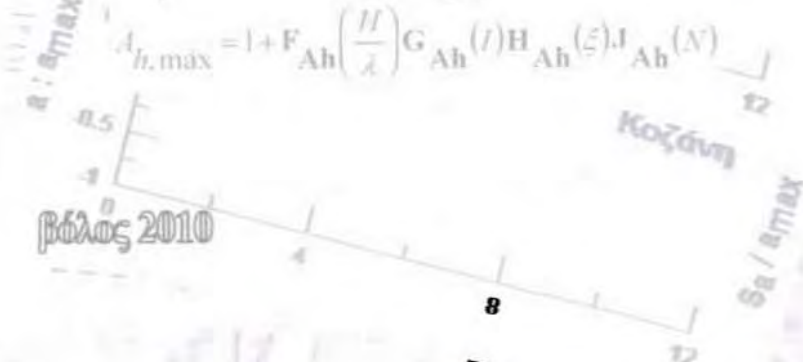
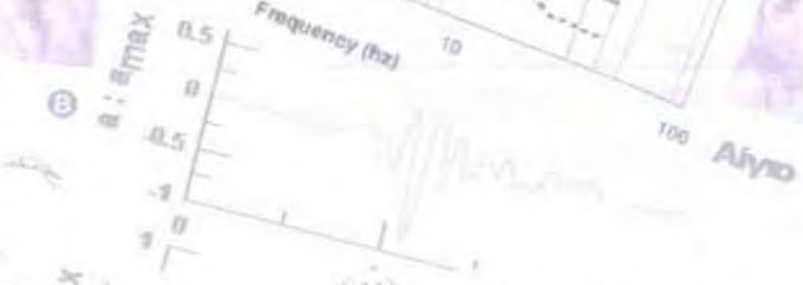
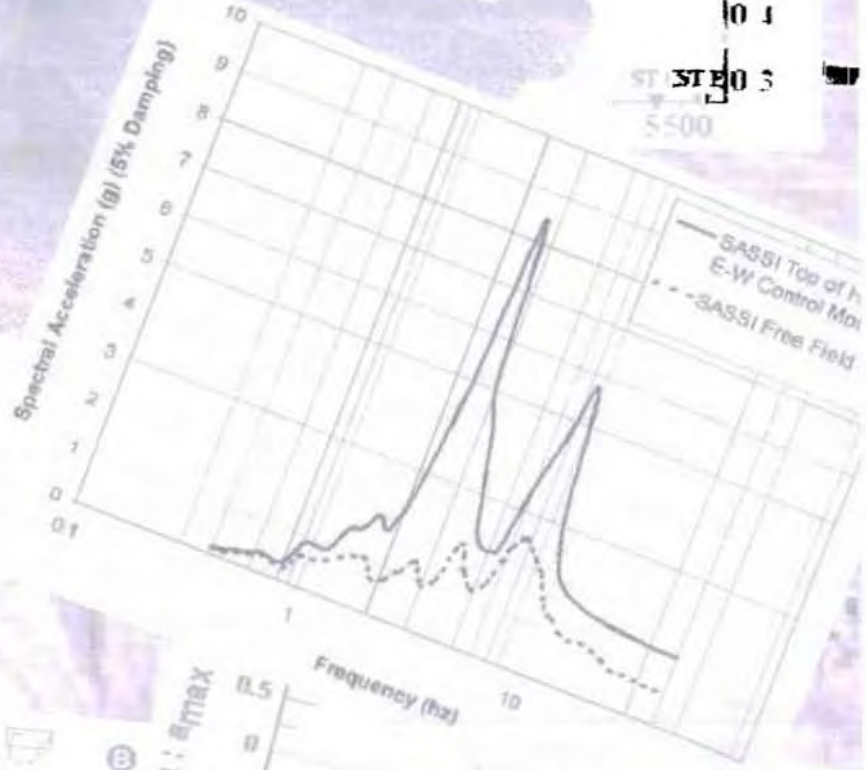


ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
 ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ  
 ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Επίδραση Τοπογραφίας Μορφής Λόφου στην  
 Μέγιστη Σεισμική Επιτάχυνση του Εδάφους

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

$$D_v \left( 1 + F_{Dv} \left( \frac{H}{\lambda} \right) G_{Dv}(l) H_{Dv}(\xi) J_{Dv}(N) \right)$$



βόλος 2010

$$A_{h,max} = 1 + F_{Ah} \left( \frac{H}{\lambda} \right) G_{Ah}(l) H_{Ah}(\xi) J_{Ah}(N)$$

ΕΣΠΗΡΙΑ

ΤΙΝΑ  
 ΜΥΛΩΝΑΚΗ

ΕΠΙΒΛΕΤΩΝ

ΑΧΧΙΛΕΑΣ  
 ΠΑΠΑΔΗΜΗΤΡΙΟΥ



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ & ΚΕΝΤΡΟ ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ  
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»**

Αριθ. Εισ.: 8621/1  
Ημερ. Εισ.: 20-07-2010  
Δωρεά: Συγγραφέα  
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ – ΠΜ  
2010  
ΜΥΛ

*στους γονείς μου,*

Γιώργο και Λίνα

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

---

*Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου προς όλους όσους υποστήριξαν πρακτικά και ηθικά την προσπάθειά μου.*

*Πρώτα από όλους θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Επιβλέποντα Καθηγητή μου, κ. Αχιλλέα Παπαδημητρίου για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή του, κατά τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας. Η διαρκής διαθεσιμότητα, η άριστη κατάρτιση και η ανεξάντλητη υπομονή του, αποτέλεσαν καταλυτικοί παράγοντες για την ολοκλήρωση της έρευνάς μου.*

*Επίσης θα ήθελα ιδιαίτερα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου, για τη συνεχή υποστήριξη και κατανόηση που επέδειξε, καθώς και για την σημαντική εμπύχωση που μου παρείχε κατά τη διάρκεια της προσπάθειάς μου.*

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Ευχαριστίες.....	-2-
Περίληψη.....	-4-
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup> : Εισαγωγή.....</b>	<b>-6-</b>
1.1.Αντικείμενο.....	-6-
1.2.Ιστορική αναδρομή.....	-6-
1.3.Διάρθρωση της διπλωματικής.....	-7-
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup> : Βιβλιογραφική Έρευνα.....</b>	<b>-9-</b>
2.1.Γενικά.....	-9-
2.2.Τοπογραφία Πρανούς.....	-11-
2.3.Τοπογραφία Λόφου.....	-17-
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup> : Μεθοδολογία Αριθμητικών Αναλύσεων.....</b>	<b>-21-</b>
3.1.Περιγραφή Μεθοδολογίας.....	-21-
3.2.Βαθμονόμηση Μεθοδολογίας.....	-24-
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup> : Επίδραση Τοπογραφίας Μορφής Λόφου σε διάφορες μορφές σεισμικής κίνησης.....</b>	<b>-31-</b>
4.1.Γενικά.....	-31-
4.2.Παρουσίαση αποτελεσμάτων – Συμπεράσματα.....	-33-
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5<sup>ο</sup> : Στατιστική επεξεργασία αριθμητικών αποτελεσμάτων Τοπογραφικής Επιδείνωσης.....</b>	<b>-44-</b>
5.1.Γενικά.....	-44-
5.2. Παρουσίαση αποτελεσμάτων – Συμπεράσματα.....	-47 -
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6<sup>ο</sup> : Συμπεράσματα.....</b>	<b>-68-</b>
6.1.Γενικά.....	-68-
6.2.Σεισμική απόκριση Λόφων.....	-68-
6.3.Περιορισμοί – Μελλοντική Έρευνα.....	-69-
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7<sup>ο</sup> : Βιβλιογραφία.....</b>	<b>-71-</b>

Στη βιβλιογραφία υπάρχουν αρκετές δημοσιεύσεις σχετικά με την επίδραση της τοπογραφίας στην ενίσχυση της μέγιστης σεισμικής επιτάχυνσης. Παρόλα αυτά, συστηματική και παραμετρική διερεύνηση της σχετικής επίδρασης βρέθηκε να έχει πραγματοποιηθεί μόνο για την περίπτωση μονοκλινούς πρανούς (Bouckovalas & Papadimitriou 2005, 2006). Στο Π.Θ. ξεκίνησε πρόσφατα μια αντίστοιχη προσπάθεια, και διερευνήθηκε η επίδραση της τοπογραφίας μορφής λόφου και φαραγγιού υπό ημιτονοειδή διέγερση (Διπλωματική, Θ. Τιμοθέου 2008). Έτσι, στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται παραμετρική αριθμητική διερεύνηση της επίδρασης τοπογραφίας μορφής λόφου στη μέγιστη σεισμική επιτάχυνση, όχι για περίπτωση αρμονικής διέγερσης, αλλά για πραγματικές σεισμικές διεγέρσεις «λίγων» και «πολλών» κύκλων. Σε κάθε περίπτωση, η εν λόγω επίδραση συγκρίνεται με την τοπογραφική επιδείνωση του αντίστοιχου μονοκλινούς πρανούς, δηλαδή του πρανούς με ίδιο ύψος  $H$ , κλίση πρανών  $i$  και απόσβεση εδάφους  $\xi$  που υποβάλλεται στην ίδια σεισμική διέγερση με δεσπόζον μήκος κύματος  $\lambda$ .

Πιο συγκεκριμένα, με χρήση του λογισμικού πεπερασμένων διαφορών FLAC πραγματοποιήθηκαν δισδιάστατες (2D) ιξωδο-ελαστικές αναλύσεις σεισμικής απόκρισης ομοιόμορφου εδάφους (με απόσβεση Rayleigh με  $\xi_{\min} = 5\%$  στη δεσπόζουσα περίοδο της διέγερσης), που διαμορφώνει στην επιφάνεια συμμετρικό τραπεζοειδή λόφο ύψους  $H$ , κλίσης πρανών  $i$  και πλάτους στέψης  $B$ . Οι σεισμικές διεγέρσεις αντιστοιχούν σε κατακόρυφα προσπίπτοντα κύματα SV με δεσπόζον μήκος κύματος  $\lambda$ . Καθώς το ίδιο δεσπόζον μήκος κύματος  $\lambda$  μπορεί να προέρχεται από εντελώς διαφορετικές μορφές χρονοϊστορίας διέγερσης, κάθε λόφος κλίσης πρανών  $i$ , αδιάστατου ύψους  $H/\lambda$  και αδιάστατου πλάτους στέψης  $B/\lambda$  υποβλήθηκε σε τρεις (3) διαφορετικές χρονοϊστορίες διέγερσης (που έχουν όλες το ίδιο δεσπόζον μήκος κύματος  $\lambda$ ) και οι οποίες είναι: α) μια αρμονική (Τιμοθέου 2008), β) την πραγματική καταγραφή του σεισμού Αιγίου (1995), με «λίγους» κύκλους, και γ) την πραγματική καταγραφή του σεισμού Κοζάνης (1995), με «πολλούς» κύκλους. Επισημαίνεται ότι για κάθε ανάλυση οι χρονοϊστορίες «Αιγίου» και «Κοζάνης» διαμορφώνονταν κατάλληλα στο επιθυμητό μήκος κύματος  $\lambda$ . Οι αναλύσεις για κάθε μορφή χρονοϊστορίας διέγερσης πραγματοποιήθηκαν για κλίσεις πρανών  $i = 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ , αδιάστατα ύψη  $H/\lambda = 0.20$  και  $0.45$  και για πλάτη της στέψης του λόφου  $B = 0.1H, H, 5H, 20H$  και  $\infty$  (μονοκλινές πρανές). Το συνολικό πλήθος των αναλύσεων ανέρχεται σε 72.

Η έμφαση στην επεξεργασία των αποτελεσμάτων δόθηκε στην τοπογραφική επιδείνωση της μέγιστης σεισμικής επιτάχυνσης καθ' όλο το μήκος της επιφάνειας του εδάφους, ορίζοντας:

- το λόγο  $A_h$  ως το λόγο της μέγιστης επιτάχυνσης για την οριζόντια ταλάντωση κάθε σημείου της επιφάνειας του λόφου προς την αντίστοιχη μέγιστη επιτάχυνση στην οριζόντια διεύθυνση του εκάστοτε ελευθέρου πεδίου (διαφορετική στη στέψη και στον πόδα), και

- το λόγο  $A_v$  ως το λόγο της μέγιστης επιτάχυνσης  $A_v$  για την παρασιτική κατακόρυφη ταλάντωση κάθε σημείου της επιφάνειας του λόφου προς τη μέγιστη επιτάχυνση στην οριζόντια διεύθυνση του εκάστοτε ελευθέρου πεδίου (και πάλι διαφορετική στη στέψη και στον πόδα).

Από την επεξεργασία των αριθμητικών αποτελεσμάτων προκύπτουν τα κάτωθι συμπεράσματα:

- α) Σε συμφωνία με τη βιβλιογραφία, η τοπογραφική επιδείνωση στην οριζόντια και την κατακόρυφη συνιστώσα μειώνεται όσο μεγαλώνει η απόσταση από την τοπογραφική ανωμαλία. Στην κορυφή του λόφου εμφανίζονται εν γένει ενισχύσεις της κίνησης, ενώ στην άμεση γειτονία του πόδα αναμένονται εν γένει απομειώσεις. Ως ιδιαίτερα σημαντικές παράμετροι οι οποίες επιδρούν σε μεγάλο βαθμό στον καθορισμό της τοπογραφικής ενίσχυσης θεωρούνται η γωνία κλίσης  $i$ , το αδιάστατο ύψος  $H/\lambda$ , το αδιάστατο πλάτος  $B/\lambda$  και η θέση μελέτης.
- β) Η μορφή της χρονοϊστορίας της σεισμικής διέγερσης επιδρά κυρίως στη χωρική διαφοροποίηση της ενίσχυσης, και όχι στις τιμές των μεγίστων ενισχύσεων. Συγκεκριμένα, παρατηρούνται εντονότερες χωρικές διαφοροποιήσεις της επιδείνωσης στην περίπτωση της αρμονικής διέγερσης σε σύγκριση με τις αντίστοιχες μεταβολές λόγω των πραγματικών διεγέρσεων, οι οποίες παρουσιάζουν πιο ομαλή χωρική διαφοροποίηση, όσο μειώνεται ο αριθμός των σημαντικών κύκλων της διέγερσης.

Δεδομένης της σημαντικής χωρικής διαφοροποίησης της σεισμικής απόκρισης, για τη στατιστική επεξεργασία η έμφαση δόθηκε στις μέγιστες τιμές ενισχύσεων ( $A_{hc}$  και  $A_{vc}$  στη στέψη, και  $A_{ht}$  και  $A_{vt}$  στον πόδα του λόφου) και στις αποστάσεις μέχρι το ελεύθερο πεδίο ( $D_{hc}$  και  $D_{vc}$  πίσω από τη στέψη, και  $D_{ht}$  και  $D_{vt}$  μπροστά από τον πόδα του λόφου). Επισημαίνεται ότι, με ακρίβεια μηχανικού, ως «ελεύθερο πεδίο» ορίζεται η περιοχή όπου η απόκριση έχει συστηματικά διαφορά μικρότερη του 10% από εκείνη του οριζόντιου ομοιόμορφου εδάφους στην αντίστοιχη θέση. Οι τιμές των εν λόγω μεγεθών  $A$  και  $D$  συγκρίνονται, εν γένει, με τις τιμές των ίδιων μεγεθών για το εκάστοτε αντίστοιχο μονοκλινές πρηνές, ώστε να προκύψει η επίδραση του αδιάστατου πλάτους  $B/\lambda$  της στέψης του λόφου στις τιμές τους, δεδομένου ότι η επίδραση της κλίσης πρηνών  $i$ , του αδιάστατου ύψους  $H/\lambda$  και του αριθμού κύκλων διέγερσης υπεισέρχεται μέσω της αντίστοιχης τιμής στο αντίστοιχο μονοκλινές πρηνές. Η διαδικασία αυτή οδήγησε στην πρόταση διαγραμμάτων για την εκτίμηση των μεγεθών  $A_h$ ,  $A_v$ ,  $D_h$  και  $D_v$  στη στέψη και τον πόδα του λόφου. Τα διαγράμματα αυτά, σε συνδυασμό με ήδη δημοσιευμένες προσεγγιστικές σχέσεις για τις τιμές των  $A$  και  $D$  και της χωρικής διαφοροποίησής τους για ένα μεγάλο εύρος περιπτώσεων μονοκλινών πρηνών (Bouckovalas & Papadimitriou 2005, 2006), συνθέτουν ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο εκτίμησης της τοπογραφικής επιδείνωσης της μέγιστης σεισμικής επιτάχυνσης στην επιφάνεια του εδάφους πλησίον δισδιάστατων ( $2\Delta$ ) συμμετρικών λόφων τραπεζοειδούς μορφής.

### 1.1. Αντικείμενο

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως στόχο τη συστηματική μελέτη και τη διατύπωση απλών μεθοδολογιών σχεδιασμού για την επίδραση τοπογραφικών συνθηκών στη σεισμική κίνηση, με έμφαση στη μέγιστη σεισμική επιτάχυνση. Με τον όρο τοπογραφικές συνθήκες, γίνεται αναφορά στη μορφή της ελεύθερης επιφάνειας του εδάφους, απομονωμένη από οποιοσδήποτε τοπικές εδαφικές συνθήκες (local soil), που χαρακτηρίζουν μια μελετούμενη σεισμογενή περιοχή, και η έμφαση εδώ δίνεται στην τοπογραφία μορφής λόφου. Πιο συγκεκριμένα, η παρούσα εργασία διερευνά την επίδραση τοπογραφίας μορφής συμμετρικού λόφου στη μέγιστη σεισμική επιτάχυνση στην επιφάνεια του εδάφους, μέσω παραμετρικών 2D αριθμητικών αναλύσεων. Σε κάθε περίπτωση, η εν λόγω επίδραση συγκρίνεται με την τοπογραφική επιδείνωση του αντίστοιχου μονοκλινούς πρηνούς, δηλαδή του πρηνούς με ίδιο ύψος  $H$ , κλίση πρηνών  $i$  και απόσβεση εδάφους  $\xi$  που υποβάλλεται στην ίδια σεισμική διέγερση με δεσπόζον μήκος κύματος  $\lambda$ . Πέραν της συστηματικής διερεύνησης των ανωτέρω φαινομένων, απώτερος στόχος της παρούσας εργασίας είναι και η μόρφωση διαγραμμάτων εκτίμησης της τοπογραφικής επιδείνωσης της μέγιστης σεισμικής επιτάχυνσης, για τη συγκεκριμένη μορφή τοπογραφίας.

### 1.2 Ιστορική αναδρομή

Από τη δεκαετία του '70 πειραματικές παρατηρήσεις (Griffiths & Bollinger 1979, Bard & Tucker 1985) υπεδείκνυαν την επιρροή που ασκεί ο τοπογραφικός παράγοντας στη σεισμική κίνηση. Παράλληλα πραγματοποιήθηκαν θεωρητικές μελέτες για τη εξεύρεση αριθμητικής λύσης στο πρόβλημα με αποτέλεσμα να εφαρμοσθούν όλες πρακτικά οι γνωστές αριθμητικές μέθοδοι (μέθοδοι εφαρμογής της θεωρίας των πεπερασμένων στοιχείων και πεπερασμένων διαφορών, του «διακεκριμένου κυματικού αριθμού» κλπ), για τη διερεύνηση του φαινομένου διάδοσης διδιάστατων κυμάτων εντός ομογενούς ελαστικού ημίχωρου με απλής μορφής τοπογραφική ανωμαλία στην επιφάνεια (Wong & Jennings 1975, Sills 1978, Wong 1982, Sanchez Sesma 1983, Ohtsuki & Harumi 1983). Αντίστοιχα, στο Π.Θ. ολοκληρώθηκαν πρόσφατα μια παραμετρική διερεύνηση της επίδρασης της τοπογραφίας μορφής λόφου και φαρυγγίου στη μέγιστη σεισμική επιτάχυνση (Τιμοθέου 2008) καθώς και παραμετρική διερεύνηση της επίδρασης τοπογραφίας μονοκλινούς πρηνούς στο ελαστικό φάσμα απόκρισης στην επιφάνεια του εδάφους, μέσω παραμετρικών 2D αριθμητικών αναλύσεων (Κασσελά και Μεσαρίτου 2009).



Οι περισσότερες εκ των δημοσιευμένων μελετών, μελετούν την τοπογραφική επιδείνωση της σεισμικής κίνησης, αλλά δεν προχωρούν και σε διατύπωση απλών κριτηρίων σχεδιασμού. Μία εκ των εξαιρέσεων αποτελεί η εργασία των Μπουκοβάλα και Παπαδημητρίου 2006, που αφορά στην τοπογραφική επιδείνωση της μέγιστης σεισμικής επιτάχυνσης λόγω μονοκλινούς πρηνούς. Η παρούσα εργασία βασίζεται και επεκτείνει την εν λόγω μελέτη για τοπογραφίες μορφής λόφου συγκεκριμένων κλίσεων  $i$  και λόγων  $H/\lambda$ .

### **1.3. Διάρθρωση της διπλωματικής**

Η εργασία αυτή αποτελείται από 7 κεφάλαια, με Πρώτο το παρόν εισαγωγικό που παρουσιάζει το αντικείμενο και μια σύντομη ιστορική αναδρομή.

Στο Δεύτερο κεφάλαιο μελετάται η επίδραση της παρουσίας λόφου σε διάφορες μορφές σεισμικής κίνησης με βάση τη βιβλιογραφία. Γίνεται παρουσίαση των βασικών παραδοχών που υιοθετούνται ευρέως για την εν λόγω τοπογραφική ανωμαλία (γεωμετρική συμμετρία, ομογενής ελαστικός ημίχωρος, απλές γεωμετρίες κλπ) και ταυτόχρονα επισημαίνονται τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του συγκεκριμένου προσωμοιώματος που επηρεάζουν την απόκριση στην ευρύτερη ζώνη επιρροής του λόφου. Ακολουθεί διερεύνηση της επίδρασης των κύριων παραγόντων του προβλήματος (κλίση πρηνούς κλπ) στην τοπογραφική επιδείνωση της μέγιστης σεισμικής επιτάχυνσης, ξεχωριστά για κάθε κλίση λόφου.

Στο Τρίτο κεφάλαιο περιγράφεται αναλυτικά το υπολογιστικό πρόγραμμα (FLAC) που χρησιμοποιήθηκε για την εκτέλεση παραμετρικών αναλύσεων στην παρούσα εργασία. Δίνονται στοιχεία για τις βασικές μαθηματικές αρχές στις οποίες στηρίζεται (μεθοδολογία Lagrange κλπ). Γίνεται αναφορά στις υπολογιστικές δυνατότητες του προγράμματος (στατική και δυναμική ανάλυση κλπ) και στη γλώσσα προγραμματισμού *fish* και περιγράφεται ένας τυπικός υπολογιστικός κύκλος κατά την πραγματοποίηση δυναμικής ανάλυσης. Ακόμη παρουσιάζονται τα πλεονεκτήματα και οι κάποιες αδυναμίες του εν λόγω κώδικα. Για την επιβεβαίωση της εγκυρότητας της υπολογιστικής μεθόδου σε προβλήματα επίδρασης τοπογραφικών συνθηκών στη σεισμική κίνηση παρουσιάζεται επαλήθευση με τα αποτελέσματα διαπιστευμένης μεθοδολογίας από τη βιβλιογραφία, η οποία έχει εφαρμοσθεί για την περίπτωση φαραγγιών από προηγούμενη χρήση του ίδιου λογισμικού (Bouckovalas & Papadimitriou 2005). Για το σκοπό αυτό, διερευνώνται διάφοροι τύποι προσπιπτόντων κυμάτων για διάφορες τιμές συχνότητας, διαφορετικής κλίμακας γεωμετρίας, ποικίλων διαστάσεων κάρναβοι με διάφορα μεγέθη στοιχείων (*elements*), υπό ημιτονική φόρτιση. Σε όλες τις δοκιμαστικές αναλύσεις δόθηκε έμφαση στην τήρηση των προτεινόμενων από τη βιβλιογραφία αναλογιών και διαστάσεων των στοιχείων του καννάβου. Στο τέλος του κεφαλαίου αυτού γίνεται ειδική

αναφορά στην εφαρμογή της εν λόγω μεθοδολογίας για την περίπτωση τοπογραφίας μορφής λόφου και τη γενικότερη διαδικασία ανάλυσης που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία.

Στο Τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται λεπτομερώς τα αποτελέσματα παραμετρικών 2D ιξωδο-ελαστικών αναλύσεων για την επίδραση ενός συμμετρικού λόφου στη μέγιστη σεισμική επιτάχυνση στην επιφάνεια του εδάφους. Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάζονται οι απλοποιητικές παραδοχές και παρατίθενται τα αποτελέσματα για διάφορες γεωμετρίες, εδαφικές συνθήκες, σεισμικές διεγέρσεις, πάντοτε σε σύγκριση με την απόκριση για το αντίστοιχο μονοκλινές πρανές. Η διερεύνηση αφορά την τοπογραφική επιδείνωση της μέγιστης σεισμικής επιτάχυνσης σε διάφορες χαρακτηριστικές θέσεις κατά μήκος του λόφου, σε ό,τι αφορά στην οριζόντια επιτάχυνση και στην παρασιτική κατακόρυφη συνιστώσα αυτής, παρά το γεγονός ότι οι αναλύσεις δίνουν στοιχεία για ολόκληρο το ελαστικό φάσμα απόκρισης.

Της παράθεσης λεπτομερών αποτελεσμάτων έπεται η στατιστική τους επεξεργασία και η κριτική αξιολόγησή τους στο Πέμπτο κεφάλαιο, κυρίως όσον αφορά την τάξη μεγέθους και το εύρος της ενίσχυσης, τον τρόπο που μεταβάλλεται χωρικά και τις θέσεις όπου παρατηρείται η μέγιστη ενίσχυση για συγκεκριμένες τιμές των ανεξάρτητων μεταβλητών (παραμέτρων). Πιο συγκεκριμένα, προτείνονται προσεγγιστικά διαγράμματα εκτίμησης της ενίσχυσης της μέγιστης σεισμικής επιτάχυνσης  $A$  της επιφάνειας του εδάφους και της απόσταση  $D$  μέχρι το ελεύθερο πεδίο των διαφορών λόφων, σε σύγκριση με τις αντίστοιχες τιμές για το μονοκλινές πρανές.

Τέλος, στο Έκτο κεφάλαιο παρουσιάζονται ποιοτικά και ποσοτικά συμπεράσματα βάσει της συσσωρευμένης πληροφορίας που παρέχουν τα αποτελέσματα των παραμετρικών αναλύσεων. Αναλύονται οι περιορισμοί της παρούσας έρευνας και οριοθετούνται οι στόχοι πιθανών μελλοντικών προσπαθειών στο ίδιο αντικείμενο.

---

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup>: Βιβλιογραφική Έρευνα

---

### 2.1. Γενικά

Η παρούσα εργασία βασίζεται στον ήδη γνωστό καταλυτικό ρόλο που παίζει η ύπαρξη ενός πρηνούς (slope) στην ενίσχυση της μέγιστης σεισμικής επιτάχυνσης του εδάφους και την επεκτείνει με παραπάνω έρευνα για λόφο (hill) 2Δ. Με τον όρο **πρηνές** εννοείται κάθε κεκλιμένη επιφάνεια του εδάφους κλίσης  $i$ , που δημιουργεί μια διαφορά ύψους  $H$  μεταξύ δύο οριζοντίων επιπέδων του ίδιου εδάφους.



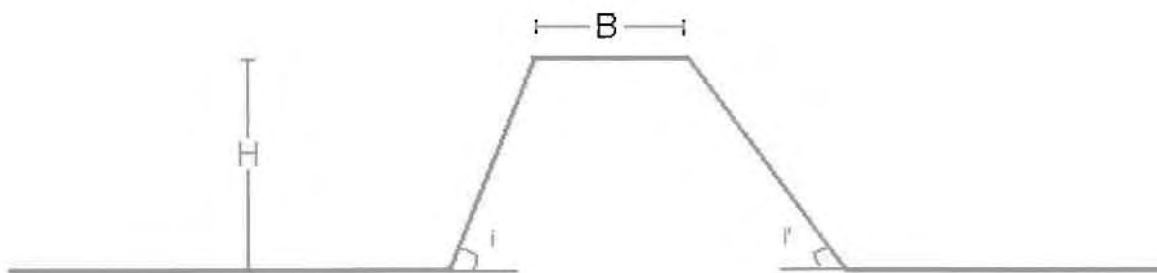
Όπου:  $H$  το ύψος του πρηνούς.

Φωτογραφία 1: Φυσικό πρηνές



Πηγή: <http://www.google.com+slopeimages>

Με τον όρο **λόφος** εννοείται κάποιος όγκος γης που εκτείνεται πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας έως και 200 μέτρα. Η τυπική μορφή ενός λόφου είναι η εξής:



**Όπου: B** είναι το πλάτος της κορυφής του λόφου

H, το ύψος του λόφου

$i = i'$  είναι οι κλίσεις του λόφου στις δύο πλευρές του

Η ομοιομορφία των πλευρών του λόφου δεν είναι απαραίτητη.

Φωτογραφία3: Φυσικός λόφος (λόφος Γκορτσούλι)



Πηγή: <http://www.google.com+hillimages>

## 2.2. Τοπογραφία Πρανούς

Συνοψίζοντας αποτελέσματα από τη βιβλιογραφία (π.χ Ashford & Sitar 1997, Ashford et al 1998, Bouckonalas & Papadimitriou 2005) για την τοπογραφική επιδείνωση λόγω μονοκλινούς πρανούς προκύπτει ότι για τις πλείστες των περιπτώσεων η ενίσχυση της μέγιστης οριζόντιας συνιστώσας της επιτάχυνσης ( $a_x$ ) στην κορυφή ως προς αυτή στο ελεύθερο πεδίο ( $a_{x,ff}$ ), δεν ξεπερνάει την τιμή 2 (για κύματα SH), για μήκος κύματος της τάξης των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της τοπογραφικής ανωμαλίας. Η τιμή αυτή είναι ανηγμένη ως προς την απόκριση του εδάφους στο ελεύθερο πεδίο «πίσω» από την κορυφή για κατακόρυφα προσπίπτον κύμα. Στα σημεία μεταξύ κορυφής και πόδα δεν έχουμε συγκεκριμένη συμπεριφορά, καθώς σε άλλα σημεία παρατηρείται απομείωση και σε άλλα ενίσχυση. Παρόμοια είναι και η συμπεριφορά για πρόσπτωση κυμάτων SV. Όμως για τα κύματα αυτά αναμένονται μεγαλύτερες τιμές ενίσχυσης. Τέλος όσον αφορά στην εμφάνιση της κατακόρυφης συνιστώσας  $a_y$  τα μεγέθη είναι σαφώς μικρότερα, αν και υπό ορισμένες προϋποθέσεις λαμβάνονται και αρκετά μεγάλες τιμές ( $a_y/a_{x,ff} < 1.6$  για κατακόρυφο προσπίπτον κύμα SV). Η τιμή του απολύτως μεγίστου εμφανίζεται στην στενή περιοχή της στέψης και για μεγάλες τιμές της αδιάστατης συχνότητας.

