

Νέα μεθοδολογία εκτίμησης σεισμικών συντελεστών για τη ψευδο-στατική ανάλυση ευστάθειας πρανών χωμάτινων φραγμάτων

Α.Γ. Παπαδημητρίου

Λέκτορας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών ΠΘ

Γ.Δ. Μπουκοβάλας

Καθηγητής, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ

Κ. Αναστασόπουλος

Πολιτικός Μηχανικός MSc, Τομέαρχης Γεωτεχνικών & Γεωλογικών Μελετών ΔΑΥΕ/ΔΕΗ

Λέξεις κλειδιά: αριθμητική ανάλυση, ευστάθεια πρανών, σεισμικοί συντελεστές, χωμάτινα φράγματα, ψευδο-στατική ανάλυση

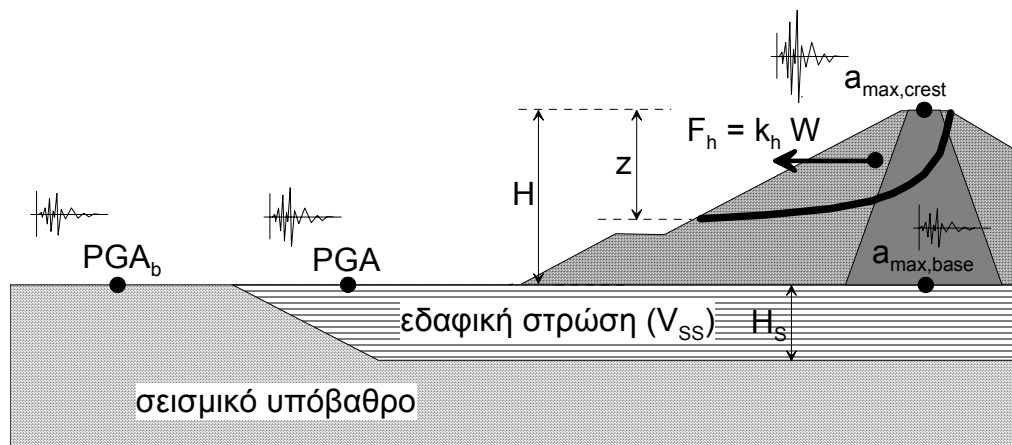
ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Παρουσιάζεται μια νέα μεθοδολογία εκτίμησης σεισμικών συντελεστών για τη ψευδο-στατική ανάλυση ευστάθειας πρανών χωμάτινων φραγμάτων, η οποία στηρίζεται σε στατιστική επεξεργασία αριθμητικών αποτελεσμάτων από εικοσιοκτώ (28) συνολικά 2Δ αναλύσεις σεισμικής απόκρισης φραγμάτων και υψηλών επιχωμάτων. Η νέα μεθοδολογία χρησιμοποιεί διαγράμματα και εξισώσεις σχεδιασμού και εκτιμά τους σεισμικούς συντελεστές συναρτήσει: (α) της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης στο ελεύθερο πεδίο του εδάφους θεμελίωσης, (β) της δεσπόζουσας περιόδου της σεισμικής διέγερσης, (γ) της πρώτης ιδιοπεριόδου του φράγματος, λαμβάνοντας υπόψη αδρά και τις εδαφικές συνθήκες θεμελίωσης, και (δ) τον αδιάστατο λόγο z/H (του μεγίστου βάθους z της επιφάνειας ολίσθησης ως προς το ύψος H του φράγματος). Η νέα μεθοδολογία προσδίδει ακρίβεια με τυπική απόκλιση του σχετικού λάθους $\pm 24\%$.

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η σεισμική απόκριση χωμάτινων φραγμάτων είναι ένα πολύπλοκο πρόβλημα της Γεωτεχνικής Σεισμικής Μηχανικής, καθώς συμπεριλαμβάνει φαινόμενα ενίσχυσης ή απομείωσης της σεισμικής κίνησης, ανάπτυξης αδρανειακών δυνάμεων στη μάζα του φράγματος, αλλαγής στη διατμητική δυσκαμψία και αντοχή των υλικών κατασκευής του φράγματος κλπ. Σύμφωνα με τις οδηγίες της {1}, η σεισμική ευστάθεια των πρανών χωμάτινων φραγμάτων μπορεί να εκτιμηθεί με τις παρακάτω μεθόδους:

- (α) ψευδο-στατική ανάλυση οριακής ισορροπίας
- (β) απλουστευμένη εκτίμηση μετατοπίσεων πρανών
- (γ) αριθμητική ανάλυση ολικών ή ενεργών τάσεων

Το ενδιαφέρον εδώ εστιάζεται στη πρώτη από τις παραπάνω μεθόδους, η οποία ήταν πρακτικώς η μόνη μέθοδος ανάλυσης μέχρι την αρχή της δεκαετίας του 1970, και η οποία οδηγεί στον υπολογισμό ενός Συντελεστή Ασφαλείας FS_d έναντι σεισμικής «αστοχίας» του πρανούς. Το περιγραφόμενο πρόβλημα παρουσιάζεται ενδεικτικά στο Σχήμα 1, όπου ορίζονται και άλλες κρίσιμες παράμετροι του προβλήματος, όπως οι μέγιστες τιμές της σεισμικής επιτάχυνσης στη στέψη, $a_{\max,crest}$, και τη βάση του φράγματος, $a_{\max,base}$, καθώς και οι τιμές της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης στο «ελεύθερο πεδίο» του εδάφους θεμελίωσης του φράγματος, PGA, και η αντίστοιχη τιμή στο αναδυόμενο υποβάθρο PGA_b ($PGA_b = PGA$, σε περίπτωση που το φράγμα θεμελιώνεται επί βραχώδους υποβάθρου).



Σχήμα 1. Ορισμός κρίσιμων παραμέτρων του προβλήματος σεισμικής ευστάθειας πρανών χωμάτινων φραγμάτων και υψηλών επιχωμάτων

Σύμφωνα με αυτή την απλουστευτική μέθοδο, τιμές του συντελεστή FS_d μεγαλύτερες από 1.0 υπονοούν σεισμικώς ασφαλείς συνθήκες, ενώ τιμές του ίδιου συντελεστή μικρότερες από 1.0 υπονοούν σεισμική «αστοχία» του πρανού. Το πόσο μικρότερος είναι ο συντελεστής FS_d από την αντίστοιχη τιμή του συντελεστή ασφαλείας FS υπό στατικές συνθήκες εξαρτάται κυρίως από την τιμή της οριζόντιας αδρανειακής δύναμης F_h που ασκείται στο κέντρο βάρους της ολισθαίνουσας μάζας του πρανού, και οποία ισούται με το βάρος W της ολισθαίνουσας μάζας επί έναν σεισμικό συντελεστή k_h . Από τα ανωτέρω γίνεται αντιληπτό ότι η επιλογή της κατάλληλης τιμής του k_h για την εκτίμηση του FS_d είναι εξαιρετικής σημασίας για τον ορθολογικό και ασφαλή σχεδιασμό ενός χωμάτινου φράγματος.

