

ΜΕΙΩΣΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΑΠΟΣΒΕΣΤΗΡΩΝ ΣΥΝΤΟΝΙΣΜΕΝΗΣ ΜΑΖΑΣ

ΙΟΥΡΑΝΗΣ ΠΕΤΡΙΔΗΣ

Μεταπτυχιακός Φοιτητής Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών Πανεπιστήμιο Πελοποννήσου, ipetrid@gmail.gr

Περίληψη

Η παρούσα ερευνητική εργασία πραγματοποιήθηκε με σκοπό τη διερεύνηση της μείωσης της απόκρισης ενός μονοβάθμιου κτιριακού μοντέλου υπό τυχαία διέγερση. Στο μονοβάθμιο σύστημα προσαρτήθηκε αποσβεστήρας σωματιδίων με την μορφή εκκρεμούς. Ο αποσβεστήρας αποτελείτο από μια κοίλη διατομή με δυνατότητα προσαρμογής του μεγέθους ενός ή περισσότερων διαμερισμάτων οπότε τοποθετούνται τα σωματίδια. Το σύστημα δοκιμάστηκε για τέσσερα διαφορετικά επίπεδα διέγερσης καθώς και για διάφορες περιπτώσεις διαμερισμάτων. Τέλος, έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ της αρχικής κατασκευής και της κατασκευής με την χρήση αποσβεστήρα σωματιδίων. Από την σύγκριση, προσδιορίστηκε η επιρροή των διάφορων τροποποιήσεων του αποσβεστήρα, στην απόκριση της κατασκευής.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η Ελλάδα αποτελεί μια χώρα με έντονη σεισμική δραστηριότητα. Αυτό σημαίνει πως οι κατασκευές στον Ελλαδικό χώρο υπόκεινται συχνά υπό την φόρτιση δυναμικών φορτίων με αποτέλεσμα την πρόκληση διαφόρων βλαβών σε αυτές. Σημαντικό παράδειγμα περίπτωσης καταστροφικού σεισμού ήταν ο μεγάλος σεισμός της Αθήνας (1999). Ωστόσο η επιστήμη με την πάροδο των χρόνων, έχει εξελιχθεί αρκετά με αποτέλεσμα να έχουν αναπτυχθεί συμβατικοί και μη συμβατικοί τρόποι αντιμετώπισης των σεισμών με σκοπό την προστασία των κατασκευών από σημαντικές ζημιές αλλά και της ανθρώπινης ζωής.

Οι συμβατικοί τρόποι αντιμετώπισης εκμεταλλεύονται την πλάσטיμη συμπεριφορά του φέροντα οργανισμού της κατασκευής για την απόσβεση της εισερχόμενης ενέργειας. Αναφέρονται σε πρότυπα σχεδιασμού καθώς και την διάταξη της κατασκευής, με τέτοιο τρόπο ώστε να παρέχεται επαρκής ασφάλεια (“Ευρωκώδικας 8: Αντισεισμικός Σχεδιασμός”). Σκοπός τους είναι η προστασία της ανθρώπινης ζωής, ο περιορισμός των βλαβών στην κατασκευή καθώς και η εξασφάλιση της λειτουργικότητας σημαντικών κατασκευών, μετά τον σεισμό.

Οι μη συμβατικοί τρόποι αντιμετώπισης αναφέρονται σε ειδικές διατάξεις οι οποίες εφαρμόζονται κατά την κατασκευή αλλά και σε ήδη υφιστάμενα κτίρια, και αποσκοπούν στον έλεγχο απόκρισης της κατασκευής. Αυτοί οι τρόποι αντιμετώπισης χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες, τα ενεργά και τα παθητικά συστήματα ελέγχου.

Τα ενεργά συστήματα ελέγχου χρησιμοποιούν τις μετρούμενες από αισθητήρες (sensors) αποκρίσεις της κατασκευής κατά την διάρκεια ενός σεισμού. Στην περίπτωση που η απόκριση της κατασκευής δεν είναι επιθυμητή, αναπτύσσονται κατάλληλες δυνάμεις ελέγχου.

Τα συστήματα παθητικού ελέγχου αποτελούνται από συσκευές τα υλικά των οποίων απορροφούν και διαχέουν την εισερχόμενη σεισμική ενέργεια. Συνήθως τα συστήματα αυτά ανταποκρίνονται καλά για ένα εύρος συχνοτήτων για το οποίο σχεδιάστηκαν, για αυτό και θεωρούνται συστήματα με περιορισμένη ικανότητα ελέγχου. Ωστόσο, μπορεί να δημιουργήσουν υψηλότερη δύναμη απόσβεσης όταν η απόκριση της κατασκευής αυξάνεται. Τα συστήματα αυτά χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, τις συσκευές απόσβεσης

ενέργειας (Energy Dissipation Devices) και την σεισμική μόνωσης βάσης (Seismic Base Isolation).

Στον Ελλαδικό χώρο έχουν χρησιμοποιηθεί διατάξεις σεισμικής μόνωσης βάσης με την μορφή εφεδράνων για παράδειγμα, στο μουσείο της Ακρόπολης, το κέντρο πολιτισμού “Σταύρος Νιάρχος” και τη Στέγη Γραμμάτων και Τεχνών. Πρόκειται για κατασκευές σημαντικού ενδιαφέροντος. Εφαρμόστηκε αυτή η κατηγορία προστασίας λόγω του ύψους των κατασκευών. Η εφαρμογή τέτοιου είδους διατάξεων αποφεύγεται σε πολυώροφες κατασκευές λόγω του κινδύνου ανατροπής της κατασκευής κατά την διάρκεια ενός σεισμού. Σε περιπτώσεις πολυώροφης κατασκευής μεγάλου ύψους γίνεται χρήση των συσκευών απόσβεσης ενέργειας.

Οι συσκευές απόσβεσης ενέργειας αποσκοπούν στη μείωση απόκρισης και των βλαβών μιας κατασκευής που μπορεί να προέλθουν από έναν σεισμό, αλλά γίνεται και συχνή χρήση τους για την μείωση επίδρασης των φορτίων ανέμου.

