

Ένα νέο σύστημα σεισμικής μόνωσης για την προστασία στερεών σωμάτων εμπνευσμένο από το Subbuteo

Γεώργιος Τσιάτας¹, Αριστοτέλης Χαραλαμπίκης², Παναγιώτης Τσόπελας³

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην εργασία αυτή διερευνάται ένα νέο σύστημα σεισμικής μόνωσης για την προστασία στερεών σωμάτων, αντλώντας την έμπνευσή του από το δημοφιλές επιτραπέζιο παιχνίδι ποδοσφαίρου Subbuteo. Η λειτουργία του προτεινόμενου συστήματος σεισμικής μόνωσης βασίζεται στον μηχανισμό της κύλισης (rolling isolation system, RIS). Το στερεό σώμα είναι άκαμπτα συνδεδεμένο σε μία καμπύλη βάση (τόξο κύκλου), η οποία μπορεί να κυλιέται ελεύθερα, χωρίς να ολισθαίνει, εκτελώντας ταλάντωση γύρω από τη θέση ισορροπίας της. Το εγγενές χαρακτηριστικό του προτεινόμενου συστήματος είναι ότι το ίδιο το στερεό σώμα αποτελεί αναπόσπαστο μέρος του, επηρεάζοντας ουσιαστικά τη δυναμική του συμπεριφορά λόγω της χαμηλότερης θέσης του κέντρου μάζας.

Λέξεις Κλειδιά: Σεισμική μόνωση, Κύλιση, Προστασία στερεών σωμάτων

1 ΓΕΝΙΚΑ

Τα συμβατικά συστήματα σεισμικής μόνωσης, τα οποία βασίζονται στον μηχανισμό της κύλισης, χρησιμοποιούν σφαιρικά ή κυλινδρικά κυλιόμενα στοιχεία μεταξύ της κατασκευής και της θεμελίωσής της για να αποσυνδέσουν τις σεισμικές δυνάμεις και να μειώσουν τη μετάδοση της ανεπιθύμητης εδαφικής διέγερσης [1-37]. Τα συστήματα αυτά αξιοποιούν την ικανότητα του μηχανισμού της κύλισης να μετατρέπει τη μεταφορική κίνηση σε περιστροφική, μειώνοντας έτσι τις επιταχύνσεις και τις δυνάμεις που ασκούνται στην υπερκείμενη κατασκευή. Στο προτεινόμενο σύστημα σεισμικής μόνωσης ο μηχανισμός αυτός ενισχύεται περαιτέρω λόγω της χαμηλότερης θέσης του κέντρου μάζας, γεγονός που οδηγεί σε σημαντική βελτίωση της σεισμικής του απόκρισης.

Συνολικά, αυτή η εργασία παρουσιάζει μια ολοκληρωμένη μελέτη για την κατανόηση της συμπεριφοράς, του σχεδιασμού και της πρακτικής εφαρμογής του νέου συστήματος σεισμικής μόνωσης, ανοίγοντας τον δρόμο για την ευρύτερη χρήση του σε στρατηγικές σεισμικής προστασίας.

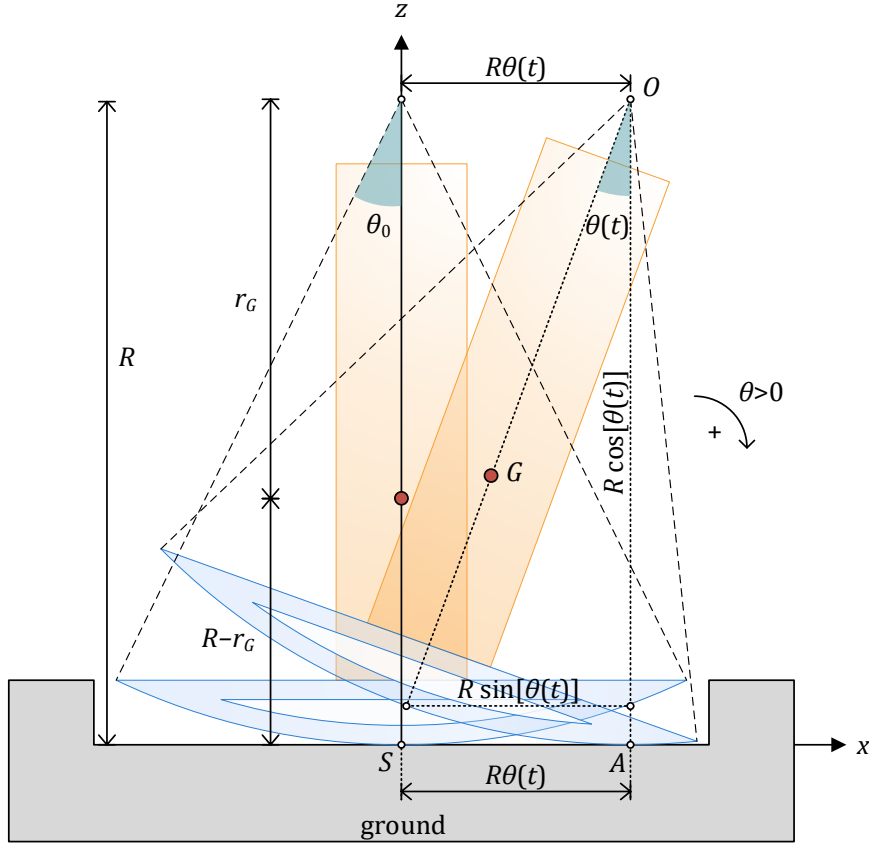
¹ Αναπλ. Καθηγητής Σ.Ε.Μ.Φ.Ε., Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, gtsiatas@central.ntua.gr

