

# Πιθανοτική Μεθοδολογία για τον Υπολογισμό Παραμενουσών Σεισμικών Μετατοπίσεων σε Πρανή

## A Probabilistic Methodology for Estimating Seismic Slope Displacements

ΤΡΑΒΑΣΑΡΟΥ, Θ. Πολιτικός Μηχανικός, Fugro West, Inc., Oakland, CA, U.S.A.

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ :** Αναπτύσσεται μία εμπειρική σχέση εκτίμησης των μόνιμων σεισμικών μετατοπίσεων σε πρανή και παρουσιάζεται το θεωρητικό πλαίσιο για την ενσωμάτωσή της σε αναλύσεις επικινδυνότητας. Η σχέση στηρίχτηκε στα αποτελέσματα ενός εξιδανικευμένου μονοδιάστατου, ισοδύναμου-γραμμικού προσομοιώματος εύκαμπτου πρανού, όπου η δυναμική ταλάντωση συμβαίνει ταυτόχρονα με την ολίσθηση. Οι μετατοπίσεις υπολογίζονται συναρτήσει της επιτάχυνσης διαρροής,  $k_y$ , της θεμελιώδους ιδιοπεριόδου,  $T_s$ , και της φασματικής επιτάχυνσης σε μία επιμηκυμένη περίοδο ίση με  $1.5T_s$ . Τα αποτελέσματα επιβεβαιώθηκαν μέσω της σύγκρισης με 16 πραγματικά περιστατικά αστοχίας φραγμάτων και πρανών σε ισχυρούς σεισμούς.

**ABSTRACT :** An empirical relationship for estimating seismic slope displacements is developed to be used in probabilistic displacement hazard evaluations. The proposed relationship is based on the response of an idealized, one-dimensional, equivalent-linear slope model, where the stick-slip episodes are coupled with the dynamic response. Permanent displacements are computed as a function of the yield coefficient,  $k_y$ , the initial fundamental period of the slope,  $T_s$ , and the spectral acceleration at a degraded period equal to  $1.5T_s$ . The proposed relationship was validated against 16 case histories of dam and solid waste landfill performance during significant earthquakes.

### 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η παραμένουσα μετατόπιση ενός πρανού (π.χ., φράγματος, επιχώματος, φυσικού πρανού) μετά από έναν σεισμό αποτελεί σημαντικό δείκτη επιτελεστικότητας και παράμετρο σχεδιασμού. Η εκτίμηση των σεισμικών μετατοπίσεων γίνεται, συνήθως, με χρήση απλοποιητικών μεθόδων (π.χ., Makdisi and Seed, 1978, Bray et al., 1998) η δομή των οποίων καθιστά δύσκολη την ενσωμάτωσή τους σε ένα πλαίσιο πιθανοτικού υπολογισμού επικινδυνότητας.

Όμως, οι αβεβαιότητες που συνδέονται με τον προσδιορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων των πρανών, και κατά μείζονα λόγο με την ένταση της σεισμικής διέγερσης, καθιστούν τις πιθανοτικές μεθόδους υπολογισμού όλο και πιο ελκυστικές. Σε αντιδιαστολή με τις προσδιορισμικές μεθόδους, οι πιθανοτικές μέθοδοι επιτρέπουν την επιλογή, βάσει των προδιαγραφών του εκάστοτε έργου, μίας

αποδεκτής στάθμης επικινδυνότητας. Επιπλέον, τέτοιες μέθοδοι συνάδουν με την έννοια της επικινδυνότητας παραμέτρων του εδαφικού κραδασμού και αποτελούν προέκτασή τους στο επίπεδο δεικτών αστοχίας που σχετίζονται άμεσα με την επιτελεστικότητα των κατασκευών.

Οι πιθανοτικές μέθοδοι που έχουν προταθεί για τον υπολογισμό των μόνιμων σεισμικών μετατοπίσεων είναι λίγες (π.χ. Lin and Whitman, 1986, Yegian et al. 1991). Επιπλέον, οι περισσότερες από αυτές είτε χρησιμοποιούν υπεραπλουστευμένα προσομοιώματα πρανού είτε βασίζονται σε περιορισμένο αριθμό αναλύσεων με πραγματικές χρονοϊστορίες σεισμών. Η παρούσα εργασία προτείνει μία νέα εμπειρική σχέση για τον υπολογισμό των μόνιμων σεισμικών μετατοπίσεων σε πρανή. Η σχέση είναι έτσι δομημένη ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε προσδιορισμικά, ή να ενσωματωθεί σε ένα πιθανοτικό πλαίσιο για

τον υπολογισμό της επικινδυνότητας των παραμενουσών μετατοπίσεων λόγω σεισμού. Η προτεινόμενη σχέση στηρίχθηκε σε ένα βελτιωμένο προσομοίωμα πρηνούς, βασίστηκε σε πληθώρα επιταχυνσιογραφημάτων, ενώ προτείνει ένα καινοτόμο μαθηματικό μοντέλο. Τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με τις καταγραφείσες μετατοπίσεις σε 16 πραγματικά περιστατικά αστοχίας φραγμάτων και Χώρων Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων (ΧΥΤΑ). Η εργασία παρουσιάζει επίσης το πιθανοτικό πλαίσιο για τον υπολογισμό της επικινδυνότητας των μετατοπίσεων, όπου λαμβάνεται υπόψη η αβεβαιότητα στις παραμέτρους που χαρακτηρίζουν τις ιδιότητες του πρηνούς και την ένταση της εδαφικής διέγερσης.

