

Κριτήρια Ανατροπής Στερεού Σώματος σε Σεισμικές Κινήσεις Κοντινού Πεδίου

Toppling Criteria of Rigid Bodies to Near – Fault Ground Motions

ΒΟΓΙΑΤΖΑΚΗ, Ε.	Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, Μεταδιδάκτωρ Ερευνήτρια, Ι.Β. ΑΤΕ
ΒΑΧΑΒΙΩΛΟΣ, Γ.	Πολιτικός Μηχανικός ΜΔΕ, Γνώμων Κατασκευές ΑΕ
ΜΥΛΩΝΑΚΗΣ, Γ.	Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, Καθηγητής Π.Π.
ΨΥΧΑΡΗΣ, Ι.Ν.	Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, Καθηγητής ΕΜΠ,
ΒΑΜΒΑΤΣΙΚΟΣ, Δ.	Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, Λέκτορας ΕΜΠ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Επανεξετάζεται το πρόβλημα του λικνισμού απλά εδραζόμενου στερεού σώματος σε επίπεδο τριβής χωρίς συνοχή, υποκείμενου σε σεισμική κίνηση κοντινού πεδίου, με σκοπό την εύρεση απλών κριτηρίων ανατροπής (ή μη ανατροπής). Λαμβάνονται υπόψη 180 σεισμικές εδαφικές κινήσεις, 5 διαφορετικά μεγέθη στερεών σωμάτων και 5 λόγοι λυγηρότητας – δηλαδή πάνω από 4500 διαφορετικά προβλήματα απόκρισης για το σύνολο των διεγέρσεων, τα οποία καλύπτουν ένα μεγάλο εύρος παραμέτρων πρακτικού ενδιαφέροντος. Εξάγονται χρήσιμα συμπεράσματα για την ανατροπή του σώματος.

ABSTRACT: The rocking response of a simply supported block on a frictional, cohesionless rigid plane under near – fault seismic excitation is revisited, with the aim of developing simple overturning criteria. To this end, 180 near-fault earthquake recordings, 5 block sizes and 5 slenderness angles are considered – leading to over 4500 cases, which cover a wide range of parameters of practical interest. Useful conclusions are drawn as to the overturning of rigid bodies.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

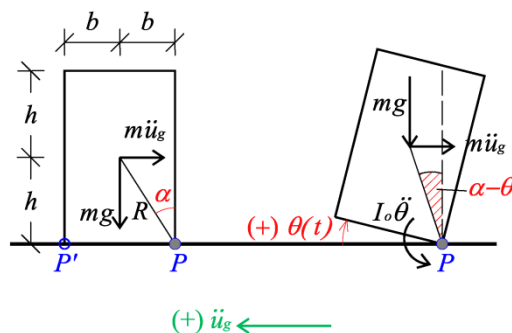
Με αφετηρία την κλασική δημοσίευση του Housner (1963), η λικνιστική απόκριση απλά εδραζόμενων στερεών σωμάτων σε σεισμικές διεγέρσεις έχει προσελκύσει το ενδιαφέρον πλήθους ερευνητών. Παρά τη φαινομενική απλότητα του προβλήματος, ο υπολογισμός της απόκρισης είναι ιδιαίτερα απαιτητικός λόγω της μη-γραμμικής φύσης των εξισώσεων κίνησης, της απώλειας ενέργειας κατά την κρούση και του θετικού πόλου του διαφορικού τελεστή σε χώρο φάσης, ο οποίος οδηγεί σε εγγενώς ασταθή συμπεριφορά. Ελάχιστες περιπτώσεις έχουν επιλυθεί πλήρως, κυρίως για απλούς παλμούς επιτάχυνσης διάρκειας μισού κύκλου (Housner 1964, Shi et al. 1996, Voyagaki et al. 2013). Οι διαθέσιμες αναλυτικές λύσεις για παλμούς διάρκειας πλήρους κύκλου που παρέχουν ακριβή ή προσεγγιστικά κριτήρια ανατροπής είναι ακόμα πιο περιορισμένες (Dimitrakopoulos & DeJong 2012, Voyagaki et al. 2014). Ο προσδιορισμός κριτηρίων ανατροπής για πραγματικές καταγραφές είναι ιδιαίτερα δύσκολος, αφού σε αυτή την περίπτωση η ανατροπή ή μη του σώματος εξαρτάται από τις λεπτομέρειες της διέγερσης (Yim et al. 1980, Ishiyama 1982, Psycharis & Jennings 1983, Spanos & Koh 1984, Makris & Vassiliou 2012).

Με αφετηρία τα παραπάνω, στην παρούσα εργασία μελετάται η απλούστερη δυνατή μορφή του προβλήματος που αφορά τον λικνισμό στερεού σώματος σε απλή έδραση επί ανένδοτης βάσης, η οποία διεγείρεται από οριζόντια σεισμική κίνηση με τη μορφή επιβαλλόμενης επιτάχυνσης, με σκοπό την εξαγωγή ενός γενικού κριτηρίου ανατροπής για σεισμούς εγγύς πεδίου.

