



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
UNIVERSITY OF WEST ATTICA

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Έξυπνα υλικά
σε αρχιτεκτονικές εφαρμογές**

ΚΑΛΥΒΑΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ ΑΜ : 71447091

ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ:
ΧΕΙΡΧΑΝΤΕΡΗ ΓΕΩΡΓΙΑ

ΜΑΡΤΙΟΣ 2024

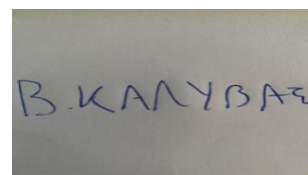
ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ/ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Καλύβας Βασίλειος του Ιωάννη, με αριθμό μητρώου 71447091 φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών του Τμήματος Βιομηχανικής Σχεδίασης και Παραγωγής, δηλώνω υπεύθυνα ότι: «Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος. Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

Ο Δηλών

Καλύβας Βασίλειος

(Υπογραφή)

A rectangular photograph showing a handwritten signature in blue ink on a light-colored surface. The signature reads "B. ΚΑΛΥΒΑΣ" in capital letters.

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας, θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες σε όλους όσους συνέβαλλαν στην εκπόνησή της. Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στην επιβλέπουσα καθηγήτριά μου, κυρία Χειρχαντέρη Γεωργία, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε εξ' αρχής, αναθέτοντάς μου το συγκεκριμένο θέμα, για το ενδιαφέρον και τη βοήθειά του στην ολοκλήρωση της διπλωματικής εργασίας μου. Επιπλέον, ευχαριστώ τον καθηγητή, κύριο Πρινωτάκη Γεώργιο και την λέκτορα εφαρμογών, κυρία Σφυρόερα Εμμανουλα, για τις εποικοδομητικές τους υποδείξεις και την πολύτιμη συμβολή τους στην ολοκλήρωση αυτής της εργασίας, ως μέλη της τριμελούς επιτροπής. Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω την οικογένειά μου, για την πολύτιμη στήριξή τους, τόσο στην παρούσα εργασία, όσο και στην ολοκλήρωση των σπουδών μου.

Η ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

ΧΕΙΡΧΑΝΤΕΡΗ ΓΕΩΡΓΙΑ ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ	
ΠΡΙΝΙΩΤΑΚΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ	
ΣΦΥΡΟΕΡΑ ΕΜΜΑΝΟΥΕΛΑ ΛΕΚΤΟΡΑΣ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ	

Περίληψη

Ο εκσυγχρονισμός του σχεδιασμού και των διαδικασιών σκέψης είναι ζωτικής σημασίας δεδομένης της κοινωνικής και τεχνικής προόδου. Η κοινωνία της πληροφορίας υπάρχει και μας προσκαλεί να ενσωματώσουμε τους στόχους και τις ευκαιρίες της. Στον τομέα της αρχιτεκτονικής, η προσαρμογή στη νέα πραγματικότητα είναι επείγουσα και ουσιαστική. Δεδομένου ότι το έργο των αρχιτεκτόνων επικεντρώνεται στον άνθρωπο, το περιβάλλον και έναν καλύτερο τρόπο ζωής, και δεδομένου ότι προσπαθούν να επιτύχουν τη χρυσή τομή, πρέπει να βρίσκονται στην πρώτη γραμμή των εξελίξεων. Σε μια εποχή που η οικονομία καταρρέει, η ανθρωπότητα πέφτει μαζί της και η κοινωνία ταλανίζεται από ζητήματα που προκύπτουν από την περίπλοκη καθημερινότητά της, ο αρχιτέκτονας πρέπει να δώσει τη λύση, διατηρώντας παράλληλα την ακεραιότητα και τηρώντας το αρχικό του σχέδιο. Τα υλικά ήταν, είναι και θα είναι πάντοτε το όργανο της δημιουργικής του διαδικασίας και της σκέψης του. Τα έξυπνα υλικά είναι εκείνα που εγγυώνται έναν οικονομικό κύκλο ζωής, έχουν εγγενή αντοχή, εστιάζουν στην επαναχρησιμοποίηση των προϊόντων, ανακυκλώνουν τα υλικά, χρησιμοποιούν ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και διαχειρίζονται έξυπνα την ενέργεια. Τα έξυπνα υλικά είναι το αποτέλεσμα των εξελίξεων στην επιστήμη των υλικών και έχουν σχεδιαστεί για να υποστηρίζουν τους αρχιτέκτονες στο έργο τους. Χαρακτηρίζονται από την απαίτηση για υψηλότερο βιοτικό επίπεδο με παράλληλη διατήρηση της βέλτιστης οικονομικής αποδοτικότητας.

Τα συστήματα που μπορούν να μεταβάλλουν τη συμπεριφορά τους ή συγκεκριμένες ιδιότητές τους ως απόκριση σε μια διέγερση αναφέρονται ως έξυπνα υλικά. Τα έξυπνα υλικά παρουσιάζουν δυναμική συμπεριφορά, προσαρμοζόμενα στις αλλαγές του περιβάλλοντος και των ενεργειακών πεδίων τους. Λόγω των ευέλικτων ιδιοτήτων τους, μπορούν να προσαρμόζονται στις μεταβαλλόμενες απαιτήσεις. Αντί να είναι προσαρμοσμένα σε ένα συγκεκριμένο σενάριο, μπορούν να προσαρμοστούν σε μια ποικιλία σεναρίων. Εξάλλου, οι μεταβαλλόμενες συνθήκες αποτελούσαν πάντα πρόβλημα για τα κτίρια. Η δουλειά τους είναι ιδιαίτερα απαιτητική εξαιτίας αυτού του γεγονότος.

Λέξεις κλειδιά

Έξυπνα υλικά, αρχιτεκτονική, κατηγορίες έξυπνων υλικών, εφαρμογή στην αρχιτεκτονική.

Abstract

The modernisation of planning and thought processes is vital given social and technical progress. The information society exists and invites us to integrate its goals and opportunities. In the field of architecture, adaptation to the new reality is urgent and essential. Since the work of architects focuses on people, the environment and a better way of life, and since they are trying to achieve the golden mean, they must be at the forefront of developments. At a time when the economy is collapsing, humanity is falling with it and society is reeling from issues arising from its complex daily life, the architect must provide the solution while maintaining integrity and adhering to the original plan. Materials were, are and always will be the instrument of his creative process and his thinking. Smart materials are those that guarantee an economical life cycle, have inherent durability, focus on product reuse, recycle materials, use renewable energy sources and manage energy intelligently. Smart materials are the result of advances in materials science and are designed to support architects in their work. They are characterised by the requirement for a higher standard of living while maintaining optimum economic efficiency.

Systems that can alter their behaviour or specific properties in response to a stimulus are referred to as smart materials. Smart materials exhibit dynamic behaviour, adapting to changes in their environment and energy fields. Due to their flexible properties, they can adapt to changing requirements. Instead of being adapted to a specific scenario, they can adapt to a variety of scenarios. After all, changing conditions have always been a problem for buildings. Their work is particularly challenging because of this fact.

Keywords

Smart materials, architecture, categories of smart materials, application in architecture.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περίληψη.....	4
Λέξεις κλειδιά.....	4
Abstract	5
Keywords.....	5
Πίνακας εικόνων.....	7
Εισαγωγή.....	8
1. Έξυπνα υλικά στην αρχιτεκτονική.....	10
1.1. Αρχιτεκτονική και δομικά υλικά.....	10
1.2. Η σχέση της αρχιτεκτονικής και των δομικών υλικών.....	11
1.3. Έξυπνα υλικά ή smart materials.....	13
1.4. Τα πρώτα έξυπνα υλικά.....	15
1.5. Τα χαρακτηριστικά των έξυπνων υλικών.....	16
1.6. Ιδιότητες των έξυπνων υλικών.....	17
2. Κατηγορίες έξυπνων υλικών.....	20
2.1. Έξυπνα υλικά τύπου I.....	22
2.1.1. Χρωμικά ή έξυπνα υλικά με μεταβολή χρώματος.....	23
2.1.2. Υλικά που αλλάζουν φάση.....	25
2.1.3. Αγώγιμα πολυμερή και άλλοι έξυπνοι αγωγοί.....	28
2.1.4. Ρεολογικά υλικά.....	29
2.1.5. Υγροί κρύσταλλοι.....	30
2.1.6. Οθόνες αιωρούμενων σωματιδίων.....	31
2.2. Έξυπνα υλικά Τύπου II.....	31
2.2.1. Υλικά εκπομπής φωτός.....	32
2.2.2. Ημιαγωγοί.....	35
2.2.3. Πιεζοηλεκτρικά.....	36
2.2.4. Κράματα με μνήμη σχήματος.....	37

2.2.5. Πολυμερή με μνήμη σχήματος.....	37
3. Εφαρμογές έξυπνων υλικών στην αρχιτεκτονική.....	39
3.1. Στον τομέα της αισθητικής.....	41
3.2. Στον τομέα της κατασκευής.....	44
3.3. Παραδείγματα.....	48
3.4. Νανοτεχνολογία.....	51
3.4.1. Παραδείγματα νανοτεχνολογίας.....	55
3.4.2. Εφαρμογές της νανοτεχνολογίας στην αρχιτεκτονική.....	56
3.5. Προβληματισμοί σχετικά με την εφαρμογή των έξυπνων υλικών στην αρχιτεκτονική.....	61
Συμπέρασμα.....	66
Βιβλιογραφία.....	67

Πίνακας εικόνων

Εικόνα 1 εφαρμογή φλοιού πεύκου για τη δημιουργία αρχιτεκτονικού περιβλήματος.....	41
Εικόνα 2 Το αυτοθεραπαυόμενο μπετόν πηγή.....	45
Εικόνα 3 κτίριο του οίκου Chanel.....	50
Εικόνα 4 Κτίριο Monte Verde.....	51
Εικόνα 5 Επίστρωση καθαρισμού.....	55
Εικόνα 6 Μετα-υλικό.....	56
Εικόνα 7 Carbon Tower - μακέτα.....	58
Εικόνα 8 E-Tree LA Tower.....	58
Εικόνα 9 Οι Nano Towers προτάθηκαν ως η νέα έδρα του ερευνητικού πάρκου DuBiotech στο Ντουμπάι από την Allard Architecture.....	59
Εικόνα 10 Αυτοκαθαριζόμενα συστήματα πρόσοψης στην Jubilee Church στη Ρώμη.....	60
Εικόνα 11 NanoSkin System ένα σύστημα επιδερμίδας ως υλικό επένδυσης για ένα κτίριο με χρήση νανοτεχνολογίας.....	61

Εισαγωγή

Η ιστορική πορεία των υλικών συμβαδίζει με την παρουσία και την πρόοδο της ανθρωπότητας σε παγκόσμια κλίμακα. Ο αντίκτυπος των υλικών στον πολιτισμό ήταν σημαντικού μεγέθους, όπως αποδεικνύεται από τις προόδους στην επιστήμη των υλικών που ενίσχυσαν την οικονομία και υπαγόρευαν την ποιότητα ζωής που μπορεί να επιτύχει η κοινωνία.

Η βαθιά επιρροή που άσκησαν τα υλικά στην εξέλιξη του ανθρώπινου πολιτισμού καταδεικνύεται από τις ονομασίες Εποχή του Λίθου, Εποχή του Χαλκού και Εποχή του Σιδήρου, υποδηλώνοντας την κατεξοχήν ουσία που χρησιμοποιούσαν οι αντίστοιχες κοινωνίες κατά τη διάρκεια των εποχών αυτών (Αρνέλλου, 2013). Ωστόσο, παρά τον αναμφισβήτητο αντίκτυπο του αντίστοιχου υλικού στην πολιτιστική εξέλιξη κάθε εποχής, είναι αξιοσημείωτο ότι ο ρυθμός προόδου που παρατηρήθηκε κατά τη διάρκεια αυτής της εκτεταμένης διάρκειας παρέμεινε σχετικά υποτονικός, σε πλήρη αντίθεση με τον ταχύτατο ρυθμό προόδου που παρατηρήθηκε τον 20ό αιώνα, όπου ο τομέας της επιστήμης και της τεχνολογίας των υλικών γνώρισε μια άνευ προηγουμένου έξαρση. Στη σύγχρονη εποχή, έχει κατασκευαστεί με επιτυχία μια νέα κατηγορία υλικών, που συνήθως αναφέρονται ως "λειτουργικά", "αυτοπροσαρμοζόμενα" ή "ευφυή" υλικά. Η πρωταρχική εστίαση αυτών των υλικών έγκειται στις λειτουργικές τους δυνατότητες και δράσεις, παρά στις συγκεκριμένες αριθμητικές τιμές που σχετίζονται με τις φυσικές τους ιδιότητες ή χαρακτηριστικά, όπως το μέτρο ελαστικότητας ή η ειδική αντίσταση (Hu et al., 2020).

Η συμβολή των εξελίξεων στην τεχνολογία των υλικών και στην τεχνολογία της πληροφορικής έχει επισπεύσει την εμφάνιση ευφυών υλικών ή συστημάτων στη σύγχρονη εποχή. Τα ευφυή υλικά αφορούν συστήματα που διαθέτουν την ικανότητα να τροποποιούν σκόπιμα και με ακρίβεια τη συμπεριφορά τους ή συγκεκριμένα χαρακτηριστικά τους, όπως το σχήμα, η φυσική συχνότητα, ο συντελεστής απόσβεσης κραδασμών κ.ο.κ., με προκαθορισμένο και ρυθμιζόμενο τρόπο, ως άμεση απόκριση σε μια εξωτερική διέγερση (Αρνέλλου, 2013). Τα συστήματα αυτά ενσωματώνουν αισθητήρες και ενεργοποιητές, οι οποίοι συνδέονται μεταξύ τους μέσω ενός κατάλληλου βρόχου ελέγχου. Διαθέτουν την ικανότητα να εκτελούν γνωστικά καθήκοντα με διακριτικό τρόπο, με την προτροπή εξωτερικών ερεθισμάτων. Οι αισθητήρες είναι σε θέση να αντιλαμβάνονται μεταβολές στο περιβάλλον, όπως μεταβολές στην εφαρμοζόμενη τάση ή τη θερμοκρασία, καθώς και μεταβολές εντός της ίδιας τους της δομής,

όπως η εμφάνιση ατελειών ή τροποποιήσεις στην κρυσταλλική δομή. Οι ενεργοποιητές, από την άλλη πλευρά, αντιδρούν σε αυτά τα ερεθίσματα προκαλώντας μεταβολές σε συγκεκριμένες ιδιότητες, όπως η ακαμψία, το σχήμα ή η ικανότητα απόσβεσης (Nanotechnology, 2018).

Με την αξιοποίηση των εγγενών χαρακτηριστικών των ευφύων υλικών, καθίσταται εφικτή η σύλληψη και η ανάπτυξη αρχιτεκτονικών διαμορφώσεων που μπορούν να αξιοποιηθούν βέλτιστα στις μέγιστες λειτουργικές και δομικές τους ικανότητες, ενώ παράλληλα μετριάζονται οι πιθανοί κίνδυνοι που συνδέονται με την υπέρβαση των εν λόγω ικανοτήτων. Επιπλέον, είναι επιτακτική ανάγκη να διαδίδουν ολοκληρωμένα αρχεία του πλήρους λειτουργικού τους χρονικού, που περιλαμβάνουν περιπτώσεις δυσλειτουργιών, την έκταση της επέκτασής τους και κρίσιμα σημεία βλάβης. Ταυτόχρονα, πρέπει να διαθέτουν την ικανότητα να ανταποκρίνονται σε επικίνδυνες καταστάσεις που απειλούν την ακεραιότητά τους, όπως οι υπερβολικές ταλαντώσεις, και να διαθέτουν την ικανότητα αυτόνομης αποκατάστασης. Ένα βέλτιστο ευφύες σύστημα μπορεί να οριστεί ως μια αυτοτελής οντότητα στην οποία η εγγενής ενέργεια που απαιτείται για την έναρξη της απόκρισης σε ένα εξωτερικό ερέθισμα είναι ενσωματωμένη στο ίδιο το σύστημα, με τα συστατικά του στοιχεία να είναι υπεύθυνα για την εκτέλεση των λειτουργιών του συστήματος. Η προσομοίωση ευφύων συστημάτων μπορεί να επιτευχθεί μέσω της προσομοίωσης βιολογικών συστημάτων. Οι αισθητήρες λειτουργούν όπως το νευρωνικό δίκτυο, οι ενεργοποιητές όπως το μυϊκό σύστημα και ο βρόχος ελέγχου όπως το εγκεφαλικό κέντρο ενός οργανισμού, ενορχηστρώνοντας τη συνολική ρύθμιση ολόκληρου του συστήματος (Kretzer, 2016).

1. Έξυπνα υλικά στην αρχιτεκτονική

1.1. Αρχιτεκτονική και δομικά υλικά

Ο βαθύς αντίκτυπος των δομικών υλικών και των διαδικασιών παραγωγής τους στην εξέλιξη του ανθρώπινου πολιτισμού αναγκάζει τους ιστορικούς να κατηγοριοποιούν ιστορικές εποχές με βάση την ανάπτυξη των εν λόγω υλικών. Στο εξής, οι μελετητές έχουν οριοθετήσει τις εποχές της Εποχής του Λίθου, της Εποχής του Χαλκού και της Εποχής του Σιδήρου. Ο συμβιωτικός χαρακτήρας της σχέσης μεταξύ αρχιτεκτονικής και δομικών υλικών διατηρείται σε όλη τη διάρκεια της ιστορίας. Η προοδευτική ανάπτυξη των δομικών υλικών άνοιξε το δρόμο για νέους δρόμους στον τομέα της αρχιτεκτονικής. Ταυτόχρονα, ο κλάδος της αρχιτεκτονικής κατέστησε αναγκαία την εμφάνιση βελτιωμένων υλικών για την αποτελεσματική υλοποίηση καινοτόμων σχεδιαστικών προτάσεων και αρχιτεκτονικών ιδεολογιών (Soliman, 2013).

Η έλευση της βιομηχανικής επανάστασης επιτάχυνε την εμφάνιση τυποποιημένων και πιστοποιημένων δομικών υλικών που διαθέτουν διακριτά φυσικά και τεχνικά χαρακτηριστικά. Το φαινόμενο αυτό λειτούργησε επίσης ως καταλύτης για τους αρχιτέκτονες στην ανάπτυξη του μοντέλου σκελετικού πλαισίου, το οποίο περιλαμβάνει τον φέροντα οργανισμό του οικοδομήματος καθώς και τα στοιχεία πλήρωσης του εξωτερικού του περιβλήματος (Lesonik et al., 2014). Κατά τη διάρκεια του 20ού αιώνα, ο τομέας της αρχιτεκτονικής γνώρισε σημαντικές τεχνολογικές εξελίξεις, οι οποίες οδήγησαν στην εμφάνιση νέων δομικών υλικών που δεν ήταν μέχρι τότε διαθέσιμα. Ο αρχιτέκτονας διέθετε την αρμοδιότητα να διακρίνει τα προτιμώμενα χαρακτηριστικά και τις ιδιότητες που όφειλε να διαθέτει το δομικό υλικό, και στη συνέχεια έκανε μια επιλογή από ένα ευρύ φάσμα υλικών που θα μπορούσαν δυνητικά να εκπληρώσουν αυτές τις απαιτήσεις. Αυτή η διαδικασία επιλογής δεν περιοριζόταν από τις προκαθορισμένες διαστάσεις και προδιαγραφές που επέβαλε η βιομηχανία δομικών υλικών (Hebel & Heisel, 2017).

Στα πρώτα χρόνια του 21ου αιώνα, γινόμαστε μάρτυρες της ανάδυσης της εποχής των έξυπνων υλικών. Το αναπόφευκτο της τεχνολογικής προόδου σε διάφορους τεχνικούς και επιστημονικούς τομείς είναι ένα ευρέως αναγνωρισμένο φαινόμενο. Ο καταλύτης στην αναδυόμενη εποχή έγκειται στον συγκερασμό της πολυμάθειας και της τεχνολογικής προόδου, με αποκορύφωμα τη δημιουργία νέων ευφών υλικών. Ο συγκερασμός γνώσεων και

εμπειρογνωμοσύνης που προέρχονται από διάφορους τομείς, όπως ενδεικτικά η τεχνολογία ανθεκτικότητας υλικών, η βιοτεχνολογία, η βιομιμητική (η αξιοποίηση των βιολογικών συστημάτων για την πληροφόρηση της ανάπτυξης περίπλοκων συστημάτων), η νανοτεχνολογία, τα μοριακά ηλεκτρονικά, τα νευρολογικά δίκτυα (η ηλεκτρονική εξομοίωση των νευρολογικών διασυνδέσεων εντός του ανθρώπινου εγκεφάλου) και η τεχνητή νοημοσύνη (Lesonik et al., 2014), είναι ένα σημαντικό εγχείρημα. Οι προαναφερθείσες τεχνολογίες θα χρησιμεύσουν για τη διαλεύκανση των λειτουργιών του εγκεφάλου, του νευρικού συστήματος και του μυοσκελετικού συστήματος στο πλαίσιο μιας νέας συνομοταξίας εξελιγμένων υλικών και ολοκληρωμένων λειτουργικών δομών και συστημάτων. Η πρόοδος στην τεχνολογία των υλικών είναι έτοιμη να γεννήσει νέες εξελίξεις στην κατασκευή έξυπνων υλικών, οι οποίες θα εκδηλωθούν με τρόπο σαφώς διαφορετικό από τον μετασχηματιστικό αντίκτυπο που επέφερε η ανακάλυψη και η εφαρμογή του ηλεκτρονικού τσιπ στην καθημερινή μας ύπαρξη (Hebel & Heisel, 2017).

1.2. Η σχέση της αρχιτεκτονικής και των δομικών υλικών

Η περίπλοκη αλληλεπίδραση μεταξύ αρχιτεκτονικής και δομικών υλικών μπορεί να χαρακτηριστεί εύστοχα ως μια δυναμική και αμοιβαία σχέση, η οποία έχει εξελιχθεί παράλληλα με την εξέλιξη της ανθρώπινης ιστορίας. Ο αρχιτέκτονας έχει στη διάθεσή του μια σειρά δομικών υλικών, τα οποία μπορεί να συνθέσει και να χρησιμοποιήσει για να εκδηλώσει συγκεκριμένες δυνατότητες. Αυτές οι δυνατότητες, με τη σειρά τους, διευκολύνουν την υλοποίηση του τελικού τεχνικού αποτελέσματος που οραματίζεται ο αρχιτέκτονας. Με παρόμοιο τρόπο, η εφαρμογή της περίπλοκης αρχιτεκτονικής νόησης ανοίγει το δρόμο για νέες τροχιές και γεννά νέες προϋποθέσεις που καθιστούν αναγκαία την εκπλήρωση της τεχνολογίας των δομικών υλικών, δίνοντας έτσι το έναυσμα για την ανάπτυξη καινοτόμων υλικών. Κατά τη διάρκεια των πρώιμων φάσεων της αρχιτεκτονικής ανάπτυξης, ο συσχετισμός μεταξύ των στοιχείων ήταν σαφής και συγκριτικά απλός. Ο αρχιτέκτονας έκανε την επιλογή των δομικών υλικών με βάση διάφορα κριτήρια, συμπεριλαμβανομένης της εξέτασης της διαθεσιμότητας των εν λόγω υλικών στην καθορισμένη περιοχή του έργου. Ένα πρόσθετο κριτήριο αφορούσε τις φυσικές ιδιότητες του υλικού και τη δυνατότητα επεξεργασίας του με τους διαθέσιμους πόρους ώστε να καταστεί πολύτιμο και επωφελές για το έργο (Bechthold & Weaver, 2017).

Τελικά, η εγγενής δομή και η εξωτερική εκδήλωση μιας δεδομένης ουσίας την καθιστούσε πρόσφορη για απασχόληση στο πεδίο της διακόσμησης. Σε μια εκτεταμένη χρονική έκταση, που καλύπτει πολυάριθμες εποχές, η πέτρα και το ξύλο αναδεικνύονται σταθερά ως τα κυρίαρχα συστατικά που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή διαφόρων οικοδομημάτων. Ο αρχιτέκτονας εκείνης της εποχής αντιμετώπιζε περιορισμούς στις δυνατότητες επεξεργασίας, γεγονός που καθιστούσε αναγκαία την αποδοχή των εγγενών ιδιοτήτων των διαθέσιμων υλικών από μακροσκοπική σκοπιά. Η απουσία ακριβών υπολογισμών σχετικά με τις φυσικές και τεχνικές ιδιότητες των εν λόγω υλικών περιόριζε περαιτέρω την προσέγγισή τους. Στην ουσία, ο αρχιτέκτονας λειτουργούσε ως η αρμόδια αρχή που, μέσω έργων, πειραμάτων πεδίου, σφαλμάτων και συμφορών, απέκτησε και βελτίωσε την κατανόηση της χρήσης, των περιορισμών και των δυνατοτήτων που ενυπήρχαν σε αυτά τα συμβατικά υλικά που ήταν επιδεκτικά εφαρμογής (Allen & Iano, 2019).

Τα αναδυόμενα υλικά γεννούν νέες προοπτικές και προσφέρουν βιώσιμες λύσεις στα διλήμματα του σχεδιασμού και της κατασκευής, αντιμετωπίζοντας έτσι τις εξελισσόμενες ανθρώπινες απαιτήσεις. Στο εξής, ο μονόδρομος συσχετισμός μεταξύ υλικότητας και αρχιτεκτονικού σχεδιασμού έχει καταστεί παρωχημένος, δίνοντας τη θέση του σε μια αμοιβαία και ρευστή αλληλεξάρτηση. Επιπλέον, μπορεί να χαρακτηριστεί ότι παρουσιάζει αυξημένο επίπεδο δημιουργικότητας (Αρνέλλου, 2013).

Στη σύγχρονη εποχή του 21ου αιώνα, υποβοηθούμενη από την πρόοδο και την εξέλιξη της τεχνολογίας, ο αρχιτέκτονας αναλαμβάνει την ευθύνη της εξακρίβωσης των επιθυμητών χαρακτηριστικών και των τεχνικών προδιαγραφών που οφείλει να διαθέτει το υλικό. Αυτό γίνεται με σκοπό να δοθεί η δυνατότητα στη βιομηχανία να κατασκευάσει το εν λόγω υλικό, διευκολύνοντας έτσι την υποστήριξη και την υλοποίηση της αρχιτεκτονικής δημιουργίας του αρχιτέκτονα. Στην επερχόμενη εποχή, η έλευση των ευφών δομικών υλικών είναι έτοιμη να προκαλέσει μια αλλαγή παραδείγματος στην αρχιτεκτονική μας γνώση και αντίληψη, προωθώντας έτσι την ανάδυση ενός νέου φιλοσοφικού πλαισίου. Αναδυόμενες κατασκευαστικές μεθοδολογίες αναμένεται να εκδηλωθούν, συνοδευόμενες από την έλευση νέων αρχών σχεδιασμού (Allen & Iano, 2019). Η δυναμική αλληλεπίδραση μεταξύ των έξυπνων υλικών και της αρχιτεκτονικής θα γεννήσει ένα παράδειγμα όπου τα δομικά στοιχεία θα προσλάβουν τα χαρακτηριστικά των ενεργειακών πεδίων, μετασχηματίζοντας έτσι την ίδια τη φύση της συμπεριφοράς και της αντιμετώπισής τους. Από το έτος 1990, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, υπήρξε μια αξιοσημείωτη μετατόπιση της αρχιτεκτονικής ιδεολογίας προς το εννοιολογικό πλαίσιο της μεταβλητότητας του περιβλήματος και της εγγενούς

αλληλεπίδρασής του με τους χρήστες του έργου. Η προτεινόμενη έννοια είναι έτοιμη να υποστεί μια μετασχηματιστική διαδικασία, σύμφωνα με την οποία η σύγχρονη αρχιτεκτονική θα απαιτήσει κτίρια που διαθέτουν μια υπόνοια ζωτικότητας, επιτρέποντάς τους να ανταποκρίνονται σε εξωτερικά ερεθίσματα και δυναμικές περιβαλλοντικές συνθήκες. Αυτό έρχεται σε πλήρη αντίθεση με τη συμβατική προσέγγιση της θωράκισης των ενοίκων και των χρηστών των αρχιτεκτονικών έργων από τις δυσμενείς εξωτερικές περιβαλλοντικές συνθήκες, μια πρακτική που ανάγεται στις πρώτες περιπτώσεις της ανθρωπότητας που αναζητούσε καταφύγιο σε σπήλαια για προστασία (Hebel & Heisel, 2017).

