

Η Σεισμική Απόκριση των Κιόνων της Περίστασης του Ναού του Επικούριου Απόλλωνα The Seismic Response of the Columns in the Perimeter of the Temple of Apollo Epikourios

Κωνσταντίνος ΠΑΠΑΔΟΠΟΥΛΟΣ¹, Ελισάβετ ΒΙΝΤΖΗΛΑΟΥ²

ΠΕΡΙΛΗΨΗ : Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται μια αριθμητική μελέτη της σεισμικής απόκρισης των κιόνων της περίστασης του κλασικού ναού του Επικούριου Απόλλωνα των Βασσών Φιγάλειας. Στη μελέτη χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS, η αξιοπιστία του οποίου στην εκτίμηση της σεισμικής απόκρισης πολυσπόνδουλων κιόνων ελέγχθηκε, αρχικά, με ικανοποιητικά αποτελέσματα. Στη συνέχεια, με το λογισμικό διερευνήθηκε η απόκριση τριών, αντιπροσωπευτικών, κιόνων του περιστευλίου του μνημείου, που αποτελούνται από κιονόκρανο και διαφορετικό αριθμό σπονδύλων (πέντε, έξι και επτά), σε τέσσερις καταγραφές σεισμών του ελλαδικού χώρου. Το κυριότερο συμπέρασμα που προέκυψε από τη μελέτη είναι ότι οι κίονες του ναού, εφόσον διατηρούν τους σπονδύλους τους χωρίς επικίνδυνες ρωγμές και με άθικτες εδράσεις, βρίσκονται σε κατακόρυφη στάση και εδράζονται σε δύσκαμπτη βάση, δύνανται να αντιστέκονται σε σημαντικές σεισμικές δράσεις, μεγαλύτερες από τις δράσεις που εκτιμάται ότι εφαρμόζουν σε αυτούς οι συνήθεις σεισμικές δονήσεις της περιοχής. Κατά συνέπεια, μετά την ολοκλήρωση των, εν εξελίξει σήμερα, εργασιών αποκατάστασης του ναού και την εξασφάλιση των προϋποθέσεων ευστάθειας που αναφέρθηκαν προηγουμένως, ο κίνδυνος κατάρρευσης από σεισμικά αίτια που θα απειλεί τους κίονες θα είναι μικρός.

ABSTRACT : This paper presents a numerical study, conducted with the aim to investigate the seismic response of the columns in the perimeter of the classical temple of Apollo Epikourios, which is located at Bassai, in the west Peloponnesus. The study was conducted using the FE software Abaqus, which efficiency to predict the seismic response of multi-drum columns was firstly investigated with satisfactory results. Then, with the software was examined the seismic response of three columns of Apollo Epikourios temple, representative of the perimeter colonnade, composed of a capital and seven or six or five drums. The numerical results showed that the temple columns, in vertical position, on rigid base and with intact drums and contacts, have the capacity to withstand significant seismic loads, larger than the loads that are being estimated to be imposed on the columns by the usual earthquakes in the area. Thus, after the restoration of the monument and, consequently, the establishment of the aforementioned stability conditions, the seismic risk for the columns will be minor.

¹ Πολιτικός Μηχανικός, Υπεύθυνος έργου αποκατάστασης ναού Επικούριου Απόλλωνα, Τ.Δ.Π.Ε.Α.Ε.–Ε.Σ.Ν.Ε.Α., email: kpapadopoulo@tee.gr

² Αναπλ. Καθηγήτρια, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, email: elvintz@civil.ntua.gr

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο κλασικός ναός του Επικούριου Απόλλωνα στις Βάσσεις Φιγάλειας (Σχ. 1), σε αντίθεση με τα συνήθη δεδομένα, διατηρεί ένα ιδιαίτερα μεγάλο ποσοστό από το δομικό υλικό του in-situ (κρηπίδα, κίονες και επιστύλια περίστασης), αναστηλωμένο (τοιχοί σηκού και δύο κίονες) και διάσπαρτο στον αρχαιολογικό χώρο (μέλη από τα ανώτερα τμήματα του κτηρίου), γεγονός που τον καθιστά ως ένα από τα πιο καλοδιατηρημένα δείγματα της αρχαίας οικοδομικής. Εντύπωση προκαλεί, επίσης, ότι οι 35 από τους 38 κίονες του περιστυλίου του παραμένου ιστάμενοι 25 αιώνες από την ανέγερσή τους, παρά το γεγονός ότι ευρίσκονται σε περιοχή με σημαντική σεισμική δραστηριότητα (δυτική Πελοπόννησο).

Όμως, ο ναός στην υπάρχουσα κατάστασή του παρουσιάζει πολλές και εκτεταμένες βλάβες, οι κυριότερες από τις οποίες είναι: οι ανομοιόμορφες καθιζήσεις της θεμελίωσης, οι πλείστες θραύσεις των λίθων της κρηπίδας, οι σημαντικές αποκλίσεις των κίωνων από την κατακόρυφο και οι έντονες ρηγματώσεις και αποσαθρώσεις των επιστυλίων. Οι βλάβες αυτές εδώ και αρκετές δεκαετίες έχουν προκαλέσει την ανησυχία ότι εγκυμονούν σοβαρούς κινδύνους κατάρρευσης σε περίπτωση μελλοντικού, κοντινού στο μνημείο, ισχυρού σεισμού. Γι αυτό το 2001 ξεκίνησε το από καιρό προγραμματιζόμενο έργο αποκατάστασης του μνημείου, με κύριους στόχους την άρση των γεωμετρικών μεταβολών του φέροντος οργανισμού του, την ενίσχυση των μηχανισμών άμυνάς του έναντι των φυσικών φαινομένων και τη συντήρηση του δομικού υλικού του.

Το έργο, το οποίο εκτελείται υπό την εποπτεία της Επιτροπής Συντήρησης ναού Επικούριου Απόλλωνα (Ε.Σ.Ν.Ε.Α.), είναι επικεντρωμένο, κατ' αρχήν, στο βόρειο τμήμα του περιστυλίου, και οι βασικές εργασίες που περιλαμβάνει είναι: α) καταβίβαση των επιστυλίων, απομάκρυνση των κίωνων, ολόσωμων, και αποσυναρμολόγηση της κρηπίδας, β) στερέωση της θεμελίωσης, γ) δομική αποκατάσταση, συντήρηση και ανάταξη των λίθων της κρηπίδας, με ταυτόχρονο εφοδιασμό τους με νέα συνδετήρια στοιχεία από τιτάνιο δ) επαναφορά των κίωνων, ολόσωμων, στο μνημείο, σε κατακόρυφη στάση και ε) δομική αποκατάσταση, συντήρηση, ανατοποθέτηση και εκ νέου σύνδεση των επιστυλίων. Μέχρι σήμερα έχει σχεδόν ολοκληρωθεί η αποκατάσταση της βόρειας όψης του μνημείου, ενώ υλοποιείται η αποκατάσταση των βορειότερων τμημάτων των μακρών πλευρών του.



Σχήμα 1. Ο ναός του Επικούριου Απόλλωνα από ΒΔ, πριν από την έναρξη των εργασιών αποκατάστασής του.

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται μια αριθμητική μελέτη της σεισμικής απόκρισης των κiónων της περίπτωσης του ναού του Επικούριου Απόλλωνα, που αποσκοπεί αφενός να συμβάλει στην περαιτέρω κατανόηση του φαινόμενου της λικνιστικής απόκρισης των αρχαίων κiónων, και αφετέρου να διατυπώσει ποσοτικές εκτιμήσεις σχετικές με την αντισεισμική ικανότητα των κiónων του ναού των Βασσών, κυρίως, στην κατάσταση που θα περιέλθουν μετά από τις, εν εξελίξει, εργασίες αποκατάστασης του μνημείου. Στη μελέτη χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS, η αξιοπιστία του οποίου στην εκτίμηση της σεισμικής απόκρισης πολυσπόνδυλων κiónων ελέγχθηκε, αρχικά, με ικανοποιητικά αποτελέσματα.

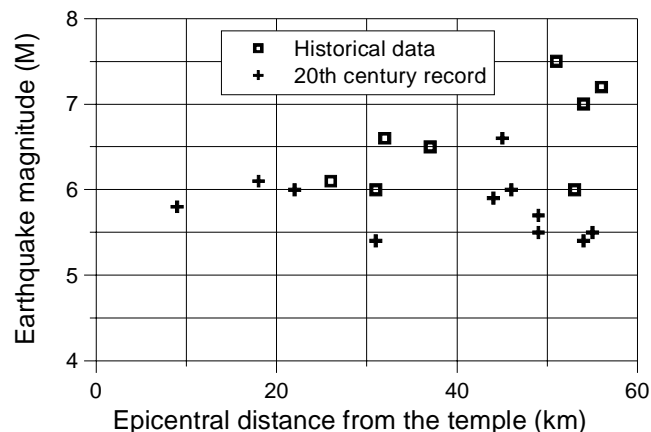
Στη συνέχεια, με το λογισμικό διερευνήθηκε η απόκριση τριών, αντιπροσωπευτικών, κiónων του περιστυλίου του μνημείου, που αποτελούνται από κιονόκρανο και διαφορετικό αριθμό σπονδύλων (πέντε, έξι και επτά), σε τέσσερις καταγραφές σεισμών του ελλαδικού χώρου. Οι αριθμητικές επιλύσεις που πραγματοποιήθηκαν αποσκοπούσαν στην εξέταση της σεισμικής απόκρισης του κίονα με του επτά σπονδύλους, στην εκτίμηση του σεισμικού ορίου ανατροπής και των τριών κiónων, στην εκτίμηση της επιρροής της απόκλισης από την κατακόρυφο στην ευστάθεια του κίονα με τους έξι σπονδύλους καθώς και στη διερεύνηση της επίδρασης της κρηπίδας στη σεισμική απόκρισή του. Το κυριότερο συμπέρασμα που προέκυψε από τη μελέτη είναι ότι οι κίονες του ναού, εφόσον διατηρούν τους σπονδύλους τους χωρίς επικίνδυνες ρωγμές και με άθικτες εδράσεις, βρίσκονται σε κατακόρυφη στάση και εδράζονται σε δύσκαμπτη βάση, δύνανται να αντιστέκονται σε σημαντικές σεισμικές δράσεις, μεγαλύτερες από τις δράσεις που εκτιμάται ότι εφαρμόζουν σε αυτούς οι συνήθεις σεισμικές δονήσεις της περιοχής. Κατά συνέπεια, μετά την ολοκλήρωση των εργασιών αποκατάστασης του ναού και την εξασφάλιση των προϋποθέσεων ευστάθειας που αναφέρθηκαν προηγουμένως, ο κίνδυνος κατάρρευσης από σεισμικά αίτια που θα απειλεί τους κίονες θα είναι μικρός.

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΝΑΟΥ ΚΑΙ ΤΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΔΙΑΤΗΡΗΣΗΣ ΤΟΥ

Ο ναός του Επικούριου Απόλλωνα κτίστηκε κατά το τελευταίο τέταρτο του 5^{ου} π.Χ. αιώνα σε ένα από τα φυσικά πλατώματα του όρους Κωτίλιου (Βάσσης), σε υψόμετρο 1130 μ., κοντά στην αρχαία αρκαδική πόλη της Φιγάλειας και σε οδική απόσταση 14 χιλιομέτρων νότια από τη σημερινή κωμόπολη της Ανδρίτσαινας. Ο ναός είναι περίπτερος, διαμορφωμένος σε πρόναο, σηκό, άδυτο και οπισθόναο· έχει κατασκευαστεί, κυρίως, από τον τοπικό λευκό-λευκότεφρο πλακώδη ασβεστόλιθο. Το κτήριο είναι προσανατολισμένο από βορρά προς νότι, ενώ οι διαστάσεις του στη στάθμη της θεμελίωσης είναι 16,14 x 39,84 [m]. Το περιστύλιο του μνημείου συνθέτουν 38 δωρικοί κίονες (6 x 15), ύψους 5.97 m, οι οποίοι διαθέτουν εξωτερική διάμετρο 1.12 m στην κάτω έδρα τους και 0.92 m στην άνω έδρα του τελευταίου σπονδύλου τους, εκτός των κiónων της βόρειας πλευράς που είναι κατασκευασμένοι παχύτεροι με αντίστοιχες διαμέτρους 1.16 m και 0.95 m. Σε αντίθεση με τη συνήθη αρχαία πρακτική (προφανώς για λόγους οικονομίας υλικού) οι κίονες αποτελούνται από κιονόκρανο και μεταβλητό πλήθος ανισοϋψών σπονδύλων. Συγκεκριμένα, από τους 37 ιστάμενους σήμερα κίονες του μνημείου, 4 κίονες διαθέτουν 5 σπόνδλους, 12 κίονες 6 σπόνδλους, 14 κίονες 7 σπόνδλους, 5 κίονες 8 σπόνδλους, 1 κίονας 9 σπόνδλους και 1 κίονας 10 σπόνδλους. Το σύστημα έδρασης του ναού συνίσταται στη θεμελίωση μόνο των φερόντων στοιχείων (κiónων και τοίχων) και τη μεταφορά των φορτίων της ανωδομής μέσω

ενός μεταβλητού ύψους θεμελίου στο βράχο. Το ύψος του θεμελίου από λίγα εκατοστά στη βόρεια και ανατολική πλευρά, λαμβάνει τη μέγιστη τιμή του (≈ 2.5 m) στη νοτιοδυτική γωνία του κτηρίου, μια και η φυσική κλίση του βραχώδους υπόβαθρου είναι από ΒΑ προς ΝΔ.

Ο ναός σώζεται σήμερα, ως ανοικτό ερείπιο, σε μορφή που έλαβε ύστερα από, εν πολλοίς, άγνωστες οικοδομικές περιπέτειες και την ευρεία αναστηλωτική προσπάθεια των αρχών του 20^{ου} αιώνα, κατά την οποία αναστηλώθηκαν σχεδόν στο σύνολό τους οι τοίχοι του σηκού και οι δύο νότιοι κίονες της δυτικής πλευράς -σήμερα μόνος κατακείμενος κίονας από το περιστύλιο είναι ο νοτιοανατολικός. Στην υπάρχουσα κατάστασή του το μνημείο παρουσιάζει πολλές και εκτεταμένες γεωμετρικές παραμορφώσεις: έντονες διαφορικές καθιζήσεις, αποκλίσεις κίωνων από την κατακόρυφο, μετατοπίσεις και στροφές σπονδύλων, μετακινήσεις επιστυλίων κ.α., ενώ μεγάλα είναι και τα προβλήματα με το υλικό του, αφού τα περισσότερα αρχιτεκτονικά μέλη είναι κατακερματισμένα και αποσαθρωμένα. Οι βλάβες αυτές αποτελούν συνέπεια πολλών παραγόντων που συνέδρασαν στη μακρόχρονη ιστορία του ναού, οι πιο καθοριστικοί από τους οποίους θεωρούνται η αστοχία της θεμελίωσης και οι διάφορες ανθρώπινες επεμβάσεις που, με στόχο τον προσπορισμό των μετάλλων των συνδέσεων, προκάλεσαν τη κατεδάφιση των τοίχων και τις πλείστες απολαξεύσεις μελών. Συγκεκριμένα, για τις παραμορφώσεις των κίωνων της περίπτωσης, οι αποκλίσεις από την κατακόρυφο και οι απώλειες της πλήρους έδρασης τους οφείλονται κυρίως στις καθιζήσεις της θεμελίωσης και στις συνακόλουθες θραύσεις των λίθων της κρηπίδας, ενώ οι μετακινήσεις των σπονδύλων τους προκλήθηκαν από τους σεισμούς που διέγειραν το μνημείο στην μακράιωνη ιστορία του. Προκύπτει, δηλαδή, από τη μελέτη της ιστορίας του ναού και της κατάστασης διατήρησής του ότι η σημαντική σεισμική δραστηριότητα της περιοχής (Σχ. 2) δεν ευθύνεται για κάποια εκτεταμένη κατάρρευση στο κτήριο, ούτε για τις πιο σημαντικές γεωμετρικές παραμορφώσεις του. Έκδηλα, λοιπόν, εξάγεται το συμπέρασμα ότι ο ναός έχει επιδείξει, ακόμη και στην ερειπιώδη κατάσταση που έχει περιέλθει τους τελευταίους αιώνες, εξαιρετική αντισεισμική συμπεριφορά. Παρά ταύτα, οι κίνδυνοι που απειλούν το μνημείο, είναι προφανείς και απορρέουν από την ετοιμορροπία των επιστυλίων, την επισφαλή ισορροπία των κίωνων, τις δυνητικές αστοχίες υλικού λόγω υπέρβασης των αντοχών του, συνέπεια των μειωμένων επιφανειών έδρασης κ.α.



Σχήμα 2. Συσχέτιση επικεντρικής απόστασης και μεγέθους των κοντινών στο ναό σεισμών, γνωστών από ιστορικές πηγές και ενόργανες καταγραφές (στοιχεία από Papazachos et. al., 2000).

ΣΥΝΟΠΤΙΚΗ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΑΡΧΑΙΩΝ ΚΙΟΝΩΝ

Οι κίονες των μνημειακών κτηρίων των κλασικών χρόνων, όπως είναι γνωστό, είναι κατασκευές που αποτελούνται από αρκετά ανεξάρτητα, ισχυρά, σχεδόν απαραμόρφωτα, λίθινα στοιχεία (τους σπονδύλους), κατάλληλα λαξευμένα και συναρμολογημένα χωρίς την παρεμβολή συνδετικού κονιάματος, ώστε στις περισσότερες περιπτώσεις να έχει επιτευχθεί σχεδόν τέλεια συναρμογή. Σε αντίθεση με το δομικό τους σύστημα που είναι απλό, το φαινόμενο της σεισμικής απόκρισής τους είναι εξαιρετικά πολύπλοκο και έντονα μη-γραμμικό. Συγκεκριμένα, οι κίονες αποκρίνονται στις ισχυρές σεισμικές διεγέρσεις παρουσιάζοντας αλληπάλληλες σχετικές περιστροφές και ολισθήσεις ή λικνισμό (ανεξάρτητα ή σε ομάδες) των σπονδύλων τους. Έτσι, καταναλώνονται μεγάλα ποσά από την εισαγόμενη ενέργεια, λόγω της υπερνίκησης των δεσμών της τριβής και των κρούσεων. Μετά το τέλος της σεισμικής δόνησης, εφόσον δεν έχουν ξεπεραστεί τα όρια που υπαγορεύονται από τις αρχές της ευσταθούς ισορροπίας (ώστε να έχει εκδηλωθεί μερική ή ολική κατάρρευση), οι σπόνδυλοι επανέρχονται στην κατάσταση ηρεμίας μέσω ελεύθερης ταλάντωσης με απόσβεση.

