

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ (Τ.Ε.Ι) ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ

ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ: ΑΡΧΙΜΗΔΗΣ ΙΙΙ

«Ενίσχυση Ερευνητικών Ομάδων ΤΕΙ»

Υπόέργο: 12

Τίτλος: «Πειραματική μελέτη της συνεισφοράς αποσβεστήρα σωματιδίων στην μείωση της απόκρισης μνημείων σε σεισμική διέγερση »

Επιστημονικός Υπεύθυνος: Δρ. Αγγελική Παπαλού

ΠΑΡΑΛΟΤΕΟ
ΕΚΘΕΣΗ ΠΡΟΟΔΟΥ



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο

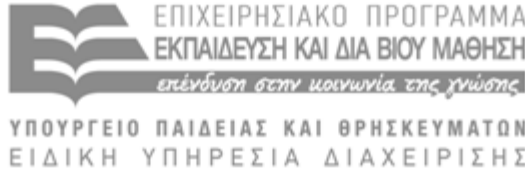


ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ



Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης

«Ενίσχυση Ερευνητικών Ομάδων στο ΤΕΙ Πάτρας» με MIS **383592** του Ε.Π. «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» που συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση «Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο (ΕΚΤ)» και Εθνικούς Πόρους

ΕΚΘΕΣΗ ΠΡΟΟΔΟΥ

Υπόεργο 12: «Πειραματική μελέτη της συνεισφοράς αποσβεστήρα σωματιδίων στην μείωση της απόκρισης μνημείων σε σεισμική διέγερση»

Επιστημονική Υπεύθυνος : Δρ. Αγγελική Παπαλού

Μέλη Κύριας Ερευνητικής Ομάδας: Δρ. Αγγελική Παπαλού, Δρ. Διονύσιος Ρουμπιέν, Δρ. Αθανάσιος Τριανταφύλλου

Μέλη Εξωτερικής Ομάδας Συνεργατών: Έργκις Χατζιράι, Ευάγγελος Κοντός, Δημήτριος Μπάρος

Η έκθεση περιλαμβάνει το πακέτο εργασίας 5.

Πακέτο εργασίας 5: Γενίκευση των αποτελεσμάτων. (1/1/2015-30/6/2015)

Η έκθεση περιλαμβάνει επίσης συμπληρωματικά στοιχεία για το Πακέτο εργασίας 4 και κάποια επιπλέον στοιχεία για τα πακέτα 2 και 3.

ΠΑΚΕΤΟ ΕΡΓΑΣΙΑΣ 5

ΓΕΝΙΚΕΥΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Διερεύνηση της αποτελεσματικότητας του αποσβεστήρα σωματιδίων στην δυναμική απόκριση σφονδύλωτου κίονα έγινε με την δημιουργία αριθμητικών μοντέλων του κίονα και του αποσβεστήρα. Τα αποτελέσματα αυτών των μοντέλων μαζί με τα πειραματικά αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν σε προηγούμενα πακέτα εργασίας χρησιμοποιήθηκαν για την γενίκευση των αποτελεσμάτων και την παρουσίαση οδηγιών χρήσης για όσους ασχολούνται με την αναστύλωση και αποκατάσταση μνημείων.

1. Ισοδύναμος αποσβεστήρας με ένα σωματίδιο

Η δυναμική απόκριση ενός κίονα είναι δύσκολο να μελετηθεί αναλυτικά λόγω ολίσθησης και λικνίσματος των σφονδύλων και γενικά της μη γραμμικής συμπεριφοράς του κίονα. Η δυσκολία αυτή αυξάνεται με την προσάρτηση ενός αποσβεστήρα σωματιδίων που είναι γνωστό από προηγούμενες έρευνες ότι η συμπεριφορά του είναι μη γραμμική. Η πρόβλεψη της δυναμικής συμπεριφοράς ενός κίονα με σωματίδια μπορεί να γίνει με αριθμητικά μοντέλα. Ένα από αυτά είναι η παρουσίαση του κίονα σαν ένα μονοβάθμιο σύστημα χωρίς και με προσαρτημένο έναν αποσβεστήρα στην κορυφή. Η βάση θεωρείται πακτωμένη ενώ η κορυφή είναι ελεύθερη να κινηθεί. Το σύνολο των σωματιδίων προσομοιώνονται σαν ένα σωματίδιο με ισοδύναμη μάζα. Η θεωρία της συμπεριφοράς ενός αποσβεστήρα με ένα σωματίδιο προσαρτημένο σε μονοβάθμιο σύστημα έχει μελετηθεί από άλλους ερευνητές [1]. Είναι προφανές ότι η προσομοίωση αυτή είναι απλουστευτική μια και δεν μπορεί να προσομοιώσει την συμπεριφορά των σφονδύλων ένα προς ένα. Όμως στις περισσότερες δονήσεις οι κάτω σφόνδυλοι παρουσιάζουν ελάχιστη μετακίνηση (ιδίως αυτός της βάσης) και σε πολλές περιπτώσεις εμφανίζονται όλοι οι σφόνδυλοι να κινούνται ενωμένοι δηλαδή χωρίς να ολισθαίνουν μεταξύ τους και με πολύ μικρό λίκνισμα. Η μέθοδος αυτή λοιπόν είναι προσεγγιστική αλλά μπορεί να δώσει πληροφορίες για το μέγεθος του κούφιου τμήματος του αποσβεστήρα που συμβάλει πιο αποτελεσματικά στην μείωση της απόκρισης του κίονα και το μέγεθος της μάζας του σωματιδίου που πρέπει να χρησιμοποιηθεί σε σχέση με την μάζα του κίονα.

Αρχικά μελετήθηκαν τα αποτελέσματα των πειραμάτων του 3m κίονα για να βρεθεί το ποσοστό κρίσιμης απόσβεσης. Μελετώντας τα σήματα κατά την διάρκεια της ελεύθερης ταλάντωσης που εμφανίζεται μετά το τέλος της εξαναγκασμένης, π.χ. για την απόκριση του

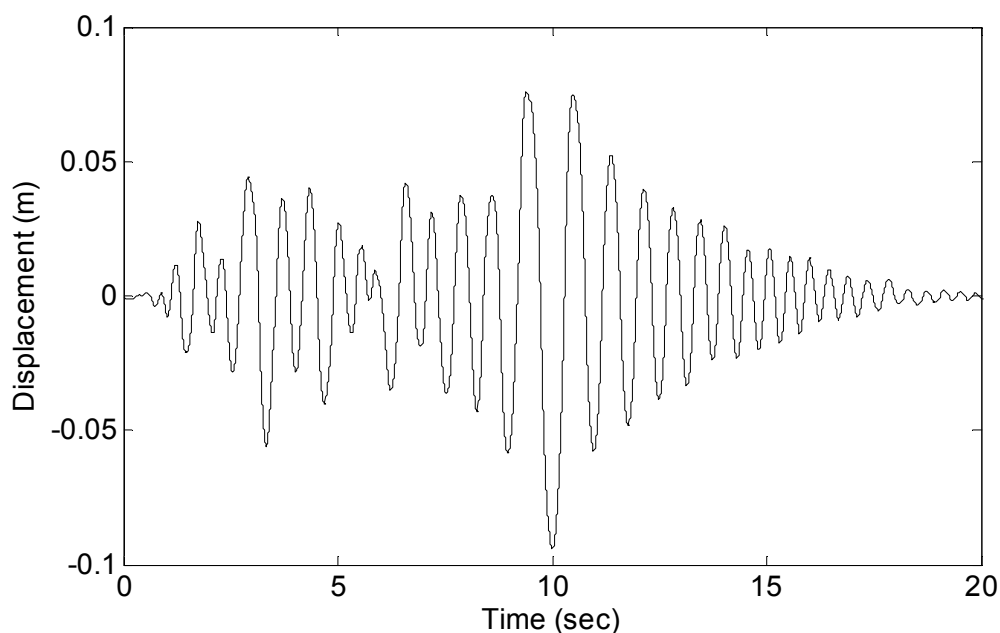
κίονα σε τυχαία διέγερση αυτή εμφανίζεται μετά τα 10 sec (Εικ. 1), βρέθηκε το ποσοστό της κρίσιμης απόσβεσης ζ να παίρνει τις εξής τιμές.

Ποσοστό κρίσιμης απόσβεσης ζ χωρίς τον αποσβεστήρα σωματιδίων

- 1ο πειρ.: 3.5% (τυχαία ταλάντωση)
- 2ο πειρ.: 3.6% (τυχαία ταλάντωση)
- 3ο πειρ.: 4.7% (τυχαία ταλάντωση)
- 4ο πειρ.: 2.6% (σεισμός Καλαμάτας)
- 5ο πειρ.: 2.1% (τυχαία ταλάντωση – κίονας υπό κλίση)

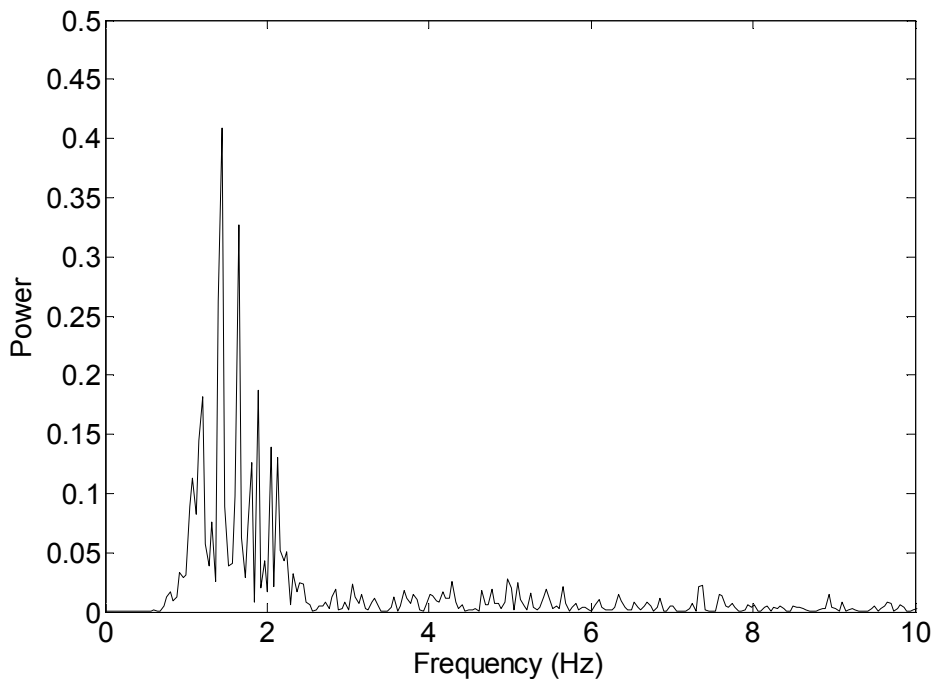
Ποσοστό κρίσιμης απόσβεσης ζ με προσαρτημένο τον αποσβεστήρα σωματιδίων

- 1ο πειρ.: 5.2% (τυχαία ταλάντωση)
- 2ο πειρ.: 4.4% (τυχαία ταλάντωση)
- 3ο πειρ.: 4% (τυχαία ταλάντωση)
- 4ο πειρ.: 4.8% (σεισμός Καλαμάτα)
- 5ο πειρ.: 4.7% (τυχαία ταλάντωση – κίονας υπό κλίση)
- 6ο πειρ.: 5.6% (τυχαία ταλάντωση – κίονας υπό κλίση – ένα μεγάλο σωματίδιο 20 cm διάμετρο)



Εικ. 1.: Απόκριση του 11^{ου} σφονδύλου (κορυφή) του κίονα χωρίς αποσβεστήρα υπό τυχαία διέγερση.

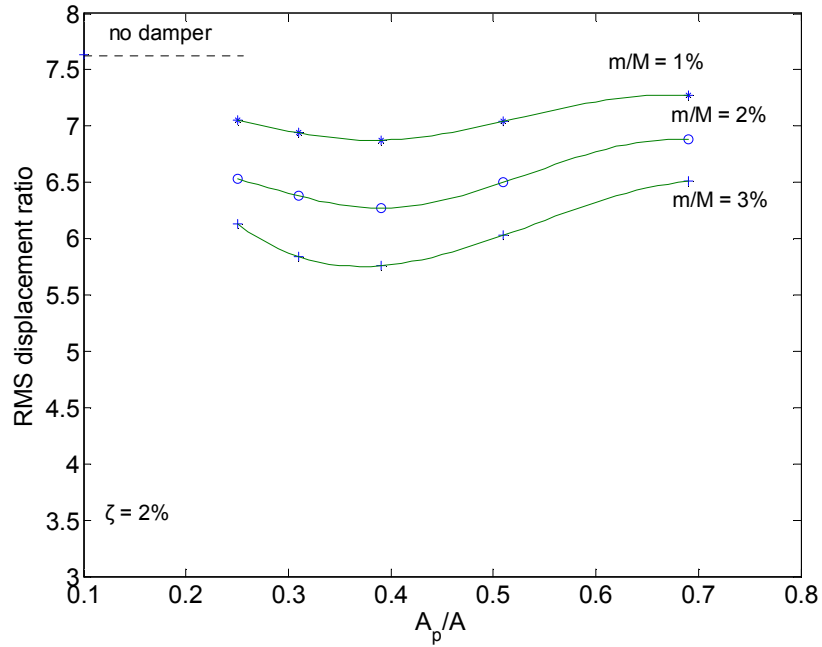
Μελετώντας τον μετασχηματισμό Fourier της απόκρισης του κίονα (Εικ. 2) οι ιδιοσυχνότητες του κίονα εμφανίζονται μεταξύ 1-3 Hz.



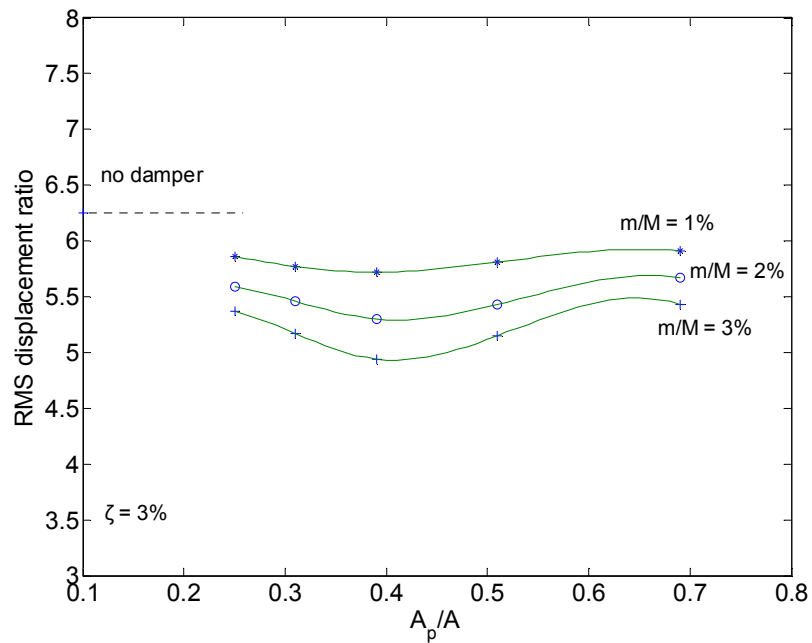
Εικ. 2: Μετασχηματισμός Fourier επιτάχυνσης σφονδύλου κορυφή

Με βάση τα παραπάνω ο κίονας μελετήθηκε σαν ένα μονοβάθμιο σύστημα χωρίς και με προσαρτημένο έναν αποσβεστήρα με ένα σωματίδιο στην κορυφή. Οι τιμές του ζ που θεωρήθηκαν ήταν 2%, 3%, 4%, 5%, 6% και 7%. Οι τιμές του λόγου της μάζας του σωματιδίου προς την μάζα του κίονα (m/M) που θεωρήθηκαν ήταν οι εξής: 1%, 2% και 3%. Το εμβαδόν του κούφιου τμήματος του αποσβεστήρα πήρε διάφορες. Οι τιμές του εμβαδού του σωματιδίου (κοιτώντας την προβολή του στο επίπεδο) σε σχέση με το εμβαδόν του κούφιου τμήματος του αποσβεστήρα (A_p/A) θεωρήθηκαν από 0.25 – 0.70. Η ανάλυση έγινε για τις εξής ιδιοσυχνότητες 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 και 3.0 Hz. Ο λόγος της ρίζας του αθροίσματος των τετραγώνων των RMS (root mean square) της απόκρισης του συστήματος με αποσβεστήρα για κάθε συχνότητα προς την ρίζα του αθροίσματος της απόκρισης του συστήματος χωρίς αποσβεστήρα για κάθε συχνότητα παρουσιάζονται στην Εικ. 3 (a)-(f). Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι όσο η λόγος μάζας του σωματιδίου προς την μάζα του κύριου φορέα (m/M) αυξάνει η απόκριση του κίονα μειώνεται. Μεγαλύτερη μείωση εμφανίζεται για λόγο A_p/A περίπου στα 40%. Όσο αυξάνεται το ποσοστό κρίσιμης απόσβεσης τόσο μειώνεται η επιρροή του αποσβεστήρα σωματιδίων στην απόκριση του κύριου φορέα (Εικ. 3(f)). Η συνεχής αύξηση της μάζας όμως δεν θα μείωνε από ένα σημείο και μετά την

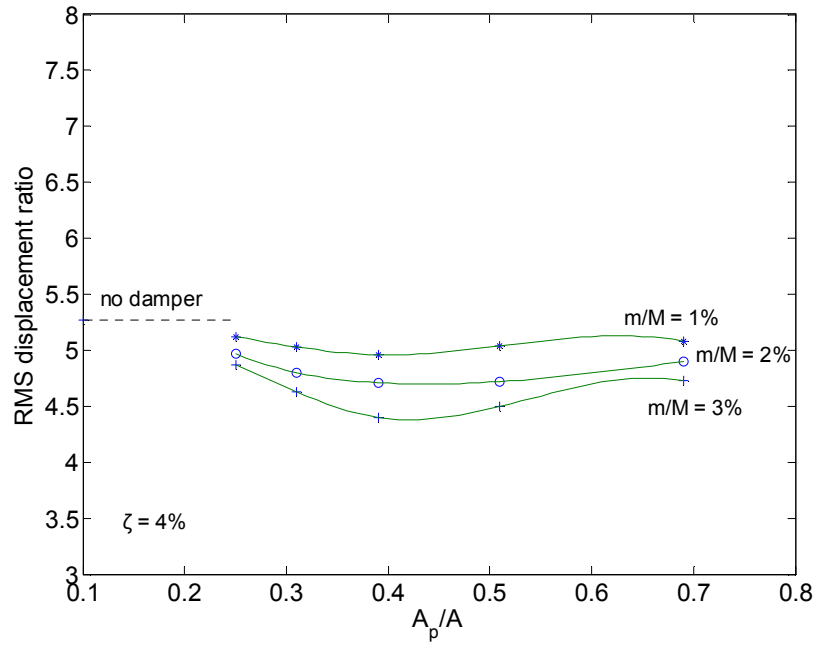
απόκριση της ταλάντωσης γιατί ο αποσβεστήρας δεν λειτουργεί ικανοποιητικά όταν τα σωματίδια είναι σφηνωμένα και δεν έχουν χώρο να κινηθούν.



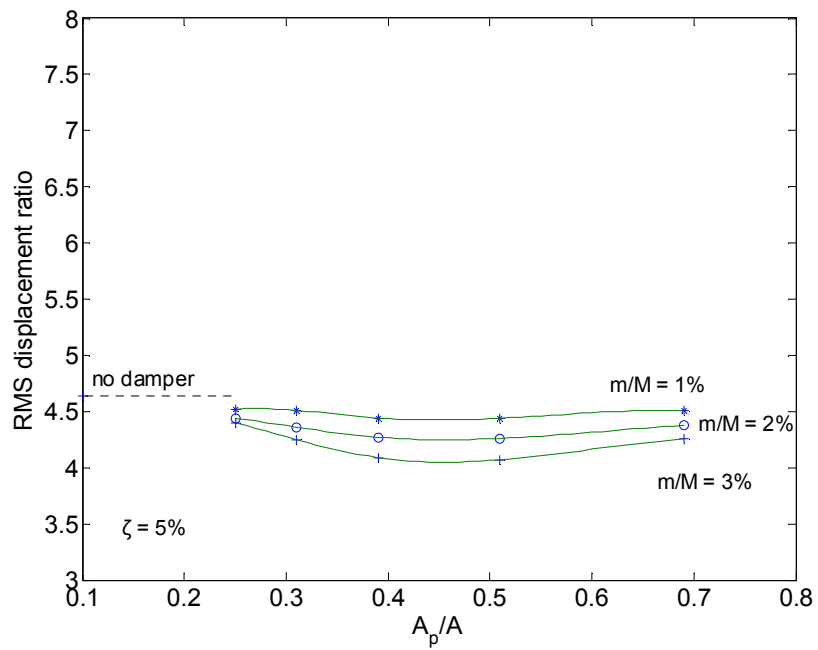
(a)



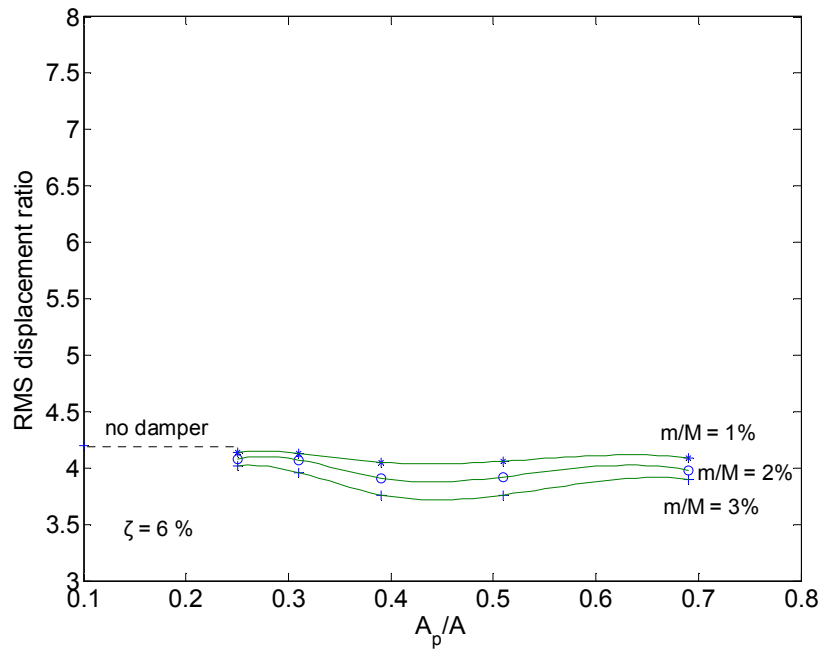
(b)



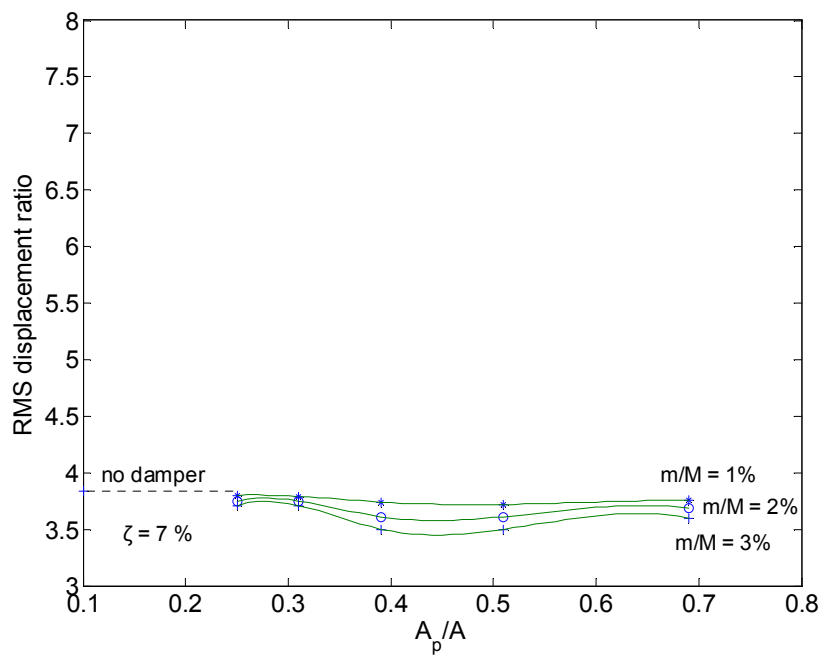
(c)



(d)



(e)



(f)

Εικ. 3: RMS λόγου μετακίνησης του μονοβάθμιου συστήματος χωρίς και με αποσβεστήρα.

