

## Συμπεριφορά αρχαίων ναών υπό σεισμική διέγερση

Fabian Haas<sup>1</sup>, Georgios Maltidis<sup>2</sup>

### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η εργασία διερευνά την συμπεριφορά των κίωνων αρχαίων ναών υπό σεισμική διέγερση με χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων (ΜΠΣ). Αρχικά διερευνήθηκαν απλά γεωμετρικά συστήματα ενός άκαμπτου σώματος υπό διέγερση απλών παλμών με σκοπό την επαλήθευση υπάρχουσών αναλυτικών λύσεων. Έπειτα διερευνήθηκαν πιο πολύπλοκα συστήματα αποτελούμενα από σπονδυλωτούς κίονες και πλαίσια κίωνων. Για την επαλήθευση του μοντέλου ΠΣ συγκρίθηκαν τα αποτελέσματα της αριθμητικής ανάλυσης με τις αναλυτικές λύσεις για απλούς παλμούς. Για πιο σύνθετες διεγέρσεις γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων της ΜΠΣ με την αριθμητική επίλυση κεντρικών διαφορών του MATLAB®. Η αλληλεπίδραση καθώς και οι μηχανισμοί λικνισμού και τριβής μεταξύ των σπονδύλων ενός κίονα αξιολογήθηκαν ως προς την συνεισφορά τους στην σταθερότητα του συστήματος.

### 1 ΓΕΝΙΚΑ

Η σεισμική συμπεριφορά αρχαίων ναών ή τμημάτων αυτών (κίωνων, κιονοστοιχιών) έχει γίνει αντικείμενο εντατικής μελέτης τα τελευταία χρόνια. Η απόκριση των κίωνων σε δυναμική διέγερση διαφέρει από αυτήν κοινών υποστυλωμάτων κατασκευασμένων με σύγχρονα υλικά. Ο σκεδασμός της σεισμικής ενέργειας δεν λαμβάνει χώρα με τον σχηματισμό πλαστικών ζωνών αλλά μέσω μηχανισμών λικνισμού και ολίσθησης των κίωνων ή των σπονδύλων αυτών.

Λόγω της πολυπλοκότητας του προβλήματος είναι μία κλειστή αναλυτική λύση εφικτή μόνο για τις απλές περιπτώσεις ενός σώματος υποκείμενο σε απλές διεγέρσεις, όπως για παράδειγμα παλμοί και περιοδικές διεγέρσεις. Ο Housner [1] ανέπτυξε τις πρώτες λύσεις για την ελεύθερη ταλάντωση άκαμπτων σωμάτων, ωστόσο μόνο για θετικές γωνίες στροφής και μέχρι την πρώτη επαφή του σώματος με το άκαμπτο υπόστρωμα. Επίσης ανέπτυξε σχέσεις πρόβλεψης της ανατροπής σωμάτων υπό σταθερή επιτάχυνση. Ο Yim [2] εξέλιξε την εξίσωση περαιτέρω για θετικές και αρνητικές γωνίες στροφής. Στις δημοσιεύσεις των Spanos & Koh [3] όπως και των Makris & Roussos [4] δίνεται η κλειστή αναλυτική λύση της ελεύθερης ταλάντωσης για περαιτέρω διεγέρσεις. Οι διερευνήσεις στις προαναφερθείσες μελέτες περιορίζονται λόγω της

<sup>1</sup> M.Sc., Ingenieurgruppe Bauen, fabian.haasingenieurgruppe-bauen.de

<sup>2</sup> Dr.-Ing., Federal Waterways Engineering and Research Institute, Germany, Georgios.maltidis@baw.de

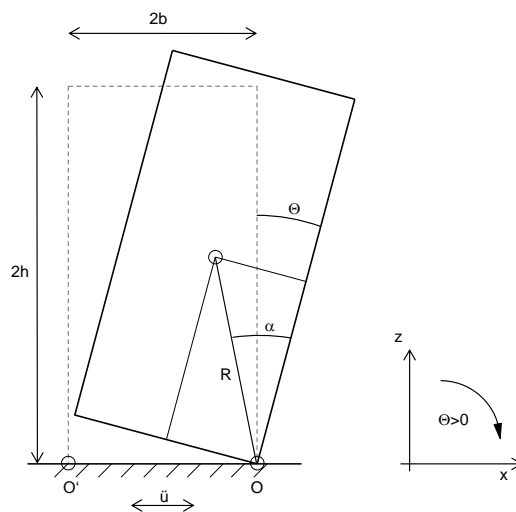
πολυπλοκότητας του προβλήματος καθώς και της δύσκολης διατύπωσης του μηχανισμού της επαφής του άκαμπτου σώματος με το υπέδαφος σε δισδιάστατες λύσεις με ένα μόνο σώμα.

Η αποτίμηση της συμπεριφοράς πολυπλοκότερων συστημάτων μπορεί να γίνει, όπως σε αυτήν την διερεύνηση, με χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων και πειραματικών αναλύσεων [7-12]

## 2 ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΔΙΚΝΙΣΤΙΚΗΣ ΤΑΛΑΝΤΩΣΗΣ

### 2.1 Άκαμπτα σώματα

Το σύστημα αποτελείται από ένα ορθογώνιο άκαμπτο σώμα εδρασμένο πάνω σε οριζόντιο μη ενδόσιμο υπόστρωμα. Οι διαστάσεις του σώματος ορίζονται ως εξής: ύψος  $2h$  και πλάτος  $2b$ . Η γεωμετρία του σώματος μπορεί να περιγραφεί από δύο παραμέτρους  $R$  και  $\alpha$ . Η παράμετρος  $R = \sqrt{b^2+h^2}$  είναι η απόσταση του κέντρου βάρους του σώματος από τα δύο κέντρα στροφής  $O$  και  $O'$ . Η λεπτότητα  $\alpha$  δίνεται από τον τύπο  $\alpha = \arctan(b/h)$ .