Ο μηχανισμός απόκρισης που μόλις περιγράφηκε, ο οποίος κάνει τους κίονες ιδιαίτερα ανθεκτικούς έναντι κατάρρευσης (και όχι φυσικά έναντι βλαβών, γεωμετρικών παραμορφώσεων δηλαδή) ακόμα και σε ιδιαίτερα ισχυρούς σεισμούς, είναι εξαιρετικά δύσκολο να περιγραφεί αναλυτικά. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ένας πολυσπόνδυλος κίονας όσο διαρκεί η σεισμική διέγερσή του αλλάζει διαρκώς «μορφή» ταλάντωσης, με διαφορετικό πλήθος ανοικτών αρμών κάθε στιγμή. Ο αριθμός των δυνατών «μορφών» ταλάντωσης είναι ιδιαίτερα μεγάλος, εκθετικά αυξανόμενος με την αύξηση του πλήθους των σπονδύλων, έτσι για τα συνήθη πλήθη σπονδύλων των κλασικών κίωνων η αναλυτική επίλυση του συστήματος είναι πρακτικά αδύνατη. Γι αυτό το λόγο, τα τελευταία χρόνια οι επιστήμονες έχουν εστιάσει σε πειραματικές και αριθμητικές διερευνήσεις για την πληρέστερη και σε βάθος κατανόηση του φαινομένου της απόκρισης των πολυσπόνδυλων κίωνων. Τα συμπεράσματα στα οποία συγκλίνουν οι έρευνες αυτές συνοψίζονται ακολούθως.

Η πιθανότητα ένας κίονας να ανατραπεί από μία σεισμική διέγερση αυξάνει με την αύξηση της έντασης της διέγερσης, με την αύξηση της λυγηρότητας του κίονα και με τη μείωση του μεγέθους του (για τις ίδιες αναλογίες διαστάσεών του). Το περιεχόμενο των συχνοτήτων της σεισμικής διέγερσης είναι ο κατ' εξοχήν καθοριστικός παράγοντας για την απόκριση και, κατ' επέκταση, την ευστάθεια ενός πολυσπόνδυλου κίονα. Συγκεκριμένα, υψίσυχνες σεισμικές διεγέρσεις οδηγούν στην εκδήλωση μετακινήσεων, σχετικά μικρών, στο ανώτερο τμήμα του κίονα και αδυνατούν να τον οδηγήσουν σε ανατροπή και για ιδιαίτερα υψηλές τιμές επιταχύνσεων. Αντίθετα, μακροπερίοδοι σεισμοί ενεργοποιούν σχεδόν όλους τους αρμούς του κίονα με σημαντικές στροφές περί τον κατακόρυφο άξονα, και φαίνεται ότι μπορούν να τον ανατρέψουν και για μέτριες τιμές επιταχύνσεων. Το φαινόμενο της σεισμικής απόκρισης των πολυσπόνδυλων κίωνων είναι ιδιαίτερα ευαίσθητο ακόμα και σε πολύ μικρές μεταβολές των παραμέτρων του συστήματος ή της διέγερσης· οι αλλαγές αυτές μάλιστα, εάν εφαρμοστούν την κατάλληλη στιγμή, μπορούν να επιφέρουν δραστικές αλλαγές στην απόκριση. Η παραμορφωμένη κατάσταση ενός μεμονωμένου κίονα μετά από σεισμό δεν αποτελεί ένδειξη του μεγέθους των μετακινήσεων που αναπτύχθηκαν κατά τη διάρκεια της

δόνησης. Έχει παρατηρηθεί σε δοκίμια κίονων ότι ενώ παρουσιάζουν σημαντικό λικνισμό και στροφές γύρω από τον κατακόρυφο άξονά τους κατά τη διάρκεια πειραματικών σεισμικών διεγέρσεων, στο τέλος επανέρχονται σχεδόν στην αρχική τους θέση με πολύ μικρές παραμένουσες μετατοπίσεις.

Εν κατακλείδι, διαπιστώνεται ότι όλοι οι μελετητές του φαινομένου της σεισμικής απόκρισης των πολυσπόνδουλων κίονων ομογνώνουν περί της μεγάλης έναντι κατάρρευσης σεισμικής αντοχής τους, κάτι που αποδεικνύεται άμεσα και από το μεγάλο πλήθος ιστάμενων αρχαίων κίονων. Η μεγάλη αντισεισμική αντοχή των κίονων, όμως, ισχύει υπό προϋποθέσεις· όταν δηλαδή οι κίονες βρίσκονται σε καλή κατάσταση (με σπονδύλους χωρίς επικίνδυνες ρωγμές και με άθικτες εδράσεις), σε κατακόρυφη στάση, και εδράζονται σε δύσκαμπτη βάση. Όσο η κατάσταση ενός κίονα αποκλίνει από αυτές, τόσο αυξάνει η πιθανότητα να καταρρεύσει ο κίονας από σεισμικό συμβάν.

ΠΕΡΙΛΗΠΤΙΚΗ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΤΩΝ ΠΡΟΓΕΝΕΣΤΕΡΩΝ ΜΕΛΕΤΩΝ

Στις τελευταίες δεκαετίες που η μελέτη του ναού του Επικούριου Απόλλωνα έχει προχωρήσει σε βάθος, αρκετές είναι οι αριθμητικές μελέτες που εκπονήθηκαν με θέμα την εξέταση της ευστάθειας των κίονων της περιστασής του. Σε όλες τις μελέτες αυτές χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό της μεθόδου των διακριτών στοιχείων UDEC και το φαινόμενο προσεγγίστηκε σε δύο διαστάσεις. Αν και η δισδιάστατη ανάλυση, όπως είναι φυσικό, δεν περιλαμβάνει όλες τις παραμέτρους της απόκρισης των πολυσπόνδουλων κίονων, τα αποτελέσματα τέτοιων μελετών είναι πολύ χρήσιμα για την εξαγωγή ποιοτικών, συγκριτικών, συμπερασμάτων για την επιρροή διαφόρων παραμέτρων στον σεισμικό κίνδυνο κατάρρευσης των κίονων του ναού.

Στην πρώτη σχετική μελέτη που εκπονήθηκε (Παπασταματίου κ.α., 1990) προσδιορίστηκε με όρους δυναμικής θεώρησης η μείωση της ευστάθειας του τυπικού κίονα του ναού με την αύξηση της αρχικής απόκλισης. Συγκεκριμένα, με παραμετρική μεγέθυνση της μέγιστης επιτάχυνσης του εδάφους για τον σεισμό της Καλαμάτας του 1986 προέκυψε μείωση του κατωφλίου ανατροπής κατά 15% και 30% για αρχικές κλίσεις μιας και δύο μοιρών αντίστοιχα. Στη μελέτη αυτή επίσης διαπιστώθηκε ότι μείωση της βάσης του κίονα κατά 10%, 25% και 50% μειώνει τη μέγιστη επιτάχυνση ανατροπής κατά 15%, 33% και 66% αντίστοιχα. Το 2000 δημοσιεύτηκε μία εκτεταμένη εργασία (Psycharis et al.), κατά την οποία με τη χρήση του προγράμματος διακριτών στοιχείων έγινε εκτίμηση της τρωτότητας του τυπικού κίονα του ναού σε αρμονική διέγερση, λαμβάνοντας υπόψη αρχική κλίση 2.5° και 6.0°, και απώλεια έδρασης 17% και 28%. Στην ίδια εργασία έγιναν αναλύσεις και για δύο κίονες που συνδέονται με επιστύλιο, στις οποίες φάνηκε ότι η σύζευξη των δύο κίονων δεν αλλάζει σημαντικά τον κίνδυνο κατάρρευσης, παρότι αλλάζει η κινηματική του συστήματος. Με τη χρήση του λογισμικού UDEC έχει εκτιμηθεί και η τρωτότητα των κίονων σε σχέση με το διαφορετικό πλήθος των σπονδύλων (Παπαντωνόπουλος, 2000). Συγκεκριμένα, για τρεις κίονες με 5, 7 και 10 σπονδύλους, με χρήση του επιταχυνσιογραφήματος του σεισμού της Καλαμάτας, διαπιστώθηκε ότι το πλήθος των σπονδύλων δεν επηρεάζει κατά συστηματικό τρόπο την απόκριση του κίονα, αν και από τα αποτελέσματα διαφάνηκε κάποια τάση βελτίωσης της ευστάθειας με αύξηση του αριθμού των σπονδύλων.

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑΣ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ABAQUS ΝΑ ΠΡΟΒΛΕΠΕΙ ΤΗ ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΠΟΛΥΣΠΟΝΔΥΛΩΝ ΚΙΟΝΩΝ

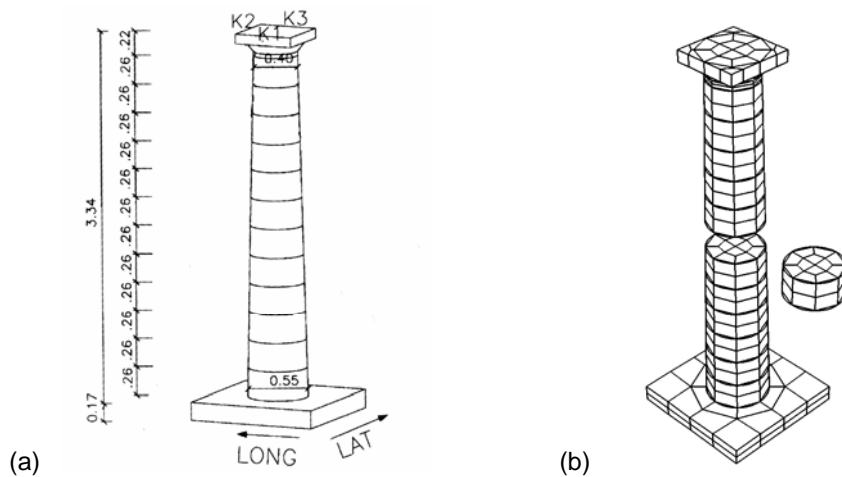
Τα πειραματικά δεδομένα

Η αξιοπιστία του λογισμικού ABAQUS που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία για την εκτίμηση της σεισμικής απόκρισης των κίωνων του ναού του Επικούριου Απόλλωνα ελέγχθηκε, αρχικά, μέσω της σύγκρισης καταγεγραμμένων σε δύο πειράματα, σεισμικών αποκρίσεων ενός πολυσπόνδουλου μαρμάρινου κίονα με τα αποτελέσματα που έδωσε η προσομοίωση των πειραμάτων. Ο έλεγχος της αξιοπιστίας του λογισμικού βασίστηκε σε παρόμοια εργασία που έγινε με το πρόγραμμα διακριτών στοιχείων 3DEC (Parantonopoulos et al., 2002). Τα πειράματα που χρησιμοποιήθηκαν είναι μέρος ενός εκτενούς πειραματικού προγράμματος που έλαβε χώρα στο Εργαστήριο Αντισεισμικής Τεχνολογίας του Ε.Μ.Π., με στόχο τη διερεύνηση της σεισμικής συμπεριφοράς ενός ομοιώματος κίονα του πρόναου του Παρθενώνα, σε κλίμακα 1/3. Ακολουθεί συνοπτική παρουσίαση του προγράμματος, λεπτομερής περιγραφή του οποίου ευρίσκεται στο (Mouzakis et al., 2002).

Ο κίονας-δοκίμιο ήταν κατασκευασμένος από πεντελικό μάρμαρο, αράβδωτος, με μείωση, αλλά χωρίς ένταση. Αποτελούνταν από 12 ισουΐεις σπονδύλους ύψους 0.26 m και ένα κιονόκρανο ύψους 0.22 m (Σχ. 3a). Είχε κάτω διάμετρο 0.56 m και εδραζόταν σε μαρμάρινη βάση η οποία ήταν πακτωμένη στη σεισμική τράπεζα του εργαστηρίου του Ε.Μ.Π. Συνολικά, στα πλαίσια του προγράμματος διενεργήθηκαν 19 πειράματα, στα οποία χρησιμοποιήθηκαν ως διεγέρσεις της βάσης καταγραφές τριών σεισμικών συμβάντων του ελλαδικού χώρου με διαφορετικά χαρακτηριστικά. Οι σεισμικές καταγραφές που είχαν επιλεγεί είναι: α) Η καταγραφή του Αργοστολίου, που προκλήθηκε από σεισμό στις 24/3/1983, μεγέθους $M=5.5$, με επίκεντρο σε απόσταση 10 km από την πόλη. β) Η καταγραφή του σεισμού της Καλαμάτας, που συνέβη στις 13/9/86, μεγέθους $M=6.0$, που είχε επίκεντρο 12 km βόρεια της πόλης. γ) Η καταγραφή του σεισμού της Έδεσσας, με μέγεθος $M = 5.9$, που συνέβη στις 21/12/90 με επίκεντρο που προσδιορίστηκε σε απόσταση 31 km ΒΑ της πόλης.

Οι σεισμικές καταγραφές εισάγονταν πολλαπλασιασμένες με κατάλληλους συντελεστές, έτσι ώστε οι δονήσεις να προκαλούν μετακινήσεις και λικνισμό στους σπονδύλους του δοκιμίου, χωρίς να επιφέρουν κατάρρευσή του. Για την καταγραφή της απόκρισης του κίονα είχαν χρησιμοποιηθεί επιταχυνσιογράφοι και βελόμετρα, τα τελευταία με τέτοια διάταξη ώστε να είναι δυνατός ο υπολογισμός της μετακίνησης του κιονόκρανου από τις καταγραφές των οργάνων.

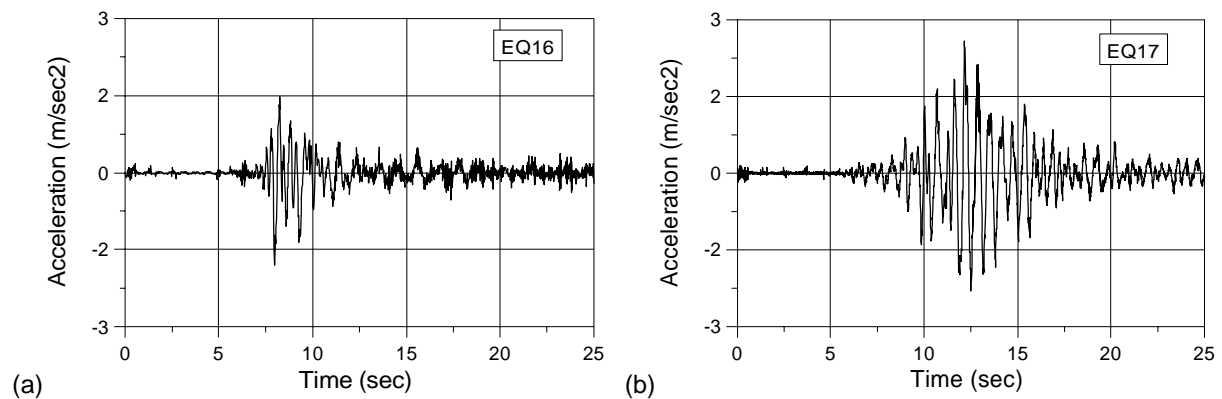
Όπως προαναφέρθηκε από το σύνολο των πειραμάτων του ερευνητικού προγράμματος του Εργαστηρίου Αντισεισμικής Τεχνολογίας του Ε.Μ.Π. επιλέχθηκαν δύο, στα οποία είχαν χρησιμοποιηθεί οι σεισμικές καταγραφές της Καλαμάτας και της Έδεσσας, για να συγκριθούν τα αποτελέσματά τους για τις μετατοπίσεις του κιονόκρανου με τα αντίστοιχα που έδωσαν οι αριθμητικές προσομοιώσεις τους. Τα δεδομένα των διεγέρσεων της σεισμικής τράπεζας των πειραμάτων αυτών παρατίθενται στον Πίνακα 1, ενώ οι επιταχύνσεις της σεισμικής τράπεζας, κατά τη διαμήκη διεύθυνση, παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.



Σχήμα 3. (a) Ο κίονας-δοκίμιο σε σκαρίφημα (Mouzakis et al., 2002), και (b) το αριθμητικό προσομοίωμά του.

Πίνακας 1. Τα βασικά δεδομένα των διεγέρσεων της σεισμική τράπεζας των δύο πειραμάτων, αποτελέσματα των οποίων συγκρίθηκαν με αντίστοιχα αριθμητικά.

Πείραμα	Καταγραφή σεισμού	Πολωτικός Συντελεστής	Μέγιστες επιταχύνσεις (g)		
			Διαμήκης	Εγκάρσια	Κατακόρ.
EQ16	Καλαμάτας	0.5	0.18	0.12	0.10
EQ17	Έδεσσας	2.0	0.26	0.15	0.09

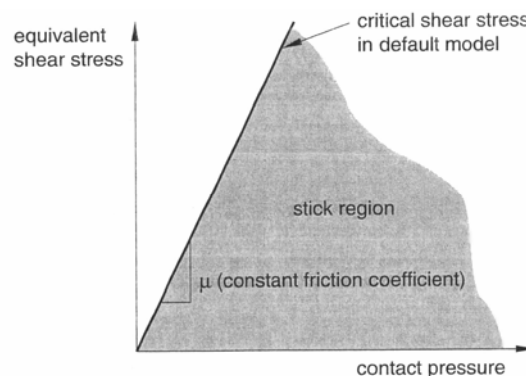


Σχήμα 4. Οι επιταχύνσεις της σεισμικής τράπεζας κατά τη διαμήκη διεύθυνση, στα πειράματα (a) EQ16 και (b) EQ17.

