

**ΜΕΤΡΑ ΕΝΤΑΣΗΣ ΑΠΟΤΙΜΗΣΗΣ ΤΗΣ ΛΙΚΝΙΣΤΙΚΗΣ  
ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΕΞΥΠΗΡΕΤΗΤΩΝ ΜΕΓΑΛΗΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ  
ΙΣΧΥΟΣ ΣΕ ΜΕΤΑΛΛΙΚΑ ΚΤΙΡΙΑ**

**Χρήστος Γ. Λαχανάς**

Μεταδιδακτορικός Ερευνητής

Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Ζωγράφου, Αθήνα, Ελλάδα

e-mail: [lahanasch@central.ntua.gr](mailto:lahanasch@central.ntua.gr)

**Δημήτριος Βαμβάτσικος**

Αναπληρωτής Καθηγητής

Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Ζωγράφου, Αθήνα, Ελλάδα

e-mail : [divamva@mail.ntua.gr](mailto:divamva@mail.ntua.gr)

**Αθανασία Κ. Καζαντζή**

Ακαδημαϊκή Υπότροφος

Διεθνές Πανεπιστήμιο της Ελλάδος

Σέρρες, Ελλάδα

e-mail : [kazantzi@ihu.gr](mailto:kazantzi@ihu.gr)

## **1. ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Διερευνάται η χρήση εναλλακτικών μέτρων έντασης για την εκτίμηση της λικνιστικής απόκρισης μη δομικών στοιχείων και συγκεκριμένα εξυπηρετητών μεγάλης υπολογιστικής ισχύος σε μεταλλικά κτίρια εφαρμόζοντας τη θεωρία λικνισμού δισδιάστατου στερεού σώματος. Η εμπειρία πρόσφατων σεισμικών γεγονότων σε αναπτυγμένες χώρες έχει δείξει ότι οι ζημιές και οι απώλειες επικεντρώνονται, στην περίπτωση των σύγχρονων μεταλλικών κτιρίων, πρωτίστως στα μη δομικά στοιχεία και τα περιεχόμενα τους, τα οποία όχι σπάνια αφορούν αντικείμενα και εξοπλισμό μεγάλης αξίας. Η επιλογή του κατάλληλου μέτρου έντασης αποτελεί βασική προϋπόθεση για την εξασφάλιση της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων σε αναλύσεις σεισμικής διακινδύνευσης για οποιαδήποτε κατασκευή ή δομικό στοιχείο. Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η διερεύνηση της αποτελεσματικότητας και επάρκειας εναλλακτικών μέτρων έντασης για το σχεδιασμό και την αποτίμηση της σεισμικής απόκρισης περιεχομένων κτιρίων με λικνιστική απόκριση.

Για το σκοπό αυτό πραγματοποιήθηκαν μη γραμμικές δυναμικές αναλύσεις με χρήση του απλού μοντέλου λικνιζόμενου στερεού σώματος για τυπικούς εξυπηρετητές μεγάλης υπολογιστικής ισχύος απλά εδραζόμενους σε όροφο μεταλλικού κτιρίου. Για τις αναλύσεις χρησιμοποιήθηκαν χρονοϊστορίες επιταχύνσεων ορόφου που καταγράφηκαν κατά τη διάρκεια 34 πραγματικών σεισμικών γεγονότων στην οροφή ενοργανομένων μεταλλικών κτιρίων. Μέσω της κατάλληλης επεξεργασίας των αποτελεσμάτων αξιολογήθηκαν διαφορετικά μέτρα έντασης ως προς τη δυνατότητά τους να περιγράψουν τη σεισμική απαίτηση στα διάφορα στάδια της λικνιστικής απόκρισης.

## 2. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η αξία των μη δομικών στοιχείων και των περιεχομένων μιας κατασκευής υπερβαίνει σε πολλές περιπτώσεις τη συνολική αξία της ίδιας της κατασκευής. Χαρακτηριστικές περιπτώσεις τέτοιου είδους κατασκευών αποτελούν τα μουσεία καθώς και τα κτίρια που περιέχουν εξοπλισμό υψηλής αξίας σχετικό με τη λειτουργία των δικτύων τηλεπικοινωνίας, ενέργειας και γενικά κρίσιμων υποδομών για τη λειτουργία μίας σύγχρονης κοινωνίας. Για τη σεισμική αποτίμηση των εν λόγω κτιρίων, κρίσιμη παράμετρος είναι όχι μόνο η σεισμική απόκριση της κατασκευής αλλά και των περιεχομένων αυτής, ώστε να εξασφαλίζεται η απρόσκοπτη λειτουργία τους καθώς και να αποτρέπονται βλάβες οι οποίες ενδέχεται να αποφέρουν σημαντικό οικονομικό και ηθικό-κοινωνικό κόστος (π.χ., εκθέματα αρχαιολογικών ευρημάτων). Ως εκ τούτου, αρκετές σύγχρονες επιστημονικές εργασίες (π.χ., [1–3]) επικεντρώνονται στην μελέτη της σεισμικής απόκρισης των μη δομικών περιεχομένων κτιρίων. Επίσης, κανονιστικές οδηγίες (π.χ., [4]) επικεντρώνονται στη σεισμική απόκριση των μη δομικών περιεχομένων.

