

3DGRIPS: Νέο λικνιζόμενο-κυλιόμενο οδοντωτό σύστημα σεισμικής μόνωσης κατασκευών και εξοπλισμού

Αριστοτέλης Χαραλαμπίδης¹, Γεώργιος Τσιάτας², Παναγιώτης Τσόπελας³

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η σεισμική μόνωση αποτελεί μια αποδεδειγμένα αποτελεσματική τεχνική αντισεισμικής προστασίας με πλήθος εφαρμογών σε πραγματικές κατασκευές. Οι συμβατικές μέθοδοι σεισμικής μόνωσης περιλαμβάνουν ελαστομερή εφέδρανα, εφέδρανα τριβής (επίπεδα ή σφαιρικά, τύπου FPS), καθώς και συστήματα βασιζόμενα στην κύλιση ή τον λικνισμό. Στην εργασία αυτή παρουσιάζεται ένα νέο λικνιζόμενο-κυλιόμενο σύστημα σεισμικής μόνωσης, το οποίο στοχεύει πρωτίστως στην προστασία αντικειμένων μικρού βάρους και μεγάλης σπουδαιότητας, είτε λόγω αξίας (όπως μουσειακά εκθέματα) είτε λόγω απαίτησης απρόσκοπτης λειτουργίας σε έκτακτες συνθήκες (όπως διακομιστές, νοσοκομειακός και τηλεπικοινωνιακός εξοπλισμός). Το προτεινόμενο σύστημα (κατοχυρωμένο με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας στον Οργανισμό Βιομηχανικής Ιδιοκτησίας) διαφοροποιείται σε σχέση με τα συμβατικά συστήματα κύλισης διότι περιλαμβάνει (α) μια τριδιάστατη οδόντωση στις επιφάνειες επαφής, προς αποφυγή της ολίσθησης και αύξηση της απόσβεσης, και (β) μια επίπεδη επιφάνεια επαφής στην κατάσταση ηρεμίας, η οποία εξασφαλίζει μείωση των αναπτυσσόμενων τάσεων, απόσβεση λόγω κρούσεων καθώς και πλήρη επαναφορά στην αρχική θέση ισορροπίας μετά από τη σεισμική διέγερση. Το προτεινόμενο σύστημα είναι σχεδιασμένο ώστε να μην υφίσταται μεγάλες παραμορφώσεις ενώ, λόγω της αξονοσυμμετρίας, μπορεί να κατασκευαστεί εύκολα και οικονομικά με απλό μηχανολογικό εξοπλισμό.

Λέξεις Κλειδιά: Σεισμική μόνωση, Κύλιση, Λικνισμός, Ανάστροφο εκκρεμές.

1 ΓΕΝΙΚΑ

Η σεισμική μόνωση είναι μια αποτελεσματική μέθοδος προστασίας, η οποία έχει μελετηθεί επαρκώς και έχει πλέον πλήθος εφαρμογών σε πραγματικές κατασκευές. Αντί της αύξησης της αντοχής, σκοπός της σεισμικής μόνωσης είναι η μείωση των σεισμικών δράσεων επί της κατασκευής. Τα συστήματα που υλοποιούν τη σεισμική μόνωση παρέχουν (ή πρέπει να παρέχουν) τα παρακάτω στοιχεία:

¹ Επίκουρος Καθηγητής ΠΑ.Δ.Α., achar@uniwa.gr

² Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π., gtsiatas@central.ntua.gr

³ Καθηγητής Ε.Μ.Π., tsopelas@central.ntua.gr

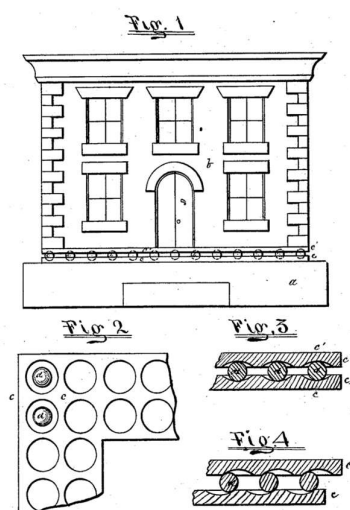
(α) τον διαχωρισμό της ανωδομής από τον υποκείμενο σχηματισμό (συνήθως το έδαφος) με χρήση στοιχείων μεγάλης ενδοσιμότητας, ο οποίος αυξάνει τη θεμελιώδη περίοδο ταλάντωσης του συστήματος και την οδηγεί μακριά από την περιοχή των τιμών στις οποίες οι σεισμικές διεγέρσεις έχουν έντονη επίδραση,

