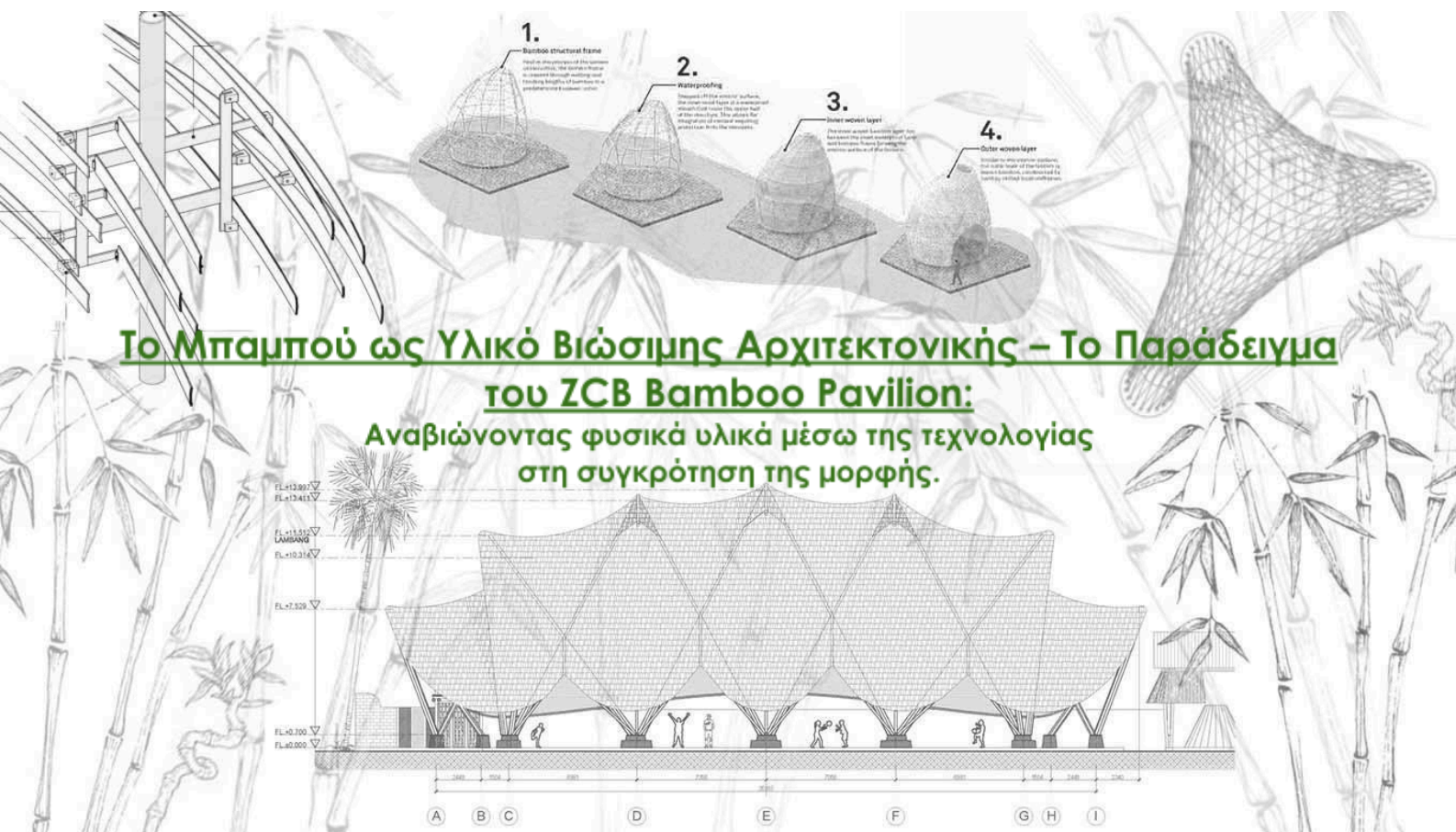




Ερευνητική Εργασία | Αθανασία Χριστοπούλου | Μαρία Κυριακοπούλου

Επιβλέπων καθηγητής Ιωάννης Ζαβολέας

Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων | Πολυτεχνική Σχολή | Τμήμα Αρχιτεκτόνων Μηχανικών

Ιωάννινα 2025

*Εικόνα εξωφύλλου: Κολάζ των συγγραφέων.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ/ABSTRACT.....	5-6
------------------------	-----

A. Εισαγωγή.....	7
Πρόκληση για Διερεύνηση.....	8
Ερευνητικό Ερώτημα.....	8
Μεθοδολογία Έρευνας.....	9

B. Ανάλυση του Υλικού Μπαμπού

B.1. Βιολογία και Δομή.....	10-12
B.2. Μηχανικές Ιδιότητες του Μπαμπού: Ανθεκτικότητα, Ευκαμψία και Βιωσιμότητα...	13-14
B.3. Χρήσεις του Μπαμπού στη Δόμηση: Βιωσιμότητα και Καινοτομία στις Κατασκευές.....	15-17
B.4. Προκλήσεις και Περιορισμοί.....	18

Γ. Το παράδειγμα του ZCB Bamboo Pavilion..

Γ.1. Ανάπτυξη Σχεδίου.....	23-30
Γ.2. Μοντελοποίηση Πληροφοριών Κατασκευής.....	30-32
Γ.3. Κατασκευή Έναντι Ψηφιακού Μοντέλου.....	32-35
Γ.4. Αποτίμηση Παραδείγματος: Αναβίωση Υλικού και Τεχνικής στο Σύγχρονο Περιβάλλον Σχεδιασμού και Κατασκευής.....	36-38

Δ. Εφαρμογές Μπαμπού στη Βιώσιμη Αρχιτεκτονική

Δ.1. The Arc at Green School, IBUKU / Bali.....	38-42
Δ.2. Bamboo Flow, Kengo Kuma And Associates / China.....	43-45
Δ.3. Bamboo Bamboo, Canopy and Pavilions, IllLab / China.....	45-49

Ε. Συμπεράσματα.....

ΣΤ. Βιβλιογραφία – Δικτυογραφία – Ερευνητικές Εργασίες.....	52-53
--	--------------

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία διερευνά τη χρήση του μπαμπού ως υλικό βιώσιμης αρχιτεκτονικής, εστιάζοντας στις ιδιότητες του, στις προκλήσεις που συνοδεύουν την αξιοποίησή του, καθώς και στις εφαρμογές του σε σύγχρονες κατασκευές. Το μπαμπού αποτελεί ένα ταχέως αναπτυσσόμενο φυσικό υλικό, με εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες όπως αντοχή σε εφελκυσμό, ευκαμψία και ανθεκτικότητα σε δυναμικά φορτία, συγκρίσιμο ακόμα και με τον χάλυβα ή το σκυρόδεμα. Η ταχύτητα ανάπτυξής του, που μπορεί να φτάσει τα 91 εκατοστά ημερησίως, και η ανανεώσιμη φύση του, το καθιστούν ιδανικό για βιώσιμες και φιλικές προς το περιβάλλον αρχιτεκτονικές λύσεις. Παρά τα πλεονεκτήματα αυτά, η εφαρμογή του μπαμπού συνοδεύεται από προκλήσεις, όπως η ανάγκη για τυποποίηση των δομικών του χαρακτηριστικών, η επεξεργασία για αντοχή σε υγρασία και έντομα, καθώς και η ανάπτυξη τεχνογνωσίας για την εκτεταμένη χρήση του σε σύγχρονες κατασκευές. Η ποικιλομορφία του υλικού, σε συνδυασμό με τη φυσική του αστάθεια, απαιτεί εξειδικευμένες μεθόδους σχεδιασμού και κατασκευής για να διασφαλιστεί η βιωσιμότητα και η μακροχρόνια απόδοσή του. Η μελέτη επικεντρώνεται στο ZCB Bamboo Pavilion, ένα πρωτοποριακό έργο στο Χονγκ Κονγκ που αναδεικνύει τις δυνατότητες του μπαμπού στη σύγχρονη αρχιτεκτονική. Η κατασκευή αυτή συνδυάζει παραδοσιακές τεχνικές χειροτεχνίας με καινοτόμα ψηφιακά εργαλεία σχεδιασμού, δημιουργώντας έναν ελαφρύ και ανθεκτικό χώρο υψηλής γεωμετρικής πολυπλοκότητας. Μέσα από πειραματικές μεθόδους που περιλάμβαναν φυσικά πρωτότυπα και ψηφιακά μοντέλα, η ομάδα σχεδιασμού κατάφερε να αξιοποιήσει πλήρως τις ιδιότητες του μπαμπού, καταδεικνύοντας τη δυνατότητα γεφύρωσης μεταξύ παραδοσιακής χειροτεχνίας και τεχνολογίας. Επιπλέον, η εργασία παρουσιάζει διεθνή παραδείγματα όπως το The Arc at Green School στο Μπαλί, το Bamboo Flow του Kengo Kuma στην Κίνα και το Bamboo Bamboo του ILLab, που αναδεικνύουν τη δυνατότητα του μπαμπού να αποτελέσει βασικό υλικό για την αρχιτεκτονική του μέλλοντος. Τα έργα αυτά αποδεικνύουν πως το μπαμπού δεν περιορίζεται σε παραδοσιακές χρήσεις, αλλά μπορεί να προσφέρει λύσεις υψηλής αισθητικής, αντοχής και βιωσιμότητας, συνδυάζοντας την τοπική κουλτούρα με σύγχρονες τεχνικές κατασκευής. Η εργασία καταλήγει στο συμπέρασμα ότι το μπαμπού αποτελεί ένα από τα πιο υποσχόμενα υλικά για τη βιώσιμη αρχιτεκτονική. Παρά τις προκλήσεις, η χρήση του μπορεί να επεκταθεί μέσω περαιτέρω έρευνας και ανάπτυξης, ενώ η συνδυαστική προσέγγιση παραδοσιακών και καινοτόμων μεθόδων μπορεί να ξεπεράσει τα εμπόδια και να δημιουργήσει νέες προοπτικές για την αρχιτεκτονική του 21ου αιώνα.

Λέξεις κλειδιά: μπαμπού, βιώσιμη αρχιτεκτονική, φυσικά υλικά, zcb bamboo pavilion, ψηφιακός σχεδιασμός, αρχιτεκτονική καινοτομία

ABSTRACT

This research examines the potential of bamboo as a sustainable material in contemporary architecture, analysing its properties, implementation challenges, and successful applications in modern construction. Bamboo's exceptional mechanical properties, including superior tensile strength, flexibility, and resistance to dynamic loads, make it comparable to conventional materials like steel and concrete. Its remarkable growth rate of up to 91 centimetres per day and inherent renewability position makes it an environmentally sustainable alternative for architectural applications. However, significant challenges persist in its widespread adoption, including the need to standardise structural characteristics, develop effective treatments for moisture and insect resistance, and establish comprehensive technical expertise in modern construction methods. Through examination of pioneering projects, with a focus on the ZCB Bamboo Pavilion in Hong Kong, which demonstrates how traditional craft techniques can be successfully integrated with innovative digital design tools to create lightweight, durable structures of high geometric complexity. The ZCB Bamboo Pavilion project analyses how experimental methods involving physical prototypes and digital models have enabled design teams to fully leverage bamboo's unique properties. International examples, including The Arc at Green School in Bali, Kengo Kuma's Bamboo Flow in China, and ILLab's Bamboo Bamboo, further illustrate the material's versatility and potential in contemporary architecture. The findings indicate that while bamboo presents certain implementation challenges, these can be effectively addressed through continued research and development, particularly in the areas of standardization and treatment methods. The study concludes that the combination of traditional craftsmanship with modern technology creates new possibilities for bamboo in 21st-century architecture. This hybrid approach not only preserves cultural building techniques but also advances sustainable construction practices. The research contributes to the growing body of knowledge supporting bamboo's role as a key material in sustainable architecture, offering solutions that balance aesthetic requirements, structural durability, and environmental responsibility.

Keywords: bamboo, sustainable architecture, natural materials, ZCB bamboo pavilion, digital design, architectural innovation

A. Εισαγωγή

Η σύγχρονη αρχιτεκτονική καλείται να ανταποκριθεί σε σημαντικές περιβαλλοντικές και κατασκευαστικές προκλήσεις, καθώς η ανάγκη για βιωσιμότητα, εξοικονόμηση πόρων και ανθεκτικότητα των κατασκευών καθίσταται πιο επιτακτική από ποτέ. Ο κατασκευαστικός κλάδος, ως ένας από τους μεγαλύτερους καταναλωτές φυσικών πόρων και παραγωγούς αποβλήτων, απαιτεί νέες προσεγγίσεις που εστιάζουν σε ανανεώσιμα και φιλικά προς το περιβάλλον υλικά. Σε αυτό το πλαίσιο, το μπαμπού αναδεικνύεται ως ένα από τα πλέον καινοτόμα φυσικά υλικά, ικανό να προσφέρει λύσεις για βιώσιμη αρχιτεκτονική, χάρη στις εξαιρετικές μηχανικές του ιδιότητες, την ταχύτατη ανάπτυξή του και τη δυνατότητα συνδυασμού παραδοσιακών και σύγχρονων κατασκευαστικών τεχνικών.

Παρότι το μπαμπού χρησιμοποιείται εδώ και αιώνες στην παραδοσιακή αρχιτεκτονική πολλών ασιατικών χωρών, η ευρεία αποδοχή του ως βασικού υλικού στη σύγχρονη κατασκευή εξακολουθεί να αποτελεί αντικείμενο έρευνας. Στη διάρκεια του 20ού αιώνα, τα συνθετικά και βιομηχανικά υλικά, όπως το σκυρόδεμα, το ατσάλι και το γυαλί, κυριάρχησαν στις κατασκευές, με αποτέλεσμα τη σταδιακή εγκατάλειψη φυσικών υλικών, παρά την περιβαλλοντική τους υπεροχή. Ωστόσο, οι σύγχρονες απαιτήσεις για οικολογική δόμηση και η ανάγκη μείωσης του αποτυπώματος άνθρακα των κατασκευών έχουν επαναφέρει στο προσκήνιο υλικά όπως το μπαμπού. Οι εξαιρετικές μηχανικές του ιδιότητες, όπως η υψηλή αντοχή σε εφελκυσμό, η ευκαμψία και η ελαφριά δομή του, το καθιστούν άριστη εναλλακτική λύση σε σχέση με τα παραδοσιακά υλικά.