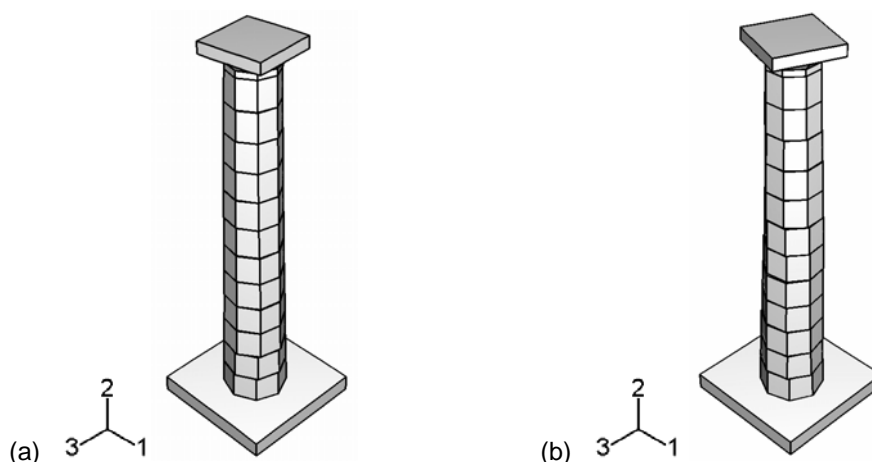
Η αριθμητική προσομοίωση των πειραμάτων

Για την αριθμητική προσομοίωση των δύο πειραμάτων σεισμικής φόρτισης του κίονα-δοκιμίου, με τη χρήση του υποπρογράμματος ABAQUS/Explicit, μορφώθηκε τρισδιάστατο προσομοίωμα με βάση τις διαστάσεις του δοκιμίου, στο οποίο κάθε σπόνδυλος αποτελεί ξεχωριστό μέλος/«εξάρτημα» της κατασκευής/μοντέλου. Η διακριτοποίηση σε πεπερασμένα στοιχεία των σπονδύλων έγινε με τη χρήση τρισδιάστατων εξαεδρικών στοιχείων (8 κόμβων), με συνέπεια μικρή διαφοροποίηση της γεωμετρίας του προσομοιώματος από αυτή του δοκιμίου, αφού οι πλευρικές έδρες του είναι πολυγωνικές και όχι κυλινδρικές (Σχ. 3b).

Η προσομοίωση της συμπεριφοράς των επιφανειών επαφής των σπονδύλων έγινε με τη χρήση κατάλληλου μοντέλου αλληλεπίδρασης επιφανειών, το οποίο εισάγει παράλληλα στον αρμό την τριβή, με τη χρήση συντελεστή τριβής (Σχ. 5), ο οποίος ορίστηκε 0.7 (από την φυσική ιδιότητα του μαρμάρου), και την απόσβεση με συντελεστή απόσβεσης που μετά από προκαταρκτική διερεύνηση επιλέχθηκε 0.01. Το μοντέλο αυτό επιτρέπει τη μεταβίβαση κάθετα στη διεπιφάνεια οποιασδήποτε πίεσης μεταξύ των επιφανειών, όταν αυτές είναι σε επαφή και το μηδενισμό των πιέσεων, όταν οι επιφάνειες διαχωρίζονται. Για να αποφευχθούν ακόμη και πολύ μικρές ελαστικές παραμορφώσεις των σπονδύλων εισήχθη στο πρόγραμμα ως μέτρο ελαστικότητας του υλικού του προσομοιώματος δεκαπλάσια τιμή του πραγματικού μέτρου ελαστικότητας του μαρμάρου. Οι δυναμικές φορτίσεις του προσομοιώματος με τις σεισμικές διεγέρσεις των πειραμάτων υλοποιήθηκαν αριθμητικά ως επιβαλλόμενες μετατοπίσεις της βάσης του κίονα με την εισαγωγή της χρονοϊστορίας των μετατοπίσεων της σεισμικής τράπεζας του εκάστοτε πειράματος. Αναφέρεται, επίσης, ότι η μόρφωση του προσομοιώματος του κίονα έγινε με τέτοιο τρόπο ώστε η 1 διεύθυνσή του ταυτίστηκε με τη διαμήκη (longitudinal) διεύθυνση του δοκιμίου των πειραμάτων (δηλαδή την οριζόντια διεύθυνση με τη μεγαλύτερη επιτάχυνση), η 2 διεύθυνση με την κατακόρυφη (vertical) και η 3 με την δεύτερη οριζόντια (lateral). Οι παραμορφωμένες στάσεις του προσομοιώματος του κίονα-δοκιμίου που έδωσαν οι αριθμητικές προσομοιώσεις των δύο πειραμάτων παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.



Σχήμα 5. Περιοχές ολίσθησης διεπιφανειών, σύμφωνα με το μοντέλο τριβής που χρησιμοποιήθηκε.



Σχήμα 6. Οι παραμορφωμένες στάσεις του αριθμητικού προσομοιώματος του κίονα, οι οποίες προέκυψαν από την προσομοίωση των πειραμάτων (a) EQ16 και (b) EQ17.

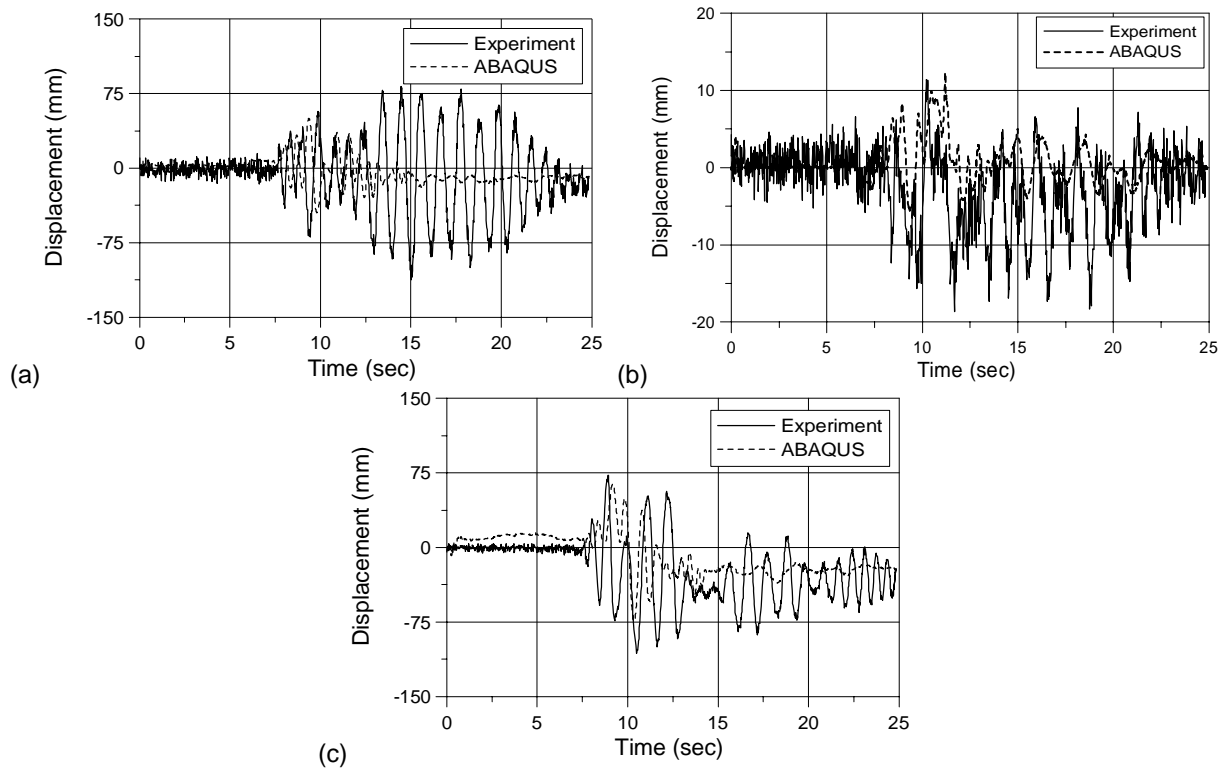
Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων - αριθμητικών προβλέψεων

Για τον έλεγχο της αξιοπιστίας των αριθμητικών προβλέψεων της σεισμική απόκρισης του κίονα/δοκιμίου συγκρίθηκαν οι χρονοϊστορίες των μετακινήσεων που έδωσαν οι αριθμητικές προσομοιώσεις των πειραμάτων για δύο χαρακτηριστικά σημεία του κιονόκρανου του δοκιμίου με τις καταγραφείσες στα πειράματα μετακινήσεις αυτών των σημείων. Οι θέσεις των σημείων αυτών, με ονομασία K2 και K3, είναι στα μέσα γειτονικών πλευρών του άβακα και φαίνονται στο Σχήμα 3a.

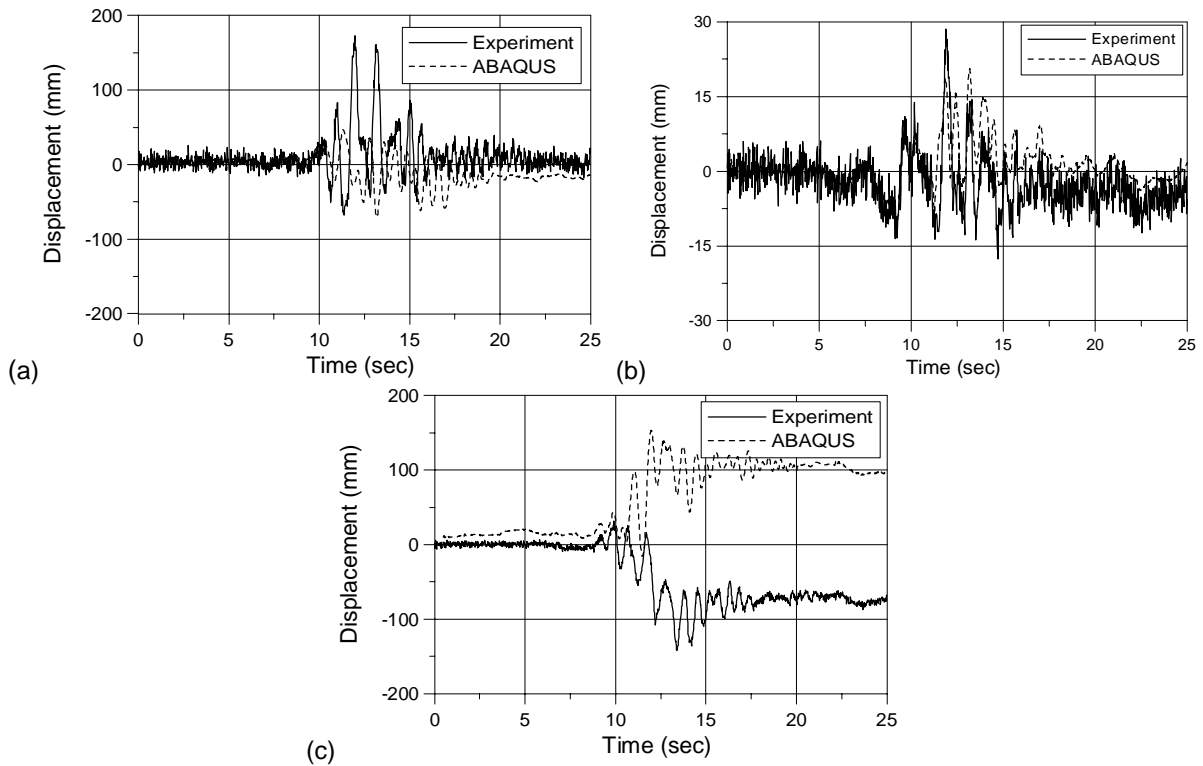
Στο Σχήμα 7 παρουσιάζονται οι συγκρίσεις των απόλυτων μετατοπίσεων του σημείου K2 του κιονόκρανου σε τρισσορθογώνιο σύστημα αξόνων, για το πείραμα EQ16. Παρατηρείται ότι στη διαμήκη διεύθυνση η αριθμητική επίλυση δίνει αποτελέσματα παραπλήσια με αυτά του πειράματος μέχρι το πέρας της ισχυρής δόνησης. Στη συνέχεια η ταλάντωση του σημείου του κιονόκρανου που δίνει το πρόγραμμα αποσβένεται σε αντίθεση με του πειράματος που ενισχύεται. Έτσι, το πρόγραμμα υποεκτιμά τη μέγιστη μετατόπιση (EQ16: 112.5 mm, ABAQUS: 50.2 mm) και δεν προβλέπει τη χρονική στιγμή που αυτή εκδηλώνεται. Στην κατακόρυφη διεύθυνση η σύγκριση της μετατόπισης του σημείου που έδωσε το πρόγραμμα και της καταγραφείσας στο πείραμα είναι ικανοποιητική. Το περιεχόμενο των συχνοτήτων των ταλαντώσεων είναι παραπλήσιο, οι χρονικές στιγμές που εκδηλώνονται οι μέγιστες μετατοπίσεις είναι κοντινές, και παρόλο που το εύρος της ταλάντωσης που προβλέπεται αριθμητικά είναι υποεκτιμημένο, οι τιμές των μέγιστων μετατοπίσεων δεν είναι ιδιαίτερα μακρινές (EQ16: 19.1 mm, ABAQUS: 12.3 mm). Στην εγκάρσια διεύθυνση η συμφωνία αριθμητικής επίλυσης και πειράματος είναι πολύ ικανοποιητική. Το λογισμικό προέβλεψε τη μορφή της ταλάντωσης (μέχρι το πέρας της ισχυρής δόνησης)· οι τιμές των μέγιστων μετατοπίσεων είναι κοντινές (EQ16: 106.5 mm, ABAQUS: 74.7 mm), και οι χρονικές στιγμές που έλαβαν χώρα είναι σχεδόν ταυτόσημες. Ακόμη, η μικρή παραμένουσα μετατόπιση που έδωσε το πείραμα (≈ 30 mm) προβλέφθηκε αριθμητικά, ελαφρώς υποεκτιμημένη (≈ 20 mm).

Στα Σχήματα 8 και 9 συγκρίνονται οι απόλυτες μετατοπίσεις των σημείων K2 και K3 του κιονόκρανου, αντίστοιχα, για το πείραμα EQ17.

Για το σημείο K2, στη διαμήκη διεύθυνση, οι μορφές ταλάντωσής του που το πείραμα και το πρόγραμμα έδωσαν είναι παρόμοιες, χωρίς όμως το πρόγραμμα να προβλέπει σωστά ούτε τη φορά ούτε την τιμή της μέγιστης μετατόπισης (EQ17: 172.6 mm, ABAQUS: 70.4 mm). Στην κατακόρυφη διεύθυνση τα αριθμητικά αποτελέσματα είναι κοντινά στα πειραματικά, έχουν σχεδόν πανομοιότητες μορφές ταλάντωσης, και παραπλήσιες μέγιστες μετατοπίσεις (EQ17: 28.6 mm, ABAQUS: 20.6 mm) και χρονικές στιγμές που συνέβησαν. Στην εγκάρσια διεύθυνση, αν και το περιεχόμενο των συχνοτήτων των ταλαντώσεων του σημείου είναι παραπλήσιο, η αριθμητική επίλυση δίνει ολίσθηση κιονόκρανου αντίθετη από αυτήν που έδωσε το πείραμα. Πάντως, οι ολισθήσεις εκδηλώνονται σχεδόν την ίδια χρονική στιγμή και έχουν παρόμοιο μέγεθος (EQ17: ≈ 75 mm, ABAQUS: ≈ 100 mm)· κατά συνέπεια οι μέγιστες μετατοπίσεις έλαβαν χώρα σε κοντινές χρονικές στιγμές και οι απόλυτες τιμές τους είναι παραπλήσιες (EQ17: 141.9 mm, ABAQUS: 153.5 mm).



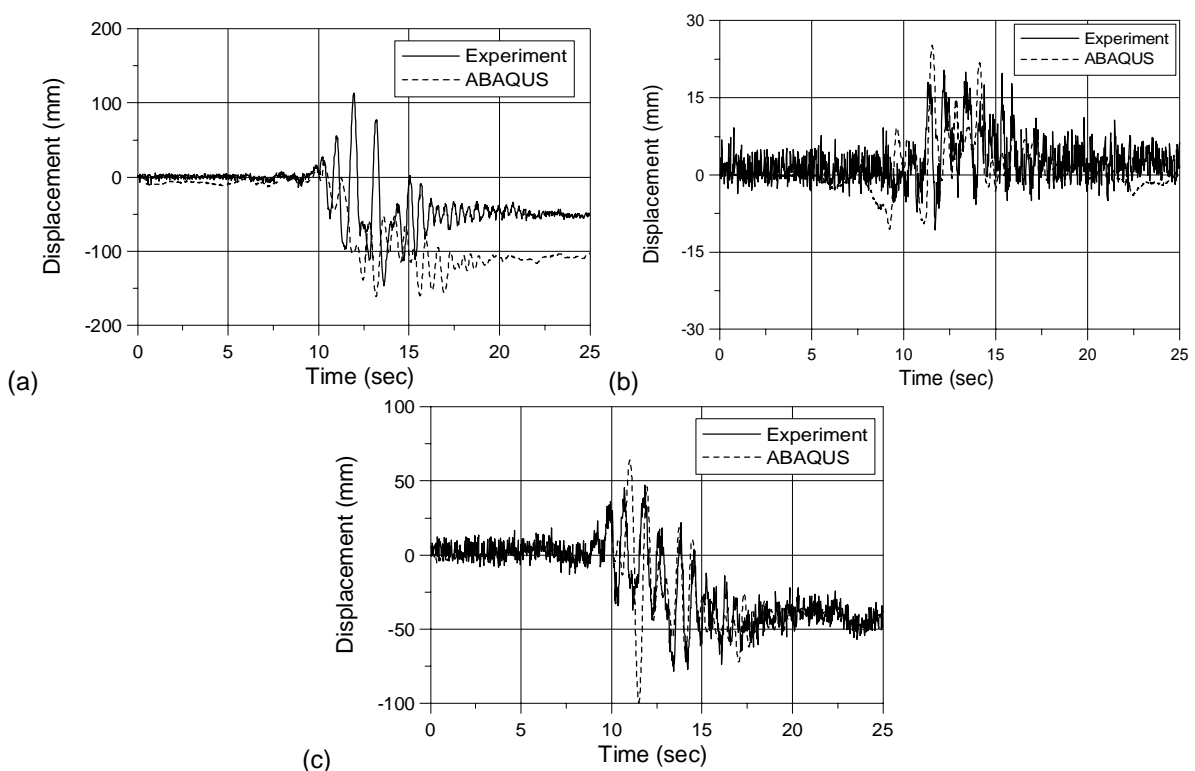
Σχήμα 7. Μετακίνηση του σημείου K2 του κιονόκranου για το πείραμα EQ16: (a) διαμήκης διεύθυνση, (b) κατακόρυφη διεύθυνση και (c) εγκάρσια διεύθυνση.