Για την εκτίμηση της σεισμικής τρωτότητας και κατ' επέκταση της σεισμικής διακινδύνευσης κατασκευών ή περιεχομένων ακολουθώντας τη μεθοδολογία της αντισεισμικής μηχανικής με βάση την επιτελεστικότητα (performance-based earthquake engineering - PBEE), κρίσιμη παράμετρο αποτελεί η επιλογή ενός κατάλληλου σεισμικού μέτρου έντασης (Intensity Measure - IM). Ένα IM αποτελεί στην ουσία εκείνη τη διαμεταβλητή που συνδέει τη σεισμική επικινδυνότητα (seismic hazard) με τη δομική τρωτότητα (structural fragility) ώστε να εκτιμηθεί η σεισμική διακινδύνευση (seismic risk) και ακολούθως οι βλάβες ή απώλειες [5-6]. Επί της ουσίας, ένα IM είναι η βαθμωτή μεταβλητή (π.χ., μέγιστη εδαφική επιτάχυνση, φασματική επιτάχυνση, μέγιστη εδαφική μετακίνηση κ.ο.κ) η οποία συνδέει το επιστημονικό πεδίο της τεχνικής σεισμολογίας (σεισμολόγους) με το επιστημονικό πεδίο της δομικής μηχανικής (μηχανικούς) στη διαδικασία εκτίμησης της σεισμικής διακινδύνευσης. Γίνεται κατανοητή λοιπόν η κομβική σημασία που έχει στην όλη διαδικασία η επιλογή ενός κατάλληλου IM, γεγονός το οποίο έχει οδηγήσει σε πληθώρα σχετικών επιστημονικών εργασιών, οι οποίες ερευνούν την καταλληλότητα εναλλακτικών IMs σε διάφορα δομικά συστήματα (π.χ., [6–9]). Εντός του πλαισίου της PBEE, ένα IM θεωρείται κατάλληλο όταν (α) δύναται να προσδιοριστεί για αυτό η σεισμική επικινδυνότητα (hazard computability) (β) είναι αποδοτικό (efficient) και (γ) είναι επαρκές (sufficient) [6].

Στον αντίποδα των έως τώρα σχετικών εργασιών για την εύρεση βέλτιστων IMs, που ως επί το πλείστον αφορούν κατασκευές οι οποίες εδράζονται-θεμελιώνονται επί εδάφους, η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στην διερεύνηση εναλλακτικών IMs για την περίπτωση μη δομικών περιεχομένων κτιρίων. Συγκεκριμένα, εξετάζονται εξυπηρετητές μεγάλης ισχύος (Server Racks - SRs) για περιπτώσεις όπου αυτοί ευρίσκονται ελεύθερα ιστάμενοι

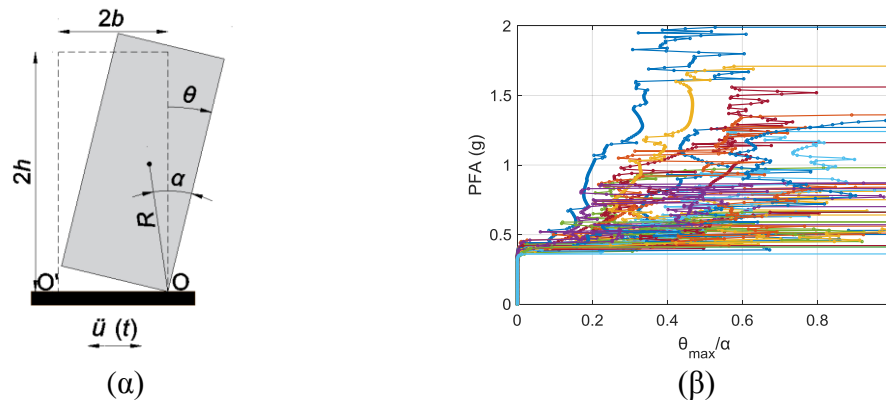
σε όροφο μεταλλικού κτιρίου. Τα SRs αποτελούν κρίσιμα δομικά περιεχόμενα υψηλής οικονομικής και λειτουργικής αξίας, ενώ, λόγω κατασκευής, η σεισμική τους απόκριση προσεγγίζεται καλύτερα με τη θεωρία της σεισμικής απόκρισης ελεύθερα ισταμένου λικνιζόμενου στερεού σώματος. Για το σκοπό αυτό παρουσιάζεται εδώ μία συγκριτική μελέτη εναλλακτικών IMs για την περίπτωση ελεύθερα ισταμένων SRs ώστε να προταθούν τα κατά το δυνατόν βέλτιστα IMs για χρήση σε μελέτες διακινδύνευσης λικνιζόμενων μη δομικών περιεχομένων κτιρίων. Θα πρέπει να επισημανθεί ότι εφόσον μιλάμε για περιεχόμενα κτιρίων τα εξεταζόμενα IMs μπορούν να εξαχθούν μέσω της δυναμικής ανάλυσης του κτιρίου στο οποίο ευρίσκονται τα εν λόγω περιεχόμενα. Στη γενική αυτή περίπτωση, τα IMs των περιεχομένων αποτελούν παραμέτρους απόκρισης (Engineering Demand Parameters - EDPs) κατά τη δυναμική ανάλυση του κτιρίου στο οποίο εμπεριέχονται.

### 3. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ, ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ, ΚΑΙ ΕΞΕΤΑΖΟΜΕΝΑ ΜΕΤΡΑ ΕΝΤΑΣΗΣ