Η παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε με σκοπό την διερεύνηση των συσκευών απόσβεσης ενέργειας με αντικείμενο μελέτης τους αποσβεστήρες σωματιδίων, αλλά και την διαπίστωση της αποτελεσματικότητας τους όσον αφορά την απόκριση της κατασκευής κατά την διάρκεια μιας τυχαίας δυναμικής φόρτισης. Ο αποσβεστήρας σωματιδίων πρόκειται για μια διάταξη η οποία αποτελείται από ένα κοίλο δοχείο στο οποίο τοποθετούνται σωματίδια. Κατά τη διάρκεια του σεισμού η συσκευή ενεργοποιείται, με αποτέλεσμα η κίνηση των σωματιδίων να συντελέσει στην μείωση απόκρισης της κατασκευής μέσω της κρούσης των σωματιδίων μεταξύ τους, αλλά και με τα τοιχώματα του αποσβεστήρα.

2. ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΚΑΙ ΑΠΟΣΒΕΣΤΗΡΑ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ

Για τις ανάγκες της έρευνας χρησιμοποιήθηκε κτιριακό μοντέλο το οποίο αποτελείτο από τέσσερα χαλύβδινα υποστυλώματα διαστάσεων 450x20x1.5 mm, συνολικής μάζας 416 gr. Τα χαλύβδινα υποστυλώματα φέρουν πλάκα διαστάσεων 15x15x2 cm. Η συνολική μάζα της κατασκευής, 4572 gr. Ο αποσβεστήρας σωματιδίων, υπό την μορφή εκκρεμούς, ο οποίος χρησιμοποιήθηκε φέρει εξωτερικές διαστάσεις 13.5x7 cm και εσωτερικές 10.1x4.6 cm, συνολικής μάζας 336 gr. Ως κρουστική μάζα χρησιμοποιήθηκαν 24 σφαιρίδια χάλυβα διαμέτρου 10 mm και μάζας 4 gr το κάθε σφαιρίδιο. Η πυκνότητα του χάλυβα ήταν $\rho = 7852 \text{ Kg/m}^3$ και το μέτρο ελαστικότητας του $E = 210 \text{ GPa}$.

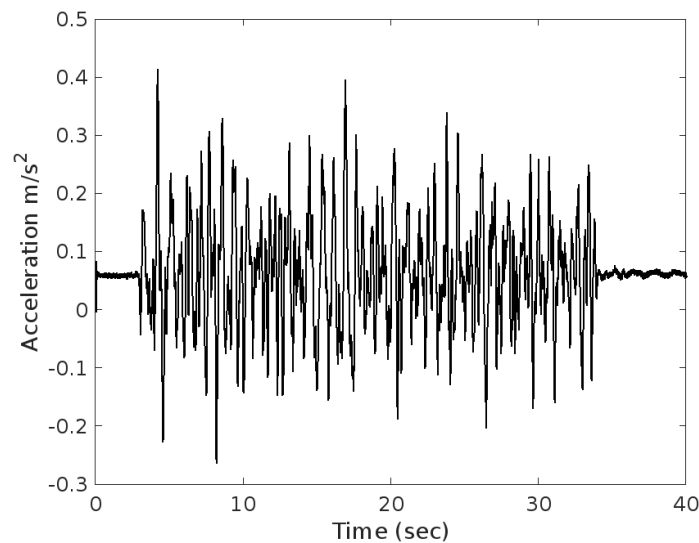
3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Για την διεξαγωγή των πειραμάτων, χρησιμοποιήθηκε ένα κτιριακό μοντέλο ενός βαθμού ελευθερίας από χάλυβα. Το κτιριακό μοντέλο τοποθετήθηκε σε μια σεισμική τράπεζα η οποία είχε τη δυνατότητα κίνησης σε μια διεύθυνση. Για την καταγραφή των δεδομένων χρησιμοποιήθηκαν όργανα καταγραφής, μετακινήσεων στην κορυφή της διάταξης (τύπου laser), μετακίνησης της σεισμικής βάσης (με την μορφή συρματόσχοινου) καθώς και επιταχυνσιόμετρα. Τέλος, έγινε χρήση προγράμματος επεξεργασίας των σημάτων καταγραφής και μετάφρασης των δεδομένων που προέκυψαν από τα παραπάνω όργανα, καθώς και υπολογιστικό πρόγραμμα για την επεξεργασία των δεδομένων (MATLAB).

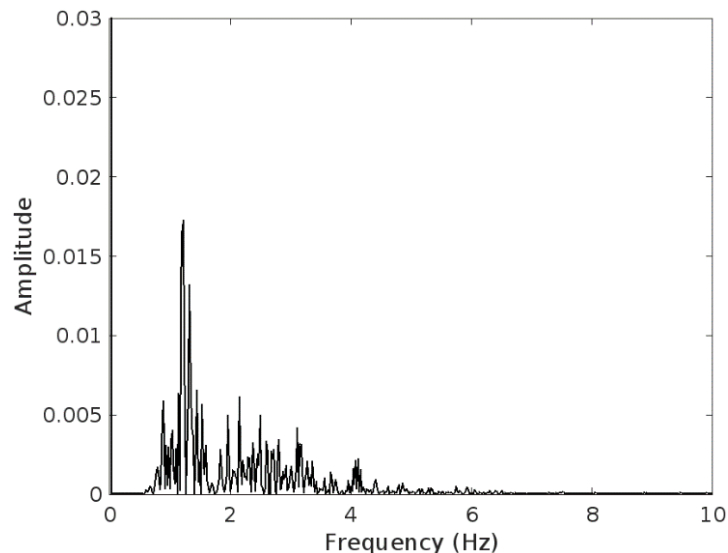
Ο αποσβεστήρας μάζας σωματιδίων αποτελείτο από ένα μεταλλικό δοχείο στο εσωτερικό του οποίου τοποθετήθηκαν κινητά μεταλλικά χωρίσματα όπου επέτρεπαν διάφορες διαμορφώσεις και αναπροσαρμογές στο εσωτερικό του.

Η αναλογία μάζας αποσβεστήρα σωματιδίων $m/M = 7.34\%$, παρέμεινε σταθερή καθ' όλη τη διάρκεια των πειραμάτων. Η επιλογή της αναλογίας μάζας αποσβεστήρα σωματιδίων έγινε με βάση παρατηρήσεις που έχουν γίνει από διάφορους μελετητές κατά καιρούς. Έχει διαπιστωθεί πως η ιδανική αναλογία μάζας αποσβεστήρα και μάζας πρωταρχικής κατασκευής δεν θα πρέπει να υπερβαίνει το 10%.

