

# Προσεγγιστικές Σχέσεις Επίδρασης Τοπογραφίας στη Σεισμική Εδαφική Κίνηση

## Approximate Relations for the Effects of Topography on Seismic Ground Motion

ΜΠΟΥΚΟΒΑΛΑΣ, Γ. Δ.	Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, Καθηγητής, Ε.Μ.Π
ΠΑΠΑΔΗΜΗΤΡΙΟΥ, Α. Γ.	Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, Ε.Μ.Π
ΒΑΣΔΕΚΗΣ, Σ.	Πολιτικός Μηχανικός Ε.Μ.Π.
ΒΟΥΡΒΑΧΑΚΗΣ, Θ.	Πολιτικός Μηχανικός Ε.Μ.Π.
ΔΡΑΝΔΑΚΗΣ, Ε.	Πολιτικός Μηχανικός Ε.Μ.Π.
ΣΟΦΙΑΝΟΥ, Ι.	Πολιτικός Μηχανικός Ε.Μ.Π.

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ:** Παρουσιάζονται αποτελέσματα από παραμετρικές αριθμητικές αναλύσεις σεισμικής απόκρισης ομοιόμορφου μονοκλινούς πρσανούς υπό κατακορύφως διαδιδόμενα κύματα SV. Οι αναλύσεις διερευνούν τις επιδράσεις της γεωμετρίας του πρσανούς, των δυναμικών εδαφικών παραμέτρων, της διάρκειας και του συχνотικού περιεχομένου της διέγερσης στην τοπογραφική επιδείνωση της σεισμικής εδαφικής κίνησης. Προκύπτει ότι η τοπογραφία δημιουργεί έντονη γεωγραφική διαφοροποίηση της οριζόντιας κίνησης (με γενική τάση ενίσχυσης στη στέψη και απομείωσης στον πόδα) και ανάπτυξη παρασιτικής κατακόρυφης κίνησης πλησίον του πρσανούς. Προτείνονται προσεγγιστικές σχέσεις για την προκαταρκτική εκτίμηση της τοπογραφικής επιδείνωσης της σεισμικής εδαφικής κίνησης και του εύρους της επηρεαζόμενης περιοχής πλησίον του πρσανούς.

**ABSTRACT:** This paper presents results from parametric numerical analyses for the seismic response of step-like uniform ground slopes, under vertically propagating SV waves. The analyses explore the effects of slope geometry, dynamic soil properties, excitation frequency content and duration on the topographic aggravation of the seismic ground motion. The results show intense geographic variability of horizontal motion (with a general trend of amplification near the crest and de-amplification near the toe) and the apparition of parasitic vertical motion near the slope. In addition, approximate relations are proposed for the preliminary evaluation of topographic aggravation of seismic ground motion and the width of the affected zone near the crest slope.

### 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Παρά το γεγονός ότι η επίδραση της τοπογραφίας μονοκλινούς πρσανούς στη σεισμική κίνηση έχει ιστορικά καταγραφεί ως ένας σημαντικός παράγων στην καταστροφικότητα ενός σεισμού (π.χ. Αίγιο 1995, Αθήνα 1999), το σχετικό φαινόμενο δεν έχει τύχει συστηματικής διερεύνησης στη βιβλιογραφία. Οι περισσότερες δημοσιευμένες έρευνες αφορούν απλώς ανάλυση ιστορικών περιστατικών (π.χ. Bouckovalas et al 1999, Athanasopoulos et al 2001, Gazetas et al 2002), ή διερευνούν συγκεκριμένες εκφάνσεις του φαινομένου όπως η επίδραση ύπαρξης εύκαμπτης στρώσης στη στέψη (Ohtsuki and Harumi 1983). Οι μόνες μελέτες παραμετρικής φύσης

παρουσιάζονται από τους Ashford and Sitar (1997) και Ashford et al (1997), οι οποίοι δίνουν ποσοτικά στοιχεία για την επίδραση της κλίσης  $i$  και του ύψους του πρσανούς  $H$ , του είδους (P, SH και SV) και του μήκους κύματος  $\lambda$ , όπως επίσης και της γωνίας πρόσπτωσης  $\beta$ .

Συμπληρώνοντας και κυρίως επεκτείνοντας τις προαναφερθείσες μελέτες, οι Bouckovalas & Papadimitriou (2005) διερευνούν την επίδραση και άλλων παραμέτρων, όπως η υστερητική απόσβεση του εδάφους  $\xi$  και ο αριθμός σημαντικών κύκλων της διέγερσης  $N$ . Επιπλέον, εκτιμούν την τοπογραφική επιδείνωση καθ' όλο το μήκος της επιφάνειας του εδάφους και προτείνουν προσεγγιστικές σχέσεις υπολογισμού της επίδρασης της τοπογραφίας μονοκλινούς πρσανούς στη σεισμική

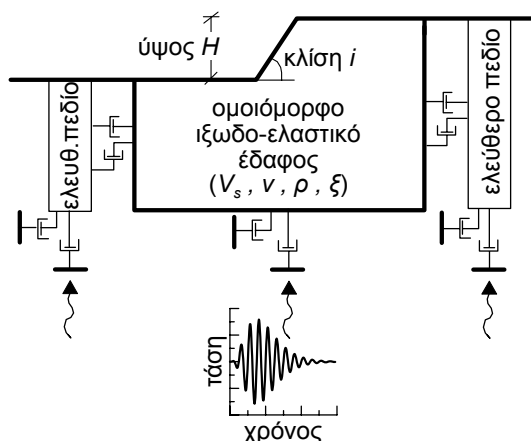
κίνηση. Στο παρόν άρθρο, παρουσιάζονται περιληπτικά οι εν λόγω σχέσεις, αλλά κυρίως επεκτείνονται σε μορφή διαγραμμάτων σχεδιασμού που θα μπορούσαν να αποτελέσουν τη βάση κανονιστικών διατάξεων.

