

RAMMED EARTH

Η ΤΕΧΝΙΚΗ ΤΟΥ ΣΥΜΠΙΕΣΜΕΝΟΥ ΧΩΜΑΤΟΣ ΣΕ ΞΥΛΟΥΠΟΥΣ
ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΗ ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Ερευνητική εργασία:

«Rammed Earth: Η τεχνική του συμπιεσμένου χώματος σε ξυλοτύπους και εφαρμογές στη σύγχρονη αρχιτεκτονική. Ζητήματα βιωσιμότητας και σεισμικής συμπεριφοράς με έμφαση στον ελλαδικό χώρο».

Σπουδαστές: Μπουλουγούρης Κωνσταντίνος και Πίρουλα-Γοδόυ Ερρίκος-Στέφανος

Επιβλέπουσες καθηγήτριες: Μιλτιάδου Ανδρονίκη και Μπουγιατιώτη Φλώρα-Μαρία

Τομέας 4: «Συνθέσεις Τεχνολογικής Αιχμής»

Ακαδημαϊκό έτος: 2021 - 2022

ΑΘΗΝΑ
ΙΟΥΝΙΟΣ 2022

ΑΠΟ ΤΟ ΧΩΜΑ

Ορμητικά και οργισμένα το χώμα βγαίνει από το χώμα. Χαριτωμένα ή μεγαλόπρεπα το χώμα περιπατεί πάνω στο χώμα. Το χώμα με το χώμα χτίζει παλάτια κι ορθώνει κάστρα και ναούς. Το χώμα υφαίνει πάνω στο χώμα θρύλους, θεωρίες και νόμους. Μετά, το χώμα κουράζεται από τα έργα του χώματος και πλέκει από το φωτοστέφανό του όνειρα και φαντασίες. Και μετά, τα μάτια του χώματος παραδίνονται από τη νύστα του χώματος στην αιώνια ανάπαυση.

Και το χώμα φωνάζει στο χώμα:

«Εγώ είμαι η μήτρα κι ο τάφος, και θα είμαι η μήτρα κι ο τάφος ώσπου να πάψουν να υπάρχουν τ' αστερία κι ο ήλιος γίνει σταχτή».

~Gibran Kahlil~

Ευχαριστούμε θερμά τις επιβλέπουσες καθηγήτριες κυρία Ανδρονίκη Μιλτιάδου και Φλώρα-Μαρία Μπουγιατιώτη για την καθοδήγηση και τη συνεργασία που είχαμε, καθώς και τη βοήθεια αλλά και τις συμβουλές που μας προσέφεραν για την ολοκλήρωση της παρούσας ερευνητικής εργασίας.

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	11
Abstract.....	11
Εισαγωγή.....	12
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Το χώμα και οι τεχνικές δόμησης.....	13
1.1. Το χώμα: σύσταση, τύποι και βασικά χαρακτηριστικά.....	14
1.1.1. Τα συστατικά του χώματος και οι ιδιότητές τους.....	14
1.1.2. Οι τύποι του χώματος και τα χαρακτηριστικά τους.....	15
1.2. Τεχνικές δόμησης με χώμα.....	17
1.2.1. Ωμόπλινθοι (adobe).....	19
1.2.2. Στοιβαχτός πηλός (cob).....	22
1.2.3. Γαιόσακοι (superadobe ή earthbags).....	25
1.2.4. Συμπιεσμένο χώμα μέσα σε καλούπια - Ξυλοτύπους (rammed earth).....	28
1.2.5. Ρευστή γη (poured earth).....	30
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Εστιάζοντας στο rammed earth.....	33
2.1. Η επιλογή του rammed earth.....	33
2.2. Η τεχνική του rammed earth από τη νεολιθική εποχή ως το σήμερα.....	34
2.2.1. Νεολιθική περίοδος και εποχή του χαλκού (9.000 – 3.000 π.Χ.).....	34
2.2.2. Κίνα: Η αφητηρία του rammed earth (300 π.Χ. – 700 μ.Χ.).....	35
2.2.3. Το rammed earth την περίοδο του Ισλάμ (7 ^{ος} – 17 ^{ος} αιώνας μ.Χ.).....	37
2.2.4. Francois Cointereaux: η σχολή χωμάτινης αρχιτεκτονικής και η άνοδος του rammed earth (17 ^{ος} – 18 ^{ος} αιώνας μ.Χ.).....	40
2.2.5. Το rammed earth στον Ευρωπαϊκό χώρο (18 ^{ος} – 19 ^{ος} αιώνας μ.Χ.).....	41
2.2.6. Η εξάπλωση του rammed earth στον κόσμο (19 ^{ος} – 20 ^{ος} αιώνας μ.Χ.).....	44
2.2.7. Ανακαλύπτοντας ξανά το rammed earth μετά τους παγκοσμίους πολέμους έως τη σύγχρονη εποχή (20 ^{ος} αιώνας μ.Χ. ως το σήμερα).....	45
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Φυσικές και μηχανικές ιδιότητες.....	47
3.1. Φυσικές Ιδιότητες.....	48
3.1.1. Πυκνότητα.....	48
3.1.2. Συμπεριφορά στη θερμότητα.....	49
3.1.3. Συμπεριφορά κατά τη διάρκεια πυρκαγιάς.....	50
3.1.4. Συμπεριφορά απέναντι στον ήχο.....	51
3.1.5. Συμπεριφορά απέναντι στην υγρασία.....	51
3.2. Μηχανικές ιδιότητες.....	53
3.2.1. Μηχανικά χαρακτηριστικά υπό την επίδραση στατικών και δυναμικών δράσεων.....	53
3.2.2. Μέτρο ελαστικότητας Young.....	56
3.2.3. Αντοχή στον σεισμό.....	57
3.3. Κύκλος ζωής του υλικού.....	64

3.3.1. Εμπειριεχόμενη ενέργεια	64
3.3.2. Εκπομπές CO ₂	65
3.3.3. Ανακυκλωσιμότητα.....	66
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Διαδικασία κατασκευής δομικών στοιχείων από rammed earth	67
4.1. Το μείγμα	67
4.1.1. Συλλογή της πρώτης ύλης του μείγματος	67
4.1.2. Μελέτη και δοκιμές της πρώτης ύλης του μείγματος.....	68
4.1.3. Δημιουργία τελικού μείγματος	71
4.2. Θεμελίωση	73
4.3. Οπλισμός	74
4.4. Θερμομόνωση.....	75
4.5. Ξυλότυπος	76
4.6. Συμπύεση μείγματος.....	79
4.6.1. Διαδικασία συμπύεσης.....	79
4.6.2. Χειροκίνητα και μηχανικά εργαλεία συμπύεσης.....	81
4.7. Επεξεργασία τελικής επιφάνειας.....	82
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Δομικά και άλλα στοιχεία σε ένα κτήριο από rammed earth	84
5.1. Πατώματα, στέγες και επίπεδα δώματα.....	84
5.1.1. Πατώματα.....	84
5.1.2. Στέγες και επίπεδα δώματα	89
5.2. Ανοίγματα.....	94
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Σύγχρονες εφαρμογές του rammed earth.....	98
6.1. Επιλογή παραδειγμάτων.....	98
6.2. Παραδείγματα κτηρίων από rammed earth σε σεισμογενείς περιοχές του εξωτερικού.....	99
6.2.1. Zhengzhou Jianye Football Town Tourist Center	100
6.2.2. Erlitou Site Museum of the Xia Capital	102
6.2.4. Earth House	108
6.2.5. Zenkonyu x Tamping Earth.....	110
6.3. Το rammed earth στην Ελλάδα.....	112
6.4. Συμπερασματικά στοιχεία παραδειγμάτων	118
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: Ζητήματα βιωσιμότητας και δομικής επάρκειας στην Ελλάδα	120
7.1. Ζητήματα βιωσιμότητας των τοιχοποιιών rammed earth.....	120
7.2. Ζητήματα δομικής επάρκειας και τρόποι αντιμετώπισης	124
7.3. Συμπεράσματα.....	124
Βιβλιογραφία	127



Περίληψη

Το rammed earth αποτελεί ένα σύγχρονο υλικό, το οποίο ωστόσο χρησιμοποιείται ήδη από το 9.000 π.Χ. Η ιστορία του υλικού αποδεικνύει τη διαχρονικότητά του, παρόλο που κατά περιόδους φαίνεται να περιορίστηκε η χρήση του, χωρίς όμως να λησμονηθεί. Στη σύγχρονη εποχή, έχει έλξει το ενδιαφέρον των αρχιτεκτόνων, λόγω της ιδιαίτερης εμφάνισής του. Στην παρούσα εργασία το rammed earth προσεγγίζεται με βάση τρεις χαρακτηριστικούς άξονες διερεύνησης. Πρώτος άξονας αποτελεί η μέθοδος κατασκευής ενός δομικού στοιχείου και ο εντοπισμός των κρίσιμων σημείων που καθορίζουν την ποιότητα και την αντοχή του. Ο δεύτερος άξονας αφορά τη σεισμική συμπεριφορά και τους τρόπους ενίσχυσης των τοιχοποιιών, ενώ ο τελευταίος άξονας αφορά τη βιωσιμότητα του υλικού, που σε συνδυασμό με τον δεύτερο, οδηγούν στη συγκρότηση των συμπερασμάτων για τον ελλαδικό χώρο, στον οποίο δεν παρατηρείται συχνή χρήση του rammed earth. Πιο συγκεκριμένα η εργασία αναπτύσσεται σε επτά συνολικά κεφάλαια. Αρχικά, παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά του χώματος και οι βασικές τεχνικές δόμησης με χώμα. Στη συνέχεια, η ανάλυση εστιάζει στο rammed earth και στη χρήση του στην ιστορία, από την πρώτη εμφάνιση μέχρι και σήμερα. Επίσης, γίνεται αναφορά στα φυσικά και μηχανικά χαρακτηριστικά του υλικού, με έμφαση στη σεισμική του συμπεριφορά. Στα επόμενα κεφάλαια παρουσιάζεται η μέθοδος κατασκευής ενός δομικού στοιχείου από rammed earth, βήμα προς βήμα, ενώ γίνεται και αναφορά σε επιμέρους δομικά και άλλα στοιχεία. Στη συνέχεια, μελετώνται υλοποιημένα παραδείγματα σε σεισμογενείς περιοχές και οι τρόποι αντιμετώπισης των προβλημάτων που προκύπτουν. Τέλος, παρουσιάζονται τα συμπεράσματά μας, τα οποία εστιάζουν στη βιωσιμότητα, στη στατική επάρκεια και στην ευρύτερη χρήση του rammed earth στην Ελλάδα.

Λέξεις κλειδιά: συμπιεσμένο χώμα, ξυλότυπος, σεισμική συμπεριφορά, στατική επάρκεια, αντοχή, βιωσιμότητα, ελλαδικός χώρος.

Abstract

Rammed earth is a modern material, which, however, was invented and has been used since 9.000 BC. Its history proves its resilience over time. Even though, at times its use was limited, it has never been forgotten. Nowadays, many architects are interested in rammed earth due to its unique look after the completion of construction. In this thesis, rammed earth is presented and analysed through three major research axes. The first concerns the construction method of a rammed earth structural wall and the identification of the critical points of reference that determine its quality and durability. Afterwards, the second axis involves the seismic structural capacity and the reinforcing methods of rammed earth walls. Lastly, the final axis is the material's sustainability. The two latter together lead to conclusions about Greece, where rammed earth construction seems to be limited. The dissertation develops in seven chapters. At first, the specific characteristics of earth are analyzed along with contemporary earthen construction methods. After that, the study focuses on rammed earth and its long history, from the earliest constructions up to date. Furthermore, the physical and mechanical properties of rammed earth walls are analysed, emphasizing on their seismic capacity. The following chapters involve the step-by-step construction of rammed earth walls, as well as their structural relationship with other elements of construction (structural and not), such as floors, roofs, openings etc. Afterwards, a number of implemented rammed earth buildings are analysed, highlighting the solutions chosen to respond to the seismic activity in their respective location. Finally, conclusions are drawn, which emphasize on the sustainability, the seismic capacity and the general use of rammed earth in the Greek architectural context.

Keywords: rammed earth, formwork, seismic performance, stability, durability, sustainability, Greece.



Εισαγωγή

Αντικείμενο και στόχοι

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας αποτελεί το rammed earth και πιο συγκεκριμένα η τεχνική συμπίεσης του χώματος μέσα σε ξυλοτύπους. Πέραν της διαδικασίας συμπίεσης και της μεθοδολογίας, δίνεται έμφαση σε δύο βασικά ζητήματα που αφορούν το υλικό. Καταρχάς, στη συμπεριφορά των δομικών στοιχείων κατά την επίδραση σεισμικών καταπονήσεων, αλλά και άλλων δυναμικών φορτίων, και κατά δεύτερον στη βιωσιμότητα και τον οικολογικό χαρακτήρα του υλικού, λαμβάνοντας υπόψη όλα τα πιθανά υλικά ενίσχυσης, καθώς και τα πρόσμικτα του μείγματος. Επιπλέον, γίνεται αναφορά στην περιορισμένη χρήση του υλικού στην Ελλάδα και στις μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί, μια εκ των οποίων έχει υλοποιηθεί. Στόχος της παρούσας εργασίας αποτελεί η μελέτη των χαρακτηριστικών του rammed earth και της διαδικασίας κατασκευής του, η παρουσίαση των κρίσιμων εκείνων σημείων που κάνουν την κατασκευή πιο ισχυρή στον σεισμό, η μελέτη της βιωσιμότητας, καθώς και η διερεύνηση της πιθανότητας να χρησιμοποιηθεί το υλικό αυτό ευρύτερα στον ελλαδικό χώρο.

Μεθοδολογία

Καταρχάς, γίνεται μια σύντομη αναφορά στο χώμα και στα χαρακτηριστικά του, ενώ στη συνέχεια παρουσιάζονται οι βασικές τεχνικές δόμησης με χώμα. Μετά την παρουσίαση των τεχνικών αυτών, η εργασία εστιάζει στο rammed earth και στα φυσικά και μηχανικά του χαρακτηριστικά. Έπειτα, παρουσιάζεται βήμα προς βήμα η διαδικασία κατασκευής ενός δομικού στοιχείου από rammed earth με την τεχνική του συμπίεσμένου χώματος σε ξυλοτύπους, αλλά και η μέθοδος τοποθέτησης όλων των επιμέρους δομικών και άλλων στοιχείων που ολοκληρώνουν μια συμβατική κατασκευή. Στη συνέχεια, γίνεται αναφορά στις εφαρμογές του υλικού στη σύγχρονη αρχιτεκτονική μέσα από επιλεγμένα παραδείγματα του εξωτερικού, αλλά και της Ελλάδας. Τέλος, στα συμπεράσματά μας, θίγονται ζητήματα βιωσιμότητας και δομικής επάρκειας, ενώ παράλληλα μελετάται η πιθανή χρήση του υλικού στον ελλαδικό χώρο.

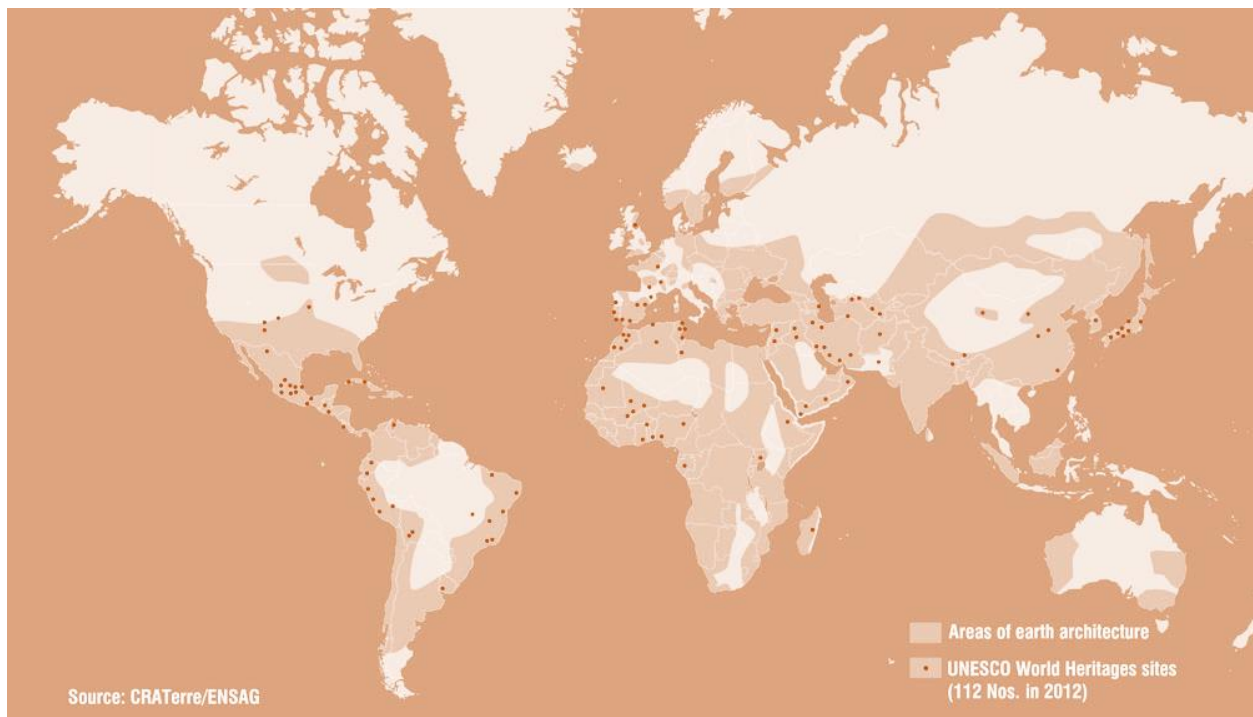
Διάρθρωση κεφαλαίων εργασίας

Η παρούσα εργασία προσεγγίζει το rammed earth με βάση τρεις χαρακτηριστικούς άξονες διερεύνησης. Πρώτος άξονας αποτελεί η διαδικασία κατασκευής ενός δομικού στοιχείου από rammed earth. Δεύτερος άξονας αποτελεί η σεισμική συμπεριφορά και οι τρόποι ενίσχυσης των τοιχοποιιών, ενώ ο τελευταίος άξονας αφορά τη βιωσιμότητα του υλικού, που σε συνδυασμό με τον δεύτερο, οδηγούν στη συγκρότηση των συμπερασμάτων για τον ελλαδικό χώρο. Πιο συγκεκριμένα η εργασία αναπτύσσεται σε επτά συνολικά κεφάλαια. Στο 1^ο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά του χώματος και οι βασικές τεχνικές δόμησης με χώμα. Το 2^ο κεφάλαιο εστιάζει στο rammed earth και στη χρήση του στην ιστορία. Στο 3^ο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στα φυσικά και μηχανικά χαρακτηριστικά του υλικού, με έμφαση στη σεισμική του συμπεριφορά. Στο 4^ο κεφάλαιο παρουσιάζεται η μεθοδολογία κατασκευής ενός δομικού στοιχείου από rammed earth, ενώ στο 5^ο κεφάλαιο γίνεται αναφορά σε επιμέρους δομικά και άλλα στοιχεία. Τέλος στο 6^ο κεφάλαιο μελετώνται υλοποιημένα παραδείγματα σε τρεις σεισμογενείς περιοχές, ενώ στο 7^ο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματά μας.



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Το χώμα και οι τεχνικές δόμησης

Το χώμα αποτελεί ένα από τα πιο διαδεδομένα φυσικά υλικά δόμησης στον κόσμο, ενώ χρησιμοποιείται από τον άνθρωπο ήδη από τα αρχαία χρόνια, και πιο συγκεκριμένα από το 9.000 με 7.000 π.Χ. κατά τη Νεολιθική περίοδο (Wikipedia, 2021). Ο άνθρωπος του παρελθόντος, στην προσπάθειά του να προστατευτεί από τα φυσικά φαινόμενα και να αποκτήσει την ιδιωτικότητά του, άρχισε να παράγει κτήρια και άλλες κατασκευές με υλικά που μπορούσε να βρει εύκολα διαθέσιμα στο περιβάλλον. Έτσι, το χώμα, ως κύριο συστατικό του φυσικού εδάφους, αποτέλεσε ένα από τα πρωταρχικά υλικά δόμησης στην ιστορία. Κατά τη διάρκεια αυτής της μακροχρόνιας χρήσης του χώματος ως δομικό υλικό, παρήχθησαν κατασκευές μικρής και μεγάλης κλίμακας, ενώ παράλληλα δόθηκε η δυνατότητα μελέτης του υλικού και ανάπτυξης ποικίλων τεχνικών κατασκευής, αλλά και αρχιτεκτονικών ρυθμών, ανάλογα με την εκάστοτε περιοχή και τον ιδιαίτερο πολιτισμό της. Το χώμα χρησιμοποιήθηκε έντονα σε μη βιομηχανοποιημένες περιοχές και κυρίως στις αναπτυσσόμενες χώρες, όπου πάνω από το 50% του πληθυσμού κατοικεί μέχρι και σήμερα σε κτήρια από χώμα (Minke, 2006:11). Στις μέρες μας περίπου το 40% του παγκόσμιου πληθυσμού ζει σε χωμάτινες οικίες, ενώ το 17% των μνημείων από τον κατάλογο πολιτιστικής κληρονομιάς της UNESCO είναι κατασκευασμένα από χώμα (Auroville earth institute, 2021) (βλ. εκ.1.1.). Στη σύγχρονη εποχή, η βιωσιμότητα των κατασκευών και η οικολογική ευσυνειδησία που πρέπει να χαρακτηρίζει τον άνθρωπο του σήμερα έχουν στρέψει το ενδιαφέρον, ακόμα πιο συστηματικά, προς τα φυσικά υλικά, όπως είναι το χώμα, καθώς είναι φιλικά προς το περιβάλλον, έχουν βιοκλιματικά χαρακτηριστικά και παρέχουν καλύτερες συνθήκες διαβίωσης για τον άνθρωπο.



εκ.1.1. Χάρτης με τις περιοχές όπου εντοπίζεται γήινη δόμηση (σκούρο χρώμα) και μνημεία παγκόσμιας πολιτιστικής κληρονομιάς κατασκευασμένα από χώμα (πορτοκαλί τελείες). (ανακτήθηκε από: http://www.earth-auroville.com/building_with_earth_en.php στις 10/11/21).

1.1. Το χώμα: σύσταση, τύποι και βασικά χαρακτηριστικά

Το χώμα είναι αποτέλεσμα μετασχηματισμών ενός αρχικού πετρώματος υπό την επίδραση μιας σειράς φυσικών, χημικών και βιολογικών διαδικασιών που συσχετίζονται τόσο με τις κλιματικές συνθήκες, όπως η βροχή, ο αέρας και ο ήλιος, όσο και με τη δραστηριότητα των ανθρώπων, των ζώων και των φυτών πάνω στη γη (Auroville earth institute, 2021). Αποτελείται από αέρα, νερό, οργανικά και ορυκτά συστατικά, δηλαδή από φυτικά και ζωικά στοιχεία, και από υλικά που προκύπτουν λόγω του μετασχηματισμού του μητρικού πετρώματος ή των ανθρωπίνων επιδράσεων. Αυτά τα συστατικά είναι σχεδόν ομοιόμορφα κατανεμημένα και συνδεδεμένα στη μάζα του χώματος και οι αναλογίες τους παίζουν σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση της ποιότητας του εδάφους και των φυσικών του χαρακτηριστικών (Τριγγίδου, 2021:53). Σε κάθε κατασκευή είναι σημαντικό να μελετάται η σύσταση του εδάφους, καθώς δεν είναι όλα τα χώματα ιδανικά για τη δημιουργία κτηρίων, αλλά επίσης κάθε τεχνική πολλές φορές απαιτεί και διαφορετική σύσταση εδάφους.

1.1.1. Τα συστατικά του χώματος και οι ιδιότητές τους

Το 25% του χώματος αποτελείται από αέρα που εγκλωβίζεται ανάμεσα στα υπόλοιπα συστατικά του. Δεν βοηθά στη σταθερότητα του χώματος και συνήθως μειώνεται κατά το δυνατόν στις περιπτώσεις που χρησιμοποιείται για τη δημιουργία γήινων κατασκευών. Επίσης, μικροοργανισμοί όπως διάφορα βακτήρια και η μούχλα μπορούν εύκολα να εγκλωβιστούν στον αέρα που περιέχεται στο νερό και να αλλοιώσουν την ποιότητα του χώματος (Σπυροπούλου, Τσακαλάκη, 2013:13).

Ακόμα ένα 25% αποτελείται από νερό, το οποίο διεισδύει στο χώμα και μπορεί να κατηγοριοποιηθεί ανάλογα με τον τόπο που εντοπίζεται, όπως για παράδειγμα νερό που συγκρατείται γύρω από τους κόκκους ή μέσα στους πολύ λεπτούς πόρους τους. Ο τρόπος σύνδεσης του νερού με τα υπόλοιπα συστατικά του χώματος αποτελεί σημαντικό παράγοντα για την ποιότητα του εδάφους (στο ίδιο).

Το υπόλοιπο 50% είναι οργανικές και ανόργανες ύλες, οι οποίες επίσης καθορίζουν σημαντικά τις φυσικές ιδιότητες του χώματος. Οι οργανικές ύλες βρίσκονται συνήθως σε ποσοστό μέχρι και 5% και στις περισσότερες περιπτώσεις απομακρύνονται. Εντοπίζονται κυρίως στην ανώτερη στρώση του εδάφους σε βάθος 5 με 35 εκατοστών. Οργανικά υλικά μπορεί να είναι κλαδιά, άχυρα, πεσμένα φύλλα ή ακόμα και ζωικά απόβλητα. Τα υλικά αυτά έλκουν πολύ εύκολα μικροοργανισμούς, αλλά και το νερό, και μπορούν να προκαλέσουν μεγάλες αστοχίες σε περιπτώσεις που το χώμα προορίζεται να χρησιμοποιηθεί ως δομικό υλικό. Η οργανική ύλη έχει πολύ χαμηλή μηχανική αντοχή και η περιεκτικότητά της σε υγρασία μπορεί να είναι πολύ υψηλή (από 100% έως 500%) εξαλείφοντας όλη τη μηχανική σταθερότητα του χώματος. Η οξύτητα των οργανικών συστατικών τείνει να προκαλεί αντιδράσεις οξέος με το νερό στο χώμα, πράγμα που μπορεί να οδηγήσει σε διάβρωση των υλικών με τα οποία έρχεται σε επαφή. Η συγκέντρωση και το είδος της οργανικής ύλης έχει σημαντικές επιδράσεις στα χαρακτηριστικά ενός φυσικού εδάφους όταν υπερβαίνει το 2% με 4% (στο ίδιο).

Τα ανόργανα συστατικά αντιπροσωπεύουν συνήθως το μεγαλύτερο μέρος του χώματος, δηλαδή περίπου το 45%. Υπάρχουν ανόργανα στοιχεία που είναι πανομοιότυπα στη σύνθεση με το αρχικό πέτρωμα από το οποίο προήλθαν, αλλά υπάρχουν και στοιχεία που είναι αποτέλεσμα της χημικής διάβρωσης των μετάλλων του αρχικού πετρώματος. Τα πρώτα είναι κροκάλες, χαλίκια και άμμος, ενώ τα δεύτερα έχουν πολύ μικρότερο μέγεθος (< 0,002 χιλιοστών) κι εξαιτίας αυτού οι κόκκοι τους όταν έρθουν σε επαφή με το νερό εμφανίζονται σαν μια κολλώδη πάστα (Σπυροπούλου, Τσακαλάκη, 2013:14).



Τα βασικά ανόργανα συστατικά του χώματος, με βάση το μέγεθος (διάμετρο) των κόκκων, μπορούν να χωριστούν στις παρακάτω κατηγορίες:

- Κροκάλες: 63 - 200 χιλιοστά.
- Χάλικες: 2 - 63 χιλιοστά.
- Άμμος: 0,06 - 2 χιλιοστά.
- Ιλύς: 0,002 - 0,06 χιλιοστά.
- Άργιλος: < 0,002 χιλιοστά.

Επιπλέον, εκτός των παραπάνω, ανάλογα με το είδος του ορυκτού, τα αργιλικά ορυκτά μπορούν να κατηγοριοποιηθούν στις παρακάτω κύριες ομάδες (ανέλιξη,2020):

- Ομάδα του καολινίτη, με αντιπροσωπευτικό ορυκτό τον καολινίτη $AlSi(OH)$
- Ομάδα του ιλλίτη, με κύριο ορυκτό τον ιλλίτη $(K,HO)Al[(OH)/AlSi10]$
- Ομάδα του μοντμοριλλονίτη, με κύριο ορυκτό τον μοντμοριλλονίτη $AlSi20(OH) \cdot nHO$

Καολινίτης: Ο καολινίτης είναι το κύριο ορυκτό συστατικό της αργίλου του καολίνη. Εξαιτίας της μοριακής του δομής, απορροφά σε σύγκριση με άλλες αργίλους περιορισμένες ποσότητες νερού. Έχει για τον ίδιο λόγο, μικρό μέτρο διόγκωσης και συρρίκνωσης και εμφανίζει μειωμένη πλαστικότητα. Τα μηχανικά του χαρακτηριστικά είναι πτωχά. Είναι γνωστός ως λευκή γη ή λευκός πηλός ή πηλός Κίνας. Είναι λεπτόκοκκο, κρυσταλλικό λευκό πέτρωμα με μορφή πούδρας. Περιέχει κυρίως καολινίτη αλλά και άλλα αργιλικά ορυκτά, καθώς και θραύσματα πυριτικών πετρωμάτων (ανέλιξη,2020).

Ιλλίτης: Ο ιλλίτης προέρχεται κυρίως από τους μαρμαρυγίες, αλλά και από άστριους των γρανιτών. Τα συστρωματώματα του ιλλίτη δε διασπώνται εύκολα από το νερό και για τον λόγο αυτόν παρουσιάζει μικρή διόγκωση και πλαστικότητα. Όταν στεγνώσει, συρρικνώνεται περισσότερο από την άργιλο του καολίνη, λιγότερο όμως από τον μοντμοριλλονίτη (ανέλιξη,2020).

Μοντμοριλλονίτης: Ο μοντμοριλλονίτης δημιουργείται από την υδροθερμική πλήρη αλλοίωση των ηφαιστειακών πωρόλιθων και της ηφαιστειακής τέφρας, ενώ αποτελεί κύριο συστατικό του μπεντονίτη, καθώς αποτελεί το 60% με 80 % του όγκου του. Το χρώμα του είναι λευκό και διαφοροποιείται ανάλογα με τις προσμίξεις που περιέχει. Ο μοντμοριλλονίτης, όταν απορροφά νερό, πολλαπλασιάζει τον όγκο του. Ο δομικός πηλός του μοντμοριλλονίτη διογκώνεται με το νερό περισσότερο από τους άλλους πηλούς. Οι ελκτικές δυνάμεις μεταξύ των αργιλικών πετάλων του αυξάνονται και αποκτά μεγάλη πλαστικότητα. Μετά το στέγνωμα συρρικνώνεται περισσότερο από τον καολίνη και τον ιλλίτη. Η απότομες μεταβολές του μοντμοριλλονίτη δεν τον καθιστούν ιδανικό για τη δόμηση με χώμα αν και χρησιμοποιείται σε ελεγχόμενες ποσότητες (ανέλιξη,2020).

1.1.2. Οι τύποι του χώματος και τα χαρακτηριστικά τους

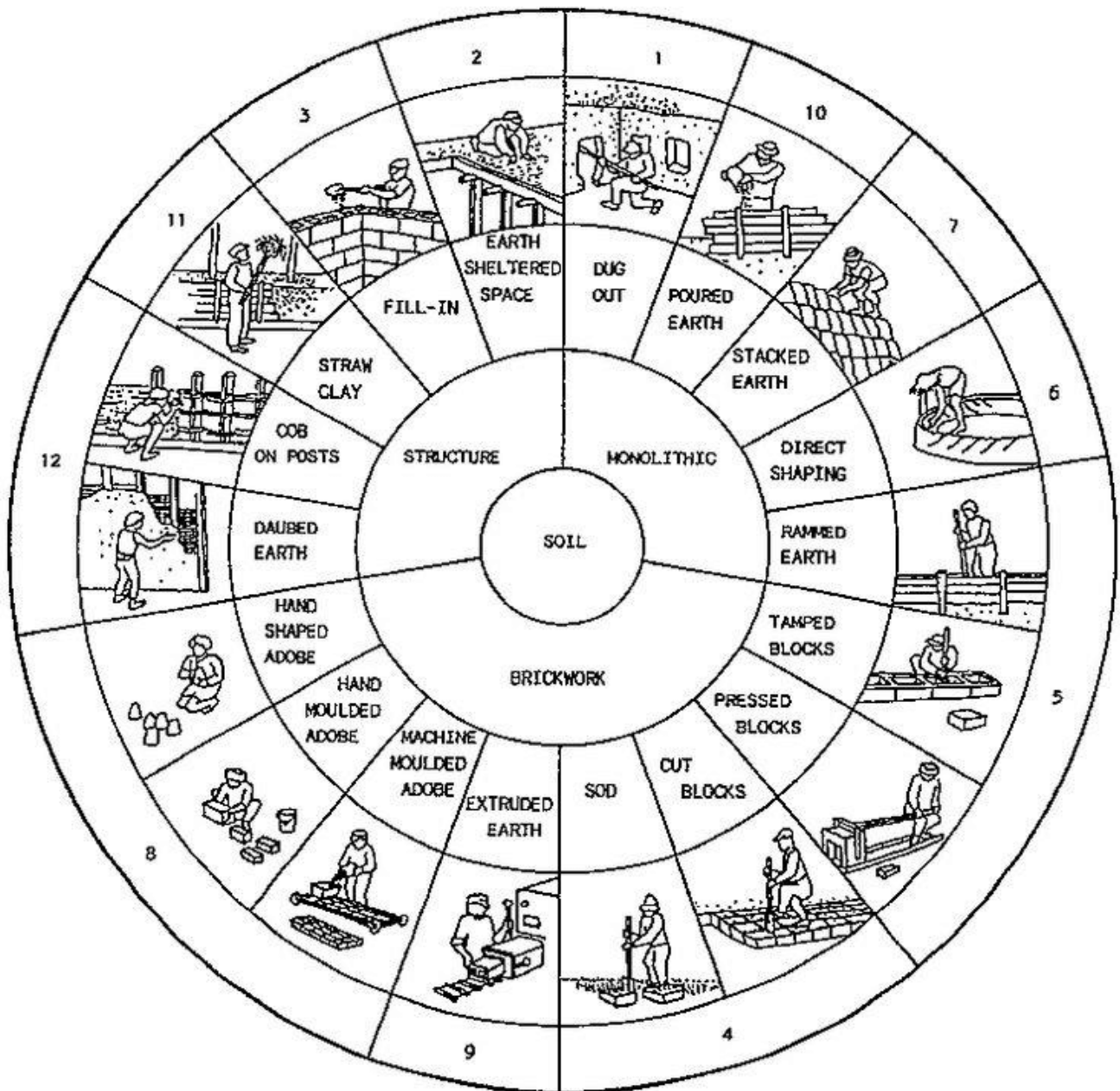
Σύμφωνα με τις αναλογίες των συστατικών του, το χώμα χαρακτηρίζεται κυρίως ως οργανικό, χαλικώδες, αμμώδες, ιλυώδες ή αργιλώδες, ωστόσο υπάρχουν ακόμα περισσότεροι τύποι χώματος και συνδυασμοί αυτών. Το οργανικό χώμα περιέχει ένα σημαντικό ποσοστό οργανικών υλικών και χρησιμοποιείται με την αρχική του μορφή πολύ σπάνια. Το χαλικώδες χώμα περιέχει σε μεγάλο ποσοστό βότσαλα και χαλίκια και το αμμώδες περιέχει κατά το μεγαλύτερο μέρος της σύστασής του άμμο (περίπου 70% και πάνω), ενώ το ποσοστό αργίλου είναι μικρότερο από το 15%. Έτσι, λόγω της μικρής περιεκτικότητας σε άργιλο, το χαλικώδες και το αμμώδες χώμα χαρακτηρίζονται και ως ελαφρά χώματα. Είναι ξηρά, μερικώς όξινα και διατηρούν μια σταθερή ζεστή θερμοκρασία. Επίσης, συναντώνται και χώματα που το ποσοστό της άμμου δεν είναι συντριπτικά μεγαλύτερο από αυτό της αργίλου και χαρακτηρίζονται ως αμμοπηλώδη. Στο ιλυώδες χώμα κυριαρχεί η ιλύς και υπάρχει χαμηλή συνεκτικότητα μεταξύ των υλικών, ενώ στο αργιλώδες κυριαρχεί η άργιλος (πάνω από το 35% ή ακόμα και το 45%), η οποία προσφέρει πλαστικότητα και πολύ καλή συνοχή. Αυτού του είδους τα χώματα

χαρακτηρίζονται ως βαριά και παραμένουν συνήθως κρύα και υγρά λόγω της συγκράτησης νερού μεταξύ των σωματιδίων της αργίλου. Επίσης, υπάρχουν και τα: αργιλοπηλώδη χώματα, (ελαφρύ προβάδισμα του ποσοστού της αργίλου σε σχέση με τα ποσοστά της άμμου και της ιλύος), ιλοαργιλώδη χώματα (υπερέχουν συντριπτικά τα ποσοστά ιλύος και αργίλου, έναντι της άμμου), αργιλοαμμώδη χώματα (υπερέχουν τα ποσοστά της αργίλου και άμμου, έναντι της ιλύος), πηλοαμμώδη χώματα (το ποσοστό της άμμου είναι μεγαλύτερο, έναντι της ιλύος και της αργίλου), αμμοαργιλοπηλώδη χώματα (υπερτερούν τα ποσοστά της άμμου και της αργίλου, έναντι της ιλύος), ιλοπηλώδη χώματα (το ποσοστό της ιλύος είναι μεγαλύτερο από εκείνα της άμμου και της αργίλου) και ιλοαργιλοπηλώδη χώματα (το ποσοστό της άμμου υστερεί σημαντικά έναντι της ιλύος και της αργίλου)(Gaia επιχειρείν, 2015).



εικ.1.2. Σύνθεση εικόνων με δείγματα των διαφορετικών τύπων χώματος. (ανακτήθηκε από: http://www.earth-auroville.com/views_of_earth_en.php στις 11/11/21).

1.2. Τεχνικές δόμησης με χώμα



εικ.1.3. Ο τροχός της γήινης δόμησης. (ανακτήθηκε από: https://www.researchgate.net/publication/334781162_An_overview_on_contemporary_rammed_earth_buildings_technological_advances_in_production_construction_and_material_characterization στις 04/05/22).

Όπως προαναφέρεται, η μακρά περίοδος χρήσης του χώματος ως δομικό υλικό βοήθησε στην ανάπτυξη μιας μεγάλης ποικιλίας τεχνικών κατασκευής. Κάποιες από αυτές τις τεχνικές διαδόθηκαν σε άλλες χώρες, ενώ κάποιες άλλες παρέμειναν στον τόπο τους. Επίσης, λόγω των διαφορετικών ποιοτήτων χώματος ανά περιοχή, πολλές μέθοδοι δεν μπόρεσαν να εφαρμοστούν σε άλλα μέρη του κόσμου, καθώς είχαν διαφορετική σύσταση εδάφους. Στις μέρες μας έχουν κυριαρχήσει παγκοσμίως κάποιοι συγκεκριμένοι τρόποι χωμάτινης δόμησης, ωστόσο σε διάφορα μέρη του κόσμου διατηρούνται ακόμα κάποιες τοπικές τεχνικές.

Συνοπτικά, οι βασικές τεχνικές που χρησιμοποιούνται στη δόμηση με χώμα είναι:

- οι ωμόπλινθοι (adobe),
- ο στοιβαχτός πηλός (cob),
- οι γαιόσακοι (superadobe ή earthbags),
- το συμπιεσμένο χώμα μέσα σε καλούπια - ξυλοτύπους (rammed earth) και
- η ρευστή γη (poured earth).

Σε αυτό το σημείο να σημειωθεί ότι υπάρχουν αρκετές ακόμα τεχνικές δόμησης, πολλές από τις οποίες περιέχουν σε μεγάλο ποσοστό το χώμα αλλά όχι ως βασικό στοιχείο τους, όπως για παράδειγμα ο τσατμάς ή το μπαγδατί ή ακόμα και οι αχυρόμπαλες ή οι κορμοί δένδρων με λάσπη. Επίσης, στη σύγχρονη εποχή έχουν γίνει προσπάθειες για τη δημιουργία μονολιθικών κατασκευών από μείγμα χώματος με τη βοήθεια της 3D εκτύπωσης μια τεχνική που σίγουρα στο μέλλον θα αναπτυχθεί περισσότερο και θα οδηγήσει σε μια νέα αντίληψη για τις κατασκευαστικές τεχνικές του σήμερα.



εικ.1.4. Το Round Houses of Raw Earth κατασκευασμένο με 3D εκτύπωση. (ανακτήθηκε από: <https://www.archdaily.com/956854/round-houses-of-raw-earth-3d-printing-sustainable-homes-in-200-hours> στις 04/05/2022).

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται συνοπτικά τα παραπάνω συστήματα δόμησης με χώμα, ως προς τη γενική περιγραφή τους και τη διαδικασία κατασκευής τους, ενώ παρουσιάζονται επίσης κάποια επιλεγμένα ενδεικτικά παραδείγματα για κάθε σύστημα. Ο τρόπος επιλογής των παραδειγμάτων αυτών βασίζεται σε μεγάλο βαθμό σε αρχιτεκτονικά κριτήρια. Ωστόσο, η επιλογή καθοδηγήθηκε κυρίως από την ανάγκη να παρουσιαστούν όσο το δυνατόν καλύτερα οι δυνατότητες κάθε δομικού συστήματος οπότε και έγινε προσπάθεια εστίασης σε κτήρια δημόσιου χαρακτήρα ή συγκροτήματα κατοικιών ενώ σε κάποιες περιπτώσεις έγινε επιλογή κάποιων πολυτελών κατοικιών.

1.2.1. Ωμόπλινθοι (adobe)

Γενική περιγραφή: Οι ωμόπλινθοι, ή αλλιώς πλιθιά, αποτελούν ένα υλικό δόμησης που χρησιμοποιήθηκε πρώτη φορά στη Μεσοποταμία (Μπέη, 2004:16). Συνοπτικά είναι ένα μείγμα νερού και χώματος, με αρκετά υψηλή περιεκτικότητα σε άργιλο, το οποίο συμπιέζεται συνήθως με τα χέρια, μέσα σε ειδικά διαμορφωμένα καλούπια, τα οποία ορίζουν και το μέγεθος της πλίνθου. Για τη μηχανική ενίσχυση του τελικού προϊόντος είναι συχνή η προσθήκη βιολογικών ινών, όπως άχυρο, καλάμια, πευκοβελόνες ή ακόμα και τρίχες κατσίκας. Πιο σπάνια, προστίθενται και επιπλέον αδρανή, όπως άμμοι, χάλικες και διάφορα κεραμικά υλικά (Μπέη, 2004:16). Γενικώς, οι ωμόπλινθοι αποτελούν μια από τις αρχαιότερες τεχνικές δόμησης με χώμα και χρησιμοποιούνται σχεδόν σε ολόκληρο τον κόσμο ακόμα και στις μέρες μας.



εικ.1.5. Στοιβαγμένοι ωμόπλινθοι έτοιμοι για χρήση. (ανακτήθηκε από: <https://www.archdaily.com/572207/preschool-of-aknaibich-bc-architects-mammoth> στις 12/11/21).

Διαδικασία κατασκευής: Η διαδικασία παρασκευής των ωμόπλινθων είναι πολύ απλή, δεν απαιτεί εξειδικευμένο εξοπλισμό και πραγματοποιείται συνήθως επιτόπου στο εργοτάξιο. Πρώτα, σκάβεται το έδαφος σε βάθος περίπου ενός μέτρου. Το χώμα που θα χρησιμοποιηθεί, πρέπει να έχει μεγάλη περιεκτικότητα σε άργιλο, η οποία αποτελεί το πιο σημαντικό συστατικό της πλίνθου, εξασφαλίζοντας τη μηχανική αντοχή της. Αφού γίνει η ανάμειξη του χώματος με το νερό και τα πρόσθετα τοποθετούνται σε ξύλινα ή μεταλλικά καλούπια και αφήνονται στον ήλιο για να ξηραθούν και να στεγνώσουν. Συνήθως χρειάζονται τρεις με τέσσερις ημέρες, ανάλογα με το κλίμα της περιοχής και τη σύσταση του τελικού μείγματος (Φράγκου, Χατζηγιάννου, 2020:55). Αφού στεγνώσουν τα πλιθιά αφαιρούνται προσεκτικά από τα καλούπια και είναι έτοιμα για χρήση στην κατασκευή. Πιο σύγχρονοι κατασκευαστές προσθέτουν στο μείγμα σταθεροποιητικά υλικά όπως γύψο, ασβέστη, γαλακτωματοποιημένη ασφαλτο ή ακόμα και τσιμέντο, έτσι ώστε να διασφαλίσουν επιπλέον σταθερότητα, αλλά και προστασία από τις δυσμενείς καιρικές συνθήκες που διαβρώνουν συχνά το υλικό (Φράγκου, Χατζηγιάννου, 2020:55).



Αφαίρεση των πλαισίων στήριξης (καλουπιών)



Οι ωμόπλινθοι μετά την αφαίρεση των καλουπιών



Φυσική ξήρανση των ωμοπλινθων



Τοποθέτηση του πηλού στα καλούπια



Συμπύκνωση (στανιάρισμα) του πηλού



Τελική διαμόρφωση επιφάνειας ωμοπλινθων

εικ.1.6. Σύνθεση εικόνων με τη διαδικασία κατασκευής των ωμόπλινθων. (ανακτήθηκε από <http://www.leivithrapark.gr/> στις 12/11/21).

Ενδεικτικά παραδείγματα: Στη διάρκεια της παγκόσμιας ιστορίας έχουν υπάρξει σημαντικά παραδείγματα παραδοσιακών κατασκευών από ωμόπλινθους. Η πόλη Sanaa, πρωτεύουσα της Υεμένης και η οχυρωματική πόλη Shibam είναι κατασκευασμένες εξ ολοκλήρου από ωμόπλινθους και αποτελούν τα πιο χαρακτηριστικά δείγματα παραδοσιακών κατασκευών τέτοιου είδους. Και στις δύο πόλεις σημαντικό στοιχείο αποτελεί η κατασκευή πολυώροφων κτηρίων που φτάνουν τους 8 και πολλές φορές και τους 12 ορόφους (βλ. εικ.1.7.). Ένα ακόμα παράδειγμα αποτελεί το Μεγάλο Τζαμί της Τζενέ, στο Μάλι, το οποίο είναι κατασκευασμένο από ωμόπλινθους και επιχρισμένο με ένα ειδικό μείγμα χώματος και άλλων πρόσθετων υλικών που προστατεύει την όλη κατασκευή. Αποτελεί μάλιστα ένα από τα μεγαλύτερα επιτεύγματα της αρχιτεκτονικής για την εποχή του (βλ. εικ.1.8.).

Παραδείγματα σύγχρονων κατασκευών στις οποίες γίνεται η εκμετάλλευση όλων των πλεονεκτημάτων που προσφέρουν οι ωμόπλινθοι, μπορούν να βρεθούν επίσης σε όλο τον κόσμο. Σημαντικό έργο που έχει υλοποιηθεί τα τελευταία χρόνια είναι το Preschool of Aknaibich στο Μαρόκο από τους BC Architects το 2014 (βλ. εικ.1.9.). Για την κατασκευή του έγιναν αρχικά workshops με μέλη της κοινότητας της περιοχής για την εκμάθηση του τρόπου κατασκευής των πλινθων. Αφού ολοκληρώθηκαν οι πλινθινοί τοίχοι του νηπιαγωγείου, επικαλύφθηκαν με μείγμα από λάσπη, άχυρα και άμμο, ενώ η ξύλινη στέγη σκεπάστηκε με ένα στρώμα φελλού για την αποφυγή απωλειών θερμότητας και στη συνέχεια καλύφθηκε κι αυτή με λάσπη. Περιμετρικά των τοίχων, τοποθετήθηκαν οριζόντια διαζώματα από σκυρόδεμα για ενίσχυση της κατασκευής και καλύτερη αντισεισμική συμπεριφορά, ενώ για τη στήριξη της οροφής τοποθετήθηκε περιμετρικά μια ξυλοδεσιά στο ανώτερο τμήμα των τοίχων (Archdaily, 2022).



εικ.1.7. Η οχυρωματική πόλη Shibam στην Υεμένη. (ανακτήθηκε από: https://en.wikipedia.org/wiki/Shibam_Hadramawt στις 12/11/21).



εικ.1.8. Το Μεγάλο Τζαμί της Τζενέ, στο Μάλι. (ανακτήθηκε από: <https://slate.com/human-interest/atlas-obscura> στις 12/11/21)



εικ.1.9. Το Preschool στο Μαρόκο από τους BC Architects. (ανακτήθηκε από: <https://www.archdaily.com/572207/preschool-of-aknaibich-bc-architects-mamoth> στις 12/11/21).

1.2.2. Στοιβαχτός πηλός (cob)

Γενική περιγραφή: Cob σημαίνει σβόλος, συμπίεσμένη μάζα και στρογγυλεμένος όγκος. Όλοι αυτοί οι όροι αποτυπώνουν τον τρόπο που διαμορφώνεται μια κατασκευή από cob. Το αποτέλεσμα είναι μονολιθικές κατασκευές, οι οποίες έχουν δημιουργηθεί μέσω της συμπίεσης επάλληλων στρώσεων σβόλων από ένα ειδικά διαμορφωμένο μείγμα. Αναμειγνύοντας χώμα, νερό και αλεσμένο άχυρο, χωρίς μηχανήματα, αλλά με τη βοήθεια χεριών και ποδιών, σχηματίζονται σβόλοι από το μείγμα και τοποθετούνται ο ένας πάνω στον άλλο δημιουργώντας τα δομικά μέρη και τα στοιχεία πλήρωσης της κατασκευής. Συνήθως, τοποθετούνται πάνω σε πέτρινα θεμέλια, ή πλέον σε θεμέλια από σκυρόδεμα, για την αποφυγή απορρόφησης υγρασίας από τη γη. Οι τοίχοι που προκύπτουν έχουν μεγάλη σταθερότητα και μπορούν να αντέξουν μεγάλες περιόδους βροχής χωρίς να αποδυναμωθούν. Το μείγμα από cob μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε για τη δημιουργία αυτοφερόμενης τοιχοποιίας, είτε ως υλικό πλήρωσης των στατικών φορέων από άλλα υλικά, όπως ξύλο, μέταλλο ή σκυρόδεμα (Φράγκου, Χατζηγιάννου, 2020:45).



εικ.1.10. Κατασκευή τοίχου με την τεχνική του cob. (ανακτήθηκε από: https://www.researchgate.net/figure/Construction-of-a-cob-wall-by-stacking-mud-balls-Phototanzaniagoesmudwordpresscom_fig4_323171283 στις 12/11/21).

Διαδικασία κατασκευής: Αρχικά, όπως και στους ωμόπλινθους, σκάβεται το έδαφος μέχρι ένα ορισμένο βάθος, έτσι ώστε να συγκεντρωθεί η πρώτη ύλη του υλικού και να τοποθετηθεί η θεμελίωση της κατασκευής. Το χώμα θα πρέπει να έχει ένα ικανοποιητικό ποσοστό αργίλου, καθώς αποτελεί σημαντικό στοιχείο για τη σταθερότητα του μείγματος και κατ' επέκταση την αντοχή του κτηρίου. Στη συνέχεια, με βάση τις ανάγκες της κατασκευής, προστίθενται τα άχυρα ή επιπλέον πρόσθετα υλικά αν χρειάζεται, τα οποία με τη βοήθεια των χεριών και των ποδιών αναμειγνύονται και γίνονται ένα ενιαίο μείγμα. Από το μείγμα δημιουργούνται με τα χέρια σβόλοι, οι οποίοι τοποθετούνται ο ένας δίπλα στον άλλον σε πολλές επάλληλες στρώσεις και ορίζουν έτσι τα δομικά στοιχεία της κατασκευής. Μόλις μια στρώση είναι έτοιμη αφήνεται να στεγνώσει και στη συνέχεια ακολουθεί η επόμενη. Η διαδικασία αυτή είναι εύκολη και πολλές φορές και διασκεδαστική (The tiny life, 2021).



εικ.1.11. Η τοποθέτηση των σβόλων πάνω στα πέτρινα θεμέλια. (ανακτήθηκε από: <https://www.re-thinkingthefuture.com/rtf-fresh-perspectives/a1704-10-construction-techniques-used-in-earth-architecture/> στις 12/11/21).

Ενδεικτικά παραδείγματα: Τα τελευταία χρόνια γίνονται προσπάθειες επανάχρησης του cob, οι οποίες ξεκίνησαν στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής, ενώ σήμερα σε διάφορες χώρες της Ευρώπης γίνονται αρκετές εκπαιδευτικές δράσεις που αφορούν αυτή την τεχνική. Ακόμα και στον ελλαδικό χώρο οι cob.gr ασχολούνται με τη φυσική δόμηση και τη βιοκλιματική αρχιτεκτονική και κατασκευάζουν κτήρια μικρής κλίμακας από φυσικά υλικά και ασχολούνται συστηματικά με την τεχνική του cob. Το 2007 κατασκευάστηκε στο Μπαγκλαντές το Handmade School με την τεχνική του cob από τους Anna Heringer και Eike Roswag (βλ. εικ.1.12.). Στόχος του έργου ήταν να βελτιωθεί σημαντικά η ποιότητα ζωής στις αγροτικές περιοχές προκειμένου να αντιμετωπιστεί η συνεχιζόμενη μετανάστευση του πληθυσμού προς τις πόλεις. Το κύριο υλικό δόμησης στις περιοχές αυτές ήταν το χώμα και το μπαμπού, από τα οποία και κατασκευάστηκε το σχολείο. Η κύρια στρατηγική του έργου ήταν η επικοινωνία και η ανάπτυξη γνώσεων και δεξιοτήτων στον τοπικό πληθυσμό, ώστε να μπορούν να κάνουν την καλύτερη δυνατή χρήση των διαθέσιμων πόρων τους. Στην ίδια περιοχή και από τους ίδιους αρχιτέκτονες, το 2019 κατασκευάστηκε το Anandaloy Centre, ένα κέντρο για τις γυναίκες της περιοχής και τα άτομα με ειδικές ανάγκες (βλ. εικ.1.14.). Η αρχιτεκτονική του κτηρίου διερευνά τις πλαστικές ικανότητες της λάσπης προκειμένου να δημιουργήσει μια ισχυρή ταυτότητα. Όπως αναφέρουν οι αρχιτέκτονες: «Η λάσπη θεωρείται φτωχό υλικό και κατώτερο από το τούβλο. Αλλά δεν έχει σημασία για εμάς πόσο παλιό είναι το υλικό, είναι θέμα δημιουργικής ικανότητας να το χρησιμοποιούμε με σύγχρονο τρόπο. Για να δείξετε την ομορφιά και την ικανότητα της λάσπης, χρειάζεται να αναδείξετε ό,τι καλύτερο έχει και όχι απλώς να το αντιμετωπίζετε ως μια φθηνότερη εκδοχή του τούβλου. Με την τεχνική cob, δεν χρειάζεται ξυλότυπος και οι καμπύλες είναι εξίσου εύκολο να γίνουν όπως και με τους ευθύγραμμους τοίχους. Σε αντίθεση με τα άλλα κτήρια αυτής της περιοχής που είναι χτισμένα σε ορθογώνια διάταξη, το κτήριο Anandaloy ξεφεύγει από το κοινό καλούπι» (Archdaily, 2022).



εικ.1.12. Το Handmade School στο Μπαγκλαντές. (ανακτήθηκε από: https://www.archdaily.com/51664/handmade-school-anna-heringer-eike-roszag?ad_source=search&ad_medium=projects_tab στις 06/05/22).



εικ.1.13. Το Anandaloy Centre κατά την κατασκευή του. (ανακτήθηκε από: https://www.archdaily.com/950681/anandaloy-center-studio-anna-heringer?ad_source=search&ad_medium=projects_tab στις 06/05/22).



εικ.1.14. Το Anandaloy Centre στο Μπαγκλαντές. (ανακτήθηκε από: https://www.archdaily.com/950681/anandaloy-center-studio-anna-heringer?ad_source=search&ad_medium=projects_tab στις 06/05/22)

1.2.3. Γαιόσακοι (superadobe ή earthbags)

Γενική περιγραφή: Οι γαιόσακοι είναι ουσιαστικά τσουβάλια γεμισμένα με χώμα, μια τεχνική γήινης δόμηση η οποία συναντάται συχνά στην αρχιτεκτονική πολλών χωρών. Σάκοι από διάφορα υλικά, γεμισμένοι με χώμα ή άμμο, στοιβάζονται ο ένας πάνω στον άλλον και συμπιέζονται, φτιάχνοντας γερές και ανθεκτικές κατασκευές. Οι τοίχοι από γαιοσάκους είναι συμπαγείς και αντέχουν σε δυσμενείς καιρικές συνθήκες, σεισμούς, υγρασία αλλά και πυρκαγιές. Είναι ιδανικοί για τη δημιουργία θολωτών ολόσωμων κατασκευών με κυκλική κάτοψη, χωρίς να είναι απαραίτητη η χρήση φέροντα οργανισμού. Ο χρόνος παραγωγής των σάκων όπως και ο χρόνος που απαιτείται για την κατασκευή των κτισμάτων είναι ελάχιστος σε σχέση με άλλες τεχνικές και δεν απαιτείται εξειδικευμένο εργατικό προσωπικό ή ειδικά εργαλεία. Αρχικά, γινόταν χρήση σάκων από κάνναβη ή λινάτσα οι οποίοι, αν και λειτουργούσαν άψογα, δεν είχαν μεγάλη διάρκεια ζωής, αφού σάπιζαν με το πέρασμα του χρόνου. Πλέον, γίνεται χρήση σάκων από πολυπροπυλένιο, οι οποίοι έχουν μεγαλύτερη αντοχή, ωστόσο δεν πρέπει να παραμένουν εκτεθειμένοι στον ήλιο για πολύ ώρα γιατί διαφορετικά αποσυντίθενται (Φράγκου, Χατζηιωάννου, 2020:79-86).



εικ.1.15. Το εσωτερικό μιας μικρής κατασκευής από γαιοσάκους. (ανακτήθηκε από: <https://architizer.com/blog/inspiration/industry/school-floating-in-the-sky/> στις 13/11/21).

Διαδικασία κατασκευής: Αρχικά γίνεται η συλλογή της πρώτης ύλης, ενώ στη συνέχεια ακολουθεί το γέμισμα των σάκων με το χώμα. Στη συνέχεια, οι σάκοι τοποθετούνται ο ένας πάνω στον άλλον σύμφωνα με το εκφορικό σύστημα, έτσι ώστε να προκύψει τελικά μια θολωτή κατασκευή. Υπάρχει η δυνατότητα κοπής του σάκου σε τμήματα, ανάλογα με το μήκος του στρώματος που απαιτείται, ώστε τα κήρια να παίρνουν μια πιο πλαστική μορφή. Ανάμεσα στις στρώσεις των σάκων τοποθετείται ένα αγκαθωτό σύρμα σε 2 ή 3 σειρές και δίνει τη λύση στο πρόβλημα της ένωσης μεταξύ των διαδοχικών στρωμάτων, το οποίο προκαλείται λόγω του μεγάλου μεγέθους του σάκου, που όταν γεμίζει με χώμα αποκτά ομαλή και ολισθηρή επιφάνεια. Τα θεμέλια, που βρίσκονται σε βάθος 40 με 60 εκατοστά κάτω από τη γη, συμπληρώνονται με σάκους γεμισμένους με χοντρά χαλίκια, σταθεροποιημένη γη, ή πιο σπάνια, μπετόν, για την αποφυγή απορρόφησης υγρασίας. Αφού ολοκληρωθεί η τοιχοποιία, αν είναι επιθυμητό, μπορεί να γίνει καύση του πλαστικού σάκου της επιφάνειας, για να αποκαλυφθεί το υλικό πλήρωσης (Φράγκου, Χατζηιωάννου, 2020:79-86).



εικ.1.16. Στιγμιότυπο από τη διαδικασία γεμίσματος των γαιοσάκων. (ανακτήθηκε από: <https://architizer.com/blog/inspiration/industry/school-floating-in-the-sky/> στις 13/11/21).

Ενδεικτικά παραδείγματα: Παραδείγματα από γαιοσάκους, βρίσκουμε σήμερα σε πολλές χώρες. Συνήθως είναι μικρές κατασκευές και κυρίως κατοικίες. Σημαντικό έργο αποτελεί η κοινότητα Langbos, της Νότιας Αφρικής, η οποία ήταν μια συνοικία χωρίς κατοικίες, δρόμους, πόσιμο νερό και ηλεκτρικό ρεύμα (βλ.εικ.1.17.). Ο μη κερδοσκοπικός οργανισμός Intsikelo, μετά από διάλογο με τους κατοίκους, προσπάθησε να καλύψει τις ανάγκες τους, διαπράττοντας πολλά έργα. Το 2015, προσέλαβε τους Jason Erlank Architects, για να δημιουργήσουν ένα κέντρο στο οποίο θα φιλοξενούνται ευπαθή παιδιά και οι οικογένειες τους. Το Langbos Children's Centre κτίστηκε με τη βοήθεια των ντόπιων, στους οποίους προσφέρθηκε εργασία, αλλά και η ευκαιρία να εκπαιδευτούν στην τεχνική των superadobe. Με τον τρόπο αυτό, απέκτησαν, έστω και προσωρινά, το δικό τους εισόδημα και καταπολεμήθηκε εν μέρη το πρόβλημα της ανεργίας. Με τη χρήση των γαιόσακων, εκμεταλλεύτηκαν την πρώτη ύλη της περιοχής, και έφτιαξαν απλούς γεωμετρικούς χώρους, με βιοκλιματικά χαρακτηριστικά. Ένα ακόμα παράδειγμα αποτελεί το Floating in the Sky School for Orphans στην Ταϊλάνδη από τον αρχιτέκτονα Kikuma Watanabe (βλ. εικ.1.19.). Σε αυτό το σχολείο έγινε χρήση γαιοσάκων για τους ισόγειους χώρους, οι οποίοι στηρίζουν τον όροφο που είναι κατασκευασμένος από μεταλλικούς σωλήνες και καλάμια για τα δάπεδα και τη στέγη. Όπως αναφέρει ο αρχιτέκτονας: «Από την ολοκλήρωσή του, το σχολείο έχει γίνει ένα επιτυχημένο μέρος για την κοινότητα και αποτελεί χώρο ιδανικός για μελέτη, παιχνίδι και καθημερινή προσευχή. Η ερμηνεία των ονείρων των παιδιών σε αρχιτεκτονική μορφή δημιουργεί τα θεμέλια που θα τα βοηθήσουν να κατακτήσουν ένα λαμπρό μέλλον» (Archdaily, 2022).



εικ.1.17. Το Langbos Children's Centre κατά την κατασκευή. (ανακτήθηκε από: <https://www.archdaily.com/942147/langbos-childrens-centre-jason-erlank-architects> στις 13/11/21).



εικ.1.18. Το Floating in the Sky School for Orphans κατά την κατασκευή. (ανακτήθηκε από: https://www.archdaily.com/630188/floating-in-the-sky-school-for-orphans-kikumawatanabe?ad_source=search&ad_medium=projects_tab στις 06/05/22).



εικ.1.19. Το Floating in the Sky School for Orphans στην Ταϊλάνδη. (ανακτήθηκε από: https://www.archdaily.com/630188/floating-in-the-sky-school-for-orphans-kikumawatanabe?ad_source=search&ad_medium=projects_tab στις 06/05/2022).

1.2.4. Συμπιεσμένο χώμα μέσα σε καλούπια - ξυλοτύπους (rammed earth)

Γενική περιγραφή: Καθώς η παρούσα εργασία αφορά το rammed earth, σε αυτό το σημείο θα αναφερθούν συνοπτικά τα βασικά στοιχεία του υλικού, έτσι ώστε να μπορεί κανείς άμεσα να συγκρίνει αυτή την τεχνική με τις υπόλοιπες. Όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις, η παρασκευή του rammed earth αποτελεί μια διαδικασία, η οποία μπορεί να πραγματοποιηθεί επιτόπου στο εργοτάξιο από τους εργάτες και χρειάζεται σχετικά μικρό εξοπλισμό. Αποτελείται από επάλληλες στρώσεις χώματος οι οποίες συμπιέζονται μέσα σε καλούπια. Το τελικό αποτέλεσμα έχει μια εξαιρετική αισθητική, καθώς αποκαλύπτονται όλες οι επιμέρους στρώσεις του μείγματος. Έτσι, σε πολλές περιπτώσεις, το μείγμα επιχρωματίζεται, είτε με φυσικούς είτε με τεχνητούς τρόπους, ώστε να γίνεται πιο έντονη η διαφορά των στρώσεων μεταξύ τους. Το rammed earth αποτελεί ένα απολύτως φυσικό υλικό, φιλικό προς τον άνθρωπο και κατά την κατεδάφισή του δεν αφήνει απόβλητα στο περιβάλλον.



εικ.1.20. Το τελικό αποτέλεσμα της τοιχοποιίας από rammed earth. (ανακτήθηκε από: https://www.archdaily.com/894341/rammed-earth-construction-15-exemplary-projects?ad_source=search&ad_medium=projects_tab&ad_source=search&ad_medium=search_result_all στις 13/11/21).

Διαδικασία κατασκευής: Η διαδικασία του rammed earth πραγματοποιείται μέσω της συμπίεσης επάλληλων λεπτών στρώσεων ενός ειδικά διαμορφωμένου μείγματος, σύμφωνα με τις ανάγκες της κάθε κατασκευής, το οποίο αποτελείται κυρίως από λάσπη, άμμο και αδρανή ποικίλης κοκκομετρίας και χρώματος. Η σύσταση του χώματος είναι πολύ σημαντική για το τελικό αποτέλεσμα και την αντοχή της κατασκευής, με αποτέλεσμα να μην είναι όλα τα χώματα ικανά για τη δημιουργία rammed earth. Το μείγμα που προκύπτει, συμπιέζεται μέσα σε ειδικά καλούπια – ξυλοτύπους, με τη βοήθεια ειδικού εξοπλισμού, και αποκτά μια εξαιρετική σκληρότητα, καθώς συμπιέζεται έως και κατά 50% του αρχικού του όγκου. Μέσω αυτής της διαδικασίας μπορούν να διαμορφωθούν συμπαγείς τοιχοποιίες σε οποιοδήποτε ύψος και μήκος, ωστόσο το πάχος χρειάζεται να είναι μεγαλύτερο από αυτό των συμβατικών τοίχων (Minke, 2006:52-54).