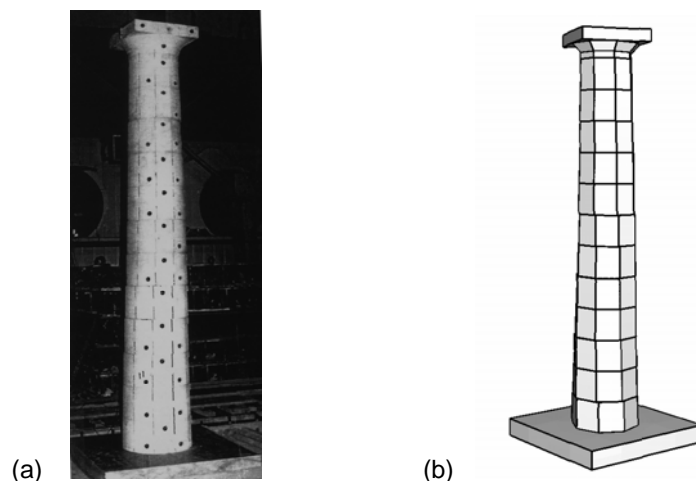
Σχήμα 8. Μετακίνηση του σημείου K2 του κιονόκranου για το πείραμα EQ17: (a) διαμήκης διεύθυνση, (b) κατακόρυφη διεύθυνση και (c) εγκάρσια διεύθυνση.

Για το σημείο K3 η αριθμητική προσομοίωση του πειράματος έδωσε τα πιο επιτυχημένα αποτελέσματα, αφού οι μετατοπίσεις του σημείου που προέβλεψε είναι εξαιρετικά κοντά στις καταγραφείσες και στις τρεις διευθύνσεις (Σχ. 9). Συγκεκριμένα, στη διαμήκη διεύθυνση η αριθμητική επίλυση έδωσε μορφή ταλάντωσης του σημείου παρόμοια με αυτή του πειράματος και μέγιστη μετατόπιση με πολύ κοντινή τιμή (EQ17: 148.8 mm, ABAQUS: 161.4 mm) και σχεδόν ταυτόχρονη με την πειραματική. Στην κατακόρυφη διεύθυνση το περιεχόμενο των συχνοτήτων των ταλαντώσεων είναι παραπλήσιο, οι μέγιστες μετατοπίσεις είναι κοντινές (EQ17: 22.4 mm, ABAQUS: 25.2 mm) και οι χρονικές στιγμές που οι τελευταίες εκδηλώθηκαν είναι σχεδόν όμοιες. Στην εγκάρσια διεύθυνση το πρόγραμμα επιτυγχάνει να προσδιορίσει τη μορφή της ταλάντωσης του σημείου, την τιμή της μέγιστης μετατόπισης (αν και ελαφρώς υπερτιμημένη: EQ17: 78.5 mm, ABAQUS: 99.7 mm) και τη παραμένουσα μετατόπιση του σημείου, μεγέθους περίπου 40 mm.

Τέλος, αναφέρεται ότι και οι παραμένουσες μετακινήσεις των σπονδύλων που έδωσε η αριθμητική προσομοίωση του πειράματος (Σχ. 10) είναι ποιοτικά συμβατές με αυτές που περιγράφουν οι ερευνητές που πραγματοποίησαν την πειραματική διερεύνηση, οι οποίοι αναφέρουν ότι σχεδόν σε όλους τους αρμούς παρατηρήθηκαν παραμένουσες ολισθήσεις και σημαντικότερες στροφές περί τον κατακόρυφο άξονα (Mouzakis et al., 2002).



Σχήμα 9. Μετακίνηση του σημείου K3 του κιονόκρανου για το πείραμα EQ17: (a) διαμήκης διεύθυνση, (b) κατακόρυφη διεύθυνση και (c) εγκάρσια διεύθυνση.



Σχήμα 10. (a) Μετακινήσεις σπονδύλων του δοκιμίου του κίονα μετά από πειράματα στη σεισμική τράπεζα (Παπαντωνόπουλος, 2005) και (b) η παραμορφωμένη στάση του αριθμητικού μοντέλου του κίονα, η οποία προέκυψε από την προσομοίωση του πειράματος EQ17.

Συμπέρασμα

Από τις συγκρίσεις αριθμητικών προβλέψεων–πειραματικών αποτελεσμάτων για τη σεισμική απόκριση του ομοιώματος του κίονα του Παρθενώνα, προκύπτει ότι το πρόγραμμα των πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιήθηκε αναπαρήγαγε τα βασικά χαρακτηριστικά του φαινομένου της λικνιστικής απόκρισης των πολυσπόνδουλων κίωνων (περιεχόμενο συχνοτήτων της ταλάντωσης, μέγιστη μετατόπιση, ολίσθηση), μέσω επιλύσεων στις οποίες δεν είχαν μεταβληθεί, ουσιαστικά, οι βασικές παράμετροι του προβλήματος. Εάν μαζί με αυτό ληφθούν υπόψη και οι δυσκολίες που επιφέρει η γνωστή ευαισθησία του φαινομένου της απόκρισης πολύλιθων σωμάτων στην ασφαλή αναλυτική ή αριθμητική εκτίμησή του, εξάγεται το συμπέρασμα ότι το λογισμικό προέβλεψε ικανοποιητικά τη σεισμική απόκριση του κίονα-δοκιμίου και άρα δύναται να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση της σεισμικής απόκρισης κατασκευών ιδίου ή παρόμοιου χαρακτήρα, όπως είναι οι αρχαίοι κίονες ή γενικότερα αρχαίες κατασκευές από λαξευτούς λίθους εν ξηρώ συναρμολογημένους.

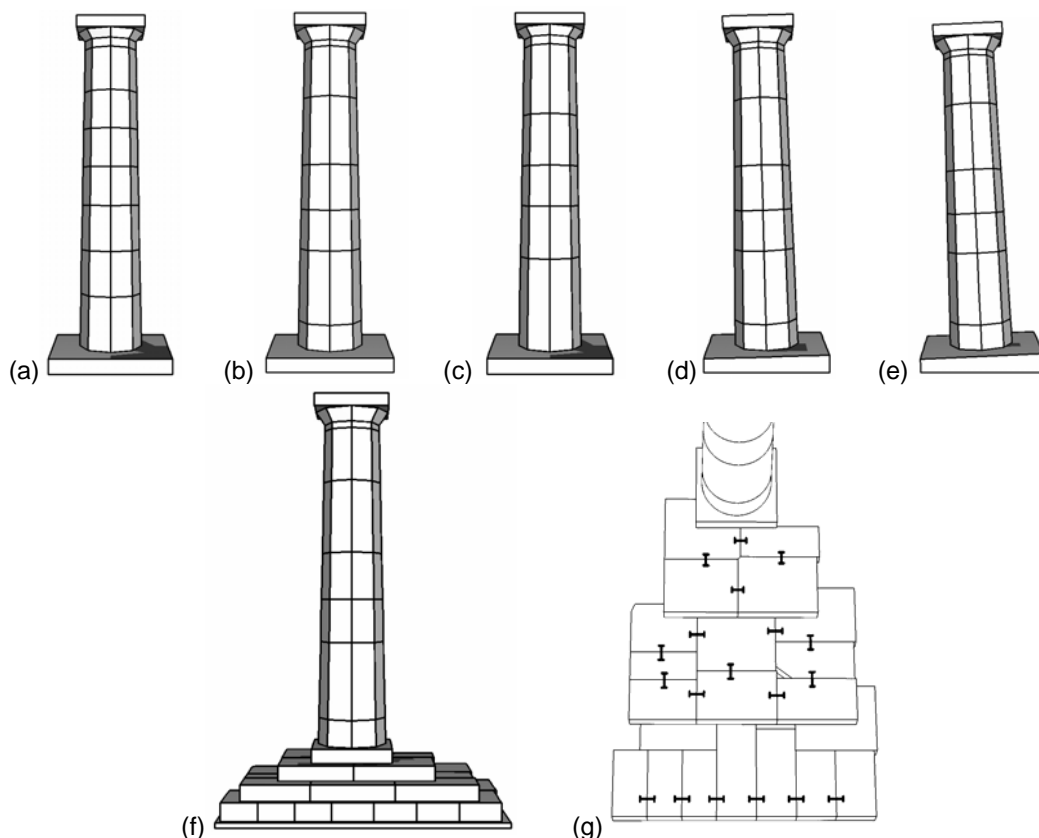
ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΤΡΙΩΝ ΚΙΩΝΩΝ

Τα προσομοιώματα

Οι τρεις κίονες του ναού των οποίων διερευνήθηκε η σεισμική συμπεριφορά είναι: ο τρίτος από ανατολικά κίονας του νότιου πτερού (κίονας ΚΝ3), ο οποίος απαρτίζεται από κιονόκρανο και επτά σπόνδλους, ο δεύτερος από ανατολικά του βόρειου πτερού (κίονας ΚΒ2), ο οποίος έχει κιονόκρανο και έξι σπόνδλους και ο πέμπτος από ανατολικά του νότιου πτερού (κίονας ΚΝ5), που αποτελείται από κιονόκρανο και πέντε σπόνδλους. Οι θέσεις των κίωνων στο μνημείο και οι εξωτερικές διαστάσεις των μελών τους παρουσιάζονται στο Σχέδιο 11 και στον Πίνακα 2. Οι αριθμητικές αναλύσεις περιλαμβάνουν εξέταση της σεισμικής απόκρισης του κίονα ΚΝ3, εκτίμηση του σεισμικού ορίου ανατροπής των κίωνων ΚΝ3, ΚΒ2 και ΚΝ5, εκτίμηση της επιρροής της απόκλισης από την κατακόρυφο στην ευστάθεια του κίονα ΚΒ2 και διερεύνηση της επίδρασης της κρηπίδας στη σεισμική απόκριση του κίονα ΚΒ2. Οι εν λόγω κίονες επιλέχθηκαν ως αντιπροσωπευτικοί του περιστευλίου, διότι με τον ίδιο με αυτούς

Για τις αριθμητικές διερευνήσεις της παρούσας μελέτης μορφώθηκαν συνολικά έξι τρισδιάστατα προσομοιώματα (Σχ. 12). Τα τρία από αυτά αντιστοιχούν στους κίονες KN3, KB2 και KN5, ελεύθερα ιστάμενους επί ορθογώνιας παραλληλόγραμμης βάσης. Δύο προσομοιώνουν τον κίονα KB2 να εδράζεται επί βάσης κατάλληλου σχήματος (τραπεζιόσχημης τομής) και διαστάσεων ώστε να αποκλίνει από την κατακόρυφο κατά γωνίες 1.5 και 2.5 μοιρών. Το έκτο προσομοίωμα περιλαμβάνει τον κίονα KB2, τους λίθους των τριών βαθμίδων της κρηπίδας και της ευθυντηρίας που μεταβιβάζουν το βάρος του κίονα στη θεμελίωση και ορθογώνια παραλληλόγραμμη βάση. Το έκτο προσομοίωμα εμπεριέχει, επίσης, στοιχεία που προσομοιώνουν τους μεταλλικούς συνδέσμους των υποκείμενων του κίονα λίθων.

Όλα τα προσομοιώματα μορφώθηκαν με βάση τις εξωτερικές διαστάσεις των αρχιτεκτονικών μελών του μνημείου, με τέτοιο τρόπο ώστε κάθε λίθος να αποτελεί αυτόνομο στοιχείο του μοντέλου. Σε κάθε περίπτωση τα αρχιτεκτονικά μέλη προσομοιώθηκαν στις θέσεις και στην κατάσταση που εκτιμάται ότι είχαν στην αρχική μορφή του ναού δηλαδή σε πλήρη μεταξύ τους επαφή, χωρίς σχετικές μετακινήσεις και χωρίς ασυνέχειες ή ανομοιομορφες απομειώσεις υλικού. Η διακριτοποίηση σε πεπερασμένα στοιχεία των μελών έγινε με τη χρήση τρισδιάστατων εξαεδρικών (8 κόμβων) και πενταεδρικών (6 κόμβων) στοιχείων. Έτσι οι πλευρικές έδρες των προσομοιωμάτων των κίωνων διαμορφώθηκαν πολυγωνικές (αντί κυλινδρικές, με ραβδώσεις).



Σχήμα 12. Τα αριθμητικά προσομοιώματα: (a) κίονας KN3, (b) κίονας KB2, (c) κίονας KN5, (d), (e) κίονας KB2 αποκλίνων από την κατακόρυφο κατά 1.5° και 2.5° , αντίστοιχα, (f) κίονας KB2 και οι υποκείμενοι λίθοι της κρηπίδας και της ευθυντηρίας, και (g) σκαρίφημα όπου παρουσιάζονται οι θέσεις των στοιχείων που συνδέουν τους υποκείμενους λίθους του κίονα KB2.

Τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν ως αντιπροσωπευτικά των συνδέσμων των λίθων αντιστοιχούν σε ελατήρια συνδεδεμένα σε δύο σημεία των γειτονικών συνδεδόμενων λίθων, τα οποία παρουσιάζουν αξονική και διατμητική αντίσταση. Για τα ελατήρια ορίστηκε ελαστική συμπεριφορά με τη χρήση μέτρου δυσκαμψίας 50×10^6 N/m και 25×10^6 N/m στη διαμήκη και την εγκάρσια διεύθυνσή τους, αντίστοιχα (οι τιμές αυτές επιλέχθηκαν για να αντιστοιχούν, κατά προσέγγιση, στη δυσκαμψία των νέων συνδέσμων από τιτάνιο που τοποθετούνται στους λίθους στα πλαίσια του έργου αποκατάστασης του ναού, Paradoπουλος, 2007). Οι θέσεις των συνδετήριων στοιχείων στο προσομοίωμα αντιστοιχούν στις θέσεις των συνδέσμων στο μνημείο (Σχ. 12g).

Το υλικό των λίθινων στοιχείων των προσομοιωμάτων θεωρήθηκε ελαστικό, συνεχές και ισότροπο. Για την αποφυγή ακόμη και πολύ μικρών ελαστικών παραμορφώσεων εισήχθη ως μέτρο ελαστικότητας του υλικού των προσομοιωμάτων δεκαπλάσια τιμή του μέτρου ελαστικότητας του ασβεστόλιθου. Η προσομοίωση της συμπεριφοράς των επιφανειών επαφής των λίθων έγινε με τη χρήση του μοντέλου αλληλεπίδρασης επιφανειών που χρησιμοποιήθηκε στις προσομοιώσεις του ομοιώματος του κίονα του Παρθενώνα. Έτσι, παράλληλα στον αρμό εισήχθη η τριβή με τη χρήση συντελεστή τριβής 0.75 -τιμή που έχει προσδιοριστεί για το υλικό δομής του ναού σε σχετική εργαστηριακή μελέτη (Παπαντωνόπουλος, 1995)- και η απόσβεση με συντελεστή απόσβεσης 0.01, ενώ κάθετα στη διεπιφάνεια ήταν δυνατή η μετάβαση οποιασδήποτε πίεσης μεταξύ των επιφανειών, όταν αυτές ήταν σε επαφή και ο μηδενισμός των πιέσεων, όταν οι επιφάνειες διαχωρίζονταν.

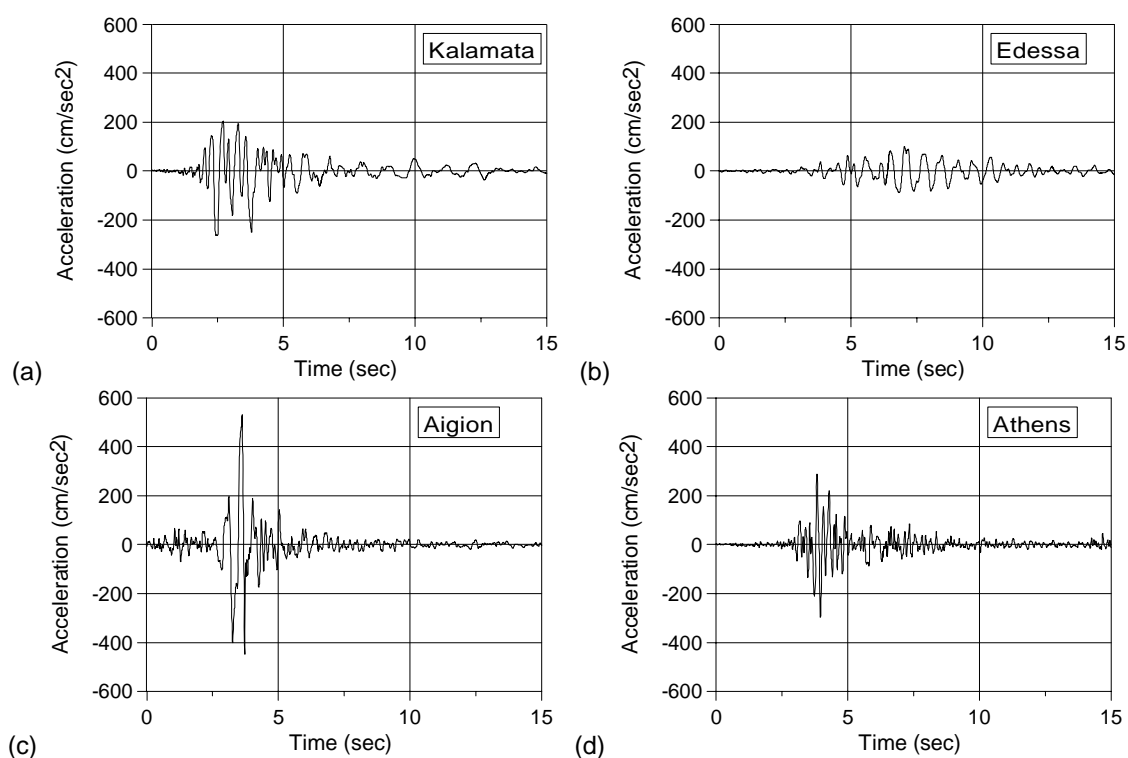
Τα προσομοιώματα φορτίστηκαν από τα ίδια βάρη τους και από δυναμικές φορτίσεις, οι οποίες εφαρμόζονταν ως επιβαλλόμενες μετατοπίσεις στις βάσεις των προσομοιωμάτων. Για τις δυναμικές φορτίσεις χρησιμοποιήθηκαν οι χρονοϊστορίες των μετατοπίσεων τεσσάρων καταγραφών σεισμικών συμβάντων του ελλαδικού χώρου, κλιμακούμενες με κατάλληλους πολλαπλασιαστικούς συντελεστές. Οι καταγραφές περιγράφονται ακολούθως.