## 2. ΥΠΟΒΑΘΡΟ

### 2.1 Γενικά

Εμπειρικές σχέσεις εκτίμησης μόνιμων σεισμικών μετατοπίσεων εκφράζονται συνήθως συναρτήσει παραμέτρων που χαρακτηρίζουν (1) τις μηχανικές ιδιότητες του πρηνούς, και (2) την ένταση του εδαφικού κραδασμού. Δημοφιλέστερη από τις τελευταίες είναι η κορυφαία εδαφική επιτάχυνση (PGA), ενώ η διάρκεια της ισχυρής σεισμικής διέγερσης ( $D_{5.95}$ ), και η μέση περίοδος ( $T_m$ ) έχουν επίσης χρησιμοποιηθεί. Εν γένει, η συσχέτιση των σεισμικών μετατοπίσεων με μία, έναντι πολλαπλών, παράμετρο χαρακτηρισμού της έντασης της σεισμικής διέγερσης διευκολύνει την ενσωμάτωση της σχέσης σε αναλύσεις επικινδυνότητας. Εναλλακτικά, είναι δυνατή η συσχέτιση με ένα δίδυμο παραμέτρων, αλλά σ' αυτήν την περίπτωση δυσχεραίνει ο υπολογισμός της επικινδυνότητας. Είναι επιθυμητό η επιλεγείσα παράμετρο να είναι αποτελεσματική και επαρκής (Cornell and Lucio, 2001). Η αποτελεσματικότητα αναφέρεται στην ελαχιστοποίηση της διασποράς όταν η παράμετρο συσχετίζεται με τις σεισμικές παραμορφώσεις. Η επαρκεία δηλώνει την ικανότητα της παραμέτρου να καθιστά τις σεισμικές μετατοπίσεις ανεξάρτητες από σεισμολογικές παραμέτρους που συνήθως χρησιμοποιούνται σε σχέσεις εξασθένισης (δηλ. μέγεθος σεισμού,  $M$ , απόσταση από το ρήγμα,  $R$ , κ.λ.π.)

Ο προσδιορισμός της βέλτιστης παραμέτρου της σεισμικής διέγερσης και η κατόπιν ανάπτυξη της εμπειρικής σχέσης

στηρίχθηκαν στα αποτελέσματα ενός ιδεατού, μονοδιάστατου, ισοδύναμου-γραμμικού, προσομοιώματος πρηνούς, όπου η ολίσθηση συμβαίνει ταυτόχρονα με την δυναμική απόκριση (Rathje and Bray, 2000). Η δυσμησία και η αντοχή του πρηνούς εκφάζονται μέσω της θεμελιώδους ιδιοπεριόδου,  $T_s$ , και του συντελεστή επιτάχυνσης διαρροής,  $k_y$  (ανηγμένου ως προς την επιτάχυνση της βαρύτητας,  $g$ ). Παραμετρικές αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν μεταβάλλοντας διακριτά την τιμή της  $T_s$  μεταξύ σε 0, και 2.0 s, και της  $k_y$  μεταξύ 0.02, και 0.3. Τα ιδεατά πρηνή υποβλήθηκαν σε 688 διεγέρσεις οι οποίες αποτελούν πραγματικές καταγραφές από 41 σεισμούς μεγέθους μεταξύ 5 και 7.6 σε αποστάσεις μικρότερες από 100 km από το σεισμικό ρήγμα, και καταγράφηκαν οι παραμένουσες μετατοπίσεις στην βάση του πρηνούς.

### 2.2 Βέλτιστη Παράμετρος

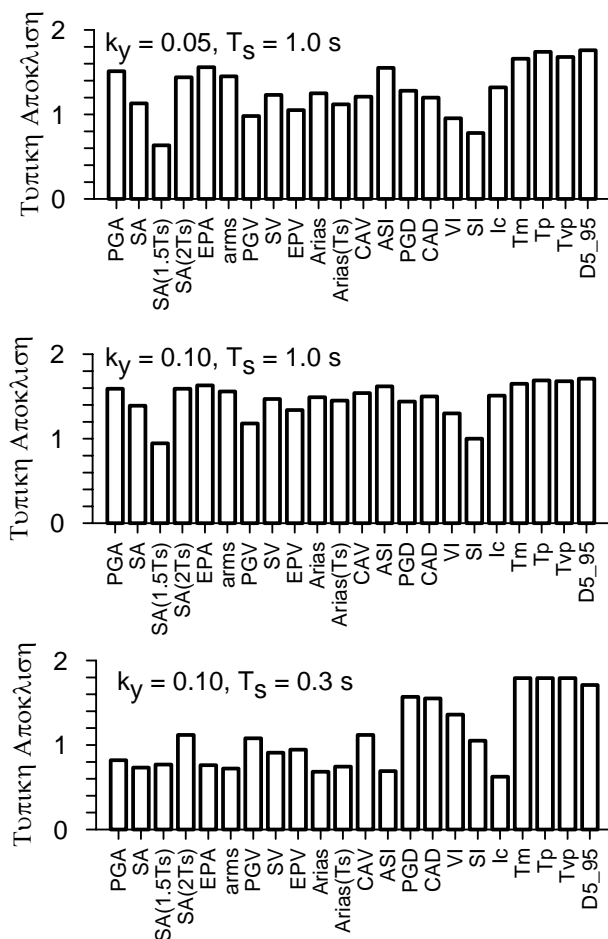
Το Σχήμα 1 δείχνει την τιμή της τυπικής απόκλισης στην συσχέτιση παραμέτρων της έντασης της σεισμικής διέγερσης με τις μόνιμες μετατοπίσεις. Πρόκειται για τρεις ενδεικτικές περιπτώσεις ευκαμψίας και αντοχής ενός πρηνούς.

Διεξοδικότερη έρευνα (Travasarou, 2003) έδειξε πως, εν γένει, καμία παράμετρο δεν ικανοποιεί τις απαιτήσεις αποτελεσματικότητας και επαρκείας για όλο το εύρος των ιδιοτήτων που εξετάστηκαν. Παρόλαυτα, για το μεγαλύτερο εύρος τιμών της ιδιοπεριόδου και του συντελεστή της επιτάχυνσης διαρροής, η φασματική επιτάχυνση,  $SA(1.5T_s)$ , σε μία επιμηκυμένη περίοδο  $1.5T_s$  ελαχιστοποιεί την διασπορά όταν σχετίζεται με τις μόνιμες σεισμικές μετατοπίσεις. Είναι, συνεπώς, μία αποτελεσματική παράμετρο χαρακτηρισμού της έντασης της σεισμικής διέγερσης.