Η παρούσα εργασία εξετάζει το μπαμπού ως υλικό βιώσιμης αρχιτεκτονικής, αναλύοντας τις φυσικές και μηχανικές του ιδιότητες, τις δυνατότητες εφαρμογής του σε σύγχρονες κατασκευές, καθώς και τις προκλήσεις που συνοδεύουν τη χρήση του. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στο παράδειγμα του ZCB Bamboo Pavilion, μιας καινοτόμου κατασκευής στο Χονγκ Κονγκ, που αποτελεί πρότυπο σύζευξης ψηφιακού σχεδιασμού και παραδοσιακών κατασκευαστικών τεχνικών. Παράλληλα, εξετάζονται διεθνή παραδείγματα χρήσης του μπαμπού, όπως το The Arc at Green School στο Μπαλί, το Bamboo Flow στην Κίνα και το Bamboo Bamboo του ILLab, που επιβεβαιώνουν τη δυναμική του μπαμπού στην παγκόσμια αρχιτεκτονική.

A.1. Πρόκληση για Διερεύνηση

Η αυξανόμενη ανάγκη για βιώσιμες λύσεις στη δόμηση έχει αναδείξει το μπαμπού ως ένα από τα πλέον υποσχόμενα φυσικά υλικά. Ωστόσο, η πλήρης αξιοποίησή του ως βασικού δομικού υλικού εγείρει σημαντικές προκλήσεις. Παρά τα πλεονεκτήματά του, το μπαμπού δεν έχει υιοθετηθεί ευρέως στη σύγχρονη κατασκευαστική βιομηχανία, λόγω της φυσικής του αστάθειας, της ανάγκης ειδικής επεξεργασίας για προστασία από έντομα και υγρασία, αλλά και της απουσίας θεσμοθετημένων προδιαγραφών για τη χρήση του. Ενώ η ταχύτατη ανάπτυξή του και η αντοχή του σε εφελκυσμό το καθιστούν ιδανικό δομικό υλικό, η μη τυποποιημένη δομή του και η ευπάθειά του σε εξωτερικούς παράγοντες δημιουργούν προκλήσεις στην ευρεία εφαρμογή του.

Το ZCB Bamboo Pavilion αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα μιας αρχιτεκτονικής λύσης που συνδυάζει τις δυνατότητες του μπαμπού με σύγχρονες τεχνολογίες σχεδιασμού, αποδεικνύοντας ότι η καινοτομία μπορεί να συμβάλει στην αξιοποίηση αυτού του φυσικού υλικού σε μεγαλύτερη κλίμακα. Η πρόκληση που εξετάζει η παρούσα εργασία είναι η ενσωμάτωση του μπαμπού στις σύγχρονες κατασκευαστικές πρακτικές, γεφυρώνοντας το χάσμα μεταξύ παραδοσιακών τεχνικών και ψηφιακών εργαλείων σχεδιασμού και κατασκευής.

A.2. Ερευνητικό Ερώτημα

Η παρούσα εργασία επιχειρεί να απαντήσει στο ερώτημα πώς το μπαμπού μπορεί να αξιοποιηθεί ως βασικό υλικό στη βιώσιμη αρχιτεκτονική, ποια είναι τα πλεονεκτήματα και οι περιορισμοί του, καθώς και ποιες τεχνολογικές και κοινωνικές προκλήσεις πρέπει να ξεπεραστούν για την ευρεία υιοθέτησή του. Η έρευνα εστιάζει στην κατανόηση των φυσικών και μηχανικών του ιδιοτήτων, στη σύγκρισή του με άλλα δομικά υλικά και στην ανάλυση της εφαρμογής του σε σύγχρονες αρχιτεκτονικές κατασκευές. Εξετάζεται επίσης ο ρόλος της τεχνολογίας στη διαμόρφωση νέων μεθόδων επεξεργασίας και χρήσης του μπαμπού, καθώς και οι τρόποι με τους οποίους το παράδειγμα του ZCB Bamboo Pavilion μπορεί να συμβάλει στην κατανόηση του δυναμικού του υλικού αυτού στη βιώσιμη δόμηση.

A.3. Μεθοδολογία

Η μεθοδολογία της παρούσας έρευνας συνδυάζει θεωρητική ανάλυση, μελέτη περίπτωσης και συγκριτική έρευνα, προκειμένου να διερευνηθεί το δυναμικό του μπαμπού στη βιώσιμη αρχιτεκτονική. Αρχικά, πραγματοποιείται εκτενής βιβλιογραφική ανασκόπηση που περιλαμβάνει επιστημονικά άρθρα, ερευνητικές εργασίες και αναλύσεις υλικών, με στόχο την πλήρη κατανόηση των φυσικών και μηχανικών χαρακτηριστικών του μπαμπού, καθώς και των δυνατοτήτων και περιορισμών του ως κατασκευαστικό υλικό.

Στη συνέχεια, η εργασία εστιάζει στη μελέτη περίπτωσης του ZCB Bamboo Pavilion, αναλύοντας τη διαδικασία σχεδιασμού και κατασκευής του, καθώς και τις τεχνικές προκλήσεις που αντιμετώπισε η ομάδα σχεδιασμού. Εξετάζεται η χρήση προηγμένων ψηφιακών εργαλείων μοντελοποίησης, η απόκλιση μεταξύ ψηφιακού μοντέλου και πραγματικής κατασκευής, καθώς και οι τρόποι με τους οποίους η παραδοσιακή τεχνική χειροτεχνίας ενσωματώθηκε σε ένα σύγχρονο αρχιτεκτονικό έργο.

Παράλληλα, γίνεται συγκριτική ανάλυση διεθνών παραδειγμάτων, όπως το The Arc at Green School, το Bamboo Flow και το Bamboo Bamboo, προκειμένου να αναδειχθούν οι ποικίλες εφαρμογές του μπαμπού στη σύγχρονη αρχιτεκτονική. Η μεθοδολογία ολοκληρώνεται με τη διατύπωση συμπερασμάτων και προτάσεων, που επισημαίνουν τις δυνατότητες και τους περιορισμούς του μπαμπού, καθώς και προτάσεις για την εμπορική και αρχιτεκτονική αξιοποίησή του μέσω περαιτέρω έρευνας και τεχνολογικής ανάπτυξης.

Β. Ανάλυση του Υλικού Μπαμπού

Β.1. Βιολογία και Δομή

Το μπαμπού ανήκει στην οικογένεια των Ποοειδών (Poaceae) και είναι ένα ταχέως αναπτυσσόμενο ποώδες φυτό, παρά τη δενδρώδη μορφή του. Ως μέλος αυτής της οικογένειας, το μπαμπού χαρακτηρίζεται από τη δομή του που μοιάζει με γρασίδι και όχι με δέντρο, γεγονός που εξηγεί την εξαιρετική του ταχύτητα ανάπτυξης. Υπάρχουν εκατοντάδες είδη μπαμπού, τα οποία συναντώνται κυρίως σε τροπικές και υποτροπικές περιοχές, αλλά ορισμένα είδη ευδοκιμούν και σε εύκρατα κλίματα. “Η παγκόσμια παρουσία του μπαμπού είναι αξιοσημείωτη, ιδιαίτερα στην περιοχή της Ασίας του Ειρηνικού, η οποία φιλοξενεί μια ποικιλία ειδών μπαμπού”¹



Εικ.1:Phyllostachys Aurea (golden bamboo)



Εικ.2:Phyllostachys Bissetii

1. Fahim, M., Haris, M., Khan, W., & Zaman, S. (2022). Bamboo as a construction material: Prospects and challenges. Advances in Science and Technology. Research Journal, 16(3).



Εικ.3:Iron Bamboo



Εικ.4:Phyllostachys Vivax



Εικ.5:Black Bamboo

Ένα από τα πιο εντυπωσιακά χαρακτηριστικά του μπαμπού είναι η ταχύτατη ανάπτυξή του. Ορισμένα είδη μπορούν να αυξηθούν έως και 91 εκατοστά μέσα σε μία ημέρα, καθιστώντας το ένα από τα ταχύτερα αναπτυσσόμενα φυτά στον κόσμο. Η ανάπτυξή του οφείλεται στη μοναδική δομή του, που περιλαμβάνει κοίλους, αρθρωτούς βλαστούς (καλαμίσκους), οι οποίοι είναι ταυτόχρονα ελαφριοί και εξαιρετικά ανθεκτικοί. Οι βλαστοί αυτοί αναπτύσσονται από ένα εκτεταμένο υπόγειο ριζικό σύστημα (ριζώματα), το οποίο διατηρείται ζωντανό ακόμη και μετά τη συγκομιδή, εξασφαλίζοντας τη συνεχή αναγέννηση του φυτού. Η δομή του μπαμπού είναι προσαρμοσμένη για αντοχή και ευκαμψία. Οι βλαστοί του αποτελούνται από ίνες υψηλής πυκνότητας που του προσδίδουν σημαντική μηχανική αντοχή σε συγκρίσιμη με τον χάλυβα, ενώ η ελαστικότητά του επιτρέπει την απορρόφηση καταπονήσεων, κάνοντάς το ιδιαίτερα ανθεκτικό σε δυναμικά φορτία. Οι κοίλοι καλαμίσκοι του χωρίζονται σε τμήματα από ενδιάμεσους κόμβους, οι οποίοι προσφέρουν επιπλέον σταθερότητα και δομική ακεραιότητα.

Αυτή η μοναδική συνδυασμένη δομή, σε συνδυασμό με τον ταχύ ρυθμό ανάπτυξης, καθιστά το μπαμπού ένα από τα πιο πολύτιμα και βιώσιμα υλικά, με εφαρμογές που κυμαίνονται από την κατασκευή μέχρι τη διακόσμηση και την προστασία του περιβάλλοντος.

B.2. Μηχανικές Ιδιότητες του Μπαμπού: Ανθεκτικότητα, Ευκαμψία και Βιωσιμότητα

Το μπαμπού αποτελεί ένα υλικό υψηλής αντοχής και προσαρμοστικότητας, διαθέτοντας μηχανικές ιδιότητες που το καθιστούν ιδιαίτερα κατάλληλο για ευρύ φάσμα κατασκευαστικών εφαρμογών. “Οι μηχανικές ιδιότητες του μπαμπού υπογραμμίζουν την καταλληλότητά του για κατασκευή. Συγκεκριμένα, η αντοχή σε εφελκυσμό, η αντοχή σε θλίψη και το μέτρο ελαστικότητας του μπαμπού κυμαίνονται σε τιμές συγκρίσιμες με τα συμβατικά δομικά υλικά.”¹ Η υψηλή αντοχή του σε εφελκυσμό, μπορεί να ξεπεράσει ακόμη και εκείνη του χάλυβα. Αυτό οφείλεται στην υψηλή περιεκτικότητα του μπαμπού σε ίνες κυτταρίνης, που είναι ιδιαίτερα ελαστικές και ανθεκτικές σε δυνάμεις που τείνουν να τραβούν το υλικό.

Παράλληλα, το μπαμπού διαθέτει εξαιρετική αντοχή σε συμπίεση, συγκρίσιμη με αυτή του σκυροδέματος, χάρη στη μοναδική δομή του, που περιλαμβάνει κοίλους βλαστούς και ενδιάμεσους κόμβους που παρέχουν επιπλέον σταθερότητα. “Επιπλέον, Το μπαμπού έχει υψηλή αναλογία αντοχής προς βάρος, καθιστώντας το ισχυρότερο από πολλούς τύπους ξύλου και χάλυβα.”²

Η ευκαμψία του μπαμπού είναι ένα ακόμη χαρακτηριστικό που ξεχωρίζει. Το υλικό μπορεί να απορροφά καταπονήσεις και να αντιστέκεται στις παραμορφώσεις χωρίς να σπάει, γεγονός που το καθιστά κατάλληλο για εφαρμογές σε σεισμογενείς περιοχές ή σε κατασκευές που υπόκεινται σε δυναμικά φορτία. “Η φυσική τμηματοποιημένη σύνθεση (με ενδιάμεσους χόνδρους) του μπαμπού παρέχει ενσωματωμένους αρμούς που επιτρέπουν ελεγχόμενη, όλκιμη παραμόρφωση, ενισχύοντας περαιτέρω τη σεισμική του ανθεκτικότητα.”³ “Η σύνθετη φύση του μπαμπού, που περιλαμβάνει ίνες κυτταρίνης ενσωματωμένες σε μια μήτρα λιγνίνης, συμβάλλει στην υψηλή αντοχή του σε εφελκυσμό, επιτρέποντάς του να αντέχει στις πλευρικές δυνάμεις που ασκούνται κατά τη διάρκεια της σεισμικής κίνησης.”⁴

1. Fahim, M., Haris, M., Khan, W., & Zaman, S. (2022). Bamboo as a construction material: Prospects and challenges. *Advances in Science and Technology. Research Journal*, 16(3).

2. Kumar, M., Gupta, V., & Rana, R. K. (2019). A Review on Bamboo as a Sustainable Construction Material. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*,

3. Ganesan, N., Chariar, V. M., & Sivakumar, K. (2012). Seismic response of bamboo reinforced concrete frame structure. *Construction and Building Materials*,

4. Dinwoodie, J. M. (2000). *Timber: its nature and behaviour*. CRC Press.

Παράλληλα, το μπαμπού είναι εξαιρετικά ελαφρύ, διευκολύνοντας τη μεταφορά και τη χρήση του σε κατασκευές, ενώ διατηρεί την υψηλή αντοχή του.

Επιπλέον, το μπαμπού παρουσιάζει φυσική αντοχή στην υγρασία και τη διάβρωση. “Ορισμένα είδη μπαμπού μπορούν να αντέξουν την έκθεση στο νερό για παρατεταμένες περιόδους χωρίς να αλλοιωθούν.”⁵ Ιδιαίτερα όταν υποστεί κατάλληλη επεξεργασία, κάτι που το καθιστά ιδανικό για υπαίθριες κατασκευές ή περιοχές με υψηλή υγρασία.

“Οι πλωτές κατοικίες που βρίσκονται σε παράκτιες κοινότητες κατασκευάζονται συχνά με κουφώματα και τοίχους από μπαμπού, επιτρέποντας ανθεκτικότητα στις πλημμύρες και παρέχοντας αερισμό σε υγρά κλίματα.”⁶ Λόγω της δομής και της ευκαμψίας του, μπορεί επίσης να απορροφά την ενέργεια πρόσκρουσης, κάνοντάς το ανθεκτικό σε κρούσεις και ιδανικό για εφαρμογές όπως γέφυρες, σκαλωσιές και προστατευτικές κατασκευές.