Οι σεισμικές διεγέρσεις

Οι σεισμικές καταγραφές που χρησιμοποιήθηκαν, πολλαπλασιασμένες με διάφορους συντελεστές, ως διεγέρσεις των βάσεων των προσομοιωμάτων των κίωνων είναι οι παρακάτω:

α) Η καταγραφή του σεισμού που συνέβη στην Καλαμάτα στις 13/9/86, μεγέθους $M=6.0$, με επίκεντρο 12 km βόρεια της πόλης. Η καταγραφή αυτή έχει μέγιστη επιτάχυνση 0.27g, δεσπόζουσα περίοδο κραδασμού περίπου 0.35 sec και διάρκεια ισχυρής δόνησης 4 sec. β) Η καταγραφή του σεισμού της Έδεσσας, με μέγεθος $M = 5.9$, που συνέβη στις 21/12/90 με επίκεντρο που προσδιορίστηκε σε απόσταση 31 km βορειοανατολικά της πόλης. Λόγω της μεγάλης απόστασης του επιταχυνσιογράφου από το επίκεντρο του σεισμού η καταγραφή αυτή έχει χαμηλές επιταχύνσεις (η μέγιστη οριζόντια μόλις ξεπέρασε τη 0.10g), σε αντίθεση με τις ιδιοπεριόδους των οριζόντιων συνιστωσών, οι οποίες επηρεαζόμενες από τους μαλακούς σχηματισμούς του υπεδάφους είναι αρκετά υψηλές ($T= 0.50 - 0.70$ sec). Παρά τις χαμηλές επιταχύνσεις η διάρκεια της ισχυρής δόνησης προσεγγίζει τα 6.0 sec. γ) Η καταγραφή του Αιγίου, που προκλήθηκε από σεισμό στις 15/6/1995, μεγέθους $M=6.4$, με επίκεντρο σε απόσταση 18 km βορειοδυτικά της πόλης. Το κύριο χαρακτηριστικό της δόνησης αυτής είναι η ύπαρξη παλμού μεγάλης επιτάχυνσης (μέγιστες τιμές οριζόντιων

συνιστωσών 0.54g και 0.50g) και μακράς περιόδου (περίπου 0.5 έως 0.6 sec). Η καταγραφή δίνει διάρκεια ισχυρής δόνησης 6 sec. δ) Η καταγραφή του σεισμού της Αθήνας που συνέβη στις 7/9/99, μεγέθους $M=5.9$, η οποία πραγματοποιήθηκε στο κτίριο του Κ.Ε.Δ.Ε., Πειραιώς 166. Η εν λόγω καταγραφή, η οποία ελήφθη σε απόσταση 11 km από το επίκεντρο του σεισμού, παρουσιάζει μέγιστη επιτάχυνση 0.30g, περίοδο κραδασμού περίπου 0.20 sec και διάρκεια ισχυρής δόνησης 5.5 sec. Η επιλογή των συγκεκριμένων καταγραφών έγινε, διότι θεωρούνται αντιπροσωπευτικές των σεισμικών κινήσεων του ελλαδικού χώρου, ενώ κινούνται και σε ευρύ φάσμα συχνοτήτων. Οι διαμήκεις συνιστώσες των επιταχύνσεων των τεσσάρων καταγραφών παρουσιάζονται στο Σχήμα 13. Οι μέγιστες τιμές των επιταχύνσεων, των ταχυτήτων και των μετατοπίσεων, και στις τρεις διευθύνσεις, των σεισμικών καταγραφών παρατίθενται στον Πίνακα 3.



Σχήμα 13. Οι διαμήκεις συνιστώσες των επιταχύνσεων των σεισμικών καταγραφών: (α) της Καλαμάτας (1986), (β) της Έδεσσας (1990), (γ) του Αιγίου (1995) και (δ) της Αθήνας (1999) που χρησιμοποιήθηκαν στις αριθμητικές διερευνήσεις.

Πίνακας 3. Οι μέγιστες εδαφικές επιταχύνσεις, ταχύτητες και μετατοπίσεις των σεισμικών καταγραφών.

Σεισμική καταγραφή	Μέγιστη επιτάχυνση (g)			Μέγιστη ταχύτητα (cm/sec)			Μέγιστη μετατόπιση (cm)		
	Διαμ.	Κατακ.	Εγκ.	Διαμ.	Κατακ.	Εγκ.	Διαμ.	Κατακ.	Εγκ.
Καλαμάτας	0.27	0.19	0.23	24.0	8.1	30.9	5.6	1.4	7.1
Έδεσσας	0.10	0.04	0.10	10.9	3.0	8.4	1.1	0.3	0.9
Αιγίου	0.54	0.20	0.50	48.1	14.5	43.4	6.1	2.6	6.7
Αθήνας	0.30	0.16	0.26	14.7	7.0	16.1	2.1	1.8	1.9

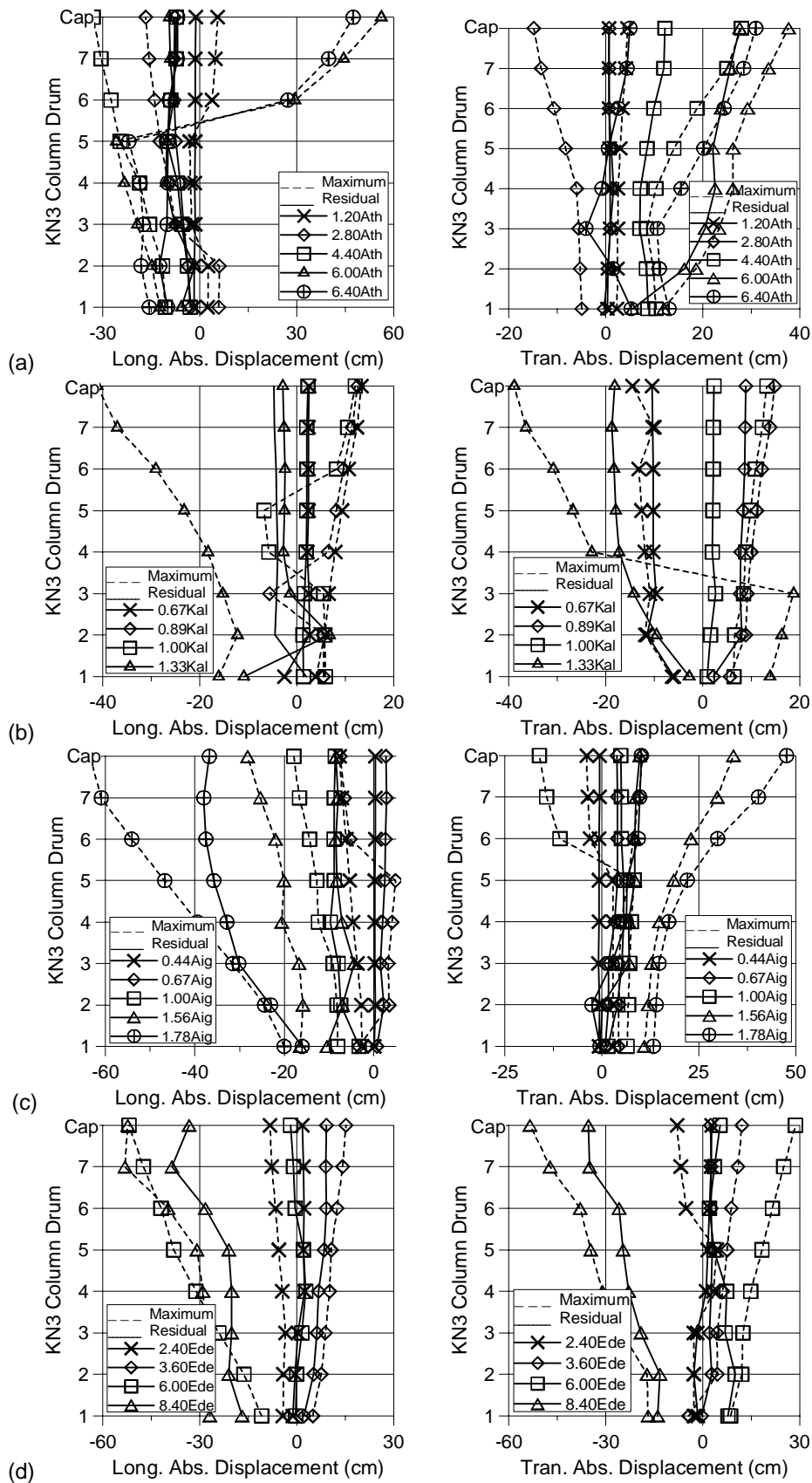
Η σεισμική απόκριση του κίονα ΚΝ3

Για τη μελέτη της σεισμικής απόκρισης ενός μεμονωμένου κίονα, σε κατακόρυφη στάση, της περίπτωσης του ναού του Επικούριου Απόλλωνα επιλέχθηκε ο τρίτος από ανατολικά κίονας του νότιου περσού (κίονας ΚΝ3), διότι διαθέτει διαστάσεις και αριθμό σπονδύλων όπως η πλειονότητα των κίωνων του περιστευλίου. Για το σκοπό αυτό πραγματοποιήθηκαν διαδοχικές αριθμητικές επιλύσεις με τη χρήση των τεσσάρων σεισμικών καταγραφών που περιγράφηκαν στην προηγούμενη παράγραφο, οι οποίες εισάγονταν στο προσομοίωμα του κίονα ως διέγερση της βάσης του, πολλαπλασιασμένες με κατάλληλο συντελεστή, αυξανόμενο σταδιακά σε κάθε επίλυση μέχρι την επίτευξη της ανατροπής του προσομοιώματος.

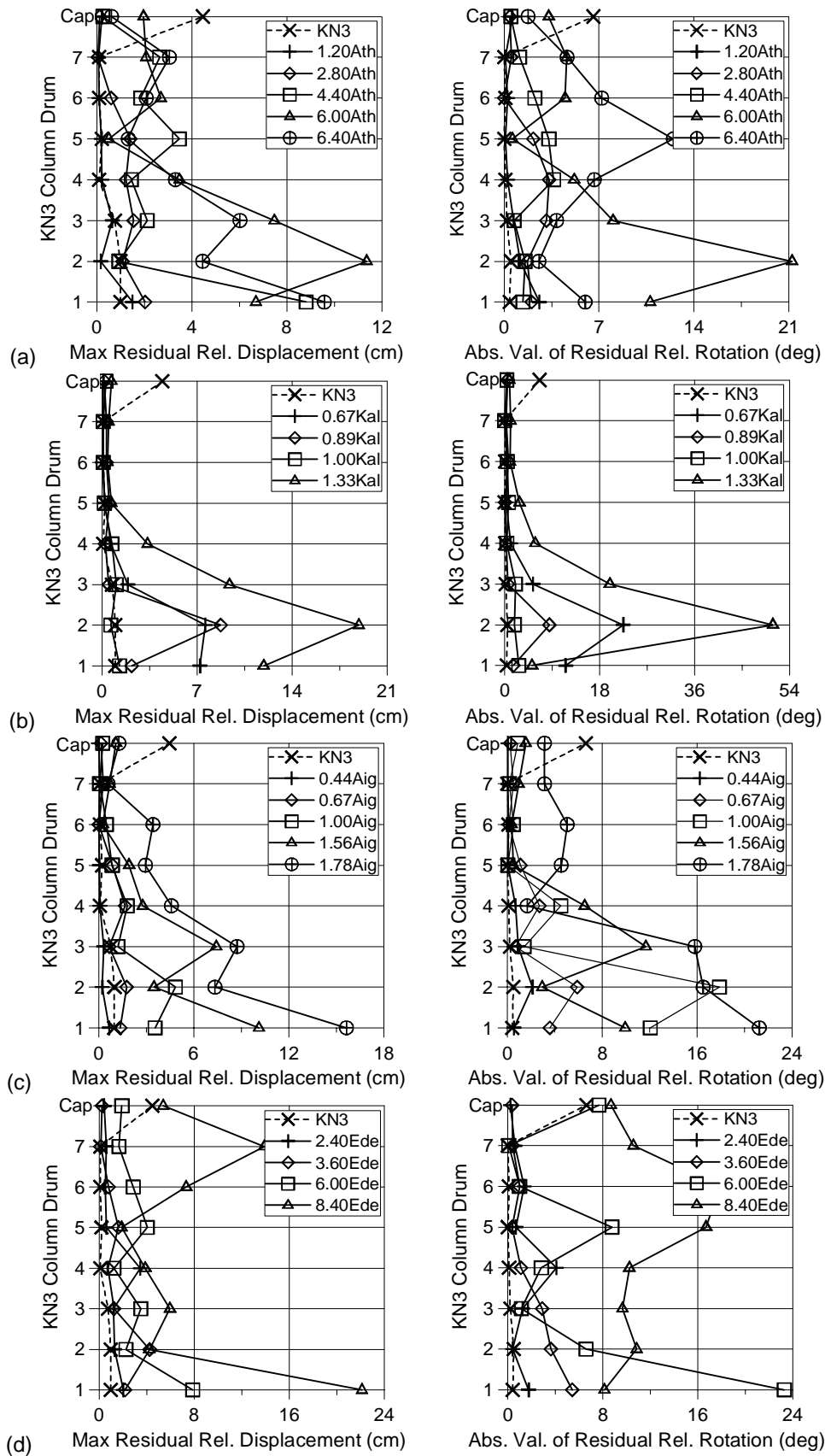
Συνολικά είκοσι πέντε αριθμητικές επιλύσεις διενεργήθηκαν, σε κάθε μία από τις οποίες οι μετακινήσεις κάθε λίθινου μέλους του κίονα καταγραφόταν. Από τις επιλύσεις προέκυψε ότι για την ανατροπή του προσομοιώματος του κίονα χρειάστηκαν διεγέρσεις μεγέθους 6.8 φορές τη σεισμική καταγραφή της Αθήνας, 1.56 φορές την καταγραφή του σεισμού της Καλαμάτας, 2 φορές την καταγραφή του σεισμού του Αιγίου και 9.60 φορές τη σεισμική καταγραφή της Έδεσσας. Τα αποτελέσματα αυτά δίνουν κάτω όρια για τη μέγιστη εδαφική επιτάχυνση, ταχύτητα και μετατόπιση του σεισμικού συμβάντος που ανατρέπει τον κίονα 0.42g, 48.1 cm/sec² και 10.6 cm, αντίστοιχα.

Τα κυριότερα αποτελέσματα των αριθμητικών επιλύσεων, σχετικά με τις μετακινήσεις των σπονδύλων και του κιονόκρανου του προσομοιώματος του κίονα, παρουσιάζονται στα Σχήματα 14 και 15. Σε όλες τις περιπτώσεις οι μετακινήσεις αφορούν στα κέντρα βάρη των μελών του κίονα. Σημειώνεται ότι στο Σχήμα 15 παρουσιάζονται οι μέγιστες τιμές των παραμενουσών σχετικών μετατοπίσεων όπως προέκυψαν από το διανυσματικό άθροισμα των σχετικών τιμών στις δύο οριζόντιες διευθύνσεις, ενώ οι παραμένουσες σχετικές στροφές παρουσιάζονται κατ' απόλυτη τιμή. Στα διαγράμματα του Σχήματος 15 εμπεριέχονται και οι γεωμετρικές παραμορφώσεις του κίονα ΚΝ3, όπως έχουν αποτυπωθεί στο μνημείο, για να συγκριθούν με τα αντίστοιχα αριθμητικά αποτελέσματα.

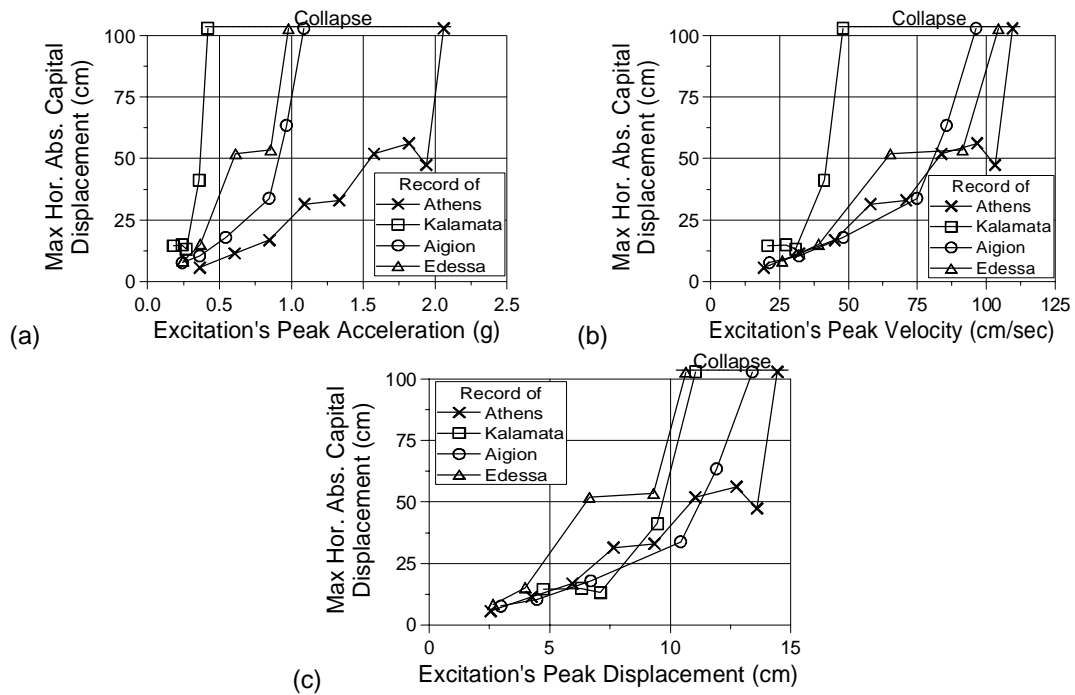
Στο Σχήμα 16 παρουσιάζονται οι μέγιστες τιμές των οριζόντιων μετατοπίσεων του κιονόκρανου σε συνάρτηση με τις μέγιστες τιμές των επιταχύνσεων, των ταχυτήτων και των μετατοπίσεων των διεγέρσεων που τις προκάλεσαν, ανεξαρτήτως διεύθυνσης. Επίσης, παρουσιάζονται και τα όρια των μέγιστων τιμών των παραμέτρων των διεγέρσεων που προκάλεσαν κατάρρευση του προσομοιώματος του κίονα.