## 3. ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΕΜΠΕΙΡΙΚΗΣ ΣΧΕΣΗΣ

### 3.1 Μαθηματικό Προσομοίωμα

Η ολίσθηση η μή ενός πρηνούς κατά την διάρκεια ενός σεισμού εξαρτάται από τις μηχανικές ιδιότητες του πρηνούς και την ένταση της σεισμικής διέγερσης. Ορισμένοι συνδυασμοί των παραμέτρων αυτών οδηγούν στην ύπαρξη μόνιμων σεισμικών μετατοπίσεων, ενώ για άλλους οι μετατοπίσεις αυτές είναι ανύπαρκτες.

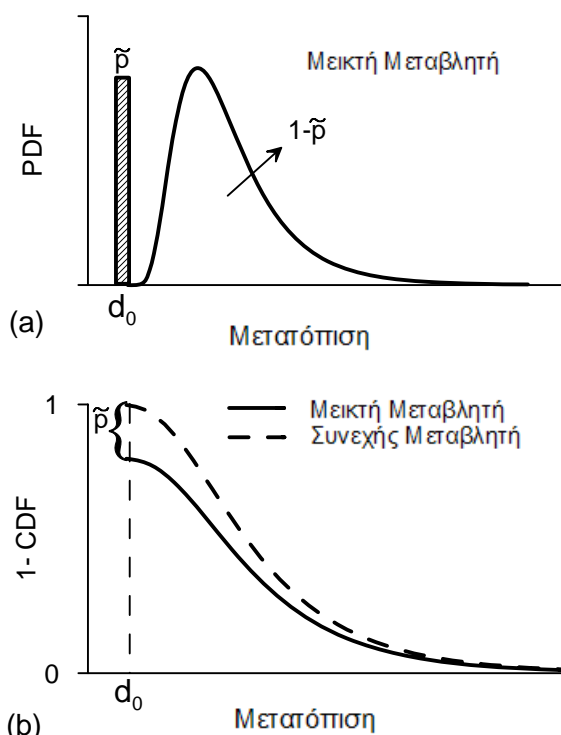


Σχήμα 1. Επιλογή Αποτελεσματικότερης Παραμέτρου στην Συσχέτιση με τις Μόνιμες Σεισμικές Μετατοπίσεις.  
 Figure 1. Identification of the Optimal Intensity Measure for Correlation with Seismic Slope Displacements.

Συνεπώς, είναι δυνατόν η μόνιμη σεισμική μετατόπιση να προσομοιωθεί ως μία μεικτή μεταβλητή, με μία συγκεντρωμένη μάζα πιθανότητας και μία συνεχή κατανομή. Προκειμένου ο υπολογισμός των παραμενουσών μετατοπίσεων να μην κατευθύνεται από πολύ μικρές τιμές μετατοπίσεων χωρίς πρακτικό ενδιαφέρον, οι τιμές μικρότερες του 0.1 cm θεωρήθηκαν πρακτικώς μηδενικές. Για την διευκόλυνση της παρουσίασης, οι τιμές αυτές αναφέρονται ως “μηδέν” (“0”) στις επόμενες παραγράφους. Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας,  $f_D(d)$ , μίας μεικτής μεταβλητής με διακριτή μάζα πιθανότητας  $\tilde{p}$  για μετατοπίσεις  $d=d_0$ , δίνεται από την Εξίσωση 1. Το Σχήμα 2 παρουσιάζει την συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας και την πιθανότητα υπέρβασης για την μεικτή μεταβλητή. Σε αντίθεση με μία συνεχή μεταβλητή, που χρησιμοποιείται συνήθως για

την μόνιμη σεισμική μετατοπίση, η μεικτή μεταβλητή αποδίδει μία διακριτή, μη μηδενική πιθανότητα ύπαρξης μηδενικών μετατοπίσεων.

$$f_D(d) = \tilde{p}\delta(d - d_0) + (1 - \tilde{p})\tilde{f}_D(d) \quad (1)$$



Σχήμα 2. (a) Συνάρτηση Πυκνότητας Πιθανότητας, και (b) Πιθανότητα Υπέρβασης για μία Συνεχή και μια Μεικτή Μεταβλητή.  
 Figure 2. (a) Probability Density Function, and (b) Probability of Exceedance for a Continuous and a Mixed Random Variable.

### 3.2 Εξίσωση Υπολογισμού

Σε συμφωνία με τον ορισμό της μεικτής μεταβλητής, η εμπειρική σχέση εκτίμησης των μόνιμων σεισμικών μετατοπίσεων αποτελείται από δύο κλάδους. Ο πρώτος υπολογίζει την πιθανότητα “ασήμαντων” μετατοπίσεων (δηλ.  $< 0.1$  cm) δεδομένης της έντασης της σεισμικής διέγερσης, όπως αυτή εκφράζεται από την φασματική επιτάχυνση σε περίοδο ίση με 1.5 φορές την θεμελιώδη ιδιοπερίοδο του πρानούς (SA(1.5T<sub>s</sub>)), και των μηχανικών ιδιοτήτων του πρानούς, όπως αυτές εκφράζονται από την αρχική θεμελιώδη ιδιοπερίοδο (T<sub>s</sub>) και τον συντελεστή της επιτάχυνσης διαρροής (k<sub>y</sub>). Ο δεύτερος κλάδος υπολογίζει το μέγεθος της παραμένουσας σεισμικής μετατόπισης συναρτήσει των ίδιων μεταβλητών όταν η

πιθανότητα πραγματοποίησης "σημαντικών" μετατοπίσεων (δηλ. > 0.1 cm) δεν είναι μηδέν.

Η πιθανότητα πραγματοποίησης μή σημαντικής μετατόπισης μπορεί να υπολογιστεί από τις Εξισώσεις 2 και 3

$$P(D="0") = 1 - \Phi(\arg) \quad (2)$$

$$\arg = -1.02 - 4.11 \ln(k_y) - 0.19 (\ln(k_y))^2 - 0.823 \ln(k_y) T_s - 2.82 T_s + 3.27 \ln(SA(1.5 T_s)) \quad (3)$$

Το μέγεθος της σεισμικής μετατόπισης, D σε cm, υπολογίζεται από την Εξίσωση (4)

$$\ln(D) = -1.64 - 3.57 \ln(k_y) - 0.478 (\ln(k_y))^2 + 0.825 \ln(k_y) \ln(SA) + 3.75 \ln(SA) - 0.33 (\ln(SA))^2 + 0.872 T_s - 0.082 T_s^2 + 0.3(M - 6.7) \pm \varepsilon \quad (4)$$

όπου  $\varepsilon$ , είναι τυχαία μεταβλητή με κανονική κατανομή, μέση τιμή μηδέν, και τυπική απόκλιση  $\sigma_{\ln D} = 0.78$ . Η Εξίσωση 4 μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση των μόνιμων σεισμικών μετατοπίσεων σε πρανή με  $k_y$ , μεταξύ 0.02 και 0.3,  $T_s$  μεταξύ 0 και 2.0 s και  $SA(1.5 T_s)$  μεταξύ 0.01 και 2.3 g.