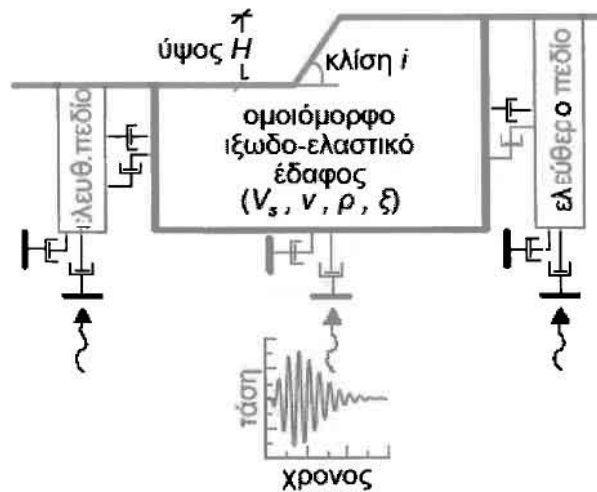
Οι μόνες μελέτες παραμετρικής φύσης παρουσιάζονται από τους Ashford and Sitar (1997) και Ashford et al (1997), οι οποίοι δίνουν ποσοτικά στοιχεία για την επίδραση της κλίσης  $i$  και του ύψους του πρανούς  $H$ , του είδους (P, SH και SV) και του μήκους κύματος  $\lambda$ , όπως επίσης και της γωνίας πρόσπτωσης  $\beta$ . Συμπληρωματικές και κυρίως επεκτατικές μελέτες, ( Bouckonalas & 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 πρανούς στη σεισμική κίνηση. Εν συνεχεία, παρουσιάζονται περιληπτικά οι εν λόγω σχέσεις, αλλά κυρίως επεκτείνονται σε μορφή διαγραμμάτων σχεδιασμού που θα μπορούσαν να αποτελέσουν τη βάση κανονιστικών διατάξεων.

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 2.1 παρουσιάζει ένα παράδειγμα  $2\Delta$  γεωμετρίας πρανούς 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 πρανούς,

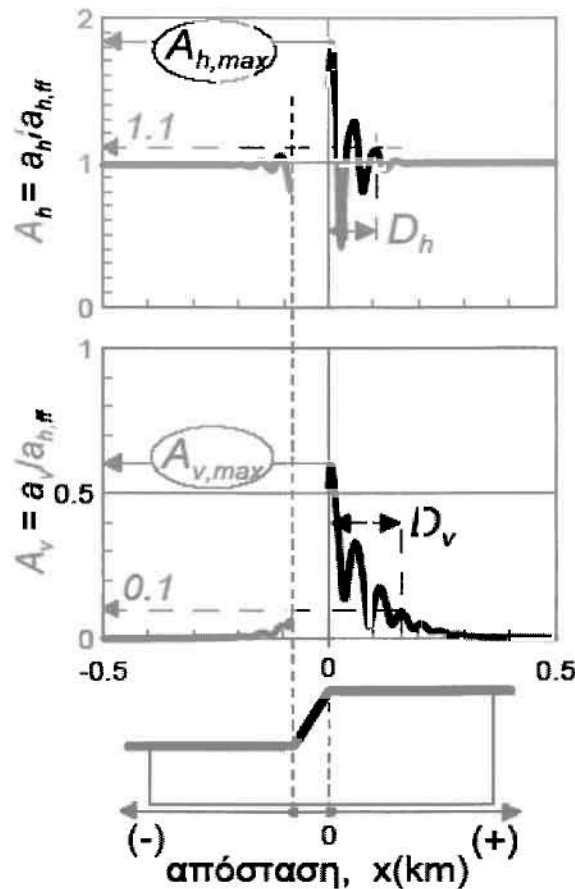
- αποσβεστήρες στη βάση και σύνορα ελεύθερου πεδίου στα πλευρικά όρια του καννάβου, και
- επιβολή της σεισμικής διέγερσης μορφής αρμονικής (βλέπε Σχήμα 2.1) στη βάση του καννάβου ως χρονοϊστορία διατμητικής τάσης που αντιστοιχεί σε κατακόρυφη πρόσπτωση κυμάτων SV.

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



**Σχήμα 2.1.** Τυπική 2Δ γεωμετρία αναλύσεων, συνοριακές συνθήκες και διέγερση βάσης (Μπουκοβάλας κ.α 2006)

Το Σχήμα 2.2 παρουσιάζει τυπικά αποτελέσματα από τις αριθμητικές αναλύσεις για την περίπτωση πρανούς με κλίση  $i = 30^\circ$ , κανονικοποιημένο ύψος πρανούς  $H/\lambda = 2.0$ , απόσβεση  $\xi = 5\%$  και έξι σημαντικούς κύκλους διέγερσης ( $N = 6$ ).



**Σχήμα 2.2.** Τοπογραφική επιδείνωση της μέγιστης σεισμικής επιτάχυνσης από αριθμητική ανάλυση για μονοκλινές πρανές με κλίση  $i=30^\circ$ ,  $H/\lambda=2.0$ ,  $\xi=5\%$  και  $N=6$  σημαντικούς κύκλους (Μπουκοβάλας κ.α 2006).

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 ελευθέρου 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 2.2 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 πρανούς. Οι επιδράσεις αυτές απομειώνονται με την απόσταση από το πρανές, 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 πρανούς, 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 απομείωσης ( $A_h < 1.0$ ) 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 πρανούς αποδίδεται στις ανακλάσεις των προσπίπτοντων κυμάτων SV στην επιφάνεια του πρανούς 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 ανάστροφων αναλύσεων βλαβών σε κτίρια είναι ιδιαίτερα αδρή, και ότι η πειραματική μέτρηση αυτής θα πρέπει να γίνεται μέσω πυκνών δικτύων επιταχυνσιογράφων. Συνολικά εκτελέστηκαν 90 παραμετρικές αναλύσεις σεισμικής απόκρισης του εδάφους με στόχο τη διερεύνηση της επίδρασης των κάτωθι παραμέτρων:

- της κλίσης του πρανούς  $i(^{\circ})$  ή  $I=i/90^{\circ}$ , με  $i = 10^{\circ} - 90^{\circ}$
- του κανονικοποιημένου ύψους του πρανούς  $H/\lambda$ , 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  $\xi = 0 - 20\%$

Για την ευχερέστερη χρήση των ανωτέρω αποτελεσμάτων, η έρευνα επικεντρώθηκε σε παραμέτρους σημαντικές για το σχεδιασμό τεχνικών έργων, δηλαδή (βλ. Σχήμα 2.2)

- τις μέγιστες τοπογραφικές επιδεινώσεις πίσω από τη στέψη του πρανούς, 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 πρανούς (όπου δηλαδή  $A_h \leq 1.10$  και  $A_v < 0.10$ , αντίστοιχα)



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

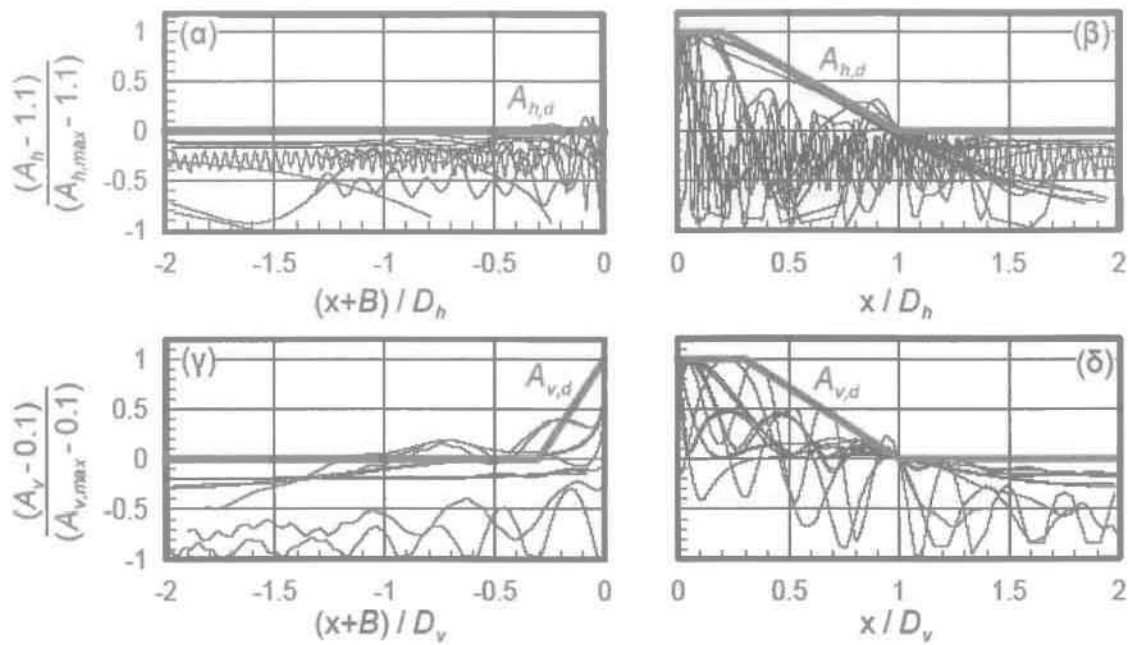
$$A_{h,max} = 1 + \frac{0.225(H/\lambda)^{0.4} \left( \frac{I^2 + 2I^6}{I^3 + 0.02} \right)}{1 + 0.9\xi} \quad (2.1)$$

$$A_{v,max} = \frac{0.75(H/\lambda)^{0.8} (I^{0.5} + 1.5I^5)}{1 + 0.15\xi^{0.5}} \quad (2.2)$$

$$D_h/H = \frac{\left[ \frac{(H/\lambda)}{0.2 + (H/\lambda)^2} \right] \left( \frac{I^{1.5} + 3.3I^8}{I^4 + 0.07} \right)}{0.71 + 3.33\xi} N^{0.43} \quad (2.3)$$

$$D_v/H = \frac{\left[ \frac{0.233(H/\lambda)}{0.2 + (H/\lambda)^2} \right] \left( \frac{I^{1.5} + 3.3I^8}{I^4 + 0.07} \right)}{\xi^{0.78}} \quad (2.4)$$

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 πρानού 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 2.3.



**Σχήμα 2.3.** 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 πρηνούς ( $B = H/\tan i$ ) (Μπουκοβάλας κ.α. 2006 )

Από τα παραπάνω αποτελέσματα ορίσθηκαν οι περιβάλλουσες σχεδιασμού  $A_{h,d}$  και  $A_{v,d}$  με την απόσταση  $x$  από το πρηνές, οι οποίες δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις:

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

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

Η ανωτέρω εργασία προσέγγισε το πρόβλημα της τοπογραφικής επιδείνωσης πρηνών στη μέγιστη σεισμική επιτάχυνση στην επιφάνεια του εδάφους μέσω παραμετρικών ιξωδο-ελαστικών αναλύσεων που είχαν σεισμική διέγερση είτε αρμονική ή μονο-χρωματική αυξομειούμενης έντασης (παλμός Chang). Το αντικείμενο της παρούσας εργασίας εντοπίζεται στην επιδείνωση της μέγιστης σεισμικής επιτάχυνσης της επιφάνειας του εδάφους που οφείλεται στην τοπογραφία μορφής λόφου.

### 2.3 Τοπογραφία Λόφου

Δεδομένου ότι στη φύση, εν γένει, δεν απαντώνται συμμετρικά σχήματα, το εν λόγω πρόβλημα έχει σύνθετο και συγκεκριμένα τρισδιάστατο χαρακτήρα. Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με τον τυχηματικό χαρακτήρα του σεισμικού φαινομένου, καθιστά ιδιαίτερα δύσκολη την προσπάθεια εξαγωγής απτών συμπερασμάτων. Για να περιοριστεί η αλληλεμπλοκή πολλών παραγόντων και να γίνει δυνατή η διακριτοποίηση των παραμέτρων που επηρεάζουν το πρόβλημα, στη βιβλιογραφία υιοθετούνται συνήθως κάποιες βασικές παραδοχές:

**α) Γεωμετρική συμμετρία.-** Προσομοίωμα λόφου για το οποίο κατακόρυφες τομές με διευθύνσεις αυτές των δύο οριζοντίων κυρίων αξόνων απεικονίζουν επίπεδα σχήματα συμμετρικά ως προς κατακόρυφο άξονα (π.χ. ημιέλλειψη, ημικύκλιο κλπ). Με τη θεώρηση αυτή το πρόβλημα «εκφυλίζεται» σε δισδιάστατο. Στις περισσότερες από τις σχετικές μελέτες που υιοθετούν γεωμετρική συμμετρία, η τρίτη (εκτός επιπέδου) διάσταση θεωρείται ότι εκτείνεται μέχρι το άπειρο, δηλαδή ο λόφος θεωρείται απειρομήκης.

**β) Ομοιογενής ιξωδο-ελαστικός ημίχωρος.-** Η θεώρηση αυτή γίνεται κυρίως για την απλοποίηση των μαθηματικών σχέσεων και τη χρήση της ελαστικής θεωρίας μετάδοσης κυμάτων.

**γ) Κατακόρυφη διάδοση κύματος.-** Η κατακόρυφη διάδοση του προσπίπτοντος κύματος, σε συνδυασμό με γεωμετρική συμμετρία, οδηγεί σε απλοποίηση της εντατικής κατάστασης και της ανάλυσης, δεν απέχει δε ιδιαίτερα από την πραγματικότητα (τουλάχιστον σε μακρινούς σεισμούς). Ο λόγος είναι ότι σύμφωνα με το νόμο του Snell, η διεύθυνση διάδοσης του κυματικού πεδίου από το υπόβαθρο προς διαρκώς πιο εύκαμπτα υπερκείμενα στρώματα γίνεται όλο και πιο κατακόρυφη σε κάθε διεπιφάνεια στρωμάτων. Επιπλέον, η ύπαρξη εύκαμπτου εδαφικού στρώματος πλησίον της επιφάνειας, ούτως ή άλλως, πρακτικώς εξουδετερώνει την επίδραση της γωνίας πρόσπτωσης  $\beta$  (Bard & Tucker 1985, Bouchon & Barker 1996).

Οι κύριες παράμετροι που φαίνεται να επηρεάζουν καθοριστικά την απόκριση στην περιοχή οποιασδήποτε τοπογραφικής ανωμαλίας μορφής λόφου είναι ο τύπος του κύματος (SV, SH, P κ.λ.π.), η διεύθυνση πρόσπτωσης του κυματισμού, η κλίση των πρηνών του λόφου, η συχνότητα του προσπίπτοντος κύματος, και φυσικά τα χαρακτηριστικά της στρωματογραφίας.

Οι πιο πάνω παράγοντες είναι οι πλέον σημαντικοί στον καθορισμό της απόκρισης στην περιοχή του λόφου. Πέραν αυτών όμως, στη βιβλιογραφία αναφέρονται και κάποιες «δευτερεύουσες» επιδράσεις, όπως η παρουσία γειτονικών λόφων, ο πραγματικά τρισδιάστατος χαρακτήρας του προβλήματος (καθώς ο λόφος λειτουργεί ως κυματικό «δοχείο») κ.α.

Τα κύρια συμπεράσματα που προκύπτουν από τη σχετική βιβλιογραφία συνοπτικά παρουσιάζονται παρακάτω:

### **A) Συνθήκες αμελητέας τοπογραφικής επίδρασης.**

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, κύριες παράμετροι που καθορίζουν τα όρια επιρροής της τοπογραφικής ανωμαλίας στην επιφανειακή απόκριση του εδάφους κατά τη σεισμική διέγερση είναι: η γωνία κλίσης του πρηνούς  $i$ , το μήκος κύματος  $\lambda$ , τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της τοπογραφικής ανωμαλίας  $H$  και  $B$  (ύψος και πλάτος αντίστοιχα) και η απόσταση από τον πόδα του πρηνούς μέχρι το ελεύθερο πεδίο  $Dt$ . Η μελέτη βέβαια κάθε μιας από τις παραπάνω παραμέτρους χωριστά είναι ιδιαίτερα δύσκολη. Τα διάφορα εξαγόμενα συμπεράσματα αφορούν μεμονωμένα παραδείγματα στις περισσότερες δημοσιεύσεις και γίνεται προσπάθεια εύρεσης της «περιβάλλουσας» των διαφόρων δημοσιευμένων μεμονωμένων περιπτώσεων.

#### **Επιρροή γωνίας κλίσης πρηνούς $i$**

Η γεωμετρία της λοφώδους τοπογραφικής ανωμαλίας, προκαλεί σημαντική ενίσχυση ακόμη και για μικρές σχετικά γωνίες κλίσης. Από τις διάφορες βιβλιογραφικές αναφορές διαφαίνεται ότι ένα κάτω όριο για να θεωρηθεί αισθητή (της τάξης του 10% ενίσχυση ως προς το ελεύθερο πεδίο) η επίδραση της κλίσης του πρηνούς, είναι χονδρικά οι  $10^\circ$ . Οι παραπάνω τιμές επαληθεύονται και από αρκετές πραγματικές καταγραφές (ενδεικτικά Tarzana hill, Northridge 1994).

#### **Επιρροή μήκους κύματος $\lambda$ , ύψους $H$ και ημιπλάτους $B$ του λόφου**

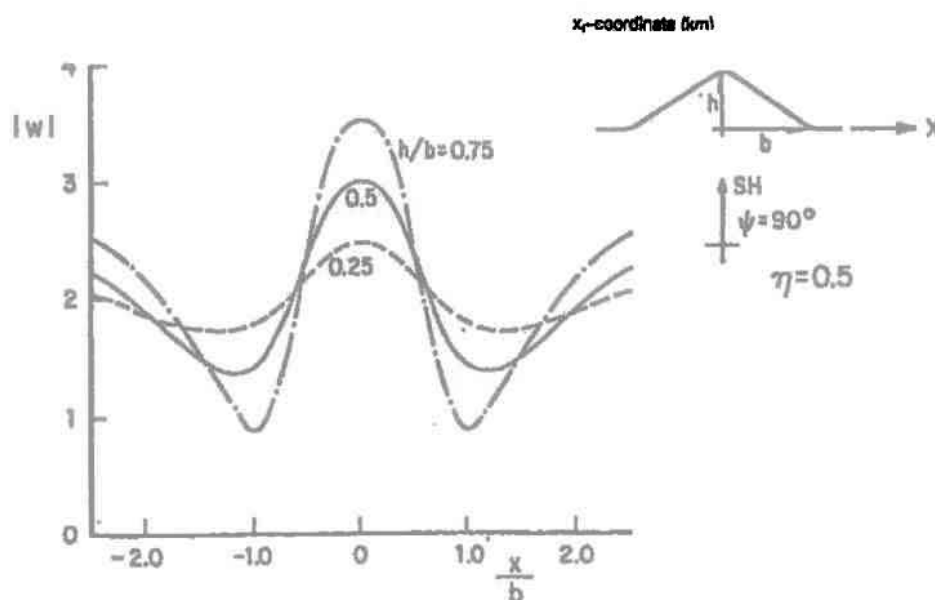
Καθορισμός της τιμής του μήκους κύματος  $\lambda$  πέραν της οποίας η επίδραση της τοπογραφίας θεωρείται αμελητέα, δεν μπορεί να γίνει ανεξάρτητα από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του λοφώδους πρηνούς. Γενικότερο συμπέρασμα είναι ότι για μήκος κύματος της τάξης του ημιπλάτους  $B$  του λόφου, η απόκριση γίνεται μέγιστη (Durand 1999, Pedersen et al 1994, Bard 1992). Πρακτικότερα συμπεράσματα για την τιμή του  $\lambda$  μπορούν να προκύψουν έμμεσα, βάσει

του εύρους των τιμών που χρησιμοποιούνται στο σύνολο των διαθέσιμων μελετών για τη διερεύνηση της εδαφικής ενίσχυσης: Χονδρικά ως κάτω όριο για την τιμή του  $\lambda$  θα μπορούσε να θεωρηθεί μια τιμή αρκετά μεγαλύτερη του  $4H$  ( $\lambda \gg 4H$ ). Εφόσον το  $H$  είναι εν γένει της τάξης του ημιπλάτους  $B$  παρόμοια σχέση μπορεί να διατυπωθεί και για το  $\lambda$  συναρτήσει του  $B$  [πάντως από τις διάφορες μεμονωμένες περιπτώσεις προκύπτει επιρροή ακόμα και για  $\lambda$  πλησίον του  $8B$  (η τιμή αυτή αφορά ειδικά SH κυματισμό)].

Είναι προφανής με βάσει τα παραπάνω η αλληλεξάρτηση μεταξύ των παραμέτρων  $\lambda$ ,  $H$  και  $B$ . Άρα, για  $H$  και  $B$  προκύπτουν έμμεσα αντίστοιχες σχέσεις συσχέτισης:  $H \ll 0.25\lambda$  και  $B \ll 0.125\lambda$  (βάσει του  $\lambda > 8B$ , κατά τις παραπάνω διαπιστώσεις για την επιρροή του  $\lambda$ ).

### Ασφαλής απόσταση Dt από τον πόδα του πρανούς

Είναι λογικό όσο απομακρυνόμαστε από το λόφο να μειώνεται η επίδραση της τοπογραφίας. Αυτό παρατηρείται στην πράξη για κάποια απόσταση όμως από τον πόδα του λόφου. Συγκεκριμένα σε μία ζώνη πλησίον του λοφώδους πρανούς δεν είναι φθίνουσα η απόκριση συναρτήσει της απόστασης αλλά παρατηρούνται έντονες διακυμάνσεις. Το εύρος ( $Dt$ ) αυτής της ζώνης (πέραν της οποίας θεωρείται ότι βρίσκεται το ελεύθερο πεδίο) εκτιμάται ότι αυξάνεται με την κλίση του πρανούς. Από μεμονωμένες περιπτώσεις προκύπτει ότι πρακτικά το ελεύθερο πεδίο απέχει κατ'ελάχιστο απόσταση  $Dt=\lambda$  από τον πόδα του πρανούς για SH κύματα (Le Brun 1999). Σε διαφορετική έρευνα (Sanchez-Sesma 1982) προκύπτει η τιμή  $Dt=1.5B$  (η μελέτη αφορούσε  $B=\lambda/4$ , Σχήμα 2.5).



**Σχήμα 2.5.** Έυρος επιφανειακής απόκρισης για διαφορετικές γωνίες κλίσης πρανούς  $i$  ( $\tan i = H/B$ ). Η τιμή της αδιάστατης συχνότητας είναι  $n=0.5$ . (Sesma et al 1982).

Πάντως άλλες δημοσιεύσεις δίνουν λιγότερο συντηρητικά αποτελέσματα (π.χ. για  $Dt \approx 0.2B$  ενίσχυση 10% ως προς το ελεύθερο πεδίο). Τέλος όσον αφορά στα κύματα P έχουμε παρατηρήσεις μέχρι την τιμή  $Dt=B$  όπου η ενίσχυση είναι ακόμα σημαντική.

## Β) Συνθήκες επίδρασης της τοπογραφίας και εύρη τιμών απόκρισης

	Σημείο Α (κορυφή λόφου)	Σημείο Β (πόδας λόφου)	Σημείο Γ (πλαγιά λόφου)
Εύρος $w/w_{ff}$	0.05÷3	0.1÷1.35	0.2÷2.3
Max $w/w_{ff}$	3	1.35	2.3
Συνθήκες «συντονισμού» <sup>(1)</sup>	$\eta \approx 1 \div 2^{(2)}$	$\eta \approx 1.1 \div 1.2$ & $\eta \approx 2.0 \div 2.5$	$\eta \approx 2 \div 2.5$
Κύριοι παράγοντες	i, λ, Β	i, λ, Β	i, λ, Β
Δευτερογενείς παράγοντες	$H^{(3)}$ , μορφή λόφου (και β)	$H^{(3)}$ , μορφή λόφου (και β)	$H^{(3)}$ , μορφή λόφου (και β)
Παρατηρήσεις	Το κάτω όριο $w/w_{ff}$ καθορίζεται από τη min τιμή για ημικυκλικό λόφο	Τα min, max όρια $w/w_{ff}$ καθορίζονται από το εύρος τιμών για ημικυκλικό λόφο	Τα min, max όρια $w/w_{ff}$ καθορίζονται από το εύρος τιμών για ημικυκλικό λόφο. <sup>(3)</sup> αρκετά χονδρική προσέγγιση
	<sup>(1)</sup> Για κάποια τιμή εντός του εύρους τιμών «η» που αναγράφεται εκτιμάται ότι εμφανίζεται η μέγιστη τιμή απόκρισης στο εξεταζόμενο σημείο. <sup>(2)</sup> Κατά Geli et al 1988, εκτιμάται ότι υπάρχει μία συχνότητα συντονισμού ειδικά για το πηλίκο απόκρισης κορυφής προς πόδα λόφου $\eta \approx 0.8$ . <sup>(3)</sup> Προτιμάται η χρήση του Β στην προσομοίωση λοφώδους πρσανούς (Β & Η αλληλεξαρτώνται μέσω της γωνίας κλίσης)		

- $w$  &  $w_{ff}$  είναι το πλάτος της μετατόπισης (ταχύτητας ή επιτάχυνσης) στην εξεταζόμενη θέση και στο ελεύθερο πεδίο, αντίστοιχα.

### 3.1. Περιγραφή Μεθοδολογίας

Πέραν της συγκριτικής αξιολόγησης των πορισμάτων σχετικών δημοσιεύσεων για τη μελέτη της επίδρασης της τοπογραφίας στη σεισμική διέγερση, για την περάτωση αυτής της εργασίας, πραγματοποιήθηκε μία σειρά αριθμητικών αναλύσεων. Το υπολογιστικό πρόγραμμα που χρησιμοποιείται είναι το FLAC το οποίο εφαρμόζεται για την επίλυση δισδιάστατων προβλημάτων με χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων διαφορών. Είναι ένα λογισμικό που εξειδικεύεται στην προσομοίωση της συμπεριφοράς εδάφους και βράχου, δηλαδή προβλημάτων που άπτονται της γεωτεχνικής (σεισμικής και μη) μηχανικής.

Η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών βασίζεται στην αριθμητική επίλυση της πλήρους διαφορικής εξίσωσης κίνησης και η διαδικασία επίλυσης εξελίσσεται με υπολογιστικά βήματα. Το υλικό προσομοιώνεται με ζώνες (ή στοιχεία) που μορφώνουν έναν κάνναβο, ο οποίος έχει καθοριστεί από το χρήστη για να ταιριάζει με τη γεωμετρία του προβλήματος. Ο κάνναβος έχει την ικανότητα να κινείται και να παραμορφώνεται «ακολουθώντας» το εδαφικό υλικό, κατά τα πρότυπα της μεθοδολογίας Lagrange («του κινούμενου παρατηρητή»), αν χρειάζεται από τη φύση του προβλήματος. Μέσω της εξίσωσης κίνησης υπολογίζονται σε κάθε βήμα αρχικά οι ταχύτητες των κόμβων του δικτύου (ή, αλλιώς, η προσαύξηση των μετατοπίσεων ανά βήμα) από τις τάσεις και δυνάμεις του προηγούμενου βήματος. Από αυτές προκύπτουν ο ρυθμοί των παραμορφώσεων σε κάθε κόμβο και από αυτούς οι νέες τάσεις στις ζώνες του δικτύου βάσει της καταστατικής σχέσης τάσεων-παραμορφώσεων που καθορίζεται από το χρήστη. Από τις τάσεις στις ζώνες (στις οποίες περιλαμβάνονται και οι τάσεις του προηγούμενου βήματος) προκύπτουν οι ισοδύναμες δυνάμεις στους κόμβους του δικτύου, που οφείλονται στην εντατική κατάσταση του μέσου. Η επαλληλία αυτών με τη δύναμη λόγω αποσβέσεως αλλά και τις εξωτερικές δυνάμεις δίνει τη μη ισορροπούσα δύναμη  $\Sigma F$  σε κάθε κόμβο. Η δύναμη αυτή θα πρέπει σύμφωνα με τη διαφορική εξίσωση κίνησης να είναι ίση με την αδρανειακή δύναμη. Έτσι διαιρώντας με την ισοδύναμη μάζα  $m$  κάθε κόμβου και πολλαπλασιάζοντας το πηλίκο επί κάποιο μικρό χρονικό βήμα  $\Delta t$ , προκύπτει η προσαύξηση την ταχύτητας κάθε κόμβου σύμφωνα με τη σχέση:

$$u_{(t+\Delta t/2)} = u_{(t-\Delta t/2)} + (\Sigma F/m) * \Delta t$$

Έχοντας υπολογίσει τη νέα ταχύτητα του κόμβου η παραπάνω διαδικασία επαναλαμβάνεται για το επόμενο υπολογιστικό βήμα.

Στην περίπτωση που το πρόβλημα επιλύεται δυναμικά, η μάζα και η σταθερά αποσβέσεως είναι αυτές που αντιστοιχούν στις πραγματικές παραμέτρους, ενώ τα χρονικά βήματα υπολογισμού  $\Delta t$  αντιστοιχούν σε πραγματικά χρονικά διαστήματα. Αν η επίλυση επιλεγεί να γίνει στατικά, τότε μάζα, σταθερά αποσβέσεως και το βήμα υπολογισμού καθορίζονται από το ίδιο το πρόγραμμα έτσι ώστε να επιτυγχάνεται ταχύτερη σύγκλιση.

Για καλύτερα αποτελέσματα η επίλυση διαχωρίζει την κάθε τετραπλευρική ζώνη του καννάβου σε τέσσερις τριγωνικές υποζώνες. Σε δυναμικά προβλήματα το χρονικό βήμα υπολογισμού υπολογίζεται από το πρόγραμμα έτσι ώστε να είναι μικρότερο από το κρίσιμο για το οποίο ισχύει:

$$\Delta t_{\text{crit}} = \min[A / V_p d_{\text{max}}]$$

Όπου:  $A$  το εμβαδόν της τριγωνικής υποζώνης κάθε ζώνης του δικτύου

$d_{\text{max}}$  η μεγαλύτερη διαγώνιος της και

$V_p$  η ταχύτητα διάδοσης των διαμήκων κυμάτων όπως αυτή υπολογίζεται από τις δεδομένες ελαστικές σταθερές του προβλήματος.

Το  $\min$  αναφέρεται στο ελάχιστο λόγο  $A/(V_p d_{\text{max}})$  που απαντάται σε όλο το δίκτυο πεπερασμένων διαφορών.

Ο περιορισμός αυτός για το χρονικό βήμα υπολογισμού οφείλεται, κατ' ουσία, στην απαίτηση όπως η «πληροφορία» για τη σχέση τάσεων-παραμορφώσεων και δράσεων να μη διαδίδεται μέσα στον κάνναβο με ταχύτητα μεγαλύτερη από την ταχύτητα διάδοσης των διαμήκων κυμάτων, παραβιάζοντας τον πραγματικό μηχανισμό που συναντάται στη φύση.

Οι συνοριακές συνθήκες του προβλήματος επιλέγονται με γνώμονα

- την κατά το δυνατό καλύτερη προσομοίωση του προβλήματος που απαντάται στη φύση και
- την υπολογιστική ταχύτητα που απαιτείται για την εξαγωγή αποτελεσμάτων.

Με βάση τα παραπάνω δεν υπάρχει ανάγκη για πολύ μεγάλους καννάβους προσομοίωσης για να επιτυγχάνεται ο στόχος μη επηρεασμού της περιοχής ενδιαφέροντος από τις συνοριακές συνθήκες. Εναλλακτικά, χρησιμοποιείται ένας λογικής τάξης μεγέθους κάνναβος στο κάτω όριο του οποίου επιβάλλονται κατάλληλες συνθήκες απορρόφησης της ενέργειας που ισοδυναμούν με την απόσβεση ακτινοβολίας που θα ελάμβανε χώρα εάν επρόκειτο για ημιχώρο. Επίσης, στα πλευρικά όρια του καννάβου εφαρμόζονται συνθήκες ελεύθερου πεδίου οι οποίες εξασφαλίζονται με ειδικές διατάξεις που πρακτικώς «επιβάλλουν» συνθήκη ελεύθερου πεδίου



στο όριο. Ακόμη επισημαίνεται ότι η κίνηση επιβάλλεται στο κάτω όριο του καννάβου ως χρονοϊστορία τάσης και όχι μετατόπισης, ταχύτητας ή επιτάχυνσης οπότε θα δημιουργούνταν τεχνητές ανακλάσεις στο εν λόγω όριο.