Το προσομοίωμα το οποίο χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία είναι αυτό του επίπεδου λικνιζόμενου στερεού σώματος εδραζόμενου ελεύθερα επί απαραμόρφωτης βάσης (Σχ. 1α). Το εν λόγω προσομοίωμα βασίζεται σε δύο βασικές παραδοχές. Η πρώτη αφορά τη μη ολίσθηση του σώματος επί της βάσης του κατά τη διάρκεια της σεισμικής του απόκρισης, ενώ η δεύτερη αφορά στη μη αναπήδηση του επί της βάσης του κατά την πρόσκρουση σε αυτή κατά τη διάρκεια του λικνισμού. Στην τυπική του περίπτωση, το λικνιζόμενο σώμα είναι ορθογώνιο με συνολικό πλάτος  $2b$  και συνολικό ύψος  $2h$  (Σχ. 1α). Η εξίσωση κίνησης για το συγκεκριμένο προσομοίωμα προτάθηκε απ' τον Housner το 1963 [10]. Οι παράμετροι οι οποίοι καθορίζουν την απόκριση του σώματος είναι η γωνία ραδινότητας  $\alpha = \tan^{-1}(b/h)$ , η χαρακτηριστική συχνότητα  $p = \sqrt{(3g)/(4R)}$ , όπου  $R = \sqrt{b^2 + h^2}$  είναι η ημι-διαγώνιος του σώματος, και ο συντελεστής ανάπαλσης  $\eta$ , ο οποίος εκφράζει την απώλεια ενέργειας σε κάθε πρόσκρουση του σώματος στη βάση του κατά τη διάρκεια της λικνιστικής του απόκρισης. Για την τελευταία παράμετρο, χρησιμοποιήθηκε εδώ η προτεινόμενη από τον Housner [10] σχέση  $\eta = 1 - (3/2) \sin^2(\alpha)$  η οποία προσφέρει μια εκτίμηση του λόγου των γωνιακών ταχυτήτων του σώματος αμέσως πριν και αμέσως μετά την πρόσκρουση. Από τις λοιπές παραμέτρους, η γωνία  $\alpha$  αποτελεί δείκτη του σχήματος του σώματος, ενώ η χαρακτηριστική συχνότητα  $p$  δείκτη του μεγέθους του. Επιπρόσθετα, η χαρακτηριστική συχνότητα  $p$  αποτελεί έναν δείκτη των δυναμικών χαρακτηριστικών του σώματος, όμως σε κάθε περίπτωση δεν θα πρέπει να σχετίζεται με τη συχνότητα ταλάντωσης υστερητικών συστημάτων καθώς η ιδιοπερίοδος ταλάντωσης ενός λικνιζόμενου στερεού σώματος δεν είναι σταθερή [10-11]. Αν και πρόκειται για ένα απλοποιημένο δισδιάστατο προσομοίωμα, το υπό χρήση προσομοίωμα έχει βρεθεί να είναι αποτελεσματικό όταν η λικνιστική απόκριση εξετάζεται πιθανοτικά [12].

Υπό οριζόντια διέγερση, ο λικνισμός άρχεται όταν η επιτάχυνση διέγερσης στη βάση του σώματος υπερβεί τη βαρυτική δύναμη ευστάθειας ( $\ddot{u} > g \tan \alpha$ ). Ακολούθως της ανασήκωσης, το σώμα λικνίζεται μεταξύ των κορυφών της βάσης του O-O', ενώ η πιθανή ανατροπή του λαμβάνει χώρα όταν η γωνία στροφής  $\theta$  υπερβεί τη γωνία ραδινότητας  $\alpha$  ( $|\theta| \geq \alpha$ ). Στον Πίν. 1 παρουσιάζονται τα γεωμετρικά και δυναμικά χαρακτηριστικά των υπό εξέταση SRs. Πρόκειται για δισδιάστατα ανάλογα SRs σταθερού πλάτους βάσης 0,60m και διαφορετικού ύψους με βάση την προτυποποιημένη μονάδα ύψους των SRs, U, όπου κάθε μονάδα U αντιστοιχεί σε 1,75in ή 4.445cm καθαρού εσωτερικού ύψους. Έτσι,

το σώμα SR1 αναπαριστά ένα 37U SR, το σώμα SR2 ένα 42U SR και το σώμα SR3 ένα 47U SR.



Σχ. 1: (α) Προσομοίωμα επίπεδου λικνιζόμενου στερεού σώματος. (β) Αποτελέσματα ικανοτικής δυναμικής ανάλυσης στο σώμα SR1 με χρήση 34 σεισμικών καταγραφών επιταχύνσεων ορόφου προερχομένων από ενοργανομένα μεταλλικά κτίρια

Server Rack	2b (m)	2h (m)	$\alpha$ (rad)	R (m)	$p$ (s <sup>-1</sup> )	$\eta$
SR1	0,60	1,89	0,3547	0,86	2,9185	0,82
SR2	0,60	2,05	0,2847	1,07	2,6247	0,88
SR3	0,60	2,27	0,2584	1,17	2,5034	0,90

Πιν. 1: Γεωμετρικά και δυναμικά χαρακτηριστικά των υπό εξέταση λικνιζόμενων εξυπηρετητών μεγάλης υπολογιστικής ισχύος (SRs)

Για τον υπολογισμό της απόκρισης των SRs, πραγματοποιήθηκαν ικανοτικές δυναμικές ανάλυσεις (Incremental Dynamic Analyses - IDA) [13] με χρήση φυσικών σεισμικών καταγραφών οι οποίες προέρχονται από ενοργανομένα κτίρια στην Καλιφόρνια των ΗΠΑ [2-3]. Από το σύνολο των διαθέσιμων καταγραφών [2-3], επιλέχθηκαν 34 καταγραφές που προέρχονται από την οροφή ενοργανομένων μεταλλικών κτιρίων. Για την ανάλυση της σεισμικής απόκρισης λικνιζόμενου στερεού σώματος χρησιμοποιήθηκαν οι κώδικες που αναπτύχθηκαν από τον Vassiliou [14]. Η κλιμάκωση των καταγραφών έγινε με χρήση σταθερού βήματος επαύξησης στη μέγιστη επιτάχυνση ορόφου (Peak Floor Acceleration - PFA) ακολουθώντας τη μεθοδολογία των Lachanas and Vamvatsikos (2022) [15] για την εκτέλεση IDA σε λικνιστικούς ταλαντωτές. Ως μέτρο απόκρισης (Engineering Demand Parameter – EDP), χρησιμοποιήθηκε η μέγιστη απόλυτη γωνία στροφής του σώματος  $\theta_{max}$  κανονικοποιημένη ως προς τη ραδινότητα αυτού ( $\tilde{\theta} = \theta_{max}/\alpha$ ). Η κλιμάκωση των καταγραφών πραγματοποιήθηκε έως την τιμή PFA όπου παρατηρείται η πρώτη ανατροπή του σώματος ( $\tilde{\theta} \geq 1,00$ ) χωρίς να λαμβάνονται υπόψη πιθανές αναβιώσεις του σώματος (structural resurrection) για ανώτερες τιμές PFA [15]. Εν συνεχεία, τα αποτελέσματα των αναλύσεων σε όρους PFA- $\tilde{\theta}$  εκφράστηκαν και σε εναλλακτικά IM μέσω της επαναπροσαρμογής των αποτελεσμάτων στο εκάστοτε επιθυμητό IM. Στο Σχ. 1β παρουσιάζονται ενδεικτικά τα αποτελέσματα της IDA για το SR1.