Σχήμα 1: Σχεδιάγραμμα του συστήματος

Μέσω διέγερσης στο επίπεδο έδρασης εκτρέπεται το σώμα με μία γωνία στροφής  $\theta$ . Για  $\ddot{u} < 0$  (όπου  $\ddot{u}$  η οριζόντια επιτάχυνση) ορίζεται η γωνία  $\theta$  ως θετική και για  $\ddot{u} > 0$  αρνητική. Με την εκτροπή του σώματος δρα ταυτόχρονα σε αυτό η ροπή επαναφοράς. Εφόσον το σώμα δεν ανατραπεί, αλλάζει η κατεύθυνση της κίνησης λόγω της ροπής επαναφοράς και ταλαντώνεται το σώμα γύρω από τα σημεία  $O$  και  $O'$ . Κατά την επαναφορά του σώματος και κατά την επαφή με το υπόστρωμα δεν λαμβάνει χώρα καμία απορρόφηση κραδασμών. Σε αυτήν την εργασία περιγράφεται η λικνίζουσα κίνηση ως ταλάντωση αναλογικά με την ταλάντωση μονοβάθμιου ταλαντωτή παρόλο που τα δύο συστήματα διαφέρουν ριζικά. Η απόκριση του συστήματος εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τα χαρακτηριστικά της διεπιφάνειας σώματος-υπόστρωματος. Εάν η τριβή μεταξύ του σώματος και του θεμελίου είναι αμελητέα και η λεπτότητα του σώματος μικρή, τότε το σώμα ολισθαίνει. Με αυξανούσα τριβή και λεπτότητα αλλάζει η



κίνηση σε λικνίζουσα γύρω από τα σημεία  $O$  και  $O'$ . Στην μεταβατική περιοχή είναι εφικτή μια μικτή μορφή απόκρισης αποτελούμενη και από τις δύο κινήσεις (ολίσθηση και λικνισμό). Θεωρείται ότι λόγω μεγάλης τραχύτητας μεταξύ των επιφανειών λαμβάνει χώρα μόνο λικνίζουσα ταλάντωση.

## 2.2 Εξίσωση κίνησης για ένα σώμα

Σε συνάρτηση με την γωνία εκτροπής  $\theta$  προκύπτει η εξίσωση της λικνίζουσας κίνησης. Η εξίσωση αυτή αφορά αποκλειστικά στον λικνισμό και όχι σε μεικτή μορφή λικνισμού – ολίσθησης του σώματος. Η εξίσωση κίνησης για θετική και αρνητική γωνία εκτροπής  $\theta$  δίνεται από:

$$I_o \ddot{\theta}(t) + mgR \sin[a - \theta(t)] = -m\ddot{u}_g(t)R \cos[a - \theta(t)], \theta(t) < 0 \quad (1)$$

$$I_o \ddot{\theta}(t) + mgR \sin[-a - \theta(t)] = -m\ddot{u}_g(t)R \cos[-a - \theta(t)], \theta(t) > 0 \quad (2)$$

Με  $I_o$  την ροπή αδράνειας επιφανείας και  $g$  την επιτάχυνση της βαρύτητας σε  $m/s^2$ . Με εισαγωγή της παραμέτρου συχνότητας  $p$ :

$$p^2 = \sqrt{(3g)/(4R)} \text{ για κύβους και} \quad (3)$$

$$p^2 = \sqrt{(12gR)/(3b^2 + 4h^2)} \text{ για κυλίνδρους} \quad (4)$$

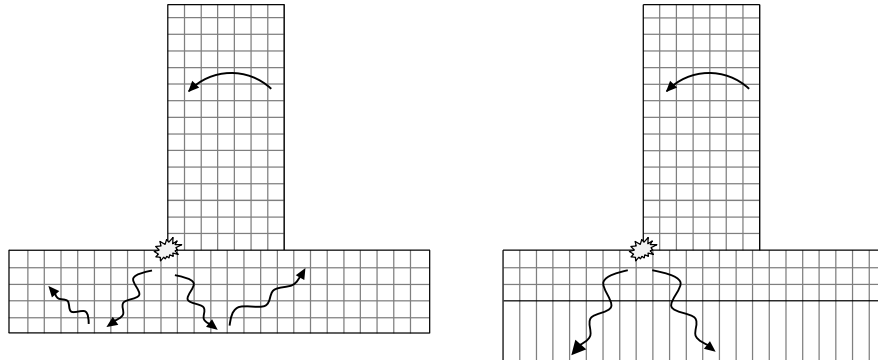
Με την παράμετρο συχνότητας  $p$  μπορεί να χαρακτηριστεί η δυναμική απόκριση του συστήματος. Η παράμετρος αυτή δεν πρέπει να συγχέεται με την ιδιοσυχνότητα ενός μονοβάθμιου ταλαντωτή. Βασική διαφορά είναι ότι η συχνότητα λικνισμού σε ελεύθερη ταλάντωση σε σχέση με την ιδιοσυχνότητα ενός μονοβάθμιου ταλαντωτή δεν είναι σταθερή [5]. Με εισαγωγή της συνάρτησης πρόσημου και της παραμέτρου συχνότητας απλοποιείται η παραπάνω έκφραση σε:

$$\ddot{\theta}(t) = -p^2 \left\{ \sin[\text{sgn}[\theta(t)] - \theta(t)] + \frac{\ddot{u}_g}{g} \cos[\text{sgn}[\theta(t)] - \theta(t)] \right\} \quad (5)$$

## 3 ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

### 3.1 Επιλογή πεπερασμένων στοιχείων

Χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus/Explicit. Για την διεξαγωγή τρισδιάστατων αναλύσεων χρησιμοποιήθηκαν εξαεδρικά στοιχεία μειωμένης ολοκλήρωσης και γραμμικής γεωμετρίας. Για το στερεό σώμα και υπόστρωμα χρησιμοποιήθηκαν τα στοιχεία C3D8R και τον ελαστικό ημιχώρο τα στοιχεία CIN3D8 που είναι διαθέσιμα στο Abaqus. Τα δεύτερα στοιχεία έχουν ενσωματωμένες τις συνοριακές συνθήκες Lysmer-Kuhlmeyer και αποσβένουν τα κύματα, που παράγονται κατά την επαναφορά και κρούση του σώματος στο υπόστρωμα.



