

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΠΜΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΜΝΗΜΕΙΩΝ

Β' ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ: ΥΛΙΚΑ & ΕΠΕΜΒΑΣΕΙΣ  
ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ ΜΝΗΜΕΙΩΝ



## ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Δοκιμές εξόλκευσης ράβδων τιτανίου από την τοιχοποιία και μέλη των ορθομαρμάρωσεων για την εύρεση ακαμψίας των συνδέσμων στο πλαίσιο της ολοκληρωμένης μελέτης προστασίας του Ιερού Κουβουκλίου του Παναγίου Τάφου στα Ιεροσόλυμα

ΚΟΥΚΟΥΡΑΣ ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ



Συνεπιβλέποντες Καθηγητές:

Καθ. Α. Μοροπούλου Σχ. ΧΜ ΕΜΠ

Επικ Καθ. Χ. Μουζάκης Σχ. ΠΜ ΕΜΠ

Αθήνα, Μάρτιος 2017

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής αυτής εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την κα. Α. Μοροπούλου και τον κ. Χ. Μουζάκη, οι οποίοι με την ιδιότητα του επιβλέποντα καθηγητή μου προσέφεραν τη δυνατότητα να συμμετάσχω σε αυτό το σημαντικό έργο και με καθοδήγησαν για την ορθότερη ολοκλήρωση της διπλωματικής αυτής εργασίας.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Κ. Σπυράκο, τον κ. Μ. Κορρέ, τον κ. Ν. Μορόπουλο, τον κ. Α. Γεωργόπουλο, τον κ. Β. Ζαφείρη, τον κ. Θ. Μητρόπουλο και όλα τα άτομα τα οποία ενεπλάκησαν σε αυτό το έργο και με προθυμία συνεργάστηκαν μαζί μου και μοιράστηκαν τις επιστημονικές τους γνώσεις και το ενδιαφέρον τους για την αποκατάσταση των μνημείων.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και ιδιαίτερα την αδερφή μου Σοφία για την αμέριστη συμπαράσταση και βοήθεια που μου προσέφεραν, ώστε να ολοκληρωθεί η παρούσα εργασία.

## **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Σκοπός της εργασίας αυτής είναι ο προσδιορισμός της ακαμψίας, της αντοχής και των μηχανισμών αστοχίας των αγκυρίων τιτανίου με τα οποία συγκρατείται η εξωτερική ορθομαρμάρωση του Παναγίου Τάφου στην τοιχοποιία. Στο πρώτο κεφάλαιο αναφέρεται η μεθοδολογία της διαγνωστικής μελέτης που εφαρμόζεται στα μνημεία καθώς επίσης και τα κριτήρια για την επιλογή των επεμβάσεων και των τεχνικών τους. Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζεται συνοπτικά η υφιστάμενη κατάσταση του μνημείου και παραθέτονται τα προβλήματα που αντιμετωπίζει ως δόμημα. Αναφέρονται ακόμα οι επεμβάσεις και οι λόγοι για τους οποίους επιλέχθηκαν. Στο τρίτο κεφάλαιο αναλύεται η επέμβαση αντικατάστασης των ιστορικών αγκυρίων του Κομνηνού με σύγχρονα. Υπολογίζονται σε θεωρητικό επίπεδο τα αναμενόμενα χαρακτηριστικά των αγκυρίων και στη συνέχεια ελέγχεται η ορθότητα των υπολογισμών με μια σειρά από πειράματα που πραγματοποιήθηκαν στο εργοτάξιο του έργου. Στο τέταρτο και πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα πειράματα και αναλύονται τα αποτελέσματα που προκύπτουν. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι τύποι αγκύρωσης που επιλέχθηκαν να εφαρμοστούν με τα χαρακτηριστικά τους και υπολογίζονται τα φορτία που καλούνται να αντιμετωπίσουν σε περίπτωση σεισμού. Στο κεφάλαιο έξι αναφέρεται η διαδικασία που προτείνεται για την ορθή τοποθέτηση των αγκυρίων στο εργοτάξιο.

## **ABSTRACT**

The aim of this research is the determination of stiffness, strength and failure mechanisms of titanium anchors with which the outer cladding of the Holy Aedicule is retained in masonry. The first chapter discusses the methodology of the diagnostic study applied to monuments as well as the criteria for selecting the operations and their techniques. The second chapter summarizes the current state of the monument and presents the structural problems. Moreover, it is mentioned the interventions and the criteria of the selection. The third chapter analyzes the replacement of historical anchors of Komnenos with modern ones. The expected characteristics of the anchors are calculated theoretically and then the correctness of calculations is confirmed with a series of experiments carried out at the project site. The fourth and fifth chapter presents the pull-out tests and discussed the results. Additionally, the types of anchorage that were finally selected and applied on the monument are presented and also the forces applied to them in case of earthquake are calculated. In the sixth chapter is presented the proposed procedure of installation of the anchors to the monument.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΕΙΚΟΝΩΝ, ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ, ΣΧΕΔΙΩΝ ΚΑΙ ΠΙΝΑΚΩΝ.....	6
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	12
1.ΓΕΝΙΚΟ ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ.....	12
1.2.ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΤΗΣ ΔΙΑΓΝΩΣΤΙΚΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ.....	13
1.3.ΔΟΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ.....	14
2. ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΜΕΛΕΤΗΣ: ΠΑΝΑΓΙΟΣ ΤΑΦΟΣ.....	17
2.1. ΔΙΑΓΝΩΣΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ.....	17
2.1.1. ΤΕΚΜΗΡΙΩΣΗ ΜΝΗΜΕΙΟΥ.....	17
2.1.2. ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΗ ΦΘΟΡΑΣ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΥΛΙΚΩΝ.....	27
2.1.3.ΔΟΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΜΝΗΜΕΙΟΥ.....	34
2.2. ΕΠΕΒΑΣΕΙΣ ΚΑΙ ΥΛΙΚΑ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ.....	40
2.2.1.ΟΙ ΕΠΕΜΒΑΣΕΙΣ ΠΟΥ ΕΠΙΛΕΧΘΗΚΑΝ.....	40
2.2.2. ΤΑ ΒΑΣΙΚΑ ΥΛΙΚΑ ΤΗΣ ΔΟΜΙΚΗΣ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ.....	50
2.2.3. ΤΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΩΝ ΕΠΕΜΒΑΣΕΩΝ ΣΤΗΝ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑ.....	53
2.2.4. ΟΙ ΤΥΠΟΙ ΤΩΝ ΑΓΚΥΡΙΩΝ ΚΑΙ ΤΩΝ ΒΛΗΤΡΩΝ.....	54
3. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ.....	58
3.2.ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ.....	58
3.3.ΑΝΑΜΕΝΟΜΕΝΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	58
3.3.1.ΑΝΤΟΧΗ ΑΓΚΥΡΙΟΥ.....	58
3.3.2.ΑΝΤΟΧΗ ΑΓΚΥΡΙΟΥ ΓΙΑ ΣΥΓΚΡΑΤΗΣΗ ΑΝΤΙΠΡΟΣΩΠΕΥΤΙΚΟ ΤΕΜΑΧΙΟΥ ΟΡΘΟΜΑΡΜΑΡΩΣΗΣ.....	61
3.3.3.ΑΝΤΟΧΗ ΒΛΗΤΡΟΥ.....	62
3.3.4.ΑΝΤΟΧΗ ΒΛΗΤΡΟΥ ΓΙΑ ΣΥΓΚΡΑΤΗΣΗ ΑΝΤΙΠΡΟΣΩΠΕΥΤΙΚΟΥ ΤΕΜΑΧΙΟΥ ΟΡΘΟΜΑΡΜΑΡΩΣΗΣ.....	64
3.3.5.ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΒΛΗΤΡΟΥ ΚΑΙ ΑΓΚΥΡΙΟΥ.....	64
4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ.....	66
4.1. Η ΣΥΣΚΕΥΗ ΕΞΟΛΚΕΥΣΗΣ.....	66
4.2. 1 <sup>η</sup> ΣΕΙΡΑ ΔΟΚΙΜΩΝ.....	69
4.1.1.ΔΟΚΙΜΗ 1η.....	70
4.1.2.ΔΟΚΙΜΗ 2η.....	73
4.1.3.ΔΟΚΙΜΗ 3η.....	75

4.1.4.ΔΟΚΙΜΗ 4η .....	77
4.1.5.ΔΟΚΙΜΗ 5η .....	79
4.1.6.ΔΟΚΙΜΗ 6η .....	81
4.1.7.ΔΟΚΙΜΗ 7η .....	84
4.1.8.ΔΟΚΙΜΗ 8η .....	87
4.1.9.ΔΟΚΙΜΗ 9η .....	89
4.1.10.ΔΟΚΙΜΗ 10η .....	92
4.1.11. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΑΚΑΜΨΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ .....	94
4.3. 2 <sup>η</sup> ΣΕΙΡΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ .....	102
4.2.1.ΔΟΚΙΜΗ 1 <sup>η</sup> .....	103
4.2.2.ΔΟΚΙΜΗ 2 <sup>η</sup> .....	107
4.2.3.ΔΟΚΙΜΗ 3 <sup>η</sup> .....	110
4.2.4. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΑΚΑΜΨΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ .....	113
4.2.5. ΔΟΚΙΜΗ 4 <sup>η</sup> .....	116
4.2.6.ΔΟΚΙΜΗ 5 <sup>η</sup> .....	118
4.2.7. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΑΚΑΜΨΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ .....	119
5.ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	122
5.1. ΤΕΛΙΚΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΟ ΜΝΗΜΕΙΟ .....	124
5.1.1.ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΔΥΝΑΜΕΩΝ ΣΤΟΥΣ ΣΥΝΔΕΣΜΟΥΣ ΤΗΣ ΟΡΘΟΜΑΡΜΑΡΩΣΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ .....	129
6.ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ .....	132
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	138

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΕΙΚΟΝΩΝ, ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ, ΣΧΕΔΙΩΝ ΚΑΙ ΠΙΝΑΚΩΝ

### Εικόνες

Εικόνα 1. Γραφική αναπαράσταση του Πανάγιου Τάφου.....	18.
Εικόνα 2. Προσδιορισμός των σχετικών θέσεων του Ρωμαϊκού λατομείου και των κτιρίων λατρείας.....	18.
Εικόνα 3. Το συγκρότημα του Ι.Ν. της Αναστάσεως φάση Μ. Κων/νου 326 μ.Χ.....	20.
Εικόνα 4 & Εικόνα 5.....	21.
Εικόνα 6 & Εικόνα 7.....	21.
Εικόνα 8. Το κουβούκλιο του Ι.Ν. της Αναστάσεως – Σταυροφορική Φάση.....	24
Εικόνα 9. Το κουβούκλιο του Ι.Ν. της Αναστάσεως-υφιστάμενη κατάσταση.....	23.
Εικόνα 10. Βόρεια όψη του μνημείου με αρίθμηση λίθων και με αποτύπωση των λιθοσωμάτων.....	24.
Εικόνα 11. Λίθος ορθομαρμάρωσης αποτυπωμένος με laserscanner.....	25.
Εικόνα 12. Φωτογραμμετρικό μοντέλο μνημείου.....	26.
Εικόνα 13. Τομή Ιερού Κουβουκλίου κατά τη διεύθυνση Δύση-Ανατολή.....	27.
Εικόνα 14. Αποτελέσματα διασκοπήσεων.....	30.
Εικόνα 15. Θερμογραφία υπερύθρου σε φάτνωμα μνημείου και σε δείγμα τοιχοποιίας...33.	
Εικόνα 16.. Παραμορφώσεις ορθομαρμάρωσης.....	34.
Εικόνα.17. Παρατήρηση της χρήσης μικρών και ακανόνιστων λιθοσωμάτων στα χαμηλότερα ύψη της τοιχοποιίας.....	35.
Εικόνα 18. Αγκύρια Κομνηνού για συγκράτηση λίθων SLAYEB.....	37.
Εικόνα 19. Αγκύρια Κομνηνού για συγκράτηση λίθων MIZZY.....	38.
Εικόνα 20. Κυκλωμένες φαίνονται οι περιοχές που δείχνουν πιθανή ύπαρξη καναλιού ύδατος.....	38.
Εικόνα 21. Σεισμολογικός χάρτης Ισραήλ.....	40.
Εικόνα 22. Εργοτάξιο βόρειας όψης.....	41.
Εικόνα 23. . Η διαδικασία επανάταξης των πεσσών στην κατακόρυφο.....	42.
Εικόνα 24. Απόκλιση ορθομαρμάρωσης από την κατακόρυφο.....	43.

Εικόνα 25. Στην εικόνα αυτή παρατηρούμε την αντικατάσταση της τοιχοποιίας με νέους λαξευτούς λίθους στο κατώτερο και πιο ταλαιπωρημένο από την ανερχόμενη υγρασία τμήμα της. Είναι εμφανής η αρμολόγηση που έχει προηγηθεί στο υπόλοιπο τμήμα.....	44.
Εικόνα 26. Οριζόντια τομή μνημείου μετά την αντικατάσταση τμήματος της τοιχοποιίας..	44.
Εικόνα 27. Το νότιο κλιμακοστάσιο μετά την τοποθέτηση του πλέγματος τιτανίου.....	45.
Εικόνα 28 .Οπές στις κατώτερες πλάκες της ορθομαρμάρωσης και δοκιμαστική τοποθέτηση αγκυρίου.....	46.
Εικόνα 29.Ο μεταλλικός κλωβός του θόλου(δεξιά ανεστραμμένος).....	47.
Εικόνα 30. Με κίτρινο χρώμα σημειώνονται τα αγκύρια τύπου U που συγκρατούν τα κολονάκια στις εσωτερικής ορθομαρμάρωσης στην τοιχοποιία. Με κόκκινο σημειώνονται οι θέσεις των ευθύγραμμων αγκυρίων. Διακρίνονται τάπες των οπών από το ίδιο μάρμαρο.....	47.
Εικόνα 31.Αγκύριο κολώνας εσωτερικής ορθομαρμάρωσης.....	48.
Εικόνα 32. Στιγμιότυπο κατά την επανατοποθέτηση της εξωτερικής ορθομαρμάρωσης...	48.
Εικόνα 33.Οπές στις κατώτερες πλάκες της ορθομαρμάρωσης για την τοποθέτηση των βλήτρων και των αγκυρίων.....	49.
Εικόνα 34. Κώνος διάτρησης της τοιχοποιίας.....	61.
Εικόνα 35. Μηχανισμοί αστοχίας σύνδεσης με τοιχοποιία.....	62.
Εικόνα 36.Κώνος περίσφυξης.....	68.
Εικόνα 37. Μοντέλο προσομοίωσης συσκευής εξολκευσης στο E-TABS.....	69.
Εικόνα 38. Η διάταξη.....	71.
Εικόνα 39. Η διάταξη μετά τη θραύση του μαρμάρου.....	71.
Εικόνα 40. Η επιφάνεια θραύσης του μαρμάρου.....	71.
Εικόνα 41. Πλάγια όψη του θραυσμένου μαρμάρου.....	72.
Εικόνα 42. Αστοχία σπειρώματος και περικοχλίου.....	73.
Εικόνα 43. Διαδικασία διάνοιξης της οπής κάθετα στην επιφάνεια του μαρμάρου.....	74.
Εικόνα 44. Διαρροή της ράβδου στο άνω σπείρωμα.....	75.
Εικόνα 45. Διαρροή της ράβδου στο κάτω σπείρωμα.....	77.
Εικόνα 46. Διαρροή της ράβδου στο κάτω σπείρωμα.....	79.
Εικόνα 47. Αστοχία του άνω σπειρώματος στη ράβδο.....	82.

Εικόνα 48. Αστοχία του άνω σπειρώματος στη ράβδο.....	82.
Εικόνα 49. Η διάταξη.....	84.
Εικόνα 50. Η μορφή της ράβδου μετά την εξόλκευση.....	85.
Εικόνα 51. Η οπή αγκύρωσης με άντυγα 4,5 cm, βάθος 10cm.....	85.
Εικόνα 52. Το λούκι αγκύρωσης με άντυγα 4,5 cm.....	85.
Εικόνα 53. Η οπή αγκύρωσης.....	87.
Εικόνα 54. Η διάταξη.....	90.
Εικόνα 55. Η μορφή της ράβδου μετά την εξόλκευση.....	90.
Εικόνα 56. Η διάταξη.....	93.
Εικόνα 57. Ολίσθηση της ράβδου επί του MASTERFLOW και μερική αποκόλληση του MASTERFLOW από την τοιχοποιία.....	93.
Εικόνα 58 . Η διάταξη.....	104.
Εικόνα 59. Η διαρροή της ράβδου στο σπείρωμα.....	104.
Εικόνα 60 . Το δεύτερο δοκίμιο πριν την εφαρμογή της διάταξης.....	107.
Εικόνα 61 . Διαρροή της ράβδου τιτανίου στο άνω σπείρωμα.....	107.
Εικόνα 62 . Έμπροσθεν όψη της διάταξης.....	110.
Εικόνα 63 . Πλαϊνή όψη της διάταξης.....	110.
Εικόνα 64 . Όπισθεν όψη της διάταξης.....	111.
Εικόνα 65 . Αστοχία των βόλτων του σπειρώματος.....	111.
Εικόνα 66. Ευθύγραμμο αγκύριο κολώνας λίγο πριν την τοποθέτηση.....	114.
Εικόνα 67. Τοποθετημένα ευθύγραμμα αγκύρια σε κολώνα. Με δυσκολία διακρίνονται οι τάπες που κρύβουν τις σπές τους.....	114.
Εικόνα 68. Αγκύριο τύπου «Γ» .....	114.
Εικόνα 69. Οι επιταχύνσεις στις όψεις του μνημείου όπως προκύπτουν για $\alpha_g = 0,87g$ ....	135.



Διαγράμματα

Διάγραμμα 1. Δοκιμή εξόλκευσης ράβδου τιτανίου d=10 mm αγκυρωμένης σε λίθο τύπου SLAYEB.....	72.
Διάγραμμα 2. Δοκιμή εξόλκευσης ράβδου τιτανίου d=10mm αγκυρωμένης σε λίθο τύπου SLAYEB.....	74.
Διάγραμμα 3. Δοκιμή εξόλκευσης ράβδου τιτανίου d=10mm αγκυρωμένης σε λίθο τύπου SLAYEB.....	76.
Διάγραμμα 4. Δοκιμή εξόλκευσης ράβδου τιτανίου d=10mm αγκυρωμένης σε λίθο τύπου SLAYEB.....	78.
Διάγραμμα 5. Δοκιμή εξόλκευσης ράβδου τιτανίου d=10mm αγκυρωμένης σε λίθο τύπου SLAYEB.....	80.
Διάγραμμα 6. Δοκιμή εξόλκευσης ράβδου τιτανίου d=10mm αγκυρωμένης σε λίθο τύπου SLAYEB.....	83.
Διάγραμμα 7. Δοκιμή εξόλκευσης ράβδου τιτανίου d=10mm αγκυρωμένης σε λίθο τύπου MIZZY.....	86.
Διάγραμμα 8. Δοκιμή εξόλκευσης ράβδου τιτανίου d=10mm αγκυρωμένης σε λίθο τύπου MIZZY.....	88.
Διάγραμμα 9. Δοκιμή εξόλκευσης ράβδου τιτανίου d=10mm αγκυρωμένης σε λίθο τύπου MIZZY.....	91.
Διάγραμμα 10. Δοκιμή εξόλκευσης νευρωμένης ράβδου τιτανίου d=10mm αγκυρωμένης στην τοιχοποιία με MasterFlow 980 σε βάθος 0,4 m.....	94.
Διάγραμμα 11 . Δοκιμή εξόλκευσης ράβδου τιτανίου d=10mm μηχανικά αγκυρωμένης στο πρώτο δοκίμιο τοιχοποιίας.....	106.
Διάγραμμα 12 . Δοκιμή εξόλκευσης ράβδου τιτανίου d=10mm μηχανικά αγκυρωμένης στο δεύτερο δοκίμιο τοιχοποιίας.....	109.
Διάγραμμα 13. Δοκιμή εξόλκευσης ράβδου τιτανίου d=10mm μηχανικά αγκυρωμένης στο τρίτο δοκίμιο τοιχοποιίας.....	113.
Διάγραμμα 14 . Δοκιμή εξόλκευσης ράβδου τιτανίου d=10mm αγκυρωμένης με κονίαμα MasteEmaco S 285 TIX σε βάθος 0,4m στην τοιχοποιία του μνημείου.....	117.
Διάγραμμα 15 . Δοκιμή εξόλκευσης ράβδου τιτανίου D=10mm αγκυρωμένης με κονίαμα MasterEmaco S285 TIX σε βάθος 0,4m στην τοιχοποιία του μνημείου.....	119.

Σχέδια

Σχέδιο 1. Οριζόντια τομή σε ύψος 2,8 μέτρα από το εσωτερικό δάπεδο με σχεδιασμένα τα ευθύγραμμα και «Γ» αγκύρια που εισχωρούν σε βάθος 0.4 μέτρα στην τοιχοποιία και τα αγκύρια του κλιμακοστασίου.....	56.
Σχέδιο 2. Οριζόντια τομή σε ύψος 1,625 μέτρα από το εσωτερικό δάπεδο με σχεδιασμένα τα ευθύγραμμα αγκύρια που εισχωρούν σε βάθος 0.4 μέτρα στην τοιχοποιία.....	57.
Σχέδιο 3 . Κάτοψη σχάρας-γρύλου.....	66.
Σχέδιο 4. Ο πλάγια όψη σχάρας γρύλου.....	67.
Σχέδιο 5. Πλάγια όψη σχάρας με γρύλο.....	67.
Σχέδιο 6. Πλάγια όψη διάταξης.....	70.
Σχέδιο 7. Πλάγια όψη διάταξης.....	73.
Σχέδιο 8. Πλάγια όψη διάταξης.....	75.
Σχέδιο 9. Πλάγια όψη διάταξης.....	76.
Σχέδιο 10. Πλάγια όψη διάταξης.....	79.
Σχέδιο 11. Πλάγια όψη διάταξης.....	81.
Σχέδιο 12. Κάτοψη νέου SLAYEB και θέση οπής.....	81.
Σχέδιο 13. Πλάγια όψη διάταξης.....	84.
Σχέδιο 14. Πλάγια όψη διάταξης.....	87.
Σχέδιο 15. Πλάγια όψη διάταξης.....	89.
Σχέδιο 16. Η διάταξη.....	92.
Σχέδιο 17 . Τομή της διάταξης.....	105.
Σχέδιο 18 . Τομή της διάταξης.....	108.
Σχέδιο 19 . Τομή της διάταξης.....	112.
Σχέδιο 20 . Τομή της διάταξης.....	116.
Σχέδιο 21. Θέσεις αγκυρίων.....	135.
Σχέδιο 22. Θέσεις αγκυρίων.....	136.
Σχέδιο 23. Θέσεις αγκυρίων.....	137.

Πίνακες

Πίνακας 1. Ιστορικά υλικά μνημείου.....	31.
Πίνακας 2. Χαρακτηριστικών ιστορικών υλικών μνημείου.....	32.
Πίνακας 3. Μηχανισμοί αστοχίας αγκυρώσεων πρώτης σειράς δοκιμών.....	101.
Πίνακας 4. Ιδιοτήτων που μετρήθηκαν.....	121
Πίνακας 5. Μηχανισμών αστοχίας ανά τύπο αγκύρωσης.....	122.
Πίνακας 6. Τύποι αγκυρώσεων που εφαρμόστηκαν.....	125.

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στη διπλωματική αυτή εργασία γίνεται διερεύνηση των αντοχών των 2 διαφορετικών τύπων αγκυρίων που χρησιμοποιήθηκαν στο μνημείο. Επίσης γίνεται υπολογισμός της ακαμψίας τους. Τα αποτελέσματα της διαδικασίας αυτής σε συνδυασμό με την προσομοίωση των δομικών στοιχείων και φορτίσεων με χρήση πεπερασμένων στοιχείων θα συμβάλλουν στην αποτίμηση της σεισμικής συμπεριφοράς του μνημείου. Η έρευνα αυτή αποτελεί τμήμα του εγχειρήματος αποκατάστασης του Παναγίου τάφου στα Ιεροσόλυμα του οποίου την υψηλή επιστημονική επιστασία ανέλαβε το Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο με υπεύθυνο την καθηγήτρια της Σχολής Χημικών Μηχανικών κ. Αντωνία Μοροπούλου.

Η έρευνα και οι εργασίες αποκατάστασης ακολούθησαν τις σύγχρονες διεθνείς πρακτικές αντιμετώπισης των μνημείων.

### 1.ΓΕΝΙΚΟ ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ

Με την πάροδο του χρόνου πολλά ιστορικά κτίρια και μνημεία, όπως το αυτό του Ιερού Κουβουκλίου του Παναγίου τάφου, εξασθενούν και αυξάνεται η τρωτότητά τους στα επιβαλλόμενα φορτία, στατικά και δυναμικά.

Οι παράγοντες που συμβάλλουν στο φαινόμενο αυτό είναι πολλοί και συχνά δρουν συνδυαστικά. Η έλλειψη συντήρησης, η εγκατάλειψη και η γήρανση των υλικών μειώνουν τη δομική ακεραιότητα του μνημείου. Ακόμα, η φθορά των επιμέρους δομικών υλικών και η εξαλλοίωση των φυσικοχημικών ιδιοτήτων τους επιβάλλουν πρόσθετα φορτία ή υποβαθμίζει τις μηχανικές τους αντοχές των ιστορικών υλικών που συχνά πλέον δεν ανταπεξέρχονται πλήρως στο τον αρχικό τους ρόλο. Στα παραπάνω έρχονται να προστεθούν, ο ερπυσμός, η χαλάρωση, οι μετατροπές και οι προσθήκες, η αλλαγή χρήσης, η πυρκαγιά, η βιοδιάβρωση και φυσικά η υγρασία, η μεταφορά διαλυτών αλάτων και οι σεισμικές δονήσεις.

Βάση των διεθνών χαρτών και της νομοθεσίας οι στόχοι και οι αρχές συντήρησης είναι οι εξής:

- Η διατήρηση των μνημείων όπως καθορίζεται από τις Χάρτες και τις Διεθνείς Συμβάσεις για την Πολιτιστική Κληρονομιά.
- Η ανταπόκριση του μνημείου στις απαιτήσεις που προκύπτουν από την χρήση του.
- Πολλές φορές οι χρηστικές απαιτήσεις του κτιρίου λειτουργούν ανταγωνιστικά ως προς τα κριτήρια επιτελεσματικότητας και συμβάτοτητας που θέτουν οι Διεθνείς Συμβάσεις
- Βασικό εργαλείο για την εκπλήρωση των απαιτήσεων των Χαρτών και των χρηστικών απαιτήσεων είναι ο Ολικός Έλεγχος Ποιότητας, που πρέπει να ανταποκρίνεται στις προδιαγραφές, και να γίνεται βάσει Κριτηρίων και Μεθοδολογίας Ελέγχου.

Είναι αλήθεια ότι η προσπάθεια προστασίας ενός ιστορικού δομήματος είναι μια πολύπλοκη διαδικασία που για την επιτυχία της απαιτεί σε βάθος γνώση των προβλημάτων που αντιμετωπίζει η κατασκευή, των αιτίων που την προκάλεσαν, καθώς επίσης και την επιρροή που θα μπορούσε να έχει στην κατασκευή η οποιαδήποτε παρέμβαση. Ένα ακόμα στοιχείο που δυσχεραίνει την προστασία των μνημείων είναι η αβεβαιότητα σχετικά με τις ιδιότητες των υλικών, η ανομοιογενής συμπεριφορά τους αλλά και συχνά η πολυπλοκότητα της ίδιας της κατασκευής. Να επισημάνουμε επίσης, τις ιδιαιτερότητα των φθορών του εκάστοτε μνημείου και τη διαφορά στην τεχνοτροπία και τις αντιλήψεις της σύγχρονης εποχής σε σχέση με του τότε. Στα παραπάνω έρχεται να προστεθεί και δυσκολία λήψης αποφάσεων λόγω των αντιφατικών πολλές φορές αξιών του μνημείου αλλά και η μοναδικότητά του.

Για την ορθή και πλήρη αντιμετώπιση των προβλημάτων που παρουσιάζει μία ιστορική κατασκευή απαιτείται η γνώση τους σε βάθος. Είναι σημαντική λοιπόν η αξιολόγηση της υφιστάμενης κατάστασης ώστε να εκτιμηθεί η απομένουσα φέρουσα ικανότητα της κατασκευής και το ποσοστό ικανοποίησης των ελάχιστων απαιτήσεων που καθορίζονται από το είδος χρήσης του μνημείου. Η χρήση αυτή μάλιστα καθορίζει και τη στάθμη επιτελεστικότητας. Ανάλογα δηλαδή με τη χρήση, ορίζεται και η επιθυμητή συμπεριφορά της κατασκευής για το φορτίο του σεισμού σχεδιασμού.

## **1.2.ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΤΗΣ ΔΙΑΓΝΩΣΤΙΚΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ**

Κρίσιμο στάδιο για το στρατηγικό σχεδιασμό των επεμβάσεων στο μνημείο είναι η εμπειριστατωμένη διαγνωστική μελέτη η οποία προτείνεται να ακολουθεί την παρακάτω μεθοδολογία.

Πρώτο βήμα είναι η πλήρης τεκμηρίωση. Η ιστορική τεκμηρίωση μας βοηθά πέρα από το να αντιληφθούμε τη σημαντικότητα του μνημείου μας ενημερώνει σχετικά με τις οικοδομικές φάσεις του μνημείου και μας διαφωτίζει συχνά σχετικά με τη δομική του λειτουργία. Επίσης θα πρέπει το μνημείο να τεκμηριώνεται αρχιτεκτονικά και γεωμετρικά/τοπογραφικά. Πρέπει ακόμα να καταγράφονται και να χαρακτηρίζονται τα υλικά.

Δεύτερο βήμα είναι η μακροσκοπική παρατήρηση του προς εξέταση μνημείου. Καταγράφεται η κατάσταση των υλικών και επισημαίνονται οι διάφοροι τύποι φθοράς τους. Ακόμα καταγράφονται οι διάφορες πιθανές επεμβάσεις που χουν γίνει στο μνημείο κατά το παρελθόν.

Τρίτο βήμα είναι η παρακολούθηση, καταγραφή και γενικά η τεκμηρίωση των περιβαλλοντικών παραγόντων. Οι παράγοντες που καταγράφονται είναι το μικροκλίμα μέσα στο οποίο βρίσκεται το μνημείο, οι ρύποι, η χημική ανάλυση του εδάφους και η παρακολούθηση της ανερχόμενης υγρασίας, η μελέτη μεταφοράς διαλυτών αλάτων και η σεισμική δραστηριότητα.

Τέταρτο βήμα είναι η εξέταση με μη καταστρεπτικές ή ελάχιστα καταστρεπτικές μεθόδους. Αυτή έχει ως σκοπό την χαρτογράφηση των υλικών και της φθοράς σε αυτά αλλά και την αποτίμηση των περιβαλλοντικών παραγόντων.

Πέμπτο βήμα ακολουθεί η ταυτοποίηση των δομικών υλικών και η έρευνα προέλευσής τους. Πραγματοποιείται πετρογραφική και ορυκτολογική μελέτη. Γίνεται μελέτη των φυσικών, χημικών και φυσικοχημικών ιδιοτήτων των ιστορικών υλικών. Προσδιορίζονται επίσης οι μηχανικές τους αντοχές.

Έκτο βήμα είναι η μελέτη της φθοράς στο εργαστήριο. Αρχικά γίνεται συστηματική συλλογή αντιπροσωπευτικών δειγμάτων από χαρακτηριστικές θέσεις του μνημείου. Ακολουθεί η μελέτη των ιδιοτήτων των φθαρμένων υλικών και των προϊόντων φθοράς. Στην εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με το είδος και το βαθμό διάβρωσης και τα αίτια της βοηθά η σύγκριση του φθαρμένου ιστορικού υλικού με υγιές.

Έβδομο βήμα είναι η συσχέτιση των ενδογενών παραγόντων του μνημείου με τους εξωγενείς. Αυτή η διαδικασία απαιτεί πολυκριτηριακή ανάλυση και προσδιορισμό του ρόλου και του ειδικού βάρους κάθε παράγοντα.

Όγδοο βήμα είναι ο προσδιορισμός των φαινομένων φθοράς που λαμβάνουν χώρα σύμφωνα με τα αποτελέσματα του βήματος επτά. Στην ασφαλή εξαγωγή συμπερασμάτων μας οδηγεί η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων των μη καταστρεπτικών τεχνικών και των εργαστηριακών δεδομένων.

Κατά το ένατο και τελευταίο βήμα προτείνεται η παραμετρική ανάλυση και η προσομοίωση των πραγματικών συνθηκών με τεχνικές επιταχυνόμενης γήρανσης στο εργαστήριο. Έτσι επιβεβαιώνονται οι αρχικές εκτιμήσεις περί των μηχανισμών με τους οποίους η φθορά αναπτύσσεται στο μνημείο.

### **1.3.ΔΟΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ**

Κατά τα πρώτα βήματα της διαγνωστικής μελέτης γίνεται η και η αναγνώριση και ανάλυση του δομικού συστήματος. Δεδομένου ότι τα δομικά συστήματα διαφοροποιούνται από τόπο σε τόπο ανάλογα με τις ανάγκες και τα διαθέσιμα υλικά. Ακολουθείται λοιπόν κατάλληλη μεθοδολογία για την αναγνώριση και την ανάλυση των επιμέρους δομικών συστημάτων που συνθέτουν το κάθε ενιαίο δομικό σύνολο. Καθοριστικής σημασίας εδώ είναι η παθολογία του κτιριακού συνόλου και των υλικών του. Με τον όρο παθολογία εννοούμε τα προβλήματα, οι ζημιές, και τα ασθενή σημεία του δομικού συνόλου του μνημείου (Εφεσίου, 2011).

Για το λόγο αυτό γίνεται αναγνώριση του δομικού συστήματος του μνημείου και τυπολογική και μορφολογική περιγραφή του. Εξετάζονται οι ιστορικές φάσεις του μνημείου και της γενικότερης γεωγραφικής περιοχής βάσει βιβλιογραφικών και άλλων αναφορών (Εφεσίου, 2011).

Πραγματοποιείται ανάλυση των δομικών στοιχείων του δομήματος ανάλογα με την τυπολογία του. Απαιτείται προσδιορισμός του συνόλου των δομικών υλικών που το αποτελούν με μακροσκοπική παρατήρηση και επιτόπου «μη καταστροφικές» ή «ελάχιστα καταστροφικές μεθόδους». Για περαιτέρω διερεύνηση λαμβάνεται ο κατά το δυνατόν επαρκής αριθμός δειγμάτων από χαρακτηριστικές θέσεις του μνημείου. Αυτά εξετάζονται σε συνθήκες εργαστηρίου και προσδιορίζονται οι ιδιότητες και η προέλευσή τους όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα. Παράλληλα

γίνεται προσδιορισμός των δομικών στοιχείων,, και συστημάτων που αυτά απαρτίζουν διακρίνοντάς τα σε πρωτεύοντα και δευτερεύοντα (π.χ. τρόπος δόμησης τοιχοποιίας, περιγραφή φορέων του πατώματος ή της στέγης). Γίνεται προσδιορισμός του τρόπου με τον οποίο συνδέονται μεταξύ τους τα μεμονωμένα δομικά στοιχεία και συστήματα για να μορφώσουν το οικοδομικό σύνολο. Γίνεται προσδιορισμός των σημείων που απαιτούν ιδιαίτερη προσοχή όπως είναι οι προαναφερθείσες συνδέσεις των μελών. Σημειώνονται τα διάφορα ανοίγματα και τα κουφώματά τους. Καταγράφονται επίσης και τα μη φέροντα στοιχεία, όπως οι κατασκευαστικές πληρώσεις, οι διαχωριστικοί τοίχοι, οι ψευδοροφές, οι μονώσεις, οι επενδύσεις, τα τελειώματα και τα διάφορα αρχιτεκτονικά και διακοσμητικά στοιχεία (Εφεσίου, 2011).

Από τη μελέτη των υλικών προκύπτουν οι τύποι και ο βαθμός φθοράς τους. Σε συνδυασμό με τον προσδιορισμό του ρόλου κάθε υλικού πάνω στο μνημείο προσδιορίζεται η τρωτότητα του δομικού συστήματος. Αναλύονται και καταγράφονται οι τυπικές αστοχίες και κατανοούνται οι μηχανισμοί τους (Εφεσίου, 2011).

Με αυτόν τον τρόπο προσεγγίζουμε την κατάσταση του δομικού συστήματος και εξάγουμε συμπεράσματα για τη φέρουσα ικανότητά του. Συχνά πραγματοποιούνται και επιτόπου δοκιμές για τον προσδιορισμό των αντοχών των μελών και των συνδέσεών τους. Τέτοιου είδους δοκιμές είναι και οι δοκιμές εξόλκευσης της παρούσας εργασίας. Σε επόμενο στάδιο μετά τη συλλογή των παραπάνω δεδομένων το μνημείο προσομοιώνεται σε Η/Υ συνήθως με χρήση προγραμμάτων πεπερασμένων στοιχείων. Προτείνεται η ενόργανη παρακολούθηση του μνημείου καθ' όλη τη διάρκεια των εργασιών και μετά από αυτές και η προσεχτική τεκμηρίωση όλων των φάσεων της αποκατάστασης. Μελετάται η σεισμική δραστηριότητα της περιοχής και συγκρίνεται η συμπεριφορά του μνημείου σε σχέση με τα γειτονικά του κτίρια (Εφεσίου, 2011).

Επόμενο στάδιο είναι ο ολοκληρωμένος σχεδιασμός αντιμετώπισης των προβλημάτων του δομήματος. Απαιτείται στρατηγική λήψη αποφάσεων όσον αφορά στις κατάλληλες επεμβάσεις συντήρησης και στον καθορισμό κριτηρίων περιβαλλοντικής διαχείρισης για την αποτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων στις αρχιτεκτονικές επιφάνειες.

Τα κριτήρια και η μεθοδολογία για την επιτελεσματικότητα των υλικών και των επεμβάσεων συντήρησης είναι:

- Προσδιορισμός των παραμέτρων ελέγχου (α)συμβατότητας και αποτελεσματικότητας των υλικών και επεμβάσεων συντήρησης, συμπεριλαμβανομένων και των επεμβάσεων δομητικής αποκατάστασης και ενίσχυσης.
- Εισαγωγή των επιστημονικών και τεχνικών κριτηρίων των υλικών και επεμβάσεων συντήρησης, δηλαδή της επιτελεσματικότητας.
- Προσδιορισμός των απαραίτητων προδιαγραφών για τα υλικά και επεμβάσεις συντήρησης, δηλαδή της προδιαγεγραμμένης επιτελεσματικότητας.
- Προσδιορισμός των παραμέτρων ελέγχου για την διασφάλιση της ποιότητας, δηλαδή του βαθμού της επίτευξης της προδιαγεγραμμένης επιτελεσματικότητας.

Οι βασικές αρχές για τη διαμόρφωση κριτηρίων και της μεθοδολογίας προστασίας δομημάτων της αρχιτεκτονικής κληρονομιάς είναι:

- Συμβατότητα με τα αρχιτεκτονικά και ιστορικά χαρακτηριστικά του κτιρίου.
- Αρχιτεκτονική και Ιστορική Τεκμηρίωση Συμβατότητα Υλικών και Επεμβάσεων Συντήρησης.
- Έλεγχος των φυσικοχημικών, χημικών, μηχανικών ιδιοτήτων, επιτελεστικότητα.
- Δομητική Ανάλυση και Διερεύνηση Ασφαλείας
- Αειφορία
- Αύξηση του χρόνου ζωής.
- Προστασία περιβάλλοντος και εξοικονόμηση ενεργειακών πόρων.

Οι απαραίτητοι έλεγχοι προτεινόμενων υλικών αποκατάστασης και επεμβάσεων για τη μελέτη επεμβάσεων είναι:

- Έλεγχος διατήρησης των μορφολογικών και αρχιτεκτονικών στοιχείων και τεχνικών δόμησης.
- Έλεγχος συμβατότητας της ιστορικής μνήμης και της αισθητικής αξίας του μνημείου με την προτεινόμενη χρήση (για προσαρμογή του μνημείου σε νέα χρήση).
- Έλεγχος εξασφάλισης στατικής επάρκειας με τις προτεινόμενες επεμβάσεις.
- Έλεγχος συμβατότητας, και ανθεκτικότητας των υλικών, και αντιστρεψιμότητας των προτεινόμενων επεμβάσεων.



## **2. ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΜΕΛΕΤΗΣ: ΠΑΝΑΓΙΟΣ ΤΑΦΟΣ**

Στόχος της διεπιστημονικής συνεργασίας και της ολοκληρωμένης μελέτης είναι η διατήρηση των αξιών και των συμβολισμών με το οποίο είναι συνδεδεμένο το Ιερό Κουβούκλιο, η δομική ακεραιότητα του μνημείου καθώς και η βιωσιμότητα της δομικής αποκατάστασης του μνημείου

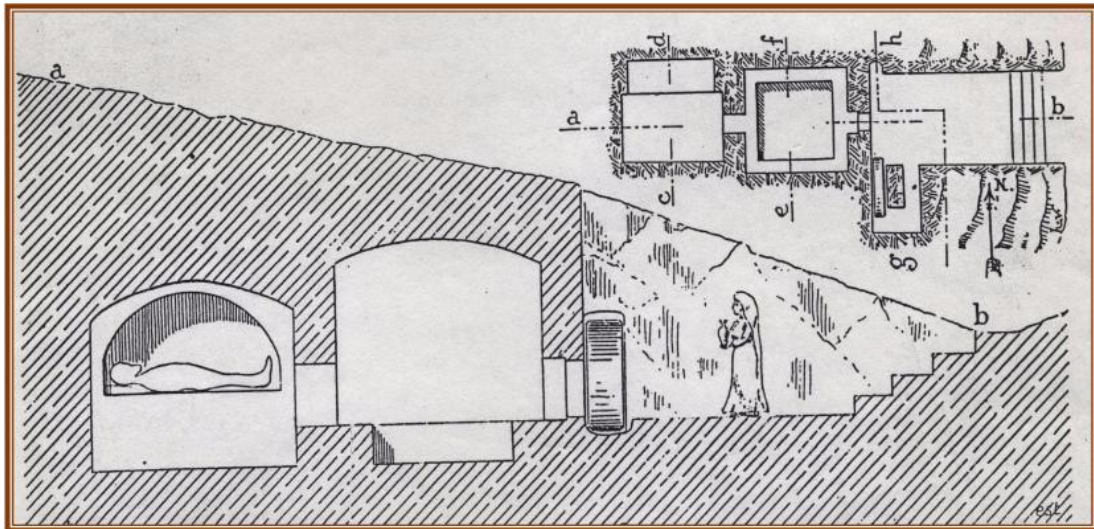
### **2.1. ΔΙΑΓΝΩΣΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ**

Κατά την αρχική επίσκεψη του μνημείου πραγματοποιείται η ιστορική, αρχιτεκτονική, γεωμετρική δομική του τεκμηρίωση καθώς επίσης διαπιστώνονται σε πρώτη φάση το είδος αλλά και το μέγεθος των βλαβών σε αυτόν. Ωστόσο, η διαγνωστική μελέτη συνεχίζεται καθ' όλη τη διάρκεια του καθώς αποκτάται πρόσβαση σε μέλη του μνημείου που έως τότε ήταν δυσπρόσιτα.

#### **2.1.1. ΤΕΚΜΗΡΙΩΣΗ ΜΝΗΜΕΙΟΥ**

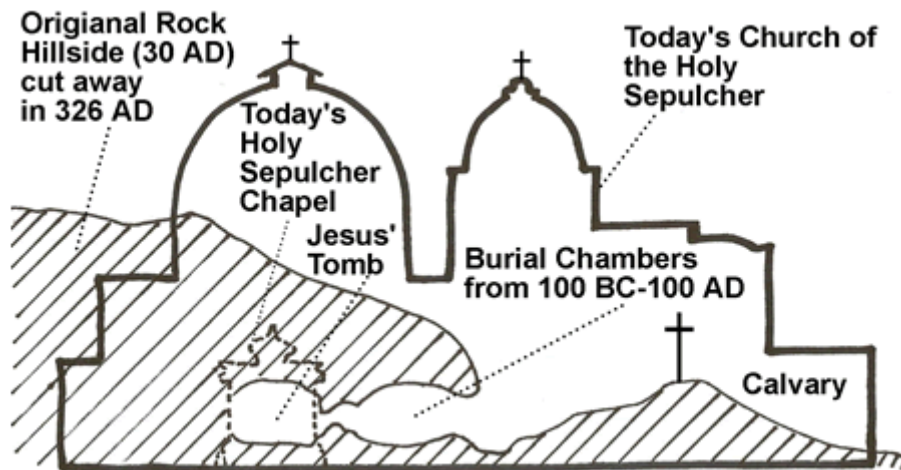
##### *ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΤΕΚΜΗΡΙΩΣΗ*

Η περιοχή όπου βρίσκεται ο Πανάγιος Τάφος ήταν κατά την εποχή των Ρωμαίων λόφος ονομαζόμενος Γκάρεμπ ο οποίος αποτελούσε λατομείο. Με την πάροδο του χρόνου το λατομείο (Γκαβαθά) αυτό μετατράπηκε σε νεκροταφείο για τους επιφανείς πολίτες της Ιερουσαλήμ. Ο Τάφος του Ιησού ήταν μια λαξευμένη κοιλότητα σε βράχο του λατομείου, όπως φαίνεται στην Εικόνα 1. Υποστηρίζεται πως ο καθ' αυτός τάφος (λαξευμένος βράχος-νεκρικός θάλαμος και προθάλαμος) προοριζόταν αρχικά για έναν επιφανή ιατρό της περιοχής ο οποίος ως υποστηρικτής του Ιησού παραχώρησε τον τάφο. Σημειώνεται ότι ο τάφος σφραγιζόταν με έναν λαξευμένο κυλινδρικό ογκόλιθο.



Γραφική αναπαράσταση του Παναγίου Τάφου πριν την επέμβαση του Μ.Κων/ντίνου

Εικόνα 1. Γραφική αναπαράσταση του Παναγίου Τάφου



Εικόνα 2. Προσδιορισμός των σχετικών θέσεων του Ρωμαϊκού λατομείου και των κτιρίων λατρείας

Με τη διάδοση του Χριστιανισμού και την καθιέρωσή του ως λατρεία, ο Τάφος του Ιησού αποτέλεσε σημείο προσκυνήματος και με τα χρόνια αποτέλεσε επίκεντρο κοινωνικών-θρησκευτικών-πολιτικών ταραχών ανά τους αιώνες.

Παρακάτω σημειώνονται κάποιες χρονολογίες σταθμοί για το μνημείο.

Περί το 130-145 μ.Χ. η περιοχή του νεκροταφείου επιχωματώνεται με εντολή του αυτοκράτορα Ανδριανού σε μία προσπάθειά του να καταπολεμήσει τον Χριστιανισμό. Συγκεκριμένα η επιχωμάτωση φέρεται να είναι τόσο εκτεταμένη που η ανώτερη στάθμη της πάνω από τον Τάφο βρισκόταν στο ίδιο

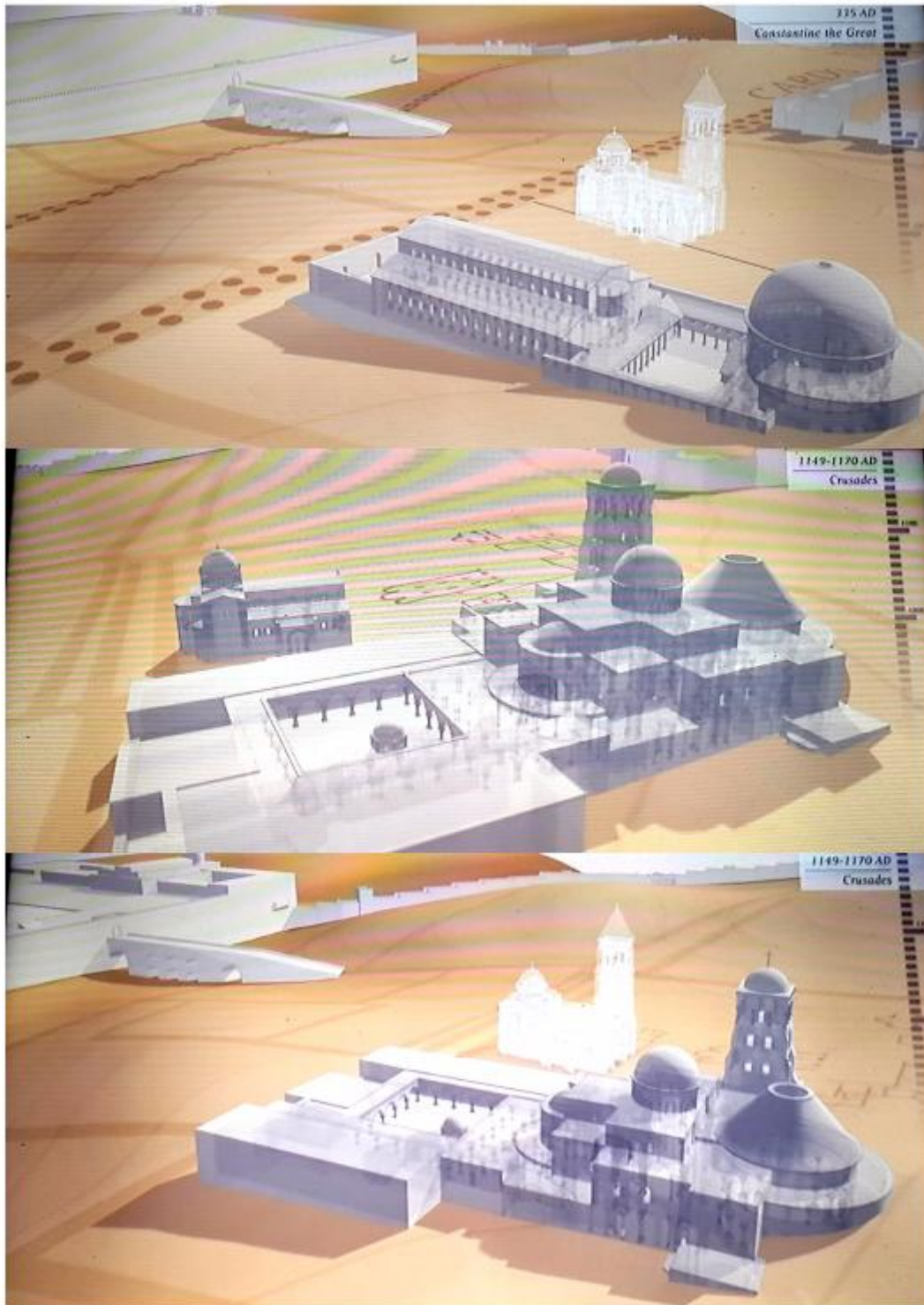
υψόμετρο με αυτό του Γολγοθά. Πάνω στο σημείο του Τάφου, χτίζεται ένας ναός λατρείας του Δία, της Ήρας και της Αφροδίτης, το Τρικάμαρο.

