

Σεισμική Απόκριση Σπονδυλωτών Κιόνων. Ρόλος του Συστήματος Πόλου – Εμπολίου

**Ιωάννης Ε. Καββαδίας
Λάζαρος Κ. Βασιλειάδης**

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία πραγματοποιείται μία αριθμητική διερεύνηση της σεισμικής απόκρισης σπονδυλωτών κιόνων και εξετάζεται η επιρροή του συστήματος πόλου-εμπολίου ως μηχανισμός σύνδεσης των σπονδύλων. Η δυναμική απόκριση των συγκεκριμένων κατασκευών αποτελεί ένα έντονα μη γραμμικό πρόβλημα λόγω των φαινομένων ολίσθησης και λικνισμού που παρατηρούνται μεταξύ των επιμέρους δομικών λίθων. Τα αριθμητικά προσομοιώματα κατασκευάστηκαν με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων και πραγματοποιήθηκαν δυναμικές αναλύσεις στον χώρο. Για την διερεύνηση της συνεισφοράς του συστήματος πόλου-εμπολίου μελετήθηκαν τρία είδη σύνδεσης μεταξύ των σπονδύλων, ενώ πραγματοποιήθηκαν και αναλύσεις ισοδύναμου μονολιθικού σώματος για την περαιτέρω σύγκριση των αποτελεσμάτων. Το σύστημα πόλου-εμπολίου προσομοιώθηκε με την εισαγωγή στατικού συντελεστή τριβής στην διεπιφάνεια μεταξύ των σπονδύλων. Από τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν συμπεραίνεται ότι η αστάθεια των σπονδυλωτών κατασκευών επηρεάζεται κυρίως από το συχνοτικό περιεχόμενο των σεισμικών διεγέρσεων. Το σύστημα πόλου –εμπολίου ενώ για μικρής έντασης διεγέρσεις επιδρά ευνοϊκά στην απόκριση των σπονδυλωτών κιόνων διότι οι παρατηρούμενες σχετικές μετατοπίσεις μεταξύ των σπονδύλων είναι μικρής κλίμακας, σε διεγέρσεις όμως μεγάλης έντασης η κατασκευή αποκρίνεται μονολιθικά.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: Σπονδυλωτοί Κίονες, Σεισμική Απόκριση, Δυναμική Ανάλυση

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τις τελευταίες δεκαετίες η δυναμική απόκριση μνημειακών κατασκευών απέκτησε ιδιαίτερο επιστημονικό ενδιαφέρον. Σε προέχουσα θέση βρίσκεται η αποτίμηση κατασκευών της Κλασσικής και Ελληνιστικής εποχής όπως είναι οι σπονδυλωτοί κίονες. Η σεισμική απόκριση αυτών των κατασκευών διαφέρει σημαντικά από αυτήν των σύγχρονων κατασκευών, οι οποίες αποκρίνονται ανελαστικά λόγω πλαστικοποίησης των δομικών στοιχείων. Η δυναμική απόκριση των κιόνων τοποθετείται στη γενική κατηγορία της δυναμικής απόκρισης των δύσκαμπτων σωμάτων. Συγκεκριμένα, η απόκριση τέτοιων κατασκευών χαρακτηρίζεται κυρίως από την ολίσθηση και τον λικνισμό των σπονδύλων, δημιουργώντας έναν σύνθετο μηχανισμό απορρόφησης ενέργειας. Το σύστημα πόλου-εμπολίου το οποίο ήταν κατασκευασμένο από ξύλο ή από σίδηρο είναι ο μοναδικός μηχανισμός σύνδεσης μεταξύ των διαδοχικών σπονδύλων μαζί με την ταυτόχρονη ύπαρξη της τριβής που δημιουργείται στην διεπιφάνεια.

Η δυναμική απόκριση και αποτίμηση σπονδυλωτών κιόνων έχει εξεταστεί μέχρι προσφάτως και πειραματικά αλλά κυρίως αναλυτικά από σημαντικούς ερευνητές. Πειραματικά έχει διερευνηθεί η σεισμική απόκριση σπονδυλωτού κίονα υπό κλίμακα (Mouzakis et al, 2002). Η δυναμική απόκριση δύσκαμπτων σωμάτων είχε απασχολήσει από το παρελθόν τους ερευνητές (Housner, 1963)(Sinopoli, 1989). Έχουν παρουσιαστεί αποτελέσματα από αναλύσεις με λογισμικά διακριτών στοιχείων στο επίπεδο για την διερεύνηση της απόκρισης σπονδυλωτών κιόνων του ναού του Επικούριου Απόλλωνα στις Βάσσες και του ναού του Δία στη Νεμέα (Psycharis et al, 2000) (Dimitri et al, 2011), όπως και αναλύσεις στον χώρο για τον Πρόναο του Παρθενώνα (Psycharis et al, 2003). Η απόκριση σπονδυλωτών και μονολιθικών διακριτών σωμάτων υπό αρμονικές και σεισμικές διεγέρσεις όπως και οι διαφορικές εξισώσεις κίνησης που διέπουν τις συγκεκριμένες κατασκευές έχει επίσης μελετηθεί διεξοδικά (Konstantinidis & Makris, 2005). Επιπροσθέτως έχει παρουσιαστεί και εξειδικευμένο λογισμικό με δυνατότητες προσομοίωσης κιόνων (Papaloizou & Komodromos, 2009).

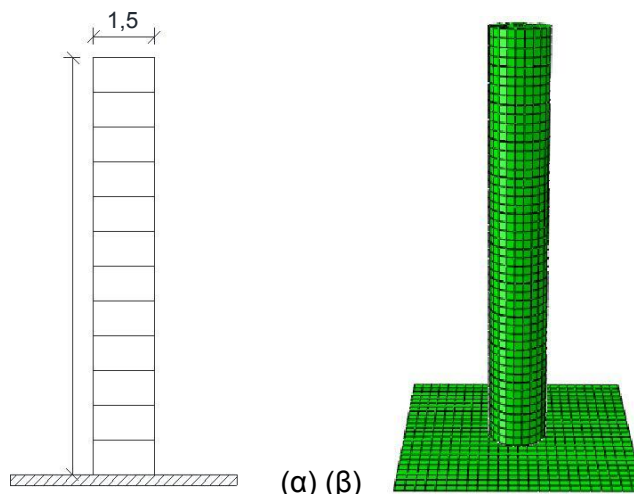
Τα βασικά συμπεράσματα των παραπάνω εργασιών συνοψίζονται στα εξής:

- Τα συστήματα των σπονδυλωτών κατασκευών δεν παρουσιάζουν φυσικές ιδιομορφές με την κλασική έννοια του όρου, καθώς ο τρόπος απόκρισής τους είναι συνάρτηση μεταβλητών όπως της διέγερσης στην οποία υπόκεινται, η οποία και καθορίζει τη μεταβολή της δυσκαμψίας με το χρόνο.
- Η απόκρισή τους αποτελεί ένα σύνθετο πρόβλημα με σημαντικές γεωμετρικές και υλικές μη γραμμικότητες.
- Η συμπεριφορά τους είναι ιδιαίτερα ευαίσθητη σε οποιαδήποτε αλλαγή τόσο της γεωμετρίας του μοντέλου, όσο των παραμέτρων της διέγερσης.
- Κατά την δυναμική διέγερση παρατηρείται κατάσταση καθαρής ολίσθησης, καθαρού λικνισμού αλλά και συζευγμένης ολίσθησης – λικνισμού μεταξύ διαδοχικών σπονδύλων.
- Ο αναλύσεις σε δύο διαστάσεις δίνουν πιο συντηρητικά αποτελέσματα επειδή δεν υπολογίζουν τις σημαντικές εκτός επιπέδου σεισμικής διέγερσης μετατοπίσεις.
- Το συχνотικό περιεχόμενο των εδαφικών επιταχύνσεων επηρεάζει κυρίως την αστάθεια των κατασκευών. Συγκεκριμένα υπό διεγέρσεις μεγάλης περιόδου παρατηρείται έντονη αστάθεια και πιθανή κατάρρευση.
- Το σύστημα πόλου – εμπολίου κατασκευασμένο από ξύλο είχε περιορισμένη διατμητική αντοχή δεν προοριζόταν να παρέχει διατμητική σύνδεση ώστε να εξασφαλίζει την μονολιθικά απόκριση του κίονα.

Ο στόχος της παρούσας εργασίας είναι η αριθμητική διερεύνηση της δυναμικής απόκρισης των κίωνων και η αποσαφήνιση της συνεισφοράς του συστήματος πόλου – εμπολίου, χαρακτηριστικό που σχετίζεται άμεσα με τη χρήση του σε αναστηλωτικές εργασίες που πραγματοποιούνται σε αρχαίους ναούς. Η μελέτη των παραπάνω πραγματοποιείται με την ανάλυση υπό αρμονικές ταλαντώσεις αλλά και με την χρήση χρονοϊστορίας σεισμικής επιτάχυνσης.

2. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

Η προσομοίωση πραγματοποιήθηκε με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων και οι κίνες προσομοιώθηκαν ως τρισδιάστατα παραμορφώσιμα σώματα με ιδιαίτερη προσοχή να δίνεται στην προσομοίωση της διεπιφάνειας. Μελετήθηκε η απόκριση ενός πρότυπου σπονδυλωτού κίονα με γεωμετρικά χαρακτηριστικά όπως εμφανίζονται στην εικόνα (1) και αποτελείται από δώδεκα σπονδύλους. Η επιλογή των διαστάσεων και η διακριτοποίηση των σπονδύλων πραγματοποιήθηκε έτσι ώστε το πρότυπο μοντέλο να έρχεται σε συμφωνία με διατάξεις και κατασκευαστικές αναλογίες της εποχής.



Εικ. 1: (α) Γεωμετρικά χαρακτηριστικά κίονα, (β) Μοντελοποίηση στο λογισμικό

Πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις με τρεις διαφορετικές περιπτώσεις στην θεώρηση της διεπιφάνειας. Στην πρώτη περίπτωση μελετήθηκε η απλή έδραση μεταξύ των σπονδύλων, στην δεύτερη η ύπαρξη ξύλινου πόλου και στην τρίτη η ύπαρξη πόλου από τιτάνιο. Επίσης μελετήθηκε και η απόκριση του μονολιθικού με ισοδύναμη γεωμετρία κίονα.

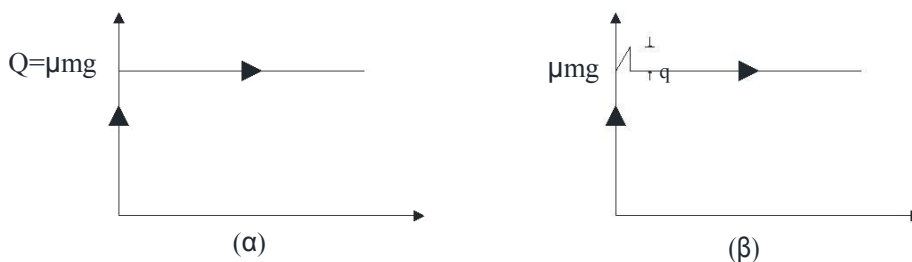
Ο δυναμικός συντελεστής τριβής μεταξύ των διαδοχικών σπονδύλων λαμβάνεται ίσος με $\mu_k = 0,7$ (Psycharis et al, 2000) (Papantonopoulos et al, 2002). Οι διαστάσεις του συστήματος πόλου–εμπολίου διαφοροποιούνται ανάλογα με το μέγεθος της κατασκευής. Συνήθως ήταν κατασκευασμένο από ξύλο πεύκου με διατμητική αντοχή $\tau_w = 0,7 \text{ kN/cm}^2$ και με μέση διάμετρο $d = 4 \text{ cm}$ (Ορλάνδος, 1958), οπότε η αντοχή του πόλου είναι $q = (\pi d^2/4) \tau_w \approx 9 \text{ kN}$. Κατασκευαστικά ο πόλος ήταν στερεωμένος στον πάνω σπόνδυλο και κατά την ανέγερση και τοποθέτηση στον υποκείμενο του περιστρεφόταν για την καλύτερη συναρμολόγηση τους. Πραγματικός ρόλος ύπαρξης του συστήματος αυτός ήταν για να εξασφαλιστεί η βέλτιστη τοποθέτηση του ενός σπονδύλου πάνω στον άλλον μέσω της δυνατότητας περιστροφής που παρείχε το σύστημα και όχι για να μεταφέρει διατμητικές δυνάμεις από σπόνδυλο σε σπόνδυλο. Στις αναστηλωτικές εργασίες τοποθετείται σύστημα κατασκευασμένο από τιτάνιο διατμητικής αντοχής $\tau_w = 31 \text{ kN/cm}^2$. Στη συγκεκριμένη εργασία μελετήθηκε σύστημα τιτανίου με διάμετρο $d = 1 \text{ cm}$ με τελική αντοχή $q \approx 24 \text{ kN}$. Προκειμένου να μην αυξηθεί σημαντικά ο υπολογιστικός χρόνος, η ύπαρξη του συστήματος πόλου–εμπολίου λαμβάνεται υπόψη προσεγγιστικά με την εισαγωγή στατικού συντελεστή τριβής (Konstantinidis & Makris, 2005), υπολογισμένου με την παρακάτω σχέση:

$$\hat{\mu}_s = \frac{\mu_s w(z) + q}{w(z)} \quad (1)$$

Όπου $w(z)$ είναι το βάρος της κολόνας στη στάθμη της διεπιφάνειας που εισάγεται ο συντελεστής και μ_s ο αρχικός στατικός συντελεστής τριβής. Στον πίνακα (1) φαίνονται οι στατικοί συντελεστές τριβής ανά διεπιφάνεια, από την βάση προς την κορυφή. Η μετάβαση από τον στατικό συντελεστή τριβής στον δυναμικό πραγματοποιείται ακαριαία. Στην εικόνα (2) φαίνεται το μοντέλο προσομοίωσης της διεπιφάνειας (α) χωρίς και (β) με σύστημα πόλου –εμπολίου.

Πιν. 1: Στατικοί συντελεστές τριβής $\hat{\mu}_s$ για τις περιπτώσεις ξύλινου πόλου και πόλου από τιτάνιο

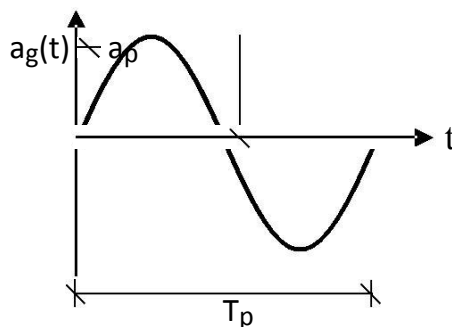
Διεπιφάνεια	Υπερκείμενο Βάρος (kN)	Ξύλινος Πόλος	Πόλος Τιτανίου
1	29	1.10	1.63
2	59	0.95	1.21
3	88	0.90	1.08
4	118	0.87	1.01
5	147	0.86	0.97
6	177	0.85	0.94
7	206	0.84	0.92
8	235	0.83	0.90
9	265	0.83	0.89
10	294	0.83	0.88
11	324	0.83	0.88
12	353	0.82	0.87



Εικ. 2: (α) Μοντέλο τριβής Mohr – Coulomb, (β) Μοντέλο συνεισφοράς του πόλου στην διατμητική αντίσταση.

3. ΔΙΕΓΕΡΣΕΙΣ

Πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις χρονοϊστορίας με αρμονικές διεγέρσεις και με διεγέρσεις εδαφικών επιταχύνσεων. Το μοντέλο υποβλήθηκε σε αρμονικές διεγέρσεις ημιτονοειδούς μορφής ενός κύκλου με εύρος πλάτους του κύματος $a_p = 0.1-12g$ και περίοδος κύματος με εύρος $T_p = 0.25 - 2s$ εικόνα (3).