## 2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Οι προσεγγιστικές σχέσεις προέκυψαν από εκτεταμένες παραμετρικές αναλύσεις με τη μέθοδο πεπερασμένων διαφορών FLAC (Itasca 1993). Το έδαφος θεωρήθηκε ιξωδοελαστικό, ομοιόμορφο με  $V_s = 500\text{m/s}$ , λόγο Poisson  $\nu = 1/3$  και πυκνότητα  $\rho = 2\text{Mg/m}^3$ . Το Σχήμα 1 παρουσιάζει ένα παράδειγμα 2D γεωμετρίας πρηνούς με τις συνοριακές συνθήκες των αναλύσεων. Συγκεκριμένα, οι αναλύσεις έγιναν με:

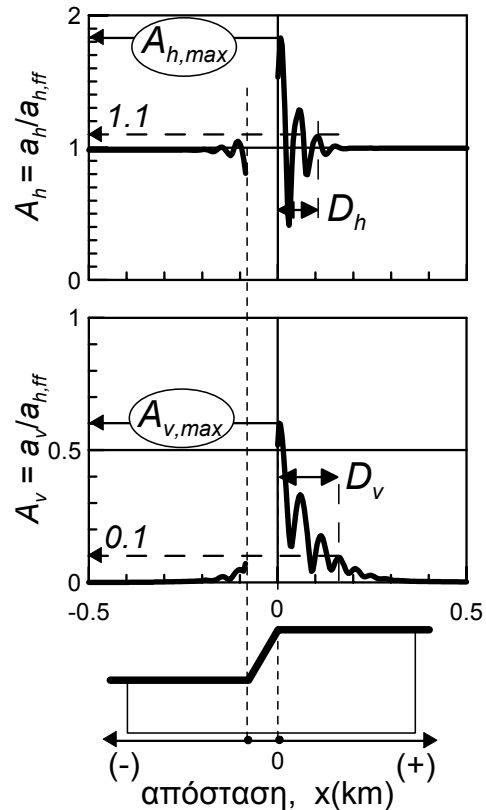
- 28000 έως 120000 τετραγωνικά στοιχεία, με μέγιστο ύψος  $1/10 - 1/20$  του δεσπόζοντος μήκους κύματος  $\lambda$  της διέγερσης,
- εύρος και ύψος του καννάβου ίσα με  $20H$  και  $5H$ , αντίστοιχα, όπου  $H$  το ύψος του πρηνούς,
- αποσβεστήρες στη βάση και σύνορα ελεύθερου πεδίου στα πλευρικά όρια του καννάβου, και
- επιβολή της σεισμικής διέγερσης μορφής αρμονικής ή παλμού Chang (βλέπε Σχήμα 1) στη βάση του καννάβου ως χρονοιστορία διατμητικής τάσης που αντιστοιχεί σε κατακόρυφη πρόσπτωση κυμάτων SV.

Σημειώνεται ότι η επιβολή της διέγερσης ως χρονοιστορίας τάσης και όχι επιτάχυνσης, (όπως συνήθως γίνεται στην πράξη) διασφαλίζει τη μη δημιουργία τεχνητών ανακλάσεων.



Σχήμα 1. Τυπική 2D γεωμετρία αναλύσεων, συνοριακές συνθήκες και διέγερση βάσης  
Figure 1. Typical 2D geometry of analyses, boundary conditions and base excitation

Άλλωστε, η ακρίβεια της ανωτέρω αριθμητικής μεθοδολογίας εξακριβώθηκε μέσω συγκρίσεων με αναλυτικές λύσεις για τοπογραφίες διαφόρων μορφών σε ελαστικό ημίχωρο. Περισσότερες λεπτομέρειες για τη διακρίβωση της μεθοδολογίας δίνονται από τους Bouckovalas & Papadimitriou (2005).



Σχήμα 2. Τυπικά αποτελέσματα τοπογραφικής επιδείνωσης της μέγιστης οριζόντιας επιτάχυνσης και ανάπτυξης μέγιστης παρασιτικής κατακόρυφης επιτάχυνσης.

Figure 2. Typical results of topographic aggravation of the peak horizontal acceleration and apparition of peak parasitic vertical acceleration.

## 3. ΤΥΠΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Το Σχήμα 2 παρουσιάζει τυπικά αποτελέσματα από τις αριθμητικές αναλύσεις για την περίπτωση πρηνούς με κλίση  $i = 30^\circ$ , κανονικοποιημένο ύψος πρηνούς  $H/\lambda = 2.0$ , απόσβεση  $\xi = 5\%$  και έξι σημαντικούς κύκλους διέγερσης ( $N = 6$ ). Το σχήμα αυτό παρουσιάζει τη μεταβολή των παραγόντων τοπογραφικής επιδείνωσης  $A_h = a_h/a_{h,ff}$  και  $A_v = a_v/a_{h,ff}$  με την απόσταση από τη στέψη  $x$ , όπου  $a_h$  και  $a_v$  είναι η μέγιστη οριζόντια και η μέγιστη παρασιτική κατακόρυφη επιτάχυνση σε κάθε σημείο της επιφάνειας.

Η παράμετρος  $a_{h,ff}$  είναι η μέγιστη οριζόντια επιτάχυνση στην επιφάνεια του ελεύθερου πεδίου, και χρησιμοποιείται για την κανονικοποίηση όχι μόνο της μέγιστης οριζόντιας επιτάχυνσης  $a_h$ , αλλά και της μέγιστης παρασιτικής κατακόρυφης συνιστώσας  $a_v$ , καθώς  $a_{v,ff} = 0$  για ένα κατακόρυφα προσπίπτον κύμα SV. Επιπλέον, από το Σχήμα 2 προκύπτουν οι εξής γενικές παρατηρήσεις:

- (α) Αναμένεται εν γένει ενίσχυση της οριζόντιας κίνησης στην περιοχή πίσω από τη στέψη, και απομείωση αυτής μπροστά από τον πόδα του πρानού. Οι επιδράσεις αυτές απομειώνονται με την απόσταση από το πρानές, έως ότου η απόκριση γίνει ίση με αυτή στο ελεύθερο πεδίο.
- (β) Ακόμη και μια αμιγώς οριζόντια διέγερση, προκαλεί σημαντική παρασιτική κατακόρυφη κίνηση στη γειτονία του πρानού, η οποία μπορεί, υπό προϋποθέσεις, να είναι της τάξης μεγέθους της οριζόντιας κίνησης.
- (γ) Η τοπογραφική επιδείνωση της οριζόντιας κίνησης παρουσιάζει έντονη γεωγραφική διαφοροποίηση πίσω από τη στέψη, που μπορεί να χαρακτηρίζεται και από μεταβολή μεταξύ ενίσχυσης ( $A_h > 1.0$ ) και απόμειωσης ( $A_h < 1.0$ ) σε μικρές οριζόντιες αποστάσεις της τάξης του μήκους κύματος  $\lambda$  των κυμάτων SV. Αντίστοιχα έντονη διαφοροποίηση εμφανίζεται και στην παρασιτική κατακόρυφη κίνηση.