Σε κάθε περίπτωση, ο συντελεστής k_h θα πρέπει να αντικατοπτρίζει την ταλάντωση της ολισθαίνουσας μάζας για το σεισμό σχεδιασμού. Αν η ολισθαίνουσα μάζα ήταν άκαμπτη, τότε ο συντελεστής k_h θα μπορούσε να συσχετισθεί με τη μέγιστη τιμή της επιτάχυνσης a_{max} σε αυτή, σύμφωνα με τη σχέση $k_h = a_{max}/g$. Δεδομένου όμως ότι η ολισθαίνουσα μάζα δεν είναι άκαμπτη, τα διάφορα σημεία της δεν ταλαντώνονται σε φάση, και συνεπώς ως αντιπροσωπευτική τιμή του k_h θα πρέπει να επιλέγεται τιμή μικρότερη από το λόγο a_{max}/g , όπως για παράδειγμα μια τιμή που να αντιστοιχεί στη μέση τιμή των μεγίστων σεισμικών επιταχύνσεων στην ολισθαίνουσα μάζα. Αυτή η μη-σύγχρονη ταλάντωση όλων των σημείων της ολισθαίνουσας μάζας είναι ιδιαίτερα εμφανής σε υψηλά φράγματα, όπου το μήκος των σεισμικών κυμάτων είναι συγκρίσιμο με το ύψος του φράγματος. Επιπλέον, αν θεωρήσει κανείς το φράγμα ως έναν, πολυβάθμιο εν γένει, ταλαντωτή που υποβάλλεται σε διέγερση βάσης, τότε η ταλάντωσή του, και συνεπώς και η ταλάντωση της ολισθαίνουσας μάζας, εξαρτάται από την ταλάντωση του εδάφους θεμελίωσης. Σύμφωνα με τα ανωτέρω, η τιμή της a_{max} συσχετίζεται με τις τιμές της μέγιστης επιτάχυνσης σε χαρακτηριστικά σημεία του φράγματος (π.χ. $a_{max,crest}$, $a_{max,base}$) ή/και της επιφάνειας του εδάφους (π.χ. PGA , PGA_b), χωρίς όμως να συμπίπτει αναγκαστικά με κάποια από τις ανωτέρω τιμές.

Πέραν των ανωτέρω, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι οι τιμές των επιταχύνσεων a_{max} , $a_{max,crest}$, $a_{max,base}$, PGA , PGA_b , αλλά και του σεισμικού συντελεστή k_h με τον οποίο συσχετίζονται, αναφέρονται στις μέγιστες τιμές των εν λόγω μεγεθών. Αυτό συνεπάγεται ότι παρατηρούνται μόνο στιγμιαία στην ταλάντωση της ολισθαίνουσας μάζας, και επομένως ο σχεδιασμός χωμάτινων φραγμάτων με χρήση ψευδο-στατικών αναλύσεων είναι σαφώς συντηρητικός όταν ικανοποιούνται ταυτόχρονα οι απαιτήσεις για $FS_d \geq 1.0$ (μέθοδος α) και για τιμή του σεισμικού συντελεστή ίση με την μέγιστη τιμή k_h . Έτσι, η συνήθης πρακτική προτάσσει τη χρήση των «ενεργών» τιμών των επιταχύνσεων και του σεισμικού συντελεστή σε συνάρτηση με την απαίτηση για $FS_d \geq 1.0$ με αντίτιμο την ανάπτυξη μικρών εν γένει παραμενόντων μετατοπίσεων της ολισθαίνουσας μάζας προς τα κατάντη του πρανού μετά το τέλος της σεισμικής δόνησης. Σημειώνεται, ότι οι

προαναφερόμενες μικρές σεισμικές μετατοπίσεις πρανών που προκύπτουν με τη χρήση της ενεργού αντί της μέγιστης τιμής του σεισμικού συντελεστή μπορεί να εκτιμηθεί απλουστευτικά με κάποια από τις μεθοδολογίες της βιβλιογραφίας (π.χ {14}, {15}), αλλά το εν λόγω θέμα εκφεύγει του στόχου του παρόντος άρθρου.

Στις παραγράφους που ακολουθούν, οι ενεργές τιμές των επιταχύνσεων και του σεισμικού συντελεστή συμβολίζονται ως a , a_{crest} , a_{base} , EGA , EGA_b και k_{hE} αντίστοιχα, και απλουστευτικά θεωρούνται ως ένα ποσοστό των αντιστοιχών μεγίστων τιμών των μεγεθών που εμφανίζονται στο Σχήμα 1. Πιο συγκεκριμένα, ο λόγος της ενεργού προς τη μέγιστη τιμή επιτάχυνσης κυμαίνεται στη βιβλιογραφία από 0.50 (π.χ {9}) για ψευδο-στατικές αναλύσεις πρανών) έως 0.80 (π.χ στον ορισμό ελαστικών φασμάτων σχεδιασμού κατά EAK 2002 και τον EC-8). Η πλέον συνήθης τιμή του λόγου είναι 0.65 έως 0.67 [π.χ στα Βρετανικά Standards {5} για ψευδο-στατικές αναλύσεις ευστάθειας πρανών φραγμάτων ή υψηλών επιχωμάτων, στον έλεγχο ρευστοποίησης κατά {18}].

Συνοψίζοντας όλα τα ανωτέρω, η τιμή του ενεργού σεισμικού συντελεστή k_{hE} με την οποία συνιστάται να εκτελούνται οι ψευδο-στατικές αναλύσεις ευστάθειας πρανών χωμάτινων φραγμάτων με ταυτόχρονη απαίτηση για συντελεστή $FS_d \geq 1.0$ είναι σαφώς μικρότερη από τη μέση τιμή των μεγίστων σεισμικών επιταχύνσεων στην ολισθαίνουσα μάζα. Με τον τρόπο αυτό λαμβάνεται υπόψη η μη-σύγχρονη ταλάντωση της ολισθαίνουσας μάζας και η πραγματικώς αυξομειούμενη ένταση της σεισμικής κίνησης.

Επί του παρόντος δεν υπάρχει μία ευρέως αποδεκτή μεθοδολογία εκτίμησης των σεισμικών συντελεστών για την ανάλυση χωμάτινων φραγμάτων, και συνεπώς ο κάθε μελετητής χρησιμοποιεί τη δική του διαδικασία βασιζόμενος στην εμπειρία του. Έτσι, στις επόμενες παραγράφους γίνεται αρχικά αναδρομή στις χρησιμοποιούμενες σήμερα μεθόδους εκτίμησης των σεισμικών συντελεστών και αξιολόγηση τους σε σύγκριση με αριθμητικά αποτελέσματα 2D αναλύσεων σεισμικής απόκρισης χωμάτινων φραγμάτων. Στη συνέχεια, τα αποτελέσματα των εν λόγω αναλύσεων χρησιμοποιούνται για τον εντοπισμό των κρίσιμων παραμέτρων του προβλήματος και για την προκαταρκτική διατύπωση μιας βελτιωμένης μεθοδολογίας προσεγγιστικής εκτίμησης των σεισμικών συντελεστών.

Επισημαίνεται ότι οι αριθμητικές αναλύσεις που χρησιμοποιήθηκαν για την πρόταση της βελτιωμένης μεθοδολογίας αφορούσαν χωμάτινα φράγματα αλλά και υψηλά επιχώματα. Συνεπώς, η προτεινόμενη μεθοδολογία μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για το σχεδιασμό υψηλών επιχωμάτων τραπεζοειδούς διατομής, και όχι μόνον φραγμάτων όπως αναφέρει, χάριν συντομίας, ο τίτλος του άρθρου.

2 ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΣΤΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

2.1 Συσχέτιση του σεισμικού συντελεστή με τη σεισμικότητα της περιοχής

Η πρώτη αναφορά στη σχετική βιβλιογραφία αποδίδεται στον Terzaghi {16}, ο οποίος υπέδειξε τιμές $k_{hE} = 0.1$, 0.2 και 0.5 για «σημαντικούς», «βίαιους» και «καταστροφικούς» σεισμούς αντίστοιχα. Στην πράξη, και μέχρι τη μέση της δεκαετίας του '70, ο ορισμός των k_{hE} γινόταν επί τη βάση της εμπειρίας και συνήθως με τιμές από 0.10 έως 0.15, με την τιμή να αυξάνει ως συνάρτηση του μεγέθους του σεισμού M ή της σημαντικότητας του έργου, και μέγιστη τιμή το 0.20 (π.χ. παλαιοί κανονισμοί-οδηγίες του US Corps of Engineers).

2.2 Συσχέτιση του σεισμικού συντελεστή με τη PGA

Σύμφωνα με {17}, η τότε ισχύουσα πρακτική στις ΗΠΑ ήταν η χρήση $k_{hE} = (0.25 \text{ έως } 1.0)$ (PGA/g) με τις μεγάλες τιμές να λαμβάνουν εμμέσως υπόψη την ελαστική ενίσχυση της δόνησης στο σώμα του φράγματος. Αντίστοιχα, τα σχετικά Βρετανικά standards {5} προτείνουν τη θεώρηση $k_{hE} =$

0.67(PGA/g), θεωρώντας ουσιαστικά την PGA ως τη μέγιστη επιτάχυνση της ολισθαίνουσας μάζας του φράγματος.