1.3. Έξυπνα υλικά ή smart materials

Ο όρος "έξυπνα υλικά", όπως εμφανίζεται στην παγκόσμια βιβλιογραφία, είναι μια σχετικά σύγχρονη ονομασία που επιδιώκει να συμπεριλάβει διάφορες έννοιες και ιδιότητες που προκύπτουν από τη συγχώνευση αυτών των δύο όρων. Επιπλέον, είναι επιτακτική ανάγκη να αναγνωριστεί ότι οι σημασιολογικές συνδηλώσεις και οι λεξιλογικές ερμηνείες αυτών των όρων παρουσιάζουν έναν ορισμένο βαθμό μεταβλητότητας που εξαρτάται από τον συγκεκριμένο τομέα της τεχνολογίας στον οποίο αναφέρονται. Εν τέλει, λόγω του γρήγορου ρυθμού των τεχνολογικών εξελίξεων, η ακριβής πορεία των μελλοντικών ανακαλύψεων και οι πιθανές ιδιότητες που θα αποδοθούν στα "έξυπνα υλικά" παραμένουν εγγενώς απρόβλεπτες και ασύλληπτες (Su & Song, 2021).

Τα έξυπνα υλικά, γνωστά και ως ευφυή υλικά, θεωρούνται ως η λογική εξέλιξη στη σφαίρα των υλικών, καθώς προσπαθούν να ανταποκριθούν σε όλο και πιο απαιτητικές και εξειδικευμένες απαιτήσεις, ενώ παράλληλα καλύπτουν τις συνεχώς αυξανόμενες ανάγκες που προκύπτουν από τη σύγχρονη εποχή της πληροφορίας. Η εξεταζόμενη εποχή χαρακτηρίζεται από τη συρροή παραγόντων όπως οι επιταχυνόμενοι ρυθμοί ανάπτυξης, η αδιάκοπη εξέλιξη της τεχνολογίας και η ανάδυση νέων κοινωνικών προτύπων και ενός σύγχρονου τρόπου ζωής (Yu et al., 2017).

Ενώ είναι αλήθεια ότι οι διάφοροι τομείς μελέτης και οι υλικές εφαρμογές έχουν διακριτές συνθήκες που συνέβαλαν στις αντίστοιχες προόδους τους, είναι αξιοσημείωτο ότι ορισμένα κοινά κίνητρα μπορούν να εντοπιστούν σε όλους αυτούς τους τομείς:

- την ανάγκη να ικανοποιούνται παροδικές επιθυμίες,

- η ανάγκη να μειωθεί το βάρος
- χαμηλότερες απαιτήσεις συντήρησης.
- βελτιστοποίηση των επιδόσεων
- ελαχιστοποίηση των αστοχιών
- ακριβής έλεγχος και
- έγκαιρη προειδοποίηση,
- η προσπάθεια βελτίωσης του φάσματος και της ποιότητας των συνθηκών επιβίωσης,
- εξοικονόμηση ενέργειας,
- εξασφάλιση υψηλής ποιότητας, ασφάλειας και άνεσης
- σε συνδυασμό με χαμηλό κόστος
- η ανάγκη για προσαρμοστικότητα και
- για την αντιμετώπιση απρόβλεπτων καταστάσεων (Αρνέλλου, 2013).

Στο πεδίο της αρχιτεκτονικής επιστήμης, είναι επιτακτική ανάγκη να αναγνωριστεί ότι τα προαναφερθέντα κίνητρα δεν έχουν σχεδιαστεί ειδικά για να διευκολύνουν την πρόοδο και την καινοτομία των ευφυών υλικών. Παρά ταύτα, παρ' όλα αυτά, η ενσωμάτωση αυτών των στοιχείων στη σφαίρα του σχεδιασμού φαίνεται να διαθέτει την ικανότητα να αντιμετωπίσει μια πληθώρα προκλήσεων που έχουν αντιμετωπίσει μέχρι στιγμής οι παραδοσιακές κατασκευές (Yu et al., 2017). Ο στόχος της εφαρμογής ενός πιο περιβαλλοντικά συνειδητοποιημένου σχεδιασμού, σε συνδυασμό με την επιδίωξη για ένα βελτιωμένο βιοτικό επίπεδο που περιλαμβάνει ένα ευρύ φάσμα ανέσεων, η μείωση των δαπανών συντήρησης, η μεγιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης και η παράταση της διάρκειας ζωής των κατασκευών με ταυτόχρονη βελτίωση της δομικής εποπτείας, είναι μεταξύ των πολλαπλών δυνατοτήτων που φαίνεται ότι μπορούν να προσφέρουν τα έξυπνα υλικά. Παρά την εκθετική πορεία που παρατηρείται στον ρυθμό ανάπτυξης αυτών των υλικών, η εφαρμογή και η αξιοποίησή τους σε διάφορους τομείς παραμένει περιορισμένη και προσωρινή (Αρνέλλου, 2013).

Στην υπάρχουσα βιβλιογραφία, τα προαναφερθέντα υλικά έχουν χαρακτηριστεί ως "ευφυή", "έξυπνα", "αυτοπροσαρμοζόμενα" και "πολυλειτουργικά". Κάθε μία από τις προαναφερθείσες περιγραφές αφορά ουσιαστικά διακριτές ιδιότητες. Στο πεδίο της επιστήμης των υλικών, είναι σκόπιμο να σημειωθεί ότι μια ουσία που διαθέτει την αξιοσημείωτη ικανότητα να δέχεται εξωτερικά ερεθίσματα που προέρχονται από το περιβάλλον της και στη συνέχεια να προσαρμόζει τις ιδιότητές της αναλόγως αναφέρεται συνήθως ως

"αυτοπροσαρμοζόμενη". Η εγγενής ευφυΐα του υποκειμένου μπορεί να αποδοθεί στην ολοκληρωμένη κατανόηση του προκαθορισμένου τρόπου με τον οποίο είναι ικανό να ανταποκρίνεται στα ερεθίσματα. Η νοημοσύνη συνδέεται στενά με τη συγχώνευση της "κριτικής σκέψης" προκειμένου να διακρίνει και να επιλέγει τον βέλτιστο τρόπο δράσης ως απάντηση σε εξωτερικά ερεθίσματα, όπως εκθέτει ο Κωβαίος (2011). Αντιθέτως, ο όρος "σοφός" ή "σοφία" αναφέρεται στην ουσία που συσσωρεύει σταδιακά την "εμπειρική" ικανότητα να προσδιορίζει και να επιλέγει ανεξάρτητα την πλέον βέλτιστη αντίδραση στο σχετικό ερέθισμα με τρόπο που να ανταποκρίνεται στο συγκεκριμένο πλαίσιο. Τα σύγχρονα υλικά που παρουσιάζουν τα προαναφερθέντα χαρακτηριστικά περιλαμβάνουν είτε μεμονωμένα είτε σε συνδυασμό τις προαναφερθείσες αρχές. Παρ' όλα αυτά, σε μια προσπάθεια να αμβλυνθεί κάθε πιθανή ασάφεια, είναι απαραίτητο να καθοριστεί ότι στο πλαίσιο του παρόντος επιστημονικού εγγράφου, οι ουσίες που παρουσιάζουν οποιοδήποτε από τα προαναφερθέντα χαρακτηριστικά θα χαρακτηρίζονται εφεξής ως ευφυείς ή έξυπνες (Γιαννού & Γιαννού, 2012).

Η ευφυΐα, που συνήθως αναφέρεται ως "I.Q.", των υλικών αυτών καθορίζεται από την ικανότητά τους να ανταποκρίνονται γρήγορα και αποτελεσματικά σε ερεθίσματα και την ικανότητά τους να ανιχνεύουν και να χειρίζονται ένα ευρύ φάσμα δεδομένων. Πολλοί μελετητές, ωστόσο, υποστηρίζουν την άποψη ότι τα υλικά αυτά δεν διαθέτουν νοημοσύνη με τη συμβατική έννοια, αλλά μάλλον παρουσιάζουν "ευφυείς συμπεριφορές" μέσω της συγχώνευσης συγκεκριμένων ιδιοτήτων, λειτουργιών, δομών και συστημάτων. Συνοψίζοντας, μπορεί να υποστηριχθεί ότι κανένα μεμονωμένο υλικό, όταν εξετάζεται μεμονωμένα, δεν μπορεί να χαρακτηριστεί με σαφήνεια ως υλικό που διαθέτει νοημοσύνη, καθώς υφίσταται εγγενώς ως αναπόσπαστο συστατικό μέσα σε ένα πολύπλοκο δίκτυο αλληλεπιδράσεων (Κωβαίος, 2011).

1.4. Τα πρώτα έξυπνα υλικά

Τα αρχικά έξυπνα υλικά σχεδιάστηκαν και κατασκευάστηκαν από το αξιόλογο ίδρυμα που είναι γνωστό ως NASA (National Aeronautics and Space Administration), κυρίως με σκοπό τη διεξαγωγή εκτεταμένων ερευνητικών προσπαθειών. Επιπλέον, οι Ένοπλες Δυνάμεις των Ηνωμένων Πολιτειών διαδραμάτισαν επίσης καθοριστικό ρόλο στην ανάπτυξη αυτών των καινοτόμων υλικών. Η μελέτη με τίτλο "Έξυπνα υλικά για δομές του στρατού", που

δημοσιεύθηκε στις 13 Απριλίου 1992, αποτελεί αντιπροσωπευτικό παράδειγμα. Αξίζει να σημειωθεί ότι ο στρατός των Ηνωμένων Πολιτειών είχε ήδη ξεκινήσει την έρευνα για τα έξυπνα υλικά αρκετά χρόνια πριν, όπως αναφέρεται από τον Αρνέλλου (2013).

Η εναρκτήρια περίπτωση ενός εμπορικού "έξυπνου υλικού" παρουσιάστηκε το έτος 1992, εκδηλωμένη με τη μορφή σκι. Το σημαντικότερο χαρακτηριστικό αυτών των σκι βρισκόταν στην ενσωμάτωση πιεζοηλεκτρικών κεραμικών. Τα πιεζοηλεκτρικά κεραμικά είναι μια κατηγορία υλικών που διαθέτουν την αξιοσημείωτη ικανότητα μετατροπής της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική, καθώς και την αντίστροφη διαδικασία μετατροπής της ηλεκτρικής ενέργειας σε μηχανική. Το πρόβλημα που αντιμετώπισαν οι σκιέρ αφορούσε την εμφάνιση δονήσεων και ταλαντώσεων στις πρόσθιες άκρες των σκι, συγκεκριμένα στην περιοχή των συνδέσμων. Η περιοχή αυτή αντιστοιχεί στις ακριβείς θέσεις όπου τα πόδια του σκιέρ έρχονται σε επαφή με το έδαφος (KÖK et al., 2019). Κατά την ανίχνευση των δονήσεων από τα πιεζοηλεκτρικά κεραμικά στοιχεία, μεταδίδονταν ηλεκτρικά σήματα στο κύκλωμα ελέγχου. Στη συνέχεια, μέσω της μετάδοσης ηλεκτρικής ενέργειας, η ακαμψία του υλικού αυξήθηκε, με αποτέλεσμα τη διακριτή μείωση του πλάτους των ταλαντώσεων και των δονήσεων. Συνοπτικά, η χρήση του "έξυπνου πιεζοηλεκτρικού κεραμικού" υλικού εξυπηρέτησε διπλό σκοπό ως αισθητήρας κραδασμών και ως ενεργοποιητής, τροποποιώντας αποτελεσματικά τη συμπεριφορά του υλικού για τον μετριασμό των κραδασμών. Κατά συνέπεια, αυτή η τεχνολογική παρέμβαση διευκόλυνε ένα αυξημένο επίπεδο ασφάλειας και βελτιωμένη ρευστότητα στην κίνηση του σκιέρ στο χιονισμένο έδαφος (Αρνέλλου, 2013).

Το aerogel μπορεί να χαρακτηριστεί ως ένα από τα πρωτοποριακά παραδείγματα "ευφυών υλικών". Η ανακάλυψη αυτού του φαινομένου μπορεί να αναχθεί στο έτος 1931, ωστόσο, μόλις τη δεκαετία του 1970 απέκτησε σημαντική αναγνώριση και ευρεία ευαισθητοποίηση. Το προαναφερθέν υλικό επιδεικνύει αξιόπαινες ιδιότητες, μεταξύ των οποίων η αξιοσημείωτη ελαφριά φύση του (διαθέτει πυκνότητα τριπλάσια από εκείνη του αέρα), οι εξαιρετικές μονωτικές ιδιότητες, η διευκόλυνση της διάδοσης του φωτός και η ικανότητα διατήρησης της δομικής του ακεραιότητας (Καλογερόπουλος, 2010).

1.5. Τα χαρακτηριστικά των έξυπνων υλικών

Υπάρχουν πέντε θεμελιώδη χαρακτηριστικά σύμφωνα με τους Michelle Addington και Daniel Schodek, στο βιβλίο τους *Smart Materials and New Technologies*, που καθιστούν ένα υλικό ευφυές σε σχέση με τα συμβατικά υλικά που χρησιμοποιούνταν στην αρχιτεκτονική μέχρι πρόσφατα, και αυτά είναι:

- αμεσότητα, η ικανότητα να ανταποκρίνονται σε πραγματικό χρόνο ή με άλλο τρόπο να έχουν άμεση επίδραση στα ερεθίσματα που δέχονται αμεσότητα, η ικανότητα να ανταποκρίνονται σε ποικίλες περιβαλλοντικές καταστάσεις, συνθήκες και εξωτερικά ερεθίσματα
- η αυτοενεργοποίηση, η εγγενής νοημοσύνη τους και ο προγραμματισμός της εσωτερικής τους δομής ώστε να ενεργοποιούνται και να αντιδρούν σε ένα συγκεκριμένο ερέθισμα
- επιλεκτικότητα, διακριτή, ελεγχόμενη και προβλέψιμη αντίδραση βάσει αρχικού προγραμματισμού
- την αμεσότητά τους, την ικανότητά τους να ανταποκρίνονται με στοχευμένο και περιορισμένο τρόπο τοπικά στο ερέθισμα ενεργοποίησης και, επιπλέον, ένα μεγάλο ποσοστό αυτών των καινοτόμων υλικών παρουσιάζει
- προσαρμοστικότητα ή βιωσιμότητα, την ικανότητα αναδιάρθρωσης, μεταρρύθμισης ή αυτοδιόρθωσης ως συνάρτηση του χρόνου ή των εξωτερικών συνθηκών (Addington Schodek, 2005)

1.6. Ιδιότητες των έξυπνων υλικών

Τα έξυπνα υλικά διαθέτουν διακριτές εσωτερικές και εξωτερικές ιδιότητες που καθορίζουν την ουσία τους και τα καθιστούν απaráμιλλα, που απορρέουν από τη φιλοσοφία και την κατασκευή τους που είναι προσεκτικά σχεδιασμένες. Ο εγγενής δυναμισμός των έξυπνων υλικών δημιουργεί μια αμοιβαία αλληλεπίδραση μεταξύ των εσωτερικών και εξωτερικών ιδιοτήτων τους. Η πρώτη οντότητα επηρεάζεται εγγενώς από τη δεύτερη οντότητα και εξαρτάται από αυτήν, και αντίστροφα, η δεύτερη οντότητα επηρεάζει αμοιβαία την πρώτη οντότητα και εξαρτάται από αυτήν. Οι εσωτερικές ιδιότητες αφορούν τις περίπλοκες διαστάσεις στη μικροκλίμακα και τη νανοκλίμακα, που εξαρτώνται από τη χημική σύνθεση του υλικού και την εσωτερική μοριακή του διαμόρφωση. Η κατηγοριοποίηση των εσωτερικών ιδιοτήτων των έξυπνων υλικών περιλαμβάνει πέντε διακριτούς τομείς, ήτοι τον μηχανικό, τον

θερμικό, τον ηλεκτρικό, τον χημικό και τον οπτικό. Οι προαναφερθείσες εσωτερικές ιδιότητες εκδηλώνονται ως συνέπεια της ενεργειακής απόκρισης που παρουσιάζει το έξυπνο υλικό ως αντίδραση στα αντίστοιχα εξωτερικά ενεργειακά ερεθίσματα και διεγέρσεις στις οποίες υπόκειται. Στον λόγο, κάνουμε μια συνοπτική αναφορά σε ορισμένες εσωτερικές ιδιότητες, όπως ενδεικτικά η σκληρότητα, η πυκνότητα, η αγωγιμότητα, η ειδική θερμότητα, η διαλυτότητα, η διαφάνεια κ.ο.κ. (Καλογερόπουλος, 2010). Οι εξωτερικές ιδιότητες αφορούν τη μακροσκοπική κλίμακα και γίνονται υποκειμενικά αντιληπτές από τους ανθρώπινους παρατηρητές. Περιλαμβάνουν κυρίως τη δυναμική αλληλεπίδραση μεταξύ των έξυπνων υλικών και του συνεχώς εξελισσόμενου εξωτερικού περιβάλλοντος. Οι προαναφερθείσες ιδιότητες περιλαμβάνουν χαρακτηριστικά όπως η απόχρωση, η μορφή, η ποιότητα της επιφάνειας και άλλα συναφή χαρακτηριστικά. Τα έξυπνα υλικά, παρά την εκτεταμένη ποικιλία τους, την ξεχωριστή ταξινόμηση στην οποία ανήκουν, την ανομοιογένεια στη δομική τους σύνθεση και το ποικίλο φάσμα εφαρμογών τους, παρουσιάζουν πολυάριθμα κοινά χαρακτηριστικά που μπορούν να ταξινομηθούν σε θεμελιώδεις ιδιότητες που ενυπάρχουν σχεδόν σε όλα τα έξυπνα υλικά (Καλογερόπουλος, 2010).

Είναι νοητό μια οντότητα να υφίσταται τροποποιήσεις των ιδιοτήτων της ως απόκριση σε μεταβολές του περιβάλλοντος. Τα έξυπνα υλικά διαθέτουν την αξιοσημείωτη ικανότητα να υφίστανται μεταβολές σε διάφορες θεμελιώδεις ιδιότητες, συμπεριλαμβανομένων ενδεικτικά των μηχανικών, θερμικών, ηλεκτρικών, χημικών και οπτικών χαρακτηριστικών. Τα υλικά που επιδεικνύουν αυτό το συγκεκριμένο χαρακτηριστικό χρησιμοποιούνται συχνότερα στον τομέα της αρχιτεκτονικής. Τα προαναφερθέντα υλικά παρουσιάζουν θερμοχρωμικές, φωτοχρωμικές, ηλεκτροχρωμικές και άλλες παρόμοιες ιδιότητες, όπως αναλύεται από τους Spraggiari και συν. (2016).

Επιδεικνύουν τη δυνατότητα ανταλλαγής ενέργειας. Η προαναφερθείσα ιδιότητα αφορά την ικανότητα της ιδιότητας να αφομοιώνει ενέργεια από το ευφές υλικό σε μια συγκεκριμένη διαμόρφωση και στη συνέχεια να τη μετατρέπει σε μια εναλλακτική διαμόρφωση που είναι πιο συμφέρουσα και αποτελεσματική. Το σύνολο της λειτουργίας βασίζεται στη θεμελιώδη αρχή του πρώτου αξιώματος της θερμοδυναμικής. Τα προαναφερθέντα υλικά περιλαμβάνουν φωτοβολταϊκά, πιεζοηλεκτρικά, θερμοηλεκτρικά και άλλες παρόμοιες παραλλαγές. Τα έξυπνα υλικά, λόγω της σύνθεσης σε μικροκλίμακα και της ενσωμάτωσης της νανοτεχνολογίας, διαθέτουν μικροσκοπικές διαστάσεις που επιτρέπουν την ακριβή τοποθέτηση στις απαιτούμενες θέσεις για βέλτιστη απόδοση και παραγωγικότητα (Αρνέλλου, 2013).

Επιπλέον, πρέπει να ληφθεί υπόψη η δυνατότητα αντιστρεψιμότητας και αμφίδρομης λειτουργίας. Η αντιστρεψιμότητα αναφέρεται στην εγγενή ικανότητα αντιστροφής της λειτουργίας της εισόδου, που συνήθως αναφέρεται ως ερέθισμα, και της επακόλουθης παραγωγής ενέργειας, που συχνά συμβολίζεται ως αντίδραση ή αποτέλεσμα. Το προαναφερθέν φαινόμενο εκδηλώνεται κυρίως στα έξυπνα υλικά που βασίζονται στη διεξαγωγή ηλεκτρικού φορτίου για τη λειτουργικότητά τους (Καλογερόπουλος, 2010). Ο όρος "αμφίδρομη γραμμή" αφορά μια κατηγορία ευφυών υλικών που παρουσιάζουν το χαρακτηριστικό της αμφίδρομης μεταγωγής. Πιο συγκεκριμένα, τα ευφυή αυτά υλικά διαθέτουν την ικανότητα να ξεκινούν διπλές δράσεις και να αποδίδουν διακριτά αποτελέσματα με τη λήψη του κατάλληλου εξωτερικού ερεθίσματος. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται συνήθως σε υλικά που υφίστανται μεταβάσεις φάσης μέσω της απορρόφησης ή της απελευθέρωσης ενέργειας, μεταβάλλοντας ταυτόχρονα τις περιβαλλοντικές συνθήκες που τα περιβάλλουν (Αρνέλλου, 2013).

Υπάρχουν ορισμένα ευφυή υλικά που διαθέτουν το αξιοσημείωτο χαρακτηριστικό να επανέρχονται στην αρχική τους κατάσταση μόλις το εξωτερικό ερέθισμα που είναι υπεύθυνο για τη μετατροπή τους παύσει να ασκεί την επιρροή του. Τα έξυπνα υλικά παρουσιάζουν συνήθως την ικανότητα να υφίστανται μεταβολές στις φυσικές τους ιδιότητες, όπως το σχήμα και το χρώμα, ως απόκριση σε εξωτερικά ερεθίσματα. Μόλις το ερέθισμα εξαλειφθεί ή αποσυρθεί, τα υλικά αυτά έχουν την ικανότητα να επανέρχονται στην αρχική ή παρθένα κατάστασή τους (Spaggiari et al., 2016).

2. Κατηγορίες έξυπνων υλικών

Στα πρώτα στάδια, υπό το πρίσμα της εμπορικής διάδοσης και χρήσης των ευφυών δομικών υλικών, έγινε προσπάθεια να ενσωματωθούν στα προϋπάρχοντα πλαίσια ταξινόμησης μαζί με τα συμβατικά υλικά. Στη συνέχεια, κατέστη προφανές ότι μια τέτοια κατηγοριοποίηση αποδείχθηκε ανέφικτη, αναιρώντας έτσι τον ουσιαστικό παράγοντα διάκρισης που διαφοροποιεί τα έξυπνα υλικά από τα αντίστοιχα συμβατικά. Ο μοναδικός χαρακτήρας και ο δυναμικός ρόλος που μπορούν να αναλάβουν. Τα έξυπνα υλικά μπορούν να ταξινομηθούν τόσο ως υλικό όσο και ως τεχνολογία. Ένα σχολαστικά σχεδιασμένο αλγοριθμικό πλαίσιο προσαρμοσμένο ώστε να παρουσιάζει δυναμική ανταπόκριση μπροστά σε ένα εξωτερικό ερέθισμα. Το αντικείμενο διαθέτει μια έμφυτη διαδραστική ικανότητα, που του επιτρέπει να υφίσταται τροποποιήσεις και να συμμετέχει σε αλληλεπιδράσεις στο περιβάλλον του (Bahl et al., 2020). Στο εξής, η προσπάθεια αφομοίωσης των έξυπνων υλικών στα συνήθη σημεία αναφοράς των συμβατικών υλικών έχει ως αποτέλεσμα την υποβάθμιση των εν λόγω υλικών, αγνοώντας έτσι την εγγενή δυναμική τους φύση, η οποία χρησιμεύει ως το απαράμιλλο και διακριτικό χαρακτηριστικό τους. Έχουν διατυπωθεί πολλαπλά πρότυπα ταξινόμησης για την κατηγοριοποίηση των έξυπνων υλικών, λαμβάνοντας υπόψη διαφορετικά κριτήρια σε κάθε περίπτωση. Οι πρωταρχικές κατηγοριοποιήσεις περιγράφονται ως εξής (Αρνέλλου, 2013):

- Με κριτήριο το επίπεδο ευφυΐας

Με βάση το προαναφερθέν κριτήριο, είναι δυνατόν να κατηγοριοποιηθούν τα έξυπνα υλικά σε δύο διακριτές κατηγορίες: ενεργά έξυπνα υλικά και παθητικά έξυπνα υλικά. Ένα αξιοσημείωτο χαρακτηριστικό που ενυπάρχει στα παθητικά έξυπνα υλικά είναι η ικανότητά τους να παρουσιάζουν μια προκαθορισμένη και τυποποιημένη απόκριση σε εξωτερικά ερεθίσματα. Ένα παράδειγμα παθητικού έξυπνου υλικού είναι το κράμα μνήμης σχήματος (SMA) (Drossel et al., 2018). Τα προαναφερθέντα κράματα διαθέτουν την ικανότητα να υφίστανται μετασχηματισμό της φυσικής τους διαμόρφωσης όταν υφίστανται μεταβολές στη θερμοκρασία, επιδεικνύοντας έναν εξαιρετικά ακριβή και προκαθορισμένο μανιερισμό που εμπεδώνεται στο κράμα κατά τη διαδικασία κατασκευής του. Αντίθετα, τα ενεργά έξυπνα υλικά διαθέτουν το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό να

εξετάζουν το εξωτερικό ερέθισμα και στη συνέχεια να καθορίζουν τη στρατηγική απόκρισής τους. Μια ενδεικτική περίπτωση ενεργού έξυπνου υλικού βρίσκεται στο πεδίο των πιεζοηλεκτρικών υλικών. Μπορεί να προταθεί μια εναλλακτική οριοθέτηση, η οποία θα διακρίνει τα ενεργά έξυπνα υλικά από τα παθητικά αντίστοιχα. Σύμφωνα με τον Arnelloy (2013), τα ενεργά υλικά διαθέτουν την ικανότητα να τροποποιούν ορισμένα χαρακτηριστικά κατά τη διαδικασία μετατροπής της ενέργειας. Τα παθητικά έξυπνα υλικά, δυστυχώς, δεν διαθέτουν την ικανότητα να μετατρέπουν αποτελεσματικά την ενέργεια από τη μία μορφή στην άλλη, περιορίζοντας έτσι τη χρησιμότητά τους αποκλειστικά στη σφαίρα των αισθητήρων και όχι των ενεργοποιητών. Σε ένα άρθρο που δημοσιεύθηκε τον Απρίλιο του 1990, ο Ιάπωνας καθηγητής Toshinori Takagi, πρόεδρος της Επιτροπής Τεχνολογίας Υλικών του Ινστιτούτου Επιστήμης και Τεχνολογίας της κυβέρνησης της Ιαπωνίας, αναλύει την κατηγοριοποίηση των έξυπνων υλικών σε τρία διαφορετικά επίπεδα ευφυΐας. Η προαναφερθείσα επιστημονική εργασία του Quader (2019):

- Η αρχική βαθμίδα περιλαμβάνει ευφυή υλικά ικανά να εκτελούν τρεις θεμελιώδεις λειτουργίες. Οι τριμερείς λειτουργίες της αντίληψης, της δράσης και της επεξεργασίας αποτελούν αναπόσπαστα συστατικά των γνωστικών συστημάτων. Αυτές οι τρεις λειτουργίες συμβαίνουν παράλληλα με τη διαδικασία μεταφοράς ενέργειας, σηματοδοτώντας έτσι την ανταλλαγή και τη διάδοση της πληροφορίας.
- Η δεύτερη βαθμίδα ταξινόμησης αφορά τα έξυπνα υλικά που παρουσιάζουν συμπληρωματικές λειτουργίες, δηλαδή αυτοδιαγνωστικές και αυτοδιορθωτικές ικανότητες. Οι προαναφερθείσες συμπληρωματικές λειτουργίες ενσωματώνονται περίπλοκα στα έξυπνα υλικά με τη μορφή λογισμικού, κατ' αναλογία με τον τρόπο που το λογισμικό ενσωματώνεται στους υπολογιστές και στη ρομποτική.
- Η επερχόμενη εκδήλωση της νοημοσύνης, που χαρακτηρίζεται ως τρίτη βαθμίδα, αφορά την ενσωμάτωση εκλεπτυσμένων και εξαιρετικά προοδευτικών δυνατοτήτων στα έξυπνα υλικά. Αυτό το επίπεδο περιλαμβάνει ανθρωπιστικές και κοινωνικές αξίες, όπως η αξιοπιστία, η φιλικότητα και η συμφωνία.