Στον Πιν. 2 παρουσιάζονται τα τέσσερα υπό εξέταση εναλλακτικά μέτρα έντασης. Πέραν της επιτάχυνσης PFA, εξετάστηκε καταρχάς η μέγιστη ταχύτητα ορόφου (Peak Floor

Velocity -  $PfV$ ). Τα επόμενα δυο εξεταζόμενα IMs αφορούν εναλλακτικές εκδοχές του  $AvgS_a$ . Η  $AvgS_a$  αποτελεί των γεωμετρικό μέσο των φασματικών επιταχύνσεων σε ένα εύρος ιδιοπεριόδων. Το εν λόγω IM έχει προταθεί ως αποδοτικό και επαρκές μέτρο σεισμικής έντασης τόσο για κτίρια [6] όσο και για λικνιζόμενα σώματα [9]. Δεδομένης της φύσης του λικνιστικού ταλαντωτή και της διαρκώς μεταβαλλόμενης περιόδου ταλάντωσης, επιλέγεται ένα εύρος ιδιοπεριόδων με σταθερό βήμα 0,1s. Εξετάζονται δύο εναλλακτικές περιπτώσεις  $AvgS_a$ . Στην πρώτη περίπτωση ελήφθη υπόψη ένα σχετικά περιορισμένο εύρος ιδιοπεριόδων μεταξύ 0,1– 1,5s για τον υπολογισμό της  $AvgS_{a1}$  ενώ στη δεύτερη περίπτωση ένα πιο εκτεταμένο εύρος μεταξύ 0,1– 4,0s για τον υπολογισμό της  $AvgS_{a2}$ . Και τα 4 μέτρα σεισμικής έντασης επιλέχθηκαν ώστε να αποτελούν σχετικά απλές και εύκολα εξαγόμενες ποσότητες από την εκάστοτε σεισμική καταγραφή σε επίπεδο ορόφου ή τη δυναμική ανάλυση του κτιρίου–στη γενική περίπτωση απουσίας ενοργάνωσης του υπό μελέτη κτιρίου– στο οποίο εμπεριέχονται τα υπό μελέτη μη δομικά στοιχεία.

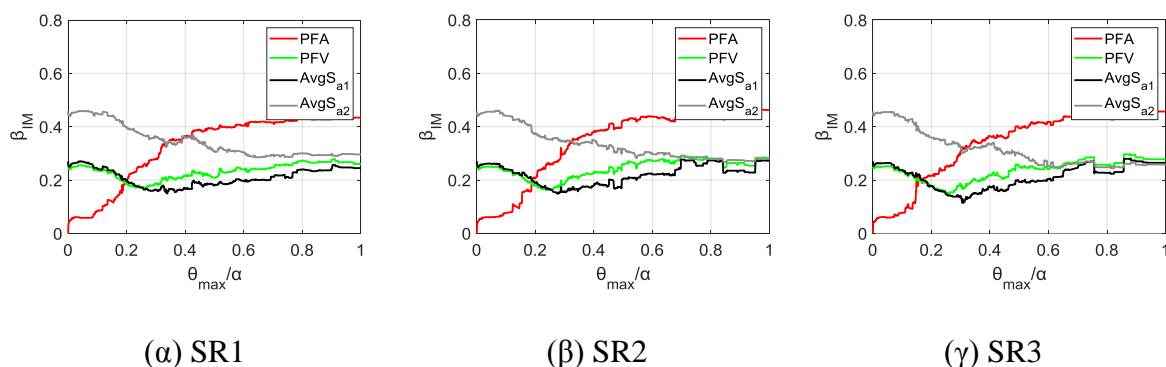
No.	Συμβολισμός (μονάδες)
1	$PFA$ (g)
2	$PfV$ (cm/s)
3	$AvgS_{a1}$ (g) εύρος ιδιοπεριόδων: (0,1– 1,5s)
4	$AvgS_{a2}$ (g) εύρος ιδιοπεριόδων: (0,1– 4,0s)