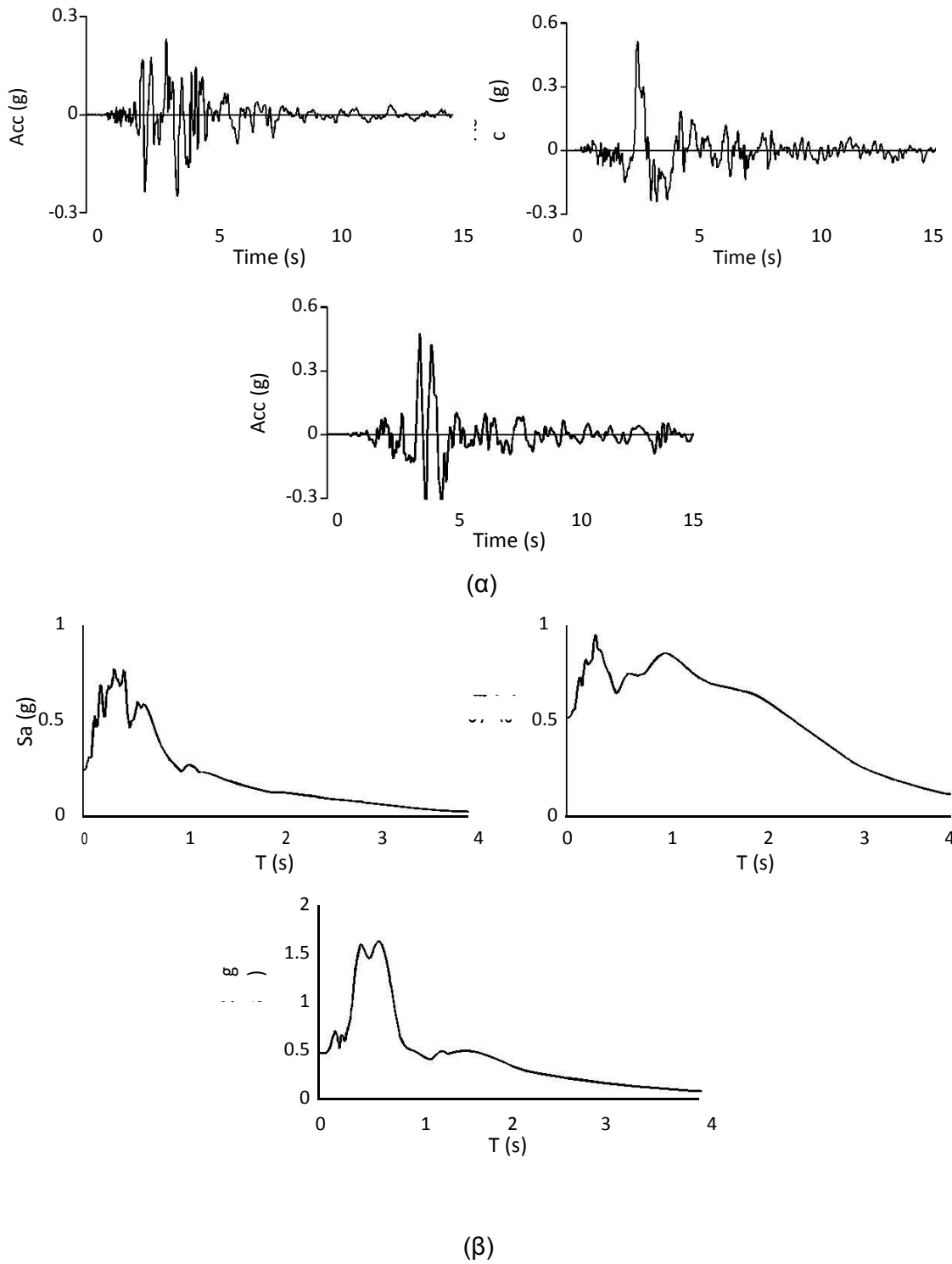


Εικ. 3: Παλμός ημιτονοειδούς μορφής.

Ο σπονδυλωτός κίονας χωρίς σύστημα πόλου εμπολίου υπόκειται σε αρμονικές διεγέρσεις. Από αυτές τις αναλύσεις προκύπτουν ξεκάθαρα αποτελέσματα για την ευαισθησία που επιδεικνύουν οι κατασκευές αυτές κυρίως λόγω μεταβολής του συχνοτικού περιεχομένου των παλμών. Επίσης πραγματοποιούνται αναλύσεις χρονοϊστορίας με διεγέρσεις εδαφικών κινήσεων. Συγκεκριμένα πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις με την χρήση τριών επιταχυνσιογραφημάτων ισχυρών σεισμικών διεγέρσεων που προκάλεσαν σημαντικές βλάβες στον δομικό πλούτο της εκάστοτε περιοχής. Οι σεισμοί που επιλέχθηκαν είναι οι εξής:

- Καλαμάτα 13-09-1986, $M_s=6.2$, Station: ITSAK 99999 Kalamata
- Erzincan 13-03-1992, $M_s=6.9$ Station: 95 Erzincan
- Parkfield 28-06-1966, $M_s=6.19$, Station: CDMG 1013 Cholame - Shandon Array #2

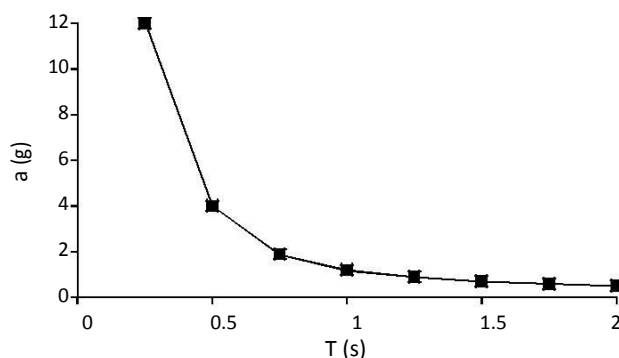
Η βασική τους διαφορά είναι εμφανής από τα διαγράμματα των αντίστοιχων φασματικών επιταχύνσεων. Στην περίπτωση του σεισμού της Καλαμάτας οι μεγάλες φασματικές επιταχύνσεις εμφανίζονται σε μικρές τιμές περιόδου ταλάντωσης ενώ στην περίπτωση του σεισμού του Erzincan οι μεγάλες επιταχύνσεις εμφανίζονται σε ευρύτερο φάσμα περιόδων. Ο σεισμός του Parkfield παρουσιάζει πολύ μεγάλες φασματικές επιταχύνσεις σε τιμές ιδιοπεριόδου $0.3s < T < 1s$ ενώ και για τιμές ιδιοπεριόδου $T < 2s$ οι φασματικές επιταχύνσεις είναι της τάξης των $0.4 - 0.5g$. Στην εικόνα (4) εμφανίζονται (α) οι χρονοϊστορίες και (β) τα φάσματα επιταχύνσεων των σεισμικών διεγέρσεων.



Εικ. 4: (α) Χρονοϊστορίες των σεισμών της Καλαμάτας, του Erzincan και του Parkfield, (β) φάσματα επιταχύνσεων των παραπάνω σεισμών.

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Από την εικόνα (5) είναι εμφανής η ευαισθησία των κίωνων σε διεγέρσεις με μεγάλη περίοδο ταλάντωσης. Διεγέρσεις μικρής περιόδου απαιτούν υπερβολικά μεγάλες τιμές επιτάχυνσης για να προκληθεί κατάρρευση. Το διάγραμμα απαρτίζεται από τους οριακούς συνδυασμούς πλάτους και περιόδου της ημιτονοειδούς διέγερσης κατά τους οποίους παρατηρείται τοπική ή ολική κατάρρευση. Για συνδυασμούς κάτω από την καμπύλη η κατασκευή παραμένει ασφαλής ενώ για συνδυασμούς πάνω από την καμπύλη προκαλείται κατάρρευση. Για μεγάλες τιμές ιδιοπεριόδου ο σπονδυλωτός κίονας αποκρίνεται σαν μονολιθικός. Δηλαδή η κατάρρευση προκαλείται από τον λικνισμό του σώματος από την βάση του χωρίς σχετικές μετατοπίσεις μεταξύ των σπονδύλων. Για μικρές τιμές περιόδου παρατηρούνται φαινόμενα λικνισμού και ολίσθησης μεταξύ των σπονδύλων και προκύπτει τοπική κατάρρευση από τον 5 σπόνδυλο και πάνω. Από την ανάλυση με αρμονική διέγερση ενός κύκλου δεν μπορούμε να συμπεράνουμε την ευεργετική δράση των σχετικών μετατοπίσεων μεταξύ των σπονδύλων λόγω της μικρής χρονικής δράσης του παλμού. Γίνεται όμως αντιληπτή η ευαισθησία των συγκεκριμένων κατασκευών σε διεγέρσεις μεγάλης περιόδου.



Εικ. 5. Οριακή καμπύλη κατάρρευσης ημιτονοειδούς παλμού.

