



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Δ.Π.Μ.Σ. «ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΤΩΝ ΜΝΗΜΕΙΩΝ», Β΄ ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ:
ΔΟΜΙΚΑ ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΕΠΕΜΒΑΣΕΙΣ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ

**«Διαγνωστική μελέτη του Τρούλου της ανωδομής του
Ιερού Κουβουκλίου του Παναγίου Τάφου στα
Ιεροσόλυμα – Προτάσεις συντήρησης και
αποκατάστασης»**



Επιβλέποντες καθηγητές:

Ομοτ. Καθ. Μ. Κορρές, Σχ. ΑΜ ΕΜΠ

Καθ. Α. Μοροπούλου, Σχ. ΧΜ ΕΜΠ

Επικ. Καθ. Χ. Μουζάκης, Σχ. ΠΜ ΕΜΠ

ΚΡΟΥΣΤΑΛΛΑΚΗ ΜΑΡΙΑ

ΠΟΛΙΤΙΚΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ

ΑΘΗΝΑ 2017

Ευχαριστίες

Η παρούσα εργασία αποτελεί μεταπτυχιακή εργασία στα πλαίσια του διατμηματικού προγράμματος μεταπτυχιακών σπουδών «Προστασία των Μνημείων» με κατεύθυνση «Δομικά Υλικά και Επεμβάσεις Συντήρησης» του τμήματος αρχιτεκτόνων μηχανικών και χημικών μηχανικών του Ε.Μ.Π. Πριν την παρουσίαση των αποτελεσμάτων της παρούσας διπλωματικής εργασίας, αισθάνομαι την υποχρέωση να ευχαριστήσω ορισμένους από τους ανθρώπους που γνώρισα, συνεργάστηκα μαζί τους και έπαιξαν πολύ σημαντικό ρόλο στην πραγματοποίησή της. Πρώτα από όλα θέλω να ευχαριστήσω τους επιβλέποντες καθηγητές της μεταπτυχιακής εργασίας: τ. Καθ. Μ. Κορρέ, Σχ. ΑΜ ΕΜΠ, Καθ. Α. Μοροπούλου, Σχ. ΧΜ ΕΜΠ, Επ. Καθ. Χ. Μουζάκη, για την πολύτιμη καθοδήγηση, εμπιστοσύνη και εκτίμηση που μου έδειξαν. Στη συνέχεια θα ήθελα να ευχαριστήσω τους: Δρ. Α. Δελέγκου, ΕΔΙΠ Σχ. ΧΜ ΕΜΠ, Δρ. Κ. Λαμπρόπουλο, ΕΔΙΠ Σχ. ΧΜ ΕΜΠ, Δρ. Α. Τσαγκαράκη, ΕΔΙΠ Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, ΥΔ Μ. Αποστολοπούλου, Σχ. ΧΜ ΕΜΠ, Β. Ζαφείρης, ΠΜ, Υπεύθυνος Εργαστηρίου Αναστήλωσης Ιερού Κουβουκλίου, οι οποίοι με τα πλούσια πνευματικά προσόντα και το ήθος τους συνέβαλαν ουσιαστικά στην ολοκλήρωση αυτής της εργασίας. Ιδιαίτερες ευχαριστίες θέλω να απευθύνω στους γονείς μου Εμμανουήλ και Αγγελική, καθώς και στην αδερφή μου Έλενα για την καθοριστική τους βοήθεια, οι οποίοι στάθηκαν σημαντικοί αρωγοί στην προσπάθειά μου και με υποστήριξαν σε κάθε φάση της πορείας μου. Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω το Χρήστο Πουλίδη, που με υπομονή και κουράγιο πρόσφερε την απαραίτητη ηθική συμπαράσταση για την ολοκλήρωση της μεταπτυχιακής μου εργασίας.

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες	1
Λίστα εικόνων	6
Λίστα πινάκων.....	14
Λίστα διαγραμμάτων	15
Περίληψη	16
Abstract	17
1. ΓΕΝΙΚΟ ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ	19
1.1. Δομικά υλικά	19
1.1.1. Κονιάματα	20
1.1.2. Πετρώματα	22
1.2. Φθορά δομικών υλικών	23
2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ	28
2.1. Ιστορική τεκμηρίωση.....	28
2.1.1. Ιστορικές φάσεις του Πανιέρου Ναού της Αναστάσεως.....	28
2.1.2. Ιστορικές φάσεις του Ιερού Κουβουκλίου	31
2.2. Γεωμετρική τεκμηρίωση.....	36
2.2.1. Μεθοδολογία	36
2.2.2. Επεξεργασία και αποτελέσματα	37
2.3. Αρχιτεκτονική τεκμηρίωση.....	39
2.3.1. Ιερό Κουβούκλιο	39
2.3.2. Τρούλος της ανωδομής.....	40
3. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ.....	43
3.1. Μακροσκοπικές παρατηρήσεις.....	44
3.1.1. Πρόσβαση στον τρούλο της ανωδομής	44
3.1.2. Περιγραφή από τη στάθμη του δώματος.....	45
3.1.3. Περιγραφή από τη στάθμη της σκαλωσιάς	50
3.2. Μη καταστρεπτικές τεχνικές (NDT)	56
3.2.1. Θερμογραφία υπερύθρου (Infra-Red Thermography)	56
3.2.2. Διασκόπηση του Τρούλου της ανωδομής του Ιερού Κουβουκλίου με τη χρήση Γεωραντάρ (Ground Penetrating Radar).....	63
3.2.3. Ενδοσκόπιο	74

4.	ΤΑΥΤΟΠΟΙΗΣΗ ΔΟΜΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ	76
4.1.	Εκτίμηση Γεωλογικής προέλευσης του δομικού λίθου slayeb του τρούλου της ανωδομής του Ιερού Κουβουκλίου	77
4.2.	Σοβάς (Ζώνη Κ)	78
4.3.	Μόλυβδος (Ζώνη Λ).....	79
4.4.	Ξύλινος φέρον οργανισμός και πηχάκια μπαγδατί	80
4.4.1.	Δομή	80
4.4.2.	Φυσικές ιδιότητες	81
4.4.3.	Μηχανικές ιδιότητες	84
5.	ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΡΟΥΛΟΥ	88
5.1.	Διαστασιολόγηση και 2D απεικόνιση	88
5.2.	3D απεικόνιση	93
5.3.	Απεικόνιση συνδέσεων	96
5.4.	Μεταλλικό στέλεχος και έλεγχος λειτουργικότητας.....	97
5.5.	Παραμετρική ανάλυση	105
5.5.1.	Σε θερμοκρασία	107
5.5.2.	Σε φορτία.....	108
5.5.3.	Σε τάσεις.....	110
6.	ΠΑΘΟΛΟΓΙΑ ΤΡΟΥΛΟΥ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ	113
6.1.	Χαρτογράφηση φθοράς και βλαβών στα δομικά υλικά του τρούλου της ανωδομής του Ιερού Κουβουκλίου	113
6.2.	Προσβολή ξύλινης δομής του τρούλου από ξυλοφάγα έντομα.....	120
6.2.1.	Προσβολή από μύκητες	120
6.2.2.	Προσβολή από ξυλοφάγα έντομα	121
6.3.	Μέθοδοι αντιμετώπισης ξυλοφάγων εντόμων- προτάσεις αποκατάστασης ξύλινου σκελετού	128
6.3.1.	Υποκαπνισμός (Φωσφίνη)	128
6.3.2.	Διοξείδιο του άνθρακα	129
6.3.3.	Θερμότητα.....	129
6.3.4.	Μικροκύματα	132
6.3.5.	Επίχρισμα με εντομοκτόνες ουσίες	132
6.4.	Προτεινόμενη μέθοδος αντιμετώπισης ξυλοφάγων εντόμων στον ξύλινο σκελετό του Τρούλου του Παναγίου Τάφου	133

6.5. Παθολογία ζωγραφικού διάκοσμου του Τρούλου και προτάσεις αποκατάστασής του	124
7. Συμπεράσματα- Προοπτικές	145
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	151

Λίστα εικόνων

ΑΡΙΘΜΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ	ΣΕΛ.
Εικόνα 2.1: Γραφική αναπαράσταση του Πανάγιου Τάφου πριν την επέμβαση του Μ. Κων/ντίνου (Biddle).	28
Εικόνα 2.2: Το Ιερό κουβούκλιο του 326 μ.Χ (αριστερά) και αναπαράσταση της μορφής του 604 μ.Χ (δεξιά), επένδυση με ορθομαρμαρώσεις πριν την καταστροφή από τους Πέρσες (σκίτσα Θ. Μητρόπουλου).	29
Εικόνα 2.3: Το Ιερό κουβούκλιο του 614 μ.Χ μετά την καταστροφή από τους Πέρσες (σκίτσο Θ. Μητρόπουλου).	30
Εικόνα 2.4: Thomas Shaw, the cupola over the Edicule looking north, detail of his drawing of the Edicule in 1772 (Bodleian Library, University of Oxford).	30
Εικόνα 2.5: 11ος αι. μ.Χ. Η αποκατάσταση του σε σχήμα «άμβωνα» από τον Μονομάχο 1045 μ.Χ, (σκίτσο Θ. Μητρόπουλου).	31
Εικόνα 2.6: Σταυροφορική φάση 12ος αι. μ.Χ. (DeBrun 16ος αι.).	31
Εικόνα 2.7: The north side of the Edicule with the steel shoring erected in March 1947, looking down south-west from the gallery of the Rotunda. Photograph by John Crook.	32
Εικόνα 2.8: Θέσεις φωτογραφικών λήψεων για την ανωδομή του Ιερού Κουβουκλίου και τον τρούλο.	34
Εικόνα 2.9: Συνολικό έγχρωμο νέφος όλου του Ιερού Κουβουκλίου.	35
Εικόνα 2.10: Ο τρούλος της ανωδομής του Ιερού Κουβουκλίου με υφή.	36
Εικόνα 2.11: Λεπτομέρειες κίωνων τρούλου. Από την εικόνα αυτή είναι εμφανής ο εντοπισμός και ο διαχωρισμός των διαφορετικών λίθων που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή του τρούλου.	36
Εικόνα 2.12: Τμήμα του τρούλου που έχει μερικώς καταστραφεί.	36
Εικόνα 2.13: Κάτοψη Ιερού Κουβουκλίου, παρούσα μορφή (Μ. Κορρές, 2015)	37
Εικόνα 2.14: πρόσοψη Ιερού Κουβουκλίου, παρούσα μορφή με τα όρια των μετακινήσεων των λίθων (Μ. Κορρές, 2015).	37
Εικόνα 2.15: Άποψη του Ιερού Κουβουκλίου και του τρούλου με έξι διπλά στηρίγματα. (Σχέδιο του Bernardino Amico, 1609).	39

Εικόνα 3.1: Άποψη του Ιερού Κουβουκλίου από τη Γαλαρία των Αρμενίων (Νοτιοανατολικά).	41
Εικόνα 3.2: Άποψη ξύλινου ικριώματος (1ο στάδιο) με μεταλλικά στηρίγματα στην ανωδομή του Ιερού Κουβουκλίου.	42
Εικόνα 3.3: Άποψη ξύλινων ικριώματων (2ο στάδιο) με μεταλλικά στηρίγματα σε 5 θέσεις καθ' ύψος (υπολογισμός σταθμών από γεωαναφερμένο σύστημα GEOMAGIC) στην ανωδομή του Ιερού Κουβουκλίου.	43
Εικόνα 3.4: Ζώνες Α έως Ι: λίθος slayeb, Ζώνη Κ: ασβεστιτικό επίχρισμα 2 στρώσεων (εξωτερικά), Ζώνη Λ: φύλλο μολύβδου.	44
Εικόνα 3.5: Ανάπτυγμα προβολών όψεων τρούλου χωρίς τα όρια των λίθων. (σχέδιο μεταπτυχιακού φοιτητή Δημήτρη Γιαννακόπουλου).	46
Εικόνα 3.6: Ανάπτυγμα προβολών όψεων τρούλου με τα όρια των λίθων. (σχέδιο μεταπτυχιακού φοιτητή Δημήτρη Γιαννακόπουλου).	47
Εικόνα 3.7: (Δεξιά) Οπή από την οποία παρατηρήθηκε η δομή του τρούλου εσωτερικά για να αποτιμηθεί ο τρόπος κατασκευής του. (Αριστερά) Μπαγδατί που αφαιρέθηκαν για να αποκαλυφθεί η δομή του τρούλου εσωτερικά.	48
Εικόνα 3.8: Μπαγδατί που αφαιρέθηκαν για να αποκαλυφθεί η δομή του τρούλου εσωτερικά.	48
Εικόνα 3.9: Οπή διαστάσεων 150cm×40cm.	48
Εικόνα 3.10: (Αριστερά) Σκελετός εξωτερικού θόλου. (Δεξιά) Σκίτσο κατά την διαδικασία των μακροσκοπικών παρατηρήσεων.	49
Εικόνα 3.11: Λεπτομέρεια σκελετού και μπαγδατί από τον εσωτερικό θόλο.	49
Εικόνα 3.12: Λεπτομέρεια σύνδεσης ακτινών του εσωτερικού θόλου.	50
Εικόνα 3.13: Λεπτομέρεια σύνδεσης ακτινών του εξωτερικού θόλου.	50
Εικόνα 3.14: Κλίση στο φύλλο μολύβδου και κατεστραμμένο επίχρισμα ως αποτέλεσμα αυτού.	51
Εικόνα 3.15: Κλίση στο φύλλο μολύβδου.	51
Εικόνα 3.16: Σημείο αποκόλλησης επιχρίσματος από τα όμβρια ύδατα-Φανερώνεται το μπαγδατί εσωτερικά.	51

Εικόνα 3.17: Κατεστραμμένο επίχρισμα από τα όμβρια ύδατα-Φανερώνεται το μπαγδατί εσωτερικά.	52
Εικόνα 3.18: Επιφανειακές ρηγματώσεις μέσου μήκους 4,416 mm.	52
Εικόνα 3.19: Επιφανειακές ρηγματώσεις.	52
Εικόνα 3.20: Επιφανειακές ρηγματώσεις.	53
Εικόνα 3.21: Απώλεια ξύλων.	53
Εικόνα 3.22: Απώλεια ξύλων.	53
Εικόνα 3.23: Μαύρη πάτινα.	54
Εικόνα 3.24: Λήψη IR_6081. Μπαγδατί βόρειο-ανατολική όψη.	57
Εικόνα 3.25: Λήψη IR_6089. Εσωτερικό Τρούλου- ανατολική όψη.	57
Εικόνα 3.26: Λήψη IR_6165. Βόρειο-ανατολική όψη Τρούλου.	58
Εικόνα 3.27: Λήψη IR_6179. Βόρεια όψη δώματος.	58
Εικόνες 3.28-3.29: Μέτρηση της υγρασίας των ξύλων των θόλων του Τρούλου με τον μετρητή υγρασίας METRICA 60274.	60
Εικόνες 3.30-3.31: Τεχνική IRT στο εσωτερικό των θόλων του Τρούλου.	60
Εικόνα 3.32-3.33: Αριστερή εικόνα: πειραματική διάταξη, Δεξιά εικόνα: επί τόπου μέτρηση των τόξων του τρούλου.	61
Εικόνα 3.34: Σάρωση 184- εξωτερική παρειά-σταυρόνημα έναρξης στο μέσον του 2ου πεσσού σε ύψος 12cm.	63
Εικόνα 3.35: Συνέχεια σάρωσης 184.	64
Εικόνα 3.36: Συνέχεια σάρωσης 184.	65
Εικόνα 3.37: Συνέχεια σάρωσης 184.	66
Εικόνα 3.38: Σάρωση 171, πεσσός 3 ^{ος}	67
Εικόνα 3.39: Σάρωση 186, βάση πεσσού 1	67
Εικόνα 3.40: Σαρώσεις τόξων 1-12.	68
Εικόνα 3.41: ΣΑΡΩΣΕΙΣ ΤΟΞΩΝ: 1, 4, 7, 10	69
Εικόνα 3.42: ΣΑΡΩΣΕΙΣ ΤΟΞΩΝ: 2, 5, 6, 9	70
Εικόνα 3.43: ΣΑΡΩΣΕΙΣ ΤΟΞΩΝ: 3, 8, 11, 12	71
Εικόνες 3.44-3.45: Λήψεις ενδοσκοπίου-περιμετρική μεταλλική ράβδος.	72

Εικόνα 4.1: Χάρτης δομικών υλικών (εσωτερικά και εξωτερικά).	74
Εικόνα 4.2: Απεικόνιση λίθου Slayeb.	75
Εικόνα 4.3: Σοβάς τριών στρώσεων συνολικού πάχους 2cm.	76
Εικόνα 4.4: FOM- μαλλιά κατσίκας	76
Εικόνα 4.5: FOM- άχυρο.	76
Εικόνα 4.6: Δομή του ξύλου.	78
Εικόνα 4.7: Διευθύνσεις του ξύλου.	79
Εικόνα 4.8: Παραμορφώσεις του ξύλου με συστολή ξήρανσης.	81
Εικόνα 5.1: Οριζόντιες τομές θόλου (από πρόγραμμα GEOMAGIC).	86
Εικόνα 5.2: Κατακόρυφες διαστάσεις (σε m) τρούλου (από πρόγραμμα GEOMAGIC).	87
Εικόνα 5.3: Διαστασιολόγηση των τόξων του Τρούλου.	88
Εικόνες: 5.4- 5.5: Διαστασιολόγηση πεσών (Ζώνη Δ) και μπαλούστρων (Ζώνη Θ) του Τρούλου.	88
Εικόνα 5.6: Τομή Ιερού Κουβουκλίου και κατ' επέκταση Τρούλου από τα ανατολικά προς τα δυτικά.	89
Εικόνα 5.7: Σκαρίφημα ξύλινου φορέα θόλων- εσωτερικού και εξωτερικού. Διαστάσεις σε m.	90
Εικόνα 5.8: Τόσο ο εσωτερικός θόλος όσο και ο εξωτερικός θόλος αποτελούνται από 32 ξύλινες ακτίνες οι οποίες σχηματίζουν μεταξύ τους γωνία 12,413°.	90
Εικόνα 5.6: 3D απεικόνιση ξύλινου φορέα εξωτερικού θόλου (βλ. παράρτημα σχέδιο υπό κλίμακα).	91
Εικόνα 5.7: 3D απεικόνιση ξύλινου φορέα εσωτερικού θόλου (βλ. παράρτημα σχέδιο υπό κλίμακα).	91
Εικόνα 5.8: 3D απεικόνιση ξύλινου φορέα εσωτερικού και εξωτερικού θόλου (βλ. παράρτημα σχέδιο υπό κλίμακα).	92
Εικόνα 5.9: Λεπτομέρεια εσωτερικού θόλου του τρούλου της ανωδομής.	93
Εικόνα 5.10: Σύνδεση βάσης εξωτερικού θόλου, ενδεικτικά, με μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν επί τόπου στο έργο.	94

Εικόνα 5.11: Σύνδεση βάσης εξωτερικού θόλου, ενδεικτικά, με μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν επί τόπου στο έργο.	94
Εικόνες 5.12-5.13-5.14: Μεταλλική κατασκευή κ. Κορρέ για την παραλαβή των φορτίων του Τρούλου εσωτερικά.	95
Εικόνες 5.15-5.16: Δημιουργία 3D Μοντέλου για την καλύτερη κατανόηση της δομής της μεταλλικής κατασκευής.	96
Εικόνα 5.17: Συναρμολόγηση και τοποθέτηση της μεταλλικής κατασκευής στον Τρούλο.	97
Εικόνα 5.18: Αντιδράσεις στηρίξεων μεταλλικής κατασκευής καρά τους άξονες x , y , z .	98
Εικόνα 5.19: Κατανομή κατά x δυνάμεων.	98
Εικόνα 5.20: Κατανομή κατά y δυνάμεων.	98
Εικόνα 5.21: Κατανομή κατά z δυνάμεων.	98
Εικόνα 5.22: Κατανομή ροπών κατά x .	99
Εικόνα 5.23: Κατανομή ροπών κατά y .	99
Εικόνα 5.24: Κατανομή ροπών κατά z .	99
Εικόνα 5.25: Κατανομή καμπτικών τάσεων S_{max} κατά Mz .	100
Εικόνα 5.26: Κατανομή καμπτικών τάσεων S_{min} κατά Mz .	100
Εικόνα 5.27: Κατανομή καμπτικών τάσεων S_{max} κατά My .	100
Εικόνα 5.28: Κατανομή καμπτικών τάσεων S_{min} κατά My .	100
Εικόνα 5.29: Διάγραμμα τάσεων maximum S_{max} .	101
Εικόνα 5.30: Διάγραμμα τάσεων minimum S_{min} .	101
Εικόνα 5.31: Τάσεις von Mises για κάθε μία από τις ράβδους της μεταλλικής κατασκευής.	101
Εικόνα 5.32: maximum τάση von Mises ολόκληρης της μεταλλικής κατασκευής.	102
Εικόνα 5.33: Προσομοίωση του Τρούλου στο πρόγραμμα Robot.	104
Εικόνα 5.34: Παραμόρφωση Τρούλου υπό θερμοκρασιακή καταπόνηση.	105
Εικόνα 5.35: Κατανομή δυνάμεων κατά x .	106
Εικόνα 5.36: Κατανομή δυνάμεων κατά y .	106
Εικόνα 5.37: Κατανομή δυνάμεων κατά z .	106

Εικόνα 5.38: Κατανομή ροπών κατά χ.	107
Εικόνα 5.39: Κατανομή ροπών κατά γ.	107
Εικόνα 5.40: Κατανομή ροπών κατά z.	107
Εικόνα 5.41: Σχηματική κατανομή των μέγιστων και ελάχιστων τάσεων.	108
Εικόνα 5.42: Διαγραμματική κατανομή των μέγιστων τάσεων.	108
Εικόνα 5.43: Διαγραμματική κατανομή των ελάχιστων τάσεων.	108
Εικόνα 5.44: Παραμόρφωση ξύλινου σκελετού λόγω μόνιμου βάρους.	109
Εικόνα 6.1: Αρίθμηση κιόνων.	111
Εικόνα 6.1: Φθορές ζωνών Α έως Ι. Με κόκκινο χρώμα σημειώνονται οι ρηγματώσεις και οι απώλειες αυθεντικού υλικού. Ακόμη εμφανίζονται δεξιά και αριστερά όλες οι όψεις των κιόνων 2 και 3 και των βάσεων τους.	112
Εικόνα 6.3: Φθορές ζωνών Α έως Ι. Με κόκκινο χρώμα σημειώνονται οι ρηγματώσεις και οι απώλειες αυθεντικού υλικού. Ακόμη εμφανίζονται δεξιά και αριστερά όλες οι όψεις των κιόνων 4 και 5 και των βάσεων τους.	113
Εικόνα 6.4: Φθορές ζωνών Α έως Ι. Με κόκκινο χρώμα σημειώνονται οι ρηγματώσεις και οι απώλειες αυθεντικού υλικού. Ακόμη εμφανίζονται δεξιά και αριστερά όλες οι όψεις των κιόνων 6 και 7 και των βάσεων τους.	114
Εικόνα 6.5: Φθορές ζωνών Α έως Ι. Με κόκκινο χρώμα σημειώνονται οι ρηγματώσεις και οι απώλειες αυθεντικού υλικού. Ακόμη εμφανίζονται δεξιά και αριστερά όλες οι όψεις των κιόνων 8 και 9 και των βάσεων τους.	115
Εικόνα 6.6: Φθορές ζωνών Α έως Ι. Με κόκκινο χρώμα σημειώνονται οι ρηγματώσεις και οι απώλειες αυθεντικού υλικού. Ακόμη εμφανίζονται δεξιά και αριστερά όλες οι όψεις των κιόνων 10 και 11 και των βάσεων τους.	116
Εικόνα 6.7: Φθορές ζωνών Α έως Ι. Με κόκκινο χρώμα σημειώνονται οι ρηγματώσεις και οι απώλειες αυθεντικού υλικού. Ακόμη εμφανίζονται δεξιά και αριστερά όλες οι όψεις των κιόνων 12 και 1 και των βάσεων τους.	117
Εικόνα 6.8: Κύκλος ζωής ξυλοφάγων εντόμων (αυγό-προνύμφη-νύμφη-τέλειο).	119
Εικόνα 6.9: Νεκρό Υμενόπτερο πάνω στο μπαγδατί.	121
Εικόνα 6.10: Οπές διατομών 2-4 mm από ξυλοφάγα έντομα, που οδηγούν σε ανενεργές στοές.	121

Εικόνα 6.11: Μαύρος μύκητας σε οπή από ξυλοφάγο έντομο.	122
Εικόνα 6.12: Περιττώματα ξυλοφάγων εντόμων. Τα ερυθρά φανερώνουν κατανάλωση μυκήτων.	122
Εικόνα 6.13: Περιττώματα ξυλοφάγων εντόμων και ξύλο εμφανώς σε άσχημη κατάσταση.	123
Εικόνα 6.14: Οπή διαφορετικής διαμέτρου και σχήματος, πιθανότατα προσβολή από διαφορετικό είδος ξυλοφάγου εντόμου.	123
Εικόνα 6.15: Σκουπάκι μπαταρίας με αναρροφητήρα (ιδιοκατασκευή κ. Τσαγκαράκη).	124
Εικόνα 6.16: Ο κ. Τσαγκαράκης κατά τη διαδικασία ακρόασης των ξυλοφάγων εντόμων με στηθοσκόπιο.	125
Εικόνα 6.17: Κατά την διαδικασία εφαρμογής του σαροκοκτόνου από τον κ. Α. Τσαγκαράκη.	134
Εικόνες 6.18-6.19: Κατά την διαδικασία εφαρμογής του σαροκοκτόνου από τον κ. Α. Τσαγκαράκη.	135
Εικόνα 6.20: Είσοδος εξαερισμού	135
Εικόνα 6.21: Σωλήνας εξαερισμού.	135
Εικόνα 6.22: Μηχανή εξαερισμού.	136
Εικόνα 6.23: Κατά την εφαρμογή καθαρισμού του ζωγραφικού διάκοσμου του Τρούλου με Vulprex-potassium methyl cyclohexyl oleate soap.	136
Εικόνες 6.24-6.25: Εξωτερική περιμετρική επιφάνεια Τρούλου πριν και μετά τον καθαρισμό.	137
Εικόνες 6.26-6.27: Άνω όψη εσωτερικού θόλου πριν και μετά τον καθαρισμό.	137
Εικόνα 6.28: Κατά τη διαδικασία στερέωσης του σοβά με το υλικό Primal 3% acrylic emulsion.	138
Εικόνα 6.29: Αποτελέσματα ταυτοποίησης χρωστικών ουσιών τεχνικής Raman.	139
Εικόνα 6.30: Κατά την διαδικασία εφαρμογής των στρώσεων του υλικού Master Emaco S TIX 285.	139
Εικόνα 6.31: Αποτύπωση ζωγραφικού διάκοσμου πριν την εφαρμογή των	140

χρωμάτων.	
Εικόνα 6.32: Κατά την διαδικασία εφαρμογής των χρωμάτων.	140
Εικόνα 6.33: Χρυσός Σταυρός.	141

Λίστα πινάκων

ΑΡΙΘΜΟΣ ΠΙΝΑΚΑ	ΣΕΛ.
Πίνακας 1.1: Μέθοδοι χαρακτηρισμού κονιαμάτων	19-20
Πίνακας 2.1: Συνοπτική απεικόνιση των ιστορικών φάσεων του Ιερού Κουβουκλίου.	33
Πίνακας 2.1: Επιλογή ζωνών τρούλου.	45
Πίνακας 3.2: Θέσεις λήψεων IRT φωτογραφιών.	55
Πίνακας 3.3: Θέσεις λήψεων IRT φωτογραφιών.	55
Πίνακας 3.4: Θέσεις λήψεων IRT φωτογραφιών.	56
Πίνακας 3.5: Μέτρηση υγρασίας στον Τρούλο.	59
Πίνακας 4.1: Μηχανικά χαρακτηριστικά μολύβδου.	78
Πίνακας 4.2: Εσωτερική υγρασία ξύλου σε σχέση με τη θερμοκρασία και τη σχετική υγρασία.	80
Πίνακας 5.1: Ιδιότητες των υλικών του Τρούλου που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση στο πρόγραμμα Robot.	19-20

Λίστα διαγραμμάτων

Διάγραμμα 4.1: Αποτελέσματα XRD του υποστρώματος του σοβά.	77
Διάγραμμα 4.2: Σύστολης ξήρανσης-Υγρασίας.	81
Σχηματικό διάγραμμα 4.3 τάσεων παραμορφώσεων ξύλου, για φόρτιση παράλληλα προς τις ίνες (συνεχής καμπύλη) και κάθετα στις ίνες (διακεκομμένη καμπύλη), υπό συνήθεις θερμοκρασίες.	82
Διάγραμμα 4.4: Μείωση του μέτρου ελαστικότητας του ξύλου σε θλίψη και σε εφελκυσμό, παράλληλα προς τις ίνες, υπό υψηλές θερμοκρασίες, Ευρωκώδικας 5.	83
Διάγραμμα 4.5: τάσεων παραμορφώσεων ξύλου σε εφελκυσμό παράλληλα προς τις ίνες για δύο ποσοστά υγρασίας (2,5% και 29,5%) και για δύο θερμοκρασίες (90°C και 25°C).	83
Διάγραμμα 4.6: Μείωση της θλιπτικής αντοχής του ξύλου παράλληλα προς τις ίνες συναρτήσει της θερμοκρασίας και για διάφορα ποσοστά υγρασίας.	84
Διάγραμμα 4.7: Τυποποιημένα - υπολογιστικά διαγράμματα τάσεων παραμορφώσεων ξύλου, σε θλίψη και σε εφελκυσμό για διάφορες θερμοκρασίες.	84
Διάγραμμα 6.1: Αποτελέσματα τεχνικής Raman.	138

Περίληψη

Στα πλαίσια της καινοτόμου έρευνας με τίτλο «Ολοκληρωμένο Πρόγραμμα Διαγνωστικής Έρευνας και Στρατηγικός Σχεδιασμός Υλικών και Επεμβάσεων Συντήρησης και Αποκατάστασης του Ιερού Κουβουκλίου του Παναγίου Τάφου στον Πανίερο Ναό της Αναστάσεως στα Ιεροσόλυμα», η οποία διεξάγεται από το ΕΜΠ σε συμφωνία με το Πατριαρχείο Ιεροσολύμων, λαμβάνει χώρα η παρακάτω μεταπτυχιακή εργασία με θέμα «*Διαγνωστική μελέτη του Τρούλου της ανωδομής του Ιερού Κουβουκλίου του Παναγίου Τάφου στα Ιεροσόλυμα – Προτάσεις συντήρησης και αποκατάστασης*».

Στόχος των εργασιών που πραγματοποιήθηκαν και περιγράφονται αναλυτικά στην εργασία αυτή είναι η αρχιτεκτονική τεκμηρίωση της μορφής του τρούλου, ο τρόπος με τον οποίο κατασκευάστηκε, η διάγνωση της φθοράς και της παθολογίας των επιμέρους υλικών του, τα προτεινόμενα υλικά και επεμβάσεις συντήρησης και αποκατάστασής του.

Πρωταρχικό και απαραίτητο στάδιο για την επίτευξη του παραπάνω στόχου είναι η διεξαγωγή επιτόπιας διαγνωστικής μελέτης με μία μακροσκοπική επισκόπηση της κατάστασης συντήρησής του. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν μη καταστρεπτικές τεχνικές (IRT, Georadar, ενδοσκόπιο) ούτως ώστε να γίνει χαρτογράφηση των υλικών και των τύπων φθοράς τους ώστε να ληφθούν χρήσιμα στοιχεία αναφορικά με τα μηχανικά χαρακτηριστικά τους.

Με βάση τα δύο προηγούμενα στάδια έγινε ταυτοποίηση των δομικών υλικών και των φυσικό-χημικών και μηχανικών χαρακτηριστικών τους. Ακόμη με επί τόπου μετρήσεις και με τη βοήθεια του προγράμματος Geomagis αποκαλύφθηκε η γεωμετρία της κατασκευής, έγινε διαστασιολόγηση των επιμέρους μελών της και απεικονίστηκε σε 2D και 3D σχέδια.

Τέλος, με βάση τα φορτία της κατασκευής και τις φθορές που έχει υποστεί ανά τους αιώνες δημιουργήθηκε μοντέλο το οποίο απεικονίζει τις παραμορφώσεις της και με βάση τα αποτελέσματα που εξάγει δίνονται λύσεις συντήρησης και αποκατάστασης για τα επιμέρους υλικά του, όπου κρίνεται απαραίτητο.

Abstract

As part of the innovative research entitled «Integrated Diagnostic Research Project and Strategic Planning for Materials, Interventions Conservation and Rehabilitation of the Holy Aedicule of the Church of the Holy Sepulchre in Jerusalem», conducted from NTUA in agreement with the Jerusalem Patriarchate, occurs the following thesis on «Diagnostic study of the dome of the superstructure of the Holy Edicule of the Holy Sepulchre in Jerusalem - Suggestions maintenance and rehabilitation.»

The goals of the work are the architectural documentation of the form of the dome, the way it was constructed, the diagnosis of decay and the pathology of the individual materials, the proposed materials and maintenance operations and restoration.

Primary and essential step towards achieving this object is to conduct diagnostic study and a visual overview of the maintenance status. The next step was to use non-destructive techniques (IRT, Georadar, endoscope) in order to obtain useful information regarding the mechanical characteristics.

After we complete the two previous stages we were able to identify the building materials and their physical, chemical and mechanical characteristics. Moreover, by using in situ measurements, assisting from the Geomagic program, the geometry of the structure was revealed, the sizing of the individual members were completed and thus it was possible to illustrate the structure in 2D and 3D designs.

Finally, based on the load of the construction and the damage suffered over the centuries, an illustrated model of the deformations was created and based on the results that were given by this model we are proposing maintenance and recovery solutions for individual materials, where it is necessary.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

«ΓΕΝΙΚΟ ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ»

1. ΓΕΝΙΚΟ ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ

1.1. Δομικά υλικά

Η ανάγκη της αναγνώρισης των παραδοσιακών δομικών υλικών προέκυψε πρόσφατα από το αυξημένο ενδιαφέρον στις τεχνικές και τα χρησιμοποιούμενα στο παρελθόν υλικά. Αρνητικά αποτελέσματα σε πρόσφατα αποκατεστημένα κτίρια, λόγω της χρήσης ακατάλληλων υλικών, οδήγησαν στην επιτακτική ανάγκη έρευνας των ιστορικών υλικών.

Ωστόσο, η τεχνολογία παραγωγής των παραδοσιακών δομικών υλικών, όπως κονίες αρμών, επιχρίσματα, στεγανωτικά κονιάματα κλπ., ενώ έχει αποδείξει αξιοσημείωτη μακροβιότητα, έχει απολεσθεί, δεδομένου ότι τα παραδοσιακά υλικά έχουν εκτοπισθεί από σύγχρονα υλικά ευρείας εφαρμογής, όπως τσιμέντο και τεχνητά πολυμερή, μη συμβατά με τα αυθεντικά υλικά, με αποτέλεσμα να έχουν προκληθεί ανεπανόρθωτες ζημιές σε πολλά μνημεία της αρχιτεκτονικής κληρονομιάς. Πρόσφατες επεμβάσεις σε ιστορικές τοιχοποιίες, χρησιμοποιώντας μοντέρνα υλικά, απέδειξαν ότι τα υλικά αυτά είναι ασύμβατα με τα αυθεντικά, προκαλώντας συχνά σοβαρές καταστροφές φυσικοχημικής και μηχανικής φύσεως. Η έρευνα που έχει γίνει μέχρι σήμερα στα παραδοσιακά δομικά υλικά για την αποκάλυψη της τεχνογνωσίας τους είναι περιορισμένη. Ωστόσο, μια συστηματική έρευνα, που έγινε τα τελευταία χρόνια σε αρχιτεκτονικά μνημεία στην περιοχή της Μεσογείου, αποκάλυψε την ακολουθούμενη τεχνογνωσία και προχώρησε στην ταξινόμηση των υλικών αυτών σε κατηγορίες ανά ιστορικές περιόδους, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά τους. Η έρευνα αυτή πραγματοποιήθηκε πάνω σε ένα μεγάλο αριθμό δειγμάτων, προερχόμενα από μνημεία της αρχαίας Ελληνικής και Ελληνιστικής περιόδου, Ρωμαϊκά, Βυζαντινά, Μεταβυζαντινά και Ενετικά μνημεία, καθώς και σε δείγματα μεταγενέστερων αποκαταστάσεων από οχυρωματικά έργα, μοναστήρια κι εκκλησίες και ιστορικά κτίρια της Στερεάς Ελλάδας, της Ρόδου, της Κρήτης, της Κέρκυρας, του Αγίου Όρους, της Βενετίας και της Κωνσταντινούπολης. Η μεθοδολογία, που αποδείχθηκε αξιόπιστη για την αξιολόγηση των φυσικοχημικών και μηχανικών ιδιοτήτων αυτών των παραδοσιακών υλικών, είναι η μεθοδολογία της αντίστροφης μηχανικής προσέγγισης (**Reverse Engineering**), η οποία ακολουθείται στο Εργαστήριο Επιστήμης και Τεχνικής των Υλικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Πρόκειται για τεχνολογία η οποία αφορά στην ολοκληρωμένη προσέγγιση των αυθεντικών υλικών.

1.1.1. Κονιάματα

Με χρήση νέων τεχνικών είναι δυνατή η ανάλυση των ιστορικών κονιαμάτων και η εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με τις πρώτες ύλες που χρησιμοποιήθηκαν καθώς και την τεχνολογία παραγωγής τους.

Η μεθοδολογία της αντίστροφης μηχανικής ξεκινά από την αναγνώριση των ιστορικών κονιαμάτων μέχρι και τη φάση της εφαρμογής των λαμβανόμενων αποτελεσμάτων σε πιλοτική κλίμακα.

Τα σημαντικότερα σημεία της αντίστροφης μηχανικής και οι ακολουθούμενες φάσεις -από τη φάση της εξέτασης των ιστορικών υλικών μέχρι και την παρασκευή κονιαμάτων αποκατάστασης- συνοψίζονται παρακάτω:

1. Δειγματοληψία αντιπροσωπευτικών δειγμάτων κονιαμάτων, που έχουν υποστεί φθορά (περιβαλλοντική, φυσική, μηχανική) στο μικρότερο δυνατό βαθμό.
2. Φυσικοχημικές και ορυκτολογικές αναλύσεις, στα συνολικά δείγματα και σε επιμέρους κλάσματα των δειγμάτων μετά από φυσικό διαχωρισμό.
3. Δοκιμές για τον προσδιορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων. Αποτίμηση των μηχανικών αντοχών των κονιαμάτων, καθώς και κονιαμάτων/δομικών υλικών, με ενόργανες και μη καταστρεπτικές μεθόδους (στατικές και δυναμικές).

Συνοπτικά τα βήματα της μεθοδολογίας της αντίστροφης μηχανικής προσέγγισης παρατίθενται στη συνέχεια.

1η Φάση: Χαρακτηρισμός Ιστορικών Κονιαμάτων

Προσδιορισμός και αποτίμηση των ορυκτολογικών, χημικών, φυσικοχημικών χαρακτηριστικών των παραδοσιακών κονιαμάτων και της συμπεριφοράς τους σχετικά με την περιβαλλοντική δράση και τις μηχανικές καταπονήσεις. Επιλογή των πρώτων υλών παραγωγής για τη σύνθεση των νέων υλικών.

2η Φάση: Παρασκευή Κονιαμάτων Αποκατάστασης.

Σύνθεση κονιαμάτων αποκατάστασης, αποτελούμενων από μίγματα διαφόρων αναλογιών, ποσοστών και κλασμάτων κοκκοδιαβάθμισης συνδετικής ύλης, αδρανών, πρόσθετων, υπό διάφορες συνθήκες και με ποικίλους τρόπους.

3η Φάση: Αποτίμηση των Χαρακτηριστικών των Κονιαμάτων Αποκατάστασης.

Αξιολόγηση των νέων υλικών αποκατάστασης και των τεχνικών θεμελιωδών χαρακτηριστικών τους σε σχέση με τα παραδοσιακά σε εργαστηριακή κλίμακα. Εργαστηριακή προσομοίωση για τη μελέτη της φυσικοχημικής και φυσικομηχανικής αντίστασης των κονιαμάτων στη

φθορά, σε συνθήκες επιταχυνόμενης γήρανσης. Δοκιμαστική εφαρμογή σε εργαστηριακή κλίμακα και σε πιλοτική τοιχοποιία, και αξιολόγηση της συμπεριφοράς με επιτόπου μη καταστρεπτικές δοκιμές.

4η Φάση: Αριστοποίηση Παρασκευής Κονιαμάτων Αποκατάστασης.

Επιλογή, σχεδιασμός και αριστοποίηση της τεχνολογίας παραγωγής - προτυποποίηση προϊόντος, με βάση τα δεδομένα που λαμβάνονται από την προηγούμενη φάση.

5η Φάση: Αποτίμηση Κονιαμάτων Αποκατάστασης.

Παραγωγή του προτυποποιημένου προϊόντος, σε ευρεία κλίμακα, και εφαρμογή του σε πιλοτική κλίμακα, σε αντιπροσωπευτικά ιστορικά μνημεία.

Ιστορικά Κονιάματα- Εργαστηριακοί έλεγχοι για την αναγνώριση της τεχνολογίας των ιστορικών κονιαμάτων

Ακολουθώντας την παραπάνω μεθοδολογία, είναι δυνατός ο χαρακτηρισμός των ιστορικών κονιαμάτων, όσον αφορά τις χαρακτηριστικές παραμέτρους μικροδομής τους, την αναλογία συνδετικής ύλης/αδρανών, το είδος της συνδετικής ύλης αλλά και των χρησιμοποιούμενων αδρανών, καθώς και τα μηχανικά τους χαρακτηριστικά, βάσει αναλυτικών μεθόδων.

Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειωθεί ότι το κονίαμα είναι ένα σύνθετο υλικό αποτελούμενο από πρόσθετα και αδρανή, τα οποία υπό συνθήκες μπορούν να αντιδράσουν με τη συνδετική ύλη, και από πρόσμικτα που εξυπηρετούν άλλους σκοπούς. Ταυτόχρονα η διαδικασία παραγωγής των ιστορικών κονιαμάτων καθώς και οι χρησιμοποιούμενες πρώτες ύλες ποικίλλουν από περιοχή σε περιοχή και ανάλογα με την ιστορική περίοδο και την εφαρμογή-χρήση του κονιάματος. Όλα τα παραπάνω καθιστούν τα κονιάματα σύνθετα συστήματα. Επομένως απαιτείται η χρησιμοποίηση περισσότερων από μιας μεθόδου για τον ολοκληρωμένο χαρακτηρισμό των αυθεντικών κονιαμάτων.

Οι μέθοδοι που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον χαρακτηρισμό ενός κονιάματος, καθώς και οι συλλεγόμενες πληροφορίες, είναι οι εξής:

1. Οπτική μικροσκοπία	Ορυκτολογικός και πετρογραφικός χαρακτηρισμός. Φυσικοχημική ανάλυση.
2. Ηλεκτρονική μικροσκοπία	
3. Μικροσκοπία οπτικών ινών	
4. Θερμικές αναλύσεις (DTA, TG/DTG, DSC, TMA)	Ποιοτικός, ποσοτικός προσδιορισμός των συστατικών των κονιαμάτων. Μέτρηση συντελεστού θερμικής διαστολής.
5. Περίθλαση ακτίνων Χ (XRD)	Προσδιορισμός κρυσταλλικών φάσεων.
6. Ποροσιμετρία Hg	Μελέτη μικροδομής.

7. Κλασιμετρία	Περιεκτικότητα σε ή μέσω μέτρησης του εκλυόμενου.
8. Φασματοφωτομετρία IR	Ποιοτική εκτίμηση ανόργανων, οργανικών φάσεων.
9. Φωτοηλεκτρονική ακτίνων X	Μελέτη διεπιφάνειας κονιάς/αδρανών και κονιαμάτων/δομικού υλικού
10. Κοκκοδιαβάθμιση	Αναλογία αδρανών/συνδετικής κονιάς (κ.β.). Διαστάσεις των κλασμάτων των αδρανών.
11. Τεστ μηχανικών αντοχών	Αποτίμηση μηχανικών αντοχών κονιαμάτων και κονιαμάτων/δομικών υλικών.

Πίνακας 1.1: Μέθοδοι χαρακτηρισμού κονιαμάτων

1.1.2. Πετρώματα

Τα πετρώματα διαχωρίζονται σε τρεις κύριες κατηγορίες με βάση την γεωλογική διεργασία από την οποία δημιουργούνται:

- Πυριγενή
- Ιζηματογενή
- Μεταμορφωμένα

Τα χαρακτηριστικά των πετρωμάτων που είναι σημαντικά για τους μηχανικούς των υλικών για την βέλτιστη επιλογή τους είναι τα ακόλουθα:

- *Ορυκτολογική σύνθεση*: Οι περισσότερες ιδιότητες των πετρωμάτων βασίζονται στις φυσικές και χημικές ιδιότητες των ορυκτών που τα απαρτίζουν
- *Ιστός / Υφή*: Αναφέρονται στον τρόπο εμφάνισης των ορυκτών συστατικών μέσα στη μάζα του πετρώματος, στο βαθμό κρυστάλλωσης το μέγεθος και το σχήμα τους.
- *Δομή της μάζας του πετρώματος*: τα μακροχαρακτηριστικά, η σχιστότητα, οι πτυχές, κ.α.

Ιδιότητες των πετρωμάτων:

- Πορώδες
- Πυκνότητα
- Υδαταπορροφητικότητα
- Σκληρότητα
- Συντελεστές θερμικής διαστολής
- Μηχανικές αντοχές

Εργαστηριακοί έλεγχοι για την αναγνώριση των ιδιοτήτων των πετρωμάτων

- *Ποροσιμετρία υδραργύρου (Mercury Intrusion Porosimetry):* Συλλογή πληροφοριών (βάσει συγκεκριμένου μοντέλου) σχετικών με το σύστημα πόρων του υλικού (ολικός όγκος Hg, ειδική επιφάνεια υλικού, μέση ακτίνα πόρων, φαινόμενα και διορθωμένη φαινόμενα πυκνότητα, ανοιχτό πορώδες)
- Επεξεργασία ψηφιακής εικόνας (Digital Image Processing)
- Ρόφηση – Εκρόφηση αερίων (π.χ. αζώτου - BET)

1.2. Φθορά δομικών υλικών

Φθορά είναι η απομείωση στο χρόνο των ιδιοτήτων (φυσικών, χημικών, μηχανικών κ.α.) και των χαρακτηριστικών (ορυκτολογικών, υφής κ.α.), της συνοχής, των διαστάσεων και της αισθητικής των υλικών. Τα φαινόμενα φθοράς εκδηλώνονται στις διεπιφάνειες υλικών/περιβάλλοντος ή υλικών/υλικών και είναι συνάρτηση ενδογενών και εξωγενών παραγόντων. Ο τρόπος θεώρησης της συμπεριφοράς των υλικών στο περιβάλλον δεν είναι γενικευμένος. Κάθε συγκεκριμένη περίπτωση πρέπει να μελετάται στην κατεύθυνση της αποκάλυψης του συγκεκριμένου μηχανισμού που επιδρά κάθε φορά

Η φθορά μελετάται σε δύο επίπεδα:

1. Μακροκλίμακα: Αναφέρεται στο είδος και την μορφολογία της διάβρωσης.
2. Μικροκλίμακα: Αναφέρεται στην κινητική του φαινομένου (ταχύτητα διάβρωσης) και στην θερμοδυναμική του φαινομένου (πιθανότητα διάβρωσης).

Φαινόμενα φθοράς στα δομικά υλικά είναι τα εξής:

1. Επιφανειακές κρούστες:

- *Γυψοποίηση:* Η γυψοποίηση αναφέρεται στον σχηματισμό γύψου, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, με προσβολή του $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ή του CaCO_3 των λίθων από θειικό οξύ. Ο γύψος στην επιφάνεια της πέτρας είναι διαλυτός και με έκπλυση (π.χ. από την βροχή) αποκαλύπτει το υγιές, μη γυψοποιημένο στρώμα της πέτρας, δηλαδή επιτρέπει την εξέλιξη του φαινομένου σε βάθος. ☒ Αυτό έχει σαν γενικότερο αποτέλεσμα την σταδιακή απαλειφή των λεπτομερειών της επιφάνειας της πέτρας
- *Όξινη ανθρακική κρούστα:* Μετατροπή του ανθρακικού ασβεστίου, CaCO_3 , σε όξινο ανθρακικό ασβέστιο, $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$, το οποίο στην συνέχεια με την εξάτμιση του νερού μετατρέπεται σε ανακρυσταλλωμένο ανθρακικό ασβέστιο. Το στρώμα αυτό, θεωρείται ότι δεν έχει καλή συνοχή με το υποκείμενο ανθρακικό ασβέστιο (της κύριας

μάζας της πέτρας) και οδηγεί σε χαλάρωση της κρούστας, που σε συνέργια με βιολογική δραστηριότητα, και την χαλάρωση των αρμών μπορεί να προκαλέσει τοπικές καταρρεύσεις σε τοιχοποιίες

- *Κρυστάλλωση αλάτων*: Η κρυστάλλωση αλάτων αναφέρεται στη μηχανική φθορά των πορωδών λίθων και δομικών υλικών, μέσω της ανάπτυξης μηχανικών τάσεων στο εσωτερικό των υλικών (πόρους) από κρυστάλλους αλάτων και διάρρηξη της συνέχειας του υλικού όταν οι τάσεις ξεπεράσουν την αντοχή του.

2. Ασύμβατα υλικά:

- *Τσιμεντιτικά κονιάματα*: Τα κονιάματα τσιμέντου παρουσιάζουν σχετικά μεγάλες τιμές θλιπτικής αντοχής και μέτρου ελαστικότητας καθιστώντας τα πολύ δυνατά και άκαμπτα σε σχέση με τα παραδοσιακά κονιάματα στις ιστορικές τοιχοποιίες. Η χρήση του τσιμέντου ως υλικού αποκατάστασης διαταράσσει την μηχανική συμπεριφορά, στατική και δυναμική, της τοιχοποιίας, με κίνδυνο εμφάνισης διαφορικών φορτίσεων σε τμήματα της δομής και επακόλουθη αστοχία τους. Τα κονιάματα τσιμέντου παρουσιάζουν γενικότερα μεγάλο συντελεστή θερμική διαστολής, σχεδόν διπλάσιο της πέτρας, με αποτέλεσμα, σε κύκλους θέρμανσης - ψύξης, να ασκούνται μηχανικές τάσεις στα αυθεντικά υλικά που μπορούν να οδηγήσουν σε αστοχία. Σε εφαρμογές αποκατάστασης ιστορικών τοιχοποιιών, η μικρή τιμή πορώδους και η σχετικά πυκνή δομή των τσιμεντιτικών κονιαμάτων δυσκολεύει την "αναπνοή" της τοιχοποιίας, δηλαδή την μεταφορά της υγρασίας στους κύκλους ύγρανσης και ξήρανσης.

3. Φθορά από μηχανικούς παράγοντες:

- *Διόγκωση μεταλλικών συνδέσμων*: Τα προϊόντα της οξειδωσης που δημιουργούνται στην επιφάνεια του συνδέσμου αυξάνουν σημαντικά τον όγκο του συστήματος μέταλλο –προϊόντα διάβρωσης. Η διόγκωση αυτή προκαλεί την ανάπτυξη ισχυρότατων μηχανικών τάσεων που οδηγούν στη ρήξη του υλικού όταν υπερβούν την αντοχή του.
- *Σεισμικές δονήσεις*: Για δεδομένη εδαφική επιτάχυνση, κτίρια με μικρή, μεσαία και μεγάλη βλάβη θα παρουσιάσουν πιθανότητες υπέρβασης επιπέδου βλάβης $P_1 < P_2 < P_3$ αντίστοιχα. Δηλαδή τα κτίρια που έχουν ήδη υποστεί μεγάλες βλάβες ή φθορές θα παρουσιάσουν μεγαλύτερη πιθανότητα υπέρβασης δεδομένου επιπέδου βλάβης που μπορεί να οδηγήσει σε μερική ή ολική κατάρρευση.