➤ Με κριτήριο την αρχή λειτουργίας

Η ταξινόμηση των ευφυών υλικών, με βάση τις αρχές λειτουργίας τους, αφορά τη μικροσκοπική σφαίρα και τα μοναδικά μοριακά χαρακτηριστικά που παρουσιάζουν. Παρ' όλα αυτά, είναι εξαιρετικά σημαντικό για τον αρχιτέκτονα, ο οποίος ασχολείται ενεργά με το μακροκοσμικό πεδίο, να έχει μια θεμελιώδη κατανόηση των λειτουργικών αρχών που διέπουν τα έξυπνα υλικά. Η γνώση αυτή δίνει στον αρχιτέκτονα τη δυνατότητα να ενσωματώσει απρόσκοπτα τα εν λόγω υλικά στον αρχιτεκτονικό σχεδιασμό και στις καθημερινές επαγγελματικές του δραστηριότητες. Η ώθηση που υποκινεί τη λειτουργία του έξυπνου υλικού είναι η ενέργεια, σε οποιαδήποτε έκφανση (Drossel et al., 2018). Υποστηρίζεται ότι κάθε υλικό εντός της φυσικής μας σφαίρας περιβάλλεται από ένα εγγενές ενεργειακό πεδίο. Οι μεταβολές στην ενεργειακή δυναμική του περιβάλλοντος περιβάλλοντος λειτουργούν ως ερέθισμα, υποκινώντας την οντότητα να ανταποκριθεί και να προσαρμοστεί σύμφωνα με τις νέες ενεργειακές συνθήκες. Διαμορφώνονται δύο διακριτοί λειτουργικοί μηχανισμοί με βάση τον τρόπο με τον οποίο το έξυπνο υλικό αξιοποιεί την εισερχόμενη ενέργεια. Με βάση τους προαναφερθέντες μηχανισμούς, είναι δυνατόν να ταξινομηθούν τα έξυπνα υλικά σε δύο διακριτές κατηγορίες. Τα προαναφερθέντα υλικά μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως υλικά τύπου I, τα οποία είναι υπεύθυνα για τις αλλαγές των ιδιοτήτων, και υλικά τύπου II, τα οποία διευκολύνουν την ανταλλαγή ενέργειας (Qader, 2019).

2.1. Έξυπνα υλικά τύπου I

Στο πλαίσιο των υλικών που μεταβάλλουν τις ιδιότητές τους, και συγκεκριμένα των υλικών τύπου I, είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η ενέργεια που απορροφάται από το έξυπνο υλικό έχει άμεσο αντίκτυπο στην εσωτερική ενεργειακή του κατάσταση. Το αποτέλεσμα αυτού του φαινομένου είναι η τροποποίηση της μοριακής δομής, οδηγώντας κατά συνέπεια στην αλλαγή και προσαρμογή ορισμένων ιδιοτήτων που σχετίζονται με αυτό. Η προαναφερθείσα μεταβολή είναι ταχεία στη φύση της και έχει την ικανότητα να αντιστρέφεται. Σε περίπτωση που ο υποκείμενος παράγοντας που ευθύνεται για την αλλοίωση των εγγενών χαρακτηριστικών της, όπως η διαμόρφωσή της, αδρανοποιηθεί, η μοριακή σύνθεση της οντότητας επανέρχεται στην προηγούμενη κατάστασή της, αποκαθιστώντας έτσι το αρχικό σχήμα και τη μορφή της (Drossel et al., 2018).

2.1.1. Χρωμικά ή έξυπνα υλικά με μεταβολή χρώματος

Μια κατηγορία έξυπνων υλικών που είναι πάντα ελκυστική για κάθε σχεδιαστή είναι η λεγόμενη "ομάδα υλικών με δυνατότητα αλλαγής χρώματος" και περιλαμβάνει τα εξής:

- Φωτοχρωμικά - υλικά που αλλάζουν χρώμα όταν εκτίθενται στο φως
- Θερμοχρωμικά - υλικά που αλλάζουν χρώμα σε απόκριση της αλλαγής της θερμοκρασίας
- Μηχανόχρωμα - υλικά που αλλάζουν χρώμα λόγω της εφαρμοζόμενης δύναμης ή/και των παραμορφώσεων.
- Χημειοχρώματα - υλικά που αλλάζουν χρώμα όταν εκτίθενται σε συγκεκριμένα χημικά περιβάλλοντα.
- Ηλεκτροχρωμικά - υλικά που αλλάζουν χρώμα όταν εφαρμόζεται ρεύμα. Οι σχετικές τεχνολογίες περιλαμβάνουν υγρούς κρυστάλλους και συστατικά αιωρούμενων σωματιδίων που αλλάζουν χρώμα ή διαφάνεια όταν ενεργοποιούνται ηλεκτρικά (Καλογερόπουλος,2010).

Τα υλικά αυτά μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως μια κατηγορία όπου οι μεταβολές στην εξωτερική πηγή ενέργειας οδηγούν σε τροποποιήσεις των οπτικών χαρακτηριστικών ενός συγκεκριμένου υλικού, συγκεκριμένα της απορροφητικότητας, της ανακλαστικότητας ή της διασποράς του. Πρέπει να σημειωθεί ότι τα υλικά που υποτίθεται ότι υφίστανται αλλαγή του χρωματισμού δεν παρουσιάζουν, στην πραγματικότητα, οποιαδήποτε διακριτή μεταβολή στις χρωματικές τους ιδιότητες. Οι οπτικές ιδιότητες των ουσιών αυτών υφίστανται μεταβολές ως απόκριση σε διάφορα εξωτερικά ερεθίσματα, όπως η θερμική ενέργεια, η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία ή οι μεταβολές στο περιβάλλον χημικό περιβάλλον. Οι τροποποιήσεις αυτές ερμηνεύονται συχνά ως εκδηλώσεις χρωματικών μετασχηματισμών. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η αντίληψη του χρώματος εξαρτάται από τη συμβολή εξωτερικών παραγόντων, δηλαδή την αλληλεπίδραση μεταξύ του φωτός και των περίπλοκων χαρακτηριστικών της ανθρώπινης οφθαλμικής συσκευής, καθώς και από εσωτερικούς παράγοντες, όπως αναλύθηκε προηγουμένως. Η κατανόηση αυτών των υλικών είναι συνεπώς πιο περίπλοκη από την απλή διαπίστωση της χρωματικής τους μεταβολής (Cabral, 2017).

Πολυάριθμες εξωγενείς μεταβλητές, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, ασκούν επιρροή στην υποκειμενική ερμηνεία των χρωματικών ερεθισμάτων. Το χρώμα, στην ουσία του, είναι θεμελιωδώς ένα χαρακτηριστικό που ενυπάρχει στη φύση του φωτός. Η φασματική κατανομή

του ηλεκτρομαγνητικού μήκους κύματος επιτρέπει τον χαρακτηρισμό κάθε στιγμιαίου φωτός. Οι επιφάνειες διαθέτουν την εγγενή ικανότητα να συμμετέχουν αποκλειστικά στα θεμελιώδη οπτικά φαινόμενα της ανάκλασης, της απορρόφησης ή της μετάδοσης, καθιστώντας τες έτσι μονίμως αφηρημένες στη φύση. Το ανθρώπινο μάτι, αντίθετα, μπορεί να θεωρηθεί ως αφαιρετική επιφάνεια, αν και με συγκριτική έννοια. Ως εκ τούτου, μπορεί να συναχθεί το συμπέρασμα ότι η αντίληψη του χρώματος εξαρτάται από τις φασματικές κατανομές και τις κατανομές έντασης που υπάρχουν στο οπτικό πεδίο, καθορίζοντας έτσι τη σχετική φύση του εντός των ορίων των ανθρώπινων οφθαλμικών δυνατοτήτων (Ευσταθίου, 2013).

Τα εγγενή οπτικά χαρακτηριστικά ενός υλικού διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στον καθορισμό του αντιλαμβανόμενου χρώματος ενός αντικειμένου, το οποίο αποτελεί αντικείμενο σημαντικού ενδιαφέροντος. Στην έρευνα που διεξήχθη προηγουμένως και αφορούσε τα θεμελιώδη χαρακτηριστικά του υλικού, παρατηρήθηκε δεόντως ότι οι ατομικές διαμορφώσεις περιλαμβάνουν ηλεκτρόνια που φέρουν αρνητικό φορτίο. Δεδομένης της εγγενούς φύσης του φωτός ως φορέα πρωτογενών ενεργειακών ώσεων, προκαλεί μια απόκριση κατά την αλληλεπίδραση με τα αρνητικά φορτισμένα ηλεκτρόνια που υπάρχουν σε ένα δεδομένο υλικό (Mginalini & Prasanthkumar, 2019). Η συμπεριφορά του φωτός κατά την αλληλεπίδρασή του με ένα υλικό εξαρτάται από τη συγκεκριμένη κρυσταλλική ή μοριακή διάταξη του εν λόγω υλικού. Στο πλαίσιο αυτό, το φως μπορεί να υποστεί διάφορα φαινόμενα, όπως χρονική καθυστέρηση, εκτροπή, απορρόφηση ή ακόμη και μετατροπή σε εναλλακτικές μορφές ενέργειας. Η συγκεκριμένη κρυσταλλική ή μοριακή διάταξη της ουσίας θα υπαγορεύσει την εκδήλωση αυτών των πιθανών φαινομένων, επηρεάζοντας στη συνέχεια την τροποποίηση ορισμένων μηκών κύματος του φωτός (επηρεάζοντας έτσι την αντίληψη του χρώματος του υλικού). Έχει αξιοσημείωτο ενδιαφέρον το γεγονός ότι η αρχική συνάντηση με τη μοριακή δομή στην επιφάνεια του υλικού παίζει καθοριστικό ρόλο στην υπαγόρευση της μετέπειτα συμπεριφοράς του. Ως εκ τούτου, μπορεί να υποστηριχθεί ότι οι οπτικές ιδιότητες των λεπτών υμενίων, των επιστρώσεων και των χρωμάτων κατέχουν ύψιστη σημασία στην επίδραση της αλληλεπίδρασης με το φως, ξεπερνώντας την επιρροή του υποκείμενου υποστρώματος (Αρνέλλου, 2013).

Στην περίπτωση του ευφυούς υλικού που εμφανίζει διακριτές χρωματικές μεταβολές στα χαρακτηριστικά του, τα εσωτερικά οπτικά χαρακτηριστικά του εν λόγω υλικού, δηλαδή η απορροφητικότητα, η ανακλαστικότητα και η σκέδαση, είναι σκόπιμα σχεδιασμένα ώστε να υφίστανται μεταβολές ως απόκριση στην εισροή εξωτερικής ενέργειας. Το πρωταρχικό αποτέλεσμα της εισόδου ενέργειας είναι η δημιουργία μιας τροποποιημένης μοριακής δομής

ή προσανατολισμού στην επιφάνεια του υλικού στην οποία προσπίπτει το φως. Τα δομικά χαρακτηριστικά μιας ουσίας εξαρτώνται τόσο από τη χημική της σύνθεση όσο και από την οργάνωση του κρυστάλλου ή του μορίου της, όπως διευκρινίζει ο Αρνέλλου (2013). Η προαναφερθείσα εξωτερική ενέργεια μπορεί να εκδηλωθεί με ποικίλες μορφές, όπως η θερμική ενέργεια ή η ενέργεια ακτινοβολίας που ενυπάρχει στο φως. Ωστόσο, ανεξαρτήτως της συγκεκριμένης φύσης της, η εν λόγω ενέργεια προκαλεί τροποποιήσεις στις εσωτερικές διαμορφώσεις της επιφάνειας του υλικού, εμπλεκόμενη με τα αρνητικά φορτισμένα ηλεκτρόνια που βρίσκονται σε αυτό. Οι προαναφερθείσες μεταβολές επηρεάζουν στη συνέχεια την απορροφητικότητα του υλικού ή τα χαρακτηριστικά ανάκλασης του υλικού, επηρεάζοντας κατά συνέπεια το αντιληπτό χρώμα. Οι μεταβολές αυτές μπορεί να εκδηλώνονται σε ολόκληρη την περιοχή ή να παρουσιάζουν επιλεκτικότητα εντός της περιοχής. Είναι ενδιαφέρον να σημειωθεί ότι οι μεταβολές παρουσιάζουν το χαρακτηριστικό της αντιστρεψιμότητας. Με την παύση του εξωτερικού ενεργειακού ερεθίσματος, η τροποποιημένη δομή υφίσταται επαναφορά στην αρχική της κατάσταση, όπως διευκρινίζεται από τον Ευσταθίου (2013).

Οι πρωταρχικές κατηγορίες ευφυών υλικών που μεταβάλλουν το χρώμα οριοθετούνται με βάση τα εγγενή χαρακτηριστικά της ενέργειας εισόδου που προκαλεί την τροποποίηση της ιδιότητας. Αυτές περιλαμβάνουν φωτοχρωματικά, ηλεκτροχρωματικά, θερμοχρωματικά, μηχανοχρωματικά και χημειοχρωματικά υλικά (Mrinalini & Prasanthkumar, 2019).

2.1.2. Υλικά που αλλάζουν φάση

Κατά τη διάρκεια των μεταβάσεων φάσης διαφόρων υλικών, παρατηρείται ότι ένα πλήθος ουσιών έχουν την ικανότητα να υφίστανται μεταβολές στις φυσικές τους καταστάσεις, δηλαδή στα αέρια, στα υγρά ή στα στερεά, οι οποίες συνήθως αναφέρονται ως φάσεις. Μια τροποποίηση της θερμοκρασίας ή της πίεσης που ασκείται σε μια δεδομένη ουσία μπορεί να προκαλέσει μια μετάβαση στη φυσική της κατάσταση, οδηγώντας σε αυτό που συνήθως αναφέρεται ως "μετάβαση φάσης". Τα φαινόμενα αλλαγής φάσης συνεπάγονται αναπόφευκτα την αφομοίωση, τη διατήρηση ή την απελευθέρωση σημαντικών ποσοτήτων ενέργειας με τη μορφή λανθάνουσας θερμότητας. Η μετάβαση από τη στερεά κατάσταση στην υγρή κατάσταση ή από την υγρή κατάσταση στην αέρια κατάσταση και αντίστροφα, πραγματοποιείται σε συγκεκριμένες και σαφώς καθορισμένες θερμοκρασίες. Ως εκ τούτου, λόγω της σύνθεσης του υλικού, καθίσταται εφικτή η πρόβλεψη των θέσεων στις οποίες

απορροφάται ή απελευθερώνεται ενέργεια. Τα υλικά μετάπτωσης φάσης, λοιπόν, προσπαθούν να αξιοποιήσουν τις προαναφερθείσες ενέργειες απορρόφησης και απελευθέρωσης (Xie et al., 2020).

Το φαινόμενο των αλλαγών φάσης είναι ένα συνηθισμένο φαινόμενο σε διάφορα υλικά, ωστόσο, είναι αξιοσημείωτο ότι ορισμένες συνθέσεις, ιδίως οι ανόργανες υδρίτες, διαθέτουν τη μοναδική ικανότητα να απορροφούν και στη συνέχεια να απελευθερώνουν σημαντικές ποσότητες θερμικής ενέργειας. Κατά τη διάρκεια της μετάβασης φάσης από το στερεό στο υγρό και στη συνέχεια στην αέρια κατάσταση, πρέπει να αφομοιωθεί σημαντική ποσότητα ενέργειας. Όταν η μετάβαση της ουσίας γίνεται από την αέρια φάση στην υγρή φάση, ακολουθούμενη από την επακόλουθη μετάβαση στη στερεή φάση, απελευθερώνεται σημαντική ποσότητα ενέργειας. Οι προαναφερθείσες διεργασίες παρουσιάζουν οπισθοδρομικά χαρακτηριστικά, ενώ αξίζει να σημειωθεί ότι τα υλικά που αλλάζουν φάση διαθέτουν την ικανότητα να υφίστανται απροσδιόριστη ποσότητα μεταβάσεων φάσης χωρίς να υφίστανται αποσύνθεση, όπως διευκρινίζεται από τον Ευσταθίου (2013).

Τα υλικά αλλαγής φάσης έχουν συγκεντρώσει σημαντική προσοχή στον τομέα της αρχιτεκτονικής λόγω της εγγενούς τους ικανότητας να απορροφούν ή να απελευθερώνουν ενέργεια σε προκαθορισμένες θερμοκρασίες. Αυτό το χαρακτηριστικό έχει οδηγήσει σε εκτεταμένη διερεύνηση της πιθανής αξιοποίησής τους ως μέσο ρύθμισης του θερμικού περιβάλλοντος εντός των κτιρίων. Μια από τις αρχικές εφαρμογές αφορούσε την εξέλιξη μιας συγκεκριμένης καινοτομίας γνωστής ως "γυψοσανίδα αλλαγής φάσης", όπου χρησιμοποιήθηκαν διάφορα ενσωματωμένα υλικά για να διευκολυνθεί η εκδήλωση των δυνατοτήτων αλλαγής φάσης. Υδρίτες, παραφίνες και λιπαρά οξέα χρησιμοποιήθηκαν εκτενώς σε διάφορες εφαρμογές. Η ενσωμάτωση των παραφινών και των λιπαρών οξέων στις γυψοσανίδες επιτεύχθηκε αρχικά μέσω της διαδικασίας της εμβάπτισης. Στη συνέχεια, χρησιμοποιήθηκαν μοκέτες εμποτισμένες με πλαστικά υλικά. Οι συγγραφείς Gao και συν. (2022) καθόρισαν θερμοκρασίες μετάβασης στο εύρος περίπου 65-72 °F για περιοχές που χαρακτηρίζονται από κλίματα που κυριαρχούνται από θέρμανση και απαιτήσεις πρωτογενούς θέρμανσης. Αντίθετα, για περιοχές με πρωταρχικές ανάγκες ψύξης, οι θερμοκρασίες μετάβασης προσδιορίστηκαν να βρίσκονται εντός του εύρους 72-79 °F.

Τα προϊόντα που προέρχονται από τεχνολογίες εμβάπτισης έχουν σταθερά επιδειξί μη βέλτιστες επιδόσεις, όπως αποδεικνύεται από την παρουσία προβλημάτων που σχετίζονται με διάφορους βαθμούς έκθεσης σε παραφίνη και λιπαρά οξέα. Οι ανησυχίες αυτές επεκτάθηκαν

στην κατανάλωση προϊόντων γυψοσανίδας από ζώα, αναδεικνύοντας περαιτέρω τις εγγενείς προκλήσεις που συνδέονται με τέτοιες προσπάθειες. Οι τεχνολογίες που βασίζονται σε υλικά που εγκιβωτίζουν αποτελεσματικά τη μετάβαση φάσης μέσα σε μικροσκοπικά σφαιρίδια παρουσιάζουν βελτιωμένη απόδοση. Οι τεχνολογίες πελλετών έχουν επιτύχει εκτεταμένη χρήση, όπως αποδεικνύεται από την εφαρμογή τους στο πλαίσιο των συστημάτων δαπέδων ακτινοβολούμενης θερμότητας (Αρνέλλου, 2013). Σε πολυάριθμες κλιματικές συνθήκες, η χρήση συστημάτων δαπέδων ακτινοβολίας που είναι στερεωμένα σε πλάκες σκυροδέματος έχει αποδείξει την αποτελεσματικότητά τους στην παροχή επαρκούς θέρμανσης. Ωστόσο, είναι σημαντικό να αναγνωριστεί ότι τα εν λόγω συστήματα είναι επιρρεπή σε ανεπιθύμητες κυκλικές διακυμάνσεις και ταλαντώσεις της θερμοκρασίας. Το φαινόμενο αυτό προκύπτει από την ανάγκη διατήρησης της θερμοκρασίας της πλάκας στο επιθυμητό επίπεδο, η οποία επιβάλλει εγγενώς την υιοθέτηση μιας σχετικά αυξημένης αρχικής θερμοκρασίας. Έχει παρατηρηθεί ότι η ενσωμάτωση υλικών αλλαγής φάσης σε μορφή σφαιριδίων μετριάζει τις προαναφερθείσες διακυμάνσεις της θερμοκρασίας (Xie et al., 2020).

Τα υλικά αλλαγής φάσης (PCM) έχουν επιδείξει επιτυχή εφαρμογή στο πεδίο των ενδυμάτων εξωτερικής ένδυσης. Υπάρχουν πατενταρισμένες τεχνολογίες για την ενσωμάτωση υλικών σε μορφή κάψουλας σε υφασμάτινα υποστρώματα. Οι ενσωματώσεις κάψουλας παρουσιάζουν μικροσκοπική κλίμακα σε μικροσκοπικό επίπεδο. Η μετάβαση φάσης των υλικών που περιέχονται σε αυτές τις κάψουλες έχει σχεδιαστεί σκόπιμα ώστε να συμβαίνει σε μια κατάσταση που παρουσιάζει χαρακτηριστικά τόσο ημιστερεάς όσο και ημι-υγρής φύσης, διατηρώντας παράλληλα την εγγύτητα στην τυπική θερμοκρασία του σώματος. Όταν οι άνθρωποι ασκούν σωματική δραστηριότητα και παράγουν θερμική ενέργεια, τα εμπλεκόμενα υλικά υφίστανται μετάβαση φάσης και απορροφούν αποτελεσματικά την πλεονάζουσα θερμότητα, διευκολύνοντας έτσι τη διατήρηση μιας ψυχρότερης θερμοκρασίας σώματος. Αντίθετα, καθώς το σώμα υφίσταται μείωση της θερμοκρασίας και χρειάζεται πρόσθετη θερμότητα, τα υλικά που αλλάζουν φάση δρομολογούν την απελευθέρωση θερμικής ενέργειας για την αποτελεσματική θέρμανση του σώματος (Ευσταθίου, 2013).

Οι εφαρμογές που συζητήθηκαν προηγουμένως παρουσίασαν ένα αξιοσημείωτο χαρακτηριστικό, δηλαδή τη χρήση υλικών αλλαγής φάσης σε ενθυλακωμένες διαμορφώσεις. Είναι νοητό να οραματιστεί κανείς ότι τα υλικά αυτά διαθέτουν τη δυνατότητα αξιοποίησης σε μυριάδες άλλα αγαθά, από φωτιστικά σώματα έως έπιπλα, ως μέσο ποσοτικοποίησης των διακυμάνσεων της θερμοκρασίας (Αρνέλλου, 2013).

2.1.3. Αγωγή πολυμερή και άλλοι έξυπνοι αγωγοί

Στην εποχή που χαρακτηρίζεται από την επικράτηση των ηλεκτρικών συσκευών, δεν αποτελεί έκπληξη το γεγονός ότι έχει δοθεί σημαντική έμφαση στα υλικά που έχουν την ικανότητα να αγωγιμοποιούν τον ηλεκτρισμό. Πολλοί επιστήμονες είναι πιθανό να γνωρίζουν τον αυξημένο ενθουσιασμό γύρω από υλικά, όπως οι υπεραγωγοί, που παρουσιάζουν ελάχιστη ή αμελητέα ηλεκτρική αντίσταση. Στη συγκεκριμένη ενότητα, θα εξεταστεί διεξοδικά μια εκτεταμένη ποικιλία αγωγίων υλικών, η οποία περιλαμβάνει εκείνα που παρουσιάζουν σημαντικές υποσχέσεις σε διάφορες σχεδιαστικές εφαρμογές (Αρνέλλου, 2013).

Με την ευρεία έννοια, το πεδίο της ηλεκτρικής αγωγιμότητας περιλαμβάνει ένα ποικίλο φάσμα υλικών, καθένα από τα οποία χαρακτηρίζεται από διακριτές ιδιότητες, όπως μονωτές, αγωγοί, ημιαγωγοί και υπεραγωγοί. Μεταξύ αυτών των ταξινομήσεων, οι μονωτές παρουσιάζουν το χαμηλότερο επίπεδο αγωγιμότητας. Πολλά προϊόντα που είναι γνωστά στους σχεδιαστές στους τομείς της αρχιτεκτονικής και της βιομηχανίας διαθέτουν το χαρακτηριστικό ότι είναι απλοί αγωγοί. Είναι προφανές ότι πολυάριθμα υλικά διαθέτουν εγγενώς ηλεκτρική αγωγιμότητα ως αποτέλεσμα της δομής του ατομικού τους πλέγματος, όπου τα ηλεκτρόνια, παρουσιάζοντας έναν βαθμό περιορισμού, έχουν εύκολη κίνηση σε όλο το υλικό (Αρνέλλου, 2013). Πολυάριθμα συμβατικά υλικά που στερούνται εγγενών αγωγίων ιδιοτήτων, όπως το γυαλί ή διάφορα πολυμερή, μπορούν να κατασκευαστούν χρησιμοποιώντας διάφορες μεθοδολογίες. Τα πολυμερή έχουν τη δυνατότητα να αποκτήσουν αγωγίμες ιδιότητες μέσω της άμεσης ενσωμάτωσης αγωγίων ουσιών, όπως γραφίτη ή σωματιδίων μεταλλικού οξέος, στην πολυμερική μήτρα. Σύμφωνα με τον Καλογερόπουλος (2010), τα γυαλιά, που συνήθως αναγνωρίζονται για τις υψηλές μονωτικές τους ιδιότητες, μπορούν να υποστούν μια μετασχηματιστική διαδικασία κατά την οποία αποκτούν τόσο αγωγιμότητα όσο και διαφάνεια. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της εναπόθεσης ενός λεπτού μεταλλικού φιλμ στις επιφάνειές τους.

Πολυάριθμα πολυμερή παρουσιάζουν εγγενή εσωτερική ηλεκτρική αγωγιμότητα. Τα ηλεκτροενεργητικά πολυμερή παρουσιάζουν την ικανότητα να μεταβάλλουν την ηλεκτρική τους αγωγιμότητα σε απόκριση στις μεταβολές της αντίστασης ενός ηλεκτρικού πεδίου που επιβάλλεται στο υλικό. Λαμβάνει χώρα μια μοριακή αναδιαμόρφωση, η οποία οδηγεί στην ευθυγράμμιση των μορίων με συγκεκριμένο τρόπο και στην επακόλουθη απελευθέρωση ηλεκτρονίων, επιτρέποντας έτσι την αγωγή του ηλεκτρισμού. Ενδεικτικές περιπτώσεις τέτοιων ενώσεων είναι η πολυανιλίνη και το πολυπυρρόλιο. Αυτά τα συζευγμένα πολυμερή

προέρχονται συνήθως από οργανικές συνθέσεις και διαθέτουν εγγενείς εσωτερικές δομές που διευκολύνουν την ενισχυμένη κινητικότητα των ηλεκτρονίων. Ορισμένα πολυμερή επιδεικνύουν χαρακτηριστικά ημιαγωγών και έχουν την ικανότητα να εκπέμπουν φως. Τα ηλεκτροχημικά πολυμερή επιδεικνύουν διακριτή διαφοροποίηση της αντιδραστικότητάς τους ανάλογα με την ένταση του περιβάλλοντος χημικού περιβάλλοντος (Τζιράκης & Tzirakis, 2012).

Έχουν διατυπωθεί πολυάριθμες εφαρμογές για την αξιοποίηση των αγώγιμων πολυμερών. Μεμβράνες πολυπροπυλενίου ή πολυανιλίνης έχουν χρησιμοποιηθεί στην ανάπτυξη τεχνητών μυών. Οι προαναφερθείσες μεμβράνες χωρίζονται σε διακριτά στρώματα που περιβάλλουν μια ιοντοαγώγιμη μεμβράνη, δημιουργώντας έτσι μια εύπλαστη διαμόρφωση. Όταν εκτίθενται σε εναλλασσόμενο ρεύμα, λαμβάνει χώρα το φαινόμενο της μεταφοράς ιόντων. Το παρόν ηλεκτρικό ρεύμα παρουσιάζει την τάση να μειώνει τη μία πλευρά, ενώ ταυτόχρονα προκαλεί οξειδωση στην άλλη πλευρά. Στη μία όψη, υπάρχει μια τάση διαστολής, ενώ στην άλλη όψη, υπάρχει μια τάση συστολής. Δεδομένου του διακριτού διαχωρισμού των μεμβρανών, εκδηλώνονται φαινόμενα λυγισμού. Το φαινόμενο του λυγισμού, όπως διευκρινίζεται από τον Καλογερόπουλος (2010), μπορεί στη συνέχεια να αξιοποιηθεί για την παραγωγή μηχανικών δυνάμεων και ενεργειών.

Υπό το πρίσμα της ένθερμης τάσης των σχεδιαστών να περιβάλλουν μια δομή με αγώγιμα πολυμερή και να προβάλλουν κατά βούληση εικόνες που δημιουργούνται από υπολογιστή, είναι επιτακτική ανάγκη να έχουμε κατά νου ότι τα υλικά αυτά χρησιμεύουν βασικά ως απλοί αγωγοί. Παρόμοια με την πρόκληση της παραγωγής μιας οπτικής απεικόνισης σε ένα χάλκινο περίβλημα, το έργο της δημιουργίας μιας εικόνας σε ένα αγώγιμο πολυμερές παρουσιάζει μια εξίσου τρομερή προσπάθεια. Δεδομένης της πλαστικότητας των ταινιών μέσω διαφόρων τεχνικών, όπως η επεξεργασία, ο σχεδιασμός και ο κατακερματισμός, είναι προφανές ότι υπάρχουν δυνητικοί δρόμοι σε αυτόν τον τομέα. Ωστόσο, πρέπει να αναγνωριστεί ότι οι προοπτικές αυτές μπορεί να είναι κάπως περιορισμένες από τη φύση τους (Grancarić et al., 2017).