Σημειώνεται ότι αντίστοιχη συσχέτιση με την PGA προτείνεται και από τους αντισεισμικούς κανονισμούς EC-8 και ΕΑΚ (2002). Μάλιστα, στον EC-8 λαμβάνονται υπόψη αδρά οι εδαφικές συνθήκες και το μέγιστο βάθος της επιφάνειας ολίσθησης σε σχέση με το ύψος του πρσανούς, και αυτό λόγω της τοπογραφικής ενίσχυσης της σεισμικής κίνησης πλησίον πρσανών. Παρόλα αυτά, στο παρόν άρθρο δεν αξιολογούνται οι εν λόγω κανονιστικές διατάξεις καθώς αφορούν συνήθη πρνή μικρού σχετικά ύψους.

2.3 Συσχέτιση του σεισμικού συντελεστή με την $a_{max,crest}$

Ως ιδιαίτερα σημαντική συνεισφορά στο υπό μελέτη θέμα θα πρέπει να θεωρηθεί η εργασία των {12}, οι οποίοι αναφερόμενοι σε μια μεθοδολογία εκτίμησης σεισμικών μετακινήσεων πρσανών συνέδεσαν την τιμή του μέγιστου συντελεστή k_h όχι μόνον με την τιμή του λόγου ($a_{max,crest}/g$), αλλά και με το βάθος z (από τη στέψη) μέχρι το οποίο φθάνει η επιφάνεια ολίσθησης των πρσανών ενός φράγματος ύψους H (βλέπε και Σχήμα 1). Εξυπακούεται βέβαια ότι, αφού $k_{hE} = (0.5 \text{ έως } 0.8)k_h$, η εν λόγω μεθοδολογία μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την εκτίμηση του ενεργού συντελεστή k_{hE} . Επιπλέον, σύμφωνα με {13}, η ανάλυση ευστάθειας φραγμάτων θα πρέπει να γίνεται με $k_{hE} = (0.33 \text{ έως } 0.50)(a_{max,crest}/g)$, που αντιστοιχούν προσεγγιστικά σε τιμές $k_h = (0.50 \text{ έως } 0.75)(a_{max,crest}/g)$.

Σε σχέση με τις δύο ανωτέρω προτάσεις, γίνεται αντιληπτό ότι το πρακτικό πρόβλημα μετατοπίζεται στην εκτίμηση της $a_{max,crest}$, η οποία δεν είναι γενικώς ίση με την PGA ή την PGA_b που είναι γνωστές από τη μελέτη σεισμικότητας και σεισμικής επικινδυνότητας του έργου. Για την εκτίμηση της $a_{max,crest}$ είναι εν γένει αναγκαία η εκτέλεση μη γραμμικών αριθμητικών αναλύσεων, όπως αυτές που αναφέρονται ακολούθως. Εναλλακτικά, η λύση στο εν λόγω πρόβλημα θα μπορούσε να δοθεί με τη χρήση ανελαστικών φασμάτων απόκρισης στην επιφάνεια του εδάφους θεμελίωσης (γνωστά και αυτά από την ως άνω μελέτη) και την εκτίμηση της $a_{max,crest}$ ως συνάρτησης των πρώτων 2-3 ιδιομορφών ταλάντωσης του φράγματος. Σημειώνεται ότι μία αντίστοιχη μεθοδολογία προτείνεται για την ευστάθεια πρσανών επιχωμάτων μικρού ύψους, έως 15m, από τον ΕΑΚ (2002).

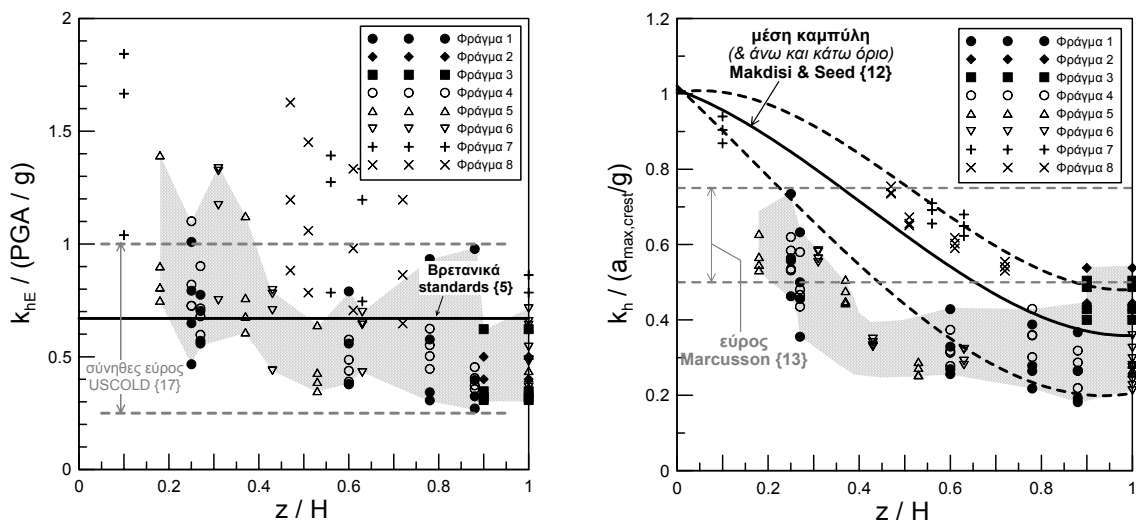
3 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΩΝ ΤΗΣ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑΣ

Ακολούθως, επιχειρείται αξιολόγηση των ανωτέρω μεθοδολογιών εκτίμησης του σεισμικού συντελεστή επί τη βάση σχετικών αριθμητικών αποτελεσμάτων. Πιο συγκεκριμένα, για το σκοπό της αξιολόγησης έγινε συλλογή αποτελεσμάτων από 2Δ αριθμητικές αναλύσεις σεισμικής απόκρισης πραγματικών φραγμάτων και υψηλών επιχωμάτων που ελάμβαναν υπόψη τη μη-γραμμική συμπεριφορά του εδάφους, κάνοντας χρήση είτε της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων (π.χ QUAD4M {8}) ή της μεθόδου των πεπερασμένων διαφορών (π.χ FLAC {11}). Στη συνέχεια, εφαρμόστηκαν διαδοχικά οι ανωτέρω μεθοδολογίες εκτίμησης των σεισμικών συντελεστών για τις περιπτώσεις των φραγμάτων των αριθμητικών αναλύσεων, και οι τιμές των σεισμικών συντελεστών που προέκυψαν συγκρίθηκαν με τα αντίστοιχα αριθμητικά αποτελέσματα.

Οι 2Δ αναλύσεις αφορούν συνολικά δώδεκα (12) διατομές από οκτώ (8) φράγματα και υψηλά επιχώματα, με ύψος H που κυμαίνεται από 22 έως 130m, κάθε μία από τις οποίες υποβλήθηκε σε 1 έως 4 σεισμικές διεγέρσεις. Συνολικά, χρησιμοποιούνται αποτελέσματα από 28 αριθμητικές αναλύσεις για σεισμικές διεγέρσεις έντασης $PGA = 0.16 \text{ έως } 0.37g$ και δεσπόζουσας περιόδου $T_e = 0.13 \text{ έως } 0.49\text{sec}$. Σημειώνεται ότι στις 2Δ αναλύσεις γινόταν διακριτοποίηση του σώματος του φράγματος, αλλά και του εδάφους θεμελίωσης σε επαρκές βάθος και πλάτος εκατέρωθεν του φράγματος, και η σεισμική διέγερση επιβαλλόταν ομοιόμορφα στη βάση του καννάβου. Στα πλευρικά όρια και τη βάση του καννάβου χρησιμοποιούνταν κατάλληλα σύνορα για την προσομοίωση της απόσβεσης ακτινοβολίας [π.χ σύνορα ελευθέρου πεδίου στα πλευρικά όρια των αναλύσεων με χρήση του FLAC {11}]. Η μη γραμμική συμπεριφορά των εδαφών ελήφθη υπόψη

είτε μέσω της ισοδύναμα-γραμμικής μεθόδου (π.χ QUAD4M {8}) ή μέσω πραγματικής μη-γραμμικής καταστατικής σχέσης (π.χ FLAC {11}).