Είδη Ξυλείας	Χρόνια ανάπτυξης	Βιωσιμότητα	Αντοχή	Κυκλική Οικονομία
Κέδρος	50-150	Μέτρια	Υψηλή	Μέτρια
Πεύκο	30-100	Υψηλή	Υψηλή	Μέτρια
Οξιά	60-80	Υψηλή	Μέτρια	Μέτρια
Έλατο	40-100	Μέτρια	Υψηλή	Μέτρια
Δρυς	80-150	Υψηλή	Μέτρια	Μέτρια
Καρυδιά	60-200	Μέτρια	Μέτρια	Μέτρια
Μπαμπού	3-5	Υψηλή	Χαμηλή	Υψηλή

Εικ.6:Πίνακας σύγκρισης συμβατικών ειδών ξυλείας με το μπαμπού.

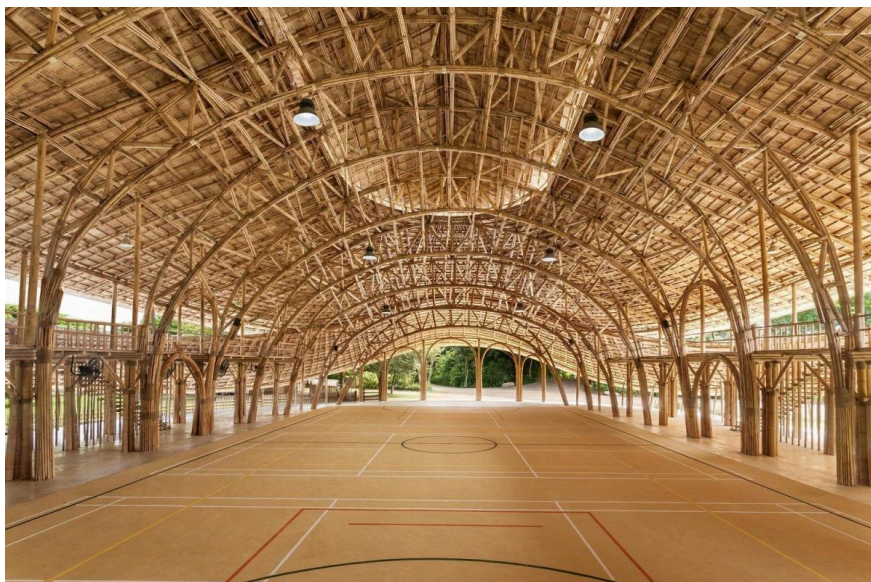
5. (Janssen κ.α.,2017)

6. (Grossman, 2019)

Β.3. Χρήσεις του Μπαμπού στη Δόμηση: Βιώσιμότητα και Καινοτομία στις Κατασκευές.

Το μπαμπού είναι ένα εξαιρετικά βιώσιμο και ανθεκτικό υλικό που βρίσκει ολοένα και περισσότερες εφαρμογές στη δομική κατασκευή, προσφέροντας μοναδικές λύσεις για οικολογικές και αποδοτικές κατασκευές. Η υψηλή αντοχή του, η ευκαμψία και η ελαφρότητα του το καθιστούν ιδανικό για την κατασκευή κτιρίων, γεφυρών, και άλλων υποδομών, ιδιαίτερα σε περιοχές με περιορισμένους πόρους ή σε χώρες με περιορισμένη πρόσβαση σε «παραδοσιακά» δομικά υλικά.

Ένα από τα πλέον αξιοσημείωτα χαρακτηριστικά του μπαμπού είναι η δυνατότητα του να αξιοποιείται ως βασικό δομικό υλικό για τη δημιουργία φέρουσας κατασκευής και προσωρινών σκαλωσιών. Η ευκαμψία και η αντοχή του το καθιστούν ιδανικό για κατασκευές σε περιοχές που πλήττονται από σεισμούς ή άλλες φυσικές καταστροφές, καθώς το μπαμπού μπορεί να απορροφήσει δυνάμεις και να μειώσει τις παραμορφώσεις χωρίς να σπάει. Σε πολλές χώρες της Ασίας και της Λατινικής Αμερικής, το μπαμπού χρησιμοποιείται παραδοσιακά για την κατασκευή κατοικιών, σχολείων και κοινοτικών κέντρων. “Η ιαπωνική αρχιτεκτονική έχει από καιρό αγκαλιάσει τη χρήση του μπαμπού ως οικοδομικό υλικό για σπίτια, ιερά, ακόμη και περίπλοκα πλαίσια από μπαμπού για τείλοποιεΐα (χώρος αναψυχής που κυρίως σερβίρει τσάι)”¹



Εικ.7: Bamboo Sports Hall for Panyaden International School, Chiangmai Life Construction / Thailand

1. (Fujimoto κ.α.,2016)

“Σε χώρες όπως η Κολομβία και το Εκουαδόρ, το μπαμπού έχει χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή σπιτιών, γεφυρών και άλλων υποδομών.”² Χάρη στη φυσική του αντοχή στη διάβρωση και την ευκολία με την οποία μπορεί να επεξεργαστεί, είναι κατάλληλο για εξωτερικές κατασκευές που απαιτούν ανθεκτικότητα στις καιρικές συνθήκες και τη φθορά του χρόνου. Σε συνδυασμό με τη βιώσιμη φύση του, το μπαμπού αποτελεί ένα οικολογικό υλικό που μειώνει το ενεργειακό αποτύπωμα της κατασκευής.



Εικ.8: Tra Su bamboo bridge / Vietnam - the longest bamboo bridge of the world

2. (Londono - Lemos κ.α.,2016)

Στη σύγχρονη αρχιτεκτονική, το μπαμπού χρησιμοποιείται επίσης για εσωτερικούς χώρους, όπως η κατασκευή επίπλων, διαχωριστικών τοίχων και άλλων διακοσμητικών στοιχείων. Η φυσική του αισθητική και η ευκολία επεξεργασίας του το καθιστούν δημοφιλές σε αρχιτεκτονικές λύσεις που συνδυάζουν την οικολογική συνείδηση με την αισθητική ποιότητα. Τέλος, το μπαμπού χρησιμοποιείται για τη δημιουργία υποδομών που απαιτούν ελαφριά και ανθεκτικά υλικά, όπως σε στέγες, δάπεδα και κολώνες, προσφέροντας μια βιώσιμη και δυναμική εναλλακτική στις παραδοσιακές κατασκευές.



Εικ.9: Έπιπλα από μπαμπού / Χρήση μπαμπού σε εσωτερικούς χώρους

Με την ταχεία ανάπτυξή του, την αντοχή του και την ελάχιστη περιβαλλοντική επιβάρυνση, το μπαμπού αναδεικνύεται ως ένα από τα πιο υποσχόμενα υλικά για την οικοδόμηση ενός βιώσιμου μέλλοντος στον τομέα της κατασκευής.

B.4. Προκλήσεις και Περιορισμοί

Το μπαμπού, ως φυσικό υλικό, κερδίζει διαρκώς έδαφος λόγω της ανθεκτικότητας του, της φιλικότητας του προς το περιβάλλον και της ευελιξίας του στη χρήση. Ωστόσο, η αξιοποίηση του παρουσιάζει συγκεκριμένες προκλήσεις και περιορισμούς που επηρεάζουν τη λειτουργικότητα και την αποδοτικότητά του.

Μία από τις βασικότερες προκλήσεις είναι η επεξεργασία του μπαμπού. Παρόλο που πρόκειται για υλικό ελαφρύ και εύκαμπτο, απαιτεί ειδικές τεχνικές επεξεργασίας και σύνθετες μεθόδους για να καταστεί κατάλληλο για κατασκευές ή προϊόντα υψηλής αντοχής. Επίσης, λόγω της φυσικής ποικιλομορφίας του, η ποιότητα του μπαμπού μπορεί να διαφέρει από κομμάτι σε κομμάτι, γεγονός που δυσχεραίνει την προβλεψιμότητα κατά την παραγωγή.

Ένας ακόμη περιορισμός είναι η αντοχή του σε περιβαλλοντικούς παράγοντες, όπως η υγρασία και τα έντομα. Το μπαμπού αν και έχει φυσική περιεκτικότητα σε πυρίτιο που το καθιστά ανθεκτικό στους τερμίτες και άλλα έντομα,¹ αν δεν υποστεί κατάλληλη επεξεργασία και συντήρηση, είναι ευάλωτο σε αυτούς του παράγοντες καθώς και σε μούχλα ή φθορά. Αυτά τα ζητήματα απαιτούν πρόσθετη επένδυση σε χημικές ή μηχανικές επεξεργασίες, που μπορεί να αυξήσουν το κόστος παραγωγής.

Επιπλέον, ο κύκλος ζωής του μπαμπού επηρεάζεται από τη βιώσιμη καλλιέργεια και συγκομιδή. Παρόλο που το μπαμπού είναι ταχέως ανανεώσιμο, η υπερβολική ή μη ελεγχόμενη εκμετάλλευσή του μπορεί να προκαλέσει εξάντληση των πόρων και περιβαλλοντική υποβάθμιση.

Τέλος, ένας σημαντικός περιορισμός είναι η δυσκολία στη μαζική παραγωγή και διάθεση προϊόντων από μπαμπού, καθώς η τεχνογνωσία για τη διαχείριση και την επεξεργασία του δεν είναι ευρέως διαδεδομένη. Αυτό μπορεί να μειώσει την εμπορική βιωσιμότητα του υλικού σε σχέση με πιο καθιερωμένα υλικά, όπως το ξύλο ή τα συνθετικά.

1. (Janssen κ.α.,2017)

Γ. Το Παράδειγμα του ZCB Bamboo Pavilion

Το ZCB Bamboo Pavilion είναι ένας δημόσιος χώρος εκδηλώσεων που κατασκευάστηκε για το κτίριο Zero Carbon του Συμβουλίου Κατασκευών (ZCB) το καλοκαίρι του 2015 στον κόλπο Kowloon του Χονγκ Κονγκ. Πρόκειται για μια τετραώροφη κατασκευή με καμπυλωτό-ενεργό μπαμπού πλέγμα τεσσάρων ορόφων, με εμβαδόν περίπου 350 τ.μ. και χωρητικότητα 200 ατόμων, το οποίο χρησιμοποιήθηκε για 8 μήνες πριν ανακυκλωθεί.



Εικ.10: ZCB Bamboo Pavilion / The Chinese University of Hong Kong School of Architecture, 2015

Είναι κατασκευασμένο από 475 μεγάλους πόλους μπαμπού που είναι λυγισμένοι για να διαμορφώσουν τη δομή και δένονται στο χέρι με μεταλλικό σύρμα χρησιμοποιώντας τεχνικές που βασίζονται στην καντονέζικη χειροτεχνία σκαλωσιάς μπαμπού. Το σχήμα είναι μια δομή ενός μεγάλου κελύφους που αναπτύσσεται και απλώνεται σε τρία κοίλα στοιχεία. Οι «κίονες» αυτοί στηρίζονται σε τρεις κυκλικές βάσεις από σκυρόδεμα. Ένα ραμμένο λευκό ύφασμα εφελκυσμού απλώνεται πάνω από το κέλυφος και φωτίζεται έντονα από το εσωτερικό των τριών ποδιών.

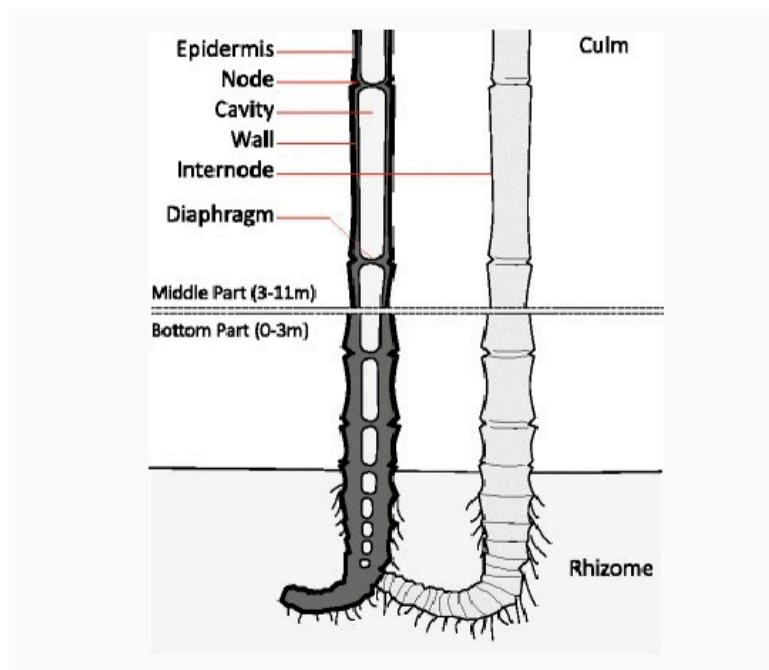
Το έργο είναι το αποτέλεσμα των συντονισμένων προσπάθειών του Συμβουλίου Κατασκευαστικής Βιομηχανίας (CIC), του Κινεζικού Πανεπιστημίου του Χονγκ Κονγκ (CUHK) και διαφόρων εργολάβων.

Σχεδιάστηκε από μια ερευνητική ομάδα με επικεφαλής τον καθηγητή Kristof Crolla στη Σχολή Αρχιτεκτονικής του CUHK. Η έρευνα διερευνά πώς τα εργαλεία υπολογιστικού σχεδιασμού μπορούν να εισαχθούν στρατηγικά σε υπάρχουσες μεθόδους κατασκευής για να επιτρέψουν ένα πιο ελκυστικό και καινοτόμο αρχιτεκτονικό αποτέλεσμα. Το ZCB Bamboo Pavilion το παρουσιάζει αυτό και δείχνει πώς μπορεί να επεκταθεί η υπό εξαφάνιση χειροτεχνία της Bamboo Scaffolding Construction στο Χονγκ Κονγκ μέσω της εισαγωγής εργαλείων ψηφιακής εύρεσης φόρμας και προσομοίωσης φυσικής σε πραγματικό χρόνο.



Εικ.11: Εσωτερική λήψη από ZCB Bamboo Pavilion, Χονγκ Κονγκ

Ο σχεδιασμός του έργου βασίζεται σε μια πρακτική άσκηση σχεδιασμού φοιτητών αρχιτεκτονικής που πραγματοποιήθηκε στο CUHK School of Architecture. Ο σχεδιασμός αναπτύχθηκε περαιτέρω από την ερευνητική ομάδα σε συνεργασία με μηχανικούς και συμβούλους μπαμπού, χρησιμοποιώντας μηχανές προσομοίωσης και διάφορα ψηφιακά μέσα. Προχώρησαν στην κατασκευή φυσικών μοντέλων και πρωτοτύπου μεγάλης κλίμακας για να εξαχθεί η τελική του μορφή.