² Επικ. Καθηγητής Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής, achar@uniwa.gr

³ Καθηγητής Σ.Ε.Μ.Φ.Ε., Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, tsopelas@central.ntua.gr

2 ΕΞΙΣΩΣΗ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ

Το σύστημα αποτελείται από (i) ένα συμπαγές, ομογενές ορθογωνικό στερεό σώμα, και (ii) μία καμπύλη βάση (τόξο κύκλου) η οποία είναι άκαμπτα συνδεδεμένη με το σώμα. Η κοίλη ή συμπαγής βάση—με κεντρική γωνία $2\theta_0$ και ακτίνα R —μπορεί να κυλιέται ελεύθερα, χωρίς να ολισθαίνει, εκτελώντας ταλάντωση γύρω από τη θέση ισορροπίας της (βλ. Σχήμα 1).



Σχήμα 1: Αρχική και μετατοπισμένη κατάσταση του συστήματος μόνωσης.

Για οριζόντια κίνηση του εδάφους $\ddot{u}_{gx}(t)$, η εξίσωση κίνησης του συστήματος ως προς το κέντρο μάζας G λαμβάνει τη μορφή [38]:

$$\begin{aligned}
 & \{I_A(t) + \mu_r m r_G R \operatorname{sgn}[\dot{\theta}(t)] \sin[\theta(t)]\} \ddot{\theta}(t) \\
 & + m r_G R \{\sin[\theta(t)] + \mu_r \operatorname{sgn}[\dot{\theta}(t)] \cos[\theta(t)]\} [\dot{\theta}(t)]^2 \\
 & + m g \{r_G \sin[\theta(t)] + \mu_r R \operatorname{sgn}[\dot{\theta}(t)]\} = -m \ddot{u}_{gx}(t) \{R - r_G \cos[\theta(t)]\},
 \end{aligned} \tag{1}$$

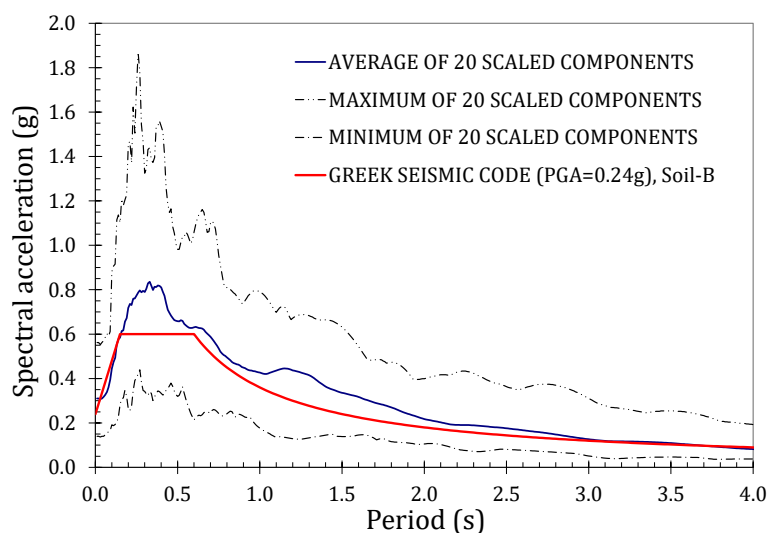
όπου $m = m_1 + m_2$ είναι το άθροισμα της μάζας του στερεού σώματος (m_1) και της βάσης (m_2), μ_r είναι ο συντελεστής τριβής κύλισης, και

$$I_A(t) = I_G + m R^2 - 2 m r_G R \cos[\theta(t)] + m r_G^2, \tag{2}$$

είναι η ροπή αδράνεια μάζας του συστήματος γύρω από τον άξονα y που διέρχεται από το σημείο επαφής A , τη χρονική στιγμή t .

