

Κατά χώρα συγκολλήσεις και συρραφές πώρινων λιθόπλινθων, κατά την αποκατάσταση του Μακεδονικού τάφου του Δερβενίου

Αλέξιος Ε. Παπασωτηρίου
Φανή Α. Αθανασίου
Βενετία Π. Μάλαμα
Μαρία Π. Μίζα
Μαρία Κ. Σαραντίδου

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο «Μακεδονικός τάφος του Λαγκαδά», γνωστός και ως «τάφος του Μακρίδη Μπέη», είναι σημαντικό ταφικό μνημείο του τέλους του 4^{ου} π.Χ. αιώνα. Ο τάφος ανασκάφηκε το 1910 από τον Th.Macridy Bey, που αμέσως επεσήμανε την εξαιρετικά κακή κατάσταση διατήρησης του μνημείου. Ωστόσο, έκτοτε το μνημείο εγκαταλείφθηκε, και οι ανασκαφικές εργασίες επαναλήφθηκαν μόλις το 1993, για διάστημα τριών ετών. Σήμερα, βρίσκεται υπό εξέλιξη το έργο αποκατάστασης και ανάδειξης του μνημείου από την ΙΣΤ΄ ΕΠΚΑ, στο πλαίσιο του οποίου έχει ήδη ολοκληρωθεί η δομική αποκατάσταση της καμάρας του προθαλάμου, με την εκτέλεση συγκολλήσεων και συρραφών σε λιθόπλινθους ευρισκόμενους κατά χώρα. Βασικό κριτήριο για τον σχεδιασμό της επέμβασης υπήρξε η διατήρηση της εν ξηρώ δομής της αρχαίας κατασκευής. Προκειμένου να εξασφαλιστεί η αυτοτέλεια και η δομική ανεξαρτησία του κάθε λιθόπλινθου, αναπτύχθηκε και εφαρμόστηκε μία σύνθετη τεχνική ενεμάτωσης, που επέτρεψε τον ακριβή έλεγχο της διείσδυσης του ενέματος, ακόμη και σε περιοχές που δεν είναι ορατές ή προσβάσιμες. Η διαδικασία που εφαρμόστηκε βασίζεται στην κατά στάδια ενεμάτωση του κάθε λιθόπλινθου, μέσα από κατάλληλα διατρήματα. Για την διερεύνηση της πορείας των ρωγμών στο εσωτερικό των λίθων και τον έλεγχο της διείσδυσης του ενέματος, χρησιμοποιήθηκε σε μεγάλη έκταση η ενδοσκοπική έρευνα.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: πώρινοι λιθόπλινθοι

1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο «Μακεδονικός τάφος του Λαγκαδά», γνωστός και ως «τάφος του Μακρίδη Μπέη» βρίσκεται στο νότιο όριο του νεκροταφείου της αρχαίας Λητής, στη θέση Δερβένι του νομού Θεσσαλονίκης. Πρόκειται για ένα οικοδόμημα μνημειακών διαστάσεων, με θάλαμο και προθάλαμο, το οποίο κατασκευάστηκε στο τέλος του 4ου π.Χ. αιώνα για την ταφή ενός μόνο νεκρού. Η ύπαρξη του κτίσματος έγινε γνωστή το Φεβρουάριο του 1910, όταν, μετά από έναν σεισμό, εμφανίστηκε μία οπή στο έδαφος του τύμβου. Η ανασκαφή του μνημείου πραγματοποιήθηκε από τον Οθωμανό αξιωματούχο Th.Macridy, ο οποίος και δημοσίευσε τα αποτελέσματα της ανασκαφής το 1911¹. Ο Μακρίδης αποκάλυψε την πρόσοψη και το εσωτερικού του τάφου, ο οποίος βρέθηκε συλημένος και σε πολύ κακή κατάσταση διατήρησης. Η σημασία του μνημείου αναγνωρίστηκε ήδη από την στιγμή της ανακάλυψής του, ωστόσο, λόγω των πολέμων που ακολούθησαν, δεν υπήρξε περαιτέρω μέριμνα για το ταφικό κτίσμα. Το μνημείο εγκαταλείφθηκε για δεκαετίες, και μόλις το 1993 ξεκίνησε νέα ανασκαφή από την ΙΣΤ΄ ΕΠΚΑ. Το 2008 η εφορεία ανέλαβε σειρά μελετών για την αποκατάσταση και την ανάδειξη του, που οδήγησαν στην ένταξη του σχετικού έργου στο ΕΣΠΑ 2007-2013.

Ο τάφος καλυπτόταν από τύμβο διαμέτρου 75m και ύψους 19m, από τον οποίο σώζεται το μεγαλύτερο μέρος. Ο τάφος είναι έκκεντρα τοποθετημένος, στη δυτική πλευρά του τύμβου (εικ. 1). Ανήκει στον τύπο του διθάλαμου μακεδονικού τάφου, και η όψη του είχε διαμόρφωση Ιωνικού ρυθμού. Ο προθάλαμος και ο θάλαμος έχουν διαφορετικές διαστάσεις και καλύπτονται με ξεχωριστές καμάρες.

¹ Macridy Th. 1911

Το οικοδόμημα είναι χτισμένο κατά το ισόδομο σύστημα, με λιθόπλινθους από καστανόχρωμο ασβεστιτικό πωρόλιθο. Μοναδικά μαρμάρινα στοιχεία είναι η λάρνακα και το θύρωμα του μεσότοιχου, το οποίο έφερε και μαρμάρινα θυρόφυλλα, που σήμερα εκτίθενται στο αρχαιολογικό μουσείο της Κωνσταντινούπολης. Ο δρόμος που οδηγούσε στο ταφικό οικοδόμημα έχει μήκος 14,70μ και πλάτος 3,40μ. Πλευρικά ορίζεται από ψηλούς τοίχους, κτισμένους με ωμές πλίνθους και επιχρισμένους με ασβεστοκονίαμα. Κατά την τελευταία ανασκαφική έρευνα βρέθηκε στην αρχή του δρόμου κλίμακα οκτώ βαθμίδων (εικ. 3).



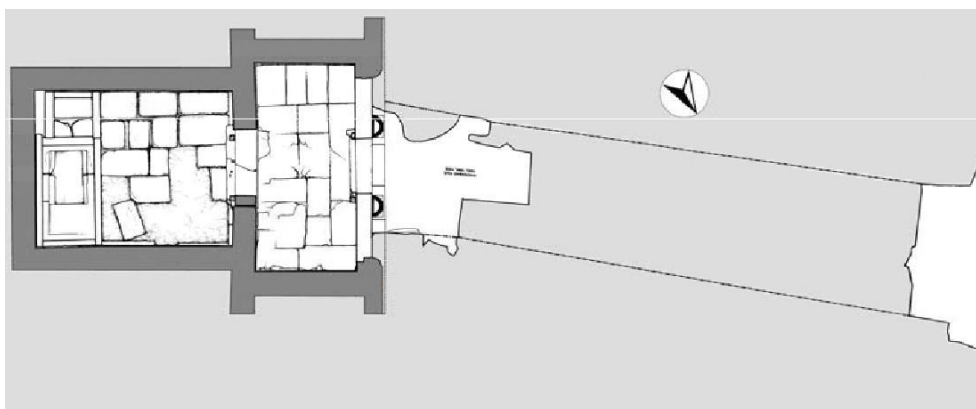
Εικ. 1: Ο τύμβος κατά την ανασκαφή του 1993. (Αρχείο ΙΣΤ' Ε.Π.Κ.Α.)