2.1.4. Ρεολογικά υλικά

Τα ρεολογικά ευφυή υλικά, όταν εκτίθενται σε ένα κατάλληλο εξωτερικό ερέθισμα, παρουσιάζουν μια αξιοσημείωτη μεταβολή στο ιξώδες τους. Η ρευστότητα και η ρεολογική

συμπεριφορά των ουσιών υφίστανται μεταβολές που συμβαδίζουν με τις μεταβολές του ιξώδους τους. Οι κατηγοριοποιήσεις των εξωτερικών ερεθισμάτων περιλαμβάνουν δύο διαφορετικές μορφές, δηλαδή μεταβολές στο ηλεκτρικό πεδίο ή τροποποιήσεις στο μαγνητικό πεδίο. Το φαινόμενο της μεταβολής του ιξώδους χαρακτηρίζεται από την εγγενή αντιστρεψιμότητά του, σύμφωνα με την οποία το υλικό υφίσταται μεταβολή του ιξώδους του, για να επανέλθει στην αρχική του κατάσταση μόλις εξαλειφθεί η υποκείμενη αιτία της μεταβολής. Το αξιοσημείωτο έγκειται στην παρατηρούμενη ποικιλομορφία των ρεολογικών χαρακτηριστικών που παρουσιάζουν τα έξυπνα υλικά. Η ρευστή ουσία παρουσιάζει μια μετάβαση προς μια στερεή κατάσταση, ενώ παράλληλα επιδεικνύει την ικανότητα να μεταβαίνει σε μια υγρή κατάσταση ανάλογα με τις μεταβολές στο ηλεκτρικό ή μαγνητικό της φορτίο (Καλογερόπουλος, 2010).

2.1.5. Υγροί κρύσταλλοι

Οι οθόνες υγρών κρυστάλλων (LCD) χρησιμοποιούνται συνήθως σε ένα ευρύ φάσμα καταναλωτικών αγαθών και τεχνολογικών συσκευών. Στη σύγχρονη εποχή, ο εντοπισμός ενός ατόμου στη σύγχρονη κοινωνία μας που δεν έχει συναντήσει ή χρησιμοποιήσει ένα από αυτά τα αγαθά αποδεικνύεται δύσκολο έργο. Παρά την πανταχού παρούσα παρουσία των τεχνολογιών υγρών κρυστάλλων, είναι απαραίτητο να αναγνωριστεί ότι η πολυπλοκότητα και η πολυπλοκότητά τους δεν πρέπει να υποτιμηθούν. Αντιθέτως, μπορεί να υποστηριχθεί ότι έχουν σημειώσει σημαντική επιτυχία στα χρονικά της τεχνολογικής προόδου.

Οι υγροί κρύσταλλοι μπορούν να περιγραφούν ως μια ενδιάμεση κατάσταση που υπάρχει μεταξύ των κρυσταλλικών στερεών και των ισοτροπικών υγρών. Στην εγγενή φύση τους, οι ουσίες αυτές παρουσιάζουν μια κατάσταση διατεταγμένης ρευστότητας, διαθέτοντας ανισότροπα χαρακτηριστικά που τις καθιστούν ιδιαίτερα ευαίσθητες στα ηλεκτρικά πεδία. Κατά συνέπεια, η χρησιμότητά τους είναι ιδιαίτερα έντονη στο πεδίο των οπτικών συσκευών. Η διαδικασία έκθεσης υγρών κρυστάλλων περιλαμβάνει τη χρήση ενός ζεύγους πολωμένων φύλλων, με ενδιάμεσο διάλυμα υλικού υγρών κρυστάλλων. Το εν λόγω φαινόμενο αφορά την ευθυγράμμιση των κρυστάλλων μέσα σε ένα υγρό μέσο, που προκαλείται από την παρουσία εναλλασσόμενου ηλεκτρικού ρεύματος. Η ευθυγράμμιση αυτή διευκολύνει τη μετάδοση του φωτός μέσω των εν λόγω κρυστάλλων. Κάθε μεμονωμένος κρύσταλλος μπορεί να

παρομοιαστεί με κλείστρο, έχοντας την ικανότητα είτε να επιτρέπει τη μετάδοση του φωτός είτε να εμποδίζει τη διέλευσή του (Schwartz et al., 2018).

2.1.6. Οθόνες αιωρούμενων σωματιδίων

Η τελευταία τεχνολογική πρόοδος στον τομέα των οθονών αφορά την ανάπτυξη οθονών με αιωρούμενα σωματίδια. Το φαινόμενο αυτό μοιάζει με τις αρχές που διέπουν την τεχνολογία υγρών κρυστάλλων. Από τεχνική άποψη, μπορεί να παρατηρηθεί ότι οι οθόνες αυτές αποτελούνται από ένα πολύπλευρο αμάλγαμα υλικών που εκτείνονται σε διάφορα στρώματα. Υπάρχει ένα ζεύγος αγώγιμων φύλλων, που διαθέτουν την αξιοσημείωτη ικανότητα να αλλάζουν την πολικότητά τους σε απόκριση της εφαρμογής ηλεκτρικού φορτίου. Τα φύλλα αυτά συνοδεύονται από ένα ρευστό μέσο, μέσα στο οποίο αιωρούνται σωματίδια. Όταν εφαρμόζεται ηλεκτρικό ρεύμα στα αγώγιμα φύλλα, τα σωματίδια που αιωρούνται στο μέσο υφίστανται ευθυγράμμιση, με αποτέλεσμα τη διευκόλυνση της μετάδοσης του φωτός. Μέσω της συγχώνευσης διαφόρων στρωμάτων υλικών, δημιουργείται ένα δομημένο πλαίσιο, όπου η διευκόλυνση ή η παρεμπόδιση της μετάδοσης του φωτός εξαρτάται από το μέγεθος του χορηγούμενου ηλεκτρικού δυναμικού. Κατά συνέπεια, αυτή η περίπλοκη αλληλεπίδραση καταλήγει στη δημιουργία αντιληπτών οπτικών ερεθισμάτων (Liu et al., 2019).

2.2. Έξυπνα υλικά Τύπου II

Στο πεδίο των υλικών που αλλάζουν ενέργεια ή υλικών τύπου II, παρατηρείται ότι η ενέργεια που λαμβάνεται από το περιβάλλον δεν προκαλεί μεταβολές στη μοριακή σύνθεση ή δομή του εν λόγω υλικού. Αντίθετα, το έξυπνο υλικό απορροφά την εν λόγω ενέργεια, αυξάνοντας έτσι το ενεργειακό του επίπεδο. Η συγκεκριμένη κατάσταση, ωστόσο, δεν έχει το χαρακτηριστικό της ισορροπίας και δεν μπορεί να διατηρηθεί με την πάροδο του χρόνου. Κατά συνέπεια, τα έξυπνα υλικά διαθέτουν την ικανότητα να αποφορτίζουν αποτελεσματικά την πλεονάζουσα ενέργεια που έχουν συσσωρεύσει προσωρινά στη δομή τους, μετατρέποντάς την έτσι σε μια πιο πρακτική και συμφέρουσα μορφή. Μια ενδεικτική περίπτωση αφορά τα φωτοβολταϊκά υλικά, τα οποία έχουν την ικανότητα να αφομοιώνουν την ηλιακή ενέργεια και στη συνέχεια να τη μετατρέπουν σε μια πρακτική μορφή ηλεκτρικής ενέργειας (Finn, 2013).

2.2.1. Υλικά εκπομπής φωτός

Η έννοια της φωτοαναπνοής μπορεί να τεκμηριωθεί με τη θεώρηση της εκπομπής φωτός που δεν οφείλεται στην πυράκτωση, αλλά σε εναλλακτικούς μηχανισμούς, όπως οι χημικές αντιδράσεις. Με μεγαλύτερη ακρίβεια, ο όρος "φωτοβολίδα" δηλώνει συνήθως το φαινόμενο της εκπομπής φωτός που προκύπτει από μια συσχετισμένη πηγή ενέργειας. Το φαινόμενο του φωτός προκύπτει από την επαναλαμβανόμενη εκπομπή ενέργειας σε συγκεκριμένα μήκη κύματος εντός του ορατού φάσματος και συνδέεται εγγενώς με τη μετάβαση ηλεκτρονίων από μια κατάσταση υψηλότερης ενέργειας σε μια κατάσταση χαμηλότερης ενέργειας. Το φαινόμενο αυτό μπορεί να προκληθεί από ένα πλήθος πηγών διέγερσης, που περιλαμβάνουν τον ηλεκτρισμό, τις χημικές αντιδράσεις ή ακόμη και την εφαρμογή τριβής. Μια παραδειγματική απεικόνιση μπορεί να βρεθεί στην ευρέως αναγνωρισμένη συσκευή "light stick", η οποία εξυπηρετεί τον σκοπό του φωτισμού σε περιόδους έκτακτης ανάγκης ή χρησιμοποιείται συνήθως από τα παιδιά με την ευκαιρία των αποκριάτικων εορτασμών (De et al., 2022).

Ο όρος "φωτοβολίδα" χρησιμεύει ως μια ευρεία κατηγοριοποίηση που περιλαμβάνει ένα πλήθος φαινομένων που προκύπτουν από την εκπομπή φωτός. Όταν η εκπομπή πραγματοποιείται με σχεδόν άμεσο τρόπο, ο χαρακτηρισμός που χρησιμοποιείται είναι "φθορισμός". Τα φθορίζοντα υλικά παρουσιάζουν φωταύγεια, ειδικά όταν υποβάλλονται σε φωτισμό από πηγή "μαύρου φωτός", η οποία εκπέμπει υπεριώδη ακτινοβολία. Όταν η εκπομπή παρουσιάζει επιβραδυνόμενη ή αναβαλλόμενη συμπεριφορά εντός του χρονικού πλαισίου μερικών εκατομμυριοστών ή δεσεκατομμυριοστών του δευτερολέπτου, είναι σκόπιμο να χαρακτηρίζεται το φαινόμενο αυτό ως φωσφορισμός. Πολλά συστατικά παρουσιάζουν εγγενή φωσφορισμό ή είναι σκόπιμα κατασκευασμένα ώστε να διαθέτουν φωσφορίζουσες ιδιότητες. Η χρονική καθυστέρηση εξαρτάται από τη συγκεκριμένη παραλλαγή του φωσφόρου που χρησιμοποιείται. Εξέχοντα παραδείγματα φωσφορίζοντων περιλαμβάνουν διάφορα μεταλλικά θειικά άλατα, όπως ο θειικός ψευδάργυρος (ZnS). Η χρήση του ZnS χρησιμεύει ως βάση για τις συμβατικές τηλεοπτικές οθόνες. Το αλουμίνιο στροντίου, εκτός από τις άλλες ιδιότητές του, παρουσιάζει ένα αξιοσημείωτο φωσφορίζον χαρακτηριστικό. Σε ορισμένες περιπτώσεις, το φαινόμενο της επίμονης εκπομπής φωτός μπορεί να διατηρηθεί για παρατεταμένη διάρκεια μετά τη διακοπή της διέγερσης της πηγής λόγω της προσωρινής παγίδευσης των ηλεκτρονίων

εντός των εγγενών χαρακτηριστικών του υλικού. Στο πλαίσιο αυτό χρησιμοποιείται η ορολογία του υπολειμματικού φωσφορισμού, όπως αναφέρεται από τους Addington και Schodek (2012).

Πολυάριθμα φωσφορίζοντα υλικά εκδηλώνονται ως στερεές καταστάσεις που φιλοξενούν μικροσκοπικές προσμίξεις, όπως τα θειικά άλατα ψευδαργύρου εμποτισμένα με ίχνη χαλκού. Όταν υποβάλλονται σε προσπίπτουσα ενέργεια στις διάφορες εκφάνσεις της, τα υλικά αυτά υφίστανται απορρόφηση της ενέργειας που μεταφέρουν τα προσπίπτοντα ηλεκτρόνια ή φωτόνια. Κατά συνέπεια, το υλικό υφίσταται αύξηση του εσωτερικού ηλεκτρονιακού πληθυσμού του σε υψηλότερες ενεργειακές καταστάσεις. Σύμφωνα με το περιγραφικό πλαίσιο που αναπτύχθηκε από τους Flinn και Trojan, παρατηρείται ότι τα ηλεκτρόνια αυτά έχουν την τάση να κατέρχονται σε αυτό που στην καθομιλουμένη αναφέρεται ως "παγίδες", οι οποίες συνδέονται εγγενώς με διάφορους ρύπους (Yang et al., 2021). Μετά από μια ορισμένη διάρκεια, το ηλεκτρόνιο που βρίσκεται εγκλωβισμένο στην παγίδα του αποκτά επαρκή ποσότητα ενέργειας για να απελευθερωθεί από τον εν λόγω εγκλωβισμό, προκαλώντας έτσι την εκπομπή φωτός με τη μορφή φωτονίων με διακριτό μήκος κύματος εντός της ορατής περιοχής του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Οι διάφορες ιδιότητες, που περιλαμβάνουν τη χρωματικότητα του εκπεμπόμενου φωτός, μπορούν να χειραγωγηθούν σκόπιμα μέσω της χρήσης διαφόρων συστατικών και προσμίξεων, με αποτέλεσμα την παραγωγή διαφορετικών υλικών εκπομπής φωτός. Για να είμαστε πιο ακριβείς, εξακολουθεί να υφίσταται ένας επίμονος προβληματισμός σχετικά με την ενίσχυση της χρονικής έκτασης του φωσφορίζοντος φαινομένου μετά τη διακοπή της πηγής διέγερσης. Υλικά όπως η αλουμίνα στροντίου, για παράδειγμα, έχουν αποτελέσει αντικείμενο εκμετάλλευσης λόγω της εγγενούς τους ιδιότητας παρατεταμένου υπολειμματικού φωσφορισμού ακόμη και μετά την παύση της πηγής διέγερσης (Kanagaraj et al., 2019).

Ο φωτοφωταύγεια είναι ένα φαινόμενο που παρατηρείται συνήθως κατά το οποίο λαμβάνει χώρα εκπομπή φωτός όταν ένα υλικό υποβάλλεται σε προσπίπτουσα ενέργεια από εξωτερική πηγή φωτός, απελευθερώνοντας στη συνέχεια φως σε μειωμένο επίπεδο ενέργειας. Το εν λόγω φαινόμενο συνεπάγεται την περίπλοκη διαδικασία ηλεκτρικής διέγερσης που διευκολύνεται από την απορρόφηση φωτονίων. Το αποτέλεσμα που προκύπτει από την πρακτική της διατήρησης της ενέργειας εκδηλώνεται ως επιμήκυνση του μήκους κύματος του εκπεμπόμενου φωτός, καθιστώντας το έτσι πιο επιρρεπές προς το ερυθρό άκρο του φάσματος, και συνεπώς με μειωμένη ποσότητα ενέργειας σε σύγκριση με το μήκος κύματος του προσπίπτοντος φωτός. Πολλαπλά είδη φωσφόρων παρουσιάζουν σημαντικό βαθμό

φωτοφωταύγειας, ιδίως όταν υποβάλλονται σε υπεριώδη ακτινοβολία (Kanagaraj et al., 2019). Οι παραδοσιακοί λαμπτήρες φθορισμού, εκτός από την πρωταρχική τους λειτουργία, εξαρτώνται επίσης από την αξιοποίηση των φωτοβολταϊκών φαινομένων. Το εσωτερικό του λαμπτήρα περιβάλλεται από επίστρωση φωσφόρου, η οποία υφίσταται διέγερση κατά την έκθεση σε υπεριώδη ακτινοβολία υδραργύρου.

Στο φαινόμενο της χημειοφωταύγειας, η διαδικασία διέγερσης ξεκινά με τη χρήση χημικής ενέργειας με τη μία ή την άλλη μορφή. Η προαναφερθείσα φωτεινή ράβδος συνεχίζει να χρησιμεύει ως η πιο παραδειγματική και διαδεδομένη απεικόνιση του συγκεκριμένου φαινομένου. Αξιοσημείωτη σημασία σε αυτό το πλαίσιο έχει το φαινόμενο του χημειοφωταύγειας, κατά το οποίο η εκπομπή φωτός λαμβάνει χώρα χωρίς ταυτόχρονη παραγωγή θερμότητας, γεγονός που είναι ενδιαφέρον αν αναλογιστεί κανείς την εμπλοκή μιας χημικής αντίδρασης. Στην περίπτωση που η θερμοκρασία του περιβάλλοντος αυξηθεί, προκύπτει ότι ο χρόνος της αντίδρασης θα παραταθεί, με αποτέλεσμα την ταυτόχρονη μείωση τόσο της παραγωγής φωτεινότητας όσο και της μείωσης της θερμοκρασίας (Kishikawa et al., 2020).

Στο πεδίο των ηλεκτροφωτεινών υλικών, το πρωταρχικό ερέθισμα για τη διέγερση προκύπτει από την εφαρμογή τάσης ή ηλεκτρικού πεδίου. Η τάση χρησιμεύει ως το μέσο με το οποίο παρέχεται η απαραίτητη ενέργεια. Υπάρχουν δύο διακριτοί τρόποι μέσω των οποίων μπορεί να εκδηλωθεί η ηλεκτροφωταύγεια. Η αρχική και συμβατική περίπτωση προκύπτει όταν υπάρχει διασπορά ρύπων εντός του θεμελιώδους φωσφόρου (Zhang et al., 2018). Η εφαρμογή ενός ισχυρού ηλεκτρικού πεδίου προκαλεί την κίνηση των ηλεκτρονίων εντός του υλικού του φωσφόρου, οδηγώντας στη σύγκρουσή τους με τους υπάρχοντες ρύπους. Η εμφάνιση της φωτοβλάστης προκαλείται από τον συνδυασμό των αλάτων που προκύπτουν και της παρουσίας ιονισμένων ρύπων. Το εκπεμπόμενο χρώμα εξαρτάται από τη συγκεκριμένη σύνθεση του ρυπογόνου υλικού, η οποία στη συνέχεια προκαλεί το σχηματισμό ενεργών ιόντων. Ένα δευτερεύον και πιο περίπλοκο φαινόμενο προκαλείται σε συγκεκριμένες ουσίες, όπως οι ημιαγωγοί, ως αποτέλεσμα της συνολικής κίνησης των ηλεκτρονίων και των οπών. Τα ηλεκτροφωταύγεια βρίσκουν εκτεταμένη χρήση σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, που περιλαμβάνουν λεπτές λωρίδες και πάνελ διαφόρων φύσεων. Ο ακτινοβόλος οπίσθιος φωτισμός που χρησιμοποιείται στα οικονομικά ρολόγια αποτελείται πάντα από ηλεκτροφωταύγεια. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η επιλογή των ενεργών ιόντων καθορίζει τα συγκεκριμένα χρώματα που παρατηρούνται. Στα ιδιαίτερα αποδοτικά οικονομικά συστήματα, ωστόσο, χρησιμοποιούνται υποτυπώδη χρωματικά φίλτρα για να προσφέρουν ένα

ευρύ φάσμα επιλογών. Οι λωρίδες ή τα πάνελ έχουν την ικανότητα να σχεδιάζονται με τρόπο που να τα καθιστά απαλλαγμένα από διάφορες εφαρμοζόμενες τάσεις. Είναι εύλογο ότι οι συσκευές αυτές τροφοδοτούνται από μπαταρίες. Αντίθετα, είναι δυνατή η κατασκευή μεγαλύτερων πάνελ που διαθέτουν την ικανότητα να φιλοξενούν αποτελεσματικά και να αντιδρούν στα ηλεκτρικά δυναμικά εντός της δομής. Η χρήση των λαμπτήρων ηλεκτροφωταύγειας έχει αρχίσει να παρουσιάζει μια διάχυτη παρουσία σε διάφορους τομείς. Οι συσκευές αυτές παρουσιάζουν ελάχιστη κατανάλωση ρεύματος και δεν έχουν την ικανότητα να παράγουν θερμική ενέργεια. Τα αντικείμενα αυτά προσφέρουν μια συνεπή κατανομή φωτισμού σε όλη την επιφάνειά τους και παρουσιάζουν ίση φωτεινότητα όταν παρατηρούνται από οποιαδήποτε οπτική γωνία. Δεδομένης της απουσίας κινητών ή ευαίσθητων εξαρτημάτων, μπορεί να συναχθεί το συμπέρασμα ότι οι οντότητες αυτές δεν είναι επιρρεπείς στο να παρουσιάζουν βλάβες ή δυσλειτουργίες με ευκολία (Zou et al., 2020).

2.2.2. Ημιαγωγοί

Οι ημιαγωγοί, τα υλικά που σηματοδοτούν την έναρξη της εποχής των μικροηλεκτρικών διατάξεων υψηλής ισχύος, είναι γνωστοί σε ένα ελάχιστο κλάσμα του πληθυσμού. Το θεμελιώδες φαινόμενο που διέπει τη συμπεριφορά ενός ημιαγωγίμου υλικού χρησιμεύει ως θεμέλιο για διάφορες άλλες τεχνολογικές εξελίξεις, όπως η αξιοποίηση των κρυσταλλικών σωλήνων και η εκμετάλλευση του φωτοβολταϊκού φαινομένου σε εφαρμογές ηλιακής ενέργειας. Πράγματι, είναι κοινή παρατήρηση ότι ένας περιορισμένος αριθμός ατόμων διαθέτει μια ολοκληρωμένη κατανόηση των περιπλοκών που περιβάλλουν το συγκεκριμένο φαινόμενο και των πραγματικών δυνατοτήτων που διαθέτουν οι ημιαγωγίμες διατάξεις (Care et al., 2015).

Τα θεμελιώδη ημιαγωγίμα υλικά, όπως το πυρίτιο, δεν παρουσιάζουν ούτε αξιόπαινα αγωγή ούτε μονωτικά χαρακτηριστικά. Ωστόσο, μέσω της ενσωμάτωσης μικροσκοπικών προσμίξεων, που συνήθως αναφέρονται ως προσμίξεις, τα υλικά αυτά μπορούν να εκδηλώσουν αξιοσημείωτες ηλεκτρικές ιδιότητες. Η εισαγωγή αυτών των προσμίξεων διευκολύνει την ακριβή διαμόρφωση της κινητικότητας των ηλεκτρονίων. Η αξιοποίηση των ιδιοτήτων που προκύπτουν έχει διευκολύνει την ικανότητα των ημιαγωγών να εκπληρώνουν διάφορες λειτουργίες, συμπεριλαμβανομένης της κατασκευής περίπλοκων ηλεκτρονικών

κυκλωμάτων που περιλαμβάνουν πολυάριθμα στοιχεία. Αναφέρεται η παραπομπή που παρέχεται από τους Yu και συν. (2016).

Η σιλικόνη, ως το κατεξοχήν ημιαγώγιμο υλικό, απολαμβάνει απaráμιλλης πανταχού παρούσας χρήσης, αν και αναγνωρίζεται η ύπαρξη εναλλακτικών υλικών στον τομέα αυτό. Τα ημιαγώγιμα υλικά θεμελιώδους φύσης εκδηλώνουν ενδιαφέροντα χαρακτηριστικά σε απόκριση στις μεταβολές των θερμοκρασιών περιβάλλοντος. Σε αντίθεση με την πλειονότητα των μεταλλικών ουσιών, όπου οι αυξημένες θερμοκρασίες οδηγούν σε αυξημένη αντίσταση, είναι αξιοσημείωτο ότι τα ημιαγώγιμα υλικά παρουσιάζουν μια ενδιαφέρουσα συμπεριφορά, σύμφωνα με την οποία η αγωγιμότητά τους κλιμακώνεται ταυτόχρονα με την αύξηση της θερμοκρασίας. Αυτό το μοναδικό χαρακτηριστικό τα καθιστά εξαιρετικά ελκυστικά για πλήθος εφαρμογών. Το προαναφερθέν φαινόμενο προκύπτει ως συνέπεια μιας ξεχωριστής διαμόρφωσης της δομής της ζώνης ηλεκτρονίων εντός της εγγενούς σύνθεσης των υλικών. Στις ενδιάμεσες περιοχές που χωρίζουν τις ζώνες, εκδηλώνεται ένα διακριτό κενό, το οποίο, υπό συγκεκριμένες συνθήκες, επιτρέπει τη διέλευση θερμικά διεγερμένων ηλεκτρονίων (Yu et al., 2016).

2.2.3. Πιεζοηλεκτρικά

Το φαινόμενο του πιεζοηλεκτρισμού ανακαλύφθηκε και τεκμηριώθηκε για πρώτη φορά το 1880, σηματοδοτώντας ένα σημαντικό ορόσημο στον τομέα της φυσικής. Από την αρχική αναγνώρισή του, το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο έχει συγκεντρώσει σημαντική προσοχή και έχει βρει εκτεταμένες εφαρμογές σε διάφορους τομείς. Πολλά καθημερινά αντικείμενα αντλούν τις αρχές λειτουργίας τους από αυτό το φαινόμενο, με παραδείγματα το κουδούνι της πόρτας και τον μηχανισμό ανάφλεξης ενός αναπτήρα. Τα πιεζοηλεκτρικά υλικά διαθέτουν την ικανότητα να συγχωνεύουν αποτελεσματικά δύο διαφορετικές δράσεις. Όταν ένα πιεζοηλεκτρικό υλικό υπόκειται σε εξωτερική πίεση ή δύναμη, υφίσταται παραμόρφωση του σχήματός του. Η εμφάνιση οποιασδήποτε μικροσκοπικής μετατόπισης σε παράλληλη διαμόρφωση έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος. Το φαινόμενο μπορεί επίσης να παρουσιάσει αντίστροφη πορεία. Ουσιαστικά, η εφαρμογή ηλεκτρικής τάσης στο υλικό προκαλεί παραμόρφωση στο υλικό, οδηγώντας ταυτόχρονα σε αύξηση της πίεσης και άσκηση δύναμης. Το φαινόμενο παρουσιάζει στιγμιαία εξέλιξη είτε μονοκατευθυντικά, συνοδευόμενη από την εκδήλωση μετατόπισης, είτε αμφίδρομα, με την πρόκληση ηλεκτρικού

φορτίου. Τα υλικά που επιδεικνύουν αυτό το χαρακτηριστικό περιλαμβάνουν τόσο ουσίες που απαντούν στη φύση όσο και ουσίες που συντίθενται τεχνητά. Ο χαλαζίας ταξινομείται ως φυσικό υλικό. Τα τεχνητά υλικά περιλαμβάνουν μια ποικιλία πολυμερών και κεραμικών. Τα πιεζοηλεκτρικά υλικά παρουσιάζουν ενδιαφέρουσες εφαρμογές τόσο ως αισθητήρες όσο και ως ενεργοποιητές (Uchino, 2017).

2.2.4. Κράματα με μνήμη σχήματος

Έχουν αναπτυχθεί διάφορα κράματα που παρουσιάζουν μια αξιοσημείωτη ιδιότητα, σύμφωνα με την οποία έχουν την ικανότητα να επανέρχονται στο αρχικό προκαθορισμένο σχήμα τους όταν υπόκεινται σε μεταβολές που προκαλούνται από μηχανικούς, θερμικούς, χημικούς ή άλλους παράγοντες. Μέσω της στρατηγικής εφαρμογής κατάλληλης εξωτερικής διέγερσης προκαλείται μια παροδική μεταβολή στη μοριακή σύνθεση του κράματος. Με τον τερματισμό της εφαρμογής της εξωτερικής διέγερσης, η μοριακή διαμόρφωση και διάταξη του κράματος επανέρχεται στην προηγούμενη κατάστασή της, με αποτέλεσμα το κράμα να ανακτά το αρχικό του σχήμα. Η πρωταρχική χρήση αυτών των κραμάτων αφορά το ρόλο τους ως ενεργοποιητών. Τα κράματα που παρουσιάζουν ιδιότητες μνήμης σχήματος μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις διακριτές λειτουργικές κατηγορίες: κράματα μονής κατεύθυνσης, κράματα διπλής κατεύθυνσης και κράματα μαγνητικά ελεγχόμενα. Αξιοσημείωτες περιπτώσεις κραμάτων με μνήμη σχήματος περιλαμβάνουν NiTi (νικέλιο-τιτάνιο), Cu Zn (χαλκός-ψευδάργυρος) και πλήθος πολυμερών. Τα πολυμερή κράματα παρουσιάζουν σημαντική χρησιμότητα στον τομέα της ορθοπεδικής χειρουργικής λόγω της ικανότητάς τους να αφομοιώνουν τη θερμοκρασία του ανθρώπινου σώματος, ενεργοποιώντας έτσι τις ιδιότητες μνήμης σχήματος κατά την ενσωμάτωσή τους (Holman et al., 2020).