Από κάθε αριθμητική ανάλυση εκτιμήθηκε η μέγιστη τιμή του σεισμικού συντελεστή k_h για 2 έως 5 επιφάνειες ολίσθησης, ανεβάζοντας το συνολικό πλήθος των τιμών k_h της βάσης αριθμητικών αποτελεσμάτων σε 112. Σημειώνεται ότι για κάθε υπό μελέτη επιφάνεια ολίσθησης, η μέγιστη τιμή του σεισμικού συντελεστή k_h εκτιμήθηκε ως η μέγιστη τιμή της συνισταμένης χρονοϊστορίας επιτάχυνσης της μάζας που περικλείει η εν λόγω επιφάνεια. Στη συνέχεια, η ενεργή τιμή του σεισμικού συντελεστή k_{hE} εκτιμήθηκε απλά ως $k_{hE} = 0.67 k_h$. Σημειώνεται ότι για τις περιπτώσεις των φραγμάτων 7 & 8 (βλ. επόμενα σχήματα), η εκτίμηση των συντελεστών k_h και k_{hE} βασίζεται εν μέρει στη μεθοδολογία των {12} και για το λόγο αυτό οι τιμές τους συμπεριλαμβάνονται στη βάση δεδομένων μόνον ενδεικτικά.



Σχήμα 2. Σύγκριση αριθμητικών αποτελεσμάτων με εμπειρικές συσχετίσεις: α) του ενεργού συντελεστή k_{hE} με τη μέγιστη επιτάχυνση στο ελεύθερο πεδίο του εδάφους θεμελίωσης PGA, β) του μέγιστου συντελεστή k_h με τη μέγιστη επιτάχυνση στη στέγη του φράγματος $a_{max,crest}$.

Σύμφωνα με τους {4}, η σύγκριση των ανωτέρω αριθμητικών αποτελεσμάτων με εμπειρικές εκτιμήσεις του σεισμικού συντελεστή k_{hE} που προκύπτουν από αδήρη συσχέτιση με τη σεισμικότητα της περιοχής του έργου καθιστά σαφές ότι υπάρχει αυξητική επίδραση της PGA στην τιμή του σεισμικού συντελεστή. Επιπλέον, η ίδια σύγκριση υποδεικνύει ότι οι συνήθεις τιμές σεισμικών συντελεστών από τη βιβλιογραφία ($k_{hE} = 0.10$ έως 0.20 , σύμφωνα με την παράγραφο 2.1) είναι ασφαλείς επιλογές για τιμές $PGA \leq 0.30g$, ενώ αντίθετα μπορεί να αποδειχθούν έντονα μη συντηρητικές για έργα που σχεδιάζονται για σεισμούς μεγαλύτερης έντασης.

Εν συνεχεία, στο Σχήμα 2α αξιολογούνται οι εμπειρικές εκτιμήσεις του ενεργού σεισμικού συντελεστή k_{hE} που βασίζονται σε συσχετίσεις με τη μέγιστη επιτάχυνση στην ελεύθερη επιφάνεια του εδάφους θεμελίωσης PGA (βλέπε παράγραφο 2.2). Παράλληλα, διερευνάται εάν υπάρχει επίδραση του αδιάστατου λόγου z/H , όπου z είναι το μέγιστο βάθος της επιφάνειας ολίσθησης (από τη στέγη) ως προς το ύψος H του φράγματος (βλέπε Σχήμα 1). Από το σχήμα αυτό προκύπτει ότι η συσχέτιση του ενεργού σεισμικού συντελεστή k_{hE} με την PGA αποτελεί μία εύλογη επιλογή, ενώ παρατηρείται συστηματική μείωση της τιμής του σεισμικού συντελεστή για την ίδια PGA, αυξανόμενου του αδιάστατου λόγου z/H . Από ποσοτική άποψη, είναι αξιοσημείωτο ότι η πρόταση των Βρετανικών standards {5} είναι αρκετά ρεαλιστική (έως και συντηρητική) για επιφάνειες ολίσθησης μέσου και μεγάλου βάθους ($z/H \geq 0.4$), ενώ υπο-εκτιμά τον σεισμική συντελεστή για επιφάνειες ολίσθησης μικρότερου βάθους. Επίσης, το εύρος των εμπειρικών εκτιμήσεων κατά

{17} περιλαμβάνει την πλειονότητα των αριθμητικών αποτελεσμάτων, εκτός ίσως από πολύ μικρού βάθους επιφάνειες ολίσθησης. Η συμφωνία όμως αυτή είναι μικρού πρακτικού ενδιαφέροντος λόγω της μεγάλης ομολογουμένως απόστασης μεταξύ των ορίων στις τιμές του σεισμικού συντελεστή που θέτουν οι εν λόγω κανονιστικές διατάξεις.

Αντίστοιχα, στο Σχήμα 2β αξιολογούνται οι εμπειρικές συσχετίσεις του μέγιστου σεισμικού συντελεστή k_h με τη μέγιστη επιτάχυνση στη στέγη του φράγματος $a_{\max,crest}$ και τον αδιάστατο λόγο z/H . Παρατηρείται ότι η συσχέτιση του μέγιστου σεισμικού συντελεστή k_h με την $a_{\max,crest}$ μειώνει τη διασπορά των αποτελεσμάτων, σε σχέση με την αντίστοιχη συσχέτιση με τη PGA του Σχήματος 2α, ενώ παραμένει η συστηματική (μειωτική) επίδραση του αδιάστατου λόγου z/H στην τιμή του σεισμικού συντελεστή για την ίδια τιμή της $a_{\max,crest}$. Σε σχέση με τις προτάσεις από τη βιβλιογραφία, αποδεικνύεται ότι το εύρος των εκτιμήσεων κατά {13} αποτελεί μία μάλλον υπεραπλουστευτική προσέγγιση και οδηγεί σε συντηρητικές εκτιμήσεις για επιφάνειες ολίσθησης πρακτικού ενδιαφέροντος (με $z/H > 0.30$). Αντιθέτως, η πρόταση των {12} είναι ποιοτικά ορθή, και προσεγγίζει ικανοποιητικά τις αριθμητικές εκτιμήσεις του σεισμικού συντελεστή για επιφάνειες ολίσθησης μεγάλου βάθους ($z/H \geq 0.70$). Για τις υπόλοιπες περιπτώσεις όμως, μπορεί να υπερεκτιμά σημαντικά τις μέσες τιμές του σεισμικού συντελεστή (έως 100%).

4 ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

4.1 Γενικά

Σύμφωνα με τις διαπιστώσεις της προηγούμενης παραγράφου, καμία από τις βιβλιογραφικές μεθοδολογίες εκτίμησης των σεισμικών συντελεστών που εξετάστηκαν δε συμφωνεί με τα αριθμητικά αποτελέσματα σε όλο το εύρος διακύμανσής τους. Έτσι, προκειμένου να προταθεί μια νέα βελτιωμένη μεθοδολογία, στο παρόν κεφάλαιο εξετάζεται ποιοι είναι οι παράγοντες που επηρεάζουν τις σημαντικές παραμέτρους του προβλήματος, και συγκεκριμένα:

- ο λόγο $k_h/(PGA/g)$, ο οποίος επιτρέπει εκτίμηση του σεισμικού συντελεστή με βάση τα σεισμολογικά δεδομένα και τις εδαφικές συνθήκες θεμελίωσης, και
- το λόγο $k_h/(a_{\max,crest}/g)$, ο οποίος οδηγεί σε εκτιμήσεις του σεισμικού συντελεστή λαμβάνοντας υπόψη επιπλέον και την ταλάντωση του ίδιου του φράγματος.

