

# ΟΠΛΟΘΗΚΗ DE MILLY ΣΤΗΝ ΜΕΣΑΙΩΝΙΚΗ ΠΟΛΗ ΤΗΣ ΡΟΔΟΥ: ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΒΛΑΒΩΝ – ΣΤΑΤΙΚΗ ΚΑΙ ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

Κυριαζής Πιτιλάκης<sup>1</sup>, Αναστάσιος Σέξτος<sup>2</sup>, Κατερίνα Ντέλλα<sup>3</sup> & Ιωάννα Γαλαζούλα<sup>4</sup>

## Περίληψη

Παρουσιάζεται η στατική και δυναμική ανάλυση της μεσαιωνικής οπλοθήκης de Milly στη Ρόδο με στόχο (α) την ερμηνεία και αποτίμηση των βλαβών και τη διερεύνηση του κυρίαρχου μηχανισμού αστοχίας, (β) την αξιολόγηση εναλλακτικών λύσεων στερέωσης του μνημείου και την αποκατάσταση της στατικής και σεισμικής του ευστάθειας και (γ) την οριστική μελέτη της πλέον ενδεδειγμένης λύσης η οποία συνίσταται στην κατασκευή εξωτερικών αντηρίδων με παράλληλη ενίσχυση της θεμελίωσης, τη συρραφή της λιθοδομής του θόλου και των περιμετρικών τοίχων, και την αποφυγή καθαιρέσεων.

## Εισαγωγή

Η οπλοθήκη De Milly βρίσκεται στη βορειοανατολική γωνία των μεσαιωνικών οχυρώσεων της πόλης της Ρόδου (Σχήμα 1). Πρόκειται για ένα κτίσμα ορθογωνικής κάτοψης (μέσων διαστάσεων 8.2×22.2m), το οποίο χρησιμοποιήθηκε μέχρι πρόσφατα από τη ΔΕΗ ως αποθηκευτικός χώρος. Το κτίσμα είναι γνωστό και ως “Θόλαρος”, λόγω του γεγονότος ότι ο θόλος του δεν έχει την συνήθη ημικυλινδρική μορφή αλλά είναι οξυκόρυφος με μέσο ύψος 6.70m. Κατά την περίοδο της Τουρκοκρατίας, όπου και χρηστικά ο «Θόλαρος» λειτουργούσε και πάλι ως αποθηκευτικός χώρος, ο νότιος τοίχος αντιστηριζόταν πλευρικά μέσω αντηρίδων πάχους 0.60m οι οποίες είχαν τοποθετηθεί ανά αξονική απόσταση περίπου 5.50m. Σήμερα, παρατηρούνται κατακόρυφες ρηγματώσεις εύρους έως 8cm, στον κορμό της λιθοδομής και κυρίως στη θέση συναρμογής του εξωτερικού (νότιου) με τους εγκάρσιους τοίχους. Προκειμένου να αντιμετωπιστεί ο κίνδυνος αστάθειας του μνημείου, κρίθηκε αναγκαία η προσωρινή εσωτερική και (μερικής) εξωτερική υποστήλωση του.

Προς την κατεύθυνση της διερεύνησης λήψης ολοκληρωμένων μέτρων αποκατάστασης της στατικής επάρκειας του μνημείου, ανατέθηκε από την Υπηρεσία στο Εργαστήριο Εδαφομηχανικής και Θεμελιώσεων του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης, η διερεύνηση, σε πρώτη φάση, των αιτιών αστοχίας και η προκαταρκτική αξιολόγηση των πιθανών μεθόδων επέμβασης. Αφού ανεδείχθη ο κυρίαρχος μηχανισμός βλάβης και πραγματοποιήθηκε η αποτίμηση της σχετικής αποτελεσματικότητας των διαφορετικών μεθόδων αποκατάστασης, επελέχθη από την Υπηρεσία η ενδεικνυόμενη λύση και μελετήθηκε διεξοδικά η στατική και δυναμική συμπεριφορά του Θόλαρου για τον επιλεχθέντα τρόπο στερέωσης. Σε κάθε στάδιο αξιοποιήθηκαν η βάση πληροφοριών και τα αποτελέσματα της «Μικροζωνικής Μελέτης Ρόδου», η οποία έχει πραγματοποιηθεί στο παρελθόν από το Εργαστήριο Εδαφομηχανικής και Θεμελιώσεων του Α.Π.Θ. (1996). Παράλληλα, γνώμονα καθ' όλες οι φάσεις της στατικής μελέτης και της πρότασης δράσεων στερέωσης του «Θόλαρου» απετέλεσαν οι επιταγές του Χάρτη της Βενετίας (Venice Charter), ο οποίος αποτελεί το θεμελιώδες διεθνές κείμενο αρχών επέμβασης σε ιστορικά μνημεία και οριοθετεί το πλαίσιο δεοντολογίας των σχετικών επεμβάσεων.

## ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΥΠΑΡΧΟΥΣΑΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ – ΠΑΘΟΛΟΓΙΑ

### Φέρων Οργανισμός

Το στατικό σύστημα της κατασκευής είναι ένας θόλος αποτελούμενος από το αρχικό (φέρων) τόξο, ύψους 3.50m στην γένεσή του, το οποίο φέρει υπερκείμενη στρώση κουρασανίου και επιπρόσθετη (μη φέρουσα) μικρού πάχους «φλούδα» λιθοδομής, ενώ κατά το παρελθόν έχει επιχωθεί με αργιλικό υλικό. Όπως φαίνεται στην τομή του Σχήματος 2, η στήριξη του θόλου επιτυγχάνεται

<sup>1</sup> Καθηγητής, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Εργαστήριο Εδαφομηχανικής και Θεμελιώσεων, 54124, Τ.Θ. 450. e-mail: [pitilakis@geo.civil.auth.gr](mailto:pitilakis@geo.civil.auth.gr)

<sup>2</sup> Δρ. Πολ. Μηχανικός, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Εργαστήριο Εδαφομηχανικής και Θεμελιώσεων, 54124, Τ.Θ. 450. e-mail: [sextos@geo.civil.auth.gr](mailto:sextos@geo.civil.auth.gr)

<sup>3</sup> Αρχ. Μηχανικός, Ταμείο Διαχείρισης Πιστώσεων για την Αποκατάσταση των Μεσαιωνικών Οχυρώσεων της Ρόδου, 81100, Ρόδος

<sup>4</sup> Πολ. Μηχανικός, MSc, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Εργαστήριο Εφηρμοσμένης Στατικής, 54124.

μονολιθικά στη νότια (εξωτερική) πλευρά με τον πάχος 2m εξωτερικό τοίχο και στην βόρεια απόληξη του (εσωτερικά) εμπλέκεται και στηρίζεται κατασκευαστικά από μεγάλο όγκο υπολείμματος του Τείχους Μεσαιωνικών Οχυρώσεων. Τα φορτία που μεταφέρει ο θόλος (κατακόρυφα και σεισμικά-οριζόντια) μεταβιβάζονται στους τρεις εξωτερικούς τοίχους από φέρουσα λιθοδομή καθώς και σε τμήμα του τείχους της εξωτερικής οχύρωσης (βορείως). Το γεγονός που αποτελούσε μία καλή και οικονομική λύση για την μεταφορά φορτίων βαρύτητας, για τη σεισμική όμως συμπεριφορά του θόλου κρίνεται ιδιαίτερος δυσμενής διότι ο θόλος, όπως αποδεικνύεται παρακάτω, ήταν αναγκασμένος να δέχεται μεγάλα οριζόντια αδρανειακά φορτία από την ταλάντωση του τείχους τα οποία εν τέλει μεταφέρονται μέσω μηχανισμού τόξου προς τον εξωτερικό (νότιο) τοίχο. Για τον λόγο αυτόν, και εξαιτίας της διακινδύνευσης απώλειας της συνολικής στατικής ευστάθειας του μνημείου, απαιτήθηκε άμεση εσωτερική υποστήριξη και εξωτερική υποστήριξη η οποία πραγματοποιήθηκε μέχρι την οριστικοποίηση της αποτίμησης της υφισταμένης κατάστασης την τελική επιλογή της μεθόδου αποκατάστασης και την οριστική στερέωση του μνημείου.

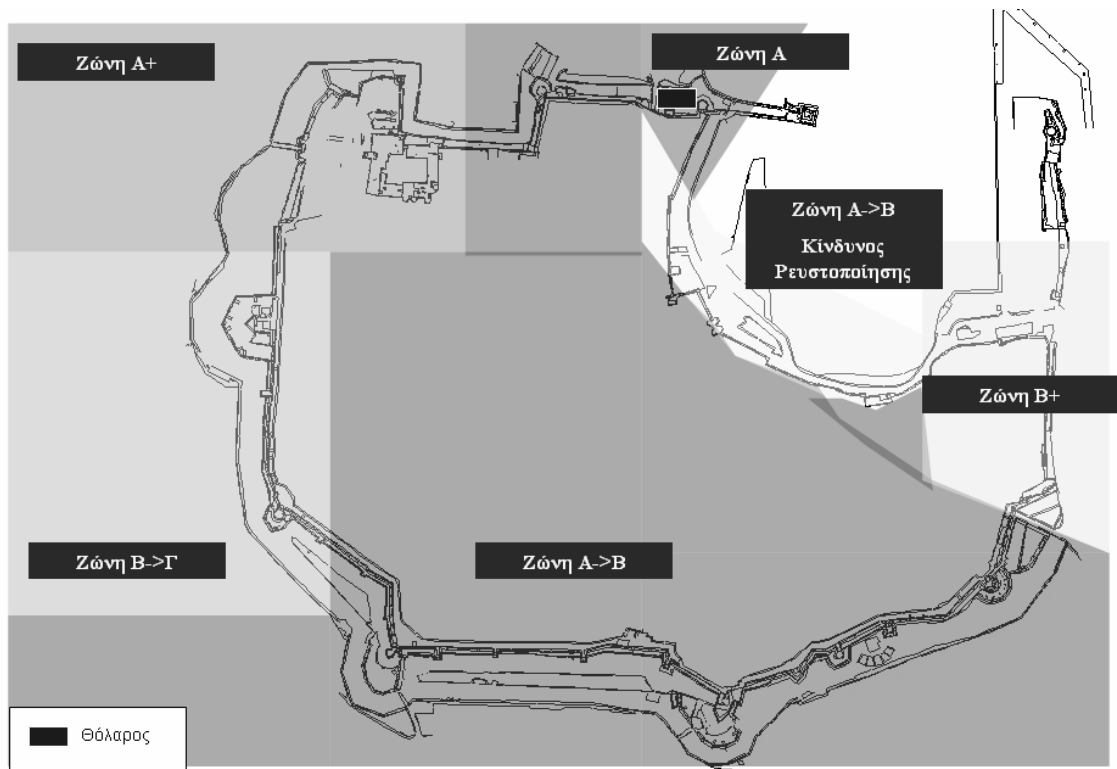
Από την άλλη, από άποψη συνοχής και ακεραιότητας των επιμέρους στοιχείων (εξωτερικών τοίχων) από φέρουσα λιθοδομή που συνθέτουν τον «Θόλο», δεν παρατηρούνται ιδιαίτερος σημαντικά προβλήματα. Επίσης, δεν παρατηρείται υπέρβαση της θλιπτικής τους αντοχής καθώς απουσιάζουν οι κατακόρυφες ρηγματώσεις στο σώμα των τοίχων που θα συνηγορούσαν στην ύπαρξη μηχανισμού ανάπτυξης εφελκυστικών τάσεων στην μοναξονικά (υπό κατακόρυφα φορτία) θλιβόμενη λιθοδομή αυτών. Από τα παραπάνω καθώς και από το γεγονός ότι δεν παρατηρείται πρόβλημα διαφορικής βράχυνσης στο σώμα των τριών τοίχων προκύπτει ότι τα κατακόρυφα φορτία ίδιου βάρους (συνεκτιμώντας τα φορτία που μεταφέρονται από τον θόλο και το υλικό παλαιότερης επίχωσης), παραλαμβάνονται με ικανοποιητική ασφάλεια από το σύστημα των τριών τοίχων και μεταφέρονται στο έδαφος μέσω της θεμελίωσης.