2. Αριθμητική προσομοίωση του συστήματος κίονα-αποσβεστήρα σωματιδίων με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων

Στόχος της παρούσης ενότητας είναι να παρουσιάσει αναλυτικά τη διαδικασία δημιουργίας ενός αριθμητικού προσομοιώματος του κίονα πριν και μετά την τοποθέτηση του αποσβεστήρα σωματιδίων, το οποίο δύναται να χρησιμοποιηθεί για την αναλυτική διερεύνηση της συμπεριφοράς του και, ως εκ τούτου, για την αξιολόγηση της αποδοτικότητας της προτεινόμενης επέμβασης.

Το πρόβλημα της συμπεριφοράς ενός αρχαιοελληνικού κίονα έναντι δυναμικών διεγέρσεων επιβαλλόμενων σε μία οριζόντια διεύθυνση μπορεί, δεδομένης και της συμμετρίας του, να προσεγγιστεί αριθμητικά μορφώνοντας είτε ένα δισδιάστατο (2-D) είτε ένα τρισδιάστατο (3-D) προσομοίωμα, χρησιμοποιώντας προφανώς τα κατάλληλα ανά περίπτωση πεπερασμένα στοιχεία. Η τρισδιάστατη προσομοίωση τέτοιου είδους προβλημάτων οδηγεί κατά κανόνα σε αποτελέσματα υψηλότερης ακρίβειας, καθώς η συμπεριφορά των μοντέλων δύναται, υπό συνθήκες, να προσεγγίσει ικανοποιητικά την αντίστοιχη των πραγματικών κατασκευών. Ωστόσο, η διαδικασία μόρφωσης των τρισδιάστατων προσομοιωμάτων είναι γενικώς χρονοβόρα και επίπονη, καθώς απαιτεί, κατά κανόνα, τον προσεκτικό ορισμό τιμών για μεγαλύτερο αριθμό παραμέτρων σε σχέση με τα αντίστοιχα δισδιάστατα. Επιπλέον, το σημαντικότερο «μειονέκτημα» της τρισδιάστατης προσέγγισης του προβλήματος σχετίζεται με τον απαιτούμενο υπολογιστικό φόρτο και χρόνο, ο οποίος, όταν επιχειρείται λεπτομερής διακριτοποίηση του φορέα, αυξάνεται ραγδαία. Ως εκ τούτου, αναλύσεις υπερβολικά λεπτομερών προσομοιωμάτων που προσεγγίζουν με μεγάλη ακρίβεια το φυσικό μοντέλο είναι πρακτικά αδύνατον να πραγματοποιηθούν σε εύλογο χρόνο με συμβατικούς υπολογιστές.

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, γίνεται σαφές ότι το πλεονέκτημα της χρηστικότητας που διακρίνει τα δισδιάστατα προσομοιώματα τα καθιστά ένα χρήσιμο εργαλείο τόσο για «καθημερινή χρήση», π.χ. για σχεδιασμό, όσο και για ερευνητικούς σκοπούς. Στην περίπτωση αυτή το ενδεχόμενο έλλειμμα ακρίβειας αντισταθμίζεται από αυξημένο αριθμό αναλύσεων παραμετρικού τύπου που είναι δυνατές δεδομένου του σημαντικά μειωμένου υπολογιστικού φόρτου και του μικρού χρόνου που απαιτείται για τις αναλύσεις.

Ακολουθώντας την λογική που αναπτύχθηκε παραπάνω επιλέχθηκε για τις ανάγκες τις παρούσας διερεύνησης η μόρφωση και χρήση τόσο επίπεδων (2-D) όσο και χωρικών (3-D) προσομοιωμάτων του κίονα με και χωρίς τον αποσβεστήρα σωματιδίων. Τα επίπεδα προσομοιώματα χρησιμοποιήθηκαν κυρίως για τη διερεύνηση και αξιολόγηση των παραμέτρων που διέπουν τη συμπεριφορά των επιφανειών επαφής τόσο μεταξύ των

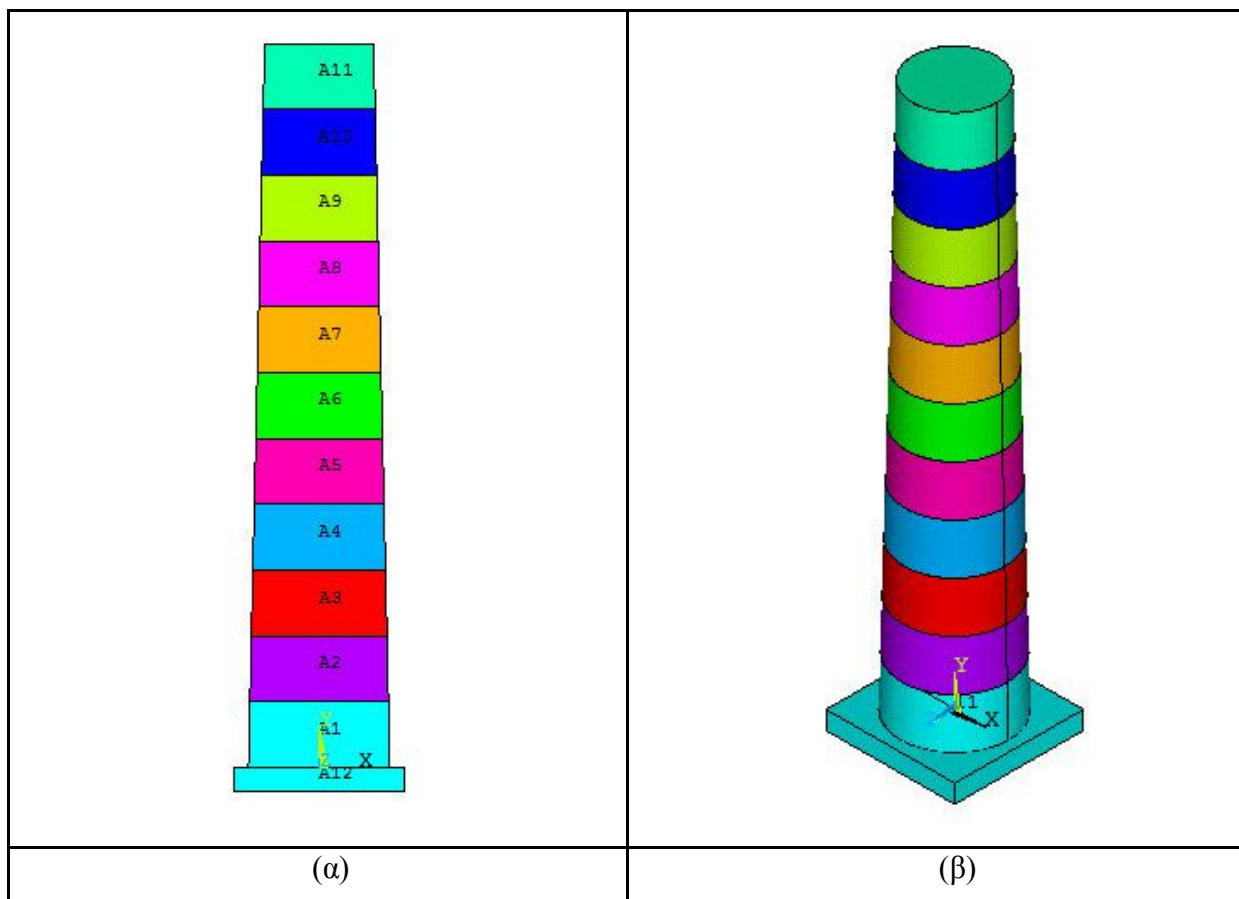
ανεξαρτήτων σφονδύλων, όσο και μεταξύ του αποσβεστήρα και της βάσης και των τοιχωμάτων της κοιλότητας στην οποία τοποθετείται. Τα χωρικά προσομοιώματα είχαν στόχο να προσφέρουν μια υψηλότερης ακρίβειας «απεικόνιση» της απόκρισης του κίονα, με τους περιορισμούς που επιβάλλονται από την προσπάθεια «ισορρόπησης» του απαιτούμενου χρόνου ανάλυσης και της ακρίβειας των αποτελεσμάτων.

Η απόκριση του κίονα καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από τη συμπεριφορά των διεπιφανειών μεταξύ των επιμέρους μελών του, η οποία εξαρτάται κυρίως από την τριβή που αναπτύσσεται. Η «μεταφορά» της στο αριθμητικό προσομοίωμα αποτέλεσε και την κύρια «ιδιαιτερότητα» του συγκεκριμένου προβλήματος και καθόρισε σε μεγάλο βαθμό την επιλογή του λογισμικού που χρησιμοποιήθηκε. Τελικώς, τα αριθμητικά προσομοιώματα του κίονα δημιουργήθηκαν χρησιμοποιώντας το γνωστό λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων ANSYS Multiphysics, με το οποίο, προφανώς, πραγματοποιήθηκαν και οι απαιτούμενες μη-γραμμικές δυναμικές αναλύσεις χρονοϊστορίας. Το συγκεκριμένο λογισμικό επιλέχθηκε καθώς διαθέτει μία εκτενή βιβλιοθήκη στοιχείων για εφαρμογές στο ευρύτερο πεδίο της δομοστατικής, τα οποία μπορούν να καλύψουν επαρκώς τις απαιτήσεις του προβλήματος που επιλύθηκε. Οι ελαστικές ιδιότητες των σφονδύλων και του αποσβεστήρα προσομοιώθηκαν με «συνήθη» επιφανειακά ή χωρικά στοιχεία (ανάλογα με το «είδος» του μοντέλου) για τη δε συμπεριφορά των διεπιφανειών χρησιμοποιήθηκαν ζεύγη στοιχείων επαφής, όπως περιγράφεται αναλυτικά στις ακόλουθες παραγράφους.

Σημειώνεται η διαδικασία και τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στην παρούσα έκθεση αφορούν την αριθμητική προσομοίωση της συμπεριφοράς του μεγάλης κλίμακας φυσικού μοντέλου του κίονα που χρησιμοποιήθηκε για τις πειραματικές δοκιμές. Η ανάλυση του υπό κλίμακα μοντέλου (του μικρότερου κίονα) παρουσιάζει δυσκολίες σχετιζόμενες με την ενδεχόμενη πτώση σφονδύλων εξαιτίας του σημαντικά μειωμένου βάρους της κατασκευής. Αν και το λογισμικό ANSYS διαθέτει διαδικασίες που επιτρέπουν την προσέγγιση τέτοιων καταστάσεων (kill elements), συχνά σε περιπτώσεις έντονης αποδιοργάνωσης του προσομοιώματος παρατηρούνται αριθμητικές αστάθειες που οδηγούν σε πρόωρη διακοπή των αναλύσεων και σε μη αξιοποιήσιμα αποτελέσματα. Λαμβάνοντας υπόψιν και την κρίσιμη αυτή παράμετρο, η πραγματοποιηθείσα διερεύνηση εστίασε στον μεγάλης κλίμακας κίονα.

2.1 Γεωμετρία προσομοιωμάτων

Για τη μόρφωση της γενικής γεωμετρίας των προσομοιωμάτων χρησιμοποιήθηκαν οι διαθέσιμες στο πρόγραμμα ανάλυσης επιλογές ορισμού επιφανειών και όγκων για το δισδιάστατο και τρισδιάστατο προσομοίωμα του κίονα αντιστοίχως. Στην πρώτη περίπτωση κάθε σφόνδυλος αντιπροσωπεύεται από μία τραπεζοειδή επιφάνεια ενώ στη δεύτερη από έναν κόλouro κώνο. Οι επιφάνειες και όγκοι έχουν σταθερό ύψος (0.272m) και μεταβλητό πλάτος και διάμετρο αντιστοίχως, ακολουθώντας τις διαστάσεις των σφονδύλων του φυσικού μοντέλου. Για λόγους απλοποίησης του προσομοιώματος που συνεπάγεται οικονομία υπολογιστικών πόρων επιλέχθηκε να μην προσομοιωθεί ο δακτύλιος που διαμορφώνεται στο άνω μέρος κάθε σφονδύλου. Η άμεση προσομοίωση του δακτυλίου εκτιμήθηκε ότι θα αύξανε σημαντικά τον αριθμό των στοιχείων και κόμβων στις συγκεκριμένες περιοχές του μοντέλου γεγονός που θα οδηγούσε σε δυσανάλογη αύξηση του απαιτούμενου χρόνου για την ανάλυση του μοντέλου αυξάνοντας παράλληλα και την πιθανότητα αριθμητικής αστάθειας, χωρίς να υπάρχει κάποιο ευδιάκριτο και εύκολα εκτιμήσιμο πλεονέκτημα (ήτοι σαφή αύξηση ακρίβειας). Άλλωστε η επίδραση του δακτυλίου στη συμπεριφορά του κίονα μπορεί να ληφθεί υπόψιν εμμέσως με την κατάλληλη τροποποίηση (μείωση) του συντελεστή τριβής, τέτοια ώστε να ισοδυναμεί με τη μειωμένη επιφάνεια επαφής μεταξύ των σφονδύλων. Σύμφωνα με τις παραπάνω παραδοχές διαμορφώθηκε η γενική γεωμετρία των δύο αριθμητικών προσομοιωμάτων, επίπεδου και χωρικού, του κίονα χωρίς τον αποσβεστήρα που παρουσιάζεται στην Εικ. 4.

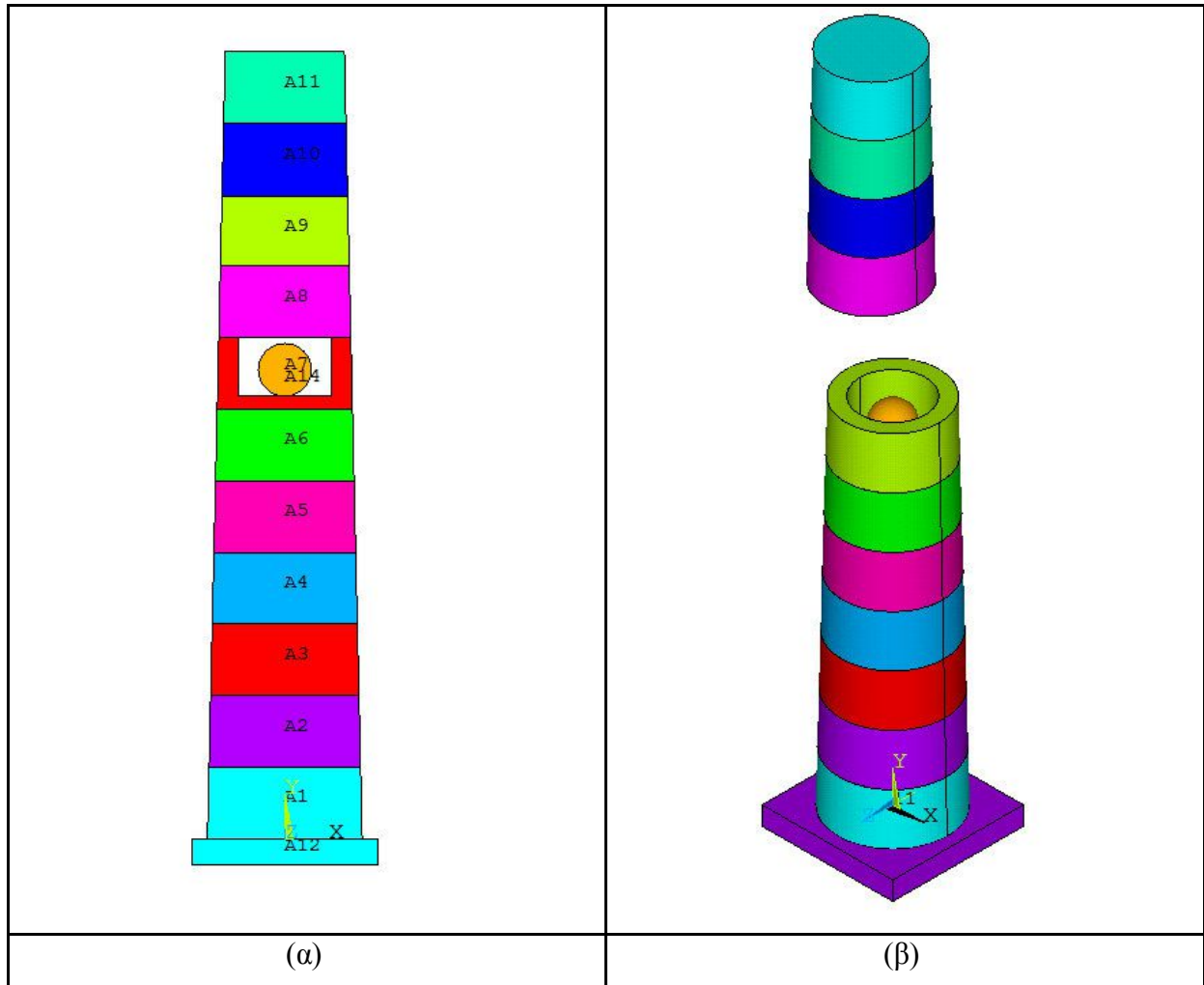


Εικ. 4: Γεωμετρία (α) επίπεδου (β) χωρικού προσομοιώματος του κίονα χωρίς τον αποσβεστήρα.

Είναι σημαντικό να εξασφαλισθεί η ανεξαρτησία των επιφανειών και των όγκων κατά τη φάση μόρφωσης της γενικής γεωμετρίας του προσομοιώματος, ορίζοντας διαφορετικές «οντότητες» (entities – επιφάνειες, γραμμές, σημεία) στις περιοχές όπου σχηματίζονται οι διεπιφάνειες του μοντέλου. Η σύνδεση και συμπεριφορά των διεπιφανειών αυτών ορίζεται ακολούθως, κατά τη φάση διακριτοποίησης (meshing), με την προσθήκη κατάλληλων στοιχείων επαφής (contact elements).

Με αντίστοιχο τρόπο μορφώθηκαν και τα προσομοιώματα του κίονα με τον ισοδύναμο αποσβεστήρα ενός σωματιδίου που ελήφθη υπόψιν κατά την αριθμητική προσέγγιση του προβλήματος. Για τον αποσβεστήρα ορίστηκε μία κυκλική επιφάνεια διαμέτρου 0.20m στο επίπεδο προσομοίωμα και ένας σφαιρικός όγκος με ίδια διάμετρο στο χωρικό προσομοίωμα. Για την τοποθέτηση του αποσβεστήρα απαιτήθηκε η δημιουργία κοιλότητας στο σπόνδυλο, η οποία επιτυγχάνεται αφαιρώντας μια ορθογωνική επιφάνεια πλάτους 0.349m στο διασδιάστατο προσομοίωμα και έναν κυλινδρικό όγκο διαμέτρου 0.349m στο τρισδιάστατο

μοντέλο. Σύμφωνα με τα παραπάνω προέκυψαν τα δύο προσομοιώματα του κίονα με τον αποσβεστήρα ενός σωματιδίου τοποθετημένο στον έβδομο σπόνδυλο που παρουσιάζονται στην Εικ. 5. Δοκιμές πραγματοποιήθηκαν και σε προσομοιώματα όπου ο αποσβεστήρας τοποθετείται στον ανώτερο σπόνδυλο και τα αποτελέσματά τους συζητούνται ακολούθως.



Εικ. 5: Γεωμετρία (α) επίπεδου (β) χωρικού προσομοιώματος του κίονα με αποσβεστήρα ενός σωματιδίου στον έβδομο σπόνδυλο.

2.2 Βασικές παραδοχές προσομοίωσης

2.2.1 Ιδιότητες υλικών

Για τη δημιουργία του αριθμητικού προσομοιώματος απαιτήθηκε, προφανώς, ο ορισμός των ιδιοτήτων των υλικών που καθορίζουν εν πολλοίς και τις ελαστικές ιδιότητες των επί μέρους τμημάτων (σπονδύλων) του κίονα, αλλά και του αποσβεστήρα.

