

Αριθμητική μελέτη της σεισμικής συμπεριφοράς σφονδυλωτών κατασκευών

Νικόλαος Αργυρίου
Πολιτικός Μηχανικός ΑΠΘ

Κυριαζής Πιτιλάκης
Καθηγητής, Τομέας Γεωτεχνικής Μηχανικής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών ΑΠΘ

Αναστάσιος Σέξτος
Λέκτορας, Τομέας Επιστήμης και Τεχνολογίας των Κατασκευών, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών ΑΠΘ

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται ιδιαίτερο ενδιαφέρον από την επιστημονική κοινότητα για τα μνημεία της Κλασικής και Ελληνιστικής εποχής τόσο αναφορικά με την προστασία τους όσο και τη σεισμική τους επάρκεια. Γεγονός είναι ότι πολλά από τα μνημεία αυτά έχουν συμπεριφερθεί ικανοποιητικά στις σεισμικές διεγέρσεις στο πέρασμα των αιώνων. Από πρόσφατες αναλυτικές μελέτες ακόμη, προκύπτει ότι η συμπεριφορά τους επιπλέον σε γνωστούς σεισμούς των τελευταίων δεκαετιών έχει αποδειχθεί εξαιρετική. Άλλωστε, είναι εξακριβωμένο πλήρως σε ποιο βαθμό η καταστροφή τους και η μορφή ερειπίου στην οποία βρίσκονται πολλά από αυτά σήμερα οφείλεται στη σεισμική δράση, σε άλλες φυσικές διαδικασίες ή στον ανθρώπινο παράγοντα. Μεταξύ του συνόλου των μνημειακών κατασκευών, οι σφονδυλωτές αποτελούν μια ειδική κατηγορία τόσο από ιστορική, αρχιτεκτονική άποψη όσο και ως προς το δομικό τους σύστημα.

Οι κατασκευές αυτές αποτελούνται από μεγάλα τεμάχια λίθων που τοποθετούνταν το ένα πάνω στο άλλο ύστερα από καλή επεξεργασία, χωρίς τη χρήση συνδετικού κονιάματος. Πρόκειται δηλαδή για 'εν ξηρώ' δόμηση. Συνήθως, για την σύνδεση μεταξύ των σφονδύλων υπήρχε σύστημα πόλου-εμπολίου ενώ γόμφοι και σύνδεσμοι χρησιμοποιούνταν για την σύνδεση των υπολοίπων στοιχείων μεταξύ τους καθώς και στοιχείων με το επιστύλιο. Είναι αξιοσημείωτο ότι η μέθοδος αυτή δημιουργεί έναν ιδιαίτερο μηχανισμό απόσβεσης της σεισμικής ενέργειας μέσω της ολίσθησης, αποκόλλησης και κρούσης μεταξύ των τμημάτων λίθου. Επιπλέον η διατμητική αντίσταση που προσέφερε το σύστημα πόλου εμπολίου πεπερασμένης αντοχής, που υπολείπεται της αντοχής των συνδεόμενων λίθων, αποτελεί αντικείμενο έρευνας, καθώς σχετίζεται άμεσα με την χρήση του στις σύγχρονες αναστηλωτικές εργασίες.

Τα βασικά συμπεράσματα ερευνητών όπως αποτυπώνονται στην ελληνική και διεθνή βιβλιογραφία (βλέπε αναφορές 2-3, 5-8), συνοψίζονται παρακάτω:

- Τα συστήματα των σφονδυλωτών κατασκευών δεν έχουν 'φυσικές ιδιομορφές' με την κλασική έννοια του όρου, καθώς ο τρόπος απόκρισής τους είναι συνάρτηση, μεταξύ άλλων, της διέγερσης στην οποία υπόκεινται, η οποία και καθορίζει τη μεταβολή της δυσκαμψίας με το χρόνο.
- Η συμπεριφορά τους είναι ιδιαίτερα ευαίσθητη σε μικρές αλλαγές τόσο της γεωμετρίας της ίδιας της κατασκευής όσο και των παραμέτρων της διέγερσης, ακριβώς εξαιτίας των γεωμετρικών μη-γραμμικοτήτων του προβλήματος.
- Τα αποτελέσματα από τη μελέτη του φαινομένου σε δύο διαστάσεις είναι μάλλον πιο συντηρητικά σε σχέση με την μελέτη του σε τρεις διαστάσεις.
- Κατά την δυναμική διέγερση παρατηρούνται τρεις κύριοι τρόποι απόκρισης: Κατάσταση καθαρής ολίσθησης μεταξύ δύο διαδοχικών σφονδύλων, κατάσταση καθαρού λικνισμού (αποκόλληση μεταξύ δύο διαδοχικών σφονδύλων) και μια τρίτη κατάσταση συζευγμένης ολίσθησης - λικνισμού.
- Η διέγερση εντός επιπέδου μπορεί, υπό προϋποθέσεις, να προκαλέσει μεγάλες μετακινήσεις των σφονδύλων και στην εκτός επιπέδου διεύθυνση της διέγερσης.
- Το συχνοτικό περιεχόμενο της εδαφικής κίνησης και η γεωμετρία της κατασκευής είναι οι βασικοί παράμετροι ευστάθειας των κατασκευών αυτών. Έτσι, παρατηρείται ότι μεγάλης περιόδου παλμοί και μικρότεροι σε ύψος κίονες (μεταξύ αυτών που έχουν τον ίδιο λόγο γεωμετρικών διαστάσεων βάσης - ύψους) αυξάνουν τις πιθανότητες για κατάρρευση. Παράλληλα, η ένταση της σεισμικής κίνησης σε

σχέση με τον συντελεστή τριβής επηρεάζουν τη δυναμική απόκριση του συστήματος καθώς ενεργοποιούν διαφορετικούς μηχανισμούς σχετικής κίνησης μεταξύ των σφονδύλων.

Με βάση τα παραπάνω, στόχος της παρούσας εργασίας είναι η αριθμητική διερεύνηση της σεισμικής συμπεριφοράς των κίωνων και η εξέταση του πολυπαραμετρικού προβλήματος της ολίσθησης και του λικνισμού μεταξύ των σφονδύλων. Με τη χρήση σύγχρονων εργαλείων ανάλυσης, και τη σύγκριση με αναλυτικές λύσεις και αριθμητικά αποτελέσματα από τη βιβλιογραφία, επιχειρείται η ποσοτική αποτίμηση της σχετικής συνεισφοράς διαφορετικών μηχανισμών ταλάντωσης, καθώς και η αποσαφήνιση του ρόλου του συστήματος πόλου-εμπολίου ως στοιχείο σύνδεσης μεταξύ των σφονδύλων.

2 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΒΑΣΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Προκειμένου να υπάρχει μια συνολική και εποπτική εικόνα των κίωνων των πιο γνωστών μνημείων του ελληνικού χώρου, δημιουργείται μια βάση δεδομένων η οποία θα αποτελέσει την πηγή αναφοράς για όλες τις μελέτες και αριθμητικές αναλύσεις που πραγματοποιούνται. Η βάση αυτή δεδομένων βρίσκεται σε εξέλιξη και περιλαμβάνει μνημεία που χρονολογούνται στην Κλασική και Ελληνιστική εποχή, ενώ αναπτύσσεται σε συνεργασία με το τμήμα Ιστορίας και Αρχαιολογίας του ΑΠΘ (καθ. Μ. Τιβέριο) και το Ταμείο Διαχείρισης Πιστώσεων για την Εκτέλεση Αρχαιολογικών Έργων (Επιτροπή Στερεώσεως και Αναστηλώσεως Μνημείων Ακρόπολης Λίνδου, κ.κ. Β. Ελευθερίου, Μ. Πίκουλα και Β. Παπαδημητρίου).

Οι πληροφορίες υπό τη μορφή πεδίων δεδομένων συλλέγονται για το κάθε μνημείο σε τρία επίπεδα. Αρχικά εμφανίζονται στοιχεία που αφορούν σε γενικά χαρακτηριστικά κάθε Μνημείου. Εν προκειμένω, στη χρονολογική του κατάταξη, τις εδαφικές συνθήκες έδρασης, τον ρυθμό των κίωνων, τον τύπο της βάσης τους, τις συνθήκες έδρασης στο στυλοβάτη καθώς και τη διαθέσιμη βιβλιογραφία. Επιπλέον σε άλλα πεδία, εμφανίζεται η σεισμική ιστορία του μνημείου καθώς και το αρχείο προγενέστερων αναστηλωτικών επεμβάσεων (Εικόνα 1).

Σε δεύτερο επίπεδο οι πληροφορίες εστιάζουν στον κάθε σφόνδυλο χωριστά. Καθώς είναι γνωστό ότι μικρές αλλαγές στην γεωμετρία των στοιχείων του φορέα μπορούν να επιφέρουν σημαντικές μεταβολές στον τρόπο απόκρισης του συστήματος, είναι σημαντικό να είναι γνωστή τόσο η ακριβής γεωμετρία των επιμέρους μερών του κίονα, όσο και η υφιστάμενη κατάσταση και παθολογία για μια κατά το δυνατό ακριβή προσομοίωση. Επιπρόσθετα, δεδομένα συλλέγονται και καταχωρούνται σχετικά με τη γεωμετρία της επιφάνειας επαφής μεταξύ των σφονδύλων καθώς είναι δυνατόν η επαφή αυτή να μην είναι πλήρης. Αυτό είναι συχνά πιθανό, όπως στην περίπτωση κατεργασίας της επιφάνειας επαφής του σφονδύλου κατά τρόπο ώστε η επαφή να γίνεται μόνο περιμετρικά υπό την έννοια ενός ομόκεντρου δακτυλίου. Η περίπτωση αυτή της μη-ομοιόμορφης κατανομής του κατακόρυφου φορτίου έχει ενδεχομένως σημασία καθώς επηρεάζει τη τριβή που αναπτύσσεται μεταξύ της διεπιφάνειας επαφής των σφονδύλων τόσο από άποψη συνολικής δύναμης όσο και ως προς την κατανομή αυτής στο επίπεδο επαφής.