#### 4. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ

Η ικανότητα της προτεινόμενης εμπειρικής σχέσης να προβλέπει αξιόπιστα μόνιμες σεισμικές μετατοπίσεις ελέγχθηκε μέσα από την σύγκριση των προβλεπόμενων μετατοπίσεων με την μέγιστη καταγραφείσα μετατόπιση σε 16 πραγματικά περιστατικά ολίσθησης φραγμάτων και ΧΥΤΑ λόγω σεισμού. Επιπλέον, το εύρος των προβλεπόμενων μετατοπίσεων συγκρίθηκε με τις προβλέψεις των απλοποιητικών μεθόδων που έχουν προταθεί από τους Makdisi and Seed (1978) και Bray et al. (1998).

Ο Πίνακας 1 παραθέτει την μέγιστη μετατόπιση που μετρήθηκε σε καθένα από αυτά τα περιστατικά. Ο Πίνακας 2 συνοψίζει τις σχετικές σεισμολογικές παραμέτρους (μέγεθος σεισμού, M, και απόσταση, R, από το ρήγμα), καθώς και την μέση τιμή των  $k_y$  και  $T_s$  του κάθε πρανού, όπως αυτές εκτιμήθηκαν από τους Buranek and Prasad (1991), Bray et al. (1998), Harder (1991), Elgamal et al. (1990). Η διάμεσος τιμή της φασματικής επιτάχυνσης  $SA(1.5 T_s)$  εκτιμήθηκε βάσει σχετικών, για κάθε περιστατικό, σχέσεων εξασθένησης.

Πίνακας 1. Περιστατικά Αστοχίας.  
Table 1. Case Histories.

#	ΧΥΤΑ / ΦΡΑΓΜΑ	Σεισμός	$D_{max}$ (cm)
1	Buena Vista LF	LP	0
2	Guadalupe LF	LP	0
3	Pacheco Pass LF	LP	0
4	Marina LF	LP	0
5	Austrian Dam	LP	48
6	Lopez Canyon C-B	NR	0
7	Chiquita Canyon D LF	NR	30
8	Sunshine Canyon LF	NR	30
9	La Villita Dam	S3	1
10	La Villita Dam	S4	1.4
11	La Villita Dam	S5	4
12	Chabot Dam	SF	
13	Lexington Dam	LP	15
14	Lopez Canyon CA LF	NR	0
15	Chiquita Canyon C LF	NR	24
16	OII Section HH LF	NR	15

Πίνακας 2. Σχετικές σεισμολογικές και γεωτεχνικές παράμετροι.  
Table 2. Relevant seismological and geotechnical properties.

#	M	R (km)	$k_y$	$T_s$ (s)	$SA(1.5 T_s)$ (g)
1	6.9	14.5	0.26	0.64	0.36
2	6.9	20.1	0.20	0.64	0.21
3	6.9	35.4	0.30	0.76	0.12
4	6.9	37.0	0.26	0.59	0.30
5	6.9	5.0	0.14	0.33	0.94
6	6.7	8.4	0.35	0.45	0.43
7	6.7	10.0	0.10	0.64	0.35
8	6.7	7.0	0.31	0.77	1.40
9	7.6	121	0.20	0.60	0.20
10	7.3	31	0.20	0.60	0.33
11	8.1	58	0.20	0.60	0.41
12	7.9	32	0.14	0.99	0.17
13	6.9	6.0	0.11	0.31	0.78
14	6.7	8.4	0.27	0.64	0.48
15	6.7	12.0	0.23	0.64	0.35
16	6.7	43.0	0.08	0.0	0.24

Ο Πίνακας 3 συγκρίνει τις μετατοπίσεις που υπολογίζονται από τις Εξισώσεις 2, 3 και 4 με αυτές που υπολογίζουν οι απλοποιητικές μέθοδοι των Makdisi and Seed (1978) και Bray et al. (1998). Στους υπολογισμούς, ο συντελεστής διαρροής ( $k_y$ ) μειώθηκε στο 0.9 της αρχικής τιμής του, προκειμένου να ληφθούν εμμέσως υπόψη τα φαινόμενα του σταδιακού σχηματισμού της επιφάνειας ολίσθησης και της επιπλέον μόνιμης μετατόπισης που οφείλεται στην κατανεμημένη διατμητική παραμόρφωση στην μάζα του πρανού.

Πίνακας 3. Καταγραφείσες και εκτιμηθείσες μόνιμες σεισμικές μετατοπίσεις.  
Table 3. Observed and estimated seismic slope displacements.