Μεθοδολογία διαγνωστικής μελέτης φαινομένων φθοράς

1. Ιστορική τεκμηρίωση - Χαρακτηρισμός ιστορικών υλικών και κατασκευών.
2. Διάγνωση φθοράς.
3. Αξιολόγηση προηγούμενων επεμβάσεων συντήρησης.
4. Αποτίμηση περιβαλλοντικών επιπτώσεων.
5. Έλεγχος ποιότητας υφιστάμενων υλικών αποκατάστασης.
6. Πιλοτική εφαρμογή επεμβάσεων συντήρησης.
7. Αξιολόγηση πιλοτικών επεμβάσεων σε εργαστηριακή κλίμακα και επιτόπου.
8. Ανάπτυξη συστήματος επιστημονικής υποστήριξης στη λήψη αποφάσεων.
9. Αξιολόγηση του συστήματος με βάση τα παραπάνω δεδομένα.
10. Διάχυση αποτελεσμάτων στους τελικούς χρήστες.
11. Εκπαίδευση και επιμόρφωση προσωπικού.

Για τη διάγνωση της φθοράς χρησιμοποιούνται αναλυτικές και μη καταστρεπτικές μέθοδοι.

Μη καταστρεπτικές μέθοδοι

- *Θερμογραφία Υπέρυθρου:* Η θερμογραφία υπέρυθρου είναι μία μη καταστρεπτική τεχνική η οποία καταγράφει την υπέρυθρη ακτινοβολία που εκπέμπεται από τα υλικά/αρχιτεκτονικές επιφάνειες. Η τεχνική της υπέρυθρης θερμογραφίας στον τομέα της προστασίας μνημείων χρησιμοποιείται για τη λήψη πληροφοριών σχετικά με τη συμβατότητα, την υγρασία, τη φθορά και την ύπαρξη ασυνεχειών, κενών στα υλικά και στις αρχιτεκτονικές επιφάνειες.
- *Μικροσκόπιο Οπτικών Ινών:* Η μικροσκοπία οπτικών ινών χρησιμεύει για την επιτόπου χαρτογράφηση και εκτίμηση της φθοράς και παρέχει πληροφορίες για την υφή της επιφάνειας ενός υλικού (μορφολογία επιφάνειας, πιθανές αστοχίες, διεπιφανειακές δράσεις). Δίνει επιπλέον πληροφορίες για τη μικροδομή του υλικού. Συμπληρώνει τη χαρτογράφηση της φθοράς και της αποτίμησης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων στις αρχιτεκτονικές επιφάνειες καθώς επίσης και των επεμβάσεων συντήρησης, καθαρισμού και προστασίας.
- *Πολωτικό Μικροσκόπιο:* Σκοπός της είναι η εξακρίβωση της γεωγραφικής προέλευσης των ορυκτών και η αναγνώριση των δομικών ορυκτών των πετρωμάτων. Επιτυγχάνεται με την εξέταση λεπτών τομών των υλικών σε πολωτικό μικροσκόπιο. Βασίζεται στα βασικά χαρακτηριστικά των ορυκτών, δηλαδή το σχήμα του κρυστάλλου, τα επίπεδα σχισμών και τις οπτικές ιδιότητες σε επίπεδο πολωμένο φως.

Αναλυτικές τεχνικές

- *Περιθλασιμετρία Ακτινών Χ:* Χρησιμεύει για την ταυτοποίηση των ενώσεων που υπάρχουν στα εξεταζόμενα κονιορτοποιημένα δείγματα.
- *Μέθοδοι Θερμικής Ανάλυσης:* Οι θερμικές αναλύσεις χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση των μεταβολών του υλικού που εμφανίζονται όταν θερμαίνονται τα υλικά σε μια θερμική κλίμακα 25-1000°C, με ρυθμό 10°C/min.
- *Ποροσιμετρία Υδραργύρου:* Με την ποροσιμετρία υδραργύρου εξετάζονται οι χαρακτηριστικές παράμετροι μικροδομής των υλικών. Τα μεγέθη που καταγράφονται είναι ο ολικός ειδικός όγκος, η φαινόμενη πυκνότητα, η ειδική επιφάνεια, η μέση ακτίνα των πόρων και το ολικό πορώδες. Από την κατανομή μεγέθους πόρων ως προς τον ολικό προσροφούμενο όγκο εξάγονται συμπεράσματα για την πορώδη δομή των υλικών (δομικών λίθων και κονιαμάτων).
- *Δοκιμές Μηχανικών Αντοχών:* Τα υλικά ανάλογα με την κατεργασία που έχουν υποστεί και τη σύστασή τους έχουν διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες. Η γνώση των ιδιοτήτων αυτών είναι σημαντική όχι μόνον στο μηχανολογικό σχεδιασμό αλλά και στον έλεγχο καταπόνησης φορτίων διαφόρων κατασκευών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο

«ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ»

2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ

2.1. Ιστορική τεκμηρίωση

Στο πέρασμα των αιώνων ο Πανιέρου Ναός της Αναστάσεως, πέρασε από πολλές οικοδομικές φάσεις, συντηρήσεις και αποκαταστάσεις ενώ η μορφή του δεν θυμίζει σε τίποτα τον πρώτο ναό που έχτισε η Α. Ελένη το 325 μ.Χ.

Διακρίνονται τρεις βασικές οικοδομικές φάσεις στο ναό της Αναστάσεως και κατ' επέκταση στο Ιερό Κουβούκλιο που περικλείει τον Πανάγιο Τάφο (Μητρόπουλος 2009, Couasnon 1972). Σύμφωνα με τον Corbo¹ χωρίζονται σε πέντε διότι εντάσσει και την περίοδο του Ανδριανού, με την οποία ξεκινάει την κατηγοριοποίηση, και αναφέρει ως τελευταία την μεγάλη αναστηλωτική ενέργεια του Κομνηνού.

2.1.1. Ιστορικές φάσεις του Πανιέρου Ναού της Αναστάσεως

1^η οικοδομική φάση

Στις 25 Αυγούστου του 325 μ.Χ. ο Χριστιανισμός γίνεται επίσημη θρησκεία και ο Αυτοκράτορας Κωνσταντίνος δίνει διαταγή στον κλήρο να αποκαλυφθούν και να καθαριστούν οι Άγιοι τόποι. Ο πατριάρχης των Ιεροσολύμων Μακάριος κατεδαφίζει το Καπιτώλιο. Με την ύπαρξη όμως του Καπιτωλίου, η Α. Ελένη καταφέρνει να βρει τον Πανάγιο Τάφο και τον Τίμιο Σταυρό. Εκείνη την περίοδο χτίζεται ένα συγκρότημα που αποτελούνταν από πέντε μεγαλοπρεπή κτίρια, για την τίμηση των Ιερών τόπων. Για τις ανάγκες της οικοδόμησης απολαξεύεται ο Ιερός βράχος και σκάβεται, περίπου 8-9μ.², για να φτάσει στο ύψος του Πανάγιου Τάφου. Γύρω από αυτόν και μέσα σε κυκλικό πλάτωμα χτίζεται οικοδόμημα κυκλικού σχήματος και ανοιχτό, το οποίο στις τρεις πλευρές του περιβάλλεται από δώδεκα κίονες και έξι πεσσούς. Στην τέταρτη πλευρά είναι η είσοδος στο οικοδόμημα που οδηγεί πρώτα σε ανοιχτό αίθριο μπροστά από τον Τάφο. Αργότερα ονομάστηκε «Ροτόντα» ή «Ανάσταση», εξαιτίας του σχήματός του. Το κουβούκλιο, που φτιάχνεται πριν την Ροτόντα, είναι και αυτό ανοιχτό σχήματος οκταγώνου.

Ανατολικά της Ροτόντας, στο σημείο όπου βρέθηκε ο τίμιος σταυρός, ανοικοδομήθηκε πεντάκλιτη Βασιλική με διπλούς γυναικωνίτες. Ανάμεσα στη Ροτόντα και τη Βασιλική διαμορφώθηκε εσωτερική, περικλειστη αυλή με κιονοστοιχίες προς το βορρά, νότο και ανατολή. Ο τετραγωνισμένος αυτός χώρος ονομάστηκε Τρικάμαρο. Στην είσοδο της Βασιλικής υπήρξε μεγάλο αίθριο από το οποίο ήταν και η κεντρική είσοδος στο συγκρότημα, ενώ στο σημείο που υπήρξε ο Γολγοθάς χτίστηκε ξεχωριστός ναός.

¹ Βλ. Angeloni Alessandra- Pappalardo Carmelo, «THE ARCHEOLOGICAL AND HISTORICAL CONTEXT OF THE BASILICA OF THE HOLY SEPULCHRE IN JERUSALEM»

² Βλ. Μητρόπουλος Θ., «Ο Πανάγιος Τάφος του Πανιέρου Ναού της Αναστάσεως»

Η λαμπρότητα και το κάλος της εκκλησίας του Μ. Κωνσταντίνου διατηρήθηκαν για 278 χρόνια. Το Μάιο του 614 μ.Χ.³ τα Περσικά στρατεύματα εισβάλουν στην Ιερουσαλήμ και την καταστρέφουν. Ο ηγούμενος της μονής του Αββά Θεοδοσίου, Μόδεστος, με τη βοήθεια του πατριάρχη της Αλεξάνδρειας, Ιωάννου του Ελεήμονα, οργανώνει αναστηλωτικές εργασίες των Αγίων προσκυνημάτων το 617μ.Χ.

Οι εργασίες αποκατάστασης ξεκίνησαν το 626μ.Χ από τον Πατριάρχη Μόδεστο. Λόγω οικονομικών δυσχερειών αποκαταστάθηκε μόνο η Ροτόντα, η εκκλησία του Γολγοθά και το Μαρτύριον ενώ φτιάχτηκε τρούλος σύμφωνα με το βυζαντινό ρυθμό της περιόδου του Ιουστινιανού. Αξίζει να σημειωθεί ότι αποκαταστάθηκε και ο πυρήνας του Ιερού κουβούκλιου. Ο Μόδεστος αφήνει τετραγωνικό άνοιγμα πάνω από το κουβούκλιο και πάνω από αυτό χτίζει τέσσερις κιονίσκους, που δημιουργούν αψίδες, οι οποίες στο τελείωμα του συναντώνται και κλείνουν δημιουργώντας ένα μικρό τρούλο. Παρόλα αυτά, ο ναός δεν ανακτά την παλαιά του αίγλη.

Υπήρξαν, κατά περιόδους και άλλες καταστροφές όχι μόνο από κατακτητές αλλά και από σεισμούς. Το 1009 μ.Χ. ο χαλίφης Hakem-bi-Amh-illah⁴ προκαλεί τρομερές καταστροφές στα Άγια Προσκυνήματα. Με αυτό τον τρόπο, σηματοδοτείται το τέλος της 1ης οικοδομικής φάσης του ναού.

2^η οικοδομική φάση

Το 1020μ.Χ. οι Πατριάρχες Θεόφιλος και Νικηφόρος επιχειρούν αναστηλωτικές επεμβάσεις που όμως είναι περιορισμένης κλίμακας⁵ λόγω έλλειψης χρηματικών πόρων. Χάρη στις δαπάνες των Βυζαντινών αυτοκρατόρων Βασιλείου Β', Κωνσταντίνου Η', Μιχαήλ Δ' και Κωνσταντίνου Θ', τα Πανάγια προσκυνήματα συντηρούνται από το 1027 έως το 1048μ.Χ.

Οι αρχιτέκτονες προσπάθησαν να ακολουθήσουν το σχέδιο του Μόδεστου και ανοικοδόμησαν το Τρικόμαρο με το βράχο του Γολγοθά, την Ροτόντα και το Πατριαρχείο. Την ίδια περίοδο αποκαθιστάται το Ιερό κουβούκλιο, το οποίο παίρνει τη μορφή «Άμβωνα»⁶. Η κάτοψη του είναι πεταλοειδής. Εισάγουν στην είσοδο δύο κιονίσκους, οι εξωτερικές επιφάνειες διακοσμούνται με ορθομαρμαρώσεις, ενώ δώδεκα κιονίσκοι, στην περίμετρο της κάτοψης, στηρίζουν τη λίθινη κιονοστοιχία.

³ Βλ. Μητρόπουλος Θ., «Ο Πανάγιος Τάφος του Πανιέρου Ναού της Αναστάσεως»

⁴ Βλ. Μητρόπουλος Θ., «Ο Πανάγιος Τάφος του Πανιέρου Ναού της Αναστάσεως»

⁵ Βλ. Μητρόπουλος Θ., «Ο Πανάγιος Τάφος του Πανιέρου Ναού της Αναστάσεως»

⁶ Βλ. Couasnon Charles, «The church of the Holy Sepulchre in Jerusalem», translate from the original French by J-P. B. and Claude Ross, The Schweich Lectures of the British Academy, 1972

Η δεύτερη οικοδομική φάση τελειώνει με τους Σταυροφόρους να καταλαμβάνουν την πόλη και να ανοικοδομούν τον Πανιέρο Ναό της Αναστάσεως καθώς και άλλες εκκλησίες.

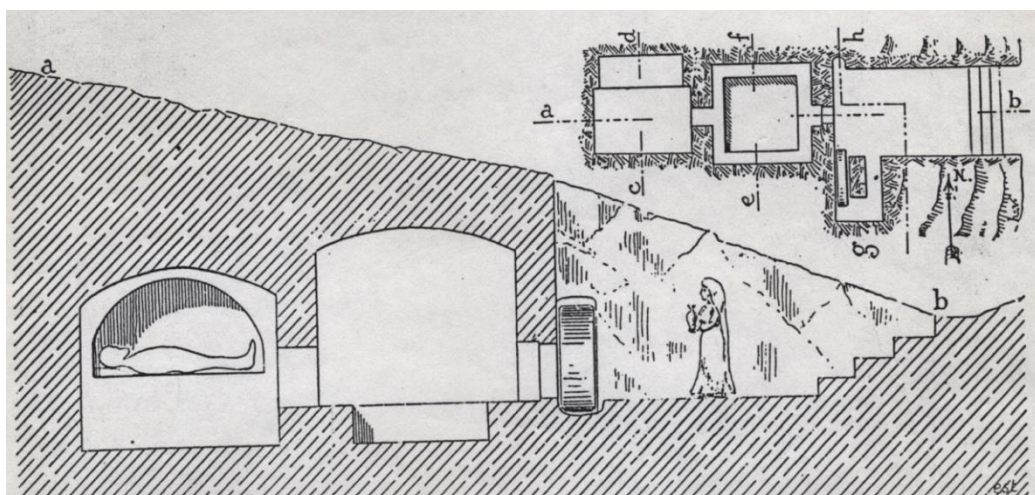
3^η οικοδομική φάση

Το 1071 μ.Χ. τα Ιεροσόλυμα καταλύονται από τους Τούρκους και τα Άγια Προσκυνημάτα εγκαταλείπονται μέχρι την ανακατάληψη τους από τους Σταυροφόρους το 1099μ.Χ., οι οποίοι ενσωματώνουν όλα τα Ιερά Προσκυνημάτα κάτω από ένα οικοδόμημα⁷ και ακολουθούν την όψιμη ρωμανική τεχνοτροπία. Στη θέση του Τρικάμαρου χτίζουν το Καθολικό το οποίο παραμένει ίδιο έως σήμερα ενώ παράλληλα διατηρούν όλη την προηγούμενη φάση.

Στο Ιερό Κουβούκλιο γίνεται προσθήκη του Παρεκκλησίου του Αγγέλου και αφαιρούνται δύο κίονες που κοσμούσαν την ανατολική όψη. Σύμφωνα με τον Hogh το εξωτερικό πλάτος της προσθήκης των Σταυροφόρων είναι μικρότερο από εκείνο του Κουβουκλίου στην ανατολική όψη⁸. Τέλος, το άνοιγμα στην οροφή από τετράγωνο μετατρέπεται σε εξάγωνο και περιέχει έξι κιονίσκους σχηματίζοντας έναν μικρό τρούλο.

Ο Πανιέρος Ναός της Αναστάσεως καταστρέφεται στην πυρκαγιά του 1808μ.Χ. με την οποία σημαίνεται και το τέλος της Σταυροφορικής περιόδου.

Η αρχική μορφή που είχε ο Πανάγιος Τάφος, ο οποίος ήταν χωροθετημένος στο λόφο Γκάρεμπ, περιλάμβανε το νεκρικό θάλαμο και τον προθάλαμο, την είσοδο του οποίου σφράγιζε ένας κυκλικός λίθος.



Εικόνα 2.1: Γραφική αναπαράσταση του Πανάγιου Τάφου πριν την επέμβαση του Μ. Κων/ντίνου (Biddle).

⁷ Βλ. Ιωαννίδης Β., « Προσκυνητάριον της Αγίας Πόλεως Ιερουσαλήμ, Ιερουσαλήμ 1877

⁸ Βλ. Μητρόπουλος Θ., «Ο Πανάγιος Τάφος του Πανιέρου Ναού της Αναστάσεως»

2.1.2. Ιστορικές φάσεις του Ιερού Κουβούκλιου

1^η Οικοδομική φάση- Περίοδος του Μεγάλου Κωνσταντίνου

Για τη θεμελίωση του θρησκευτικού οικοδομήματος, από τον αυτοκράτορα Κωνσταντίνο, έσκαψαν το βραχώδες υπέδαφος 8-9 μέτρα⁹ από την επιφάνεια του μέχρι τη στάθμη του Τάφου του Χριστού. Ο Μ. Κωνσταντίνος και οι αρχιτέκτονες του αφαίρεσαν τον προθάλαμο ώστε ο νεκρικός θάλαμος να γίνει το κεντρικό σημείο της Ροτόντας. Τον λαξεύουν εξωτερικά σε οκταγωνική κάτοψη και είσοδο προς την ανατολή. Εσωτερικά είναι ορθογωνικός με το αρκοσόλιο στη βόρεια πλευρά του.



Εικόνα 2.2: Το Ιερό κουβούκλιο του 326 μ.Χ (αριστερά) και αναπαράσταση της μορφής του 604 μ.Χ (δεξιά), επένδυση με ορθομαρμαρώσεις πριν την καταστροφή από τους Πέρσες (σκίτσα Θ. Μητρόπουλου).

Στις αρχές του 7^{ου} αιώνα το Ιερό Κουβούκλιο επενδύεται με λιθόκτιστο τοίχο τον οποίο στόλιζαν περίτεχνοι κιονίσκοι. Διαθέτει μονολιθική σκεπή σχήματος κωνικού που καταλήγει σε κορυφή. Η είσοδος βρίσκεται στα ανατολικά. Λίγο αργότερα το 614 μ.Χ.¹⁰ καταστρέφεται ολοκληρωτικά από τους Πέρσες.

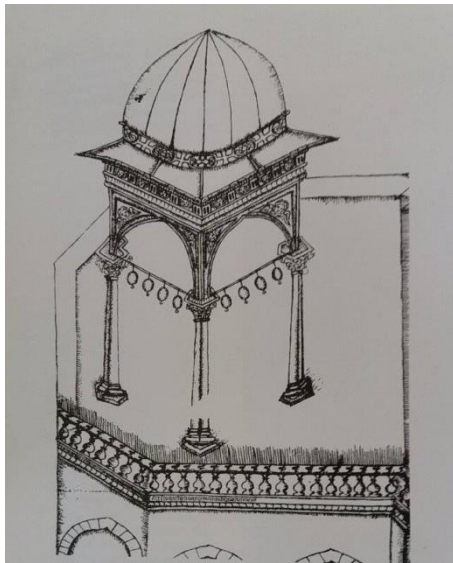
⁹ Βλ. Μητρόπουλος Θ., «Ο Πανάγιος Τάφος του Πανίερου Ναού της Αναστάσεως»

¹⁰ Βλ. Μητρόπουλος Θ., «Ο Πανάγιος Τάφος του Πανίερου Ναού της Αναστάσεως»



Εικόνα 2.3: Το Ιερό κουβούκλιο του 614 μ.Χ. μετά την καταστροφή από τους Πέρσες (σκίτσο Θ. Μητρόπουλου).

Το 626 μ.Χ. ο πυρήνας του Ιερού Κουβουκλίου αποκαθίσταται από τον Πατριάρχη Μόδεστο. Στο πάνω μέρος αφήνει τετραγωνικό άνοιγμα, το οποίο περικλείει με τέσσερις κιονίσκους. Οι κιονίσκοι δημιουργούν αψίδες που στο τελείωμα τους συναντώνται και κλείνουν με αποτέλεσμα να δημιουργείται τρούλος.



Εικόνα 2.4: Thomas Shaw, the cupola over the Edicule looking north, detail of his drawing of the Edicule in 1772 (Bodleian Library, University of Oxford).

Το 1009 μ.Χ. καταστρέφονται τα Αγία Προσκυνήματα από τον χαλίφη Hakem-bi-Amh-illah¹¹ και ειδικότερα το Ιερό Σπήλαιο μέχρι τη στάθμη του φυσικού βράχου.

¹¹ Βλ. Μητρόπουλος Θ., «Ο Πανάγιος Τάφος του Πανιέρου Ναού της Αναστάσεως»

2^η Οικοδομική φάση- 11^{ος} αιώνας Βυζαντινή Περίοδος- Πρώτη Σταυροφοριακή Περίοδος (1099-1187)

Τον 11^ο αιώνα ο αυτοκράτορας Κωνσταντίνος Θ' ο Μονομάχος συμπληρώνει τα αυθεντικά τμήματα του σπηλαίου με λιθοδομή, επαναλαμβάνοντας την Κωνσταντινεία κάτοψη του τάφου. Την ίδια περίοδο, 1099 μ.Χ., οι Σταυροφόροι προσθέτουν έναν προθάλαμο (Παρεκκλήσι του Αγγέλου), χάριν του οποίου αφαιρούνται δύο κιονίσκοι που κοσμούσαν την είσοδο. Έτσι στο εξωτερικό περιστύλιο παραμένουν 10 κίονες και ορθομαρμαρώσεις που καλύπτουν όλη την εξωτερική επιφάνεια. Τέλος μετατρέπουν το άνοιγμα στην οροφή από τετράγωνο σε εξάγωνο και πλέον το περικλείουν έξι κιονίσκοι μετατρέποντας το σε μικρό τρούλο.

Σύμφωνα με λατινικές πηγές το 1555 το Ιερό Κουβούκλιο αναστηλώνεται από τον Fra Bonifazioda Ragusa και εμπλουτίζεται από τον γλύπτη Renghiera Renghiergi, με γλυπτό διάκοσμο, εσωτερικά και εξωτερικά.

Το 1808 μ.Χ. το Ιερό Κουβούκλιο καταστρέφεται από πυρκαγιά.



Εικόνα 2.5: 11ος αι. μ.Χ. Η αποκατάσταση του σε σχήμα «άμβωνα» από τον Μονομάχο 1045 μ.Χ. (σκίτσο Θ. Μητρόπουλου).



Εικόνα 2.6: Σταυροφορική φάση 12ος αι. μ.Χ. (DeBrun 16ος αι.).

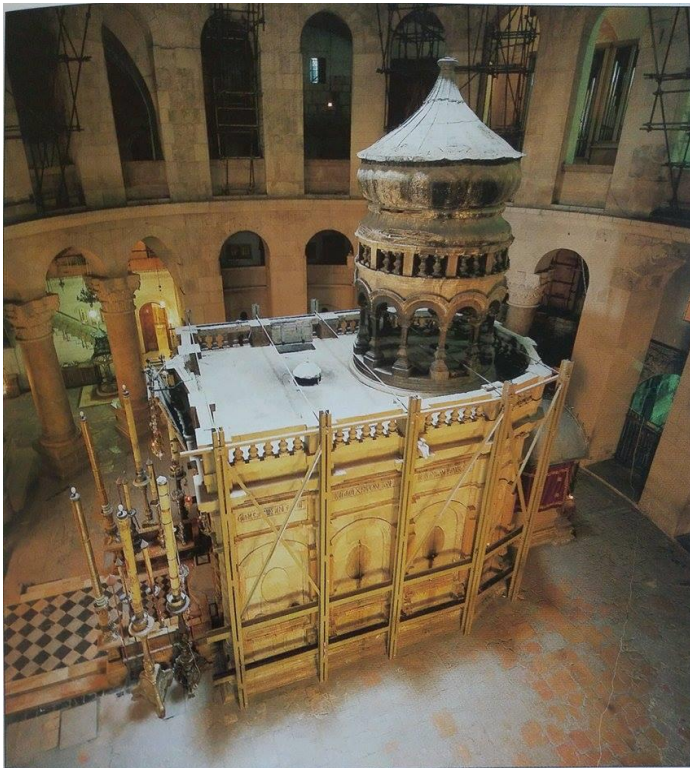
3^η οικοδομική φάση- Η τελευταία αναστηλωτική επέμβαση μετά την πυρκαγιά του 1808

Τον Ιούλιο του 1809 ξεκίνησαν οι αναστηλωτικές εργασίες στο Ιερό Κουβούκλιο. Αρχικά απομακρύνθηκαν τα συντρίμια και τον Οκτώβριο του 1809 τοποθετήθηκαν περιμετρικά του Κουβουκλίου ικριώματα ώστε να καθαιρεθούν τα κατεστραμμένα τμήματα. Σύμφωνα με το Συμαίο η αφαίρεση της ορθομαρμάρωσης αποκάλυψε τις διαστάσεις του νεκρικού θαλάμου 3×1.5×4 πήχεις. Η βόρεια και η νότια πλευρά παρέμειναν στην παλαιοχριστιανική τους μορφή ενώ η ανατολική και δυτική πλευρά χτίστηκαν με ορθογωνισμένους λίθους.

Ο αρχιτέκτονας Κομνηνός, στην εσωτερική ορθομαρμάρωση του δυτικού τοίχου του Παναγίου Τάφου, κατασκευάζει ένα τυφλό θύρωμα, από όπου μπορεί κανείς να παρατηρήσει την λιθοδομή, το οποίο καλύπτεται από ξύλινη πόρτα.

Ο τρούλος της ανωδομής στηρίζεται πλέον σε 12 κιονίσκους οι οποίοι συμβολίζουν τους 12 αποστόλους.

Τέλος το 1947 προστίθεται σιδηρός κλωβός από τους Βρετανούς για την αποφυγή περαιτέρω μετατόπισης των ορθομαρμαρώσεων.



Εικόνα 2.7: The north side of the Edicule with the steel shoring erected in March 1947, looking down south-west from the gallery of the Rotunda. Photograph by John Crook.

Οι πολλαπλές αναστηλωτικές εργασίες που πραγματοποιήθηκαν με την πάροδο του χρόνου οδήγησαν στην συνύπαρξη πολλών διαφορετικών υλικών και μορφών οι οποίες οδήγησαν σε παραμορφώσεις της τοιχοποιίας και απόκλισης των ορθομαρμαρώσεων από την κατακόρυφο.

326	Ανέγερση Ιερού Κουβουκλίου από τον Μ. Κωνσταντίνο
614	Καταστροφή του Ιερού Κουβουκλίου από τους Πέρσες
626	Αποκατάσταση του Ιερού Κουβουκλίου από τον Πατριάρχη Μόδεστο
1009	Καταστροφή του Ιερού Κουβουκλίου από τον χαλίφη Hakeem-bi-Amh-illah
1042-1048	Αποκατάσταση του κτιρίου από τον αυτοκράτορα Κωνσταντίνο σε σχήμα «άμβωνα»
1099	Προσθήκη του προθαλάμου (Παρεκκλήσι του Αγγέλου)
1555	Αναστηλωτική επέμβαση του Ιερού Κουβουκλίου από τον Fra Bonifazioda Ragusa και τον γλύπτη Renghiera Renghieri
1808	Καταστροφική πυρκαγιά
1810	Αναστήλωση του Ιερού Κουβουκλίου από τον αρχιτέκτονα Κάλφα Κομνηνό
1947	Προσθήκη σιδηρού κλωβού από τους Βρετανούς

Πίνακας 2.1: Συνοπτική απεικόνιση των ιστορικών φάσεων του Ιερού Κουβουκλίου.

2.2. Γεωμετρική τεκμηρίωση

Τα Εργαστήρια Γενικής Γεωδαισίας (Δ/ντής Καθ. κ. Δ.Μπαλοδήμος) και Φωτογραμμετρίας (Δντής Καθ. κ. Α. Γεωργόπουλος) ανέλαβαν και έφεραν σε πέρας, για λογαριασμό του Ελληνορθόδοξου Πατριαρχείου, την πλήρη γεωμετρική Τεκμηρίωση του Πανιέρου Ναού της Αναστάσεως στα Ιεροσόλυμα την περίοδο 1993-1999 (Balodimos et al. 2003, Georgoroulos & Modatsos 2002, Lanvas 2009).

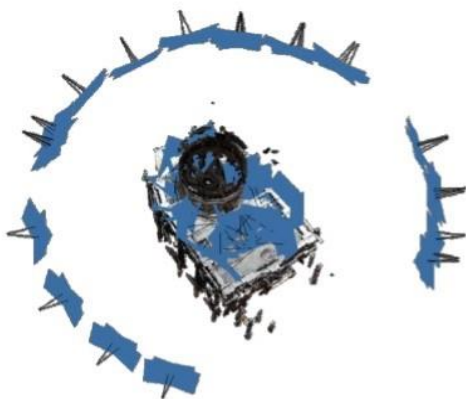
Σκοπός της παρούσας γεωμετρικής τεκμηρίωσης, η οποία διεξήχθη από την επιστημονική ομάδα του ΕΜΠ με επιστημονικά υπεύθυνο τον κ. Α. Γεωργόπουλο, ήταν η παραγωγή τρισδιάστατου μοντέλου μεγάλης ακρίβειας με τη χρήση φωτογραμμετρικών και γεωδαιτικών μεθόδων τόσο του εσωτερικού όσο και του εξωτερικού του Ιερού Κουβουκλίου του Παναγίου Τάφου.

Με το μοντέλο αυτό προκύπτουν προϊόντα τεκμηρίωσης όπως οριζόντιες και κατακόρυφες τομές, όψεις αλλά και ένταξη του τρισδιάστατου μοντέλου σε ένα κοινό σύστημα αναφοράς (γεωαναφορά) ούτως ώστε να διαπιστωθεί η ύπαρξη παραμορφώσεων και μικρομετακινήσεων.

Η παραπάνω διαδικασία γίνεται και πριν αλλά και κατά τη διάρκεια των εργασιών συντήρησης ώστε να προλαμβάνουμε οποιαδήποτε μικρομετακίνηση μπορεί να προκληθεί λόγω των εργασιών.

2.2.1. Μεθοδολογία

Συλλέχθηκαν ακολουθίες πυκνά επικαλυπτόμενων ψηφιακών εικόνων από μεταβλητές αποστάσεις και γωνίες αλλά και διαφορετική θέση, με χρήση ψηφιακής επαγγελματικής φωτογραφικής μηχανής Canon EOS-1Ds MarkIII. Με τον τρόπο αυτό αποδίδονται όλες οι λεπτομέρειες των αρχιτεκτονικών επιφανειών και διασφαλίζεται η πλήρης καταγραφή τους.



Εικόνα 2.8: Θέσεις φωτογραφικών λήψεων για την ανωδομή του Ιερού Κουβουκλίου και τον τρούλο.

2.2.2. Επεξεργασία και αποτελέσματα

2.2.2.1. Ιερό κουβούκλιο

Για τη δημιουργία του τελικού 3D μοντέλου, αφότου συλλεχθεί το απαραίτητο υλικό, φιλτράρεται και συνενώνεται με κατάλληλα λογισμικά και μεγάλη ανθρώπινη προσπάθεια ώστε να μη χαθεί σημαντική πληροφορία. Πιο αναλυτικά, αφότου γίνει η διαλογή εικόνων και η κατηγοριοποίηση τους σε φακέλους ανάλογα με το θέμα τους, γίνεται η ραδιομετρική διόρθωσή τους για τυχόν σφάλματα λόγω σκιών και σκοτεινών σημείων. Στη συνέχεια οι εικόνες αυτές εισάγονται σε ένα λογισμικό, που υλοποιεί τεχνικές SfM και DIM, το οποίο εξάγει σημεία σε τρισδιάστατο χώρο, τα οποία υπόκεινται σε καθαρισμό για τυχόν λάθος σημεία, που μπορεί να επηρεάζουν το αποτέλεσμα. Τέλος τα νέφη αυτά συνενώνονται και αποδίδονται σε πραγματική κλίμακα.



Εικόνα 2.9: Συνολικό έγχρωμο νέφος όλου του Ιερού Κουβουκλίου.

2.2.2.2. Τρούλος της ανωδομής

Στις επόμενες εικόνες παρουσιάζεται μεμονωμένα το τμήμα του τρούλου το οποίο είναι ένα από τα πιο πολύπλοκα τμήματα του Ιερού Κουβουκλίου.



Εικόνα 2.10: Ο τρούλος της ανωδομής του Ιερού Κουβουκλίου με υφή.



Εικόνα 2.11: Λεπτομέρειες κίωνων τρούλου. Από την εικόνα αυτή είναι εμφανής ο εντοπισμός και ο διαχωρισμός των διαφορετικών λίθων που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή του τρούλου.

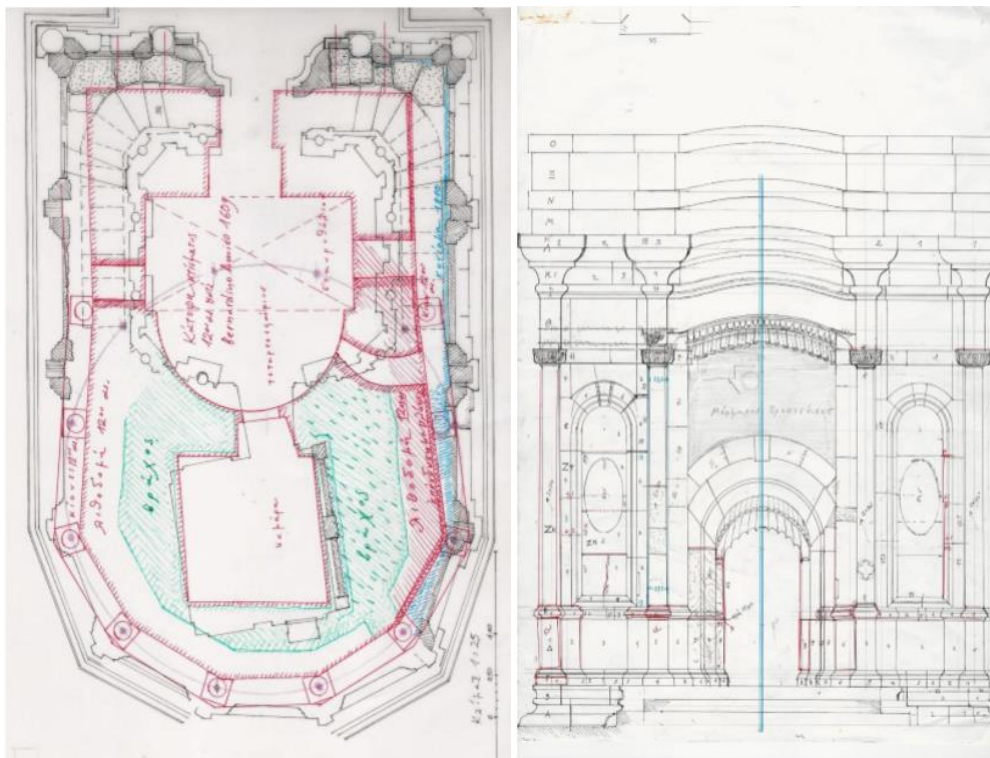


Εικόνα 2.12: Τμήμα του τρούλου που έχει μερικώς καταστραφεί.

2.3. Αρχιτεκτονική τεκμηρίωση¹²

2.3.1. Ιερό Κουβούκλιο

Η παρούσα μορφή του Ιερού Κουβουκλίου είναι αποτέλεσμα επισκευής του προγενέστερου κτίσματος μετά την πυρκαγιά του 1808.



Εικόνα 2.13 (αριστερά): Κάτοψη Ιερού Κουβουκλίου, παρούσα μορφή (Μ. Κορρές, 2015), Εικόνα 2.14 (δεξιά): Πρόσοψη Ιερού Κουβουκλίου, παρούσα μορφή με τα όρια των μετακινήσεων των λίθων (Μ. Κορρές, 2015).

Μετά την πυρκαγιά ο αρχιτέκτονας Κάλφας Κομνηνός ανέλαβε να επισκευάσει το Ιερό Κουβούκλιο. Όμως δεν ήταν δυνατό να το φέρει στην αρχική του μορφή διότι για να το κάνει αυτό θα έπρεπε να προσθέσει σχεδόν παντού ικανού πάχους νέα λιθοδομή κάτι το οποίο θα άλλαζε τις διαστάσεις του προγενέστερου χτίσματος και αυτό δεν ήταν επιθυμητό. Αποφάσισε λοιπόν να κάνει τα εξής:

- Ακολούθησε την αρχική διάταξη, δηλαδή διμερές εσωτερικό, πολυγωνικό δυτικό πέρας, κυκλικό επί του δώματος επιστέγασμα και την εξωτερική διαμόρφωση την επανέλαβε σαν την προγενέστερη προσθέτοντας φέροντα τόξα. Ακόμη αντικατέστησε τις παραστάδες με κίονες.
- Διεύρυνε τον προθάλαμο και αύξησε το ύψος των θόλων.

¹² Βλ. Μ. Κορρές «Αρχιτεκτονική τεκμηρίωση, μορφής, δομής, δομικών βλαβών»

- Χρησιμοποίησε κατά κύριο λόγο ερυθρά μάρμαρα, στο εξωτερικό, από τα Ιεροσόλυμα, και λευκά, στο εσωτερικό, από την Κωνσταντινούπολη (μάρμαρα Προκονήσου).
- Οι μορφές που χρησιμοποίησε θύμιζαν ένα ιδιότυπο μείγμα Μπαρόκ της Κεντρικής Ευρώπης σε συνδυασμό με την κλασική αρχιτεκτονική.
- Επιδίωξε τη χρήση μετρικών αναλογιών, δηλαδή ο κύριος όγκος του κτίσματος βασιζόταν στη σχέση 2:2:3.

Η συνύπαρξη όλων των αρχιτεκτονικών φάσεων του Ιερού Κουβουκλίου οδήγησε σε παραμορφώσεις και βλάβες. Το φαινόμενο αυτό είναι παντού σταθερό. Συμπεραίνεται λοιπόν ότι το αίτιο βρίσκεται ακριβώς πίσω από τις μαρμάρινες μάζες, στο κονίαμα του γεμίματος, λόγω της ανερχόμενης υγρασίας και του περιορισμένου αερισμού του χώρου.

2.3.2. Τρούλος της ανωδομής

Κατά την αναμόρφωση του κτίσματος, δηλαδή την επέκτασή του προς την ανατολή, στήθηκε ακριβώς πάνω από το νεκρικό θάλαμο, στο δώμα του Ιερού Κουβουκλίου, κυκλικό δωδεκάστυλο επιστέγασμα (τρούλος), το οποίο προστάτευε τον Πανάγιο Τάφο από τα όμβρια ύδατα που έμπαιναν δια μέσου της οπής στη Ροτόντα. Ο εν λόγω τρούλος κατασκευάστηκε κατά μίμηση του αρχαίου εβραϊκού τάφου, ο οποίος καλείται σήμερα «τάφος του Αβεσσαλώμ», και βρίσκεται στην κοιλάδα του Ιωσαφάτ¹³. Οι δώδεκα κίονές του σχημάτιζαν αρχικά κανονικό δωδεκάγωνο ώστε να ανακλούν την αρχική μορφή του κτίσματος. Μετά όμως από την αναμόρφωση του 12^{ου} αιώνα, οι κίονες αυτοί παρέμειναν μεν δώδεκα, διατάχθηκαν όμως κατά ζεύγη, απαρτίζοντας έξι διπλά στηρίγματα. Σχέδια του 1609 αποδεικνύουν το γεγονός αυτό.

¹³ Βλ. †Βενιαμίν Ιωαννίδου, Αρχιμανδρίτου του Πατριαρχικού Θρόνου των Ιεροσολύμων, «Προσκυνητάριον της Αγίας Γης, η Αγία Πόλη Ιερουσαλήμ και τα Περίχωρα Αυτής», εκ του τυπογραφείου του Παναγίου Τάφου 1877, Εκδόσεις Μυγδονία 2004.



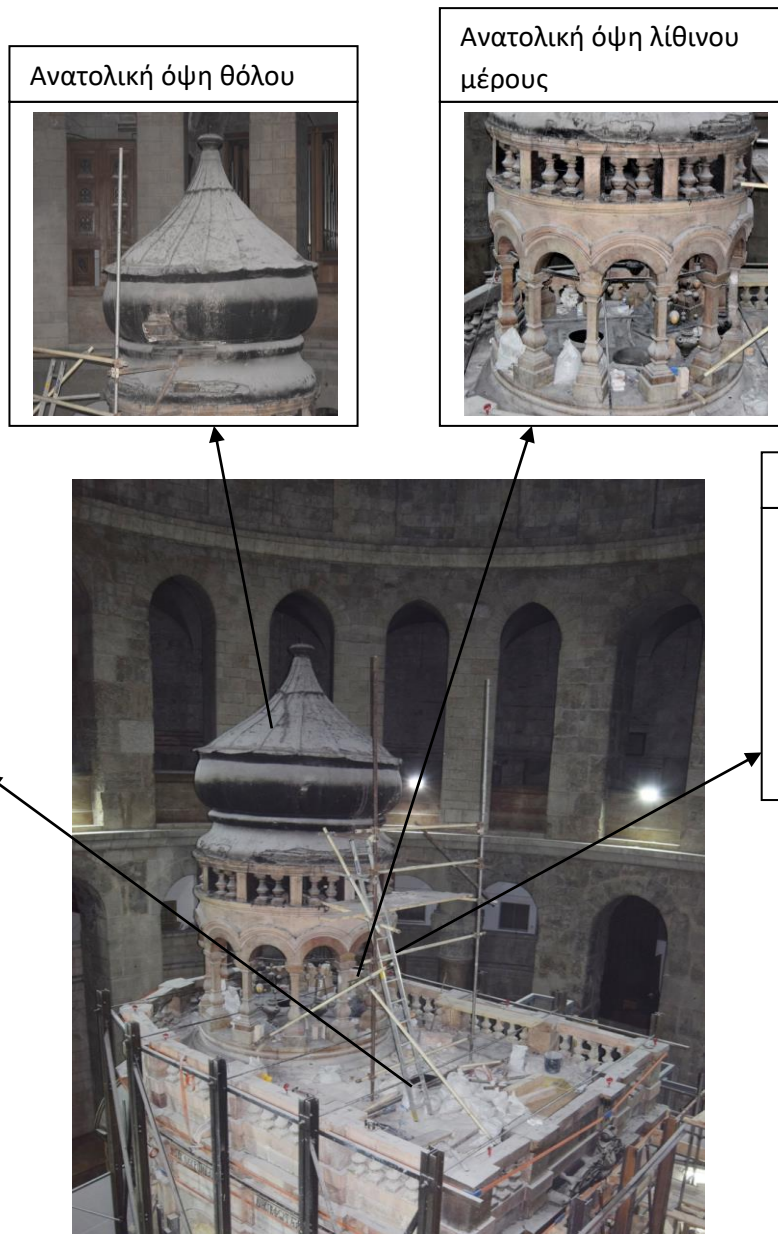
Εικόνα 2.15: Άποψη του Ιερού Κουβουκλίου και του τρούλου με έξι διπλά στηρίγματα. (Σχέδιο του Bernardino Amico, 1609).

Για καλύτερη αντίληψη της δομικής σχέσεως της παρούσας κατασκευής και για την καλύτερη κατανόηση των παραμορφώσεών της συντέθηκαν σχέδια αρχιτεκτονικής αποτύπωσης τα οποία περιγράφουν με ακρίβεια τα όρια των λίθων. Τα όρια αυτά συχνά συγχέονται με εκείνα των αρχιτεκτονικών μορφών, γι' αυτό το λόγο είναι απαραίτητη η επί τόπου παρατήρηση και αποτύπωσή τους. Τα αρχιτεκτονικά σχέδια σε συνδυασμό με εκείνα που προκύπτουν από τη γεωμετρική τεκμηρίωση αποδίδουν τις ακριβείς διαστάσεις των λίθων και των ορίων τους.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

«ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ»

3. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ



Εικόνα 3.1: Άποψη του Ιερού Κουβουκλίου από τη Γαλαρία των Αρμενίων (Νοτιοανατολικά).

3.1. Μακροσκοπικές παρατηρήσεις

Στο πλαίσιο της επίσκεψης στο Ιερό Κουβούκλιο του Παναγίου Τάφου (Ιεροσόλυμα, Ισραήλ) για την διεξαγωγή επιτόπιας διαγνωστικής μελέτης για την αποτίμηση των φθορών και την εκτίμηση της κατάστασης συντήρησης του Τρούλου της ανωδομής, αρχικά έγινε μια μακροσκοπική επισκόπηση της κατάστασης συντήρησης του.

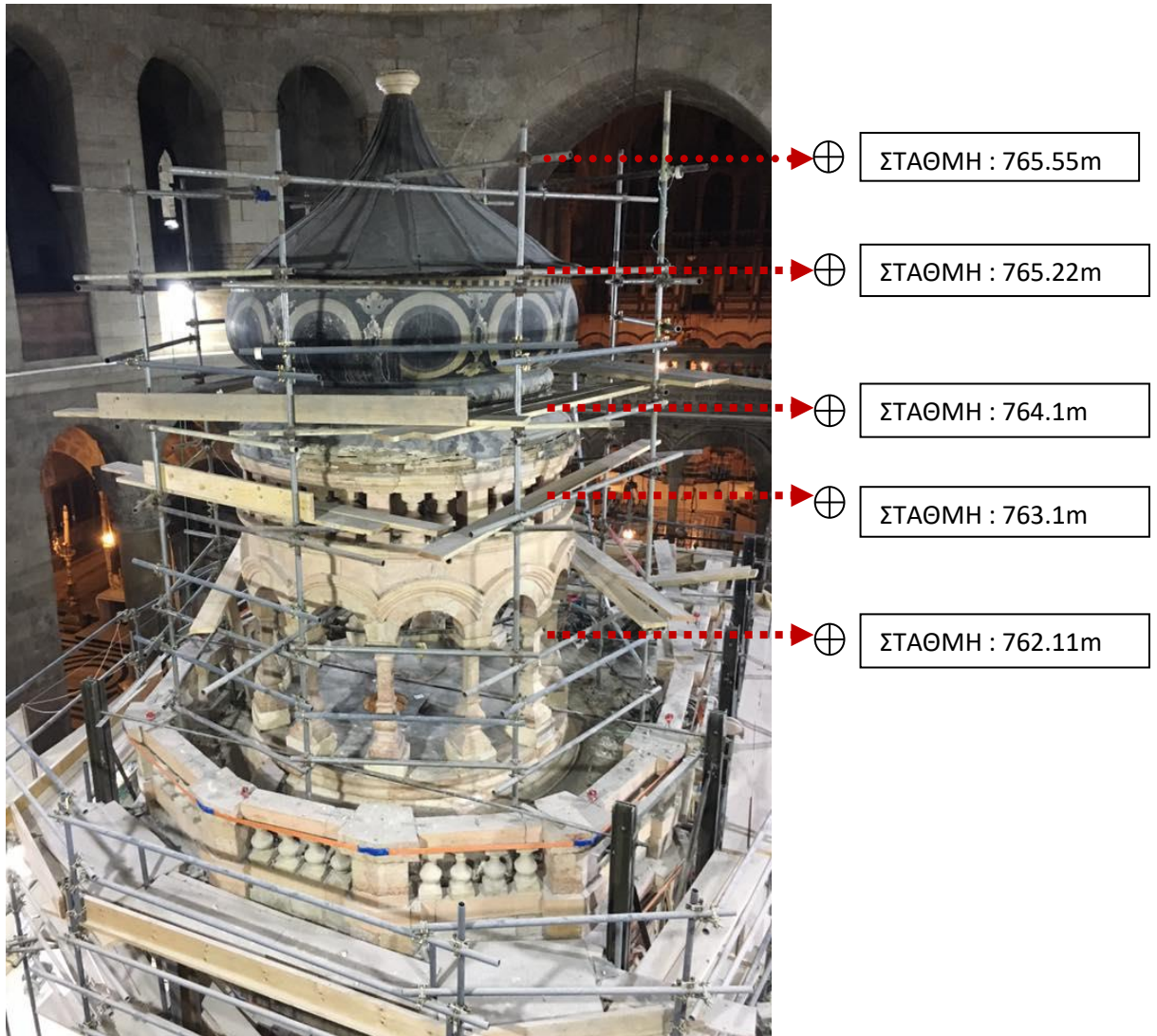
3.1.1. Πρόσβαση στον Τρούλο της ανωδομής

Οι μακροσκοπικές παρατηρήσεις του Τρούλου της ανωδομής του Ιερού Κουβουκλίου ήταν απαραίτητο να γίνουν όσο πιο κοντά στη στάθμη της βάσης του. Για το σκοπό αυτό υπήρχαν δύο εναλλακτικοί τρόποι πρόσβασης. Είτε δια μέσου των δύο εσωτερικών κλιμάκων οι οποίες παρέμειναν ανοιχτές έως τα μέσα Αυγούστου 2016 (στη συνέχεια έκλεισαν λόγω εργοταξιακών εργασιών μέσα στα κλιμακοστάσια), είτε δια μέσου ηλεκτρικού εξωτερικού ανελκυστήρα και στη συνέχεια ξύλινης κλίμακας. Ο δεύτερος τρόπος ήταν ο πιο εφικτός ιδιαιτέρως τις ώρες λειτουργίας του Ναού λόγω της μεγάλης επισκεψιμότητας.

Για την καλύτερη κατανόηση της δομής-κατασκευής του τρούλου και της πρόσβασης σε υψηλότερες στάθμες, στήθηκε ξύλινη σκαλωσιά με μεταλλικά στηρίγματα στο δώμα του Ιερού Κουβουκλίου με τη βοήθεια της ομάδας εργασιών του κ. Β. Ζαφείρη, εργολάβου του έργου, σε ύψος 2.5m από τη στάθμη του δώματος.



Εικόνα 3.2: Άποψη ξύλινου κριώματος (1ο στάδιο) με μεταλλικά στηρίγματα στην ανωδομή του Ιερού Κουβουκλίου.