Εικ.12: Ανάλυση δομής μπαμπού

Το μπαμπού είναι ένα ευρέως διαθέσιμο, φιλικό προς το περιβάλλον υλικό που αναπτύσσεται άφθονα και με αξιοσημείωτα υψηλές ταχύτητες στην περιοχή Ασίας-Ειρηνικού, την Αφρική και την Αμερική. Είναι ένας εξαιρετικός ανανεώσιμος φυσικός πόρος που δεσμεύει το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂) και το μετατρέπει σε οξυγόνο. Είναι ισχυρό, ελαφρύ και εύκολο στην επεξεργασία και μεταφορά. Στο Χονγκ Κονγκ το μπαμπού εμφανίζεται κυρίως σε προσωρινά θέατρα, σκαλωσιές ή κατασκευές για θρησκευτικά φεστιβάλ. Σε παγκόσμιο επίπεδο συνήθως εφαρμόζεται ως υποκατάστατο ξύλου ή χάλυβα, χάρη στις μοναδικές ιδιότητες κάμψης και αντοχής του υλικού. Συνεπώς, το ZCB Bamboo Pavilion παρουσιάζει μια εναλλακτική αρχιτεκτονική εφαρμογή που μεγιστοποιεί αυτές τις ιδιότητες του υλικού.



Εικ.13: Μπαμπού δεμένο στο χέρι που χρησιμοποιείται ως τυπική προσωρινή σκαλωσιά στο Χονγκ Κονγκ.

Το περίπτερο είναι γεωμετρικά πολύπλοκο, το μπαμπού έχει ευρέως ποικίλες γεωμετρίες, πολλές και διαφορετικές διαστασιολογήσεις. Η χρήση του μπαμπού για την κατασκευή σκαλωσιάς και άλλων μικρών κατασκευών δεν αποτελούν συμβατικά αρχιτεκτονικά σχέδια. Επομένως, η κατασκευή του έργου αμφισβήτησε τα όρια του σχεδιαστικού ελέγχου του αρχιτεκτονικού σχεδιασμού. Αναπτύχθηκαν νέες μέθοδοι που συγχώνευσαν ακριβή συστήματα ψηφιακού σχεδιασμού με καινοτόμους φυσικούς πόρους προκειμένου να αντιμετωπιστούν απρόβλεπτες καταστάσεις στο βαθμό που ήταν δυνατό να συμβεί.

Το ZCB Bamboo Pavilion προωθεί τον καινοτόμο και οικολογικό αρχιτεκτονικό σχεδιασμό στο ευρύτερο κοινό και τη σχεδιαστική κοινότητα. Χρησιμοποιήθηκε για τη φιλοξενία εκθέσεων, παραστάσεων και εκδηλώσεων που υποστηρίζουν τη ζωή, την κατασκευή και την ανάπτυξη χαμηλών εκπομπών άνθρακα. Με την προώθηση βιώσιμων, ελαφρών μεθόδων δόμησης για αρχιτεκτονική μεγάλης έκτασης, το έργο αναζητά τρόπους για την εξέλιξη της παραδοσιακής καντονέζικης χειροτεχνίας για τον 21ο αιώνα.

Γ.1. Ανάπτυξη Σχεδίου

Κατά την έναρξη του ερευνητικού έργου στις αρχές του 2014, κανένας οικοδομικός κώδικας και σχεδόν καμία πληροφορία δεν ήταν διαθέσιμη σχετικά με τη χρήση του μπαμπού ως δομικό υλικό στην αρχιτεκτονική, ειδικά όσον αφορά την μοναδική ιδιότητα κάμψης που διαθέτει το μπαμπού, δεν υπήρχε κάποια εφαρμογή που να το αναδεικνύει¹. Μόνο διαθέσιμες γενικές πληροφορίες για το μπαμπού, ως υλικό αρχιτεκτονικής²

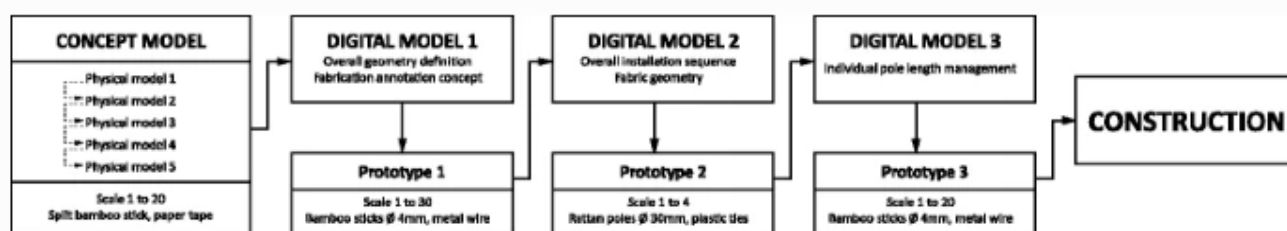
Δημιουργήθηκε μια επαναληπτική σειρά βημάτων για το σχεδιασμό και τον συντονισμό του έργου με συμβούλους, πελάτες, μηχανικούς και εργολάβους και για την αντιμετώπιση αποκλίσεων υλικών, κατασκευαστικών ανακρίβειών και ανθρώπινων σφαλμάτων⁴. Εργαλεία ψηφιακής σχεδίασης διαδικασιών, μηχανές προσομοίωσης εικονικής – φυσικής και πρωτότυπα φυσικών μοντέλων χρησιμοποιήθηκαν σε ποικίλες κλίμακες¹. Τα ψηφιακά περιβάλλοντα δημιουργήθηκαν για την ανάπτυξη μιας ροής εργασίας που καθορίζει τη γεωμετρία από αρχικά μοντέλα φυσικών σκίτσων και για τη διαδικαστική δημιουργία εξόδου πληροφοριών κτιρίου, κατάλληλες για ανάπτυξη στο σημείο εφαρμογής. Το φυσικό πρωτότυπο δημιούργησε ευκαιρίες δοκιμής και εισαγωγής νέων πληροφοριών στο ψηφιακό μοντέλο για επανυπολογισμό και περαιτέρω ανάλυση. Αυτός ο συνεχής διάλογος μεταξύ ψηφιακής προσομοίωσης και οπτικοποίησης αφενός, και αναλογικών δοκιμών και φυσικών πρωτοτύπων αφετέρου, συνεχίστηκε σε όλη τη διαδικασία κατασκευής και συναρμολόγησης, καθώς τα περίεργα περιστατικά απαιτούσαν συνεχείς αλλαγές στο σύστημα σχεδιασμού.

1. Rockwood, D. (2015). *Bamboo Architecture and Construction with Sustainable Materials*. Routledge.

2. Jayanetti, D. L., & Follett, P. R. (1998). *Bamboo in Construction: An Introduction*. International Network for Bamboo and Rattan (INBAR).

4. Hidalgo-Lopez, O. (2003). *Bamboo: The Gift of the Gods*. D'Vinci Design.

Εκτός από την κλίμακα της, η τελική κατασκευή δεν έχει διαφορετική θέση από προηγούμενα πρωτότυπα σε αυτήν τη ροή εργασίας³.

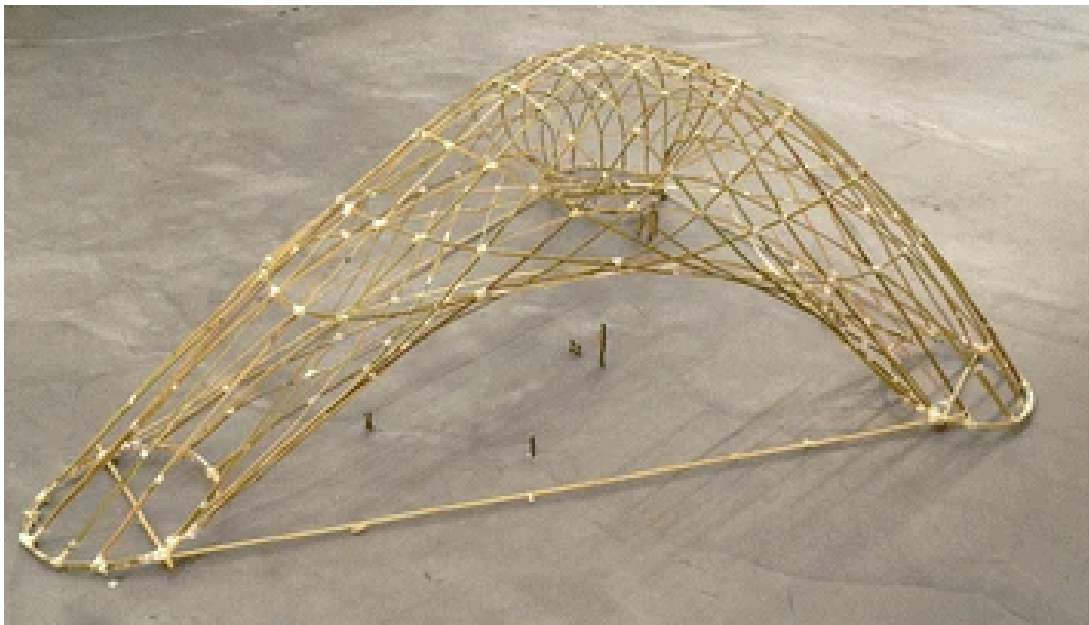


Εικ.14: Σχεδιασμός ακολουθίας με χρήση ψηφιακών και φυσικών μοντέλων

Η ιδέα για τη δομή του έργου προέκυψε μέσω μιας σειράς πέντε επαναλήψεων μοντέλων μελέτης φυσικού σχεδιασμού σε κλίμακα 1 προς 20, κατασκευασμένα από μακριές σχισμές μπαμπού. Η αντιπροσωπευτική γεωμετρική συμπεριφορά αναμενόταν, επιλέγοντας το ίδιο υλικό με το τελικό έργο. Μέσω παρατηρήσεων που έγιναν στα μοντέλα μελέτης σχετικά με τη δομική σταθερότητα, τη σύνδεση και τη γεωμετρική διάταξη, αυτά τα μοντέλα εξελίχθηκαν σταδιακά στο τελικό τριγωνικό κέλυφος του διαγράμματος ⁵. Αυτό το κέλυφος αποτελείται από τρία στρώματα μπαμπού και αναπτύσσεται πάνω σε τρία μεγάλα κοίλα στοιχεία με τετραγωνισμένα και ελεύθερα κρεμαστά γραμμικά μέλη. Κατά τη συναρμολόγηση του μοντέλου, οι σχισμές από μπαμπού κάμπτονταν με το χέρι και συνδέονταν στα σημεία τομής, καθορίζοντας ένα μοντέλο πλήρως διπλά καμπυλωμένου άξονα για τη συνολική γεωμετρία. Οι εσωτερικές δυνάμεις κάμψης μεταφέρονταν συνεχώς μεταξύ των μελών μέσω των κόμβων μέχρι να επιτευχθεί μια συνολική ισορροπία δύναμης. Έτσι, δημιουργήθηκε ένα ισχυρό και σταθερό ελαφρύ σύστημα, ικανό να εκτείνεται σε μεγάλες αποστάσεις.

3. Janssen, J. J. A. (2000). *Designing and Building with Bamboo*. Technical University of Eindhoven.

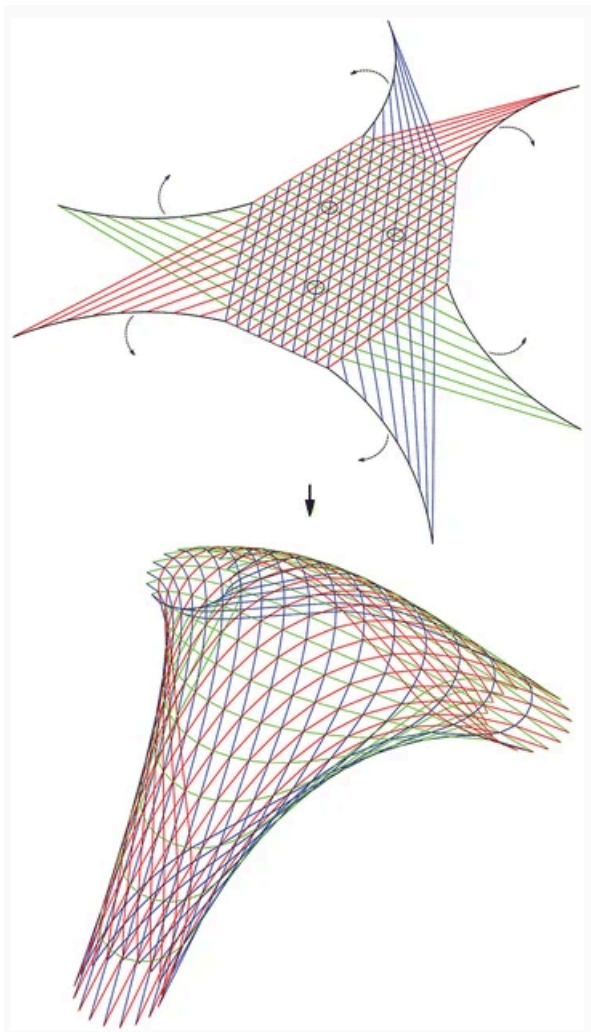
5. Velez, S. (2013). *Grow Your Own House: Simon Velez and Bamboo Architecture*. Vitra Design Museum.



Εικ.15: Πρότυπο μοντέλο μελέτης (μπαμπού, 1:20)

Με βάση την πέμπτη επανάληψη του μοντέλου μελέτης, αναπτύχθηκε ένα πρότυπο μοντέλο αξόνων σε ψηφιακή μορφή στο περιβάλλον λογισμικού Rhinoceros του McNeel χρησιμοποιώντας επιπρόσθετα Grasshopper και το πρόσθετο προσομοίωσης φυσικής δύναμης, Kangaroo⁴. Σε αυτό το μοντέλο, οι δυνάμεις κάμψης που λειτουργούν στα φυσικά μοντέλα αναλύθηκαν σε αντίστοιχες διανυσματικές δυνάμεις που εφαρμόζονται σε ένα διακριτό δίκτυο καμπυλών που αντιπροσωπεύεται από ένα σύστημα ελατηρίου-σωματιδίου. Κάθε μέλος σε αυτή τη διασυνδεδεμένη διάταξη στόχευε στη διατήρηση του μήκους του και στην ευθυγράμμιση. Παρόλο που όλα τα διανύσματα δυνάμεων ορίστηκαν από αφηρημένους αριθμούς χωρίς ακριβή συσχέτιση με τις πραγματικές ιδιότητες των φυσικών υλικών, μπορούσε να γίνει αντιληπτή μια συμπεριφορά σε μακροεπίπεδο παρόμοια με αυτή που βρέθηκε στα φυσικά μοντέλα. Η ψηφιακή εγκατάσταση θα βρει την ισορροπία δυνάμεων της σε συγκρίσιμες αναδυόμενες γεωμετρίες.

