως επιτυγχάνεται βελτίωση της τάξης του 25% για το σύστημα της πόρτας, σε επίπεδο ενεργειακών καταναλώσεων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 – ΥΛΙΚΑ ΜΕΤΑΒΑΛΛΟΜΕΝΗΣ ΦΑΣΗΣ

6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ -ΡΥΘΜΙΣΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ: ΥΛΙΚΑ ΜΕΤΑΒΑΛΛΟΜΕΝΗΣ ΦΑΣΗΣ (PHASE CHANGING MATERIALS, PCMS)

Το κτίριο είναι ένας από τους κυριότερους τομείς της κατανάλωσης ενέργειας. Το 2009, περίπου 40% της συνολικής ορυκτής ενέργειας καταναλώθηκε στον κατασκευαστικό τομέα στις Ηνωμένες Πολιτείες και στην Ευρωπαϊκή Ένωση . Επιπλέον, η κατανάλωση ενέργειας των συστημάτων θέρμανσης, εξαερισμού και κλιματισμού εξακολουθεί να αυξάνεται με την αυξανόμενη ζήτηση για θερμική άνεση. Υπό αυτές τις συνθήκες, τα συστήματα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας με υψηλή δυνατότητα εξοικονόμησης ενέργειας στα κτίρια έχουν αποκτήσει όλο και περισσότερη προσοχή. Η αποθήκευση θερμικής ενέργειας μπορεί γενικά να ταξινομηθεί ως αποθήκευση θετικής θερμότητας και αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας σύμφωνα με τα μέσα αποθήκευσης θερμότητας. Στην αποθήκευση της λογικής θερμότητας, η θερμότητα αποθηκεύεται ή απελευθερώνεται συνοδευόμενη από τη μεταβολή της θερμοκρασίας των μέσων αποθήκευσης, ενώ στην αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας η θερμότητα αποθηκεύεται ή απελευθερώνεται ως θερμότητα σύντηξης / στερεοποίησης κατά τις διαδικασίες αλλαγής φάσης των μέσων αποθήκευσης. Αντιθέτως, η αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας με υλικά αλλαγής φάσης (PCMs) παρέχει υψηλή πυκνότητα αποθήκευσης θερμότητας και έχει την ικανότητα αποθήκευσης μεγάλης ποσότητας θερμότητας κατά τη διάρκεια της διαδικασίας αλλαγής φάσης με μικρή διακύμανση του όγκου και της θερμοκρασίας του PCM.

Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα που δείχνει την υψηλή θερμική χωρητικότητα των αποθηκευτών λανθάνουσας θερμότητας, είναι ένας κύβος από πάγο, που μεταβάλλεται από τη στερεή στη ρευστή φάση στους 0°C. Η ρευστή κατάσταση αρχίζει επίσης στους 0°C αλλά η δοσμένη ενέργεια που απαιτείται για αυτή την μεταβολή της κατάστασης είναι ίδια με αυτή που χρειάζεται για την αύξηση της θερμοκρασίας του νερού από τους 0o C στους 80o C. Αυτή η «κρυφή» αποθήκη θερμότητας, είναι σχετικά μεγάλη, με αποτέλεσμα η αρχή στην οποία βασίζεται να μπορεί να χρησιμοποιηθεί στη μόνωση κτηρίων. Η λέξη «λανθάνουσα» χρησιμοποιείται με την έννοια της «κρυφής» θερμότητας, δηλαδή υπάρχει αλλά δεν φαίνεται.

6.2 ΙΣΤΟΡΙΚΑ

Η χρήση υλικών μεταβαλλόμενης φάσης δεν είναι σύγχρονη. Στην αρχαία Βαγδάτη, τα δωμάτια διατηρούνταν δροσερά με την χρήση πάγου. Κατά τη δεκαετία του 1940, έγιναν οι πρώτες σύγχρονες προσπάθειες για την χρήση των υλικών μεταβαλλόμενης φάσης σε κτήρια. Η χρήση του υλικού έγινε διαδεδομένη, μετά την παραγωγή μικρο - καψουλών (MPCM), κάτι που αποτέλεσε σταθμό στην ανάπτυξη του υλικού. Το 1980 η NASA ξεκίνησε βασική έρευνα πάνω στην ανάπτυξη των PCMs. Το 1988 κατασκευάστηκαν οι πρώτες διαστημικές στολές και γάντια που επέτρεπαν στους κοσμοναύτες να αντέχουν στις ακραίες θερμοκρασίες του διαστήματος. Στα κτήρια και στις κατασκευές η βασική χρήση τους αφορά την διατήρηση της ενέργειας.

6.2.1 ΑΝΑΛΥΤΙΚΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΡΕΥΝΑ ΠΑΝΩ ΣΤΑ PCM

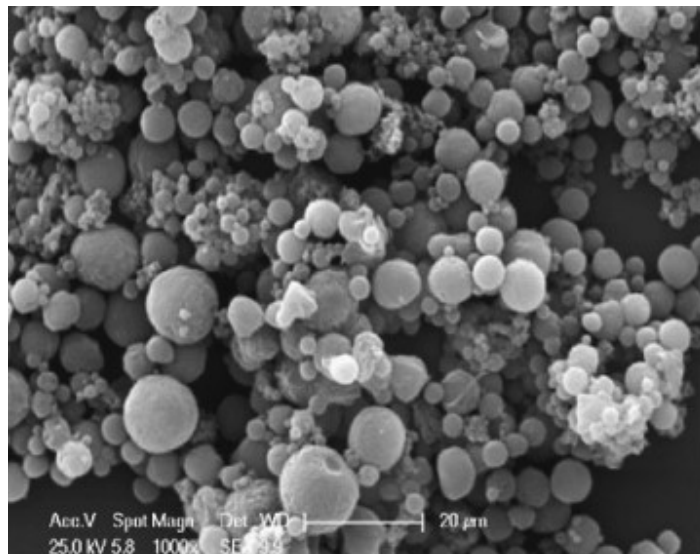
- *Ηλιακή ενέργεια -1983-* Η αποθήκευση θερμότητας σε θερμοκρασίες 0-120 ° C αναθεωρήθηκε από τις δυνατότητες των θερμικών ιδιοτήτων και της μακροπρόθεσμης σταθερότητας διαφόρων ειδών PCM καθώς και από προβλήματα διάβρωσης.
- *Κτίριο και περιβάλλον -1988-* Το σύστημα θερμικής αποθήκευσης που χρησιμοποιείται στα κτίρια αναθεωρήθηκε, συμπεριλαμβανομένης της λογικής αποθήκευσης θερμότητας και της αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας, κυρίως από τη θεωρητική πλευρά.
- *Εφαρμοσμένη θερμική μηχανική -2003-* Μια επισκόπηση για την αποθήκευση θερμικής ενέργειας δόθηκε από υλικά σε εφαρμογές. Οι αριθμητικές λύσεις που αφορούν την αγωγιμότητα και τη μεταφορά έλαβαν επίσης υπόψη.
- *Μετατροπή και διαχείριση ενέργειας -2004-* Παρουσιάστηκαν υλικά για την αποθήκευση θερμικής ενέργειας και για τις κύριες εφαρμογές των PCM.