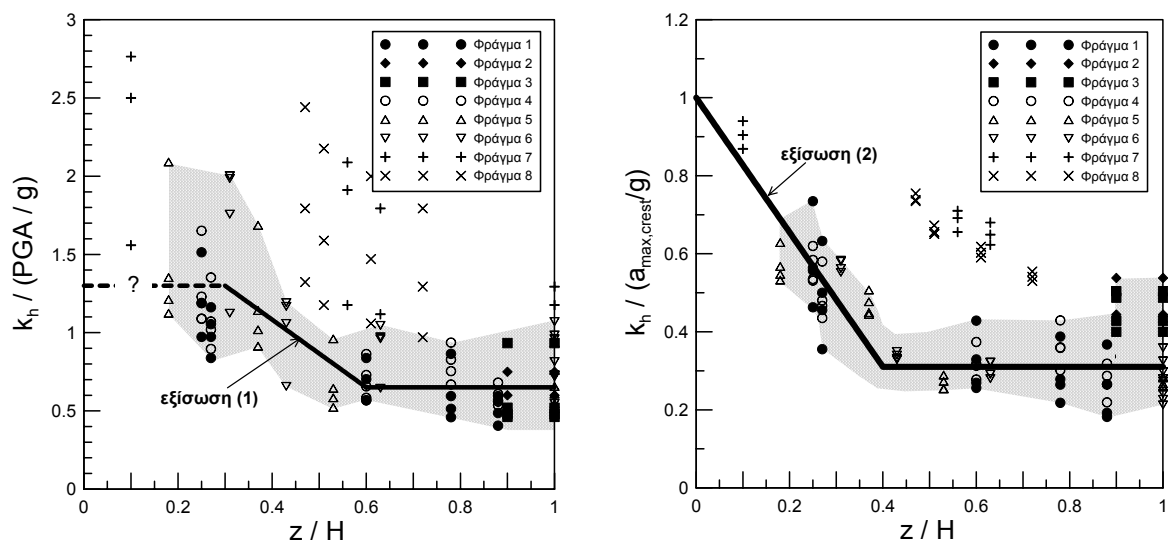
Σημειώνεται ότι η έμφαση εδώ δίδεται στη μέγιστη τιμή του σεισμικού συντελεστή k_h θεωρώντας ότι η τιμή του ενεργού συντελεστή k_{hE} μπορεί να εκτιμηθεί προσεγγιστικά ως: $k_{hE}=(0.5 \text{ έως } 0.8)k_h$.

4.2 Εκτίμηση σεισμικού συντελεστή επί τη βάση της PGA

Όπως προκύπτει από το Σχήμα 2α, η συσχέτιση του σεισμικού συντελεστή με την τιμή της PGA και τον αδιάστατο λόγο z/H είναι σχετικώς ικανοποιητική. Έτσι, στο Σχήμα 3α παρουσιάζεται το διάγραμμα σχεδιασμού του μέγιστου σεισμικού συντελεστή k_h ως συνάρτηση των δύο ανωτέρω παραγόντων, με τη διακεκομμένη γραμμή να θεωρείται μια ενδεικτική μέση τιμή που δίνεται από την παρακάτω εξίσωση (1):

$$\frac{k_h}{(PGA/g)} = \begin{cases} 1.3 & , \quad 0.0 \leq z/H \leq 0.3 \\ 1.3 - 2.17(z/H - 0.3) & , \quad 0.3 \leq z/H \leq 0.6 \\ 0.65 & , \quad 0.6 \leq z/H \leq 1.0 \end{cases} \quad (1)$$

Η ανωτέρω προσέγγιση θεωρείται απλουστευτική, καθώς δε λαμβάνει υπόψη την ταλάντωση του φράγματος, ενώ οι προκύπτουσες εκτιμήσεις του σεισμικού συντελεστή θεωρούνται σχετικές αδρές ειδικά για αβαθείς επιφάνειες ολίσθησης ($z/H \leq 0.4$).



Σχήμα 3. Διάγραμμα εκτίμησης (βάσει αριθμητικών αποτελεσμάτων) του μέγιστου συντελεστή k_h ως συνάρτησης του αδιάστατου λόγου z/H και α) της μέγιστης σεισμικής επιτάχυνσης PGA στο έδαφος θεμελίωσης, και β) της μέγιστης σεισμικής επιτάχυνσης στη στέψη του φράγματος $a_{max,crest}$.

4.3 Εκτίμηση σεισμικού συντελεστή επί τη βάση της $a_{max,crest}$

Όπως προκύπτει από το Σχήμα 2β, η συσχέτιση του σεισμικού συντελεστή με την τιμή της $a_{max,crest}$ και τον αδιάστατο λόγο z/H είναι ιδιαίτερα ικανοποιητική. Έτσι, στο Σχήμα 3β παρουσιάζεται το διάγραμμα σχεδιασμού του μέγιστου σεισμικού συντελεστή k_h ως συνάρτησης των δύο ανωτέρω παραγόντων, με τη συνεχή γραμμή να αντιστοιχεί στη μέση τιμή που δίνεται από την παρακάτω εξίσωση (2):

$$\frac{k_h}{(a_{max,crest}/g)} = \begin{cases} 1 - 1.725(z/H) & , 0.0 \leq (z/H) \leq 0.4 \\ 0.31 & , 0.4 \leq (z/H) \leq 1.0 \end{cases} \quad (2)$$

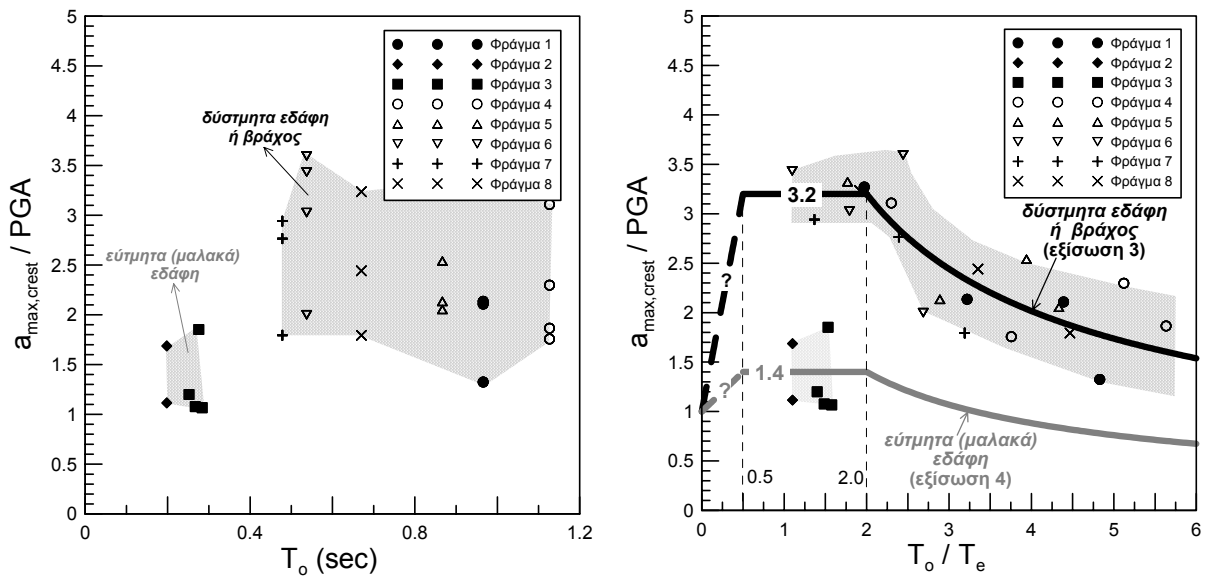
Η ανωτέρω προσέγγιση είναι πιο εύλογη σε σχέση με την εξίσωση (1), καθώς λαμβάνει υπόψη την ταλάντωση του φράγματος, ενώ οδηγεί και σε μικρότερη διασπορά για όλα τα πιθανά βάθη των επιφανειών ολίσθησης και ειδικά στις πλέον αβαθείς ($z/H \leq 0.4$).