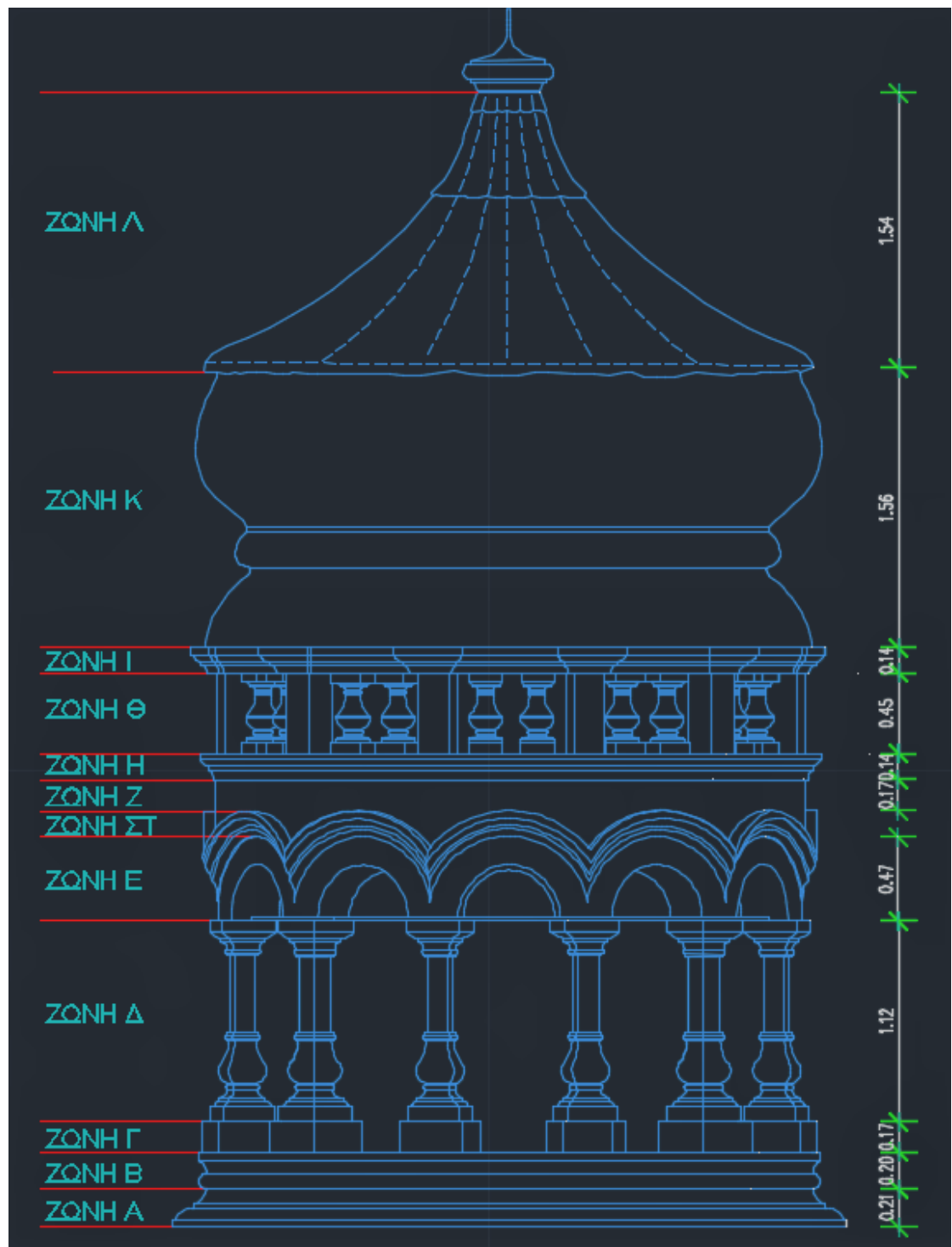
Εικόνα 3.3: Άποψη ξύλινων ικριώματων (2ο στάδιο) με μεταλλικά στηρίγματα σε 5 θέσεις καθ' ύψος (υπολογισμός σταθμών από γεωαναφερμένο σύστημα GEOMAGIC) στην ανωδομή του Ιερού Κουβουκλίου.

3.1.2. Περιγραφή από τη στάθμη του δώματος

Η 1^η οπτική παρατήρηση είναι εκείνη η οποία ξεχωρίζει τα υλικά. Δηλαδή:

- Από τη στάθμη του δώματος 760,32m (σε γεωαναφερμένο σύστημα, με μηδενική στάθμη αυτή της θάλασσας) έως τη στάθμη 763,55 m, ο τρούλος αποτελείται από λίθο slayeb ως υλικό δόμησης.
- Από τη στάθμη 763,55m έως τη στάθμη 765,10m διακρίνουμε μία επιχρισμένη επιφάνεια.
- Ενώ από τη στάθμη 765,10m έως την κορυφή του τρούλου 766,7m το υλικό επικάλυψης είναι φύλλο μολύβδου.

Η 2^η οπτική παρατήρηση είναι εκείνη η οποία κατατάσσει τα υλικά αυτά σε ζώνες διακριτές μεταξύ τους. Δηλαδή:



Εικόνα 3.4: Ζώνες Α έως Ι: λίθος slageb, Ζώνη Κ: ασβεστωτικό επίχρισμα 2 στρώσεων (εξωτερικά), Ζώνη Λ: φύλλο μολύβδου (σχέδιο υπό κλίμακα δεξ παραρτήμα).

ΖΩΝΕΣ	ΟΝΟΜΑΣΙΑ ΖΩΝΩΝ
A	ΕΥΘΥΝΤΗΡΙΑ
B	ΣΤΥΛΟΒΑΤΗΣ
Γ	ΒΑΣΕΙΣ ΠΕΣΣΩΝ-ΠΛΙΝΘΟΙ
Δ	ΣΩΜΑ ΠΕΣΣΩΝ
E	ΤΟΞΑ
ΣΤ	ΚΟΡΝΙΖΑ
Z	ΖΩΦΟΡΟΣ
H	ΤΑΙΝΙΑ
Θ	ΣΩΜΑ ΜΠΑΛΟΥΣΤΡΩΝ
I	ΓΕΙΣΟ
K	ΑΣΒΕΣΤΙΤΙΚΟ ΕΠΙΧΡΥΣΜΑ
Λ	ΦΥΛΛΟ ΜΟΛΥΒΔΟΥ

Πίνακας 3.1:Επιλογή ζωνών τρούλου.



Εικόνα 3.5: Ανάπτυγμα προβολών όψεων Τρούλου χωρίς τα όρια των λίθων.¹⁴

¹⁴ Σχέδιο μεταπτυχιακού φοιτητή Δημήτρη Γιαννακόπουλου

Η 3^η οπτική παρατήρηση είναι αυτή που διακρίνει τα όρια των μελών της κάθε ζώνης. Δηλαδή:



Εικόνα 3.6: Ανάπτυγμα προβολών όψεων Τρούλου με τα όρια των λίθων (σχέδιο υπό κλίμακα δεξ παραρτήμα).¹⁵

¹⁵ Σχέδιο μεταπτυχιακού φοιτητή Δημήτρη Γιαννακόπουλου

3.1.3. Περιγραφή από τη στάθμη της σκαλωσιάς (1^ο στάδιο)

Από τη στάθμη αυτή έγινε προσιτή η οπτική παρατήρηση του θόλου του τρούλου. Για μια πιο ξεκάθαρη εικόνα του τρόπου κατασκευής του θόλου ανοίχθηκε οπή μεγέθους 15cm×40cm στο ήδη κατεστραμμένο τμήμα του.



Εικόνα 3.7: (Δεξιά) Οπή από την οποία παρατηρήθηκε η δομή του Τρούλου εσωτερικά για να αποτιμηθεί ο τρόπος κατασκευής του. (Αριστερά) Μπαγδατί που αφαιρέθηκαν για να αποκαλυφθεί η δομή του Τρούλου εσωτερικά.

Αφαιρέθηκαν 3 ξύλα (μπαγδατί) με πολύ προσεχτικό τρόπο ώστε να μπορούν να επανατοποθετηθούν σωστά στην ίδια ακριβώς θέση όπου βρίσκονταν.



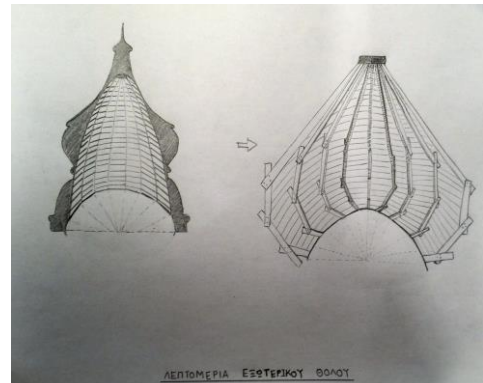
Εικόνα 3.8: Μπαγδατί που αφαιρέθηκαν για να αποκαλυφθεί η δομή του Τρούλου εσωτερικά.

Σε μεταγενέστερο στάδιο η οπή μεγάλωσε για να μπορέσουμε να εισχωρήσουμε μέσα στον Τρούλο ώστε να πραγματοποιηθούν ενέργειες που θα αναλυθούν παρακάτω.

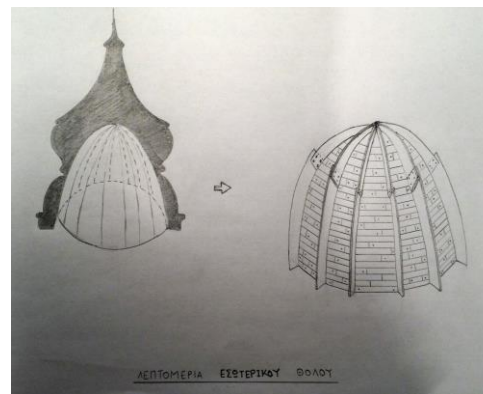


Εικόνα 3.9: Οπή διαστάσεων 150cm×40cm.

- I. Υπάρχουν 2 θόλοι. Ένας μικρός εσωτερικός και ένας μεγαλύτερος εξωτερικός. Και οι δύο θόλοι είναι κατασκευασμένοι από έναν ξύλινο σκελετό που σχηματίζει κώνο. Στα μέλη του ξύλινου σκελετού έχουν τοποθετηθεί ξύλινα πηχάκια (μπαγδατί¹⁶) διαστάσεων 40cm×2cm×[2,5-4,5cm] με τρόπο που ο ξύλινος σκελετός καλύπτεται καθ' ύψος και σχηματίζεται πολύγωνο. Τα μπαγδατί και των δύο θόλων είναι επικαλυμμένα, εξωτερικά, με ασβεστιτικό επίχρισμα τριών στρώσεων. Παρατηρήθηκε ακόμη ένα είδος υφάσματος το οποίο πιθανόν να χρησιμοποιήθηκε για λόγους καλύτερης συγκόλλησης του επιχρίσματος με το μπαγδατί.



Εικόνα 3.10: (Αριστερά) Σκελετός εξωτερικού θόλου. (Δεξιά) Σκίτσο κατά την διαδικασία των μακροσκοπικών παρατηρήσεων.



Εικόνα 3.11: Λεπτομέρεια σκελετού και μπαγδατί από τον εσωτερικό θόλο.

¹⁶ Ορισμός: τεχνική κατασκευής των τοίχων των παλιών σπιτιών από ξύλο. Οι τοίχοι αυτοί αποτελούνταν από ξύλινο σκελετό με οριζόντιες πήχεις ή καλάμια, που είτε σοβαντίζονται και από τις δύο μεριές με ασβεστοκονίαμα ή παραμένουν χωρίς επίχρισμα στην εξωτερική τους πλευρά, αλλά με επένδυση από οριζόντιες ξύλινες σανίδες. Ο τύπος της αρχιτεκτονικής "με μπαγδατί" ήταν ιδιαίτερα διαδεδομένος στη Λέσβο τον 19ο αιώνα.

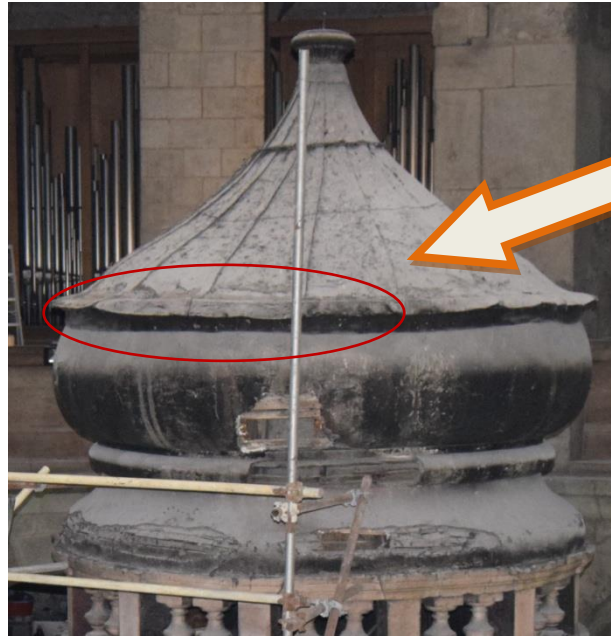


Εικόνα 3.12: Λεπτομέρεια σύνδεσης ακτινών του εσωτερικού θόλου.



Εικόνα 3.13: Λεπτομέρεια σύνδεσης ακτινών του εξωτερικού θόλου.

- II. Στο ασβεστιτικό επίχρισμα (σοβά) παρατηρήθηκε ινώδες υλικό, πιθανόν για μεγαλύτερη ελαστικότητα.
- III. Ο εξωτερικός σοβάς παρουσιάζει πολλά σημεία αστοχίας, τα οποία δημιουργήθηκαν από τα όμβρια ύδατα, όταν η σπή στη ροτόντα του Ναού ήταν ακόμη ανοιχτή. Τα σημεία βλάβης του σοβά είναι εντονότερα στα χαμηλότερα στρώματα του θόλου στα ανατολικά και δυτικά. Το γεγονός αυτό οφείλεται στη γεωμετρία του φύλλου μολύβδου, το οποίο παρουσιάζει ελαφριά κλίση η οποία λειτουργούσε σαν ρήση για το νερό μεταφέροντας το στα σημεία που σήμερα εμφανίζεται έντονη αστοχία.



Είσοδος όμβριων υδάτων από την οπή της ροτόντας-καταστροφή ρήσεων μολύβδου-ρηγματώσεις επιχρίσματος

Εικόνα 3.14: Κλίση στο φύλλο μολύβδου και κατεστραμμένο επίχρισμα ως αποτέλεσμα αυτού.



Εικόνα 3.15: Κλίση στο φύλλο μολύβδου.

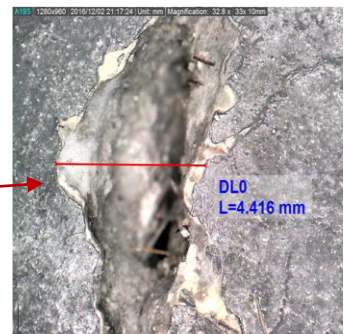


Εικόνα 3.16: Σημείο αποκόλλησης επιχρίσματος από τα όμβρια ύδατα - Φανερώνεται το μπαγδατί εσωτερικά.



Εικόνα 3.17: Κατεστραμμένο επίχρισμα από τα όμβρια ύδατα - Φανερώνεται το μαγαδατί εσωτερικά.

- IV. Σε όλη την επιφάνεια του σοβά αλλά κυρίως στην χαμηλότερη ζώνη εμφανίζονται έντονες ρηγματώσεις.



Εικόνα 3.18: Επιφανειακές ρηγματώσεις μέσου μήκους 4,416 mm.



Εικόνα 3.19: Επιφανειακές ρηγματώσεις και αποκόλληση του επιχρίσματος.



Εικόνα 3.20: Επιφανειακές ρηγματώσεις.

- V. Κομμάτια ξύλου έχουν αποκολληθεί από τις θέσεις τους.



Εικόνα 3.21: Απώλεια ξύλων.



Εικόνα 3.22: Απώλεια ξύλων.

- VI. Ο εσωτερικός θόλος βρίσκεται σε πολύ καλή κατάσταση, καθώς και ο σοβάς του, από πλευράς ρηγματώσεων/αποκόλλησης από το μπαγδατί, παρόλο που έχει επικαλυφθεί με μαύρη πάτινα ως αποτέλεσμα της καύσης των κεριών και της σκόνης.



Εικόνα 3.23: Μαύρη πάτινα.

3.2. Μη καταστρεπτικές τεχνικές (NDT)

Κατά την επί τόπου επίσκεψη στον Ιερό Ναό της Αναστάσεως, από την ομάδα του μεταπτυχιακού «Προστασία των Μνημείων» με την επιστημονικά υπεύθυνη καθ. Α. Μοροπούλου, πραγματοποιήθηκε ο μη καταστρεπτικός έλεγχος των εξεταζόμενων περιοχών του τρούλου της ανωδομής του Ιερού Κουβουκλίου προκειμένου να χαρτογραφηθούν τα υλικά και οι βασικοί τύποι φθοράς τους αλλά και να ληφθούν χρήσιμα στοιχεία αναφορικά με τα μηχανικά χαρακτηριστικά τους. Ο μη καταστρεπτικός έλεγχος περιλάμβανε την εφαρμογή των ακόλουθων τεχνικών:

3.2.1. Θερμογραφία υπέρυθρου (Infra-Red Thermography)

Η θερμογραφία υπέρυθρου είναι μία μη καταστρεπτική τεχνική η οποία καταγράφει την υπέρυθρη ακτινοβολία που εκπέμπεται από τα υλικά. Με την τεχνική της υπέρυθρης θερμογραφίας λαμβάνουμε πληροφορίες σχετικά με τη συμβατότητα, την υγρασία, τη φθορά και την ύπαρξη ασυνεχειών στα υλικά. Το θερμογραφικό σύστημα που χρησιμοποιήθηκε ήταν το FLIR_Therma CAMTM της εταιρείας FLIR SYSTEMS. Η κάμερα μετατρέπει την υπέρυθρη ακτινοβολία σε ηλεκτρικό σήμα. Ο επεξεργαστής λαμβάνει αυτό το σήμα, το αποθηκεύει στη μνήμη, το επεξεργάζεται βάση ενός ειδικού λογισμικού και το εμφανίζει στην οθόνη υπό μορφή θερμογραφήματος. Το θερμογραφικό σύστημα που χρησιμοποιείται μπορεί να μετρήσει σε ανοιχτούς χώρους στην περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος από 7.5-13μm. Έχει τη δυνατότητα να απεικονίσει θερμοκρασίες αντικειμένων από -20°C έως + 120°C. Η τελική επεξεργασία εικόνων γίνεται με τη βοήθεια του Η/Υ, μέσω του λογισμικού FLIR TOOLS.

Με τη χρήση της θερμοκάμερας λήφθηκαν οι εξής φωτογραφίες στις ακόλουθες συνθήκες και από τις ακόλουθες αποστάσεις:

T=28°C, RH=53.7%, Td=17.6

Αύξων αριθμός φωτογραφιών	Θέση	Απόσταση
6075	Τρούλος ανατολική όψη	2m
6077	Οπή από παρεκκλήσι Αγγέλου από Β. όψη	2m
6079	N.A. όψη κολωνάκι	2m
6081	Μπαγδατί ανατολική με βόρεια όψη	3m
6083	Μπαγδατί ανατολική προς βόρεια όψη	3m

Πίνακας 3.2: Θέσεις λήψεων IRT φωτογραφιών.

T=28°C, RH=57.1%, Td=18.6

Αύξων αριθμός φωτογραφιών	Θέση	Απόσταση
6085	Εσωτερικό τρούλου δυτική όψη	1m
6087	Εσωτερικό τρούλου νότια όψη	1m
6089	Εσωτερικό τρούλου ανατολική όψη	1m
6091	Εσωτερικό τρούλου βόρεια όψη	1m

Πίνακας 3.3: Θέσεις λήψεων IRT φωτογραφιών.

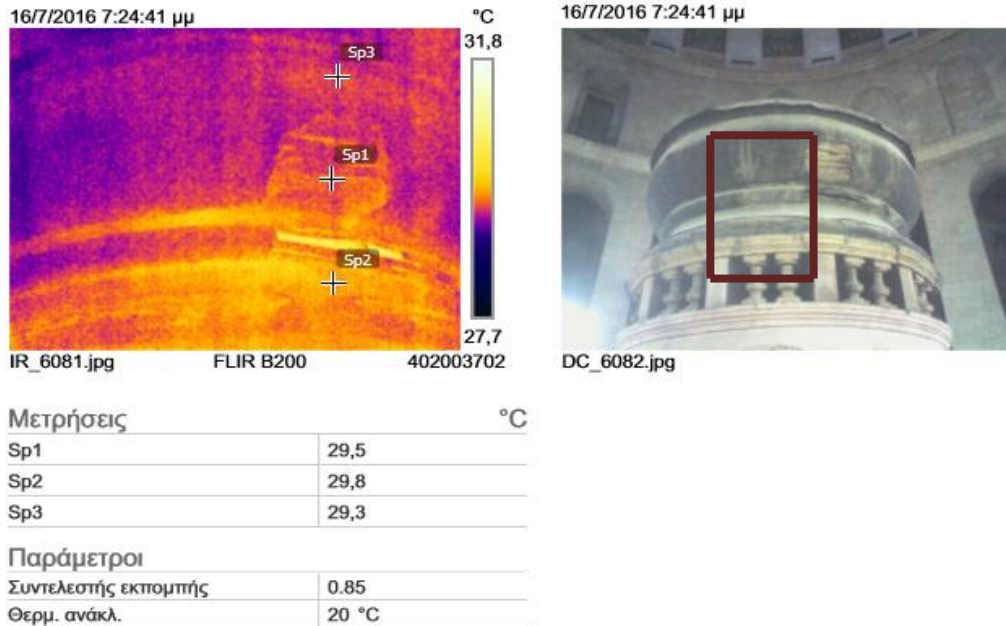
T=28°C, RH=52.7%, Td=17.3

Αύξων αριθμός φωτογραφιών	Θέση	Απόσταση
6163	B.A. Όψη τρούλου	Γαλαρία Λατίνων
6165	B.A. Όψη τρούλου	Γαλαρία Λατίνων
6167	B.A. Δώμα	Γαλαρία Λατίνων
6169	Δώμα και κάτω μέρος	Γαλαρία Λατίνων
6171	Βορειότερα της 6163	Γαλαρία Λατίνων
6173	Πάνω μέρος του τρούλου	Γαλαρία Λατίνων
6175	B.A. Δώμα	Γαλαρία Λατίνων
6179	Δώμα βόρεια	Γαλαρία Λατίνων
6181	Τρούλος βόρεια	Γαλαρία Λατίνων
6183	Δώμα βόρεια	Γαλαρία Λατίνων
6185	Τρούλος βόρεια	Γαλαρία Λατίνων
6187	Δώμα βόρεια	Γαλαρία Λατίνων
6189	B.Δ. Κάτω μέρος τρούλου	Γαλαρία Λατίνων
6191	B.Δ. Δώμα	Γαλαρία Λατίνων
6193	B.Δ. Μπαγδατί	Γαλαρία Λατίνων
6195	B.Δ. Μπαγδατί	Γαλαρία Λατίνων
6197	B.Δ. Πάνω μέρος τρούλου	Γαλαρία Λατίνων
6199	B.Δ. Κάτω μέρος τρούλου	Γαλαρία Λατίνων
6201	Τρούλος πιο B.Δ.	Γαλαρία Λατίνων
6203	Φάτνωμα N5 Κόπτες	Γαλαρία Λατίνων
6205	Κάτω μέρος τρούλου	Γαλαρία Λατίνων
6207	Τρούλος	Γαλαρία Λατίνων
6209	Κάτω μέρος τρούλου δυτικά	Γαλαρία Λατίνων
6211	Μέση τρούλου δυτικά	Γαλαρία Λατίνων
6213	N.Δ. Τρούλος	Γαλαρία Λατίνων
6215	N.Δ. Κάτω μέρος τρούλου	Γαλαρία Λατίνων
6217	Σκαλωσιές	Γαλαρία Λατίνων
6219	Σκαλωσιές	Γαλαρία Λατίνων

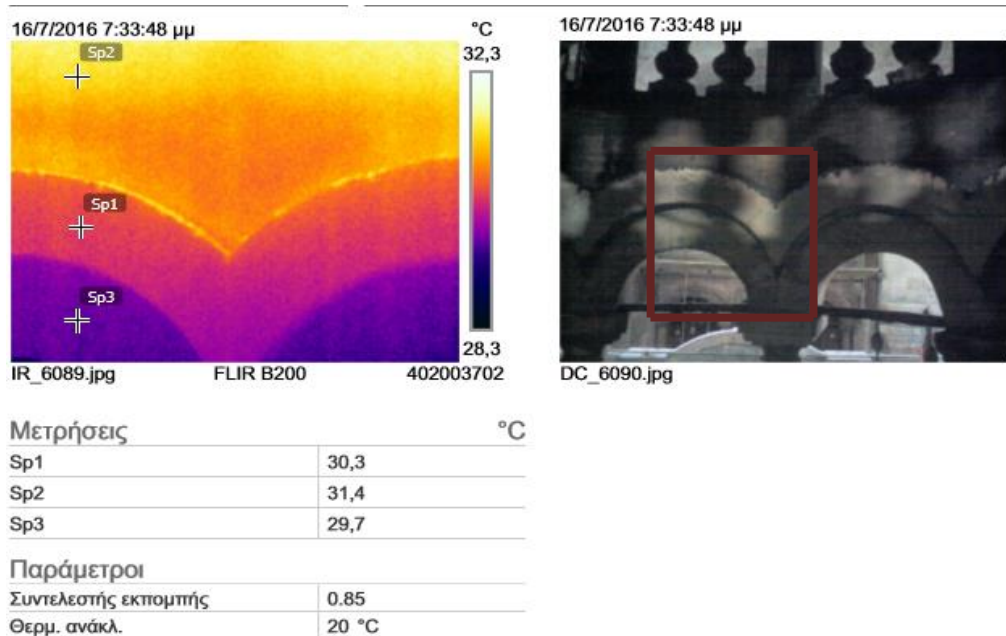
Πίνακας 3.4: Θέσεις λήψεων IRT φωτογραφιών.

Οι μετρήσεις με τη μέθοδο της θερμογραφίας υπερύθρου πραγματοποιήθηκαν για τη συλλογή δεδομένων σε σχέση με τη φθορά που παρουσιάζουν τα δομικά υλικά, τον έλεγχο της φυσικοχημικής τους συμβατότητας και τον εντοπισμό ελαττωματικών περιοχών. Οι θερμικές διαφοροποιήσεις των υπό εξέταση υλικών καταγράφονται και αποδίδονται με εικόνες όπου διαφορετικά χρώματα αντιστοιχούν σε διαφορετικές θερμοκρασίες. Στις παρακάτω αντιπροσωπευτικές εικόνες, που επιλέχθηκαν από το σύνολο των λήψεων, παρουσιάζονται συνοπτικά τα κυριότερα

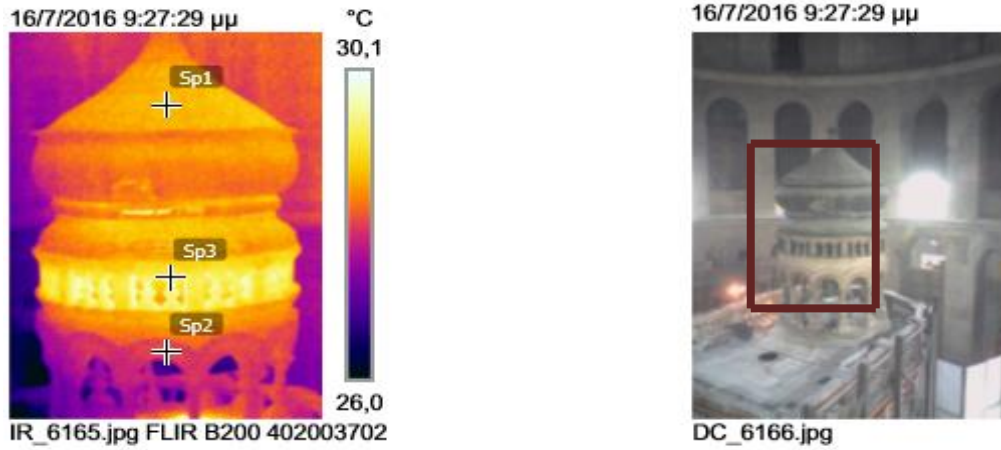
αποτελέσματα του θερμογραφικού ελέγχου του Τρούλου της ανωδομής του Ιερού Κουβουκλίου:



Εικόνα 3.24: Λήψη IR_6081. Μπαγδατί βόρειο-ανατολική όψη.



Εικόνα 3.25: Λήψη IR_6089. Εσωτερικό Τρούλου- ανατολική όψη.



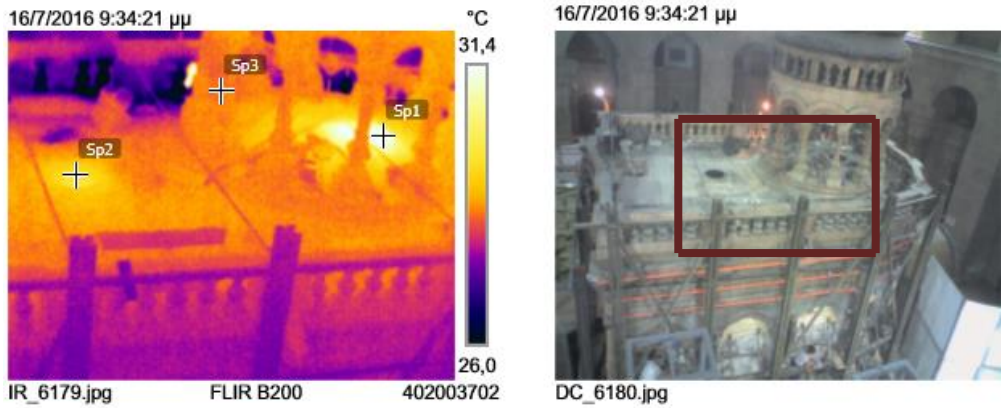
Μετρήσεις °C

Sp1	28,8
Sp2	28,3
Sp3	29,2

Παράμετροι

Συντελεστής εκπομπής	0.85
Θερμ. ανάκλ.	20 °C

Εικόνα 3.26: Λήψη IR_6165. Βόρειο-ανατολική όψη Τρούλου.



Μετρήσεις °C

Sp1	32,1
Sp2	29,4
Sp3	28,5

Παράμετροι

Συντελεστής εκπομπής	0.85
Θερμ. ανάκλ.	20 °C

Εικόνα 3.27: Λήψη IR_6179. Βόρεια όψη δώματος.

Μικρή θερμοκρασιακή διαφορά παρατηρείται στο τμήμα του Τρούλου (Ζώνη Κ) στο οποίο υπάρχει αποκόλληση του ασβεστιτικού κονιάματος συγκριτικά με τις περιοχές που το κονίαμα είναι ακόμη σε συνάφεια με το υπόστρωμα (Εικόνα 3.24). Μέρος του Τρούλου της ανωδομής του Ιερού Κουβουκλίου, από τη Ζώνη Α έως τη Ι, κατά το θερμογραφικό έλεγχο δε φαίνεται να παρουσιάζει κάποια ελαττωματική περιοχή και δείχνει να βρίσκεται σε ικανοποιητική κατάσταση διατήρησης. Παρόλα αυτά, είναι εμφανής η αισθητική υποβάθμιση που έχει λάβει χώρα λόγω της συσσώρευσης μαύρων επικαθήσεων (εικόνα 3.25). Η βάση του τρούλου (δηλαδή οι Ζώνες Α έως Ι, όπως έχουν αναλυθεί παραπάνω) παρουσιάζει σχετικά μικρού εύρους θερμοκρασιακές κατανομές, γεγονός αναμενόμενο αφού αποτελείται κατά αποκλειστικότητα από το δολομιτικό ασβεστόλιθο *Slayeb* (Εικόνα 3.26). Η κυκλική βάση (δάπεδο) του τρούλου παρουσιάζει πιο υψηλές θερμοκρασίες, γεγονός που οφείλεται στη θερμότητα που παράγεται από τα καντήλια, που προέρχονται από το Αρκοσόλιο, και καταλήγουν στην οπή του δαπέδου κάτω από τον τρούλο. Οι περιοχές του δώματος περιμετρικά των οπών των δύο τρούλων παρουσιάζουν τουλάχιστον κατά 1°C υψηλότερη θερμοκρασία από τις περιοχές των άκρων του δώματος (Εικόνα 3.27).

Ακόμη πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις υγρασίας, και στη συνέχεια μετρήσεις με τη μέθοδο της θερμογραφίας υπερύθρου στο εσωτερικό των δύο θόλων του Τρούλου.

Αρχικά χρησιμοποιώντας τον μετρητή υγρασίας ξύλου METRICA 60274, όπως φαίνεται στις εικόνες 3.28-3.29, υπολογίστηκε η υγρασία μέσα και έξω από τους θόλους αλλά και η υγρασία των ξύλων από τα οποία αποτελούνται (πίνακας 3.5).

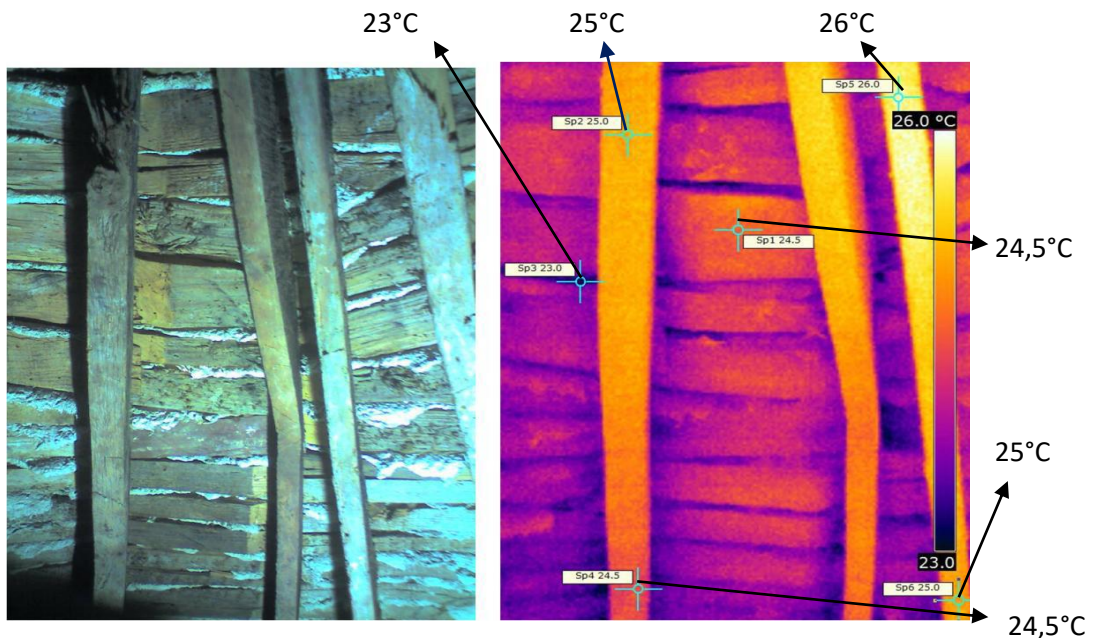
Τοποθεσία μέτρησης υγρασίας	Ποσοστό υγρασίας επί τοις %
RH% μέσα στο θόλο	45
RH% έξω από το θόλο	57
RH% ξύλινου φέροντα οργανισμού και ξύλων μπαγδατί	7-11

Πίνακας 3.5: Μέτρηση υγρασίας στον Τρούλο.



Εικόνες 3.28-3.29: Μέτρηση της υγρασίας των ξύλων των θόλων του Τρούλου με τον μετρητή υγρασίας METRICA 60274.

Η έρευνα με την μέθοδο IRT έδειξε ότι ο γύψος παρουσιάζει χαμηλότερες θερμοκρασίες σε σχέση με τα ξύλινα στοιχεία, ενώ τα ξύλινα στοιχεία του φέροντα οργανισμού των θόλων παρουσιάζουν υψηλότερες θερμοκρασίες από τα πηγάκια μπαγδατί. Το συνολικό εύρος κατανομής της θερμοκρασίας είναι 3°C το οποίο είναι χαμηλό αν αναλογιστούμε τα διαφορετικά υλικά που υπάρχουν (Εικόνες 3.30-3.31).

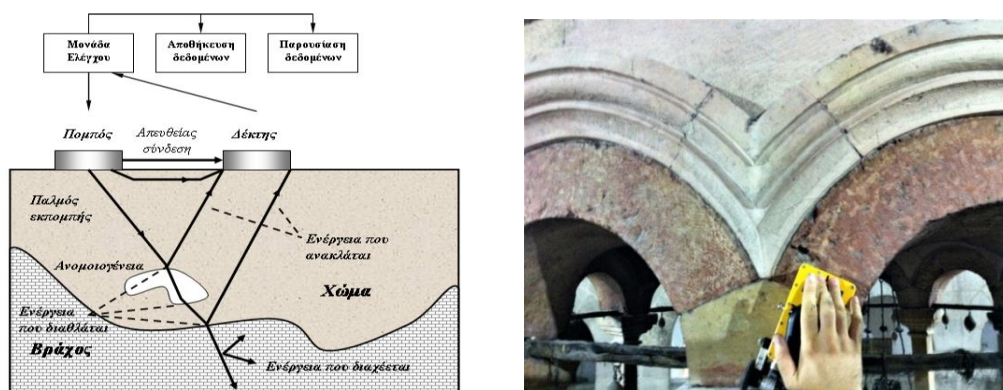


Εικόνες 3.30-3.31: Τεχνική IRT στο εσωτερικό των θόλων του Τρούλου.

3.2.2. Διασκόπηση του Τρούλου της ανωδομής του Ιερού Κουβουκλίου με τη χρήση Γεωραντάρ (Ground Penetrating Radar)

Το γεωραντάρ είναι μια μη-καταστρεπτική ηλεκτρομαγνητική τεχνική που μπορεί να εντοπίσει αντικείμενα ή διεπιφάνειες μέσα σε μια κατασκευή. Χρησιμοποιεί διακριτούς ηλεκτρομαγνητικούς παλμούς με κεντρική συχνότητα 10 MHz - 2,5 GHz για την αποκάλυψη της θέσης και των διαστάσεων στρωμάτων ή αντικειμένων/ασυνεχειών μέσα σε δομές τα οποία έχουν διαφορετικές ηλεκτρικές ιδιότητες μεταξύ τους. Όταν ο ηλεκτρομαγνητικός παλμός συναντήσει μια διεπιφάνεια δύο υλικών με διαφορετικές ηλεκτρικές ιδιότητες, ένα μέρος της ενέργειας του παλμού ανακλάται πίσω, ενώ ο υπόλοιπος παλμός διαχέεται προς βαθύτερα επίπεδα έως ότου αποσβεστεί. Ο ανακλώμενος παλμός συλλέγεται στην επιφάνεια σάρωσης από την κεραία ανίχνευσης και εμφανίζεται ως κυματομορφή έντασης ενέργειας ως προς τον χρόνο.

Το σύστημα γεωραντάρ που χρησιμοποιήθηκε για την εξέταση του Τρούλου της ανωδομής του Ιερού Κουβουκλίου ήταν το σύστημα ProEx της MALÅ Geoscience με χρήση κεραίας συχνότητας 2.3GHz antennae. Το λογισμικό Groundvision 2 της MALÅ Geoscience χρησιμοποιήθηκε για πρόσκτηση δεδομένων. Στις παρακάτω εικόνες εμφανίζεται η διάταξη του γεωραντάρ και η επί τόπου χρήση του.



Εικόνα 3.32-3.33.: Αριστερή εικόνα: πειραματική διάταξη, Δεξιά εικόνα: επί τόπου μέτρηση των τόνων του Τρούλου.

Στον Τρούλο της ανωδομής πραγματοποιήθηκαν σαρώσεις με γεωραντάρ, τόσο στις εξωτερικές του επιφάνειες όσο και στις εσωτερικές με σκοπό την αποκάλυψη του τρόπου κατασκευής του. Η ύπαρξη περίτεχνα διακοσμημένων αρχιτεκτονικών επιφανειών, τόσο στις εξωτερικές όσο και στις εσωτερικές επιφάνειες του Τρούλου καθιστούσαν δύσκολη τη διαδικασία των σαρώσεων ιδιαίτερως στην περιοχή των πεσσών. Η χρήση γεωραντάρ είχε ως κύριο σκοπό την αποκάλυψη της εσωτερικής δομής του Τρούλου, δηλαδή τον τρόπο σύνδεσης των κατά μήκος ζωνών μεταξύ τους

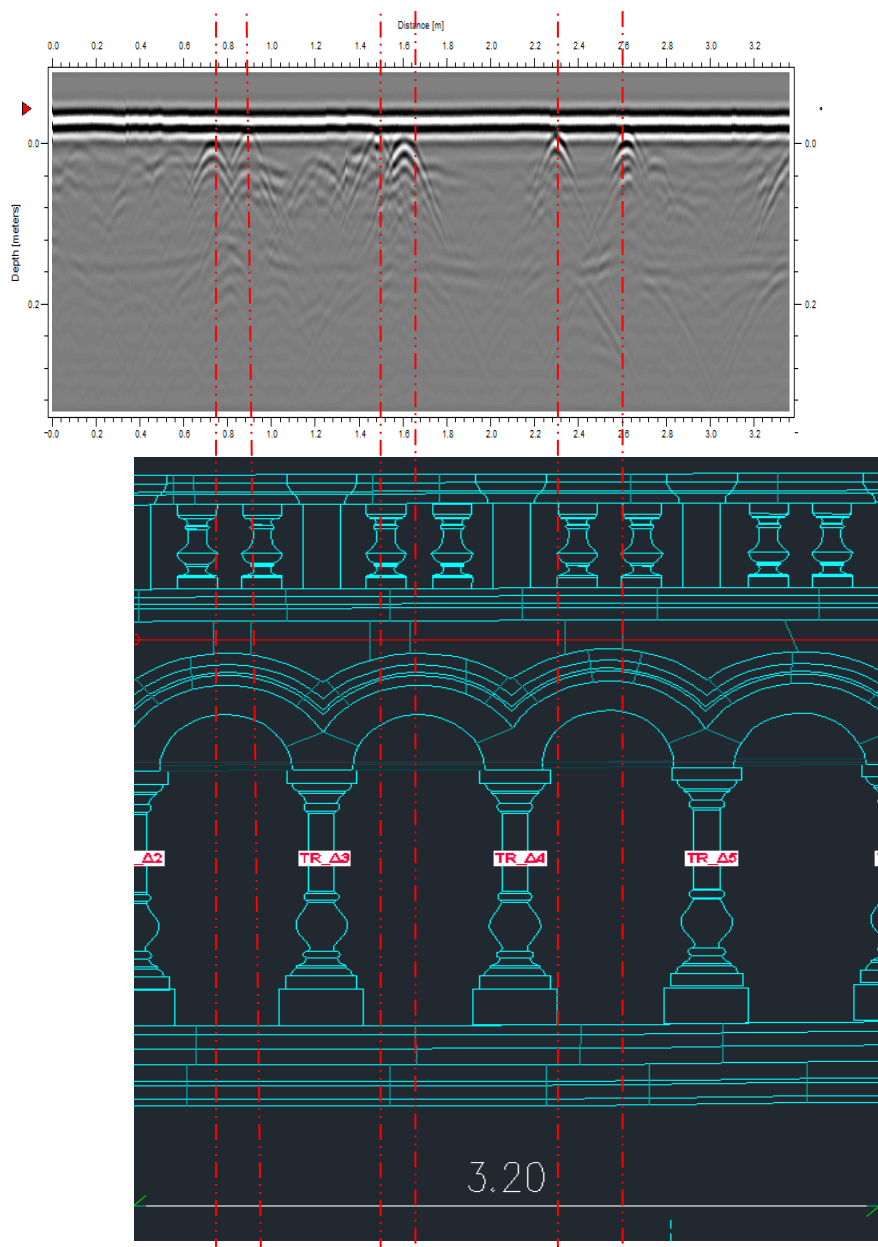
(γόμφοι, μολυβδοχόηση), καθώς και την αποτίμηση της κατάστασης διατήρησής και συνοχής τους.

Στις Εικόνες 3.34 – 3.43 παρουσιάζονται οι σχηματικές θέσεις των διασκοπήσεων με γεωραντάρ στις μελετηθείσες περιοχές του Τρούλου.

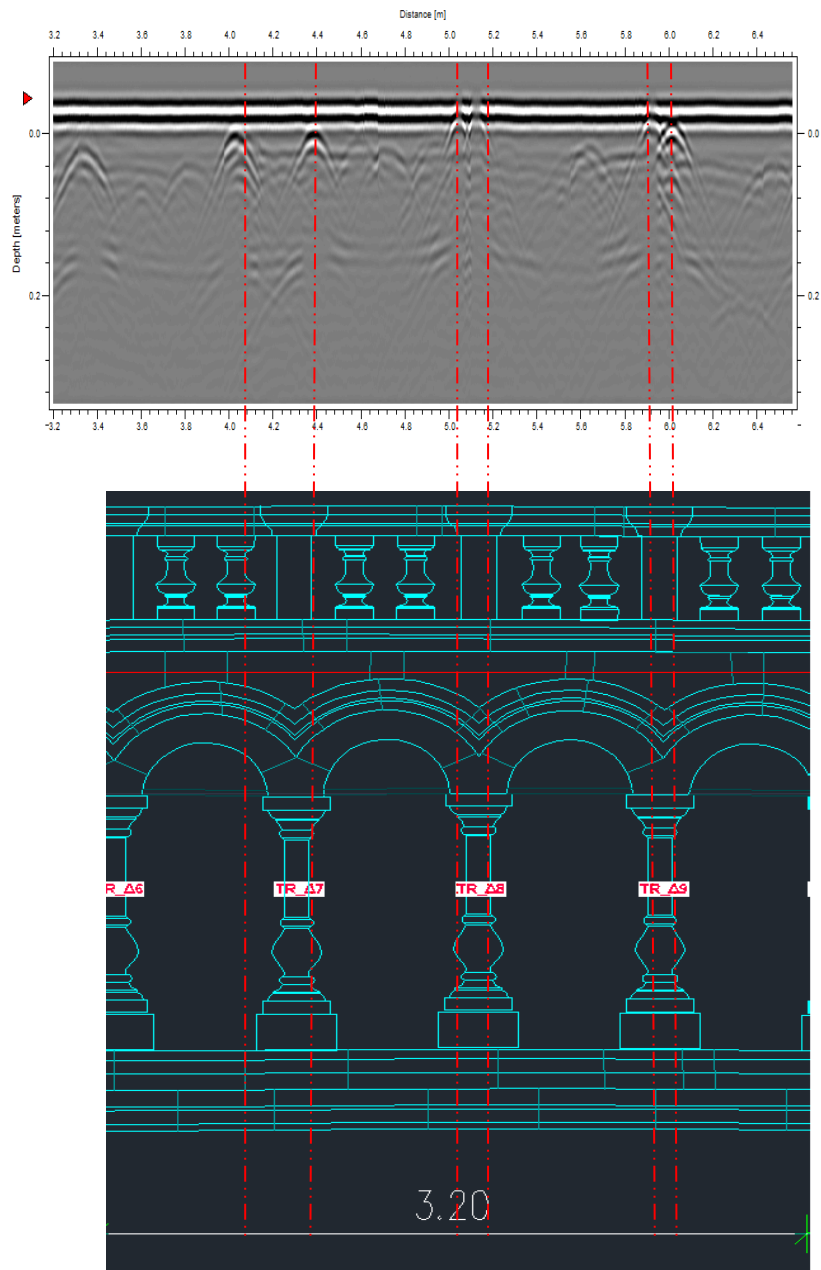
Ως κάτοψη παράθεσης των διασκοπήσεων με γεωραντάρ χρησιμοποιήθηκε το σχέδιο Autocad που φαίνεται στις παρακάτω εικόνες το οποίο προέκυψε με τομή από το νέφος σημείων στο πρόγραμμα Geomagic. Η τομή αυτή αντιστοιχεί στη στάθμη 762,95m (γεωαναφερμένο σύστημα). Η κάτοψη αυτή χρησιμοποιήθηκε για την ανάλυση των γεωγραφημάτων. Αυτό που αποκαλύφθηκε από τα γεωγραφήματα ήταν μόνον οι αρμοί των διάφορων λίθων, που απαρτίζουν τα τόξα, οι οποίοι είναι **μολυβδοχοημένοι**.

Το ίδιο ακριβώς φαινόμενο παρατηρήθηκε και με τις σαρώσεις του στεφανιού, εσωτερικά και εξωτερικά, του Τρούλου (εικόνες 3.34 έως 3.37).

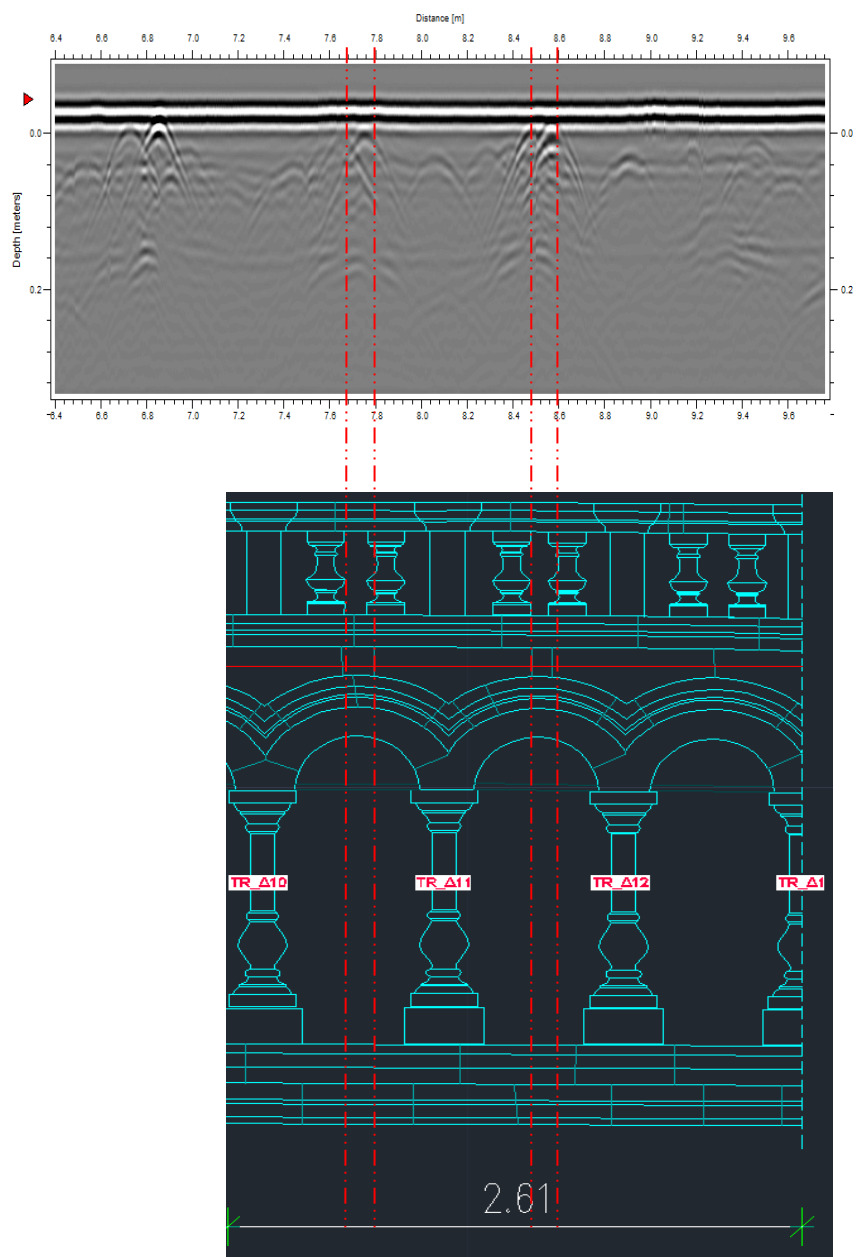
Τέλος δεν παρατηρήθηκε καμία απώλεια συνοχής των λίθων και καμία διεπιφάνεια διαφορετικού υλικού μέσα στη μάζα τους. Συμπερασματικά ο λίθος Slageb από τον οποίο είναι κατασκευασμένος ο Τρούλος της ανωδομής (ζώνες Α έως Ι) βρίσκεται σε εξαιρετική κατάσταση και δε χρήζει στατικής επέμβασης.