- *Μετατροπή και διαχείριση ενέργειας -2004-* Έδωσαν μια περίληψη για τις προηγούμενες έρευνες σχετικά με την ενσωμάτωση PCM σε δομικά υλικά, όπως σκυρόδεμα, γυψοσανίδα, σε οροφή και δάπεδο.
- *Ανανεώσιμες και βιώσιμες πηγές ενέργειας -2007-* Συγκεντρώθηκαν διάφορες μέθοδοι θέρμανσης και ψύξης σε κτίρια και εφαρμογές αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας για παθητική και ενεργητική αποθήκευση ενέργειας.
- *Ανανεώσιμες και βιώσιμες πηγές ενέργειας -2007-* Εφαρμογές ηλιακής ενέργειας εισήχθησαν από τις ακόλουθες πτυχές: παθητικό και ενεργό ηλιακό σύστημα θέρμανσης, ηλιακά θερμοκήπια και ηλιακές κουζίνες,
- *Κτίριο και Περιβάλλον -2007-* Έδωσαν ορισμένες λειτουργικές αρχές για την εφαρμογή PCM στα κτίρια, όπως ηλεκτρική θέρμανση κάτω από το δάπεδο και νυχτερινό εξαερισμό. Επίσης, συνόψισαν τις τρέχουσες εφαρμογές PCM σε κτίρια. Το πιο σημαντικό, έδωσαν μια μελλοντική προοπτική για αυτό το έργο.
- *Επισκόπηση ανανεώσιμων και βιώσιμων πηγών ενέργειας -2008-* Παρουσίασαν λεπτομερή επισκόπηση της ενσωμάτωσης PCM σε κτίρια για θέρμανση χώρων και ψύξη χώρου.
- *Επισκόπηση ανανεώσιμων και βιώσιμων πηγών ενέργειας -2009-* Αναθεώρησαν την αποθήκευση της θερμικής ενέργειας από θεωρητικές και αριθμητικές πτυχές και έδωσαν επίσης τις βασικές εφαρμογές αποθήκευσης θερμικής ενέργειας.
- *Μετατροπή και Διαχείριση Ενέργειας -2009-* Εξετάστηκαν τα δυναμικά χαρακτηριστικά και οι θερμικές επιδόσεις των ενεργών και παθητικών εφαρμογών κτιρίων.
- *Ενέργεια και κτίρια -2010-* Ανασκόπησαν τα PCM που χρησιμοποιήθηκαν για κτίρια και περιέγραψαν τις εφαρμογές του κτιρίου όπως ενισχυμένες σανίδες τοίχου, ενισχυμένο σκυρόδεμα και βελτιωμένα μονωτικά υλικά.
- *Επισκόπηση ανανεώσιμων και βιώσιμων ενεργειακών αναλύσεων -2011-* Προέκυψαν εκτεταμένες ανασκοπήσεις σχετικά με τα PCM που χρησιμοποιούνται στην αποθήκευση

ενέργειας στα κτίρια, συμπεριλαμβανομένων των θερμοφυσικών ιδιοτήτων, της μακροπρόθεσμης σταθερότητας, της εγκαυσούλωσης και του κινδύνου πυρκαγιάς.

6.3 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ

Τα υλικά μεταβαλλόμενης φάσης, PCMs, κατασκευάζονται από παραφίνη και ένυδρα άλατα. Κατά τη διαδικασία αυτή, μικρές σφαίρες παραφίνης σφραγίζονται σε πλαστικούς υποδοχείς. Αυτά εισάγονται σε κατασκευαστικά υλικά, όπου αναφέρεται χαρακτηριστικά ότι 3 εκατομμύρια από αυτές τις κάψουλες είναι δυνατό να χωρέσουν σε 1 τετραγωνικό εκατοστό. Καθώς το PCM μπορεί να απορροφά ενέργεια (θερμότητα), χωρίς το μέσο αυτό καθαυτό να θερμαίνεται, δύναται να απορροφήσει μεγάλα ποσά θερμότητας, που χρησιμοποιεί με στόχο να υγροποιήσει την παραφίνη, ενώ με τον τρόπο αυτό διατηρεί δροσερό τον εσωτερικό χώρο του κτηρίου.



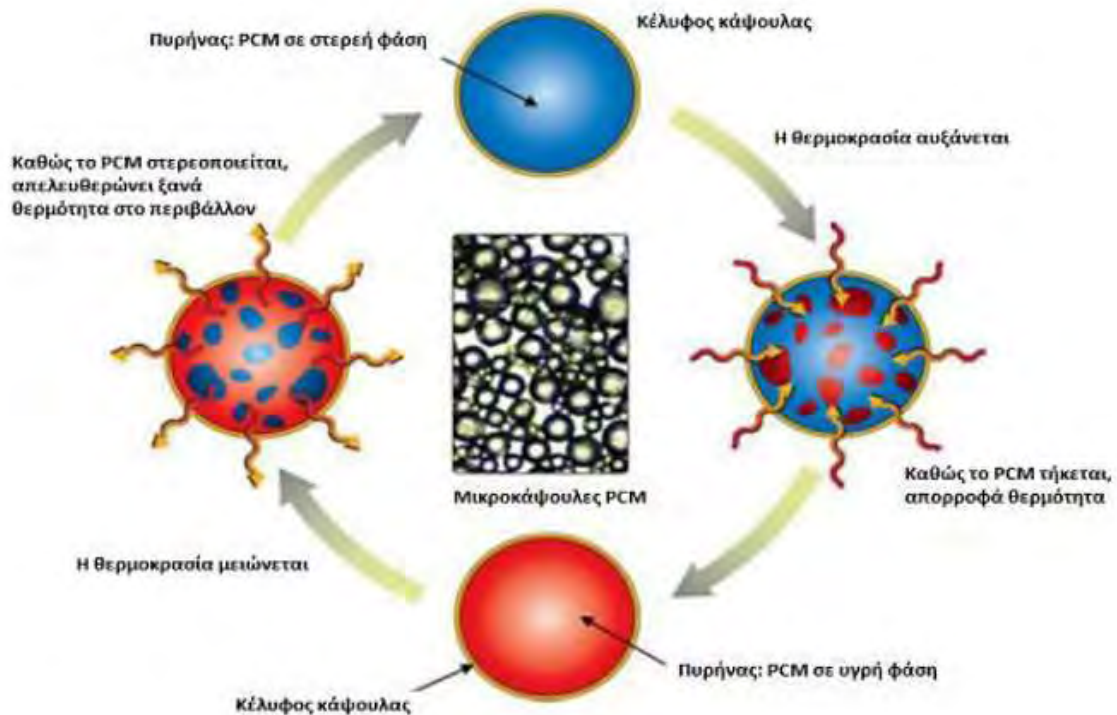
Εικόνα 6.1 Φωτογραφία από SEM κατά τη μικροενσωμάτωση (Jamekhorshida, Sadramelia, Faridb (2014))

Ενώ η θερμοκρασία αυξάνεται, λιώνει το κέρινο περιεχόμενο της μικροκάψουλας μεταβάλλοντας τη μορφή της παραφίνης, από στερεή σε υγρή. Η ίδια αρχή λειτουργεί και αντίστροφα, δηλαδή χώροι οι οποίοι ψύχονται διατηρούν την θερμοκρασία τους υψηλή, για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα, καθώς η λιωμένη παραφίνη, σκληραίνει σε ένα βάθος χρόνου πριν χάσει την

θερμότητα της. Το θερμικό επίπεδο των υλικών παραμένει σταθερό, ενώ το ποσό της ενέργειας που συγκρατείται ή απελευθερώνεται είναι αρκετό, ώστε μια μικρή ποσότητα υλικού να εμφανίζει τεράστια θερμική χωρητικότητα, με αποτέλεσμα η θερμοκρασίας στο εσωτερικό των κτηρίων να μπορεί να ρυθμίζεται. Κατά την αλλαγή φάσης, η θερμότητα παραμένει σε λανθάνουσα μορφή, για όσο χρειάζεται για την μεταβολή από την μία φυσική κατάσταση στην άλλη.

Κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας, το υλικό απορροφά ένα συγκεκριμένο ποσό θερμότητας, που είναι ίσο με το ποσό της ενέργειας που απαιτείται για να λιώσει η παραφίνη. Η διαδικασία λειτουργεί σύμφωνα με αυτή την αρχή αλλά και ανάστροφα. Κατά την μεταβολή των φάσεων τα PCMs αποθηκεύουν είτε θερμότητα, είτε ψύχος (free - cooling principal).