Σε ένα τρίτο επίπεδο τέλος, καταχωρούνται δεδομένα για το σύστημα πόλου-εμπολίου, το υλικό και τις διαστάσεις του, καθώς και πληροφορίες για τη χρήση του συστήματος αυτού κατά τις σύγχρονες αναστηλωτικές επεμβάσεις. Σημειώνεται ότι αρχικά το σύστημα ήταν κατασκευασμένο από ξύλο ή σίδηρο, ενώ στις σύγχρονες αναστηλωτικές εργασίες χρησιμοποιείται τιτάνιο ή ορείχαλκος. Για την αναλυτική αποτίμηση του ρόλου του πόλου-εμπολίου στη δυναμική συμπεριφορά του συστήματος θα πρέπει τα χαρακτηριστικά τόσο της γεωμετρίας όσο και του υλικού να είναι γνωστά προκειμένου να συνεκτιμηθεί η διατμητική δύναμη που ενεργοποιείται κατά τη διάρκεια των δυναμικών διεγέρσεων. Σε ορισμένες προγενέστερες εργασίες (Psycharis et.al., 2003, Konstantinidis & Makris 2005) έχει εκτιμηθεί ότι η συνεισφορά αυτή των ξύλινων πόλων στον τρόπο απόσβεσης της ενέργειας μέσω της ενεργοποίησης των διατμητικών δυνάμεων είναι πολύ μικρή. Το τιτάνιο από την άλλη, είναι πιθανό να επηρεάσει δυσμενώς την ευστάθεια των κίωνων υπό σεισμικές διεγέρσεις. Σε κάθε περίπτωση πάντως, τονίζεται ο καθοριστικός ρόλος της χρήσης πόλου-εμπολίου ο οποίος διαφοροποιεί τη δυναμική συμπεριφορά του συνολικού συστήματος. Στην Εικόνα 1 παρουσιάζεται η βάση δεδομένων με όλα τα πεδία δεδομένων του πρώτου επιπέδου όπως αυτά περιγράφηκαν παραπάνω. Για εποπτικούς λόγους, κάποια από τα πεδία είναι κατ' αρχήν ενημερωμένα με πραγματικά δεδομένα από το Μνημείο του Ερεχθείου.

Μνημεία και κίονας που περιγράφεται

Γεωμετρικά χαρακτηριστικά

Άλλες πληροφορίες

Ιστορικό σεισμών και παθολογίας

Εικόνα 1. Παρουσίαση των πεδίων που αφορούν και στα τρία επίπεδα πληροφοριών της βάσης δεδομένων.

3 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ

Η μη-γραμμικότητα που χαρακτηρίζει το πρόβλημα τόσο από άποψη καταστατικού νόμου υλικού (του συστήματος πόλου-εμπολίου), όσο και από άποψη γεωμετρίας και επαφής, καθιστά αναγκαία τη χρήση σύγχρονων αριθμητικών εργαλείων με δυνατότητες προσομοίωσης της σύζευξης μεταξύ της ολίσθησης και της αποκόλλησης μεταξύ δύο επιφανειών (εν προκειμένω δύο διαδοχικών σφονδύλων). Επιπλέον, η μέθοδος ανάλυσης στο πεδίο του χρόνου με εισαγωγή χρονοϊστοριών διέγερσης είναι η μόνη λύση εξέτασης των προβλημάτων γεωμετρικής μη-γραμμικότητας, γεγονός που καθιστά ακόμη συνθετότερη τη μελέτη της δυναμικής απόκρισης του συστήματος.

Οι περισσότερες μελέτες πάνω στην σεισμική συμπεριφορά αρχαίων κίωνων και σφονδυλωτών κατασκευών, χρησιμοποιούν και μάλιστα με ικανοποιητικό τρόπο, προγράμματα αντίστοιχα με αυτά της ανάλυσης και προσομοίωσης βραχόμαζας, εξαιτίας των διαθέσιμων νόμων τριβής και διάρρηξης καθώς και του μικρού υπολογιστικού χρόνου. Σε μια τέτοια προσέγγιση οι σφόνδυλοι συμπεριφέρονται ως απαραμόρφωτα σώματα τα οποία βρίσκονται σε επαφή. Στην παρούσα εργασία αντίθετα, όλες οι αναλύσεις αφορούν προσομοίωση με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Αξιοποιούνται δηλαδή αριθμητικά εργαλεία με δυνατότητα προσομοίωσης τόσο της γεωμετρικής μη γραμμικότητας όσο και φαινόμενα μεγάλων μετακινήσεων με τη χρήση στοιχείων επαφής (contact elements) στη διεπιφάνεια μεταξύ των σφονδύλων. Ο στατικός και δυναμικός συντελεστής τριβής και

η συνοχή ελήφθησαν παραμετρικά ενώ χρησιμοποιήθηκε το κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb ως νόμος συμπεριφοράς της διεπιφάνειας. Σημειώνεται ότι η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων ως εργαλείο μελέτης φαινομένων γεωμετρικής μη-γραμμικότητας δεν είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη κυρίως εξαιτίας της δυσκολίας σύγκλισης. Εντούτοις, όπως αποδεικνύεται παρακάτω, μέσα από διεξοδικούς ελέγχους είναι δυνατόν να προσομοιωθεί το φαινόμενο με ικανοποιητική ακρίβεια και σε ανεκτό υπολογιστικό χρόνο. Επιπρόσθετα, η χρήση της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων, παρουσιάζει το πλεονέκτημα ότι παρέχει τη μεταβολή των διατμητικών τάσεων επί της διεπιφάνειας συν τω χρόνω, καθώς και πληθώρα άλλων αποτελεσμάτων που αφορούν στη σχετική κίνηση και μεταφορά των δυνάμεων μεταξύ δύο διαδοχικών σφονδύλων.

Για την χρονική διακριτοποίηση χρησιμοποιήθηκε βήμα της τάξης των 10^{-3} sec ή και μικρότερο προκειμένου να αποφευχθεί αριθμητική αστάθεια η οποία οδηγεί είτε σε αδικαιολόγητα μεγάλες μετακινήσεις, είτε προκαλεί λανθασμένη (αριθμητική) διεξόδου του ενός σφονδύλου στον άλλο κατά την διάρκεια του λικνισμού. Αυτός ήταν και ο βασικός παράγοντας αριθμητικού σφάλματος καθώς παρατηρήθηκε ότι η διακριτοποίηση του προσομοιώματος σε μεγαλύτερο αριθμό πεπερασμένων στοιχείων δεν είχε ιδιαίτερη επιρροή στα αποτελέσματα.

Για το μέτρο ελαστικότητας του πυρόλιθου των σφονδύλων χρησιμοποιήθηκε τιμή ίση με 1044MPa, τιμή που πάρθηκε από δημοσιευμένη εργασία για την Ελληνιστική Στοά της Ακρόπολης της Λίνδου (Επιτροπή Στερεώσεως και Αναστηλώσεως Μνημείων Ακρόπολης Λίνδου, 2000). Η διαδικασία επίλυσης έγινε σε δύο βήματα. Στο πρώτο ασκήθηκε η επιτάχυνση της βαρύτητας προκειμένου να ενεργοποιηθεί το βάρος του κίονα και κατά συνέπεια τα στοιχεία επαφής τριβής. Στο δεύτερο εισήχθη η χρονοϊστορία της διέγερσης και η ανάλυση συνεχίστηκε μέχρι το τέλος της δηλαδή από το τελευταίο βήμα της πρώτης φάσης μέχρι το τέλος της επιβολής του σεισμικού καταναγκασμού.

4 ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΩΝ ΚΙΟΝΩΝ

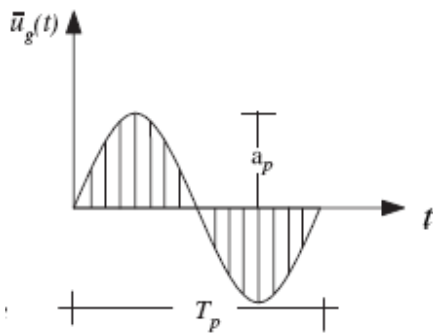
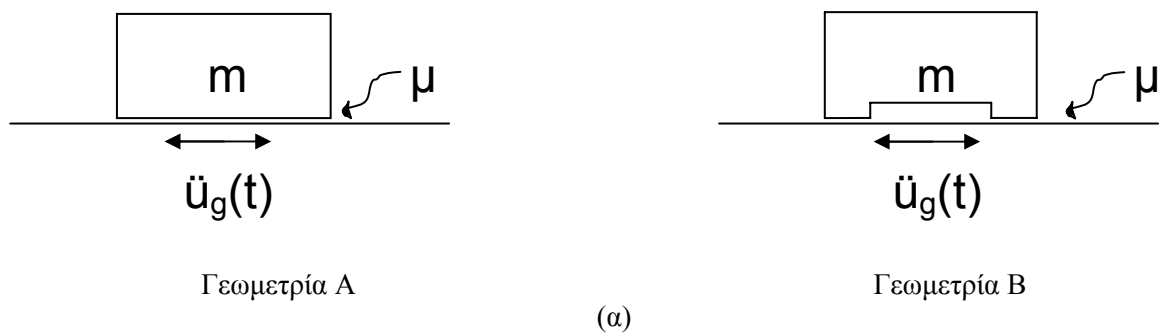
Όπως έχει ήδη αναφερθεί (Shenton 1996), οι σφονδυλωτές κατασκευές συμπεριφέρονται με τρεις διαφορετικούς τρόπους: καθαρή ολίσθηση, καθαρός λικνισμός και ταυτόχρονη ολίσθηση και λικνισμός. Η συνθήκη που πρέπει να ικανοποιεί ένα σώμα προκειμένου να εισέλθει σε κάποια από τις τρεις καταστάσεις, εξαρτάται από την γεωμετρία του σώματος και την επιτάχυνση της διέγερσης στην οποία υπόκεινται. Στην παρούσα εργασία πραγματοποιείται σειρά παραμετρικών αναλύσεων. Ο στόχος είναι να μελετηθούν τα όρια έναρξης διακριτών μορφών συμπεριφοράς (σε ολίσθηση και λικνισμό) ενός σφονδύλου που εδράζεται σε βάση μεγάλων διαστάσεων και υπόκεινται σε μια σειρά ημιτονοειδών παλμών διαφορετικής περιόδου και διαφορετικού μεγέθους a_p . Τα αποτελέσματα που εξήχθησαν από την αριθμητική αυτή διερεύνηση, συγκρίθηκαν με άλλα ήδη δημοσιευμένα από προγενέστερες μελέτες που εξέτασαν το πρόβλημα τόσο αναλυτικά όσο και αριθμητικά (Konstantinidis & Makris 2005). Αρχικά εξετάστηκε η περίπτωση καθαρής ολίσθησης, ενώ στη συνέχεια βρέθηκαν οι διακριτές τιμές επιτάχυνσης και συντελεστή τριβής διεπιφάνειας μεταξύ των τριών διαφορετικών καταστάσεων απόκρισης. Όλες οι αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν θεωρώντας τη γεωμετρία του φορέα και τη διέγερση στο επίπεδο.