2.2.5. Πολυμερή με μνήμη σχήματος

Αξίζει να αναφερθεί ότι τα κράματα δεν είναι τα μόνα υλικά που εκδηλώνουν αντιδράσεις μνήμης σχήματος. Σημαντικές προσπάθειες έχουν αφιερωθεί, με αξιόπαινα επιτεύγματα, για τη διασφάλιση της ισοδυναμίας των αποτελεσμάτων στα πολυμερή

μηχανικής. Οι πιθανές εφαρμογές είναι τεράστιες, δεδομένης της εγγενούς ευελιξίας των πολυμερών, τα οποία μπορούν εύκολα να κατασκευαστούν σε μυριάδες διαφορετικές διαμορφώσεις. Ιατρικές εφαρμογές, όπως η χρήση πολυμερικών νημάτων μνήμης σχήματος σε χειρουργικές επεμβάσεις ως αυτοκόλλητων κόμβων, αποτελούν παράδειγμα των εξελίξεων στον τομέα. Τα νήματα χρησιμοποιούνται με σκοπό τη δημιουργία συνδέσεων μεταξύ αιμοφόρων αγγείων. Τα νήματα είναι προικισμένα με μια αρχική διαμόρφωση, που περιβάλλει ένα δοχείο, και, καθώς η θερμική ενέργεια του οργανισμού επηρεάζει το πολυμερές, το νήμα υφίσταται μια διαδικασία εμπλοκής, διατηρώντας έτσι την απομνημονευμένη μορφή του (Leng et al., 2009).

3. Εφαρμογές έξυπνων υλικών στην αρχιτεκτονική

Συνήθως, η κινητική αρχιτεκτονική καλλιεργείται μέσω μηχανικής και ηλεκτρονικής ανίχνευσης, παράλληλα με μηχανισμούς ενεργοποίησης και ρύθμισης, με αποτέλεσμα η αρχιτεκτονική να μην είναι ενεργειακά αποδοτική. Είναι προφανές ότι η επίτευξη του στόχου της προσαρμογής μέσω της χρήσης συμβατικών αδρανών υλικών θα δημιουργούσε σημαντικές προκλήσεις. Αξίζει να αναγνωριστεί ότι για την πλήρη αξιοποίηση των εγγενών ιδιοτήτων και τη βελτιστοποίηση της χρήσης των έξυπνων υλικών, είναι επιτακτική ανάγκη να αναπτυχθούν μεθοδολογίες που διευκολύνουν την ολοκληρωμένη κατανόηση των υποκείμενων φυσικών μηχανισμών (Salma, 2011). Σύμφωνα με τους Al-Obaidi και συν. (2017), τα έξυπνα υλικά διαθέτουν την ικανότητα να υφίστανται διάφορες μορφές παραμόρφωσης, όπως τέντωμα, αναδίπλωση ή κάμψη, ως απόκριση σε συγκεκριμένα περιβαλλοντικά ερεθίσματα. Αυτά τα ερεθίσματα μπορεί να περιλαμβάνουν κράματα με μνήμη σχήματος (SMA), πολυμερή με μνήμη σχήματος (SMP), πιεζοηλεκτρικά υλικά, μαγνητοστρεπτικά υλικά, ηλεκτροστρεπτικά υλικά και ηλεκτροενεργά πολυμερή (Sherif & Sabry Elattar, 2013). Επιπλέον, είναι επιτακτική ανάγκη να αναγνωριστεί ότι οι περίπλοκες μοριακές συνθέσεις που ενυπάρχουν στα έξυπνα υλικά παίζουν καθοριστικό ρόλο στη ρύθμιση και τη δημιουργία μιας απόδοσης που εξαρτάται από τη μορφή του υλικού. Αυτή η απόδοση, με τη σειρά της, διευκολύνει την ικανότητα του υλικού να αλληλεπιδρά αποτελεσματικά με διάφορα περιβαλλοντικά ερεθίσματα, συμπεριλαμβανομένων, μεταξύ άλλων, της υγρασίας, της θερμοκρασίας, του φωτός και του διοξειδίου του άνθρακα (Lopez et al., 2015).

Σύμφωνα με τον Sung (2007), τα έξυπνα υλικά παρουσιάζουν ένα εύρος επιλογών εγκατάστασης, συμπεριλαμβανομένων, μεταξύ άλλων, του ξύλου, των μετάλλων, των ινών, των ιστών και του πάχους του υφάσματος. Οι μελετητές του Πανεπιστημίου Clemson δημιούργησαν με επιτυχία αναπτύξιμα ινώδη υλικά που παρουσιάζουν συμπεριφορά που ανταποκρίνεται στην υγρασία, αντλώντας έμπνευση από το αξιοσημείωτο φαινόμενο του αυθόρμητου ξεδιπλώματος των φύλλων των δέντρων. Το προαναφερθέν μοντέλο χρησιμεύει για να καταδείξει την ικανότητα των ινών των φύλλων δέντρων να αφομοιώνουν την υγρασία και να αντιδρούν στη μετατροπή της αυτοενέργειας σε καμπυλότητα, όπως διευκρινίστηκε από τους Hoefnagels και συν. (2007).

Τα αρχιτεκτονικά στοιχεία που είναι γνωστά ως προσόψεις και περιβλήματα κτιρίων χρησιμεύουν ως μεσολαβητές μεταξύ του εσωτερικού χωρικού πεδίου ενός κτιρίου και του

εξωτερικού περιβάλλοντος. Αναλαμβάνουν κεντρικό ρόλο στη διευκόλυνση της ανταλλαγής θερμότητας και φωτός. Η απόδοση αυτών των συστημάτων έχει άμεσο αντίκτυπο σε διάφορες πτυχές, όπως η άνεση και η παραγωγικότητα των ενοίκων, η κατανάλωση ενέργειας και τα λειτουργικά έξοδα. Αξίζει να σημειωθεί ότι ορισμένα συστήματα περιλαμβάνουν πολλαπλά στοιχεία που έχουν σχεδιαστεί για να ανταποκρίνονται και να προσαρμόζονται αποτελεσματικά στις αλλαγές του εξωτερικού περιβάλλοντος (López et al., 2017). Η θεματική εστίαση του "Προσαρμοστικού κελύφους κτιρίων" αφορά μια εκκολαπτόμενη τεχνολογική πρόοδο. Οι προσαρμοστικές ή δυναμικές προσόψεις διαθέτουν την αξιοσημείωτη ικανότητα να ρυθμίζουν βέλτιστα διάφορες ιδιότητες, συμπεριλαμβανομένων, μεταξύ άλλων, της θερμότητας, του φωτός, της υγρασίας και του αέρα, ανταποκρινόμενες στις διαρκώς μεταβαλλόμενες κλιματικές συνθήκες και τις προτιμήσεις των χρηστών. Σε αντίθεση με τα συμβατικά συστήματα προσόψεων, η συγκεκριμένη τεχνολογική εξέλιξη έχει τη δυνατότητα να συμβάλει ουσιαστικά στη βελτιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης των σύγχρονων αρχιτεκτονικών κατασκευών. Το Climate Adaptive Building Shell (CABS) είναι ένα αρχιτεκτονικό σύστημα που διαθέτει την ικανότητα να προσαρμόζεται ώστε να λειτουργεί ως κέλυφος κτιρίου. Σκοπός του είναι να προσαρμόζει τη συμπεριφορά του σύμφωνα με τις ανάγκες των χρηστών, μειώνοντας έτσι αποτελεσματικά τη συνολική ενεργειακή ζήτηση (Fiorito et al., 2016). Το προαναφερθέν σύστημα χρησιμοποιεί ευφυή υλικά, συγκεκριμένα κράμα μνήμης σχήματος (SMA), εντός του κελύφους του, επιτρέποντάς του να ανταποκρίνεται δυναμικά στις περιβαλλοντικές διακυμάνσεις, αξιοποιώντας την εγγενή ικανότητά του να αλλάζει το σχήμα του και να προσαρμόζεται στις μεταβαλλόμενες συνθήκες (Pesenti et al., 2015).

Αντίθετα, είναι αξιοσημείωτο ότι μόνο ένας περιορισμένος αριθμός συστημάτων έχει υιοθετήσει την έννοια της βιομιμητικής προσέγγισης, όπου τα βιολογικά συστήματα ενσωματώνονται απρόσκοπτα με ευφυή υλικά στο πλαίσιο των αρχιτεκτονικών εφαρμογών. Στόχος είναι η απόκτηση μιας ολοκληρωμένης κατανόησης των λειτουργικών αρχών που διέπουν τα φυσικά συστήματα, τα οποία περιλαμβάνουν φυτά, ζώα, έντομα, ακόμη και βακτήρια, με απώτερο σκοπό την εφαρμογή αυτού του εννοιολογικού πλαισίου στα αρχιτεκτονικά συστήματα. Στην πρωτοποριακή εργασία τους, οι Badarnah και Kadri (2014) πρότειναν τη νέα έννοια ενός προσαρμοστικού τοίχου, ο οποίος χρησιμεύει ως μηχανισμός συλλογής νερού αξιοποιώντας τις αρχές της βιομιμητικής. Συγκεκριμένα, οι συγγραφείς χρησιμοποίησαν ανώμαλα αναχώματα και αυλακώσεις για τη διευκόλυνση της τριχοειδούς δράσης, επιτρέποντας έτσι την κατανομή του νερού σε όλη την επιφάνεια του τοίχου και στη

συνέχεια τη συλλογή σταγονιδίων νερού μέσω των ανωμαλιών που υπάρχουν στην εν λόγω επιφάνεια. Επιπλέον, οι Holston, Bridgens και Farmer (2015) εισήγαγαν το μοντέλο πεύκου ως βιομιμητικό σύστημα, αποδίδοντας τις ικανότητες βιομιμητισμού του στην αξιοσημείωτη ικανότητα του κώνου πεύκου να αντιδρά και να προσαρμόζεται στα επίπεδα υγρασίας, υποβάλλοντας ελεγχόμενες κινήσεις ανοίγματος και κλεισίματος σε απόκριση στις διακυμάνσεις της ατμοσφαιρικής υγρασίας και των κλιματικών συνθηκών. Η πρόταση που διατυπώνουν οι Holston, Bridgens και Farmer (2015) συνεπάγεται τη χρησιμοποίηση ευφών υλικών, όμοιων με την κίνηση που παρατηρείται στους κώνους πεύκου, με σκοπό την κατασκευή του αρχιτεκτονικού περιβλήματος ενός κτιρίου.



Εικόνα 1 εφαρμογή φλοιού πεύκου για τη δημιουργία αρχιτεκτονικού περιβλήματος

3.1. Στον τομέα της αισθητικής

Η σημασία της αισθητικής σε ένα κτίριο έχει εξελιχθεί σε διάφορες αρχιτεκτονικές περιόδους. Αν και μπορεί να μην αποτελούσε σημαντικό παράγοντα στο παρελθόν, απέκτησε σημασία στη μοντερνιστική αρχιτεκτονική με τη διάσημη αρχή "η μορφή ακολουθεί τη λειτουργία". Σήμερα, η αισθητική θεωρείται εξίσου κρίσιμη με την ίδια την κατασκευή. Τα έξυπνα υλικά προσφέρουν καινοτόμες λύσεις σε μακροχρόνιες προκλήσεις του κλάδου, μετατρέποντας τις καθημερινές και παραδοσιακές προσόψεις σε δυναμικές, πολυδιάστατες κατασκευές. Ο αρχιτεκτονικός σχεδιασμός έχει παραδοσιακά επικεντρωθεί στην επιφάνεια, παραμελώντας τη σημασία της τρίτης διάστασης των υλικών. Ως εκ τούτου, η απεικόνιση των σχημάτων σε ορθογραφική προβολή οδηγεί αναπόφευκτα στην απλοποίηση της αντίληψης σε δύο διαστάσεις και στην ανάλογη χρήση των υλικών. Με την έλευση των νέων τεχνολογιών,

η προσέγγιση του αρχιτέκτονα στα υλικά υφίσταται μετασχηματισμό. Δίνεται πλέον μεγαλύτερη έμφαση στην εξέταση των υλικών με πιο ολοκληρωμένο τρόπο, λαμβάνοντας υπόψη τις διάφορες ιδιότητές τους ήδη από τα αρχικά στάδια της διαδικασίας σχεδιασμού (Addington & Schodek, 2005).

Το γυαλί διαθέτει τεράστιες δυνατότητες όσον αφορά τις αισθητικές και ενεργειακές του ιδιότητες. Ωστόσο, όταν χρησιμοποιείται χωρίς τη δέουσα προσοχή και μέριμνα, μπορεί να δημιουργήσει σημαντικές προκλήσεις για τους ενοίκους ενός κτιρίου. Στις αρχές του 20ού αιώνα, οι αρχιτέκτονες αγκάλιασαν την επαναστατική ιδέα των γυάλινων κελυφών, χρησιμοποιώντας τα εκτενώς στα σχέδιά τους. Ωστόσο, λίγη σκέψη δόθηκε για τις πιθανές συνέπειες που θα μπορούσαν να έχουν αυτές οι κατασκευές στο εσωτερικό περιβάλλον. Η χρήση τους δημιουργούσε σημαντικά έξοδα τόσο για τη θέρμανση όσο και για την ψύξη των χώρων, και η εφαρμογή τους γνώρισε σταδιακά σημαντική μείωση. Σήμερα, μια πιθανή λύση στο ζήτημα αυτό περιλαμβάνει τη χρήση γυάλινων επιφανειών σε συνδυασμό με ηλεκτροχρωμικό γυαλί ή κυψέλες υγρών κρυστάλλων. Ο ηλεκτρονικός έλεγχος της διαφάνειας και της απορροφητικής τους ικανότητας επιτρέπει την ενισχυμένη ηλιοπροστασία σε περιόδους έντονης ηλιοφάνειας (Cecilia Russo & Ferrara, 2017).

Ωστόσο, όταν πρόκειται για την αξιοποίηση του γυαλιού, η ενέργεια δεν είναι το μοναδικό ζήτημα που απαιτεί την προσοχή μας. Η πρόκληση της διατήρησης των μεγάλων γυάλινων επιφανειών σε άριστη κατάσταση για παρατεταμένη διάρκεια είναι ένα θέμα που απασχολεί από αισθητική άποψη. Ευτυχώς, οι πρόσφατες εξελίξεις στην τεχνολογία έχουν αφιερωθεί στην αντιμετώπιση αυτού του ζητήματος. Οι υαλοπίνακες με επικάλυψη διοξειδίου του τιτανίου (TiO_2) διαθέτουν την αξιοσημείωτη ικανότητα αυτοκαθαρισμού και βελτίωσης της ποιότητας του αέρα μέσα σε ένα δωμάτιο. Η διαδικασία μπορεί να περιγραφεί ως εξής: όταν η υπεριώδης ακτινοβολία αλληλεπιδρά με την επιφάνεια του διοξειδίου του τιτανίου, έχει ως αποτέλεσμα την απελευθέρωση αρνητικά φορτισμένων ηλεκτρονίων, ενώ θετικά φορτισμένες οπές παραμένουν πίσω. Αυτό επιτρέπει τη διείδυση της ατμοσφαιρικής υγρασίας ή του νερού της βροχής στη δομή της επιφάνειας ως σταγονίδια, καθαρίζοντάς την αποτελεσματικά, και όλα αυτά χωρίς καμία ανθρώπινη παρέμβαση (Russo, 2017).

Αξίζει να σημειωθεί ότι τα έξυπνα υλικά έχουν τη δυνατότητα να αντιμετωπίσουν τις πολυάριθμες προκλήσεις που αντιμετωπίζει σήμερα ο τομέας της αρχιτεκτονικής. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα είναι ο τρόπος με τον οποίο διευρύνουν τις δυνατότητες κατά τη διαδικασία σύνθεσης, όπως δείχνουν οι αυτοφωτιζόμενοι γυάλινοι πίνακες. Πάνε οι εποχές

που έπρεπε να εγκαταστήσει κανείς μεμονωμένες πηγές φωτός για να φωτίσει και να τονίσει ένα κτίριο, διαταράσσοντας την αρμονική εμφάνιση της πρόσοψής του (Kretzer, 2016). Μέσω της ενσωμάτωσης μεμβρανών LED σε υαλοπίνακες και της διακριτικής τοποθέτησης ηλεκτρικών καλωδίων, είμαστε σε θέση να επιτύχουμε ένα βέλτιστο αποτέλεσμα φωτισμού. Αυτή η καινοτόμος προσέγγιση μας παρέχει επίσης την ελευθερία να χρησιμοποιούμε μια ευρύτερη γκάμα χρωμάτων στις προσόψεις των κτιρίων. Ο φωτισμός με χρήση ανόργανων διόδων εκπομπής φωτός (LED) προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα σε σύγκριση με τις παραδοσιακές μεθόδους φωτισμού. Επιπλέον, λόγω της συμπαγούς φύσης τους, οι λυχνίες LED διαθέτουν την ικανότητα να χρησιμοποιούνται σε διάφορες χωρικές διαστάσεις, παρέχοντας στους χρήστες τη δυνατότητα να χειρίζονται και να ρυθμίζουν με ακρίβεια τα χαρακτηριστικά του φωτισμού που εκπέμπουν. Ένα σημαντικό μειονέκτημα είναι η μειωμένη απόδοση, που συνήθως κυμαίνεται από 20 έως 30 lumen/watt. Φυσικά, αυτό ξεπερνά την απόδοση των παραδοσιακών λαμπτήρων πυράκτωσης (Russo, 2017).

Μπορεί κανείς να διερευνήσει τις δυνατότητες αξιοποίησης του φωτός εντός μιας δομής μέσω ενός συγκεκριμένου τύπου προϊόντων ηλεκτροφωταύγεια. Τα προϊόντα αυτά διατίθενται σε διάφορες επιλογές, όπως λεπτές ή παχιές μεμβράνες, και μπορούν να είναι μονής ή διπλής όψης. Μπορούν να εφαρμοστούν τόσο σε ευθείες όσο και σε καμπύλες επιφάνειες και να στερεωθούν μέσω μηχανικών μέσων ή συγκόλλησης. Η ευελιξία και η ευκολία κοπής τους επιτρέπουν στους ειδικούς να τα διαμορφώνουν και να τα προσαρμόζουν στην επιθυμητή μορφή χωρίς να διακυβεύεται η λειτουργικότητά τους. Επιπλέον, τα καλώδια αυτά μπορούν να βρεθούν σε διάφορες αγορές και είναι αρκετά ευέλικτα ώστε να εφαρμόζονται σε οποιαδήποτε επιφάνεια μέσω ραψίματος ή συγκόλλησης. Παρέχουν συγκρίσιμο επίπεδο ποιότητας με τις μεμβράνες (Vaisi, S2012). Είναι σημαντικό να σημειωθεί μια άλλη κατηγορία έξυπνων υλικών που παρέχουν στους αρχιτέκτονες παρόμοιες ευκαιρίες πειραματισμού - τα ηλεκτροφωτοβολταϊκά υλικά. Τα θερμοδυναμικά υλικά είναι διαθέσιμα στην αγορά εδώ και αρκετό καιρό, ωστόσο η χρήση τους παραμένει αρκετά περιορισμένη κυρίως λόγω του υπέρογκου κόστους τους. Αυτά παρέχουν τη δυνατότητα για την ανάπτυξη ενδιαφέρουσες πτυχές που, όταν προτρέπονται ανάλογα, μπορούν να αλλάξουν το σχήμα τους (Kretzer, 2016).

Τα ευφυή υλικά που έχουν την ικανότητα να αλλάζουν το χρώμα τους, όπως τα φωτοχρωματικά, τα θερμοχρωματικά και τα ηλεκτροχρωματικά, παρουσιάζουν πολλές συναρπαστικές ευκαιρίες στο πεδίο της αρχιτεκτονικής. Τα προϊόντα αυτά μπορούν να βρεθούν στα καταστήματα και να έρθουν με τη μορφή χρώματος. Μπορούν να εφαρμοστούν

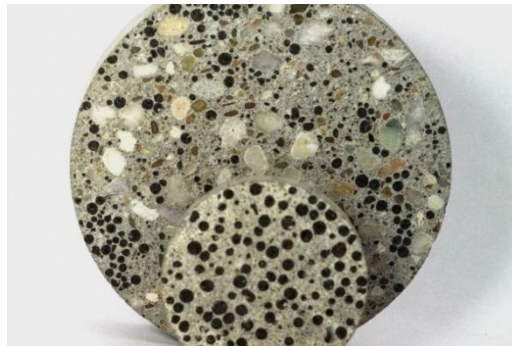
με πινέλο, ρολό ή ψεκαστήρα σε ένα ευρύ φάσμα επιφανειών, όπως ξύλο, πλαστικό, υφάσματα, χαρτόνι, ακόμη και σκυρόδεμα. Μέσω της εφαρμογής συγκεκριμένων ερεθισμάτων, όπως το φως, η θερμότητα και ο ηλεκτρισμός, οι επιφάνειες ενός κτιρίου, είτε είναι εσωτερικές είτε εξωτερικές, μπορούν να βελτιωθούν από άποψη οπτικής ποιότητας. Αυτό ανοίγει ένα ευρύ φάσμα διακοσμητικών και συνθετικών δυνατοτήτων που έχουν να προσφέρουν αυτά τα υλικά (Cecilia Russo & Ferrara, 2017).

3.2. Στον τομέα της κατασκευής

Ο κατασκευαστικός κλάδος έχει σημειώσει σημαντική πρόοδο όσον αφορά την ποιότητα και τις δυνατότητες. Με την έλευση του σκυροδέματος στην αρχιτεκτονική στα τέλη του 19ου αιώνα, αναδύθηκε ένας κόσμος δυνατοτήτων που επέτρεψε την υλοποίηση κάθε φανταστικής μορφής κτιρίου. Οι αναδυόμενες τεχνολογίες είναι έτοιμες να βελτιώσουν τα σημερινά υλικά και να προσφέρουν στους ειδικούς των κατασκευών καινοτόμες λύσεις σε προκλήσεις που αντιμετώπιζαν στο παρελθόν (Sommese et al., 2023). Στο πεδίο των κατασκευών, είναι ζωτικής σημασίας να εξετάζονται τα έξυπνα υλικά από την αρχή της διαδικασίας σύνθεσης. Η εφαρμογή τους δεν θα πρέπει να αποτελεί μια μεταγενέστερη σκέψη, καθώς η δυναμική τους θα πρέπει να ευθυγραμμίζεται με κάθε αρχιτεκτονική απόφαση (Balali & Valipour, 2020).

Ένα ζήτημα μεγάλης σημασίας που έχει τραβήξει την προσοχή των μηχανικών είναι η περιορισμένη ανθεκτικότητα του σκυροδέματος, το οποίο σήμερα αποτελεί το πιο διαδεδομένο υλικό που χρησιμοποιείται. Όταν κατασκευάζεται πρόσφατα, το σκυρόδεμα παρουσιάζει αξιοσημείωτη ανθεκτικότητα και διαθέτει μια σειρά εξαιρετικών ιδιοτήτων. Με την πάροδο του χρόνου, η αντοχή του υλικού μειώνεται και δημιουργεί μια σειρά προβλημάτων, όπως ρωγμές και εμφάνιση αλάτων. Αυτή η συνεχιζόμενη φθορά αποτελεί σημαντική πρόκληση. Οι πρόσφατες εξελίξεις στην τεχνολογία έχουν επιφέρει μια πρωτοποριακή εξέλιξη στον συγκεκριμένο τομέα: το αυτοθεραπευόμενο σκυρόδεμα. Η νέα λύση ενσωματώνει μικροκάψουλες πυριτικού νατρίου στο σκυρόδεμα, παρέχοντας μια καινοτόμο προσέγγιση. Καθώς αρχίζουν να σχηματίζονται ρωγμές, οι μικροκάψουλες σπάνε, απελευθερώνοντας ένα υγρό που αλληλεπιδρά με το υπάρχον υδροξείδιο του ασβεστίου στο σκυρόδεμα. Αυτό γεμίζει αποτελεσματικά τις ρωγμές και φράζει τους πόρους που έχουν σχηματιστεί. Η χημική αντίδραση έχει ως αποτέλεσμα το σχηματισμό μιας ουσίας που μοιάζει με γέλη και

στερεοποιείται σταδιακά κατά τη διάρκεια μιας εβδομάδας. Η διαδικασία αυτή ενισχύει σημαντικά την ανθεκτικότητα του σκυροδέματος και, κατά συνέπεια, τη συνολική μακροζωία της κατασκευής. Κατά συνέπεια, ένα πιθανό αποτέλεσμα θα μπορούσε να είναι η μείωση της ζήτησης του υλικού και, στη συνέχεια, η μείωση των εκπομπών CO₂ κατά τη διαδικασία παραγωγής. Αυτό είναι αξιοσημείωτο καθώς είναι υπεύθυνο για το 10% της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στις ΗΠΑ (Kretzer, 2016).



Εικόνα 2 Το αυτοθεραπανόμενο μπετόν πηγή

Σημαντική επανάσταση επιτεύχθηκε με την έλευση των οπτικών ινών, μιας τεχνολογίας που έχει αποκτήσει τεράστια δημοτικότητα και έχει υιοθετηθεί ευρέως σε διάφορες βιομηχανίες. Είναι σημαντικό να επαναλάβουμε ότι η λειτουργία των οπτικών ινών δεν επιδεικνύει καμία πρακτική ευφυή συμπεριφορά, καθώς δεν υφίσταται κανέναν μετασχηματισμό. Αποτελούν απλώς έναν αγωγό φωτισμού. Ωστόσο, είναι σκόπιμο να αναφερθούν σε αυτό το σημείο, καθώς, όπως και τα έξυπνα υλικά, αλλάζουν ριζικά την αντίληψή μας για τη διαδικασία κατασκευής κτιρίων. Τα υλικά αυτά χρησιμοποιούνται συνήθως σε εφαρμογές φωτισμού. Οι οπτικές ίνες έχουν την αξιοσημείωτη ικανότητα να παρέχουν φως σε έναν χώρο χωρίς την ανάγκη ηλεκτρικής ενέργειας ή πυράκτωσης, σε αντίθεση με τα συστήματα που έχουμε συνηθίσει. Ολόκληρη η λειτουργία τους βασίζεται σε δύο θεμελιώδεις ιδιότητες του φωτός: την ανάκλαση και τη διάθλαση. Μια οπτική ίνα λειτουργεί ως κυματοδηγός, μεταφέροντας ουσιαστικά το φως κατά μήκος της μέσω μιας σειράς διαθλάσεων. Είναι συνήθως κατασκευασμένη από γυαλί ή πλαστικό, χρησιμεύοντας ως σωλήνας για το σκοπό αυτό. Τα καλώδια οπτικών ινών εκπέμπουν μικρότερη ποσότητα φωτός σε σύγκριση με τους κανονικούς λαμπτήρες, αλλά το φως που παράγουν είναι ανώτερης ποιότητας (Sun, 2015). Οι κανονικοί λαμπτήρες παρουσιάζουν μείωση του φωτός καθώς

αυξάνεται η απόσταση, κάτι που δεν αποτελεί πρόβλημα με τις οπτικές ίνες. Στην πραγματικότητα, οι οπτικές ίνες επιτρέπουν τη ρύθμιση της καθαρότητας του φωτός. Επιπλέον, μέσω της βέλτιστης αξιοποίησης των οπτικών ινών, είναι νοητό να φωτιστεί ένα ολόκληρο σπίτι με μια μοναχική λάμπα, εξαλείφοντας έτσι την περιττή θερμότητα που παράγεται από το σημερινό, πιο περίπλοκο σύστημά μας (Casini, 2016).

Μια ενδιαφέρουσα εφαρμογή των οπτικών ινών, η οποία δεν είχε διερευνηθεί στο παρελθόν, αφορά τη χρήση τους για τον εντοπισμό ζητημάτων σε ολοκληρωμένες κατασκευές. Η διαδικασία που χρησιμοποιείται στην περίπτωση αυτή μοιάζει πολύ με εκείνη που χρησιμοποιείται στα συστήματα ελέγχου, με τη διαφορά ότι απευθυνόμαστε σε πιο ουσιαστικές κατασκευές, όπως κτίρια και γέφυρες. Οι οπτικές ίνες εγκαθίστανται στρατηγικά μέσα στις κατασκευές, συγκεκριμένα σε κρίσιμα σημεία, ώστε να εξασφαλίζεται η συνεχής παρακολούθηση της κατάστασής τους. Η διαδικασία αυτή είναι εξαιρετικά πολύπλοκη και απαιτεί μια ολοκληρωμένη κατανόηση των αρχών που διέπουν τις οπτικές ίνες. Ωστόσο, τα δυνητικά οφέλη της είναι ανεκτίμητα και μπορούν δυνητικά να σώσουν ζωές σε πολλές περιπτώσεις. Οι πιεζοηλεκτρικές τεχνολογίες χρησιμοποιούνται με σκοπό την ανίχνευση παραμορφώσεων σε δομές. Σε αντίθεση με τις οπτικές μεθόδους, οι τεχνολογίες αυτές βασίζονται στην παρακολούθηση των μεταβολών των ηλεκτρικών σημάτων που κατευθύνονται σε συγκεκριμένα σημεία μεγάλων δομών (Mukherjee et al., 2021).