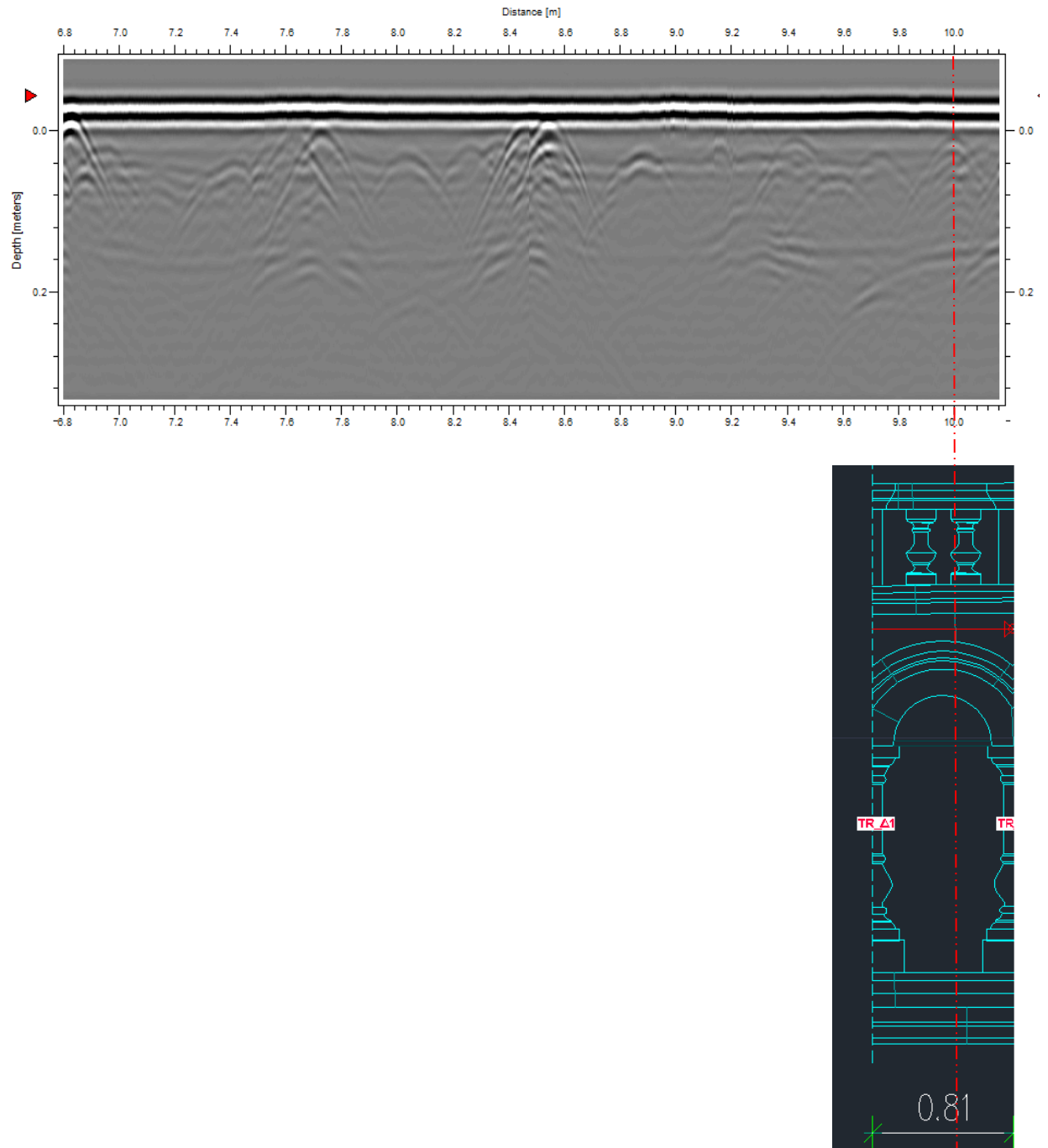
Εικόνα 3.34: Σάρωση 184- εξωτερική παρειά-σταυρόνημα έναρξης στο μέσον του 2ου πεσσού σε ύψος 12cm.



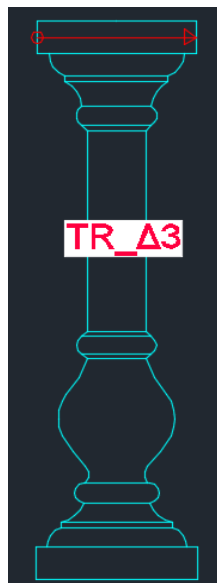
Εικόνα 3.35: Συνέχεια σάρωσης 184.



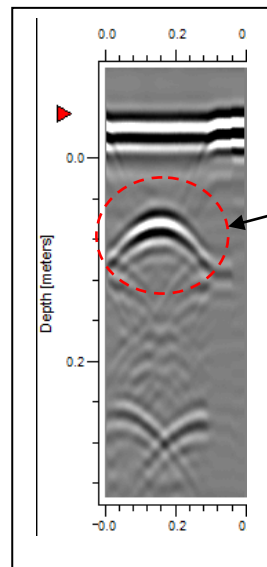
Εικόνα 3.36: Συνέχεια σάρωσης 184.



Εικόνα 3.37: Συνέχεια σάρωσης 184.

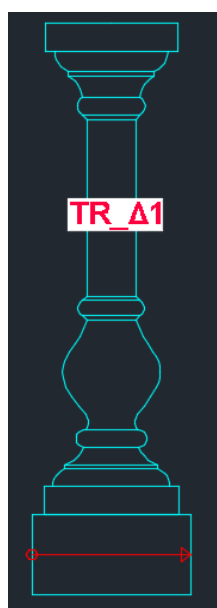


Εικόνα 3.38

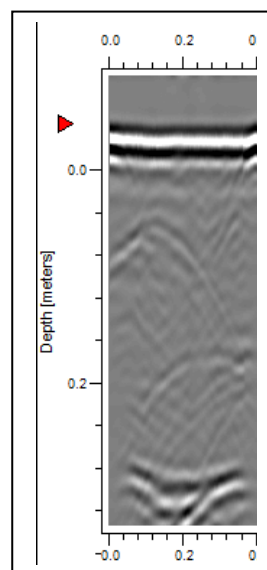


Σάρωση 171, πεσσός 3^{ος}:

Από το γεωγράφημα παρατηρούμε την ύπαρξη **μεταλλικού γόμφου**, σε βάθος 0.06m και μήκος 0.02m, μέσα στη μάζα του πεσσού που πιθανόν να υπάρχει εκεί για να συνδέει τις ζώνες Δ και Ε μεταξύ τους.

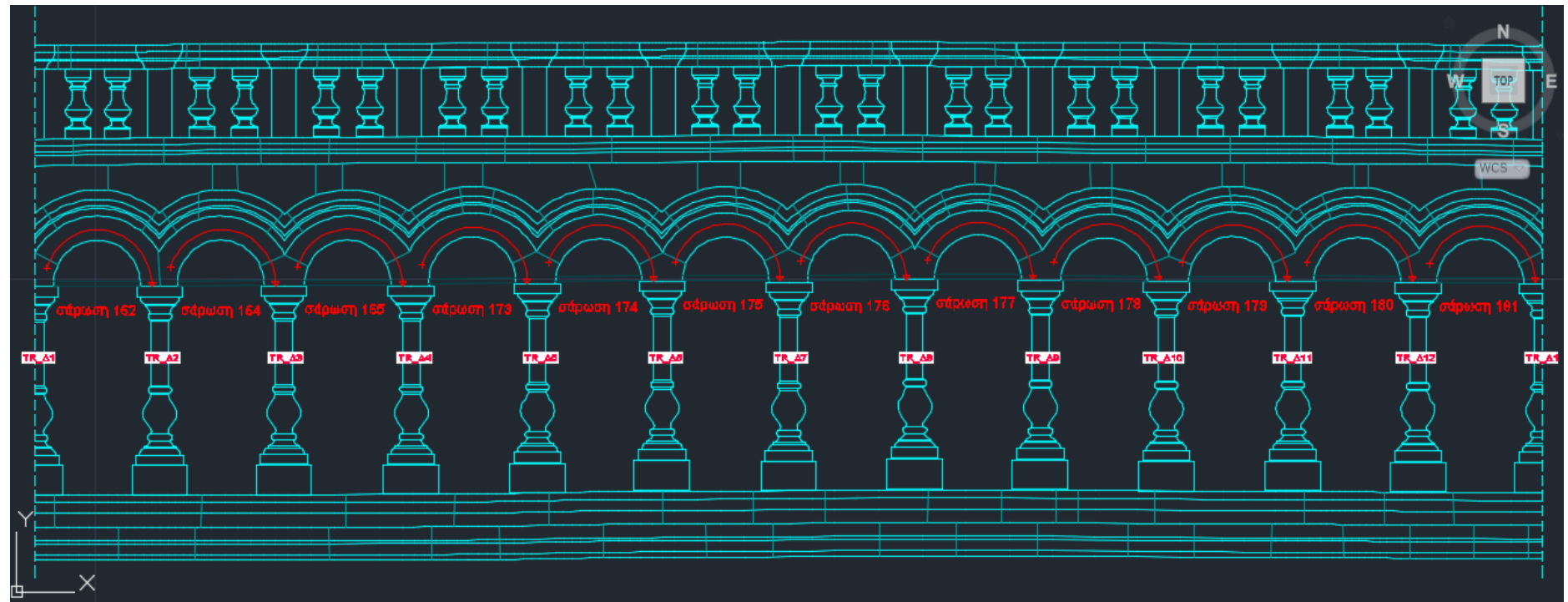


Εικόνα 3.39

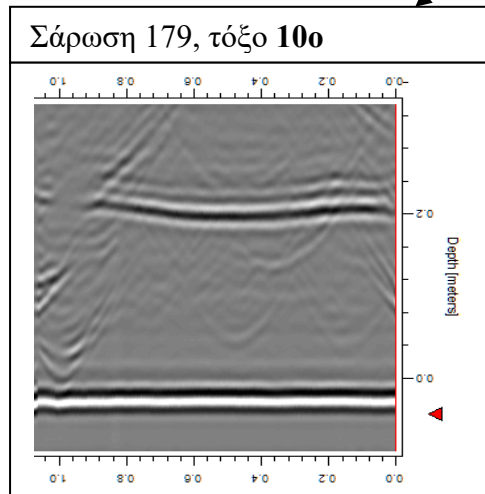
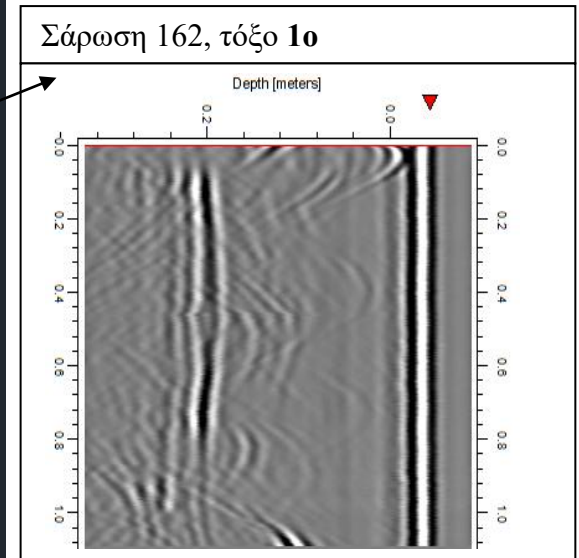
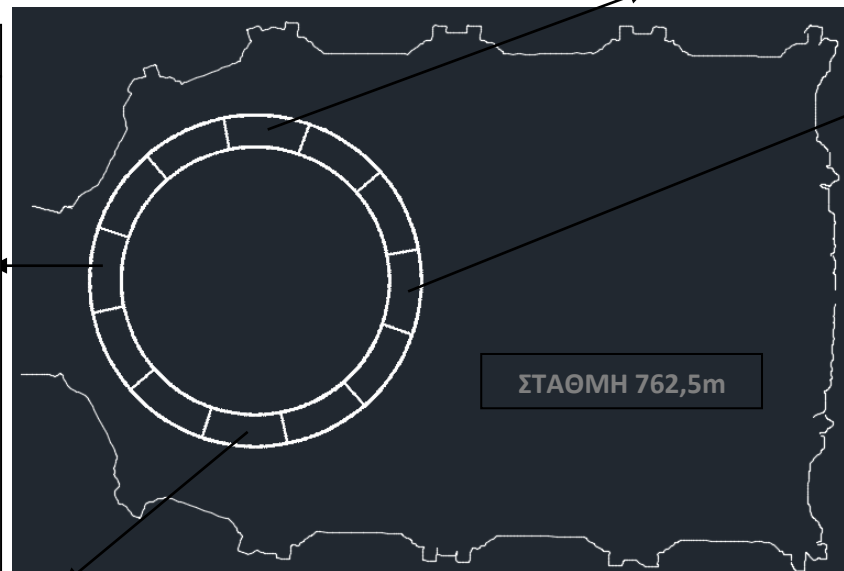
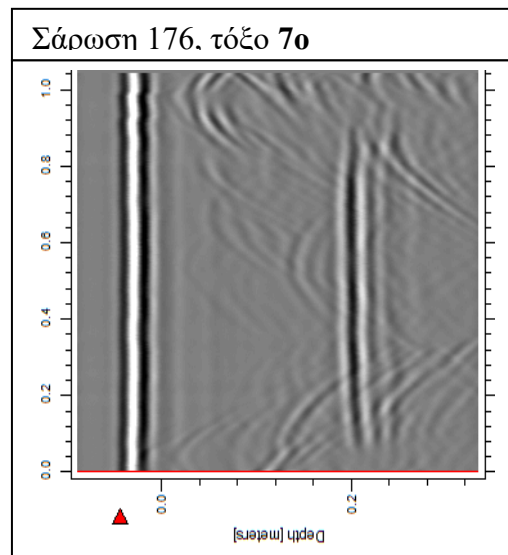
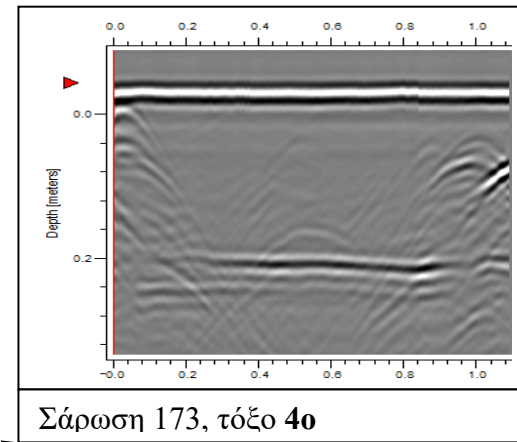


Σάρωση 186, βάση πεσσού 1:

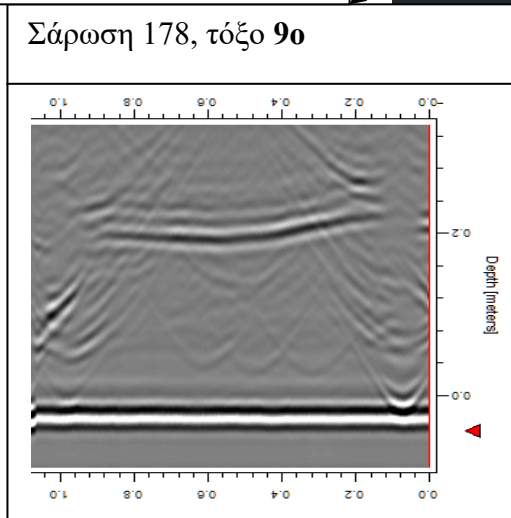
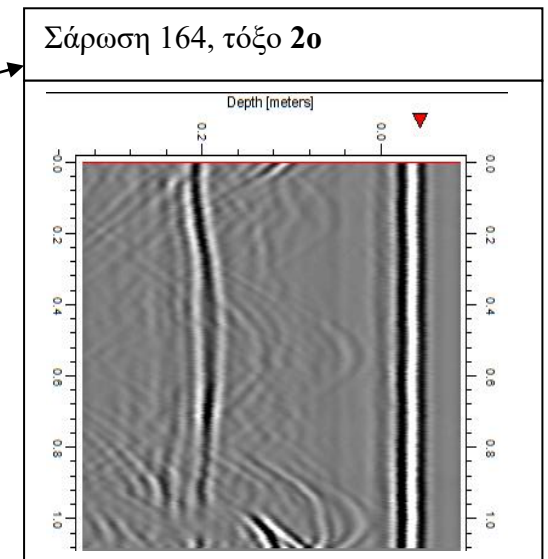
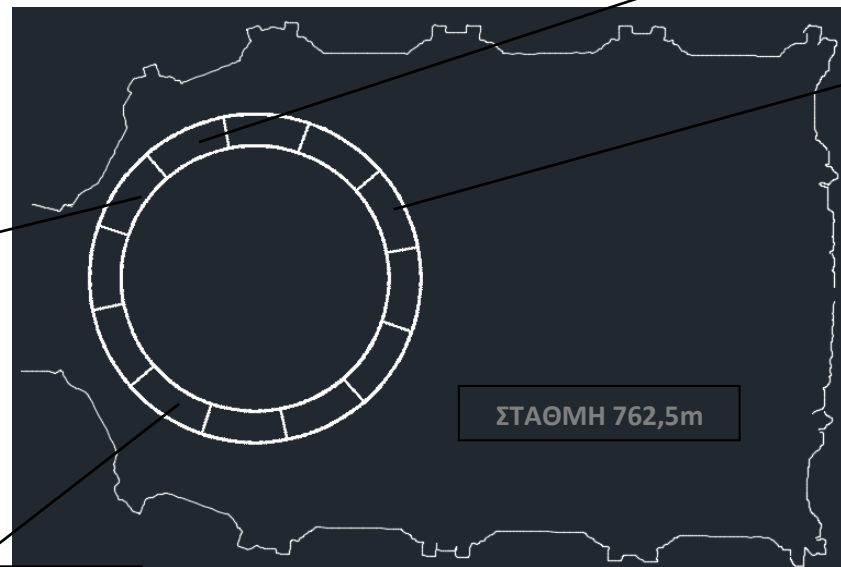
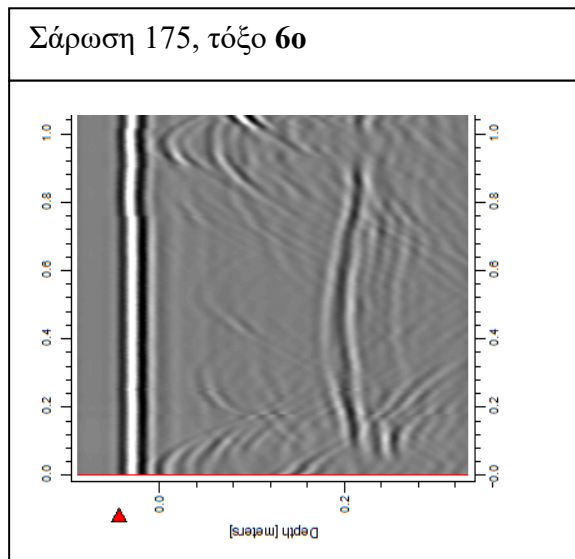
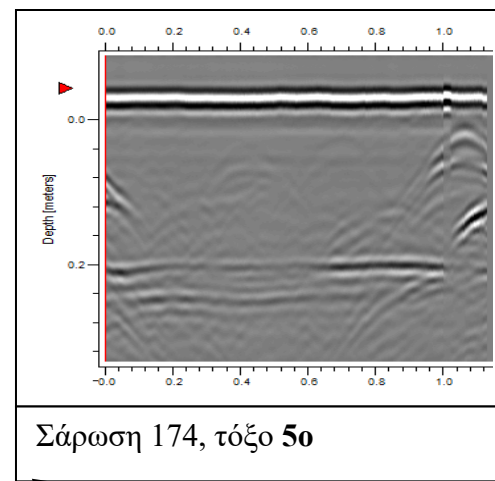
Δεν παρατηρήθηκε μεταλλικός γόμφος ούτε κάποια ασυνέχεια/διεπιφάνεια.



Εικόνα 3.40: Σαρώσεις τόξων 1-12.

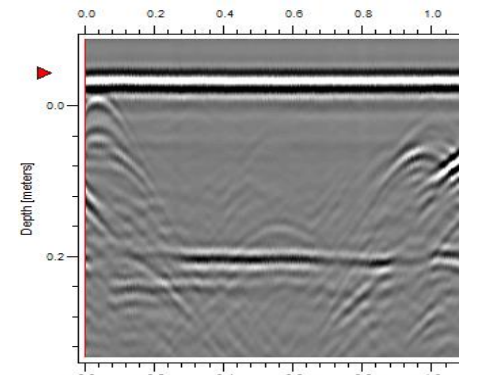


Εικόνα 3.41: ΣΑΡΩΣΕΙΣ ΤΟΞΩΝ: 1, 4, 7, 10

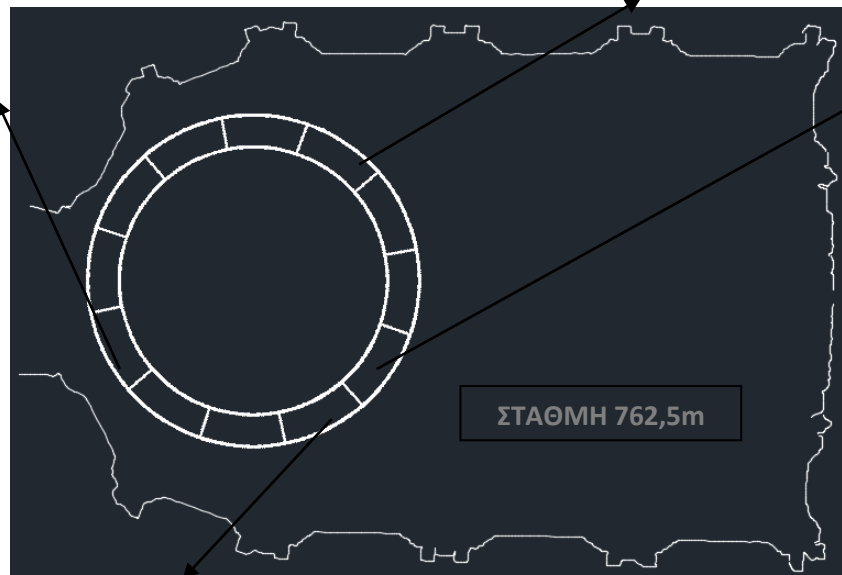
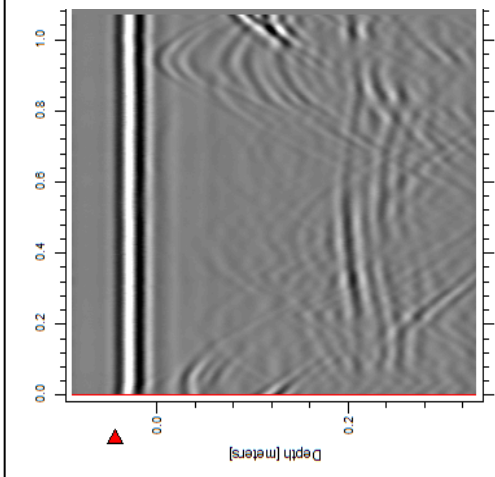


Εικόνα 3.42: ΣΑΡΩΣΕΙΣ
ΤΟΞΩΝ: 2, 5, 6, 9

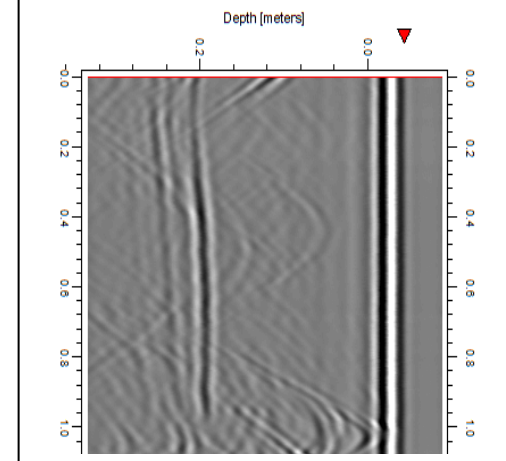
Σάρωση 165, τόξο 3ο



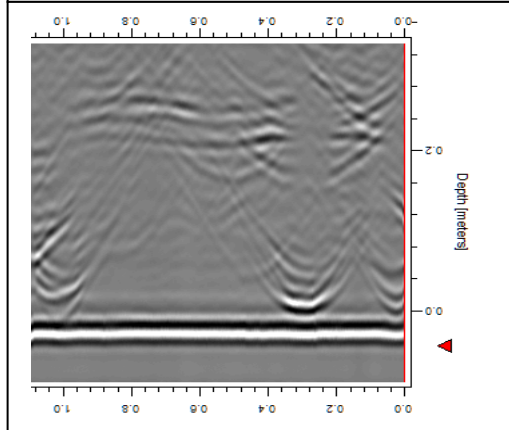
Σάρωση 177, τόξο 8ο



Σάρωση 181, τόξο 12ο



Σάρωση 180, τόξο 11ο



Εικόνα 3.43: ΣΑΡΩΣΕΙΣ
ΤΟΞΩΝ: 3, 8, 11, 12

3.2.3. Ενδοσκόπιο

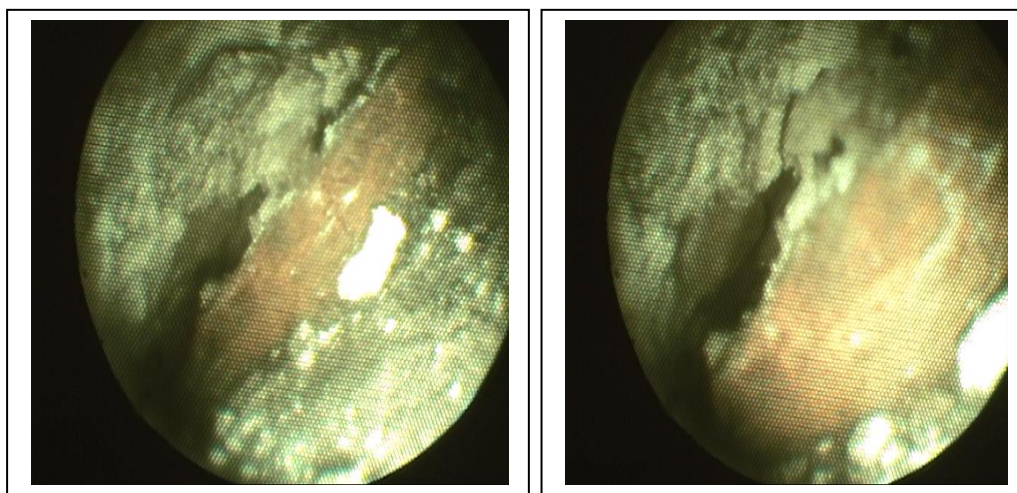
Είναι μια ελάχιστα καταστρεπτική μέθοδος η οποία συνίσταται στη διάνοιξη μιας οπής (στη θέση αρμού), σε σχολαστικό καθαρισμό της οπής και στη εισαγωγή στελέχους με οπτικές ίνες μέσα στην οπή, το οποίο επιτρέπει την άμεση οπτική παρατήρηση, καθώς και τη λήψη φωτογραφιών σε οποιοδήποτε βάθος.

Διάμετρος οπής: ~25mm

Μέγιστο βάθος παρατήρησης: ~0.5m

Χρησιμοποιείται συνδυαστικά με το γεωραντάρ, στα σημεία τα οποία τα αποτελέσματα του είναι ασαφή. Δεν υπάρχει δυσκολία ως προς τη χρήση του ενδοσκοπίου ούτε κάποιος εξωτερικός παράγοντας που να εμποδίζει τη διαδικασία αυτή.

Στην περίπτωση του Τρούλου της ανωδομής του Ιερού Κουβουκλίου χρησιμοποιήθηκε το ενδοσκόπιο για να εκτιμηθεί αν η περιμετρική μεταλλική ράβδος βρίσκεται σε καλή κατάσταση. Για το σκοπό αυτό δε χρειάστηκε να διανοιχθεί οπή και να «τραυματιστεί» ο λίθος. Στο σημείο όπου ο 12^{ος} πεσσός συνδέεται με τη μεταλλική ράβδο υπήρχε οπή ικανοποιητικού μεγέθους ούτως ώστε να εισέλθει το στέλεχος του ενδοσκοπίου και να παρατηρηθεί η κατάσταση της μεταλλικής ράβδου. Η οπή αυτή ήταν διαμέτρου 2cm και βάθους 0.12m. Στις επόμενες δύο εικόνες (18 και 19) φαίνεται η κατάσταση διατήρησης της ράβδου η οποία είναι εμφανώς ικανοποιητική και δεν συντρέχει λόγος αντικατάστασης ή συντήρησής της.



Εικόνες 3.44-3.45: Λήψεις ενδοσκοπίου - περιμετρική μεταλλική ράβδος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο

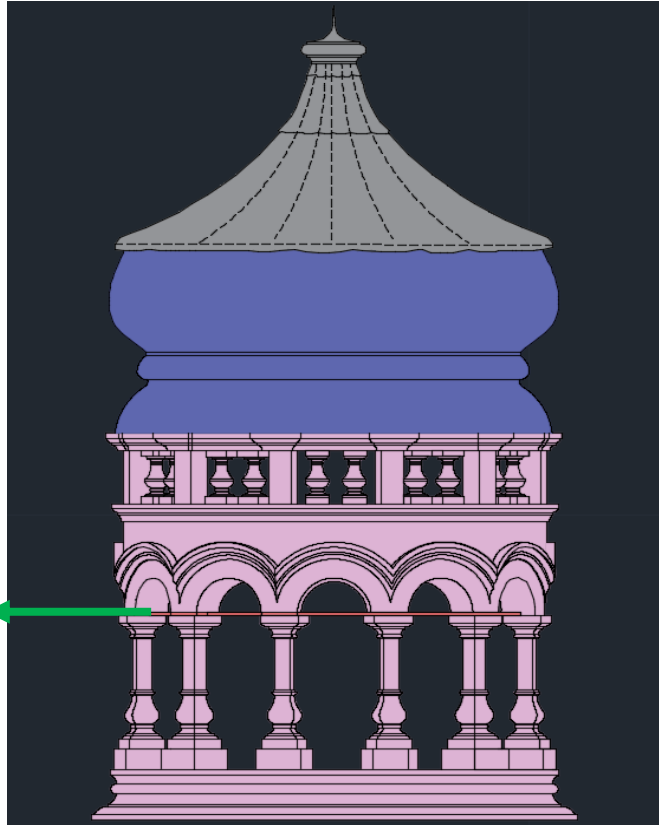
«ΤΑΥΤΟΠΟΙΗΣΗ ΔΟΜΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ»

4. ΤΑΥΤΟΠΟΙΗΣΗ ΔΟΜΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

ΕΣΩΤΕΡΙΚΑ

Ξύλινος φορέας ο οποίος καλύπτεται από ξύλινα πηχάκια (**μπαγδατί**) το οποίο δίνει στον τρούλο την σημερινή του όψη.

Μεταλλική ράβδος



ΕΞΩΤΕΡΙΚΑ

Φύλλο μολύβδου

Ασβεστιτικό επίχρισμα (σοβάς)

Δομικός λίθος **Slayeb**

Εικόνα 4.1: Χάρτης δομικών υλικών (εσωτερικά και εξωτερικά).

4.1. Εκτίμηση Γεωλογικής προέλευσης του δομικού λίθου Slayeb του Τρούλου της ανωδομής του Ιερού Κουβουκλίου

Με βάση τα δεδομένα της Βάσης Γεωλογικών Δεδομένων (G.I.S.) της Γεωλογικής Υπηρεσίας του Ισραήλ τα δείγματα που εξετάστηκαν από τη Δ/ση Ορυκτολογίας – Πετρογραφίας του Ι.Γ.Μ.Ε. από τον Δρ Γεωλόγο - Πετρολόγο Γεώργιο Οικονόμου, εκτιμάται ότι η προέλευση του συγκεκριμένου δομικού λίθου είναι από λατομεία της ευρύτερης περιοχής της Ιερουσαλήμ, και συγκεκριμένα από τον Γεωλογικό Σχηματισμό Animatav.

Ο λίθος Slayeb είναι κοκκινωπός ασβεστόλιθος, με έντονες και ευδιάκριτες φλεβώσεις, διαφόρων χρωματισμών, ο οποίος χρησιμοποιείται και σήμερα σε κατασκευές. Στον Πανίερο Ναό της Αναστάσεως τον συναντάμε στις αρχιτεκτονικές και διακοσμητικές επεμβάσεις του αρχιτέκτονα Κάλφα Κομνηνού, ο οποίος τον χρησιμοποίησε για:

- τη χρωματική διαφοροποίηση των επεμβάσεων του,
- τη στατική επάρκεια του λίθου και
- τη σχετική ασφάλεια που παρέχει σε περίπτωση φωτιάς

Η ερυθρωπή πέτρα που χρησιμοποιεί ο Κομνηνός στις διακοσμητικές επεμβάσεις του προέρχεται από την περιοχή του Σταυρού, του Προφήτη Ηλία ή τη Ραμάλλα. Από τον λίθο αυτό έχουν κατασκευαστεί οι ζώνες Α έως Ι (βλ. πίνακα 3.1, σελ 42) όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



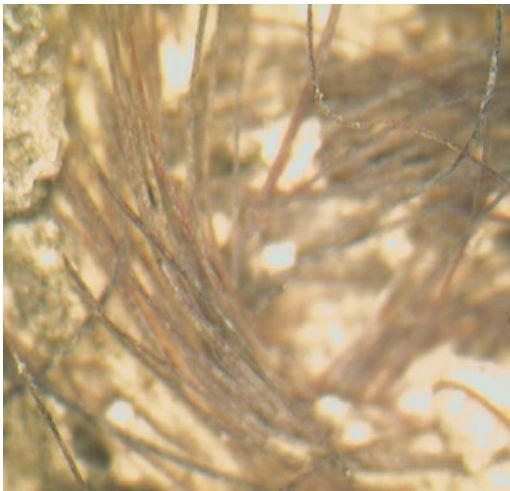
Εικόνα 4.2: Απεικόνιση λίθου Slayeb.

4.2. Σοβάς (Ζώνη Κ)

Ο σοβάς, ο οποίος είναι αγκιστρωμένος πάνω στα πηχάκια μπαγδατί των δύο θόλων, αποτελείται από τρεις στρώσεις. Το συνολικό πάχος των τριών στρώσεων είναι κατά μέσο όρο 3cm (Εικόνα 4.3) . Με την μικροσκοπία οπτικών ινών (FOM)¹⁷ βρέθηκε ότι η μάζα του σοβά περιέχει μεγάλη ποσότητα σε μαλλιά κατσίκας και άχυρα για μεγαλύτερη ελαστικότητα και καλύτερη συνοχή μεταξύ των στρώσεων (Εικόνα 4.4-4.5). Η ορυκτολογική σύσταση¹⁸ κάθε στρώσης είναι ο ασβεστίτης, ενώ περιέχεται και δολομίτης ως πρόσμικτο (Εικόνα 4.6) .



Εικόνα 4.3: Σοβάς τριών στρώσεων συνολικού πάχους 3cm.



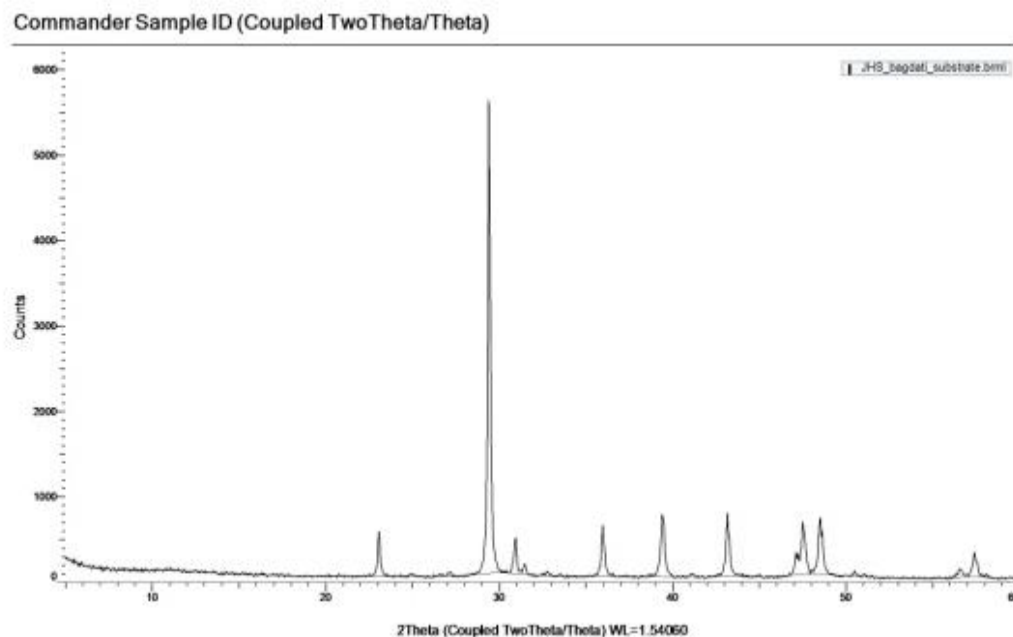
Εικόνα 4.4: FOM- μαλλιά κατσίκας.



Εικόνα 4.5: FOM- άχυρο.

¹⁷ Μικροσκόπιο Οπτικών Ινών (FOM): χρησιμοποιείται για την εξέταση των επιφανειών από την άποψη της υφής και της μικροδομής των υλικών.

¹⁸ Περιθλασιμετρία ακτίνων Χ (XRD): χρησιμοποιείται για την ορυκτολογική εξέταση πρώτων υλών.



Διάγραμμα 4.1: Αποτελέσματα XRD του υποστρώματος του σοβά.

4.3. Μόλυβδος (Ζώνη Λ)

Οι τρούλοι γενικότερα αλλά και ο Τρούλος του Παναγίου Τάφου ειδικότερα, είναι κατασκευές δύσκολα προσπελάσιμες, άρα είναι απαραίτητο το υλικό που τις επικαλύπτει να μπορεί να τοποθετηθεί εύκολα και να μη χρήζει επισκευής ή συντήρησης.

Το φύλλο μολύβδου είναι ένα εξαιρετικά ευέλικτο και εύκολο σε διαχείριση δομικό υλικό, αφού δεν απαιτεί τη χρήση εξειδικευμένων εργαλείων και ενδείκνυται στις κατασκευές. Τοποθετείται εύκολα αφού με την ελαστικότητα που διαθέτει προσαρμόζεται σε καμπύλες επιφάνειες. Είναι ακόμη ένα έξοχα ανθεκτικό υλικό τόσο σε περιβαλλοντικές όσο και σε χημικές διαβρώσεις, για το λόγο αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε εσωτερικό χώρο και σε εξωτερικό περιβάλλον.

Στον Τρούλο της ανωδομής του Παναγίου Τάφου χρησιμοποιήθηκε φύλλο μολύβδου 2mm για λόγους μόνωσης, στεγανοποίησης και απομόνωσης της υγρασίας αφού το εσωτερικό του αποτελείται από ξύλινο σκελετό, ο οποίος κινδύνευε να διαβρωθεί από τα όμβρια ύδατα την περίοδο που η οπή της ροτόντας ήταν ακόμη ανοιχτή.

Ακόμη, τα φύλλα μολύβδου έχουν αντοχή στο χρόνο με αποτέλεσμα να μη χρήζουν συντήρησης ή επισκευής. Παρά, όμως, όλα τα παραπάνω θετικά του μολύβδου είναι καλό να αποφεύγεται λόγω του μόνιμου βάρους που προσθέτει στην κατασκευή και λόγω της τοξικής του επίδρασης σε βιολογικούς οργανισμούς.

Μηχανικά Χαρακτηριστικά Μολύβδου	
Σημείο τήξης	327,46 °C
Πυκνότητα	11,34 g/cm ³
Μέτρο Ελαστικότητας	16 GPa
Μέτρο Διάτμησης	5,6 GPa
Λόγος Poisson	0,44

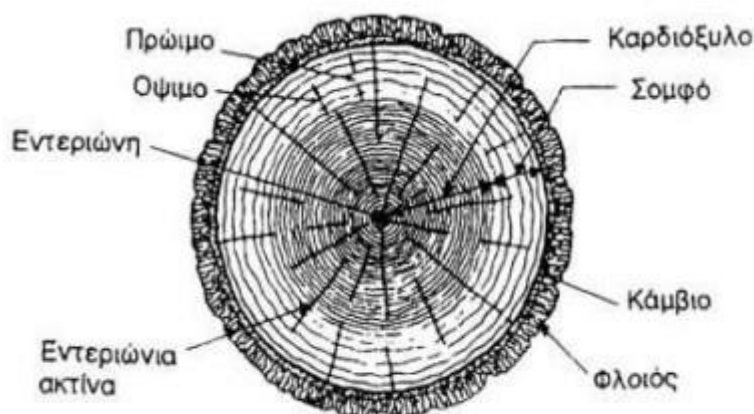
Πίνακας 4.1. : Μηχανικά χαρακτηριστικά μολύβδου.

4.4. Ξύλινος φέρον οργανισμός και πηχάκια μπαγδατί

Το ξύλο ως υλικό είναι ανισότροπο, ανομοιογενές και υγροσκοπικό, έχει συνεπώς διαφορετικές μηχανικές αντοχές στις διάφορες διευθύνσεις του. Η γνώση των μηχανικών του ιδιοτήτων αποτελεί βασική προϋπόθεση για τη σωστή αξιοποίηση του στις κατασκευές. Για την περίπτωση του Τρούλου της ανωδομής του Ιερού Κουβουκλίου, ο οποίος αποτελείται από έναν εσωτερικό και έναν εξωτερικό ξύλινο θόλο, παρατίθενται οι μηχανικές ιδιότητες του ξύλου ούτως ώστε να μπορέσουμε ύστερα από στατική μελέτη να ελέγξουμε τη στατική του επάρκεια.

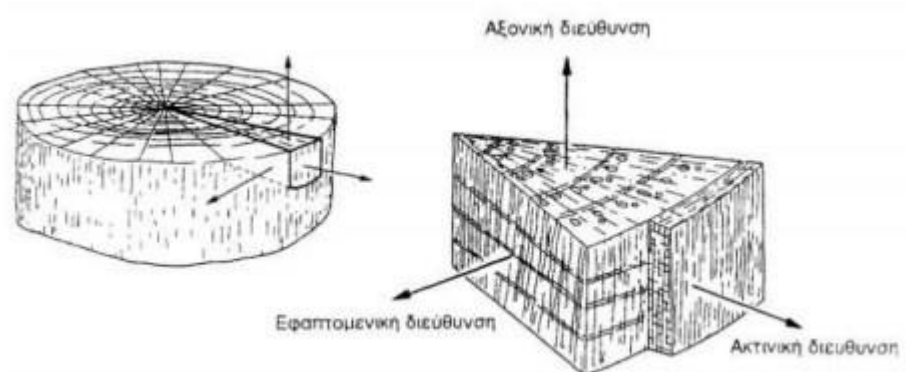
4.4.1. Δομή

Εκτελώντας μία τομή κάθετα στον άξονα ενός δένδρου αποκαλύπτονται τα διάφορα χαρακτηριστικά του μέρη. Ξεκινώντας από το κέντρο συναντάμε την **εντεριώνη** η οποία από τεχνικής άποψης αποτελεί μειονέκτημα του ξύλου μειώνοντας την αντοχή του. Γύρω από αυτό βρίσκεται το καρδιόξυλο που είναι αδρανής στρώση η οποία περιβάλλεται από το σομφό ξύλο. Ύστερα ακολουθεί το κάμβιο το οποίο παράγει τον εσωτερικό φλοιό προς τα έξω και τέλος έχουμε τον φλοιό που αποτελείται από τον εσωτερικό και τον εξωτερικό φλοιό.



Εικόνα 4.6: Δομή του ξύλου.

Βασικό χαρακτηριστικό του ξύλου ως προς την μηχανική του αντοχή είναι ότι αποτελεί ανισότροπο υλικό δηλαδή παρουσιάζει διαφορετικές ιδιότητες σε διάφορες διευθύνσεις. Συγκεκριμένα τρεις είναι οι διευθύνσεις όπου μελετώνται οι μηχανικές ιδιότητές του: η αξονική (παράλληλα στον άξονα του κορμού), η ακτινική και η εφαπτομενική.



Εικόνα 4.7: Διευθύνσεις του ξύλου.

4.4.2. Φυσικές ιδιότητες

Πυκνότητα

Η πυκνότητα του ξύλου αποτελεί μία σημαντική φυσική ιδιότητά του καθώς συνδέεται άμεσα με τις μηχανικές του ιδιότητες αλλά και με τις υπόλοιπες φυσικές, όπως η υγροσκοπικότητα, η ρίκνωση, η διόγκωση και θερμικές του ιδιότητες. Πυκνότητα είναι το μέτρο της μάζας που περιέχεται σε ορισμένο όγκο υλικού και εκφράζεται με το πηλίκο μάζας και όγκου. Στην δομική ξυλεία αυτή κυμαίνεται μεταξύ **300 και 550 kg/m³** (περίπτωση Τρούλου), ενώ στις πλάκες προσανατολισμένων ινών κυμαίνεται μεταξύ 550 και 750 kg/m³. Η πυκνότητα του ξύλου επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες. Σημαντικότερος από αυτούς είναι η υγρασία. Το ξύλο είναι ύλη υγροσκοπική, δηλαδή είχε την ιδιότητα να προσλαμβάνει υγρασία. **Πρόσληψη υγρασίας έχει ως αποτέλεσμα αύξηση του όγκου και της μάζας του, και απώλεια υγρασίας την μείωσή τους.** Γενικά παρατηρείται ότι μεγαλύτερη πυκνότητα του ξύλου σημαίνει καλύτερες μηχανικές ιδιότητες. Αυτό είναι εύλογο καθώς αύξηση της πυκνότητας υποδηλώνει κύτταρα με παχύτερα τοιχώματα και λιγότερα διάκενα μεταξύ τους.

Υγροσκοπικότητα

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω το ξύλο αποτελεί ένα υγροσκοπικό υλικό που ανταλλάσσει νερό με το περιβάλλον, ώσπου να φθάσει σε μία στάθμη ισορροπίας. Το περιεχόμενο νερό, εκτός από τις αναμενόμενες προφανείς ογκομετρικές μεταβολές και τις μεταβολές του βάρους, επηρεάζει σημαντικά όλες τις φυσικές και μηχανικές ιδιότητες του ξύλου. Ανεξάρτητα από την

υγρασία που περιέχει το ξύλο στο ζωντανό δέντρο η επαφή του με την ατμόσφαιρα έχει ως συνέπεια την απώλεια υγρασίας. Η ποσότητα που τελικά συγκρατεί εξαρτάται από τις ατμοσφαιρικές συνθήκες στις οποίες είναι εκτεθειμένο (ποσοστό υγρασίας της ατμόσφαιρας στην περιοχή γύρω από τον Τρούλο μετρημένο με υγρόμετρο: 53,7%). Το σημείο του ποσοστού της υγρασίας του ξύλου που αντιστοιχεί στον πλήρη κορεσμό των κυτταρικών τοιχωμάτων του με τις κυτταρικές κοιλότητες εντελώς κενές ονομάζεται σημείο ινοκόρου και κυμαίνεται γύρω στο 28%. Παρατηρείται ότι οποιαδήποτε μεταβολή υγρασίας κάτω από το σημείο αυτό επηρεάζει άμεσα την κυτταρική δομή του ξύλου και επομένως μεταβάλλονται οι διαστάσεις του. Πράγματι οι μεταβολές της υγρασίας κάτω από το σημείο του ινοκόρου έχουν ως αποτέλεσμα την σχεδόν γραμμική μεταβολή των διαστάσεων του ενώ αντίθετα πάνω από αυτό οι μεταβολές είναι αμελητέες και συντελούν πρακτικά μόνο στην αύξηση του βάρους. Επομένως στον Τρούλο της ανωδομής έχουμε ξεπεράσει κατά πολύ το σημείο ινοκόρου και άρα η μεταβολή των διαστάσεων των ξύλων είναι γραμμική.

Στον παρακάτω πίνακα φαίνεται η εσωτερική υγρασία του ξύλου σε σχέση με την θερμοκρασία και την σχετική υγρασία περιβάλλοντος. Για σχετική υγρασία 53,7% και θερμοκρασία 28°C η **εσωτερική υγρασία των ξύλων είναι 9,555%** (όπως μετρήθηκε με το υγρόμετρο ξύλου, η υγρασία του μέσα στον Τρούλο κυμαίνεται από 9-11%, επομένως επαληθεύεται ο παρακάτω πίνακας).

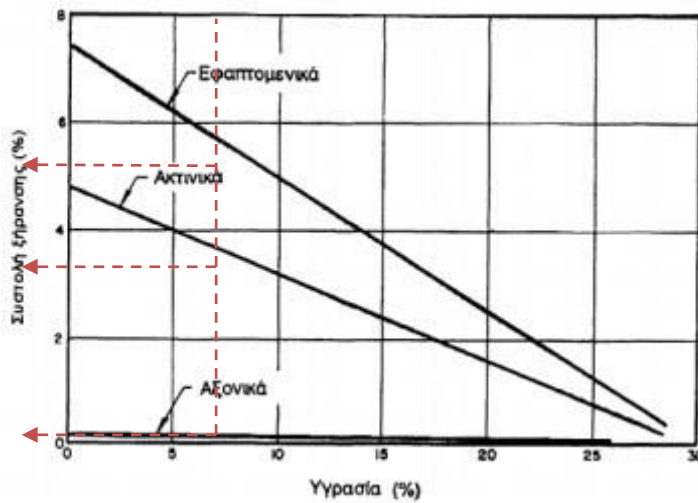
Σχετική υγρασία(%)	Θερμοκρασία (°C)									
	10	15	20	30	40	50	60	70	80	
90	22	22	22	21	20	19	18	17	15.5	
80	17	17	16.5	16	15	14.5	13.5	12.5	12	
70	14	13.5	13	13	12	11.5	11	10	9	
60	11.5	11	11	10.5	10	9.5	9	8	7.5	
50	9.5	9.5	9.5	9	8.5	8	7.5	7	6	
40	8	8	8	7.5	7	6.5	6	5.5	5	
30	6	6	6	6	5.5	5	5	4.5	4	
20	4.5	4.5	4.5	4	4	3.5	3	3	2.5	
10	2.5	2.5	2.5	2.5	2	2	2	1.5	1.5	

Πίνακας 4.2: Εσωτερική υγρασία ξύλου σε σχέση με τη θερμοκρασία και τη σχετική υγρασία.

Ρίκνωση και Διόγκωση λόγω μεταβολής υγρασίας

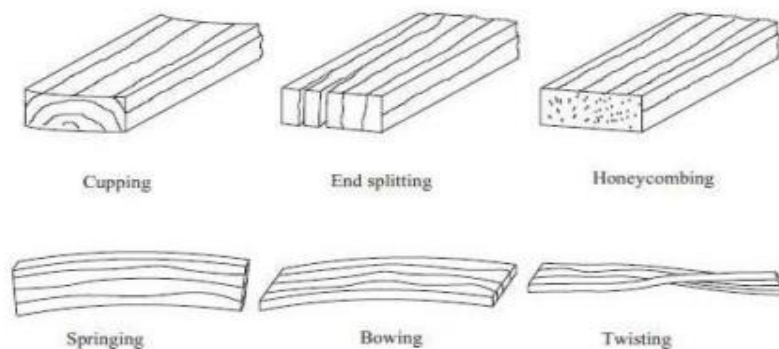
Το ξύλο είναι ανισότροπο υλικό από άποψη ρίκνωσης και διόγκωσης, δηλαδή οι μεταβολές των διαστάσεών του, για την ίδια μεταβολή υγρασίας, διαφέρουν σε διαφορετικές αυξητικές διευθύνσεις. Συγκεκριμένα, η αυξομείωση είναι **ελάχιστη στην αξονική διεύθυνση, πολύ μεγαλύτερη ακτινικά και σχεδόν διπλάσια της ακτινικής στην εφαπτομενική διεύθυνση**. Επομένως για εσωτερική υγρασία 9,555% η συστολή ξήρανσης έχει ως εξής:

- 0.2 Αξονικά
- 3.4 Ακτινικά
- 5.3 Εφαπτομενικά



Διάγραμμα 4.2: Συστολής ξήρανσης-Υγρασίας.

Ως αποτέλεσμα της ανομοιομορφίας στην κατανομή των παραμορφώσεων, λόγω του παραπάνω φαινομένου αλλά και λόγω ενδεχόμενης ανομοιόμορφης κατανομής της υγρασίας στο εσωτερικό του ξύλου, εμφανίζεται στρέβλωση επιφανειών και διατομών του ξύλου, ακόμη και διαμήκεις και εγκάρσιες ρωγμές. Όπως είναι προφανές η παραμορφωσιμότητα του ξύλου μπορεί να γίνει σοβαρό εμπόδιο στην αξιοποίηση του γιατί υποβαθμίζει την ποιότητα κατασκευών και προϊόντων του. Για παράδειγμα ένα σκεβρωμένο ξύλο εμφανίζει προβλήματα εφαρμογής, ένα δομικό στοιχείο με υψηλή παραμόρφωση μπορεί να προκαλέσει ρηγματώσεις στις συνδέσεις. Προκύπτει επομένως ότι η υγροσκοπικότητα του ξύλου αποτελεί το σημαντικότερο ελάττωμα του ως δομικό υλικό.