εικ.1.21. Η διαδικασία συμπίεσης του χώματος για το rammed earth. (ανακτήθηκε από: https://www.archdaily.com/968229/local-techniques-in-big-cities-beyond-earth-and-bamboo?ad_source=search&ad_medium=projects_tab&ad_source=search&ad_medium=search_result_all στις 13/11/21).

Ενδεικτικά παραδείγματα: Πλέον υπάρχουν πολλά παραδείγματα κτηρίων από rammed earth σε πολλές χώρες. Το πιο γνωστό και χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι αυτό των DUST Architects που σχεδίασαν στην πόλη Tucson, στην Αριζόνα των Ηνωμένων Πολιτειών, μια πολυτελή κατοικία από συμπιεσμένο χώμα με θέα την έρημο, η οποία υλοποιήθηκε το 2012 (βλ. εικ.1.22). Η χρήση του τοπικού χώματος για την κατασκευή της, την κάνει να φαίνεται σαν προέκταση του ίδιου του εδάφους, σαν να αναδύεται από αυτό. Στην άνοδρη αυτή περιοχή, η τεχνική από τα παλαιότερα χρόνια ήταν πολύ διαδεδομένη και μέχρι σήμερα ενσωματώνει εγγενείς ποιητικές ιδιότητες και ενώνει τις οπτικές, τις απτές και τις ακουστικές αισθήσεις όσων βιώνουν τον χώρο. Ένα ακόμα χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί μια παλαιότερη κατασκευή του 2006, το Nk'Mip Desert Cultural Centre στον Καναδά από τους DIALOG (βλ. εικ.1.23.). Το πολιτιστικό κέντρο περιλαμβάνει χώρους εκθέσεων, γραφείων, εργαστηρίων και ένα μικρό αμφιθέατρο. Επίσης, υπάρχουν χώροι για τους επισκέπτες όπως ένα μικρό κατάστημα κι ένα εστιατόριο, ενώ το δώμα είναι φυτεμένο και βατό. Η μελέτη του έργου έγινε με γνώμονα τη βιωσιμότητα και τον σεβασμό του τοπίου και αντανακλά τις βασικές αξίες και την ιστορία της περιοχής. Το ακραίο κλίμα έκανε τον βιώσιμο σχεδιασμό μια πολύ ιδιαίτερη πρόκληση, καθώς τα ζεστά, ξηρά καλοκαίρια και οι δροσεροί, ξηροί χειμώνες έχουν μέσες θερμοκρασίες που κυμαίνονται από -18 βαθμούς έως +33 βαθμούς Κελσίου, ενώ συχνά φτάνουν και τους +40 τις καλοκαιρινές μέρες. Η χωροθέτηση και ο προσανατολισμός του κτηρίου είναι οι πρώτες στρατηγικές κινήσεις προς τη βιωσιμότητα αναφέρουν οι αρχιτέκτονες (Archdaily, 2022).



εικ.1.22. Η πολυτελής κατοικία από rammed earth στην Αριζόνα. (ανακτήθηκε από: https://www.archdaily.com/370237/tucson-mountain-retreat-dust?ad_source=search&ad_medium=projects_tab στις 13/11/21).



εικ.1.23. Το Nk'Mip Desert Cultural Centre στον Καναδά. (ανακτήθηκε από: <https://www.archdaily.com/508294/nk-mip-desert-cultural-centre-dialog> στις 6/05/22).

1.2.5. Ρευστή γη (poured earth)

Γενική περιγραφή: Το poured earth, στα ελληνικά ρευστή γη, είναι μια τεχνική που συνδυάζει τη διαδικασία κατασκευής έργων από μπετόν και συμπιεσμένο χώμα. Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα που προσφέρει είναι η σημαντική μείωση εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) από μια κοινή κατασκευή με μπετόν, το οποίο είναι υπεύθυνο για το 4% με 8% της παγκόσμιας εκπομπής CO₂. Η διαφορά του από το συμπιεσμένο χώμα είναι η ανάμειξη του χώματος με σκυρόδεμα και το γεγονός ότι δεν χρειάζεται να συμπιεστεί. Το τσιμέντο Portland παίρνει τη θέση της αργίλου, ενώ το χώμα θα μπορούσαμε να πούμε ότι αντικαθιστά τα αδρανή του συμβατικού σκυροδέματος, με αποτέλεσμα να μειώνεται σημαντικά η βιωσιμότητα των κατασκευών συγκριτικά με το απλό συμπιεσμένο χώμα (rammed earth). Γενικώς, το τελικό έργο αποκτά αυξημένη αντίσταση στον ήλιο και στη βροχή χωρίς να χρειάζεται ιδιαίτερη συντήρηση στο μέλλον (Φράγκου, Χατζηγιάννου, 2020:75).



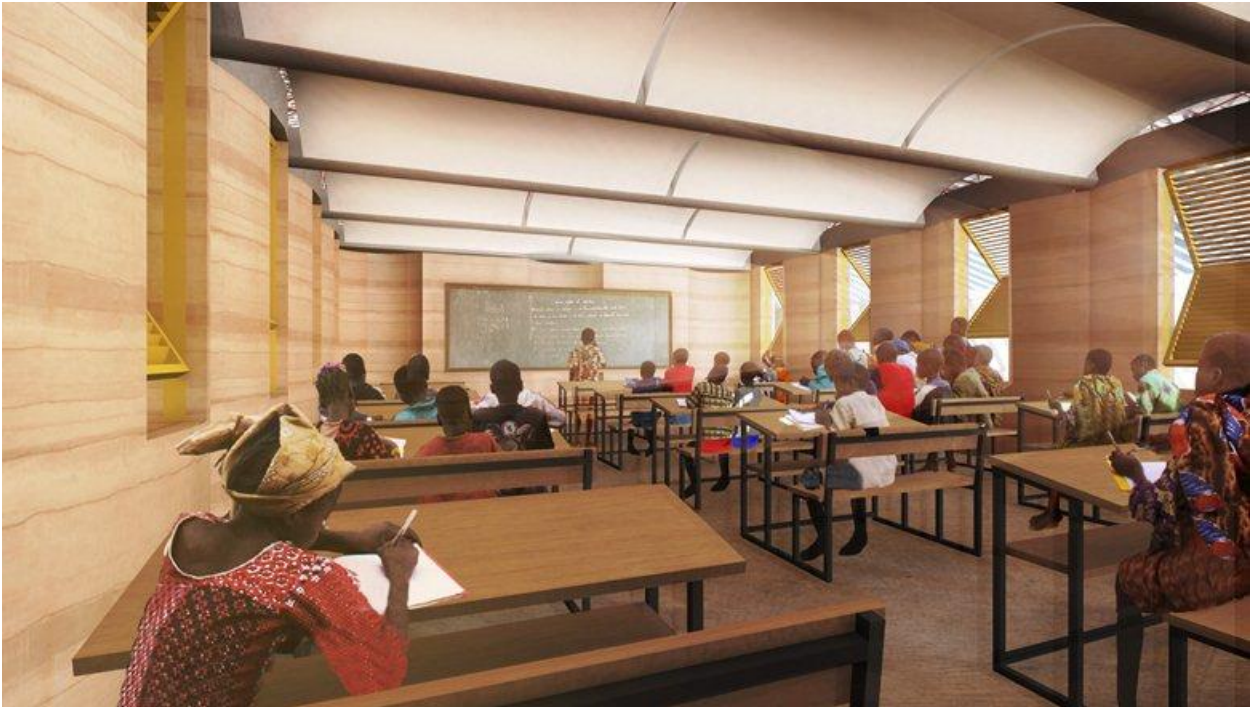
εικ.1.24. Πολυτελής κατοικία από ρευστή γη στον Λίβανο. (ανακτήθηκε από: <https://www.archdaily.com/942494/villa-chams-carl-gerges-architects> στις 13/11/21).

Διαδικασία κατασκευής: Η διαδικασία είναι κοινή με αυτή του σκυροδέματος. Το τσιμέντο αναμειγνύεται με το χώμα, το οποίο πρέπει να είναι σε υγρή μορφή, να περιέχει αρκετά αμμώδη αδρανή, αλλά και να έχει χαμηλή περιεκτικότητα σε άργιλο. Μπορεί να τοποθετηθούν στο μείγμα δύο διαφορετικά είδη χώματος, για τη βελτίωση της συμπεριφοράς του υλικού. Η χρήση ασβέστη, ιπτάμενης τέφρας (ως ένα συγκεκριμένο ποσοστό αφού σχετίζεται με εκπομπές ραδονίου) ή οξειδίου του μαγνησίου μπορεί να ελαττώσει την απαιτούμενη ποσότητα τσιμέντου έως και 50%. Για την ανάμειξη του μείγματος, αλλά και το γέμισμα των ξυλοτύπων, χρησιμοποιούνται τα ίδια εργαλεία και μηχανήματα με την διαδικασία παραγωγής του μπετόν. Ένα μειονέκτημα της ρευστής γης προκύπτει από την υψηλή περιεκτικότητά της σε νερό. Μετά την εξάτμισή του προκαλούνται εκτεταμένες ρηγματώσεις και συρρίκνωση της τοιχοποιίας. Επομένως, είναι απαραίτητη η σταθεροποίηση του υλικού πριν τη χρήση, η διαίρεση των επιφανειών σε μικρότερα τμήματα και η φροντίδα των ρωγμών μετά το στέγνωμα (Φράγκου, Χατζηγιάννου, 2020:75-76).



εικ.1.25. Η διαδικασία κατασκευής δομικού στοιχείου από ρευστή γη. (ανακτήθηκε από: http://www.earth-auroville.com/poured_earth_research_en.php στις 06/05/22).

Ενδεικτικά παραδείγματα: Το 2001 κατασκευάστηκε από ρευστό χώμα το Secondary School of Gando, στην Μπουρκίνα Φάσο της δυτικής Αφρικής, το οποίο φιλοξένησε από τότε πάνω από 700 παιδιά (βλ. εικ.1.26.). Ο αρχιτέκτονας Diébédo Francis Kéré κατάφερε μέσω του σχεδιασμού του και της χρήσης του χώματος ως κύριο υλικό, να κερδίσει το Gold Global Holcim Award 2012. Το σχολείο είναι ανοικτό προς τη δύση, έτσι ώστε να εκμεταλλεύεται τους δροσερούς δυτικούς ανέμους της περιοχής, ενώ στην ανατολή έχει περιορισμένα ανοίγματα, αφού από εκεί μεταφέρονται μαζί με τον ζεστό αέρα πολλές σκόνες από την έρημο. Σημαντικό ρόλο παίζει και η ενίσχυση του φυσικού αερισμού με υπόγειους σωλήνες (εναλλάκτες εδάφους - αέρα). Η χρήση διπλού κελύφους στις όψεις και στη στέγη, η μελέτη για φυσικό φωτισμό και η μελετημένη φύτευση δέντρων και φυτών, ενισχύουν τη βιοκλιματική συμπεριφορά του κτηρίου. Κατά την κατασκευή του, εργάστηκαν οι κάτοικοι της πόλης δίνοντας κοινωνικό χαρακτήρα στο έργο. Το τοπικό χώμα που χρησιμοποιείται στις παραδοσιακές τεχνικές δόμησης, αντί να μπει σε καλούπια για τη δημιουργία πλίνθων, αναμείχθηκε με τσιμέντο και τοποθετήθηκε σε καλούπια διαφόρων σχημάτων και μεγεθών, κυρίων ημικυλινδρικά, για τη σύνθεση του κτηρίου. Το αποτέλεσμα που προέκυψε, σε συνδυασμό με το παιχνίδισμα του φωτός μέσω των ανοιγμάτων, δημιουργεί μοναδικούς γεωμετρικούς χώρους, υψηλής αισθητικής (Archilovers, 2012).



εικ.1.26. Φωτορεαλιστικό σχέδιο για το Secondary School of Gando. (ανακτήθηκε από: <https://www.archilovers.com/projects/53932/secondary-school-with-passive-ventilation-system.html#renderings> στις 13/11/21).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Εστιάζοντας στο rammed earth

Το κεφάλαιο αυτό εστιάζει πλέον στο βασικό δομικό σύστημα της εργασίας αυτής, δηλαδή στο rammed earth και στην τεχνική συμπίεσης του χώματος μέσα σε καλούπια. Πριν την ανάλυση της διαδικασίας κατασκευής, των χαρακτηριστικών και όλων των απαραίτητων στοιχείων για την κατανόηση του συστήματος αυτού, γίνεται αναφορά στους λόγους επιλογής του rammed earth και στην ιστορική διαδρομή από την πρώτη εμφάνισή του μέχρι και το σήμερα.

2.1. Η επιλογή του rammed earth

Είναι γεγονός, ότι οι τεχνικές κατασκευής κτηρίων από χώμα είναι πολλές και διαφορετικές μεταξύ τους. Η κάθε τεχνική έχει το δικό της αρχιτεκτονικό αποτύπωμα και γοητεύει λιγότερο ή περισσότερο τους σύγχρονους αρχιτέκτονες. Ένα υλικό που έλκει σημαντικά το ενδιαφέρον της αρχιτεκτονικής του σήμερα, αλλά πολύ περισσότερο το δικό μας ενδιαφέρον, είναι το rammed earth, γνωστό και ως risé (de terre) στα γαλλικά ή απλώς συμπιεσμένο χώμα σε καλούπια - ξυλοτύπους. Αποτελεί ένα αρκετά οικολογικό υλικό δόμησης με σχεδόν μηδενικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα, σε όλο τον κύκλο ζωής του, πράγμα αρκετά σημαντικό για τον σύγχρονο κόσμο, καθώς η ρύπανση του περιβάλλοντος και η κλιματική αλλαγή είναι εμφανείς. Τα κτήρια που είναι κατασκευασμένα από rammed earth έχουν πολύ καθαρή γεωμετρία και παρουσιάζουν μεγάλο ενδιαφέρον στην όψη τους, καθώς μετά το πέρας της κατασκευής όλες οι επάλληλες στρώσεις του χώματος, διαφόρων αποχρώσεων, αποκαλύπτονται και παραμένουν εμφανείς. Η υφή της τοιχοποιίας από rammed earth είναι ιδιαίτερη και προσδίδει μία ξεχωριστή ποιότητα στον χώρο. Τα πλεονεκτήματα που προσφέρει το υλικό αυτό είναι πολλά, ωστόσο παρατηρούνται και αδυναμίες, όπως για παράδειγμα ζητήματα που αφορούν τη συμπεριφορά του κατά τη διάρκεια ενός σεισμού, αλλά και γενικότερα τις καταπονήσεις από τα διάφορα φορτία ή ακόμα ζητήματα βιωσιμότητας καθώς πλέον λόγω των αυξημένων αναγκών των κατασκευών, στο μείγμα προθέτονται μη οικολογικά και ανακυκλώσιμα υλικά. Επιπλέον, τα τελευταία χρόνια τα πλεονεκτήματα του rammed earth, αξιοποιούνται από διεθνούς φήμης αρχιτέκτονες, που τα επιλέγουν συχνά για την κατασκευή σύγχρονων κτηρίων. Αρκετοί έχουν κερδίσει Pritzker Prize, με τη δημιουργία έργων από συμπιεσμένο χώμα. Δύο από αυτούς είναι ο Renzo Piano, με το νοσοκομείο παιδιών στην Ουγκάντα το 2019 και ο Wang Shu στην Κίνα, με το Wa Shan Guest House στο Hangzhou campus το 2013.



εικ.2.1. Το νοσοκομείο παιδιών στην Ουγκάντα του Renzo Piano. (ανακτήθηκε από: <https://www.archdaily.com/914606/renzo-piano-designs-emergency-hospital-in-uganda-with-rammed-earth-walls> στις 13/11/21).



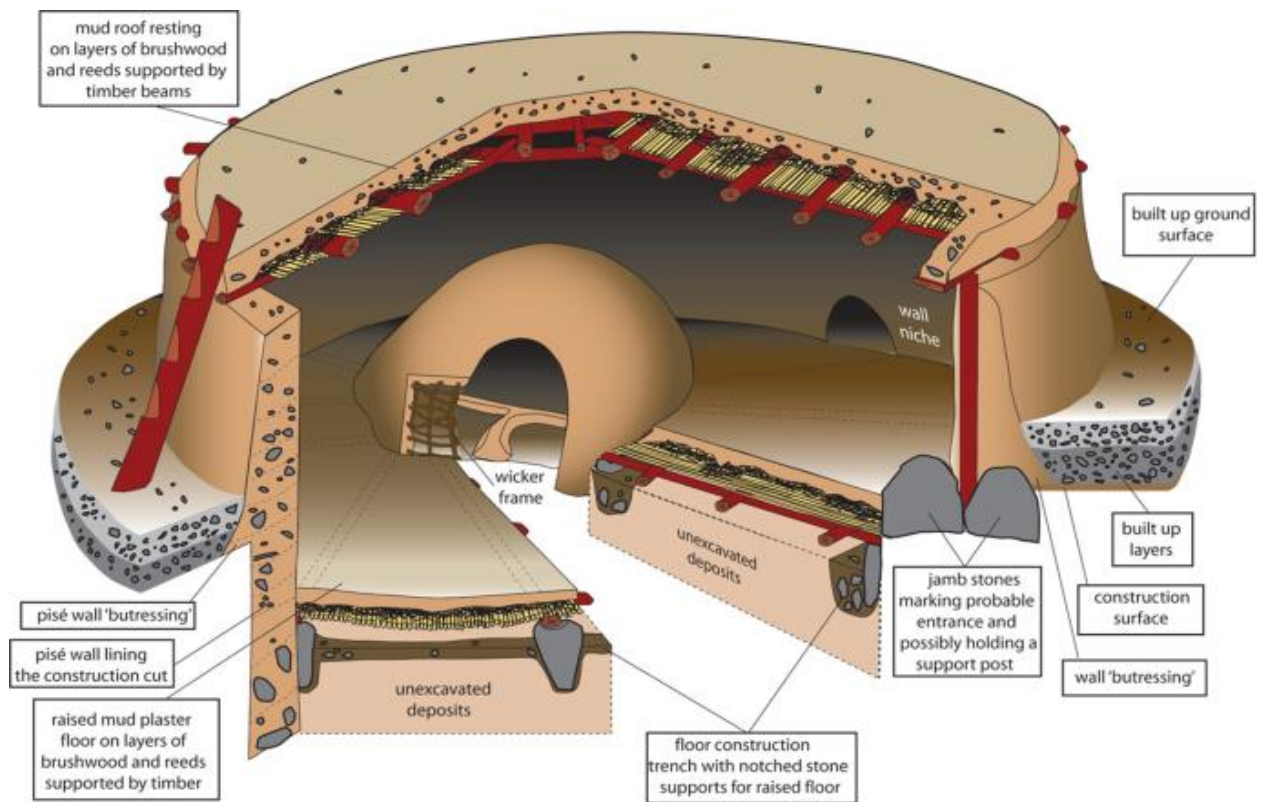
εικ.2.2. To Wa Shan Guest House στο Hangzhou campus στην Κίνα του Wang Shu. (ανακτήθηκε από: <https://tlmagazine.com/wang-shu-lu-wenyu-arc-reve/> στις 13/11/21).

2.2. Η τεχνική του rammed earth από τη νεολιθική εποχή ως το σήμερα

Το συμπίεσμένο χώμα, έχοντας σε μεγάλο ποσοστό της πρώτης ύλης του το χώμα, παρουσιάζει ένα σημαντικό πλεονέκτημα στο διαχρονικό του αποτύπωμα. Πρώτον, είναι εύχρηστο, ακόμα και από ανειδίκευτους εργάτες και, δεύτερον, είναι προσιτό και προσβάσιμο σχεδόν σε όλες τις χώρες και περιοχές του πλανήτη, σε όλες τις οικονομικές τάξεις. Με αυτά τα δύο δεδομένα, γίνεται κατανοητή η πρώιμη προσπάθεια του ανθρώπου να το αξιοποιήσει στις ζωτικές για εκείνον κατασκευές διαβίωσης, με απλούστερες μεθόδους συμπίεσης αρχικά και πιο περίπλοκες στο πέρασμα των χρόνων. Η εμφάνιση του υλικού αυτού δεν οριοθετείται σε ορισμένες χρονικές περιόδους, αντιθέτως έχει ένα εμφανές ταξίδι ανάπτυξης τεχνογνωσίας, το οποίο καταλήγει στη δημιουργία παγκοσμίως γνωστών σχολών αρχιτεκτονικής αφοσιωμένων στην ανάλυση και κατασκευή της τεχνικής αυτής.

2.2.1. Νεολιθική περίοδος και εποχή του χαλκού (9.000 – 3.000 π.Χ.)

Τα πρώτα ευρήματα της τεχνικής rammed earth χρονολογούνται στη Νεολιθική εποχή περίπου το 9.000 - 7.000 π.Χ., σε περιοχές της Μέσης Ανατολής, όπως το Ιράκ ή η Συρία (Wikipedia, 2021). Τα ευρήματα αυτά αποτελούν πρώιμες μορφές κατοικιών, συνήθως οβάλ κάτοψης και υπόσκαφες, στις οποίες οι περιμετρικοί αναλημματικοί τοίχοι αποτελούσαν πρώιμες κατασκευές rammed earth. Χαρακτηριστικό παράδειγμα τέτοιου είδους κατασκευών, ανακαλύφθηκε το 1993, στην αρχαιολογική εκσκαφή περιοχής της Νότιας Ιορδανίας, με όνομα WF16 (Fayan heritage, 2018). Στον χώρο αυτόν, εκτός των εξαιρετικών ευρημάτων εργαλείων και οστών, βρέθηκαν αποσπάσματα αναλημματικών τοίχων, κατασκευασμένων από συμπίεσμένο χώμα, τα οποία επεκτείνονταν μέχρι ένα χαμηλό σχετικά ύψος και έφεραν στέγη. Η τεχνική συμπίεσης του χώματος παραμένει άγνωστη, γεγονός που όμως δεν απορρίπτει την κατασκευή αυτή ως μια από τις πρώτες εμφανίσεις συμπίεσμένου χώματος σε κατοικία. Εκτός από τη Μέση Ανατολή, ευρήματα της τεχνικής rammed earth εμφανίζονται και στην Κίνα, κοντά στο 5.000 – 2.000 π.Χ., με έμφαση στη χρήση της ως κύριο τρόπο κατασκευής κατοικιών, παρόμοιων με εκείνων της Μέσης Ανατολής. Συγκεκριμένα, στις περιοχές των Lung-shan και Yang-shao βρέθηκαν υπόσκαφες κατοικίες με αναλημματικούς τοίχους από rammed earth, οι οποίοι μάλιστα ήταν «επενδεδυμένοι» με κλαδιά δέντρων και στρώσεις λάσπης στο εξωτερικό περίβλημα.



εικ.2.3. Ενδεικτική απεικόνιση κατοικίας από χώμα, κατά τη Νεολιθική εποχή, από το σημείο εκσκαφής WF16. (ανακτήθηκε από: <https://www.nature.com/articles/s41599-020-00615-7?proof=t%29> στις 15/11/21).

2.2.2. Κίνα: Η αφετηρία του rammed earth (300 π.Χ. – 700 μ.Χ.)

Είναι γεγονός, ότι οι αρχαίοι πολιτισμοί της Κίνας δεν σταμάτησαν τη χρήση του συμπιεσμένου χώματος μόνο για τη δημιουργία γρήγορων και τυπικών υπόσκαφων κατοικιών, αλλά συνέχισαν να αναπτύσσουν την τεχνική αυτή. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το Σινικό Τοίχος, που αποτέλεσε μια προσπάθεια κατασκευής πολλών ετών (από το 300 π.Χ. έως και το 1.700 μ.Χ.). Είχε δύο βασικές αρχές κατά την αρχική του ανέγερση: α) όπου διαπερνά ορεινή περιοχή, τότε η κατασκευή στηρίζεται σε πέτρινα τοιχεία, με μεγαλύτερες αντοχές σε αντίξοες συνθήκες και στην υψηλή υγρασία και β) όπου διαπερνά πεδιάδα, η κατασκευή θα στηρίζεται σε τοιχεία συμπιεσμένου χώματος, λόγω της ταχύτητας και ευκολίας ανέγερσης τέτοιου είδους κατασκευών, λογική που ανέπτυξε η δυναστεία Qin (Τριγγίδου, 2021:25-26). Στη συνέχεια, όμως ενδιαφέρονταν για την κατασκευή ψηλότερων κτισμάτων με την τεχνική αυτή, με αποτέλεσμα τη δημιουργία της παγόδας Dayan Ta επί της δυναστείας Tang. Η παγόδα αυτή αποτελεί ορόσημο στην ιστορία του rammed earth, καθώς αποτέλεσε την πρώτη κατασκευή μεγάλου ύψους, που κατάφερε να διατηρηθεί στον χρόνο και μάλιστα έπειτα από έναν από τους μεγαλύτερους καταγεγραμμένους σεισμούς παγκοσμίως το 1556 (Gramlich, 2013:70-71). Αποτελεί έναν κτίσμα 15 ορόφων και 45 μέτρων σε ύψος, το οποίο μάλιστα ανέπτυξε μια τεχνική σύμμικτης κατασκευής από rammed earth και οπτόπλινθους, η οποία του έδωσε τη στατική επάρκεια, ώστε να διατηρηθεί σε άριστη κατάσταση για τόσα χρόνια.



εικ.2.4. Τμήμα του Σινικού Τοίχους, κτισμένο κατά την δυναστεία Han. (ανακτήθηκε από: <https://www.cchatty.com/The-Great-Wall-g-100100> στις 15/11/21).



εικ.2.5. Άποψη της παγόδας Dayan Ta. (ανακτήθηκε από: <https://m.visitourchina.com/xian/attraction/big-wild-goose-pagoda.html> στις 15/11/21).

2.2.3. Το rammed earth την περίοδο του Ισλάμ (7^{ος} – 17^{ος} αιώνας μ.Χ.)

Το συμπιεσμένο χώμα ως τεχνική συνέχισε να εξελίσσεται ανά τους αιώνες, ενώ με τις δυνατότητες κατασκευής που εξέλιξαν οι πολιτισμοί της Κίνας, ξεκίνησαν να εμφανίζονται κατασκευές υψηλότερης τεχνογνωσίας σε περισσότερες χώρες παγκοσμίως. Ξεκινώντας από μια χώρα με αρχιτεκτονική βαθύτατα επηρεασμένη από τις χώρες της Ανατολής, η Ισπανία, μετά την Αραβική κυριαρχία σε μεγάλο μέρος της, παρήγαγε αρχιτεκτονική επηρεασμένη από τις τεχνικές που αναπτύχθηκαν στην χώρα που την κυριαρχούσε. Ορόσημο αυτής της λογικής αποτέλεσε το παλάτι της Alhambra, του οποίου τμήματα, εξ ολοκλήρου ή κατά τμήματα, εμφάνισαν τεχνικές rammed earth, με ή χωρίς αδρανή εντός του μείγματος. Η εναλλαγή τεχνικών και υλικών εξηγείται από τη θέληση των τότε κυρίαρχων της περιοχής να αναδείξουν τη θρησκεία και τη δύναμή τους, φέρνοντας τεχνικές από τις χώρες τους (Gramlich, 2013:71-72 και Easton, 2018:20-21). Στην εικ.2.6. απεικονίζεται τμήμα του παλατιού και η Πύλη της Δικαιοσύνης, όπου φαίνεται χαρακτηριστικά αυτή η μείξη των διαφορετικών τεχνικών.



εικ.2.6. Άποψη της Πύλης της Δικαιοσύνης στο παλάτι της Alhambra. (ανακτήθηκε από: https://www.granadahoy.com/granada/Justicia-Granada_0_1568243867.html στις 15/11/21).



εικ.2.7. Άποψη του μνημείου Serón de Nágima. (ανακτήθηκε από: <https://www.sorianitelaimaginas.com/monumentos/castillo-de-seron-de-nagima/> στις 15/11/21).

Άλλο ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα στην περιοχή της Ισπανίας αποτελεί το κάστρο Serón de Nágima, μια κατασκευή εξ ολοκλήρου κατασκευασμένη από rammed earth, χτισμένη τον 14^ο αιώνα, από την οποία έχουν απομείνει ελάχιστα τμήματα μέχρι σήμερα, λόγω την καταστροφή τους από την κατάκτηση των Καθολικών Σταυροφόρων (βλ. εικ.2.7.). Οι ίδιοι προσπαθώντας να απωθήσουν τις ξενόφερτες θρησκείες και κουλτούρες, κατέστρεψαν σημαντικά δείγματα της τεχνικής αυτής.

Rammed earth κατασκευές δεν εμφανίστηκαν μονάχα στην Ισπανία. Για παράδειγμα, στο Μαρόκο εμφανίζεται μια σειρά μνημείων ιδιαίτερης σημασίας για την παγκόσμια κληρονομιά, κατασκευασμένα εξ ολοκλήρου από rammed earth. Χαρακτηριστικά, το Ksar της Ait-Ben-Haddou, το οποίο αναγνωρίστηκε από την UNESCO ως μνημείο παγκόσμιας πολιτιστικής κληρονομιάς, αποτελεί ορόσημο, τόσο της Μαροκινής αρχιτεκτονικής, όσο και της αρχιτεκτονικής από rammed earth (βλ. εικ.2.8.). Η αξία του φαίνεται κυρίως στο μέγεθος της κατασκευής, καθώς αποτέλεσε μια ολόκληρη περιφραγμένη πόλη, καλά διατηρημένη έως και τη σύγχρονη εποχή χτισμένη μονάχα από συμπίεσμένο χώμα και άλλα τοπικά υλικά, η οποία παρ' όλ' αυτά έχει εγκαταλειφθεί λόγω των δυσμενών αναγκών διαβίωσης (Τριγγίδου, 2021: 25-26). Εξίσου σημαντικό παράδειγμα της ίδιας χώρας, αποτέλεσε το kasbah (φρούριο) Tamnougalt, του οποίου η περίοδος κατασκευής παραμένει άγνωστη, γεγονός το οποίο φυσικά δεν αναιρεί τη σημασία του ως Μαροκινό αρχιτεκτόνημα (Rovero, 2016) (βλ.εικ.2.9.). Μικρότερο σε μέγεθος από το Ksar, το φρούριο αυτό αναδεικνύει ιδιαίτερα την αντοχή και τις δυνατότητες κατασκευής της τεχνικής rammed earth, καθώς παρά τις πολλαπλές λεηλασίες και επιθέσεις που δέχτηκε, παρέμεινε έως και σήμερα σε σχετικά καλή κατάσταση.



εικ.2.8. Εσωτερική άποψη του φρουρίου Ait-Ben-Haddou. (ανακτήθηκε από: <https://whc.unesco.org/en/list/444/gallery/&index=13&maxrows=12> στις 15/11/21).



εικ.2.9. Άποψη του φρουρίου Tamnougalt. (ανακτήθηκε από: <https://whc.unesco.org/en/list/444/gallery/&index=13&maxrows=12> στις 15/11/21).



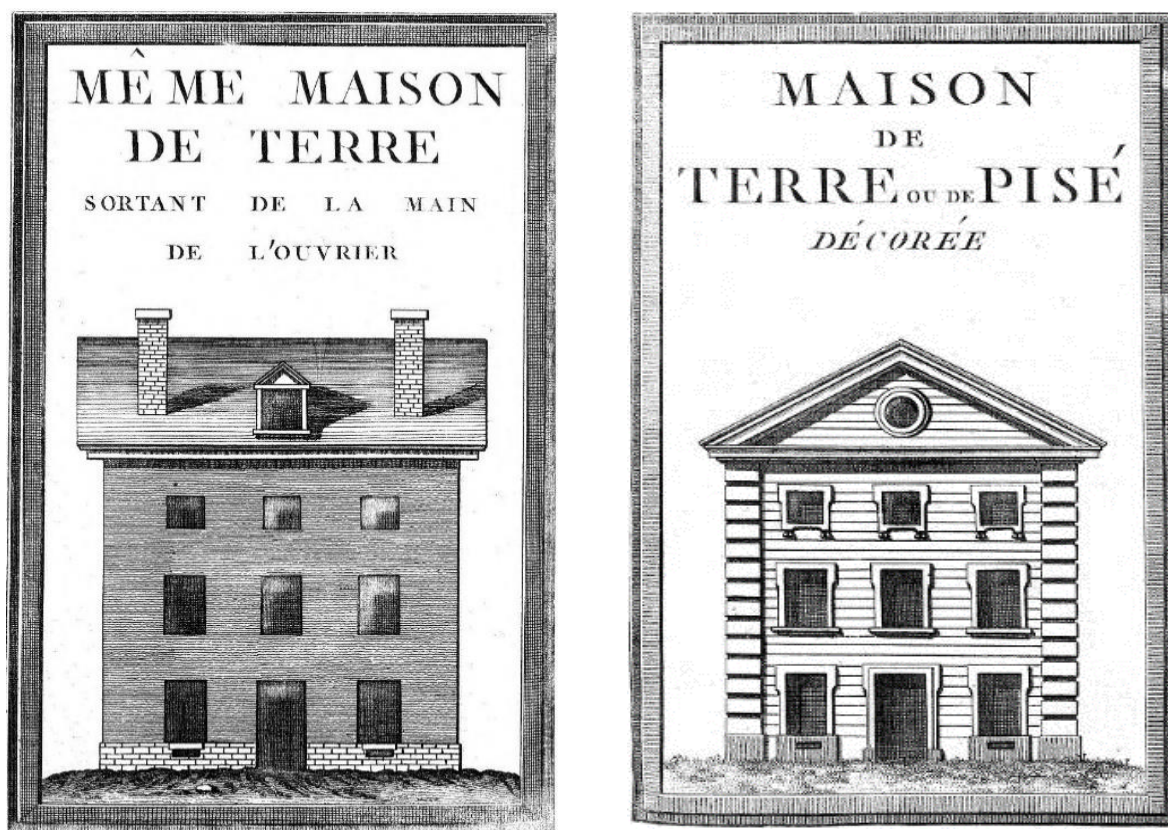
Εικ.2.10. Εκκλησία Αγίου Αντωνίου στο Sao Paulo (αριστερά) και Ναός της Κυρίας του Ροζαρίου στην Pirenopolis (δεξιά). (ανακτήθηκαν από: https://sjoneall.net/big-galleries/maroc-2010-big/05_tamnougalt/index.html και [https://pt.wikipedia.org/wiki/Igreja_Matriz_de_Nossa_Senhora_do_Rosario_\(Pirenopolis\)](https://pt.wikipedia.org/wiki/Igreja_Matriz_de_Nossa_Senhora_do_Rosario_(Pirenopolis)) στις 15/11/21).

Επιπλέον, στη Βραζιλία κατά τον 16^ο με 17^ο αιώνα, ανοικοδομήθηκαν δύο σημαντικοί χριστιανικοί ναοί με τοίχους από συμπίεσμένο χώμα. Από τη μια, ο ναός Igreja de Santo Antonio στο Sao Paulo, και από την άλλη ο ναός Igreja Matriz de Nossa Senhora do Rosario στην Pirenopolis (Gramlich, 2013:73) (βλ. εικ.2.10.). Η ιδιαιτερότητα των δύο αυτών ναών ως προς την τεχνική κατασκευής τους πηγάζει στην ιδιαίτερα πετυχημένη «επένδυση» του συμπίεσμένου χώματος από κονιάματα ασβέστη.

2.2.4. François Cointereaux: η σχολή χωμάτινης αρχιτεκτονικής και η άνοδος του rammed earth (17^{ος} – 18^{ος} αιώνας μ.Χ.)

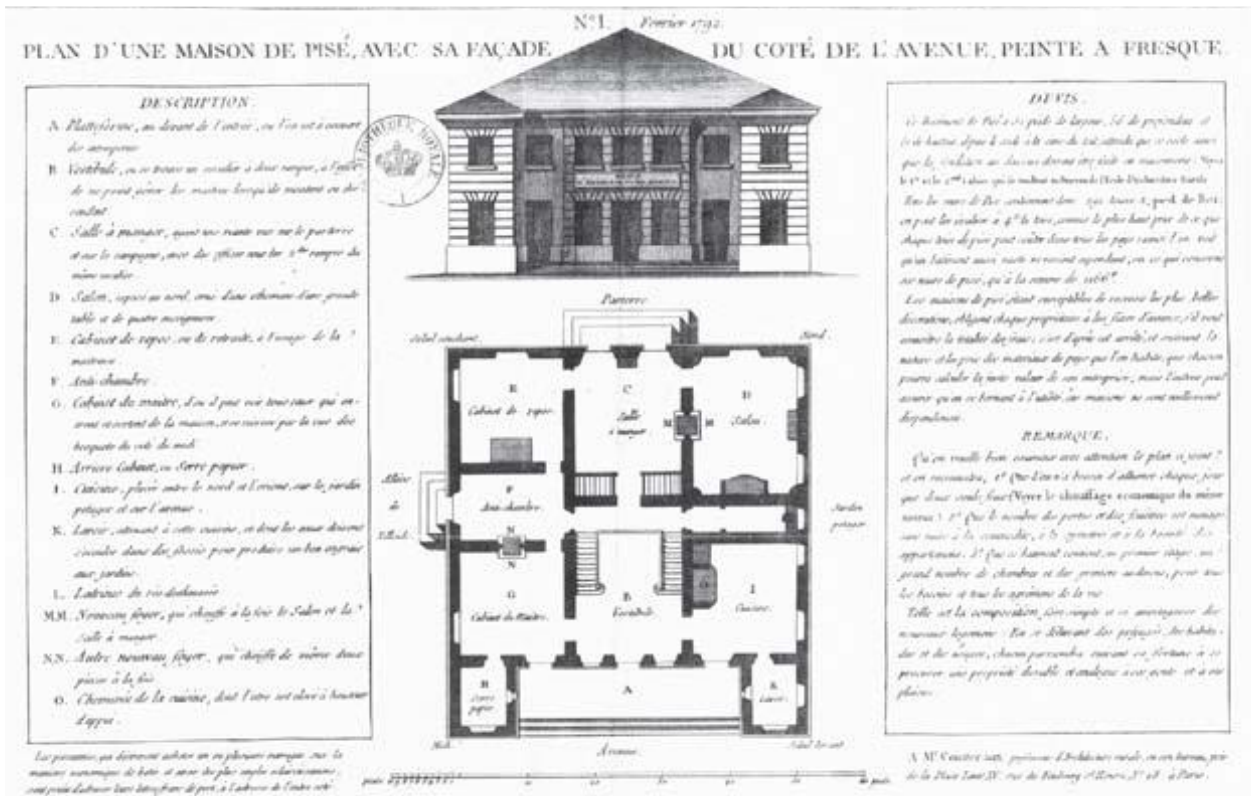
Η τεχνική rammed earth γνώρισε ιδιαίτερη αναγνώριση και ανάπτυξη με την ίδρυση της Γαλλικής σχολής αρχιτεκτονικής γήινων και αυτόχθονων υλικών. Ιδρυτής της σχολής ήταν ο François Cointereaux, Γάλλος αρχιτέκτονας γεννημένος στη Lyon, μια περιοχή όπου η τεχνική του συμπιεσμένου χώματος ήταν η συνήθης κατασκευαστική μέθοδος, όπως αναφέρει χαρακτηριστικά και η Ashley Nicolle Gramlich, στην διατριβή της: *A Concise history of the use of the rammed earth building technique* (2013). Ο ίδιος στην προσπάθειά του να βελτιώσει τις δύσκολες συνθήκες διαβίωσης σε περιοχές όπως αυτές που μεγάλωσε, αλλά και να εξελίξει τις ίδιες αυτές περιοχές, ίδρυσε τη σχολή «École d'Architecture Rurale» το 1790. Δημοσίευσε ενημερωτικά φυλλάδια για την ίδια τη σχολή και το έργο της, εντός και εκτός Γαλλίας. Τα φυλλάδια αυτά ξεπέρασαν τα όρια της Γαλλίας και, μεταφρασμένα, έφτασαν σε πολλές χώρες της Ευρώπης, όπως Αγγλία, Γερμανία, Ιταλία, Δανία, Ρωσία κ.ά., με αποτέλεσμα μεγάλα αρχιτεκτονικά ονόματα της τότε εποχής (Henry Holland, David Gilly, κ.ά.) να δείξουν ενδιαφέρον τόσο για τη σχολή, όσο και για τις τεχνικές που ανέπτυξε.

Ο ίδιος ο Cointereaux τελειοποίησε την τεχνική poutre bois, «νέα συμπιεσμένη γη», όπως την ονόμασε, με σκοπό τη συμμετοχή του σε έναν επιστημονικό διαγωνισμό στη σχολή της Amiens στη Γαλλία. Σκοπός αυτού του διαγωνισμού ήταν η ανάπτυξη μιας απλής, γρήγορης και χαμηλού κόστους κατασκευαστικής τεχνικής, η οποία θα χρησιμοποιούσε τοπικά πυράντοχα υλικά. Ένα από τα μεγαλύτερα ευρήματά του, ως προς την τεχνογνωσία του rammed earth, ήταν η αποφυγή της κατασκευής του τοίχου από χυτό υλικό in-situ, αλλά, αντί αυτού, δημιούργησε τα μπλοκ συμπιεσμένης γης, τα οποία κατασκεύαζε σε εργαστήριο χρησιμοποιώντας ένα συμπιεστικό μηχάνημα που σχεδίασε ο ίδιος (François Cointereaux, *École d' Architecture Rurale*, 1796). Χάρης στον διαγωνισμό αυτό, ο Cointereaux κατάφερε να ανακαλύψει ποιό είναι πραγματικά το αρχιτεκτονικό του όραμα και να εξελίξει, να καταγράψει και να μεταφέρει παγκοσμίως το rammed earth (Gramlich, 2013:73-77).



εικ.2.11. Φυλλάδια που σχεδίασε ο François Cointereaux για την ανάδειξη του pisé de terre. (ανακτήθηκε από: https://fr.wikisource.org/wiki/%C3%89cole_d%27E2%80%99architecture_rurale/Texte_entier στις 15/11/21).

Με τη δημιουργία της σχολής του και τη συνεχόμενη αύξηση της δημοσιότητάς της, άρχισε να εκθέτει τις δυνατότητες του rammed earth. Ο ίδιος έλεγε για την τεχνική αυτή ότι προερχόταν από τους Ρωμαίους, τέχνασμα το οποίο χρησίμευσε στην αποδοχή της τεχνικής από τον κόσμο, λόγω της ανόδου του Νεοκλασικισμού κατά την εποχή εκείνη (Young Lee, 2008:173). Έτσι, δημοσίευε φυλλάδια, όπως εκείνα της εικ.2.11., τα οποία αναδείκνυαν τις δυνατότητες της τεχνικής σε μορφές προσόψεων. Τόνισε ιδιαίτέρως, μάλιστα, τα δύο βασικά προτερήματα του «rise»: χαμηλό κόστος και εύχρηστο υλικό, σε σημείο που το ίδιο ως υλικό αποτέλεσε σύμβολο της Γαλλικής Επανάστασης, ως υλικό - σύμβολο της ελευθερίας και της νέας εποχής (Gramlich, 2013:73-77). Καταλήγοντας, αξιοσημείωτα αποτελούν τα κτίσματα κατοικιών που πρότεινε, φυσικά κατασκευασμένα από rammed earth, τα οποία ήταν φτηνά, πυράντοχα και βιώσιμα.



εικ.2.12. Η πρώτη σχεδιασμένη κατοικία από pise του Francois Cointereaux. (Gramlich, «A concise history of the use of the rammed earth building technique including information on methods of preservation, repair, and maintenance», University of Oregon, USA, 2013, σελ.77).

2.2.5. Το rammed earth στον Ευρωπαϊκό χώρο (18^{ος} – 19^{ος} αιώνας μ.Χ.)

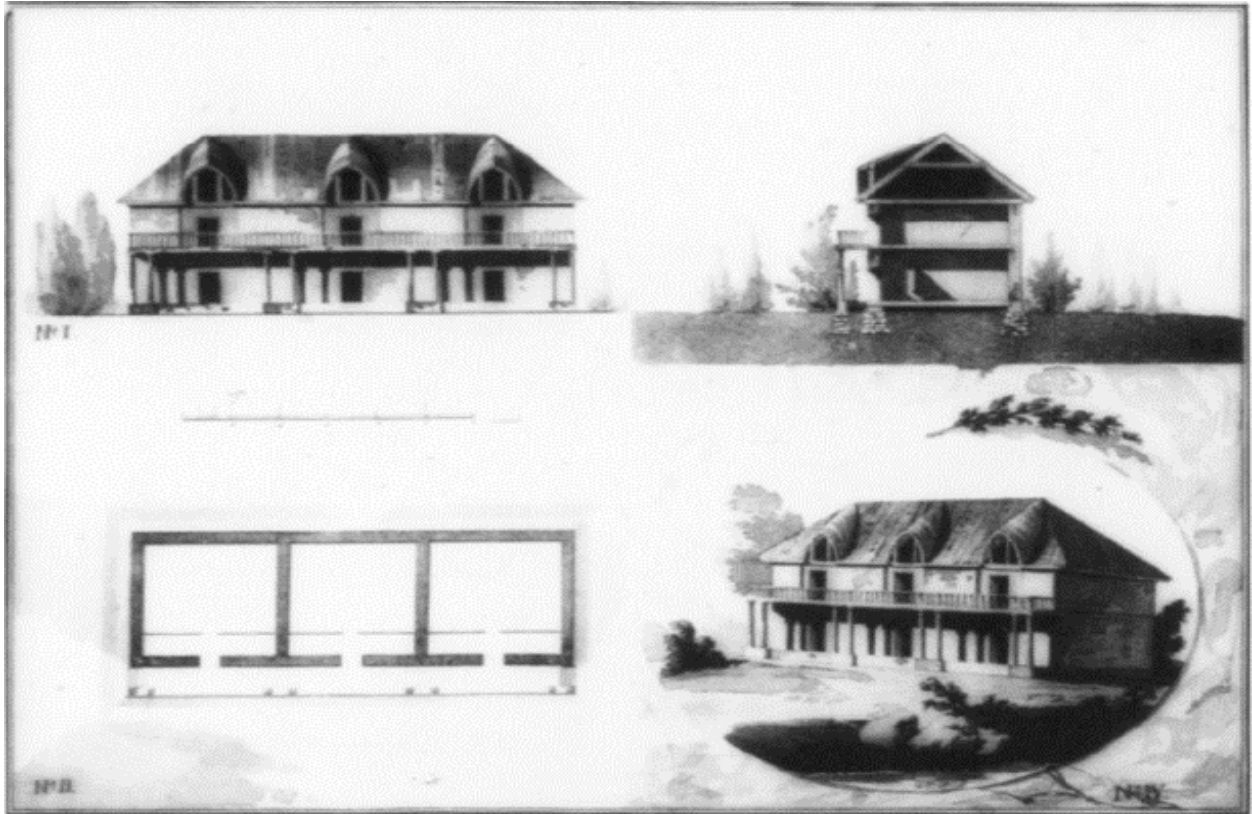
Χάρης στην ανάδειξη των χωμάτινων τεχνικών από την σχολή του Francois Cointereaux, η τεχνική rammed earth άρχισε να εξαπλώνεται και σε άλλες χώρες της Ευρώπης, ως μια τεχνική φτηνή και λειτουργική. Αρχικά, στη Γερμανία, ο αρχιτέκτονας David Gilly (1748-1808) ίδρυσε μια παρόμοια σχολή αρχιτεκτονικής, με τα πρότυπα που είχε θέσει η σχολή του Cointereaux. Η σχολή αυτή (Bauschule) με τα χρόνια απέκτησε ακόμα μεγαλύτερη φήμη με αποτέλεσμα να μετατραπεί σε ακαδημία (Bauakademie) (Cellauro, Richaud, 2006:130). Επίσης, στη Γερμανία, ο αρχιτέκτονας Wilhelm Jacob Wimpf (1767-1839), ξεκίνησε να κατασκευάζει τα πρώτα βιομηχανικά κτήρια από rammed earth, καθώς και παραπάνω από 20 κατοικίες. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτών, αποτέλεσε η πολυκατοικία επτά ορόφων στη Γερμανία, η οποία διατηρείται μέχρι και σήμερα, έπειτα από μια σειρά ανακαινίσεων (βλ. εικ.2.13.).



εικ.2.13. Πολυκατοικία 7 ορόφων από rammed earth στη Γερμανία. (ανακτήθηκε από: <https://twitter.com/wrathofgnon/status/1260019608565645314?lang=fr> στις 15/11/21)

Περισσότερο σε θεωρητικό επίπεδο μελέτησαν την αρχιτεκτονική του Cointereaux, αρχιτέκτονες από τη Δανία και τη Φινλανδία, οι οποίοι μετέφρασαν τα έργα του και τα δίδαξαν στις χώρες τους αντίστοιχα, σε σχολές αρχιτεκτόνων. Χαρακτηριστικά η Gramlich (2013:82) αναφέρει ότι στη Δανία μέχρι και το 1871, είχαν κατασκευαστεί περισσότερες από 4.000 κατοικίες με τη μέθοδο poutre bois.

Στη Ρωσία, η επιρροή του Cointereaux ήταν φανερή. Η δουλειά του, μεταφρασμένη από τον αρχιτέκτονα Aleksander Barsov, αποτέλεσε σημείο τομής για τους Ρώσους αρχιτέκτονες. Ο Nicolai L'von (1751-1803) ξεκίνησε να χτίζει κτήρια συμπιεσμένου χώματος στη Ρωσία το 1793 (Cellauro, Richaud, 2006:135), σε δικής του χρήσης οικόπεδα, ενώ σε συνεργασία με τον σκωτσέζο Adam Menelaws (1749-1831), παρήγαγε με την ίδια τεχνική κατασκευές μεγάλης κλίμακας. Πρώτο χαρακτηριστικό παράδειγμα ο στρατώνας του Tsar Paul I, εξ ολοκλήρου κτισμένος από rammed earth και άχυρο. Ο L'von έπεισε τον Τσάρο να προτιμήσει αυτά τα «ευτελή» υλικά με την πρόφαση της προβληματικής μείωσης των δασών της Ρωσίας, λόγω των πολλών ξύλινων κατασκευών (Makhron, 1997:171). Δεύτερο παράδειγμα, αποτέλεσε στη Μάλτα το Μοναστηριακό Παλάτι για τους Ιππότες της Μάλτας, το μοναδικό μάλιστα κτήριο που έχει σχεδιάσει ο L'von, το οποίο έχει διατηρηθεί μέχρι και σήμερα (Makhron, 1997:174-175). Το 1799, ο L'von προσλήφθηκε στη Μόσχα ως επικεφαλής της Σχολής Γήινης Δόμησης, όπου και κάλεσε τον Menelaws ως καθηγητή, όπου και μαζί δίδαξαν τα πρότυπα που έθεσε ο Cointereaux στη γήινη δόμηση. Στη συνέχεια, οι ίδιοι οργάνωσαν στη σχολή της Μόσχας ανοιχτή προς το κοινό έκθεση, με 42 κατοικίες από συμπιεσμένο χώμα, ως εκθέματα. Τέλος, όσον αφορά την περίπτωση της Ρωσίας, η σχολή αυτή έκλεισε το 1803, καθώς με τη δολοφονία του Τσάρου, θεωρήθηκε ότι οι τεχνικές που ανέπτυξε αποτελούσαν υπενθύμιση της κυριαρχίας του (Cellauro, Richaud, 2006:135).



εικ.2.14. Παράδειγμα πρώτων κατοικιών από rammed earth στη Ρωσία. (Gramlich, «A concise history of the use of the rammed earth building technique including information on methods of preservation, repair, and maintenance», University of Oregon, USA, 2013, σελ.85).



εικ.2.15. Κάστρο από rammed earth σχεδιασμένο από τον Λ'νον στη Ρωσία. (ανακτήθηκε από: <https://twitter.com/wrathofgnon/status/1260019608565645314?lang=fr> στις 15/11/21).

Μια χώρα που δεν έμεινε εκτός του κινήματος που ξεκίνησε από τον Cointereaux ήταν το Ηνωμένο Βασίλειο. Οι Άγγλοι αρχιτέκτονες αναγνώρισαν ότι οι τεχνικές που ανέπτυξαν οι Γάλλοι, ήταν πολύ καλύτερες, περισσότερο κατανοητές από ανειδίκευτους χτίστες, ενώ παρέμεναν φτηνές και μεγάλων αντοχών, όπως αναφέρει στο άρθρο του «Rural Improvements» ο John Plaw (1796). Συγκεκριμένα, στην Αγγλία αναπτύχθηκε την ίδια εποχή η τεχνική δόμησης του cob, με αποτέλεσμα να υπάρχει ήδη μια πορεία αναγνώρισης και αποδοχής των γήινων υλικών. Έτσι, χάρις στην εξέλιξη που πρόσφερε η σχολή Cointereaux, αντιλήφθηκαν τις επιπλέον δυνατότητες τέτοιων κατασκευών. Ο Henry Holland (1745-1806), χρησιμοποίησε αποσπασματικά τη δουλειά του Francois Cointereaux, στο Συμβούλιο της Γεωργίας, σε μία ομιλία του με όνομα: «Pisé, or the art of building strong and durable walls, to the height of several stories, with nothing but earth, or the most common materials. Drawn up and presented to the Board of Agriculture». Εκεί, κάνοντας αναφορά τόσο στην ιστορία, όσο και στις τεχνικές του rammed earth, προσπάθησε να αποδείξει το γιατί θα πρέπει ο πληθυσμός των αγροτικών χώρων να αξιοποιεί την τεχνική αυτή ως την κύρια κατασκευαστική μέθοδο κατοικιών τους, θέτοντας προτερήματα ταχύτητας, κόστους, εργάσιμου και απλής τεχνογνωσίας.

2.2.6. Η εξάπλωση του rammed earth στον κόσμο (19^{ος} – 20^{ος} αιώνας μ.Χ.)

Για τα επόμενα χρόνια και κατά την αρχή του 19ου αιώνα, οι John Plaw και Henry Holland πέτυχαν να επηρεάσουν ιδιαίτερα την παγκόσμια γνώμη όσον αφορά την αναγνώριση της τεχνικής rammed earth. Για 40 χρόνια, τα κείμενα τους αναφέρονταν σε άρθρα και μαθήματα σχολών, αγγλόφωνων χωρών εντός αλλά και εκτός Ευρώπης (Αμερική, Νέα Ζηλανδία, Αυστραλία), ενώ κτίσματα από rammed earth στην Αγγλία μελετήθηκαν ευρέως από τα αμερικανικά πανεπιστήμια, ως σημαντικές αρχιτεκτονικές δημιουργίες (Gramlich, 2013: 86-87).



Εικ.2.16. Τυπογραφείο του 1830 στην Νέα Ζηλανδία του αρχιεπίσκοπου Pompallier. (ανακτήθηκε από: <https://visitheritage.co.nz/visit/northland/pompallier-mission-and-printery/stories/story-name/> στις 15/11/21).

Οι αρχιτέκτονες παγκοσμίως αναγνώρισαν γενικότερα τις μεθόδους κατασκευής με γήινα υλικά, κυρίως με την τεχνική συμπιεσμένου χώματος, ως κατάλληλη αντικατάσταση των ξύλινων κατασκευών σε περιοχές με δυσκολία πρόσβασης σε ξυλεία ή σε εκείνες με σοβαρά περιβαλλοντικά προβλήματα, εξαιτίας της μείωσης των πόρων ξυλείας. Δείγματα αυτής της συνειδητοποίησης αποτέλεσαν τα άρθρα του αρχιτέκτονα Rees Abraham (1743-1825) το 1817 και το 1823, τα οποία εξηγούσαν εις βάθος τα προτερήματα τέτοιων κατασκευών προς ελάφρυνση της μείωσης των ξύλινων πόρων. Κατοικίες άρχισαν να εμφανίζονται έτσι σε χώρες, όπως η Αυστραλία (οι οποίες δεν διατηρήθηκαν μέχρι σήμερα) και η Νέα Ζηλανδία, σε περιοχές αγροτικού χαρακτήρα.

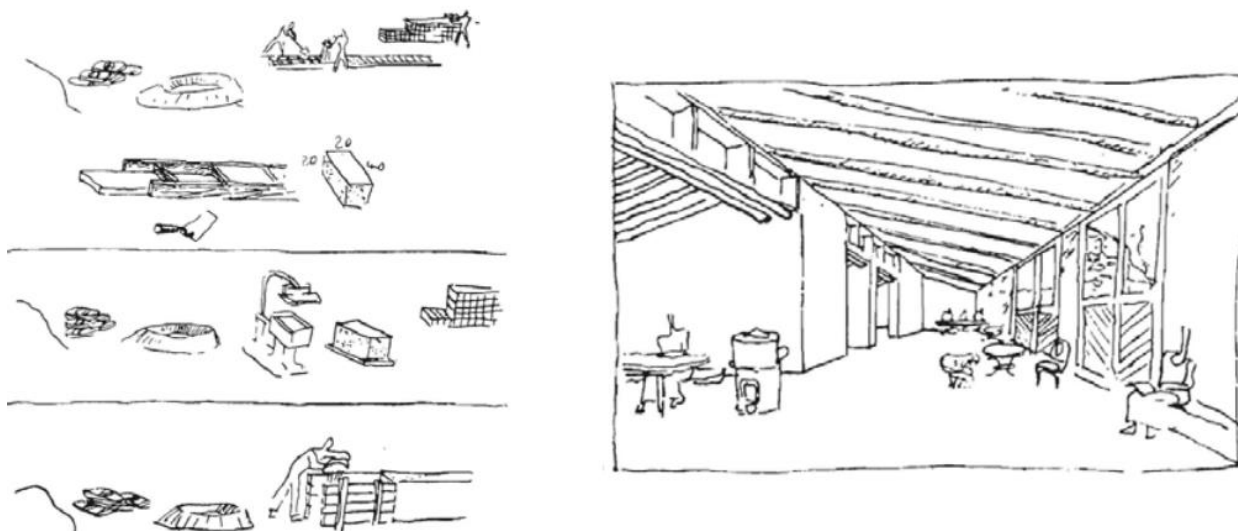


Μετά τους Ναπολεόντειους Πόλεμους, λόγω της μεγάλης κίνησης προσφύγων από τη Γαλλία και την Ευρώπη, προς αναζήτηση νέας γης προς κατοίκηση, ο William Wilds, το 1835 δημοσίευσε ένα βιβλίο που αφορούσε τη γρήγορη και φτηνή κατασκευή κατοικιών από γήινα υλικά, χρησιμοποιώντας την τεχνική συμπιεσμένου χώματος. Σκοπός του ήταν να προσελκύσει τους προσφυγικούς πληθυσμούς της εποχής εκείνης και να τους παρακινήσει να χτίσουν χρησιμοποιώντας αυτές τις τεχνικές, γεγονός που πέτυχε με αποτέλεσμα μια ευρεία εμφάνιση κατοικιών rammed earth στην Αμερική από το 1820 έως το 1860 (Gramlich, 2013:89-91). Συγκεκριμένα, ο Thomas Jefferson, άρχισε να μελετά την τεχνική συμπιεσμένου χώματος, μεταφράζοντας κείμενα του Cointereaux και φέρνοντας τη μελέτη του υλικού στον ακαδημαϊκό αμερικάνικο χώρο, παρά τις αντιρρήσεις των όμοιών του. Έτσι, γεννιέται στην Αμερική μια σειρά αρχιτεκτόνων που ξεκίνησαν να χτίζουν σε απομονωμένες περιοχές της χώρας, αξιοποιώντας τα προτερήματα του rammed earth. Ως αποτέλεσμα αυτού, εμφανίζονται κατά το τέλος του 19^{ου} μέχρι και τις αρχές του 20^{ου} αιώνα στην Αμερική πολυάριθμες παραθεριστικές και μη κατοικίες κατασκευασμένες κατά κύριο λόγο από rammed earth (Gramlich, 2013, σύντομη αναφορά στο 4^ο κεφάλαιο).

Στην Αυστραλία κατά το 1850-1870 δημιουργήθηκαν και οι πρώτες κατασκευαστικές οργανώσεις, με εξειδίκευση στις τεχνικές rammed earth και γήινων υλικών, οι οποίες προσλαμβάνονταν από προσφυγικούς και ντόπιους αγροτικούς πληθυσμούς για την κατασκευή κατοικιών. Χαρακτηριστικό, μάλιστα, της Αυστραλίας αποτελεί το πως μέχρι και σήμερα πρωτοπορεί στον τομέα της χωμάτινης δόμησης, ενώ παράλληλα αποτελεί μια από τις λίγες χώρες που στον Κτηριακό Κανονισμό της έχει συμπεριλάβει κριτήρια, προϋποθέσεις και κατασκευαστικούς συντελεστές για την κατασκευή συμπιεσμένου χώματος, στο υποκεφάλαιο με όνομα: Bulletin 5: Earth Wall Construction (CSIRO, 2012).

2.2.7. Ανακαλύπτοντας ξανά το rammed earth μετά τους παγκοσμίους πολέμους έως τη σύγχρονη εποχή (20^{ος} αιώνας μ.Χ. ως το σήμερα)

Με το πέρασμα των χρόνων και με την ανάδειξη του σκυροδέματος ως κατασκευαστική νόρμα της σύγχρονης εποχής, η τεχνική rammed earth παρέμεινε ως μια τεχνική αγροτικών πληθυσμών, χαμηλού κόστους και ευτελών υλικών. Ενώ μετά τους Παγκοσμίους Πολέμους και τη μεγάλη έλλειψη κατοικιών, λόγω των καταστροφών παγκοσμίως, παράλληλα με την τρομερή έλλειψη πρώτων υλών, ο κόσμος αρνήθηκε να στραφεί στην επιλογή κατοίκησης μέσα σε «γήινες κατοικίες». Δείγματα αυτής της ανάγκης για τη βιωσιμότητα και αξιοπιστία της τεχνικής rammed earth υπάρχουν από το 1920, όταν ο αρχιτέκτονας William-Ellis δημοσίευσε ένα βιβλίο περί της χρησιμότητας του rammed earth, το οποίο παρόλα αυτά κατέρριψε το Συμβούλιο Έρευνας Κατασκευαστικών Μεθόδων της Αγγλίας, απορρίπτοντας την τεχνική του rammed earth και λοιπές τεχνικές γης και τονώνοντας τη σημασία της ξηράς δόμησης και του οπλισμένου σκυροδέματος. Ακόμα και μετά τον Δεύτερο Παγκόσμιο Πόλεμο, ο William-Ellis διόρθωσε και επανέκδωσε το βιβλίο του, ωστόσο καταρρίφθηκε ξανά από τα σχόλια και τη μελέτη του Paul Oliver, στο βιβλίο του με τίτλο «Το χώμα ως δομικό υλικό του σήμερα», στο οποίο «αποδεικνύει» την ανικανότητα των γήινων υλικών να κατασκευάσουν ένα σύγχρονο βιώσιμο κτήριο (Gramlich, 2013:96-98). Παρ' όλ' αυτά, κτήρια κατοικιών από rammed earth εμφανίστηκαν και κατά αυτή την εποχή, όμως παρέμειναν γνωστά ως άτυπα κτήρια αρχιτεκτονικής κουλτούρας, με χαμηλή κοινωνική υπόληψη.



εικ.2.17. Σκίτσα του Le Corbusier που αναδεικνύουν το ενδιαφέρον του για τη δόμηση με χώμα. (Gramlich, «A concise history of the use of the rammed earth building technique including information on methods of preservation, repair, and maintenance», University of Oregon, USA, 2013, σελ.101).

Στη σύγχρονη εποχή, κτήρια ιδιαίτερης αρχιτεκτονικής σημασίας έχουν ανεγερθεί σε πολλές χώρες παγκοσμίως, από τα οποία είναι δυνατό να αναγνωστεί ολόκληρη η τεχνογνωσία που μελετήθηκε και εξελίχθηκε. Αρχικά, όπως ήταν άλλωστε ο πρωταρχικός σκοπός της τεχνικής του συμπιεσμένου χώματος, κατασκευές από rammed earth δημιουργούνται σε χώρες και περιοχές όπου υφίστανται χαμηλές οικονομικές δυνατότητες, αλλά και μειωμένοι πόροι της συνήθους δόμησης. Χρησιμοποιώντας όμως το τοπικό χώμα, ως κύριο κατασκευαστικό υλικό, δύναται η ανέγερση κατοικιών, αλλά και κτηρίων δημόσιου χαρακτήρα, τα οποία είναι οικονομικά, όμως πληρούν τις προϋποθέσεις και τους κανονισμούς, ώστε να εξασφαλίζεται η άνεση και η βιωσιμότητά τους. Χαρακτηριστικά παραδείγματα κτηρίων από συμπιεσμένο χώμα της σύγχρονης εποχής θα παρουσιαστούν και θα αναλυθούν σε επόμενο κεφάλαιο.

Είναι πιθανότατα αδύνατο να θεωρήσει κανείς ότι κάποια από τις παραπάνω εποχές ή κατασκευές αποτέλεσε το ορόσημο για τη δόμηση με συμπιεσμένο χώμα. Η τεχνική αυτή είναι μια τεχνική που αναπτύχθηκε ανά τους αιώνες, με εμφανίσεις μέχρι και στη Νεολιθική εποχή. Άλλωστε είναι λογική η ανάγκη αξιοποίησης του ίδιου του χώματος ως δομικό υλικό, μιας που είναι φτηνό, εργάσιμο και μπορεί να ανασκαφεί από πρακτικά κάθε περιοχή. Είναι αξιοσημείωτες οι προσπάθειες που έγιναν ανά τα χρόνια με σκοπό την εξάπλωση της τεχνικής αυτής, αλλά και την ανάδειξη των προτερημάτων τους, έναντι της συνηθισμένης κατασκευαστικής λογικής. Άλλωστε, αν η τεχνική δεν έφερε πραγματικά αποτελέσματα κατάλληλης και ασφαλούς διαβίωσης, θα είχε χαθεί τελείως στο πέρασμα των χρόνων. Η σύγχρονη εποχή έχει τρομερή ανάγκη περιβαλλοντικής μέριμνας των κατασκευών. Τόσο από θέμα οικονομικού κόστους και εμπεριεχόμενης ενέργειας του υλικού, όσο και σε σχέση με τη μείωση της εξάντλησης των μη ανανεώσιμων φυσικών πόρων. Το χώμα και η τεχνική συμπίεσής του θα μπορούσε να είναι μια αρχή αυτής της μέριμνας, η οποία αν εμφανιζόταν ως παγκόσμια αρχή, θα βελτίωνε τις περιβαλλοντικές δυσκολίες, ενώ παράλληλα θα παρήγαγε αρχιτεκτονική ιδιαίτερου κύρους και αισθητικής. Ωστόσο, δεν πρέπει να παραλείπονται οι πιθανές αδυναμίες του υλικού, αλλά να μελετάται η δυνατότητα χρήσης του σύμφωνα με τις συνθήκες της εκάστοτε περιοχής.