Πιν. 2: Υπό εξέταση μέτρα σεισμικής έντασης

#### 4. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΥΠΟ ΕΞΕΤΑΣΗ ΜΕΤΡΩΝ ΕΝΤΑΣΗΣ

Η σύγκριση των τεσσάρων εναλλακτικών μέτρων έντασης υλοποιήθηκε μέσω της σύγκρισης της αποδοτικότητας (efficiency) και της επάρκειας (sufficiency) τους. Στη βάση της προτεινόμενης μεθοδολογίας από τους Vamvatsikos and Cornell (2005) [16] ένα IM είναι αποδοτικό όταν παρουσιάζει χαμηλή διασπορά μεταξύ των καταγραφών για δεδομένες τιμές του EDP. Η διασπορά κάθε IM ( $\beta_{IM}$ ) υπολογίζεται, για δεδομένες τιμές  $\tilde{\theta}$  στο πλήρες εύρος της λικνιστικής απόκρισης [ $\tilde{\theta} = 0, \dots 1$ ], ως η τυπική απόκλιση του φυσικού λογαρίθμου των 34 τιμών IM. Στο Σχ. 2 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του ελέγχου αποδοτικότητας για τα τέσσερα IMs και τα τρία υπό διερεύνηση SRs. Όπως μπορεί εύκολα να εξαχθεί από την παρατήρηση του Σχ. 2, και για τα τρία υπό εξέταση λικνιζόμενα σώματα τα συμπεράσματα είναι ανάλογα. Συγκεκριμένα, η επιτάχυνση  $PFA$  αποτελεί το πλέον αποδοτικό IM για την απόκριση του σώματος στην περιοχή περίξ της έναρξης του λικνισμού ( $\tilde{\theta} < 0.10$ ). Το εν λόγω εύρημα μπορεί να χαρακτηριστεί ως αναμενόμενο, δεδομένης της άμεσης σύνδεσης της επιτάχυνσης στη βάση και της έναρξης λικνισμού του σώματος. Για το υπόλοιπο εύρος της λικνιστικής απόκρισης έως και την ανατροπή, η  $PFA$  είναι το λιγότερο αποδοτικό IM, με τιμές διασποράς που υπερβαίνουν το 0.40 κοντά στην ανατροπή του σώματος. Για την περίπτωση της  $AvgS_a$  παρατηρείται μεγαλύτερη αποδοτικότητα έναντι της  $PFA$  με εξαίρεση την περιοχή κοντά στην έναρξη του λικνισμού. Επίσης, παρατηρείται ότι και για τις τρεις περιπτώσεις SRs που εξετάστηκαν στην εν λόγω εργασία, η επιλογή ενός στενού εύρους ιδιοπεριόδων που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της  $AvgS_{a1}$  οδηγεί σε ένα πιο αποδοτικό IM έναντι

της χρήσης ενός πιο εκτεταμένου εύρους ιδιοπεριόδων που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της  $AvgS_{a2}$ . Το συγκεκριμένο εύρημα εντοπίζεται και για τα τρία υπό εξέταση SRs ωστόσο για τη γενίκευση του σε περιπτώσεις περιεχομένων με σημαντικά διαφοροποιημένη γεωμετρία απαιτείται πρόσθετη διερεύνηση. Το παραπάνω αποτελεί επί της ουσίας και το βασικό μειονέκτημα της  $AvgS_a$  για περιπτώσεις λικνιζόμενων σωμάτων, καθώς θα πρέπει να καθορίζεται ανά περίπτωση το κατάλληλο εύρος ιδιοπεριόδων. Τέλος, η ταχύτητα  $PFV$  παρουσιάζει σταθερή αποδοτικότητα με τιμές διασποράς που κυμαίνονται μεταξύ 0.18–0.25 σε όλο το εύρος του λικνισμού. Έτσι, ενώ υπολείπεται σε αποδοτικότητα έναντι της  $PFA$  στην περιοχή έναρξης της λικνιστικής απόκρισης, και πιθανόν έναντι κάποιας εκδοχής  $AvgS_a$  στην περιοχή γύρω από την ανατροπή του σώματος, μπορεί να θεωρηθεί το πλέον σταθερά αποδοτικό IM για τη γενική περίπτωση μελετών λικνιστικών περιεχομένων όπου ενδιαφέρει κυρίως η συνολική απόκριση του λικνιζόμενου στερεού σώματος και όχι μόνο κάποιο συγκεκριμένο στάδιο απόκρισης.

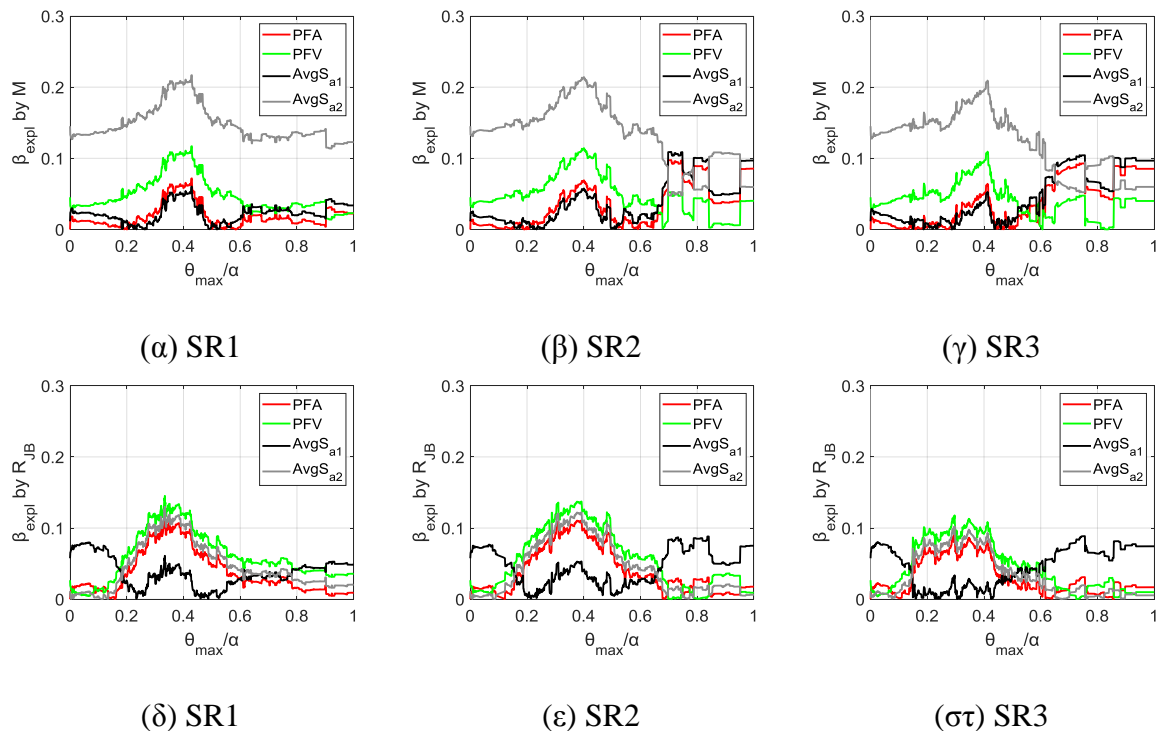


Σχ. 2: Αποτελέσματα ελέγχου αποδοτικότητας των εξεταζόμενων IMs για τους τρεις υπό μελέτη εξυπηρετητές μεγάλης υπολογιστικής ισχύος (SRs)