Όμως, το πρακτικό πρόβλημα που δημιουργείται για τη χρήση της ανωτέρω σχέσης, όπως και των αντίστοιχων μεθοδολογιών της βιβλιογραφίας (π.χ {13}, {12}), είναι ότι χρειάζεται ένας τρόπος εκτίμησης της $a_{max,crest}$ ο οποίος να είναι εύλογος και επαρκώς απλός. Στα πλαίσια αυτά, οι Παπαδημητρίου κ. α. {4} διερεύνησαν μια συσχέτιση της $a_{max,crest}$ με την $a_{max,base}$, δηλαδή τη μέγιστη σεισμική επιτάχυνση στη βάση του φράγματος (βλέπε Σχήμα 1), αλλά κατέληξαν ότι η διασπορά της εν λόγω συσχέτισης δεν επιτρέπει αξιόπιστη χρήση αυτής. Έτσι, στο Σχήμα 4α διερευνάται η συσχέτιση της $a_{max,crest}$ με την PGA, αλλά και με την (πρώτη) ιδιοπερίοδο ταλάντωσης του φράγματος. Στο Σχήμα αυτό γίνεται μια αδρή διαφοροποίηση των αριθμητικών αποτελεσμάτων με βάση τις γεωτεχνικές συνθήκες θεμελίωσης, αλλά παρόλα αυτά προκύπτει αρκετά μεγάλη διασπορά. Αντιθέτως, στο Σχήμα 4β η αντίστοιχη συσχέτιση του λόγου $a_{max,crest}/PGA$ ως προς την αδιαστατοποιημένη ιδιοπερίοδο T_o/T_e (όπου T_e η δεσπόζουσα περίοδος της σεισμικής διέγερσης) μειώνει σημαντικά τη διασπορά και επιπλέον διαχωρίζει σαφώς την απόκριση φραγμάτων ή υψηλών επιχωμάτων ανάλογα με τις εδαφικές συνθήκες θεμελίωσης. Έτσι δικαιολογείται ο ορισμός δύο σχέσεων μέσης τιμής, μίας για φράγματα ή υψηλά επιχώματα θεμελιωμένα σε βράχο ή δύστητα εδάφη (εξίσωση 3, συνεχής γραμμή στο Σχήμα 4β) και μίας για αντίστοιχες γεωκατασκευές θεμελιωμένες σε εύμητα εδάφη (εξίσωση 4, διακεκομμένη γραμμή στο Σχήμα 4β):

$$\frac{a_{\max,crest}}{PGA} = \begin{cases} 1 + 4.4 \left(\frac{T_o}{T_e} \right) & , \quad 0.0 \leq \frac{T_o}{T_e} \leq 0.5 \\ 3.2 & , \quad 0.5 \leq \frac{T_o}{T_e} \leq 2.0 \\ 3.2 \left(\frac{2T_o}{T_e} \right)^{2/3} & , \quad 2.0 \leq \frac{T_o}{T_e} \end{cases} \quad (3)$$

$$\frac{a_{\max,crest}}{PGA} = \begin{cases} 1 + 0.8 \left(\frac{T_o}{T_e} \right) & , \quad 0.0 \leq \frac{T_o}{T_e} \leq 0.5 \\ 1.4 & , \quad 0.5 \leq \frac{T_o}{T_e} \leq 2.0 \\ 1.4 \left(\frac{2T_o}{T_e} \right)^{2/3} & , \quad 2.0 \leq \frac{T_o}{T_e} \end{cases} \quad (4)$$

Γίνεται φανερό ότι οι εξισώσεις (3) και (4) δανείζονται τη μορφή τους από τις αντίστοιχες σχέσεις ορισμού των ελαστικών φασμάτων απόκρισης κατά τον ΕΑΚ (2002). Επιπλέον όμως λαμβάνουν υπόψη και τη δεσπόζουσα περίοδο της διέγερσης T_e και έτσι παρουσιάζουν μέγιστο σε τιμές του λόγου T_o/T_e περί το 1.0, υποδεικνύοντας τη σημασία των φαινομένων συντονισμού στη σεισμική απόκριση φραγμάτων.



Σχήμα 4. Συσχέτιση του λόγου $a_{\max,crest}/PGA$ με τις εδαφικές συνθήκες θεμελίωσης και: α) την πρώτη ιδιοπερίοδο T_o του φράγματος, και β) την αδιαστατοποιημένη ιδιοπερίοδο T_o/T_e του φράγματος, βάσει αριθμητικών αποτελεσμάτων

5 ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Με βάση όλα τα ανωτέρω, αλλά και όσα περιγράφονται αναλυτικά από τους {3} και {4}, η προτεινόμενη μεθοδολογία εκτίμησης των σεισμικών συντελεστών εφαρμόζεται σε πέντε (5) διαδοχικά βήματα, που αποτελούν το αντικείμενο των παραγράφων 5.1 έως 5.5 που ακολουθούν.

5.1 Εκτίμηση PGA και δεσπόζουσας περιόδου T_e σεισμικής διέγερσης (Βήμα 1)

Η Μελέτη Σεισμικότητας και Σεισμικής Επικινδυνότητας καταλήγει για κάθε σεισμό σχεδιασμού (MDE, OBE, RIE) σε μια τιμή μέγιστης σεισμικής επιτάχυνσης (PGA_b) αλλά και ένα ελαστικό φάσμα απόκρισης (για απόσβεση 5%) για το αναδύμενο σεισμικό υπόβαθρο. Έτσι, η δεσπόζουσα περίοδος T_e της σεισμικής διέγερσης εκτιμάται ως η περίοδος (ή το εύρος περιόδων) για την οποία εμφανίζεται η μέγιστη τιμή της φασματικής επιτάχυνσης στο ανωτέρω ελαστικό φάσμα απόκρισης. Η εκτίμηση της PGA βασίζεται στην PGA_b , αλλά θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη και τις εδαφικές συνθήκες θεμελίωσης. Έτσι, διακρίνονται δύο περιπτώσεις:

(α) το φράγμα θεμελιώνεται σε βράχο, τότε ισχύει: $PGA = PGA_b$,

(β) το φράγμα θεμελιώνεται σε εδαφική στρώση (π.χ. όπως στο Σχήμα 1).

Στην δεύτερη περίπτωση, η εκτίμηση της PGA μπορεί να γίνει είτε με χρήση κάποιας αριθμητικής μεθόδου [π.χ. ισοδύναμα-γραμμική ανάλυση με χρήση του SHAKE91 {10}] ή με χρήση κάποιας απλουστευτικής μεθοδολογίας, όπως οι κάτωθι σχέσεις [που στηρίζονται στη προσεγγιστική μεθοδολογία των {2}]:

$$PGA = PGA_b \frac{1 + 0.85 \left(\frac{PGA_b}{g} \right)^{-0.17} \left(\frac{T_s}{T_e} \right)^2}{\sqrt{\left(1 - \left(\frac{T_s}{T_e} \right)^2 \right)^2 + 1.78 \left(\frac{T_s}{T_e} \right)^2}} \quad (5)$$

όπου T_s είναι η μη-γραμμική ιδιοπερίοδος της εδαφικής στρώσης θεμελίωσης που εκτιμάται ως:

$$T_s = \left(\frac{4H_s}{V_{ss}} \right) \sqrt{1 + 5330 V_{ss}^{-1.3} \left(\frac{PGA_b}{g} \right)^{1.04}} \quad (6)$$

όπου H_s είναι το πάχος της εδαφικής στρώσης (m) και V_{ss} είναι η (μέση) ταχύτητα διατμητικών κυμάτων στην εδαφική στρώση (m/s).

5.2 Εκτίμηση πρώτης ιδιοπεριόδου T_o φράγματος (Βήμα 2)

Απλουστεύοντας τις σχετικές αναλυτικές σχέσεις των {6}, προτείνεται η χρήση της κάτωθι σχέσης για την εκτίμηση της (πρώτης) ιδιοπεριόδου T_o ενός φράγματος τραπεζοειδούς διατομής:

$$T_o = (2.6 + 2r) \frac{H}{V_s} \quad (7)$$

όπου H είναι το ύψος του φράγματος (m), V_s είναι η μέση ταχύτητα διατμητικών κυμάτων στο σώμα του φράγματος (με έμφαση στο κεντρικό τμήμα της διατομής), η οποία κυμαίνεται συνήθως από 200 έως 300m/s για πυρήνα από συνεκτικό έδαφος (με τις μεγαλύτερες τιμές να εμφανίζονται για υψηλά φράγματα) και έως 350m/s για υψηλά λιθόρριπτα επιχώματα, και r είναι ο λόγος του εύρους της στένης προς το εύρος της βάσης του φράγματος στην εξεταζόμενη διατομή.

