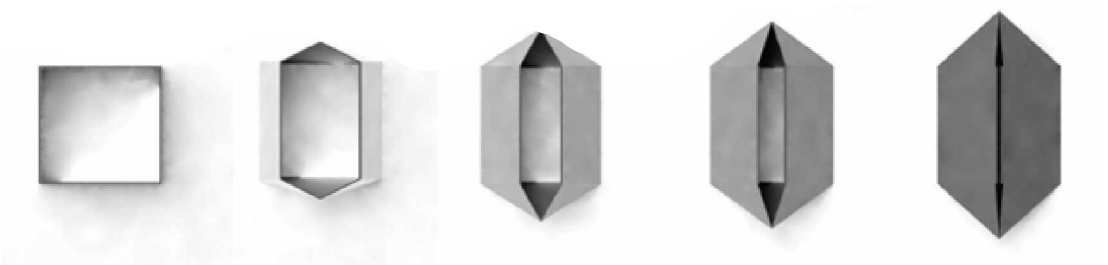
MEMO
R | GA
M |

ΟΨΕΙΣ ΠΟΥ ΑΝΤΑΠΟΚΡΙΝΟΝΤΑΙ ΣΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ



Α. Μ. Καμπιτάκη, Κ. Χαμηλοθώρη | Κ. Α. Ουγγρίνης

Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Αρχιτεκτόνων Μηχανικών.

Όψεις που ανταποκρίνονται στο περιβάλλον | Memorigami

Αντιγόνη-Μαρία Καμπιτάκη, Κύνθια Χαμηλοθώρη

Επιβλέπων Καθηγητής: *Κ. Α. Ουγγρίνης*

Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Αρχιτεκτόνων Μηχανικών.

2014

ευχαριστούμε
τους δικούς μας
τους δασκάλους μας
τους φίλους μας
το σπίτι μας
τα λάπτοπ μας
και η μία την άλλη.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1 | Εισαγωγή
σελίδες 6-17

2 | Δομική Φυσική
σελίδες 19-33

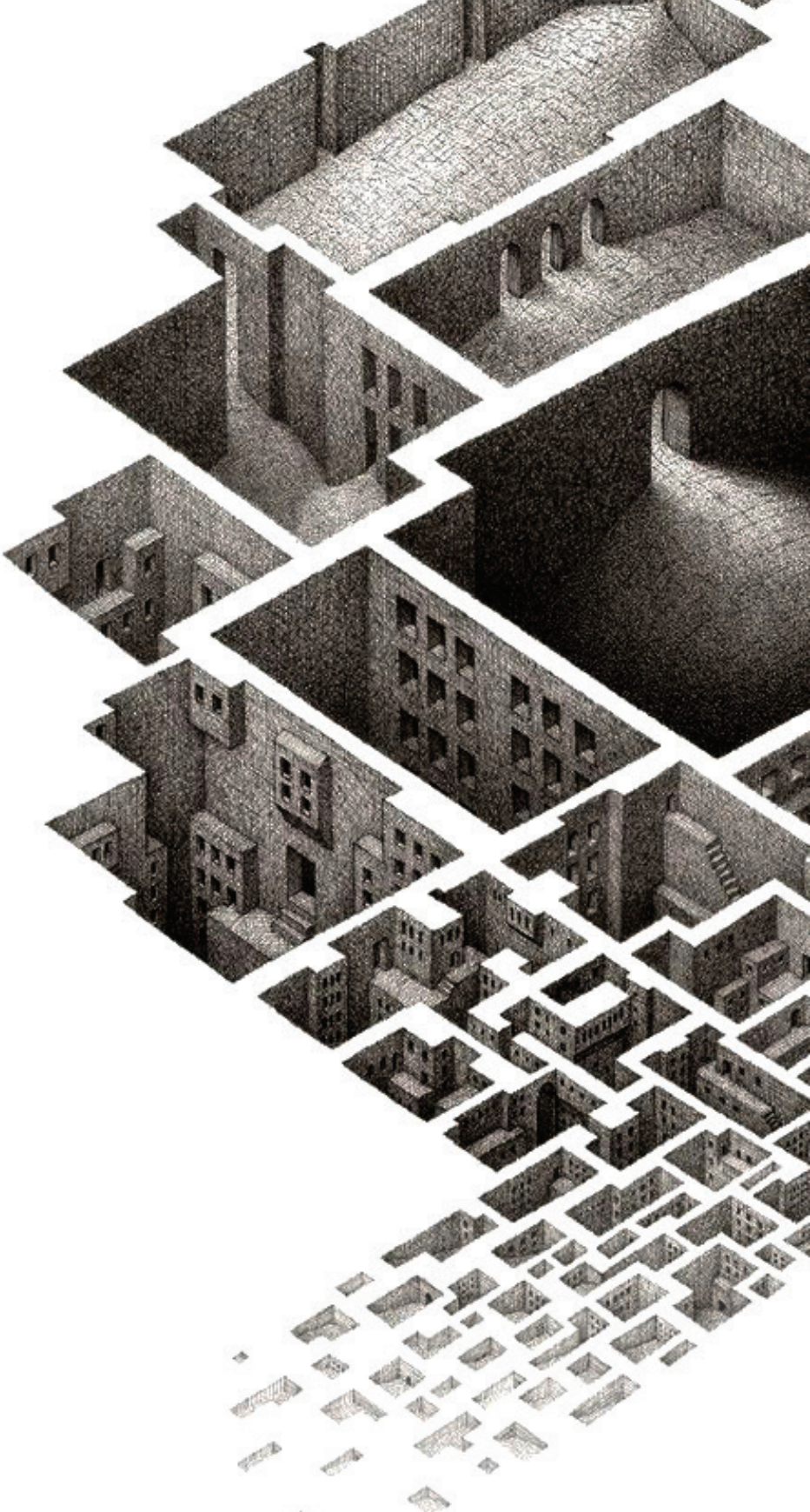
3 | Μεταβλητότητα
σελίδες 35-59

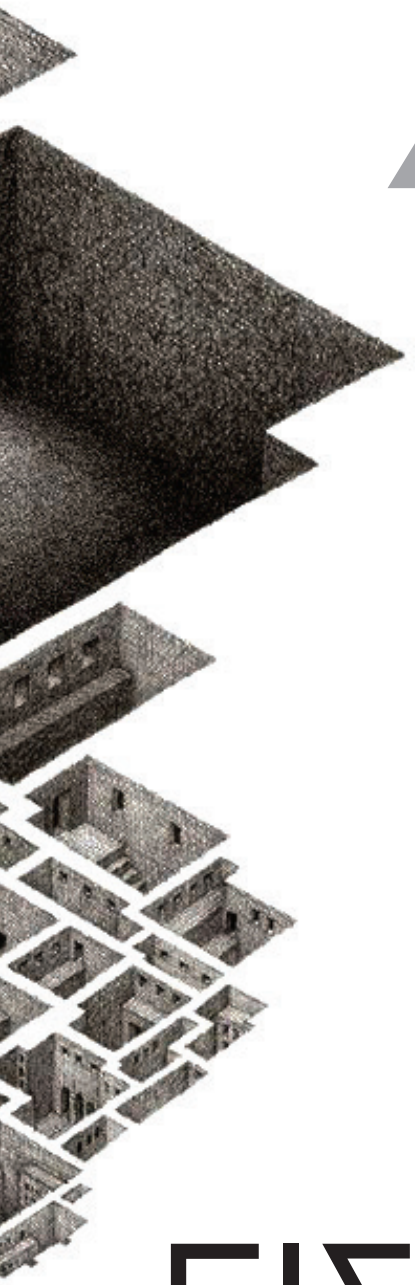
4 | Έξυπνα Υλικά
σελίδες 60-71

5 | Memorigami
σελίδες 72-93

Βιβλιογραφικές Αναφορές
σελίδες 94-102

Πηγές Εικόνων
σελίδες 103-110





1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Our contact with the world takes place at the boundary line of the self through specialized parts of our enveloping membrane.

The Eyes of the Skin, J. Pallasmaa.

Η ερευνητική αυτή εργασία έχει ως σκοπό της τη διερεύνηση, την εφαρμογή και την ανάδειξη των δυνατοτήτων τις οποίες μπορεί να προσφέρει η μεταβαλλόμενη αρχιτεκτονική, επιχειρώντας να προτείνει εναλλακτικές λύσεις στα σύγχρονα ζητήματα που έχουν προκύψει για την εξοικονόμηση ενέργειας και τη βιώσιμη ανάπτυξη. Η συσχέτιση της σημασίας της όψης στην αρχιτεκτονική και στην απόδοση του κτιρίου με τους παράγοντες που συμβάλλουν στην ομαλή λειτουργία του αλλά και οι εφαρμογές νέων τεχνολογιών αποτέλεσαν τους αρχικούς προβληματισμούς για αυτή την έρευνα. Εστιάζοντας στη σημασία που έχει η όψη στην αρχιτεκτονική και ειδικότερα στην ενεργειακή απόδοση ενός κτιρίου, πρόκειται να μελετηθούν εκδοχές μεταβλητών όψεων που στόχο έχουν να δημιουργήσουν ένα δυναμικό πεδίο, τόσο για το χρήστη όσο και για το περιβάλλον.

Θα μας απασχολήσουν επομένως έννοιες που σχετίζονται με τη μεταβαλλόμενη αρχιτεκτονική, την ενέργεια και τα "έξυπνα" υλικά. Ως μεταβαλλόμενη ή κινητική κατασκευή θεωρείται οποιαδήποτε κατασκευή η οποία εμπεριέχει το στοιχείο της κίνησης, αλλάζοντας με αυτό τον τρόπο τη μορφή της. Όσον αφορά τα υλικά, ξεκινώντας από την παραδοχή πως τα παραδοσιακά υλικά που χρησιμοποιούνται στην αρχιτεκτονική διαφέρουν από τα "έξυπνα" υλικά ως προς την επιλεκτικότητα στον τρόπο λειτουργίας τους, την αυτο-ενεργοποίηση και την ανταποκρισιμότητα, μπορούμε να ορίσουμε και να ομαδοποιήσουμε τα δεύτερα βάσει της δυνατότητας μεταβολής των ιδιοτήτων τους, τη δυνατότητα ανταλλαγής ενέργειας, το διακριτό τους μέγεθος και την ιδιότητα της αναστρεψιμότητάς τους.[1] Γενικά ο χαρακτηρισμός "έξυπνος" ορίζεται ως εξής:

"*έξυπνος, -η, -ο [1.] αυτός που έχει την ικανότητα να αντιλαμβάνεται γρήγορα και σε βάθος τα πράγματα - ο ευφυής [2.] (για λόγο,*

πράξη, ενέργεια κ.λπ.) αυτός που φανερώνει οξύτατη αντίληψη, εξυπνάδα [3.] (για μηχανισμό, συσκευή κ.λπ.) αυτός που μπορεί να επιλέγει τον τρόπο δράσης του ανάλογα με την περίσταση, ώστε να επιτελεί τη λειτουργία του με μεγάλη ακρίβεια και επιτυχία. Στη χρήση του όρου για την περιγραφή άβιων όντων προσδίδεται η έννοια της ανταπόκρισης, για παράδειγμα: "έξυπνο σπίτι: σπίτι στο οποίο όλες οι ηλεκτρικές συσκευές και τα ηλεκτρικά συστήματα ελέγχονται από έναν Η/Υ, ο οποίος προγραμματίζεται ώστε να ανταποκρίνεται αποτελεσματικά στις μεταβολές των συνθηκών, χωρίς τη συνεχή ανθρώπινη παρέμβαση.''. (Μπαμπινιώτης, 2002). Στην περίπτωση των "έξυπνων" υλικών, στην οποία αντιστοιχεί ο τρίτος ορισμός που αναφέρθηκε, η χρήση της λέξης "έξυπνο" υπονοεί μια σχέση αντίληψης και ανταπόκρισης η οποία φυσικά δεν υπάρχει σε κάποιο υλικό. Θα ήταν σωστότερο να γίνεται αναφορά σε μία έξυπνη συμπεριφορά των υλικών, την οποία μπορούμε να εκμεταλλευτούμε κατάλληλα προκειμένου να δημιουργήσουμε ευφυή συστήματα που να ανταποκρίνονται στον εν λόγω ορισμό, όντας ικανά τόσο να αντιληφθούν συνθήκες του περιβάλλοντος χώρου όσο και να ανταποκριθούν κατάλληλα σ' αυτές. Με τη παραπάνω διευκρίνιση, θα αναφερόμαστε σε "έξυπνα" υλικά στο πλαίσιο της εργασίας αυτής, χάριν ευκολίας, καθώς είναι ο όρος που έχει επικρατήσει.

Στη σύγχρονη διερεύνηση της αρχιτεκτονικής η υιοθέτηση της μεταβλητότητας και των έξυπνων υλικών στον κατασκευασμένο χώρο αποτελούν καίρια ζητήματα. Με τις νέες δυνατότητες που έφερε η εξέλιξη της τεχνολογίας και της πληροφορικής, η έρευνα στα πεδία αυτά έγινε πιο διαδεδομένη και η υλοποίηση περισσότερο εφικτή. Αποτέλεσμα των παραπάνω είναι η ταχεία ανάπτυξη στον τομέα των υλικών και αντίστοιχα, στο άμεσα συνυφασμένο με αυτόν πεδίο της μεταβλητότητας, προσφέροντας πληθώρα νέων

δυνατοτήτων μέσω των τεχνολογικών καινοτομιών[2]. Η ανάπτυξη αυτή θέτει προβληματισμούς που αφορούν την εφαρμογή αυτών των δυνατοτήτων στην αρχιτεκτονική καθώς και τον επαναπροσδιορισμό του στόχου της σε μία κοινωνία με καινούριες περιβαλλοντικές και τεχνολογικές συνθήκες.

Εικόνα 01 | C. Hoberman and Hoberman Associates, Packable dome, 1991.

Προβληματισμοι

Προκύπτουν λοιπόν σημαντικά θέματα, τα οποία αποτελούν και το έναυσμα της ακόλουθης έρευνας, που αφορούν τις σχεδιαστικές επιλογές του αρχιτέκτονα στους παραπάνω τομείς και κυρίως εκείνες που εστιάζουν στο κέλυφος του κτιρίου. Εγείρονται λοιπόν δύο ερωτήματα: το πρώτο, γιατί είναι σημαντική η εφαρμογή της μεταβλητότητας στην όψη και το δεύτερο, γιατί είναι σημαντική η χρήση έξυπνων υλικών στην κατασκευή.

Ο ρόλος που διαδραματίζει στο κτίριο είναι ιδιαίτερα σύνθετος, καθώς το κέλυφος έχει ένα διττό χαρακτήρα λόγω της ταυτόχρονης σχέσης του τόσο με το εσωτερικό όσο και το εξωτερικό του κτιρίου. Από αυτό το στοιχείο προκύπτουν δύο κύρια δίπολα: δημόσιου-ιδιωτικού και εσωτερικού-εξωτερικού. Η θεώρηση της όψης ως στοιχείο που γίνεται αντιληπτό από τον εξωτερικό παρατηρητή - κάτοικο της πόλης και παράλληλα από τον εσωτερικό παρατηρητή - κάτοικο του κτιρίου δημιουργεί το δίπολο δημόσιου και ιδιωτικού.[3] Οι όψεις ενός κτιρίου προσδιορίζουν την οπτικά αντιληπτή παρουσία και θέση του στο περιβάλλον του. Καθώς οι όψεις αντιπροσωπεύουν το κτίριο και τα κτίρια συνθέτουν τις πόλεις, οι όψεις συνθέτουν την εικόνα της πόλης.[4] Υπό αυτό το πρίσμα, η όψη έχει μια διττή λειτουργία προβολής και απόκρυψης: η όψη του κτιρίου λειτουργεί ως μέσο αντιπροσώπευσης του κατοίκου του κτιρίου (και του αρχιτέκτονα, σύμφωνα με τη αντίληψη πως σχεδιάζουμε για τον εαυτό μας) αλλά και ως μέσο διαφύλαξης της ιδιωτικότητας, σύνορο μεταξύ του μέσα και του έξω[5]. Προκύπτει λοιπόν το δεύτερο δίπολο της λειτουργίας της όψης ως όριο μεταξύ του εσωτερικού και του εξωτερικού περιβάλλοντος. Στο πλαίσιο αυτού του διπόλου, θα εστιάσουμε στη σημασία του κελύφους ως μέσο ελέγχου της

σχέσης μεταξύ των εξωτερικών και εσωτερικών συνθηκών του κτιρίου με σκοπό τη βελτιστοποίηση των περιβαλλοντολογικών παραμέτρων και την επίτευξη ικανοποιητικών συνθηκών στο εσωτερικό του. Μπορούμε λοιπόν να συνδέσουμε το δίπολο εσωτερικού και εξωτερικού περιβάλλοντος με την έννοια της θερμικής άνεσης, καθώς και το δίπολο δημόσιου-ιδιωτικού με την αισθητική της όψης[6], σχεδιαστικά ζητήματα τα οποία απασχολούν τον αρχιτέκτονα.

γιατί μεταβλητότητα στην όψη;

Προσθέτοντας στα ζητήματα αυτά τον παράγοντα του χρόνου και δεχόμενοι πως ανάγκες του χρήστη που αφορούν τη θερμική άνεση και σε δεύτερο επίπεδο, την αισθητική της όψης μεταβάλλονται στη διάρκεια του χρόνου, προκύπτει ένα ιδιαίτερα σύνθετο σχεδιαστικό πρόβλημα. Σ' αυτό το πρόβλημα προσπαθεί να απαντήσει η μεταβλητότητα στην όψη, με τη δυνατότητα μεταβολής στοιχείων του κελύφους ανταποκρινόμενα στις δυναμικές καταστάσεις που επηρεάζουν το χώρο λειτουργικά και αισθητικά.

Η ιδέα της μεταβλητότητας στην αρχιτεκτονική μπορεί να θεωρείται νεωτερισμός, είναι ωστόσο ένα χαρακτηριστικό που συναντάται ακόμη και στις πιο συμβατικές όψεις, σε στοιχεία στα οποία υπάρχει η ανάγκη να είναι μεταβλητά, όπως ανοίγματα (πόρτες, παράθυρα) ή σκίαστρα.[7] Η όψη, όντας το τελευταίο σύνορο μεταξύ του μέσα και του έξω, έχει ιδιαίτερη σημασία λειτουργώντας ως "επιδερμίδα" του κτιρίου, ''building skin''.[8] Με τον ίδιο τρόπο που η επιδερμίδα του ανθρώπου ανταποκρίνεται στις αλλαγές του περιβάλλοντος με σκοπό τη ρύθμιση της θερμοκρασίας του σώματος, το κέλυφος του κτιρίου μπορεί, μέσω μεταβλητών στοιχείων, να προσαρμοστεί προκειμένου να διατηρήσει στο

εσωτερικό του τις επιθυμητές συνθήκες.[9] Σημαντικός στόχος της εφαρμογής της μεταβλητότητας στην όψη είναι η ανταπόκριση του κτιρίου στα περιβαλλοντικά δεδομένα με σκοπό την εξασφάλιση ικανοποιητικής ποιότητας του εσωτερικού περιβάλλοντος με τη μικρότερη δυνατή δαπάνη ενέργειας.

Παράλληλα, στο πλαίσιο της μεταβλητότητας, εξετάζεται η δυνατότητα μεταβολής στοιχείων της όψης και από τον ίδιο το χρήστη του κτιρίου προκειμένου το κτίριο να ανταποκρίνεται πλήρως στις εκάστοτε προθέσεις του. Προκύπτει έτσι η ιδέα ενός κτιρίου "ζωντανού" που αντιδρά στα δεδομένα που το περιβάλλουν, σε αντίθεση με το στατικό, μη συμμετέχον συμβατικό κτίριο. Η δυσκολία έγκειται στο να προσδιοριστούν τα δεδομένα αυτά, καθώς και η βαρύτητα με την οποία επηρεάζουν την ανταπόκριση του κτιρίου, κυρίως σε σχέση με τον υποκειμενικό παράγοντα της βούλησης του χρήστη.

Εγείρονται λοιπόν ερωτήματα που αφορούν την ισορροπία μεταξύ των προθέσεων του χρήστη, τα δεδομένα του περιβάλλοντος και την ανταπόκριση -"συμπεριφορά" του κτιρίου. Το μεταβλητό κτίριο θα έπρεπε, σε ιδανικές συνθήκες, να λειτουργεί ως απάντηση στη βούληση του χρήστη, δηλαδή να μην αντιτίθεται στις προθέσεις του ανταποκρινόμενο αποκλειστικά στα περιβαλλοντικά δεδομένα, αλλά παράλληλα να διατηρεί μια αυτονομία ανταπόκρισης στις περιβαλλοντικές συνθήκες με σκοπό τη διατήρηση του βέλτιστου εσωτερικού περιβάλλοντος όταν, για παράδειγμα, ο χρήστης του κτιρίου δεν έχει κάποια συγκεκριμένη πρόθεση.

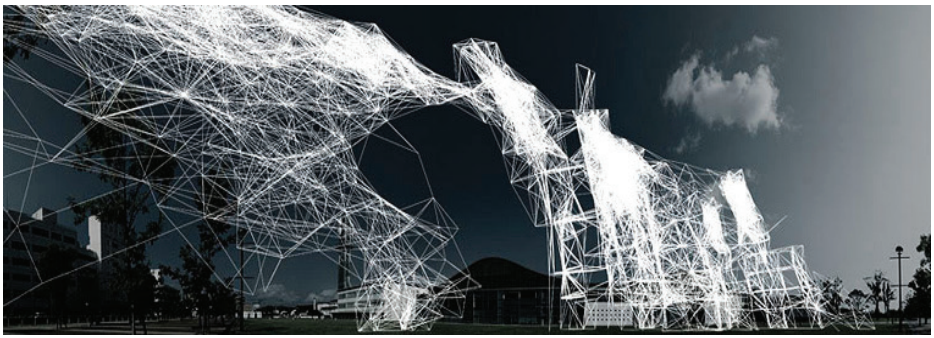
γιατί έξυπνα υλικά;

Οι μεθοδολογίες που χρησιμοποιούνται για την αντιμετώπιση των περιβαλλοντικών παραγόντων στο πλαίσιο της μεταβαλλόμενης αρχιτεκτονικής μπορούν να ομαδοποιηθούν σε δύο κύριες κατηγορίες: τη χρήση μηχανικών κινητικών συστημάτων και τη χρήση έξυπνων υλικών. Στην πρώτη κατηγορία χρησιμοποιούνται κινητικά συστήματα στο κτίριο τα οποία ελέγχονται μέσω ηλεκτρονικών συστημάτων με σκοπό την αλλαγή της γεωμετρίας του κελύφους του κτιρίου συναρτήσει των κλιματικών δεδομένων. Στη δεύτερη κατηγορία εφαρμόζονται στο κέλυφος του κτιρίου έξυπνα υλικά τα οποία, με τη ικανότητά τους να αλλάζουν τα φυσικά ή ενεργειακά τους χαρακτηριστικά ανάλογα με τις περιβαλλοντικές συνθήκες, μπορούν να συμβάλλουν στη βελτίωση του ενεργειακού ισοζυγίου του κτιρίου. Η βέλτιστη λύση είναι η συνεργασία αυτών των μεθόδων σε ένα καταστατικό μοντέλο[10], μεγιστοποιώντας την ακρίβεια των ενεργειών μέσω του ελέγχου από ηλεκτρονικά μέρη και παράλληλα μειώνοντας την πολυπλοκότητα του συνολικού συστήματος με την εισαγωγή έξυπνων υλικών.

Στην εργασία αυτή θα επικεντρωθούμε στον συνδυασμό γεωμετρίας και έξυπνων υλικών, εστιάζοντας στη χρήση μνημονικών υλικών όπως τα κράματα μνήμης. Καθώς η ικανότητα μεταβολής των έξυπνων υλικών βρίσκεται στη μοριακή δομή τους, δεν απαιτείται η χρήση εξωτερικών ηλεκτρονικών συστημάτων ελέγχου. Το ίδιο το υλικό λειτουργεί ταυτόχρονα και σαν αισθητήρας (sensor) και σαν ενεργοποιητής (actuator), ελαχιστοποιώντας το συνολικό κόστος εφαρμογής και συντήρησης του συστήματος[11]. Αυτή η ιδιότητα το καθιστά ένα πολύ ενδιαφέρον πεδίο μελέτης για πιθανές εφαρμογές σε κι-

νητικούς μηχανισμούς στο κέλυφος του κτιρίου, για παράδειγμα σε συστήματα σκίασης, πεδίο στο οποίο και θα εστιάσουμε.