3 ΕΡΜΗΣ ΤΟΥ ΠΡΑΞΙΤΕΛΗ

Στην ενότητα αυτή αξιολογείται η αποτελεσματικότητα του προτεινόμενου συστήματος μόνωσης για την προστασία ενός αγάλματος που τοποθετείται στο Μουσείο της Ακρόπολης, έναντι σεισμικής διέγερσης. Για την ανάλυση επιλέχθηκε ένα σύνολο 20 επιταχυνσιογραφημάτων μακρινού πεδίου (Far Field, FF) με $\text{mean PGA} = 0.310g$ και $\text{max PGA} = 0.564g$ τα οποία περιλαμβάνουν δέκα ζεύγη κλιμακωμένων καταγραφών από έξι μεγάλους σεισμούς, ο καθένας με μέγεθος μεγαλύτερο από 6.5, καθώς και επικεντρικές αποστάσεις που κυμαίνονται από 10 έως 20 km. Οι καταγραφές ελήφθησαν από τοποθεσίες με μαλακό βράχο ή σκληρό έδαφος, και κλιμακώθηκαν ώστε να ευθυγραμμίζονται με τον ΕΑΚ για κατηγορία εδάφους Τύπου Β και μέγιστη επιτάχυνση $0.24g$ (βλ. Σχήμα 2).



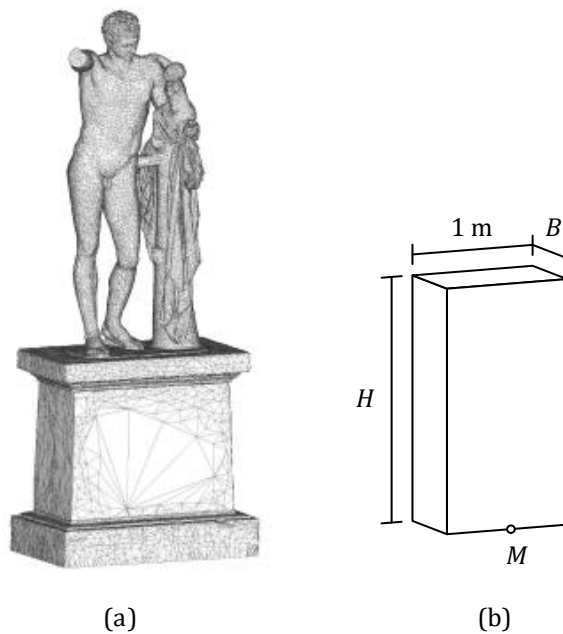
Σχήμα 2: Φάσμα επιταχύνσεων των 20 κλιμακωμένων καταγραφών.

Λεπτομερή χαρακτηριστικά των καταγραφών, συμπεριλαμβανομένων των συντελεστών κλιμάκωσής τους, παρέχονται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1: Λεπτομερή χαρακτηριστικά των 20 κλιμακωμένων καταγραφών.

Record ID	Seismic event	Station	Component	Scale factor
1,2	1992 Landers	Joshua (DMG)	90, 0	1.09
3,4		Yermo (CDMG)	270, 360	0.94
5,6	1989 Loma Prieta	Gilroy 2 (CDMG)	0, 90	1.07
7,8		Hollister (CDMG)	0, 90	0.79
9,10	1994 Northridge	Century (CDMG)	90, 360	1.67
11,12		Moorpark (CDMG)	180, 90	1.91
13,14	1949 W. Washington	325 (USGS)	N86E, N04W	2.01
15,16	1954 Eureka	022 (USGS)	N79E, N11W	1.27
17,18	1971 San Fernando	241 (USGS)	N00W, S90W	1.43
19,20		458 (USGS)	S00W, S90W	1.63

Αντλώντας έμπνευση από τον Ομ. Καθηγητή Ε.Μ.Π. κ. Βλάση Κουμούση [39], για την παρούσα μελέτη επιλέχθηκε ένα άγαλμα που μοιάζει με αυτό του Ερμή που κρατάει τον Διόνυσο (βλ. Σχήμα 3α). Αυτό το άγαλμα, που αποδίδεται στον διάσημο γλύπτη της κλασικής εποχής Πραξιτέλη, είναι το μόνο γνωστό έργο του που χρονολογείται από το 343 π.Χ. Εκτός από το δεξί χέρι του αγάλματος, τα άλλα ελλείποντα μέρη—όπως το αριστερό πόδι κάτω από το γόνατο, το κάτω μέρος του δεξιού ποδιού και η βάση του δέντρου—έχουν αντικατασταθεί με αποκαταστάσεις και στηρίγματα από γύψο. Στην τρέχουσα μορφή του, το άγαλμα, συμπεριλαμβανομένης της βάσης του, έχει συνολική μάζα 3008 kg. Για όλες τις μη γραμμικές αναλύσεις χρονοϊστορίας, το άγαλμα και η βάση του μοντελοποιήθηκαν ως ένα ισοδύναμο συμπαγές, ορθογωνικό σώμα από σκυρόδεμα (βλ. Σχήμα 3b) με τις ακόλουθες ιδιότητες: $\rho_1 = 2.5 \text{ ton/m}^3$, $B = 0.631 \text{ m}$, $H = 1.907 \text{ m}$, $m_1 = 3.008 \text{ ton}$, $p = 2.707 \text{ rad/s}$, και $\tan \alpha = 0.331$. Ο σχεδιασμός λαμβάνει υπόψη τέσσερα διαφορετικά σενάρια λόγω μαζών, $m_2/m_1 = 0.4, 0.8, 1.5, 2.5$ και τρεις ιδιοπεριόδους $T_{iso} = 2.5, 3, 4 \text{ s}$ για το σύστημα σεισμικής μόνωσης, με $\rho_2 = 2.5 \text{ ton/m}^3$. Να σημειωθεί ότι, για την προστασία του Αγάλματος του Ερμή του Πραξιτέλη, η μάζα της βάσης υπολογίστηκε σε $m_2 = 2.72m_1$ [39].



