

# Μεθοδολογία εκτίμησης των σεισμικών μετακινήσεων μουσειακών εκθεμάτων. Εφαρμογή στο Αρχ. Μουσείο Αργοστολίου

Αναστάσιος Σέξτος

*Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Α.Π.Θ.*

Γεώργιος Γιώτης

*Πολιτικός Μηχανικός, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Α.Π.Θ.*

Αντώνιος Πετρόπουλος

*Πολιτικός Μηχανικός, ΛΕ' Εφορεία Προϊστορικών και Κλασικών Αρχαιοτήτων*

Κοσμάς Στυλιανίδης

*Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Α.Π.Θ.*

## 1. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Η εργασία αυτή εστιάζει στην ανάπτυξη μιας ολοκληρωμένης μεθοδολογίας εκτίμησης των σεισμικών μετατοπίσεων μουσειακών εκθεμάτων συνδυάζοντας αριθμητικές αναλύσεις και τυχόν μετρημένη συμπεριφορά η οποία καταγράφηκε κατά τη διάρκεια ισχυρών σεισμικών κινήσεων. Εξετάζεται ειδικότερα η περίπτωση αγαλμάτων του Αρχαιολογικού Μουσείου του Αργοστολίου στην Κεφαλονιά κατά τη διπλή σεισμική δόνηση της 26/1/2014 και 3/2/2014 μεγέθους  $M_w=6.1$  και  $M_w=6.0$ , αντίστοιχα (GEER/EERI/ATC 2014). Με επί τόπου παρατηρήσεις και μετρήσεις μετά τα ανωτέρω δύο συμβάντα κατεγράφησαν οι ακριβείς μόνιμες μετατοπίσεις τριών εκθεμάτων στο εσωτερικό του Μουσείου (ενός αγάλματος, μιας στήλης και μίας βάσης) καθώς και ενός σύγχρονου αγάλματος στον περίβολο (Σχήμα 1). Το σύνολο των αγαλμάτων που μελετήθηκαν λειτουργεί συμπληρωματικά ως προς τη μελέτη του φυσικού προβλήματος καθώς τα μεν εκθέματα στο εσωτερικό υπόκεινται στην ταλάντωση του κτιρίου ενώ, αντίθετα, το άγαλμα στο εξωτερικό διεγείρεται απευθείας από τη σεισμική κίνηση του εδάφους.

## 2. ΣΧΗΜΑ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

Καθώς το φυσικό πρόβλημα της σεισμικής μετατόπισης των αγαλμάτων επί της διεπιφάνειας στήριξης είναι φαινόμενο γεωμετρικά μη-γραμμικό διαμορφώθηκαν κατάλληλα αριθμητικά προσομοιώματα τα οποία συνεκτιμούν την σχετική ολίσθηση (sliding) στη διεπιφάνεια εκθέματος-βάσης, τον λικνισμό (rocking) του πρώτου περί τους τρεις άξονές του καθώς και τον βηματισμό (stepping) ή την ανατροπή που προκύπτει ως συνδυασμός των ανωτέρω. Για την προσομοίωση των τεσσάρων συστημάτων χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα ABAQUS (Simulia 2007) με τη θεώρηση τριβής. Πραγματοποιήθηκε καταρχάς παραμετρική ανάλυση απλούστερων συστημάτων για την επιβεβαίωση της ακρίβειας της αριθμητικής προσέγγισης συγκρίνοντας τα αποτελέσματα με αμιγώς αναλυτικές λύσεις από τη διεθνή βιβλιογραφία (Konstantinidis and Makris 2005). Η σύγκριση αυτή οδήγησε σε ικανοποιητική συμφωνία σε επίπεδο μέγιστων μετατοπίσεων, συχνοτικού περιεχομένου απόκρισης και χρονικής στιγμής της ανατροπής εδραιώνοντας την αξιοπιστία της μεθόδου προσομοίωσης. Δεδομένου του μεγάλου Μέτρου Ελαστικότητας του υλικού των εκθεμάτων και του εξωτερικού αγάλματος τόσο αυτά όσο και η βάση έδρασης θεωρήθηκαν ~~έκκεντρα~~ απαραμόρφωτα προς απλοποίηση του μαθηματικού ομοιώματος. Εφόσον όμως και οι δύο επιφάνειες (εκθέματος και βάσης) τελούν υπό κίνηση, χρησιμοποιήθηκε κατάλληλος δυναμικός συντελεστής τριβής εκθετικά μειούμενος από την στατική τιμή  $\mu_s$  κατά την έναρξη της ολίσθησης προς την μικρότερη τιμή  $\mu_k$ :

$$\mu = \mu_k + (\mu_s - \mu_k)e^{-d_c \gamma'_{eq}} \quad (3)$$

Όπου  $\gamma'_{eq}$  είναι ο ισοδύναμος ρυθμός ολίσθησης και  $d_o$  συντελεστής απομείωσης. Εξετάστηκαν δύο εναλλακτικές τιμές του συντελεστή τριβής, εν προκειμένω,  $\{\mu_s=0.7, \mu_k=0.7\}$  και  $\{\mu_s=0.7, \mu_k=0.3\}$  με  $d=0.05$ , σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία (Komodromos et al. 2008; Ambraseys and Psycharis 2011). Ακολούθως προσομοιώθηκαν τα πραγματικά εκθέματα καθώς και το άγαλμα στον περίβολο του Μουσείου και υπολογίστηκαν τα φάσματα λικνισμού (rocking spectra) καθώς και η μη-γραμμική