Στο πλαίσιο αυτό θα πρέπει να εμβαθύνουμε στα θέματα που αφορούν το λόγο επιλογής των συγκεκριμένων υλικών και συστημάτων, το σκοπό που εξυπηρετούν, καθώς και το αν τελικά ο σκοπός αυτός επιτυγχάνεται. Τα θέματα αυτά θα παρουσιαστούν σε τρία κεφάλαια: τη *Δομική Φυσική*, που εστιάζει στον ενεργειακό στόχο της επέμβασης στην όψη του κτιρίου, τη *Μεταβλητότητα*, όπου μελετάται το μέσο επέμβασης, δηλαδή τα μεταβλητά στοιχεία, και τέλος το κεφάλαιο που εστιάζει στα *Έξυπνα Υλικά*, όπου αναλύονται οι ιδιότητές τους και παρουσιάζονται διαφορετικές προσεγγίσεις και μελέτες εφαρμογής τους στα μεταβλητά στοιχεία του κελύφους. Τέλος, στο κεφάλαιο *Memorigami* παρουσιάζεται η πορεία της έρευνάς μας για την ανάπτυξη του Memorigami, ενός πρωτότυπου ανταποκριτικού συστήματος σκίασης που ενσωματώνει κράματα μνήμης με στόχο την αποφυγή κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας.



Εικόνα 02 | doubleNegatives Architecture, Διαδραστική εγκατάσταση Corpora in si(gh)te, YCAM, Japan 2003.

Στο πλαίσιο του έργου αυτού παρουσιάζονται σε πραγματικό χρόνο διαφορετικά δεδομένα του περιβάλλοντος, όπως η θερμοκρασία, η υγρασία, η φωτεινότητα και η κατεύθυνση του ανέμου σε πραγματικό χρόνο, συνθέτοντας μια όψη επαυξημένης πραγματικότητας του εκάστοτε κτιρίου.

Εικόνα 03 | Διαδραστική εγκατάσταση Corpora in si(gh)te, doubleNegatives Architecture, Venice, 2008.

Σημειωσεις κεφαλαιου

1. Addington, M., & Shodek, D. (2005). *Smart Materials and New Technologies for the Architecture and Design Professions* (pp. 78-79). Oxford: Architectural Press/Elsevier.

2. *''Το πεδίο της τεχνολογίας υλικών εικονογραφεί μιαν άλλη σταθερή στην εξέλιξη των τεχνικών: τη συστηματική αξιοποίηση όλων των δυνατών συνδυασμών που επιτρέπουν οι προηγούμενες καινοτομίες. Ύστερα από την εντατική εφευρετική δραστηριότητα που εγνώρισε ο 19ος αιώνας και το πρώτο μισό του 20ου, η σημερινή περίοδος προχωρεί στο συνδυασμό όλων των διαθέσιμων υλικών είτε στο εσωτερικό της μεταλλουργίας, με τα πιο ποικίλα κράματα, είτε διασταυρώνοντας τα υφάσματα με ανθρακονήματα, τις οργανικές ύλες με τα μέταλλα, τα κεραμικά με τα κράματα.''* Jacomy, B. (1990). *Συνοπτική Ιστορία των Τεχνικών (σ. 378)*. Αθήνα: Πολιτιστικό Τεχνολογικό Ίδρυμα ΕΤΒΑ.

3. Triantis, E. (1991). *La physionomie des immeubles d' habitation collective: La façade comme élément de transition (pp. 129-133).* Lausanne: École Polytechnique Fédérale de Lausanne.

4. *"[Η όψη του κτιρίου]... διαδραματίζει τον τρόπο με τον οποίο οι άνθρωποι προσανατολίζονται μέσα στην πόλη και διαμορφώνουν εξελικτικά την αντίληψή τους για το χώρο."* Rossi, A. (1991). *Η Αρχιτεκτονική της Πόλης* (σ. 10). Θεσσαλονίκη: University Studio Press.

5. *"Άσχετα με το πόσο μικρό είναι, [ο άνθρωπος] θέλει το σύνορό του να είναι ευδιάκριτο. Μέσα από αυτό είναι ασφαλής και ευτυχισμένος. Αυτός είναι ο ρόλος του φράχτη."* McCabe, C. (1967). *Please Fence Me In*. San Francisco: San Francisco Chronicle.

6. *"Το σύμβολο αυτό [του αμερικανικού σπιτικού] σημαίνει μια πανταχόθεν ελεύθερη μονοκατοικία, όχι ένα σπίτι συνεχόμενο με άλλα,*

και το ιδανικό του σπιτιού έχει βάση αισθητική, όχι λειτουργική.'' Rapoport, A. (1976). Ανώνυμη Αρχιτεκτονική και Πολιτιστικοί Παράγοντες (σ.178). Αθήνα: Έκδοση Αρχιτεκτονικών Θεμάτων.

7. *"As a transition between inside and outside - between the building and the urban space- the building skin plays an important role. First and foremost it provides protection from the elements, demarcates private property and creates privacy. But its aestheric and cultural function is just as important."* Schittich, C. (2006). *Building Skins* (p. 7). Munich: Birkhäuser.

8. Schittich, C. (2006). *Building Skins* (p. 7). Munich: Birkhäuser.

9. Moloney, J. (2011). *Designing Kinetics for Architectural Facades: State Change* (p. 9). New York: Routledge.

10. Addington, M., & Shodek, D. (2005). *Smart Materials and New Technologies for the Architecture and Design Professions* (pp. 226). Oxford: Architectural Press/Elsevier.

11. Ουγγρίνης, Κ. Α. (2012). *Μεταβαλλόμενη Αρχιτεκτονική: Κίνηση - Προσαρμογή - Ευελιξία* (σ. 353). Αθήνα: Εκδοτικός Όμιλος Ίων.

2

ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ & ΔΟΜΙΚΗ ΦΥΣΙΚΗ

Να θυμάσαι ότι η επιδερμίδα του κτιρίου θα έπρεπε να λειτουργεί με εξίσου ωραίο και πλούσιο τρόπο, όπως η επιδερμίδα των φυτών, των ζώων και του ανθρώπου. Αρκεί μόνο να αντιμετωπίζουμε το κτίριο κατά τον ίδιο σύνθετο τρόπο και όχι μόνο επιδερμικά, επίπλαστα και αισθητικά.

Α. Τομπάζης, Γράμμα σ' ένα νέο αρχιτέκτονα.

Ανεξάρτητα από τη χρήση ενός κτιρίου, μπορούμε να θεωρήσουμε ως γενικούς στόχους δημιουργίας του τη λειτουργικότητα, την εξασφάλιση κατάλληλων συνθηκών διαβίωσης για τους χρήστες και παράλληλα την ελάχιστη δυνατή κατανάλωση ενέργειας και φυσικών πόρων για την κατασκευή του και κυρίως για την λειτουργία του. Εξετάζοντας το κτίριο ως υποσύστημα του εξωτερικού περιβάλλοντος και λαμβάνοντας υπόψην την αλληλεπίδρασή του με αυτό, είναι εμφανής η σύνδεση μεταξύ των εσωτερικών συνθηκών του κτιρίου και των χαρακτηριστικών κατασκευής και λειτουργίας του κελύφους του.

Ο τομέας της Δομικής Φυσικής μελετά τις επιδράσεις των παραγόντων του εξωτερικού περιβάλλοντος στα κτίρια και υποστηρίζει τον περιβαλλοντικό – ενεργειακό σχεδιασμό, με σκοπό τη διασφάλιση ικανοποιητικού εσωτερικού περιβάλλοντος με τη μικρότερη δυνατή δαπάνη ενέργειας. Οι σημαντικότεροι φυσικοί παράγοντες του εξωτερικού περιβάλλοντος που επιδρούν στα κτίρια και συμβάλλουν στην διαμόρφωση του εσωκλίματος είναι η θερμοκρασία, η υγρασία, η ποιότητα του αέρα, ο φωτισμός, και δευτερευόντως οι ήχοι και η θέα. Μέσω του αρχιτεκτονικού σχεδιασμού επιδιώκεται η ισορροπία των παραγόντων αυτών και η δημιουργία ιδανικών συνθηκών στο εσωτερικό του κτιρίου βάσει της αλληλεπίδρασής του με το περιβάλλον.

Εικόνα 04 | David Troupes, Buttercup Festival 2-31, 2009.

Ιδανικες συνθηκες – Θερμικη ανεση

Η επίτευξη ενός περιβάλλοντος ιδανικών συνθηκών στο εσωτερικό ενός κτιρίου είναι ένα ιδιαίτερα σύνθετο ζήτημα. Στόχος της ύπαρξης του κτιρίου είναι η άνεση των χρηστών, ένας όρος με ευρεία έννοια και υποκειμενική χροιά. Η χρήση του όρου άνεση αναφορικά με το δομημένο περιβάλλον περιγράφει, σε γενικές γραμμές, την ικανοποίηση του χρήστη από τις συνθήκες στο εσωτερικό του κτιρίου. Η ικανοποίηση αυτή του χρήστη επιτυγχάνεται με την ικανοποίηση συγκεκριμένων παραμέτρων που αφορούν τέσσερις υποκατηγορίες: τη θερμική άνεση, την οπτική άνεση, ηχητική άνεση και την ποιότητα του αέρα. Το κέλυφος του κτιρίου και τα συστήματα ελέγχου του εσωκλίματος επηρεάζουν όλες τις παραπάνω υποκατηγορίες, συμβάλλοντας σημαντικά στην επίτευξη συνθηκών άνεσης οι οποίες επηρεάζουν την ικανοποίηση, την υγεία και την απόδοση των κατοίκων του κτιρίου[1].

Εστιάζοντας στην έννοια της θερμικής άνεσης, πρέπει να αναφερθεί ότι δεν υπάρχει απόλυτη σταθερά. Όπως είναι προφανές, η κατάσταση στην οποία ένα άτομο αισθάνεται θερμικά άνετα έχει υποκειμενικό χαρακτήρα – τόσο συγκρίνοντας μεγάλα σύνολα πληθυσμού, καθώς οι άνθρωποι μπορούν και ζουν σε ένα πολύ μεγάλο εύρος διαφορετικών κλιμάτων, όσο και σε ατομικό επίπεδο, όπου διαφορετικοί άνθρωποι έχουν άλλα επίπεδα ικανοποίησης από τη θερμική κατάσταση ενός χώρου. Ένας αποδεκτός ορισμός της θερμικής άνεσης είναι "*η κατάσταση του νου κατά την οποία ένα άτομο δεν επιθυμεί καμία θερμική αλλαγή του εσωτερικού περιβάλλοντος και εκφράζει ικανοποίηση με τις επικρατούσες θερμικές συνθήκες.*" (ASHRAE, Αμερικανική Επιστημονική Εταιρία Θέρμανσης,

Ψύξης και Κλιματισμού)[2]. Σε πρακτικό επίπεδο, η αίσθηση της θερμικής άνεσης επιτυγχάνεται όταν καταναλώνεται η ελάχιστη δυνατή ενέργεια από τον οργανισμό προκειμένου να διατηρηθεί το ενεργειακό ισοζύγιό του.

πρότυπα θερμικής άνεσης

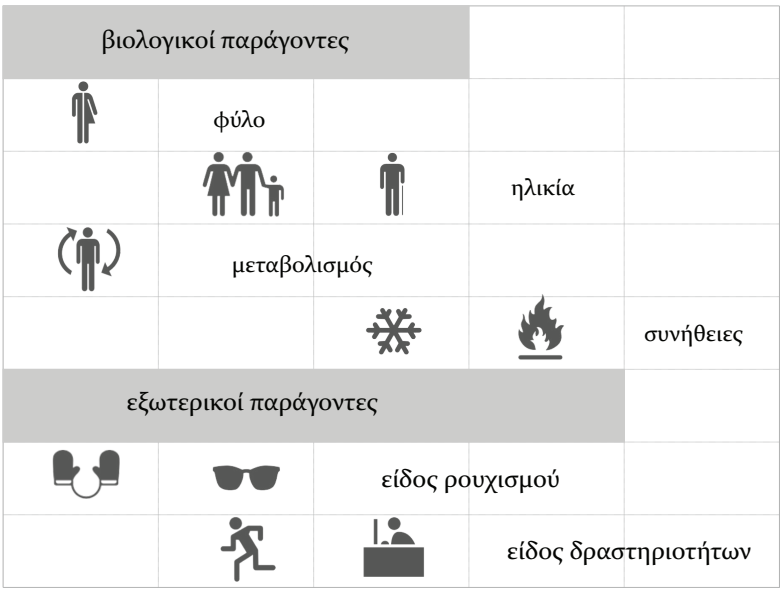
Τα σημερινά πρότυπα θερμικής άνεσης ISO 7730 χρησιμοποιούν δύο κύριους δείκτες, τον PMV (Predicted Mean Vote, Δείκτης Μέσης Ψήφου) και τον PPD (Predicted Percentage Dissatisfied, Πιθανό Ποσοστό Δυσαρέσκειας) με τους οποίους προσδιορίζονται τα αποδεκτά όρια που συνεπάγονται τη θερμική άνεση[3]. Συγκεκριμένα, ο δείκτης PMV προβλέπει τη μέση τιμή των ψήφων μιας μεγάλης ομάδας ατόμων για τη θερμική κατάσταση στην οποία βρίσκονται σε μία κλίμακα από το -3 μέχρι το +3, με την άνεση να βρίσκεται στο 0 *[εικόνα 05]*.

Εικόνα 05 | Κλίμακα δείκτη PMV.

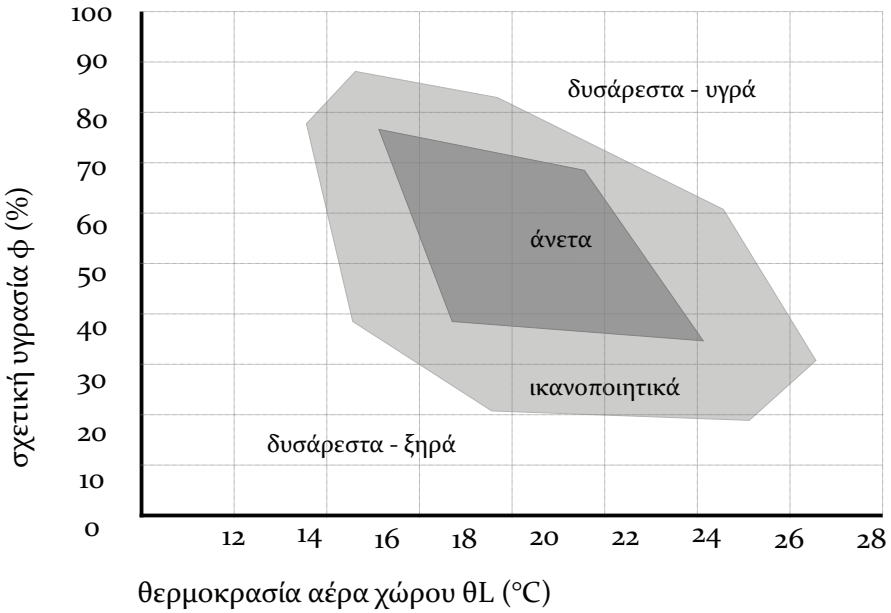
Ο δείκτης PPD προβλέπει το ποσοστό μιας μεγάλης ομάδας ατόμων να βρίσκονται στα δύο άκρα της κλίμακας του PMV, να νιώθουν δηλαδή δυσάρεστα. Ο Διεθνής Οργανισμός Τυποποίησης με το ISO/DIS 159 DP 7730 αποδέχεται τις τιμές του PMV που βρίσκονται μεταξύ του ± 0,5 και αντιστοιχούν σε μια τιμή του PPD όχι μεγαλύτερη από 10%. Τα πρότυπα αυτά βασίζονται σε ένα στατικό μοντέλο θερμικής άνεσης σύμφωνα με το οποίο ο

άνθρωπος θεωρείται παθητικός αποδέκτης θερμικών ερεθισμάτων, με αποτέλεσμα να έχουν κατακριθεί ως ανεπαρκή[4]. Τα τελευταία χρόνια έχει αναπτυχθεί η δυναμική θεωρία της θερμικής άνεσης (adaptive thermal comfort) όπου αναγνωρίζεται η ικανότητα του ανθρώπου να προσαρμόζεται στις κλιματικές συνθήκες, αποτέλεσμα τόσο της ανθρώπινης φυσιολογίας όσο και της ψυχολογίας[5].

Στο πλαίσιο της στατικής θεωρίας μπορούμε να ομαδοποιήσουμε τους παράγοντες που επηρεάζουν τη θερμική άνεση σε εκείνους που σχετίζονται με το χρήστη κι εκείνους που αφορούν τις περιβαλλοντικές συνθήκες. Οι παράγοντες επιρροής που αναφέρονται στο χρήστη είναι βιολογικοί (φύλο, ηλικία, μεταβολισμός, συνήθειες) και εξωτερικοί (είδος ρουχισμού, είδος δραστηριοτήτων). Οι περιβαλλοντικοί παράγοντες αποτελούνται από τη θερμοκρασία και την ταχύτητα του αέρα, τη θερμοκρασία των περιβαλλουσών επιφανειών και την υγρασία *[εικόνα 06]*.



Εικόνα 06 | Παράγοντες επιρροής θερμικής άνεσης.



Εικόνα 07 | Όρια συνθηκών άνεσης άνεσης σε σχέση με τους παράγοντες της σχετικής υγρασίας και της θερμοκρασίας αέρας του χώρου.

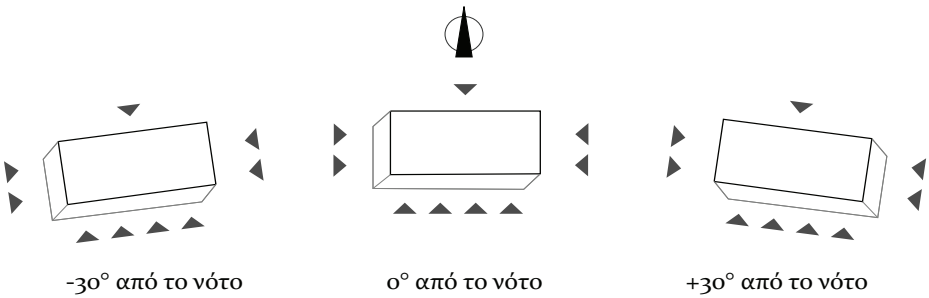
Εστιάζοντας στους παράγοντες της υγρασίας και της θερμοκρασίας του αέρα *[εικόνα 07]*, προκύπτει ότι υπάρχει μία περιοχή άνεσης η οποία κυμαίνεται μεταξύ των ορίων 17°C για τη θερμοκρασία με 75% σχετική υγρασία και 24°C θερμοκρασία με 35% σχετική υγρασία. Γύρω από την περιοχή αυτή υπάρχει μία ζώνη, μέσα στα όρια της οποίας οι συνθήκες κρίνονται ανεκτές. Την ψυχρή περίοδο η θερμοκρασία άνεσης κυμαίνεται μεταξύ 21 και 24°C, ενώ κατά τη θερμή περίοδο μεταξύ 24 και 26 °C. Βλέπουμε από το διάγραμμα ότι σε κανονικές συνθήκες θερμοκρασίας 20-22 °C η σχετική υγρασία πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ 35-65%, ενώ σε υψηλότερες δεν πρέπει να υπερβαίνει το 55%.

Η ΣΗΜΑΣΙΑ ΤΗΣ ΟΨΗΣ ΣΤΗ ΔΟΜΙΚΗ ΦΥΣΙΚΗ

Το κέλυφος του κτιρίου είναι το σημαντικότερο και ταυτόχρονα το πολυπλοκότερο στοιχείο κατά τη μελέτη και την κατασκευή ενός κτιρίου, καθώς βρίσκεται στην πρώτη γραμμή "άμυνας" του κτιρίου έναντι του εξωτερικού περιβάλλοντος - αποτελεί την "τρίτη επιδερμίδα" του ατόμου[6], με πρώτη την ανθρώπινη επιδερμίδα και δεύτερη το ρουχισμό. Καθώς η όψη μπορεί να αντιστοιχεί στο 15% μέχρι 40% του συνολικού προυπολογισμού του κτιρίου και όντας παράλληλα ένας παράγοντας που μπορεί να αυξήσει μέχρι και κατά 40% το κόστος των εγκαταστάσεων για τη διατήρηση της θερμικής άνεσης[7] , ο σχεδιασμός της σύμφωνα με τις αρχές της Δομικής Φυσικής είναι ένα στοιχείο που επηρεάζει σημαντικά τόσο το οικονομικό όσο και τα ενεργειακό ισοζύγιο κατά τη διάρκεια ζωής του κτιρίου.

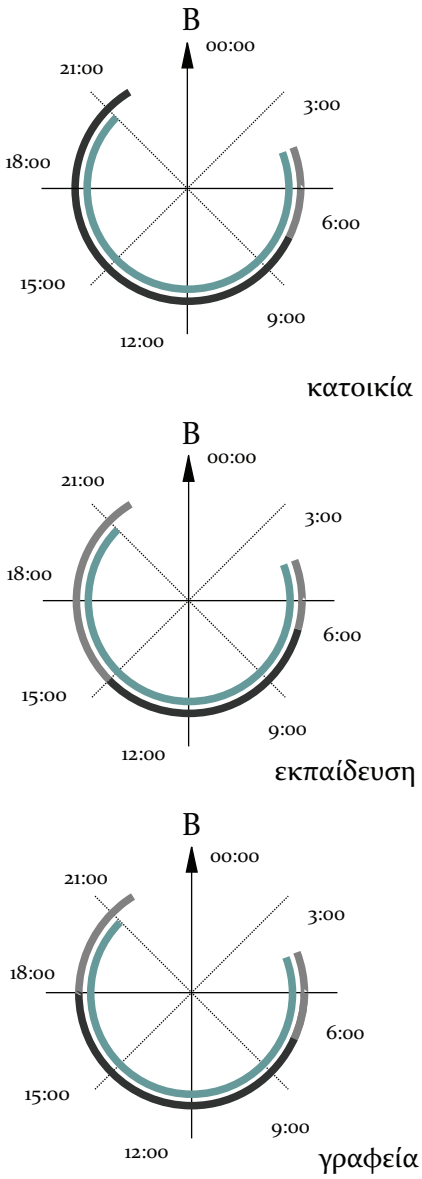
Με την αντιμετώπιση του ζητήματος της ενεργειακής συμπεριφοράς του κελύφους μπορεί να γίνει αξιοποίηση των θετικών επιδράσεων του κλίματος και αποφυγή των επιζήμιων. Καθώς οι επιδράσεις του κλίματος αλλάζουν κατά τη διάρκεια του χρόνου, προκύπτουν διαφορετικές ανάγκες που πρέπει να αντιμετωπιστούν από το κέλυφος του κτιρίου. Συγκεκριμένα, το χειμώνα είναι ιδιαίτερα σημαντική η εξασφάλιση ηλιακής ενέργειας με τον ηλιασμό με παράλληλο περιορισμό των θερμικών απωλειών μέσω της θερμομόνωσης. Αντίστοιχα, το καλοκαίρι πρέπει να εξασφαλίζεται η προστασία από την απευθείας ηλιακή ακτινοβολία και να αποτρέπεται η υπερβολική ανύψωση της θερμοκρασίας των χώρων μέσω του αερισμού και της ηλιοπροστασίας[8]. Τα ανοίγματα του κελύφους διαδραματίζουν ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο στο ενεργειακό ισοζύγιο του κτιρίου.

Η ενεργειακή απώλεια μέσω ενός ανοίγματος εξαρτάται από την εξωτερική και εσωτερική θερμοκρασία και, κατ' επέκταση, από τον προσανατολισμό του. Αντίστοιχα, το ενεργειακό κέρδος εξαρτάται από την κατεύθυνση πρόσπτωσης των ηλιακών ακτίνων[9]. Ο βέλτιστος προσανατολισμός ανοιγμάτων ενός κτιρίου είναι προς το νότο, με απόκλιση 30° ανατολικά ή δυτικά του νότου. Προτείνονται λοιπόν μεγάλα μεγέθη ανοιγμάτων στο νότο, ανοίγματα μετρίου μεγέθους στην ανατολή και τη δύση και μικρά ανοίγματα στο βορρά *[εικόνα 08]*.