Για τους μαρμάρινους σφονδύλους ορίστηκε και χρησιμοποιήθηκε ένα γραμμικό, ισότροπο υλικό, δεδομένου ότι η ανελαστική συμπεριφορά του κίονα ορίζεται κυρίως από αυτή των επιφανειών επαφής μεταξύ των σφονδύλων και του ανελαστικού νόμου τριβής (Coulomb) που λαμβάνεται υπόψη για αυτές. Το μέτρο ελαστικότητας του υλικού αυτού, E , ελήφθη ίσο με 1044 MPa και ο λόγος Poisson, $\nu = 0.30$, τιμές που προέκυψαν από τη βιβλιογραφία (Οικονόμου 2003). Πέραν των ανωτέρω βασικών ελαστικών σταθερών, για το υλικό αυτό ορίστηκε η πυκνότητα ίση με 2689 kg/m^3 . Με βάση την πυκνότητα αυτή και τις διαστάσεις των επί μέρους τμημάτων του κίονα υπολογίζεται αυτομάτως από το λογισμικό η μάζα και το βάρος της κατασκευής.

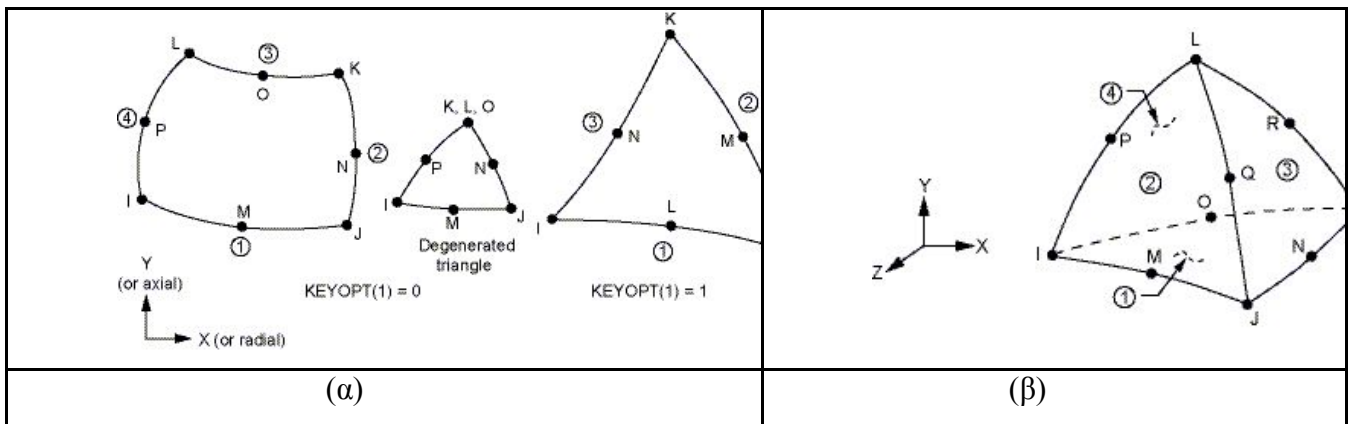
Προφανώς με αντίστοιχο τρόπο ορίστηκε και το (δεύτερο) υλικό που αφορά τον αποσβεστήρα σωματιδίων, δηλαδή ο χάλυβας με μέτρο ελαστικότητας $E = 210 \text{ GPa}$, λόγο Poisson, $\nu = 0.30$ και πυκνότητα ίση με 7850 kg/m^3 .

Ως ιδιότητες των υλικών δηλώνονται στο λογισμικό ANSYS και οι τιμές του συντελεστή τριβής που χρησιμοποιούνται από τα στοιχεία επαφής. Ως εκ τούτου ορίστηκε ένα υλικό για κάθε ξεχωριστή τιμή του συντελεστή τριβής που χρησιμοποιήθηκε, οι οποίες είναι 0.31 για την τριβή μεταξύ των σφονδύλων, των οποίων η απόκριση χαρακτηρίζεται από συνδυασμό λικνισμού και ολίσθησης, 0.15 για την τριβή μεταξύ του αποσβεστήρα και της βάσης της κοιλότητας επί της οποίας περιστρέφεται υπό τη δράση των δυναμικών φορτίων και, τέλος 0.05 για την τριβή μεταξύ του αποσβεστήρα και των τοιχωμάτων της κοιλότητας, επί των οποίων, προφανώς, προσκρούει. Από τις ανωτέρω τιμές, η πρώτη προέκυψε από τη βιβλιογραφία [3] και οι υπόλοιπες επιλέχθηκαν έπειτα από διερεύνηση που είχε ως βασικό στόχο την εξασφάλιση της αριθμητικής ευστάθειας του προσομοιώματος.

2.2.2 Επιλογή στοιχείων και διακριτοποίηση.

Για την προσομοίωση του «σώματος» του κίονα, δηλαδή για τους σφονδύλους, στο δισδιάστατο μοντέλο χρησιμοποιήθηκε το οκτάκομβο στοιχείο υψηλής τάξης PLANE183. Πρόκειται για στοιχείο επίπεδης έντασης και παραμόρφωσης με δύο βαθμούς ελευθερίας ανά κόμβο (μετατοπίσεις UX και UY κατά τη διεύθυνση του x και y άξονα αντιστοίχως). Στο τρισδιάστατο προσομοίωμα χρησιμοποιήθηκε το στοιχείο SOLID187, ένα επίσης υψηλής τάξεως δεκάκομβο στοιχείο χωρικής έντασης και παραμόρφωσης με τρεις βαθμούς ελευθερίας ανά κόμβο (μετατοπίσεις UX, UY και UZ κατά τη διεύθυνση του x, y και z άξονα αντιστοίχως). Η γενική γεωμετρία των στοιχείων αυτών παρουσιάζεται στην Εικ. 6. Σημειώνεται ότι τα στοιχεία αυτά παρέχουν τη δυνατότητα να ληφθούν υπόψη διάφορα

φαινόμενα όπως ο ερπυσμός και οι μεγάλες μετατοπίσεις και παραμορφώσεις, κάτι που λόγω της συμπεριφοράς του κίονα δεν είναι απαραίτητα στη συγκεκριμένη εφαρμογή.

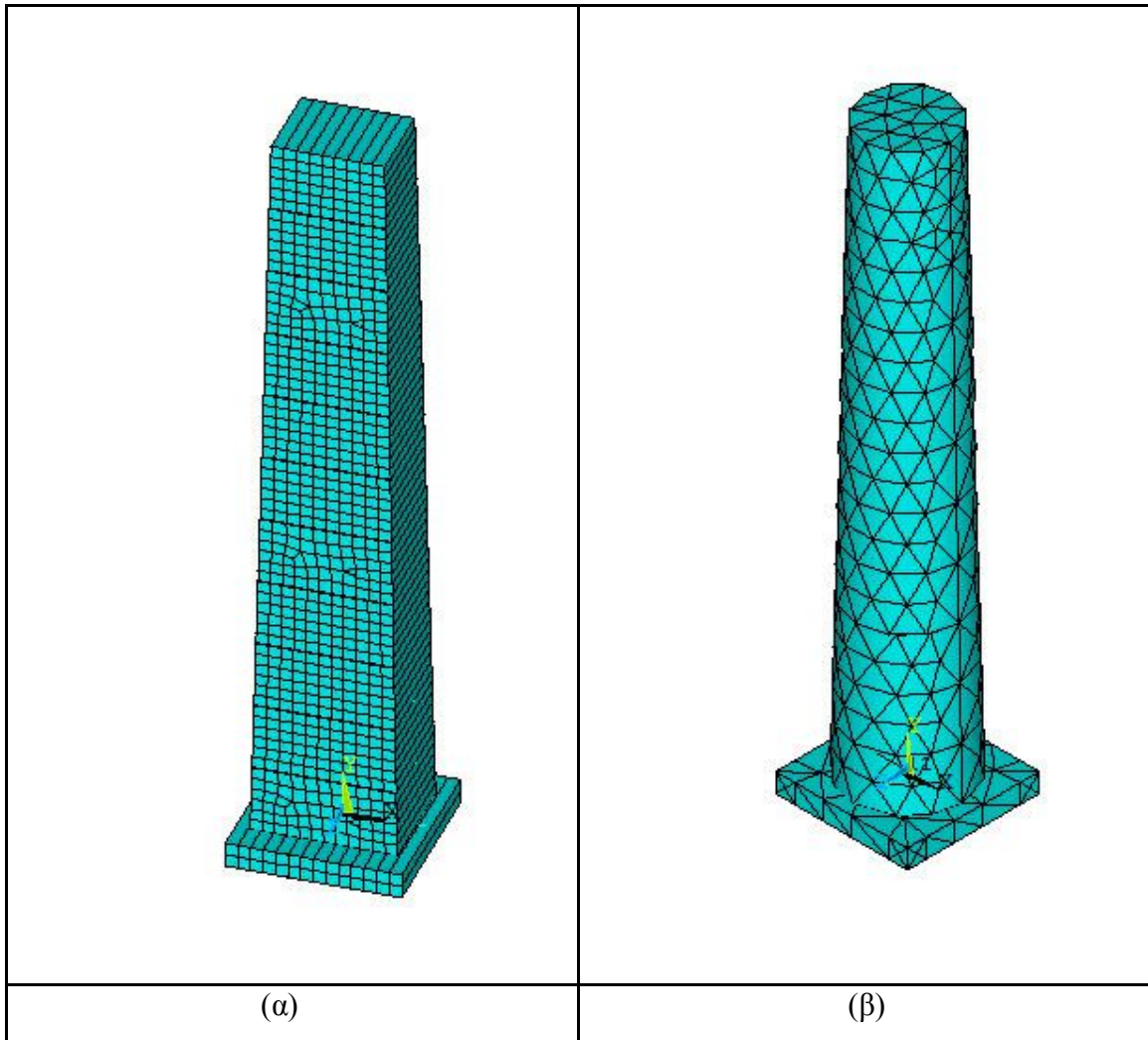


Εικ. 6: Γεωμετρία πεπερασμένων στοιχείων (α) PLANE183 (β) SOLID187 [2].

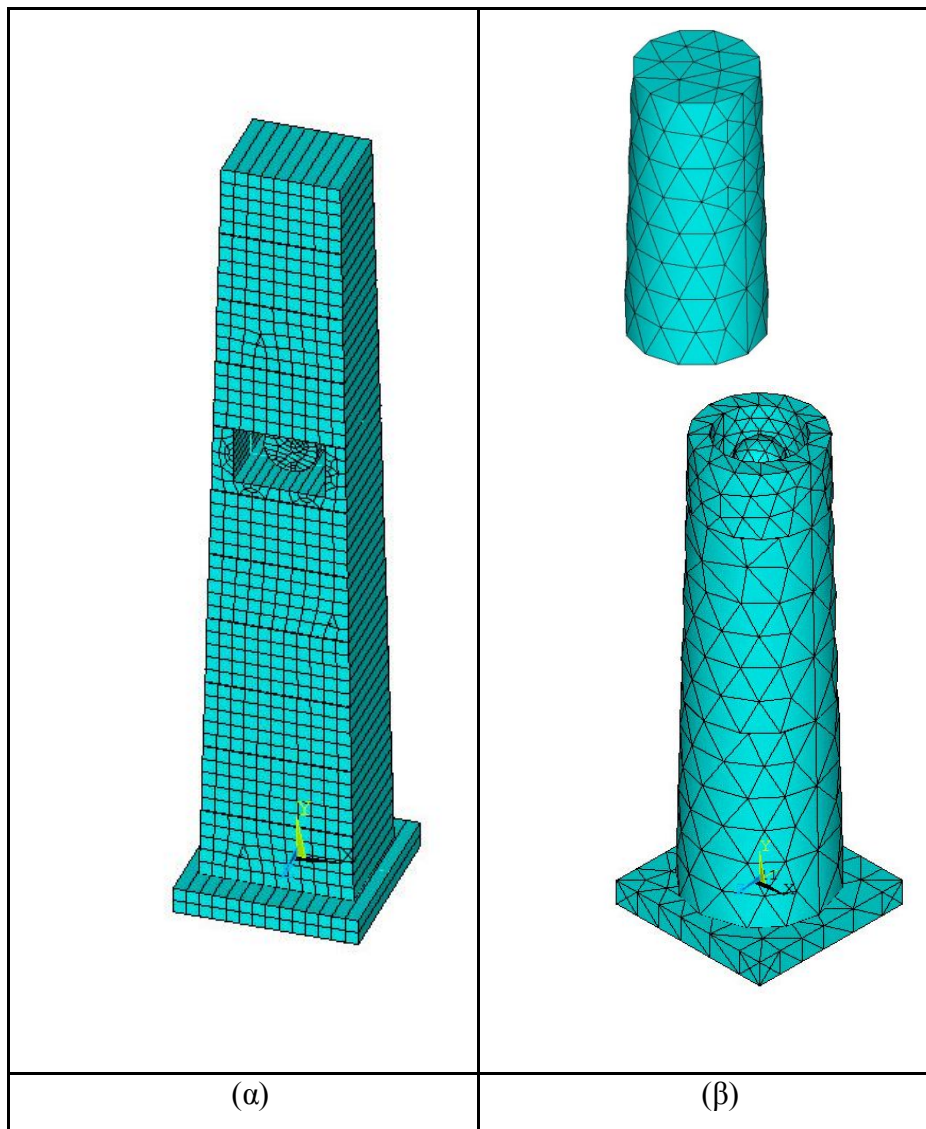
Στην περίπτωση του επίπεδου προσομοιώματος, το στοιχείο PLANE183 ορίζεται ως επίπεδη ένταση με πάχος (plane strs w/thk), ώστε να μπορεί να εισαχθεί ισοδύναμο πάχος του στοιχείου. Το ισοδύναμο πάχος αυτό ορίζεται ως πραγματική σταθερά (real constant) του μοντέλου και υπολογίστηκε λαμβάνοντας υπόψη την απαίτηση ο κάθε σφόνδυλος του αριθμητικού μοντέλου να έχει ίδιο βάρος και ίδια αδρανειακά χαρακτηριστικά με τον αντίστοιχο του πειράματος.

Η διακριτοποίηση και, κατά συνέπεια, η επιλογή του αριθμού των στοιχείων, των κόμβων και των βαθμών ελευθερίας κάθε προσομοιώματος έγινε με γνώμονα την εξασφάλιση αποτελεσμάτων ικανοποιητικής ακρίβειας σε εύλογο χρονικό διάστημα. Ζητούμενο ήταν δε και ο κατά το δυνατόν περιορισμός του όγκου των δεδομένων που εξάγονται από το πρόγραμμα, ώστε να είναι διαχειρίσιμος από συμβατικούς υπολογιστές. Με βάση τα παραπάνω προέκυψαν οι διακριτοποιήσεις που απεικονίζονται στα Εικ. 7 και 8 για τον κίονα χωρίς και με τον αποσβεστήρα σωματιδίων αντιστοίχως.

Ενδεικτικά αναφέρεται ότι μετά τη διακριτοποίηση προκύπτουν συνολικά 2477 κόμβοι στο επίπεδο και 3463 κόμβοι στο τρισδιάστατο προσομοίωμα του κίονα χωρίς τον αποσβεστήρα (Εικ. 7). Σημειώνεται ότι στη δεύτερη περίπτωση ο αριθμός των βαθμών ελευθερίας είναι διπλάσιος δεδομένου ότι κάθε κόμβος έχει δυνατότητα μετατόπισης σε τρεις άξονες, με ό,τι αυτό συνεπάγεται για τη χρηστικότητα και το χρόνο που απαιτείται για την ανάλυση.



Εικ. 7: Διακριτοποίηση (α) επίπεδου προσομοιώματος όπου διακρίνεται το ορισθέν ισοδύναμο πάχος και (β) χωρικού προσομοιώματος του κίονα χωρίς αποσβεστήρα.

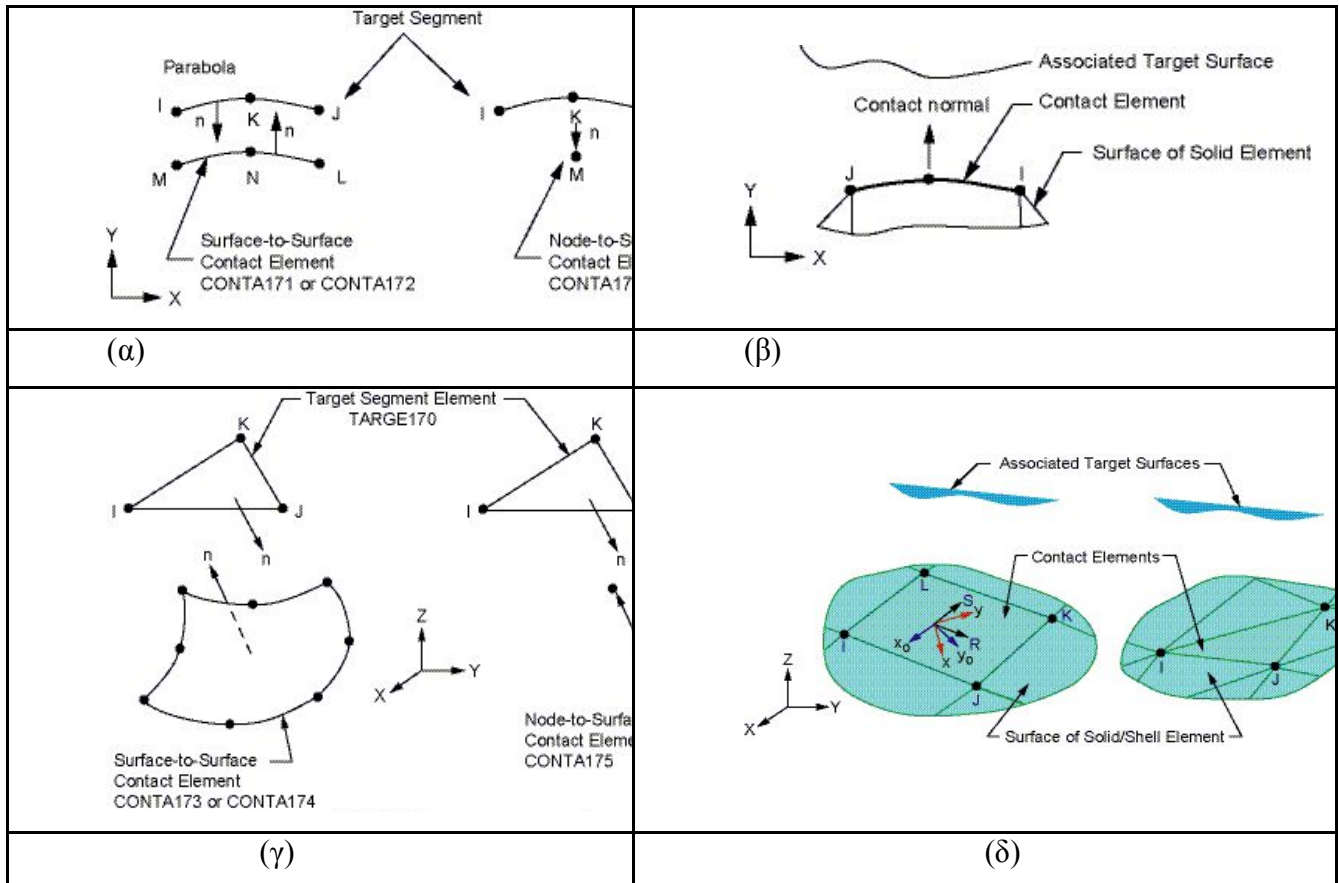


Εικ. 8: Διακριτοποίηση (α) επίπεδου προσομοιώματος όπου διακρίνεται το ορισθέν ισοδύναμο πάχος και (β) χωρικού προσομοιώματος του κίονα με αποσβεστήρα σωματιδίων στον έβδομο σφόνδυλο αποσβεστήρα.

Σημειώνεται τέλος ότι στα προσομοιώματα με τον αποσβεστήρα σωματιδίων θεωρήθηκε εύλογο να γίνει μία πύκνωση της διακριτοποίησης στο σφόνδυλο που «φιλοξενεί» τον αποσβεστήρα αλλά και στον όγκο που τον αντιπροσωπεύει, προκειμένου να εξασφαλισθεί η αριθμητική ευστάθεια του μοντέλου και η ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Το γεγονός αυτό είχε ως συνέπεια στην περίπτωση του τρισδιάστατου μοντέλου την σημαντική αύξηση των βαθμών ελευθερίας (5390 κόμβοι), συνεπώς και του χρόνου που απαιτείται για την ανάλυση, καθώς και του όγκου των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από αυτήν.

2.2.3 Προσομοίωση της συμπεριφοράς των διεπιφανειών.

Για την προσομοίωση των χαρακτηριστικών των διεπιφανειών που δημιουργήθηκαν στο αριθμητικό προσομοίωμα του κίονα χρησιμοποιήθηκαν ζεύγη στοιχείων επαφής. Στο επίπεδο μοντέλο χρησιμοποιήθηκαν τα στοιχεία TARGE169 και CONTA172 και στο χωρικό τα αντίστοιχά τους TARGE170 και CONTA173. Η γενική γεωμετρία των στοιχείων αυτών παρουσιάζεται ενδεικτικά στο Εικ. 9.



Εικ. 9: Γεωμετρία στοιχείων επαφής (α) TARGE169 (β) CONTA172 (γ) TARGE170 (δ) CONTA173 [2].

Η συμπεριφορά των στοιχείων TARGE και CONTA είναι γενικά σύνθετη και διέπεται από τις τιμές μίας σειρά παραμέτρων, η λεπτομερής παρουσίαση των οποίων ξεφεύγει από τους στόχους της παρούσης και μπορεί να αναζητηθεί στη βιβλιογραφία. Συνοπτικά, σε κάθε διεπιφάνεια απαιτείται ο χαρακτηρισμός της επιφάνειας στόχου (target) και της επιφάνειας επαφής (contact). Το λογισμικό θεωρεί ότι η επιφάνεια στόχος κινείται επί της επιφάνειας επαφής. Στην πρώτη τοποθετείται στο στοιχείο TARGE και στη δεύτερη το στοιχείο CONTA.

Το στοιχείο TARGE απαιτεί τον ορισμό κυρίως γεωμετρικών παραμέτρων που επιτρέπουν στο πρόγραμμα να διαπιστώνει κατά την ανάλυση που τμήμα της διεπιφάνειας βρίσκεται σε επαφή (είναι «κλειστό» δηλαδή) και ποιο όχι. Το στοιχείο CONTA διαθέτει μία σειρά από παραμέτρους που καθορίζουν λεπτομερώς επιμέρους χαρακτηριστικά της συμπεριφοράς της διεπιφάνειας όπως τριβή και δυσκαμψία της κάθετα στο επίπεδό της.