Συγκεκριμένα, επανεξετάζεται το πρόβλημα του λικνισμού σε δύο διαστάσεις, απλά εδραζόμενου στερεού σώματος σε επίπεδο τριβής χωρίς συνοχή, υποκείμενο σε σεισμική κίνηση κοντινού πεδίου, με σκοπό την εύρεση απλών κριτηρίων ανατροπής (ή μη ανατροπής). Για τον σκοπό αυτό λαμβάνονται υπόψη 180 σεισμικές εδαφικές κινήσεις κοντινού πεδίου, οι οποίες εμπεριέχουν παλμούς ταχύτητας και επιτάχυνσης κυρίως στην κάθετη στο ρήγμα συνιστώσα της καταγραφής. Εξετάζονται 5 διαφορετικά μεγέθη στερεών σωμάτων και 5 λόγοι λυγηρότητας – δηλαδή πάνω από 4500 διαφορετικά προβλήματα απόκρισης για το σύνολο των διεγέρσεων, τα οποία καλύπτουν ένα μεγάλο εύρος παραμέτρων πρακτικού ενδιαφέροντος. Τα αποτελέσματα κανονικοποιούνται βάσει της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης, της μέγιστης εδαφικής ταχύτητας, και της δεσπόζουσας περιόδου της σεισμικής κίνησης, όπως αυτές υπολογίζονται από εδραιωμένες μεθόδους της βιβλιογραφίας.

2. ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Για τη μελέτη της λικνιστικής απόκρισης σε οριζόντια σεισμική διέγερση, θεωρούμε ένα απόλυτα στερεό ορθογωνικό σώμα, διαστάσεων $2h \times 2b$, το οποίο περιγράφεται από τη γωνία ραδινότητας α και την απόσταση R του κέντρου βάρους από τον πόλο περιστροφής P , εδραζόμενο σε οριζόντιο επίπεδο με τριβή αλλά χωρίς συνοχή, διεγερόμενο με επιτάχυνση $\ddot{u}_g(t)$, όπως φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα (Σχήμα 1). Ο συντελεστής τριβής θεωρείται ικανά μεγάλος για την αποφυγή ολίσθησης. Αρχικώς, για μικρές τιμές της εδαφικής επιτάχυνσης, το σώμα βρίσκεται σε ηρεμία ως προς το επίπεδο της βάσης, ενώ η αναπτυσσόμενη αδρανειακή δύναμη στο κέντρο βάρους του σώματος ισούται με $F_I = m\ddot{u}_g(t)$. Όταν η ροπή της αδρανειακής δύναμης περί το σημείο P , $M_I = F_I h$, υπερβεί τη ροπή ευστάθειας λόγω ίδιου βάρους $M_G = mgb$, το σώμα ανασηκώνεται από την βάση έδρασης και περιστρέφεται περί τον πόλο περιστροφής P . Θεωρώντας ότι τη χρονική στιγμή t το στερεό σώμα έχει περιστραφεί γύρω από το P κατά γωνία θ λόγω οριζόντιας σεισμικής επιτάχυνσης $\ddot{u}_g(t)$, η περιστροφή αντιστοιχεί σε θετική γωνία στροφής, δηλ. $\theta > 0$, για στροφή κατά την ωρολογιακή φορά.



Σχήμα 1. Λικνιζόμενο στερεό σώμα σε απαραμόρφωτη βάση.
Figure 1. Rocking block on a rigid base.

Οι δράσεις που δημιουργούν ροπές περί τον πόλο περιστροφής είναι τρεις: το βάρος του σώματος mg , (που στην αρχή δρά ως ροπή ευστάθειας ενώ για μεγάλες γωνίες απόκρισης μετατρέπεται σε ροπή ανατροπής), η εξωτερική δυναμική φόρτιση F_I και η αδράνεια του σώματος που δημιουργεί ροπή περί το σημείο P . Λαμβάνοντας υπόψη τη μεταβολή στην γεωμετρία αναφορικά με τους μοχλοβραχίονες των δυνάμεων (το οποίο αντιστοιχεί σε ανάλυση 2ης τάξης), καταλήγουμε στις εξισώσεις κίνησης

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

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

όπου I_o η αδρανειακή ροπή περί τον πόλο περιστροφής P ή P' (για ορθογωνική γεωμετρία, $I_o = 4/3mR^2$). Το θετικό πρόσημο στο δεξιό μέλος της εξίσωσης διασφαλίζει θετική λικνιστική απόκριση υπό θετική εδαφική επιτάχυνση όπως υποδηλώνει το σύστημα αναφοράς του Σχήματος 1. Η αλλαγή του πόλου περιστροφής συνοδεύεται από απώλεια ενέργειας η οποία περιγράφεται μέσω του συντελεστή αποκατάστασης ε που ισούται με τον λόγο των γωνιακών ταχυτήτων του στερεού μετά και πριν την κρούση (Εξ. 2).

$$\varepsilon = \dot{\theta}_i^+ / \dot{\theta}_i^- \quad (2)$$

Αναφορικά με τη γεωμετρία του στερεού σώματος, εξετάστηκαν πέντε γωνίες ραδιότητας α και πέντε ακτίνες R , οι τιμές των οποίων δίνονται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1. Γεωμετρικά χαρακτηριστικά λικνιζόμενου στερεού που εξετάστηκαν.