Εικόνα 08 | Βέλτιστος προσανατολισμός ανοιγμάτων σε σχέση με το νότο.

Τα ανοίγματα αυτά αποφέρουν θερμικά κέρδη κατά τους ψυχρούς μήνες, αλλά καθώς το καλοκαίρι οι κλιματικές συνθήκες αντιστρέφονται, πρέπει να αντιμετωπιστούν με διαφορετική μεταχείριση. Καθώς η ηλιακή ακτινοβολία είναι έντονη στη διάρκεια των καλοκαιρινών μηνών, το κτίριο απορροφά μεγάλες ποσότητες θερμότητας με αποτέλεσμα στο εσωτερικό του να επικρατούν συνθήκες υπερθέρμανσης που ξεπερνούν τα θερμικά όρια άνεσης και ικανοποίησης που αναφέραμε παραπάνω, 26°C και 27°C αντίστοιχα. Η βελτίωση του εσωκλίματος του κτιρίου κατά τη διάρκεια των καλοκαιρινών μηνών επιτυγχάνεται με την εξασφάλιση φυσικού αερισμού και την προστασία του από



τον ήλιο κυρίως με τη σκίαση των ανοιγμάτων του. Το είδος των ηλιοπροστατευτικών συστημάτων των ανοιγμάτων, η μορφή και η λειτουργία τους εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το είδος και την περίοδο χρήσης του κτιρίου, καθώς πρέπει παράλληλα με τη θερμική άνεση να διασφαλίζονται και οι ανάγκες θέασης και φωτισμού των χρηστών.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η αντιπαράθεση των χρονικών διαστημάτων λειτουργίας και αδράνειας κτιρίων με διαφορετική χρήση (εκπαίδευση, εργασία, κατοικία) κατά τη διάρκεια μιας τυπικής καλοκαιρινής μέρας *[εικόνα 09]*. Παρατηρούμε ότι στην αδρανή περίοδο του κτιρίου, τις ώρες κατά

περίοδος άμεσου ηλιασμού
περίοδος χρήσης του κτιρίου
αδρανής περίοδος του κτιρίου

Εικόνα 09 | Σχέση περιόδου λειτουργίας κτιρίων διαφορετικών χρήσεων και περιόδου ηλιασμού κατά τη διάρκεια μιας ζεστής καλοκαιρινής μέρας.

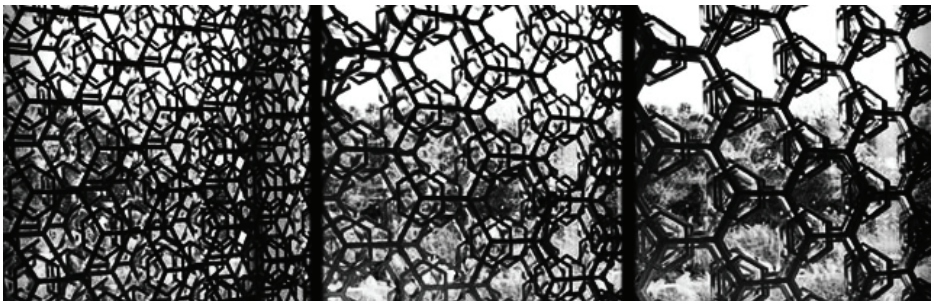
τις οποίες υπάρχει άμεση ηλιακή ακτινοβολία χωρίς παράλληλη έντονη δραστηριότητα από τους χρήστες, οι θερμικές ανάγκες του κτιρίου υπερισχύουν των υποκειμενικών αναγκών των χρηστών. Στην περίοδο αυτή μπορεί, για παράδειγμα, να γίνει πλήρης σκίαση από τα συστήματα ηλιοπροστασίας, καθώς δεν υπάρχει ανάγκη για φωτισμό ή θέα, προκειμένου να διατηρηθεί η επιθυμητή θερμοκρασία στο εσωτερικό του κτιρίου. Αυτό το φαινόμενο μπορεί να αξιοποιηθεί εύκολα μέσω μεταβλητών συστημάτων ηλιοπροστασίας, που μπορούν να λειτουργούν εν απουσία του χρήστη.

συστήματα ηλιοπροστασίας

Η ηλιοπροστασία, στην οποία θα εστιάσουμε, είναι βασικός παράγοντας για την εξοικονόμηση ενέργειας στα κτίρια, ιδιαίτερα σε κλιματικά δεδομένα όπως τα ελληνικά. Αξίζει να αναφερθεί πως η ψύξη είναι δεκαπλάσια ενεργοβόρα από ότι η αντίστοιχη ισοδύναμη θέρμανση[10]. Σε χώρες όπως η Ελλάδα, με άμεση ακτινοβολία 50.000-80.000 Lux και έμμεση ακτινοβολία 5.000-10.000 Lux[11], υπάρχει κίνδυνος υπερθέρμανσης και υπερφωτεινότητας των χώρων, ιδιαίτερα τους θερινούς μήνες. Ο κίνδυνος αυτός πολλαπλασιάζεται καθώς ενώ το σύνολο των ανοιγμάτων μιας μεσημβρινής όψης επαρκεί για τον ικανοποιητικό φωτισμό του χώρου εάν αντιστοιχεί στο 12%-14% της επιφάνειας της κάτοψης συχνά γίνεται υπέρβαση του ποσοστού αυτού με σκοπό την ενοποίηση του κτιρίου με το εξωτερικό περιβάλλον[12].

Οι ηλιοπροστατευτικές διατάξεις καθορίζονται από τον προσανατολισμό του κτιρίου, με γενική κατεύθυνση τις οριζόντιες διατάξεις στο νότο και κατακόρυφες στην ανατολή και δύση με σωστή κλίση σε σχέση με τις προσπίπτουσες ηλιακές ακτίνες.

Τα συστήματα ηλιοπροστασίας διαχωρίζονται σε εσωτερικά και εξωτερικά, στατικά και κινητά, με την κινητή εξωτερική ηλιοπροστασία, παρά το μεγαλύτερο κόστος της σε σχέση με στατικές διατάξεις, να αποδεικνύεται πιο αποδοτική στη λειτουργία της[13]. Η επιλογή του συστήματος ηλιοπροστασίας καθορίζεται και από αισθητικά κριτήρια, καθώς η σχέση του μέσα και του έξω, η διαφάνεια του κελύφους και η διαπερατότητά του από το φως αποτελούν σημαντικά στοιχεία για τη συνθετική διαμόρφωση της όψης του κτιρίου. Προκύπτουν λοιπόν κάποια βασικά κριτήρια αξιολόγησης των συστημάτων ηλιοπροστασίας: η αρχιτεκτονική επίδραση στην όψη, το κόστος εφαρμογής και συντήρησης καθώς και η η απόδοση του συστήματος όσον αφορά τη διαπερατότητα από την ηλιακή ακτινοβολία.



Εικόνα 10 | Hoberman Associates Adaptive Building Initiative, Kinetic Facade for the Simons Center for Geometry and Physics, New York, 2010.

Σημειωσεις κεφαλαιου

1. Παπαδόπουλος, Α. Μ. (2006). *Θερμική Άνεση στα Κτίρια - Νέα Πρότυπα και Βελτίωση Θερμικής Άνεσης στα Κτίρια* (σ. 3). Ιωάννινα: Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.
2. Όπ. παρ. (σ. 4).
3. Santamouris, M. (ed). (2003). *Solar Thermal Technologies for Buildings: The State of the Art* (p. 169). London: James & James.
4. Darby, S.,& White, R. (2005). *Thermal Comfort, Background document C for the 40% House report*. Oxford: University of Oxford, Environmental Change Institute.
5. Παπαδόπουλος, Α. Μ. (2006). *'Οπ. παρ.* (σ. 19).
6. *"Kruger describes the building as our 'second skin', but this is actually provided by the clothes we wear, which provide a significant level of thermal and protective control. This makes the building skin perform the function of a 'third skin'."* Wiggington, M., & Harris, J. (2002). Intelligent Skins. Oxford: Butterworth-Heinemann.
7. *"The facade is one of the most significant contributors to the energy budget as well as the comfort parameters of a building. The facade of a building can account for between 15% and 40% of the total building budget, and may be a significant contributor to the cost of up to 40% more through its impact on the cost of building services."* Όπ. παρ. (σ. 13)
8. Παπαδόπουλος, Μ., & Αξαρλή, Κ. (2006). *Ενεργειακός σχεδιασμός & παθητικά ηλιακά συστήματα κτιρίων* (σ. 13). Θεσσαλονίκη: Εκδοτικός Οίκος Αδελφών Κυριακίδη.
9. *"Όταν τα δεδομένα της ηλιακής ακτινοβολίας χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με την εσωτερική και εξωτερική θερμοκρασία είναι δυνατό να καθορίσυμε το ημερήσιο ηλιακό κέρδος και τη μέση απώλεια θερμότη-*

τας – η διαφορά μεταξύ των δύο είναι η ημερήσια ενεργειακή ισορροπία.'' Κοσμόπουλος, Π. Ι. (2008). *Περιβαλλοντικός Σχεδιασμός* (σσ. 170-171). Θεσσαλονίκη: University Studio Press.

10. Παπαδόπουλος, Μ., & Αξαρλή, Κ. (2006). *Όπ. παρ. (σ. 167).*

11. Μαλινδρέτος, Μ. (2007). *Δομική Φυσική* (σ. 138). Θεσσαλονίκη: University Studio Press.

12. Όπ. παρ. (σ. 139).

13. Ανδρεαδάκη, Ε. (2007). *Βιοκλιματικός Σχεδιασμός - Περιβάλλον και Βιωσιμότητα* (σ. 90). Θεσσαλονίκη: University Studio Press. Μαλινδρέτος, Μ. (2007). Δομική Φυσική. Θεσσαλονίκη: University Studio Press.

3

ΜΕΤΑΒΛΗΤΟΤΗΤΑ

“Η αληθινή αρχιτεκτονική δεν είναι ένα στατικό, πλαστικό μέγεθος που στέκουμε μπροστά του σα θεατές και μονάχα για να το προσκυνάμε, αλλά είναι κάτι το ζωντανό, που δουλεύουμε και ζούμε μαζί του (που κι αυτό δηλαδή ζει μαζί μας), μέσα στο χώρο του τοπίου και μέσα στο δικό του χώρο, αλλά και μέσα στη διάρκεια της ζωής του.’’

Για την αρχιτεκτονική, Ά. Κωνσταντινίδης.

Η μεταβλητότητα απαντάει στις αναγκαίες συνθήκες θερμικής άνεσης που αναλύσαμε παραπάνω, δεδομένου τόσο των καιρικών και χρονικών αλλαγών όσο και των υποκειμενικών παραγόντων, εισάγοντας δηλαδή τον παράγοντα του χρόνου σε σχέση με τις ανάγκες που προκύπτουν από τη συνεχή ανανέωση των δεδομένων για το περιβάλλον και το χρήστη. Συγκεκριμένα οι όψεις, όπως αναφέρθηκε, λειτουργούν ως όριο μεταξύ του εσωτερικού περιβάλλοντος του κτιρίου και των εξωτερικών συνθηκών, χωρίς να ανταποκρίνονται σε αυτές. Η μεταβαλλόμενη όψη ωστόσο, μπορεί να αλλάζει μέρος της εμφάνισης ή ακόμη και τη συνολική μορφή της, ανταποκρινόμενη σε κλιματικούς παράγοντες ή σε ανθρώπινες δραστηριότητες[1]. Με την αξιοποίηση των δυνατοτήτων που προσφέρει το περιβάλλον αλλά και των δεδομένων μεταβολών κατά τη διάρκεια μίας ημέρας, η μεταβαλλόμενη αρχιτεκτονική επιτυγχάνει να αντιδρά το κτίριο στα ερεθίσματα που δέχεται από το περιβάλλον του ή ακόμη και να αλληλεπιδρά με το χρήστη.

Μέσω της χωρικής αλλά και χρονικής μεταβλητότητας επιδιώκεται να ανατραπεί η στερεότυπη αντίληψη για μία αρχιτεκτονική στάσιμη[2], και να δοθεί μία δυναμική διάσταση ευελιξίας στη σχέση ανθρώπου, κτιρίου και περιβάλλοντος. Αναζητείται λοιπόν ο βέλτιστος συνδυασμός των υπαρχόντων μέσων, που θα συμβάλλει στο να βελτιωθεί ο σχεδιασμός χωρικά, κοινωνικά, ενεργειακά και αντιληπτικά.

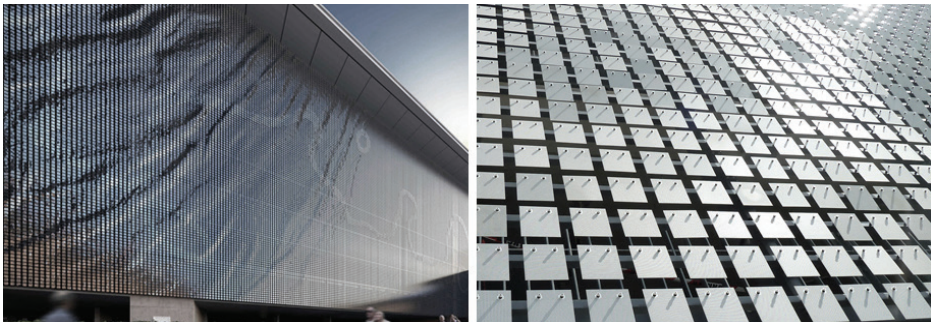
Η μεταβλητότητα στην αρχιτεκτονική μπορεί να εφαρμοστεί είτε με χρήση μηχανικών συστημάτων είτε με μη μηχανικά μέρη (έξυπνα υλικά), με τον δεύτερο να αποτελεί τον τομέα στον οποίο θα εστιάσουμε. Οι μηχανικές μεταβολές μπορούν επίσης να κατηγοριοποιηθούν ανάλογα με την κατασκευαστική προσέγγιση και τη μορφή τους. Συνοπτικά, μπορούν να

ταξινομηθούν σε πτυχωτά και κυλιόμενα στοιχεία και επιφάνειες, χωροδικτυωματικά συστήματα, μεταβολές με ψηφιακά μέσα και τέλος όπως προαναφέρθηκε, μεταβολές με έξυπνα υλικά[3]. Τα συστήματα που προτείνονται, σε κάθε περίπτωση μεταβαλλόμενης αρχιτεκτονικής, μπορούν να είναι αυτόνομα ή να είναι χειριζόμενα από το χρήστη. Αυτό σημαίνει ότι είτε δίνεται η δυνατότητα στο χρήστη να επηρεάσει τη μεταβλητή συμπεριφορά του συστήματος είτε το σύστημα να ανταποκρίνεται σε προκαθορισμένα δεδομένα χωρίς δυνατότητα παρέμβασης από το χρήστη. Η ιδανικότερη λύση φαίνεται να είναι συνδυασμός αυτών, όπου το κτίριο μπορεί να προσαρμόζεται ανάλογα με τα δεδομένα που του έχουν δοθεί, χωρίς όμως να υποχρεώνει το χρήστη να παραμείνει σε μία μη επιθυμητή κατάσταση που είναι καθορισμένη από το σύστημα, δίνοντάς του τη δυνατότητα να ελέγχει την προσαρμοστικότητα του συστήματος.

Εικόνα 11 | T. Jansen, Animaris Percipiere, 2006.

ΜΕΤΑΒΛΗΤΗ VS ΣΤΑΤΙΚΗ ΟΨΗ

Μία μεταβλητή όψη λοιπόν, διαφέρει από μία στατική λόγω της ενσωμάτωσης ανταποκριτικών μηχανισμών στο κτίριο, οι οποίοι προσαρμόζονται στα δεδομένα που δέχονται επιτρέποντάς τους να ρυθμίζουν το κλίμα στο εσωτερικό του κτιρίου. Τα κτίρια ανταποκρίνονται στα εισερχόμενα ερεθίσματα με στόχο την επίτευξη των επιθυμητών ποσοστών θερμικής άνεσης με παράλληλη ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας για τη λειτουργία του κτιρίου. Με τον τρόπο αυτό επηρεάζεται το δίπολο εσωτερικού-εξωτερικού περιβάλλοντος του κτιρίου, καθώς η μεταβλητή όψη συμβάλλει στην ενεργή διαμόρφωση της σχέσης μεταξύ του μέσα και του έξω, σε αντίθεση με τον παθητικό ρόλο ενός συμβατικού κτιρίου. Παράλληλα, η εφαρμογή της μεταβλητότητας στο κέλυφος του κτιρίου επιφέρει αλλαγές στο δίπολο μεταξύ δημοσίου και διωτικού, επηρεάζοντας την αντιπροσώπευση του κτιρίου μέσω της όψης και της μορφής του. Η αισθητική της μεταβλητής όψης αποκτά νέα υπόσταση σε σχέση με τη συμβατική όψη καθώς ενσωματώνει τα στοιχεία του χρόνου[4] και της κίνησης.



Εικόνα 12 | N. Kahn and UAP, Brisbane Airport car park, Brisbane, 2012.

Οι έννοιες αυτές είναι αλληλένδετες μεταξύ τους στην ανθρώπινη αντίληψη, καθώς αντιλαμβανόμαστε το χρόνο μόνο σε σχέση με την κίνηση και την αλλαγή (με εμφανή παραδείγματα τη φθορά ή την αλλαγή των εποχών). Η σχέση αυτή λειτουργεί και αμφίδρομα: αντιλαμβανόμαστε κάθε κίνηση σε σχέση με το χρόνο. Για να περιγραφεί μία κίνηση χρειάζονται τουλάχιστον δύο διαφορετικές καταστάσεις που αφορούν την μεταβολή στον χρόνο ή το χώρο, με τη δεύτερη να συνεπάγεται μεταβολή και στο χρόνο. Εμφανές παράδειγμα είναι ο ορισμός της κίνησης στην φυσική με τη μεταβολή της μετατόπισης να περιγράφεται ως:

$$\Delta x = v\Delta t$$

όπου x είναι η χωρική μεταβολή, u είναι η ταχύτητα της χωρικής μεταβολής και Δt η χρονική μεταβολή: δεν νοείται κίνηση χωρίς την έννοια του χρόνου.

Συνεπώς η μεταβλητότητα στην εξωτερική όψη του κτιρίου είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με την έννοια του χρόνου, δίνοντας ένα πολύ ενδιαφέρον πεδίο ανίχνευσης δυνατοτήτων για τον αρχιτέκτονα, με το κτίριο να λειτουργεί ως πεδίο προβολής των συνεχών μεταβολών του περιβάλλοντος. Η ενσωμάτωση της μεταβλητότητας και, κυρίως, της ανταποκρισιμότητας στο κτίριο, δηλαδή της μεταβλητής λειτουργίας συναρτήσει εξωτερικών ερεθισμάτων, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως εργαλείο σύνδεσης του κτιρίου με τον χρόνο. Τα κτίρια σχεδιάζονται με σκοπό να είναι κατάλληλα για μεγάλα χρονικά διαστήματα, για παράδειγμα με κριτήριο την αντοχή τους σε σχέση με το προσδόκιμο όριο ζωής τους[5]. Μέσω της μεταβλητής συμπεριφοράς του κτιρίου, η σχέση του με το χρόνο μπορεί να αφορά μικρότερα χρονικά διαστήματα, για παράδειγμα μέσω της ανταπόκρισής του σε ημερήσιες αλλαγές στη θερμοκρασία.

ΜΕΤΑΒΛΗΤΟΤΗΤΑ & ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΝΕΣΗ

Η αρχιτεκτονική έχει στόχο να ανταποκρίνεται στις ανθρώπινες ανάγκες. Δεχόμενοι πως οι ανάγκες αυτές είναι μεταβλητές, οφείλουμε να δώσουμε αντίστοιχη δυνατότητα ευελιξίας στο αποτέλεσμα του αρχιτεκτονικού σχεδιασμού, δημιουργώντας κτίρια που μεταβάλλονται σε σύμπνοια με το χρήστη, ανταποκρινόμενα στις ανάγκες του. Η εξέλιξη της μεταβαλλόμενης αρχιτεκτονικής, μέσα στο εύρος των δυνατοτήτων που προσφέρει, οφείλει να εστιάσει σε τρεις κύριους παράγοντες: την άνεση του χρήστη, την εξοικονόμηση ενέργειας και τέλος, την αρχιτεκτονική ποιότητα.

Εστιάζοντας στην άνεση του χρήστη, ο στόχος είναι να διατηρούνται οι εσωτερικές συνθήκες του κτιρίου όσο πιο σταθερές γίνεται, αναφορικά με την προστασία από το κρύο, τη ζέστη και τον ήλιο, καθώς και το φυσικό αερισμό και φωτισμό. Οι παράμετροι αυτοί είναι συχνά αντικρουόμενες, ενώ παράλληλα πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν οι υποκειμενικές ανάγκες του ατόμου. Δημιουργείται έτσι ένα ιδιαίτερα πολύπλοκο σύστημα παραμέτρων με διαφορετικές βαρύτητες, οι οποίες σε πραγματικές συνθήκες είναι ευμετάβλητες – για παράδειγμα άλλοτε κρίνεται σημαντικότερη η θερμική άνεση του χρήστη, άλλοτε η δυνατότητα θέασης κ.ο.κ.. Ένα ιδανικό ευφυές σύστημα θα έπρεπε να είναι σε θέση να αξιολογήσει τις παραμέτρους αυτές και να τροποποιήσει ανάλογα τη συμπεριφορά του, εγχείρημα σημαντικά δύσκολο. Στο πλαίσιο της εργασίας αυτής, θα θέσουμε εμείς συγκεκριμένες παραμέτρους καθώς και τις ιδανικές τιμές αυτών, σε μια απλοποιημένη προσέγγιση της έννοιας της ανταποκρισιμότητας.

Όσον αφορά την εξοικονόμηση ενέργειας, στόχος της εφαρμογής μεταβλητότητας στην όψη του κτιρίου είναι

η βέλτιστη ανταπόκρισή του στη σχέση εξωτερικών και εσωτερικών συνθηκών προκειμένου να εξασφαλιστεί η λιγότερη δυνατή δαπάνη ενέργειας. Η εξοικονόμηση ενέργειας μέσω της εφαρμογής μεταβλητών συστημάτων σκίασης συνεπάγεται τρία ζητούμενα: την απόσβεση του αρχικού κόστους κατασκευής των συστημάτων αυτών μέσω της λειτουργίας τους, την βελτίωση του ενεργειακού ισοζυγίου κατά τη διάρκεια της λειτουργίας τους σε σχέση με την εφαρμογή συμβατικών συστημάτων, και τέλος τη μείωση του κόστους συντήρησης και επισκευής κατά τη διάρκεια ζωής των μεταβλητών συστημάτων.

Τέλος, η αρχιτεκτονική ποιότητα της όψης είναι ένας υποκειμενικός παράγοντας, στον οποίο δύσκολα μπορούμε να θέσουμε κριτήρια. Σε γενικές γραμμές, στόχος είναι να δοθεί κινητικότητα στην όψη του κτιρίου η οποία να προκύπτει τόσο από την κίνηση των μεταβλητών στοιχείων της αυτή καθεαυτή όσο και από την ίδια τη μορφή αυτών των στοιχείων. Παράλληλα, θεωρούμε πολύ σημαντική την ανάδειξη της σχέσης του φωτός και της σκιάς μέσω των συστημάτων αυτών, ένα στοιχείο που επηρεάζει ιδιαίτερα την αίσθηση του χρήστη στο χώρο.