#### **Στήριξη θόλου - Αποκόλληση νοτίου τοίχου - Ρηγματώσεις**

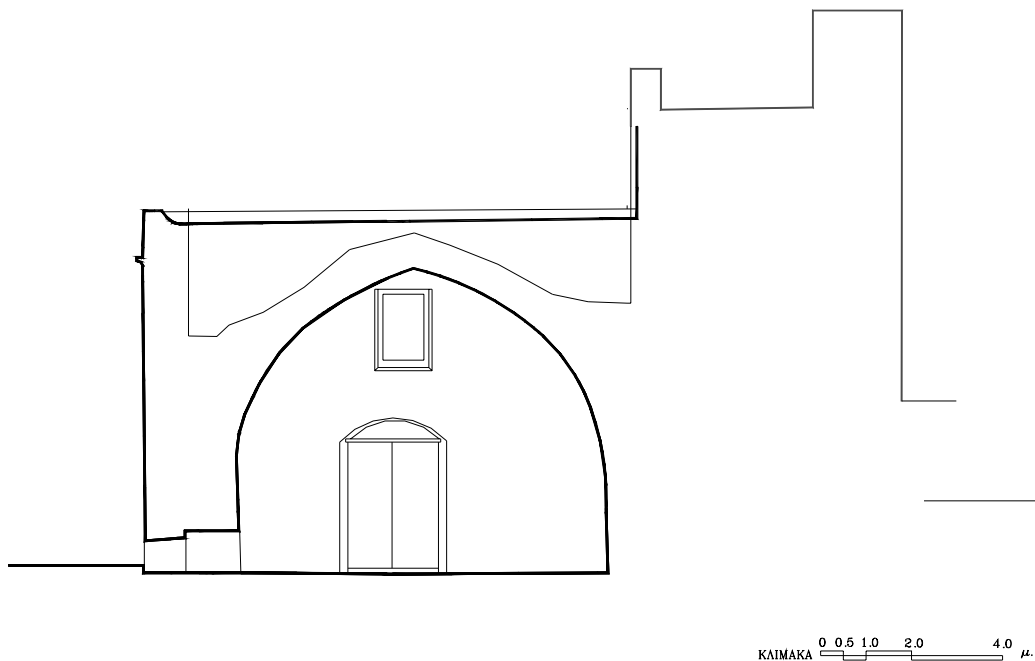
Η ανεπαρκής ανάπτυξη μηχανισμού μεταφοράς ωθήσεων από τον θόλο προς τον εξωτερικό (νότιο) τοίχο και η συνακόλουθη ανάπτυξη εφελκυστικών τάσεων στο σώμα του θόλου έχει προκαλέσει την αποκόλληση του νοτίου τοίχου και την απόκλιση από την κατακόρυφο κατά 4-6cm. Παράλληλα παρατηρούνται ρηγματώσεις εύρους έως 8cm στους εγκάρσιους (ανατολικό και δυτικό) τοίχους, και ειδικότερα στο σημείο συναρμογής αυτών με τον νότιο τοίχο, η οποίες αναπτύσσονται καθ' ύψος, υπερβαίνοντας το επίπεδο του θόλου. Απόρροια του μηχανισμού αυτού είναι και η ανάπτυξη εφελκυστικών τάσεων και η συνακόλουθη εμφάνιση ρηγματώσεων σε συγκεκριμένες θέσεις κατά τη διαμήκη έννοια του θόλου τόσο στην άνω όσο και στην κάτω ίνα. Ο νότιος τοίχος συνεπώς, αποτελεί πρακτικά έναν πρόβολο από λιθοδομή, ο οποίος εμφανίζεται ιδιαίτερα ασθενής έναντι σεισμικής ώθησης κάθετα προς το επίπεδο του καθώς αντιστέκεται στις αδρανειακές δυνάμεις όχι τόσο με την (σχετικά μικρή) καμπτική αντοχή της βάσης του, αλλά κυρίως με το ίδιο βάρος του το οποίο είναι σημαντικό λόγω του περίπου 2m πλάτους του. Δεδομένου ότι η διεύθυνση της σεισμικής δράσης είναι τυχηματική το φέρον σύστημα των τριών τοίχων έχει αναπόφευκτα καταπονηθεί στο παρελθόν και εντός επιπέδου. Εντούτοις, δεν παρατηρούνται μορφές αστοχίας (διατμητικής, καμπτικής ή ολίσθησης) εξαιτίας της σημαντικά μεγαλύτερης αντίστασης των τοίχων εντός επιπέδου μέσω της λειτουργίας δίσκου. Η περίπτωση όμως απώλειας της στατικής ισορροπίας του θόλου ως στερεού σώματος λόγω της απόκλισης από την κατακόρυφο του φέροντος νότιου τοίχου θα πρέπει επίσης να εξεταστεί.

#### **Λιθοδομή**

Γενικά, η λιθοδομή του Θόλου κρίνεται ότι βρίσκεται σε μέτρια έως ικανοποιητική τοπικά κατάσταση. Ο τρόπος δόμησης είναι αρκετά πυκνός γεγονός που αποτελεί πλεονέκτημα αφού έως έναν βαθμό οι αναπτυσσόμενες εφελκυστικές τάσεις μοιράζονται σε πολλούς αρμούς με αποτέλεσμα να περιορίζεται η ανάπτυξη υψηλού τοπικού ελκυσμού και η συνακόλουθη ρηγματώση στους εγκάρσιους τοίχους. Οι ρηγματώσεις που παρατηρούνται στις γωνίες των εγκάρσιων τοίχων οφείλονται στην παραμόρφωση του νότιου τοίχου υπό την επίδραση των σημαντικότερων αδρανειακών σεισμικών φορτίων από το μεσαιωνικό τείχος και τη μερική αδυναμία της θεμελίωσης. Η μεγαλύτερη φθορά των λίθων στις γωνίες οφείλεται μεταξύ άλλων στη δυσμενή δράση του ανέμου σε συνδυασμό με τη διάβρωση της λιθοδομής λόγω υγρασίας και γειννίας με το θαλάσσιο περιβάλλον. Επίσης δεν είναι καθόλου αμελητέα και η επιβάρυνση του μνημείου από τον έντονο κυκλοφοριακό φόρτο πάσης φύσεως οχημάτων.



**Σχήμα 1:** Γενική άποψη των ζωνών σεισμικής επικινδυνότητας στις Μεσαιωνικές οχυρώσεις με βάση τη Μικροζωνική Μελέτη της πόλης της Ρόδου (Εργαστήριο Εδαφομηχανικής και Θεμελιώσεων του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης, 1996)



**Σχήμα 2:** Εγκάρσια Τομή και Ανατολική Όψη του Θόλου



α.



β.



γ.



δ.



ε.



στ.

**Σχήμα 3:** Γενική άποψη του Θόλου (α,β). Εμφανείς ρηγματώσεις στον ανατολικό τοίχο (γ), εσωτερικά (δ) και στο επίπεδο του θόλου (ε,στ)

## Θεμελίωση

Από τη διερευνητική τομή που πραγματοποιήθηκε στο επίπεδο της θεμελίωσης αλλά και από την γενικότερη εμπειρία περί των μεθόδων κατασκευής μεσαιωνικών κτισμάτων, προκύπτει ότι η θεμελίωση ειδικά του νότιου τοίχου, αποτελεί απλώς μια συνέχεια της δόμησης με λιθοδομή κάτω από την επιφάνεια του εδάφους (με μικρή διαπλάτυνση), χωρίς ειδικότερη γεωμετρία ή εξυγιαντικές στρώσεις. Ο βαθμός επάρκειας της θεμελίωσης καθώς και η φέρουσα ικανότητα του εδάφους εξετάζονται αναλυτικά προκειμένου να προταθεί στο πλαίσιο της συνολικής στερέωσης του μνημείου και η παράλληλη ενίσχυση της θεμελίωσης.

Μικρού βαθμού διαφορική καθίζηση παρατηρείται στην διεύθυνση την κάθετη στον διαμήκη άξονα του Θόλαρου λόγω της θεμελίωσης του νότιου τοίχου σε μαλακότερο έδαφος σε σχέση με το Μεσαιωνικό τείχος το οποίο εδράζεται επί επιφανειακής έξαρσης ασβεστολίθου. Σε μικρότερο βαθμό το φαινόμενο αυτό είναι δυνατό να έχει επιδεινωθεί και από τα μεγάλα φορτία κυκλοφορίας που επιβαρύνουν τον παρακείμενο δρόμο. Η επιρροή της διαφορικής αυτής καθίζησης στην συνολική μορφή παραμόρφωσης του φορέα, αποτιμάται μέσω στατικής και δυναμικής ανάλυσης σε συνδυασμό με τους υπόλοιπους μηχανισμούς που αναπτύσσονται.

## Αρχική Εκτίμηση αιτιών αστοχίας

Για τον προσδιορισμό των αιτιών που προκάλεσαν τις συγκεκριμένες παραμορφώσεις απαιτήθηκε εκτεταμένη ανάδρομη στατική και δυναμική ανάλυση για διαφορετικούς συνδυασμούς φορτιστικών καταστάσεων (υποχώρηση στήριξης, σεισμική δράση, επίχωση θόλου) και καταναγκασμών (διαφορική καθίζηση θεμελίωσης) οι οποίοι θεωρήθηκαν πιθανοί κατά την επί τόπου αποτίμηση της κατασκευής.

Από τα παραπάνω σενάρια και σε συνδυασμό με μια σειρά από ελέγχους ευαισθησίας στις τιμές των εισαγόμενων τιμών μηχανικών ιδιοτήτων αλλά και επί των υιοθετημένων παραδοχών, εξετάστηκαν πιθανοί συνδυασμοί μεταξύ των σχετικών παραμέτρων (διαφορετικές τιμές μέτρου ελαστικότητας για τη λιθοδομή, ύπαρξη ή μη επιχώματος στη στέγη του θόλου, συνθήκες άκαμπτης/ελαστικής έδρασης του νότιου τοίχου, αλληλεπίδραση θόλαρου - διπλανού κτίσματος, σεισμοί διαφορετικού συχνοτικού περιεχομένου και διάρκειας) οδηγώντας τελικά στην σύνθεση 252 διαφορετικών υποθέσεων φόρτισης και καταναγκασμών.

## ΜΗΧΑΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΥΛΙΚΩΝ

Η λιθοδομή είναι ένα σύμμεκτο υλικό του οποίου η αντοχή είναι συνάρτηση των επιμέρους συστατικών της, εν προκειμένω των λίθων και του κονιάματος. Οι τιμές αυτές μηχανικών ιδιοτήτων έχουν προσδιοριστεί εργαστηριακά στο Ε.Μ.Π. στο πλαίσιο του Ερευνητικού Προγράμματος για την Μεσαιωνική Πόλη και αναφέρονται στην αντοχή του Πωρόλιθου του Λατομείου Σφουγγαριών Αρχαγγέλου Ρόδου. Η λιθοδομή του Θόλαρου δεν είναι απαραίτητο να σχετίζεται με το συγκεκριμένο λατομείο, γι αυτό και οι τιμές που τελικά χρησιμοποιούνται στην παρούσα μελέτη λαμβάνονται συντηρητικές. Σύμφωνα με τις διατάξεις του Ευρωκώδικα 6, και δεδομένης της αντοχής λίθων και κονιάματος (Πίνακας 1), η αντοχή της λιθοδομής σε θλίψη προκύπτει ίση προς  $f_{vk} = 1.80 \text{ MPa}$ , σε διάτμηση ίση προς  $f_{vk} = f_{vk0} + 0.4\sigma_d [\text{MPa}]$  και σε εφελκυσμό σε περίπου ίση με το 10% της αντίστοιχης θλιπτικής αντοχής, δηλαδή ίση προς 0.18 MPa. Αντίστοιχα το μέτρο ελαστικότητας της λιθοδομής προσδιορίζεται ίσο προς  $E = 1000f_w = 1800 \text{ MPa}$ , και ο λόγος του Poisson,  $\nu = 0.25$ .

Πληροφορίες για το έδαφος στη θέση της κατασκευής υπάρχουν διαθέσιμες από προγενέστερη Μικροζωνική Μελέτη που εκπονήθηκε από το Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης (Εργαστήριο Εδαφομηχανικής και Θεμελιώσεων, 1996), για την ευρύτερη περιοχή των Μεσαιωνικών Οχυρώσεων και η οποία συνοδεύεται από επί τόπου δοκιμές (γεωτρήσεις και σεισμικές διασκοπίσεις). Ένα ζεύγος εξ αυτών πραγματοποιήθηκε σε πολύ μικρή απόσταση από τον Θόλαρο. Οι επί-τόπου αυτές έρευνες συμπληρώνονται από αναλυτικές εργαστηριακές δοκιμές οι οποίες έχουν πραγματοποιηθεί στο Α.Π.Θ. στο πλαίσιο του ανωτέρω προγράμματος, παρέχοντας έτσι λεπτομερειακά και αξιόπιστα γεωτεχνικά δεδομένα. Από τις ανωτέρω γεωτεχνικές μελέτες που έχουν γίνει στο υπέδαφος της περιοχής του Θόλαρου αλλά και από ερευνητικά σκάμματα που έγιναν περιμετρικά, προκύπτει ότι η νότια πλευρά του είναι θεμελιωμένη σε μαλακό-χαλαρό έδαφος (αμμοϋλύ), ενώ η βόρεια σε βράχο και εδράζεται επάνω στο τείχος. Ο υπόγειος ορίζοντας, βρίσκεται ψηλά, σχεδόν στην επιφάνεια του εδάφους εξαιτίας της γειννίας με την θάλασσα.

**Πίνακας 1: Μηχανικά χαρακτηριστικά υλικών**

<b>ΕΛΑΦΟΣ ΘΕΜΕΛΙΩΣΗΣ</b>	
Αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη	$q_u = 134 \text{ kN/m}^2$
Φυσική υγρασία	$W = 37 \%$
Κορεσμένο Ειδικό Βάρος	$\gamma_d = 18.4 \text{ kN/m}^3$
Βυθισμένο Ειδικό Βάρος	$\gamma_{\beta\theta 0} = 8.4 \text{ kN/m}^3$
Γωνία Τριβής στην επιφανειακή στρώση του εδάφους	$\varphi = 30^\circ$
Συνοχή στην επιφανειακή στρώση του εδάφους	$c = 7 \text{ kPa}$
Δείκτης Συμπιεστότητας	$C_c = 0.356$
Δείκτης Πόρων	$e_o = 1.375$
Μέση ταχύτητα διάδοσης διατμητικών κυμάτων σε όλο το εδαφικό προφίλ	$V_s = 420 \text{ m/sec}$
Μέση ταχύτητα διάδοσης διατμητικών κυμάτων στην επιφανειακή στρώση εδάφους	$V_s = 250 \text{ m/sec}$

**ΛΙΘΟΙ**

Ειδικό Βάρος	$\gamma_d = 22.0 \text{ kN/m}^3$
Μέτρο Ελαστικότητας	1800 MPa
Μέση Θλιπτική αντοχή	7.08 MPa
Χαρακτηριστική Θλιπτική αντοχή	3.50 MPa

**ΚΟΝΙΑΜΑ**

Θλιπτική αντοχή	2.20 MPa
Διατμητική αντοχή κονιάματος χωρίς κάθετη θλίβουσα δύναμη	0.45 MPa

**ΛΙΘΟΔΟΜΗ**

Θλιπτική αντοχή	1.80 MPa
Διατμητική αντοχή (EC6)	0.55 MPa
Εφελκυστική αντοχή (EC6)	0.18 MPa
Συντελεστής ασφαλείας υλικού (EC6)	$\gamma_M = 1.0$ (αποτίμηση)
Μέτρο Ελαστικότητας	1800 MPa
Απόσβεση	3%

**Πίνακας 2: Χαρακτηριστικά χρονοϊστοριών επιτάχυνσης που χρησιμοποιήθηκαν για τη σεισμική διέγερση της κατασκευής στο πεδίο του χρόνου**

Σεισμός	Ημερομηνία	Μέγεθος $m_b$	R	Αριθμός βημάτων	Βήμα ολοκλήρωσης	PGA (g)	PSA (g)
Καλαμάτα	13/09/86	5.8	8 km	6016	0.005	0.24	0.79
Αθήνα	07/09/99	5.9	9 km	7816	0.005	0.30	1.67
Λευκάδα	27/05/81	4.9	15 km	2668	0.01	0.22	0.54
Ρόδος	05/10/87	5.1	6 km	1863	0.01	0.23	1.56
Irinia				7379	0.002	0.24	0.93
Kobe				4001	0.01	0.21	0.54
Tabas	16/09/78	6.5	5	6357	0.01	0.25	0.84

## ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ

Από την μελέτη των αποτελεσμάτων των διεξοδικών αναλύσεων αποτίμησης του μηχανισμού αστοχίας προκύπτει ότι, η υφιστάμενη κατάσταση του φορέα αποτελεί πράγματι συνάθροιση μιας σειράς παραγόντων, οι οποίοι έδρασαν κατά τη διάρκεια ζωής του κτίσματος, όπως η επανειλημμένη σεισμική καταπόνηση, η εξ επαφής μεταφορά αδρανειακών (σεισμικών) δυνάμεων από το παρακείμενο τείχος, η κατά περιόδους επίχωση του θόλου, η διαφορική καθίζηση της θεμελίωσης του νότιου τοίχου ως προς το (εδραζόμενο σε έξαρση επιφανειακού ασβεστόλιθου) βόρειο τείχος, καθώς και η φυσική φθορά της λιθοδομής, αποτέλεσμα της αποδιοργανωτικής επιρροής του χρόνου και του διαβρωτικού περιβάλλοντος, φαινόμενα που οδήγησαν στην ανάπτυξη εφελκυστικών τάσεων μεγαλύτερων της διαθέσιμης αντοχής στο σώμα της λιθοδομής.

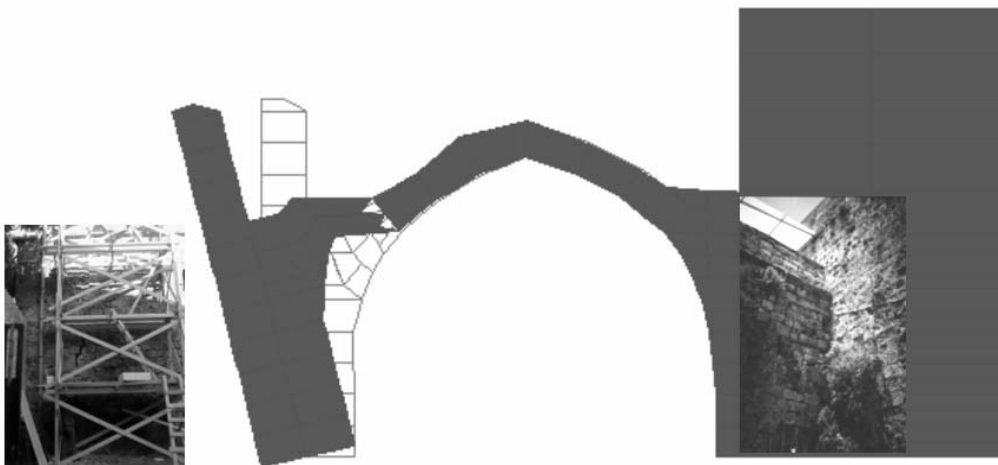
Η διαφορική καθίζηση του μνημείου είναι αποτέλεσμα της έδρασης του νότιου τοίχου στην επίστρωση σχετικά χαλαρής αμμοιλύος καθώς και της υψηλής στάθμης του υπογείου ορίζοντα, καθώς σε περίπτωση ισχυρού σεισμού οδηγεί στην αύξηση της πίεσης του νερού των πόρων, στην ταυτόχρονη μείωση των ενεργών τάσεων, και την συνακόλουθη απομείωση της φέρουσας ικανότητας με συνέπεια την αύξηση των καθιζήσεων. Στο Σχήμα 4 είναι φανερή η τάση του νότιου τοίχου να αποκολληθεί από τον υπόλοιπο φορέα χωρίς όμως κίνδυνο ανατροπής, κύρια λόγω του μεγάλου πλάτους και ιδίου βάρους του. Η μέγιστη απόκλιση του νότιου τοίχου από την κατακόρυφο βρέθηκε ίση με περίπου 6cm, τιμή που επαληθεύει τις μετρηθείσες τιμές μετακίνησης.

## ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑ ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΕΠΕΜΒΑΣΗΣ

Έχοντας αποσαφηνίσει τον μηχανισμό αστοχίας της κατασκευής, επιδιώχθηκε η διερεύνηση του βαθμού αποτελεσματικότητας διαφορετικών μεθόδων και τεχνικών αποκατάστασης και ενίσχυσης, προκειμένου να προσδιοριστεί σε συνεργασία με την Υπηρεσία ο βέλτιστος τρόπος επέμβασης από άποψη συντελεστή ασφαλείας έναντι απώλειας στατικής ισορροπίας ευστάθειας, μείωσης των αναπτυσσόμενων εφελκυστικών τάσεων αλλά και σεβασμού των αρχιτεκτονικών και ιστορικών ιδιαιτεροτήτων του μνημείου. Οι μέθοδοι στερέωσης που εξετάστηκαν παρουσιάζονται παρακάτω. Σε όλες τις περιπτώσεις γίνεται η θεώρηση ότι παράλληλα με την επέμβαση επί του φορέα, έχει αφαιρεθεί το υπερκείμενο του θόλου εδαφικό επίχωμα, ενώ η περιοχή της συναρμογής του θόλου με τους εγκάρσιους τοίχους έχει ανακατασκευασθεί μέσω αρμολογήματος, με χρήση κονιαμάτων υψηλής αντοχής. Επίσης θεωρείται πως η υπάρχουσα θεμελίωση έχει ενισχυθεί κατάλληλα.

### Εναλλακτική λύση 1: Χρήση ελκυστήρων

Επιδιώκεται η διερεύνηση της δυνατότητας παραλαβής των αδρανειακών δυνάμεων και των ωθήσεων εκ της λειτουργίας τόξου του θόλου από πρόσθετους μεταλλικούς ελκυστήρες και όχι από το σώμα του νότιου τοίχου και του θόλου.