Συνεπώς η ενέργεια αποθηκεύεται με λανθάνουσα μορφή, όταν το υλικό αλλάζει από μία φυσική κατάσταση σε μια άλλη, είτε από στερεό σε υγρό, είτε από υγρό σε αέριο. Η λανθάνουσα θερμότητα, η οποία αποθηκεύεται με την μορφή αυτή, μπορεί να χρησιμοποιηθεί αργότερα για ρύθμιση της θερμοκρασίας. Στα υλικά αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας, η προκαθορισμένη θερμοκρασία μεταβολής, στην οποία μεταβάλλεται η φάση από την μία φυσική κατάσταση στην άλλη, είναι οι 25°C, ενώ πάνω από αυτή, η θερμοκρασία του δωματίου θεωρείται ζεστή. Ανάλογως με το υλικό που χρησιμοποιείται, για την ρύθμιση αύξησης θερμοκρασίας κατά 5°C, απαιτείται πάχος ενός χιλιοστού από υλικό μεταβαλλόμενης φάσης, σε αντίθεση με το τσιμέντο, όπου χρειάζεται πάχος 10 έως 40 χιλιοστών. Το PCM έχει πολύ μεγαλύτερη θερμική χωρητικότητα, καθώς ένας τοίχος από σκυρόδεμα, θερμαίνεται πολύ πιο γρήγορα, ενώ η θερμοκρασία του πρώτου παραμένει σταθερή. Τα PCMs λειτουργούν σε διαφορετικές θερμοκρασίες μεταβολής φάσης ώστε να βρίσκουν διαφορετικές περιοχές εφαρμογής. Σε τομείς πέραν των κατασκευών η θερμοκρασία μεταβολής των υλικών αυτών κυμαίνεται από αρνητικές τιμές, έως και 100°C.



Εικόνα 6.2 Απεικόνιση διαδικασίας της μικροενσωμάτωσης (Γενεράλη (2014))

Σήμερα τα PCMs διατίθενται ως πρόσθετα τα οποία μπορούν να προστεθούν στα συνηθισμένα κατασκευαστικά υλικά όπως σοβάδες, γυψοσανίδες, αεριούχα τεμάχια σκυροδέματος, με συγκεκριμένες συνθήκες διατήρησης στο εσωτερικό τους. Τα δύο πρώτα υλικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως ρυθμιστές της θερμοκρασίας σε εσωτερικούς χώρους, ενώ τα τελευταία σε αρχικά στάδια κατασκευής κτιρίων. Ιδιαίτερη σημασία έχει το γεγονός, ότι τα υλικά πρέπει να εκτεθούν σε θέρμανση πριν την χρήση τους. Για παράδειγμα, δεν έχει νόημα μονωθεί εσωτερικά ένα μέρος τοίχου από αεριούχο σκυρόδεμα, καθώς κάτι τέτοιο θα απομειώσει την αποτελεσματικότητα του τελευταίου.

Από πλευρά πυρασφάλειας, πρέπει να τονιστεί ότι η παραφίνη, με την μορφή που χρησιμοποιείται στα PCMs είναι εύφλεκτη, για αυτό και δεν ενδείκνυται ως υλικά πυρασφάλειας. Όταν βρίσκονται σε επαφή με άλλα κατασκευαστικά υλικά παραφινικής βάσης, τα PCMs δεν προκαλούν χημικές αντιδράσεις, όπως για παράδειγμα διάβρωση. Επιπλέον, λόγω του μικρού τους μεγέθους, τα σφαιρίδια του PCM που περιέχονται σε υλικά εμφανίζουν ιδιαίτερα υψηλή αντοχή

στη φθορά, καθώς τέτοια υλικά μπορούν να επεξεργαστούν, χωρίς να καταστραφεί ο μηχανισμός ρύθμισης της θερμοκρασίας.



Εικόνα 6.3 Προσθήκη μιας στρώσης PCM σε γυψοσανίδα. Παρόλο που η γυψοσανίδα έχει πάχος μόνο 15mm, έχει γίνει επίστρωση με 3 κιλά από το υλικό. (Leydecker (2008))

Κατά τη χρήση των υλικών αυτών, σε κλειστά συστήματα, πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι παράλληλα με την αλλαγή φάσης, λαμβάνει χώρα και μεταβολή του όγκου του υλικού. Τα υλικά που εμπεριέχουν PCM, πρέπει να έχουν πολύ καλή θερμική αγωγιμότητα ώστε να εξασφαλίζεται η ταχύτερη μεταφορά θερμότητας από και προς το PCM. Η παραφίνη έχει σχετικά μικρή θερμική αγωγιμότητα, μειονέκτημα που αντισταθμίζεται όμως από την υψηλή αντιδραστικότητα που εμφανίζει λόγω της μεγάλης επιφάνειας των μορίων της. Η θερμική χωρητικότητα των PCM πρέπει να παραμένει σταθερή με την πάροδο του χρόνου. Εκτός του πλεονεκτήματος που έχουν τα PCM, να διατηρούν την ενέργεια μειώνοντας με τον τρόπο αυτό τις απαιτήσεις για θέρμανση και ψύξη, τα PCMs είναι ανακυκλώσιμα και βιοδιασπώμενα. Τα PCMs βρίσκουν εφαρμογή στις κατασκευές καθώς μειώνουν το κόστος κλιματισμού και σε κάποιες περιπτώσεις καθιστούν περιττή την εγκατάσταση του, συμβάλλοντας με αυτό τον τρόπο στην μείωση των εκπομπών CO₂. Τα συστήματα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας, χρησιμοποιούνται είδη επιτυχώς σε

ψυγεία για την μεταφορά ευαίσθητων υλικών, σε εξωτερικές επικαλύψεις, ως συστατικά κρεμών και περιτυλίγματα τροφίμων.

6.5 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

3-LITER HAUS, GERMANY



Εικόνα 6.4 3-LITER HAUS, GERMANY (www.luwoe-consult.com)

Το πρότζεκτ περιελάμβανε ανακατασκευή του κτηριακού συγκροτήματος ,που ήταν κτισμένο το 1952 περιορίζοντας την ενεργειακή κατανάλωση από 25 σε 3 λίτρα ανά τετραγωνικό μέτρο και να μειωθεί η ενεργειακή κατανάλωση για θέρμανση και διοξειδίου του άνθρακα κατά 80%.

Έχει χρησιμοποιηθεί PCM σε μορφή υγρού , δημιουργώντας μια παχιά στρώση από υλικό. Αυτή η κατασκευή έχει σκοπό να λειτουργεί η τοιχοποιία ως ένα είδος air condition, για να διασφαλιστεί ένα περιβάλλον άνετο και ευχάριστο.

Floating Pavilion, Rotterdam (Public Domain Architects and Deltasync)



6.5 Floating Pavilion, Rotterdam (https://www.sustainableinsteel.eu/p/558/pcm_projects.html)

Στο αμφιθέατρο - ο μικρότερος θόλος - έχουν χρησιμοποιηθεί τα PCM, λόγω της ταχέως μεταβαλλόμενης θερμοκρασίας που προκαλείται από την συνεχή μεταβολή του αριθμού των ατόμων που βρίσκονται μέσα στο θόλο. Η λειτουργία των PCM είναι να μετριάζουν τις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας στους χώρους.

Η ζήτηση για ψύξη κατά τη διάρκεια της ημέρας επιτυγχάνεται με την ανακυκλοφορία του αέρα γύρω από το PCM και με την έμμεση ψύξη με εξαγωγή σε συνδυασμό με συλλέκτες απορρόφησης και ηλιακής ενέργειας. Το βράδυ μια μονάδα κλιματισμού εξασφαλίζει ότι το PCM "επαναφορτίζεται".

Wilo Nederland industrial building, Westzaan (Bentham Crouwel Architects



6.6 Wilo Nederland industrial building, Westzaan (https://www.sustainablein-steel.eu/p/558/pcm_projects.html)

Το PCM στη χαλύβδινη οροφή είναι κυρίως για να αποτρέψει τον εσωτερικό χώρο να ζεσταθεί πολύ γρήγορα ή να γίνει υπερθερμανθεί. Το PCM δεν λειτουργεί μόνο παθητικά για να μειώνει τις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας. Μπορεί επίσης να ενεργοποιηθεί μέσω της σύνδεσης με το σύστημα θέρμανσης και ψύξης.

Το PCM είναι μόνο το 4% της μάζας της κατασκευής στέγης, ωστόσο, αυτό το 4% οδηγεί σε διπλασιασμό της θερμικής μάζας. Το σκυρόδεμα λειτουργεί ως σύστημα συγκράτησης για το PCM.