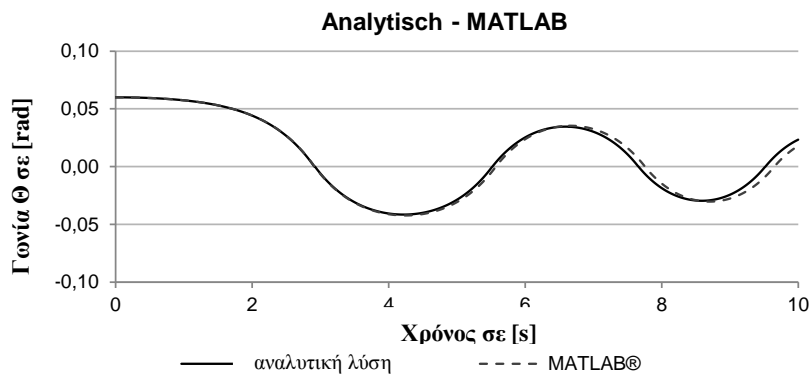
Σχήμα 2: Εξιδανίκευση με στοιχεία απείρου.

### 3.2 Εξιδανίκευση της επαφής

Μια σημαντική παράμετρος των αναλύσεων σπονδυλωτών κίονων στα πλαίσια αυτής της εργασίας είναι η διερεύνηση της αλληλεπίδρασης (ολίσθηση και κρούση) μεταξύ των σπονδύλων. Η διασκέδαση της ενέργειας κατά την ολίσθηση μεταξύ των σπονδύλων καθώς και την μεταφορά και σκέδαση ενεργείας κάθετα στις διεπιφάνειες αυτών κατά το ανασήκωμα και την κρούση επηρεάζουν καθοριστικά την κινηματική και την απόκριση του συστήματος. Ο ορισμός των επιφανειών, που έρχονται σε επαφή, είναι του τύπου general contact του Abaqus χωρίς να είναι απαραίτητος ο διαχωρισμός των επιφανειών σε master-slave.

### 3.3 Επαλήθευση του μοντέλου ΠΣ

Για την βελτίωση του μοντέλου ΠΣ και την ταυτόχρονη επαλήθευση της αναλυτικής λύσης χρησιμοποιήθηκε ένα μεμονωμένο σώμα, του οποίου η απόκριση μπορεί να βρεθεί με τις αναλυτικές λύσεις, που υπάρχουν διαθέσιμες στην βιβλιογραφία. Με την αριθμητική επίλυση της εξίσωσης κίνησης με χρήση του MATLAB® επιτεύχθηκε μία περαιτέρω επαλήθευση για παραδείγματα με πολύπλοκότερες διεγέρσεις, για τις οποίες δεν υπάρχει αναλυτική λύση. Η επίλυση της διαφορικής εξίσωσης στο MATLAB® έγινε με χρήση της μεθόδου των κεντρικών διαφορών ενώ στο Abaqus με ρητό αλγόριθμο (explicit) χρονικής ολοκλήρωσης.

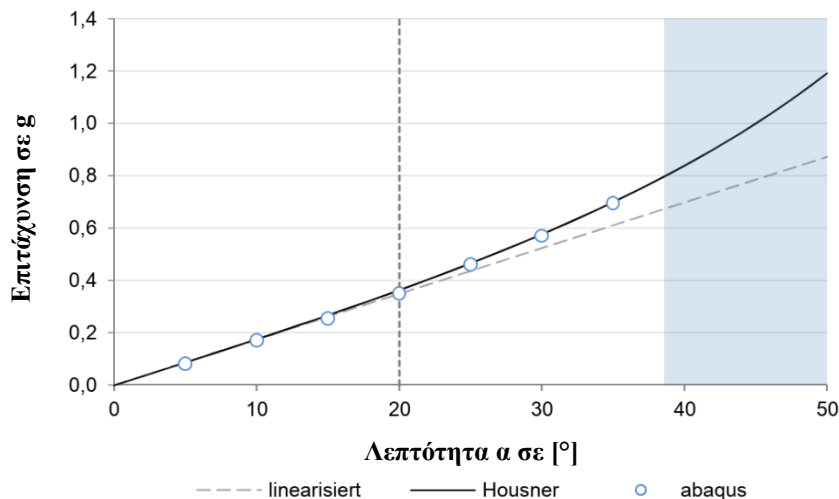


Σχήμα 3: Σύγκριση της αναλυτικής λύσης με την αριθμητική λύση από το MATLAB®.