**Σχήμα 4:** Παραμορφωμένος φορέας υπό την ταυτόχρονη επιρροή της σεισμικής δράσης και της ενδοσιμότητας του εδάφους θεμελίωσης του νότιου τοίχου

## Εναλλακτική λύση 2: Χρήση αντηρίδων

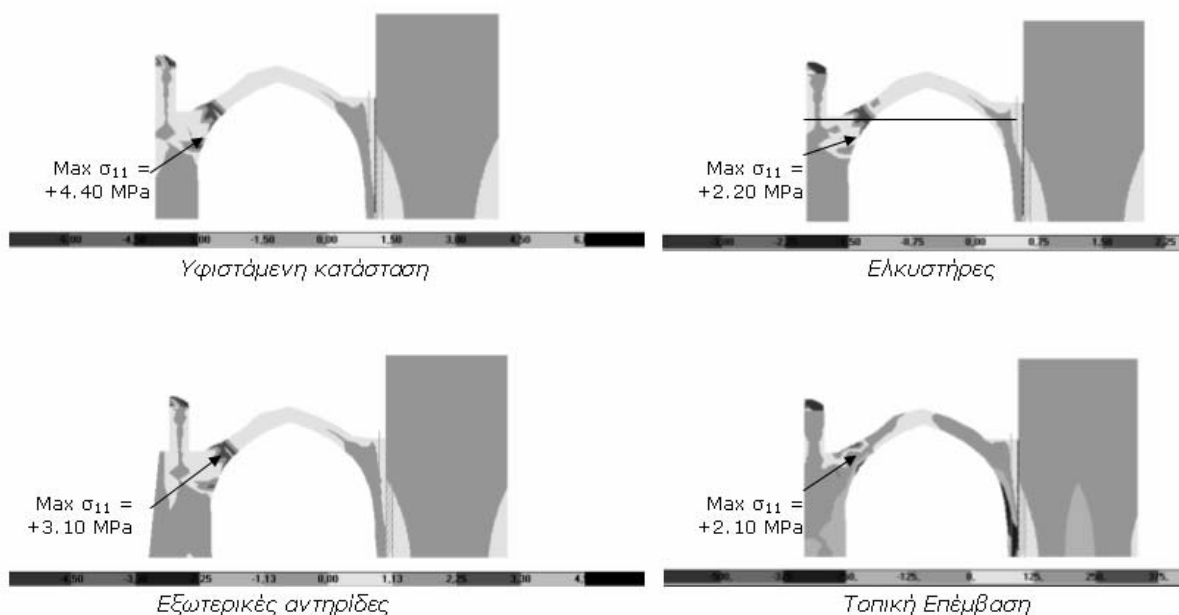
Αφορά πλευρική αντιστήριξη με κατάλληλες αντηρίδες των οποίων οι διαστάσεις συνάδουν μορφολογικά με προγενέστερη ιστορική φάση (επί Τουρκοκρατίας) όπου αποτελούσαν δομικό μέρος του Θόλαρου. Οι αξονικές αποστάσεις των αντηρίδων καθώς και τα γεωμετρικά τους χαρακτηριστικά καθορίστηκαν σε συνεργασία με την Υπηρεσία ως ακολούθως: ύψος 4.50m, βάση μικρή 0.50m, βάση μεγάλη 1.00m, αξονική απόσταση 5.50m, πάχος 0.80m. Η λύση συνδυάζεται με επέκταση της θεμελίωσης προς τα έξω κατά 1.00m προκειμένου να επιτευχθεί η βελτίωση της φέρουσας ικανότητας της θεμελίωσης υπό στραγγισμένες ή αστράγγιστες συνθήκες

## Εναλλακτική λύση 3: Τοπική επέμβαση/ραφή στη θέση εμφάνισης της ρηγμάτωσης

Δύναται να πραγματοποιηθεί με την χρήση συνδέσμων συρραφής, και παρά τις εγγενείς κατασκευαστικές δυσκολίες και αβεβαιότητες, στοχεύει στην επαύξηση της μονολιθικότητας του φορέα και την αύξηση της εφελκυστικής αντοχής της λιθοδομής.

Από τη μελέτη της επιρροής των εναλλακτικών μεθόδων επέμβασης στις αναπτυσσόμενες οριζόντιες και κατακόρυφες τάσεις του Θόλαρου, προκύπτει πως και οι τρεις μέθοδοι επέμβασης (χρήση ελκυστήρων, εξωτερικών αντηρίδων, εκτεταμένης συρραφής) είναι κατ' αρχήν αποδεκτές από άποψη αποτελεσματικότητας, προσφέροντας βεβαίως διαφορετικό βαθμό αύξησης του συντελεστή ασφαλείας. Ειδικότερα θα πρέπει να επισημανθεί ότι:

- Η επιλογή της τοποθέτησης εμφανών ελκυστήρων, ως μεθόδου επέμβασης, κρίνεται ικανοποιητική, αφού συνδυάζει την ευκολία στην κατασκευή με την ταυτόχρονη μείωση των εφελκυστικών τάσεων έως και κατά 50% (Σχήμα 5). Η πρόσφυση των ράβδων στους τοίχους επιτυγχάνεται με χρήση κονιαμάτων υψηλής αντοχής καθώς και με την πιθανή χρήσητσιμεντενέσεων. Μειονέκτημα αποτελεί η αισθητική αλλαγή στο εσωτερικό του Μνημείου.
- Η επιλογή της χρήσης αντηρίδων υπολείπεται σε κάποιο βαθμό, σε αποτελεσματικότητα, έναντι της προηγούμενης λύσης χωρίς όμως να θεωρείται ανεπαρκής. Συνδυάζει την ευκολία κατασκευής, μια και πρόκειται για εξωτερική επέμβαση, και την μείωση των εφελκυστικών τάσεων του υπάρχοντος φορέα σε ικανοποιητικό επίπεδο (έως 30%).
- Τέλος, η μέθοδος των συνδέσμων θεωρητικά απομειώνει τις εφελκυστικές τάσεις στον μέγιστο βαθμό, θα πρέπει όμως να επισημανθεί ότι η τοπική επέμβαση/ραφή, στην περιοχή της ένωσης του τοίχου με τον θόλο, είναι αρκετά δύσκολο να επιτευχθεί καθώς ανακύπτουν ερωτηματικά αναφορικά με το ποσοστό επιτυχίας της μεθόδου.



**Σχήμα 5:** Αποτελεσματικότητα εναλλακτικών μεθόδων επέμβασης: Αναπτυσσόμενες κατακόρυφες τάσεις υπό κατακόρυφα φορτία (I.B.), διαφορική καθίζηση και σεισμική δράση



Με βάση τα αποτελέσματα αυτά, η Υπηρεσία αποφάνθηκε ότι η προσηφορότερη μέθοδος στερέωσης είναι η χρήση αντηρίδων. Η λύση αυτή συνάδει με τις ιστορικές και αρχιτεκτονικές απαιτήσεις που τίθενται από τη φυσιογνωμία του Μνημείου, διατηρεί τον χαρακτήρα του αποφεύγοντας την εκτεταμένη χρήση πυκνών (και εμφανών) ελκυστήρων, ενώ παράλληλα πληροί την αρχή της αντιστρεψιμότητας των επεμβάσεων. Η λύση που προτείνεται και τελικά εφαρμόζεται συνοψίζεται στις εξής εργασίες:

- Κατασκευή τεσσάρων εξωτερικών αντηρίδων
- Αποκατάσταση της συνέχειας του θόλου όπου έχει διαταραχθεί με καλή συρραφή και αρμολόγημα. Οριστικοποίηση της αφαίρεσης της επίχωσης.
- Αποκατάσταση των λιθοδομών των εγκάρσιων τοίχων και καλή σύνδεση αυτών με τον νότιο τοίχο. Ενίσχυση της σύνδεσης με την κατασκευή εσωτερικώς «κλειδιών σε πλέξη» από καλής ποιότητας λίθους
- Διαπλάτυνση της θεμελίωσης με καλής ποιότητας λιθοδομή καταλλήλως συνδεδεμένη με την υφιστάμενη
- Κατασκευή περιμετρικής ζώνης αποστράγγισης σε ικανό βάθος για την μείωση της πιθανής αύξησης της πίεσης των πόρων στην στάθμη θεμελίωσης στην περίπτωση ενός ισχυρού σεισμού με στόχο τη μείωση του κινδύνου απώλειας της διατμητικής αντοχής (και επομένως και της φέρουσας ικανότητας) του εδάφους θεμελίωσης. Ταυτόχρονα περιορίζεται και ο κίνδυνος πλευρικής μετακίνησης (lateral spreading) και εξασφαλίζεται η ανάπτυξη ικανών παθητικών ωθήσεων ώστε η βάση του νότιου τοίχου να πληροί τις προϋποθέσεις «πάκτωσης».

## **ΣΤΑΤΙΚΗ ΚΑΙ ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΦΟΡΕΑ ΜΕΤΑ ΤΗ ΛΥΣΗ ΤΩΝ ΑΝΤΗΡΙΔΩΝ**

### **Προσομοίωση σε δύο διαστάσεις (2D)**

Η στατική και δυναμική μελέτη του μεσαιωνικού κτίσματος έγινε με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Sap 2000. Για τον σκοπό αυτόν μορφώθηκε αρχικά ένα διδιάστατο προσομοίωμα, που αντιστοιχεί γεωμετρικά στην τομή του Σχήματος 1. Επειδή στην προκειμένη περίπτωση του Θόλου, ο φέρων οργανισμός συνίσταται από λιθοδομή, ήταν απαραίτητη η θεώρηση επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων κελύφους (shell elements) επίπεδης παραμόρφωσης για την προσομοίωση της απόκρισης του συστήματος υπό κατακόρυφα και σεισμικά φορτία, (Πίνακας 1).

Προκειμένου να ληφθεί υπόψη η συγκριτικά μεγάλη μάζα του μεσαιωνικού τείχους στο οποίο στηρίζεται ο Θόλος και η συνακόλουθη δυναμική αλληλεπίδραση (μεταφορά αδρανειακών δυνάμεων) που υπάρχει στη συμπεριφορά μεταξύ των δύο δομημάτων κατά τη διάρκεια σεισμικής δράσης, χρησιμοποιούνται στοιχεία N-Link τύπου Gap (μη-γραμμικοί σύνδεσμοι πρόσκρουσης). Σε αντίθεση με το τμήμα του τείχους, ο νότιος τοίχος του Θόλου θεωρήθηκε εδραζόμενος επί ενδόσιμου εδαφικού στρώματος η προσομοίωση του οποίου πραγματοποιήθηκε με γραμμικά ελατήρια δυσκαμψίας ίσης προς  $K_z = 550000 \text{ KN/m}^2$  (από γεωτεχνικά δεδομένα παρακείμενης γεώτρησης).

Είναι φανερό πως η ενεργοποίηση μεγάλου αριθμού ιδιομορφών (απαιτήθηκαν 30 ιδιομορφές για την ενεργοποίηση του 90% της μάζας της κατασκευής) καθώς και η μονόπλευρη επαφή της βόρειας πλευράς του με το μεσαιωνικό τείχος, δεν επιτρέπουν την μελέτη της σεισμικής συμπεριφοράς της κατασκευής με την επιβολή ισοδύναμα στατικής αδρανειακής φόρτισης, με αποτέλεσμα η δυναμική ανάλυση της κατασκευής στο πεδίο των συχνοτήτων και του χρόνου να καθίσταται αναγκαία. Ο φορέας μελετήθηκε στη γραμμική ελαστικότητα.