#### **Πλεονεκτήματα του προγράμματος FLAC:**

- Το FLAC αντιμετωπίζει την ανελαστικότητα στη σχέση τάσεων – παραμορφώσεων με διάφορα ελαστο-πλαστικά καταστατικά μοντέλα (π.χ. το μοντέλο Mohr-Coulomb, Drucker-Prager) και μάλιστα σχεδόν με τις ίδιες απαιτήσεις σε υπολογιστική ισχύ που προβλέπονται για το απλό ελαστικό μοντέλο. Αντίθετα, προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων απαιτούν σημαντικά περισσότερο χρόνο.
- Δε γίνεται μόρφωση και αποθήκευση μητρώων ακαμψίας οπότε μπορεί να χρησιμοποιηθεί μεγάλος αριθμός στοιχείων κατά την προσομοίωση με μέτριες απαιτήσεις σε μνήμη, ενώ προβλήματα με μεγάλες μετατοπίσεις και παραμορφώσεις αντιμετωπίζονται επίσης χωρίς πρόσθετη υπολογιστική προσπάθεια.
- Διαθέτει μια ενσωματωμένη γλώσσα, τη Fish που μοιάζει με τη FORTRAN, αλλά που είναι προσαρμοσμένη στις δυνατότητες, απαιτήσεις και ανάγκες του FLAC. Η Fish δίνει την δυνατότητα στον χρήστη να εφοδιάζει τα αρχεία εισόδου του με υπορουτίνες και κώδικες που μπορούν να μετατρέπουν ή να συμπληρώνουν καταστατικά προσομοιώματα ή να εισάγουν στην υπολογιστική διαδικασία νέες μεταβλητές και παραμέτρους.

Παρά τα πλεονεκτήματα του FLAC που αναφέρονται παραπάνω, υπάρχουν και ορισμένες αδυναμίες που ενδέχεται να αυξήσουν τις απαιτήσεις σε υπολογιστική ισχύ. Συγκεκριμένα:

- Η χρήση συντελεστή αποσβέσεως ανάλογου της ακαμψίας, πολύπλοκα ελαστοπλαστικά καταστατικά προσομοιώματα και άλλες υπορουτίνες γραμμένες σε Fish, που παρεμβάλλονται σε κάθε υπολογιστικό κύκλο που εκτελεί το πρόγραμμα, είναι παράγοντες που αυξάνουν το συνολικό χρόνο επίλυσης.
- Κυρίως όμως χρειάζεται σημαντική υπολογιστική προσπάθεια διότι τα υπολογιστικά βήματα που απαιτούνται πρέπει να είναι μικρά και κατά συνέπεια πολλά σε αριθμό, αφού προκειμένου να μειωθεί η επίδραση της αδράνειας στο ελάχιστο, οι επιβαλλόμενες ταχύτητες στο σύνορο πρέπει να είναι μικρές. Αυτό ισχύει και για τη στατική επίλυση καθώς, λόγω του χαρακτήρα του κώδικα, η επίδραση της αδράνειας υπεισέρχεται και σ' αυτή την ανάλυση.

### 3.2. Βαθμονόμηση Μεθοδολογίας

Η χρήση του FLAC για προβλήματα σεισμικής απόκρισης έχει αξιολογηθεί στο παρελθόν (Bouckonas & Papadimitriou 2005), και συνεπώς εδώ γίνεται μόνο μια περιληπτική παρουσίαση της διαδικασίας βαθμονόμησης του. Πιο συγκεκριμένα, για το σκοπό αυτό τα αριθμητικά αποτελέσματα θα έπρεπε να συγκριθούν με αντίστοιχα από μια καλά προσδιορισμένη και διεθνώς αναγνωρισμένη μέθοδο (π.χ. αναλυτικές ή αριθμητικές λύσεις). Για το εν λόγω πρόβλημα (επίδραση τοπογραφικής ανωμαλίας στην εδαφική απόκριση κατά την πρόσπτωση κυμάτων SV και P) η μελέτη στη βιβλιογραφία έχει γίνει κυρίως προσεγγιστικά με αριθμητικές μεθόδους και δευτερευόντως με αναλυτικές λύσεις, λόγω της μεγάλης πολυπλοκότητας των δεύτερων.

Η πιο συχνά αναφερόμενη μεθοδολογία επίλυσης τέτοιων προβλημάτων είναι η μέθοδος που εφαρμόστηκε από τον Wong για τη μελέτη της απόκρισης σε ανωμαλία μορφής φαράγγιου λόγω κυμάτων P και SV. Είναι αξιοσημείωτο ότι τα αποτελέσματα του Wong (1982) χρησιμοποιούνται ως πρότυπο με το οποίο συγκρίνονται τα αποτελέσματα νέων μεθόδων (π.χ. Sesma et al 1985, Sesma & Campillo 1991), και αυτός είναι ο λόγος που η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων του FLAC αξιολογήθηκε με σύγκριση προς τα αντίστοιχα του Wong. Επισημαίνεται ότι η πρότυπη αυτή μεθοδολογία εφαρμόστηκε αρχικά σε στατικά προβλήματα θεμελιώσεων και μετέπειτα προσαρμόστηκε σε δυναμικά προβλήματα διάδοσης κυμάτων. Εφαρμόζεται μια «γενικευμένη αντίστροφη μέθοδος» (generalized inverse method) που διαφέρει ως προς τις άλλες αριθμητικές μεθόδους δίνοντας ιδιαίτερη έμφαση στις συνοριακές συνθήκες. Επιλέγεται μια δοκιμαστική συνάρτηση με άγνωστες σταθερές η οποία επαληθεύει αρχικά την καταστατική εξίσωση (governing equation) του προβλήματος και στη συνέχεια τις συνοριακές συνθήκες με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων. Η μόνωση της ανωμαλίας γίνεται θεωρώντας ένα επίπεδο σύνορο με μια τοπική ανωμαλία, η οποία προσομοιώνεται με μια καμπύλη επιφάνεια. Οι δοκιμαστικές συναρτήσεις επιλέγονται ανάλογα με τη μορφή της ανωμαλίας, ώστε να ικανοποιούνται οι συνθήκες της ελεύθερης επιφάνειας του ημιχώρου και της απόσβεσης ακτινοβολίας στο άπειρο, καθώς και οι εξισώσεις επίπεδης παραμόρφωσης σε κάθε σημείο εκτός εκείνων στα οποία επιβάλλεται η διέγερση. Οι συνοριακές συνθήκες στην καμπύλη επιφάνεια προσδιορίζονται αλλάζοντας το πλάτος και τη φάση των δοκιμαστικών συναρτήσεων.

### Σύνκριση αποτελεσμάτων

Ο Wong (1982) εφάρμοσε τη μεθοδολογία του για ημικυκλικό φαράγγι χάριν απλότητας και παρουσίασε αποτελέσματα για πρόσπτωση κυμάτων P και SV. Στις αναλύσεις με το FLAC, η διέγερση επιβάλλεται στην κάτω επιφάνεια του καννάβου ως χρονιοιστορία τάσης και εξετάζεται η απόκριση των σημείων της ελεύθερης επιφάνειας. Η μέγιστη απόκριση των σημείων αυτών στην ευρύτερη ζώνη της ανωμαλίας απεικονίζεται συναρτήσεως της απόστασης από τον άξονα συμμετρίας της ανωμαλίας σε διαγράμματα που αφορούν σε συγκεκριμένη τιμή της αδιάστατης συχνότητας:

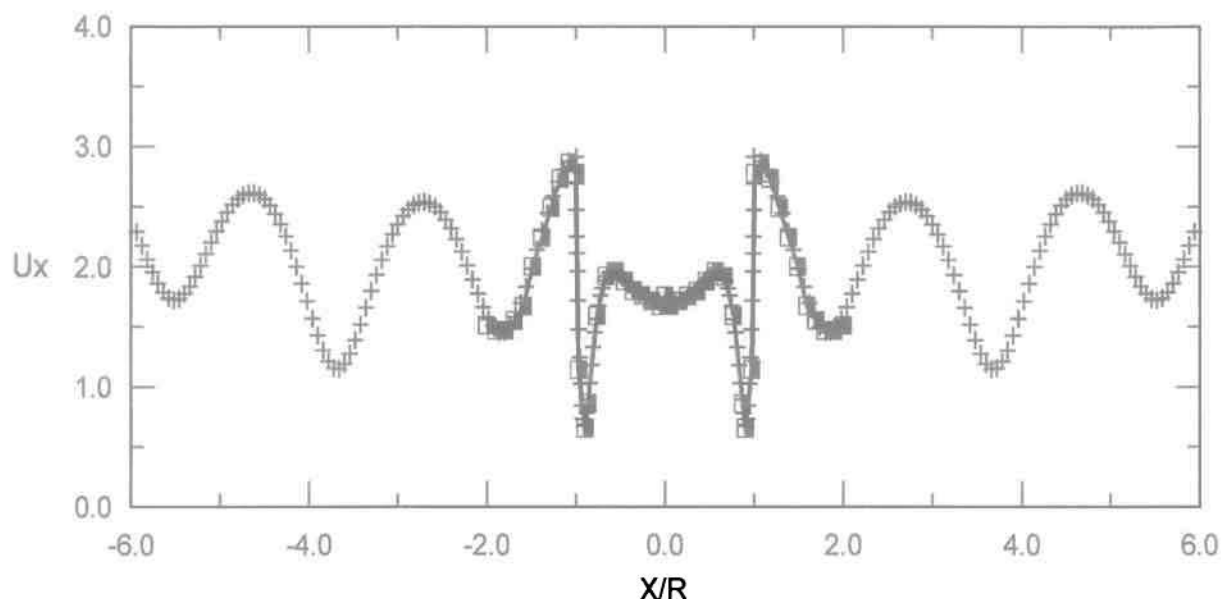
$$\eta = \frac{\omega \cdot R}{\pi \cdot V}$$

όπου: R η ακτίνα του ημικυκλίου,

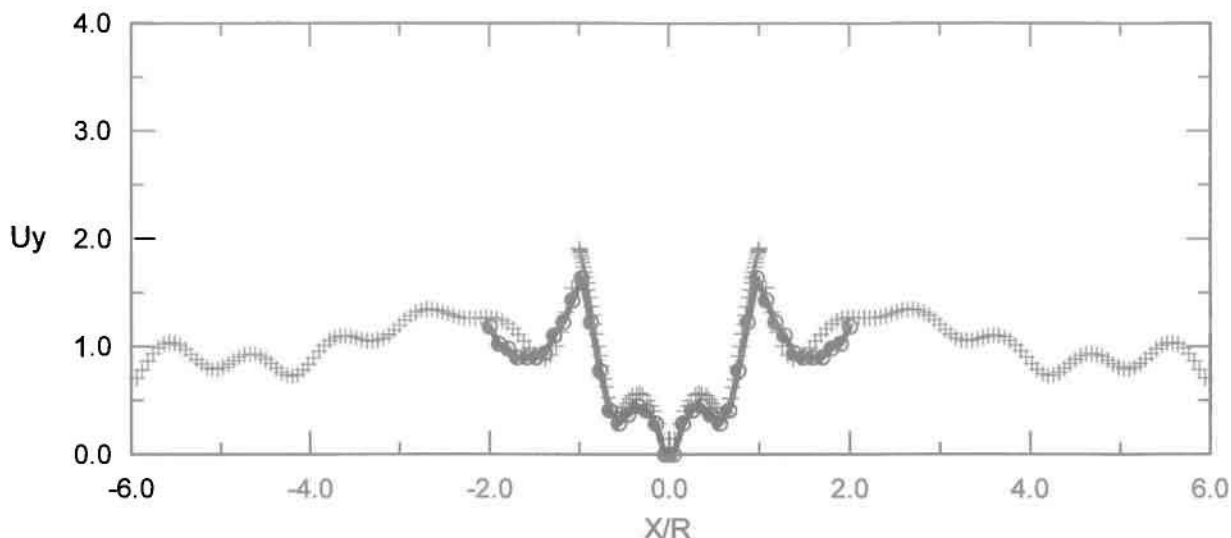
$\omega$  η κυκλική συχνότητα και

V η κυματική ταχύτητα του προσπίπτοντος σεισμικού κύματος.

Το αρχικό πρόβλημα που ελέγχθηκε αναφέρεται στο εν λόγω προσομοίωμα με ακτίνα R=25m και για κατακόρυφη πρόσπτωση κύματος SV. Επιλέχθηκε κάρναβος διαστάσεων 300m x 150m που αποτελείται από 200 x 150 στοιχεία. Δοκιμάστηκαν οι τιμές αδιάστατης συχνότητας  $\eta=1$  (Σχήμα 3.1) και  $\eta=2$ .



**Σχήμα 3.1α** Τοπογραφική ενίσχυση οριζόντιας κίνησης κατά μήκος ζώνης τοπογραφίας φαραγγιού υπό κατακόρυφως προσπίπτον κύμα SV για αδιάστατη συχνότητα  $\eta=1$  και ακτίνα φαραγγιού R=25m (+FLAC, ■ Wong (1982)). Διαστάσεις καννάβου 300m x 150m, στοιχεία 200 x 150.



**Σχήμα 3.1β** Τοπογραφική ενίσχυση κατακόρυφης κίνησης κατά μήκος ζώνης τοπογραφίας φαραγγιού υπό κατακορύφως προσπίπτον κύμα SV για αδιάστατη συχνότητα  $\eta = 1$  και ακτίνα φαραγγιού  $R=25\text{m}$  (+ FLAC, ■ Wong (1982)). Διαστάσεις καννάβου  $300\text{m} \times 150\text{m}$ , στοιχεία  $200 \times 150$ .

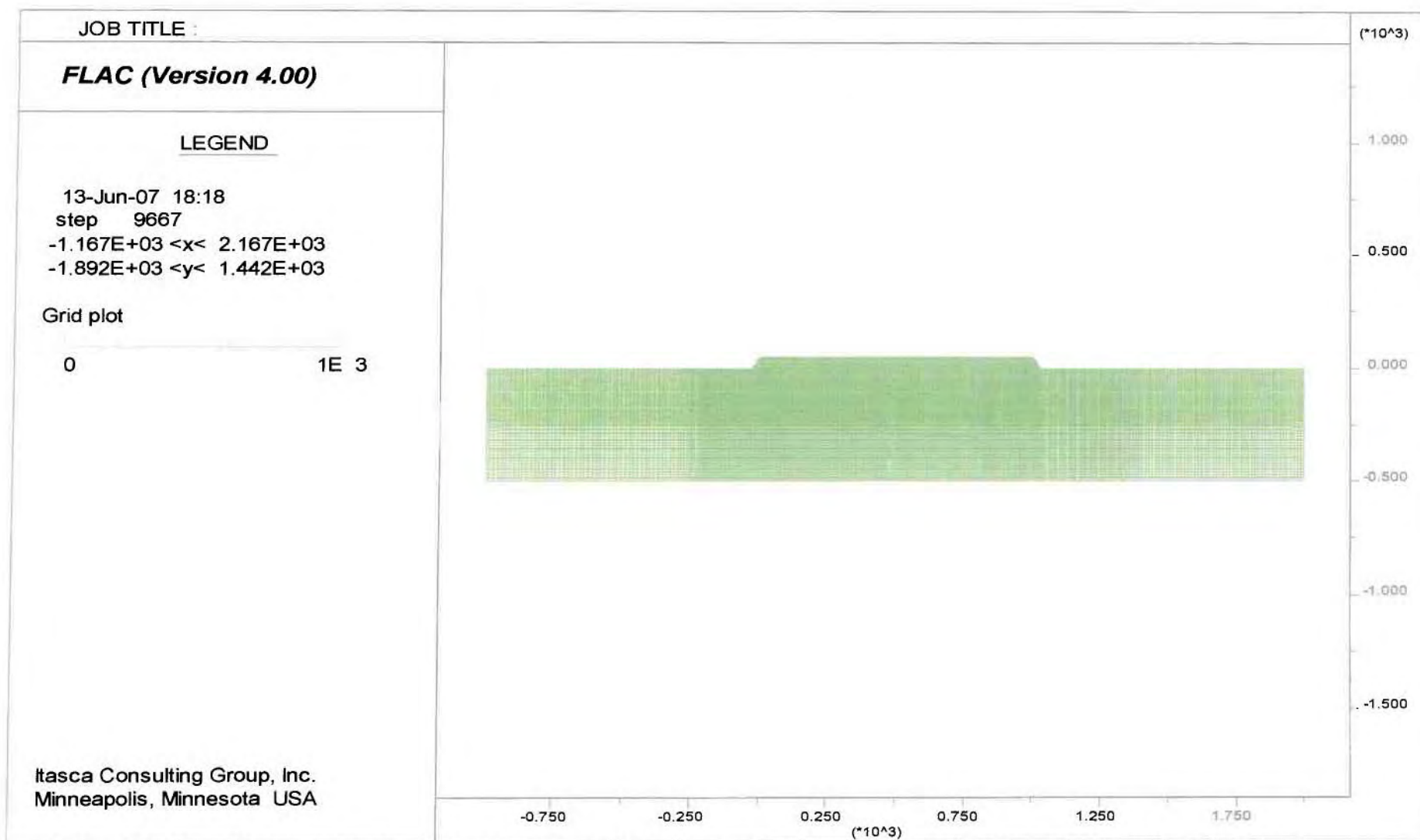
Στο παρελθόν έχουν πραγματοποιηθεί αναλύσεις για διερεύνηση της αξιοπιστίας της χρήσης του FLAC. Συνοψίζοντας, η χρήση του FLAC μπορεί να δώσει αξιόπιστα αποτελέσματα για ιξωδο-ελαστικές αναλύσεις σεισμικής απόκρισης με μέγιστο ύψος ζωνών  $dh_{\max}$  μεταξύ  $\lambda/25$  και  $\lambda/10$  επαρκείς οριζόντιες αποστάσεις του καννάβου από την τοπογραφική ανωμαλία (π.χ.  $6R$  ή  $3\lambda$  από το κέντρο του ημικυκλικού φαραγγιού) και τέλος κατακόρυφη απόσταση της βάσης του καννάβου από την τοπογραφική ανωμαλία τουλάχιστον  $2\lambda$ .

Οι κάρναβοι που χρησιμοποιήθηκαν στις αναλύσεις της παρούσας διπλωματικής κατασκευάστηκαν υιοθετώντας τις αρχές που αναφέρθηκαν ανωτέρω. Ενδεικτικά στο Σχήμα 3.2 δίνεται ένα παράδειγμα καννάβου για την ανάλυση σεισμικής απόκρισης λόφου ( $H/\lambda = 0.20$ , κλίσης  $i = 60^\circ$ ).

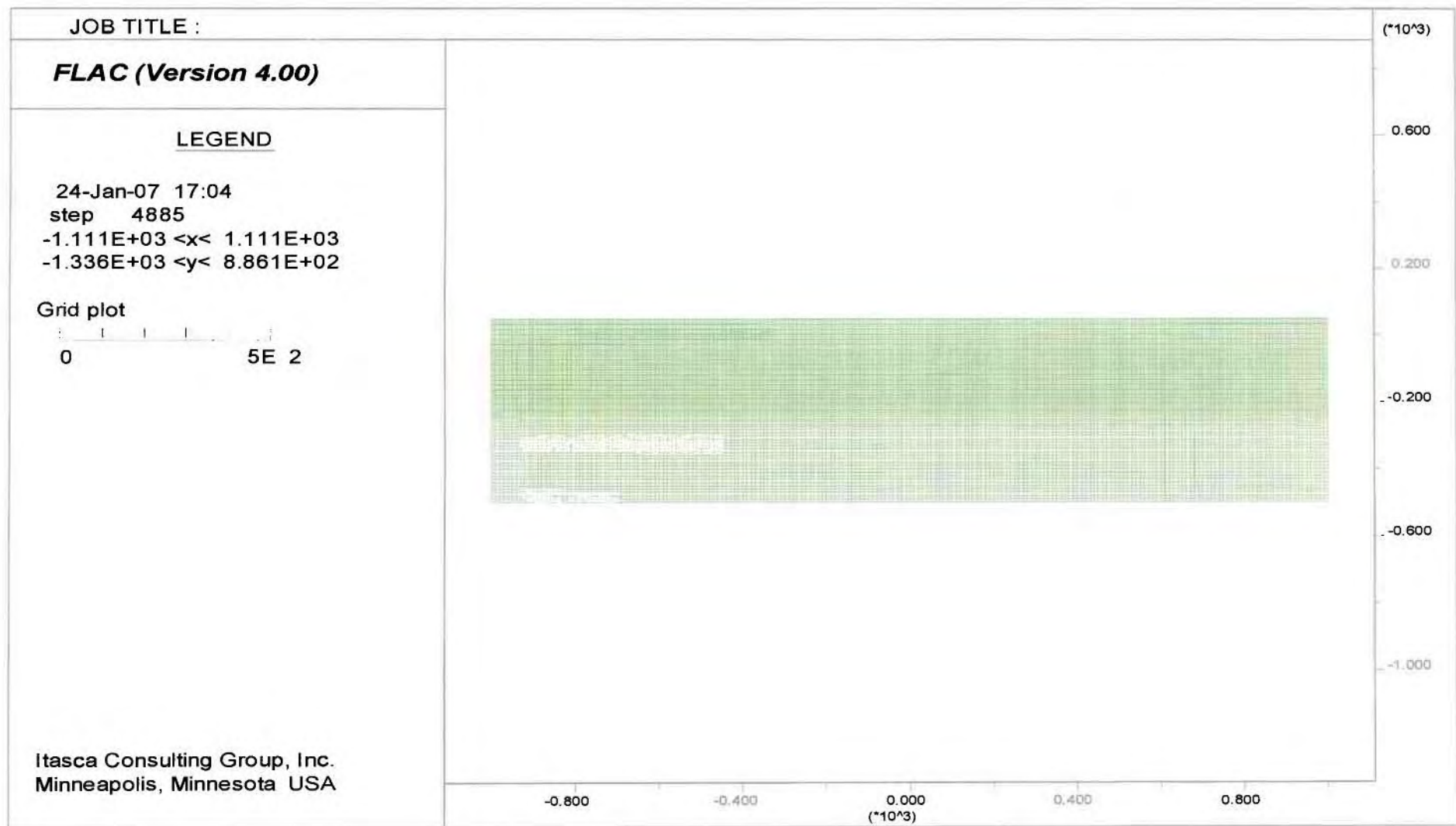
Για να εκτιμηθεί η τοπογραφική επιδείνωση της σεισμικής κίνησης στην περίπτωση λόφου, πέραν της ανάλυσης με κάρναβο σαν αυτό του Σχήματος 3.2, έγιναν και δύο αναλύσεις «ελευθέρου πεδίου», μία για την περιοχή πίσω από τη στέψη και μία για την περιοχή μπροστά από τον πόδα, οι οποίες υποβάλλονται στην ίδια σεισμική διέγερση στη βάση. Οι αντίστοιχοι κάρναβοι των αναλύσεων «ελευθέρου πεδίου» στέψης και πόδα δίνονται στα Σχήματα 3.3 και 3.4. Έτσι, η εκτίμηση των ενισχύσεων είναι ακριβής, καθώς οι τιμές των παρονομαστών των λόγων που εκφράζουν την ενίσχυση δεν είναι επηρεασμένοι, πιθανώς, από τα σύνορα ή το πεπερασμένο εύρος των κάρναβων στις αναλύσεις του λόφου.

Η σεισμική διέγερση όλων των αναλύσεων ήταν χρονοϊστορία οριζόντιας ταλάντωσης του υλικού σημείου που επιβλήθηκε ως χρονοϊστορία διατμητικών τάσεων στο κάτω σύνορο των κάρναβων. Ως αποτελέσματα εκ των αναλύσεων λόφου εξήχθησαν οι χρονοϊστορίες

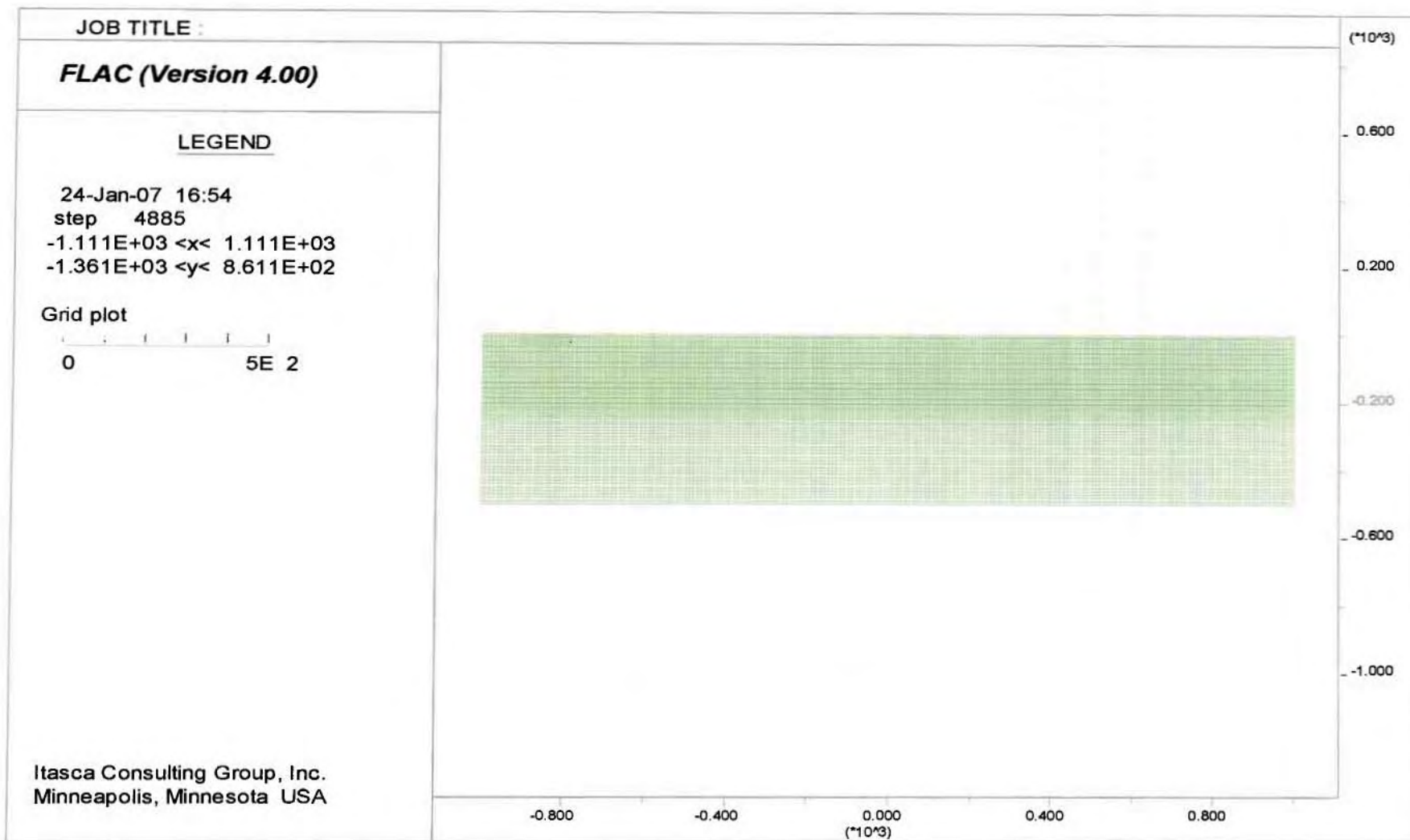
επιτάχυνσης της οριζόντιας και κατακόρυφης διεύθυνσης για κάθε σημείο της επιφάνειας του εδάφους, ενώ από τις αναλύσεις ελεύθερου πεδίου εξήχθησαν οι τυπικές ιστορίες οριζόντιας επιτάχυνσης, μία για το ελεύθερο πεδίο πίσω από τη στέψη και μία για την περιοχή μπροστά από τον πόδα. Στη συνέχεια, μέσω εξωτερικού (προς το FLAC) λογισμικού, έγινε ο υπολογισμός των μέγιστων σεισμικών επιταχύνσεων της οριζόντιας και κατακόρυφης διεύθυνσης για κάθε σημείο της επιφάνειας του εδάφους, και οι εν λόγω επιταχύνσεις διαιρέθηκαν προς την αντίστοιχη οριζόντια επιτάχυνση στο εκάστοτε ελεύθερο πεδίο.



**Σχήμα 3.2:** Κάνναβος πεπερασμένων διαφορών για τη 2Δ ανάλυση σεισμικής απόκρισης λόφου με  $H = 50\text{m}$ ,  $B=1000\text{m}$ ,  $i=60^\circ$ .



**Σχήμα 3.3:** Κάνναβος πεπερασμένων διαφορών για τη 1Δ ανάλυση σεισμικής απόκρισης ελευθέρου πεδίου στέψης



**Σχήμα 3.4:** Κάνναβος πεπερασμένων διαφορών για τη 1Δ ανάλυση σεισμικής απόκρισης ελευθέρου πεδίου πόδα

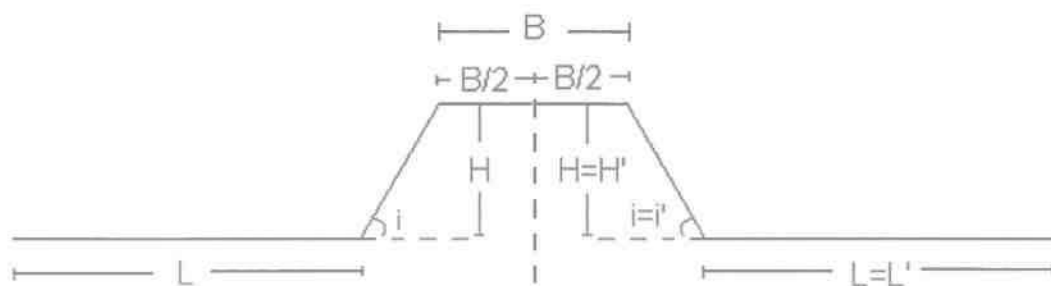
Επίδραση Τοπογραφίας στο Ελαστικό Φάσμα Απόκρισης στην Επιφάνεια του Εδάφους



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup>: Επίδραση Τοπογραφίας μορφής Λόφου για διάφορες μορφές σεισμικής διεγέρσης

### 4.1 Γενικά

Όπως περιγράφεται σε προηγούμενα κεφάλαια, ενώ έχει μελετηθεί παραμετρικά ο ρόλος που παίζει η ύπαρξη ενός μονοκλινούς πρानούς στην ενίσχυση της μέγιστης σεισμικής επιτάχυνσης του εδάφους σε παλαιότερες έρευνες, δε συμβαίνει το ίδιο και για την περίπτωση λόφου. Στη διπλωματική αυτή, χάριν απλότητας, οι μορφές των λόφων που μελετώνται, είναι απόλυτα συμμετρικές, θεωρώντας ως άξονα συμμετρίας το ακριβές κέντρο τους. Έτσι ο εκάστοτε λόφος, θα μπορούσε να θεωρηθεί σαν δύο ενωμένα πρानή, αντίθετης φοράς, με ακριβώς ίδια κλίση ( $i$ ), ύψος στέψης ( $H$ ), μήκος στέψης ( $L$ ) και μήκος βάσης ( $B/2$ ) (Σχ.4.1). Παρ' όλη τη συμμετρία οι αναλύσεις έχουν γίνει για τους πλήρεις λόφους, θεωρώντας τη στέψη τους ίση με  $B$  και διερευνώντας παραμετρικά την επίδραση της στέψης τους  $B$ , σε σχέση πάντα με το μονοκλινές πρανές στο οποίο αντιστοιχούν (και το οποίο αντιστοιχεί σε  $B \rightarrow \infty$ ).