Εν συνεχεία πραγματοποιήθηκε ο έλεγχος επάρκειας (sufficiency) των εξεταζόμενων IMs. Η επάρκεια αφορά στην επιρροή που έχουν στη σεισμική απόκριση τα επιμέρους σεισμολογικά χαρακτηριστικά της σεισμικής διέγερσης. Ένα IM κρίνεται ως επαρκές όταν παρουσιάζει μικρή εξάρτηση από τα επιμέρους σεισμολογικά χαρακτηριστικά της σεισμικής διέγερσης, όπως για παράδειγμα το μέγεθος ή η απόσταση από το ρήγμα. Με άλλα λόγια, όταν χρησιμοποιείται ένα επαρκές IM, η σεισμική απόκριση ενός στερεού σώματος ή μιας κατασκευής εν γένει δεν επηρεάζεται σημαντικά όταν για την ανάλυση αυτής χρησιμοποιούνται σεισμικές καταγραφές με σημαντικές διαφοροποιήσεις ως προς τα προαναφερθέντα χαρακτηριστικά. Σε αντιστοιχία με τον έλεγχο αποδοτικότητας, ο έλεγχος επάρκειας γίνεται σε δεδομένες τιμές του  $\tilde{\theta}$  στο πλήρες εύρος της λικνιστικής απόκρισης [ $\tilde{\theta} = 0, \dots, 1$ ]. Με βάση την προτεινόμενη μεθοδολογία των Kazantzi and Vamvatsikos (2015) [6] ο έλεγχος γίνεται στη βάση της διασποράς η οποία εξηγείται (explained dispersion,  $\beta_{expl}$ ) από τις επιμέρους σεισμολογικές παραμέτρους των 34 χρησιμοποιούμενων σεισμικών καταγραφών επιταχύνσεων ορόφου. Ως σεισμολογικές παράμετροι ελήφθησαν υπόψη το μέγεθος του σεισμικού γεγονότος ( $M$ ) καθώς και η απόσταση της καταγραφής από τη διάρρηξη του ρήγματος ( $R_{JB}$ ). Συγκεκριμένα, για δεδομένες τιμές  $\tilde{\theta}$  η εξηγούμενη από τα  $M, R_{JB}$  διασπορά υπολογίζεται ως η τετραγωνική ρίζα του τετραγώνου της συνολικής διασποράς των 34 σεισμικών καταγραφών ( $\beta_{IM}^2$ ) μείον το τετράγωνο της μη εξηγήσιμης από την εκάστοτε παράμετρο διασποράς ( $\beta_{unexpl}^2$ ). Η  $\beta_{unexpl}$  υπολογίζεται ως η τυπική απόκλιση των υπολειμμάτων της γραμμικής παλινδρόμησης (regression residuals) έπειτα από εφαρμογή ενός μοντέλου γραμμικής

παλινδρόμησης μεταξύ των 34 τιμών  $\ln IM$  για δεδομένη τιμή  $\bar{\theta}$  και των τιμών  $M$  και  $R_{JB}$  των καταγραφών αντίστοιχα [9]. Για τις 34 σεισμικές καταγραφές που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία, το μέγεθος του σεισμικού γεγονότος κυμαίνεται μεταξύ  $M = 6-7,3$ , ενώ η απόσταση από τη διάρρηξη του ρήγματος μεταξύ  $R_{JB} = 18,7-112,7\text{km}$ .

Στο Σχ. 3 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του ελέγχου επάρκειας για τα τέσσερα εξεταζόμενα IMs και τις τρεις περιπτώσεις SRs. Συγκεκριμένα, παρουσιάζονται οι τιμές της  $\beta_{expl}$  από το μέγεθος  $M$  (Σχ. 3α-γ) και την απόσταση  $R_{JB}$  (Σχ. 3δ-στ). Όπως και στην περίπτωση του ελέγχου αποδοτικότητας, τα γενικά συμπεράσματα είναι σχετικώς κοινά και για τα τρία υπό εξέταση SRs, χωρίς απαραίτητα να τεκμαίρεται γενίκευσή τους για λικνιζόμενα σώματα οποιασδήποτε γεωμετρίας. Θα πρέπει επίσης να τονιστεί, ότι, όπως και για την αποδοτικότητα, για να χαρακτηριστεί ένα IM ως επαρκές δεν υφίσταται κάποιο προκαθορισμένο όριο για τη διασπορά  $\beta_{expl}$ , με το γενικό κανόνα να είναι πως όσο μικρότερη διαφορά εξηγείται από κάθε σεισμολογική παράμετρο τόσο πιο επαρκές το υπό εξέταση IM. Παρατηρώντας τα αποτελέσματα του ελέγχου επάρκειας για τα υπό εξέταση IMs, για την PFA παρέχονται ενδείξεις επάρκειας τόσο έναντι του μεγέθους  $M$  όσο και της απόστασης  $R_{JB}$  με τιμές  $\beta_{expl} \leq 0,10$  για το πλήρες εύρος της λικνιστικής απόκρισης. Μια μεγαλύτερη επιρροή του  $M$  διαπιστώνεται κοντά στην ανατροπή για τα SR2 και SR3 και για  $\bar{\theta} = 0,30 - 0,40$  έναντι  $R_{JB}$ . Η PFV παρουσιάζει ανάλογη εικόνα με την PFA όσον αφορά στην επάρκεια έναντι  $R_{JB}$ , ενώ έναντι  $M$  παρουσιάζει μεγαλύτερη εξάρτηση, με εξαίρεση τις μεγάλες στροφές του σώματος πλησίον της ανατροπής αυτού. Στην περίπτωση της  $AvgS_{a1}$  (περιορισμένο εύρος ιδιοπεριόδων) το μέγεθος παρουσιάζει σημαντικότερη επιρροή έναντι της απόστασης. Από την άλλη το εκτεταμένο εύρος ιδιοπεριόδων που χρησιμοποιείται στην περίπτωση της  $AvgS_{a2}$  οδηγεί εν γένει σε ένα πιο επαρκές IM έναντι  $M$ . Όσον αφορά την επάρκεια έναντι  $R_{JB}$  το εύρος των ιδιοπεριόδων επηρεάζει την επάρκεια του IM, με την επιλογή ενός εκτεταμένου εύρους ( $AvgS_{a2}$ ) να οδηγεί σε ένα λιγότερο επαρκές IM για την περιοχή κοντά στην έναρξη του λικνισμού και κοντά στην ανατροπή του σώματος, την ώρα που εμφανίζει μεγαλύτερη επάρκεια για τα ενδιάμεσα στάδια της απόκρισης  $\bar{\theta} = 0,20 - 0,50$ .