4. Hidalgo-Lopez, O. (2003). *Bamboo: The Gift of the Gods*. D'Vinci Design



Εικ.16: Ψηφιακό μοντέλο 1: Οι μηχανές προσομοίωσης φυσικών σωματιδίων ελατηρίου χρησιμοποιούνται ως εργαλείο εύρεσης μορφής – γεωμετρίας – ισορροπίας

Η γεωμετρία από αυτό το πρώτο ψηφιακό μοντέλο χρησιμοποιήθηκε για την εξαγωγή συμβατικών αρχιτεκτονικών σχεδίων, τομών και υψομετρικών σχεδίων για την επικοινωνία πελάτη και εργολάβου κατά τη διάρκεια του δημόσιου διαγωνισμού και για αιτήσεις αδειών λειτουργίας σε μεταγενέστερο στάδιο. Το μοντέλο χρησιμοποιήθηκε επίσης από δομικούς μηχανικούς για την αξιολόγηση της βιωσιμότητας του έργου. Επιπλέον χρησίμευσε ως βάση για ένα φυσικό πρωτότυπο σε κλίμακα 1 προς 30, κατασκευασμένο από μπαστούνια μπαμπού μήκους δύο μέτρων ακολουθώντας τις γεωμετρικές γραμμές του άξονα. Αυτό το πρωτότυπο χρησιμοποιούσε ένα απλό σύστημα σήμανσης στο οποίο οι διασταυρώσεις κόμβων, που εξήχθησαν από τα ψηφιακά αρχεία, σημειώνονταν με ακρίβεια σε μακριά, ευθεία, άκαμπτα, στοιχεία από μπαμπού. Αντίστοιχες ετικέτες διασταύρωσης σε διαφορετικά μέρη του μπαμπού στη συνέχεια συγκεντρώθηκαν μία προς μία ενώ κάμπτονταν τα μέλη κατά τη διάρκεια της συναρμολόγησης. Καθώς ενώθηκαν οι αντίστοιχες ετικέτες, η φόρμα εμφανίστηκε σταδιακά και σκληρύνθηκε.

Το μοντέλο 1 προς 30 αποκάλυψε αρκετές απρόβλεπτες προκλήσεις που θα μπορούσαν να επηρεάσουν προβληματικά την τελική δομή σε πλήρη κλίμακα. Πρώτον, όσον αφορά τη σειρά εγκατάστασης, τα μέλη πρακτικά μπορούσαν να τοποθετηθούν μόνο από την κορυφή, αντί να τοποθετηθούν από κάτω (αδύνατο να φτάσουμε) ή να υφαθούν (αδύνατον να λυγίσουν). Δεύτερον, η προσέγγιση του πάχους του στρώματος και του σχήματος της μορφής έπρεπε να ενσωματωθεί με μεγαλύτερη ακρίβεια ψηφιακά. Τέλος, το μήκος των δύο μέτρων των χρησιμοποιημένων ραβδιών από μπαμπού δεν μπορούσε να κλιμακωθεί τριάντα φορές επί τόπου. Μόνο περίπου τα κεντρικά 12 μέτρα ενός στύλου από μπαμπού είναι κατάλληλα για κατασκευή, πράγμα που σημαίνει ότι τα μέλη της κατασκευής θα πρέπει να συναρμολογηθούν από χωριστές ράβδους μπαμπού.

Ένα δεύτερο ψηφιακό μοντέλο αντιμετώπισε και ενσωμάτωσε τα περισσότερα από αυτά τα ζητήματα. Η αρχικά εξιδανικευμένη γεωμετρία μιας επιφάνειας χωρίστηκε και μετατοπίστηκε σε τρία στρώματα που απέχουν μεταξύ τους σύμφωνα με το αναμενόμενο μέσο πάχος υλικού μπαμπού. Η γεωμετρία του άξονα όλων των μελών προσαρμόστηκε ώστε να ελίσσεται μεταξύ αυτών των τριών μόνο στρωμάτων με τρόπο που ακολουθούσε μια προσεκτικά ενορχηστρωμένη ακολουθία εγκατάστασης τοποθετώντας μέλη από το εξωτερικό σε προηγούμενως τοποθετημένα μέλη. Αυτό απέτρεψε τις σφιχτές ακτίνες κάμψης ενώ παρέμεναν όσο το δυνατόν πιο κοντά στο αρχικό σχήμα.

Από αυτό το δεύτερο ψηφιακό μοντέλο, κατασκευάστηκε ένα πρωτότυπο μοντέλο μελέτης σε κλίμακα 1 προς 4. Αυτό το μοντέλο χρησιμοποιήθηκε για την αξιολόγηση της πρακτικότητας των βελτιώσεων όσον αφορά τη σειρά εγκατάστασης και για τη δοκιμή μεγάλης κλίμακας για τον έλεγχο της δομικής συμπεριφοράς. Αντί για μπαμπού χρησιμοποιήθηκαν μπαστούνια από rattan, μπαστούνια μήκους τριών μέτρων με διάμετρο τριών εκατοστών. Το Rattan είναι ένα καλάμι πολύ πιο εύκαμπτο από το μπαμπού, υπερβάλλοντας έτσι τη δομική συμπεριφορά του πρωτοτύπου. Τα μακριά μέλη της κατασκευής κατασκευάστηκαν πριν από τη συναρμολόγηση συνδέοντας αυθαίρετα ραβδιά – μπαστούνια μεταξύ τους με επαρκή επικάλυψη για τη μεταφορά των δυνάμεων κάμψης. Έχοντας μια σωστά κλιμακούμενη διάμετρο, το πρωτότυπο επιβεβαίωσε τη χρηστικότητα του συστήματος σήμανσης και τη νέα ακολουθία

εγκατάστασης. Η υψηλή ευελιξία του μπαστουνιού επέτρεψε να αξιολογηθεί ο ερπυσμός και η εκτροπή με την πάροδο του χρόνου.

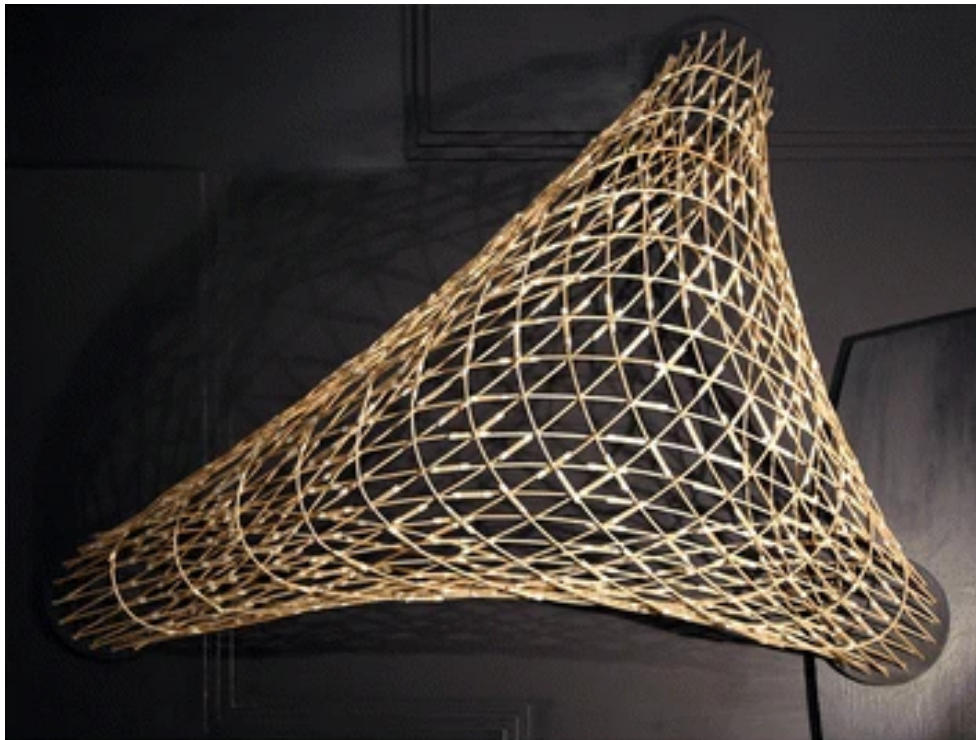
Το εξωτερικό κέλυφος βρέθηκε εξαιρετικά ισχυρό και σταθερό, αλλά η κάτω πλευρά του κελύφους, η «κοιλιά», κατέρρευσε. Σε απάντηση, εισήχθη ένα σύστημα ανάρτησης στα ακόλουθα μοντέλα. Έξι σημεία της «γραμμής των άκρων της κοιλιάς» αναρτήθηκαν από το πιο σταθερό κέλυφος παραπάνω χρησιμοποιώντας μεταλλικό σύρμα ή καλώδιο. Επιπλέον, η αυθαίρετη διασύνδεση των ράβδων-μπαστουνιών σε μακριές συνεχείς γραμμές άξονα αποκάλυψε προκλήσεις κόμπων σε περιοχές κόμβων όπου και οι τρεις κατευθύνσεις αξόνων έτυχε να έχουν επικαλύψεις. Είχαν εμφανιστεί κόμποι με έως και έξι πόλους να συναντώνται. Επίσης, οι επικαλύψεις κοντά στα τελικά σημεία προκάλεσαν δομικές δυσκολίες. Ως εκ τούτου, η ακριβής τοποθέτηση των επικαλύψεων έπρεπε να συμπεριληφθεί στα ακόλουθα μοντέλα σχεδίασης.



Εικ.17: Δεύτερο πρότυπο, που χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση της δομικής συμπεριφοράς (rattan, 1:4)

Το τελικό ψηφιακό μοντέλο, που δοκιμάστηκε σε ένα τρίτο πρωτότυπο στην κλίμακα 1 προς 20, ενσωμάτωσε όλες τις πληροφορίες που χρησιμοποιήθηκαν για την τελική κατασκευή. Μετά από μια φυσική δοκιμή μέγιστης ακτίνας κάμψης με πολλούς πόλους μπαμπού, έγινε μια ψηφιακή ανάλυση καμπυλότητας της μορφής για να ελεγχθεί η καταλληλότητα της γεωμετρίας. Οι περιορισμοί οδικής μεταφοράς επιβεβαίωσαν ότι το μέγιστο

μήκος των κορμών μπαμπού που μπορούσαν να μεταφερθούν ήταν 7,2 μέτρα και η δοκιμή με τους πραγματικούς πόλους μπαμπού αποκάλυψε την απαραίτητη επικάλυψη 1,5 μέτρου για να εξασφαλιστεί η σωστή μεταφορά της δύναμης κάμψης χωρίς τσάκισμα ή λυγισμό. Αυτές οι πληροφορίες ενσωματώθηκαν στο μοντέλο και σχεδιάστηκε το σχέδιο επικάλυψης των πόλων. Στα ψηφιακά μοντέλα χρησιμοποιήθηκε κατά προσέγγιση διάμετρος πόλου 12 εκατοστών καθώς οι ακριβείς διάμετροι πόλων κυμαίνονταν από 12 έως 15 εκατοστά στη βάση και οκτώ έως 12 εκατοστά στην κορυφή.



Εικ.18: Τρίτο πρότυπο: δοκιμή ακολουθίας τελικής εγκατάστασης (μπαμπού, 1:20)

Έγινε σύγκριση γεωμετρίας μιας τρισδιάστατης σάρωσης του τρίτου πρωτοτύπου και του ψηφιακού αρχείου για να απεικονιστεί γραφικά η ομοιότητα μεταξύ των δύο. Αυτό αποκάλυψε επαρκή προσέγγιση του μοντέλου ψηφιακής προσομοίωσης με τη μακέτα του μοντέλου μελέτης. Σε κλιμάκωση, στα περισσότερα σημεία υπήρξε απόκλιση πέντε εκατοστών από το ψηφιακό μοντέλο. Μόνο ένα σημείο όπου έσπασε ένα ραβδί μοντέλου είχε πολύ μεγαλύτερη απόκλιση. Αυτό παρείχε επαρκή εμπιστοσύνη στο μοντέλο ψηφιακής εξομοίωσης και στη μεθοδολογία εφαρμογής μας για να συνεχίσουμε με το τελικό βήμα της κατασκευής πλήρους κλίμακας.



Εικ.19: Σύγκριση μεταξύ του τελικού ψηφιακού μοντέλου και του τρίτου φυσικού πρωτοτύπου που έχει σαρωθεί σε κλίμακα 3D: κόκκινο = μικρότερη από 50 χιλιοστά απόκλιση, μπλε = απόκλιση μεγαλύτερη από 1000 χιλιοστά.

Γ.2. Μοντελοποίηση Πληροφοριών Κατασκευής

Η δημιουργία ενός εύκαμπτου ψηφιακού μοντέλου επέτρεψε τη σταδιακή ενημέρωση των υποτιθέμενων μεταβλητών που σχετίζονται με τις ιδιότητες των φυσικών υλικών, τις τεχνικές κατασκευής, τον σχεδιασμό λεπτομερειών και τις δομικές ανησυχίες. Καθώς τα δεδομένα είχαν γίνει πιο συγκεκριμένα σε όλη τη διαδικασία σχεδιασμού και πρωτοτύπων, η απρόβλεπτη φύση τόσο του υλικού όσο και της μεθόδου συναρμολόγησης απαιτείται πλέον για την ανάπτυξη νέων οδηγιών κατασκευής¹ (Rockwood, 2015). Αυτά έπρεπε να είναι αρκετά ξεκάθαρα για να ελαχιστοποιηθεί οποιαδήποτε παρερμηνεία δεδομένων, τεχνικής συναρμολόγησης ή σειράς λειτουργιών, παραμένοντας ένα ανοιχτό σύστημα που θα μπορούσε να προσαρμοστεί σε επείγουσες αλλαγές στη λεπτομέρεια ή τη γεωμετρία³.

Αν και το τελικό ψηφιακό μοντέλο ενσωμάτωσε όλες τις απαραίτητες πληροφορίες για την αυτόματη παραγωγή κοινών γραφικών αναπαραστάσεων, όπως αρχιτεκτονικά σχέδια και αποδόσεις, μόνο εξαιρετικά επιλεκτικές πληροφορίες κτιρίου ελήφθησαν για τεκμηρίωση κατασκευής. Αυτό μείωσε την πολυπλοκότητα του έργου στο απλούστερο από τα δυνατά σύνολα εντολών. Οι συνεχείς γραμμές του άξονα μπαμπού ξετυλίχτηκαν ψηφιακά σε μεγάλες ευθείες γραμμές. Στη συνέχεια, τα σημεία τομής με άλλα σημεία του έργου χαρτογραφήθηκαν σε αυτές τις γραμμές⁴.

