

# Αποτίμηση και πρόταση αποκατάστασης δυτικού και βορειοδυτικού πύργου του Κάστρου Σερβίων Κοζάνης

Χρήστος Ιγνατάκης  
Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Α.Π.Θ.

Αναστάσιος Σέξτος  
Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Α.Π.Θ.

## 1. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας αποτελεί η αριθμητική μελέτη και αποτίμηση της σεισμικής επάρκειας ενός τμήματος του Κάστρου των Σερβίων καθώς και η αποτίμηση της επιτελεστικότητας εναλλακτικών σχημάτων ενίσχυσης. Το Κάστρο των Σερβίων αποτέλεσε τμήμα του βυζαντινού οχυρωματικού δικτύου της ευρύτερης περιοχής της εύφορης πεδιάδας του Αλιάκμονα, με ειδικότερο στόχο τον έλεγχο της σημαντικής διάβασης από Μακεδονία προς Θεσσαλία. Στην εργασία αυτή έμφαση δίνεται σε δύο πύργους του δυτικού και βορειοδυτικού τμήματος των οποίων η ευστάθεια κρίνεται επισφαλής. Ο κατακόρυφος φέρων οργανισμός των δύο Πύργων αποτελείται από τρίστρωτη αργολιθοδομή μεγάλου πάχους με απομειώσεις καθύψος στις στάθμες όπου εδράζονταν τα ξύλινα πατώματα από τα οποία διασώζονται μόνο οι δοκοθήκες των πατόξυλων στις εσωτερικές όψεις των τοιχοποιιών. Στο κατώτερο τμήμα των γωνιών υπάρχουν χονδρολαξευμένοι γωνιόλιθοι ενώ στις όψεις και σπανιότερα στο σώμα των λιθοδομών υπάρχουν διάσπαρτες πλακοειδείς πλίνθοι. Το κονίαμα δόμησης είναι ασθενές ασβεστοκονίαμα με έντονη επιφανειακή αποσάθρωση. Οι τοιχοποιίες φέρουν ξυλοδεσιές στις στάθμες των πατωμάτων και σε μία ενδιάμεση στάθμη ανά όροφο, οι οποίες αποτελούνται από τρεις διαμήκεις δοκούς και εγκάρσιες δοκίδες (τραβέρσες) ανά αποστάσεις. Όλα τα ξύλινα στοιχεία εμφανίζουν εντονότατη διάβρωση. Τόσο οι Πύργοι όσο και το περιτείχισμα θεμελιώνονται επιφανειακά επάνω στην κορυφή του υψώματος ακολουθώντας τις απότομες τοπικά κλίσεις. Η γενική άποψη του κάστρου φαίνεται στο Σχήμα 1, ενώ βασικές διαστάσεις σημειώνονται στο Σχήμα 2, όπως αποτυπώθηκαν με φωτογραμμετρική μέθοδο με τη χρήση Laser Scanner.

## 2. ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΦΕΡΟΥΣΑΣ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΟΥ ΦΟΡΕΑ