Σχήμα 3: (α) Το αρχικό άγαλμα και (β) το ισοδύναμό του συμπαγές, ορθογωνικό από σκυρόδεμα ($B = 0.631 \text{ m}$, $H = 1.907 \text{ m}$).

Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά καθώς και η απόδοση του προτεινόμενου συστήματος μόνωσης συνοψίζονται στους ακόλουθους Πίνακες, για κάθε μία από τις ιδιοπεριόδους T_{iso} . Στην παρούσα μελέτη για την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας του συστήματος χρησιμοποιήθηκαν τόσο οι μέσες και μέγιστες τιμές του δείκτη απόδοσης, $PI = |\theta_{\max}|/\theta_{cr}$, όσο και οι μέσες και μέγιστες οριζόντιες, $|a_{Mx,\max}|/g$, και κατακόρυφες, $|a_{Mz,\max}|/g$, επιταχύνσεις στο μέσο σημείο M , που βρίσκεται στη βάση του μπλοκ (βλ. Σχήμα 3b). Η ανάλυση γενικά αποκαλύπτει ότι η αύξηση του λόγου μάζας οδηγεί σε μείωση τόσο της γωνίας περιστροφής $\theta(t)$ όσο και των επιταχύνσεων, για μια δεδομένη ιδιοπερίοδο T_{iso} του συστήματος μόνωσης. Επιπλέον, οι οριζόντιες και κατακόρυφες επιταχύνσεις μειώνονται—για δεδομένο λόγο μάζας—καθώς

αυξάνεται η ιδιοπερίοδος T_{iso} . Αξιοσημείωτα, ο δείκτης απόδοσης (PI) φτάνει στην ελάχιστη τιμή του για $T_{iso} = 3$ s.

Πιο συγκεκριμένα, από τον Πίνακα 2 ($T_{iso} = 2.5$ s) συμπεραίνουμε ότι η αύξηση του λόγου μάζας, m_2/m_1 , του συστήματος μόνωσης έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση 53% στον μέσο δείκτη απόδοσης, mean PI , μεταξύ λόγου μαζών 0.4 και 2.5. Για την ίδια σύγκριση, η αντίστοιχη μείωση στον μέγιστο δείκτη απόδοσης, maximum PI , είναι 48%. Επιπλέον, οι μειώσεις στην επιτάχυνση στο σημείο M έχουν ως εξής: 22% και 32% για τις μέσες και μέγιστες οριζόντιες επιταχύνσεις και 53% και 45% για τις μέσες και μέγιστες κατακόρυφες επιταχύνσεις, αντίστοιχα.

Πίνακας 2: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά και δείκτες αποδόσεις του προτεινόμενου συστήματος μόνωσης για ιδιοπερίοδο $T_{iso} = 2.5$ s και λόγους μαζών $m_2/m_1 = 0.4, 0.8, 1.5, 2.5$.

	$m_2 = 0.4m_1$	$m_2 = 0.8m_1$	$m_2 = 1.5m_1$	$m_2 = 2.5m_1$
R (m)	1.935	1.996	2.157	2.449
θ_0 (rad)	0.591	0.740	0.879	0.968
b (m)	2.157	2.690	3.323	4.036
h (m)	0.329	0.521	0.781	1.061
R/r_G	2.009	1.922	1.820	1.719
I_G (ton·m ²)	2.320	3.771	6.740	12.258
θ_{cr} (rad)	1.033	1.257	1.457	1.589
f_{sup}	0.650	0.594	0.528	0.463
mean $ \theta_{max} /\theta_{cr}$	0.265	0.200	0.156	0.124
max $ \theta_{max} /\theta_{cr}$	0.634	0.520	0.423	0.331
mean $ a_{Mx,max} /g$	0.238	0.214	0.195	0.186
max $ a_{Mx,max} /g$	0.425	0.366	0.303	0.287
mean $ a_{Mz,max} /g$	0.113	0.090	0.069	0.053
max $ a_{Mz,max} /g$	0.426	0.390	0.324	0.236

Ομοίως, από τον Πίνακα 3 ($T_{iso} = 3$ s) προκύπτει ότι οι μειώσεις στον μέσο και μέγιστο PI μεταξύ των ίδιων σεναρίων λόγου μαζών (0.4 και 2.5) είναι 53% και 44%, αντίστοιχα. Οι μειώσεις στις οριζόντιες επιταχύνσεις είναι 30% (μέσος όρος) και 23% (μέγιστο), ενώ οι μειώσεις στις κατακόρυφες επιταχύνσεις είναι 61% (μέσος όρος) και 59% (μέγιστο).