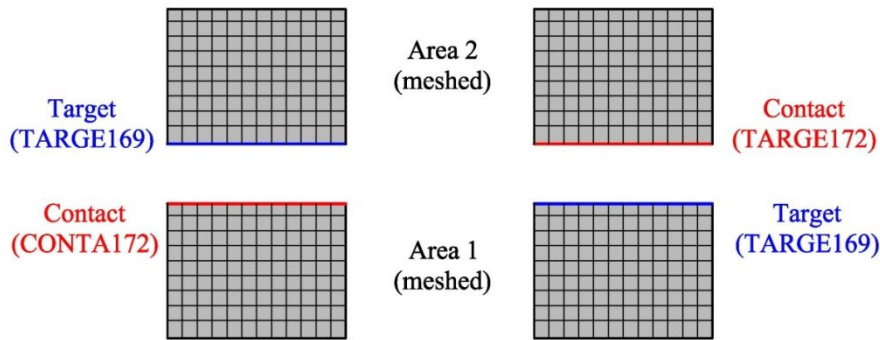
Για την παρούσα εφαρμογή, από τις διαθέσιμες για το στοιχείο CONTA επιλογές, κεφαλαιώδους σημασίας είναι η τιμή του συντελεστή τριβής που λαμβάνεται υπόψη. Οι τιμές αυτές ελήφθησαν από τα ιδεατά υλικά που δημιουργήθηκαν για το λόγο αυτό και αναφέρθηκαν σε προηγούμενη παράγραφο της παρούσης. Ιδιαίτερα καθοριστικές για τη συμπεριφορά της διεπιφάνειας είναι και οι τιμές που επιλέγονται για τις ακόλουθες δύο επίσης βασικές ιδιότητες:

Normal Penalty Thickness που αντιπροσωπεύει τη δυσκαμψία της διεπιφάνειας και ετέθη σταθερή (constant) και ίση με 100 MPa (η τιμή δόθηκε αρνητική γιατί είναι απόλυτη)

Penetration Tolerance που αντιπροσωπεύει τη μέγιστη επιτρεπόμενη διείσδυση και συνδέεται άμεσα με τη σύγκλιση της λύσης. Χρησιμοποιήθηκε η τιμή 0.05 αντί της προεπιλεγμένης από το πρόγραμμα (0.10).

Οι ανωτέρω τιμές προέκυψαν από τη βιβλιογραφία και παρατηρήθηκε, έπειτα από διερεύνηση ότι οδηγούν σε ικανοποιητικά αποτελέσματα.

Τέλος, αναφορικά με την παραμετροποίηση των διεπιφανειών του προσομοιώματος, αξίζει να σημειωθεί ότι για την περίπτωση της επαφής μεταξύ των σφονδύλων δημιουργήθηκαν συμμετρικά ζεύγη στοιχείων, δεδομένου ότι οι επιφάνειες αυτές είναι εξαρχής σε πλήρη επαφή, ολισθαίνουν δε σχετικά η μία ως προς την άλλη. Η επιλογή αυτή τοποθετεί στοιχεία TARGE και CONTA και στις δύο επιφάνειες όπως παρουσιάζεται ενδεικτικά στην Εικ. 10. Για την περίπτωση της επαφής του αποσβεστήρα (σφαίρας) με τη βάση και, κυρίως με τα τοιχώματα της κοιλότητας στα οποία προσκρούει, επιλέχθηκε αντίθετα να ληφθούν κατάλληλα υπόψη φαινόμενα αρχικής διείσδυσης (initial penetration) που γενικώς παρατηρήθηκε ότι «διευκολύνουν» την επίλυση της κύλισης του αποσβεστήρα και της κρούσης του στα τοιχώματα του σφονδύλου.



Εικ. 10: Συμμετρικό ζεύγος στοιχείων επαφής για την προσομοίωση της σχετικής κίνησης των σφονδύλων του κίονα στη διεπιφάνεια επαφής τους.

2.3 Αποτελέσματα αναλύσεων

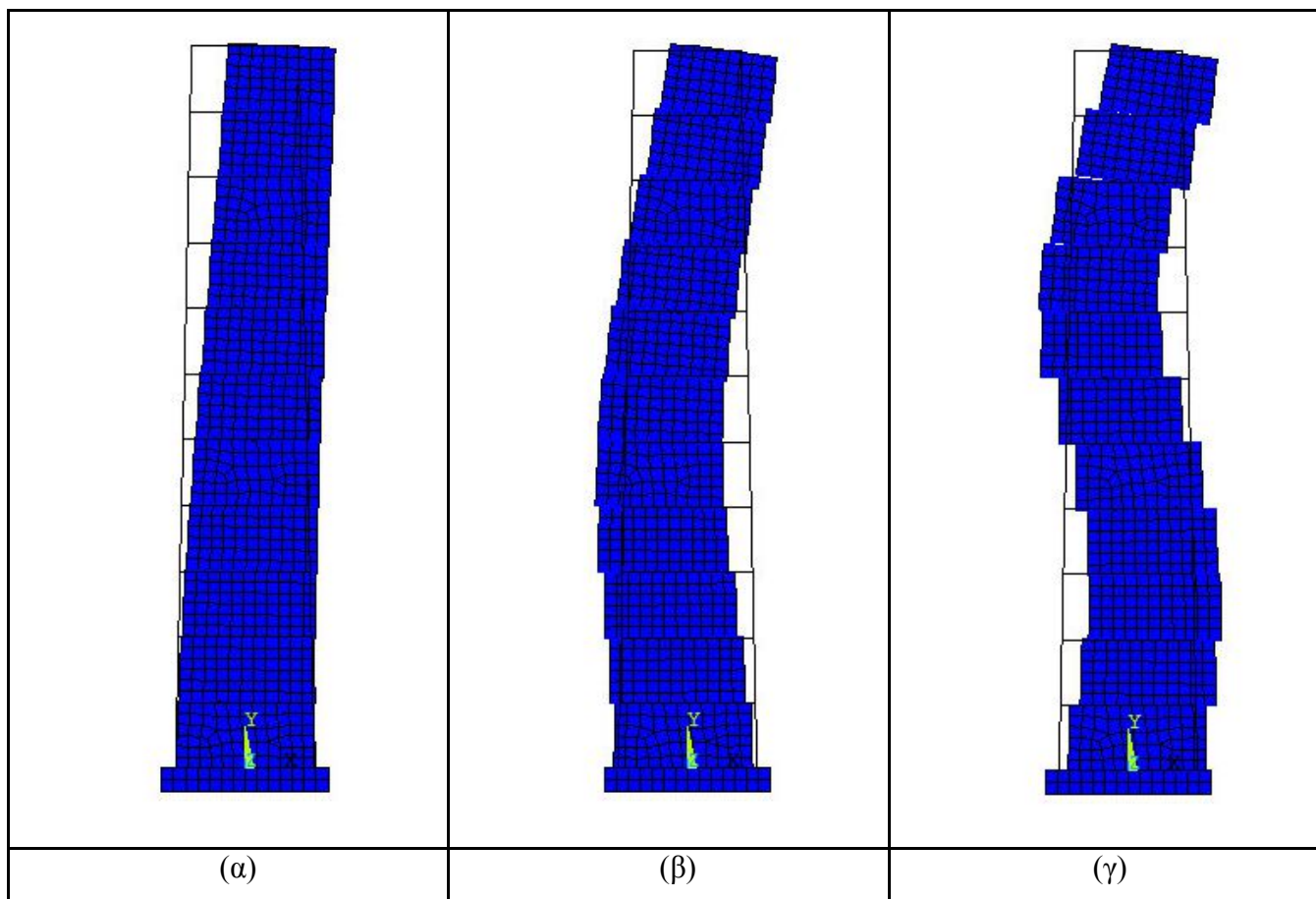
2.3.1 Ιδιομορφικές αναλύσεις

Οι ιδιομορφικές αναλύσεις παρέχουν μια πρώτη εικόνα των δυναμικών χαρακτηριστικών του μοντέλου, επιτρέπουν δε μία πρώτη αξιολόγηση της επίδρασης του αποσβεστήρα στην αναμενόμενη συμπεριφορά του κίονα. Τα αποτελέσματά τους χρησιμοποιήθηκαν επίσης για τον υπολογισμό των συντελεστών απόσβεσης κατά Rayleigh που ελήφθη υπόψιν κατά τις δυναμικές αναλύσεις χρονοϊστορίας που πραγματοποιήθηκαν.

Οι τρεις πρώτες ιδιομορφές του κίονα χωρίς και με τον αποσβεστήρα σωματιδίων παρουσιάζονται στα Εικ. 11 και 12 αντιστοίχως, όπως προέκυψαν από την ιδιομορφική ανάλυση των επίπεδων προσομοιωμάτων. Οι αντίστοιχες ιδιοσυχνότητες είναι 0.74, 2.347 και 4.353 Hz για τον κίονα χωρίς τον αποσβεστήρα και 0.748, 1.315 και 2.438 Hz μετά την προσθήκη του αποσβεστήρα σωματιδίων.

Είναι εμφανές ότι η σημαντικότερη διαφοροποίηση εντοπίζεται στη δεύτερη ιδιομορφή, όπου στο προσομοίωμα με τον αποσβεστήρα «αποτυπώνει» την πρακτικά ανεξάρτητη κίνηση του σωματιδίου (σφαίρας) εντός της κοιλότητας και την κρούση του με τα τοιχώματά της. Η μορφή αυτή της ταλαντώσεως αποτυπώνει χαρακτηριστικά τη δράση του αποσβεστήρα, αναμένεται δε να επηρεάσει τα αποτελέσματα και των δυναμικών αναλύσεων.

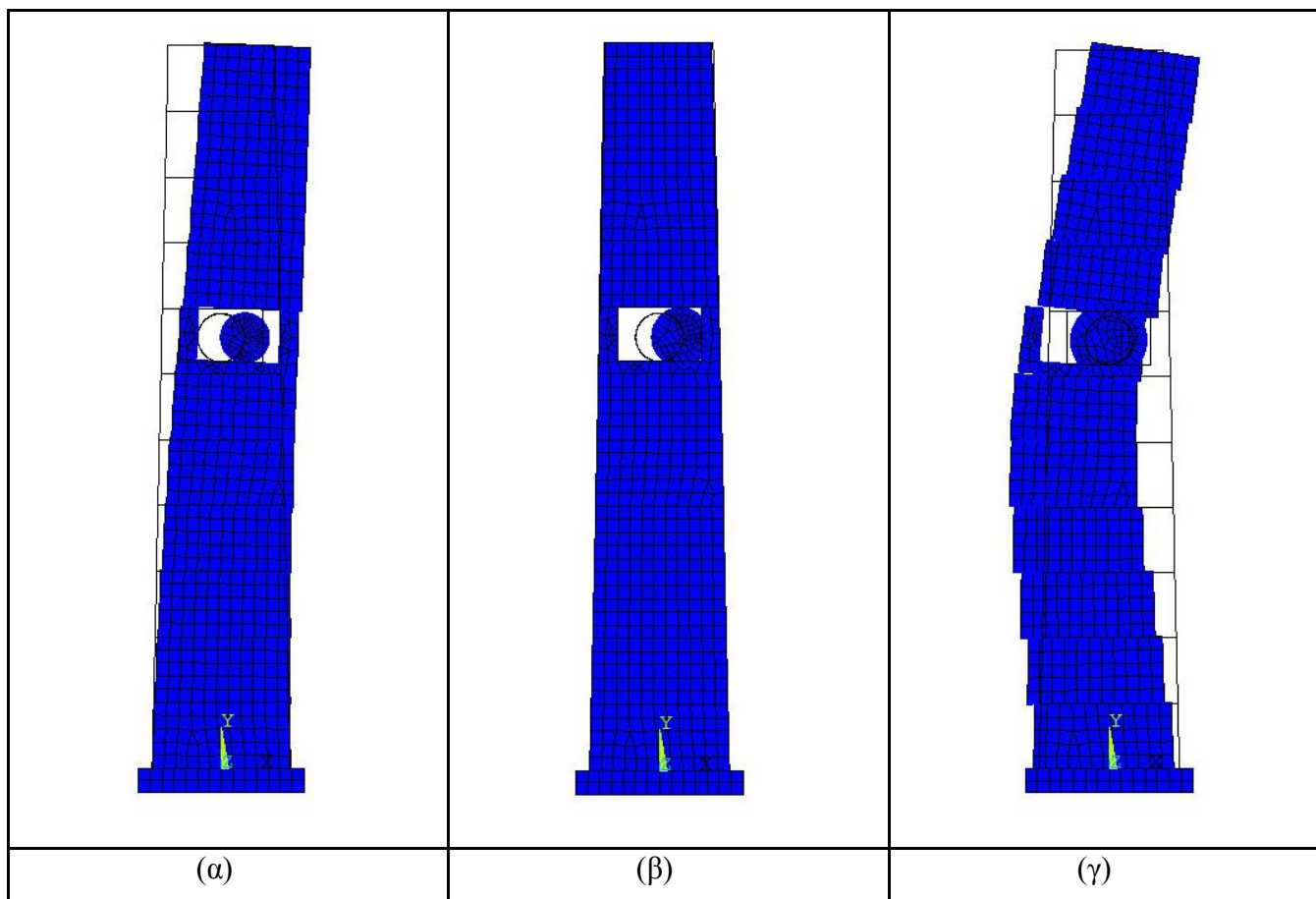
Επισημαίνεται ότι, προφανώς, αντίστοιχα είναι τα αποτελέσματα των ιδιομορφικών αναλύσεων και των τρισδιάστατων προσομοιωμάτων, όπου βέβαια υπολογίζονται και οι καμπτικές κατά τον άξονα y και στρεπτικές ιδιομορφές, οι οποίες δεν αφορούν άμεσα την παρούσα διερεύνηση δεδομένου ότι επιβάλλεται δυναμική διέγερση μόνο κατά τη διεύθυνση του x -άξονα.



Εικ. 11: (α) Πρώτη (β) δεύτερη και (γ) τρίτη ιδιομορφή του προσομοιώματος του κίονα χωρίς αποσβεστήρα.

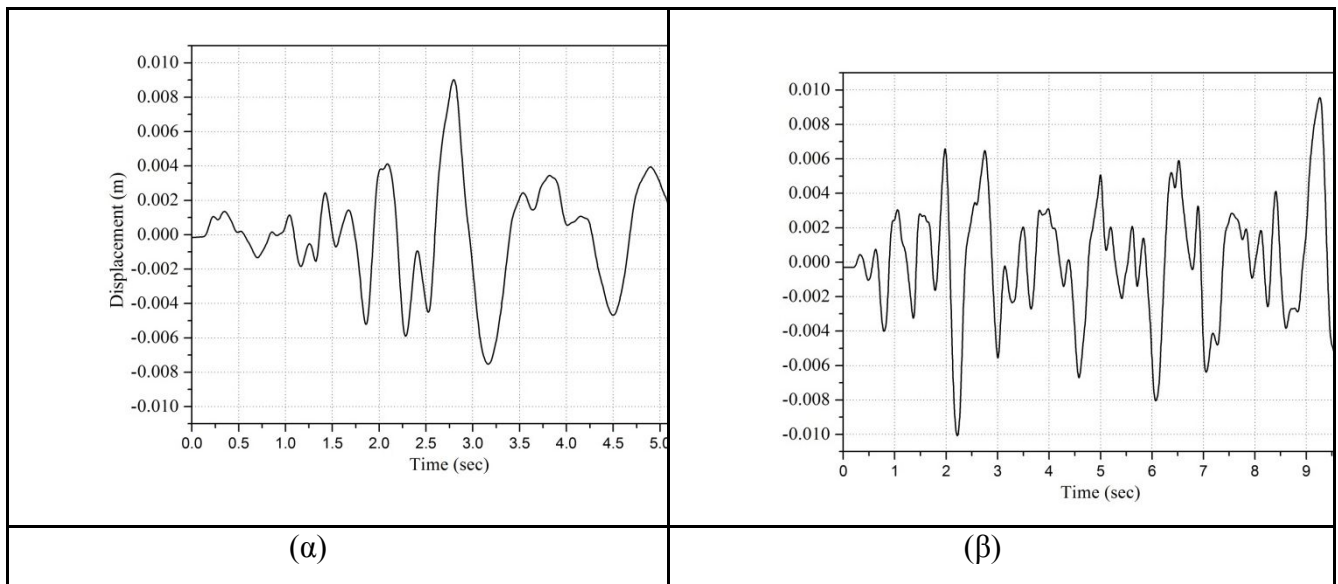
2.3.2 Μη-γραμμικές δυναμικές αναλύσεις χρονοϊστορίας

Για τις μη-γραμμικές δυναμικές αναλύσεις χρονοϊστορίας χρησιμοποιήθηκαν ημιτεχνητές και τεχνητές διεγέρσεις από τις αντίστοιχες πειραματικές δοκιμές. Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκε η καταγραφή του σεισμού της Καλαμάτας όπως τροποποιήθηκε και κλιμακώθηκε για τις ανάγκες του πειράματος και το τυχαίο (random) σήμα που δημιουργήθηκε για τον ίδιο λόγο. Οι διαθέσιμες καταγραφές επιταχύνσεων βάσης μετατράπηκαν σε μετατοπίσεις βάσης για της ανάγκες της αριθμητικής επίλυσης. Για την ολοκλήρωση και διόρθωση βάσης (baseline correction) των σημάτων χρησιμοποιήθηκε η σουίτα εφαρμογών Easysrin σε περιβάλλον Matlab, και τα αποτελέσματα ελέγχθηκαν με το εμπορικό λογισμικό SeismoSignal. Οι καταγραφές που προέκυψαν από την παραπάνω διαδικασία παρουσιάζονται στο Εικ. 13.



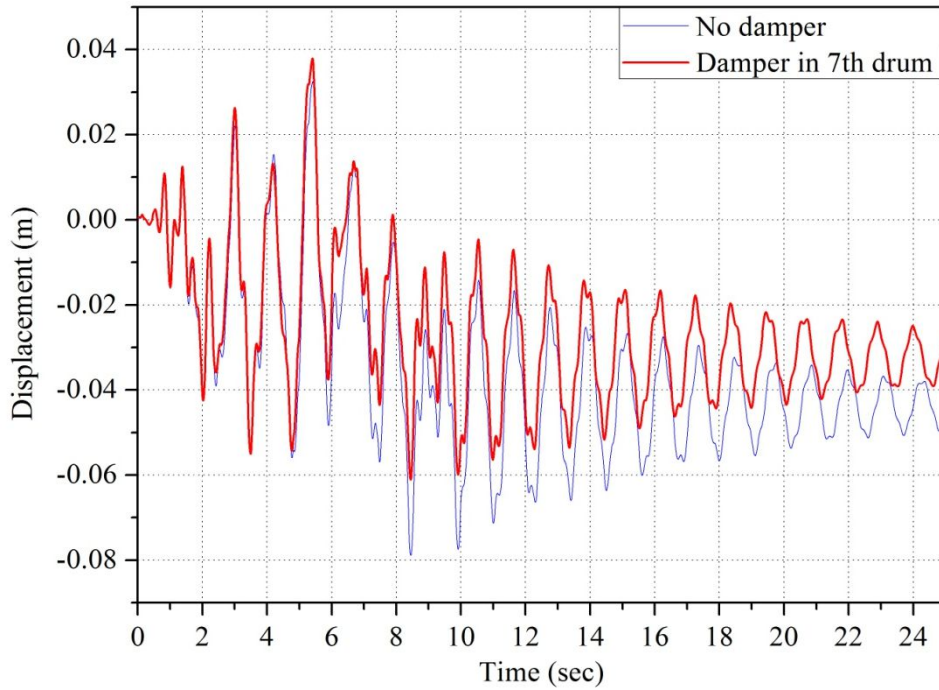
Εικ. 12: (α) Πρώτη (β) δεύτερη και (γ) τρίτη ιδιομορφή του προσομοιώματος του κίονα με αποσβεστήρα ενός σωματιδίου στον έβδομο σπόνδυλο.

Για τις αριθμητικές, μη-γραμμικές δυναμικές αναλύσεις με το λογισμικό ANSYS χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος ολοκλήρωσης του Newmark με $\gamma = 0.005$. Το μέγιστο βήμα ολοκλήρωσης ορίστηκε ίσο με 0.005 sec, όσο δηλαδή και το χρονικό βήμα της διέγερσης και το ελάχιστο ίσο με 0.001 sec. Επιλέχθηκε επίσης η αποθήκευση μόνο των βασικών αποτελεσμάτων κάθε ανάλυσης (μετατοπίσεων, τάσεων κλπ.) ώστε να περιοριστεί ο όγκος των εξαγόμενων δεδομένων. Τέλος σημειώνεται ότι η ανάλυση πραγματοποιήθηκε σε δύο επάλληλα βήματα, με το πρώτο να περιλαμβάνει την επιβολή των κατακορύφων φορτίων (ίδιο βάρος του κίονα) με οιονεί στατικό τρόπο, δηλαδή μέσω ενός δυναμικού αλγορίθμου επίλυσης αλλά με πολύ αργό ρυθμό. Το δεύτερο βήμα αφορά, προφανώς, την οριζόντια διέγερση της βάσης.