ΜΕΤΑΒΛΗΤΟΤΗΤΑ & ΗΛΙΟΠΡΟΣΤΑΣΙΑ

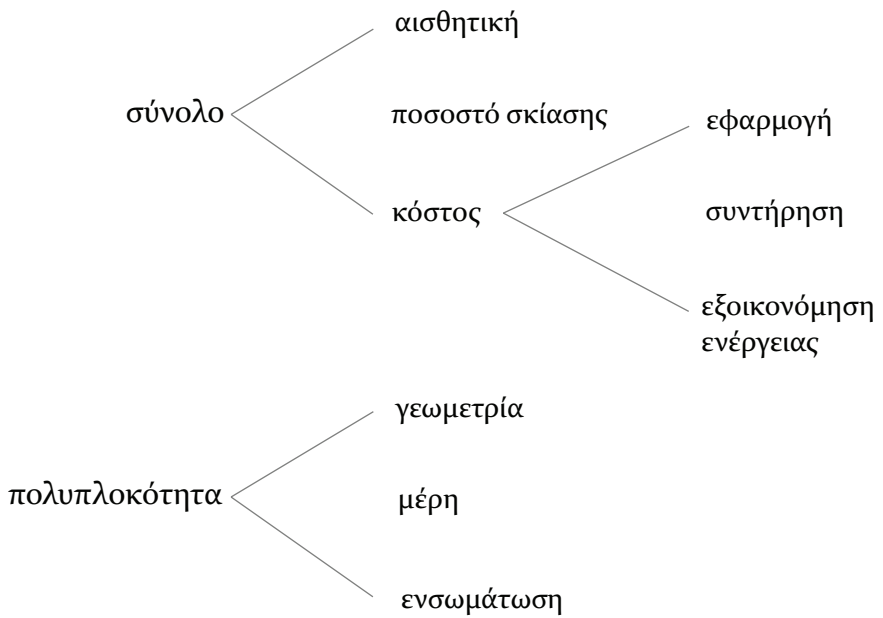
Μέσω της παραπάνω ανάλυσης τέθηκε η βάση για την ενασχόλησή μας με συστήματα ηλιοπροστασίας τα οποία ενσωματώνουν στοιχεία μεταβλητότητας. Θέτουμε σαν παράμετρο τον αυτοματισμό των μεταβλητών αυτών συστημάτων, καθώς θα εστιάσουμε σε συστήματα που παρουσιάζουν ανταποκρισιμότητα στις περιβαλλοντικές συνθήκες, στοιχείο που περιλαμβάνει την έννοια του αυτοματισμού. Οι δυνατότητες που προσφέρει ένα σύστημα σκίασης το οποίο ανταποκρίνεται στις περιβαλλοντικές

συνθήκες είναι εμφανείς, καθώς μπορεί να συμβάλλει τόσο στη βελτίωση των συνθηκών άνεσης μέσα στο κτίριο καθώς και τη λειτουργική απόδοση του συστήματος[6]. Παράλληλα, υπάρχει μια αντίφαση μεταξύ της εν λόγω λειτουργίας του συστήματος και της ανάγκης για χαμηλό κόστος και κατανάλωση ενέργειας. Σ' αυτήν ακριβώς την αντίφαση έγκειται η δυσκολία κατασκευής ενός ανταποκριτικού συστήματος σκίασης που να βελτιώνει τόσο τις συνθήκες άνεσης του κτιρίου όσο και το ενεργειακό του ισοζύγιο. Ιδιαίτερα σημαντικό στοιχείο είναι και ο παράγοντας του κόστους του συστήματος σκίασης, στον οποίο μπορούμε να συμπεριλάβουμε το κόστος εφαρμογής, το κόστος συντήρησης αλλά και το ενεργειακό του κόστος. Χάριν ευκολίας, δεχόμαστε ότι η έννοια του κόστους εφαρμογής περιλαμβάνει και το κόστος κατασκευής του συστήματος. Ένας τρόπος επίτευξης χαμηλού κόστους είναι η μείωση της πολυπλοκότητας του μεταβλητού συστήματος. Προκύπτουν λοιπόν σημαντικοί παράγοντες που επηρεάζουν την πολυπλοκότητα, και κατ'επέκταση το κόστος, όπως η γεωμετρία του συστήματος, ο αριθμός των μερών από τα οποία αποτελείται καθώς και ο βαθμός ενσωμάτωσης της μεταβλητής λειτουργίας στο σύστημα.

Με αυτόν τον τρόπο τίθεται ο προβληματισμός που αποτέλεσε κινητήρια δύναμη αυτής της εργασίας, ο οποίος μπορεί να περιγραφεί ως δυσκολία συμβιβασμού μεταξύ της σύνθετης συμπεριφοράς του συστήματος και της απλής κατασκευής του, με το δεύτερο σκέλος να συνεπάγεται το επιθυμητό χαμηλό κόστος και τις χαμηλές ενεργειακές απαιτήσεις. Στο ίδιο πλαίσιο αναζήτησης μπορούμε να εντάξουμε και τη συλλογική διάσταση της εφαρμογής της ανταποκρισιμότητας στα στοιχεία της όψης του κτιρίου. Προκειμένου να είναι ομαλή η ενσωμάτωση μιας τέτοιας εφαρμογής στην ιστορική, κοινωνική και πολιτισμική

ροή, είναι σημαντική η αποφυγή ασυνεχειών - τέτοιες ασυνέχειες στον τομέα της τεχνολογίας, για παράδειγμα, αναφέρονται με τον όρο high tech, υποδηλώνοντας την διαφορετικότητα της εν λόγω καινοτομίας. Αυτή τη συλλογική διάσταση μπορούμε να την εκφράσουμε με την έννοια της αισθητικής, δίνοντας έμφαση στην ιδέα της αποδοχής και την έκφραση πολισμικών χαρακτηριστικών μέσω της μορφής και της ενσωμάτωσης των μεταβλητών στοιχείων.

Στην προσπάθειά μας να αξιολογήσουμε διαφορετικά ανταποκριτικά συστήματα σκίασης, προέκυψε ένα σύνολο κριτηρίων αξιολόγησης τα οποία θα αναλύσουμε στη συνέχεια.



Εικόνα 13 | Συσχετισμός μεταξύ των κριτηρίων αξιολόγησης.

ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΣΚΙΑΣΗΣ

Κατηγορία: Σύνολο

Αισθητική - Διάκοσμος

Το κριτήριο αυτό αποσκοπεί στην αξιολόγηση της πολυπλοκότητας του διακόσμου του συστήματος σκίασης. Η τιμή του διακόσμου αφορά τη φιλοσοφία της αισθητικής και την πυκνότητα του διακόσμου, στοιχεία που προκαλούν συναισθήματα και εκφράζουν πολιτισμικά χαρακτηριστικά.

Εύρος: απλή γεωμετρία, ενδιάμεση πολυπλοκότητα γεωμετρίας, διακοσμητικό μοτίβο

Συντελεστής σκίασης

Το κριτήριο αυτό αποσκοπεί στην αξιολόγηση του συντελεστή σκίασης που προσφέρει το σύστημα σκίασης. Το εύρος του εξαρτάται από την αποτελεσματικότητα σκίασης του συστήματος.

Εκτιμώμενο εύρος: 0 (μηδενική σκίαση) έως 100% (πλήρης σκίαση)

Κόστος

Το κριτήριο αυτό αποσκοπεί στην αξιολόγηση του συνολικού κόστους του συστήματος σκίασης. Η τιμή αυτή εκφράζεται ως ο μέσος όρος των τριών μεταβλητών της κατηγορίας 'Κόστος'.

Εύρος κλιμάκωσης: χαμηλό, μεσαίο, υψηλό

Κατηγορία: Κόστος

Εφαρμογή - Εγκατάσταση

Το κριτήριο αυτό αποσκοπεί στην αξιολόγηση του κόστους εφαρμογής και εγκατάστασης του συστήματος σκίασης. Η τιμή του κόστους εγκατάστασης του συστήματος σκίασης εκφράζεται ως ποσοστό του συνολικού κόστους του κτιρίου.

Εκτιμώμενο εύρος: 0-0.5%, 0.5-1%, 1-5% του συνολικού κόστους.

Συντήρηση

Το κριτήριο αυτό αποσκοπεί στην αξιολόγηση του κόστους συντήρησης του συστήματος σκίασης. Η τιμή του εκφράζει τη συχνότητα μεταξύ των απαιτούμενων επισκευών.

Εκτιμώμενο εύρος: (εκφράζεται σε έτη) 0-0.5 έτος, 0.5-1 έτος, 1-1.5 έτος.

Ενεργειακή Απόδοση

Το κριτήριο αυτό αποσκοπεί στην αξιολόγηση της ενεργειακής απόδοσης του συστήματος σκίασης. Η τιμή του κριτηρίου ενεργειακής απόδοσης αφορά το ισοζύγιο της ενεργειακής κατανάλωσης του συστήματος σκίασης.

Εκτιμώμενο εύρος: κατανάλωση ενέργειας (αρνητικό ενεργειακό ισοζύγιο), μηδενικό ενεργειακό ισοζύγιο, ενεργειακό κέρδος (θετικό ενεργειακό ισοζύγιο).

Κατηγορία: Πολυπλοκότητα

Γεωμετρία

Το κριτήριο αυτό αποσκοπεί στην αξιολόγηση του βαθμού γεωμετρικής πολυπλοκότητας του συστήματος σκίασης.

Εύρος: γεωμετρικά σχήματα απλής, ενδιάμεσης, μεγάλης πολυπλοκότητας.

Μέρη

Το κριτήριο αυτό αποσκοπεί στην αξιολόγηση της ποσότητας των μερών που απαρτίζουν μια μονάδα σκιάστρου. Η τιμή αυτή εκφράζεται βάσει της ποσότητας των μερών που απαρτίζουν μία μονάδα σκιάστρου.

Εύρος: χαμηλό, μεσαίο, υψηλό

Ενσωμάτωση

Το κριτήριο αυτό αποσκοπεί στην αξιολόγηση του βαθμού ενσωμάτωσης της έξυπνης συμπεριφοράς στο σύστημα σκίασης. Η τιμή του κριτηρίου της ενσωμάτωσης εξαρτάται από τον αριθμό των διαφορετικών διεργασιών που απαιτούνται για την ανταπόκριση του σκιάστρου.

Εύρος: χαμηλό, μεσαίο, υψηλό

Αξιολόγηση παραδειγμάτων

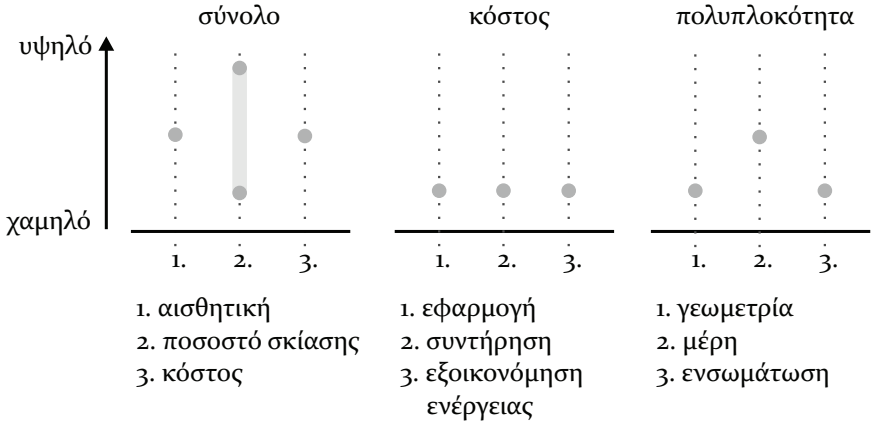
Στη συνέχεια παραθέτουμε τρία παραδείγματα συστημάτων σκίασης που παρουσιάζουν ανταποκρισιμότητα. Η επιλογή αυτών των παραδειγμάτων αντανακλά την απόφασή μας να αξιολογήσουμε συστήματα που προέρχονται από διαφορετικές αρχές σχεδιασμού, και συγκεκριμένα, τόσο συστήματα που ενσωματώνουν ευρέως χρησιμοποιούμενη τεχνογνωσία όσο και συστήματα που ενσωματώνουν καινοτόμες τεχνολογίες. Τα παραδείγματα που θα αξιολογήσουμε είναι το κτίριο γραφείων ΑΚΤΕΡ ΑΤΕ στα Χανιά (Ελλάδα), το Ινστιτούτο Αραβικού Κόσμου στο Παρίσι (Γαλλία) και το Esplanade - Θέατρο στον Κόλπο στη Σιγκαπούρη (Σιγκαπούρη).

Το κτίριο της εταιρίας ΑΚΤΕΡ ΑΤΕ επιλέχθηκε ως αντιπροσωπευτικό παράδειγμα εφαρμογής ενός ανταποκριτικού συστήματος σκίασης το οποίο παρουσιάζει μεγάλη απήχηση στην Ελλάδα και απαιτεί ευρέως χρησιμοποιούμενη τεχνογνωσία. Τα άλλα δύο παραδείγματα αφορούν συστήματα σκίασης τα οποία εφαρμόζουν λιγότερο διαδεδομένη τεχνολογία αλλά παράλληλα διαφέρουν μεταξύ τους στην πολυπλοκότητα του μηχανισμού σκίασης. Θα εξετάσουμε τα παραδείγματα αυτά σε σχέση με τα κριτήρια που αναφέραμε παραπάνω, αξιολογώντας τα σε τρεις ενότητες: τις ενότητες του κόστους και της πολυπλοκότητας καθώς και την ενότητα του συνόλου, η οποία περιλαμβάνει γενικά χαρακτηριστικά του συστήματος σκίασης καθώς και την εκτίμηση του συνολικού κόστους που προκύπτει από την αντίστοιχη ενότητα.

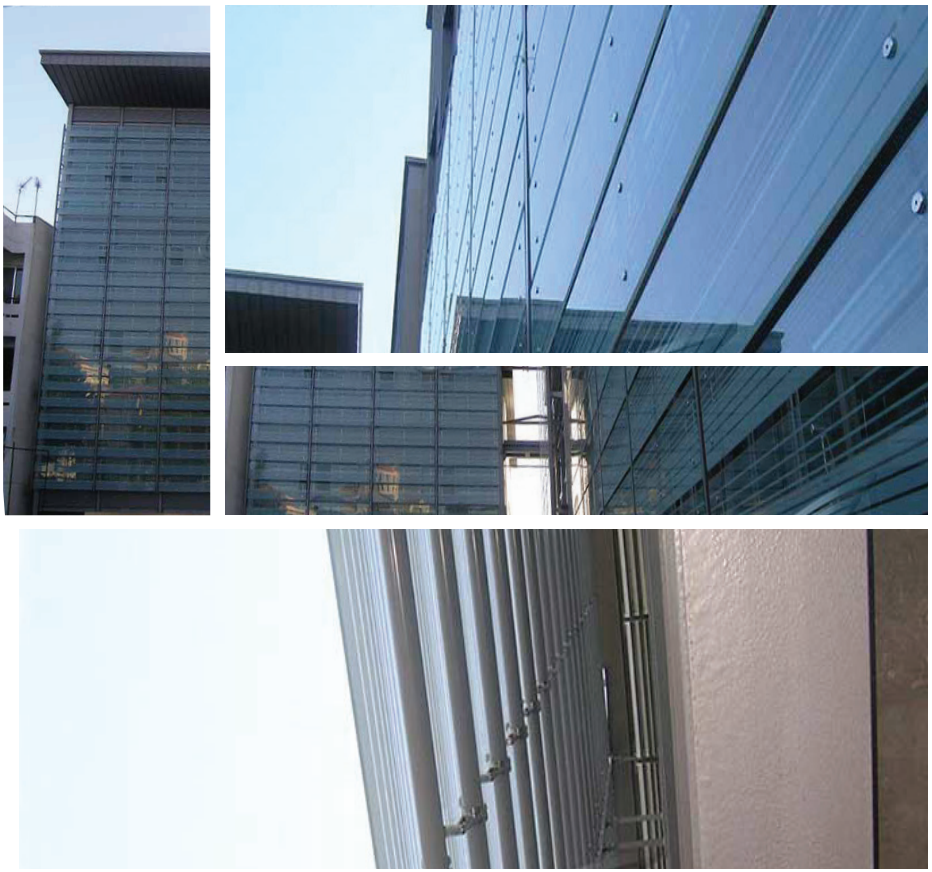
Εικόνα 14 | Απόψεις των τριών κτιρίων που θα αξιολογηθούν.

Κτίριο γραφείων ΑΚΤΕΡ ΑΤΕ

Γ. & Λ. Αραχωβίτης, Χανιά, Ελλάδα, 2009
Το συγκεκριμένο κτίριο αποτελεί αντιπροσωπευτική περίπτωση εφαρμογής του πιο συχνά χρησιμοποιούμενου είδους σκιάστρων στην Ελλάδα. Το σύστημα αυτό των περσίδων στην όψη παρέχει ηλιοπροστασία στο κτίριο, χρησιμοποιώντας ηλεκτρονικούς αισθητήρες και κινητήρες[7]. Η μείωση της πολυπλοκότητας, σε τέτοιες περιπτώσεις συστημάτων σκίασης, τα καθιστά ως μία οικονομικά αποδοτική λύση και αποτελεί έναν από τους κύριους λόγους που είναι τα πιο ευρέως διαδεδομένα σκίαστρα στην Ελλάδα. Το χαμηλής πολυπλοκότητας σύστημα αποτελείται από γυάλινες περσίδες με τυπωμένη μεταξοτυπία για αποδοτικότερο έλεγχο του φωτός.



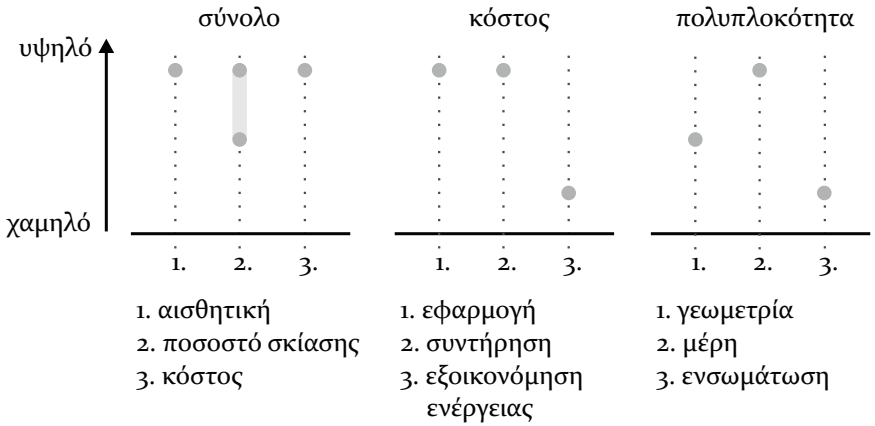
Εικόνα 15 | Αξιολόγηση του κτιρίου γραφείων ΑΚΤΕΡ ΑΤΕ.



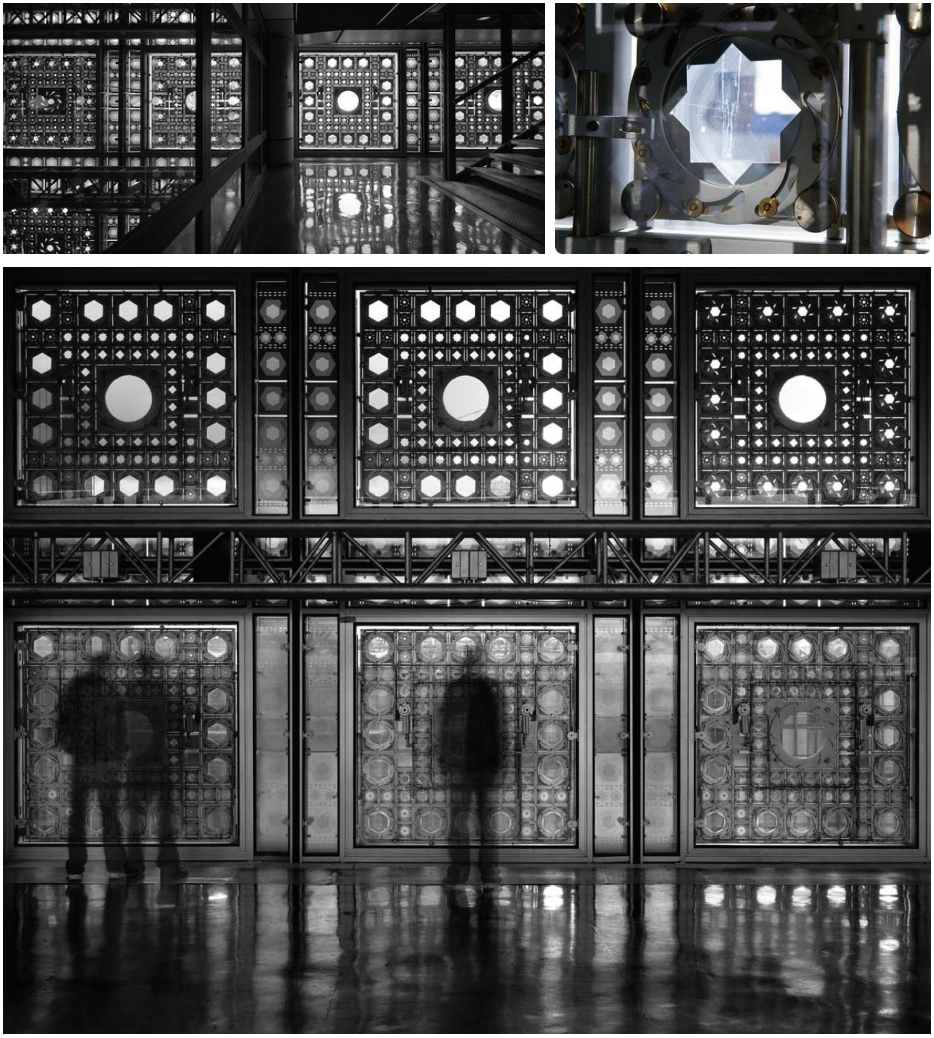
Εικόνα 16 | Απόψεις του κτιρίου γραφείων ΑΚΤΕΡ ΑΤΕ.

Ινστιτούτο του Αραβικού Κόσμου
Arab World Institute

Jean Nouvel, Paris, France, 1981 – 1987
Το Ινστιτούτο του Αραβικού Κόσμου είναι ένα από τα πιο γνωστά παραδείγματα συνδυασμού αισθητικής και τεχνολογίας στον τομέα της μεταβαλλόμενης αρχιτεκτονικής[8]. Ο Jean Nouvel εμπνεύστηκε από το αραβικό moucharabieh και σχεδίασε μία γεωμετρική όψη, η οποία αποτελείται από τετράγωνα πλαίσια με μηχανικά κλείστρα[9]. Τα κλείστρα αυτά, όντας συνδεδεμένα με έναν κεντρικό υπολογιστή, διαμορφώνουν την διαπερατότητα της όψης. Λόγω του μεγάλου κόστους συντήρησης η όψη αυτή είναι τώρα στατική, καθώς ένα μέρος των κλείστρων έχει βλάβες[10]. Τα κύρια χαρακτηριαστικά της όψης είναι η υψηλή αισθητική της καθώς και η πολυπλοκότητά της.



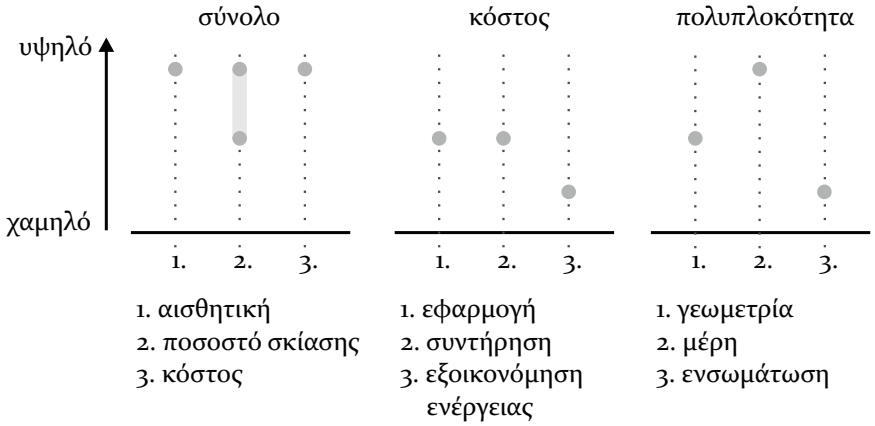
Εικόνα 17 | Αξιολόγηση του κτιρίου Arab World Institute.



Εικόνα 18 | Απόψεις του κτιρίου Arab World Institute.

Θέατρα στον Κόλπο
Theatres on the Bay

DP Architects, Michael Wilford & Partners, Marina Bay, Singapore, 2002
Το κτίριο Esplanade Theatres on the Bay είναι ένα παράδειγμα ανταποκριτικού κελύφους το οποίο παρουσιάζει γεωμετρική απλότητα. Η επένδυση του κελύφους είναι εμπνευσμένη από μορφές και μοτίβα που βρίσκονται στη φύση[11]. Το σύστημα σκίασης του κτιρίου αποτελείται από ένα χωροδικτύωμα χάλυβα στο οποίο είναι αναρτημένα τριγωνικά σκιάδια αλουμινίου[12]. Τα σκιάδια, ελεγχόμενα από κεντρικό υπολογιστή, ανοιγοκλείνουν προκειμένου να προστατεύσουν το κτίριο από την άμεση ακτινοβολία.