Από τις αναλύσεις ιστορίας που πραγματοποιήθηκαν η αξιολόγηση της συμβολής του συστήματος πόλου-εμπολίου διερευνήθηκε με βάση τα αποτελέσματα της παραμένουσας σχετικής μετατόπισης των σπονδύλων και της στροφής που αναπτύσσουν οι σπόνδυλοι λόγω του λικνισμού τους. Υπό τον σεισμό του Erzincan και στις τρεις περιπτώσεις παρατηρήθηκε κυρίως λικνισμός των κίωνων που συνοδεύτηκε με κατάρρευση. Το γεγονός αυτό τεκμηριώνεται λόγω των μεγάλων τιμών επιταχύνσεων στη περιοχή υψηλών ιδιοπεριόδων που παρατηρείται στο αντίστοιχο φάσμα. Υπό τον σεισμό του Parkfield που εμφανίζει πολύ υψηλές τιμές επιτάχυνσης σε χαμηλές περιόδους ενώ και σε μεγαλύτερες τιμές περιόδων παρουσιάζει σημαντικές τιμές επιταχύνσεων, παρατηρήθηκε ταυτόχρονη ολίσθηση και λικνισμός των σπονδύλων, με τους κίονες τελικά να “επιβιώνουν” με μικρές σχετικές μετατοπίσεις. Τέλος στον σεισμό της Καλαμάτας όπου οι μεγάλες τιμές επιταχύνσεων εμφανίζονται σε μικρές ιδιοπεριόδους παρατηρήθηκε κυρίως ολίσθηση των σπονδύλων και η κατασκευή επέδειξε σημαντική σταθερότητα. Τα αποτελέσματα έρχονται αρχικά σε συμφωνία με αυτά των αναλύσεων με αρμονικές ταλαντώσεις.

Στους πίνακες (2) και (3) παρουσιάζονται οι παραμένουσες σχετικές μετατοπίσεις μεταξύ των διαδοχικών σπονδύλων για τις αναλύσεις ιστορίας με τις διεγέρσεις των σεισμών της Καλαμάτας και του Parkfield αντίστοιχα. Αποτελέσματα παραμένουσών μετατοπίσεων δεν παρουσιάζονται για τον σεισμό του Erzincan αφού η κατάρρευση προέκυψε από τον λικνισμό των σπονδύλων.

Παρατηρούνται παραμένουσες σχετικές μετατοπίσεις εντός επιπέδου έως 40mm. Οι μεγαλύτερες τιμές παρατηρούνται μεταξύ των υψηλότερων σπονδύλων. Ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι, η ύπαρξη συστήματος πόλου-εμπολίου οδηγεί συχνά σε σχετικές μετακινήσεις που υπερβαίνουν αυτές που παρατηρήθηκαν στον αντίστοιχο κίονα χωρίς σύνδεση πόλου-εμπολίου μεταξύ των σπονδύλων. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι ο κίονας που διαθέτει σύστημα πόλου-εμπολίου, ταλαντώνεται μονολιθικά αποκλειστικά κατά τα πρώτα δευτερόλεπτα της σεισμικής διέγερσης, καθώς η μετέπειτα θραύση των πólων σε συγκεκριμένα επίπεδα είναι δυνατό να οδηγήσει σε σημαντικές σχετικές μετακινήσεις στα επίπεδα αυτά. Το γεγονός αυτό ενδεχόμενα θέτει έναν προβληματισμό αναφορικά με τη σκοπιμότητα χρήσης δύσκαμπτων στοιχείων σύνδεσης.

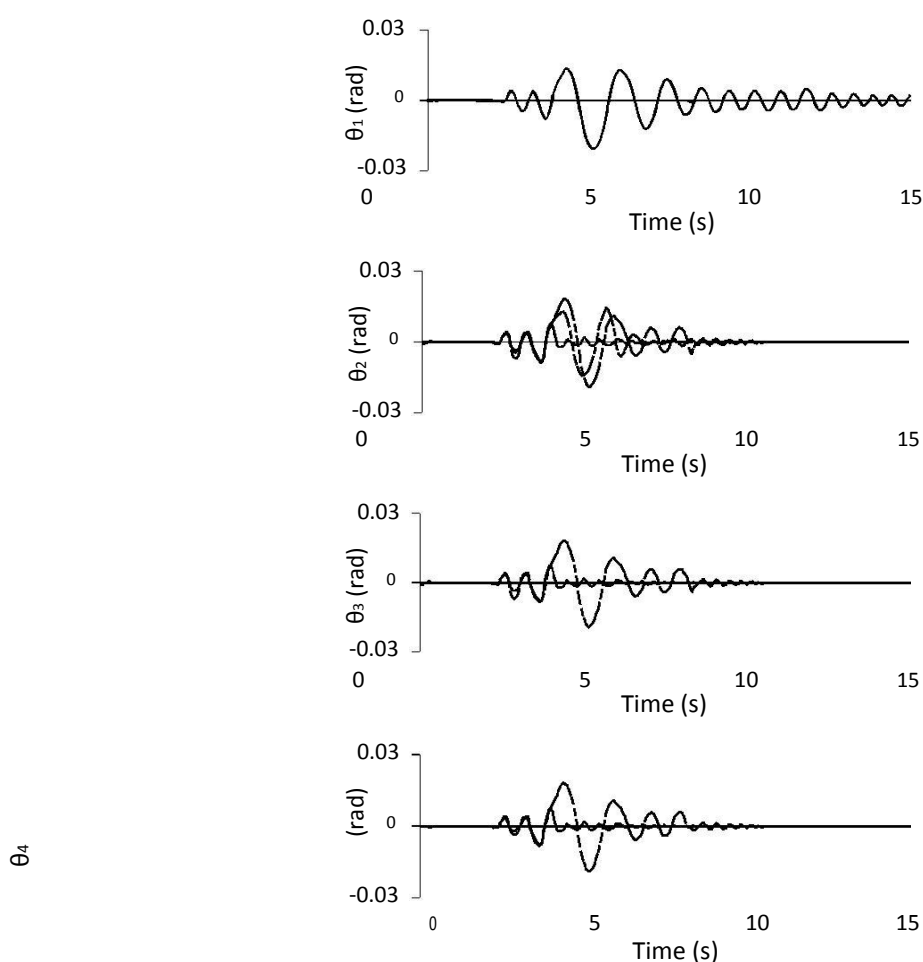
Πιν. 2: Παραμένουσες σχετικές μετατοπίσεις μεταξύ των σπονδύλων (mm) υπό τη διέγερση του σεισμού της Καλαμάτας.