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Φυσικές και μηχανικές ιδιότητες

Για τη βέλπστη κατανόηση των δυνατοτήτων της τεχνικής συμπιεσμένου χώματος είναι αναγκαία η ανάλυση των φυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων των παραγόμενων δομικών στοιχείων. Συγκεκριμένα, αντιλαμβανόμενοι τα φυσικά και μηχανικά χαρακτηριστικά της τεχνικής rammed earth μπορούμε να οδηγηθούμε στην κατανόηση των κατασκευαστικών δυνατοτήτων, αλλά και ορίων, του υλικού αυτού.

Η τεχνική rammed earth, όπως προαναφέρεται, αφορά τη δημιουργία δομικών στοιχείων από τη συμπίεση χώματος εντός ορισμένων καλούπιων. Ως απόρροια του παραπάνω γεγονότος, είναι λογικό ότι οι φυσικές και μηχανικές ιδιότητες του δομικού στοιχείου εξαρτώνται κατά κύριο λόγο από τη σύσταση του χώματος που αξιοποιείται, τα πρόσθετα υλικά που αναμιγνύονται στο μείγμα ώστε να προσαρμοστεί στις ανάγκες της εκάστοτε περιοχής ανέγερσης του στοιχείου, το πάχος του δομικού στοιχείου, τις στρώσεις που μπορεί να το επικαλύπτουν ή να το διαπερνούν (π.χ. μόνωση στον πυρήνα) και τον τρόπο συμπίεσης.

Τα τοιχία από συμπιεσμένο χώμα κατασκευάζονται κατά κύριο λόγο με πάχος 30-60 εκατοστών και οι στρώσεις συμπίεσης στο τελικό προϊόν έχουν περίπου 7,5-15 εκατοστά ύψος. Φυσικά, οι διαφορές στις τιμές αυτές συνεπάγονται και διαφορές στις ιδιότητες, άρα για τη συνέχεια θεωρείται τυπικό πάχος τοιχοποιίας 40 εκατοστών και ύψος κάθε στρώσης 10-11 εκατοστών (αν υπάρξουν διαφορετικές τιμές θα αναφερθούν στο κείμενο). Για την κατάλληλη αντιμετώπιση και ανάγνωση των ιδιοτήτων των παραγόμενων δομικών στοιχείων rammed earth, αναγνωρίζονται τρεις βασικές κατηγορίες (Ranime El Nabouch, 2016:12-14):

- α) (N)RE→(Natural) Rammed Earth ή αλλιώς Unstabilized Rammed Earth, είναι το φυσικό (μη σταθεροποιημένο) συμπιεσμένο χώμα. Η συγκεκριμένη κατηγορία αφορά την κατασκευή τοίχων από μείγμα χώματος, το οποίο δεν εμπεριέχει πρόσθετα υλικά για τη βελτίωση των χαρακτηριστικών ιδιοτήτων του, ενώ εμφανίζεται κυρίως σε παλιότερες κατασκευές. Το γεγονός αυτό δεν μειώνει τη φερεγγυότητα της ανθεκτικότητας ή της αντοχής της κατασκευής, ενώ παράλληλα διατηρεί το κόστος χαμηλό και προσιτό.
- β) SRE→Stabilized Rammed Earth, είναι το σταθεροποιημένο συμπιεσμένο χώμα. Η κατηγορία αυτή αναφέρεται στα δομικά στοιχεία από rammed earth, τα οποία για τη βελτίωση των χαρακτηριστικών τους σταθεροποιούνται με διάφορα πρόσμικτα. Η σταθεροποίηση αυτή αφορά κυρίως την αύξηση της θλιπτικής αντοχής και την επιβράδυνση της διάβρωσης εξαιτίας των καιρικών συνθηκών. Φυσικά, επηρεάζουν σημαντικά όλες τις ιδιότητες του υλικού. Υπάρχουν τέσσερα είδη SRE:
 - CSRE, δηλαδή cement stabilized rammed earth, που αφορά τη σταθεροποίηση με τσιμέντο.
 - LSRE, δηλαδή Lime stabilized rammed earth, που αφορά τη σταθεροποίηση με άσβεστο.
 - FSRE, δηλαδή Fiber stabilized rammed earth, που η σταθεροποίηση επιτυγχάνεται μέσα από την ενίσχυση του μείγματος με προσθήκη ινών (οργανικών και μη).
 - SSSRE, δηλαδή Sodium Silicate stabilized rammed earth, που η σταθεροποίηση επιτυγχάνεται με πρόσμιξη πυριτικού νατρίου σε συνέχεια της οποίας χρειάζονται περίπου επτά ημέρες για την κατάλληλη ομογενοποίηση του υλικού.
- γ) PRE→Prefabricated rammed earth, που είναι τα προκατασκευασμένα στοιχεία ή πάνελ συμπιεσμένου χώματος. Τα συγκεκριμένα στοιχεία κατασκευάζονται σε ειδικά εργαστήρια ή επί τόπου στο εργοτάξιο μέσα σε τυποποιημένα καλούπια σταθερού μεγέθους, σηκώνονται από γεραμούς και τοποθετούνται πάνω σε επιφάνειες επικαλυμμένες με ειδικά ασβεστοκονιάματα. Αφορά μια σχετικά σύγχρονη κατασκευαστική μέθοδο (παραδείγματά της πρωτοεμφανίστηκαν το 1995), η οποία προσπαθεί να αποδώσει στην τεχνική μια τυποποίηση, με σκοπό τη μαζική παραγωγή.



3.1. Φυσικές Ιδιότητες

Ξεκινώντας, θα αναλυθούν οι χαρακτηριστικές φυσικές ιδιότητες του υλικού, οι οποίες είναι:

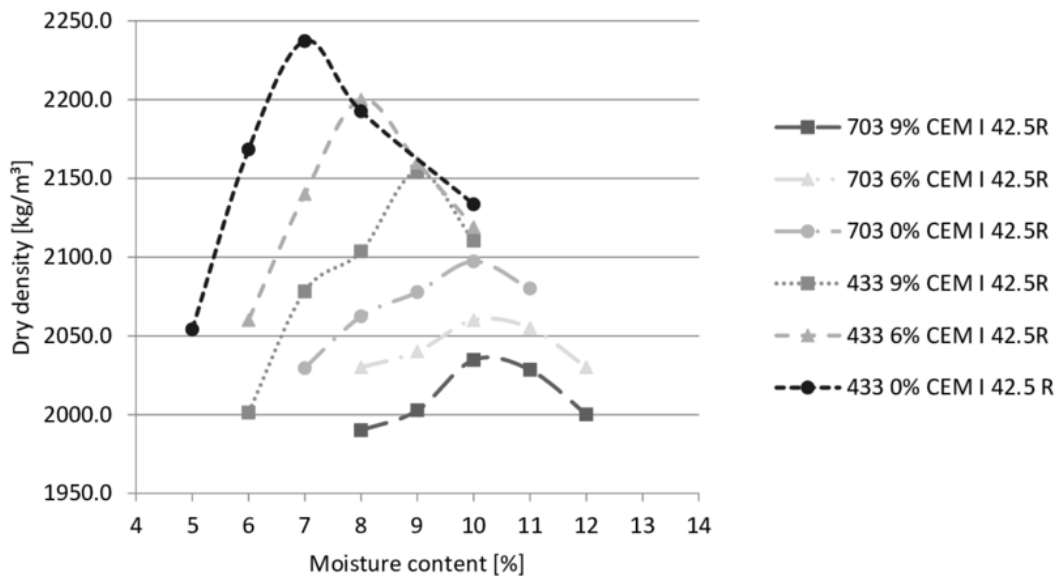
- Η πυκνότητα, η οποία αποτελεί ένα χαρακτηριστικό μέγεθος και επηρεάζει όλα τα υπόλοιπα.
- Η θερμική συμπεριφορά, η οποία αφορά στη δυνατότητα του υλικού να διατηρεί ή όχι τη θερμότητα στο εσωτερικό του, αλλά και πόσο εύκολα τη διαδίδει σε άλλα μέσα. Χαρακτηριστικά μεγέθη που εξυπηρετούν την ανάλυση είναι ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας λ , η θερμοπερατότητα U , η θερμοχωρητικότητα C και η διαχυτότητα θερμότητας a του υλικού.
- Η συμπεριφορά κατά τη διάρκεια πυρκαγιάς, η οποία αφορά τον συντελεστή πυραντίστασης (δυνατότητα διατήρησης των ιδιοτήτων κατά την διάρκεια πυρκαγιάς).
- Η συμπεριφορά στον ήχο, που θα μελετηθεί σε σχέση με την ηχομείωση του υλικού.
- Η συμπεριφορά στην υγρασία, η οποία αφορά την αλληλεπίδραση των στοιχείων από rammed earth με την περιβαλλοντική υγρασία.

3.1.1. Πυκνότητα

Η πυκνότητα ενός στοιχείου από rammed earth, είναι ένας από τους σημαντικότερους συντελεστές μετρήσεως, καθώς η ίδια θα καθορίσει τις υπόλοιπες φυσικές και μηχανικές ιδιότητες του στοιχείου. Συγκεκριμένα, μελέτες που έχουν γίνει σε διάφορα ήδη κατασκευασμένα κτήρια παγκοσμίως, δείχνουν ότι η κατάλληλη πυκνότητα ενός τυπικού τοιχίου συμπίεσμένου χώματος κυμαίνεται στα:

$$\rho = 1.700 - 2.200 \text{ kg/m}^3$$

Η πυκνότητα αυτή υπολογίζεται όταν ο τοίχος έχει ξηραθεί και είναι έτοιμος για αξιοποίηση, οπότε ορίζεται ως ξηρά πυκνότητα ή dry density, όμως για την επίτευξη των κατάλληλων τιμών πυκνότητας, είναι αναγκαία μια κατάλληλη εσωτερική υγρασία μείγματος, ώστε το αποτέλεσμα του τοίχου να μην εμφανίσει ρωγμές κατά την ξήρανση του.



εικ.3.1. Διάγραμμα που δείχνει τη σχέση εμπριεχόμενης υγρασίας και ξηράς πυκνότητας στοιχείων NRE. Οι διαφορετικοί συμβολισμοί χαρακτηρίζουν διαφορετικά μείγματα χώματος. (Narloch, Piotr, Wojciechowski, «Assessing Cement Stabilized Rammed Earth Durability in A Humid Continental Climate», 2020).



3.1.2. Συμπεριφορά στη θερμότητα

Η θερμική συμπεριφορά διαμορφώνεται από μια σειρά βασικών και παράγωγων ιδιοτήτων, πολλές από τις οποίες εξαρτώνται και από την πυκνότητα. Αρχικά, πρέπει κανείς να αναλογιστεί τη θερμική διαστολή/συστολή του υλικού, δηλαδή την ογκομετρική διαφορά που προκύπτει στο δομικό στοιχείο, όταν αυτό υπόκειται σε ιδιαίτερες θερμοκρασιακές αλλαγές. Τοίχοι από συμπιεσμένο χώμα, διατηρούν μια τυπική θερμοκρασία γύρω στους 20-25°C, οπότε θεωρείται μια τυπική σταθερή τιμή θερμοκρασίας 22 °C για την λήψη των δεδομένων.

Οι ιδιότητες που χαρακτηρίζουν τη θερμική συμπεριφορά δομικών στοιχείων από συμπιεσμένο χώμα είναι:

- **Η θερμική αγωγιμότητα** (λ), η οποία είναι η ικανότητα των υλικών στο να επιτρέπουν τη διέλευση της θερμότητας μέσω της μάζας τους. Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας λ εκφράζει το ποσό θερμότητας Q που διέρχεται από επιφάνεια 1 m^2 του υλικού και πάχους 1 μέτρου σε μονάδα χρόνου (συνήθως ώρας) όταν η διαφορά των επιφανειών είναι 1°C . Ο συντελεστής αυτός επηρεάζεται άμεσα από την πυκνότητα, έτσι για $\rho = 1700 \text{ kg/m}^3$ τότε $\lambda = 0,81 \text{ W/mK}$, ενώ για $\rho = 2000 \text{ kg/m}^3$ τότε $\lambda = 1,60 \text{ W/mK}$ (σύνηθες εύρος τιμών λ).
- **Η θερμοπερατότητα**, δηλαδή ο βαθμός κατά τον οποίο ένα δομικό στοιχείο μπορεί να μεταφέρει θερμότητα από τη μια επιφάνεια του στην άλλη. Η τιμή για στοιχεία rammed earth ανέρχεται στα $U = 1.9-2 \text{ W/m}^2\text{K}$ (για στοιχείο πάχους 300mm), ενώ, για λόγους σύγκρισης, αναφέρεται ότι η μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή για τοίχους για τη Β' κλιματική ζώνη της Ελλάδας είναι $0,45 \text{ W/m}^2\text{K}$. Ενώ, παράγωγο της τιμής αυτής είναι η θερμική αντίσταση του στοιχείου, όπου ισχύει $R = 0.35-0.70 \text{ m}^2\text{K/W}$ ($R=1/U$), μέγεθος το οποίο δείχνει την αντίσταση του στοιχείου σε θερμικές μεταβολές.
- **Η θερμοχωρητικότητα**, δηλαδή το ογκομετρικό ποσό θερμικής ενέργειας σε J που δύναται να διατηρήσει ένα δομικό στοιχείο που θερμαίνεται, όταν η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των δύο επιφανειών του είναι ακριβώς 1°C . Για δομικά στοιχεία rammed earth, η τιμή αυτή είναι $C = 1830 \text{ J/m}^3^\circ\text{C}$ ή 0.508 Wh/m^3
- **Η διαχυτότητα**, η οποία αφορά τον βαθμό εξάπλωσης της θερμότητας στο εσωτερικό ενός δομικού στοιχείου ($\alpha = \lambda/\rho c$), όπου για στοιχεία συμπιεσμένου χώματος προκύπτει για $\rho = 2300 \text{ kg/m}^3$ ισχύει $\alpha = 7,8e-7$ ή $7,8 \times 10^{-7} \text{ m/s}^2$.

Ιδιότητα	Σύμβολο	Μονάδα μέτρησης	Τιμή	Πηγή
Πυκνότητα	ρ	kg/m^3	1.700-2.200	Maniatidis, Walker, 2003: 12-13
Θερμική αγωγιμότητα	λ	W/m.K	0,81-1,60	Daniela Ciancio, Christopher Beckett, 2015: 36
Θερμοπερατότητα	U	$\text{W/m}^2\text{K}$	1,9-2	Vasilios Maniatidis, Peter Walker, 2003: 19-20
Θερμοχωρητικότητα	C	$\text{J/m}^3^\circ\text{C}$	1830	Vasilios Maniatidis, Peter Walker, 2003: 19-20
Διαχυτότητα	α	m/s^2	7,8e-7	Ranime El Nabouch, 2016: 16

πιν.3.1. Πίνακας που παρουσιάζει τις βασικές ιδιότητες του rammed earth που αφορούν τη συμπεριφορά του στη θερμότητα και οι τιμές που προκύπτουν με βάση τις πηγές (ιδία επεξεργασία).



Από τα παραπάνω δεδομένα, μπορούν να ληφθούν διάφορα συμπεράσματα για τις δυνατότητες των στοιχείων rammed earth. Αρχικά, παρατηρώντας τον συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας αλλά και τη θερμοπερατότητα, είναι φανερό ότι παρά την υψηλή πυκνότητα του υλικού, το ίδιο μεταφέρει γρήγορα τη θερμότητα που λαμβάνει (σύγκριση με τα ελληνικά δεδομένα θα διατυπωθεί στο κεφάλαιο 7 των συμπερασμάτων). Ωστόσο, το υλικό χαρακτηρίζεται επίσης από υψηλή τιμή θερμοχωρητικότητας, γεγονός που συνεπάγεται ότι κατά τη θέρμανση του στοιχείου rammed earth, το ίδιο δύναται να διατηρήσει μακροπρόθεσμα την ενέργεια που συγκεντρώνεται στον πυρήνα του.

3.1.3. Συμπεριφορά κατά τη διάρκεια πυρκαγιάς

Η συμπεριφορά του υλικού στη φωτιά, αφορά τη δυνατότητα του υλικού να διατηρεί τις χαρακτηριστικές του ιδιότητες, κατά τη διάρκεια δυσμενών συνθηκών πυρκαγιάς. Ένα σημαντικό μέγεθος που καθορίζει τη συμπεριφορά έναντι της φωτιάς είναι ο δείκτης πυραντίστασης, ο οποίος αντιστοιχεί στη χρονική διάρκεια κατά την οποία το δομικό στοιχείο, όταν υποβάλλεται σε μια προδιαγεγραμμένη θερμική και μηχανική φόρτιση, ικανοποιεί συγκεκριμένα κριτήρια θερμικής και μηχανικής συμπεριφοράς. Τα σημαντικότερα κριτήρια τα οποία μελετώνται για τον προσδιορισμό του συντελεστή πυραντίστασης είναι (σύμφωνα με τον διεθνή κανονισμό EN 13501-2):

- **R - Ευστάθεια ή φέρουσα ικανότητα** (load bearing capacity). Η ικανότητα ενός φέροντος δομικού στοιχείου να αντέχει μηχανικές δράσεις, ενώ είναι εκτεθειμένο σε φωτιά σε μια ή περισσότερες πλευρές, χωρίς απώλεια της δομικής του ευστάθειας - ικανότητας.
- **E - Ακεραιότητα** (integrity). Η ικανότητα ενός διαχωριστικού δομικού στοιχείου, όταν εκτίθεται σε φωτιά στη μία του πλευρά, να μην επιτρέπει τη διέλευση φλογών, θερμών αερίων και καπνού, αποτρέποντας την εμφάνισή τους στη μη εκτεθειμένη του πλευρά.
- **I - Θερμομονωτική ικανότητα** (thermal insulation). Η ικανότητα ενός διαχωριστικού δομικού στοιχείου, όταν εκτίθεται σε φωτιά στη μία του πλευρά, να περιορίζει την άνοδο της θερμοκρασίας της μη εκτεθειμένης πλευράς εντός καθορισμένων ορίων.
- **W - Περιορισμός θερμικής ακτινοβολίας** (limitation of radiation). Η ικανότητα ενός δομικού στοιχείου όταν εκτίθεται στη φωτιά στη μία του πλευρά να περιορίζει την πιθανότητα μετάδοσής της θερμικής ακτινοβολίας, είτε διαμέσου του ίδιου του στοιχείου είτε από τη μη εκτεθειμένη του επιφάνεια στα γειτονικά υλικά.
- **M - Μηχανική αντοχή** (mechanical resistance). Η ικανότητα ενός δομικού στοιχείου να αντιστέκεται στην επιρροή μιας προκαθορισμένης δύναμης πρόσκρουσης λόγω δομικής αστοχίας ενός άλλου στοιχείου.
- **C - Ικανότητα αυτοσφράγισης** (self closure). Η ικανότητα δομικών στοιχείων (θυρών ή ρολών) να κλείνουν πλήρως και αυτόματα χωρίς ανθρώπινη παρέμβαση, ανεξαρτήτως διαθεσιμότητας παροχής ηλεκτρικής ενέργειας.
- **S- Διαρροή καπνού** (smoke leakage). Η ικανότητα ενός δομικού στοιχείου να μειώνει ή να περιορίζει τη διόδο θερμών αερίων ή καπνού από τη μία πλευρά του στην άλλη.

Με λίγα λόγια, προσμετράται η χρονική δυνατότητα του υλικού να συνεχίσει να καλύπτει όλα τα παραπάνω κριτήρια αντοχής. Τυπικά δομικά στοιχεία συμπίεσμένου χώματος, έπειτα από διάφορες μετρήσεις που διεξήχθησαν παγκοσμίως, έφτασαν σε τιμές πυραντίστασης έως και 4 ωρών (για τυπικό πάχος τοίχου 30 εκατοστών) (Niroumand, 2013:435), γεγονός ιδιαίτερα ικανοποιητικό και βιώσιμο για το υλικό αυτό. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον αποτελεί το γεγονός ότι η τιμή αυτή δεν μεταβάλλεται έπειτα από τη σταθεροποίηση του δομικού στοιχείου (SRE).



3.1.4. Συμπεριφορά απέναντι στον ήχο

Η συμπεριφορά των δομικών στοιχείων σε σχέση με τον ήχο αφορά κυρίως τη δυνατότητα μείωσης της έντασης του ήχου R . Οι διάφορες κατηγορίες rammed earth δεν έχουν μελετηθεί επαρκώς ως προς τη δυνατότητα ηχομείωσης τους. Ωστόσο, τυπικά δομικά στοιχεία από rammed earth έχουν τιμές $R = 57-58,5$ dB (για πάχος τοίχου 30 εκατοστών), ενώ παράλληλα υποθέσεις τίθενται για την παραγόμενη αντήρηση των δομικών στοιχείων, σύμφωνα με τις οποίες χάρις στο πορώδες του υλικού, παράγει ιδιαίτερα λιγότερη ηχώ απ' ό τι ένα συμβατικό δομικό στοιχείο (Avila, Puertas, Gallego, 2020: 8). Πάντως, η παραγόμενη τιμή είναι παραπάνω από επαρκής για την αξιοποίηση στοιχείων συμπιεσμένου χώματος σε ευρύτερο πεδίο, καθώς για παράδειγμα ο οικοδομικός κανονισμός της Αγγλίας θέτει ως ελάχιστο όριο τιμής R τα 40 dB για εσωτερικούς τοίχους (Gallipoli, Bruno, Perlot, Mendes, 2017:9).

3.1.5. Συμπεριφορά απέναντι στην υγρασία

Ιδιαίτερη σημασία είναι αναγκαίο να δοθεί στη συμπεριφορά των δομικών στοιχείων συμπιεσμένου χώματος στην υγρασία. Υπάρχουν διάφορες μορφές υγρασίας: νερό από βροχή, ανιούσα υγρασία εδάφους, υδρατμοί (αέρια μορφή νερού) και εμπειριεχόμενη υγρασία των στοιχείων, η οποία προκύπτει από το ποσοστό νερού που βρίσκεται στο στοιχείο πριν και μετά την ξήρασή του. Ως παράγοντας η υγρασία παίζει πρωταρχικό ρόλο στη μελέτη του υλικού, για παράδειγμα λόγω της εμπειριεχόμενης υγρασίας σε σχέση με την πυκνότητα του υλικού, λόγω της επιρροής της στο εργάσιμο του υλικού, ή ακόμα και ως παράγοντας διάβρωσης του υλικού. Επομένως, λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, μελετάται το υλικό ως προς το πορώδες, την υδροαπορροφητικότητα, την υδατοπερατότητα και την αντίσταση στην απορρόφηση υδρατμών.

Πορώδες

Πορώδες ενός υλικού, αποτελεί ο καθαρός δείκτης θ , ο οποίος συμβολίζει τον κενό όγκο ως προς τον μοναδιαίο όγκο ενός υλικού. Το πορώδες του υλικού επηρεάζεται άμεσα από την πυκνότητα του εκάστοτε υλικού, καθώς χαμηλή πυκνότητα συνεπάγεται αύξηση του πορώδους (αύξηση των πιθανών κενών αέρα στο εσωτερικό του υλικού). Αποτελεί ένα χαρακτηριστικό μέγεθος το οποίο καθορίζει τον όγκο στον οποίο δύναται να υπάρξει νερό, μέσα σε ένα κυβικό μέτρο ενός υλικού. Όσον αφορά το συμπιεσμένο χώμα, η τιμή αυτή ανέρχεται στο:

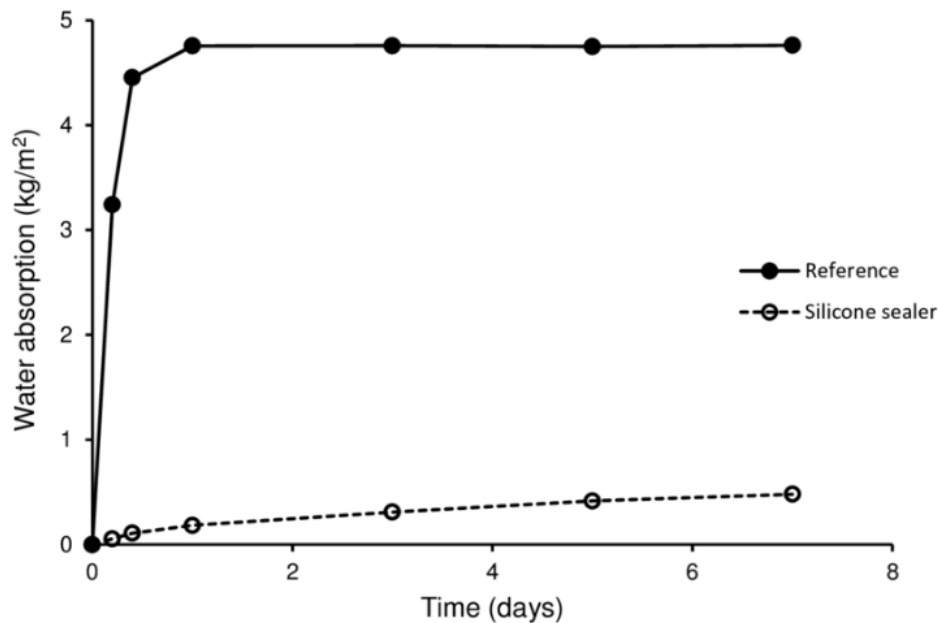
$$\theta = 0,347, \text{ ή περίπου το } 35\% \text{ του όγκου σε } 1 \text{ m}^3 \text{ συμπιεσμένου χώματος (για } \rho = 1,70-1,75)$$

Από το παραπάνω μέγεθος, γίνεται αντιληπτό ότι εξαιτίας του υψηλού πορώδους του υλικού, υπάρχει μεγάλος όγκος «κενού», ο οποίος μπορεί να καλυφθεί από νερό, και άρα κατ' επέκταση το υλικό αυτό δύναται να συγκεντρώσει υψηλά μεγέθη μάζας νερού στον όγκο του. Το παραπάνω στοιχείο αποτελεί βάση των επόμενων χαρακτηριστικών της συμπεριφοράς του σε σχέση με την εξωτερική υγρασία.

Υδατοαπορροφητικότητα

Η υδροαπορροφητικότητα αφορά τη δυνατότητα ενός υλικού να απορροφά μάζα νερού, ορισμένης επιφάνειας σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Έχοντας υπόψη τα παραπάνω δεδομένα πορώδους, είναι λογικό το γεγονός ότι η υδροαπορροφητικότητα των στοιχείων συμπιεσμένου χώματος είναι ιδιαίτερα υψηλή. Με το δεδομένο αυτό, αναγνωρίζονται οι συνέπειες στη λειτουργία και την αντοχή του υλικού. Συγκεκριμένα, η υψηλή απορρόφηση του νερού συνεπάγεται ρευστοποίηση του μείγματος, μείωση των στατικών αντοχών της κατασκευής αλλά και δημιουργία ρηγματώσεων στην επιφάνειά του, εάν η απορροφούμενη υγρασία εξατμιστεί από το στοιχείο. Φυσικά, με την αξιοποίηση στεγανωτικών και σφραγιστικών παραγόντων, ένα στοιχείο rammed earth μπορεί να προστατευθεί

από την περιβαλλοντική υγρασία, καθώς μειώνεται σημαντικά ο δείκτης υδροαπορροφητικότητάς του. Στην εικόνα 3.2. παρουσιάζεται ένα διάγραμμα, που υπολογίζει την υδροαπορροφητικότητα σε σχέση με τον χρόνο για τυπικό στοιχείο rammed earth πάχους 40 εκατοστών, παρουσία και μη, στεγανοποιητικού παράγοντα από σιλικόνη (Gallipoli, Bruno, Perlot, Mendes, 2017:11).



εικ.3.2. Διάγραμμα που δείχνει την τιμή υδροαπορροφητικότητας σε συνάρτηση με τον χρόνο, παρουσία και μη, στεγανοποιητικού παράγοντα. (Gallipoli, Domenico, Bruno, Walter, Perlot, Céline, Mendes, «A Geotechnical Perspective of Raw Earth Building», 2017).

Ενδιαφέρουσα παρατήρηση από το παραπάνω διάγραμμα είναι η εκθετική αύξηση της τιμής υδροαπορροφητικότητας του υλικού σε ελάχιστο χρονικό διάστημα, η οποία όμως έπειτα διατηρείται σταθερή. Το παραπάνω φαινόμενο οφείλεται στην εξισορρόπηση της εμπεριεχόμενης υγρασίας του υλικού με την περιβαλλοντική υγρασία. Επίσης, επισημαίνεται το γεγονός ότι είναι χαρακτηριστικά σημαντική η μείωση της τιμής αυτής με τη χρήση τυπικού στεγανοποιητικού παράγοντα, ώστε να μην απορροφάται και να μην χάνεται ποσό νερού κατά τη διάρκεια της ζωής του στοιχείου, με αποτέλεσμα να μην μεταβληθούν οι επιθυμητές τιμές των ιδιοτήτων του.

Υδατοπερατότητα

Οι τοίχοι από rammed earth είναι σημαντικό να μελετώνται ως προς τη διείσδυση του νερού στο εσωτερικό τμήμα τους, καθώς το φαινόμενο αυτό επηρεάζει σημαντικά την αντοχή του στις φυσικές συνθήκες. Έχοντας ως βασικό υλικό κατασκευής το χώμα, η μελέτη ως προς τη διαπερατότητα του νερού στα δομικά στοιχεία καθίσταται δύσκολη, καθώς το υλικό έχει την τάση να ρευστοποιείται κατά την επαφή του με μεγάλες ποσότητες νερού. Έτσι, τυπικές μέθοδοι εξακρίβωσης του μεγέθους υδατοπερατότητας τροποποιήθηκαν, έτσι ώστε να εξακριβωθεί ένα άρτιο εύρος τιμών (Indekeu, Feng, Janssen, Woloszyn, 2019). Στα πλαίσια της παρούσας ερευνητικής εργασίας και με βάση τη βιβλιογραφία που μελετήθηκε δεν μπορούν να παρουσιαστούν συγκεκριμένες τιμές υδατοπερατότητας.

Αντίσταση στη διάχυση υδρατμών

Η αντίσταση στη διάχυση υδρατμών συμβολίζεται με μ και εκφράζει την αντίσταση που παρουσιάζει ένα υλικό δεδομένου πάχους στη δίοδο των υδρατμών (αποτελεί μια καθαρή τιμή χωρίς μονάδα μέτρησης). Ομοιάζει στην υδατοπερατότητα, αλλά εκφράζει την αντοχή στους υδρατμούς, δηλαδή την



αέρια μορφή του νερού. Μετριέται με την τοποθέτηση ενός δοκιμίου πάνω από δοχεία με νερό (και χωρίς παρουσία ενδιάμεσης στρώσης αέρα). Κατά τη μέτρηση άνω του δοχείου χωρίς νερό μετριέται η απορρόφηση υγρασίας από το περιβάλλον και κατά την τοποθέτηση άνω του δοχείου με νερό μετριέται η αντίσταση διέλευσης των υδρατμών από το δοχείο και το δοκίμιο στο εξωτερικό περιβάλλον. Τα στοιχεία από rammed earth εμφανίζουν ιδιαίτερα χαμηλή τιμή $\mu = 9,4-10,6$ (για $\rho \approx 1.700 \text{ kg/m}^3$) (Narloch, Piatkiewicz, Pietruszka, 2021), όταν το οπλισμένο σκυρόδεμα φτάνει τα $\mu = 200^+$. Άρα προκύπτει ότι οι τοίχοι «αναπνέουν» κι έχουν τη δυνατότητα εξισορρόπησης της εσωτερικής σχετικής τους υγρασίας.

Συμπέρασμα όλων των παραπάνω μεγεθών όσον αφορά τη σχέση των στοιχείων rammed earth με την περιβαλλοντική υγρασία είναι το γεγονός ότι εξαιτίας του υψηλού πορώδους του υλικού, το στοιχείο που θα κατασκευαστεί είναι αναγκαίο να προστατευθεί μακροπρόθεσμα από την υγρασία. Αυτό είναι δυνατό να επιτευχθεί είτε με την προσθήκη πρόσμικτων που θα μειώσουν το πορώδες του υλικού, είτε με την επικάλυψη των στοιχείων χρήσει ειδικών βερνικιών ή βαφών. Εκτός των παραπάνω, άλλοι μέθοδοι αποφυγής διάχυσης υγρασίας και νερού στα στοιχεία rammed earth είναι η ανύψωση από το φυσικό έδαφος, οι δημιουργία προεξοχών με σταλαγμούς στις στέγες ή στο δώμα (προστασία από βροχή) κ.ά.

3.2. Μηχανικές ιδιότητες

Για τη σωστή κατανόηση των χαρακτηριστικών του rammed earth δεν αρκούν μόνο οι φυσικές του ιδιότητες. Αν και οι ίδιες καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό τις μηχανικές ιδιότητες που αναφέρονται παρακάτω, είναι λογικό ότι πρέπει να αξιολογηθούν καταρχάς ποσοτικά οι τιμές τους, ώστε σύμφωνα με τους οικοδομικούς κανονισμούς της εκάστοτε χώρας, να γίνει αντιληπτό το αν καλύπτονται οι απαραίτητες προϋποθέσεις αντοχής και ανθεκτικότητας δομικών στοιχείων από συμπιεσμένο χώμα. Είναι επίσης σημαντικό να αναφερθεί ότι το rammed earth από τη φύση του δύσκολα μπορεί να τυποποιηθεί και να αποκτήσει σταθερά μηχανικά χαρακτηριστικά, καθώς παίζουν ρόλο πολλοί παράγοντες από τους οποίους λίγοι μπορούν να είναι διαχειρίσιμοι. Ωστόσο, πολλές χώρες όπως η Νέα Ζηλανδία, η Αυστραλία, η Αγγλία κ.ά. έχουν προσπαθήσει να τυποποιήσουν ή έστω να περιορίσουν το εύρος τιμών των μηχανικών χαρακτηριστικών του rammed earth.

Για την κατάλληλη μελέτη των μηχανικών ιδιοτήτων του συμπιεσμένου χώματος στην εργασία αυτή, είναι αναγκαίο να αναφερθεί ότι θα γίνει ανάλυση του φυσικού συμπιεσμένου χώματος NRE, καθώς ο τύπος αυτός συναντάται περισσότερο στη βιβλιογραφία και επαρκεί για τους στόχους της παρούσας εργασίας. Η ανάλυση και κατανόηση των ιδιοτήτων δεν αφορά την αναλυτική και ποσοτική κατανομή όλων των μορφών του συμπιεσμένου χώματος, αλλά μια κριτική αξιολόγηση των τυπικών μεγεθών και σύγκριση αυτών με τα σημερινά δεδομένα και ανάγκες αντοχών και λειτουργικότητας.

3.2.1. Μηχανικά χαρακτηριστικά υπό την επίδραση στατικών και δυναμικών δράσεων

Η μηχανική συμπεριφορά υπό την δράση κάθε τύπου καταπονήσεων αποτελεί χαρακτηριστικό κομμάτι της μελέτης των δομικών στοιχείων, ανεξαρτήτως υλικού. Επομένως, η συμπεριφορά των κατασκευών υπό στατικές και δυναμικές καταπονήσεις, αποτελεί αναπόσπαστο τμήμα της μελέτης, και εξυπηρετεί τη διαμόρφωση ουσιαστικής αντίληψης ως προς τα πλεονεκτήματα, αλλά και τα μειονεκτήματα ενός υλικού ή μιας κατασκευαστικής μεθόδου. Έχοντας, επομένως, ως βάση τις φυσικές ιδιότητες του εν λόγω υλικού, μπορούν μέσα από πειραματικές μεθόδους σε υπάρχουσες κατασκευές ή δοκίμια να ληφθούν τιμές, οι οποίες θα εξακριβώσουν τις δυνατότητες των στοιχείων από rammed earth.



Αντοχή σε θλίψη

Όσον αφορά τα υλικά με χαμηλή συνοχή μείγματος, τα οποία μάλιστα είναι χυτά και επηρεάζονται σημαντικά από την τιμή της πυκνότητας τους, έτσι και στα στοιχεία από rammed earth ο σημαντικότερος παράγοντας μελέτης αποτελεί η αντοχή στοιχείων σε θλιπτικές τάσεις. Γενικά έχει παρατηρηθεί ότι οι περισσότερες μελέτες που έχουν διεξαχθεί παγκοσμίως πραγματοποιούνται με τη βοήθεια δοκιμών, δηλαδή δεν μελετάται η αντοχή μιας συνολικής κατασκευής αφού ολοκληρωθεί. Ωστόσο, τα δοκίμια που χρησιμοποιούνται είναι επαρκή ώστε να γίνει αντιληπτή η δυνατότητα αξιοποίησης του υλικού. Αρχικά είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι στην αντοχή σε θλίψη, αλλά και στις υπόλοιπες στατικές δυνάμεις, οι ιδιότητες που καθορίζουν σημαντικά την τελική τιμή είναι:

- η ξηρά πυκνότητα,
- η εμπειριεχόμενη υγρασία και
- το μείγμα χώματος (συγκεκριμένα η αναλογία πηλού στην περίπτωση NRE και τσιμέντου στην περίπτωση CSRE).

Φυσικά, καθοριστικό παράγοντα των μελετών αυτών αποτελούν και οι εργαστηριακές συνθήκες, όπως το μέγεθος του δείγματος, η ενέργεια συμπίεσης και άλλα. Ωστόσο, η επιρροή των συνθηκών αυτών είναι ακόμα ασαφής σε σχέση με την αντοχή σε θλίψη, οπότε και για την παρούσα εργασία θα θεωρηθούν αμελητέες (Avila, Puertas, Gallego, 2021:4).

Στη συνέχεια, δίνεται ενδεικτικός πίνακας τιμών για διάφορα δείγματα φυσικού rammed earth και τις παραγόμενες τιμές θλιπτικής αντοχής, σε σχέση με την πυκνότητά τους. Είναι σημαντικό, ότι γίνεται σύγκριση ανάμεσα στην τιμή ξηράς πυκνότητας και θλιπτικής αντοχής, ενώ παράλληλα η εμπειριεχόμενη υγρασία εμφανίζει μεγάλο και ακανόνιστο εύρος τιμών, που όμως σε κάθε περίπτωση μειώνεται ευλόγως όσο μεγαλώνει η τιμή της ξηράς πυκνότητας.

Δείγμα (cm)	Ξηρά πυκνότητα (ρ) (kg/m ³)	% Εμπειριεχόμενης υγρασίας (MC)	Θλιπτική αντοχή (f _c) (Mpa)
Ø4 , h = 8	1.649	21	1,04
25 x 25 x 50	1.878	12	1,15
40 x 40 x 65	1.900	11	1,00
30 x 30 x 60	1.920	13	0,81
Ø7.5 , h = 15	1.946	12	2,23
Ø10 , h = 20	2.080	8	1,90
55 x 55 x 20	2.100	10	1,26

πιν.3.2. Πίνακας που παρουσιάζει τη θλιπτική αντοχή δοκιμών rammed earth. (Avila, Puertas, Gallego, «Characterization of the mechanical and physical properties of unstabilized rammed earth: A review», 2021, σελ.4).

Από τα παραπάνω προκύπτει μια μέση τιμή θλιπτικής αντοχής $f_c = 1,5-1,6$ MPa, για $\rho = 1.942$ kg/m³ και εμπειριεχόμενο ποσοστό υγρασίας 12%. Χρησιμοποιώντας ως τιμές αναφοράς διεθνείς κανονισμούς, που θέτουν το κατώτατο όριο θλιπτικής αντοχής για τυπικά χωμάτινα δομικά στοιχεία, γίνεται αντιληπτή η δυνατότητα αξιοποίησης του υλικού. Συγκεκριμένα, σύμφωνα με τον κώδικα της Νέας Ζηλανδίας NZS 4297-4298 ορίζεται ελάχιστο όριο $f_c \geq 1,30$, ανεξαρτήτως πυκνότητας, πράγμα που οδηγεί σε ικανοποιητική θλιπτική αντοχή.

Αντοχή σε εφελκυσμό και διάτμηση

Η μέθοδος συμπιεσμένου χώματος παράγει ιδιαίτερα χαμηλά αποτελέσματα αντοχής σε εφελκυσμό και διάτμηση. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στην ψαθυρή φύση του υλικού, η οποία δεν του επιτρέπει να παραμορφωθεί κατάλληλα, αλλά αστοχεί όταν παραλαμβάνει τις παραπάνω στατικές δυνάμεις. Παράλληλα, το φαινόμενο αυτό της αστοχίας ενισχύεται με την αύξηση της εμπειριεχόμενης

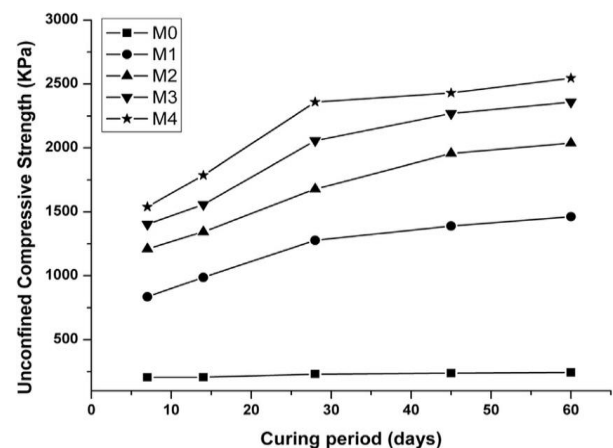
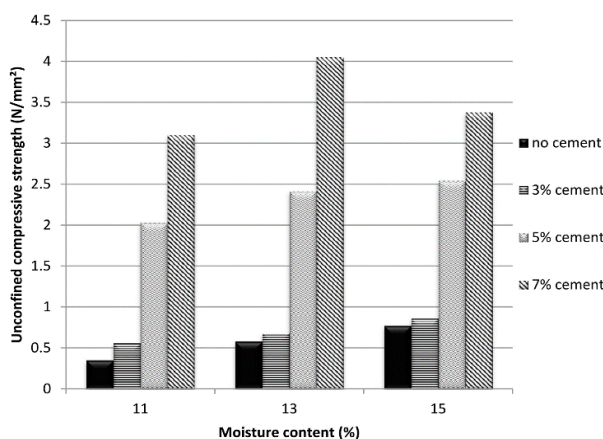
υγρασίας του υλικού (Avila, Puertas, Gallego, 2021:5). Παρ' όλ' αυτά, μελέτες διεξάγονται ώστε να υπολογίσουν την τιμή των αντοχών αυτών.

Ενδεικτικές τιμές αντοχής σε εφελκυσμό f_t τείνουν κοντά στο 10% της θλιπτικής του αντοχής. Συγκεκριμένα, το εύρος τιμών $f_t = 0,10-0,35$ MPa, ιδιαίτερα χαμηλό για τις τυπικές ανάγκες κτηρίου, αρκετά σημαντικό όμως, καθώς είναι αντίστοιχο με αυτό που συναντάται επίσης στην περίπτωση των τοιχοποιιών (Μιλτιάδου, 2021 Διδακτικές σημειώσεις μαθήματος Ε.Θ. Δομικής Μηχανικής 7B, Σχέδιο Κανονισμού Δομητικών Επεμβάσεων Τοιχοποιίας, ΟΑΣΠ 2021). Ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι σύμφωνα με μελέτη, κατά την οποία δείγματα συμπιεσμένου χώματος καταπονήθηκαν σε διαφορετικές διευθύνσεις υπό τις ίδιες εφελκυστικές δυνάμεις, έφτασαν στο συμπέρασμα ότι το υλικό αυτό, με συγκεκριμένη διαμόρφωση μείγματος, είναι ισότροπο υλικό (διατηρεί σταθερές τιμές μηχανικών ιδιοτήτων, ανεξάρτητα από τη διεύθυνση καταπόνησης) (Avila, Puertas, Gallego, 2021:6).

Παράλληλα, όσον αφορά την αντοχή σε διάτμηση, εμφανίζονται ιδιαίτερα χαμηλές τιμές, με αποτέλεσμα να θεωρείται σχεδόν ίση με μηδέν σε μερικούς κτηριολογικούς κανονισμούς (π.χ. Australian Handbook) ή αμελητέα/μη αξιοποιήσιμη (0,035 MPa σύμφωνα με τον κανονισμό της Νέας Ζηλανδίας NZS 4297-98). Το κύριο κριτήριο επιρροής της τιμής διατμητικής αντοχής φαίνεται να είναι η εμπριεχόμενη υγρασία του μείγματος, καθώς σύμφωνα με πειράματα εμφανίστηκε 75% πτώση της διατμητικής αντοχής του υλικού, όταν η εμπριεχόμενη πυκνότητα μεταβλήθηκε από 0,00% σε 4,20% (Avila, Puertas, Gallego, 2021:6).

Καταληκτικά, ακόμα και αν οι τυπικές τιμές αρχικά δεν καλύπτουν επαρκώς τις ανάγκες που θέτουν οι κανονισμοί, είναι δυνατό με την τροποποίηση του αρχικού μείγματος να βελτιωθούν σημαντικά οι αποδόσεις των στοιχείων. Για παράδειγμα, η σταθεροποίηση του μείγματος επιδρά έντονα στις στατικές αντοχές του υλικού. Συγκεκριμένα, παίρνοντας ως παράδειγμα τη σταθεροποίηση με τσιμέντο, η διαφορά γίνεται εμφανής. Άλλος ένας παράγοντας που επηρεάζει σημαντικά τις τιμές των αντοχών είναι η χρονική περίοδος σταθεροποίησης του μείγματος στο καλούπι, καθώς όσο περισσότερος καιρός δίνεται στο υλικό να διαμορφωθεί φυσικά, τόσο πιο βελτιωμένες παρατηρούνται οι τιμές.

Τα παραπάνω τεκμηριώνονται στα διαγράμματα των εικόνων 3.3. και 3.4., σύμφωνα με τα οποία με σταθερές συνθήκες υγρασίας, η προσθήκη παράγοντα τσιμεντοκονίας και η αύξηση της περιόδου σταθεροποίησης επηρεάζουν δραματικά τις αντοχές σε στατικές δυνάμεις.



εικ.3.3. Πίνακας που παρουσιάζει τιμές θλιπτικής αντοχής σε σταθερές συνθήκες υγρασίας, παρουσία διάφορων αναλογιών τσιμέντου (αριστερά).

εικ.3.4. Πίνακας που παρουσιάζει τιμή θλιπτικής αντοχής σε σχέση με την αύξηση της περιόδου σταθεροποίησης του μείγματος (δεξιά).

(ανακτήθηκαν από: <https://ascelibrary.org/doi/full/10.1061/%28ASCE%29AE.1943-5568.0000281>, στις 10/2/22).



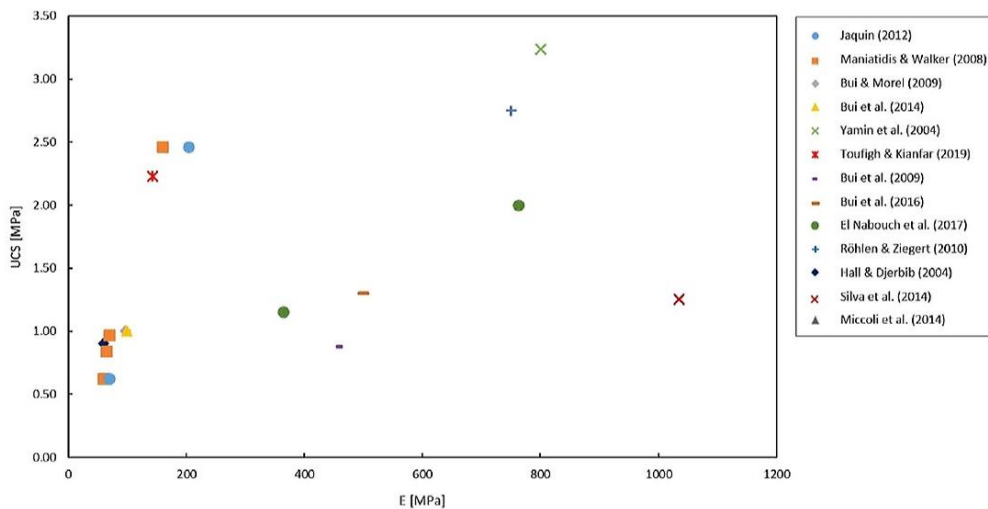
3.2.2. Μέτρο ελαστικότητας Young

Οι μελέτες που διεξήχθησαν για τον υπολογισμό των τιμών υπό στατικών επιδράσεων, παρέχουν αποτελέσματα και για τον δείκτη ελαστικότητας E του υλικού. Παρ' όλ' αυτά, η μελέτη του μέτρου Young, είναι βαθύτατα συνδεδεμένη όχι μόνο με τη σύσταση και τα χαρακτηριστικά του μείγματος, αλλά και με τις συνθήκες διεξαγωγής του πειράματος. Με λίγα λόγια, το σχήμα και το μέγεθος του δείγματος, η περιβαλλοντική υγρασία του χώρου διεξαγωγής κ.ά. επηρεάζουν σημαντικά τα αποτελέσματα (Avila, Puertas, Gallego, 2021:5). Έτσι, εμφανίζεται ως αποτέλεσμα ενός εύρους τιμών, το οποίο, εξαιτίας του παραπάνω γεγονότος, δεν εξυπηρετεί στην αποσαφήνιση μιας εξακριβωμένης τιμής μέτρου Young.

Θεωρητικά, με την αύξηση της αντοχής σε θλίψη εμφανίζεται και μια ανάλογη αύξηση του μέτρου Young, όπως με όλα τα ψαθυρά υλικά. Παρόλα αυτά, το εύρος τιμών του μέτρου E δεν επιτρέπει τον αντίστοιχο συσχετισμό των δύο αυτών μηχανικών ιδιοτήτων, όπως γίνεται και στο σκυρόδεμα (Avila, Puertas, Gallego, 2021:5). Παρακάτω, δίνεται πίνακας τιμών για το μέτρο ελαστικότητας σε σχέση με τα χαρακτηριστικά πυκνότητας και εμπειροχόμενης υγρασίας του μείγματος, αλλά και διάγραμμα που συσχετίζει την τιμή της αντοχής σε θλίψη και του μέτρου ελαστικότητας Young.

Δείγμα (cm)	Ξηρά πυκνότητα (ρ) (kg/m ³)	% Εμπειροχόμενης υγρασίας (MC)	Μέτρο ελαστικότητας (E) (Mpa)
Ø4 , h = 8	1.649	21	103
Ø10 , h = 20	1.850	13	160
25 x 25 x 50	1.878	12	365
40 x 40 x 65	1.900	11	100
30 x 30 x 60	1.920	13	65
Ø7.5 , h = 15	1.946	12	34
55 x 55 x 20	2.100	10	1.034

πιν.3.3. Πίνακας που παρουσιάζει το μέτρο ελαστικότητας δοκιμών rammed earth. (Avila, Puertas, Gallego, «Characterization of the mechanical and physical properties of unstabilized rammed earth: A review», 2021, σελ.4).



εικ.3.5. Διάγραμμα που παρουσιάζει τις τιμές του μέτρου ελαστικότητας σε σχέση με τη θλιπτική αντοχή. (Avila, Puertas, Gallego, «Characterization of the mechanical and physical properties of unstabilized rammed earth: A review», 2021, σελ.4).

Εξαιτίας της ποικιλομορφίας των χαρακτηριστικών και της έλλειψη ενδεικτικών τιμών, είναι πρακτικά αδύνατη μια πιθανή τυποποίηση του υλικού, τουλάχιστον όσο συνεχίζει η έλλειψη εκτενέστερων και βαθύτερων μελετών της τεχνικής του rammed earth. Παρ' όλ' αυτά, λόγω του εύρους



τιμών υπάρχει η δυνατότητα παραγωγής ενός μείγματος, το οποίο με το κατάλληλο ερευνητικό υπόβαθρο μπορεί να καλύψει πολλαπλές στατικές ανάγκες, υψηλές ή χαμηλές, αξιοποιώντας ορθά τα πολλαπλά προτερήματα της μεθόδου συμπιεσμένου χώματος.

3.2.3. Αντοχή στον σεισμό

Ένα από τα μεγαλύτερα ζητήματα προς επίλυση κάθε κατασκευής είναι η παραλαβή των δυναμικών τάσεων, που προκαλούνται από μια σεισμική δόνηση, οι οποίες επιδρούν πάνω σε φέροντα στοιχεία. Αυτές οι δυναμικές καταπονήσεις μπορεί να βρίσκονται εντός και εκτός επιπέδου ενός στοιχείου (να επιδρούν δηλαδή κάθετα σε αυτό ή παράλληλα κατά μήκος του), γεγονός που συνεπάγεται τη δημιουργία ισχυρών καταπονήσεων εις βάρος των στοιχείων. Στην περίπτωση των χωμάτινων κατασκευών, εμφανίζεται ιδιαίτερη δυσκολία παραλαβής των τάσεων αυτών, καθώς εξαιτίας της υψηλής μάζας τους, εμφανίζουν μεγάλες δυνάμεις αδράνειας που επιδρούν στο σύνολό τους και παράλληλα χαρακτηρίζονται από μια ιδιαίτερη ακαμψία ως προς τον κατακόρυφο άξονα (El Nabouch, 2016:136-137). Ως αποτέλεσμα του παραπάνω, κατά τη διάρκεια ισχυρών σεισμικών δυνάμεων πάνω στα στοιχεία αυτά, οι πιθανότητες ρηγμάτωσης, ή ακόμα και στατικής αστοχίας είναι ιδιαίτερα υψηλές.

Ωστόσο, όπως αναφέρθηκε και στην ιστορική αναδρομή, είναι εμφανής η αντοχή τους σε σεισμικές καταπονήσεις, καθώς κτίσματα από συμπιεσμένο χώμα έχουν διατηρηθεί στον χρόνο, παρά την επίδραση ισχυρών σεισμικών φαινομένων ανά τα χρόνια. Ένας από τους σκοπούς της παρούσας εργασίας είναι να γίνει αντιληπτή η αξία των στοιχείων συμπιεσμένου χώματος, σταθεροποιημένου και μη, ώστε ως μέθοδος να διατηρηθεί και να εξελιχθεί κατά τη σύγχρονη περίοδο, σε οποιαδήποτε χώρα αυτή η μέθοδος θα μπορούσε να είναι βιώσιμη. Μέσα στο φάσμα της βιωσιμότητας βρίσκεται και η αντοχή στις σεισμικές καταπονήσεις, καθώς ασχέτως των αντοχών, υπάρχει υψηλός κίνδυνος αστοχίας κατά τη διάρκεια σεισμού. Στη συνέχεια λοιπόν, γίνεται αναφορά στους τρόπους ενίσχυσης των κατασκευών από rammed earth, έτσι ώστε να αποκτήσουν καλύτερη συμπεριφορά στον σεισμό.

Τρόποι ενίσχυσης της κατασκευής

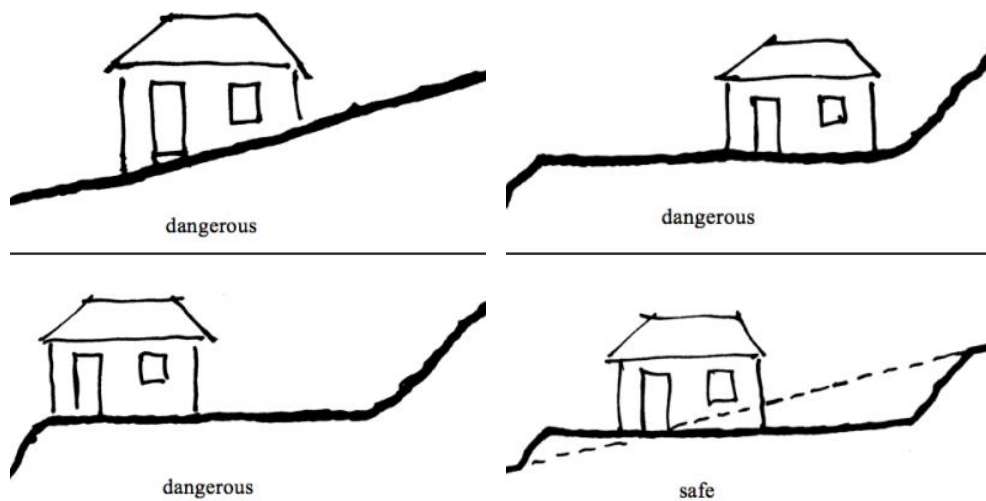
Οι κατασκευές από rammed earth έχουν πολλά πλεονεκτήματα, ωστόσο έχουν και δύο μεγάλες αδυναμίες: την υγρασία και τους σεισμούς. Η προστασία από την υγρασία είναι πλέον εύκολη στην αντιμετώπιση με σύγχρονες επαλειφόμενες τεχνικές και πολύ καλά θεμέλια, σε αντίθεση με τον σεισμό που χρειάζεται προσπάθεια για να αντιμετωπιστεί, πολύ περισσότερο όταν η κατασκευή βρίσκεται σε σεισμογενή περιοχή. Ωστόσο, στις μέρες μας έχουν αναπτυχθεί τεχνικές που περιορίζουν τις συνέπειες ενός σεισμού στις κατασκευές. Σχεδόν βέβαιη είναι η τοποθέτηση οπλισμού με αποτέλεσμα το φαινόμενο αυτό να εξασθενεί, όμως και πάλι για να αντέξει η κατασκευή θα πρέπει να ενισχυθούν όλα τα ευαίσθητα σημεία της. Οι λόγοι κατάρρευσης των κτηρίων είναι οι παρακάτω και αφορούν κτήρια αποκλειστικά κατασκευασμένα με φέροντα οργανισμό από rammed earth (Minke, 2001:12):

- Τα πρέκια και οι ποδιές των παραθύρων έχουν μικρές διαστάσεις που δεν επαρκούν.
- Τα ανοίγματα των θυρών και των παραθύρων είναι πολύ μεγάλα.
- Τα ανοίγματα βρίσκονται πολύ κοντά στις ακμές της κατασκευής.
- Οι τοίχοι έχουν μεγάλο ύψος και μικρό πάχος.
- Η θεμελίωση και γενικότερα η βάση της κατασκευής είναι ελλιπής.
- Η σύνδεση των τοίχων στις γωνίες της κατασκευής είναι ελλιπής.
- Η σύνδεση της τοιχοποιίας με τα θεμέλια και τη στέγη είναι ελλιπής.
- Δεν υπάρχει ικανό οριζόντιο διάζωμα (ξυλοδεσιά ή κάποιου είδους σενάζ).
- Η οροφή και τα ενδιάμεσα πατώματα έχουν μεγάλο βάρος.
- Η δημιουργία πολυώροφων κατασκευών (πάνω από ισόγειο συν έναν όροφο).
- Η κατασκευή είναι τοποθετημένη κοντά σε επικλινές έδαφος που δεν είναι αρκετά σταθερό.

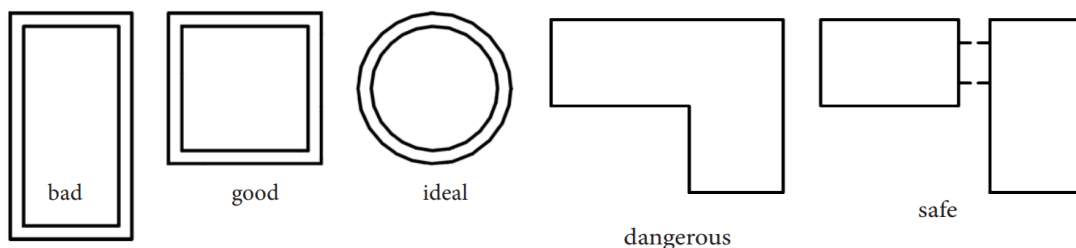
Γίνεται κατανοητό, ότι οι κυριότεροι παράγοντες κατάρρευσης ενός κτηρίου από συμπιεσμένο χώμα σε έναν σεισμό δεν σχετίζονται μόνο με την μηχανική αντοχή του υλικού, αλλά επιπλέον με τον τρόπο κατασκευής, τη σύνδεση των επιμέρους δομικών στοιχείων και την ενίσχυση των ευαίσθητων σημείων του. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι βασικοί παράγοντες που επηρεάζουν τη συμπεριφορά της κατασκευής στον σεισμό, τα ευαίσθητα σημεία της, αλλά και οι κυριότεροι τρόποι ενίσχυσής τους.

Η τοποθέτηση της κατασκευής στο οικόπεδο: Η τοποθέτηση ενός κτηρίου από rammed earth στο οικόπεδο είναι αρκετά σημαντική. Γενικότερα συνιστάται τα κτήρια να μην τοποθετούνται απευθείας πάνω σε έντονα πρηνή με μεγάλη κλίση, καθώς δεν είναι σταθερά κατά τη διάρκεια του σεισμού και πιθανότατα να οδηγήσουν σε κατάρρευση της κατασκευής. Αν ωστόσο το οικόπεδο έχει έντονη κλίση προτείνεται η εκσκαφή και η δημιουργία ενός οριζόντιου επιπέδου (ταμπάνι), έτσι ώστε το κτήριο να έχει την ιδανική έδραση. Σε αυτή την περίπτωση το κτήριο θα πρέπει να τοποθετείται σχετικά κεντρικά στην εκσκαφή, καθώς η τοποθέτηση στην περίμετρο είναι επικίνδυνη. (Minke, Schmidt, 2015:350).

Το σχήμα της κατασκευής: Ένας τρόπος διασφάλισης της αντοχής μιας κατασκευής από rammed earth είναι το σχήμα της κάτοψης. Το σχήμα της κάτοψης επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τη σταθερότητα του κτηρίου. Το τετράγωνο είναι πολύ καλύτερο από το ορθογώνιο, ενώ η βέλτιστη επιλογή είναι ο κύκλος. Τη χειρότερη επιλογή αποτελεί το σχήμα Γ. Σε τέτοιες περιπτώσεις, προτιμάται ο διαχωρισμός του σχήματος σε δύο ορθογώνια, όπως γίνεται και στο σκυρόδεμα με τον αρμό διαστολής. Επίσης, ένα ορθογώνιο αρκετά μεγάλου μήκους καλό είναι να διαχωρίζεται σε επιμέρους τμήματα. Γενικότερα, στα κτήρια από χώμα είναι σημαντικό να υπάρχει συμμετρία και να αποφεύγονται σχήματα που η μία πλευρά τους είναι πολύ μεγαλύτερη από την άλλη (Minke, Schmidt, 2015:351).

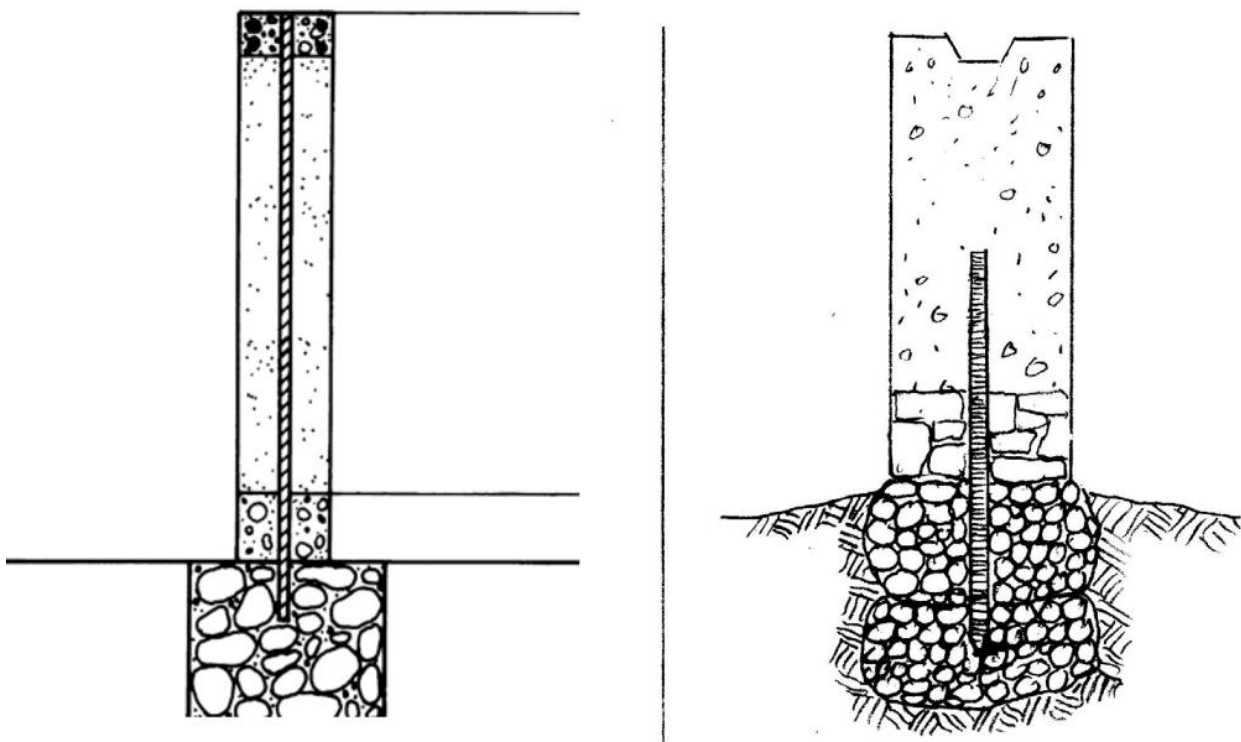


εικ.3.6. Περιπτώσεις τοποθέτησης του κτηρίου στο οικόπεδο και επικινδυνότητα. (Minke, Schmidt, «Building earthquake resistant clay houses», 2015, σελ.350).