Εικόνα 19 | Αξιολόγηση του κτιρίου Esplanade - Theatres on the Bay.

Εικόνα 20 | Απόψεις του κτιρίου Esplanade - Theatres on the Bay.

Συμπεράσματα αξιολόγησης

Ιδανικές τιμές στην αξιολόγηση του συστήματος σκίασης είναι το χαμηλό κόστος καθώς και το μεγάλο εύρος συντελεστή σκίασης. Όσον αφορά το κριτήριο της αισθητικής, επιθυμητή τιμή του ιδανικού συστήματος θεωρούμε το μέσο του εύρους, καθώς οι ακραίες τιμές του εύρους σχετίζονται με το συναίσθημα του ανοίκειου[13]. Η ανάλυση των παραδειγμάτων τονίζει τις σχέσεις εξάρτησης μεταξύ των δεδομένων κριτηρίων, ιδίως μεταξύ των ενοτήτων της πολυπλοκότητας και του κόστους. Η εξάρτηση αυτή υποδηλώνει την πιθανότητα βελτίωσης πολλών παραγόντων με τη μείωση της πολυπλοκότητας του συστήματος. Έχοντας ως δεδομένο την επιθυμητή ανταποκριτική λειτουργία του μηχανισμού, κύριο ζητούμενο είναι η παράλληλη επίτευξη χαμηλού κόστους.

Η μείωση της πολυπλοκότητας του μηχανισμού σκίασης, είτε όσον αφορά τη γεωμετρία είτε τα μέρη του, καθώς και ο μεγαλύτερος βαθμός ενσωμάτωσης της μεταβλητής συμπεριφοράς στο σκίαστρο είναι σημαντικός παράγοντας επιρροής του συνολικού κόστους του συστήματος τόσο σε οικονομικό όσο και σε ενεργειακό επίπεδο. Από την ανάλυση αυτή υπογραμμίζεται ο προβληματισμός που θέσαμε παραπάνω για τη δυσκολία συμβιβασμού μεταξύ της επιθυμητής σύνθετης συμπεριφοράς και της απλής κατασκευής του συστήματος. Καθώς η αντίφαση μεταξύ της ανάγκης για πολύπλοκη συμπεριφορά και της παράλληλης μείωσης του κόστους αυτής συναντάται και στο ευρύτερο περιβάλλον, είναι σημαντική η μελέτη της συμπεριφοράς της φύσης και συγκεκριμένα των έμβιων όντων για την αντιμετώπιση του συγκεκριμένου θέματος.

Βιομιμητική

Η διαδικασία της φυσικής επιλογής κατά τη διάρκεια εκατομμυρίων χρόνων έχει οδηγήσει σε μία πληθώρα λύσεων για την εύρεση της κατάλληλης ισορροπίας μεταξύ σύνθετης συμπεριφοράς και απλής κατασκευής[14], δημιουργώντας τη βάση για το πεδίο της βιομιμητικής[20]. Η βιομιμητική, όπως είναι εμφανές από την ίδια την ετυμολογία της λέξης, βίος και μίμησις, αφορά τη μίμηση της ζωής και της φύσης. Η επιστήμη αυτή μελετά διεργασίες, μεθόδους και μηχανισμούς εμπνευσμένους από τη φύση[15].

Στη φύση συναντώνται μηχανισμοί ανάπτυξης και σύμπτυξης γεωμετρίας με τη λιγότερη δυνατή κατανάλωση ενέργειας[16], οι οποίοι μπορούν να αποτελέσουν πηγή έμπνευσης για την αρχιτεκτονική. Ο σχεδιασμός με πρότυπο τη φύση, ο οποίος εστιάζει όχι μόνο στις φυσικές μορφές αλλά και στην ομαλή ενσωμάτωση της ανταποκριτικής συμπεριφοράς στο ίδιο το σύστημα, είναι ένα πεδίο το οποίο πραγματεύεται το εν λόγω ζήτημα. Η ιαπωνική τέχνη διπλώματος χαρτιού Origami είναι μία τεχνική που στοχεύει στην απλούστευση μορφών από τη φύση και τη μεταφορά τους σε κατασκευές μικρότερης πολυπλοκότητας[17]. Στο ίδιο πλαίσιο αναφοράς εντάσσεται και η έννοια του βιολογικού προτύπου στον τομέα των υλικών, όπου η ενσωμάτωση της μεταβολής γίνεται σε μικρο-κλίμακα (μικρότερη του ενός μικρομέτρου) ενώ παράλληλα τα αποτελέσματα αυτής της μεταβολής είναι αντιληπτά στη μεσο-κλίμακα (ένα εκατοστό) και τη μακρο-κλίμακα (μεγαλύτερη από ένα μέτρο)[18]. Η βελτιστοποίηση αυτή παραπέμπει στην σύμπτυξη λειτουργιών που παρατηρούνται σε βιολογικές μορφές[19].

Σημειωσεις κεφαλαιου

1. *"The evolution of reactive and expressive surfaces leads to a whole new generation of sensitive and communicative objects for which the central point of the design is no longer the physical shape but rather the form of the relationship set up with the environment ."* Manzini, E. (1990). *Objects and their Skin in The Plastics Age: From Modernity to Post-Modernity* (p. 127). London: Victoria and Albert Museum.

2. *"Architecture is expected to be solid, stable and reassuring – physically, socially and psychologically."* Hill, J. (2006). *Immaterial Architecture (p. 2).* New York: Routledge.

3. Ουγγρίνης, Κ. Α. (2012). *Μεταβαλλόμενη Αρχιτεκτονική: Κίνηση - Προσαρμογή - Ευελιξία* (σ. 136). Αθήνα: Εκδοτικός Όμιλος Ίων.

4. "Η μεταβαλλόμενη αρχιτεκτονική περιγράφεται και σαν δυναμικός παραμετρικός σχεδιασμός που ανταποκρίνεται σε φαινόμενα, σε πραγματικό χρόνο." Όπ. παρ. (σ. 173).

5. Curwell, S., Fox, B., Greenberg, M., & March, C. (2002). A Guide to the Selection of Environmentally Responsive Alternatives. London: Spon Press.

6. "A combination of automatic control and pseudo-instinctive responses to these varying conditions may serve to improve occupancy conditions and operational efficiency in energy terms, bringing the notion of the zero energy building closer to reality." Wiggington, M., & Harris, J. (2002). *Intelligent Skins* (p.21). Oxford: Butterworth-Heinemann.

7. Κοκοτσάκης, Α. (2008). *Βιοκλιματικό κτίριο στα Χανιά.* ΤΑ ΝΕΑ, ΤΑ ΝΕΑ , 16 Οκτ. 2008, σ. 62

8. Yu, M. L. (2013). *Skins, Envelopes, and Enclosures: Concepts for Designing Building Exteriors* (pp.229-232). New York: Routledge.

9. Boissiere, O., Nouvel, J., Hanneforth, I., & Murray, W. (2001). *Jean Nouvel*. Paris: Pierre Terrail.

10. Cocho Bermejo, A. (2012). *EmDeplo Morphogenesis* (pp. 34-40). Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya.

11. Anderson, C. (2012). *DP Architects: The Master Architect Series* (pp. 36-42). London: Images.

12. n.d. (2004). *The Realisation of Complex Roof Geometries*, Roof & Facade Asia, Vol. 1, pp. 2-3.

13. Casakin, H., & Mastandrea, S. (2009). *Aesthetic Emotions and the Evaluation of Architectural Styles* (p. 4). International Conference on Engineering and Product Design Education.

14. Gruber, P., Bruckner, D., & Hellmich, C. (2001). *Biomimetics - Materials, Structures and Processes: Examples, Ideas and Case Studies* (p. 53). Berlin: Editions Springer.

15. Bar-Cohen, Y. (2006). *Biomimetics: Biologically Inspired Technologies* (p. 3). Florida: CRC Press.

16. Niklas, K., & Spatz, H. C. (2012). Plant Physics. Chicago: Chicago Press.

17. Bar- Cohen, Y. (2006). *Όπ. παρ.* (σ. 510)

18. Buri, U. (2010). *Origami-Folded Plate Structures* (p. 18). Lausanne: École Polytechnique Fédérale de Lausanne.

19. Addington, M., & Shodek, D. (2005). *Smart Materials and New Technologies for the Architecture and Design Professions (*p. 138). Oxford: Architectural Press/Elsevier.

20. Μαραγκουδάκη, Α. (2012). *Ερευνητική Εργασία: Κινητική Αρχιτεκτονική χωρίς Μηχανικά Μέρη*. Αθήνα: Ε.Μ.Π. Σχολή Αρχιτεκτόνων Μηχανικών.

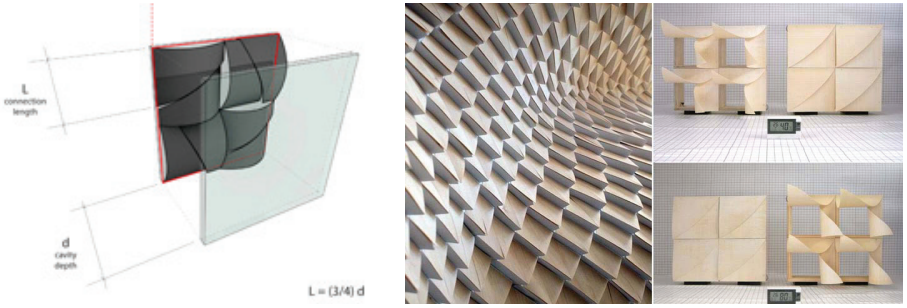
4

ΕΞΥΠΝΑ ΥΛΙΚΑ

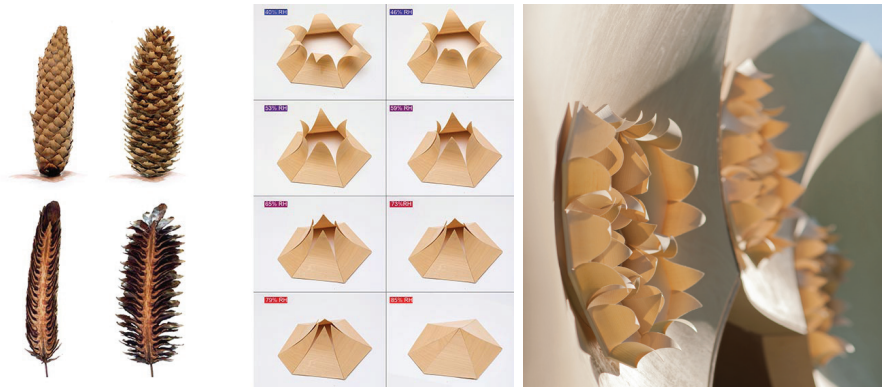
Η επιλογή των υλικών για την αρχιτεκτονική αρχικά περιοριζόταν σε συγκεκριμένες εφαρμογές σε αντίθεση με τις μετέπειτα δυνατότητες, οι οποίες αναπτύχθηκαν κυρίως από τα μέσα στου 200υ αιώνα, όπου ο αρχιτέκτονας μπορούσε πλέον να χρησιμοποιήσει τα υλικά ως σχεδιαστικό εργαλείο. Μία από τις πρώτες απόπειρες στο πεδίο αυτό αφορούσε τη χρήση των θερμο-διμεταλλικών ελασμάτων ή αλλιώς thermobimetals (TBM). Πρόκειται για διμεταλλικά ελάσματα τα οποία περιέχουν δύο μέταλλα με διαφορετικούς ρυθμούς διαστολής, μετατρέποντας έτσι τη διαφορά θερμοκρασίας σε κίνηση. Μία αξιοσημείωτη ενσωμάτωση των θερμο-διμεταλλικών ελασμάτων στην αρχιτεκτονική είναι το Bloom (2011) *[εικόνα 21]*, ένα εκθεσιακό περίπτερο στο Silver Lake της California, το οποίο ανταποκρίνεται στη θερμοκρασία[1] και σχεδιάστηκε από την ομάδα των DO|SU (D. K. Sung, I. Wahloos-Ritter και M. Melnyk). Οι DO|SU συνέχισαν την έρευνα στο πεδίο της εφαρμογής θερμο-διμεταλλικών ελασμάτων στην αρχιτεκτονική με το Glass Panel Shutter System (2011 έως σήμερα) *[εικόνα 22]*, ένα πρωτότυπο σύστημα υαλοστασίου με ανταποκριτικά μεταλλικά σκίαστρα[2].

Ιδιαίτερα εντυπωσιακή είναι και η χρήση φυσικών υλικών, όπως το ξύλο, για την κατασκευή ανταποκρινόμενων μηχανισμών. Παραδείγματα αυτής της χρήσης είναι τα Responsive Surface Structure I, II *[εικόνα 22]* και το Hygroscope, η ακολουθία κατασκευών των A. Menges και S. Reichert[3]. Η εργασία της ομάδας αυτής διερευνά τις δυνατότητες εκμετάλλευσης της αλλαγής σχήματος του ξύλου σε σχέση με την μεταβολή της υγρασίας του περιβάλλοντος[4]. Πρόσφατα τα αποτελέσματα της εργασίας αυτής εφαρμόστηκαν σε πραγματικές συνθήκες με την κατασκευή του εκθεσιακού περιπτέρου Hygroskin, το οποίο ανταποκρίνεται στην υγρασία του περιβάλλοντος *[εικόνα 23]*.

Εικόνα 21 | DO|SU, Bloom Pavillion, California, 2012.



Εικόνα 22 | DO|SU, Glass Panel Shutter System (αριστερά) και A. Menges et. al, Responsive Surface Structures (δεξιά), έρευνες σε εξέλιξη.

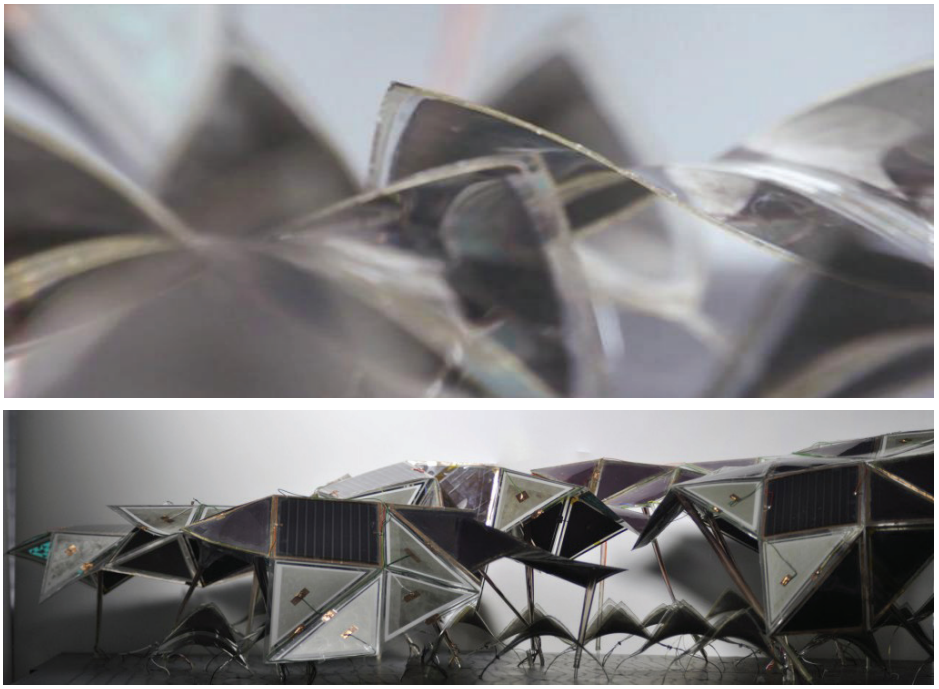


Εικόνα 23 | A. Menges, O. D. Krieg and S. Reichert, Hygroskin: Meteorosensitive Pavillion, Stuttgart, 2013.

Η προσέγγιση των υλικών σε σχέση με το βιολογικό πρότυπο σε συνδυασμό με τις σύγχρονες τεχνολογικές εξελίξεις, οδήγησε στη δημιουργία των "έξυπνων" υλικών ή συστημάτων, τα οποία, έχοντας συγκεκριμένες ιδιότητες ενσωματωμένες στη δομή τους, μπορούν να βελτιώσουν την αποδοτικότητα του συστήματος. Ως "έξυπνα" υλικά θεωρούνται εκείνα που έχουν την ικανότητα να αλλάζουν κάποια από τα χαρακτηριστικά τους μέσω των ερεθισμάτων που δέχονται όταν μεταβάλλονται οι τιμές ορισμένων συνθηκών, όπως το φως ή η θερμοκρασία. Τα "έξυπνα" υλικά χωρίζονται συνήθως βάσει της ενεργειακής τους δράσης, στον Τύπο 1, στον οποίο παρατηρούνται μεταβολές ιδιοτήτων που αφορούν χρωματικές μεταβολές ή αλλαγές φάσης του υλικού και στον Τύπο 2 που αναφέρεται σε υλικά ανταλλαγής ενέργειας.

Στην εργασία αυτή θα μας απασχολήσουν υλικά του Τύπου 1 και συγκεκριμένα υλικά αλλαγής φάσης, τα οποία παρουσιάζουν μεταβολή της δομής των μοριακών τους συνδέσμων και, κατ' επέκταση, των χαρακτηριστικών τους. Τέτοια υλικά είναι τα ηλεκτροενεργά πολυμερή, electroactive polymers (EAP), υλικά τα οποία παρουσιάζουν αλλαγή στη μορφή τους όταν διεγείρονται από ηλεκτρικό πεδίο. Τα υλικά αυτά καταναλώνουν ηλεκτρική ενέργεια για να λειτουργήσουν, καθώς όμως η εν λόγω ενέργεια είναι ελάχιστη θα μπορούσε να παράγεται από το ίδιο το σύστημα που τα χρησιμοποιεί. Αξιόλογες μελέτες που χρησιμοποιούν EAP είναι το Shape Shift (2010) *[εικόνα 24]*, ένα ανταποκρινόμενο σύστημα ελέγχου αέρα και φωτός, το οποίο πραγματοποιήθε στα πλαίσια συνεργασίας μεταξύ των εργαστηρίων Computer Aided Architectural Design (ETHZ) και Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology (EMPA), καθώς και ο διάδοχός του Phototropia (2012) *[εικόνα 25]*, το οποίο είναι ικανό να παράγει το ίδιο την ενέργεια που χρειάζεται μέσω ηλιακών κυττάρων.

Εικόνα 24 | CAAD, Shapeshift, ETH, Zürich, 2010.

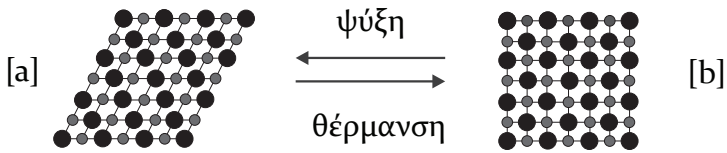


Εικόνα 25 | CAAD, Phototropia, ETH, Zürich, 2010.

Κραματα μνημης σχηματος

Ένα άλλο είδος υλικών αλλαγής φάσης είναι τα κράματα μνήμης σχήματος ή αλλιώς shape memory alloys (SMA). Τα υλικά αυτά παρουσιάζουν την ιδιότητα να μεταβάλλουν τη μορφή τους με προγραμματισμένο τρόπο σε σχέση με συγκεκριμένες τιμές θερμοκρασίας, λειτουργώντας παράλληλα ως αισθητήτες και ενεργοποιητές. Οι αλλαγές στη θερμοκρασία που δέχονται τα κράματα μνήμης σχήματος, οι οποίες μπορούν να προκληθούν και μέσω ωμικής θέρμανσης (αντίσταση στο ηλεκτρικό ρεύμα), μεταβάλλουν τη μοριακή δομή του υλικού και προκαλούν κρυσταλλική αλλαγή φάσης (crystalline phase change).

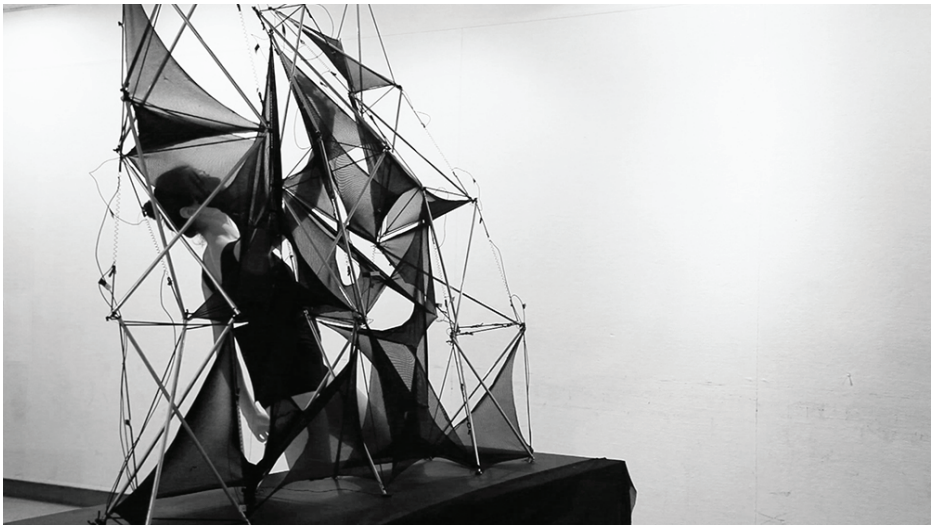
Πιο συγκεκριμένα με την αύξηση της θερμοκρασίας πάνω από μία τιμή As, austenite start, το υλικό περνάει από την μαρτενσιτική φάση *[εικόνα 26, a]*, martensite, στην οστενιτική φάση *[εικόνα 26, b]*, austenite, με την τελευταία να ολοκλήρώνεται όταν η θερμοκρασία φτάνει την τιμή Af, austenite finish. Η αλλαγή της φάσης από οστενίτη *[εικόνα 26, b]* σε μαρτενσίτη *[εικόνα 26, a]* πραγματοποιείται με την πτώση της θερμοκρασίας.



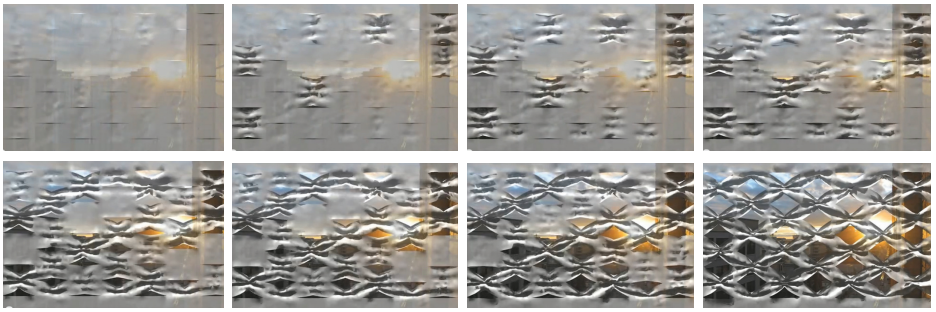
Εικόνα 26 | Κρυσταλλική δομή μαρτενσίτη [a] και οστενίτη [b].

Η συμπεριφορά αυτή αρχικά παρατηρήθηκε σε μέταλλα, συγκεκριμένα κράματα Νικελίου και Τιτανίου (NiTi), αλλά πλέον ερευνώνται αντίστοιχες δυνατότητες και σε πολυμερή (shape memory polymers). Μελέτες που ερευνούν την εφαρμογή των κραμάτων μνήμης σχήματος σε μεταβλητές όψεις περιλαμβάνουν

κινητικά συστήματα όψης που ανταποκρίνονται στον ήλιο και τον άνεμο, τα οποία έχουν πραγματοποιηθεί μόνο σε εργαστηριακό περιβάλλον. Τα τελευταία χρόνια έχουν γίνει εφαρμογές των κραμάτων μνήμης σχήματος σε ανταποκριτικές κατασκευές, κυρίως σε εικαστικές εγκαταστάσεις, όπως η Alloplastic Architecture της B. Farahi (2012) *[εικόνα 27]* και η Reef των R. Ley και J. Stein (2009) *[εικόνα 29]*. Οι δύο αυτές εφαρμογές ανταποκρίνονται στην κίνηση χρησιμοποιώντας αισθητήρες σε συνδυασμό με κράματα μνήμης σχήματος. Μια ακόμη αξιοσημείωτη μελέτη είναι το Smart Screen (2010) *[εικόνα 28]* των Decker & Yeadon, μια ακολουθία έρευνας που αφορά διαφορετικές μορφές ηλιοπροστασίας με τη χρήση κραμάτων μνήμης σχήματος. Η πιο πρόσφατη μορφή αυτής της έρευνας, το Smart Screen III, ένα σύστημα σκίασης με διάτρητες συρόμενες επιφάνειες έχει πραγματοποιηθεί σε ένα πρωτότυπο μικρής κλίμακας (proof of concept prototype).