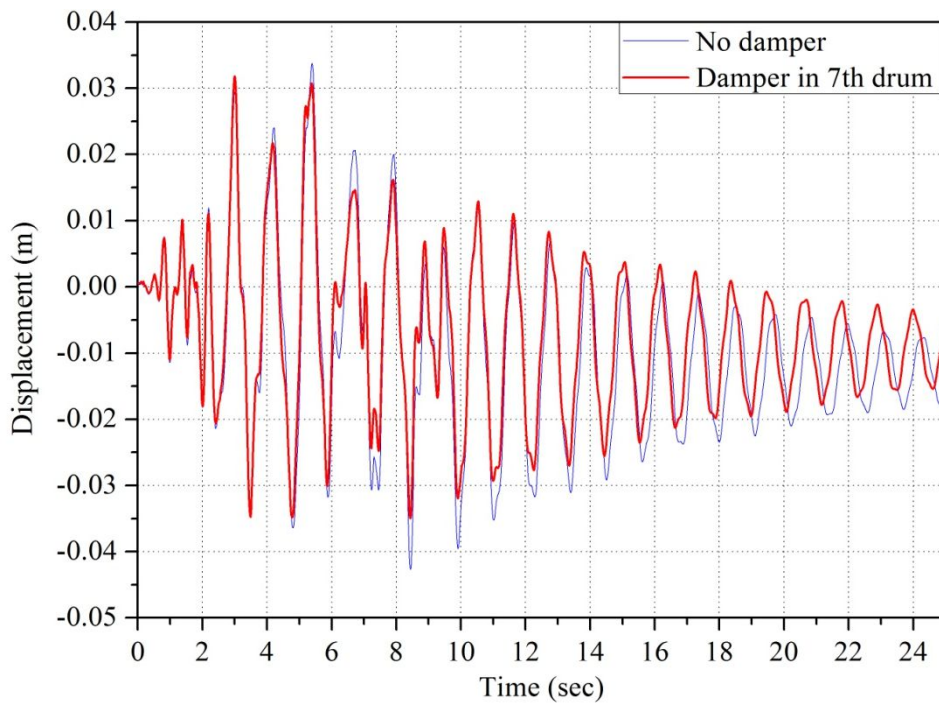


Εικ. 13: Χρονοϊστορίες μετατοπίσεων βάσης που χρησιμοποιήθηκαν στις αναλύσεις (α) διέγερση Καλαμάτας και (β) τυχαία (random) διέγερση

Στις Εικ. 14 και 15 παρουσιάζονται χαρακτηριστικά αποτελέσματα από την ανάλυση του τρισδιάστατου προσομοιώματος, που θεωρείται ότι αποτελεί και την ακριβέστερη απεικόνιση της πραγματικού κίονα, με χρήση της τυχαίας (random) διέγερσης. Τα αποτελέσματα αφορούν τη σχετική μετατόπιση του ενδέκατου και δέκατου σφονδύλου. Παρατηρείται πως το βασικό πρόβλημα που ανιχνεύει η ανάλυση για τον κίονα πριν την απόσβεση είναι η σημαντική μετατόπιση, απολύτως μέγιστη και παραμένουσα, των ανώτερων σφονδύλων του. Η προσθήκη του αποσβεστήρα βελτιώνει την απόκριση του οδηγώντας σε σημαντικά μειωμένες τιμές των μετατοπίσεων αυτών. Οι μειώσεις στις μετατοπίσεις παρατηρούνται μετά τις πρώτες κρούσεις του αποσβεστήρα στα τοιχώματα της κοιλότητας που συμβαίνουν κατά τις μέγιστες μετατοπίσεις της βάσης, ενώ αρχικά οι αποκρίσεις των δύο εκδοχών του κίονα, με και χωρίς τον αποσβεστήρα σωματιδίων, πρακτικά συμπίπτουν όπως ήταν αναμενόμενο.



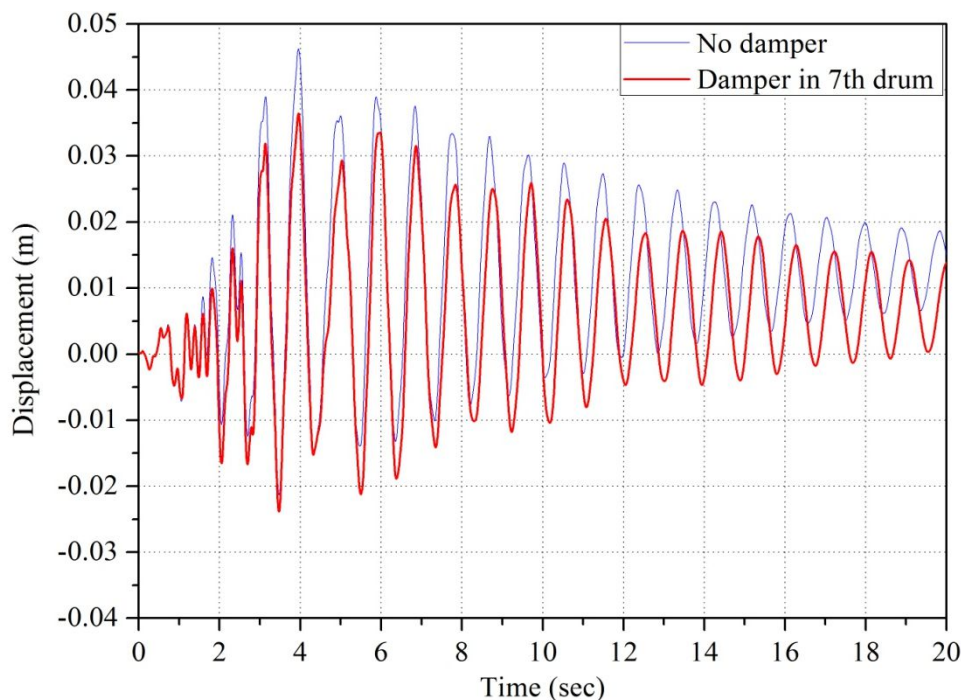
Εικ. 14: Χρονοϊστορία σχετικής ως προς τη βάση μετατόπισης του ενδέκατου σφονδύλου του κίονα με και χωρίς των αποσβεστήρα σωματιδίων στον έβδομο σφόνδυλο - τρισδιάστατο προμοίωμα – τυχαία (random) διέγερση.



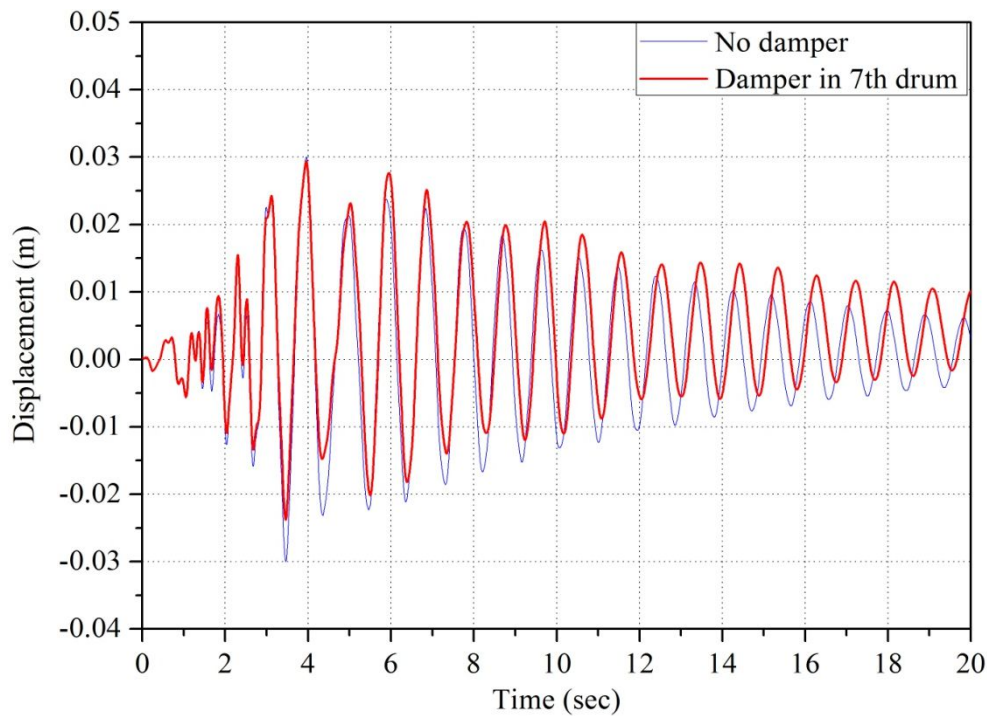
Εικ. 15: Χρονοϊστορία σχετικής ως προς τη βάση μετατόπισης του δέκατου σφονδύλου του κίονα με και χωρίς των αποσβεστήρα σωματιδίων στον έβδομο σπόνδυλο - τρισδιάστατο προμοίωμα – τυχαία (random) διέγερση.

Αναλυτικά, όπως φαίνεται στα διαγράμματα, η απολύτως μέγιστη μετατόπιση στον ενδέκατο σφόνδυλο μειώνεται μετά την προσθήκη του αποσβεστήρα κατά ~30% (6.10 cm έναντι 7.9 cm, Εικ. 16) και η αντίστοιχη του δέκατου σφονδύλου προκύπτει μειωμένη κατά ~22% (3.4 cm έναντι 4.2 cm, Εικ. 15). Αντίστοιχες (~20%) είναι και οι μειώσεις στις τιμές των παραμενουσών μετατοπίσεων στους εν λόγω σπόνδλους, όπως επίσης είναι εμφανές στα διαγράμματα (τιμές περί των οποίων παλινδρομούν οι μετατοπίσεις στο τμήμα της ελεύθερης ταλάντωσης του κίονα). Συνοψίζοντας, μπορεί να εξαχθεί το αρχικό συμπέρασμα ότι το αριθμητικό προσομοίωμα ανιχνεύει ορθά τη συμπεριφορά του αποσβεστήρα και την ευεργετική επίδρασή του στην απόκριση του κίονα.

Αντίστοιχα είναι τα αποτελέσματα και για την διέγερση της Καλαμάτας αλλά και για το δισδιάστατο προσομοίωμα. Για την τελευταία περίπτωση παρατίθενται χαρακτηριστικά διαγράμματα στις Εικ. 16 και 17, όπου παρατηρείται ότι η προσθήκη του αποσβεστήρα οδηγεί ξανά σε μείωση της μέγιστης μετατόπισης του ανώτερου σφονδύλου κατά ~27% (3.6 cm έναντι 4.6 cm, Εικ. 16), αλλά και σε αντίστοιχη μείωση της παραμένουσας μετατόπισης. Ωστόσο, η βελτίωση της εικόνας για του δεκάτου σφονδύλου είναι στην περίπτωση αυτή πιο ήπια (Εικ. 17).



Εικ. 16: Χρονοϊστορία σχετικής ως προς τη βάση μετατόπισης του ενδέκατου σφονδύλου του κίονα με και χωρίς των αποσβεστήρα σωματιδίων στον έβδομο σφόνδυλο - επίπεδο προμοίωμα –διέγερση Καλαμάτας.



Εικ. 17: Χρονοϊστορία σχετικής ως προς τη βάση μετατόπισης του δέκατου σφονδύλου του κίονα με και χωρίς των αποσβεστήρα σωματιδίων στον έβδομο σφόνδυλο - επίπεδο προμοίωμα – διέγερση Καλαμάτας.

Αξίζει να σημειωθεί ότι το δισδιάστατο προσομοίωμα που χρησιμοποιήθηκε στις διερευνήσεις της παρούσας εμφανίζει μεγαλύτερη ευαισθησία έναντι παραμέτρων όπως ο συντελεστής τριβής μεταξύ των σφονδύλων αλλά και του αποσβεστήρα και της βάσης της κοιλότητας μέσα στην οποία τοποθετείται και οι ιδιότητες των στοιχείων επαφής. Δεδομένης της αβεβαιότητας που συνοδεύει ούτως ή άλλως τις τιμές που υιοθετήθηκαν για τα μεγέθη αυτά, τα οποία γενικώς δεν είναι εύκολα μετρήσιμα στο εργαστήριο, καθίσταται σαφές ότι τα αποτελέσματα του επίπεδου προσομοιώματος συνοδεύονται από μικρότερο περιθώριο αξιοπιστίας. Ωστόσο, αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι ακόμα και στη δυσμενέστερη για το προσομοίωμα αυτό περίπτωση που απεικονίζεται στα προηγούμενα διαγράμματα (Εικ. 16 και 17) ανιχνεύεται ορθώς η «δράση» του συστήματος απόσβεσης και η γενική βελτίωση της απόκρισης του κίονα. Λαμβάνοντας λοιπόν υπόψη και τη σημαντική οικονομία υπολογισμών που επιτυγχάνεται με το επίπεδο προσομοίωμα μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι και το μοντέλο αυτό, όπως και το σαφώς ακριβέστερο τρισδιάστατο, αποτελεί μια ικανοποιητική λύση για την αριθμητική διερεύνηση της επιρροής του αποσβεστήρα στη συμπεριφορά του

κίονα και, ενδεχομένως, το σχεδιασμό, πιθανόν και με παραμετρικού τύπου αναλύσεις, ενός συστήματος απόσβεσης αυτής της μορφής.

3. Γενίκευση των αποτελεσμάτων

Προηγούμενοι ερευνητές [7-11] ασχολήθηκαν με την δυναμική συμπεριφορά σφονδύλωτου κίονα. Από τις έρευνες διαπιστώθηκε ότι:

α) Η κύρια δυναμική απόκριση κολώνας από blocks (τεμάχια τοποθετημένα το ένα πάνω στο άλλο) περιλαμβάνει λικνισμό και ολίσθηση. Η ολίσθηση των blocks αυξάνει την ισορροπία περισσότερο από την μονολιθική.

β) Η δυναμική απόκριση σφονδύλωτου κίονα είναι μη γραμμική και ευαίσθητη σε μικρές αλλαγές των γεωμετρικών χαρακτηριστικών ή της διέγερσης.

γ) Η κατασκευή αλλάζει ιδιομορφές κατά την διάρκεια της δόνησης. Επίπεδες διεγέρσεις μπορούν να προκαλέσουν κίνηση των σφονδύλων εκτός επιπέδου λόγω ατελειών.

δ) Μία σειρά από κίονες συνδεδεμένων μεταξύ τους είναι πιο σταθεροί από ανεξάρτητους κίονες.

ε) Οι ξύλινοι σύνδεσμοι (πόλος-εμπόλιο) που χρησιμοποιούνταν στα αρχαία χρόνια είχαν ελάχιστη επίδραση στην δυναμική απόκριση του κίονα. Οι μεταλλικοί σύνδεσμοι που χρησιμοποιούνται στις αναστυλώσεις (αντικαθιστώντας τους ξύλινους) για να ενώσουν τους σφονδύλους μπορεί να έχουν μη επιθυμητά αποτελέσματα στην δυναμική απόκριση του κίονα αλλά μπορεί να είναι ευεργετικά μεταξύ κιονόκρανου και επιστυλίου σε μία κιονοστοιχία.

στ) Οι ατέλειες ενός κίονα περιλαμβάνοντας μειωμένη διατομή των σφονδύλων, κλήση του κίονα κλπ μπορεί να μειώσουν την αντισεισμική ασφάλεια του κίονα.

ζ) Οι σφονδύλωτοί κίονες είναι σε μεγαλύτερο κίνδυνο να καταρρεύσουν από διεγέρσεις χαμηλών συχνοτήτων παρά υψηλών.

Όσα από τα παραπάνω αφορούσαν την παρούσα έρευνα διαπιστώθηκαν και κατά την πραγματοποίησή της. Η δυναμική συμπεριφορά του κίονα ήταν πολύ ευαίσθητη στις μικροαλλαγές της διέγερσης και στις ατέλειες των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του κίονα. Με τον λικνισμό των μαρμάρινων σφονδύλων τμήματα τους από την εξωτερική επιφάνεια αποσπόνταν με αποτέλεσμα να αλλάζουν έστω και λίγο τα γεωμετρικά τους χαρακτηριστικά. Όταν οι ατέλειες μεγάλωναν η επιρροή τους ήταν σημαντική αυξάνοντας την δυναμική απόκριση του κίονα και μειώνοντας την αντισεισμική ασφάλεια του.

Υπάρχουν αρκετά μνημεία που αποκαθίστανται ή πρόκειται να αποκατασταθούν στο κοντινό μέλλον που θα μπορούσαν να ευεργετηθούν από την χρήση αποσβεστήρα σωματιδίων μια και

αυτή η μέθοδος δεν εμπλέκεται με προηγούμενες επεμβάσεις αποκατάστασης. Οι περισσότερες αποκαταστάσεις χρησιμοποιούν όσο το δυνατόν περισσότερο υπάρχον υλικό και αντικαθιστούν αυτό που λείπει με νέο υλικό παρόμοιο με το παλιό. Όμως η έλλειψη του αρχικού υλικού έχει και η ανάγκη για αντικατάστασή του έχει και τα θετικά σημεία σε σχέση με την αντσεισμική προστασία ενός ναού που αποκαθίσταται: επιτρέπει την αντικατάσταση του σφονδύλου που λείπει ή έχει υποστεί αρκετές ζημιές και δεν μπορεί να αντέξει τα φορτία με έναν αποσβεστήρα σωματιδίων. Με αυτόν τον τρόπο ο αποσβεστήρας μπορεί να χρησιμοποιηθεί χωρίς να μειώσει την ύπαρξη του αρχικού υλικού που θα χρησιμοποιείτο σε μια συμβατική αποκατάσταση χωρίς ιδιαίτερη αντσεισμική προστασία.

Σχετικά με την τοποθέτηση του αποσβεστήρα για την βέλτιστη χρήση του διαπιστώθηκε από τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν και από τα αριθμητικά μοντέλα ότι η αποτελεσματικότητα του αποσβεστήρα αυξάνει όταν τοποθετείται πάνω από την μέση του κίονα ώστε τα σωματίδια να έχουν αρκετό χώρο να κινηθούν και να αποκτήσουν την απαιτούμενη ορμή. Στα πειράματα που έγιναν με την χρήση μικρής κλίμακας κίονα ο αποσβεστήρας ήταν πιο αποτελεσματικός όταν τοποθετήθηκε κάτω από την κορυφή. Παρόλα αυτά ο αποσβεστήρας ήταν ιδιαίτερα αποτελεσματικός όταν τοποθετήθηκε στην κορυφή στον κίονα μεγάλης κλίμακας. Να μην ξεχνάμε ότι στα δοκίμια μικρής κλίμακας δεν μπορούν να αντιπροσωπευτούν επαρκώς τα μη γραμμικά φαινόμενα.

Οι εξωτερικές διαστάσεις του αποσβεστήρα είναι ίδιες με τις διαστάσεις του σφονδύλου που αντικαθιστούν ώστε να μην επηρεάσουν την μορφή του κίονα. Οι διαστάσεις του κούφιου μέρους του αποσβεστήρα εξαρτάται από το μέγεθος και το υλικό των σωματιδίων. Συνιστάται η χρήση σφαιρικών σωματιδίων υψηλής πυκνότητας από χάλυβα ή βολφράμιο. Τα σωματίδια πρέπει να είναι διατεταγμένα σε μία στρώση αντιστοιχώντας σε μάζα 1-3%, καταλαμβάνοντας το 40%-60% του κούφιου μέρους του αποσβεστήρα. Έτσι τα σωματίδια θα έχουν την απαραίτητη ορμή για να την ανταλλάξουν με τον κίονα υπό ταλάντωση.

4. Χρήση αποσβεστήρων σε μνημειακές κατασκευές

Ο αποσβεστήρας σωματιδίων μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε αρχαίους ναούς που αποτελούνται από σφονδυλωτούς κίονες με κατάλληλη χρήση παραμέτρων του συστήματος. Η χρήση του αποσβεστήρα δεν περιορίζεται σε μεμονωμένους κίονες αλλά μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε κιονοστοιχία μια και η ευστάθεια σε μια κιονοστοιχία είναι αυξημένη σε σχέση με αυτή του μεμονωμένου κίονα. Ένα καλό παράδειγμα που θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ο

αποσβεστήρας είναι ο ναός του Δία στην Ολυμπία (Εικ. 18) μια και επί των ημερών γίνεται η αναστύλωσή του.



Εικ 18: Αρχαίος ναός του Δία στην Ολυμπία (www.archaiologia.gr)

Ο ναός του Δία στην Ολυμπία είναι ο μεγαλύτερος ναός της Πελοποννήσου. Ο ναός ολοκληρώθηκε το 456 π.Χ. και θεωρείται ως ένα εξαιρετικό παράδειγμα Δωρικής αρχιτεκτονικής. Οι κίονες, κατασκευασμένοι από ασβεστόλιθο (από κελύφη), είχαν 10.43 m ύψος και 2.25 m διάμετρο. Μέσα σε αυτόν τον ναό ήταν τοποθετημένο το χρυσελεφάντινο άγαλμα του Δία, ένα από τα επτά θαύματα της αρχαιότητας που δημιουργήθηκε από τον Φειδία το 430 π.Χ. Ο ναός κάηκε από τον Θεοδόσιο II το 426 μ.Χ. Καταστράφηκε ολοσχερώς από σεισμούς το 551 και 552 μ.Χ. Οι εκσκαφές του ναού ξεκίνησαν από Γάλλους το 1829 και ολοκληρώθηκαν από το Γερμανικό Αρχαιολογικό Ινστιτούτο. Συντήρηση και καθαρισμός του μνημείου γίνεται στις ημέρες μας.

Ένα μεγάλο μέρος του αυθεντικού υλικού ήταν στο έδαφος και βρέθηκε μετά από την απομάκρυνση λάσπης που είχε μεταφερθεί από τα ποτάμια της περιοχής. Το αυθεντικό υλικό που βρέθηκε αρκεί για την αποκατάσταση ενός μεγάλου τμήματος του ναού. Όμως η κακή ποιότητα του ασβεστόλιθου και το γεγονός ότι παρέμεινε τόσοι αιώνες καλυμμένο με την λάσπη των ποταμών έχει σαν αποτέλεσμα την αλλοίωση των εξωτερικών επιφανειών των σφονδύλων των κίωνων. Για να γίνει η τοποθέτηση των σφονδύλων ο ένας πάνω στον άλλον ένα μεγάλο ποσοστό νέου υλικού θα πρέπει να προστεθεί για να συμπληρωθούν τα τμήματα που λείπουν. Ήδη έχει αποκατασταθεί ένας κίονας και υπάρχει αυθεντικό υλικό για την αποκατάσταση αρκετών ακόμα. Μια τέτοια περίπτωση, με αυθεντικό υλικό που λείπει και με

κακή κατάσταση κάποιων σφονδύλων, αποτελεί ιδανική περίπτωση για την αντικατάσταση ενός από αυτούς τους σφονδύλους με έναν αποσβεστήρα.

Με αυτό τον τρόπο ο αποσβεστήρας μπορεί να χρησιμοποιηθεί χωρίς να μειώσει το αυθεντικό υλικό. Ο αποσβεστήρας θα πρέπει να μπει σε κάθε κίονα στο επίπεδο που θα λείπει ο σφόνδυλος (τηρώντας τα απαιτούμενα για τον σωστό του σχεδιασμό) και πιθανότατα δεν θα είναι στο ίδιο επίπεδο σε κάθε κίονα. Με αυτό τον τρόπο θα αυξηθεί η αντισεισμική προστασία των κίωνων.

Στο Παράρτημα Α παρουσιάζονται διάφοροι ναοί που θα μπορούσαν να ωφεληθούν από την χρήση του αποσβεστήρα σωματιδίων. Στα Παραρτήματα Β και Γ παρουσιάζονται επιπλέον στοιχεία για τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν στα πακέτα Β, Γ και Δ.