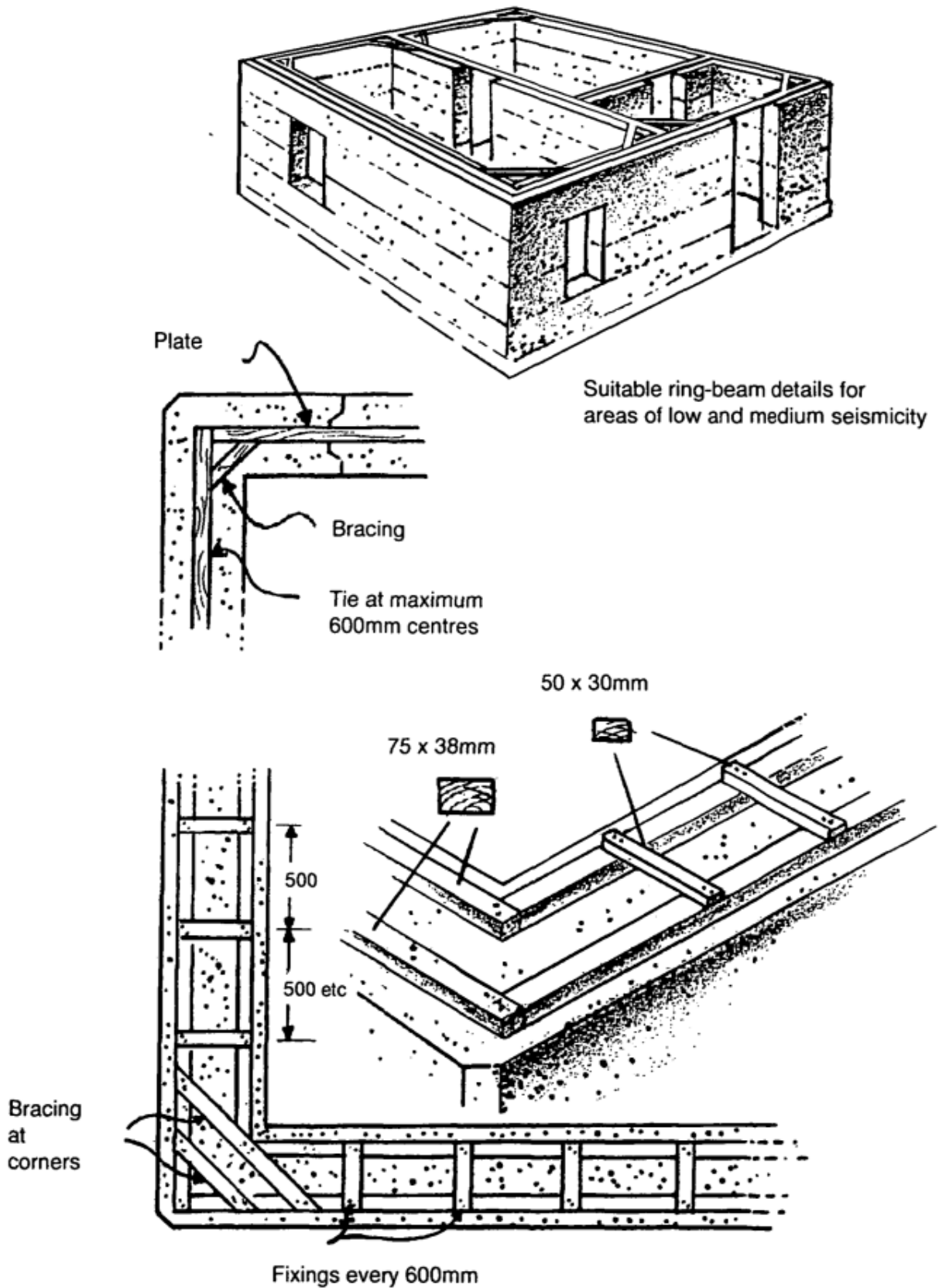
εικ.3.7. Το σχήμα του κτηρίου και η επικινδυνότητά του. (Minke, Schmidt, «Building earthquake resistant clay houses», 2015, σελ.351).

Τα θεμέλια και η σύνδεση με την τοιχοποιία: Το πρώτο σημείο που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη για την αντιμετώπιση του σεισμού είναι τα θεμέλια και περισσότερο η σύνδεση των θεμελίων με την τοιχοποιία από rammed earth. Οι διαστάσεις και το υλικό των θεμελίων ορίζονται κυρίως ανάλογα με την ποιότητα του χώματος στο οικόπεδο, αλλά συνήθως έχουν βάθος περίπου 40 εκατοστά και πρέπει να είναι τουλάχιστον 10 εκατοστά πλατύτερα από την υπερκείμενη τοιχοποιία. Όπως αναφέρουν οι Minke και Schmidt (2015:350-351), το θεμέλιο από σκυρόδεμα με χονδρά αδρανή είναι ίσως το πιο ισχυρό. Επίσης αναφέρουν, πως ένας έξυπνος τρόπος να αντιμετωπιστεί ο σεισμός είναι η δημιουργία πλωτών θεμελίων κατασκευασμένων από στρώσεις πλαστικών σάκων γεμισμένων με αδρανή. Με αυτό τον τρόπο, οι τοιχοποιίες δεν είναι πακτωμένες στο έδαφος κι έτσι μπορούν να κινηθούν πιο ελεύθερα κατά τον σεισμό με αποτέλεσμα να μη καταρρέουν. Σε κάθε περίπτωση, είναι σημαντικό τα θεμέλια να συνδέονται με την υπερκείμενη τοιχοποιία με μεταλλικούς ή ξύλινους συνδέσμους.

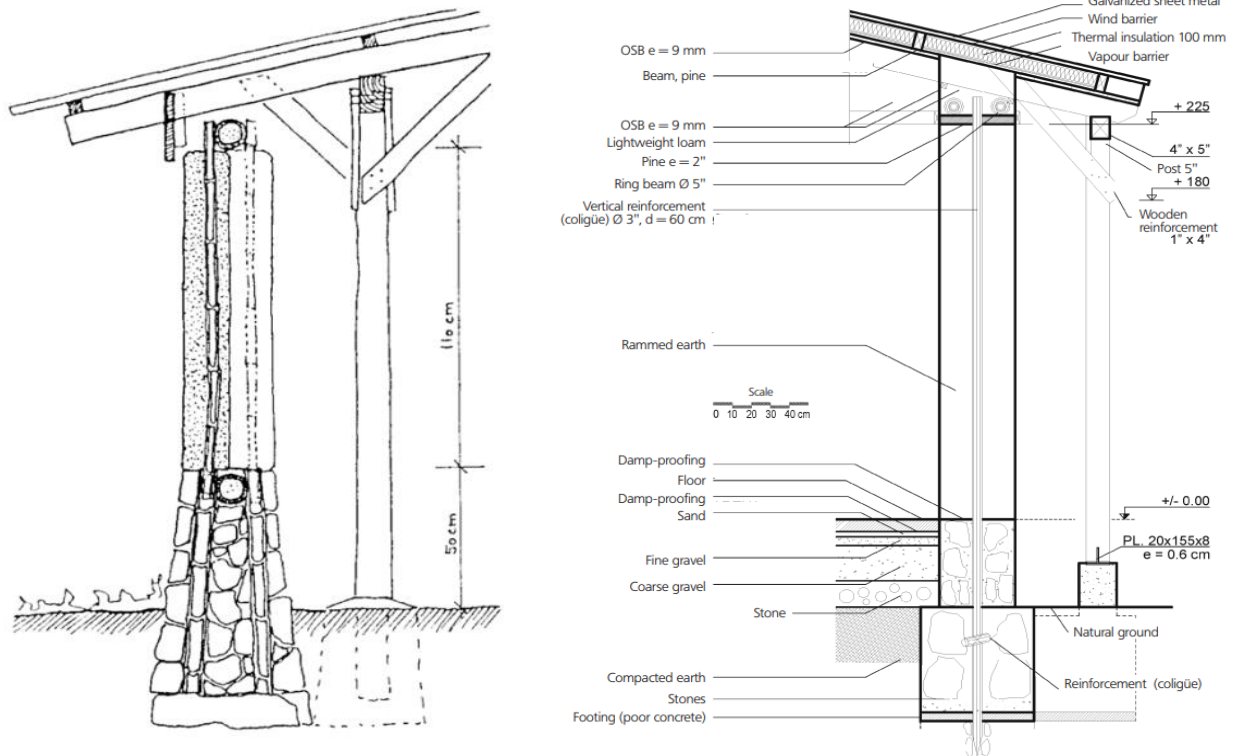


εικ.3.8. Αριστερά θεμέλιο από σκυρόδεμα με χονδρά αδρανή και δεξιά πλωτό θεμέλιο και τρόποι σύνδεσης με την τοιχοποιία. (Minke, Schmidt, «Building earthquake resistant clay houses», 2015, σελ.: 351).

Τα οριζόντια διαζώματα και η σύνδεση των επιπέδων και της στέγης: Επόμενο σημείο προς μελέτη είναι τα οριζόντια διαζώματα. Είναι σημαντικό ανά τακτά διαστήματα ύψους της τοιχοποιίας να τοποθετούνται οριζόντια διαζώματα από ξύλο, μέταλλο ή σκυρόδεμα (το οποίο πρέπει να καλύπτει όλο το πάχος της τοιχοποιίας), έτσι ώστε να «δένουν» όλες τις τοιχοποιίες και να λειτουργούν συνολικά κατά τον σεισμό. Συνηθίζεται να τοποθετούνται σε θέσεις που να βοηθούν την κατασκευή. Έτσι προτιμάται στις ποδιές και τα πρέκια των παραθύρων και των θυρών, ενώ επίσης είναι σημαντικό να τοποθετούνται και στα επίπεδα των πατωμάτων και της στέγης ή του δώματος, βοηθώντας έτσι και στην καλύτερη σύνδεσή τους με τις τοιχοποιίες (Keable, 2011:110). Επίσης, πέρα από τη σύνδεση των θεμελίων με την τοιχοποιία που αναφέρθηκε παραπάνω, συχνά επιλέγεται να επεκτείνουν αυτή τη σύνδεση και στα πατώματα έως και στη στέγη ή το δώμα του κτηρίου, ενισχύοντας ακόμα περισσότερο την κατασκευή. Όλες αυτές οι ενισχύσεις επιτρέπουν στο κτήριο να λειτουργεί συνολικά στον σεισμό (Minke, Schmidt, 2015:351).



εικ.3.9. Ξυλοδεσιά σε κτήριο από rammed earth. (Julian & Rowland Keable, «Rammed Earth Structures - A Code of Practice», 2011, σελ.111).

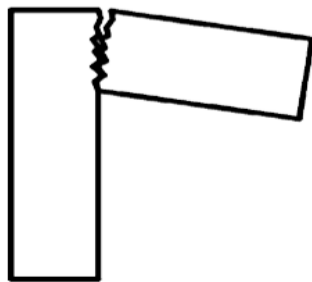


εικ.3.10. Τρόπος σύνδεσης των θεμελίων με την τοιχοποιία και τα οριζόντια διαζώματα (αριστερά). (Minke, Schmidt, «Building earthquake resistant clay houses», 2015, σελ.351).

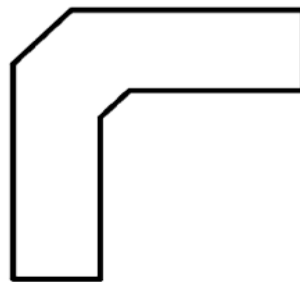
εικ.3.11. Τρόπος σύνδεσης των θεμελίων με την τοιχοποιία, τα οριζόντια διαζώματα και τη στέγη (δεξιά). (Minke, «Building with Earth - Design and Technology of a Sustainable Architecture», 2006, σελ.143).

Οι ακμές των εξωτερικών τοίχων: Ένα από τα πιο ευαίσθητα σημεία ενός κτηρίου είναι οι γωνίες του ή αλλιώς οι ακμές του. Πολλές φορές τα σημεία αυτά αποκτούν ρωγμές κι έτσι καταρρέει η κατασκευή. Ένας απλός τρόπος αντιμετώπισης είναι η δημιουργία μικρών αποστηρίξεων στις ακμές με φάλτσες πλευρές ή τόξα. Επίσης, πολλές φορές επεκτείνονται οι τοιχοποιίες λίγα εκατοστά πιο έξω από το κτήριο ώστε να λειτουργούν ως μικρές αντηρίδες. Παράλληλα, είναι σημαντικό τα οριζόντια διαζώματα να είναι πιο ενισχυμένα σε αυτές τις περιοχές και να συνδέονται καλά με την τοιχοποιία. Τέλος, σε περιπτώσεις που είναι αναγκαία η ορθή γωνία χωρίς αποστηρίξεις ή αντηρίδες, θα πρέπει τα διαζώματα να είναι ενισχυμένα τοπικά, ώστε να είναι ικανά να συγκρατήσουν τις γωνίες ενώ σε πολλές περιπτώσεις οι ακμές ενισχύονται με υποστυλώματα κυρίως από σκυρόδεμα, αλλά και μέταλλο ή ξύλο, τα οποία μπορεί να είναι εσωτερικά εμφανή ή και όχι (Minke, Schmidt, 2015:352-354).

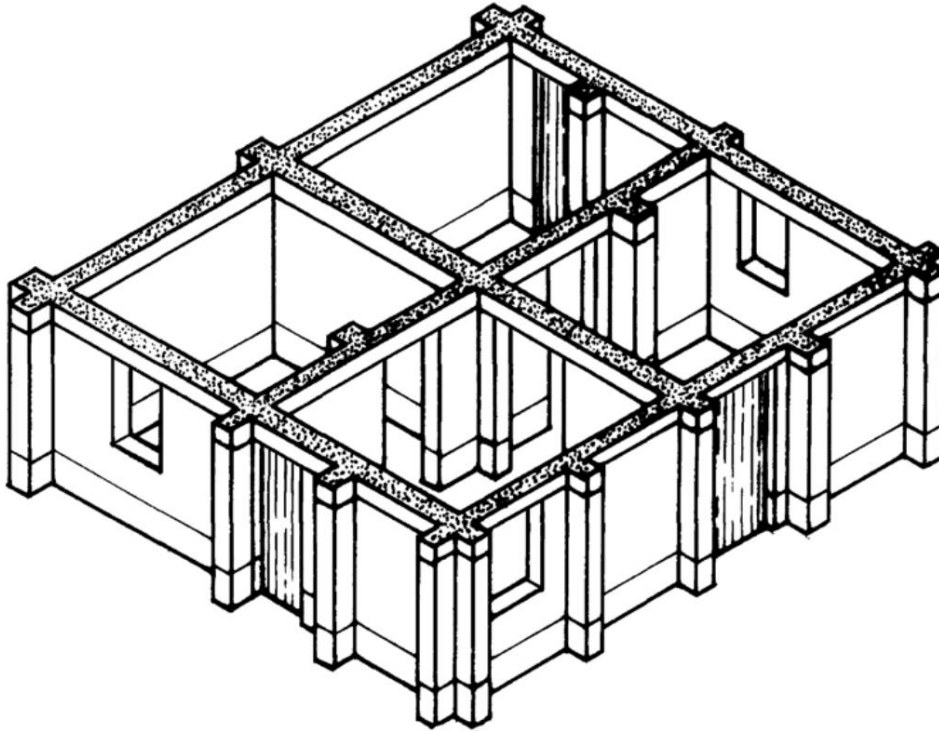
dangerous



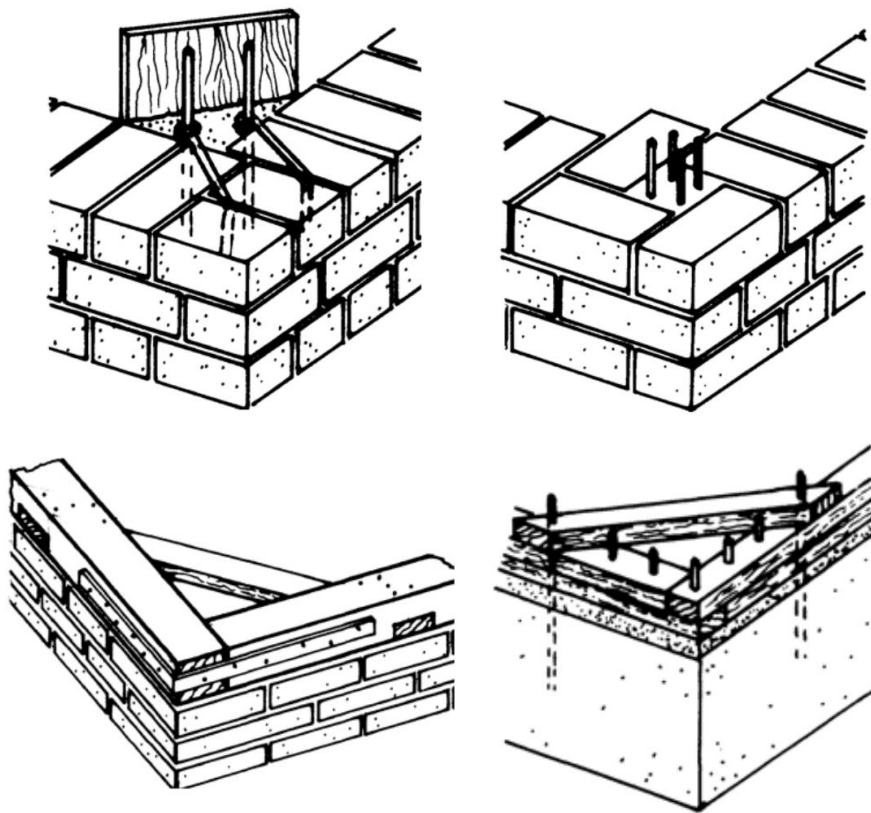
correct



εικ.3.12. Η απότμηση της γωνίας. (Minke, Schmidt, «Building earthquake resistant clay houses», 2015, σελ.352).

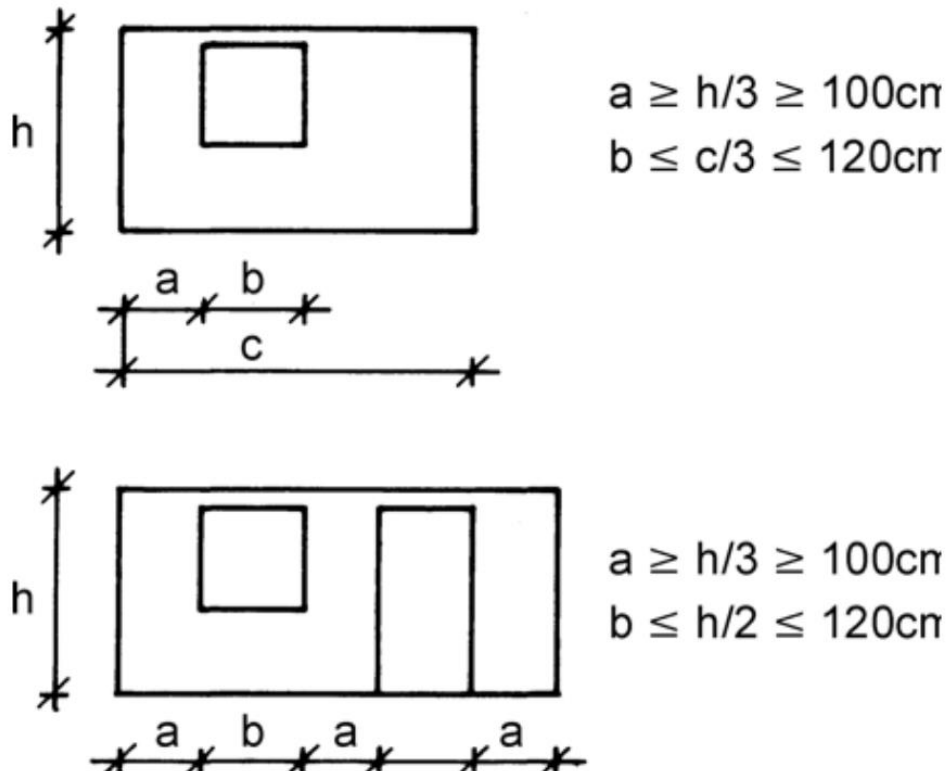


εικ.3.13. Οι εξοχές των τοίχων ως αντηρίδες στο κτήριο. (Minke, Schmidt, «Building earthquake resistant clay houses», 2015, σελ.352).



εικ.3.14. Μερικοί από τους τρόπους ενίσχυσης της γωνίας και η χρήση του υποστυλώματος. (Minke, Schmidt, «Building earthquake resistant clay houses», 2015, σελ.352 & 354).

Τα ανοίγματα της κατασκευής: Το τελευταίο ευαίσθητο σημείο ενός κτηρίου από χώμα είναι τα ανοίγματα. Καταρχάς, χρειάζεται να έχουν ικανά πρέκια και ποδιές, τα οποία σύμφωνα με τον Minke θα πρέπει να είναι τουλάχιστον 40 με 50 εκατοστά μέσα στην τοιχοποιία εκατέρωθεν του ανοίγματος. Ωστόσο, ένας έξυπνος τρόπος να αποφύγει κάποιος τα πρέκια και τις ποδιές είναι η σύνδεση της κάσας του παραθύρου ή της πόρτας με τα οριζόντια διαζώματα. Πέραν αυτού, οι διαστάσεις των ανοιγμάτων είναι επίσης σημαντικές. Καταρχάς, η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών ανοιγμάτων, αλλά και η απόσταση του ανοίγματος από την ακμή του κτηρίου θα πρέπει να είναι τουλάχιστον ένα μέτρο και μεγαλύτερο από το 1/3 του συνολικού ύψους της τοιχοποιίας. Το πλάτος των ανοιγμάτων ορίζεται τουλάχιστον όσο το 1/3 του συνολικού μήκους της τοιχοποιίας ή το 1/2 του συνολικού ύψους και μικρότερο από 1,20 μέτρα. Επίσης, τα παράθυρα είναι καλό να έχουν κατακόρυφη διάταξη, να έχουν δηλαδή μεγαλύτερο ύψος από το πλάτος τους. Όσον αφορά τις πόρτες δεν θα πρέπει να είναι μεγαλύτερες από 1,20 μέτρα, εκτός αν υπάρχει ανάγκη και είναι αποδεκτό από την εκάστοτε μελέτη (π.χ. σε περιπτώσεις ΑμεΑ ή άλλων ειδικών προδιαγραφών). Τέλος, καλό είναι τα ανοίγματα να τοποθετούνται συμμετρικά ως προς την κάτοψη (Minke, Schmidt, 2015:354). Συνοπτικά όλοι οι κανόνες για τα ανοίγματα παρουσιάζονται στην εικ.3.15.



εικ.3.15. Κανόνες για τις διαστάσεις των ανοιγμάτων και της απόστασης μεταξύ τους. (Minke, Schmidt, «Building earthquake resistant clay houses», 2015, σελ.354).

Το πάχος της τοιχοποιίας: Ένας τελευταίος παράγοντας που χρειάζεται να λαμβάνεται υπόψη για την ενίσχυση της κατασκευής είναι το πάχος της τοιχοποιίας. Το ελάχιστο πάχος θα μπορούσε να είναι τα 30 εκατοστά. Καθώς, όμως η αναλογία του πάχους με το ύψος δεν πρέπει να ξεπερνά το 1/8, αυτό σημαίνει ότι το μεγαλύτερο ύψος που μπορεί να χτιστεί είναι τα 2,40 μέτρα (από το τέλος της θεμελίωσης μέχρι τη βάση της οροφής). Έτσι, λοιπόν, η τοιχοποιία χρειάζεται να έχει μεγαλύτερο πάχος από τα 30 εκατοστά και υπολογίζεται σύμφωνα με την αναλογία 1/8 (Minke, Schmidt, 2015:351).



3.3. Κύκλος ζωής του υλικού

Το συμπιεσμένο χώμα αποτελεί ένα ιδιαίτερα ενδιαφέρον υλικό ως προς τον κύκλο ζωής του, καθώς αποτελείται κατά κύριο λόγο από φυσικά υλικά. Αυτό βέβαια αφορά κυρίως το φυσικό rammed earth, καθώς το σταθεροποιημένο και το προκατασκευασμένο συμπιεσμένο χώμα δέχονται συχνά πρόσμικτα που αλλοιώνουν τα χαρακτηριστικά του. Ωστόσο, το rammed earth, ως ένα υλικό το οποίο αποτελείται κυρίως από χώμα, επιτυγχάνει σε μεγάλο βαθμό μια περιβαλλοντική βιωσιμότητα. Η σύγχρονη εποχή χαρακτηρίζεται ιδιαίτερα από μια στροφή προς υλικά φιλικά προς το περιβάλλον και βιώσιμα, εξαιτίας των περιβαλλοντικών προβλημάτων που έχουν προκύψει από την κατάχρηση των πεπερασμένων φυσικών πόρων. Το παραπάνω φαινόμενο αποδίδει στο συμπιεσμένο χώμα ως υλικό ένα ισχυρό θετικό πρόσημο ως προς την ευρύτερη διάδοση της χρήσης του, εφόσον εξοικονομεί κόστος και ενέργεια για την παραγωγή του (Fernando Avila, Esther Puertas, Rafael Gallego, 2020:8-9). Βέβαια, παρόλη την περιβαλλοντική αξία του υλικού, υπάρχει έλλειψη μελετών αυτού ως προς τον κύκλο ζωής του, ώστε να δοθεί μια καθαρή εικόνα του περιβαλλοντικού του αποτυπώματος.

3.3.1. Εμπειροχόμενη ενέργεια

Είναι αντλητικό ότι η κατασκευή στοιχείων συμπιεσμένου χώματος δεν αποτελεί μια διαδεδομένη τεχνική δόμησης, η οποία έχει μελετηθεί ποσοτικά και έχει τυποποιηθεί πλήρως μέχρι σήμερα. Παρόλα αυτά, μπορεί κανείς να χωρίσει τη μελέτη της εμπειροχόμενης ενέργειας των δομικών στοιχείων από rammed earth βάσει ορισμένων παραγόντων:

- Προέλευση όγκου χώματος.
- Πρόσμικτα υλικά / τύπος rammed earth.
- Συμπύεση μείγματος.
- Λοιπές απαραίτητες εργασίες.

Λαμβάνοντας υπόψη αυτούς τους παράγοντες προκύπτει ότι αν διεξαχθούν οι απαραίτητες μελέτες στην περιοχή κατασκευής των στοιχείων, υπάρχει η δυνατότητα αξιοποίησης του χώματος της ίδιας περιοχής ως βασικό συστατικό του μείγματος του στοιχείου, γεγονός που ουσιαστικά εκμηδενίζει την ενέργεια μεταφοράς υλικών. Έπειτα, έχοντας ολοκληρώσει τον σχεδιασμό της κατασκευής και άρα γνωρίζοντας τις ανάγκες που προκύπτουν προς επίλυση, υπολογίζεται η εμπειροχόμενη ενέργεια παραγωγής των πρόσμικτων υλικών. Στη συνέχεια, μετριέται η απαραίτητη ενέργεια συμπύεσης του τελικού μείγματος, η οποία εξαρτάται από τα υλικά πρόσμιξης, καθώς λόγω χάρη η αύξηση της αναλογίας του πηλού στο μείγμα αυξάνει αισθητά το μέγεθος της εμπειροχόμενης ενέργειας (Venkatarama, Prassana, 2009). Τέλος, προστίθενται οι λοιπές εργασίες που δεν αναφέρθηκαν στην παραπάνω διαδικασία, όπως η τοποθέτηση και αφαίρεση καλουπιού.

Είναι αντλητικό, ότι ο βασικός παράγοντας υπολογισμού της εμπειροχόμενης ενέργειας αποτελεί η συμπύεση του τελικού μείγματος, όπως αναφέρουν οι Venkatarama και Prassana στο άρθρο τους «Embodied energy in cement stabilized rammed earth walls», σύμφωνα με τους οποίους, για ένα μείγμα φυσικού rammed earth, η τιμή τείνει στα 0,033 MJ/m³, ενώ για ένα στοιχείο σταθεροποιημένου συμπιεσμένου χώματος με παράγοντα τιμέντου σε αναλογία 6-8% είναι 0,4-0,5 GJ/m³. Επομένως, με βάση τα στοιχεία του σταθεροποιημένου μείγματος, το οποίο είναι και το πιο διαδεδομένο, γίνεται αντλητική η εξοικονόμηση ενέργειας, όταν μάλιστα η τυπική τιμή εμπειροχόμενης ενέργειας του οπλισμένου σκυροδέματος C30 υπολογίζεται κοντά στα 3,2-4,5 GJ/m³.

	Συμβατική τοιχοποιία	Συμπιεσμένο χώμα	Σκυροδέμα
Ενέργεια (GJ)	97	70	239
Μεταφορά (t.km)	1.390	1.041	6.707

πιν.3.4. Πίνακας τιμών εμπειροχόμενης ενέργειας και ενέργειας μεταφορών. (El Nabouch Ranime, «Mechanical behavior of rammed earth walls under Pushover tests», Communaute Universite Grenoble Alpes, 2017, σελ.16).



3.3.2. Εκπομπές CO₂

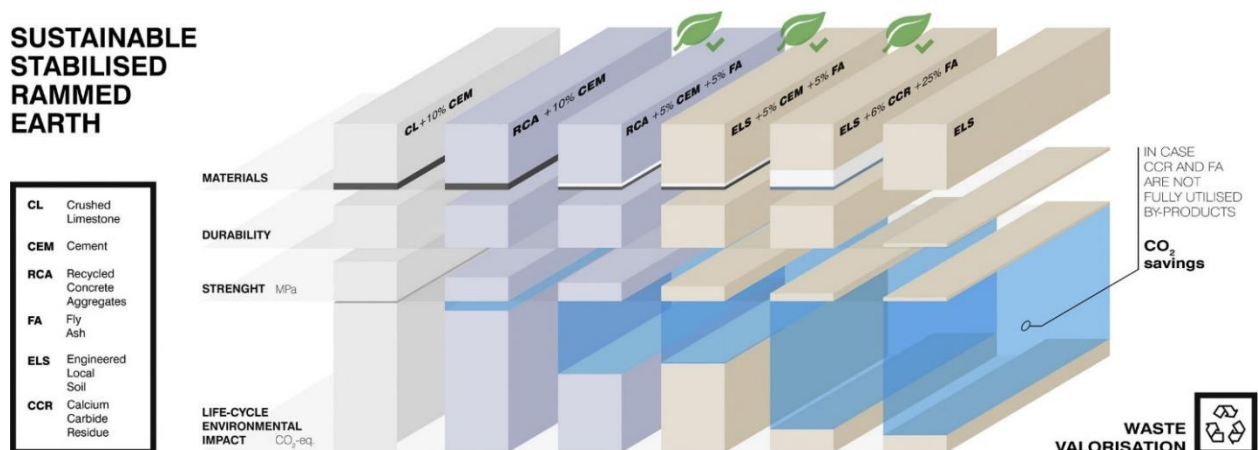
Ένα από τα σημαντικότερα στοιχεία μελέτης του περιβαλλοντικού αποτυπώματος των υλικών είναι οι εκπομπές CO₂ που παράγονται κατά τη δημιουργία, την τοποθέτηση και την αξιοποίηση των δομικών στοιχείων. Χαρακτηριστικές τιμές για την καλύτερη κατανόηση της σημασίας του συμπίεσμένου χώματος δίνονται στον παρακάτω πίνακα (Avila, Puertas, Gallego, 2020:9):

Υλικό	kg CO ₂ /kg	kg CO ₂ /m ³
NRE	0,004	9
7.5% CSRE	0,06	127
Διάτρητος οπτόπλινθος	0,14	94
Σκυρόδεμα	0,14	330
Οπλισμένο σκυρόδεμα	0,18	450

πιν.3.5. Πίνακας τιμών εκπομπών Co₂ (Ιδία επεξεργασία).

Από τα παραπάνω γίνεται αντιληπτή η συντριπτική διαφορά του φυσικού συμπίεσμένου χώματος σε σχέση με λοιπά υλικά συμβατικής δόμησης ως προς τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα. Επίσης, όχι φυσικά στον ίδιο βαθμό, το σταθεροποιημένο συμπίεσμένο χώμα με παράγοντα τσιμέντου έχει σημαντική διαφορά με τα σκυροδέματα, όταν μάλιστα πρόκειται και για υλικό δυνατό να φέρει σημαντικά στατικά φορτία.

Αναγκαίο είναι να αναφερθεί ότι έχουν γίνει μελέτες, σύμφωνα με τις οποίες το CSRE μπορεί να μειώσει περαιτέρω τον δείκτη αυτό, αξιοποιώντας διαφορετικού τύπου τσιμεντοκονιάματα, καθώς σε αυτά αποδίδεται κυρίως η δραματική αύξηση του δείκτη εκπομπών CO₂. Παρακάτω, δίνεται πίνακας που τεκμηριώνει τη θέση αυτή με διαγραμματικά δεδομένα. (Arrigoni, Beckett, Ciancio, Dotelli, 2017:128-136). Ιδιαίτερο ενδιαφέρον εμφανίζεται στο σημείο που ενώ μειώνονται σημαντικά οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, αναλόγως μειώνονται σημαντικά η στατική επάρκεια και η αντοχή στις καιρικές συνθήκες. Άρα, είναι αναγκαίο να βρεθεί μία μέση επιλογή η οποία θα εξισορροπεί τα μεγέθη αυτά, διατηρώντας παράλληλα χαμηλό περιβαλλοντικό αποτύπωμα.

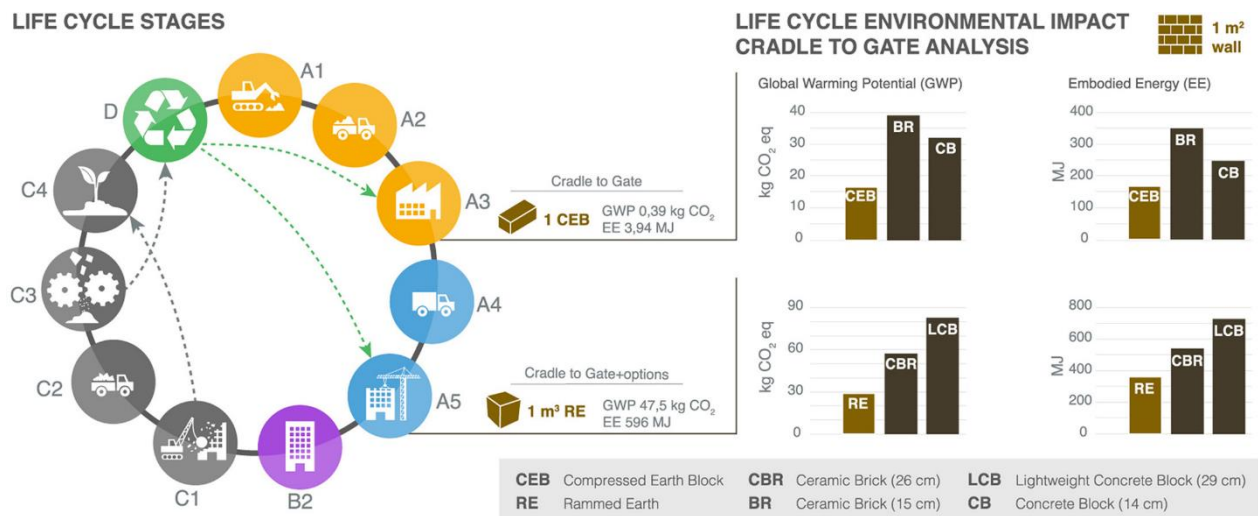


εικ.3.16. Συσχέτιση μηχανικής αντοχής, ανθεκτικότητας και εκπομπών CO₂ διαφόρων τύπων μείγματος rammed earth. (Arrigoni, Beckett, Ciancio, Dotelli, «Life cycle analysis of environmental impact vs. durability of stabilized rammed earth», 2017, σελ.128).

3.3.3. Ανακυκλωσιμότητα

Ένα σημαντικό κομμάτι της ζωής των δομικών στοιχείων είναι και το τέλος αυτής. Όταν μια κατασκευή παύει να εξυπηρετεί τις ανάγκες των χρηστών της, τότε γίνεται πιθανή η καταστροφή της προς δημιουργία μιας νέας. Έτσι, ένας παράγοντας αξιολόγησης των κατασκευών, ο οποίος μάλιστα χάρις στις οικολογικές και περιβαλλοντολογικές τάσεις της σύγχρονης εποχής έχει λάβει ιδιαίτερη προσοχή και έχει ενταχθεί μέχρι και σε διεθνείς κανονισμούς, είναι η δυνατότητα ανακύκλωσης της κατασκευής.

Οι κατασκευές από συμπιεσμένο χώμα κατέχουν ένα ιδιαίτερα σημαντικό πλεονέκτημα στον τομέα αυτό. Αρχικά, έχουν ήδη εξελιχθεί τεχνικές κατά τις οποίες στο ίδιο το μείγμα του συμπιεσμένου χώματος, αξιοποιούνται ανακυκλωμένα αδρανή, όπως για παράδειγμα αδρανή σκυροδέματος, ως πρόσμιξη που αυξάνει τη συνεκτικότητα και την αντοχή του μείγματος. Έπειτα, το μείγμα, έχοντας ως βασικό συστατικό το χώμα στο φυσικό rammed earth, μπορεί κάλλιστα να ανακυκλωθεί πλήρως ή να επιστρέψει στο φυσικό του περιβάλλον. Με την κατεδάφιση των τοίχων, μπορεί να πραγματοποιηθεί διαχωρισμός των διαφόρων αδρανών κι έτσι να γίνει χρήση τους σε άλλες κατασκευές. Τα συστατικά αυτά όντας μη βιομηχανικά επεξεργασμένα και ανόργανα υλικά, στην περίπτωση του φυσικού rammed earth, δεν επηρεάζονται ως προς τις αντοχές τους διακριτά με το πέρασμα του χρόνου, ενώ ως μέρος χυτού υλικού, προστατεύονται σε μεγάλο μέρος τους από τις καιρικές συνθήκες. Έτσι, δύναται η ανακατασκευή μείγματος συμπιεσμένου χώματος από ανακυκλωμένα συστατικά παλαιότερων κατασκευών. Εκτός των ίδιων των συστατικών, είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι ο ξυλότυπος, που αξιοποιείται για τη διαμόρφωση των τοίχων, δύναται επίσης να ανακυκλωθεί και να αξιοποιηθεί σε πολλαπλές κατασκευές. Σε περιπτώσεις που το μείγμα έχει και άλλα πρόσμικτα όπως τσιμέντο, η ανακύκλωση των στοιχείων είναι πιο δύσκολη και δεν πραγματοποιείται πλήρως, ωστόσο και πάλι ένα μέρος μπορεί να μετατραπεί σε αδρανή και να χρησιμοποιηθεί σε άλλες κατασκευές.



εικ.3.17. Διαγραμματική ανάλυση κύκλου ζωής του Rammed Earth σε σχέση με κεραμικούς διάτρητους οπτόπλινθους. (Fernandes, Peixoto, Mateus, Gervásio, « Life cycle analysis of environmental impacts of earthen materials in the Portuguese context: Rammed earth and compressed earth blocks », 2019, σελ.130).



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Διαδικασία κατασκευής δομικών στοιχείων από rammed earth

Σε αυτό το κεφάλαιο δίνεται έμφαση στη διαδικασία κατασκευής δομικών στοιχείων από rammed earth, με σκοπό αφενός την κατανόηση της μεθοδολογίας που πρέπει να ακολουθείται σε κάθε εργοτάξιο και αφετέρου τη διάκριση των κρίσιμων εκείνων σημείων που χρειάζονται ιδιαίτερη προσοχή, ώστε η κατασκευή να αντέξει στον χρόνο και να μην αστοχήσει. Σε αντίθεση με τα παλαιότερα χρόνια, η σύγχρονη διαδικασία κατασκευής δομικών στοιχείων από rammed earth είναι τόσο απαιτητική όσο και εξαιρετικά τεχνική, καθώς οι ανάγκες ενός σύγχρονου κτηρίου είναι πλέον αυξημένες για να μπορεί να είναι βιώσιμο και άνετο για τον άνθρωπο. Συνοπτικά, το πρώτο στάδιο αποτελεί η συλλογή και η μελέτη της καταλληλότητας της πρώτης ύλης, δηλαδή του χώματος και η δημιουργία του τελικού μείγματος, αναλόγως με τις ανάγκες του κάθε κτηρίου. Στη συνέχεια, κατασκευάζονται οι θεμελιώσεις και τοποθετείται ο οπλισμός, όταν αυτός κριθεί απαραίτητος από τους μελετητές. Επόμενο στάδιο, αποτελεί η κατασκευή και η τοποθέτηση του ξυλοτύπου, ενώ ένα από τα σημαντικότερα στάδια της κατασκευής είναι η συμπίεση του μείγματος και των επιμέρους στρώσεων, καθώς και η απομάκρυνση του ξυλοτύπου. Τελευταίο στάδιο είναι η επεξεργασία της τελικής επιφάνειας και η τοποθέτηση επιχρίσματος όταν αυτό απαιτείται.

4.1. Το μείγμα

Πριν την έναρξη της κατασκευής, το πρώτο στάδιο για τη δόμηση με rammed earth είναι η συλλογή του χώματος από το οικόπεδο, η μελέτη της καταλληλότητάς του και η δημιουργία του τελικού μείγματος. Ανάλογα με τον τύπο και το είδος του rammed earth που θα χρησιμοποιηθεί, το χώμα θα πρέπει να έχει διαφορετική σύσταση. Για δόμηση με φυσική συμπιεσμένη γη (natural rammed earth ή unstabilized rammed earth) χρειάζεται ένα χώμα πλούσιο σε άργιλο και με πιο χονδρόκοκκα αδρανή, ενώ για τη δημιουργία σταθεροποιημένης συμπιεσμένης γης (stabilized rammed earth) η άργιλος θα πρέπει να είναι σε μικρότερο ποσοστό, καθώς τη θέση της παίρνουν τα διάφορα πρόσμικτα, όπως για παράδειγμα το τσιμέντο (cement stabilized rammed earth) (πηλόικο, 2021).

4.1.1. Συλλογή της πρώτης ύλης του μείγματος

Για τη συλλογή της πρώτης ύλης του μείγματος, ουσιαστικά πραγματοποιείται μια εκσκαφή επί τόπου στο σημείο του εργοταξίου σε βάθος τουλάχιστον ενός μέτρου, καθώς στα ανώτερα στρώματα του εδάφους υπάρχουν οργανικά στοιχεία, όπως κλαδιά, φύλλα και διάφορα ζωικά απόβλητα που αλλοιώνουν κατά πολύ την ποιότητα του μείγματος και για τον λόγο αυτό απομακρύνονται συνήθως από αυτό. Ωστόσο, το βάθος της εκσκαφής δεν είναι συγκεκριμένο και προσδιορίζεται με βάση τα τοπικά χαρακτηριστικά της κάθε περιοχής, την ποιότητα του εδάφους, καθώς και το ποσοστό και το είδος της βλάστησης στο οικόπεδο. Επίσης, σε περιπτώσεις που το κτήριο διαθέτει υπόγειους χώρους, η εκσκαφή πραγματοποιείται με τέτοιο τρόπο, ώστε να εξυπηρετεί της κατασκευή τους, δηλαδή στο σημείο που θα διαμορφωθούν αυτοί οι χώροι. Μετά την εκσκαφή, το χώμα στοιβάζεται σε μικρούς λόφους και αποθηκεύεται μέχρι να έρθει η στιγμή της κατασκευής.



εικ.4.1. Γυναίκες στην Κίνα συλλέγουν την πρώτη ύλη για την κατασκευή τους από rammed earth. (ανακτήθηκε από: <http://rammedearthconsulting.com/rammedearth-mixing.htm> στις 02/01/22).

4.1.2. Μελέτη και δοκιμές της πρώτης ύλης του μείγματος

Κατά τη διάρκεια της εκσκαφής του οικοπέδου και πριν την ολοκλήρωσή της, πραγματοποιούνται διάφορες δοκιμές της πρώτης ύλης, έτσι ώστε να μελετηθεί η σύσταση του χώματος και τα ποιοτικά του χαρακτηριστικά, καθώς αν το χώμα κριθεί ακατάλληλο για την κατασκευή θα πρέπει να σταματήσει η εκσκαφή και να μελετηθούν άλλοι τρόποι εύρεσης πιο κατάλληλου χώματος. Η μελέτη της πρώτης ύλης μπορεί να πραγματοποιηθεί σε εργαστήρια με τη βοήθεια ειδικών μηχανημάτων, τα οποία οδηγούν σε αξιόπιστα αποτελέσματα. Ωστόσο, υπάρχουν διάφοροι τρόποι και εμπειρικές δοκιμές που μπορούν να πραγματοποιηθούν επί τόπου στο εργοτάξιο και να βοηθήσουν σημαντικά στην κατανόηση της ποιότητας του χώματος και της σύστασής του. Οι δοκιμές αυτές είναι πολυάριθμες, και πολλές από αυτές έχουν προκύψει μέσα από την εμπειρία των κατασκευαστών. Αναλόγως με το είδος της γήινης δόμησης απαιτούνται και διαφορετικές δοκιμές της πρώτης ύλης. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται οι πιο συνηθισμένες και αντικειμενικές δοκιμές χώματος που πραγματοποιούνται στις περισσότερες περιπτώσεις κατασκευών από rammed earth (Minke, 2006:21-24).

Περιεκτικότητα σε νερό: Η περιεκτικότητα του νερού στο έδαφος μπορεί εύκολα να προσδιοριστεί ζυγίζοντας μια ποσότητα χώματος πριν και μετά τη θέρμανσή του περίπου στους 105°C (ώστε να εξατμιστεί σίγουρα το νερό). Αν το βάρος παραμείνει σταθερό, τότε το χώμα δεν έχει μεγάλη περιεκτικότητα σε νερό και είναι αρκετά ξηρό. Στην περίπτωση, όμως, που υπάρχει διαφορά, τότε το χώμα έχει μεγαλύτερη υγρασία και το βάρος νερού αντιστοιχεί περίπου στη διαφορά του βάρους μεταξύ των δύο μετρήσεων. Έτσι μπορεί να προκύψει η περιεκτικότητα σε νερό, η οποία δηλώνεται ως το ποσοστό νερού κατά βάρος ξηρού μείγματος (στο ίδιο).

Μέσω της όσφρησης: Το κατάλληλο και επιθυμητό χώμα είναι γενικώς άοσμο, ενώ όταν αυτό περιέχει διάφορα οργανικά υλικά, τα οποία όπως προαναφέρεται διαχωρίζονται από το χώμα για να μπορεί να χρησιμοποιηθεί, αποκτά μια δυσάρεστη μυρωδιά μούχλας (στο ίδιο).

Μέσω της αφής: Ένα μικρό δείγμα χώματος πλάθεται στο χέρι και δέχεται μικρά τσιμπήματα. Ένα αμμώδες χώμα προκαλεί μια δυσάρεστη αίσθηση στην αφή σε αντίθεση με ένα πιο ιλυώδες έδαφος. Επίσης, ένα αργιλώδες χώμα δίνει μια πιο κολλώδη και λεία αίσθηση (στο ίδιο).



εικ.4.2. Δυο διαφορετικές υφές μπάλες από χώμα. (Minke, «Building with Earth - Design and Technology of a Sustainable Architecture, Birkhäuser», 2006, σελ.42).

Μέσω τις τριβής: Δείγμα χώματος μετά την προσθήκη μικρής ποσότητας νερού τρίβεται μεταξύ των χεριών. Αν γίνονται εύκολα ευδιάκριτοι οι κόκκοι τότε το χώμα είναι αμμώδες ή χαλικώδες. Αν το μείγμα είναι κολλώδες αλλά τα χέρια καθώς τρίβονται παραμένουν καθαρά τότε δηλώνει ένα ιλυώδες χώμα, ενώ αν τα χέρια χρειάζονται νερό για να καθαρίσουν τότε το χώμα είναι αργιλώδες (στο ίδιο).

Κόψιμο μπάλας: Ένα μικρό δείγμα χώματος πλάθεται στο σχήμα μιας μπάλας και στη συνέχεια κόβεται με ένα μαχαίρι. Αν η επιφάνεια που φανερώνεται μετά την τομή είναι λεία αυτό σημαίνει ότι το χώμα είναι αργιλώδες, ενώ αν είναι πιο τραχιά και θαμπή τότε το χώμα είναι πιο ιλυώδες (στο ίδιο).

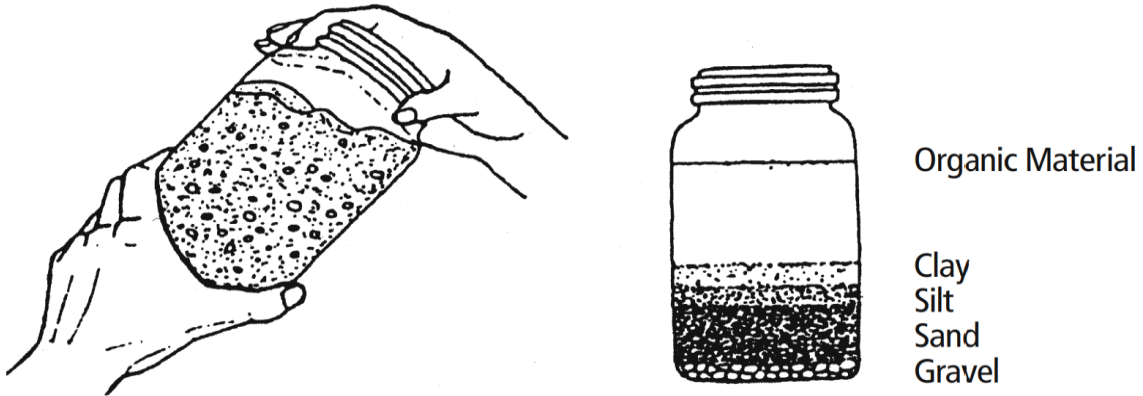
Ρίψη μπάλας: Δείγμα χώματος πλάθεται και δημιουργείται μια μπάλα διαμέτρου περίπου 4 εκατοστών. Το μείγμα θα πρέπει να είναι όσο ξηρό γίνεται, αλλά και αρκετά υγρό ώστε να μπορεί να δημιουργηθεί η μπάλα. Στη συνέχεια, η μπάλα αυτή αφήνεται να πέσει από ύψος περίπου 1,5 μέτρου πάνω σε μια επίπεδη επιφάνεια. Τα αποτελέσματα ποικίλουν. Αν η μπάλα κολλήσει στην επιφάνεια και δεν δημιουργηθούν πολλές ρωγμές, τότε το χώμα είναι αργιλώδες. Σε αντίθετη περίπτωση, αν η μπάλα διαλυθεί μερικώς ή πλήρως, τότε το χώμα είναι αμμώδες ή χαλικώδες (στο ίδιο).



εικ.4.3. Τα διάφορα αποτελέσματα μετά τη ρίψη της μπάλας. (Minke, «Building with Earth - Design and Technology of a Sustainable Architecture», Birkhäuser, 2006, σελ.23).

Τεστ καθίζησης: Δείγμα χώματος τοποθετείται σε ένα βάζο, το οποίο στη συνέχεια γεμίζει με νερό και ανακινείται πολύ καλά. Αφού μείνει αρκετή ώρα σε ηρεμία αρχίζουν να σχηματίζονται επάλληλες στρώσεις από τα διάφορα συστατικά του χώματος. Τα πιο βαριά υλικά όπως τα χαλίκια και η άμμος παρατηρούνται στον πάτο του βάζου, ενώ τα πιο ελαφριά όπως η άργιλος και η ιλύς εντοπίζονται πιο ψηλά. Επίσης, στην επιφάνεια του νερού αναδύονται τα οργανικά υλικά, όπως φύλλα και κλαδιά, τα οποία επιπλέουν. Αυτή η δοκιμή αποτελεί έναν αρχικό τρόπο κατανόησης της σύστασης του χώματος. Ωστόσο, όπως αναφέρει και ο Minke (2006:22), πολλοί συγγραφείς υπογραμμίζουν ότι η θεώρηση ότι το ύψος κάθε στρώσης δηλώνει και την αναλογία των υλικών είναι λανθασμένη, καθώς πειραματικά

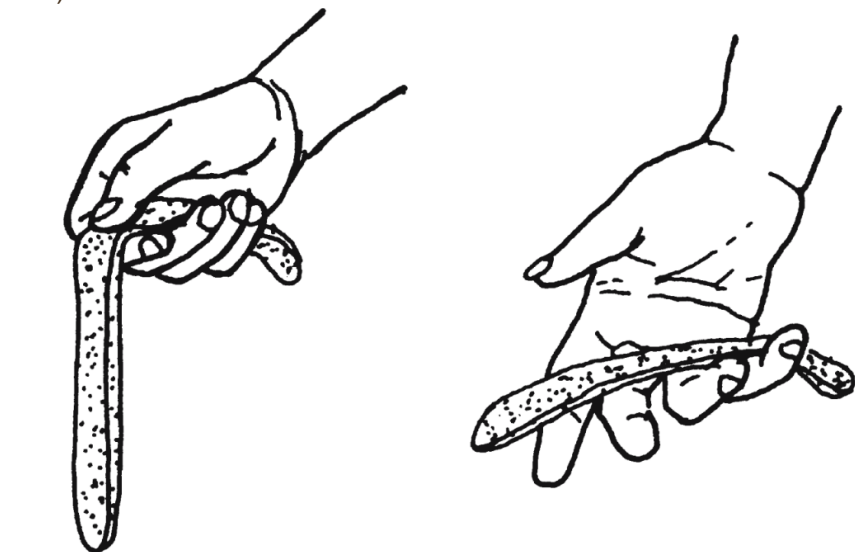
προκύπτουν μεγάλες αποκλίσεις και σφάλματα που αγγίζουν το ποσοστό του 1.750% μεταξύ της επιτόπου μέτρησης και της μέτρησης σε εργαστήριο. Έτσι, λοιπόν, χρειάζεται προσοχή και χρήσης αυτής της δοκιμής με σύνεση και φειδώ (στο ίδιο).



εικ.4.4. Το τεστ καθίζησης. (Minke, «Building with Earth - Design and Technology of a Sustainable Architecture», Birkhäuser, 2006, σελ.22).

Τεστ σταθερότητας: Δείγμα χώματος με μικρή προσθήκη νερού πλάθεται και δημιουργείται μια μπάλα 2 ή 3 εκατοστών. Στη συνέχεια, η μπάλα τυλίγεται με λεπτό νήμα διαμέτρου 3 χιλιοστών και πλάθεται μαζί με αυτό. Αν δεν είναι δυνατή η δημιουργία μιας ενιαίας μπάλας αυτό σημαίνει ότι το μείγμα έχει μεγάλη περιεκτικότητα σε άμμο ή χάλικες. Αν η μπάλα μπορεί να διαμορφωθεί και ρηγματώνεται εύκολα αν ασκηθεί πίεση με τον αντίχειρα και τον δείκτη, τότε το χώμα είναι αργιλώδες. Τέλος, αν η μπάλα καταρρέει συνεχώς και δεν μπορεί να διαμορφωθεί καθόλου, τότε το χώμα έχει μεγάλη περιεκτικότητα σε ιλύ (στο ίδιο).

Τεστ συνοχής: Δείγμα χώματος με μικρή προσθήκη νερού πλάθεται και δημιουργεί μια ταινία πάχους 6 χιλιοστών και πλάτους 2 εκατοστών. Η ταινία θα πρέπει να έχει το ίδιο πάχος και το ίδιο πλάτος σε όλο το μήκος που θα προκύψει. Στη συνέχεια, η ταινία κρατείται από την παλάμη και σιγά σιγά αφήνεται αυξανόμενα να προεξέχει και να κρέμεται από τη μια πλευρά μέχρι να κοπεί. Εάν το ελεύθερο μήκος πριν την αστοχία της ταινίας είναι πάνω από 20 εκατοστά, τότε το χώμα είναι αργιλώδες ή ιλυώδες, ενώ αν η ταινία κοπεί μετά από λίγα εκατοστά, τότε το χώμα είναι αμμώδες ή χαλικώδες (στο ίδιο).



εικ.4.5. Το τεστ συνοχής. (Minke, «Building with Earth - Design and Technology of a Sustainable Architecture», Birkhäuser, 2006, σελ.24).



Τεστ περιεκτικότητας ασβέστη: Η τελευταία βασική δοκιμή αφορά την περιεκτικότητα σε ασβέστη, καθώς αλλοιώνει σημαντικά την ποιότητα του χώματος. Σε μια ξύλινη ή γυάλινη ράβδο προστίθεται μια σταγόνα διαλύματος υδροχλωρίου (HCL) 20% w/v, ενώ στη συνέχεια η ράβδος έρχεται σε επαφή με το χώμα, ώστε να παραχθεί αντίδραση καύσης προς παραγωγή ασβέστη. Ο ασβέστης (CO₂) παράγεται σύμφωνα με την αντίδραση:



Η παραγωγή ασβέστη μπορεί να παρατηρηθεί εύκολα λόγω του αποχρωματισμού που προκύπτει στο διάλυμα. Αν δεν υπάρξει αποχρωματισμός τότε η περιεκτικότητα σε ασβέστη είναι κάτω από το 1%. Αν παρατηρηθεί ένας αδύναμος και σύντομος αποχρωματισμός, τότε ο ασβέστης βρίσκεται σε ποσοστό περίπου 1% με 2%, ενώ αν παρατηρηθεί πιο έντονος αλλά και πάλι σύντομος αποχρωματισμός, τότε το ποσοστό ανεβαίνει στο 3% με 4%. Τέλος, αν ο αποχρωματισμός είναι ισχυρός και με μεγάλη διάρκεια, τότε η περιεκτικότητα του χώματος σε ασβέστη είναι από 5% και πάνω (στο ίδιο).

4.1.3. Δημιουργία τελικού μείγματος

Αφού πραγματοποιηθούν όλες οι απαραίτητες διαδικασίες και οι έλεγχοι για το χώμα, στη συνέχεια ακολουθεί η δημιουργία του τελικού μείγματος που θα αποτελέσει το βασικό οικοδομικό υλικό της κατασκευής. Και σε αυτή την περίπτωση, τη σύσταση του μείγματος και την προσθήκη ή όχι πρόσμικτων στοιχείων την καθορίζουν πολλοί παράγοντες, όπως για παράδειγμα η ποιότητα της πρώτης ύλης, η σεισμικότητα της περιοχής και τα τοπικά κλιματικά χαρακτηριστικά. Αυτοί και πολλοί άλλοι παράγοντες χρειάζεται να λαμβάνονται υπόψη κάθε φορά πριν την κατασκευή από τους μελετητές, έτσι ώστε να διαμορφωθεί το κατάλληλο μείγμα για τις ανάγκες του κάθε κτηρίου. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα βασικά συστατικά του μείγματος που κυριαρχούν σε όλους τους τύπους rammed earth και τα βασικά πρόσμικτα που χρησιμοποιούνται (Evergreen, 2007:8).

Γενικώς, το μείγμα για δόμηση με rammed earth όλων των τύπων αποτελείται από τα εξής βασικά συστατικά: χάλικες, άμμος, ιλύ και άργιλο. Στη συνέχεια ανάλογα, με τις ανάγκες της περιοχής και του κτηρίου που θα κατασκευαστεί προσδιορίζεται ο τύπος rammed earth που θα χρησιμοποιηθεί και τα πρόσμικτα που θα προστεθούν στο τελικό μείγμα. Παρακάτω παρουσιάζονται τα όρια της περιεκτικότητας κατά μάζα μεταξύ των βασικών συστατικών και του τσιμέντου που αποτελεί το κυρίαρχο πρόσμικτο στοιχείο. Επίσης, αναφέρεται το ποσοστό νερού κατά μάζα σε περιπτώσεις που είναι αναγκαίο για το μείγμα (Evergreen, 2007:8).

- Χάλικες και άμμος: 45 - 80%
- Ιλύς: 10 - 30%
- Άργιλος: 5 - 30%
- Νερό: 6 - 10%
- Τσιμέντο: 4 - 8%

Χάλικες και άμμος: Οι χάλικες και η άμμος αποτελούν τα βασικά αδρανή του μείγματος και μπορούν να εντοπιστούν σε ένα μεγάλο ποσοστό μέσα στο μείγμα. Η κοκκομετρική διαβάθμιση επιλέγεται από τους μελετητές, καθώς πέραν της διαφορετικής αντοχής των δομικών στοιχείων που προσδίδουν, διαμορφώνουν και διαφορετική όψη στο τελικό αποτέλεσμα. Τα αδρανή αυτά καθώς στοιβάζονται αφήνουν μεταξύ τους μικρές οπές μέσα στις οποίες μπορούν να εγκλωβιστούν αέρας και νερό. Επίσης, μέσα στα κενά που δημιουργούνται εισχωρούν τα υπόλοιπα υλικά του μείγματος, κι έτσι συνδέονται μεταξύ τους παράγοντας ένα ομοιογενές μείγμα, όταν παράλληλα όλα τα συστατικά βρίσκονται στις κατάλληλες αναλογίες (Evergreen, 2007:8).

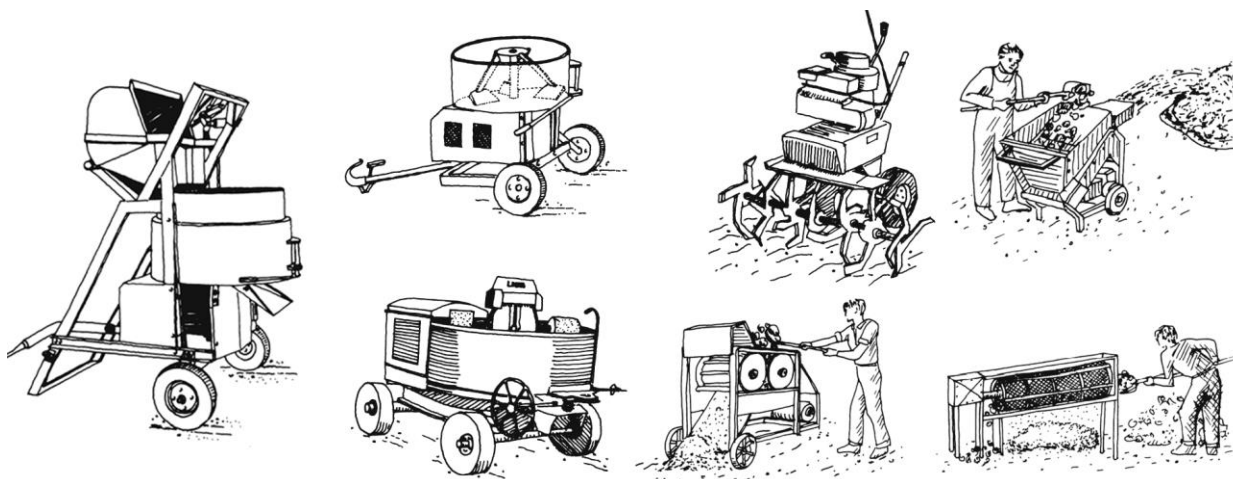
Ιλύς: Η ιλύς αποτελεί ένα σημαντικό υλικό, καθώς είναι το συστατικό που λειτουργεί ως στοιχείο πλήρωσης μεταξύ των αδρανών, δηλαδή των χαλικιών και της άμμου. Έχει την ικανότητα να καλύπτει τα μικροσκοπικά κενά που δημιουργούνται, με αποτέλεσμα να περιορίζει σημαντικά το ποσοστό του αέρα και του νερού που μπορεί να παγιδευτεί μέσα στο μείγμα κάνοντας το δομικό στοιχείο πιο στιβαρό και σταθερό. Μικρή περιεκτικότητα σε ιλύ οδηγεί σε ρηγματώσεις των δομικών στοιχείων από rammed earth, καθώς δεν είναι αρκετά στιβαρά, ενώ σε αντίθετη περίπτωση μεγάλη περιεκτικότητα σε ιλύ, σε συνδυασμό με χαμηλό ποσοστό αργίλου, μπορεί να αποτρέψει το μείγμα από την επίτευξη της κατάλληλης συνοχής μεταξύ των υλικών και να οδηγήσει πάλι σε ρωγμές κατά την ξήρανση του στοιχείου (Evergreen, 2007:8).

Αργίλος: Η άργιλος αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα στοιχεία του μείγματος. Όταν είναι υγρή έχει κολλώδη σύσταση που της δίνει τη δυνατότητα να συνδέεται καλά με τα υπόλοιπα στοιχεία, ενώ όταν στεγνώνει αποκτά μια εξαιρετική σκληρότητα ιδανική για τις κατασκευές από χώμα. Ουσιαστικά αποτελεί τη συνδετήρια ουσία όλων των συστατικών και ομογενοποιεί το μείγμα. Είναι ενδιαφέρον ότι τα σωματίδια της αργίλου είναι ηλεκτρικά φορτισμένα και ενεργούν σαν μαγνήτες που αντλούν μόρια νερού στην επιφάνειά τους. Αυτό το μοναδικό χαρακτηριστικό της επιτρέπει να συγκρατεί τα γειτονικά της σωματίδια ενωμένα. Ωστόσο, η αναλογία της αργίλου δεν είναι σταθερή σε όλους τους τύπους rammed earth. Για δόμηση με φυσική συμπιεσμένη γη, το ποσοστό της αργίλου χρειάζεται να είναι μεγάλο, ωστόσο δεν θα πρέπει να ξεπερνά ένα συγκεκριμένο όριο, καθώς πάρα πολύ μεγάλη περιεκτικότητα σε άργιλο οδηγεί σε απότομη συρρίκνωσή των δομικών στοιχείων, κατά τη διάρκεια της ξήρανόσ τους, και δημιουργία πολλών ρωγμών. Για δόμηση με σταθεροποιημένη συμπιεσμένη γη το ποσοστό της αργίλου θα πρέπει να είναι μειωμένο, καθώς τη θέση της παίρνουν διάφορα πρόσμικτα, αλλά και πάλι θα πρέπει να κατέχει ένα ικανοποιητικό ποσοστό, καθώς αποτελεί βασική συνδετική ουσία του μείγματος (Evergreen, 2007:8).

Νερό: Με την προσθήκη νερού επιτυγχάνεται η κατάλληλη σύνδεση όλων των συστατικών του μείγματος ιδιαίτερα όταν αυτό έχει έλλειψη σε υγρασία. Όταν το χώμα είναι υγρό και συμπιέζεται, αναγκάζει την άργιλο να συνδεθεί με τα άλλα συστατικά πιο εύκολα δημιουργώντας ένα πιο ισχυρό αποτέλεσμα. Μεγάλη περιεκτικότητα σε νερό προκαλεί μεγάλες ρωγμές στα δομικά στοιχεία μετά την ξήρανόσ τους, ενώ πολύ λίγη υγρασία θα αποτρέψει τα συστατικά από το να συνδεθούν με την άργιλο και το μείγμα θα είναι ανομοιογενές. Δεν είναι πάντα απαραίτητη η χρήση νερού στο μείγμα, καθώς η άργιλος και η ιλύς συγκρατούν συνήθως αρκετή υγρασία που ικανοποιεί τις ανάγκες του μείγματος γι' αυτό χρειάζεται πρώτα να μελετάται η σύσταση και η ποιότητα του χώματος (Evergreen, 2007:8).

Πρόσμικτα: Σε όλους τους τύπους rammed earth και ιδιαίτερα στη σταθεροποιημένη συμπιεσμένη γη είναι συχνή η χρήση πρόσθετων ουσιών, δηλαδή τα πρόσμικτα, που δίνουν κάποια επιπλέον χαρακτηριστικά αντοχής, καθώς έχουν κριθεί απαραίτητα για την κατασκευή από τους μελετητές. Τα πιο απλά πρόσμικτα αποτελούν οι οργανικές ίνες, όπως κλαδιά, άχυρα, ίνες μπαμπού και τρίχες κασίικας που δημιουργούν έναν τύπο ινοπλισμένου rammed earth από φυσικές ίνες. Επίσης στη σύγχρονη εποχή χρησιμοποιούν άσβεστο ή ποζολανικά υλικά, όπως θηραϊκή γη σε συγκεκριμένες δοσολογίες. Ένα άλλο πρόσμικτο που συναντάται συχνά στο μείγμα είναι το τσιμέντο. Το τσιμέντο πέρα από την επιπλέον αντοχή περιορίζει σημαντικά τη διάβρωση του δομικού στοιχείου από το νερό. Η ποσότητα τσιμέντου που προστίθεται στο μείγμα ποικίλλει και εξαρτάται κυρίως από τις ιδιότητες του εδάφους και συνήθως αποτελεί ένα πολύ μικρό ποσοστό. Γενικότερα, τα πρόσμικτα είναι πολυάριθμα και επιλέγονται με βάση τα χαρακτηριστικά της περιοχής και του τελικού αποτελέσματος που θέλουν να προσδώσουν οι μελετητές (Evergreen, 2007:8).