Table 1. Geometrical properties of the systems analysed.

Γωνία α (μοίρες)	2	5	10	15	20
Ακτίνα R (m)	1	2	5	10	20

Αναφορικά με τις ιδιότητες της διέγερσης, επιλέχθηκαν 91 σεισμικές καταγραφές (με μία ή δύο οριζόντιες συνιστώσες) με χαρακτηριστικά πρόσω κατευθυντικότητας (Baker, 2007) που αντιστοιχούν σε 180 παλμικά επιταχυνσιογραφήματα. Στο σύνολο αυτό των εδαφικών κινήσεων, η μέγιστη εδαφική επιτάχυνση A_g κυμαίνεται από 0.09g έως 1.23g, ενώ η μέγιστη εδαφική ταχύτητα V_g από 10cm/sec έως 191.1cm/sec. Το μέγεθος σεισμικής ροπής M_w (moment magnitude) κυμαίνεται από 5 έως 7.6.

3. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ

Για τις αριθμητικές αναλύσεις αναπτύχθηκε κώδικας Matlab που επιλύει τις μη-γραμμικές εξισώσεις λικνισμού μέσω μιας μεθόδου Runge-Kutta μεταβλητής τάξης για τυχαία χρονιοστορία διέγερσης, ως συνεχείς συναρτήσεις. Με βάση τη δημοσίευση των Prieto *et al.* (2004), εξήχθη μια συμπαγής μορφή της εξίσωσης κίνησης η οποία περιλαμβάνει τις μη-γραμμικότητες λόγω: (1) αλλαγής πόλου περιστροφής, (2) απώλειας ενέργειας κατά την κρούση και σχετικής ασυνέχειας στην τιμή της γωνιακής ταχύτητας λικνισμού, και (3) γεωμετρικές μη-γραμμικότητες που εκφράζονται μέσω των τριγωνομετρικών όρων της Εξ. (1), η οποία μπορεί να γραφεί σε αδιάστατη μορφή ως

$$\ddot{x} + \frac{f^2}{\alpha} \operatorname{sgn}(x) \sin[\alpha(1 - x \operatorname{sgn}(x))] = \frac{f^2}{\eta} \cos[\alpha(1 - x \operatorname{sgn}(x))] \ddot{\psi}(\tau) + \ln(\varepsilon) \dot{x}^2 \delta(x) \operatorname{sgn}(\dot{x}) \quad (3)$$

όπου $x = \theta/\alpha$ η κανονικοποιημένη γωνία στροφής, $\ddot{\psi}(\tau) = \ddot{u}_g(\tau)/A_g$ η χρονιοστορία της εδαφικής επιτάχυνσης κανονικοποιημένη ως προς το εύρος της, η η αντίσταση σε λικνισμό (ένας δείκτης ραδιότητας ή εύρους της διέγερσης) που ισούται με το λόγο της γωνίας ραδιότητας α ως προς την μέγιστη εδαφική επιτάχυνση σε όρους g

$$\eta = \alpha \cdot g / A_g \quad (4)$$

και f η αδιάστατη συχνότητα (παράμετρος κλίμακας/μεγέθους του λικνιζόμενου σώματος)

$$f = \rho T_p / 2 \quad (5)$$

Με ρ συμβολίζεται η χαρακτηριστική συχνότητα του συστήματος (για ορθογωνική γεωμετρία $\rho = \sqrt{3g/4R}$), και T_p η δεσπόζουσα περίοδος της διέγερσης η οποία υπολογίζεται σύμφωνα με τις μεθόδους των Mavroeidis et al. (2004) και Baker (2007). Τιμές για τις δεσπόζουσες περιόδους είναι διαθέσιμες στις δημοσιεύσεις των Voyagaki et al (2014) και Βαχαβιώλος (2013), και δεν επαναλαμβάνονται εδώ χάριν συντομίας. Αξίζει να σημειωθεί ότι μεγάλες τιμές της χαρακτηριστικής συχνότητας ρ αντιστοιχούν σε μικρό μέγεθος λικνιζόμενου σώματος που εν γένει ανατρέπεται ευκολότερα. Αντίστοιχα μεγάλες τιμές της δεσπόζουσας περιόδου διέγερσης αντιστοιχούν σε μεγαλύτερη διάρκεια των παλμών επιτάχυνσης και αντίστοιχα σε ευκολότερη ανατροπή. Συνεπώς όσο μεγαλύτερη είναι η παράμετρος f τόσο περισσότερα συστήματα αναμένεται να ανατραπούν.