4.1 Καθαρή Ολίσθηση

Μελετώνται δύο περιπτώσεις σωμάτων, διαφορετικής γεωμετρίας ως προς την επιφάνεια επαφής τους με την βάση, τα οποία υπόκεινται σε απλές ημιτονοειδείς διεγέρσεις διαφορετικής περιόδου T_p και πλάτους a_p . Στην πρώτη περίπτωση θεωρείται πλήρης επαφή σφονδύλου-βάσης ενώ στη δεύτερη η επαφή γίνεται σε μια περιοχή δεξιά και αριστερά από τις παρειές του σφονδύλου ενώ στη μεσαία περιοχή του υπάρχει κενό 1 cm ώστε να μην εφάπτεται με την βάση (Σχ. 1). Σκοπός της διαφοροποίησης αυτής είναι να εκτιμηθεί η επιρροή της πιθανά διαφορετικής γεωμετρίας της επιφάνειας επαφής και να γίνει μια σύγκριση των αποτελεσμάτων με τη βιβλιογραφία.

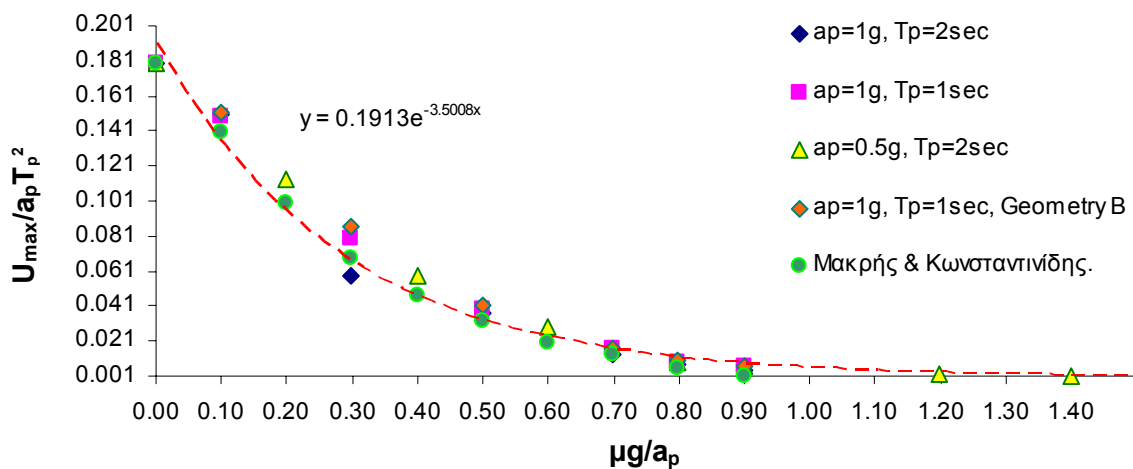
Για όλες τις αναλύσεις θεωρήθηκε μηδενική τιμή συνοχής. Ο συντελεστής τριβής πήρε διαδοχικά τις τιμές 0.1 έως 0.9 (ανά 0.1) ενώ ημιτονοειδείς διεγέρσεις μιας περιόδου χρησιμοποιήθηκαν για την διέγερση της βάσης. Οι τιμές του μεγέθους a_p και της περιόδου T_p περιγράφονται στο σχήμα 1. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο σχήμα 2 με τη μορφή αδιάστατων μεγεθών της μέγιστης σχετικής μετακίνησης σφονδύλου - βάσης $U_{max}/a_p T_p^2$ ως συνάρτηση της διατμητικής αντίστασης της

διεπιφάνειας η οποία περιγράφεται από την ανηγμένη ποσότητα $\mu g/a_p$. Παρατηρείται ότι ανεξάρτητα από το μέγεθος της διέγερσης και την περίοδο του παλμού, η μέγιστη σχετική μετακίνηση ακολουθεί μια συγκεκριμένη καμπύλη καταδεικνύοντας ότι η (ανηγμένη) συμπεριφορά του σφονδύλου είναι πανομοιότυπη. Με κυκλικά σημεία παριστάνονται τα αποτελέσματα όπως εξήχθησαν και περιγράφονται στην δημοσιευμένη εργασία των Κωνσταντινίδη και Μακρή (Konstantinidis & Makris 2005), όπου και διαφαίνεται η πολύ καλή συμφωνία μεταξύ των αποτελεσμάτων που εξήχθησαν με τις δύο διαφορετικές μεθοδολογίες. Εκτός της πολύ καλής συμφωνίας μεταξύ των δύο προσεγγίσεων, σημειώνεται και η εύλογη φυσική ερμηνεία της ανηγμένης καμπύλης $u_{max}/a_p T^2$ με την τριβή $\mu g/a_p$. Πράγματι, μικρός συντελεστής τριβής (μ) ή ισχυρή σεισμική διέγερση (a_p) προκαλούν σημαντικότερες σχετικές μετακινήσεις, δεδομένης σταθερής περιόδου του ημιτονοειδούς σήματος. Διευκρινίζεται ακόμη ότι στο πλαίσιο των αναλύσεων που αποτυπώνονται στο Σχήμα 2, η μόνη μορφή σχετικής μετακίνησης των δύο μελών είναι η ολίσθηση.



- Γεωμετρία Α
- $a_p = 1g, T_p = 2 \text{ sec}$
 - $a_p = 1g, T_p = 1 \text{ sec}$
 - $a_p = 0.5g, T_p = 2 \text{ sec}$
- Γεωμετρία Β
- $a_p = 1g, T_p = 1 \text{ sec}$

Σχήμα 1. (α) Οι δύο διαφορετικές γεωμετρίες επιφάνειας επαφής σώματος που εδράζεται σε βάση μεγάλων διαστάσεων. (β) Χαρακτηριστικά ημιτονοειδών παλμών που χρησιμοποιήθηκαν



Σχήμα 2. Τα αδιάστατα μεγέθη της μέγιστης σχετικής μετακίνησης συναρτήσει της αντίστασης της διεπιφάνειας. Με διακεκομμένη γραμμή παριστάνεται η μέση καμπύλη των αποτελεσμάτων (τρεις περιπτώσεις Γεωμετρίας Α, μια περίπτωση Γεωμετρίας Β και σύγκριση με αποτελέσματα από τη βιβλιογραφία).

Πίνακας 1. Αποτελέσματα μετακινήσεων για τις δύο γεωμετρίες σφονδύλου

Συντελεστής τριβής μ	Γεωμετρία A		Γεωμετρία B		
	u_{\max} (m)	$\Pi_1 = u_{\max}/a_p T_p^2$	u_{\max} (m)	$\Pi_1 = u_{\max}/a_p T_p^2$	$\Pi_2 = \mu g/a_p$
0,1	1,460	0,149	1,487	0,152	0,100
0,3	0,780	0,080	0,846	0,086	0,300
0,5	0,390	0,040	0,411	0,042	0,500
0,7	0,160	0,016	0,164	0,017	0,700
0,9	0,090	0,009	0,099	0,010	0,800

Θα πρέπει εδώ να σημειωθεί ότι η έννοια της μέγιστης μετακίνησης επιδέχεται δύο διαφορετικές ερμηνείες καθώς μπορεί να αναφέρεται είτε στη μέγιστη μετακίνηση εντός της διάρκειας του παλμού εισαγωγής είτε στη μέγιστη μετακίνηση που πιθανώς (αδρανειακά) προκύπτει μετά το πέρας της διέγερσης. Για τον σκοπό αυτόν, οι αναλύσεις συνεχίστηκαν για 1.5 sec μετά τη λήξη του παλμού. Παρ' όλα αυτά παρατηρήθηκε ότι η μέγιστη σχετική μετακίνηση συνέβη εντός της διάρκειας διέγερσης και συνεπώς οι τιμές του Σχήματος 2 αναφέρονται σε αυτές.

Ένα δεύτερο ζήτημα διερεύνησης υπήρξε η ποσοτική αποτίμηση της επιρροής τυχόν ανομοιομορφης επιφάνειας επαφής μεταξύ του σφονδύλου και της βάσης, γεγονός που περιγράφηκε ανωτέρω με τη μορφή της εναλλακτικής γεωμετρίας A και B. Παρατηρείται (Πίνακας 1) ότι η μέγιστη σχετική κίνηση του σφονδύλου γεωμετρίας B είναι μεγαλύτερη αυτή του σώματος γεωμετρίας A, όπως άλλωστε ήταν αναμενόμενο καθώς η αντίσταση που προβάλλει η μειωμένη διεπιφάνεια επαφής είναι μικρότερη. Εντούτοις, η επιρροή της γεωμετρίας επαφής στην ολίσθηση είναι μικρή (δεν υπερβαίνει το 7%) τουλάχιστον για τους παλμούς που χρησιμοποιήθηκαν. Είναι φανερό πάντως ότι το ζήτημα χρήζει περαιτέρω διερεύνησης καθώς η διαφορά αναμένεται να είναι περισσότερο ευδιάκριτη όταν ο ρόλος του μηχανισμού της τριβής είναι σημαντικότερος.