Η διαδικασία ανάμειξης των συστατικών μπορεί πραγματοποιηθεί με πολλούς τρόπους. Ένας απλός τρόπος αποτελεί η ανάμειξη των υλικών χειρωνακτικά με τη βοήθεια των χεριών και των ποδιών. Σε περιπτώσεις που το χώμα είναι σκληρό και δεν είναι εργάσιμο, συνήθως προστίθεται μικρή ποσότητα νερού και αφήνεται για 2 έως 4 ημέρες για να υγρανθεί, έτσι ώστε να γίνει πιο εύπλαστο. Ωστόσο, στη σύγχρονη εποχή υπάρχουν πολλά μηχανήματα, όπως χειροκίνητοι ή αυτόματοι αναδευτήρες και πολλές παραλλαγές αυτών, που βοηθούν σημαντικά στην ανάμειξη όλων των συστατικών (Minke, 2006:37-38).



εικ.4.6. Διάφορες μηχανές και εργαλεία ανάμειξης του μείγματος. (Minke, «Building with Earth - Design and Technology of a Sustainable Architecture», Birkhäuser, 2006, σελ.37-38).

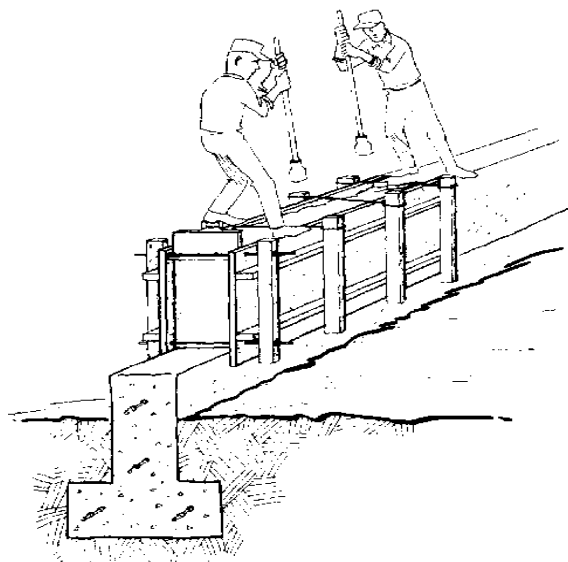
4.2. Θεμελίωση

Ιστορικά έχει παρατηρηθεί ότι οι περισσότεροι τοίχοι rammed earth δεν έφεραν θεμέλια, καθώς χάρις στην υψηλή αντοχή τους σε θλιπτικές τάσεις και την ελαστικότητα που εμφάνιζαν, θεωρήθηκε μη αναγκαίο (Maniatidis, Walker, 2003:64). Στη σύγχρονη εποχή, όμως, ο σχεδιασμός και η τοποθέτηση θεμελιώσεων για τις τοιχοποιίες rammed earth φέρει έναν ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο στην κατασκευαστική διαδικασία.

Αρχικά, εμφανίζονται κυρίως δύο τύποι θεμελίωσης στις συμβατικές κατασκευές rammed earth: πεδילוδοκοί και συνδετήριες δοκοί από οπλισμένο σκυρόδεμα. Πιο συχνά παρατηρείται η χρήση συνδετήριων δοκών, οι οποίες διατρέχουν περιμετρικά το κτήριο και εξυπηρετούν όλες τις τοιχοποιίες μεγαλύτερου πάχους που βρίσκονται στο εξωτερικό περίγραμμα. Οι δοκοί αυτές θα πρέπει να έχουν ίσο ή μεγαλύτερο πάχος σε σχέση με τον τοίχο. Οι πεδילוδοκοί εμφανίζονται κυρίως ως θεμέλια σε περιοχές δυσμενέστερες, όσον αφορά τις δυνατότητες του υπεδάφους, ενώ ουσιαστικά δεν φέρουν τόσο τους ίδιους τοίχους, αλλά μια ενιαία πλάκα οπλισμένου σκυροδέματος (αυτή του ισογείου), η οποία μετέπειτα φέρει τις τοιχοποιίες (Maniatidis, Walker, 2003:64). Βέβαια, έχουν εμφανιστεί και άλλες υλικότητες για τη διαμόρφωση θεμελιών, όπως για παράδειγμα τούβλα ή ογκώδεις λίθοι, οι οποίες όμως αφορούν κατά κύριο λόγο παραδοσιακές κατασκευές.

Σημαντικοί παράγοντες που πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν κατά τη διάρκεια κατασκευής θεμελιώσεων για στοιχεία rammed earth είναι (Maniatidis, Walker, 2003:65-67):

- Η σύσταση του υπεδάφους, η οποία μελετάται από την απαραίτητη γεωτεχνική μελέτη που διεξάγεται στην περιοχή εγκατάστασης της κατασκευής.
- Το κατάλληλο ύψος της θεμελίωσης, το οποίο επιβεβαιώνει ότι η τοιχοποιία δεν θα έρχεται σε άμεση επαφή με το γειτονικό χώμα του υπεδάφους, ώστε να μην διεισδύει η υγρασία μεταξύ των δύο εξ επαφής, θα προστατεύει τα δομικά στοιχεία από πιθανά βρόχινα νερά του εδάφους και θα εξασφαλίζει ότι τα θεμέλια θα προστατεύονται πλήρως, ώστε να μην φθείρονται κι αυτά γρήγορα από τις περιβαλλοντικές συνθήκες.
- Η κατάλληλη στεγάνωση και η απομάκρυνση των όμβριων υδάτων, καθώς το στατικό νερό μπορεί να συμβάλει στην αύξηση των υδρατμών και τελικά στην ισχυρότερη διείσδυση υγρασίας, αλλά και στην ταχύτερη διάβρωση των θεμελιών ή της τοιχοποιίας.



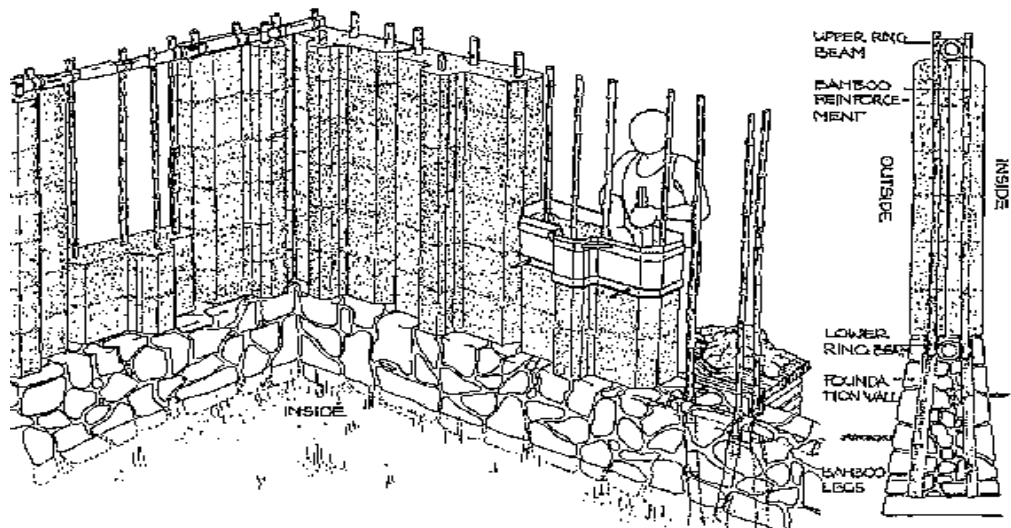
εικ.4.7. Τυπικό στοιχείο θεμελίωσης από σκυροδέμα. (Handbook for Building homes of earth, Chapter 11: Making rammed earth walls).

4.3. Οπλισμός

Στο προηγούμενο κεφάλαιο μελετήθηκαν οι μηχανικές ιδιότητες των τοιχοποιιών rammed earth, πράγμα που έφερε στην επιφάνεια ορισμένα στατικά ζητήματα. Οι τοιχοποιίες αυτές, παρά την ικανοποιητική θλιπτική τους αντοχή εμφανίζουν δυσκολία στην παραλαβή διατμητικών και εφελκυστικών τάσεων. Παράλληλα, εκτός αυτών, εμφανίζεται μια αδυναμία παραλαβής δυναμικών καταπονήσεων σεισμού, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις υψηλά σεισμογενών περιοχών. Στα ζητήματα αυτά μία απάντηση πέραν αυτής της σταθεροποίησης του μείγματος με παράγοντα τιμμέντου, ή άλλων παραγόντων, έρχεται να δώσει η τοποθέτηση οπλισμού στο εσωτερικό των τοιχοποιιών αυτών.

Ο οπλισμός των τοιχοποιιών από rammed earth επιτυγχάνεται με διάφορα είδη οπλισμού. Καταρχάς, υπάρχει η δυνατότητα αξιοποίησης τυπικών χαλύβδινων ράβδων, με διάμετρο τέτοια ώστε να καλύπτονται οι στατικές ανάγκες. Οι ράβδοι αυτές τυπικά είναι περίπου $\Phi 12-16$, τοποθετούνται σε δύο σειρές σε κάθε παρειά της τοιχοποιίας, σε κατάλληλη απόσταση και καταλαμβάνουν όλο το ύψος, ενώ συνδέονται μεταξύ τους με συνδετήρες. Εκτός όμως αυτής της συμβατικής επιλογής, δύο ακόμα τρόποι οπλισμού έχουν αποδειχθεί επαρκείς. Οι ράβδοι μπαμπού και ο ινοπλισμός του μείγματος. Μάλιστα, τα στοιχεία μπαμπού, εμφανίζονται ιδιαίτερα έντονα σε μια μεγάλη γκάμα παραδοσιακών κατασκευών συμπίεσμένου χώματος. Αυτά τυπικά έχουν διάμετρο τουλάχιστον 2,5 εκατοστά και τοποθετούνται ανά 30-50 εκατοστά (Minke, Schmidt, 2015:352).

Ο οπλισμός επεκτείνεται από τα θεμέλια και άρα τοποθετείται πριν την σκυροδέτηση τους, έτσι ώστε να επιτευχθεί διαφραγματική λειτουργία σε όλο το ύψος της κατασκευής. Τοποθετείται κυρίως κατακόρυφα στις τοιχοποιίες, καθώς ο οριζόντιος οπλισμός δυσκολεύει τη συμπίεση του μείγματος στη συνέχεια της κατασκευής, δημιουργεί δυσκολία στην ένωση των διαφόρων στρώσεων του μείγματος με αποτέλεσμα την εμφάνιση ρωγμών. Παρόλο που δεν εξυπηρετεί εμφανώς τις στατικές ιδιότητες του στοιχείου, διευκολύνει την παραλαβή των διατμητικών τάσεων. Ωστόσο, σε σύγχρονες κατασκευές παρατηρείται η χρήση οριζόντιου οπλισμού. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δίνεται στις γωνίες του εκάστοτε κτίσματος, καθώς στη συναρμογή των τοιχοποιιών εξαιτίας των οριζόντιων δυναμικών φορτίων μπορεί εύκολα να εμφανιστεί αστοχία και να ρηγματώσει. Έτσι, συνιστάται μια πύκνωση του οπλισμού σε αυτές ή η εξολοκλήρου αποφυγή δημιουργίας γωνιών μικρότερων ή ίσων των 90° (Minke, Schmidt, 2015:352-353). Τέλος, σημαντική αναφορά πρέπει να γίνει στο γεγονός ότι ο οπλισμός πρέπει να απέχει από τις δύο παρειές του τοίχου τουλάχιστον 5 εκατοστά, ώστε να αποφευχθούν μελλοντικές ρηγματώσεις στην επιφάνεια του.



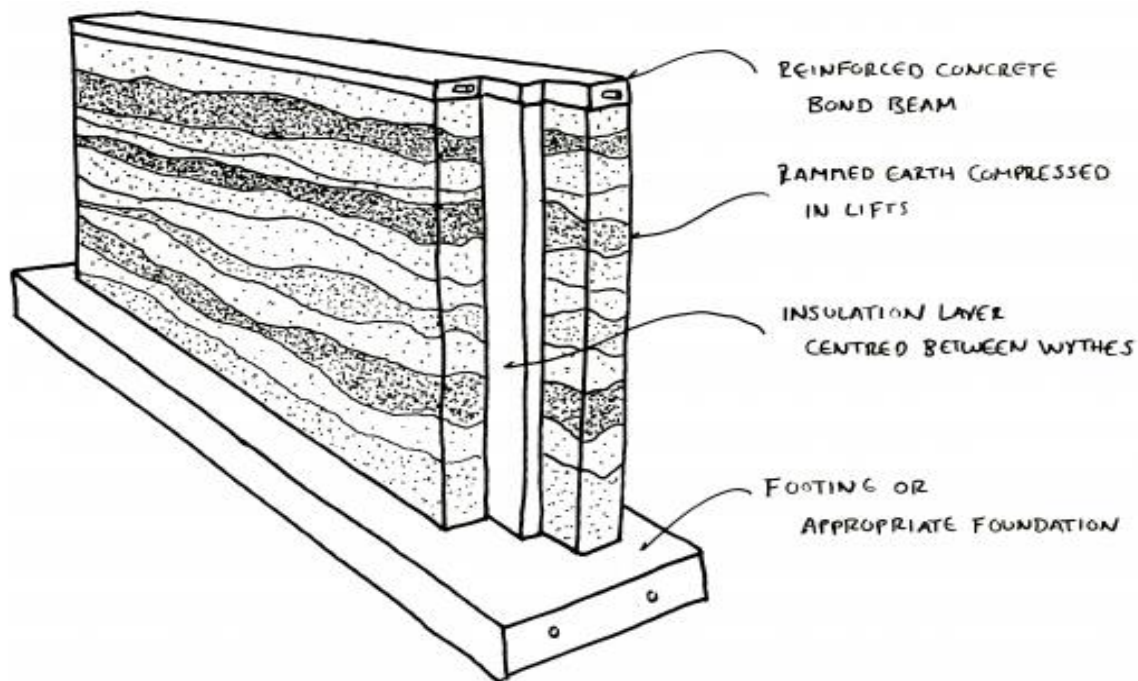
εικ.4.8. Παραδοσιακή κατασκευή από rammed earth με οπλισμό από μπαμπού. (ανακτήθηκε από: <http://www.nzdl.org/cgi-bin/library?e=d-00000-00---off-0cdl--00-0---0-10-0---0---0direct-10---4-----0-0l--11-en-50---20-about---00-0-1-00-0-0-11-1-OutfZz-8-10&cl=CL2.1&d=HASH51495f314e8d35f51533d4.9.2>=1> στις 10/03/22).

4.4. Θερμομόνωση

Η ανάγκη για θερμομόνωση στις τοιχοποιίες rammed earth έγινε εμφανής, διαπιστώνοντας την ιδιαίτερα υψηλή θερμοπερατότητα των τοιχοποιιών. Η θερμοπερατότητα κατά μέσο όρο δίνεται κοντά στα $U = 1,90-2,00 \text{ W/m}^2\text{K}$, για τυπικό πάχος τοίχου 30 εκατοστών και απέχει αρκετά από τις απαιτήσεις των Κανονισμών. Έτσι, για παράδειγμα στην Ελλάδα, ο Κ.Εν.Α.Κ. θέτει ως ανώτατο όριο θερμοπερατότητας εξωτερικού τοίχου σε επαφή με τον εξωτερικό αέρα $U_{\max} = 0,60-0,40$ (ανάλογα τη θερμική ζώνη). Έτσι, είναι αντιληπτή η ανάγκη τοποθέτησης θερμομόνωσης στους τοίχους αυτούς.

Η μέθοδος τοποθέτησης της μόνωσης των τοιχοποιιών αυτών είναι παρόμοια με αυτή των συμβατικών τοιχοποιιών, καθώς η μόνωση τοποθετείται στο κέντρο της τοιχοποιίας και καλύπτεται από την τοιχοποιία, γεγονός το οποίο φέρει ορισμένα θετικά, αλλά και ορισμένα αρνητικά. Αρχικά, η τοποθέτηση στη μέση έχει ως αποτέλεσμα ένα τμήμα του τοίχου να αξιοποιείται ως θερμική μάζα, ενώ το υπόλοιπο συνεισφέρει στη θερμομονωτική ικανότητα του τοίχου. Επίσης, με την τοποθέτηση στη μέση διατηρείται καθαρή η εικόνα και η υφή που προσφέρεται από ένα τόσο ιδιαίτερο υλικό, όπως το rammed earth (Yourhome, 2022). Ωστόσο, τα αρνητικά εμφανίζονται κατά κύριο λόγο στη στατική επάρκεια του τοίχου, καθώς η θερμομόνωση ουσιαστικά τον διχοτομεί. Συγκεκριμένα, πρέπει τα τμήματα που περιβάλλουν τη μόνωση να έχουν πάχος τουλάχιστον 20 εκατοστά, ώστε να μην παρατηρείται μεγάλη στατική διαφορά που προκύπτει από τη διχοτόμηση. Το παραπάνω γεγονός συνεπάγεται την ανάγκη ύπαρξης τοίχων κοντά στα 50 εκατοστά, καθώς θεωρητικά ο τοίχος χρειάζεται τουλάχιστον 8 εκατοστά μόνωσης, ώστε να μειωθεί αρκετά η θερμοπερατότητά του. Παράλληλα, είναι αναγκαίο να υπάρχουν συνδετήρες που διαπερνούν τη μόνωση, ώστε να ενώνονται τα δύο τμήματα της τοιχοποιίας και να υπάρχει διαφραγματικότητα της κατασκευής. Φυσικά, δημιουργούνται θερμογέφυρες στους συνδετήρες που τοποθετούνται, όμως δύναται να θεωρηθούν αμελητέες στους υπολογισμούς ενεργειακής απόδοσης. Η μόνωση, φυσικά, δύναται να τοποθετηθεί εξωτερικά ή και εσωτερικά της τοιχοποιίας, αν αυτό κρίνεται αναγκαίο από την αρχιτεκτονική μελέτη. Ωστόσο, στην περίπτωση της εσωτερικής θερμομόνωσης χάνεται πλήρως η κατάλληλη αξιοποίηση της θερμικής μάζας της τοιχοποιίας, καθώς και η υφή που προσφέρεται από την υλικότητα αυτή.

Τέλος, το υλικό της θερμομόνωσης θα πρέπει να είναι σχετικά σκληρό και σε μορφή πλακών (για παράδειγμα, πολυστερίνη), καθώς τοποθετείται παράλληλα με την τοποθέτηση του ξυλότυπου. Το γεγονός όμως αυτό έρχεται σε αντιπαράθεση με την οργανικότητα και τη σύσταση του υλικού, με αποτέλεσμα να εμφανίζεται δυσκολία στη συναρμογή των δύο διαφορετικών υλικών.

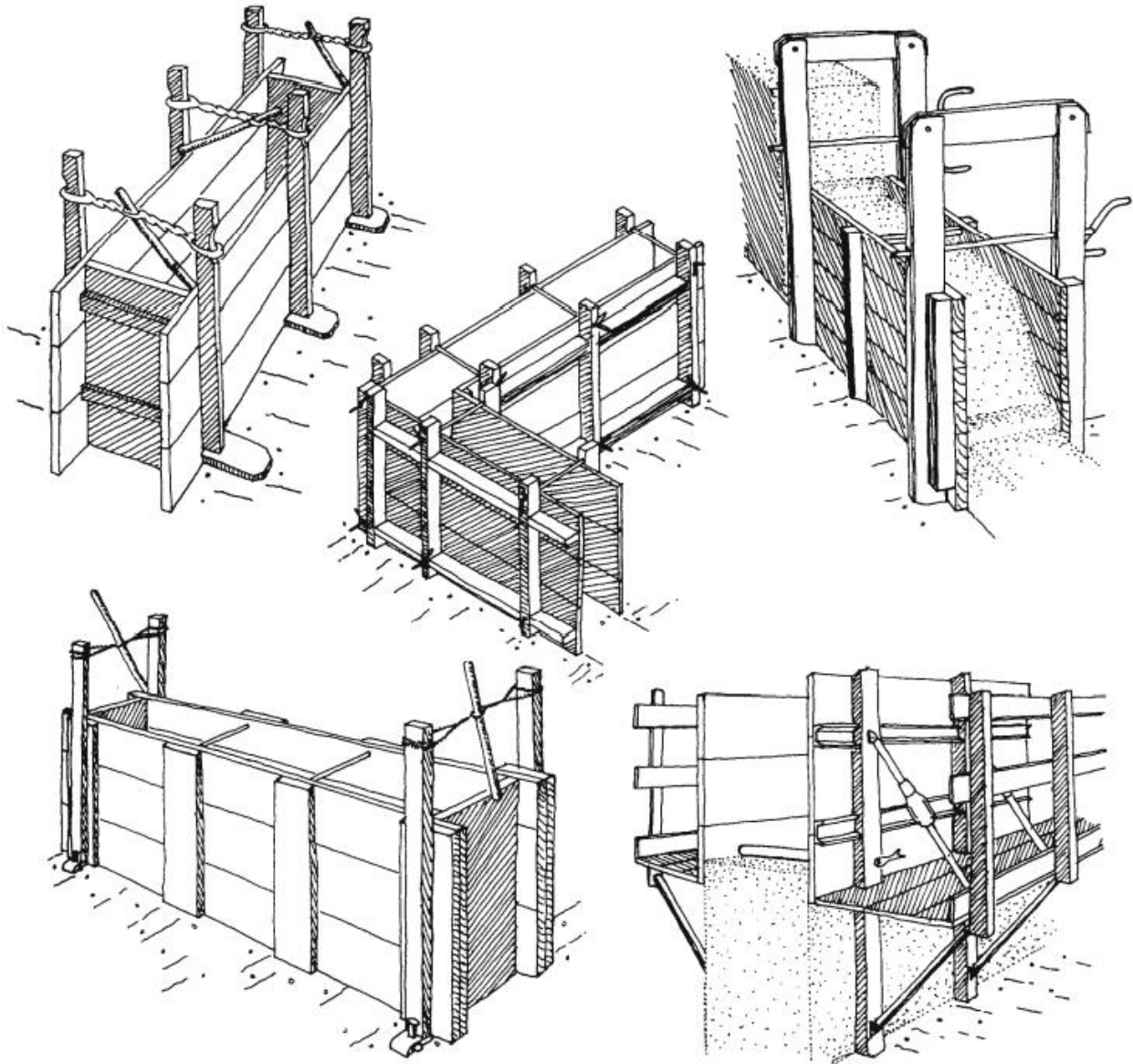


εικ.4.9. Τυπική τοποθέτηση θερμομόνωσης σε τοιχοποιία από rammed earth. (ανακτήθηκε από: <https://endeavourcentre.org/resources-for-building-green/free-encyclopedia-of-sustainable-building-materials/walls/rammed-earth/?v=e4b09f3f8402> στις 10/03/22).

4.5. Ξυλότυπος

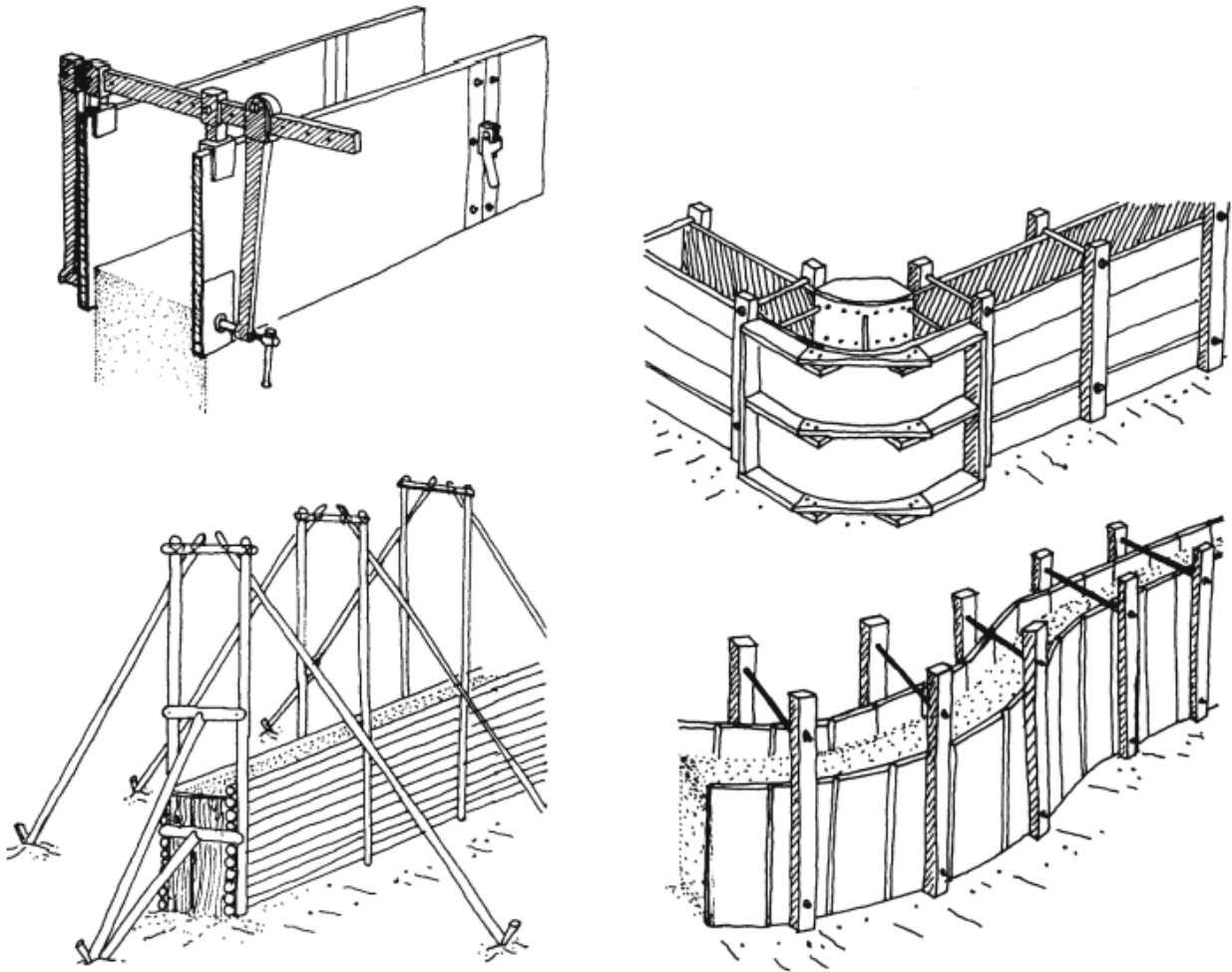
Αφού πραγματοποιηθεί η διαδικασία των θεμελιώσεων και τοποθετηθεί ο απαραίτητος οπλισμός, σύμφωνα με τις ανάγκες της κατασκευής, σειρά έχει η τοποθέτηση του ξυλοτύπου στο σημείο που θα κατασκευαστεί το επιθυμητό δομικό στοιχείο. Το υλικό του ξυλοτύπου μπορεί να ποικίλει και επιλέγεται συνήθως με βάση την αισθητική της τελικής επιφάνειας, αλλά και τα τοπικά υλικά κάθε περιοχής. Ωστόσο, πολύ σπάνια χρησιμοποιούνται καλούπια (ξυλότυπος) από μέταλλο ή άλλα υλικά, καθώς επιλέγεται κυρίως το ξύλο που είναι συγκριτικά πιο ελαφρύ, δεν επιβαρύνει την κατασκευή και είναι πιο εύκολα διαχειρίσιμο (Minke, 2006:53).

Ο παραδοσιακός ξυλότυπος αποτελείται καταρχάς από δύο παράλληλες επιφάνειες επάλληλων σανίδων, οι οποίες βρίσκονται σε απόσταση μεταξύ τους, τόση όσο και το επιθυμητό πάχος του δομικού στοιχείου. Κάθετα στις επιφάνειες αυτές τοποθετούνται επίσης ξύλινα στοιχεία που δημιουργούν ένα κλειστό περίγραμμα, έτσι ώστε να συγκρατούν το μείγμα στο εσωτερικό του και να καθορίζουν το μήκος του δομικού στοιχείου. Οι σανίδες των δύο παρειών συγκρατούνται με τη βοήθεια ξύλινων κατακόρυφων στοιχείων, τα οποία τοποθετούνται ανά ίσες αποστάσεις. Τα αντίστοιχα κατακόρυφα στοιχεία κάθε παρειάς συγκρατούνται μεταξύ τους σε απόσταση με τη βοήθεια ξύλινων ή μεταλλικών αποστατών. Ωστόσο, οι αποστάτες αυτοί παραμένουν στον ξυλότυπο μέχρι την ολοκλήρωση της συμπίεσης του μείγματος και την απομάκρυνση του ξυλοτύπου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να διαπερνούν κάθετα τα δομικά στοιχεία που δημιουργούνται, ενώ κατά την αφαίρεση του ξυλοτύπου αποκαλύπτονται διαμπερείς οπές, οι οποίες μειώνουν την αντοχή της κατασκευής και χρειάζεται να τις γεμίζουν με επιπλέον υλικό κατά το στάδιο επεξεργασίας της τελικής επιφάνειας. Για την αποφυγή αυτών των οπών έχει δημιουργηθεί μια παραλλαγή του παραδοσιακού ξυλοτύπου, στην οποία οι αποστάτες αντικαθίστανται από πολύ λεπτούς μεταλλικούς ελκυστήρες διαστάσεων 4 x 6 χιλιοστών, έτσι ώστε να αφήνουν ένα ελάχιστο κενό κατά την αφαίρεσή τους (Minke, 2006:53).



εικ.4.10. Διάφοροι τύποι παραδοσιακών ξυλοτύπων με ξύλινους και μεταλλικούς αποστάτες. (Minke, «Building with Earth - Design and Technology of a Sustainable Architecture», Birkhäuser, 2006, σελ.52).

Πιο σύγχρονες μέθοδοι, για να εξαλειφθεί πλήρως το μειονέκτημα των διαμπερών οπών, διαμορφώνονται χωρίς ενδιάμεσους αποστάτες, ωστόσο σε αυτή την περίπτωση χρειάζεται μεγαλύτερος χώρος εκατέρωθεν του δομικού στοιχείου για να στηριχθούν οι ξύλινες επιφάνειες με αποτέλεσμα να εμποδίζεται σημαντικά η κίνηση περιμετρικά. Εξελικτικά, μέχρι τις μέρες μας έχουν μελετηθεί διάφορα συστήματα ξυλοτύπων, δίνοντας έμφαση κυρίως στο ζήτημα των αποστατών με αποτέλεσμα να διατίθενται πλέον πάρα πολλές και διαφορετικές λύσεις ξυλοτύπων που αντιμετωπίζουν τα παραπάνω προβλήματα. Επίσης, έχουν διαμορφωθεί μορφές ξυλοτύπων με καμπύλες επιφάνειες, έτσι ώστε να δίνουν μεγαλύτερη ελευθερία στη μορφή των δομικών στοιχείων αλλά και στο σύνολο της κατασκευής (Minke, 2006:53).



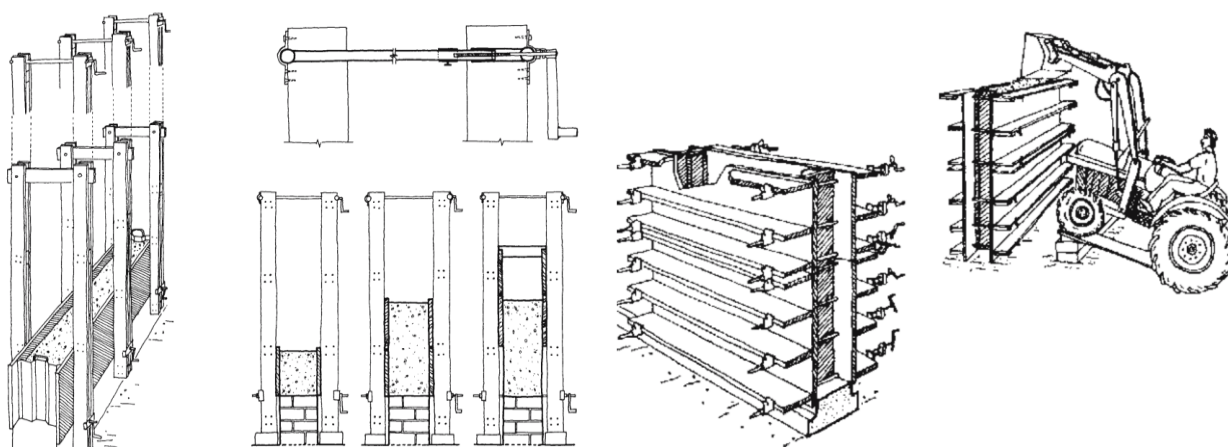
εικ.4.11. Η εξέλιξη των ξυλοτύπων και η ελευθερία των μορφών. (Minke, «Building with Earth - Design and Technology of a Sustainable Architecture», Birkhäuser, 2006, σελ.53).

Ένα πρόβλημα που προκύπτει συχνά στις κατασκευές από rammed earth είναι η δημιουργία ρωγμών στα σημεία που γίνεται η μετακίνηση του ξυλοτύπου κατά μήκος του δομικού στοιχείου, καθώς η συμπίεση του μείγματος πραγματοποιείται κατά τμήματα, δηλαδή μεταξύ δύο διαδοχικών τμημάτων που τέθηκαν σε συμπίεση. Αυτό στις μέρες μας, συνήθως αντιμετωπίζεται με τη δημιουργία εσοχών και εξοχών στη διατομή του δομικού στοιχείου με αποτέλεσμα κάθε μέρος να κουμπώνει στο επόμενο, ενώ παράλληλα δεν αφήνει κάποιο αποτύπωμα στην όψη, όπως γίνεται με άλλες μεθόδους που χρησιμοποιούν ασβεστοκονιάματα. Η διατομή αυτή επιτυγχάνεται με την τοποθέτηση εγκάρσιων στοιχείων εντός του ξυλοτύπου, συνήθως από πτυχωτή λαμαρίνα ή και άλλα υλικά (Minke, 2006:55).

Κοινά συστήματα ξυλοτύπων με αυτά που χρησιμοποιούνται στις κατασκευές από σκυρόδεμα μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για το rammed earth, συνήθως όμως αποδεικνύεται ότι είναι πολύ βαριά και ακριβά σε αντίθεση με τα παραπάνω συστήματα. Στην Ευρώπη πλέον για τις παρειές των δομικών στοιχείων χρησιμοποιούνται ξύλινες επιφάνειες πάχους περίπου 20 χιλιοστών, ενώ τα κάθετα στοιχεία τοποθετούνται ανά 75 εκατοστά. Αν δεν τηρηθούν αυτές οι αποστάσεις υπάρχει κίνδυνος κατά τη συμπίεση του μείγματος οι εξωτερικές επιφάνειες να καμφθούν και να λυγίσουν προς τα έξω. Μια εναλλακτική είναι η χρήση ξύλινων επιφανειών 30 έως 45 χιλιοστών. Σε αυτή την περίπτωση τα κατακόρυφα στοιχεία μπορούν να τοποθετηθούν ανά 100 έως 150 εκατοστά.

Γενικότερα, για τον ξυλότυπο της τεχνικής του rammed earth είναι σημαντικό να λαμβάνονται υπόψη τα παρακάτω (Minke, 2006:53):

- Το πάχος των σανίδων ή των ξύλινων επιφανειών θα πρέπει να είναι ικανό να παραλάβει την κάμψη κατά τη διάρκεια της συμπίεσης του μείγματος.
- Τα κάθετα στοιχεία που συγκρατούν τις βασικές επιφάνειες του δομικού στοιχείου θα πρέπει να έχουν μεταξύ τους κατάλληλες αποστάσεις, ώστε να μην επιτρέπουν την κάμψη των επιφανειών.
- Κάθε εξάρτημα που χρησιμοποιείται θα πρέπει να μπορεί να μεταφερθεί εύκολα από δύο άτομα.
- Το σύνολο του ξυλοτύπου θα πρέπει να έχει την ικανότητα να προσαρμόζεται εύκολα τόσο στον κατακόρυφο όσο και στον οριζόντιο άξονα.
- Σφάλματα που μπορεί να προκύψουν στον ξυλότυπο και να οδηγήσουν σε διαφορετικό πάχος του δομικού στοιχείου, είτε κατά μήκος είτε καθ' ύψος, θα πρέπει να βρίσκονται εντός καθορισμένων ορίων από τους μελετητές.



εικ.4.12. Σύγχρονοι ξυλότυποι. (Minke, «Building with Earth - Design and Technology of a Sustainable Architecture», Birkhäuser, 2006, σελ.56-57).

4.6. Συμπίεση μείγματος

Αφού ολοκληρωθεί η επιλογή και η τοποθέτηση του ξυλοτύπου ακολουθεί η σταδιακή συμπίεση του μείγματος που έχει δημιουργηθεί και η κατασκευή των δομικών στοιχείων του κτηρίου. Η συμπίεση του μείγματος αποτελεί το πιο βασικό στάδιο της συνολικής διαδικασίας του rammed earth, και ίσως το σημαντικότερο όσον αφορά την εξασφάλιση των προδιαγραφών αντοχής και της ποιότητας του τελικού αποτελέσματος για το δομικό στοιχείο. Γενικότερα, ο τρόπος συμπίεσης του μείγματος είναι κοινός σε όλες τις τεχνικές, ανεξαρτήτως της μορφής του ξυλοτύπου. Οι διαφορές εντοπίζονται στα εργαλεία που χρησιμοποιούνται τα οποία αποτελούν ένα σημαντικό στοιχείο για τη σωστή συμπίεση του μείγματος και κατ' επέκταση του τελικού αποτελέσματος.

4.6.1. Διαδικασία συμπίεσης

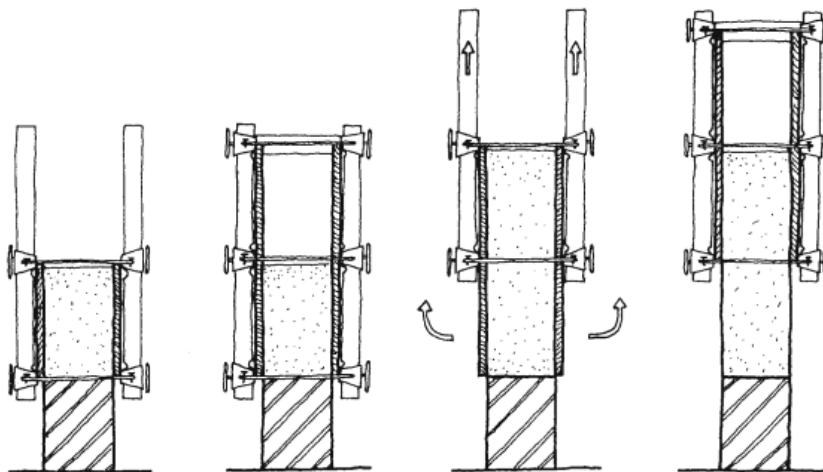
Η συμπίεση του μείγματος πραγματοποιείται σταδιακά μέσα στον ξυλότυπο σε επάλληλες λεπτές στρώσεις. Κάθε στρώση μείγματος έχει περίπου αρχικό πάχος 15 με 20 εκατοστά, ενώ μετά τη συμπίεση μπορεί να φτάσει και τα 10 εκατοστά έχοντας συμπιεστεί έως και στο 50%. Η συμπίεση των στρώσεων πραγματοποιείται με τη βοήθεια χειροκίνητων ή μηχανικών εμβόλων (rammers), για τα οποία γίνεται εκτενέστερη αναφορά στη συνέχεια. Σε αυτή τη φάση είναι σημαντικό να δοθεί προσοχή στον τρόπο συμπίεσης του μείγματος. Γενικότερα, η συμπίεση θα πρέπει να πραγματοποιείται ομοιόμορφα σε όλη την επιφάνεια και να δίνεται μεγάλη έμφαση στις ακμές και στις γωνίες, ώστε να

μην δημιουργούνται κενά και το μείγμα να έχει συνοχή. Αφού ολοκληρωθεί η συμπίεση της πρώτης στρώσης, ακολουθεί ξανά η χύτευση του μείγματος στον ξυλότυπο και η συμπίεση της επόμενης στρώσης, χωρίς να χρειάζεται χρόνος για να στεγνώσει η προηγούμενη στρώση. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρι τη δημιουργία συγκεκριμένου ύψους και μήκους σύμφωνα με τις διαστάσεις που επιτρέπει η μορφή του ξυλοτύπου (Dabaieh, 2014:18).



εικ.4.13. Διαδικασία συμπίεσης μείγματος. (ανακτήθηκε από: <https://www.flickr.com/photos/ourfarmadventure/4101441208/> στις 02/01/22).

Σε όλες σχεδόν τις τεχνικές κατασκευής στοιχείων από rammed earth, ο ξυλότυπος δεν παραμένει σταθερός αλλά μεταφέρεται κατά τον οριζόντιο και κατακόρυφο άξονα, με αποτέλεσμα τα δομικά στοιχεία να διαμορφώνονται σταδιακά και βήμα προς βήμα. Κάθε στάδιο συμπίεσης, πριν τη μετακίνηση του ξυλοτύπου, επιτρέπει τη δημιουργία χωμάτινων στοιχείων περίπου από 50 μέχρι 80 εκατοστά σε ύψος, ενώ το μήκος προσδιορίζεται συνήθως από τους μελετητές σύμφωνα με τη μορφή του ξυλοτύπου. Οι διαστάσεις αυτές βέβαια δεν είναι σταθερές και προσδιορίζονται ανάλογα με τις ανάγκες του κτηρίου, το είδος του μείγματος και το επιθυμητό αισθητικό αποτέλεσμα σε κάθε κατασκευή ξεχωριστά από τους επιβλέποντες του έργου. Στη συνέχεια, αφού δημιουργηθεί το απαραίτητο ύψος σε όλο το επιθυμητό μήκος, ο ξυλότυπος μεταφέρεται υψηλότερα και ακολουθείται η ίδια διαδικασία μέχρι να δημιουργηθεί το απαραίτητο ύψος των δομικών στοιχείων (Minke, 2006:55).



εικ.4.14. Η μετακίνησης του ξυλοτύπου κατά τη διαδικασία συμπίεσης. (Minke, «Building with Earth - Design and Technology of a Sustainable Architecture», Birkhäuser, 2006, σελ.53).



Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι κατά τη μεταφορά του ξυλοτύπου, καθώς απαιτείται κάποιο χρονικό διάστημα, τα τμήματα του στοιχείου από χώμα που αφήνονται ελεύθερα αρχίζουν να ξηραίνονται και να συρρικνώνονται αφού απομακρύνεται σταδιακά η υγρασία από αυτά. Αυτό το φαινόμενο είναι πιο έντονο στα ανώτερα τμήματα του στοιχείου. Έτσι, κατά τη συμπίεση του όμορου στοιχείου χρειάζεται προσοχή, ώστε να ενωθούν σωστά τα επιμέρους τμήματα, καθώς σε πολλές περιπτώσεις δημιουργούνται ρωγμές που μειώνουν σημαντικά την ποιότητα της κατασκευής, ενώ παράλληλα μπορεί πιο εύκολα να εισχωρήσει το νερό και να προκαλέσει αποσύνθεση μέρους του δομικού στοιχείου. Με τη γαλλική τεχνική rammed earth (pisé), αυτό το πρόβλημα επιλύθηκε με τη χρήση ενός στρώματος ασβεστολιθικού κονιάματος πάνω από κάθε στοιχείο πριν από την τοποθέτηση ενός νέου, ενώ μερικές φορές τοποθετείται ακόμη και στην πλευρική ένωση μεταξύ των τμημάτων με μια μικρή κλίση. Ένας άλλος τρόπος επίλυσης αυτού του προβλήματος είναι η επεξεργασία των ελεύθερων επιφανειών με τη βοήθεια των χεριών ή αιχμηρών εργαλείων όπως πριόνια και μαχαίρια, ώστε να απομακρυνθεί μια λεπτή στρώση υλικού και η επιφάνεια να γίνει πιο αδρή ώστε το επόμενο τμήμα να έχει καλύτερη εφαρμογή (Minke, 2006:55).

4.6.2. Χειροκίνητα και μηχανικά εργαλεία συμπίεσης

Για την επιτυχή συμπίεση του μείγματος και τη δημιουργία ανθεκτικών δομικών στοιχείων από rammed earth χρειάζεται λίγη προσοχή και πολύ καλά εργαλεία συμπίεσης, τα λεγόμενα rammers. Αυτό βέβαια δεν καθιστά τα πιο απλά έμβολα λιγότερο αποτελεσματικά. Καταρχάς, υπάρχουν τα παραδοσιακά χειροκίνητα έμβολα, τα οποία είναι κατασκευασμένα συνήθως από ξύλο, μέταλλο και πέτρα. Οι λαβές των εμβόλων είναι κοινές και η διαφορά εντοπίζεται στις κεφαλές οι οποίες έχουν ποικιλία μεγέθους και σχήματος, έτσι ώστε να εξυπηρετείται κάθε φορά η συμπίεση σε όλα τα σημεία του ξυλοτύπου. Έτσι, μια τετράγωνη κεφαλή βοηθά σημαντικά σε ορθοκανονικούς ξυλοτύπους, ενώ μια στρογγυλή κεφαλή εξυπηρετεί περισσότερο τη συμπίεση καμπύλων ξυλοτύπων. Επίσης, υπάρχουν ειδικές κεφαλές που χρησιμοποιούνται στις γωνίες και τις ακμές του ξυλοτύπου, έτσι ώστε να διευκολύνουν τη συμπίεση και να μην αφήνουν κενά στο μείγμα. Η συμπίεση με τα χειροκίνητα έμβολα πραγματοποιείται μέσω της επαναλαμβανόμενης πίεσης του μείγματος με τις εκάστοτε κεφαλές, έως ότου να προκύψει το επιθυμητό πάχος της στρώσης και το μείγμα να αποκτήσει μια σχετική σπιβαρότητα. Οι τρεις βασικοί παράγοντες που επηρεάζουν την ποιότητα της συμπίεσης είναι (rammed earth consulting, 2021):

- η επιφάνεια της κεφαλής του εμβόλου.
- το πάχος της στρώσης που πρέπει να συμπιεστεί.
- η δύναμη που ασκείται στο μείγμα κατά τη συμπίεση από το έμβολο.

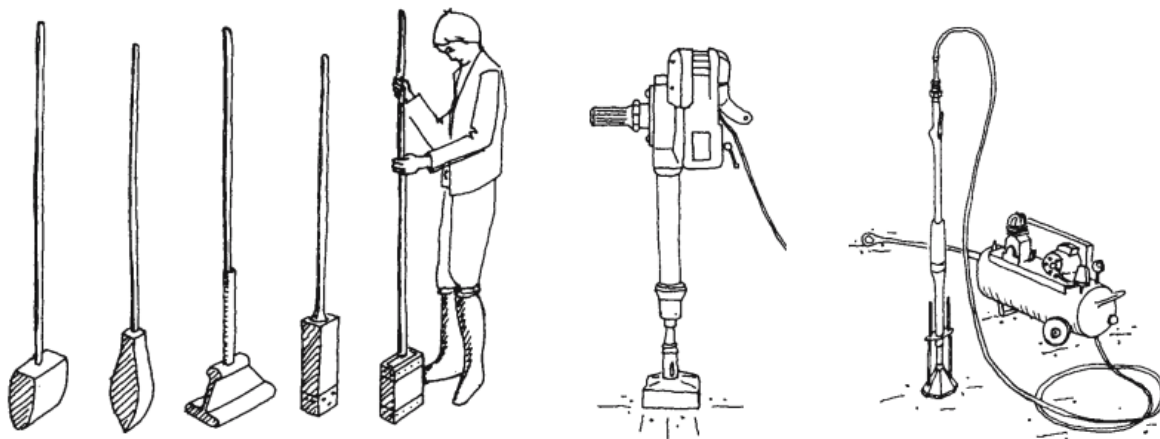
Η επιφάνεια της κεφαλής του εμβόλου μπορεί να είναι πιο μεγάλη σε εμβαδόν όταν το πάχος της στρώσης που προορίζεται για συμπίεση είναι μικρό, ενώ όταν το πάχος αυξάνεται το εμβαδόν της κεφαλής θα πρέπει να μειώνεται. Όσο πιο μικρή είναι η επιφάνεια της κεφαλής τόσο μεγαλύτερη είναι η πίεση που ασκείται στο μείγμα. Μικρές επιφάνειες κεφαλών χρησιμοποιούνται στο περίγραμμα του ξυλοτύπου, έτσι ώστε να δημιουργηθεί ένα ισχυρό και πιο σκληρό περίγραμμα, ενώ στο εσωτερικό χρησιμοποιούνται κεφαλές με μεγαλύτερη επιφάνεια.

Το βάρος των εμβόλων ποικίλλει, έτσι ώστε να εξυπηρετεί κάθε φορά τις ανάγκες της συμπίεσης, αλλά κυρίως την πιο εύκολη διαχείριση από τον άνθρωπο. Μερικοί προτιμούν πιο βαριά έμβολα, ενώ άλλοι επιλέγουν πιο ελαφριά, τα οποία μπορούν να διαχειριστούν πιο εύκολα.

Οι λαβές των εμβόλων συνήθως είναι ξύλινες και έχουν ένα ικανό μήκος για να είναι πιο διαχειρίσιμα, ωστόσο μπορούν να είναι κατασκευασμένες και από μέταλλο αυξάνοντας ίσως το βάρος του εμβόλου.

Εκτός από τα χειροκίνητα έμβολα πλέον υπάρχουν και τα μηχανικά έμβολα, τα οποία χρειάζονται έναν ειδικό συμπιεστή για να λειτουργήσουν, ενώ συχνά είναι και τα βενζινοκίνητα ή τα ηλεκτρικά

έμβολα. Η επιλογή μεταξύ όλων των εμβόλων, χειροκίνητων και μηχανικών, προκύπτει με μοναδική προϋπόθεση την ευελιξία και την ευκολία λειτουργίας τους κατά τη διαδικασία της συμπίεσης με βάση τη μορφή και το είδος του ξυλότυπου. Ένας απλός ξυλότυπος ίσως δεν έχει ανάγκη μηχανικών εμβόλων, ωστόσο ένας πιο περίπλοκος πιθανόν να χρειάζεται ένα συνδυασμό μηχανικών και χειροκίνητων εμβόλων. Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι παρόλο που τα μηχανικά έμβολα λειτουργούν πολύ καλά, έχουν συνήθως μεγαλύτερο βάρος, πράγμα που τα καθιστά λιγότερο εύχρηστα και δεν περιορίζουν εν τέλει τον χρόνο της συμπίεσης. Τέλος, όπως χαρακτηρίστηκα αναφέρει η ομάδα των rammed earth consulting (2021), τα μηχανικά έμβολα παράγουν πολύ θόρυβο που δεν επιτρέπει στους εργαζόμενους να επικοινωνούν μεταξύ τους, ενώ όταν δουλεύουν με χειροκίνητα έμβολα έχουν την ευκαιρία ταυτόχρονα να μιλούν και να τραγουδούν, καθώς εργάζονται.



εικ.4.15. Χειροκίνητα και μηχανικά εργαλεία συμπίεσης. (Minke, «Building with Earth - Design and Technology of a Sustainable Architecture», Birkhäuser, 2006, σελ.54).

4.7. Επεξεργασία τελικής επιφάνειας

Ολοκληρώνοντας την κατασκευή της τοιχοποιίας και απομακρύνοντας τον ξυλότυπο, φτάνουμε στο τελικό στάδιο εργασίας, δηλαδή στην επεξεργασία της τελικής επιφάνειας. Ένα από τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της τοιχοποιίας rammed earth είναι η τελική επιφάνειά της, καθώς εμφανίζονται οι επιμέρους στρώσεις που συμπίεστηκαν. Εφόσον έχει αξιοποιηθεί ο κατάλληλος λείος ξυλότυπος και η συμπίεση έχει ολοκληρωθεί επιτυχώς, τότε το τελικό αποτέλεσμα της τοιχοποιίας είναι το επιθυμητό (Guelberth, Chiras, 2003:411). Σε περίπτωση που εμφανιστούν ατέλειες στην τελική επιφάνεια ή διαμπερείς οπές λόγω του ξυλότυπου, αυτές συμπληρώνονται με επιπλέον μείγμα ή διαβρέχονται τοπικά και πλάθονται με το χέρι.

Παρ' όλ' αυτά, μπορεί να υπάρξουν λόγοι για τους οποίους είναι αναγκαία η επικάλυψη αυτής της επιφάνειας, τουλάχιστον στην εξωτερική της παρειά. Ένας από αυτούς μπορεί να είναι η επικάλυψη με κατάλληλο τύπο κονιάματος, ο οποίος προστατεύει την τοιχοποιία από τη διάβρωση εξαιτίας των καιρικών συνθηκών, με αποτέλεσμα να αυξάνει αισθητά τον χρόνο ζωής της (Guelberth, Chiras, 2003:411). Στην περίπτωση επεξεργασίας της τελικής επιφάνειας, είναι αναγκαίο να μελετηθούν τα υλικά τα οποία δύναται να επικαλύψουν τοίχοποιες από rammed earth, αλλά και η κατάλληλη μέθοδος δημιουργίας της επιφάνειας αυτής.

Αρχικά, είναι αναγκαία η προετοιμασία του τοίχου για την επικάλυψη του. Συγκεκριμένα, επειδή όπως προαναφέρθηκε οι τοιχοποιίες αυτές τείνουν να έχουν λεία επιφάνεια, είναι απαραίτητη είτε η επικάλυψη της τελικής επιφάνειας με έναν συγκολλητικό παράγοντα, ώστε να έχει καλύτερη πρόσφυση το υλικό επικάλυψης, είτε να ξυστεί η επιφάνεια αυτή ώστε να γίνει περισσότερο τραχιά. Επιπλέον, είναι πιθανή η ανάγκη χρήσης διπλής στρώσης επικάλυψης, καθώς λόγω της υφής του



rammed earth, λεπτές ζώνες επικάλυψης τείνουν να ρηγματώνονται εύκολα στο πέρασμα του χρόνου (Guelberth, Chiras, 2003:412).

Όσον αφορά τα υλικά επικάλυψης, υπάρχει μία ιδιαίτερη έλλειψη σύγχρονης μελέτης, η οποία να αναζητά τα κατάλληλα υλικά, που θα αλληλοεπιδράσουν ορθά με την υλικότητα του τοίχου rammed earth. Παρόλα αυτά, στο βιβλίο της Patty R.L. «Paints and plasters for rammed earth walls» αναλύονται εις βάθος τα υλικά που αξιοποιήθηκαν μέχρι και τα μέσα του 20^{ου} αιώνα στην επικάλυψη τέτοιων τοιχοποιιών. Συγκεκριμένα, εμφανίζονται τα παρακάτω:

- Τσιμεντοκονιάματα Portland, τα οποία, αν και αποτελούν μια από τις πιο ακριβές επιλογές, εμφανίζονται στις περισσότερες περιπτώσεις επικάλυψης. Εφαρμόζονται με ιδιαίτερη ευκολία, με τη χρήση κολλητικού παράγοντα και καρφωμένου πλέγματος ενίσχυσης, ενώ παράλληλα παραμένουν και για μεγάλα χρονικά διαστήματα άφθαρτα, έχοντας τον μεγαλύτερο δείκτη αντοχής στις καιρικές συνθήκες.
- Σοβάς τύπου Dagga, ένα είδος «λασπώδη» σοβά με κύρια συστατικά χρώμα από μυρμηγκοφωλιές και κόπραννα ή αίμα αγελάδας, ο οποίος έχει τη δυνατότητα να στεγνώνει γρήγορα χάρις την ψηλή αναλογία του σε άμμο και πηλό. Αν και είναι η φθηνότερη επιλογή, δεν σημαίνει κι ότι δεν διαρκεί εξίσου όσο το τσιμέντο, με την προϋπόθεση ότι θα τοποθετείται από έμπειρο τεχνητή.
- Σοβάς Dagga με προσθήκη ασφαλτικού παράγοντα, πράγμα που εξυπηρετεί στην ευκολότερη τοποθέτηση του σοβά.
- Σοβάς Dagga με προσθήκη τσιμέντου, για την μακροπρόθεσμη αντοχή του σοβά στα καιρικά φαινόμενα.

Είναι σημαντικό να αναφερθεί, ότι τα παραπάνω αποτελούν επιχρίσματα τα οποία αναφέρονται συχνά στην βιβλιογραφία και που χρησιμοποιούσαν κυρίως οι άνθρωποι σε παλαιότερες κατασκευές. Στη σύγχρονη εποχή έχουν δημιουργηθεί αρκετά επαλειφώμενα διάφανα βερνίκια που προστατεύουν από την υγρασία και το νερό της βροχής, αλλά και τους μικροοργανισμούς που μπορεί να βλάψουν το υλικό, χωρίς όμως να καλύπτουν την ιδιαίτερη τελική επιφάνεια της τοιχοποιίας που στις περισσότερες κατασκευές είναι επιθυμητή για την ολοκλήρωση της συνθετικής ιδέας του κτηρίου. Δυστυχώς, οι βιβλιογραφικές πηγές για αυτά τα βερνίκια είναι λίγες και γι' αυτόν τον λόγο δεν έγινε δυνατή η εύρεση των συστατικών και του τρόπου παρασκευής τους.

Καταλήγοντας, η διαδικασία κατασκευής τοιχοποιιών από rammed earth απαιτεί μια ιδιαίτερη μελέτη και έναν κατάλληλο συντονισμό των συνεργείων που εμπλέκονται στο έργο. Η ορθή συγκρότησή τους απαιτεί κατάλληλη τεχνογνωσία πάνω στον τρόπο δημιουργίας του μείγματος, την κατάλληλη τοποθέτηση του ξυλοτύπου και την τελική συμπίεση του μείγματος, ασχέτως των πιθανών περαιτέρω στοιχείων που μπορεί να φέρει (όπως θερμομόνωση, οπλισμός ή επικάλυψη). Ωστόσο, αν επιτευχθεί η δημιουργία του δομικού στοιχείου, τότε έχει επιτευχθεί και η δημιουργία μιας μοναδικής τοιχοποιίας, η οποία είναι ανθεκτική στον χρόνο, με σημαντική στατική επάρκεια και φυσικά με ένα ιδιαίτερο χαρακτηριστικό τελικό αισθητικό αποτέλεσμα.



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Δομικά και άλλα στοιχεία σε ένα κτήριο από rammed earth

Το κεφάλαιο αυτό αναφέρεται στην κατασκευή των λοιπών βασικών δομικών στοιχείων ενός κτηρίου από rammed earth, και πιο συγκεκριμένα στα ανοίγματα, στα πατώματα και στον τρόπο στέγασης του κτηρίου. Γενικότερα, η κατασκευή των στοιχείων αυτών δεν διαφέρει ουσιαστικά από αυτή στα συμβατικά κτήρια με φέροντα οργανισμό από σκυρόδεμα, ενώ παράλληλα ούτε τα υλικά που χρησιμοποιούνται διαφέρουν. Ωστόσο υπάρχουν αρκετοί παράγοντες που οδηγούν στην επιλογή του υλικού και του τρόπου κατασκευής, όπως για παράδειγμα η σεισμική δραστηριότητα της περιοχής, η συνάφεια των υλικών μεταξύ τους, η βιωσιμότητα του κτηρίου, το είδος του rammed earth που χρησιμοποιείται και η συνολική συνθετική και αρχιτεκτονική αντίληψη για την κατασκευή. Καθώς νέες εξελιγμένες τεχνικές rammed earth αναδεικνύονται με το πέρασμα των χρόνων, τα στοιχεία αυτά αποκτούν ολοένα και περισσότερες δυνατότητες σε σύγχρονα κτήρια στα οποία και εστιάζεται το ενδιαφέρον των παρακάτω κεφαλαίων.

5.1. Πατώματα, στέγες και επίπεδα δώματα

Τα πατώματα και η στέγαση της κατασκευής ολοκληρώνουν τα βασικά δομικά στοιχεία ενός κτηρίου. Όπως προαναφέρεται δεν υπάρχει κάποιο ιδανικό υλικό κατασκευής ή δομικό σύστημα για τα στοιχεία αυτά, κι έτσι μπορεί να χρησιμοποιηθεί οπδήποτε χρησιμοποιείται και στις συμβατικές κατασκευές. Το σκυρόδεμα, το μέταλλο και το ξύλο μπορούν εξίσου να τοποθετηθούν σε κτήρια από rammed earth. Ωστόσο, παράγοντες όπως η στατική επάρκεια, η βιωσιμότητα και η συνάφεια των υλικών μπορούν να αποτελέσουν ισχυρά στοιχεία για την επιλογή του κατάλληλου υλικού. Καθώς το χώμα έχει πολύ μικρή αντοχή σε εφελκυσμό, η χρήση του σκυροδέματος αποτελεί επιβαρυντικό παράγοντα, ιδιαίτερα σε περιοχές με έντονη σεισμική δραστηριότητα, καθώς έχει μεγάλο ίδιο βάρος. Σε αυτές τις περιπτώσεις το μέταλλο ή ακόμα καλύτερα το ξύλο, ως ελαφριές κατασκευές, είναι προτιμότερες από το σκυρόδεμα. Επιπλέον, το ξύλο ως φυσικό υλικό έχει καλύτερη συνάφεια με τις τοιχοποιίες από rammed earth, σε αντίθεση με το μέταλλο και το σκυρόδεμα που αποτελούν βιομηχανικά υλικά και πιο ενεργοβόρα. Τέλος, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει ο τρόπος σύνδεσης των στοιχείων αυτών με τις τοιχοποιίες από rammed earth και αποτελεί το σημείο που θα μελετηθεί περισσότερο στις επόμενες παραγράφους.

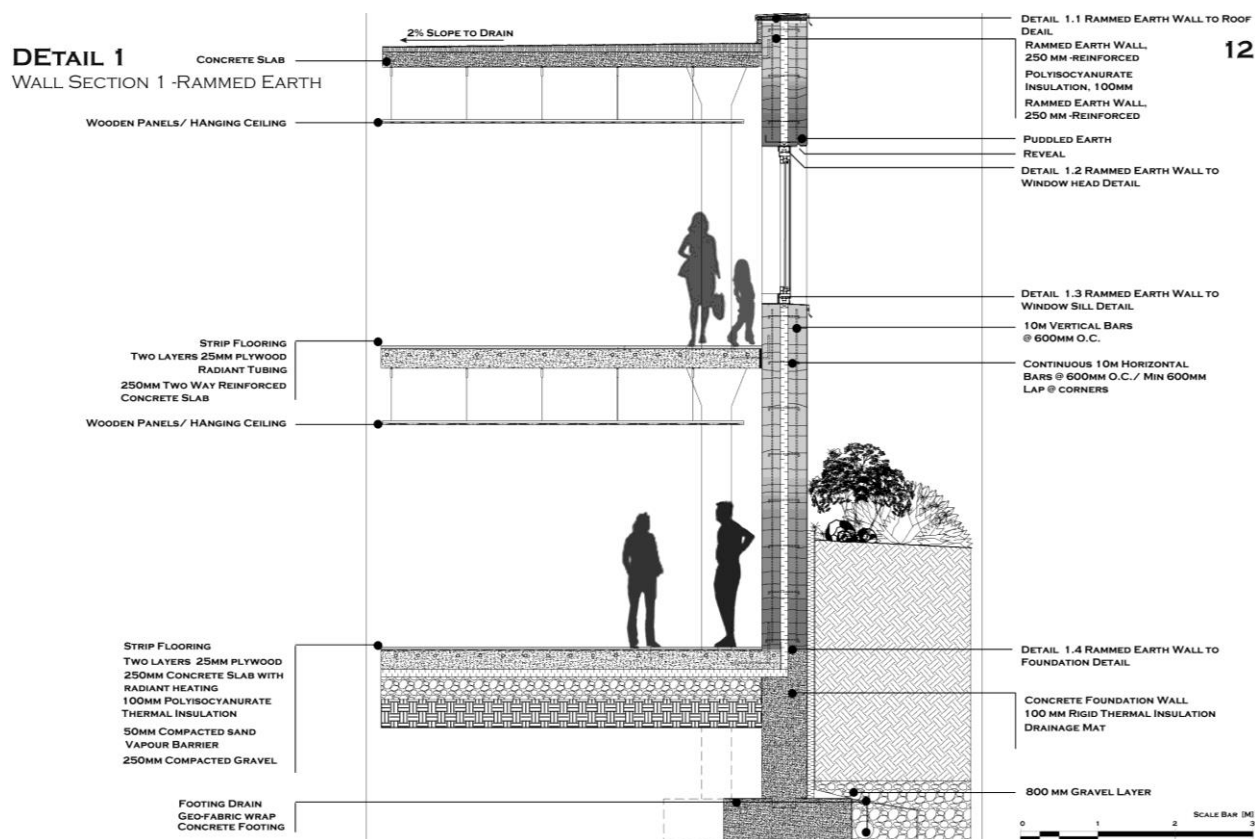
Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι μεγάλο μέρος των πληροφοριών που παρουσιάζονται σε αυτό το κεφάλαιο έχουν προκύψει μέσα από τη μελέτη ποικιλίας οικοδομικών λεπτομερειών για κάθε υλικό και τύπο πατώματος και στέγης, με έμφαση στα σημεία σύνδεσης με την τοιχοποιία, καθώς η υπόλοιπη κατασκευή τους συμβαδίζει με αυτή των συμβατικών κτηρίων. Επομένως, είναι στοιχεία τα οποία έχουν μελετηθεί ή έχουν εφαρμοστεί ήδη σε υπάρχοντα κτήρια και αποτελούν την επιλογή του αντίστοιχου μελετητή, χωρίς να είναι δεσμευτική και απολύτως αντικειμενική.