**Σχήμα 4.1:** Σκαρίφημα δισδιάστατου (2Δ) συμμετρικού τραπεζοειδούς λόφου ( $i=i'$ ,  $L=L'$ )

Συγκεκριμένα πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις για τρεις (3) διαφορετικές κλίσεις πρανούς  $i$  ύψους  $H$ , κάθε μια από τις οποίες επαναλήφθηκε για διεγέρσεις 2 διαφορετικών τιμών δεσπόζοντος μήκους κύματος  $\lambda$ . Καθώς το ίδιο δεσπόζον μήκος κύματος  $\lambda$  μπορεί να προέρχεται από εντελώς διαφορετικές μορφές διεγέρσης, κάθε πρανές κλίσης  $i$  και αδιάστατου ύψους  $H/\lambda$  υποβλήθηκε σε τρεις (3) διαφορετικές διεγέρσεις (που έχουν όλες το ίδιο δεσπόζον μήκος κύματος  $\lambda$ ). Για κάθε ζεύγος τιμών ( $i$ ,  $H/\lambda$ ) διερευνήθηκε παραμετρικά η επίδραση του πλάτους  $B$  του λόφου, που κυμάνθηκε από  $H$  έως και  $20H$ .

Πιο συγκεκριμένα οι πραγματοποιηθείσες αναλύσεις αφορούν λόφους με τα εξής χαρακτηριστικά ( $H=50\text{m}$ ,  $V_s=500\text{m/s}$  πάντα) και:

$i=30^\circ$ , $H/\lambda=0,20$	} $\Rightarrow$ για $B=H, 5H, 20H, \infty$
$i=30^\circ$ , $H/\lambda=0,45$	
$i=45^\circ$ , $H/\lambda=0,20$	
$i=45^\circ$ , $H/\lambda=0,45$	
$i=60^\circ$ , $H/\lambda=0,20$	
$i=60^\circ$ , $H/\lambda=0,45$	

Επίσης οι σεισμικές διεγέρσεις που εφαρμόστηκαν σε κάθε προηγούμενο συνδυασμό ( $i$ ,  $H/\lambda$ ) είναι:

- Αρμονική, διαβαθμισμένη στο επιθυμητό δεσπόζον μήκος κύματος  $\lambda$  (Τιμοθέου 2008)
- Σεισμός Αιγίου (1995), πραγματική καταγραφή, διαβαθμισμένη στο επιθυμητό δεσπόζον μήκος κύματος  $\lambda$
- Σεισμός Κοζάνης (1995), πραγματική καταγραφή, διαβαθμισμένη στο επιθυμητό δεσπόζον μήκος κύματος  $\lambda$

Στο σύνολό τους οι ανωτέρω αναλύσεις ανήλθαν σε πλήθος των εβδομήντα δύο (72). Επισημαίνεται ότι η ανάλυση  $B \rightarrow \infty$  αντιστοιχεί στην περίπτωση μονοκλινούς πρσανούς, ενώ για τις αρμονικές διεγέρσεις έχουν γίνει επιπλέον αναλύσεις για  $B=0,1H$  (Τιμοθέου 2008).

Η έμφαση στην επεξεργασία των αποτελεσμάτων δόθηκε στην τοπογραφική επιδείνωση της μέγιστης σεισμικής επιτάχυνσης καθ' όλο το μήκος της επιφάνειας του εδάφους. Πιο συγκεκριμένα ορίζονται:

- η τοπογραφική επιδείνωση (ενίσχυση ή απομείωση) της μέγιστης σεισμικής επιτάχυνσης στην οριζόντια διεύθυνση, που ποσοτικοποιείται με το συντελεστή  $A_h$  (συντελεστής οριζόντιας τοπογραφικής επιδείνωσης), δηλαδή το λόγο της μέγιστης σεισμικής οριζόντιας επιτάχυνσης σε κάθε θέση προς τη μέγιστη σεισμική οριζόντια επιτάχυνση στο εκάστοτε «ελεύθερο πεδίο» (διαφορετική τιμή στην περιοχή πίσω από τη στέψη και διαφορετική τιμή στον πόδα του λόφου)
- η τοπογραφική επιδείνωση (εμφάνιση) της μέγιστης σεισμικής επιτάχυνσης στην (παρασιτική) κατακόρυφη διεύθυνση, που ποσοτικοποιείται με το συντελεστή  $A_v$  (συντελεστής κατακόρυφης τοπογραφικής επιδείνωσης), δηλαδή το λόγο της μέγιστης σεισμικής παρασιτικής κατακόρυφης επιτάχυνσης σε κάθε θέση προς τη μέγιστη σεισμική οριζόντια επιτάχυνση στο εκάστοτε «ελεύθερο πεδίο» (διαφορετική τιμή στην περιοχή πίσω από τη στέψη και διαφορετική τιμή στον πόδα του λόφου).

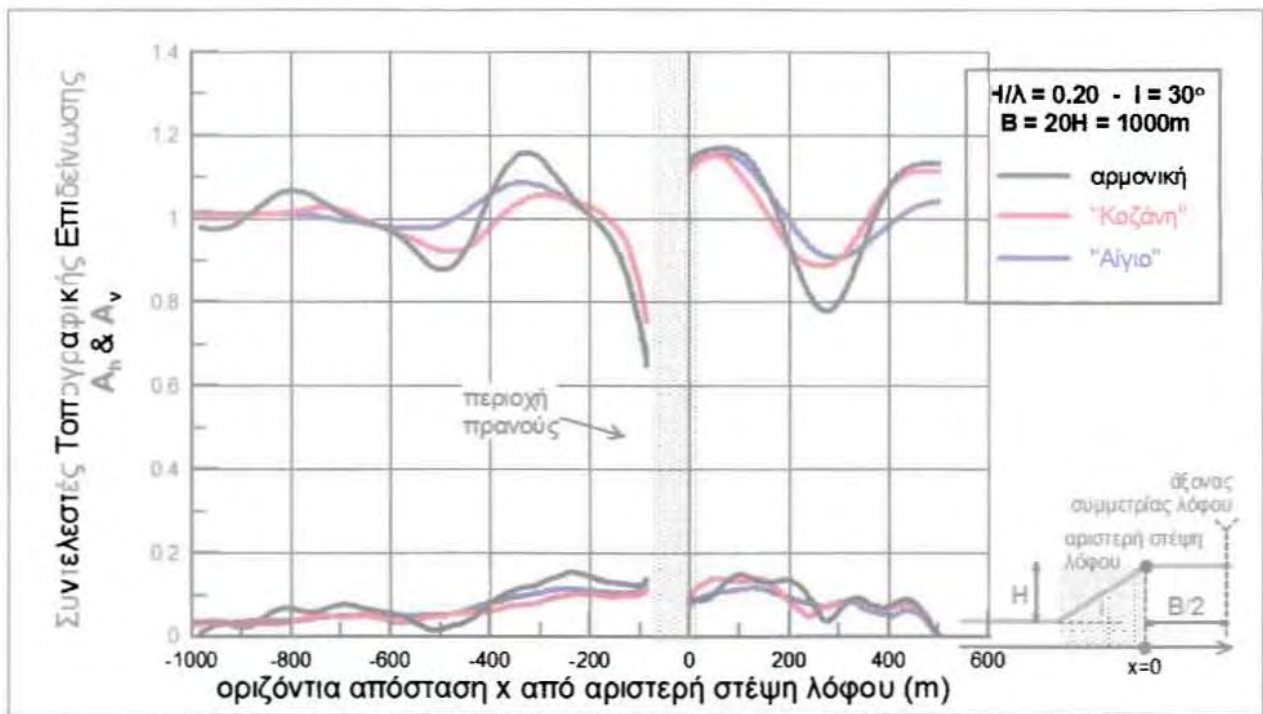
## 4.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων – Συμπεράσματα

Όπως παρουσιάζεται ανωτέρω, ο στόχος των αναλύσεων ήταν η διερεύνηση της επίδρασης της κλίσης  $i$  και του αδιάστατου πλάτους του λόφου  $B/\lambda$ , σε συνάρτηση με την σεισμική διέγερση που επιβάλλεται, στους προαναφερθέντες συντελεστές επιδείνωσης  $A_h$ ,  $A_v$  κατά μήκος όλης της επιφάνειας του εδάφους. Ο όγκος των αποτελεσμάτων είναι προφανώς τεράστιος, κι έτσι στην παρούσα εργασία γίνεται επιλογή χαρακτηριστικών αποτελεσμάτων τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εξαγωγή συμπερασμάτων γενικής εφαρμογής.

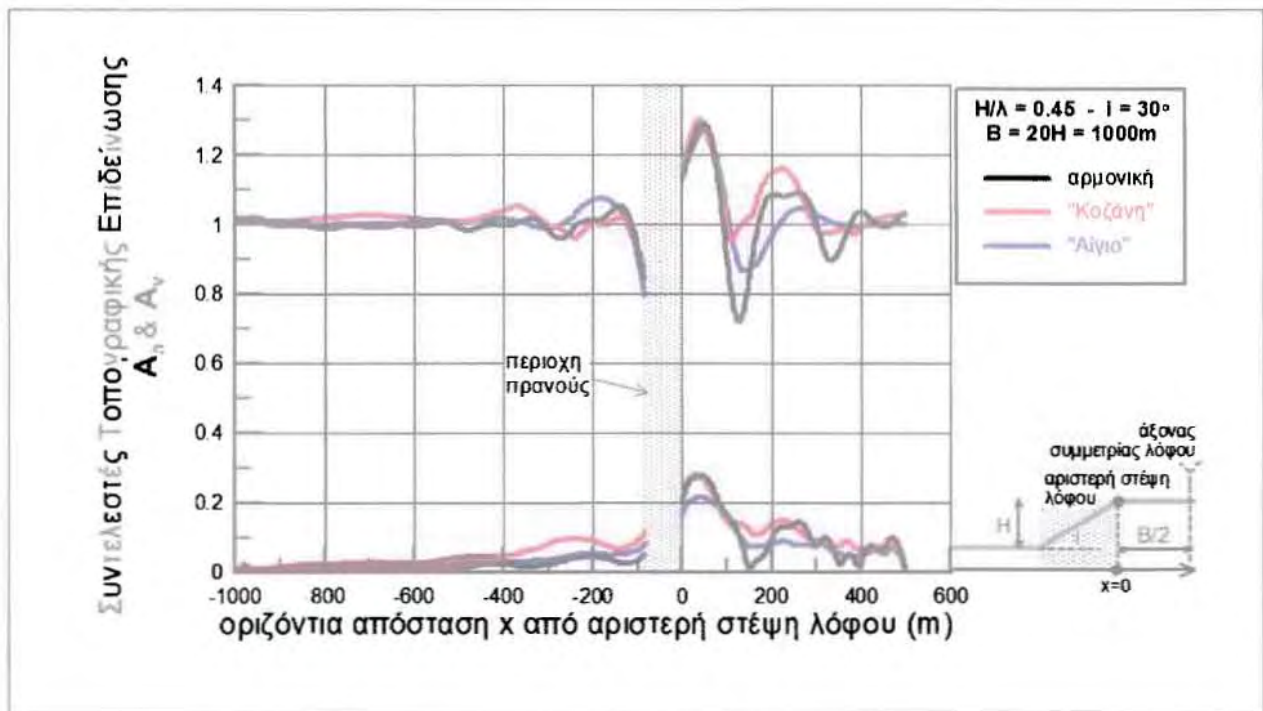
Συνεπώς κάθε σχήμα σύγκρισης απεικονίζει λόφους συγκεκριμένης κλίσης  $i$  και συγκεκριμένου  $H/\lambda$  και πλάτους στέψης  $B$ . Επισημαίνεται ότι στα σχήματα που ακολουθούν, δεν αποτυπώνονται τα αποτελέσματα για ολόκληρους του λόφους, καθώς λόγω της απόλυτης συμμετρίας τους σχεδιάζεται μόνο το τμήμα που είναι αντίστοιχης φοράς με το μονοκλινές πρηνές, για να είναι ευχερέστερη η μεταξύ τους σύγκριση, δεδομένου ότι τα αποτελέσματα σε όρους  $A_h$  και  $A_v$  για τις δύο πλευρές ενός συμμετρικού λόφου είναι ίδια στην ίδια απόσταση από τον άξονα.

Πιο συγκεκριμένα, στα **Σχήματα 4.1 έως 4.13** παρουσιάζεται η επίδραση της επιβαλλόμενης διέγερσης σε λόφο με τα εξής χαρακτηριστικά κλίσης  $i$ , αδιάστατου ύψους  $H/\lambda$  και πλάτους στέψης  $B$ :

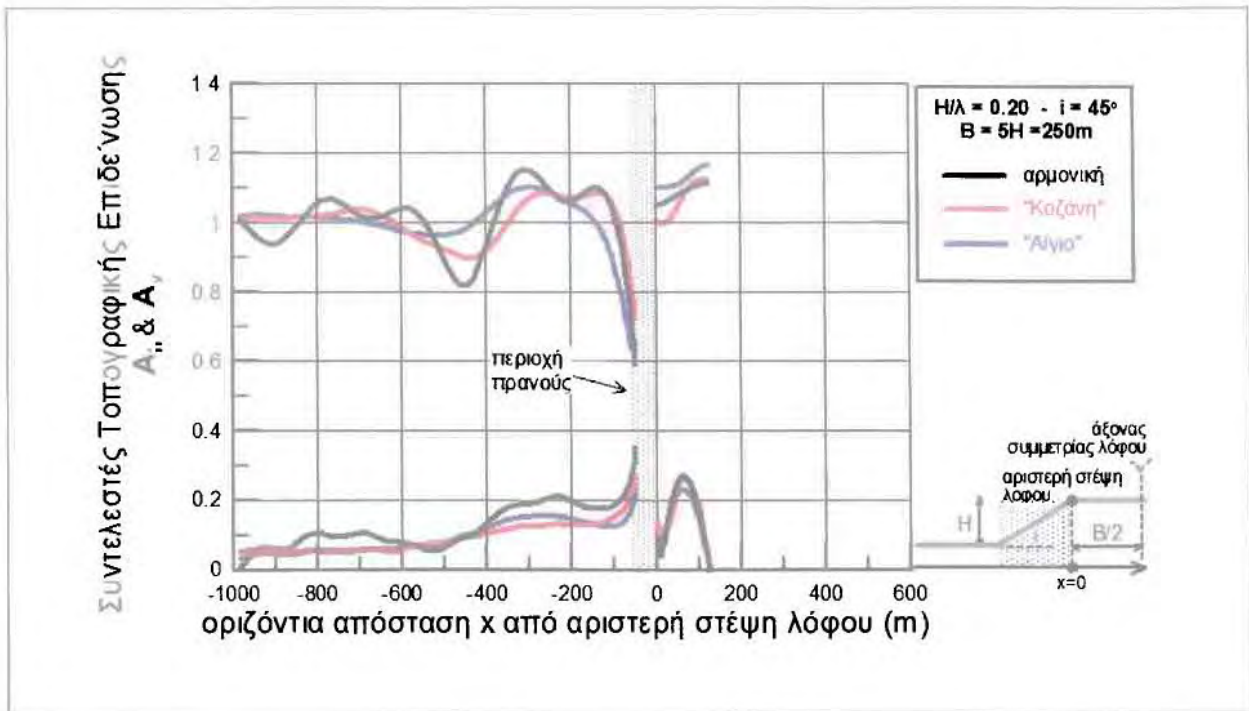
i.	$i=30^\circ$	$H/\lambda=0.20$	$B=20H$	(Σχήμα 4.1)
ii.	$i=30^\circ$	$H/\lambda=0.45$	$B=20H$	(Σχήμα 4.2)
iii.	$i=45^\circ$	$H/\lambda=0.20$	$B=5H$	(Σχήμα 4.3)
iv.	$i=45^\circ$	$H/\lambda=0.20$	$B=20H$	(Σχήμα 4.4)
v.	$i=45^\circ$	$H/\lambda=0.45$	$B=H$	(Σχήμα 4.5)
vi.	$i=45^\circ$	$H/\lambda=0.45$	$B=5H$	(Σχήμα 4.6)
vii.	$i=45^\circ$	$H/\lambda=0.45$	$B=20H$	(Σχήμα 4.7)
viii.	$i=60^\circ$	$H/\lambda=0.20$	$B=H$	(Σχήμα 4.8)
ix.	$i=60^\circ$	$H/\lambda=0.20$	$B=5H$	(Σχήμα 4.9)
x.	$i=60^\circ$	$H/\lambda=0.20$	$B=20H$	(Σχήμα 4.10)
xi.	$i=60^\circ$	$H/\lambda=0.45$	$B=H$	(Σχήμα 4.11)
xii.	$i=60^\circ$	$H/\lambda=0.45$	$B=5H$	(Σχήμα 4.12)
xiii.	$i=60^\circ$	$H/\lambda=0.45$	$B=20H$	(Σχήμα 4.13)



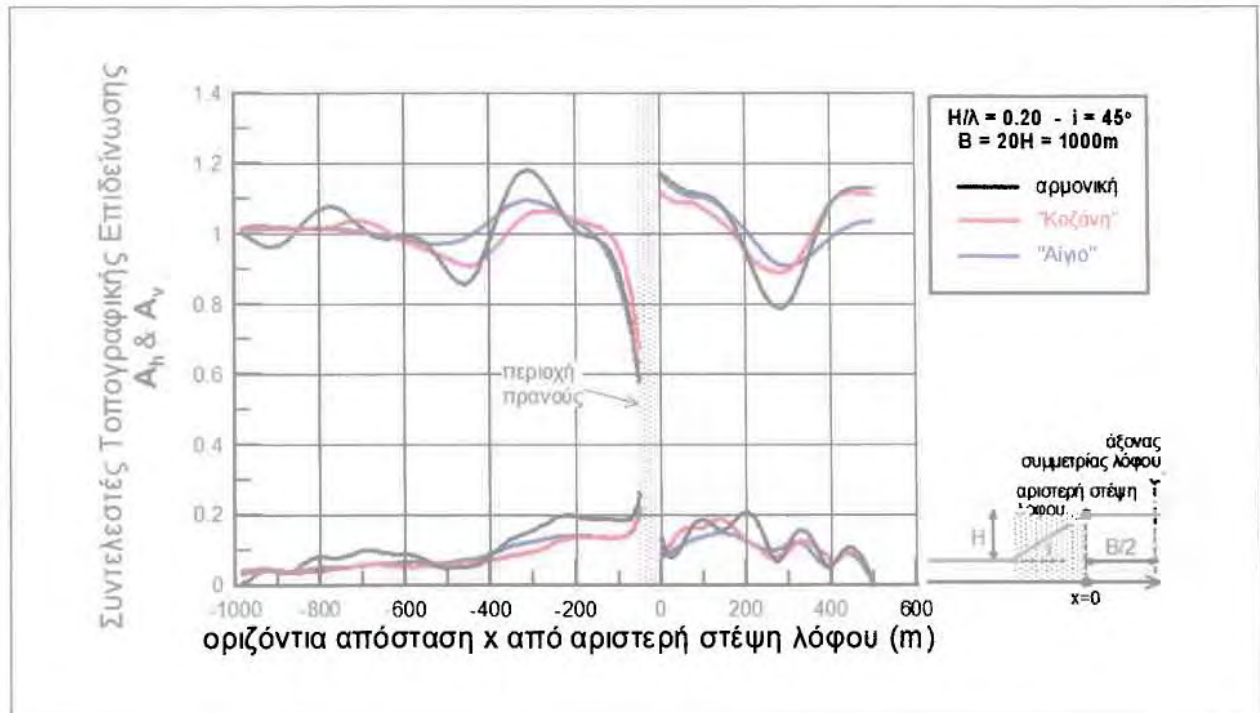
**Σχήμα 4.1:** Συντελεστές τοπογραφικής επιδείνωσης  $A_h$  και  $A_v$  κατά μήκος της επιφάνειας του εδάφους για λόφους μήκους στέψης  $B=20H=1000\text{m}$ , κλίσης πρσανών  $i=30^\circ$  και αδιάστατου ύψους  $H/\lambda=0.20$



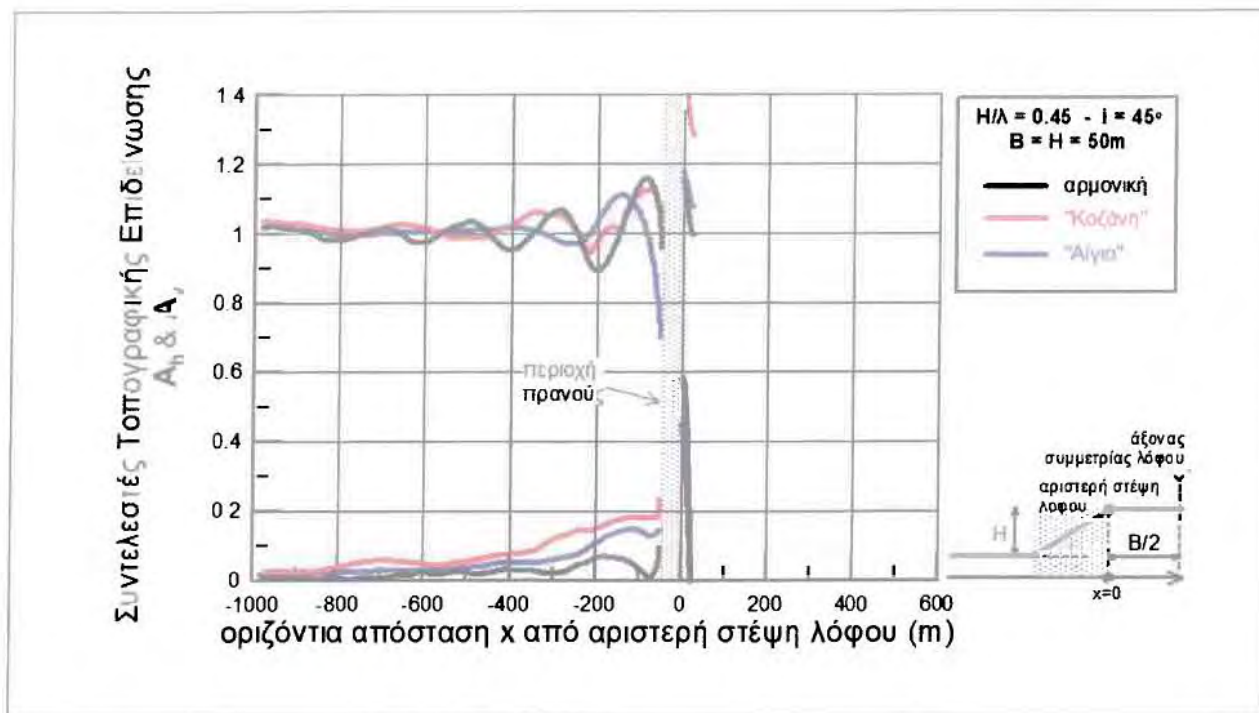
**Σχήμα 4.2:** Συντελεστές τοπογραφικής επιδείνωσης  $A_h$  και  $A_v$  κατά μήκος της επιφάνειας του εδάφους για λόφους μήκους στέψης  $B=20H=1000\text{m}$ , κλίσης πρσανών  $i=30^\circ$  και αδιάστατου ύψους  $H/\lambda=0.45$



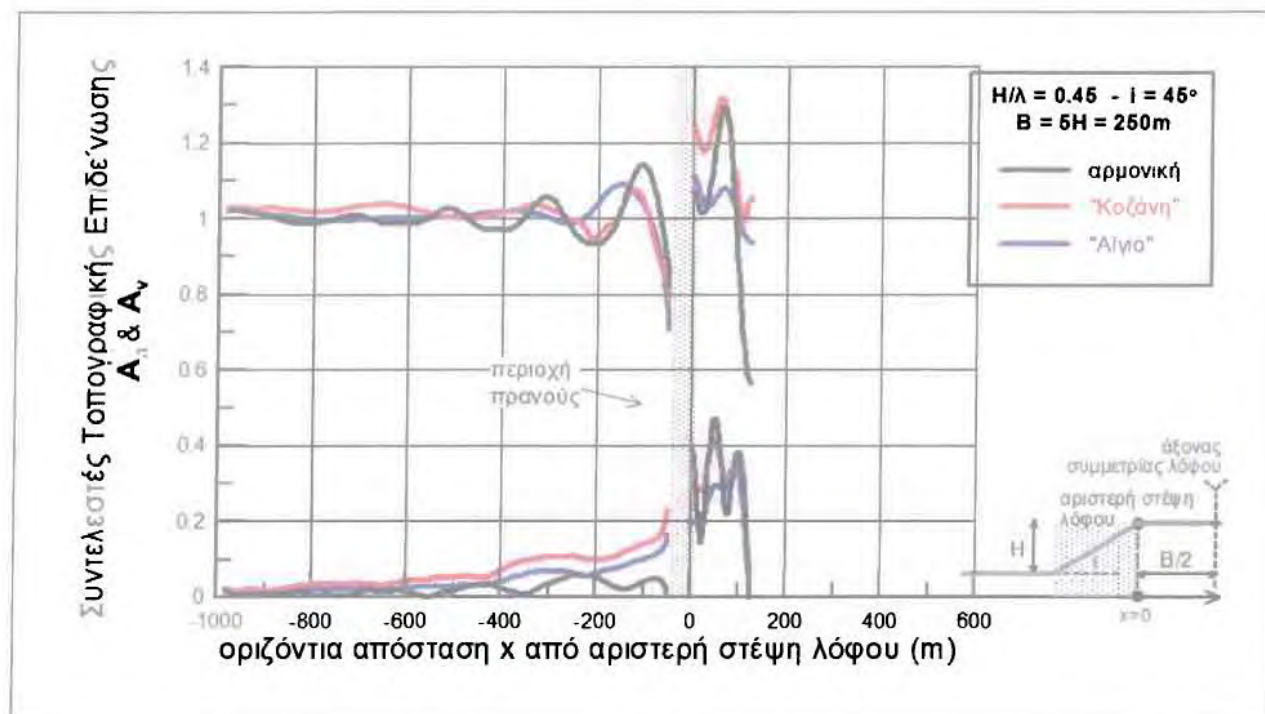
**Σχήμα 4.3:** Συντελεστές τοπογραφικής επιδείνωσης  $A_h$  και  $A_v$  κατά μήκος της επιφάνειας του εδάφους για λόφους μήκους στέψης  $B=5H=250\text{m}$ , κλίσης πρηνών  $i=45^\circ$  και αδιάστατου ύψους  $H/\lambda=0.20$



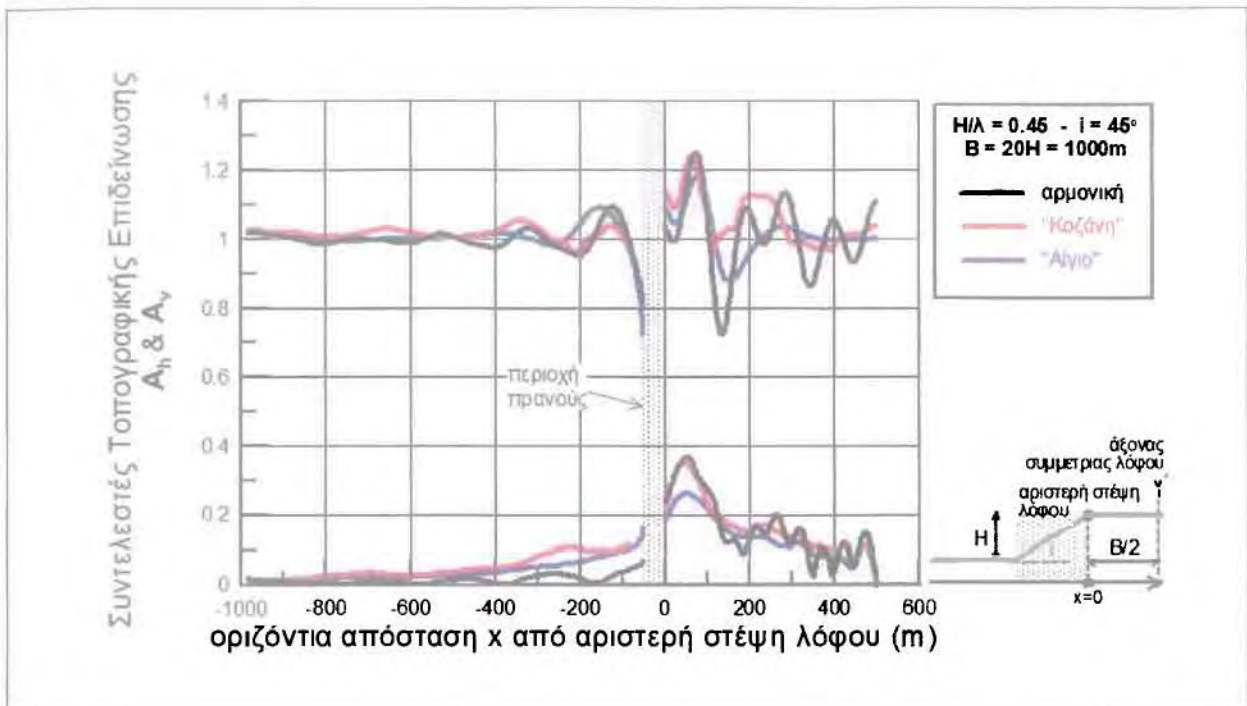
**Σχήμα 4.4:** Συντελεστές τοπογραφικής επιδείνωσης  $A_h$  και  $A_v$  κατά μήκος της επιφάνειας του εδάφους για λόφους μήκους στέψης  $B=20H=1000\text{m}$ , κλίσης πρηνών  $i=45^\circ$  και αδιάστατου ύψους  $H/\lambda=0.20$



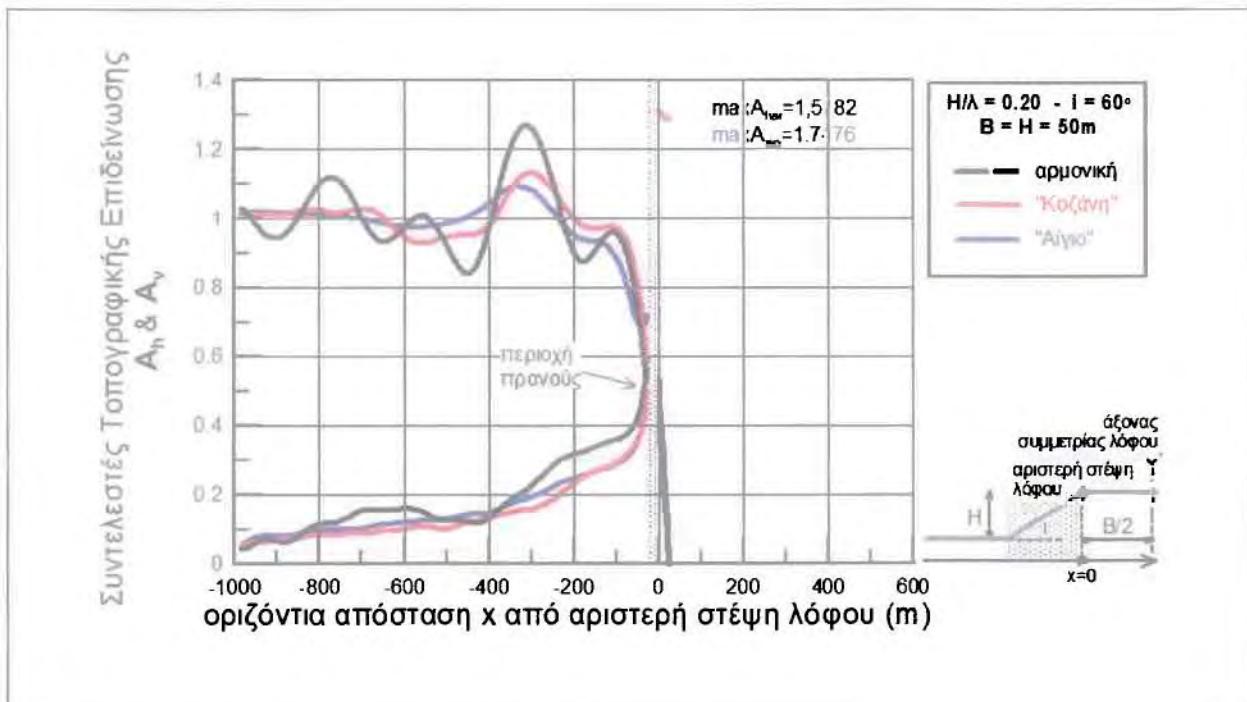
**Σχήμα 4.5:** Συντελεστές τοπογραφικής επιδείνωσης  $A_h$  και  $A_v$  κατά μήκος της επιφάνειας του εδάφους για λόφους μήκους στέψης  $B=H=50\text{m}$ , κλίσης πρανών  $i=45^\circ$  και αδιάστατου ύψους  $H/\lambda=0.45$