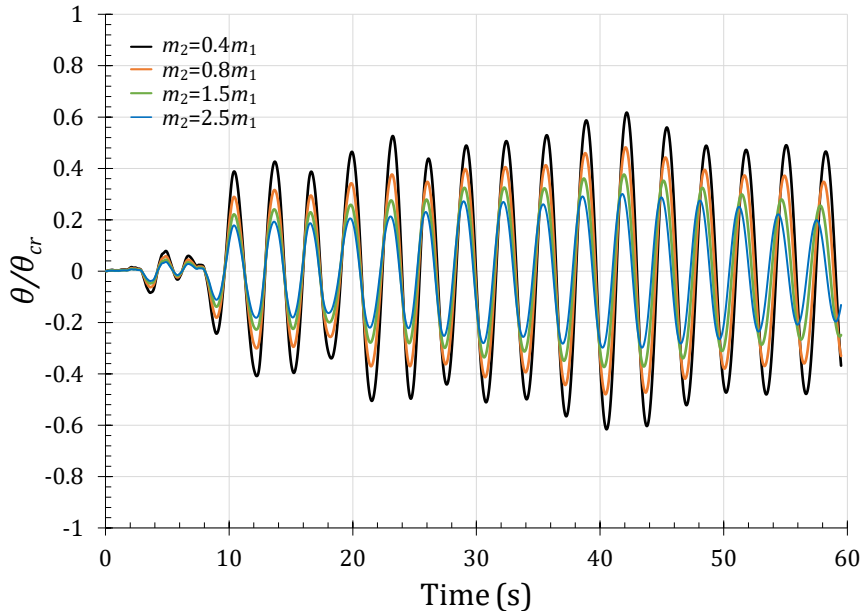
Πίνακας 3: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά και δείκτες αποδόσεις του προτεινόμενου συστήματος μόνωσης για ιδιοπερίοδο $T_{iso} = 3$ s και λόγους μαζών $m_2/m_1 = 0.4, 0.8, 1.5, 2.5$.

	$m_2 = 0.4m_1$	$m_2 = 0.8m_1$	$m_2 = 1.5m_1$	$m_2 = 2.5m_1$
R (m)	1.669	1.720	1.852	2.085
θ_0 (rad)	0.656	0.824	0.987	1.098
b (m)	2.036	2.524	3.089	3.712
h (m)	0.347	0.552	0.830	1.135
R/r_G	2.450	2.331	2.195	2.062
I_G (ton·m ²)	2.305	3.717	6.544	11.658
θ_{cr} (rad)	1.009	1.242	1.456	1.604
f_{sup}	0.649	0.595	0.534	0.475
mean $ \theta_{max} /\theta_{cr}$	0.259	0.196	0.151	0.122
max $ \theta_{max} /\theta_{cr}$	0.661	0.531	0.434	0.367
mean $ a_{Mx,max} /g$	0.236	0.211	0.183	0.165
max $ a_{Mx,max} /g$	0.430	0.372	0.337	0.329
mean $ a_{Mz,max} /g$	0.077	0.058	0.041	0.030
max $ a_{Mz,max} /g$	0.347	0.229	0.178	0.144

Για το σύστημα μόνωσης με ιδιοπερίοδο απομόνωσης $T_{iso} = 4$ s (βλ. Πίνακα 4), είναι ενδιαφέρον να παρατηρηθεί ότι το σενάριο λόγου μάζας $m_2/m_1 = 0.4$ παρουσιάζει μέγιστο PI μεγαλύτερο από 1 (υποβαλλόμενο στην καταγραφή #19), υποδεικνύοντας αστοχία του συστήματος. Ωστόσο, ο μέσος PI παραμένει πολύ κάτω από 1, με τιμή 0.325. Συγκρίνοντας τις επιταχύνσεις στο σημείο M μεταξύ σεναρίων λόγου μαζών 0.4 και 2.5, οι μειώσεις είναι 42% (μέσος όρος) και 49% (μέγιστο), για οριζόντιες επιταχύνσεις, και 77% (μέσος όρος) και 86% (μέγιστο) για κατακόρυφες επιταχύνσεις.