Διεπιφάνεια	Χωρίς θεώρηση συστήματος πόλου - εμπολίου	Με ξύλινο πόλο	Με πόλο τιτανίου
1	0.43	0.04	0.07
2	2.77	7.38	1.90
3	1.51	4.36	20.33
4	4.57	3.30	7.66
5	2.68	1.93	11.63
6	4.66	0.96	1.91
7	4.16	1.72	1.76
8	2.90	0.48	1.91
9	3.50	2.37	2.74
10	2.97	2.59	1.99
11	1.93	1.45	3.51
12	6.75	0.09	1.88

Πιν. 3: Παραμένουσες σχετικές μετατοπίσεις μεταξύ των σπονδύλων (mm) υπό τη διέγερση του σεισμού του Parkfield.

Διεπιφάνεια	Χωρίς θεώρηση συστήματος πόλου - εμπολίου	Με ξύλινο πόλο	Με πόλο τιτανίου
1	6.24181	14.8448	10.92569
2	7.1357	11.72354	12.8413
3	2.1296	4.634	1.8472
4	2.2998	0.2707	1.5925
5	1.4109	2.1619	3.3559
6	5.3381	5.6306	1.0268
7	1.3388	2.9354	3.4009
8	4.2428	3.2432	1.3474
9	1.26847	5.1033	2.4587
10	6.27461	4.6988	8.298
11	9.89732	2.0514	7.9869
12	38.3655	11.5664	12.48381

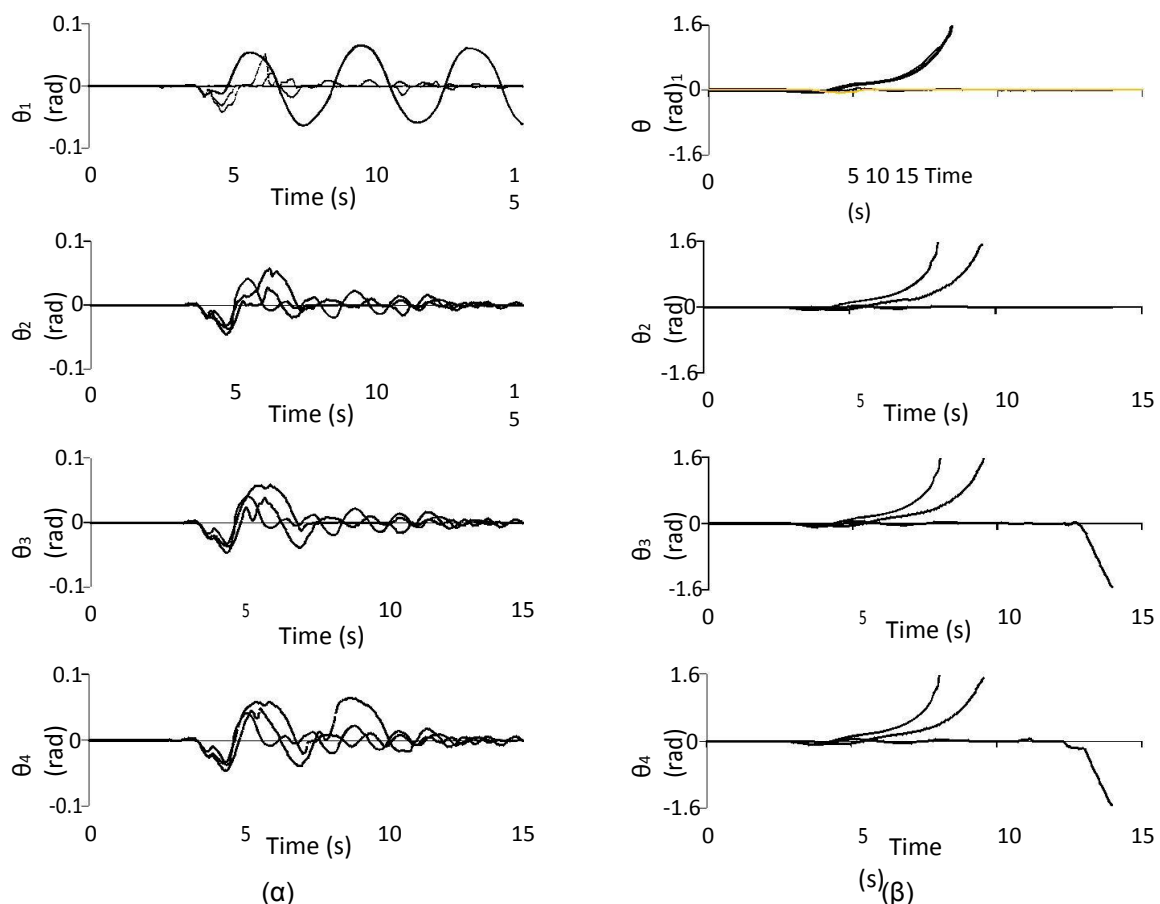
Υπό την διέγερση της Καλαμάτας η απόκριση του κίονα χαρακτηρίζεται κυρίως από την σχετική ολίσθηση των σπονδύλων. Αυτό γίνεται αντιληπτό και από τα αποτελέσματα των στροφών. Στην εικόνα (6) εμφανίζονται οι στρόφες που αναπτύσσουν οι τέσσερις πρώτοι από την βάση σπόνδυλοι. Στο πρώτο διάγραμμα εμφανίζεται με συμπαγή έντονη γραμμή και η λικνιστική απόκριση του μονολιθικού με ισοδύναμη γεωμετρία σπονδύλου. Σε σύγκριση με τον μονολιθικό ο λικνισμός του κατώτερου σπονδύλου στους σπονδυλωτούς κίονες είναι ελάχιστος και γι' αυτό δεν γίνεται ορατός στο διάγραμμα. Με συμπαγή γραμμή παρουσιάζονται οι στρόφες των σπονδύλων χωρίς σύστημα πόλου–εμπολίου, με διακεκομμένη γραμμή των σπονδύλων με ξύλινο πόλο και με εστιγμένη γραμμή των σπονδύλων με πόλο τιτανίου. Από τους υπερκείμενους σπονδύλους παρατηρούμε την πιο έντονη λικνιστική συμπεριφορά των κίωνων με σύστημα πόλου–εμπολίου και ειδικά στην περίπτωση πόλου τιτανίου. Ο λικνισμός στον οποίον παρατηρείται η μέγιστη στρόφη $\max\theta = 0.02 \text{ rad}$, δικαιολογεί και την έντονη ολίσθηση μεταξύ 3ου και 4ου σπονδύλου αφού η εναλλαγή διεύθυνσης λικνισμού επιφέρει ολίσθηση των υπερκείμενων σπονδύλων (Konstantinidis & Makris, 2005).