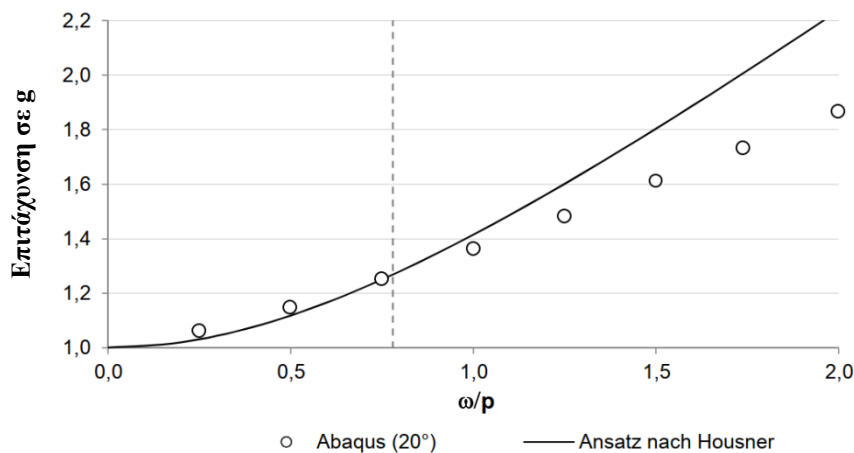
Περαιτέρω συγκρίθηκαν οι αναλύσεις με τη ΜΠΣ με τις αναλυτικές λύσεις για τον υπολογισμό της ελάχιστης επιτάχυνσης που προκαλεί λικνισμό ( $a_g > g \tan a$ ) και της επιτάχυνσης που προκαλεί ανατροπή του σώματος κατά Housner [1] βάσει του τύπου (6):

$$\alpha_{min} = ag \sqrt{1 + \left(\frac{\omega}{p}\right)^2} \quad (6)$$

Οι υπολογισθείσες τιμές με το Abaqus συμπίπτουν με τις υπολογισθείσες με τον τύπο του Housner για την πρώτη περίπτωση. Για την δεύτερη περίπτωση του υπολογισμού της επιτάχυνσης ανατροπής οι αριθμητικές αναλύσεις δίνουν μικρότερες τιμές επιτάχυνσης ανατροπής από αυτήν του Housner (Σχήμα 4).



Σχήμα 4: Ελάχιστη επιτάχυνση για πρόκληση λικνίζουσας κίνησης.



Σχήμα 5: Σύγκριση ελάχιστης επιτάχυνσης για ημιτονοειδή παλμό.

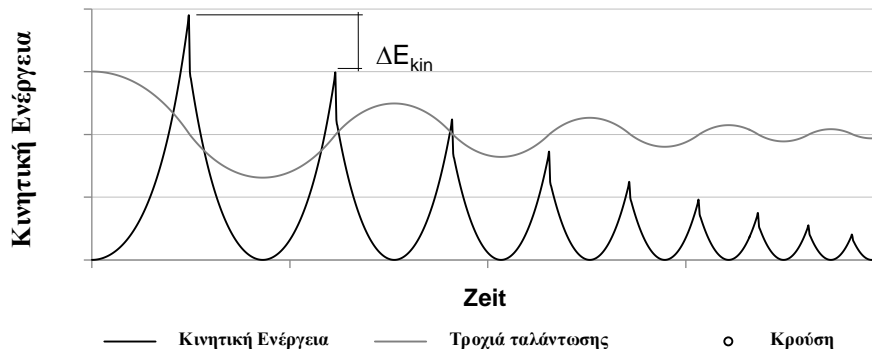
### 3.4 Συντελεστής επαναφοράς (restitution coefficient)

Για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων του Abaqus καθορίζεται η απόκλιση αυτών από την αναλυτική λύση. Στην αναλυτική λύση άκαμπτων σωμάτων παραμελείται η επιρροή της τριβής ενώ στις αριθμητικές αναλύσεις ο ορισμός μίας τιμής τριβής είναι προϋπόθεση για την επίτευξη λικνισμού του σώματος. Γι αυτόν τον λόγο η απόκλιση των δύο συντελεστών επαναφοράς περιλαμβάνει πέρα από άλλες αριθμητικές επιδράσεις αυτήν της τριβής. Βάσει της ιστορίας της κινητικής ενέργειας του συστήματος μπορεί να υπολογισθεί ο συντελεστής επαναφοράς ως ο λόγος των μεγίστων τιμών. Με τον τύπο της κινητικής ενέργειας στρέφοντος σώματος

$$E_{rot} = \frac{1}{2} I_o \omega^2 \quad \text{με } \omega = \dot{\theta} \quad (7)$$

προκύπτει το ισοζύγιο των ενεργειών

$$\frac{E_{rot,1}}{E_{rot,2}} = \left( \frac{1}{2} I_o \dot{\theta}_1^2 \right) / \left( \frac{1}{2} I_o \dot{\theta}_2^2 \right) = (\dot{\theta}_1 / \dot{\theta}_2)^2 = r \quad (8)$$



Σχήμα 6: Σχηματική απεικόνιση της κινητικής ενέργειας.

### 3.5 Επιρροή της τριβής

Στις παραδοχές για την εύρεση της εξίσωσης κίνησης κατά τον Housner ανήκουν η επαρκής τραχύτητα μεταξύ του σώματος και του θεμελίου και σχετικές μετατοπίσεις μεταξύ αυτών των δύο αποκλείονται. Στην πραγματικότητα αποτελούν μεταξύ άλλων αυτές οι δύο διεργασίες παράγοντες για την σκέδαση της ενέργειας. Με την εισαγωγή τριβής στο μοντέλο ΠΣ είναι δυνατή η απεικόνιση των επιρροών αυτών των χαρακτηριστικών.