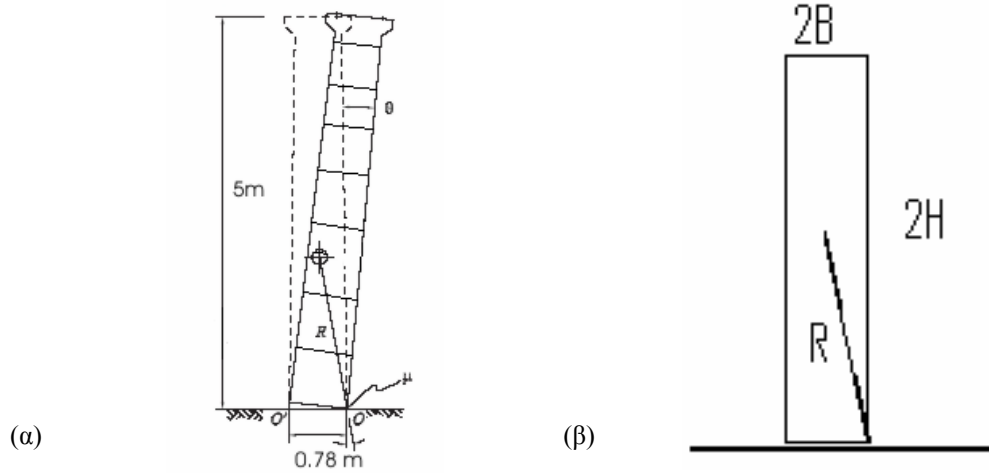
4.2 Λικνισμός και ταυτόχρονος λικνισμός και ολίσθηση

Πέρα από την καθαρή ολίσθηση και τον καθαρό λικνισμό υπάρχει και ενδιάμεσος τρόπος ταλάντωσης των στερεών σωμάτων. Πρόκειται (Shenton et. al., 1996) για την κατάσταση συνύπαρξης ολίσθησης και λικνισμού που παρατηρείται για ένα εύρος μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης τριγωνομετρικών παλμών και εξαρτάται από τον λόγο πλάτους βάσης/ύψος (B/H) κίονα και το συντελεστή τριβής μ της διεπιφάνειας επαφής κίονα (ή σφονδύλου) και βάσης. Προσδιορίζεται γεωμετρικά ότι η τιμή του συντελεστή τριβής προκειμένου ο κίονας να εισέλθει σε αυτή την κατάσταση είναι B/H (Σχήμα 3α).

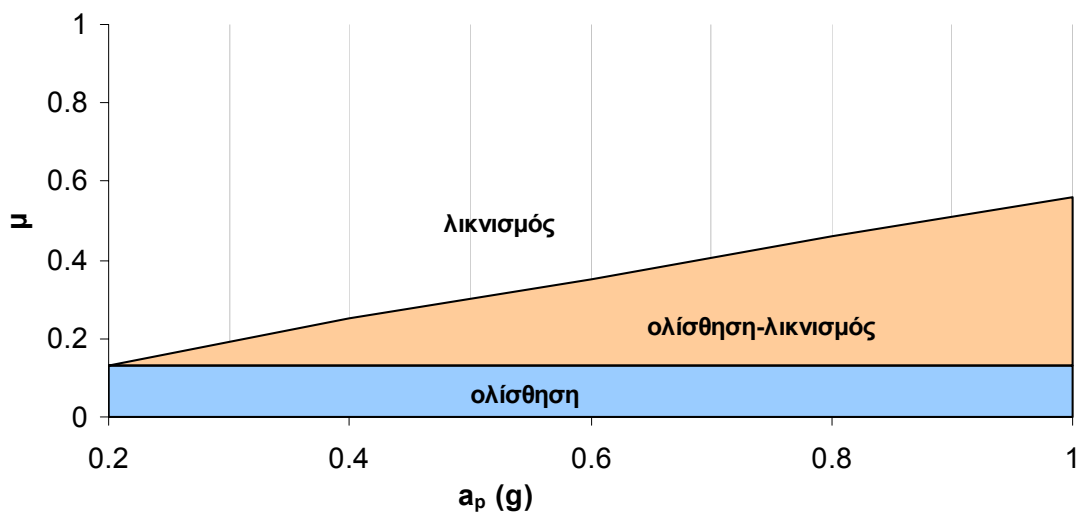
Στην παρούσα εργασία εξετάζεται η περίπτωση ενός μονολιθικού κίονα με ισοδύναμη γεωμετρία (ίδιο λόγο B/R) με αυτήν ενός σφονδυλωτού της ελληνιστικής Στοάς της Ακρόπολης της Λίνδου (Σχ. 3β). Ο σφονδυλωτός αυτός κίονας αποτελείται από 7 σφονδύλους, έχει διάμετρο βάσης 0.78m. και ύψος 5.0m. Ο λόγος των διαστάσεων είναι $\sin\alpha = B/R$. Για την ανάλυση χρησιμοποιήθηκαν ημιτονοειδείς παλμοί με περίοδο T_p ίση προς 2sec και πέντε διαφορετικές τιμές επιτάχυνσης a_p ίσες προς 0.2g, 0.4g, 0.6g, 0.8g, και 1g αντίστοιχα. Στο Σχήμα 4 παρουσιάζονται τα όρια μεταξύ ολίσθησης, λικνισμού και ταυτόχρονης ολίσθησης-λικνισμού όπως προέκυψαν από την αριθμητική επίλυση του προβλήματος. Τα αποτελέσματα, εκτός της πολύ καλής φυσικής τους ερμηνείας, βρίσκονται σε πλήρη συμφωνία με την αναλυτική μεθοδολογία που ακολουθήθηκε από τον Shenton για την περίπτωση στερεού και απαραμόρφωτου σώματος. Διαφαίνεται ότι όταν ο συντελεστής τριβής είναι σχετικά μικρός ($\mu < 0.15 = B/H$) τότε ανεξαρτήτως της έντασης διέγερσης, ο (μονολιθικός) κίονας ολισθαίνει επί της βάσης χωρίς να λικνίζεται. Στον αντίποδα, για τιμές τριβής της διεπιφάνειας κίονα-βάσης μεγαλύτερες του 0.5, και για τις τιμές επιτάχυνσης που χρησιμοποιήθηκαν, ο κίονας λικνίζεται χωρίς να ολισθαίνει καθόλου, γεγονός απόλυτα αναμεινόμενο. Για ενδιάμεσες τιμές τριβής, λαμβάνει σίγουρα χώρα λικνισμός, συζευγμένος με σχετική ολίσθηση των δύο μελών ο βαθμός της οποίας είναι ανάλογος της έντασης της διέγερσης.

Βέβαια, θα πρέπει να επισημανθεί ότι η συμπεριφορά αυτή του υπό εξέταση θεωρούμενου συστήματος είναι λίγο πολύ αναμενόμενη. Εντούτοις, η ποσοτικοποίηση δια της αριθμητικής ανάλυσης των σχετικών ορίων παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον καθώς εξαιτίας του ανηγμένου τρόπου προσέγγισης του προβλήματος αναφέρεται στη γενικότερη περίπτωση γεωμετρίας κίονα. Από την άλλη, είναι απαραίτητο να τονιστεί ο σχετικός περιορισμός της προσέγγισης αυτής που τίθεται υπό την υπόθεση της μονολιθικότητας του σώματος. Για τον λόγο αυτόν, διερευνάται στις ενότητες

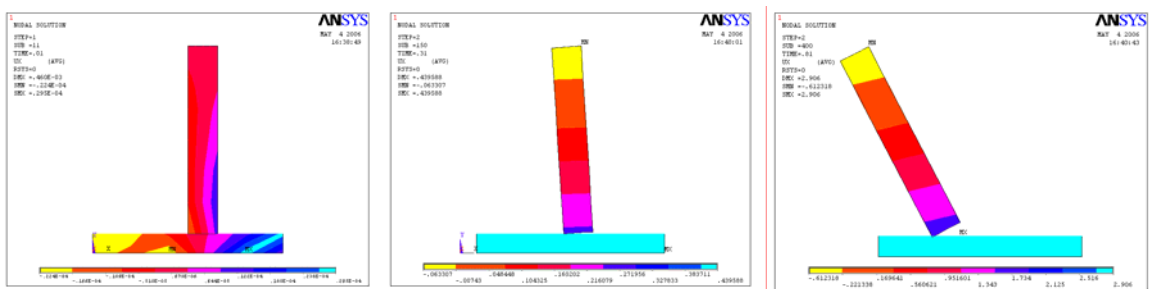
που ακολουθούν, η περίπτωση της ρεαλιστικότερης προσομοίωσης της υπό εξέταση μορφής κίονα. Σε αυτήν ελήφθη αριθμητικώς υπόψη η συμβολή των διεπιφανειών επαφής μεταξύ όλων των σφονδύλων.



Σχήμα 3. Γεωμετρία σφονδυλωτού κίονα από την Ελληνιστική Στοά της Ακροπόλης ης Λίνδου (α) και το ισοδύναμο μονολιθικού που χρησιμοποιήθηκε για τις αναλύσεις (β).



Σχήμα 4. Όρια μεταξύ καθαρής ολίσθησης, ολίσθησης-λικνισμού, και καθαρού λικνισμού για λόγο βάρης/υψους=0.151



Σχήμα 5. Παρουσίαση της κατάστασης ολίσθησης - λικνισμού για ημιτονοειδή παλμό πλάτους 1g και περιόδου 1sec. Ο συντελεστής τριβής της διεπιφάνειας τέθηκε ίσος προς $\mu=0.3$.

5 ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΤΙΚΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΣΧΕΤΙΚΗΣ ΟΛΙΣΘΗΣΗΣ

Οι αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν για την περίπτωση καθαρής ολίσθησης κατέδειξαν μια πανομοιότυπη συμπεριφορά του σφονδύλου η οποία φάνηκε στο Σχήμα 2. Η μέση καμπύλη τάσης που προέκυψε με βάση τα σημεία των αποτελεσμάτων παριστάνεται επίσης στο Σχήμα 2 και περιγράφεται από την εξίσωση:

$$\frac{U_{\max}}{a_p T_p^2} = 0.1919e^{(-3.5008 \frac{\mu g}{a_p})} \quad (1)$$

όπου U_{\max} η μέγιστη σχετική μετακίνηση μεταξύ της βάσης και του κίονα, a_p το μέγεθος των ημιτονοειδών παλμών και T_p η περίοδός τους. Επισημαίνεται ότι η ισχύς της εξίσωσης (1) περιορίζεται στο εύρος τιμών $\mu g/a_p < 1$. Ο στόχος της εξαγωγής μιας γραμμής τάσης με βάση τα αριθμητικά δεδομένα του Σχήματος 2, τα οποία αναφέρονται σε ημιτονοειδή διέγερση της βάσης και παρουσιάζουν πολύ καλή συμφωνία με τη βιβλιογραφία, είναι η διερεύνηση της δυνατότητας περαιτέρω αξιοποίησης τους για την περίπτωση πραγματικής σεισμικής διέγερσης. Κι αυτό γιατί κάθε σεισμική διέγερση μπορεί να αναλυθεί σε άθροισμα ημιτονοειδών παλμών διαφορετικού πλάτους και φάσης.