Η παρασιτική κατακόρυφη κίνηση στη γειτονία του πρानού αποδίδεται στις ανακλάσεις των προσπίπτοντων κυμάτων SV στην επιφάνεια

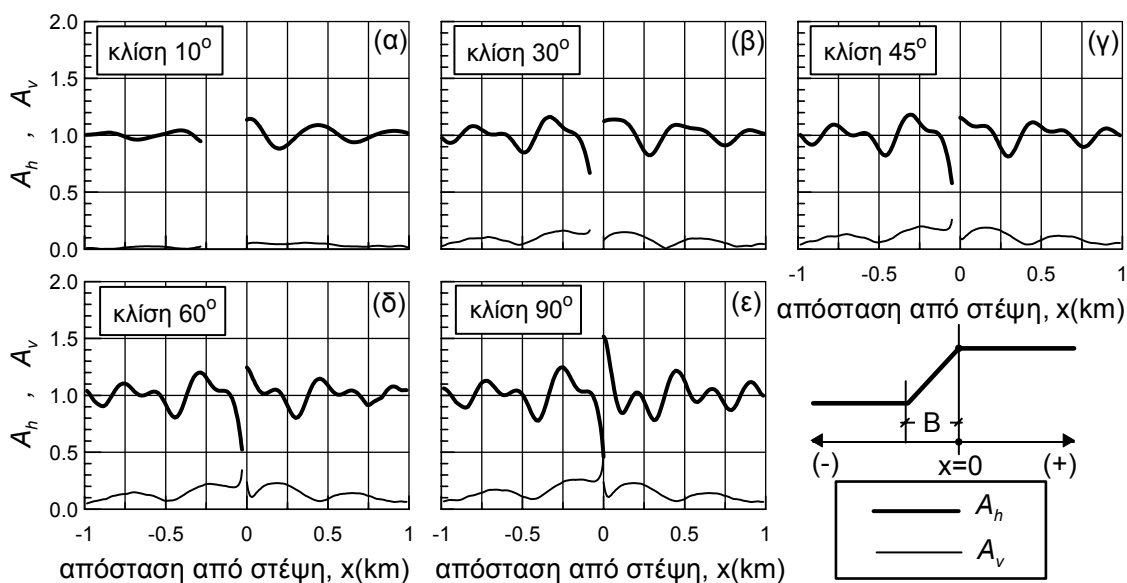
του πρανού και στη δημιουργία κυμάτων P και SV, καθώς και κυμάτων Rayleigh, τα οποία όλα έχουν σημαντική κατακόρυφη συνιστώσα. Η έντονη γεωγραφική διαφοροποίηση αποδίδεται στο ότι τα ανωτέρω δευτερογενή κύματα καταφθάνουν με χρονική υστέρηση και διαφορά φάσης στα διάφορα σημεία της επιφάνειας, και η επαλληλία τους με τα προσπίπτοντα πρωτογενή κύματα SV δημιουργούν διαδοχικά σημεία με απομείωση και ενίσχυση αντίστοιχα.

Τα ανωτέρω υποδεικνύουν ότι η έμμεση διακρίβωση της τοπογραφικής επιδείνωσης της σεισμικής κίνησης μέσω αναστροφών αναλύσεων βλαβών σε κτίρια είναι ιδιαίτερα αδρή, και ότι η πειραματική μέτρηση αυτής θα πρέπει να γίνεται μέσω πυκνών δικτύων επιταχυνσιογράφων.

#### 4. ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΤΙΚΕΣ ΣΧΕΣΕΙΣ

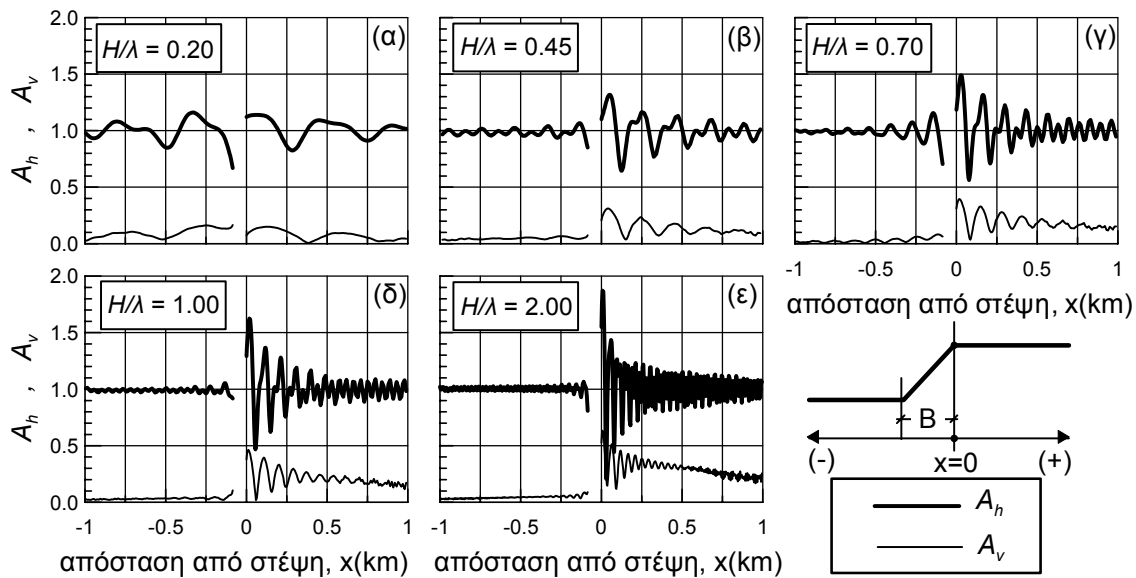
Συνολικά εκτελέστηκαν 90 παραμετρικές αναλύσεις σεισμικής απόκρισης του εδάφους με στόχο τη διερεύνηση της επίδρασης των κάτωθι παραμέτρων:

- της κλίσης του πρανού  $i(^{\circ})$  ή  $I=i/90^{\circ}$ , με  $i = 10^{\circ} - 90^{\circ}$
- του κανονικοποιημένου ύψους του πρανού  $H/\lambda$ , με  $H/\lambda = 0.05 - 2.0$ ,
- του αριθμού σημαντικών κύκλων διέγερσης  $N$ , με  $N = 1 - 12$ , και
- της υστερητικής απόσβεσης του εδάφους  $\xi$ , με  $\xi = 0 - 20\%$



Σχήμα 3. Επίδραση κλίσης πρανού  $i$  στην τοπογραφική επιδείνωση της μέγιστης επιτάχυνσης στην επιφάνεια, στην οριζόντια  $A_h$  και κατακόρυφη διεύθυνση  $A_v$  ( $H/\lambda=0.2$ ,  $\xi < 5\%$ ).