Με $\tau = t / (T_p / 2)$ συμβολίζεται ο αδιάστατος χρόνος, κανονικοποιημένος ως προς την δεσπόζουσα περίοδο της διέγερσης.

Από την Εξ. (3) προκύπτει ότι οι παράμετροι του προβλήματος έχουν περιοριστεί στις εξής τέσσερις: ε , α , f και η .

Υποβάλλοντας τους 25 συνδυασμούς γεωμετρίας του Πίνακα 1 στις 180 σεισμικές κινήσεις που προαναφέρθηκαν, προκύπτουν 4500 συνδυασμοί απόκρισης για κάθε τιμή του συντελεστή αποκατάστασης ε , που καλύπτουν ένα μεγάλο εύρος τιμών για την αντοχή σε ανύψωση η από 0.03 έως 1 (τιμές του συντελεστή $\eta > 1$ που αντιστοιχούν σε μη λικνιζόμενα συστήματα δεν λαμβάνονται υπόψη), και για τη διάρκεια του παλμού f από 0.12 έως 17.50.

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων απεικονίζονται στο Σχήμα 2 σε χώρο η , f για συντελεστή αποκατάστασης $\varepsilon=0.80$ και τιμές T_p σύμφωνα με τις μεθόδους των Baker (2007) και Mavroeidis et al (2004). Με λευκό χρώμα συμβολίζονται τα συστήματα που δεν ανατρέπονται, ενώ με κόκκινο χρώμα αυτά που ανατρέπονται.

Παρατηρούμε ότι: (1) όπως στην περίπτωση των απλών παλμών (Voyagaki et al 2013, 2014) τα συστήματα στο πάνω αριστερά τμήμα των γραφημάτων δεν ανατρέπονται, (2) τα συστήματα που ανατρέπονται έχουν μεγάλες χαρακτηριστικές συχνότητες και μικρή αντοχή σε σχέση με τη διέγερση, (3) υπάρχουν συστήματα με τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά που δεν ανατρέπονται. Μια πιθανή ερμηνία για τη συγκεκριμένη συμπεριφορά είναι η παρουσία υψίσυχων παλμών μεγάλης επιτάχυνσης στην αρχή της χρονιοιστορίας με αποτέλεσμα την έναρξη λικνισμού χαμηλού εύρους και μεγάλου αριθμού κρούσεων πριν την άφιξη των κυρίως παλμών.

Ένα λογικό άνω όριο των συστημάτων που ανατρέπονται δίνεται από την εξίσωση

$$\eta_w = (1 - e^{-f})^2 \quad (6\alpha)$$

η οποία περιγράφεται με μπλε γραμμή στο Σχήμα 3α. Για μεγάλα η το κριτήριο γίνεται πολύ συντηρητικό και μπορεί να αντικατασταθεί από την Εξίσωση (6β)

$$\eta_w \cong 3/4 \quad (6\beta)$$

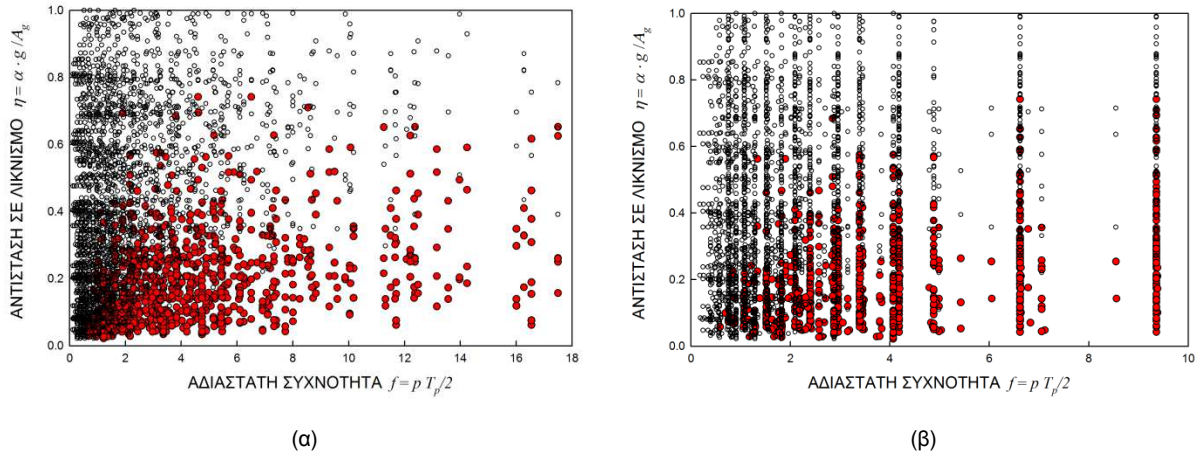
δεδομένου ότι δεν υπάρχουν συστήματα που ανατρέπονται αριστερά και πάνω από αυτές τις γραμμές. Η ακρίβεια του συγκεκριμένου κριτηρίου εξαρτάται από το μέγεθος του δείγματος που εξετάζουμε σε όρους αριθμού σεισμικών κινήσεων και συνδυασμών λικνιζόμενων συστημάτων. Για παράδειγμα οι Voyagaki et al (2014) λαμβάνοντας υπόψη μόνο το 7% του