Επισημαίνεται ότι για σεισμικές διεγέρσεις μεγάλης έντασης (π.χ $PGA > 0.4g$) προτείνεται η «τεχνητή» απομείωση της τιμής της ταχύτητας V_s , ώστε να ληφθεί υπόψη εμμέσως η αύξηση της ιδιοπεριόδου ταλάντωσης του φράγματος λόγω της μη-γραμμικής συμπεριφοράς των γεωϋλικών κατασκευής του. Η εν λόγω μείωση μπορεί να φθάσει το 30 έως 40% κατά μέγιστο, αλλά σε κάθε περίπτωση η χρήση της σχέσης (7) με την «ελαστική» τιμή της V_s είναι συντηρητική, λόγω της μορφής των φασμάτων σχεδιασμού του Σχήματος 4β (βλ. μη αύξηση της $a_{max,crest}/PGA$ με την T_o , τουλάχιστον για $T_o/T_e \geq 0.5$, δηλαδή για τις πλέον συνήθεις περιπτώσεις).

5.3 Εκτίμηση της $a_{max,crest}$ στη στέψη του φράγματος (Βήμα 3)

Η μέγιστη επιτάχυνση στη στέψη του φράγματος $a_{max,crest}$ εκτιμάται ως συνάρτηση της PGA (βήμα 1), της δεσπόζουσας περιόδου T_e της διέγερσης (βήμα 1) και της πρώτης ιδιοπεριόδου T_o του φράγματος (βήμα 2) σύμφωνα με:

- (α) την εξίσωση (3) για φράγματα που είναι θεμελιωμένα σε βράχο ή δύστημτα εδάφη, ή
- (β) την εξίσωση (4) για φράγματα που είναι θεμελιωμένα σε εύτημτα εδάφη,

Η διαφοροποίηση μεταξύ δύστημων και εύτημων εδαφών θεμελίωσης μπορεί να γίνει αδρά επί τη βάση της γεωτεχνικής μελέτης, ή καλύτερα επί τη βάση του λόγου PGA/PGA_b που εκτιμήθηκε στο βήμα 1. Πιο συγκεκριμένα, κατά συντηρητική προσέγγιση, μόνο αν ο λόγος $PGA/PGA_b < 1.0$ θα πρέπει το έδαφος θεμελίωσης να θεωρείται εύτημο.

5.4 Εκτίμηση της μέγιστης τιμής του σεισμικού συντελεστή k_h (Βήμα 4)

Ο μέγιστος σεισμικός συντελεστής k_h εκτιμάται ως συνάρτηση της $a_{max,crest}$ (βήμα 3) και του αδιάστατου λόγου z/H (του μέγιστου βάθους z της επιφάνειας ολίσθησης ως προς το ύψος H του φράγματος) σύμφωνα με την εξίσωση (2). Η τιμή αυτή αντιστοιχεί στη μέγιστη τιμή της επιτάχυνσης στην ολισθαίνουσα μάζα, και ως εκ τούτου είναι κατάλληλη για τον υπολογισμό των σεισμικών μετατοπίσεων της εν λόγω μάζας με τη θεώρηση «ολισθαίνοντος» στερεού (π.χ {14}, {15}).

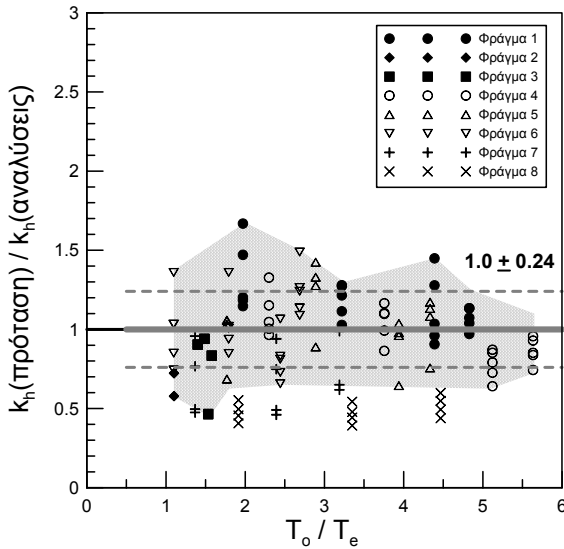
5.5 Εκτίμηση της ενεργής τιμής του σεισμικού συντελεστή k_{hE} (Βήμα 5)

Στη βιβλιογραφία, ο λόγος της ενεργού τιμής του σεισμικού συντελεστή k_{hE} προς την αντίστοιχη μέγιστη τιμή k_h (βήμα 4), κυμαίνεται από 0.5 έως 0.8. Ο μελετητής καλείται να επιλέξει μεταξύ αυτών των τιμών, αλλά η συνηθέστερα χρησιμοποιούμενη τιμή του λόγου είναι η τιμή 2/3. Επισημαίνεται, ότι η ενεργός τιμή του σεισμικού συντελεστή k_{hE} είναι κατάλληλη για χρήση σε ψευδο-στατικές αναλύσεις ευστάθειας των πρανών χωμάτινων φραγμάτων, με ταυτόχρονη απαίτηση για $FSD \geq 1.0$. Υπογραμμίζεται ότι ένας τέτοιος σχεδιασμός οδηγεί σε πολύ μικρές, σχεδόν μηδενικές μετατοπίσεις των πρανών.

5.6 Αξιοπιστία και περιορισμοί της μεθοδολογίας

Για τη διερεύνηση της ακρίβειας εκτίμησης του σεισμικού συντελεστή k_h , η προτεινόμενη μεθοδολογία εφαρμόστηκε για την εκ των υστέρων «πρόβλεψη» των τιμών του συντελεστή k_h από τις αριθμητικές αναλύσεις και για τις 112 περιπτώσεις της βάσης δεδομένων. Έτσι στο Σχήμα 5 παρουσιάζεται η επίδραση της αδιαστατοποιημένης ιδιοπεριόδου T_o/T_e του φράγματος στην τιμή του λόγου του k_h από την προτεινόμενη μεθοδολογία προς την τιμή του k_h από τις λεπτομερείς αριθμητικές αναλύσεις. Όπως προκύπτει η προτεινόμενη μεθοδολογία είναι ικανοποιητικά ακριβής στην εκτίμηση του k_h , με σχετικά μικρή διασπορά, καθώς η τυπική απόκλιση του σχετικού λάθους είναι $\pm 24\%$. Το ίδιο σχήμα υποδεικνύει ότι η διασπορά είναι πρακτικώς ομοιόμορφη και ανεξάρτητη της τιμής του T_o/T_e , αλλά και των υπολοίπων σημαντικών παραμέτρων του προβλήματος H , T_o και z/H {3}.

Η νέα μεθοδολογία προτείνεται για την εκτίμηση των σεισμικών συντελεστών για το εύρος τιμών των παραμέτρων πάνω στις οποίες στηρίχθηκε η εξαγωγή της, δηλαδή για:



Σχήμα 5. Επίδραση αδιαστατοποιημένης ιδιοπεριόδου φράγματος T_0/T_e στην ακρίβεια εκτίμησης του συντελεστή k_h σύμφωνα με την προτεινόμενη μεθοδολογία.

- Χωμάτινα φράγματα και υψηλά επιχώματα με ύψος $H = 22$ έως 130m , τριγωνικής ή τραπεζοειδούς διατομής με λόγο εύρους στέγης προς βάσης στη διατομή $r = 0$ έως 0.1 (σύνηθες εύρος), που θεμελιώνονται σε διάφορες εδαφικές συνθήκες,
- Διεγέρσεις με δεσπόζουσα περίοδο $T_e = 0.13$ έως 0.49s (σύνηθες εύρος στον Ελλαδικό χώρο), μέγιστη επιτάχυνση στο αναδύμενο υπόβαθρο $PGA_b = 0.27$ έως $0.37g$, ενώ το αντίστοιχο εύρος στο ελεύθερο πεδίο του εδάφους θεμελίωσης είναι $PGA = 0.16$ έως $0.37g$.
- Πιθανές επιφάνειες ολίσθησης που διέρχονται από την περιοχή της στέγης του πρανούς, διέρχονται από τον πυρήνα και έχουν διεισδύσει σε επαρκές βάθος εντός του σώματος του φράγματος ώστε να μη μπορούν να προσομοιωθούν απλουστευτικά με θεώρηση απειρομήκους πρανούς (δεν είναι δηλαδή ρηχές ή επιφανειακές).