ΚΑΤΟΙΚΙΑ ΗΛΙΚΙΩΜΕΝΩΝ ΜΕ ΕΙΔΙΚΕΣ ΑΝΑΓΚΕΣ , ΕΛΒΕΤΙΚΕΣ ΑΛΠΕΙΣ



Εικόνα 6.7 Κατοικία ηλικιωμένων με ειδικές ανάγκες , ελβετικές Άλπεις (Leydecker (2008))

Όλα τα διαμερίσματα έχουν μεγάλες εκτάσεις υαλοπινάκων με νότιο προσανατολισμό και, ανάλογα με την εποχή, τα διαμερίσματα θερμαίνονται ενεργά ή παθητικά με ηλιακή ενέργεια. Το μεσαίο κτίριο έχει υαλοπίνακες σύνθετου γυάλινου στοιχείου πάχους 8 εκ. Περιέχει ένα υλικό πλήρωσης ένυδρου άλατος το οποίο λειτουργεί ως αποθήκη λανθάνουσας θερμότητας για ηλιακή θερμότητα και προστατεύει τα δωμάτια από την υπερθέρμανση. Η αποθήκη λανθάνουσας θερμότητας έχει ικανότητα θερμικής απορρόφησης ισοδύναμη με τοίχο σκυροδέματος πάχους 15 cm. Ο υαλοπίνακας είναι διαφανής όταν το υλικό γεμίσματος έχει λειώσει και γαλακτώδες-

λευκό όταν είναι κρύος. Επομένως, η μεταβολή της κατάστασης του υλικού αντανακλάται άμεσα στην εμφάνιση του κτιρίου - η λειτουργία και η αισθητική συνδέονται άρρηκτα. Η λειτουργία απομόνωσης της αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας καθιστά δυνατή τη ρύθμιση της εσωτερικής θερμοκρασίας ως επί το πλείστον παθητικά, με αποτέλεσμα σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας για θέρμανση (και ψύξη).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 – ΝΑΝΟΎΛΙΚΑ ΚΑΙ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ

7.1 ΚΙΝΔΥΝΟΙ ΓΙΑ ΤΗΝ ΥΓΕΙΑ ΚΑΙ ΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΝΑΝΟΎΛΙΚΩΝ

Μια συνολική εκτίμηση των επιπτώσεών των νανοϋλικών στην υγεία του ανθρώπου και του περιβάλλοντος είναι απαραίτητη για τη θέσπιση κανονισμών και κατευθυντήριων γραμμών που επιτρέπουν τα πολυάριθμα οφέλη των νανοϋλικών, παρέχοντας παράλληλα επαρκή προστασία στο οικοσύστημα. Λόγω των διαστάσεων που ελέγχονται στη μεταβατική ζώνη μεταξύ ατόμου και μορίου, το νανοϋλικό αποκτά νέες ιδιότητες σε σύγκριση με το αντίστοιχο υλικό υπό κανονική κλίμακα. Οι μοναδικές ιδιότητες που επιτυγχάνονται στη νανοκλίμακα επιτρέπουν στο υλικό να παρουσιάζει εξαιρετικά αυξημένες επιδόσεις στην κατάλυση, την αγωγιμότητα, το μαγνητισμό, τη μηχανική αντοχή και / ή την οπτική ευαισθησία, επιτρέποντας ευρείες εφαρμογές, συμπεριλαμβανομένων ηλεκτρονικών συσκευών, βιοϊατρικών παραγόντων, καταλυτών και αισθητήρων.

Όσον αφορά τα προαναφερθέντα πλεονεκτήματα των νανοϋλικών, η νανοτεχνολογία στον τομέα των κατασκευών επελέγη ως μια από τις 10 στοχοθετημένες εφαρμογές νανοτεχνολογίας ικανές να επιλύσουν τα μεγαλύτερα προβλήματα του αναπτυσσόμενου κόσμου.

7.2 ΚΙΝΔΥΝΟΙ ΓΙΑ ΤΗΝ ΥΓΕΙΑ – ΠΡΟΛΗΨΗ

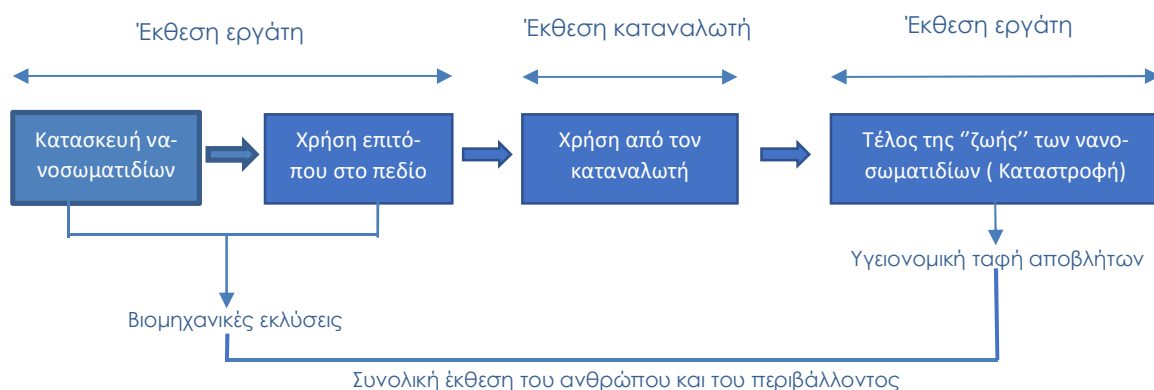
Η αξιολόγηση της έκθεσης αποτελεί ένα κρίσιμο βήμα προς τον χαρακτηρισμό των κινδύνων και την πρόληψη και μετριασμό των ακούσιων επιπτώσεων. Η πρόληψη της έκθεσης αποτελεί προτεραιότητα, διότι, ανεξάρτητα από την τοξικότητα των νανοϋλικών, η έλλειψη έκθεσης εξλείφει τον κίνδυνο για την υγεία. Αυτό είναι ευκολότερο να επιτευχθεί μέσω της καλύτερης κατανόησης της τύχης, της μεταφοράς και του μετασχηματισμού των νανοϋλικών στο περιβάλλον, που είναι αναγκαία για την εκτίμηση των συγκεντρώσεων και των μορφών στις οποίες θα εκτίθενται οι οικολογικοί και ανθρώπινοι υποδοχείς. Επιπλέον, ο καθορισμός του κατά πόσον τα κατασκευασμένα νανοϋλικά διατηρούν το μέγεθος, τη δομή και την αντιδραστικότητα τους σε νανοκλίμακα ή συσσωματώνονται ή συνδέονται με άλλα μέσα (π.χ. προσρόφηση, πρόσληψη

ή απώλεια επικαλύψεων) είναι ένα κρίσιμο βήμα για την εκτίμηση της βιοδιαθεσιμότητας των νανοϋλικών και των επιπτώσεων σε ζωντανούς οργανισμούς

7.2.1 ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΜΕΝΑ ΝΑΝΟΥΛΙΚΑ

Τα κατασκευασμένα νανοϋλικά μπορούν να εισέλθουν στο περιβάλλον κατά τη διάρκεια της κατασκευής, της μεταφοράς, της χρήσης και της διάθεσής τους με σκόπιμες και ακούσιες εκλύσεις και συμπεριφέρονται ως αναδυόμενοι ρύποι (Εικόνα 7.1). Παρά την αυξανόμενη συνειδητοποίηση των πιθανών εκλύσεων νανοϋλικών, οι προσπάθειες για τον εντοπισμό των κυρίαρχων δίοδων έκθεσης ήταν σε αρκετά πρόωρο στάδιο. Η έλλειψη μελέτης των περιπτώσεων και σχετικών δεδομένων καθιστά επίσης δύσκολη την ποσοτικοποίηση πιθανών σεναρίων έκλυσης τους. Παρ' όλα αυτά, αρκετές μελέτες έχουν αξιολογήσει τον πιθανό κίνδυνο από επιλεγμένα νανοϋλικά, αξιολογώντας ένα περιορισμένο αριθμό σημείων τοξικότητας προς συγκεκριμένους στοχευμένους οργανισμούς.