### 2.1 Μηχανικές ιδιότητες υλικών και εδάφους

Σημειώνεται ότι η αποτίμηση των Πύργων γίνεται μετά την εφαρμογή των στοιχειωδών επεμβάσεων αποκατάστασης του ολόσωμου χαρακτήρα των λιθοδομών (ενέματα και αρμολογήματα) οπότε θα αποκτήσει τις ιδιότητες της ενισχυμένης λιθοδομής. Εν προκειμένω, η χαρακτηριστική αντοχή σε σύνθλιψη λαμβάνεται ίση προς  $f_{wc,k} = 4.0\text{MPa}$  ενώ η αντίστοιχη σχεδιασμού σε σύνθλιψη προκύπτει  $f_{wc,d} = \frac{f_{wc,k}}{\gamma_M} = \frac{f_{wc,k}}{2.5} = 1.6\text{MPa}$ . Η χαρακτηριστική αντοχή σε εφελκυσμό λαμβάνεται ίση προς  $f_{wt,d} = \frac{f_{wt,k}}{15} = \frac{4.0}{15} = 0.26\text{MPa}$ , συνεπώς η αντοχή σχεδιασμού της υφιστάμενης λιθοδομής σε εφελκυσμό προκύπτει ίση προς  $f_{wt,d} = \frac{f_{wt,k}}{2.5} = 0.11\text{MPa}$ . Σημειώνεται ότι ο συντελεστής ασφαλείας 2.5 λαμβάνεται μειωμένος, ίσος προς  $2.5 \times 2/3 = 1.67$  κατά το σεισμικό συνδυασμό δράσεων. Η τιμή του Μέτρου Ελαστικότητας λαμβάνεται ίση προς  $E = 1000 \times f_{wc,k} = 4000\text{MPa}$ , συνεπώς  $E_{II} = \frac{E}{2} = 2000\text{MPa}$ . Με βάση τη γεωτεχνική μελέτη, το έδαφος κατατάσσεται στην κατηγορία C κατά Ευρωκώδικα 8. Επιλέγεται η υποδεικνύομενη από τη γεωτεχνική μελέτη τιμή του δείκτη εδάφους  $k_s = 6600\text{kN/m}^3$  και η επιτρεπόμενη τάση (φέρουσα ικανότητα σχεδιασμού)  $\sigma_{ep} = 245\text{kPa}$ .

### 2.2 Προσομοίωση

Η μελέτη αποτίμησης των Πύργων 1 και 2 πραγματοποιήθηκε με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS (έκδοση 6.12). Για λόγους τεκμηρίωσης και ελέγχου, ορισμένες αριθμητικές

αναλύσεις επαναλήφθηκαν και με το λογισμικό ETABS (έκδοση 9.7.0). Για την προσομοίωση του φορέα μορφώθηκαν δύο αριθμητικά προσομοιώματα, ένα για κάθε Πύργο. Για το σώμα της λιθοδομής χρησιμοποιήθηκαν χωρικά πεπερασμένα στοιχεία. Το σύστημα επιλύθηκε καταρχάς για τα φορτία βαρύτητας καθώς και για τους κατά Ευρωκώδικα 8 σεισμικούς συνδυασμούς. Κατά την αποτίμηση του υφιστάμενου φορέα και για το σεισμικό συνδυασμό πραγματοποιείται (α) απλοποιημένη (ισοδύναμη) στατική, (β) δυναμική φασματική ανάλυση ενώ το σύστημα θεωρήθηκε γραμμικά ελαστικό. Ενδεικτικές τιμές αναπτυσσόμενων κατακόρυφων κυρίων τάσεων παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.

### 3. ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΦΕΡΟΥΣΑΣ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΩΝ ΣΧΗΜΑΤΩΝ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ

Εξετάστηκαν δύο εναλλακτικά σχήματα ενίσχυσης που αφορούν στην ανάκτηση του αρχικού περιγράμματος των Πύργων καθώς και την εσωτερική αντιστήριξη με την κατασκευή εσωτερικών μεταλλικών πλαισίων. Η αξιοπιστία της αποτίμησης των αριθμητικών προσομοιωμάτων του ενισχυμένου φέροντα οργανισμού των Πύργων μετά την εφαρμογή των ανωτέρω επεμβάσεων βασίζεται στην προϋπόθεση (α) της επιτυχούς αποκατάστασης του ολόσωμου χαρακτήρα των υφιστάμενων τοιχοποιιών, (β) της υποκατάστασης των διαβρωμένων ξυλοδεσιών με χαλύβδινους ελκυστήρες ισοδύναμης διατομής και στις ίδιες στάθμες, (γ) της εξασφάλισης συνεργασίας των ανακτίσεων με τις υφιστάμενες τοιχοποιίες, (δ) της εξασφάλισης συνεργασίας των γραμμικών μελών των μεταλλικών πλαισίων με τις υφιστάμενες τοιχοποιίες και τις ανακτίσεις (εφόσον υιοθετηθεί λύση προσθήκης μεταλλικού σκελετού) καθώς και (ε) της εξασφάλισης της ευστάθειας του πόδα έδρασης των λιθοδομών κατά μήκος της εξωτερικής περιμέτρου των Πύργων. Από την αξιολόγηση της απόκρισης των διαδοχικών στατικών προσομοιωμάτων που προηγήθηκε διαπιστώνονται συνοπτικά τα εξής:

- α. Οι Πύργοι στην παρούσα μορφή τους παρουσιάζουν ικανοποιητική συμπεριφορά υπό τα φορτία βαρύτητας αλλά υπό τα αυξημένα σεισμικά φορτία που επιβάλλουν οι σύγχρονοι κανονισμοί για κατασκευές μνημειακής αξίας εμφανίζει έντονη ανεπάρκεια, ιδιαίτερα ο Πύργος Π1 που είναι υψηλότερος από τον Πύργο Π2.
- β. Η εξασφάλιση της ευστάθειας των Πύργων έναντι σεισμού με την παρούσα μορφή τους είναι ανέφικτη καθώς θα απαιτούσε ιδιαίτερα ισχυρές και αντιαισθητικές εξωτερικές αντιστηρίξεις.
- γ. Η ανάκτηση και συμπλήρωση του περιγράμματος στο κατώτερο τμήμα των Πύργων, μέχρι τη στάθμη του πρώτου πατώματος, αποδείχθηκε ανεπαρκής και για τους δύο Πύργους.
- δ. Η επί πλέον προσθήκη μεταλλικού μονώροφου σκελετού στο εσωτερικό των Πύργων, μέχρι τη στάθμη του πρώτου πατώματος, προσφέρει ελάχιστα και είναι ανεπαρκής.
- ε. Η ανάκτηση και συμπλήρωση του περιγράμματος των Πύργων σε μεγαλύτερο ύψος, μέχρι τη στάθμη του δεύτερου πατώματος, είναι οριακά ανεπαρκής για τον Πύργο Π1 και επαρκής για τον Πύργο Π2.
- στ. Η επί πλέον προσθήκη μεταλλικού δώροφου σκελετού στο εσωτερικό του Πύργου Π1 βελτίωσε μερικώς τον συντελεστή ασφαλείας του Πύργου σε τιμή μεγαλύτερη της μονάδας, όχι όμως υψηλή.

Ειδικότερα η τελευταία λύση της προσθήκης μεταλλικού σκελετού οδηγεί σε αύξηση μεν του συντελεστή ασφαλείας σε τιμή άνω της μονάδας χωρίς όμως η αύξηση αυτή να είναι μεγάλη. Αντίθετα, η συγκεκριμένη λύση παρουσιάζει μειονεκτήματα όπως η αισθητική επιβάρυνση, η αναστηλωτική ασυμβατότητα παρά την αντιστρεψιμότητα της λύσης, τα τεχνικά προβλήματα προσαρμογής της λύσης (συνδέσεις του σκελετού με την περίμετρο του Πύργου, ανάγκη μικροπασσάλων για την έδραση της πλάκας βάσης του μεταλλικού σκελετού κ.λ.π.), ο χρόνος και το κόστος ολοκλήρωσης.