Εικόνα 27 | B. Farahi, Alloplastic Architecture, University of Southern California, California, 2012.



Εικόνα 28 | Decker & Yeadon, SmartScreen I, New York, 2010

Εικόνα 29 | R. Ley and J. Stein, Reef Responsive Architectural Installation, New York, 2009.

Σημειωσεις κεφαλαιου

1. Fortmeyer, R., & Linn, C. (2014). *Kinetic Architecture: Design for Active Envelopes* (p. 84). Victoria: The Images Group.
2. Sung, D. (2012). *Prototyping a Self-Ventilating Building Skin with Smart Thermobimetals*. AIA Report on University Research.
3. Menges, A. (ed) (2012). *Material Computation: Higher Integration in Morphogenetic Design (*p. 5). Sussex: Wiley-Academy.
4. Glasner, B., & Ott, S. (2013). *Wonder Wood: A Favorite Material for Design* (p. 132), Architecture and Art. Basel: Birkhauser.
5. Trubiana, F. (2012). *Design and Construction of High-Performance Homes: Building Envelopes* (p. 78), Renewable Energies and Integrated Practice. New York: Routledge.
6. *"Energy and matter flows can be optimized through the use of smart materials, as the majority of these materials and products take up energy and matter indirectly and directly from the environment."* Kronenburg, R. (2007). *Flexible: Architecture that Responds to Change* (p. 216). London: Laurence King Publishing.
7. Ουγγρίνης, Κ. Α. (2012). *Μεταβαλλόμενη Αρχιτεκτονική: Κίνηση - Προσαρμογή - Ευελιξία* (σ. 107). Αθήνα: Εκδοτικός Όμιλος Ίων.
8. Όπ. παρ. (σ. 173).
9. Addington, M., & Shodek, D. (2005). *Smart Materials and New Technologies for the Architecture and Design Professions* (pp. 108-122). Oxford: Architectural Press/Elsevier.
10. Suralkar, R. (2001). *Solar Responsive Kinetic Facade Shading Systems Inspired by Plant Movements in Nature*. Proceedings of Conference: People and Buildings. London.
11. Lignarolo, L., Lelieveld, C., & Teuffel, P. (2011). *Shape Morphing Wind-Responsive Facade Systems Realized with Smart Materials*. Proceedings of Conference: Adaptive Architecture, An International Conference. London.

5

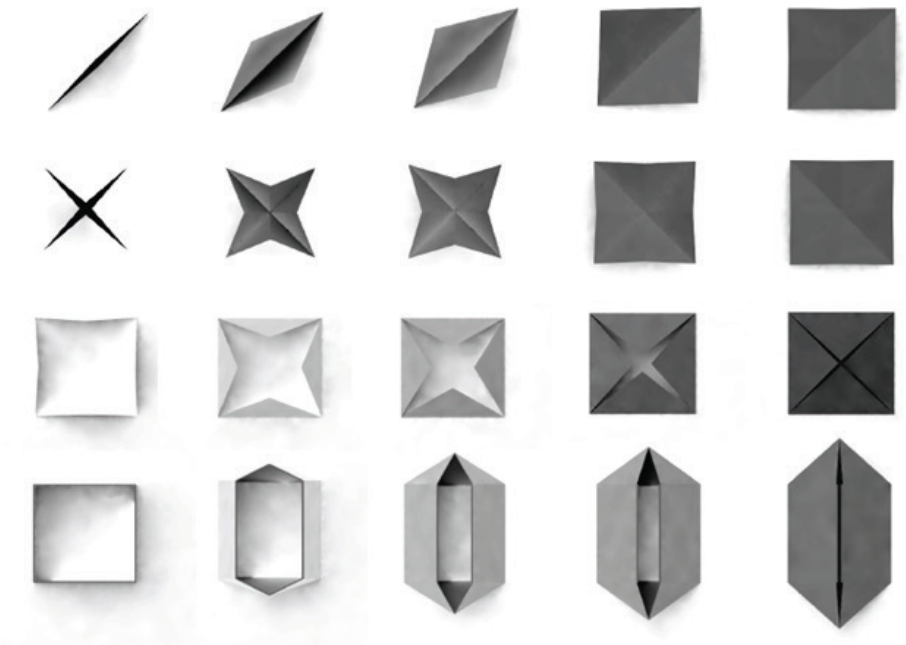
MEMORIGAMI

Στο πλαίσιο της ενασχόλησής μας με την ερευνητική αυτή εργασία προέκυψε η ιδέα αξιοποίησης των δυνατοτήτων των κραμάτων σχήματος μνήμης σε μεταβλητές κατασκευές με σκοπό την ηλιοπροστασία των κτιρίων, το οποίο είναι ένα θέμα ιδιαίτερα σημαντικό για τα ελληνικά κλιματικά δεδομένα όπως έχουμε ήδη αναφέρει. Συνδυάζοντας τα δύο αυτά πεδία, της μεταβλητότητας στην αρχιτεκτονική και των κραμάτων μνήμης σχήματος, προέκυψε η προσπάθεια ανάπτυξης ενός πρωτότυπου σκιάστρου το οποίο να ανταποκρίνεται στην περιβαλλοντική θερμοκρασία, αξιοποιώντας την ηλιακή ενέργεια, λειτουργώντας χωρίς ηλεκτρονικά μέρη και, κατ' επέκταση, μειώνοντας την ενεργειακή κατανάλωση του κτιρίου.

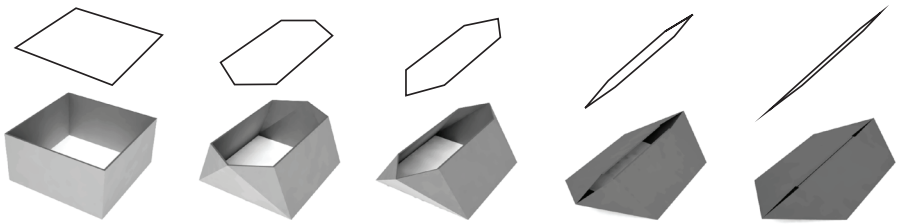
Ως αποτέλεσμα της ανάλυσής μας εστιάσαμε σε ορισμένα κριτήρια, με κυριότερα την αυτοματοποίηση του συστήματος με σκοπό τη βελτίωση της απόδοσής του και την ελαχιστοποίηση της δαπανώμενης ενέργειας για τη λειτουργία του. Χρησιμοποιώντας κράματα ή πολυμερή μνήμης σχήματος με θερμοκρασία ενεργοποίησης τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος μπορούμε να πετύχουμε ανταπόκριση ενός μηχανισμού στις μεταβολές της εξωτερικής θερμοκρασίας μόνο με αξιοποίηση της υφιστάμενης θερμικής ενέργειας. Εφαρμόζοντας λοιπόν ένα μηχανισμό με ενεργοποιητή κράματος μνήμης σχήματος και ελαχιστοποιώντας την πολυπλοκότητα της γεωμετρίας του, προτείνουμε το σχεδιασμό μιας μεταβλητής μονάδας σκιάστρου που ανταποκρίνεται στην περιβαλλοντική θερμοκρασία με δυνατότητα εφαρμογής της σε κτίρια διαφορετικής χρήσως και κλίμακας, επιδιώκοντας ευελιξία στην ικανοποίηση των αναγκών διαφορετικών κτιρίων.

Σκοπός μας είναι η μελέτη και η ανάπτυξη ενός λειτουργικού πρωτοτύπου συστήματος σκίασης με εφαρμογή κράματος μνήμης σχήματος, το οποίο μπορεί να λειτουργήσει ως έναυσμα

για περαιτέρω έρευνα των δυνατοτήτων της εφαρμογής νέων τεχνολογιών στην αρχιτεκτονική. Θέλοντας να διερευνήσουμε διαφορετικές μορφές σκιάστρων χρησιμοποιήσαμε ως πρότυπο την ιαπωνική τέχνη Origami, η οποία, όπως αναφέραμε σε προηγούμενο κεφάλαιο, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως εργαλείο απλούστευσης σύνθετων μορφών εμπνευσμένων από τη φύση. Το πρωτότυπο αυτό σκίαστρο ονομάστηκε Memorigami, συνδυάζοντας τα κύρια στοιχεία έμπνευσης αυτής της έρευνας, το origami και τα shape memory alloys (κράματα μνήμης σχήματος). Στο πλαίσιο της αναζήτησή μας για τη μορφή του σκιάστρου πειραματιστήκαμε με διαφορετικές εκδοχές γεωμετρίας, με στόχο το μεγάλο εύρος του συντελεστή σκίασης μεταξύ της ανοιχτής και της κλειστής κατάστασης του σκιάστρου *[εικόνα 30]*.

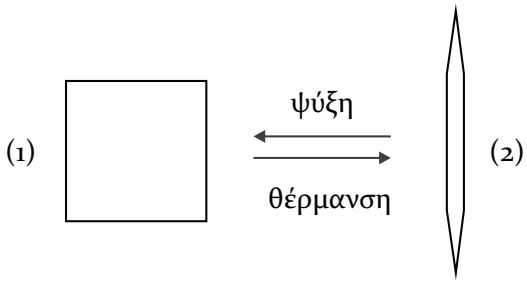


Εικόνα 30 | Διαφορετικές εκδοχές της γεωμετρίας του σκιάστρου.



Εικόνα 31 | Η εκδοχή της μονάδας σκιάστρου που επιλέχθηκε.

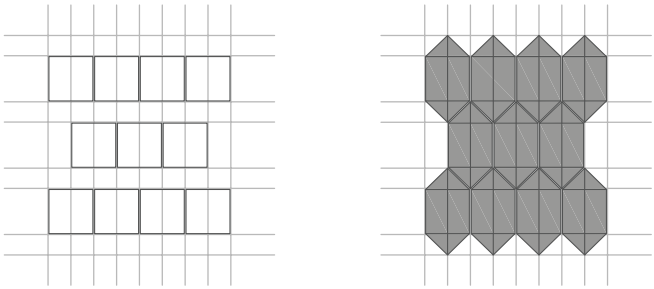
Η γεωμετρία της μονάδας σκιάστρου που επιλέξαμε *[εικόνα 31]* επιτρέπει την ομαλή ενσωμάτωσή της σε υπάρχουσες όψεις, τόσο λόγω των τεσσάρων σταθερών σημείων στη βάση της όσο και της απλής μορφής της όταν είναι κλειστή.



Εικόνα 32 | Μεταβολή της γεωμετρίας της μονάδας σκιάστρου.

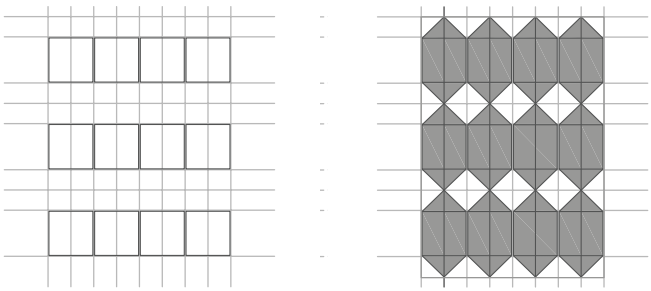
Στην παραπάνω σχηματική απεικόνιση της μονάδας σκιάστρου *[εικόνα 32]* βλέπουμε τη μεταβολή της γεωμετρίας μεταξύ των δύο ακραίων καταστάσεων ανοικτού (1) και κλειστού (2) σκιάστρου και την αντίστοιχη μεταβολή του κλείστρου, του ανοίγματος δηλαδή από το οποίο περνάει το φως (aperture). Το σκίαστρο ανταποκρίνεται στην αλλαγή της θερμοκρασίας κλείνοντας όταν η τιμή της θερμοκρασίας είναι μεγαλύτερη από ένα όριο (θέρμανση) και ανοίγοντας ξανά όταν το σκίαστρο ψυχθεί (ψύξη). Η γεωμετρία αυτή επιτρέπει ένα ιδιαίτερα μεγάλο εύρος συντελεστή σκίασης.

Παράλληλα, η διάταξη των μονάδων σκίασης επιτρέπει την επίτευξη διαφορετικών ποσοστών σκίασης όταν όλες οι μονάδες είναι κλειστές, ανάλογα με τις ανάγκες σκίασης του εκάστοτε κτιρίου, όπως βλέπουμε στο παρακάτω διάγραμμα *[εικόνα 33]*. Τόσο οι αποστάσεις μεταξύ των μονάδων όσο και ο αριθμός τους σε σχέση με την επιφάνεια των ανοιγμάτων μπορούν να παραμετροποιηθούν, οδηγώντας σε διαφορετικά αποτελέσματα ανάλογα με το επιθυμητό ποσοστό σκίασης.



Διάταξη Α

Ποσοστό σκιασμένης επιφάνειας: 80-100%

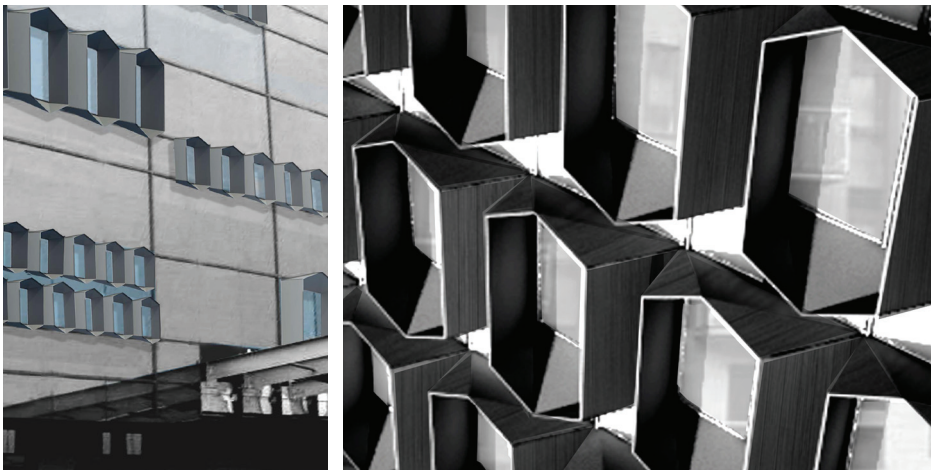


Διάταξη Β

Ποσοστό σκιασμένης επιφάνειας: 80-70%

Εικόνα 33 | Διαφορετικές διατάξεις και αντίστοιχα ποσοστά σκίασης σε σχέση με την επιφάνεια του ανοίγματος.

Οι μονάδες του συστήματος σκίασης αναρτώνται σε μεταλλικό πλαίσιο και η καθεμία είναι αυτόνομη, εμπεριέχει δηλαδή το δικό της ενεργοποιητή. Η διάταξη αυτή επιτρέπει την εναλλαγή στην ανταποκρισιμότητα του συνόλου της όψης, καθώς οι μονάδες του σκιάστρου μεταβάλλουν τη γεωμετρία τους σε διαφορετικές χρονικές στιγμές ανάλογα με την ηλιακή ακτινοβολία και, κατ' επέκταση, τη θερμική ενέργεια που δέχονται.



Εικόνα 34 | Απεικόνιση εφαρμογής του σκιάστρου.

Μεθοδολογια

Η ενασχόλησή μας με το Memorigami κατηγοριοποιείται σε τρία στάδια υλοποίησης. Σκοπός του πρώτου σταδίου είναι η μελέτη της μεταβολής της γεωμετρίας του σκιάστρου καθώς και ο σχεδιασμός του ενεργοποιητή που θα την καθιστά δυνατή. Το δεύτερο στάδιο υλοποίησης αφορά την κατασκευή πρωτοτύπων τόσο του σκιάστρου όσο και του ενεργοποιητή σε μικρή κλίμακα με σκοπό τη βελτίωσή τους. Το τρίτο στάδιο υλοποίησης, τέλος, αφορά τη συνολική βελτιστοποίηση του σκιάστρου καθώς και την κατασκευή ενός πρωτότυπου σκιάστρου σε πραγματική κλίμακα με σκοπό τη μετέπειτα εγκατάστασή του στο Πολυτεχνείο Κρήτης. Παράλληλα με την εγκατάσταση του σκιάστρου, προβλέπεται και μελλοντική ενσωμάτωση συστήματος αισθητήρων θερμοκρασίας και φωτός, με σκοπό την μελέτη της απόδοσης του σκιάστρου με ποσοτικά δεδομένα πραγματικού χρόνου.

Το Memorigami είναι μία εργασία σε εξέλιξη η οποία υλοποιείται στο πλαίσιο του Τρίτου Κύκλου της δράσης «Φυτώριο Ιδεών» της Μονάδας Καινοτομίας και Επιχειρηματικότητας του Πολυτεχνείου Κρήτης. Ο Τρίτος Κύκλος του «Φυτωρίου Ιδεών» υλοποιείται μέσω του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» (Ε.Π.Ε.Δ.Β.Μ) ΕΣΠΑ και ολοκληρώνεται τον Ιούνιο του 2014.

Οι τρεις φάσεις υλοποίησης που αναφέραμε κατηγοριοποιούνται ως εξής:

Φάση Α'

- Μελέτη της γεωμετρίας του σκιάστρου.
- Σχεδιασμός του παθητικού ενεργοποιητή.

Φάση Β'

- Χρήση κράματος μνήμης σχήματος τύπου Nitinol (NiTi) με θερμοκρασία μετάβασης τους 65°C με σκοπό τον πλήρη έλεγχο του ενεργοποιητή σε εργαστηριακές συνθήκες.
- "Training"' (αποθήκευση) του επιθυμητού σχήματος στο σύρμα Nitinol.
- Κατασκευή διαφορετικών ενεργοποιητών με σύρμα Nitinol και έλεγχος της απόδοσής τους με εφαρμογή σε πρωτότυπο μικρής κλίμακας.
- Πειραματισμός με διαφορετικά είδη ενεργοποιητών (ελατήρια Nitinol, πολυμερή μνήμης σχήματος).
- Βελτιστοποίηση παθητικού ενεργοποιητή.

Φάση Γ'

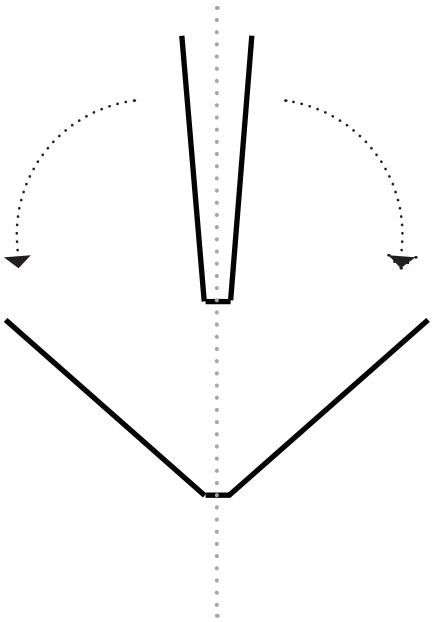
- Βελτιστοποίηση πρωτοτύπου.
- Κατασκευή πρωτοτύπου σε πραγματική κλίμακα και εφαρμογή του στο Πολυτεχνείο Κρήτης.
- Εφαρμογή αισθητήρων θερμοκρασίας και φωτός για την ποσοτική ανάλυση απόδοσης του σκιάστρου.

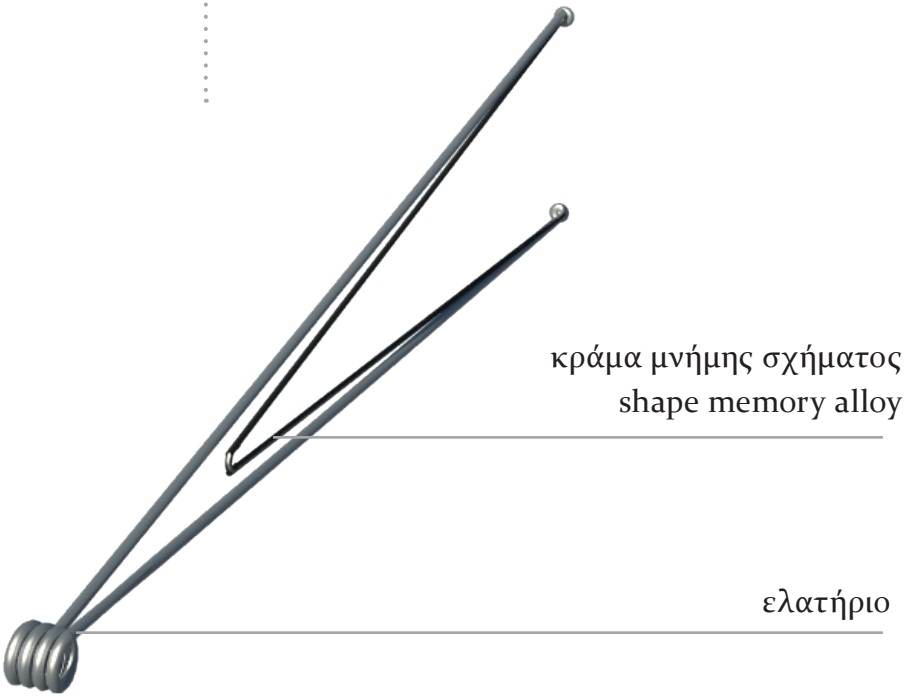
Φάση Α’

Μελέτη της γεωμετρίας

Στο πλαίσιο της έρευνάς μας κατασκευάστηκε μακέτα μελέτης της μεταβολής της γεωμετρίας της μονάδας σκιάστρου *[εικόνα 35]*, με σκοπό τον πειραματισμό με διαφορετικά είδη υλικών και ενεργοποιητών προκειμένου να επιτευχθεί η αυτοματοποίηση της κίνησης του σκιάστρου. Ο ενεργοποιητής που σχεδιάστηκε χρησιμοποιεί σύρμα κράματος μνήμης σχήματος μονής κατεύθυνσης (one-way shape memory alloy), καθώς έχει σημαντικά μικρότερο κόστος από το κράμα μνήμης σχήματος διπλής κατεύθυνσης. Αυτό σημαίνει ότι το σύρμα έχει αποθηκευμένο μόνο ένα σχήμα στο οποία επανέρχεται όταν θερμαίνεται. Για το λόγο αυτό σχεδιάσαμε έναν ενεργοποιητή που χρησιμοποιεί ένα σύρμα κράματος μνήμης σχήματος και ένα ελατήριο *[εικόνα 36]*, το οποίο επαναφέρει το σύρμα στο αρχικό σχήμα του, το οποίο δεν είναι αποθηκευμένο. Το κράμα μνήμης σχήματος παίρνει την αποθηκευμένη του αυτή μορφή όταν θερμαίνεται πάνω από μια συγκεκριμένη θερμοκρασία, η οποία ονομάζεται θερμοκρασία ενεργοποίησης ή θερμοκρασία μετάβασης.

Εικόνα 35 | Μακέτα μελέτης της μεταβολής της γεωμετρίας του σκιάστρου.