Ορισμένες μελέτες έχουν επίσης αντιμετωπίσει τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις εξετάζοντας τη χρήση των νανοϋλικών, τη μεταφορά, τον μετασχηματισμό, τη βιοδιαθεσιμότητα και τη βιοσυσσωμάτωση. Παρόλο που οι μελέτες αυτές υποδηλώνουν ότι τα κατασκευασμένα νανοϋλικά έχουν τη δυνατότητα να επηρεάσουν το περιβάλλον και την ανθρώπινη υγεία, δεν επαρκούν για την παροχή επαρκούς βάσης για τη θέσπιση ρυθμιστικών κατευθυντήριων γραμμών για την ασφαλή παραγωγή, χρήση και διάθεση νανοϋλικών κατασκευής. Κατά συνέπεια, η κατανόηση της δυναμικής των πηγών που έχουν δημοσιευτεί, για τις μεταφορές και τις χρήσεις των νανοϋλικών κατασκευής αντιπροσωπεύουν κενά γνώσης κρίσιμης σημασίας για την αξιολόγηση του κινδύνου.



Εικόνα 7.1 Η συνολική έκθεση του ανθρώπου κατά τη διάρκεια ‘ζωής’ των νανοσωματιδίων. (Lee, Mahendra, Alvarez (2009))

7.3 ΑΠΕΛΕΥΘΕΡΩΣΗ ΝΑΝΟΥΪΚΩΝ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΟΥΣ

Η απελευθέρωση νανοϋλικών στο περιβάλλον μπορεί να συμβούν κατά τη διάρκεια της κατασκευής δομικών υλικών, σε διαδικασίες που περιλαμβάνουν επικάλυψη, ανάμιξη και ενσωμάτωση νανοϋλικών. Η πιθανή έκθεση στους εργαζομένους μπορεί να συμβεί με εισπνοή, η οποία μπορεί να προκαλέσει προβλήματα υγείας του αναπνευστικού συστήματος. Επομένως, συνιστάται να χρησιμοποιείτε εξοπλισμός προστασίας της εισπνοής όπως φίλτρα αέρα που προστατεύουν τους εργαζομένους από τον αμιάντο ή τα πολύ λεπτά σωματίδια. Δεδομένου ότι η μόλυνση προέρχεται από πηγές σημείου που είναι εύκολα αναγνωρίσιμες, μπορεί εύκολα να επιτευχθεί ανάλυση έκθεσης, παρακολούθηση αποβλήτων και εγκατάσταση προστατευτικού εξοπλισμού (π.χ. αναπνευστήρας, φίλτρο αέρα) στο χώρο εργασίας. Οι προκλήσεις που συνδέονται με την αποφυγή της έκθεσης είναι ότι πρώτον οι προμηθευτές νανοπροϊόντων είναι απρόθυμοι να αποκαλύψουν τις διαδικασίες κατασκευής λόγω ιδιοκτησιακών πληροφοριών και δεύτερον οι περισσότερες είναι μικρές νεοσύστατες εταιρείες που δύσκολα μπορούν να λειτουργήσουν με βάση την προληπτική και πολύ συντηρητική υπόθεση ότι όλα τα νανοϋλικά είναι τοξικά.

7.4 ΑΠΕΛΕΥΘΕΡΩΣΗ ΝΑΝΟΥΪΚΩΝ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΚΑΤΕΔΑΦΙΣΗ

Είναι πολύ πιθανό ότι η κατεδάφιση, είτε μερική είτε πλήρης, έχει ως αποτέλεσμα την περιβαλλοντική απελευθέρωση νανοϋλικών του δομικού συστήματος. Οι τυποποιημένες διαδικασίες κατεδάφισης συνιστούν εκπαιδευμένους ειδικούς να διασπούν τα επικίνδυνα υλικά (π.χ. αμιαντοσιμέντο, βαφή με βάση το μόλυβδο και μερικά υπολείμματα) πριν εκτελέσουν εκτεταμένες κατεδαφίσεις. Σχετικά μικρού μεγέθους κατασκευαστικά νανοπροϊόντα όπως παράθυρο, επιστρώσεις / πίνακες και συσκευές αισθητήρων μπορούν να αφαιρεθούν σε αυτό το στάδιο. Η έκθεση στα νανοϋλικά μπορεί να είναι ανεξέλεγκτη σε μεταγενέστερα στάδια της κατεδάφισης λόγω της χρήσης εκρηκτικών ή βαριάς μηχανικής διαταραχής (π.χ. σφαίρες καταστροφής,

μπουλντόζες) (Εικόνα 7.2). Επιπλέον, η τυχαία σύνθλιψη αναμειγνύει τα εναπομένοντα συντρίμματα ώστε να είναι δύσκολο να διαχωριστούν τα απόβλητα που σχετίζονται με τα νανοϋλικά. Τα απόβλητα που παράγονται από την κατεδάφιση ταξινομούνται και μεταφέρονται σε χώρους υγειονομικής ταφής, οι οποίοι θα μπορούσαν να είναι συνήθεις πηγές περιβαλλοντικής απελευθέρωσης νανοϋλικών.



Εικόνα 7.2 Κατά την κατεδάφιση η έκθεση στα νανοϋλικά μπορεί να είναι ανεξέλεγκτη (Lee, Mahendra, Alvarez (2009))

7.5 ΑΠΕΛΕΥΘΕΡΩΣΗ ΝΑΝΟΎΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΑΠΟΣΥΝΘΕΣΗ

Τα απόβλητα που περιέχουν νανοϋλικά παράγονται κυρίως κατά τις εργασίες επισκευής, ανακαίνισης και κατασκευής. Εκτός από την πιθανή έκθεση των εργαζομένων και την ακούσια απελευθέρωση στα εργοτάξια, η διάθεση των αποβλήτων από την υγειονομική ταφή και η απόρριψη αποβλήτων κατασκευών θα μπορούσαν να είναι συνήθεις τρόποι εκφόρτωσης των νανοϋλικών στο περιβάλλον.

7.6 ΜΑΚΡΟΠΡΟΘΕΣΜΕΣ ΕΚΛΥΣΕΙΣ

Κατά τη διάρκεια ζωής των κτιρίων, οι βλάβες, η φθορά και η τριβή των υποδομών, τεχνητών ή φυσικών, μπορούν να προκαλέσουν εκλύσεις νανοϋλικών στο περιβάλλον. Τα ατυχήματα (π.χ. πυρκαγιά) και οι καταστροφές (π.χ. έντονες βροχοπτώσεις, πλημμύρες και καταιγίδες) προκαλούν ζημιές σε αστικές δομές που περιέχουν νανοπροϊόντα. Για παράδειγμα, η πυρκαγιά ή η αποτέφρωση θα μπορούσαν να απελευθερώσουν νανοϋλικά στην ατμόσφαιρα και οι βροχοπτώσεις μπορούν να προωθήσουν τη διάλυση ή την απόπλυση και αποστράγγιση των νανοϋλικών σε φυσικές οδούς και εδάφη. Είναι πολύ δύσκολο να χαρακτηρίσει κανείς τέτοιες εκλύσεις σε μακροπρόθεσμη βάση λόγω των σημερινών αναλυτικών περιορισμών. Τέτοιες δυσκολίες έγκεινται στα υψηλά όρια ανίχνευσης που αποκλείουν την ποσοτικοποίηση των απελευθερώσεων νανοϋλικών σε ιχνοστοιχεία και χαμηλά ποσοστά και την έλλειψη επαρκούς αναλυτικής ειδικευσης για τη διάκριση της συγκέντρωσης και της μορφής των νανοϋλικών σε πολύπλοκες περιβαλλοντικές μορφές. Έτσι συχνά καθίσταται δύσκολη η οριοθέτηση της περιοχής επιρροής της έκλυσης των νανοϋλικών.

7.7 ΑΝΑΓΚΗ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ ΤΗΣ ΠΡΟΛΗΨΗΣ ΚΙΝΔΥΝΩΝ ΑΠΟ ΝΑΝΟΎΛΙΚΑ

Τα νανοϋλικά αναμένεται να καταστούν κοινό χαρακτηριστικό σε ορισμένα δομικά υλικά λόγω των νέων και αξιοσημείωτων ιδιοτήτων τους. Ωστόσο, η ανησυχία για τις ακούσιες επιπτώσεις τους στην υγεία του ανθρώπου και του περιβάλλοντος υποκινεί την έρευνα όχι μόνο για την εκτίμηση των κινδύνων, αλλά και για την ασφαλή κατασκευή τους και την οικολογική υπεύθυνη χρήση και διάθεση.