Figure 3. Effect of slope inclination  $i$  on the topographic aggravation of the peak acceleration at the ground surface, in the horizontal  $A_h$  and vertical direction  $A_v$  ( $H/\lambda=0.2$ ,  $\xi < 5\%$ ).



Σχήμα 4. Επίδραση κανονικοποιημένου ύψους  $H/\lambda$  στην τοπογραφική επιδείνωση της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης, στην οριζόντια  $A_h$  και κατακόρυφη διεύθυνση  $A_v$  ( $i=30^\circ$ ,  $\xi < 5\%$ ).  
 Figure 4. Effect of normalized height  $H/\lambda$  on the topographic aggravation of the peak ground acceleration, in the horizontal  $A_h$  and vertical direction  $A_v$  ( $i=30^\circ$ ,  $\xi < 5\%$ ).

Δεδομένου ότι η τοπογραφική επιδείνωση αποδεικνύεται ίδια για συνδυασμούς πρηνούς-διέγερσης με διαφορετικές τιμές των  $H$  και  $\lambda$  αλλά ίδια τιμή του λόγου  $H/\lambda$  (Ashford et al 1997), οι ανωτέρω αναλύσεις καλύπτουν όλες τις πιθανές περιπτώσεις στην πράξη.

Στα Σχήματα 3 και 4 δίνονται ενδεικτικά αποτελέσματα για την επίδραση των  $H/\lambda$  και  $i$ . Παρατηρείται ότι οι παράμετροι αυτές έχουν σημαντική και μη μονοτονική επίδραση στους συντελεστές επιδείνωσης  $A_h$  και  $A_v$ , αλλά και στην απόσταση μέχρι το ελεύθερο πεδίο εμπρός και πίσω από το πρηνές (Βουρβαχάκης & Δρανδάκης 2001). Αντίθετα, η επίδραση της απόσβεσης  $\xi$  έχει σημαντική επίδραση μόνο στην απόσταση έως το ελεύθερο πεδίο, ενώ ο αριθμός κύκλων  $N$  αποδεικνύεται εντελώς δευτερεύουσας σημασίας (Βασδέκης & Σοφιανού 2002).

Για την ευχερέστερη χρήση των ανωτέρω αποτελεσμάτων, η έρευνα επικεντρώθηκε σε παραμέτρους σημαντικές για το σχεδιασμό τεχνικών έργων, δηλαδή (βλ. Σχήμα 2):

- τις μέγιστες τοπογραφικές επιδεινώσεις πίσω από τη στέψη του πρηνούς, στην οριζόντια και την κατακόρυφη διεύθυνση  $A_{h,max}$  και  $A_{v,max}$ , και
- τις αποστάσεις  $D_h$  και  $D_v$  πίσω από τη στέψη στις οποίες η σεισμική κίνηση δεν επηρεάζεται πρακτικώς από την ύπαρξη του πρηνούς (όπου δηλαδή  $A_h \leq 1.10$  και  $A_v \leq 0.10$ , αντίστοιχα)

Οι τέσσερις (4) αυτές παράμετροι σχεδιασμού συνδέθηκαν στατιστικά με τα τέσσερα (4) χαρακτηριστικά ενός πρηνούς υπό σεισμική διέγερση, δηλαδή τις παραμέτρους  $I$ ,  $H/\lambda$ ,  $\xi$  και  $N$ , σύμφωνα με τις σχέσεις (Βασδέκης & Σοφιανού 2002, Bouckovalas & Papadimitriou 2005):

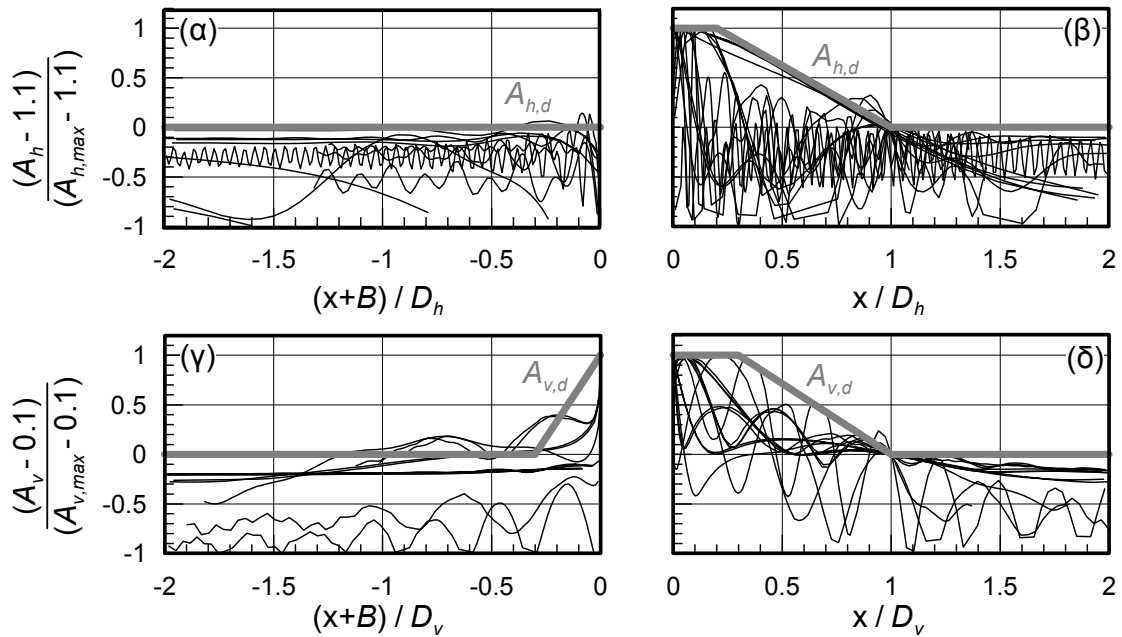
$$A_{h,max} = 1 + \frac{0.225(H/\lambda)^{0.4} \left( \frac{I^2 + 2I^6}{I^3 + 0.02} \right)}{1 + 0.9\xi} \quad (1)$$

$$A_{v,max} = \frac{0.75(H/\lambda)^{0.8} (I^{0.5} + 1.5I^5)}{1 + 0.15\xi^{0.5}} \quad (2)$$

$$D_h/H = \frac{\left[ \frac{(H/\lambda)}{0.2 + (H/\lambda)^2} \right] \left( \frac{I^{1.5} + 3.3I^8}{I^4 + 0.07} \right)}{0.71 + 3.33\xi} N^{0.43} \quad (3)$$

$$D_v/H = \frac{\left[ \frac{0.233(H/\lambda)}{0.2 + (H/\lambda)^2} \right] \left( \frac{I^{1.5} + 3.3I^8}{I^4 + 0.07} \right)}{\xi^{0.78}} \quad (4)$$