Εικ. 6: Στρόφες των πρώτων 4^{ων} σπονδύλων από την βάση υπό την διέγερση του σεισμού της Καλαμάτας.

Υπό τις διεγέρσεις του σεισμού του Parkfield και ιδιαίτερα του Erzincan υπερίσχυσε το φαινόμενο του λικνισμού κατά την απόκριση των κίονων. Στην εικόνα (7, α) εμφανίζονται οι στροφές των τεσσάρων πρώτων σπονδύλων από την βάση υπό την διέγερση του Parkfield κατά την οποία δεν προέκυψε κατάρρευση. Συγκρίνοντας τον λικνισμό του μονολιθικού κίονα με τους σπονδυλωτούς παρατηρούμε ότι η ταλάντωση του μονολιθικού κίονα φθίνει με πολύ μικρό ποσοστό, ενώ στην περίπτωση των σπονδυλωτών κίονων η ταλάντωση φθίνει άμεσα μετά το ισχυρό πλήγμα της διέγερσης λόγω της πρόσθετης απορρόφησης ενέργειας που παρατηρείται μέσω της κίνησης μεταξύ των σπονδύλων. Ο έντονος λικνισμός είναι δυνατόν να επιφέρει τοπικές αποδιοργανώσεις στα άκρα των σωμάτων λόγω των κρούσεων κατά την εναλλαγή διεύθυνσης του λικνισμού. Το φαινόμενο αυτό προσθέτει στο πρόβλημα πιθανές γεωμετρικές μη γραμμικότητες οι οποίες σε αυτήν εδώ την εργασία δεν λήφθηκαν υπόψιν. Στις περιπτώσεις ύπαρξης συστήματος πόλου-εμπολίου προκύπτουν μεγαλύτερες στροφές σε σύγκριση με την περίπτωση απλής έδρασης των σπονδύλων. Συγκεκριμένα έντονος λικνισμός παρουσιάζεται από τον τρίτο σπόνδυλο και επάνω στην περίπτωση του ξύλινου πόλου ενώ στην περίπτωση του πόλου τιτανίου μεγάλες στροφές εμφανίζονται από τον τέταρτο σπόνδυλο.

Στην εικόνα (7,β) παρουσιάζονται οι στροφές των σπονδύλων των κίονων που υπόκεινται στην διέγερση του Erzincan. Προέκυψε ανατροπή του κίονα και στις τρεις διαφορετικές θεωρήσεις της διεπιφάνειας όπως επίσης και στην ανάλυση του μονολιθικού κίονα. Η ανατροπή του σπονδυλωτού κίονα χωρίς σύστημα πόλου-εμπολίου συμπίπτει με την απόκριση του μονολιθικού κίονα όπως φαίνεται στο πρώτο διάγραμμα, δηλαδή η ανατροπή εμφανίζεται από τον πρώτο κίονα. Στον κίονα με πόλο τιτανίου η ανατροπή επέρχεται από λικνισμό που παρατηρείται στον δεύτερο σπόνδυλο, ενώ στην περίπτωση ξύλινου πόλου ο κίονας ανατρέπεται από τον τρίτο σπόνδυλο.



Εικ. 7: Στροφές 4ων πρώτων σπονδύλων από την βάση: (α) υπό την διέγερση του Parkfield, (β) υπό τη διέγερση του Erzincan.

Επίσης στις αναλύσεις υπό τις διεγέρσεις των σεισμών του Parkfield και του Erzincan εμφανίστηκαν μεγάλες εκτός επιπέδου μετακινήσεις και για τις τρεις θεωρήσεις. Σημαντικές στροφές γύρω από τον κατακόρυφο άξονα του κίονα παρατηρούνται κυρίως στις περιπτώσεις θεώρησης συστήματος πόλου-εμπολίου. Αυτά τα φαινόμενα εμφανίζονται κυρίως στους σπονδύλους πάνω από τους οποίους λικνίζεται εντονότερα ο κίονας. Στην ανάλυση του κίονα με ξύλινο πόλο υπό την διέγερση του Erzincan η ανατροπή του πραγματοποιείται σε μεταγενέστερο χρόνο και συμπεραίνεται ότι παρουσιάζει μεγαλύτερη ευστάθεια. Γεγονός που δεν ισχύει γιατί η απόκρισή του παρουσίασε σύνθετες κινήσεις στον χώρο με έντονες στροφικές ταλαντώσεις εκτός επιπέδου και περιστροφές γύρω από τον άξονα των σπονδύλων.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, μελετάται το σύνθετο πρόβλημα της δυναμικής συμπεριφοράς των σπονδυλωτών κίωνων. Επίσης διερευνάται η συμβολή του συστήματος πόλου-εμπολίου είτε είναι κατασκευασμένος από ξύλο είτε από τιτάνιο που μας παραπέμπει σε τεχνικές που ακολουθούνται κατά τις αναστηλωτικές εργασίες των κίωνων σήμερα. Μελετήθηκε ένας πρότυπος κίονας ύψους 10μ. και πλάτους 1,5μ., αποτελούμενος από 13 σπονδύλους ο οποίος προσομοιώθηκε με την μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων στον χώρο. Πραγματοποιήθηκαν δυναμικές αναλύσεις τόσο με διεγέρσεις ημιτονοειδούς μορφής όσο και με διεγέρσεις τριών εδαφικών κινήσεων.