σεισμική συμπεριφορά τους υπό την καταγραφείσα, διαδοχική τριαξονική επιπόνηση κατά το διπλό σεισμό της 26/2/14 και της 3/2/14 πλησίον του Μουσείου (Σχήμα 2). Συνολικά τα τέσσερα υπό μελέτη συστήματα υποβλήθηκαν σε μια σειρά τριών διεγέρσεων (δύο κύριων σεισμών και ενός ενδιάμεσου μετασεισμού) κατόπιν κατάλληλου ενδιάμεσου χρόνου ηρεμίας και υπολογίστηκε το προφίλ των αθροιστικών μόνιμων μετακινήσεων το οποίο συγκρίθηκε, πολύ ικανοποιητικά με την πραγματική, παρατηρηθείσα μετατόπιση (Σχήμα 3). Σημειώνεται ότι προκειμένου να ταυτοποιηθούν ανάδρομα οι μετρηθείσες μετατοπίσεις στην περίπτωση των εκθεμάτων στο εσωτερικό του Μουσείου απαιτήθηκε η προσομοίωση του συνόλου του κτιρίου καθώς η δική του ταλάντωση-απόκριση στη σεισμική διέγερση του εδάφους αποτελούσε την κίνηση εισαγωγής σεισμικής ενέργειας στη βάση των εκθεμάτων. Παράλληλα, αποδείχθηκε σημαντικός ο κατάλληλος προσανατολισμός των συνιστωσών της σεισμικής κίνησης έως ότου επιτευχθεί η επιδιωκόμενη σύγκλιση.

### 3. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η διεξοδική μεθοδολογία προσομοίωσης της διέγερσης και απόκρισης εκθεμάτων του Αρχαιολογικού Μουσείου του Αργοστολίου καθώς και αυτής αγάλματος στον περίβολο αυτού ανέδειξε τις σημαντικές δυνατότητες προσομοίωσης του φαινομένου ολίσθησης και λικνισμού μουσειακών εκθεμάτων. Η κατάλληλη ταυτοποίηση των παρατηρηθεισών μετακινήσεων καθώς και η λεπτομερής συνεκτίμηση της σεισμικής απόκρισης του κτιρίου του Μουσείου καθεαυτού βοηθούν σημαντικά στην κατανόηση του φυσικού προβλήματος, ενώ παρέχουν εργαλεία σχεδιασμού μέτρων προστασίας και επιτυχούς στήριξης μεγάλων ή και μικρότερων εκθεμάτων αποτρέποντας, δια του κατάλληλου σχεδιασμού της βάσης, την ανατροπή τους υπό ισχυρή σεισμική κίνηση.

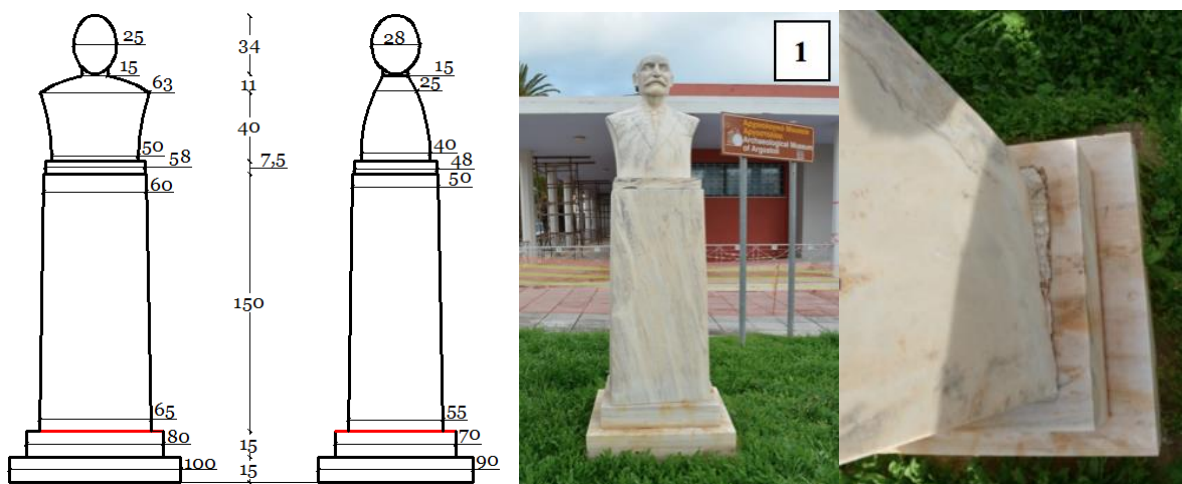
### BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

GEER/EERI/ATC (2014) Earthquake Reconnaissance Report for the 2014 Cephalonia, Greece earthquakes, GEER Association Report 0034 in collaboration with EERI and ATC.