Εικόνα 4.8: Παραμορφώσεις του ξύλου με συστολή ξήρανσης.

Συστολή και Διαστολή

Όταν το ξύλο ψύχεται οι διαστάσεις του ελαττώνονται (συστολή) και αντίστροφα όταν θερμαίνεται οι διαστάσεις του αυξάνονται (διαστολή). Οι θερμικές συστολοδιαστολές του ξύλου δεν έχουν σημαντική πρακτική σημασία, καθώς είναι πολύ μικρές σε σχέση με τη ρίκνωση ή διόγκωση που προκαλείται από τις μεταβολές της υγρασίας. Μάλιστα γίνεται, με την μεταβολή της θερμοκρασίας να έχουμε ρίκνωση ή διόγκωση μεγαλύτερη από την αντίστοιχη διαστολή ή συστολή με αποτέλεσμα το ξύλο να συμπεριφέρεται αντίθετα από το αναμενόμενο. Ο συντελεστής θερμικής διαστολής κάθε ξύλου διαφέρει κι αυτός στις διάφορες διευθύνσεις, με την μικρότερη τιμή στην αξονική διεύθυνση ($3-4,5 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}$).

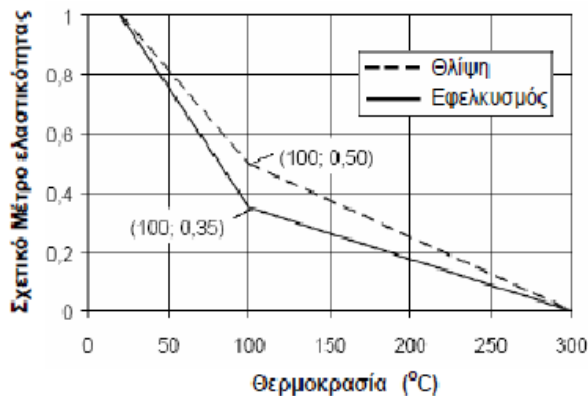
4.4.3. Μηχανικές ιδιότητες



Σχηματικό διάγραμμα 4.3 τάσεων παραμορφώσεων ξύλου, για φόρτιση παράλληλα προς τις ίνες (συνεχής καμπύλη) και κάθετα στις ίνες (διακεκομμένη καμπύλη), υπό συνήθεις θερμοκρασίες.

Από το παραπάνω διάγραμμα είναι φανερό ότι το ξύλο δύναται να πάρει μεγαλύτερες παραμορφώσεις παράλληλα προς τις ίνες του από ότι κάθετα σε αυτές.

Μέτρο ελαστικότητας

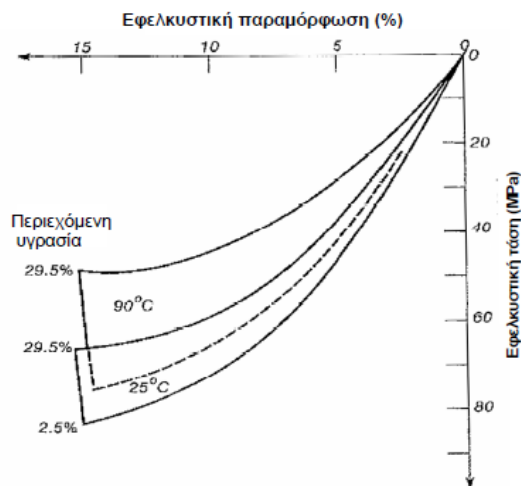


Η αύξηση της θερμοκρασίας μαζί με την ενυπάρχουσα υγρασία έχουν συνέπεια τη μείωση του μέτρου ελαστικότητας του ξύλου (δημιουργούνται συνθήκες ανάλογες με εκείνες που εφαρμόζονται κατά την κατεργασία προκειμένου να επιτευχθεί καμπύλωση του ξύλου).

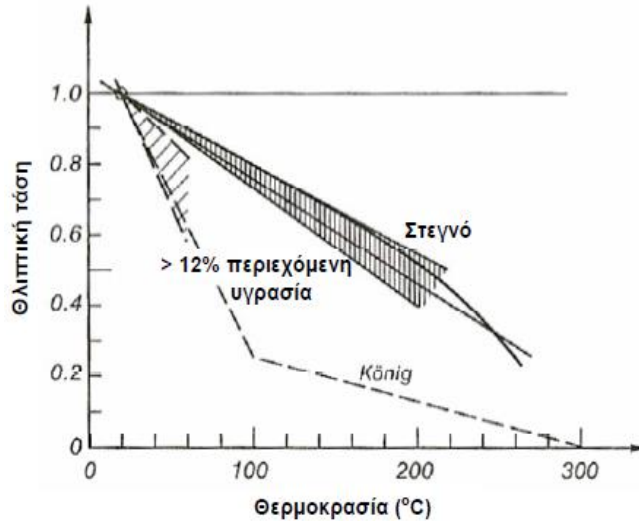
Διάγραμμα 4.4: Μείωση του μέτρου ελαστικότητας του ξύλου σε θλίψη και σε εφελκυσμό, παράλληλα προς τις ίνες, υπό υψηλές θερμοκρασίες, Ευρωκώδικας 5.

Εφελκυστική και θλιπτική αντοχή παράλληλα προς τις ίνες

Η αντοχή του ξύλου, παράλληλα προς τις ίνες μειώνεται αυξανόμενης της θερμοκρασίας και της υγρασίας του. Ενδεικτικά από το παρακάτω διάγραμμα προκύπτει ότι στους 90°C, με 29,5% υγρασία ξύλου, η εφελκυστική αντοχή μειώνεται στο 60% της αντοχής του ξηρού ξύλου υγρασίας 2,5% σε θερμοκρασία περιβάλλοντος 25°C. Κάτι ανάλογο γίνεται και στη θλίψη.



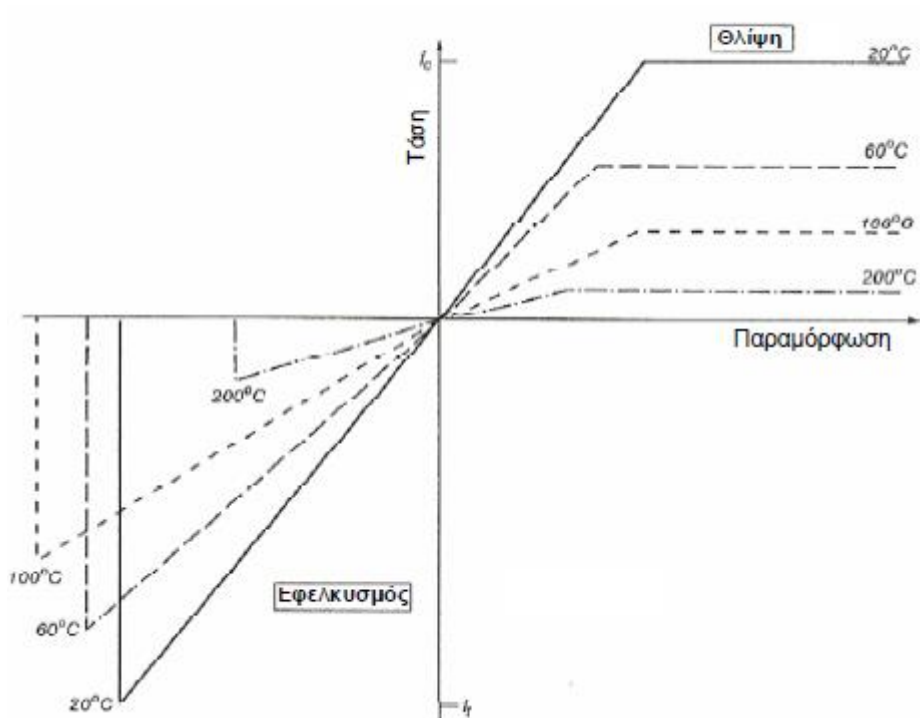
Διάγραμμα 4.5: τάσεων παραμορφώσεων ξύλου σε εφελκυσμό παράλληλα προς τις ίνες για δύο ποσοστά υγρασίας (2,5% και 29,5%) και για δύο θερμοκρασίες (90°C και 25°C).



Διάγραμμα 4.6: Μείωση της θλιπτικής αντοχής του ξύλου παράλληλα προς τις ίνες συναρτήσει της θερμοκρασίας και για διάφορα ποσοστά υγρασίας.

Κάμψη παράλληλα προς τις ίνες

Η καμπτική αντοχή του ξύλου, παράλληλα προς τις ίνες, μειώνεται αυξανόμενης της θερμοκρασίας και της υγρασίας του.



Διάγραμμα 4.7: Τυποποιημένα-υπολογιστικά διαγράμματα τάσεων παραμορφώσεων ξύλου, σε θλίψη και σε εφελκυσμό για διάφορες θερμοκρασίες.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο

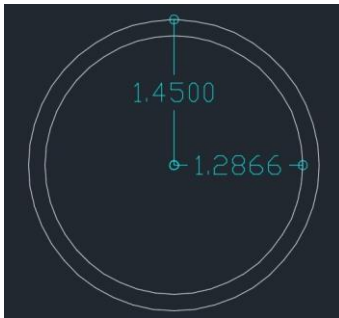
«ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΡΟΥΛΟΥ»

5. ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΡΟΥΛΟΥ

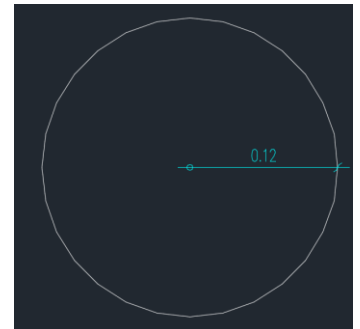
5.1. Διαστασιολόγηση και 2D απεικόνιση

Για την καλύτερη κατανόηση της γεωμετρίας της κατασκευής, πέραν των επί τούτου αποτυπώσεων, χρησιμοποιήθηκε το νέφος σημείων του προγράμματος GEOMAGIC από το οποίο προέκυψαν οι παρακάτω οριζόντιες, καθ' ύψος τομές του Τρούλου, και εισήχθησαν σε πρόγραμμα Autocad για την καλύτερη απεικόνιση τους και μέτρηση των αποστάσεων με ακρίβεια. Το παραπάνω μοντέλο προέκυψε κατά τη διαδικασία της τοπογραφικής τεκμηρίωσης όπως αναλύθηκε στο 2ο κεφάλαιο.

764m



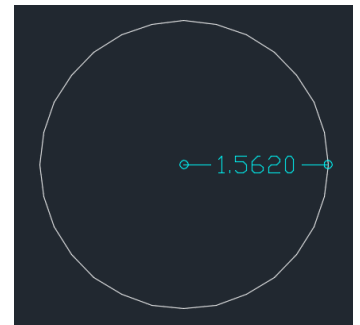
766,7m



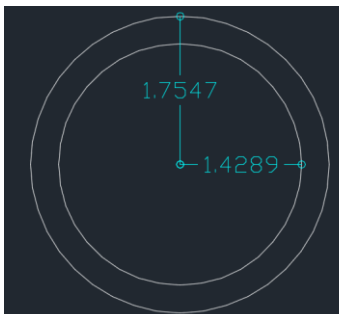
763.53m



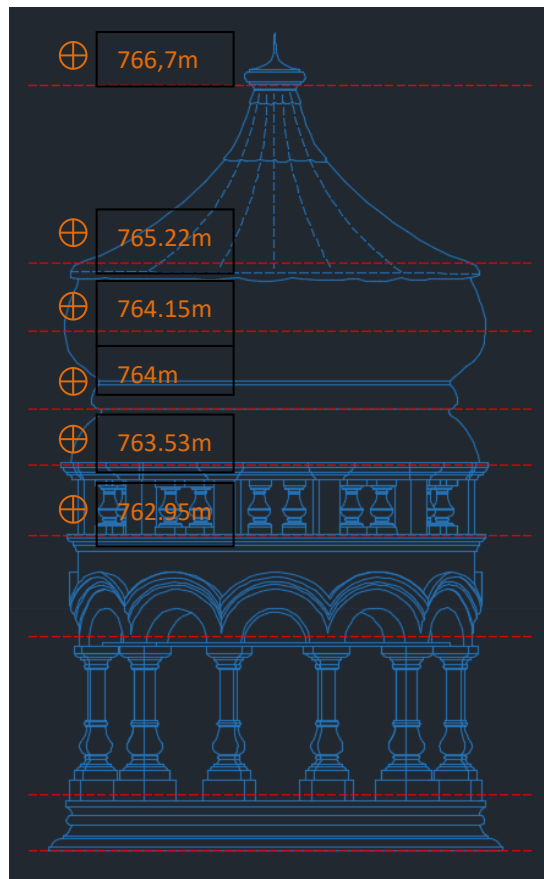
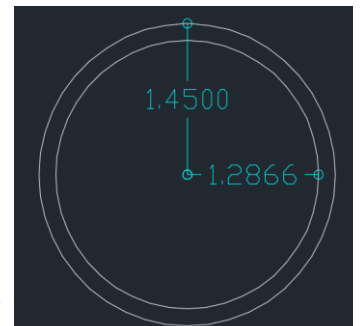
765.22m



762.95m

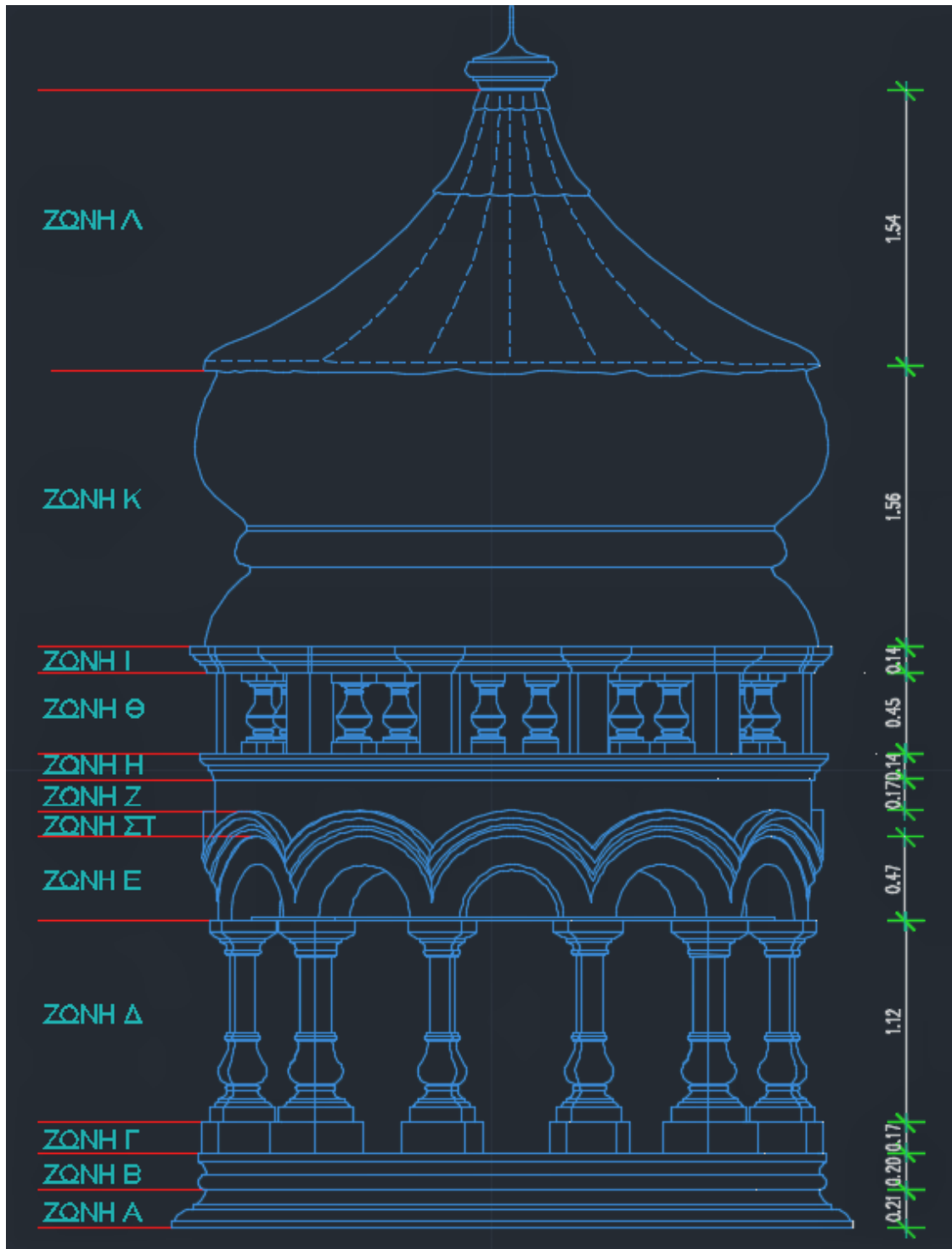


764.15m

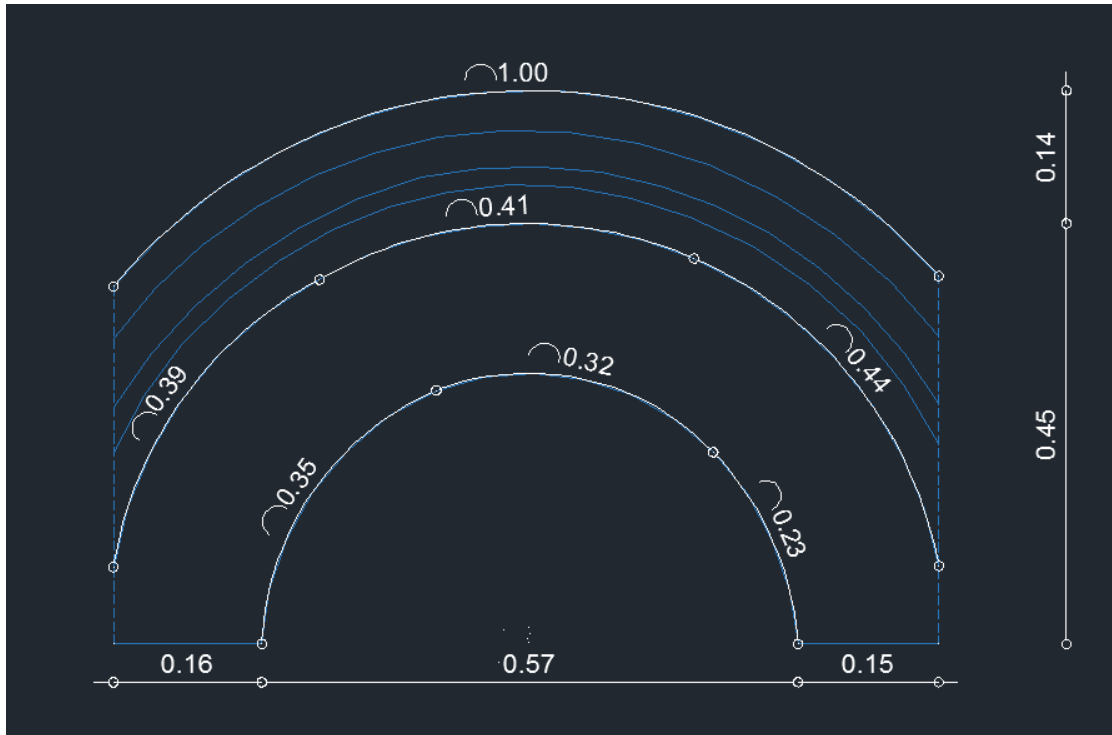


Εικόνα 5.1: Οριζόντιες τομές θόλου (από πρόγραμμα GEOMAGIC) σε 6 διαφορετικές στάθμες- διαστάσεις σε m.

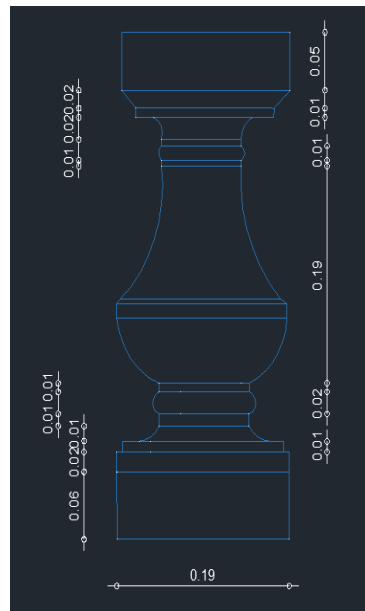
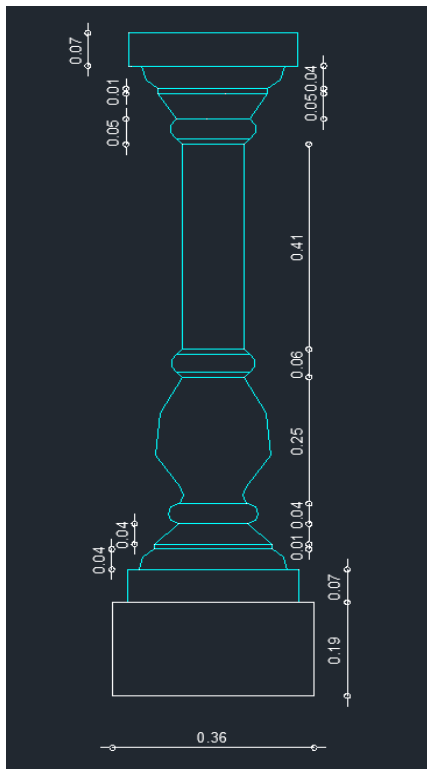
Επίσης από το νέφος σημείων προέκυψε η διαστασιολόγηση των μελών του Τρούλου, κατά μήκος και καθ' ύψος, όπως φαίνεται στις παρακάτω εικόνες 5.2, 5.3, 5.4:



Εικόνα 5.2: Κατακόρυφες διαστάσεις (σε m) τρούλου (από πρόγραμμα GEOMAGIC).

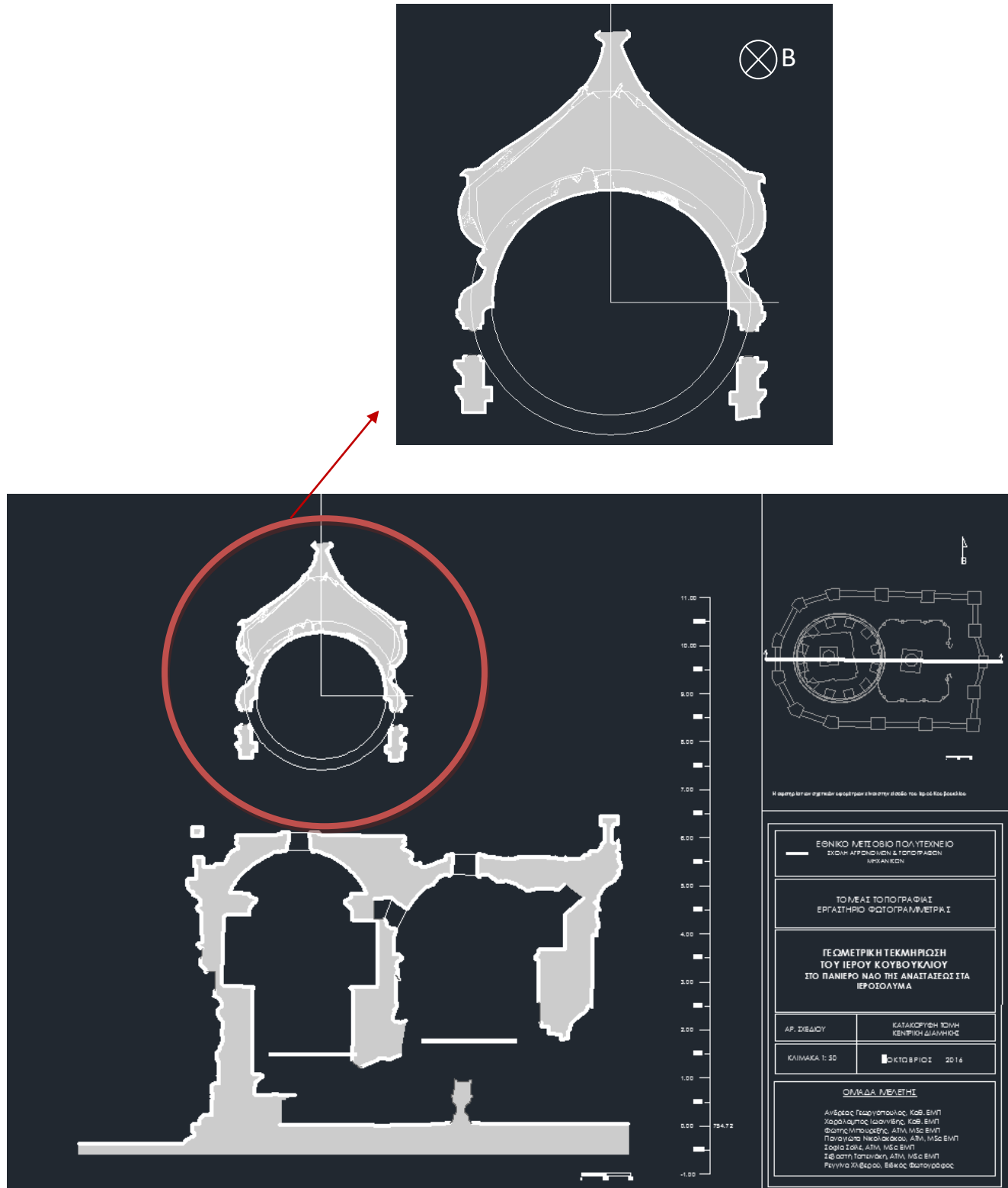


Εικόνα 5.3: Διαστασιολόγηση των τόξων του Τρούλου.



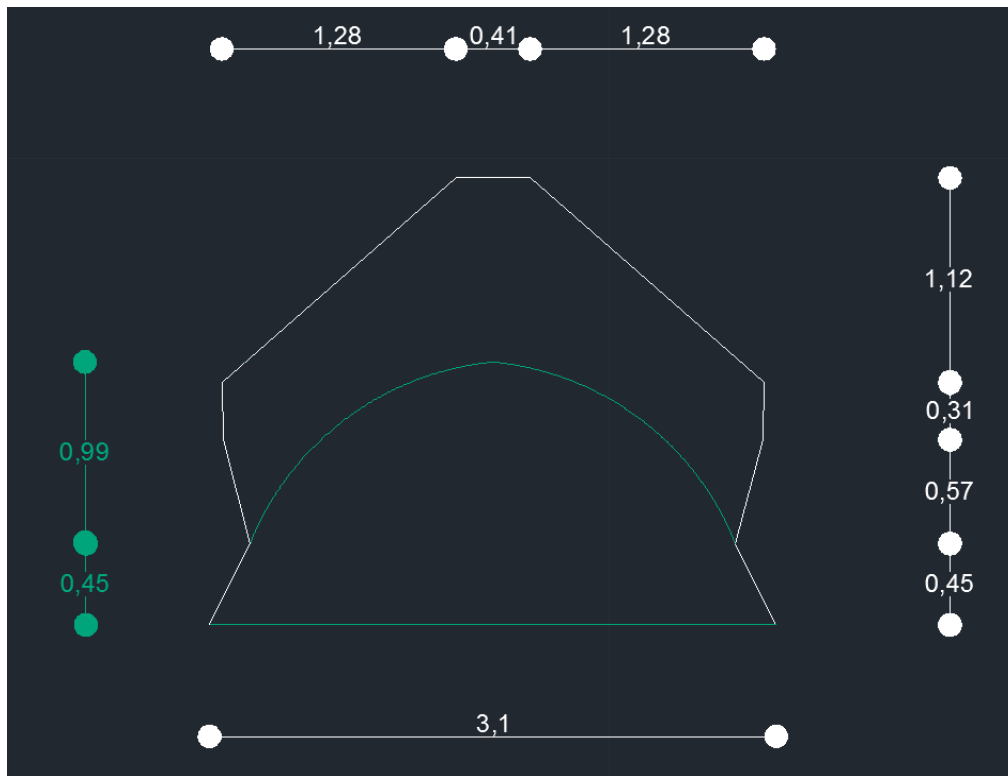
Εικόνες: 5.4- 5.5: Διαστασιολόγηση πεσών (Ζώνη Δ) και μπαλούστρων (Ζώνη Θ) του Τρούλου.

Με την βοήθεια των τοπογράφων μηχανικών, του Τομέα τοπογραφίας και του εργαστηρίου φωτογραμμετρίας, της ομάδας του καθ. κ. Γεωργόπουλου και του Layzer Scanner αποτυπώθηκε το Ιερό Κουβούκλιο και κατ' επέκταση ο Τρούλος της ανωδομής σε τομή από τα ανατολικά προς τα δυτικά.



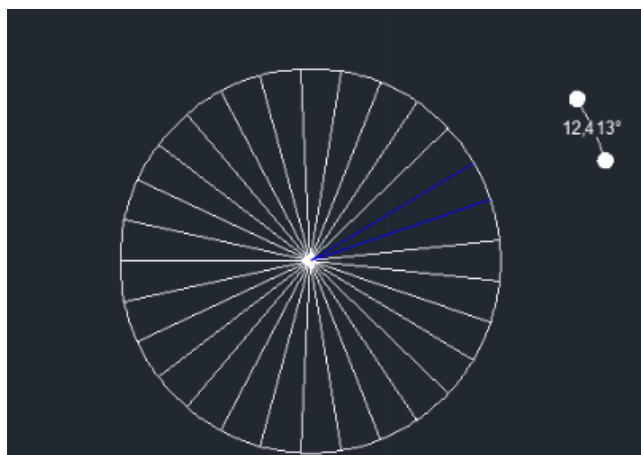
Εικόνα 5.6: Τομή Ιερού Κουβουκλίου και κατ' επέκταση Τρούλου από τα ανατολικά προς τα δυτικά.

Από τις παραπάνω τομές, τις μακροσκοπικές παρατηρήσεις και τις επί τόπου αποτυπώσεις στον Τρούλο προκύπτουν τα παρακάτω σκαρίφημα των 2 εσωτερικών θόλων:



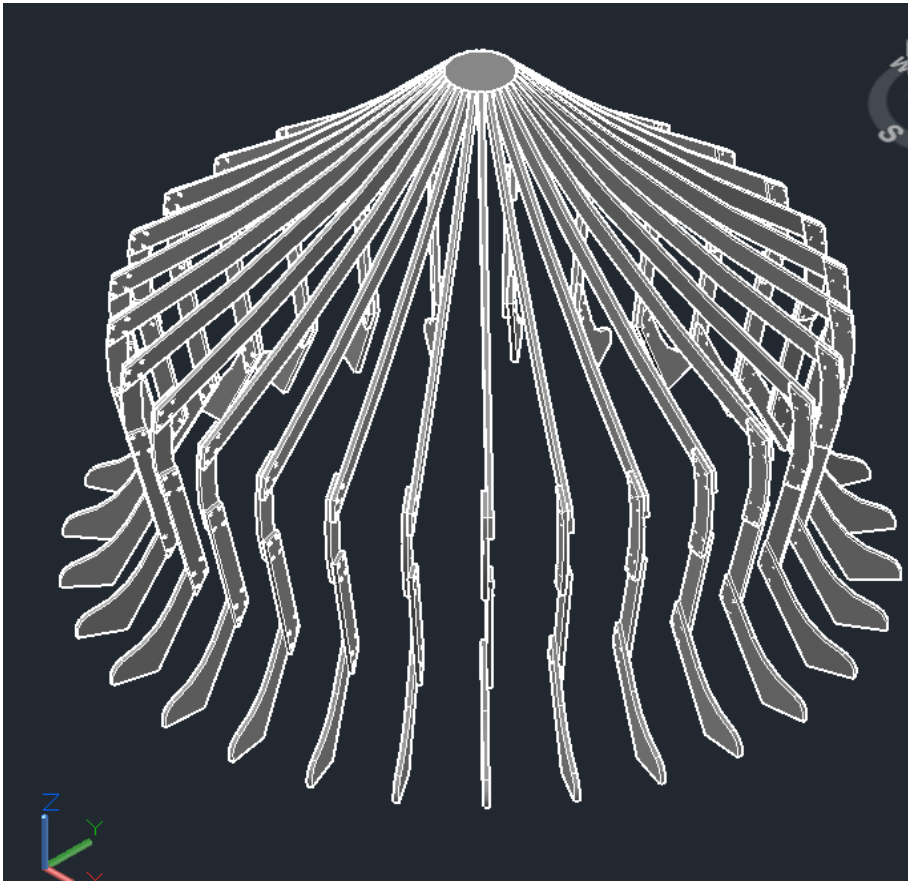
Εικόνα 5.7: Σκαρίφημα ξύλινου φορέα θόλων- εσωτερικού και εξωτερικού. Διαστάσεις σε m.

Στην επόμενη εικόνα (5.8) απεικονίζεται η κάτοψη του εσωτερικού και εξωτερικού θόλου. Ο εσωτερικός θόλος αποτελείται από 29 ξύλινες ακτίνες, κάθε μία από τις οποίες απαρτίζεται από 2 τμήματα που συγκολλούνται μεταξύ τους με ήλους. Ο εξωτερικός θόλος από την άλλη αποτελείται από 29 ξύλινες ακτίνες, κάθε μία από τις οποίες απαρτίζεται από 4 τμήματα που συγκολλούνται μεταξύ τους με ήλους.

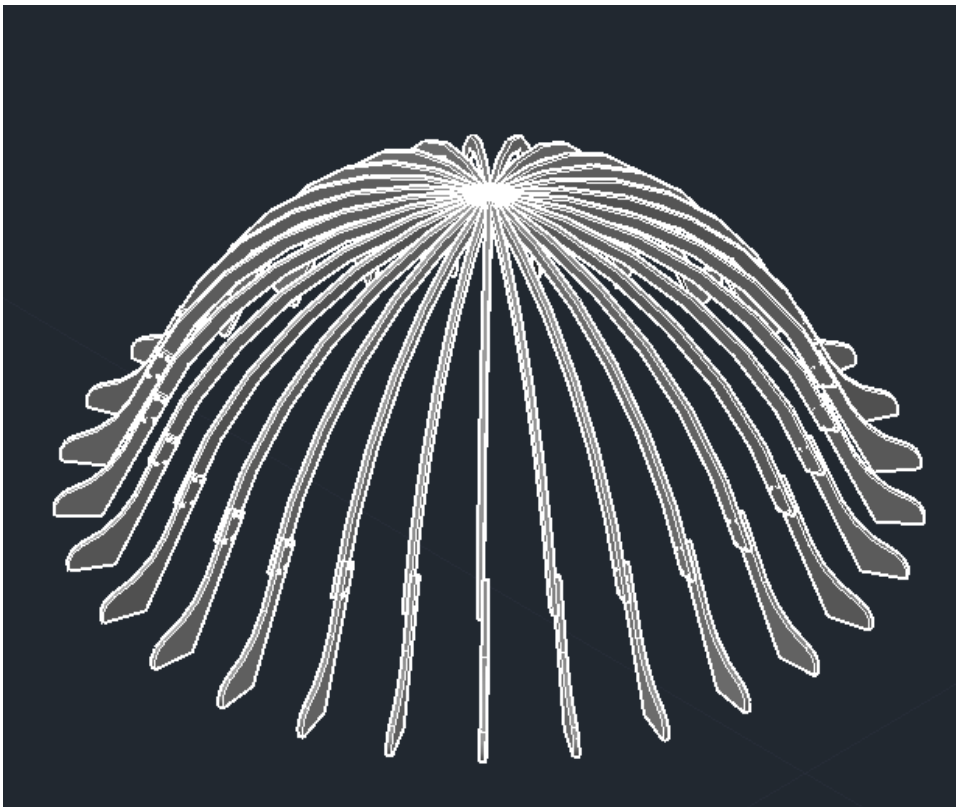


Εικόνα 5.8: Τόσο ο εσωτερικός θόλος όσο και ο εξωτερικός θόλος αποτελούνται από 29 ξύλινες ακτίνες οι οποίες σχηματίζουν μεταξύ τους γωνία 12,413°.

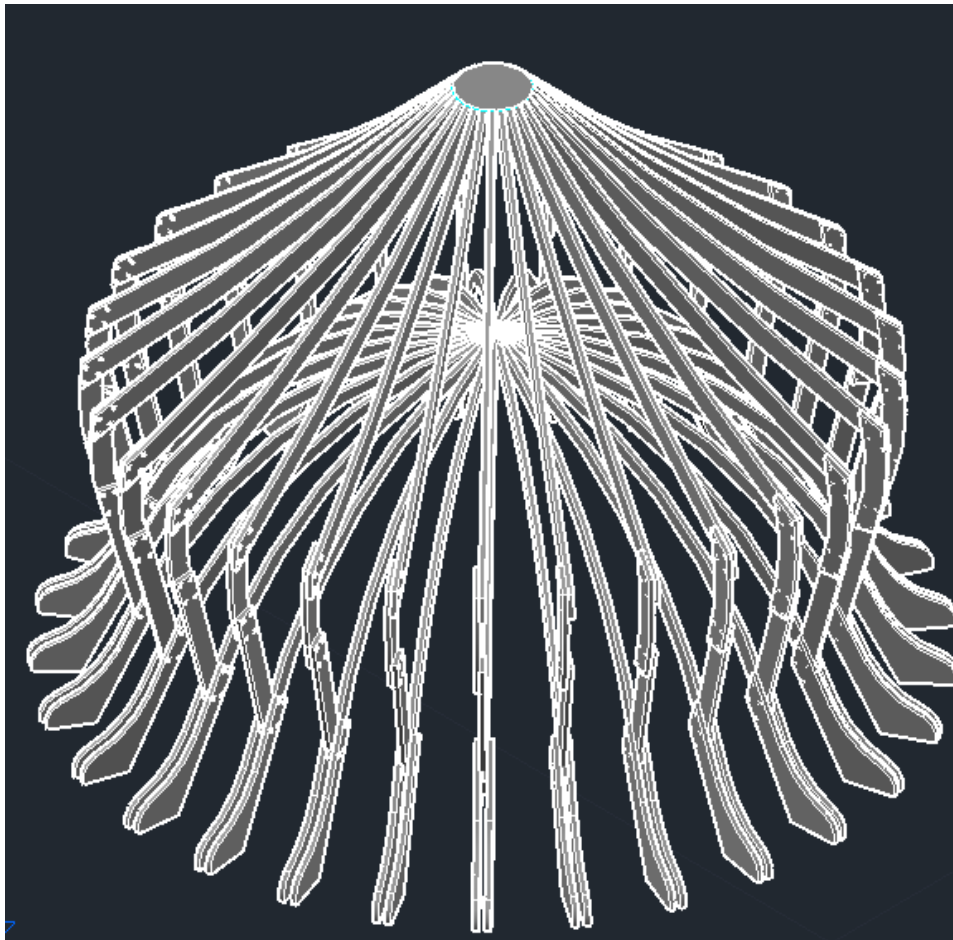
5.2. 3D απεικόνιση



Εικόνα 5.6: 3D απεικόνιση ξύλινου φορέα εξωτερικού θόλου (βλ. παράρτημα σχέδιο υπό κλίμακα).

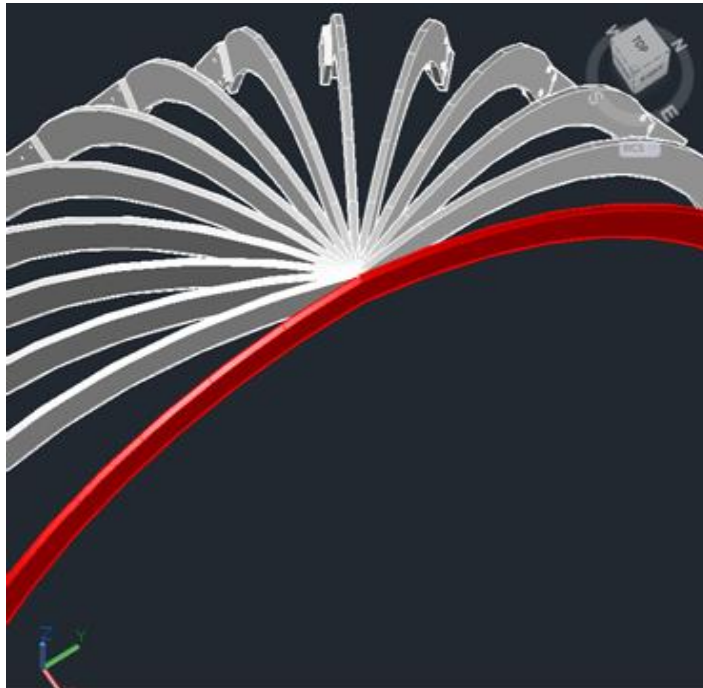


Εικόνα 5.7: 3D απεικόνιση ξύλινου φορέα εσωτερικού θόλου (βλ. παράρτημα σχέδιο υπό κλίμακα).



Εικόνα 5.8: 3D απεικόνιση ξύλινου φορέα εσωτερικού και εξωτερικού θόλου (βλ. παράρτημα σχέδιο υπό κλίμακα).

Οι δύο ξύλινοι θόλοι του Τρούλου είναι αρθρωμένοι πάνω σε ένα ξύλινο δαχτυλίδι το οποίο πακτώνεται πάνω στο δαχτυλίδι που σχηματίζεται από τον λίθο Slayeb στη Ζώνη Ι (βλ. σχέδια στο παράρτημα).

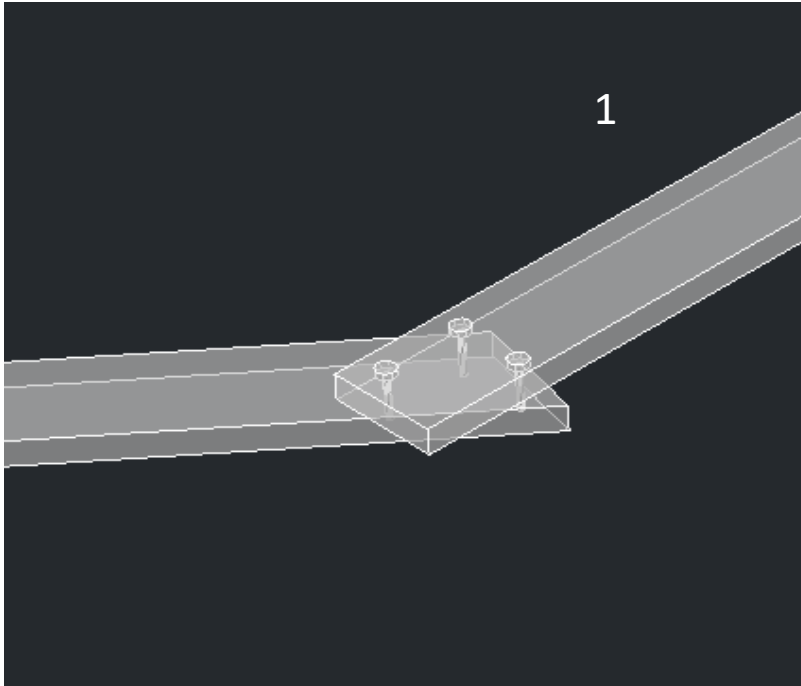


Εικόνα 5.9: Λεπτομέρεια εσωτερικού θόλου του τρούλου της ανωδομής.

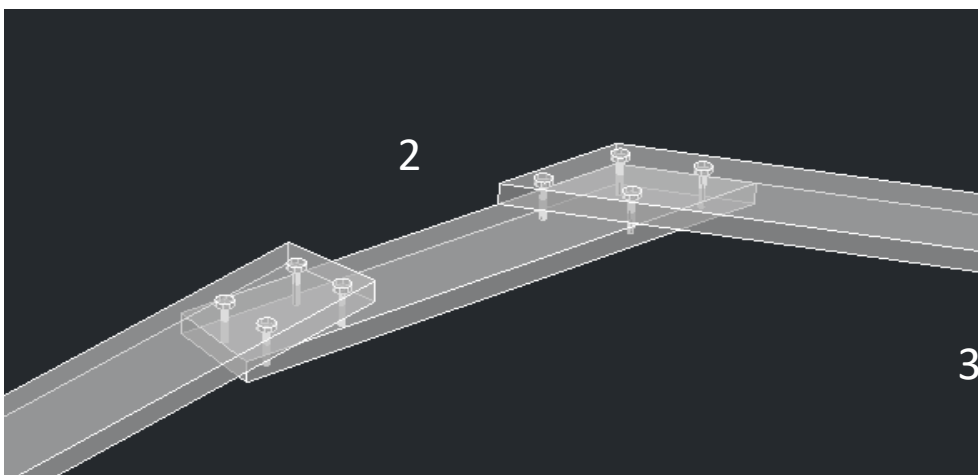
Στην παραπάνω εικόνα (5.9) απεικονίζεται ο εσωτερικός θόλος του Τρούλου, σε τομή. Το κόκκινο μέλος φανερώνει ότι υπάρχει ένα κεντρικό ενιαίο ξύλο σαν τόξο πάνω στο οποίο “δένουν” όλα τα υπόλοιπα ξύλα του ξύλινου φορέα.

5.3. Απεικόνιση συνδέσεων

Οι συνδέσεις των ξύλων του ξύλινου φέροντα οργανισμού, καθώς και οι συνδέσεις αυτών με τα πηγάκια μπαγδατί δεν ακολουθούν κάποια συγκεκριμένη διαδοχικότητα, αλλά η κατασκευή τους φανερώνει τυχαία τοποθέτηση ούτως ώστε να γίνεται η σύνδεση σταθερή εμπειρικά. Το γεγονός αυτό φανερώνουν οι παρακάτω εικόνες, όπου παρατηρείται τυχαία διάταξη αλλά και άνισος αριθμός ήλων σε κάθε μέλος (προέκυψε μετά από in situ μετρήσεις).



Εικόνα 5.10: Σύνδεση βάσης εξωτερικού θόλου, ενδεικτικά, με μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν επί τόπου στο έργο.

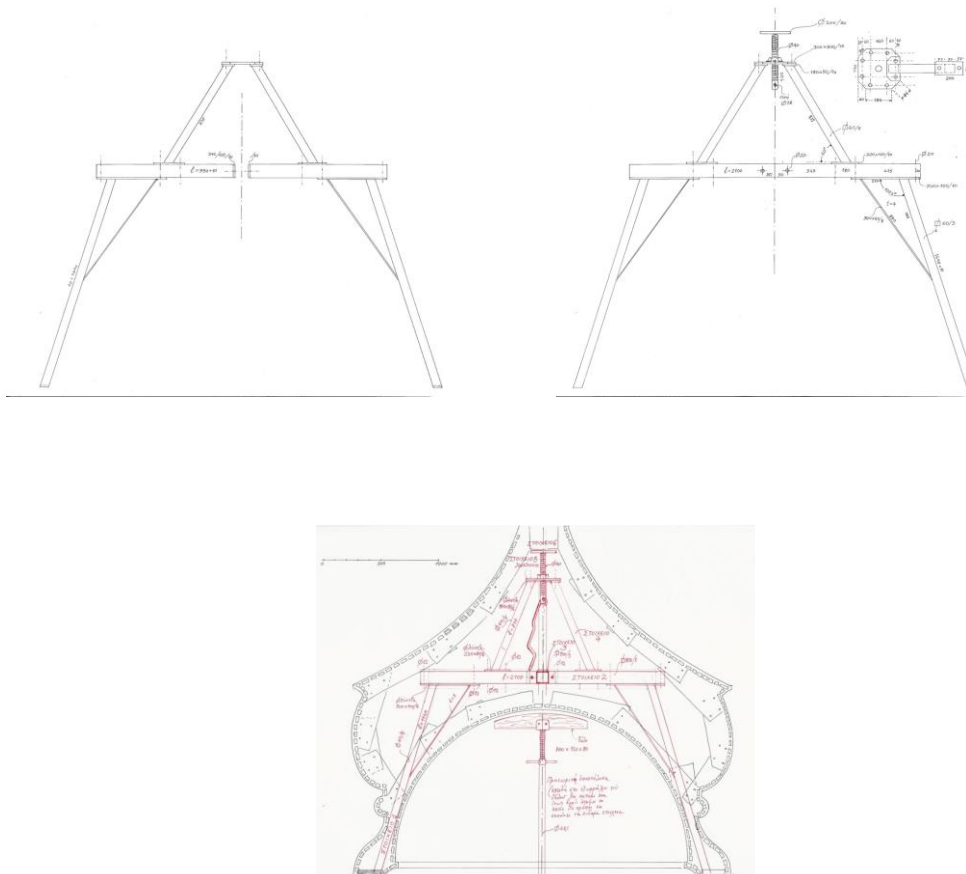


Εικόνα 5.11: Σύνδεση βάσης εξωτερικού θόλου, ενδεικτικά, με μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν επί τόπου στο έργο.

5.4. Μεταλλικό στέλεχος και έλεγχος λειτουργικότητας

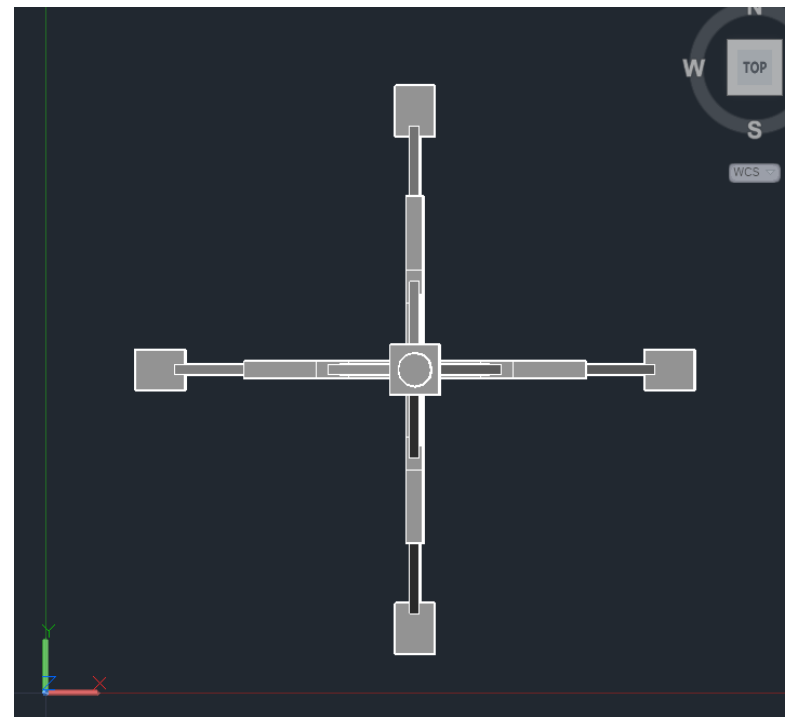
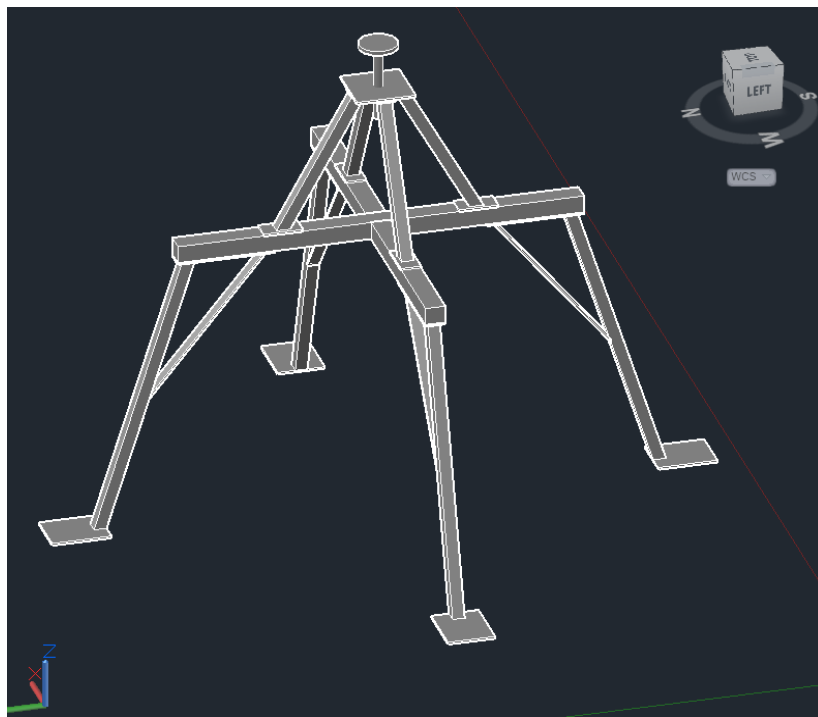
Για την υποστήριξη του ξύλινου φορέα του Τρούλου και την επιμήκυνση του χρόνου ζωής της δομής του, σχεδιάστηκε από τον καθηγητή κύριο Μανόλη Κορρέ μεταλλικό στέλεχος (εικόνες 5.12-5.17.), το οποίο με τη βοήθεια εξειδικευμένου συνεργείου τοποθετήθηκε στο εσωτερικού του Τρούλου όπως φαίνεται στην εικόνα 5.17. Λόγω της κίνησης του συνεργείου μέσα στον Τρούλο, προβλέφθηκε ανακουφιστική προσωρινή υποστήλωση, όπως φαίνεται στην εικόνα 5.14, για την παραλαβή του κινητού βάρους των ανθρώπων, κατά την διαδικασία της τοποθέτησης της μεταλλικής κατασκευής.