#	$D_{max}$ (cm)	P("0")	D (cm)	D (cm) M&S	D (cm) Bray et al.
1	0	0.43	0.5 – 2.6	0	0 – 0.4
2	0	0.71	0.2 – 1.0	0	0
3	0	1.00	-	0	0
4	0	0.64	0.3 – 1.4	0	0
5	48	0	23 – 109	0 – 11	14 – 167
6	0	0.55	0.3 – 1.5	0	0 – 0.2
7	30	0	5.6 – 26	0 – 12	1.5 – 35
8	30	0	17 – 82	0 – 1	1 – 20
9	1	0.74	0.2 – 1.0	0	0
10	1.4	0.16	1.0 – 4.6	0 – 0.6	0
11	4	0.05	2.4 – 11	0 – 1.3	0
12		0.59	0.6 – 2.6	0 – 16	0
13	15	0	23 – 108	0 – 3	13 – 155
14	0	0.17	1.1 – 5.4	0	0 – 0.2
15	24	0.29	0.7 – 3.2	0	0 – 1.0
16	15	0	2.1 – 10	5 – 38	20 – 200

Το εύρος των μετατοπίσεων που εκτιμάται από την νέα σχέση συμφωνεί, γενικά, με τις πραγματικές καταγραφές. Στις περιπτώσεις όπου οι πραγματικές μετακινήσεις ήταν πολύ μικρές έως μηδέν, η πιθανότητα "ασήμαντης" μετατόπισης που υπολογίζεται από την Εξίσωση 2 είναι μεγάλη, οι δε τιμές της μετατόπισης, όπως αυτές υπολογίζονται από την Εξίσωση 4 δεν υπερβαίνουν τα 3 cm. Στην περίπτωση όπου καταγράφηκαν σημαντικές μετατοπίσεις, η τιμή τους περιλαμβάνεται στο εύρος που προβλέπεται από την προτεινόμενη σχέση υπολογισμού. Μόνη εξαίρεση αποτελούν οι περιπτώσεις 13 με 16, όπου η νέα σχέση είτε υποεκτιμά είτε υπερεκτιμά τις μετατοπίσεις. Οι περιπτώσεις αυτές αναλύονται διεξοδικότερα από τους Bray and Travarasou (2005), και Travarasou (2003). Φαίνεται όμως ότι καμία από τις απλοποιητικές μεθόδους δεν προβλέπει ικανοποιητικά τις μετατοπίσεις για τα περιστατικά αυτά.

## 5. ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑ ΜΟΝΙΜΩΝ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΕΩΝ

### 5.1 Θεωρητικό Πλαίσιο

Η μέθοδος που παρουσιάζεται εδώ ενσωματώνει την εμπειρική σχέση που προτάθηκε παραπάνω, σε ένα πιθανοτικό πλαίσιο για τον υπολογισμό της επικινδυνότητας των μόνιμων σεισμικών μετατοπίσεων. Λαμβάνεται έτσι υπόψη η

αβεβαιότητα που χαρακτηρίζει την ένταση του εδαφικού κραδασμού σε μία σεισμογενή περιοχή, καθώς και η διασπορά γύρω από τις τιμές  $T_s$  και  $k_y$  που οφείλεται πρωτογενώς στην διασπορά γύρω από την τιμή της αντοχής και της δυστημσίας του εδάφους. Η προτεινόμενη μέθοδος κάνει απευθείας χρήση της καμπύλης επικινδυνότητας της φασματικής επιτάχυνσης. Διευκολύνονται συνεπώς οι υπολογισμοί αφού περιορίζεται ο αριθμός των ανεξάρτητων μεταβλητών και κατεπέκταση ολοκληρωμάτων στους υπολογισμούς επικινδυνότητας.

Το ζητούμενο είναι η εύρεση της ετήσιας συχνότητας υπέρβασης  $\nu(D>d)$  της μόνιμης σεισμικής μετατόπισης  $d$ . Θεωρώντας πως οι μεταβλητές  $T_s$  και  $k_y$  είναι ανεξάρτητες, η συχνότητα αυτή μπορεί να εκφραστεί συναρτήσει της φασματικής επιτάχυνσης, της ιδιοπεριόδου και του συντελεστή επιτάχυνσης διαρροής όπως δείχνει η Εξίσωση 5

$$\nu(D > d) = \nu \cdot$$

$$\int \int \int P(D > d | sa, k_y, t_s) f(sa) f(k_y) f(t_s) dsadk_y dt_s \quad (5)$$

όπου,  $\nu$  είναι η ετήσια συχνότητα σεισμών με μέγεθος  $M > M_{min}$ , και  $f(x)$  η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της μεταβλητής,  $x$ . Επειδή οι παράμετροι  $k_y$ , και  $T_s$  μπορούν να λάβουν μόνον θετικές τιμές, θεωρείται πως ακολουθούν λογαριθμική κατανομή (Εξίσωση 6) με παραμέτρους κατανομής  $\lambda$  και  $\zeta$ . Αυτές υπολογίζονται συναρτήσει της μέσης τιμής,  $\mu$ , και της τυπικής απόκλισης,  $\sigma$ , της μεταβλητής από την Εξίσωση 7.

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \zeta \cdot x} \exp \left[ -0.5 \left( \frac{\ln(x) - \lambda}{\zeta} \right)^2 \right] \quad (6)$$

$$\zeta = \sqrt{\ln \left( 1 + \left( \frac{\sigma}{\mu} \right)^2 \right)} \quad \text{καί} \quad \lambda = \ln(\mu) - 0.5\zeta^2 \quad (7)$$

Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της φασματικής επιτάχυνσης ( $SA(1.5T_s)$ ) υπολογίζεται από την παράγωγο της καμπύλης επικινδυνότητας,  $H(sa)$ , της μεταβλητής αυτής, όπως δείχνει η Εξίσωση 8.

$$f(sa) = \frac{1}{\nu} \cdot \frac{1}{1 - H(sa)} \cdot \left| \frac{dH(sa)}{dsa} \right| \approx \frac{1}{\nu} \cdot \left| \frac{dH(sa)}{dsa} \right| \quad (8)$$

Η πιθανότητα στην Εξίσωση 5 είναι ίση με

$$P(D > d | sa, k_y, t_s) = [1 - P(D = "0")] \cdot P(D > d) \quad (9)$$

όπου,  $P(D=0)$  και  $P(D>d)$  υπολογίζονται από τις Εξισώσεις 2 και 10 αντιστοίχως.

$$P(D > d) = 1 - \Phi\left(\frac{\ln(d) - \ln(\hat{d})}{\sigma_{\ln D}}\right) \quad (10)$$

Στην Εξίσωση 10,  $\Phi()$  είναι η κανονικοποιημένη συνάρτηση (standard normal cumulative distribution function),  $\hat{d}$  η median τιμή της μετατόπισης, και  $\sigma_{\ln D}$  η τυπική απόκλιση όπως υπολογίζονται από την Εξίσωση 4.