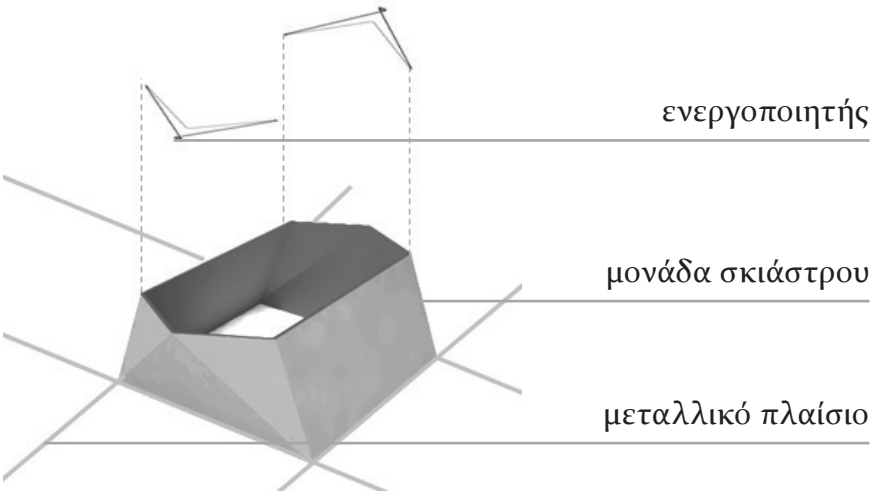




Εικόνα 36 | Ενεργοποιητής κράματος μνήμης σχήματος με ελατήριο.

Σε θερμοκρασία από τη θερμοκρασία μετάβασης και πάνω, το κράμα μνήμης σχήματος παραμένει στην οστενιτική κρυσταλλική φάση υψηλής θερμοκρασίας (austenite), διατηρώντας το αποθηκευμένο σχήμα του *[εικόνα 38, Β]*. Στην κρυσταλλική αυτή φάση το σύρμα ασκεί δύναμη στο ελατήριο και κλείνει το σκίαστρο. Όταν η θερμοκρασία είναι χαμηλότερη της θερμοκρασίας μετάβασης, το κράμα μνήμης σχήματος αλλάζει στην μαρτενσιτική κρυσταλλική φάση χαμηλότερης θερμοκρασίας (martensite). Στη φάση αυτή της χαμηλής θερμοκρασίας, το σύρμα είναι ξανά παραμορφώσιμο και επαναφέρεται μέσω του ελατηρίου στο αρχικό σχήμα *[εικόνα 38, Α]*, ανοίγοντας το σκίαστρο και καθιστώντας ικανή την επαναλαμβανόμενη κίνηση του σκιάστρου.

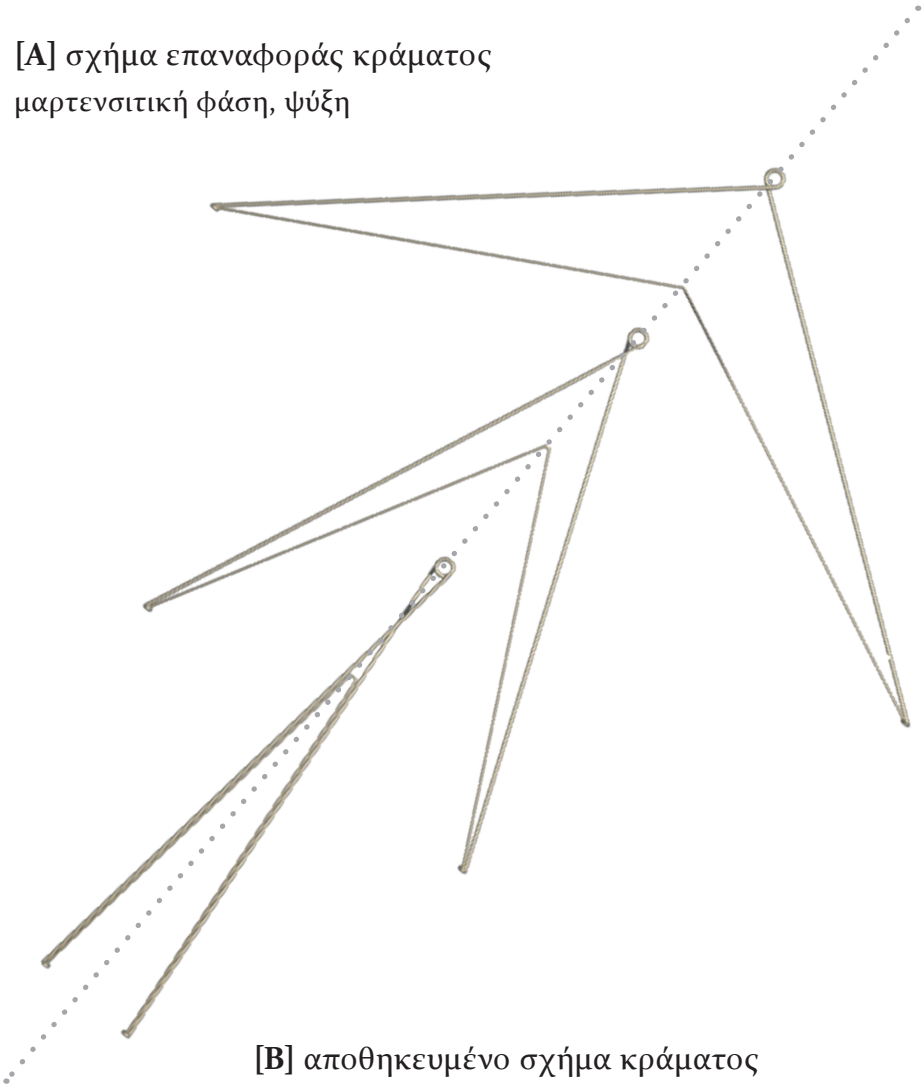
Ο ενεργοποιητής αυτός τοποθετείται σε κάθε μονάδα σκιάστρου, η οποία, με τη σειρά της, αναρτάται σε μεταλλικό πλαίσιο ανάλογα με τις ανάγκες σκίασης της εκάστοτε εγκατάστασης *[εικόνα 37]*.



Εικόνα 37 | Προσάρτηση της μονάδας σκιάστρου σε μεταλλικό πλαίσιο.

δύναμη ελατηρίου > δύναμη κράματος μνήμης σχήματος

[A] σχήμα επαναφοράς κράματος
μαρτενσιτική φάση, ψύξη



[B] αποθηκευμένο σχήμα κράματος
οστενιτική φάση, θέρμανση

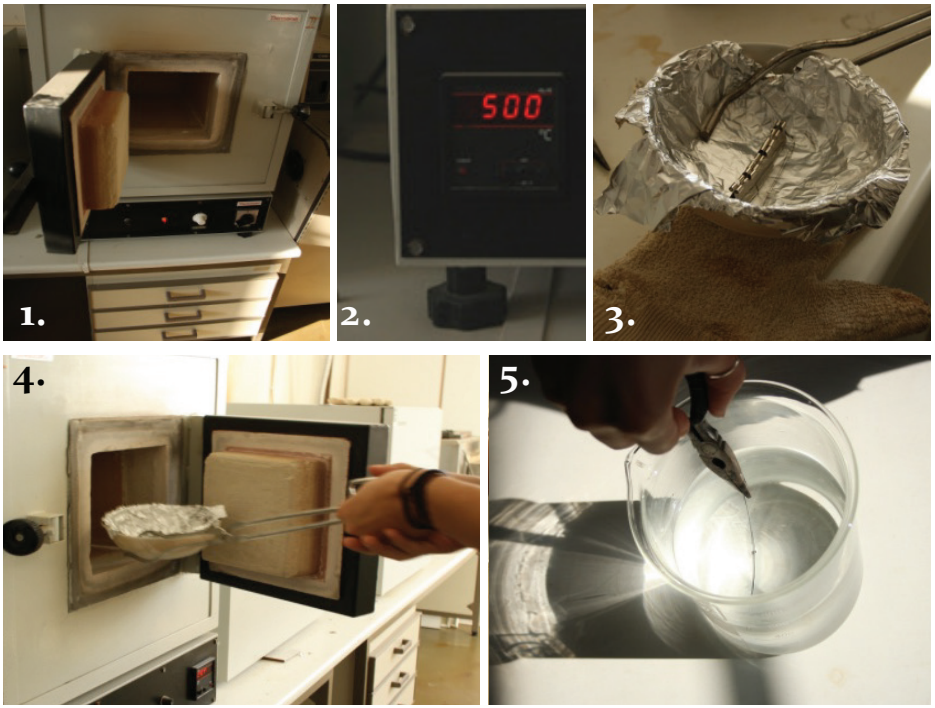
δύναμη ελατηρίου < δύναμη κράματος μνήμης σχήματος

Εικόνα 38 | Μεταβολή του ενεργοποιητή σε διαφορετικές θερμοκρασίες.

Φάση Β

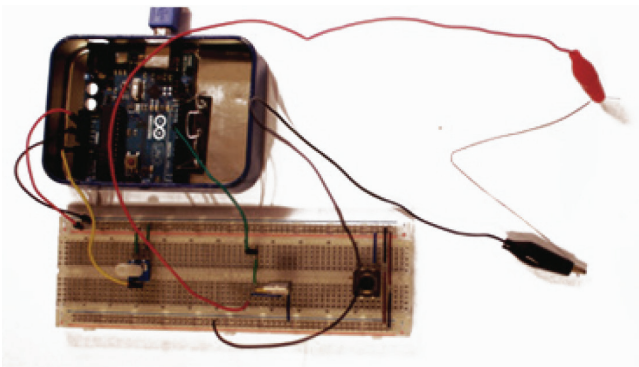
Βελτιστοποίηση Παθητικού Ενεργοποιητή

Στο πλαίσιο του δεύτερου σταδίου γίνεται κατασκευή μακέτας μιας μονάδας σκιάστρου με ενεργοποιητή βασισμένο σε κράμα μνήμης σχήματος Nitinol με θερμοκρασία μετάβασης στους 65°C, με σκοπό την επίτευξη αυτόματης μηχανικής λειτουργίας του σκιάστρου σε ελεγχόμενο περιβάλλον. Προκειμένου να αποθηκεύσουμε το σχήμα που θέλουμε στο Nitinol, το σύρμα πρέπει να θερμανθεί στους 500 βαθμούς Κελσίου *[εικόνα 39.1, 39.2, 39.4]* όντας παραμορφωμένο στο επιθυμητό σχήμα μέσα σε μεταλλική μήτρα [*εικόνα 39.3]*. Στη συνέχεια γίνεται άμεση ψύξη του σύρματος με βύθιση του μετάλλου σε νερό *[εικόνα 39.5]*.



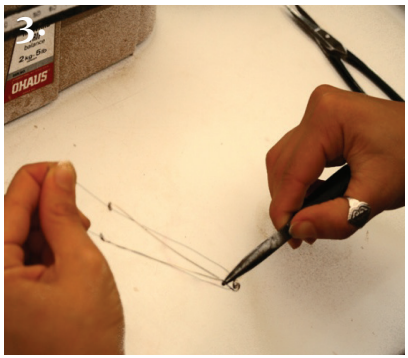
Εικόνα 39 | Διαδικασία αποθήκευσης σχήματος στο κράμα.

Το επόμενο βήμα είναι ο έλεγχος του σύρματος με ωμική θέρμανση με τη χρήση ενός μικροελεγκτή Arduino [εικόνα 40.1]. Γίνεται θέρμανση του κράματος με PWM, pulse width modulation, με σκοπό τον έλεγχο της αποθήκευσης του επιθυμητού σχήματος στο σύρμα. Στη συνέχεια, το «εκπαιδευμένο» (trained) σύρμα ενσωματώνεται στο ελατήριο *[εικόνα 40.2, 40.3]* και τοποθετείται στην πειραματική μακέτα του σκιάστρου προκειμένου να διαπιστωθεί η απόδοσή του. Καθώς η μελέτη του Memorigami είναι εν εξελίξει, βρισκόμαστε σε στάδιο πειραματισμού με διαφορετικές μορφές ελατηρίου καθώς και διαφορετικά είδη και διαμέτρους κράματος μνήμης σχήματος.



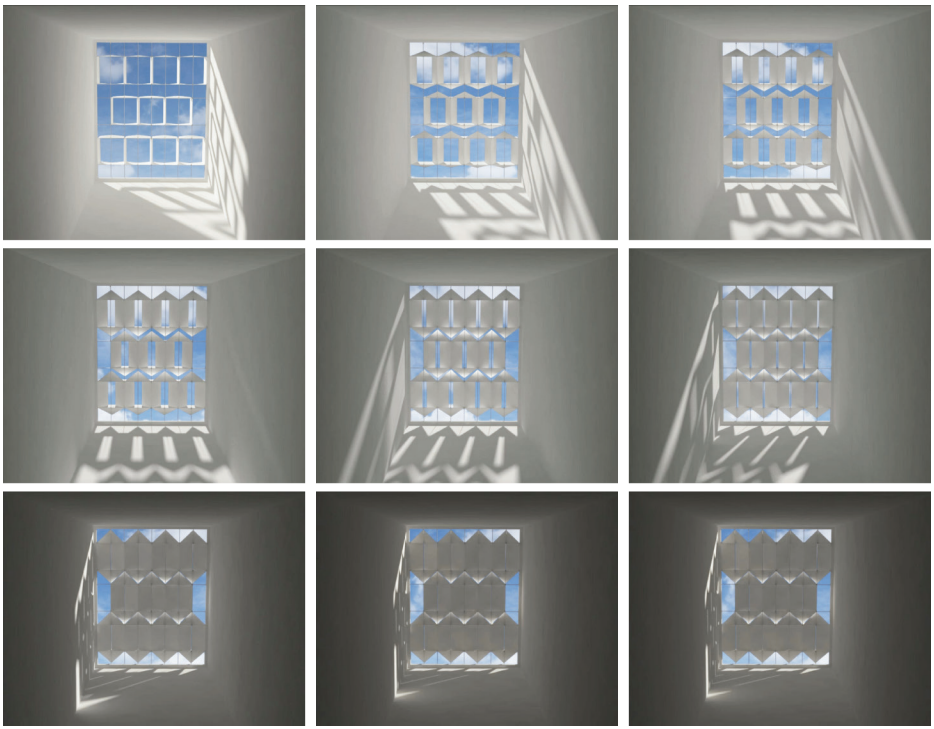
1.

2.



3.

Εικόνα 40 | Ενεργοποίηση σύρματος με ωμική θέρμανση.



Εικόνα 41 | Μεταβολή του σκιάστρου κατά τη διάρκεια της μέρας.

Προτασεις και συμπερασματα

Απώτερος στόχος μας είναι η μελέτη και η κατασκευή ενός πρωτότυπου σκιάστρου το οποίο να ανταποκρίνεται στην αλλαγή θερμοκρασίας σε εργαστηριακό περιβάλλον με την ενσωμάτωση κράματος μνήμης σχήματος. Εφόσον πραγματοποιηθεί αυτό το στάδιο, στοχεύουμε στη συνέχεια της μελέτης με την υλοποίηση πρωτοτύπου το οποίο να λειτουργεί και να ανταποκρίνεται στις περιβαλλοντικές συνθήκες και την εφαρμογή του σε εξωτερικό χώρο του Πολυτεχνείου. Η ερευνητική μελέτη αυτή θα μπορούσε να συνεχιστεί με τον ποσοτικό προσδιορισμό των αποτελεσμάτων της εφαρμογής του προτεινόμενου συστήματος σκίασης στα πεδία της θερμικής και οπτικής άνεσης καθώς και της ενεργειακής απόδοσής του κατά τη διάρκεια ενός ημερολογιακού έτους. Η ποσοστικοποίηση αυτή μπορεί να πραγματοποιηθεί με τη χρήση θεωρητικών και εμπειρικών μοντέλων από προγράμματα προσομοίωσης και μετρήσεις μέσω εφαρμογής αισθητήρων θερμοκρασίας και φωτός.

Καθώς πρόκειται για ένα έργο εν εξελίξει, αξίζει να αναφέρουμε συγκεκριμένους τομείς στους οποίους, λόγω της μεγάλης πολυπλοκότητάς τους, θεωρούμε θα μπορούσαν να διερευνηθούν περισσότερο σε επόμενη προσέγγιση. Οι τομείς αυτοί αφορούν τα θέματα της υλικότητας και της αυτονομίας του ανταποκριτικού σκιάστρου, πεδία τα οποία, όπως έχουμε προαναφέρει, εμπλέκονται με την εφαρμογή έξυπνων υλικών και συστημάτων.

Πιο συγκεκριμένα, όσον αφορά την υλικότητα, τίθεται το ζήτημα του υλικού κατασκευής των επιφανειών που συνθέτουν τη μονάδα σκιάστρου. Το πρόβλημα που παρουσιάζεται είναι η ανάγκη ικανοποίησης τριών διαφορετικών παραμέτρων από το

ίδιο υλικό: την αντοχή στον ήλιο, την αντοχή στη βροχή και τον άνεμο, και το μικρό βάρος, προκειμένου το σκίαστρο να αντέχει στις εξωτερικές συνθήκες και παράλληλα να είναι αρκετά ελαφρύ ώστε να μπορεί να λειτουργήσει ο ενεργοποιητής. Συνήθη υλικά όπως το πλαστικό, το ύφασμα και το ξύλο υπολείπονται σε κάποια από τις τρεις αυτές παραμέτρους (την αντοχή στον ήλιο, την αντοχή στον άνεμο και το μικρό βάρος αντίστοιχα) ή δημιουργούν άλλα προβλήματα, όπως για παράδειγμα το ζήτημα της αντανάκλασης με τη χρήση μεταλλικών φύλλων. Για να ικανοποιηθούν οι τρεις αυτές συνθήκες χρειάζεται τόσο μελέτη δυνατοτήτων πιθανών συνδυασμών υλικών, για παράδειγμα ύφασμα τοποθετημένο σε ξύλινο σκελετό, όσο και προσδιορισμό του ακριβούς ορίου δύναμης που μπορεί να ασκήσει ο ενεργοποιητής.

Ένα ακόμα σημείο που θεωρούμε ενδιαφέρον είναι η επιδίωξη εκμετάλλευσης της ηλιακής ενέργειας που δέχεται το σκίαστρο μέσω του υλικού του. Το θέμα αυτό μπορεί να διερευνηθεί με την εφαρμογή φωτοβολταϊκών κυττάρων στις επιφάνειες του σκιάστρου που δέχονται άμεσο ηλιασμό και τη μελέτη της απόδοσής τους παράλληλα με τη λειτουργία του σκιάστρου.

Το επόμενο ζήτημα της υλικότητας του σκιάστρου αφορά το είδος του υλικού που χρησιμοποιείται για την κατασκευή του έξυπνου συστήματος-ενεργοποιητή. Τα κράματα μνήμης σχήματος παρουσιάζουν κάποιες αδυναμίες, όπως η μηχανική κόπωση λόγω της επαναλαμβανόμενης κίνησης του υλικού, καθώς και το αυξημένο κόστος. Σημαντικός περιορισμός στην πρακτική εφαρμογή των κραμάτων μνήμης σχήματος είναι και η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των αλλαγών φάσεων από τη δομή υψηλότερης προς τη δομή χαμηλότερης θερμοκρασίας και αντίστροφα, λόγω της απώλειας μηχανικής ενέργειας κατά τη διαδικασία αυτή (hysteresis). Αυτή η διαφορά

θερμοκρασίας συνεπάγεται την ύπαρξη χρονικών διαστημάτων κατά τη διάρκεια των οποίων το σκίαστρο δεν είναι ικανό να ανταποκριθεί και να επανέλθει στην επιθυμητή κατάσταση.

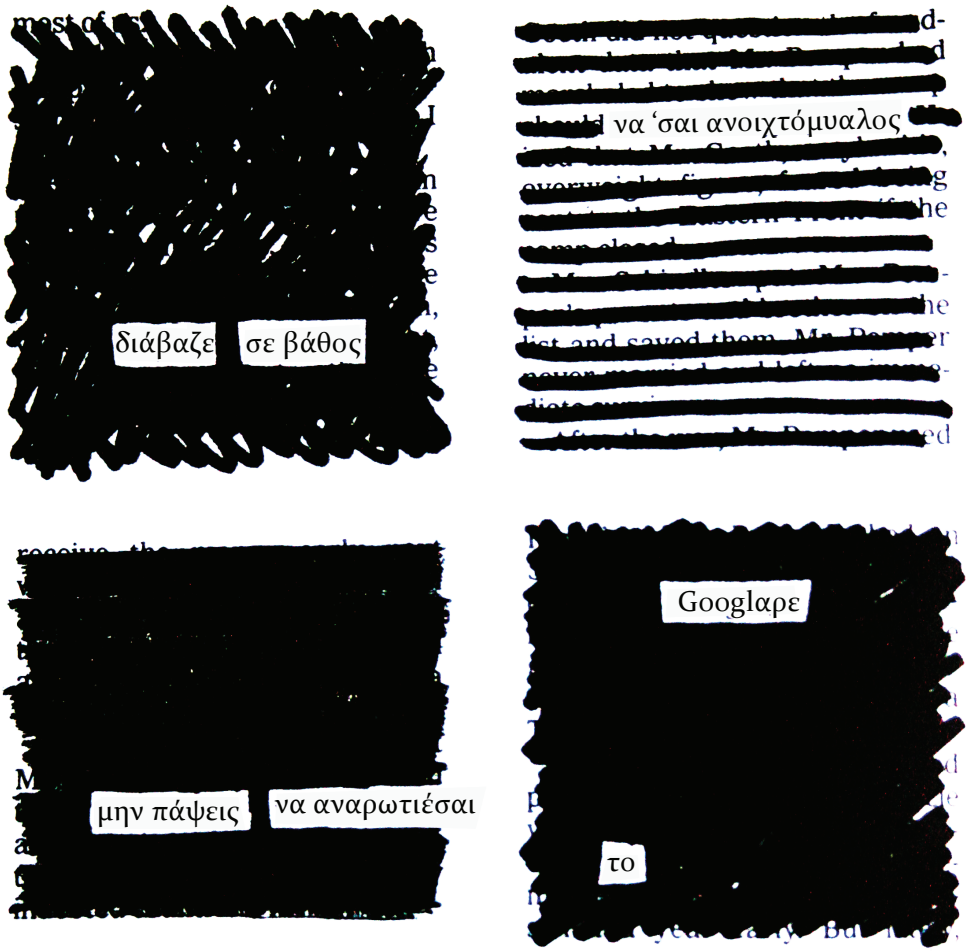
Οι αδυναμίες αυτές των κραμάτων μνήμης σχήματος μας οδηγούν στην αναζήτηση εναλλακτικών προσεγγίσεων για την υλοποίηση του μηχανισμού ανταπόκρισης όπως τα πολυμερή μνήμης σχήματος, τα διμεταλλικά ελάσματα και τα ηλεκτροενεργά πολυμερή, τα οποία αναφέραμε στα προηγούμενα κεφάλαια.

Ένα ακόμα σημαντικό ζήτημα είναι εκείνο της αυτονομίας του σκιάστρου. Συγκεκριμένα μπορούμε να αναφερθούμε τόσο στην αυτονομία της μίας μονάδας σκιάστρου από την άλλη όσο και την αυτονομία λειτουργίας του σκιάστρου σε σχέση με το χρήστη. Όσον αφορά τις μονάδες του συστήματος σκίασης που συνθέτουν την ανταποκριτική όψη, προκύπτει το ερώτημα της σύνδεσης μεταξύ των μονάδων προκειμένου να μειωθεί ο αριθμός των απαιτούμενων ενεργοποιητών και, κατ' επέκταση, το συνολικό κόστος κατασκευής και συντήρησής τους. Παράλληλα, η σύνδεση αυτή μειώνει την ευαισθησία ανταπόκρισης της όψης, καθώς ελαττώνεται το ποσοστό των ενεργοποιητών σε σχέση με την επιφάνεια της όψης. Λαμβάνοντας υπόψην τις οικονομικές, λειτουργικές και αισθητικές ανάγκες του κτιρίου μπορεί λοιπόν να αναπτυχθεί η κατάλληλη παραμετροποιήσιμη σχέση μεταξύ του αριθμού των απαιτούμενων ενεργοποιητών και των μονάδων σκιάστρου που συνθέτουν την ανταποκριτική όψη. Στο ίδιο πλαίσιο μελέτης εντάσσεται και ο προσδιορισμός του κατάλληλου αριθμού, των διαστάσεων καθώς και των αποστάσεων μεταξύ των μονάδων σκίασης ανάλογα με τις ανάγκες της εκάστοτε εφαρμογής.