Σχ. 3: Διασπορά που εξηγείται από το μέγεθος ( $M$ ) ( $\alpha-\gamma$ ) και την απόσταση από τη διάρρηξη ( $R_{JB}$ ) ( $\delta-\sigma$ ) των εξεταζόμενων  $IMs$  για τους τρεις υπό μελέτη εξυπηρετητές μεγάλης υπολογιστικής ισχύος ( $SRs$ )

## 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα κύρια συμπεράσματα τα οποία προκύπτουν από την παρούσα εργασία συνοψίζονται στα εξής:

- Η μέγιστη επιτάχυνση ορόφου ( $PFA$ ) αποτελεί το πλέον αποτελεσματικό και επαρκές μέτρο σεισμικής έντασης ( $IM$ ) για μη δομικά περιεχόμενα κτιρίων σε περιπτώσεις που η έναρξη της λικνιστικής απόκρισης, και εν γένει οι μικρές γωνίες στροφής του σώματος είναι βαρύνουσας σημασίας. Το συγκεκριμένο συμπέρασμα αφορά περιπτώσεις σωμάτων τα οποία είναι επιρρεπή σε σημαντικές βλάβες ακόμη και για πολύ μικρές γωνίες στροφής. Τέτοιες περιπτώσεις απαντώνται και στη περίπτωση κάποιων εξυπηρετητών μεγάλης υπολογιστικής ισχύος ( $Server Racks - SRs$ ) που δύναται να υποστούν σημαντικές βλάβες με την έναρξη του λικνισμού, δηλαδή έστω και με ελάχιστη ανασήκωση του σώματος.
- Η μέγιστη ταχύτητα ορόφου ( $PfV$ ) αν και λιγότερο αποτελεσματικό μέτρο έντασης έναντι άλλων για συγκεκριμένες περιοχές της λικνιστικής απόκρισης (π.χ., έναντι της  $PFA$  κοντά στην έναρξη του λικνισμού) παρουσιάζει σταθερή αποτελεσματικότητα ως  $IM$  για το πλήρες εύρος της λικνιστικής απόκρισης. Ως προς την επάρκεια, παρατηρείται μια μεγαλύτερη εξάρτηση του  $PfV$  από το μέγεθος των σεισμικών καταγραφών σε σχέση με την απόσταση από την διάρρηξη χωρίς ωστόσο να παρουσιάζεται ανεπάρκεια έναντι και των δυο εξεταζόμενων σεισμικών παραμέτρων.
- Ο γεωμετρικός μέσος των φασματικών επιταχύνσεων σε ένα εύρος ιδιοπεριόδων ( $AvgS_d$ ), μπορεί να αποτελέσει βέλτιστη επιλογή τόσο από άποψη επάρκειας όσο και από άποψη αποτελεσματικότητας. Ωστόσο, παρουσιάζει το εγγενές μειονέκτημα της κατάλληλης επιλογής του εύρους ιδιοπεριόδων για την περίπτωση των λικνιστικών ταλαντωτών. Συγκεκριμένα για την περίπτωση των  $SRs$  που εξετάστηκαν, φαίνεται ένα σχετικά περιορισμένο εύρος ιδιοπεριόδων στην ( $AvgS_d$ ), να υπερτερεί έναντι ενός εκτεταμένου όσον αφορά την δημιουργία ενός αποδοτικού και επαρκούς  $IM$ .

Για τα παραπάνω συμπεράσματα θα πρέπει να ληφθεί υπόψη ο περιορισμένος αριθμός των διαθέσιμων φυσικών καταγραφών επιταχύνσεων ορόφου επί ενοργανομένων μεταλλικών κτιρίων. Λόγω της έντονης μη γραμμικής φύσης των λικνιστικών ταλαντωτών έχει προταθεί ένα κάτω όριο περίπου 40 φυσικών καταγραφών για την εξασφάλιση της ακρίβειας και της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων της  $IDA$  [15]. Εντούτοις, στην παρούσα εργασία επιλέχθηκαν συγκεκριμένα καταγραφές επί μεταλλικών κτιρίων ώστε να επικεντρωθεί η διερεύνηση σε μη δομικά περιεχόμενα επί φορέων με κοινό δομικό τύπο. Θα πρέπει επίσης να αναφερθεί ότι η παρούσα εργασία και τα συμπεράσματα αυτής αφορούν αποκλειστικά περιπτώσεις ελεύθερα ιστάμενων λικνιζόμενων μη δομικών περιεχομένων κτιρίων. Περιπτώσεις περιεχομένων μερικώς ή πλήρως αγκυρωμένων απαιτούν τη χρήση διαφορετικού προσομοιώματος και ως εκ τούτου δεν καλύπτονται από την εν λόγω μελέτη. Τέλος, για τον πληρέστερο έλεγχο επάρκειας ενός  $IM$  για τη σεισμική απόκριση μη δομικών περιεχομένων θα πρέπει να εξεταστεί και η επιρροή της ενδεχόμενης πλαστικοποίησης του κτιρίου, η οποία δεν ελήφθη υπόψη στο πλαίσιο της εν λόγω ερευνητικής εργασίας.