Η δυναμική ελαστική συνεπώς επίλυση του φορέα έγινε για επτά σεισμούς, με διαφορετικό συχνοτικό περιεχόμενο και διάρκεια, αξιοποιώντας και την προγενέστερη μικροζωνική μελέτη του Α.Π.Θ. για την περιοχή της Ρόδου. Η μέγιστη εδαφική επιτάχυνση των σεισμικών αυτών κινήσεων ελήφθη ίση προς 0.24g, τιμή που προδιαγράφει ο ΕΑΚ2000 για την περιοχή της Ρόδου με πιθανότητα υπέρβασης 10% στα 50 χρόνια. Από την ιδιομορφική ανάλυση του φορέα προκύπτει ότι ο Θόλος στην υφιστάμενη κατάσταση έχει ιδιοπερίοδο  $T = 0.105 \text{ sec}$  ενώ ο ενισχυμένος φορέας εμφανίζει περίοδο ίση με 0.098 sec, γεγονός που ήταν αναμενόμενο εξαιτίας της αύξησης της δυσκαμψίας, λόγω της τοποθέτησης των αντηρίδων.

Το τελικό αριθμητικό προσομοίωμα επιλύθηκε υπό κατακόρυφα φορτία, διαφορική καθίζηση (δια της ενδοσιμότητας του υποκείμενου του νότιου τοίχου εδάφους) και σεισμική δράση. Από την γενική σύγκριση των εφελκυστικών τάσεων που αναπτύσσονται στον φορέα και της διαθέσιμης

εφελκυστικής αντοχής ( $180 \text{ kN/m}^2$ ), παρατηρείται ότι ενώ οι αναπτυσσόμενες εφελκυστικές τάσεις είναι μικρότερες των επιτρεπομένων υπό την επίδραση του ιδίου βάρους του φορέα, δηλαδή για στατικές συνθήκες, εντούτοις, σε μερικές περιπτώσεις οι τιμές των τάσεων αυτών είναι μεγαλύτερες από την επιτρεπόμενη εφελκυστική αντοχή της λιθοδομής. Θα πρέπει όμως να τονιστεί πως οι τιμές αυτές δεν εκφράζουν τις μέσες αναπτυσσόμενες τάσεις, καθώς αφενός εμφανίζονται σε μικρές (σημειακές) περιοχές επάνω στο φορέα, αφετέρου δε παρατηρούνται σε μεμονωμένες χρονικές στιγμές της ιστορίας μεταβολής των εντατικών μεγεθών. Οι θλιπτικές τάσεις που αναπτύσσονται στον ενισχυμένο φορέα είναι ακόμα και για την επίδραση του σεισμού μικρότερες των επιτρεπομένων (Πίνακας 3).

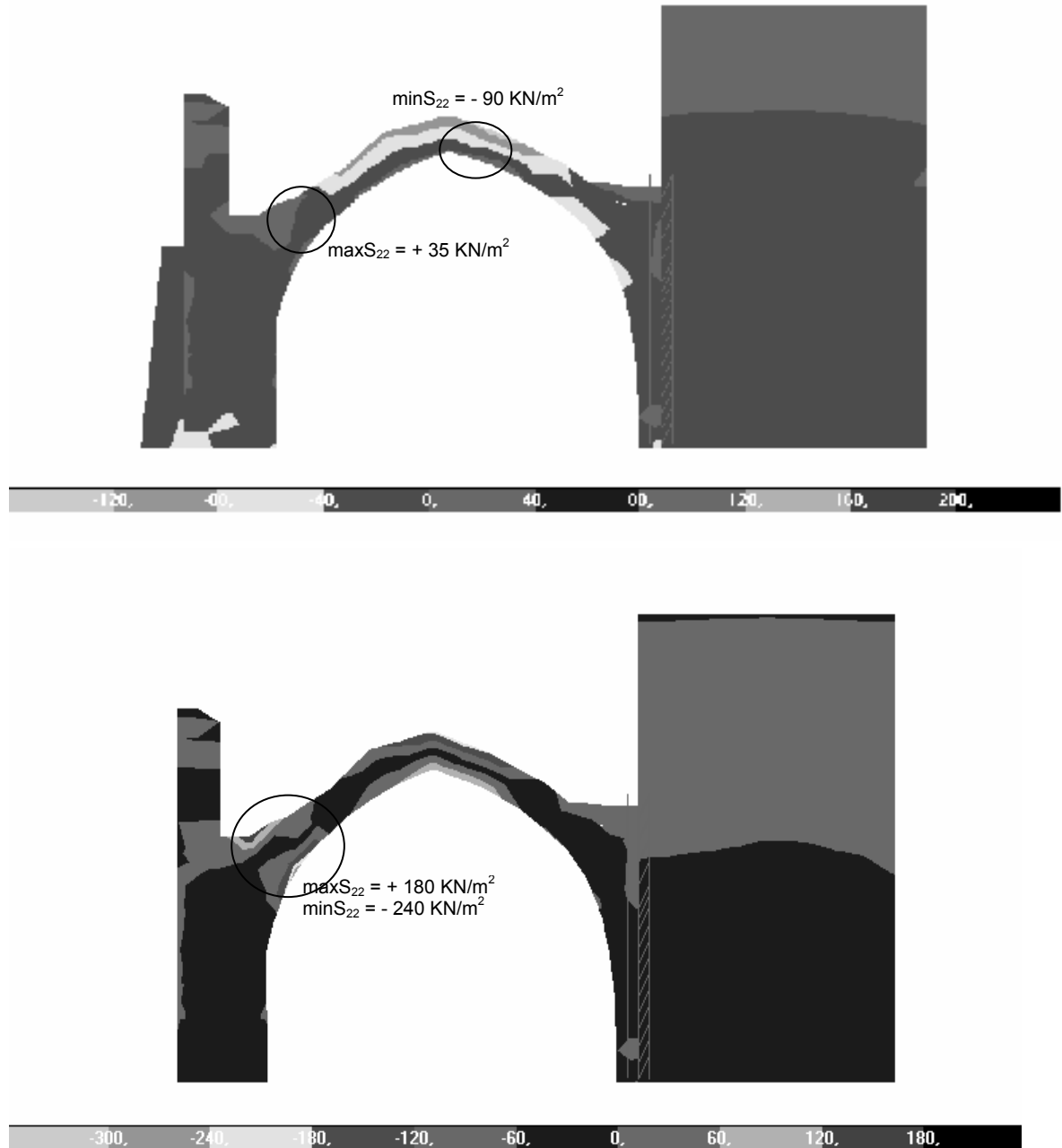
### **Προσομοίωση σε τρεις διαστάσεις (3D)**

Παράλληλα με την παραπάνω προσέγγιση προσομοίωσης, κρίθηκε σκόπιμο να διερευνηθεί η στατική και δυναμική απόκριση του Θόλαρου εκτός του επίπεδου της τομής του Σχήματος 2, προκειμένου να αναδειχθεί ο βαθμός κατά τον οποίο παρατηρείται συγκέντρωση τάσεων στα σημεία συναρμογής του νότιου τοίχου με τους εγκάρσιους καθώς και το αυξημένο βέλος απόκλισης στο κέντρο της διαμήκου διάστασης της επιφάνειας του νότιου τοίχου – στοιχεία που δεν είναι δυνατό να μελετηθούν μέσω δισδιάστατης προσομοίωσης. Για την επίλυση του τρισδιάστατου προσομοιώματος που μορφώθηκε για τον σκοπό αυτόν (Σχήματα 5, 6) χρησιμοποιήθηκαν 2240 στοιχεία επίπεδης παραμόρφωσης. Ο φορέας θεωρήθηκε πακτωμένος στο βόρειο τμήμα του ενώ το νότιο τμήμα εδράζεται πάνω στο φυσικό έδαφος με σειρά κατακόρυφων ελατηρίων. Στις γωνίες του φορέα γίνεται η παραδοχή μονολιθικής σύνδεσης δεδομένης της πρότασης αρμολογήματος και η πλέξης των λιθοσωμάτων στη θέση συναρμογής των εγκάρσιων με τον νότιο τοίχο.

Η ανάλυση σε τρεις διαστάσεις πραγματοποιήθηκε με την υπόθεση της διέγερσης κάθετα προς τον άξονα του Θόλαρου δεδομένου ότι από την προμελέτη ανεδείχθη ο μηχανισμός εγκάρσιας μεταφοράς αδρανειακών φορτίων από το τείχος προς τον θόλο και κατ' επέκτασης τον νότιο τοίχο. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης του φορέα στις τρεις διαστάσεις είναι παρόμοια των αντίστοιχων δισδιάστατων προσομοιωμάτων όσον αναφορά τα δυναμικά χαρακτηριστικά και το μέγεθος και την περιοχή ανάπτυξης των τάσεων (Πίνακας 3). Παράλληλα, επαληθεύεται ο μηχανισμός αποκόλλησης του νότιου τοίχου, ενώ επιπρόσθετα παρατηρείται αύξηση των βελών απόκλισης (και της αντίστοιχης έντασης) προς το κέντρο του τοίχου (Σχήμα 7).

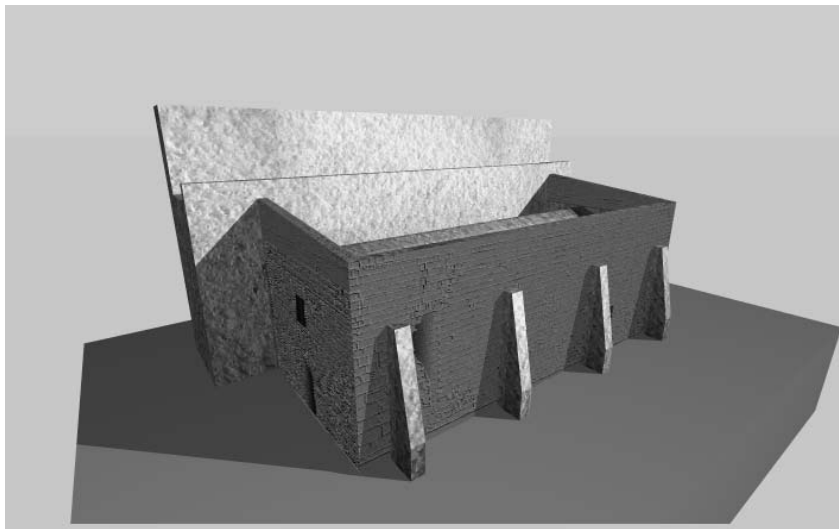
### **ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΔΙΑΤΟΜΩΝ – ΕΛΕΓΧΟΙ ΕΠΑΡΚΕΙΑΣ**