Το 325 μ.Χ. ο Χριστιανισμός καθιερώνεται ως επίσημη θρησκεία από το Κωνσταντίνο το Μέγα. Οι τόποι των παθών του Ιησού γίνονται τόποι λατρείας και γίνονται προσπάθειες για αποκατάστασή της περιοχής του Τάφου στην προ

Ανδριανού κατάσταση με αφαίρεση επιχωμάτων και κατεδάφιση του Τρικάμαρου. Στη συνέχεια γίνεται προσπάθεια για ανάδειξη της περιοχής κα δημιουργείται κατασκευών θρησκευτικού-λατρευτικού χαρακτήρα. Το σύμπλεγμα των κτιρίων αυτών που δημιουργήθηκαν στην περιοχή του Τάφου αποτελείτο όπως φαίνεται και στην αναπαράσταση της εικόνας 2 από:

- Έναν κυκλικής κάτοψης ναό, το ναό της Αναστάσεως (Ροτόντα), ο οποίος εμπεριείχε στο κέντρο του τον Πανάγιο Τάφο.
- Το Μαρτύριο- Βασιλική ο οποίος βρισκόταν ανατολικά της Ροτόντας.
- Το ανατολικό αίθριο
- Το Τρικάμαρο
- Το Πατριαρχείο

Το συνολικό μήκος αυτών είναι 150 μ. περίπου και το πλάτος, μαζί με το Πατριαρχείο, 59 μ.

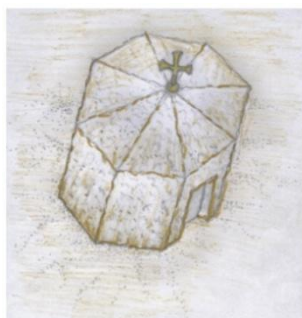


Το συγκρότημα του Ι.Ν. της Αναστάσεως – Φάση Μ.Κων/ντίνου 326 μ.Χ – Σταυροφορική Φάση 12<sup>ος</sup> αι. μ.Χ. © Theo Mitropoulos

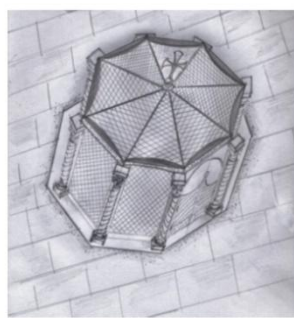
Εικόνα 3. Το συγκρότημα του Ι.Ν. της Αναστάσεως φάση Μ. Κων/νου 326 μ.Χ.

Όσον αφορά τον Τάφο καθαυτό, ο βράχος στον οποίο βρισκόταν λαξεύεται στη δυτική και νότια πλευρά του και ενσωματώνεται στο εσωτερικό του Τρικλάμαρου. Μάλιστα δίνεται σε αυτόν οκταγωνικό σχήμα εξωτερικά και μετέπειτα τοποθετείται ορθομαρμάρωση και επίστεψη (Εικόνες 4 και 5). Στον αντίποδα, το εσωτερικό του νεκρικού θαλάμου παραμένει στην αρχική του μορφή.





Εικόνα 4



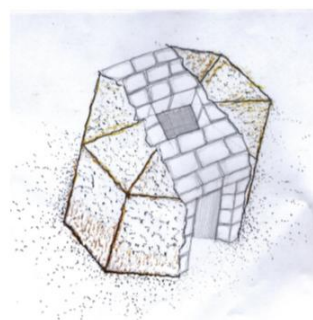
Εικόνα 5

Πηγή: Μητρόπουλος, 2015

Το 614 μ.Χ. η Ιερουσαλήμ καταλαμβάνεται από του Πέρσες, οι οποίοι λεηλατούν τα χριστιανικά κτίρια που είχαν κατασκευαστεί στην περιοχή. Ο Πανάγιος Τάφος λεηλατείται και αυτός καθώς οι Πέρσες τον διχοτομούν καταστρέφοντας τον μεσαίο του τμήμα (Εικόνα 6).



Εικόνα 6



Εικόνα 7

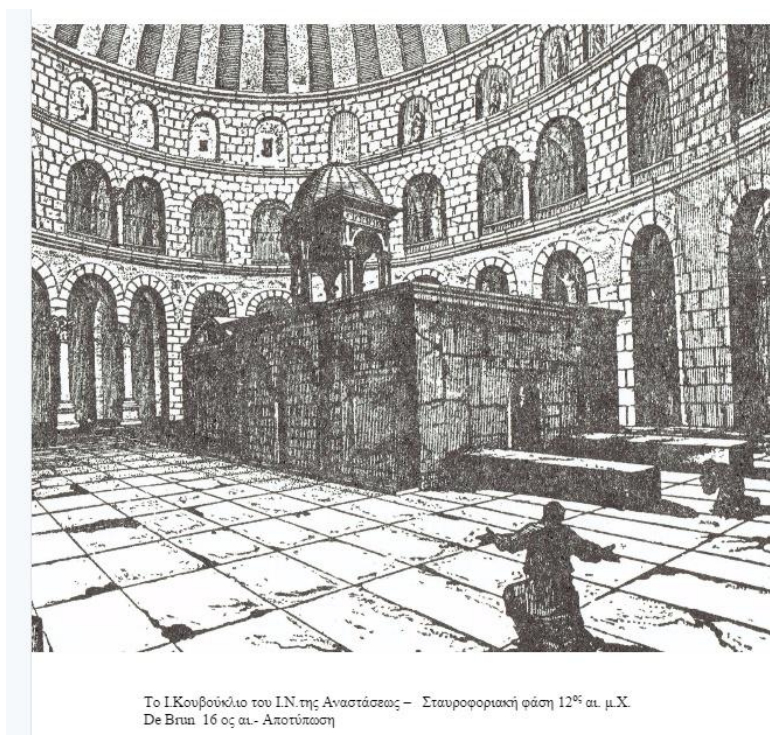
Πηγή: Μητρόπουλος, 2015

Επί αυτοκράτορα Μονομάχου ο διχοτομημένος βράχος επισκευάζεται και συμπληρώνεται με λιθοδομή το μεσαίο του τμήμα που είχε καταστραφεί (Εικόνα 7). Την περίοδο αυτή κατασκευάζεται και το επίμηκες οικοδόμημα που περικλείει τον Τάφο.

Τον 12<sup>ο</sup> αι. επί σταυροφόρων κατασκευάζεται με λιθοδομή, στην ανατολή πλευρά-είσοδο του Τάφου, ένας προθάλαμος (Παρεκκλήσι του Αγγέλου). Επιπλέον οι σταυροφόροι διακοσμούν το σύνολο Τάφου-Προθαλάμου με ορθομαρμαρώσεις, τόξα και κιονίσκους όπως φαίνεται και στην Εικόνα 7. Το σύνολο νεκρικού θαλάμου-προθαλάμου έκτοτε αναφέρεται και ως «Ιερό Κουβούκλιο».

Το κουβούκλιο του 11ου αιώνα είχε την μορφή του άμβωνα, κάτοψη σχήματος πετάλου, οι εξωτερικές επιφάνειες ήταν διακοσμημένες με ορθομαρμαρώσεις, ενώ

δώδεκα κιονίσκοι, στην περίμετρο της κάτοψης, στήριζαν τη λίθινη κιονοστοιχία. Με τη προσθήκη του προθαλάμου (παρεκκλήσι του Αγγέλου), από τους Λατίνους τον 12ο αιώνα, αφαιρούνται οι δύο κίονες που κοσμούσαν την ανατολική όψη. Στην οροφή του νεκρικού θαλάμου υπάρχει οπή, η οποία καλύπτεται από ένα κιβώριο, που εδράζεται σε κιονίσκους όπως φαίνεται και στην Εικόνα 7. Το κουβούκλιο αυτό αναστηλώνεται το 1555 από τον Fra Bonifazioda Ragusa και διατηρείται μέχρι την πυρκαγιά του 1808 στο Ναό της Αναστάσεως.



Εικόνα 8. Το κουβούκλιο του Ι.Ν. της Αναστάσεως – Σταυροφορική Φάση

Οι σταυροφόροι, δεν επεμβαίνουν μόνο στο ίδιο τον Τάφο. Πραγματοποιούν μία ενσωμάτωση όλων των Προσκυνημάτων κάτω από ένα ενιαίο οικοδόμημα, το οποίο κατασκευάζεται σε όψιμη Ρωμανική τεχνοτροπία. Διατηρούν όλη σχεδόν την προηγούμενη φάση, ενώ στη θέση του Τρικάμαρου κατασκευάζεται το μεγαλοπρεπές Καθολικό.

Κατά το 1808 συμβαίνει πυρκαγιά στο ναό και ο ξύλινος έως τότε θόλος της Ροτόντας πέφτει πάνω στο Ιερό Κουβούκλιο καταστρέφοντας μεγάλο τμήμα του. Τα συντρίμμια από τα κατεστραμμένα τμήματα του Ιερού Κουβουκλίου απομακρύνονται και αποκαλύπτεται ο βράχος. Το 1810 δίνεται εντολή στον αρχιτέκτονα Κομνηνό να σχεδιάσει και να φέρει εις πέρας την ανακατασκευή του Ιερού Κουβουκλίου δίνοντας του τη σημερινή του μορφή. Στη μορφή αυτή οι εξωτερικές ορθομαρμαρώσεις αποτελούνται από κοκκινωπούς λίθους τύπου Slayeb στα τόξα και τις κολώνες ενώ τα φατνώματα που σχηματίζονται αποτελούνται από

λίθους τύπου Mizzy. Στο εσωτερικό του Ιερού Κουβουκλίου οι ορθομαρμαρώσεις αποτελούνται από μάρμαρο Προκονήσου.

Το 1948 οι Άγγλοι για να αντιμετωπίσουν προβλήματα παραμόρφωσης του Ιερού Κουβουκλίου, τα οποία θα αναλυθούν πιο κάτω τοποθετήθηκε ένας μεταλλικός κλωβός γύρω από το μνημείο (Εικόνα 9)



Εικόνα 9. Το κουβούκλιο του Ι.Ν. της Αναστάσεως-υφιστάμενη κατάσταση

Πηγή: Προσωπικό αρχείο

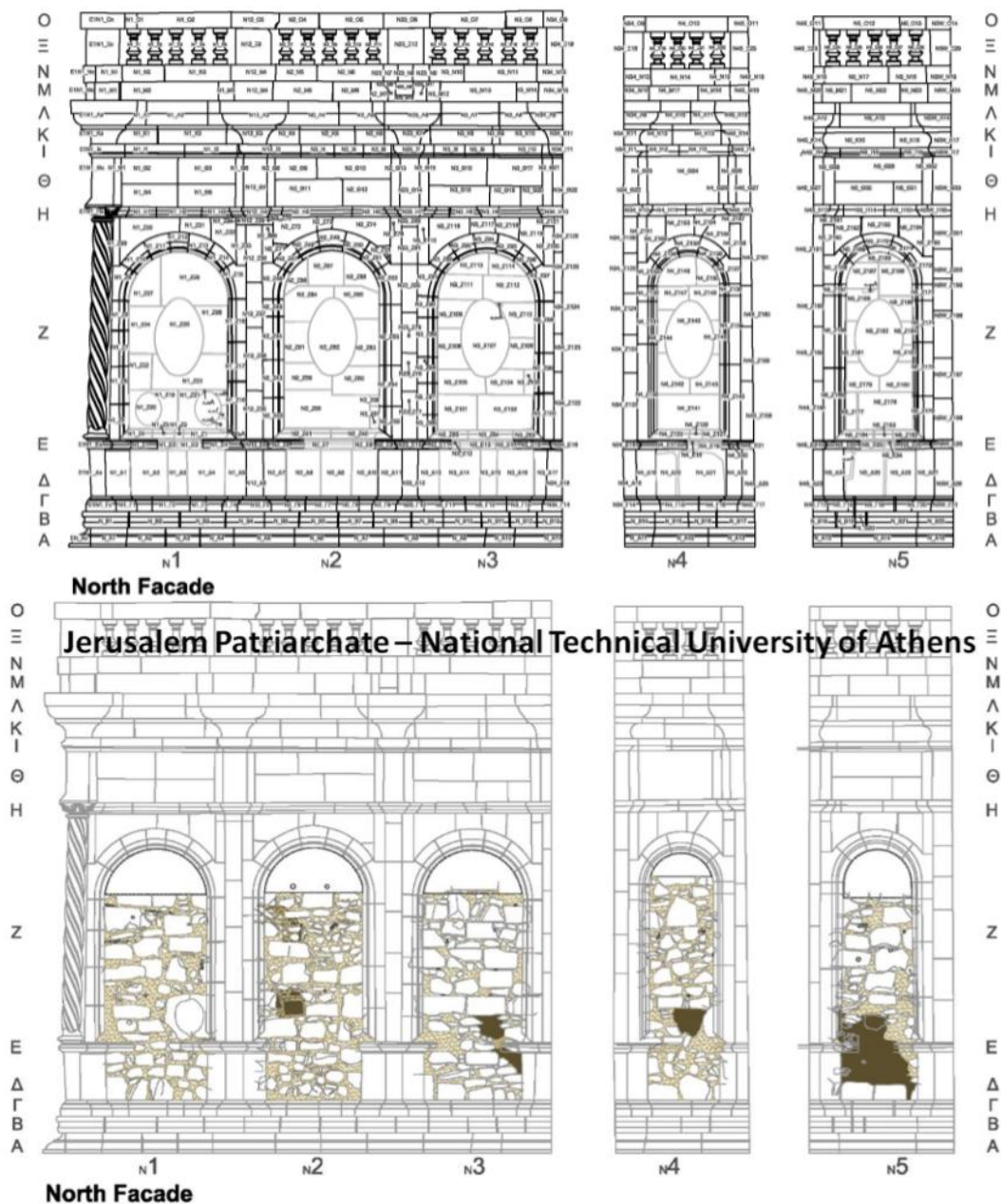
#### *ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΤΕΚΜΗΡΙΩΣΗ*

Ολόκληρη η εξωτερική όψη του Παναγίου Τάφου είναι επενδεδυμένη με ορθομαρμάρωση δύο διαφορετικών τύπων λίθων. Στο εσωτερικό των αψίδων που κοσμούν τις όψεις έχει χρησιμοποιηθεί λίθος Mizzy υπόλευκου χρώματος. Σε όλη την υπόλοιπη όψη έχει χρησιμοποιηθεί λίθος τύπου Slayeb κοκκινωπού χρώματος. Ο αρχιτεκτονικός ρυθμός παρουσιάζει ρυθμολογικά στοιχεία της εποχής του Κομνηνού. Την εξωτερική όψη του μνημείου διακοσμούν κατά κύριο λόγο, ψευδοπεσοοί με αψίδες μεταξύ τους. Οι αψίδες αυτές φέρουν ημικυκλικά τόξα. Τα τεμάχια των μαρμάρων συχνά φέρουν δύο ή περισσότερες αρχιτεκτονικές μορφές και παρουσιάζουν μεταξύ τους επαρκή συναρμογή. Στα φατνώματα παρατηρείται έλλειψη επιδίωξης επανάληψης του μοτίβου των αρμών. Πάνω από τα φατνώματα βρίσκεται ο θριγκός και πάνω από αυτόν, σε όλη την περίμετρο της κατασκευής, υπάρχει στηθαίο με κιονίσκους. Επί της οροφής της κατασκευής, υπάρχει κυκλικό κατασκεύασμα με τη μορφή τρούλου. Ο τρούλος αυτός βρίσκεται πάνω από την οπή της οροφής του νεκρικού θαλάμου. Εδράζεται σε έξι ζεύγη κίωνων και έχει γεωμετρία διπλής καμπυλότητας. Εξωτερικά είναι επενδυμένος με στρώση μολύβδου ενώ στο εσωτερικό υπάρχει κατασκευή ξύλινου σκελετού.



Στην ανατολική όψη, όπου βρίσκεται και η μοναδική είσοδος, διακρίνονται τέσσερις κιονίσκοι που καταλήγουν σε κιονόκρανα κορινθιακού τύπου. Πάνω από την είσοδο υπάρχει ανάγλυφη η παράσταση της Αναστάσεως του Κυρίου, η οποία φέρει νεότερη αργυρεπίχρυση επένδυση. Διακοσμητικά στοιχεία της εισόδου αποτελούν τα χαρακτηριστικά της κυμάτια.

Κατά την αρχιτεκτονική τεκμηρίωση έγιναν σχέδια εξωτερικών όψεων και σχέδια καταγραφής των λιθοσωμάτων και των αρμών της εσωτερικής τοιχοποιίας. Ακόμα από τα πρώτα κιάλας στάδιά της πραγματοποιήθηκε διαχωρισμός των όψεων της ορθομαρμάρωσης σε ζώνες τόσο καθ' ύψος όσο και οριζόντια και ακολούθησε κωδικοποιημένη αρίθμηση ανάλογα με τη θέση κάθε λίθου (βλέπε Παράρτημα)



Εικόνα 10. Βόρεια όψη του μνημείου με αρίθμηση λίθων και με αποτύπωση των λιθοσωμάτων

Πηγή: Ερευνητική ομάδα ΕΜΠ

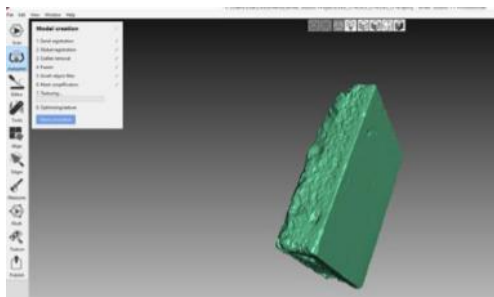


## ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΚΗ ΤΕΚΜΗΡΙΩΣΗ

Για την αποτύπωση της γεωμετρίας του μνημείου η ομάδα τοπογράφων του πολυτεχνείου χρησιμοποίησε φωτογραμμετρικές μεθόδους. Γίνεται καταγραφή του μνημείου πριν τις επεμβάσεις, κατά τη διάρκειά τους και μετά το πέρας αυτών με σκοπό την αποτύπωση φθορών και αρχικών παραμορφώσεων, την καταγραφή της τοιχοποιίας και αλλά και τα αποτελέσματα των επεμβάσεων στην γεωμετρία του μνημείου. Αφού πραγματοποιηθεί η διαλογή των εικόνων και η καταχώρισή τους σε θεματικούς φακέλους, πραγματοποιείται η ραδιομετρική διόρθωσή τους για την βελτίωσή τους και την ελαχιστοποίηση των επιδράσεων των σκιών και των σκοτεινών σημείων των εικόνων. Στη συνέχεια, οι εικόνες αυτές εισάγονται σε λογισμικό που υλοποιεί τεχνικές SfM και DIM. Από το λογισμικό αυτό εξάγονται σημεία στον 3D χώρο, τα οποία υπόκεινται σε χρονοβόρα επεξεργασία για τον καθαρισμό τους από λάθος σημεία που μπορούν να επηρεάσουν την τελική ακρίβεια του προϊόντος. Στη συνέχεια, αυτά τα νέφη σημείων επανεισάγονται στο λογισμικό SfM και DIM για τη συνένωσή τους και την απόδοση πραγματικής κλίμακας.

Οι τεχνικές επεξεργασίας του πυκνού νέφους σημείων του Ιερού Κουβουκλίου πραγματοποιήθηκαν στα λογισμικά GeomagicStudio®, Meshlab® και CloudCompare®. Ύστερα από την εισαγωγή του νέφους στα λογισμικά αυτά, απομακρύνθηκαν χονδρικά σφάλματα (outliers) και εφαρμόστηκαν κατάλληλες τεχνικές για την αραίωση του νέφους, διατηρώντας μόνο τα απαραίτητα για την ορθή και ακριβή περιγραφή της επιφάνειας, σημεία. Στη συνέχεια, δημιουργείται δίκτυο τριγώνων (TIN) και επιφάνειες.

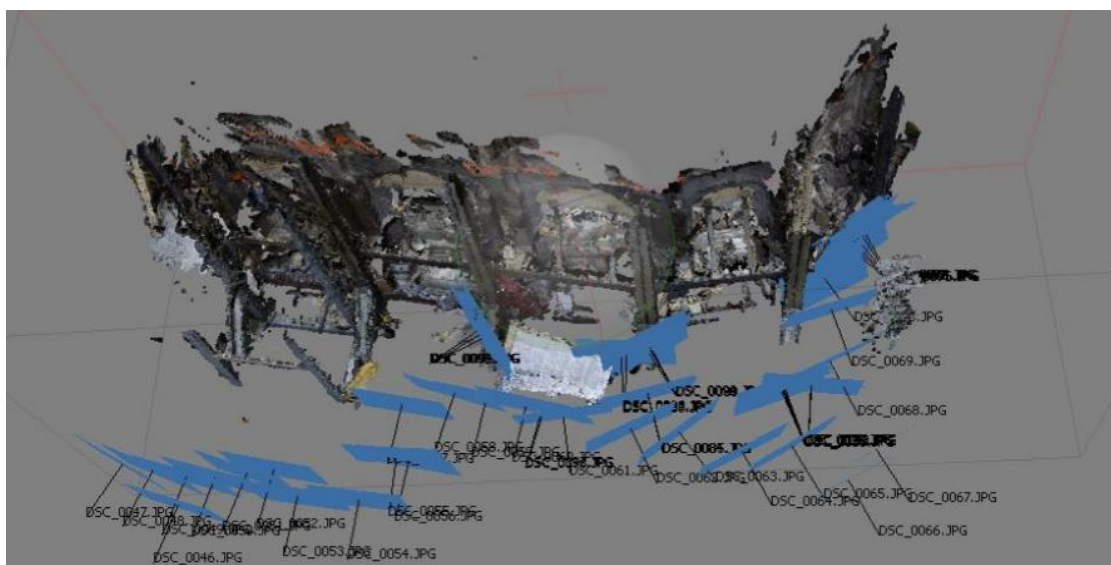
Για την αποτύπωση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών χρησιμοποιήθηκε επίσης συσκευή laser scanner για την αποτύπωση και των πιο δυσπρόσιτων περιοχών του μνημείου. Το laser scanner χρησιμοποιήθηκε επίσης για την ακριβή αποτύπωση των μελών της ορθομαρμάρωσης που είχαν αφαιρεθεί πριν την επανατοποθέτησή τους. Όπως θα φανεί πιο κάτω η αποτύπωση αυτή θα χρησιμεύσει επιπλέον στην εξαγωγή συμπερασμάτων για τα δυναμικά χαρακτηριστικά του δομήματος.



Εικόνα 11.Λίθος ορθομαρμάρωσης αποτυπωμένος με Laser Scanner

Έγινε επίσης τοποθέτηση τρισδιάστατου γεωδαιτικού δικτύου με χρήση 17 σημείων. Σκοπός της ενέργειας αυτής είναι η καταγραφή της αρχικής κατάστασης του μνημείου αλλά και της κατάστασής του μετά από τις επεμβάσεις αποκατάστασης καθώς και τυχόν καθιζήσεις ή μετακινήσεις από σεισμούς. Τα 3 από αυτά βρίσκονται τοποθετημένα στο ανώτερο τμήμα της Ροτόντας, άλλα 10 βρίσκονται στην οροφή του Ιερού Κουβουκλίου και άλλα 4 βρίσκονται επί της ανατολικής

όψης. Οι μετρήσεις του δικτύου έγιναν με γεωδαιτικό σταθμό υψηλής ακρίβειας τύπου Trimble S9.



Εικόνα 12. Φωτογραμμετρικό μοντέλο μνημείου  
Πηγή: Ερευνητική ομάδα ΕΜΠ

Ακόμα, κάθε μέλος της ορθομαρμάρωσης που αφαιρέθηκε, πριν την επανατοποθέτησή του, αποτυπώθηκε γεωμετρικά με χρήση laser scanner χειρός με σκοπό τα δεδομένα να εισαχθούν αργότερα στο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων.



Εικόνα 13. Τομή Ιερού Κουβουκλίου κατά τη διεύθυνση Δύση-Ανατολή

Πηγή: Λάβας και Μπαλοδήμος, 2003

### 2.1.2. ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΗ ΦΘΟΡΑΣ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΥΛΙΚΩΝ

#### *ΜΑΚΡΟΣΚΟΠΙΚΕΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ*

Με μακροσκοπική παρατήρηση διαπιστώνεται εύκολα δύο βασικά προβλήματα του μνημείου. Η κύρτωση της ορθομαρμάρωσης περιμετρικά του μνημείου. Και η αλλοίωση της όψης από τις επικαθίσεις στις επιφάνειες των μαρμάρων. Διαπιστώνεται επίσης το ανεπαρκές πάχος της τοιχοποιίας στα σημεία των κλιμακοστασίων.

Ο εντονότερος προβληματισμός σχετικά με την δομική ακεραιότητα του μνημείου προκαλείται από τις παραμορφώσεις των ορθομαρμαρώσεων. Το φαινόμενο των παραμορφώσεων εμφανίζεται σε όλες τις εξωτερικές πλευρές. Επεξεργαζόμενοι τα γεωμετρικά δεδομένα βλέπουμε ότι η μέγιστη παραμόρφωση συναντάται σε ύψος 0,8- 1 μέτρο από το επίπεδο του εσωτερικού δαπέδου. Στο ύψος δηλαδή των αρμών μεταξύ των κάτω πεσίσκων και των άνω κιόνων. Σε αυτό το ύψος η οριζόντια απόκλιση από την κατακόρυφο είναι 8-9 εκατοστά. Οι παραμορφώσεις μειώνονται σταδιακά όσο πλησιάζουμε προς την οροφή και γίνονται αμελητέες έως ανύπαρκτες

στο ύψος του θριγκού και των γείσων. Μας είναι γνωστό ότι λόγω των διαφορετικών οικοδομικών φάσεων του, η τοιχοποιία που βρίσκεται πίσω από τις ορθομαρμαρώσεις κατά τόπους διαφέρει ως προς τα υλικά, την ηλικία τους και τις αντοχές τους, και την τεχνοτροπία τους. Υπάρχει διαφοροποίηση τόσο στο μέγεθος των λίθων όσο και στο πάχος των αρμών και την ποιότητα του κονιάματος καθ' ύψος και οριζοντίως. Πιθανολογούμε επομένως σε πρώτη φάση ότι το αίτιο των παραμορφώσεων βρίσκεται αμέσως πίσω από τις εξωτερικές ορθομαρμαρώσεις και μπροστά από την τοιχοποιία.

Το υλικό που βρίσκεται στη θέση αυτή είναι το κονίαμα πληρώσεως. Κατά τις μακροσκοπικές παρατηρήσεις ανάμεσα στους διευρυμένους αρμούς των μαρμάρων αντιλαμβανόμαστε άμεσα την κακή κατάσταση στην οποία έχει περιέλθει το κονίαμα αυτό. Συγκεκριμένα παρουσιάζουν ιδιαίτερα σαθρή δομή και πορώδη και η συνάφειά τους με το μάρμαρο είναι ουσιαστικά ανύπαρκτη. Εξωθώντας τα μάρμαρα προς τα έξω το κονίαμα διατηρώντας σταθερό τον συνολικό του όγκο πλέον δημιουργεί κενά στην πάνω πλευρά κοντά στα ημικύκλια των φατνωμάτων. Έτσι τα μάρμαρα σε πρώτη φάση ωθούνται από την διόγκωση του κονιάματος και σε δεύτερη φάση από το αποσαθρωμένο πλέον κονίαμα που τα ωθεί με «υδροστατικού τύπου» δυνάμεις.

Στην εξέλιξη του φαινομένου αυτού που θα αναλυθεί και σε άλλη παράγραφο, κύριο αίτιο πιθανολογείται πως είναι η υγρασία. Οι πηγές υγρασίας υπήρξαν 3 από το 1810 οπότε και χτίστηκε η ορθομαρμάρωση του Κομνηνού έως σήμερα. Πρώτη και ιδιαίτερα έντονη ήταν η ανοικτή οροφή της Ροτόντας όπου βρίσκεται ο Πανάγιος Τάφος. Τα πρώτα εξήντα χρόνια ο τρούλος της ροτόντας δεν υπήρχε ώστε να προστατεύσει το μνημείο από τα νερά της βροχής. Δεύτερη πηγή υγρασίας η οποία υπάρχει μέχρι σήμερα είναι η ανερχόμενη υγρασία. Η υγρασία αυτή προέρχεται από το έδαφος όπου εδράζεται ο Τάφος. Ένα σύστημα αποχέτευσης όμβριων υδάτων βρίσκεται στο πάτωμα της Ροτόντας και πολύ κοντά στα δομικά στοιχεία του υπό εξέταση μνημείου και τροφοδοτεί το έδαφος και έμμεσα αυτά με υγρασία. Η παρουσία υγρασίας εντείνεται μάλιστα από την θέση του Τάφου αφού βρίσκεται μέσα σε ένα κλειστό κτίριο με περιορισμένο αερισμό.. Τρίτη πηγή υγρασίας είναι οι ίδιοι οι επισκέπτες που με την ανάσα τους εκπνέουν υδρατμούς.

Ακόμα ο κύριος τύπος φθοράς σε όλες σχεδόν τις επιφάνειες των λίθων του Ιερού Κουβουκλίου είναι οι ελαιώδεις αποθέσεις και οι εκτεταμένες μαύρες επικαθίσεις σωματιδίων αιθάλης λόγω της καύσης των κεριών και των καντηλιών . Δεν αποκλείεται και η μερική γυψοποίηση των υλικών των αρχιτεκτονικών επιφανειών. Εκτός από την αισθητική υποβάθμιση, οι ελαιώδεις αποθέσεις και οι επικαθίσεις αιθάλης δημιουργούν ευνοϊκές συνθήκες για να λάβουν χώρα οξειδωτικές δράσεις στις οποίες δρουν καταλυτικά τα σωματίδια άνθρακα και μετάλλων που εμπεριέχονται σε αυτές, οδηγώντας έτσι με την παρουσία τους στην αύξηση της επιδεκτικότητας στην περαιτέρω φθορά των αρχιτεκτονικών επιφανειών. Αναλυτικότερα, με τον όρο «μαύρες επικαθίσεις» περιγράφονται συνοπτικά τα αιωρούμενα σωματίδια που προσροφούνται ή/και εναποτίθενται στις αρχιτεκτονικές επιφάνειες και συνίστανται κυρίως σε σωματίδια αιθάλης, αργιλοπυριτικής σύστασης σωματίδια, ακόρεστους και κορεσμένους

υδρογονάνθρακες , καθώς και οξείδια διαφόρων μετάλλων ή/και μετάλλων όπως Fe, Pb, Zn, Ni, Vn, κ.α

Επίσης κατά την πραγματοποίηση των εργασιών έγινε επίσκεψη στο εσωτερικό του τρουλίσκου της οροφής όπου και διαπιστώθηκε η έντονη παρουσία ξυλοφάγων εντόμων. Τα έντομα που τρέφονται από το ξύλο αυτό έχουν μειώσει την αντοχή του αφού ουσιαστικά μειώνουν την ενεργό διατομή του.

## **Επιτόπου μη καταστρεπτικές μέθοδοι για τη χαρτογράφηση της φθοράς**

### **Θερμογραφία Υπερύθρων**

Με την θερμογραφία υπερύθρων καταγράφεται η υπέρυθη ακτινοβολία που εκπέμπεται από τις επιφάνειες των υλικών λόγω της θερμότητας τους. Λαμβάνοντας θερμογραφίες λαμβάνουμε στοιχεία για τη θερμοκρασία μιας επιφάνειας. Λόγω διαφορετικής θερμοκρασίας του τοίχου με υγρασία σε σχέση με τον απόλυτα ξηρό τοίχο υποβαλλόμενοι σε ίδιες μεταβολές συνθηκών περιβάλλοντος, μπορούμε να εντοπίσουμε τις περιοχές της τοιχοποιίας που συγκεντρώνουν μεγαλύτερα ποσοστά υγρασίας.

### **Οπτική μικροσκοπία**

Χρησιμοποιήθηκε μικροσκόπιο οπτικών ινών ώστε να εξετασθεί η επιφάνεια των υλικών(σε πρώτη φάση των ιστορικών και σε δεύτερη για την αποτίμηση των πιλοτικών εφαρμογών). Επίσης οι εικόνες λήψης του μπορούν να εισαχθούν σε πρόγραμμα επεξεργασίας εικόνας για εξαγωγή επιπλέον συμπερασμάτων σχετικά με τη μικροδομή.

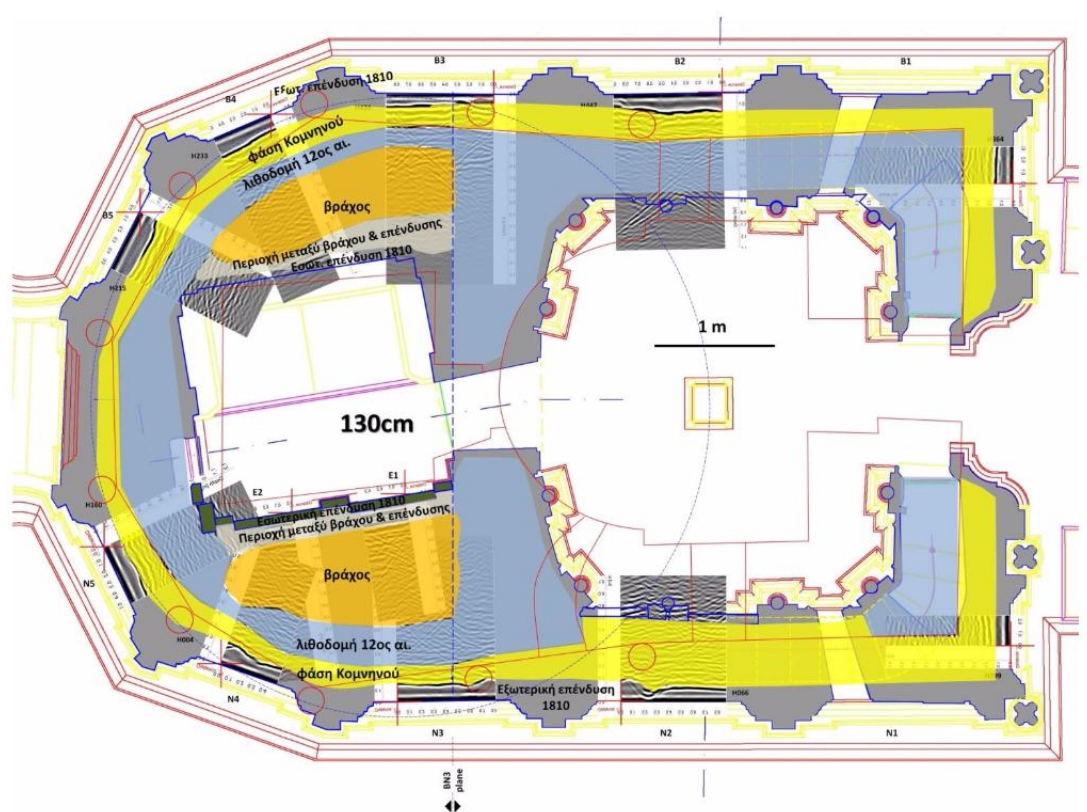
### **Ενδοσκόπηση**

Πραγματοποιήθηκαν ενδοσκοπήσεις χρησιμοποιώντας κάμερα σε εύκαμπτο σωλήνα για τον έλεγχο απροσπέλαστων με μακροσκοπική παρατήρηση σημείων του ναού και του εσωτερικού της τοιχοποιίας του.

### **Γεωραντάρ**

Χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος του γεωραντάρ σε όλες τις προσιτές περιοχές στο εξωτερικό και εσωτερικό του μνημείου. Από την ανάλυση των μετρήσεων με τη συσκευή γεωραντάρ προκύπτει η παρακάτω δομή του εσωτερικού (μη ορατού) του Παναγίου Τάφου και προκύπτει η χαρτογράφηση των δομικών υλικών. Παρατηρούμε την μεγάλη ταύτιση με το σχέδιο του Κ. Μητρόπουλου.





Εικόνα 14.Αποτελέσματα διασκοπήσεων  
 Πηγή: Ερευνητική ομάδα ΕΜΠ

Κατά τις διασκοπήσεις του γεωραντάρ διαπιστώθηκε η πιθανή ύπαρξη ρωγμής στη νότια πλευρά του Ιερού Βράχου με διεύθυνση Ανατολή-Δύση σε υψόμετρο 0,8-1,2 μέτρο από το εσωτερικό δάπεδο και το οποίο έχει μορφή «Λ». Η παρουσία του πιθανολογείται στην επιβολή φορτίων από την ανωδομή. Ο τρουλίσκος πάνω από τον νεκρικό θάλαμο φαίνεται να μεταβιβάζει ένα μέρος του βάρους του στον Ιερό Βράχο.

### Χαρακτηρισμός των δομικών υλικών και μελέτη των τύπων φθοράς στο εργαστήριο

Για τον χαρακτηρισμό των υλικών πραγματοποιήθηκε έρευνα η οποία είχε ως αντικείμενα:

- Δειγματοληψία
- Επί τόπου μη καταστρεπτικός έλεγχος (Μικροσκοπία οπτικών ινών, θερμογραφία υπερύθρου, γεωραντάρ, κρουσιμέτρηση),
- Ενόργανες μέθοδοι χαρακτηρισμού υλικών στο Εργαστήριο (ποιοτική και ποσοτική ανάλυση ορυκτολογικών, πετρογραφικών, χημικών, φυσικών,

μηχανικών ιδιοτήτων και μικροδομής). Χρήση των μεθόδων θερμογραφίας και οπτικής μικροσκοπίας και στα δείγματα του εργαστηρίου.

- Ταυτοποίηση και έρευνα προέλευσης δομικών λίθων (Συνδρομή γεωλογικών χαρτών Ισραήλ)

Πραγματοποιήθηκε μια σειρά επιτόπου και εργαστηριακών δοκιμών. Με βάση τις μετρήσεις των δοκιμών, η επιστημονική ομάδα του ΕΜΠ δημιούργησε τον παρακάτω Πίνακα 1 με τα δομικά υλικά και τα χαρακτηριστικά τους όπως αυτά παρουσιάζονται σε σχετική έκθεση [Μοροπούλου κ.α. 2016]. Για το σκοπό αυτό πραγματοποιήθηκαν δοκιμές ποροσιμετρίας υδραργύρου, Διαφορική θερμική ανάλυση (DTA), Περίθλαση ακτίνων Χ (XRD), Πολωτικό μικροσκόπιο, Φασματοσκοπία υπεράυθρου με μετασχηματισμό Fourier (FTIR), Δοκιμές μηχανικών αντοχών και κοκκοδιαβάθμιση των ιστορικών κονιαμάτων.

Κατά τον υπολογισμό των αντοχών λήφθηκε υπόψη η στάθμη αξιοπιστίας των δεδομένων. Ακόμα, ακολουθώντας τη διεθνή βιβλιογραφία, οι αντοχές που παρουσιάζονται στον πίνακα αυτό είναι αρχικά μειωμένες κατά τον συντελεστή  $FC=1,2$  και στη συνέχεια πολλαπλασιάστηκαν με το μειωτικό συντελεστή ασφαλείας  $\gamma_M=2,0$ . Δηλαδή οι τιμές αντοχής των υλικών που λαμβάνουμε υπόψη, είναι μειωμένες κατά  $1,2 \times 2,0 = 2,4$  σε σχέση με της μετρημένες (Μοροπούλου, 2016)

Πίνακας 2. Χαρακτηριστικών ιστορικών υλικών μνημείου

Πηγή: Μοροπούλου, 2016

Υλικό	Θέση	Περιγραφή	Αντοχή
Λίθος SLAYEB	Κύριος λίθος της ορθομαρμάρωσης	Κοκκινωπός Ασβεστόλιθος	Υψηλή
Λίθος Mizzy	Δευτερέων λίθος της ορθομαρμάρωσης(φατνώματα)	Ανοιχτό μπεζ Μικριτικός απολιθοματοφόρος ασβεστόλιθος	Υψηλή
Σταυροφοριακός Λίθος τοιχοποιίας	Λιθοσώματα τοιχοποιίας	Λευκός λίθος	Ανεκτή
Κονίαμα πλήρωσης	όπισθεν ορθομαρμάρωσης	Ασβεστιτικής φύσης	Πολύ χαμηλή
Κονίαμα αρμών τοιχοποιίας	Αρμοί τοιχοποιίας	Ασβεστιτικής φύσης	Χαμηλή
Ιερός Βράχος	Περιμετρικά του νεκρικού θαλάμου, εσωτερικά της τοιχοποιίας		Χαμηλή
Μάρμαρο Προκονήσου	Εσωτερική ορθομαρμάρωση	Ανοιχτό γκρι μάρμαρο	Υψηλή

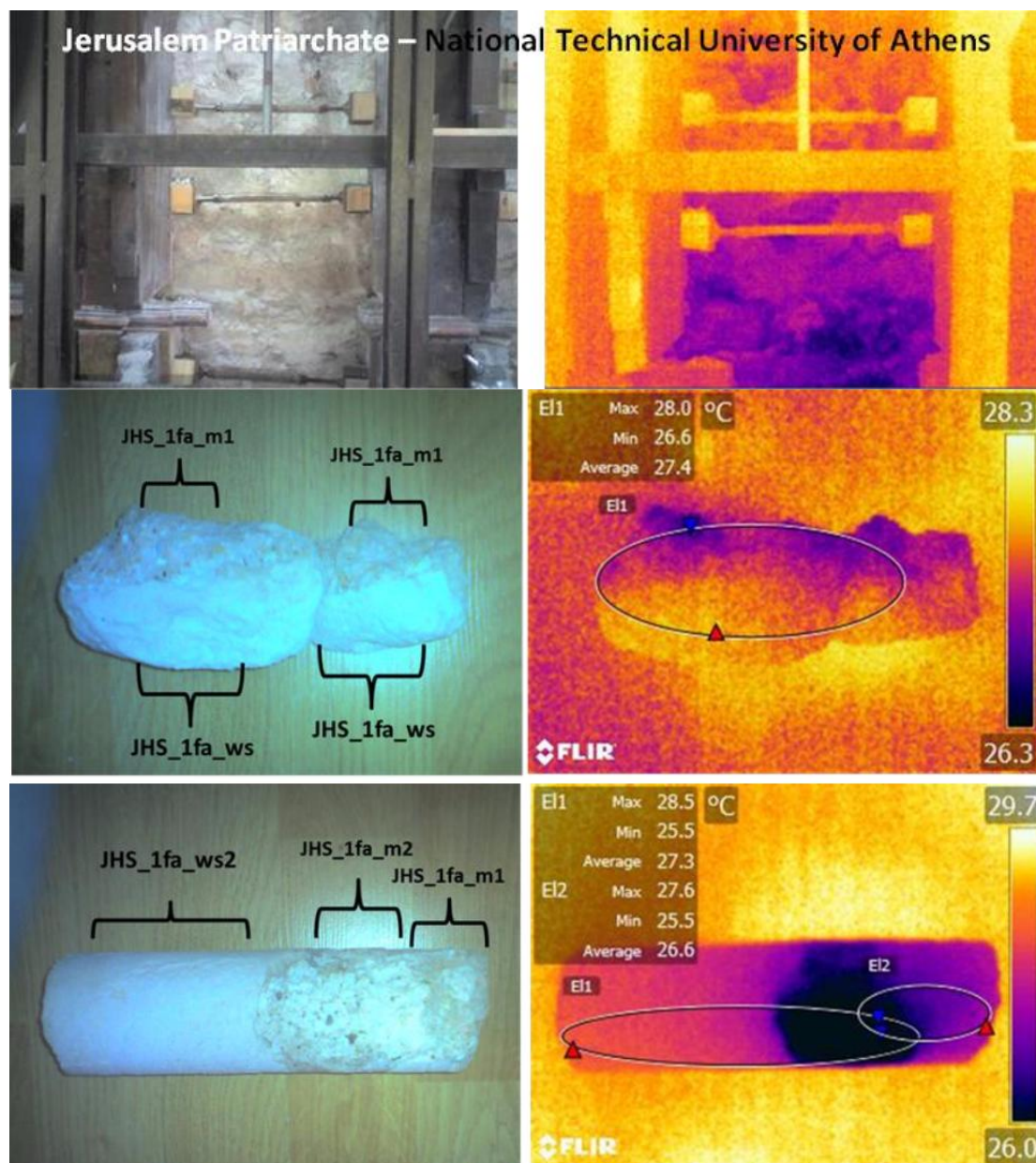
Για την καλύτερη κατανόηση του παραπάνω πίνακα συστήνεται στον αναγνώστη να συμβουλευτεί τις εικόνες του κεφαλαίου 2.1

Πίνακας 1. Ιστορικά υλικά μνημείου  
Πηγή: Μοροπούλου, 2016

Υλικό	Τάση θραύσεως σε θλίψη (Μρα)	Μέτρο ελαστικότητας (Gra) σε θλίψη	Λόγος Poisson από πείραμα θλίψης	Τάση θραύσεως σε εφελκυσμό	Μέτρο ελαστικότητας (Gra) σε εφελκυσμό	Λόγος Poisson από πείραμα εφελκυσμού
Ιερός βράχος	10,3	21,7	0,190	1,46	17,7	0,305
Λίθος Mizzy	77,8	38,2	0,235	6,95	29,3	0,290
Κονίαμα	1,4	0,0526				
Λιθοσώματα Σταυροφοριακής φάσης	12	0,8				

Κατά την πραγματοποίηση της παραπάνω έρευνας παρατηρήθηκε η ανεκτή κατάσταση στην οποία βρισκόντουσαν οι λίθοι και οι αντοχές τους. Ωστόσο διαπιστώθηκε και η έντονη φθορά που παρουσιάζουν τα κονιάματα. Επιβεβαιώθηκε ακόμα, η ασυμβατότητα δομικών λίθων-κονιαμάτων που υποδηλώνεται εύκολα και από τη μεγάλη θερμοκρασιακή διαφορά των υλικών κατά τα θερμογράφημα. Παρατηρείται η έντονη παρουσία υγρασίας.





Εικόνα 15. Θερμογραφία υπερύθρου σε φάντωμα μνημείου και σε δείγμα τοιχοποιίας

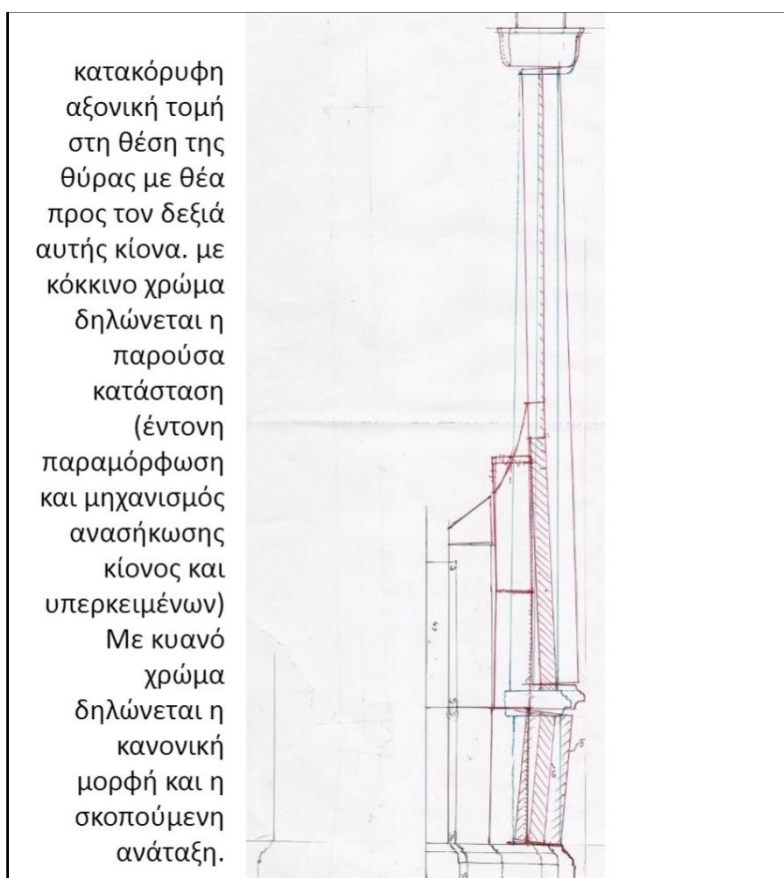
Πηγή:Ερευνητική ομάδα ΕΜΠ

Αναλυτικότερα, οι εργαστηριακές μετρήσεις μας έδωσαν τα χαρακτηριστικά του ιστορικού κονιάματος πλήρωσης. Το κονίαμα αυτό είναι ασβεστιτικής φύσης, ποζολανικό. Περιέχει χαλαζιακά αδρανή και θραύσματα κεραμικών ενώ υπάρχει παρουσία άχυρου και ιών. Κατά την φάση της πήξης και σκλήρυνσης αναπτύσσονται αργιλικά άλατα ασβεστίου (CAH) που προσδίδουν ελαφρώς υδραυλικό χαρακτήρα στο κονίαμα. Κατά τις αναλύσεις διαπιστώθηκε η παρουσία εντριγκίτη στην οποία οφείλεται η εξαλλοίωση του κονιάματος και κατ' επέκταση η διόγκωσή του και η παραμόρφωση των μαρμάρων.