(β) τη χρήση κάποιας μορφής απόσβεσης, με σκοπό τον περιορισμό των μετακινήσεων του συστήματος σε αποδεκτά όρια, και

(γ) τη χρήση κάποιων στοιχείων στιβαρότητας, τα οποία θα αποτρέπουν την σημαντική ενεργοποίηση του συστήματος υπό συνήθη φορτία λειτουργίας (όπως στην περίπτωση επίδρασης της ανεμοπίεσης επί της ανωδομής, ή την περίπτωση σεισμικών διεγέρσεων μικρής έντασης).

2 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

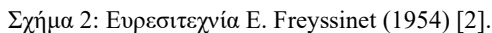
Η πρώτη κατηγορία συστημάτων σεισμικής μόνωσης αναφέρεται σε συστήματα κυλιόμενου τύπου (rolling-type seismic isolation). Ο J. Touaillon με το Δίπλωμα Ευρεσιτεχνίας (ΔΕ) US99973 κατοχύρωσε ήδη από το 1870 το σύστημα σεισμικής μόνωσης που φαίνεται στο Σχ. 1 [1].



Σχήμα 1: Ευρεσιτεχνία J. Touaillon (1870) [1].

Το κτίριο εδράζεται επί κυλιόμενων μεταλλικών σφαιρών και συνεπώς κατά τη διάρκεια της σεισμικής διέγερσης δεν υφίσταται σημαντικές επιταχύνσεις. Παρόμοια ΔΕ αποδόθηκαν στον P. Seiler (US846249 – 1907), τον F. Schär (US951028 – 1910), τον F.D. Cummings (US1761659 – 1930) και τον J.F.J. Bakker (US2014643 – 1935). Αντί των σφαιρών, κυλινδρικά στοιχεία έχουν επίσης χρησιμοποιηθεί, σε μία ή και δύο διαστάσεις, λ.χ. το ΔΕ που απονεμήθηκε στους G. C. Lee et al. (US6971795 – 2005). Τα συστήματα με κύλιση έχουν το πλεονέκτημα της απλότητας αλλά και το σημαντικό μειονέκτημα της μικρής απόσβεσης. Κατά συνέπεια, οι απαιτήσεις σε μετατόπιση είναι γενικά υπερβολικές. Στην περίπτωση που χρησιμοποιηθούν στιβαρές σφαίρες, π.χ., από μέταλλο, η μεταφορά των κατακόρυφων φορτίων γίνεται σημειακά και οι τάσεις είναι τοπικά πολύ μεγάλες. Από την άλλη, στην περίπτωση που οι σφαίρες ή/και οι επιφάνειες επί των οποίων κυλίνουν έχουν επικαλυφθεί με παχιά στρώση πιο μαλακού υλικού