Από τις στατικές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν, προκύπτει πως η προτεινόμενη λύση κατασκευής των αντηρίδων, υπό κατακόρυφα φορτία (ιδίου βάρους με την παραδοχή της αποφόρτισης μέσω αφαίρεσης του επιχώματος) και υπό τη διαφορική καθίζηση του εδραζόμενου σε μαλακό έδαφος νοτίου τοίχου, οδηγεί σε καταστάσεις φόρτισης όπου το σώμα της λιθοδομής είναι σε θέση να φέρει με ασφάλεια τις αναπτυσσόμενες εφελκυστικές και θλιπτικές τάσεις οι οποίες είναι εν γένει μικρότερες της διαθέσιμης αντοχής του (Πίνακας 1). Η κατασκευή μάλιστα των αντηρίδων οδηγεί σε απομείωση έως και κατά 80% των εφελκυστικών τάσεων και 63% των θλιπτικών τάσεων σε σχέση με αυτές που αναπτύσσονται σήμερα στον υφιστάμενο φορέα (Σχ. 6). Από την άλλη, για την περίπτωση σεισμικής δράσης είναι γεγονός πως παρά την μείωση των εφελκυστικών τάσεων κατά περίπου 20%, σχεδόν σε όλες τις περιπτώσεις σεισμικής διέγερσης, οι αναπτυσσόμενες εφελκυστικές τάσεις υπερβαίνουν την εφελκυστική αντοχή της λιθοδομής η οποία έχει εκτιμηθεί προσεγγιστικά ίση προς  $0.18 \text{ MPa}$  - τιμή που κρίνεται αρκετά χαμηλή, θεωρήθηκε όμως ότι ελλείψει ειδικών δοκιμών είναι σκόπιμο να πραγματοποιείται γενικά συντηρητική εκτίμηση της αντοχής. Θα πρέπει στο σημείο αυτό όμως να τονιστεί πως ήδη από το Σχήματα 8 γίνεται φανερό ότι οι μέγιστες τάσεις που αναπτύσσονται αντιστοιχούν σε μεμονωμένες χρονικές στιγμές της ιστορίας ενώ πολλές φορές παρατηρούνται και σημειακά ως προς τον χώρο δηλαδή δεν χαρακτηρίζουν ομοιόμορφα μια ευρύτερη περιοχή του φορέα. Για τον λόγο αυτόν, και προκειμένου να είναι εφικτή η εξαγωγή μιας «δράσας» (effective) αναπτυσσόμενης τάσης, αρχικά λαμβάνεται μια μέση τιμή ίση προς το 50% της μέγιστης αναπτυσσόμενης εφελκυστικής τάσης σε κάθε θέση. Κατόπιν, συνεκτιμώνται οι αντίστοιχα υπολογισμένες τιμές εφελκυστικής τάσης σε τρία γειτονικά σημεία της δυσμενέστερα εφελκυστικής περιοχής και τελικά λαμβάνεται η μέση τιμή που προκύπτει από την επανάληψη της διαδικασίας και για τους τέσσερις υπό εξέταση σεισμούς. Από την ολοκλήρωση της ανωτέρω εξομάλυνσης, προκύπτουν οι δρώσες εφελκυστικές τάσεις που αναμένεται να αναπτυχθούν στο σώμα του Θόλαρου, τιμές που παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.

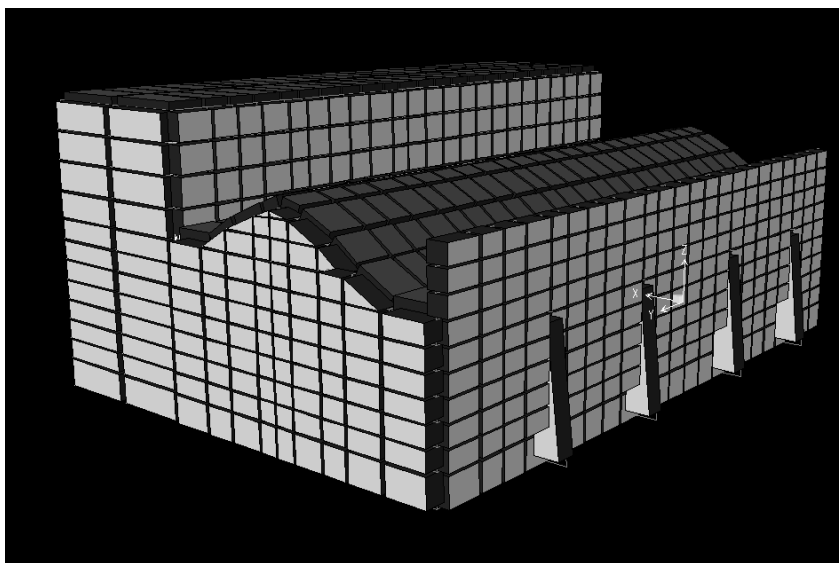


**Σχήμα 6:** Αναπτυσσόμενες οριζόντιες τάσεις ( $\text{KN/m}^2$ ) υπό κατακόρυφα φορτία και διαφορική καθίζηση, πριν (επάνω) και μετά (κάτω) την κατασκευή των αντηρίδων. Παρατηρείται μείωση των εφελκυστικών τάσεων κατά 80% και των θλιπτικών τάσεων κατά 62%.

Από την σύγκριση των «μέσων» εφελκυστικών και θλιπτικών τάσεων με τη διαθέσιμη αντοχή της λιθοδομής τεκμαίρεται ότι υπό σεισμική φόρτιση, ο φορέας αναμένεται να υποβληθεί, έστω στιγμιαία, σε επιπόνηση η οποία υπερβαίνει σε ορισμένες θέσεις την αντοχή του και συνεπώς ένα ποσοστό βλάβης θα πρέπει να αναμένεται. Θα πρέπει όμως στο σημείο αυτό να τονιστεί πως η δυναμική ανάλυση επιδιώχθηκε να είναι αρκετά συντηρητική καθώς πραγματοποιήθηκε υπό το πρίσμα εξίσου συντηρητικών παραδοχών, όπως την θεώρηση μηδενικής απορρόφησης ενέργειας μέσω της χρήσης συντελεστή μετελαστικής συμπεριφοράς ίσου προς 1, και σχετικά μικρής απόσβεσης (3%) του φορέα, ενώ δεν ελήφθησαν υπόψη στην ανάλυση πρόσθετες βελτιώσεις (τοπικές συρραφές, ενίσχυση).



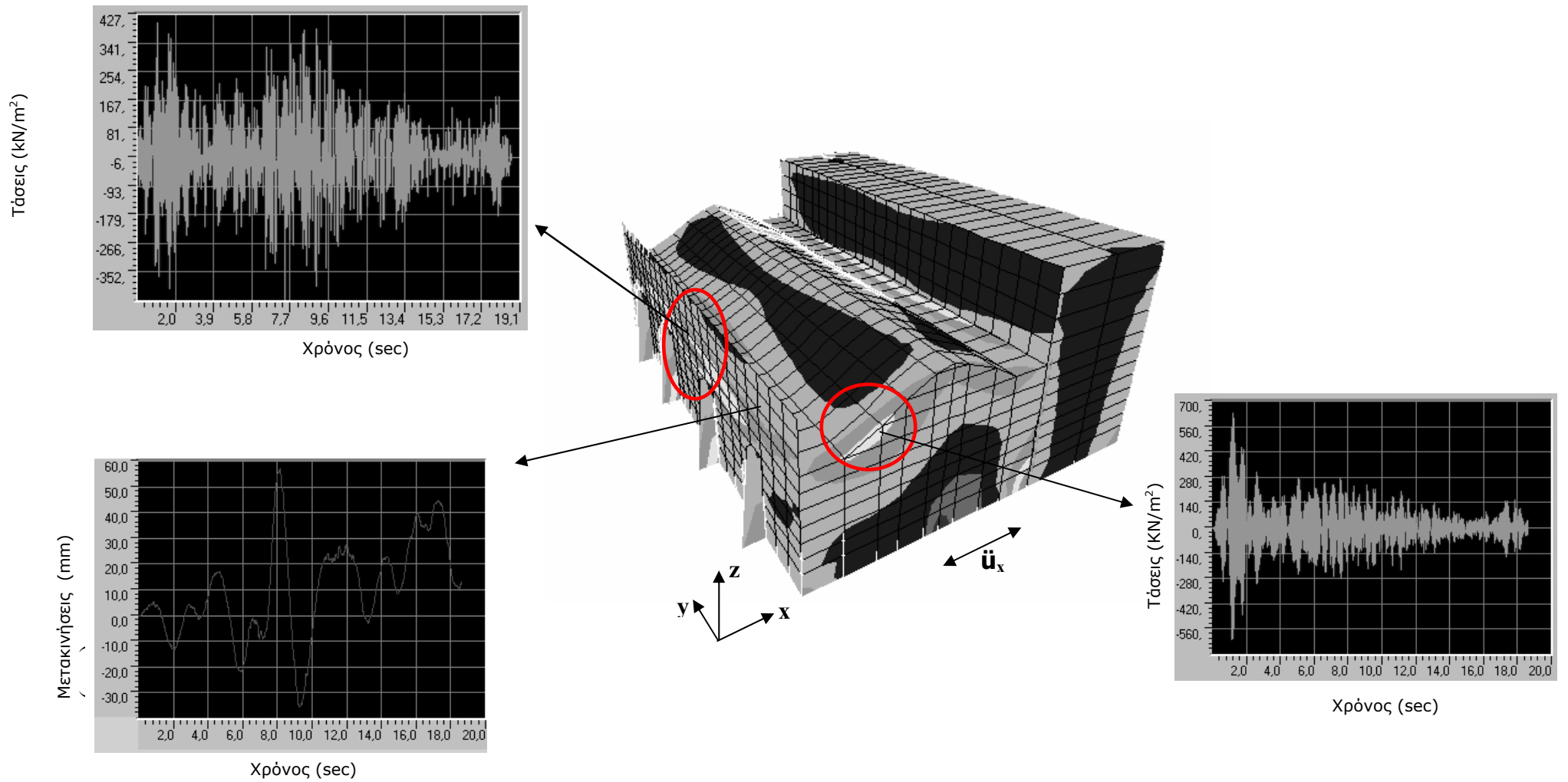
**Σχήμα 5:** Τρισδιάστατος φορέας – απεικόνιση του Θόλαρου



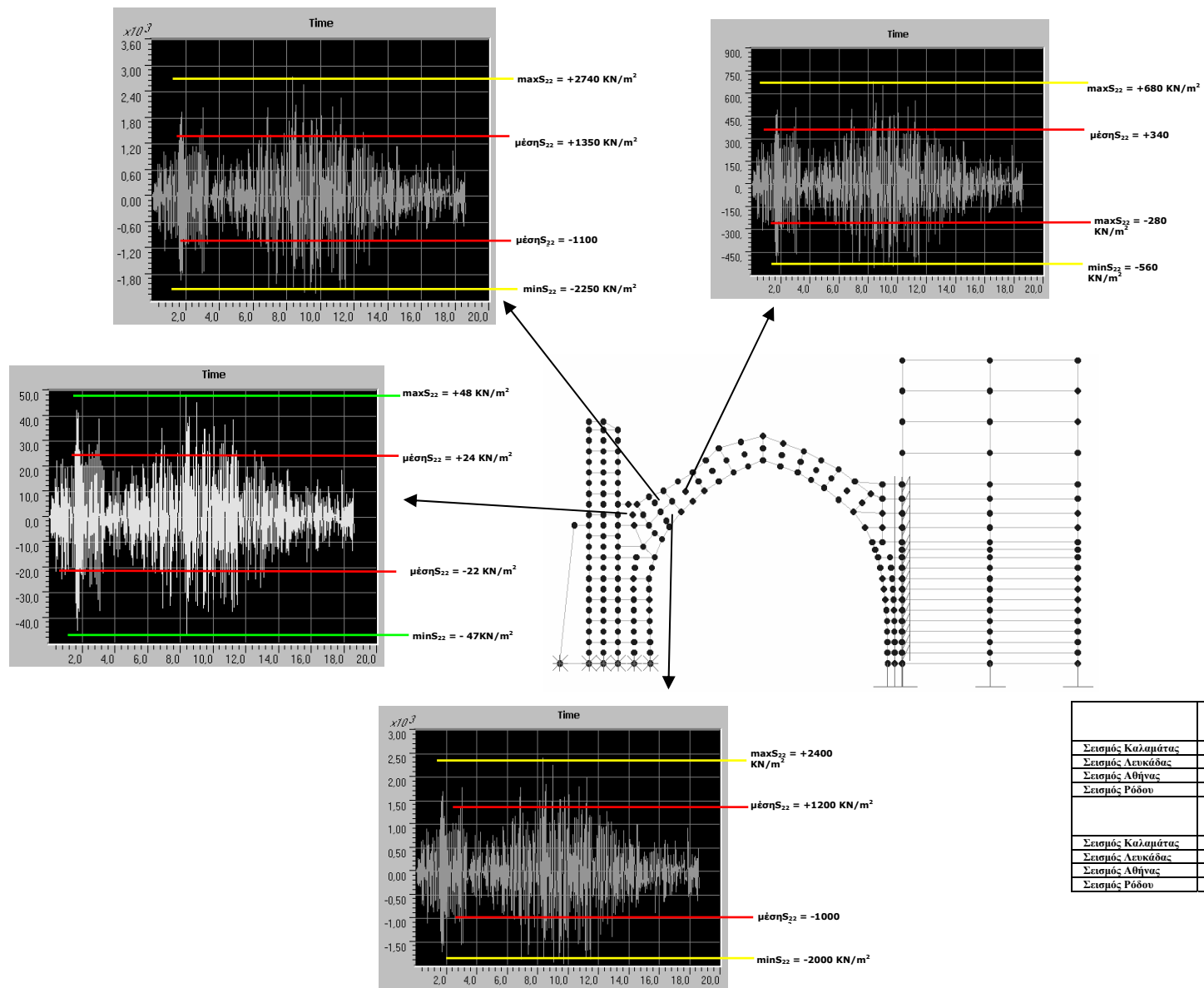
**Σχήμα 6:** Τρισδιάστατος φορέας όπως προσομοιώθηκε με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων

**Πίνακας 3:** Τελικά μεγέθη έντασης και παραμόρφωσης του πλευρικού

	Προσομοίωση 2D	Προσομοίωση 3D	Επιτρεπόμενο μέγεθος
Θεμελιώδης ιδιοπερίοδος	0.098	0.094	-
Μέγιστες οριζόντιες εφελκυστικές τάσεις υπό κατακόρυφα φορτία	0.03 MPa	0.02 MPa	0.18 MPa
Μέγιστες οριζόντιες θλιπτικές τάσεις υπό κατακόρυφα φορτία	0.09 MPa	0.10 MPa	1.80 MPa
Μέγιστες κατακόρυφες εφελκυστικές τάσεις υπό κατακόρυφα φορτία	0.08 MPa	0.06 MPa	0.18 MPa
Μέγιστες κατακόρυφες θλιπτικές τάσεις υπό κατακόρυφα φορτία	0.08 MPa	0.07 MPa	1.80 MPa
Μέση στον χώρο και στον χρόνο κατακόρυφη εφελκυστική τάση υπό κατακόρυφα φορτία, διαφορική καθίζηση και σεισμική δράση (σεισμοί Καλαμάτας, Ρόδου, Λευκάδας, Αθήνας)	0.22 MPa	0.32 MPa	0.18 MPa
Μέση στον χώρο και στον χρόνο κατακόρυφη θλιπτική τάση υπό κατακόρυφα φορτία, διαφορική καθίζηση και σεισμική δράση (σεισμοί Καλαμάτας, Ρόδου, Λευκάδας, Αθήνας).	0.19 MPa	0.30 MPa	1.80 MPa
Μέση στον χώρο και στον χρόνο οριζόντια εφελκυστική τάση υπό κατακόρυφα φορτία, διαφορική καθίζηση και σεισμική δράση (σεισμοί Καλαμάτας, Ρόδου, Λευκάδας, Αθήνας)	0.72 MPa	0.60 MPa	0.18 MPa
Μέση στον χώρο και στον χρόνο οριζόντια θλιπτική τάση υπό κατακόρυφα φορτία, διαφορική καθίζηση και σεισμική δράση (σεισμοί Καλαμάτας, Ρόδου, Λευκάδας, Αθήνας)	0.62 MPa	0.24 MPa	1.80 MPa
Απόκλιση νοτίου τοίχου από την κατακόρυφο υπό κατακόρυφα φορτία, διαφορική καθίζηση και σεισμική δράση (Ρόδος)	0.06 cm	0.06 cm	0.00 cm

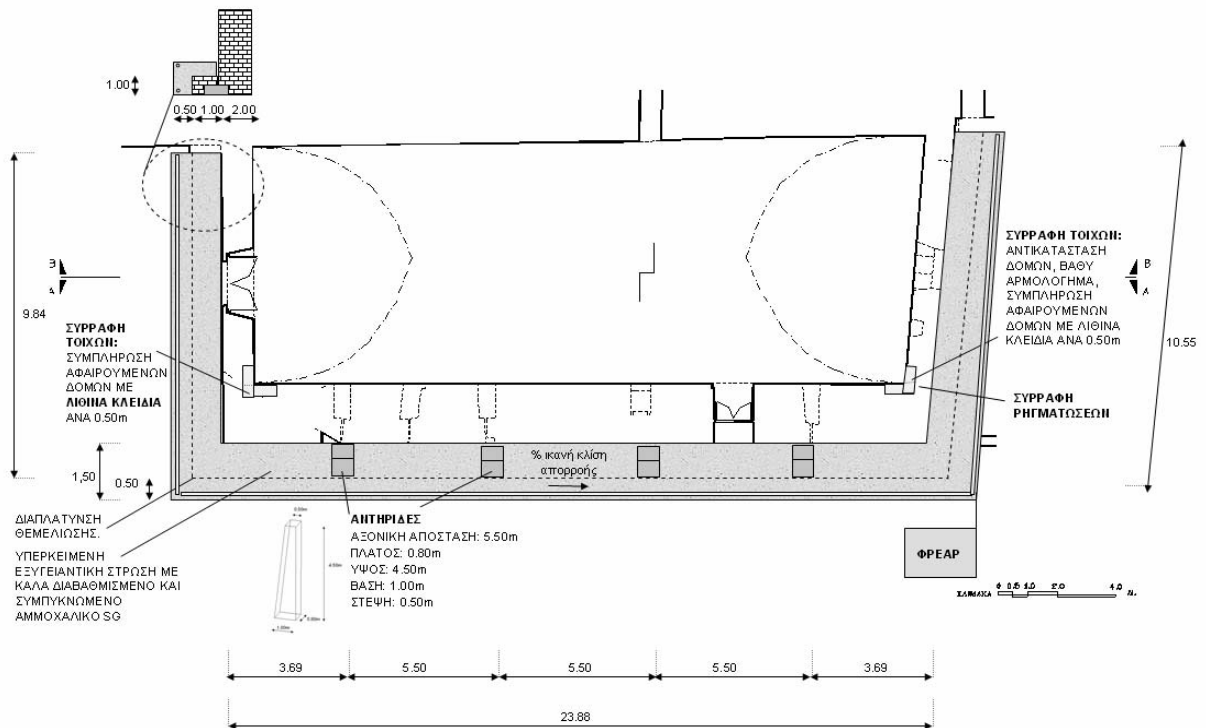


**Σχήμα 7:** Αναπτυσσόμενες εφελκυστικές τάσεις ( $10^3 \cdot \text{kN/m}^3$ ) (κέντρο), εκτός επιπέδου μετακινήσεις σε mm (κάτω αριστερά) στην περίπτωση σεισμικής δράσης και οριζόντιες τάσεις που αναπτύσσονται σε χαρακτηριστικές περιοχές του φορέα (πάνω αριστερά και δεξιά).

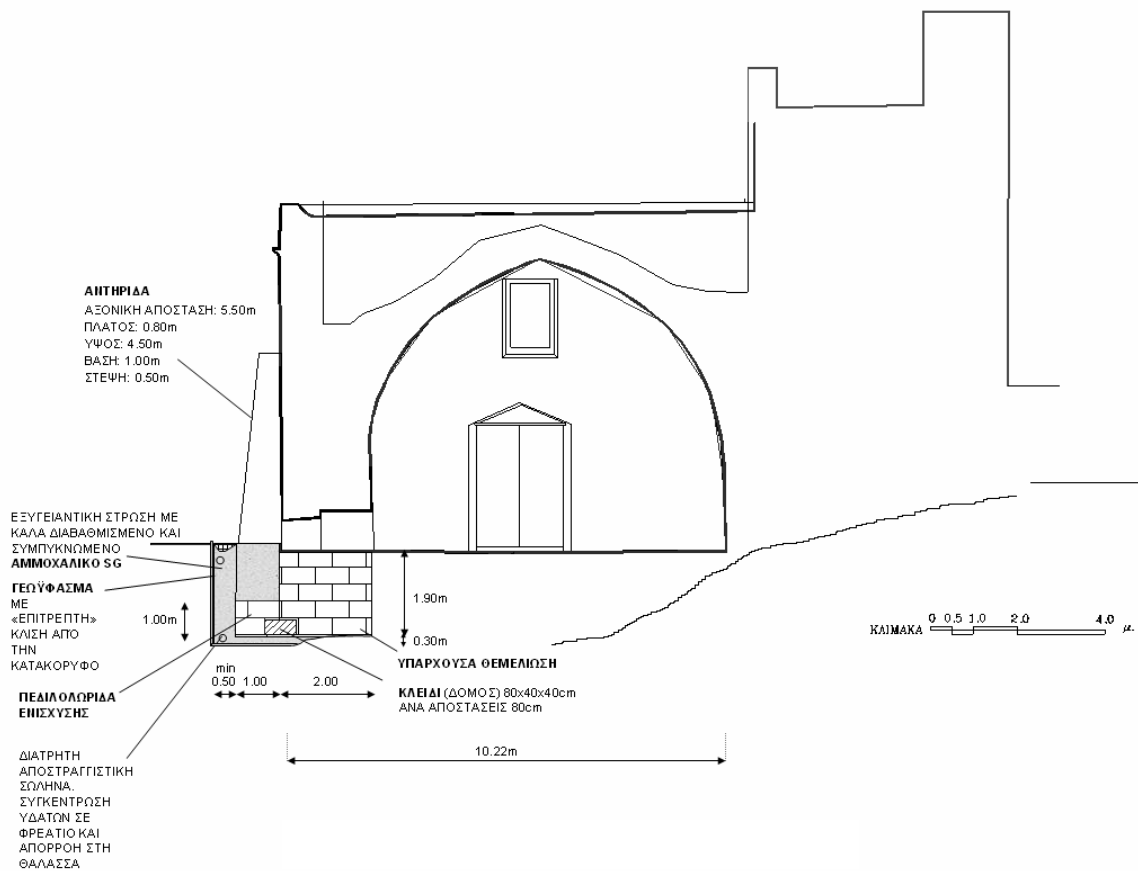


Παρατηρούμε ότι οι τάσεις μεταβάλλονται τόσο στο χρόνο όσο και στο χώρο. Η μέγιστη τάση που αναπτύσσεται στο φορέα αντιστοιχεί σε μεμονωμένες χρονικές στιγμές της ιστορίας (peak). Από τη μελέτη των ιστοριών προκύπτει ότι οι μέσες αναπτυσσόμενες τάσεις είναι ίσες με το μισό των μέγιστων. Για το λόγο αυτό στους συγκριτικούς πίνακες οι τάσεις δίδονται υποδιπλασιασμένες.