Σημειώνεται ότι οι ανωτέρω σχέσεις για τις παραμέτρους σχεδιασμού  $A_{h,max}$ ,  $A_{v,max}$ ,  $D_h/H$  και  $D_v/H$  αναπαράγουν τα αποτελέσματα των 90 αριθμητικών αναλύσεων με τυπική απόκλιση του σχετικού λάθους που κυμαίνεται μεταξύ 29 και 40%.



Σχήμα 5. Περιβάλλουσες σχεδιασμού  $A_{h,d}$  και  $A_{v,d}$  των συντελεστών τοπογραφικής επιδείνωσης  $A_h$  και  $A_v$  με την απόσταση  $x$  από τη στέψη του πρανούς ( $B = H/\tan i$ )  
 Figure 5. Design envelopes  $A_{h,d}$  and  $A_{v,d}$  of the topography aggravation factors  $A_h$  and  $A_v$  with distance  $x$  from the crest of the slope ( $B = H/\tan i$ ).

Η αύξηση των σεισμικών δράσεων στην οριζόντια και κατακόρυφη διεύθυνση κατά  $A_{h,max}$  και  $A_{v,max}$  για όλη την απόσταση  $D_h$  και  $D_v$  πίσω από τη στέψη κρίνεται υπερβολικά συντηρητική, και μη συμβατή με τις αναλύσεις. Συνεπώς, τα αποτελέσματα μεταβολής των  $A_h$  και  $A_v$  με την απόσταση  $x$  από τη στέψη του πρανούς και για τις 90 αναλύσεις κανονικοποιήθηκαν ως προς τις εκάστοτε τιμές  $A_{h,max}$ ,  $A_{v,max}$ ,  $D_h$  και  $D_v$ . Έτσι προέκυψαν τα αποτελέσματα του Σχήματος 5, απ' όπου ορίσθηκαν οι περιβάλλουσες σχεδιασμού  $A_{h,d}$  και  $A_{v,d}$  με την απόσταση  $x$  από το πρανές, οι οποίες δίνονται από τις σχέσεις (5) και (6):

$$A_{h,d} = \begin{cases} 1.0 \div 1.1 & , \quad x \leq -B \\ 1.1 + \frac{A_{h,max} - 1.1}{B}(x + B) & , \quad -B \leq x \leq 0 \\ A_{h,max} & , \quad 0 \leq x \leq 0.2D_h \\ A_{h,max} - \frac{A_{h,max} - 1.1}{0.8D_h}(x - 0.2D_h) & , \quad 0.2D_h \leq x \leq D_h \\ 1.0 \div 1.1 & , \quad D_h \leq x \end{cases}$$

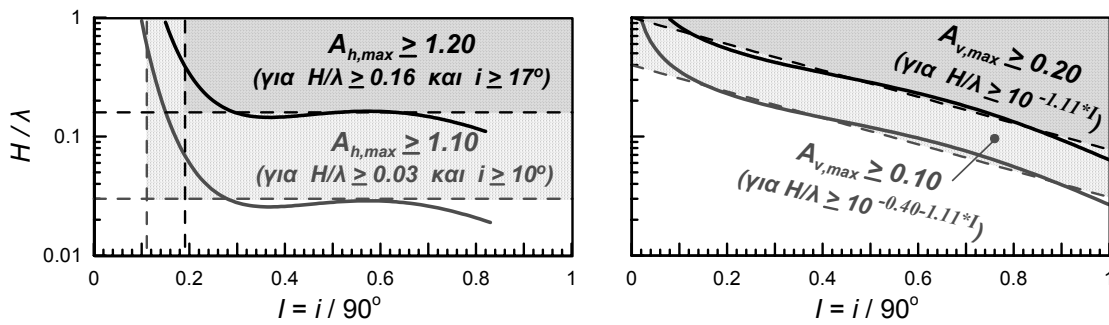
$$A_{v,d} = \begin{cases} 0.0 \div 0.1 & , \quad x \leq -(B + 0.3D_v) \\ 0.1 + \frac{A_{v,max} - 0.1}{0.3D_v}(x + B + 0.3D_v) & , \quad -(B + 0.3D_v) \leq x \leq -B \\ A_{v,max} & , \quad -B \leq x \leq 0.3D_v \\ A_{v,max} - \frac{A_{v,max} - 0.1}{0.7D_h}(x - 0.3D_v) & , \quad 0.3D_v \leq x \leq D_v \\ 0.0 \div 0.1 & , \quad D_v \leq x \end{cases}$$

## 5. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΚΑΝΟΝΙΣΤΙΚΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ

Η σύγκριση των ανωτέρω αποτελεσμάτων με τις προβλέψεις κανονιστικών διατάξεων οδηγεί σε χρήσιμα συμπεράσματα σε σχέση με τη συμβατότητα μεταξύ Κανονισμών και θεωρητικών προβλέψεων.

Από την έρευνα στη βιβλιογραφία βρέθηκε ότι μόνο ο Ευρω-κώδικας EC-8 (2000 & προσχέδιο 2002) και ο Γαλλικός Αντισεισμικός Κανονισμός PS-92 εμπεριέχουν διατάξεις σχετικές με την τοπογραφική επιδείνωση της σεισμικής κίνησης. Συγκεκριμένα, για τοπογραφία μονοκλινούς πρανούς οι δύο Κανονισμοί προβλέπουν αύξηση της μέγιστης οριζόντιας επιτάχυνσης κατά 20% και 40% αντίστοιχα, ενώ παραβλέπουν τη δημιουργία παρασιτικής κατακόρυφης κίνησης. Στον EC-8 η αύξηση της μέγιστης οριζόντιας επιτάχυνσης προβλέπεται για περιοχές «πλησίον της στέψης» του πρανούς, δηλαδή δεν καθορίζεται σαφώς η απόσταση έως το ελεύθερο πεδίο. Αντίθετα, στον PS-92 δίδονται σχέσεις υπολογισμού της εν λόγω απόστασης, οι οποίες οδηγούν σε τιμές που δεν υπερβαίνουν συνήθως το ύψος του πρανούς  $H$ .