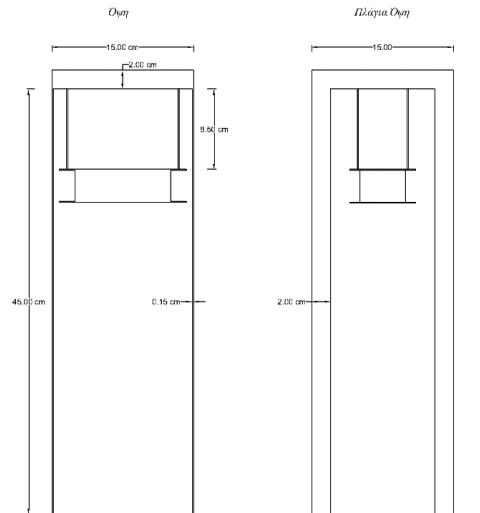
Ως σήμα διέγερσης χρησιμοποιήθηκε ένα τυχαίο σήμα, το οποίο φαίνεται παρακάτω (Σχήμα 1, Σχήμα 2). Ο ρυθμός δειγματοληψίας ήταν 200 Hz με καταγραφή δεδομένων ανά 0.05 sec και με διάρκεια καταγραφής του κάθε πειράματος περίπου τα 60 sec. Χρησιμοποιήθηκαν τέσσερα διαφορετικά επίπεδα διέγερσης (I,II,III,IV) όπου το επίπεδο διέγερσης I χρησιμοποιήθηκε ως βάση για τα επόμενα επίπεδα διέγερσης, τα οποία είχαν ένταση 2,3 και 4 φορές μεγαλύτερη της αρχικής.



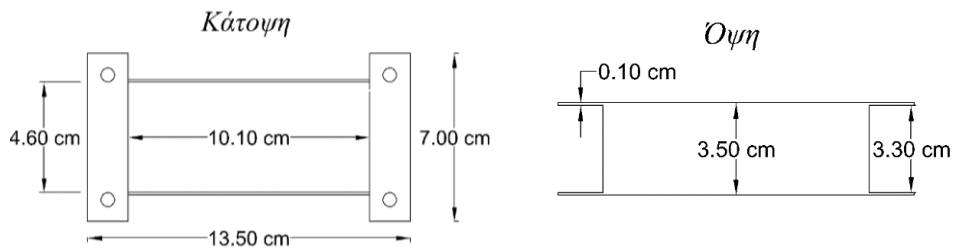
Σχήμα 1 Σήμα διέγερσης κατασκευή για επίπεδο διέγερσης I.



Σχήμα 2 FFT του τυχαίου σήματος διέγερσης, για επίπεδο διέγερσης I.



Σχήμα 3 Διαστασιολόγηση κτιριακού μοντέλου (cm).



Σχήμα 4 Διαστασιολόγηση αποσβεστήρα σωματιδίων.



Εικόνα 1 Αποσβεστήρας σωματιδίων σε προοπτική κάτοψης.

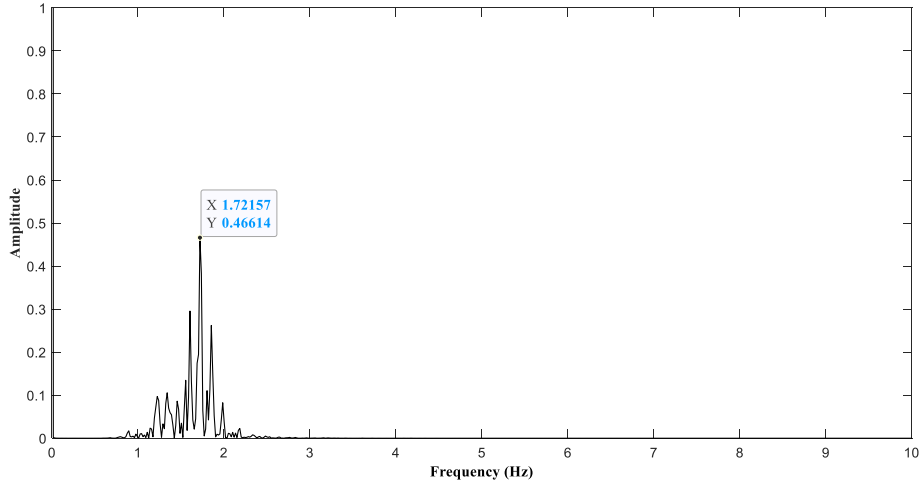
4. FAST FOURIER TRANSFORM (FFT)

Για τον υπολογισμό της ιδιοπεριόδου της κατασκευής χρησιμοποιήθηκε ο γρήγορος μετασχηματισμός Fourier¹.

Με την χρήση αυτού του αλγόριθμου προσδιορίστηκε η πραγματική ιδιοσυχνότητα της κατασκευής η οποία, είναι (Σχήμα 5) :

$$f_0 = 1.72 \text{ Hz}$$

¹ "An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series" HTML articles powered by AMS MathViewer by James W. Cooley and John W. Tukey, Math. Comp. 19 (1965), 297-301



Σχήμα 5 FFT για τον υπολογισμό της ιδιοσυχνότητας της αρχικής κατασκευής.

Με βάση την ιδιοσυχνότητα της κατασκευής ($f_0 = 1.72 \text{ Hz}$, Σχήμα 5), υπολογίστηκε το μήκος προσάρτησης του αποσβεστήρα σωματιδίων. Για τον υπολογισμό του μήκους προσάρτησης, χρησιμοποιήθηκε η εξίσωση ιδιοπεριόδου για εκκρεμές²:

Υπολογισμός μήκους προσάρτησης αποσβεστήρα:

$$T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}} \Rightarrow l \approx 8.5 \text{ cm}$$

5. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΑΠΟΣΒΕΣΗΣ

Για τον προσδιορισμό του συντελεστή απόσβεσης χρησιμοποιήθηκε η εξίσωση της Υστερητικής Λογαριθμικής Μείωσης³. Για τιμές οι οποίες κυμαίνονται μεταξύ $0 < \zeta < 1$, ισχύουν οι παρακάτω εξισώσεις για τον υπολογισμό του λόγου απόσβεσης της κατασκευής:

Εξίσωση λογαριθμικής μείωσης :

$$\delta = \frac{1}{n} \ln \left(\frac{x_1}{x_{n+1}} \right)$$

Ο λόγος απόσβεσης προκύπτει από την παρακάτω εξίσωση⁴:

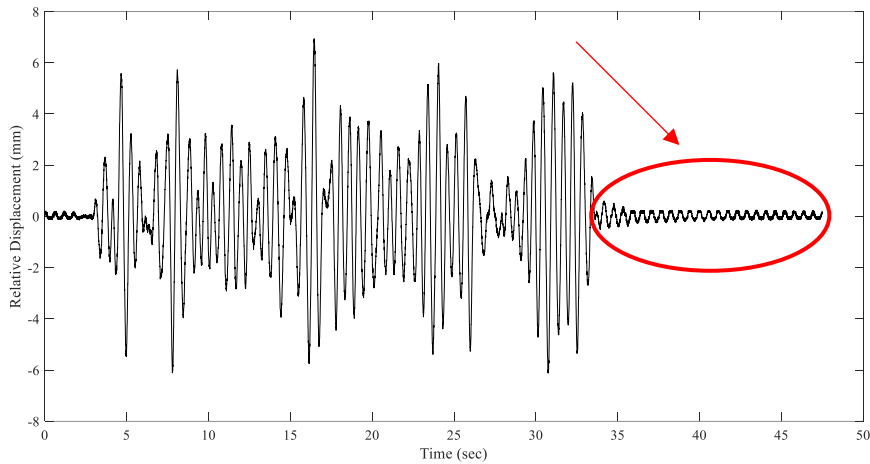
$$\zeta = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{2\pi}{\delta}\right)^2}}$$

Για τον υπολογισμό του λόγου απόσβεσης της κατασκευής έγινε χρήση των σημάτων σχετικής μετατόπισης σε συνάρτηση με τον χρόνο, πριν την εφαρμογή του αποσβεστήρα. Επιλέχθηκαν δύο μη διαδοχικά μεταξύ τους σημεία με διαφορά $n=4$, τα οποία αναφέρονται σε ελεύθερη ταλάντωση της κατασκευής (βλέπε Σχήμα 6).

² “Fundamentals of physics” by Halliday, David, 1916-2010; Resnick, Robert, 1923-; Walker, Jearl, 1945-

³ Inman, Daniel J. (2008). Engineering Vibration. Upper Saddle, NJ: Pearson Education, Inc. pp. 43–48. ISBN 978-0-13-228173-7.

⁴ Douglas C. Giancoli (2000), “Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics (3rd Edition)”, Prentice Hall. p. 387, ISBN 0-13-021517-1



Σχήμα 6 Σχετική μετατόπιση σε συνάρτηση με τον χρόνο, κατασκευή χωρίς αποσβεστήρα, επίπεδο διέγερσης I.

Οπότε, η μέση τιμή του συντελεστή απόσβεσης προκύπτει :

$$\bar{\zeta} = \frac{\sum \zeta}{n} = 0.04 = 4 \%$$

6. ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Για την ανάλυση των αποτελεσμάτων και την σύγκριση τους με την αρχική κατασκευή χρησιμοποιήθηκε η εξίσωση μέσης τετραγωνικής ρίζας (Root Mean Square)⁵. Η εξίσωση ρίζας μέσων τετραγώνων παρέχει την κεντρική τάση των δεδομένων απόκρισης της κατασκευής και αποτελεί μια καλή μέθοδο υπολογισμού της αποτελεσματικότητας του αποσβεστήρα, ιδίως για τυχαίο σήμα διέγερσης. Για τον υπολογισμό των RMS εφαρμόστηκαν οι σχετικές μετακινήσεις της κατασκευής υπό διέγερση, σε συνάρτηση με τον χρόνο και το πλήθος αυτών.

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n}(x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2)}$$

Όπου: n το πλήθος των μετρήσεων και x_n οι σχετικές μετακινήσεις ανά 0.05 sec.

7. ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΔΙΑΜΕΡΙΣΜΑΤΩΝ ΣΤΟ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΤΟΥ ΑΠΟΣΒΕΣΤΗΡΑ

Η επιλογή των διαμερισμάτων στη κάθε πειραματική σειρά έγινε με την αναλογία πλήρωσης της επιφάνειας που καταλαμβάνουν τα σωματιδίων στον αποσβεστήρα (Filling Area Ratio). Ο συντελεστής FAR είναι η προβολή της περιοχής των τετραγώνων που εγγράφονται στη διάμετρο των σωματιδίων (πλευράς ίσης με εκείνης της διαμέτρου των σωματιδίων)⁶. Αναφέρεται στο ποσοστό που καταλαμβάνουν τα σωματίδια στο δοχείο του αποσβεστήρα.

$$FAR = \frac{nd^2}{A}$$

⁵ "Root-mean-square value", A Dictionary of Physics (6 ed.), Oxford University Press, 2009, ISBN 9780199233991.

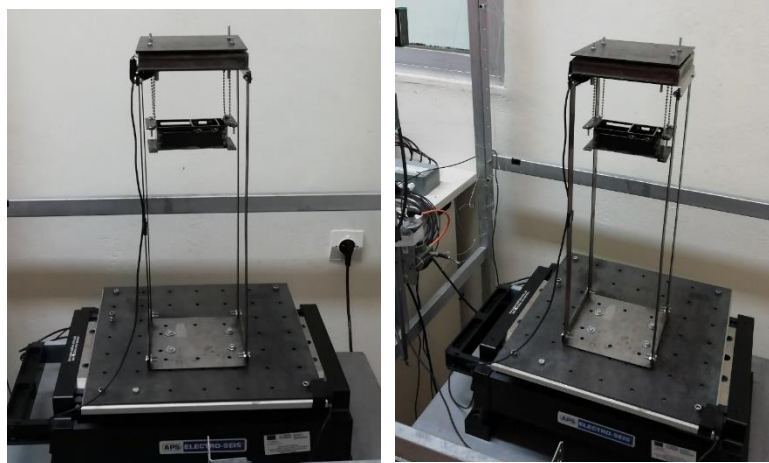
⁶ Effects of the Design Configuration on the Performance of Compartmental Particle Dampers, Angeliki Papalou, Civil Engineering Department, University of the Peloponnese June 2022

Όπου : n το πλήθος των σωματιδίων, d η διάμετρος των σωματιδίων και A η εσωτερική επιφάνεια του δοχείου του αποσβεστήρα.

Μελέτες έχουν δείξει ότι ο αποσβεστήρας σωματιδίων είναι αποτελεσματικός για όλα τα επίπεδα διέγερσης για τιμή $FAR = 60\%$ ⁶. Με βάση αυτή τη παρατήρηση επιλέχθηκαν διάφορες τιμές του συντελεστή FAR για 52,60,70 και 80% ούτως ώστε να υπάρχει μέτρο σύγκρισης των διαφόρων περιπτώσεων του συντελεστή.

8. ΔΙΕΞΑΓΩΓΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ

Για την πρώτη σειρά πειραμάτων χρησιμοποιήθηκαν άνισα διαμερίσματα με 12 σωματίδια σε κάθε διαμέρισμα και διαστάσεων αποσβεστήρα 5 cm – 5cm ($FAR=52\%$), 5 cm – 4.3 cm ($FAR = 60\%$), 3.7 cm – 3.7 cm ($FAR = 70\%$) και 5 cm – 3.2 cm ($FAR = 80\%$). Στην δεύτερη σειρά πειραμάτων χρησιμοποιήθηκαν διαμερίσματα ίσων διαστάσεων με 12 σωματίδια σε κάθε διαμέρισμα και διαστάσεων αποσβεστήρα 5 cm – 5 cm ($FAR = 52\%$), 4.3 cm – 4.3 cm ($FAR = 60\%$), 3.7 cm – 3.7 cm ($FAR=70\%$) και 3.2 cm – 3.2 cm ($FAR=80\%$). Τέλος, στην τρίτη σειρά πειραμάτων διερευνήθηκε η περίπτωση ενός ενιαίου διαμερίσματος με την χρήση 24 σωματιδίων και διαστάσεων αποσβεστήρα 10.1 cm ($FAR = 52\%$), 8.7 cm ($FAR = 60\%$), 7.5 cm ($FAR=70\%$) και 6.5 cm ($FAR=80\%$).



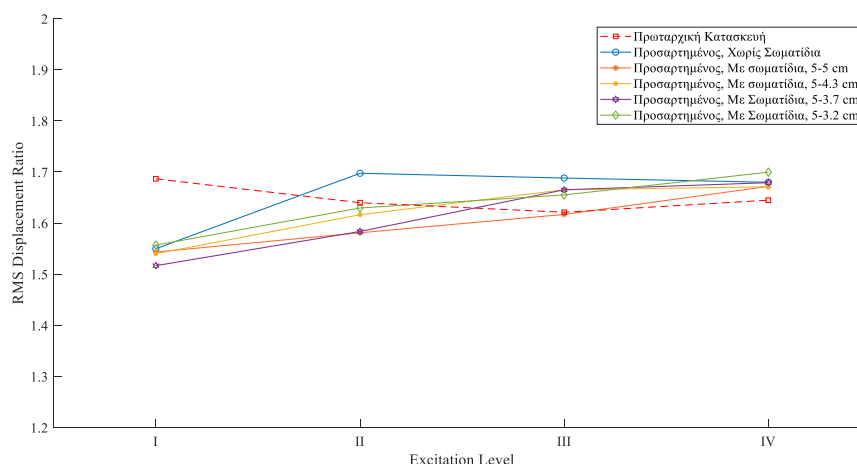
Εικόνα 2 Πειραματική διάταξη, μοντέλο κτιρίου και αποσβεστήρα σωματιδίων.

9. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΡΕΥΝΑΣ

Η αποτελεσματικότητα του συστήματος προσδιορίστηκε από την σύγκριση της απόκρισης της κατασκευής με και χωρίς την χρήση του αποσβεστήρα σωματιδίων. Η καμπύλη η οποία συμβολίζεται με κόκκινη διακεκομμένη στην χρονοϊστορία αναφέρεται στην αρχική κατασκευή (βλέπε Σχήμα 7) και αποτελεί μέτρο σύγκρισης με την κάθε περίπτωση απόκρισης της κατασκευής με την προσαρτημένη κρουστική μάζα. Επιλέχθηκε η σχετική μετατόπιση για την σύγκριση των πειραμάτων καθώς εκείνη αποτελεί καθοριστικό παράγοντα στην ασφάλεια μιας κατασκευής αλλά και όσον αφορά την λειτουργικότητα της κατασκευής.

Αρχικά ο αποσβεστήρας προσαρτήθηκε στην κατασκευή χωρίς σωματίδια. Για το συγκεκριμένο μήκος κρέμασης ο αποσβεστήρας ήταν αποδοτικός μόνο για το πρώτο επίπεδο διέγερσης όπως φαίνεται στο Σχήμα 7 (μπλε καμπύλη). Στη συνέχεια τοποθετήθηκαν τα σωματίδια στα διαμερίσματα του αποσβεστήρα για την πρώτη σειρά πειραμάτων.

Πρώτη σειρά πειραμάτων



Σχήμα 7 Σχετική μετακίνηση σε συνάρτηση με τον χρόνο για άνισα διαμερίσματα αποσβεστήρα.

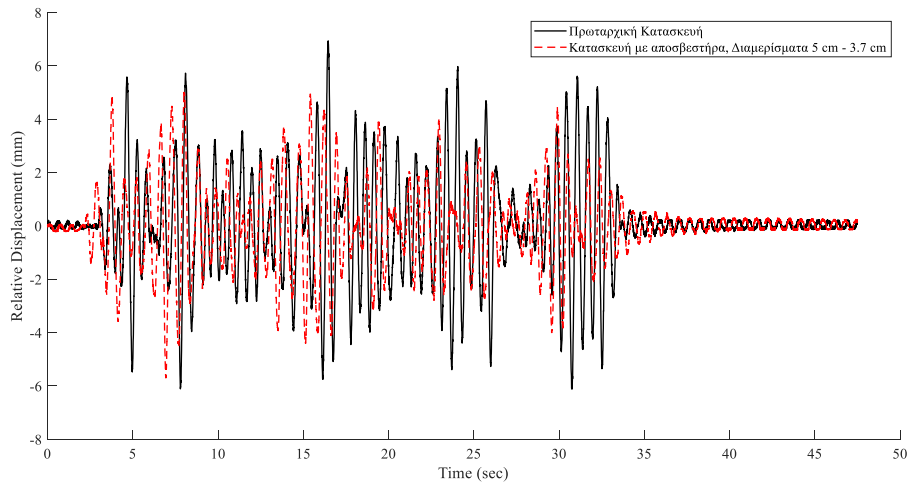
Στην πρώτη σειρά πειραμάτων εξετάστηκαν τέσσερις διαφορετικές περιπτώσεις για δύο διαφορετικά μεγέθη διαμερισμάτων στο δοχείο του αποσβεστήρα. Η κρουστική μάζα του κάθε διαμερίσματος αποτελεί την μισή της συνολικής μάζας, δηλαδή σε κάθε διαμέρισμα τοποθετήθηκαν 12 σωματίδια συνολικής μάζας 48 gr.