### 2.1.3.ΔΟΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΜΝΗΜΕΙΟΥ

Οι λίθοι της ορθομαρμάρωσης παρουσιάζουν ικανοποιητικές αντοχές. Όμως, οι εξωτερικές επιφάνειες τους τοιχοποιίας του μνημείου (ορθομαρμαρώσεις) παρουσιάζουν σημαντικές παραμορφώσεις. Αυτές έχουν σημαντικές επιπτώσεις στη μακροζωία του μνημείου καθώς δημιουργούν επιπρόσθετες φορτίσεις στα δομικά μέλη του.

Το αίτιο τους παραμόρφωσης τους διαπιστώθηκε ότι είναι η εξαλλοίωση των κονιαμάτων που υπήρχαν πίσω από την ορθομαρμάρωση. Ο υδραυλικός τους χαρακτήρας αποδίδεται σε υδραυλικά άλατα του ασβεστίου που αναπτύσσονται κατά τη φάση τους πήξης και σκλήρυνσης του υδραυλικού ασβέστη που προέρχεται από την καύση μαργαίικων ασβεστόλιθων. Ο κύριος λόγος εξαλλοίωσής τους προέρχεται από την εισροή υδάτων από την οροφή αλλά και την ανερχόμενη υγρασία και τη συμπύκνωση από την αναπνοή των προσκυνητών. Στο φαινόμενο αυτό φαίνεται να συνέβαλε και η πλήρωση των αρμών των ορθομαρμαρώσεων με μόλυβδο ο οποίος εμπόδιζε την ορθομαρμάρωση να «αναπνεύσει».



Εικόνα 16.. Παραμορφώσεις ορθομαρμάρωσης  
Πηγή: Κορρές, 2016

Κατά την έρευνα στην ιστορική τοιχοποιία εντοπίστηκαν δύο είδη δομικών λίθων. Ο ένας είναι ο μαλακός λίθος τύπου Κακουλι με αντοχή της τάξης των 12 Μρ ακαι ο τύπος Mizzy Yehoudi με αντοχή της τάξης των 77,8 Μρα. Σε γενικές γραμμές η αντοχή των ιστορικών δομικών λίθων κρίνεται ανεκτή. Ωστόσο, ανά περιοχές και ιδιαίτερα μέχρι ύψους 1,5 μέτρων από το έδαφος, τα λιθοσώματα είχαν έντονα ακανόνιστο σχήμα και οι αρμοί είχαν σχεδόν τυχαίες διευθύνσεις. Το κονιάμα των αρμών της τοιχοποιίας έχει απολέσει τις αρχικές του αντοχές.



Εικόνα.17. Παρατήρηση της χρήσης μικρών και ακανόνιστων λιθοσωμάτων στα χαμηλότερα ύψη της τοιχοποιίας.

Πηγή: Προσωπικό αρχείο

Δεδομένου ότι διαθέτουμε την θλιπτική αντοχή του λίθου και του κονιάματος, η αντοχή σε θλίψη της τοιχοποιίας της σταυροφορικής φάσης υπολογίζεται σύμφωνα με την βιβλιογραφία από την ακόλουθη σχέση (Τάσιος και Χρονόπουλος 1986):

$$f_{wc} = \frac{2}{3} \cdot \sqrt{f_{bc}} - a + b \cdot f_{mc}$$

όπου  $f_{bc}$  και  $f_{mc}$  είναι η τάση θραύσεως του λιθοσώματος και του κονιάματος, αντίστοιχα,  $a$  είναι μειωτικός συντελεστής για τοιχοποιία από φυσικά λιθοσώματα ( $\alpha=1$ ) και  $b$  είναι συντελεστής ο οποίος λαμβάνει υπόψη τη συνεισφορά του

κονιάματος στην αντοχή (για τοιχοποιία από φυσικά λιθοσώματα λαμβάνει την τιμή  $\beta=0.5$ ).

Θεωρώντας συντηρητικά ότι το κονίαμα της τοιχοποιίας της σταυροφορικής φάσης είναι  $M_1$  ( $f_{mc}=1$  Mpa) προκύπτει  $f_{wc}=1.8$  Mpa. Το μέτρο ελαστικότητας σύμφωνα με τη βιβλιογραφία μπορεί να θεωρηθεί, ελλείψει άλλων δεδομένων, ως  $E=1000 \times f_{wc}=1.8$  Gra και η εφελκυστική αντοχή  $f_{tc} = f_{wc}/10=0.18$  Mpa (Σπυράκος & Μανιατάκης, 2016).

Ο τρουλίσκος που βρίσκεται πάνω από τον νεκρικό θάλαμο εδράζεται σε 12 πεσσούς και αποτελείται από επιφάνειες διπλής καμπυλότητας. Στο εσωτερικό, υπάρχει σκελετός από ξύλο και περιβάλλεται με κονίαμα και μία εξωτερική στρώση μολύβδου πάχους 3 mm.

Τα μεταλλικά στοιχεία έχουν οξειδωθεί και συνεπώς έχουν διογκωθεί. Κατά την διόγκωσή τους τα επιχρίσματα εμφανίζουν ρωγμές ενώ κατά τόπους μάλιστα διαρρηγνύεται. Αποτέλεσμα αυτού είναι η απόσπαση και αποκόλληση τμημάτων του επιχρίσματος.

#### Τα ακύρια του Κομνηνού

Κατά την επιτόπια έρευνα κατά την αφαίρεση των φατνωμάτων των ορθομαρμαρώσεων επιβεβαιώνεται και ο τρόπος ακινητοποίησης των μαρμάρων και η σύνδεσή τόσο μεταξύ τους όσο και με το υπόλοιπο μνημείο. Η σύνδεση αυτή εξασφαλιζόταν με τρεις τρόπους.

Πρώτον, μέσω του κονιάματος πλήρωσης που κάλυπτε το κενό των 15-20 πόντων μεταξύ της τοιχοποιίας και της πίσω-ανώμαλη επιφάνεια των μαρμάρων. Το κονίαμα αυτό όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως είχε αλλοιωθεί και με την παρουσία της υγρασίας και την πάροδο του χρόνου είχε χάσει τις αρχικές του αντοχές και είχε χαθεί σε μεγάλο ποσοστό η συνάφειά του.

Δεύτερον, μέσω των γόμφων που βρισκότουσαν στις πλευρές των μαρμάρων και τα συνέδεαν μεταξύ τους. Οι γόμφοι αυτοί συνέδεαν κατά κύριο λόγο τους λίθους μεταξύ τους στην άνω και κάτω τους πλευρά. Είχαν μήκος περίπου 18 εκατοστά. Μάλιστα το μήκος αυτό κρίνεται ορθό κρίνοντάς το με βάση τις σύγχρονές μας γνώσεις. Αποτελούνταν από έναν πείρο-πυρήνα από χυτοσίδηρο και ήταν καλυμμένοι εξωτερικά με μόλυβδο. Ο μόλυβδος έπαιζε διπλό ρόλο. Αφενός προστάτευε τον χυτοσίδηρο από την οξείδωση, αφετέρου πλήρωνε το κενό που υπήρχε μεταξύ του χυτοσίδηρου και της εσωτερικής επιφάνειας της εσοχής του λίθου. Η παραμορφωσιμότητα του μολύβδου λειτουργούσε ευνοϊκά στην μεταφορά των τάσεων μεταξύ γόμφου και λίθου και απορροφούσε τμήμα της ενέργειας σε περίπτωση σεισμικής δόνησης. Ενδιαφέρον μάλιστα παρουσιάζει η τεχνική πλήρωσης του γόμφου με μόλυβδο. Αρχικά ο λίθος που θα τοποθετούνταν από την άνω πλευρά γυρνούσε ανάποδα και οι εργάτες τοποθετούσαν τον πείρο και έχυναν στην εσοχή μέχρι το χείλος της το λιωμένο μόλυβδο. Στη συνέχεια, και



αφού ο μόλυβδος είχε στερεοποιηθεί, τοποθετούσαν το λίθο στη θέση του και η άλλη πλευρά του πείρου εισερχόταν στην εσοχή ου από κάτω. Μέσω ενός μικρού ανοίγματος που υπήρχε συνήθως στην πίσω όψη του λίθου, είτε μέσω αύλακος που ήταν χαραγμένη στην άνω πλευρά του λίθου οι τεχνίτες έχυναν το μόλυβδο μέχρι πλήρωσης και της εσοχής του κάτω λίθου.

Τρίτον, μέσω μεταλλικών ελασμάτων- αγκυρίων που συνέδεαν τα μάρμαρα με το κύριο σώμα της τοιχοποιίας. Κατά την κατασκευή εξωτερικής ορθομαρμάρωσης, κάτω από το επίπεδο του κοσμίτη, είχαν χρησιμοποιηθεί μεταλλικές λάμες από χυτοσίδηρο ως αγκύρια ώστε να συγκρατείται αυτή στην τοιχοποιία. Όσον αφορά τους λίθους Mizzy των φατνωμάτων, κάθε μια από αυτές ήταν συνδεδεμένη με την τοιχοποιία με ξεχωριστή λάμα. Το ίδιο ισχύει και για τους λίθους τύπου Slayeb. Κάθε ένας από αυτούς ήταν συνδεδεμένος με την τοιχοποιία με ένα αγκύριο στο πάνω μέρος του. Οι παραπάνω λάμες ήταν διαστάσεων 20mmπ λάτος επί 4mm πάχο. Εισέρχονταν στην εσοχή των μαρμάρων στο πλάι τους για να τα συγκρατήσουν. Είχαν δηλαδή μορφή Γ.



Εικόνα 18. Αγκύρια Κομνηνού για συγκράτηση λίθων SLAYEB  
Πηγή: Προσωπικό αρχείο

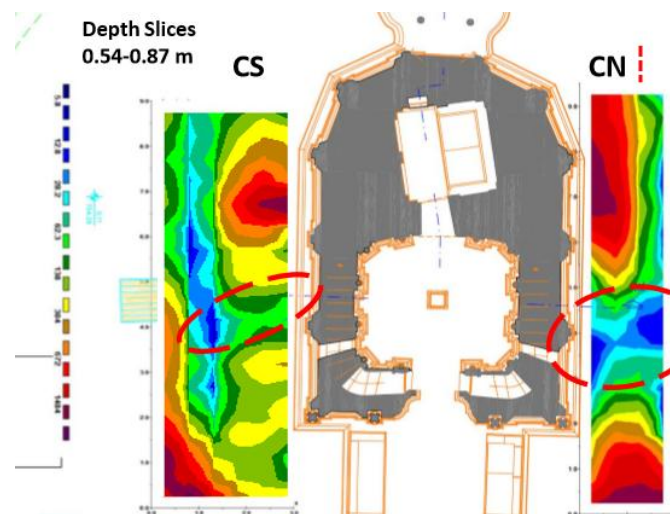
Ειδικότερα, σχετικά με το αντικείμενο της παρούσας εργασίας, κατά την αφαίρεση των εξωτερικών ορθομαρμαρώσεων διαπιστώθηκαν οι αναμενόμενες αλλοιώσεις στα αγκύρια που συνέδεαν τα τμήματα της εξωτερικής ορθομαρμάρωσης με την τοιχοποιία.



Εικόνα 19. Αγκύρια Κομνηνού για συγκράτηση λίθων MIZZY  
Πηγή: Προσωπικό αρχείο

Όπως παρατηρείται, τα μεταλλικά αυτά μέλη κατασκευασμένα από σίδηρο κατά την τοποθέτηση των μαρμάρων (1808 μ.Χ.) έχουν οξειδωθεί. Αποτέλεσμα της οξείδωσης αυτής είναι η αλλοίωση της επιφάνειας τους περιμετρικά με αποτέλεσμα την απομείωση της διατομής τους. Αποτέλεσμα αυτού είναι και η απομείωση της αντοχής τους και της δύναμης με την οποία μπορούν να συγκρατήσουν την ορθομαρμάρωση και ειδικά σε περίπτωση σεισμικής δόνησης.

Σημαντικό επίσης πρόβλημα που αντιμετωπίζει το μνημείο είναι η αποδυνάμωση του εδάφους θεμελίωσης λόγω της υγρασίας. Για το λόγω αυτό είναι επιτακτική η ανάγκη δημιουργίας ενός συστήματος αποστράγγισης ώστε το μνημείο να προστατευτεί ριζικά από την ανερχόμενη υγρασία. Στο έδαφος κάτω από το νεκρικό θάλαμο συνεχίζει ο Ιερός βράχος, ενώ προς τα ΝΑ και ΒΑ του εκτείνονται στοές.



Εικόνα 20. Κυκλωμένες φαίνονται οι περιοχές που δείχνουν πιθανή ύπαρξη καναλιού ύδατος

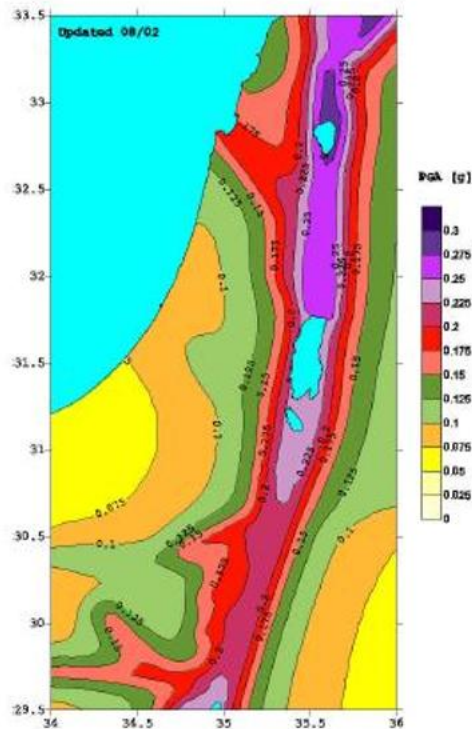
## ΣΕΙΣΜΟΙ ΚΑΙ ΣΕΙΣΜΟΛΟΓΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ

Στην ευρύτερη περιοχή του κράτους του Ισραήλ έχουν συμβεί κατά το παρελθόν σημαντικοί σεισμοί. Οι ιστορικές μαρτυρίες της σεισμικότητας της περιοχής έχουν επιβεβαιωθεί με σύγχρονες επιστημονικές μεθόδους χρησιμοποιώντας στοιχεία από τη γεωλογική ιστορία της λεκάνης της Νεκράς Θάλασσας [Ken-Tor et al 2001] κατά μήκος της οποίας έχει διαπιστωθεί η ύπαρξη σημαντικών ενεργών ρηγμάτων [Garfunkel et al 1981]. Μεταξύ των σημαντικότερων σεισμικών γεγονότων θα πρέπει να αναφερθούν οι σεισμοί: το 749 μ.Χ. με τοπικό μέγεθος  $M_L=7.3$ , το 1033 μ.Χ. με ένταση MMS X, το 1545 μ.Χ. με ένταση MMS IX ο οποίος προκάλεσε μερική κατάρρευση του κωδωνοστασίου του Ναού, και το 1927 μ.Χ. όπου στις πόλεις της Ιεριχούς και Ιερουσαλήμ καταγράφηκε σεισμική ένταση της τάξης των MMS VII [Ben Menahem 1991] και σεισμικό μέγεθος επιφανείας  $M_S=6.25$  [Rutenberg and Levy 2004].

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία ο σεισμός του 1927 είναι πρακτικά ο μόνος ιδιαίτερα καταστροφικός σεισμός ο οποίος συνέβη μετά το 1900 μ.Χ. Ο σεισμός του 1927 προξένησε σημαντικές βλάβες στην πόλη των Ιεροσολύμων η οποία βρίσκεται σε απόσταση της τάξης των 25-30 km από τη Νεκρά Θάλασσα προξενώντας κατάρρευση 250 σπιτιών μόνο στην περιοχή της παλαιάς πόλης. Εκτιμάται πως η εδαφική επιτάχυνση έφτασε την τιμή των  $a_g=0,87g$  σύμφωνα με μελέτες από τους Rutenberg and Levy [2004].

Το Γεωφυσικό Ινστιτούτο του Ισραήλ εφαρμόζοντας πιθανοτικές μεθοδολογίες σεισμικής επικινδυνότητας κατασκεύασε το χάρτη σεισμικής επικινδυνότητας για το Ισραήλ για βραχώδες έδαφος και με πιθανότητα υπέρβασης 10% στα 50 έτη ο οποίος παρουσιάζεται στο Σχήμα 1 [Shapira 2002, SI 413]. Η πιθανότητα αυτή αντιστοιχεί σε περίοδο επαναφοράς 475 έτη. Οι μέγιστες τιμές εδαφικής επιτάχυνσης είναι 0.3g και αφορούν σε θέσεις που βρίσκονται στο βόρειο τμήμα του ρήγματος της Νεκράς Θάλασσα Με βάση το Χάρτη Σεισμικής επικινδυνότητας του Ισραήλ η μέγιστη εδαφική επιτάχυνση σε βραχώδες έδαφος στην περιοχή των Ιεροσολύμων είναι  $a_{gR}=0.13g$ .

Γίνεται αντιληπτό λοιπόν, ότι πέραν των στατικών φορτίων που φέρει το οικοδόμημα εξαιτίας των υλικών που το συναποτελούν, η συμπεριφορά των δομικών υλικών του Ιερού Κουβουκλίου θα πρέπει να μελετηθεί και με βάση τις σεισμικές δυνάμεις που ενδέχεται να απειλήσουν τη δομική του ακεραιότητα. Η σεισμικές δυνάμεις προκύπτουν με βάση την ιστορική σεισμικότητα της περιοχής των Ιεροσολύμων, λαμβάνοντας υπόψη τις τρέχουσες αντιλήψεις για τον υπολογισμό του φάσματος σχεδιασμού σύμφωνα με τις διατάξεις του Ευρωκώδικα 8 [CEN 2004].



Εικόνα 21. Σεισμολογικός χάρτης Ισραήλ  
Πηγή:SI 413 1995, 2004

## 2.2. ΕΠΕΒΑΣΕΙΣ ΚΑΙ ΥΛΙΚΑ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

### 2.2.1.ΟΙ ΕΠΕΜΒΑΣΕΙΣ ΠΟΥ ΕΠΙΛΕΧΘΗΚΑΝ

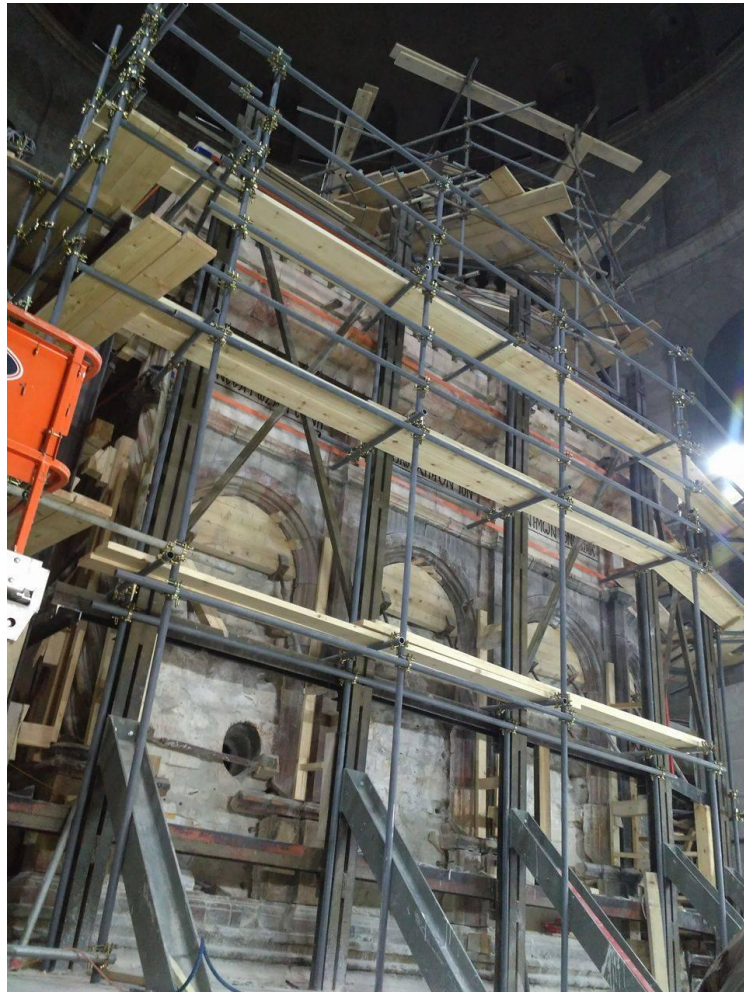
Επεξεργαζόμενη τα αποτελέσματα της διαγνωστικής μελέτης και σεβόμενη τις αρχές αποκατάστασης των μνημείων η ομάδα του ΕΜΠ κατέληξε σε μία σειρά από επεμβάσεις απαραίτητες για την αρχιτεκτονική και δομική ακεραιότητα του μνημείου. Οι κυριότερες από αυτές είναι:

- Κατόπιν πιλοτικών εφαρμογών έγινε η επιλογή χρήσης υλικών για τον καθαρισμό των επιφανειών του μνημείου και των αγιογραφιών. Επιλέχθηκε Vulrex με ατμό για τον καθαρισμό όλων των επιφανειών της εξωτερικής ορθομαρμάρωσης με έντονες ελαιώδεις αποθέσεις και αιθάλη. Για τις λιγότερο βεβαρημένες περιοχές έγινε χρήση ατμού και Vulrex για τους λίθους Slayeb και χρήση πάστας AB57 για τους λίθους Mizzy. Για τον καθαρισμό των εσωτερικών επιφανειών από μάρμαρο Προκονήσου επιλέχθηκε πάλι ατμός με Vulrex.
- Κατόπιν πιλοτικών εφαρμογών έγινε η επιλογή των υλικών στερέωσης των λίθων. Πραγματοποιήθηκε στερέωση των επιφανειών της ορθομαρμάρωσης και για τους δύο τύπους λίθων με χρήση υλικού με βάση το κερί και με χρήση νερού ως διαλύτη με την ονομασία AGS. Το υλικό αυτό δημιουργεί μια



προστατευτική επιφάνεια στοπ λίθο, χωρίς να μεταβάλει σημαντικά τον χρωματισμό του ( $\Delta E < 5$ ) και είναι συμβατό με τη μικροδομή των λίθων.

- Αφαίρεση των μαρμάρων ανάμεσα στους ψευδοπεσσούς και μέχρι το ύψος της κορυφής των αψίδων με κόψιμο των διαβρωμένων αγκυριών τους. Έτσι έγινε εμφανής η τοιχοποιία που βρισκόταν πίσω από αυτά. Στην κορυφή κάθε αψίδας τοποθετήθηκαν ημικυκλικού σχήματος ξύλινες στηρίξεις για την προστασία των παραμορφωμένων ψευδοπεσσών από τα φορτία της ανωδομής.



Εικόνα 22. Εργοτάξιο βόρειας όψης  
Πηγή: Προσωπικό αρχείο

- Αφαίρεση του φθαρμένου κονιάματος πλήρωσης.
- Αφαίρεση των ασύμβατων επεμβάσεων του παρελθόντος. Κατά την αρχική μελέτη αλλά και κατά τις εργασίες, η ερευνητική ομάδα του ΕΜΠ εντόπισε επεμβάσεις του παρελθόντος που δεν είχαν καταγραφεί και που συχνά επιδεινώναν την κατάσταση του μνημείου μακροπρόθεσμα.. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η επιλογή τσιμέντου σε συγκεκριμένα σημεία.

- Αντικατάσταση κάποιων μεμονωμένων τμημάτων της ορθομαρμάρωσης που παρουσίαζαν έντονη φθορά (ρωγμές κλπ) με υλικό ίδιου τύπου.
- Ανάταξη της ορθομαρμάρωσης στην κατακόρυφη θέση. Χρησιμοποιήθηκαν χειροκίνητοι γρύλλοι για την επαναφορά των ψευδοπεσσών στην κατακόρυφη θέση.

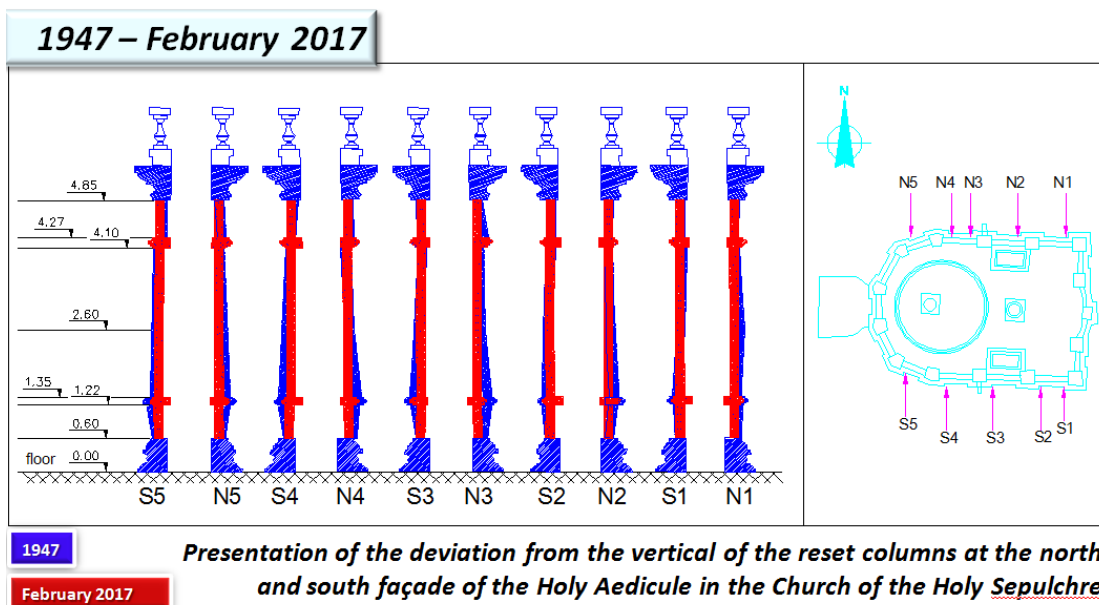


Εικόνα 23. . Διακρίνονται με κόκκινο οι χειροκίνητοι γρύλλοι για την επανάταξη των πεσσών

Πηγή: Προσωπικό αρχείο

## DIMINUTION OF THE DEFORMATIONS – SIGNIFICANT REDUCTION OF DEVIATIONS FROM VERTICALITY

Prof. A. Georgopoulos\*, Assoc. Professor Evangelia Lambrou\*, Assoc. Professor George Pantazis\*  
\*School of Rural and Surveying Engineering



Εικόνα 24. Απόκλιση ορθομαρμάρωσης από την κατακόρυφο

Πηγή: Ερευνητική ομάδα ΕΜΠ

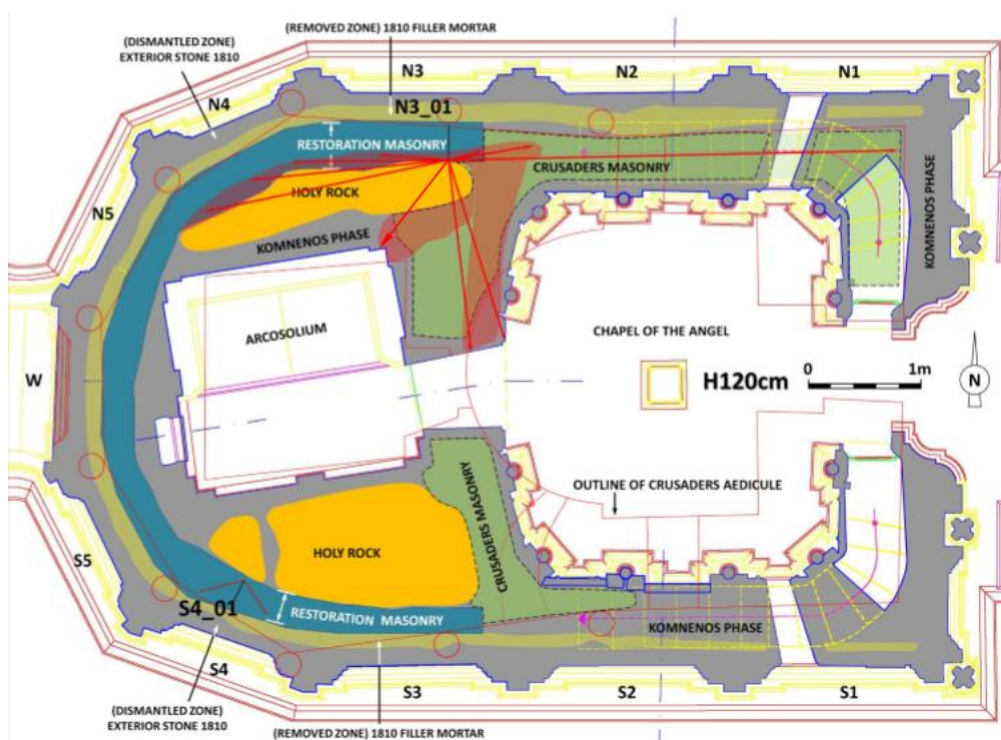
- Αρμολόγηση της τοιχοποιίας Σταυροφοριακής και Κομνηνού με κονίαμα συμβατό με τα ιστορικά κονιάματα και τους λίθους της. Το κονίαμα αυτό ((MasterEmaco S 285 TIX) επιλέχθηκε κατόπιν χρήση της μεθόδου αντίστροφης μηχανικής προσέγγισης ώστε να είναι συμβατό με τα ιστορικά υλικά. Αναλυτικότερα τα χαρακτηριστικά του αναφέρονται σε επόμενο κεφάλαιο.
- Αντικατάσταση τμημάτων της τοιχοποιίας με λαξευτούς παραλληλεπίπεδους λίθους από λατομείο της περιοχής των Ιεροσολύμων.. Λόγω της κακής κατάστασης της τοιχοποιίας στην δυτική πλευρά του ναού με μικρά λιθοσώματα και αρμούς ακανόνιστου σχήματος, αποφασίστηκε η αντικατάστασή της. Το φαινόμενο αυτό παρουσιαζόταν κυρίως σε ύψος μέχρι 1,5 μέτρα από το έδαφος. Το χαμηλότερο αυτό επίπεδο της τοιχοποιίας είναι και αυτό που ταλαιπωρείται περισσότερο από την ανερχόμενη υγρασία. Κατά τη διάρκεια της αποκατάστασης, αποφασίστηκε η ανάρτηση του ανώτερου τμήματος τις τοιχοποιίας με δοκούς διπλού ταύ όπως φαίνεται στην παρακάτω φωτογραφία. Η κίνηση αυτή έγινε για να μην μεταφερθούν τα φορτία της ανωδομής στον Ιερό Βράχο κατά την αφαίρεση του αποδιοργανωμένου κάτω τμήματος της τοιχοποιίας.





Εικόνα 25. Στην εικόνα αυτή παρατηρούμε την αντικατάσταση της τοιχοποιίας με νέους λαξευτούς λίθους στο κατώτερο και πιο ταλαιπωρημένο από την ανερχόμενη υγρασία τμήμα της. Είναι εμφανής η αρμολόγηση που έχει προηγηθεί στο υπόλοιπο τμήμα

Πηγή: Προσωπικό αρχείο



Εικόνα 26. Οριζόντια τομή μνημείου μετά την αντικατάσταση τμήματος της τοιχοποιίας

Πηγή: Ερευνητική ομάδα ΕΜΠ

- Τοποθέτηση καννάβου με σωληνάκια και εισπίεση ενέματος στο εσωτερικό της τοιχοποιίας. Στις πλαϊνές όψεις και την οροφή. Το κονίαμα του ενέματος που επιλέχθηκε είναι το MasterInject 222 εταιρείας BASF. Το κονίαμα αυτό επιλέχθηκε κατόπιν χρήσης της μεθόδου αντίστροφης μηχανικής προσέγγισης ώστε να είναι συμβατό με τα ιστορικά υλικά. Αναλυτικότερα τα χαρακτηριστικά του αναφέρονται σε επόμενο κεφάλαιο. Τα σωληνάκια του καννάβου του ενέματος εισέρχονται στην τοιχοποιία σε τρία διαφορετικά βάθη. Για την ενεμάτωση της κατακόρυφης τοιχοποιίας καταναλώθηκαν σύνολο 1010,3 λίτρα κονιάματος. Ελέγχθηκαν τυχόν έξοδοι διαφυγής του ενέματος προς το υπέδαφος με χρήση γεωραντάρ. Έγινε προσεκτικός έλεγχος ώστε να μην προσβληθεί η περιοχή του αρκοσολίου από τα ενέματα, ενώ παράλληλα να πληρωθούν όσο το δυνατόν περισσότερα κενά και ρωγμές στο σώμα της τοιχοποιίας. Η επιτυχία της ενεμάτωσης ελέγχθηκε στο τέλος με χρήση γεωραντάρ.
- Αφαίρεση του παλιού και τοποθέτηση νέου επιχρίσματος πάχους περίπου 5cm στα κλιμακοστάσια (στο εσωτερικό της ανατολικής όψης) με χρήση κονιάματος MasterEmaco S 285 TIX. Μέσα στο νέο κονίαμα τοποθετήθηκαν κάθετα και οριζόντια ράβδοι τιτανίου Φ8mm ανά 20cm.



Εικόνα 27. Το νότιο κλιμακοστάσιο μετά την τοποθέτηση του πλέγματος τιτανίου

Πηγή: Ερευνητική ομάδα ΕΜΠ

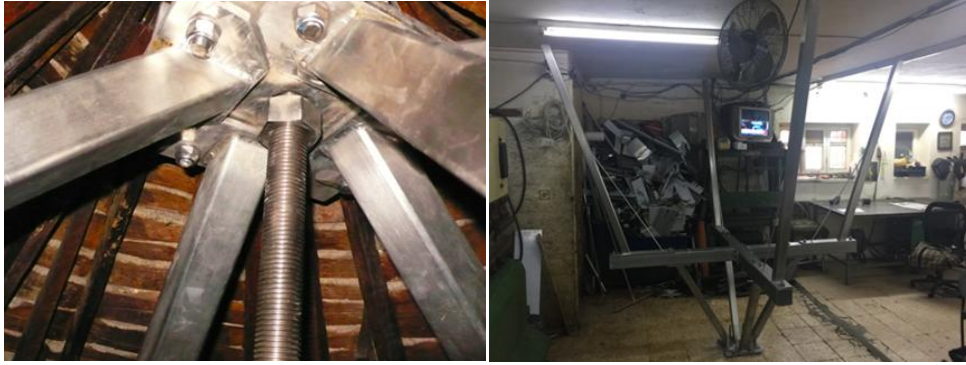
- Αποκάλυψη των οξειδωμένων μεταλλικών στοιχείων στις θέσεις που αυτό είναι δυνατό και επάλειψή τους με αναστολέα διάβρωσης.
- Διάνοιξη οπών και τοποθέτηση αγκυρίων τιτανίου αφού έχει προηγηθεί η επαναφορά της καθετότητας της εξωτερικής ορθομαρμάρωσης. Η συγκεκριμένη επέμβαση θα αναλυθεί στα επόμενα κεφάλαια.



Εικόνα 28 .Οπές στις κατώτερες πλάκες της ορθομαρμάρωσης και δοκιμαστική τοποθέτηση αγκυρίου  
Πηγή: Προσωπικό αρχείο

- Πρόθεση για τοποθέτηση μεταλλικού δακτυλίου περίσφιξης εσωτερικά στην οροφή του νεκρικού θαλάμου η οποία θα είναι αγκυρωμένη στην τοιχοποιία.
- Αφαίρεση τμήματος της εσωτερικής ορθομαρμάρωσης προκειμένου να ελεγχθεί η κατάσταση του Ιερού Βράχου πίσω από αυτό και επανατοποθέτησή τους.
- Δημιουργία παραθύρου στο πλαϊνό του νεκρικού θαλάμου ώστε ο επισκέπτης να έχει οπτική επαφή με τον Ιερό Βράχο αλλά και να πραγματοποιείται αερισμός του τοίχου λειτουργώντας ως διέξοδος της εγκλωβισμένης υγρασίας.
- Έγινε απεντόμωση του ξύλινου σκελετού του τρουλίσκου. Υπάρχει πρόθεση για τοποθέτηση μεταλλικού σκελετού σε συνύπαρξη με τον ξύλινο, με την προϋπόθεση ότι ο μεταλλικός θα φέρει πλέον τα φορτία. Αρχικά έγινε καθαρισμός της θολωτής κατασκευής. Πραγματοποιήθηκε πλήρωση των ρωγμών στην εξωτερική επιφάνεια του τρουλίσκου με ακρυλικό υλικό και τοποθετήθηκε περιμετρικά στην κατώτερη ζώνη του δύο στρώσεις επιχρίσματος (MasterEmaco S 285 TIX), η εσωτερική με 2mm μεγαλύτερη διάμετρο κόκκου και η εξωτερική με 1mm διάμετρο κόκκου. Έγινε ακόμα αποκατάσταση ζωγραφιστού διακόσμου.





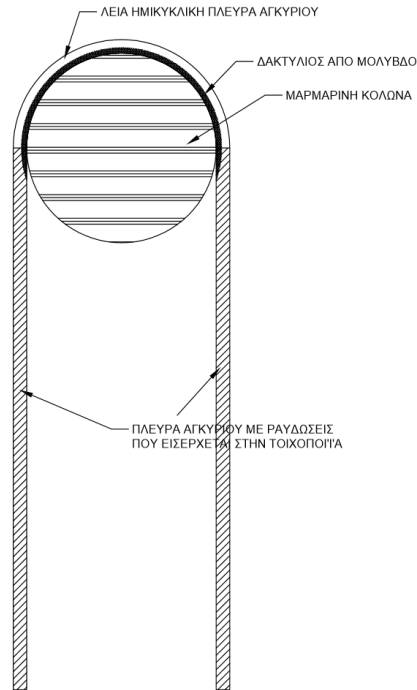
Εικόνα 29.Ο μεταλλικός κλωβός του θόλου(δεξιά ανεστραμμένος)  
Πηγή: Ερευνητική ομάδα ΕΜΠ

- Πραγματοποιήθηκε επανάταξη και αγκύρωση των μελών κάτω από τα μπαλούστρα περιμετρικά της οροφής του μνημείου.
- Τα μέλη της εσωτερικής ορθομαρμάρωσης στο παρεκκλήσι του Αγγέλου αγκυρώθηκαν στην τοιχοποιία με χρήση ευθύγραμμων και μορφής U ράβδων από τιτάνιο.



Εικόνα 30. Με κίτρινο χρώμα σημειώνονται τα αγκύρια τύπου U που συγκρατούν τα κολονάκια στην εσωτερικής ορθομαρμάρωσης στην τοιχοποιία. Με κόκκινο σημειώνονται οι θέσεις των ευθύγραμμων αγκυρίων. Διακρίνονται τάπες των οπών από το ίδιο μάρμαρο

Πηγή: Ερευνητική ομάδα ΕΜΠ



Εικόνα 31. Αγκύριο κολώνας εσωτερικής ορθομαρμάρωσης  
Πηγή: Ερευνητική ομάδα ΕΜΠ, ίδια επεξεργασία

- Αντικατάσταση των καρφίδων στο θόλο του παρεκκλησίου του Αγγέλου με άλλες από τιτάνιο Grade 2 διαμέτρου  $\Phi$  8mm.
- Επιλέχθηκε η τοποθέτηση πλέγματος τιτανίου  $\Phi$ 8mm ανά 20cm ανάμεσα στην εξωτερική ορθομαρμάρωση και την τοιχοποιία. Σκοπός της επέμβασης αυτής είναι η προστασία του κονιάματος πλήρωσης από την επιβολή φορτίων σε αυτό.



Εικόνα 32. Στιγμιότυπο κατά την επανατοποθέτηση της εξωτερικής ορθομαρμάρωσης  
Πηγή: Ερευνητική ομάδα ΕΜΠ

- Επανατοποθέτηση των μαρμάρων που αφαιρέθηκαν και ταυτόχρονα έγχυση του σκυροδέματος πλήρωσης. Το σκυρόδεμα αυτό αποτελείται από MasterEmaco S 285 ΤΙΧσε συνδυασμό με γαρμπίλι μέγιστης διαμέτρου 35mm. Σε σημεία που η ορθομαρμάρωση απέχει απόσταση μικρότερη από την τοιχοποιία χρησιμοποιήθηκε το 12mm χρησιμοποιήθηκε κονίαμα αποκατάστασης.
- Αφαίρεση του μεταλλικού κλωβού.

Καθ' όλη την πραγματοποίηση του έργου της αποκατάστασης υπάρχει πλήρης τεκμηρίωση και παρακολούθηση των μετακινήσεων των δομικών στοιχείων του μνημείου με σύστημα Monitoring.



Εικόνα 33.Οπές στις κατώτερες πλάκες της ορθομαρμάρωσης για την τοποθέτηση των βλήτρων και των αγκυρίων.

Πηγή : Προσωπικό αρχείο

## 2.2.2. ΤΑ ΒΑΣΙΚΑ ΥΛΙΚΑ ΤΗΣ ΔΟΜΙΚΗΣ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

Η επιλογή των υλικών και των τεχνικών αλλά και της έκτασης της αποκατάστασης διέπεται από της αρχές αποκαταστάσεων μνημείων όπως αναφέρθηκαν στην Εισαγωγή.

### *ΤΑ ΚΟΝΙΑΜΑΤΑ ΤΟΥ ΕΡΓΟΥ*

Για την επιλογή όλων των κονιαμάτων που χρησιμοποιήθηκαν στην αποκατάσταση ακολουθήθηκε ερευνητική πορεία που ακολουθείται για κάθε είδους κονίαμα αποκατάστασης Είναι η ίδια που πραγματοποιήθηκε και για τον προσδιορισμό των κονιαμάτων αρμολόγησης και ομογενοποίησης με ενέματα. Τα στάδια της πορείας αυτής είναι (Μοροπούλου κ.α. , 2016):

- Αποτίμηση χαρακτηρισμού ιστορικών υλικών
- Θέσπιση προδιαγραφών για κονιάματα αποκατάστασης
- Επιλογή κονιάματος αποκατάστασης
  - ✓ Συμβατότητα
  - ✓ Επιτελεστικότητα
- Επιλογή ενέματος για ομογενοποίηση και ενίσχυση της τοιχοποιίας αλλά και επιλογή κονιάματος αγκυρώσεων αφού και αυτές αποτελούν μέρος της τοιχοποιίας

Μεθοδολογία σχεδιασμού συμβατών κονιαμάτων αποκατάστασης(Αντίστροφη Μηχανική Προσέγγιση)(Μοροπούλου κ.α. , 2016).

1. Χαρακτηρισμός και αποτίμηση ιστορικών κονιαμάτων –επιλογή πρώτων υλών – επιλογή συνθέσεων.
2. Προετοιμασία συνθέσεων κονιαμάτων αποκατάστασης. Συντήρηση σε ελεγχόμενες συνθήκες κατά την πήξη και σκλήρυνση.
3. Αποτίμηση ιδιοτήτων κονιαμάτων αποκατάστασης.
4. Αριστοποίηση –Τυποποίηση βάσει χαρακτηριστικών.
5. Πιλοτική επί τόπου εφαρμογή για την αποτίμηση των κονιαμάτων αποκατάστασης στην κλίμακα της τοιχοποιίας.

Για την σύνθεση του κονιάματος αποκατάστασης της τοιχοποιίας η ερευνητική ομάδα του ΕΜΠ κατέληξε στο συνδυασμό υδρασβέστου-ποζολάνης (μετακαολίνης υψηλής δραστηριότητας),με ποταμίσια πυριτικά αδρανή μέγιστης διαμέτρου 2 mm και ορυκτές ανόργανες ίνες .Εξασφαλίζει θλιπτική αντοχή >15 MPa και κατατάσσεται ως κονίαμα τοιχοποιίας τύπου M15 κατά EN 998/2 (Μοροπούλου κ.α., 2016)

Για την περάτωση του έργου της αποκατάστασης χρησιμοποιήθηκαν 3 είδη κονιαμάτων ασβέστου-ποζολάνης (μετακαολίνη υψηλής δραστηριότητας) της εταιρίας BASF:

**Το κονίαμα MasterEmaco 285 TIX** για το αρμολόγημα της τοιχοποιίας. Το ίδιο κονίαμα χρησιμοποιήθηκε ως επίχρισμα με σπλισμό τιτανίου για την ενίσχυση της εσωτερικής παρειάς της Ανατολικής όψης. Επίσης κατά την επανατοποθέτηση της ορθομαρμάρωσης με το κονίαμα αυτό θα πληρωθεί το κενό μεταξύ τοιχοποιίας και ορθομαρμάρωσης. Το κονίαμα αυτό έχει τα παρακάτω χαρακτηριστικά (BASF,2014):

- Στατικό μέτρο ελαστικότητας: 16000 Mpa
- Θλιπτική αντοχή: 18 Mpa (μετά από 28 μέρες)
- Αντίσταση σε εξόλκευση μεταλλικών ράβδων: > 6 Mpa (μετά από 28 μέρες)
- Συνάφεια με υπόστρωμα (υπό διάτμηση): > 0,6 Mpa (μετά από 28 μέρες)
- Η παρασκευή του κονιάματος έγινε σύμφωνα με τις οδηγίες που παρέχει η εταιρία παραγωγής του.
- Απουσία τσιμέντου. Η πλήρης απουσία τσιμέντου στο προϊόν το καθιστά συμβατό με τα παραδοσιακά δομικά υλικά της προς ενίσχυση τοιχοποιίας.
- Πολύ χαμηλή περιεκτικότητα σε υδατοδιαλυτά άλατα. Δεν εισάγει στην τοιχοποιία θειικά, χλωριούχα και νιτρικά άλατα, καθώς και ιόντα καλίου και νατρίου. Δε συμβάλει επίσης σε φυσικοχημικά φαινόμενα φθοράς που σχετίζονται με το σχήμα και την κρυστάλλωση αλάτων.
- Εύκολο και απλό στην εφαρμογή. Με μυστρί ή με εκτόξευση χρησιμοποιείται για επεμβάσεις ενίσχυσης για πάχη μέχρι 5 cm. Για επεμβάσεις όπου απαιτείται πάχος μεγαλύτερο των 5 cm, μπορεί να εφαρμοσθεί με χύτευση προσθέτοντας στο κονίαμα αδρανή κατάλληλης κοκκομετρίας επιτυγχάνοντας σκυροδέματα υψηλής αντοχής.
- Υψηλή διαπερατότητα σε υδρατμούς. Σημαντική ιδιότητα που επιτρέπει την κανονική διαπνοή της τοιχοποιίας.
- Χαμηλή τριχοειδής ρόφηση. Σημαντική για να παρεμποδίζει εξωτερικά την είσοδο του νερού στην τοιχοποιία.
- Άκαυστο υλικό και δεν εκλύει καπνό.

**Το κονίαμα MasterFlow 980** το οποίο θα χρησιμοποιηθεί για την πλήρωση των οπών σε αγκύρια. . Το κονίαμα αυτό έχει τα παρακάτω χαρακτηριστικά (BASF,2014):

- Στατικό μέτρο ελαστικότητας: 30000 Mpa
- Θλιπτική αντοχή: >60 Mpa (μετά από 28 μέρες)
- Αντίσταση σε εξόλκευση μεταλλικών ράβδων: > 30 Mpa (μετά από 28 μέρες)
- Συνάφεια με υπόστρωμα (υπό διάτμηση): >6 Mpa (μετά από 28 μέρες)
- Αντοχή σε κάμψη: >7 Mpa (μετά από 28 μέρες)
- Η παρασκευή του κονιάματος έγινε σύμφωνα με τις οδηγίες που παρέχει η εταιρία παραγωγής του.
- Απουσία τσιμέντου. Η πλήρης απουσία τσιμέντου στο προϊόν το καθιστά συμβατό με τα παραδοσιακά δομικά υλικά της προς ενίσχυση τοιχοποιίας.
- Πολύ χαμηλή περιεκτικότητα σε υδατοδιαλυτά άλατα. Δεν εισάγει στην τοιχοποιία θειικά, χλωριούχα και νιτρικά άλατα, καθώς και ιόντα καλίου και

νατρίου. Δε συμβάλει επίσης σε φυσικοχημικά φαινόμενα φθοράς που σχετίζονται με το σχήμα και την κρυστάλλωση αλάτων.