5.1.1. Πατώματα

Στη σύγχρονη αρχιτεκτονική ο πιο συχνά συναντώμενος τύπος πατώματος είναι μια πλάκα από οπλισμένο σκυρόδεμα, ενώ το υλικό των δαπέδων ποικίλει. Στα κτήρια που έχουν ως βασικό φέροντα οργανισμό τις τοιχοποιίες από rammed earth, η πλάκα από σκυρόδεμα αποτελεί έναν επιβαρυντικό παράγοντα για όλη την κατασκευή, καθώς έχει μεγάλο βάρος. Όπως αναφέρεται στο Κεφάλαιο 3, παρόλο που το rammed earth δεν έχει ικανοποιητική αντοχή σε εφελκυσμό, η αντοχή του σε θλίψη είναι πολύ καλύτερη, με αποτέλεσμα η επιλογή μιας πλάκας από σκυρόδεμα να μην είναι απολύτως απαγορευτική, ιδιαίτερα αν η περιοχή δεν έχει έντονη σεισμική δραστηριότητα. Σε αντίθετες περιπτώσεις, το rammed earth αποτελεί έναν δευτερεύοντα φέροντα οργανισμό, ενώ τη βασική στήριξη της πλάκας και τη μεταφορά των φορτίων αναλαμβάνουν οι δοκοί και στη συνέχεια υποστυλώματα από σκυρόδεμα. Σε κάθε περίπτωση είναι σημαντικό να μελετηθεί ο τρόπος σύνδεσης της πλάκας από σκυρόδεμα με τις τοιχοποιίες από rammed earth. Συνήθως, χρησιμοποιείται ένα

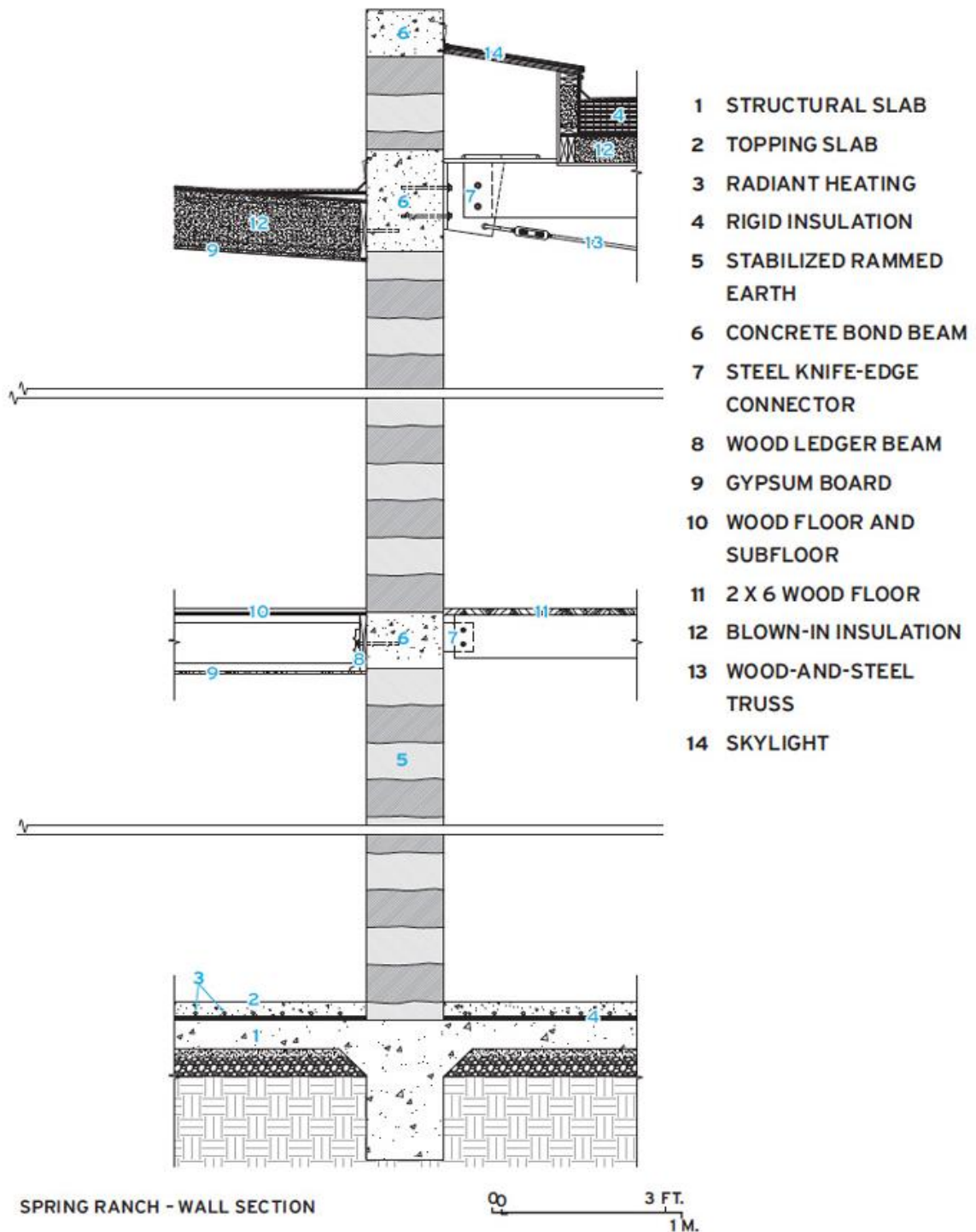


περιμετρικό οριζόντιο διάζωμα στα επίπεδα των πατωμάτων, το οποίο συνδέεται με τον οπλισμό της τοιχοποιίας, όταν υπάρχει, κι έτσι όλη η κατασκευή λειτουργεί συνολικά κατά την επίδραση των δυναμικών φορτίων. Σε περιπτώσεις που υπάρχουν υποστυλώματα από σκυρόδεμα που στηρίζουν την πλάκα, η συναρμογή με τοιχοποιίες συμπιεσμένου χώματος πραγματοποιείται ευκολότερα, χωρίς τη χρήση σενάζ, ωστόσο θα πρέπει και πάλι να είναι ικανή, ώστε η κατασκευή να λειτουργεί συνολικά υπό την επίδραση των φορτίων.



εικ.5.1. Πλάκα από σκυρόδεμα που στηρίζεται σε υποστυλώματα από σκυρόδεμα ενώ οι τοιχοποιίες είναι από rammed earth. (ανακτήθηκε από: <https://www.tboake.com/2016/Technical%20Report%20Sample.pdf>, σελ.12, στις 10/03/22).

Μια άλλη επιλογή για την κατασκευή των πατωμάτων είναι η χρήση μεταλλικών δοκών. Το μέταλλο αποτελεί κομμάτι των ελαφριών κατασκευών, καθώς η αντοχή του είναι πολύ μεγάλη σε σχέση με τις διατομές που απαιτούνται για την παραλαβή των φορτίων. Ωστόσο, είναι σημαντικό να λαμβάνεται υπόψη η επικάλυψη του μεταλλικού φέροντα οργανισμού. Για παράδειγμα η χρήση σύμμικτης πλάκας σκυροδέματος ή ελαφροσκυροδέματος θα μπορούσε να αυξήσει σημαντικά το βάρος της πλάκας και να οδηγήσει σε ισχυρή καταπόνηση της κατασκευής. Σε άλλη περίπτωση, η χρήση του ξύλου ως επικάλυψη αποτελεί καλύτερη λύση, καθώς δεν αυξάνει κατά πολύ το βάρος της κατασκευής. Όσον αφορά τη σύνδεση με τις τοιχοποιίες, ισχύουν οι ίδιες τεχνικές με αυτές της πλάκας από σκυρόδεμα. Στα επίπεδα των πατωμάτων τοποθετείται περιμετρικά ένα σενάζ πάνω στο οποίο στηρίζονται τα μεταλλικά δοκάρια με ειδικούς συνδέσμους (όπως δοκοθήκες ή λάμες) και βλήτρα, δηλαδή μεταλλικών συνδέσμων που καταπονούνται κυρίως με διατμητικό φορτίο.

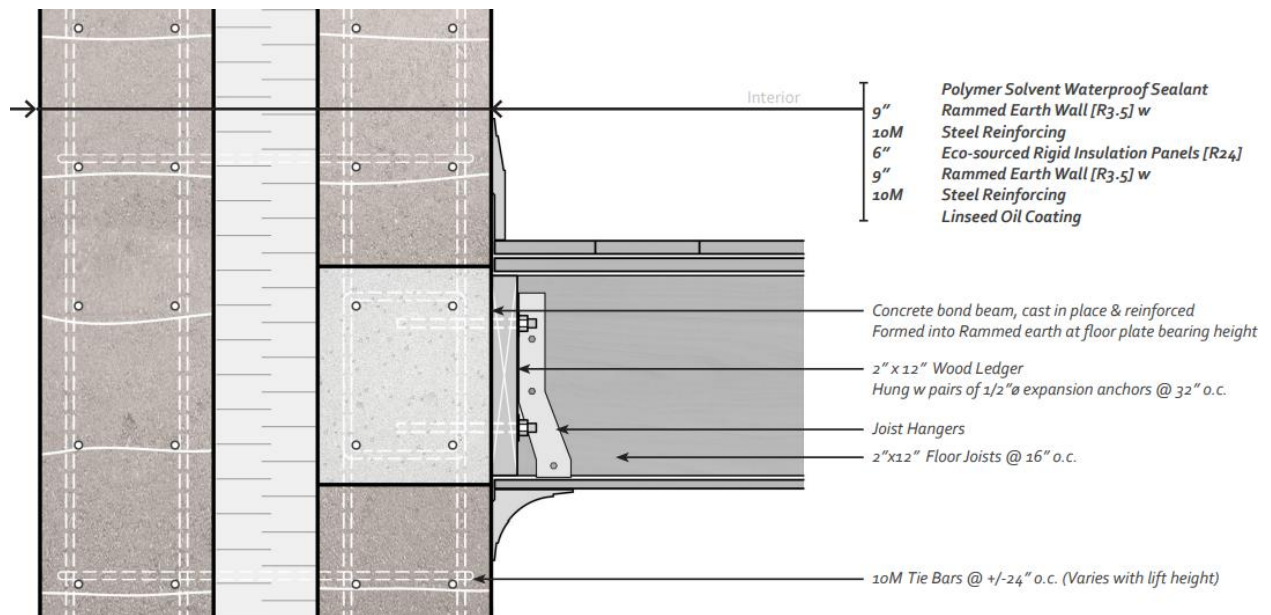


εικ.5.2. Πατώματα κατασκευασμένα από μεταλλικά δοκάρια (και ξύλινα) τα οποία στηρίζονται σε σενάζ. Σε αυτή την περίπτωση οι τοιχοποιίες είναι φέρουσες. (ανακτήθηκε από: <https://continuingeducation.bnppmedia.com/courses/multi-aiia/rammed-earth/2/> στις 10/03/22).

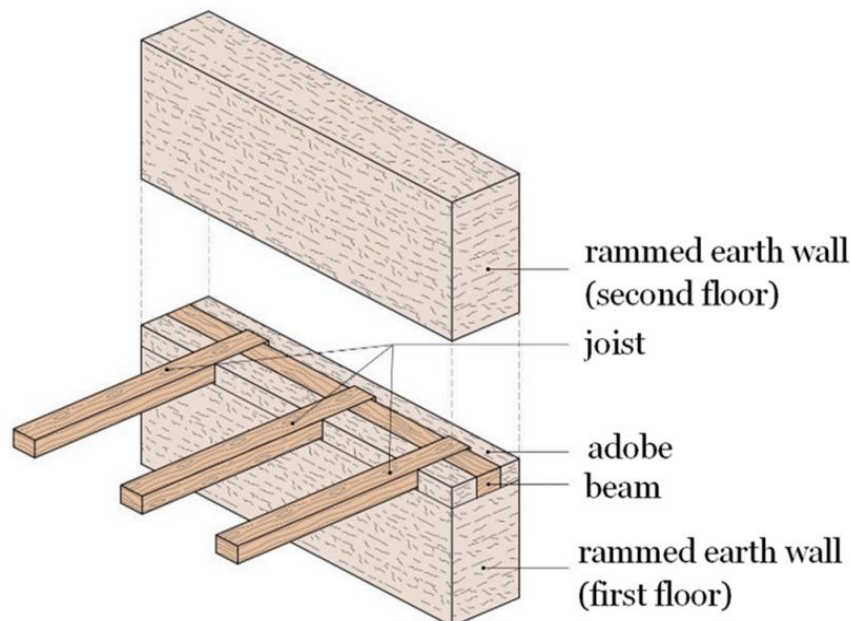
Τελευταία κατηγορία αποτελούν τα ξύλινα πατώματα. Το ξύλο, όπως και το μέταλλο, αποτελεί κομμάτι των ελαφριών κατασκευών και κατασκευάζεται όπως τα συμβατικά ξύλινα πατώματα, με βασικές ξύλινες δοκούς και δευτερεύουσες τεγίδες πάνω στις οποίες τοποθετείται η επιθυμητή επικάλυψη. Και σε αυτή την περίπτωση, το είδος της επικάλυψης θα πρέπει να υπολογίζεται σωστά, έτσι ώστε να μην επιβαρύνει πολύ το σύνολο της κατασκευής, αλλά και τις φέρουσες τοιχοποιίες από rammed earth. Η σύνδεση των ξύλινων δοκών με τις τοιχοποιίες, όπως και στις προηγούμενες



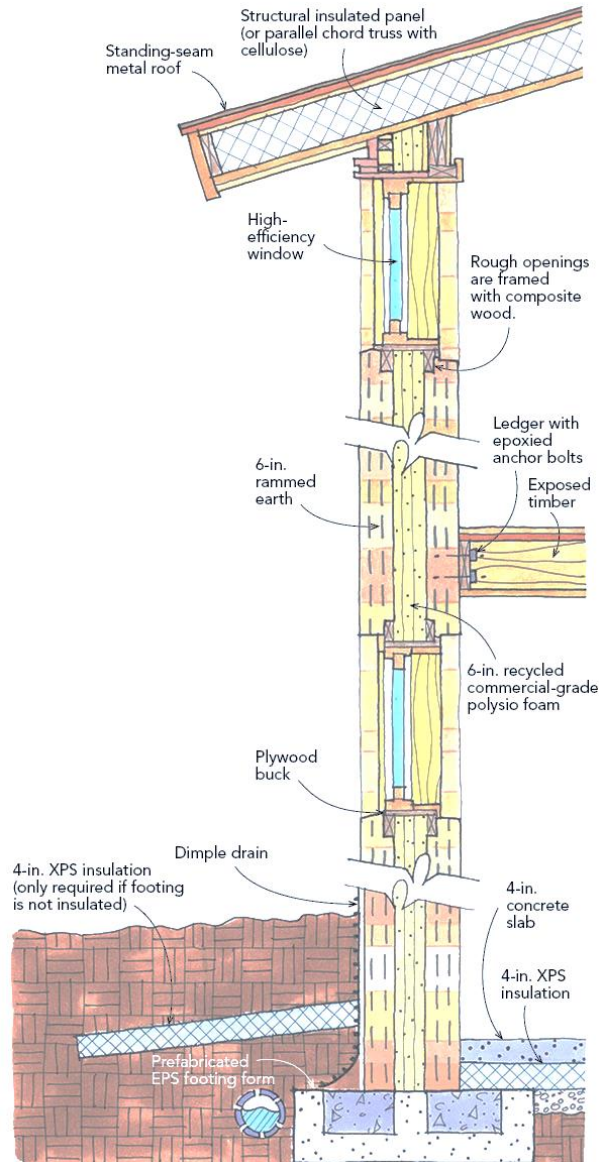
περιπτώσεις, επιτυγχάνεται με τη βοήθεια περιμετρικού σενάζ από σκυρόδεμα όπως στην εικ.5.3. ή από ξύλο (ξυλοδεσιά). Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι το παράδειγμα της εικ.5.3. μπορεί να εφαρμοστεί σε περιοχές με μικρή σεισμικότητα, ενώ σε κάθε άλλη περίπτωση θα πρέπει να δεθεί και η εξωτερική παρειά της τοιχοποιίας. Στην περίπτωση της ξυλοδεσιάς τα ξύλινα δοκάρια μπορούν να τοποθετηθούν στον πυρήνα της τοιχοποιίας, με αποτέλεσμα να μην εμφανίζονται στην όψη, όπως συχνά συμβαίνει με το σενάζ από σκυρόδεμα (εικ. 5.4). Σε περιοχές με μικρή σεισμική δραστηριότητα το ξύλινο δάπεδο μπορεί να αγκυρωθεί στον οπλισμό της τοιχοποιίας με ειδικά αγκύρια τα οποία καταπονούνται κυρίως κατά τον άξονά τους με εφελκυστικές δυνάμεις.



εικ.5.3. Λεπτομέρεια πατώματος κατασκευασμένο από ξύλο. Το μεταλλικό δοκάρι στηρίζεται σε σενάζ από σκυρόδεμα το οποίο είναι τοποθετημένη στην εσωτερική παρειά της τοιχοποιίας. (Cassandra Erin Cautius, *Rammed Earth: Adaptations to Urban Toronto*, 2014, σελ.36).



εικ.5.4. Λεπτομέρεια ξυλοδεσιάς για ξύλινο πάτωμα. (ανακτήθηκε από: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061821039623#f0010> στις 10/03/22).



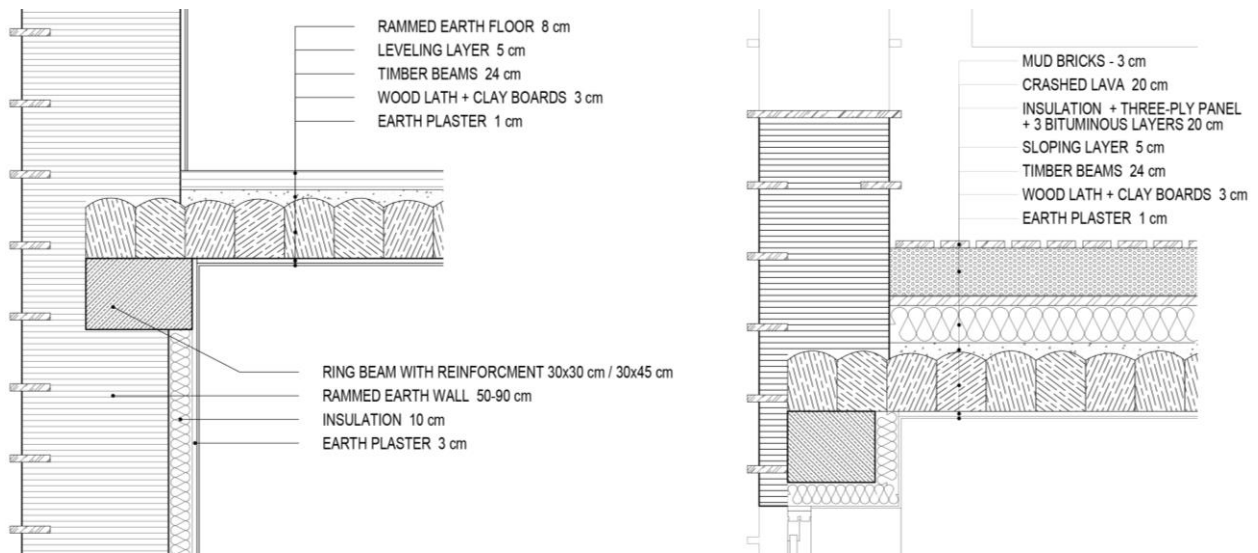
εικ.5.5. Λεπτομέρεια ξύλινου πατώματος που στηρίζεται με ειδικά αγκύρια από την τοιχοποιία. (ανακτήθηκε από <https://www.finehomebuilding.com/2020/01/03/rammed-earth-creating-a-500-year-house> στις 10/03/22).

Σύμφωνα με τα παραπάνω αποδεικνύεται ότι είναι δυνατή η χρήση οποιουδήποτε υλικού για την κατασκευή των πατωμάτων σε κτήρια από φέρουσες τοιχοποιίες rammed earth. Κάθε υλικό παρουσιάζει τις δικές του ιδιαιτερότητες και ανάγκες, ενώ παράλληλα δημιουργεί διαφορετικό αισθητικό αποτέλεσμα. Ένας βασικός παράγοντας που μπορεί να οδηγήσει στην επιλογή του υλικού είναι η σεισμική δραστηριότητα της περιοχής. Για παράδειγμα σε σεισμικά περιβάλλοντα η χρήση του σκυροδέματος καλό είναι να αποφεύγεται. Όπως θα αναφερθεί και σε επόμενο κεφάλαιο, τα κτήρια από rammed earth για να μπορούν να έχουν μια καλή συμπεριφορά στον σεισμό θα πρέπει να έχουν όσο το δυνατόν πιο ελαφριά πατώματα και στέγες. Αυτό, λοιπόν, αποτελεί έναν λόγο να χρησιμοποιηθεί το μέταλλο ή ακόμα καλύτερα το ξύλο. Επίσης, το τελικό αποτέλεσμα της όψης αποτελεί ακόμα ένα παράγοντα, καθώς το υλικό και ο τρόπος τοποθέτησης του σενάζ αλλάζει σύμφωνα με το υλικό του πατώματος. Επιπλέον, πέραν των μηχανικών χαρακτηριστικών είναι σημαντική η παράμετρος της βιωσιμότητας. Το ξύλο, σε σχέση με το μέταλλο και το σκυρόδεμα, είναι φυσικό υλικό και έχει την ιδανική συνάφεια με το χώμα, ωστόσο πάντοτε αυτός που επιλέγει το υλικό είναι ο μελετητής του κτηρίου με βάση τις ανάγκες της κατασκευής και τις δυνατότητες του κάθε υλικού.



Τα Δάπεδα

Τα δάπεδα έχουν άμεση σχέση και εξάρτηση με τα πατώματα. Όλα τα συμβατικά υλικά δαπέδων όπως τα κεραμικά πλακίδια, οι μαρμαρίνες πλάκες, τα μωσαϊκά, τα πλαστικά δάπεδα ή τα ξύλινα δάπεδα μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον για τα κτήρια από rammed earth παρουσιάζουν τα δάπεδα τα οποία είναι κατασκευασμένα και αυτά από συμπιεσμένο χώμα, αλλά και δάπεδα κατασκευασμένα γενικότερα από παράγωγα του χώματος. Αυτού του είδους τα δάπεδα χρησιμοποιούνται κυρίως στις πλάκες εδάφους, ωστόσο μπορούν να χρησιμοποιηθούν και στα ενδιάμεσα πατώματα. Μια λεπτή στρώση μείγματος 15-20 εκατοστών κοινό με αυτό του rammed earth τοποθετείται στην επιθυμητή επιφάνεια και συμπιέζεται έτσι ώστε να συρρικνωθεί έως και κατά 50%. Είναι σημαντικό η επιφάνεια τοποθέτησης του μείγματος να μην έχει κενά και να στηρίζεται σωστά, έτσι ώστε να μην ρηγματώσει κατά τη συμπίεση. Αφού στεγνώσει η πρώτη στρώση ακολουθούν δύο λεπτές στρώσεις από αργιλικό χώμα και πηλό. Η τελική επιφάνεια γυαλίζεται με ειδικά μηχανήματα και αλείφεται με βερνίκια και έλαια που βοηθούν στη συντήρησή του. Το τελικό αποτέλεσμα είναι αρκετά ικανοποιητικό και ανθεκτικό (lowimpact, 2022).



εικ.5.6. Ξύλινα πατώματα με δάπεδο από συμπιεσμένο χώμα, θηραϊκή γη και πλάκες από πηλό. (ανακτήθηκε από: <https://oguzhansaygi.com/Rammed-Earth-in-Action> στις 10/03/22).

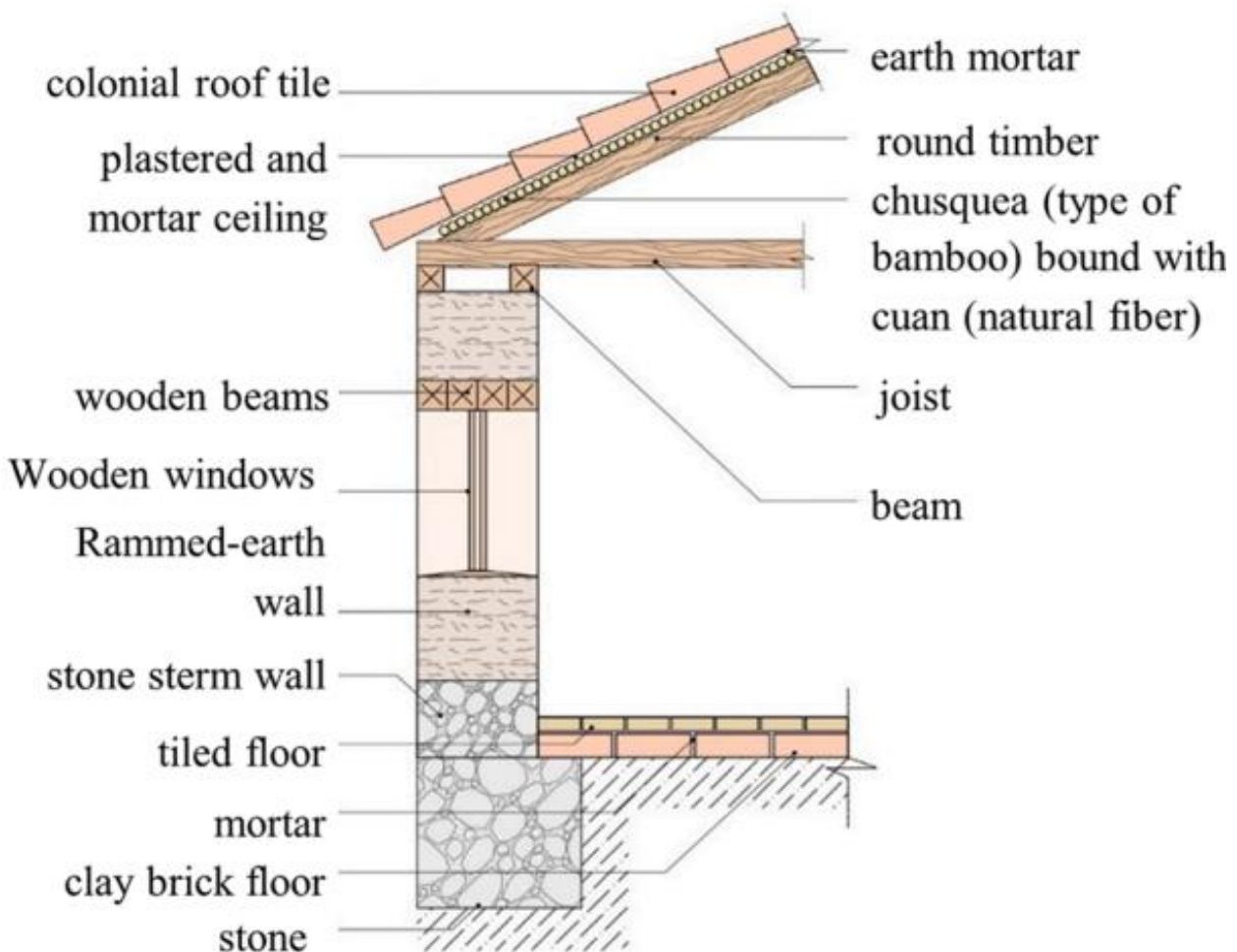
5.1.2. Στέγες και επίπεδα δώματα

Ο τρόπος στέγασης των κτηρίων από rammed earth, ιδιαίτερα για τεχνικές δόμησης παρόμοιες με τις παραδοσιακές κατασκευές, αποτελεί σημαντικό κομμάτι για την προστασία της κατασκευής από τις καιρικές συνθήκες και κυρίως από τη βροχή. Σε σύγχρονα κτήρια, στα οποία η φυσική συμπιεσμένη γη έχει αντικατασταθεί από ένα πιο πολύπλοκο μείγμα με διάφορα πρόσμικτα όπως το τσιμέντο, οι επιφάνειες διαβρώνονται πιο δύσκολα και μόνο όταν το νερό εγκλωβίζεται και παραμένει στάσιμο. Έτσι σε νέα κτήρια από rammed earth, κάθε τύπος στέγασης που χρησιμοποιείται στις συμβατικές κατασκευές μπορεί να χρησιμοποιηθεί. Ωστόσο, όπως και στα πατώματα, η επιλογή του υλικού καθορίζεται με τους ίδιους παράγοντες που προαναφέρονται. Γενικότερα είναι επιθυμητή η χρήση όσο το δυνατόν πιο ελαφριών κατασκευών, ώστε να μην καταπονείται πολύ η φέρουσα τοιχοποιία από συμπιεσμένο χώμα.

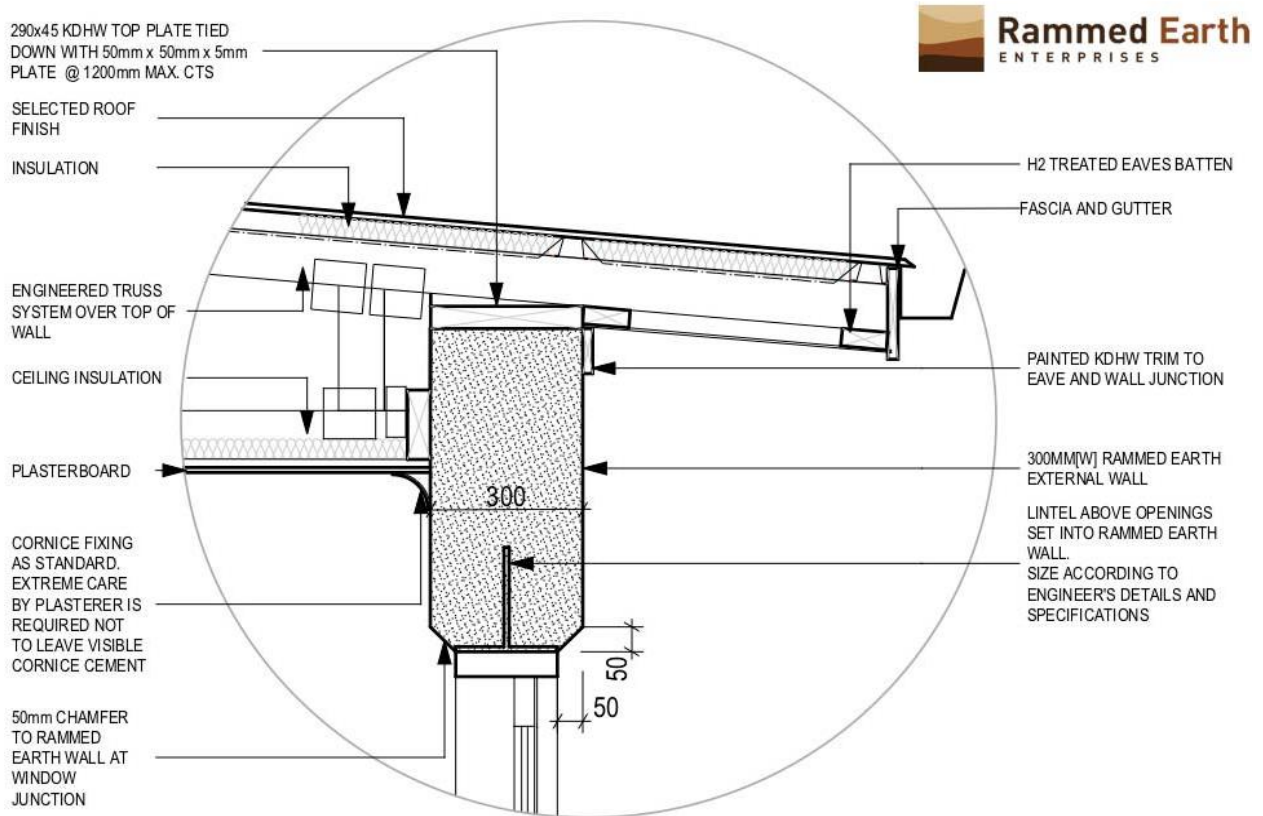
Όσον αφορά τις στέγες, πρέπει να πληρούν τρεις βασικές προϋποθέσεις (Wolfskill, Dunlap, Gallaway, 2005:123):

- Πρέπει να είναι καλά συνδεδεμένη με τις τοιχοποιίες, έτσι ώστε να μην μπορεί να μετακινηθεί και το κτήριο να λειτουργεί συνολικά υπό την επίδραση των φορτίων.
- Δεν πρέπει να έχει κενά που να επιτρέπουν την εισχώρηση του νερού.
- Πρέπει να παρέχει την απαραίτητη προστασία, έτσι ώστε το νερό της βροχής να μην κυλά στην εξωτερική παρειά των τοίχων.

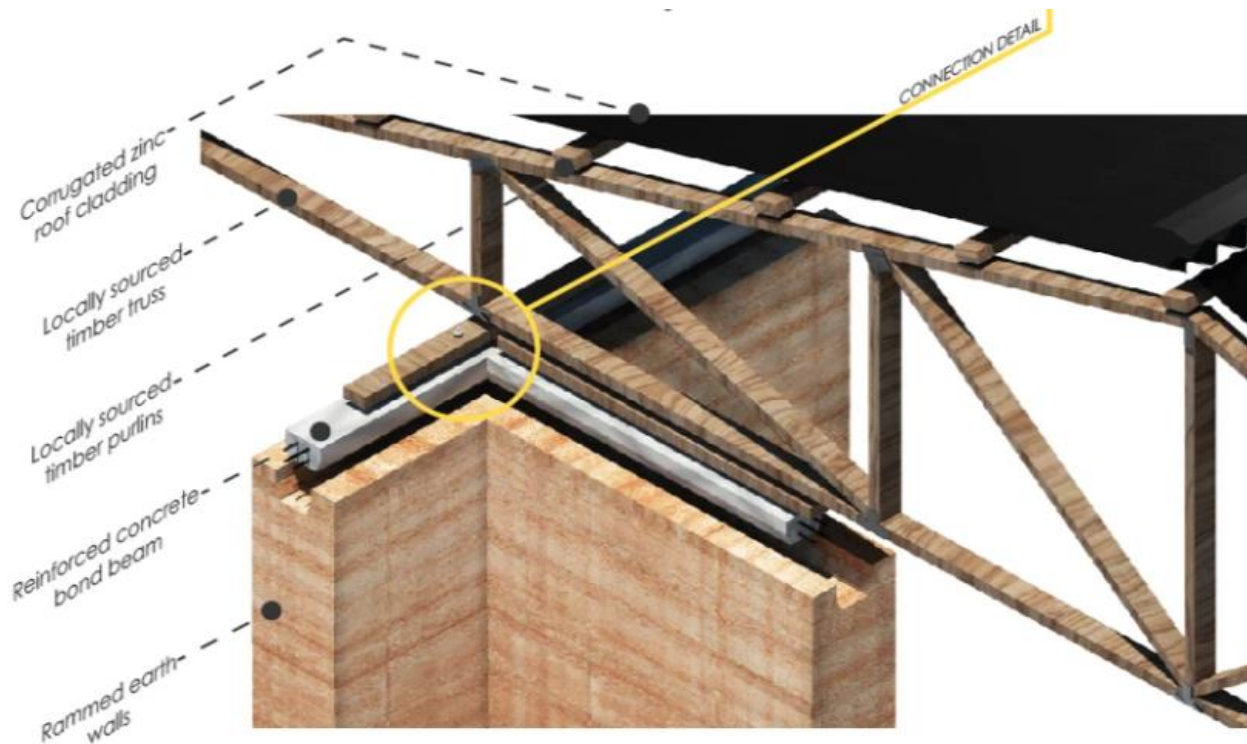
Ο φέρων οργανισμός της στέγης συνήθως κατασκευάζεται από ξύλο, ωστόσο δεν είναι απαγορευτικό κάποιο διαφορετικό υλικό, όπως για παράδειγμα το μέταλλο. Η επικάλυψη μπορεί να αποτελείται από όλα τα συμβατικά υλικά που χρησιμοποιούνται συνήθως στα κτήρια, όπως τα κεραμίδια ή οι μεταλλικές λαμαρίνες (π.χ. από πιτανιούχο ψευδάργυρο - zinc), ωστόσο πάλι το βάρος αποτελεί τον παράγοντα επιλογής του τελικού υλικού, με βάση βέβαια τις ανάγκες και τις δυνατότητες της κατασκευής. Σε παραδοσιακά κτήρια, ως υλικό επικάλυψης παρατηρείται και η λάσπη με άχυρα ή η χρήση άλλων παράγωγων υλικών του χώματος, ωστόσο σε σύγχρονα κτήρια αυτά δεν επιλέγονται. Όπως και στα πατώματα, σημαντικό κομμάτι για τις στέγες αποτελεί ο τρόπος σύνδεσής τους με τις τοιχοποιίες. Συνήθως, η στέγη εδράζεται πάνω σε ένα περιμετρικό διάζωμα από σκυρόδεμα ή από ξύλο, το οποίο με τη σειρά του συνδέεται ισχυρά με το σύνολό της. Πολλές φορές γίνεται συνδυασμός των υλικών κι έτσι το σκυρόδεμα συνεργάζεται με το ξύλο.



εικ.5.7 Λεπτομέρεια ξύλινης στέγης που συνδέεται με ξυλοδοσιά. (Construction and Building Materials: Flexural behavior of rammed earth components reinforced with steel plates based on experimental, numerical, and analytical modeling, σελ.2).

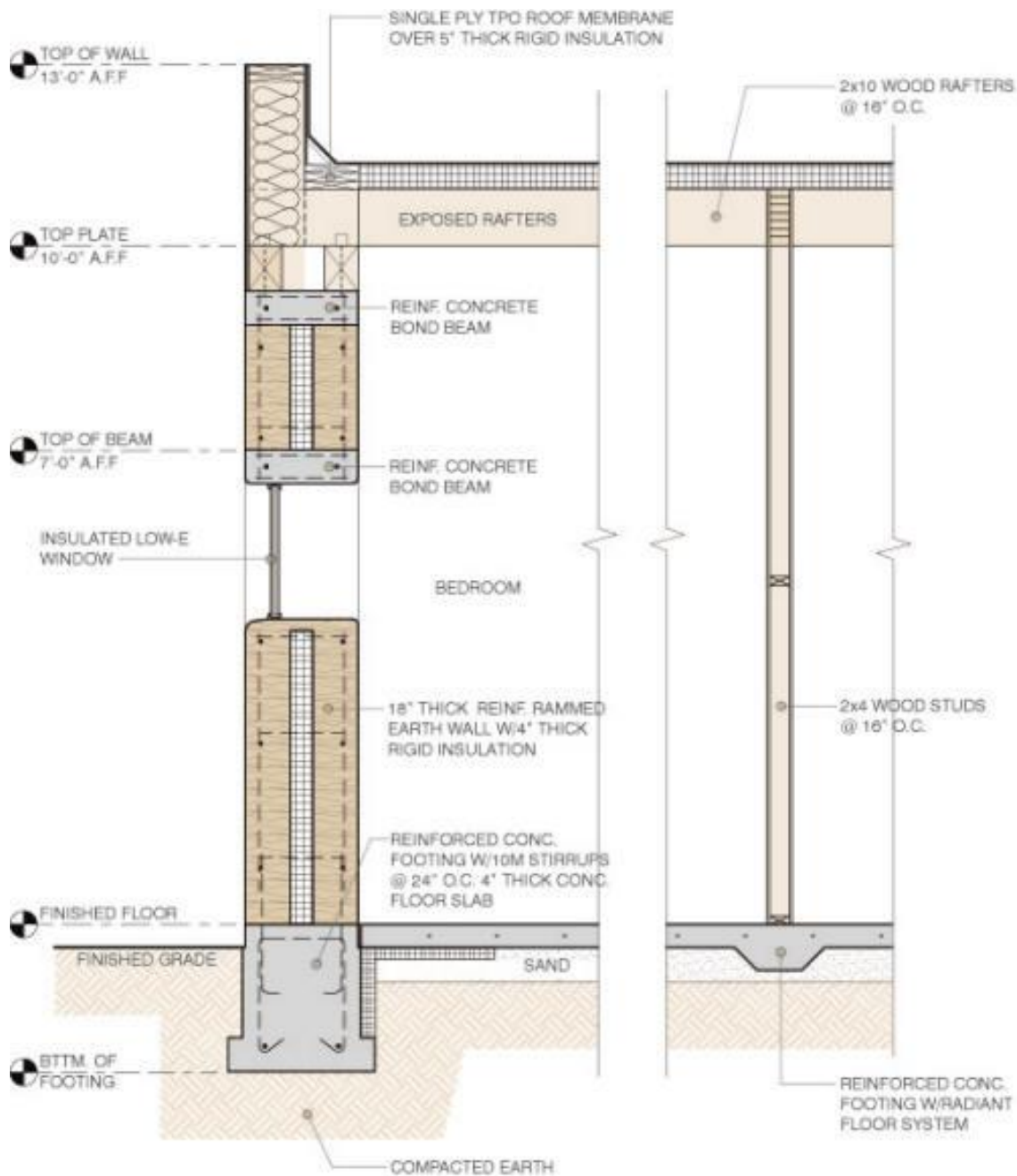


εικ.5.8. Λεπτομέρεια στέγης και σύνδεση με την τοιχοποιία. (ανακτήθηκε από: <https://www.rammedearthenterprises.com.au/rammed-earth-information-for-professionals/> στις 12/3/22).

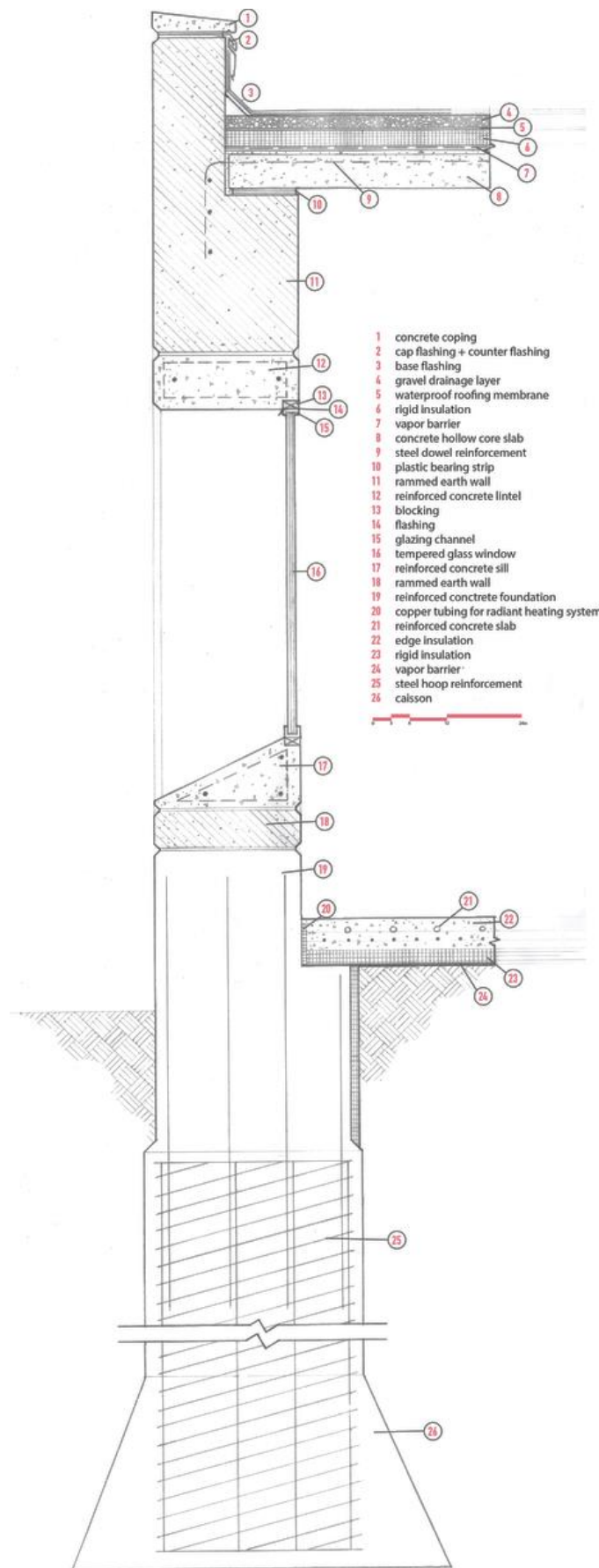


εικ.5.9. Αξονομετρική λεπτομέρεια σύνδεσης της τοιχοποιίας με ξύλινη στέγη. Σε αυτή την περίπτωση το σενάζ από σκυρόδεμα συνδυάζεται με το ξύλο. (ανακτήθηκε από: <https://www.indiegogo.com/projects/earth-building-workshop-in-tanzania/#/> στις 12/3/22).

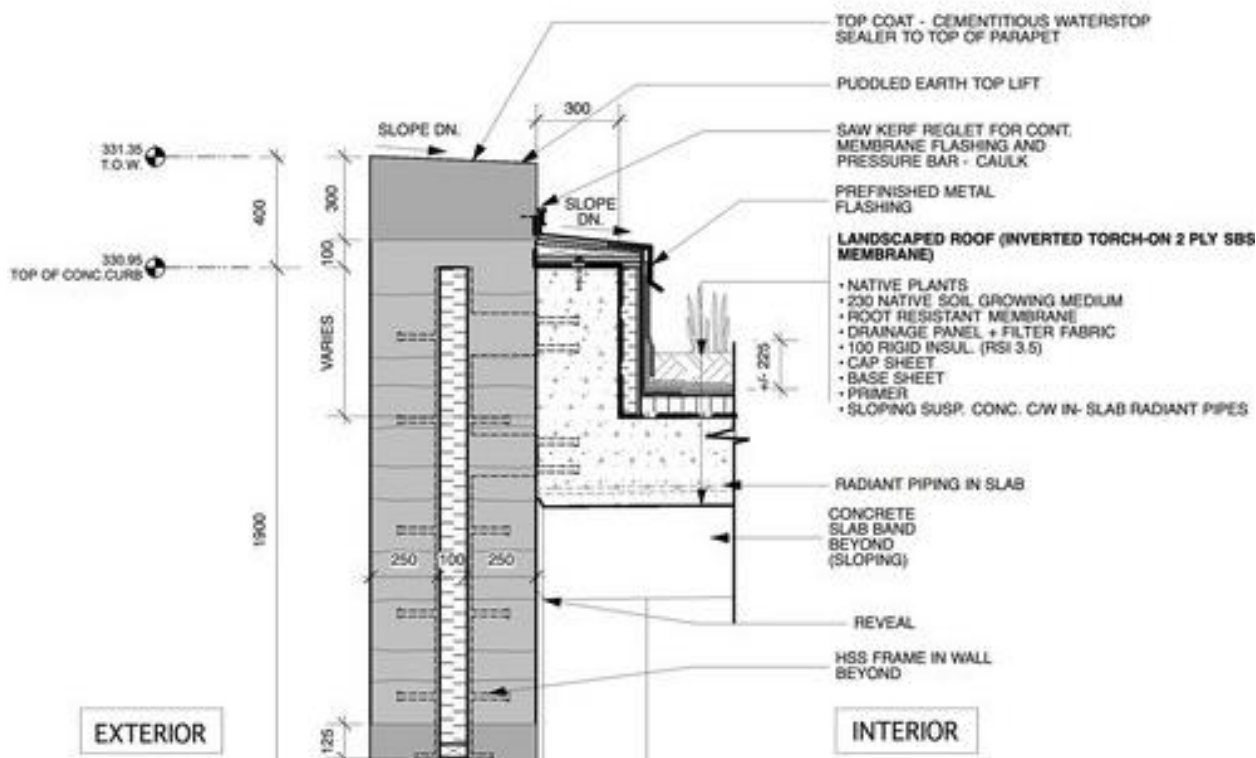
Στα σύγχρονα κτήρια από rammed earth συναντάται συχνά η χρήση επίπεδου δώματος για τη στέγαση του κτηρίου. Με αυτόν τον τρόπο όμως πολλές φορές δεν προστατεύεται η τοιχοποιία, καθώς είναι πλήρως εκτεθειμένη στις καιρικές συνθήκες και στη βροχή. Ωστόσο, το σταθεροποιημένο μείγμα, που πλέον παρασκευάζεται, μέσα στο οποίο τοποθετούνται διάφορα πρόσμικτα όπως το τσιμέντο και άλλα βελτιωτικά, επιτρέπει την έκθεση αυτή. Επιπλέον, είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι το μεγάλο πάχος της τοιχοποιίας σε συνδυασμό με την απαραίτητη συντήρησή της ανά διαστήματα λειτουργεί υποστηρικτικά σε αυτό. Η κατασκευή των δωματίων δεν διαφέρει από αυτή των στεγών και τα υλικά ποικίλουν. Σημαντική ξανά είναι η στήριξη και ο τρόπος σύνδεσης με τις τοιχοποιίες. Πολλές φορές επιλέγεται η δημιουργία φυτεμένου δώματος, το οποίο όμως μπορεί να επιβαρύνει την κατασκευή ανάλογα με τον όγκο χώματος που απαιτείται, γι' αυτό χρειάζεται πάντα στατική μελέτη.



εικ.5.10. Συνολική λεπτομέρεια της τοιχοποιίας και του ξύλινου δώματος. (ανακτήθηκε από: <http://www.arch.ttu.edu/courses/2013/summer/5501/students/Robles/05/Default.htm> στις 12/3/22).



εικ.5.11. Συνολική λεπτομέρεια από τα θεμέλια έως και το δώμα. Η πλάκα του δώματος είναι από σκυρόδεμα. (ανακτήθηκε από: <https://hannahlisesimonson.com/wall-section> στις 12/3/22).



εικ.5.12. Λεπτομέρεια φυτεμένου δώματος σε κτήριο από rammed earth. (ανακτήθηκε από: <https://www.archdaily.com/802195/13-spectacular-living-roofs-in-detail> στις 12/3/22).

5.2. Ανοίγματα

Ένα εξίσου σημαντικό στοιχείο στον συνθετικό και κατασκευαστικό σχεδιασμό των κτηρίων είναι τα ανοίγματα, τα οποία παρέχουν επικοινωνία μεταξύ των χώρων, αλλά και με το εξωτερικό περιβάλλον. Δημιουργούν αλληλεπιδράσεις των συνθηκών εντός της κατοικίας, ενώ παράλληλα συνεισφέρουν στην αξιοποίηση ορισμένων κλιματικών παραμέτρων τις εποχές που αυτές είναι επιθυμητές, π.χ. ηλιακή ακτινοβολία τον χειμώνα ή δροσερός αέρας το καλοκαίρι, σύμφωνα πάντα με την απαραίτητη βιοκλιματική μελέτη που προηγείται της ολοκλήρωσης του σχεδιασμού μιας κατασκευής. Το ζήτημα στο οποίο καλείται κανείς να απαντήσει κατά την τοποθέτηση ανοιγμάτων σε φέρουσες τοιχοποιίες από rammed earth είναι το πως θα διατηρήσει τη συνολική συνοχή και σταθερότητα του τοίχου ενώ τοποθετεί το άνοιγμα, αλλά και το πως θα μπορέσει να σφραγίσει κατάλληλα τα ίδια αυτά ανοίγματα (στεγάνωση από τα φυσικά στοιχεία νερού και αέρα). Τα ζητήματα αυτά αποκτούν ακόμα μεγαλύτερο βάρος όταν τα ανοίγματα επρόκειτο να τοποθετηθούν σε ψαθυρές τοιχοποιίες, όπως αυτές από rammed earth.

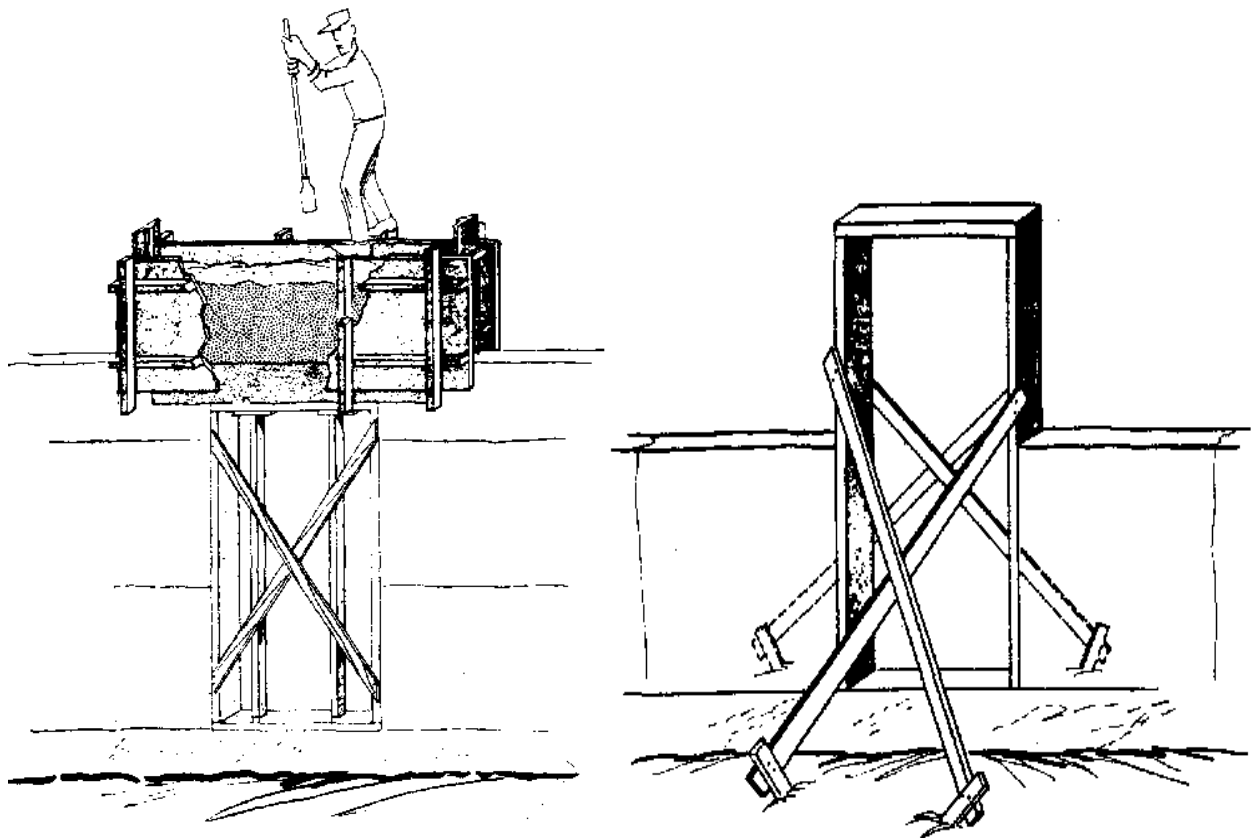
Ξεκινώντας, είναι σημαντικό να τεθεί ως στοιχείο διερεύνησης ένας τοίχος εξολοκλήρου κατασκευασμένος από rammed earth, χωρίς οικοδομικά στοιχεία, όπως διαζώματα (σενάζ), για τη στήριξη των ανοιγμάτων. Η παραπάνω επιλογή γίνεται καθώς διαφορετικά δεν θα υπήρχε καμία κατασκευαστική διαφορά στην εγκατάσταση ανοιγμάτων στην τοιχοποιία, σε σχέση με λοιπές συμβατικές τοιχοποιίες.

Κατά την τοποθέτηση ανοιγμάτων σε τοιχοποιίες δύο είναι οι κύριες κατασκευαστικές μέθοδοι που επιλέγονται:

- Η εξαρχής τοποθέτηση του πλαισίου, του παραθύρου ή της πόρτας, κατά τη δημιουργία του ξυλοτύπου και
- Η χρήση πρεκιού και ψευδόκασας που ενσωματώνονται στον υπό κατασκευή τοίχο.

Η βασική διαφορά των δύο αυτών τεχνικών είναι η δυσκολία κατά τη συμπίεση, αλλά και το αρχικό αποτύπωμα του ανοίγματος στην τοιχοποιία (New Zealand Digital Library, 2022).

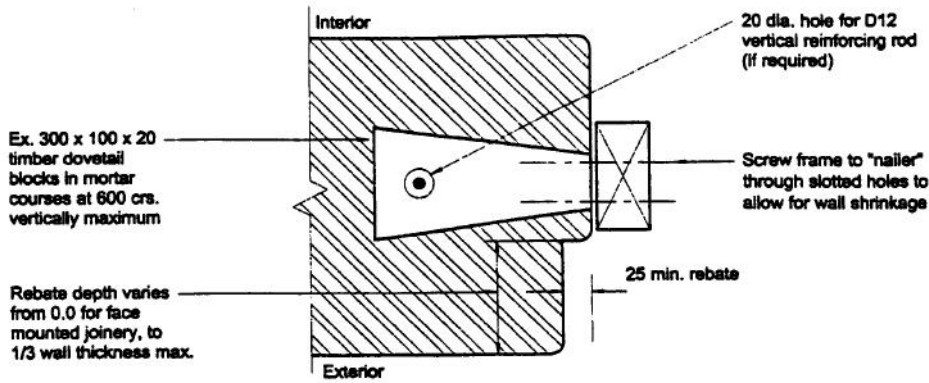
Όσον αφορά την πρώτη περίπτωση, ξεκινώντας από την τοποθέτηση του ίδιου πλαισίου του ανοίγματος κατά τη δημιουργία του ξυλοτύπου, είναι άμεσα αντιληπτά τα βασικά κατασκευαστικά προβλήματα. Υπάρχει ανάγκη κατάλληλης στήριξης, ώστε το κούφωμα να μην μετακινηθεί από την αρχική του θέση εξαιτίας των δονήσεων της συμπίεσης. Έτσι, με τη χρήση ξύλινων αντηρίδων και στηριγμάτων πρέπει να εξασφαλίζεται η ακινησία του πλαισίου, όπως φαίνεται στην εικ.5.14. Παράλληλα, υπάρχει κίνδυνος αστοχίας του πλαισίου και πλήρους καταστροφής του, λόγω των τάσεων που θα επιβληθούν πάνω του. Για να μην εμφανιστούν οι αστοχίες αυτές, συνιστάται να τοποθετούνται εσωτερικά του ανοίγματος στοιχεία που θα παραλάβουν τις ισχυρές θλιπτικές τάσεις, όταν συμπιέζεται το μείγμα ακριβώς πάνω από το παράθυρο, ώστε να επιτραπεί η κατάλληλη μεταφορά των δυνάμεων στην τοιχοποιία και όχι στο πλαίσιο του κουφώματος. Τέλος, συνιστάται να μην αρκестεί κανείς στο σφήνωμα του παραθύρου στην τοιχοποιία, αλλά να αγκυρώσει το πλαίσιο σε μεγαλύτερο βάθος σε αυτήν, ώστε το παράθυρο και η τοιχοποιία να λειτουργούν διαφραγματικά. Για την επίτευξη της αγκύρωσης συνηθίζεται να αξιοποιούνται στο εργοτάξιο ξύλινοι τάκοι, οι οποίοι παραμένουν εσωτερικά της τοιχοποιίας, έχουν μια τρύπα στο κέντρο τους σε περίπτωση που τους διαπερνά κατακόρυφος οπλισμός, ενώ πάνω τους βιδώνεται το πλαίσιο του ανοίγματος (Maniatidis, Walker, 2003:39).



εικ.5.13. Τοποθέτηση στηρίξεων κατά τη συμπίεση του μείγματος στην άνω παρειά του πλαισίου (αριστερά).

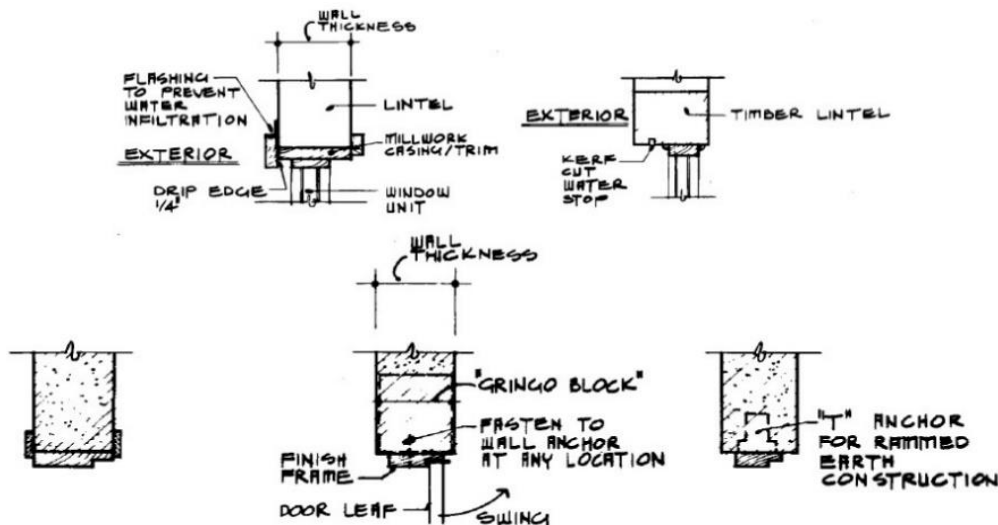
Εικ.5.14. Στήριξη του πλαισίου προς αποφυγή μετακίνησής του κατά την συμπίεση (δεξιά).

(ανακτήθηκαν από: www.nzdl.org στις 14/03/22).



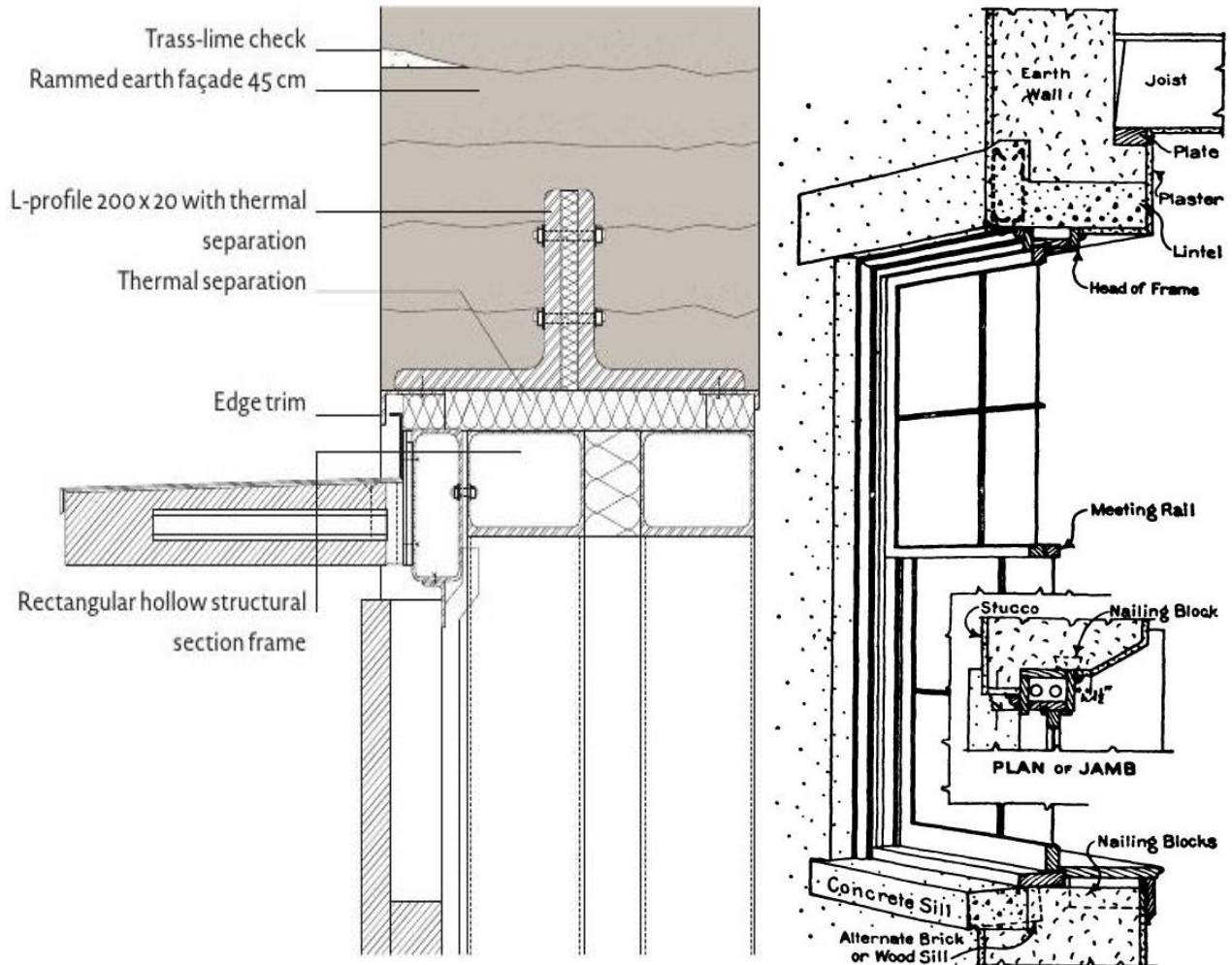
Εικ.5.15. Κάτοψη τάκου στήριξης πλαισίου ανοίγματος σε τοιχοποιία rammed earth. (Maniatidis, Walker, «A Review of Rammed Earth Construction», 2003, σελ.39).

Ως δεύτερη μέθοδος τοποθέτησης προτείνεται η αξιοποίηση ψευδοκασών, οι οποίες τοποθετούνται παράλληλα με τη συμπίεση του μείγματος. Στις περιπτώσεις αυτές, στην πάνω παρειά του ανοίγματος τοποθετείται ένα πιο ισχυρό στοιχείο πρεκιού, ώστε να κατανέμεται κατάλληλα η θλιπτική τάση της συμπίεσης στην τοιχοποιία και όχι στην ψευδόκασα. Οι ψευδόκασες αυτές, αλλά και το πρέκι, στη σύγχρονη εποχή εμφανίζονται ως μεταλλικά στοιχεία, όμως υπάρχουν και περιπτώσεις που έχει χρησιμοποιηθεί ξύλο και για τις δύο κατασκευές (ψευδόκασας και πρεκιού) ή συνδυασμός υλικών (για παράδειγμα πρέκι από σκυρόδεμα και ψευδόκασα μεταλλική). Σημαντικό στοιχείο που πρέπει να μελετάται πριν την τοποθέτηση του πρεκιού είναι να μην προκύψει κάμψη εξαιτίας του βάρους της τοιχοποιίας ακριβώς από πάνω του. Για την αποφυγή του παραπάνω φαινομένου, συνιστάται το πρέκι να προεξέχει εκατέρωθεν του ανοίγματος τουλάχιστον 20 εκατοστά και από τις δύο πλευρές και να έχει ένα ικανό ύψος, το οποίο υπολογίζεται από την στατική μελέτη. Στον κανονισμό της Νέας Ζηλανδίας για τοιχοποιίες από χωμάτινα υλικά, μάλιστα, γίνεται λόγος για ελάχιστα μεγέθη πρεκιού σε σχέση με το μήκος του ανοίγματος, σε μια προσπάθεια τυποποίησης αυτής της κατασκευαστικής διαδικασίας. Η κατασκευή αυτή κυρίως αποτελείται από μεταλλικά στοιχεία σχήματος Γ (βλ. catnic.com), τα οποία τοποθετούνται κατά τη διάρκεια της συμπίεσης. Αφού το χώμα συμπιεσθεί και δημιουργηθεί το άνοιγμα, δύναται να απομακρυνθεί η ψευδόκασα και να τοποθετηθεί ανεξάρτητα η κάσα του παραθύρου. Τέλος είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι έχει γίνει προσπάθεια προς δημιουργία πρεκιών από σταθεροποιημένο rammed earth, όμως δεν μπορεί να αξιοποιηθεί για μήκος ανοίγματος μεγαλύτερο του ενός μέτρου (Maniatidis, Walker, 2003:40-41).



Εικ.5.16. Κατασκευαστικές σημειώσεις για την τοποθέτηση ανοιγμάτων σε τοιχοποιίες rammed earth. (Maniatidis, Walker, «A Review of Rammed Earth Construction», 2003, σελ.39).