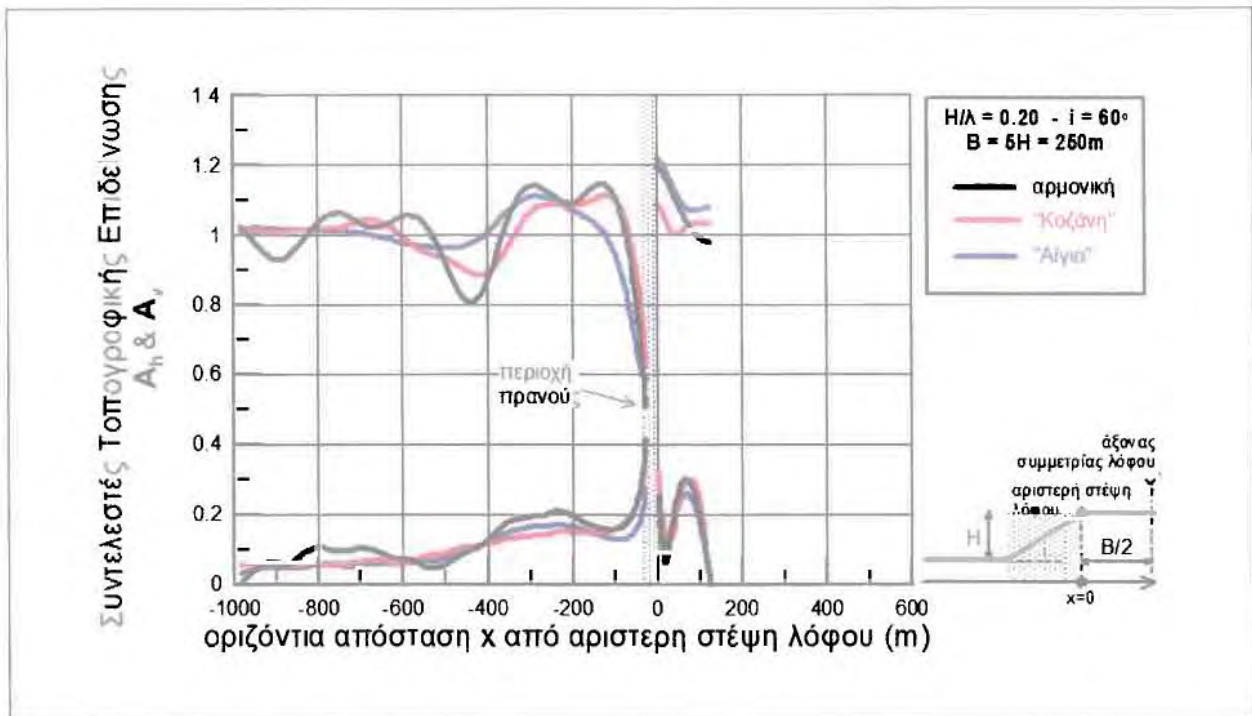
**Σχήμα 4.6:** Συντελεστές τοπογραφικής επιδείνωσης  $A_h$  και  $A_v$  κατά μήκος της επιφάνειας του εδάφους για λόφους μήκους στέψης  $B=5H=250\text{m}$ , κλίσης πρανών  $i=45^\circ$  και αδιάστατου ύψους  $H/\lambda=0.45$



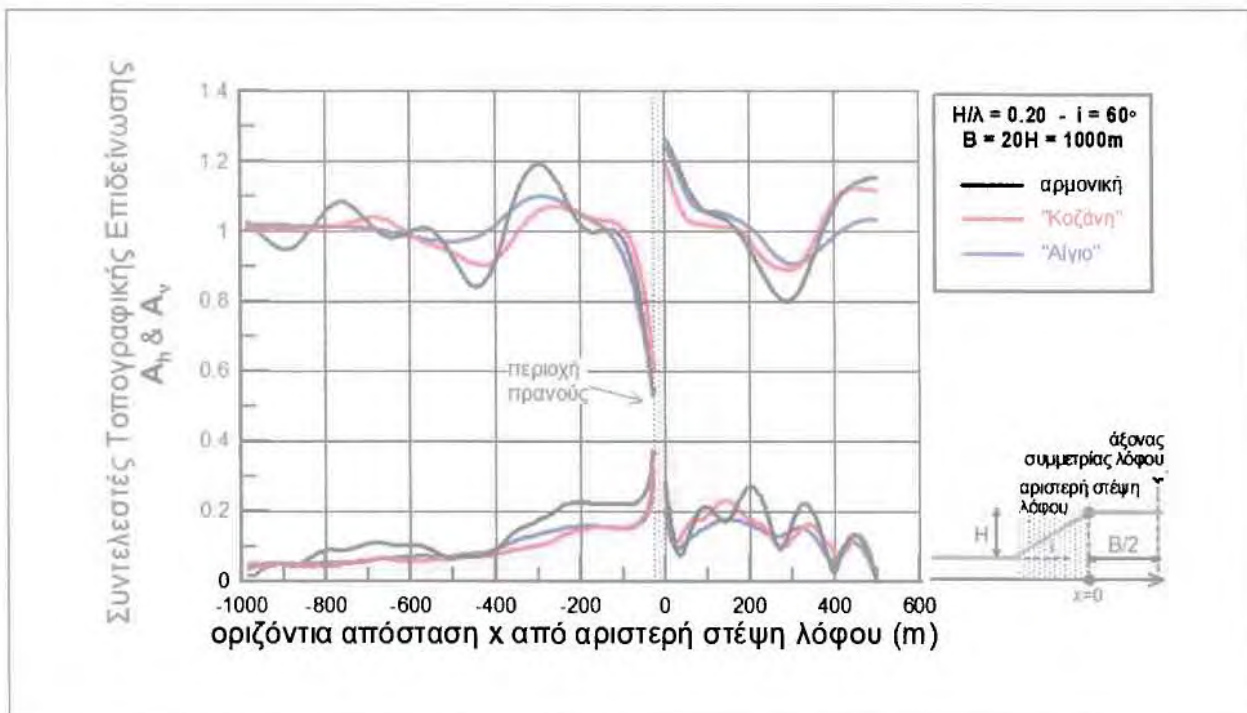
**Σχήμα 4.7:** Συντελεστές τοπογραφικής επιδείνωσης  $A_h$  και  $A_v$  κατά μήκος της επιφάνειας του εδάφους για λόφους μήκους στέψης  $B=20H=1000\text{m}$ , κλίσης πρηνών  $i=45^\circ$  και αδιάστατου ύψους  $H/\lambda=0.45$



**Σχήμα 4.8:** Συντελεστές τοπογραφικής επιδείνωσης  $A_h$  και  $A_v$  κατά μήκος της επιφάνειας του εδάφους για λόφους μήκους στέψης  $B=H=50\text{m}$ , κλίσης πρηνών  $i=60^\circ$  και αδιάστατου ύψους  $H/\lambda=0.20$

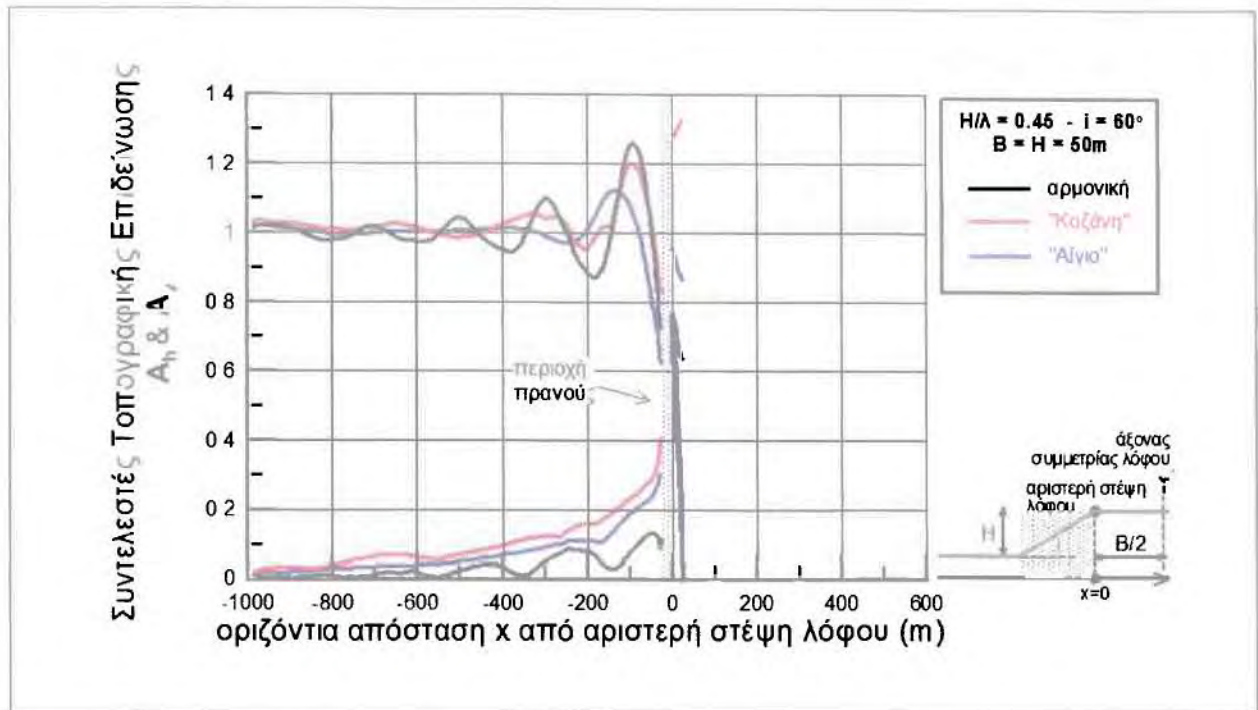


**Σχήμα 4.9:** Συντελεστές τοπογραφικής επιδείνωσης  $A_h$  και  $A_v$  κατά μήκος της επιφάνειας του εδάφους για λόφους μήκους στέψης  $B=5H=250m$ , κλίσης πρανών  $i=60^\circ$  και αδιάστατου ύψους  $H/\lambda=0.20$

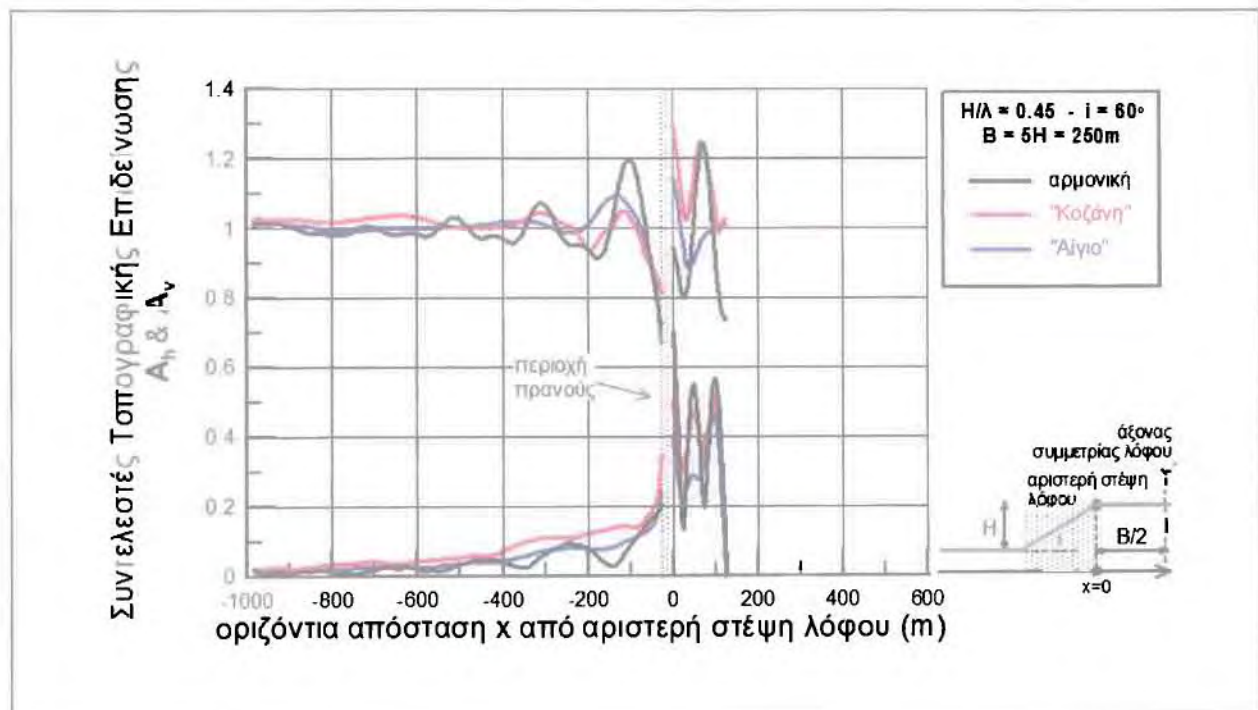


**Σχήμα 4.10:** Συντελεστές τοπογραφικής επιδείνωσης  $A_h$  και  $A_v$  κατά μήκος της επιφάνειας του εδάφους για λόφους μήκους στέψης  $B=20H=1000m$ , κλίσης πρανών  $i=60^\circ$  και αδιάστατου ύψους  $H/\lambda=0.20$

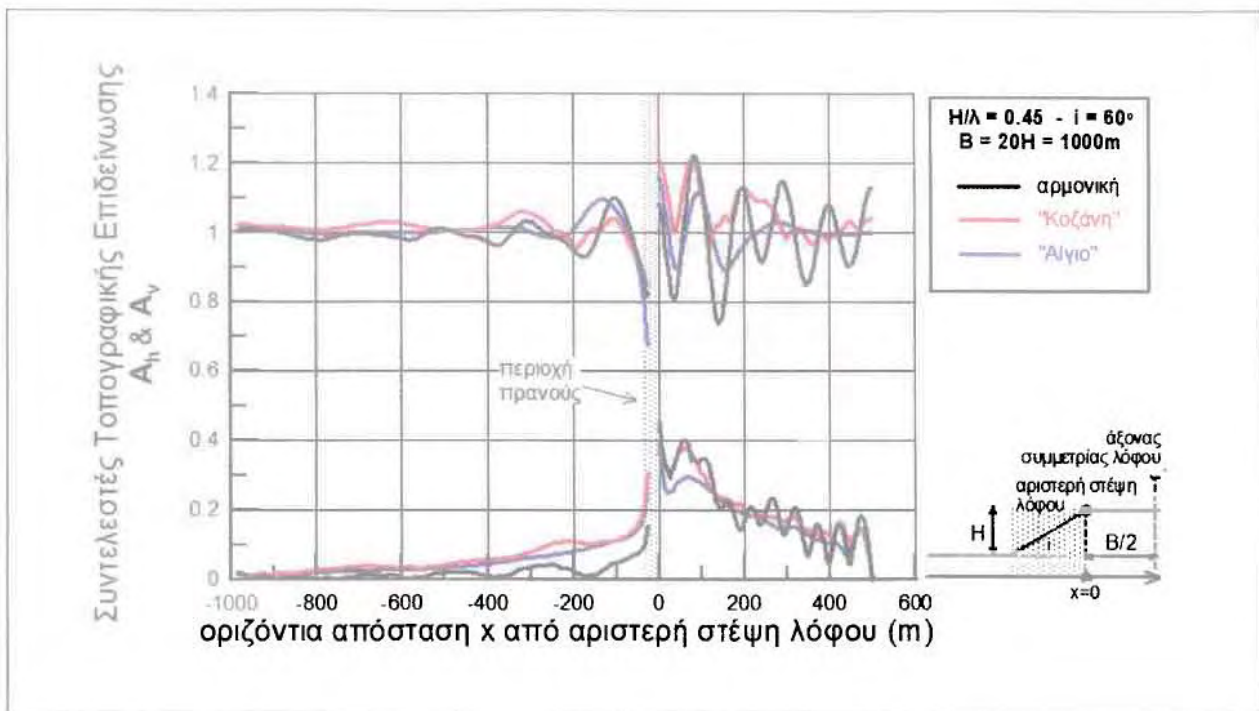




**Σχήμα 4.11:** Συντελεστές τοπογραφικής επιδείνωσης  $A_h$  και  $A_v$  κατά μήκος της επιφάνειας του εδάφους για λόφους μήκους στέψης  $B=H=50\text{m}$ , κλίσης πρανών  $i=60^\circ$  και αδιάστατου ύψους  $H/\lambda=0.45$

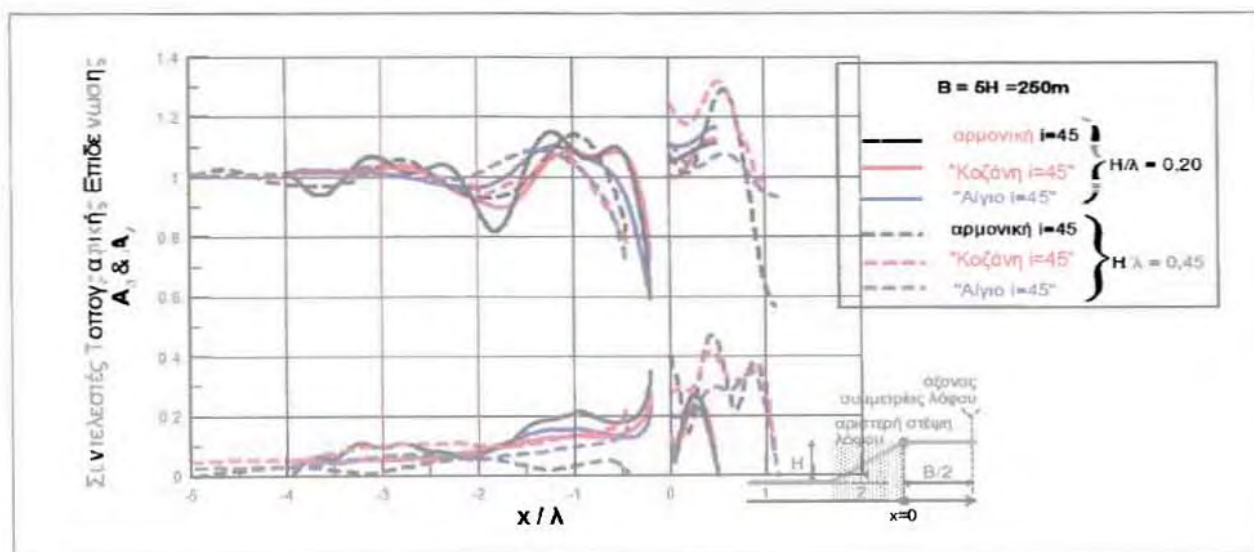


**Σχήμα 4.12:** Συντελεστές τοπογραφικής επιδείνωσης  $A_h$  και  $A_v$  κατά μήκος της επιφάνειας του εδάφους για λόφους μήκους στέψης  $B=5H=250\text{m}$ , κλίσης πρανών  $i=60^\circ$  και αδιάστατου ύψους  $H/\lambda=0.45$

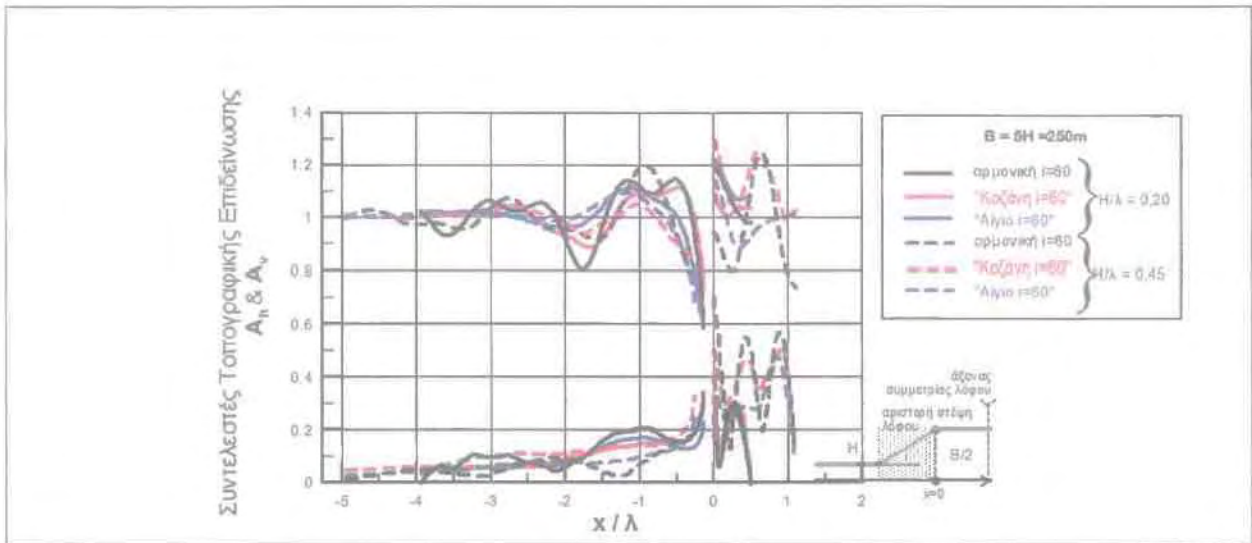


**Σχήμα 4.13:** Συντελεστές τοπογραφικής επιδείνωσης  $A_h$  και  $A_v$  κατά μήκος της επιφάνειας του εδάφους για λόφους μήκους στέψης  $B=20H=1000m$ , κλίσης πηρατών  $i=60^\circ$  και αδιάστατου ύψους  $H/\lambda=0.45$

Στη συνέχεια, στα **Σχήματα 4.14, 4.15**, που ακολουθούν παρουσιάζεται η επίδραση της χρονοϊστορίας διέγερσης στους συντελεστές σεισμικής επιδείνωσης  $A_h$ ,  $A_v$  σε συνάρτηση με την κανονικοποιημένη, ως προς το δεσπόζον μήκος κύματος διέγερσης  $\lambda$ , απόσταση  $x$  από την αριστερή στέψη του λόφου. Πιο συγκεκριμένα, απεικονίζεται η επίδραση της επιβαλλόμενης διέγερσης σε λόφο με τα εξής χαρακτηριστικά: κλίση  $i=45, 60$ , αδιάστατο ύψος  $H/\lambda=0.20, 0.45$  και πλάτος σρέψης  $B=5H=250m$ .



**Σχήμα 4.14:** Συντελεστές τοπογραφικής επιδείνωσης  $A_h$  και  $A_v$  κατά μήκος της επιφάνειας του εδάφους για λόφους μήκους στέψης  $B=5H=250m$ , κλίσης πρανών  $i=45^\circ$  και αδιάστατου ύψους  $H/\lambda=0.20, 0.45$



**Σχήμα 4.15:** Συντελεστές τοπογραφικής επιδείνωσης  $A_h$  και  $A_v$  κατά μήκος της επιφάνειας του εδάφους για λόφους μήκους στέψης  $B=5H=250m$ , κλίσης πρανών  $i=60^\circ$  και αδιάστατου ύψους  $H/\lambda=0.20, 0.45$

Γίνεται φανερό ότι η κάθε περίπτωση έχει τα δικά της χαρακτηριστικά, που δε γενικεύονται εύκολα. Παρόλα αυτά, προσεκτική παρατήρηση και σύγκριση των διαγραμμάτων μπορεί να οδηγήσει στα κάτωθι ποιοτικά έστω συμπεράσματα:

- Στην πλειοψηφία των περιπτώσεων παρατηρούμε ότι στην κατακόρυφη διεύθυνση και οσον αφορά την περιοχή μπροστά από τον πόδα του λόφου, ο συντελεστής τοπογραφικής επιδείνωσης  $A_v$  μεγιστοποιείται στο σημείο ακριβώς που τελειώνει το κεκλιμένο τμήμα του λόφου και ξεκινάει ο πόδας και στις τρεις περιπτώσεις διέγερσης. Αντίστοιχα, ο συντελεστής  $A_h$  ελαχιστοποιείται σχεδόν πάντα στον πόδα του πρηνούς. Παρόμοια συμπεράσματα για την περιοχή πίσω από τη στέψη του λόφου, για την οριζόντια και την κατακόρυφη διεύθυνση δεν μπορούν να εξαχθούν.
- Η μορφή χρονοϊστορίας διέγερσης, επιδρά κυρίως ποσοτικά και όχι ποιοτικά στα διαγράμματα χωρικής διαφοροποίησης, καθώς παρατηρείται παρόμοια τοπογραφική επιδείνωση και για τις τρεις περιπτώσεις διέγερσης. Η εν λόγω συστηματική επίδραση των διεγέρσεων είναι ότι η χωρική διαφοροποίηση εντείνεται για τις διεγέρσεις με μεγάλο αριθμό σημαντικών κύκλων (αρμονική διέγερση και σεισμός «Κοζάνης», σε σύγκριση με το σεισμό «Αιγίου»), και αυτό εντοπίζεται κυρίως στην περιοχή πίσω από τη στέψη και λιγότερο στην περιοχή μπροστά από τον πόδα του λόφου.
- Η χωρική διαφοροποίηση σαφώς εξαρτάται από το μήκος κύματος  $\lambda$  της διέγερσης. Έτσι, οι μέγιστες τιμές  $A_h$  μπροστά από τον πόδα αναμένονται σε απόσταση  $\pm 0.5\lambda$  από τη στέψη του λόφου, ενώ για τη στέψη του λόφου η απόκριση επηρεάζεται και από το εύρος του σε σχέση με το μήκος κύματος  $\lambda$ .

Συνεπώς δε μπορούν να εξαχθούν ποσοτικά συμπεράσματα γενικής εφαρμογής, με βάση τα ανωτέρω σχήματα. Έτσι, στο Κεφάλαιο 5 γίνεται μια στατιστική επεξεργασία των παραπάνω αποτελεσμάτων, ώστε να σχεδιασθούν διαγράμματα για την εκτίμηση των μέγιστων τιμών των  $A_h$ ,  $A_v$ , αλλά και των αποστάσεων από το ελεύθερο πεδίο  $D_h$ ,  $D_v$  στην περιοχή πίσω από τη στέψη και μπροστά από τον πόδα του λόφου.

---

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5<sup>ο</sup>: Στατιστική επεξεργασία αριθμητικών αποτελεσμάτων τοπογραφικής επιδείνωσης

---

### 5.1. Γενικά

Στην εργασία αυτή μελετάται η επίδραση του πλάτους  $B$  της στέψης λόφων και της μορφής χρονοϊστορίας διέγερσης, επί των συντελεστών τοπογραφικής επιδείνωσης  $A_h$  και  $A_v$ . Καθώς δεν έγινε πλήρης διερεύνηση (για όλες τις τιμές των  $i$ ,  $H/\lambda$ ,  $\xi$  και  $N$ ), ως βάση σύγκρισης υπάρχει η απόκριση του εκάστοτε αντιστοίχου μονοκλινούς πρανούς για σημαντικές παραμέτρους της οποίας έχουν ήδη προταθεί στο παρελθόν οι ακόλουθες εμπειρικές σχέσεις εκτίμησης (Bouckovalas & Papadimitriou 2005):

$$A_{h,max} \text{ (πρανούς)} = 1 + \frac{0.225(H/\lambda)^{0.4} \left( \frac{l^2 + 2l^6}{l^3 + 0.02} \right)}{1 + 0.9\xi} \quad (5.1)$$

$$A_{v,max} \text{ (πρανούς)} = \frac{0.75(H/\lambda)^{0.8} (l^{0.5} + 1.5l^5)}{1 + 0.15\xi^{0.5}} \quad (5.2)$$

$$D_{hc} \text{ (πρανούς)} = \frac{\left[ \frac{(H/\lambda)}{0.2 + (H/\lambda)^2} \right] \left( \frac{l^{15} + 3.3l^8}{l^4 + 0.07} \right)}{0.71 + 3.33\xi} N^{0.43} \quad (5.3)$$

$$D_{vc} \text{ (πρανούς)} = \frac{\left[ \frac{0.233(H/\lambda)}{0.2 + (H/\lambda)^2} \right] \left( \frac{l^{1.5} + 3.3l^8}{l^4 + 0.07} \right)}{\xi^{0.78}} \quad (5.4)$$

όπου:

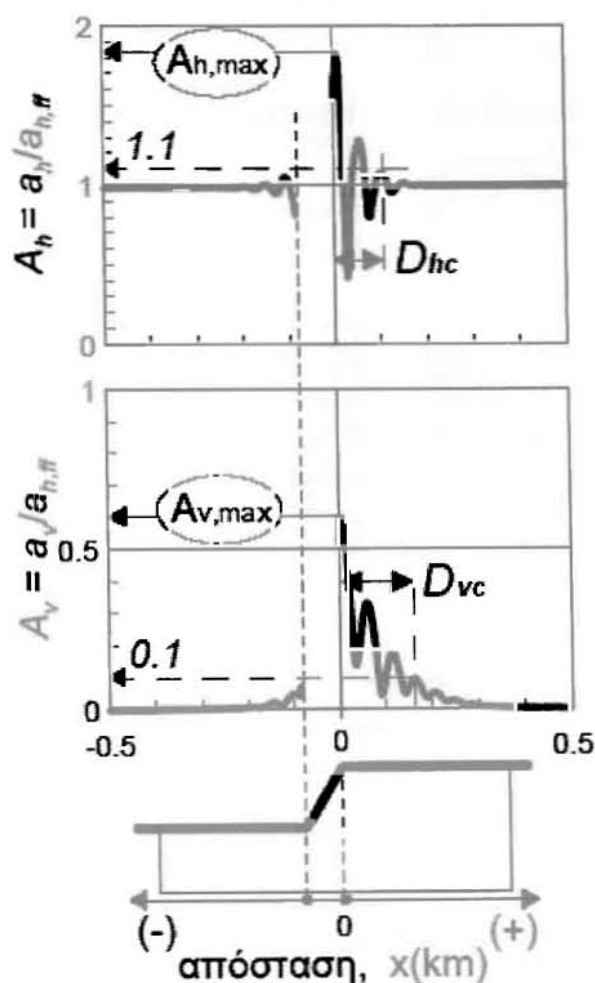
$A_{h,max}$  είναι η μέγιστη τιμή του συντελεστή οριζόντιας τοπογραφικής επιδείνωσης πίσω από τη στέψη μονοκλινούς πρανούς,

$A_{v,max}$  είναι η μέγιστη τιμή του συντελεστή (παρασιτικής) κατακόρυφης τοπογραφικής επιδείνωσης πίσω από τη στέψη μονοκλινούς πρανούς

$D_{hc}$  είναι η απόσταση πίσω από τη στέψη μονοκλινούς πρανούς μέχρι το «ελεύθερο πεδίο» για την οριζόντια επιτάχυνση, μια απόσταση που ορίζεται, με ακρίβεια μηχανικού, ως η απόσταση μέχρις ότου η τιμή του συντελεστή  $A_h$  γίνει συστηματικά μικρότερη από 1.10

$D_{vc}$  είναι η απόσταση πίσω από τη στέψη μονοκλινούς πρανούς μέχρι το «ελεύθερο πεδίο» για την παρασιτική κατακόρυφη επιτάχυνση, μια απόσταση που ορίζεται, με ακρίβεια μηχανικού, ως η απόσταση μέχρις ότου η τιμή του συντελεστή  $A_v$  γίνει συστηματικά μικρότερη από 0.10

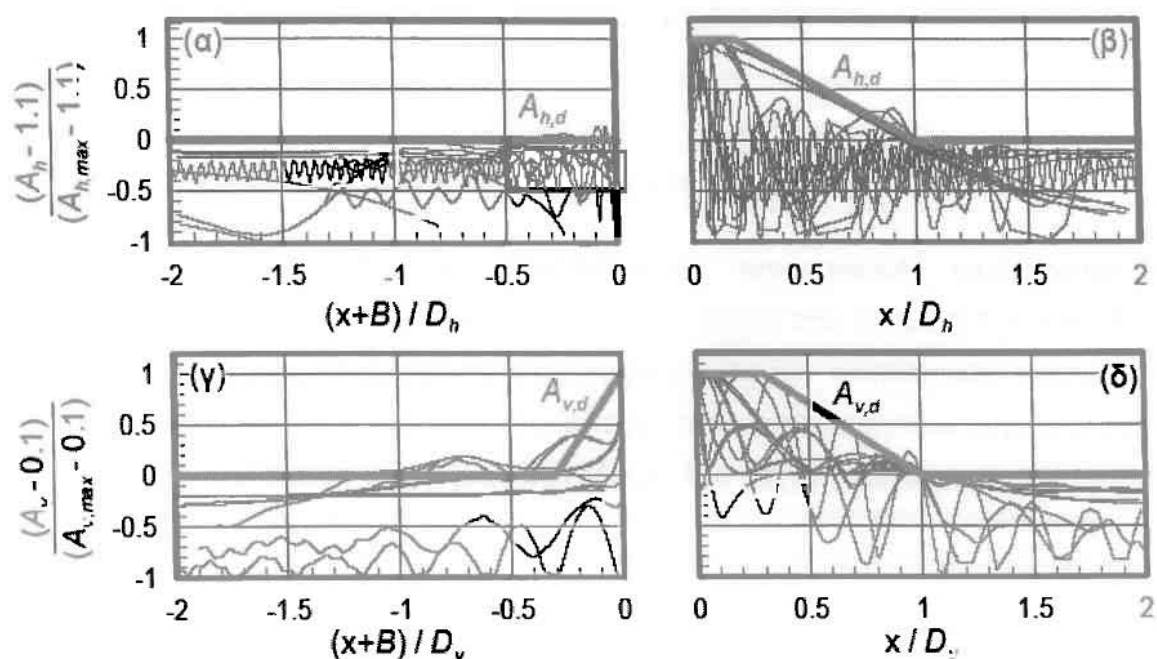
Ενδεικτικά, οι ανωτέρω παράμετροι σχεδιασμού για την απόκριση μονοκλινούς πρανούς ορίζονται πρακτικώς όπως στο ακόλουθο Σχήμα 5.1



**Σχήμα 5.1** Τοπογραφική επιδείνωση της μέγιστης σεισμικής επιτάχυνσης από αριθμητική ανάλυση για μονοκλινές πρανές με κλίση  $i=30^\circ$ , αδιάστατο ύψος  $H/\lambda=2.0$ , απόσβεση  $\xi=5\%$  και  $N=6$  σημαντικούς κύκλους και ορισμός μεγεθών σχεδιασμού (Μπουκοβάλας κ.α 2006).