Το Σχήμα 7 παρουσιάζει την απόκριση της κατασκευής σε σχέση με τα διαφορετικά επίπεδα διέγερσης για τα άνισα μεγέθη διαμερισμάτων στο δοχείο του αποσβεστήρα. Για τις περιπτώσεις FAR = 52%, FAR = 60%, FAR = 70%, FAR = 80% η μείωση απόκρισης της κατασκευής για χαμηλά επίπεδα διέγερσης ήταν αποτελεσματική, ενώ για υψηλότερα επίπεδα διέγερσης (III, IV) το σύστημα στις περισσότερες των περιπτώσεων δεν ήταν αποτελεσματικό.

Συγκεκριμένα για την περίπτωση διαμερισμάτων 5 cm – 5 cm (FAR = 52%) η μείωση απόκρισης της κατασκευής για επίπεδο διέγερσης I είναι 8.49%, για επίπεδο διέγερσης II είναι 3.58%, ενώ για τα επίπεδα διέγερσης III και IV το σύστημα παύει να είναι αποτελεσματικό. Για τη περίπτωση διαμερισμάτων 5 cm – 4.3 cm (FAR = 60%) η μείωση απόκρισης της κατασκευής για επίπεδο διέγερσης I είναι 9.52%, για επίπεδο διέγερσης II είναι 1.43% ενώ για επίπεδα διέγερσης III και IV η διάταξη δεν είναι αποτελεσματική. Για την περίπτωση 5 cm – 3.7 cm (FAR = 70%) η μείωση απόκρισης της κατασκευής για επίπεδο διέγερσης I είναι 10.07%, για επίπεδο διέγερσης II είναι 3.43 % του οποίου η μείωση είναι αρκετά χαμηλή, ενώ για τα επίπεδα III, IV το σύστημα δεν είναι πλέον αποτελεσματικό.

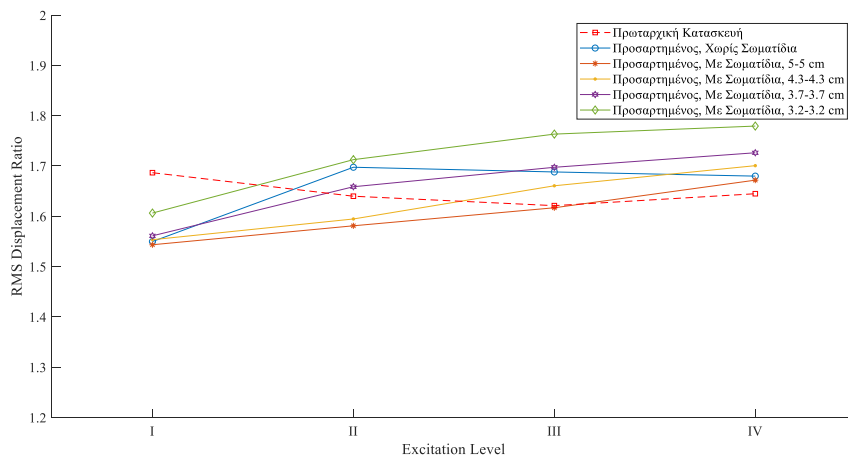
Όπως φαίνεται παρακάτω η περίπτωση 5 cm – 3.7 cm (FAR = 70%) προκύπτει η καλύτερη των περιπτώσεων από όλες τις σειρές πειραμάτων. Ενδεικτικά παρουσιάζεται η χρονοϊστορία απόκρισης της κατασκευής με και χωρίς τη χρήση του αποσβεστήρα σωματιδίων για αυτή τη περίπτωση (Σχήμα 8).

Τέλος, για την περίπτωση διαμερισμάτων 5 cm – 3.2 cm (FAR = 80%) για επίπεδο διέγερσης I είναι 7.69%, για επίπεδο διέγερσης II είναι 0.63% και για επίπεδο διέγερσης III, IV το σύστημα δεν είναι αποτελεσματικό.



Σχήμα 8 Σχετική μετακίνηση σε συνάρτηση με τον χρόνο, πρωταρχικής κατασκευής και αποσβεστήρα σωματιδίων με διαμερίσματα 5 cm - 3.7 cm.

Δεύτερη σειρά πειραμάτων



Σχήμα 9 Σχετική μετακίνηση σε συνάρτηση με τον χρόνο για ίσα διαμερίσματα αποσβεστήρα.

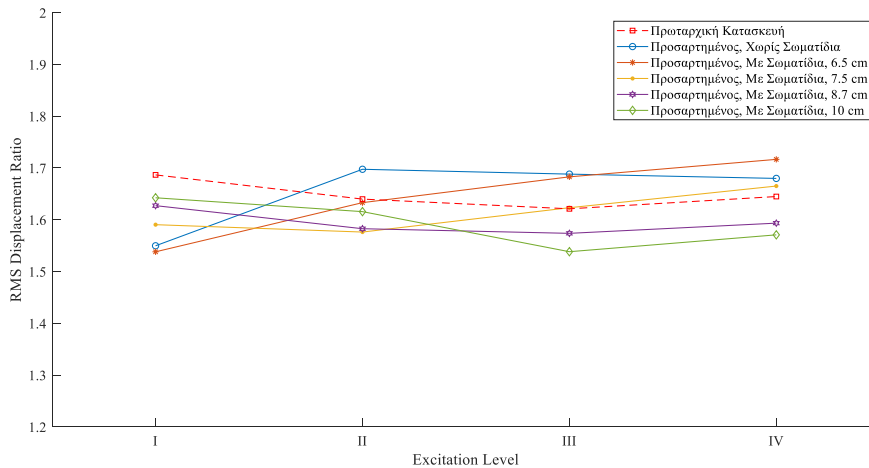
Στην δεύτερη σειρά πειραμάτων εξετάστηκαν τέσσερις διαφορετικές περιπτώσεις για δύο ισομεγέθη διαμερίσματα στο δοχείο του αποσβεστήρα. Η κρουστική μάζα του κάθε διαμερίσματος αποτελεί την μισή της συνολικής μάζας, δηλαδή σε κάθε διαμέρισμα τοποθετήθηκαν 12 σωματίδια μάζας 48 gr.

Το Σχήμα 9 παρουσιάζει την απόκριση της κατασκευής σε σχέση με τα διαφορετικά επίπεδα διέγερσης για ισομεγέθη διαμερίσματα στο δοχείο του αποσβεστήρα. Για τις περιπτώσεις FAR = 52%, FAR = 60%, FAR = 70%, FAR = 80% η μείωση απόκρισης της κατασκευής για χαμηλά επίπεδα διέγερσης ήταν αποτελεσματική. Για επίπεδο διέγερσης II το σύστημα λειτούργησε μόνο για τις περιπτώσεις FAR = 52%, FAR = 60% με μικρή αποτελεσματικότητα στην μείωση απόκρισης της κατασκευής, ενώ για τα επίπεδα διέγερσης III και IV το σύστημα δεν ήταν αποτελεσματικό.