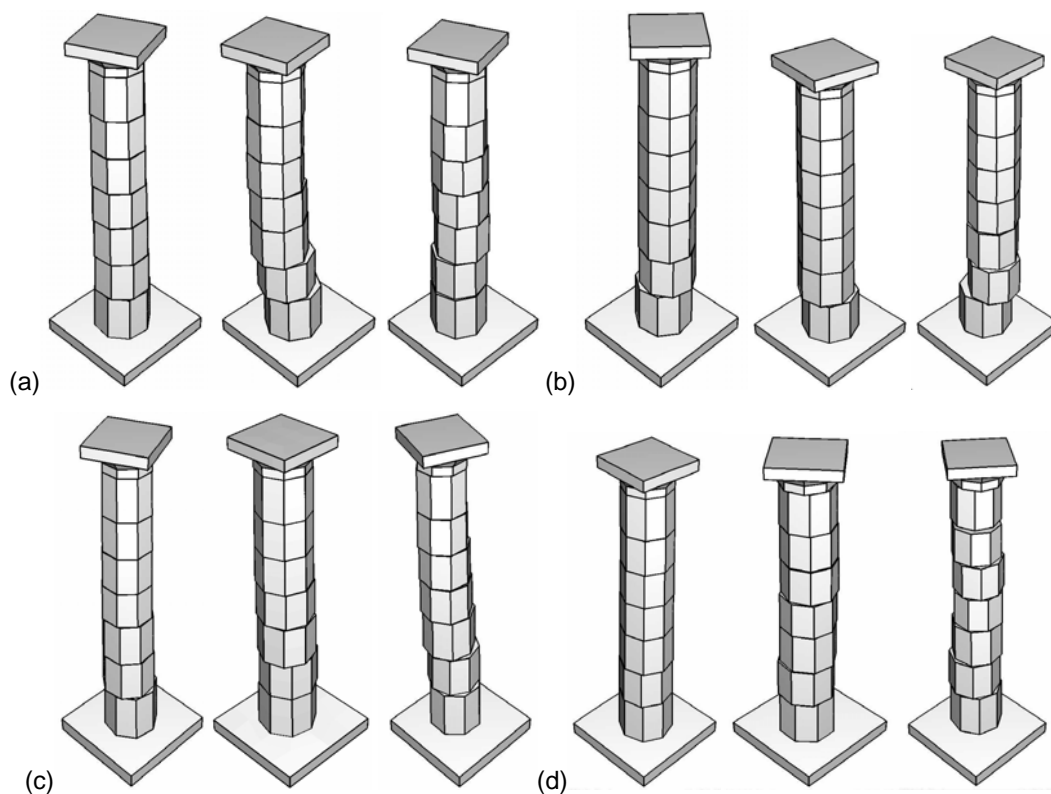
Σχήμα 14. Μέγιστες και παραμένουσες απόλυτες μετατοπίσεις των σπονδύλων και του κιονόκρανου του προσομοιώματος του κίονα KN3, όπως προέκυψαν από τη διερεύνηση της απόκρισής του στη σεισμική καταγραφή (a) της Αθήνας, (b) της Καλαμάτας, (c), του Αιγίου, και (d) της Έδεσσας.



Σχήμα 15. Παραμένουσες σχετικές μετατοπίσεις και στροφές των σπονδύλων και του κιονόκρανου του προσομοιώματος του κίονα KN3, όπως προέκυψαν από τη διερεύνηση της απόκρισής του στη σεισμική καταγραφή (a) της Αθήνας, (b) της Καλαμάτας, (c), του Αιγίου, και (d) της Έδεσσας.



Σχήμα 16. Μέγιστες οριζόντιες μετατοπίσεις του κινούκранου του προσομοιώματος του κίονα KN3 σε συνάρτηση με τις μέγιστες τιμές (a) των επιταχύνσεων, (b) των ταχυτήτων και (c) των μετατοπίσεων των κλιμακούμενων σεισμικών διεγέρσεων.



Σχήμα 17. Οι παραμορφωμένες στάσεις του προσομοιώματος του κίονα KN3, όπως όπως προέκυψαν από τη διεγέρσή του με τη σεισμική καταγραφή: (a) της Αθήνας, πολλαπλασιασμένη με 3.60, 5.20 και 6.40, (b) της Καλαμάτας, πολ/σμένη με 0.67, 0.89 και 1.33, (c) του Αιγίου, πολ/σμένη με 1.00, 1.56 και 1.78, και (d) της Έδεσσας, πολ/σμένη με 3.60, 6.00 και 8.40.

Η ευστάθεια των κίονων KN3, KB2 και KN5

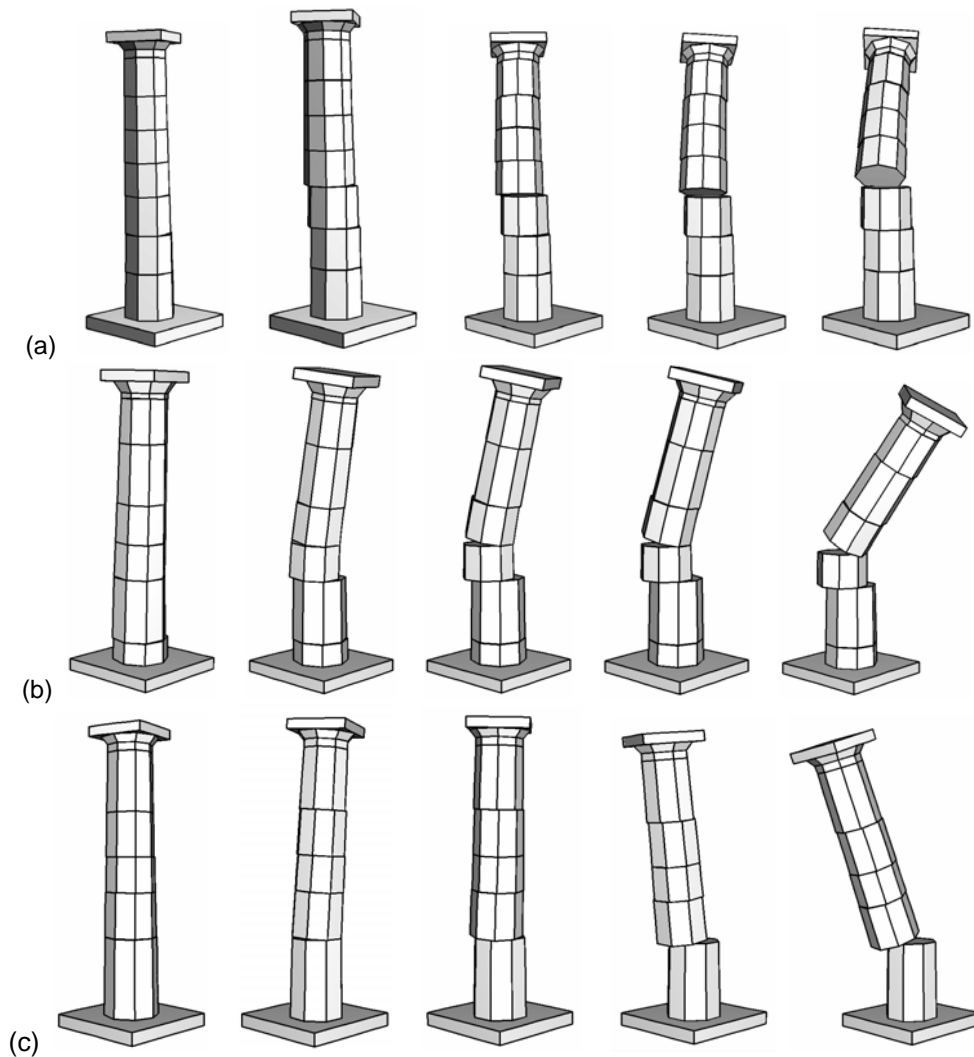
Για να διαπιστωθεί εάν επηρεάζεται η ευστάθεια των κίονων της περίπτωσης του ναού του Επικούριου Απόλλωνα από το γεγονός ότι πολλοί κίονες διαθέτουν διαφορετικό αριθμό σπονδύλων, πραγματοποιήθηκαν διαδοχικές αριθμητικές επιλύσεις με τα προσομοιώματα των κίονων KN3, KB2 και KN5 (οι οποίοι διαθέτουν 7, 6 και 5 σπόνδυλους, αντίστοιχα) να διεγείρονται από τις σεισμικές καταγραφές της Καλαμάτας της Έδεσσας του Αιγίου και της Αθήνας, διαρκώς κλιμακούμενες μέχρι την επίτευξη της ανατροπής των προσομοιωμάτων. Τα αποτελέσματα για τα κατώτατα όρια των μέγιστων τιμών των επιταχύνσεων, των ταχυτήτων και των μετατοπίσεων των τεσσάρων σεισμικών καταγραφών, κατάλληλα κλιμακούμενων, που ανατρέπουν τους κίονες, παρατίθενται στον Πίνακα 3. Στον Πίνακα 4 παρουσιάζονται οι μέσες τιμές και οι τυπικές αποκλίσεις των μέγιστων επιταχύνσεων, ταχυτήτων και μετατοπίσεων των διεγέρσεων που ανέτρεψαν τα προσομοιώματα των τριών κίονων του ναού.

Πίνακας 3. Οι μέγιστες τιμές επιταχύνσεων, ταχυτήτων και μετατοπίσεων των σεισμικών διεγέρσεων που ανέτρεψαν τα προσομοιώματα των τριών κίονων.

Κίονας	Σεισμική καταγραφή	Scaling factor	PGA (g)	PGV (cm/sec)	PGD (cm)	Αποτέλεσμα: κατάρρευση κιονόκ. και
KN	Αθήνας	6.80	2.06	109.5	14.4	4 από 7 σπ.
	Καλαμάτας	1.56	0.42	48.1	11.1	6 από 7 σπ.
	Αιγίου	2.00	1.09	96.2	13.4	4 από 7 σπ.
	Έδεσσας	9.60	0.98	104.3	10.6	3 από 7 σπ.
KB	Αθήνας	6.80	2.06	109.5	14.4	3 από 6 σπ.
	Καλαμάτας	1.33	0.36	41.2	9.5	5 από 6 σπ.
	Αιγίου	2.67	1.45	128.3	17.9	2 από 6 σπ.
	Έδεσσας	10.80	1.10	117.3	12.0	1 από 6 σπ.
KN	Αθήνας	6.40	1.94	103.1	13.6	3 από 5 σπ.
	Καλαμάτας	2.00	0.54	61.8	14.2	4 από 5 σπ.
	Αιγίου	2.44	1.33	117.6	16.4	2 από 5 σπ.
	Έδεσσας	9.60	0.98	104.3	10.6	3 από 5 σπ.

Πίνακας 4. Στατιστικά στοιχεία που αφορούν στη σεισμική διέγερση που δύναται να επιφέρει κατάρρευση στους τρεις κίονες του ναού.

Κίονας	Κρίσιμης διέγερσης βάσης κίονα, μέγιστη					
	επιτάχυνση (g)		ταχύτητα (cm/sec)		μετατόπιση (cm)	
	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση
KN3	1.14	0.68	89.5	28.2	12.4	1.83
KB2	1.24	0.71	99.1	39.3	13.4	3.59
KN5	1.20	0.59	96.7	24.2	13.7	2.37
Όλοι	1.19	0.60	95.1	28.6	13.2	2.51

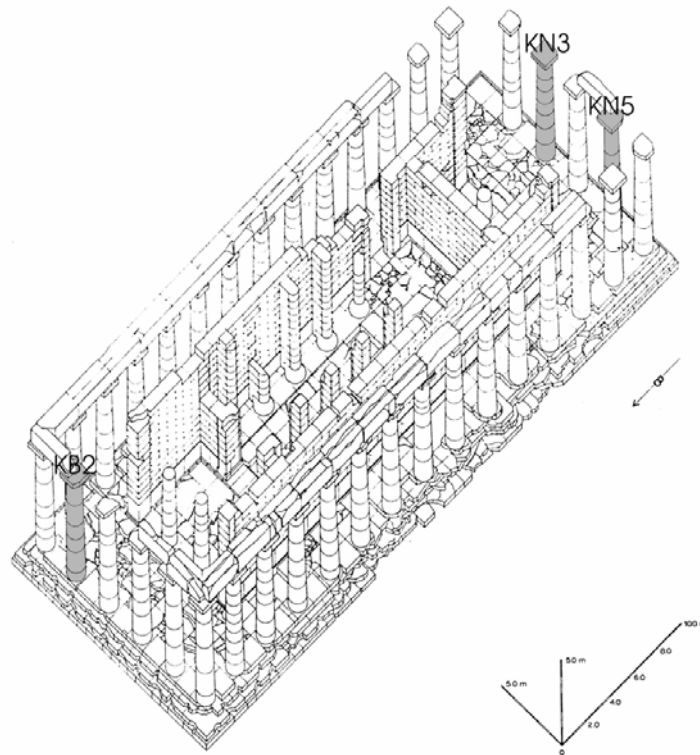


Σχήμα 18. Στιγμιότυπα από την κατάρρευση: (a) του προσομοιώματος του κίονα KN3, διεγερμένου από τη καταγραφή του σεισμού του Αιγίου, πολλαπλασιασμένη με 2.00, (b) του προσομοιώματος του κίονα KB2, διεγερμένου από τη σεισμική καταγραφή της Αθήνας, πολ/σμένη με 6.80 και (c) του προσομοιώματος του κίονα KN5, διεγερμένου από το σεισμό της Καλαμάτας πολ/σμένο με 2.00.

Η επίδραση της απόκλισης από την κατακόρυφο στην ευστάθεια του κίονα KB2

Για να εκτιμηθεί η επίδραση της απόκλισης από την κατακόρυφο στην ευστάθεια των κίωνων του ναού του Επικούριου Απόλλωνα πραγματοποιήθηκε παραμετρική αριθμητική μελέτη της ευστάθειας του κίονα KB2 για αρχικές γωνίες απόκλισης 1.5° και 2.5° και για διεγέρσεις βάσης τις σεισμικές καταγραφές της Έδεσσας και της Αθήνας, των οποίων η ένταση κλιμακωνόταν σταδιακά έως την επίτευξη της ανατροπής του κίονα. Λόγω της γεωμετρικής ασυμμετρίας του προσομοιώματος του κεκλιμένου κίονα όλες οι αριθμητικές επιλύσεις έλαβαν χώρα για τη δυσμενέστερη φορά του σεισμικού συμβάντος, δηλαδή οι διεγέρσεις εφαρμόστηκαν έτσι ώστε η διεύθυνσή τους με τη μέγιστη επιτάχυνση να ταυτίζεται με τη διεύθυνση κατά την οποία ο κίονας έκλινε. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το προσομοίωμα του κίονα που παρουσίαζε 1.5° αρχική απόκλιση από την κατακόρυφο ανατράπηκε όταν διεγέρθηκε με 5.80 φορές την καταγραφή του σεισμού της Αθήνας και με 8.40 φορές τη σεισμική καταγραφή της Έδεσσας, ενώ το προσομοίωμα με απόκλιση 2.5° κατάρρευσε όταν φορτίστηκε δυναμικά με την καταγραφή της Αθήνας πολλαπλασιασμένη με 3.60 και της

αριθμό σπονδύλων (5, 6 ή 7) αποτελούνται άλλοι 27 κίονες –μόλις 7 από τους 37 σήμερα ιστάμενους απαρτίζονται από διαφορετικό αριθμό σπονδύλων– και γιατί οι δύο από αυτούς (κίονες KN3 και KN5) διαθέτουν τις τυπικές διαστάσεις των κίωνων της περίπτωσης, ενώ ο τρίτος (κίονας KB2) ανήκει στην ξεχωριστή κατηγορία των παχύτερων κίωνων του βόρειου πτερού.

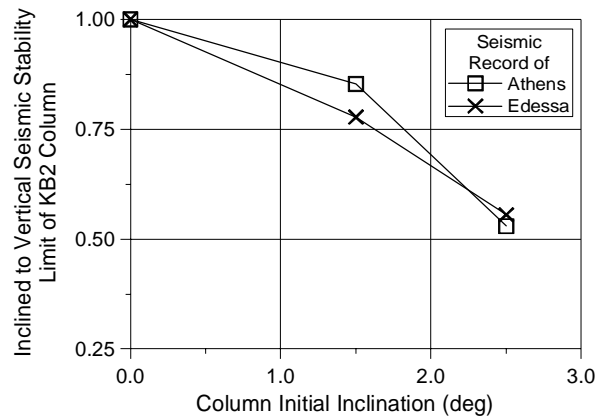


Σχήμα 11. Προοπτικό σχέδιο του ναού του Επικούριου Απόλλωνα πριν από την έναρξη των εργασιών αποκατάστασης του (Σβολόπουλος, 1995), στο οποίο σημαίνονται με γκρι χρώμα οι τρεις κίονες των οποίων διερευνήθηκε αριθμητικά η σεισμική απόκριση.

Πίνακας 2. Οι διαστάσεις των κίωνων που διερευνήθηκε η σεισμική συμπεριφορά.