## 5.2 Ενδεικτικό Παράδειγμα Υπολογισμού

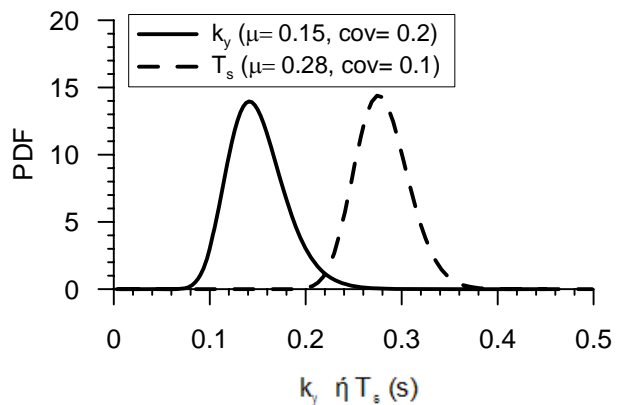
Η παραπάνω προτεινόμενη μεθοδολογία εφαρμόστηκε για τον υπολογισμό της επικινδυνότητας των μόνιμων σεισμικών μετατοπίσεων σε έναν Χώρο Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων (ΧΥΤΑ) σε περιοχή υψηλής σεισμικότητας, στο Richmond της Καλιφόρνιας. Το έργο απέχει μόλις 4 και 24 km από τα ενεργά ρήγματα Hayward και San Andreas, αντιστοίχως. Η γεωτεχνική κατασκευή, ύψους περίπου 50 m (~ 150 ft) εδράζεται σε 14 m (~ 40 ft) μαλακής αργίλου (Young Bay Mud) η οποία υπέρκειται σφιχρότερης αργίλου (Old Bay Clay). Ψευδοστατικές αναλύσεις ευστάθειας υπέδειξαν μία κυκλική επιφάνεια αστοχίας με επιτάχυνση διαρροής  $k_y = 0.17$ . Η τιμή αυτή απομειώθηκε σε  $k_y = 0.9 \times 0.17 = 0.15$  προκειμένου να ληφθούν υπόψη τα φαινόμενα του σταδιακού σχηματισμού της επιφάνειας ολίσθησης και της κατανεμημένης διατμητικής παραμόρφωσης στην μάζα του πρανούς. Η αρχική θεμελιώδης ιδιοπερίοδος του πρανούς υπολογίστηκε ίση με  $T_s = 0.28$  s. Επιπλέον, τα γεωτεχνικά δεδομένα υπέδειξαν συντελεστές διακύμανσης c.o.v( $k_y$ ) = 0.2 και c.o.v( $T_s$ ) = 0.1. Οι συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας των παραμέτρων  $k_y$  και  $T_s$  φαίνονται στο Σχήμα 3.

Για το έργο αυτό, η καμπύλη επικινδυνότητας της παραμέτρου έντασης του εδαφικού κραδασμού  $SA(1.5T_s) = SA(0.42$  s) υπολογίστηκε από την ιστοσελίδα της United States Geological Survey (USGS, <http://earthquake.usgs.gov/hazmaps/>). Η καμπύλη συμβολίζει την ετήσια συχνότητα υπέρβασης της φασματικής επιτάχυνσης και δείχνεται στο Σχήμα 4. Στο ίδιο σχήμα φαίνεται η εκθετική αναλυτική καμπύλη που προσεγγίζει βέλτιστα την καμπύλη επικινδυνότητας και περιγράφεται από την Εξίσωση 10. Η συνάρτηση αυτή επιτρέπει τον

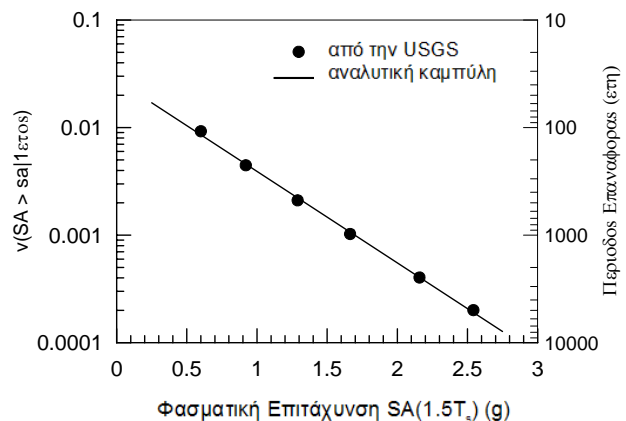
αναλυτικό υπολογισμό της παραγώγου της καμπύλης επικινδυνότητας όπως δείχνεται στην Εξίσωση 11. Οι τιμές χρησιμοποιούνται απευθείας στις Εξισώσεις 7 και 4.

$$H(sa) = a \exp(-b \cdot sa) = 0.028 \exp(-1.958 \cdot sa) \quad (11)$$

$$\left| \frac{dH(sa)}{dsa} \right| = ab \exp(-bsa) = 0.0542 \exp(-1.958sa) \quad (12)$$



Σχήμα 3. Λογαριθμική Συνάρτηση Πυκνότητας Πιθανότητας για τις Παραμέτρους  $k_y$  και  $T_s$ .  
Figure 3. Lognormal Probability Density Function for  $k_y$  and  $T_s$ .

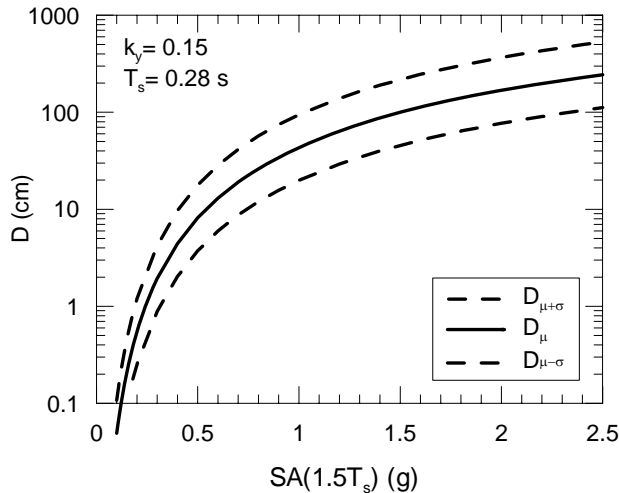


Σχήμα 4. Ετήσια Καμπύλη Επικινδυνότητας της Φασματικής Επιτάχυνσης  $SA(0.42$  s).  
Figure 4. Annual Hazard Curve for Spectral Acceleration at  $1.5T_s$ .