Το ταφικό κτίσμα έχει υποστεί σημαντικές βλάβες, οι περισσότερες από τις οποίες προκλήθηκαν κατά αρχαιότητα, από το φορτίο του τύμβου. Οι βλάβες αυτές συνίστανται αφενός στην έντονη παραμόρφωση των καμαρών και των τοίχων, και αφετέρου σε εκτεταμένες ρηγματώσεις λιθόπλινθων. Συνέπεια των βλαβών υπήρξε η αστοχία της κύριας όψης του μνημείου, η οποία είχε ήδη καταρρεύσει όταν ο Μακρίδης ανέσκαψε το μνημείο. Εξάλλου, σημαντικές βλάβες υπέστη και το τύμπανο του μεσότοιχου, το κεντρικό τμήμα του οποίου κατέρρευσε στα χρόνια που ακολούθησαν την ανασκαφή του Μακρίδη.

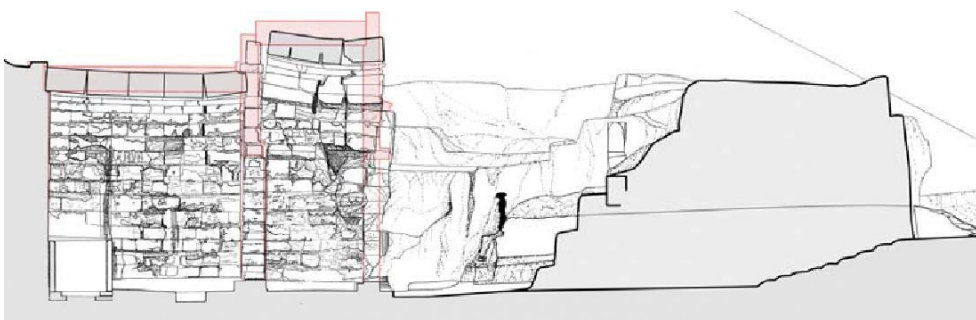
Μολονότι δομικές βλάβες παρατηρούνται σε όλη την έκταση του μνημείου, οι πλέον σοβαρές από αυτές καταγράφονται στην καμάρα του προθαλάμου και στο άνω μέρος των πλευρικών του τοίχων. Κατά την ανασκαφή της δεκαετίας του '90 έγινε προληπτική υποστύλωση της καμάρας, που όμως δεν μπόρεσε να αποτρέψει την παραμόρφωσή της στα χρόνια που ακολούθησαν. Το 2008, η καμάρα βρισκόταν ήδη σε κατάσταση ετοιμορροπίας λόγω οριακής ευστάθειας, και απαιτήθηκε η ανακατασκευή της υποστύλωσης και η λήψη εκτάκτων μέτρων προστασίας. Η μελέτη που εκπονήθηκε για την αποκατάσταση και αναστήλωση του μνημείου προέβλεπε ένα σύνολο σύνθετων επεμβάσεων², που χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες: Κατασκευές εκτός του ταφικού κτίσματος, που αποσκοπούν στην προστασία του και στην εξασφάλιση επαρκούς πλευρικής αντιστήριξης, και επεμβάσεις στο ίδιο το μνημείο, με σκοπό την επισκευή των βλαβών σε κρίσιμες θέσεις. Σήμερα, οι εργασίες δομικής αποκατάστασης στο ταφικό κτίσμα έχουν ολοκληρωθεί, και απομένει η ολοκλήρωση της αναστήλωσης.

² Αθανασίου Φ., Μάλαμα Β., Μίζα Μ., Σαραντίδου Μ., Παπασωτηρίου Α. (2012)

Η πλέον σημαντική από τις επεμβάσεις για την δομική αποκατάσταση του τάφου, ήταν η κατά χώρα συγκόλληση και συρραφή μεγάλου μέρους των ρηγματωμένων θολιτών στην γένεση της καμάρας του προθαλάμου. Η αποκατάσταση των συγκεκριμένων θολιτών, αλλά και ορισμένων λιθόπλινθων στον νότιο και τον βόρειο τοίχο του προθαλάμου, ήταν καθοριστική για την εξασφάλιση της δομικής ακεραιότητας της καμάρας, η οποία λόγω της έκτασης των βλαβών δεν μπορούσε πλέον να φέρει με ασφάλεια το ίδιο βάρος.



Εικ. 2: Κάτοψη του ταφικού κτίσματος και του δρόμου



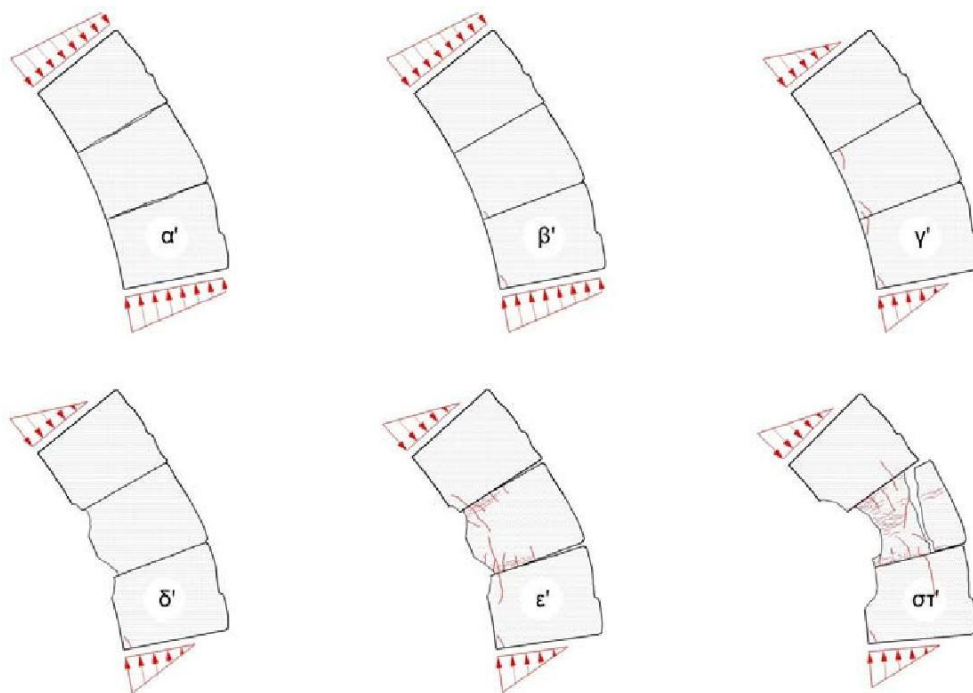
Εικ. 3: Διαμήκης τομή. Με κόκκινο χρώμα η αναπαράσταση του τάφου πριν την παραμόρφωση

Βασικό κριτήριο για τον σχεδιασμό της επέμβασης υπήρξε η διατήρηση της εν ξηρώ δομής της αρχαίας κατασκευής. Για να παραμείνει η περιοχή των αρμών κενή από κονίαμα, έπρεπε να εξασφαλιστεί ο ακριβής έλεγχος της διείσδυσης των ενεμάτων (δοθέντος ότι η επέμβαση γίνεται κατά χώρα και επομένως η σφράγιση των ρωγμών στις μη ορατές επιφάνειες δεν είναι εφικτή). Προκειμένου να καλυφθεί η παραπάνω απαίτηση, η μελέτη πρότεινε μία μέθοδο ενεμάτωσης κατά στάδια, με εφαρμογή κονιάματος προκαθορισμένου όγκου και μεταβαλλόμενης ρευστότητας, ανάλογα με την κάθε περίπτωση.

2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΠΑΘΟΛΟΓΙΑΣ ΤΩΝ ΛΙΘΟΠΛΙΝΘΩΝ

Οι βλάβες των προς αποκατάσταση λιθόπλινθων προκλήθηκαν κατά την αρχαιότητα, ως αποτέλεσμα της ισχυρής έντασης που αναπτύχθηκε κατά την κατασκευή και την συρρίκνωση του τύμβου. Οι βλάβες αυτές συνίστανται σε ρηγματώσεις των λιθόπλινθων λόγω κάμψης ή λόγω διάτμησης, ενώ σε ορισμένες θέσεις παρατηρούνται και αποφλοιώσεις, ή/και εκτεταμένη αποδιοργάνωση της δομής του λίθου, λόγω της ισχυρής θλίψης.

Η μορφή των βλαβών των λιθόπλινθων καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από την φύση του υλικού κατασκευής τους. Οι λιθόπλινθοι λαξεύτηκαν σε έντονα ανομοιογενή, βιογενή ασβεστοπικό πωρόλιθο (κογχυλίτη). Ο λίθος αυτός παρουσιάζει έντονη διαστρωμάτωση, στην οποία εναλλάσσονται ζώνες διαφορετικής πυκνότητας και συνοχής. Η διακύμανση της αντοχής του λίθου από ζώνη σε ζώνη είναι εντυπωσιακή: Στον ίδιο λιθόπλινθο μπορεί να συνυπάρχουν στρώσεις εξαιρετικά συμπαγούς πετρώματος (συμπαγής ασβεστόλιθος), στρώσεις χαλαρά συσσωματωμένων κελυφών, και στρώσεις που περιέχουν μεγάλες, συνεχόμενες κοιλότητες. Ο αρχαίος τεχνίτης μερίμνησε ώστε οι πλέον συμπαγείς λίθοι να τοποθετηθούν στην βάση του μνημείου, ενώ οι λίθοι χαμηλότερης αντοχής σε θέσεις με μειωμένες απαιτήσεις φέρουσας ικανότητας. Παράλληλα, λάξευσε τους λιθόπλινθους κατά τρόπο ώστε οι επιφάνειες έδρασης τους να είναι παράλληλες με την εσωτερική διαστρωμάτωση του λίθου, επιλογή που οδηγεί προφανώς στην βέλτιστη μηχανική συμπεριφορά του λιθόπλινθου. Για λόγους που-ενδεχομένως-σχετίζονται με την διαδικασία λατόμευσης και λάξευσης, οι πιο συμπαγείς (και μεγαλύτερης αντοχής) ζώνες βρίσκονται στις επιφάνειες έδρασης των λιθόπλινθων, ενώ οι ζώνες υψηλού πορώδους στο εσωτερικό τους. Λόγω της πορώδους και ανομοιογενούς δομής του λίθου, καθώς και των ορθότροπων χαρακτηριστικών του, εμφανίζονται συστηματικά βλάβες που σχετίζονται με τοπικές αστοχίες: Κάτω από ισχυρά θλιπτικά φορτία, η εσωτερική πορώδης δομή των λιθόπλινθων καταρρέει και μετατρέπεται σε μία ζώνη έντονα κατακερματισμένη και αποδιοργανωμένη, χωρίς ωστόσο αυτός ο τύπος βλάβης να επεκτείνεται στις ισχυρότερες στρώσεις του λίθου, στις οποίες συνήθως αναπτύσσεται ένα δίκτυο αραιών ρωγμών. Οι βλάβες στους λιθόπλινθους εξελίχθηκαν σταδιακά, παράλληλα με την αύξηση των φορτίων που δεχόταν ο τάφος. Πριν την κατασκευή του τύμβου, το ταφικό κτίσμα καταπονούνταν μόνο από το ίδιο βάρος, με αποτέλεσμα να αναπτύσσεται μία μικρή, αμελητέα εν συγκρίσει με την αντοχή του λίθου, ένταση. Ωστόσο, εξαιτίας των ατελειών στην λάξευση των εδρών των λιθόπλινθων³, υπήρχαν περιοχές όπου αναπτυσσόταν σημαντική ένταση λόγω συγκέντρωσης των τάσεων (εικ. 4 α). Με την έναρξη της κατασκευής του τύμβου και την σταδιακή αύξηση του φορτίου, ο λίθος άρχισε τοπικά να αστοχεί, έως ότου οι λιθόπλινθοι να αποκτήσουν πλήρη επαφή (εικ. 4 β). Κατά την διαδικασία αυτή ορισμένοι λιθόπλινθοι ρηγματώθηκαν λόγω κάμψης, διάτμησης ή στρέψης, εξαιτίας της ανομοιόμορφης κατανομής του φορτίου κατά το μήκος τους.



Εικ. 4: Διαδοχικά στάδια εμφάνισης βλαβών στους λιθόπλινθους (εδώ, για τον θολίτη Θ17.2)

³ Η ακρίβεια στην λάξευση των επιφανειών έδρασης είναι υποδεέστερη εκείνης που συναντάμε στα μαρμάρινα μέλη. Σε διάσπαρτους λιθόπλινθους που σώζουν ακέραιες τις επιφάνειες έδρασης, αποκλίσεις από την επιπεδότητα μέχρι 7mm είναι συνήθεις.

Καθώς τα φορτία του τύμβου συνέχιζαν να αυξάνουν, οι τοίχοι και οι καμάρες άρχισαν να κάμπτονται, λόγω των ωθήσεων του εδάφους⁴. Η κάμψη αυτή έχει ως συνέπεια την διεύρυνση των υπάρχουσών ρωγμών, και την δημιουργία νέων ρηγματώσεων, στο σύνολο σχεδόν των λιθόπλινθων. Στην φάση αυτή, η κάμψη προκαλεί την συγκέντρωση των ήδη ισχυρών θλιπτικών τάσεων στην περιοχή της θλιβόμενης ίνας. Στις περιοχές όπου αναπτύσσεται έντονη εκκεντρότητα, οι λιθόπλινθοι αρχίζουν να εμφανίζουν μορφές θλιπτικής αστοχίας (εικ. 4γ, 4δ). Τυπικά δείγματα τέτοιας αστοχίας είναι οι αποφλοιώσεις που παρατηρούμε σήμερα στο εσωράχιο των καμαρών, καθώς και η εμφάνιση, σε ορισμένους λιθόπλινθους, εσωτερικών ρωγμών με διάταξη κατακόρυφη και παράλληλη με τον επίπεδο του τοίχου. Τέλος, εμφανίζονται και οι πρώτες τοπικές αστοχίες λόγω θλίψης, οι οποίες χαρακτηρίζονται από γενικευμένη ρηγμάτωση (κατακερματισμό) και αποδιοργάνωση του λίθου. Οι βλάβες αυτές συνοδεύονται από σημαντική βράχυνση των λίθων και ανακατανομή των εσωτερικών τάσεων (εικ. 4ε). Από ένα χρονικό σημείο και μετά, η φόρτιση του τάφου καθορίζεται από την σταδιακή συρρίκνωση του τύμβου λόγω της καθίζησης και συμπίκνωσης του εδαφικού υλικού του. Ο τάφος δέχθηκε την συρρίκνωση αυτή περισσότερο σαν καταναγκασμό, παρά σαν απλή αύξηση του φορτίου, και κατά την διάρκειά της υπέστη μεγάλες παραμορφώσεις, που σε επίπεδο λιθόπλινθου εκτείνονται πολύ πέραν του ορίου ελαστικότητας. Οι παραμορφώσεις αυτές, όπως είναι φυσικό, συγκεντρώνονται στους πλέον καταπονούμενους λιθόπλινθους, οι οποίοι είχαν ήδη υποστεί σημαντικές βλάβες. Κατά την φάση αυτή προκλήθηκαν οι εκτεταμένες θλιπτικές αστοχίες που παρατηρούμε σήμερα στους θολίτες πλησίον της γένεσης των καμαρών (εικ. 4στ, εικ. 5), αλλά και ορισμένες σημαντικές διατμητικές αστοχίες, ιδίως στον νότιο διαμήκη τοίχο του προθαλάμου.



Εικ. 5: Εσωτερική όψη του θολίτη Θ17.2, πριν την επέμβαση. Είναι εμφανής ο έντονος κατακερματισμός του λίθου. Με κόκκινη διακεκομμένη, το θεωρητικό περίγραμμα της εσωτερικής του όψης

⁴ Η παραμόρφωση του μνημείου λόγω των εδαφικών ωθήσεων είναι αρκετά σύνθετη, Papasotiriou A, Athanasiou F, Malama V, Miza M, Sarantidou M, 2010

3. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΒΛΑΒΩΝ ΣΤΗΝ ΔΟΜΙΚΗ ΑΚΕΡΑΙΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΜΝΗΜΕΙΟΥ

Οι παραπάνω βλάβες είναι καθοριστικές για την δομική ακεραιότητα του μνημείου, καθώς περιορίζουν δραστικά την ικανότητα των λιθόπλινθων να φέρουν θλιπτικά φορτία. Εξάλλου, η εσωτερική ισορροπία στις περιοχές όπου ο λίθος έχει κατακερματιστεί είναι εξαιρετικά ευαίσθητη και ασταθής. Μικρές μετακινήσεις ή διακυμάνσεις του φορτίου μπορούν να καταστρέψουν την ισορροπία, οδηγώντας σε τοπική ή γενικευμένη κατάρρευση⁵. Το ότι ο τάφος διατηρήθηκε μέχρι τον 20^ο αιώνα, οφείλεται στην προστασία που παρείχε ο τύμβος στο ταφικό κτίσμα: Το έδαφος του τύμβου ανέπτυξε κατά την συμπίκνωσή του αξιοσημείωτα υψηλή φέρουσα ικανότητα, με αποτέλεσμα να ελαχιστοποιηθεί η απαίτηση για υποστήριξη του από το μνημείο. Ο τύμβος τελικά λειτούργησε ως νάρθηκας, παρεμποδίζοντας ο ίδιος, από ένα σημείο και μετά, κάθε περαιτέρω παραμόρφωση. Τέλος, το παχύ στρώμα του τύμβου εξασφάλισε για το ταφικό κτίσμα εξαιρετικά σταθερές συνθήκες, που συνεισέφεραν καθοριστικά στην διατήρησή του. Η επισφαλής αυτή ισορροπία διαταράχθηκε με την ανασκαφή του 1910, και τελικά καταργήθηκε πλήρως με την αποχωμάτωση του μνημείου 1995. Έκτοτε, το μνημείο βρέθηκε και πάλι εκτεθειμένο στο περιβάλλον, με αποτέλεσμα να ξεκινήσει η ραγδαία επιδείνωση της κατάστασής του, κύριο χαρακτηριστικό της οποίας υπήρξε η σταδιακή υποχώρηση της καμάρας του προθαλάμου⁶. Η νέα, δυναμική κατάσταση που διαμορφώθηκε, έγινε για πρώτη φορά κατανοητή σε όλη της έκταση κατά την εκπόνηση της μελέτης αποκατάστασης του μνημείου. Στο πλαίσιο της μελέτης αυτής εγκαταστάθηκε σύστημα ενόργανης παρακολούθησης για την καταγραφή των μετακινήσεων σε χαρακτηριστικές θέσεις του μνημείου. Οι καταγραφές δεν κατέδειξαν μόνο το μέγεθος του προβλήματος, αλλά παρείχαν και σαφή στοιχεία για τα αίτια της παραμόρφωσης και τον μη αναστρέψιμο χαρακτήρα της.

4. ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ ΤΩΝ ΛΙΘΟΠΛΙΝΘΩΝ

Η μελέτη προέβλεπε την κατά χώρα αποκατάσταση 36 λιθόπλινθων του μνημείου, οι περισσότεροι από τους οποίους είναι θολίτες κοντά στην γένεση της καμάρας του προθαλάμου. Η έκταση της επέμβασης σε κάθε λίθο διαφέρει, ωστόσο γενικά περιλαμβάνει την συγκόλληση και συρραφή των θραυσμάτων του, και, σε ορισμένες περιπτώσεις, την συμπλήρωσή του. Κατά την εκτέλεση της επέμβασης γίνεται χρήση ενέσιμων κονιαμάτων, για δύο σκοπούς: Την πάκτωση των χαλύβδινων ράβδων και την συγκόλληση των λίθινων θραυσμάτων, όπου το ένεμα εφαρμόζεται τοπικά, και την αποκατάσταση των κατακερματισμένων τμημάτων του λίθου, όπου το ένεμα καλείται να διαπεράσει και να πληρώσει την μάζα του αποδιοργανωμένου λίθου. Σε πολλές περιπτώσεις, οι δύο τύποι επεμβάσεων συνυπάρχουν. Βασική απαίτηση κατά την εφαρμογή των ενεμάτων ήταν να εξασφαλιστεί ότι το κονίαμα θα περιοριστεί στο εσωτερικό του κάθε λιθόπλινθου και δεν θα διαρρεύσει στα διάκενα των αρμών. Σε αντίθεση με ο,τι ισχύει γενικά κατά την εκτέλεση των ενεμάτων, η σφράγιση των ρωγμών (αρμολόγημα) στις θέσεις αυτές δεν ήταν εφικτή. Επιπλέον, λόγω της πορώδους δομής του, ο λίθος παρέχει ένα πλήθος διόδων-πέρα από τις ρωγμές-από τις οποίες το ένεμα μπορεί να διεισδύσει και να κινηθεί σε τελείως απρόβλεπτες κατευθύνσεις. Προκειμένου να προβλεφθεί η πορεία του ενέματος, ήταν αναγκαία η ακριβής γνώση της εσωτερικής δομής του λίθου, της κατεύθυνσης των ρηγμάτων και των διόδων που διαθέτει ο λίθος, καθώς και του μεγέθους τους. Στους τομείς αυτούς, η πληροφορία που μπορεί να αντληθεί από την εξωτερική εικόνα του κάθε λίθου δεν είναι επαρκής. Μάλιστα, κατά την εκτέλεση των εργασιών ενίσχυσης, αποδείχθηκε ότι η εξωτερική εικόνα είναι συχνά παραπλανητική σχετικά με την κατάσταση στο εσωτερικό του λίθου.

Για την διερεύνηση της κατάστασης στο εσωτερικό κάθε λίθου προκρίθηκε η χρήση ενδοσκοπικών μεθόδων, καθώς-στην συγκεκριμένη περίπτωση-μπορούσαν να καλύψουν επαρκώς το εσωτερικό των λίθων, λόγω του μεγάλου πλήθους των διατρήσεων που προέβλεπε η μελέτη. Μάλιστα, η χρήση ενδοσκοπίου προτιμήθηκε έναντι άλλων μεθόδων λόγω της αμεσότητας που παρέχει στην παρατήρηση: Με το ενδοσκόπιο, παρότι η πρόσβαση περιορίζεται μόνο σε συγκεκριμένες θέσεις⁷, γίνεται άμεση οπτική αναγνώριση της υπάρχουσας κατάστασης. Αντιθέτως άλλες μέθοδοι, όπως η σονομέτρηση, ή οι διάφορες μέθοδοι διασκόπησης, απαιτούν την βαθμονόμηση των οργάνων, και μία σύνθετη, σχετικά ασαφή διαδικασία ερμηνείας των αποτελεσμάτων και των καταγραφών. Κατά την εκτέλεση των εργασιών αποδείχθηκε ότι η χρήση ενδοσκοπίου είναι αποτελεσματική

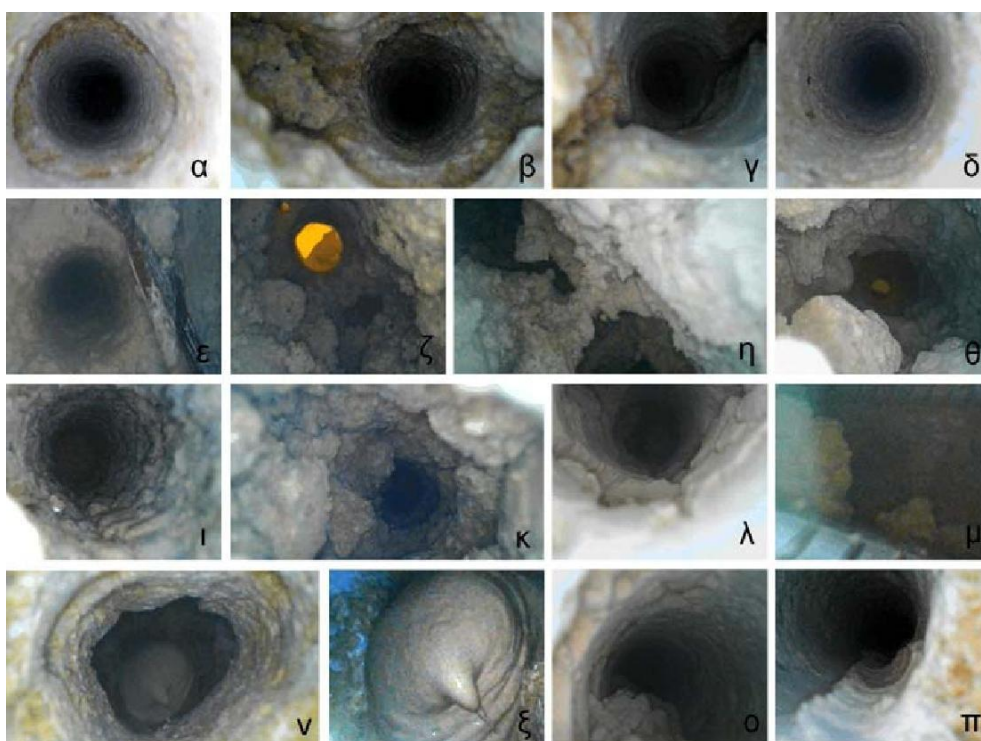
⁵Μικρής κλίμακας ανακατανομές των φορτίων έγιναν αντιληπτές τα τελευταία χρόνια από τις καταγραφές των παραμορφώσεων

⁶Papasotiriou A, Athanasiou A, Malama V, Miza M, Sarantidou M, 2010

⁷Binda L., Saisi A., Tongini Folli R., Zanzi L, 2001

μέθοδος για την διερεύνηση των εσωτερικών του βλαβών, αλλά και για τον σωστό σχεδιασμό της ενεμάτωσης. Η υλοποίηση των επεμβάσεων στους λιθόπλινθους βασίστηκε στην χρήση ενδοσκοπίου στους ακόλουθους τομείς:

- Για τον έλεγχο της γεωμετρίας των ρωγμών στην θέση των ράβδων των συρραφών. Ελέγχθηκε το κατά πόσο η κάθε οπή διαπερνά τα προς συγκόλληση τεμάχια του λίθου σύμφωνα με τις προβλέψεις της μελέτης (εικ. 6α': οπή που διαπερνά κάθετα μία ρωγμή). Σε περίπτωση που η εσωτερική κατάσταση του λίθου είναι διαφορετική από τις παραδοχές της μελέτης (π.χ. ρωγμή παράλληλη με τον άξονα του βλήτρου, εικ. 6β', 6γ'), προβλεπόταν η δυνατότητα σχεδιασμού συμπληρωματικών επεμβάσεων προκειμένου να εξασφαλιστούν οι στόχοι της μελέτης.
- Για την αναγνώριση της εσωτερικής δομής του λίθου, ιδίως για την εκτίμηση του πορώδους και την αναζήτηση τυχόν μεγάλων κοιλοτήτων. Η οπτική εξέταση του λίθου επιτρέπει την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την αναμενόμενη μηχανική του συμπεριφορά, καθώς επίσης και την εκτίμηση του όγκου του ενέματος που απαιτείται για επιτυχημένη ενεμάτωση (π.χ. λίθος συμπαγής στην εικ. 6δ', κοιλοότητες διαφόρων μεγεθών στις εικ. 6ε', 6ζ', 6η', 6θ').

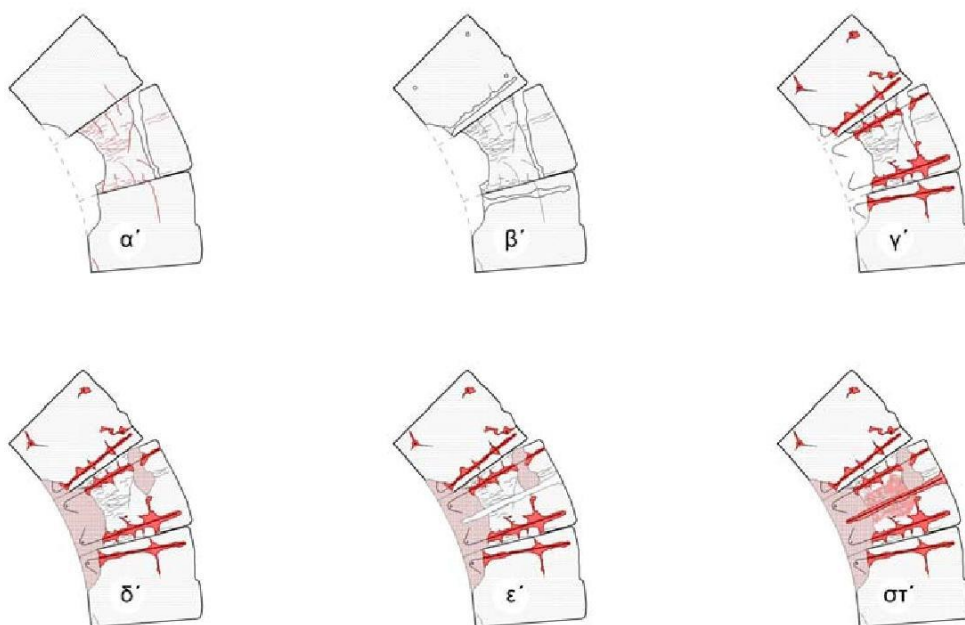


Εικ. 6: Διάφορες εικόνες ενδοσκοπίου: α'-γ' ρωγμές, δ' συμπαγής λίθος, ε'-θ' διάφορες κοιλότητες, ι'-λ' κατακερματισμένος λίθος, μ' ράβδοι οπλισμού, ν'-ξ' τμηματική ενεμάτωση οπής, ο'-π' οπές με ρύπους

- Για την καταγραφή των εσωτερικών βλαβών του λίθου. Η πορεία, το πλήθος, η κατανομή και το εύρος των ρωγμών στο εσωτερικό των λιθόπλινθων βρέθηκε να διαφέρει σημαντικά εν σχέση με την εξωτερική τους εμφάνιση. Συχνά, ρωγμές που εξωτερικά αναγνωρίζονται ως απλή θραύση, εσωτερικά καταλήγουν σε γενικευμένη ρηγμάτωση και κατακερματισμό του λίθου (εικ. 6ι', 6κ', 6λ'). Η πληροφορία που συλλέχθηκε σχετικά με τις εσωτερικές βλάβες του κάθε λιθόπλινθου αποδείχθηκε κρίσιμη για τον σωστό σχεδιασμό της ενεμάτωσης, ιδίως για την επιλογή της διεισδυτικότητας του ενέματος και τον καθορισμό της σειράς ενεμάτωσης.

1. Σε συνδυασμό με δοκιμασμένες εμπειρικές μεθόδους (όπως η παρακολούθηση της ροής του αέρα μεταξύ των οπών) σχηματίστηκε μία σαφής εικόνα για την διασύνδεση των οπών μέσω των ρωγμών και των κοιλοτήτων, και προβλέφθηκε επιτυχώς η πορεία του ενέματος μέσα στον λίθο.
2. Για τον έλεγχο των επεμβάσεων (π.χ. έλεγχος της τοποθέτησης ράβδων οπλισμού, εκ. 6μ'), ή τον έλεγχο της πορείας της ενεμάτωσης, ιδίως στην περίπτωση οπών που πληρώνονται κατά στάδια (εικ. 6ν', 6ξ').
3. Για τον έλεγχο της προετοιμασίας του λίθου, π.χ. τον έλεγχο του καθαρισμού των οπών και των κοιλοτήτων (εικ. 6ο': οπή με θρύμματα λίθου, εικ. 6π': οπή με σκόνη).

Η εκτέλεση των ενεμάτων στους λιθόπλινθους έγινε κατά στάδια, προκειμένου να ελέγχεται η περιοχή του λίθου στην οποία εξαπλώνεται το ένεμα. Κατά γενικό κανόνα, η ενεμάτωση ξεκινούσε από την περιφέρεια του κάθε λιθόπλινθου, και από θέσεις που απαιτούσαν τοπική εφαρμογή, όπως πακτώσεις βλήτρων και πληρώσεις μεγάλων ρωγμών και διακένων (εικ. 7γ'). Στις θέσεις αυτές εφαρμοζόταν ενέματα μειωμένης ρευστότητας (που δεν ρέουν στον κώνο Marsh⁸), με χαμηλή πίεση και προκαθορισμένο όγκο. Λόγω της μειωμένης ρευστότητας, το ένεμα δεν μπορεί να διεισδύσει σε ρωγμές μικρού εύρους, και είναι αναγκασμένο να εξαπλωθεί στον προκαθορισμένο όγκο που σχηματίζουν οι μεγάλες ρωγμές και κοιλότητες. Ακόμη, το ένεμα δεν ρέει με την βαρύτητα, με αποτέλεσμα η ροή να σταματάει μόλις σταματήσει η εφαρμογή πίεσης, ακόμη κι αν υπάρχουν ανοιχτές ρωγμές ή χάσματα.

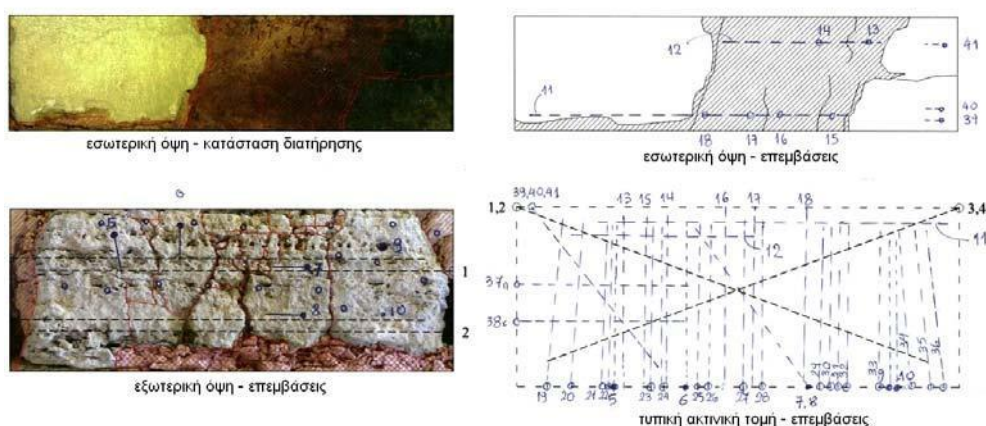


Εικ. 7: Ενδεικτική απεικόνιση της εξέλιξης της ενεμάτωσης: α' πριν την επέμβαση, β' πρώτη ομάδα διατρήσεων, γ' ενέματα χαμηλής ρευστότητας, δ' συμπληρώσεις, ε' δεύτερη ομάδα διατρήσεων, στ' ενέματα υψηλής ρευστότητας.

⁸ Στο έργο χρησιμοποιήθηκε κώνος κατά το πρότυπο ASTM C939

Η εφαρμογή του ενέματος γινόταν πάντα μέσα από τα διατρήματα των συρραφών, καθώς παρέχουν εύκολη δίοδο γνωστής κατεύθυνσης, με αποτέλεσμα να επιτυγχάνεται καλύτερος έλεγχος της περιοχής στην οποία εξαπλώνεται το ένεμα. Η εκτέλεση των ενεμάτων γινόταν χωρίς να αρμολογηθούν πλήρως οι εμφανείς ρωγμές, προκειμένου να ελέγχεται ο βαθμός πλήρωσης. Η αρμολόγηση ολοκληρωνόταν κατά την ενεμάτωση, μετά την πλήρωση των ρωγμών. Όπου απαιτούσαν, ο βαθμός πλήρωσης ελεγχόταν και ενδοσκοπικά, από τις θέσεις που ήταν προσβάσιμες με το ενδοσκόπιο. Η εκτέλεση των ενεμάτων αυτής της κατηγορίας είχε ως συνέπεια την σφράγιση όλων των μεγάλων κοιλοτήτων και ρωγμών του λιθόπλινθου. Έτσι, στα επόμενα στάδια μπορούσε να χρησιμοποιηθεί πιο ρευστό ένεμα, χωρίς τον κίνδυνο διαρροών. Με την ίδια μέθοδο, η ενεμάτωση προχώρησε σε ομάδες ρωγμών όλο και μικρότερου εύρους. Τελευταίες ενεματώνονταν οι περιοχές όπου ο λίθος ήταν κατακερματισμένος, και στις οποίες απαιτούνταν υψηλή διεισδυτικότητα του ενέματος. Σε τέτοιες περιοχές εφαρμόστηκε ρευστό ένεμα (~13sec στον κώνο Mars), με πιέσεις μέχρι 8bar, χωρίς να σημειωθούν διαρροές προς όμορους λίθους (εικ. 7στ').

Στις περισσότερες περιπτώσεις η εισαγωγή του ενέματος στον λίθο γινόταν με επιστόμια προσαρμοσμένα εξωτερικά στις οπές. Ωστόσο, σε αρκετές περιπτώσεις η εφαρμογή του ενέματος έγινε από το εσωτερικό των οπών (ξεκινώντας από τον πυθμένα), προκειμένου να εισαχθεί συγκεκριμένος όγκος ενέματος σε κάθε θέση. Στις περιπτώσεις αυτές χρησιμοποιήθηκε ελαστικός σωλήνας στην διάμετρο των οπών, ο οποίος κατά την εφαρμογή πίεσης διογκωνόταν και εξασφάλιζε στεγανότητα με τα τοιχώματα της οπής. Για την εφαρμογή αυτής της μεθόδου, οι ράβδοι οπλισμού εισάγονταν αφού ολοκληρωνόταν η ενεμάτωση. Τέλος, σε ειδικές περιπτώσεις έγινε κατά στάδια ενεμάτωση κατά το μήκος της ίδια οπής (εικ. 6 ν', 6ξ'). Στις περιπτώσεις αυτές εισαγόταν αρχικά ένεμα χαμηλής ρευστότητας στον πυθμένα της οπής, προκειμένου να δημιουργηθεί ένας φραγμός που θα αποτρέψει την διαρροή κατά την ενεμάτωση με πιο ρευστό ένεμα. Το ένεμα που χρησιμοποιήθηκε ήταν σε όλες τις περιπτώσεις της ίδιας σύνθεσης, με βάση την ποζολάνη. Τον σχεδιασμό του ενέματος ανέλαβε το Εργαστήριο Δομικών Υλικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης. Η ρύθμιση του βάθους διείσδυσης του ενέματος έγινε αποκλειστικά με την μεταβολή της ρευστότητας του, με κατάλληλη δοσολόγηση του υπερρευστοποιητή. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε υπερρευστοποιητής υψηλών επιδόσεων (καρβοξυλικής βάσης). Για την εξασφάλιση της σταθερότητας⁹, η παρασκευή των ενεμάτων υψηλής ρευστότητας έγινε με μίκτη υψηλού στροβιλώδους.



Εικ. 8: Ορθοφωτογραφίες και διαγράμματα από την καρτέλα τεκμηρίωσης του θολίτη Θ4.2, όπου φαίνεται η έκταση των επεμβάσεων.

⁹ Απαιτούσαν σταθερότητα των ρεολογικών χαρακτηριστικών του ενέματος για περισσότερο από μία ώρα, καθώς και μηδενική εξίδρωση