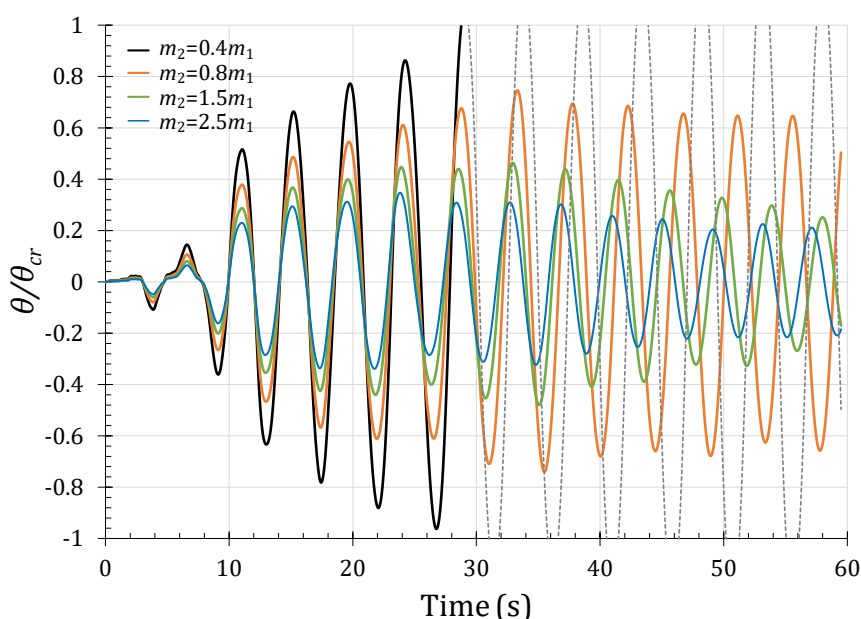
Πίνακας 4: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά και δείκτες αποδόσεις του προτεινόμενου συστήματος μόνωσης για ιδιοπερίοδο $T_{iso} = 4$ s και λόγους μαζών $m_2/m_1 = 0.4, 0.8, 1.5, 2.5$.

	$m_2 = 0.4m_1$	$m_2 = 0.8m_1$	$m_2 = 1.5m_1$	$m_2 = 2.5m_1$
R (m)	1.401	1.442	1.549	1.732
θ_0 (rad)	0.744	0.939	1.135	1.279
b (m)	1.896	2.328	2.808	3.317
h (m)	0.370	0.591	0.895	1.233
R/r_G	3.568	3.363	3.140	2.924
I_G (ton·m ²)	2.293	3.669	6.371	11.116
θ_{cr} (rad)	0.978	1.223	1.457	1.627
f_{sup}	0.646	0.595	0.538	0.484
mean $ \theta_{max} /\theta_{cr}$	0.325	0.230	0.169	0.134
max $ \theta_{max} /\theta_{cr}$	1.273	0.746	0.481	0.375
mean $ a_{Mx,max} /g$	0.233	0.199	0.162	0.134
max $ a_{Mx,max} /g$	0.424	0.359	0.284	0.218
mean $ a_{Mz,max} /g$	0.062	0.040	0.024	0.014
max $ a_{Mz,max} /g$	0.355	0.175	0.080	0.049



Σχήμα 4: Χρονοϊστορίες του λόγου $\theta(t)/\theta_{cr}$ για το προτεινόμενο σύστημα μόνωσης με $T_{iso} = 3$ s και τα τέσσερα σενάρια λόγου μαζών—(a) $m_2/m_1 = 0.4$, (b) $m_2/m_1 = 0.8$, (c) $m_2/m_1 = 1.5$, και (d) $m_2/m_1 = 2.5$. Σεισμική διέγερση #19, 1971 Σαν Φερνάντο, 458 (USGS), S00W.

Τέλος, οι χρονοϊστορίες του λόγου $\theta(t)/\theta_{cr}$ για τα τέσσερα σενάρια λόγου μαζών—(a) $m_2/m_1 = 0.4$, (b) $m_2/m_1 = 0.8$, (c) $m_2/m_1 = 1.5$, και (d) $m_2/m_1 = 2.5$ —παρουσιάζονται στο Σχήμα 4 και στο Σχήμα 5 για ιδιοπεριόδους $T_{iso} = 3$ s και $T_{iso} = 4$ s, αντίστοιχα. Η διέγερση του εδάφους αντιστοιχεί στην καταγραφή #19 από τον σεισμό του Σαν Φερνάντο του 1971, 458 (USGS), S00W.



Σχήμα 5: Χρονοϊστορίες του λόγου $\theta(t)/\theta_{cr}$ για το προτεινόμενο σύστημα μόνωσης με $T_{iso} = 4$ s και τα τέσσερα σενάρια λόγου μαζών—(a) $m_2/m_1 = 0.4$, (b) $m_2/m_1 = 0.8$, (c) $m_2/m_1 = 1.5$, και (d) $m_2/m_1 = 2.5$. Σεισμική διέγερση #19, 1971 Σαν Φερνάντο, 458 (USGS), S00W.