Στη συνέχεια το μεταλλικό στέλεχος προσομοιώθηκε σε πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων (Robot της Autodesk) με βάση τις διαστάσεις των σχεδίων του κ. Κορρέ. Υπολογίστηκε το συνολικό βάρος της κατασκευής ($\approx 2\text{tn}^{19}$, υπέρ της ασφάλειας) το οποίο θα παραλαμβάνει το μεταλλικό στέλεχος και θα λειτουργεί ανακουφιστικά για την κατασκευή. Και προέκυψαν τα παρακάτω αποτελέσματα (εικόνες 5.18-5.32).



Εικόνες 5.12-5.13-5.14: Μεταλλική κατασκευή κ. Κορρέ για την παραλαβή των φορτίων του Τρούλου εσωτερικά.

¹⁹ Βλ. Υποκεφάλαιο 5.5 «Παραμετρική ανάλυση», για τον υπολογισμό του βάρους της κατασκευής.

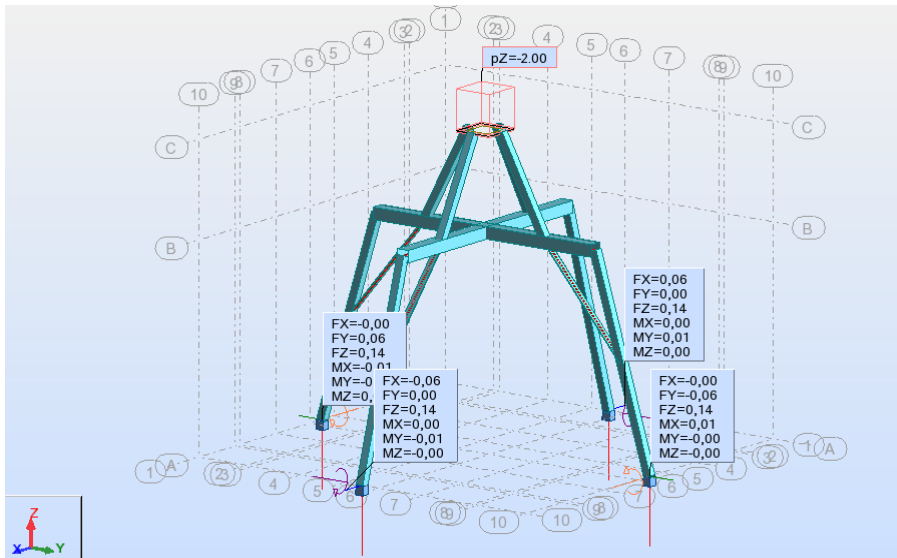


Εικόνες 5.15-5.16: Δημιουργία 3D Μοντέλου για την καλύτερη κατανόηση της δομής της μεταλλικής κατασκευής.

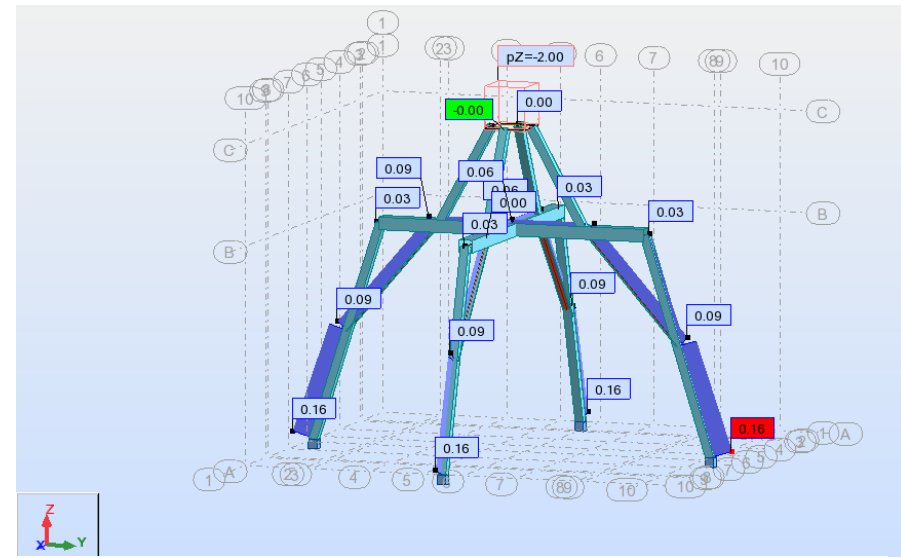


Εικόνα 5.17: Συναρμολόγηση και τοποθέτηση της μεταλλικής κατασκευής στον Τρούλο.

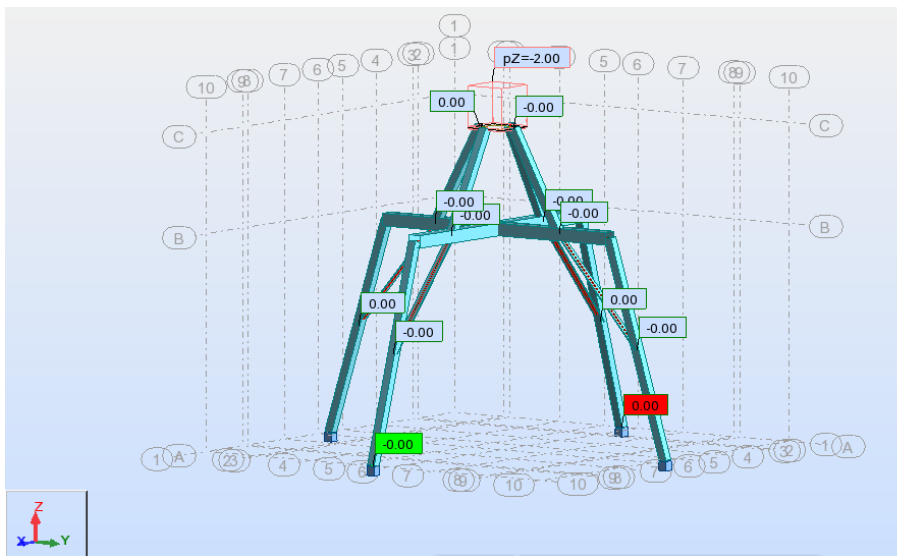
Στην παραπάνω εικόνα απεικονίζεται η μεταλλική κατασκευή κατά τη διαδικασία συναρμολόγησής της στο εργοτάξιο και κατά τη διαδικασία τοποθέτησής της μέσα στον Τρούλο.



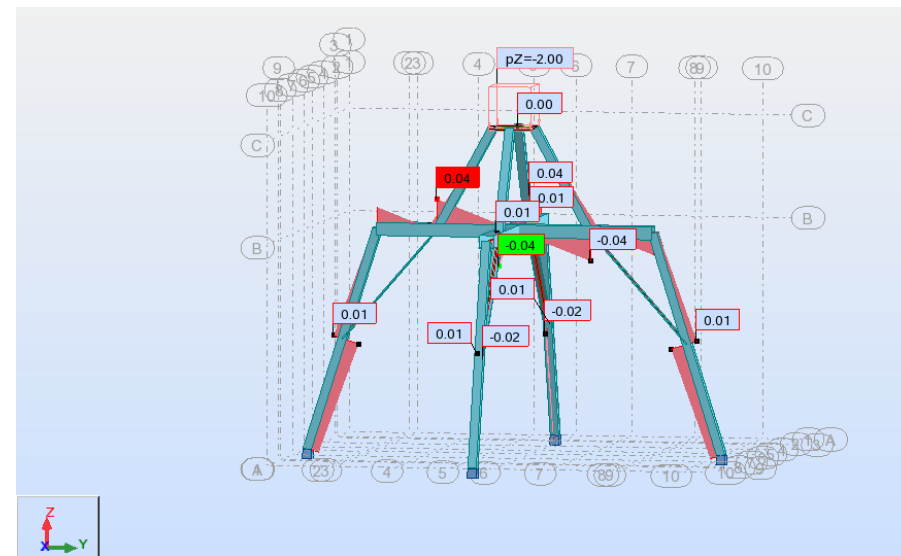
Εικόνα 5.18: Αντιδράσεις στηρίξεων μεταλλικής κατασκευής κατά τους άξονες x, y, z.



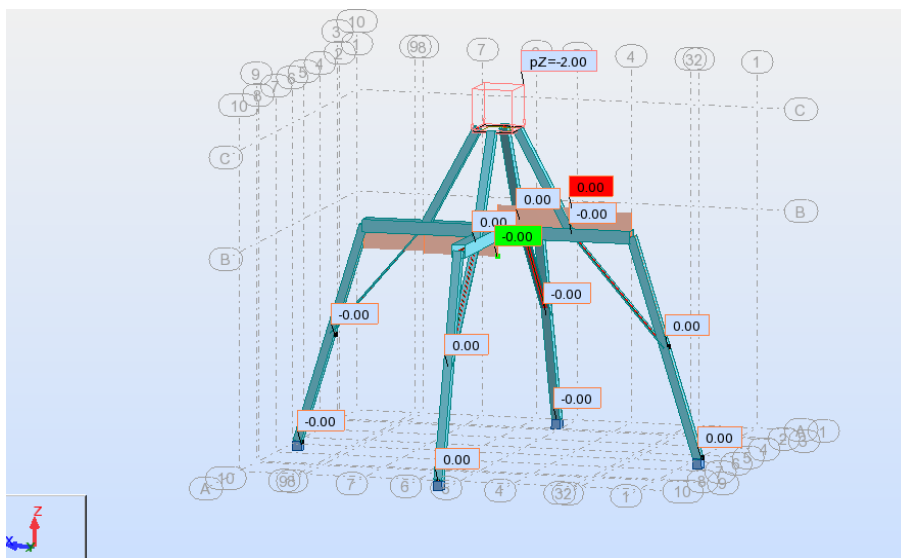
Εικόνα 5.19: Κατανομή κατά x δυνάμεων.



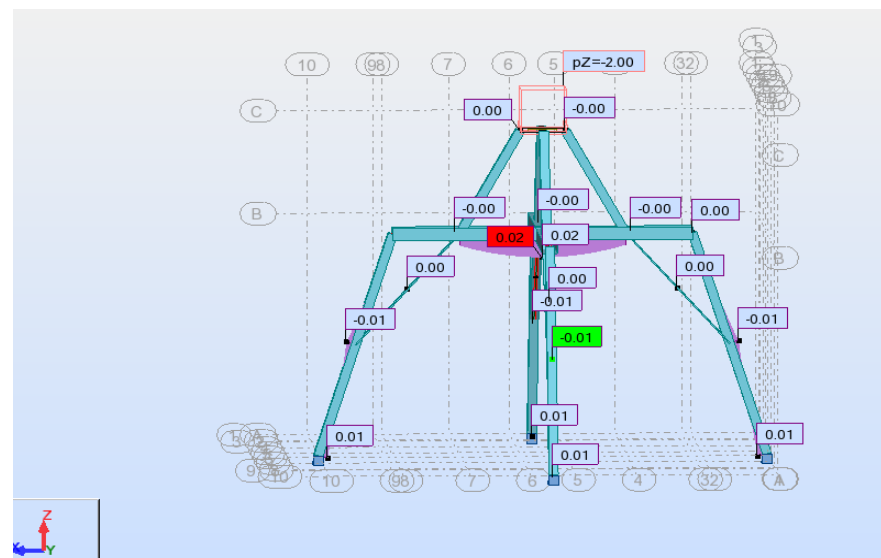
Εικόνα 5.20: Κατανομή κατά y δυνάμεων.



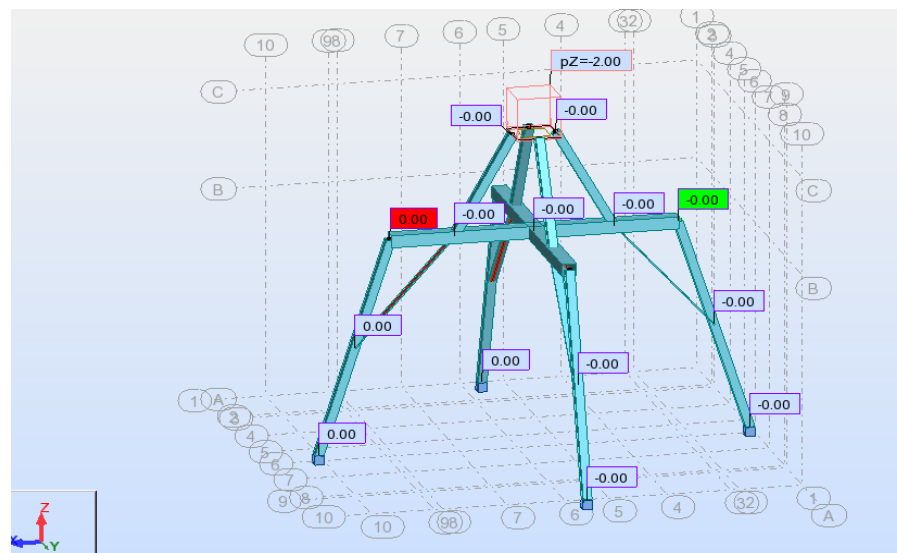
Εικόνα 5.21: Κατανομή κατά z δυνάμεων.



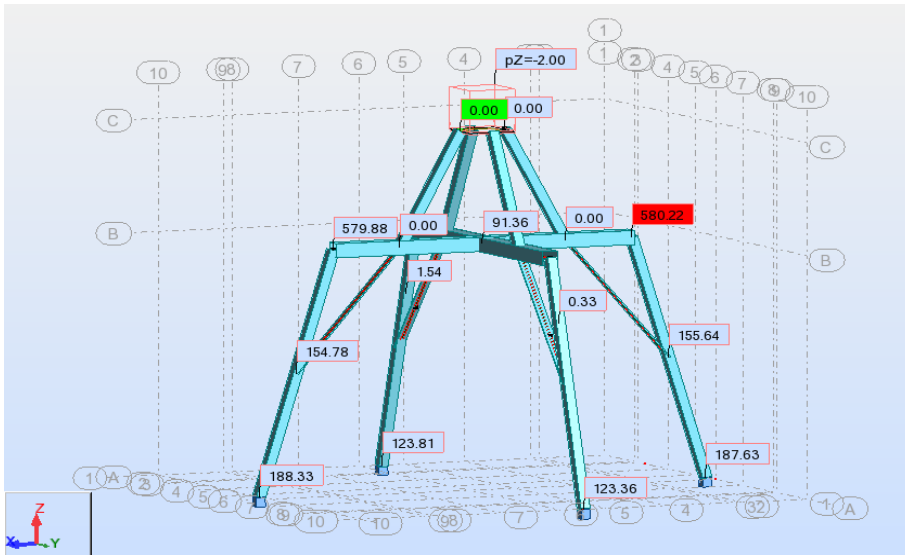
Εικόνα 5.22: Κατανομή ροπών κατά x.



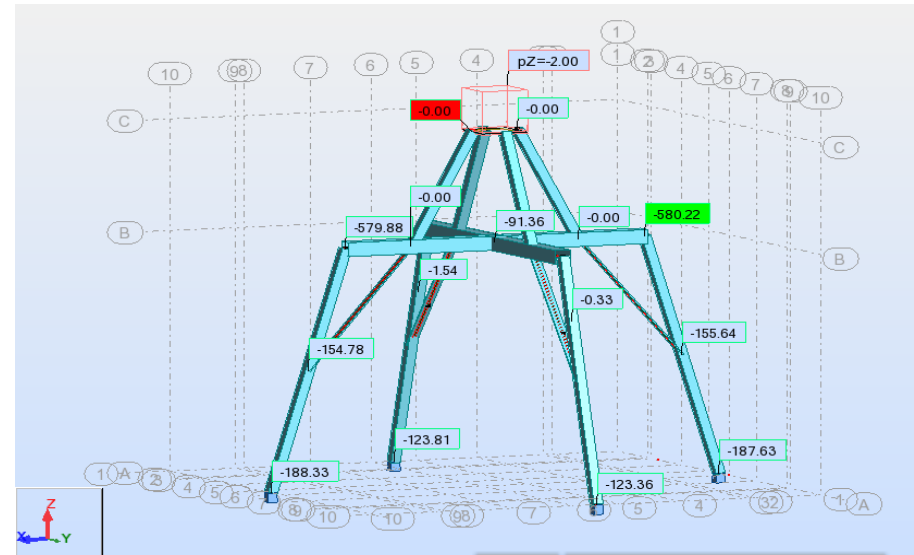
Εικόνα 5.23: Κατανομή ροπών κατά y.



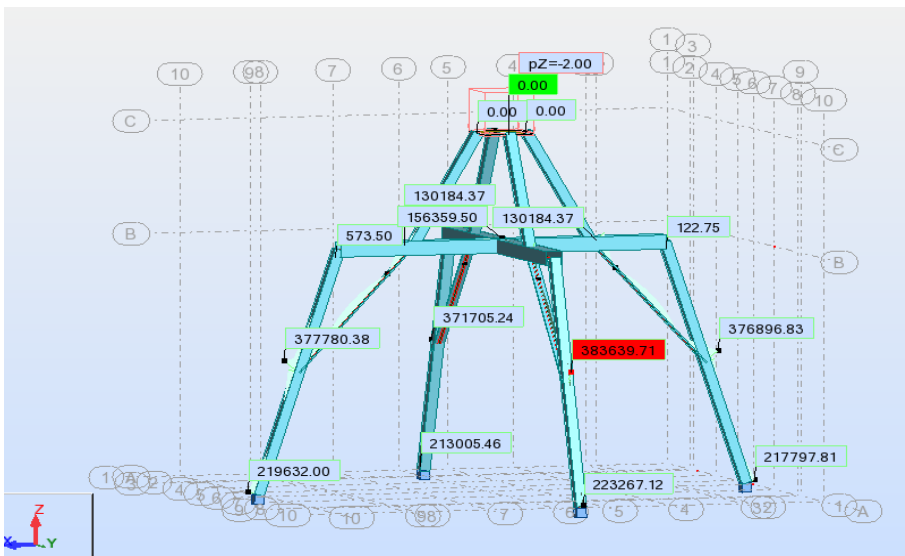
Εικόνα 5.24: Κατανομή ροπών κατά z.



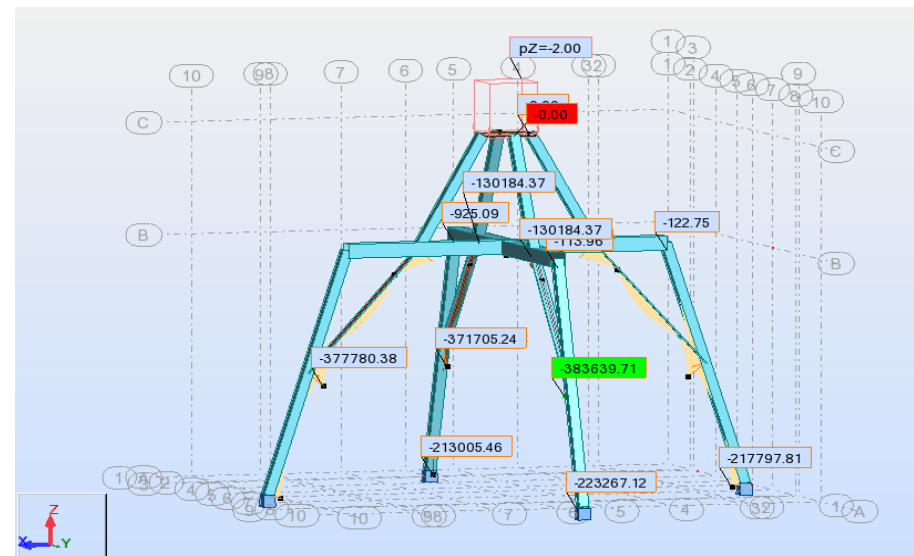
Εικόνα 5.25: Κατανομή καμπτικών τάσεων Smax κατά Mz.



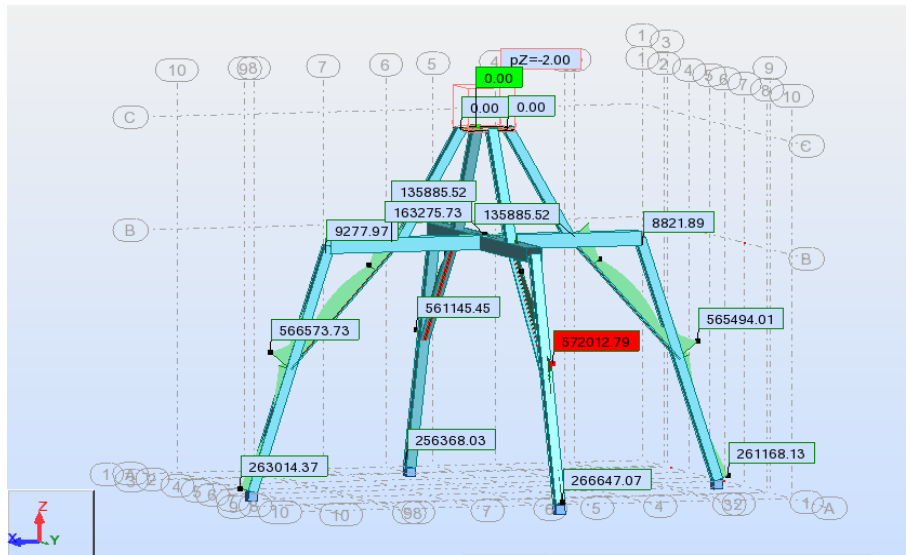
Εικόνα 5.26: Κατανομή καμπτικών τάσεων Smin κατά Mz.



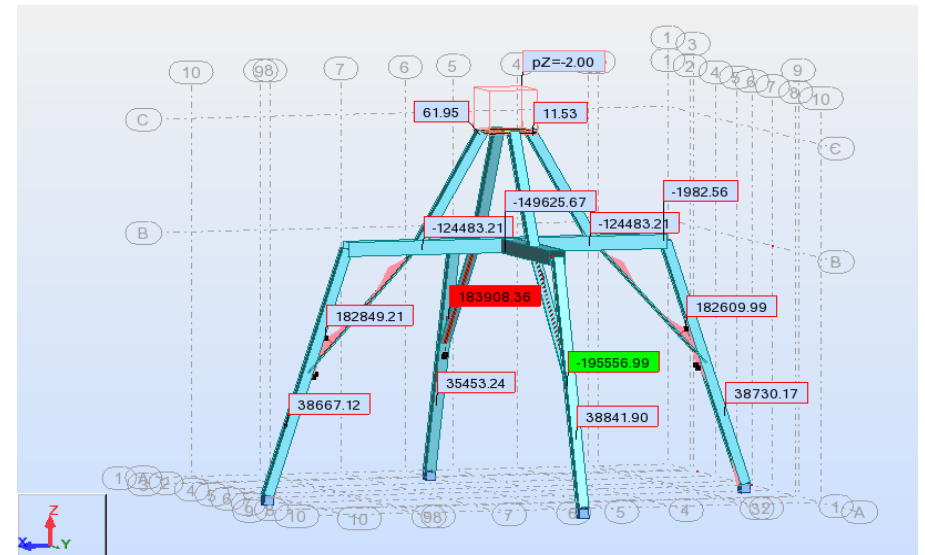
Εικόνα 5.27: Κατανομή καμπτικών τάσεων Smax κατά My.



Εικόνα 5.28: Κατανομή καμπτικών τάσεων Smin κατά My.



Εικόνα 5.29: Διάγραμμα τάσεων maximum Smax.



Εικόνα 5.30: Διάγραμμα τάσεων minimum Smin.

ΡΑΒΔΟΣ / ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ	von mises [Fx, Fy, Fz, Mx, My, Mz] min.	von mises [Fx, Fy, Fz, Mx, My, Mz] max.	ΚΑΝΟΝΙΚΟ min.	ΚΑΝΟΝΙΚΟ max.	Ταυ xy max.	Ταυ xz max.	von Mises max.
	kgf/m2	kgf/m2	kgf/m2	kgf/m2	kgf/m2	kgf/m2	kgf/m2
1 / 1	95.77	261168.13	-186603.14	261168.13	81.60	539.17	261168.13
2 / 1	58.67	263014.37	-187761.71	263014.37	74.63	5419.11	263014.37
3 / 1	0.00	135885.52	-124483.21	135885.52	0.00	4710.14	135885.52
4 / 1	0.00	135885.52	-124483.21	135885.52	0.00	4710.14	135885.52
5 / 1	470.48	163276.20	-149626.13	163276.19	6408.12	133.80	163276.20
6 / 1	674.34	256368.03	-183125.11	256368.03	5.38	5233.01	256368.03
7 / 1	80.61	266647.07	-189742.33	266647.07	2.35	5408.97	266647.07
8 / 1	0.00	135885.52	-124483.21	135885.52	0.00	4710.14	135885.52
9 / 1	0.00	135885.52	-124483.21	135885.52	0.00	4710.14	135885.52
10 / 1	425.27	163838.80	-150135.81	163838.80	6533.04	8.95	163838.80
12 / 1	596.08	572012.07	-195306.15	572012.79	4164.88	1.19	572012.79
13 / 1	1071.84	566573.73	-189296.61	566573.73	4141.69	35.96	566573.73
14 / 1	1164.47	565488.35	-188610.92	565494.01	4135.31	26.51	565494.01
15 / 1	2028.03	561145.45	-182304.41	561145.45	3934.43	0.16	561145.45

Εικόνα 5.31: Τάσεις von Mises για κάθε μία από τις ράβδους της μεταλλικής κατασκευής.

	von Mises [Fx, Fy, Fz, Mx, My, Mz] min.	von Mises [Fx, Fy, Fz, Mx, My, Mz] max.	ΚΑΝΟΝΙΚΟ min.	ΚΑΝΟΝΙΚΟ max.	Tau xy max.	Tau xz max.	von Mises max.
	kgf/m ²	kgf/m ²	kgf/m ²	kgf/m ²	kgf/m ²	kgf/m ²	kgf/m ²
ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ	1 : DL1						
ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΙΜΗ	0.00	572012.07	-195306.15	572012.79	6533.04	5419.11	572012.79
ΘΕΣΗ ΔΙΑΤΟΜΗΣ	1.00	0.00	0.00	0.00	0.22	0.51	0.00
ΡΑΒΔΟΣ	9	12	12	12	10	2	12

Εικόνα 5.32: Maximum τάση von Mises ολόκληρης της μεταλλικής κατασκευής.

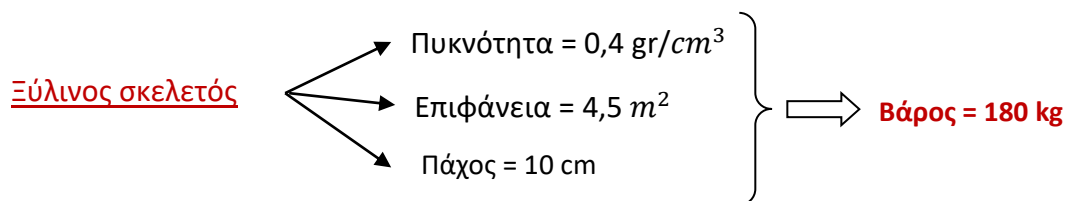
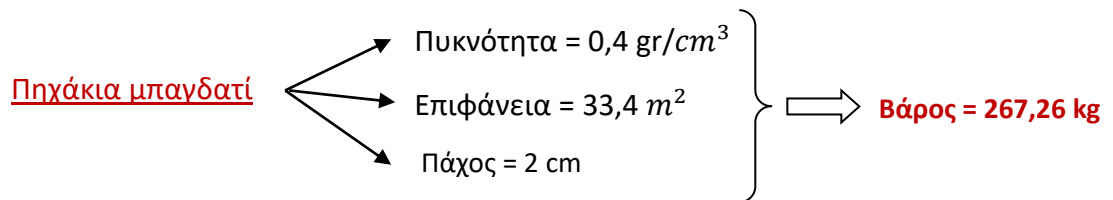
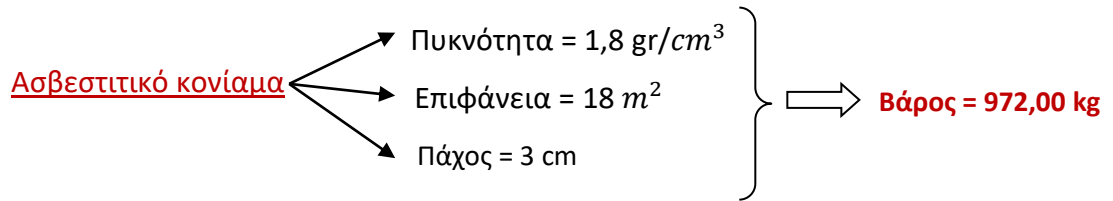
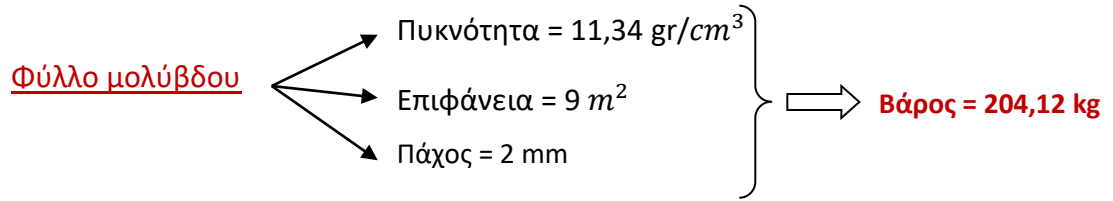
Η ανάλυση της μεταλλικής κατασκευής στο πρόγραμμα Robot έγινε για να ελέγξουμε αν μπορεί να παραλάβει το φορτίο των θόλων χωρίς να υπάρξει ενδεχόμενη μελλοντική αστοχία. Γι' αυτό το λόγο, υπολογίστηκε το βάρος της κατασκευής σε τόνους και εισήχθη, σαν ομοιόμορφο μόνιμο φορτίο στην κατασκευή. Το πρόγραμμα έδωσε τα άνωθεν αποτελέσματα από τα οποία υπολογίστηκε η μέγιστη τάση von Mises. Αυτή βρίσκεται στην δοκό 12, δηλαδή στο σημείο της ένωσης των κατακόρυφων δοκών με τις δεσμικές ράβδους (λάμες) και είναι $572012,79 \text{ kgf/m}^2$. Αν λοιπόν θεωρήσουμε ότι η μεταλλική κατασκευή είναι κατασκευασμένη από δομικό χάλυβα S275 (ούτως ώστε να βρισκόμαστε υπέρ της ασφάλειας), ο οποίος έχει τάση διαρροής 275MPa, τότε πρέπει να συγκρίνουμε τη μέγιστη τάση von Mises (max) που εξήγαγε το Robot, και αυτή να μην ξεπερνά σε μέγεθος την τάση διαρροής του χάλυβα, για να εξασφαλίσουμε την στατικότητα της κατασκευής. Μετατρέπουμε, επομένως, τα $572012,79 \text{ kgf/m}^2$ σε MPa και παίρνουμε το εξής:

$$\text{Von Mises max}_{12} = 572012,79 \text{ kgf/m}^2 = 5,61 \text{ MPa} < < 275 \text{ MPa}$$

Επομένως **βρισκόμαστε στην ασφάλεια**. Η μεταλλική κατασκευή δεν κινδυνεύει από το βάρος των θόλων.

5.5. Παραμετρική ανάλυση των υλικών κατασκευής του Τρούλου

○ Μάζα της κατασκευής:



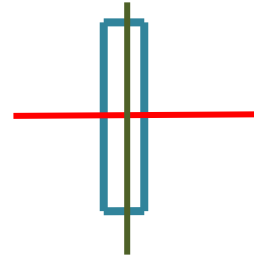
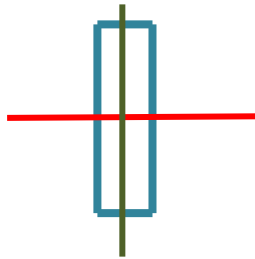
Mass = 1,7tn \approx 2tn

Ξύλινα μέλη φέροντα οργανισμού εσωτερικού και εξωτερικού θόλου:

Material=**C14** (κωνοφόρο)

Timber 40x80 εξωτερικού θόλου

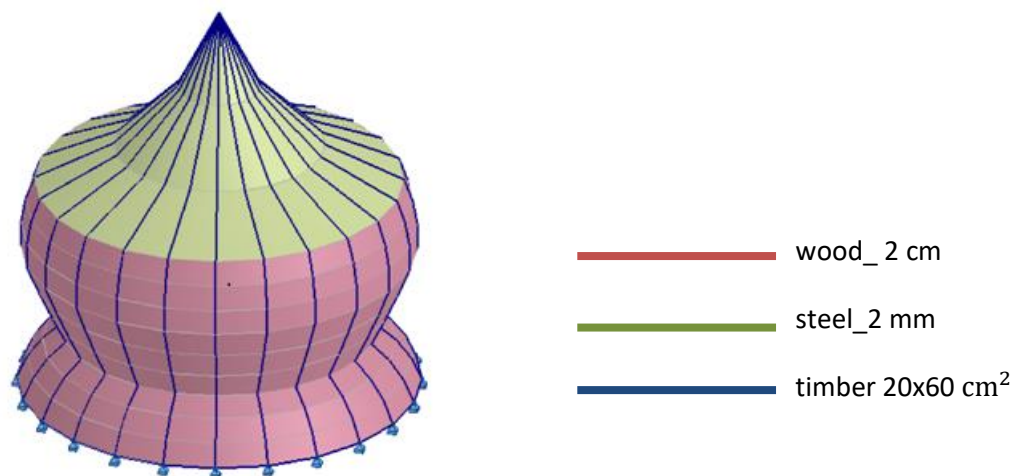
Timber 40x50 εσωτερικού θόλου



Ιδιότητες υλικών (που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση στο πρόγραμμα Robot)

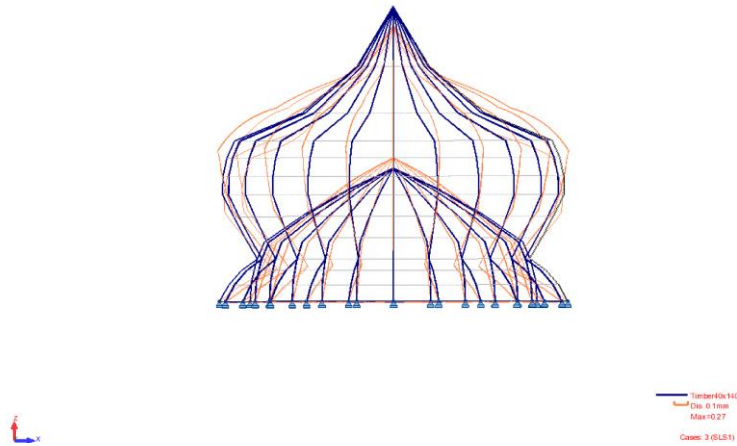
	Material	E (MPa)	G (MPa)	Re (MPa)
1	C14	7000.00	440.00	14.00
2	Pb	16000.00	11340.00	10.00

Πίνακας 5.1: Ιδιότητες των υλικών του Τρούλου που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση στο πρόγραμμα Robot.



Εικόνα 5.33: Προσομοίωση του Τρούλου στο πρόγραμμα Robot.

5.5.1. Σε θερμοκρασία

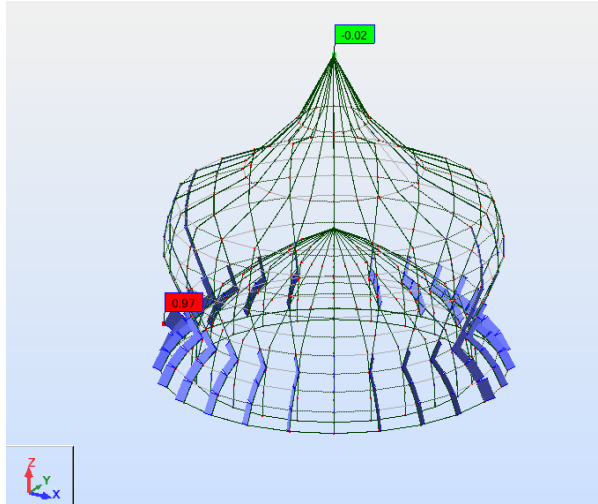


Εικόνα 5.34: Παραμόρφωση Τρούλου υπό θερμοκρασιακή καταπόνηση.

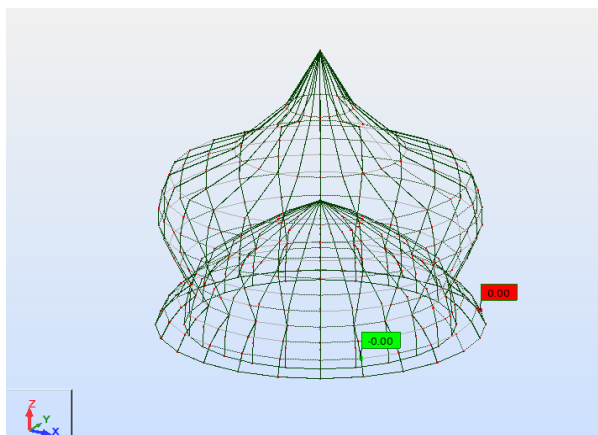
Σε θερμική καταπόνηση 50 °C κατά τον άξονα Z μελετήθηκε η συμπεριφορά του ξύλινου σκελετού του Τρούλου, ο οποίος εμφανίζει μέγιστη παραμόρφωση περί τα 2mm. Η παραμόρφωση αυτή είναι απαγορευτική αφού υπάρχει ασβεστιτική επίστρωση επιχρίσματος στην επιφάνεια του. Δεδομένης λοιπόν της κακής κατάστασης διατήρησης του επιχρίσματος, καθώς και της ήδη αποκολλημένης επιφάνειάς του από τα πηγάκια μπαγδατί, απορρίφθηκε η οποιαδήποτε αύξηση της θερμοκρασίας στην περιοχή των θόλων. Ακόμη η κακή κατάσταση διατήρησης των ήλων (ενανθράκωση) αλλά και η τυχαία τοποθέτησή τους απαγορεύει την περαιτέρω καταπόνησή τους με εγκάρσιες μετατοπίσεις.

5.5.2. Σε φορτία

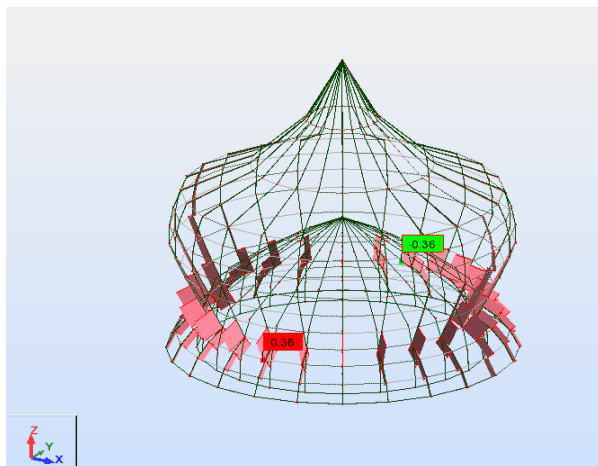
Στις παρακάτω εικόνες 5.35, 5.36, 5.37 βλέπουμε τις κατανομές των F_x , F_y , F_z δυνάμεων υπό την επίδραση του μόνιμου φορτίου του Τρούλου (ίδιον βάρος) αντίστοιχα.



Εικόνα 5.35: Κατανομή δυνάμεων κατά x .

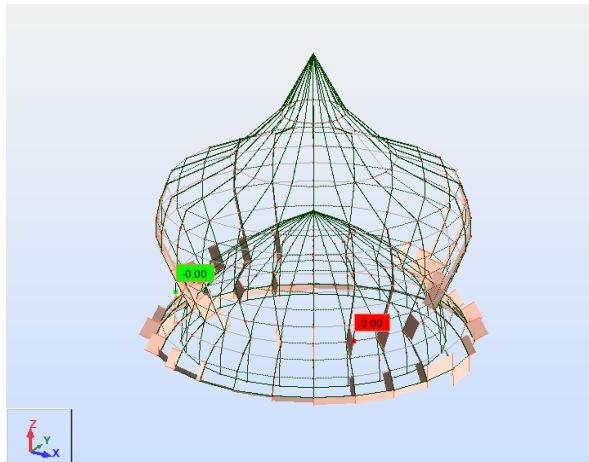


Εικόνα 5.36: Κατανομή δυνάμεων κατά y .

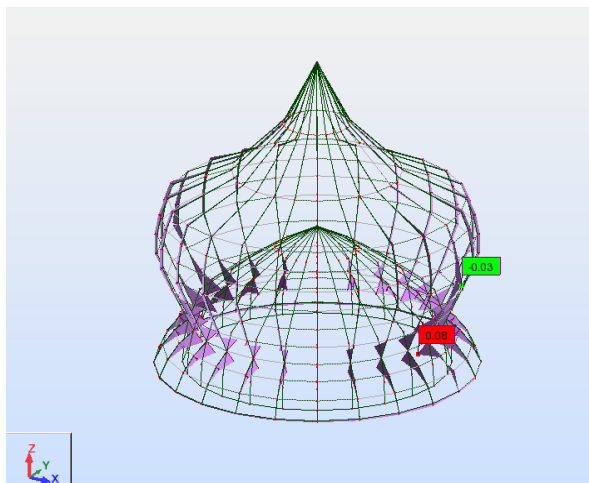


Εικόνα 5.37: Κατανομή δυνάμεων κατά z .

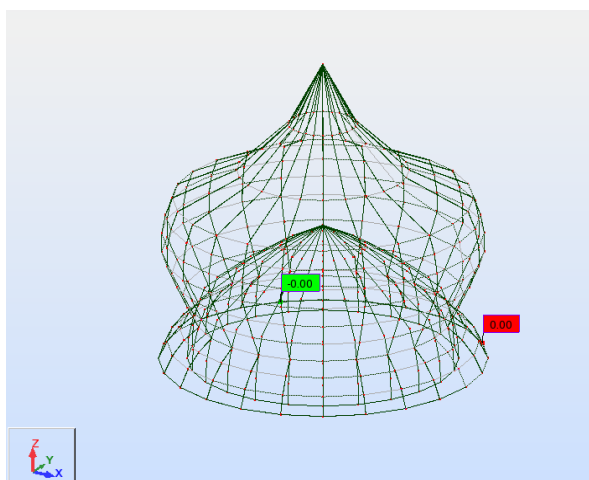
Στις επόμενες εικόνες 5.38, 5.39, 5.40 βλέπουμε την κατανομή των ροπών M_x , M_y , M_z υπό την επίδραση του μόνιμου φορτίου του Τρούλου (ίδιον βάρος) αντίστοιχα.



Εικόνα 5.38: Κατανομή ροπών κατά x .

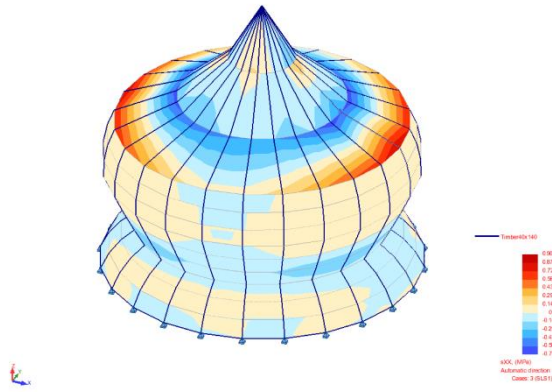


Εικόνα 5.39: Κατανομή ροπών κατά y .

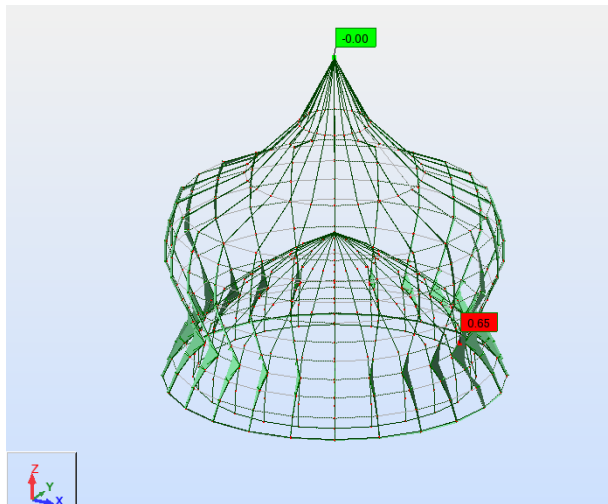


Εικόνα 5.40: Κατανομή ροπών κατά z .

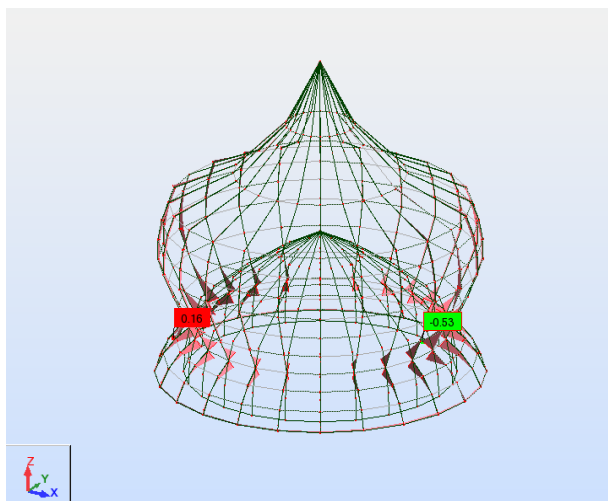
5.5.3. Σε τάσεις



Εικόνα 5.41: Σχηματική κατανομή των μέγιστων και ελάχιστων τάσεων.

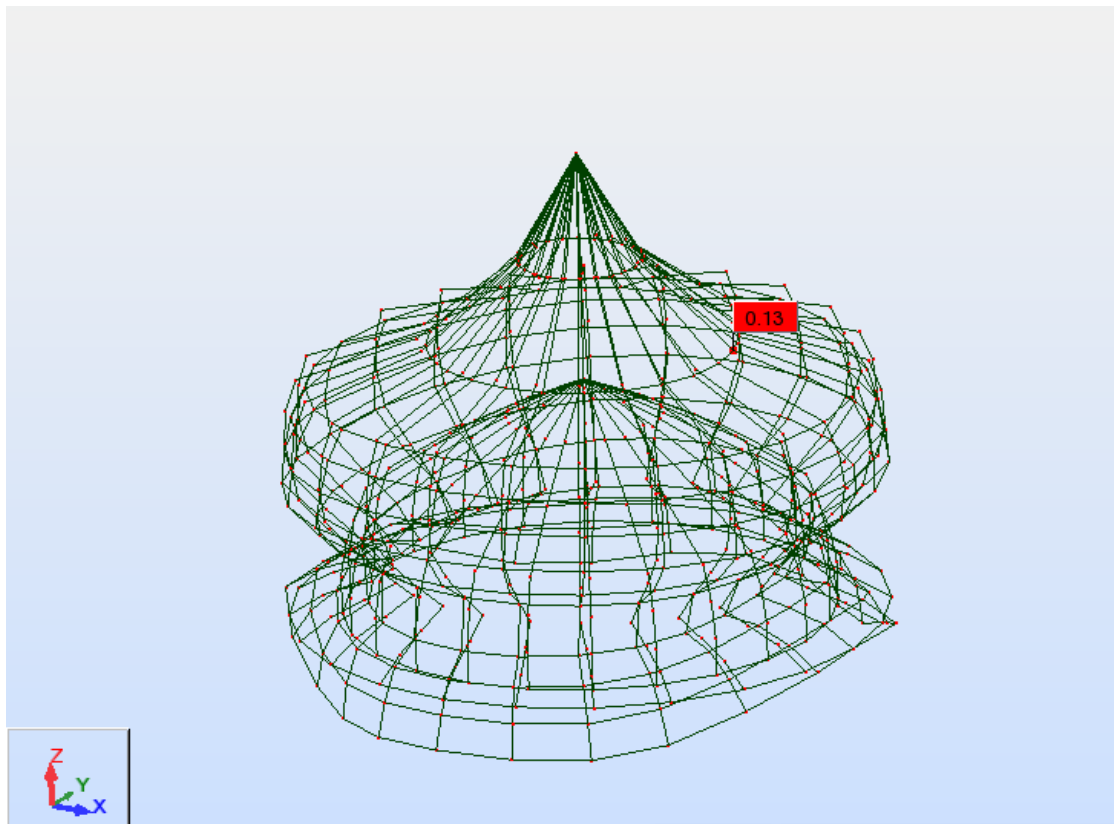


Εικόνα 5.42: Διαγραμματική κατανομή των μέγιστων τάσεων.



Εικόνα 5.43: Διαγραμματική κατανομή των ελάχιστων τάσεων.