1. Rockwood, D. (2015). *Bamboo Architecture and Construction with Sustainable Materials*. Routledge.

3. Janssen, J. J. A. (2000). *Designing and Building with Bamboo*. Technical University of Eindhoven.

4. Hidalgo-Lopez, O. (2003). *Bamboo: The Gift of the Gods*. D'Vinci Design

Επιτόπου, η μέτρηση με το χέρι αυτών των σημείων διασταύρωσης στις κορυφές έγινε χρησιμοποιώντας προσαρμοσμένες ετικέτες με αυτοκόλλητα που περιέχουν τις πληροφορίες αριθμού των πόλων που τέμνονται στο συγκεκριμένο σημείο. Τα αυτοκόλλητα τοποθετήθηκαν χειροκίνητα σε διασυνδεδεμένους μεμονωμένους πόλους μπαμπού που αποτελούσαν τα μακριά συνεχή μέλη²(Jayanetti & Follett, 1998). Αυτά τα μέλη στη συνέχεια ανυψώθηκαν επί τόπου και λυγίστηκαν χειροκίνητα στη θέση τους. Με την αντιστοίχιση των αντίστοιχων ετικετών, το συνολικό σχήμα προέκυψε σταδιακά⁵.



Εικ.20: Οι πόλοι μπαμπού διασυνδέονται σε μακριές συνεχείς θέσεις

Τα έγγραφα κατασκευής διατήρησαν υψηλό επίπεδο ακρίβειας στον καθορισμό των σημάνσεων σημείων τομής σύνδεσης σε μέλη μεταβλητού πάχους. Αυτές οι σημάνσεις έγιναν οδηγοί για μια διαδικασία συναρμολόγησης που περιλάμβανε ανοχές και ανθρώπινο λάθος, με αποτέλεσμα μια διασύνδεση που επέτρεψε ένα επίπεδο επιτόπιας εύρεσης φόρμας. Η μέθοδος ήταν αρκετά απλή ώστε να επιτρέπει την επιτόπια υπέρβαση και διόρθωση. Κατά την εγκατάσταση έλαβε χώρα ένα ορισμένο επίπεδο αυτοδιόρθωσης: καθώς το σύστημα βασιζόταν στη φυσική συμπεριφορά κάμψης του υλικού, τα σφάλματα εγκατάστασης που απέκλιναν πολύ από την «ακριβή» προσομοιωμένη ψηφιακή γεωμετρία τα κατέστησαν αδύνατα καθώς το πραγματικό υλικό θα αντέκρουε για να βρει την ισορροπία του. Μεγάλα ανθρώπινα σφάλματα θα εντοπιζόνταν και θα

2. Jayanetti, D. L., & Follett, P. R. (1998). *Bamboo in Construction: An Introduction*. International Network for Bamboo and Rattan (INBAR).

5. Velez, S. (2013). *Grow Your Own House: Simon Velez and Bamboo Architecture*. Vitra Design Museum.

διορθώνονταν αμέσως από το αυθόρμητα ισορροπημένο σύστημα κατασκευής.



Εικ.21: Οι αυτοκόλλητες ετικέτες με πληροφορίες σύνδεσης τοποθετούνται χρησιμοποιώντας μια μεζούρα



Εικ.22: Επιτόπια εγκατάσταση με αντιστοίχιση των αντίστοιχων ετικετών

Γ.3. Κατασκευή Έναντι Ψηφιακού Μοντέλου

Το 'ZCB Bamboo Pavilion' κατασκευάστηκε σε συνολικό χρόνο κάτω από 90 ημέρες. Η κατασκευή από μπαμπού κατασκευάστηκε χωρίς ουσιαστικά προβλήματα χρησιμοποιώντας την ίδια μεθοδολογία κατασκευής που χρησιμοποιήθηκε στα πρωτότυπα μοντέλα μικρής κλίμακας και χρησιμοποιώντας τις ίδιες τεχνικές και υλικά στερέωσης που υπάρχουν στην παραδοσιακή τοπική βιοτεχνία³. Μόνο σε περιοχές με τις πιο σφιχτές ακτίνες κάμψης χρειάζονταν πρόσθετες εγκοπές στις κορυφές για να καλυφθεί η απαιτούμενη καμπυλότητα⁴ (Hidalgo-Lopez, 2003). Ένα

3. Janssen, J. J. A. (2000). *Designing and Building with Bamboo*. Technical University of Eindhoven.

4. Hidalgo-Lopez, O. (2003). *Bamboo: The Gift of the Gods*. D'Vinci Design.

ασυνήθιστα ζεστό καλοκαίρι είχε στεγνώσει και σκληρύνει τους επιτόπιους πόλους σε απρόβλεπτο βαθμό. Το σύστημα τεκμηρίωσης κατασκευής λειτούργησε καλά για να κατευθύνει τους εργολάβους με ένα σαφές σύνολο οδηγιών και σειρές εργασιών για τη συναρμολόγηση. Σταδιακά εμφανίστηκε σταθερή γεωμετρία πλέγματος-κελύφους καθώς κάθε μέλος κάμπτονταν και στερεώνονταν επί τόπου. Ωστόσο, οι φυσικές παραλλαγές διαστάσεων του μπαμπού και οι ανοχές στους κόμπους καθιστούσαν αδύνατη την τέλεια αντιστοίχιση κάθε ετικέτας παντού, καθώς περιστασιακά σχηματιζόταν σωρευτική ολίσθηση. Επίσης, τα μέλη σποραδικά ήταν πολύ κοντά ή πολύ μακριά στα σημεία σύνδεσης θεμελίωσης λόγω πρόσθετων αποκλίσεων, που απαιτούσαν λύσεις ad hoc λεπτομερειών. Τα υπέρ-ακριβή σημεία συντεταγμένων τομής πόλων από το μοντέλο ψηφιακής εξομοίωσης τελικά υλοποιήθηκαν σε μια «προσεγγιστική σφαίρα» με διάμετρο περίπου 20 εκ.



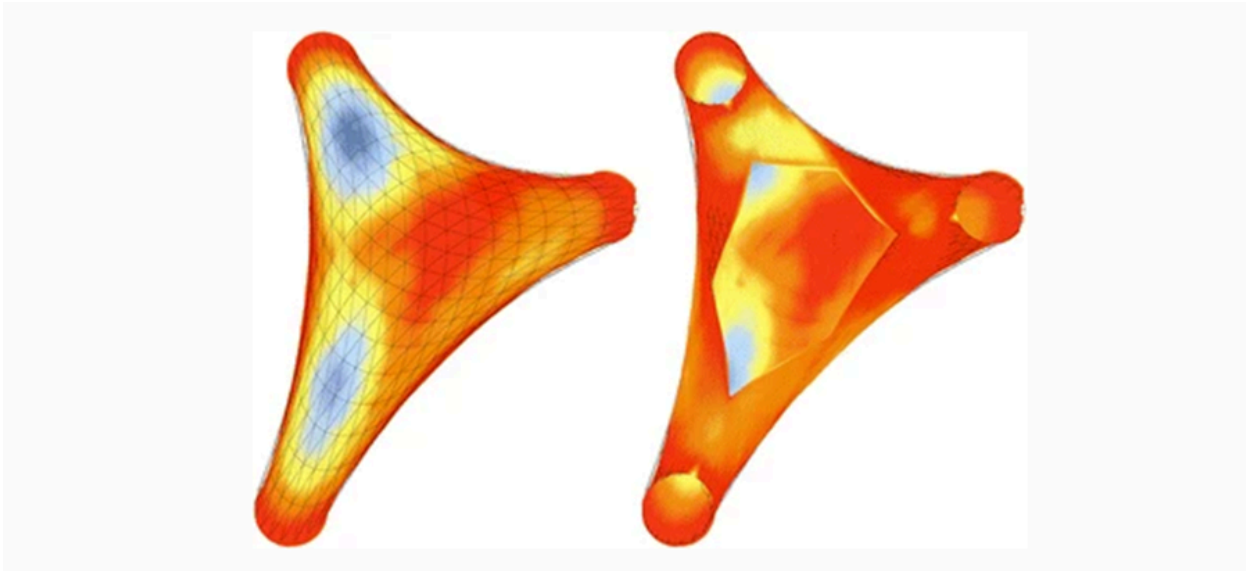
Εικ.23: Ολοκληρωμένη κατασκευή από μπαμπού



Εικ.24:Τυπικό παράδειγμα αναντιστοιχίας
ΕΤΙΚΕΤΩΝ

Όπως και η γεωμετρική σύγκριση μεταξύ του φυσικού μοντέλου κλίμακας 1 προς 20 και του ψηφιακού μοντέλου, έγινε μια τρισδιάστατη σάρωση υψηλής ανάλυσης της τελικής ενσωματωμένης γεωμετρίας και μετρήθηκε σε σχέση με τα ψηφιακά δεδομένα. Τα περισσότερα μέλη κάμψης βρήκαν την τελική τους μορφή σε απόσταση 50 χιλιοστών από το προσομοιωμένο ψηφιακό μοντέλο. Σε δύο σημεία ελάχιστης καμπυλότητας, ωστόσο, η δομή προσπάθησε να ισοπεδωθεί με δύο από τα τρία μέλη να ισιώνουν περισσότερο από το αναμενόμενο, με αποτέλεσμα αποκλίσεις άνω του 1 μέτρου. Αυτή η αυθόρμητα εμφανιζόμενη απόκλιση κρίθηκε αποδεκτή καθώς παρέμεινε η συγκλαστική φύση της επιφάνειας σε αυτές τις περιοχές. Αυτό σήμαινε ότι δεν αναμενόταν τοπικός λυγισμός ή ενισχυμένος συνεχής ερπυσμός κάτω από το αναμενόμενο φορτίο. Επίσης οπτικά, η διαφορά δεν δημιουργούσε κανένα πρόβλημα καθώς το κοινό εξακολουθούσε να αντιλαμβάνεται τη φόρμα στο παρθένο πλατωνικό της σχήμα. Έτσι, η απόκλιση θεωρήθηκε μέρος της συμπεριφοράς εύρεσης φυσικής μορφής του έργου. Λαμβάνοντας υπόψη την πολυπλοκότητα του έργου, τον περιορισμένο χρόνο στο εργοτάξιο, τον μοναδικό ψηφιακό σχεδιασμό και τη διαδικασία τεκμηρίωσης και τον πειραματικό χαρακτήρα της συναρμολόγησης, η συνολική κατασκευή κατέληξε στο συμπέρασμα ότι ήταν επιτυχής².

2. Jayanetti, D. L., & Follett, P. R. (1998). *Bamboo in Construction: An Introduction*. International Network for Bamboo and Rattan (INBAR).



Εικ.25: Τρισδιάστατο σαρωμένο ύφασμα έναντι υφάσματος που σχεδιάστηκε αρχικά: κόκκινο = μικρότερη από 50 mm απόκλιση, μπλε = απόκλιση μεγαλύτερη από 1000 mm. Κάτοψη (αριστερά), κάτω όψη (δεξιά)

Το «ZCB Bamboo Pavilion» πρωτοπορεί στην υπέρβαση των ορίων των οποίων οι συναλλαγές δεδομένων που βασίζονται σε 3D μοντέλα ενσωματώνονται στην κατασκευή. Όπως τονίστηκε, ορισμένα οφέλη μπορούν να βρεθούν μόνο σε πιο λεπτομερή ή εναλλακτικά μοντέλα. Ωστόσο, τα εργαλεία μοντελοποίησης πληροφοριών που χρησιμοποιούνται πιο συχνά στην πράξη δεν έχουν αναπτυχθεί για να εξυπηρετήσουν την ποικιλία των ανακρίβειών, των ανοχών και των απροσδιοριστιών του υλικού που αντιμετωπίζονται επί τόπου. Αν και τα ψηφιακά μοντέλα ενημερώνονται συνήθως για την επίτευξη ενός τελικού μοντέλου "ως κατασκευασμένο", αυτή η ροή πληροφοριών δεν ενσωματώνει την απροσδιοριστία πίσω στη διαδικασία σχεδιασμού. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε ένα τελικό μοντέλο που δυνητικά διαφέρει δραματικά από την αρχική σχεδίαση. Η αφομοίωση της φυσικής μεταβλητότητας σε ψηφιακά περιβάλλοντα δεν είναι δυνατή με τα συμβατικά εργαλεία, αλλά θα ήταν μια απαίτηση εάν θέλουμε να χρησιμοποιήσουμε πρώτες ύλες που δεν υφίστανται εκτεταμένη βιομηχανική τυποποίηση.

Γ.4. Αποτίμηση Παραδείγματος: Αναβίωση υλικού και Τεχνικής στο Σύγχρονο Περιβάλλον Σχεδιασμού και Κατασκευής

Οι αρχιτέκτονες σχεδιαστές έχουν πλέον παγκοσμίως εύκολη πρόσβαση σε φθηνή υπολογιστική ισχύ για να επιτρέψουν την πρακτική ενσωμάτωσή της, ακόμη και σε έργα μικρής κλίμακας. Το αρκετά ισχυρό λογισμικό έγινε προσιτό και αρκετά ευέλικτο ώστε να επιτρέπει την εξατομικευμένη προσαρμογή σε μοναδικά σχέδια. Εν τω μεταξύ, σήμερα, ακόμη, η πλειονότητα της επιτόπιας κατασκευής γίνεται σχεδόν αποκλειστικά με το χέρι, επιτόπου, χωρίς τη χρήση εξελιγμένης τεχνολογίας κατασκευής, βασιζόμενη σε όποια δεξιότητες ή δεξιότητα είναι διαθέσιμη τοπικά. Αυτές οι δύο πραγματικότητες πρέπει να έρθουν σε στενό διάλογο.

Το 'ZCB Bamboo Pavilion' έχει ξεπεράσει τα όρια του χώρου σχεδιαστικών λύσεων της αρχιτεκτονικής μπαμπού. Ο τρόπος πρακτικής του, ωστόσο, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί και σε άλλα συστήματα αναλογικής κατασκευής. Μέσω της δημιουργίας ενός βρόχου ανατροφοδότησης αμοιβαίας επιβολής μεταξύ του ψηφιακού και του φυσικού κόσμου και της χαλάρωσης της ακαμψίας των μοντέλων ψηφιακής σχεδίασης, θα καταστεί δυνατό ένα ευρύτερο γεωμετρικά, δομικά και χωρικά φάσμα αρχιτεκτονικής.

Ενώ οι τεχνολογικές συνθήκες συνεχίζουν να εξελίσσονται γρήγορα, ο υλικός και ο ψηφιακός κόσμος πρέπει να έρθουν πιο κοντά μέσω μιας ισορροπημένης ροής εργασίας. Σε αυτό, το θεμελιώδες καθήκον του αρχιτέκτονα είναι ο ορισμός, μέσα στη συνολική διαδικασία σχεδιασμού και κατασκευής, της άνετης ισορροπίας μεταξύ του τι επιτρέπουν τα ψηφιακά εργαλεία και του πόσο αυτά ανταποκρίνονται στην επί τόπου εφαρμογή.