παρόντος δείγματος (320 συνδυασμούς) κατέληξαν στο κριτήριο που περιγράφεται με μωβ καμπύλη στο Σχήμα 3α και δίνεται από την εξίσωση

$$\eta_w = 2 - \frac{2}{f} \ln[2e^{\frac{f}{2}} - 1] \leq 3/4 \quad \& \quad f_w \geq 3/4 \quad (7)$$

Αντίστοιχα, για 1600 συνδυασμούς ο Βαχαβιώλος (2013) εξήγαγε ένα κριτήριο παραβολικής μορφής (πράσινη καμπύλη στο Σχήμα 3α)

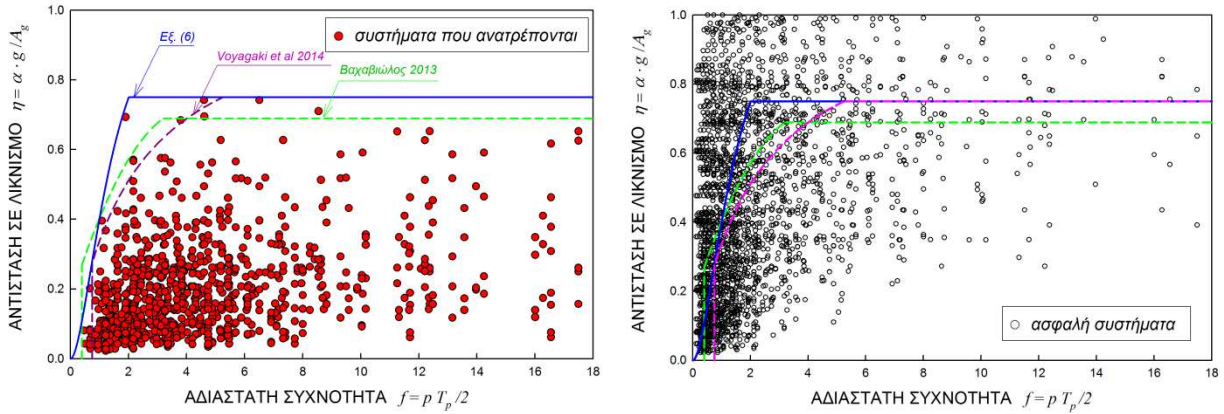
$$\eta_w = -0.032f^2 + 0.265f + 0.169 \leq 2/3 \quad \& \quad f_w \geq 0.4 \quad (8)$$



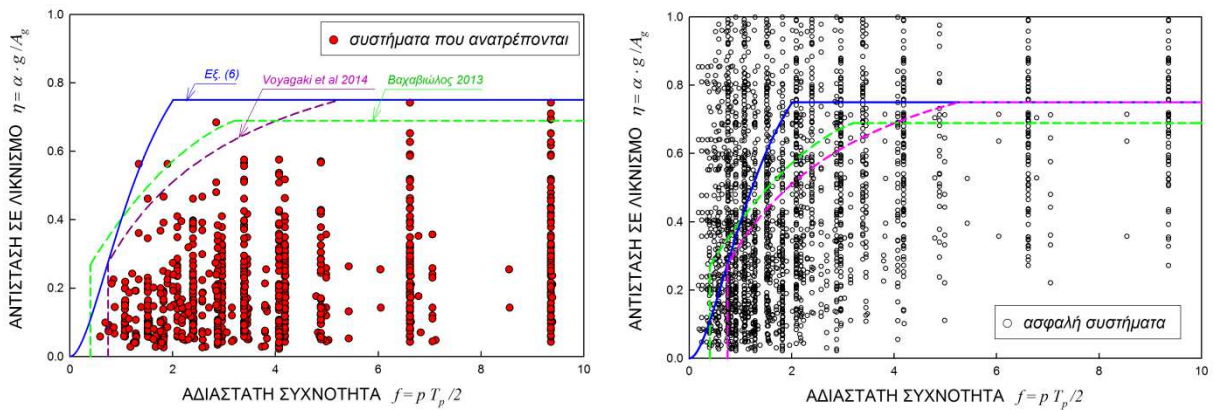
Σχήμα 2. Αριθμητική διερεύνηση ανατροπής λικνιζόμενου σώματος υπό πραγματικές καταγραφές κοντινού πεδίου. Κανονικοποίηση των αποτελεσμάτων με τη μέγιστη εδαφική επιτάχυνση A_g . T_p από (α) Baker (2007), (β) Mavroeidis et al (2004). Με κόκκινο χρώμα συμβολίζονται τα συστήματα που ανατρέπονται, ενώ με λευκό τα ευσταθή συστήματα ($\varepsilon = 0.8$).