Βιβλιογραφία

1. Masri SF (1965). Analytical and experimental studies of impact dampers, Ph.D. thesis.
2. ANSYS Inc. Documentation.
3. Οικονόμου Θ (2003). Μελέτη της σεισμικής συμπεριφοράς συνδέσεων σπονδύλων μνημείων και σπονδυλωτών κατασκευών. Εφαρμογή στην ακρόπολη της Λίνδου. Διατριβή Διπλώματος Ειδίκευσης, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης
4. Stoll S. and Schweiger A. (2006). EasySpin, a comprehensive software package for spectra simulation and analysis in EPR. *Journal of Magnetic Resonance* (178), pp. 42 –55
5. Seismosoft Inc. Documentation.
6. Konstantinidis D, Makris N. Seismic response analysis of multidrum classical columns. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 2005; 34:1243-1270.
7. Papantonopoulos C, Psycharis IN, Papastamatiou DY, Lemos JV, Mouzakis H. Numerical prediction of the earthquake response of classical columns using the distinct element method, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 2002; 31:1699 –1717.
8. Psycharis I, Lemos J, Papastamatiou D, Zambas C, Papantonopoulos C. Numerical study of the seismic behaviour of a part of the Parthenon Pronaos. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 2003; 32:2063-2084.
9. Mouzakis HP, Psycharis IN, Papastamatiou DY, Carydis PG, Papantonopoulos C, Zambas C. Experimental investigation of the earthquake response of a model of a marble classical column. *Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 2002; 31:1681-1698.
10. Dassios ME, Mouzakis X, Psycharis I, Papantonopoulos K, Vayias I. Πειραματική διερεύνηση κίωνων και κιονοστοιχιών αρχαίων ναών, 3^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Μηχανικής και Τεχνικής Σεισμολογίας, 5-7 November, 2008.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Αρχαίοι ναοί που θα μπορούσαν να ωφεληθούν από την χρήση του αποσβεστήρα σωματιδίων.



(a)



(b)

Εικ. Α.1: (a) Ναός του Δία-Αθήνα-Ελλάδα; (b) Aphrodisias, Ναός της Αφροδίτης, της Τουρκίας (<https://el.wikipedia.org/wiki>)



(a)



(b)

Εικ. Α.2: (a) Ναός Απόλλωνα-Πομπηία-Ιταλία. (b) Ναός της Άρτεμης-Jerash-Ιορδανία (http://www.atlastours.net/jordan/jerash_map.html)



(a)



(b)

Εικ. 3: (a) Ναός Bacchus-Baalbek-Λίβανος; (b) Ναός του Απόλλωνα-Δελφοί-Ελλάδα (<http://www.digital-camera.gr/>)



(a)



(b)

Εικ. 4: (a) Forum Augustus (Η Αγορά του Αύγουστου)-Ρώμη-Ιταλία ; (b) Ακρόπολη της Σελινούς-Σικελία-Ιταλία (<https://el.wikipedia.org/wiki>)



(a)



(b)

Εικ. 5: (a) Ηραίο-Σάμου-Ελλάδα (<https://eleysis69.wordpress.com>); (b) Ναός Άρτεμης-Βραυρώνα-Ελλάδα



(a)



(b)

Εικ. 5: (a) Ναός Αθηνάς-Καμπανία-Ιταλία; (b) Ναός Απόλλωνα-Δίδυμα-Τουρκία (<http://eleftheriskepsii.blogspot.gr>)



(a)



(b)

Εικ. 6: (a) Ναός Επικούριου Απόλλωνα-Βάσσης Φιγαλείας-Πελοπόννησος -Ελλάδα (<http://arcadia.ceid.upatras.gr>); (b) Ναός Νεμείου Διός-Κορινθία-Ελλάδα (<http://autochthoneseλληνες.blogspot.gr>)



(a)



(b)

Εικ. 7: (a) Ναός Αθηνάς Πολιάς-Πριήνη-Τουρκία; (b) Ναός 'Αρτεμης της Εφεσού-Ελλάδα



(a)



(b)

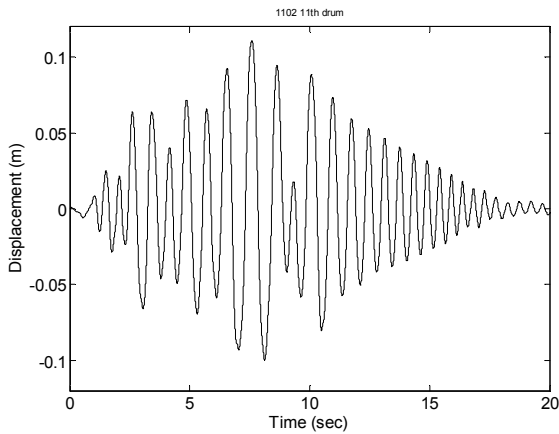
Εικ. 8: (α) Ναός Ήρας-Ολυμπία-Ελλάδα (<http://www.panoramio.com>); (b) Ναός Ποσειδώνα-Σούνιο-Ελλάδα (<http://www.tripadvisor.com.gr/>)

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

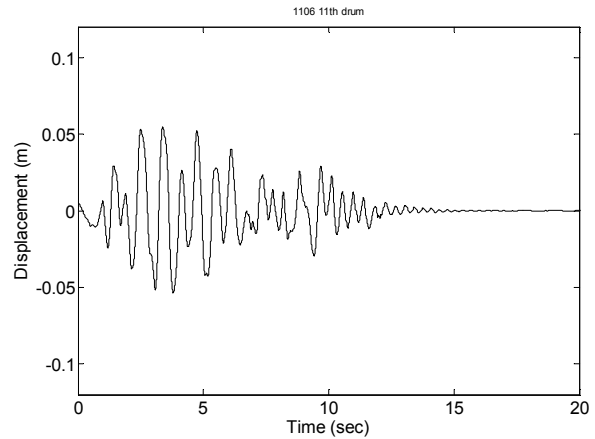
Κίονας μεγάλης κλίμακας (3m ύψος) υπό κλίση 2.1%

Παρουσιάζεται η ανάλυση πειραμάτων του κίονα μεγάλης κλίμακας (3 m) υπό κλίση.

1) Τυχαία διέγερση



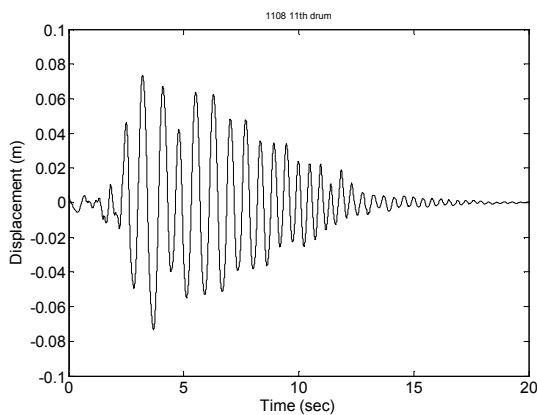
(a)



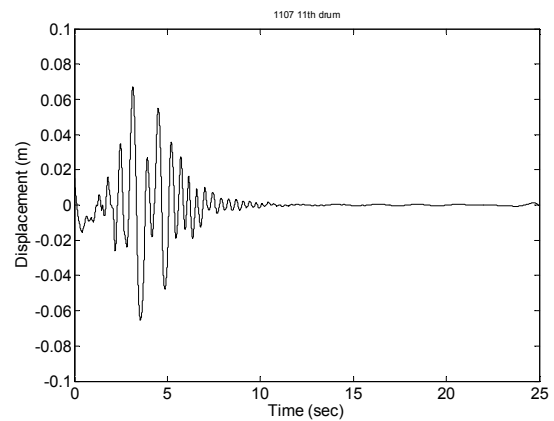
(b)

Εικ. Β1: (a) Χωρίς αποσβεστήρα. (b) Με αποσβεστήρα στην θέση του 11^{ου} σφονδύλου με 32 σωματίδια διαμέτρου 50 mm

2) Σεισμική διέγερση (σεισμός Καλαμάτας)

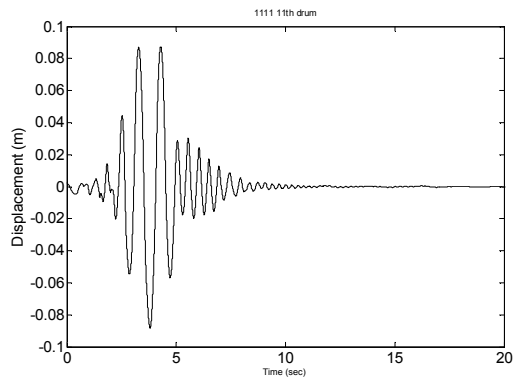


(a)



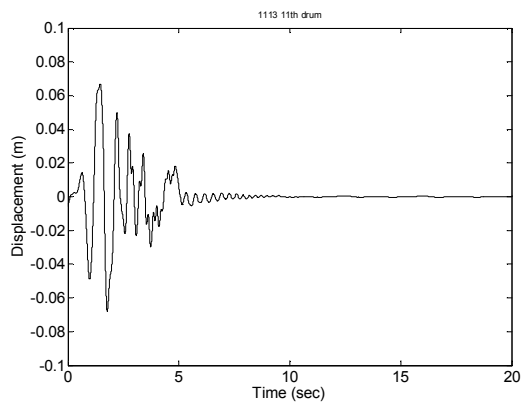
(b)

Εικ. Β2: (a) Χωρίς αποσβεστήρα. (b) Με αποσβεστήρα στην θέση του 11^{ου} σφονδύλου με 32 σωματίδια διαμέτρου 50 mm

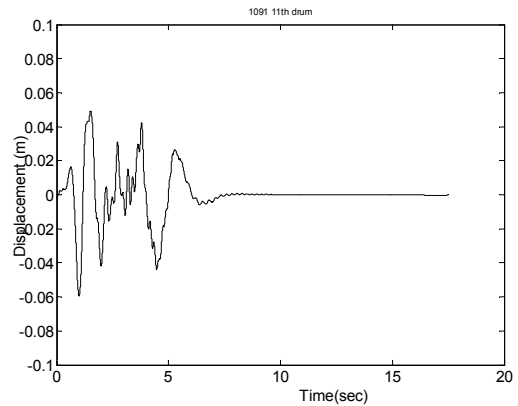


Εικ. Β3: Με αποσβεστήρα στην θέση του 7⁰⁰ σφονδύλου με μία μεταλλική σφαίρα διαμέτρου 20 cm και δύο μεταλλικά χιτώνια

3) Ημιτονοειδής διέγερση

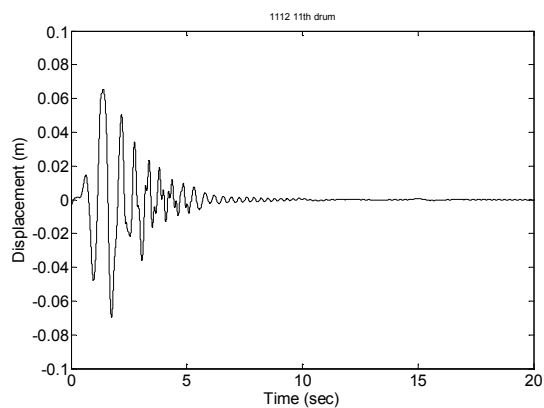


(a)



(b)

Εικ. Β4: (a) Χωρίς αποσβεστήρα. (b) Με αποσβεστήρα στην θέση του 11⁰⁰ σφονδύλου με 32 σωματίδια διαμέτρου 50 mm



Εικ. Β5: Με αποσβεστήρα στην θέση του 7⁰⁰ σφονδύλου με μία μεταλλική σφαίρα διαμέτρου 20 cm και δύο μεταλλικά χιτώνια

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΤΟΥ ΚΙΟΝΑ ΜΕΓΑΛΗΣ ΚΛΙΜΑΚΑΣ (11 ΣΦΟΝΔΥΛΟΙ)

Παρουσιάζεται μια ποιοτική διερεύνηση -χωρίς την επεξεργασία πειραματικών δεδομένων και αποτελεσμάτων δηλαδή- της δυναμικής συμπεριφοράς του κίονα για αρμονική, τυχαία και σεισμική διέγερση με χρησιμοποίηση αποσβεστήρα σωματιδίων και χωρίς αυτήν. Ο ύψους 3 μέτρων και βάρους 1707 κιλών κίονας, αντίγραφο ενός αρχαίου κίονα του Παρθενώνα (κλίμακα 1:3.3), αποτελούνταν από 11 μαρμάρινους σφονδύλους, οι οποίοι στηρίζονταν πάνω σε μια μαρμάρινη πλάκα (βάση). Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων υπήρχε η δυνατότητα αντικατάστασης του έβδομου και του ενδέκατου (κορυφή του κίονα) σφονδύλου με κοίλο μαρμάρινο σφόνδυλο στον οποίο είχε τοποθετηθεί κάθε φορά συγκεκριμένος αριθμός χαλύβδινων σφαιρικών σωματιδίων, ενώ μελετηθήκαν και καταγράφηκαν και τα αποτελέσματα της χρησιμοποίησης μιας και μόνο χαλύβδινης σφαίρας μεγαλύτερης διαμέτρου. Ο κίονας υπεβλήθη σε μια σειρά διαφορετικών δυναμικών διεγέρσεων όπως αυτές παρουσιάζονται παρακάτω. Η περιγραφή γίνεται με βάση παρατηρήσεις κατά την διάρκεια των πειραμάτων και με μελέτη των μαγνητοσκοπημένων πειραμάτων.

Διεγέρσεις με επίπεδη βάση

Τυχαία διέγερση

α) Χωρίς αποσβεστήρα

Από τα πρώτα κιόλας δευτερόλεπτα της διέγερσης διαπιστώνουμε ότι στην απόκριση του κίονα **υπερισχύουν τα φαινόμενα λικνισμού**. Έτσι, καταγράφουμε **αρχικά** τον έντονο λικνισμό μεταξύ 4^{ου} και 5^{ου} σφονδύλου, ο οποίος και συνεχίζεται καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος, καθώς και λικνισμούς μετρίου βαθμού που **εμφανίζονται στη συνέχεια** μεταξύ 2^{ου} – 3^{ου}, 3^{ου} - 4^{ου}, 6^{ου} - 7^{ου} και 8^{ου} – 9^{ου} σφονδύλου. Τέλος καταγράφονται και δυο μικροί λικνισμοί μεταξύ 1^{ου} σφονδύλου – βάσης και 7^{ου} – 8^{ου} σφονδύλου. Από την άλλη, παρατηρούμε μόνο τρεις ολισθήσεις σφονδύλων, με τις δυο να χαρακτηρίζονται μικρές (του 3^{ου} και του 9^{ου} σφονδύλου) και την τρίτη μετρίου βαθμού (του 7^{ου} σφονδύλου). Μετά το πέρας της εξαναγκασμένης ταλάντωσης, παρατηρούμε ότι ο κίονας εξακολουθεί να κινείται για σημαντικό χρονικό διάστημα προτού έρθει τελικά σε κατάσταση ηρεμίας. Σε ότι έχει να κάνει με τις τελικές μετακινήσεις, καταγράφονται μικρές, **κάθετες στη διεύθυνση της διέγερσης**

μετακινήσεις του 3^{ου}, 5^{ου} και 9^{ου} σφονδύλου, καθώς και μια μετρίου βαθμού μετακίνηση του 7^{ου} σφονδύλου **κατά τη διεύθυνση διέγερσης**. Τέλος, σημειώνονται συνολικά επτά στροφές σφονδύλων, με αυτές του 1^{ου}, 5^{ου} και 8^{ου} σφονδύλου να χαρακτηρίζονται μικρές και αυτές του 3^{ου}, 4^{ου}, 7^{ου} και 9^{ου} ως μετρίου βαθμού .

β) Με αποσβεστήρα στη θέση του 11^{ου} σφονδύλου – 32 χαλύβδινα σωματίδια διαμέτρου 50mm

Παρατηρούμε ότι η **χρησιμοποίηση του αποσβεστήρα σωματιδίων έχει μειώσει σημαντικά τη δυναμική απόκριση του κίονα**. Έτσι, το φαινόμενο του λικνισμού, που είχε πολύ έντονη παρουσία κατά τη διάρκεια του προηγούμενου πειράματος, εδώ περιορίζεται αισθητά, με έναν μόνο μετρίου βαθμού λικνισμό μεταξύ 4^{ου} και 5^{ου} σφονδύλου και τρεις μικρούς μεταξύ 1^{ου} σφονδύλου - βάσης, 2^{ου} – 3^{ου} και 6^{ου} – 7^{ου} σφονδύλου. Επιπλέον, έχουμε σχεδόν απουσία ολισθήσεων σφονδύλων, με τις μόνες που καταγράφονται να είναι αυτές των 5^{ου} και 7^{ου} σφονδύλου. Αμφότερες χαρακτηρίζονται μικρές. Μετά το πέρας της διέγερσης, ο κίονας ακινητεί σε **μικρότερο χρονικό διάστημα** συγκριτικά με την περίπτωση που δεν χρησιμοποιήθηκε αποσβεστήρας, ενώ και **το πλάτος της ταλάντωσης είναι μικρότερο**. Καταγράφονται συνολικά τέσσερις μετακινήσεις σφονδύλων, με αυτές του 5^{ου} και του 9^{ου} να χαρακτηρίζονται μικρές και αυτές του 7^{ου} και του 11^{ου} ως μετρίου βαθμού. Τέλος, σε ότι έχει να κάνει με τις στροφές, σημειώνονται τρεις μικρές στροφές που αφορούν τους σφονδύλους 1, 5 και 7 και δυο μετρίου βαθμού στροφές που αφορούν τους σφονδύλους 3 και 4. Άλλες στροφές ή μετακινήσεις σφονδύλων τέτοιες ώστε να καταγραφούν και να επισημανθούν δεν παρατηρούνται.

γ) Με αποσβεστήρα στη θέση του 11^{ου} σφονδύλου – 64 χαλύβδινα σωματίδια διαμέτρου 50mm

Παρατηρούμε ότι **και** σε αυτήν την περίπτωση, η συνεισφορά του αποσβεστήρα σωματιδίων στη **μείωση της δυναμικής απόκρισης** του κίονα είναι **μεγάλη**. Καταγράφονται έτσι μόνο δυο μετρίου βαθμού λικνισμοί μεταξύ 2^{ου} - 3^{ου} και 4^{ου} – 5^{ου} σφονδύλου, καθώς και τέσσερις μικρότεροι μεταξύ 3^{ου} – 4^{ου}, 6^{ου} – 7^{ου}, 7^{ου} – 8^{ου} και 8^{ου} - 9^{ου} σφονδύλου. Οι μόνες ολισθήσεις που σημειώνονται αφορούν τους σφονδύλους 5, 7 και 11 και χαρακτηρίζονται μικρές. Όπως και προηγουμένως, έτσι και σε αυτήν την περίπτωση, μετά το πέρας της εξαναγκασμένης ταλάντωσης, ο κίονας ακινητεί σε **μικρότερο χρονικό διάστημα** συγκριτικά με το πείραμα που δεν χρησιμοποιήθηκε αποσβεστήρας, ενώ και **το πλάτος της ταλάντωσης είναι μικρότερο**. Σε ότι έχει να κάνει με τις τελικές μετακινήσεις των σφονδύλων, σημειώνονται

όλες *κατά την εγκάρσια διεύθυνση*, με αυτές του 3^{ου} και του 11^{ου} σφονδύλου να χαρακτηρίζονται μικρές και αυτές του 5^{ου} κ του 7^{ου} ως μετρίου βαθμού. Τέλος, καταγράφουμε τις μικρές *περιστροφές* που έχουν υποστεί ο 2^{ος}, ο 7^{ος}, ο 8^{ος} και ο 9^{ος} σφόνδυλος, καθώς και τις μετρίου βαθμού περιστροφές που έχουν υποστεί ο 3^{ος}, ο 4^{ος} και ο 5^{ος}.

δ) *Με αποσβεστήρα στη θέση του 11^{ου} σφονδύλου – 500 χαλύβδινα σωματίδια διαμέτρου 20mm*

Για ακόμη μια φορά, η δυναμική απόκριση του κίονα στην τυχαία αυτή διέγερση κρίνεται *μειωμένη* σε σχέση με αυτήν που παρουσίασε όταν δεν χρησιμοποιήθηκε αποσβεστήρας. Καταγράφονται τρεις μετρίου βαθμού λικνιστικές κινήσεις μεταξύ 2^{ου} - 3^{ου}, 4^{ου} - 5^{ου} και 6^{ου} - 7^{ου} σφονδύλου, καθώς και τρεις μικρότεροι λικνισμοί μεταξύ 1^{ου} σφονδύλου – βάσης, 3^{ου} - 4^{ου} και 7^{ου} – 8^{ου} σφονδύλου. Επίσης, σημειώνονται *μόνο μικρού βαθμού* ολισθήσεις και αυτές αφορούν τους σφονδύλους 3, 5, 7 και 11. Ο κίονας έρχεται σε κατάσταση ηρεμίας σε *μικρό χρονικό διάστημα* μετά το πέρας της διέγερσης. *Μικρό* κρίνεται επίσης και το *πλάτος της ταλάντωσής του*. Καταγράφονται συνολικά πέντε μετακινήσεις σφονδύλων, με αυτές του 3^{ου}, 7^{ου}, 9^{ου} και 11^{ου} σφονδύλου να χαρακτηρίζονται μικρές και αυτή του 5^{ου} ως μετρίου βαθμού. Οι στροφές, τέλος, που σημειώνονται είναι αυτές του 1^{ου}, 4^{ου} και 5^{ου} σφονδύλου (μικρές), καθώς και αυτές των σφονδύλων 3 και 7 (μετρίου βαθμού). Άλλες στροφές ή μετακινήσεις σφονδύλων τέτοιες ώστε να καταγραφούν και να επισημανθούν δεν παρατηρούνται.