Από όλα τα παραπάνω διαγράμματα προκύπτει ότι η μέγιστη παραμόρφωση των θόλων του Τρούλου λόγω του μόνιμου φορτίου του είναι 0,13 mm όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 5.44: Παραμόρφωση ξύλινου σκελετού λόγω μόνιμου βάρους.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο

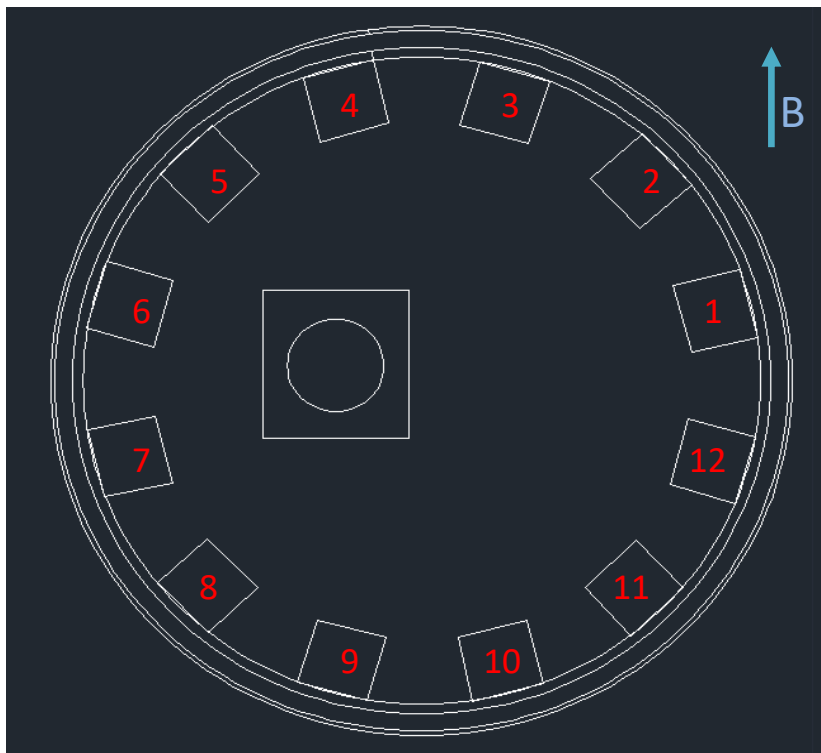
«ΠΑΘΟΛΟΓΙΑ ΤΡΟΥΛΟΥ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ»

6. ΠΑΘΟΛΟΓΙΑ ΤΡΟΥΛΟΥ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

6.1. Χαρτογράφηση φθοράς και βλαβών στα δομικά υλικά του τρούλου της ανωδομής του Ιερού Κουβουκλίου

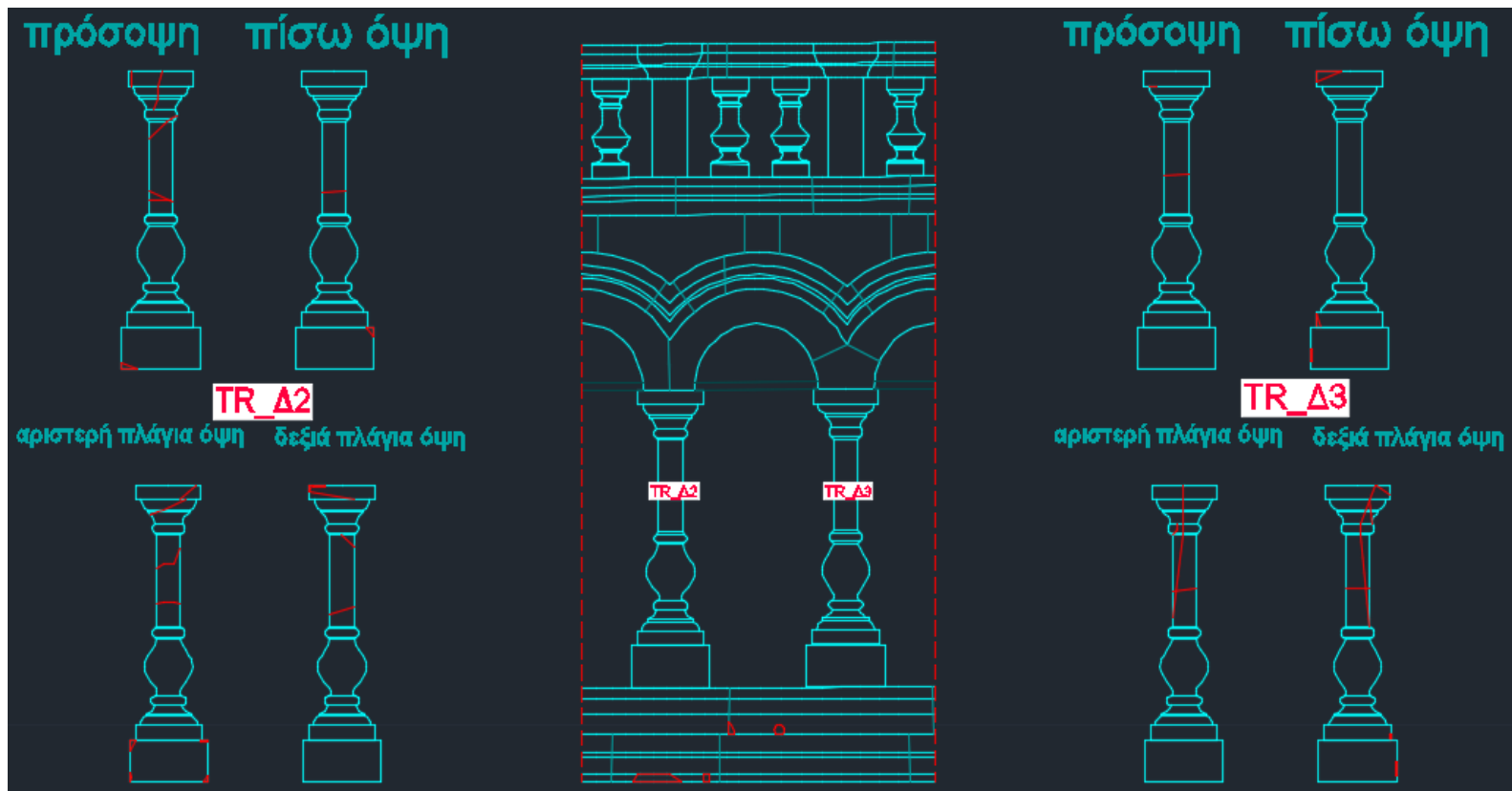
Έπειτα από προσεχτική μακροσκοπική παρατήρηση και πολύωρες μετρήσεις χαρτογραφήθηκαν οι επιφανειακές φθορές των δομικών υλικών του Τρούλου, οι οποίες εν συνεχεία παρουσιάζονται σε πρόγραμμα CAD. Η χαρτογράφηση των ρωγμών αποτέλεσε αρκετά δύσκολη διαδικασία ιδιαίτερα στο εσωτερικό του τρούλου διότι παχύ στρώμα μαύρης πάτινας, από την καύση των κεριών, κάλυπτε τη λίθινη επιφάνεια.

Η αρίθμηση των κίωνων ξεκινάει από την ανατολική πλευρά του Ιερού Κουβουκλίου και από τον αριστερό κίονα, διαγράφοντας αριστερόστροφη φορά. Μετρήθηκαν οι αστοχίες σε όλες τις ζώνες καθ' ύψος και σε όλα τα μέλη της κάθε ζώνης (232 λίθινα μέλη).

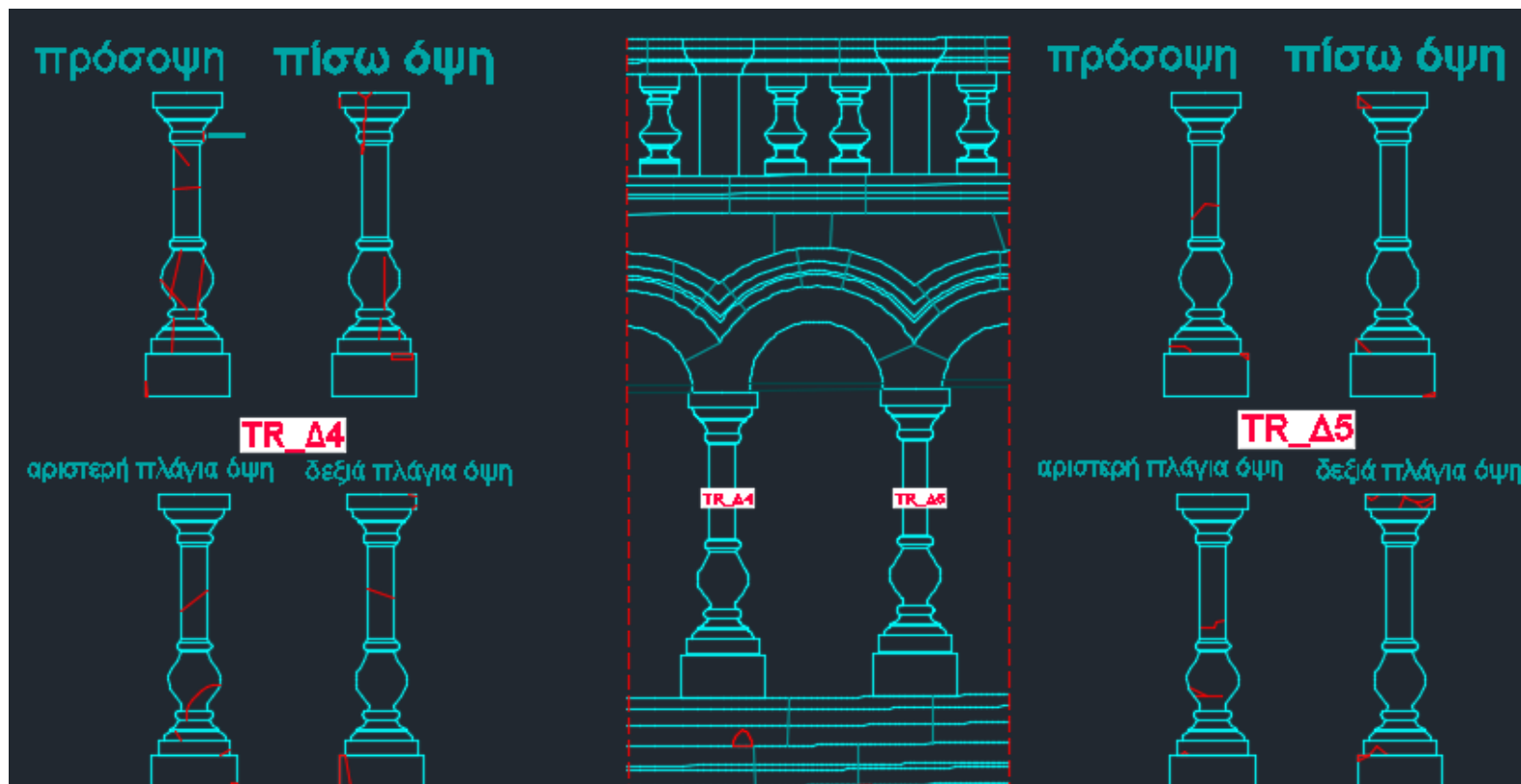


Εικόνα 6.1: Αρίθμηση κίωνων.

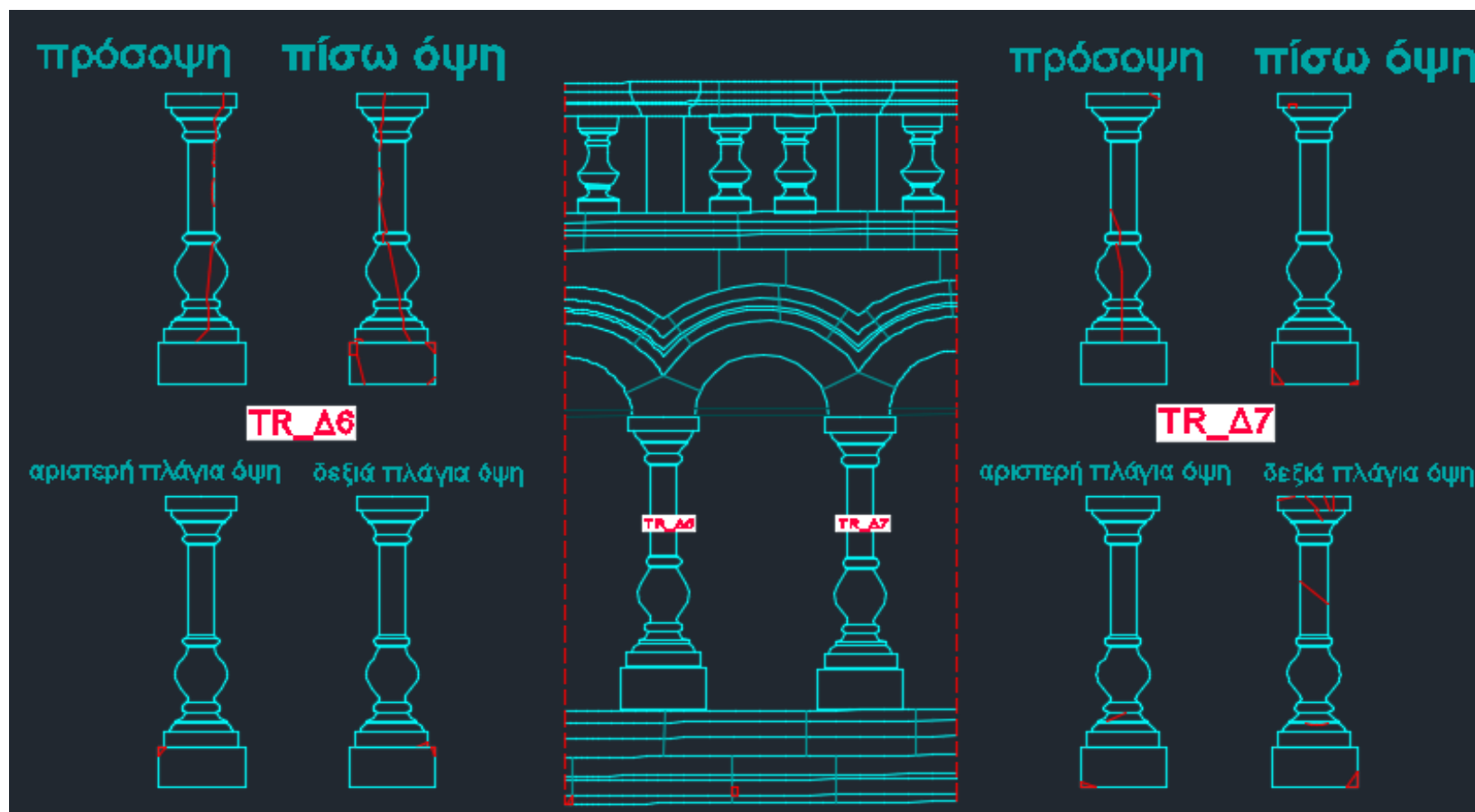
Οι απώλειες αυθεντικού υλικού παρατηρήθηκαν κυρίως στα σημεία λικνισμού των κίωνων δηλαδή 'έλειπαν' γωνίες στην άνω και κάτω βάση κάθε κίονα. Οι ρηγματώσεις που σημειώθηκαν είχαν άνοιγμα μικρότερο του ενός χιλιοστού και φαινόταν σαν να είχαν συμπληρωθεί με κάποιου είδους συγκολλητικό υλικό. Και οι δύο παραπάνω φθορές δεν επηρεάζουν τη στατικότητα του μνημείου αφού θεωρούνται αμελητέες.



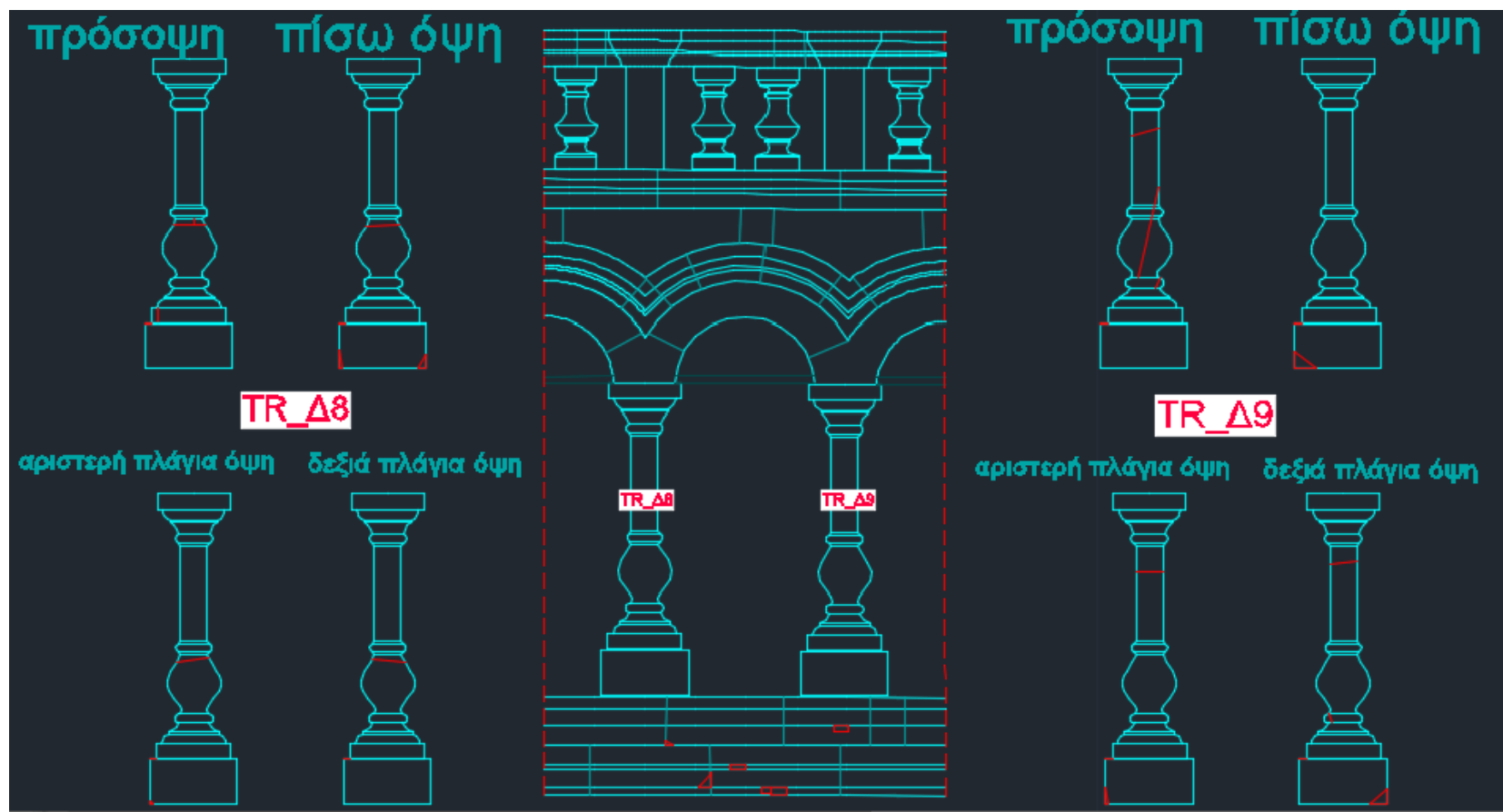
Εικόνα 6.3: Φθορές ζωνών Α έως Ι. Με κόκκινο χρώμα σημειώνονται οι ρηγματώσεις και οι απώλειες αυθεντικού υλικού. Ακόμη εμφανίζονται δεξιά και αριστερά όλες οι όψεις των κιόνων 2 και 3 και των βάσεων τους.



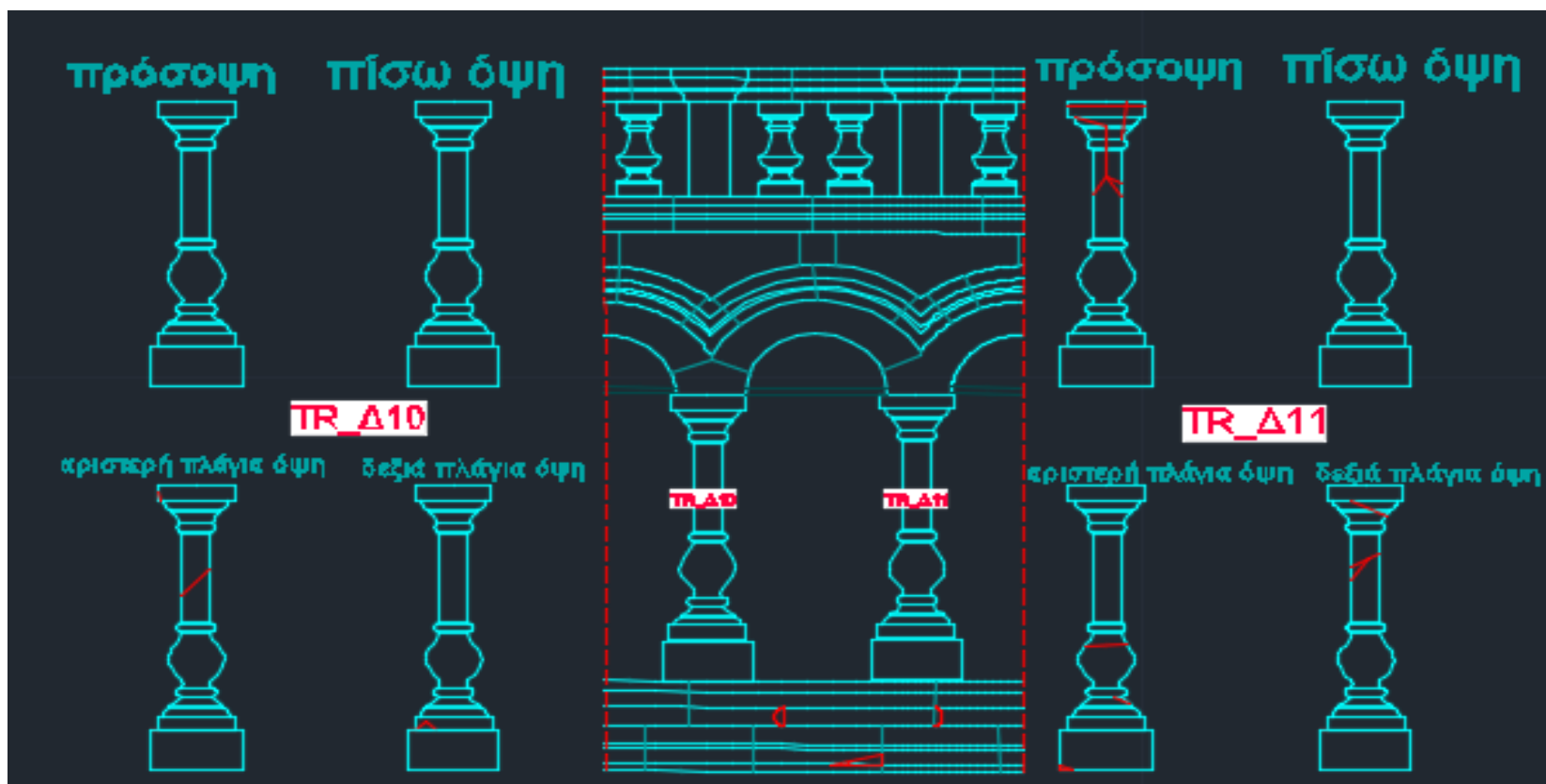
Εικόνα 6.3: Φθορές ζωνών Α έως Ι. Με κόκκινο χρώμα σημειώνονται οι ρηγματώσεις και οι απώλειες αυθεντικού υλικού. Ακόμη εμφανίζονται δεξιά και αριστερά όλες οι όψεις των κίωνων 4 και 5 και των βάσεων τους.



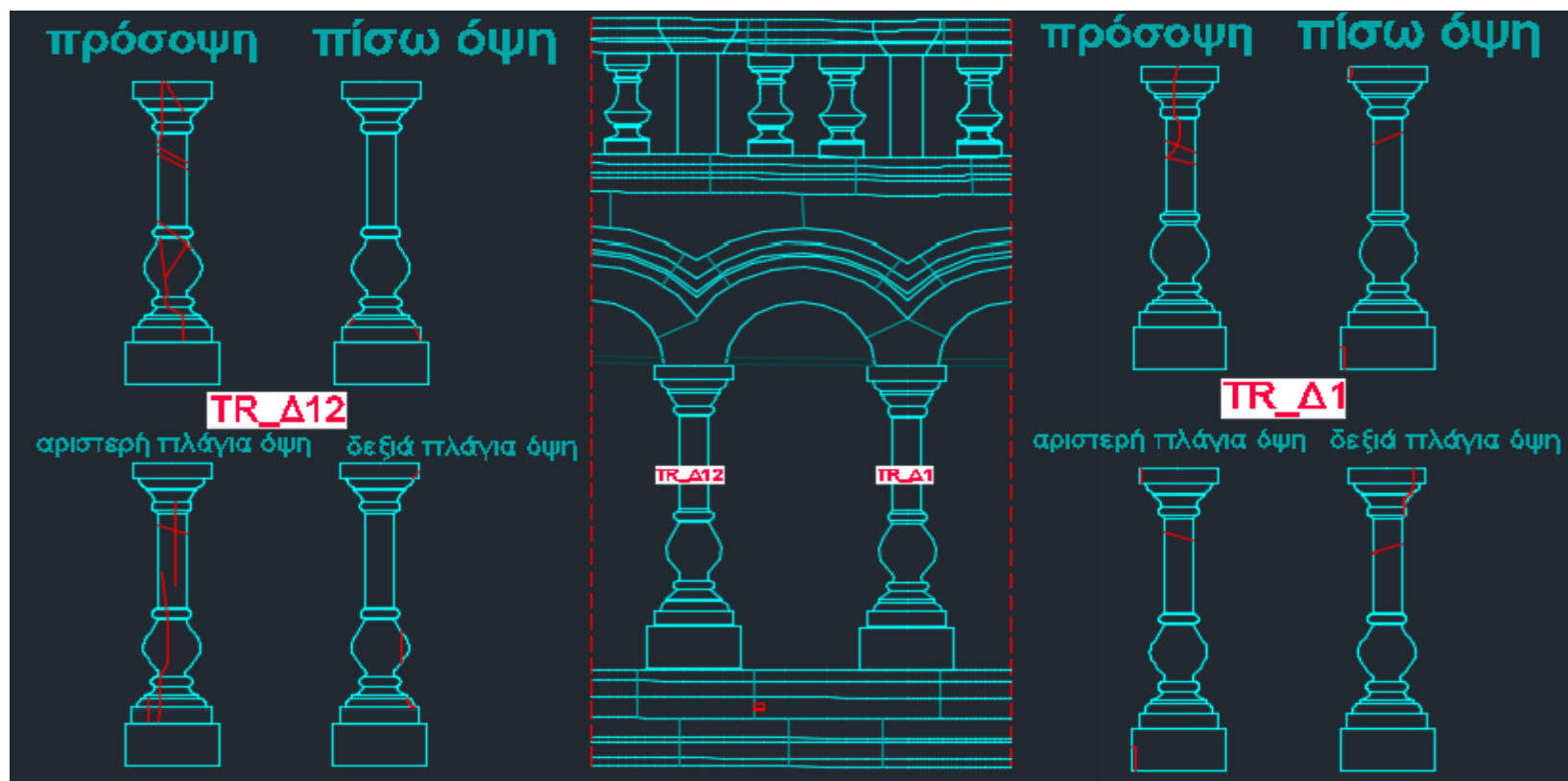
Εικόνα 6.4: Φθορές ζωνών Α έως Ι. Με κόκκινο χρώμα σημειώνονται οι ρηγματώσεις και οι απώλειες αυθεντικού υλικού. Ακόμη εμφανίζονται δεξιά και αριστερά όλες οι όψεις των κίωνων 6 και 7 και των βάσεων τους.



Εικόνα 6.5: Φθορές ζωνών Α έως Ι. Με κόκκινο χρώμα σημειώνονται οι ρηγματώσεις και οι απώλειες αυθεντικού υλικού. Ακόμη εμφανίζονται δεξιά και αριστερά όλες οι όψεις των κιόνων 8 και 9 και των βάσεων τους.



Εικόνα 6.6: Φθορές ζωνών Α έως Ι. Με κόκκινο χρώμα σημειώνονται οι ρηγματώσεις και οι απώλειες αυθεντικού υλικού. Ακόμη εμφανίζονται δεξιά και αριστερά όλες οι όψεις των κίωνων 10 και 11 και των βάσεων τους.



Εικόνα 6.7: Φθορές ζωνών Α έως Ι. Με κόκκινο χρώμα σημειώνονται οι ρηγματώσεις και οι απώλειες αυθεντικού υλικού. Ακόμη εμφανίζονται δεξιά και αριστερά όλες οι όψεις των κιόνων 12 και 1 και των βάσεων τους.

6.2. Προσβολή ξύλινης δομής του Τρούλου από ξυλοφάγα έντομα

Το σομφό ξύλο όσο είναι ακόμη ζωντανό, δηλαδή δέντρο, είναι δύσκολο να αποικηθεί από παθογόνους οργανισμούς. Αντίθετα όταν το σομφό ξύλο μετατραπεί σε δομική ξυλεία είναι ιδιαίτερα ευπαθές εξαιτίας των θρεπτικών συστατικών που περιλαμβάνει τα οποία προτιμώνται από μύκητες και ξυλοφάγα έντομα. Στην περίπτωση του Τρούλου της ανωδομής του Ιερού Κουβουκλίου παρουσιάζεται τέτοιου είδους παθογένεια της κατασκευής του. Δηλαδή το μπαγδατί των δύο θόλων έχει προσβληθεί από μύκητες και ξυλοφάγα έντομα. Αυτά αναζητούν υψηλή σχετική υγρασία για να αναπτυχθούν. Η εμφάνιση σήψης παραμένει πιθανή μόνο όταν η περιεχόμενη υγρασία του ξύλου είναι μεγαλύτερη από 18-20%.

6.2.1. Προσβολή από μύκητες

Οι μύκητες είναι ετερότροφοι οργανισμοί γιατί χρειάζονται έτοιμες οργανικές ενώσεις για να τραφούν.

Οι μύκητες οι οποίοι εμφανίζονται κατά κύριο λόγο στις κατασκευές από ξύλο είναι οι ακόλουθοι και χωρίζονται σε κατηγορίες ανάλογα με το χρώμα που παίρνει το ξύλο δηλαδή καστανός ή λευκός μύκητας.

- **Caniaphora Puleana:** πρόκειται για καστανό μύκητα ο οποίος μπορεί να προσβάλει και τη μαλακή και τη σκληρή ξυλεία. Προτιμά τις υγρές συνθήκες, κάνει το ξύλο πιο σκούρο και διακρίνεται από κυβοειδούς μορφής σκασίματα.
- **Fibroporia Vaillantil:** καφέ μύκητας που προτιμά τις υψηλές θερμοκρασίες και προσβάλλει τη μαλακή ξυλεία. Το μυκήλιο διακρίνεται σαν λευκό ή υπόλευκο φύλλο.
- **Donkioporia Expansa:** καφέ μύκητας που επιτίθεται στην ξηρή ξυλεία, προτιμάει την υγρασία και το μυκήλιο του είναι κίτρινο.

Οι παραπάνω μύκητες αναπτύσσονται στο ξύλο που έχει υγρασία μεγαλύτερη από το 20% για μεγάλο χρονικό διάστημα. Αν η πηγή υγρασίας απομονωθεί και πέσει κάτω από το 20% τότε οι μύκητες θα αποδυναμωθούν και θα εξοντωθούν.

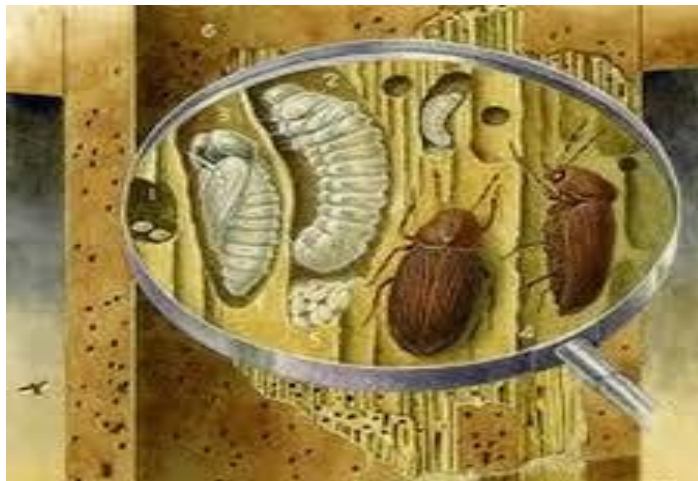
- **Serpula Lacrymans:** καφέ μύκητας ο οποίος αναπτύσσεται όταν το ξύλο έχει περιεχόμενη υγρασία 30-40%. Ωστόσο δεν προσβάλλει ξύλα με υγρασία μικρότερη του 20%. Αναπτύσσεται σε υπόγειους, μη αεριζόμενους χώρους, και ξύλινες επενδύσεις οι οποίες βρίσκονται κοντά σε πηγές υγρασίας. Η μορφή του είναι μία αφράτη λευκή μάζα ενώ σε ξηρές συνθήκες εμφανίζεται σαν γκρι επικάλυψη. Σημειώνεται ότι ενώ αυτός ο μύκητας δεν έχει τη δυνατότητα να

αποικίσει σε ξηρό ξύλο έχει την ικανότητα να εκκρίνει σταγόνες νερού και να υγραίνει το ξύλο.

6.2.2. Προσβολή από ξυλοφάγα έντομα

- **Κολεόπτερα – σκαθάρια:** πολλά είδη κολεόπτρων περνούν το μεγαλύτερο μέρος της ζωής τους τρώγοντας αργά το ξύλο. Υπάρχουν δύο είδη ξυλοφάγων κολεόπτρων- εκείνα που προσβάλλουν τη μαλακή ξυλεία και εκείνα που προσβάλλουν τη σκληρή ξυλεία.

Τα ενήλικα έντομα αφήνουν τα αυγά τους στις σχισμές/ρωγμές των ξύλινων επιφανειών. Στο στάδιο της εκκόλαψης τους η προνύμφη τρυπάει το ξύλο, εισχωρεί στο εσωτερικό του και αρχίζει να τρέφεται από αυτό δημιουργώντας τούνελ. Η προνύμφη χρειάζεται 2 έως 5 χρόνια, καταστροφικά για το ξύλο, έως ότου μετατραπεί σε κάμπια. Οι κάμπιες μετατρέπονται σε ενήλικα έντομα τρυπώντας το ξύλο για να βγουν έξω από αυτό και ένας νέος κύκλος προσβολής αρχίζει.



Εικόνα 6.8: Κύκλος ζωής ξυλοφάγων εντόμων (αυγό-προνύμφη-νύμφη-τέλειο).

- **Τερμίτες:** είναι ξυλοφάγα έντομα τα οποία μπορούν να προκαλέσουν πολύ μεγάλες καταστροφές στις κατασκευές. Ζουν σε ξηρό και υγιές περιβάλλον. Προσβάλλουν το ξύλο αφήνοντας άθικτη την εξωτερική του επιφάνεια. Υπάρχουν και τερμίτες οι οποίοι προσβάλλουν ξύλο με υψηλή περιεκτικότητα σε υγρασία.

Με την πολύτιμη βοήθεια του κύριου Αντώνιου Τσαγκαράκη, μέλους Ε.ΔΙ.Π. του Εργαστηρίου Γεωργικής Ζωολογίας και Εντομολογίας του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών, έγιναν τα παρακάτω:

Μακροσκοπικές παρατηρήσεις από τις οποίες εξήχθησαν τα εξής συμπεράσματα:

Πέραν των ενδείξεων της παρουσίας του εντόμου *Anobium punctatum* (Coleoptera Anobiidae), το οποίο είχε βρεθεί μετά από σχετική έρευνα δείγματος από το μπαγδατί του τρούλου σε εργαστηριακές εξετάσεις στο Γ.Π.Α., παρατηρήθηκαν ξυλοφάγα Υμενόπτερα (δύο νεκρά άτομα ξυλοφάγων «μελισσών» και μυρμηγκιών).

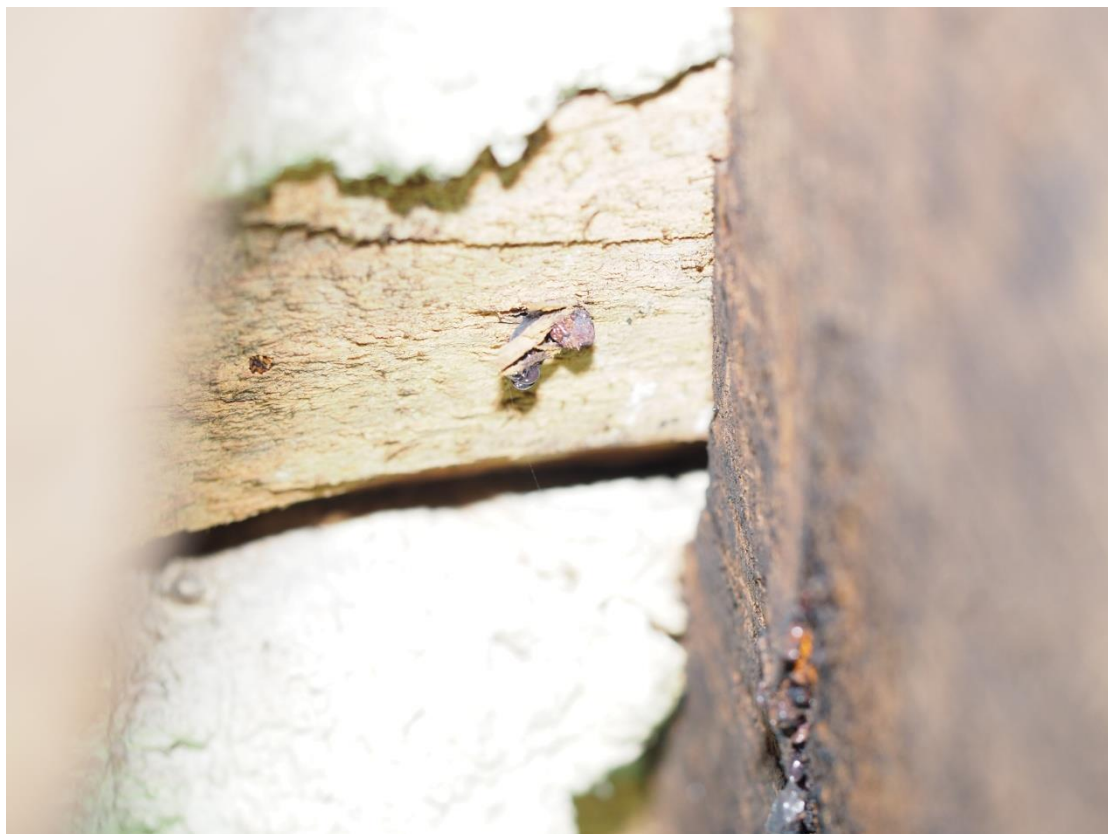
Στην δυτική όψη του τρούλου οι οπές στο ξύλο έχουν δημιουργηθεί από *A. Punctatum* και έχουν διάμετρο 2 με 4 χιλιοστά οι οποίες δεν είναι γνωστό αν είναι ενεργές. Το είδος αυτό θα αναλυθεί στο εργαστήριο με στερεοσκοπική παρατήρηση.

Στη συνέχεια της μακροσκοπικής εξέτασης παρατηρήθηκαν οπές μεγαλύτερου μεγέθους και διαφορετικού σχήματος το οποίο σημαίνει πως πιθανώς υπάρχει και κάποιο άλλο είδος κολεόπτερου το οποίο διαφέρει από το κοινό σαράκι.

Έντονη προσβολή παρατηρήθηκε στο σημείο του φορέα το οποίο έχει αποκαλυφθεί.

Στα νότια του τρούλου παρατηρήθηκαν, επίσης, οπές διαφορετικής διαμέτρου και σχήματος οι οποίες, επίσης, φανερώνουν ύπαρξη διαφορετικού εντόμου από τα κοινά σαράκια.

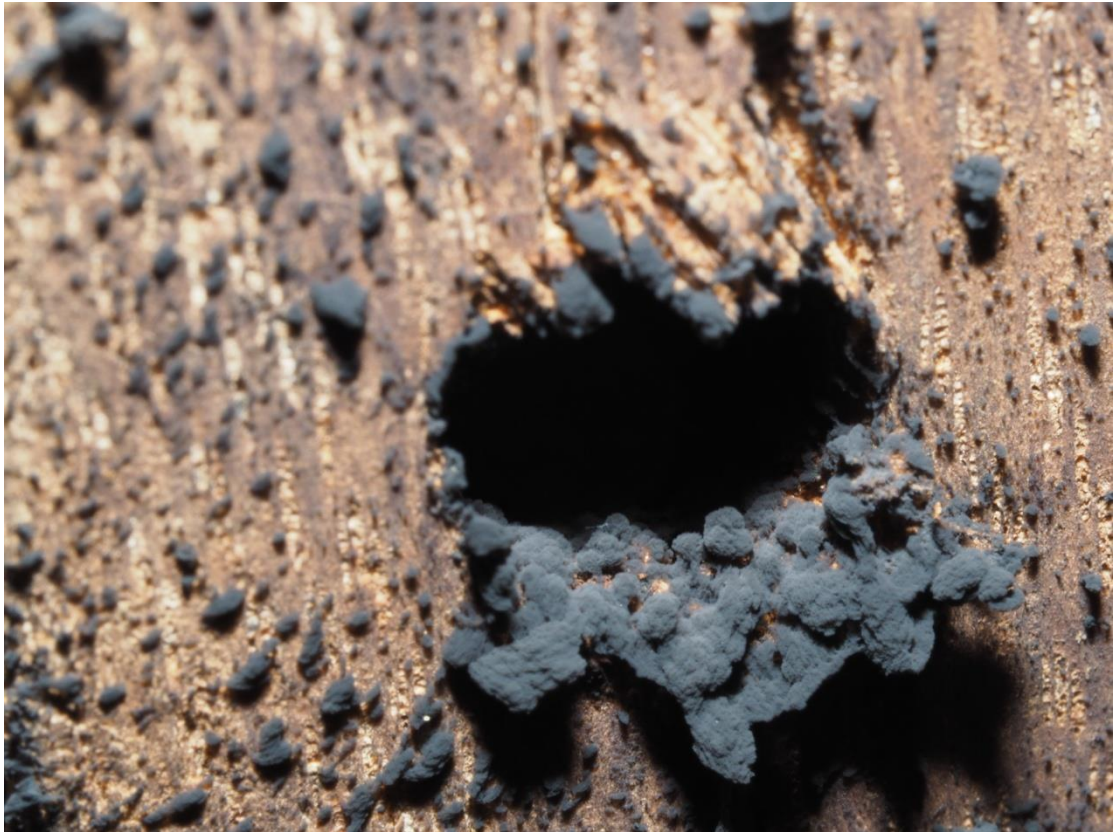
Τα παραπάνω απεικονίζονται στη συνέχεια με μακροφωτογραφίες από την φωτογραφική μηχανή Olympus OM-D E-M10 Mark II και φακούς Olympus M.Zuiko Digital ED 14-150mm f/4-5,6 II, Olympus M.Zuiko MED 60mm f/2,8 Macro.



Εικόνα 6.9: Νεκρό Υμενόπτερο πάνω στο μπαγδατί.



Εικόνα 6.10: Οπές διατομών 2-4 mm από ξυλοφάγα έντομα, που οδηγούν σε ανενεργές στοές.



Εικόνα 6.11: Μαύρος μύκητας σε οπή από ξυλοφάγο έντομο.



Εικόνα 6.12: Περιττώματα ξυλοφάγων εντόμων. Τα ερυθρά φανερώνουν κατανάλωση μυκήτων.



Εικόνα 6.13: Περιπτώματα ξυλοφάγων εντόμων και ξύλο εμφανώς σε άσχημη κατάσταση.



Εικόνα 6.14: Οπή διαφορετικής διαμέτρου και σχήματος, πιθανότατα προσβολή από διαφορετικό είδος ξυλοφάγου εντόμου.

Η εργασία συνεχίστηκε με τη συλλογή των εντόμων από σκουπάκι μπαταρίας το οποίο διέθετε έναν αναρροφητήρα. Κατά την αναρρόφηση συλλέγονται άμεσα και έμμεσα ευρήματα εντόμων. Στα άμεσα ανήκουν τα έντομα σε διάφορα στάδια ανάπτυξης (ενήλικο, προνύμφη, νύμφη, ωό), ενώ στα έμμεσα ανήκουν τα περιττώματα των εντόμων.



Εικόνα 6.15: Σκουπάκι μπαταρίας με αναρροφητήρα (ιδιοκατασκευή κ. Τσαγκαράκη).

Χρησιμοποιήθηκε ακόμη μέθοδος συλλογής εντόμων με πινέλο και λαβίδα στην οποία κάθε άτομο από τα έντομα που εντοπίσαμε τοποθετήθηκε σε ειδικό φιαλίδιο.

Η διαδικασία αυτή ακολουθήθηκε και στον εξωτερικό και στον εσωτερικό θόλο εξίσου με τον ίδιο τρόπο.

Για να είναι αποτελεσματικότερη η δειγματοληψία απαραίτητη κρίθηκε η ακρόαση του ξύλου με στηθοσκόπιο (Εικόνα 6.16) ώστε να ακούσουμε τη δραστηριότητα των εντόμων. Η διαδικασία αυτή αντιμετώπισε μικρές δυσκολίες λόγω μεγάλου θορύβου και δονήσεων από της εργοταξιακές εργασίες.



Εικόνα 6.16: Ο κ. Τσαγκαράκης κατά τη διαδικασία ακρόασης των ξυλοφάγων εντόμων με στηθοσκόπιο.

Τέλος, παρατηρήθηκαν δομές βιολογικής προέλευσης στο μπαγδατί οι οποίες εκτιμώνται ότι προέρχονται είτε από μύκητες, είτε από οξείδωση των μεταλλικών ήλων, είτε πρόκειται για χελώνιο κοκκοειδούς εντόμου.

6.3. Μέθοδοι αντιμετώπισης ξυλοφάγων εντόμων- προτάσεις αποκατάστασης ξύλινου σκελετού

6.3.1. Υποκαπνισμός (Φωσφίνη)

Με τον υποκαπνισμό επιτυγχάνεται ριζική και εγγυημένη καταπολέμηση σε περιπτώσεις ξυλοφάγων εντόμων. Είναι μια ιδιαίτερη εφαρμογή απεντόμωσης με την οποία επιτυγχάνουμε έλεγχο της προσβολής σε περιπτώσεις που δεν μπορούμε να επέμβουμε με άλλες μεθόδους. Το υποκαπνιστικό σκεύασμα που χρησιμοποιούμε, η φωσφίνη (PH₃) ή φωστοξίνη, είναι μία χημική ουσία που δρα σε μορφή αερίου και σε ορισμένες θερμοκρασίες είναι τοξική (θανατηφόρα) για όλα τα έντομα. Σε συγκεκριμένη συγκέντρωση σαν αέριο έχει την ιδιότητα να διαπερνά όλες τις επιφάνειες (ξύλινα πατώματα, κάσες, έπιπλα, οροφές κτλ) με υψηλή διαπερατότητα, επιφέροντας τον θάνατο σε όλα τα στάδια του βιολογικού κύκλου ξυλοφάγων εντόμων (αυγό-προνύμφη-νύμφη-τέλειο).

Η ποσότητα της φωσφίνης επιλέγεται υπολογίζοντας τον όγκο του χώρου προς απεντόμωση με παραμέτρους την εσωτερική θερμοκρασία και υγρασία όπως επίσης και τις μικρές απώλειες που ίσως υπάρξουν. Η πιο σημαντική εργασία μετά το σωστό υπολογισμό της μορφής και της ποσότητας του σκευάσματος, είναι η στεγανοποίηση του χώρου εξωτερικά ώστε να μη χαθεί το αέριο. Η συγκέντρωση της φωσφίνης πρέπει να φτάσει στα επιθυμητά επίπεδα ώστε να εισχωρήσει σε βάθος σε όλες τις ξύλινες επιφάνειες και να θανατώσει όλα τα στάδια ζωής του εντόμου.

Ο χώρος καλύπτεται εξωτερικά με πλαστικά καλύμματα πολλαπλών στρώσεων (multi layer) σε κρίσιμα σημεία διαφυγής του αερίου. Η φωσφίνη είναι πιθανό να οξειδώσει σε υψηλές θερμοκρασίες και υψηλή υγρασία ελάσματα χαλκού, χρυσού, ασημιού και μπρούντζου. Συνολικά ο προς απεντόμωση χώρος μετατρέπεται σε ένα «καμίνι καταπολέμησης», αφού διαχέεται σε όλο του τον όγκο η φωσφίνη χωρίς να διαφεύγει.

Όταν έχουν γίνει με ακρίβεια όλες οι εξωτερικές και εσωτερικές στεγανοποιήσεις τοποθετείται η φωσφίνη και ο χώρος «σφραγίζεται» για 5 – 7 μέρες. Με το «άνοιγμα» του χώρου λαμβάνονται μετρήσεις συγκέντρωσης φωσφίνης για να επιβεβαιώσουμε ότι δεν είχαμε διαφυγή του αερίου και να συμπεράνουμε ότι «πέτυχε» η εφαρμογή. Μετά τον προβλεπόμενο αερισμό δεν υπάρχει στο χώρο καμία τοξικότητα καθώς τα σκεύασματα που χρησιμοποιούνται δεν έχουν καθόλου υπολειμματική δράση.

Αν και η μέθοδος του υποκαπνισμού είναι η πλέον δραστική μέθοδος για την καταπολέμηση των ξυλοφάγων εντόμων, δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην περίπτωση του ξύλινου τρούλου του Ιερού Κουβουκλίου για τους εξής βασικούς λόγους:

- Οξειδωση μεταλλικών συνδέσμων και φύλλου μολύβδου.
- Υψηλή επικινδυνότητα για την υγεία του συνεργείου που θα αναλάβει την επέμβαση.
- Ο χώρος δεν μπορεί να σφραγιστεί για το απαιτούμενο χρονικό διάστημα, διότι η επισκεψιμότητα του Ναού είναι καθημερινή και συνεχής.

6.3.2. Διοξείδιο του άνθρακα

Κατά την εφαρμογή της μεθόδου ελαχιστοποιείται η συγκέντρωση οξυγόνου (O₂) στον χώρο και πραγματοποιείται εισαγωγή αδρανούς αερίου, δηλαδή διοξειδίου του άνθρακα (CO₂). Η μέθοδος εφαρμόζεται σε χώρους με ειδική διαμόρφωση για την καταπολέμηση ξυλοφάγων εντόμων που προσβάλουν ξύλινα αντικείμενα και ευπαθή έργα τέχνης. Η τεχνική αυτή είναι πολύ αποτελεσματική, περιβαλλοντικά ασφαλής και δομικά ακίνδυνη για απεντόμωση επίπλων, ή πολύτιμων αντικειμένων τέχνης, αλλά είναι εντελώς αντιοικονομική σε απεντόμωση ογκωδών αντικειμένων, τα οποία απαιτούν μεγάλους αεροστεγείς θαλάμους. Εάν, δε, το αντικείμενο είναι ενσωματωμένο σε οικοδομή, η μέθοδος είναι εξαιρετικά δύσκολο να εφαρμοστεί, καθώς πρέπει να προβεί κάποιος σε αφαίρεση του αντικειμένου. Πρακτικά δεν μπορεί να εφαρμοστεί στον ξύλινο σκελετό του Τρούλου του Παναγίου Τάφου.

6.3.3. Θερμότητα

Μία από τις πιο ενδιαφέρουσες εφαρμογές της καταπολέμησης των ξυλοφάγων εντόμων είναι η Θερμική Απεντόμωση. Η μέθοδος της θερμικής Απεντόμωσης είναι μία υποσχόμενη, επαναστατική, πρωτοποριακή μέθοδος η οποία εφαρμόζεται για την καταπολέμηση όλων των εντόμων. Η χρήση των υψηλών θερμοκρασιών για την εξόντωση εντόμων αποτελεί γρήγορη, μη χημική μέθοδο απεντόμωσης. Η θερμική απεντόμωση τα τελευταία χρόνια έχει κριθεί απαραίτητη διότι η αγορά προτιμάει προϊόντα τα οποία είναι απαλλαγμένα από φυτοπροστατευτικές ουσίες και βιοκτόνα. Ακόμη τα έντομα έχουν αναπτύξει ένα είδος «ανοσίας» σε τέτοιου είδους βιοκτόνα και φυτοπροστατευτικές ουσίες. Τέλος έχει καταργηθεί η μέθοδος του Βρωμιούχου Μεθυλίου στις χώρες της Ε.Ε.

Μελετώντας την επίδραση της θερμοκρασίας στο βιολογικό κύκλο και τις ζωτικές λειτουργίες των εντόμων παρατηρούμε ότι η ανάπτυξη των εντόμων διαφοροποιείται σε διάφορα εύρη θερμοκρασιών. Η παρατήρηση της θανάτωσης των εντόμων σε θερμοκρασίες 48-58 °C σε όλα τα βιολογικά τους στάδια εντός λίγων λεπτών, αποτελεί και τη βασική αρχή εφαρμογής της μεθόδου της θερμικής απεντόμωσης. Οι υψηλές θερμοκρασίες και η θερμότητα που αναπτύσσεται στο χώρο

συμβάλει στη μείωση της υγρασίας του χώρου. Η υψηλή θερμοκρασία σε σχέση με τη χαμηλή υγρασία οδηγεί στην αφυδάτωση των εντόμων και κατά συνέπεια το θάνατό τους. Σε χαμηλή υγρασία περιβάλλοντος η θερμική μέθοδος είναι αποτελεσματικότερη. Επιπλέον, σε κάποια πιο ψυχρά σημεία, π.χ. σε σημεία ρηγματώσεων δεν επιτυγχάνεται άμεση θανάτωση των εντόμων, αλλά τα έντομα πεθαίνουν μέσα σε λίγες ώρες λόγω θερμοκρασιακού stress και αφυδάτωσης ή καθίστανται μη γόνιμα λόγω υπερέκθεσής τους σε ιδιαίτερα υψηλές θερμοκρασίες. Πιθανά επιβιώσαντα έντομα μετά τη θερμική απεντόμωση είναι ιδιαίτερα ευαίσθητα στη χημική καταπολέμηση, όπως στον ψεκάσμό τους με ένα πυρεθρινοειδές εντομοκτόνο.