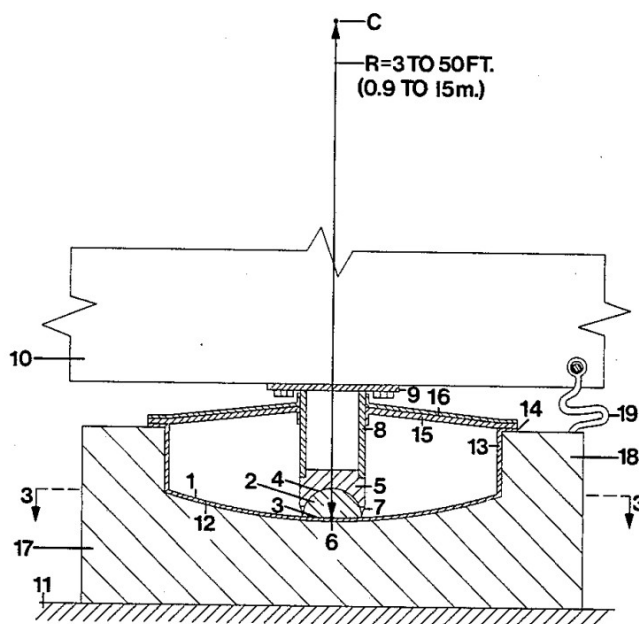
Ένα άλλο ιδιαίτερα διαδεδομένο σύστημα σεισμικής μόνωσης είναι το ελαστομερές εφέδρανο. Το εφέδρανο περιλαμβάνει, κατά την οριζόντια έννοια, πολλαπλά λεπτά μεταλλικά ελάσματα με ενδιάμεσες στρώσεις καουτσούκ. Απαρχή του συστήματος θεωρείται το ΔΕ που αποδόθηκε στον E. Freyssinet (FR1110285 – 1954) [2], βλ. Σχ. 2. Το εφέδρανο αυτό πιθανότατα χρησιμοποιήθηκε από τον Freyssinet για να καλύψει τις αλλαγές στις διαστάσεις της κατασκευής λόγω ερπυσμού του σκυροδέματος. Σύντομα όμως, χρησιμοποιήθηκε για την αντισεισμική μόνωση κτιρίων την δεκαετία του '60 στη Βρετανία.



Ένα άλλο ιδιαίτερα διαδεδομένο σύστημα σεισμικής μόνωσης είναι το επίπεδο εφεδρανοολίσθησης (flat sliding bearing). Το σύστημα αυτό έχει το πλεονέκτημα της απόσβεσης, αλλά πάσχει διότι απουσιάζει παντελώς κάποια δύναμη επαναφοράς. Έτσι, το σύστημα δεν έχει καμία τάση να επιστρέφει στην αρχική του θέση, κάτι το οποίο πρέπει να γίνει με εξωτερική παρέμβαση εκ των υστέρων. Αυτό αποτελεί κρίσιμο πρόβλημα στην περίπτωση διαδοχικών σεισμικών διεγέρσεων, όπου σε κάθε διέγερση το σύστημα ξεκινάει από άλλη αρχική θέση. Στην κατηγορία

αυτή ανήκουν ενδεικτικά τα ΔΕ που απονεμήθηκαν στον R.D. Hein (US3349418A – 1965) και S. Ueda et al. (US6289640 – 2001).

Το πρόβλημα της έλλειψης δύναμης επαναφοράς έχει λυθεί σε κάποιο βαθμό με τα συστήματα ολίσθησης σε σφαιρική επιφάνεια, λ.χ. το σύστημα το οποίο κατοχυρώθηκε με ΔΕ στον V. Zayas (US4644714 – 1987) [4], βλ. Σχ. 3. Το σύστημα αυτό είναι πιο γνωστό ως FPS (friction pendulum system) [5,6].



Σχήμα 3: Ευρεσιτεχνία V. Zayas (1987) [4].

Άλλα παραδείγματα εφεδράνων ολίσθησης σε κοίλη επιφάνεια είναι τα ΔΕ που έχουν αποδοθεί στους D. Yaguchi et al. (US5867951 – 1999), K. Z. Y. Yen et al. (US6126136 – 2000) και C-S Tsai (US7814712B2 – 2010). Στα συστήματα αυτά η κοίλη επιφάνεια προκαλεί μια δύναμη επαναφοράς η οποία είναι η συνιστώσα, στον οριζόντιο άξονα, της αντίδρασης επί της κοίλης επιφάνειας. Η δύναμη αυτή επαναφοράς είναι σημαντική όταν το σύστημα εκτρέπεται αρκετά από την κατακόρυφο, ενώ είναι πρακτικά μηδενική για μικρή εκτροπή. Συνεπώς και σε αυτή την περίπτωση υπάρχει θέμα με την επαναφορά του συστήματος στην αρχική θέση ισορροπίας, αν και - προφανώς - σε μικρότερο βαθμό από τα συστήματα ολίσθησης σε επίπεδη επιφάνεια.