4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην εργασία αυτή διερευνήθηκε η αποτελεσματικότητα ενός νέου συστήματος σεισμικής μόνωσης για την προστασία στερεών σωμάτων, ιδιαίτερα των μεγάλων αντικειμένων τέχνης. Η λειτουργία του προτεινόμενου συστήματος σεισμικής μόνωσης βασίζεται στον μηχανισμό της κύλισης (rolling isolation system, RIS). Το στερεό σώμα είναι άκαμπτα συνδεδεμένο με μία καμπύλη βάση (τόξο κύκλου), η οποία μπορεί να κυλιέται ελεύθερα, χωρίς να ολισθαίνει, εκτελώντας ταλάντωση γύρω από τη θέση ισορροπίας της. Το προτεινόμενο σύστημα παρουσιάζει πλεονεκτική συμπεριφορά έναντι του λικνισμού διότι μετατρέπει τη μεταφορική κίνηση σε περιστροφική. Οι αναλύσεις έδειξαν ότι καθώς αυξάνεται ο λόγος μάζας, τόσο η γωνία περιστροφής όσο και η γωνιακή ταχύτητα μειώνονται—για δεδομένη ιδιοπερίοδο—ως αποτέλεσμα της μείωσης του κέντρου μάζας. Επιπλέον, οι οριζόντιες και κατακόρυφες επιταχύνσεις μειώνονται—για δεδομένο λόγο μάζας—όσο η ιδιοπερίοδος του συστήματος αυξάνεται.

5 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Kasalanati A, Reinhorn A, Constantinou M, Sanders D. Experimental Study of Ball-In-Cone Isolation System. Building to last: Proceedings of the 15th structures congress, New York: 1997.

2. Tsai MH, Wu SY, Chang KC, Lee GC. Shaking table tests of a scaled bridge model with rolling-type seismic isolation bearings. *Engineering Structures* 2007; 29(5): 694–702.
3. Lee GC, Ou YC, Niu T, Song J, Liang Z. Characterization of a Roller Seismic Isolation Bearing with Supplemental Energy Dissipation for Highway Bridges. *Journal of Structural Engineering* 2010; 136(5): 502–510.
4. Ou YC, Song J, Lee GC. A parametric study of seismic behavior of roller seismic isolation bearings for highway bridges. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics* 2010; 39(5): 541–559.
5. Lin PY, Lin TK. Control of seismically isolated bridges by magnetorheological dampers and a rolling pendulum system. *Structural Control and Health Monitoring* 2012; 19(2): 278–294.
6. Lin T -W, Hone C -C. Base isolation by free rolling rods under basement. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics* 1993; 22(3): 261–273. DOI: 10.1002/EQE.4290220307.
7. Jangid RS, Londhe YB. Effectiveness of Elliptical Rolling Rods for Base Isolation. *Journal of Structural Engineering* 1998; 124(4): 469–472.
8. Zhou Q, Lu X, Wang Q, Feng D, Yao Q. Dynamic Analysis On Structures Base-Isolated By A Ball System With Restoring Property. *Earthquake Engineering And Structural Dynamics* 1997; 27: 773–791.
9. Hosseini M, Soroor A. Using orthogonal pairs of rollers on concave beds (OPRCB) as a base isolation system—part I: analytical, experimental and numerical studies of OPRCB isolators. *The Structural Design of Tall and Special Buildings* 2011; 20(8): 928–950.
10. Hosseini M, Soroor A. Using orthogonal pairs of rollers on concave beds (OPRCB) as a base isolation system—part II: application to multi-story and tall buildings. *The Structural Design of Tall and Special Buildings* 2013; 22(2): 192–216.
11. Cilsalar H, Constantinou MC. Behavior of a spherical deformable rolling seismic isolator for lightweight residential construction. *Bulletin of Earthquake Engineering* 2019; 17(7): 4321–4345.
12. Cilsalar H, Constantinou MC. Parametric study of seismic collapse performance of lightweight buildings with spherical deformable rolling isolation system. *Bulletin of Earthquake Engineering* 2020; 18(4): 1475–1498.
13. Katsamakas AA, Belser G, Vassiliou MF, Blondet M. Experimental investigation of a spherical rubber isolator for use in low income countries. *Engineering Structures* 2022; 250: 113522.
14. Katsamakas AA, Del Giudice L, Reyes SI, Candebat-Sanchez D, Vassiliou MF. Experimental and numerical assessment of grout-filled tennis balls as seismic isolation bearings. *Engineering Structures* 2023; 294: 116716.
15. Katsamakas AA, Vassiliou MF. Experimental Parametric Study and Phenomenological Modeling of a Deformable Rolling Seismic Isolator. *Journal of Earthquake Engineering* 2023; 27(16): 4664–4693.
16. Restrepo SL, Constantinou MC. Model Development and Validation for a Seismic Isolation System for Lightweight Structures. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics* 2025.
17. Restrepo SL, Constantinou MC. Shake table testing of a seismic isolation system for lightweight structures. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics* 2025; 54(2): 562–582.
18. Ismail M, Rodellar J, Ikhrouane F. Performance of structure–equipment systems with a novel roll-n-cage isolation bearing. *Computers & Structures* 2009; 87(23–24): 1631–1646.
19. Vargas R, Bruneau M. Experimental Response of Buildings Designed with Metallic Structural Fuses. II. *Journal of Structural Engineering* 2009; 135(4).
20. Harvey PS, Gavin HP. The nonholonomic and chaotic nature of a rolling isolation system. *Journal of Sound and Vibration* 2013; 332(14). DOI: 10.1016/j.jsv.2013.01.036.
21. Harvey PS, Zéhil GP, Gavin HP. Experimental validation of a simplified model for rolling isolation systems. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 2014; 43(7).
22. Harvey PS, Gavin HP. Double rolling isolation systems: A mathematical model and experimental validation. *International Journal of Non-Linear Mechanics* 2014; 61.
23. Harvey PS, Gavin HP. Assessment of a rolling isolation system using reduced order structural models. *Engineering Structures* 2015; 99.
24. Harvey PS. Vertical Accelerations in Rolling Isolation Systems: Experiments and Simulations. *Journal of Engineering Mechanics* 2016; 142(3).
25. Rawat A, Matsagar V. An Oblate Spheroid Base Isolator and Floating Surface Diaphragm for Seismic Protection of Liquid Storage Tank. *Journal of Earthquake Engineering* 2022; 26(10).
26. Rawat A, Matsagar V. Seismic analysis of liquid storage tank using oblate spheroid base isolation system based on rolling friction. *International Journal of Non-Linear Mechanics* 2022; 147.
27. Covarrubias Vargas BA, Harvey PS, Cao L, Ricles JM, Al-Subaihawi S, Villalobos Vega E. Characterization and real-time hybrid simulation testing of rolling pendulum isolation bearings with different surface treatments. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 2022; 51(11).
28. Harvey PS, Kelly KC. A review of rolling-type seismic isolation: Historical development and future directions. *Engineering Structures* 2016; 125.