- Εύκολο και απλό στην εφαρμογή. Με μυστρί ή με εκτόξευση χρησιμοποιείται για επεμβάσεις ενίσχυσης για πάχη μέχρι 5 cm. Για επεμβάσεις όπου απαιτείται πάχος μεγαλύτερο των 5 cm, μπορεί να εφαρμοσθεί με χύτευση προσθέτοντας στο κονίαμα αδρανή κατάλληλης κοκκομετρίας επιτυγχάνοντας σκυροδέματα υψηλής αντοχής..
- Χαμηλή τριχοειδή ρόφηση. Σημαντική για να παρεμποδίζει εξωτερικά την είσοδο του νερού στην τοιχοποιία.
- Άκαυστο υλικό και δεν εκλύει καπνό.
- Ελαφρώς διογκούμενο κατά τις πρώτες 12 ώρες.
- Αμελητέα τροχοειδής ρόφηση νερού.
- Χαμηλή θερμοκρασία ενυδάτωσης
- Υψηλή δύναμη συνάφειας με τα μέταλλα
- Ανάληψη υψηλών αντοχών πολύ γρήγορα

**Το κονίαμα MasterInject 222** το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την ομογενοποίηση της τοιχοποιίας με ενέματα. Να σημειωθεί εδώ ότι η ενεμάτωση πραγματοποιήθηκε σε όλες τις όψεις του μνημείου εκτός της Ανατολικής όψης λόγω του περιορισμένου πλάτους της τοιχοποιίας εκεί. Το κονίαμα αυτό δε θα μας απασχολήσει περαιτέρω στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής. Το κονίαμα αυτό έχει τα παρακάτω χαρακτηριστικά(BASF,2014):

- Θλιπτική αντοχή): >7 Μρα (μετά από 28 μέρες)
- Διάμετρος κόκκου: <12 μm
- Απουσία τσιμέντου. Η πλήρης απουσία τσιμέντου στο προϊόν το καθιστά συμβατό με τα παραδοσιακά δομικά υλικά της προς ενίσχυση τοιχοποιίας.
- Πολύ λεπτή κοκκομετρία και υψηλή ρευστότητα και συγκράτηση νερού που το κάνουν εύκολα αντλίσσιμο και του επιτρέπουν να εισχωρήσει επαρκώς στα κενά της τοιχοποιίας καλύπτοντάς τα.
- Πολύ χαμηλή περιεκτικότητα σε υδατοδιαλυτά άλατα. Δεν εισάγει στην τοιχοποιία θειικά, χλωριούχα και νιτρικά άλατα, καθώς και ιόντα καλίου και νατρίου. Δε συμβάλει επίσης σε φυσικοχημικά φαινόμενα φθοράς που σχετίζονται με το σχήμα και την κρυστάλλωση αλάτων.
- Υψηλή εργασιμότητα.
- Υψηλή διαπερατότητα σε υδρατμούς. Σημαντική ιδιότητα που επιτρέπει την κανονική διαπνοή της τοιχοποιίας.
- Άκαυστο υλικό και δεν εκλύει καπνό.
- Αντοχή σε προσβολή από άλατα που πιθανόν να προϋπάρχουν στην τοιχοποιία.
- Χαμηλή θερμοκρασία ενυδάτωσης
- Χαμηλή τριχοειδή ρόφηση.



**Ο τύπος λίθου Jamaïn** χρησιμοποιήθηκε για την ανακατασκευή της τοιχοποιίας περιμετρικά του Ιερού Βράχου. Ο λίθος αυτός είναι ένα είδος Mizzy, προέρχεται από την ευρύτερη περιοχή της Παλαιστίνης και παρουσιάζει:

- Μπεζ χρώμα
- Μικροδομή συμβατή με τα υπόλοιπα ιστορικά υλικά και τα υλικά των επεμβάσεων αποκατάστασης
- Αντοχή σε θλίψη <50 Mpa.
- Χρησιμοποιήθηκαν λίθοι λαξευτοί παραλληλεπίπεδοι διαστάσεων ώστε τα μειωθεί κατά το δυνατόν το πάχος των αρμών..

### 2.2.3. ΤΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΩΝ ΕΠΕΜΒΑΣΕΩΝ ΣΤΗΝ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑ

Με βάση τα υλικά ενίσχυσης και σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία, οι ιδιότητες των αρχικών υλικών ( μέτρο ελαστικότητας,, θλιπτική και εφελκυστική αντοχή) κατά ένα ποσοστό της τάξης των 20%.

(α) Αντικατάσταση τοιχοποιίας Σταυροφορικής φάσης στη δυτική πλευρά.

Η τοιχοποιία της Σταυροφορικής φάσης μετά την αποκάλυψή των εξωτερικών στρώσεων του Ιερού Κουβουκλίου διαπιστώθηκε ότι είχε υποστεί σημαντική αποδιοργάνωση. Για το λόγο αυτό κρίθηκε αναγκαία η αντικατάστασή της με λαξευμένα φυσικά λιθοσώματα αντοχής  $f_b=50$  Mpa και κονίαμα αντοχής  $f_m=15$  Mpa. Θεωρώντας ότι οι αρμοί ήταν αρκετά λεπτοί η χαρακτηριστική θλιπτική αντοχή της τοιχοποιίας μπορεί να υπολογιστεί με χρήση της ακόλουθης σχέσης του Ευρωκώδικα 6 (CEN, 2005):

$$f_k = K \cdot f_b^{0,7} \cdot f_m^{0,3} = 0,45 \cdot 50^{0,7} \cdot 15^{0,3} = 15,67 \text{ Mpa}$$

Το μέτρο ελαστικότητας μπορεί να θεωρηθεί για νέα τοιχοποιία ότι είναι  $1000 \times f_{wcs} = 15.67$  Gra (Eurocode 6, CEN,2005).

(β) Ενισχυμένη τοιχοποιία φάσης Κομνηνού

Η τοιχοποιία φάσης Κομνηνού ενισχύθηκε με χρήση ενέματος. Για τον υπολογισμό της αντοχής της ενισχυμένης τοιχοποιίας λαμβάνεται υπόψη η αναλογία όγκου ενέματος  $V_i$  και όγκου τοιχοποιίας  $V_w$  σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση [ΟΑΣΠ, 2014]:

$$f_{wcs} = f_{wc0} \cdot \left( 1 + 1,25 \cdot \frac{V_i}{V_w} \cdot \frac{\sqrt{f_{gr,c}}}{f_{wv0}} \right)$$

όπου  $f_{wcs}$  η θλιπτική αντοχή της ενισχυμένης τοιχοποιίας,  $f_{wc0}$  η θλιπτική αντοχή της τοιχοποιίας πριν από την ενίσχυση και  $f_{gr,c}$  η θλιπτική αντοχή του ενέματος. Προκύπτει η θλιπτική αντοχή της φάσης Κομνηνού μετά την ενίσχυση  $f_{wcs} = 1.68$  Mpa.

Το μέτρο ελαστικότητας μπορεί να θεωρηθεί ότι κυμαίνεται μεταξύ  $300 \times f_{wcs}$  και  $1200 \times f_{wcs}$  δηλαδή μεταξύ 0.504 Gra και 2.016 Gra [ΚΑΔΕΤ 2014]. Δυσμενέστερη

είναι η θεώρηση της πρώτης τιμής η οποία θα οδηγήσει σε περισσότερο εύκαμπτο φορέα, δηλαδή μεγαλύτερη πρώτη ιδιοπερίοδο και επομένως μεγαλύτερη φασματική επιτάχυνση. Για το λόγο αυτό υιοθετείται η τιμή  $E = 0.504 \text{ GPa}$ .

#### 2.2.4. ΟΙ ΤΥΠΟΙ ΤΩΝ ΑΓΚΥΡΙΩΝ ΚΑΙ ΤΩΝ ΒΛΗΤΡΩΝ

Για τη συγκράτηση της ορθομαρμάρωσης χρησιμοποιούνται αγκύρια τιτανίου ώστε να μεταφέρονται τα φορτία στην τοιχοποιία.

**Το τιτάνιο** είναι ένα από τα υλικά που χρησιμοποιούνται ευρέως στα έργα αποκατάστασης μνημείων, κυρίως λόγω της μεγάλης του αντοχής σε όλα τα είδη διάβρωσης. Επίσης το εμπορικός καθαρό τιτάνιο (Grade2 κατά ASTM B265 και B348) που χρησιμοποιείται στα έργα αποκατάστασης είναι συμβατό υλικό με το μάρμαρο από άποψη φυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων (Μοροπούλου κ.α. , 2016).

Το τιτάνιο παρουσιάζει εξαιρετική αντοχή στη διάβρωση, ενώ έχει το μισό ειδικό βάρος σε σχέση με τον χάλυβα, το μισό μέτρο ελαστικότητας, ικανοποιητική εφελκυστική αντοχή και πολύ ικανοποιητική επιμήκυνση θραύσεως. Ο χαμηλός συντελεστής θερμικής διαστολής του είναι πλησιέστερος προς το μάρμαρο σε σύγκριση με τους συντελεστές άλλων χρησιμοποιούμενων μετάλλων, όπως ο μπρούντζος, ο ανοξείδωτος χάλυβας κτλ., ενώ διαθέτει και ικανοποιητική πλαστιμότητα (Μοροπούλου κ.α. , 2016).

Η συγκόλληση θραυσμάτων λίθων με κοχλιοτομημένες ράβδους τιτανίου και συμβατά κονιάματα, είναι μία εργασία που εκτελείται συχνότατα στα έργα συντήρησης και αποσκοπεί στην αποκατάσταση της μονολιθικότητας των κατακερματισμένων αρχιτεκτονικών μελών (Μοροπούλου κ.α. , 2016).

- Σε λίθους οι οποίοι έχουν αστοχήσει κατά κανόνα λόγω υπέρβασης της εφελκυστικής τους αντοχής, οι σπλισμοί των συγκολλήσεων οι οποίοι τοποθετούνται με διεύθυνση κάθετη στις επιφάνειες θραύσεως, και προορίζονται να αναλάβουν εφελκυστικά φορτία.

- Στις περιπτώσεις κατά τις οποίες οι ράβδοι τιτανίου αναμένεται να υποβληθούν σε διάτμηση, όπως στις συγκολλήσεις όπου η διεπιφάνεια είναι παράλληλη στην διεύθυνση του σεισμικού φορτίου, οι ράβδοι θα συμπεριφέρονται ως βλήτρα, ενώ το βασικό κριτήριο αστοχίας του σπλισμού και όχι των μαρμάρινων στοιχείων εξακολουθεί να ισχύει. (Μοροπούλου κ.α. , 2016)

Τα χαρακτηριστικά του τιτανίου από το οποίο είναι κατασκευασμένες οι ράβδοι είναι (Inspection Certificate):

Τύπος: ASTM B345 GR-2

Μέτρο Ελαστικότητας: 105 GPa

Μέγιστη εφελκυστική Αντοχή: 420 MPa

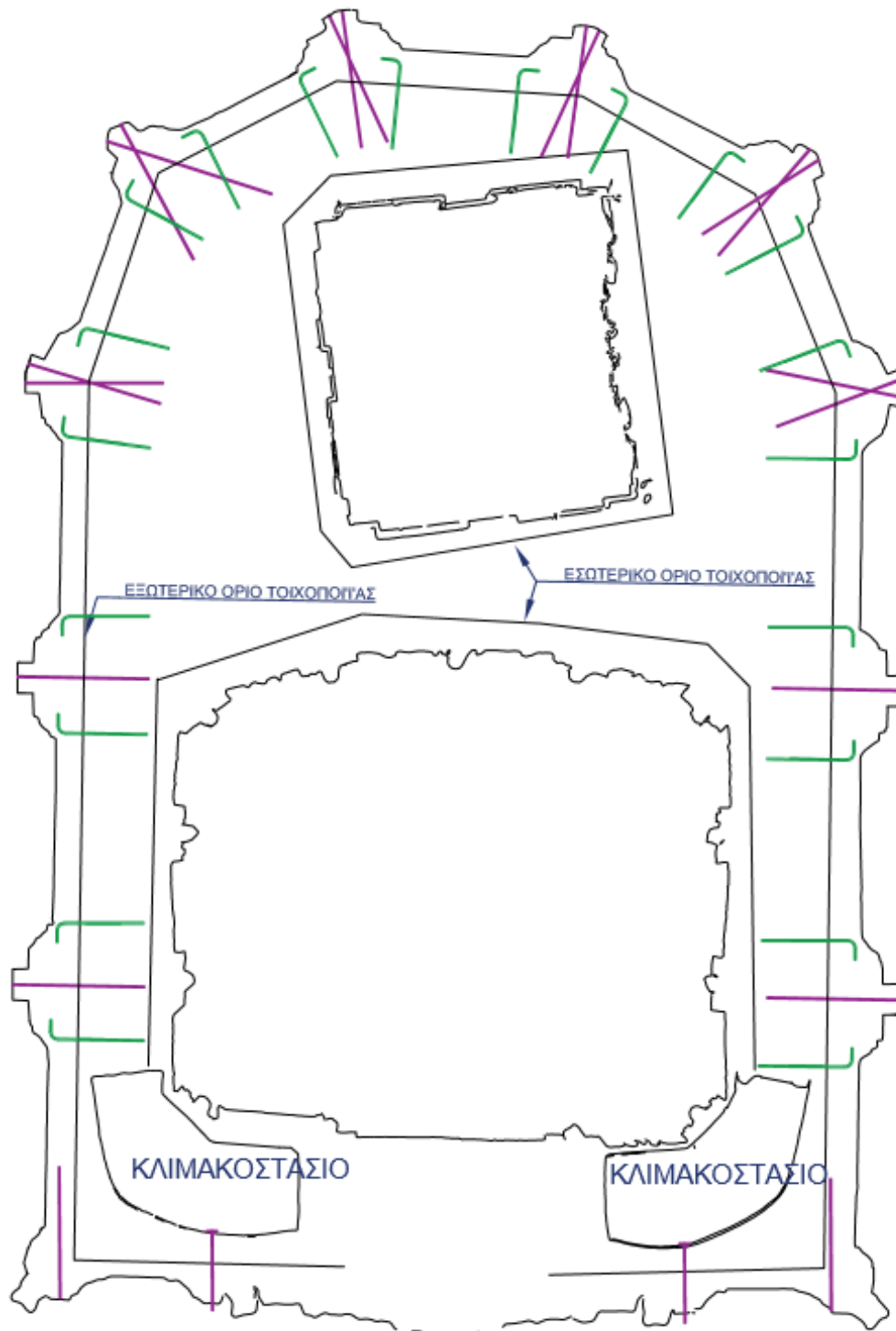
Τάση διαρροής: 300 MPa

Συντελεστής θερμικής διαστολής:  $9 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$

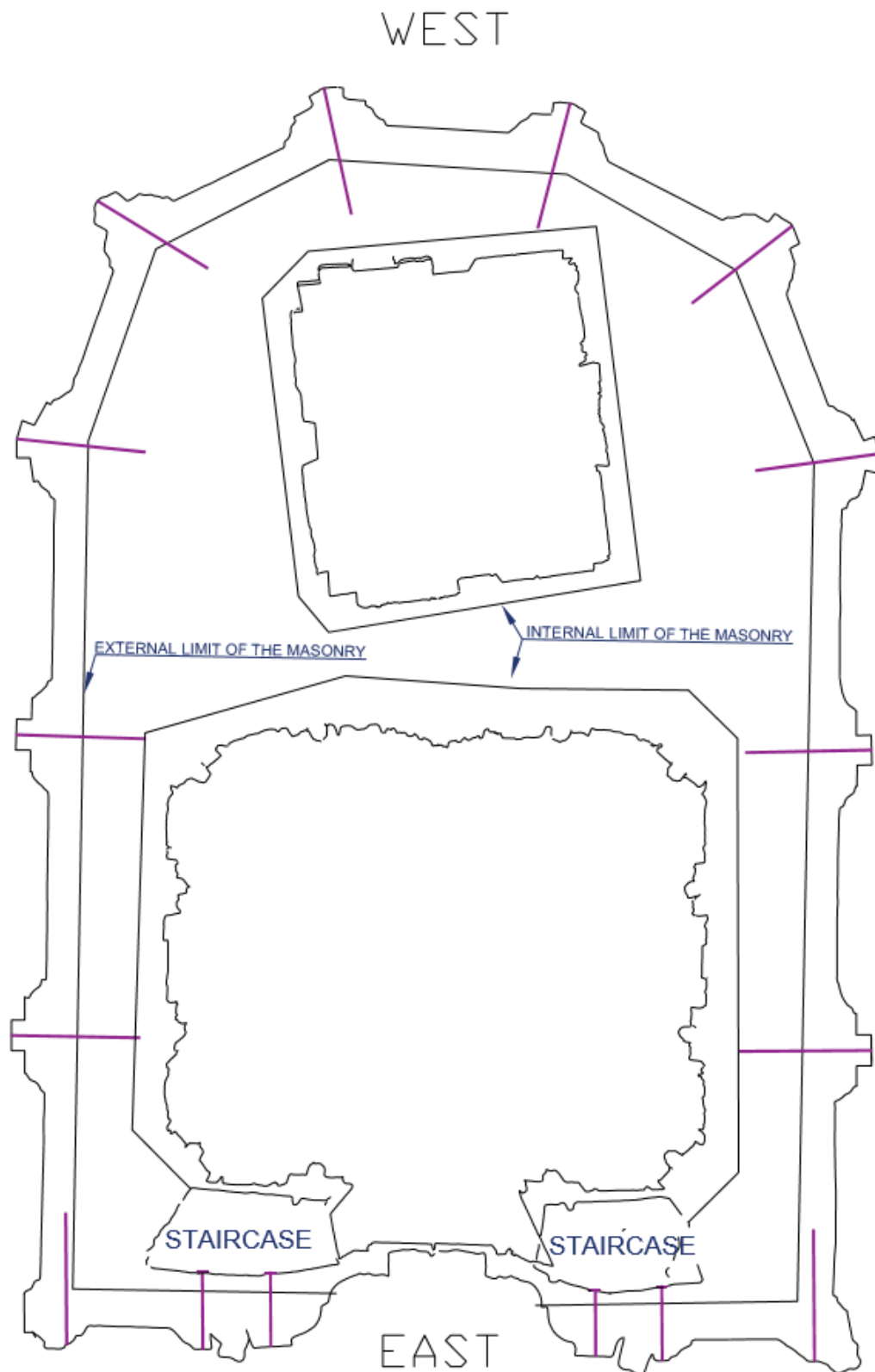
Οι τύποι των αγκυρίων που χρησιμοποιήθηκαν κατατάσσονται σε δύο βασικές κατηγορίες.

Η πρώτη είναι τα αγκύρια εκείνα που συνδέονται με τον τοίχο και μεταφέρουν τις δυνάμεις τους σε αυτόν μέσω κονιάματος και της συνάφειας που έχει αυτό με τα υλικά της τοιχοποιίας. Τα αγκύρια αυτού του είδους βρίσκονται σε όλες τις υπόλοιπες όψεις εκτός της ανατολικής- εισόδου (βλ. Παράρτημα) Ο λόγος επιλογής αυτής της μεθόδου αγκύρωσης είναι ότι αποκλείστηκε αποκαθήλωση της εσωτερικής ορθομαρμάρωσης και επομένως έπρεπε να βρεθεί λύση που να δίνει τη δυνατότητα στους τεχνίτες να εργαστούν μόνο από την εξωτερική πλευρά της τοιχοποιίας. Σε αυτό βοήθησε το γεγονός ότι υπήρχε διαθέσιμο επαρκές πάχος στην τοιχοποιία ώστε τα αγκύρια να εισαχθούν σε αυτή στο απαραίτητο βάθος (για υπολογισμούς βλ. Κεφάλαιο 3.2.1)

Η δεύτερη είναι τα αγκύρια εκείνα που μεταφέρουν τις δυνάμεις στην τοιχοποιία μέσω μίας πλάκας αγκύρωσης. Τα αγκύρια αυτά είναι τοποθετημένα διαμπερώς στην τοιχοποιία. Ο τύπος αυτός παρουσιάζεται στην ανατολική όψη του μνημείου και συγκεκριμένα στην περιοχή του κλιμακοστασίου όπου το πάχος της εξωτερικής τοιχοποιίας είναι περιορισμένο. Συγκεκριμένα κατά τόπους η προ αποκατάστασης τοιχοποιία έφτανε μέχρι και τα 20 εκατοστά πάχος. Λόγω του μικρού πάχους δεν προσφερόταν επαρκές βάθος για αγκύρια με κονίαμα να μεταφέρουν μέσω συνάφειας τα φορτία στον τοίχο. Να υπενθυμίσουμε εδώ ότι στην περιοχή αυτή του κλιμακοστασίου πραγματοποιήθηκε ενίσχυση με μανδύα κονιάματος MasterEmaco S 285 TIX και με πλέγμα ράβδων τιτανίου πράγμα που επιδρά θετικά στη μεταφορά των φορτίων από την πλάκα αγκύρωσης στους λίθους της τοιχοποιίας.



Σχέδιο 1. Οριζόντια τομή σε ύψος 2,8 μέτρα από το εσωτερικό δάπεδο με σχεδιασμένα τα ευθύγραμμα και «Γ» αγκύρια που εισχωρούν σε βάθος 0.4 μέτρα στην τοιχοποιία και τα αγκύρια του κλιμακοστασίου.



Σχέδιο 2. Οριζόντια τομή σε ύψος 1,625 μέτρα από το εσωτερικό δάπεδο με σχεδιασμένα τα ευθύγραμμα αγκύρια που εισχωρούν σε βάθος 0.4 μέτρα στην τοιχοποιία.

### 3. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

#### 3.2.ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ

Στη διπλωματική αυτή εργασία γίνεται διερεύνηση των αντοχών των 2 διαφορετικών τύπων αγκυρίων που χρησιμοποιήθηκαν στο μνημείο. Επίσης γίνεται υπολογισμός της ακαμψίας τους. Τα αποτελέσματα της διαδικασίας αυτής θα χρησιμοποιηθούν για την προσομοίωση των δομικών στοιχείων και των φορτίσεων τους σε πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων και συγκεκριμένα στο πρόγραμμα ABAQUS. Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα είναι τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για την αποκατάσταση του μνημείου με τα χαρακτηριστικά που αναφέρθηκαν πιο πάνω στο Κεφάλαιο 2.

#### 3.3.ΑΝΑΜΕΝΟΜΕΝΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στο υποκεφάλαιο αυτό γίνονται θεωρητικοί υπολογισμοί της αντοχής και της ακαμψίας των αγκυρίων και των βλήτρων.

##### 3.3.1.ΑΝΤΟΧΗ ΑΓΚΥΡΙΟΥ

Η μέγιστη εφελκυστική δύναμη που μπορεί να αναλάβει ένα αγκύριο είναι η μικρότερη από τις δυνάμεις : (α)Δύναμη διαρροής αγκυρίου, (β)Δύναμη αστοχίας συνάφειας αγκυρίου-συνδετικού κονιάματος, (γ)Δύναμη αστοχίας συνάφειας μεταξύ συνδετικού κονιάματος- υποστρώματος τοιχοποιίας.

Αναλυτικότερα:

(α) Διαρροή του Αγκυρίου

Υπό την προϋπόθεση ότι διατίθεται επαρκές μήκος έμπηξης του αγκυρίου, η μέγιστη εφελκυστική δύναμη την οποία μπορεί να αναλάβει ένα αγκύριο υπολογίζεται μέσω της ακόλουθης σχέσης:

$$N_{yd} = A_s \cdot f_{yd}$$

$A_s$ : το εμβαδόν της διατομής αγκυρίου

$f_{yd}$ : το όριο διαρροής του αγκυρίου

Επομένως για ράβδο τιτανίου Φ10 mm έχουμε

$$N_{yd} = 3,14 \cdot 0,005^2 \cdot 300 = 23,55 \text{ KN}$$

(β) Αστοχία της Συνάφειας Μεταξύ Αγκυρίου και Συνδετικού Υλικού



Η μέγιστη εφελκυστική δύναμη την οποία μπορεί να αναλάβει ένα αγκύριο, ώστε να προκληθεί αστοχία (αποκόλληση-ολίσθηση) στην επιφάνεια μεταξύ του αγκυρίου και του συνδετικού κονιάματος, υπολογίζεται μέσω της ακόλουθης σχέσης:

$$N_{bd} = \frac{f_{bk} \cdot l_e \cdot \pi \cdot d_b}{\gamma_b}$$

$f_{bk}$ : η χαρακτηριστική αντοχή της αντοχής συνάφειας μεταξύ αγκυρίου και συνδετικού υλικού

$l_e$ : το μήκος έμπηξης του αγκυρίου,

$d_b$ : η διάμετρος του αγκυρίου

$\gamma_b$ : ο επιμέρους συντελεστής ασφαλείας για τη συνάφεια.

Επομένως, για τη χρήση MasterFlow 980 και για συντελεστή ασφαλείας  $\gamma_b=1,5$  έχω :

$$N_{bd} = \frac{f_{bk} \cdot l_e \cdot \pi \cdot d_b}{\gamma_b} = \frac{30Mpa \cdot 0,4m \cdot \pi \cdot 0,01m}{1,5} = 251,20KN$$

Για τη χρήση MasterEmaco S 285 TIX και για συντελεστή ασφαλείας  $\gamma_b=1,5$  έχω :

$$N_{bd} = \frac{f_{bk} \cdot l_e \cdot \pi \cdot d_b}{\gamma_b} = \frac{6Mpa \cdot 0,4m \cdot \pi \cdot 0,01m}{1,5} = 50,24KN$$

(γ) Αστοχία Συνάφειας στην Επιφάνεια Συνδετικού Υλικού και Υποστρώματος

Η μέγιστη εφελκυστική δύναμη την οποία μπορεί να αναλάβει ένα αγκύριο, ώστε να προκληθεί αστοχία (αποκόλληση-ολίσθηση) στην επιφάνεια μεταξύ του συνδετικού κονιάματος και της τοιχοποιίας, υπολογίζεται μέσω της ακόλουθης σχέσης:

$$N_{bd} = \frac{f_{bk} \cdot l_e \cdot \pi \cdot d_b}{\gamma_b}$$

$f_{bk}$ : η χαρακτηριστική αντοχή της αντοχής συνάφειας μεταξύ αγκυρίου και συνδετικού υλικού

$l_e$ : το μήκος έμπηξης του αγκυρίου,

$d_b$ : η διάμετρος του αγκυρίου

$\gamma_b$ : ο επιμέρους συντελεστής ασφαλείας για τη συνάφεια.

Επομένως, για τη χρήση MasterFlow 980 και για συντελεστή ασφαλείας  $\gamma_b=1,5$  έχω :

$$N_{bd} = \frac{f_{bk} \cdot l_e \cdot \pi \cdot d_b}{\gamma_b} = \frac{6Mpa \cdot 0,4m \cdot \pi \cdot 0,02m}{1,5} = 100,48KN$$

Για τη χρήση MasterEmaco S 285 TIX, για συντελεστή ασφαλείας  $\gamma_b=1,5$  και για οπή  $\Phi 20mm$  έχω :

$$N_{bd} = \frac{f_{bk} \cdot l_e \cdot \pi \cdot d_b}{\gamma_b} = \frac{0,6Mpa \cdot 0,4m \cdot \pi \cdot 0,02m}{1,5} = 10,05KN$$

Για τη χρήση MasterEmacoS 285 TIX, για συντελεστή ασφαλείας  $\gamma_b=1,5$  και για οπή  $\Phi 38mm$  έχω :

$$N_{bd} = \frac{f_{bk} \cdot l_e \cdot \pi \cdot d_b}{\gamma_b} = \frac{0,6Mpa \cdot 0,4m \cdot \pi \cdot 0,038m}{1,5} = 19,09KN$$

#### (δ) Αστοχία της Συνάφειας στο Περιβάλλον Υπόστρωμα

Η μέγιστη δύναμη την οποία μπορεί να αναλάβει το αγκύριο, ώστε να εξολκευθεί το σύστημα “αγκυρίου / συνδετικού υλικού”, υπολογίζεται μέσω της ακόλουθης σχέσης:

$$N_{cd} = 4,5 \cdot \pi \cdot l_e \sqrt{\frac{f_{ck} \cdot \Phi}{\gamma_c}}$$

$f_{ck}$ : η χαρακτηριστική τιμή της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος στο οποίο εμπήγνυται το αγκύριο

$\Phi$ : η διάμετρος της οπής στην οποία τοποθετείται το αγκύριο, όχι μεγαλύτερη από  $d_b + 5mm$

$l_e$ : το μήκος έμπηξης του αγκυρίου

$\gamma_c$ : ο επί μέρους συντελεστής ασφαλείας για το υλικό του υποστρώματος.

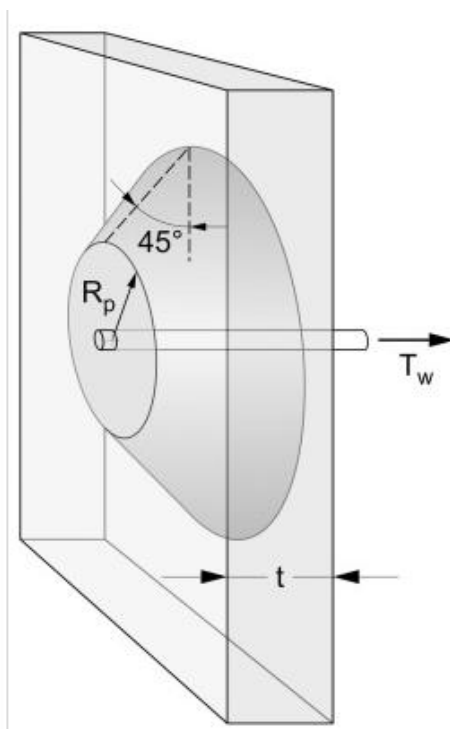
Ο συντελεστής  $\gamma_c$  υπολογίζεται ως εξής:

$$\gamma_c = \gamma'_c / \gamma_{inst}$$

$\gamma'_c = 1.8$  ο επί μέρους συντελεστής ασφαλείας του σκυροδέματος σε εφελκυσμό  
 $\gamma_{inst}$ : επί μέρους συντελεστής ασφαλείας εξαρτώμενος από την ποιότητα εφαρμογής του αγκυρίου στο εργοτάξιο. Λαμβάνουμε  $\gamma_{inst} = 1.0$  για υψηλή ποιότητα εφαρμογής,  $\gamma_{inst} = 1.2$  για συνήθη ποιότητα εφαρμογής και  $\gamma_{inst} = 1.4$  για ανεκτή ποιότητα εφαρμογής

Για την τοιχοποιία κατόπιν των επεμβάσεων, όπως προέκυψε και σε προηγούμενο κεφάλαιο έχουμε  $f_{wcs}=1,68 \text{ Mpa}$ . Επομένως, για αποκόλληση από την τοιχοποιία και για συντελεστή ασφαλείας  $\gamma_c=1,8$  έχω :

$$N_{cd} = 4,5 \cdot \pi \cdot l_e \sqrt{\frac{f_{ck} \cdot \Phi}{\gamma_c}} = 4,5 \cdot \pi \cdot 400\text{mm} \sqrt{\frac{1,68\text{Mpa} \cdot 20\text{mm}}{1,8}} = 24,419\text{KN}$$



Εικόνα 34. Κώνος διάτρησης της τοιχοποιίας,

Πηγή: Pisani, 2016

### 3.3.2.ΑΝΤΟΧΗ ΑΓΚΥΡΙΟΥ ΓΙΑ ΣΥΓΚΡΑΤΗΣΗ ΑΝΤΙΠΡΟΣΩΠΕΥΤΙΚΟ ΤΕΜΑΧΙΟΥ ΟΡΘΟΜΑΡΜΑΡΩΣΗΣ

Επιλέγεται διάμετρος βλήτρου  $d_b= 10\text{mm}$  . Η επιλογή αυτή βασίζεται όχι μόνο στο εμβαδόν της αντοχής του αγκυρίου αλλά αποσκοπεί και στη μακροζωία της αγκύρωσης λόγω της πολύ αργής αλλά υπαρκτής οξειδωσης του τιτανίου, σε συνδυασμό με τη σημαντικότητα του μνημείου απορρίφθηκε χρήση ράβδων διαμέτρου μικρότερης από 10mm.

Επί το δυσμενέστερο επιλέγουμε τη δύναμη με την οποία θα ελέγξουμε την αντοχή του αγκυρίου ίση με το βάρος του μεγαλύτερου τεμαχίου της ορθομαρμάρωσης.. Άρα  $N_{SD} = 3 \text{ KN}$

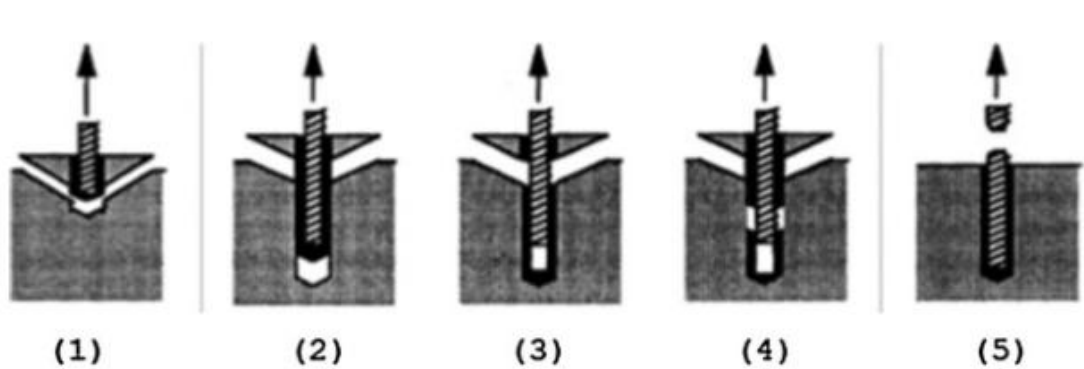
$$N_{yd} = 9.42 \text{ KN}$$

$$N_{bd} = 19,09 \text{ KN}$$

$$N_{cd} = 24,42 \text{ KN}$$

Άρα  $N_{UD} = 9,42 \text{ KN}$

Επομένως  $N_{UD} > N_{SD}$  και το αγκύριο που επιλέξαμε επαρκεί.

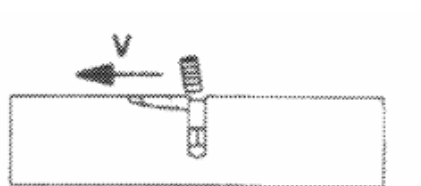


Εικόνα 35. Μηχανισμοί αστοχίας σύνδεσης με τοιχοποιία  
Πηγή PISIANI

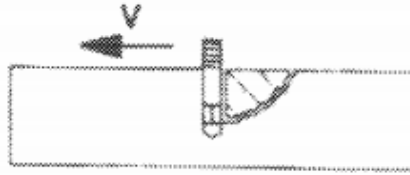
### 3.3.3. ANTOXH ΒΛΗΤΡΟΥ

Οι πιθανοί τρόποι αστοχίας για ένα βλήτρο είναι τρεις και περιγράφονται παρακάτω.

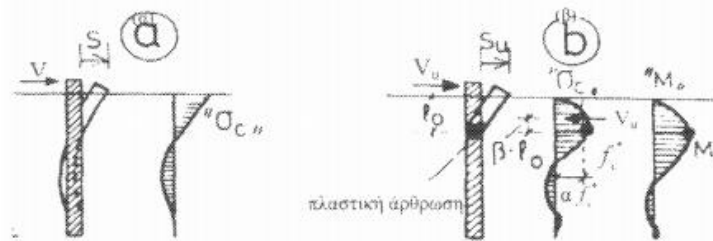
- a) Ο πρώτος τρόπος αστοχίας αφορά την περίπτωση που αστοχεί το βλήτρο-τιτάνιο στη θέση διεπιφάνειας. Αυτός ο τρόπος αστοχίας μπορεί να συμβεί εάν το βλήτρο βρίσκεται σε ικανές αποστάσεις από τα όρια του λίθου και οφείλεται αποκλειστικά στην υπέρβαση των χαρακτηριστικών αντοχής του χάλυβα.



- b) Ο δεύτερος τρόπος αστοχίας αφορά την περίπτωση που αστοχεί ο λίθος στο περιβάλλον του βλήτρου λόγω της πλευρικής πίεσης που ασκεί το βλήτρο στην κατεύθυνση του διατμητικού φορτίου και διαρροής ράβδου-βλήτρου.



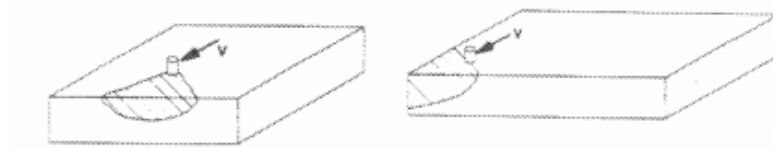
Επέρχεται σύνθλιψη του περιβάλλοντος σκυροδέματος και δημιουργία πλαστικής άρθρωσης στο βλήτρο.



Σχήμα 3: Μοντέλα συμπεριφοράς βλήτρου  
α) Ελαστικό μοντέλο. β) Πλαστικό μοντέλο

Αυτό είναι το αναμενόμενο ελαστικό και πλαστικό μοντέλο του βλήτρου και οι αναμενόμενες κατανομές των τάσεων κατά μήκος του.

- c) Ο τρίτος τρόπος αστοχίας αφορά την περίπτωση αστοχίας του υποστρώματος με μορφή απόσχισης ενός πλευρικού κώνου λόγω μικρών αποστάσεων του βλήτρου από τα όρια του στοιχείου



Η τιμή σχεδιασμού της μέγιστης τέμνουσας,  $F_{ud}$ , που μπορεί να μεταφερθεί από μία ράβδο με διάμετρο  $d_b$ , με επαρκές μήκος και επαρκείς επικαλύψεις, υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$N_{bd} = \frac{1,3 \cdot d_b^2}{\gamma_{Rd}} \cdot \sqrt{f_{cd} \cdot f_{yd}} < \frac{A_s \cdot f_{yd}}{\sqrt{3}}$$

$A_s$ : η διατομή της ράβδου

$f_{cd}$ : η τιμή σχεδιασμού της θλιπτικής αντοχής του υποστρώματος

$f_{yd}$ : η τιμή σχεδιασμού του ορίου διαρροής της ράβδου

$\gamma_{Rd}$ : συντελεστής ασφαλείας ίσος με 1.3.

Περιορισμοί στον σχεδιασμό των βλήτρων και των θέσεών τους:

- Πρέπει να εξασφαλίζεται ότι ο μηχανισμός βλήτρου αστοχεί με διαρροή του βλήτρου και ταυτόχρονη τοπική αστοχία λόγω σύνθλιψης του υποστρώματος κάτω από τη ράβδο. Ο επιθυμητός τρόπος αστοχίας

εξασφαλίζεται όταν η επικάλυψη της ράβδου, διαμέτρου  $d_b$  (κατά τη διεύθυνση της φόρτισης και κάθετα προς αυτήν), είναι τουλάχιστον ίση με τις τιμές που ακολουθούν:

- Κατά τη διεύθυνση φόρτισης: Ελάχιστη εμπρός επικάλυψη =  $6d_b$
- Ελάχιστη πίσω επικάλυψη =  $5d_b$
- Κάθετα στη διεύθυνση φόρτισης: Ελάχιστη πλευρική επικάλυψη =  $3d_b$
- Η απόσταση μεταξύ βλήτρων που συγκρατούν το ίδιο δομικό μέλος πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 5 φορές τη διάμετρο του βλήτρου.
- Σε περίπτωση βλήτρων διατεταγμένων εν σειρά, η καθαρή απόσταση μεταξύ διαδοχικών βλήτρων πρέπει να είναι κατ' ελάχιστον ίση με το πενταπλάσιο της διαμέτρου του βλήτρου ( $5d_b$ )

### 3.3.4.ΑΝΤΟΧΗ ΒΛΗΤΡΟΥ ΓΙΑ ΣΥΓΚΡΑΤΗΣΗ ΑΝΤΙΠΡΟΣΩΠΕΥΤΙΚΟΥ ΤΕΜΑΧΙΟΥ ΟΡΘΟΜΑΡΜΑΡΩΣΗΣ

Αγκύρωση αντιπροσωπευτικού τεμαχίου ορθομαρμάρωσης διαστάσεων  $60 \times 40 \times 15 \text{cm}^3$  από τοίχο του Παναγίου Τάφου. Πίσω από το αγκυρωμένο τμήμα του μαρμάρου θα εφαρμοστεί ένεμα MasterInject με αντοχή 15 Μρα. οποίο και θα αποτελεί το υπόστρωμα στο οποίο θα αναρτηθεί μέσω βλήτρων. Τα βλήτρα θα είναι κατασκευασμένα από τιτάνιο ποιότητας Grade 2. Το βάθος έμπηξης είναι 10cm.

Επιλέγεται διάμετρος βλήτρου ίση με 12mm και επιλέγονται οι θέσεις τους πάνω στο μνημείο ώστε να καλύπτονται τα κριτήρια που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Άρα  $F_{UD} = N_{bd} = 6,350 \text{KN}$

Επί το δυσμενέστερον επιλέγουμε τη δύναμη με την οποία θα ελέγξουμε την αντοχή του βλήτρου, ίση με το βάρος του μεγαλύτερου τεμαχίου της ορθομαρμάρωσης.. Άρα  $F_{SD} = 3 \text{KN}$

Επομένως  $F_{UD} > F_{SD}$  και το αγκύριο που επιλέξαμε επαρκεί.

### 3.3.5.ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΒΛΗΤΡΟΥ ΚΑΙ ΑΓΚΥΡΙΟΥ

Λόγω της διαφορετικής διεύθυνσης των φορτίσεων και του άξονα των ράβδων τιτανίου αναμένεται οι τελευταίες να λειτουργούν σε αξονική φόρτιση και σε διάτμηση ταυτόχρονα. Είναι γνωστό ότι όταν ένα αγκύριο υποβάλλεται ταυτόχρονα σε τέμνουσα δεν είναι συνατή η πλήρης αξιοποίηση της αντοχής του για κάθε δράση. Σε αυτή την περίπτωση θα πρέπει να ισχύουν οι ακόλουθες σχέσεις:

$$\frac{N_{sd}}{N_{rd}} < 1$$



$$\frac{V_{sd}}{V_{rd}} < 1$$

$$\frac{N_{sd}}{N_{rd}} + \frac{V_{sd}}{V_{rd}} < 1,2$$

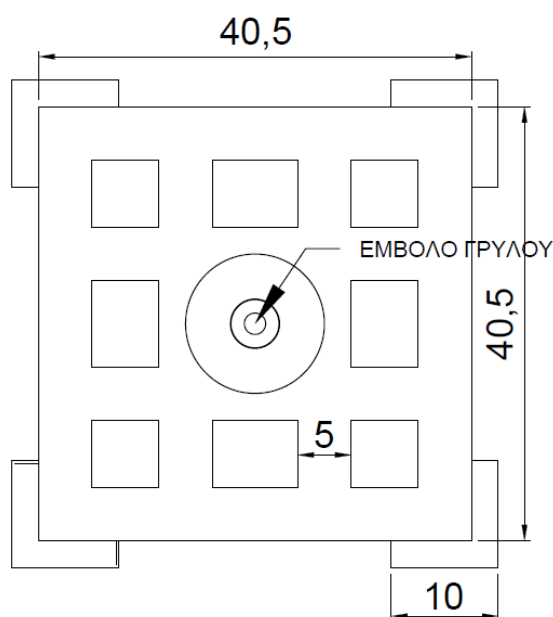
όπου:  $N_{sd}$  και  $N_{ud}$  η δρώσα εφελκυστική δύναμη και η μέγιστη αντίσταση εξόλκευσης αντίστοιχα,  $F_{sd}$  και  $F_{ud}$  είναι η δρώσα τέμνουσα και η μέγιστη αντοχή βλήτρου αντίστοιχα.

#### 4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

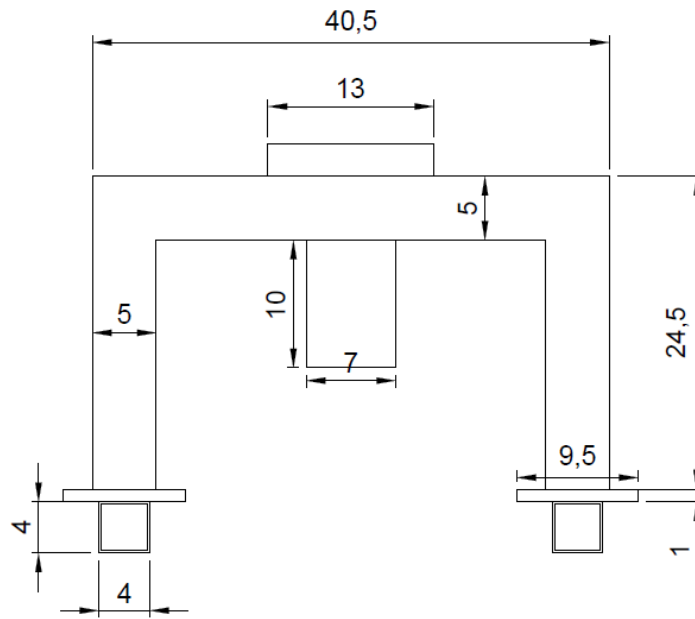
Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστεί η ανάλυση των αποτελεσμάτων, η οποία θα χωριστεί σε δύο υποκεφάλαια. Στο σημείο αυτό πρέπει να διευκρινιστεί ότι κάθε αγκύριο συνδέεται στην μια του άκρη με την εξωτερική ορθομαρμάρωση και στην άλλη άκρη με την τοιχοποιία μεταφέροντας τα φορτία από το ένα δομικό στοιχείο στο άλλο. Αρχικά, στο πρώτο υποκεφάλαιο, δηλαδή στην πρώτη σειρά δοκιμών εξετάζουμε την σύνδεση των αγκυρίων με το μάρμαρο, καθώς και τον τύπο σύνδεσης του αγκυρίου με τον τοίχο που χρησιμοποιείται στην μεγαλύτερη έκταση του μνημείου. Η πρώτη σειρά δοκιμών αποτελείται από δέκα συνολικά πειράματα. Στο δεύτερο υποκεφάλαιο, δηλαδή στην δεύτερη σειρά δοκιμών, εξετάζουμε τον τρόπο σύνδεσης των αγκυρίων με την τοιχοποιία της ανατολικής όψης και αναλύεται σε πέντε δοκιμές.

##### 4.1. Η ΣΥΣΚΕΥΗ ΕΞΟΛΚΕΥΣΗΣ

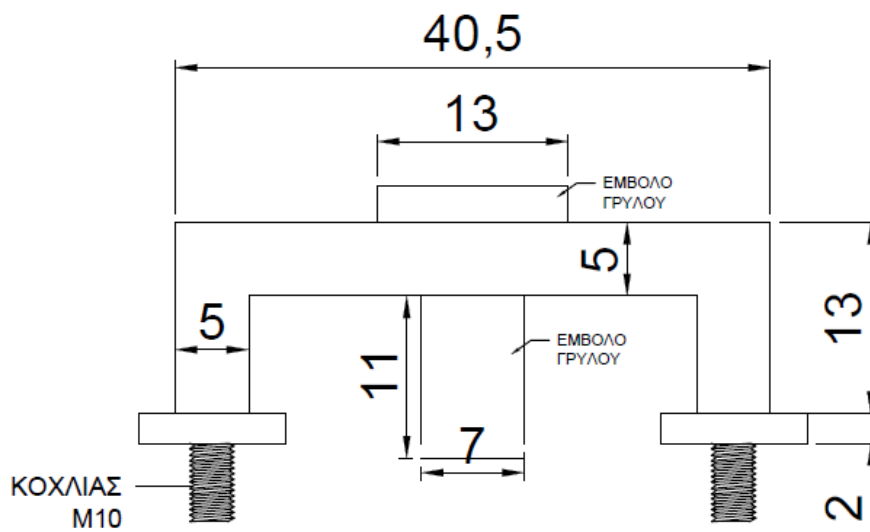
Για την πραγματοποίηση της πρώτης σειράς των δοκιμών έγινε χρήση μιας ιδιοκατασκευής που αποτελείται από μια μεταλλική κατασκευή-σχάρα κοιλοδοκών 50X50X1 mm και ένα γρύλο. Η γεωμετρία της σχάρας φαίνεται στα σχέδια 3,4 και 5. Ο γρύλος και τα παρελκόμενα του είναι της εταιρίας ENERPAC και είναι χειροκίνητος. Η μέγιστη πίεση που μπορεί να αναπτύξει να είναι τα 10000 PSI(700 BAR).