Μια εναλλακτική μέθοδος, η οποία έχει προταθεί για την σεισμική θωράκιση τόσο κτιρίων όσο και γεφυρών, βασίζεται στον λικνισμό (rocking). Ο λικνισμός έχει μελετηθεί υπό δύο μορφές, ήτοι τον λικνισμό στο επίπεδο των θεμελίων (foundation rocking) και τον λικνισμό στο επίπεδο της κατασκευής (structural rocking) [7–9].

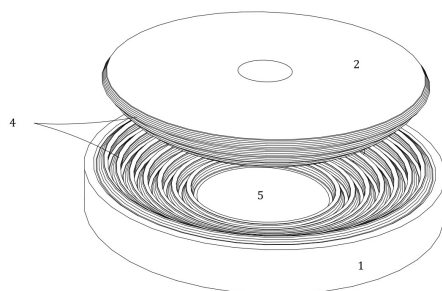
Το μεγάλο μειονέκτημα του λικνισμού είναι ότι η κίνηση είναι ιδιαίτερα ευαίσθητη στις αρχικές συνθήκες και σε κατασκευαστικές αποκλίσεις ή ατέλειες. Ως συνέπεια, πανομοιότυπα επαναλαμβανόμενα πειράματα οδηγούν σε σημαντικά διαφορετικές αποκρίσεις, υπονοώντας χαοτική συμπεριφορά. Ένα άλλο θέμα είναι η απόσβεση της σεισμικής ενέργειας, η οποία μπορεί

να οφείλεται σε κρούσεις της βάσης ή σε ολίσθηση. Αποτέλεσμα είναι η μέθοδος αυτή να μην έχει κερδίσει το ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας. Εξαίρεση αποτελούν αρκετά κτίρια που έχουν κατασκευαστεί στη Ρωσία, με ελεύθερα λικνιζόμενα υποστυλώματα στη στάθμη του ισογείου, τα οποία έχουν ονομαστεί κινηματικές στηρίξεις (kinematic supports) [10].

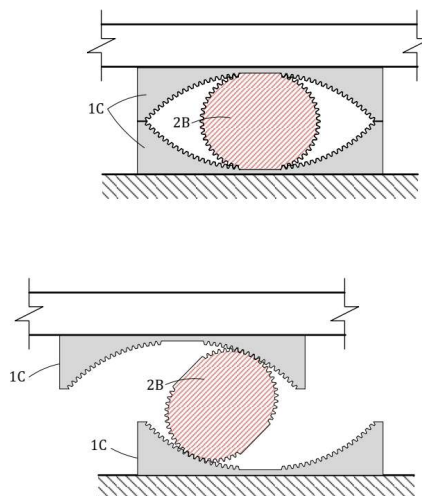
3 ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΟ ΣΥΣΤΗΜΑ 3DGRIPS

Η προτεινόμενη μέθοδος σεισμικής μόνωσης (Three-Dimensional Geared Rocking/Rolling Inverse Pendulum System – 3DGRIPS) [11] βασίζεται σε ένα λικνιζόμενο/κυλιόμενο οδοντωτό σύστημα ανάστροφου εκκρεμούς (βλ. Σχ. 4), το οποίο παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι των συμβατικών τεχνικών. Ειδικότερα, αντιμετωπίζει τρία κύρια προβλήματα που παρατηρούνται στα υπάρχοντα συστήματα, ήτοι

- (α) την αδυναμία λειτουργίας με μικρά κατακόρυφα φορτία,
- (β) την αναποτελεσματική επαναφορά στην αρχική θέση μετά από σεισμική διέγερση (recentering), και
- (γ) την ανεπαρκή διαχείριση της κατακόρυφης συνιστώσας της σεισμικής διέγερσης.



Σχήμα 4α: Πόδας συστήματος ανάστροφου εκκρεμούς [11].