Οι σχέσεις (5.1) έως (5.4) μπορούν να δώσουν μια αξιόπιστη εκτίμηση των χρήσιμων αυτών μεγεθών για κάθε περίπτωση  $i$ ,  $H/\lambda$ ,  $\xi$  και  $N$  και στη συνέχεια, η επίδραση του πλάτους  $B$  να εκτιμηθεί με όσα αναφέρονται στην παράγραφο 5.2 για τους λόφους.

Η αύξηση των σεισμικών δράσεων στην οριζόντια και κατακόρυφη διεύθυνση κατά  $A_{hc}$  και  $A_{vc}$  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 από τους Bouckovalas & Papadimitriou (2006) ως προς τις εκάστοτε τιμές  $A_{hc}$ ,  $A_{vc}$ ,  $D_h$  και  $D_v$ . Έτσι προέκυψαν τα αποτελέσματα του Σχήματος 5.2.



**Σχήμα 5.2.** 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 ( $B = H/\tan i$ ) (Bouckovalas & Papadimitriou 2006)

Από τα παραπάνω αποτελέσματα ορίσθηκαν οι **χωρικές περιβάλλουσες σχεδιασμού  $A_{h,d}$  και  $A_{v,d}$**  με την απόσταση  $x$  από το πρανός, οι οποίες δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$A_{h,d} = \begin{cases} 1.0 \div 1.1 & , \quad x \leq -B \\ 1.1 + \frac{A_{h,max} - 1.1}{B} (x + B) & , \quad -B \leq x < 0 \\ A_{h,max} & , \quad 0 \leq x \leq 0.2D_h \\ A_{h,max} - \frac{A_{h,max} - 1.1}{0.8D_h} (x - 0.2D_h) & , \quad 0.2D_h \leq x \leq D_h \\ 1.0 \div 1.1 & , \quad D_h \leq x \end{cases} \quad (5.5)$$



$$A_{v,d} = \begin{cases} 0.0 - 0.1 & , \quad x \leq -(B + 0.3D_v) \\ 0.1 + \frac{A_{v,max} - 0.1}{0.3D_v}(x + B + 0.3D_v) & , \quad -(B + 0.3D_v) < x \leq -B \\ A_{v,max} & , \quad -B \leq x \leq 0.3D_v \\ A_{v,max} - \frac{A_{v,max} - 0.1}{0.7D_v}(x - 0.3D_v) & , \quad 0.3D_v \leq x \leq D_v \\ 0.0 - 0.1 & , \quad D_v \leq x \end{cases} \quad (5.6)$$

Στην εργασία αυτή δε δίνεται η έμφαση στη χωρική διαφοροποίηση της τοπογραφικής επιδείνωσης, καθώς κρίνεται ότι, σε πρώτη προσέγγιση, η ανωτέρω προσέγγιση είναι επαρκώς ακριβής.

## 5.2. Παρουσίαση αποτελεσμάτων - Συμπεράσματα

Για τη στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων τοπογραφικής επιδείνωσης που παρουσιάζονται στα Σχήματα 4.1 έως 4.13, γίνεται κατ' αρχάς στο Σχήμα 5.3 ο ορισμός των κρίσιμων μεγεθών ενδιαφέροντος που είναι οι μέγιστες τιμές των συντελεστών τοπογραφικής επιδείνωσης ( $A_{hc}$ ,  $A_{ht}$ ,  $A_{vc}$ ,  $A_{vt}$ ) και οι αποστάσεις μέχρι το «ελεύθερο πεδίο» μπροστά από τον πόδα ( $D_{ht}$ ,  $D_{vt}$ ) και πίσω από τη στέψη ( $D_{hc}$ ,  $D_{vc}$ ) λόφων. Πιο συγκεκριμένα, τα προαναφερθέντα μεγέθη ενδιαφέροντος ορίζονται ως:

$A_{hc}$ : μέγιστη τιμή του συντελεστή οριζόντιας τοπογραφικής επιδείνωσης πίσω από τη στέψη λόφων

$A_{ht}$ : μέγιστη τιμή του συντελεστή οριζόντιας τοπογραφικής επιδείνωσης μπροστά από τον πόδα λόφων

$A_{vc}$ : μέγιστη τιμή του συντελεστή (παρασιτικής) κατακόρυφης τοπογραφικής επιδείνωσης πίσω από τη στέψη λόφων

$A_{vt}$ : μέγιστη τιμή του συντελεστή (παρασιτικής) κατακόρυφης τοπογραφικής επιδείνωσης μπροστά από τον πόδα λόφων

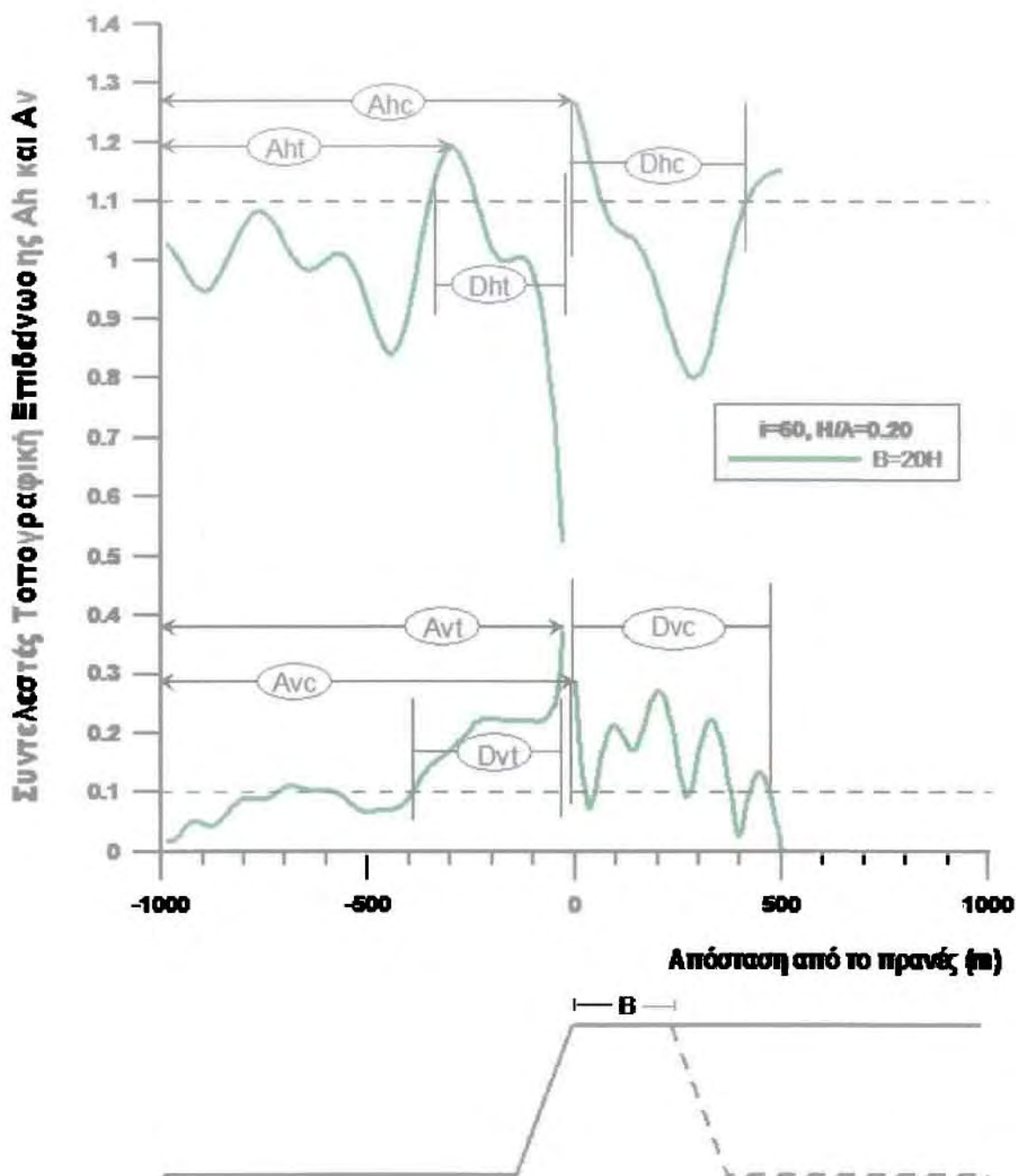
$D_{ht}$ : απόσταση μπροστά από τον πόδα λόφων μέχρι το «ελεύθερο πεδίο» για την οριζόντια επιτάχυνση, μια απόσταση που ορίζεται, με ακρίβεια μηχανικού, ως η απόσταση μέχρις ότου η τιμή του συντελεστή  $A_h$  γίνει συστηματικά μικρότερη από 1.10

$D_{vc}$ : απόσταση μπροστά από τον πόδα λόφων μέχρι το «ελεύθερο πεδίο» για την (παρασιτική) κατακόρυφη επιτάχυνση, μια απόσταση που ορίζεται, με ακρίβεια μηχανικού, ως η απόσταση μέχρις ότου η τιμή του συντελεστή  $A_v$  γίνει συστηματικά μικρότερη από 0.10

$D_{hc}$ : απόσταση πίσω από τη στέψη λόφων μέχρι το «ελεύθερο πεδίο» για την οριζόντια επιτάχυνση, μια απόσταση που ορίζεται, με ακρίβεια μηχανικού, ως η απόσταση μέχρις ότου η τιμή του συντελεστή  $A_h$  γίνει συστηματικά μικρότερη από 1.10

$D_{vc}$ : απόσταση πίσω από τη στέψη λόφων μέχρι το «ελεύθερο πεδίο» για την (παρασιτική) κατακόρυφη επιτάχυνση, μια απόσταση που ορίζεται, με ακρίβεια μηχανικού, ως η απόσταση μέχρις ότου η τιμή του συντελεστή  $A_v$  γίνει συστηματικά μικρότερη από 0.10

Στο διάγραμμα που ακολουθεί απεικονίζονται τα παραπάνω μεγέθη σχηματικά.



**Σχήμα 5.3:** Ορισμός μέγιστων τιμών συντελεστών τοπογραφικής επιδείνωσης  $A_{hc}$ ,  $A_{ht}$ ,  $A_{vc}$ ,  $A_{vt}$ ,  $D_{hc}$ ,  $D_{vc}$ , για τοπογραφία μορφής λόφου.

Οι τιμές όλων των ανωτέρω μεγεθών για τις πραγματοποιηθείσες αναλύσεις συνοψίζονται στους Πίνακες 5.1 έως 5.3 και για τις τρεις περιπτώσεις διέγερσης. Χάρην σύγκρισης, στον ίδιο πίνακα ενσωματώνονται αποτελέσματα και για τα εκάστοτε αντίστοιχα μονοκλινή πρηνή, για τα

οποία θεωρήθηκε ότι αντιστοιχούν σε λόφους με πολύ μεγάλο λόγο πλάτους στέψης προς μήκος κύματος (π.χ.  $B/\lambda=20$ ).

Για να χρησιμοποιηθούν ως βάση αναφοράς και γενίκευσης οι εξισώσεις 5.1 έως 5.4 από τη βιβλιογραφία, οι εκτιμήσεις για τα  $A_{hc}$ ,  $A_{vt}$ ,  $A_{vc}$ ,  $A_{vt}$  κανονικοποιήθηκαν ως προς τιμές απόκρισης που προέκυψαν για τις εκάστοτε αντίστοιχες αναλύσεις μονοκλινών πρανών και συγκεκριμένα:

- \* Τα  $A_{hc}$ ,  $A_{vt}$ ,  $A_{vc}$ ,  $A_{vt}$  όλων των περιπτώσεων λόφων κανονικοποιήθηκαν με τα  $A_{hc}$ ,  $A_{vt}$ ,  $A_{vc}$ ,  $A_{vt}$  του αντίστοιχου πρανούς,
- \* Επιπλέον, το  $A_{ht}$  κάθε λόφου κανονικοποιήθηκε με το  $A_{hc}$  του αντίστοιχου πρανούς, καθώς οι σχέσεις των Bouckovalas & Papadimitriou (2005) δεν περιλαμβάνουν εκτίμηση του  $A_{ht}$  (πρανούς), όπως και με την τιμή του  $A_{hc}$  του ίδιου του λόφου (για τους ίδιους λόγους)
- \* Τέλος, το  $A_{vt}$  κάθε λόφου κανονικοποιήθηκε με το  $A_{vc}$  του αντίστοιχου πρανούς, καθώς οι σχέσεις των Bouckovalas & Papadimitriou (2005) δεν περιλαμβάνουν εκτίμηση του  $A_{vt}$  (πρανούς), όπως και με την τιμή του  $A_{vc}$  του ίδιου του λόφου (για τους ίδιους λόγους)

Η επίδραση του αδιάστατου εύρους  $B/\lambda$  επί των ανωτέρω λόγων τοπογραφικής επιδείνωσης παρουσιάζεται στα Σχήματα 5.4 έως 5.15.

**Πίνακας 5.1:** Δεδομένα και αποτελέσματα από αναλύσεις σεισμικής απόκρισης λόφων υπό διέγερση «Αιγίου» (λίγων κύκλων)

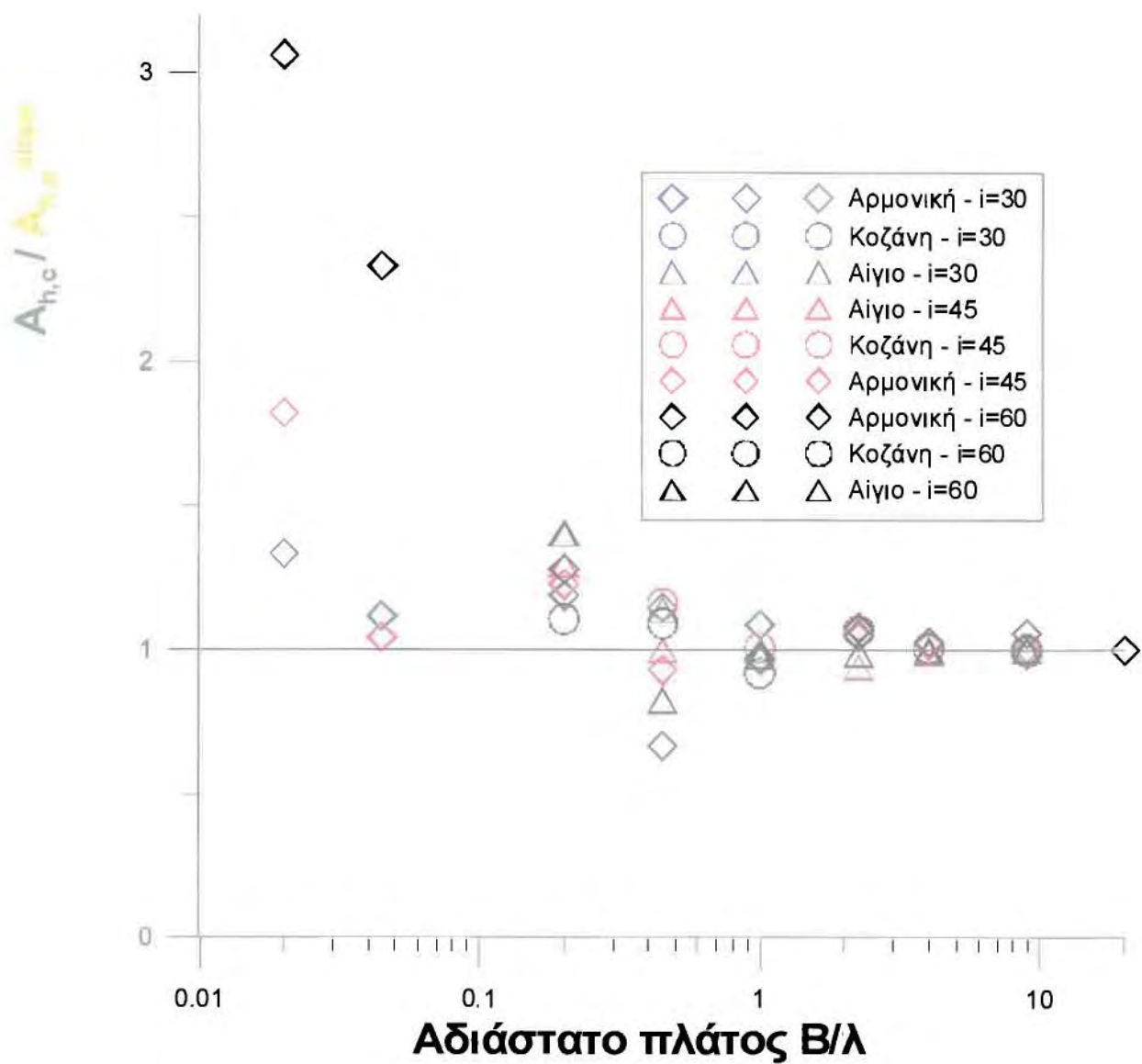
i	H	Te	λ	H/λ	B	B/H	B/λ	analysis	Ahc	Dhc	Avc	Dvc	Aht	Dht	Avt	Dvt
30	50	0,50	250	0,20	1000	20	4	aigio	1,1545	0	0,1158	189	1,088	0	0,1356	257
30	50	0,50	250	0,20	5000	40	20	aigio	1,1592	147	0,118	184	1,0884	0	0,1361	357
30	50	0,22	111,111	0,45	50	1	0,45	aigio	1,4464	25	0,3592	19	1,0736	0	0,1251	227
30	50	0,22	111,111	0,45	1000	20	9	aigio	1,2698	88	0,2158	131	1,0515	0	0,0797	0
30	50	0,22	111,111	0,45	2222,22	40	20	aigio	1,269	88	0,2155	127	1,0738	0	0,0787	0
45	50	0,50	250	0,20	50	1	0,2	aigio	1,5086	25	0,2605	17	1,1074	370	0,3333	694
45	50	0,50	250	0,20	250	5	1	aigio	1,1655	125	0,2317	107	1,1034	349	0,2294	464
45	50	0,50	250	0,20	1000	20	4	aigio	1,1684	115	0,245	345	1,0647	324	0,2219	369
45	50	0,50	250	0,20	5000	40	20	aigio	1,1656	128	0,1413	294	1,0939	0	0,2156	386
45	50	0,22	111,111	0,45	50	1	0,45	aigio	1,1795	13	0,4498	20	1,111	65	0,1474	215
45	50	0,22	111,111	0,45	250	5	2,25	aigio	1,1135	4	0,3741	117	1,0897	0	0,1595	95
45	50	0,22	111,111	0,45	1000	20	9	aigio	1,183	102	0,2634	336	1,0921	158	0,1614	98
45	50	0,22	111,111	0,45	2222,22	40	20	aigio	1,1822	100	0,2647	327	1,0924	0	0,1612	99
60	50	0,50	250	0,20	50	1	0,2	aigio	1,7476	25	0,4223	17	1,0939	0	0,4975	826
60	50	0,50	250	0,20	250	5	1	aigio	1,2195	56	0,2595	109	1,111	314	0,2789	447
60	50	0,50	250	0,20	1000	20	4	aigio	1,2417	54	0,2017	457	1,1013	0	0,2785	372
60	50	0,50	250	0,20	5000	40	20	aigio	1,2452	56	0,2011	367	1,1011	310	0,2774	395
60	50	0,22	111,111	0,45	50	1	0,45	aigio	0,9555	0	0,6885	20	1,1233	158	0,3001	296
60	50	0,22	111,111	0,45	250	5	2,25	aigio	1,1449	10	0,4745	120	1,0925	0	0,2424	108
60	50	0,22	111,111	0,45	1000	20	9	aigio	1,1583	102	0,3907	486	1,0962	0	0,2475	150
60	50	0,22	111,111	0,45	2222,22	40	20	aigio	1,157	105	0,3911	424	1,0972	0	0,2472	145

**Πίνακας 5.2:** Δεδομένα και αποτελέσματα από αναλύσεις σεισμικής απόκρισης λόφων υπό διέγερση «Κοζάνης» (πολλών κύκλων)

i	H	Te	λ	H/λ	B	B/H	B/λ	analysis	Ahc	Dhc	Avc	Dvc	Aht	Dht	Avt	Dvt
30	50	0,50	250	0,20	1000	20	4	kozani	1,1513	500	0,1399	186	1,0578	0	0,1167	239
30	50	0,50	250	0,20	5000	40	20	kozani	1,1477	108	0,1446	168	1,063	0	0,1524	106
30	50	0,22	111,111	0,45	1000	20	9	kozani	1,3018	264	0,2801	274	1,0515	0	0,1169	0
30	50	0,22	111,111	0,45	2222,22	40	20	kozani	1,2965	260	0,2808	288	1,0515	0	0,1192	95
45	50	0,50	250	0,20	250	5	1	kozani	1,1245	125	0,2649	118	1,0849	277	0,271	483
45	50	0,50	250	0,20	1000	20	4	kozani	1,1197	408	0,1872	368	1,0647	0	0,2219	281
45	50	0,50	250	0,20	5000	40	20	kozani	1,1169	22	0,1773	239	1,0691	0	0,2178	284
45	50	0,22	111,111	0,45	50	1	0,45	kozani	1,4386	25	0,5837	20	1,125	103	0,2321	325
45	50	0,22	111,111	0,45	250	5	2,25	kozani	1,3189	91	0,4203	117	1,0747	0	0,2286	359
45	50	0,22	111,111	0,45	1000	20	9	kozani	1,2388	264	0,3503	480	1,0564	0	0,211	265
45	50	0,22	111,111	0,45	2222,22	40	20	kozani	1,2398	266	0,353	373	1,0545	0	0,2097	99
60	50	0,50	250	0,20	50	1	0,2	kozani	1,3102	25	0,5338	20	1,334	339	0,4975	623
60	50	0,50	250	0,20	250	5	1	kozani	1,0896	0	0,3259	113	1,1139	158	0,3705	489
60	50	0,50	250	0,20	1000	20	4	kozani	1,1916	500	0,2576	478	1,0715	0	0,3023	324
60	50	0,50	250	0,20	5000	40	20	kozani	1,1846	17	0,2505	340	1,0719	0	0,2934	331
60	50	0,22	111,111	0,45	50	1	0,45	kozani	1,3283	25	0,7258	22	1,1994	129	0,3848	415
60	50	0,22	111,111	0,45	250	5	2,25	kozani	1,2985	92	0,5134	119	1,0502	0	0,3272	348
60	50	0,22	111,111	0,45	1000	20	9	kozani	1,2127	244	0,4587	486	1,0604	0	0,2905	264
60	50	0,22	111,111	0,45	2222,22	40	20	kozani	1,2165	254	0,4573	433	1,109	0	0,1607	246

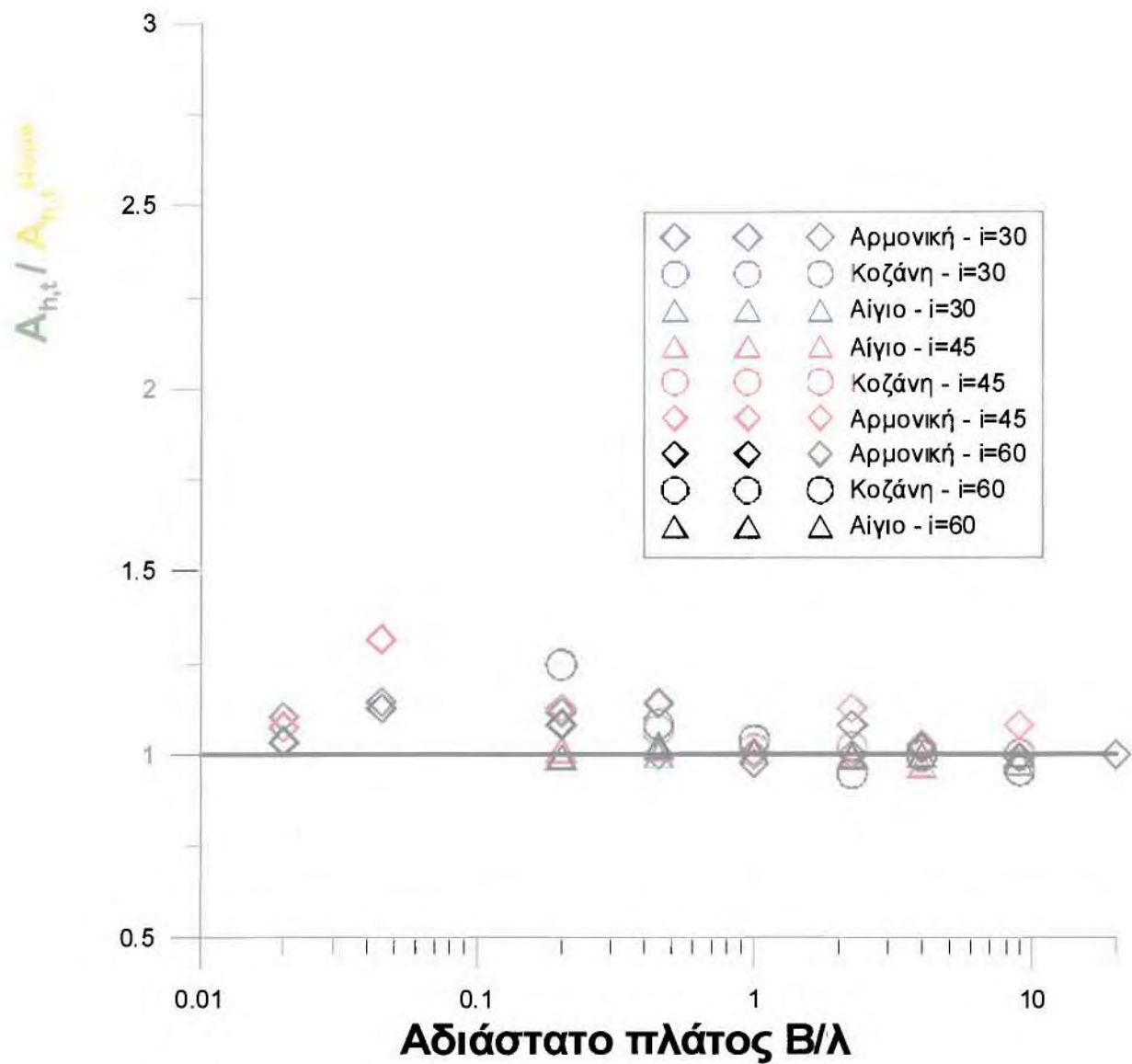
**Πίνακας 5.3:** Δεδομένα και αποτελέσματα από αναλύσεις σεισμικής απόκρισης λόφων υπό αρμονική διέγερση (Τιμοθέου 2008)

i	H	Te	λ	H/λ	B	B/H	B/λ	analysis	Ahc	Dhc	Avc	Dvc	Aht	Dht	Avt	Dvt
30	50	0,5	250	0,20	5	0,1	0,02	harmonic	1,519		0,016		1,254	800	0,254	700
30	50	0,50	250	0,20	50	1	0,2	harmonic	1,3537	25	0,1379	15	1,2694	836	0,2231	723
30	50	0,50	250	0,20	250	5	1	harmonic	1,2391	125	0,2197	110	1,143	362	0,196	411
30	50	0,50	250	0,20	1000	20	4	harmonic	1,1688	422	0,1483	238	1,1604	387	0,1539	384
30	50	0,50	250	0,20	5000	40	20	harmonic	1,1391	149	0,1373	247	1,1385	375	0,1524	395
30	50	0,22	111,111	0,45	5	0,1	0,045	harmonic	1,458		0,057		1,213	60	0,073	0
30	50	0,22	111,111	0,45	50	1	0,45	harmonic	1,4962	25	0,5014	20	1,0611	0	0,107	158
30	50	0,22	111,111	0,45	250	5	2,25	harmonic	1,3763	82	0,3956	116	1,0603	0	0,03086	0
30	50	0,22	111,111	0,45	1000	20	9	harmonic	1,2914	269	0,2772	478	1,053	0	0,0526	0
30	50	0,22	111,111	0,45	2222,22	40	20	harmonic	1,3068	266	0,2821	297	1,0604	0	0,0605	0
45	50	0,50	250	0,20	5	0,1	0,02	harmonic	2,094		0,045		1,239	800	0,441	800
45	50	0,50	250	0,20	50	1	0,2	harmonic	1,411	25	0,2605	25	1,2963	822	0,4087	833
45	50	0,50	250	0,20	250	5	1	harmonic	1,1125	125	0,26995	107	1,1531	354	0,3473	850
45	50	0,50	250	0,20	1000	20	4	harmonic	1,1712	417	0,2054	450	1,1834	366	0,2609	701
45	50	0,50	250	0,20	5000	40	20	harmonic	1,1511	57	0,1726	302	1,1514	360	0,2452	395
45	50	0,22	111,111	0,45	5	0,1	0,045	harmonic	1,297		0,126		1,332	310	0,222	270
45	50	0,22	111,111	0,45	50	1	0,45	harmonic	1,1535	8	0,5758	22	1,1587	122	0,0961	0
45	50	0,22	111,111	0,45	250	5	2,25	harmonic	1,2933	84	0,472	119	1,1417	134	0,0586	0
45	50	0,22	111,111	0,45	1000	20	9	harmonic	1,2508	500	0,3689	485	1,0953	0	0,0711	0
45	50	0,22	111,111	0,45	2222,22	40	20	harmonic	1,2414	286	0,3558	328	1,014	130	0,0709	0
60	50	0,50	250	0,20	5	0,1	0,02	harmonic	3,774		0,158		1,215	780	0,635	820
60	50	0,50	250	0,20	50	1	0,2	harmonic	1,5782	25	0,4997	18	1,2699	804	0,5967	837
60	50	0,50	250	0,20	250	5	1	harmonic	1,197	45	0,3022	111	1,1455	334	0,417	829
60	50	0,50	250	0,20	1000	20	4	harmonic	1,2672	500	0,2853	471	1,1938	352	0,3733	732
60	50	0,50	250	0,20	5000	40	20	harmonic	1,2319	479	0,2252	359	1,173	342	0,3219	379
60	50	0,22	111,111	0,45	5	0,1	0,045	harmonic	2,692		0,34		1,247	320	0,243	220
60	50	0,22	111,111	0,45	50	1	0,45	harmonic	0,7702	0	0,7584	22	1,2604	300	0,1343	85
60	50	0,22	111,111	0,45	250	5	2,25	harmonic	1,2448	88	0,7013	120	1,1962	130	0,1878	246
60	50	0,22	111,111	0,45	1000	20	9	harmonic	1,2243	500	0,4523	491	1,1008	114	0,1418	37
60	50	0,22	111,111	0,45	2222,2	40	20	harmonic	1,157	295	0,4574	490	1,109	121	0,1607	44