Επιπλέον αυτών, οι δύο Κανονισμοί ορίζουν και ελάχιστα όρια γεωμετρίας του πρανούς για την εμφάνιση τοπογραφικής επιδείνωσης. Συγκεκριμένα, ο EC-8 θέτει όρια ύψους  $H > 30m$  και κλίσης  $i > 15^\circ$ , ενώ ο PS-92 υιοθετεί τα εξής όρια:  $H > 10m$  και  $i > 22^\circ$ .



Σχήμα 6. Κριτήρια σημαντικής τοπογραφικής επιδείνωσης σε όρους κανονικοποιημένου ύψους  $H/\lambda$  και κλίσης  $I=i/90^\circ$  πρανούς, για την οριζόντια και παρασιτική κατακόρυφη κίνηση.  
 Figure 6. Criteria of significant topographic aggravation in terms of the normalized height  $H/\lambda$  and the inclination  $I=i/90^\circ$  of the slope, for the horizontal and parasitic vertical motion.

Για να επιτευχθεί η σύγκριση των αποτελεσμάτων του άρθρου με τις ανωτέρω Κανονιστικές διατάξεις, θα πρέπει να εκτιμηθούν οι τιμές των  $A_{h,max}$ ,  $A_{v,max}$  και της απόστασης  $D_{\#}$  έως το ελεύθερο πεδίο πίσω από τη στέψη (δηλ. της μέγιστης των  $D_h$  και  $D_v$ ) για συνήθεις περιπτώσεις πρανών – σεισμικών διεγέρσεων. Επιπλέον, θα πρέπει να διατυπωθούν κριτήρια σημαντικότητας της τοπογραφικής επιδείνωσης.

Στις περισσότερες περιπτώσεις στην πράξη, αναμένεται ότι οι παράμετροι εισόδου θα παίρνουν τιμές:  $H/\lambda = 0.2 \div 1.0$ ,  $i = 25 \div 75^\circ$  και  $\xi = 5 \div 15\%$ . Οι τιμές αυτές οδηγούν σε σύνηθες εύρος  $A_{h,max} = 1.20 \div 1.50$  και  $A_{v,max} = 0.10 \div 1.10$ , ενώ η απόσταση  $D_{\#}$  κυμαίνεται από  $2H$  ως  $8H$ . Συνεπώς, οι Κανονιστικές διατάξεις είναι συμβατές με τις θεωρητικές προβλέψεις σε ό,τι αφορά στην ενίσχυση της μέγιστης οριζόντιας επιτάχυνσης, αλλά υποεκτιμούν σαφώς την απόσταση έως το ελεύθερο πεδίο. Επιπλέον, το γεγονός ότι η παρασιτική κατακόρυφη κίνηση εκτιμάται ως αρκετά σημαντική σε συνήθεις περιπτώσεις στην πράξη, υποδεικνύει ένα κενό στις υπάρχουσες Κανονιστικές διατάξεις.

Για τη διατύπωση κριτηρίων σημαντικότητας της τοπογραφικής επιδείνωσης, στο Σχήμα 6 παρουσιάζονται τα ζεύγη τιμών των πλέον σημαντικών παραμέτρων  $H/\lambda$  and  $I=i/90^\circ$  για τα οποία οι τιμές των  $A_{h,max} \geq 1.10$  &  $1.20$  και  $A_{v,max} \geq 0.10$  &  $0.20$ . Η τιμή της απόσβεσης  $\xi$  στο Σχήμα 6 έχει μικρή επίδραση και εν πάση περιπτώσει θεωρήθηκε ίση με  $10\%$ . Από το Σχήμα 6 προκύπτει ότι τα κριτήρια για ουσιώδη τοπογραφική επιδείνωση της οριζόντιας επιτάχυνσης (δηλ.  $A_{h,max} \geq 1.10$  &  $1.20$ ) είναι πιο αυστηρά από εκείνα για την εμφάνιση ουσιώδους παρασιτικής κατακόρυφης κίνησης (δηλ.  $A_{v,max} \geq 0.10$  &  $0.20$ ). Συνεπώς, υιοθετώντας τα πρώτα προκύπτει ότι θα πρέπει:

- $H/\lambda > 0.03$  και  $i > 10^\circ$  για τουλάχιστον  $10\%$  τοπογραφική επιδείνωση της οριζόντιας κίνησης, και
- $H/\lambda > 0.16$  και  $i > 17^\circ$  για τουλάχιστον  $20\%$  τοπογραφική επιδείνωση της οριζόντιας κίνησης.

Τα ως άνω κριτήρια, θεωρούνται πιο ορθολογικά από τα αμιγώς γεωμετρικά κριτήρια των Κανονισμών, καθώς λαμβάνουν υπόψη (έστω αδρά) τις εδαφικές συνθήκες και τη σεισμική διέγερση μέσω του δεσπόζοντος μήκους κύματος  $\lambda$ . Σε κάθε περίπτωση, για συνήθη πρανή με  $V_s > 400\text{m/s}$  (δύσκαμπτα εδάφη ή μαλακοί βράχοι), και για τυπικές σεισμικές διεγέρσεις με δεσπόζουσα περίοδο μεγαλύτερη από  $0.20\text{s}$ , τα κανονιστικά όρια βρίσκονται σε αδρή συμφωνία με τα ανωτέρω προταθέντα για  $20\%$  τοπογραφική επιδείνωση, καθώς μεταφράζονται σε  $H > 13\text{m}$  και  $i > 17^\circ$ .