Το Σχήμα 5 δείχνει την εξάρτηση των μόνιμων σεισμικών μετατοπίσεων από την φασματική επιτάχυνση  $SA(1.5T_s)$  όπως υπολογίζεται από τις Εξισώσεις 2, 3, και 4. Η σχέση υπολογίστηκε για τις μέσες τιμές των  $k_y$  και  $T_s$  για το έργο αυτό. Το Σχήμα 6 δείχνει την ετήσια καμπύλη επικινδυνότητας των μόνιμων σεισμικών μετατοπίσεων που υπολογίστηκε με την βοήθεια της Εξίσωσης 5, σύμφωνα με την μεθοδολογία που παρουσιάστηκε στην προηγούμενη παράγραφο. Η τιμή της

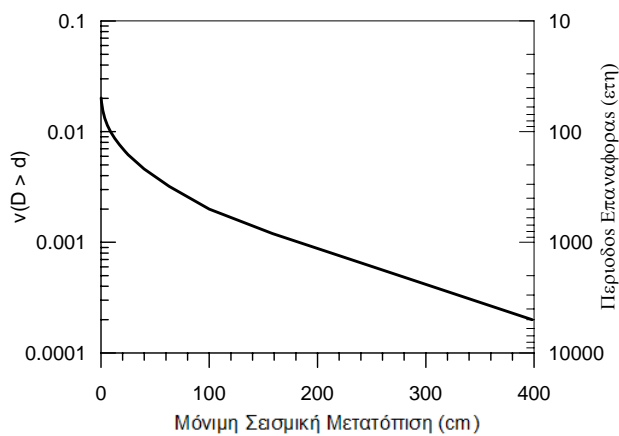


μετατόπισης για μία επιλεγείσα στάθμη επικινδυνότητας με περίοδο επαναφοράς 475 έτη (πιθανότητα υπέρβασης 10% σε 50 έτη) εκτιμάται ίση με 95 cm, περίπου. Για μία μεγαλύτερη περίοδο επαναφοράς ίση με 975 έτη, (πιθανότητα υπέρβασης 5% σε 50 έτη) η τιμή της μετατόπισης είναι 180 cm, περίπου.



Σχήμα 5. Προσδιορισμική Καμπύλη Εκτίμησης Μετατοπίσεων.

Figure 5. Deterministic Estimates of Seismic Displacement.



Σχήμα 6. Ετήσια Καμπύλη Επικινδυνότητας των Μόνιμων Σεισμικών Μετατοπίσεων.

Figure 6. Annual Hazard Curve for Seismic Slope Displacements.

Η εκτίμηση των μόνιμων σεισμικών μετατοπίσεων θα μπορεί να γίνει και “ψευδο-προσδιορισμικά”, εάν η φασματική επιτάχυνση που αντιστοιχεί στην επιλεγμένη, για το έργο, στάθμη επικινδυνότητας, χρησιμοποιηθεί απευθείας στην Εξίσωση 4 σε συνδυασμό με τις μέσες τιμές των παραμέτρων  $T_s$  και  $k_y$ . Τα αποτελέσματα των δύο μεθόδων συγκρίνονται στον Πίνακα 4. Για την ψευδο-προσδιορισμική μέθοδο εκτιμώνται οι μετατοπίσεις που

αντιστοιχούν στην διάμεσο τιμή,  $D_\mu$  και την διάμεσο συν μία τυπική απόκλιση,  $D_{\mu+\sigma}$ . Οι προσδιορισμικές αναλύσεις χρησιμοποιούν, κατά παράδοση την δεύτερη μεγαλύτερη τιμή με το πρόσχημα της μεγαλύτερης ασφάλειας. Φαίνεται πως η πιθανοτικώς εκτιμηθείσες μετατοπίσεις είναι σημαντικά μικρότερες από την τιμή αυτή.

Πίνακας 4. Σύγκριση πιθανοτικού και “ψεύδο-προσδιορισμικού” υπολογισμού μετατοπίσεων Table 4. Comparison between probabilistic and deterministic displacement estimates.

Μέθοδος	$T_{επεν.}$ (έτη)	SA(1.5 $T_s$ ) (g)	$D_\mu$ (cm)	$D_{\mu+\sigma}$ (cm)
Ψευδο-Προσδιορισμική	475	1.30	75	164
Πιθανοτική	475	εύρος	95	-
Ψευδο-Προσδιορισμική	975	1.66	120	260
Πιθανοτική	975	εύρος	180	-

## 6. ΠΕΡΙΛΗΨΗ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Οι σημαντικές αβεβαιότητες που περιβάλλουν το πρόβλημα των μόνιμων σεισμικών μετατοπίσεων προβάλλουν την χρησιμότητα πιθανοτικών μεθόδων υπολογισμού, οι οποίες λαμβάνουν υπόψη την διασπορά στις σχετικές παραμέτρους. Το πρόβλημα σεισμικής ευστάθειας των πρανών επανεξετάσθηκε με αποτέλεσμα την δημιουργία μίας εμπειρικής σχέσης για την πρόβλεψη των μόνιμων σεισμικών μετατοπίσεων. Επιπλέον προτείνεται ένα πιθανοτικό πλαίσιο όπου η σχέση μπορεί να ενσωματωθεί με σκοπό την αποτίμηση της επικινδυνότητας.