Κατά την εφαρμογή της Θερμικής Απεντόμωσης του ξύλινου σκελετού του τρούλου του Ιερού Κουβουκλίου, στόχος μας είναι αύξηση και διατήρηση της θερμοκρασίας του χώρου στους 54-57°C για 16-24 ώρες. Η διατήρηση της θερμοκρασίας σταθερά στα ανωτέρω επίπεδα είναι πολύ σημαντική, καθώς είναι απαραίτητο η θερμότητα να διεισδύσει σε όλες τις σχισμές και χαραμάδες οι οποίες αποτελούν πιθανές εστίες εντόμων.

Η μέθοδος πραγματοποιείται σε τρία στάδια:

Περίοδος προθέρμανσης κατά την οποία στόχο έχουμε την αύξηση της θερμοκρασίας στο χώρο και τη σταθεροποίησή της στη θερμοκρασία στόχο, 54°C – 57°C. Η διάρκεια της προθέρμανσης είναι περίπου 6 ώρες. Στο στάδιο αυτό παρατηρείται έντονη κινητικότητα των εντόμων όταν η θερμοκρασία ανέλθει στους 40°C.

Περίοδος θέρμανσης όπου πραγματοποιείται η κυρίως απεντόμωση με στόχο τη διατήρηση της θερμοκρασίας σταθερά στους 54°C – 57°C. Η περίοδος αυτή διαρκεί 16-24 ώρες και είναι η περίοδος στην οποία πραγματοποιείται η θανάτωση των εντόμων και η έξοδός τους ακόμη και από τα πιο δυσπρόσιτα σημεία. Κατά την περίοδο θέρμανσης τα επίπεδα υγρασίας του χώρου πέφτουν σε ιδιαίτερα χαμηλά επίπεδα.

Περίοδος αποθέρμανσης κατά την οποία σταματά η εφαρμογή θέρμανσης του χώρου και ο χώρος αερίζεται με στόχο την επαναφορά της θερμοκρασίας σε κανονικά επίπεδα (25°C). Η περίοδος αποθέρμανσης υπολογίζεται περίπου στις 2-4 ώρες, ενώ ο επιθυμητός ρυθμός μείωσης της θερμοκρασίας είναι 6-7°C ανά ώρα. Αντίστοιχα τα επίπεδα υγρασίας του χώρου σταδιακά ανεβαίνουν σε φυσιολογικά επίπεδα κυρίως μέσου του αερισμού.

Πλεονεκτήματα της μεθόδου

- Μη τοξική και ασφαλής για το προσωπικό που την εφαρμόζει.
- Μη χημική ή με ελάχιστη χρήση εντομοκτόνων σε εστιασμένα σημεία.
- Προϊόντα και χώροι με μηδενικά υπολείμματα χημικών ουσιών.
- Οι χώροι είναι επισκέψιμοι κατά τη διάρκεια της εφαρμογής.
- Δυνατότητα αντιμετώπισης των εντόμων σε ρωγμές, σχισμές και δυσπρόσιτα σημεία.
- **Η παρακολούθηση των σημείων εξόδου των εντόμων κατά τη διάρκεια της εφαρμογής υποδεικνύει πιθανές εστίες και αποτελεί σημαντική πηγή πληροφόρησης για τα « αδύνατα» σημεία του χώρου.**
- Η συνολική ισχύς που απαιτείται για τη λειτουργία των θερμαντικών μονάδων είναι 20 Kw ανά μηχανήμα και απαιτείται η διάθεση παροχής τριφασικού ρεύματος αντίστοιχης ισχύος.

Μειονεκτήματα της μεθόδου στην περίπτωση εφαρμογής της στον ξύλινο σκελετό του τρούλου του Ιερού Κουβουκλίου.

Αν και όλες οι συνθήκες χρήζουν ευνοϊκές για την εφαρμογή της Θερμικής μεθόδου στον ξύλινο σκελετό του τρούλου του Παναγίου Τάφου, δεν μπορούμε να παραβλέψουμε το γεγονός ότι είναι μία κατασκευή του 1810 η οποία όπως παρατηρήθηκε μακροσκοπικά δεν ακολουθεί κανένα αρχιτεκτονικό σχέδιο. Τα ξύλα είναι τοποθετημένα με τυχαία διάταξη, χωρίς να τηρούνται οι απαραίτητες αποστάσεις μεταξύ τους, οι συνδέσεις του φέροντα οργανισμού καθ' ύψος είναι διαφορετικές σε κάθε ακτίνα, και τα νερά, δηλαδή οι ίνες, των ξύλων του τρούλου έχουν τοποθετηθεί με τυχαία φορά. Ακόμη οι ήλοι που συνδέουν τα τμήματα του φέροντα οργανισμού και εκείνοι που στερεώνουν τα μπαγδατί πάνω στον φέροντα οργανισμό, δεν έχουν τοποθετηθεί μετά από μελέτη συνδέσεων, αλλά είναι τυχαία τοποθετημένοι.

Όπως αποδείχτηκε σε προηγούμενη ενότητα η ανάπτυξη υψηλών θερμοκρασιών στα υλικά δομήσεως επηρεάζει δυσμενώς τόσο τα μηχανικά χαρακτηριστικά τους (όπως θλιπτική και εφελκυστική αντοχή, όρια διαρροής και θραύσεως, μέτρο ελαστικότητας κ.λπ.) όσο και τις φυσικοχημικές ιδιότητές τους (αλλαγή μικροδομής και πορώδες). Συνέπεια αυτών των μεταβολών είναι αντίστοιχες μειώσεις στη φέρουσα ικανότητα των δομικών μελών, αύξηση των παραμορφώσεών τους υπό σταθερό φορτίο ανακατανομές εντάσεως κ.λπ.

Όλα τα παραπάνω και σε συνδυασμό με τις φυσικές ιδιότητες του ξύλου που αναλύθηκαν στο 5ο κεφάλαιο, δηλαδή την συμπεριφορά του σε εφαρμογή θερμότητας (συστολή ξήρανσης), καθιστούν την Θερμική μέθοδο απαγορευτική διότι στους 50°C το ξύλο θα υποστεί παραμόρφωση

διαφορετικού μήκους σε κάθε διεύθυνση του (αξονική, εφαπτομενική, ακτινική), το οποίο πιθανότατα να παραμορφώσει αισθητά το σκελετό του τρούλου, να χαλαρώσει τις συνδέσεις των ήλων και να αποκολληθεί το επίχρισμα, με το χρωματικό διάκοσμο, από τα μπαγδατί πάνω στα οποία στερεώνεται.

6.3.4. Μικροκύματα

Η χρήση συσκευών εκπομπής μικροκυμάτων (συχνότητας 2.45 GHz και μέγιστης έντασης 1.1 kW) προσφέρει αποτελεσματική αντιμετώπιση ξυλοφάγων εντόμων, του *A. Punctatum* συμπεριλαμβανομένου. Πλεονεκτήματα της μεθόδου αποτελούν η ταχύτητα στην χρήση και στην απόδοση του απεντομωμένου υλικού προς χρήση, καθώς και η αποτελεσματικότητα της μεθόδου. Σοβαρό μειονέκτημα αποτελεί η ύπαρξη μεταλλικών αντικειμένων, τα οποία μπορεί να συντελέσουν στην καταστροφή του μηχανήματος παραγωγής μικροκυμάτων. Λόγω της ύπαρξης πολυάριθμων ήλων καθώς και του φύλλου από μόλυβδο στον θόλο, η μέθοδος δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί με ασφάλεια και, συνεπώς, δεν προτείνεται.

6.3.5. Επίχρισμα με εντομοκτόνες ουσίες

Η χρήση συνθετικών εντομοκτόνων σε υγρή μορφή μπορεί να αποτελέσει ταχεία, φθηνή και αξιόπιστη λύση για αντιμετώπιση των ξυλοφάγων εντόμων, αλλά και των μυκήτων που τα συνοδεύουν. Με την επιλογή του κατάλληλου εντομοκτόνου (μίγμα εντομοκτόνων δραστικών ουσιών και μυκητοκτόνου) μπορεί να επιτευχθεί αποτελεσματικός έλεγχος του μεγαλύτερου μέρους του μολύσματος που υπάρχει μέσα στα ξύλα. Για την αποτελεσματική δράση του εντομοκτόνου θα πρέπει να γίνει εφαρμογή με πινέλο για μεγαλύτερη ακρίβεια. Ένα εντομοκτόνο σκεύασμα με προσθήκη μυκητοκτόνου, κατάλληλο για χρήση στον συγκεκριμένο χώρο, είναι το Serpol Gel (δ.ο. permethrin 0,7% και propiconazole 1,21%). Το συγκεκριμένο σκεύασμα δρα σε βάθος 3-6,5 εκ μέσα στο ξύλο, θανατώνοντας τα ξυλοφάγα έντομα, ενώ η υπολειμματικότητά του αναφέρεται ότι φθάνει τα 10 έτη. Μειονέκτημα αποτελεί το γεγονός ότι σε ξύλα μεγαλύτερου πάχους, αν και θα θανατωθεί ένα πολύ μεγάλο ποσοστό του μολύσματος, εντούτοις είναι δυνατόν να διατηρηθεί ένα ποσοστό, ειδικά εάν η προσροφητικότητα στο ξύλο δεν είναι μεγάλη.

6.4. Προτεινόμενη μέθοδος αντιμετώπισης ξυλοφάγων εντόμων στον ξύλινο σκελετό του Τρούλου του Παναγίου Τάφου

Από όλα τα παραπάνω, η πρόταση αντιμετώπισης που μπορεί να προταθεί είναι η μέθοδος του επιχρίσματος εντομοκτόνων ουσιών, με την προσθήκη μυκητοκτόνου. Με την συγκεκριμένη μέθοδο καθίσταται δυνατή η απεντόμωση του ξύλου σε αρκετά μεγάλο βάθος, το οποίο υπερβαίνει αυτό των πήχων του μπαγδατί, αλλά και αυτό του φορέα (με επίχρισμα αμφοτέρων των όψεων αυτού). Η μέθοδος, εκτός από αποτελεσματική, είναι ταχεία, ασφαλής για τον εφαρμοστή και τους χρήστες του χώρου (μοναχούς και προσκυνητές), καθώς και έχει μεγάλη υπολειμματική διάρκεια. Επίσης, μετά την απορρόφηση του εντομοκτόνου, το ξύλο είναι έτοιμο και διαθέσιμο για οποιαδήποτε εφαρμογή, καθώς δεν αφήνει ελαιώδη κατάλοιπα στην επιφάνεια. Το μειονέκτημα της πιθανής διαφυγής από την θανάτωση κάποιων εντόμων μπορεί να αντιμετωπιστεί με συμπληρωματική επέμβαση μετά από εύλογο χρονικό διάστημα (π.χ. 1-2 έτη). Στην συγκεκριμένη πρόταση εφαρμογής μεγάλη βαρύτητα είχε η ύπαρξη μολύσματος και σε έτερους χώρους, οι οποίοι θα δράσουν ως «ρεζερβουάρ» τροφοδοσίας και επαναφορά του προβλήματος μετά από παρέλευση μικρού χρονικού διαστήματος.

Υλικά Εφαρμογής

- Xylofarm Killer Professional: είναι συμπυκνωμένο σαρακοκτόνο ξυλοπροστασίας, ειδικής σύνθεσης, που ενεργεί σε βάθος για θεραπεία του ξύλου.
- Πινέλο επιχρίσματος.
- Μέτρα προστασίας εφαρμοστή: Φόρμα, γάντια νιτριλίου, καπέλο, γυαλιά, μάσκα με φίλτρο άνθρακα.

Απαιτούμενος χρόνος για εφαρμογή: περίπου 3 ώρες

Χρόνος για απόδοση του θόλου για έτερη χρήση: 1 ημέρα

Τονίζεται ότι για όλο το παραπάνω διάστημα (εφαρμογής και μέχρι την απόδοση του θόλου) οι λοιπές εργασίες στον χώρο του Παναγίου Τάφου μπορούν να συνεχίζονται ανεμπόδια.

Τεχνικές προδιαγραφές του Xylofarm Killer Professional

ΟΔΗΓΙΕΣ ΧΡΗΣΗΣ

1. Ανακινήστε το spray πολύ καλά πριν και κατά τη διάρκεια της χρήσης, ώστε να υπάρχει το επιθυμητό αποτέλεσμα.
2. Η επιφάνεια εφαρμογής πρέπει να είναι στεγνή και καθαρή από σκόνες. Το υγρό δεν διαπερνάει βερνικωμένες επιφάνειες.
3. Χρησιμοποιήστε το spray κατά προτίμηση κάθετα και όχι σε γωνία μεγαλύτερη από 45 μοίρες.
4. Εφαρμόστε το υλικό όσο το δυνατόν κοντύτερα στην προσβεβλημένη περιοχή.
5. Τοποθετήστε το λεπτό σωλήνα στη βαλβίδα του spray και κατόπιν βάλτε την άκρη του σωλήνα στην επιθυμητή τρύπα και πιέστε τη βαλβίδα για λίγα δευτερόλεπτα μέχρι να βγει υγρό από διπλανές τρύπες. Κατόπιν επαναλάβετε σε διπλανή τρύπα που δεν έχει βγει υγρό.
6. Σκουπίστε το πλεονάζον υγρό.
7. Για ξύλινες επιφάνειες ψεκάστε υπό γωνία 45 μοιρών από απόσταση 15-25 εκατοστών χωρίς το σωληνάκι. Περιμένετε να στεγνώσει πριν τη βαφή ή το βερνίκωμα της επιφάνειας.
8. Το XYLOFARM KILLER PROFESSIONAL εφαρμόζεται 2-3 φορές ανάλογα με το βαθμό προσβολής. Σε δύσκολες περιπτώσεις μπορεί να χρειασθούν επαναληπτικές εφαρμογές.
9. Μετά την χρήση γυρίστε το spray ανάποδα και ψεκάστε μέχρι να βγει μόνο αέριο για να καθαριστεί η βαλβίδα. Επιβάλλεται στο χώρο εφαρμογής να υπάρχει πολύ καλός αερισμός. Τα δοχεία πρέπει να κλείνονται καλά και να φυλάσσονται σε δροσερό μέρος μακριά από πηγές υψηλής θερμότητας και ακτινοβολίας του ήλιου.

ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΣ

Τα εργαλεία καθαρίζονται αμέσως μετά τη χρήση με SWAN White Spirit ή SWAN διαλυτικό Νίτρου.

ΑΠΟΔΟΣΗ

8 -10 m²/Lt

ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

- Τύπος: Συμπυκνωμένο σαρακοκτόνο ξύλου.
- Μορφή: Λεπτόρρευστο υγρό
- Χρώμα: Διαυγές
- Οσμή: Χαρακτηριστική
- Ειδικό βάρος: 820 kg/m³ 25ο C
- Αναφλεξιμότητα: Εύφλεκτο
- Μέθοδος εφαρμογής: Ψεκασμός
- Θερμοκρασία εφαρμογής: 50 C - 350 C
- Αραίωση: Δεν χρειάζεται αραίωση, έτοιμο προς χρήση.
- Στέγνωμα: Στην αφή 1 - 2 ώρες, επαναβάφεται μετά από 6 ώρες.

ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ

Τα δοχεία πρέπει να αποθηκεύονται σε στεγνούς και δροσερούς χώρους σε θερμοκρασία 50 -300 C. Προστατέψτε τα δοχεία από την υγρασία τον παγετό και την άμεση έκθεση στην ηλιακή ακτινοβολία.

ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΖΩΗΣ

Υπό τις συνθήκες της αποθήκευσης 12 μήνες από την ημερομηνία παραγωγής. Το προϊόν πρέπει να παραμείνει στα αυθεντικά, μη-ανοιγμένα δοχεία, φέροντας τον αριθμό παραγωγής.

ΟΔΗΓΙΕΣ ΥΓΙΕΙΝΗΣ, ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ & ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

- Επιβλαβές
- Επικίνδυνο για το περιβάλλον.
- Εξαιρετικά εύφλεκτο.
- Επιβλαβές όταν εισπνέεται και σε επαφή με το δέρμα.
- Πολύ τοξικό για τους υδρόβιους οργανισμούς, μπορεί να προκαλέσει μακροχρόνιες δυσμενείς επιπτώσεις στο υδάτινο περιβάλλον.
- Μπορεί να προκαλέσει βλάβη στους πνεύμονες σε περίπτωση κατάποσης.
- Να φυλάσσεται κλειδωμένο και μακριά από παιδιά.
- Το δοχείο να διατηρείται ερμητικά κλεισμένο σε καλά αεριζόμενο μέρος.
- Μακριά από τρόφιμα, ποτά και ζωοτροφές.
- Μην αναπνέετε τις αναθυμιάσεις/ατμούς.
- Αποφεύγετε την επαφή με το δέρμα και τα μάτια.
- Λάβετε προστατευτικά μέτρα έναντι ηλεκτροστατικών εκκενώσεων.
- Φοράτε κατάλληλη προστατευτική ενδυμασία και γάντια.
- Για την κατάσβεση να χρησιμοποιείτε άμμο, διοξείδιο του άνθρακα ή πυροσβεστική σκόνη, ουδέποτε νερό.

- Μην αδειάζετε το υπόλοιπο του περιεχομένου στην αποχέτευση.
- Το υλικό και ο περιέκτης του να εναποτεθούν σε δημόσιο χώρο συλλογής επικίνδυνων ή ειδικών αποβλήτων.
- Να χρησιμοποιείται μόνο σε καλά αεριζόμενο χώρο.
- Σε περίπτωση κατάποσης ζητήστε αμέσως ιατρική συμβουλή και δείξτε αυτό το δοχείο ή την ετικέτα.
- Μη ψεκάζετε προς την κατεύθυνση φλόγας ή πυρακτωμένου σώματος. Δοχείο υπό πίεση.
- Να προφυλάσσεται από τις ακτίνες του ηλίου και να μην εκτίθεται σε θερμοκρασία ανώτερη των 50°C.
- Να μην τρυπηθεί ή καεί ακόμα και μετά τη χρήση.

Εφαρμογή σαροκοκτόνου επί τόπου στον Τρούλο της ανωδομής του Παναγίου Τάφου



Εικόνα 6.17: Κατά την διαδικασία εφαρμογής του σαροκοκτόνου από τον κ. Α. Τσαγκαράκη.



Εικόνες 6.18-6.19: Κατά την διαδικασία εφαρμογής του σαροκοκτόνου από τον κ. Α. Τσαγκαράκη.

Κατά την εφαρμογή του σαροκοκτόνου χρησιμοποιήθηκε σύστημα εξαερισμού όπως επιβάλουν οι τεχνικές προδιαγραφές (Εικόνες 6.18-6.20).



Εικόνα 6.20: Είσοδος εξαερισμού



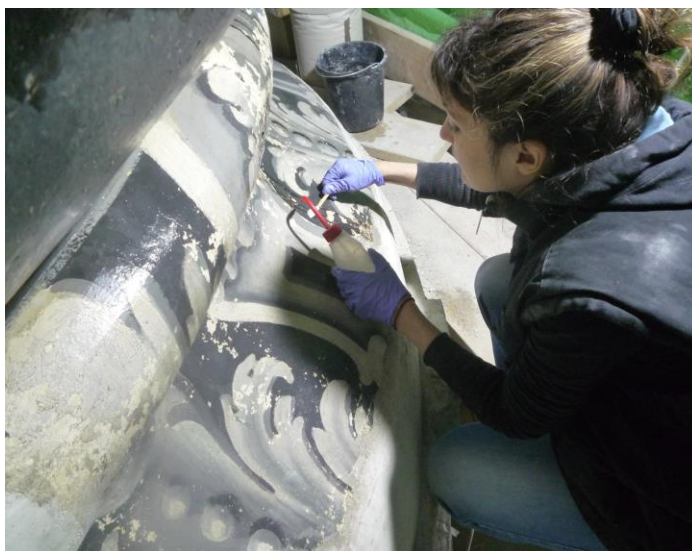
Εικόνα 6.21: Σωλήνας εξαερισμού.



Εικόνα 6.22: Μηχανή εξαερισμού.

6.5. Παθολογία ζωγραφικού διάκοσμου του Τρούλου και προτάσεις αποκατάστασής του

Ο τρούλος της ανωδομής του Ιερού Κουβουκλίου περιμετρικά παρουσιάζει παχύ στρώμα σκόνης το οποίο καθιστά αρκετά δυσδιάκριτο έως καθόλου ορατό τον ζωγραφικό διάκοσμο της επιφάνειάς του. Το ίδιο ισχύει και για την άνω όψη του εσωτερικού θόλου του, του οποίου η επιφάνεια πάσχει από παχύ στρώμα μαύρης πάτινας λόγω της καύσης των κεριών. Για την ανάδειξη, λοιπόν, της ιστορικής αξίας του ζωγραφικού διάκοσμου του Τρούλου απαιτείται καθαρισμός της επιφάνειάς του με **Vulprex- potassium methyl cyclohexyl oleate soap** (Εικόνα 6.23). Το Vulprex είναι ένας από τους πιο διαδεδομένους σάπωνες στο πεδίο της συντήρησης έργων τέχνης, δεσμεύει και γαλακτωματοποιεί την επιφανειακή βρωμιά, τα λίπη, τα έλαια, τα κεριά και τους υδρογονάνθρακες γρήγορα και αποτελεσματικά. Παρουσιάζει αλκαλικό pH και δεν είναι επικίνδυνο για τον χρήστη και τα αντικείμενα. Τέλος η επιφάνεια ξεπλένεται με white spirit.

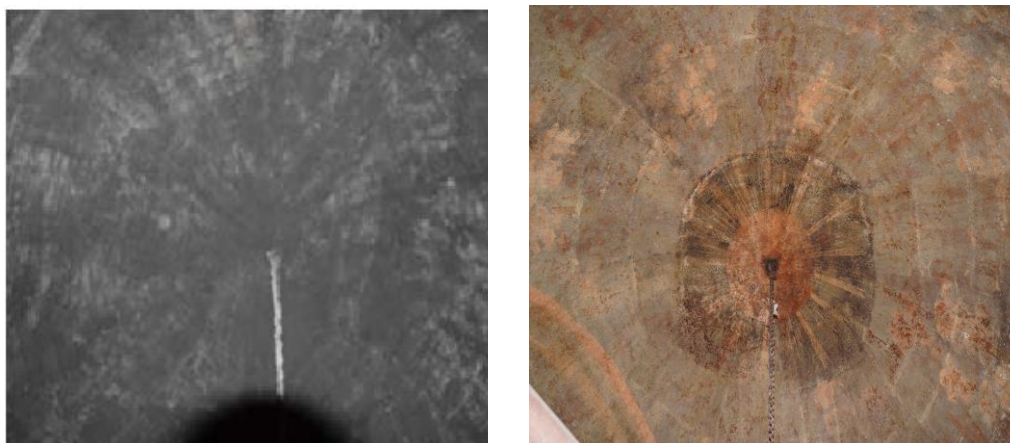


Εικόνα 6.23: Κατά την εφαρμογή καθαρισμού του ζωγραφικού διάκοσμου του Τρούλου με Vulprex-potassium methyl cyclohexyl oleate soap.

Μετά τον ενδεδειγμένο καθαρισμό της επιφάνειας του σοβά του Τρούλου (Ζώνη Κ) αποκαλύφθηκε ο ζωγραφικός διάκοσμος από την τελευταία αναστηλωτική επέμβαση του Κομνηνού, του οποίου η συντήρηση αποτελούσε επιτακτική ανάγκη αφού είναι διάκοσμος μεγάλης ιστορικής αξίας (εικόνες 6.24-6.27).



Εικόνες 6.24-6.25: Εξωτερική περιμετρική επιφάνεια Τρούλου πριν και μετά τον καθαρισμό.



Εικόνες 6.26-6.27: Άνω όψη εσωτερικού θόλου πριν και μετά τον καθαρισμό.

Μετά την πραγματοποίηση του καθαρισμού ακολουθεί η στερέωση και ενίσχυση του σοβά του Τρούλου, ο οποίος περιβάλλει τα πηχάκια μπαγδατί. Λόγω της αστοχίας των ρήσεων του φύλλου μολύβδου και της εισβολής των όμβριων υδάτων από την οπή στην Ροτόντα του Ναού της Αναστάσεως, ο σοβάς έχει υποστεί μερική αποκόλληση από τα μπαγδατί και ταυτόχρονη ρηγμάτωση, όντας ψαθυρό υλικό.

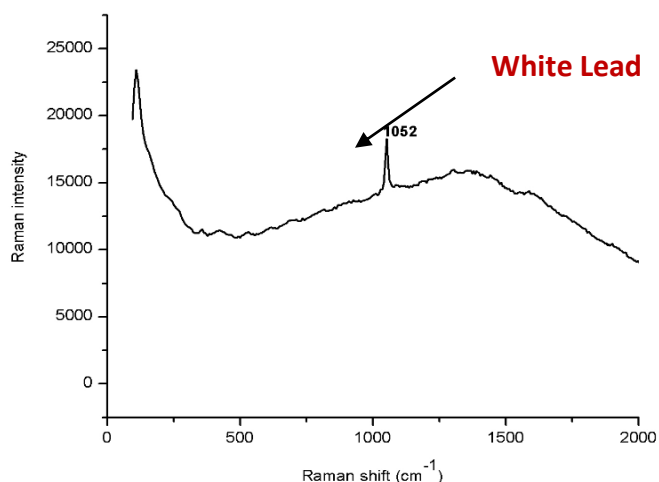
Για τους παραπάνω λόγους κρίνεται απαραίτητη η στερέωση του σοβά με **Primal 3% acrylic emulsion** (Εικόνα 6.26), το οποίο είναι ένα ευέλικτο υλικό με βάση το νερό, 100% ακρυλικό πολυμερές σχεδιασμένο αποκλειστικά για αποδοτική εφαρμογή σε ζωγραφικούς διακόσμους εσωτερικού και εξωτερικού

χώρου. Διαθέτει εξαιρετική ρεολογική ικανότητα, είναι ανθεκτικό στην UV ακτινοβολία και είναι υδροφοβικό υλικό.

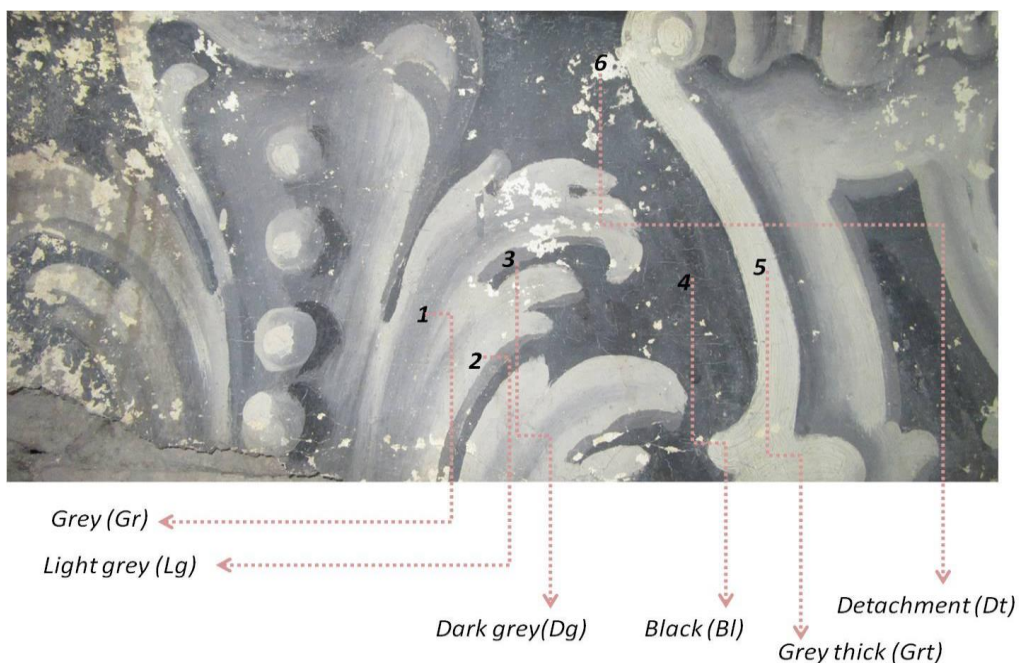


Εικόνα 6.28: Κατά τη διαδικασία στερέωσης του σοβά με το υλικό Primal 3% acrylic emulsion.

Τέλος, είναι απαραίτητη η ταυτοποίηση των χρωστικών ουσιών και η παρασκευή ενός συνόλου χρωματικών δειγμάτων με τέτοιο τρόπο ώστε να προσεγγίζουν τις τεχνικές και τις συστάσεις που χρησιμοποιήθηκαν κατά την αναστηλωτική επέμβαση του Κομνηνού, προσομοιώνοντας τις χρωματικές εντυπώσεις του Τρούλου. Απαραίτητη, επομένως, κρίνεται η τεχνική Raman με οπτικό μικροσκόπιο και ανιχνευτή CCD και με προγραμματιζόμενους βηματικούς κινητήρες για την ελεγχόμενη σάρωση του δείγματος και για τον προσδιορισμό της μοριακής δομής των πιγμένων των δειγμάτων. Μέσω της τεχνικής αυτής είναι εφικτός ο προσδιορισμός των τόνων του γκρι, καθώς και η τεχνική με την οποία ο ζωγράφος του Κομνηνού δημιούργησε τον διάκοσμο. Μετά, λοιπόν, τη χρήση της Raman βρέθηκε ότι η τεχνική περιλαμβάνει αρκετές στρώσεις χρώματος, κάτι το οποίο υποδηλώνει ότι μάλλον πραγματοποιήθηκαν και μεταγενέστερες επεμβάσεις πάνω στα χρώματα.



Διάγραμμα 6.1: Αποτελέσματα τεχνικής Raman.



Εικόνα 6.29: Αποτελέσματα ταυτοποίησης χρωστικών ουσιών τεχνικής Raman.

Για την σωστή εφαρμογή των χρωμάτων πάνω στην επιφάνεια του σοβά επιβάλλεται η δημιουργία σωστής βάσης πάνω στην επιφάνεια. Για το σκοπό αυτό προτείνεται η εφαρμογή δύο στρώσεων **Master Emaco S TIX 285**, ενός, δηλαδή, ποζολανικού υλικού με βάση την άβεστο, χωρίς τσιμέντο, με εξαιρετική αντοχή, το οποίο χρησιμοποιείται ως επισκευαστικό κονίαμα στις αποκαταστάσεις ιστορικών κτιρίων.



Εικόνα 6.30: Κατά την διαδικασία εφαρμογής των στρώσεων του υλικού Master Emaco S TIX 285.

Η ανάδειξη του ζωγραφικού διάκοσμου κλείνει με την εφαρμογή των χρωμάτων που βρέθηκαν από την τεχνική Raman.



Εικόνα 6.31: Αποτύπωση ζωγραφικού διάκοσμου πριν την εφαρμογή των χρωμάτων.



Εικόνα 6.32: Κατά την διαδικασία εφαρμογής των χρωμάτων.

Τέλος, τοποθετήθηκε Χρυσός Σταυρός αντίγραφο του Σταυρού του Κομνηνού ως επίστεψη στην κορυφή του Τρούλου της ανωδομής του Παναγίου Τάφου.



Εικόνα 6.33: Χρυσός Σταυρός.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7^ο

«ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ»

7. Συμπεράσματα- Προοπτικές

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει σκοπό την κατασκευαστική ανάλυση και την αποτίμηση της δομικής ακεραιότητας και παθολογίας του Τρούλου της ανωδομής του Ιερού Κουβουκλίου του Παναγίου Τάφου, ώστε να αναπτυχθούν οι κατάλληλες επεμβάσεις συντήρησης και αποκατάστασης, οι οποίες θα του εξασφαλίζουν στατική επάρκεια και διάρκεια ζωής (Lifetime Engineering). Για τους παραπάνω λόγους αναπτύχθηκαν:

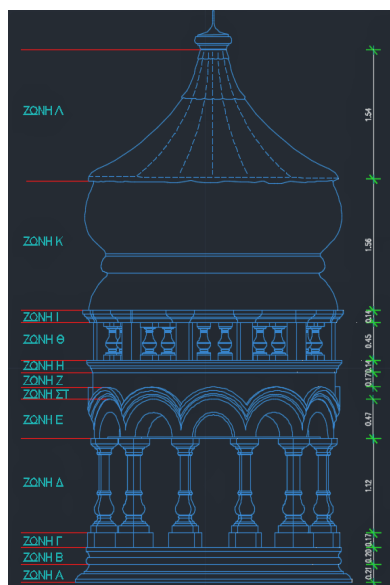
- αριθμητικά προσομοιώματα με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων στο πρόγραμμα ROBOT της AUTODESK,
- σχέδια 2D Και 3D διαστάσεων με το πρόγραμμα AUTOCAD της AUTODESK,
- καθώς και μη καταστρεπτικές τεχνικές (θερμογραφία υπερύθρου, γεωραντάρ, ενδοσκόπιο) επί τόπου στο πεδίο για την αποτίμηση της παθολογίας του τρούλου.

Για να επιτευχθούν τα παραπάνω, αξιοποιήθηκαν αποτελέσματα τα οποία προέκυψαν από όλες τις μέχρι σήμερα διερευνητικές εργασίες που πραγματοποιήθηκαν από την ερευνητική ομάδα του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, και οι οποίες περιλαμβάνουν ενδελεχή αρχιτεκτονική και γεωμετρική τεκμηρίωση, αποτίμηση της θέσης αλλά και των μηχανικών και χημικών ιδιοτήτων των υλικών με επί τόπου και εργαστηριακές μετρήσεις και δοκιμές, και μέτρηση των ιδιομορφικών χαρακτηριστικών της κατασκευής στο πεδίο.

Από όλα τα παραπάνω και σε συνδυασμό με μακροσκοπικές παρατηρήσεις στο πεδίο προέκυψαν τα εξής συμπεράσματα για τον Τρούλο του Παναγίου Τάφου, ξεκινώντας από την βάση του:

1. ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Ο τρούλος χωρίστηκε σε 12 ζώνες ανάλογα με τα υλικά και τα μέλη του ως εξής:



Εικόνα 7.1: Χωρισμός σε ζώνες.

ΖΩΝΕΣ	ΟΝΟΜΑΣΙΑ ΖΩΝΩΝ
A	ΕΥΘΥΝΤΗΡΙΑ
B	ΣΤΥΛΟΒΑΤΗΣ
Γ	ΒΑΣΕΙΣ ΠΕΣΣΩΝ-ΠΛΙΝΘΟΙ
Δ	ΣΩΜΑ ΠΕΣΣΩΝ
E	ΤΟΞΑ
ΣΤ	ΚΟΡΝΙΖΑ
Z	ΖΩΦΟΡΟΣ
H	ΤΑΙΝΙΑ
Θ	ΣΩΜΑ ΜΠΑΛΟΥΣΤΡΩΝ
I	ΓΕΙΣΟ
K	ΑΣΒΕΣΤΙΤΙΚΟ ΕΠΙΧΡΥΣΜΑ
Λ	ΦΥΛΛΟ ΜΟΛΥΒΔΟΥ

Πίνακας 7.1: Διαχωρισμός Τρούλου σε ζώνες.

Οι ζώνες A έως I αποτελούνται από κοκκινωπό λίθο Slayeb. Η ζώνη K από ασβεστιτικό επίχρυσμα επιφανειακά. Η ζώνη Λ από φύλλο μολύβδου επιφανειακά. Το εσωτερικό των ζωνών K και Λ αποτελείται από τον ξύλινο φέροντα οργανισμό του τρούλου, δηλαδή από δύο θόλους, έναν εσωτερικό και έναν εξωτερικό. Για μεγαλύτερη κατανόηση της δομής του, δημιουργήθηκαν σχέδια σε Autocad 2D και 3D έπειτα από λεπτομερή αποτύπωση επί τόπου στο μνημείο. Για την αποκάλυψη των ξύλινων θόλων που υποστηρίζουν το λεγόμενο «κρεμμύδι» του Τρούλου ανοίχτηκε οπή, στο ήδη αποκολλημένο από τα όμβρια ύδατα, ασβεστιτικό κονίαμα ούτως ώστε να γίνει δυνατή η τοπογραφική-αρχιτεκτονική αποτύπωση του εσωτερικού του και η διάγνωση της παθολογίας του.

2. ΠΑΘΟΛΟΓΙΑ

- Στα λίθινα δομικά μέρη του τρούλου, τα οποία είναι κατασκευασμένα από λίθο Slayeb, είναι αισθητή η επιφανειακή φθορά, λόγω απώλειας αυθεντικού υλικού, ρηγματώσεων στους πεσσούς και μαύρη πάτινα από την καύση των κεριών και τη σκόνη.
- Η μεταλλική περιμετρική λάμα που συνδέει τις βάσεις των τόξων του τρούλου βρίσκεται σε πολύ καλή κατάσταση.
- Οι δύο ξύλινοι θόλοι της κορυφής του τρούλου είναι διαβρωμένοι από το ξυλοφάγο έντομο *Anobioum Punctatum*, και λόγω της υγρασίας υπάρχει ανάπτυξη μυκήτων.
- Το φύλλο μολύβδου που επικαλύπτει τη δομή των θόλων, αν και βρίσκεται σε πολύ καλή κατάσταση, παρουσιάζει μια ανωμαλία ως προς την κατεύθυνση των ρήσεών του για την απομάκρυνση των

όμβριων υδάτων, που εισέρχονται από την οπή στην Ροτόντα του Ναού.

- e) Το ασβεστιτικό επίχρισμα παρουσιάζει ψαθυρότητα και άρα ρηγματώση και αποκόλληση από τα μπαγδατί στα σημεία αστοχίας των ρήσεων του φύλλου μολύβδου.
- f) Οι ήλοι που συνδέουν τα μπαγδατί με τον ξύλινο σκελετό/φορέα είναι εμφανώς ενανθρακωμένοι.
- g) Ο ζωγραφικός διάκοσμος ο οποίος βρίσκεται πάνω στο ασβεστιτικό επίχρισμα, εξωτερικά, είχε επικαλυφθεί λόγω της σκόνης. Επίσης ο ζωγραφικός διάκοσμος ο οποίος βρίσκεται πάνω στο ασβεστιτικό επίχρισμα, στην άνοψη του εσωτερικού θόλου, έχει επικαλυφθεί από μαύρη πάτινα, λόγω της καύσης των κεριών.

3. ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ ΚΑΙ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

Προτάσεις συντήρησης και αποκατάστασης έγιναν για τα υλικά και τα μέλη του Τρούλου τα οποία βρίσκονται σε κρίσιμη κατάσταση, αναφορικά με τη στατικότητα και την εμφάνισή τους.

- a) Η προτεινόμενη μέθοδος αντιμετώπισης ξυλοφάγων εντόμων στον ξύλινο σκελετό του Τρούλου του Παναγίου Τάφου είναι η μέθοδος του επιχρίσματος εντομοκτόνων ουσιών, με την προσθήκη μυκητοκτόνου. Με την συγκεκριμένη μέθοδο καθίσταται δυνατή η απεντόμωση του ξύλου σε αρκετά μεγάλο βάθος, το οποίο υπερβαίνει αυτό των πήξεων του μπαγδατί, αλλά και αυτό του φορέα. Η μέθοδος, εκτός από αποτελεσματική, είναι ταχεία, ασφαλής για τον εφαρμοστή και τους χρήστες του χώρου (μοναχούς και προσκυνητές), καθώς και έχει μεγάλη υπολειμματική διάρκεια. Ακόμη δεν αφήνει ελαιώδεις αποθέσεις πάνω στις επιφάνειες των ξύλων και η λειτουργία του Ναού δε χρειάζεται να διακοπεί κατά την εφαρμογή του.
- b) Μετά τον ενδεδειχθέν καθαρισμό της επιφάνειας του σοβά του Τρούλου (Ζώνη Κ) αποκαλύφθηκε ο ζωγραφικός διάκοσμος από την τελευταία αναστηλωτική επέμβαση του Κομνηνού. Μετά την πραγματοποίηση του καθαρισμού ακολουθεί η στερέωση και ενίσχυση του σοβά του Τρούλου, ο οποίος περιβάλλει τα πηχάκια μπαγδατί. Για τους παραπάνω λόγους κρίνεται απαραίτητη η στερέωση του σοβά με Primal 3% acrylic emulsion, το οποίο είναι ένα ευέλικτο υλικό με βάση το νερό, 100% ακρυλικό πολυμερές σχεδιασμένο αποκλειστικά για αποδοτική εφαρμογή σε ζωγραφικούς διακόσμους εσωτερικού και εξωτερικού χώρου. Διαθέτει εξαιρετική ρεολογική ικανότητα, είναι ανθεκτικό στην UV ακτινοβολία και είναι υδροφοβικό υλικό.

- c) Τέλος, είναι απαραίτητη η ταυτοποίηση των χρωστικών ουσιών (με την τεχνική Raman) και η παρασκευή ενός συνόλου χρωματικών δειγμάτων με τέτοιο τρόπο ώστε να προσεγγίζουν τις τεχνικές και τις συστάσεις που χρησιμοποιήθηκαν κατά την αναστηλωτική επέμβαση του Κομνηνού, προσομοιώνοντας τις χρωματικές εντυπώσεις του Τρούλου. Για την σωστή εφαρμογή των χρωμάτων πάνω στην επιφάνεια του σοβά επιβάλλεται η δημιουργία σωστής βάσης πάνω στην επιφάνεια. Για το σκοπό αυτό προτείνεται η εφαρμογή δύο στρώσεων **Master Emaco S TIX 285**, ενός, δηλαδή, ποζολανικού υλικού με βάση την άσβεστο, χωρίς τσιμέντο, με εξαιρετική αντοχή, το οποίο χρησιμοποιείται ως επισκευαστικό κονίαμα στις αποκαταστάσεις ιστορικών κτιρίων.
- d) Τέλος, τοποθετήθηκε Χρυσός Σταυρός αντίγραφο του Σταυρού του Κομνηνού ως επίστεψη στην κορυφή του Τρούλου της ανωδομής του Παναγίου Τάφου.

«ΛΙΣΤΑ ΣΧΕΔΙΩΝ ΥΠΟ ΚΛΙΜΑΚΑ»

«ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Διεθνής

- Angeloni Alessandra- Pappalardo Carmelo, «THE ARCHEOLOGICAL AND HISTORICAL CONTEXT OF THE BASILICA OF THE HOLY SEPULCHRE IN JERUSALEM»
- Couasnon Charles, «The church of the Holy Sepulchre in Jerusalem», translate from the original French by J-P. B. and Claude Ross, The Schweich Lectures of the British Academy, 1972
- Biddle, M., Cooper, M.A.R., Robson, S., 1992. The Tomb of Christ, Jerusalem: a photogrammetric survey, *The Photogrammetric Record*, 14(79), 25-43.
- Balodimos, D., Lavvas G., Georgopoulos, A., 2003. Wholly Documenting Holy Monuments CIPA XIX International Symposium, 2003, Antalya.
- Lavvas, G., 2009. The Church of the Holy Sepulchre in Jerusalem, Academy of Athens, 2009, 192 p., ISBN 978-960-404-139-8 (in Greek).
- In American English also spelled *Sepulcher*. Also called the Basilica of the Holy Sepulchre. *McMahon, Arthur L. (1913). "Holy Sepulchre". Catholic Encyclopedia. New York: Robert Appleton Company.*
- "*Church of the Holy Sepulchre, Jerusalem*". *Jerusalem: Sacred-destinations.com*. 21 February 2010. Retrieved 7 July 2012. NPNF2-01. *Eusebius Pamphilius: Church History, Life of Constantine, Oration in Praise of Constantine.*
- *Pringle, Denys (2007). The Churches of the Crusader Kingdom of Jerusalem 3. Cambridge University Press. p. 6. ISBN 978-0521390361. Retrieved 2014-09-19.*
- Κουβούκλιον: Modern Greek for small compartment Americans spell this as *Edicule* from Latin: *aediculum*, small building "*Commemoration of the Founding of the Church of the Resurrection (Holy Sepulchre) at Jerusalem*". *Orthodox Church in America. Retrieved 2 March 2012.*
- *Murphy-O'Connor, Jerome (February 1998). The Holy Land. Oxford University Press. pp. 56,59. ISBN 978-0191528675.*

- *Cohen, Raymond (May 2009). "The Church of the Holy Sepulchre: A Work in Progress". The Bible and Interpretation. Retrieved 2014-09-19.*
- *"Miracle of Holy Fire which happens every year".Holyfire.org. Retrieved 2 March 2012.*
- Kanai, K., and Tanaka, T., 1961, "On Microtremor VIII", Bulletin of Earthquake Research Institute, University of Tokyo, Japan, Vol39.
- CEN, (2004). Eurocode 8 (EC8-1), 2004: *Design of structures for earthquake resistance Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings.*
- CEN, (2005). Eurocode 3 (EC8-3), 2005: *Design of steel structures. Part 1-1: General rules and rules for buildings.*

Ελληνική

- ❖ Ολυμπίου Π. Νικόλαος, «Ιερά κειμήλια του Πανάγιου Τάφου», τόμος Α' «Χρυσοκέντητα», εκ. «Αλληλεγγύη» ΜΚΟ της εκκλησίας της Ελλάδος, Αθήνα 2006.
- ❖ «Booklet Ζαππείου», «Ιστορική τεκμηρίωση».
- ❖ Μητρόπουλος Θ., «Ο Πανάγιος Τάφος του Πανίερου Ναού της Αναστάσεως».
- ❖ Μητρόπουλος Θ., «Ο Πανίερους ναός της Αναστάσεως Ιεροσολύμων, Το έργο του Κάλφα Κομνηνού 1808- 1810», Ευρωπαϊκό Κέντρο Βυζαντινών και Μεταβυζαντινών Μνημείων, Θεσσαλονίκη 1009.
- ❖ Ιωαννίδης Β., « Προσκυνητάριον της Αγίας Πόλεως Ιερουσαλήμ, Ιερουσαλήμ 1877.
- ❖ Κορωναίος Αμ. Γ.- Σαργέντης Φ., «Θερμογραφία», Δημοσιεύσεις Εργαστηρίου Τεχνικών Υλικών», Τεύχος 2, Αθήνα 2003.
- ❖ Μοροπούλου Τ., «Πρότυπα, μεθοδολογία και τεχνικές για τον ολικό έλεγχο ποιότητας στις κατασκευές και τα έργα υποδομών με μη καταστρεπτικές μεθόδους», συνέδριο ΤΕΕ, Αθήνα 19-21/04/2015.

- ❖ Βιντζηλαίου Ε., «Τεκμηρίωση φέροντος οργανισμού και βλαβών: επί τόπου και εργαστηριακές διερευνητικές μέθοδοι», Επιστημονικές ημερίδες για την προστασία της πολιτιστικής κληρονομιάς, Απρίλιος 2007.
- ❖ Παλιεράκη Β, Βιντζηλαίου Ε, Μανωλεδάκη Α, Αδάμη Χ, Νικολοπούλου Β, «Οι μέθοδοι του ραντάρ και της ενδοσκοπησης. Εφαρμογή σε Βυζαντινά και Νεώτερα μνημεία».
- ❖ Carydis P. and H.P. Mouzakis: “Ambient vibration measurements of undamaged, seismically damaged and repaired buildings”, Earthquake Spectra, Vol. 2, N0 3, pp.515-535, 1986.
- ❖ Carydis, P. G.: “Measurement and evaluation of ambient vibrations on monuments”, Part 18- I.3.
- ❖ Βαρβούνης Μ.Γ. (2009). Ο Πανάγιος Τάφος και ο Ναός της Αναστάσεως. Εκδόσεις Χελάνδιον.
- ❖ Γεωργόπουλος, Α., Αγραφιώτης Π., Παπαδάκη Α. (2016). Γεωμετρική Τεκμηρίωση Ιερού Κουβουκλίου Παναγίου Τάφου – Ενδιάμεση Έκθεση.
- ❖ Κορρές, Μ. (2016). Αρχιτεκτονική τεκμηρίωση μορφής, δομής, δομικών βλαβών, τρόπων επισκευής – Ενδιάμεση Έκθεση.
- ❖ Λαβάς Γ., Μπαλοδήμος Δ.-Δ., (2003). Πανίερος Ναός Αναστάσεως, Τοπογραφική– Φωτογραμμετρική Τεκμηρίωση, Ελληνορθόδοξον Πατριαρχείον Ιεροσολύμων.
- ❖ Μανιατάκης, Χ. (2015). Αντισεισμικός σχεδιασμός κατασκευών σε σεισμικές διεγέρσεις του εγγύ-πεδίου. Εργαστήριο Αντισεισμικής Τεχνολογίας ΕΜΠ, Διδακτορική Διατριβή.
- ❖ Μητρόπουλος, Θ. (2012). Ιστορικά στοιχεία σχετικά με την σεισμικότητα της περιοχής των Ιεροσολύμων και η καταγραφή των σημαντικότερων σεισμών μέχρι τον 20ο αι. Μητρόπουλος, Θ., (2015). Ο Πανάγιος Τάφος του Πανιέρου Ναού της Αναστάσεως - Σύνομη ιστορική και κτηριακή ανάδρομη από τους αρχαιότετους χρόνους μέχρι την πυρκαγιά του Ναού της Αναστάσεως το 1808.
- ❖ Μοροπούλου, Α., Μπακόλας Α., Δελέγκου Α., Μούνδουλας, Π., Αλεξάκης Ε., Σιούλα, Λ.(2016). Τεκμηρίωση και Χαρακτηρισμός Δομικών Υλικών και

Διάγνωση της Φθοράς και της Παθολογίας. Τεκμηρίωση και Χαρακτηρισμός Δομικών Υλικών – Διάγνωση Φθοράς - Ενδιάμεση Έκθεση.

- ❖ Μοροπούλου, Α., Λαμπρόπουλος, Κ. (2016). Τεκμηρίωση και Χαρακτηρισμός Δομικών Υλικών και Διάγνωση της Φθοράς και της Παθολογίας. Μη καταστροφικός έλεγχος Διερεύνησης/ Απεικόνισης Εσωτερικής Δομής του Ιερού Κουβουκλίου του Παναγίου Τάφου στον Πανίερο Ναό της Αναστάσεως στα Ιεροσόλυμα με χρήση Γεωραντάρ - Ενδιάμεση Έκθεση.
- ❖ Μουζάκης, Χ. (2016). Δυναμικά χαρακτηριστικά του Ιερού Κουβουκλίου του Παναγίου Τάφου - Τεχνική Έκθεση.
- ❖ Οργανισμός Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας, ΟΑΣΠ (2013). Ομάδα μελέτης για τη σύνταξη κανονισμού επεμβάσεων σε κτίρια από οπλισμένο σκυρόδεμα -Ομάδα εναρμόνισης του ΚΑΝ.ΕΠΕ. με τους ευρωκώδικες: Κανονισμός Επεμβάσεων (ΚΑΝ.ΕΠΕ.), 1η Αναθεώρηση 2013. ΦΕΚ 2187B, 05/09/2013.
- ❖ Σπυράκος, Κ., (2004). Ενίσχυση Κατασκευών για Σεισμικά Φορτία, Έκδοση Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδας, Αθήνα.
- ❖ Τάσιος, Θ.Π., Χρονόπουλος, Μ.Π., (1986). Παθολογικά Αίτια και Μηχανική των Βλαβών της Τοιχοποιίας, Υ.ΠΕ.ΧΩ.ΔΕ./ Εργ. Ωπλ. Σκυροδέματος Ε.Μ.Π., Αθήνα, 1986.
- ❖ Maniatakis, C.A, Spyrakos, C.C. (2012). A new methodology to determine elastic displacement spectra in the near-fault region. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 35, 41-58.
- ❖ Π. Τουλιάτος, Σημειώσεις για το μάθημα «Αρχιτεκτονική και σεισμός». Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2009.
- ❖ Π. Τουλιάτος, Ιερά Μονή Δοχειαρίου Αγίου όρους: η αρχιτεκτονική του καθολικού και του πύργου. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2009.
- ❖ Π. Τουλιάτος, Ε. Τσακανίκα, Ζ. Κοντέας, Το ξύλο και η ξύλινη κατασκευή. Αθήνα: Σύνδεσμος Εισαγωγέων – Εμπόρων Ξυλείας και Οικοδομικών Υλικών, 2014.

Ιστοσελίδες

- ✓ www.stonecontact.com
- ✓ <http://www.panoramio.com/photo/53775923>
- ✓ <http://www.mercola.gr>
- ✓ <http://portal.tee.gr>
- ✓ <http://www.wfdt.teilar.gr>