Τα φωτοβολταϊκά είναι ένα αξιοσημείωτο σύστημα στο πεδίο των νέων τεχνολογιών, που διαθέτει τεράστιο ενεργειακό δυναμικό. Τα υλικά αυτά έχουν αποκτήσει σημαντική δημοτικότητα λόγω της ευελιξίας και της ευρείας χρήσης τους. Μπορούν εύκολα να προσαρμοστούν για διάφορες εφαρμογές, όπως στέγες ή άμεση ενσωμάτωση σε δομές κτιρίων. Η λειτουργία τους προέρχεται από το φαινόμενο του ημιαγωγού, όπως έχει παρατηρηθεί στην ακαδημαϊκή έρευνα. Όταν τα φωτόνια αλληλεπιδρούν με ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο, ένα μέρος τους ανακυκλώνεται, ενώ τα υπόλοιπα απορροφώνται από το στοιχείο. Τα φωτόνια που απορροφώνται έχουν ως αποτέλεσμα την παραγωγή ηλεκτρικής τάσης. Όταν συνδεθεί κατάλληλα σε ένα φορτίο, η τάση αυτή παράγει ηλεκτρικό ρεύμα (Patel & Goyal, 2018). Αν και τα φωτοβολταϊκά συστήματα προσφέρουν πολλά πλεονεκτήματα, όπως ο φιλικός προς το περιβάλλον χαρακτήρας τους και η αξιοποίηση της απεριόριστης ηλιακής ενέργειας, ένα σημαντικό μειονέκτημα είναι το σημαντικό κόστος τους. Δυστυχώς, η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας τους εξακολουθεί να θεωρείται σχετικά χαμηλή, γεγονός που δεν αντισταθμίζει το υψηλό κόστος. Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι οι συνθήκες για τη χρήση φωτοβολταϊκών συστημάτων στην Ελλάδα είναι ιδιαίτερα ευνοϊκές σε σύγκριση με άλλες ευρωπαϊκές χώρες.

Αυτό οφείλεται κυρίως στην άφθονη και παρατεταμένη ηλιοφάνεια που βιώνει η χώρα (Krishna & Thirumal, 2015).

Υπάρχουν συναρπαστικές εξελίξεις στον τομέα της θέρμανσης και του κλιματισμού, με την εμφάνιση ευφυών υλικών που μπορούν να υφίστανται αλλαγές φάσης. Μικροκάψουλες ενσωματώνονται σε δομικά υλικά, όπως γυψοσανίδες ή σοβατεπί, και έχουν την ικανότητα να απορροφούν ή να απελευθερώνουν ενέργεια με βάση τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Κάθε μικροκάψουλα είναι γεμάτη με κερί παραφίνης που υφίσταται αλλαγή φάσης σε συγκεκριμένες θερμοκρασίες, απορροφώντας θερμότητα όταν λιώνει μεταξύ 23-26ο C και ψύχοντας τον αέρα όταν στερεοποιείται κάτω από 18ο -22ο C. Επομένως, υπάρχει μια διαδικασία απορρόφησης θερμότητας κατά τη διάρκεια της ημέρας και επακόλουθης απελευθέρωσης θερμότητας τη νύχτα καθώς η θερμοκρασία μειώνεται. Αναμφίβολα, τα συστήματα αυτά είναι καταλληλότερα για περιοχές με ημερήσιες διακυμάνσεις της θερμοκρασίας, όπως σε ορισμένα μέρη της Ευρώπης (Krishna & Thirumal, 2015). Ίσως σε πιο νότιες χώρες, θα μπορούσαν ενδεχομένως να βοηθήσουν στη μείωση της χρήσης ηλεκτρικής ενέργειας από τα κλιματιστικά κατά τους καλοκαιρινούς μήνες. Αυτό το σύστημα θέρμανσης προσφέρει μια πιο συμπαγή λύση σε σύγκριση με τις παραδοσιακές μεθόδους, που ενσωματώνεται άψογα στα οικοδομικά υλικά και επιτρέπει τη βέλτιστη και στρατηγική τοποθέτηση. Επιπλέον, η εξαιρετική ταχύτητά του εγγυάται ταχεία και αποτελεσματική απόδοση, παρέχοντας απaráμιλλη άνεση σε κλάσμα του χρόνου σε σύγκριση με τις παραδοσιακές εναλλακτικές λύσεις. Αυτές οι μικροκάψουλες έχουν ήδη εισαχθεί στην αγορά στην Ευρώπη και τις ΗΠΑ, όπως σημειώνουν οι Patel και Goyal το 2018.

Μια άλλη πτυχή που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη όταν πρόκειται για την αποτελεσματική λειτουργία ενός κτιρίου είναι ο εξαερισμός. Πρόκειται για ένα θέμα που οι αρχιτέκτονες συχνά αμφισβητούν κατά τη διαμόρφωση ενός σχεδίου, ωστόσο εξακολουθεί να δημιουργεί δυσκολίες για τους ενοίκους μιας δομής. Ένα έξυπνο σύστημα που ονομάζεται ελεγχόμενος αερισμός βάσει ζήτησης (D.C.V.) αποτελεί μια εξαιρετική λύση. Αυτή η στρατηγική εξαερισμού περιλαμβάνει τη μέτρηση της συγκέντρωσης CO₂ σε συγκεκριμένα σημεία ενός δωματίου για τη διατήρηση του ελέγχου της ροής του αέρα. Με απλά λόγια, ο εξαερισμός ενός κτιρίου επηρεάζεται από τα άτομα που βρίσκονται στο χώρο και το επίπεδο κατοχής τους. Δεδομένης της εξάρτησης του καθαρού αέρα από τη συμπεριφορά των χρηστών, οι συμβατικοί αισθητήρες που χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση της πληρότητας του χώρου είναι ανεπαρκείς. Ο ελεγχόμενος κατά ζήτηση εξαερισμός εφαρμόζεται συνήθως σε

ευρύχωρα περιβάλλοντα που παρουσιάζουν υψηλή επισκεψιμότητα σε καθημερινή βάση, όπως γυμναστήρια, αμφιθέατρα, εκκλησίες και εκθεσιακούς χώρους (Roy et. al. 2016).

Μια ενδιαφέρουσα εφαρμογή έξυπνων υλικών στον τομέα της αρχιτεκτονικής είναι οι αποσβεστήρες μαγνητορεολογικών ρευστών MRF (magnetorheological fluid dampers). Αυτά τα ρευστά λειτουργούν με βάση τις αρχές της μαγνητορεολογίας, παρουσιάζοντας ιξώδες που μπορεί να μεταβάλλεται και μηχανικές ιδιότητες που μπορούν να μεταβάλλονται με την παρουσία μαγνητικού πεδίου. Αυτοί οι αποσβεστήρες τοποθετούνται στρατηγικά στα θεμέλια των κατασκευών για να τις προστατεύουν αποτελεσματικά από τις εδαφικές επιταχύνσεις κατά τη διάρκεια σεισμών. Ως αποτέλεσμα, οι καταστροφικές δυνάμεις που ασκούνται στις κατασκευές ελαχιστοποιούνται σημαντικά. Οι ειδικοί ανακάλυψαν ότι τα μαγνητορεολογικά ρευστά έχουν την αξιοσημείωτη ικανότητα να ελέγχουν την απόσβεση των ταλαντώσεων. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα ρευστά αυτά ακολουθούν στενά τους μετασχηματισμούς του μαγνητικού πεδίου, ένα φαινόμενο που έχει μελετηθεί εκτενώς από ακαδημαϊκούς. Πριν από την εφαρμογή, είναι επιτακτική ανάγκη να εξεταστεί διεξοδικά η συμπεριφορά κάθε κατασκευής κατά τη διάρκεια ενός σεισμού. Αυτό μπορεί πλέον να επιτευχθεί με ευκολία μέσω της χρήσης εξειδικευμένων προγραμμάτων προσομοίωσης στον υπολογιστή. Επιπλέον, οι σημαντικές διαστάσεις αυτών των αντικειμένων και η στρατηγική τους τοποθέτηση εντός ενός κτιρίου επιβάλλουν ορισμένους περιορισμούς στον αρχιτέκτονα, καθιστώντας αναγκαία την εξέτασή τους από τα αρχικά στάδια της διαδικασίας σχεδιασμού (Patel & Goyal, 2018).

Καθώς ολοκληρώνουμε τη συζήτησή μας σχετικά με τις δυνατότητες των νέων τεχνολογιών στην αρχιτεκτονική, είναι σημαντικό να επισημάνουμε μερικά παραδείγματα πρακτικής εφαρμογής τους. Τα παραδείγματα αυτά χρησιμεύουν ως γέφυρα μεταξύ της αρχιτεκτονικής που γνωρίζουμε και εφαρμόζουμε σήμερα και του μέλλοντος της "έξυπνης" αρχιτεκτονικής. Ακολουθούν τρία σημαντικά παραδείγματα κτιρίων, δύο από τα οποία λειτουργούν ήδη εδώ και μερικά χρόνια. Τα κτίρια αυτά παρουσιάζουν τη χρήση έξυπνων υλικών με πρακτικούς και αποδεδειγμένους τρόπους (Sommese et al., 2023).

3.3. Παραδείγματα

Η αρχική εικονογράφηση παρουσιάζει την αρχιτεκτονική δημιουργία του Peter Marino, ενός καταξιωμένου αμερικανικής καταγωγής αρχιτέκτονα, που βρίσκεται στην πόλη

του Τόκιο της Ιαπωνίας. Πρόκειται για τη νέα έδρα του παγκοσμίως αναγνωρισμένου οίκου μόδας Chanel. Κατασκευασμένο το 2004, αυτό το αξιοσημείωτο δεκαώροφο κτίριο απέκτησε παγκόσμια αναγνώριση λόγω του πρωτοποριακού εξωτερικού σχεδιασμού του. Το κτίριο διαθέτει ηλεκτροτροπικό γυαλί σε συνδυασμό με πάνελ LED, επιδεικνύοντας έναν καινοτόμο συνδυασμό. Το κτίριο εκτείνεται σε μια εντυπωσιακή έκταση 1300 m² και διαθέτει ένα ευρύχωρο εμπορικό κέντρο, μια μεγάλη αίθουσα συναυλιών και ένα εξαιρετικό εστιατόριο. Το κτίριο αποτελείται από δύο διακριτά λειτουργικά στρώματα. Το εξωτερικό κοσμείται με ένα κομψό γκρι γυαλί, προσδίδοντας του έναν αέρα απaráμιλλης κομψότητας. Εν τω μεταξύ, το εσωτερικό διαθέτει ένα καινοτόμο ηλεκτροτροπικό έξυπνο υλικό. Υπάρχει ένα κενό μεταξύ του πρώτου και του δεύτερου στρώματος. Η εσωτερική πρόσοψη είναι κατασκευασμένη με γυαλί ασφαλείας διπλής όψης, το οποίο τονίζεται κομψά από οριζόντιες ράβδους αλουμινίου που ενσωματώνουν απρόσκοπτα σειρές λευκών LED. Καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας, το ηλεκτροτροπικό γυαλί και ολόκληρη η πρόσοψη απενεργοποιούνται, επιτρέποντας πλήρη διαφάνεια και παρέχοντας ανεμπόδιστη θέα στο εσωτερικό του κτιρίου. Κατά τις βραδινές ώρες, το γυαλί υφίσταται μια συναρπαστική μεταμόρφωση. Μετατρέπεται σε μια αδιαφανή επιφάνεια που χρησιμεύει ως οθόνη προβολής για μια εντυπωσιακή συστοιχία 700.000 LED. Αυτές οι λυχνίες LED ελέγχονται σχολαστικά από τρεις ισχυρούς κεντρικούς υπολογιστές και έναν εκπληκτικό αριθμό 65.000 μικροϋπολογιστών. Μαζί, διαθέτουν την αξιοσημείωτη ικανότητα να επεξεργάζονται πάνω από 32 τρισεκατομμύρια εντολές κάθε δευτερόλεπτο. Η οθόνη έχει τη δυνατότητα να προβάλλει τόσο εικόνες όσο και παρουσιάσεις βίντεο, μετατρέποντας ουσιαστικά το κτίριο σε μια δυναμική πλατφόρμα επικοινωνίας και διαφήμισης (Arun Kumar Parashar et al., 2023).



Εικόνα 3 κτίριο του οίκου Chanel

Ένα άλλο αξιοσημείωτο παράδειγμα είναι η διάσημη πολυκατοικία "Monte Verde", σχεδιασμένη από την αυστριακή εταιρεία Albert Wimmer και AN-architects, που βρίσκεται στη Βιέννη της Αυστρίας. Παρόμοια με τον πύργο της Chanel που αναφέρθηκε προηγουμένως, αυτή η δομή έχει κερδίσει παγκόσμια αναγνώριση για τον πρωτοποριακό σχεδιασμό της. Ωστόσο, αυτό που την κάνει να ξεχωρίζει είναι η μοναδική μεμβράνη κατασκευής της, η οποία ενσωματώνει διοξειδίο του τιτανίου. Ο πύργος, που στέκεται σε ύψος 77 μέτρων, αποτελείται από έναν ορθογώνιο κορμό που κοσμείται από μικρότερους κυβοειδείς όγκους που εκτείνονται από την επιφάνειά του. Η μοναδικότητα αυτής της κατασκευής, ωστόσο, δεν προέρχεται από το σχήμα της, αλλά από τις κεραμικές πλάκες που κοσμούν την πρόσοψή της. Οι πλάκες διαθέτουν μια ξεχωριστή πρασινογάλαζη απόχρωση ως αποτέλεσμα της παρουσίας διοξειδίου του τιτανίου, η οποία τους προσδίδει επίσης την αξιοσημείωτη ικανότητα αυτοκαθαρισμού. Η υδρόφιλη επιφάνειά τους είναι επιρρεπής στο να επηρεάζεται από το νερό της βροχής ή την ατμοσφαιρική υγρασία, με αποτέλεσμα να εξαφανίζονται τυχόν σωματίδια σκουριάς ή σκόνης από τον αέρα (Karakaya & Özgunler, 2021).

Επιπλέον, η επιφάνεια του υλικού διαθέτει αξιοσημείωτη αυτοκαθαριστική ιδιότητα, ενώ η παρουσία φωτός και ατμοσφαιρικού οξυγόνου βοηθά στον καθαρισμό του αέρα απομακρύνοντας τις βλαβερές ουσίες. Με βάση επιστημονικές έρευνες, μια επιφάνεια 1000 m² με παρόμοιες φωτοκαταλυτικές ιδιότητες έχει τη δυνατότητα να καθαρίσει τον αέρα που ισοδυναμεί με την επίδραση 70 φυλλοβόλων δέντρων μεσαίου μεγέθους. Ως εκ τούτου, τα

6800 m² της κεραμικής πρόσοψης του Monte Verde ισοδυναμούν με 476 δέντρα παρόμοιου μεγέθους. Είναι σημαντικό να ληφθεί υπόψη ότι η αντικατάσταση των δέντρων μιας πόλης με προσόψεις κτιρίων επικαλυμμένες με διοξείδιο του τιτανίου μπορεί να μην είναι εφικτή λύση. Τα δέντρα προσφέρουν πολυάριθμα οφέλη, συμπεριλαμβανομένης της παραγωγής οξυγόνου, τα οποία δεν μπορούν εύκολα να αναπαραχθούν από τεχνητές κατασκευές (Karakaya & Özgunler, 2021). Σε αστικές περιοχές που αντιμετωπίζουν αυξημένα επίπεδα ατμοσφαιρικής ρύπανσης, η εφαρμογή φωτοκαταλυτικών επιφανειών υπόσχεται να μετριάσει την περαιτέρω ρύπανση. Ωστόσο, είναι ζωτικής σημασίας η εξασφάλιση επαρκούς παροχής φυσικού φωτός, και συγκεκριμένα του κατάλληλου μήκους κύματος, για την αποτελεσματική λειτουργία αυτών των επιφανειών (Yoon, 2018).



Εικόνα 4 Κτίριο Monte Verde

3.4. Νανοτεχνολογία

Ο αρχιτέκτονας, στην επιδίωξη της καινοτομίας, συχνά παρακινείται από μια ακόρεστη επιθυμία να καλλιεργήσει νέες αρχιτεκτονικές δομές και να διατυπώσει πρωτότυπες έννοιες σχετικά με τον χωροταξικό σχεδιασμό. Ο τομέας της αρχιτεκτονικής ιστορίας αποτελείται από διάφορες εξελίξεις που αποτελούν παράδειγμα των πιο πρόσφατων και τολμηρών μορφών κτιρίων και των εξελίξεων στις τεχνικές κατασκευής. Ισχυριζόμαστε ότι τα αναδυόμενα έξυπνα και νανοϋλικά έχουν την ικανότητα να εγκαινιάσουν μια νέα εποχή στο πεδίο του

αρχιτεκτονικού σχεδιασμού και της κατασκευής. Αυτή η αλλαγή παραδείγματος θα δώσει τη δυνατότητα στους αρχιτέκτονες να επιτύχουν έναν αυξημένο βαθμό πολυπλοκότητας, που θα περιλαμβάνει τις μοριακές περιπλοκές στη μικροκλίμακα έως τις ευρύτερες κοινωνικές δομές στο μακροεπίπεδο. Σε παρόμοιο πνεύμα, η επιδίωξη της επιστημονικής προόδου έχει σταθερά χρησιμεύσει ως γόνιμο έδαφος για τους σχεδιαστές που αναζητούν νέες λύσεις στις τεχνικές προκλήσεις τους, ενώ παράλληλα προσπαθούν να αρθρώσουν τις εκκολαπτόμενες σχεδιαστικές έννοιες (Casini, 2014). Στο πεδίο της έρευνας των έξυπνων και νανοϋλικών, οι αρχιτέκτονες είναι υποχρεωμένοι να προβλέψουν τις επερχόμενες προεκτάσεις που αυτά τα καινοτόμα και προηγμένα υλικά θα ασκήσουν στο πεδίο των κατασκευών. Από τα πεδία των νανο- και έξυπνων υλικών αναδύονται νέες έννοιες της υλικότητας που διαθέτουν τη δυνατότητα να επιτρέψουν στους αρχιτέκτονες να αντιμετωπίσουν αποτελεσματικότερα και να αλληλεπιδράσουν με το σύγχρονο περιβάλλον μας. Αυτό το πλαίσιο χαρακτηρίζεται από τη διασύνδεσή του, τους γρήγορους ρυθμούς, την οργανική του φύση, την ευκαμψία, την προσαρμοστικότητα, την παροδικότητα, την εξάρτηση από τα μέσα και την έμφαση στην τεχνολογία. Υπό το πρίσμα του θέματος, μπορεί να υποστηριχθεί ότι τα νανο- και έξυπνα υλικά έχουν τη δυνατότητα να προωθήσουν την αρχιτεκτονική προς την κορυφή ενός συστημικού οργανισμού, όπου ένα δεδομένο υλικό ή κατασκευή είναι ικανό να επιδεικνύει μια δυναμική και αμοιβαία ανταπόκριση στο περιβάλλον του. Επιπλέον, ενισχυμένοι από αυτές τις αναδυόμενες τεχνολογίες υλικών, οι αρχιτέκτονες μπορούν να ανακαλύψουν νέους δρόμους για την αμφισβήτηση των αριστοτελικών εννοιών που αφορούν την οριοθέτηση και την αιτιότητα, την επιτακτική εκφραστικότητα και τις επιταγές της λειτουργικότητας (Kalay, 1999).

Η χρήση βελτιωμένων υλικών στην παραγωγή γνωστών προϊόντων θα οδηγήσει αναπόφευκτα σε αξιοσημείωτη βελτίωση της ασφάλειας, των επιδόσεων και της συνολικής χρησιμότητάς τους. Επιπλέον, θα διαφωτίσει το πιο στοιχειώδες εγχείρημα της μηχανικής. Σύμφωνα με τον Drexler (1987), μια αξιοσημείωτη μεταμόρφωση θα προκύψει ως συνέπεια των νέων τεχνικών παραγωγής, οδηγώντας στην εμφάνιση άγνωστων προϊόντων. Η οραματική προοπτική του Drexler, αν και ισχυρή, μόλις πρόσφατα άρχισε να διαπερνά το πεδίο της αρχιτεκτονικής, δημιουργώντας έτσι μια αίσθηση καθυστερημένου επείγοντος. Υπονοώντας την ενσωμάτωση πολυεπίπεδων δομών και πολύπλευρων διαδικασιών κατασκευής, η οραματική αντίληψη του Drexler αποσκοπούσε στο να ωθήσει τα πεδία της επιστήμης και της κοινωνίας προς αυξημένα επίπεδα αποδοτικότητας, αποδίδοντας έτσι ενισχυμένα αποτελέσματα με ταυτόχρονη μείωση του κόστους. Ευθυγραμμισμένοι με την

οραματική προοπτική του Drexler, οι ερευνητές στον τομέα της επιστήμης των υλικών αναζητούν σήμερα έμπνευση και συγκεντρώνουν εμπειρικά στοιχεία από τις βιοσυναγεργτικές ικανότητες των νυχτερίδων, τα μοναδικά οδοντοστοιχεία που βρίσκονται στο δέρμα του καρχαρία και τις περίπλοκες μελωδίες των τραγουδιών των φαλαινών. Οι προσπάθειες αυτές αποσκοπούν στη διευκόλυνση της ανάπτυξης ευφών υλικών, γνωστών ως Έξυπνα υλικά, τα οποία διαθέτουν ενισχυμένες λειτουργικότητες και δυνατότητες. Ταυτόχρονα, μια σημαντική προσπάθεια έχει αφιερωθεί στην εξομοίωση των μιτοχονδρίων μέσα στα φυτικά κύτταρα, στα θαλάσσια όστρακα, στους ιστούς των αραχνών, στη σύνθεση πρωτεϊνών και σε διάφορες άλλες ζωντανές δομές νανοκλίμακας με χαρακτηριστικά που μοιάζουν με μηχανές, με απώτερο στόχο την κατασκευή νανοϋλικών. Διάφορα στελέχη μοριακών κατασκευαστών ασχολούνται επιμελώς με την επιδίωξη της ανάπτυξης μηχανών σε νανοκλίμακα, που συνήθως αναφέρονται ως νανοσυναρμολογητές, καθώς και περίπλοκων δομών. Οι οντότητες αυτές διαθέτουν την αξιοσημείωτη ικανότητα να κατασκευάζουν, να προγραμματίζουν, να τεκμηριώνουν και να μεταφέρουν πληροφορίες. Επιπλέον, φιλοδοξούν να επιτύχουν το αποκορύφωμα της αυτοαναπαραγωγής, δημιουργώντας έτσι πανομοιότυπες δομές που μπορούν να εκτελούν αποτελεσματικά πανομοιότυπες εργασίες. Η κατασκευή σε αυτά τα διάφορα επίπεδα έχει τη δυνατότητα να αποδώσει υλικά με αυξημένη αναλογία αντοχής προς βάρος, καθώς και ευέλικτα υλικά που μπορούν να εκπληρώσουν πολλαπλές λειτουργίες, μειώνοντας έτσι τις δαπάνες για υλικά και εργασία. Κατά συνέπεια, αυτό έχει τη δυνατότητα να καταστήσει την αρχιτεκτονική πιο οικονομικά βιώσιμη, περιβαλλοντικά βιώσιμη και εύκολα προσβάσιμη. Κατά τη διάρκεια των τελευταίων ετών, παρατηρήθηκε μια αξιοσημείωτη αύξηση στον πολλαπλασιασμό των αρχιτεκτονικών σχεδίων που παρουσιάζουν μια αξιοσημείωτη ικανότητα να λειτουργούν με τρόπο που είναι ιδιαίτερα προσαρμοσμένος στα περιβαλλοντικά ερεθίσματα. Όσον αφορά την απόδοση του κτιρίου, συχνά αναφερόμαστε σε αυτό ως πράσινο σχεδιασμό ή βιώσιμο αρχιτεκτονικό σχεδιασμό (Drexler, 1987).

Οι προαναφερθείσες μεθοδολογίες σχεδιασμού δίνουν προτεραιότητα στην ανάπτυξη βιώσιμων κτιρίων που παρουσιάζουν υψηλές επιδόσεις. Στο πλαίσιο αυτό, η υψηλή απόδοση αναφέρεται στη χρήση των πόρων με τρόπο οικονομικά βιώσιμο, αποδοτικό και περιβαλλοντικά συνειδητό, με στόχο τη δημιουργία βιώσιμων, λειτουργικών και ψυχαγωγικών χώρων (Hawkes et al., 2001). Οι πρόσφατες αρχιτεκτονικές προσπάθειες του Norman Forster επιδεικνύουν μια αξιέπαινη αφοσίωση προς τα προαναφερθέντα πρότυπα, καθώς προσπαθεί επιμελώς να ενσωματώσει αρμονικά την ακεραιότητα του σχεδιασμού με τις ανησυχίες της

βιωσιμότητας και της περιβαλλοντικής απόδοσης στο σύνολο των εξωτερικών χώρων των κτιρίων του (Foster, 2003).

Ως εκ τούτου, αν και η έννοια της "έξυπνάδας των υλικών" εφαρμόζεται επί του παρόντος, όπου υλικά ενσωματωμένα με αισθητήρες χρησιμοποιούνται σε νεόδμητα κτίρια για τη μετάδοση δεδομένων ασφαλείας και θερμοκρασίας, καθώς και για την εκτέλεση διαφόρων περιβαλλοντικών λειτουργιών, η πραγματική χρήση πραγματικά έξυπνων υλικών γίνεται μόλις τώρα εφικτή. Με την αξιοποίηση των δυνατοτήτων των Έξυπνων υλικών, νέες μεθοδολογίες για τη συγχώνευση ποικίλων λειτουργιών σε ένα μοναδικό υλικό θα παρουσιάσουν εναλλακτικές προσεγγίσεις στην κατασκευή, διευκολύνοντας έτσι τη μείωση των δαπανών τόσο για υλικά όσο και για κατασκευές. Ταυτόχρονα, αυτό θα επιτρέψει την ενσωμάτωση της τεχνολογίας αιχμής και των συναφών πλεονεκτημάτων της με ασφαλή τρόπο. Ενδεικτικά, η χρήση νέων δομικών υλικών κατασκευής που διαθέτουν μειωμένο βάρος και ταυτόχρονα αυξημένη αντοχή έχει τη δυνατότητα να μειώσει τη συνολική μάζα των κατασκευαζόμενων οντοτήτων, παρουσιάζοντας έτσι την ευκαιρία για την ανάπτυξη μεγαλύτερων, πιο ουσιαστικών και τελικά πιο ασφαλών κατασκευών. Η πραγματοποίηση των επιθέσεων της 11ης Σεπτεμβρίου, η δομική αστοχία του τερματικού σταθμού Charles de Gaulle, η επαναλαμβανόμενη εμφάνιση φυσικών καταστροφών και οι θεμελιώδεις οικονομικές αρχές που αφορούν τη βελτιστοποίηση της αποδοτικότητας των υλικών έχουν αναγάγει συλλογικά τη σημασία των υψηλών λόγων αντοχής προς βάρος σε ζήτημα εξαιρετικά επείγοντος (Di Sia, 2020).