Σπόνδ	Κίονας KN3			Κίονας KB2			Κίονας KN5		
	Διάμετρος (m)		Ύψος	Διάμετρος (m)		Ύψος	Διάμετρος (m)		Ύψος
	Κάτω	Άνω		Κάτω	Άνω		Κάτω	Άνω	
1 ^{ος}	1.12	1.09	0.97	1.16	1.14	0.46	1.12	1.06	1.63
2 ^{ος}	1.09	1.06	0.81	1.14	1.09	1.31	1.06	1.03	0.94
3 ^{ος}	1.06	1.03	0.82	1.09	1.06	0.73	1.03	1.00	0.72
4 ^{ος}	1.03	1.00	0.70	1.06	1.03	0.80	1.00	0.97	0.92
5 ^{ος}	1.00	0.98	0.69	1.03	0.98	1.23	0.97	0.92	1.24
6 ^{ος}	0.98	0.95	0.68	0.98	0.95	0.90	–	–	–
7 ^{ος}	0.95	0.92	0.78	–	–	–	–	–	–
Κιονόκρ.	0.92	–	0.52	0.95	–	0.54	0.92	–	0.52
Άβακας	1.19 x 1.19 x 0.20			1.25 x 1.25 x 0.21			1.19 x 1.19 x 0.20		

Έδεσσας πολλαπλασιασμένη με 6.00 (πίν. 3.7). Τα στοιχεία αυτά ισοδυναμούν με υποβίβαση της αντισεισμικής ικανότητας του κίονα, σε σχέση με αυτή που επέδειξε κατακόρυφα ιστάμενος και διεγερόμενος από τις καταγραφές των σεισμών της Αθήνας και της Έδεσσας, αντίστοιχα, κατά 15% και 22%, όταν αποκλίνει 1.5° και κατά 47% και 44%, όταν έχει απόκλιση 2.5° . Η επιρροή της απόκλισης στην ευστάθεια του κίονα παρουσιάζεται γραφικά στο Σχήμα 19, που ακολουθεί.

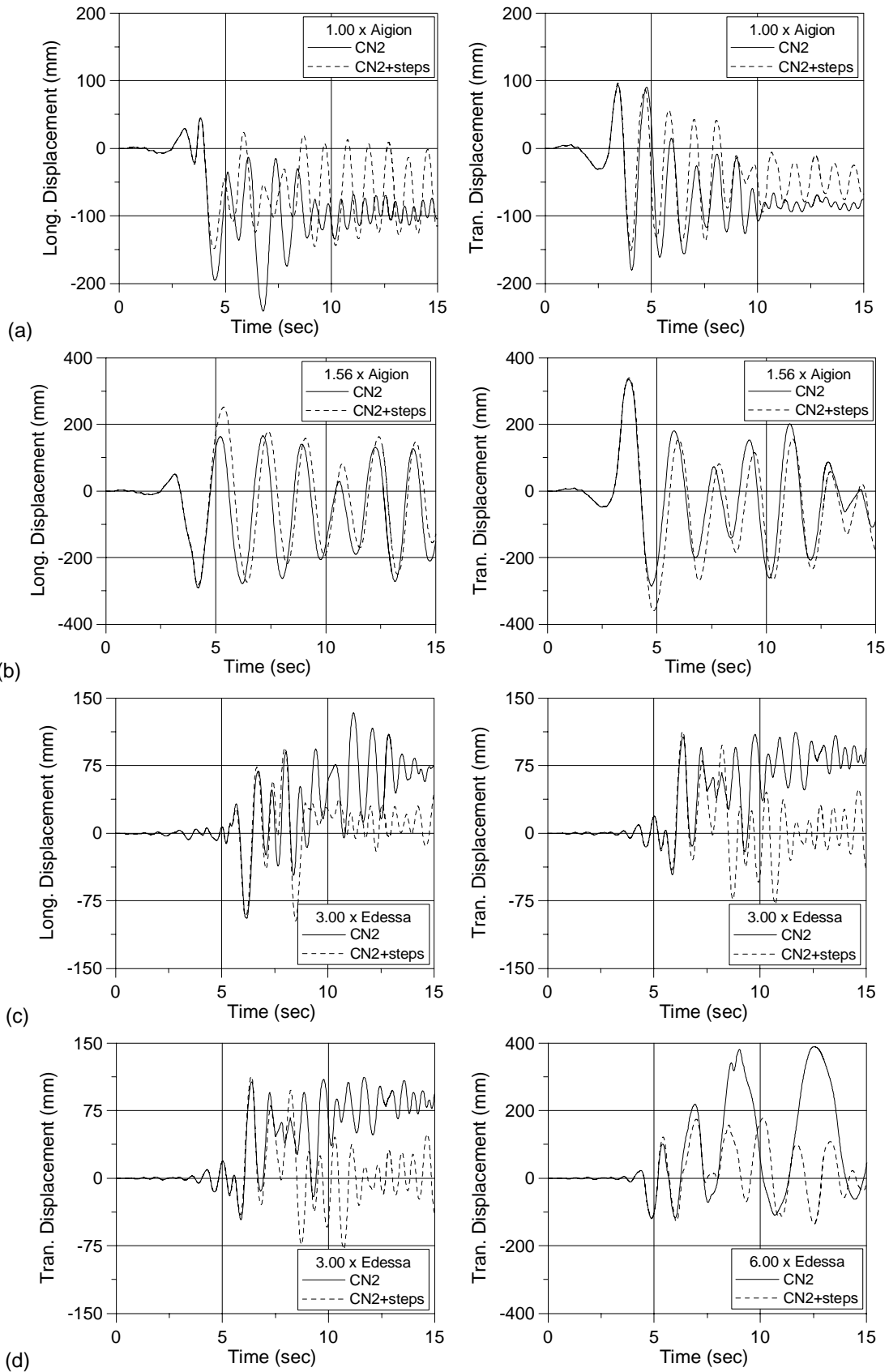


Σχήμα 19. Η επιρροή της απόκλισης από την κατακόρυφο στην ευστάθεια του κίονα KB2.

Η επίδραση της κρηπίδας στην απόκριση του κίονα KB2

Όλες οι προηγούμενες διερευνήσεις αφορούν στην απόκριση κίονων που διεγείρεται σεισμικά ο λίθος επί του οποίου εδράζονται. Όμως, οι κίονες της περίπτωσης του ναού του Επικούριου Απόλλωνα εδράζονται επί των τριών αναβαθμών της κρηπίδας και ανισοϋφούς θεμελίωσης, η οποία στην ανατολική πλευρά και στο μεγαλύτερο μέρος της βόρειας και της νότιας πλευράς του μνημείου αποτελείται από μια στρώση λίθων, την ευθυνηρία. Για την εξέταση της επίδρασης της ύπαρξης υποκείμενων στρώσεων λίθων στη σεισμική απόκριση των κίονων του ναού πραγματοποιήθηκε μικρή διερεύνηση κατά την οποία το προσομοίωμα που περιλαμβάνει τον κίονα KB2, τους υποκείμενους αυτού λίθους της κρηπίδας και της ευθυνηρίας, συνδετήρια στοιχεία των λίθων, και ορθογώνια παραλληλόγραμμη βάση, καθώς και το προσομοίωμα του κίονα KB2 εδραζόμενου απ' ευθείας σε βάση, φορτίστηκαν δυναμικά με τη σεισμική καταγραφή του Αιγίου πολλαπλασιασμένη με τους συντελεστές 1.00 και 1.56, και της Έδεσσας, πολλαπλασιασμένη με 3.00 και 6.00. Όλες οι επιλύσεις με το πρώτο προσομοίωμα πραγματοποιήθηκαν με τη διεύθυνση της διέγερσης με τη μέγιστη επιτάχυνση να συμπίπτει με το διαμήκη άξονα της κρηπίδας.

Στο Σχήμα 20 παρατίθενται συγκρίσεις των χρονοϊστοριών των απόλυτων μετατοπίσεων του κιονόκρανου, στις δύο οριζόντιες διευθύνσεις, που έδωσαν οι επιλύσεις με τα δύο προσομοιώματα (στην κατακόρυφη διεύθυνση τα αποτελέσματα ήταν πολύ κοντινά, σχεδόν ταυτόσημα). Οι μετατοπίσεις αφορούν στο κέντρο της άνω έδρας του άβακα. Στον Πίνακα 5 παρατίθενται οι μέγιστες τιμές των εφελκυστικών και διατμητικών δράσεων που παρουσιάστηκαν στα συνδετήρια στοιχεία των υποκείμενων λίθων του κίονα, ανά στρώση, ανεξάρτητα αν οι τιμές εμφανίστηκαν στο ίδιο ή σε άλλο στοιχείο.



Σχήμα 20. Σύγκριση των απολύτων μετατοπίσεων του κιονόκranου που προέκυψαν από φόρτιση των δύο προσομοιωμάτων του κίονα KB2 (απομονωμένου, και με του υποκείμενούς του λίθους) με τη σεισμική καταγραφή: (a), (b) του Αιγίου πολλαπλασιασμένη με 1.00 και 1.56, και (c), (d) της Έδεσσας πολλαπλασιασμένη με 3.00 και 6.00.

Πίνακας 5. Μέγιστες δράσεις στα συνδετήρια στοιχεία των υποκείμενων λίθων του κίονα KB2.

Θέση συνδέσμου	Δράση σε συνδετήριο στοιχείο (σε kN) από προσομοίωση που χρησιμοποιήθηκε							
	η σεισμική καταγραφή του Αιγίου, πολλαπλασιασμένη με				η σεισμική καταγραφή της Έδεσσας, πολλαπλασιασμένη με			
	1.00		1.56		3.00		6.00	
	Εφελκυστ.	Διατμητ.	Εφελκυστ.	Διατμητ.	Εφελκυστ.	Διατμητ.	Εφελκυστ.	Διατμητ.
Ευθυνηρία	0.50	0.59	1.95	2.90	0.44	0.63	1.26	0.91
1 ^{ος} αναβαθ.	3.01	1.04	2.86	2.32	2.50	0.72	4.17	1.49
2 ^{ος} αναβαθ.	3.15	0.96	3.54	2.48	2.93	0.89	6.44	2.79

Από την παραβολή των αποτελεσμάτων για τις μετακινήσεις του κιονόκρανου των δύο προσομοιωμάτων του κίονα KB2 προκύπτουν οι παρατηρήσεις που ακολουθούν: Οι πρώτες «δίδυμες» προσομοιώσεις, στις οποίες χρησιμοποιήθηκε η καταγραφή του σεισμού του Αιγίου (Σχ. 20a), έδωσαν διαφορετικές αποκρίσεις κυρίως στη διαμήκη διεύθυνση, όπου η μέγιστη μετατόπιση και η παραμένουσα ολίσθηση που εκδηλώθηκαν στο προσομοίωμα του απομονωμένου κίονα είναι διπλάσιες των αντίστοιχων τιμών που καταγράφηκαν στο προσομοίωμα με την κρηπίδα. Στην εγκάρσια διεύθυνση υπάρχουν παρόμοιες διαφοροποιήσεις, αλλά αρκετά μικρότερου, σχεδόν ασήμαντου, εύρους. Στο δεύτερο ζεύγος αριθμητικών επιλύσεων με τη σεισμική καταγραφή του Αιγίου, όπου το δυναμικό φορτίο ήταν μεγαλύτερο, ο κίονας παρουσίασε παρεμφερείς, σχεδόν όμοιες, αποκρίσεις σε όλες τις διευθύνσεις (Σχ. 20b). Αντίθετα στις αριθμητικές επιλύσεις που χρησιμοποιήθηκε η μακροπερίοδη σεισμική καταγραφή της Έδεσσας προέκυψε διαφοροποίηση στην απόκριση του κίονα και για τα δύο επίπεδα δυναμικής φόρτισης που ελέγχθηκαν. Πιο συγκεκριμένα για τη διέγερση με τη μικρότερη ένταση καταγράφηκαν σημαντικές παραμένουσες μετατοπίσεις ($\approx 75 - 80$ mm) και στις δύο οριζόντιες διευθύνσεις στον απομονωμένο κίονα, οι οποίες δεν εμφανίστηκαν στο άλλο μοντέλο (Σχ. 20c). Στο τελευταίο ζεύγος προσομοιώσεων το λογισμικό προέβλεψε μόνο για το προσομοίωμα του κίονα χωρίς τους υποκείμενους λίθους σημαντική λικνιστική μετακίνηση και μεγάλη παραμένουσα μετατόπιση (≈ 150 mm) και στις δύο διευθύνσεις (Σχ. 20d).

Σχολιασμός των αριθμητικών αποτελεσμάτων

Από την αριθμητική εξέταση της σεισμικής απόκρισης του κίονα KN3 του ναού του Επικούριου Απόλλωνα προέκυψε ότι ο κίονας, στην κατάσταση που ελέγχθηκε (ελεύθερα και κατακόρυφα ιστάμενος, με άθικτες εδράσεις σπονδύλων και επί άκαμπτης βάσης), διαθέτει ιδιαίτερα μεγάλη, έναντι ανατροπής, σεισμική αντοχή. Συγκεκριμένα, προέκυψαν κάτω όρια για τη μέγιστη εδαφική επιτάχυνση, ταχύτητα και μετατόπιση του σεισμικού συμβάντος που ανατρέπει τον κίονα να είναι $0.42g$, 48.1 cm/sec^2 και 10.6 cm , αντίστοιχα. Από τη διερεύνηση διαφάνηκε, επίσης, ότι η απόκριση του κίονα συσχετίζεται πολύ καλά με τη μέγιστη τιμή της μετατόπισης της διέγερσής του και ότι το εύρος διακύμανσης της μετατόπισης που απαιτείται για να ανατραπεί ο κίονας είναι αρκετά μικρό (Σχ. 16c). Αρκετά καλά με τη σεισμική απόκριση και το όριο ανατροπής του κίονα συσχετίζεται και η μέγιστη ταχύτητα της διέγερσης (Σχ. 16b). Αν μάλιστα, εξαιρεθούν τα αποτελέσματα που έδωσε η χρήση της σεισμικής καταγραφής της Καλαμάτας, η οποία παρουσιάζει τη μεγαλύτερη τιμή μέγιστης εδαφικής μετατόπισης από όλες τις καταγραφές που χρησιμοποιήθηκαν, τότε η συσχέτιση γίνεται μεγαλύτερη. Αντίθετα, η μέγιστη τιμή της επιτάχυνσης της διέγερσης δεν

αποτέλεσε παράγοντα που επηρέασε συστηματικά την απόκριση του προσομοιώματος (Σχ. 16a)· αν και, εφόσον αγνοηθούν ξανά τα σχετικά με την καταγραφή του σεισμού της Καλαμάτας αποτελέσματα, παρατηρείται μία φθίνουσα τάση της μέγιστης επιτάχυνσης της διέγερσης που ανατρέπει τον κίονα όσο αυξάνει η δεσπόζουσα περίοδος της διέγερσης. Οι ίδιες εκτιμήσεις για τις παραμέτρους της διέγερσης του επηρεάζουν την ευστάθεια προέκυψαν και από τις διερευνήσεις για τους δύο άλλους κίονες του ναού (Πιν. 3).

Αναφορικά με τις γεωμετρικές παραμορφώσεις του προσομοιώματος του κίονα KN3, ως αποτέλεσμα των σεισμικών διεγέρσεων του, διαπιστώθηκε ότι οι μέγιστες μετατοπίσεις των σπονδύλων και του κιονόκρανου που αναπτύσσονταν κατά τη διάρκεια των δονήσεων είναι αρκετά μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες παραμένουσες· οι διαφορές αυτές, μάλιστα, αυξάνουν όσο μεγαλώνει το μέγεθος της δόνησης (Σχ. 14). Η εκτίμηση αυτή έρχεται σε συμφωνία με συμπέρασμα σχετικής πειραματικής διερεύνησης που πραγματοποιήθηκε σε ομοίωμα κίονα του πρόναου του Παρθενώνα (Mouzakis et al., 2002). Επίσης, τα μεγέθη των σχετικών παραμενουσών μετατοπίσεων και στροφών των μελών του κίονα μειώνονται όσο υψηλότερη είναι η θέση τους, σχεδόν στο σύνολο των περιπτώσεων που εξετάστηκαν, με ελάχιστες εξαιρέσεις που αφορούν σε προσομοιώσεις που χρησιμοποιήθηκε η μακροπερίοδη καταγραφή της Έδεσσας (Σχ. 14 και 17). Τα αποτελέσματα αυτά συνάδουν με τις αποτυπωμένες παραμορφώσεις του κίονα στο μνημείο. Επιπλέον, οι μορφές των τεθλασμένων γραμμών που περιγράφουν τις παραμορφώσεις του προσομοιώματος του κίονα, αλλά και η οπτική παρατήρηση των στιγμιότυπων που παρουσιάζουν την απόκρισή του, συντείνουν στο συμπέρασμα ότι το είδος της κίνησης που επικρατεί στην απόκριση του κίονα στις ισχυρές σεισμικές διεγέρσεις είναι λικνισμός κατά ομάδες σπονδύλων, με αποτέλεσμα οι παραμένουσες γεωμετρικές παραμορφώσεις να οφείλονται κυρίως σε επίπεδες ή χωρικές περιστροφικές μετακινήσεις. Αυτή η λικνιστική διαδικασία, μάλιστα, ήταν που οδήγησε σε κατάρρευση τα προσομοιώματα και των τριών κίωνων σε όλες τις περιπτώσεις (Σχ. 18). Παρόμοια ευρήματα προέκυψαν και από αριθμητική διερεύνηση της σεισμικής διερεύνησης κίωνων του πρόναου Παρθενώνα (Psycharis et al., 2003).

Από τον αριθμητικό έλεγχο της ευστάθειας των τριών κίωνων του ναού (KN3, KB2 και KN5) διαφάνηκε ότι το γεγονός ότι διαθέτουν διαφορετικό αριθμό σπονδύλων (7, 6 και 5, αντίστοιχα) δεν επηρεάζει με συστηματικό τρόπο το όριο ανατροπής τους (Πίν. 3). Άλλωστε, και από επισκόπηση των στιγμιότυπων απόκρισης των προσομοιωμάτων των κίωνων (Σχ. 18) δεν διαπιστώνεται ουσιαστική ποιοτική διαφοροποίηση στον τρόπο που αποκρίθηκαν στις σεισμικές διεγέρσεις. Αντίθετα, η ανάλυση έδωσε παρόμοια αποτελέσματα για τα όρια ευστάθειας και των τριών κίωνων, κάτι που επιτρέπει την ομαδοποίηση των αποτελεσμάτων για την εξαγωγή συνολικής ποσοτικής εκτίμησης για την αντισεισμική ικανότητα που διαθέτει σχεδόν το σύνολο των κίωνων του περιστευλίου (διότι, όπως προαναφέρθηκε, όμοιο αριθμό σπόνδυλων με ένα από τους τρεις κίονες διαθέτουν οι 30 από τους 37, σήμερα ιστάμενους, κίονες του μνημείου) –πάντα υπό τις προϋποθέσεις ότι είναι κατακόρυφοι, με άθικτες εδράσεις και τους σπονδύλους τους και τη βάση τους σε καλή κατάσταση. Έτσι, προκύπτει ότι η μια σεισμική διέγερση για να ανατρέπει τους κίονες της περίπτωσης του ναού πρέπει να παρουσιάζει, τουλάχιστον, μέγιστη εδαφική ταχύτητα 95.1 cm/sec (± 28.6 cm/sec) ή μέγιστη εδαφική μετατόπιση 13.2 cm (± 2.51 cm) (Πίν. 4). Για να διατυπωθεί εκτίμηση για το τι επίδραση μπορούν να επιφέρουν στις σύγχρονες κατασκευές σεισμικά επίπεδα παρόμοια με αυτά που προέκυψαν ότι ανατρέπουν τους κίονες του ναού, αναφέρεται ότι σύμφωνα με

σχετική μελέτη για τον ελλαδικό χώρο (Koliopoulos et al., 1998), σεισμικά συμβάντα με μέγιστη εδαφική ταχύτητα μεγαλύτερη από 75 cm/sec προκαλούν βλάβες ΙΧ της κλίμακας Modified Mercalli.