Σχέδιο 3 . Κάτοψη σχάρας-γρύλου  
Πηγή : Ιδία επεξεργασία



Σχέδιο 4. Ο πλάγια όψη σχάρας γρύλου  
Πηγή : Ιδία επεξεργασία



Σχέδιο 5. Πλάγια όψη σχάρας με γρύλο  
Πηγή : Ιδία επεξεργασία

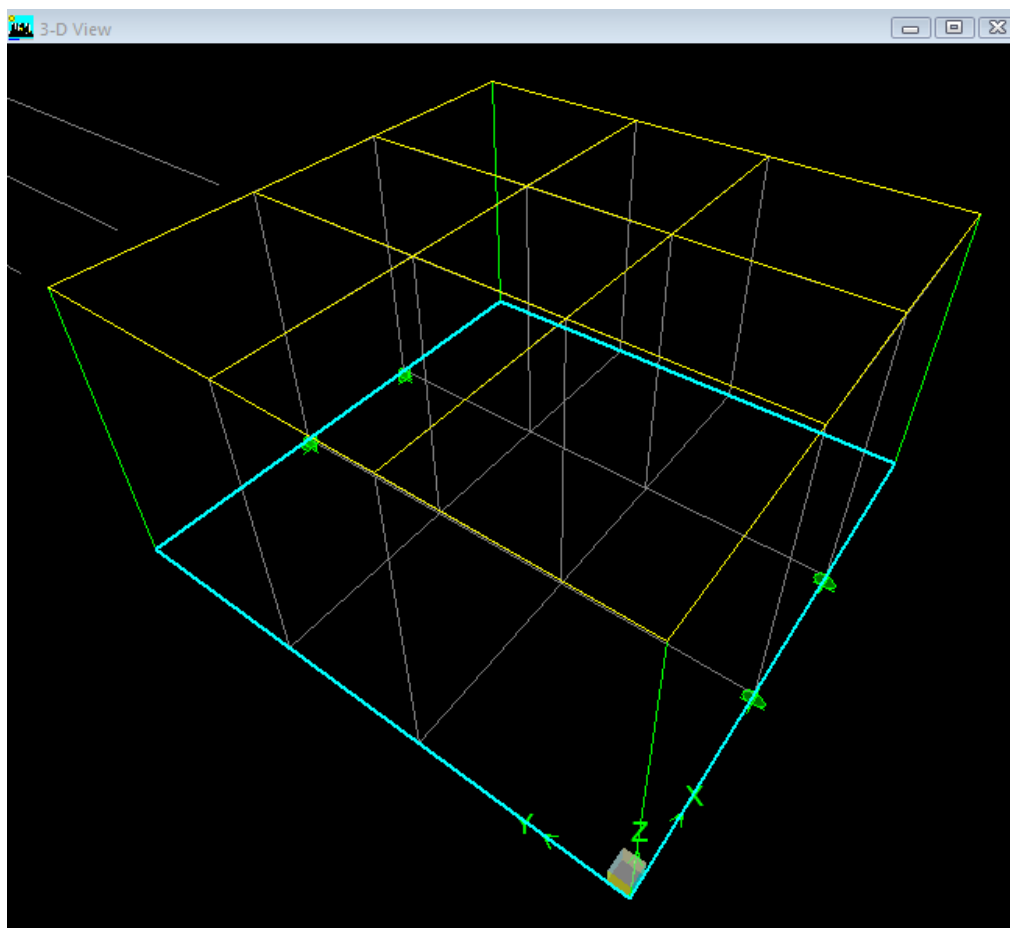
Για την πραγματοποίηση της δεύτερης σειράς πειραμάτων πραγματοποιήθηκαν κάποιες αλλαγές στην αρχική (Σχέδιο 4) συσκευή εξόλκευσης με σκοπό την καλύτερη και ευκολότερη λειτουργία (Σχέδιο 5). Για τη συγκράτηση της ράβδου από το γρύλο χρησιμοποιήθηκε ένα σύστημα κώνου (Εικόνα 36) που σφίγγει τη ράβδο κατά τον εφελκυσμό της χωρίς την ανάγκη χρήσης ροδέλας και παξιμαδιού. Για την πραγματοποίηση των πειραμάτων στα δοκίμια τοιχοποιίας η σχάρα τροποποιήθηκε έτσι ώστε να προσαρμόζεται στην σχετικά ανώμαλη επιφάνεια τους χωρίς την ανάγκη σφηνών και παράλληλα να εξασφαλίζεται η καθετότητά της σε σχέση με την εφελκυσόμενη ράβδο. Η διάταξη και η γεωμετρία της σχάρας φαίνονται στα παραπάνω σχέδια



Εικόνα 36.Κώνος περισφυξης

Πηγή: Προσωπικό αρχείο

Πραγματοποιήθηκε προσομοίωση της συσκευής εξόλκευσης με χρήση truss elements στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων E-Tabs για την εύρεση της ακαμψίας της. Στη συνέχεια η ακαμψία της ελήφθη υπόψη κατά την επεξεργασία των αποτελεσμάτων των δοκιμών αφού αφαιρέθηκε από τα διαγράμματα.



Εικόνα 37. Μοντέλο προσομοίωσης συσκευής εξόλκευσης στο E-TABS

Πηγή : Ιδία επεξεργασία

#### 4.2. 1<sup>η</sup> ΣΕΙΡΑ ΔΟΚΙΜΩΝ

Κατά την πραγματοποίηση των δοκιμών χρησιμοποιήθηκαν ράβδοι τιτανίου και κονίαμα τύπου MasterFlow 980

Τα χαρακτηριστικά του τιτανίου στις ράβδους είναι(Inspection Certificate):

- Τύπος: ASTM B345 GR-2
- Μέτρο Ελαστικότητας: 105 GPa
- Μέγιστη εφελκυστική Αντοχή: 420MPa
- Τάση διαρροής: 300 MPa
- Διάμετρος ράβδου: 10mm
- Μήκος ράβδου: για τα πειράματα 1-9 είναι 0.6m και για το πείραμα 10 είναι 0.8m
- Μήκος κάθε σπειρώματος: 50mm

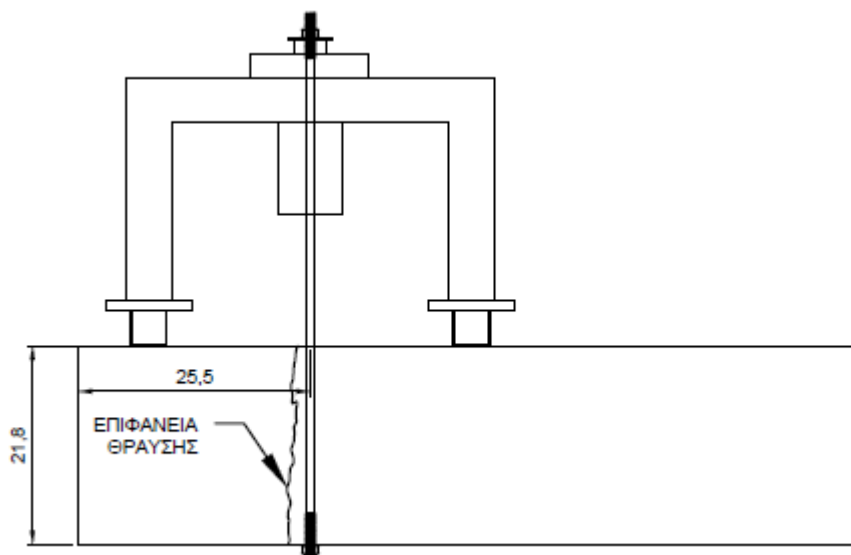
Τα χαρακτηριστικά του κονιάματος που χρησιμοποιήθηκε είναι:

- Τύπος: Emaco MasterFlow 980

- Στατικό μέτρο ελαστικότητας: 30000 Mpa
- Θλιπτική αντοχή: 60 Mpa (μετά από 28 μέρες)
- Αντίσταση σε εξόλκευση μεταλλικών ράβδων > 6 Mpa
- Συνάφεια με υπόστρωμα 2-4 Mpa

#### 4.1.1.ΔΟΚΙΜΗ 1η

Χρησιμοποιήθηκε μάρμαρο τύπου Slageb από το μνημείο, που αφαιρέθηκε προς αντικατάσταση. Η σπή για τη ράβδο τιτανίου διανοίχθηκε κάθετα στα νερά του μαρμάρου. Ο μηχανισμός αστοχίας που καταγράφηκε είναι η ψαθυρή θραύση του μαρμάρου παράλληλη στην μικρή του πλευρά. Η αστοχία δεν επήλθε πάνω στην τρύπα αλλά σε μικρή απόσταση από αυτήν.



Σχέδιο 6. Πλάγια όψη διάταξης  
Πηγή : Ιδία επεξεργασία





Εικόνα 38. Η διάταξη  
Πηγή: Προσωπικό αρχείο



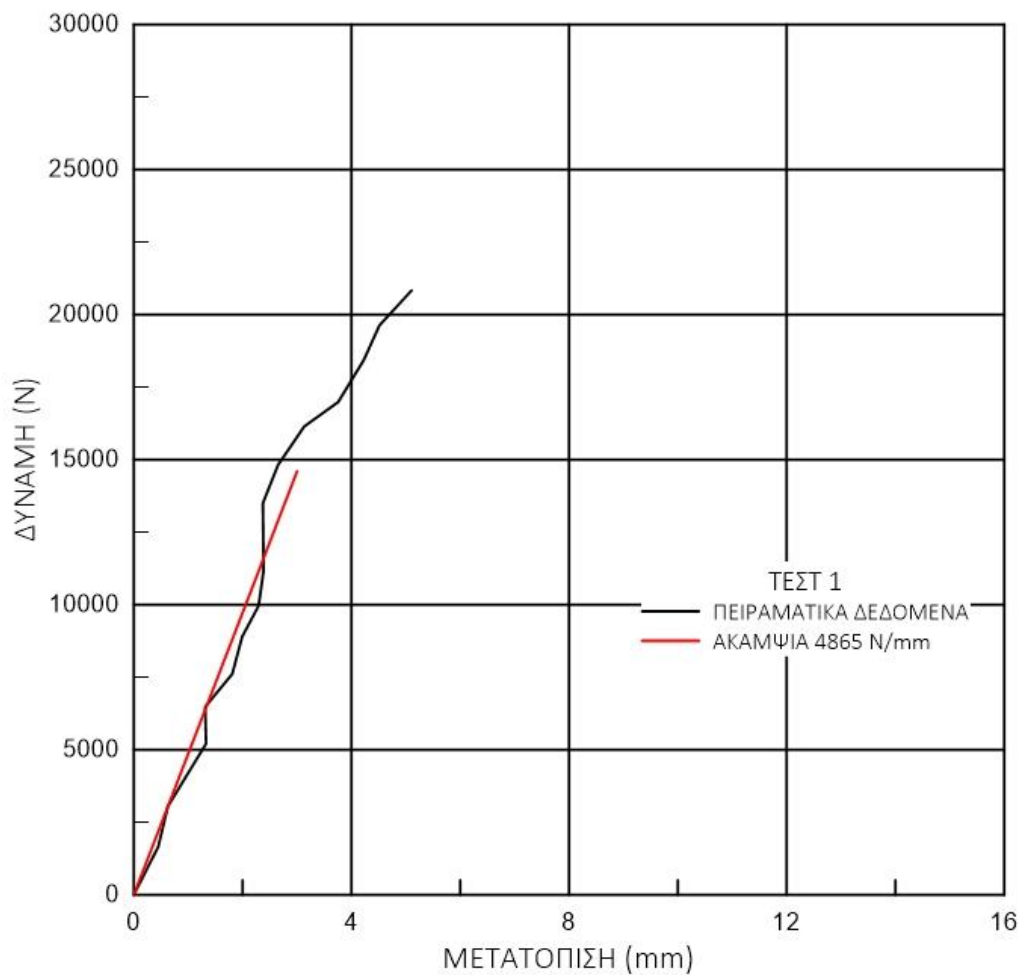
Εικόνα 39. Η διάταξη μετά τη θραύση του μαρμάρου  
Πηγή: Προσωπικό αρχείο



Εικόνα 40. Η επιφάνεια θραύσης του μαρμάρου  
Πηγή: Προσωπικό αρχείο



Εικόνα 41. Πλάγια όψη του θραυσμένου μαρμάρου  
Πηγή: Προσωπικό αρχείο

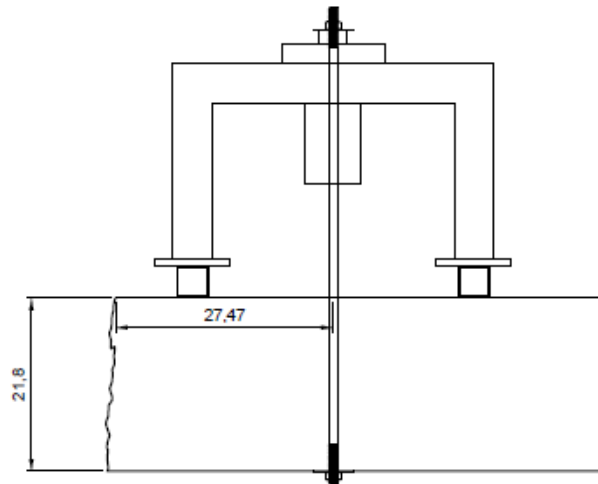


Διάγραμμα 1. Δοκιμή εξόλκευσης ράβδου τιτανίου  $d=10\text{mm}$  αγκυρωμένης σε λίθο τύπου SLAYEB

Πηγή: Ίδια επεξεργασία

#### 4.1.2.ΔΟΚΙΜΗ 2η

Χρησιμοποιήθηκε μάρμαρο τύπου Slageb από το μνημείο, που αφαιρέθηκε προς αντικατάσταση. Η οπή για τη ράβδο τιτανίου διανοίχθηκε κάθετα στα νερά του μαρμάρου με διάμετρο  $\Phi 12\text{mm}$ . Ο μηχανισμός αστοχίας που καταγράφηκε είναι η αστοχία της κοχλιώσεως στην άνω πλευρά της ράβδου.



Σχέδιο 7. Πλάγια όψη διάταξης  
Πηγή: Ιδία επεξεργασία

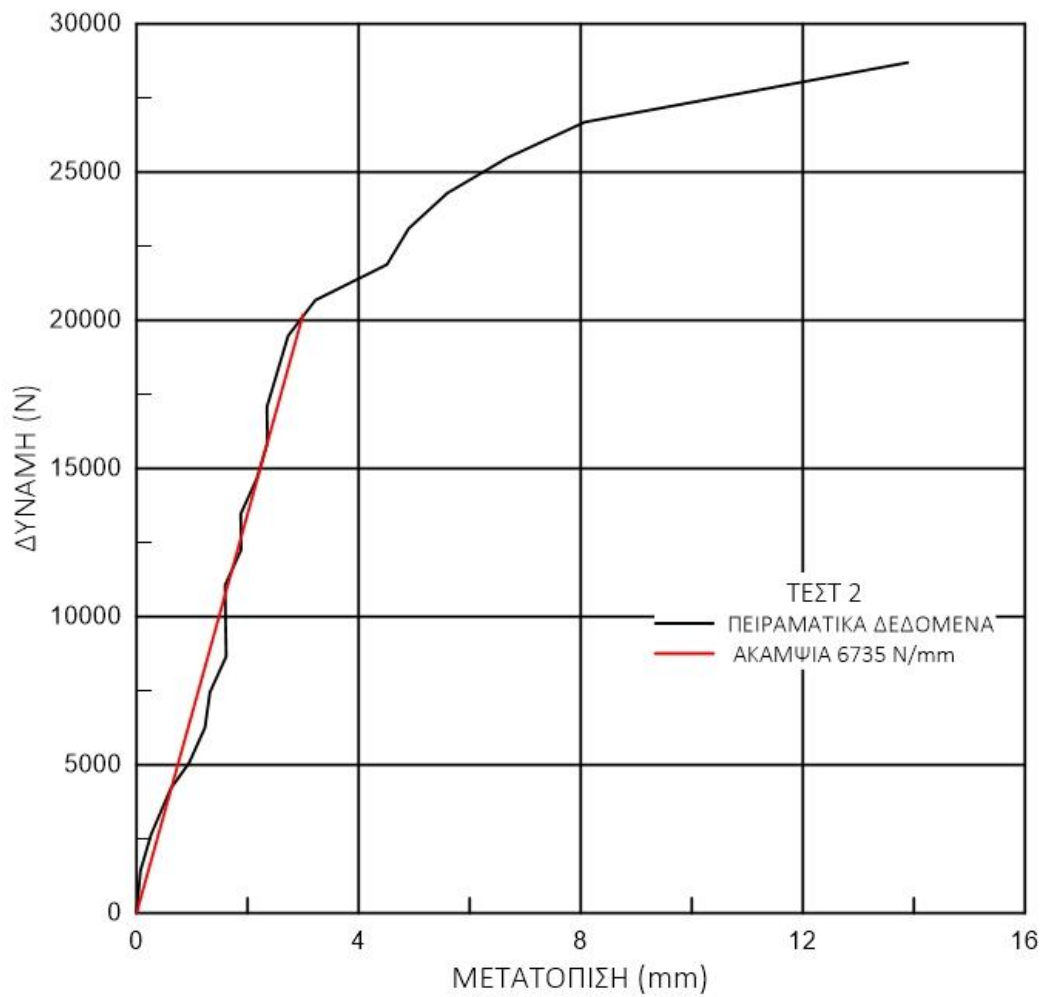


Εικόνα 42. Αστοχία σπειρώματος και περικοχλίου  
Πηγή: Προσωπικό Αρχείου



Εικόνα 43. Διαδικασία διάνοιξης της οπής κάθετα στην επιφάνεια του μαρμάρου

Πηγή: Προσωπικό αρχείο

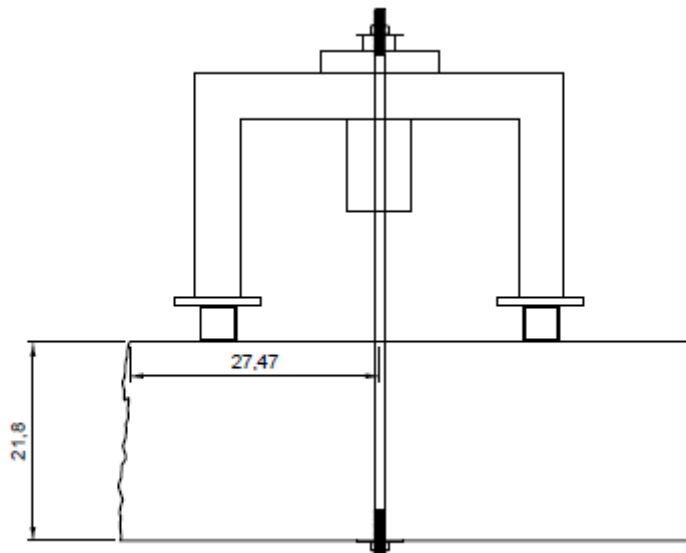


Διάγραμμα 2. Δοκιμή εξόλκεσης ράβδου τιτάνιου  $d=10\text{mm}$  αγκυρωμένης σε λίθο τύπου SLAYEB

Πηγή: Ίδια επεξεργασία

#### 4.1.3.ΔΟΚΙΜΗ 3η

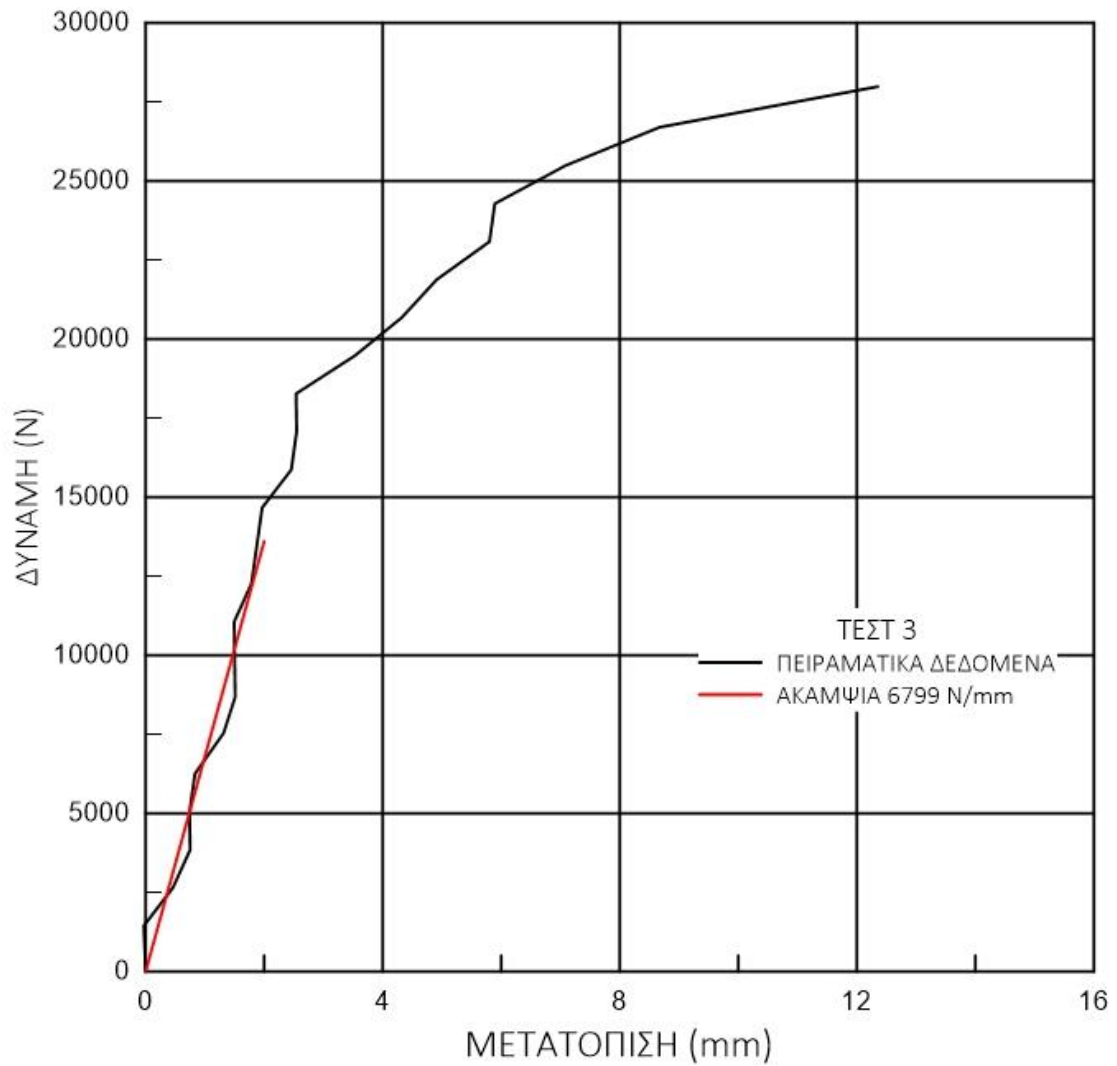
Χρησιμοποιήθηκε μάρμαρο τύπου Slageb από το μνημείο, που αφαιρέθηκε προς αντικατάσταση. Η οπή για τη ράβδο τιτανίου διανοίχθηκε κάθετα στα νερά του μαρμάρου. Ο μηχανισμός αστοχίας που καταγράφηκε είναι η διαρροή της ράβδου τιτανίου στο άνω σπείρωμα.



Σχέδιο 8. Πλάγια όψη διάταξης  
Πηγή: Ιδία επεξεργασία



Εικόνα 44. Διαρροή της ράβδου στο άνω σπείρωμα  
Πηγή: Προσωπικό αρχείο



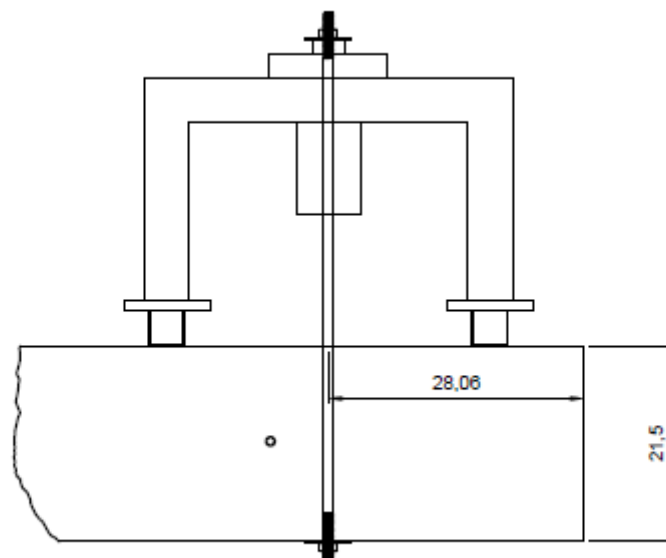
Διάγραμμα 3. Δοκιμή εξόλκευσης ράβδου τιτανίου  $d=10\text{mm}$  αγκυρωμένης σε λίθο τύπου SLAYEB

Πηγή: Ιδία επεξεργασία

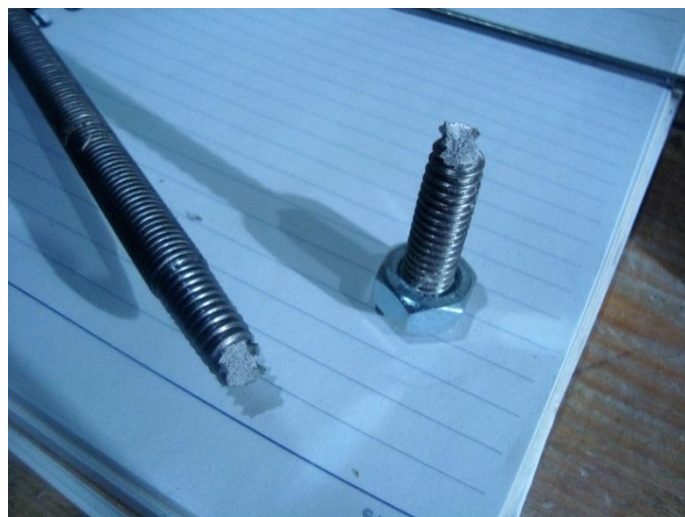


#### 4.1.4.ΔΟΚΙΜΗ 4η

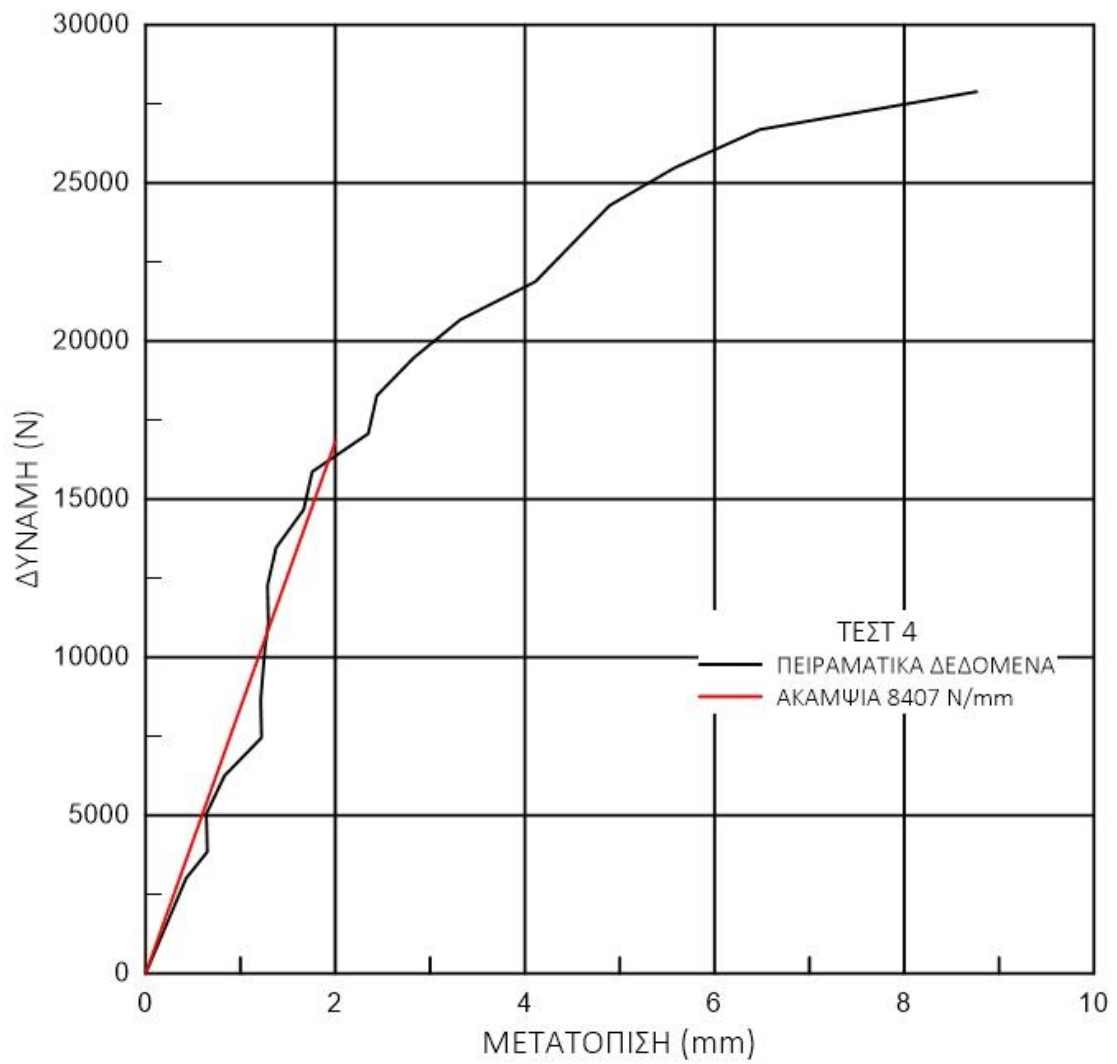
Χρησιμοποιήθηκε μάρμαρο τύπου Slageb από το μνημείο, που αφαιρέθηκε προς αντικατάσταση. Η οπή για τη ράβδο τιτανίου διανοίχθηκε παράλληλα στα νερά του μαρμάρου. Ο μηχανισμός αστοχίας που καταγράφηκε είναι η διαρροή της ράβδου τιτανίου στο κάτω σπείρωμα.



Σχέδιο 9.Πλαγια όψη διάταξης  
Πηγή: Ιδία επεξεργασία



Εικόνα 45. Διαρροή της ράβδου στο κάτω σπείρωμα  
Πηγή: Προσωπικό αρχείο

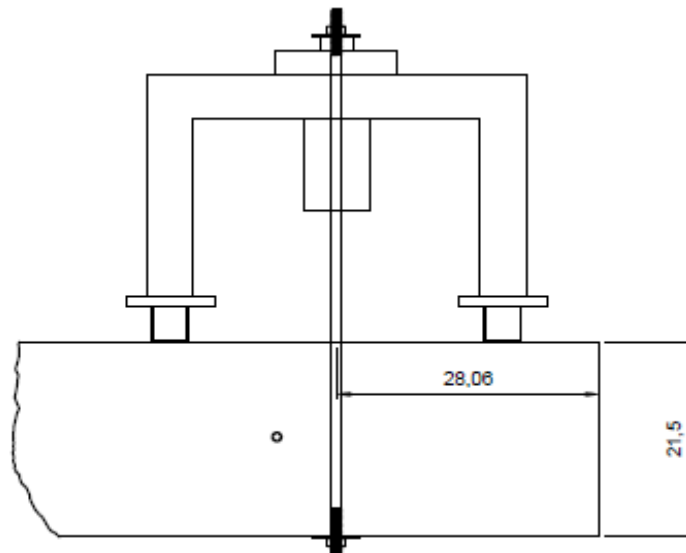


Διάγραμμα 4. Δοκιμή εξόλκευσης ράβδου τιτανίου  $d=10\text{mm}$  αγκυρωμένης σε λίθο τύπου SLAYEB

Πηγή: Ίδια επεξεργασία

#### 4.1.5.ΔΟΚΙΜΗ 5η

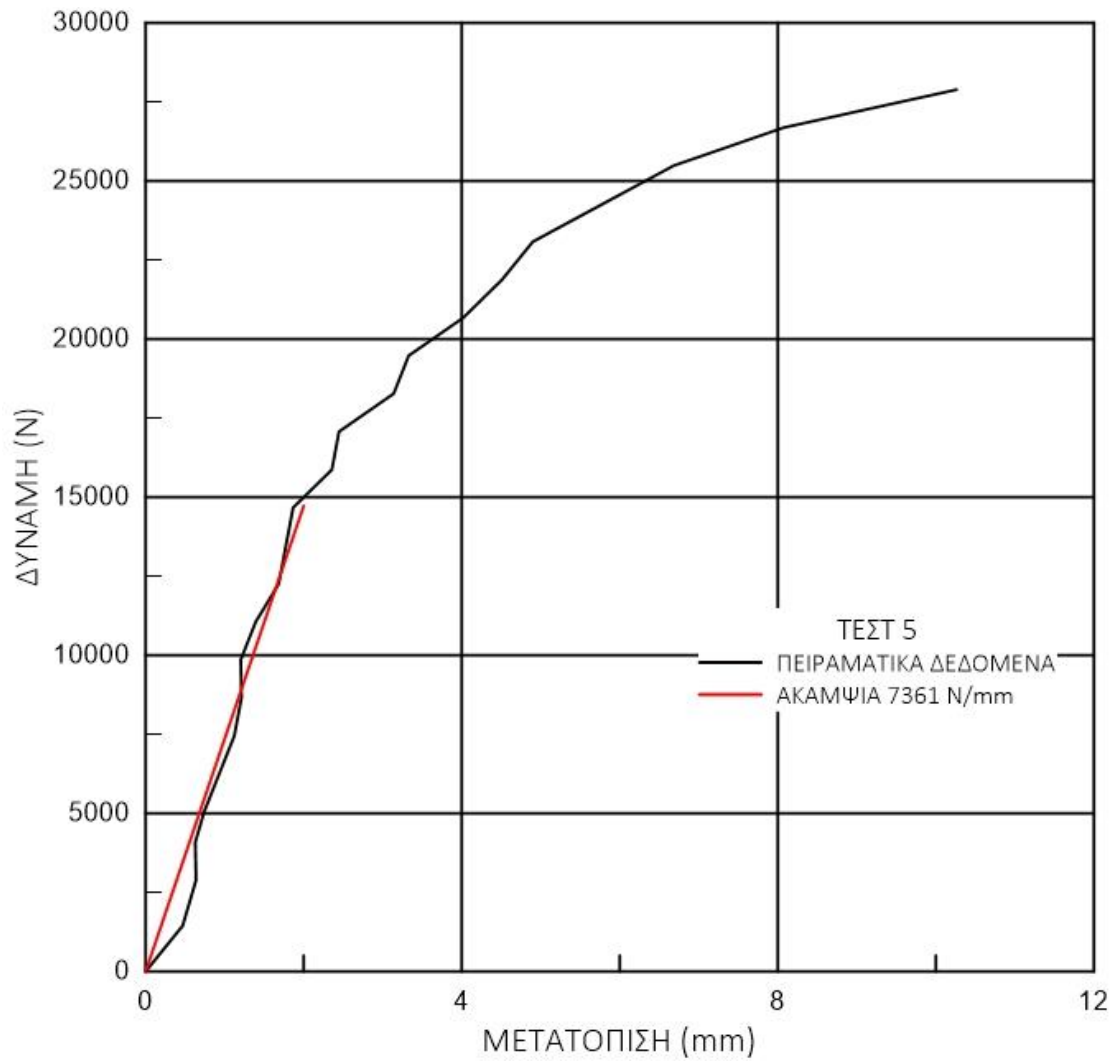
Χρησιμοποιήθηκε μάρμαρο τύπου Slageb από το μνημείο, που αφαιρέθηκε προς αντικατάσταση. Η οπή για τη ράβδο τιτανίου διανοίχθηκε παράλληλα στα νερά του μαρμάρου. Ο μηχανισμός αστοχίας που καταγράφηκε είναι η διαρροή της ράβδου τιτανίου στο κάτω σπείρωμα.



Σχέδιο 10. Πλάγια όψη διάταξης  
Πηγή: Ίδια επεξεργασία



Εικόνα 46. Διαρροή της ράβδου στο κάτω σπείρωμα  
Πηγή: Προσωπικό αρχείο

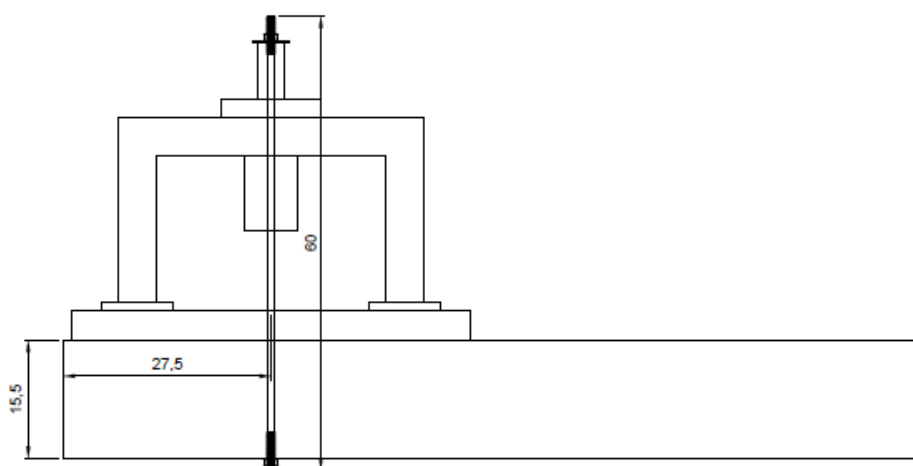


Διάγραμμα 5. Δοκιμή εξόλκευσης ράβδου τιτανίου  $d=10\text{mm}$  αγκυρωμένης σε λίθο τύπου SLAYEB

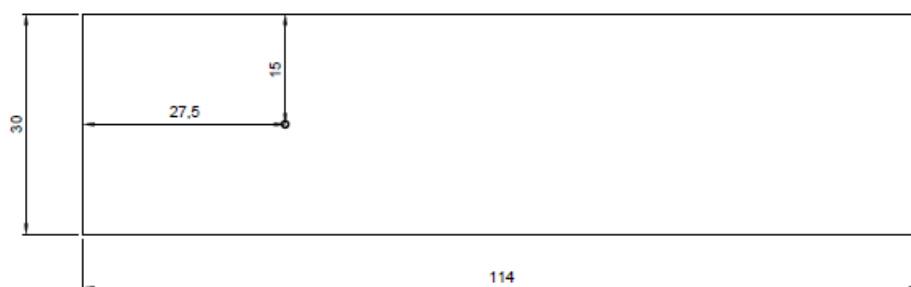
Πηγή: Ίδια επεξεργασία

#### 4.1.6.ΔΟΚΙΜΗ 6η

Χρησιμοποιήθηκε νέο μάρμαρο τύπου Slayeb που θα χρησιμοποιηθεί προς αντικατάσταση των παλαιών. Η οπή για τη ράβδο τιτανίου διανοίχθηκε διαγώνια στα νερά του μαρμάρου. Ο μηχανισμός που καταγράφηκε είναι η αστοχία του σπειρώματος τιτανίου-χάλυβα στην άνω κοχλίωση.



Σχέδιο 11. Πλάγια όψη διάταξης  
Πηγή: Ιδία επεξεργασία



Σχέδιο 12. Κάτοψη νέου SLAYEB και θέση οπής  
Πηγή: Ιδία επεξεργασία

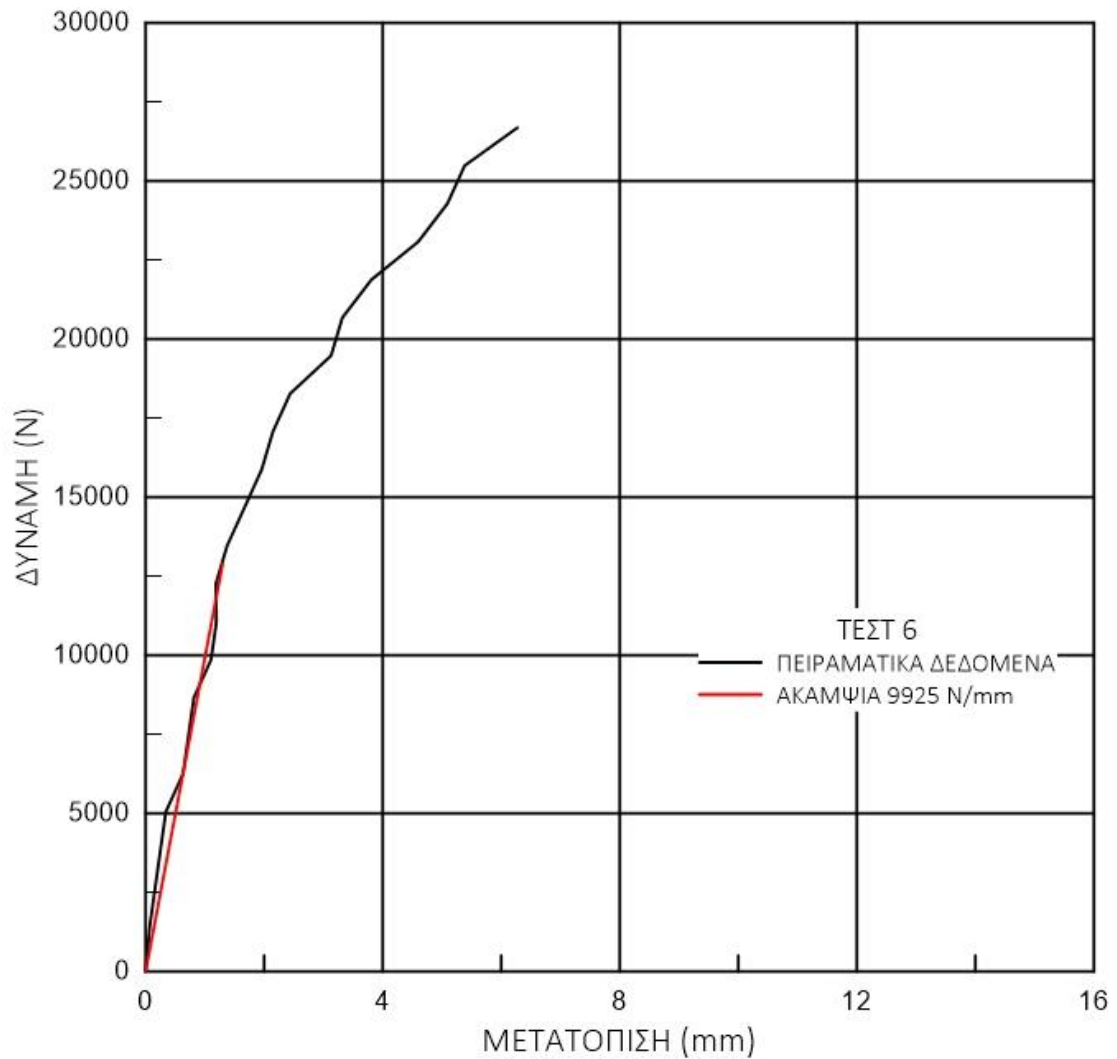


Εικόνα 47. Αστοχία του άνω σπειρώματος στη ράβδο  
Πηγή: Προσωπικό αρχείο



Εικόνα 48. Αστοχία του άνω σπειρώματος στη ράβδο  
Πηγή: Προσωπικό αρχείο



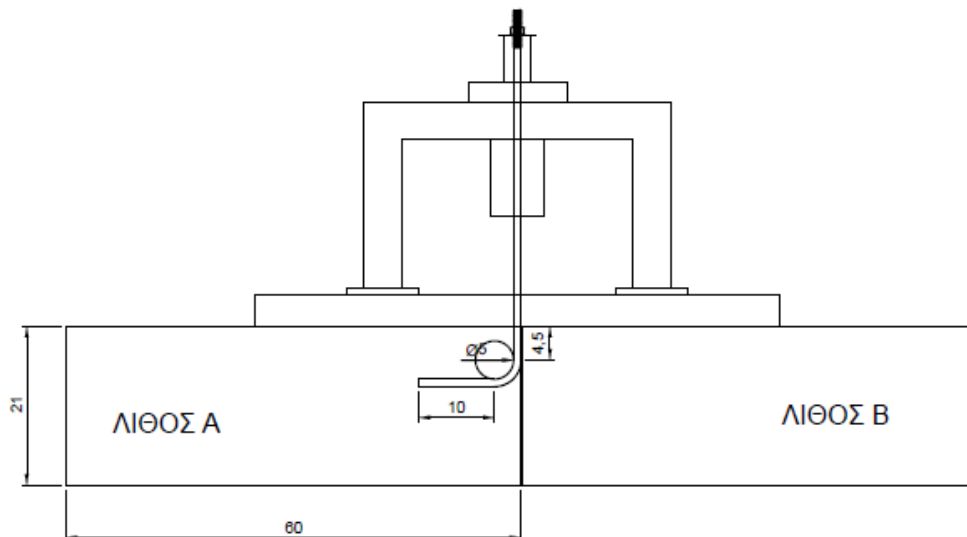


Διάγραμμα 6. Δοκιμή εξόλκευσης ράβδου τιτανίου  $D=10\text{mm}$  αγκυρωμένης σε λίθο τύπου SLAYEB

Πηγή: Ίδια επεξεργασία

#### 4.1.7.ΔΟΚΙΜΗ 7η

Χρησιμοποιήθηκε νέος λίθος τύπου Mizzy που θα χρησιμοποιηθεί προς αντικατάσταση των παλαιών. Η οπή για τη ράβδο τιτανίου διανοίχθηκε διαγώνια στα νερά του μαρμάρου. Αγκύρωση στη μεγάλη πλευρά. Ο μηχανισμός αστοχίας που καταγράφηκε είναι η ολίσθηση της ράβδου τιτανίου εντός της αγκύρωσής της στο λίθο.



Σχέδιο 13. Πλάγια όψη διάταξης  
Πηγή: Ιδία επεξεργασία



Εικόνα 49. Η διάταξη  
Πηγή: Προσωπικό αρχείο



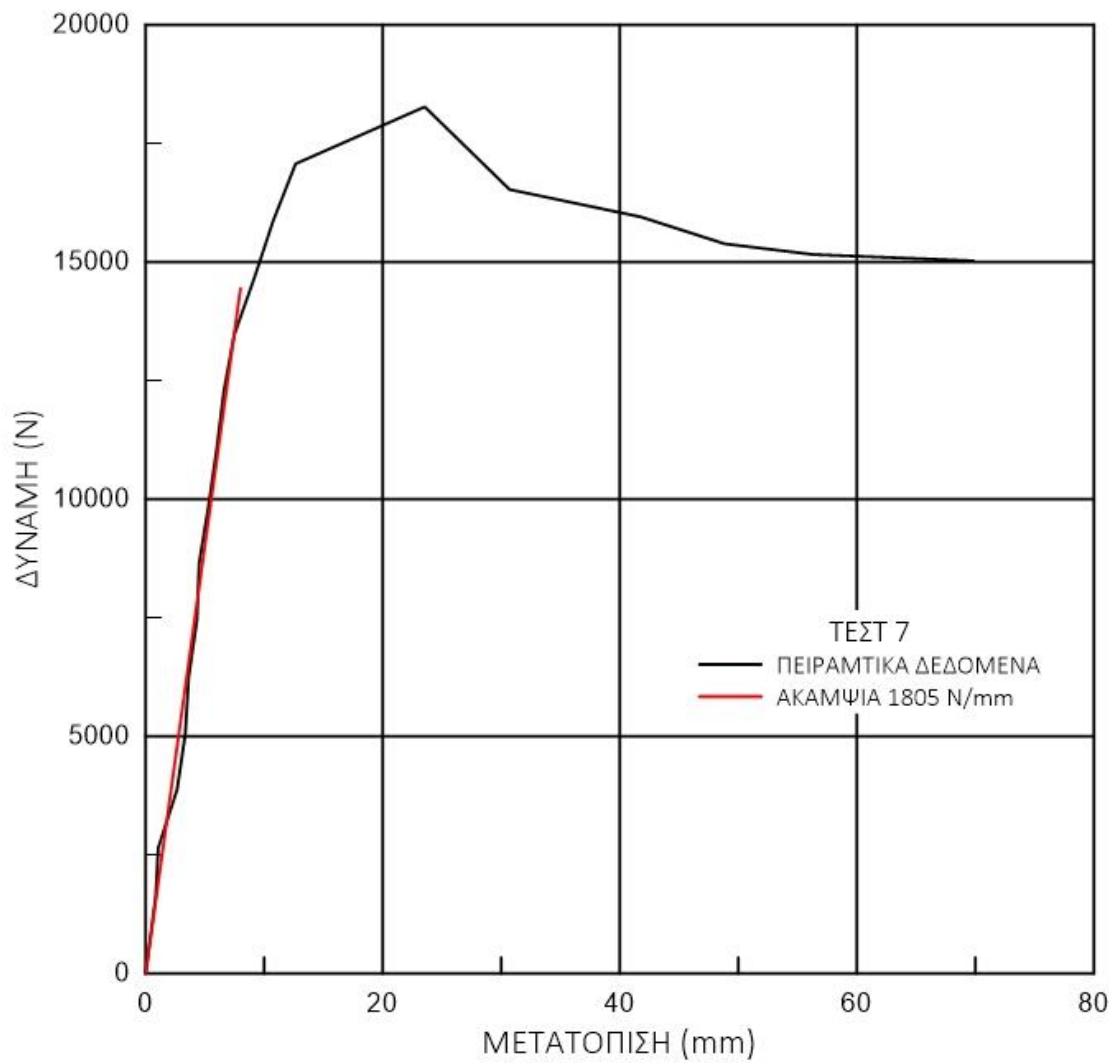
Εικόνα 50. Η μορφή της ράβδου μετά την εξόλκευση  
Πηγή: Προσωπικό αρχείο



Εικόνα 51. Η οπή αγκύρωσης με άντυγα 4,5 cm, βάθος 10cm  
Πηγή: Προσωπικό αρχείο



Εικόνα 52. Το λούκι αγκύρωσης με άντυγα 4,5 cm

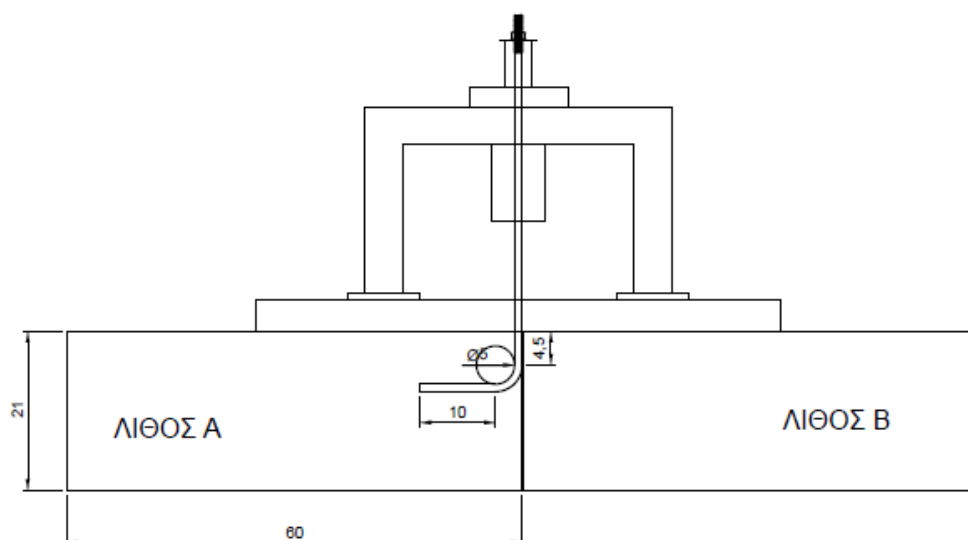


Διάγραμμα 7. Δοκιμή εξόλκευσης ράβδου τιτανίου d=10mm αγκυρωμένη σε λίθο MIZZY

Πηγή: Ιδία επεξεργασία

#### 4.1.8.ΔΟΚΙΜΗ 8η

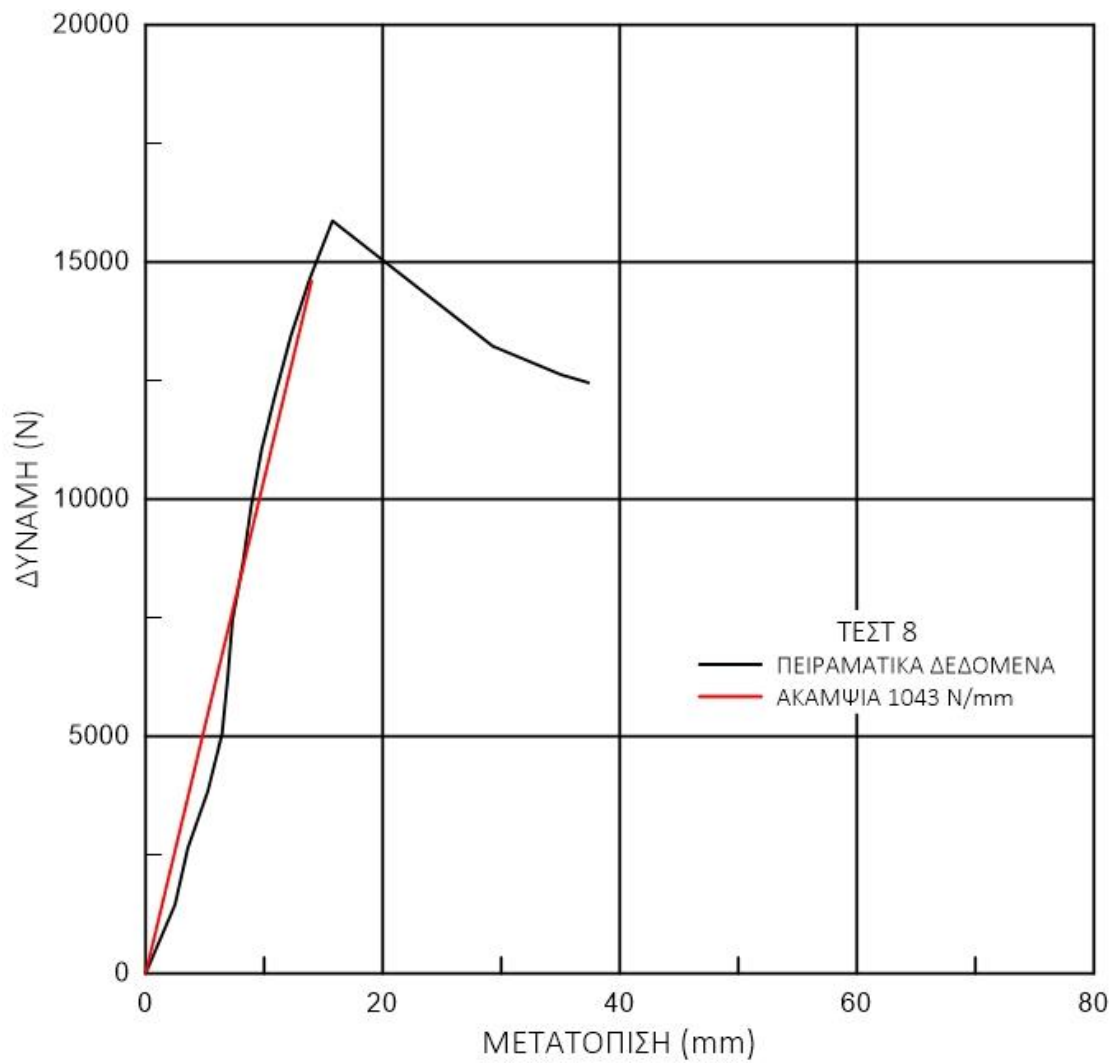
Χρησιμοποιήθηκε νέος λίθος τύπου Mizzy που θα χρησιμοποιηθεί προς αντικατάσταση των παλαιών. Η οπή για τη ράβδο τιτανίου διανοίχθηκε διαγώνια στα νερά του μαρμάρου. Αγκύρωση στη μεγάλη πλευρά. Ο μηχανισμός αστοχίας που καταγράφηκε είναι η ολίσθηση της ράβδου τιτανίου εντός της αγκύρωσης της στο λίθο.