## 6. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΩΝ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΔΙΕΓΕΡΣΕΩΝ

Οι διεγέρσεις που χρησιμοποιήθηκαν για την εκτέλεση των παραμετρικών αναλύσεων ήταν είτε αρμονικές ή είχαν πολύ στενό εύρος συχνοτήτων (παλμός Chang) σε σύγκριση με πραγματικές σεισμικές διεγέρσεις. Για να διερευνηθεί η σημαντικότητα αυτού του περιορισμού έγινε εφαρμογή των ανωτέρω σχέσεων για την πρόβλεψη της τοπογραφικής επιδείνωσης που εκτιμήθηκε από τρεις (3) λεπτομερείς αριθμητικές αναλύσεις ιστορικών περιστατικών στην Ελλάδα, και συγκεκριμένα:

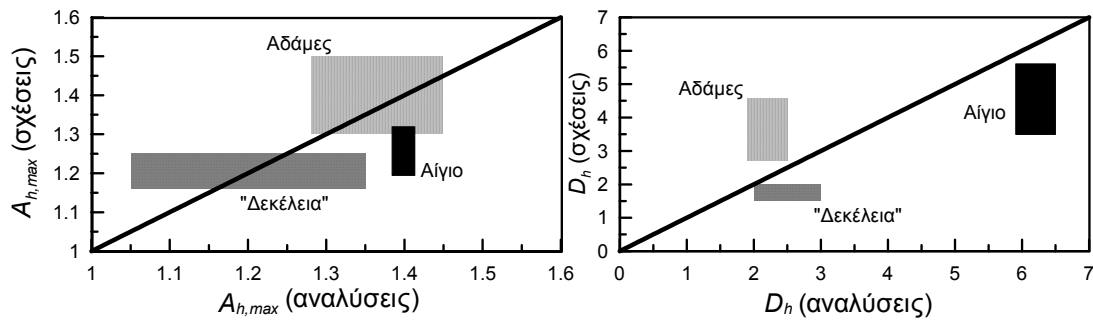
- α) του πρανούς του Αιγίου με κλίση  $i \cong 45^\circ$ , ύψος  $H \cong 80\text{m}$  στο σεισμό του Αιγίου (15-6-95), από τους Bouckovalas et al (1999).
- β) του πρανούς του Κηφισού ποταμού στις Αδάμες με κλίση  $i \cong 30^\circ$ , ύψος  $H \cong 40\text{m}$  στο σεισμό της Αθήνας (7-9-99), από τους Gazetas et al (2002).

γ) του πρηνούς του Κηφισού ποταμού στο Ξενοδοχείο «Δεκέλεια» με κλίση  $i \cong 16^\circ$ , ύψος  $H \cong 35\text{m}$  στο σεισμό της Αθήνας (7-9-99), από τους Athanasopoulos et al (2001). Η σύγκριση των αποτελεσμάτων από λεπτομερείς αναλύσεις και τις προσεγγιστικές σχέσεις ως προς τη μέγιστη ενίσχυση της οριζόντιας κίνησης  $A_{h,max}$  και της απόστασης μέχρι το ελεύθερο πεδίο  $D_h$  για τα προαναφερθέντα ιστορικά περιστατικά παρουσιάζεται στο Σχήμα 7, όπου προκύπτει ικανοποιητική συμφωνία.

Επιπλέον, έγινε ένα αριθμητικό «πείραμα»: ένα μονοκλινές πρηνές με  $H = 50\text{m}$ ,  $i = 60^\circ$  και τις εδαφικές παραμέτρους της παραγράφου 2 υποβλήθηκε σε τρεις (3) διεγέρσεις, δύο καταγραφές (ARG1 και ARG7) με παρόμοιες τιμές των  $T_e = 0.14 - 0.16\text{s}$  και  $N = 2 - 4.5$  και ένας παλμός Chang με αντίστοιχα χαρακτηριστικά.

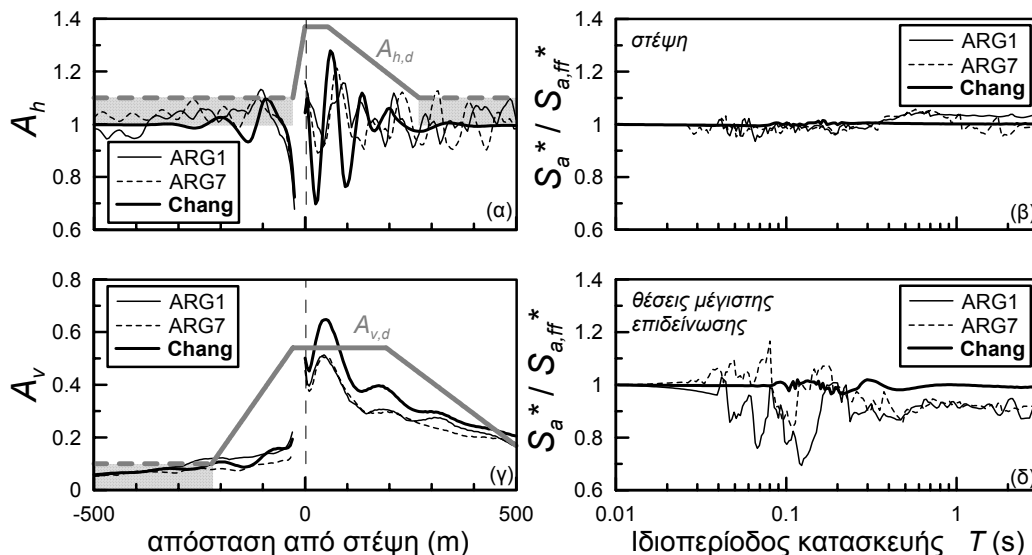
Τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων συγκρίνονται με τις περιβάλλουσες που προκύπτουν με βάση τις σχέσεις σχεδιασμού (1) έως (6) στο Σχήμα 8. Συγκεκριμένα, στα Σχ. 8α & 8γ συγκρίνονται οι μεταβολές των  $A_h$  και  $A_v$  με την απόσταση από τη στέψη, με τις αντίστοιχες τιμές σχεδιασμού  $A_{h,d}$  και  $A_{v,d}$ , ενώ στα Σχ. 8β & 8δ παρουσιάζεται η τοπογραφική επιδείνωση του κανονικοποιημένου ελαστικού φάσματος απόκρισης (5% απόσβεση)  $S_a^* = S_a/a_h$  στη στέψη, και στις θέσεις όπου  $A_h = A_{h,max}$ , οι οποίες δε συμπίπτουν στις τρεις αναλύσεις, αλλά είναι γειτονικές.

Συμπεραίνεται ότι τα αποτελέσματα συγκλίνουν ικανοποιητικά, με τις τιμές σχεδιασμού. Επιπλέον, προκύπτει ότι η τοπογραφία φαίνεται να επιδρά κυρίως στη μέγιστη τιμή της επιτάχυνσης και λιγότερο στο συχνοτικό περιεχόμενο αυτής.