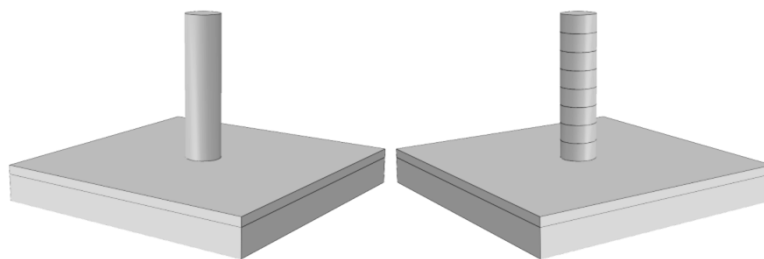
### 3.6 Φάσμα λικνισμού

Το φάσμα λικνισμού είναι ένα μέσο για τον χαρακτηρισμό της δυναμικής απόκρισης άκαμπτων σωμάτων υπό δυναμική διέγερση. Σε συνάρτηση με την λεπτότητα  $a$  και την συνάρτηση της περιόδου  $T=2\pi/p$  μπορεί να απορρεύσει σε αναλογία με το κλασικό φάσμα απόκρισης η απόκριση του εξεταζόμενου σώματος [7]. Για αύξουσες τιμές της περιόδου  $T$  αυξάνει το

μέγεθος του σώματος. Ο Μακρής [4] έχει δείξει ότι με αύξον μέγεθος του σώματος αυξάνει η επίδραση γραμμικά, η δε αντίσταση παραβολικά.

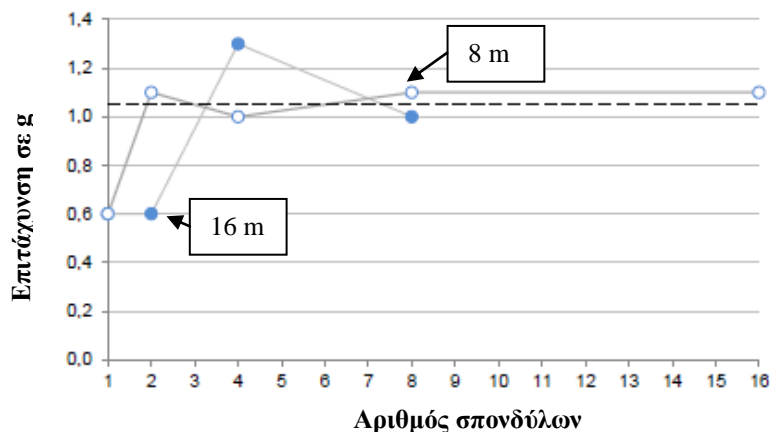
#### 4 ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΣΕ ΣΠΟΝΔΥΛΩΤΟΥΣ ΚΙΟΝΕΣ ΚΑΙ ΠΛΑΙΣΙΑ

Οι σπονδυλωτοί κίονες αναπτύσσουν σε σύγκριση με τους μονολιθικούς κίονες λόγω διαφόρων μηχανισμών μεγαλύτερη σταθερότητα. Μεταξύ άλλων είναι για αυτό υπεύθυνος ο μεγαλύτερος αριθμός διεπιφανειών, όπου λαμβάνει χώρα μεγαλύτερος σκεδασμός ενέργειας και έτσι μπορεί να απορροφήσει το σύστημα μεγαλύτερη κινητική ενέργεια. Η επιρροή του αριθμού και της διάταξης των σπονδύλων διερευνήθηκαν με σκοπό την αποτίμηση της ικανότητας του κίονα να απορροφά ενέργεια.



Σχήμα 7: Ένας μονολιθικός και ένας σπονδυλωτός κίονας

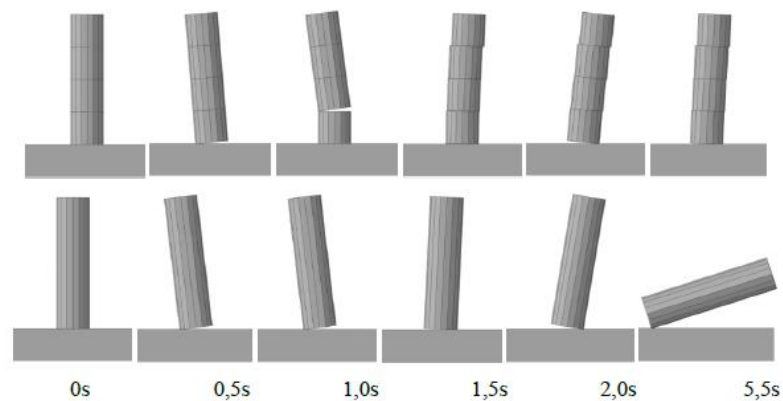
Σαν περίπτωση μελέτης παρουσιάζονται δύο κίονες με σταθερή διάμετρο 2 μ. και ύψος 8 μ. και 16 μ. αντίστοιχα. Ο κοντύτερος κίονας διαιρέθηκε σε 1 (μονολιθικός), 2, 4 και 8 σπόνδουλους, ενώ ο μεγαλύτερος επιπλέον σε 16 σπονδύλους. Η διέγερση είναι ημιτονοειδής με περίοδο 1 sec. Σκοπός της διερεύνησης ήταν αν βρεθεί η επιτάχυνση για την οποία ο εκάστοτε κίονας καταρρέει.



Σχήμα 8: Αξιολόγηση της δυναμικής συμπεριφοράς με αύξοντα αριθμό σπονδύλων.