Σχήμα 4β: Συνολικό σύστημα με μηδενικό ύψος υποστυλώματος [11].

Συγκεκριμένα, το ανάστροφο εκκρεμές μπορεί να έχει τη μορφή ενός υποστυλώματος το οποίο κυλίνεται επί τριδιάστατων κοίλων επιφανειών. Οι κοίλες επιφάνειες αυτές (μία στον πόδα και μία στην κορυφή του υποστυλώματος) διαθέτουν τριδιάστατη οδόντωση η οποία επιτρέπει την κύλιση/λικνισμό του υποστυλώματος κατά ελεγχόμενο τρόπο και χωρίς ολίσθηση. Αντίστοιχες οδοντώσεις υπάρχουν και στις δύο βάσεις του συστήματος (μία τοποθετημένη στο έδαφος και μία στην ανωδομή). Ο πόδας ενός τέτοιου συστήματος φαίνεται στο Σχ. 4α. Η εμπλοκή των οδόντων (βλ. Σχ. 4α, σημείο 4) προκαλεί τριβή και απόσβεση, η οποία μπορεί να ενισχυθεί με επικάλυψη των εμπλεκόμενων επιφανειών με κατάλληλα ελαστομερή υλικά μικρού πάχους.



Σχήμα 5: Τριδιάστατα εκτυπωμένα δοκίμια (ευρεσιτεχνία Α. Charalampakis (2023) [11]).

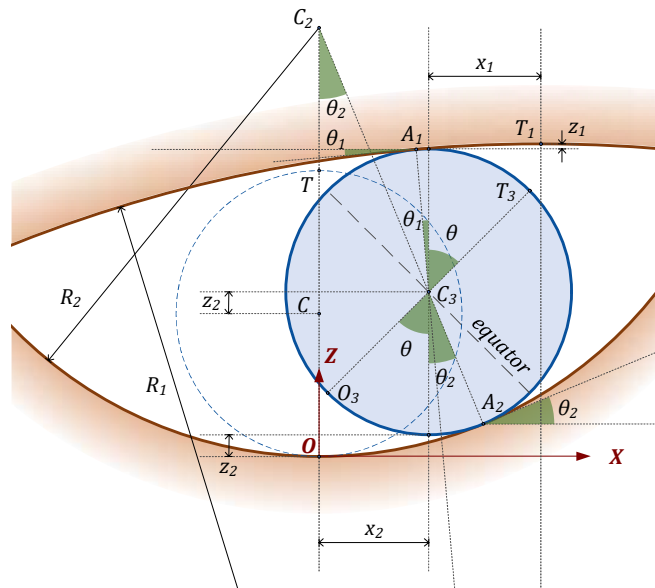
Στο κέντρο κάθε μίας από τις διεπιφάνειες υπάρχει κυκλική επίπεδη επιφάνεια (βλ. Σχ. 4α, σημείο 5), η οποία είναι ιδιαίτερης σημασίας. Καταρχήν προσφέρει ανακούφιση τάσεων (αφού η επαφή των εμπλεκόμενων σωμάτων δεν γίνεται σημειακά αλλά επιφανειακά), συνεισφέροντας στη διατήρηση του σχήματός τους. Επίσης, προσφέρει σταθερότητα σε κατάσταση ηρεμίας (ή και υπό τη δράση μικρών οριζόντιων φορτίων) αφού απαιτείται συγκεκριμένη μέγιστη οριζόντια επιτάχυνση για να ενεργοποιηθεί το σύστημα, ενώ εξασφαλίζει και πλήρη επανακέντρωση στο τέλος μιας ισχυρής δυναμικής διέγερσης. Τέλος, η κρούση μεταξύ των επίπεδων επιφανειών συνεισφέρει στην απόσβεση του συστήματος κάθε φορά που υπάρχει αλλαγή στο πρόσημο της μετακίνησης. Σημειώνεται ότι το ίδιο το υποστύλωμα μπορεί να έχει αξονική ενδοσιμότητα και σύστημα απόσβεσης για την κατακόρυφη συνιστώσα της σεισμικής διέγερσης.