29. Roussis PC, Pavlou EA, Pisiara EC. Base-isolation technology for earthquake protection of art objects. The 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing: 2008.
30. Roussis PC, Odysseos S. Rocking Response of Seismically-Isolated Rigid Blocks Under Simple Acceleration Pulses and Earthquake Excitations. The Open Construction and Building Technology Journal 2017; 11(1). DOI: 10.2174/1874836801711010217.
31. Vassiliou MF, Makris N. Analysis of the rocking response of rigid blocks standing free on a seismically isolated base. Earthquake Engineering and Structural Dynamics 2012; 41(2). DOI: 10.1002/eqe.1124.
32. Pellecchia D, Lo Feudo S, Vaiana N, Dion JL, Rosati L. A procedure to model and design elastomeric-based isolation systems for the seismic protection of rocking art objects. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering 2022; 37(10). DOI: 10.1111/mice.12775.
33. Destro Bisol G, DeJong MJ, Liberatore D, Sorrentino L. Displacement-based design procedures for rigid block isolation. Earthquake Engineering and Structural Dynamics 2024; 53(4). DOI: 10.1002/eqe.4074.
34. Koumoussis V, Moysidis A. On the dynamic behavior of nonlinear lightweight isolator for museum artifacts. Soil Dynamics and Earthquake Engineering 2019; 117. DOI: 10.1016/j.soildyn.2018.09.011.
35. Syrimi P, Tsiatas G, Tsopelas P. Magnetic restoring forces on rocking blocks. Earthquake Engineering & Structural Dynamics 2024. DOI: 10.1002/EQE.4177.
36. Giresini L, Puppio ML, Laccone F, Froli M. Experimental and numerical investigation on a passive control system for the mitigation of vibrations on SDOF and MDOF Structures: mini Tribological ROCKing Seismic Isolation Device (miniTROCKSISD). Journal of Earthquake Engineering 2022; 26(14): 7486–7504. DOI: 10.1080/13632469.2021.1964646.
37. Harvey PS. Behavior of a Rocking Block Resting on a Rolling Isolation System. Journal of Engineering Mechanics 2017; 143(8).
38. Tsiatas GC, Charalampakis AE, Tsopelas P. A Subbuteo-Inspired Rolling Isolation System for Protecting Rigid Blocks. Earthquake Engineering & Structural Dynamics 2025; 54:1918–1933.
39. Koumoussis V.K. Seismic isolation system for the statue of Hermes at the archaeological museum of Olympia. Advances in the protection of museum collections from earthquake damage, Los Angeles: 2008.