Εικ.26: Εναέρια άποψη του «ZCB Bamboo Pavilion» την ημέρα.

Ως συμμετοχικό έργο έρευνας δράσης, το «ZCB Bamboo Pavilion» δείχνει πώς οι στρατηγικές, οι τρόποι πρακτικής και η κατανόηση του περιβάλλοντος της πρακτικής μπορούν να εντοπιστούν και με τον υπολογισμό να προσαρμοστούν για να επιτραπεί η επέκταση του αρχιτεκτονικού σχεδιασμού στη λύση του χώρου. Το έργο είναι ένα πείραμα στην ικανότητα διαχείρισης επιτόπιων προσδοκιών με βάση ένα αρχικό σύνολο αγνώστων και απρόβλεπτων καταστάσεων μέσα σε ένα σύστημα κατασκευής. Με την πάροδο του χρόνου, τη διερεύνηση, τη βελτίωση και την ανάπτυξη, χρησιμοποιώντας τόσο φυσικά πρωτότυπα μοντέλα όσο και ψηφιακά μοντέλα, τα κενά στη διαδικασία σχεδιασμού διευκρινίστηκαν και επανεισάχθηκαν στη ροή εργασίας. Οι πληροφορίες που συλλέγονταν κατά τη διάρκεια της σχεδίασης – εφαρμογής έγιναν έτσι μέρος των συνεχιζόμενων προσομοιώσεων που τελικά ήταν σε θέση να προβλέψουν την ασταθή συμπεριφορά του συστήματος.

Πρωταρχική σημασία για την επιτυχία του έργου ήταν μια ψηφιακή διαμόρφωση ικανή για ευελιξία σε σχέση με τις ανοχές των πραγματικών δυνατοτήτων ενός φυσικού υλικού και τις τεχνικές επιτόπιες συναρμολόγησης, καθώς και η προσαρμογή του τελικού έργου που

προκύπτει όταν η ψηφιακή εξομοίωση δεν ισχύει πλέον. Για αυτό, απαιτούνται εναλλακτικοί τύποι κατασκευαστικής τεκμηρίωσης και υλικού αναφοράς που εξάγονται από τα πολύπλοκα πρωτότυπα δεδομένα για να επιτευχθεί ένα επίπεδο πρακτικής απλότητας.

Η υιοθέτηση ψηφιακών εργαλείων πρέπει να εφαρμοστεί με ευαισθησία για να φιλοξενήσει και να αξιοποιήσει ένα ευρύτερο φάσμα πρώτων υλών και περιφερειακές τεχνικές δεξιότητες. Η σχέση μεταξύ της απόλυτης ακρίβειας ενός συστήματος με την απροσδιοριστία θα παραμείνει ανοιχτή καθώς η υιοθέτηση φυσικών υλικών και οι ποικίλες κατασκευαστικές πρακτικές διερευνώνται περαιτέρω. Μέσω της καινοτόμου χρήσης υπολογιστικών εργαλείων στην αρχιτεκτονική πρακτική, τα προσαρμοσμένα μοντέλα πληροφοριών κτιρίου μπορούν να υιοθετήσουν μια ad-hoc προσέγγιση για την εξισορρόπηση του κινδύνου, της πιθανότητας και της ασάφειας έναντι ενός εξειδικευμένου σχεδιασμού.

Δ. Εφαρμογές Μπαμπού στη Βιώσιμη Αρχιτεκτονική

Δ.1. The Arc at Green School / Bali



Εικ.27: Πανοραμική όψη τμήματος της πανεπιστημιούπολης στο Μπαλί

Οι IBUKU πρωτοστάτησαν σε ένα νέο λεξιλόγιο σχεδιασμού, φτιάχνοντας τους δικούς τους κανόνες στην πορεία και προσφέροντας νέες λύσεις στον κόσμο μέσα από το ταξίδι τους. Σήμερα, προσφέρουν μια ακόμη σχεδιαστική λύση, μια άνευ προηγουμένου δομή που δεν είναι μόνο ένα απίστευτο κομμάτι αρχιτεκτονικής από μπαμπού, αλλά θα χρησιμεύσει ως αναφορά σε ελαφριές κατασκευές συνολικά.

Το Arc είναι το νεότερο κτίριο στην πανεπιστημιούπολη στο παγκοσμίου φήμης Green School στο Μπαλί, της Ινδονησίας. Το σχολείο έχει μια 12ετή ιστορία σπάζοντας τα όρια και διευρύνοντας τους ορίζοντες και το Arc είναι το νεότερο σημείο αναφοράς σε αυτή την ιστορία, ανεβάζοντας τον πήχη για βιώσιμη εκπαίδευση σε όλο τον κόσμο. Το πρώτο κτίριο του είδους του που έγινε ποτέ, το The Arc at Green School είναι χτισμένο από μια σειρά διασταυρούμενων καμάρων από μπαμπού ύψους 14 μέτρων που εκτείνονται σε 19 μέτρα, που συνδέονται μεταξύ τους με αντικλαστικά πλέγματα και αντλούν τη δύναμή τους από την καμπυλότητα σε δύο αντίθετες κατευθύνσεις.



Εικ.28: Διαδικασία κατασκευής από μπαμπού

Το Arc είναι ένα κατόρθωμα της μηχανικής. Απαιτούσε μήνες έρευνας, ανάπτυξης και τελειοποίησης των εξατομικευμένων λεπτομερειών. Το αποτέλεσμα είναι ένα εκλεπτυσμένο σχέδιο με απaráμιλλη ομορφιά, το οποίο αποτελεί απόδειξη της δέσμευσης των IBUKU να διευρύνουν τους ορίζοντες στην αρχιτεκτονική και τον σχεδιασμό.



Εικ.29: Όψη εσωτερικού τμήματος του The Arc of Green School

Το Arc χρησιμοποιεί μια από τις μεγαλύτερες στρατηγικές της φύσης για τη δημιουργία μεγάλων χώρων με ελάχιστη δομή. Μέσα σε ένα ανθρώπινο θώρακα, μια σειρά από νευρώσεις που λειτουργούν με συμπίεση συγκρατούνται στη θέση τους από ένα τεντωμένο εύκαμπτο στρώμα μυών και δέρματος. Αυτό δημιουργεί ένα λεπτό αλλά ισχυρό περίβλημα για τους πνεύμονες. Στην περίπτωση του The Arc, τα τόξα που λειτουργούν με συμπίεση συγκρατούνται στη θέση τους με τεντωμένα αντικλαστικά πλέγματα. Αυτά τα σημεία του πλέγματος φαίνονται να πέφτουν στα κενά μεταξύ των απίστευτα λεπτών τόξων, δίνοντας μια ιδιοτροπία, οικειότητα και ομορφιά στο χώρο. Αν και τα πλέγματα φαίνονται να κρέμονται από τις καμάρες, στην πραγματικότητα τα συγκρατούν.



Εικ.30: Κέλυφος από πλέγμα μπαμπού

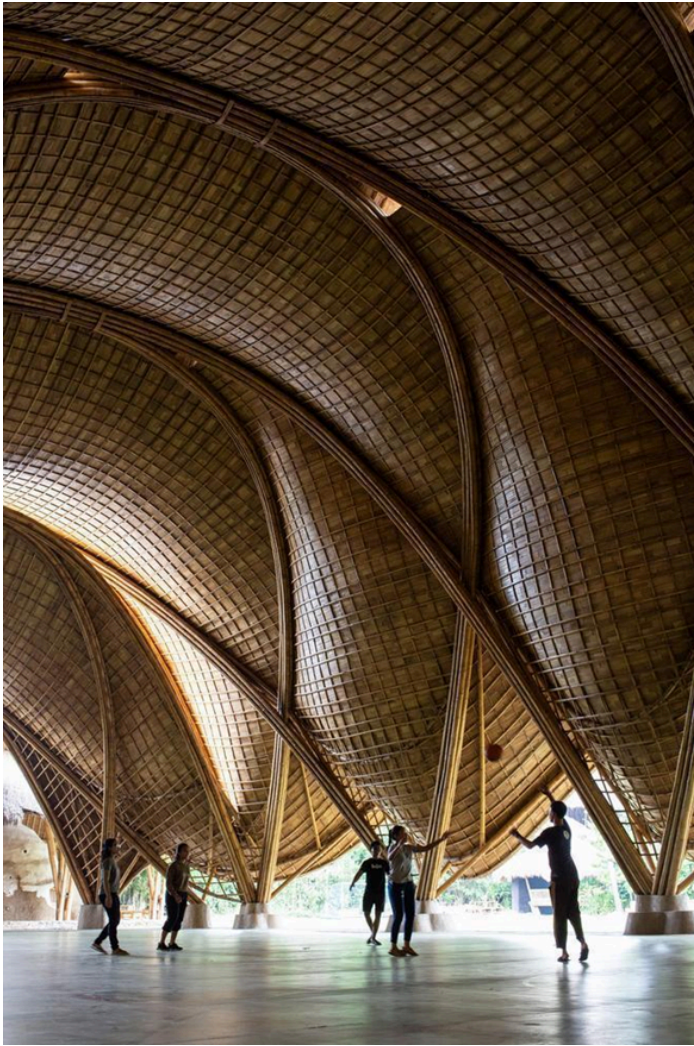


Εικ.31: Εξωτερική όψη του The Arc of Green School / Bali

Η ενορχήστρωση της γεωμετρίας του Arc φέρνει τη δομή σε κατάσταση ισορροπίας, πράγμα που σημαίνει μειωμένη ανάγκη για άλλο δομικό υλικό. Αυτό σημαίνει επίσης έναν άνευ προηγούμενου εσωτερικό ενιαίο όγκο χωρίς κανένα ζευκτικό που αποσπά την προσοχή.



Εικ.32: Άποψη The Arc of Green School / Bali



Εικ.33: Εσωτερική άποψη 2

Green School Bali. (n.d.). The Arc at Green School. Διαθέσιμο από: <https://www.greenschool.org>.

Δ.2. Bamboo Flow, Kengo Kuma And Associates / China



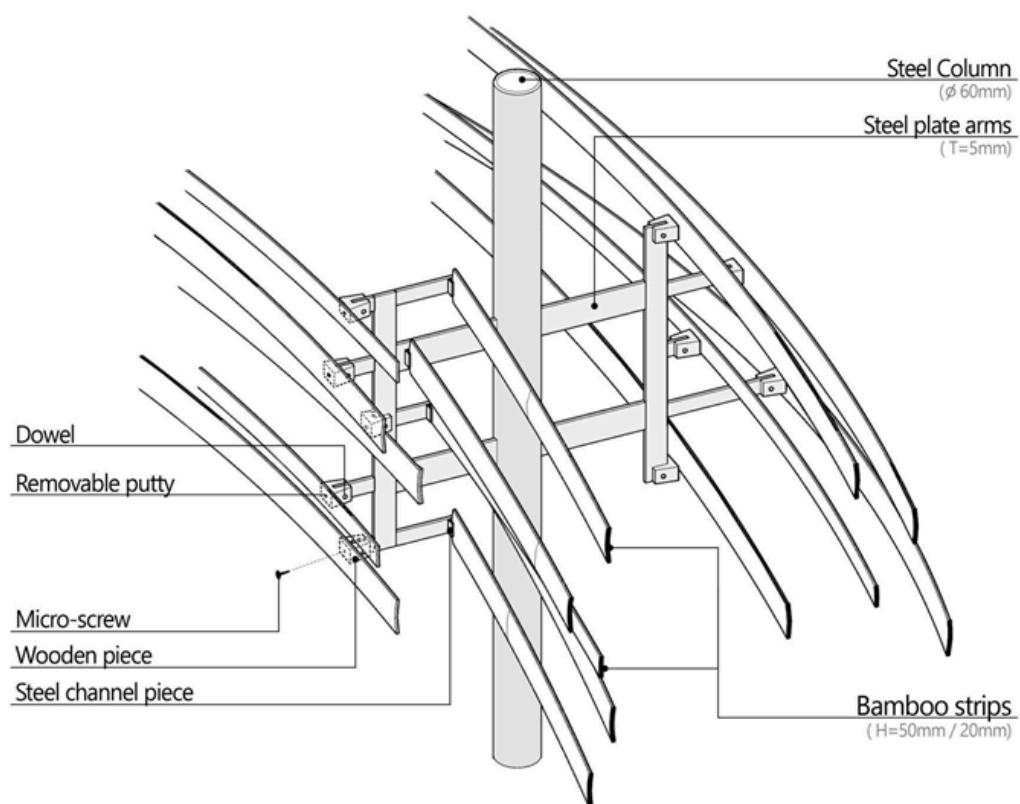
Εικ.34 Εξωτερική όψη του Bamboo Flow / China

Το Bamboo Flow είναι ένα τείλοποτείο που δημιουργήθηκε στο πλαίσιο της περιοδεύουσας έκθεσης του ΚΚΑΑ στην Κίνα, «Αρχιτεκτονική για τις Πέντε Αισθήσεις». Σχεδιάστηκε για να προσφέρει μια δυναμική αντίθεση με την κύρια ροή της έκθεσης, τοποθετώντας το τείλοποτείο με τρόπο ώστε να προκαλεί την αίσθηση ενός «κήπου», συνδυάζοντας τη ζωντάνια με την ηρεμία.

Το τείλοποτείο αποτελείται από τρισδιάστατες επιφάνειες από λωρίδες μπαμπού πλάτους 5 cm και 2 cm, οι οποίες είναι καμπυλωμένες σε διαφορετικά σχήματα και τοποθετημένες κατά μήκος μιας σπειροειδούς μορφής. Οι λωρίδες αυτές είναι στερεωμένες σε μικρά ξύλινα κομμάτια, τα οποία συνδέονται με χαλύβδινες πλάκες σε σχήμα πιρουνιού που διαθέτουν βραχίονες διαφορετικών μηκών. Όταν όλες οι καμπυλωτές λωρίδες μπαμπού τοποθετηθούν στη δομή, το τείλοποτείο αποκτά μια οργανική και φαινομενικά τυχαία μορφή από μπαμπού, δημιουργώντας μια μοναδική ηρεμία στον χώρο.



Εικ.35 Άποψη του κελύφους



Εικ.36 Λεπτομέρεια κατασκευής

Το Bamboo Flow ενσωματώνει την ομορφιά του «θορύβου» της ανατολίτικης τέχνης, της καλλιγραφίας και των ήχων παραδοσιακών ανατολίτικων μουσικών οργάνων, προσφέροντας μια αισθητική που δεν μπορεί να επιτευχθεί αποκλειστικά με βιομηχανικές μεθόδους και υλικά.