Η έρευνα σχετικά με τους μηχανισμούς τοξικότητας των νανοϋλικών μπορεί να αποκαλύψει πληροφορίες που επιτρέπουν τον σχεδιασμό περιβαλλοντικά δεχόμενων νανοςύνθετων υλικών. Τα σωματίδια νανοκλίμακας μπορούν να προκαλέσουν βλάβες στην αναπνοή καθώς και φλεγμονή του δέρματος, παρ' όλα αυτά ο τρόπος δράσης τους δεν είναι πλήρως κατανοητός. Συγκεκριμένα, είναι ελάχιστα κατανοητό πως η κατανομή μεγέθους σωματιδίων, η χημική σύνθεση, το σχήμα, η επιφανειακή χημεία επηρεάζουν την πρόσληψη, τη δραστικότητα, τη

βιοδιαθεσιμότητα και την τοξικότητα. Έτσι, η ανάπτυξη μιας μηχανικής κατανόησης των σχέσεων δομής-αντιδραστικότητας και η σύνδεσή τους με την ανοσολογία και την τοξικότητα είναι ένας ερευνητικός τομέας προτεραιότητας. Τέτοια έρευνα πρέπει να εξετάσει όχι μόνο την οξεία τοξικότητα και τη θνησιμότητα, η οποία έχει ιστορικά επικεντρωθεί στη νανοτοξικολογία, αλλά και την αντιμετώπιση της χρόνιας έκθεσης και της επίδρασης στη συμπεριφορά των οργανισμών.

Οι περισσότερες μελέτες τοξικότητας έχουν διερευνήσει τα χαρακτηριστικά απόκρισης δόσης μερικών αντιπροσωπευτικών νανοϋλικών σε μεμονωμένα είδη υπό εργαστηριακές συνθήκες. Οι επιπτώσεις των μιγμάτων νανοϋλικών, των διαφορών των οργανισμών και των περιβαλλοντικών παραγόντων όπως το pH, η αλατότητα και η φυσική οργανική ύλη (που μπορεί να επιχρίσουν ή απορροφήσουν νανοϋλικά) δεν έχουν ακόμη αξιολογηθεί πλήρως. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό επειδή τα νανοϋλικά στο περιβάλλον είναι πιθανό να υποστούν σημαντική μετασχηματισμό (π.χ. πήξη, συσσωμάτωση, προσρόφηση, απώλεια ή απόκτηση επικαλύψεων, βιομετασχηματισμό κλπ.) που θα μπορούσαν να επιδεινώσουν ή να μετριάσουν τις πιθανές επιπτώσεις τους.

Οι τρέχουσες αναλυτικές ικανότητες είναι ανεπαρκείς για την ποσοτικοποίηση και τη διάκριση των νανοϋλικών σε σύνθετες μήτρες σε περιβαλλοντικά σημαντικές χαμηλές συγκεντρώσεις. Έτσι, απαιτούνται αναλυτικές τεχνικές και η πρόοδος στη μετρολογία των νανοςωματιδίων για την παρακολούθηση των νανοϋλικών και την εκμάθηση της μεταφοράς, του μετασχηματισμού, της συμπεριφοράς και της τύχης τους σε διαφορετικά περιβαλλοντικά διαμερίσματα (π.χ. ατμοσφαιρικό, χερσαίο και υδάτινο περιβάλλον). Η βελτιωμένη μετρολογία θα πρέπει να επιτρέπει την παρακολούθηση της έκθεσης των εργαζομένων σε βραχυπρόθεσμη βάση κατά τις διαδικασίες κατασκευής και κατεδάφισης, καθώς και τη μακροπρόθεσμη παρακολούθηση των απελευθερώσεων νανοϋλικών από κατασκευαστικά υλικά (π.χ. διάλυση και έκπλυση νανοϋλικών, καθώς η γήρανση, η διάβρωση, στοιχεία από τις καιρικές συνθήκες). Η ποσοτικοποίηση τέτοιων πηγών είναι σημαντική για την κατανόηση της περιοχής επιρροής τους και για την ανάπτυξη αποτελεσματικών στρατηγικών που παρεμποδίζουν τις κύριες οδούς έκθεσης. Απαιτούνται επίσης βελτιωμένες αναλυτικές τεχνικές για να βαθμονομηθούν και να επικυρωθούν τα μαθηματικά μοντέλα δημιουργίας και μεταφοράς για να προβλεφθούν τα σενάρια έκθεσης και να ενισχυθεί η διαχείριση του κινδύνου.

Η ασφαλής διάθεση των δομικών αποβλήτων που περιέχουν νανοϋλικά θα πρέπει επίσης να εξετάσει το ενδεχόμενο έκπλυσης και μεταγενέστερης μεταφοράς μέσω των εσωτερικών επενδύσεων και των υποκείμενων εδαφών. Αυτές οι πληροφορίες είναι απαραίτητες για να διακρίνει την ανάγκη για πρόσθετα εμπόδια για να εξασφαλιστεί η συγκράτηση των νανοϋλικών και για να ελαχιστοποιηθεί η πιθανότητα ρύπανσης των υπογείων υδάτων. Τέλος, η προοπτική του κύκλου ζωής είναι πιθανό να παρακινήσει την έρευνα για την πρόληψη της ρύπανσης και να εντοπίσει ευκαιρίες για την ανακατασκευή, την επαναχρησιμοποίηση και την ανακύκλωση αυτών των νανοϋλικών. Συνολικά, η περαιτέρω έρευνα θα ενισχύσει πιθανώς την ανάπτυξη κατάλληλων κατευθυντήριων γραμμών και κανονισμών για τον μετριασμό των πιθανών περιβαλλοντικών επιπτώσεων και την ενίσχυση της βιωσιμότητας της κατασκευαστικής βιομηχανίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Ο κατασκευαστικός κλάδος είναι γενικά πολύ συντηρητικός, ευνοώντας τα παραδοσιακά υλικά και τεχνολογίες. Ωστόσο, τα υλικά αυτά και οι τεχνολογίες δεν μπορούν να ικανοποιήσουν τη συνεχή προσπάθεια των κυβερνήσεων και των ενδιαφερομένων για τη βελτίωση της ασφάλειας, της βιωσιμότητας και της απόδοσης των κτιρίων και των υποδομών. Η νανοτεχνολογία μπορεί να διαδραματίσει σημαντικό ρόλο στην ικανοποίηση των απαιτήσεων βελτιώνοντας τις πρωτογενείς ιδιότητες των υλικών, όπως η βελτίωση της αντοχής του σκυροδέματος και των θερμομονωτικών ιδιοτήτων των μονωτικών υλικών. Μπορεί επίσης να προσθέσει νέες λειτουργίες στα υπάρχοντα υλικά και προϊόντα, όπως φαίνεται από τα αντιμικροβιακά, αυτοκαθαριζόμενα και αυτοσυμπυκνούμενα σκυροδέματα και την οπτικά διαφανή μόνωση.

Η νανοτεχνολογία μπορεί επίσης να διαδραματίσει σημαντικό ρόλο στη βελτίωση της ασφάλειας των δομών και στη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και της ενεργειακής καταπόνησης που συνδέονται με τα κτίρια και την υποδομή. Για παράδειγμα, τα νανοσωματίδια οξειδίων μετάλλων ή τα πρόσθετα CNTs μπορούν να μετριάσουν τις δυσμενείς επιπτώσεις που μπορούν να έχουν οι «φιλικές προς το περιβάλλον» αντικαταστάσεις τσιμέντου με βάση τα βιομηχανικά απόβλητα στις φυσικές ιδιότητες του σκυροδέματος. Αυτό αυξάνει το φάσμα των εφαρμογών στις οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν αυτά τα πιο φιλικά προς το περιβάλλον σκυροδέματα.