Σχέδιο 14.Πλάγια όψη διάταξης  
Πηγή: Ίδια επεξεργασία



Εικόνα 53. Η οπή αγκύρωσης



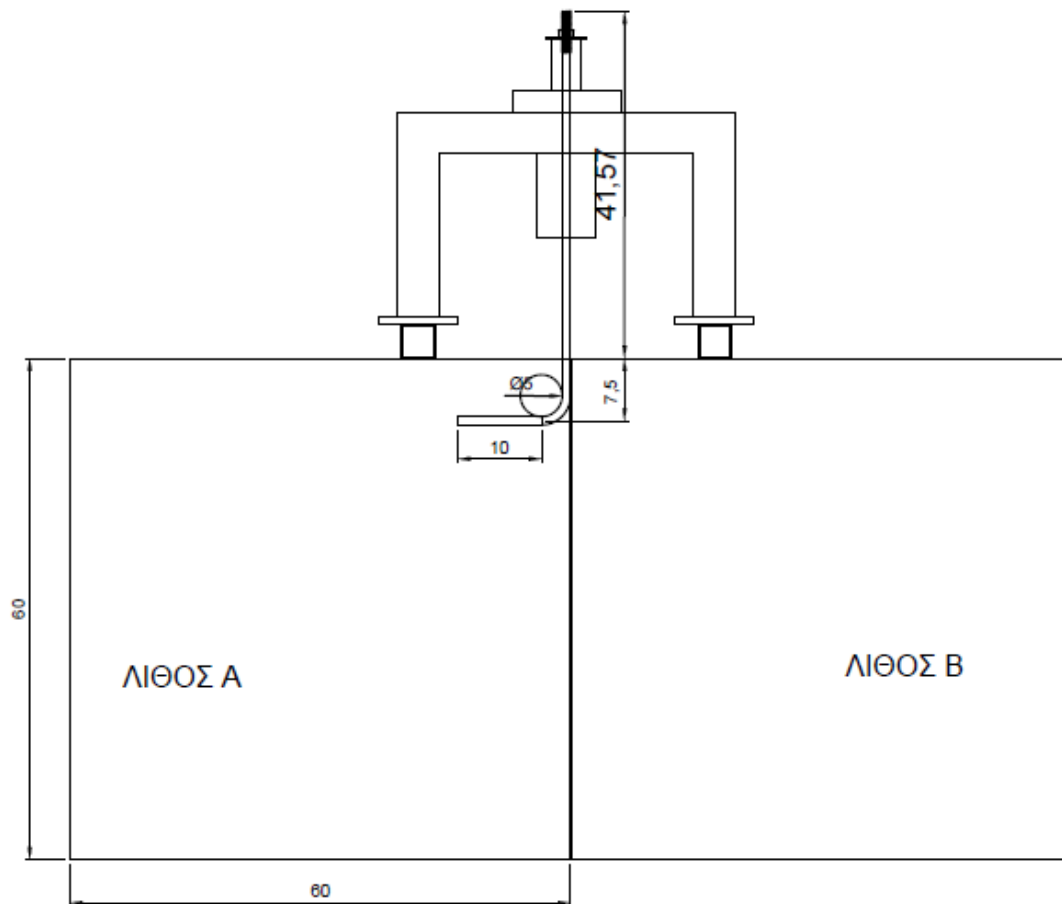
Διάγραμμα 8. Δοκιμή εξόλκευσης ράβδου τιτανίου  $d=10\text{mm}$  αγκυρωμένη σε λίθο MIZZY,

Πηγή: Ίδια επεξεργασία



#### 4.1.9.ΔΟΚΙΜΗ 9η

Χρησιμοποιήθηκε νέος λίθος τύπου Mizzy που θα χρησιμοποιηθεί προς αντικατάσταση των παλαιών. Η οπή για τη ράβδο τιτανίου διανοίχθηκε διαγώνια στα νερά του μαρμάρου. Αγκύρωση στη μικρή πλευρά. Ο μηχανισμός αστοχίας που καταγράφηκε είναι η ολίσθηση της ράβδου τιτανίου εντός της αγκύρωσής της στο λίθο.



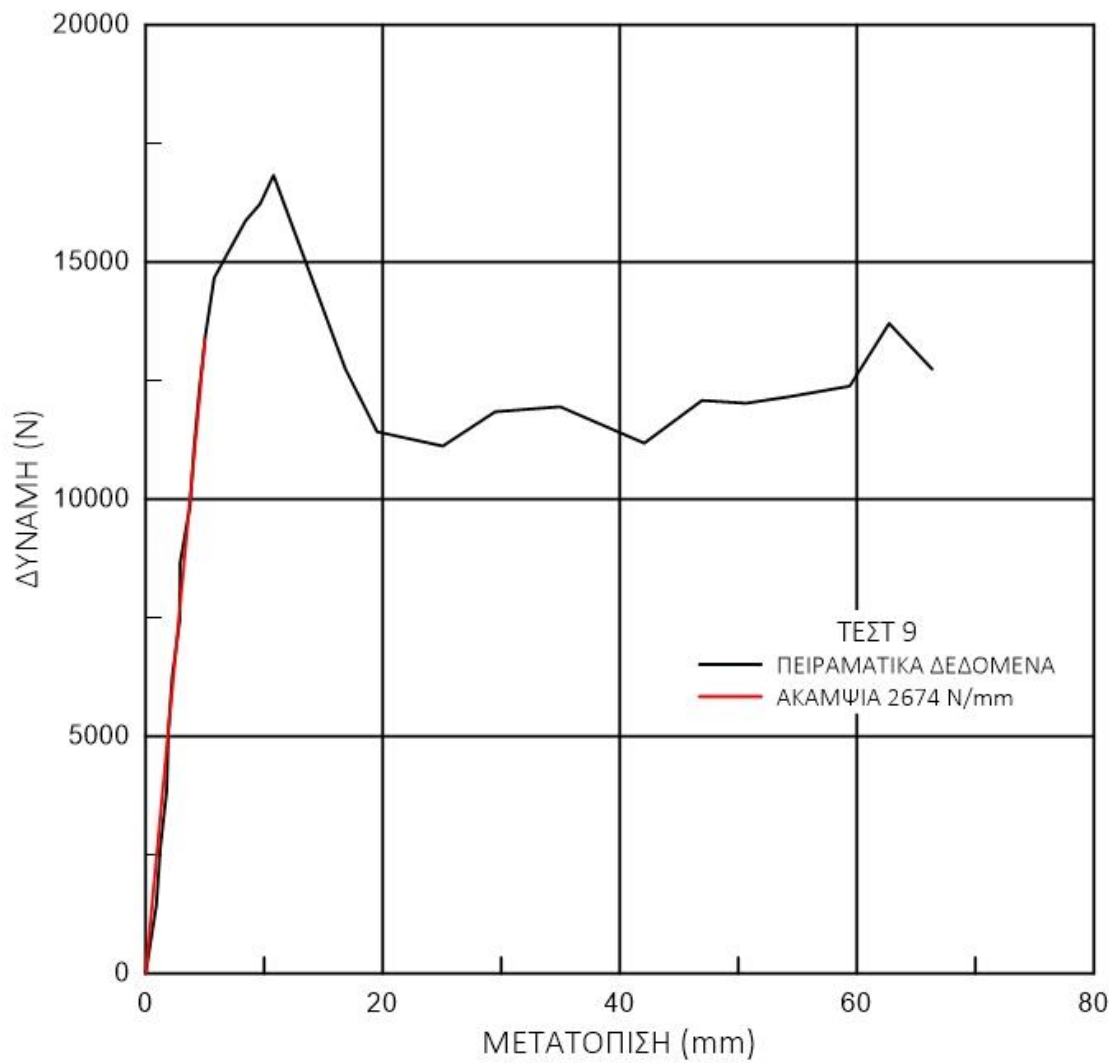
Σχέδιο 15.Πλάγια όψη διάταξης  
Πηγή: Ιδία επεξεργασία



Εικόνα 54. Η διάταξη  
Πηγή: Προσωπικό αρχείο



Εικόνα 55. Η μορφή της ράβδου μετά την εξόλκευση  
Πηγή: Προσωπικό αρχείο

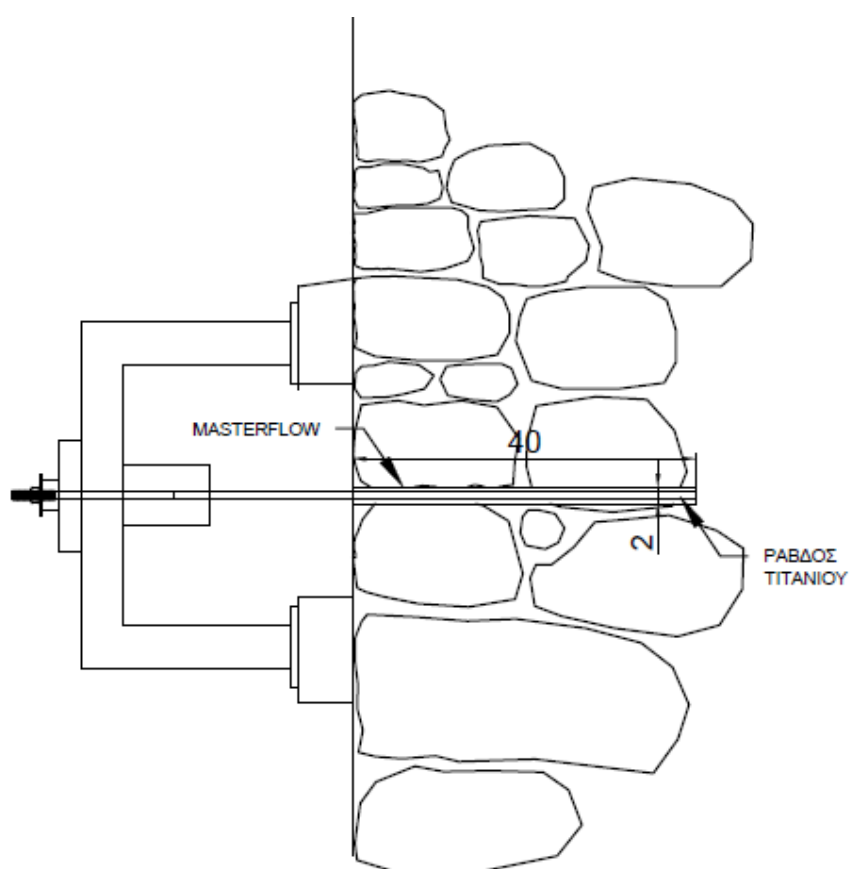


Διάγραμμα 9. Δοκιμή εξόλκευσης ράβδου τιτανίου  $d=10\text{mm}$  αγκυρωμένη σε λίθο MIZZY

Πηγή: Ιδία επεξεργασία

#### 4.1.10.ΔΟΚΙΜΗ 10η

Η δοκιμή αυτή εξόλκευσης πραγματοποιήθηκε επί της τοιχοποιίας σε σημείο εμφανούς αρμού στο φάτνωμα N1 και σε ύψος 1m από το εσωτερικό δάπεδο. Διανοίχθηκε οπή στην τοιχοποιία διαμέτρου 20mm και βάθους 400mm. Το κονίαμα που επιλέχθηκε είναι τύπου MasterFlow. Για την αύξηση των ρεοντολογικών του χαρακτηριστικών έγινε κοσκίνισμα των αδρανών του με κόσκινο διαμέτρου 3mm. Τοποθετήθηκε κεντρικά η ράβδος τιτανίου και εισπιέστηκε κονίαμα τύπου MasterFlow με χειροκίνητη συσκευή. Ο χρόνος ωρίμανσης του κονιάματος όταν πραγματοποιήθηκε η δοκιμή ήταν 24 ώρες. Ο μηχανισμός αστοχίας που καταγράφηκε είναι η ολίσθηση της ράβδου επί του κονιάματος MasterFlow.



Σχέδιο 16. Η Διάταξη  
Πηγή: Ιδία επεξεργασία

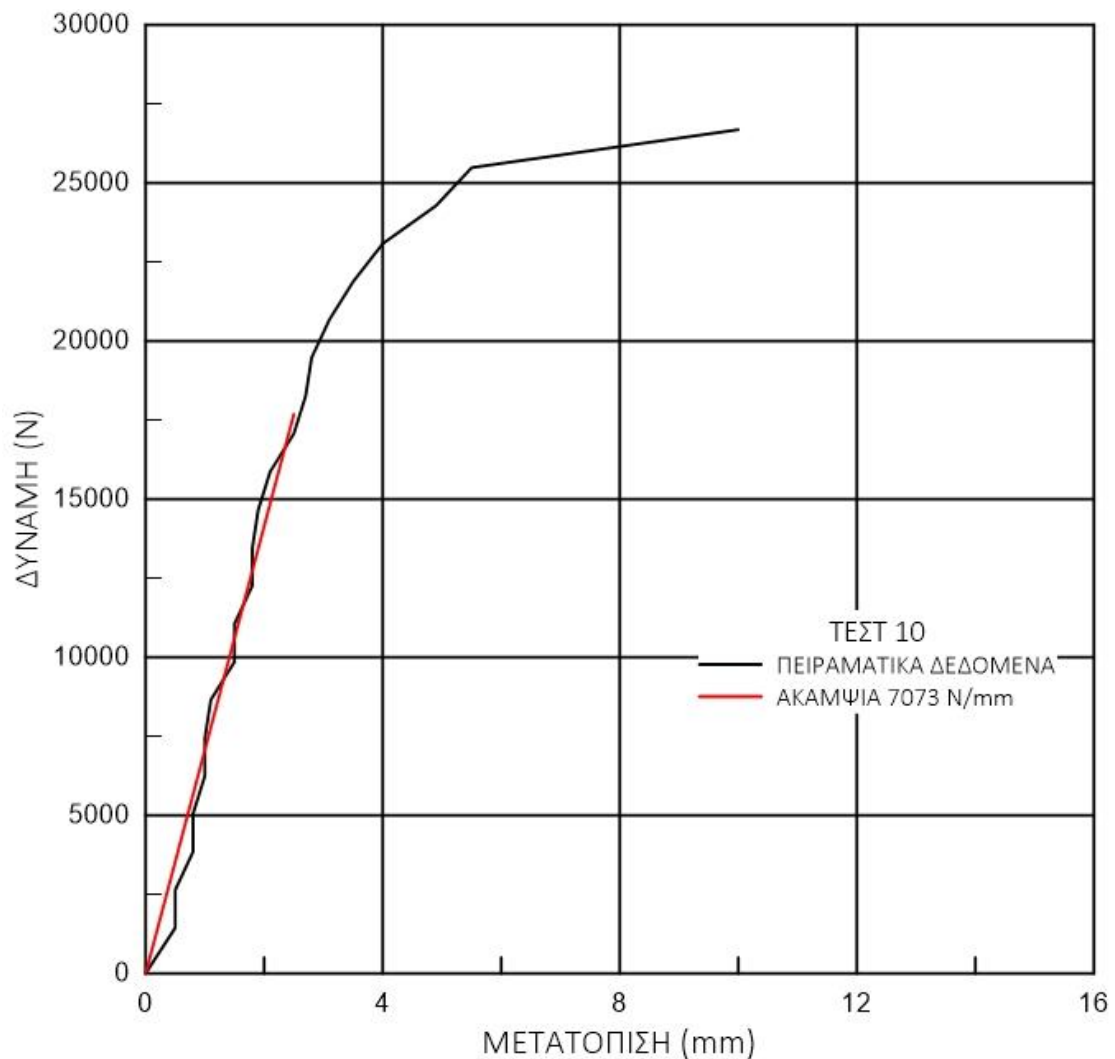


Εικόνα 56. Η διάταξη  
Πηγή: Προσωπικό αρχείο



Εικόνα 57. Ολίσθηση της ράβδου επί του MASTERFLOW 980 και μερική αποκόλληση  
του MASTERFLOW 980 από την τοιχοποιία  
Πηγή: Προσωπικό αρχείο





Διάγραμμα 10. Δοκιμή εξόλκευσης ράβδου τιτανίου D=10mm ενσωματωμένη στην τοιχοποιία

Πηγή: Ίδια επεξεργασία

#### 4.1.11. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΑΚΑΜΨΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

Στο υποκεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται το μέτρο ελαστικότητας του μαρμάρου με βάση τα αποτελέσματα των πειραμάτων της πρώτης σειράς.

Εύρεση μέτρου ελαστικότητας παλαιού μαρμάρου Slayeb κάθετα στα νερά του από τις δοκιμές 2,3 :

Αρχικά γίνεται η θεώρηση πως αυτά τα μέλη του συστήματος ράβδου-σπειρωμάτων-μαρμάρου συμπεριφέρονται ως ελατήρια εν σειρά. Επομένως:

$$\frac{1}{K_{tot}} = \frac{1}{K_{bar}} + \frac{2}{K_{thread}} + \frac{1}{K_{marble}}$$

- Από τα διαγράμματα Δύναμης-Μετατόπισης προκύπτει η μέση ακαμψία του συστήματος ράβδου-σπειρωμάτων-μαρμάρου

$$K_{tot} = \frac{6735+6799}{2} = 6767\text{N/mm}$$

- Προσδιορίζουμε την ακαμψία του κορμού της ράβδου τιτανίου:

Το  $K_{bar}$  είναι γνωστό από τη σχέση  $K_{bar} = \frac{EA}{L}$ ,

όπου τα  $E, A, L$  γνωστά,

$E=105\text{GPa}$

$$A = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi 0.1^2}{4} = 7,85 \times 10^{-5} \text{m}^2$$

Το μήκος του κορμού της ράβδου θα είναι το ολικό της μήκος μείον το μήκος των σπειρωμάτων

$$L = 0.6 - 2 \times 0.05 = 0.5\text{m}$$

Επομένως  $K_{bar} = \frac{EA}{L} = 16485\text{N/mm}$

- Προσδιορίζουμε την ακαμψία του ενός σπειρώματος:

Το  $K_{thread}$  είναι γνωστό από τη σχέση  $K_{thread} = \frac{EA}{L}$ ,

όπου τα  $E, A, L$  γνωστά,

$E=105\text{GPa}$

$$A_t = \frac{\pi}{4} (D - 0.938194p)^2 = 57,99 \times 10^{-6} \text{m}^2$$

$$L = 0.05\text{m}$$

Επομένως  $K_{thread} = \frac{EA}{L} = 121780\text{N/mm}$

Από τον τύπο:

$$\frac{1}{K_{marble}} = \frac{1}{K_{tot}} - \frac{2}{K_{thread}} - \frac{1}{K_{bar}}$$

Προκύπτει  $K_{marble} = 14145,93 \text{N/mm}$

Από τον τύπο:

$$K_{marble} = \frac{0,5774\pi d E_{marble}}{2 \ln \left( 5 \frac{0,5774l + 0,5d}{0,5774l + 2,5d} \right)} =$$



$$E_{marble} = \frac{2 \ln \left( 5 \frac{0.5774l + 0.5d}{0.5774l + 2.5d} \right) K_{marble}}{0,5775\pi d}$$

Προκύπτει λοιπόν το  $E_{marble} = 2288,4 \text{ MPa}$

Εύρεση μέτρου ελαστικότητας παλαιού μαρμάρου Slayeb παράλληλα στα νερά του από τις δοκιμές 4,5 :

Αρχικά γίνεται η θεώρηση πως αυτά τα μέλη του συστήματος ράβδου-σπειρωμάτων-μαρμάρου συμπεριφέρονται ως ελατήρια εν σειρά. Επομένως

$$\frac{1}{K_{tot}} = \frac{1}{K_{bar}} + \frac{2}{K_{thread}} + \frac{1}{K_{marble}}$$

- Από τα διαγράμματα Δύναμης-Μετατόπισης προκύπτει η μέση ακαμψία του συστήματος ράβδου-σπειρωμάτων-μαρμάρου

$$K_{tot} = \frac{8407 + 7361}{2} = 7884 \text{ N/mm}$$

- Προσδιορίζουμε την ακαμψία του κορμού της ράβδου τιτανίου:

Το  $K_{bar}$  είναι γνωστό από τη σχέση  $K_{bar} = \frac{EA}{L}$ ,

όπου τα  $E, A, L$  γνωστά,

$E = 105 \text{ GPa}$

$$A = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi 0.1^2}{4} = 7,85 \times 10^{-5} \text{ m}^2$$

Το μήκος του κορμού της ράβδου θα είναι το ολικό της μήκος μείον το μήκος των σπειρωμάτων

$$L = 0.6 - 2 \times 0.05 = 0.5 \text{ m}$$

Επομένως  $K_{bar} = \frac{EA}{L} = 16485 \text{ N/mm}$

- Προσδιορίζουμε την ακαμψία του ενός σπειρώματος:

Το  $K_{thread}$  είναι γνωστό από τη σχέση  $K_{thread} = \frac{EA}{L}$ ,

όπου τα  $E, A, L$  γνωστά,

$E = 105 \text{ GPa}$

$$A_t = \frac{\pi}{4} (D - 0.938194p)^2 = 57,99 \times 10^{-6} \text{ m}^2$$

$$L = 0.05 \text{ m}$$

Επομένως  $K_{thread} = \frac{EA}{L} = 121780 \text{ N/mm}$

Από τον τύπο:

$$\frac{1}{K_{marble}} = \frac{1}{K_{tot}} - \frac{2}{K_{thread}} - \frac{1}{K_{bar}}$$

Προκύπτει  $K_{marble}=20058,52\text{N/mm}$

Από τον τύπο

$$:K_{marble} = \frac{0,5774\pi d E_{marble}}{2\ln\left(\frac{5 \cdot 0,5774 l + 0,5d}{0,5774 l + 2,5d}\right)} =$$

$$E_{marble} = \frac{2\ln\left(\frac{5 \cdot 0,5774 l + 0,5d}{0,5774 l + 2,5d}\right) K_{marble}}{0,5775\pi d}$$

Προκύπτει λοιπόν το  $E_{marble}=3247,42\text{MPa}$

Εύρεση μέτρου ελαστικότητας νέου μαρμάρου Slayeb από τη δοκιμή6 :

Αρχικά γίνεται η θεώρηση πως αυτά τα μέλη του συστήματος ράβδου-σπειρωμάτων-μαρμάρου συμπεριφέρονται ως ελατήρια εν σειρά. Επομένως

$$\frac{1}{K_{tot}} = \frac{1}{K_{bar}} + \frac{2}{K_{thread}} + \frac{1}{K_{marble}}$$

- Από το διάγραμμα Δύναμης-Μετατόπισης προκύπτει η ακαμψία του συστήματος ράβδου-σπειρωμάτων-μαρμάρου  $K_{tot}=9925\text{ N/mm}$
- Προσδιορίζουμε την ακαμψία του κορμού της ράβδου τιτανίου:

Το  $K_{bar}$ μας είναι γνωστό από τη σχέση  $K_{bar} = \frac{EA}{L}$ ,

όπου τα  $E, A, L$  γνωστά,

$E=105\text{GPa}$

$$A = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi 0,1^2}{4} = 7,85 \times 10^{-5} \text{m}^2$$

Το μήκος του κορμού της ράβδου θα είναι το ολικό της μήκος μείον το μήκος των σπειρωμάτων

$$L = 0,6 - 2 \times 0,05 = 0,5\text{m}$$

Επομένως  $K_{bar} = 16485\text{N/mm}$

- Προσδιορίζουμε την ακαμψία του ενός σπειρώματος:

Το  $K_{thread}$  είναι γνωστό από τη σχέση  $K_{thread} = \frac{EA}{L}$ ,

όπου τα  $E, A, L$  γνωστά,

$E=105\text{GPa}$

$$A_t = \frac{\pi}{4} (D - 0.938194p)^2 = 57,99 \times 10^{-6} \text{m}^2$$

$$L = 0.05 \text{m}$$

Επομένως  $K_{thread} = 121780 \text{N/mm}$

Από τον τύπο:

$$\frac{1}{K_{marble}} = \frac{1}{K_{tot}} - \frac{2}{K_{thread}} - \frac{1}{K_{bar}}$$

Προκύπτει  $K_{marble} = 42245 \text{ N/mm}$

Από τον τύπο:

$$K_{marble} = \frac{0,5774\pi d E_{marble}}{2 \ln \left( 5 \frac{0,5774l + 0,5d}{0,5774l + 2,5d} \right)}$$

$$E_{marble} = \frac{2 \ln \left( 5 \frac{0,5774l + 0,5d}{0,5774l + 2,5d} \right) K_{marble}}{0,5775\pi d}$$

Προκύπτει λοιπόν το  $E_{marble} = 6621,7 \text{MPa}$

Εύρεση ακαμψίας αγκύρωσης σε λίθο Mizzy στη μεγάλη πλευρά από τις δοκιμές 7,8 :

Αρχικά γίνεται η θεώρηση πως αυτά τα μέλη του συστήματος ράβδου-σπειρωμάτων-μαρμάρου συμπεριφέρονται ως ελατήρια εν σειρά. Επομένως:

$$\frac{1}{K_{tot}} = \frac{1}{K_{bar}} + \frac{1}{K_{thread}} + \frac{1}{K_{anch}}$$

- Από τα διαγράμματα Δύναμης-Μετατόπισης προκύπτει η μέση ακαμψία του συστήματος ράβδου-σπειρωμάτων-μαρμάρου

$$K_{tot} = \frac{1805 + 1043}{2} = 1424 \text{N/mm}$$

- Προσδιορίζουμε την ακαμψία του κορμού της ράβδου τιτανίου:

Το  $K_{bar}$  είναι γνωστό από τη σχέση  $K_{bar} = \frac{EA}{L}$ ,

όπου τα  $E, A, L$  γνωστά,

$E=105\text{GPa}$

$$A = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi 0.1^2}{4} = 7,85 \times 10^{-5} m^2$$

Το μήκος της ράβδου που λαμβάνεται εδώ υπόψη είναι αυτό του κορμού έξω από το λίθο συν το συννευθιακό του τμήμα μέσα στο λίθο  $L = 0.3618 + 0.045 = 0.407m$

Επομένως  $K_{bar} = 22781,9\text{N/mm}$

- Προσδιορίζουμε την ακαμψία του ενός σπειρώματος:

Το  $K_{thread}$  μας είναι γνωστό από τη σχέση  $K_{thread} = \frac{EA}{L}$ ,

όπου τα  $E, A, L$  γνωστά,

$E=105\text{GPa}$

$$A_t = \frac{\pi}{4} (D - 0.938194p)^2 = 57,99 \times 10^{-6} m^2$$

$$L = 0.05m$$

Επομένως  $K_{thread} = 121780\text{N/mm}$

Από τον τύπο:

$$\frac{1}{K_{tot}} = \frac{1}{K_{bar}} + \frac{1}{K_{thread}} + \frac{1}{K_{anchor}}$$

Προκύπτει  $K_{anchor} = 1538\text{ N/m}$

Εύρεση ακαμψίας αγκύρωσης σε λίθο Mizzy στη μικρή πλευρά από τη δοκιμή 9 :

Αρχικά γίνεται η θεώρηση πως αυτά τα μέλη του συστήματος ράβδου-σπειρωμάτων-μαρμάρου συμπεριφέρονται ως ελατήρια εν σειρά. Επομένως

$$\frac{1}{K_{tot}} = \frac{1}{K_{bar}} + \frac{1}{K_{thread}} + \frac{1}{K_{anchor}}$$

- Από το διάγραμμα Δύναμης-Μετατόπισης προκύπτει η μέση ακαμψία του συστήματος ράβδου-σπειρωμάτων-μαρμάρου  $K_{tot}=2674 \text{ N/mm}$

- Προσδιορίζουμε την ακαμψία του κορμού της ράβδου τιτανίου:

Το  $K_{bar}$  μας είναι γνωστό από τη σχέση  $K_{bar} = \frac{EA}{L}$ ,

όπου τα  $E, A, L$  γνωστά,

$E=105\text{GPa}$

$$A = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi 0.1^2}{4} = 7,85 \times 10^{-5} \text{m}^2$$

Το μήκος της ράβδου που λαμβάνεται εδώ υπόψη είναι αυτό του κορμού έξω από το λίθο συν το συνευθιακό του τμήμα μέσα στο λίθο  $L = 0.3618 + 0.045 = 0.407 \text{m}$

Επομένως  $K_{bar} = 22781,9 \text{ N/mm}$

- Προσδιορίζουμε την ακαμψία του ενός σπειρώματος:

Το  $K_{thread}$  μας είναι γνωστό από τη σχέση  $K_{thread} = \frac{EA}{L}$ ,

όπου τα  $E, A, L$  γνωστά,

$E=105\text{GPa}$

$$A_t = \frac{\pi}{4} (D - 0.938194p)^2 = 57,99 \times 10^{-6} \text{m}^2$$

$$L = 0.05 \text{m}$$

Επομένως  $K_{thread} = 121780 \text{ N/mm}$

Από τον τύπο:

$$\frac{1}{K_{tot}} = \frac{1}{K_{bar}} + \frac{1}{K_{thread}} + \frac{1}{K_{anchore}}$$

Προκύπτει  $K_{anchore} = 3107 \text{ N/mm}$

Εύρεση ακαμψίας τοιχοποιίας στο σημείο αγκύρωσης από τη δοκιμή 10 :

Αρχικά γίνεται η θεώρηση πως αυτά τα μέλη του συστήματος ράβδου-σπειρωμάτων-μαρμάρου συμπεριφέρονται ως ελατήρια εν σειρά. Επομένως

$$\frac{1}{K_{tot}} = \frac{1}{K_{bar}} + \frac{1}{K_{thread}} + \frac{1}{K_{masonry}}$$

- Από το διάγραμμα Δύναμης-Μετατόπισης προκύπτει η μέση ακαμψία του συστήματος ράβδου-σπειρωμάτων-τοιχοποιίας  $K_{tot}=7073 \text{ N/mm}$

- Προσδιορίζουμε την ακαμψία του κορμού της ράβδου τιτανίου:

Το  $K_{bar}$  μας είναι γνωστό από τη σχέση  $K_{bar} = \frac{EA}{L}$ ,

όπου τα  $E, A, L$  γνωστά,

$E=105\text{GPa}$

$$A = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi 0.1^2}{4} = 7,85 \times 10^{-5} \text{m}^2$$

Το μήκος της ράβδου έξω από την τοιχοποιία είναι

$$L = 0.4 \text{m}$$

Επομένως  $K_{bar} = 22539 \text{ N/mm}$

- Προσδιορίζουμε την ακαμψία του ενός σπειρώματος:

Το  $K_{thread}$  μας είναι γνωστό από τη σχέση  $K_{thread} = \frac{EA}{L}$ ,

όπου τα  $E, A, L$  γνωστά,

$E=105\text{GPa}$

$$A_t = \frac{\pi}{4} (D - 0.938194p)^2 = 57,99 \times 10^{-6} \text{m}^2$$

$$L = 0.05 \text{m}$$

Επομένως  $K_{thread} = 121780 \text{ N/mm}$

Από τον τύπο:

$$\frac{1}{K_{tot}} = \frac{1}{K_{bar}} + \frac{1}{K_{thread}} + \frac{1}{K_{masonry}}$$

Προκύπτει  $K_{masonry} = 11261 \text{ N/mm}$

Πίνακας 3. Μηχανισμοί αστοχίας αγκυρώσεων πρώτης σειράς δοκιμών

Πηγή: Ιδία επεξεργασία

	ΦΟΡΤΙΟ ΔΙΑΡΡΟΗΣ (N)	ΜΕΓΙΣΤΟ ΦΟΡΤΙΟ (N)	ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΑΣΤΟΧΙΑΣ
ΤΕΣΤ1	20830	20830	ΨΑΘΥΡΗ ΘΡΑΥΣΗ ΜΑΡΜΑΡΟΥ
ΤΕΣΤ2	20000	28689	ΑΣΤΟΧΙΑ ΑΝΩ ΣΠΕΙΡΩΜΑΤΟΣ

ΤΕΣΤ3	18269	27980	ΔΙΑΡΡΟΗ ΤΙΤΑΝΙΟΥ ΣΤΗ ΘΕΣΗ ΤΟΥ ΑΝΩ ΣΠΕΙΡΩΜΑΤΟΣ
ΤΕΣΤ4	19471	27884	ΔΙΑΡΡΟΗ ΤΙΤΑΝΙΟΥ ΣΤΗ ΘΕΣΗ ΤΟΥ ΚΑΤΩ ΣΠΕΙΡΩΜΑΤΟΣ
ΤΕΣΤ5	17067	27884	ΑΣΤΟΧΙΑ ΚΑΤΩ ΣΠΕΙΡΩΜΑΤΟΣ
ΤΕΣΤ6	17067	26682	ΑΣΤΟΧΙΑ ΑΝΩ ΣΠΕΙΡΩΜΑΤΟΣ
ΤΕΣΤ7	13461	18269	ΟΛΙΣΘΗΣΗ ΤΗΣ ΡΑΒΔΟΥ ΤΙΤΑΝΙΟΥ ΕΠΙ ΤΟΥ ΜΑΡΜΑΡΟΥ
ΤΕΣΤ8	15865	15865	ΟΛΙΣΘΗΣΗ ΤΗΣ ΡΑΒΔΟΥ ΤΙΤΑΝΙΟΥ ΕΠΙ ΤΟΥ ΜΑΡΜΑΡΟΥ
ΤΕΣΤ9	14663	16826	ΟΛΙΣΘΗΣΗ ΤΗΣ ΡΑΒΔΟΥ ΤΙΤΑΝΙΟΥ ΕΠΙ ΤΟΥ ΜΑΡΜΑΡΟΥ
ΤΕΣΤ10	19471	26682	ΟΛΙΣΘΗΣΗ ΤΗΣ ΡΑΒΔΟΥ ΤΙΤΑΝΙΟΥ ΕΠΙ ΤΟΥ MASTERFLOW

### 4.3. 2<sup>η</sup> ΣΕΙΡΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ

Στη δεύτερη σειρά πειραμάτων γίνονται δοκιμές εξόλκευσης ράβδων τιτανίου σε δοκίμια τοιχοποιίας με χρήση πλάκας αγκύρωσης. Ακόμα, πραγματοποιούνται πειράματα εξόλκευσης ράβδων τιτανίου από την τοιχοποιία μνημείου με Masteremaco S 285 TIX.

#### Υλικά δοκιμών

##### Εφελκούμενες ράβδοι τιτανίου και παρελκόμενα

Οι ράβδοι τιτανίου ήταν διαμέτρου Φ10 mm και είχαν μήκος 0.7m για τις δοκιμές 1,2,3 και 0,8 για τις 4,5. Στην περίπτωση των δοκιμών 1,2,3 είχε διανοιχθεί σε αυτές σπείρωμα M10 στο άκρο τους πάνω στο οποίο θα τοποθετηθεί η πλάκα αγκύρωσης

Για τις ανάγκες της διάταξης στα πειράματα 1,2,3 χρησιμοποιήθηκαν ακόμα παξιμάδια από ανοξείδωτο χάλυβα για σπείρωμα M8. Ως πλάκες αγκύρωσης κρίθηκε επαρκές να χρησιμοποιηθούν ροδέλες (washers) από ανοξείδωτο χάλυβα πάχους 2mm. Η εξωτερική διάμετρος από τις ροδέλες ήταν 5cm και η εσωτερική 1,2 cm.



## ΔΟΚΙΜΕΣ ΕΞΟΛΚΕΥΣΗΣ ΡΑΒΔΩΝ ΣΕ ΔΟΚΙΜΙΑ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑΣ

Πραγματοποιήθηκαν δοκιμές εφελκυσμού ράβδων τιτανίου που ήταν αγκυρωμένες με πλάκες σε δοκίμια τοιχοποιίας που προσομοιάζουν αυτή του μνημείου. Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν τις ημερομηνίες 26/11/2016 και 27/11/2016. Οι δοκιμές αυτές αποσκοπούν στον έλεγχο της αντοχής σύνδεσης των τμημάτων της ορθομαρμάρωση με την τοιχοποιία του μνημείου σε συγκεκριμένα σημεία. Τα σημεία αυτά είναι:

- i) Η περιοχή στη ΒΑ και ΝΑ γωνία του Κουβουκλίου. Η περιοχές δηλαδή των κλιμακοστασίων όπου η τοιχοποιία παρουσιάζει μειωμένο πάχος και δεν παρέχεται η δυνατότητα του επιθυμητού βάθους αγκύρωσης 0,40 m.
- ii) Η περιοχή της δυτικής πλευράς του θόλου του νεκρικού θαλάμου.

### Περιγραφή δοκιμών τοιχοποιίας

Τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν είχαν ολικό πάχος 30 cm έκαστο και ενδεικτικά 55-65cm ύψος και 80 cm πλάτος. Αποτελούνταν από λιθοδομή πάχους 20 cm. Η λιθοδομή αυτή σχηματιζόταν από λίθους σχετικά μικρού μεγέθους, οι οποίοι είχαν αφαιρεθεί από τη δυτική πλευρά του μνημείου κατά την ανακατασκευή της τοιχοποιίας. Το κονίαμα που χρησιμοποιήθηκε για την σύνδεση των λίθων μεταξύ τους ήταν το MasterEmaco S 285 TIX. Εκατέρωθεν της λιθοδομής αυτής είχαν τοποθετηθεί ράβδοι τιτανίου Φ8 mm ανά 20 cm οριζόντια και κάθετα, εν είδει πλέγματος. Ο τύπος τιτανίου ήταν ASTM B345 GR-2 με τα ίδια χαρακτηριστικά με αυτά που αναφέρονται παραπάνω. Επίσης στις πλευρές των δοκιμών τοποθετήθηκε επίχρισμα πάχους 5 cm σε κάθε πλευρά και αυτό από κονίαμα MasterEmaco S 285 TIX.

Για την τοποθέτηση της ράβδου τιτανίου διανοίχθηκε στα δοκίμια διαμπερής οπή με χρήση τρυπανιού 12 mm σε κρουστικό δράπανο.

#### 4.2.1. ΔΟΚΙΜΗ 1<sup>η</sup>

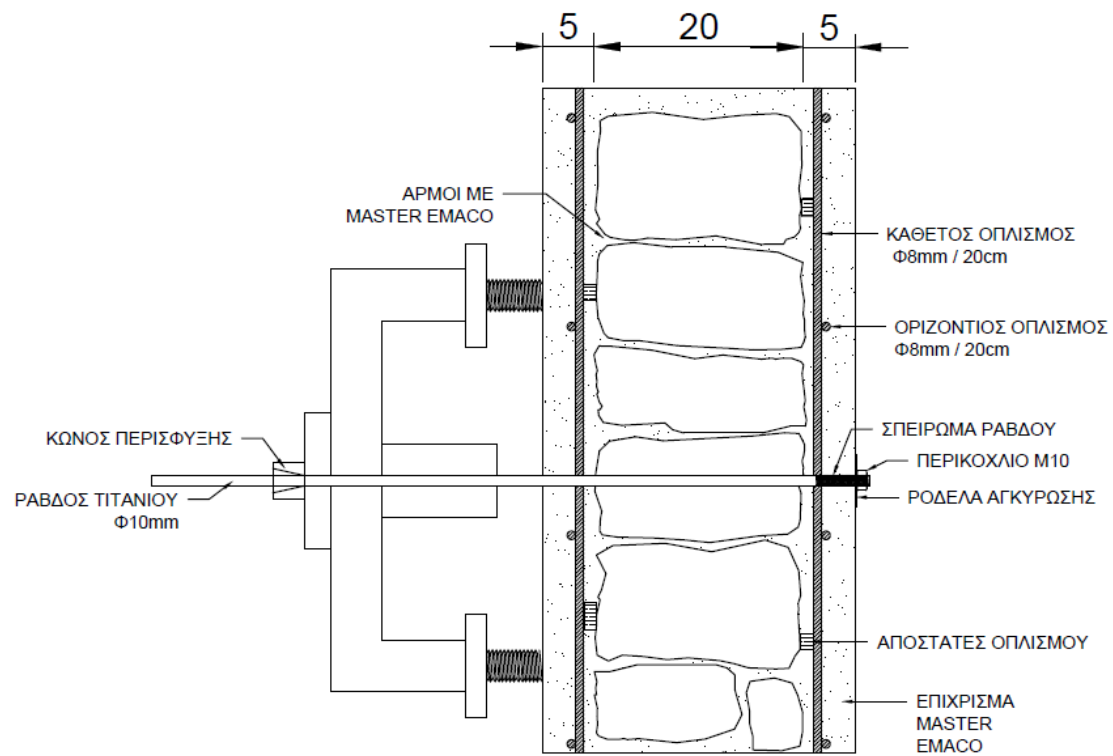
Ο μηχανισμός αστοχίας που καταγράφηκε είναι η διαρροή της ράβδου τιτανίου στην περιοχή του σπειρώματος. Ο λόγος αστοχίας της ράβδου στο σημείο αυτό και όχι σε κάποιο άλλο σημείο του μήκους της είναι ότι στην περιοχή αυτή, με την δημιουργία του σπειρώματος M10 έχουμε ουσιαστικά αφαίρεση υλικού και μείωση της διαμέτρου της ράβδου. Στις ΕΙΚΟΝΕΣ 3,4 διακρίνεται μάλιστα ο «λαιμός» που δημιουργείται στην εφελκυσόμενη ράβδο και γίνεται έντονος λίγο πριν την αστοχία καθώς και η επιφάνεια αστοχίας. Η μέγιστη μετατόπιση που καταγράφηκε πριν τη θραύση ήταν 16,8mm. Η μέγιστη δύναμη που καταγράφηκε ήταν τα 30456 N.



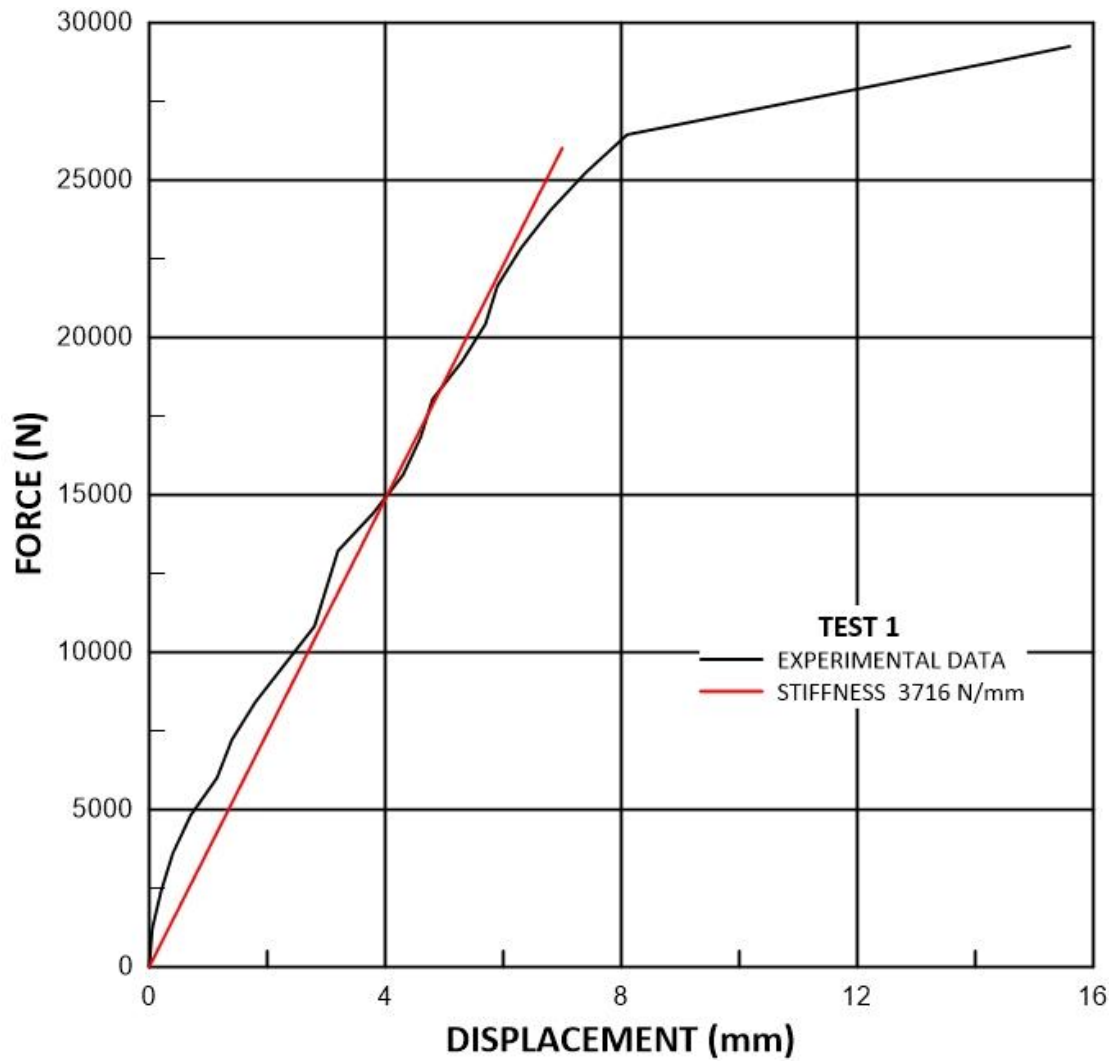
Εικόνα 58 . Η Διάταξη  
Πηγή: Προσωπικό αρχείο



Εικόνα 59. Η διαρροή της ράβδου στο σπείρωμα  
Πηγή: Προσωπικό αρχείο



Σχέδιο 17 . Τομή της διάταξης  
Πηγή: Ιδία επεξεργασία



Διάγραμμα 11 . Δοκιμή εξόλκευσης ράβδου τιτανίου  $d=10\text{mm}$  μηχανικά αγκυρωμένης στο πρώτο δοκίμιο τοιχοποιίας  
Πηγή: Ιδία επεξεργασία

#### 4.2.2.ΔΟΚΙΜΗ 2<sup>η</sup>

Ο μηχανισμός αστοχίας που καταγράφηκε είναι η διαρροή της ράβδου τιτανίου στην περιοχή του σπειρώματος . Ο λόγος αστοχίας της ράβδου στο σημείο αυτό και όχι σε κάποιο άλλο σημείο του μήκους της είναι ότι στην περιοχή αυτή, με την δημιουργία του σπειρώματος M10 έχουμε ουσιαστικά αφαίρεση υλικού και μείωση της διαμέτρου της ράβδου. Στην Εικόνα 61 διακρίνεται μάλιστα ο «λαιμός» που δημιουργείται στην εφελκυσμένη ράβδο και γίνεται έντονος λίγο πριν την αστοχία. Η μέγιστη μετατόπιση που καταγράφηκε πριν τη θραύση ήταν 11,3mm. Η μέγιστη δύναμη που καταγράφηκε ήταν τα 29411 N.