Η νέα σχέση εκτιμά το μέγεθος των μόνιμων σεισμικών μετατοπίσεων, συναρτήσει 1) της αντοχής του πρανούς, όπως εκφράζεται από τον συντελεστή της επιτάχυνσης διαρροής,  $k_y$ , 2) της ευκαμψίας του πρανούς, όπως εκφράζεται από την αρχική θεμελιώδη ιδιοπερίοδο,  $T_s$ , και 3) της έντασης του εδαφικού κραδασμού όπως εκφράζεται από την φασματική επιτάχυνση, SA(1.5  $T_s$ ) σε μία επιμηκυμένη περίοδο, ίση με 1.5  $T_s$ . Η εμπειρική σχέση βασίζεται στα αποτελέσματα ενός εξιδανικευμένου προσομοιώματος εύκαμπτου πρανούς. Το προσομοίωμα είναι μονοδιάστατο, ισοδύναμο-γραμμικό, και, λαμβάνει υπόψη την ταυτόχρονη ύπαρξη της ολίσθησης και της δυναμικής απόκρισης κατά την διάρκεια του σεισμού. Οι καινοτομίες της προτεινόμενης σχέσης συνοψίζονται στα εξής: (1) Αναγνωρίζει ότι η μόνιμη σεισμική

μετατόπιση είναι μία μεικτή μεταβλητή, η οποία μπορεί να λάβει "μηδενικές" ή μη τιμές, ανάλογα με τον συνδυασμό των μηχανικών ιδιοτήτων του πρανούς και την ένταση της σεισμικής φόρτισης. (2) Χρησιμοποιεί ένα πιο ρεαλιστικό, προσομοίωμα πρανούς όπου λαμβάνεται υπόψη η ευκαμψία του, και η μη γραμμικότητα που οφείλεται στην ταυτόχρονη δυναμική απόκριση και ολίσθηση. (3) Βασίζεται σε περισσότερες από 680 καταγεγραμμένες χρονοϊστορίες επιτάχυνσης.

Η ικανότητα της προτεινόμενης σχέσης να προβλέπει αξιόπιστα μόνιμες σεισμικές μετατοπίσεις επιβεβαιώθηκε μέσω της σύγκρισης των εκτιμώμενων μετατοπίσεων με τις καταγεγραμμένες σε 16 περιστατικά δυναμικής απόκρισης πρανών σε ισχυρούς σεισμούς. Προκειμένου να ληφθούν υπόψη τα φαινόμενα του σταδιακού σχηματισμού της επιφάνειας ολίσθησης και της μόνιμης μετατόπισης που οφείλεται στην κατανεμημένη διατμητική παραμόρφωση στην μάζα του πρανούς, προτείνεται η απομείωση της μέσης τιμής του συντελεστή επιτάχυνσης διαρροής στο 0.9 της τιμής που βασίζεται στην πιο αξιόπιστη αστράγγιστη διατμητική αντοχή. Πρέπει να τονιστεί πως η παρούσα σχέση αναφέρεται στις μετατοπίσεις που λαμβάνουν χώρα λόγω ολίσθησης και κατανεμημένης διατμητικής παραμόρφωσης και δεν υπολογίζει τις μόνιμες μετατοπίσεις που οφείλονται σε ογκομετρική παραμόρφωση. Επιπλέον, η σχέση δεν πρέπει να χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις που η αντοχή ενός πρανούς μειώνεται σημαντικά, λόγω, π.χ. ρευστοποίησης του εδάφους.

Προκειμένου να αποτιμηθεί η επικινδυνότητα των σεισμικών μετατοπίσεων, η προτεινόμενη σχέση μπορεί να ενσωματωθεί με ευκολία σε ένα πιθανοτικό πλαίσιο όπου γίνεται απευθείας χρήση της καμπύλης επικινδυνότητας της φασματικής επιτάχυνσης. Η μεθοδολογία χρησιμοποιήθηκε για τον σχεδιασμό ενός ΧΥΤΑ στην Καλιφόρνια. Οι αναλύσεις δείχνουν πως ο υπολογισμός των μόνιμων σεισμικών μετατοπίσεων μέσω προσδιορισμικών μεθόδων μπορεί να είναι υπερβολικά συντηρητικός. Η χρήση πιθανοτικών μεθόδων μπορεί να προσφέρει λύση σε αυτό το πρόβλημα.

## 8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Buraneck, D. and Prasad, S. (1991) "Sanitary landfill performance during the Loma Prieta earthquake" 2<sup>nd</sup> International Conf. on

- Recent Advances in Geotech. Engin. and Soil Dynamics, St. Louis, pp. 1655-1660.
- Bray J.D., and Travasarou, Th. (2005). "Simplified procedure for estimating seismic earth and waste-fill deviatoric displacements" submitted, J. of Geotechnical and Geoenvironmental Engrg.
- Bray JD, Rathje EM, Augello AJ, and Merry SM. (1998) "Simplified seismic design procedures for geosynthetic-lined, solid waste landfills." Geosynthetics International; 5(1-2): 203-235.
- Cornell, A.C., and Luco, N. (2001). "Ground motion intensity measures for structural performance assessment of near fault sites" U.S.-Japan Coop. Res. on Urban EQ. Disaster Mitigation, Seattle, Washington.
- Elgamal, A., Scott, R., Succarieh, M., and Yan, L. (1990). "La Villita Dam response during five earthquakes including permanent deformation" J. of Geotechnical Engineering, Vol. 10, No. 116, pp. 1443-1462.
- Harder, L. (1991). "Performance of earth dams during the Loma Prieta earthquake" 2<sup>nd</sup> International Conf. on Recent Advances in Geotech. Engin. and Soil Dynamics, St. Louis, pp. 1613-1628.
- Makdisi F, and Seed H. (1978) "Simplified procedure for estimating dam and embankment earthquake-induced deformations." Journal of Geotechnical Engineering; 104(7): 849-867.
- Lin J-S, and Whitman R. (1986) "Earthquake induced displacements of sliding blocks." Journal of Geotechnical Engineering; 112(1): 44-59.
- Rathje EM, and Bray J.D. (2000) "Nonlinear coupled seismic sliding analysis of earth structures." Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 2000; 126(11): 1002-1014.
- Travasarou, Th. (2003) "Optimal ground motion intensity measures for probabilistic assessment of seismic slope displacements" Ph.D. Dissertation, U.C. Berkeley, December.
- Yegian M, Marciano E, and Ghahraman V. (1991a) "Earthquake-induced permanent deformations: Probabilistic approach." Journal of Geotechnical Engineering; 117(1): 18-34.
- Yegian M, Marciano E, and Ghahraman V. (1991b) "Seismic risk analysis for earth dams." Journal of Geotechnical Engineering; 117(1): 35-50.