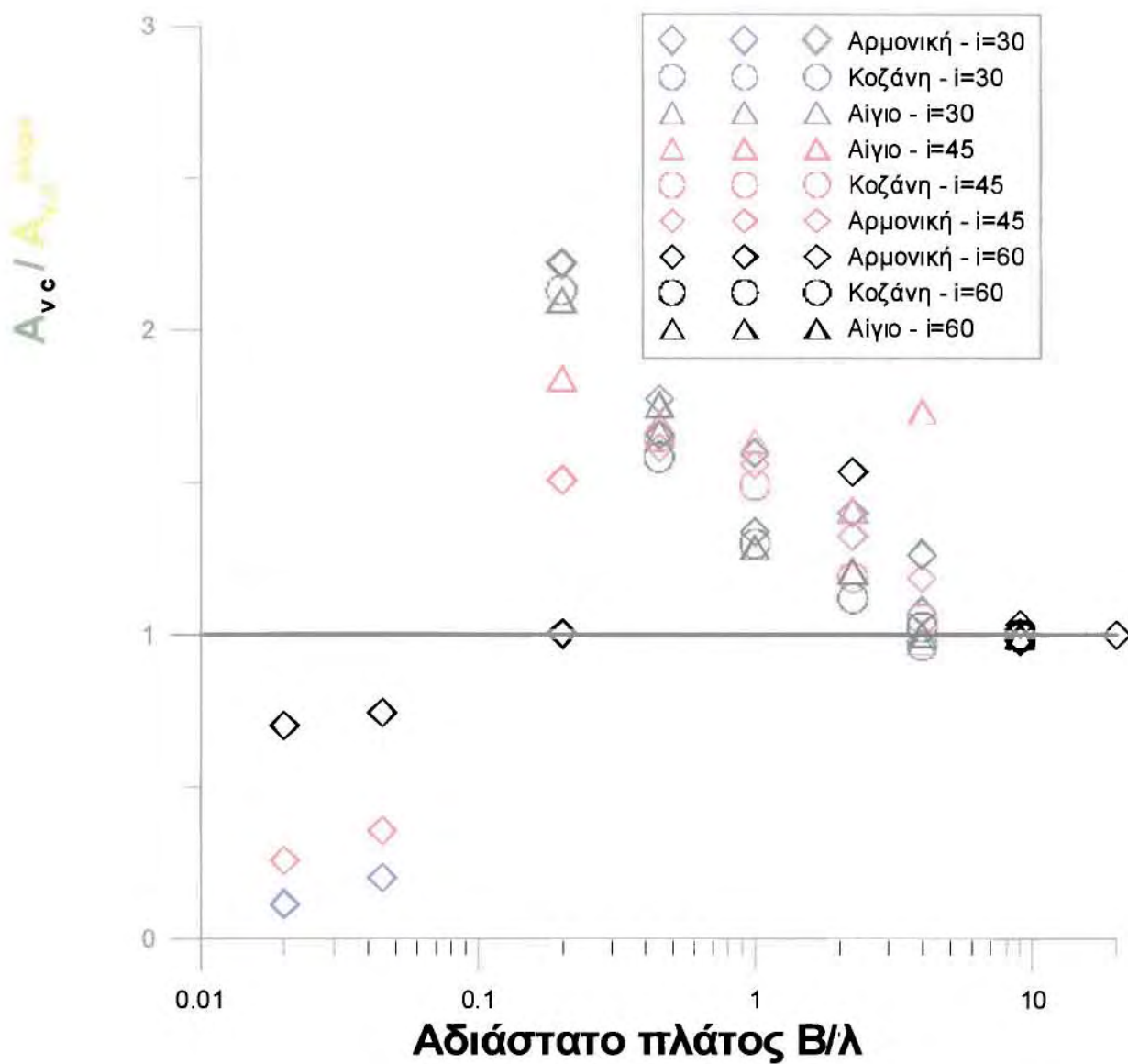


**Σχήμα 5.4:** Επίδραση του αδιάστατου εύρους λόφου B/l στη μέγιστη ενίσχυση της οριζόντιας σεισμικής επιτάχυνσης πίσω από τη στέψη, εν συγκρίσει με τη μέγιστη ενίσχυση της οριζόντιας σεισμικής επιτάχυνσης πίσω από τη στέψη μονοκλινούς πρανούς

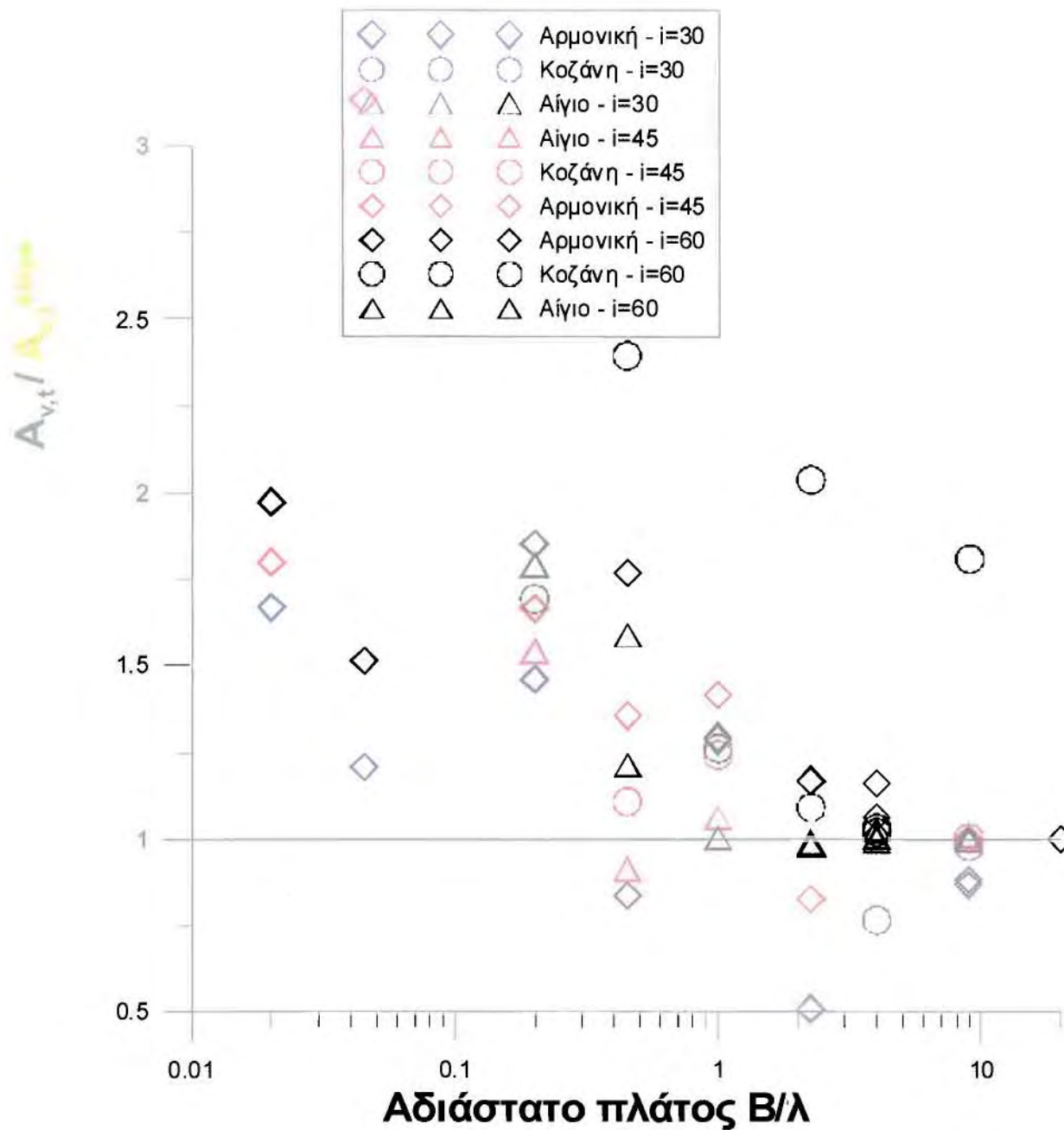




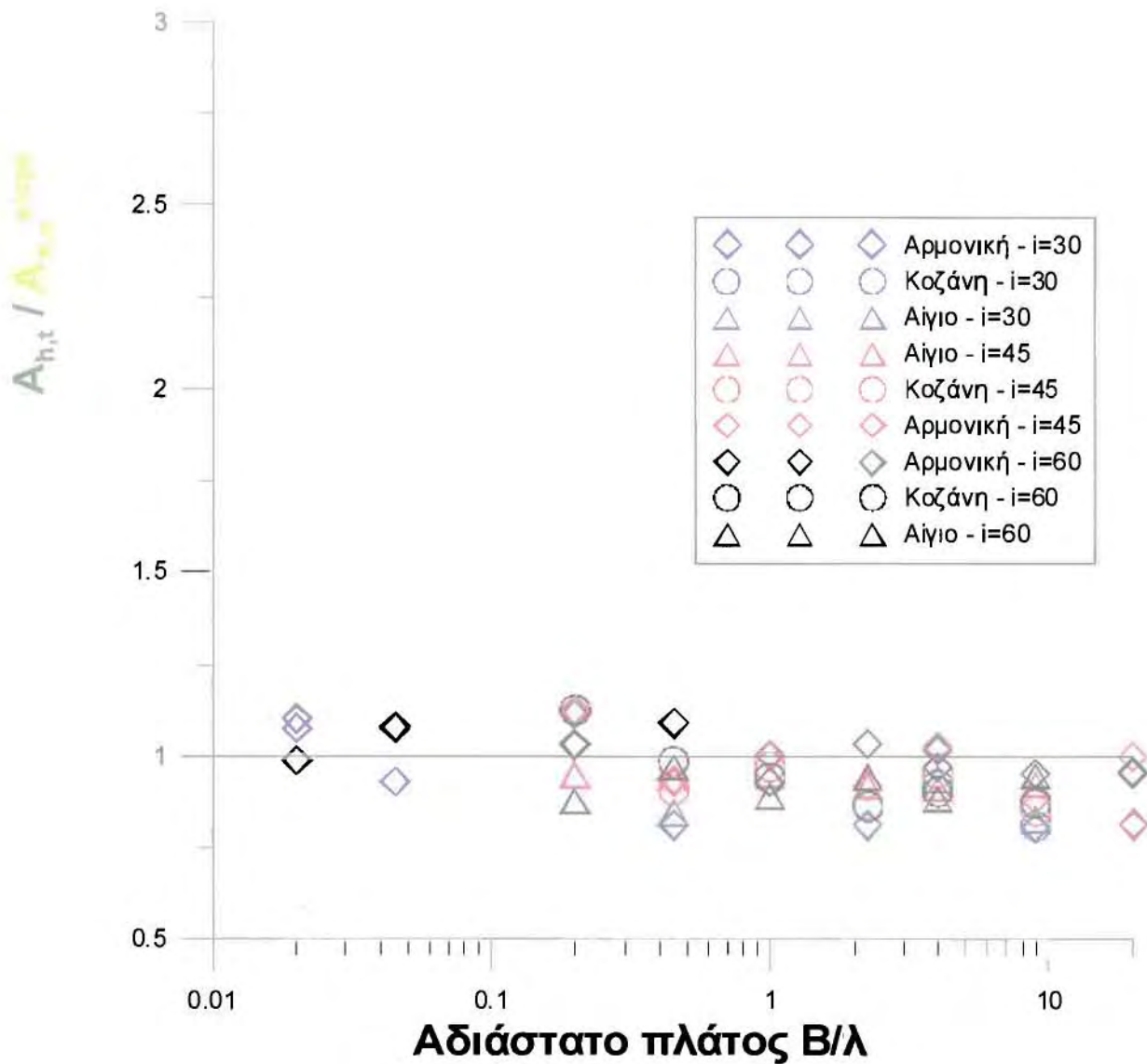
**Σχήμα 5.5:** Επίδραση του αδιάστατου εύρους λόφου B/l στη μέγιστη ενίσχυση της οριζόντιας σεισμικής επιτάχυνσης μπροστά από τον πόδα, εν συγκρίσει με τη μέγιστη ενίσχυση της οριζόντιας σεισμικής επιτάχυνσης μπροστά από τον πόδα μονοκλινούς πρανούς



**Σχήμα 5.6:** Επίδραση του αδιάστατου εύρους λόφου  $B/\lambda$  στη μέγιστη ενίσχυση της κατακόρυφης παρασιτικής επιτάχυνσης πίσω από τη στέψη, εν συγκρίσει με τη μέγιστη ενίσχυση της κατακόρυφης παρασιτικής επιτάχυνσης πίσω από τη στέψη μονοκλινούς πρηνούς

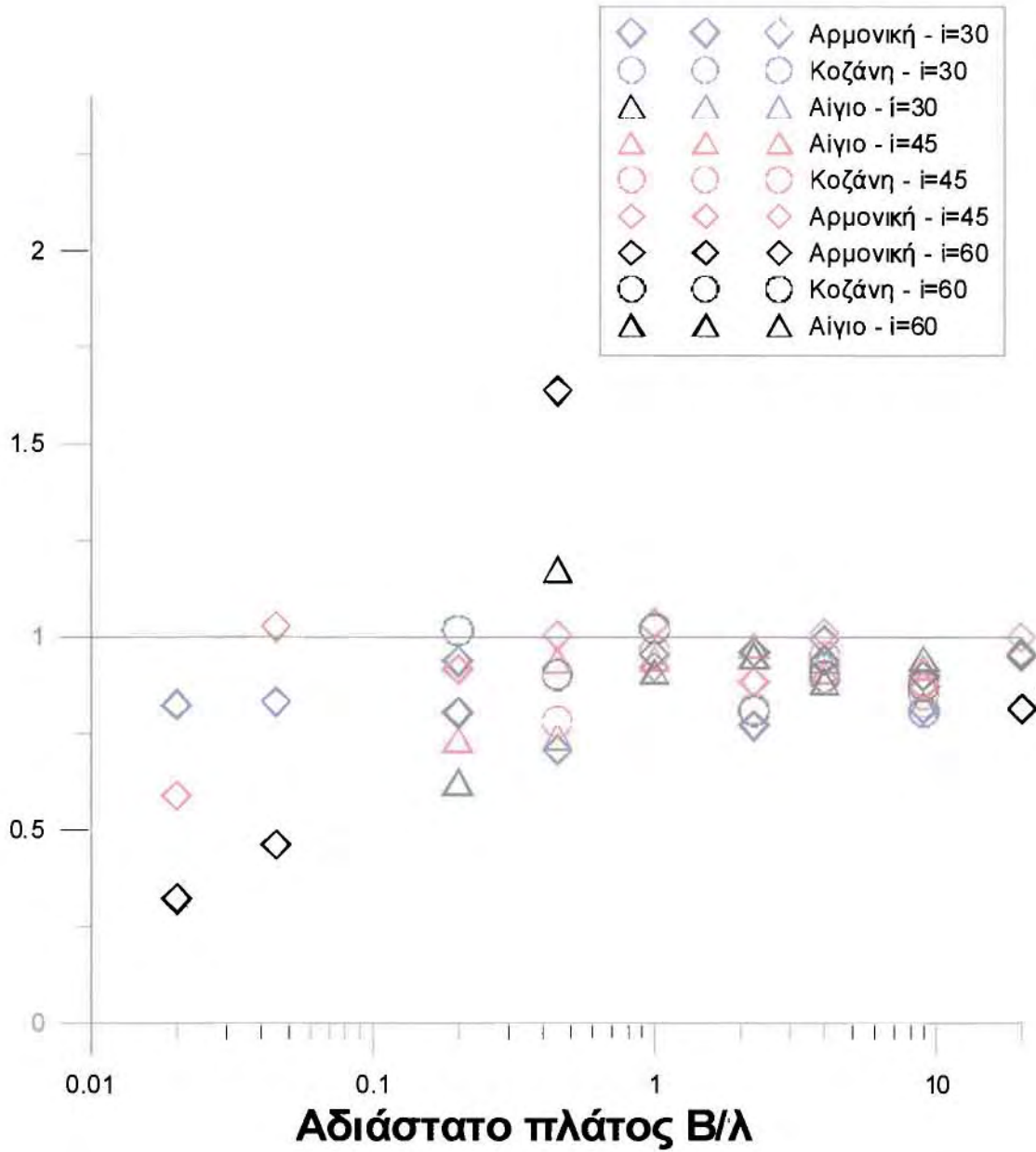


**Σχήμα 5.7:** Επίδραση του αδιάστατου εύρους λόφου  $B/\lambda$  στη μέγιστη ενίσχυση της κατακόρυφης παρασιτικής επιτάχυνσης μπροστά από τον πόδα, εν συγκρίσει με τη μέγιστη ενίσχυση της κατακόρυφης παρασιτικής επιτάχυνσης μπροστά από τον πόδα μονοκλινούς πρανούς

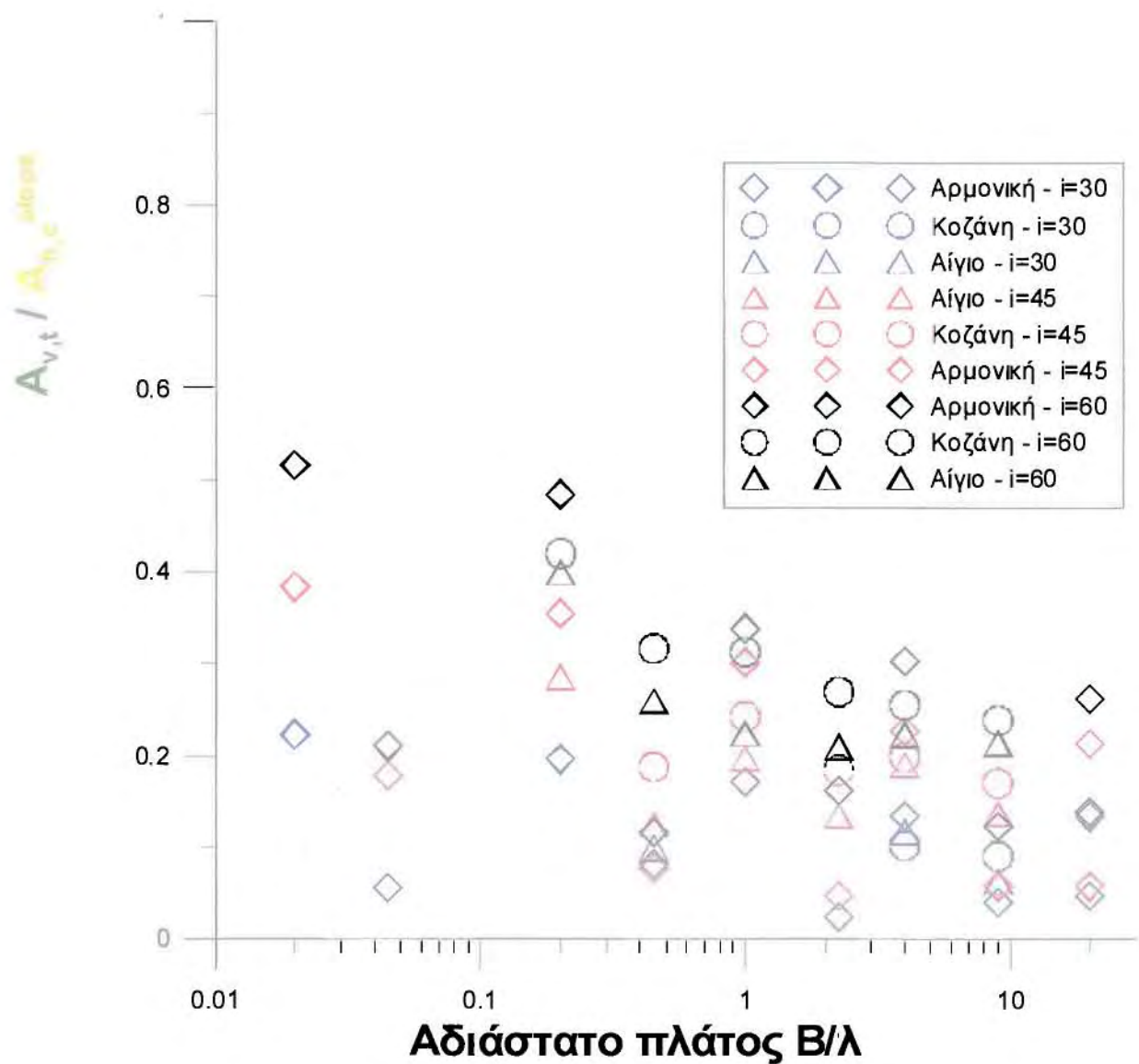


**Σχήμα 5.8:** Επίδραση του αδιάστατου εύρους λόφου B/l στη μέγιστη ενίσχυση της οριζόντιας σεισμικής επιτάχυνσης μπροστά από τον πόδα, εν συγκρίσει με τη μέγιστη ενίσχυση της οριζόντιας σεισμικής επιτάχυνσης πίσω από τη στέψη μονοκλινούς πρानούς

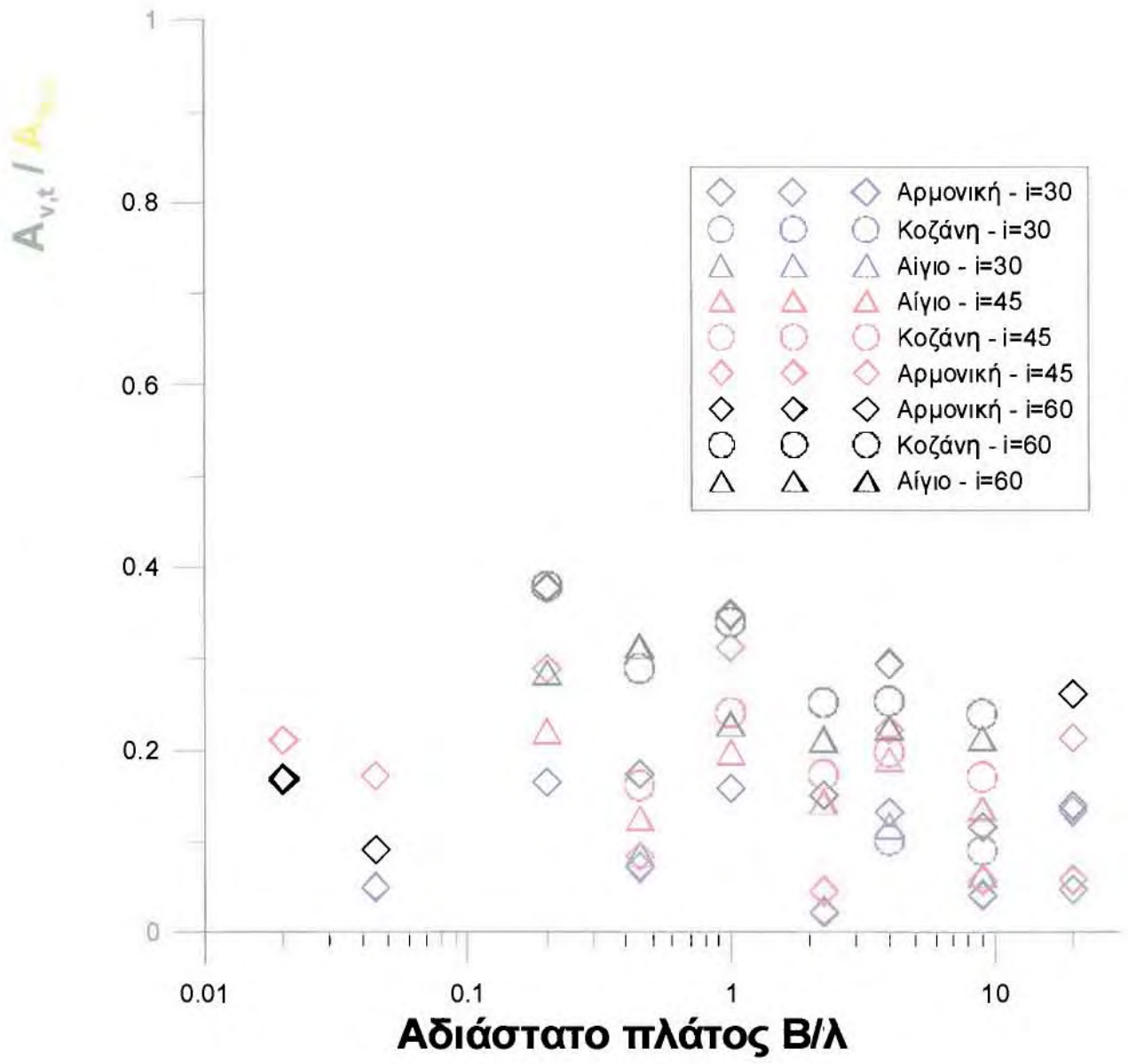
$A_{h,t} / A_{h,0}$



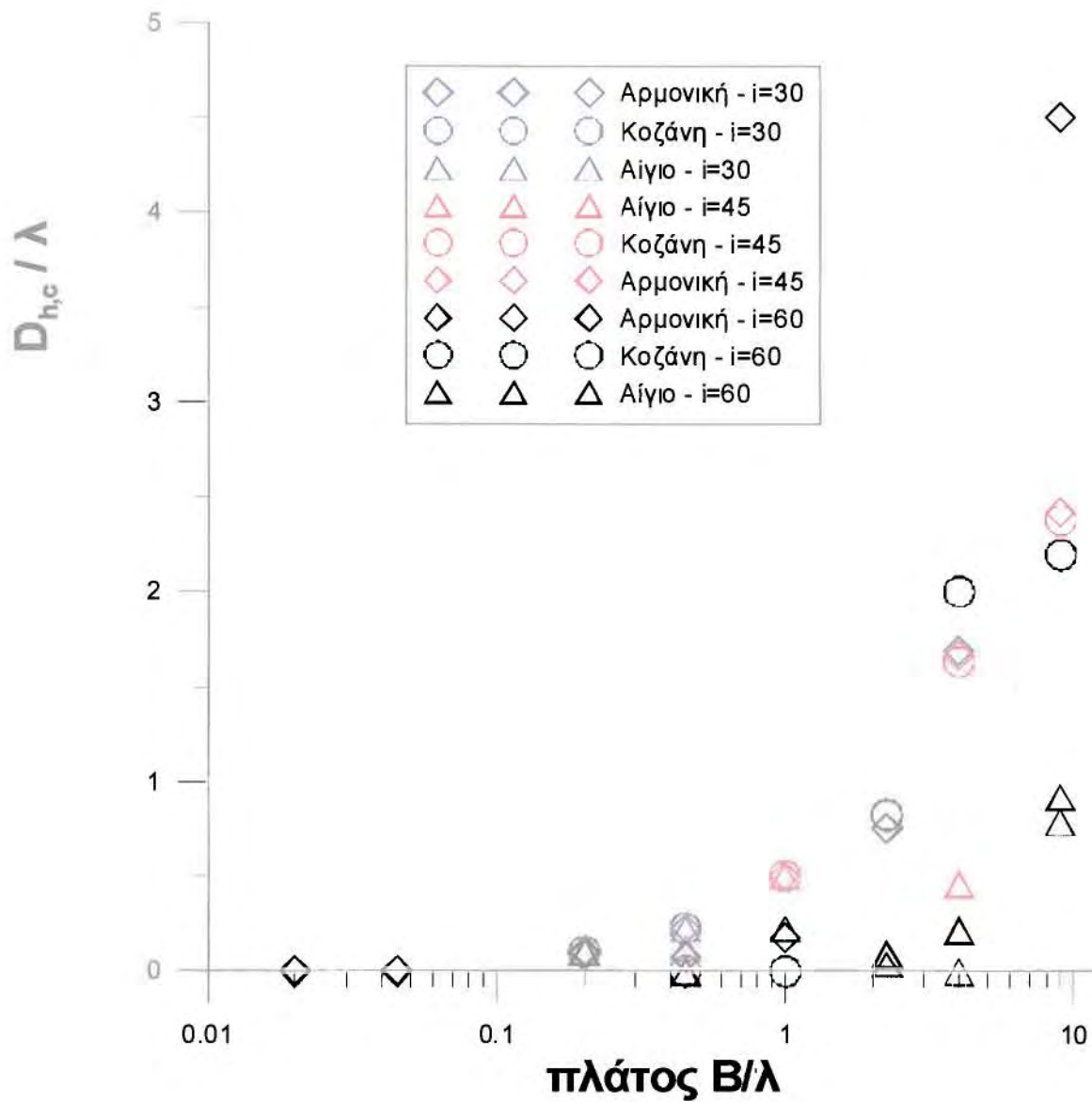
**Σχήμα 5.9:** Επίδραση του αδιάστατου εύρους λόφου  $B/l$  στη μέγιστη ενίσχυση της οριζόντιας σεισμικής επιτάχυνσης μπροστά από τον πόδα, εν συγκρίσει με τη μέγιστη ενίσχυση της οριζόντιας σεισμικής επιτάχυνσης πίσω από τη στέψη λόφου



**Σχήμα 5.10:** Επίδραση του αδιάστατου εύρους λόφου B/λ στη μέγιστη ενίσχυση της κατακόρυφης παρασιτικής επιτάχυνσης μπροστά από τον πόδα, εν συγκρίσει με τη μέγιστη ενίσχυση της οριζόντιας σεισμικής επιτάχυνσης πίσω από τη στέψη μονοκλινούς πρανούς