## 6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ



- [1] Spyrakos C.C., Maniatakis C.A., Taflampas I.M. “Application of predictive models to assess failure of museum artifacts under seismic loads”, *Journal of Cultural Heritage*, 23(1):11–21, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2016.10.001>
- [2] Kazantzi A.K., Vamvatsikos D., Miranda E. “Evaluation of seismic acceleration demands on building nonstructural elements”, *Journal of Structural Engineering (ASCE)*, 146(7): 04020118, 2020. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0002676](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002676)
- [3] Kazantzi A.K., Lachanas C.G., and Vamvatsikos D. “Seismic response distribution expressions for rocking building contents under ordinary ground motions”, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 20:6659–6682, 2022. <https://doi.org/10.1007/s10518-022-01424-w>
- [4] FEMA. FEMA 356 - Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings, Federal Emergency Management Agency, 2000.
- [5] Cornell C.A., Jalayer F., Hamburger R.O., Foutch D.A. “The probabilistic basis for the 2000 SAC/FEMA steel moment frame guidelines”, *ASCE Journal of Structural Engineering*, 128(4): 526–533, 2002. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2002\)128:4\(526\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2002)128:4(526))
- [6] Kazantzi A.K., Vamvatsikos D. Intensity measure selection for vulnerability studies of building classes. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 44(15): 2677–2694, 2015. <https://doi.org/10.1002/eqe.2603>
- [7] Luco N., Cornell C.A. “Structure-specific scalar intensity measures for near-source and ordinary earthquake ground motions”, *Earthquake Spectra*, 23(2):357–392, 2007. <http://dx.doi.org/10.1193/1.2723158>
- [8] Padgett J.E., Nielson B.G., DesRoches R. “Selection of optimal intensity measures in probabilistic seismic demand models of highway bridge portfolios”, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 37(5):711–725, 2008. <https://doi.org/10.1002/eqe.782>
- [9] Lachanas C.G., Vamvatsikos D., Dimitrakopoulos E.G. “Intensity measures as interfacing variables versus response proxies: The case of rigid rocking blocks”, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 52(6):1722–1739, 2023. <https://doi.org/10.1002/eqe.3838>
- [10] Housner G.W. “The behavior of inverted pendulum structures during earthquakes”, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 53(2):403–417, 1963.
- [11] Makris N., Konstantinidis D. “The rocking spectrum and the limitations of practical design methodologies”, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 32(2):265–289, 2003. <https://doi.org/10.1002/eqe.223>
- [12] Bachmann J.A., Strand M., Vassiliou M.F., Broccardo M., Stojadinović B. “Is rocking motion predictable?”, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 47(2):535–552, 2018. <https://doi.org/10.1002/eqe.2978>
- [13] Vamvatsikos D., Cornell C.A. “Incremental dynamic analysis. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*”, 31(3):491–514, 2002. <https://doi.org/10.1002/eqe.141>
- [14] Vassiliou M.F. Script for the seismic response of a planar rocking block, MATLAB script, 2021. Available at <http://hdl.handle.net/20.500.11850/521016>, <http://dx.doi.org/10.3929/ethz-b-000521016>
- [15] Lachanas C.G., Vamvatsikos D. “Rocking incremental dynamic analysis”, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 51(3):688–703, 2022. <https://doi.org/10.1002/eqe.3586>
- [16] Vamvatsikos D., Cornell C.A. “Developing efficient scalar and vector intensity

measures for IDA capacity estimation by incorporating elastic spectral shape information”, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 34(13):1573–1600, 2005. <https://doi.org/10.1002/eqe.496>

## 7. ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα έρευνα έχει χρηματοδοτηθεί από την Ευρωπαϊκή Ένωση στα πλαίσια της δράσης Horizon 2020 προγραμμάτων έρευνας και καινοτομίας από το έργο: «METIS–Methods and tools innovations for seismic risk assessment» με κωδικό έργου No. 945121.

## INTENSITY MEASURES FOR ASSESSING THE ROCKING RESPONSE OF SERVER RACKS IN STEEL BUILDINGS

**Christos G. Lachanas**

Postdoctoral Researcher

School of Civil Engineering, National Technical University of Athens

Zografou, Athens, Greece

e-mail: [lahanasch@central.ntua.gr](mailto:lahanasch@central.ntua.gr)

**Dimitrios Vamvatsikos**

Associate Professor

School of Civil Engineering, National Technical University of Athens

Zografou, Athens, Greece

e-mail: [divamva@mail.ntua.gr](mailto:divamva@mail.ntua.gr)

**Athanasia K. Kazantzi**

Adjunct Lecturer

International Hellenic University

Serres, Greece

e-mail: [kazantzi@ihu.gr](mailto:kazantzi@ihu.gr)

## SUMMARY

Alternative seismic intensity measures (IMs) are examined for the case of non-structural rocking building contents and in particular for the case of server racks standing freely on the higher floors of steel buildings. Observations following recent earthquakes in developed countries have revealed that most of the damages after a seismic event consider non-structural building contents of high value. On the other hand, the selection of a robust

IM is a basic requirement in the context of the performance-based earthquake engineering framework for assessing the seismic risk and the consequential loss/damage of engineering structures or non-structural contents with high fidelity. Hence, a bunch of alternative IMs are tested in terms of efficiency and sufficiency as potential IMs for rocking vulnerability studies. The simple planar rocking block model is employed for running nonlinear dynamic analysis with a set of 34 floor motions that were recorded during past earthquakes on the roof of instrumented steel buildings. Rocking blocks of various shapes and sizes are analyzed that resemble two-dimensional analogues of server racks. After analysis, efficiency and sufficiency of the examined IMs are compared aiming to propose optimal IMs for the case of rocking contents in the different stages of rocking response from rocking uplift to overturning.