Καταλήγοντας, παρατίθενται ορισμένες οικοδομικές λεπτομέρειες από επιλεγμένες κατασκευές ως παραδείγματα αρχιτεκτονικών επιλύσεων του ζητήματος τοποθέτησης ανοιγμάτων σε τοιχοποιίες από rammed earth. Στις σύγχρονες κατασκευές παρατηρείται κυρίως η χρήση της δεύτερης μεθόδου, καθώς ομοιάζει εκείνης που αξιοποιείται σε συμβατικές κατασκευές.



εικ.5.17. Λεπτομέρεια τοποθέτησης παραθύρου με χρήση μεταλλικών γωνιών ως πρέκι στήριξης ανοίγματος (αριστερά). (ανακτήθηκε από: <https://issuu.com/detail-magazine/docs/978-3-95553-273-4-bk-en-rauch-refin/26> στις 08/05/22).

εικ.5.18. Λεπτομέρεια τοποθέτησης παραθύρου με πρέκι από οπλισμένο σκυρόδεμα (δεξιά). (SDSU Agricultural Experiment Station, «Rammed Earth Walls for Buildings», South Dakota State University, 1926, σελ.17).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Σύγχρονες εφαρμογές του rammed earth

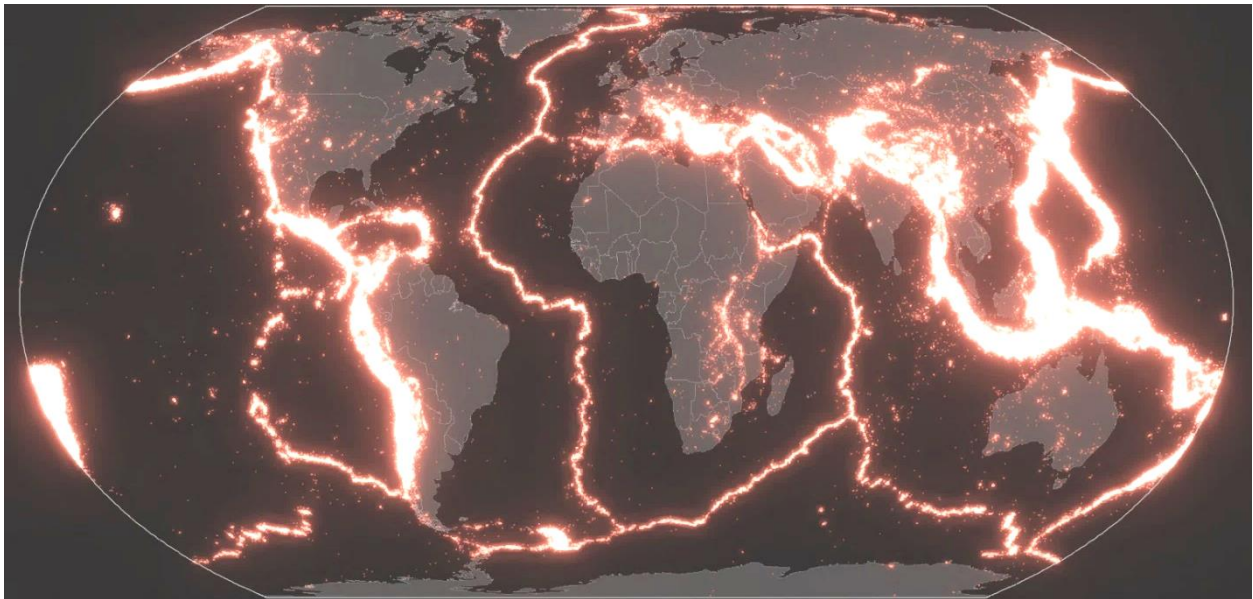
Στα προηγούμενα κεφάλαια έγινε αναφορά στα ιδιαίτερα φυσικά και μηχανικά χαρακτηριστικά του rammed earth, στη διαδικασία κατασκευής των τοιχοποιιών, καθώς και στην κατασκευή των βασικών στοιχείων που ολοκληρώνουν τη γενική μορφή ενός κτηρίου (πατώματα, επίπεδα δώματα, στέγες και ανοίγματα). Έχοντας λοιπόν κατανοήσει στη θεωρία, τον τρόπο που λειτουργεί ένα κτήριο από rammed earth στο σύνολό του, σε αυτό το κεφάλαιο μελετάται το υλικό στην πράξη με τη βοήθεια παραδειγμάτων που έχουν υλοποιηθεί, εστιάζοντας στην Ελλάδα και στα πρώτα δείγματα κτηρίων από rammed earth που είτε έχουν κατασκευαστεί, είτε έχουν απλώς φτάσει στο στάδιο της μελέτης.

6.1. Επιλογή παραδειγμάτων

Σκοπός των παραδειγμάτων αποτελεί καταρχάς η παρουσίαση του rammed earth ως υλικό δόμησης και η ανάδειξη των δυνατοτήτων του σε σύγχρονες εφαρμογές. Εξίσου σημαντική είναι η μελέτη του τρόπου αντιμετώπισης της στατικής του αδυναμίας σε σεισμικές καταπονήσεις ή σε έντονα καιρικά φαινόμενα, καθώς και άλλων ζητημάτων που προκύπτουν κατά τη μελέτη κτηρίων από χώμα, όπως η βιωσιμότητα και η συνάφεια των υλικών που χρησιμοποιούνται. Εστιάζοντας περισσότερο στον σεισμό, η επιλογή των παραδειγμάτων πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια δύο χαρτών. Ο πρώτος χάρτης απεικονίζει τις περιοχές όπου εντοπίζεται έντονα η χρήση rammed earth ως υλικό δόμησης μέχρι τα τέλη του 20^{ου} αιώνα. Ο δεύτερος χάρτης συγκεντρώνει όλα τα σημεία στα οποία έχει εντοπιστεί σεισμική δραστηριότητα από το 1970 έως και το 2019.



εικ.6.1. Περιοχές που χρησιμοποιούν το rammed earth ως υλικό δόμησης. (Julian and, Rowland Keable, «Rammed Earth Structures: A Code of Practice. London: Practical Action Publishing», 2011, σελ 3).



εικ.6.2. Οι περιοχές όπου έχει εντοπιστεί σεισμική δραστηριότητα από το 1970 έως το 2019. (ανακτήθηκε από: <https://developers.arcgis.com/javascript/latest/visualization/high-density-data/bloom/> στις 26/03/22).

Λαμβάνοντας υπόψη τους παραπάνω χάρτες προκύπτει ότι πολλές από τις περιοχές που χρησιμοποιούν το rammed earth ως υλικό δόμησης παρουσιάζουν μικρή σεισμική δραστηριότητα ή δεν αντιμετωπίζουν καθόλου σεισμούς, ωστόσο υπάρχουν και περιοχές με περισσότερους και πιο έντονους σεισμούς. Για παράδειγμα η Κίνα, που σημαντική της έκταση έχει έντονη και συχνή σεισμική δραστηριότητα, όχι μόνο έχει κτήρια από rammed earth, αλλά αποτέλεσε και την αφετηρία του υλικού αυτού (βλ. Κεφάλαιο 2). Επίσης, σε μεγάλα τμήματα στη δυτική παράκτια περιοχή της Βόρειας και Νότιας Αμερικής (Καλιφόρνια, Μεξικό, Κολομβία, Περού, Χιλή), όπου υπάρχει έντονη σεισμικότητα, επιλέγεται το rammed earth για κτήρια κάθε κλίμακας. Επιπλέον, λίγα τμήματα της Ισπανίας και της ανατολικής Αφρικής χρησιμοποιούν το rammed earth, καθώς έχουν σεισμούς όχι όμως αρκετά συχνούς. Ο τρόπος επιλογής, λοιπόν, των παραδειγμάτων εστιάζει στις περιοχές με έντονη σεισμική δραστηριότητα, με σκοπό να μελετηθούν οι δυσμενέστερες συνθήκες φορτίων και ο τρόπος αντιμετώπισης των προβλημάτων που προκύπτουν. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι πέραν του σεισμού λαμβάνονται υπόψη και αρχιτεκτονικά κριτήρια, καθώς δεν αρκεί μόνο η αντιμετώπιση του προβλήματος, αλλά και η εύρεση λύσεων που να συμβαδίζουν με τη συνθετική ιδέα της κατασκευής.

6.2. Παραδείγματα κτηρίων από rammed earth σε σεισμογενείς περιοχές του εξωτερικού

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται χαρακτηριστικά παραδείγματα κτηρίων, μικρής και μεγάλης κλίμακας, από rammed earth. Σύμφωνα με τα κριτήρια επιλογή που τέθηκαν παραπάνω, έχουν επιλεγεί δυο κτήρια που βρίσκονται σε περιοχές της Κίνας, δύο κτήρια σε πόλεις του Μεξικού και ένα παράδειγμα στην Ιαπωνία που αποτελεί τη χώρα με τη μεγαλύτερη σεισμική δραστηριότητα στον κόσμο.

6.2.1. Zhengzhou Jianye Football Town Tourist Center

Τόπος: Zhengzhou, Κίνα

Κλίμα: Cfa - Υγρό υποτροπικό κλίμα με ζεστά, υγρά καλοκαίρια και δροσερούς, ήπιους χειμώνες

Τοποθεσία: Αστική

Σεισμικότητα: Μέτρια

Αρχιτέκτονες: SHUI SHI

Έτος κατασκευής: 2019

Χρήση: Δημόσιο κτήριο πολιτισμού

Πηγές στοιχείων: <https://www.archdaily.com/918378/zhengzhou-jianye-football-town-tourist-center-shuishi>

https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2004/07/Seismic_hazard_map

https://en.wikipedia.org/wiki/File:K%C3%B6ppen-Geiger_Climate_Classification_Map.png



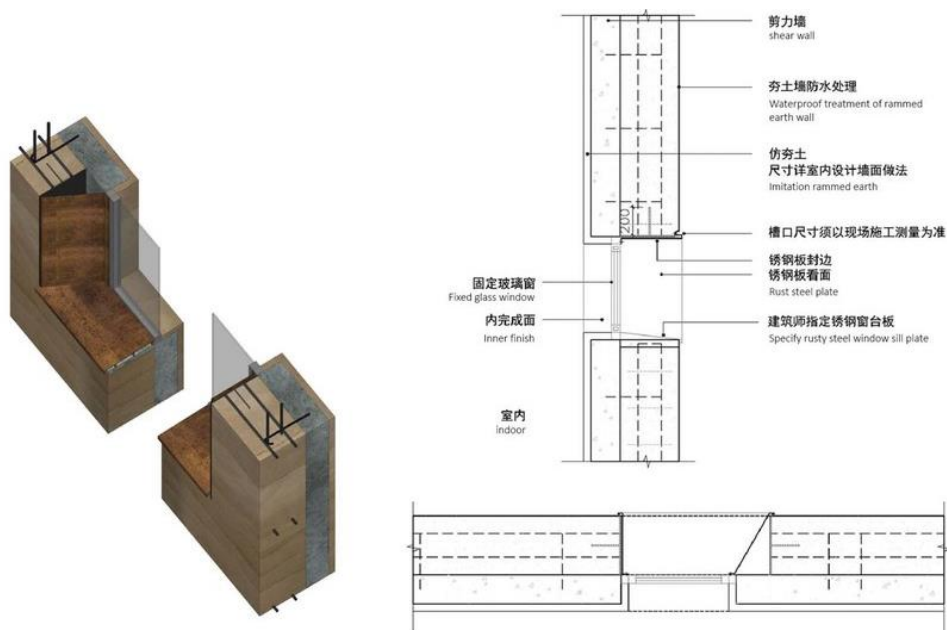
εικ.6.3. Συνολική άποψη του Zhengzhou Jianye Football Town Tourist Center. (ανακτήθηκε από: https://www.archdaily.com/918378/zhengzhou-jianye-football-town-tourist-center-shuishi?ad_source=search&ad_medium=projects_tab στις 06/04/22).

Γενικά στοιχεία: Η Jianye Football Town, μια πόλη αφιερωμένη στο ποδόσφαιρο, συνδυάζει το φυσικό τοπίο με την αναψυχή, τον αθλητισμό και τον πολιτισμό. Στην είσοδο αυτής της θεματικής πόλης κατασκευάστηκε αυτό το τουριστικό κέντρο που αποτελεί και τον βασικό χώρο υποδοχής των επισκεπτών, ενώ παράλληλα φιλοξενεί εκθέσεις και εκδηλώσεις. Η συνθετική ιδέα εκκινεί από το τοπίο και πιο συγκεκριμένα από τα γραμμικά ποτάμια και τη δυναμική ροή των ανέμων ανάμεσα στους μικρούς λόφους της περιοχής. Έτσι όλη η σύνθεση έχει μία δυναμικότητα και μια ροή προς την είσοδο της πόλης και είναι έτοιμη να υποδεχτεί τον επισκέπτη. Οι όψεις του κτηρίου είναι κατασκευασμένες από rammed earth σε μια τολμηρή προσπάθεια να αφομοιωθεί με το γύρω περιβάλλον του. Η υφή και το χρώμα της τελικής επιφάνειας μελετήθηκε από ειδικούς έτσι ώστε να σέβεται το τοπίο, έτσι επιλέχθηκε η χρήση ενός κοκκινωπού πηλού που υπάρχει στην περιοχή. Το τουριστικό κέντρο της ποδοσφαιρικής πόλης στο Τσεντσόου, αποτελεί το ψηλότερο κτήριο στο οποίο έγινε χρήση rammed earth στον κόσμο και ένα πολύ καλό παράδειγμα εφαρμογής του υλικού αυτού σε μια σύγχρονη κατασκευή (archdaily, 2022).



εικ.6.4. Η είσοδος του Zhengzhou Jianye Football Town Tourist Center. (ανακτήθηκε από: https://www.archdaily.com/918378/zhengzhou-jianye-football-town-tourist-center-shuishi?ad_source=search&ad_medium=projects_tab στις 06/04/22).

Στατική επίλυση φορέα: Το rammed earth σε αυτή την περίπτωση δεν θα μπορούσε να αποτελέσει τον βασικό φέροντα οργανισμό του κτηρίου. Καταρχάς η Κίνα έχει έντονη σεισμική δραστηριότητα και κατά δεύτερον η κλίμακα του κτηρίου είναι πολύ μεγάλη και συχνά συναντώνται στους όγκους μέχρι και τρεις όροφους. Μεγάλο μέρος, λοιπόν, του φέροντα αποτελείται από σκυρόδεμα, ενώ το rammed earth αποτελεί ένα δευτερεύον μη δομικό στοιχείο. Στο κτήριο δεν υπάρχουν υποστυλώματα, καθώς χρησιμοποιούνται ισχυρά διατημητικά τοιχεία τα οποία παραλαμβάνουν όλα τα φορτία ενώ πρόκειται για μια εξαιρετικά δύσκολη τεχνική δόμησης. Το rammed earth τοποθετείται ως επικάλυψη αυτών των τοιχείων στην εξωτερική παρειά, ενώ εσωτερικά τοποθετείται μια στρώση απομίμησης rammed earth, όπως χαρακτηριστικά αναφέρεται από τους αρχιτέκτονες. Τα πατώματα και τα δώματα είναι κατασκευασμένα από μεταλλικές δοκούς που ακυρώνονται στα τοιχεία του κτηρίου (archdaily, 2022).



εικ.6.5. Οριζόντια και κατακόρυφη τομή τοίχου και αξονομετρικό διάγραμμα από το Zhengzhou Jianye Football Town Tourist Center. (ανακτήθηκε από: https://www.archdaily.com/918378/zhengzhou-jianye-football-town-tourist-center-shuishi?ad_source=search&ad_medium=projects_tab στις 06/04/22).

6.2.2. Erlitou Site Museum of the Xia Capital

Τόπος: Luoyang, Κίνα

Κλίμα: Cfa - Υγρό υποτροπικό κλίμα με ζεστά, υγρά καλοκαίρια και δροσερούς, ήπιους χειμώνες

Τοποθεσία: Περιαστική

Σεισμικότητα: Μέτρια

Αρχιτέκτονες: TJAD Rurban Studio

Έτος κατασκευής: 2019

Χρήση: Δημόσιο κτήριο πολιτισμού

Πηγές στοιχείων: <https://www.archdaily.com/960343/erlitou-site-museum-of-the-xia-capital-tjad-rurban-studio>

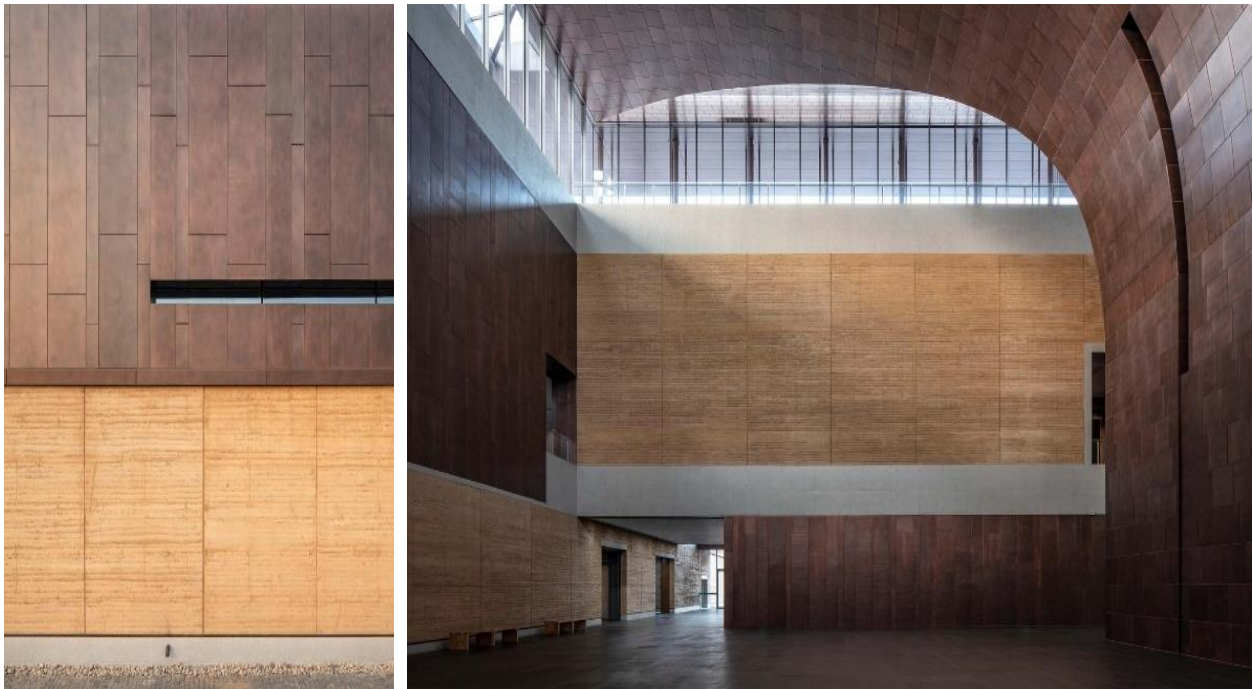
https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2004/07/Seismic_hazard_map

https://en.wikipedia.org/wiki/File:K%C3%B6ppen-Geiger_Climate_Classification_Map.png



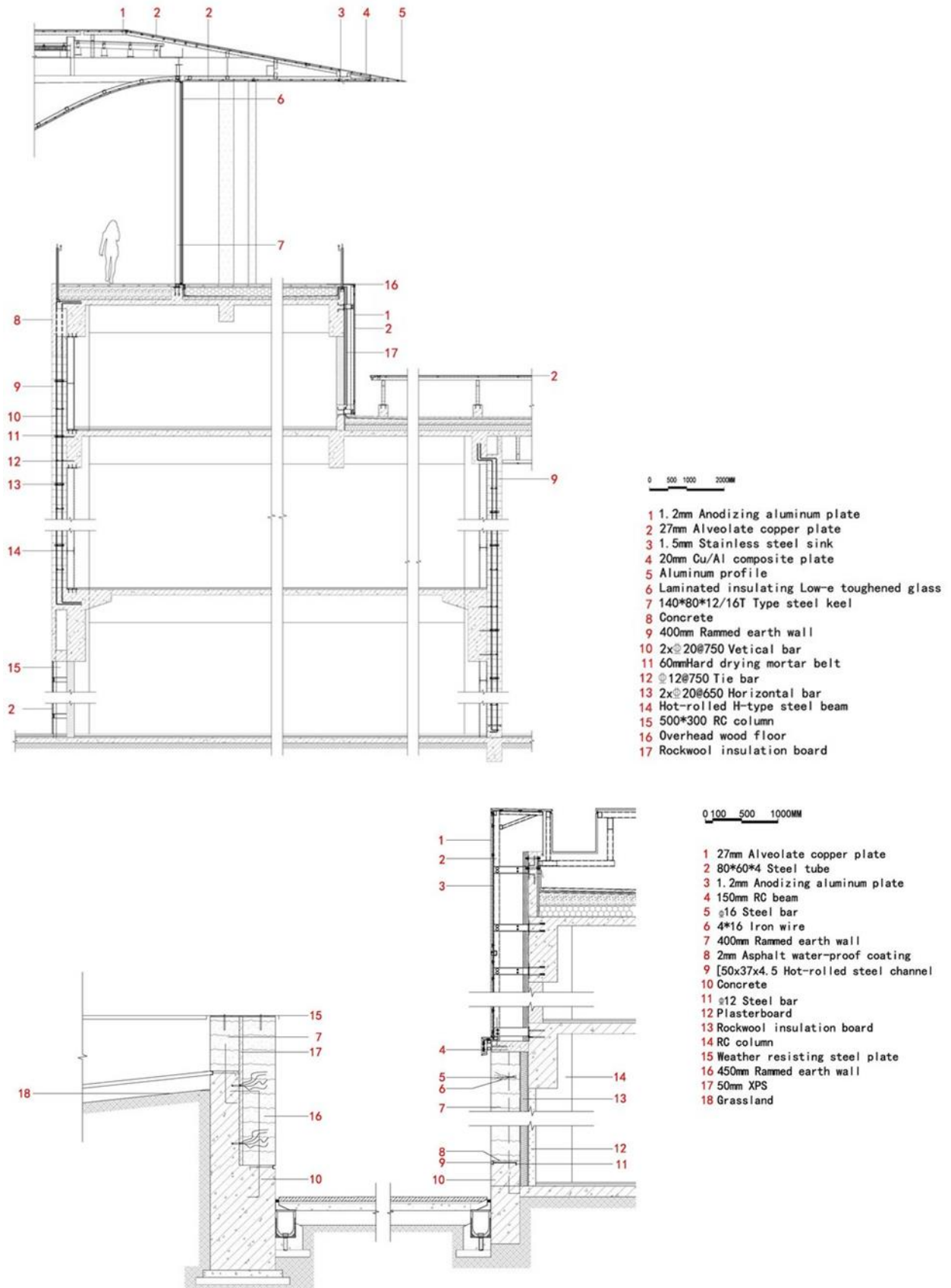
εκ.6.6. Εξωτερική άποψη του μουσείου Erlitou Site Museum of the Xia Capital. (ανακτήθηκε από: <https://www.archdaily.com/960343/erlitou-site-museum-of-the-xia-capital-tjad-rurban-studio> στις 08/04/22).

Γενικά στοιχεία: Το μουσείο αυτό αποτελεί το κληρονόμημα της πρώτης πρωτεύουσας της Κίνας κατά τη δυναστεία Xia. Θεωρείται από πολλούς ως η ρίζα της κινέζικης κουλτούρας και του εθνικού συστήματος της χώρας (Chinadaily, 2020). Φέρει στους λειτουργικούς για το κοινό χώρους του, όλη την πρώιμη ιστορία της Κίνας με εκθέματα που αφορούν τόσο την περιοχή εκείνη και την ζωή της τότε εποχής (περίπου πριν από 3.800 χρόνια), αλλά και μακέτες των κατασκευών που δημιουργήθηκαν τότε με την εμφάνιση που πιθανολογείται να είχαν, στη μορφή τριών εκθέσεων. Παράλληλα, στους ιδιωτικούς χώρους διενεργούνται έρευνες για την εξέλιξη της ιστορίας αλλά και τη βαθύτερη μελέτη της. Το κτήριο αυτό κατέχει μεγάλους εκθεσιακούς χώρους, αίθουσες προβολών, εργαστήρια, αμφιθέατρο για εκδηλώσεις, γραφεία και πολλαπλούς βοηθητικούς χώρους. Η σύνθεση της κατασκευής φαίνεται να πηγάζει από τις οργανικές διατάξεις που έχουν ανακαλυφθεί στις ανασκαφές των πόλεων της δυναστείας εκείνης, στην οποία αφιερώνεται. Κεντρικά τοποθετείται μια κατασκευή στέγης, η οποία καλύπτει μια εμφανή κατακόρυφη κίνηση, που εξυπηρετεί όλο το εύρος του κτίσματος και φέρει ορισμένα χαρακτηριστικά καμπύλα στοιχεία.



εικ.6.7. Τμήματα πλήρωσης του μουσείου με τοιχοποιίες από rammed earth. (ανακτήθηκε από: <https://www.archdaily.com/960343/erlitou-site-museum-of-the-xia-capital-tjad-rurban-studio> στις 08/04/22).

Στατική επίλυση φορέα: Η έκταση του μουσείου είναι ιδιαίτερα μεγάλη, καθώς καλύπτει συνολικά πάνω από 31.000 τετραγωνικά μέτρα. Τα πρωτεύοντα στατικά στοιχεία είναι κατασκευασμένα κατά κύριο λόγο από οπλισμένο σκυρόδεμα και μεταλλικές κατασκευές ελαφριού τύπου. Το παραπάνω γεγονός οφείλεται στην ανάγκη γεφύρωσης μεγάλων ανοιγμάτων για την δημιουργία των εκθεσιακών χώρων και αμφιθεάτρων, πράγμα που δεν θα ήταν δυνατό μονάχα με την αξιοποίηση τοιχίων rammed earth. Όσον αφορά τα στοιχεία rammed earth που εμφανίζονται στο εσωτερικό και στο εξωτερικό του κτηρίου, τοποθετούνται κυρίως ως στοιχεία πλήρωσης στους χώρους υψηλής συγκέντρωσης κοινού. Στους χώρους αυτούς, η χρήση rammed earth, εκτός του επιθυμητού αισθητικού παράγοντα, εξυπηρετεί ως πρόσθετη θερμική μάζα, για τη βελτιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης του κτηρίου, αλλά και ως ηχοαπορροφητικό υλικό, για τη μείωση του βαθμού όχλησης μεταξύ των αιθουσών. Τα στοιχεία αυτά, όπως γίνεται αντιληπτό από τις λεπτομέρειες, τοποθετούνται πάνω σε δοκούς από οπλισμένο σκυρόδεμα (πράγμα που φέρει αντίστοιχο ρόλο με τα θεμέλια στις συμβατικές κατασκευές rammed earth) και είναι οπλισμένα με κατακόρυφες και οριζόντιες χαλύβδινες ράβδους Φ16. Παρατηρείται, επίσης, η χρήση στεγανωτικών επικαλύψεων (όπως ασφαλτικά γαλακτώματα) μεταξύ του τοίχου rammed earth και του οπλισμένου σκυροδέματος, ώστε να αποφευχθεί η διείσδυση της υγρασίας από τις δοκούς στα τοιχεία. Τέλος, τα τοιχεία αυτά φέρουν και θερμομονωτικά υλικά σε μορφή πλακών, είτε στην εσωτερική επιφάνεια του τοιχείου, είτε στο ενδιάμεσο δύο συγκοινωνούντων τοιχίων.



εικ.6.8. Κατασκευαστικές λεπτομέρειες του Erlitou Site Museum. (ανακτήθηκε από: <https://www.archdaily.com/960343/erlitou-site-museum-of-the-xia-capital-tjad-rurban-studio> στις 08/04/22).



6.2.3. Casa Ballena Art Center

Τόπος: San José del Cabo, Μεξικό

Κλίμα: BWh - Θερμό κλίμα της ερήμου με ζεστές, ξηρές συνθήκες και έντονη ηλιοφάνεια

Τοποθεσία: Περιαστική

Σεισμικότητα: Μέτρια προς υψηλή

Αρχιτέκτονες: RIMA Design Group

Έτος κατασκευής: 2019

Χρήση: Δημόσιο κτήριο πολιτισμού

Πηγές στοιχείων: <https://www.archdaily.com/942459/casa-ballena-art-center-rima-arquitectura>

https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2004/07/Seismic_hazard_map

https://en.wikipedia.org/wiki/File:K%C3%B6ppen-Geiger_Climat_Classification_Map.png



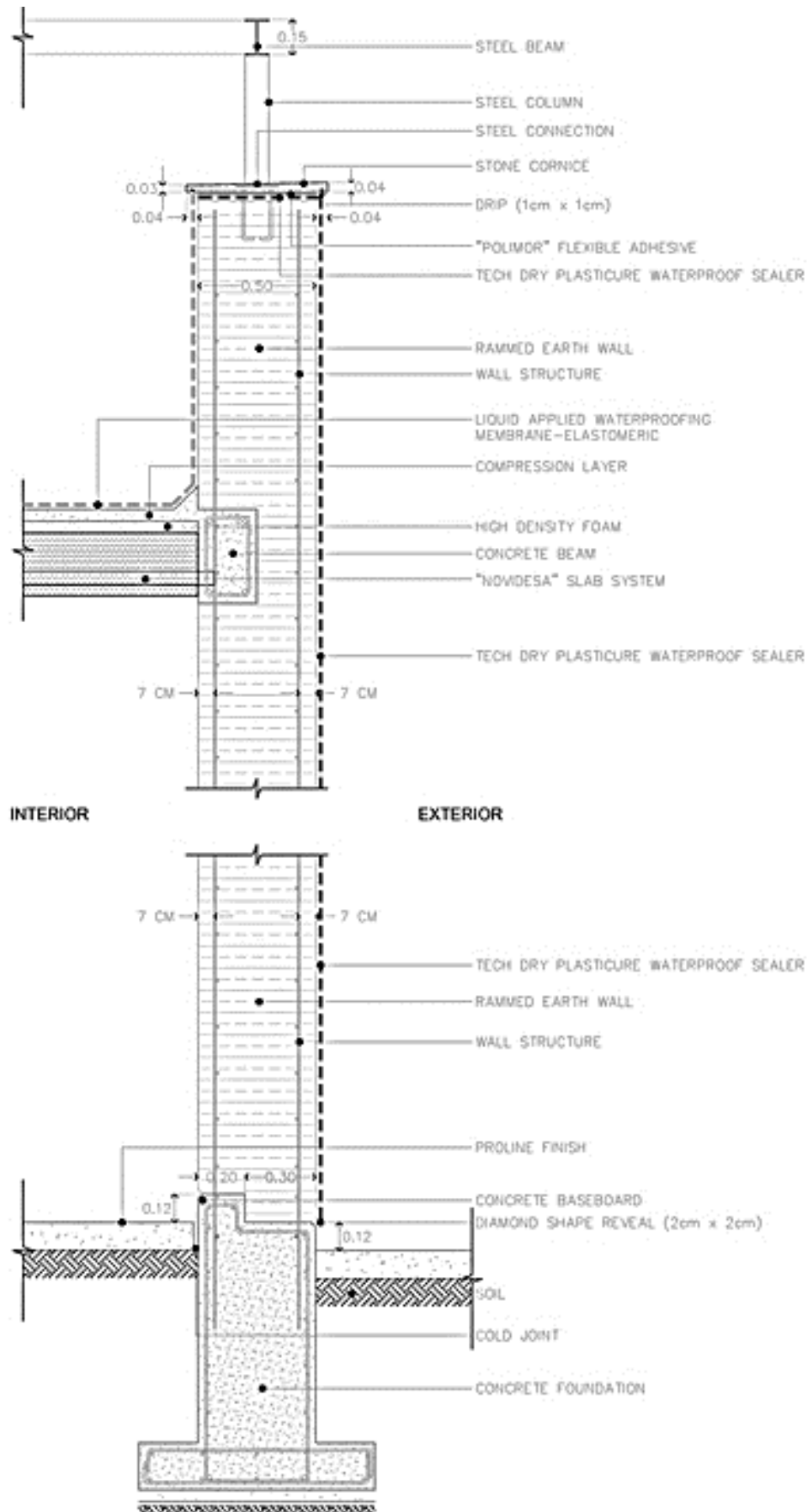
εικ.6.9. Συνολική άποψη του Casa Ballena Art Center. (ανακτήθηκε από: https://www.archdaily.com/942459/casa-ballena-art-center-rima-arquitectura?ad_source=search&ad_medium=projects_tab στις 06/04/22).

Γενικά στοιχεία: Το Casa Ballena Art Center είναι ένα κέντρο τεχνών που επιδιώκει να προσφέρει την πιο μοναδική εμπειρία στο Los Cabos, σε νέους καλλιτέχνες του Μεξικού αλλά και του εξωτερικού. Αποτελεί το πιο διάσημο και ολοκληρωμένο έργο των RIMA, καθώς μελέτησαν συστηματικά κάθε ξεχωριστή λεπτομέρεια, από τον σχεδιασμό και την κατασκευή των κτηρίων, έως τη διακόσμηση και τη διαμόρφωση του εξωτερικού χώρου. Οι επτά όγκοι από χώμα, αναδύονται μέσα από τη φυσική τοπογραφία της περιοχής και ατενίζουν τον ορίζοντα και τη μαρίνα του Puerto Los Cabos, προσφέροντας στους καλλιτέχνες τους ιδανικούς εσωτερικούς και εξωτερικούς χώρους για να εργαστούν και να αναδείξουν τις καλλιτεχνικές τους ανησυχίες. Το κέντρο αυτό προσφέρει τρία εργαστήρια, έναν μεγάλο εκθεσιακό χώρο, πολλά αίθρια πολλαπλών χρήσεων, διοικητικούς και βοηθητικούς χώρους, τραπεζαρίες και σαλόνια. Η επιλογή του rammed earth έγινε με γνώμονα τον βιοκλιματικό σχεδιασμό, αλλά και λόγω του εξαιρετικού αισθητικού αποτελέσματος που αντιπροσωπεύει τη χειροτεχνική διαδικασία της τέχνης για την οποία δημιουργήθηκε αυτό το κέντρο. Κάθε όγκος έχει προσανατολισμό που εξυπηρετεί κάθε φορά τη λειτουργία του, ενώ η διαφοροποίηση του ύψους των όγκων επιτρέπει τη φυσική σκίαση που σε συνδυασμό με τη φύτευση δημιουργεί ένα ιδανικό μικροκλίμα ιδιαίτερα τους θερινούς μήνες (archdaily, 2022).



εικ.6.10. Πρόσοψη του Casa Ballena Art Center. (ανακτήθηκε από: https://www.archdaily.com/942459/casa-ballena-art-center-rima-arquitectura?ad_source=search&ad_medium=projects_tab στις 06/04/22).

Στατική επίλυση φορέα: Καθώς το Μεξικό αποτελεί μια σεισμογενής χώρα, δεν θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί μόνο το rammed earth ως υλικό δόμησης για τον φέροντα οργανισμό. Το σκυρόδεμα κατέχει σημαντικό ρόλο σε αυτό το κτήριο, καθώς αποτελεί τον φέροντα οργανισμό του κτηρίου και εγκιβωτίζει τις τοιχοποιίες από rammed earth που λειτουργούν ως στοιχεία πλήρωσης και έχουν πάχος 50 εκατοστών, δίνοντας μεγαλύτερη αντοχή στα διάφορα δυναμικά φορτία που μπορεί να προκύψουν. Επιπλέον, ενισχύονται τα πρέκια και οι ποδιές των ανοιγμάτων, ενώ συγχρόνως οριζόντια διαζώματα από σκυρόδεμα τοποθετούνται στο εσωτερικό των τοιχοποιιών, έτσι ώστε να μην είναι εμφανή στην όψη, και συνδυάζονται με τις χαλύβδινες ράβδους του οπλισμού. Βοηθητικός παράγοντας αποτελεί το γεγονός ότι δεν υπάρχει όροφος και όλοι οι όγκοι είναι ισόγειοι, έτσι ώστε να μην επιβαρύνονται περισσότερο οι τοιχοποιίες. Παράλληλα, για να περιοριστούν στο ελάχιστο τα φορτία από το επίπεδο δώμα επιλέχθηκε ένα ιδιαίτερο είδος πλακών της εταιρείας Novidesa που βασίζεται σε ένα τεχνολογικά προηγμένο σύστημα δόμησης με πλάκες εξηλασμένης πολυστερίνης EPS που έχει πολύ μικρότερο βάρος σε σχέση με αυτό μιας συμβατικής πλάκας εξολοκλήρου από σκυρόδεμα, ενώ ακολουθεί τους κανονισμούς του IECC (Διεθνής Κώδικας Εξοικονόμησης Ενέργειας) του 2015-2018 (advantechcs, 2019).



εικ.6.11. Κατασκευαστική λεπτομέρεια τοίχου. (ανακτήθηκε από: https://www.archdaily.com/942459/casa-ballena-art-center-rima-arquitectura?ad_source=search&ad_medium=projects_tab στις 06/04/22).

6.2.4. Earth House

Τόπος: Mérida, Μεξικό

Κλίμα: Aw – Τροπικό υγρό και ξηρό κλίμα ή τροπικό κλίμα σαβάνας

Τοποθεσία: Αστική

Σεισμικότητα: Χαμηλή προς μέτρια

Αρχιτέκτονες: earthLAB Studio

Έτος κατασκευής: 2017

Χρήση: Κατοικία

Πηγές στοιχείων: <https://www.archdaily.com/877159/earth-house-earthlab-studio>

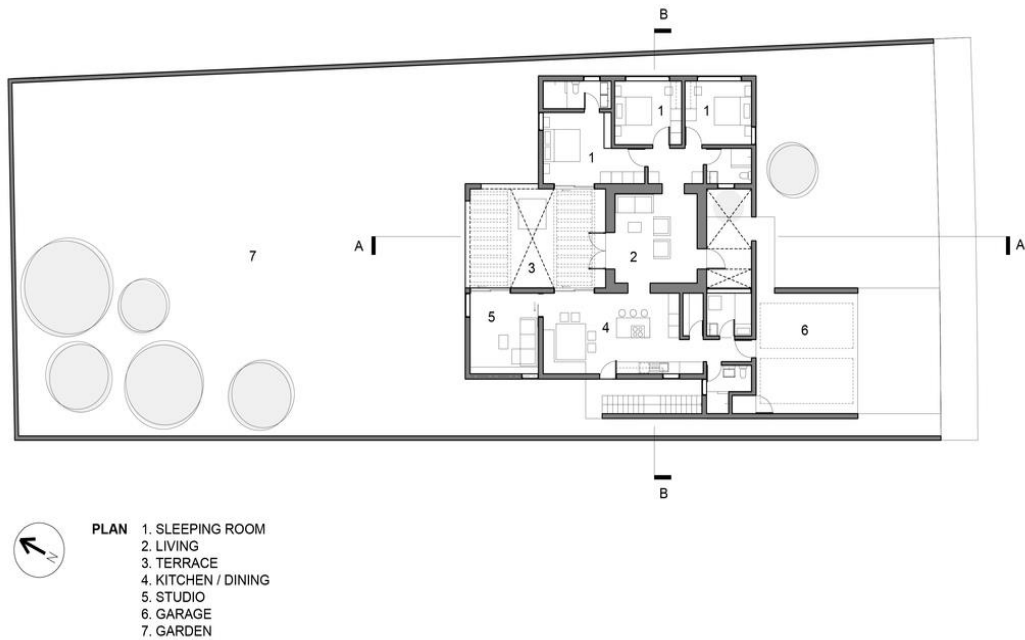
https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2004/07/Seismic_hazard_map

https://en.wikipedia.org/wiki/File:K%C3%B6ppen-Geiger_Climate_Classification_Map.png



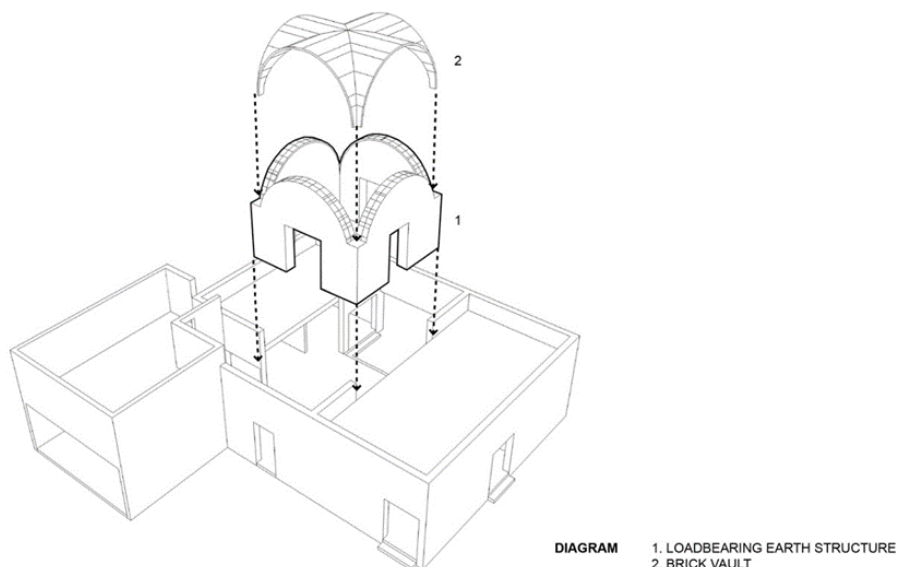
εικ.6.12. Εξωτερική άποψη Earth House. (ανακτήθηκε από: https://www.archdaily.com/877159/earth-house-earthlab-studio?ad_source=search&ad_medium=projects_tab στις 08/04/22).

Γενικά στοιχεία: Το Earth House στα περίχωρα της Μέριδα, Μεξικού, αποτελεί μια κατοικία 189 τετραγωνικών μέτρων με πισίνα. Η χρήση του rammed earth στη συγκεκριμένη κατοικία, σύμφωνα με κείμενο του ίδιου του αρχιτέκτονα, αφορά την εναρμόνιση της παραδοσιακής και μοντέρνας αρχιτεκτονικής, ως στοιχείο σύνδεσης των δύο. Συγκεκριμένα, κεντρικά της κατοικίας υπάρχει ένα σταυροθόλιο, τοποθετημένο πάνω σε τοιχία rammed earth το οποίο αποτελεί τον πυρήνα της κατοικίας και δημιουργεί ένα κεντρικό σημείο συνάντησης όλων των χώρων, δίνοντας στους χρήστες έναν κεντρικό ανοιχτό χώρο για συγκέντρωση και χαλάρωση. Συμβολικά, δηλαδή, τα τοιχία rammed earth σχηματίζουν την καρδιά της κατοικίας και μορφολογικά και λειτουργικά.



εικ.6.13. Κάτοψη Earth House. (ανακτήθηκε από: https://www.archdaily.com/877159/earth-house-earthlab-studio?ad_source=search&ad_medium=projects_tab στις 08/04/22).

Στατική επίλυση φορέα: Το συγκεκριμένο κτήριο ως φέροντα στοιχεία αξιοποιεί συμβατικά τοιχεία οπλισμένου σκυροδέματος αλλά και τοιχεία rammed earth. Όπως προαναφέρθηκε ο πυρήνας του κτίσματος είναι εξολοκλήρου κατασκευασμένος από rammed earth, το οποίο είναι τοποθετημένο σε θεμέλια οπλισμένου σκυροδέματος. Τα τοιχεία αυτά φέρουν οριζόντιο και κατακόρυφο χαλύβδινο οπλισμό, ο οποίος στις 4 γωνίες ενισχύεται σημαντικά, ώστε να παραλάβει τις θλιπτικές και εφελκυστικές τάσεις που προκύπτουν από το σταυροθόλιο. Τα τοιχεία αυτά, εμφανώς μεγαλύτερου πάχους, φέρουν ανοίγματα, τα οποία για να δημιουργηθούν τοποθετείται μεταλλικό πλαίσιο κατά τη διάρκεια της συμπίεσης, στο οποίο έπειτα τοποθετείται σκελετός κουφώματος, αν είναι αναγκαίο. Σημαντικό στοιχείο της συνολικής κατασκευής του κτηρίου είναι ότι οι γύρω τοίχοι συμβατικής κατασκευής λειτουργούν σαν αντηρίδες των τοιχείων rammed earth.



εικ.6.14. Τρισδιάστατη απεικόνιση και διάγραμμα χωροθέτησης στοιχείων rammed earth και σταυροθολίου. (ανακτήθηκε από: https://www.archdaily.com/877159/earth-house-earthlab-studio?ad_source=search&ad_medium=projects_tab στις 08/04/22).



εικ.6.15. Εσωτερικές απόψεις από το σταυροθόλιο του Earth House και τους τοίχους από rammed earth. (ανακτήθηκε από: https://www.archdaily.com/877159/earth-house-earthlab-studio?ad_source=search&ad_medium=projects_tab στις 08/04/22).

6.2.5. Zenkonyu x Tamping Earth

Τόπος: Honjima Island, Ιαπωνία

Κλίμα: Cfa - Υγρό υποτροπικό κλίμα με ζεστά, υγρά καλοκαίρια και δροσερούς, ήπιους χειμώνες

Τοποθεσία: Περιαστική

Σεισμικότητα: Υψηλή

Αρχιτέκτονες: Tadashi Saito + Atelier NAVE

Έτος κατασκευής: 2013

Χρήση: Δημόσιο κτήριο

Πηγές στοιχείων: <https://www.archdaily.com/506198/zenkonyu-tamping-earth-tadashi-saito-atelier-nave>

https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2004/07/Seismic_hazard_map

https://en.wikipedia.org/wiki/File:K%C3%B6ppen-Geiger_Climate_Classification_Map.png

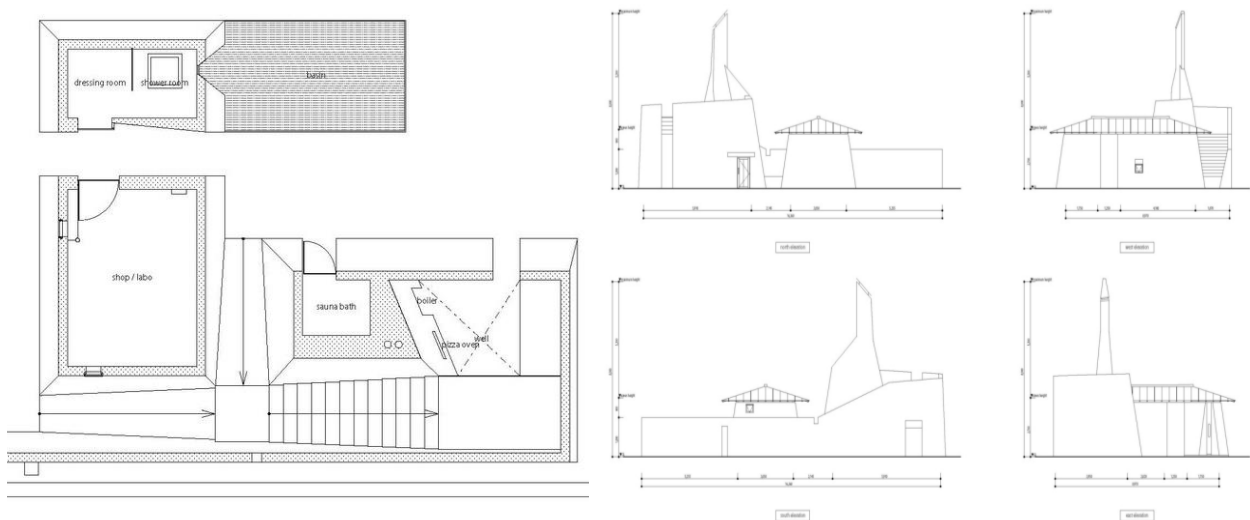


εικ.6.16. Εξωτερική άποψη του κτίσματος Zenkonyu x Tamping Earth. (ανακτήθηκε από: <https://www.archdaily.com/506198/zenkonyu-tamping-earth-tadashi-saito-atelier-nave> στις 08/04/22).

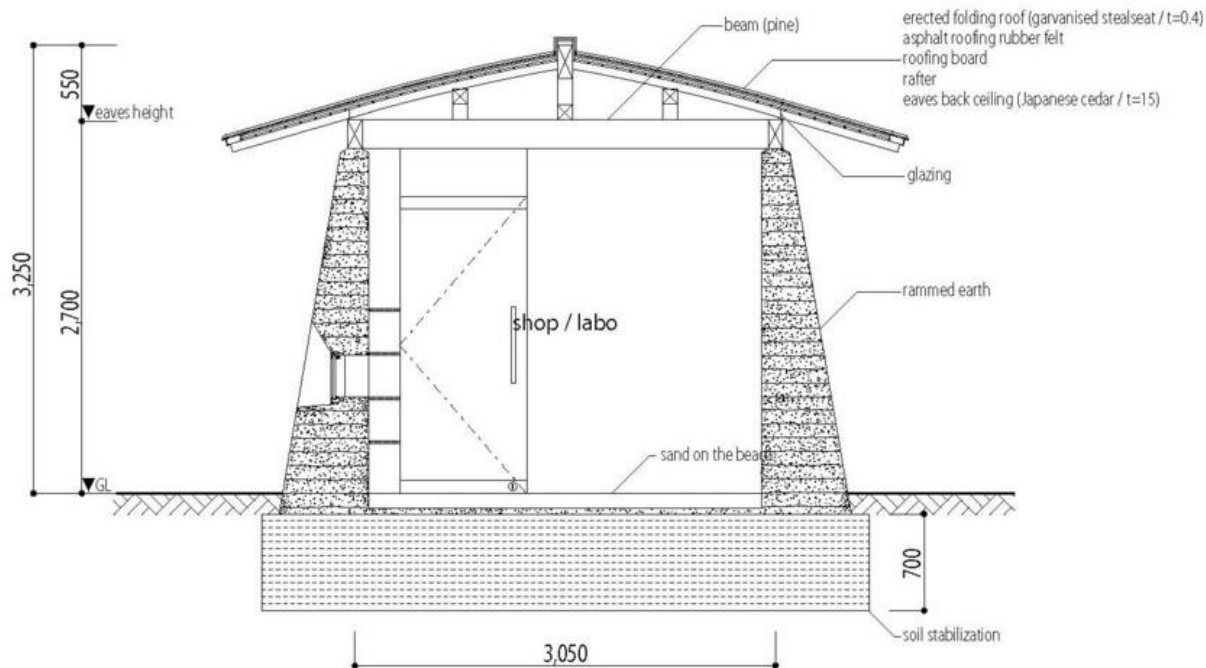


Γενικά στοιχεία: Η παραπάνω κατασκευή μικρής κλίμακας από rammed earth αποτελεί συμμετοχή στην έκθεση Setouchi Triennale, που διεξήχθη το 2013. Είναι ένα κτίσμα δημόσιου χαρακτήρα, συγκεκριμένα δημόσια λουτρά και χώρος παρασκευής φαγητού, το οποίο απαντά στις ανάγκες των κατοίκων της περιοχής Honjima. Χαρακτηριστικά στην περιοχή εκείνη από την εποχή Edo και έπειτα κατοικούν μεγάλοι πληθυσμοί που ασχολούνται με χειρωνακτικά επαγγέλματα, όπως ξυλουργοί, αρχιτέκτονες, εργάτες κ.ά., με χαμηλότερο οικονομικό επίπεδο. Η περιοχή εκείνη υπέστη μεγάλες καταστροφές, εξαιτίας του Δευτέρου Παγκοσμίου Πολέμου, αλλά και εξαιτίας της μεγάλης σεισμογένειας που εμφανίζεται εκεί. Απόρροια του παραπάνω γεγονότος ήταν η εξολοκλήρου καταστροφή των κατοικιών αλλά και των κτισμάτων δημόσιου χαρακτήρα, καθιστώντας τους κατοίκους της περιοχής εκείνης άστεγους και αναγκάζοντάς τους να ζουν σε κακές συνθήκες. Ως, λοιπόν, μια ανθρωπιστική κίνηση απέναντι στην κακή κατάσταση της περιοχής αυτής, χτίστηκαν αυτά τα λουτρά.

Η κατασκευαστική μέθοδος του rammed earth δεν επιλέχθηκε τυχαία. Αντιθέτως, προέκυψε ως φυσική επιλογή των αρχιτεκτόνων, καθώς η περιοχή αυτή είναι δύσβατη και δεν κατείχε αποθέματα των συμβατικών υλικών κατασκευής. Έτσι, επιλέχθηκε ως βέλπστη επιλογή, η οποία μπόρεσε να προσφέρει στους κατοίκους μια φτηνή λύση για την ανοικοδόμηση των κατασκευών μικρής κλίμακας αλλά και μια δυνατότητα συμμετοχής στην κατασκευαστική διαδικασία, όντας μία ιδιαίτερα απλή μέθοδος οικοδόμησης. Έτσι, τα λουτρά της Honjima οικοδομήθηκαν με αυτή τη μέθοδο, αξιοποιώντας τους χειρωνακτες κατοίκους της περιοχής εκείνης. Όσον αφορά το κτήριο, αποτελείται από όγκους οι οποίοι σχηματίζουν σε κάτοψη μια σπείρα, ενώ ενώνονται εξωτερικά από ένα ενιαίο τοίχιο rammed earth. Χαρακτηριστικό αποτελεί η καθολική χρήση του rammed earth στους στατικούς και μη τοίχους, σε συνδυασμό με την ξύλινη οροφή. Σύμφωνα με τους ίδιους τους αρχιτέκτονες: «Η χειρωνακτική κατασκευή έγινε χωρίς προσοχή στην λεπτομέρεια και την τεχνική και την αναζήτηση ορθολογικών μορφών». Με την παραπάνω φράση αντιλαμβάνεται κανείς το γεγονός ότι η κατασκευή δεν έχρηζε ιδιαίτερης τεχνογνωσίας και κατασκευαστικής εμπειρίας. Αντιθέτως, αποτέλεσε την ομαδική και οργανική αναζήτηση μορφών από τους ίδιους τους μελλοντικούς χρήστες.



εικ.6.17. Σχέδια κάτοψης και όψεων κτίσματος Zenkonyu x Tamping Earth. (ανακτήθηκε από: <https://www.archdaily.com/506198/zenkonyu-tamping-earth-tadashi-saito-atelier-nave> στις 08/04/22).



εικ.6.18. Κατασκευαστική τομή του Zenkonyu x Tamping Earth. (ανακτήθηκε από: <https://www.archdaily.com/506198/zenkonyu-tamping-earth-tadashi-saito-atelier-nave> στις 08/04/22).

Στατική επίλυση φορέα: Παρά την αποφυγή των αρχιτεκτόνων για μια λεπτομερή κατασκευή, εμφανίζεται ιδιαίτερο ενδιαφέρον στις επιλογές που πάρθηκαν όσον αφορά τους τοίχους rammed earth. Συγκεκριμένα, παρατηρείται ότι οι τοίχοι είναι με μεταβαλλόμενο πάχος, αυξανόμενο προς την βάση του τοίχου (ομοιάζει της συμβατικής αντηρίδας). Η επιλογή αυτή μπορεί να έγινε για να αυξήσει την δυνατότητα παραλαβής δυναμικών σεισμικών καταπονήσεων, αλλά και για την καλύτερη παραλαβή της ξύλινης ελαφριάς κατασκευής της στέγης. Στην κορυφή των τοίχων τοποθετούνται αξονικά ξύλινοι στρωτήρες, ώστε να «πατήσει» κατάλληλα η στέγη, για την βέλτιστη παραλαβή των δυνάμεων. Τέλος παρατηρείται η έλλειψη θεμελίωσης στα τοιχεία, η οποία όμως αντικαθίσταται από σταθεροποιημένο έδαφος, πάχους 70 εκατοστών, δημιουργώντας στο κτίσμα ένα ενιαίο ευρύ πέδιλο. Αντλαμβάνεται κανείς από το παραπάνω κτίσμα τις δυνατότητες που μπορεί να προσφέρει η μέθοδος rammed earth, όταν σε μια τόσο σεισμογενή χώρα όπως η Ιαπωνία, αξιοποιήθηκε χωρίς άλλα φέροντα στοιχεία, ενώ παράλληλα η χρήση του κτίσματος ως λουτρό, παράγει ερευνητικό ενδιαφέρον για την ορθή διαχείριση της υγρασίας στο εσωτερικό.

6.3. Το rammed earth στην Ελλάδα

Στην Ελλάδα, μέχρι πρόσφατα, η χρήση μεθόδων συμπίεσης χώματος για την κατασκευή κτηρίων ή πιο απλών κατασκευών ήταν μηδενική ακόμα και στο στάδιο της μελέτης. Καταρχάς, η άγνοια για το υλικό αυτό και κυρίως η αδυναμία του να σταθεί σε σεισμικά περιβάλλοντα ίσως οδήγησε στη συστηματική αποφυγή του. Η πρώτη εμφάνιση του rammed earth στην Ελλάδα φαίνεται να έγινε το 2009 σε μια μελέτη ενός μικρού οινοποιείου στην Παροικιά της Πάρου από το γραφείο kokkinou-kourkoulas Architects and Associates. Το οινοποιείο αφορούσε δυο ξεχωριστά κτήρια, εκ των οποίων το ένα αποτελούσε το βασικό οινοποιείο, τα κελάρια και τα γραφεία της διοίκησης, ενώ το άλλο προοριζόταν για αποθηκευτική χρήση. Το κτήριο τοποθετούνταν πίσω από έναν τοίχο από rammed earth και κάτω από έναν φυσικό μικρό λόφο με τρόπο ώστε ο μεγαλύτερος όγκος του κτηρίου να μην ξεχωρίζει στο τοπίο αλλά να εντάσσεται ομαλά σε αυτό (Kokkinou-Kourkoulas Architects and Associates, 2022).



εικ.6.19. Σύνθεση φωτορεαλιστικών του οινοποιείου από τον κύριο εξωτερικό χώρο. (ανακτήθηκε από: <https://www.kokkinoukourkoulas.com/el/winery-in-paros/> στις 08/04/22).

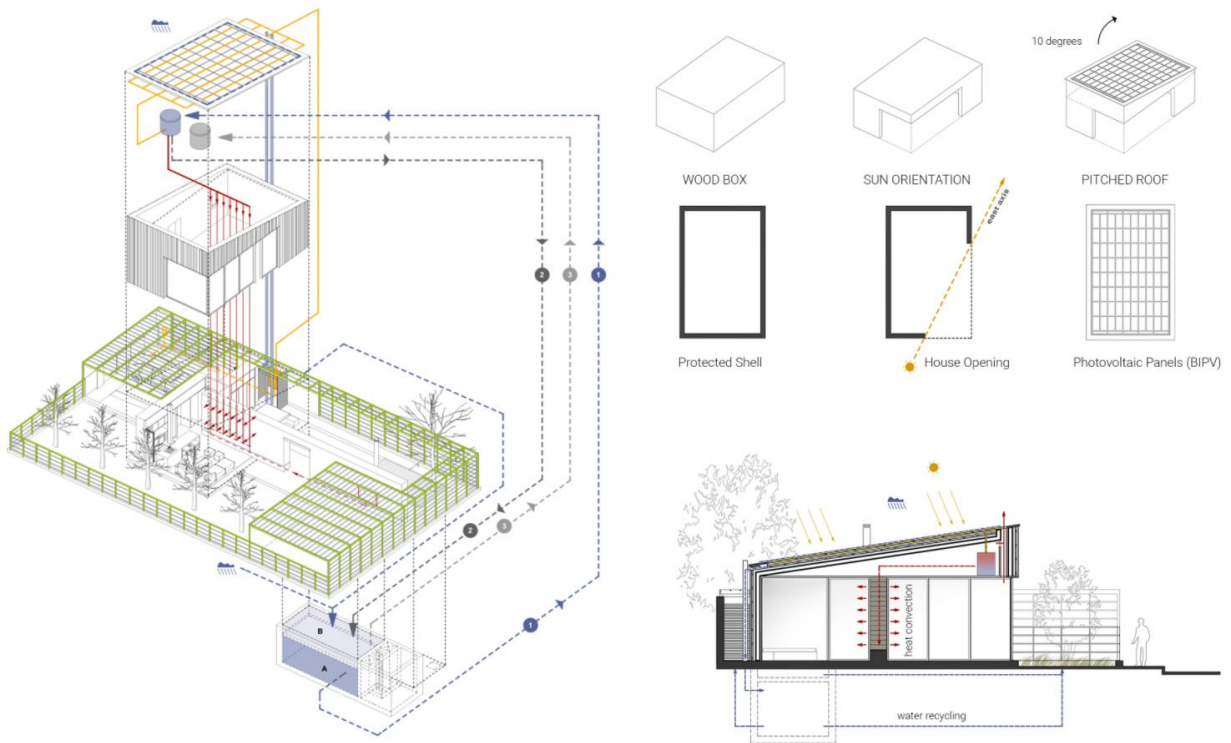
Την περίοδο 2016 - 2017 πραγματοποιήθηκε η πρώτη ολοκληρωμένη μελέτη κτηρίου στο οποίο υπήρχαν δομικά στοιχεία από rammed earth και αφορούσε μια κατοικία στη Σαλαμίνα. Το earthwood όπως ονομάστηκε η κατοικία αυτή μελετήθηκε από το γραφείο KAAF Architects και οι βασικές προκλήσεις ήταν να μπορεί να κατασκευαστεί σε πάρα πολύ μικρό χρονικό διάστημα (2 με 4 ημέρες), να αποτελείται μόνο από φυσικά ανακυκλώσιμα δομικά υλικά και να είναι ενεργειακά αυτόνομη μέσω της χρήσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και της βέλτιστης διαχείρισης και ανακύκλωσης του νερού, σε μια γενικότερη προσπάθεια βελτίωσης των συνθηκών διαβίωσης, μείωσης του οικολογικού αποτυπώματος και μεγιστοποίησης της θετικής επίδρασης του έργου στο περιβάλλον. Η βασική συνθετική ιδέα ξεκινά από την κατοικία η οποία είναι κατασκευασμένη από σταυρωτή επικολλητή ξυλεία και ένα γραμμικό στοιχείο από rammed earth το οποίο διαπερνά την κατοικία και διαμορφώνει επιμέρους χωρικές ποιότητες στον εξωτερικό χώρο, σε συνδυασμό με δύο ανπιδιαμετρικά στέγαστρα τα οποία αποτελούν ιδανικά για τα αναρριχητικά φυτά. Από το 2017 και έκτοτε, η μελέτη αυτή έχει λάβει πολλές διακρίσεις και βραβεία, ενώ παρουσιάζεται σε διάφορες εκδηλώσεις, εκθέσεις, διαλέξεις και περιοδικά σε εγχώριο και διεθνές επίπεδο (KAAF Architects, 2022).



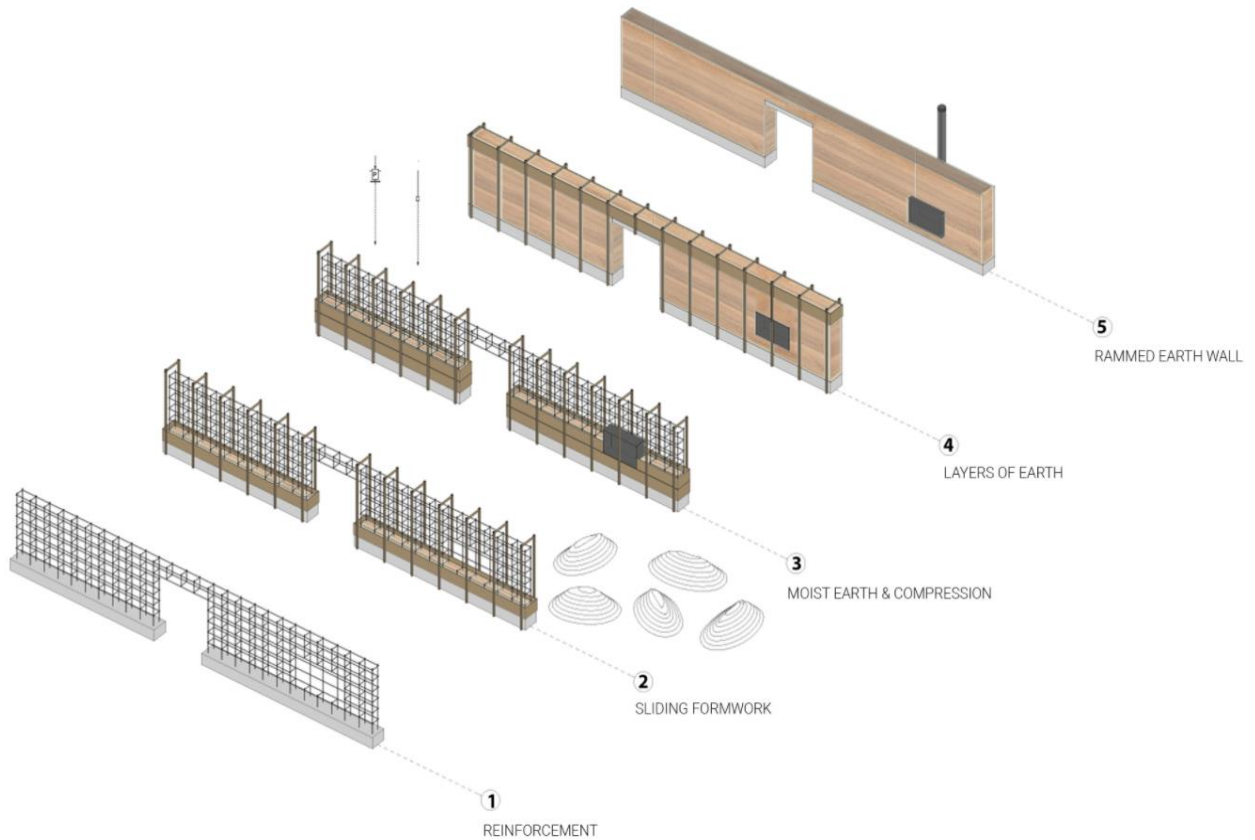
εικ.6.20 Φωτορεαλιστικό της κατοικίας. Ένα γωνιακό άνοιγμα χωρίς ενδιάμεσα υποστυλώματα, ανοίγεται προς την κεντρική αυλή, ενώ δημιουργείται η αίσθηση της διείσδυσης του τοίχου από rammed earth στο εσωτερικό της. (ανακτήθηκε από: <http://www.gradreview.gr/2017/06/earthwood-kaaf-project.html> στις 08/04/22).



εικ.6.21. Η συνολική σύνθεση της κατοικίας και η σχέση της με τους υπαίθριους και ημιυπαίθριους χώρους. (ανακτήθηκε από: <http://www.gradreview.gr/2017/06/earthwood-kaaf-project.html> στις 08/04/22).



εικ.6.22. Η βιοκλιματική και μηχανολογική μελέτη και ο ρόλος του τοίχου από rammed earth. (ανακτήθηκε από: <https://www.kaaf.gr/work/earthwood> στις 08/04/22).



εικ.6.23. Τα στάδια κατασκευής του τοίχου από rammed earth. (ανακτήθηκε από: <https://www.kaaf.gr/work/earthwood> στις 08/04/22).