Θα ήταν συνεπώς δυνατόν, να προσεγγίζεται η σχετική μετακίνηση μεταξύ ενός σώματος και μιας επιφάνειας έδρασης μέσω των παρακάτω βημάτων:

1. Ανάλυση του σεισμικού κραδασμού μέσω του μετασχηματισμού Fourier σε n διακριτές συχνότητες (όπου n δύναμη του 2).
2. Για κάθε μια από τις n διακριτές συχνότητες, άρα και περιόδους T_{pi} , του καθενός προσπίπτοντος ημιτονοειδούς παλμού πλάτους a_{pi} και φάσης ϕ_i στον οποίον αναλύεται το αρχικό σήμα, και δεδομένου του (σταθερού) συντελεστή τριβής μ , λαμβάνεται η μέγιστη πιθανή σχετική μετακίνηση $U_{\max i}$ σύμφωνα με το Σχήμα 2 και την εξίσωση (1).
3. Η συνολική μέγιστη σχετική μετακίνηση του συστήματος προκύπτει από την επαλληλία των σχετικών μετακινήσεων που προέκυψαν για κάθε μια από τις συχνότητες στις οποίες αναλύθηκε ο αρχικός σεισμικός κραδασμός, ώστε

$$U_{\max} = \sum_{i=1}^n U_{\max i} \quad (2)$$

Απαραίτητη βέβαια προϋπόθεση για να ισχύουν τα παραπάνω είναι να εξασφαλισθεί ότι, α) το σύστημα κατά κύριο λόγο ολισθαίνει χωρίς να λικνίζεται (ώστε να εμπίπτει στα όρια της ανάλυσης του Σχήματος 2), β) η ανάλυση κατά Fourier δεν οδηγεί σε σημαντικές διαφοροποιήσεις των φάσεων τουλάχιστον στο συχνοτικό πεδίο ενδιαφέροντος και γ) είναι αποδεκτό το σφάλμα της επαλληλίας επιμέρους ημιτονοειδών παλμών σε (γεωμετρικώς) μη-γραμμικά συστήματα.

Ασφαλώς, η διαδικασία αυτή προσέγγισης υπόκειται στους ανωτέρω περιορισμούς, ενώ το πραγματικό φυσικό πρόβλημα είναι ακόμη ποιο σύνθετο. Εντούτοις, η δυνατότητα πραγματοποίησης ενός απλού, έστω πολύ προσεγγιστικού υπολογισμού χωρίς τη χρήση πολύπλοκων προσομοιωμάτων πεπερασμένων στοιχείων ή μαθηματικών εξισώσεων, χρήζει περαιτέρω διερεύνησης. Γι' αυτό το λόγο εφαρμόστηκε δοκιμαστικά η ανωτέρω προσέγγιση, με τη χρήση δύο χρονοϊστοριών σεισμικής κίνησης και πέντε διαφορετικών τιμών του συντελεστή τριβής. Προκειμένου να μειωθεί το απαιτούμενο υπολογιστικό κόστος από τις αναλύσεις, μόνο ένα τμήμα της καταγραφής εισήχθη από κάθε επιταχυνσιογράφημα. Συνεπώς χρησιμοποιήθηκαν 15 δευτερόλεπτα από τον σεισμό της Λευκάδας, 2003 (PGA=0.43g, $M_L=5.9$) και 12 δευτερόλεπτα από τον σεισμό της Αθήνας, 1999 - καταγραφή από τον σταθμό στα Σεπόλια (PGA=0.246g, $M_L=5.9$). Ο τελευταίος εισήχθη ανηγμένος στην (πραγματικά μεγάλη) τιμή της PGA ίσης προς 0.9g, καθώς, εξαιτίας του συχνοτικού του περιεχομένου, οι προκύπτουσες τιμές ολίσθησης ήταν πολύ μικρές για να εξαχθούν αξιόπιστα αποτελέσματα. Οι χρονοϊστορίες και τα φάσματα Fourier περιγράφονται στο Σχήμα 6. Η καταγραφή του σεισμού της Λευκάδας αφορά στη θέση νοσοκομείο, σε έδαφος κατηγορίας B κατά EAK2000, ενώ η καταγραφή του σεισμού της Αθήνας στο σταθμό των Σεπολίων, αφορά σε έδαφος A κατά EAK2000.

Στον Πίνακα 2 παρουσιάζεται η σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων. Παρατηρήθηκε ότι για τον σεισμό της Λευκάδας οι δύο μεθοδολογίες βρίσκονται σε σχετικά καλή συμφωνία, ιδιαίτερα για τις

μικρές τιμές του συντελεστή τριβής. Σε μεγαλύτερες τιμές υπάρχουν κάποιες αποκλίσεις, αλλά τα μεγέθη της μέγιστης σχετικής μετακίνησης είναι τόσο μικρά που οι αποκλίσεις θα μπορούσαν να οφείλονται στην αριθμητική ολοκλήρωση της ανάλυσης. Για τον σεισμό της Αθήνας οι αποκλίσεις είναι μεγαλύτερες.

Γενικά, συμπεραίνεται ότι στις περιπτώσεις που το φαινόμενο είναι έντονα μη-γραμμικό (τιμές του λόγου $\mu g/a_p < 0.5$) και η ολίσθηση είναι περισσότερο έντονη, η προσεγγιστική μέθοδος παρέχει μια σχετικά ικανοποιητική εκτίμηση των αναμενόμενων μετακινήσεων. Ειδικά στην περίπτωση πολύ μικρής τριβής (ή αντίστοιχα μεγάλης έντασης της διέγερσης ώστε $\mu g/a_p = 0.1$) η εκτίμηση αυτή είναι πραγματικά πολύ καλή. Αντιθέτως, σε περιπτώσεις όπου ο λόγος $\mu g/a_p$ είναι μεγαλύτερος του 0.5 οι αποκλίσεις είναι μεγάλες. Σε περιπτώσεις όπου ο συντελεστής τριβής μ υπερβαίνει το 0.15, στη σχετική μετακίνηση μεταξύ των δύο σωμάτων υπεισέρχεται ο λικνισμός και συνεπώς δεν είναι εξ' αρχής δυνατή η εφαρμογή της προσεγγιστικής μεθόδου και των εξισώσεων (1) και (2). Συνεπώς απαιτούνται διεξοδικότερη διερεύνηση και περαιτέρω παραμετρικές αριθμητικές αναλύσεις προκειμένου να αποτιμηθεί η δυνατότητα προσεγγιστικής πρόβλεψης των σχετικών μετακινήσεων δύο εν επαφή σωμάτων.

Πίνακας 2. Σύγκριση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τις δύο μεθοδολογίες

Σεισμός Λευκάδας (PGA=0.43g)	Λόγοι $\mu g/a_p$				
	0.1	0.3	0.46	0.93	1.39
Αριθμητική ανάλυση	1.370	0.300	0.125	0.014	0.000017
Προσέγγιση με τη χρήση ανάλυσης Fourier	1.380	0.320	0.130	0.014	0.002
Σεισμός Αθήνας (αηγημένη PGA=0.89g)	Λόγοι $\mu g/a_p$				
	0.1	0.22	0.3	0.44	0.66
Αριθμητική ανάλυση	0.230	0.086	0.0030	0.045	0.035
Προσέγγιση με τη χρήση ανάλυσης Fourier	0.249	0.021	0.0057	0.0005	0.00002

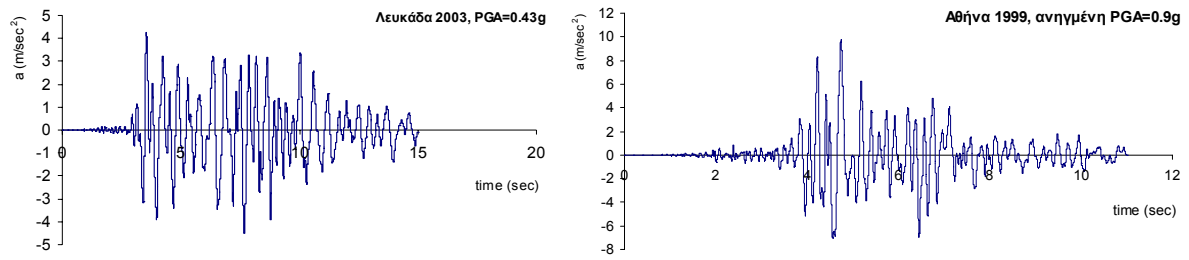
6 ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΣΦΟΝΔΥΛΩΤΟΥ ΚΙΟΝΑ

Δεδομένων των περιορισμών που θέτει η θεώρηση του κίονα ως ένα μονολιθικό σύστημα, κρίθηκε σκόπιμη η διεξοδική αριθμητική προσομοίωση της δυνατότητας ολίσθησης και αποκόλλησης (λικνισμού) σε όλες τις διεπιφάνειες καθώς και του χαμηλότερου σφονδύλου με τη βάση. Στην ενότητα αυτή συνεπώς εξετάζεται η σεισμική συμπεριφορά του κίονα K22 από την ελληνιστική Στοά της Ακρόπολης της Λίνδου. Ο κίονας αποτελείται από επτά σφονδύλους και το κιονόκρανο, τα ύψη των οποίων διαφέρουν μεταξύ τους. Η προσομοίωση γίνεται σε τρεις διαστάσεις ενώ για την διέγερση χρησιμοποιείται η καταγραφή της Λευκάδας που παρουσιάστηκε παραπάνω. Παρόλο που ο συγκεκριμένος κίονας διαθέτει σύστημα πόλου-εμπολίου, στο αντίστοιχο προσομοίωμα αυτό ελήφθη υπόψη με έμμεσο τρόπο προκειμένου να εξεταστεί ο στόχος που τέθηκε παραπάνω. Έτσι, πραγματοποιήθηκαν δύο αναλύσεις για την συγκεκριμένη σεισμική διέγερση. Η πρώτη θεωρεί την περίπτωση απλής επαφής μεταξύ των σφονδύλων ενώ η δεύτερη συνεκτιμά όπως προαναφέρθηκε εμμέσως και την συνεισφορά των ξύλινων πόλων. Ο τρόπος με τον οποίο συνεκτιμάται η συμπεριφορά του πόλου περιγράφεται στην επόμενη ενότητα. Η διακριτοποίηση έγινε με τέτοιο τρόπο ώστε να αναπαριστά ο κίονας κατά το δυνατόν την πραγματική γεωμετρία του ενώ το υπολογιστικό κόστος να μην αυξάνεται υπερβολικά.