Από τις αναλύσεις προέκυψε η ικανοποιητική απόκριση των κίωνων σε συνήθεις σεισμικές δράσεις, δηλαδή σε εδαφικές κινήσεις που εμφανίζουν μεγάλες επιταχύνσεις σε μικρές τιμές περιόδου. Αντίθετα επέδειξε σημαντική αστάθεια σε διεγέρσεις που χαρακτηρίζονται από μεγάλες ιδιοπεριόδους χωρίς να εμφανίζουν μεγάλες επιταχύνσεις. Συμπεραίνουμε ότι η σεισμική απόκριση των σπονδυλωτών κατασκευών επηρεάζεται κυρίως από το φασματικό πεδίο των σεισμικών δράσεων και όχι από την έντασή τους. Από τις αναλύσεις με τις διεγέρσεις επιταχυνσιογραφημάτων εδαφικών κινήσεων επήλθε τοπική ή και ολική κατάρρευση μόνο στην περίπτωση του σεισμού του Erzincan που παρουσιάζει μεγάλες επιταχύνσεις σε μεγάλες τιμές περιόδου όπου η κατασκευή τείνει να αποκριθεί μονολιθικά.

Επίσης ο λικνισμός των σπονδυλωτών κίωνων φθίνει με μεγαλύτερο ρυθμό σε σύγκριση με τον μονολιθικό κίονα ισοδύναμης γεωμετρίας λόγω της πρόσθετης απορρόφησης ενέργειας μέσω της σχετικής κίνησης των σπονδύλων. Διερευνήθηκε επίσης και η επιρροή ύπαρξης του συστήματος πόλου-εμπολίου. Μελετήθηκε η εφαρμογή ξύλινου πόλου αλλά και πόλου τιτανίου. Στις περιπτώσεις θεώρησης πόλου ο λικνισμός των σπονδύλων είναι εντονότερος από αυτόν του κίονα με θεώρηση απλής έδρασης μεταξύ των σπονδύλων.

Σε γενικές γραμμές η ύπαρξη πόλων περιορίζει τις σχετικές παραμένουσες μετατοπίσεις εκτός των περιπτώσεων εμφάνισης λικνισμού σε ορισμένες στάθμες και θραύσης του πόλου που τελικά συνοδεύονται με μεγαλύτερες σχετικές μετατοπίσεις. Επίσης στην περίπτωση θεώρησης πόλου ταυτόχρονα με τον λικνισμό των σπονδύλων εμφανίζονται σημαντικές εκτός επιπέδου σχετικές μετατοπίσεις και περιστροφή γύρω από τον άξονα του σπονδύλου, με αποτέλεσμα η απόκριση τους να γίνεται πιο σύνθετη.

Από την παρούσα αριθμητική προσέγγιση προκύπτει ότι η σεισμική απόκριση των κίωνων είναι ένα πολύπλοκο και πολυπαραμετρικό φυσικό πρόβλημα, το οποίο είναι έντονα μη γραμμικό αφού περιλαμβάνει φαινόμενα σχετικής ολίσθησης και λικνισμού τόσο εντός αλλά και εκτός επιπέδου διέγερσης. Συνεπώς είναι σκόπιμο η αριθμητική προσομοίωση του συστήματος να συνεκτιμά ζητήματα γεωμετρικής και υλικής μη γραμμικότητας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Housner GW (1963). The behavior of inverted pendulum structures during earthquakes. Bulletin of the Seismological Society of America, 53(2), 403-417.
- Sinopoli A (1989). Kinematic approach in the impact problem of rigid bodies. Applied Mechanics Reviews (ASME), 42(11), S233-S244.
- Mouzakis HP, Psycharis IN, Papastamatiou DY, Carydis PG, Papantonopoulos C, Zambas C (2002). Experimental investigation of the earthquake response of a model of a marble classical column. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 31(9), 1681-1698.
- Psycharis IN, Papastamatiou DY, Alexandris AP (2000). Parametric investigation of the stability of classical columns under harmonic and earthquake excitations. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 29(8), 1093-1109.
- Dimitri R, De Lorenzis L, Zavarise G (2012). Numerical study on the dynamic behavior of masonry columns and arches on buttresses with the discrete element method. Engineering Structures, 33, 3172-3188.
- Papantonopoulos C, Psycharis IN, Papastamatiou DY, Lemos JV, and Mouzakis H (2002). Numerical prediction of the earthquake response of classical columns using the Distinct Element Method. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 31, 1699-1717.
- Psycharis IN, Lemos JV, Papastamatiou DY, Zambas C (2003). Numerical study of the seismic behaviour of a part of the Parthenon Pronaos. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 32(13), 2063 - 2084.
- Konstantinidis D and Makris N (2005). Seismic response analysis of multidrum classical columns. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 34(10), 1243-1270.
- Papaloizou L and Komodromos P (2009). Planar investigation of the seismic response of ancient columns and colonnades with epistyles using a custom-made software. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 29, 1437-1454.
- Ορλάνδος ΑΚ (1958). Τα υλικά δομές των Αρχαίων Ελλήνων - ΙΙ. Αρχαιολογική Εταιρεία. Αθήνα.

ΒΙΟΓΡΑΦΙΚΟ ΣΗΜΕΙΩΜΑ

Ιωάννης Ε. Καββαδίας Υποψήφιος Διδάκτορας .Π.Θ με τίτλο διδακτορικής διατριβής «Διερεύνηση της δυναμικής απόκρισης ιστορικών μνημείων και εφαρμογή συστημάτων σεισμικής μόνωσης – Συμβολή στη σεισμική θωράκιση» Κάτοχος Μεταπτυχιακού Διπλώματος με τίτλο «Νέα Υλικά και Τεχνολογίες στο Σχεδιασμό Έργων από Ωπλισμένο Σκυρόδεμα» του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών Π.Θ. Διπλωματούχος Πολιτικός Μηχανικός του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών Δ.Π.Θ. Γνωστικό αντικείμενο: Γραμμικές και μη γραμμικές αναλύσεις φορέων οπλισμένου σκυροδέματος, Αριθμητικές μέθοδοι ανάλυσης κατασκευών, Δυναμικές αναλύσεις ιστορικών κατασκευών. Email: ikavvadi@civil.duth.gr

Λάζαρος Κ. Βασιλειάδης, Δρ. Πολιτικός Μηχανικός Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών .Π.Θ Εργαστήριο Στατικής και Δυναμικής των Κατασκευών Γνωστικό αντικείμενο: Στατική και Δυναμική των Κατασκευών, Αριθμητικές Μέθοδοι Ανάλυσης Κατασκευών Email: lvasilia@civil.duth.gr

Πολυτεχνική Σχολή Ξάνθης, Βας. Σοφίας 12, 67100 Ξάνθη, τηλ: 2541079625