Figure 2. Numerical investigation of overturning to near-fault earthquake recordings. Normalization of results with peak ground acceleration A_g . T_p after (α) Baker 2007, (β) Mavroeidis et al (2004). Red bullets denote overturning; white bullets denote surviving systems ($\varepsilon = 0.8$)

Τα παραπάνω κριτήρια αντιστοιχούν σε ένα άνω όριο για τα συστήματα που ανατρέπονται. Μπορούμε, δηλαδή, μέσω των Εξ. (6)-(8), να αποκλείσουμε την πιθανότητα ανατροπής των ικανά *μεγάλων* ή *ανθεκτικών* συστημάτων, όπως αυτά ορίζονται από τις εκφράσεις στις εξισώσεις (4) και (5). Ωστόσο, το αντίθετο δεν ισχύει καθώς υπάρχουν αρκετά συστήματα που επιβιώνουν (για τους λόγους που προαναφερθηκαν) που απεικονίζονται κάτω από αυτά τα όρια (Σχήμα 3β). Οι εξισώσεις (6) έως (8) μπορούν να εφαρμοσθούν ανεξαρτήτως μεθόδου υπολογισμού της δεσπόζουσας περιόδου όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.



Σχήμα 3. Προτεινόμενα όρια ανατροπής: (α) δεν υπάρχουν συστήματα που ανατρέπονται πάνω από το όριο ανατροπής, (β) υπάρχουν συστήματα που επιβιώνουν κάτω από το όριο ανατροπής (T_p από Baker (2007), $\varepsilon = 0.8$).
 Figure 3. Safety walls: (a) no system will overturn above safety wall, (b) systems may survive rocking below wall (T_p after Baker (2007), $\varepsilon = 0.8$)



Σχήμα 4. Προτεινόμενα όρια ανατροπής: (α) δεν υπάρχουν συστήματα που ανατρέπονται πάνω από το όριο ανατροπής, (β) υπάρχουν συστήματα που επιβιώνουν κάτω από το όριο ανατροπής (T_p από Mavroudis et al (2004), $\varepsilon = 0.8$).
 Figure 4. Safety walls: (a) no system will overturn above safety wall, (b) systems may survive rocking below wall (T_p after Mavroudis et al (2004), $\varepsilon = 0.8$)

Ακολούθως, τα αποτελέσματα της ανάλυσης παρουσιάζονται σε όρους ισοδύναμης αντίστασης σε ανύψωση η^* που αντιστοιχεί σε κανονικοποίηση της γωνίας ραδινότητας α με την μέγιστη εδαφική επιτάχυνση ενός ισοδύναμου ορθογωνικού παλμού, $\alpha_{g,rect}$, διάρκειας $T_p/2$ και ταχύτητας ίσης με τη μέγιστη του σεισμικού σήματος V_g , και ισούται με:

$$\eta^* = \alpha / \alpha_{g,rect} = \alpha / [2 V_g / (T_p g)] \quad (9)$$

Τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων βάσει αυτής της εναλλακτικής κανονικοποίησης απεικονίζονται στο Σχήμα 5. Σε αντιστοιχία με το προηγούμενο σχήμα, με πράσινο χρώμα συμβολίζονται τα συστήματα που δεν ανατρέπονται, ενώ με κόκκινο χρώμα αυτά που ανατρέπονται. Παρατηρούμε ότι η συγκεκριμένη κανονικοποίηση είναι πλεονεκτικότερη από την άποψη ότι μας επιτρέπει να ορίσουμε απλούστερες και αρκετά σαφείς περιοχές ανατροπής και ευστάθειας μέσω απλών γραμμικών σχέσεων. Όπως