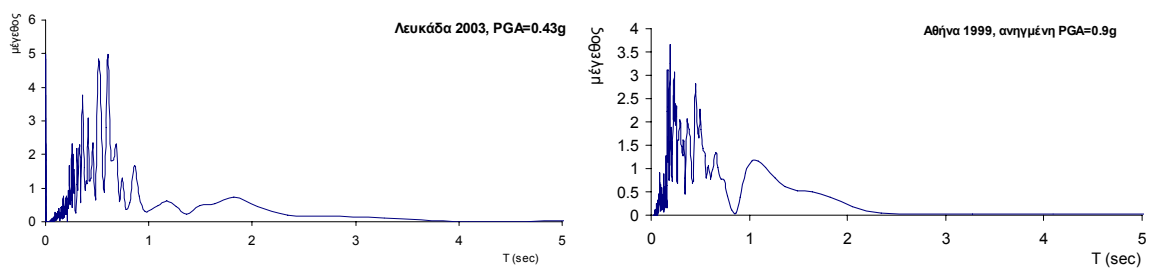
Σημειώνεται ότι κατά την προσομοίωση δεν ελήφθησαν υπόψη τυχόν ρηγματώσεις που υπήρχαν στους σφονδύλους ενώ θεωρήθηκε πλήρης επαφή σε όλες τις επιφάνειες μεταξύ τους. Άλλωστε ο συγκεκριμένος κίονας είναι αναστηλωμένος με τους έξι πρώτους σφονδύλους να έχουν κατασκευαστεί εξ' ολοκλήρου από νέο παρόλιθο ενώ μόνο ο έβδομος είναι από το πρωτογενές του υλικό. Επιπλέον, για την έδραση μεταξύ τους χρησιμοποιήθηκε εξομαλυντική στρώση κονιάματος, γεγονός που καθιστά ρεαλιστική την προσέγγιση έδρασης σε όλο το εμβαδό της διεπιφάνειας. Στο Σχήμα 7 παρουσιάζεται από τρεις διαφορετικές οπτικές γωνίες η διακριτοποίηση που πραγματοποιήθηκε ενώ στον Πίνακα 3 συνοψίζονται τα μηχανικά χαρακτηριστικά που εισήχθησαν στο μοντέλο.

Πίνακας 3. Μηχανικά χαρακτηριστικά που χρησιμοποιήθηκαν στο προσομοίωμα του Σχήματος 7

Συνοχή C	Δυναμικός συντελεστή τριβής μ	Μέτρο Ελαστικότητας E (MPa)	Πυκνότητα ρ (ton/m ³)
0	0.7	1044	2

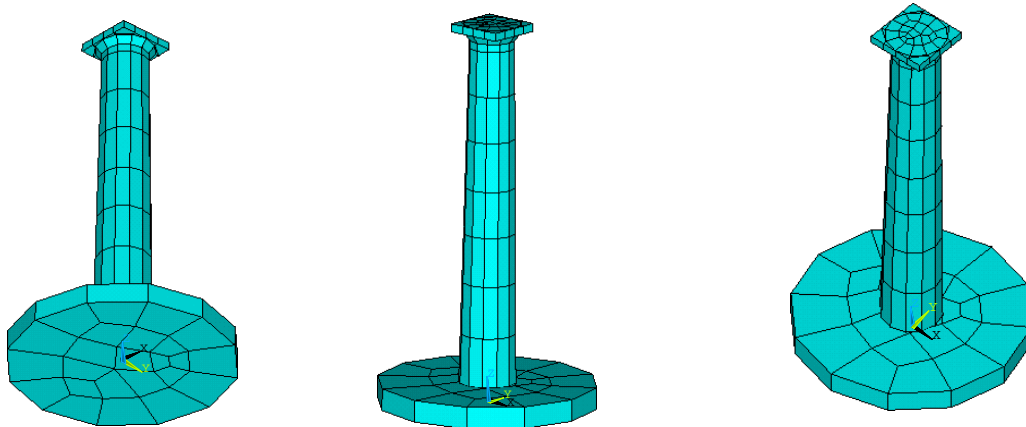


(α)



(β)

Σχήμα 6. Χρονοϊστορίες των σεισμών της Λευκάδας και της Αθήνας (α). Φάσματα Fourier των παραπάνω χρονοϊστοριών (β).



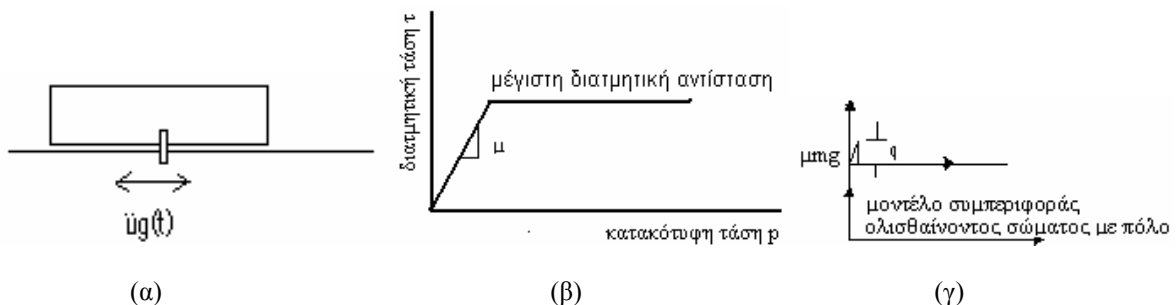
Σχήμα 7. Κιονοστοιχία στην Ακρόπολη της Λίνδου και διακριτοποιημένο προσομοίωμα μεμονωμένου κίονα

6.1 Συνεισφορά του ρόλου του συστήματος πόλου – εμπολίου

Το σύστημα του πόλου και του εμπολίου χρησιμοποιούνται για την περιστροφή των σφονδύλων και την καλή τοποθέτηση του ενός πάνω στον άλλο. Το υλικό αυτού συνήθως ήταν από ξύλο ή από σίδηρο (Ορλάνδος 1958) αν και στις σύγχρονες αναστηλωτικές επεμβάσεις χρησιμοποιείται συχνά ο ορείχαλκος ή το τιτάνιο. Και στις δύο περιπτώσεις πάντως δημιουργείται μία διατμητική αντίσταση κατά την διάρκεια της σεισμικής διέγερσης η οποία προστίθεται στην ήδη υπάρχουσα που δημιουργεί η τριβή μεταξύ των διεπιφανειών (Σχ. 8γ). Η πρόσθετη αυτή αντίσταση παύει να υπάρχει με την θραύση του συστήματος, πέραν της οποίας η απόσβεση της σεισμικής κίνησης πραγματοποιείται αποκλειστικά μέσω της ολίσθησης των σφονδύλων. Στο σχήμα 8β περιγράφεται το μοντέλο συμπεριφοράς Mohr-Coulomb κατά την ολίσθηση της διεπιφάνειας. Η μέγιστη διατμητική αντίσταση αναφέρεται στο άνω όριο, η υπέρβαση του οποίου ισοδυναμεί με θραύση των μικροανωμαλιών της διεπιφάνειας και έναρξη ολίσθησης. Υπενθυμίζεται ότι όσο οι σφόνδυλοι βρίσκονται σε ακινησία η τιμή της τριβής προκύπτει από τον στατικό συντελεστή τριβής ενώ μόλις ξεπεραστεί η στατικώς προσδιοριζόμενη τιμή, ο ‘δυναμικός’ συντελεστής τριβής είναι αυτός που καθορίζει την τριβή στη διεπιφάνεια. Προκειμένου λοιπόν να ληφθεί υπόψη η συνεισφορά του συστήματος στο τρισδιάστατο προσομοίωμα χωρίς να αυξηθεί δραματικά ο υπολογιστικός χρόνος δια της θεώρησης επιφανειών επαφής στις διεπιφάνειες πόλου-εμπολίου ή της αριθμητικής συνεκτίμησης της πιθανής θραύσης, επιλέγεται προσεγγιστικά να προστίθεται στο στατικό συντελεστή τριβής κάθε διεπιφάνειας η αντίστοιχη διατμητική αντίσταση του πόλου q , σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση:

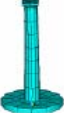
$$\mu'_s = \frac{\mu_s w(z) + q}{w(z)} \quad (3)$$

όπου $w(z)$ είναι το υπερκείμενο βάρος του κίονα από την κάθε διεπιφάνεια, μ_s ο αρχικός στατικός συντελεστής τριβής και μ'_s ο αντίστοιχος στατικός συντελεστής συνολικής τριβής. Με βάση τη θεώρηση αυτή, η οποία άλλωστε καθορίζεται και εγγενώς από το χρησιμοποιούμενο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ANSYS, κρίσιμη καθίσταται για την ανάλυση, η παράμετρος του δυναμικού συντελεστή που επιλέγεται. Επισημαίνεται ακόμη ότι η μετάβαση ανάμεσα στις δύο τιμές των συντελεστών τριβής γίνεται ακαριαία και αυτός είναι ένας βασικός λόγος για τον οποίον απαιτούνται πολύ μικρές τιμές της χρονικής διακριτοποίησης προκειμένου να μην παρατηρηθούν αριθμητικές αστάθειες. Ειδικά για την υπό μελέτη περίπτωση, λαμβάνεται τυπική διατμητική αντοχή ξύλινου πόλου $\tau=0.7$ KN/cm² και διάμετρος αυτού ίση προς 4cm. Στον Πίνακα 4 παρουσιάζονται οι λόγοι στατικού προς δυναμικού (κινηματικού) συντελεστή τριβής (μ_s/μ_k) που χρησιμοποιήθηκαν σε κάθε διεπιφάνεια μεταξύ των σφονδύλων (ο δυναμικός συντελεστής τριβής θεωρήθηκε 0.7 σε όλες τις διεπιφάνειες). Θα πρέπει πάντως να επισημανθεί πως ανεξάρτητα του τρόπου αύξησης της τριβής, η έμμεση αυτή προσομοίωση του συστήματος πόλου-εμπολίου αποτελεί ουσιαστικά ένα άνω όριο της επιρροής του συστήματος σύνδεσης καθώς σε περίπτωση που μετά την υποτιθέμενη θραύση, και σε δεδομένη χρονική στιγμή, οι δύο εν επαφή επιφάνειες παύσουν να κινούνται ο μηχανισμός ολίσθησης θα επανενεργοποιηθεί (αριθμητικά) με βάση την εξίσωση (3) και την αρχική τιμή της διατμητικής αντίστασης του πόλου, q .