Συγκεκριμένα για την περίπτωση διαμερισμάτων 5 cm – 5 cm (FAR = 52%) η μείωση απόκρισης της κατασκευής για επίπεδο διέγερσης I είναι 8.49%, για επίπεδο διέγερσης II είναι 3.58%, ενώ για τα επίπεδα διέγερσης III και IV το σύστημα παύει να είναι αποτελεσματικό. Για την περίπτωση διαμερισμάτων 4.3 cm – 4.3 cm (FAR = 60%) η μείωση απόκρισης της κατασκευής για επίπεδο διέγερσης I είναι 7.89%, για επίπεδο διέγερσης II η μείωση είναι 2.75%

ενώ για τα επίπεδα III, IV το σύστημα δεν είναι αποτελεσματικό. Για τη περίπτωση διαμερισμάτων 3.7 cm – 3.7 cm (FAR = 70 %) η μείωση απόκρισης της κατασκευής για επίπεδο διέγερσης I είναι 7.44%, ενώ για επίπεδα II, III, IV το σύστημα δεν λειτουργεί. Τέλος για την περίπτωση διαμερισμάτων 3.2 cm – 3.2 cm (FAR = 80%), η μείωση απόκρισης της κατασκευής για επίπεδο διέγερσης I είναι 4.47 %, ενώ για τις περιπτώσεις II, III, IV το σύστημα δεν λειτουργεί.

Τρίτη σειρά πειραμάτων



Σχήμα 10 Σχετική μετακίνηση σε συνάρτηση με τον χρόνο για κοινό διαμέρισμα αποσβεστήρα.

Στην τρίτη σειρά πειραμάτων εξετάστηκαν τέσσερις διαφορετικές περιπτώσεις χρησιμοποιώντας ένα διαμέρισμα στο δοχείο του αποσβεστήρα. Η κρουστική μάζα του διαμερίσματος αποτελεί την συνολική μάζα των σωματιδίων, δηλαδή στο ενιαίο διαμέρισμα τοποθετήθηκαν 24 σωματίδια μάζας 96 gr.

Το Σχήμα 10 παρουσιάζει την απόκριση της κατασκευής σε σχέση με τα διαφορετικά επίπεδα διέγερσης για το κάθε διαμέρισμα στον αποσβεστήρα. Για τις περιπτώσεις FAR = 52%, FAR = 60%, FAR = 70%, FAR = 80% οι περισσότερες των περιπτώσεων λειτουργήσαν με μικρή αποτελεσματικότητα.

Συγκεκριμένα για την περίπτωση διαμερίσματος 6.5 cm (FAR = 80%) η μείωση απόκρισης της κατασκευής για επίπεδο διέγερσης I είναι 8.8%, για επίπεδο διέγερσης II είναι 0.42%, ενώ για επίπεδο διέγερσης III, IV το σύστημα δεν ήταν αποτελεσματικό. Για την περίπτωση διαμερίσματος 7.5 (FAR = 70%) η μείωση απόκρισης για επίπεδο διέγερσης I είναι 5.7%, για επίπεδο διέγερσης II είναι 3.88%, ενώ για III, IV το σύστημα δεν ήταν αποτελεσματικό. Για την περίπτωση διαμερίσματος 8.7 cm (FAR = 60%) η μείωση απόκρισης για επίπεδο διέγερσης I είναι 3.52%, για επίπεδο διέγερσης II είναι 3.48%, για επίπεδο διέγερσης 2.92% και για επίπεδο διέγερσης IV είναι 3.12%. Τέλος για την περίπτωση διαμερίσματος 10.1 cm, η μείωση απόκρισης για επίπεδο διέγερσης I είναι 2.62% , για επίπεδο διέγερσης II είναι 1.47%, για επίπεδο διέγερσης III είναι 5.11% και για επίπεδο διέγερσης IV είναι 4.5%.

Σχόλια

Με βάση τους Zheng Lu, Dianchao Wang και Peizhen Li έχει αποδειχθεί πως για την αποδοτική λειτουργία του συστήματος θα πρέπει η συχνότητα του αποσβεστήρα χωρίς σωματίδια να είναι συντονισμένη στην ιδιοσυχνότητα της κατασκευής που υπόκειται σε

φόρτιση.⁷ Όταν αυτό δεν συμβαίνει μπορεί να υπάρξει αύξηση της κίνησης αντί να μειωθεί. Με βάση τα παραπάνω και σε συνδυασμό με τους περιορισμούς του πειράματος, δεν επιτεύχθηκε στην παρούσα έρευνα η βέλτιστη ρύθμιση του αποσβεστήρα σωματιδίων ώστε να επιτευχθεί η μέγιστη αποδοτικότητα του. Αναμένεται σε επόμενες έρευνες να μελετηθούν περαιτέρω περιπτώσεις για διαφορετικά μήκη εκκρεμούς του αποσβεστήρα σωματιδίων ούτως ώστε να προκύψει η βέλτιστη ρύθμιση.

10. Συμπεράσματα

Συνολικά παρατηρήθηκε πως σημαντικό ρόλο για την μείωση απόκρισης της κατασκευής κατέχει ο συντελεστής FAR. Η μείωση της απόκρισης της κατασκευής εξαρτάται από την πρόσκρουση των σωματιδίων μεταξύ τους αλλά και με τα τοιχώματα του αποσβεστήρα τα οποία είναι κάθετα στην διεύθυνση διάδοσης του σήματος διέγερσης.

Από τα παραπάνω προέκυψε ότι όταν ο συντελεστής FAR είναι μεγάλος, το σύστημα δεν είναι αποδοτικό για μεγάλα επίπεδα διέγερσης σε όλες των περιπτώσεων. Αυτό συμβαίνει γιατί οι κρούσεις που λαμβάνουν χώρα είναι περισσότερες όσο αυξάνεται το επίπεδο διέγερσης με αποτέλεσμα η απόκριση της κατασκευής να προκύπτει μεγαλύτερη από αυτή της πρωταρχικής κατασκευής. Παρόμοιες παρατηρήσεις έχουν γίνει και από την Papalou (2022).⁸

Για την σειρά πειραμάτων με άνισα διαμερίσματα παρατηρήθηκε ότι το σύστημα ήταν αποδοτικό για όλες τις περιπτώσεις του συντελεστή FAR (52%, 60%, 70%, 80%) όσον αφορά το επίπεδο διέγερσης I και II. Με καλύτερη των περιπτώσεων εκείνη όπου FAR = 70% και ποσοστό μείωσης απόκρισης της κατασκευής τα 10.07%.