Το πρόβλημα της αυτονομίας μεταξύ των μονάδων μας

οδηγεί στον αντίστοιχο προβληματισμό για την αυτονομία του σκιάστρου συναρτήσει του ελέγχου του από το χρήστη. Όπως έχουμε τονίσει σε προηγούμενα κεφάλαια, θεωρούμε ιδιαίτερα σημαντική τη σχέση μεταξύ της αυτόνομης ανταπόκρισης του συστήματος στις περιβαλλοντικές συνθήκες και της δυνατότητας παράκαμψής της από το χρήστη (override), ένα ζήτημα που παρουσιάζει ιδιαίτερη πολυπλοκότητα. Το ερώτημα αυτό μπορεί να μελετηθεί με το σχεδιασμό και την ανάπτυξη ενός μηχανισμού απελευθέρωσης της μονάδας του σκιάστρου από τον αντίστοιχο ενεργοποιητή (quick release), δίνοντας τη δυνατότητα στο χρήστη να παρέμβει στην λειτουργία του σκιάστρου. Παράλληλα, τίθεται το ζήτημα της επίτευξης της μέγιστης ενεργειακής απόδοσης του συστήματος με την μείωση της παρέμβασης του χρήστη στη λειτουργία του. Το γεγονός αυτό οδηγεί στην ανάγκη μελέτης του βαθμού αυτονομίας του χρήστη σε σχέση με την αντοποκριτικού λειτουργία του συστήματος, λαμβάνοντας υπόψην και το ζήτημα του ανοίκειου στην περίπτωση της μειωμένης παρέμβασης του χρήστη, όπου ο χρήστης νιώθει -και είναι- αποκομμένος από το εν λόγω σύστημα.

Η καινοτομία που παρουσιάζει το προτεινόμενο σύστημα σκίασης είναι ο συνδυασμός τριών σημαντικών στοιχείων: την αυτοματοποίηση, την ηλιοπροστασία και την βελτίωση ενεργειακής απόδοσης. Οι τρεις αυτοί τομείς αποτελούν σημαντικές ανάγκες της εποχής, τόσο λόγω της τάσης για χρήση συστημάτων που ανταποκρίνονται στις ανάγκες των χρηστών όσο και της ολοένα αυξανόμενης σημασίας της μείωσης της ενεργειακής κατανάλωσης των κτιρίων. Στόχος αυτής μας της εργασίας είναι να αποτελέσει κίνητρο, τόσο για εμάς όσο και για άλλους, στην έρευνα των δυνατοτήτων της εφαρμογής έξυπνων υλικών και συστημάτων στην αρχιτεκτονική.



Εικόνα 42 | A. Kleon, Κλέψε σαν Καλλιτέχνης.

Βιβλιογραφικες Αναφορες

Αρχιτεκτονική και όψεις:

Anderson, C. (2012). *DP Architects: The Master Architect Series.* London: Images.

Heidegger, M. (2008). *Κτίζειν, Κατοικείν, Σκέπτεσθαι.* Αθήνα: Πλέθρον.

Hill, J. (2006). *Immaterial Architecture.* New York: Routledge.

Jacomy, B. (1990). *Συνοπτική Ιστορία των Τεχνικών.* Αθήνα: Πολιτιστικό Τεχνολογικό Ίδρυμα ΕΤΒΑ.

Knaack, U., Klein, T., Bilow, M., & Auer, T. (2007). *Façades: Principles of Construction.* Berlin: Birkhäuser.

Knaack, U., & Klein, T. (2009). *The Future Envelope 2: Architecture, Climate, Skin.* Amsterdam: IOS Press.

Knaack, U., Meijs, M., Van der Voort, J., & Bilow, M. (2011). *Materials in Architecture: Principles of Construction.* Berlin: Birkhäuser.

Manzini, E. (1990). *Objects and their Skin in The Plastics Age: From Modernity to Post-Modernity.* London: Victoria and Albert Museum.

McCabe, C. (1967). Please Fence Me In. *San Francisco Chronicle.*

Menzel, L. (2012). *Façades: Design, Construction & Technology.* Salenstein: Braun Publish.

Murtlow, J. (1997). *The Poetic Architecture of Ricardo Legoretta.* New York: Rizzoli.

Pallasmaa, J. (2005). *The Eyes of the Skin - Architecture and the Senses.* Sussex: Wiley-Academy.

Rapoport, A. (1976). *Ανώνυμη Αρχιτεκτονική και Πολιτιστικοί Παράγοντες.* Αθήνα: Έκδοση Αρχιτεκτονικών Θεμάτων.

Rossi, A. (1991). *Η Αρχιτεκτονική της Πόλης.* Θεσαλλονίκη: University Studio Press.

Schittich, C. (2006). *Building Skins.* Munich: Birkhäuser.
Staib, G., Dörrhöfer, A., & Rosenthal, M. (2008). *Components and Systems: Modular Construction, Design, Structure, New Technologies.* Basel: Birkhäuser.
Trubiana, F. (2012). *Design and Construction of High-Performance Homes: Building Envelopes, Renewable Energies and Integrated Practice.* New York: Routledge.
Zumthor, P. (1998). *Thinking Architecture.* Basel: Birkhäuser.

Γιακουμακάτος, Α. (2003). *Ιστορία της Ελληνικής Αρχιτεκτονικής - 20ος Αιώνας.* Αθήνα: Εκδόσεις Νεφέλη.
Κωνσταντινίδης, Α. (2004). *Για την Αρχιτεκτονική.* Αθήνα: Εκδόσεις Άγρα.
Λέφας, Π., Siebel, W., & Bindé, J. (2003). *Αύριο οι Πόλεις.* Αθήνα: Πλέθρον.
Τομπάζης, Α. (2007). *Γράμμα σ' ένα νέο αρχιτέκτονα.* Αθήνα: Libro.
Τσιάντης, Γ. (2003). *Φιλοσοφία και Τεχνολογία.* Αθήνα: Εκδοτικός Όμιλος Ίων.
Τσινίκας, Ν. (1993). *Αρχιτεκτονική Τεχνολογία.* Θεσσαλονίκη: University Studio Press.
Τσινίκας, Ν. (2001). *Αρχιτεκτονική Ενάντια στη Βαρύτητα.* Θεσσαλονίκη: University Studio Press.

Άρθρα και Διπλωματικές Εργασίες:

Casakin, H., & Mastandrea, S. (2009). Aesthetic Emotions and the Evaluation of Architectural Styles. *International Conference on Engineering and Product Design Education,* (p. 4).
Triantis, E. (1991). *La physionomie des immeubles d' habitation collective: La façade comme élément de transition.* Lausanne: École Polytechnique Fédérale de Lausanne.

Βιοκλιματική Αρχιτεκτονική και Δομική Φυσική:

Curwell, S., Fox, B., Greenberg, M., & March, C. (2002). *A Guide to the Selection of Environmentally Responsive Alternatives.* London: Spon Press.

Hausladen, G., De Saldanha, M., & Lied, P. (2008). *Climateskin: building-skin concepts that can do more with less energy.* Basel: Birkhäuser.

Knaack, U., & Klein, T. (2009). *The Future Envelope 2: Architecture, Climate, Skin.* Amsterdam: IOS Press.

Porteous, C. (2002). *The New Eco-Architecture: Alternatives from the Modern Movement.* London: Spon Press.

Santamouris, M. (. (2003). *Solar Thermal Technologies for Buildings: The State of the Art.* London: James & James.

Smith, P. F. (2001). *Architecture in a Climate of Change: A Guide to Sustainable Design.* Oxford: Architectural Press/Elsevier.

Trubiana, F. (2012). *Design and Construction of High-Performance Homes: Building Envelopes* (p. 78), Renewable Energies and Integrated Practice. New York: Routledge.

Ανδρεαδάκη, Ε. (2007). *Βιοκλιματικός Σχεδιασμός - Περιβάλλον και Βιωσιμότητα.* Θεσσαλονίκη: University Studio Press.

Κοσμόπουλος, Π. Ι. (2008). *Περιβαλλοντικός Σχεδιασμός.* Θεσσαλονίκη: University Studio Press.

Μαλινδρέτος, Μ. (2007). *Δομική Φυσική.* Θεσσαλονίκη: University Studio Press.

Παπαδόπουλος, Α. Μ. (2006). *Θερμική Άνεση στα Κτίρια - Νέα Πρότυπα και Βελτίωση Θερμικής Άνεσης στα Κτίρια.* Ιωάννινα: Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.

Παπαδόπουλος, Μ., & Αξαρλή, Κ. (2006). *Ενεργειακός σχεδιασμός & παθητικά ηλιακά συστήματα κτιρίων.* Θεσσαλονίκη: Εκδοτικός

Οίκος Αδελφών Κυριακίδη.

Άρθρα και Διπλωματικές Εργασίες:

Altomonte, S. (2008). Climate Change and Architecture: Mitigation and Adaptation
Strategies for a Sustainable Development. *Journal of Sustainable Development CCSE*.
Du Plessis, C. (2006). Thinking about the day after tomorrow: New Perspectives on Sustainable Building. *Rethinking Sustainable Construction*. Florida: CSIR Built Environment.

Μεταβλητότητα:
Bell, J., & Godwin, S. (2000). *The Transformable House.* Sussex: Wiley-Academy.
Fortmeyer, R., & Linn, C. (2014). *Kinetic Architecture: Design for Active Envelopes.* Victoria: The Images Group.
Hausladen, G., De Saldanha, M., & Lied, P. (2008). *Climateskin: building-skin concepts that can do more with less energy.* Basel: Birkhäuser.
Jormakka, K. (2002). *Flying Dutchmen: Motion in Architecture.* Basel: Birkhäuser.
Kronenburg, R. (2007). *Flexible: Architecture that Responds to Change.* London: Laurence King Publishing.
Moloney, J. (2011). *Designing Kinetics for Architectural Facades: State Change.* New York: Routledge
Wiggington, M., & Harris, J. (2002). *Intelligent Skins.* Oxford: Butterworth-Heinemann.

Γιαννούδης, Σ. (2012). *Προσαρμόσιμη Αρχιτεκτονική.* Αθήνα: Εκδοτικός Όμιλος Ίων.
Ουγγρίνης, Κ. Α. (2012). *Μεταβαλλόμενη Αρχιτεκτονική: Κίνηση - Προσαρμογή - Ευελιξία.* Αθήνα: Εκδοτικός Όμιλος Ίων.
Ουγγρίνης, Κ.-Α. (2006). *Transformations: Paradigms for Designing Transformable Spaces.* Cambridge: Harvard Design School.

Άρθρα και Διπλωματικές Εργασίες:
Asefi, M., & Foruzandeh, A. (2011). Nature and Kinetic Architecture: The Development of a New Type of Transformable Structure for Temporary Applications, June 2011, Volume 5, No. 6 (Serial No. 43), pp. 513-526. *Journal of Civil Engineering and Architecture.*
Buri, U. (2010). *Origami-Folded Plate Structures.* Lausanne: École

Polytechnique Fédérale de Lausanne.
Cocho Bermejo, A. (2012). *EmDeplo Morphogenesis.* Barcelona: BarcelonaTech.
Fox, M. A. (2010). Sustainable Applications of Intelligent Kinetic Systems: Responsive Skylights. *Massachusetss Institute of Technology.*
Leighton Beaman, M., & Bader, S. (2010). Responsive Shading | Intelligent Façade Systems. *Acadia*, 264-269.
Niqui, M. (2012). *Responsive Systems, Light and Human Responsive Systems in Architecture.* Lausanne: École Polytechnique Fédérale de Lausanne.
Park, J. W., Huang, J., & Terzidis, K. (2011). A Tectonic Approach for Integrating Kinesis with a Building in the Design Process of Interactive Skins. *JAABE.*
Μαραγκουδάκη, Α. (2012). *Κινητική Αρχιτεκτονική χωρίς Μηχανικά Μέρη.* Αθήνα: Ε.Μ.Π. Σχολή Αρχιτεκτόνων Μηχανικών.

Έξυπνα Συστήματα και Υλικά:

Addington, M., & Shodek, D. (2005). *Smart Materials and New Technologies for the Architecture and Design Professions.* Oxford: Architectural Press/Elsevier.

Glasner, B., & Ott, S. (2013). *Wonder Wood: A Favorite Material for Design, Architecture and Art.* Basel: Birkhäuser.

Menges, A. (. (2012). *Material Computation: Higher Integration in Morphogenetic Design* . Sussex: Wiley-Academy.

Niklas, K., & Spatz, H. C. (2012). *Plant Physics.* Chicago: Chicago Press.

Otto, F. (1985). *Architecture et Bionique: Constructions Naturelles.* Denges: Editions Deta & Spes.

Peters, S. (2012). *Material Revolution Sustainable and Multi-Purpose Materials for Design and Architecture.* Basel: Birkhäuser.

Wiggington, M., & Harris, J. (2002). *Intelligent Skins.* Oxford: Butterworth-Heinemann.

Άρθρα και Διπλωματικές Εργασίες:

Decker, M., & Yeadon, P. (2010). SmartScreen: Controlling Solar Heat Gain with Shape Memory Systems. *Decker Yeadon LLC*, 2.

Fox, M. A. (2010). Sustainable Applications of Intelligent Kinetic Systems: Responsive Skylights. *Massachusetss Institute of Technology.*

Janke, L., Czaderski, C., Motavalli, M., & Ruth, J. (2005). Applications of Shape Memory Alloys in Civil Engineering Structures - Overview, Limits and New Ideas. *Smart Materials and Structures Vol. 39*, 578-592.

Lelieveld, C. (2003). *Smart Materials for the Realisation of an Adaptive Building Component.* Delft: TU DELFT.

Lignarolo, L., Lelieveld, C., & Teuffel, P. (2011). Shape Morphing

Wind-Responsive Facade Systems Realized with Smart Materials. *Adaptive Architecture: An International Conference.* London.
Mavroidis, K., Pfeiffer, C., & Mosley, M. (2009). Conventional Actuators, Shape Memory Alloys and Electrorheological Fluids. In Y. (. Bar-Cohen, *Automation, Miniature Robotics and Sensors for Non-Destructive Testing and Evaluation.* Columbus: ASNT.
Seeboth, A., Ruhmann, R., & Mühling, O. (2010). Thermotropic and Thermochromic Polymer Based Materials for Adaptive Solar Control. *Materials*.
Paik, K. J., & Wood, R. J. (2012). A bidirectional shape memory alloy folding actuator. *Smart Materials and Structures Vol. 21.*
Sung, D. (2012). Prototyping a Self-Ventilating Building Skin with Smart Thermobimetals. *AIA Report on University Research*.
Zanaboni, E. (2007). One Way and Two Way–Shape Memory Effect: Thermo–Mechanical Characterization of Ni–Ti wires. *Università degli Studi di Padova*.
Μαραγκουδάκη, Α. (2012). *Κινητική Αρχιτεκτονική χωρίς Μηχανικά Μέρη.* Αθήνα: Ε.Μ.Π. Σχολή Αρχιτεκτόνων Μηχανικών.
Καλογερόπουλος, Θ. Α. (2010). *Εφαρμογές Έξυπνων Υλικών.* Αθήνα: Ε.Μ.Π Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών.

Βιολογικό Πρότυπο:
Bar- Cohen, Y. (2006). *Biomimetics: Biologically Inspired Technologies.* Florida: CRC Press.
Gruber, P., Bruckner, D., & Hellmich, C. (2001). *Biomimetics - Materials, Structures and Processes: Examples, Ideas and Case Studies.* Berlin: Editions Springer.
Mazzoleni, I. (2013). *Architecture Follows Nature - Biomimetic Principles for Innovative Design.* Florida: CRC Press.

Τσινίκας, Ν. (1999). *Μορφές Φύσης & Τεχνολογίας - Παραλληλισμοί, Αντιπαραθέσεις.* Θεσσαλονίκη: University Studio Press.

Άρθρα:
Asefi, M., & Foruzandeh, A. (2011). Nature and Kinetic Architecture: The Development of a New Type of Transformable Structure for Temporary Applications, June 2011, Volume 5, No. 6 (Serial No. 43), pp. 513-526. *Journal of Civil Engineering and Architecture.*
Suralkar, R. (2001). Solar Responsive Kinetic Facade Shading Systems Inspired by Plant Movements in Nature. *Proceedings of Conference: People and Buildings.* London.

Πηγες Εικονων

Εξώφυλλο κεφαλαίου 1 | *M. Borrett, Exploring A Hypnagogic City, 2003.*
http://www.mathewborrett.com/drawings/room-series/11955024 [27.03.2014]
Εικόνα 1 | *Hoberman Associates, Packable dome.*
http://www.ladesigntech.org/newsletter_071211.html
Εικόνα 2 | *doubleNegatives Architecture, Corpora in si(gh)te, YCAM, Japan 2003.*
http://corpora.hu/ [27.03.2014]
Εικόνα 3 | *doubleNegatives Architecture, Corpora in si(gh)te, Venice, 2008.*
http://corpora.hu/ [27.03.2014]

Εξώφυλλο κεφαλαίου 2 | *A. de Saint-Exupéry, Le petit prince, 1943.*
Εικόνα 4 | *David Troupes, Buttercup Festival 2-31, 2009.*
http://www.buttercupfestival.com/2-31.htm [27.03.2014]
Εικόνα 5 | *Κλίμακα δείκτη PMV.*
Προσωπικό αρχείο, γράφημα βασισμένη στο υλικό του βιβλίου: Santamouris, M. (2003). *Solar Thermal Technologies for Buildings: The State of the Art.* London: James & James.
Εικόνα 6 | *Παράγοντες επιρροής θερμικής άνεσης.*
Προσωπικό αρχείο.
Εικόνα 7| *Όρια συνθηκών θερμικής άνεσης.*
Προσωπικό αρχείο, γράφημα βασισμένο στο υλικό του βιβλίου: Παπαδόπουλος, Α. Μ. (2006). *Θερμική Άνεση στα Κτίρια - Νέα Πρότυπα και Βελτίωση Θερμικής Άνεσης στα Κτίρια (σ. 13).* Ιωάννινα: Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.

Εικόνα 8 | *Βέλτιστος προσανατολισμός ανοιγμάτων.*
Προσωπικό αρχείο, γράφημα βασισμένο στο υλικό του βιβλίου Ανδρεαδάκη, Ε. (2007). *Βιοκλιματικός Σχεδιασμός - Περιβάλλον και Βιωσιμότητα.* Θεσσαλονίκη: University Studio Press.
Εικόνα 9 | *Σχέση περιόδου λειτουργίας – περιόδου ηλιασμού*
Προσωπικό αρχείο, γράφημα βασισμένο στο υλικό του βιβλίου Hausladen, G., De Saldanha, M., & Lied, P. (2008). Climateskin: building-skin concepts that can do more with less energy. Basel: Birkhäuser.
Εικόνα 10 | *Hoberman Associates Adaptive Building Initiative, Kinetic Facade for the Simons Center for Geometry and Physics, New York, 2010.*
http://www.azahner.com/portfolio/stony-brook [27.03.2014]

Εξώφυλλο κεφαλαίου 3 | *H. Miyazaki, Howl's Moving Castle, 2004.*
Εικόνα 11 | *T. Jansen, Animaris Percipiere, 2006.*
http://www.creazina.it/persone/theo-jansen-creature-del-vento [27.03.2014]
Εικόνα 12 | *N. Kahn and UAP, Brisbane Airport car park, Brisbane, 2012.*
http://inhabitgroup.com/2011/11/australia-brisbane-brisbane-airport-domestic-terminal-carpark/ [27.03.2014]
Εικόνα 13 | *Συσχετισμός μεταξύ των κριτηρίων αξιολόγησης.*
Προσωπικό αρχείο.
Εικόνα 14 |
Από πάνω προς τα κάτω:
Κτίριο γραφείων ΑΚΤΕΡ ΑΤΕ, Γ. & Λ. Αραχωβίτης, Χανιά, Ελλάδα, 2009
www.akter.gr [27.03.2014]

Arab World Institute, Jean Nouvel, Paris, France, 1981 – 1987
http://archdata.org/buildings/12/arab_world_institute [27.03.2014]
Esplanade - Theatres on the Bay, DP Architects, Michael Wilford & Partners, Marina Bay, Singapore, 2002
http://www.dpa.com.sg/projects/esplanade/ [27.03.2014]
Εικόνα 15 | *Αξιολόγηση κτιρίου γραφείων ΑΚΤΕΡ ΑΤΕ.*
Προσωπικό αρχείο. Αξιολόγηση βασισμένη σε βιβλιογραφική έρευνα και έρευνα πεδίου.
Κοκοτσάκης, Α. (2008). *Βιοκλιματικό κτίριο στα Χανιά.* ΤΑ ΝΕΑ, ΤΑ ΝΕΑ, 16 Οκτ. 2008, σ. 62
Εικόνα 16 | *Απόψεις του κτιρίου γραφείων ΑΚΤΕΡ ΑΤΕ.*
Εικόνα 17 | *Αξιολόγηση του κτιρίου Arab World Institute.*
Προσωπικό αρχείο. Αξιολόγηση βασισμένη σε βιβλιογραφική έρευνα.
Yu, M. L. (2013). *Skins, Envelopes, and Enclosures: Concepts for Designing Building Exteriors* (pp.229-232). New York: Routledge.
Boissiere, O., Nouvel, J., Hanneforth, I., & Murray, W. (2001). *Jean Nouvel.* Paris: Pierre Terrail.
Cocho Bermejo, A. (2012). *EmDeplo Morphogenesis* (pp. 34-40). Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya.
Εικόνα 18 | *Απόψεις του κτιρίου Arab World Institute.*
http://wikidi.com/view/arab-world-institute [27.03.2014]
http://matthewpillsbury.com/photographs/institute-du-monde-arabe-paris-2008/ [27.03.2014]
Εικόνα 19 | *Αξιολόγηση του κτιρίου Theatres on the Bay.*
Προσωπικό αρχείο. Αξιολόγηση βασισμένη σε βιβλιογραφική έρευνα.
Anderson, C. (2012). *DP Architects: The Master Architect Series* (pp. 36-42). London: Images.
n.d. (2004). *The Realisation of Complex Roof Geometries*, Roof &

Facade Asia, Vol. 1, pp. 2-3.
Εικόνα 20 | *Απόψεις του κτιρίου Esplanade - Theatres on the Bay.*
http://www.dpa.com.sg/projects/esplanade/ [27.03.2014]

Εξώφυλλο κεφαλαίου 4 | *CAAD, Shapeshift, ETH, Zürich, 2010.*
http://www.caad.arch.ethz.ch/shapeshift [27.03.2014]
Εικόνα 21 | *DO|SU, Bloom Pavillion, California, 2012.*
http://www.dosu-arch.com/bloom.html [27.03.2014]
Εικόνα 22 | *DO|SU, Glass Panel Shutter System. (αριστερά)*
http://www.dosu-arch.com/smartwindow.html [27.03.2014]
A. Menges, O. D. Krieg and S. Reichert, Responsive Surface Structures. (δεξιά)
http://icd.uni-stuttgart.de/?p=5655 [27.03.2014]
Εικόνα 23 | *A. Menges, O. D. Krieg and S. Reichert, Hygroskin: Meteorosensitive Pavillion, Stuttgart, 2013.*
http://icd.uni-stuttgart.de/?p=9869 [27.03.2014]
Εικόνα 24 | *CAAD, Shapeshift, ETH, Zürich, 2010.*
http://www.caad.arch.ethz.ch/shapeshift [27.03.2014]
Εικόνα 25 |*CAAD, Phototropia, ETH, Zürich, 2010.*
http://www.caad.arch.ethz.ch/blog/phototropia/ [27.03.2014]
Εικόνα 26 | *Κρυσταλλική δομή οστενίτη και μαρτενσίτη.*
Προσωπικό αρχείο, γράφημα βασισμένη στο υλικό του βιβλίου: Addington, M., & Shodek, D. (2005). *Smart Materials and New Technologies for the Architecture and Design Professions* (p. 120). Oxford: Architectural Press/Elsevier.
Εικόνα 27 | *B. Farahi, Alloplastic Architecture, University of Southern California, California, 2012.*
http://behnazfarahi.prosite.com/204244/913126/gallery/alloplastic-architecture [27.03.2014]
Εικόνα 28 | *Decker & Yeadon, SmartScreen I, New York, 2010.*

http://www.deckeryeadon.com/projects.html [27.03.2014]
Εικόνα 29 | *R. Ley and J. Stein, Reef Responsive Installation, New York, 2009.*
http://www.reefseries.com/index.php?/project/reef/ [27.03.2014]

Εξώφυλλο κεφαλαίου 5, Εικόνες 30-41 | *Σκίαστρο Memorigami.* Προσωπικό αρχείο.
Εικόνα 42 | A. Kleon. (2013). *Κλέψε σαν Καλλιτέχνης.* Αθήνα: Key Books.