Σχήμα 8. Σχηματική απεικόνιση σφονδύλου με πόλο (α), Μοντέλο συμπεριφοράς Mohr-Coulomb (β) Απλοποιητική αναπαράσταση της συνεισφοράς του πόλου στη διατμητική αντίσταση (γ)

Πίνακας 4. Παρουσίαση του λόγου μ_s/μ_k που εισήχθη σε κάθε επιφάνεια επαφής.

	Ύψος κάθε σφονδύλου (m)	Διεπιφάνεια	Υπερκείμενο βάρος (KN)	Λόγος μ_s/μ_k
1 ^{ος} σφόνδυλος	0.675	Βάση – 1 ^{ος} σφόνδυλος	10.451	2.20
2 ^{ος} σφόνδυλος	0.715	1 ^{ος} – 2 ^{ος} σφόνδυλος	8.918	2.41
3 ^{ος} σφόνδυλος	0.680	2 ^{ος} – 3 ^{ος} σφόνδυλος	7.394	2.70
4 ^{ος} σφόνδυλος	0.640	3 ^{ος} – 4 ^{ος} σφόνδυλος	6.036	3.08
5 ^{ος} σφόνδυλος	0.680	4 ^{ος} – 5 ^{ος} σφόνδυλος	4.839	3.60
6 ^{ος} σφόνδυλος	0.638	5 ^{ος} – 6 ^{ος} σφόνδυλος	3.650	4.44
7 ^{ος} σφόνδυλος	0.642	6 ^{ος} – 7 ^{ος} σφόνδυλος	2.609	5.81
κιονόκρανο	0.330	7 ^{ος} – κιονόκρανο	1.628	8.72

Στους Πίνακες 5 και 6 παρουσιάζονται οι μέγιστες σχετικές μετακινήσεις κάθε σφονδύλου. Παρατηρείται ότι οι μέγιστες σχετικές μετακινήσεις κατά τη διάρκεια της σεισμικής διέγερσης κυμαίνονται περίπου από 1-7cm εντός επιπέδου (Πιν. 5) ενώ οι αντίστοιχες μόνιμες μετακινήσεις είναι μικρότερες, της τάξης του 20-50% των ανωτέρω τιμών (Πίν. 6). Επίσης παρατηρείται ότι γενικά, οι σχετικές μετακινήσεις μεταξύ των κατώτερων σφονδύλων είναι μικρότερες σε σχέση με αυτές των υψηλότερων, τόσο εντός όσο και εκτός του επιπέδου της διέγερσης (Πιν. 7).

Ενδιαφέρον επίσης 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 σφονδύλων, παρά την σχετικά μεγαλύτερη δυσκαμψία του πρώτου. 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 διαδοχικά επίπεδα είναι δυνατό να οδηγήσει σε σχετικές μετακινήσεις οι οποίες είναι αξιοσημείωτες, ιδιαίτερα στους ανώτερους σφονδύλους. Το γεγονός αυτό ενδεχόμενα θέτει έναν προβληματισμό αναφορικά με τη σκοπιμότητα χρήσης δύσκαμπτων στοιχείων σύνδεσης, όπως για παράδειγμα τιτάνιο, για την αναστήλωση των σφονδουλωτών μνημείων. Σε κάθε περίπτωση, το ζήτημα θα πρέπει να εξετάζεται σε συνάρτηση με το συχνοτικό περιεχόμενο του προσπίπτοντος σεισμικού κραδασμού, καθώς φαίνεται πως οι σφονδουλωτές κατασκευές είναι περισσότερο τρωτές σε περιπτώσεις σεισμικής διέγερσης που χαρακτηρίζεται από μεγάλες περιόδους καθώς η κίνηση δείχνει να διαδίδεται γρήγορα προς τους ανώτερους σφονδύλους οι οποίοι και κινούνται αντιθετα από κάποιο σημείο της διέγερσης και έπειτα (Σχήμα 9).

Η σχετική αυτή κίνηση των σφονδύλων συμπληρώνεται και από σημαντικές μετακινήσεις εκτός του επιπέδου στο οποίο επιβάλλεται η διέγερση. Έτσι, όπως φαίνεται στο ίδιο σχήμα, η στροφή περί τον άξονα του κίονα είναι εμφανής ιδιαίτερα στους ανώτερους σφονδύλους (όπου η τριβή είναι μικρότερη) και προς το τέλος του σεισμικού κραδασμού ($t > 9\text{sec}$). Σημειώνεται ότι το φαινόμενο αυτό δεν περιορίζεται από την ύπαρξη συστήματος πόλου - εμπολίου. Αντίθετα, το κιονόκρανο εμφανίζει σημαντική περιστροφή, με μόνιμη μετακίνηση στην εκτός επιπέδου διεύθυνση η οποία είναι περίπου 9 cm (Σχήμα 9) - γεγονός που βρίσκεται σε συμφωνία με ανάλογες εργασίες που έχουν γίνει για τμήμα του Πρόναου του Παρθενώνα (Psycharis et. al. 2003).

Πίνακας 5. Μέγιστες σχετικές μετακινήσεις διαδοχικών σφονδύλων κατά τη διάρκεια της διέγερσης και στο επίπεδο της διέγερσης (X)

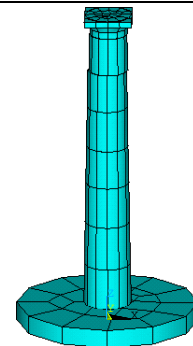
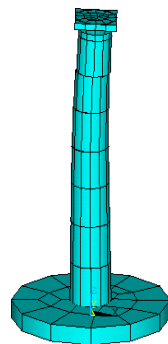
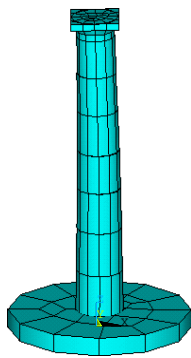
Διεπιφάνεια	Χωρίς θεώρηση συστήματος πόλου-εμπολίου	Με θεώρηση συστήματος πόλου-εμπολίου
	Μέγιστες σχετικές μετακινήσεις στο επίπεδο διέγερσης X (cm)	
1 ^{ος} σφόνδυλος - βάση	1.76	1.68
2 ^{ος} - 1 ^{ος} σφόνδυλος	0.49	0.43
3 ^{ος} - 2 ^{ος} σφόνδυλος	2.53	2.12
4 ^{ος} - 3 ^{ος} σφόνδυλος	2.96	2.24
5 ^{ος} - 4 ^{ος} σφόνδυλος	3.60	6.10
6 ^{ος} - 5 ^{ος} σφόνδυλος	4.05	0.65
7 ^{ος} - 6 ^{ος} σφόνδυλος	4.06	3.99
Κιονόκρανο - 7 ^{ος}	5.82	7.60

Πίνακας 6. Μέγιστες μόνιμες μετακινήσεις των σφονδύλων μετά το τέλος της σεισμικής κίνησης

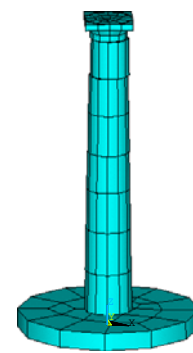
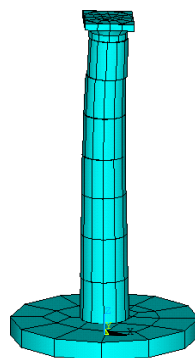
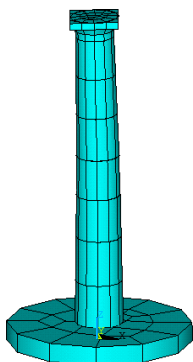
Επίπεδο	Χωρίς θεώρηση συστήματος	Με θεώρηση συστήματος
	πόλου-εμπολίου	πόλου-εμπολίου
Μέγιστες μόνιμες μετακινήσεις στο επίπεδο διέγερσης X (cm)		
1 ^{ος} σφόνδυλος	0.68	0.24
2 ^{ος} σφόνδυλος	0.15	0.27
3 ^{ος} σφόνδυλος	0.16	0.20
4 ^{ος} σφόνδυλος	0.37	0.09
5 ^{ος} σφόνδυλος	0.19	0.59
6 ^{ος} σφόνδυλος	0.80	0.37
7 ^{ος} σφόνδυλος	0.20	0.49
κιονόκρανο	0.06	3.07

Πίνακας 7. Μέγιστες σχετικές μετακινήσεις διαδοχικών σφονδύλων κατά τη διάρκεια της διέγερσης και στο επίπεδο της διέγερσης (Y)

Διεπιφάνεια	Χωρίς θεώρηση συστήματος	Με θεώρηση συστήματος
	πόλου-εμπολίου	πόλου-εμπολίου
Μέγιστες σχετικές μετακινήσεις στο επίπεδο διέγερσης Y (cm)		
1 ^{ος} σφόνδυλος - βάση	1.99	2.25
2 ^{ος} - 1 ^{ος} σφόνδυλος	0.32	0.43
3 ^{ος} - 2 ^{ος} σφόνδυλος	0.48	1.28
4 ^{ος} - 3 ^{ος} σφόνδυλος	1.83	1.16
5 ^{ος} - 4 ^{ος} σφόνδυλος	0.71	1.43
6 ^{ος} - 5 ^{ος} σφόνδυλος	7.55	5.81
7 ^{ος} - 6 ^{ος} σφόνδυλος	4.30	17.42
Κιονόκρανο - 7 ^{ος}	2.20	15.92