Στην περίπτωση που το ύψος του υποστυλώματος εκφυλιστεί, προκύπτει το σύστημα του Σχ. 4β. Πλέον στην θέση του υποστυλώματος υπάρχει κεντρικά τοποθετημένο πεπλατυσμένο σφαιρίδιο, ενώ το όλο σύστημα έχει μικρό ύψος. Τριδιάστατα εκτυπωμένα δοκίμια του προτεινόμενου συστήματος φαίνονται στο Σχ. 5, τόσο με πυκνές όσο και με αραιές οδοντώσεις.

Η εφεύρεση [11] βρίσκεται επί του παρόντος σε Επίπεδο Τεχνολογικής Ετοιμότητας TRL3 (πειραματική απόδειξη της έννοιας). Η περαιτέρω μελέτη της χρηματοδοτήθηκε πρόσφατα από το ΕΛ.ΙΔ.Ε.Κ.. Στόχος του ερευνητικού έργου είναι η ενδεδειγμένη θεωρητική, υπολογιστική και πειραματική διερεύνηση της προαναφερθείσας νέας εφεύρεσης, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε κατάλληλες τροποποιήσεις και προσαρμογές, και η ανάπτυξη της σε Επίπεδο Τεχνολογικής Ετοιμότητας TRL6 (επίδειξη τεχνολογίας σε σχετικό περιβάλλον).

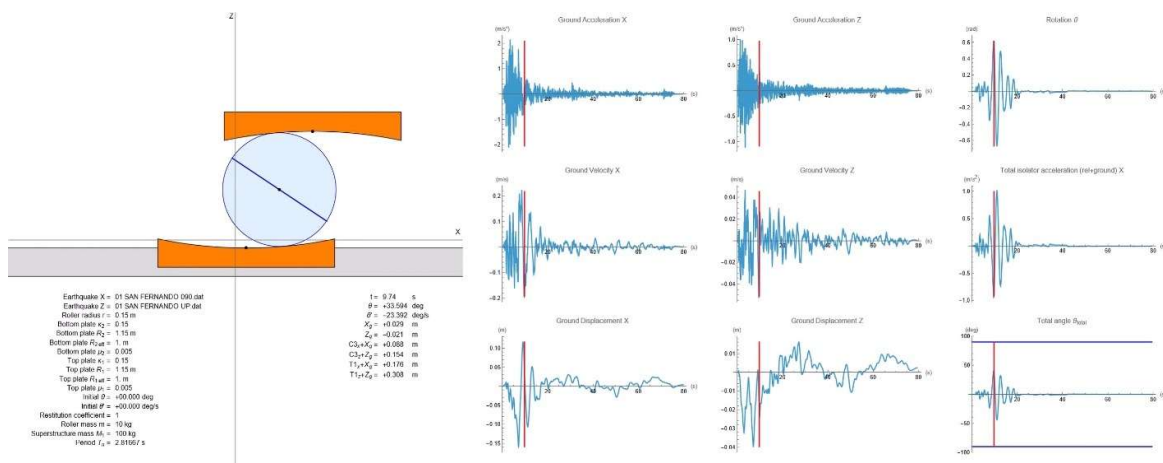
4 ΜΕΛΕΤΗ ΣΦΑΙΡΙΚΟΥ ΚΥΛΙΟΜΕΝΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Για την κατάστρωση των εξισώσεων κίνησης του πεπλατυσμένου σφαιριδίου του συστήματος 3DGRIPS, είναι πρώτα δόκιμη η μελέτη της ενός σφαιρικού κυλίστου συστήματος (βλ. Σχ. 6). Θεωρείται ότι η κίνηση λαμβάνει χώρα στο επίπεδο XZ , χωρίς ολίσθηση.



Σχήμα 6: Διδιάστατη κατακόρυφη κεντρική τομή σφαίρας η οποία κυλίστα πάνω σε διπλή σφαιρική επιφάνεια.