Αναφέρεται, επίσης, ότι ο Κ. Παπαντωνόπουλος (1995) χρησιμοποιώντας αναλυτικό κριτήριο ανατροπής στέρεου σώματος που διεγείρεται από σεισμικές διεγέρσεις, κριτήριο που χρησιμοποιεί ως παραμέτρους την εδαφική ταχύτητα και τη μετατόπιση (Ishiyama et al., 1982), κατέληξε ότι μονόλιθος κίονας που διαθέτει διαστάσεις όμοιες με τις τυπικές των κίωνων της περίπτωσης του μνημείου ανατρέπεται για κατώτατα όρια μέγιστης εδαφικής ταχύτητας 63.0 cm/sec και μέγιστης εδαφικής μετατόπισης 20.0 cm. Το ότι είναι συγκρίσιμα αυτά τα μεγέθη (πολύ περισσότερο βέβαια για την κρίσιμη μέγιστη εδαφική ταχύτητα) με τα αντίστοιχα που προέκυψαν από την παρούσα αριθμητική εργασία, αποτελεί ένδειξη για το ότι είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί για μία πρώτη προσεγγιστική εκτίμηση του ορίου ανατροπής ενός πολυσπόνδου κίονα η σχετικά απλή αναλυτική επίλυση του ισοδύναμου προς αυτόν μονόλιθου –εκτίμηση που έχει εξαχθεί και από προγενέστερη αριθμητική εργασία (Psycharis et al., 2000). Από τα προηγούμενα προκύπτει η παρατήρηση ότι οι κίονες του μνημείου θα διέθεταν μεγάλη αντοχή έναντι ανατροπής στις σεισμικές δράσεις και εάν ήσαν μονοσπόνδυλοι, η οποία ενισχύεται και από το γεγονός ότι επτά κίονες του αρχαϊκού ναού του Απόλλωνα της Κορίνθου, που είναι μονοσπόνδυλοι και με κοντινές διαστάσεις και λυγηρότητα μ' αυτές των κίωνων του ναού του Επικούριου Απόλλωνα, παραμένουν ιστάμενοι μέχρι σήμερα παρά το ότι ευρίσκονται σε περιοχή με ιδιαίτερα βεβαρημένο σεισμικό παρελθόν.

Η διερεύνηση της επιρροής της απόκλισης από την κατακόρυφο στην ευστάθεια του κίονα KB2 κατέδειξε σημαντική υποβίβαση της αντισεισμικής ικανότητας του προσομοιώματος του κεκλιμένου κίονα (Σχήμα 19), συνηγορώντας και αυτή στο ότι οι κλίσεις των κίωνων στην υπάρχουσα κατάσταση του μνημείου είναι σημαντικά επιβαρυντικές στην ευστάθειά τους. Ενδεικτικό είναι ότι για τη μεγαλύτερη τιμή απόκλισης που ελέγχθηκε στην παρούσα εργασία, 2.5 μοίρες, η οποία είναι μάλιστα μικρότερη (κοντινή πάντως) από τη μέγιστη καταγεγραμμένη στο περιστύλιο του ναού, η μείωση στην ευστάθεια του προσομοιώματος του κίονα προσέγγισε το 50%. Διαφάνηκε, επίσης, από τα αριθμητικά αποτελέσματα (κυρίως στις επιλύσεις με τη σεισμική καταγραφή της Αθήνας) ότι όσο μεγαλώνει η απόκλιση από την κατακόρυφο του κίονα τόσο αυξάνεται ο ρυθμός με τον οποίο μειώνεται η αντισεισμική ικανότητά του.

Η τελευταία διερεύνηση, που έλαβε χώρα στα πλαίσια της παρούσας μελέτης, είναι σχετική με το πόσο μεταβάλλεται η σεισμική απόκριση του κίονα KB2 από την ύπαρξη μεταξύ αυτού και του σεισμικά διεγειρόμενου υπόβαθρου τεσσάρων στρώσεων λίθων, όπως συμβαίνει στο μνημείο, σε σχέση με την απόκριση που θα είχε ο κίονας αν εδραζόταν απ' ευθείας στη διεγειρόμενη βάση. Με αυτό το σκοπό τα δύο προσομοιώματα του κίονα φορτίστηκαν με τη σεισμική καταγραφή του Αιγίου, πολλαπλασιασμένη με 1.00 και 1.56 και της Έδεσσας με 3.00 και 6.00. Σημειώνεται ότι αυτά τα επίπεδα δυναμικών φορτίσεων αντιστοιχούν στο 37% και 58% του ορίου ανατροπής που προέκυψε από τη διερεύνηση της ευστάθειας του προσομοιώματος του απομονωμένου κίονα με τη χρήση της σεισμικής καταγραφής του Αιγίου, και στο 28% και 56% με την καταγραφή της Έδεσσας. Αν και η διερεύνηση αυτή είναι σχετικά περιορισμένη, τα αποτελέσματά της υποδεικνύουν ότι η ύπαρξη των στρώσεων των

λίθων κάτω από τον κίονα τείνει να περιορίσει το εύρος λικνιστού του και να μειώσει τις παραμένουσες ολισθήσεις του (το πρώτο διαπιστώθηκε μόνο στις αναλύσεις που χρησιμοποιήθηκε η σεισμική καταγραφή της Έδεσσας). Το γεγονός αυτό μπορεί να αποδοθεί στην επιπρόσθετη κατανάλωση της εισαγομένης ενέργειας που λαμβάνει χώρα στις διεπιφάνειες των υποκείμενων λίθων του κίονα, λόγω των συγκρούσεων και των ολισθήσεων των λίθων (παρατήρηση που επιβεβαιώνεται από τις εντάσεις που εμφανίστηκαν στα συνδετήρια στοιχεία τους, Πίν. 5). Άρα, έμμεσα, μπορεί να εξαχθεί η εκτίμηση ότι το προσομοίωμα του κίονα που περιλαμβάνει και τους λίθους της κρηπίδας και της ευθυντηρίας (το οποίο είναι το πιο αντιπροσωπευτικό της κατάστασης του κίονα στο μνημείο) διαθέτει παρόμοιο, ή μεγαλύτερο, όριο σεισμικής κατάρρευσης με το όριο του απλού προσομοιώματος του κίονα.

Η τελευταία εκτίμηση επιτρέπει να χρησιμοποιηθούν τα στοιχεία, που προέκυψαν από τις προηγούμενες αριθμητικές διερευνήσεις για να γίνει αποτίμηση του σεισμικού κινδύνου κατάρρευσης των κίωνων της περίπτωσης του ναού στην κατάσταση που θα περιέλθουν μετά το πέρας των εργασιών αποκατάστασης του μνημείου, υπό την προϋπόθεση ότι, για λόγους απλοποίησης του προβλήματος, η επιρροή της αποκαταστημένης θεμελίωσης στην απόκριση της ανωδομής του ναού θα θεωρηθεί αμελητέα και η επίδραση της σύζευξης των κίωνων με τα επιστύλια όχι επιβαρυντική στην ευστάθειά τους. Η αξιοπιστία της πρώτης θεώρησης προκύπτει όχι μόνο από τα μέτρα που λαμβάνονται για την ενίσχυση της θεμελίωσης του ναού (Papadopoulos, 2008), αλλά και από το γεγονός ότι το αποδιοργανωμένο από αιώνες, ανομοιόμορφου ύψους, δυτικό θεμέλιο δε συνέβαλλε ώστε κάποιος σεισμός της περιοχής να προκαλέσει εκτεταμένη κατάρρευση στο μνημείο. Σε ότι αφορά τη δεύτερη θεώρηση υπάρχουν προγενέστερες αριθμητικές μελέτες (Psycharis et al., 2000), (Ψυχάρης κ.α., 2005) που έχουν καταδείξει ότι η σύζευξη κίωνων με επιστύλιο δεν μεταβάλλει ουσιαστικά την ευστάθειά τους.

Έτσι, με τη χρήση εμπειρικών σχέσεων απόσβεσης της μέγιστης εδαφικής ταχύτητας και μετατόπισης επιφανειακών σεισμών που έχουν διατυπωθεί για τον ελλαδικό χώρο (Scarlatoudis et al., 2003), για πιθανότητα κατάρρευσης 50%, και για παραμέτρους κρίσιμης διέγερσης $PGV=95.1$ cm/sec ή $PGD=13.2$ cm (Πίν. 4) εξάγεται ότι οι κίονες του ναού θα καταρρεύσουν εάν λάβει χώρα επιφανειακός σεισμός με επίκεντρο σε απόσταση από το μνημείο 5 km και με μέγεθος πολύ μεγαλύτερο από $M=7.0$. Από τα γνωστά στοιχεία για τη σεισμικότητα της περιοχής του ναού (Σχ. 2) διαπιστώνεται ότι σεισμικά συμβάντα τόσο μεγάλης έντασης δεν έχουν καταγραφεί σε μικρές επικεντρικές από το ναό αποστάσεις· αντίθετα, οι γνωστοί κοντινοί σεισμοί κυμαίνονται σε επίπεδα αρκετά χαμηλότερα ($M\approx 6.0$). Κατά συνέπεια, μπορεί να διατυπωθεί ότι μετά την ολοκλήρωση των εργασιών αποκατάστασης του μνημείου και την επαναδημιουργία των προϋποθέσεων για την ιδιαίτερα μεγάλη ευστάθεια των κίωνων (με την ενίσχυση της θεμελίωσης, την αποκατάσταση της ακεραιότητας και της σύνδεσης των λίθων της κρηπίδας και την επαναφορά των κίωνων στην κατακόρυφη στάση) ο κίνδυνος να ανατραπούν κίονες από σεισμικό συμβάν θα είναι ιδιαίτερα περιορισμένος. Η αξιοπιστία αυτού του συμπεράσματος υποστηρίζεται, φυσικά, και από το γεγονός ότι σχεδόν το σύνολο του περιστευλίου του ναού παραμένει ιστάμενο είκοσι πέντε αιώνες από τότε που κατασκευάστηκε.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Παρά την ευαισθησία του φαινομένου της σεισμικής απόκρισης των πολυσπόνδουλων κίονων και τις αναγκαίες, λόγω της πολυπλοκότητας του θέματος, προσεγγιστικές και απλουστευτικές παραδοχές που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια των αριθμητικών επιλύσεων της παρούσας εργασίας για την προσομοίωση των κίονων του ναού του Επικούριου Απόλλωνα, διαφάνηκε από τα αποτελέσματα ότι το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιήθηκε δύναται να προβλέψει με αξιοπιστία τη δυναμική συμπεριφορά των κίονων του μνημείου. Αυτό υποστηρίζεται όχι μόνο από το ότι τα αριθμητικά αποτελέσματα που προέκυψαν συμφωνούν με αντίστοιχα στοιχεία από προγενέστερες σχετικές πειραματικές και αριθμητικές εργασίες, αλλά και από το ότι δεν έρχονται σε αντίθεση με την κατάσταση στην οποία διατηρούνται οι κίονες του ναού. Με βάση το συμπέρασμα αυτό μπορούν να διατυπωθούν οι παρακάτω εκτιμήσεις, οι οποίες προέκυψαν από τα αποτελέσματα των αριθμητικών διερευνήσεων, σχετικές με τη σεισμική απόκριση των κίονων του περιστευλίου του ναού των Βασσών.

Οι κίονες της περίπτωσης του ναού, εφόσον διατηρούν τους σπονδύλους τους χωρίς επικίνδυνες ρωγμές και με άθικτες εδράσεις, βρίσκονται σε κατακόρυφη στάση και εδράζονται σε δύσκαμπτη βάση, δύνανται να αντιστέκονται σε σημαντικές σεισμικές δράσεις, μεγαλύτερες από τις δράσεις που εφαρμόζουν σε αυτούς οι συνήθεις σεισμικές δονήσεις της περιοχής. Κατά συνέπεια, μετά την ολοκλήρωση των εργασιών αποκατάστασης του μνημείου και την εξασφάλιση των προϋποθέσεων ευστάθειας που αναφέρθηκαν προηγουμένως, ο κίνδυνος κατάρρευσης από σεισμικά αίτια που θα απειλεί τους κίονες θα είναι μικρός.

Ο διαφορετικός αριθμός των σπονδύλων, που διαθέτουν οι κίονες του ναού, δεν επιφέρει ουσιαστική διαφοροποίηση στην αντισεισμική ικανότητά τους. Οι αποκλίσεις από την κατακόρυφο που παρουσιάζουν οι κίονες στην υπάρχουσα κατάσταση του μνημείου επιδρούν επιβαρυντικά στη σεισμική αντοχή τους. Η μείωση στο όριο ανατροπής των κίονων προσεγγίζει στις περιπτώσεις με τις μεγαλύτερες τιμές αποκλίσεων, περίπου, το 50% του ορίου που θα διέθεταν ιστάμενοι κατακόρυφα.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Οι συγγραφείς ευχαριστούν θερμά τον Κ. Παπαντωνόπουλο, δρ. πολιτικό μηχανικό, για τη διάθεση των πειραματικών δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν στον έλεγχο της αξιοπιστίας των αριθμητικών αποτελεσμάτων.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

ABAQUS Version 6.3., (2002), *ABAQUS Theory Manual*, Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc.
Ishiyama Y., (1982), "Motions of rigid bodies and criteria for overturning by earthquake excitations", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 10, pp. 635-650.
Koliopoulos P.K., Margaris B.N, and Klimis N.S., (1998), "Duration and energy characteristics of Greek string motion records", *Journal of Earthquake Engineering*, 2, pp. 391-417.
Mouzakis H.P., Psycharis I.N., Papastamatiou D.Y., Carydis P.G., Papantonopoulos C., and Zambas C., (2002), "Experimental investigation of the earthquake response of a model of

- a marble classical column”, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 31, pp. 1681-1698.
- Papadopoulos K., (2007), “The restoration study of the connections between the stone-blocks in the steps of the temple of Apollo Epikourios”, *Proc. 5th intern. symp. Structural analysis of historical constructions, New Delhi, 6-8 November 2006*, P.B. Lourenço, P. Roca C. Modena & S. Agrawal (eds), Macmillan, New Delhi, pp. 1389-1396.
- Papadopoulos K., (2008), “The restoration of the foundation in the north side of the temple of Apollo Epikourios”, *Proc. 6th intern. symp. Structural analysis of historical constructions, Bath, 2-4 July 2008* (accepted for publication).
- Papazachos B.C., Comninakis P.E., Karakaisis G.F., Karakostas B.G., Papaioannou Ch.A., Papazachos C.B., and Scordilis E.M., (2000), *A catalogue of earthquakes in Greece and surrounding area for the period 550BC-1999*, Publ. Geoph. Lab., Univ. of Thessaloniki.
- Παπαντωνόπουλος Κ., (1995), *Ναός Επικουρίου Απόλλωνος Βασσών. Μελέτη δομικής αποκατάστασης*, ΥΠ.ΠΟ.-Ε.Σ.Ν.Ε.Α., Αθήνα.
- Παπαντωνόπουλος Κ., (2000), *Αρχαία μνημεία υπό σεισμική δράση*, Διδακτορική Διατριβή, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π., Αθήνα.
- Papantonopoulos C., Psycharis I.N., Papastamatiou D.Y., Lemos J.V., and Mouzakis H.P., (2002), “Numerical prediction of the earthquake response of classical columns using the distinct element method”, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 31 pp. 1699-1717.
- Παπασταματίου Δ., Ψυχάρης Ι., και Ηλίας Δ., (1990), *Μελέτη στατικής επάρκειας ναού Επικούριου Απόλλωνα*, Αθήνα.
- Psycharis I.N., Papastamatiou D.Y., and Alexandris A.P., (2000), “Parametric investigation of the stability of classical columns under harmonic and earthquake excitations”, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 29, pp. 1093-1109.
- Psycharis I.N., Lemos J.V., Papastamatiou D.Y., Zambas C., and Papantonopoulos C., (2003), “Numerical study of the seismic behavior of a part of the Parthenon Pronaos”, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 32, pp. 2063-2084.
- Σβολόπουλος Δ., (1995), *Ναός Επικουρίου Απόλλωνος Βασσών. Αρχιτεκτονική μελέτη*, ΥΠ.ΠΟ.-Ε.Σ.Ν.Ε.Α., Αθήνα.
- Scarlattoudis A.A., Papazachos C.B., Margaris B.N., Theodulidis N., Papaioannou Ch., Kalogeras I., Scordilis E.M., Karakostas V., (2003), “Empirical peak ground-motion predictive relations for shallow earthquakes in Greece”, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 93(6), pp. 2591-2603.
- Ψυχάρης Ι., Κορρές Μ., Παπαντωνόπουλος Κ., Ταφλαμπάς Ι., Σουάνης Σ., και Lemos J.V., (2005), «Μελέτη της σεισμικής συμπεριφοράς των στύλων του Ολυμπίου Διός – Εφαρμογή στη διερεύνηση της σεισμικής ιστορίας της Αθήνας», *Έκθεση Νο NTUA/LEE-05/01*, Εργαστήριο Αντισεισμικής Τεχνολογίας Ε.Μ.Π., Αθήνα.