Τα αποτελέσματα συνοψίζονται στο Σχήμα 8. Στον άξονα x είναι ο αύξοντος αριθμός των σπονδύλων των ενώ στον άξονα y η επιτάχυνση της διέγερσης σε g λίγο πριν την κατάρρευση του κίονα. Η διερεύνηση δείχνει μία σαφή αύξηση της σταθερότητας του κίονα, όταν αυτός αποτελείται από περισσότερους από 2 σπόνδυλους. Με περαιτέρω αύξηση του αριθμού των σπονδύλων δεν παρατηρείται κάποια σημαντική αύξηση της δυναμικής αντοχής του κίονα. Για σπονδυλωτούς κίονες αντιστοιχεί η επιτάχυνση κατάρρευσης κατά μέσο όρο 1,7 φορές την επιτάχυνση κατάρρευσης του αντίστοιχου μονολιθικού κίονα. Το Σχήμα 9 δείχνει επί παραδείγματι στην πάνω σειρά την απόκριση του κίονα των 8 μ. με 4 σπονδύλους και στην κάτω σειρά την απόκριση του αντίστοιχου μονολιθικού κίονα. Ο μονολιθικός κίονας καταρρέει σε μία επιτάχυνση 0,9 g ενώ ο σπονδυλωτός κίονας λόγω της μεγαλύτερης του σεισμικής αντοχής δεν καταρρέει.



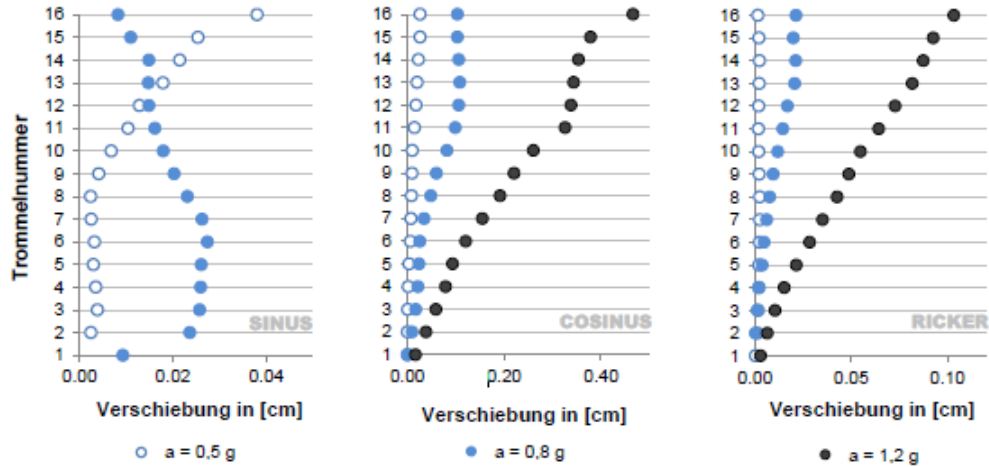
Σχήμα 9: Μονολιθικός και ένας σπονδυλωτός κίονας υπό ίδια διεγέρση

#### 4.1 Απόκριση σε διάφορες διεγέρσεις

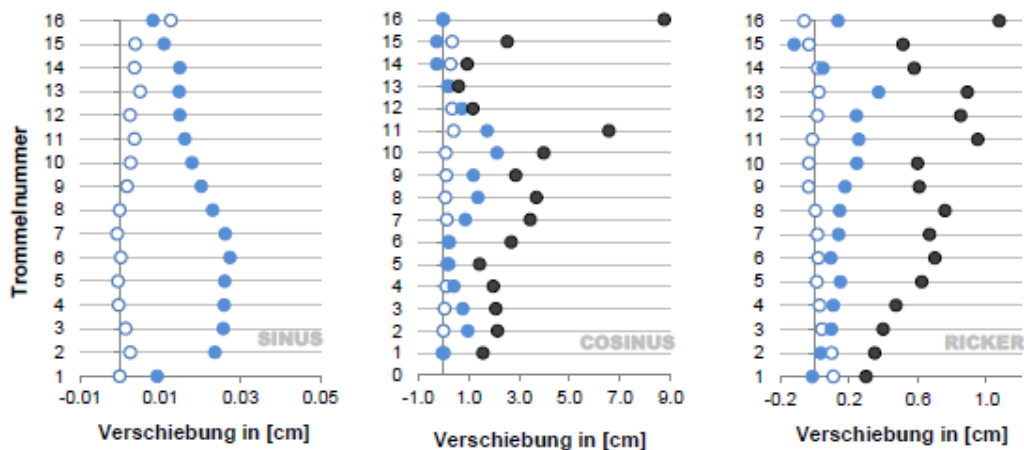
Η ικανότητα ενός σπονδυλωτού κίονα εξαρτάται και από το είδος και την συχνότητα της διέγερσης. Σαν παράδειγμα διερευνήθηκε ο κίονας των 16 μ. με 16 σπονδύλους. Τρεις παλμοί (ημιτονοειδής, συνημιτονοειδής και Ricker) αποτελούν τις διεγέρσεις. Η διάρκεια του παλμού είναι 1 sec και η επιτάχυνση αυξάνεται μέχρι την κατάρρευση του κίονα. Το Σχήμα 10 δείχνει πόσο διαφέρουν οι τελικές μετατοπίσεις των σπονδύλων (μόνιμες μετατοπίσεις) ανάλογα με τον επιβαλλόμενο παλμό. Για ημιτονοειδή παλμό και επιτάχυνση 1,2 g καταρρέει ο κίονας γι αυτό δεν εμφανίζονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα.

Ανάλογα με τον παλμό βρίσκονται οι μέγιστες σχετικές μετατοπίσεις των σπονδύλων σε διαφορετικά ύψη του κίονα. Για παράδειγμα για τον ημιτονοειδή παλμό εμφανίζονται οι μέγιστες σχετικές μετατοπίσεις στην βάση του κίονα, για τον συνημιτονοειδή παλμό στο μέσο του ύψους και για τον παλμό Ricker στο πάνω μέρος του κίονα.





Σχήμα 10: Απόλυτες μετατοπίσεις για ημιτονοειδή, συνημιτονοειδή και Ricker παλμό.