Καταστρώνοντας προσεκτικά τις εξισώσεις δυναμικής ισορροπίας των σωμάτων καταλήγουμε στην τελική διαφορική εξίσωση κίνησης ως προς θ . Προς επιβεβαίωση των υπολογισμών, συντάχθηκε κώδικας προσομοίωσης της κίνησης σε πραγματικό χρόνο (βλ. Σχ. 7).



Σχήμα 7: Προσομοίωση κίνησης κυλιόμενου σφαιρικού συστήματος σε πραγματικό χρόνο.

5 ΠΕΡΑΤΤΕΡΩ ΜΕΛΕΤΗ

Το ερευνητικό πρόγραμμα βρίσκεται σε εξέλιξη. Πληροφορίες είναι διαθέσιμες στον ιστότοπο του προγράμματος: <https://3dgrips.eu/>.

6 ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Το ερευνητικό Έργο με τίτλο «Τριδιάστατη σεισμική μόνωση ευαίσθητων τεχνουργημάτων και εξοπλισμού με χρήση λικνιζόμενου/κυλιόμενου οδοντωτού συστήματος ανάστροφου εκκρεμούς» (“Three-dimensional seismic isolation of sensitive artefacts and equipment by Geared Rocking/Rolling Inverse Pendulum System – 3DGRIPS”) υλοποιείται στο πλαίσιο της δράσης του ΕΛ.ΙΔ.Ε.Κ. «3^η Προκήρυξη Ερευνητικών Έργων ΕΛ.ΙΔ.Ε.Κ. για μέλη ΔΕΠ και Ερευνητές/τριες» (Αριθμός Έργου ΕΛ.ΙΔ.Ε.Κ.: 23284).

7 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Touaillon J. Improvement in buildings. US99973A, 1870.
2. Freyssinet E. Elastic connection device with one or more degrees of freedom. FR1110285A, 1954.
3. Kelly JM, Konstantinidis DA. Mechanics of Rubber Bearings for Seismic and Vibration Isolation. *Mechanics of Rubber Bearings for Seismic and Vibration Isolation* 2011. DOI: 10.1002/9781119971870.
4. Zayas VA. Earthquake protective column support. US4644714A, 1987.
5. Zayas VA, Low SA, Mahin SA. *The FPS earthquake resisting system experimental report*. Berkeley, California: Earthquake Engineering Research Center; 1987.
6. Zayas VA, Low SS, Mahin SA. A Simple Pendulum Technique for Achieving Seismic Isolation. *https://doi.org/10.1193/11585573* 1990; **6**(2): 317–333. DOI: 10.1193/1.1585573.
7. Pelekis I, Madabhushi GSP, DeJong MJ. Seismic performance of buildings with structural and foundation rocking in centrifuge testing. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics* 2018; **47**(12): 2390–2409. DOI: 10.1002/EQE.3089.
8. Vassiliou MF, Cengiz C, Dietz M, Dihoru L, Broccardo M, Mylonakis G, *et al*. Data set from shake table tests of free-standing rocking bodies. *Earthquake Spectra* 2021; **37**(4): 2971–2987. DOI: 10.1177/87552930211020021/ASSET/IMAGES/LARGE/10.1177_87552930211020021-FIG10.JPEG.
9. Vassiliou MF, Broccardo M, Cengiz C, Dietz M, Dihoru L, Gunay S, *et al*. Shake table testing of a rocking podium: Results of a blind prediction contest. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics* 2021; **50**(4): 1043–1062. DOI: 10.1002/EQE.3386.

10. Smirnov V, Eisenberg J, Vasileva A. Seismic isolation of buildings and historical monuments. Recent developments in Russia. *13th World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, Canada: 2004.
11. Charalampakis A. Geared rocking/rolling inverse pendulum system for the three-dimensional seismic isolation of structures and infrastructure. Hellenic Industrial Property Organisation (OBI) Patent No. 1010370, 2023.
12. 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. DOI: 10.1007/S10518-019-00626-Z/TABLES/7.
13. Wang J. Seismic isolation analysis of a roller isolation system. *PhD Thesis*. State University of New York at Buffalo, New York, 2005.