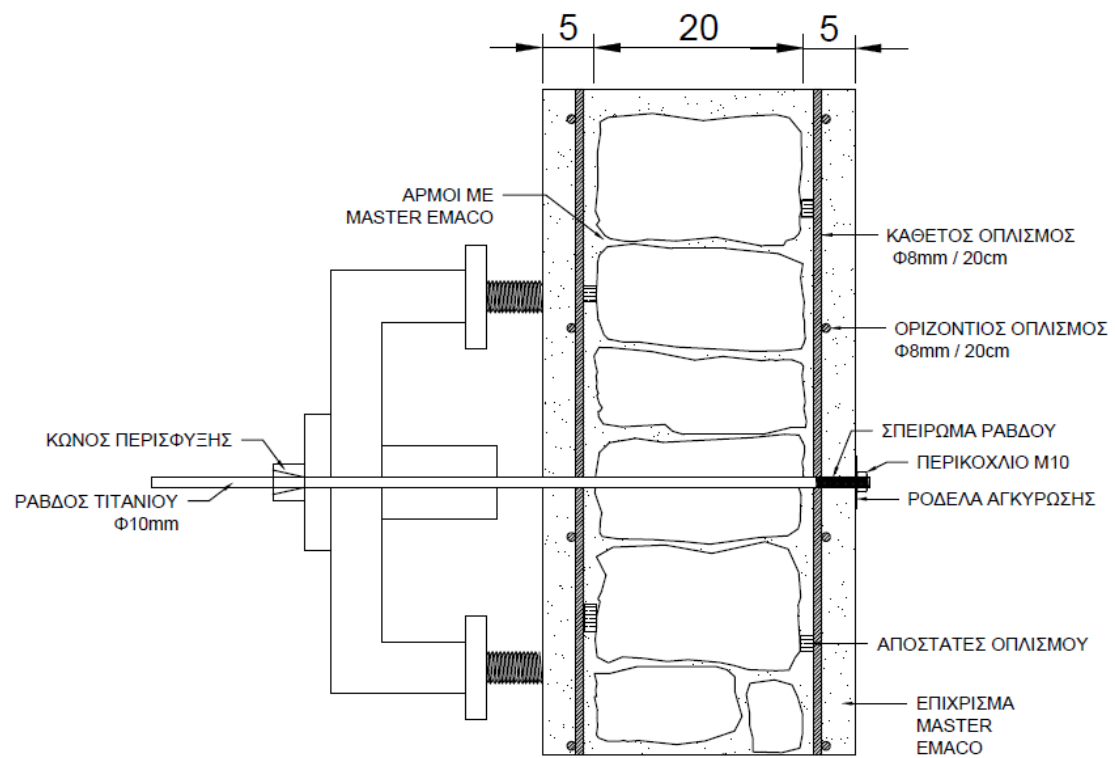


Εικόνα 60 . Το δεύτερο δοκίμιο πριν την εφαρμογή της διάταξης  
Πηγή: Προσωπικό αρχείο

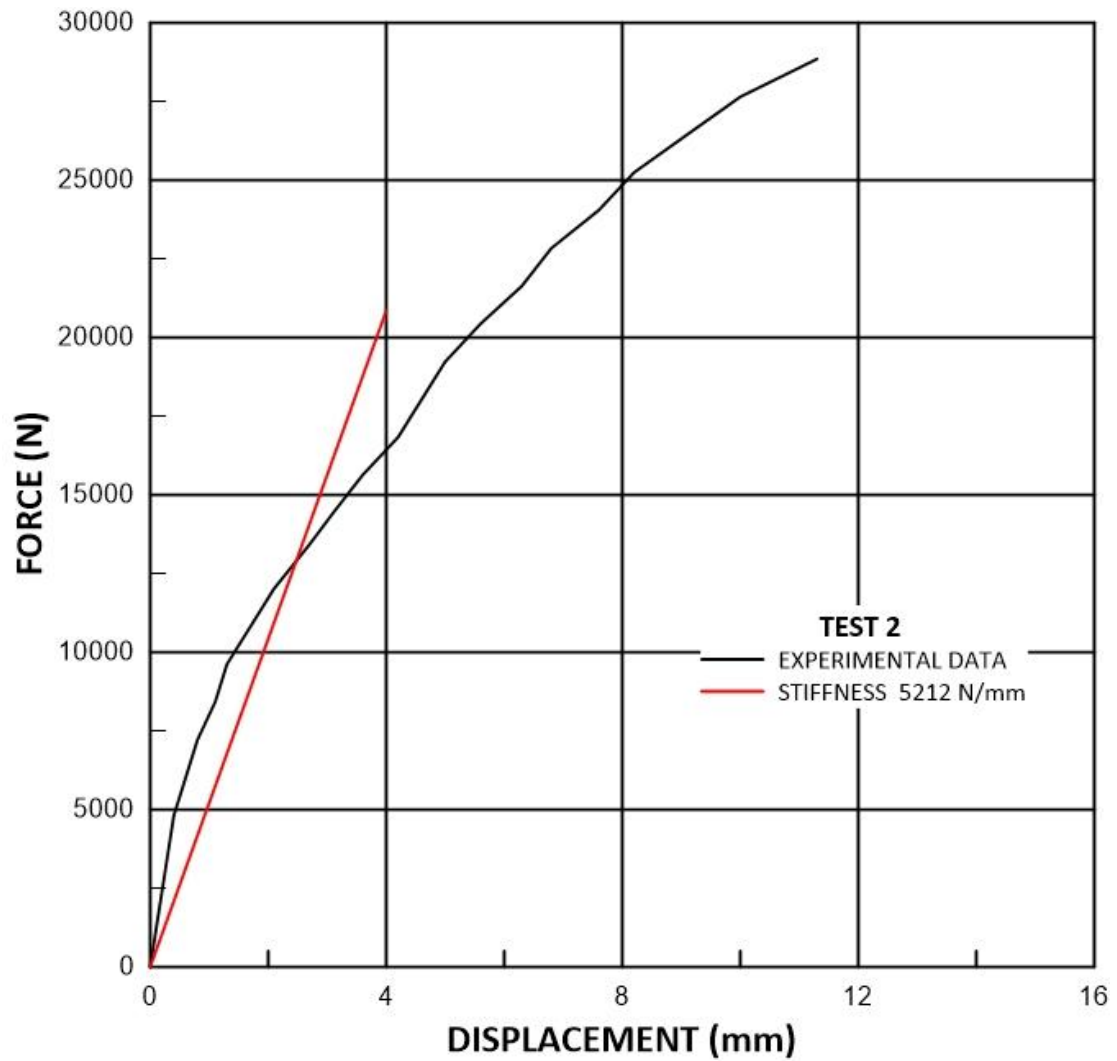


Εικόνα 61 . Διαρροή της ράβδου τιτανίου στο άνω σπείρωμα

Πηγή: Προσωπικό αρχείο



Σχέδιο 18 . Τομή της διάταξης  
Πηγή: Ιδία επεξεργασία



Διάγραμμα 12 . Δοκιμή εξόλκεσης ράβδου τιτανίου d=10mm μηχανικά αγκυρωμένης στο δεύτερο δοκίμιο τοιχοποιίας  
Πηγή: Ιδία επεξεργασία



#### 4.2.3.ΔΟΚΙΜΗ 3<sup>η</sup>

Ο μηχανισμός αστοχίας που καταγράφηκε είναι η αστοχία του σπειρώματος. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα την ολίσθηση της ράβδου επί του περικοχλίου και εν τέλει την αποσύνδεση της ράβδου από την ροδέλα αγκύρωσης και κατ' επέκταση την τοιχοποιία. Στην Εικόνα 65 διακρίνεται η παραμόρφωση στις «βόλτες» του σπειρώματος στη ράβδο. Η μέγιστη μετατόπιση που καταγράφηκε πριν τη θραύση ήταν 8,2mm. Η μέγιστη δύναμη που καταγράφηκε ήταν τα 28726 N.



Εικόνα 62 . Έμπροσθεν όψη της διάταξης



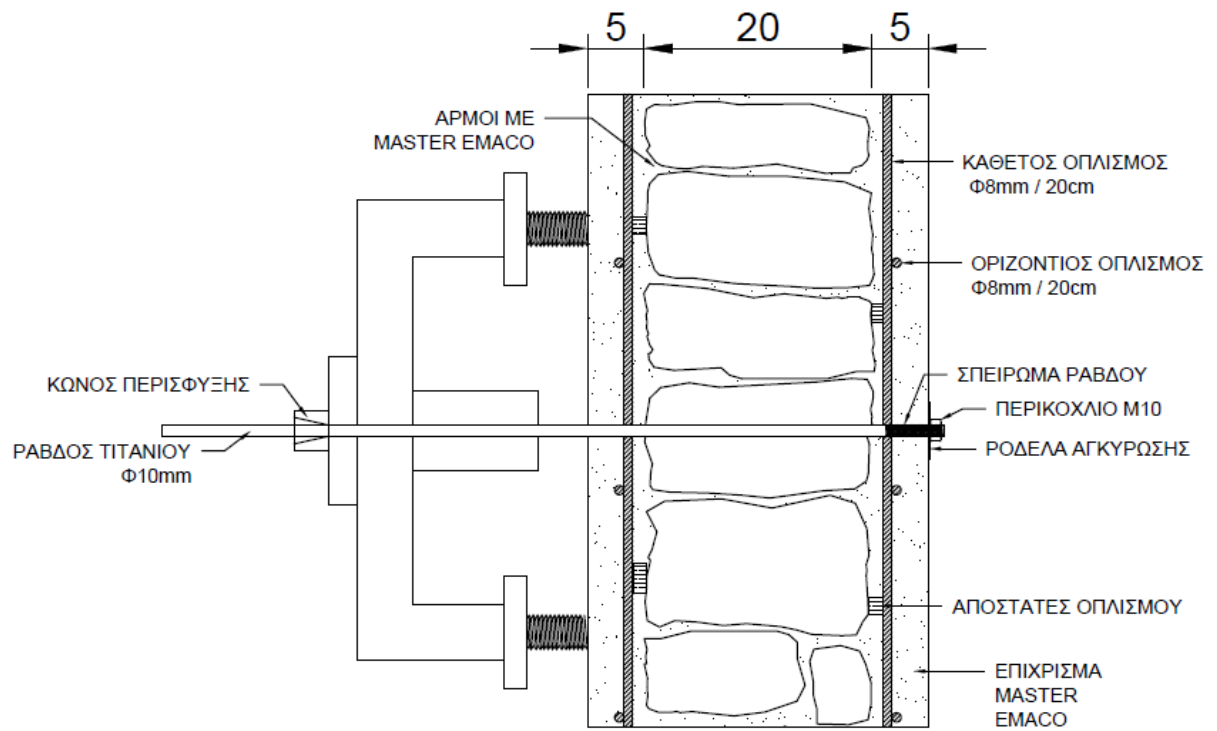
Εικόνα 63 . Πλάγια όψη της διάταξης



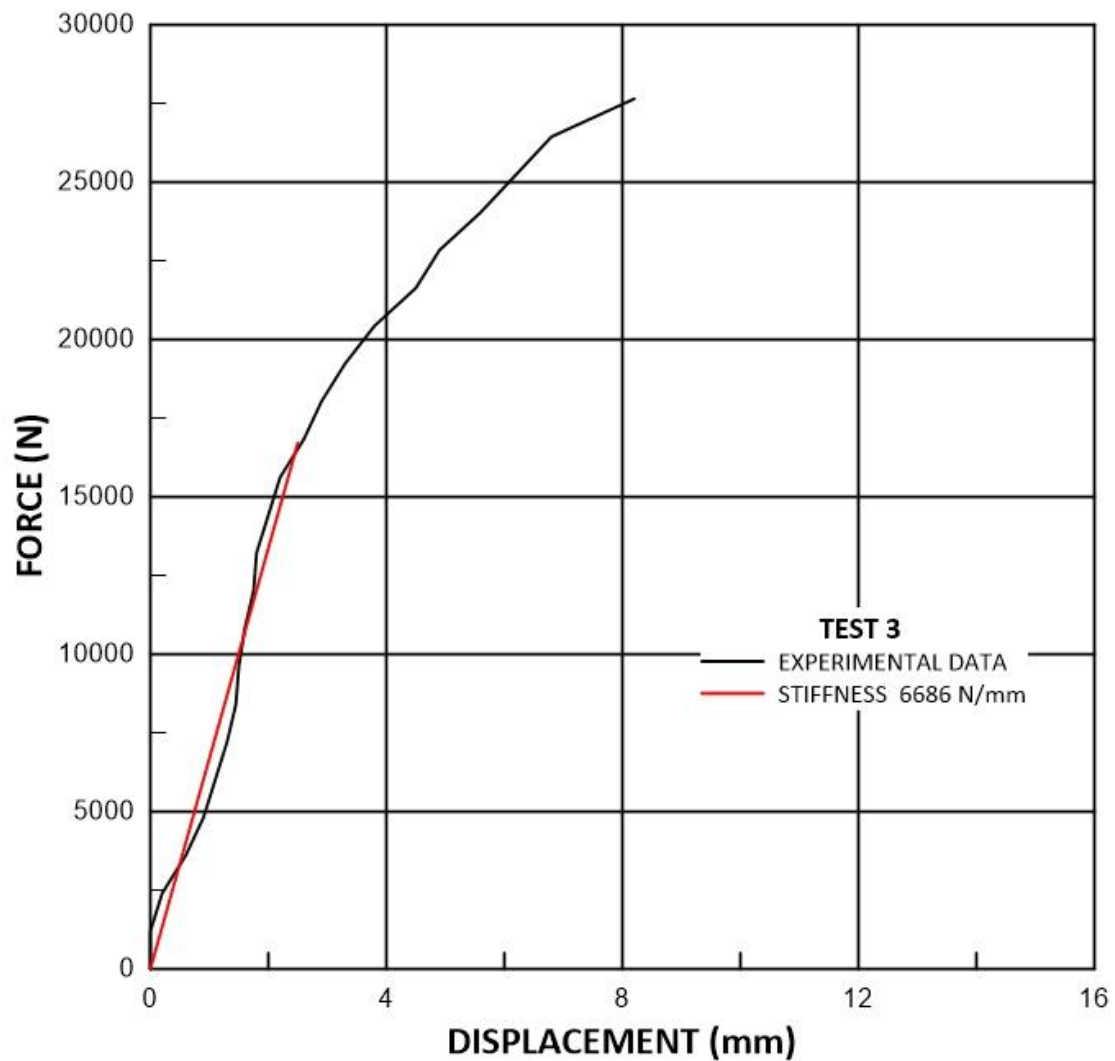
Εικόνα 64 . Όπισθεν όψη της διάταξης



Εικόνα 65 . Αστοχία των βολτών του σπειρώματος



Σχέδιο 19 . Τομή της διάταξης  
Πηγή: Ιδία επεξεργασία



Διάγραμμα 13. Δοκιμή εξόλκευσης ράβδου τιτανίου d=10mm μηχανικά αγκυρωμένης στο τρίτο δοκίμιο τοιχοποιίας  
 Πηγή: Ιδία επεξεργασία

#### 4.2.4. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΑΚΑΜΨΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

Εύρεση ακαμψίας τοιχοποιίας στο σημείο αγκύρωσης από τη δοκιμή 1 :

Αρχικά γίνεται η θεώρηση πως αυτά τα μέλη του συστήματος ράβδου-σπειρωμάτων-μαρμάρου συμπεριφέρονται ως ελατήρια εν σειρά. Επομένως

$$\frac{1}{K_{tot}} = \frac{1}{K_{bar}} + \frac{1}{K_{masonry}}$$

- Από το διάγραμμα Δύναμης-Μετατόπισης προκύπτει η μέση ακαμψία του συστήματος ράβδου-σπειρωμάτων-τοιχοποιίας  $K_{tot} = 3716 \text{ N/mm}$

- Προσδιορίζουμε την ακαμψία του κορμού της ράβδου τιτανίου:

Το  $K_{bar}$  μας είναι γνωστό από τη σχέση  $K_{bar} = \frac{EA}{L}$ ,

όπου τα  $E, A, L$  γνωστά,

$E=105\text{GPa}$

$$A = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi 0.1^2}{4} = 7,85 \times 10^{-5} \text{m}^2$$

Το μήκος της ράβδου χωρίς τα σπειρώματα έξω από την τοιχοποιία είναι

$$L = 0.27\text{m}$$

Επομένως  $K_{bar} = 33391\text{N/mm}$

Από τον τύπο:

$$\frac{1}{K_{tot}} = \frac{1}{K_{bar}} + \frac{1}{K_{masonry}}$$

Προκύπτει  $K_{masonry} = 4183\text{ N/mm}$

Εύρεση ακαμψίας τοιχοποιίας στο σημείο αγκύρωσης από τη δοκιμή 2 :

Αρχικά γίνεται η θεώρηση πως αυτά τα μέλη του συστήματος ράβδου-σπειρωμάτων-μαρμάρου συμπεριφέρονται ως ελατήρια εν σειρά. Επομένως

$$\frac{1}{K_{tot}} = \frac{1}{K_{bar}} + \frac{1}{K_{masonry}}$$

- Από το διάγραμμα Δύναμης-Μετατόπισης προκύπτει η μέση ακαμψία του συστήματος ράβδου-σπειρωμάτων-τοιχοποιίας  $K_{tot} = 5212\text{ N/mm}$

- Προσδιορίζουμε την ακαμψία του κορμού της ράβδου τιτανίου:

Το  $K_{bar}$  μας είναι γνωστό από τη σχέση  $K_{bar} = \frac{EA}{L}$ ,

όπου τα  $E, A, L$  γνωστά,

$E=105\text{GPa}$

$$A = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi 0.1^2}{4} = 7,85 \times 10^{-5} \text{m}^2$$

Το μήκος της ράβδου χωρίς τα σπειρώματα έξω από την τοιχοποιία είναι

$$L = 0.26\text{m}$$

Επομένως  $K_{\text{bar}} = 34675\text{N/mm}$

Από τον τύπο:

$$\frac{1}{K_{\text{tot}}} = \frac{1}{K_{\text{bar}}} + \frac{1}{K_{\text{masonry}}}$$

Προκύπτει  $K_{\text{masonry}} = 6135\text{N/mm}$

Εύρεση ακαμψίας τοιχοποιίας στο σημείο αγκύρωσης από τη δοκιμή 3 :

Αρχικά γίνεται η θεώρηση πως αυτά τα μέλη του συστήματος ράβδου-σπειρωμάτων-μαρμάρου συμπεριφέρονται ως ελατήρια εν σειρά. Επομένως

$$\frac{1}{K_{\text{tot}}} = \frac{1}{K_{\text{bar}}} + \frac{1}{K_{\text{thread}}} + \frac{1}{K_{\text{masonry}}}$$

- Από το διάγραμμα Δύναμης-Μετατόπισης προκύπτει η μέση ακαμψία του συστήματος ράβδου-σπειρωμάτων-τοιχοποιίας  $K_{\text{tot}} = 6686\text{ N/mm}$
- Προσδιορίζουμε την ακαμψία του κορμού της ράβδου τιτανίου:

Το  $K_{\text{bar}}$  μας είναι γνωστό από τη σχέση  $K_{\text{bar}} = \frac{EA}{L}$ ,

όπου τα  $E, A, L$  γνωστά,

$E = 105\text{GPa}$

$$A = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi 0.1^2}{4} = 7,85 \times 10^{-5}\text{m}^2$$

Το μήκος της ράβδου χωρίς τα σπειρώματα έξω από την τοιχοποιία είναι

$$L = 0.27\text{m}$$

Επομένως  $K_{\text{bar}} = 33391\text{N/mm}$

Από τον τύπο:

$$\frac{1}{K_{\text{tot}}} = \frac{1}{K_{\text{bar}}} + \frac{1}{K_{\text{masonry}}}$$

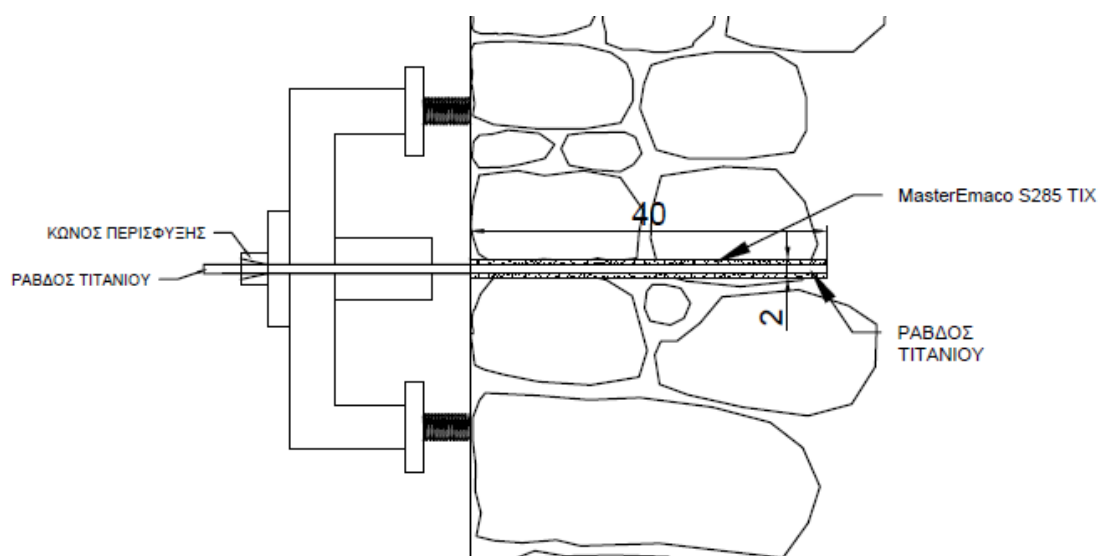
Προκύπτει  $K_{masonry}=8361N/mm$

### ΔΟΚΙΜΕΣ ΣΕ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑ ΜΝΗΜΕΙΟΥ ΜΕ MASTEREMACOS 285 TIX

Πραγματοποιήθηκαν δοκιμές εφελκυσμού ράβδων τιτανίου που ήταν αγκυρωμένες στην τοιχοποιία του Κουβουκλίου και σε βάθος 0,4m από την επιφάνεια τη τοιχοποιίας(και όχι των μαρμάρων). Η διεξαγωγή των δοκιμών έγινε στις 12/11/2016. Οι δοκιμές έγιναν στην τοιχοποιία του μνημείου αφού έχει προηγηθεί σε αυτή ενεμάτωση με MasterInject 222 και βαθύ αρμολόγημα με MasterEmaco S 285 TIX. Η δοκιμή 4 έγινε στην τοιχοποιία που βρίσκεται πίσω από το φάτνωμα N2 ενώ η δοκιμή 5 στην τοιχοποιία του φανώματος N1. Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν μετά το πέρας 28 ημερών από την εισπίεση του MasterEmaco S 285 TIX στις οπές αγκύρωσης. Για χρόνο ωρίμανσης > 28 ημερών το MasterEmaco S 285 TIX αναπτύσσει τάση συνάφειας της τάξης των 0,6 Μpa. Η τιμή αυτή είναι μικρότερη από αυτή του MasterFlow 980. Για το λόγο αυτό επιλέχθηκε μεγαλύτερη διάμετρος οπής (Φ 38mm) ώστε να υπάρχει μεγαλύτερη επιφάνεια επαφής κονιάματος-τοιχοποιίας.

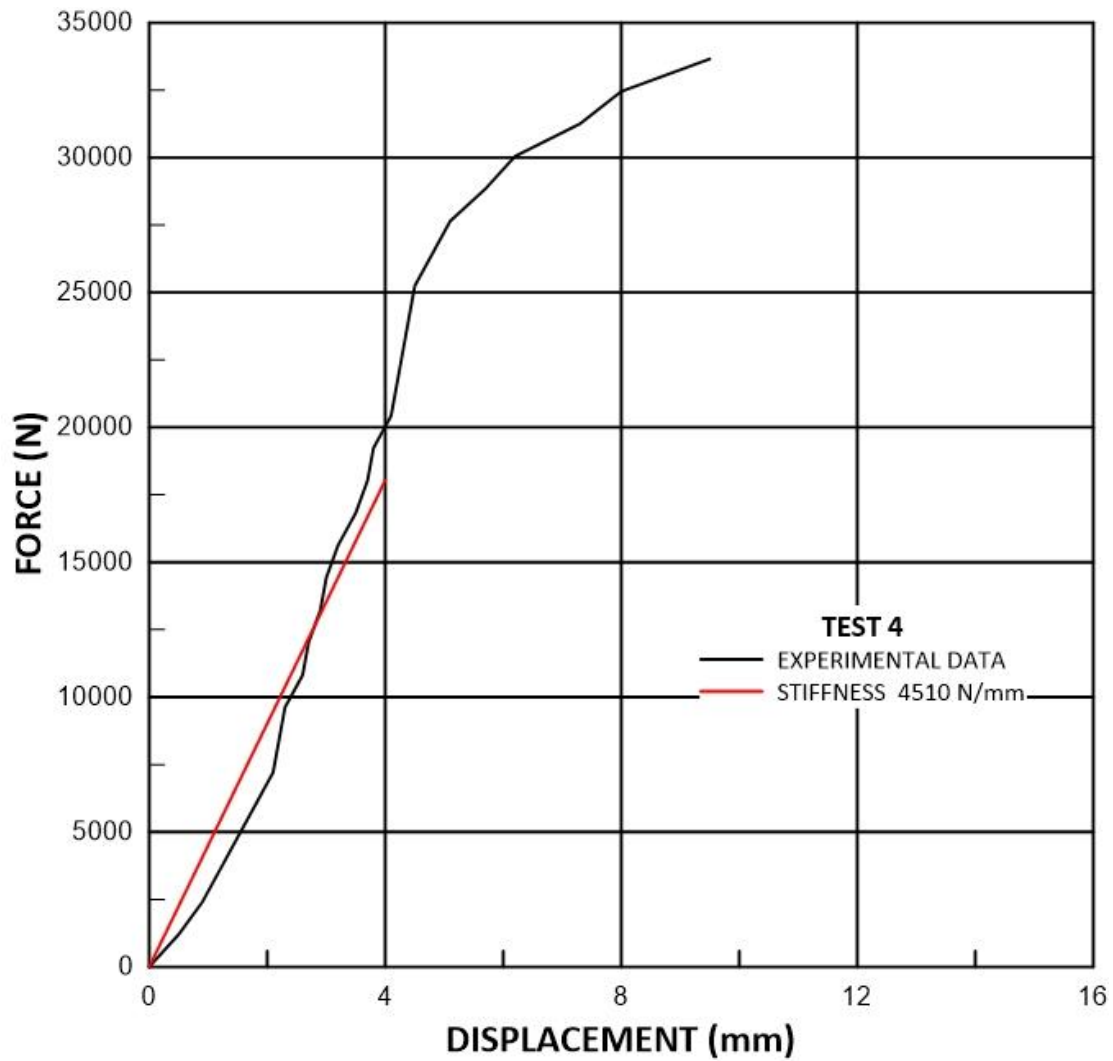
#### 4.2.5. ΔΟΚΙΜΗ 4<sup>η</sup>

Ο μηχανισμός αστοχίας που παρατηρήθηκε ήταν η διαρροή της ράβδου τιτανίου. Η μέγιστη μετατόπιση που καταγράφηκε κατά τη στιγμή της αστοχίας ήταν τα 9,7 mm. Σε αυτή τη μετατόπιση αντιστοιχεί δύναμη που δεν υπερβαίνει τα 34855 N.



Σχέδιο 20 . Τομή της διάταξης  
Πηγή: Ιδία επεξεργασία

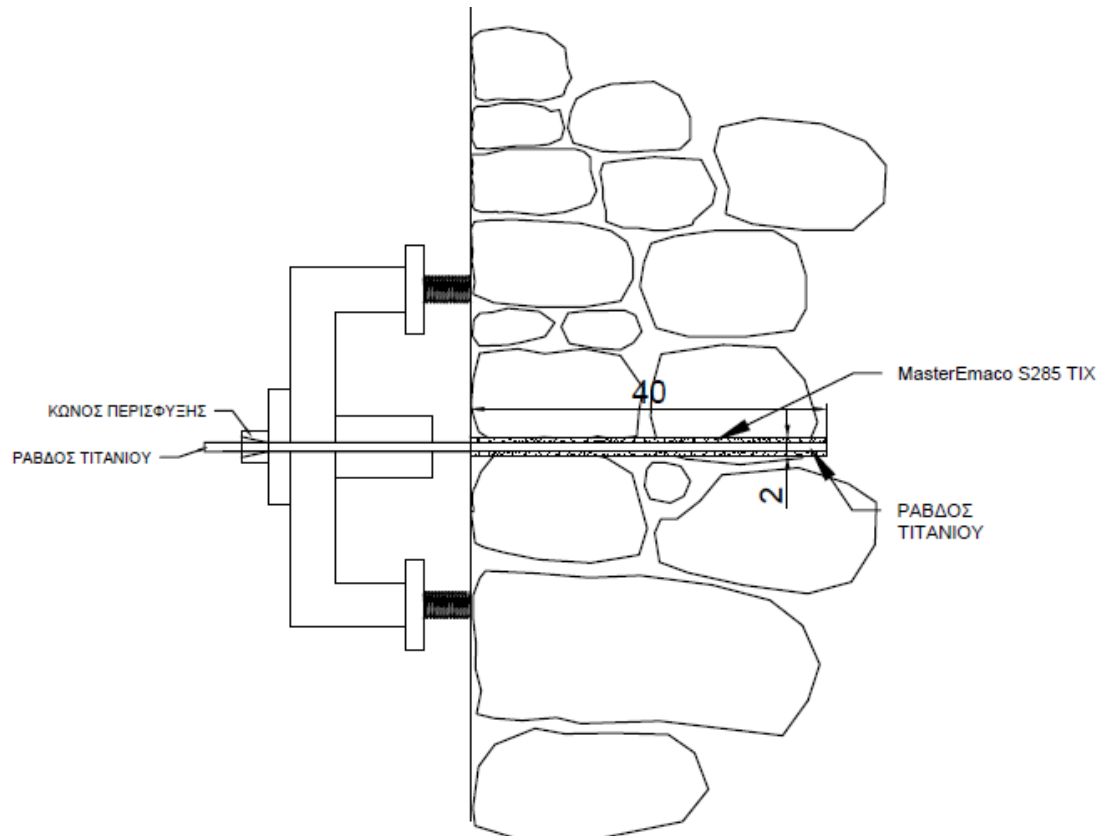




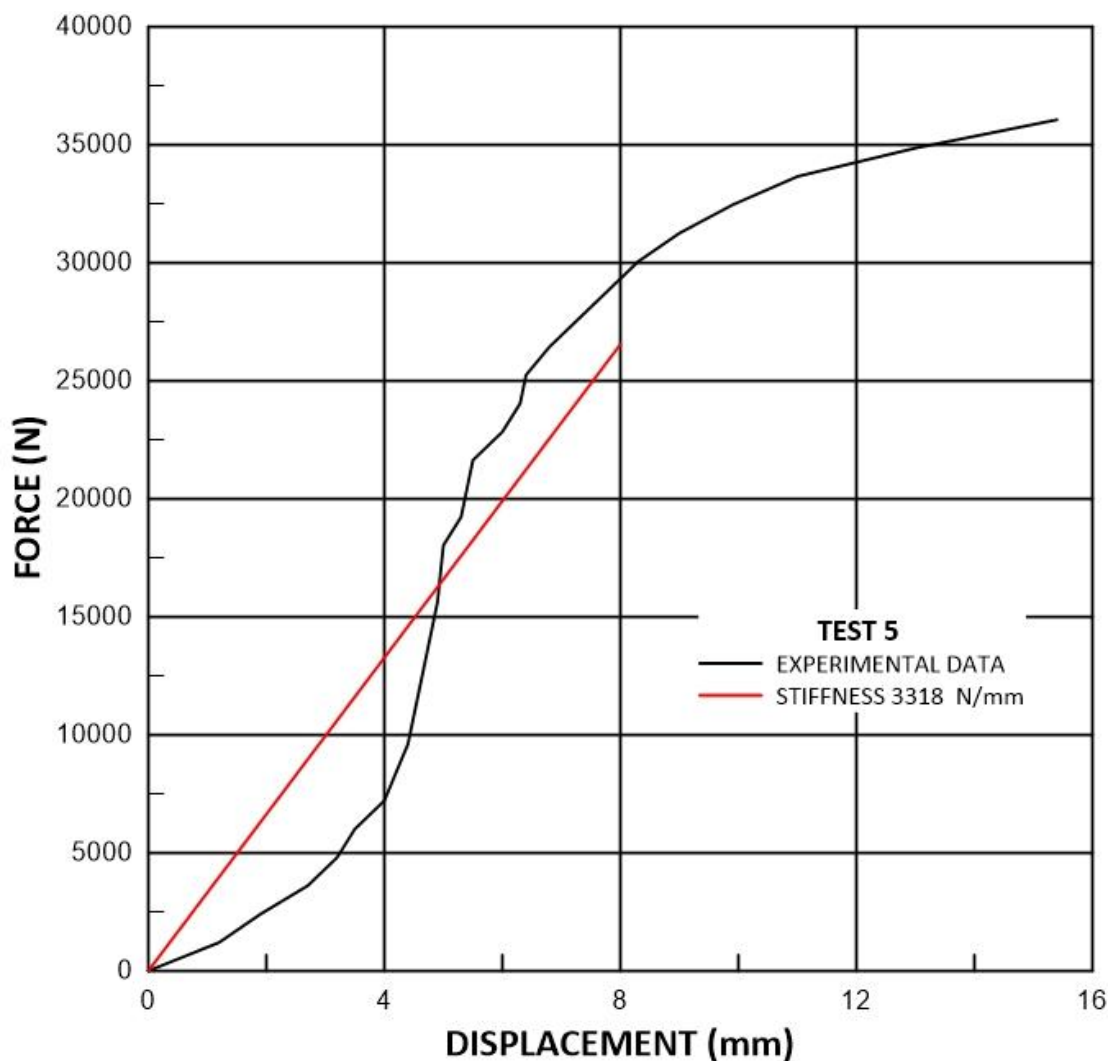
Διάγραμμα 14 . Δοκιμή εξόλκευσης ράβδου τιτανίου  $d=10\text{mm}$  αγκυρωμένης με κονίαμα MasterEmaco S285 TIX σε βάθος 0,4m στην τοιχοποιία του μνημείου  
Πηγή: Ιδία επεξεργασία

#### 4.2.6.ΔΟΚΙΜΗ 5<sup>η</sup>

Ο μηχανισμός αστοχίας που παρατηρήθηκε ήταν η ολίσθηση της ράβδου επί του κονιάματος. Παρατηρούνται μεγάλες μετατοπίσεις της τάξεως των 4,08 cm πριν συμβεί η αστοχία. Η μέγιστη δύναμη που ασκήθηκε στη ράβδο ήταν τα 38329 N.



Σχέδιο 21 . Τομή της διάταξης  
Πηγή: Ιδία επεξεργασία



Διάγραμμα 15 . Δοκιμή εξόλκευσης ράβδου τιτανίου D=10mm αγκυρωμένης με κονίαμα MasterEmaco S285 TIX σε βάθος 0,4m στην τοιχοποιία του μνημείου  
 Πηγή: Ιδία επεξεργασία

#### 4.2.7. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΑΚΑΜΨΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

Εύρεση ακαμψίας τοιχοποιίας στο σημείο αγκύρωσης από τη δοκιμή 4 :

Αρχικά γίνεται η θεώρηση πως αυτά τα μέλη του συστήματος ράβδου--μαρμάρου συμπεριφέρονται ως ελατήρια εν σειρά. Επομένως

$$\frac{1}{K_{tot}} = \frac{1}{K_{bar}} + \frac{1}{K_{masonry}}$$

- Από το διάγραμμα Δύναμης-Μετατόπισης προκύπτει η μέση ακαμψία του συστήματος ράβδου-σπειρωμάτων-τοιχοποιίας  $K_{tot}=4510 \text{ N/mm}$

- Προσδιορίζουμε την ακαμψία του κορμού της ράβδου τιτανίου:

Το  $K_{bar}$  μας είναι γνωστό από τη σχέση  $K_{bar} = \frac{EA}{L}$ ,

όπου τα  $E, A, L$  γνωστά,

$E=105\text{GPa}$

$$A = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi 0.1^2}{4} = 7,85 \times 10^{-5} \text{m}^2$$

Το μήκος της ράβδου χωρίς τα σπειρώματα έξω από την τοιχοποιία είναι

$$L = 0.33\text{m}$$

Επομένως  $K_{bar} = 27320\text{N/mm}$

Από τον τύπο:

$$\frac{1}{K_{tot}} = \frac{1}{K_{bar}} + \frac{1}{K_{masonry}}$$

Προκύπτει  $K_{masonry} = 5402\text{N/mm}$

Εύρεση ακαμψίας τοιχοποιίας στο σημείο αγκύρωσης από τη δοκιμή 5 :

Αρχικά γίνεται η θεώρηση πως αυτά τα μέλη του συστήματος ράβδου-σπειρωμάτων-μαρμάρου συμπεριφέρονται ως ελατήρια εν σειρά. Επομένως

$$\frac{1}{K_{tot}} = \frac{1}{K_{bar}} + \frac{1}{K_{masonry}}$$

- Από το διάγραμμα Δύναμης-Μετατόπισης προκύπτει η μέση ακαμψία του συστήματος ράβδου-σπειρωμάτων-τοιχοποιίας  $K_{tot} = 3318\text{ N/mm}$

- Προσδιορίζουμε την ακαμψία του κορμού της ράβδου τιτανίου:

Το  $K_{bar}$  μας είναι γνωστό από τη σχέση  $K_{bar} = \frac{EA}{L}$ ,

όπου τα  $E, A, L$  γνωστά,

$E=105\text{GPa}$

$$A = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi 0.1^2}{4} = 7,85 \times 10^{-5} \text{m}^2$$

Το μήκος της ράβδου χωρίς τα σπειρώματα έξω από την τοιχοποιία είναι

$$L = 0.3\text{m}$$

Επομένως  $K_{bar} = 30052 \text{N/mm}$

Από τον τύπο:

$$\frac{1}{K_{tot}} = \frac{1}{K_{bar}} + \frac{1}{K_{masonry}}$$

Προκύπτει  $K_{masonry} = 3729 \text{N/mm}$

Πίνακας 4. Ιδιοτήτων που μετρήθηκαν

Υλικό	Ιδιότητα
Ιστορικός λίθος Slayeb (κάθετα στα νερά) : πείραμα 2,3	E=2288,4 MPa
Ιστορικός λίθος Slayeb (παράλληλα στα νερά) : πείραμα 4,5	E=3247,42 MPa
Νέος λίθος Slayeb (παράλληλα στα νερά) : πείραμα 6	E=6621,7 MPa
Αγκύρωση σε λίθο Mizzy (μεγάλη πλευρά): πείραμα 7, 8	K=1538 N/mm
Αγκύρωση σε λίθο Mizzy (μικρή πλευρά): πείραμα 9	K=3107 N/mm
Ιστορική τοιχοποιία του N1 φατνώματος: πείραμα 10	K=11261 N/mm
Δοκίμια προσομοίωσης ενισχυμένης τοιχοποιίας στα κλιμακοστάσια: πείραμα 11,12,13	K= 6226 N/mm

## 5.ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Μελετώντας τα αποτελέσματα και των πέντε παραπάνω πειραμάτων συμπεραίνουμε ότι οι μέθοδοι αγκύρωσης που εξετάστηκαν επαρκούν για την συγκράτηση ακόμα και των μεγαλύτερων τμημάτων της ορθομαρμαρώσεως, δηλαδή τα όβουλα, με ικανοποιητικό συντελεστή ασφαλείας ακόμα και για επιταχύνσεις της τάξεως του 1g.

Λαμβάνοντας υπ' όψιν τα αποτελέσματα των ανωτέρω δοκιμών αλλά και των δοκιμών εξόλκευσης που διενεργήθηκαν κατά την περίοδο 8/2016 δημιουργούμε τον παρακάτω Πίνακα 4. Στον πίνακα αυτό παρουσιάζονται οι αναμενόμενοι μηχανισμοί ,που θα εμφανιστούν πρώτοι, στην ακραία περίπτωση αστοχίας για κάθε διαφορετικό τύπο αγκύρωσης.

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να αναλύσουμε κάποια από τα δεδομένα της 10<sup>ης</sup> δοκιμής από τη σειρά πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν κατά την περίοδο 8/2016. Η δοκιμή αυτή έγινε επί της τοιχοποιίας του μνημείου με MasterFlow 980 24 ώρες μετά την εισπίεση του κονιάματος στην οπή. Σύμφωνα με την εταιρία παραγωγής του κονιάματος το κονίαμα αυτό σε 24 ώρες αναπτύσσει το μισό της τελικής του αντοχής σε συνάφεια. Αναμένεται λοιπόν, για χρόνο >28 ημερών, τελική αντοχή σε συνάφεια >2-4 Μpa. . Κατά το πείραμα είχαμε ,κατά την αστοχία ,ολίσθηση της ράβδου επί του MasterFlow 980. Επίσης οι επιφάνειες επαφής ράβδου-κονιάματος και κονιάματος-τοιχοποιίας παραμένουν σταθερές, Υπολογίζουμε θεωρητικά λοιπόν ότι για διάστημα >28 ημερών χρειάζεται διπλάσια δύναμη ( $2 \times 26887 = 53774$  N) για την εξόλκευση της ράβδου από το κονίαμα. Έτσι, στην περίπτωση επανάληψης της δοκιμής για χρόνο > 28 ημερών αναμένουμε διαφορετικό μηχανισμό αστοχίας. Αυτός θα είναι η διαρροή της ράβδου υπέρβασης της εφελκυστικής της αντοχής.

Παρατηρούμε ότι η ράβδος τιτανίου Φ10 και τα σπειρώματα στα πειράματα αστοχούν περί τα 27900-30500 N ,ενώ η σύνδεση στο μάρμαρο με στροφή της 90 μοίρες έχει αντοχή περί τα 15000-18000 N. Αντιλαμβανόμαστε, ότι στο έργο για >28 ημέρες, στις αγκυρώσεις επί της τοιχοποιίας με MasterFlow 980 , ο πραγματικός μηχανισμός αστοχίας που αναμένεται δε θα είναι η εξόλκευση της ράβδου από τον τοίχο αλλά θα είναι είτε η ολίσθηση της ράβδου επί του μαρμάρου, είτε η διαρροή αυτής στο σπείρωμά της.

Πίνακας 5. Μηχανισμών αστοχίας ανά τύπο αγκύρωσης

ΤΥΠΟΣ ΑΓΚΥΡΩΣΗΣ	ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ
Ράβδος τιτανίου Φ10, Οπή στην τοιχοποιία Φ20 και χρήση κονιάματος MasterFlow 980 (>28 μέρες)για τη	Διαρροή της ράβδου τιτανίου ή αστοχία του σπειρώματος

σύνδεση της ράβδου με αυτήν, Χρήση ροδέλας και περικοχλίου για τη σύνδεση με μάρμαρο τύπου Slayeb	
Ράβδος τιτανίου Φ10, Οπή στην τοιχοποιία Φ20 και χρήση κονιάματος MasterFlow 980 για τη σύνδεση της ράβδου με αυτήν, Κάμψη της ράβδου κατά 90 μοίρες και έμπηξη της σε μάρμαρο τύπου Slayeb	Ολίσθηση της ράβδου επί του μαρμάρου
Ράβδος τιτανίου Φ10, Οπή στην τοιχοποιία Φ20 και χρήση ροδέλας και περικοχλίου για τη σύνδεση της με αυτήν, Χρήση ροδέλας και περικοχλίου για τη σύνδεση με μάρμαρο τύπου Slayeb	Διαρροή της ράβδου τιτανίου ή αστοχία του σπειρώματος
ράβδος τιτανίου Φ10, Οπή στην τοιχοποιία Φ20 και χρήση ροδέλας και περικοχλίου για τη σύνδεση της με αυτήν, Κάμψη της ράβδου κατά 90 μοίρες και έμπηξη της σε μάρμαρο τύπου Slayeb	Ολίσθηση της ράβδου επί του μαρμάρου
Ράβδος τιτανίου Φ10, Οπή στην τοιχοποιία Φ38 και χρήση κονιάματος MasterFlow 980 για τη σύνδεση της ράβδου με αυτήν, Κάμψη της ράβδου κατά 90 μοίρες και έμπηξη της σε μάρμαρο τύπου Mizzy	Ολίσθηση της ράβδου επί του μαρμάρου
Ράβδος τιτανίου Φ10, Οπή στην τοιχοποιία Φ20 και χρήση ροδέλας και περικοχλίου για τη σύνδεση της με αυτήν, Κάμψη της ράβδου κατά 90 μοίρες και έμπηξη της σε μάρμαρο τύπου Mizzy	Ολίσθηση της ράβδου επί του μαρμάρου
Ράβδος τιτανίου Φ10, Οπή στην τοιχοποιία Φ20 και χρήση κονιάματος MasterEmaco S 285 TIX για τη σύνδεση της ράβδου με αυτήν, Χρήση ροδέλας και περικοχλίου για τη σύνδεση με μάρμαρο τύπου Slayeb	Διαρροή της ράβδου τιτανίου ή αστοχία του σπειρώματος.( οριακά έναντι του μηχανισμού ολίσθησης της ράβδου επί του MasterEmaco S 285 TIX )
Ράβδος τιτανίου Φ10, Οπή στην τοιχοποιία Φ20 και χρήση κονιάματος MasterEmaco S 285 TIX για τη σύνδεση της ράβδου με αυτήν, Κάμψη της ράβδου κατά 90 μοίρες και έμπηξη της	Ολίσθηση της ράβδου επί του μαρμάρου



σε μάρμαρο τύπου Slayeb	
-------------------------	--

Ο μηχανισμός σε κάθε περίπτωση είναι ο επιθυμητός καθώς έχουμε προστασία του ιστορικού υλικού από θραύση και παράλληλα ο μηχανισμός δεν είναι ψαθυρός.

## 5.1. ΤΕΛΙΚΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΟ ΜΝΗΜΕΙΟ

Λαμβάνοντας υπ' όψη τα παραπάνω δεδομένα

Μέχρι τη στιγμή σύνταξης της παρούσας διπλωματικής δεν πραγματοποιήθηκε πείραμα εξόκλευσης ράβδου από την τοιχοποιία με χρήση MasterEmacoS 285 TIX και οπή διαμέτρου Φ20mm. Από τη θεωρητική ανάλυση του υποκεφαλαίου 3.3.1 προκύπτει ότι η μονοαξονική αντοχή του ακυρίου αυτού θα είναι 10,05 KN. Η αντοχή αυτή (10,05KN) είναι πολύ μεγαλύτερη της μέγιστης δρώσας δύναμης (3,389KN). Το γεγονός αυτό καθιστά την επιλογή μεγαλύτερης διαμέτρου οπής στα ευθύγραμμα αγκύρια μη αναγκαία. Όσον αφορά τα γωνιακά αγκύρια η επιλογή της διαμέτρου Φ38mm έγινε ώστε να μπορούν αυτά να τοποθετηθούν από το προσωπικό στις θέσεις τους λόγω γεωμετρίας.