Εικ.37 Εσωτερική άποψη του Bamboo Flow / China

Δ.3. Bamboo Bamboo, ILLab / China

Το Bamboo Bamboo, Canopy and Pavilions θα μπορούσαμε να πούμε ότι είναι ένας χώρος έκθεσης φωτός. Βρίσκεται σε ένα από τα πιο δραματικά τοπία της Κίνας. Ατελείωτο πράσινο περιβάλλει την τοποθεσία ανάμεσα σε μεγάλους βράχους. Με ένα τοπίο, τόσο μεγαλειώδες, οποιεσδήποτε κινήσεις για να το απορρίψουν, πόσο μάλλον να το ανταγωνιστούν, δεν θα είχαν νόημα. Με αυτό το σκεπτικό, αποφασίστηκε ότι τα ίδια τα φυσικά στοιχεία θα αποτελέσουν την προϋπόθεση για την αρχιτεκτονική που θα κατοικούσε στην τοποθεσία, ένα στοιχείο, ειδικότερα, το μπαμπού.



Εικ.38 Εξωτερική άποψη 1

Στόχος ήταν η εισαγωγή νέων παρεμβάσεων, να υποστηρίξει την προϋπάρχουσα κατάσταση. Στο σημείο μεγάλες συστάδες μπαμπού καλύπτουν το μεγαλύτερο μέρος της τοποθεσίας, δημιουργώντας μορφές ανάμειξης σωλήνων και φύλλων. Ως μέσο για να συμπέσει με ό,τι υπάρχει ήδη, η νέα αρχιτεκτονική εξέτασε τον δανεισμό της υλικότητας του μπαμπού, την αναδιαμόρφωσή του για να σχηματίσει νέο χώρο. Με αυτόν τον τρόπο, αυτός ο νέος χώρος σημαίνει να μην αγωνίζεσαι. Αντίθετα, στοχεύει να αυξήσει, αν και πολύ ήπια, τους γύρω ελαιώνες και λόφους από μπαμπού.



Εικ.39 Εξωτερική άποψη 2

Το έργο εισάγει δύο νέα συστήματα για να ενσωματωθούν στην υπάρχουσα φυσική υφή, διαμορφώνοντας παράλληλα ένα είδος συναισθηματικής αντίληψης και την προαναγγελία της κουλτούρας της ιστορίας.

Το πρώτο σύστημα, το "woven bamboo" είναι ο χώρος της δομής φαναριού από χειροποίητο μπαμπού, διάσπαρτος στην περιοχή της εισόδου και χρησιμοποιείται ως σημείο εμπειρίας πολιτιστικής και δημιουργικής ενός χώρου ανάπαυσης, όπου ο επισκέπτης βιώνει την εντύπωση του Liu Sanjie πολιτισμού πριν την είσοδο στον χώρο.



Εικ.40



Εικ.41

Η Handmade Bamboo Art Gallery σχηματίζει ένα στρώμα από χειροποίητα υφαντά "δίχτυα μπαμπού" μεταξύ των συστάδων μπαμπού, παρέχοντας μια περιοχή πεζοπορίας που μπορεί να προστατεύσει στις βροχοπτώσεις και σε άλλα καιρικά φαινόμενα.



Εικ.42



Εικ.43



Eik.44



Eik.45



Eik.46

Ε. Συμπεράσματα

Το μπαμπού αποτελεί έναν εξαιρετικά σημαντικό πόρο στη συζήτηση για τη βιωσιμότητα της αρχιτεκτονικής, συνδυάζοντας μοναδικά χαρακτηριστικά που το καθιστούν αναντικατάστατο για μια βιώσιμη ανάπτυξη. Με την υψηλή αντοχή του σε εφελκυσμό, τη δυνατότητά του να συγκριθεί με υλικά όπως ο χάλυβας και το σκυρόδεμα, την ευκαμψία του που του επιτρέπει να αντέχει σε σεισμικά φορτία, και τον ταχύ ρυθμό ανάπτυξής του που φτάνει τα 91 εκατοστά ημερησίως, το μπαμπού αναδεικνύεται ως ένα από τα πιο οικολογικά και πρακτικά υλικά της σύγχρονης εποχής. Αυτά τα χαρακτηριστικά, σε συνδυασμό με την ελάχιστη περιβαλλοντική του επιβάρυνση, το καθιστούν μια λύση ικανή να ανταποκριθεί στις προκλήσεις της κλιματικής αλλαγής, της εξάντλησης φυσικών πόρων και της ανάγκης για μείωση των εκπομπών άνθρακα.

Ωστόσο, η αξιοποίηση του μπαμπού στη σύγχρονη αρχιτεκτονική συνοδεύεται από σοβαρές προκλήσεις. Η ποικιλομορφία και η φυσική μεταβλητότητα του υλικού απαιτούν εξειδικευμένες τεχνικές επεξεργασίας και τυποποίησης, ώστε να διασφαλιστεί η συνέπεια στις κατασκευές. Επιπλέον, η ευπάθεια του μπαμπού σε περιβαλλοντικούς παράγοντες, όπως η υγρασία και οι επιθέσεις από έντομα, καθιστούν απαραίτητη την περαιτέρω ανάπτυξη τεχνολογιών συντήρησης και προστασίας. Η εμπορική εφαρμογή του περιορίζεται επίσης από την έλλειψη τεχνογνωσίας σε πολλές περιοχές, καθώς και από το υψηλότερο κόστος που μπορεί να συνεπάγεται η εξειδικευμένη επεξεργασία του. Παρ' όλες αυτές τις δυσκολίες, οι δυνατότητές του ως βιώσιμο υλικό είναι τεράστιες, με την εργασία να εξετάζει συγκεκριμένα παραδείγματα και μεθοδολογίες που μπορούν να ξεπεράσουν αυτά τα εμπόδια.

Το ZCB Bamboo Pavilion αποτελεί μια ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα περίπτωση μελέτης, όπου συνδυάζονται παραδοσιακές τεχνικές κατασκευής με την καινοτομία της ψηφιακής σχεδίασης. Η δομή αυτή, που δημιουργήθηκε στο Χονγκ Κονγκ, επιδεικνύει πώς η συνδυαστική χρήση πρωτοτύπων, φυσικών δοκιμών και υπολογιστικών μοντέλων μπορεί να οδηγήσει σε κατασκευές μεγάλης κλίμακας που ανταποκρίνονται στις απαιτήσεις της βιώσιμης αρχιτεκτονικής. Η γεωμετρική πολυπλοκότητα της κατασκευής, η οποία συνδυάζει τοπικές παραδόσεις χειροτεχνίας με τη σύγχρονη τεχνολογία, καταδεικνύει τη δυναμική του μπαμπού να χρησιμοποιηθεί για τη δημιουργία χώρων υψηλής αισθητικής, αντοχής και λειτουργικότητας. Το ZCB Bamboo Pavilion δεν είναι μόνο ένα επιτυχημένο παράδειγμα βιώσιμης αρχιτεκτονικής, αλλά και μια απόδειξη ότι η υλικότητα του μπαμπού μπορεί να αναπλαισιώσει τον τρόπο με τον οποίο σχεδιάζονται και κατασκευάζονται σύγχρονες αρχιτεκτονικές δομές.

Παράλληλα, έργα όπως το The Arc στο Μπαλί και το Bamboo Flow στην Κίνα αναδεικνύουν διαφορετικές αρχιτεκτονικές εφαρμογές του μπαμπού, εστιάζοντας στη διασταύρωση της παραδοσιακής αισθητικής με τις σύγχρονες απαιτήσεις. Το The Arc, για παράδειγμα, χρησιμοποιεί τις φυσικές καμπυλότητες του μπαμπού για να δημιουργήσει μια εντυπωσιακή δομή που εμπνέεται από τη βιολογία, μιμούμενο τον ανθρώπινο θώρακα. Αυτή η αρχιτεκτονική προσέγγιση δεν προσφέρει μόνο λειτουργικότητα, αλλά ενσωματώνει μια οργανική σχέση με τη φύση. Από την άλλη, το Bamboo Flow, με τις δυναμικές καμπύλες και την ανατολίτικη αισθητική του, αναδεικνύει την πολιτισμική διάσταση της χρήσης του μπαμπού και προάγει την τέχνη μέσα από την αρχιτεκτονική.

Αυτό που καθιστά το μπαμπού πραγματικά μοναδικό δεν είναι μόνο οι μηχανικές του ιδιότητες, αλλά και η δυνατότητά του να ενσωματώνει πολιτισμικές, περιβαλλοντικές και αισθητικές αξίες σε κάθε έργο. Η εργασία υπογραμμίζει τη σημασία της σύνδεσης τοπικών παραδόσεων και τεχνικών με τη σύγχρονη τεχνολογία, δημιουργώντας μια γέφυρα ανάμεσα στο παρελθόν και το μέλλον της αρχιτεκτονικής. Η παραδοσιακή καντονέζικη χειροτεχνία, που αποτέλεσε τη βάση για την κατασκευή του ZCB Bamboo Pavilion, ενισχύθηκε μέσα από τη χρήση ψηφιακών εργαλείων και μοντέλων προσομοίωσης, επιτρέποντας την υπέρβαση των φυσικών περιορισμών του υλικού.

Το σημαντικότερο ίσως συμπέρασμα της ερευνητικής εργασίας είναι η δυνατότητα του μπαμπού να λειτουργήσει ως καταλύτης για έναν νέο τρόπο σκέψης στην αρχιτεκτονική. Η φύση του υλικού απαιτεί έναν διάλογο μεταξύ ανθρώπινης δεξιοτεχνίας, υπολογιστικής τεχνολογίας και φυσικής μεταβλητότητας, προωθώντας μια διαδικασία σχεδιασμού που είναι συνεχώς εξελισσόμενη και προσαρμόσιμη. Η συνεργασία μεταξύ φυσικών μοντέλων και ψηφιακών προσομοιώσεων, όπως καταδεικνύεται στο ZCB Bamboo Pavilion, δεν αποτελεί μόνο μέσο για την επίτευξη ενός λειτουργικού αποτελέσματος, αλλά μια επαναστατική προσέγγιση στον σχεδιασμό και την κατασκευή που μπορεί να υιοθετηθεί και σε άλλα υλικά και κατασκευαστικά συστήματα.

Συνολικά, η εργασία θέτει το μπαμπού στο επίκεντρο της συζήτησης για τη βιωσιμότητα, την καινοτομία και τη διατήρηση της πολιτιστικής κληρονομιάς. Αναδεικνύει το δυναμικό του να επαναπροσδιορίσει τις αρχιτεκτονικές πρακτικές, όχι μόνο ως υλικό βιώσιμο και ανανεώσιμο, αλλά και ως φορέα μιας νέας σχεδιαστικής φιλοσοφίας που γεφυρώνει την παράδοση με την τεχνολογία. Το μέλλον της αρχιτεκτονικής με μπαμπού δεν εξαρτάται μόνο από την ανάπτυξη καλύτερων τεχνολογιών και διαδικασιών, αλλά και από την προθυμία μας να επαναπροσδιορίσουμε τη σχέση μας με τα φυσικά υλικά, δημιουργώντας αρχιτεκτονικές μορφές που αντανακλούν

την ανάγκη για αρμονία με το περιβάλλον και τις κοινότητες στις οποίες ανήκουν.

ΣΤ. Βιβλιογραφία

1. Dinwoodie, J. M. (2000). Timber: its nature and behaviour. CRC Press.
2. Fahim, M., Haris, M., Khan, W., & Zaman, S. (2022). Bamboo as a construction material: Prospects and challenges. Advances in Science and Technology. Research Journal, 16(3).
3. Ganesan, N., Chariar, V. M., & Sivakumar, K. (2012). Seismic response of bamboo reinforced concrete frame structure. Construction and Building Materials,
4. Hidalgo-Lopez, O. (2003). Bamboo: The Gift of the Gods. D'Vinci Design.
5. Jayanetti, D. L., & Follett, P. R. (1998). Bamboo in Construction: An Introduction. International Network for Bamboo and Rattan (INBAR).
6. Janssen, J. J. A. (2000). Designing and Building with Bamboo. Technical University of Eindhoven.
7. Kumar, M., Gupta, V., & Rana, R. K. (2019). A Review on Bamboo as a Sustainable Construction Material. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science,
8. Rockwood, D. (2015). Bamboo Architecture and Construction with Sustainable Materials. Routledge.
9. Velez, S. (2013). Grow Your Own House: Simon Velez and Bamboo Architecture. Vitra Design Museum.
10. Ντε Μπούρκα, Τ. (2023). Υλικά κατασκευής με ουδέτερο άνθρακα: Ανακαλύψεις και δυνατότητες. Άρθρο.

Δικτυογραφία

1. Network for Bamboo and Rattan (INBAR). (n.d.). Building with Bamboo. Διαθέσιμο από: <https://www.inbar.int>
2. Kengo Kuma and Associates. (n.d.). Bamboo Flow Project. Διαθέσιμο από: <http://kkaa.co.jp>

3. Green School Bali. (n.d.). The Arc at Green School. Διαθέσιμο από: <https://www.greenschool.org>
4. Wikipedia. (n.d.). Μπαμπού. Διαθέσιμο από: <https://el.wikipedia.org/wiki/Μπαμπού>
5. ArchDaily. (2020). Bamboo Bamboo, Canopy and Pavilions / IILab. Διαθέσιμο από: <https://www.archdaily.com/947625/bamboo-bamboo-canopy-and-pavilions-iilab>
6. The Chinese University of Hong Kong, School of Architecture. (n.d.). ZCB Bamboo Pavilion. Διαθέσιμο από: <https://www.arch.cuhk.edu.hk/projects/research-works/zcb-bamboo-pavilion>

Ερευνητικές Εργασίες

1. Li, H., Fu, F., Zhou, Q., & Lu, Z. (2019). Mechanical properties and sustainability of bamboo as a structural material. *Construction and Building Materials*, 229, 116852. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116852>
2. Sharma, B., Gato, A., & Bock, M. (2015). Engineered bamboo: State of the art. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Construction Materials*, 168(2), 57-67. <https://doi.org/10.1680/coma.14.00013>
3. Van der Lugt, P., & Vogtlander, J. (2014). The sustainability of bamboo products for local and Western markets: A study on bamboo products' life cycle. *Journal of Cleaner Production*, 66, 145-153. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.10.013>
4. Φαρκώνας, Ι. (n.d.). Προς μια κυκλική οικονομία στην ελληνική κατασκευαστική βιομηχανία: Εξερευνώντας το μπαμπού ως ανανεώσιμη εναλλακτική λύση στα συμβατικά υλικά δόμησης. Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία.