

Στατική αναστήλωση του τόξου της δυτικής παρόδου του αρχαίου θεάτρου Φιλίππων

Κοσμάς Στυλιανίδης

Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών ΑΠΘ

Αναστάσιος Σέξτος

Λέκτορας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών ΑΠΘ

Κώστας Ζάμπας

Πολιτικός Μηχανικός Δρ. ΕΜΠ, Μελετητής

1 ΠΕΡΙΛΗΨΗ

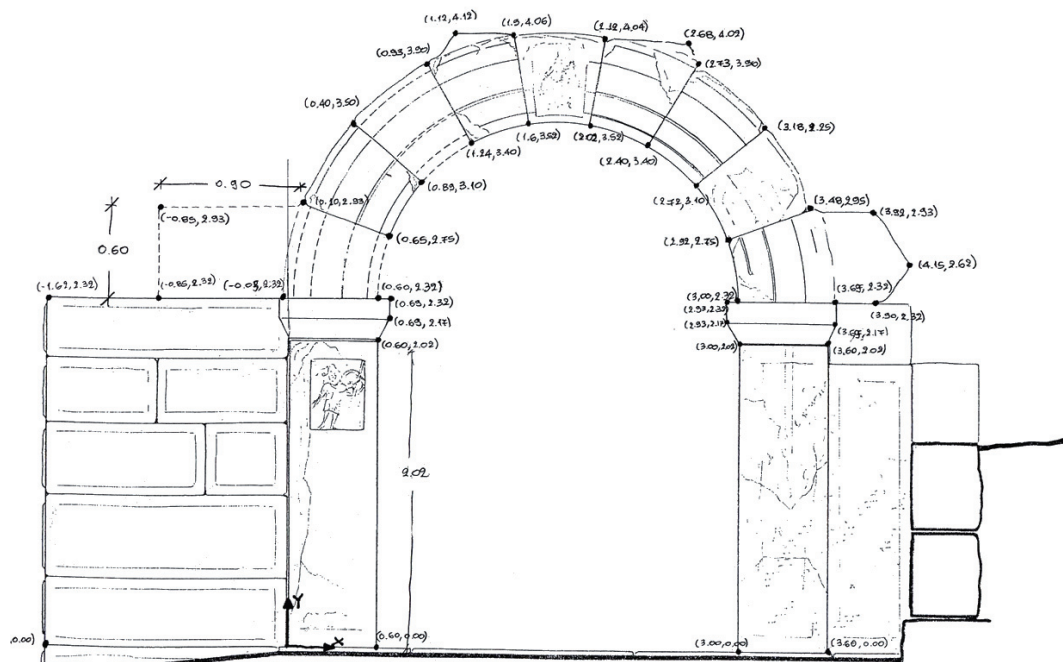
Αντικείμενο τη παρούσας εργασίας αποτελεί η πρόταση στατικής αναστήλωσης του τόξου της δυτικής παρόδου του αρχαίου θεάτρου των Φιλίππων στην Καβάλα. Το υπό αναστήλωση τόξο συντίθεται από θολίτες οι οποίοι εδράζονται επί ολόσωμων πεσσών. Από τους δύο στηρίζοντες πεσσούς ο μιν βόρειος είναι σε καλή σχετικά κατάσταση και είναι σε θέση να μεταφέρει τα φορτία του τόξου ενώ ο νότιος παρουσιάζει ρηγματώσεις οι οποίες καθιστούν τη στήριξη του τόξου επισφαλή. Για το λόγο αυτό η αρχιτεκτονική μελέτη (συντάκτης Γ. Καραδέδος) πρότεινε την παράκαμψη του νότιου πεσσού κατά τη μεταφορά των φορτίων, με την τοποθέτηση ολόσωμου λίθινου γείσου, το οποίο αποτελεί την τελευταία στρώση του έξω από τον πεσσό τμήματος του τοίχου, από τον οποίο προβάλλει υπό μορφή επικράνου. Με τον τρόπο αυτό τα φορτία του τόξου μεταφέρονται στο γείσο και κατόπιν στον τοίχο. Προϋπόθεση της παράκαμψης του νότιου πεσσού αποτελεί η υλοποίηση κατασκευαστικού αρμού μικρού εύρους 2 – 3mm στην κεφαλή του πεσσού, κάτω από το γείσο. Η δημιουργούμενη εκκεντρότητα φόρτισης και η συνακόλουθη τάση για ανύψωση της ακραίας (νότιας) περιοχής του τοίχου παραλαμβάνονται με κατακόρυφους μεταλλικούς ελκυστήρες οι οποίοι διατρυπών τους ολόσωμους λίθους του τοίχου. Στην εργασία παρουσιάζεται η τεκμηρίωση της στατικής επάρκειας της λύσης και η διαστασιολόγηση των μεταλλικών συνδέσμων. Τέλος δίδονται ορισμένες φωτογραφίες από την εφαρμογή της μελέτης.

2 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ

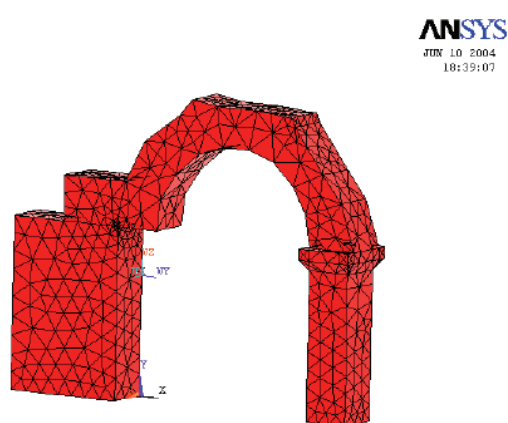
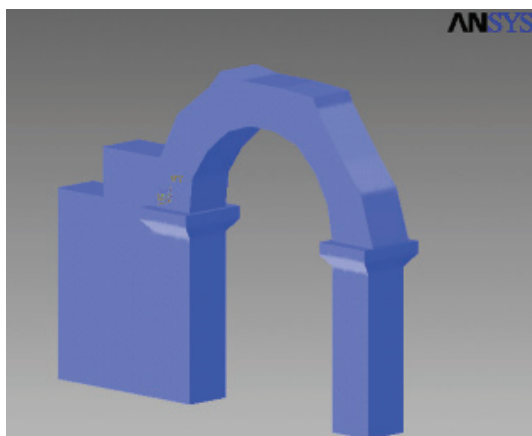
Η στατική ανάλυση του τόξου έγινε με τη βοήθεια του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων ANSYS, έκδοση 7.0. Για το σκοπό αυτό μορφώθηκε τρισδιάστατο προσομοίωμα, με βάση τα αρχιτεκτονικά σχέδια της πρότασης (Σχήμα 1) που συντίθεται από 4200 πεπερασμένα στοιχεία. Η γεωμετρική διακριτοποίηση (Σχήμα 2) υπήρξε κατά το δυνατόν λεπτομερής, ιδιαίτερα στις θέσεις απότομης μεταβολής των γεωμετρικών χαρακτηριστικών, ώστε να εξασφαλίζεται το συμβιβαστό των παραμορφώσεων και να αποφεύγεται η αριθμητική συγκέντρωση τάσεων. Επισημαίνεται πάντως η ατέλεια του προσομοιώματος, το οποίο δεν συνεκτιμά την αδυναμία των διεπιφανειών των θολιτών να παραλάβουν εφελκυσμό. Για τη θεμελίωση θεωρήθηκε απλή έδραση στο έδαφος, προς την πλευρά δε της ασφαλείας αγνοήθηκαν οι ευεργετικές πλευρικές αντιστάσεις του βόρειου τοίχου που βρίσκεται στη συνέχεια του βόρειου πεσσού καθώς και η χωρική συνεργασία με τους ολόσωμους λίθους του νότιου πεσσού, τους ευρισκόμενους εκτός του επιπέδου του τόξου. Είναι φανερό ότι κατά τη σύνθεση του αριθμητικού προσομοιώματος έχει παραλειφθεί ο προς παράκαμψη νότιος πεσσός

3 ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ ΦΟΡΤΙΩΝ ΚΑΙ ΥΛΙΚΩΝ

Ως αποκλειστικά φορτία υπολογισμού ελήφθησαν τα ίδια βάρη της κατασκευής με ειδικό βάρος μαρμάρου 27.6 KN/m^3 . Η αντοχή του μαρμάρου σε εφελκυσμό και σύνθλιψη φαίνεται στον Πίνακα 1. Υιοθετήθηκε, προς την πλευρά της ασφαλείας, μεγάλος συντελεστής ασφαλείας υλικού ($\gamma=3.0$). Για το χάλυβα των μεταλλικών κατακόρυφων ράβδων θεωρήθηκε όριο διαρροής 220MPa (κατηγορία ανοξείδωτου χάλυβα S220) και συντελεστής ασφαλείας 1.75, τιμές γενικώς συντηρητικές και προς την πλευρά της ασφαλείας. Δεν έγινε έλεγχος έναντι σεισμικών φορτίων.



Σχήμα 1: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά φορέα (σκαρίφημα Γ. Καραδέδου)



Σχήμα 2: Προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων

Πίνακας 1: Μηχανικά χαρακτηριστικά υλικών

ANTOXH ΜΑΡΜΑΡΟΥ

Αντοχή σε θλίψη	$f_{wk} = 100.0 \text{ MPa}$
Τάση σχεδιασμού σε θλίψη υπό στατική φόρτιση	$f_{wd} = 33.3 \text{ MPa}$
Αντοχή σε εφελκυσμό	$f_{wx} = 10.0 \text{ MPa}$
Τάση σχεδιασμού σε εφελκυσμό υπό στατική φόρτιση	$f_{wd} = 3.3 \text{ MPa}$
Μερικός συντελεστής ασφαλείας υλικού υπό στατική φόρτιση	$\gamma = 3.0$

ΜΗΧΑΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Μέτρο Ελαστικότητας	$E = 48.1 \text{ GPa}$
Ειδικό βάρος	$\gamma = 27.6 \text{ kN/m}^3$
Λόγος Poisson	$\nu = 0.4$

ANTOXH ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΩΝ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΕΛΚΥΣΤΗΡΩΝ

Όριο διαρροής	$f_{yk} = 220 \text{ MPa}$
Τάση σχεδιασμού σε εφελκυσμό υπό στατική φόρτιση	$f_{yd} = 125 \text{ MPa}$
Μερικός συντελεστής ασφαλείας υλικού υπό στατική φόρτιση	$\gamma = 1.75$

4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΤΑΤΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΩΝ

Στα Σχήματα 3 και 4 φαίνονται οι προκαλούμενες ελαστικές μετακινήσεις. Οι μέγιστες τιμές είναι της τάξεως του 0.02mm, δηλαδή πολύ μικρές, κυρίως λόγω της παραδοχής της συνέχειας του φορέα και του πολύ μεγάλου μέτρου ελαστικότητας του υλικού. Η κατακόρυφη βύθιση του γείσου – προβόλου είναι της τάξεως του 0.015mm, πρακτικώς ασήμαντη. Παρά τη μικρή όμως αυτή τιμή θεωρείται σκόπιμο να προβλεφθεί αρμός της τάξεως των 2 - 3mm ώστε να διασφαλισθεί η μη ενεργοποίηση του υποκείμενου νότιου πεσσού. Στα Σχήματα 5 και 6 φαίνονται οι αναπτυσσόμενες τάσεις. Η μέγιστη θλιπτική τάση είναι της τάξεως των 0.2MPa = 2.0kg/cm², δηλαδή περίπου 150 φορές μικρότερη από την αντοχή του υλικού. Οι μέγιστες τιμές της εφελκυστικής τάσης στο τόξο εμφανίζονται στην κάτω ίνα του ανοίγματος και στο εξωράχιο του τόξου υπό γωνία περίπου 30 – 45⁰ ως προς την οριζόντιο και είναι και πάλι της τάξεως των 0.2MPa. Οι περιοχές αυτές εφελκυσμού είναι αναμενόμενες, γνωστές από την τυπική λειτουργία των συνήθων διστύλων τόξων και προκαλούν ελαφρά ανοίγματα των υφισταμένων αρμών, χωρίς όμως απώλεια ισορροπίας λόγω των ανακατανομών της έντασης. Εφελκυστικές τάσεις της τάξεως περίπου των 0.1MPa = 1.0kg/cm² αναπτύσσονται στην άνω ίνα του γείσου – προβόλου, οι οποίες είναι περίπου 30 φορές μικρότερες από την αντοχή του υλικού σε εφελκυσμό. Κατά συνέπεια δεν τίθεται θέμα ρηγματώσης του αντίστοιχου ολόσωμου λίθινου γείσου. Στον πέραν του νότιου πεσσού τοίχο, λόγω της εκκεντρότητας φόρτισης, αναπτύσσονται τάσεις κατακόρυφου εφελκυσμού, δηλαδή τάση ανύψωσης των λίθων, οι οποίες λόγω της καθύψους ασυνέχειας του φορέα δεν είναι δυνατόν να αναληφθούν. Για το λόγο αυτό προτείνεται η τοποθέτηση μεταλλικών κατακόρυφων ανοξείδωτων ελκυστήρων.

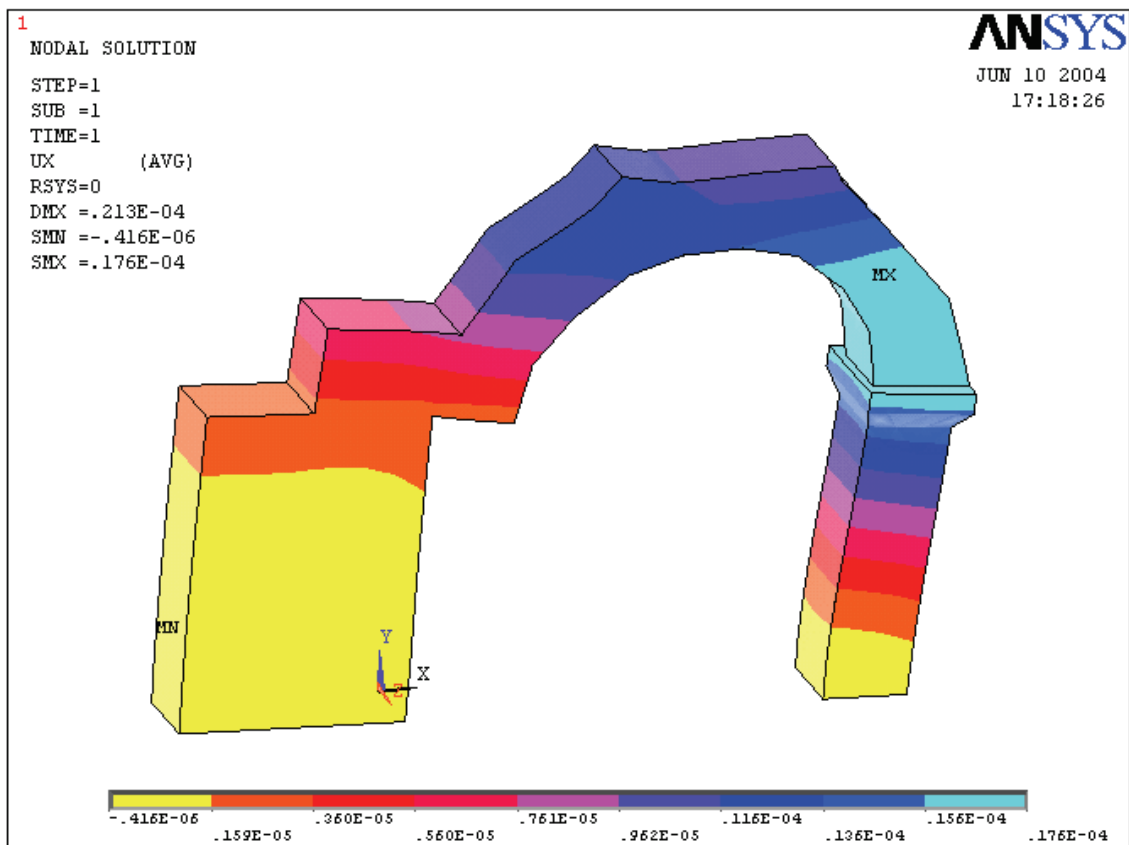
5 ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΕΛΚΥΣΤΗΡΩΝ

Στην περιοχή γύρω από το άκρο του ολόσωμου λίθου που καταλήγει στο κιονόκρανο (Σχήμα 7) αναπτύσσονται τάσεις εφελκυσμού με μέγιστη τιμή 0.2MPa οι οποίες μηδενίζονται σε απόσταση περίπου 40cm από το άκρο. Με την εύλογη παραδοχή τριγωνικής κατανομής προκύπτει δύναμη $0.60 \times 0.40 \times 200 / 2 = 24 \text{KN} = 2.4 \text{t}$. Απαιτείται οπλισμός $2.4 / 1.25 = 1.92 \text{cm}^2$, δηλαδή 2Ø12 (Σχήμα 8). Οι οπλισμοί αυτοί απαιτούν μήκος αγκύρωσης της τάξεως των 60cm μέσω εποξειδικής ρητίνης σε κατάλληλα ανοιγόμενες οπές διαμέτρου λίγο μεγαλύτερης από Ø12. Η διάτρηση περιλαμβάνει τους λίθους των στρώσεων Ε και Δ και σταματά λίγο ψηλότερα από τον αρμό μεταξύ στρώσεων Γ και Δ, μέσα στο σώμα του λίθου της στρώσης Δ. Στο νότιο άκρο του τοίχου αναπτύσσονται επίσης εφελκυστικές τάσεις της τάξεως των 0.01MPa, δηλαδή πολύ μικρότερες από τις προηγούμενες, γεγονός που θα δικαιολογούσε τοποθέτηση οπλισμών μικρότερης διαμέτρου. Για λόγους όμως ομοιομορφίας τοποθετούνται και πάλι 2Ø12, το μήκος όμως αγκύρωσης και οι αντίστοιχες διατρήσεις φθάνουν κατά μία στρώση χαμηλότερα.

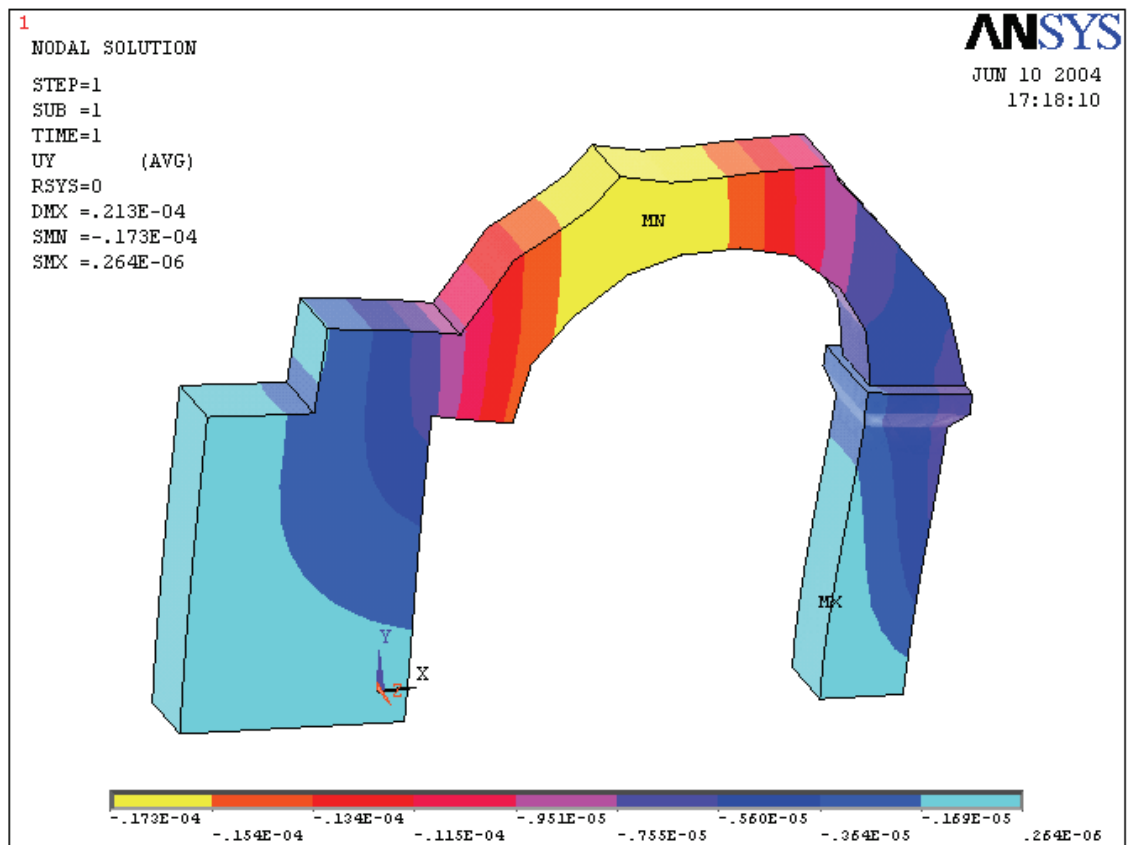
6 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΛΥΣΗΣ

Το ΚΑΣ δεν αποδέχθηκε την πρόταση του μελετητή να μείνει ανοιχτός ο αρμός μεταξύ του αρμού και του επικράνου. Κατά την εφαρμογή της λύσης, με επιβλέποντα τον Κ. Ζάμπα, αφέθηκε αρχικά αρμός εύρους περίπου 1mm και στη συνέχεια τοποθετήθηκε συρταρωτά φύλλο μολύβδου αντίστοιχου πάχους, το οποίο σφηνώθηκε περιμετρικά. Από στατική άποψη το μεγαλύτερο μέρος των φορτίων μεταφέρεται στο μαρμάρινο τοίχο σύμφωνα με την πρόταση του μελετητή και ένα μικρό μέρος αναλαμβάνεται από τον πεσσό. Η συνέργεια τοίχου και πεσσού θα οριστικοποιηθεί μετά από τις ενδεχόμενες μικρομετακινήσεις στο μέλλον, χωρίς πάντως να κινδυνεύουν τα μέλη. Άλλωστε μετά την προσωρινή αφαίρεση του πεσσού διαπιστώθηκε ότι οι ρωγμές δεν ήταν διαμπερείς και η κατάστασή του καλύτερη από αυτήν που είχε υποτεθεί. Στις θέσεις των τυφλών ρωγμών έγινε συρραφή με ράβδους 7Φ10. Γενικώς σε όλες τις θέσεις επέμβασης χρησιμοποιήθηκαν ράβδοι από εμπορικώς καθαρό τιτάνιο αντί του ανοξείδωτου χάλυβα.

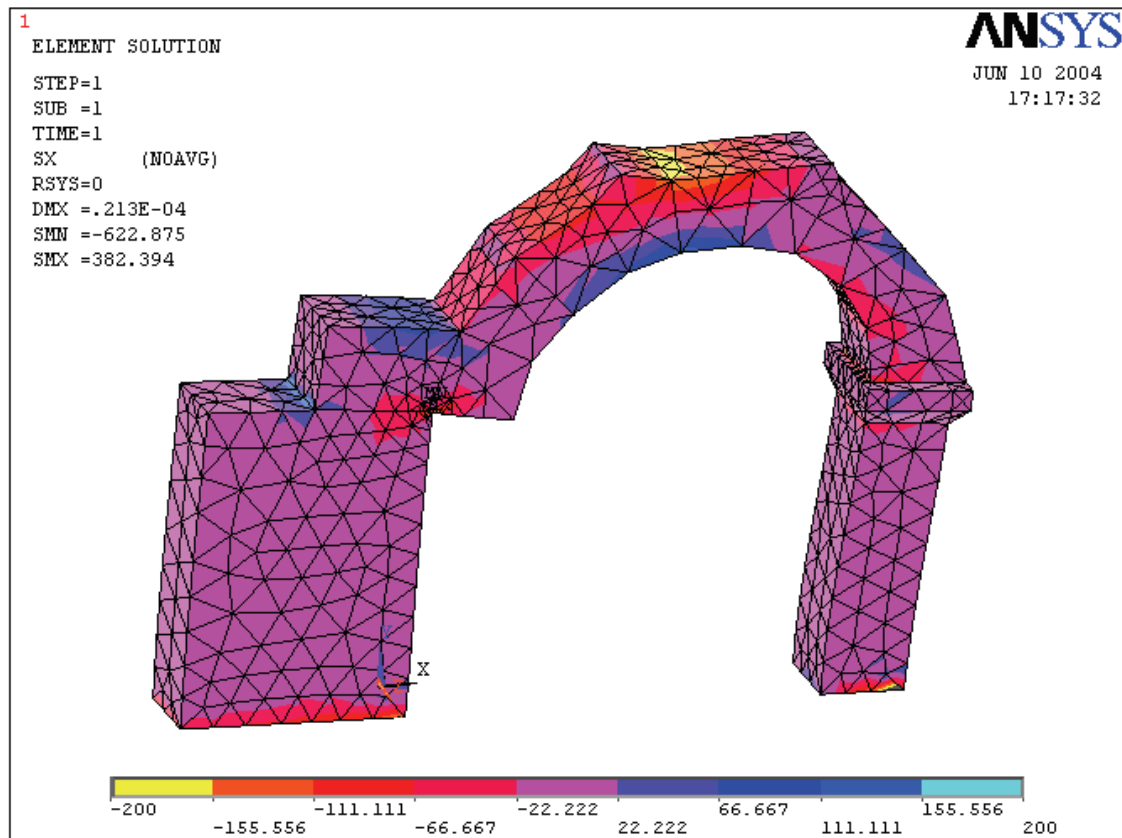
Για την ακριβή αναστήλωση του τόξου δόθηκαν λεπτομερή σχέδια για τα αρχιτεκτονικά μέλη που ανακατασκευάστηκαν από νέο μάρμαρο. Η επανατοποθέτηση των θολιτών έγινε με επαναληπτικές δοκιμές και μικρομετακινήσεις με τη βοήθεια ισχυρού και ευέλικτου ξυλοτύπου (Φωτ. 9 έως 12 και Σχήματα 13, 14).



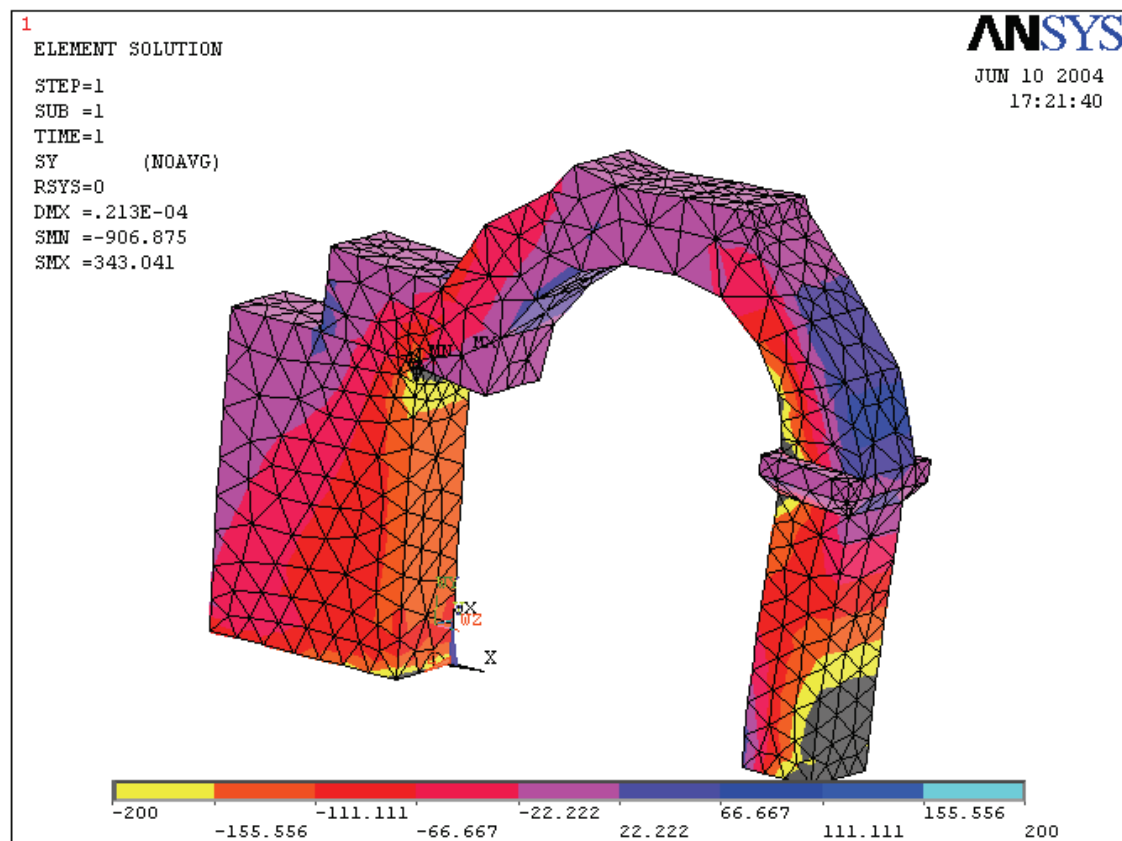
Σχήμα 3 : Οριζόντιες μετακινήσεις U_x (m) υπό το ίδιο βάρος



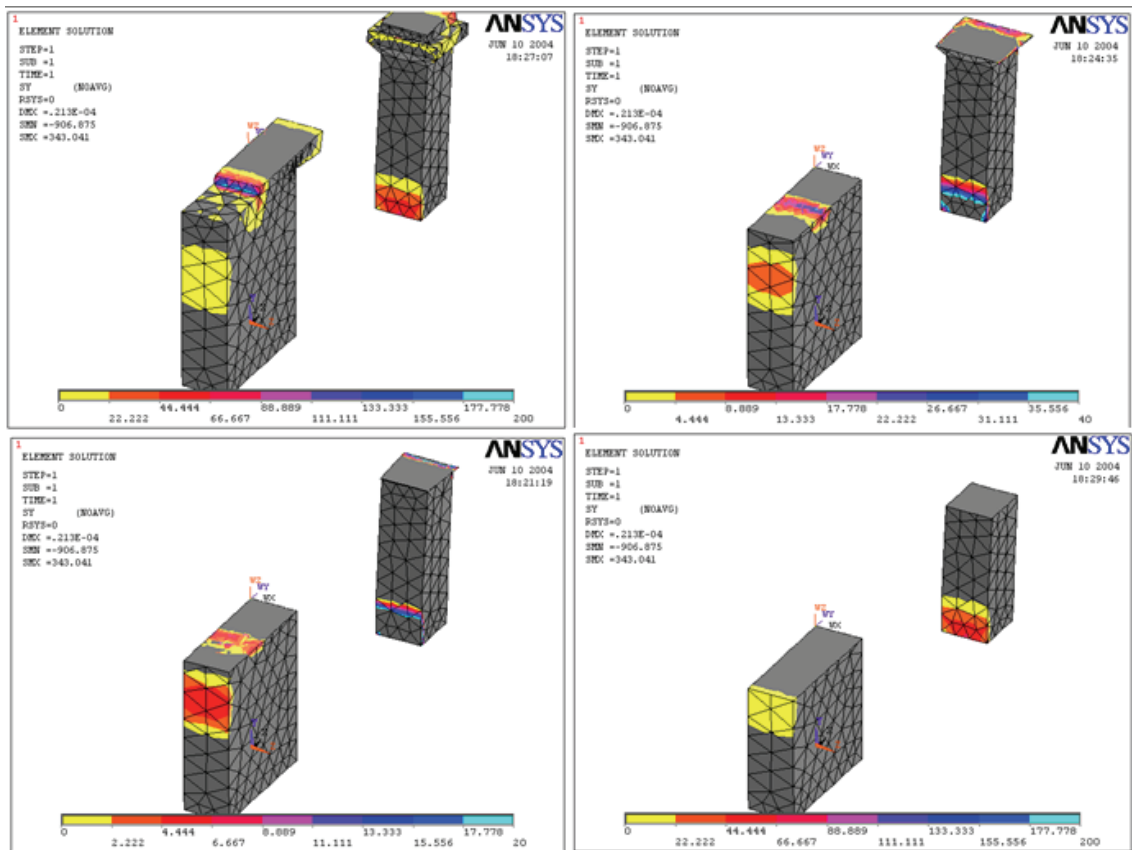
Σχήμα 4: Κατακόρυφες μετακινήσεις U_y (m) υπό το ίδιο βάρος



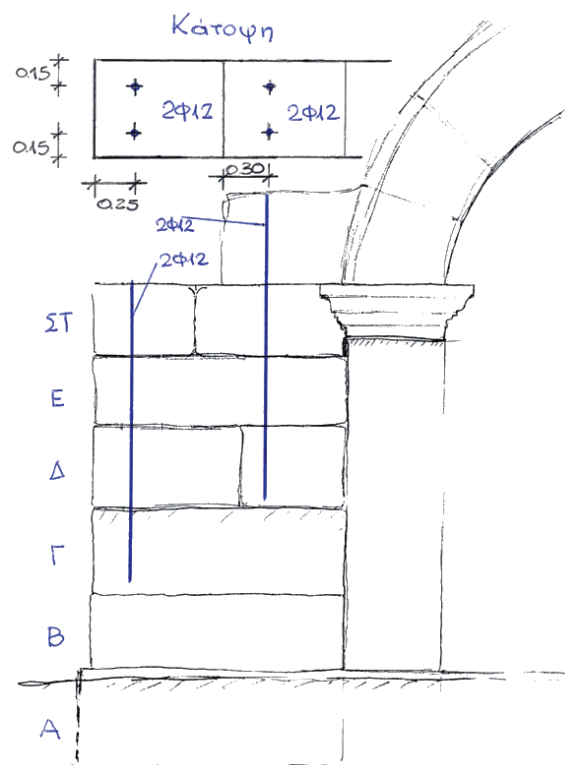
Σχήμα 5: Οριζόντιες ορθές τάσεις S_{xx} (KN/m²) υπό το ίδιο βάρος



Σχήμα 6: Κατακόρυφες ορθές τάσεις S_{yy} (KN/m²) υπό το ίδιο βάρος



Σχήμα 7: Διαδοχικές οριζόντιες τομές των κατακορύφων μελών, όπου εμφανίζονται αποκλειστικά οι εφελκυστικές ορθές τάσεις S_{yy} υπό το ίδιο βάρος



Σχήμα 8: Θέσεις μεταλλικών ελκυστήρων, συνολικά 4φ12 ανοξείδωτου χάλυβα, κατηγορίας τουλάχιστον S220



Φωτογραφία 9: Η έναρξη κατασκευής του τόξου. Ανατολική όψη. Αριστερά φαίνεται ο νότιος πεσσός



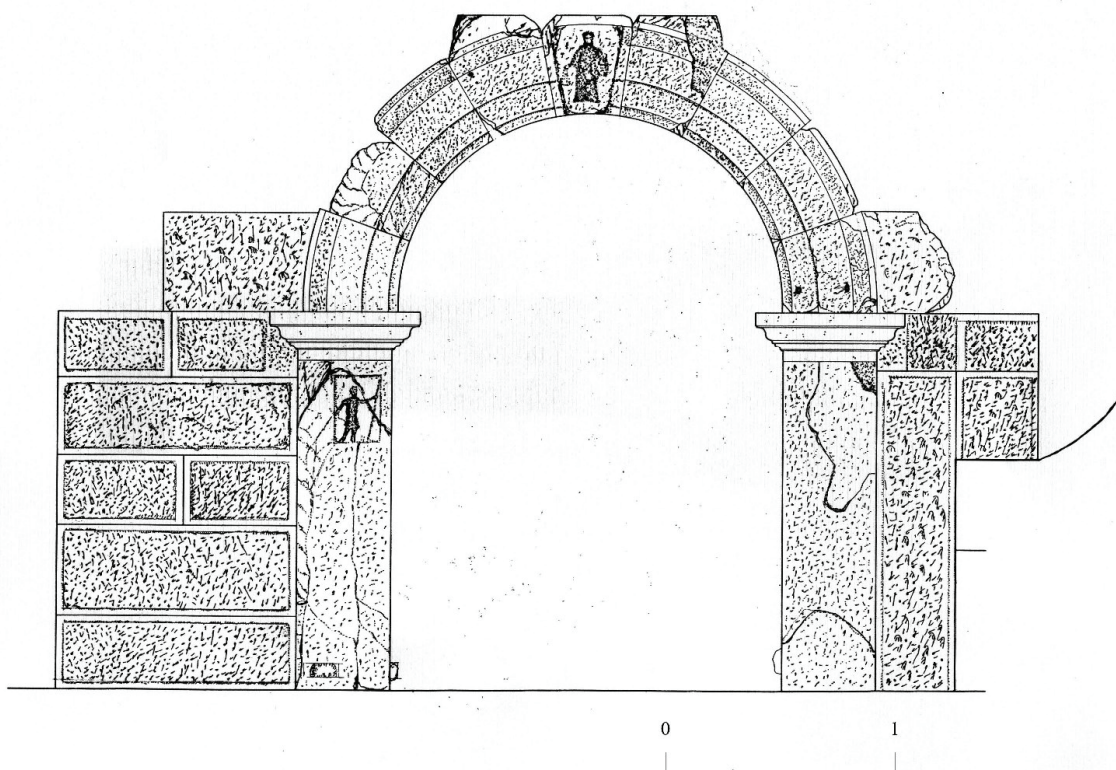
Φωτογραφία 10: Η εξέλιξη της κατασκευής του τόξου. Δυτική όψη



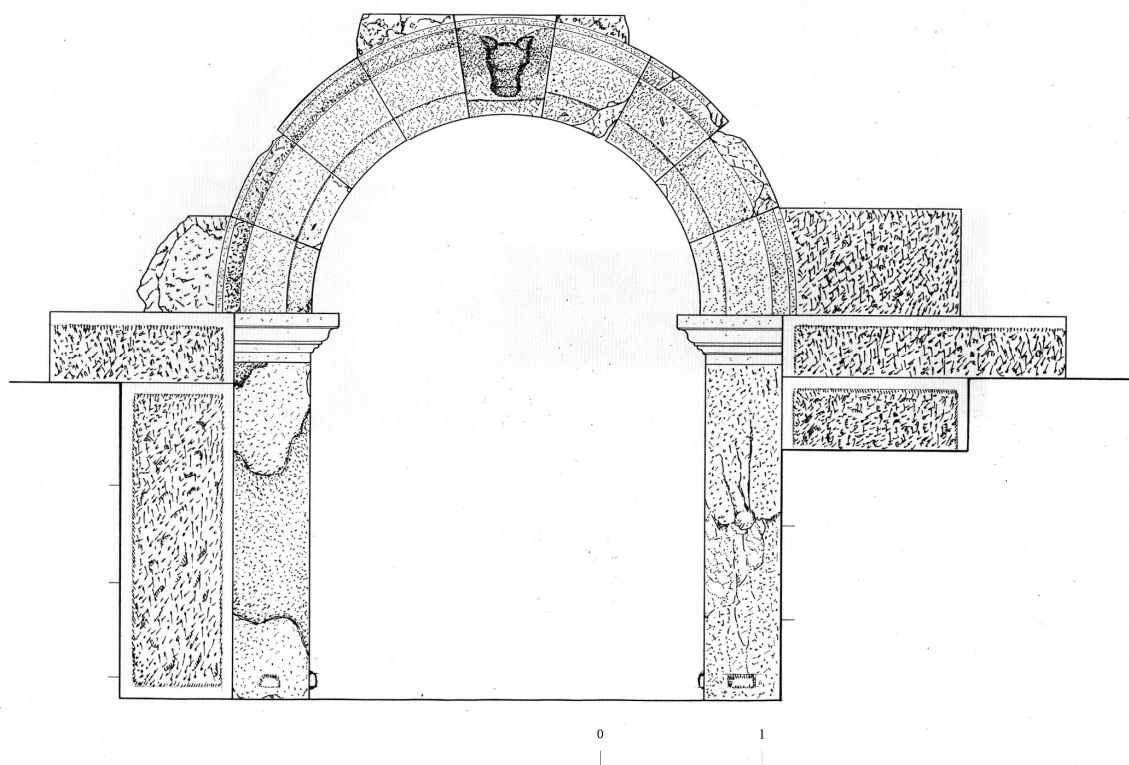
Φωτογραφία 11: Ολοκλήρωση του τόξου. Ανατολική όψη



Φωτογραφία 12: Ολοκλήρωση του τόξου. Δυτική όψη



Σχήμα 13: Σχεδιαστική απόδοση της ανατολικής όψης του τόξου, «ως κατεσκευάσθη»



Σχήμα 14: Σχεδιαστική απόδοση της δυτικής όψης του τόξου, «ως κατεσκευάσθη»