Η περίπτωση όπου ο αποσβεστήρας έχει άνισα διαμερίσματα είναι πολλά υποσχόμενη και συγκεκριμένα όταν χρησιμοποιείται μεγάλη και μικρή τιμή για τα μεγέθη του διαμερίσματος.

Για την σειρά πειραμάτων με ίσα διαμερίσματα σημειώθηκε ότι το σύστημα ήταν αποδοτικό για όλες τις περιπτώσεις του συντελεστή FAR (52%, 60%, 70%, 80%) για επίπεδο διέγερσης I. Με καλύτερη των περιπτώσεων εκείνη όπου FAR = 52% και ποσοστό μείωσης απόκρισης της κατασκευής τα 8.49%. Σε αυτή τη περίπτωση προέκυψε ότι μόνο δύο εκ των τεσσάρων περιπτώσεων λειτούργησαν για μεγαλύτερο επίπεδο διέγερσης.

Τέλος για την σειρά πειραμάτων η οποία αφορά τα μονά διαμερίσματα σημειώθηκε ότι το σύστημα είχε απόδοση για όλες τις περιπτώσεις του συντελεστή FAR (52%, 60%, 70%, 80%) και για διαφορετικά επίπεδα διέγερσης. Για συντελεστή FAR = 52% η καλύτερη απόδοση του συστήματος ήταν για τα επίπεδα διέγερσης III, IV όπου τα ποσοστά μείωσης ήταν 5.11% και 4.5% αντίστοιχα. Για συντελεστή FAR = 60% το σύστημα είχε σχετικά γραμμική απόδοση με καλύτερα ποσοστά μείωσης απόκρισης της κατασκευής εκείνα για τα επίπεδα διέγερσης I, II και IV όπου το ποσοστά είναι 3.52%, 3.48 και 3.48% αντίστοιχα. Τέλος για FAR = 70% και FAR = 80% το σύστημα είχε απόδοση για επίπεδο διέγερσης I με ποσοστά μείωσης απόκρισης 5.7% και 8.8% αντίστοιχα. Η βέλτιστη μείωση απόκρισης της κατασκευής για την τρίτη σειρά πειραμάτων προκύπτει για FAR = 80% που αφορά το επίπεδο διέγερσης I.

⁷ “Comparison Study of Vibration Control Effects between Suspended Tuned Mass Damper and Particle Damper”, Zheng Lu, Dianchao Wang, and Peizhen Li, July 2014

⁸ “Effects of the Design Configuration on the Performance of Compartmental Particle Dampers”, Angeliki Papalou, Civil Engineering Department, University of the Peloponnese June 2022

11. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Richard Lourenco (2011), Master Degree Thesis, “Design, Construction and Testing of an Adaptive Pendulum Tuned Mass Damper”
- [2] Papalou A., Strepelias E., Roubien D., Bousias S. and Triantafyllou T. (2015) , “Seismic protection of monuments using particle dampers in multi-drum columns”, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol.77, p. 360-368
- [3] Angeliki Papalou, Ph.D. Thesis, “Analytical and experimental studies of particle dampers”, Chapter 4, p. 126 – 151
- [4] “Effects of the Design Configuration on the Performance of Compartmental Particle Dampers”, Angeliki Papalou, Civil Engineering Department, University of the Peloponnese June 2022
- [5] “Comparison Study of Vibration Control Effects between Suspended Tuned Mass Damper and Particle Damper”, Zheng Lu, Dianchao Wang, and Peizhen Li, July 2014
- [6] “Root-mean-square value”, A Dictionary of Physics (6 ed.), Oxford University Press, 2009, ISBN 9780199233991.
- [7] “FUNDAMENTALS OF PHYSICS, 7th EDITION”, by Halliday, David, Walker, (2005)
- [8] “Inman, Daniel J. (2008). Engineering Vibration. Upper Saddle”, NJ: Pearson Education, Inc. pp. 43–48. ISBN 978-0-13-228173-7.
- [9] “An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series HTML articles powered” by AMS MathViewer by James W. Cooley and John W. Tukey ,Math. Comp. 19 (1965), 297-301
- [10] Richard Lourenco (2011), Master Degree Thesis, “Design, Construction and Testing of an Adaptive Pendulum Tuned Mass Damper”
- [11] A. Papalou, S. F. Marsi (1996), “Performance of Particle Dampers Under Random Excitation”, ASME Journal of Vibration and Acoustics, Vol. 4, 361-379.
- [12] Papalou A., (2015), “Passive Control Techniques and their Applications in Historic Structures”, Chapter from book: “Seismic Assessment and Rehabilitation of Historic Structures”, IGI Global Publisher
- [13] Ιορδάνης Πετρίδης (2020), ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ, «ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΑΛΑΝΤΩΣΕΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΜΕ ΤΗΝ ΧΡΗΣΗ ΑΠΟΣΒΕΣΤΗΡΩΝ
- [14] “Effects of the Design Configuration on the Performance of Compartmental Particle Dampers”, Angeliki Papalou, 2022
- [15] ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ, «Μείωση απόκρισης κατασκευών με τη χρήση αποσβεστήρων συντονισμένης μάζας», Ιορδάνης Πετρίδης (2022)

13. ΕΠΙΒΛΕΨΗ – ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η εργασία αυτή πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια μελέτης της δυναμικής απόκρισης κατασκευών με την χρήση αποσβεστήρων σωματιδίων υπό την επίβλεψη της Δρ. Αγγελικής Παπαλού, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πελοποννήσου.

Είμαι ιδιαίτερα ευγνώμων για την στήριξη της επιβλέπουσας καθηγήτριας μου Δρ. Αγγελικής Παπαλού. Η ειδίκευση της στον τομέα του αντισεισμικού σχεδιασμού της είχε καθοριστικό ρόλο στην διεκπεραίωση της παρούσας εργασίας.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την οικογένεια μου η οποία ήταν στο πλάι μου και με υποστήριξε κατά διάρκεια των σπουδών μου ως προπτυχιακός αλλά και ως μεταπτυχιακός φοιτητής.

Αφιερώνω αυτή την εργασία στην μητέρα μου και στον αείμνηστό πατέρα μου.