Σχήμα 7. Σύγκριση προβλέπων τοπογραφικής επιδείνωσης σε όρους  $A_{h,max}$  και  $D_h$  για ιστορικά περιστατικά από λεπτομερείς αναλύσεις και τις προτεινόμενες σχέσεις.

Figure 7. Comparison of topographic aggravation predictions in terms of  $A_{h,max}$  and  $D_h$  for case histories from detailed analyses and the proposed approximate relations.



Σχήμα 8. Σύγκριση τοπογραφικής επιδείνωσης με βάση τις προτεινόμενες σχέσεις σχεδιασμού με αναλύσεις με πραγματικές καταγραφές (ARG1, ARG7) και ισοδύναμο παλμό Chang.

Figure 8. Comparison of topographic aggravation from the proposed design relations to analyses with real recordings (ARG1, ARG7) and an equivalent Chang signal

## 7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα βασικά συμπεράσματα από την παρούσα μελέτη είναι τα κάτωθι:

- (α) Η τοπογραφία πρηνούς μεταβάλλει (αυξάνει και μειώνει) κυρίως τη μέγιστη επιτάχυνση και λιγότερο το συχνοτικό περιεχόμενο της οριζόντιας σεισμικής κίνησης. Επιπλέον, δημιουργεί και μια παρασιτική κατακόρυφη κίνηση. Οι επιδράσεις επικεντρώνονται στη γειτονία του πρηνούς και μειώνονται με την απόσταση.
- (β) Πίσω από τη στέψη αναμένεται ενίσχυση και μπροστά από τον πόδα απομείωση της οριζόντιας κίνησης, αλλά παρουσιάζονται έντονες γεωγραφικές διαφοροποιήσεις, ακόμη και σε αποστάσεις δεκάδων μέτρων.
- (γ) Προτείνονται προσεγγιστικές σχέσεις για την εκτίμηση των συντελεστών τοπογραφικής επιδείνωσης της οριζόντιας και κατακόρυφης επιτάχυνσης  $A_{h,max}$  και  $A_{v,max}$ , καθώς και των αντιστοίχων αποστάσεων έως το ελεύθερο πεδίο,  $D_h$  και  $D_v$ . Επιπλέον, δίνεται η γεωγραφική περιβάλλουσα σχεδιασμού έναντι τοπογραφίας,  $A_{h,d}$  και  $A_{v,d}$ . Συνολικά, οι προτεινόμενες σχέσεις είναι σε ικανοποιητική συμφωνία με αναλύσεις ιστορικών περιστατικών.
- (δ) Η τοπογραφική επιδείνωση θεωρείται ουσιώδης όταν  $H/\lambda > 0.16$  και η κλίση του πρηνούς  $i > 17^\circ$ . Στις περιπτώσεις αυτές, οι τιμές των συντελεστών τοπογραφικής επιδείνωσης της οριζόντιας και κατακόρυφης σεισμικής κίνησης κυμαίνονται σε  $A_{h,max} = 1.20 - 1.50$  και  $A_{v,max} = 0.10 - 1.10$ , ενώ το ελεύθερο πεδίο αναμένεται σε αποστάσεις  $D_{\#} = 2H - 8H$ .
- (ε) Οι μόνοι Αντισεισμικοί Κανονισμοί που ασχολούνται με την τοπογραφική επιδείνωση (EC-8 και PS-92) δίνουν λογικές τιμές για την ενίσχυση της οριζόντιας επιτάχυνσης. Παρόλα αυτά, αγνοούν την εμφάνιση παρασιτικής κατακόρυφης κίνησης και υποεκτιμούν σοβαρά την απόσταση έως το ελεύθερο πεδίο. Τέλος, τα κριτήρια σημαντικότητας της τοπογραφικής επιδείνωσης που προτείνουν θεωρούνται λογικά.

## 8. ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα έρευνα χρηματοδοτήθηκε από τον Ο.Α.Σ.Π. Τα ονόματα των τεσσάρων (4) τελευταίων συγγραφέων αναφέρονται αλφαβητικά.

## 9. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Ashford S. and Sitar N. (1997), "Analysis of topographic amplification of inclined shear waves in a steep coastal bluff". Bulletin of the Seismological Society of America, 87(3): 692-700
- Ashford S., Sitar N., Lysmer J., Deng N. (1997), "Topographic effects on the seismic response of steep slopes". Bulletin of the Seismological Society of America, 87(3): 701-709.
- Athanasopoulos G. A., Pelekis P. C., Xenaki V. C. (2001), "Topography effects in the Athens 1999 earthquake: the case of hotel Dekelia". Proc. 4<sup>th</sup> IC on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, San Diego, (in CD-ROM)
- Βασδέκης Σ., Σοφιανού Ι., (2002), "Αριθμητική ανάλυση της τοπογραφικής επιδείνωσης του σεισμικού κραδασμού για την περίπτωση μονοκλινούς πρηνούς", Διπλωματική Εργασία, Τομέας Γεωτεχνικής Ε.Μ.Π.
- Βουρβαχάκης Θ., Δρανδάκης Ε., (2001), "Επίδραση πρηνών στη σεισμική κίνηση – αριθμητική διερεύνηση για (ιξωδο)ελαστικό έδαφος", Διπλωματική Εργασία, Τομέας Γεωτεχνικής Ε.Μ.Π.
- Bouckovalas G. D., Gazetas G., Papadimitriou A. G. (1999), "Geotechnical aspects of the Aegion (Greece) earthquake". Proc. 2<sup>nd</sup> International Conference on Geotechnical Earthquake Engineering, Lisbon, 2: 739-748
- Bouckovalas G. D. and Papadimitriou A. G. (2005), "Numerical evaluation of slope topography effects on seismic ground motion". Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 25 (7-10): pp. 547 – 558
- Gazetas G., Kallou P. V., Psarropoulos P. N. (2002), "Topography and soil effects in the Ms=5.9 Parnitha Athens earthquake: the case of Adames". Natural Hazards, 27: 133-169
- Itasca Consulting Group Inc. (1993), "FLAC: Fast Lagrangian Analysis of Continua". User's Manual
- Ohtsuki, A. and Harumi, K. (1983), "Effect of topography and subsurface inhomogeneities on seismic SV waves". Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 11: 441-462.