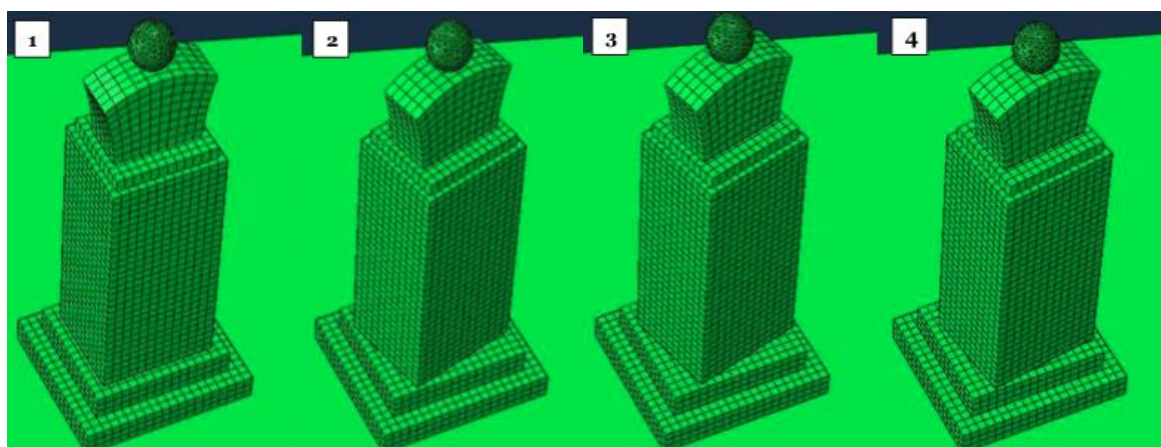
Komodromos P, Papaloizou L, Polycarpou PC (2008). Simulation of the response of ancient columns under harmonic and earthquake excitations, *Engineering Structures*, 30:2154–2164.

Konstantinidis D and Makris N (2005). Seismic response analysis of multidrum classical columns, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 34(10): 1243–1270.

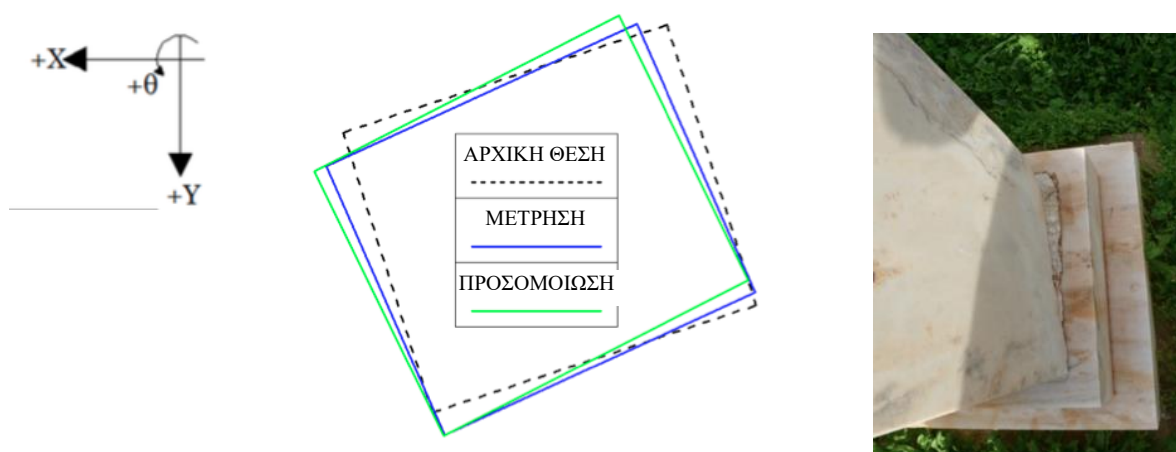
Papantonopoulos C, Psycharis IN, Papastamatiou DY, et al. (2002). Numerical prediction of the earthquake response of classical columns using the distinct element method, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 31:1699–1717.



Σχήμα 1. Μόνιμες μετακινήσεις του αγάλματος στον περίβολο του Μουσείου Αργοστολίου μετά τη διπλή σεισμική δόνηση της 26/1/2014 και 3/2/2014 μεγέθους  $M_w=6.1$  και  $M_w=6.0$ .



Σχήμα 2. Αριθμητική πρόβλεψη μόνιμων μετακινήσεων του αγάλματος στον περίβολο του Μουσείου Αργοστολίου σε διαφορετικά στάδια της διέγερσης: (1) εν ηρεμία, (2) μετά τον κύριο σεισμό της 26/1/2014 (3) μετά τον μετασεισμό της 26/1/2014 (4) μετά τον κύριο σεισμό της 3/2/2014.



Σχήμα 3. Μόνιμες μετακινήσεις και στροφή του αγάλματος στον περίβολο του Μουσείου.