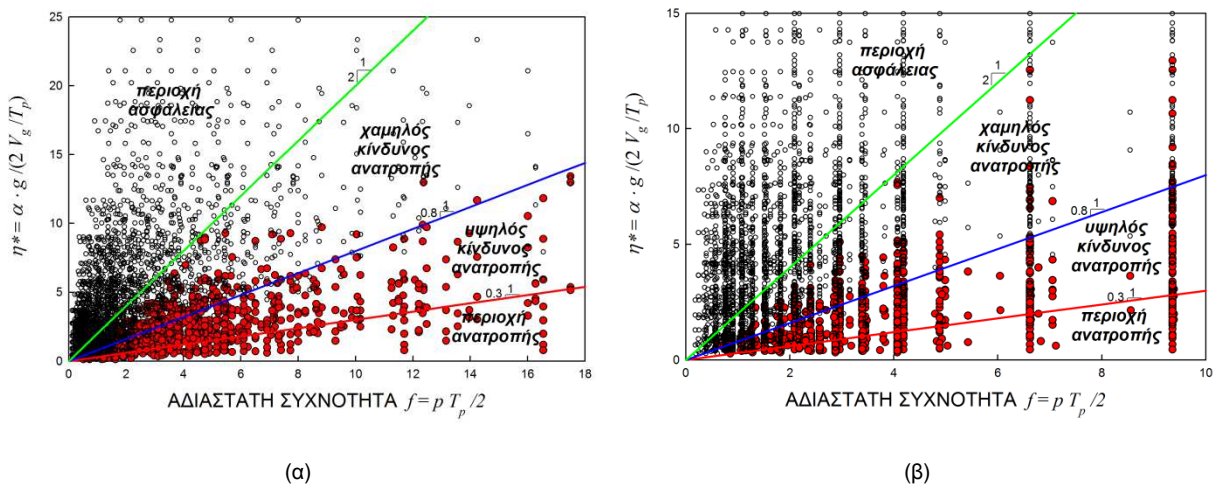
φαίνεται στο Σχήμα 5 μπορούμε να ξεχωρίσουμε με αρκετή σαφήνεια τέσσερις επιμέρους περιοχές:

- (1) την περιοχή ανατροπής (όπου σχεδόν όλα τα συστήματα ανατρέπονται)
- (2) την περιοχή υψηλού κινδύνου (όπου τα περισσότερα συστήματα ανατρέπονται)
- (3) την περιοχή χαμηλού κινδύνου (όπου τα περισσότερα συστήματα επιβιώνουν)
- (4) την περιοχή ευστάθειας (όπου σχεδόν κανένα σύστημα δεν ανατρέπεται).

Τα όρια αυτών των περιοχών περιγράφονται από την παρακάτω απλή σχέση αναλογίας:

$$\eta^* = \chi f \quad (10)$$

Η τιμή $\chi = 0.3$ αντιστοιχεί στο όριο μεταξύ των περιοχών της σχεδόν σίγουρης ανατροπής και του υψηλού κινδύνου, $\chi = 0.8$ στο όριο μεταξύ των περιοχών υψηλού και χαμηλού κινδύνου, και $\chi = 2$ στο όριο μεταξύ των περιοχών χαμηλού κινδύνου και ευστάθειας. Η συγκεκριμένη κανονικοποίηση διαχωρίζει καλύτερα τα ευσταθή από τα ανατρεπόμενα συστήματα συγκριτικά με την αντίστοιχη που βασίζεται στην επιτάχυνση, και συνεπώς κρίνεται ως πιο ορθολογική.



Σχήμα 5. Αριθμητική διερεύνηση ανατροπής λικνιζόμενου σώματος υπό πραγματικές καταγραφές κοντινού πεδίου. Κανονικοποίηση των αποτελεσμάτων με τη μέγιστη εδαφική ταχύτητα V_g . T_p από (α) Baker (2007), (β) Mavroeidis et al (2004). Με κόκκινο χρώμα συμβολίζονται τα συστήματα που ανατρέπονται, ενώ με λευκό τα ευσταθή, ($\varepsilon = 0.8$).

Figure 5. Numerical investigation of overturning under near-fault seismic motions. Normalization of results with peak ground velocity V_g . T_p after (α) Baker 2007, (β) Mavroeidis et al (2004). Red colour denotes overturning, white colour denotes safety ($\varepsilon = 0.8$)

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από τις αριθμητικές αναλύσεις για πραγματικές καταγραφές εγγύς πεδίου προέκυψαν απλά κριτήρια για τα συστήματα που ανατρέπονται. Η ύπαρξη υψηλών εδαφικών επιταχύνσεων στην αρχή της σεισμικής καταγραφής, οδηγεί αναπόφευκτα σε πολλαπλές κρούσεις και γωνιακή ταχύτητα με τυχαίο πρόσημο πριν την άφιξη του κυρίως παλμού. Αυτό μπορεί να είναι ευεργετικό και να οδηγήσει σε ευστάθεια ακόμη και για συστήματα χαμηλής αντοχής και υψηλής συχνότητας. Τα κριτήρια των Εξισώσεων (6), (7) και (8) εξασφαλίζουν την ευστάθεια καθώς δεν βρέθηκαν συστήματα που ανατρέπονται πέρα από αυτά τα όρια. Μέσω αυτών των παρατηρήσεων, οδηγούμαστε στο συμπέρασμα ότι κινήσεις εγγύς πεδίου με αδιάστατη επιτάχυνση A_g/g μικρότερη του 75% της γωνίας ραδινότητας α δεν οδηγούν σε ανατροπή (Εξ. 6 και 7). Επίσης, κινήσεις εγγύς πεδίου με δεσπόζουσα περίοδο μικρότερη του 40% της

χαρακτηριστικής περιόδου του λικνιζόμενου σώματος δεν προκαλούν ανατροπή (Εξ. 8). Για όλες τις υπόλοιπες περιπτώσεις, τα συστήματα που ανατρέπονται φράσσονται από μια απλή καμπύλη η μορφή της οποίας μπορεί να είναι παραβολική, εκθετική ή σιγμοειδής (Εξ. 6-8). Η ακρίβεια των κριτηρίων φαίνεται να εξαρτάται από το μέγεθος του δείγματος που λαμβάνεται υπόψη στις αναλύσεις.