Χωρίς θεώρηση συστήματος πόλου - εμπολίου

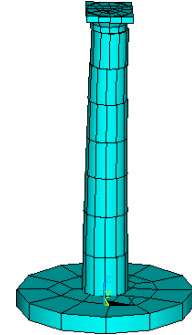
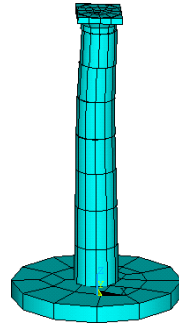
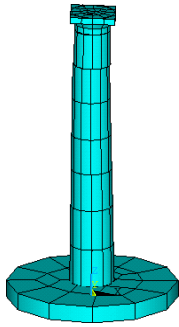


t = 4 sec

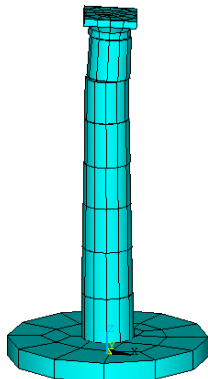
t = 5 sec

t = 6 sec

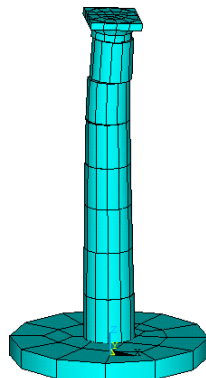
Με θεώρηση συστήματος πόλου - εμπολίου



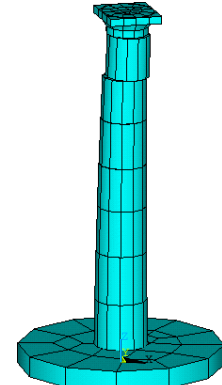
Χωρίς θεώρηση συστήματος πόλου - εμπολίου



t = 7 sec

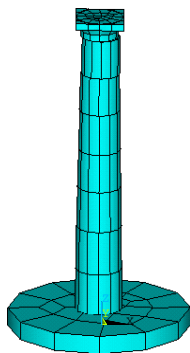


t = 8 sec

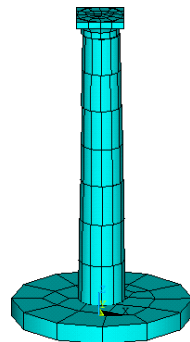


t = 9 sec

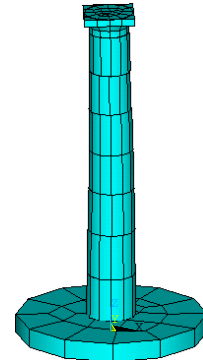
Με θεώρηση συστήματος πόλου - εμπολίου



t = 11 sec



t = 13 sec



t = 15 sec

Χωρίς θεώρηση συστήματος πόλου - εμπολίου

Με θεώρηση συστήματος πόλου - εμπολίου

Σχήμα 9. Μορφές απόκρισης του κίονα σε διάφορες χρονικές στιγμές του επιταχυνσιογραφήματος

7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, μελετάται το σύνθετο πρόβλημα της δυναμικής συμπεριφοράς των κίωνων. Αποδεικνύεται ότι η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιήθηκε μπορεί να αποτελέσει μια αξιόπιστη μέθοδο για την μελέτη της συμπεριφοράς κίωνων και σφονδυλωτών κατασκευών καθώς τα αποτελέσματα που προέκυψαν βρίσκονται σε ικανοποιητική συμφωνία με τη βιβλιογραφία. Σε αντίθεση λοιπόν με την επικρατούσα αντίληψη των τελευταίων ετών, η μέθοδος μπορεί να αποτελέσει εναλλακτική λύση εξέτασης των προβλημάτων γεωμετρικής μη-γραμμικότητας, υπό την προϋπόθεση ότι πραγματοποιούνται διεξοδικοί έλεγχοι αριθμητικής ευστάθειας, σύγκλισης και ευαισθησίας.

Με τη μέθοδο αυτή, μελετάται η συμπεριφορά μονολιθικών σωμάτων σε ολίσθηση και λικνισμό μέσω σειράς παραμετρικών αναλύσεων σε δύο και τρεις διαστάσεις οι οποίες αφορούν στην επιλογή του συντελεστή τριβής της διεπιφάνειας καθώς και στο μέγεθος και την περίοδο των ημιτονοειδών παλμών της κίνησης εισαγωγής στη βάση του συστήματος. Από τις αναλύσεις προκύπτει ότι ανεξάρτητα από τις παραμέτρους διέγερσης, η ανηγμένη συμπεριφορά ενός σώματος που εδράζεται επί διεγερόμενης βάσης, όπως αυτή εκφράζεται σε όρους καθαρής ολίσθησης, εξαρτάται με σταθερό και προβλέψιμο τρόπο από τον συντελεστή τριβής της διεπιφάνειας σώματος-βάσης.

Οι αναλύσεις επιβεβαίωσαν την τρίτη μορφή σχετικής κίνησης, η οποία αφορά σε ταυτόχρονο λικνισμό και ολίσθηση και λαμβάνει χώρα για τιμές του συντελεστή τριβής $0.15 < \mu < 0.7$ σε άμεση εξάρτηση πάντα από την ένταση της διέγερσης.

Από την τρισδιάστατη προσομοίωση ενός πραγματικού κίονα προέκυψε ακόμη, πως η δυναμική συμπεριφορά των σφονδυλωτών κατασκευών είναι γενικά ικανοποιητική καθώς παρά τις γενικά μεγάλες μετακινήσεις κατά τη διάρκεια της σεισμικής κίνησης, οι τελικές (μόνιμες) σχετικές μετακινήσεις μεταξύ των διαδοχικών σφονδύλων είναι μικρές. Σημειώνεται πάντως ότι κατά την διάρκεια της κίνησης παρατηρήθηκε ότι ο λικνισμός των σφονδύλων δημιούργησε έντονη περιστροφή περί τον κατακόρυφο άξονα με συνέπεια η συνισταμένη της μεταίνηση να είναι εκτός επιπέδου σε σχέση με αυτό της διέγερσης. Το συμπέρασμα αυτό γίνεται πιο έντονο στην περίπτωση αύξησης του στατικού συντελεστή τριβής και την θεώρηση ύπαρξης συστήματος πόλου-εμπολίου.

Τέλος, η θεώρηση ύπαρξης του ξύλινου πόλου διαφοροποιεί μεν τη δυναμική συμπεριφορά του κίονα, όμως το φαινόμενο αυτό περιορίζεται στα πρώτα δευτερόλεπτα της διέγερσης (μέχρι να συμβεί η θραύση του πόλου και η ανεξάρτητη μετακίνηση των σφονδύλων). Το συγκεκριμένο θέμα χρήζει περισσότερης διερεύνησης αναφορικά με την χρησιμοποίηση τιτανίου ή άλλων υλικών κατά τις αναστηλωτικές επεμβάσεις.

Σε κάθε περίπτωση, από την παρούσα αριθμητική προσέγγιση προκύπτει ότι η δυναμική (και σεισμική) συμπεριφορά των κίωνων είναι ένα πολύπλοκο και πολυπαραμετρικό φυσικό πρόβλημα, το οποίο είναι εξόχως μη-γραμμικό. Συνεπώς είναι σκόπιμο η αριθμητική προσομοίωση του συστήματος να συνεκτιμά ζητήματα γεωμετρικής μη γραμμικότητας ή/και και μετελαστικής συμπεριφοράς.

8 ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η εργασία αυτή εκπονήθηκε στο πλαίσιο του Ερευνητικού Προγράμματος «Πυθαγόρας II: Μελέτη της ανελαστικής σεισμικής συμπεριφοράς σπονδύλων κίωνων και κιονοστοιχιών με εμπόλιο σε αρχαιολογικούς ναούς - Εφαρμογή στην Ακρόπολη της Λίνδου» που χρηματοδοτήθηκε από το Υπουργείο Εθνικής Παιδείας και Θρησκευμάτων (Ε.Υ. καθ. Κ. Πιτιλάκης).

Σημαντική επιστημονική υποστήριξη προκειμένου να συγκεντρωθούν όλα τα απαραίτητα στοιχεία αλλά και να γίνει η επιλογή και διαμόρφωση των πεδίων της βάσης δεδομένων παρασχέθηκε από τον καθηγητή Κλασικής Αρχαιολογίας του Τμήματος Ιστορίας και Αρχαιολογίας του Α.Π.Θ. κ. Μιχάλη Τιβέριο και την ομάδα του. Πολύτιμες πληροφορίες και συμβουλές για τις αναστηλωτικές εργασίες και παροχή σημαντικών στοιχείων από τις αναστηλωτικές εργασίες στην Ακρόπολη της Λίνδου δόθηκαν από την αρχιτέκτονα κ. Βασιλική Ελευθερίου και την πολιτικό μηχανικό κ. Μαρία Πίκουλα. Τους ανωτέρω ευχαριστούν θερμά οι συγγραφείς.

9 ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- ANSYS Engineering Analysis System 2005. User and Theoretical Manual. ANSYS. Inc.. Southpointe. Canonsburg. Pennsylvania. Version 10.0.
- Konstantinidis D. & Makris N. 2005. Seismic response analysis of multidrum classical columns. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* DOI:10.1002/eqe.378
- Mouzakis HP. Psycharis IN. Papastamatiou DY. Carydis PG. Papantonopoulos C. Zambas C. 2002. Experimental investigation of the earthquake response of the model of a marble classical column. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*; 31(9):1681-1698.
- Ορλάνδος ΑΚ. 1958. Τα υλικά δομής των Αρχαίων Ελλήνων - ΙΙ. Αρχαιολογική Εταιρεία. Αθήνα
- Papantonopoulos C. Psycharis IN. Papastamatiou DY. Lemos JV. Mouzakis H. 2002. Numerical prediction of the earthquake response of classical columns using the distinct element method. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*; 31(9):1699 –1717.
- 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.
- Psycharis I. Lemos J. Papastamatiou D. Zambas C. Papantonopoulos C. 2003. Numerical study of the seismic behaviour of a part of the Parthenon Pronaos. *Earthquake Engng Struct.* 32:2063-2084
- Shenton III HW.1996. Criteria for initiation of slide. rock. and slide-rock rigid body modes. *Journal of EngineeringMechanics (ASCE)*; 122:690–693.
- Sinopoli A. 1989. Kinematic approach in the impact problem of rigid bodies. *Applied Mechanics Reviews (ASME)*; 42(11):S233–S244.
- Υπουργείο Πολιτισμού. Επιτροπή στερεώσεως και αναστηλώσεως μνημείων ακρόπολης Λίνδου 2002. ‘Αναστηλωτικές εργασίες στην Ακρόπολη της Λίνδου. Ελληνιστική Στοά’, Αθήνα.