Σχήμα 11: Σχετικές μετατοπίσεις για ημιτονοειδή, συνημιτονοειδή και Ricker παλμό.

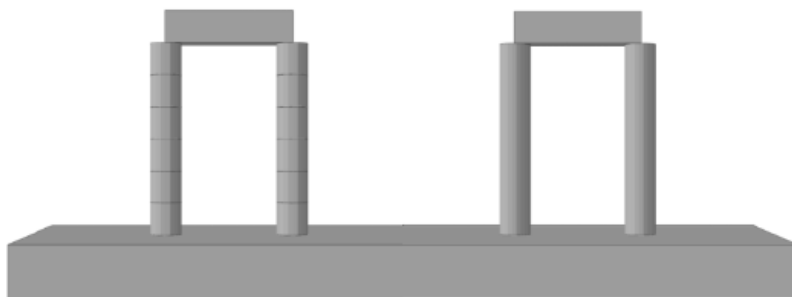
Συγκρίνοντας τις σχετικές μετατοπίσεις των σπονδύλων γίνεται εμφανές ότι ο ημιτονοειδής παλμός προκαλεί σε σχέση με τους άλλους δύο παλμούς τις μικρότερες σχετικές μετατοπίσεις ( $u_{max}=0,025\text{cm}$ ). Αντιθέτως για ένα συνημιτονοειδή παλμό ( $a=0,8\text{g}$ ) είναι οι μετατοπίσεις περίπου 100 φορές μεγαλύτερες ( $u_{max}=2,5\text{cm}$ ). Μία αιτία για αυτήν την συμπεριφορά έγκειται στην μορφή του παλμού. Για τον συνημιτονοειδή παλμό ξεκινά η διέγερση με το μέγιστο εύρος της διέγερσης, γεγονός που προκαλεί σημαντικές αδρανειακές δυνάμεις, οι οποίες με την σειρά τους οδηγούν σε μεγάλες σχετικές μετατοπίσεις. Τέτοιες μετατοπίσεις έχουν παρατηρηθεί σε κίονες ναών που έχουν υποστεί σεισμική διέγερση (Σχήμα 12).



Σχήμα 12: Σχετικές μετατοπίσεις των σπονδύλων κίωνων; Αριστερά ναός του Ποσειδώνα, δεξιά Ηραίο (Σάμος).

#### 4.2 Πλαισιωτά συστήματα

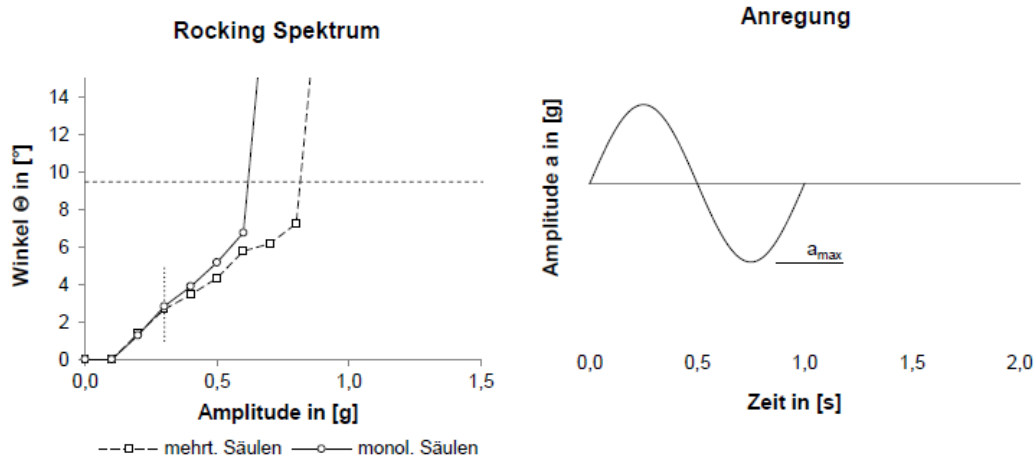
Τα αποτελέσματα των προηγούμενων ενοτήτων αποτελούν την βάση για την διερεύνηση πολυπλοκότερων συστημάτων, όπως πλαισιωτών φορέων (σπονδυλωτοί κίονες με επιστήλιο). Διερευνήσεις πλαισιωτών φορέων αποτελούμενων από μονολιθικούς κίονες μπορούν να βρεθούν στην βιβλιογραφία. Σε αυτήν την ενότητα εξετάζονται συστήματα δύο σπονδυλωτών κίωνων με επιστήλιο (Σχήμα 13) και αξιολογείται η σεισμική τους ικανότητα βάσει της διέγερσής τους με απλούς παλμούς. Οι κίονες έχουν ύψος 12 μ. και διάμετρο 2 μ. Έτσι προκύπτουν οι χαρακτηριστικές παράμετροι των κίωνων ( $p=1,45 \text{ rad/sec}$  και  $R=4,12 \text{ μ.}$ ).



Σχήμα 13: Σπονδυλωτά πλαίσια (αριστερά) και μονολιθικά πλαίσια (δεξιά)

Όπως δείχνει το φάσμα λικνισμού του Σχήματος 14 δείχνουν και τα δύο συστήματα αρχικά μια γραμμική απόκριση. Μέσα σε αυτήν την περιοχή (διακεκομμένη γραμμή) δεν λαμβάνουν χώρα σημαντικές διεργασίες ολίσθησης και λικνισμού μεταξύ των σπονδύλων. Κάτω από αυτήν την επιτάχυνση συμπεριφέρονται τα σπονδυλωτά πλαίσια σαν μονολιθικά πλαίσια, χωρίς να αποκολλώνται οι σπόνδυλοι μεταξύ τους. Με περαιτέρω αύξηση της επιτάχυνσης παρατηρείται ο διαχωρισμός των δύο καμπυλών, με το σπονδυλωτό πλαίσιο να επιδεικνύει μεγαλύτερη σεισμική ικανότητα. Τα πλαίσια με μονολιθικούς κίονες καταρρέουν στο 75% της μέγιστης επιτάχυνσης των πλαισίων με σπονδυλωτούς κίονες.