Το 2019, πραγματοποιήθηκε ακόμα μια μελέτη για μια κατοικία στη Σαντορίνη από το γραφείο KAPSIMALIS ARCHITECTS με θέα τη θάλασσα και το φυσικό τοπίο. Η κεντρική ιδέα αφορούσε τη δημιουργία μιας ψευδαίσθησης κατά την οποία ένα μεγάλο κομμάτι γης θα φαινόταν σαν να αιωρείται πάνω από το επίπεδο του εδάφους. Την ίδια περίοδο το γραφείο SUBU που ασχολείται με τη δημιουργία παθητικών κτηρίων και κτηρίων σχεδόν μηδενικής κατανάλωσης (nZEB), μαζί με μια μεγάλη ομάδα επιστημόνων και μηχανικών, κατάφεραν να δημιουργήσουν την πρώτη κατασκευή από συμπίεσμένο χώμα με εργαλεία αέρος στην Ελλάδα, σύμφωνα με τις διεθνείς προδιαγραφές. Το R.E.W. (Rammed Earth Wall), όπως ονομάστηκε, πραγματοποιήθηκε στο Παιχνιδαγωγείο Δημοτικό Σχολείο, στο Νέο Ψυχικό, και αφορούσε ένα παιχνίδι προορισμένο για αθλοπαιδιάς. Ουσιαστικά αποτελεί έναν καμπύλο τοίχο με μικρά κυκλικά ανοίγματα, ενώ στο ανώτερο σημείο υπάρχουν ξύλινες δοκοί από τις οποίες διάφορα σχοινιά και ανεμόσκαλες κρέμονται προσφέροντας απεριόριστες δυνατότητες παιχνιδιού. Ένα μικρό μεταλλικό στέγαστρο προστατεύει τις παρειές του τοίχου από το νερό της βροχής, ενώ ένα υπερυψωμένο θεμέλιο βοηθά στην αποφυγή της στάσιμης υγρασίας στο κάτω τμήμα του. Η κατασκευή αυτή, έλαβε μια από τις 5 ειδικές διακρίσεις στην 10^η Μπιενάλε Νέων Ελλήνων Αρχιτεκτόνων που διοργάνωσε το Hellenic Institute of Architecture για το 2021.



εικ.6.24. Φωτορεαλιστικό από τη μελέτη της κατοικίας στη Σαντορίνη. (ανακτήθηκε από: <https://el.ozonweb.com/culture/art-design/kapsimalis-architects-santorini-residence> στις 06/04/22).



εικ.6.25. Ο τοίχος από rammed earth στο Παιχνιδαγωγείο Δημοτικό Σχολείο, στο Νέο Ψυχικό. (ανακτήθηκε από: <https://www.subu.gr/selected/rammed-earth-playwall/> στις 06/04/22).

Το πιο πρόσφατο έργο από rammed earth που παρουσιάστηκε στην Ελλάδα είναι το Porto Kale-The Rammed Earth Towers (2019). Μελετήθηκε από το γραφείο TP Architects και αφορούσε στη δημιουργία δύο αυτόνομων πύργων φιλοξενίας και αναψυχής εντός του παραδοσιακού οικισμού Πόρτο Κάγιο του δήμου Ανατολικής Μάνης. Το ελάχιστο δυνατό οικολογικό αποτύπωμα και ο αρμονικός διάλογος με ένα πλούσιο ιστορικά και μορφολογικά τοπίο, όπως αυτό της Λακωνικής Μάνης αποτέλεσαν τους κύριους άξονες πάνω στους οποίους κινήθηκε η πρόταση. Η επιβλητική παρουσία των παραδοσιακών πέτρινων Μανιάτικων πύργων αποτέλεσε σημείο αναφοράς για τη μορφολογική επίλυση του έργου. Όπως αναφέρουν οι αρχιτέκτονες: «Η ομορφιά της φυσικής φθοράς του χρόνου πάνω στην πέτρα, δεν θα μπορούσε να επιτευχθεί από οποιαδήποτε νέα λιθοδομή. Ως εκ τούτου προσεγγίστηκε η λογική πίσω από το κτίσιμο των πύργων εκείνα τα χρόνια, δηλαδή η χρήση υλικών που προσφέρει σε αφθονία ο τόπος (πέτρα και χώμα), δημιουργώντας όσο το δυνατόν πιο σπιβαρές και ασφαλείς κατασκευές προς τους εξωγενείς παράγοντες, ιδιαιτερότητα της πρότασης προκύπτει από την αναζήτηση ενός ιστορικού και μορφολογικό διαλόγου με τους παραδοσιακούς Μανιάτικους πύργους και εστιάζει στην επιλογή των υλικών της εξωτερικής τοιχοποιίας. Έτσι, χρησιμοποιήθηκε ένας συνδυασμός τοίχων από rammed earth και από την παραδοσιακή λιθοδομή. Με πάχος 50 εκατοστών, οι τοίχοι προσφέρουν στατική επάρκεια και υπερκαλύπτουν όλους τους κώδικες υγρομόνωσης, ηχομόνωσης και πυρασφάλειας, ενώ η αισθητική και η υφή τους είναι εξαιρετικά ενδιαφέροντα» (hotelshow, 2022). Το Porto Kale επιλέχθηκε ανάμεσα σε περισσότερες από 100 συμμετοχές για το βραβείο καλύτερου μη υλοποιημένου έργου και βραβείο κοινού στα Hotel Design Awards 2019.



εικ.6.26. Φωτορεαλιστικό του Porto Kale με έμφαση στους δυο πύργους από rammed earth. (ανακτήθηκε από: <https://www.hotelshow.gr/gr/design-awards/participation/168> στις 06/04/22).

6.4. Συμπερασματικά στοιχεία παραδειγμάτων

	Football Town Tourist Center	Eritritu Site Museum of the Xia Capital	Casa Ballena Art Center	Earth House	Zenkonyu x Tamping Earth
Τόπος	Zhengzhou, Κίνα	Luoyang, Κίνα	San José del Cabo, Μεξικό	Mérida, Μεξικό	Honjima, Ιαπωνία
Κλίμα	Cfa	Cfa	Bwh	Aw	Cfa
Σεισμικότητα	Μέτρια	Μέτρια	Μέτρια προς υψηλή	Χαμηλή προς μέτρια	Υψηλή
Επιφάνεια	2.725 m ²	31.781 m ²	6.996 m ²	189 m ²	32 m ²
Χρήση	Δημόσιο κτήριο Πολιτισμού	Δημόσιο κτήριο Πολιτισμού	Δημόσιο κτήριο πολιτισμού	Κατοικία	Δημόσιο Κτήριο
Χρονολογία	2019	2019	2019	2017	2013
Φέρων οργανισμός	Οπλισμένο σκυρόδεμα	Μεταλλική κατασκευή	Οπλισμένο σκυρόδεμα	Rammed earth & οπλισμένο σκυρόδεμα	Rammed earth
Πληρώσεις Κουφώματα	Rammed earth Μεταλλικά	Rammed earth Μεταλλικά	Rammed earth Ξύλινα	Οπτοπλινθοδομή Μεταλλικά	- Ξύλινα
Στέγαση	Δώμα οπλισμένου σκυροδέματος	Μεταλλική στέγη	Δώμα οπλισμένου σκυροδέματος	Θόλος από οπτόπλινθους & δώμα οπλισμένου σκυροδέματος	Ξύλινη στέγη
Θερμομόνωση	Στον πυρήνα	Στον πυρήνα & εσωτερική	Χωρίς	Στον πυρήνα	Χωρίς

πιν.6.1. Πίνακας ανάλυσης παραδειγμάτων κτηρίων από rammed earth σε σειсмоγενείς χώρες του εξωτερικού (Ιδία επεξεργασία).

	Οινοποιείο στην Πάρο	Κατοικία στη Σαλαμίνα	Κατοικία στη Σαντορίνη	Rammed Earth Wall*	Porto Kale
Τόπος	Πάρος	Σαλαμίνα	Σαντορίνη	Νέο Ψυχικό	Μάνη
Κλίμα	Csa*	Csa	Csa	Csa	Csa
Σεισμικότητα	Μέτρια προς υψηλή	Μέτρια προς υψηλή	Μέτρια προς υψηλή	Μέτρια προς υψηλή	Μέτρια προς υψηλή
Επιφάνεια	-	-	-	-	-
Χρήση	Οινοποιείο	Κατοικία	Κατοικία	Αθλοπαιδιές	Ξενοδοχείο
Χρονολογία	2009	2016	2019	2021	2019
Φέρων οργανισμός	-	Οπλισμένο σκυρόδεμα	Οπλισμένο σκυρόδεμα	Rammed earth	Οπλισμένο σκυρόδεμα
Πληρώσεις κουφώματα	Rammed earth	Rammed earth Μεταλλικά	Rammed earth	-	Rammed earth Ξύλινα
Στέγαση	Δώμα οπλισμένου σκυροδέματος	Μεταλλική στέγη	-	-	Δώμα οπλισμένου σκυροδέματος
Θερμομόνωση	-	χωρίς	-	-	Στον πυρήνα

πιν.6.2. Πίνακας ανάλυσης παραδειγμάτων κτηρίων από rammed earth στην Ελλάδα (η σεισμικότητα προσδιοριστική από το: https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2004/07/Seismic_hazard_map. (*το Csa αποτελεί το μεσογειακό κλίμα) (* το rammed earth Wall αποτελεί τη μοναδική υλοποιημένη κατασκευή στην Ελλάδα) (Ιδία επεξεργασία).



Από τα προηγούμενα δεδομένα, τα οποία συνοπτικά παρουσιάζονται στους παραπάνω πίνακες, για κτήρια από rammed earth τόσο στο εξωτερικό όσο και στην Ελλάδα μπορεί κανείς να αντλήσει ορισμένα σημαντικά συμπεράσματα. Αρχικά, ξεκινώντας από την τοποθεσία, είναι αντιληπτό ότι δεν αποτελεί πραγματικός περιορισμός η σεισμικότητα της εκάστοτε περιοχής και πιθανόν ο σχεδιασμός να μη χρειάζεται να λαμβάνει αυτόν τον παράγοντα υπόψη κατά τη μελέτη. Το παραπάνω μπορεί να αποτελέσει απόρροια λόγω του κτηρίου Zenkonyu x Tamping Earth (παρ. 6.2.1. σελ.100), το οποίο βρίσκεται στην Ιαπωνία στην περιοχή Honjima, η οποία ανήκει σε μια ζώνη υψηλής σεισμικότητας. Αντιστοίχως, στην Ελλάδα αν και στην πλειονότητά τους δεν έχουν κατασκευαστεί οι μελέτες που παρουσιάζονται παραπάνω, είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι δύο από αυτές είχαν λάβει έγκριση για κατασκευή στη Σαντορίνη και στη Μάνη αντιστοίχως, ωστόσο δεν κατασκευάστηκαν. Στην συνέχεια, όσον αφορά την επιφάνεια, και κατ' επέκταση τη χρήση, παρατηρείται ένας σημαντικός αριθμός κατοικιών ή εν γένει κτισμάτων μικρής κλίμακας, τα οποία μάλιστα είναι και εκείνα τα οποία αξιοποιούν περισσότερο τις τοιχοποιίες rammed earth ως φέροντα στοιχεία. Αντίθετα, τα κτήρια μεγάλης κλίμακας και δημόσιου χαρακτήρα εμφανίζουν τις τοιχοποιίες rammed earth ως πληρώσεις και τις αξιοποιούν ως προς τα φυσικά χαρακτηριστικά τους (όπως ηχομονωτικές και θερμομονωτικές δυνατότητες). Στις κατασκευές αυτές που δεν εμφανίζονται στατικά στοιχεία rammed earth, επιλέγεται οπλισμένο σκυρόδεμα για την κατασκευή του φέροντα οργανισμού. Όσον αφορά τη στέψη του εκάστοτε κτηρίου, τόσο στο εξωτερικό όσο και στην Ελλάδα η χρήση δώματος οπλισμένου σκυροδέματος κυριαρχεί των υπολοίπων παρόλο που έχει μεγάλο βάρος σε σχέση με μια ελαφριά κατασκευή από ξύλο ή μέταλλο. Τα ανοίγματα που επιλέγονται δύνανται να είναι και ξύλινα και μεταλλικά, ίσως με μια τάση προς τα ξύλινα, λόγω της ευρύτερης εικόνας της κατασκευής που προσεγγίζει έναν φυσικό χαρακτήρα. Τέλος, κλείνοντας με την επιλογή του σημείου τοποθέτησης της θερμομόνωσης, κυριαρχεί η τοποθέτηση στον πυρήνα, γεγονός απόλυτα λογικό, καθώς με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνονται ταυτόχρονα και η αξιοποίηση της προσφερόμενης θερμικής μάζας της τοιχοποιίας, αλλά και η διατήρηση της εικόνας της τελικής επιφάνειας, η οποία φέρει τον ιδιαίτερο χαρακτήρα της. Τα άνωθεν παραδείγματα, ελληνικά και του εξωτερικού, αποτελούν δείγματα των δυνατοτήτων που προσφέρουν οι τοιχοποιίες από rammed earth. Έτσι, αν η τεχνική αυτή αναπτυχθεί περαιτέρω με το πέρασμα των χρόνων, τότε η ποικιλία και η ποιότητα των έργων που μπορούν να εμφανιστούν πιθανόν να αυξηθούν εκθετικά.



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: Ζητήματα βιωσιμότητας και δομικής επάρκειας στην Ελλάδα

Στο τελευταίο κεφάλαιο της παρούσας ερευνητικής εργασίας παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τη συνολική μελέτη του rammed earth, τη διαδικασία κατασκευής του και τον τρόπο εφαρμογής του σε σύγχρονα κτήρια, μέσα από την ιδιαίτερη προσέγγιση της εργασίας που αφορά τη βιωσιμότητα, τα βιοκλιματικά χαρακτηριστικά και τη σεισμική συμπεριφορά που παρουσιάζει. Τα συμπεράσματα αυτά αφορούν τον ελλαδικό χώρο και εστιάζουν στους παραπάνω βασικούς άξονες. Γίνεται αναφορά στα ελληνικά δεδομένα, μέσα από τους σύγχρονους ελληνικούς οικοδομικούς κανονισμούς, βάσει των οποίων συγκρίνονται τα δεδομένα που συλλέχθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια. Το κεφάλαιο αυτό αποτελεί την ολοκλήρωση της δικής μας προσωπικής μελέτης, η οποία εξυπηρετεί τον στόχο της εργασίας αυτής, ωστόσο συνιστά μια ιδανική αφετηρία για την περαιτέρω διερεύνηση του rammed earth, αλλά και νέων τρόπων δόμησης, φιλικών προς το περιβάλλον σε μια εποχή που η κλιματική αλλαγή είναι πλέον γεγονός. Έτσι, μια μέθοδος ξεχασμένη από τους αρχιτέκτονες για αρκετά χρόνια, αποκτά την ευκαιρία να επανέλθει και να ενταχθεί στην κατασκευαστική διαδικασία, τόσο ως πλήρωση όσο και ως στατικό στοιχείο.

7.1. Ζητήματα βιωσιμότητας των τοιχοποιιών rammed earth

Η βιωσιμότητα στην αρχιτεκτονική αφορά έννοιες, όπως διατήρηση, υποστήριξη και διάρκεια. Αποτελεί μια σύγχρονη τάση, η οποία στοχεύει στη βελτίωση τόσο των συνθηκών διαβίωσης του ανθρώπου, όσο και στη διατήρηση του φυσικού περιβάλλοντος. Είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με την έννοια της βιώσιμης ανάπτυξης, ενώ είναι εύκολα αντιληπτός ο λόγος για τον οποίο έχει εξελιχθεί ως μια νέα τάση. Ξεκινώντας με τα ζητήματα βιωσιμότητας των τοιχοποιιών αυτών, είναι σημαντικό να τεθούν ορισμένοι άξονες με βάση τους οποίους θα κατηγοριοποιηθούν οι δυνατότητες του υλικού. Συγκεκριμένα, η βιωσιμότητα του υλικού, για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας, επιλέγεται να μελετηθεί ως προς:

- τη μεταφορά,
- τον χρόνο διεκπεραίωσης της κατασκευής,
- το κόστος,
- τους ρύπους κατά το στάδιο της κατασκευής,
- τις θερμομονωτικές ανάγκες που εμφανίζονται,
- τις ηχομονωτικές ανάγκες,
- τις ανάγκες κάλυψης των προδιαγραφών της πυρασφάλειας και
- την ανακυκλωσιμότητα του υλικού.

Μεταφορά: Η μεταφορά του μείγματος εξαρτάται από την ποιότητα του τοπικού χώματος της περιοχής της κατασκευής. Πιο συγκεκριμένα, από τη δυνατότητα να κατασκευαστεί το μείγμα in-situ από το τοπικό χώμα ή αν πρέπει να προηγηθεί η δημιουργία αυτού σε κατασκευαστικές μονάδες, για λόγους μη αξιοποιήσιμου τοπικού χώματος ή για λόγους ανάγκης μείγματος με παράγοντες σταθεροποίησης. Τα παραπάνω δεδομένα είναι δύσκολο να ποσοτικοποιηθούν, καθώς η κάθε περιοχή χαρακτηρίζεται από διαφορετική σύσταση χώματος. Σίγουρο παρ' όλ' αυτά, είναι το γεγονός ότι εάν είναι δυνατό να αξιοποιηθεί το τοπικό χώμα στην κατασκευή, τότε μειώνεται σημαντικά το κόστος και ο χρόνος μεταφοράς υλικών, καθώς το κύριο υλικό του κτίσματος βρίσκεται ήδη στο εργοτάξιο. Παράλληλα, άλλο ένα στοιχείο που παίζει σημαντικό ρόλο για τη βιωσιμότητα του υλικού είναι η εμπεριεχόμενη ενέργεια κατά την μεταφορά, αλλά και εκπομπές αέριων ρύπων από την μεταφορά. Ως προς την εμπεριεχόμενη ενέργεια, αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 3 της δοθείσας εργασίας η χαρακτηριστική διαφορά του rammed earth σε σχέση με την εμπεριεχόμενη ενέργεια μεταφοράς του σκυροδέματος, αλλά και συμβατικών υλικών κατασκευής.



Χρόνος διεκπεραίωσης: Ένα χαρακτηριστικό στοιχείο μιας κατασκευής είναι η χρονική διάρκεια της ολοκλήρωσής της. Ο παράγοντας αυτός μελετάται και αποτελεί σημαντικό στοιχείο της ανάλυσης, καθώς επηρεάζει άμεσα και λοιπούς παράγοντες, όπως το κόστος και τους ρύπους. Για την ακριβή μελέτη της χρονικής διάρκειας ανέγερσης μιας τοιχοποιίας rammed earth, είναι αναγκαίο να μελετηθεί ο χρόνος ξήρανσης του μείγματος, μέχρις ότου η κατασκευή να καλύπτει τις αναγκαίες στατικές αντοχές. Οι μελέτες που έχουν διεξαχθεί μέχρι στιγμής δεν μπορούν να ποσοτικοποιήσουν με ακρίβεια τον μέσο χρόνο ολοκλήρωσης της ξήρανσης του υλικού, επομένως ούτε και τον χρόνο που χρειάζεται ώστε το υλικό να φτάσει στα αναγκαία στατικά δεδομένα, ώστε να προχωρήσει η κατασκευή. Παρόλα αυτά, μια μελέτη που διεξήχθη στο Πολυτεχνείο της Πράγας το 2018 αναδεικνύει ότι κυρίως ο χρόνος αυτός εξαρτάται από τη σύσταση του μείγματος και την εμπιερόμενη υγρασία. Χαρακτηριστικά, η αύξηση του πηλού στο υλικό σταθεροποιεί αρκετά τον χρόνο ξήρανσης περίπου στις 18 ημέρες, ενώ η αύξηση της εμπιερόμενης υγρασίας, καθυστερεί την ολοκλήρωση, καθώς είναι αναγκαίο να πέσει τουλάχιστον στο 10%, ώστε το υλικό να εμφανίσει τις επιθυμητές στατικές αντοχές του (δείγμα τοίχου πάχους 30 εκατοστών). Συμπερασματικά, λοιπόν, θα μπορούσε κανείς να θεωρήσει ότι το υλικό rammed earth δύναται να ολοκληρώνεται ταχύτερα από ένα συμβατικό στοιχείο σκυροδέματος (28 μέρες ξήρανσης), πράγμα που εξαρτάται καθολικά από το μείγμα. Βέβαια, δεν αποτελεί σταθερή ένδειξη.

Κόστος: Ίσως το σημαντικότερο στοιχείο οποιασδήποτε κατασκευής, το κόστος μπορεί να αποτελέσει καταλυτικό παράγοντα για την αξιοποίηση των rammed earth τοιχοποιιών. Τα κτήρια από rammed earth αποτελούν κτίσματα μοναδικά και αρκετά ιδιαίτερα. Κατέχοντας στοιχεία τα οποία δεν είναι σταθερά και τυποποιημένα, που απαιτούν και περαιτέρω μελέτη αυτής των συμβατικών, είναι αναπληρωτό ότι η τιμή τους δεν θα προσεγγίζει αυτή μιας τυπικής και φτηνής κατασκευής. Παρόλα αυτά, είναι αναγκαίο να προηγηθεί ένα αναλυτικό πρόγραμμα κόστους, ώστε να προκύψουν τα σωστά συμπεράσματα για το κόστος των rammed earth στοιχείων.

Είναι ανάγκη αρχικά, να αναγνωριστούν οι παράγοντες για τους οποίους το κόστος της κατασκευής δύναται να αυξηθεί. Αναλυτικά:

- Η ποιότητα του εδάφους της περιοχής αποτελεί σημαντικό στοιχείο αύξησης του κόστους, καθώς η θεμελίωση των στοιχείων δύναται να απαιτεί μεγαλύτερη προσοχή, μελέτη αλλά και όγκο υλικού για την ορθή τοποθέτηση των στοιχείων σε περιοχές με δυσχερείς σύσταση εδάφους.
- Το μέγεθος της κατασκευής μπορεί να αποτελέσει σημαντικό κριτήριο για το κόστος. Παρόλα αυτά, ένα σημαντικό συμπέρασμα που χαρακτηρίζει τη σχέση μεγέθους - κόστους είναι το γεγονός ότι σε μία επιφάνεια είναι προτιμότερο να δημιουργηθούν τα λιγότερα πιθανά δωμάτια, διότι μειώνονται οι τοίχοι. Με άλλα λόγια, η κατασκευή δυο διαφορετικών δωματίων είναι μη συμφέρουσα σε σχέση με την κατασκευή ενός δωματίου ίσης επιφάνειας (σε τ.μ.), καθώς αυξάνει τις ανάγκες δημιουργίας νέων τοίχων, πατωμάτων, ανοιγμάτων κ.ά. Παρόλα αυτά, ένα επίμηκες δωμάτιο έχει κίνδυνο βλάβης από τις εκτός επιπέδου καταπονήσεις, ενώ η δημιουργία ενός δεύτερου τοίχου στο κέντρο του δωματίου μειώνει το άνοιγμα εμφανίζοντας καλύτερη δομική συμπεριφορά.
- Τα ανοίγματα της κατασκευής αποτελούν ένα κριτήριο το οποίο επηρεάζει το κόστος διπλά. Αρχικά, το είδος του ανοίγματος (παράθυρο ή πόρτα) κατέχει από μόνο του ένα σημαντικό κόστος, αλλά παράλληλα δημιουργεί και δυσχερείς συνθήκες στην τοιχοποιία που θα το παραλάβει, ως προς την στατική επάρκειά της. Η τοιχοποιία αυτή θα πρέπει να ενισχυθεί και να εμφανίζει κάποια μέθοδο στήριξης του χώματος στην άνω παρειά (πρέκι) του κουφώματος.
- Το ύψος του κτηρίου και συγκεκριμένα των τοίχων από rammed earth επηρεάζει το κόστος, καθώς απαιτούν μεγαλύτερη μελέτη, περισσότερο υλικό και ακριβότερα μηχανήματα για την κατασκευή. Συστήνεται οι τοίχοι από rammed earth να μην ξεπερνάνε τα τρία μέτρα σε ύψος, ώστε να μην αυξήσουν έντονα το συνολικό κόστος.
- Το είδος της στέψης του κτίσματος και συγκεκριμένα η ύπαρξη επικλινούς στέγης, μπορεί πιθανά να αυξήσει το κόστος, καθώς σε πολλές περιπτώσεις αυξάνει τις δομικές ανάγκες των τοιχοποιιών

αλλά και τον σχεδιασμό της στέγης, λόγω της εμφάνισης διατμητικών τάσεων (Rammed earth enterprises, 2022). Πιθανώς, να γίνεται αναγκαία η δημιουργία τοίχων μεγαλύτερου πάχους από ότι του τυπικού για την ορθή παραλαβή των τάσεων μιας στέγης (κυρίως σε παλαιότερες κατασκευές που δεν υπήρχε συχνά ο ελκυστήρας). Φυσικά, η παραπάνω θέση δεν ενισχύει τη χρήση δώματος από οπλισμένο σκυρόδεμα, αλλά αφορά τη δημιουργία δωματίων πιθανά από κάποια ξύλινη ελαφριά κατασκευή, η οποία δεν θα καταπονεί στον ίδιο βαθμό τους τοίχους.

Τα παραπάνω στοιχεία αποτελούν τους κύριους παράγοντες που επιδρούν στο κόστος μιας κατασκευής rammed earth. Φυσικά, δεν είναι οι μοναδικοί παράγοντες, καθώς μπορεί να γίνει αναφορά για δημιουργία λοιπών στοιχείων για τις ανάγκες του εκάστοτε κτηρίου. Όμως, τα στοιχεία αυτά δεν επηρεάζουν σημαντικά το συνολικό κόστος της κατασκευής.

Για να αντιληφθεί κανείς τα παραπάνω δεδομένα ευκολότερα, υπολογίζεται ότι μια τέτοια κατασκευή φτάνει περίπου στα 3.000 – 3.500 ευρώ / τ.μ., ενώ το κόστος μιας τοιχοποιίας από rammed earth περίπου 400 ευρώ / τ.μ. (Rammed earth enterprises, 2022). Είναι αντιληπτό λοιπόν, ότι μία τέτοια κατασκευή δεν είναι στα όρια της τυπικής κατασκευής. Όμως θα πρέπει να αναλογιστεί κανείς, ότι οι τοιχοποιίες rammed earth δύνανται να εμφανίζουν μετέπειτα οφέλη λόγω των οικολογικών χαρακτηριστικών του υλικού. Επιγραμματικά, αυτές οι τοιχοποιίες εμφανίζουν οφέλη όσον αφορά την προσφερόμενη θερμική μάζα, τη διάρκεια ζωής και το χαμηλό κόστος συντήρησης (Rammed earth enterprises, 2022).

Ρύποι κατά το στάδιο παραγωγής: Οι κατασκευές rammed earth αποτελούν οικολογικές κατασκευές. Αυτό οφείλεται στο ότι το μείγμα της κατασκευής μπορεί να αποτελείται εξ ολοκλήρου από φυσικά στοιχεία, τα οποία μάλιστα δεν χρήζουν εργοστασιακή επεξεργασία, εκτός από την περίπτωση που υπάρχει πρόσμιξη με τσιμέντο, οι οποίοι ρύποι όμως αποδίδονται στη χρήση τσιμέντου. Με τα παραπάνω δεδομένα υπόψιν, είναι αντιληπτό ότι η ύπαρξη ρύπων κατά την κατασκευή είναι μηδαμινή και μπορεί να μην σχετίζεται πραγματικά με την κατασκευή των στοιχείων rammed earth. Όπως έγινε αναφορά και σε προηγούμενο κεφάλαιο, οι ρύποι από εκπομπές CO₂ υπολογίζονται στα 9 kg CO₂/m³ για κατασκευές από φυσικό rammed earth και στα 127 kg CO₂/m³ (με προσθήκη τσιμέντου), όταν το σκυρόδεμα τυπικά προσεγγίζει τα 330 kg CO₂/m³ όταν είναι χωρίς οπλισμό και 450 kg CO₂/m³ όταν οπλίζεται.

Θερμομονωτικές ανάγκες: Όπως μελετήθηκε και στο Κεφάλαιο 3 της παρούσας εργασίας, η θερμομονωτική αξία των τοιχοποιιών rammed earth δεν αφορά τη θερμοπερατότητά τους (K / U-value). Αυτή είναι αρκετά υψηλή, με αποτέλεσμα να υπάρχει ανάγκη τοποθέτησης θερμομονωτικών στρώσεων στην τοιχοποιία, ώστε να καλύπτονται οι απαιτήσεις των κανονισμών. Παρόλα αυτά, μεγάλη αξία έχει η προσφερόμενη θερμική μάζα ή θερμοχωρητικότητα, η οποία αν αξιοποιηθεί ορθά από την αρχιτεκτονική μελέτη και σε συνδυασμό με στοιχεία παθητικού δροσισμού ή θέρμανσης, δημιουργεί εσωτερικά του κτίσματος κατάλληλες και ευκόλως διατηρούμενες θερμικές συνθήκες, τόσο το καλοκαίρι, όσο και τον χειμώνα. Βέβαια, αξίζει να αναρωτηθεί κανείς, όταν προστίθενται οι προαναφερόμενες στρώσεις θερμομόνωσης, από τι υλικό πρέπει να προτιμά κανείς να είναι. Τυπικά, συνηθίζεται να αξιοποιούνται τα συμβατικά είδη θερμομόνωσης όπως η διογκωμένη και η εξηλασμένη πολυστερίνη, γιατί δεν παρουσιάζουν υδατοπερατότητα. Όμως, τα υλικά συμβατικής θερμομόνωσης είναι πολλές φορές μη οργανικά και βιομηχανικά παραγόμενα, πράγμα που δεν αντιστοιχεί στην συνολική φυσική πλευρά της κατασκευής rammed earth, ενώ παράλληλα δημιουργούνται προβλήματα συνεκτικότητας στην τοιχοποιία, όταν οι μονώσεις αυτές τοποθετούνται στον πυρήνα (η οποία επιλύεται με την χρήση βλήτρων). Άρα, ίσως θα πρέπει να γίνει αναφορά στην αποφυγή της χρήσης των τυπικών θερμομονωτικών υλικών και στην πιθανή επιλογή υλικότητων φυσικού χαρακτήρα, όπως συμπίεσμένο άχυρο ή φύλλα κάνναβης, ωστόσο τα παραπάνω υλικά απορροφούν σημαντικά την υγρασία κατά την ξήρανση των τοιχοποιιών. Ως αποτέλεσμα αυτού, έως και σήμερα η πολυστερίνη είναι η πιο συνηθισμένη επιλογή.

Ηχομονωτικές ανάγκες: Όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 3, λόγω της ψαθυρότητας του υλικού και της υψηλής του πυκνότητας, εμφανίζει ικανοποιητικό δείκτη ηχομείωσης, αερόφερτων ήχων έως



και κοντά στα 60 dB (τυπικού πάχους 30 εκατοστών), με αποτέλεσμα να είναι επαρκές να καλύψει τους τυπικούς κανονισμούς ηχομόνωσης χωρίς την ανάγκη επιπρόσθετων στρώσεων. Δίνονται τυπικές τιμές ηχομείωσης για τοίχο οπλισμένου σκυροδέματος πάχους 19 εκατοστών 51 dB και για τοίχο από τούβλα πάχους 13 εκατοστών 43 dB (Remy, 2011: 12).

Ανάγκες πυρασφάλειας: Τα τοιχεία rammed earth μπορούν να διατηρήσουν τη στατική και λειτουργική ακεραιότητά τους για περίπου 4 ώρες, κατά τη διάρκεια πυρκαγιάς. Η τιμή αυτή υπερκαλύπτει τις ανάγκες που τίθεται από τους διεθνείς οργανισμούς για την πυρασφάλεια των κατασκευών, ενώ παράλληλα μελέτες δείχνουν ότι έπειτα από πυρκαγιά, το κόστος επισκευής των τοιχείων αυτών είναι ιδιαίτερα χαμηλό.

Ανακυκλωσιμότητα: Ολοκληρώνοντας τη μελέτη βιωσιμότητας του υλικού rammed earth, είναι αντιληπτό ότι πρέπει να αναλογιστεί κανείς τι θα προκύψει στο τέλος της ζωής του υλικού αυτού. Γνωρίζοντας ότι το υλικό αυτό αποτελείται έως και εντελώς από φυσικά στοιχεία (λάσπη, πηλός, άμμος, χαλίκια και μικρότερα αδρανή) είναι αντιληπτό άμεσα ότι είναι ανακυκλώσιμο. Η ανακύκλωση αυτή πραγματοποιείται αξιοποιώντας βιομηχανικά κόσκινα, τα οποία ξεχωρίζουν λεπτομερώς τα διάφορα συστατικά του μείγματος και τα διαχωρίζουν παράγοντας αδρανή διαφορετικής κοκκομετρίας. Στη συνέχεια, τα διάφορα αυτά συστατικά μπορούν να αξιοποιηθούν όχι μονάχα στη δημιουργία νέων τοιχοποιιών rammed earth, αλλά εν γένει στην κατασκευαστική διαδικασία. Τα λοιπά δομικά και άλλα στοιχεία που εμφανίζονται στις κατασκευές rammed earth (όπως πατώματα, πρέκια, στέγες κτλ), ανάλογα με το υλικό τους υπάρχει πιθανότητα να ανακυκλωθούν, για παράδειγμα το ξύλο μπορεί να επαναποθετηθεί σε άλλες κατασκευές. Η δυνατότητα αυτή κάνει το υλικό αυτό να διακρίνεται ανάμεσα σε πολλά άλλα, όταν μάλιστα προσφέρει δυνατότητες κατασκευής στατικών στοιχείων.

Συνοπτικά, όσον αφορά τη βιωσιμότητα των τοιχοποιιών rammed earth, προκύπτουν τα παρακάτω συμπεράσματα:

- Η μεταφορά δύναται να μη ληφθεί καθόλου υπόψιν, εφόσον το χώμα στην περιοχή κατασκευής μπορεί να αξιοποιηθεί αυτούσιο για τη δημιουργία του τελικού μείγματος.
- Ο χρόνος διεκπεραίωσης έχει διακυμάνσεις και δεν είναι δυνατό να τυποποιηθεί, με αποτέλεσμα να δημιουργείται στον παράγοντα αυτόν μια αβεβαιότητα. Παρ' όλ' αυτά, σε μείγματα που η εμπιεχόμενη υγρασία είναι χαμηλή και η περιεκτικότητα του μείγματος σε πηλό είναι υψηλή, δύναται να ολοκληρωθεί ταχύτερα από μια συμβατική κατασκευή από σκυρόδεμα.
- Παρ' όλο που το κόστος κατασκευής είναι χαμηλό, το κόστος μελέτης είναι υψηλό και ασύμφορο εξαρχής. Όμως, η κατασκευή έχει οφέλη στο στάδιο της χρήσης και αφορούν κυρίως τη μείωση των μετέπειτα λειτουργικών εξόδων.
- Οι εκπνεόμενοι ρύποι στο στάδιο της παραγωγής του υλικού (και κυρίως οι εκπομπές CO₂) είναι χαρακτηριστικά πιο χαμηλοί από ότι θα ήταν σε μια συμβατική κατασκευή.
- Η θερμική μάζα που προσφέρεται από τις τοιχοποιίες rammed earth μπορεί να προσφέρει στο κτίσμα σταθερές εσωτερικές συνθήκες. Αν το κτήριο σχεδιαστεί με βάση τον βιοκλιματικό σχεδιασμό, τότε μπορεί να μην χρειάζεται συμβατική θέρμανση ή ψύξη.
- Ηχομονωτικά τα δομικά στοιχεία από rammed earth καλύπτουν τις ανάγκες μιας τυπικής κατασκευής.
- Τα στοιχεία rammed earth δίνουν ένα περιθώριο 4 ωρών στατικής επάρκειας και λειτουργικότητας σε περιπτώσεις πυρκαγιάς, χρόνος ικανοποιητικός για την εκκένωση μιας κατασκευής υπό κρίσιμες συνθήκες.
- Είναι αρκετά ανακυκλώσιμο, καθώς αποτελείται συχνά μόνο από φυσικά συστατικά, τα οποία δύναται να επαναχρησιμοποιηθούν μετά το πέρας της ζωής της κατασκευής και σε άλλες κατασκευές.



7.2. Ζητήματα δομικής επάρκειας και τρόποι αντιμετώπισης

Στο Κεφάλαιο 3 έγινε εκτενής αναφορά στη συμπεριφορά του rammed earth κατά τη διάρκεια σεισμικών καταπονήσεων και στους τρόπους ενίσχυσης των κατασκευών, ενώ παράλληλα παρουσιάστηκαν τα αδύναμα σημεία ενός κτηρίου από συμπιεσμένο χώμα. Υπενθυμίζεται ότι το υλικό αυτό έχει ικανοποιητική αντοχή σε θλίψη, ωστόσο δεν συμβαίνει το ίδιο με τον εφελκυσμό και τη διάτμηση, κι έτσι χρειάζεται επιπλέον ενίσχυση. Αυτή η παράγραφος εσπάζει περισσότερο στα συμπεράσματα αυτής της μελέτης. Συμπεραίνουμε, λοιπόν, ότι:

- Το κτήριο θα πρέπει να είναι κτισμένο πάνω σε μια επίπεδη επιφάνεια και όχι σε επικλινές έδαφος ούτε κοντά στις άκρες των πρανών.
- Το κτήριο θα πρέπει να έχει όσο το δυνατόν συμμετρική κάτοψη και θα πρέπει να αποφεύγονται πολύπλοκα σχήματα, εκτός αν διαχωρίζονται σε μικρότερα τμήματα.
- Τα θεμέλια του κτηρίου θα πρέπει να είναι καλά συνδεδεμένα με την υπερκείμενη τοιχοποιία.
- Το κτήριο θα πρέπει να έχει ικανά οριζόντια διαζώματα (σενάζ, ξυλοδεσιές) που να του επιτρέπουν να λειτουργεί συνολικά, ενώ θα πρέπει να είναι καλά συνδεδεμένα με τα πατώματα, τη στέγη ή το δώμα, αλλά και με τα θεμέλια.
- Η στέγη και τα πατώματα θα πρέπει να είναι όσο πιο ελαφριά γίνεται.
- Οι ακμές του κτηρίου θα πρέπει να ενισχύονται, καθώς αποτελούν πολύ αδύναμα σημεία.
- Τα ανοίγματα του κτηρίου θα πρέπει να έχουν κατακόρυφο προσανατολισμό (η μικρή πλευρά να είναι παράλληλη στο έδαφος) και να έχουν ικανά πρέκια και ποδιές.
- Τα ανοίγματα του κτηρίου θα πρέπει να είναι συμμετρικά ως προς την κάτοψη, ενώ οι διαστάσεις τους και οι αποστάσεις μεταξύ τους ορίζονται ανάλογα με τις συνολικές διαστάσεις του κτηρίου.
- Η σχέση μεταξύ πάχους και ύψους του τοίχου θα πρέπει να είναι τουλάχιστον 1/8.

Όλα τα παραπάνω αφορούν κτήρια με φέροντα οργανισμό από rammed earth. Στα σύγχρονα κτήρια παρατηρείται συχνά η χρήση φέροντα οργανισμού από σκυρόδεμα, μέταλλο ή ξύλο, ενώ το rammed earth αποτελεί επικάλυψη, πλήρωση ή δευτερεύων φέρων σύστημα, ιδιαίτερα στις περιοχές με έντονη σεισμική δραστηριότητα (π.χ. Κίνα). Σε αυτές τις περιπτώσεις, είναι λογικό οι δυνατότητες του rammed earth να μεγιστοποιούνται και να μπορούν έτσι να προκύψουν πολλές διαφορετικές μορφές και πολλών ορόφων. Σε αυτά τα κτήρια, η μελέτη της συμπεριφοράς τους κατά τον σεισμό είναι πολύπλοκη και δεν ακολουθεί κοινούς κανόνες οπότε και μελετάται διεξοδικά από τους ειδικούς κάθε φορά για κάθε ξεχωριστό κτήριο.

7.3. Συμπεράσματα

Όπως αναφέρεται και στην εισαγωγή, σκοπός αυτής της ερευνητικής εργασίας δεν αποτελεί μόνο η μελέτη του τρόπου κατασκευής, των χαρακτηριστικών και των δυνατοτήτων του rammed earth, αλλά η διερεύνηση των πιθανοτήτων χρήσης του υλικού αυτού σε σεισμογενείς περιοχές που συνειδητά δεν το επιλέγουν και ιδιαίτερα στην Ελλάδα. Έχοντας μελετήσει σε αυτό το κεφάλαιο δύο βασικούς άξονες διερεύνησης, τη βιωσιμότητα και τη σεισμική συμπεριφορά του υλικού και με βάση τη συνολική μελέτη που πραγματοποιήθηκε για αυτή την εργασία παραθέτουμε ακολούθως τα συμπεράσματά μας.

Καταρχάς, όσον αφορά τη βιωσιμότητα, ως προς τα ποσοτικά δεδομένα, μπορεί κανείς να θεωρήσει, ότι αν το rammed earth καλύπτει ορισμένες τιμές που παρουσιάζονται στους ελληνικούς κτηριακούς κανονισμούς, το υλικό μπορεί να θεωρηθεί βιώσιμο στην Ελλάδα. Τα δεδομένα βάσει των οποίων πραγματοποιήθηκε ο έλεγχος ακολουθούν τους ενημερωμένους ελληνικούς κτηριακούς κανονισμούς του Απριλίου του 2022. Πιο συγκεκριμένα:

- Σύμφωνα με τον Κ.Εν.Α.Κ., είναι αναγκαίο ένας εξωτερικός τοίχος σε επαφή δηλαδή με τον εξωτερικό αέρα να έχει συνολικό συντελεστή θερμοπερατότητας $U = 0,40-0,60 \text{ W/m}^2\text{K}$ (αναλόγως

την κατάταξη της περιοχής κατασκευής στις 4 κλιματικές ζώνες κατά Κ.Εν.Α.Κ.). Είναι προφανές, ότι η τιμή αυτή δεν δύναται να καλυφθεί από μια τοιχοποιία rammed earth χωρίς στρώση θερμομόνωσης, καθώς εμφανίζεται $U = 1,9-2 \text{ W/m}^2\text{K}$ (για στοιχείο πάχους 30 εκατοστών). Λαμβάνοντας, λοιπόν, υπόψη ότι τοποθετείται μια στρώση θερμομόνωσης σε συνδυασμό με τη θερμική μάζα που προσφέρεται από ένα τοίχιο rammed earth, τότε δύναται να δημιουργηθούν ιδιαίτερα άνετοι και λειτουργικοί χώροι. Το ζήτημα που παρουσιάζεται, είναι ότι αν η στρώση θερμομόνωσης που τοποθετείται είναι στο κέντρο της τοιχοποιίας, τότε η τοιχοποιία θα αποκτήσει ιδιαίτερα μεγάλο πάχος, καθώς το rammed earth χρειάζεται τουλάχιστον 30 εκατοστά πάχους ώστε να σταθεί από μόνο του. Βάσει των παραπάνω, θεωρείται ως βέλτιστη επιλογή η χρήση θερμομόνωσης σε μορφή εξωτερικής θερμομόνωσης (θερμοπρόσοψης), ώστε να αποφευχθεί το μεγάλο πάχος τοίχου, να αξιοποιείται η θερμική μάζα που προσφέρεται, αλλά και να μειώνονται οι πιθανές θερμογέφυρες στις συναρμογές των τοιχίων με λοιπά δομικά στοιχεία (όπως δοκάρια, πλάκες κ.ά.). Ωστόσο, σε αυτή την περίπτωση χάνεται η εξωτερική επιφάνεια της τοιχοποιίας που πολλοί αρχιτέκτονες επιθυμούν, οπότε και η μόνωση τοποθετείται στον πυρήνα της τοιχοποιίας. Ένας ακόμα προβληματισμός που γεννάται από τη θερμομόνωση είναι το υλικό της. Οι πολυστερίνες (διογκωμένη ή εξηλασμένη) που κατά κύριο λόγο χρησιμοποιούνται στις κατασκευές λόγω της μειωμένης υδατοπερατότητας και υγραπορροφητικότητάς τους, είναι βιομηχανικά υλικά, παράγωγα πετρελαίου, και δεν έχουν καλή συνάφεια με το χώμα που αποτελεί ένα πλήρως φυσικό υλικό. Έτσι, παρόλο που υπάρχουν φυσικά υλικά, όπως το άχυρο, τα φύλλα κάνναβης ή άλλα οργανικά υλικά, που μπορούν να αντικαταστήσουν τις πολυστερίνες και παράλληλα να βρίσκονται εντός των τιμών του Κ.Εν.Α.Κ., λόγω της αυξημένης υδαταπορρόφησης τους είναι ακατάλληλα για την αξιοποίησή τους στον πυρήνα της τοιχοποιίας.

- Σύμφωνα με τον ελληνικό κανονισμό κτιριακής ηχοπροστασίας, μελετώντας τις αναγκαίες τιμές για τις κατοικίες, μια τοιχοποιία μπορεί να μειώσει τους ήχους (ώστε να φτάσει στο κατηγορία ακουστικής άνεσης 3) κατά 45-60 dB αναλόγως το είδος του ήχου όχλησης (κτυπογενής ή αερόφερτος) και αναλόγως την προέλευση του ήχου (περιβαλλοντικός, εσωτερικά του κτηρίου ή από εγκαταστάσεις του ιδίου ή άλλων κτισμάτων). Έχοντας υπόψη τα δεδομένα του Κεφαλαίου 3, μια τοιχοποιία από rammed earth πάχους 30 εκατοστών δύναται να μειώσει ήχους κατά περίπου 60 dB (αερόφερτους ή κτυπογενείς) χάρις στην υψηλή πυκνότητα της τοιχοποιίας και την υλικότητα της. Φυσικά, δύναται να προστεθούν περαιτέρω μονωτικές στρώσεις για καλύτερα αποτελέσματα ή για ανάγκες ειδικών κτηρίων, όπως κτήρια γραφείων ή σχολεία. Επίσης, όσο αυξάνεται το πάχος μιας τοιχοποιίας (σε λογικά πλαίσια), τόσο καλύτερη είναι και η ηχομονωτική του συμπεριφορά.
- Σύμφωνα με τον ελληνικό κανονισμό πυροπροστασίας, σε μια κατοικία για υπέργειους τοίχους (καθώς το rammed earth δεν ενδείκνυται για χρήση σε υπόγειους χώρους λόγω της πιθανής εισχώρησης της υγρασίας εξ επαφής με το φυσικό χώμα, αλλά και για στατικούς λόγους), υπάρχει ανάγκη για αντοχή από μισή ώρα έως και 2 ώρες αναλόγως το ύψος και τον αριθμό των ορόφων του κτηρίου. Με βάση τα στοιχεία που μελετήθηκαν στο Κεφάλαιο 3 προκύπτει ότι το rammed earth εύκολα καλύπτει τις ανάγκες αυτές.

Εκτός των κανονισμών, αξίζει να αναφερθούν λίγα λόγια για την οικονομία του rammed earth. Η Ελλάδα αποτελεί μια χώρα η οποία έχει αντιμετωπίσει στην κοντινή της ιστορία μια μεγάλη σειρά οικονομικών υφέσεων και κοινωνικών δυσκολιών. Είναι αντιληπτό, λοιπόν, ότι δεν υπάρχει η δυνατότητα για όλους να οδηγούνται σε υλικά και κατασκευαστικές μεθόδους που απαιτούν υψηλό κόστος, ενώ παράλληλα δεν βοηθούν στη βιωσιμότητα. Το rammed earth εν γένει αποτελεί ένα οικονομικό υλικό δόμησης, ωστόσο είναι λογικό σε περιοχές όπου δεν το χρησιμοποιούν η μελέτη μιας τέτοιας κατασκευής να είναι ακριβή. Παρ' όλ' αυτά, η κατασκευαστική λογική rammed earth μπορεί να δημιουργήσει ευκαιρίες οικονομικού χαρακτήρα στην Ελλάδα. Το παραπάνω αιτιολογείται με το γεγονός ότι η τεχνογνωσία, που αυτή τη στιγμή είναι περιορισμένη στη χώρα μας, μπορεί να αναπτυχθεί και να εφαρμοστεί από ένα νέο εργατικό δυναμικό, σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα, καθώς αποτελεί μια εύκολη κατασκευαστική μέθοδο που μαθαίνεται επίσης εύκολα. Έτσι, μπορούν

σύντομα να δημιουργηθούν νέες θέσεις εργασίας εξασφαλίζοντας νέες οικοδομικές ευκαιρίες. Παράλληλα, με την αξιοποίηση του ίδιου χώματος της περιοχής κατασκευής, δύναται να μειωθεί σημαντικά το γενικό κόστος της κατασκευής, καθώς εκμηδενίζεται το κόστος μεταφοράς του χώματος. Τέλος, είναι σημαντικό να αναλογιστεί κανείς πως ακόμα και στην περίπτωση αξιοποίησης υλικών και τρόπων κατασκευής όπου η μελέτη τους είναι ακριβή, αυτό μπορεί να αυξήσει το ενδιαφέρον του κοινού για το υλικό και την αξιοποίησή του σε περισσότερες κατασκευές, αυξάνοντας τη ζήτηση και ρίχνοντας τελικά την τιμή μελέτης και κατασκευής, ενώ η αύξηση των έργων από rammed earth θα εξελίξει καθολικά την κατασκευαστική αυτή διαδικασία που πέραν της βιωσιμότητας έχει ένα εξαιρετικό αισθητικό αποτέλεσμα. Ωστόσο, ένα ζήτημα που τίθεται, και θα αναφερθεί στη συνέχεια, είναι το κατά πόσο στην Ελλάδα μπορεί να αντέξει το υλικό αυτό κατά τη διάρκεια ενός σεισμού.

Σε πολλές περιπτώσεις η βιωσιμότητα της κατασκευής διαμορφώνεται ανάλογα με τις επιλογές των μελετητών. Για παράδειγμα, η χρήση του ξύλου για οπλισμό της τοιχοποιίας και των ξύλινων οριζόντιων διαζωμάτων (ξυλοδεσιές) σε αντίθεση με τις χαλύβδινες ράβδους, έχουν καλύτερη συνάφεια με το χώμα και ανακυκλώνονται χωρίς τη σπατάλη μεγάλων ποσών ενέργειας. Βέβαια πάντα θα πρέπει να υπάρχει μια ισορροπία μεταξύ της βιωσιμότητας των υλικών και της αντοχής τους στα διάφορα φορτία.

Κοντά στην έννοια της βιωσιμότητας, θα ήταν σημαντικό να γίνει και μια μικρή αναφορά ανάμεσα στη σχέση του κλίματος της Ελλάδα και του rammed earth. Το υλικό αυτό είναι υγροσκοπικό και κατανέμει την υγρασία μεταξύ του εσωτερικού και εξωτερικού περιβάλλοντος μέχρι να έρθει η ισορροπία. Αυτό σε ένα κλίμα εύκρατο όπως της Ελλάδας είναι αρκετά ωφέλιμο, ενώ σε συνδυασμό με την ικανή θερμοχωρητικότητα της τοιχοποιίας και τη χρήση θερμομόνωσης οδηγούν σε καλύτερες εσωτερικές συνθήκες διαβίωσης.

Όσον αφορά τη σεισμική συμπεριφορά του υλικού, η αντοχή του σε σεισμικά περιβάλλοντα δεν είναι ικανή ακόμα κι αν ενισχυθεί με οποιοδήποτε είδος οπλισμού, καθώς η αντοχή σε εφελκυσμό και διάτμηση είναι πολύ μικρή. Πιθανόν αυτό να αποτελεί και έναν βασικό παράγοντα για τον οποίο το υλικό αυτό δεν επιλέγεται από τους αρχιτέκτονες και τους κατασκευαστές στην Ελλάδα. Ωστόσο, το παράδειγμα της Ιαπωνίας στο Κεφάλαιο 6, οδηγεί στο συμπέρασμα ότι και στην Ελλάδα θα μπορούσαν να κατασκευαστούν κτήρια ισόγεια και μικρής κλίμακας εξ ολοκλήρου από rammed earth ενισχυμένα με διάφορους έξυπνους τρόπους που παράλληλα να δίνουν έναν αρχιτεκτονικό χαρακτήρα. Εν συνεχεία, σε περιπτώσεις που ο βασικός φέροντας οργανισμός είναι από κάποιο άλλο υλικό, το rammed earth θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ως υλικό πλήρωσης σε κτήρια αρκετών ορόφων αντικαθιστώντας τα τούβλα, ενώ παράλληλα θα μπορούσε να αποτελέσει και τελικό υλικό όψης. Βέβαια και πάλι γεννιούνται ερωτήματα όπως η συνάφεια των υλικών και η αντοχή των συναρμογών κατά τον σεισμό, αν και τα παραδείγματα που μελετήθηκαν στο Κεφάλαιο 6 και ιδιαίτερα το Porto Kale στη Μάνη, μας παρουσιάζουν δυνατή και αυτή την επιλογή.

Ολοκληρώνοντας, το rammed earth αποτελεί ένα πλήρως φυσικό υλικό, αρκετά βιώσιμο, ενώ τα χαρακτηριστικά του βελτιώνονται ή δυσχεραίνονται ανάλογα με τις επιλογές των μελετητών. Δεν έχει καλή συμπεριφορά στον σεισμό, ωστόσο ακολουθώντας κάποιους κανόνες και ενισχύοντας την τοιχοποιία μπορεί να αποτελέσει ένα ιδανικό υλικό για μικρής κλίμακας κτήρια, ενώ ως πλήρωση και επικάλυψη ενός κύριου φέροντα οργανισμού, οι δυνατότητές του μεγιστοποιούνται. Στην Ελλάδα, έχουν πραγματοποιηθεί αρκετές φιλόδοξες μελέτες του υλικού σε κτήρια μικρής και μεγάλης κλίμακας, παρ' όλ' αυτά δεν υλοποιήθηκαν ποτέ. Ωστόσο, σε μια εποχή πολύ πιο ευαισθητοποιημένη απέναντι στην οικολογική καταστροφή που πραγματοποιείται και τη σταδιακή κλιματική αλλαγή, η εστιασμένη μελέτη φυσικών και βιώσιμων υλικών, ολοένα και αποκτά μια θέση στη σύγχρονη κατασκευαστική διαδικασία. Έτσι, λοιπόν, το rammed earth δύναται να αποτελέσει μια φυσική επιλογή δόμησης που χρειάζεται να μελετηθεί, ώστε να εξελιχθεί και να μπορεί να εφαρμοστεί σε ολοένα και περισσότερα σύγχρονα κτήρια. Παραδείγματα στην Κίνα, στο Μεξικό, αλλά και σε άλλες σεισμογενείς περιοχές μας δίνουν το βήμα να μελετήσουμε και να υλοποιήσουμε πλέον κτίσματα με αυτό το υλικό το οποίο δεν βοηθά μόνο στη βιωσιμότητα των νέων κατασκευών, αλλά έχει και ένα εξαιρετικό τελικό αποτέλεσμα απολύτως σύγχρονο, παρόλο που το υλικό χρησιμοποιείται εδώ και αιώνες.



Βιβλιογραφία

A. Ελληνική βιβλιογραφία:

1. Κανονισμός Ενεργειακής Απόδοσης Κτηρίων (Κ.Εν.Α.Κ.), ενημερωμένος την περίοδο Ιουνίου 2022.
2. Μπέη Γεωργία, «*Τοιχοποιία από πηλό: πειραματική διερεύνηση μηχανικών και φυσικών χαρακτηριστικών δομικών μονάδων και τοίχων από συμπιεσμένες ωμοπλίνθους*», διδακτορική διατριβή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Πολίτικων Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής, Θεσσαλονίκη 2004.
3. Σβάρνας Αθανάσιος, «*Η αρχιτεκτονική του συμπιεσμένου χώματος: τεχνικές και προοπτικές στο πλαίσιο της αειφόρου*», ερευνητική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Τμήμα Αρχιτεκτόνων Μηχανικών, Αθήνα 2021.
4. Σπυροπούλου Παναγιώτα, Τσακαλάκη Ειρήνη, «*Διερεύνηση Πρακτικών Δόμησης Στις Χωμάτινες Κατασκευές*», ερευνητική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Τμήμα Αρχιτεκτόνων Μηχανικών, Αθήνα 2013.
5. Τριγγίδου Χριστίνα, «*Οι πρακτικές δόμησης των χωμάτινων κατασκευών στην σύγχρονη τεχνολογία κατασκευής και στις σημερινές πρακτικές κατοίκησης*», ερευνητική εργασία, Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων, Τμήμα Αρχιτεκτόνων Μηχανικών, 2021.
6. Φράγκου Χάρις και Χατζηγιάννου Ελένη, «*Γήινη Δόμηση: Αρχιτεκτονική του αύριου με υλικά του χθες*», ερευνητική εργασία, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Αρχιτεκτόνων Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής, Θεσσαλονίκη 2020.

B. Ξένη βιβλιογραφία:

1. Abhilash Holur Narayanaswamy «Mechanical testing procedure for local building materials: rammed earth and laterite building stones», Université de Lyon, 2016.
2. African Organization for Standardization, «Rammed earth structures – Code of practice», 2014.
3. Araki Hiroyuki, Koseki Junichi, Sato Takeshi, «Tensile strength of compacted rammed earth materials», Department of Civil Engineering, University of Tokyo, Japan, 2016.
4. Arrigoni, Beckett, Ciancio, Dotelli, «Life-cycle analysis of environmental impact vs. durability of stabilized rammed earth», 2017.
5. Arya Anand, Boen Teddy, Ishiyama Yuji, «Guidelines for earthquake resistant non-engineered construction», United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, 2013.
6. Avila Fernando, Gallego Rafael, Puertas Esther, «Characterization of the mechanical and physical properties of unstabilized rammed earth», University of Granada, 2020.
7. Banyan Tree & Evergreen, «Bricks of the earth - A Hands-on Manual - An innovative way to engage students in green building techniques», 2007.
8. Barrera Natalia, Bran Cristian, Laverde Camila, Reyes Juan, Ruiz Daniel, Suesca Daniel & Yezid Restrepo, «Construction and Building Materials», Elsevier, 2021.
9. Beckett Christopher, Ciancio Daniella, «Rammed Earth Construction, Cutting-edge Research on Traditional and Modern Rammed Earth», University of Western Australia, Αυστραλία, 2015.
10. Berge Bjørn, «The ecology of building materials», δεύτερη έκδοση, Elsevier, Architectural press, Italy, 2009.
11. Bruno, Gallipolli, Menses, Perlot, «A Geotechnical perspective of Raw Earth Building», Université de Pau et des Pays de l'Adour, Γαλλία, 2017.
12. Bui Q., El Nabouch R., Perrotin P., Plassiard J. & Ple O., «Numerical modeling of rammed earth constructions: analysis and recommendations», Université de Savoie, 2015.
13. Canivell Jacinto, Falcón Raúl, Martín-del-Río Juan Jesús and Rubio-Bellido Carlos, «Rammed earth construction: a proposal for a statistical quality control in the execution process», MDPI, Sustainability, 2020.
14. Cautius Cassandra Erin, «Rammed Earth: Adaptations to Urban Toronto», A thesis presented to the University of Waterloo in fulfillment of the thesis requirement for the degree of Master of Architecture, Canada 2014.



15. Dabaieh Marwa, «Building with rammed earth: a practical experience with Martin Rauch in Basehabitat summer school», Lund University, 2014.
16. Dabaieh Marwa, Nöbauer Iris, Noriega Gian Franco, Palazzo Alice, Seibt Lola & Teixeira Tania, «Handbook: Work in Progress», BASEhabitat Summer School, 2018.
17. Daneels Annick & Torras Freixa Maria, «Earthen Construction Technology», Archaeopress Publishing Ltd, 2018.
18. de Morsier Yves, «Our experience with rammed earth: A manual for rammed earth building», Desert Creek House, [20;].
19. Dunlap Wayne, Gallaway Bob & Wolfskill Lyle, «Handbook for Building Homes of Earth», Texas transportation institute, [19;].
20. El Nabouch Ranime, «Mechanical behavior of rammed earth walls under Pushover tests», Communaute Universite Grenoble Alpes, 2017.
21. Feng Chi, Indekeu L. Margaux, Janssen Hans, Woloszyn Monika, «Rammed earth hygric properties and evolution», University Savoie Mont Blanc, France, 2019.
22. Gramlich Ashley Nicolle, «A concise history of the use of the rammed earth building technique including information on methods of preservation, repair, and maintenance», University of Oregon, USA, 2013.
23. Hamed Niroumand, M. F. M. Zain and Maslina Jamil, «Rammed earth theory in earth architecture», Department of Architecture, Faculty of Engineering, National University of Malaysia, African Journal of Agricultural Research, 2013.
24. Holur Narayanaswamy Abhilash, «Mechanical Testing Procedure for Local Building Materials: Rammed Earth and Laterite Building Stones», L'Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat, 2016.
25. Kai Liu, Ming Wang, Wen Pan, Xiaodong Yang & Yaan Wang, «Shaking table tests on seismic retrofitting of rammed earth structures», Springer Science+Business Media Dordrecht 2016.
26. Kaluder Jelena, Kraus Ivan, Kraus Lucija & Perić Ana, «Experimental campaigns on mechanical properties and seismic performance of unstabilized rammed earth - A literature review», MDPI, Buildings, 2021.
27. Kamaladasa N. & Jayasinghe C., «Structural Properties of Cement Stabilized Rammed Earth», The Institution of Engineers, Sri Lanka, 2005.
28. Keable Julian and Keable Rowland, «Rammed earth structures: A code of practice», Practical Action Publishing Ltd, 1996.
29. Loccarini Federica, «Behaviour of rammed earth structures: sustainable materials and strengthening techniques», Department of Architecture, Civil Engineering and Environmental Sciences University of Braunschweig – Institute of Technology, Department of Civil and Environmental Engineering University of Florence, Italy 2017.
30. Maniatidis Vasilios & Walker Peter, «A Review of Rammed Earth Construction», Natural Building Technology Group Department of Architecture & Civil Engineering University of Bath, 2003.
31. Middleton, G. F. & Schneider, L.M. Bulletin 5. Earth-wall construction, North Ryde, N.S.W.: CSIRO Division of Building, Construction and Engineering, 2012
32. Minke Gernot & Schmidt Hans-Peter, «Building earthquake resistant clay houses», Ithaka Journal: biochar materials, ecosystems & agronomy, 2015.
33. Minke Gernot, «Building with earth, Design and Technology of a Sustainable Architecture», Birkhäuser, Kassel, 2006.
34. Minke Gernot, «Construction Manual for Earthquake - Resistant Houses Built of Earth», Basin Kassel, 2001.
35. Narlach, Piatkiewicz, Pietruszka, «The Effect of Cement Addition on Water Vapour Resistance Factor of Rammed Earth», 2017.
36. New Zealand Standard, Materials and Workmanship for earth buildings, NZS 4298:1998, διάταγμα του 1998, ενημερωμένο την περίοδο Ιουνίου 2022.
37. Preciado Adolfo, Santos Juan Carlos, «Rammed earth sustainability and durability in seismic areas as a building material», IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020.
38. Ruppe Loret Miller, «A handbook for building homes of earth», Department of Housing & Urban Development, Washington, 1981.



39. SDSU Agricultural Experiment Station, «Rammed Earth Walls for Buildings», South Dakota State University, 1926.
40. Singh Konjengbam Darunkumar & Tripura Deb Dulal, «A study on characteristic properties of stabilized and unstabilized rammed earth blocks», 2013.
41. UK Guideline Appendixes A-C, ενημερωμένα την περίοδο Ιουνίου 2022.

Γ. Διαδικτυακοί τόποι:

1. Ανέλιξη. <https://anelixi2020.org/>
2. Ένα ιστολόγιο για δόμησης με χώμα. <http://xtizontasmexoma.blogspot.com/2010/10/blog-post.html>
3. Adventures of Nikole. <https://adventuresofilnicki.com/>
4. Anna Heringer. <https://www.anna-heringer.com/vision/>
5. Archdaily. <https://www.archdaily.com/>
6. Archinect. <https://archinect.com/>
7. Arquitectura viva. <https://arquitecturaviva.com/en>
8. Auroville. <http://www.earth-auroville.com/index.php>
9. Ceptportfolio. <https://portfolio.cept.ac.in/2021/M>
10. Clifton Schooley & associates - Rammed earth. <http://www.rammedearth.info/>
11. Cob. <https://www.cob.gr/>
12. Continuing education. <https://continuingeducation.bnppmedia.com/>
13. Dezeen. <https://www.dezeen.com/tag/rammed-earth/>
14. Earth architecture. <http://eartharchitecture.org/>
15. Elliottwood. <https://www.elliottwood.co.uk/latest/using-rammed-earth-at-bushey-cemetery>
16. Endeavour. <https://endeavourcentre.org/resources-for-building-green/free-encyclopedia-of-sustainable-building-materials/walls/>
17. Faynan heritage. <http://faynanheritage.org/>
18. Gaia Επιχειρείν. <https://www.c-gaia.gr/>
19. Greenspec. <https://www.greenspec.co.uk/building-design/rammed-earth/>
20. Kaaf architects <https://www.kaaf.gr/work/earthwood>
21. Lowimpact. <https://www.lowimpact.org/>
22. Made in earth. <https://madeinearth.in/>
23. Modern diamond heights. <https://www.moderndiamondheights.com/>
24. Nature. <https://www.nature.com/>
25. Oguzhan Saygi. <https://oguzhansaygi.com/Rammed-Earth-in-Action>
26. Rammed earth constructions. <http://www.rammedearthconstructions.com.au/rammed-earth-info/>
27. Rammed earth consulting. <http://rammedearthconsulting.com/>
28. Rammed earth consulting. <http://www.rammedearthconsulting.com/rammed-earth-CAT-lecture-theatre.htm>
29. Rammed earth enterprises. <https://www.rammedearthenterprises.com.au/>
30. Rammed earth enterprises. <https://www.rammedearthenterprises.com.au/rammed-earth-cost>
31. Slimwallet. <https://www.slimwallet.co/blogs/news/how-to-build>
32. Terra firma builders. <https://www.terrafirmabuilders.ca/>
33. Thannal. <https://thannal.com/>
34. The plan. <https://www.theplan.it/eng>
35. Unesco. <https://www.unesco.org/en>
36. Uni-terra. <http://www.uni-terra.org/bauhaus-universitaet-weimar/rammed-earth-walls-moisture-transfer-and-change-in-strength>
37. Unt digital library. <https://digital.library.unt.edu/>
38. Wikipedia. https://en.wikipedia.org/wiki/Rammed_earth
39. Your home. <https://www.yourhome.gov.au/materials/rammed-earth>

(όλοι οι διαδικτυακοί τόποι ανακτήθηκαν τη χρονική περίοδο 2021 – 2022)

"Buildings, too, are children of earth and sun"

- Frank Lloyd Wright