Με την ενσωμάτωση των ευφυών υλικών σε συνδυασμό με τη νανοτεχνολογία, η επερχόμενη πορεία της επιλογής και κατασκευής υλικών θα εκδηλωθεί ως ένα προσαρμοσμένο και προσαρμόσιμο παράδειγμα. Όπως προαναφέρθηκε, η ενσωμάτωση των νανοϋλικών θα χρησιμεύσει ως ένα νέο και πρωτοποριακό εργαλείο στους τομείς της μηχανικής, των κατασκευών και της αρχιτεκτονικής (Casini, 2016). Οι σύγχρονες εξελίξεις στις τεχνικές κατασκευής έχουν διευκολύνει την παραγωγή υλικών που προσφέρουν την αξιοσημείωτη ικανότητα δυναμικής χειραγώγησης διαφόρων χαρακτηριστικών, συμπεριλαμβανομένων, μεταξύ άλλων, της υφής, του χρώματος και της πίεσης. Τα υλικά που παρουσιάζουν την ικανότητα να υφίστανται αλλαγές στις ιδιότητές τους έχουν τη δυνατότητα να αξιοποιηθούν τόσο για αισθητικές όσο και για λειτουργικές εφαρμογές. Ενδεικτικά, είναι εύλογο να εξεταστεί η αξιοποίηση μιας επένδυσης τοίχου που αποτελείται από ένα εξελεγμένο υλικό το οποίο διαθέτει την ικανότητα να τροποποιεί την υφή της επιφάνειάς του ως απόκριση σε διάφορα ερεθίσματα, όπως μεταβολές στη θερμοκρασία, εφαρμογή ηλεκτρικού ρεύματος και

άλλους σχετικούς παράγοντες ενεργοποίησης. Το φαινόμενο των χαμαιλεοντικών ιδιοτήτων μπορεί επίσης να διερευνηθεί σε λειτουργικούς τομείς, όπως η εξέταση της απόκρισης ενός υλικού σε πίεση. Σε αυτό το σενάριο, ένα υλικό έχει τη δυνατότητα να τροποποιεί την αντοχή ή την ευκαμψία του όταν υποβάλλεται σε εξωτερική επαφή, ανάλογα με το μέγεθος της εφαρμοζόμενης δύναμης. Στην περίπτωση που τα υλικά αυτά είναι ικανά να καλλιεργηθούν επί τόπου μέσω της αυτοσυναρμολόγησης, όπως η ανάπτυξη των φυτών, είναι επιτακτική ανάγκη για τον τομέα της αρχιτεκτονικής να προβλέψει και να αντιμετωπίσει επαρκώς τις πιθανές συνέπειες που απορρέουν από αυτή την καινοτόμο εξέλιξη (Abbas, 2021). Η επιστημονική έρευνα έχει προς το παρόν εντοπίσει τη δυνατότητα των νανοελεγκτών και των συναρμολογητών να επιδίδονται σε αυτοαναπαραγωγή, μιμούμενοι έτσι τις εγγενείς διαδικασίες που παρατηρούνται στη φύση. Καθώς αυτές οι μελλοντικές καινοτομίες μεταβαίνουν από τα όρια του εργαστηρίου στην οικιακή σφαίρα, καθίσταται επιτακτική ανάγκη για τους εργολάβους να αποκτήσουν τις απαραίτητες γνώσεις και δεξιότητες για την καλλιέργεια δομών θεμελίωσης αντί για την απλή κατασκευή τους. Στο προαναφερθέν σενάριο, είναι εύλογο να προγραμματιστούν ελεγκτές ατομικού μεγέθους, με την εξειδικευμένη καθοδήγηση και τις ακριβείς προδιαγραφές ενός αρχιτέκτονα, ώστε να διευκολύνεται η ανάπτυξη τοίχων και θεμελίων. Η διαδικασία αυτή παρουσιάζει ομοιότητα με τον τρόπο με τον οποίο το γενετικό υλικό ενορχηστρώνει την ανάπτυξη των θηλαστικών (Casini, 2016).

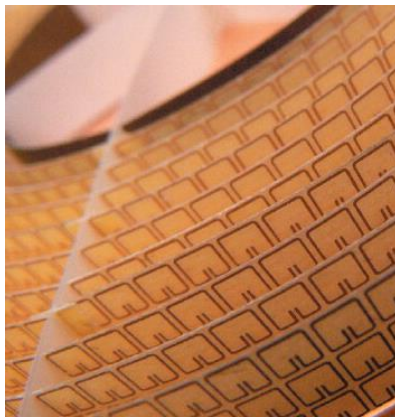
3.4.1. Παραδείγματα νανοτεχνολογίας

- Επίστρωση καθαρισμού: που έχει την ιδιότητα να μην επιτρέπει την εναπόθεση σκόνης στις γυάλινες επιφάνειες, καθιστώντας τον καθαρισμό τους ευκολότερο και ταχύτερο (Paolo Di Sia, 2020).



Εικόνα 5 Επίστρωση καθαρισμού

- **Αυτοεπιδιορθούμενο πολυμερές:** Το πολυμερές διαχέεται στο σημείο όπου εμφανίστηκε η ασυνέχεια (ρωγμή), μέσω ενός συστήματος μικροκαναλιών ενσωματωμένων στο υπόστρωμα (Paolo Di Sia, 2020).
- **Μεταϋλικό:** David Smith στο Πανεπιστήμιο Duke στη Βόρεια Καρολίνα των ΗΠΑ. Η ιδιαιτερότητα αυτού του υλικού είναι ότι παρουσιάζει διαφορετική συμπεριφορά ηλεκτρομαγνητικής διάθλασης από τα συνήθη υλικά που συναντάμε στη φύση (Paolo Di Sia, 2020).



Εικόνα 6 Μετα-υλικό

- **Το πιο μαύρο μαύρο:** Αυτό το υλικό είναι αποτέλεσμα της συνεργασίας του Rensselaer Polytechnic Institute στο Troy της Νέας Υόρκης των ΗΠΑ και του Rice University στο Houston των ΗΠΑ και είναι πιθανώς το πιο σκούρο συνθετικό υλικό στον κόσμο (κέντρο της εικόνας). Το πλεονέκτημα αυτού του υλικού είναι ότι αυξάνει τον συντελεστή απόδοσης των φωτοβολταϊκών πλαισίων καθώς και όλων των συστημάτων απορρόφησης ηλιακής ενέργειας (Paolo Di Sia, 2020).

3.4.2. Εφαρμογές της νανοτεχνολογίας στην αρχιτεκτονική

Η νανοτεχνολογία, ο χειρισμός της ύλης σε κλίμακα μικρότερη από ένα δισεκατομμυριοστό του μέτρου, έχει τεράστιες δυνατότητες να φέρει επανάσταση στο

δομημένο περιβάλλον με τρόπους που σήμερα φαίνονται πέρα από τη φαντασία μας. Η νανοτεχνολογία, που έχει ήδη αφήσει το στίγμα της στην παραγωγή καθημερινών αντικειμένων όπως τα αντηλιακά και τα ρούχα, βρίσκεται στα πρόθυρα του μετασχηματισμού της αρχιτεκτονικής. Στο εγγύς μέλλον, τα υλικά του περιβλήματος των κτιρίων, όπως οι επιστρώσεις, τα πάνελ και η μόνωση, ενδέχεται να υποστούν σημαντικές εξελίξεις, διευρύνοντας τα όρια της ενεργειακής απόδοσης, της αξιοποίησης του φωτός, της ασφάλειας και της ευφυΐας.

Αυτές οι αρχικές εξορμήσεις στη νανοτεχνολογία θα μπορούσαν να αλλάξουν ριζικά τη φύση των κτιριακών περιβλημάτων, αναδιαμορφώνοντας τον τρόπο με τον οποίο οι κατασκευές μας αλληλεπιδρούν με το περιβάλλον και τους χρήστες. Κοιτάζοντας μπροστά, η ανάπτυξη επαναστατικών υλικών όπως οι νανοσωλήνες άνθρακα υπόσχεται μια αλλαγή παραδείγματος στο σχεδιασμό και την απόδοση των κτιρίων. Η διάκριση μεταξύ δομικών στοιχείων και εξωτερικών επιφανειών μπορεί να εξαφανιστεί, καθώς εμφανίζονται υπερελαφριά, εξαιρετικά ισχυρά υλικά, ικανά να χρησιμεύσουν τόσο ως δομικός σκελετός όσο και ως περιβάλλουσα επιδερμίδα των κτιρίων (Cheirchanteri, 2023).

Ένα παράδειγμα αυτής της φουτουριστικής προσέγγισης είναι ο Πύργος Carbon Tower, ένα οραματικό δημιούργημα του Peter Testa. Αυτή η 40όροφη δομή μικτής χρήσης πρωτοπορεί στην ενσωμάτωση πέντε καινοτόμων συστημάτων, με υλικό κατασκευής τις ίνες άνθρακα. Ο Πύργος Carbon στοχεύει όχι μόνο στην αυξημένη ευελιξία σε σύγκριση με τα άκαμπτα πλαίσια, αλλά μπορεί επίσης να υπερηφανεύεται για την ενισχυμένη αισθητική, την περιβαλλοντική βιωσιμότητα και την οικονομική αποδοτικότητα. Αποτελούμενος από 40 κλώνους ινών άνθρακα τοποθετημένους σε ελικοειδές ή διασταυρούμενο μοτίβο, το καθένα με πλάτος περίπου 1 ίντσα και μήκος σχεδόν 650 πόδια, ο πύργος αντιπροσωπεύει μια κορυφαία εξέλιξη της τρέχουσας έρευνας στον τομέα της μηχανικής και της επιστήμης των υλικών με τη βοήθεια υπολογιστών. Ενώ η πραγματική κατασκευή του Πύργου άνθρακα παραμένει αβέβαιη, η σύλληψή του σηματοδοτεί ένα σημαντικό βήμα στην αρχιτεκτονική του 21ου αιώνα, καταδεικνύοντας τη δυναμική συγχώνευση προηγμένων υλικών, μηχανικής και αρχών σχεδιασμού (Hawthorne, 2003).



Εικόνα 7 Carbon Tower - μακέτα

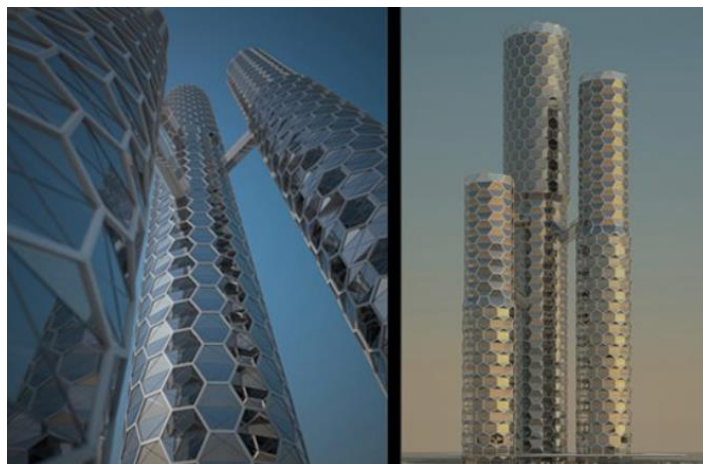
Ο αρχιτέκτονας Dennis Dollens σχεδίασε το E-Tree, έναν πρωτοποριακό πύργο αυτοσκίασης για το Λος Άντζελες, ο οποίος είναι πρωτόπορος στην ψηφιακή βοτανική αρχιτεκτονική. Αυτή η καινοτόμος προσέγγιση αντλεί έμπνευση από την ανάπτυξη δομών φυτών σε τρισδιάστατα μοντέλα (Altun & Örgülü, 2014). Επί του παρόντος σε φάση έρευνας, το έργο διαθέτει έναν κεντρικό σκελετό που μοιάζει με κορμό και χρησιμεύει ως σπονδυλική στήλη του κτιρίου. Ο κορμός περιβάλλεται από μια πρόσοψη ενός κελύφους, η οποία όχι μόνο φέρει τα φορτία αλλά και υποστηρίζει ολόκληρη τη δομή των 15 ορόφων. Το εξωτερικό κέλυφος αποτελείται από διασυνδεδεμένα στοιχεία που βρίσκονται υπό διερεύνηση, σχεδιασμένα να φέρουν δομικά φορτία, ενώ παράλληλα εκπληρώνουν πρόσθετους ρόλους, όπως η διήθηση, ο εξαερισμός, η παρακολούθηση μέσω ενσωματωμένων αισθητήρων, και να χρησιμεύουν ως χώρος για την ανάπτυξη φυτών (Dollens, 2014).



Εικόνα 8 E-Tree LA Tower

Το Nano Vent Skin του Agustin Otegu είναι μια καινοτόμος αρχιτεκτονική ιδέα που χρησιμοποιεί ανεμογεννήτριες ναοκλίμακας. Αυτός ο μοναδικός σχεδιασμός τοίχου ενσωματώνει διάφορους μικροοργανισμούς που αξιοποιούν και μετατρέπουν σε συνεργασία τη φυσική περιβαλλοντική ενέργεια. Αυτοί οι βιομηχανοποιημένοι οργανισμοί, που δεν έχουν πειραχθεί γενετικά, σχηματίζουν μια συνεκτική αποικία όπου κάθε μέλος επιτελεί συγκεκριμένο ρόλο σε μια συμβιωτική διαδικασία παραγωγής ενέργειας. Το εξωτερικό δέρμα της δομής συλλαμβάνει το ηλιακό φως χρησιμοποιώντας ένα οργανικό φωτοβολταϊκό στρώμα, διοχετεύοντάς το σε ναοΐνες μέσα σε ναοσύρματα, κατευθύνοντας τελικά την ενέργεια σε μονάδες αποθήκευσης στο τέλος κάθε πάνελ. Ταυτόχρονα, κάθε τουρμπίνα στο πάνελ διευκολύνει την παραγωγή ενέργειας μέσω χημικών αντιδράσεων και χρησιμεύει ως φίλτρο, απορροφώντας CO₂ από τον περιβάλλοντα αέρα όταν εκτίθεται στον άνεμο. Το σύστημα, που μοιάζει με το ανθρώπινο δέρμα, παρουσιάζει μια αρμονική ενσωμάτωση των φυσικών διεργασιών (Lloyd, 2008).

Εν τω μεταξύ, η πρόταση της Allard Architecture για τους Nano Towers, που οραματίζεται ως η νέα έδρα του ερευνητικού πάρκου DuBiotech στο Ντουμπάι, είναι μια ανάπτυξη μικτής χρήσης που εκτείνεται σε 160.000 τετραγωνικά μέτρα. Ο πύργος ύψους 262 μέτρων φιλοξενεί χώρους γραφείων, εργαστήρια, ένα ξενοδοχείο και κατοικίες, μαζί με τις σχετικές υποστηρικτικές κατασκευές. Εμπνευσμένος από σωλήνες άνθρακα σε ναοκλίμακα, ο σχεδιασμός του πύργου ενσωματώνει διακλαδώσεις όπου η γεωμετρία μεταπίπτει απρόσκοπτα από την κατακόρυφη στην οριζόντια, δημιουργώντας πολυάριθμες ευκαιρίες για την οριοθέτηση εσωτερικών χώρων κατά μήκος των γραμμών των πεσσών (Lloyd, 2008).



Εικόνα 9 Οι Nano Towers προτάθηκαν ως η νέα έδρα του ερευνητικού πάρκου DuBiotech στο Ντουμπάι από την Allard Architecture.

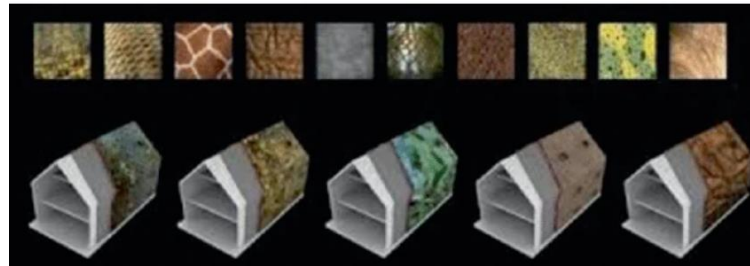
Η Jubilee Church στη Ρώμη, σχεδιασμένη από την Richard Meier & Partners Architects LLP, παρουσιάζει ένα καινοτόμο σύστημα αυτοκαθαριζόμενης πρόσοψης. Αποτελούμενη από 256 προκατασκευασμένα και προεντεταμένα στοιχεία σκυροδέματος που σχηματίζουν οκτώ καμπυλωτά λευκά κελύφη, καθένα από τα οποία υψώνεται σε ύψος 85 ποδιών, η εκκλησία αποτελεί απόδειξη αρχιτεκτονικής εφευρετικότητας. Κατασκευασμένο από ένα μίγμα σκυροδέματος υψηλής απόδοσης που περιλαμβάνει λευκό τσιμέντο Πόρτλαντ, μετακαολίνη και λευκά αδρανή από μάρμαρο Carrara, το αποτέλεσμα είναι ένα αστραφτερό, άψογο λευκό φινίρισμα από σκυρόδεμα. Βρίσκεται σε μια βιομηχανική περιοχή με αυξημένα επίπεδα ρύπανσης, η πρόκληση της διατήρησης της καθαριότητας του κτιρίου αντιμετωπίζεται μέσω μιας αυτοκαθαριζόμενης επίστρωσης με υλικά νανοτεχνολογίας. Αυτή η επίστρωση απορροφά τους ρύπους από την ατμόσφαιρα, διασπώντας τους σε αβλαβή στοιχεία, κερδίζοντας στην εκκλησία το προσωνύμιο "Η εκκλησία της Ρώμης που τρώει το σύννεφο" (Norton, 2011).



Εικόνα 10 Αυτοκαθαριζόμενα συστήματα πρόσοψης στην Jubilee Church στη Ρώμη

Ερευνητές από το Ινστιτούτο Beckman του Πανεπιστημίου του Ιλινόις, μεταξύ των οποίων οι Francesco Gatti, Francesco Lipari, Aurgho Jyoti και Summer Nie, παρουσίασαν ένα πρωτοποριακό σύστημα NanoSkin ως ένα νέο υλικό επένδυσης κτιρίων, που χρησιμοποιεί νανοτεχνολογία. Αυτό το καινοτόμο υλικό επένδυσης-δερμίδας προσδίδει στη δομή νοημοσύνη μέσω αυτόματων μηχανισμών προσαρμογής σε διάφορα σενάρια (Hawthorne, 2003). Το δέρμα ενσωματώνει συστήματα μόνωσης ζωτικής σημασίας για τη λειτουργικότητά του. Το καλοκαίρι, το δέρμα διευκολύνει την απαγωγή της θερμότητας μέσω μιας διαδικασίας εφίδρωσης, δημιουργώντας ένα αποτέλεσμα ψύξης στο κτίριο. Αντίθετα, κατά τη διάρκεια του χειμώνα, μικροσκοπικές δομές που μοιάζουν με τρίχες και δημιουργούνται στο δέρμα εξασφαλίζουν τη συγκράτηση της θερμότητας, αποτρέποντας την απώλεια θερμότητας μέσω

της μόνωσης. Επιπλέον, η ικανότητα του δέρματος να αλλάζει χρώμα παίζει καθοριστικό ρόλο στην ενίσχυση των συστημάτων θερμομόνωσης (Cheirchanteri, 2023).



Εικόνα 11 NanoSkin System ένα σύστημα επιδερμίδας ως υλικό επένδυσης για ένα κτίριο με χρήση νανοτεχνολογίας.

Με την ανάπτυξη μιας φυσικής και ζωντανής επιδερμίδας που δημιουργήθηκε με τη μελέτη του DNA διαφόρων τύπων οργανισμών και ζώων, οι σχεδιαστές στοχεύουν όχι μόνο σε μια "στέγη" ή "πρόσοψη" προστασίας, αλλά επίσης αναμένουν ότι θα αντιδράσει και θα αλλάξει ανάλογα με το κλίμα στις διάφορες εποχές του έτους (Norton, 2011).

3.5. Προβληματισμοί σχετικά με την εφαρμογή των έξυπνων υλικών στην αρχιτεκτονική

Το θέμα των έξυπνων υλικών έχει κερδίσει σημαντική προσοχή τα τελευταία χρόνια και αποκτά ολοένα και μεγαλύτερη σημασία. Το πεδίο εφαρμογής της μελέτης είναι εκτεταμένο, γεγονός που καθιστά αναγκαία μια ολοκληρωμένη ανάλυση κάθε υποκατηγορίας ξεχωριστά, η οποία θα απαιτούσε σημαντικό χώρο, ενδεχομένως μεγαλύτερο ακόμη και από την ίδια την όλη μελέτη. Ο ρυθμός της τεχνολογικής προόδου αυξάνεται ραγδαία, εγκαινιάζοντας νέες σφαίρες δυνατοτήτων και μετασχηματίζοντας τις αλληλεπιδράσεις μας με αυτήν. Δεν είναι πλέον συγκρίσιμη, αλλά διαμορφώνεται πλέον μια σχέση αλληλεπίδρασης, παρόμοια με τον τρόπο με τον οποίο δύο βιολογικοί οργανισμοί αλλάζουν και εξελίσσονται ανταποκρινόμενοι ο ένας στον άλλον. Τα ευφυή συστήματα είναι το προϊόν εκτεταμένης έρευνας και των αφοσιωμένων προσπαθειών των επιστημόνων που προσπαθούν να αναπαράγουν τις συμπεριφορές και την προσαρμοστικότητα των φυσικών οργανισμών ως απάντηση σε ποικίλες συνθήκες. Αυτός ο βαθύς μετασχηματισμός των υλικών θα έχει

αναμφίβολα βαθύ αντίκτυπο στην αρχιτεκτονική, απαιτώντας μια αλλαγή νοοτροπίας ώστε να αγκαλιάσουμε ενεργά αυτή τη διαδικασία εξέλιξης (Yates, 2012).

Ένα κτίριο θα πρέπει να θεωρείται ως μια δυναμική δομή που εξελίσσεται σε πραγματικό χρόνο. Μετά την υλοποίησή του, ο σχεδιασμός θα υφίσταται συνεχή εξέλιξη, με τον χρήστη να διαδραματίζει κεντρικό ρόλο στη διαμόρφωση του χώρου. Μέσω της αλληλεπίδρασής τους, ο χώρος θα προσαρμόζεται ώστε να ανταποκρίνεται στις ανάγκες και τις επιθυμίες του χρήστη (Sobczyk et al., 2021).

Τα έξυπνα υλικά είναι υλικά ή προϊόντα που μπορούν να προσαρμόζουν τις ιδιότητές τους σε απόκριση στις αλλαγές του περιβάλλοντός τους. Με απλά λόγια, έχουν την ικανότητα να παρατηρούν αυτές τις μεταβολές και να ανταποκρίνονται με ακριβή και σκόπιμο τρόπο. Αυτή η ικανότητα έχει κεντρίσει την περιέργεια των επιστημόνων και διαφόρων βιομηχανιών, δελεάζοντάς τους να την ενσωματώσουν σε ένα ευρύ φάσμα προϊόντων και να τα ενισχύσουν με δυναμικές ιδιότητες ή μορφές. Τα ολοκληρωμένα συστήματα που βασίζονται σε έξυπνα υλικά έχουν μεγάλη σημασία. Τα συστήματα αυτά διαθέτουν την αξιοσημείωτη ικανότητα να ανταποκρίνονται σε διάφορες περιβαλλοντικές αλλαγές και να ενσωματώνονται απρόσκοπτα σε άλλες δομές, επιτρέποντάς τους να ελέγχουν αποτελεσματικά τη συμπεριφορά τους. Ο τομέας της αυτοματοποίησης, μαζί με άλλες βιομηχανίες που εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από αυτοματοποιημένα συστήματα, όπως η αεροναυπηγική, η αεροδιαστημική και η ρομποτική, αρχίζουν να αναγνωρίζουν τις τεράστιες δυνατότητες που μπορούν να προσφέρουν αυτά τα υλικά στις δραστηριότητές τους (Addington & Schodek, 2012).

Μέσα στο σημερινό τοπίο, η ηλεκτρονική είναι έτοιμη να καθιερωθεί ως η αιχμή της επιστημονικής προόδου. Η συσχέτιση μεταξύ της εισροής ενέργειας και του έργου που παράγεται από ένα έξυπνο υλικό είναι αυτή που οδηγεί στην εξέχουσα θέση του στον συγκεκριμένο τομέα. Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα των έξυπνων υλικών, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, είναι η ικανότητά τους να ελαχιστοποιούν το μέγεθος της συσκευής και να μειώνουν τον αριθμό των ενεργών μερών. Οι μικροηλεκτρονικές έξυπνες συσκευές έχουν την αξιοσημείωτη ικανότητα να ενσωματώνονται απρόσκοπτα σε ένα ευρύ φάσμα αντικειμένων ή δομών. Λόγω αυτής της λογικής, η ηλεκτρονική χρησιμεύει ως το μέσο για την επέλευση της εποχής των έξυπνων υλικών. Ή τουλάχιστον αυτό έχει αρχίσει να γίνεται αντιληπτό. Παρ' όλα αυτά, λαμβάνοντας υπόψη τα προαναφερθέντα σημεία, είναι σημαντικό να αναγνωρίσουμε ότι τα έξυπνα υλικά δεν πρέπει να εκλαμβάνονται ως απλή συνέχεια των σημερινών αντικειμένων και συστημάτων. Σε αντίθεση με τη δημοφιλή πεποίθηση, τα άτομα

θα πρέπει να εξετάσουν το ενδεχόμενο να προσαρμόσουν τη νοοτροπία τους ώστε να ευθυγραμμιστούν με τις μοναδικές τους ικανότητες (Minoli et al., 2017).

Τα έξυπνα υλικά έχουν τη δυνατότητα να καθιερωθούν εμπορικά, ιδίως από θεωρητική άποψη. Ωστόσο, αναμφίβολα θα πρέπει να αντιμετωπιστούν πολυάριθμες προκλήσεις προκειμένου να επιτευχθεί αυτός ο στόχος. Μια σημαντική πρόκληση προκύπτει από το υψηλότερο κόστος αυτών των υλικών σε σύγκριση με τα συμβατικά, το οποίο καθιστά την ευρεία υιοθέτησή τους οικονομικά ανέφικτη. Η αντικατάσταση του μεταλλικού σκελετού ενός κτιρίου με κράματα μνήμης σχήματος θέτει σημαντικές προκλήσεις. Οι δομικοί περιορισμοί και το υπέρογκο κόστος κατασκευής είναι μερικά μόνο από τα εμπόδια που θα πρέπει να ξεπεραστούν (Sobczyk et al., 2021). Η ενσωμάτωση έξυπνων υλικών σε προϊόντα μικρότερης κλίμακας μπορεί να καταστήσει την κατασκευή τους οικονομικά ασύμφορη και συχνά οδηγεί σε σημαντική μείωση των επιδόσεων σε σύγκριση με τα συμβατικά υλικά. Μια ενδεικτική περίπτωση αφορά εύκαμπτα ηλεκτρονικά συστήματα που, στην επιδίωξη της μείωσης του κόστους, υφίστανται σημαντική μείωση των επιδόσεων κατά την κατασκευή. Για να επιτευχθεί ανώτερη απόδοση, κάθε μονάδα πρέπει να κατασκευάζεται ξεχωριστά, με αποτέλεσμα την επακόλουθη αύξηση του κόστους. Είναι ευρέως αποδεκτό ότι πολυάριθμα ερευνητικά κέντρα διερευνούν επιμελώς μεθόδους για την αντιμετώπιση αυτών των προκλήσεων, και είναι πολύ πιθανό να τα καταφέρουν εν ευθέτω χρόνω.

Επιπλέον, αξίζει να σημειωθεί η εξαιρετική ανθεκτικότητα αυτής της νέας γενιάς υλικών σε σύγκριση με τα συμβατικά υλικά. Αυτό δεν αποτελεί πραγματική πρόκληση. Σε αντίθεση με τη δημοφιλή πεποίθηση, είναι στην πραγματικότητα ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματά τους. Στον επιχειρηματικό κόσμο, ωστόσο, υπάρχουν ορισμένες αξιοσημείωτες διακρίσεις. Η φιλοσοφία κατασκευής προϊόντων, όπως καθιερώθηκε πριν από μισό αιώνα, έδινε έμφαση στη δημιουργία προϊόντων και συσκευών μεγάλης διάρκειας που θα εξυπηρετούσαν τον χρήστη για μεγάλο χρονικό διάστημα. Αυτή η φιλοσοφία δεν είναι πλέον σχετική στους ακαδημαϊκούς κύκλους. Το φαινόμενο της υπερπαραγωγής επιβάλλει τη διαρκή αντικατάσταση διαφόρων αγαθών προκειμένου να αποκτηθούν νέα (Casini, 2016). Η μείωση της ποιότητας των διαφόρων προϊόντων αποτελεί σημαντική συνέπεια αυτής της κατάστασης. Η σημερινή επικρατούσα κατάσταση χαρακτηρίζεται από τον συνδυασμό του υψηλού κόστους των ανταλλακτικών και της υποβαθμισμένης ποιότητας κατασκευής τους. Ωστόσο, τα ευφυή υλικά είναι έτοιμα να διαταράξουν αυτό το μακροχρόνιο παράδειγμα. Η αξιοσημείωτη ανθεκτικότητα αυτών των υλικών είναι απaráμιλλη, εξασφαλίζοντας ότι τα αντικείμενα θα αντέξουν για μια ζωή. Η παραγωγική διαδικασία υιοθετεί πλέον μια πιο επιχειρηματικά

προσανατολισμένη νοοτροπία που είχε παραμεληθεί για αρκετό καιρό. Ωστόσο, θα ήταν εσφαλμένο να απορρίψουμε την ικανότητά τους να ευδοκιμήσουν στον επιχειρηματικό τομέα. Είναι πολύ πιθανό ότι κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας θα καταβληθούν προσπάθειες για την αποκατάσταση της υφιστάμενης συσχέτισης μεταξύ ποιότητας και προϊόντος, ενώ είναι πιθανό να βελτιωθεί και η σχέση κόστους-απόδοσης. Σε ένα εναλλακτικό περιβάλλον, κάτω από ένα διακριτό οικονομικό πλαίσιο, μπορεί να μην υπάρχει κίνητρο για συμβιβασμό της ποιότητας των προϊόντων προς όφελος της ενίσχυσης των εμπορικών συναλλαγών (Sobczyk et al., 2021).