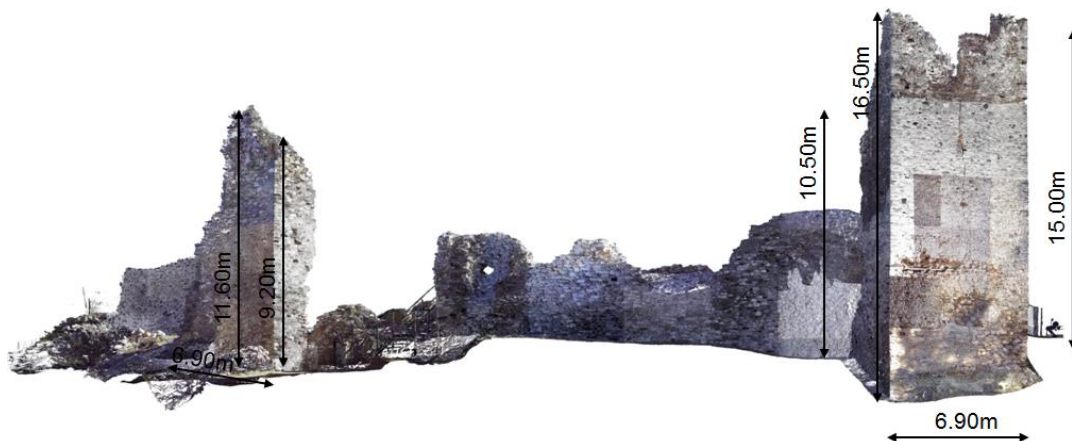
### 4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Με βάση την παραπάνω διεξοδική αριθμητική προσέγγιση του προβλήματος και την εξέταση εναλλακτικών λύσεων ενίσχυσης των δύο πύργων του κάστρου των Σερβίων, προτάθηκε μόνο η ανάκτηση και συμπλήρωση του φέροντος οργανισμού με εξασφάλιση των παραπάνω (α,β,γ) προϋποθέσεων. Η επέμβαση αυτή κρίθηκε επαρκής χωρίς προσθήκη εσωτερικού μεταλλικού σκελετού παρά το γεγονός ότι ο συντελεστής ασφαλείας υπολείπεται ελαφρά της μονάδας και μετά

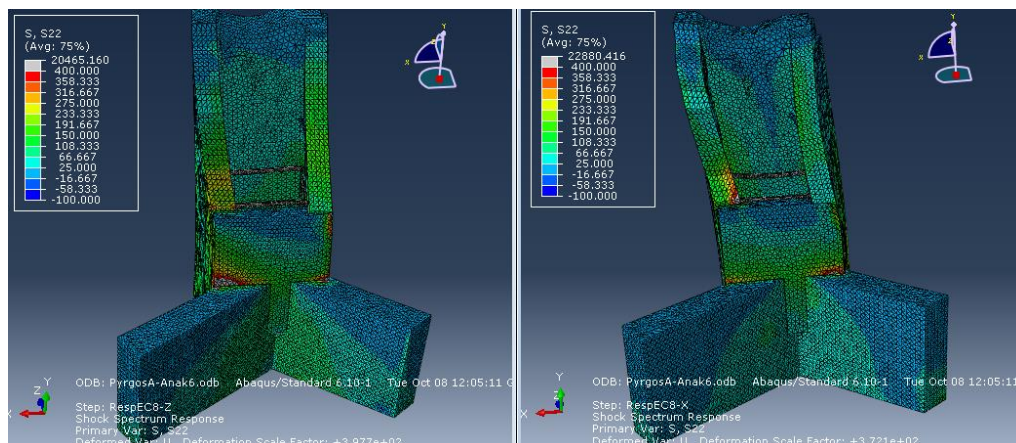
από θετική εισήγηση της αρμόδιας ΕΦΑ Ημαθίας, έγινε αποδεκτή από το Κεντρικό Αρχαιολογικό Συμβούλιο . Η λύση αυτή αναδεικνύει το ζήτημα των πολλαπλών και ευρύτερων κριτηρίων ενίσχυσης τα οποία δεν είναι αμιγώς υπολογιστικά αλλά άπτονται και ζητημάτων αισθητικής, αρχών αναστήλωσης και σχέσης κόστους-οφέλους.



Σχήμα 1: Γενική άποψη του Κάστρου των Σερβίων



Σχήμα 2: Δυτική όψη των οχυρώσεων. Πύργος 1 (δεξιά). Πύργος 2 (αριστερά).



Σχήμα 3: Αναπτυσσόμενες κατακόρυφες κύριες τάσεις  $\sigma_{22}$  (σε kPa) υπό δυναμική φασματική ανάλυση για σεισμική φόρτιση  $E_z$  παράλληλα προς τα σκέλη (αριστερά) και αντίστοιχες μετακινήσεις κατά τον ίδιο άξονα (δεξιά).