Αντικαθιστώντας τον δείκτη η με ένα ισοδύναμο δείκτη αντίστασης σε ανύψωση η^* , ο οποίος προκύπτει από κανονικοποίηση με τα V_g και T_p της χρονοιστορίας, μπορούμε να διαχωρίσουμε τη πιθανότητα ανατροπής ενός συστήματος σε 4 περιοχές: (1) Ασφαλής Περιοχή (*Safe Area*), (2) Περιοχή Χαμηλού Κινδύνου (*Low Risk Area*), (3) Περιοχή Υψηλού Κινδύνου (*High Risk Area*), και (4) Περιοχή Ανατροπής (*Overturning Area*). Οι περιοχές αυτές διαχωρίζονται βάσει του αδιάστατου συντελεστή χ ($= 0.3, 0.8, 2$) της εξίσωσης (10). Η συγκεκριμένη κανονικοποίηση διαχωρίζει καλύτερα τα ευσταθή από τα ανατρεπόμενα συστήματα συγκριτικά με την αντίστοιχη που βασίζεται στην επιτάχυνση, και συνεπώς κρίνεται ως πιο ορθολογική.

6. ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα έρευνα έχει συγχρηματοδοτηθεί από την Ελλάδα και την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) μέσω του Επιχειρησιακού Προγράμματος “Ανάπτυξη Ανθρώπινου Δυναμικού” του Εθνικού Στρατηγικού Πλαισίου Αναφοράς (ΕΣΠΑ) 2007-2013 – Δράση: «Ενίσχυση της απασχόλησης ερευνητών σε επιχειρήσεις»

7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Βαχαβιώλος, Γ. (2013), “Έλεγχος ανατροπής στερεού σώματος σε σεισμικές κινήσεις κοντινού πεδίου” Διπλωματική Εργασία Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης, ΕΑΠ.
- Baker, W. J. (2007), "Quantitative classification of near-fault ground motions using wavelet analysis" *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 97, No. 5, pp. 1486–1501.
- Dimitrakopoulos, E., DeJong, M. (2012) “Revisiting the rocking block: closed-form solutions and similarity laws” *Proc. of the Royal Society*. Vol. 468, No. 2144, pp. 2294-2318.
- Housner, G.W. (1963) "The behavior of inverted pendulum structures during earthquakes" *BSSA*, Vol. 53 No. 2, pp. 403-417.
- Ishiyama, Y. (1982), "Motions of Rigid Bodies and Criteria for Overturning by Earthquake Excitations". *EESD*, Vol. 10, pp. 635 – 650.
- Makris, N., Vassiliou, M.F. (2012). “Sizing the slenderness of free-standing rocking columns to withstand earthquake shaking.” *Archive of Applied Mechanics*, Vol. 82, pp.1497-1511.
- Mavroeidis, G., Dong, Papageorgiou, A. (2004). “Near-Fault Ground Motions & the Response of Elastic and Inelastic Single-Degree-of-Freedom (SDOF) Systems.” *EESD*. Vol. 33, No. 9, pp. 1023-1049.
- Prieto, F., Lourenço, P.B. & Oliveira, C.S. (2004). Impulsive Dirac-delta forces in the rocking motion. *EESD*. Vol. 33, No. 7, pp. 839–857.
- Psycharis, I.N. & Jennings, P.C. (1983). “Rocking of slender bodies allowed to uplift.” *EESD*. Vol. 11, pp. 57-76.
- Shi, B., Anooshehpour, A., Zheng, Y. & Brune, J.N. (1996). “Rocking and overturning of precariously balanced rocks by earthquakes.” *Bulletin of the Seismological Society of America*. Vol. 86, No. 5, pp. 1364-1371.
- Spanos, P.D. & Koh, A.S. (1984). “Rocking of rigid bodies due to harmonic shaking.” *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE. Vol. 110, No. 11, pp. 1627-1642.
- Voyagaki, E., Psycharis, I. N., Mylonakis, G. (2013). “Rocking Response & Overturning Criteria for Free Standing Rigid Blocks to Single – Lobe Pulses” *SDEE*, Vol. 46, pp. 85–95
- Voyagaki, E., Psycharis I.N., Mylonakis, G. (2014). “Complex Response of a Rocking Block to a Full-Cycle Pulse.” *Journal of Engineering Mechanics ASCE*, doi: 10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0000712
- Yim, C.S., Chopra, A., Penzien J. (1980) "Rocking Response of Rigid Blocks to Earthquakes", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Vol. 8, pp. 565–587.