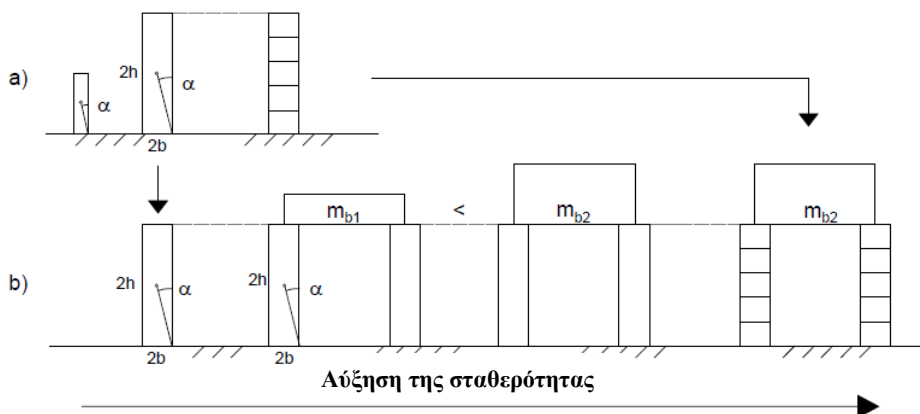
Για σπονδυλωτά πλαίσια, ακριβώς όπως και για σπονδυλωτούς μεμονωμένους κίονες, αυξάνεται η σταθερότητα του συστήματος. Συγκεκριμένα, λόγω του επιστηλίου, που δρα λόγω του βάρους του ευεργετικά, επιτυγχάνεται μία περαιτέρω αύξηση της σεισμικής ικανότητας έναντι σε σεισμό.



Σχήμα 14: Φάσμα λικνισμού για ημιτονοειδή διέγερση

## 5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σκοπός της εργασίας ήταν η διερεύνηση των λειτουργιών λικνισμού και ολίσθησης άκαμπτων σωμάτων. Στο επίκεντρο της διερεύνησης αυτής ήταν σπονδυλωτοί κίονες και πλαίσια με σπονδυλωτούς κίονες και επιστήλιο. Μέσω των μηχανισμών, που λαμβάνουν χώρα, ένα μεγάλο μέρος της κινητικής ενέργειας σκεδάζεται μέσω της κρούσης και της ολίσθησης μεταξύ των σπονδύλων. Το Σχήμα 15 συνοψίζει τα αποτελέσματα της διερεύνησης σε μία εικόνα. Η περιγραφή της επίδρασης του μεγέθους από τον Housner ορίζει ότι από δύο σώματα με ίδια λεπτότητα, πιο σταθερό είναι αυτό με το μεγαλύτερο μέγεθος. Μια περαιτέρω αύξηση της σταθερότητας επιτυγχάνεται μέσω των σπονδυλωτών κίωνων, για τους λόγους, που προαναφέρθηκαν. Επιπροσθέτως, αυξάνει η σεισμική αντίσταση του συστήματος με την προσθήκη ενός επιστηλίου.



Σχήμα 15: Σύγκριση της σταθερότητας των διερευνημένων συστημάτων

## 6 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Housner, G., „The behaviour of inverted pendulum structures during earthquakes,“ 1963.
2. Yim, C.-S., Chopra, A. K. und Penzien, J., „Rocking response of rigid blocks to earthquakes,“ *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, pp. 565-587, 1980.
3. Spanos, P. D. und Koh, A.-S., „Rocking of rigid blocks due to harmonic shaking,“ *Journal of Engineering* M4 Makris, N. und Roussos, Y., „Rocking response and overturning of equipment under horizontal pulse-type motions,“ *Pacific Earthquake Engineering Research Center*, 1998.
4. Makris, N. und Vassiliou, M. F., „Analysis of the rocking response of rigid blocks standing free on a seismically isolated base,“ *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, pp. 177-196, 2012.
5. Makris, N. und Konstantinidis, D., „The rocking spectrum and the shortcomings of design guidelines,“ *Pacific Earthquake Engineering Research Center*, 07 2001.
6. Stefanou, I., Psycharis, I. and Georgopoulos, I.-O., „Dynamic response of reinforced masonry columns in classical monuments,“ *Construction and Building Materials*, pp. 4325-4337, 2011.
7. 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.
8. 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.
9. 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.
10. Μ.-Ε. Δασίου, Ι. Ψυχάρης, Ι. Βάγιας. Ανάλυση σεισμικής συμπεριφοράς κίωνων και κιονοστοιχιών αρχαίων ναών. 3ο Πανελλήνιο Συνέδριο Αντισεισμικής Μηχανικής & Τεχνικής Σεισμολογίας 5–7 Νοεμβρίου, 2008 Άρθρο 1832
11. Παπαδόπουλος Κ., Βιντζηλαίου Ελ., Η Σεισμική Απόκριση των Κίωνων της Περίστασης του Ναού του Επικούριου Απόλλωνα., 3ο Πανελλήνιο Συνέδριο Αντισεισμικής Μηχανικής & Τεχνικής Σεισμολογίας 5–7 Νοεμβρίου, 2008
12. Haas, F. Verhalten alter Tempel unter Erdbebenbeanspruchung. Masterarbeit. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Massivbau und Baustofftechnologie, Lehrstuhl für Massivbau. 2015.