Προκειμένου να εξασφαλιστεί η επιτυχία της επέμβασης, εφαρμόστηκε στον τόπο του έργου ένα πρόγραμμα αξιολόγησης των μεθόδων και των διαδικασιών που πρότεινε η μελέτη. Κατά την διάρκεια του προγράμματος αυτού εφαρμόστηκαν πάνω σε ομοιώματα λιθόπλινθων, κατασκευασμένα από πωρόλιθο αντίστοιχο με εκείνο του μνημείου, όλες οι μέθοδοι και οι τεχνικές των επεμβάσεων. Οι δοκιμές έγιναν σε πραγματικές συνθήκες, στον χώρο του εργοταξίου, με τον εξοπλισμό, το προσωπικό και τα υλικά του έργου. Ελέγχθηκαν οι μέθοδοι και τα εργαλεία διάτρησης, οι τεχνικές καθαρισμού των οπών και των κοιλοτήτων του λίθου, η διαδικασία παραγωγής του ενέματος, οι τεχνικές ενεμάτωσης κλπ. Οι δοκιμές αυτές έδωσαν την δυνατότητα να ελεγχθεί η καταλληλότητα των υλικών, να διαπιστωθούν εγκαίρως τα όποια προβλήματα και να εξακριβωθούν παράμετροι που δεν μπορούσαν να είναι γνωστές κατά την μελέτη, όπως ο χρόνος που απαιτείται από την παραγωγή του ενέματος μέχρι την ολοκλήρωση της εφαρμογής του. Εξάλλου, η φάση των δοκιμών αποτέλεσε και περίοδο εκπαίδευσης του προσωπικού, απολύτως αναγκαία λόγω της σύνθετης φύσης των επεμβάσεων. Στο πλαίσιο του προγράμματος αξιολόγησης έγινε εκτενής έλεγχος της αποτελεσματικότητας των επεμβάσεων. Επιβεβαιώθηκαν οι ιδιότητες του νωπού ενέματος (ρευστότητα, σταθερότητα, διεισδυτικότητα), καθώς και τα χαρακτηριστικά του σκληρυμένου ενέματος (αντοχή, συρρίκνωση κλπ). Τέλος πιστοποιήθηκε ότι με τις συγκεκριμένες μεθόδους επιτυγχανόταν ικανοποιητικός βαθμός πλήρωσης των λίθων, και ταυτόχρονα ικανοποιητικός έλεγχος της περιοχής στην οποία εξαπλώνεται το ένεμα. Οι δοκιμαστικές ενεματώσεις συνοδεύτηκαν από δοκιμές αντοχής του υλικού, αλλά και δοκιμές εξόλκευσης σε πακτωμένες ράβδους οπλισμού. Με την ολοκλήρωση του προγράμματος αξιολόγησης, έγινε εφαρμογή των επεμβάσεων σε διάσπαρτους αρχαίους λίθους, ως ένα ενδιάμεσο στάδιο πριν την εκτέλεση επεμβάσεων επί του μνημείου.

5.ΕΠΙΛΟΓΟΣ

Η κατά χώρα συγκόλληση και συρραφή των 36 έντονα ρηγματωμένων λιθόπλινθων έγινε εφικτή μέσα από ένα αυστηρά οργανωμένο πρόγραμμα επεμβάσεων, το οποίο υπήρξε αποτέλεσμα εξαντλητικής μελέτης και μεθοδικού σχεδιασμού. Για την εξασφάλιση της αξιοπιστίας της επέμβασης ακολουθήθηκαν όλα τα στάδια ενός σύνθετου τεχνικού έργου: έρευνα, σχεδιασμός, εκπαίδευση του προσωπικού, αξιολόγηση των μεθόδων, έλεγχος ποιότητας, τεκμηρίωση. Ο ρόλος της επέμβασης στην αναστήλωση του μνημείου ήταν καθοριστικός, καθώς κατέστησε εφικτή την δομική αποκατάσταση του χωρίς εμφανείς κατασκευές, και χωρίς την μερική αποσυναρμολόγησή του. Το συγκριτικό όφελος που προκύπτει από την αποφυγή της αποσυναρμολόγησης του μνημείου είναι ανυπολόγιστο, όχι μόνο λόγω της οικονομίας σε χρόνο και πόρους, αλλά κυρίως λόγω της μεγάλης απώλειας αρχαίου υλικού, στην οποία θα οδηγούσε αναπόφευκτα η προσπάθεια αφαίρεσης των λιθόπλινθων.

ΤΑΥΤΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΕΡΓΟΥ

Το έργο «Αποκατάσταση, προστασία, συντήρηση και ανάδειξη του μακεδονικού τάφου του Δερβενίου» είναι ενταγμένο στο ΕΣΠΑ 2013-2015 και εκτελείται από την ΙΣΤ' ΕΠΚΑ.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- 1 Macridy Th. (1911). *Un tumulus Macédonien à Langaza*, JDAI 26, 193-215.
- 2 Papasotiriou A, Athanasiou F., Malama V., Miza M., Sarantidou M. *Damage assessment to the Macedonian "tomb of Macridy Bey" at Derveni*, Thessaloniki, 2010, 8th International Symposium on the Conservation of Monuments in the Mediterranean Basin

3 Ανάλυση δομικών Υλικών και αξιολόγηση αποτελεσμάτων του Μακεδονικού τάφου Μακρίδη Μπέη στο Δερβένι. Επιστημονικός υπεύθυνος : Ιωάννα Παπαγιάννη, Καθηγήτρια του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Α.Π.Θ.

4 Αθανασίου Φ., Μάλαμα Β., Μίζα Μ., Σαραντίδου Μ., Παπασωτηρίου Α. (2012) Η αποκατάσταση του μακεδονικού «τάφου Μακρίδη Μπέη» στο Δερβένι Θεσσαλονίκης, 3ο Πανελλήνιο Συνέδριο Αναστήλωσης ΕΤΕΠΑΜ

5 Papayianni I., Pachta V., High Performance Lime Based Grouts for Repair of Historic Masonries, Proc. of 8th International Conference SAHC 2012 'Structural Analysis of Historical Constructions'

6 Miltiadiou-Fezans A., Tassios (2012) T. Penetrability of hydraulic grouts, Materials and Structures 45, 1817-1828

7 Binda L., Saisi A., Tongini Folli R., Zanzi L. (2001) Boroscopy, flat-jacks and NDT as complementary tools, Proc. Int. RILEM Workshop 'On-Site Control and Evaluation of Masonry Structures', Mantova (I), November 12-14

8 Lizzi, F., Preserving the original static scheme in the consolidation of old buildings, IABSE Symposium, Venezia 1983, Final report, pp. 313-320

9 Magnus Eriksson, Martina Friedrich, Christoph Vorschulze. (2004) Variations in the rheology and penetrability of cement-based grouts—an experimental study, Cement and Concrete Research 34(7) 1111-1119

10 Toumbakari E., Van Gemert D, Tenoutasse N., Tassios T.P. (1999) Effect of mixing procedure on injectability of cementitious grouts, Cement and Concrete Research, Vol. 29, nr 6, 1999, pp. 867-872

ΒΙΟΓΡΑΦΙΚΟ ΣΗΜΕΙΩΜΑ

Αλέξιος Ε. Παπασωτηρίου

Πολιτικός Μηχανικός - Αναστηλωτής (ΙΣΤ΄ ΕΠΚΑ)

Φανή Α. Αθανασίου

Αρχιτέκτων Μηχανικός - Αναστηλώτρια (ΙΣΤ΄ ΕΠΚΑ)

Βενετία Π. Μάλαμα Αρχιτέκτων Μηχανικός (ΙΣΤ΄ ΕΠΚΑ)

Μαρία Π. Μίζα Αρχιτέκτων Μηχανικός (ΙΣΤ΄ ΕΠΚΑ)

Μαρία Κ. Σαραντίδου Αρχιτέκτων Μηχανικός (ΙΣΤ΄ ΕΠΚΑ)