Αναμφίβολα, η σημασία της πληροφορίας στον σημερινό κόσμο δεν μπορεί να υπερεκτιμηθεί, καθώς έχει τη δυνατότητα να διαμορφώσει το μέλλον της ανθρωπότητας με βαθύτατους τρόπους. Σε αυτή την ψηφιακή εποχή, η απρόσκοπτη ανταλλαγή πληροφοριών μέσω του Διαδικτύου έχει ενσωματωθεί απρόσκοπτα στην καθημερινότητά μας. Ίσως ακόμη και ο πλούτος μπορεί να γίνει κατανοητός με τέτοιους όρους. Σύμφωνα με τον Di Salvo (2016), ο τριτογενής τομέας της παραγωγής θα διαδραματίσει πλέον καθοριστικό ρόλο στη διαμόρφωση της ανθρώπινης ζωής.

Όσον αφορά την ανθρώπινη ετοιμότητα, αυτό είναι ένα εντελώς ξεχωριστό ζήτημα. Βρισκόμαστε επί του παρόντος στη διαδικασία αναζήτησης πιθανών αλλαγών. Είναι προφανές ότι ένας αυξανόμενος αριθμός ατόμων αποκτά επάρκεια στις σύγχρονες τεχνολογίες κάθε μέρα που περνάει. Ενώ η παλαιότερη γενιά μπορεί να δυσκολεύεται να συμβαδίσει με τις ραγδαίες εξελίξεις στην τεχνολογία και τις πληροφορίες, τα νέα παιδιά διαθέτουν αξιοσημείωτες ικανότητες προσαρμογής. Εάν η εποχή των έξυπνων υλικών ενσωματωθεί στα ηλεκτρονικά συστήματα, ο κόσμος βρίσκεται στα πρόθυρα της υιοθέτησης αυτής της πρωτοποριακής προόδου. Σύμφωνα με τον Di Salvo (2016), απαιτείται ένα ορισμένο επίπεδο τεχνογνωσίας για την πλήρη κατανόηση της λειτουργίας τους. Παρ' όλα αυτά, όταν πρόκειται για την πλήρη αφομοίωσή τους στον ιστό της ανθρώπινης ύπαρξης, προκύπτουν πολλές προκλήσεις. Εξετάζοντας την περίπτωση του "έξυπνου" σπιτιού του Ken Sakamura, γίνεται φανερό ότι οι ένοικοι αποφάσισαν τελικά να το εγκαταλείψουν λόγω του ότι το αντιλήφθηκαν ως ένα υπερβολικά μεγάλο στοιχειωμένο σπίτι. Το παράδειγμα αυτό ρίχνει φως στις πιθανές προκλήσεις που μπορεί να προκύψουν κατά την προσπάθεια εφαρμογής έξυπνων υλικών (Alobeidi & Alsarraf, 2019).

Η αποδοχή των έξυπνων υλικών από τα άτομα είναι στενά συνδεδεμένη με το πόσο ενσωματώνονται στην καθημερινή ρουτίνα τους. Στην πιο ακραία εκδήλωσή της, όταν τα

έξυπνα υλικά διαπερνούν κάθε πτυχή της ζωής μας, η ανθρωπότητα παραιτείται από την εξουσία της επί των δικών της ενεργειών. Περιβάλλεται από μια πληθώρα υλικών αγαθών που προβλέπουν τις ανάγκες του και ανταποκρίνονται ανάλογα, ακόμη και πριν προλάβει να τις αναγνωρίσει. Ταυτόχρονα, τα αποτελέσματα των ποικίλων ενεργειών του παραμένουν συχνά κρυφά, όπως όταν τα υλικά επισκευάζονται ή καθαρίζονται από μόνα τους ως εκ θαύματος, οδηγώντας σε μια απομάκρυνση από το φυσικό πεδίο και μια απώλεια της σύνδεσης με αυτό. Το άτομο αποσυνδέεται εντελώς από το φυσικό του περιβάλλον, καθώς οι δικλείδες ασφαλείας που η ανθρωπότητα ανέπτυξε με κόπο και με το πέρασμα του χρόνου για να προστατευτεί από τις δυνάμεις της φύσης εξαλείφονται εντελώς. Το ανθρώπινο περιβάλλον έχει υποστεί μια βαθιά μεταμόρφωση, μοιάζοντας με ένα διαφανές κλουβί όπου τα άτομα βρίσκονται απογυμνωμένα από την αυτονομία τους, καθώς οι επιλογές τους υπαγορεύονται πλέον από τα υλικά και τα αντικείμενα που τα περιβάλλουν (Addington & Schodek, 2012).

Συμπέρασμα

Τα ευφυή υλικά έχουν εμφανιστεί στον κόσμο των αρχιτεκτόνων, ανοίγοντας νέους δρόμους πνευματικής εξερεύνησης. Διαθέτουν την αξιοσημείωτη ικανότητα να φέρνουν σε επαφή δύο προηγουμένως ξεχωριστά πεδία - το φυσικό και το ψηφιακό - ενώ παράλληλα έχουν τη δύναμη να διαμορφώνουν μια νέα και μετασχηματιστική ύπαρξη. Η αρχιτεκτονική, που συμβαδίζει διαρκώς με την πρόοδο του πολιτισμού και τις εξελίξεις, πρέπει να αγκαλιάσει αυτό το σημαντικό άλμα προς τα εμπρός. Ήρθε η ώρα να αφήσουμε πίσω μας τον δισταγμό και τον φόβο να κάνουμε λάθη ή να επιλέξουμε τον λάθος δρόμο. Αντ' αυτού, ας αντιμετωπίσουμε με τόλμη τη νέα εποχή των ευφυών υλικών και ας εξερευνήσουμε τις ατελείωτες δυνατότητες που προκύπτουν από τη γνωστική και εμπειρική τους κατάκτηση.

Οι συνθέσεις έξυπνων υλικών προσφέρουν μια ποικιλία από συναρπαστικά αισθητικά αποτελέσματα, δημιουργώντας ένα ελκυστικό περιβάλλον που προάγει την έμπνευση για αρχιτέκτονες, σχεδιαστές και καλλιτέχνες. Διαθέτουν την αξιοσημείωτη ικανότητα να μεταβάλλουν το χρώμα ή την εμφάνισή τους, να εκπέμπουν ήχο και άρωμα, να παρουσιάζουν περίπλοκα μοτίβα, να μεταμορφώνουν το σχήμα τους, ακόμη και να δημιουργούν κίνηση ή να προβάλλουν διαδραστικές εικόνες. Τα ευφυή υλικά διαθέτουν ένα μοναδικό σύνολο αισθητικών χαρακτηριστικών που κεντρίζουν το ενδιαφέρον των χρηστών των κτιρίων και των ατόμων που συχνάζουν σε δημόσιους χώρους. Τα υλικά έχουν καταστεί σημαντική πηγή καινοτομίας στον σημερινό κόσμο. Δεν περιορίζονται πλέον μόνο σε πρακτικούς σκοπούς, αλλά συμβάλλουν πλέον και στην ενίσχυση της αισθητικής. Τα ευφυή υλικά προσφέρουν περισσότερα από απλά πρακτικά πλεονεκτήματα. Εισάγουν μια πληθώρα συναρπαστικών αισθητικών δυνατοτήτων, αποτελώντας πηγή έμπνευσης για αρχιτέκτονες, σχεδιαστές και καλλιτέχνες.

Μέσα από σχολαστικά και σκόπιμα μέτρα, χωρίς να παραβλέπονται οι καθιερωμένες αρχές και παραδόσεις, η στρατηγική αξιοποίηση των ευφυών υλικών έχει τη δυνατότητα να εγκαινιάσει μια νέα εποχή του σχεδιασμού και να επαναπροσδιορίσει την αντίληψή μας για τον χώρο. Με την πάροδο του χρόνου, ο πραγματικός σκοπός τους μέσα στις κατασκευές μας και στην καθημερινή μας ζωή θα γίνει σαφέστερος.

Βιβλιογραφία

Ξενόγλωσση

- Abbas, M. (2021). Smart materials for changing the electrical properties of nanostructures. *Composites and Advanced Materials*, 30, p.263498332110164. doi:<https://doi.org/10.1177/26349833211016479>.
- Addington Schodek, M. D., 2005. *Smart Materials and New Technologies for architecture*. Oxford: Architectural Press
- Norton, S. (2011, February). Nanotechnology in Architecture. Retrieved from Caddetails: <http://www.caddetails.com/articles/February2011.htm>.
- Lloyd, A. (2008, May). Nano Vent Skin of Micro-Wind Turbines. Retrieved from TreeHugger: <http://www.treehugger.com/renewable-energy/nano-vent-skin-of-micro-windturbines.html>
- Dollens, D., (2014). Digital Botanic Architecture 2 - eBook. Retrieved from Desic.org: <http://www.exodesic.org/TrussImages/DBA2-150.pdf>
- Altun, D. A., and Örgülü, B. (2014). Towards a different architecture in cooperation with nanotechnology and genetic science: New approaches for the present and the future. *Architecture Research*, 4(1B), 1-12.
- Hawthorne, C. (2003, February). MetropolisMag. Retrieved from MetropolisMag: <http://www.metropolismag.com/February-2003/Carbon-Fiber-Future/>
- Addington, M. and Schodek, D.L. (2012). *Smart Materials and Technologies in Architecture*. *Routledge eBooks*. doi:<https://doi.org/10.4324/9780080480954>.
- Addington, M. and Schodek, D.L. (2012). *Smart Materials and Technologies in Architecture*. *Routledge eBooks*. doi:<https://doi.org/10.4324/9780080480954>.
- Addington, M., and Schodek, D. (2005). Smart materials and technologies. *Architecture and Urbanism*, 5(3), 8-13.
- Allen, E. and Iano, J. (2019). *Fundamentals of Building Construction: Materials and Methods*. [online] *Google Books*. John Wiley & Sons. Available at: <https://www.google.com/books?hl=el&lr=&id=2HGqDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR1>

[1&dq=The+relationship+between+architecture+and+building+materials&ots=oq-Xe_soi_&sig=YafX4r6CoGkfNcuJt7XccjtHVCA.](https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.028)

- Al-Obaidi, K.M., Azzam Ismail, M., Hussein, H. and Abdul Rahman, A.M. (2017). Biomimetic building skins: An adaptive approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 79, pp.1472–1491. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.028>.
- Alobeidi, M. M., & Alsarraf, A. A. (2019). The Impact of the use of Smart Materials on the Facades of Contemporary Buildings. *International Journal of Engineering & Technology*, 8(1.5), 308-315.
- Arun Kumar Parashar, Kumar, A., Jitendra Gudhainiya, Sharma, N. and Sharma, P. (2023). Approach to advanced materials in architecture and civil engineering: Review. *Nucleation and Atmospheric Aerosols*. doi:<https://doi.org/10.1063/5.0154025>.
- Badarnah, L. and Kadri, U. (2014). A methodology for the generation of biomimetic design concepts. *Architectural Science Review*, 58(2), pp.120–133. doi:<https://doi.org/10.1080/00038628.2014.922458>.
- Bahl, S., Nagar, H., Singh, I. and Sehgal, S. (2020). Smart materials types, properties and applications: A review. *Materials Today: Proceedings*, [online] 28, pp.1302–1306. doi:<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.04.505>.
- Balali, A. and Valipour, A. (2020). Identification and selection of building façade's smart materials according to sustainable development goals. *Sustainable Materials and Technologies*, p.e00213. doi:<https://doi.org/10.1016/j.susmat.2020.e00213>.
- Bechthold, M. and Weaver, J.C. (2017). Materials science and architecture. *Nature Reviews Materials*, 2(12). doi:<https://doi.org/10.1038/natrevmats.2017.82>.
- Cabral, I., Silva, C., Worbin, L., & Souto, A. P. (2017, October). Exploring dynamic lighting, colour and form with smart textiles. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 254, No. 7, p. 072005). IOP Publishing.
- Care, A., Bergquist, P.L. and Sunna, A. (2015). Solid-binding peptides: smart tools for nanobiotechnology. *Trends in Biotechnology*, 33(5), pp.259–268. doi:<https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2015.02.005>.

- Casini, M. (2014, June). Smart materials and nanotechnology for energy retrofit of historic buildings. In International Conference on Advances in Civil, Structural and Construction Engineering, Rome (pp. 7-8).
- Casini, M. (2016). *Smart Buildings: Advanced Materials and Nanotechnology to Improve Energy-Efficiency and Environmental Performance*. [online] Google Books. Woodhead Publishing. Available at: https://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=KId4CgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=smart+materials+in+the+field+of+aesthetics+building+&ots=r0R6qD0_Ro&sig=r5TuL1YW9YmAs_BHnW5BGXsnk-Y.
- Casini, M. (2016). *Smart Buildings: Advanced Materials and Nanotechnology to Improve Energy-Efficiency and Environmental Performance*. [online] Google Books. Woodhead Publishing. Available at: https://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=KId4CgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=importance+Smart+Materials+Nanotechnology&ots=r0R3rz0_Ko&sig=09ur7D9j9Hfy8i5uC_B5I2MVWvs.
- Cecilia Russo, A. and Ferrara, M. (2017). Smart Solutions, ‘Smart Aesthetics’?. *The Design Journal*, 20(sup1), pp.S342–S353. doi:<https://doi.org/10.1080/14606925.2017.1352872>.
- Cheirchanteri, G. (2023), “Nanotechnology: The Challenge in Innovative Architectural Design Using Nanomaterials”, In: Barros, J.A.O., Kaklauskas, G., Zavadskas, E.K. (eds) *Modern Building Materials, Structures and Techniques. MBMST 2023. Lecture Notes in Civil Engineering*, vol 392. Springer, Cham.https://doi.org/10.1007/978-3-031-44603-0_33
- De, R., Sharma, S., Sengupta, S. and Santanu Kumar Pal (2022). Discs to a ‘Bright’ Future: Exploring Discotic Liquid Crystals in Organic Light Emitting Diodes in the Era of New-Age Smart Materials. *The Chemical Record*, 22(8). doi:<https://doi.org/10.1002/tcr.202200056>.
- Di Salvo, S. (2016). Smart Materials in Architecture. *International Journal of Engineering Research in Africa*, 23, pp.72–79. doi:<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/jera.23.72>.
- Drexler, E. (1987). *Engines of creation: the coming era of nanotechnology*. Anchor.
- Drossel, W.-G. ., Meinel, F., Bucht, A. and Kunze, H. (2018). Smart materials for smart production – a cross-disciplinary innovation network in the field of smart materials.

- Finn, N. (2013). *2 - Types of smart materials for protection*. [online] ScienceDirect. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780857090560500029>.
- Fiorito, F., Sauchelli, M., Arroyo, D., Pesenti, M., Imperadori, M., Masera, G. and Ranzi, G. (2016). Shape morphing solar shadings: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 55, pp.863–884. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.086>.
- Foster, N. (2003). *Foster Catalogue*. Prestel Publishing.
- Gao, M., Meng, Y., Shen, C.R. and Pei, Q. (2022). Stiffness Variable Polymers Comprising Phase-Changing Side-Chains: Material Syntheses and Application Explorations. *Advanced Materials*, 34(21). doi:<https://doi.org/10.1002/adma.202109798>.
- Grancarić, A.M., Jerković, I., Koncar, V., Cochrane, C., Kelly, F.M., Soulat, D. and Legrand, X. (2017). Conductive polymers for smart textile applications. *Journal of Industrial Textiles*, 48(3), pp.612–642. doi:<https://doi.org/10.1177/1528083717699368>.
- Hawkes, D., McDonald, J., Steemers, K. (2001). *The selective environment: an approach to environmentally responsive architecture - Sustainable Framework*. Spon Press.
- Hebel, D.E. and Heisel, F. (2017). *Cultivated Building Materials: Industrialized Natural Resources for Architecture and Construction*. [online] Google Books. Birkhäuser. Available at: <https://www.google.com/books?hl=el&lr=&id=iItsDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA5&dq=Architecture+and+building+materials&ots=7wvon5CmIO&sig=4oNqWi224ByFHn5-Nu6umKc7A58>.
- Hoefnagels, H.F., Wu, D., de With, G. and Ming, W. (2007). Biomimetic Superhydrophobic and Highly Oleophobic Cotton Textiles. *Langmuir*, 23(26), pp.13158–13163. doi:<https://doi.org/10.1021/la702174x>.

- Holman, H., Kavarana, M.N. and Rajab, T.K. (2020). Smart materials in cardiovascular implants: Shape memory alloys and shape memory polymers. *Artificial Organs*. doi:<https://doi.org/10.1111/aor.13851>.
- Holstov, A., Bridgens, B. and Farmer, G. (2015). Hygromorphic materials for sustainable responsive architecture. *Construction and Building Materials*, 98, pp.570–582. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.136>.
- Hu, W., Zhang, H., Salaita, K., & Sirringhaus, H. (2020). SmartMat: Smart materials to Smart world. *SmartMat*, 1(1).
- Kalay, Y.E. (1999). Performance-based design. *Automation in Construction*, [online] 8(4), pp.395–409. doi:[https://doi.org/10.1016/s0926-5805\(98\)00086-7](https://doi.org/10.1016/s0926-5805(98)00086-7).
- Kanagaraj, S., Puthanveedu, A. and Choe, Y. (2019). Small Molecules in Light-Emitting Electrochemical Cells: Promising Light-Emitting Materials. *Advanced Functional Materials*, 30(33), p.1907126. doi:<https://doi.org/10.1002/adfm.201907126>.
- Karakaya, A., & Özgünler, S. A. (2021). A Research about Smart Facade Materials within the context of sustainable architecture. *Livernach VII*, 172.
- Kök, M., Qader, İ.N., Dağdelen, F. and Aydoğdu, Y. (2019). Akıllı Malzemeler üzerine derleme: araştırmalar ve uygulamaları. *El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi*. doi:<https://doi.org/10.31202/ecjse.562177>.
- Kretzer, M. (2016). *Information Materials: Smart Materials for Adaptive Architecture*. [online] *Google Books*. Springer. Available at: <https://books.google.com/books?hl=el&lr=&id=CQxwDQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR5&dq=smart+materials+in+the+field+of+aesthetics+building+&ots=iXBbZaAPnD&sig=z4ENOaeAWXX29bYMzAl6yDGFcfk>.
- Kretzer, M. (2016). *Information Materials: Smart Materials for Adaptive Architecture*. [online] *Google Books*. Springer. Available at: <https://www.google.com/books?hl=el&lr=&id=CQxwDQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR5&dq=history+of+smart+materials&ots=iWKf28DQiz&sig=0rXfaJadlFQiiC24mUSCgoWcijY>.
- Krishna, J. G., and Thirumal, J. R. (2015). Application of smart materials in smart structures. *Int J Innovat Res Sci Eng Technol*, 4, 5018-5023.

- Leng, J., Lu, H., Liu, Y., Huang, W.M. and Du, S. (2009). Shape-Memory Polymers—A Class of Novel Smart Materials. *MRS Bulletin*, [online] 34(11), pp.848–855. doi:<https://doi.org/10.1557/mrs2009.235>.
- Lesovik, R., Degtev, Y., Shakarna, M. and Levchenko, A. (2014). Green Composites in Architecture and Building Material Science. *Modern Applied Science*, 9(1). doi:<https://doi.org/10.5539/mas.v9n1p45>.
- Liu, J., Ren, B., Wang, Y., Lu, Y., Wang, L., Chen, Y., Yang, J. and Huang, Y. (2019). Hierarchical porous ceramics with 3D reticular architecture and efficient flow-through filtration towards high-temperature particulate matter capture. *Chemical Engineering Journal*, [online] 362, pp.504–512. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.01.065>.
- López, M., Rubio, R., Martín, S. and Ben Croxford (2017). How plants inspire façades. From plants to architecture: Biomimetic principles for the development of adaptive architectural envelopes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67, pp.692–703. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.018>.
- López, M., Rubio, R., Martín, S., Croxford, B. and Jackson, R. (2015). Active materials for adaptive architectural envelopes based on plant adaptation principles. *Journal of Facade Design and Engineering*, 3(1), pp.27–38. doi:<https://doi.org/10.3233/fde-150026>.
- Minoli, D., Sohraby, K. and Occhiogrosso, B. (2017). IoT Considerations, Requirements, and Architectures for Smart Buildings – Energy Optimization and Next Generation Building Management Systems. *IEEE Internet of Things Journal*, 4(1), pp.1–1. doi:<https://doi.org/10.1109/jiot.2017.2647881>.
- Mrinalini, M. and Prasanthkumar, S. (2019). Recent Advances on Stimuli-Responsive Smart Materials and their Applications. *ChemPlusChem*, 84(8), pp.1103–1121. doi:<https://doi.org/10.1002/cplu.201900365>.
- Mukherjee, A., Deepmala, Srivastava, P. and Sandhu, J.K. (2021). Application of smart materials in civil engineering: A review. *Materials Today: Proceedings*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.03.304>.
- Nanotechnology, F. (2018). State of the Art and Applications. *Nano Tech Appl*, [online] 1(2), pp.1–5. Available at: <http://www.scivisionpub.com/pdfs/smart-materials-and-structures-state-of-the-art-and-applications-596.pdf>.

- Naoya Kishikawa, Mahmoud El-Maghrabey, Yuusuke Nagamune, Nagai, K., Kaname Ohyama and Kuroda, N. (2020). A Smart Advanced Chemiluminescence-Sensing Platform for Determination and Imaging of the Tissue Distribution of Natural Antioxidants. *Analytical Chemistry*, 92(10), pp.6984–6992. doi:<https://doi.org/10.1021/acs.analchem.0c00044>.
- Paolo Di Sia (2020). Nanotechnologies and Advanced Smart Materials. pp.67–87. doi:<https://doi.org/10.1002/9781119592990.ch4>.
- Patel, J. and Goyal, A. (2018). *Smart Materials in Construction Technology*. [online] IEEE Xplore. doi:<https://doi.org/10.1109/ICSCET.2018.8537256>.
- Pesenti, M., Masera, G., Fiorito, F. and Sauchelli, M. (2015). Kinetic Solar Skin: A Responsive Folding Technique. *Energy Procedia*, 70, pp.661–672. doi:<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.02.174>.
- Qader, I. N., Mediha, K. Ö. K., Dagdelen, F., & Aydoğdu, Y. (2019). A review of smart materials: researches and applications. *El-Cezeri*, 6(3), 755-788.
- Roy, S., Mishra, H., and Mohapatra, B. (2016). Creating sustainable environment using smart materials in smart structures. *Indian Journal of Science and Technology*, 9(30).
- Russo, A.C. (2017). The Emotional Side of Smartness: Intelligent Materials and Everyday Aesthetics. *Intelligent Human Systems Integration*, pp.733–738. doi:https://doi.org/10.1007/978-3-319-73888-8_113.
- Salma (2011). BIOMIMICRY AS A TOOL FOR SUSTAINABLE ARCHITECTURAL DESIGN. *146.201*. [online] doi:<http://hdl.handle.net/1/1129>.
- Schwartz, M., Lenzini, G., Geng, Y., Rønne, P.B., Ryan, P.Y.A. and Lagerwall, J.P.F. (2018). Cholesteric Liquid Crystal Shells as Enabling Material for Information-Rich Design and Architecture. *Advanced Materials*, 30(30), p.1707382. doi:<https://doi.org/10.1002/adma.201707382>.
- Sherif, M. and Sabry Elattar (2013). Scientific Research and Essays Smart structures and material technologies in architecture applications. [online] 8(31), pp.1512–1521. doi:<https://doi.org/10.5897/SRE2012.0760>.

- Sobczyk, M., Wiesenhütter, S., Noennig, J.R. and Wallmersperger, T. (2021). Smart materials in architecture for actuator and sensor applications: A review. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, p.1045389X2110279. doi:<https://doi.org/10.1177/1045389x211027954>.
- Soliman, O. A. (2013). Perception of building materials in architecture. *Journal of Engineering and Applied Science*, 60(6), 1-23.
- Sommese, F., Badarnah, L. and Ausiello, G. (2023). Smart materials for biomimetic building envelopes: current trends and potential applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, [online] 188, p.113847. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113847>.
- Spaggiari, A., Castagnetti, D., Golinelli, N., Dragoni, E. and Scirè Mammano, G. (2016). Smart materials: Properties, design and mechatronic applications. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, 233(4), pp.734–762. doi:<https://doi.org/10.1177/1464420716673671>.
- Su, M. and Song, Y. (2021). Printable Smart Materials and Devices: Strategies and Applications. *Chemical Reviews*, 122(5), pp.5144–5164. doi:<https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.1c00303>.
- Sun, B. (2015). Smart materials and structures. Lecture at Swiss Federal Institute of Technology Zurich (ETH), Zurich. Published by Cape Peninsula University of Technology, Cape Town, South Africa.
- Sung, D. K. (2007). Skin deep: Breathing life into the layer between man and nature. AIA Report on University Research, 3.
- Uchino, K. (2017). *Chapter 1 - The Development of Piezoelectric Materials and the New Perspective*. [online] ScienceDirect. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780081021354000011>.
- Xie, Y., Guan, F., Li, Z., Meng, Y., Cheng, J., Li, L. and Pei, Q. (2020). A Phase-Changing Polymer Film for Broadband Smart Window Applications. *Macromolecular Rapid Communications*, 41(16), p.2000290. doi:<https://doi.org/10.1002/marc.202000290>.

- Yang, P., Zhu, F., Zhang, Z., Cheng, Y., Wang, Z. and Li, Y. (2021). Stimuli-responsive polydopamine-based smart materials. *Chemical Society Reviews*, [online] 50(14), pp.8319–8343. doi:<https://doi.org/10.1039/D1CS00374G>.
- Yates, S. (2012). *Structural and Smart Materials Analysis in Responsive Architectural and Textile Mechanical Applications*. [online] dalspace.library.dal.ca. Available at: <https://dalspace.library.dal.ca/handle/10222/15051>.
- Yoon, J.W. (2018). *Sustainability Assessment of Smart Materials in Buildings*. [online] Materials Science Forum. Available at: <https://www.scientific.net/MSF.940.133>.
- Yu, H., Shi, R., Zhao, Y., Waterhouse, G.I.N., Wu, L.-Z., Tung, C.-H. and Zhang, T. (2016). Smart Utilization of Carbon Dots in Semiconductor Photocatalysis. *Advanced Materials*, 28(43), pp.9454–9477. doi:<https://doi.org/10.1002/adma.201602581>.
- Yu, X., Cheng, H., Zhang, M., Zhao, Y., Qu, L. and Shi, G. (2017). Graphene-based smart materials. *Nature Reviews Materials*, 2(9). doi:<https://doi.org/10.1038/natrevmats.2017.46>.
- Zhang, X., Liu, S., Zhang, L. and Xie, W. (2018). In-Planar-Electrodes Organic Light-Emitting Devices for Smart Lighting Applications. *Advanced Optical Materials*, 7(3), pp.1800857–1800857. doi:<https://doi.org/10.1002/adom.201800857>.
- Zou, S.-J., Shen, Y., Xie, F.-M., Chen, J.-D., Li, Y.-Q. and Tang, J.-X. (2020). Recent advances in organic light-emitting diodes: toward smart lighting and displays. *Materials Chemistry Frontiers*, 4(3), pp.788–820. doi:<https://doi.org/10.1039/c9qm00716d>.

Ελληνική

- Αρνέλλου, Ζ. Δ., Μπέρκη, Α., & Σαραντινούδη, Π. (2013). Έξυπνα υλικά.
- Γιαννού, Μ.Κ. and Γιαννού, Μ.Κ. (2012). *Από τα σύνθετα στα έξυπνα υλικά και τις εφαρμογές τους*. [online] dspace.lib.ntua.gr. Available at: <https://dspace.lib.ntua.gr/xmlui/handle/123456789/7230>.
- Ευσταθίου, Π. (2013). Υλικά ‘αλλαγής φάσης’ και υλικά ‘μνήμης σχήματος’: Τεχνολογία, ιδιότητες / χαρακτηριστικά και χρήσεις στην κλωστοϋφαντουργία. *oceanis.lib2.uniwa.gr*. [online] Available at: <http://oceanis.lib2.uniwa.gr/xmlui/handle/123456789/1031>.

- Καλογερόπουλος, Τ.Α. (2010). Εφαρμογές έξυπνων υλικών. [online] dspace.lib.ntua.gr. Available at: <https://dspace.lib.ntua.gr/xmlui/handle/123456789/3677>.
- Κωβαίος, Ι. (2011). *Μοντελοποίηση και έλεγχος ρευστοδυναμικών συστημάτων με χρήση έξυπνων υλικών*. [online] www.didaktorika.gr. Available at: <https://www.didaktorika.gr/eadd/handle/10442/25675>.
- Τζιράκης, Δ.Α. and Tzirakis, D.A. (2012). *Έξυπνα υλικά στην αεροναυπηγική*. [online] dspace.lib.ntua.gr. Available at: <https://dspace.lib.ntua.gr/xmlui/handle/123456789/7494>.