Να σημειωθεί ακόμα ότι, όσον αφορά την τελική εφαρμογή στο έργο, αποφασίστηκε η αποκλειστική χρήση του MasterEmaco S 285 TIX όπου απαιτείται κονίαμα για τη συγκράτηση των ράβδων αγκυρίων στη λιθοδομή. Ωστόσο στον ΠΙΝΑΚΑ 1, παρατίθενται οι πιθανοί μηχανισμοί αστοχίας και για την περίπτωση του MasterFlow 980 για λόγους πληρότητας. Η επιλογή του MasterEmaco S2 85 TIX υπερίσχυσε επίσης ως κονίαμα περισσότερο συμβατό προς τα ιστορικά υλικά έναντι του MasterFlow 980. Οι τελικές διάμετροι των οπών για την σύνδεση των ράβδων στην τοιχοποιία με MasterEmaco S 285 TIX που επιλέχθηκαν εν τέλει για τη ζώνη των φατνωμάτων είναι:

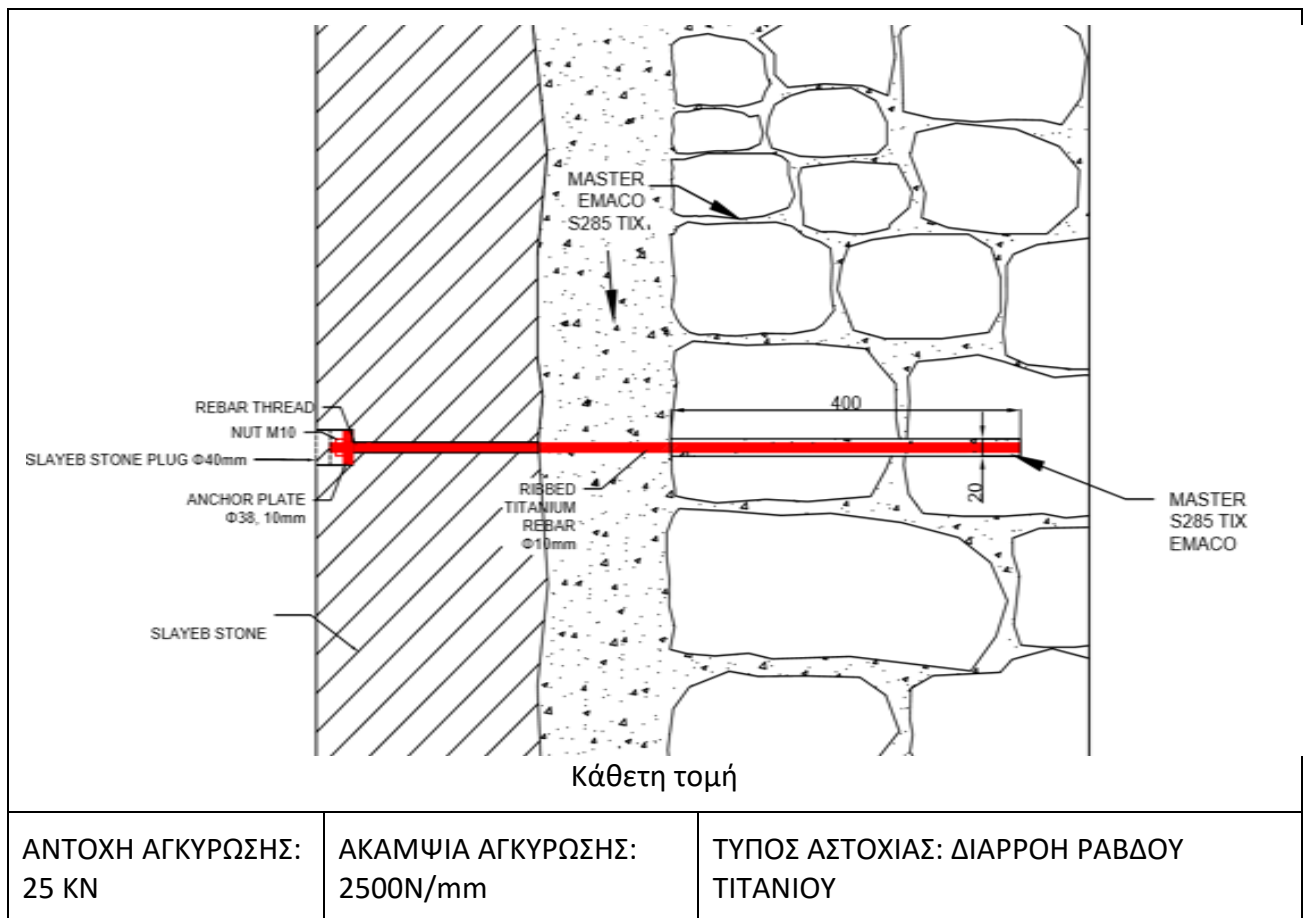
- Φ20mm για τα ευθύγραμμα αγκύρια
- Φ38mm για τα γωνιακά αγκύρια

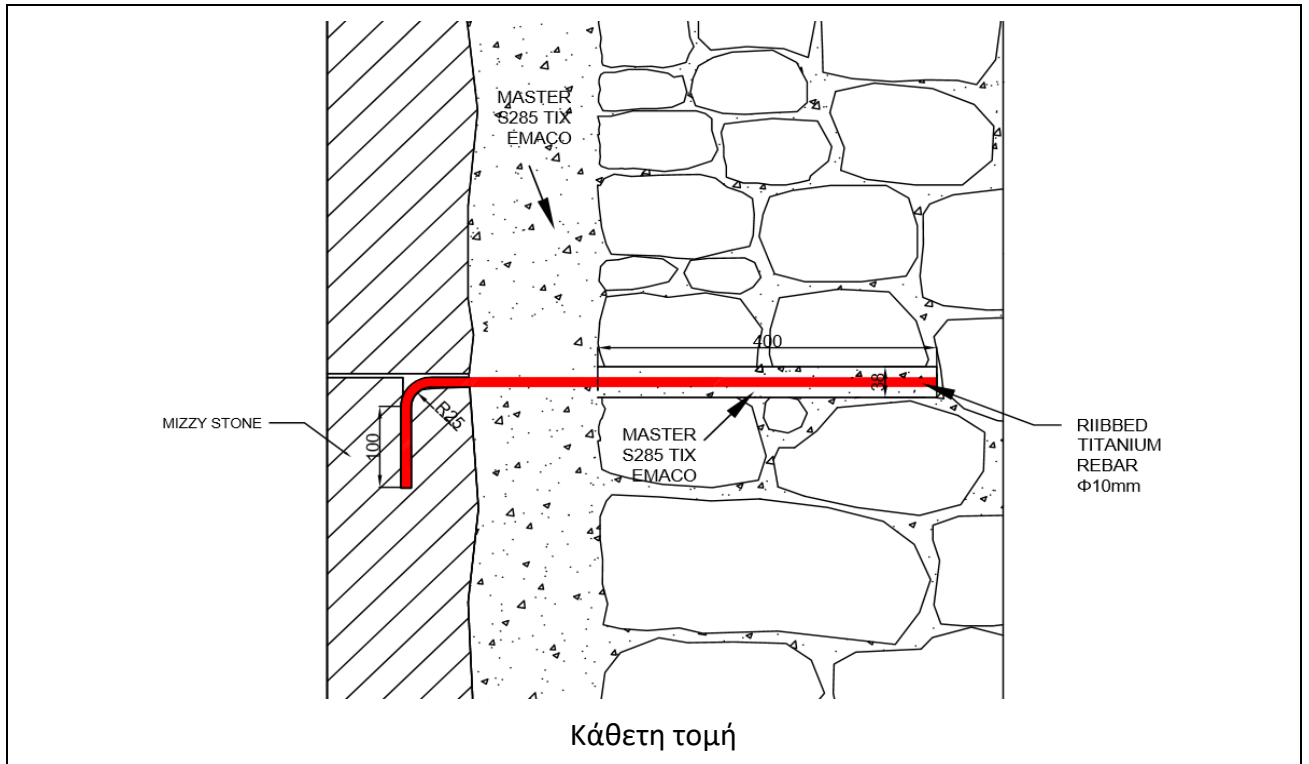
Επίσης, αναφορικά με τα αγκύρια τύπου «Γ» στις κολώνες, στα πλαίσια της διπλωματικής αυτής δεν πραγματοποιήθηκε δοκιμή εξόκλευσης από λίθο Slayeb. Εφόσον όμως οι διαστάσεις άντυγας επαρκούν αναμένεται το αγκύριο να αστοχήσει με τον ίδιο τρόπο, δηλαδή να ολισθήσει-εξολκευθεί από τον λίθο.

Κάθε ένα από τα αγκύρια αυτά αποτελείται από τρία τμήματα: τη σύνδεση με την ορθομαρμάρωση, τη σύνδεση με την τοιχοποιία και το «ελεύθερο» τμήμα μεταξύ τους. Για την αποτίμηση της ακαμψίας καθενός είδους αγκυρίου που χρησιμοποιήθηκε μπορεί να προσομοιωθούν τα τρία αυτά τμήματα ως ελατήρια σε σειρά. Η επιρροή του κονιάματος πλήρωσης θεωρείται αμελητέα στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής.

$$\frac{1}{K_{anchor}} = \frac{1}{K_{stone}} + \frac{1}{K_{bar}} + \frac{1}{K_{masonry}}$$

Πίνακας 6. Τύποι αγκυρώσεων που εφαρμόστηκαν , Ιδία επεξεργασία



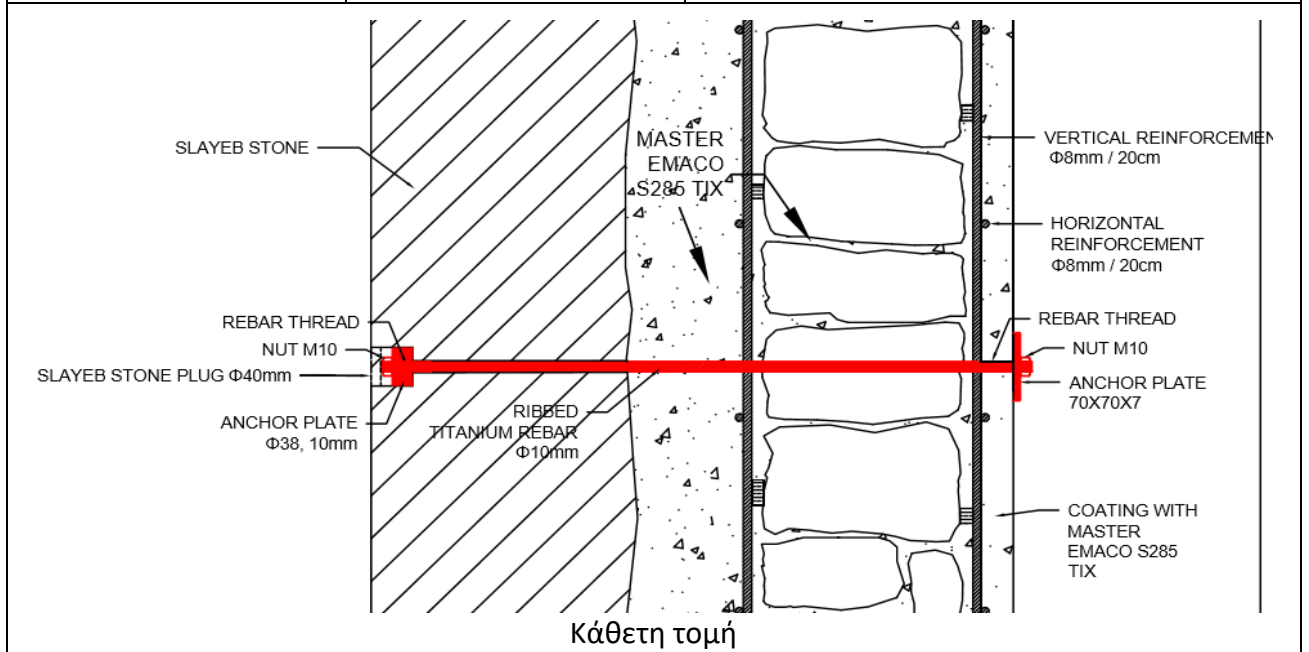


ΑΝΤΟΧΗ ΑΓΚΥΡΩΣΗΣ:  
10 KN

ΑΚΑΜΨΙΑ ΑΓΚΥΡΩΣΗΣ:

1250 N/mm

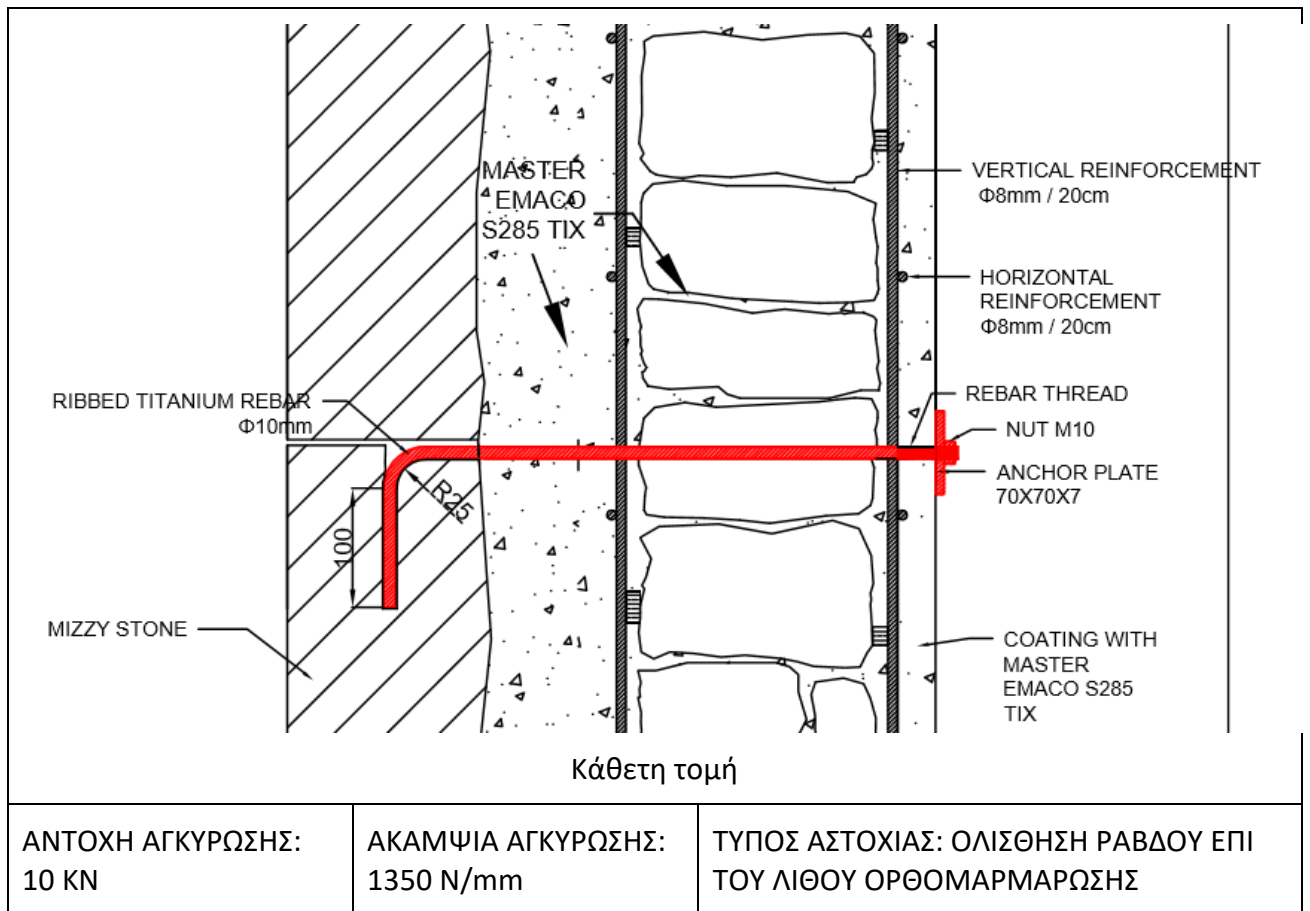
ΤΥΠΟΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ: ΟΛΙΣΘΗΣΗ ΡΑΒΔΟΥ ΕΠΙ ΤΟΥ ΛΙΘΟΥ ΟΡΘΟΜΑΡΜΑΡΩΣΗΣ



ΑΝΤΟΧΗ ΑΓΚΥΡΩΣΗΣ:  
25 KN

ΑΚΑΜΨΙΑ ΑΓΚΥΡΩΣΗΣ:  
3000 N/mm

ΤΥΠΟΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ: ΔΙΑΡΡΟΗ ΡΑΒΔΟΥ ΤΙΤΑΝΙΟΥ



Εικόνα 66. Ευθύγραμμο αγκύριο κολώνας λίγο πριν την τοποθέτηση  
 Πηγή: Ερευνητική ομάδα ΕΜΠ, 2017



Εικόνα 67. Τοποθετημένα ευθύγραμμα αγκύρια σε κολώνα. Με δυσκολία διακρίνονται οι τάρες που κρύβουν τις οπές τους.

Πηγή: Ερευνητική ομάδα ΕΜΠ, 2017



Εικόνα 68. Αγκύριο τύπου «Γ»  
Πηγή: Ερευνητική ομάδα ΕΜΠ, 2017

### 5.1.1.ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΔΥΝΑΜΕΩΝ ΣΤΟΥΣ ΣΥΝΔΕΣΜΟΥΣ ΤΗΣ ΟΡΘΟΜΑΡΜΑΡΩΣΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Τα δεδομένα των υλικών, από τα οποία θα αποτελείται το μνημείο στην τελική του μορφή, εισάγονται στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS. Εισάγονται επίσης τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του μνημείου και προκύπτει έτσι το μοντέλο-προσομοίωμα του μνημείου. Στη συνέχεια υπολογίζονται οι δυνάμεις που θα κληθούν να παραλάβουν οι σύνδεσμοι τιτανίου σε περίπτωση σεισμού συμβατού με τη σεισμική επικινδυνότητα της περιοχής των Ιεροσολύμων.

Η μεθοδολογία που ακολουθείται είναι η εξής:

α. Κατασκευάζονται τεχνητά επιταχυνσιογραφήματα της εδαφικής κίνησης σύμφωνα με την Παράγραφο §3.2.3.1.2 του Ευρωκώδικα 8 [2004]. Δημιουργείται το φάσμα απόκρισης για σεισμό όπου λαμβάνονται υπόψη δεδομένα από παλιότερους σεισμούς που συνέβησαν στην περιοχή.

β. Επιλύεται το χωρικό προσομοίωμα.

γ. Υπολογίζονται οι επιταχύνσεις στις όψεις του Ιερού Κουβουκλίου με βάση τις οποίες θα προκύψουν οι δυνάμεις τις οποίες θα κληθούν να παραλάβουν οι σύνδεσμοι.

δ. Οι δυνάμεις των συνδέσμων τιτανίου προκύπτουν πολλαπλασιάζοντας τη μάζα κ άθε λίθου, με βάση τη λεπτομερή τους αποτύπωση, με την αντίστοιχη επιτάχυνση.

Για την αποτίμηση των δυναμικών χαρακτηριστικών εφαρμόζεται το φάσμα σχεδιασμού Τύπου Α του Ευρωκώδικα 8 (CEN 2004) και δεδομένης της σπουδαιότητας του μνημείου χρησιμοποιείται ο μέγιστος συντελεστής ασφαλείας  $\gamma=1,4$ . Η εδαφική επιτάχυνση αναφοράς για το έδαφος τύπου Α είναι  $\alpha_g=0,13g$ . Ωστόσο λόγω σπουδαιότητας του μνημείου, λήφθηκε υπόψη και το σενάριο για εδαφική επιτάχυνση  $\alpha_g=0,87g$  όπως υπολογίστηκε από τους Rutenberg & Levy (2004) για το σεισμό του 1927 (Σπυράκος & Μανιατάκης, 2017).

#### Ανατολική όψη

Με βάση τις επιταχύνσεις που προκύπτουν από την ανάλυση χρονοϊστορίας με τεχνητά επιταχυνσιογραφήματα, η επιτάχυνση σε καμία θέση της ανατολικής όψης δεν υπερβαίνει τα  $14,36 \text{ m/sec}^2$ . Επί το δυσμενέστερο, η μέγιστη δύναμη που θα κληθεί να αντιμετωπίσει ένα αγκύριο τιτανίου προκύπτει από τον πολλαπλασιασμό της επιτάχυνσης  $14,36 \text{ m/sec}^2$  επί τη μάζα του βαρύτερου λίθου

της όψης αυτής (E3\_D10) που είναι 117,463 kg. Προκύπτει λοιπόν μία δύναμη της τάξης του 1,719 KN.

### **Δυτική όψη**

Οι επιτάχυνσεις που εμφανίζονται στη δυτική όψη δεν υπερβαίνουν τα 12,75 m/sec<sup>2</sup>. Επί το δυσμενέστερο, η μέγιστη δύναμη που θα κληθεί να αντιμετωπίσει ένα αγκύριο τιτανίου προκύπτει από τον πολλαπλασιασμό της επιτάχυνσης 12,75 m/sec<sup>2</sup> επί τη μάζα του βαρύτερου λίθου της όψης αυτής (W\_D3) που είναι 80,554 kg. Προκύπτει λοιπόν μία δύναμη της τάξης του 1,047KN.

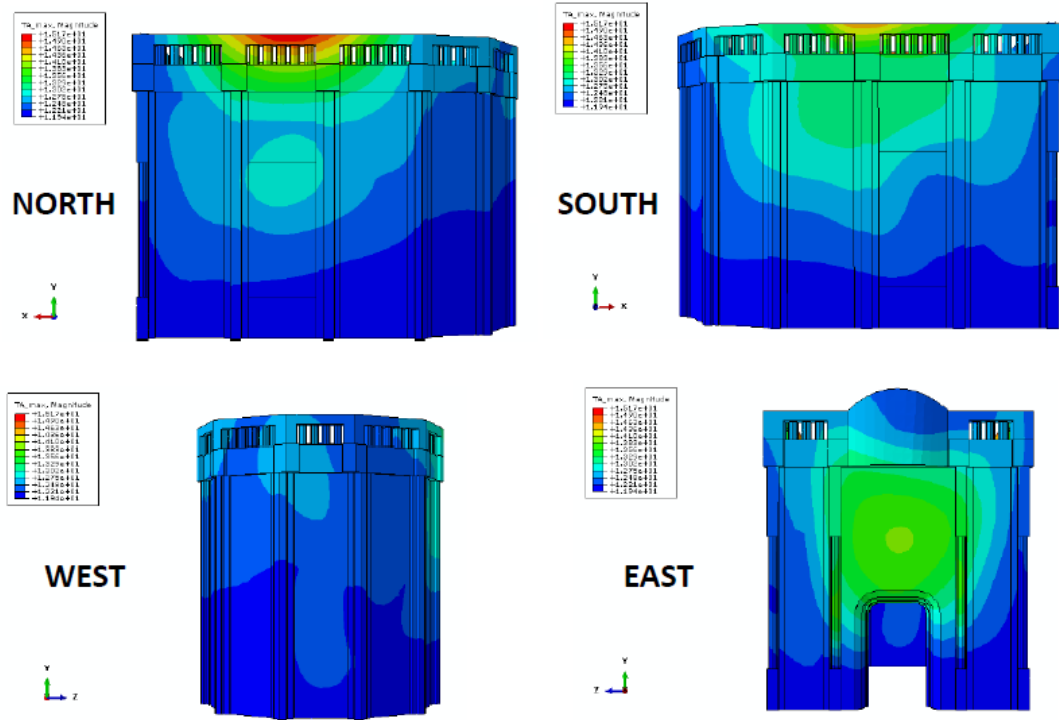
### **Βόρεια όψη**

Από την ανάλυση χρονοϊστορίας με τεχνητά επιταχυνσιογραφήματα στο μνημείο, η επιτάχυνση σε καμία θέση της βόρειας όψης δεν υπερβαίνει στη Ζώνη 1 τα 13,56 m/sec<sup>2</sup> και στη Ζώνη 2 τα 15,17 m/sec<sup>2</sup>. Επί το δυσμενέστερο, η μέγιστη δύναμη που θα κληθεί να αντιμετωπίσει ένα αγκύριο τιτανίου προκύπτει από τον πολλαπλασιασμό της επιτάχυνσης 13,56 m/sec<sup>2</sup> επί τη μάζα του βαρύτερου λίθου της όψης (N2\_Z62) αυτής που είναι 234,797 kg. Προκύπτει λοιπόν μία δύναμη της τάξης του 3,246 KN.

### **Νότια όψη**

Στην όψη αυτήν, η μέγιστη επιτάχυνση που εμφανίζεται είναι στη Ζώνη 1 τα 13,83 m/sec<sup>2</sup> και στη Ζώνη 2 τα 15,17 m/sec<sup>2</sup>. Επί το δυσμενέστερο, η μέγιστη δύναμη που θα κληθεί να αντιμετωπίσει ένα αγκύριο τιτανίου προκύπτει από τον πολλαπλασιασμό της επιτάχυνσης 13,83 m/sec<sup>2</sup> επί τη μάζα του βαρύτερου λίθου της όψης (S3\_Z99) αυτής που είναι 240,405 kg. Προκύπτει λοιπόν μία δύναμη της τάξης του 3,389KN. **Η δύναμη αυτή 3,389KN είναι και η μέγιστη δύναμη που ασκείται σε λίθο της ορθομαρμάρωσης σε όλο το μνημείο. Όπως παρατηρείται η αντοχή των αγκυρίων είναι περισσότερο από δύο φορές τη μέγιστη δρώσα δύναμη.** Αξίζει να σημειωθεί επίσης ότι η δύναμη αυτή εμφανίζεται σε όβουλο φατνώματος. Όπως φαίνεται όμως και στα σχέδια τοποθέτησης των αγκυρίων, τα μέλη αυτά συγκρατούνται από περισσότερα από ένα γωνιακά αγκύρια γεγονός που συμβάλει ακόμα περισσότερο υπέρ της ασφάλειας.





Εικόνα 69. Οι επιταχύνσεις στις όψεις του μνημείου όπως προκύπτουν για  $\alpha_g=0,87g$

Πηγή: Σπυράκος & Μανιατάκης, 2017

## 6.ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η διαδικασία ακύρωσης ράβδων τιτανίου Φ10 τοιχοποιία από λιθοδομή όπως συντάχθηκε υπό την καθοδήγηση του επιβλέποντα καθηγητή Χ. Μουζάκη. Η αγκύρωση νευρωμένων ράβδων τιτανίου διαμέτρου Φ10 σε τοιχοποιία από λιθοδομή σε οπές φ20 ή φ38 με τη χρήση των υλικών MASTERFLOW 980 ή MASTEREMACO S285 TIX της εταιρίας BASF ακολουθούνται τα βήματα τα οποία περιγράφονται στη συνέχεια:

### **Βήμα 1. Προετοιμασία Υλικών –Αναλογία ανάμειξης**

#### A.Κονίαμα MASTERFLOW 980, διάμετρος οπής φ20

Το υλικό ενός σάκου 25Kg διέρχεται από κόσκινο βρόγχου 2mm και προκύπτει κονίαμα βάρους 16,97Kg. Για την παρασκευή ενέματος υψηλής ρευστότητας το υλικό αναμειγνύεται με νερό, ο λόγος νερού/κονίαμα κατά βάρος είναι 0,20. Για κάθε αγκύριο απαιτούνται 2Kg κοσκινισμένου κονιάματος.

#### B.Κονίαμα MASTEREMACO S 285 TIX, διάμετρος οπής φ20

Για την παρασκευή ενέματος υψηλής ρευστότητας το υλικό αναμειγνύεται με νερό, ο λόγος νερού/κονίαμα κατά βάρος είναι 0,225. Για κάθε αγκύριο απαιτούνται 2Kg κονιάματος.

#### Γ. Κονίαμα MASTEREMACO S 285 TIX, διάμετρος οπής φ38

Για την παρασκευή ενέματος μέτριας ρευστότητας το υλικό αναμειγνύεται με νερό, ο λόγος νερού/κονίαμα κατά βάρος είναι 0,17. Για κάθε αγκύριο απαιτούνται 4Kg κονιάματος.

### **Βήμα 2. Διάτρηση οπών**

#### A.Διαμέτρου Φ20

Διανοίγεται αρχικά οπή διαμέτρου φ12 και βάθους 0,40m με κρουστικό δράπανο, η οποία στη συνέχεια διευρύνεται με τρυπάνι φ 20 στο ίδιο βάθος. Το βάθος διάτρησης μετρείται από την επιφάνεια της τοιχοποιίας. Όταν το κονίαμα δόμησης της τοιχοποιίας είναι χαμηλής αντοχής τεμάχια του πέφτουν μέσα στην οπή. Για την απομάκρυνσή τους το τρυπάνι εισέρχεται και εξέρχεται παλινδρομικά μέχρις ότου ο χειριστής να μην δέχεται αντίσταση.

#### B.Διαμέτρου Φ38

Ακολουθούνται τα βήματα για τη διάνοιξη της οπής διαμέτρου Φ20 και στη συνέχεια η οπή διευρύνεται διαδοχικά μέχρι βάθους 0,40m με τρυπάνια Φ32 και Φ38.

### **Βήμα 3. Προετοιμασία οπών**

#### **A.Καθαρισμός**

Στην οπή εισέρχεται σωλήνας με πεπιεσμένο αέρα εξωτερικής διαμέτρου Φ16 μέχρι το πέρας της. Για τον καθαρισμό χρησιμοποιείται τουμπόβουρτσα ενώ η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρις ότου να μην εξέρχεται σκόνη από την οπή.

#### **B.Διαβροχή**

Πλένεται η οπή με νερό επιτρέποντας του να ρέει προς τα έξω με χρήση σωλήνα εξωτερικής διαμέτρου Φ16. Κατόπιν αυτή διαβρέχεται επαναλαμβανόμενα μέχρι τον πλήρη κορεσμό των λίθων και των κονιαμάτων της λιθοδομής της τοιχοποιίας.

### **Βήμα 4. Τοποθέτηση ενέματος στην οπή**

Χρησιμοποιείται ειδική αντλία χειρός μέσα στην οποία τοποθετείται το κονίαμα. Στη συνέχεια προσαρμόζεται στο ακροφύσιο της σωλήνας εξωτερικής διαμέτρου Φ16 ή Φ32 για την οπή Φ20 και Φ38 αντίστοιχα. Στην περίμετρο της οπής τοποθετείται σφουγγάρι, το οποίο αφήνει το πάνω μέρος της ανοικτό, ώστε να εξέρχεται ο αέρας που υπάρχει μέσα σε αυτή μέχρι την πλήρωσή της. Κατά την πλήρωση ο σωλήνας κινείται προς τα έξω, ενώ το σφουγγάρι εμποδίζει την εξαγωγή του ενέματος από την οπή.

### **Βήμα 5. Τοποθέτηση ράβδων τιτανίου στην οπή**

Τοποθετείται το τιτάνιο μέσα στην οπή μέχρι βάθους 0,40m περιστρέφοντάς το σύμφωνα με τους δείκτες του ρολογιού, αν χρειαστεί να κινηθεί προς τα έξω τότε περιστρέφεται ανθρωπολογικά. Στην οπή Φ20 αν απαιτηθεί χρησιμοποιείται κρούση του τιτανίου με σφυρί.

### **Βήμα 6 Καθαρισμός εργαλείων**

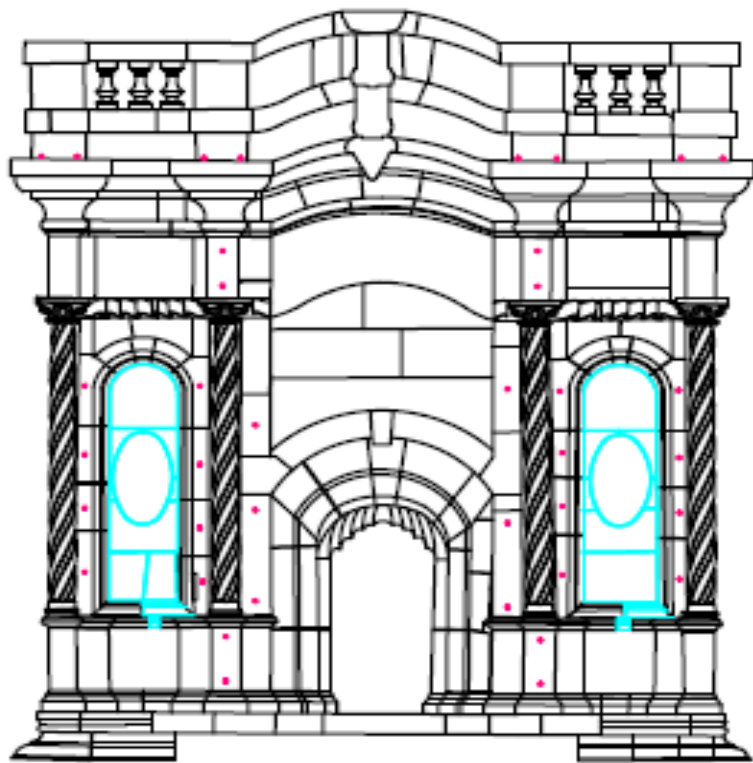
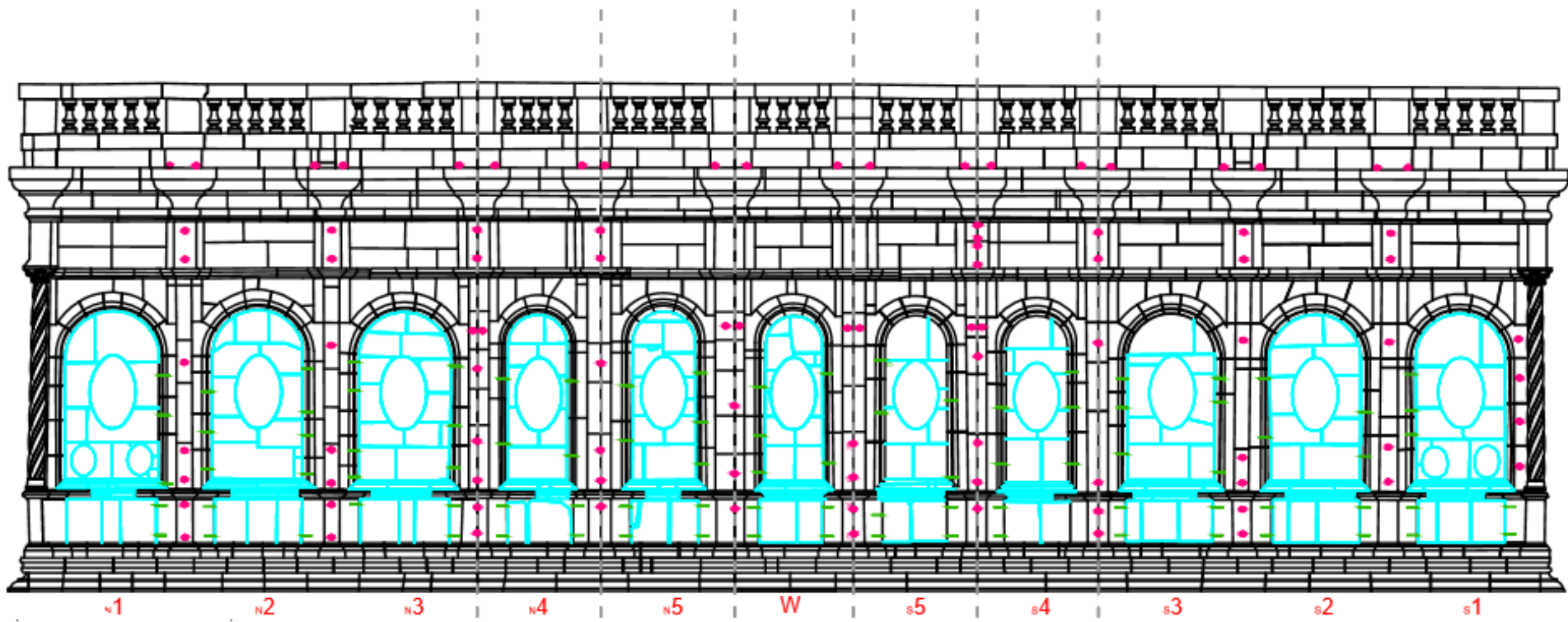
Αμέσως μετά την πλήρωση των οπών με κονίαμα, η αντλία και οι σωλήνες που χρησιμοποιήθηκαν πρέπει να πλυθούν πολύ καλά ώστε να είναι έτοιμα για την επόμενη πλήρωση.

### **Βήμα 7 Συντήρηση του ενέματος**

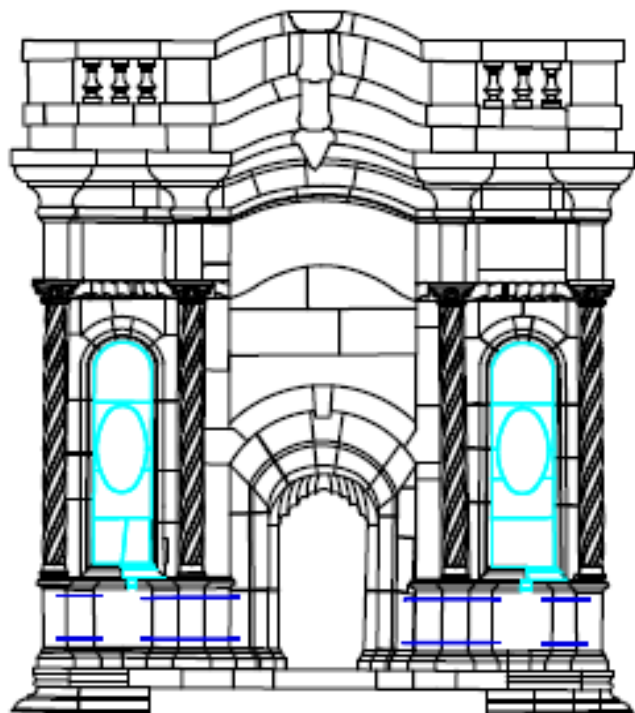
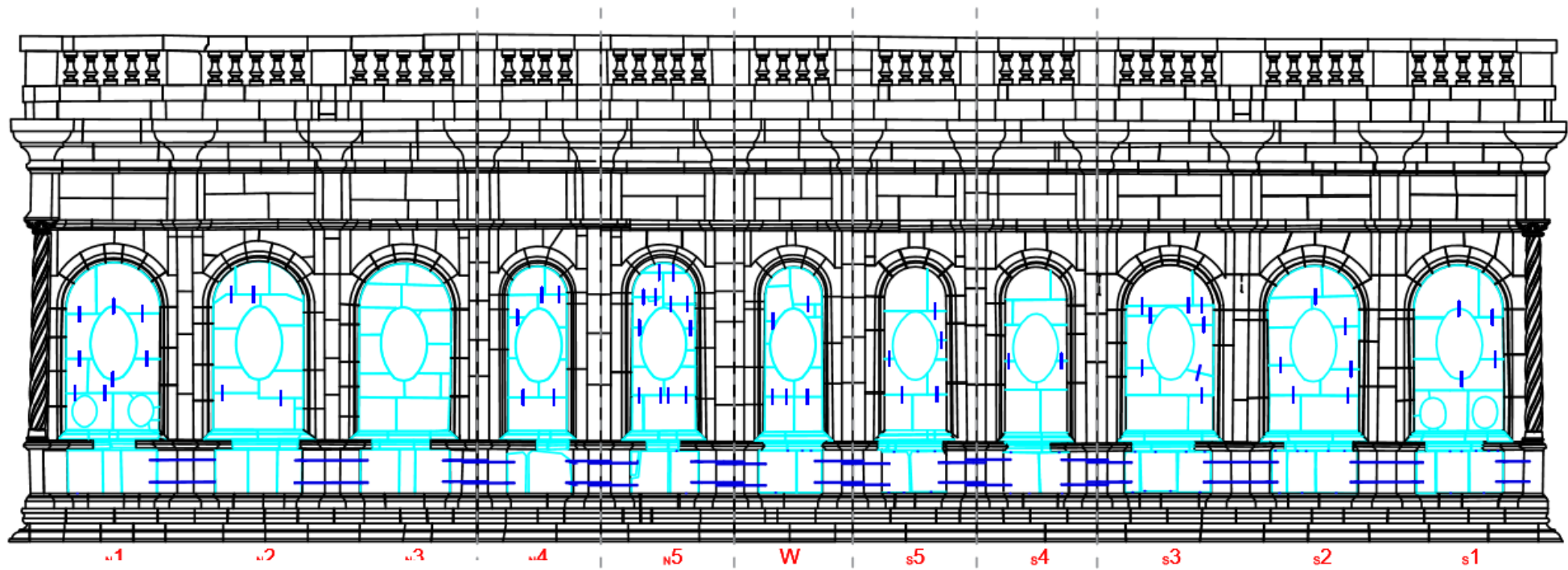
Το ένεμα συντηρείται με διαβροχή νερού για πέντε ημέρες.

Για την διεξαγωγή όλων των ανωτέρω εργασιών είναι αναγκαία η χρήση από το προσωπικό προστατευτικών γυαλιών, γαντιών και μάσκας.

## **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ**

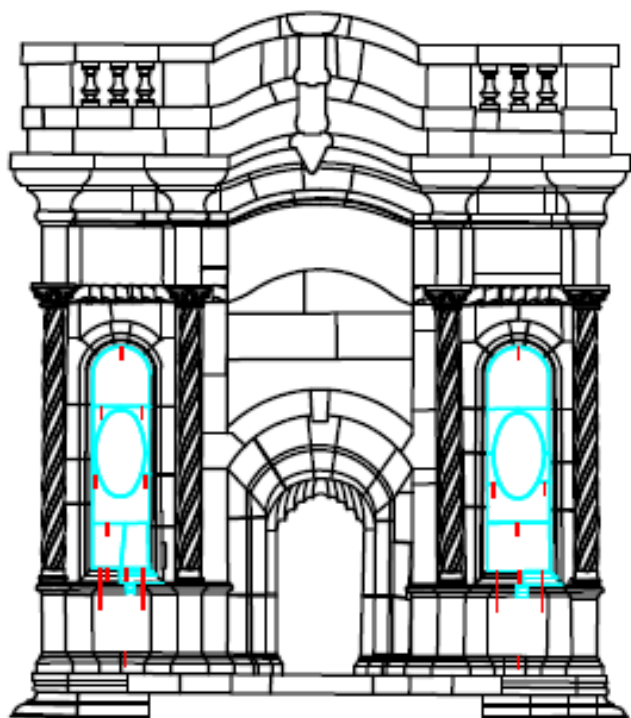
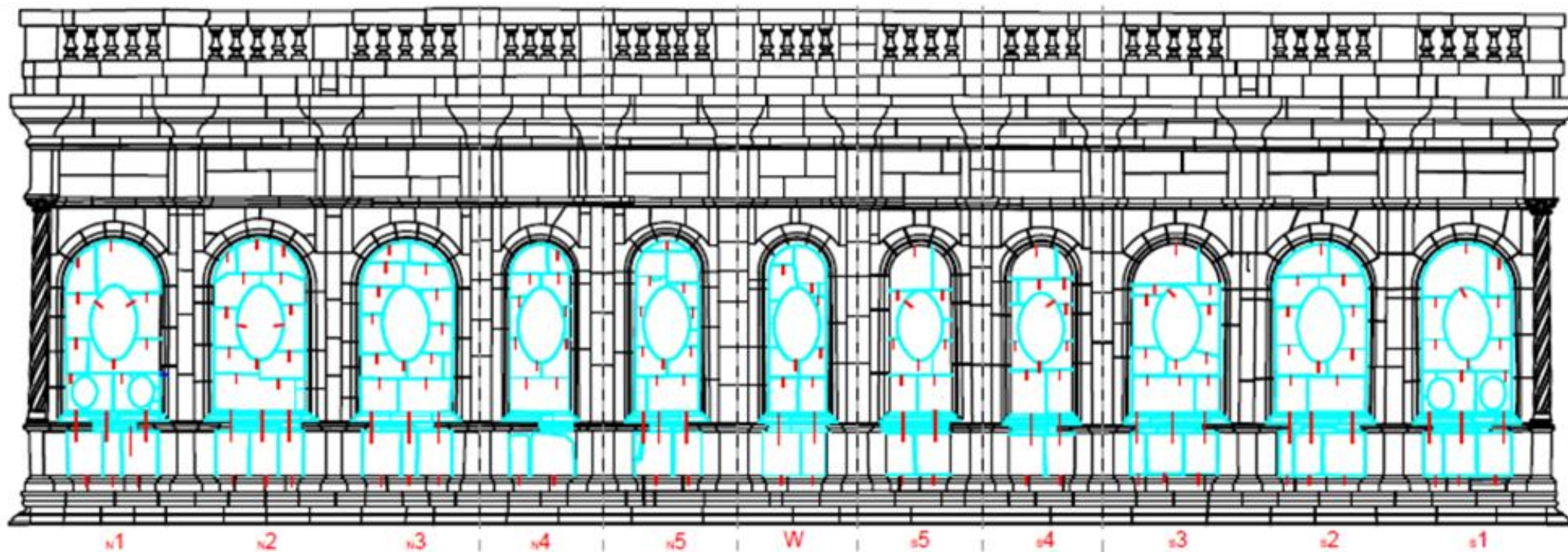


Σχέδιο 22. Κλίμακα 1:70.Θέσεις αγκυρίων Φ10mm. Με φούξια χρώμα σημειώνονται οι θέσεις των ευθύγραμμων αγκυρίων και με πράσινο οι θέσεις των αγκυρίων «Γ» στις κολώνες. Τα αγκύρια είναι διαμέτρου Φ10mm και έχουν νευρώσεις.



Σχέδιο 24. Κλίμακα 1:70. Θέσεις βλήτρων Φ12mm. Με πορτοκαλί χρώμα σημειώνονται οι θέσεις των βλήτρων πάνω στις όψεις του μνημείου. Τα κάθετα βλήτρα εισέρχονται 10cm σε κάθε λίθο συνδέοντάς τους μεταξύ τους. Τα οριζόντια, διατρέχουν όπως φαίνεται τους λίθους των βάσεων από τις κολώνες σε όλο τους το μήκος και εισέρχονται 10cm στους γειτονικούς.





Σχέδιο 24. Κλίμακα 1:70. Θέσεις αγκυρίων  $\Phi 10\text{mm}$ .  
 Με κόκκινο χρώμα σημειώνονται οι θέσεις των  
 νευρωμένων αγκυρίων «Γ» των φατνωμάτων.



## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

### Ξένα Βιβλιογραφία

BASF, (2014), MASTEREMACOS285 TIX, Technical Data Sheet

BASF, (2014), MASTEINJECT 222, Technical Data Sheet

BASF, (2014), MASTERFLOW 980, Technical Data Sheet

Titanium Inspection certificate,2016, Jerusalem

Ben-Menahem, A. (1991). Four thousand years of seismicity along the Dead Sea rift. *Journal of Geophysical Research* 1991:96(812);20195-2021

Birger Gigla, Field pull-out test of supplementary injection anchors in historic masonry. Universitat Karlsruhe, Karlsruhe, Germany

Konstantinos Daniel Tsavdaridis, Mohamed A. Shaheen, Charalampos Baniotopoulos, Emad Salem ,(2015) Analytical approach of anchor rod stiffness and steel base plate calculation under tension, Leeds, UK

Comité Européen de Normalisation, CEN (2004). Eurocode 8 (EC8-1), 2004: Design of structures for earthquake resistance Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings

Comité Européen de Normalisation, CEN (2005). "Eurocode 6: Design of Masonry Structures—Part 1-1: General Rules for Reinforced and Unreinforced Masonry Structures." Comité Européen de Normalisation: Brussels, Belgium (2005). .

Contrafatto L. & Cosenza R. (2014), Behaviour of post-installed adhesive anchors in natural stone, *Construction and Building Materials*, (68),σελ. 355 - 369

Dakanali I., Stavrakas I., Triantis D., Kourkoulis S.K., Pull-out of threaded reinforcing bars from marble blocks, National Technical University of Athens, Athens

Interdisciplinary Research Group for the Monuments Protection,( 2016), First progress report on the scientific supervision, monitoring and decision making, National Technical University of Athens, Jerusalem

Interdisciplinary Research Group for the Monuments Protection,( 2016), Second progress report on the scientific supervision, monitoring and decision making, National Technical University of Athens, Jerusalem

Interdisciplinary Research Group for the Monuments Protection,( 2017), Third progress report on the scientific supervision, monitoring and decision making, National Technical University of Athens, Jerusalem

Interdisciplinary Research Group for the Monuments Protection,(2017), Fourth progress report on the scientific supervision, monitoring and decision making, National Technical University of Athens, Jerusalem

Loredana Contrafatto, Renato Cosenza,(2014), Behaviour of post-installed adhesive anchors in natural stone, University of Catania, Italy

Pisani M. A., (2016), Theoretical approach to the evaluation of the load-carrying capacity of the tie rod anchor system in a masonry wall,Engineering Structures, (124), σελ. 85-95

Pringle D.,(2007), The Churches of the Crusader Kingdom of Jerusalem: Volume 3, The City of Jerusalem,Cambridge press,Cambridge

Siamak Epackachia et al,(2015), Behavior of adhesive bonded anchors under tension and shear loads, Department of Civil, Structural and Environmental Engineering, University at Buffalo, Buffalo, NY 14260, USA

Wiemers G.(2010), Jerusalem: History, Archaeology and Apologetic Proof of Scripture, Last Hope Books and Publications

User's Guide. ETABS® 2015. Integrated Building Design Software, 2015

User's Guide. ETABS®, (2015), Integrated Building Design Software, 2015

### Ελληνόγλωσση Βιβλιογραφία

Εφεισίου Ε., (2011), Παραδοσιακά και νεώτερα ιστορικά δομικά συστήματα στον Ελληνικό χώρο – κατασκευαστική ανάλυση, Πρόχειρες σημειώσεις για το μάθημα 2.1. Μεθοδολογία ανάλυσης και τεχνηρίωσης, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Κορρές Ε., (2016), 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, Διάλεξη στα πλαίσια του ΔΠΜΣ Β' κατεύθυνση

Μητρόπουλος Θ., (2015), Ο Πανάγιος τάφος του πανίερου ναού της Αναστάσεως: Σύντομη ιστορική και κτηριακή αναδρομή από τους αρχαιότετους χρόνους μέχρι την πυρκαγιά του ναού της Αναστάσεως το 1808.

Μοροπούλου,Μούνδουλας(2014),Συμβατά και επιτελεστικά κονιάματα αποκατάστασης, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Σπυράκος, Κ., Μανιατάκης, Χ.Α. (2016). Αποτίμηση Υφιστάμενης Κατάστασης Έναντι Στατικών και Σεισμικών Φορτίων του Ιερού Κουβούκλιου του Παναγίου Τάφου στον Πανίερο Ναό της Αναστάσεως στα Ιεροσόλυμα.

Σπυράκος, Κ., Μανιατάκης, Χ.Α. (2016), Υπολογισμός στηρίξεων ορθομαρμάρωσης-Υπολογισμός δυνάμεων.

Τάσιος, Θ. 2000. Οι υφιστάμενες κατασκευές και οι σεισμοί. Διάλεξη στην Γαλλική Εταιρεία Αντισεισμικής.