6 ΠΕΡΙΛΗΨΗ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο παρόν άρθρο παρουσιάζεται μια βελτιωμένη μεθοδολογία εκτίμησης σεισμικών συντελεστών για την εκτέλεση ψευδο-στατικών αναλύσεων ευστάθειας πρανών χωμάτινων φραγμάτων και υψηλών επιχωμάτων. Η προτεινόμενη μεθοδολογία στηρίζεται σε στατιστική επεξεργασία αριθμητικών αποτελεσμάτων από 28 2Δ αναλύσεις σεισμικής απόκρισης. Η μεθοδολογία εφαρμόζεται σε πέντε (5) διαδοχικά βήματα, είναι απλή στη χρήση καθώς χρησιμοποιεί διαγράμματα και εξισώσεις σχεδιασμού και εκτιμά τους σεισμικούς συντελεστές ως συναρτήσεις: α) της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης στο ελεύθερο πεδίο του εδάφους θεμελίωσης PGA , β) της δεσπόζουσας περιόδου T_e της σεισμικής διέγερσης, γ) της πρώτης ιδιοπεριόδου T_0 του φράγματος, λαμβάνοντας υπόψη αδρά και τις εδαφικές συνθήκες θεμελίωσης, και δ) τον αδιάστατο λόγο z/H (του μεγίστου βάθους z της επιφάνειας ολίσθησης ως προς το ύψος H του φράγματος). Κατ' αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται ικανοποιητική ακρίβεια σε σχέση με τα αριθμητικά αποτελέσματα, με τυπική απόκλιση του λάθους $\pm 24\%$.

Σε σύγκριση με τις υπάρχουσες μεθοδολογίες ή οδηγίες σχεδιασμού της βιβλιογραφίας, η νέα μεθοδολογία απαλείφει υπερ-απλουστεύσεις και αυξάνει την ακρίβεια εκτίμησης των σεισμικών συντελεστών. Παρόλα αυτά, υπάρχουν ακόμη περιθώρια βελτίωσης κυρίως ως προς το εύρος εφαρμογής της (π.χ. για ιδιαίτερα υψηλές τιμές της PGA , για διαφορετικών μορφών επιφάνειες

ολίσθησης). Επιπλέον, θεωρείται αναγκαία η αξιολόγηση της βελτιωμένης μεθοδολογίας έναντι αριθμητικών αποτελεσμάτων που δεν συμπεριλαμβάνονται στη βάση δεδομένων πάνω στην οποία στηρίχθηκε. Σημειώνεται ότι η εν λόγω διαδικασία αξιολόγησης και διεύρυνσης του εύρους εφαρμογής της προτεινόμενης μεθοδολογίας βρίσκεται σε εξέλιξη, καθώς αποτελεί το αντικείμενο ερευνητικού προγράμματος με τίτλο «*Εκτίμηση Σεισμικών Παραμέτρων Ανάλυσης Ευστάθειας Πρανών Χωμάτων Φραγμάτων: Β΄ Φάση*» που χρηματοδοτείται από τη ΔΑΥΕ/ΔΕΗ.

7 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. ANCOLD (1998), "Guidelines for design of dams for earthquake", Australian National Committee on Large Dams, Melbourne
2. Bouckovalas G. D., Papadimitriou A. G. (2003), "Multi-variable relations for soil effects on seismic ground motion", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 32: 1867-1896, Wiley
3. Μπουκοβάλας Γ. Δ., Παπαδημητρίου Α. Γ. (2006), "Εκτίμηση Σεισμικών Παραμέτρων Ανάλυσης Ευστάθειας Πρανών Χωμάτων Φραγμάτων: Α΄ Φάση", Τεχνική Έκθεση προς ΔΕΗ/ΔΑΥΕ, Νοέμβριος.
4. Παπαδημητρίου Α. Γ., Μπουκοβάλας Γ. Δ., Αναστασόπουλος Κ. (2008), "Βελτιωμένη μεθοδολογία εκτίμησης σεισμικών συντελεστών για τη ψευδο-στατική ανάλυση ευστάθειας πρανών χωμάτων φραγμάτων", Πρακτικά, 3^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Αντισεισμικής Μηχανικής & Τεχνικής Σεισμολογίας, 5-7 Νοεμβρίου, Αθήνα, άρθρο 2060.
5. Charles J. A., Abiss C. P., Gosschalk E. M., Hinks J. L. (1991), "An engineering guide to seismic risk to dams in the United Kingdom", Building Research Establishment Report.
6. Dakoulas P., Gazetas G. (1985), "A class of inhomogeneous shear models for seismic response of dams and embankments", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 4(4): 166-182
7. EuroCode – 8: Design of Structures for Earthquake Resistance, (draft 2003).
8. Hudson M., Idriss I. M., and Beikae M. (1994), "QUAD4M: A computer program to evaluate the seismic response of soil structures using finite element procedures and incorporating a compliant base", User's Manual, CGM, UC Davis, CA
9. Hynes-Griffin M. E., Franklin A. G. (1984), "Rationalizing the seismic coefficient method", Miscellaneous Paper GL-84-13, U.S. Army Corps of Engineers Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi, 21 pp
10. Idriss I. M., Sun J. I. (1992), "SHAKE91: a computer program for conducting equivalent linear seismic response analyses of horizontally layered soil deposits", User's Guide, University of California at Davis
11. Itasca Consulting Group Inc (1998), "FLAC – Fast Lagrangian Analysis of Continua", Version 3.4, User's Manual, Minneapolis: Itasca.
12. Makdisi F. H., Seed H. B. (1978), "Simplified procedure for estimating dam and embankment earthquake-induced deformations", *Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 104(7): 849-867
13. Marcusson W. F., III (1981), "Moderator's report for session on 'Earth dams and stability of slopes under dynamic loads',", Proceedings, International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, 3, pp. 1175
14. Newmark N. (1965), "Effects of earthquakes on dams and embankments", *Geotechnique*, 15(2): 139-160
15. Richards R., Elms D. G. (1979), "Seismic behaviour of gravity retaining walls", *Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 105(4), pp. 449-464
16. Terzaghi K. (1950), "Mechanisms of landslides", *Engineering Geology (Berkey) Volume*, Geological Society of America
17. USCOLD (1985) "Guidelines for selecting seismic parameters for dam projects", Report of Committee on Earthquakes, U.S. Committee on Large Dams
18. Youd T. L., Idriss I. M. (2001), "Liquefaction resistance of soils: summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF Workshops on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, 127(4): 297 – 313

New methodology for the estimation of seismic coefficients for the pseudo-static slope stability analysis of earth dams

A.G. Papadimitriou

Lecturer. Department of Civil Engineering, University of Thessaly, Greece

G.D. Bouckovalas

Professor. School of Civil Engineering, National Technical University of Athens, Greece

K. Anastassopoulos

Civil Engineer MSc. Hydro Development Department, Public Power Company, Greece

Key Words: earth dams, numerical analysis, pseudo-static analysis, seismic coefficients, slope stability

ABSTRACT: This paper presents a new methodology for the estimation of seismic coefficients for the pseudo-static slope stability analysis of earth dams. This methodology is based on the statistical analysis of results from twenty eight (28) 2D seismic response analyses of earth dams and high embankments. The new methodology employs design charts and equations and estimates the seismic coefficients as functions of: (a) the peak ground acceleration at the free field of the foundation soil, (b) the predominant period of the seismic excitation, (c) the fundamental vibration period of the earth dam, broadly taking into account the soil foundation conditions, and (d) the dimensionless ratio z/H (of the maximum depth z of the failure surface over the height H of the dam). The new methodology offers accuracy with a standard deviation of the error $\pm 24\%$.