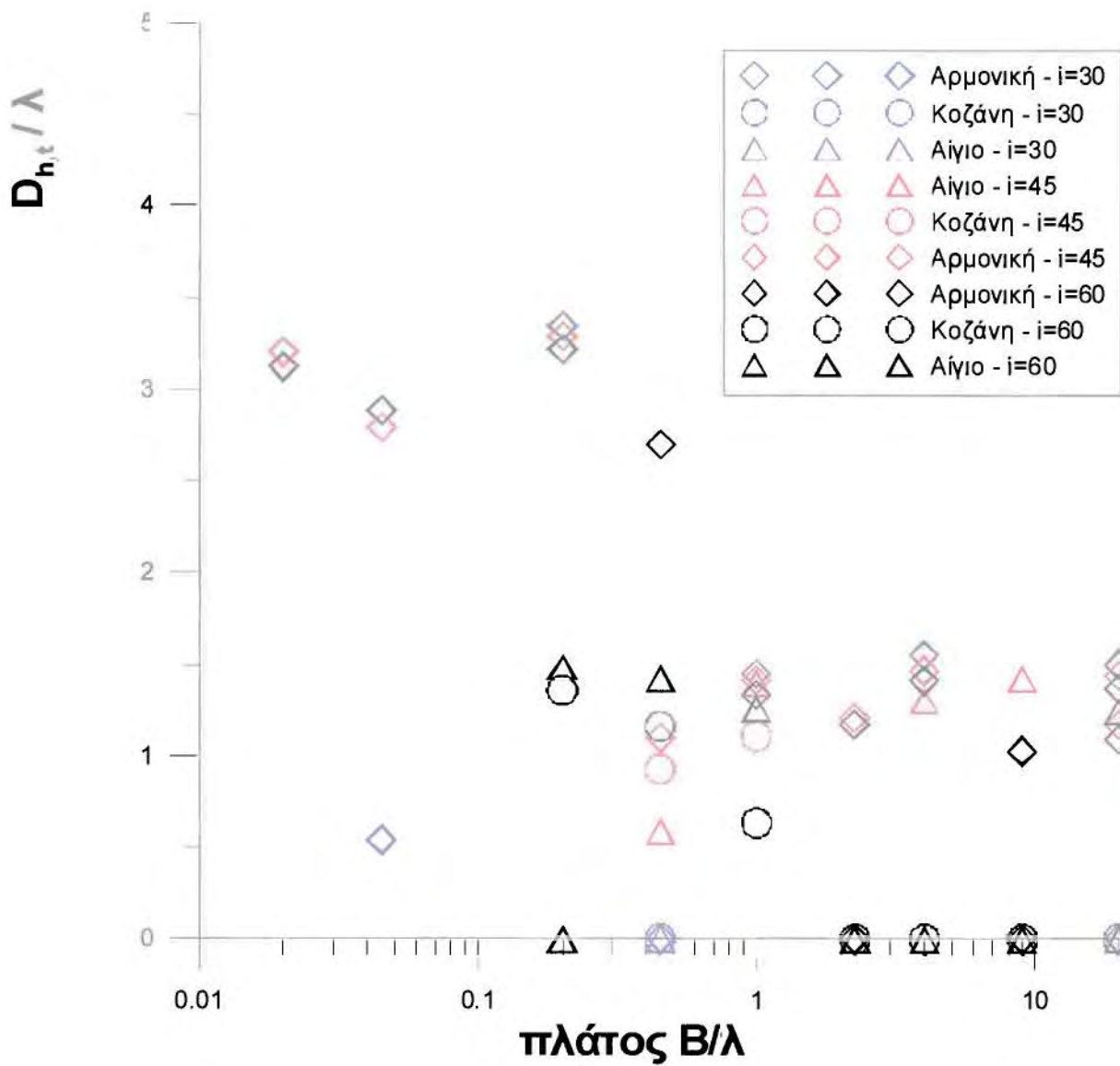


**Σχήμα 5.11:** Επίδραση του αδιάστατου εύρους λόφου  $B/\lambda$  στη μέγιστη ενίσχυση της κατακόρυφης παρασιτικής επιτάχυνσης μπροστά από τον πόδα, εν συγκρίσει με τη μέγιστη ενίσχυση της οριζόντιας σεισμικής επιτάχυνσης πίσω από τη στέψη λόφου

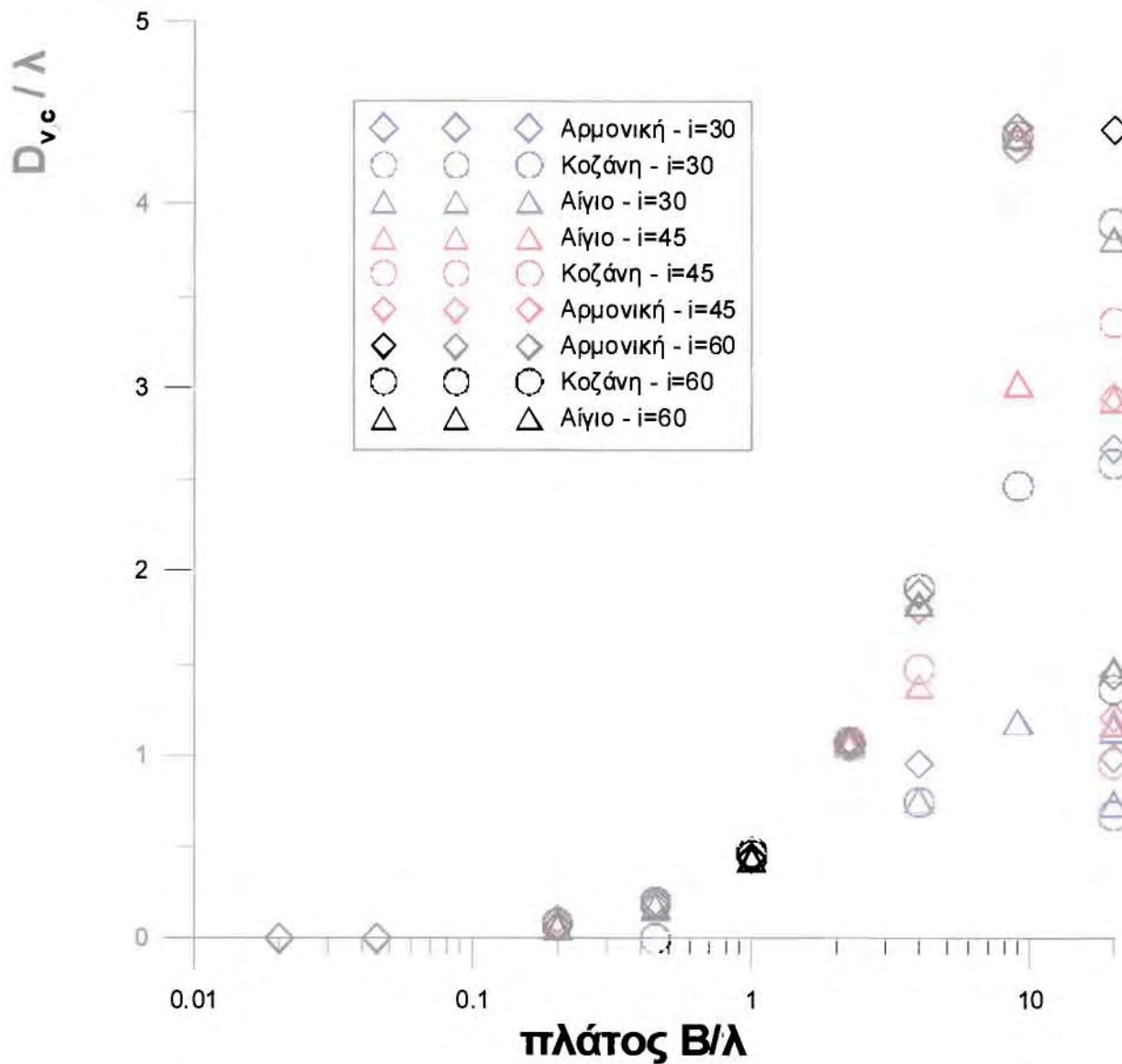


**Σχήμα 5.12:** Επίδραση του αδιάστατου εύρους λόφου  $B/\lambda$  στην απόσταση έως το ελεύθερο πεδίο για την οριζόντια σεισμική επιτάχυνση πίσω από τη στέψη λόφου  $D_{h,c}$ , κανονικοποιημένης ως προς το δεσπάζον μήκος κύματος  $\lambda$ .

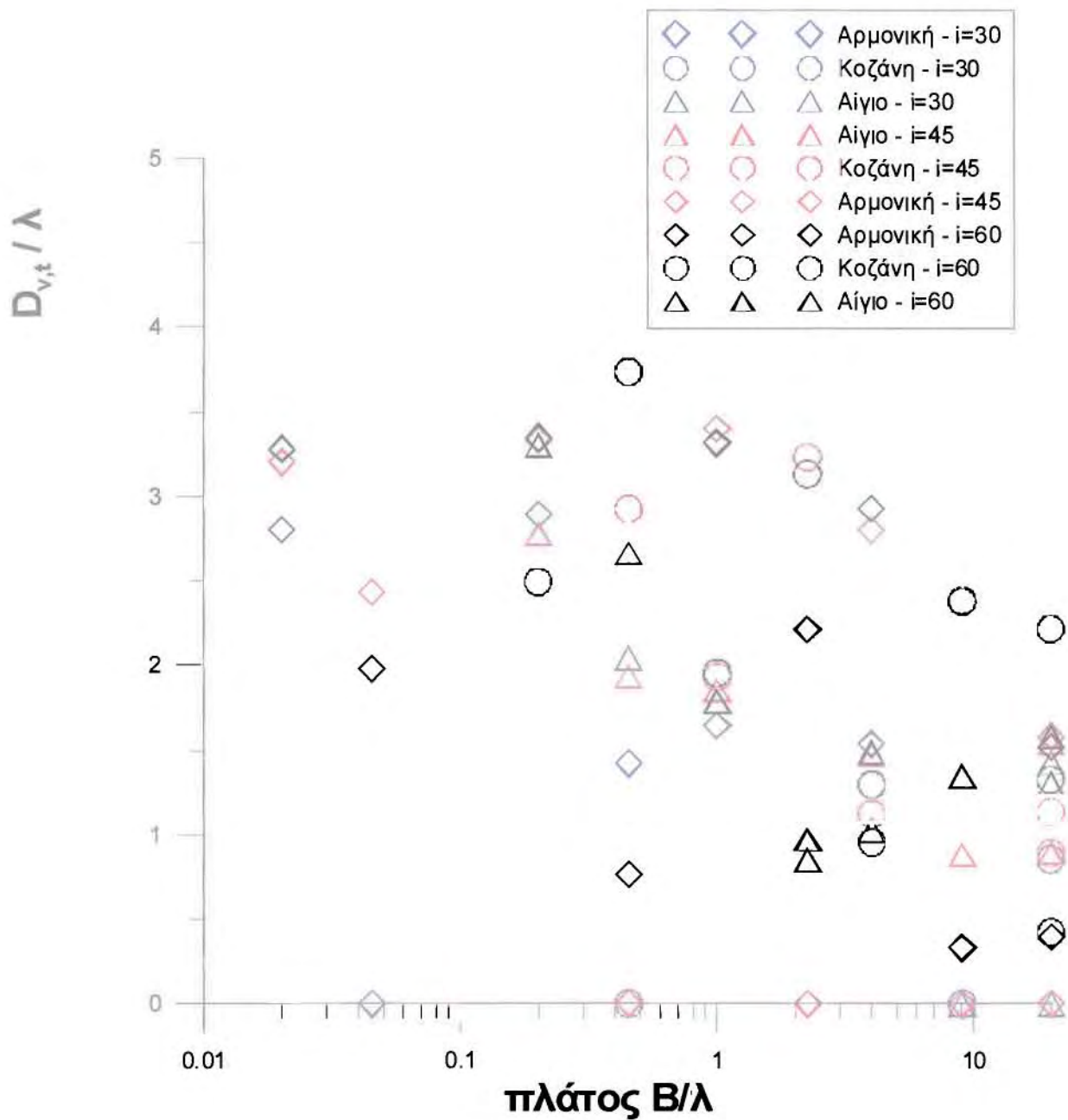




**Σχήμα 5.13:** Επίδραση του αδιάστατου εύρους λόφου  $B/\lambda$  στην απόσταση έως το ελεύθερο πεδίο για την ορζόντια σεισμική επιτάχυνση μπροστά από τον πόδα λόφου  $D_{ht}$ , κανονικοποιημένης ως προς το δεσπόζον μήκος κύματος  $\lambda$ .



**Σχήμα 5.14:** Επίδραση του αδιάστατου εύρους λόφου  $B/\lambda$  στην απόσταση έως το ελεύθερο πεδίο για την παρασιτική κατακόρυφη επιτάχυνση πίσω από τη στέψη λόφου  $D_{vc}$ , κανονικοποιημένης ως προς το δεσπόζον μήκος κύματος  $\lambda$ .



**Σχήμα 5.14:** Επίδραση του αδιάστατου εύρους λόφου  $B/\lambda$  στην απόσταση έως το ελεύθερο πεδίο για την παρασιτική κατακόρυφη επιτάχυνση μπροστά από τον πόδα λόφου  $D_{v,t}$ , κανονικοποιημένης ως προς το δεσπόζον μήκος κύματος  $\lambda$ .

Από τα Σχήματα 5.4 έως 5.11 παρατηρούμε για την επίδραση του  $B/\lambda$  στις μέγιστες τιμές των συντελεστών τοπογραφικής επιδείνωσης τα εξής:

- Αύξηση της μέγιστης ενίσχυσης της οριζόντιας σεισμικής  $A_h$  και της κατακόρυφης παρασιτικής επιτάχυνσης  $A_v$  σε σχέση με τη μέγιστη ενίσχυση της οριζόντιας σεισμικής  $A_h^{slope}$  και της κατακόρυφης παρασιτικής επιτάχυνσης  $A_v^{slope}$  του αντίστοιχου μονοκλινούς πρानού, στις περιοχές πίσω από τη στέψη του λόφου και μπροστά από τον πόδα, όσο μειώνεται το πλάτος  $B$  της στέψης του λόφου. Μόνη συστηματική εξαίρεση στον κανόνα αυτό αποτελεί η τιμή της  $A_v$  πίσω από τη στέψη πολύ στενών λόφων ( $B/\lambda < 0.1$ ) που είναι μικρότερη εκείνης του αντίστοιχου πρानού.
- Οι σημαντικότερες ενισχύσεις της οριζόντιας σεισμικής επιτάχυνσης  $A_h$  στην περιοχή πίσω από τη στέψη του λόφου, εντοπίζονται στα διαγράμματα για τιμές του αδιαστατοποιημένου εύρους λόφου  $B/\lambda < 0.1$ .
- Οι σημαντικότερες ενισχύσεις της κατακόρυφης παρασιτικής επιτάχυνσης  $A_v$  στην περιοχή πίσω από τη στέψη του λόφου, εντοπίζονται στα διαγράμματα για τιμές του αδιαστατοποιημένου εύρους λόφου  $0.1 < B/\lambda < 4$ .
- Οι σημαντικότερες ενισχύσεις της οριζόντιας σεισμικής επιτάχυνσης  $A_h$  στην περιοχή μπροστά από τον πόδα του λόφου, εντοπίζονται στα διαγράμματα για τιμές του αδιαστατοποιημένου εύρους λόφου  $B/\lambda < 0.1$ .
- Οι σημαντικότερες ενισχύσεις της κατακόρυφης παρασιτικής επιτάχυνσης  $A_v$  στην περιοχή μπροστά από τον πόδα του λόφου, εντοπίζονται στα διαγράμματα για τιμές του αδιαστατοποιημένου εύρους λόφου  $B/\lambda < 1$ .

Από τα Σχήματα 5.12 έως 5.15 παρατηρούμε ότι δεν υπάρχει σαφής και συστηματική επίδραση του αδιαστατοποιημένου εύρους του λόφου ( $B/\lambda$ ) στις κανονικοποιημένες ως προς το μήκος κύματος  $\lambda$  αποστάσεις από το ελεύθερο πεδίο ( $D_h$ ,  $D_v$ ) για τις δύο συνιστώσες της σεισμικής επιτάχυνσης. Παρόλα αυτά ως γενικές παρατηρήσεις από τα διαγράμματα προκύπτουν τα εξής:

- Εκθετική αύξηση της κανονικοποιημένης απόστασης μέχρι το ελεύθερο πεδίο για την οριζόντια σεισμική ( $D_h/\lambda$ ) και την κατακόρυφη παρασιτική επιτάχυνση ( $D_v/\lambda$ ), στην περιοχή πίσω από τη στέψη του λόφου, με άνω όριο της τιμής των  $D_h$  και  $D_v$  να είναι το ημι-πλάτος της κορυφής του λόφου ( $B/2$ ).
- Μείωση της κανονικοποιημένης απόστασης μέχρι το ελεύθερο πεδίο για την οριζόντια σεισμική ( $D_h/\lambda$ ) και την κατακόρυφη παρασιτική επιτάχυνση ( $D_v/\lambda$ ), στην περιοχή μπροστά από τον πόδα του λόφου.

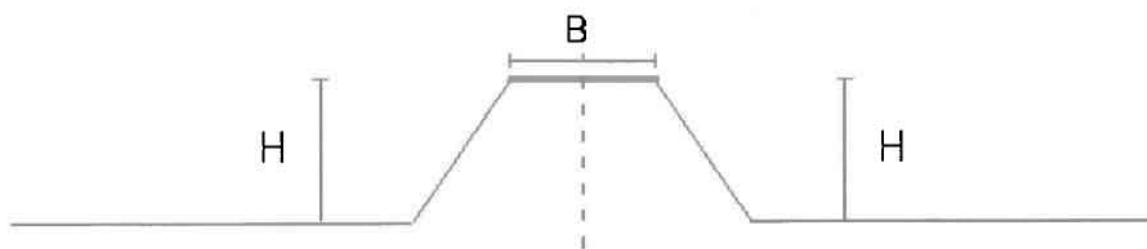
### 6.1. ΓΕΝΙΚΑ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία διερευνήθηκε η σεισμική απόκριση δισδιάστατων (2D) λόφων. Σε κάθε περίπτωση, οι λόφοι που μελετήθηκαν ήταν εδαφικά ομοιόμορφοι, είχαν τραπεζοειδή συμμετρική μορφή και έτσι ήταν άμεσα συγκρίσιμοι με ένα μοναδικό, κάθε φορά, μονοκλινές πρηνές, η σεισμική απόκριση του οποίου έχει μελετηθεί παραμετρικά στη βιβλιογραφία (Bouckonas & Papadimitriou 2005, 2006).

### 6.2. Σεισμική απόκριση λόφων

Έγιναν συνολικά 72 αναλύσεις σεισμικής απόκρισης ομοιομορφων λόφων με αδιάστατα ύψη  $H/\lambda = 0.2$  και  $0.45$ , κλίσεις πρηνών  $i = 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ , και πλάτη στέψης  $B=0.1H, H, 5H, 20H$ . Κάθε μία από τις έξι παραπάνω περιπτώσεις τοπογραφίας λόφου υποβλήθηκε σε τρεις (3) διαφορετικές μορφές χρονοϊστορίες διέγερσης (που έχουν όλες το ίδιο δεσπόζον μήκος κύματος  $\lambda$ ) και οι οποίες είναι: α) μια αρμονική (Τιμοθέου 2008), β) η πραγματική καταγραφή του σεισμού Αιγίου (1995) και γ) η πραγματική καταγραφή του σεισμού Κοζάνης (1995), με τις δύο τελευταίες να είναι κατάλληλα διαμορφωμένες στο εκάστοτε επιθυμητό μήκος κύματος  $\lambda$ . Η απόσβεση του εδάφους ήταν ίση με  $\xi_{min} = 5\%$  στη δεσπόζουσα περίοδο της διέγερσης (Rayleigh Damping).

#### A. Περιοχή στη στέψη του λόφου

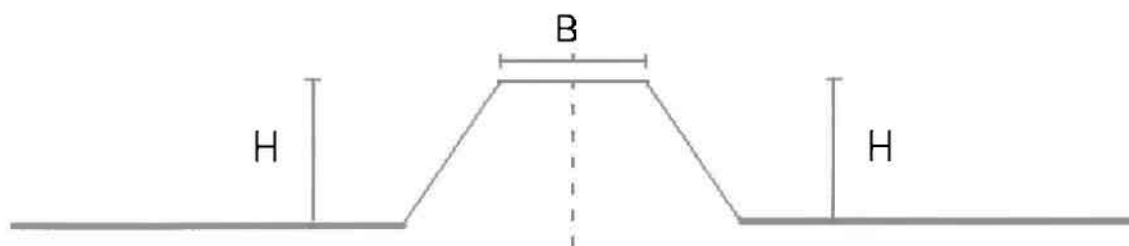


1. Η μέγιστη τοπογραφική επιδείνωση της μέγιστης οριζόντιας επιτάχυνσης  $A_{hc}$  παρουσιάζει σημαντικά αυξημένες τιμές σε σχέση με εκείνες του αντίστοιχου μονοκλινούς πρηνούς, ειδικά για μικρού εύρους στέψης λόφους ( $B/\lambda < 0.1$ ), ενώ η μέγιστη τοπογραφική επιδείνωση της μέγιστης παρασιτικής κατακόρυφης επιτάχυνσης για  $B/\lambda < 0.1$  (δηλαδή για

λόφους με πλάτος στέψης πολύ μικρό), παρουσιάζει σημαντικά μειωμένες τιμές σε σχέση με αυτές του αντίστοιχου πρσανούς. Από εκεί και πέρα, για  $0.1 < B/\lambda < 4$  έχουμε σημαντικές τιμές ενίσχυσης  $A_{vc}$  και μικρές τιμές ενίσχυσης  $A_{hc}$ , οι οποίες μειώνονται με την αύξηση του λόγου  $B/\lambda$ . Για τιμές αδιάστατου πλάτους  $B/\lambda=20$ , η σεισμική απόκριση οιουδήποτε (απ' τους μελετηθέντες) λόφους γίνεται πρακτικώς ταυτόσημη με εκείνη του αντίστοιχου μονοκλινούς πρσανούς.

2. Η απόσταση έως το ελεύθερο πεδίο πίσω από τη στέψη (οριζόμενο σε απόσταση όπου η απόκριση παρουσιάζει έως 10% απόκλιση από τις 1Δ συνθήκες, με ακρίβεια μηχανικού) για την οριζόντια  $D_{hc}$  και την κατακόρυφη παρασιτική επιτάχυνση  $D_{vc}$  κανονικοποιείται ευχερώς με το δεσπόζον μήκος κύματος  $\lambda$ , και παρουσιάζει εκθετική αύξηση με το αδιάστατο πλάτος λόφου  $B/\lambda$ , παρουσιάζοντας μέγιστη πιθανή τιμή ίση με  $B/2$ .

#### B. Περιοχή μπροστά από τον πόδα του λόφου



1. Η μέγιστη τοπογραφική επιδείνωση της μέγιστης οριζόντιας επιτάχυνσης  $A_{ht}$  παίρνει τιμές παρόμοιες με εκείνες στον πόδα μονοκλινούς πρσανούς για όλο το εύρος τιμών  $B/\lambda$ . Αντιθέτως, η μέγιστη τοπογραφική επιδείνωση της μέγιστης παρασιτικής κατακόρυφης επιτάχυνσης  $A_{vt}$  είναι εμφανώς αυξημένη συγκρινόμενη με εκείνη στη βάση του αντίστοιχου μονοκλινούς πρσανούς.
2. Η απόσταση έως το ελεύθερο πεδίο μπροστά από τον πόδα για την οριζόντια  $D_{ht}$  και την κατακόρυφη παρασιτική επιτάχυνση  $D_{vt}$  κανονικοποιείται ευχερώς με το δεσπόζον μήκος κύματος  $\lambda$  και παρουσιάζει μείωση με το αδιάστατο πλάτος λόφου  $B/\lambda$ .

### 6.3. Περιορισμοί – Μελλοντική Έρευνα

Τα συμπεράσματα που συνοψίζονται ανωτέρω και τα προτεινόμενα διαγράμματα εκτίμησης των συντελεστών τοπογραφικής επιδείνωσης A και D στηρίζονται σε 72 ιξωδο-ελαστικές αναλύσεις σεισμικής απόκρισης ομοιόμορφου εδάφους. Στην παρούσα παράγραφο συνοψίζονται οι περιορισμοί της παρούσας έρευνας και δίνονται κατευθύνσεις για τη μελλοντική έρευνα σε αντίστοιχο αντικείμενο:

#### A. Περιορισμοί

- Οι πραγματοποιηθείσες αναλύσεις αφορούν δισδιάστατους (2-D), συμμετρικούς λόφους, χάριν απλότητας. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, τρισδιάστατες δομές αναμένεται να οδηγούν σε ακόμη μεγαλύτερες ενισχύσεις από τις εδώ εκτιμηθείσες. Επιπλέον, πιθανή έλλειψη συμμετρίας των εν λόγω τοπογραφικών δομών αναμένεται να δημιουργεί επιπλέον πολυπλοκότητα στη σεισμική τους απόκριση, και συνεπώς η αξιοπιστία των ανωτέρω συμπερασμάτων και εξισώσεων σχεδιασμού για μη συμμετρικές τοπογραφικές δομές θα πρέπει να διερευνηθεί ή να αντιμετωπιστεί με εξειδικευμένες ανά περίπτωση αναλύσεις.
- Οι πραγματοποιηθείσες αναλύσεις έγιναν για έδαφος με απόσβεση  $\xi = \xi_{\min} = 5\%$  στη δεσπόζουσα περίοδο της σεισμικής διέγερσης. Η επιλογή αυτής της τιμής απόσβεσης ουσιαστικά αποδίδει τη σεισμική απόκριση εδαφών υπό μικρής έντασης σεισμική διέγερση. Αν η ένταση της σεισμικής διέγερσης ήταν μεγαλύτερη, θα αποδιδόταν με μεγαλύτερη τιμή απόσβεσης, η οποία όμως θα οδηγούσε σε μικρότερες τιμές A και D σε όλες τις τοπογραφικές δομές (λόφοι, πρηνή), και συνεπώς σε μικρότερες διαφοροποιήσεις μεταξύ αυτών. Με άλλα λόγια, η επιλογή  $\xi = 5\%$  πιστεύεται ότι οδηγεί σε συντηρητική εκτίμηση των διαφοροποιήσεων μεταξύ μονοκλινούς πρηνούς και λόφου.
- Οι πραγματοποιηθείσες αναλύσεις έγιναν για ομοιόμορφο έδαφος, χάριν απλότητας. Πιθανή ανομοιομορφία θα επέφερε επιπλέον πολυπλοκότητα στη σεισμική απόκριση, αλλά δεν αναμένεται να επηρεάζε σημαντικά τη σύγκριση σεισμικών αποκρίσεων μονοκλινούς πρηνούς και λόφου.

#### B. Μελλοντική έρευνα

- Πέραν της απάλειψης των ανωτέρω περιορισμών, η μελλοντική έρευνα θα πρέπει να διερευνήσει τη χωρική διαφοροποίηση τόσο για τη μέγιστη επιτάχυνση όσο και για ολόκληρο το ελαστικό φάσμα απόκρισης. Οι εδώ πραγματοποιηθείσες αναλύσεις δίνουν

αυτά τα στοιχεία, δεδομένου ότι πρόκειται για αναλύσεις με «πραγματικές» σεισμικές διεγέρσεις.

- Επιπλέον, θα πρέπει να γίνει διακρίβωση της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων της παρούσας διπλωματικής με τα αποτελέσματα μη-γραμμικών αναλύσεων για τις ίδιες τοπογραφικές (B, H, i), γεωτεχνικές ( $V_s$ ) και σεισμολογικές συνθήκες (διέγερση), χάριν συγκρίσεως.
- Θα πρέπει επίσης να πραγματοποιηθεί σύγκριση των αποτελεσμάτων με τα αντίστοιχα αποτελέσματα λεπτομερών αριθμητικών αναλύσεων ή ακόμα και με τις καταγραφές από ιστορικά περιστατικά για πραγματικές συνθήκες.
- Τέλος, ως επέκταση του αντικειμένου της παρούσας διπλωματικής θα πρέπει να διερευνηθεί μελλοντικά η επίδραση της τοπογραφίας για τρισδιάστατους (3-Δ) λόφους και μη-ομοιόμορφο έδαφος.



---

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7ο: Βιβλιογραφία

---

1. Μπουκοβάλας Γ., Παπαδημητρίου Α., Βασδέκης Σ., Βουρβαχάκης Θ., Δρανδάκης Ε., Σοφianού Ι. (2006). "Προσεγγιστικές σχέσεις επίδρασης τοπογραφίας στη σεισμική εδαφική κίνηση", Πρακτικά, 5ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής και Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής, Ξάνθη, Μάϊος.
2. 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, Vol.87, No. 3, pp.701-709.
3. Ashford S., Sitar N. (1997). "Analysis of topographic amplification of inclined shear waves in a steep coastal bluff", Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.87, No. 3, pp.692-700.
4. Bard P.Y., Tucker B.E. (1985). "Underground and ridge site effects: A comparison of observation and theory", Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.75, No 4, pp. 905-922.
5. Bouchon M., Barker J.S. (1996). "Seismic response of a Hill: The Example of Tarzana, California", Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.86, No 1A, pp. 66-72.
6. Bouckovalas G. D., Papadimitriou A. G. (2005), "Numerical Evaluation of Slope Topography Effects on Seismic Ground Motion", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 25(7-10): 547 - 555
7. Bouckovalas G. D., Papadimitriou A. G. (2006), "Aggravation of seismic ground motion due to slope topography", Proceedings, 1st European Conference on Earthquake Engineering and Seismology, Geneva, 3 - 8 September, (paper no. 1171)
8. Chuhan Z., Chongbin Z. (1988). "Effects of canyon topography and geological conditions on strong ground motion", Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 16, pp. 81-97
9. Durand S., Gaffet S., Virieux J. (1999). "Seismic diffracted waves from topography using 3-D discrete wavenumber-boundary integral equation simulation", Geophysics, Vol.64, No 2, pp. 572-578
10. Griffiths D.W., Bollinger G.A. (1979). "The effect of Appalachian mountain topography on seismic waves", Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.69, No. 4, pp.1081-1105.
11. Ohtsuki A., Harumi K. (1983). "Effect of topography and subsurface inhomogeneities on seismic SV waves", Earthquake Engineering & Structural Dynamics, Vol.11, pp. 441-462

12. Pedersen H., Le Brun, Hatzfeld D., Campillo M., Bard P.Y. (1994). "Ground-motion amplitude across ridges", Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.84, No 6, pp. 1786-1800.
13. Sanchez-Sesma F.J. (1983). "Diffraction of elastic waves by three-dimensional surface irregularities", Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.73, No 6, pp.1621-1636.
14. Sanchez-Sesma F.J. (1985). "Diffraction of elastic SH waves by wedges", Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.75, No 5, pp. 1435-1446
15. Sanchez-Sesma F.J. (1990). "Elementary solutions for response of a wedge-shaped medium to incident SH and SV waves", Short notes-Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.80, No 3, pp. 737-742
16. Sanchez-Sesma F.J., Bravo M.A., Herrera I. (1985). "Surface motion of topographical irregularities for incident P, SV and Rayleigh waves", Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.75, No 1, pp. 263-269.
17. Sánchez-Sesma F.J., Campillo M. (1991). "Diffraction of P, SV and Rayleigh waves by topographic features: A boundary integral formulation", Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.81, No 6, pp. 2234-2253.
18. Sills L.B. (1978). "Scattering of horizontally-polarized shear waves by surface irregularities", Geophys. J. R. astr. Soc., Vol.54, pp. 319-348.
19. Trifunac M. D. (1971). "Surface motion of a semi-cylindrical alluvial valley for incident plane SH waves", Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 61, pp. 1755-1770.
20. Trifunac M. D. (1973). "Scattering of plane SH wave by semi-cylindrical canyon", International Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 1, pp. 257-281.
21. Wong H.L. (1982). "Effect of surface topography on the diffraction of P, SV and Rayleigh waves", Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.72, No 4, pp. 1167-1183.
22. Wong H.L., Jennigs P. C. (1975). "Effect of canyon topographies on strong ground motion", Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 65, pp. 1239-1257.
23. Wong H.L., Trifunac M. D. (1974a). "Scattering of plane SH wave by semi-elliptical canyon", International Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 3, pp. 157-169.
24. Wong H.L., Trifunac M. D. (1974b). "Surface motion of a semi-elliptical alluvial valley for incident plane SH waves", Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 64, pp. 1389-1408.
25. Zhao C., Valliapan S. (1993). "Incident P and SV wave scattering effects under different canyon topographic and geological conditions", International Journal for Numerical and