Οι αισθητήρες με βάση τη νανοτεχνολογία (π.χ. αυτοθεραπευόμενο σκυρόδεμα) μπορούν να αντικαταστήσουν τις παραδοσιακές μεθόδους οπτικής επιθεώρησης για τη βελτίωση της ακρίβειας της παρακολούθησης της δομικής υγείας και τη μείωση του κόστους εργασίας. Τα δομικά ηλιακά κύτταρα, τα χρώματα και τα τζάμια με βάση τη νανοτεχνολογία μπορούν να διευρύνουν το φάσμα των περιοχών όπου μπορεί να εφαρμοστεί η τεχνολογία συγκομιδής της ηλιακής ενέργειας και μπορεί να μειώσουν το κόστος και να βελτιώσουν την αποδοτικότητα των πιο παραδοσιακών προϊόντων ηλιακών κυττάρων. Η νανοτεχνολογία μπορεί επίσης να διαδραματίσει ρόλο στη βελτίωση των φυσικών ιδιοτήτων και της αποτελεσματικότητας των αντιδιαβρωτικών επιστρώσεων και στη μείωση των επιπέδων της τοξικότητας από τις επικαλύψεις στο περιβάλλον.

Η επιστήμη και η μηχανική μόλις που έχουν ξεκινήσει να διερευνούν τις πιθανότητες ανακάλυψης και δημιουργικότητας στη νανοκλίμακα, όμως ήδη βγαίνουν στην επιφάνεια γνώμες για τον περιορισμό ή και πλήρη απαγόρευση της νανοτεχνολογίας. Μια τέτοια πράξη θα ήταν εξαιρετικά ανώριμη, γιατί αυτή τη στιγμή οι έρευνες βρίσκονται ακόμα σε σχετικά αρχικό στάδιο. Επιβάλλεται να ερευνηθούν παραπάνω το πρακτικό κομμάτι, δηλαδή το πως η νανοτεχνολογία με τις εφαρμογές της θα εξυπηρετεί όσο το δυνατό καλύτερα τις ανάγκες του ανθρώπου. Να διερευνηθεί και να εξασφαλιστεί η υγεία και η ασφάλεια των εργαζομένων και των αποδεκτών γενικότερα της καινούριας αυτής τεχνολογίας.

Υπάρχουν βάσιμοι λόγοι να πιστεύουμε ότι η μηχανική στη νανοκλίμακα θα έχει πολύ ευρείες εφαρμογές σε όλους τους τομείς της τεχνολογίας και στους περισσότερους τομείς της επιστήμης. Ως εκ τούτου, θα είναι ένας καταλύτης ή ενισχυτής των επιπτώσεων των άλλων τεχνολογιών.

Εν τέλει... "Είναι η νανοτεχνολογία επιβλαβής;"

Η νανοτεχνολογία δεν είναι ούτε ηθική ούτε ανήθικη. Πρόκειται μάλλον για μια πλειάδα διαφορετικών εφαρμογών, καθεμία από τις οποίες έχει μια σειρά πιθανών χρήσεων και καταχρήσεων σε συνδυασμό με άλλες τεχνολογίες και εφαρμόζεται με διαφορετικούς σκοπούς.

Αυτή η λογική θα μπορούσε να οδηγήσει ορισμένους στο συμπέρασμα ότι δεν χρειάζεται να ανησυχούμε καθόλου για τις κοινωνικές και ηθικές επιπτώσεις της νανοτεχνολογίας, διότι θα ενταχθούν στις συνέπειες των μεγαλύτερων συστημάτων. Άλλοι θα μπορούσαν να καταλήξουν στο συμπέρασμα ότι είναι πολύ νωρίς στην ιστορία της μηχανικής της νανοκλίμακας να εξετάσουμε τις κοινωνικές επιπτώσεις, διότι δεν μπορούμε να μελετήσουμε τον αντίκτυπο μιας τεχνολογίας που δεν υπάρχει ακόμη.

Τις τελευταίες δεκαετίες έχουν αρχίσει να εμφανίζονται μερικές σχετικά απλές αλλά σημαντικές εφαρμογές, οπότε σε αυτές τις περιπτώσεις μπορεί να παρατηρηθεί τουλάχιστον αντίκτυπος. Οι επιστήμονες και οι μηχανικοί έχουν πράγματι αρχίσει να εξετάζουν το μέλλον της νανοτεχνολογίας, οπότε μπορούμε να βασιστούμε στις πρώτες αυτές προσπάθειες σε αυτόν τον σημαντικό τομέα.

Εδώ είναι μερικές από τις σημαντικότερες αρχές για την εκπαίδευση, την κοινωνική επιστήμη και την ηθική:

- Οι έννοιες της νανοκλίμακας θα πρέπει να εισαχθούν στην επιστήμη και την τεχνολογική εκπαίδευση σε όλα τα επίπεδα, δίνοντας έτσι στο ευρύτερο φάσμα φοιτητών μια θεμελιώδη κατανόηση του πεδίου, ενώ ταυτόχρονα συνδέει τη νανοτεχνολογία με πολλούς άλλους τομείς.
- Η εκπαίδευση των νανοτεχνολόγων θα πρέπει να περιλαμβάνει κοινωνικές επιπτώσεις και ηθική ευαισθησία, έτσι ώστε η μελλοντική τους εργασία θα καθοδηγείται από αρχές που θα μεγιστοποιούν το ανθρώπινο όφελος.
- Θα πρέπει να αναπτυχθούν τυπικές μέθοδοι μέτρησης, όπως οι κοινωνικοί και οικονομικοί δείκτες, και να χρησιμοποιηθούν με συνέπεια για να καταγραφούν οι πραγματικές ευρέως διαδεδομένες αλλαγές στη βιομηχανία, την εκπαίδευση και την ευημερία των πολιτών καθώς εμφανίζονται.
- Οι κυβερνητικές υπηρεσίες, τα ιδιωτικά ιδρύματα και η βιομηχανία θα πρέπει να υποστηρίζουν ένα ευρύ φάσμα μελετών κοινωνικής και οικονομικής έρευνας που βασίζονται στη θεωρία σχετικά με τη νανοτεχνολογία, εξετάζοντας τόσο τις διαδικασίες λήψης αποφάσεων που διαμορφώνουν την αναδυόμενη τεχνολογία όσο και τις επιμέρους κοινωνικές της επιπτώσεις όταν αναπτυχθεί.
- Πρέπει να δημιουργηθεί μια βάση δεδομένων και μια θεσμική υποδομή για την αξιολόγηση των πιθανών μελλοντικών πνευματικών και κοινωνικών επιπτώσεων της νανοεπιστήμης και της νανοτεχνολογίας βραχυπρόθεσμα, μεσοπρόθεσμα και μακροπρόθεσμα.
- Θα πρέπει να υπάρχουν επίσημες οργανώσεις και μηχανισμοί για να διασφαλιστεί η συμμετοχή διαφόρων κοινωνικών θεσμών και του ευρύτερου κοινού στη χάραξη προτεραιοτήτων για την έρευνα και την ανάπτυξη και στην παροχή έγκαιρης συμβολής στους υπεύθυνους λήψης αποφάσεων.

Επομένως, η νανοτεχνολογία με το πέρασμα των χρόνων γίνεται ολοένα και πιο διαδεδομένη. Αποκτά περισσότερη απήχηση και στον κόσμο των επιστημόνων και μηχανικών αλλά και στους απλούς ανθρώπους. Η περεταίρω ανάλυση, επεξεργασία και διεξαγωγή πειραμάτων είναι απαραίτητη ώστε εκτός από τη χρήση να ερευνηθεί και η επικινδυνότητα τους.

Στον 21^ο αιώνα ο άνθρωπος είναι απαραίτητο και αυτονόητο να χρησιμοποιεί κάθε επίτευγμα της επιστήμης και της τεχνολογίας προς όφελος του. Παρόλα αυτά, σήμερα όπως φάνηκε και από την παραπάνω εργασία έχει ελάχιστη ευρεία χρήση. Κύριος λόγος είναι η τιμή τους, που παρόλο που τα τελευταία χρόνια έχει μειωθεί αρκετά, δεν φτάνει στα επίπεδα ώστε ο απλός καταναλωτής να μπορέσει να χρησιμοποιήσει νανοϋλικά.

Η νανοτεχνολογία στο κοντινό μέλλον...