Ημιτονοειδής διέγερση

α) *Χωρίς αποσβεστήρα*

Κατά τη διάρκεια του συγκεκριμένου πειράματος ο κίονας παρουσιάζει μια *πολύπλοκη δυναμική απόκριση*, όπου περιπλέκονται έντονα τα φαινόμενα του λικνισμού και της ολίσθησης. Στα πρώτα δευτερόλεπτα της διέγερσης καταγράφονται δυο μεγάλοι λικνισμοί μεταξύ 2^{ου} - 3^{ου} και 4^{ου} - 5^{ου} σφονδύλου. Αμέσως μετά παρατηρούμε την έντονη ολίσθηση του 10^{ου} και του 11^{ου} σφονδύλου, οι οποίοι αρχικά ολισθαίνουν μαζί σαν ένα ενιαίο σώμα και στη συνέχεια ανεξάρτητα ο ένας από τον άλλον. Καθώς η διέγερση συνεχίζεται, τα φαινόμενα λικνισμού *υπερισχύουν και πάλι* στην απόκριση, με μετρίου βαθμού λικνιστικές κινήσεις να καταγράφονται μεταξύ 6^{ου} - 7^{ου}, 7^{ου} - 8^{ου} και 8^{ου} - 9^{ου} σφονδύλου. Ο κίονας ακινητεί πλήρως αφού παρέλθει σημαντικό χρονικό διάστημα από το πέρας της εξαναγκασμένης ταλάντωσης. Καταγράφονται συνολικά έξι μετακινήσεις σφονδύλων, με αυτές του 10^{ου} και του 11^{ου} να χαρακτηρίζονται μεγάλες, αυτές του 7^{ου} και του 9^{ου} μετρίου βαθμού και αυτές του 2^{ου} και του

3⁰⁰ μικρές. Σε ότι έχει να κάνει τέλος με τις στροφές, έχουμε μια μεγάλη στροφή του 10⁰⁰ σφονδύλου, μια μετρίου βαθμού του 11⁰⁰, καθώς και τέσσερις μικρότερες στροφές των σφονδύλων 3, 4, 5 και 7. Λοιπές μετακινήσεις ή στροφές τέτοιες ώστε να καταγραφούν και να επισημανθούν δεν παρατηρούνται.

β) Με αποσβεστήρα στη θέση του 11⁰⁰ σφονδύλου – 32 χαλύβδινα σωματίδια διαμέτρου 50mm

Στα πρώτα δευτερόλεπτα της διέγερσης καταγράφεται μια πολύ έντονη ολίσθηση του 10⁰⁰ σφονδύλου. Κατά την ολίσθηση του αυτή ο 10⁰⁰ σφόνδυλος **συμπαράσχει** και τον 11⁰⁰, ενώ καταγράφεται και μια μετρίου βαθμού σχετική ολίσθηση **μεταξύ** των 2 σφονδύλων. Μετρίου βαθμού ολισθήσεις παρατηρούνται και για τους σφονδύλους 7 και 9, ενώ αυτές των 3, 5 και 8 χαρακτηρίζονται μικρές. Σε ότι έχει να κάνει με λικνιστικά φαινόμενα, παρατηρούμε αρχικά δυο μικρούς λικνισμούς μεταξύ 1⁰⁰ σφονδύλου – βάσης και 2⁰⁰ - 3⁰⁰ σφονδύλου, και στη συνέχεια τρεις μεγαλύτερης έντασης και διάρκειας μεταξύ 4⁰⁰ – 5⁰⁰, 7⁰⁰ – 8⁰⁰ και 8⁰⁰ -9⁰⁰ σφονδύλου. Μετά το πέρας της διέγερσης, ο κίονας ακινητεί σε μικρότερο χρονικό διάστημα συγκριτικά με την περίπτωση που δεν χρησιμοποιήθηκε αποσβεστήρας, ενώ και το πλάτος της ταλάντωσης είναι μικρότερο. Κυρίαρχο στοιχείο των τελικών μετακινήσεων είναι οι πολύ μεγάλες μετακινήσεις του 10⁰⁰ και του 11⁰⁰ σφονδύλου, οι οποίες είναι και οι **μεγαλύτερες που καταγράφηκαν στο σύνολο των πειραμάτων**. Μικρότερες μετακινήσεις έχουν υποστεί οι υπόλοιποι σφόνδυλοι, με αυτές του 7⁰⁰, 8⁰⁰ και 9⁰⁰ σφονδύλου να χαρακτηρίζονται μετρίου βαθμού και αυτές του 2⁰⁰ και του 5⁰⁰ μικρές. Όσον αφορά τις στροφές τέλος, παρατηρούμε μια μικρή στροφή του 1⁰⁰ σφονδύλου, τέσσερις μετρίου βαθμού στροφές των σφονδύλων 4, 7, 8 και 9, καθώς και δυο μεγάλες στροφές των σφονδύλων 10 και 11. Δεν παρατηρούνται άλλες στροφές ή μετακινήσεις τέτοιες ώστε να καταγραφούν και να επισημανθούν.

Σεισμικές δονήσεις

Σεισμός Ιρπίνια

α) Χωρίς αποσβεστήρα

Κατά τη διάρκεια της διέγερσης παρατηρούμε έναν έντονο **λικνισμό (rocking)** μεταξύ 2⁰⁰ και 3⁰⁰ σφονδύλου, καθώς και δυο μικρότερους μεταξύ 1⁰⁰ σφονδύλου - βάσης και 4⁰⁰ - 5⁰⁰ σφονδύλου. Οι υπόλοιποι σφόνδυλοι λικνίζονται σε πολύ μικρότερο βαθμό και ανεξάρτητα ο ένας από τον άλλον, ενώ επίσης δεν καταγράφονται φαινόμενα **ολίσθησης (sliding)** μεταξύ

των. Μετά το πέρας της εξαναγκασμένης ταλάντωσης, παρατηρούμε ότι η κίνηση του κίονα συνεχίζεται για λίγα δευτερόλεπτα ακόμα. Όσον αφορά τις τελικές μετατοπίσεις, καταγράφεται μια μικρή **μετακίνηση** του 11^{ου} και του 8^{ου} σφονδύλου κατά τη διεύθυνση διέγερσης, καθώς επίσης και μια μεγαλύτερη μετακίνηση αλλά και **στροφή** του 3^{ου} σφονδύλου. Στροφή παρατηρείται επίσης στον 1^ο σφόνδυλο, η οποία χαρακτηρίζεται μικρή. Δεν παρατηρείται μετατόπιση ή στροφή των υπολοίπων σφονδύλων ώστε αυτή να καταγραφεί και να επισημανθεί.

β) Με αποσβεστήρα στη θέση του 11^{ου} σφονδύλου – 32 χαλύβδινα σωματίδια διαμέτρου 50mm

Τον έντονο λικνιστικό φαινόμενο μεταξύ 2^{ου} και 3^{ου} σφονδύλου που παρατηρήθηκε χωρίς αποσβεστήρα παρατηρείται και σε αυτήν την περίπτωση. Από εκείνο το ύψος και πάνω όμως, ο κίονας παρουσιάζει μια σχεδόν **μονολιθική συμπεριφορά** με τους σφονδύλους να λικνίζουν ομαδικά σαν ένα ενιαίο σώμα. Μοναδική εξαίρεση στη μονολιθικότητα αποτελεί η ολίσθηση του 11^{ου} σφονδύλου, η οποία όμως χαρακτηρίζεται μικρή. Παρατηρούμε ότι μετά το πέρας της διέγερσης, η ταλάντωση του κίονα συνεχίζεται για **μικρότερο χρονικό διάστημα** και **με μικρότερο πλάτος** συγκριτικά με την περίπτωση που δεν χρησιμοποιήθηκε αποσβεστήρας. Σε ότι έχει να κάνει με τις τελικές μετατοπίσεις, καταγράφονται **πολύ μικρές** μετακινήσεις, κάθετες στη διεύθυνση της διέγερσης, του 3^{ου}, 4^{ου} και 5^{ου} σφονδύλου, καθώς και μια μεγαλύτερη μετακίνηση του 11^{ου} σφονδύλου κατά τη διεύθυνση διέγερσης. Παρατηρείται τέλος μια μικρή στροφή του 5^{ου} σφονδύλου καθώς και μια μεγαλύτερη του 3^{ου}. Δεν παρατηρούνται μετακινήσεις ή στροφές των υπολοίπων σφονδύλων τέτοιες ώστε να καταγραφούν και να επισημανθούν.

Σεισμός Καλαμάτας

α) Χωρίς αποσβεστήρα

Από τα πρώτα κίολας δευτερόλεπτα της διέγερσης παρατηρείται μια μετρίου βαθμού σχετική ολίσθηση μεταξύ 7^{ου} και 8^{ου} σφονδύλου. Τα φαινόμενα λικνισμού είναι και εδώ παρόντα, κάνοντας πιο αισθητή την παρουσία τους μεταξύ 1^{ου} σφονδύλου – βάσης, 2^{ου} - 3^{ου}, 4^{ου} - 5^{ου} και 6^{ου} - 7^{ου} σφονδύλου. Παρατηρούνται αρκετές και σημαντικές σχετικές μετακινήσεις καθώς επίσης και συνεχείς εναλλαγές της γεωμετρίας του κίονα. Ο κίονας ακινητεί πλήρως αφού έχει παρέλθει ένα σημαντικό χρονικό διάστημα από το πέρας της εξαναγκασμένης ταλάντωσης. Σε ότι έχει να κάνει με τις τελικές μετατοπίσεις, παρατηρούνται μικρές

μετακινήσεις, **κάθετες στη διεύθυνση της διέγερσης**, του 4^{ου}, 5^{ου}, 7^{ου} και 10^{ου} σφονδύλου, καθώς και μια μεγαλύτερη μετακίνηση του 8^{ου} σφονδύλου **κατά τη διεύθυνση διέγερσης**. Τέλος, παρατηρείται μια μικρή στροφή του 4^{ου} και του 10^{ου} σφονδύλου καθώς και μια μεγαλύτερη του 8^{ου}. Δεν παρατηρείται μετακίνηση ή στροφή των υπολοίπων σφονδύλων τέτοια ώστε να καταγραφεί και να επισημανθεί.

β) Με αποσβεστήρα στη θέση του 11^{ου} σφονδύλου – 32 χαλύβδινα σωματίδια διαμέτρου 50mm

Κατά τη διάρκεια και αυτού του πειράματος έχουμε την παρουσία λικνιστικών κινήσεων, με έναν μεγάλο λικνισμό μεταξύ 2^{ου} και 3^{ου} σφονδύλου και τέσσερις μικρότερους μεταξύ 1^{ου} σφονδύλου – βάσης, 4^{ου} – 5^{ου}, 6^{ου} - 7^{ου} και 7^{ου} - 8^{ου} σφονδύλου. Οι υπόλοιποι λικνίζονται όλοι μαζί σε ομάδα σφονδύλων (8^{ος} + 9^{ος} + 10^{ος} + 11^{ος}). Επίσης καταγράφεται μια μικρή σχετική ολίσθηση του 11^{ου} ως προς τον 10^ο και του 7^{ου} ως προς τον 6^ο σφόνδυλο καθώς και μια μεγαλύτερη μεταξύ 7^{ου} και 8^{ου} σφονδύλου. Πρέπει να επισημανθεί ο αρκετά μικρότερος χρόνος (συγκριτικά με το πείραμα χωρίς αποσβεστήρα) που χρειάστηκε ώστε ο κίονας να έρθει σε κατάσταση ηρεμίας μετά το πέρας της διέγερσης καθώς και το αισθητά μικρότερο πλάτος ταλάντωσης. Όσον αφορά τις τελικές μετατοπίσεις και στροφές, παρατηρούμε μικρές μετακινήσεις του 9^{ου} και 11^{ου} σφονδύλου, μεγαλύτερες μετακινήσεις για τους σφονδύλους 3 και 7 και μια ακόμα μεγαλύτερη μετακίνηση αλλά και στροφή του 8^{ου} σφονδύλου. Δεν παρατηρούνται μετακινήσεις ή στροφές των υπολοίπων σφονδύλων τέτοιες ώστε να καταγραφούν και να επισημανθούν.

Διεγέρσεις με τη βάση του κίονα υπό κλίση

Τυγαία διέγερση

α) Χωρίς αποσβεστήρα

Στο πείραμα αυτό έχουμε πολύ έντονη την παρουσία τόσο του φαινομένου της ολίσθησης όσο και αυτού του λικνισμού. Η όλη απόκριση του κίονα μπορεί να χαρακτηριστεί έντονα **μη γραμμική**, αφού παρατηρούνται μεγάλες σχετικές μετακινήσεις και συνεχείς εναλλαγές της γεωμετρίας του. Πιο συγκεκριμένα, καταγράφονται δυο μεγάλοι λικνισμοί μεταξύ 2^{ου} - 3^{ου} και 4^{ου} - 5^{ου} σφονδύλου, δυο μετρίου βαθμού μεταξύ 1^{ου} σφονδύλου – βάσης και 6^{ου} - 7^{ου}, και ένας ασθενέστερος μεταξύ 7^{ου} – 8^{ου} σφονδύλου. Έχουμε επίσης τρεις μετρίου βαθμού ολισθήσεις των σφονδύλων 3, 5, και 9 καθώς και μια πολύ μεγάλη ολίσθηση του 11^{ου}

σφονδύλου. Σε ότι έχει να κάνει με τις τελικές μετακινήσεις, το κυρίαρχο στοιχείο είναι η πολύ μεγάλη μετατόπιση του 11^{ου} σφονδύλου. Από εκεί και πέρα, μετρίου βαθμού μετακινήσεις έχουν υποστεί ο 3^{ος}, ο 5^{ος} και ο 10^{ος} σφονδύλος και πιο μικρές ο 4^{ος}, ο 7^{ος} και ο 8^{ος}. Καταγράφονται συνολικά τέσσερις στροφές σφονδύλων. Αυτές του 1^{ου}, 5^{ου} και 7^{ου} σφονδύλου χαρακτηρίζονται μικρές, ενώ αυτή του 3^{ου} χαρακτηρίζεται μεγάλη. Τέλος, θα πρέπει να επισημανθεί το μεγάλο χρονικό διάστημα που μεσολαβεί από το πέρας της εξαναγκασμένης ταλάντωσης μέχρι τη χρονική στιγμή που ο κίονας έρχεται σε κατάσταση ηρεμίας.

β) Με αποσβεστήρα στη θέση του 11^{ου} σφονδύλου – 32 χαλύβδινα σωματίδια διαμέτρου 50mm

Η συνεισφορά του αποσβεστήρα στη **μείωση της δυναμικής απόκρισης** του κίονα είναι μεγάλη. Τα φαινόμενα του λικνισμού και της ολίσθησης που είχαν έντονη παρουσία κατά τη διάρκεια του προηγούμενου πειράματος, εδώ περιορίζονται αισθητά. Καταγράφεται μια μετρίου βαθμού λικνιστική κίνηση μεταξύ 2^{ου} και 3^{ου} σφονδύλου, καθώς και τρεις μικρότερες μεταξύ 1^{ου} σφονδύλου – βάσης, 4^{ου} - 5^{ου} και 6^{ου} – 7^{ου} σφονδύλου. Σε ότι έχει να κάνει με τις ολισθήσεις, καταγράφονται μόνο δυο. Αυτή του 11^{ου} σφονδύλου, η οποία χαρακτηρίζεται μετρίου βαθμού και αυτή του 8^{ου}, η οποία χαρακτηρίζεται μικρή. Οι τελικές μετακινήσεις που παρατηρούνται είναι αυτές του 3^{ου}, 8^{ου} και 10^{ου} σφονδύλου (μικρές), καθώς και αυτή του 11^{ου} (μετρίου βαθμού). Όσον αφορά τις στροφές τώρα, καταγράφονται συνολικά τέσσερις, με αυτές των σφονδύλων 1, 3 και 10 να χαρακτηρίζονται μικρές, και αυτή του 11^{ου} να χαρακτηρίζεται μετρίου βαθμού. Τέλος, θα πρέπει να τονιστεί ότι μετά το πέρας της εξαναγκασμένης ταλάντωσης, ο κίονας ακινητεί σε μικρότερο χρονικό διάστημα συγκριτικά με την περίπτωση που δεν χρησιμοποιήθηκε αποσβεστήρας.

γ) Με αποσβεστήρα στη θέση του 7^{ου} σφονδύλου – χαλύβδινη σφαίρα διαμέτρου 20cm

Από τα πρώτα κίονας δευτερόλεπτα της διέγερσης γίνεται αντιληπτό ότι στην απόκριση του κίονα **υπερισχύουν τα φαινόμενα ολίσθησης**. Παρατηρούμε τις έντονες ολισθήσεις των σφονδύλων 10 και 11, καθώς και τις λιγότερο έντονες αλλά σημαντικές των σφονδύλων 1, 3, 4 και 5. Λικνιστικές κινήσεις που χαρακτηρίζονται μικρές εμφανίζονται μεταξύ 1^{ου} σφονδύλου – βάσης, 4^{ου} – 5^{ου} και 7^{ου} – 8^{ου} σφονδύλου, ενώ παρατηρείται και ένας μετρίου βαθμού λικνισμός μεταξύ 2^{ου} και 3^{ου} σφονδύλου. Σε ότι έχει να κάνει με τις τελικές μετατοπίσεις, **κατά τη διεύθυνση διέγερσης** έχουμε τις δυο μεγάλες μετακινήσεις του 10^{ου} και

του 11^{ου} σφονδύλου, την μετρίου βαθμού μετακίνηση του 1^{ου} και την μικρή μετακίνηση του 2^{ου}, και **κατά την εγκάρσια διεύθυνση** έχουμε τις τρεις μετρίου βαθμού μετακινήσεις των σφονδύλων 3, 4 και 5. Καταγράφουμε επίσης πέντε στροφές, οι οποίες χαρακτηρίζονται μικρές και αφορούν τους σφονδύλους 2, 3, 5, 9 και 10. Δεν παρατηρούνται λοιπές μετακινήσεις ή στροφές τέτοιες ώστε να καταγραφούν και να επισημανθούν. Τέλος, θα πρέπει να τονίσουμε ότι **και** σε αυτήν την περίπτωση η όλη απόκριση του κίονα κρίνεται **μειωμένη** σε σχέση με αυτήν που παρουσίασε όταν δεν χρησιμοποιήθηκε αποσβεστήρας.

Σεισμός Καλαμάτας

α) Χωρίς αποσβεστήρα

Από τα πρώτα κιόλας δευτερόλεπτα της διέγερσης καταγράφεται μια έντονη σχετική ολίσθηση μεταξύ του 9^{ου} και του 10^{ου} σφονδύλου καθώς και μια μικρότερη μεταξύ 7^{ου} και 6^{ου}. Έχουμε μια έντονη παρουσία του φαινομένου του λικνισμού, καθώς παρατηρούμε την πλειονότητα των σφονδύλων να λικνίζουν ανεξάρτητα ο ένας από τον άλλον και μόνον τον 10^ο και τον 11^ο να λικνίζουν σε ομάδα σφονδύλων. Μεγάλες λικνιστικές κινήσεις καταγράφονται μεταξύ 2^{ου} - 3^{ου}, 4^{ου} - 5^{ου} και 6^{ου} - 7^{ου} σφονδύλου και μικρότερες μεταξύ 1^{ου} σφονδύλου – βάσης, 3^{ου} - 4^{ου}, 7^{ου} - 8^{ου} και 8^{ου} - 9^{ου}. Μετά το πέρας της εξαναγκασμένης ταλάντωσης ο κίονας συνεχίζει να κινείται για αρκετά δευτερόλεπτα ακόμα μέχρι να έρθει σε κατάσταση ηρεμίας. Σε ότι έχει να κάνει με τις τελικές μετατοπίσεις, μπορούμε να καταγράψουμε μικρές μετακινήσεις του 3^{ου}, 4^{ου} και 5^{ου} σφονδύλου κατά την εγκάρσια διεύθυνση, μικρές μετακινήσεις του 7^{ου}, 8^{ου} και 11^{ου} σφονδύλου κατά τη διεύθυνση διέγερσης, καθώς και μια αρκετά μεγάλη μετατόπιση, πάλι κατά τη διεύθυνση διέγερσης, του 10^{ου} σφονδύλου. Τέλος, καταγράφονται τέσσερις **σχετικές** στροφές, με τις τρεις να χαρακτηρίζονται μικρές (2^{ος} - 3^{ος}, 3^{ος} - 4^{ος} και 4^{ος} - 5^{ος} σφόνδυλος) και την τέταρτη αρκετά μεγαλύτερη (9^{ος} - 10^{ος} σφόνδυλος).

β) Με αποσβεστήρα στη θέση του 11^{ου} σφονδύλου – 32 χαλύβδινα σωματίδια διαμέτρου 50mm

Γίνεται αμέσως αντιληπτό ότι η **δυναμική απόκριση του κίονα μειώνεται σημαντικά** αν την συγκρίνουμε με εκείνη της περίπτωσης που **δεν** χρησιμοποιείται αποσβεστήρας. Λικνιστικά φαινόμενα εμφανίζονται μονό μεταξύ 1^{ου} σφονδύλου – βάσης, 2^{ου} - 3^{ου}, 4^{ου} - 5^{ου} και 6^{ου} - 7^{ου} σφονδύλου, με τους τέσσερις λικνισμούς πάντως να χαρακτηρίζονται μικροί. Με εξαίρεση μια πολύ μικρή ολίσθηση του 11^{ου} σφονδύλου, θα μπορούσαμε να χαρακτηρίσουμε τη

συμπεριφορά του κίονα από τον 7^ο σφόνδυλο και πάνω σχεδόν **μονολιθική**. Μετά το πέρας της διέγερσης, ο κίονας ακινητεί σε πολύ μικρότερο χρονικό διάστημα ενώ και το πλάτος της ταλάντωσης είναι αρκετά μικρότερο. Καταγράφονται τρεις μικρές τελικές μετακινήσεις, δυο κατά τη **διεύθυνση διέγερσης** (4^{ος} και 11^{ος} σφόνδυλος), και μια κατά την **εγκάρσια διεύθυνση** (3^{ος}). Τέλος, παρατηρούνται μια στροφή του 3^{ου} και μια στροφή του 4^{ου} σφονδύλου, οι οποίες και οι δυο χαρακτηρίζονται μικρές. Δεν παρατηρούνται λοιπές μετακινήσεις ή στροφές τέτοιες ώστε να καταγραφούν και να επισημανθούν.

γ) Με αποσβεστήρα στη θέση του 7^{ου} σφονδύλου – χαλύβδινη σφαίρα διαμέτρου 20cm (δύο χιτώνια)

Κατά τη διάρκεια του πειράματος αυτού παρατηρούμε ότι όσο πλησιάζουμε στην κορυφή του κίονα το φαινόμενο της ολίσθησης είναι εντονότερο από αυτό του λικνισμού, ενώ το αντίθετο συμβαίνει για τους σφονδύλους που βρίσκονται πλησιέστερα στη βάση. Έτσι, από τα πρώτα κιάλας δευτερόλεπτα της διέγερσης παρατηρούμε την έντονη ολίσθηση του 10^{ου} και του 11^{ου} σφονδύλου καθώς και τη μικρότερου βαθμού ολίσθηση του 8^{ου} σφονδύλου. Από την άλλη, καταγράφουμε μετρίου βαθμού λικνιστικές κινήσεις μεταξύ 1^{ου} σφονδύλου – βάσης και 2^{ου} - 3^{ου} σφονδύλου, καθώς και έναν ασθενή λικνισμό μεταξύ 4^{ου} και 5^{ου} σφονδύλου. Όσον αφορά τις τελικές μετατοπίσεις, **κατά τη διεύθυνση διέγερσης** έχουμε τις δυο σημαντικές μετακινήσεις του 10^{ου} και του 11^{ου} σφονδύλου και την μικρότερου βαθμού μετακίνηση του 8^{ου} σφονδύλου, ενώ **κατά την εγκάρσια διεύθυνση** τις τρεις μικρές μετακινήσεις του 3^{ου}, 4^{ου} και 5^{ου} σφονδύλου. Τέλος, καταγράφονται τρεις στροφές. Αυτές του 1^{ου} και του 4^{ου} σφονδύλου χαρακτηρίζονται μικρές, ενώ αυτή του 3^{ου} χαρακτηρίζεται ως μετρίου βαθμού. Δεν παρατηρούνται λοιπές μετακινήσεις ή στροφές τέτοιες ώστε να καταγραφούν και να επισημανθούν.