Σχήμα 8: Μεταβολή των αναπτυσσόμενων οριζόντιων τάσεων στο χρόνο σε διάφορες θέσεις του φορέα για το σεισμό της Ρόδου



Σχήμα 9: Απεικόνιση σε κάτοψη των στερεωτικών εργασιών (αιτηρίδες κλπ. και της ενίσχυσης της θεμελίωσης)



Σχήμα 10: Εγκάρσια Τομή. Προτάσεις ενίσχυσης θεμελίωσης

Σε κάθε περίπτωση πάντως, θα πρέπει επίσης να ληφθεί υπόψη το γεγονός ότι, με δεδομένους τους υφιστάμενους αρχιτεκτονικούς και ιστορικούς περιορισμούς (μη χρήση ελκυστήρων, χρήση υλικών συμβατών χωρίς τη χρήση οπλισμένου σκυροδέματος, δεδομένη απόσταση και γεωμετρία αντηρίδων) δεν είναι εφικτός στην μνημειακή αυτή κατασκευή ένας βαθμός ασφαλείας ο οποίος να αντιστοιχεί σε σύγχρονη φιλοσοφία αντισεισμικού σχεδιασμού καινούργιας κατασκευής από Ο/Σ με βάση τις τρέχουσες διατάξεις του Αντισεισμικού Κανονισμού. Με άλλα λόγια, δεν θα πρέπει να αναμένει κανείς ότι το Μνημείο θα αποκριθεί στην ελαστική περιοχή και δεν θα παρουσιάσει τοπικού χαρακτήρα ρηγματώσεις και βλάβες, υπό οποιαδήποτε σεισμική φόρτιση, γεγονός που άλλωστε όχι απλά δεν αποκλείεται αλλά πρακτικά γίνεται αποδεκτό από τους σύγχρονους αντισεισμικούς κανονισμούς και μάλιστα για όλες τις νεόδμητες κατασκευές μέσω της αποδοχής, μεγαλύτερου της μονάδας, συντελεστή μεταελαστικής συμπεριφοράς (άρα και βλάβης). Κρίνεται όμως ότι με την παρούσα επέμβαση επιτυγχάνεται η εξασφάλιση της ευστάθειας και στατικής επάρκειας του Θόλαρου υπό συνηθισμένες συνθήκες κατακόρυφης και οριζόντιας (σεισμικής) φόρτισης. Για την περίπτωση του ακραίου σεισμικού συμβάντος εξασφαλίζεται σύμφωνα με τις υποθέσεις της μελέτης και την προτεινόμενη λύση, ο προδιαγεγραμμένος από τον Αντισεισμικό Κανονισμό βαθμός ασφαλείας έναντι μη κατάρρευσης.

## **ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΕΠΕΜΒΑΣΗΣ-ΣΤΕΡΕΩΣΗΣ**

### **Φέρον σύστημα- Πλευρική αντιστήριξη**

Με βάση τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες ενότητες, προκύπτει ότι απαιτείται να κατασκευαστούν τέσσερις εξωτερικές αντηρίδες των οποίων η γεωμετρία και αξονικές αποστάσεις συνάδουν με τις ιστορικές και αρχιτεκτονικές απαιτήσεις που τίθενται από τη φυσιογνωμία του Μνημείου. Για την κατασκευή των αντηρίδων αυτών θα χρησιμοποιηθεί πωρόλιθος από το Λατομείο Σφουγγαριών Αρχαγγέλου Ρόδου και ισχυρό κονίαμα με βάση την άσβεστο. Μεγάλη προσοχή θα πρέπει να δοθεί και σε αυτό το σημείο στη συναρμογή της αντηρίδας με τον αρχικό φορέα. Σκοπός της καλής συναρμογής είναι η λειτουργία του ενισχυμένου φορέα σαν ένα σώμα. Σε συνδυασμό και με την ενίσχυση της θεμελίωσης εξασφαλίζεται ότι ο κρίσιμος νότιος τοίχος του θόλαρου, σε περίπτωση πολύ ισχυρού σεισμού, ακόμα και αν στιγμιαία απολέσει την επαφή του με τον θόλο λόγω της ανάπτυξης μεγάλων εφελκυστικών τάσεων, δεν θα παρουσιάσει μεγάλες μόνιμες παραμορφώσεις.

### **Βαθύ αρμολόγημα - Βελτίωση συναρμογής τοίχων -Συρραφή ρηγματώσεων**

Η συστηματική στερεωτική επέμβαση επί της αποδιοργανωμένης λιθοδομής κρίνεται επιβεβλημένη. Στις θέσεις όπου παρατηρούνται σχετικά μικρού πάχους ρηγματώσεις απαιτείται προσεκτικό αρμολόγημα (εσωτερικό και εξωτερικό) το οποίο θα πρέπει να συμπληρώνεται με αντικατάσταση ολόκληρων λίθων σε περίπτωση πλήρους αποδιοργάνωσής τους, όταν η βλάβη εκτείνεται σε βάθος, υπονομεύει το στατικό σύστημα, ή εκτείνεται σε μεγάλη επιφάνεια. Τέλος κρίνεται σκόπιμη και η βελτίωση του σώματος της λιθοδομής μέσω λιθοσυρραφών όπως προβλέπεται και στην περίπτωση της συναρμογής των τοίχων του μνημείου.

Όπως αναφέρθηκε, Προς την κατεύθυνση της αποκατάστασης της ένωσης αλλά και της ενίσχυσης του φορέα έναντι μελλοντικών φορτίσεων στην θέση συναρμογής του νότιου με τους εγκάρσιους τοίχους προτείνεται κατάλληλο πλέξιμο νέων λίθων (λιθοσυρραφή) ικανών διαστάσεων, σε όλο το ύψος του τοίχου η οποία θα πραγματοποιηθεί και στις δύο γωνίες. Η ραφή αυτή υλοποιείται στην εσωτερική πλευρά του Θόλαρου, κατόπιν αφαίρεσης λίθων και αντικατάστασης τους με λίθινα «κλειδιά». Σε κάθε περίπτωση πάντως, στις θέσεις αποκόλλησης του νότιου τοίχου καθώς και σε όσες θέσεις το εύρος των ρηγματώσεων υπερβαίνει το 1cm, η συρραφή των ρηγματώσεων θα πραγματοποιηθεί με τη χρήση παρεμβαλλόμενων λίθινων κλειδιών τα οποία τοποθετούνται κάθετα της ρωγμής εισχωρώντας εκατέρωθεν στα αποσχισμένα μέλη της λιθοδομής.

### **Ενίσχυση Θεμελίωσης**

Η ενίσχυση της θεμελίωσης, κρίνεται ότι πρέπει να πραγματοποιηθεί καθώς θα οδηγήσει στην ανάπτυξη τάσεων μικρότερων των επιτρεπομένων, τόσο για αστράγγιστες όσο και για συνθήκες στις οποίες δεν αναπτύσσονται υπερπίεσεις. Προτείνεται εκσκαφή για την ενίσχυση (διαπλάτυνση) των υφιστάμενων θεμελίων κατά 1.00m. Μεγάλη προσοχή θα πρέπει να δοθεί στη συναρμογή της παλιάς



με τη νέα θεμελίωση, η οποία θα επιτευχθεί με κατάλληλη πλέξη των λίθων μεταξύ τους μέσω δόμου-«κλειδιού» διαστάσεων 80x40x40cm ο οποίος προβλέπεται να τοποθετείται ανά 80cm.

Παράλληλα, προτείνεται κατασκευή αποστραγγιστικής ζώνης πλάτους τουλάχιστον 0.50m, η οποία θα αποτελείται από καλά διαβαθμισμένο και κυρίως συμπυκνωμένο αμμοχάλικο υψηλής διαπερατότητας, για την καλύτερη εκτόνωση των υπερπίεσεων. Η ζώνη θα περιβάλλεται από γεωϋφασμα ενώ δια καταλλήλως κεκλιμένων αποστραγγιστικών σωλήνων θα εξασφαλίζει την απορροή των υδάτων σε παρακείμενο φρεάτιο και από εκεί στη θάλασσα (εναλλακτικά θα μπορούσε η τελική απορροή να γίνει προς την τάφρο). Περιμετρικά του μνημείου τέλος, πρέπει να προστεθεί κατάλληλο σύστημα επιφανειακής απορροής των ομβρίων (συμπεριλαμβανομένων και των προερχομένων από το θόλο) με την κατασκευή περιμετρικού καναλέτου με σχάρα σε απόσταση 1.0m - 1.5m από το μνημείο. Στόχος του συστήματος αυτού είναι ο περιορισμός της κατείσδυσης των ομβρίων στη θεμελίωση.

#### **Ανακατασκευή θόλου**

Κρίνεται πως δεν απαιτείται ανακατασκευή του Θόλου δεδομένου του ότι το πρόβλημα εστιάζεται στην έλλειψη πλευρικής αντιστήριξης σε συνδυασμό με την μεταφορά ωθήσεων από το τείχος της μεσαιωνικής οχύρωσης. Σκοπός των επισκευών που θα γίνουν είναι, με την κατάλληλη συμπλήρωση-αποκατάσταση και πλέξιμο των λίθων, η στέγη του θόλου να συμπεριφέρεται σαν μία ενιαία στρώση μονολιθικά συνδεδεμένη με τον βόρειο και νότιο τοίχο. Το επίχωμα στην στέψη θόλου, έχει ήδη αφαιρεθεί προσεκτικά, με σκοπό την ανακούφιση του από το πρόσθετο φορτίο ώστε να προκύψει περαιτέρω μείωση των τάσεων που αναπτύσσονται στο σύνολο του φορέα. Η ανακατασκευή της άνω προστατευτικής στρώσης λίθων με παρεμβολή στρώσης κουρασάνιου και η τελική στεγάνωση του θόλου με παραδοσιακό τρόπο είναι απαραίτητη. Η απορροή των ομβρίων πρέπει να γίνει με δύο σωλήνες στον ανατολικό εγκάρσιο τοίχο.

#### **ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**

Στο παρόν τεκμαίρεται ότι δια της στατικής και δυναμικής ανάλυσης, είναι εφικτή η αποτίμηση της συμπεριφοράς και η ανάδειξη του μηχανισμού αστοχίας της μεσαιωνικής οπλοθήκης De Milly, στην Ρόδο. Παράλληλα πραγματοποιείται η αξιολόγηση εναλλακτικών τρόπων ενίσχυσης και αποκατάστασης των βλαβών και προτείνονται μέθοδοι επέμβασης οι οποίοι επιλέχθηκαν με γνώμονα τον σεβασμό στον αρχιτεκτονικό και ιστορικό χαρακτήρα του μνημείου και την εξασφάλιση της μελλοντικής ευστάθειας της κατασκευής.

#### **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

- Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Εργαστήριο Εδαφομηχανικής και Θεμελιώσεων (1996) Μικροζωνική Μελέτη Ρόδου.
- Eurocode 8. Design provisions for earthquake resistance of structures. EN 1998-1 General rules, seismic actions and rules for buildings.
- Eurocode 6. Design of masonry structures. ENV 1996-1 General Rules
- Εθνικό Κείμενο Εφαρμογής (N.A.D.)
- EAK 2000 Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός
- Πιτιλάκης, Κ. & Σέξτος, Α. (2000) Ανάπτυξη λογισμικού για την αποτύπωση, κατηγοριοποίηση, αποτίμηση και ιεράρχηση των βλαβών στην Μεσαιωνική Πόλη της Ρόδου, 1<sup>ο</sup> Πανελλήνιο Συνέδριο Επεμβάσεων σε Μνημεία, Θεσσαλονίκη, 159-171.