Πρόκειται για κτίρια και οχήματα των οποίων τα δομικά υλικά, επιφάνειες επικάλυψης και σχέδια που θα αξιοποιούν πλήρως τις μοναδικές δυνατότητες που προσφέρουν τα νανοδομημένα υλικά. Αυτά τα κτίρια με βάση τα νανοϋλικά θα λειτουργήσουν με τρόπους που θα αλλάξουν τον τρόπο με τον οποίο ζούμε, εργαζόμαστε και παίζουμε, επειδή τα υλικά επιτρέπουν ελεγχόμενες και βελτιστοποιημένες ιδιότητες και ευρύτερες επιλογές σχεδίασης. Αυτές οι δομές μπορούν, αν το επιθυμούμε, να μοιάζουν πολύ με τα σημερινά κτίρια, αν και θα λειτουργούν διαφορετικά. Αλλά ριζικά διαφορετικές αρχιτεκτονικές εκφράσεις και στυλ θα είναι επίσης δυνατές. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή αυτών των νανοκτιρίων θα παράγονται σε κλίμακες βασικών εμπορευμάτων και θα χρησιμοποιούνται σε μεγάλες ποσότητες.

Ο σκοπός της εξέλιξης της τεχνολογίας ήταν και είναι η βελτίωσή των όρων ζωής του ανθρώπου. Με αυτό το στόχο ελπίζουμε η νανοτεχνολογία να αποκτήσει σύντομα ευρεία χρήση και να βρίσκεται στην διάθεση του καθενός από εμάς.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- 1) Alam M., Singh H., Limbachiya M.C. (2011) Vacuum Insulation Panels (VIPs) for building construction industry – A review of the contemporary developments and future directions
- 2) Arabzadeha A., Ceylanb H., Kimc S. et al. (2017) Superhydrophobic coatings on Portland cement concrete surfaces.
- 3) Bhushan B. (2003) Handbook of Nanotechnology
- 4) Binz A., Moosmann A., Steinke G. et al. (2005) Vacuum Insulation in the Building Sector. *Systems and Applications*, Institutions and Authors
- 5) Cardellicchio L. (2019) Self-cleaning and colour-preserving efficiency of photocatalytic concrete: case study of the Jubilee Church in Rome
- 6) Chen J., Poon C. (2009) Photocatalytic construction and building materials: From fundamentals to applications
- 7) Daczko J. A. (2012) Self-Consolidating Concrete Applying What We Know
- 8) Drexler K.E. (1981) Molecular engineering: an approach to the development of general capabilities for molecular manipulation. *Proc Natl Acad Sci U S A* 79:5275–5278
- 9) Feynman R.P. (1960) There's plenty of room at the bottom. *Eng Sci* 23:22–36, <http://www.zyvex.com/nanotech/feynman.html>
- 10) Formwork Technology for Architectural Concrete (2010)
- 11) Garboczi E.J. (2009) Concrete Nanoscience and Nanotechnology: Definitions and Applications
- 12) Goncalves M.C. (2015) Nanomaterials
- 13) Gopalakrishnan K. , Birgisson B., Taylor P. et al. (2011) Nanotechnology in Civil Infrastructure A Paradigm Shift
- 14) Greßler S., Fiedeler U., Simkó M. et al. (2010) Self-cleaning, dirt and water-repellent coatings on the basis of nanotechnology
- 15) Hanus M. J. , Harris A.T. (2012) Nanotechnology innovations for the construction Industry

- 16) Henry A. Colorado, Juan C. Nino and Oscar Restrepo (2018) Applications and Opportunities of Nanomaterials in Construction and Infrastructure
- 17) Interagency Working Group on Nanoscience, Engineering and Technology, National Science and Technology Council Committee on Technology, (Sept.1999), “Nanotechnology: Shaping the World Atom by Atom.”
- 18) Jalil W. D. A., Kahachi A. H. (2018) The Impact of Nano-Concrete in Contemporary Architecture
- 19) Jamekhorshida A., Sadramelia S. M. , Faridb M. (2014) A review of microencapsulation methods of phase change materials(PCMs) as a thermal energy storage (TES)
- 20) Jones, Gibb, Goodier et al. (2017) Nanomaterials in construction – what is being used, and where?
- 21) Jones W., Gibb A., Goodier A. et al. (2015) Nanomaterials in construction and demolition – how can we assess the risk if we don’t know where they are?
- 22) Kalnæs S. E., Jelle B. P. (2014) Vacuum insulation panel products: A state-of-the-art review and future research pathways
- 23) Leydecker S. (2008) Nano Materials in Architecture, Interior Architecture and Design
- 24) Ledererova M. (2016) Nanomaterials, nanocomposites uses in construction
- 25) Lee J. , Mahendra S. and Alvarez P.J.J. (2009) Potential Environmental and Human Health Impacts of Nanomaterials Used in the Construction Industry
- 26) Lippy BW and West G (2015), Identifying, assessing and controlling nanoparticle exposures among US construction workers
- 27) Munafò P., Goffredo G. B., Quagliarini E. (2015) TiO₂-based nanocoatings for preserving architectural stone surfaces: An overview
- 28) Norhasri M., Hamidah A., Fadzil M.(2017) Applications of using nano material in concrete: A review, (journal homepage: www.elsevier.com/locate/conbuildmat)
- 29) Pacheco-Torgal F., Diamanti M. V., Nazari A. et al. (2013) Nanotechnology in eco-efficient construction
- 30) Pacheco-Torgal F. , Kalaiselvam S., Ivanov V. et al. (2016) Nano and Biotech Based Materials for Energy Building Efficiency

- 31) Raki L. , Beaudoin J., Alizadeh R. et al. (2010) Cement and Concrete Nanoscience and Nanotechnology
- 32) Sanchez F. , Sobolev K. Nanotechnology in concrete – A review
- 33) Schodek D. L., Ferreira P., Ashby M. F. (2009) Nanomaterials, Nanotechnologies and Design_ An Introduction for Engineers and Architects-Butterworth-Heinemann
- 34) Sobolev K. (2016) Modern developments related to nanotechnology and nanoengineering of concrete,
- 35) Taniguchi N. (1974) Proceedings of the international conference on production engineering, Tokyo Part II, Japan Society of Precision Engineering
- 36) Tenpierik M.J. and Cauberg J.J.M (2007) Integrating vacuum insulation panels in building constructions: an integral perspective
- 37) THE 3-LITER HOUSE, LUWOGЕ consult , www.luwoqe-consult.com
- 38) The European Guidelines For Self-Compacting Concrete Specification, Production and Use
- 39) van Broekhuizen P, van Broekhuizen F, Cornelissen R and ReijndersL(2011) Use of nanomaterials in the European constructionindustry and some occupational health aspects thereof. Journal of Nanoparticle Research
- 40) West G.H. , Lippy B.E. , Cooper M.R. et al.(2016) Toward responsible development and effective risk management of nano-enabled products in the US construction industry. Journal of Nanoparticle Research
- 41) Zhou D., Zhaob C.Y. ,Tiana Y. (2012) Review on thermal energy storage with phase change materials (PCMs) in building applications
- 42) Γενεράλη Β. (2014) Χρήση Υλικών Αλλαγής Φάσης (PCM) σε εσωτερικούς τοίχους, με συναλλαγή θερμότητας εκατέρωθεν και ηλιακή φόρτιση από μία ή δύο κατευθύνσεις
- 43) <https://shodhganga.inflibnet.ac.in/bitstream/10603/119265/3/chapter%20i.pdf>
- 44) https://faculty.arch.tamu.edu/media/cms_page_media/4433/TheMaxxi_CaseStudyPresentation.pdf
- 45) <https://arcspace.com/feature/phaeno-science-center/>
- 46) https://www.theconcreteinitiative.eu/images/ECP_Documents/EuropeanGuidelinesSelfCompactingConcrete.pdf

- 47) <https://ordrupgaard.dk/en/zaha-hadids-building/>
- 48) https://assets.mbs.basf.com/en-us/project_profile-rosenthal.pdf
- 49) <http://manchesterhistory.net/architecture/2000/arlandatower.html>
- 50) <https://www.kalwall.com/technology/performance/>
- 51) <https://www.tgpamerica.com/products/glass/pilkington-profilite-insulation/>
- 52) <https://www.paragon.co.il/wp-content/uploads/2015/07/Lumira-Anwendungs-systeme.pdf>