Οι σφονδυλωτοί κίονες παρουσιάζουν μια **πολύπλοκη απόκριση** υπό αρμονικά, τυχαία ή σεισμικά φορτία όπου περιπλέκονται φαινόμενα λικνισμού και ολίσθησης. Στην εργασία αυτή παρουσιάζονται τα συμπεράσματα από τη μελέτη της δυναμικής συμπεριφοράς ενός κίονα – δοκιμίου, του οποίου ο έβδομος και ο τελευταίος (ενδέκατος) σφόνδυλος μπορούσαν να αντικατασταθούν με **αποσβεστήρα σωματιδίων**.

Ο κίονας υπεβλήθη σε μια σειρά από διαφορετικές δυναμικές διεγέρσεις και σε όλες τις περιπτώσεις εξετάστηκε η επιρροή της ολίσθησης και του λικνισμού κατά τη διάρκεια της διέγερσης και της προκαλούμενης απόκρισης. Διαπιστώθηκε ότι η απόκριση του κίονα στο

σύνολο σχεδόν των διεγέρσεων ήταν έντονα **μη γραμμική**, με μεγάλες σχετικές μετακινήσεις και συνεχείς εναλλαγές της γεωμετρίας του.

Διαπιστώθηκε επίσης ότι κατά τα πειράματα όπου ο αποσβεστήρας σωματιδίων αντικαθιστούσε έναν από τους σφονδύλους, **η δυναμική απόκριση του κίονα μπορούσε να μειωθεί σημαντικά.**

Τέλος, παρατηρήθηκε ότι στις περιπτώσεις όπου είχαμε χρησιμοποίηση του αποσβεστήρα, η κίνηση του κίονα μετά το πέρας της εξαναγκασμένης ταλάντωσης συνεχίστηκε για **μικρότερο χρονικό διάστημα** και με **μικρότερο πλάτος** συγκριτικά με τις περιπτώσεις όπου δεν χρησιμοποιήθηκε αυτός.

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΤΟΥ ΚΙΟΝΑ ΜΙΚΡΗΣ ΚΛΙΜΑΚΑΣ (ΚΙΟΝΙΣΚΟΣ ΜΕ 7 ΣΦΟΝΔΥΛΟΥΣ)

Τυχαία διέγερση

1) Χωρίς αποσβεστήρα (μικρή διέγερση)

Η ταλάντωση του κιονίσκου χαρακτηρίζεται μέτρια έως ισχυρή.

- 1ος, 2ος σφόνδυλος: ελάχιστη μετατόπιση και στροφή (ο 1^{ος} σφόνδυλος είναι στην βάση του κιονίσκου)
- 3ος, 4ος σφόνδυλος: ελάχιστη στροφή
- 5ος, 6ος σφόνδυλος: αμελητέα ως και καθόλου στροφή
- 7ος σφόνδυλος: μικρή μετατόπιση, ελάχιστη στροφή

Οι σφόνδυλοι 1ος, 2ος, 3ος, 4ος λικνίζονται ανεξάρτητα το καθένα με φθίνουσα ένταση από τον 1ο-4ο, ενώ οι υπόλοιποι σφόνδυλοι ταλαντώνονται ως ένα ενιαίο σώμα οπού ο καθένας γλιστρά πάνω στο άλλο με τον 7ο να παρουσιάζει τη μεγαλύτερη μετακίνηση.

2) Χωρίς αποσβεστήρα

Ισχυρή ταλάντωση του κιονίσκου με μικρή όμως απόκριση στη διέγερση αυτή.

- 1ος σφόνδυλος: μικρή στροφή και μετακίνηση
- 2ος σφόνδυλος: μικρή στροφή και ελάχιστη μετακίνηση
- 3ος σφόνδυλος: μικρή στροφή
- 4ος σφόνδυλος: ελάχιστη στροφή
- 5ος, 6ος σφόνδυλο : ελάχιστη στροφή και μετακίνηση
- 7ος σφόνδυλος: μικρή μετακίνηση και ελάχιστη στροφή

Οι σφόνδυλοι 1ος, 2ος, 3ος, 4ος λικνίζονται ανεξάρτητα ο καθένας κατά φθίνουσα ένταση από τον 1ο-4ο, ενώ οι υπόλοιποι ταλαντώνονται ως ένα ενιαίο σώμα παρουσιάζοντας μεταβολές στη στροφή και τη μετακίνηση τους.

3) Χωρίς αποσβεστήρα (πρώτη επανάληψη πειράματος)

Πρόκειται για ισχυρή ταλάντωση του κιονίσκου.

- 1ος σφόνδυλος: μικρή στροφή και μετατόπιση
- 2ος σφόνδυλος: ελάχιστη στροφή, μικρή μετατόπιση
- 3ος σφόνδυλος: ελάχιστη στροφή και μετακίνηση
- 4ος, 5ος σφόνδυλος: περίπου σταθερά στη θέση τους

- 6ος σφόνδυλος: ελάχιστη μετακίνηση

- 7ος σφόνδυλος: μικρή μετακίνηση

Οι σφόνδυλοι 1ος,2ος,3ος,4ος λικνίζονται ανεξάρτητα ο καθένας και στο τέλος της δοκιμής με τη μεγάλη διέγερση λικνίζεται για ελάχιστα και ο 6ο σφόνδυλος. Ο 5ος σφόνδυλος ταλαντώνεται μαζί με τον 4ο ως ένα ενιαίο σώμα χωρίς να μετακινηθεί ή περιστραφεί, ενώ ο 7ος ταλαντώνεται μαζί με τον 4ο και τον 6ο ως ένα σύνολο γλιστρώντας έτσι στην επιφάνεια του 6ου προκαλώντας μικρή μετακίνηση.

4) Χωρίς αποσβεστήρα (δεύτερη επανάληψη πειράματος)

Ισχυρή ταλάντωση του κιονίσκου.

- 1ος σφόνδυλος: μέτρια μετατόπιση, μικρή στροφή

- 2ος, 3ος σφόνδυλος: μικρή μετατόπιση και στροφή

- 4ος, 5ος σφόνδυλος: σταθερά

- 6ος σφόνδυλος: ελάχιστη μετακίνηση και στροφή

- 7ος σφόνδυλος: ελάχιστη στροφή, μικρή ως μέτρια μετατόπιση

Οι σφόνδυλοι 1ος, 2ος, 3ος λικνίζονται ξεχωριστά το καθένα με φθίνουσα ένταση από τον 1ο-3ο. Οι υπόλοιποι σφόνδυλοι λικνίζονται μαζί με τον 3ο ως ένα ενιαίο σύνολο και ολισθαίνουν ο ένας πάνω στον άλλο με το τελευταίο σφόνδυλο να έχει τη μεγαλύτερη μετακίνηση.

5) Χωρίς αποσβεστήρα (τρίτη επανάληψη πειράματος)

Πρόκειται για αρκετά ισχυρή ταλάντωση

- 1ος σφόνδυλος: ελάχιστη στροφή

- 2ος σφόνδυλος: μικρή στροφή, μικρή μετακίνηση

- 3ος, 4ος σφόνδυλος: ελάχιστη μετακίνηση

- 5ος σφόνδυλος: ελάχιστη μετακίνηση και στροφή

- 6ος σφόνδυλος: μέτρια ως μεγάλη μετακίνηση, μικρή στροφή

- 7ος σφόνδυλος :μεγάλη μετακίνηση, μικρή στροφή

Σε αυτή την περίπτωση λικνίζονται όλοι οι σφόνδυλοι ανεξάρτητα ο καθένας. Πρόκειται για μια ισχυρή διέγερση που προκαλεί ολίσθηση των σφονδύλων πάνω την επιφάνεια των άλλων με μεταβολές στη στροφή και μετακίνηση σε κάθε σφόνδυλο. Ειδικά, ο 6ος και 7ος λικνίζονται και είναι αυτοί έτσι που εμφανίζουν σημαντικές μετακινήσεις και μικρές στροφές.

6) Με αποσβεστήρα στη θέση του 5^{ου} σφόνδουλου – 8 χαλύβδινα σωματίδια διαμέτρου 20mm- αποσβεστήρας με μεσαίο άνοιγμα

Ο κιονίσκος ταλαντώνεται μετρίως.

- 1ος σφόνδυλος: παρουσιάζει μικρή μετακίνηση και ελάχιστη στροφή
- 2ος, 5ος σφόνδυλος: αμελητέα στροφή
- 3ος, 4ος, 6ος σφόνδυλος: είναι κυρίως αμετάβλητα
- 7ος σφόνδυλος: παρουσιάζει μια ελάχιστη μετακίνηση

Οι σφόνδυλοι 1ος, 2ος, 3ος, 4ος λικνίζονται ο καθένας ξεχωριστά με φθίνουσα ένταση από τον 1ος-4ος. Οι υπόλοιποι σφόνδυλοι επειδή ταλαντώνονται ως ένα ενιαίο σώμα είναι περίπου αμετάβλητοι, εκτός από τον 7ο σφόνδυλο που γλιστράει πάνω στον 6ο σφόνδυλο παρουσιάζοντας μια ελάχιστη μετακίνηση.

7) Με αποσβεστήρα στη θέση του 5^{ου} σφόνδουλου – 8 χαλύβδινα σωματίδια διαμέτρου 20mm- αποσβεστήρας με μεσαίο άνοιγμα (επανάληψη)

Η ταλάντωση του κιονίσκου παρατηρείται μέτρια.

- 1ος, 3ος, 4ος, 6ος σφόνδυλος: αμετάβλητα
- 2ος σφόνδυλος: ελάχιστη στροφή και μετακίνηση
- 5ος σφόνδυλος: ελάχιστη στροφή
- 7ος σφόνδυλο : ελάχιστη στροφή και μετακίνηση

Οι σφόνδυλοι 1ος, 2ος λικνίζονται ανεξάρτητα ο καθένας με φθίνουσα ένταση από 1ο-2ο σφόνδυλο. Έπειτα λικνίζεται και ο 4ος ξεχωριστά, άλλα ελάχιστα με μικρή ένταση. Οι υπόλοιποι σφόνδυλοι ταλαντώνονται μαζί με τον 2ο και τον 4ο ως ένα σύνολο ολισθαίνοντας ο ένα πάνω στον άλλο με μικρές μεταβολές στη στροφή – μετακίνηση (5ος, 7ος σφόνδυλος).

8) Με αποσβεστήρα στη θέση του 5^{ου} σφόνδουλου – 8 χαλύβδινα σωματίδια διαμέτρου 20mm αποσβεστήρας με μεγάλο άνοιγμα

Η ταλάντωση του κιονίσκου χαρακτηρίζεται μέτρια.

- 1ος σφόνδυλος: πολύ μικρή μετακίνηση, μικρή στροφή
- 2ος σφόνδυλος: μικρή μετακίνηση και στροφή
- 3ος σφόνδυλος: ελάχιστη στροφή, μικρή μετακίνηση
- 4ος σφόνδυλος: ελάχιστη στροφή
- 5ος σφόνδυλος: ελάχιστη στροφή, αμελητέα μετακίνηση
- 6ος σφόνδυλος: μικρή μετακίνηση

- 7ος σφόνδυλος: μικρή ως μέτρια μετακίνηση

Οι σφόνδυλοι 1ος, 2ος, 3ος, 4ος, 5ος λικνίζονται ανεξάρτητα ο καθένας, πιο έντονα κυρίως ο 3ος και 4ος, ενώ οι υπόλοιποι 1ος, 2ος και 5ος λιγότερο έντονα. Οι σφόνδυλοι 6^{ος} και 7ος ταλαντώνονται ως ένα ενιαίο σώμα, όπου το καθένα ολισθαίνει πάνω στο άλλο με μικρές μεταβολές στη στροφή και τη μετακίνηση.

9) Με αποσβεστήρα στη θέση του 5^{ου} σφονδύλου – 8 χαλύβδινα σωματίδια διαμέτρου 20mm αποσβεστήρας με μεγάλο άνοιγμα (πρώτη επανάληψη πειράματος)

Ο κιονίσκος ταλαντώνεται μετρίως.

- 1ος, 4ος, 6ος σφόνδυλος: ελάχιστη στροφή
- 2ος, 3ος σφόνδυλος: μικρή στροφή
- 5ος σφόνδυλος: ελάχιστη μετακίνηση
- 7ος σφόνδυλος: μικρή στροφή, ελάχιστη μετακίνηση

Οι σφόνδυλοι 1ος, 2ος, 3ος, 4ος λικνίζονται ανεξάρτητα ο καθένας περίπου με την ίδια ένταση.

Οι σφόνδυλοι 5ος, 6ος, 7ος ταλαντώνονται μαζί με τον 4ο ενιαία έτσι ώστε ο 5ος παρουσιάζει ελάχιστη μετακίνηση στην επιφάνεια του 4ου και ομοίως ο 7ος πάνω στην επιφάνεια του 6ου.

10) Με αποσβεστήρα στη θέση του 5^{ου} σφονδύλου – 8 χαλύβδινα σωματίδια διαμέτρου 20mm αποσβεστήρας με μεγάλο άνοιγμα (δεύτερη επανάληψη πειράματος)

Ο κιονίσκος ταλαντώνεται μετρίως.

- 1ος σφόνδυλος: μικρή στροφή, ελάχιστη μετατόπιση
- 2ος, 4ος, 5ος σφόνδυλος: ελάχιστη στροφή
- 3ος σφόνδυλος: αλώβητο
- 6ος σφόνδυλος: ελάχιστη μετακίνηση
- 7ος σφόνδυλος: μικρή μετακίνηση

Έχουμε λίκνισμα των σφονδύλων 1ου, 2ου, 3ου, 4ου, 5ου ξεχωριστά ο καθένας με μικρή ένταση όλοι τους. Οι σφόνδυλοι 6ος, 7ος ταλαντώνονται μαζί με τον 5ο ως ένα ενιαίο σώμα προκαλώντας τον 6ο να γλιστρήσει πάνω στην επιφάνεια του 5ου και ο 7ος να γλιστρήσει πάνω στην επιφάνεια του 6ου με μια ελάχιστη και μικρή μετακίνηση αντίστοιχα.

11) Με αποσβεστήρα στη θέση του 5^{ου} σφονδύλου – 3 χαλύβδινα σωματίδια διαμέτρου 30mm αποσβεστήρας με μεγάλο άνοιγμα

Ελαφρώς ισχυρή ταλάντωση του κιονίσκου.

- 1ο σφόνδυλος: ελάχιστη μετακίνηση
- 2ο σφόνδυλος: ελάχιστη περιστροφή, μικρή μετακίνηση
- 3ο σφόνδυλος: ελάχιστη στροφή
- 4ο,5ο,7ο σφόνδυλος: μικρή μετακίνηση
- 6ο σφόνδυλος: περίπου σταθερό

Οι σφόνδυλοι 1ος, 2ος, 3ος, 4ος, 5ος λικνίζονται ξεχωριστά ο καθένας, εντονότερα ο 1ος και ο 2ος, ενώ οι υπόλοιποι από αυτούς ελάχιστα. Οι 6ος, 7ος σφόνδυλοι ταλαντώνονται μαζί με το 5ο ως ένα ενιαίο σώμα οπότε μόνο ο 7ος σφόνδυλος μετακινείται πάνω στην επιφάνεια του 6ου σφονδύλου.

12) Με αποσβεστήρα στη θέση του 5^{ου} σφονδύλου – 3 χαλύβδινα σωματίδια διαμέτρου 30mm αποσβεστήρας με μεγάλο άνοιγμα (επανάληψη πειράματος)

Η ταλάντωση του κιονίσκου χαρακτηρίζεται ως μέτρια και παρουσιάζει μικρή απόκριση στη διέγερση αυτή.

- 1ος σφόνδυλος: ελάχιστη στροφή και μετακίνηση
- 2ος, 3ος σφόνδυλος: ελάχιστη στροφή
- 5ος, 6ος σφόνδυλος: ελάχιστη μετακίνηση
- 4ος, 7ος σφόνδυλος: μικρή μετακίνηση

Οι σφόνδυλοι 1ος, 2ος, 3ος λικνίζονται ο καθένας ανεξάρτητα με ελάχιστη ένταση. Οι σφόνδυλοι 4ος, 5ος, 6ος, 7ος ταλαντώνονται μαζί με τον 3ο ως ένα ενιαίο σύνολο παρουσιάζοντας μικρές ως ελάχιστες μεταβολές στη στροφή και μετακίνηση, αφού ο ένας ολισθαίνει πάνω στην επιφάνεια του προηγούμενου σφονδύλου .

13) Με αποσβεστήρα στη θέση του 5^{ου} σφονδύλου – 1 χαλύβδινο σωματίδιο διαμέτρου 50mm αποσβεστήρας με μεγάλο άνοιγμα

Η ταλάντωση του κιονίσκου παρατηρείται μέτρια.

- 1ος, 6ος σφόνδυλος: ελάχιστη μετακίνηση
- 2ος, 3ος, 4ος σφόνδυλος: σταθερά
- 5ος σφόνδυλος: μικρή μετακίνηση
- 7ος σφόνδυλος: μικρή ως μέτρια μετακίνηση

Οι σφόνδυλοι 1ος, 2ος, 3ος, 4ος, 5ος λικνίζονται ανεξάρτητα ο καθένας με φθίνουσα ένταση από τον 1ο-5ο. Οι σφόνδυλοι 6ος, 7ος ταλαντώνονται μαζί με το 5ο ως ένα ενιαίο σύνολο και το ένα ολισθαίνει πάνω στον άλλο με μικρές μετακινήσεις και στις δυο περιπτώσεις.

14) Με αποσβεστήρα στη θέση του 5^{ου} σφονδύλου – 1 χαλύβδινο σωματίδιο διαμέτρου 50mm αποσβεστήρας με μεγάλο άνοιγμα (επανάληψη πειράματος)

Πρόκειται για μια μέτρια ως ισχυρή ταλάντωση του κιονίσκου.

- 1ος, 4ος σφόνδυλος: ελάχιστη στροφή και μετακίνηση
- 2ος, 3ος σφόνδυλος: μικρή μετακίνηση και ελάχιστη στροφή
- 5ος, 6ος σφόνδυλος: περίπου αμετάβλητα
- 7ος σφόνδυλος: μικρή μετακίνηση

Έχουμε ταλάντωση των σφονδύλων 1ου,2ου,3ου,4ου,5ου ανεξάρτητα ο καθένας με φθίνουσα ένταση από το 1ο-5ο. Οι σφόνδυλοι 6ος,7ος ταλαντώνονται μαζί με το 5ο ως ένα ενιαίο σύνολο με τον 7ο να ολισθαίνει πάνω στην επιφάνεια του 6ου με μικρή μετακίνηση.

15) Με αποσβεστήρα στη θέση του 5^{ου} σφονδύλου – 8 χαλύβδινα σωματίδια διαμέτρου 20mm αποσβεστήρας με μικρό άνοιγμα

Πρόκειται για ισχυρή διέγερση.

- 1ος, 3ος σφόνδυλος: ελάχιστη στροφή
- 2ος, 4ος σφόνδυλος: αμετάβλητα
- 5ος σφόνδυλος :ελάχιστη μετακίνηση
- 6ος σφόνδυλος :μικρή μετακίνηση, μικρή ως μέτρια στροφή
- 7ος σφόνδυλος :μέτρια μετακίνηση, μικρή στροφή

Σε αυτή την περίπτωση λικνίζονται ανεξάρτητα ο καθένας από τους σφονδύλους 1ος, 4ος, 5ος. Κυρίως ο 1ος λικνίζεται πολύ έντονα, ενώ ο 4ος, 5ος ελάχιστα. Οι υπόλοιποι σφόνδυλοι ταλαντώνονται μαζί με τον 1ο που είναι ο μοναδικός που λικνίζεται έντονα, έτσι φαίνεται ο κιονίσκος να ταλαντώνεται ως ένα ενιαίο σώμα, προκαλώντας έτσι την ολίσθηση των πάνω σφονδύλων. Έτσι πραγματοποιούνται σημαντικές μετακινήσεις στους δυο τελευταίους σφονδύλους δηλαδή στον 6ο και 7ο σφόνδυλο .

- Οι μετακινήσεις(ή μετατοπίσεις) και οι στροφές των σφονδύλων αναφέρονται σε σχέση με την πάνω επιφάνεια του αμέσως προηγούμενου σφονδύλου, εκτός από τον 1ο σφόνδυλο που είναι σε σχέση με την επιφάνεια της βάσης.
- Όσο αυξάνεται το ύψος, αυξάνεται το πλάτος(ένταση) της ταλάντωσης, με αποτέλεσμα οι σφόνδυλοι στην κορυφή του κιονίσκου να ταλαντώνονται περισσότερο από τους κατώτερους σφονδύλους.

- Κατά μέσο όρο μόνο οι σφόνδυλοι 1ος, 2ος, 3ος, 4ος λικνίζονται ανεξάρτητα ο καθένα τους, ενώ οι υπόλοιποι σφόνδυλοι ως ένα ενιαίο σώμα. Έτσι, οι υπόλοιποι σφόνδυλοι ολισθαίνουν ο ένας πάνω στο άλλο με σημαντικές μετακινήσεις στους τελευταίους σφονδύλους (συνήθως 6ο,7ο σφόνδυλο).
- Κατά μέσο όρο οι σφόνδυλοι 1ος, 2ος, 3ος, 4ος παρουσιάζουν μικρή μετακίνηση και στροφή. Η στροφή σε αυτούς είναι μεγαλύτερη από τους υπόλοιπα σφονδύλους εξαιτίας του γεγονότος ότι λικνίζονται ανεξάρτητα ο καθένας.