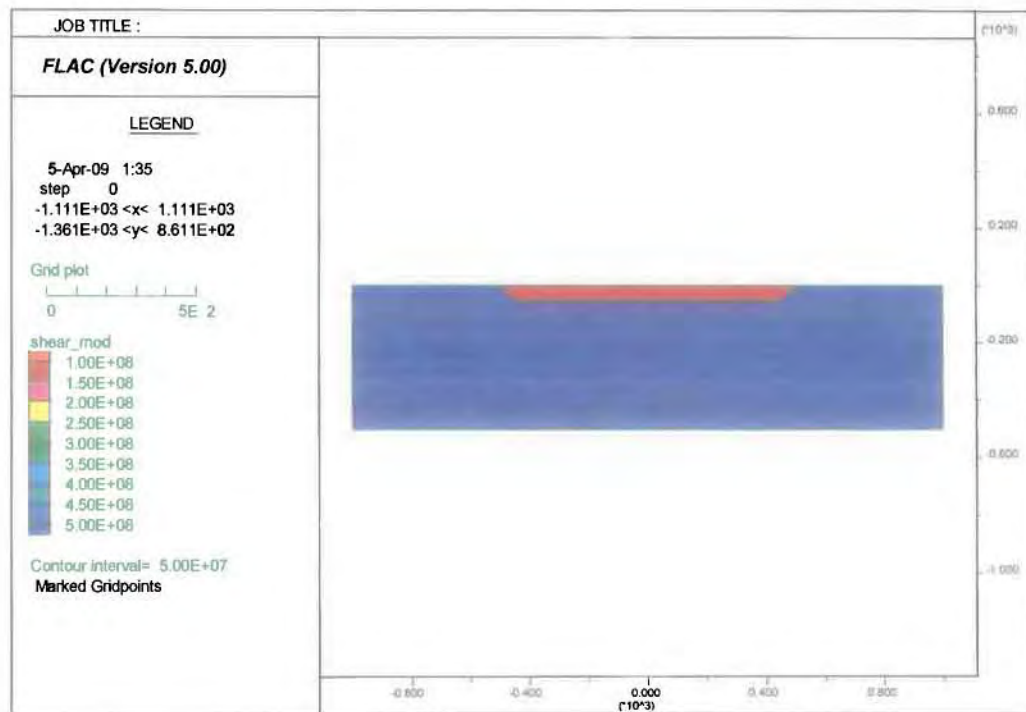


**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ  
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**



**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**‘ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑΣ ΥΠΟΒΑΘΡΟΥ ΣΤΗ ΣΕΙΣΜΙΚΗ  
ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΗ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ’**



**TITLE  
‘EFFECT OF BEDROCK MORPHOLOGY ON THE PEAK  
SEISMIC ACCELERATION AT THE GROUND SURFACE’**

**ΦΟΙΤΗΤΗΣ: ΓΡΙΝΤΑΚΗΣ ΕΥΣΤΡΑΤΙΟΣ  
ΥΠ. ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΠΑΠΑΔΗΜΗΤΡΙΟΥ ΑΧΙΛΛΕΑΣ**

**ΒΟΛΟΣ 2009**

στους γονείς μου Δημήτρη και Μαρία  
και την αδερφή μου Ευαγγελία,

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ .....	- 3 -
ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....	- 4 -
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1ο:</b> Εισαγωγή .....	- 6 -
1.1. Αντικείμενο .....	- 6 -
1.2. Διάρθρωση της διπλωματικής .....	- 6 -
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2ο:</b> Βιβλιογραφική Έρευνα .....	- 8 -
2.1. Γενικά .....	- 8 -
2.2. Διερεύνηση σημαντικών παραμετρών σε 2Δ λεκανές .....	- 9 -
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3ο:</b> Μεθοδολογία Αριθμητικών Αναλύσεων .....	- 25 -
3.1. Περιγραφή Μεθοδολογίας .....	- 25 -
3.2. Βαθμονόμηση Μεθοδολογίας .....	- 28 -
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4ο:</b> Επίδραση Μορφολογίας υποβάθρου στη σεισμική κίνηση .....	- 34 -
4.1. Γενικά .....	- 34 -
4.2. επίδραση γεωμετρικών και μηχανικών χαρακτηριστικών λεκανής .....	- 37 -
4.3. Επίδραση σημαντικών παραμέτρων στην γεωμορφική ενίσχυση .....	- 43 -
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5ο:</b> Στατιστική επεξεργασία αριθμητικών αποτελεσμάτων .....	- 62 -
5.1. Γενικά .....	- 62 -
5.2. Σχέση εκτίμησης της μέγιστης ενίσχυσης της οριζόντιας επιτάχυνσης .....	- 77 -
5.3. Σχέση εκτίμησης της μέγιστης ενίσχυσης της παρασιτικής επιτάχυνσης .....	- 77 -
5.4. Γεωγραφική διαφοροποίηση γεωμορφικών ενισχύσεων .....	- 74 -
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6ο:</b> Συμπεράσματα – Προτάσεις .....	- 77 -
6.1. Γενικά .....	- 77 -
6.2. Συμπεράσματα .....	- 77 -
6.3. Περιορισμοί – Μελλοντική Έρευνα .....	- 77 -
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7ο:</b> Βιβλιογραφία .....	- 80 -

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

---

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

Πρωτίστως, ευχαριστώ θερμά τον Επιβλέποντα Καθηγητή κ. Παπαδημητρίου Αχιλλέα, για την άριστη καθοδήγησή του, τις πολύτιμες υποδείξεις του και την καταπληκτική συνεργασία που είχαμε, κατά τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας. Η συνεχής υποστήριξή του, η διαρκής διαθεσιμότητά του και ο επιστημονικός του ζήλος, ενίσχυσαν τις προσπάθειές μου για την περάτωση αυτής της έρευνας.

Επίσης ευχαριστώ τους φίλους μου, που ενίσχυσαν την προσπάθειά μου αυτή, με την υποστήριξή που μου προσέφεραν, και τη συμπαράσταση που μου έδωσαν.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω από καρδιάς την οικογένειά μου. Τους γονείς μου, για την ηθική και υλική υποστήριξη, την αστείρευτη συμπαράσταση και τη δυνατότητα που μου έδωσαν, ώστε να αφοσιωθώ απερίσπαστα στην περάτωση αυτής της διπλωματικής εργασίας, καθώς επίσης και την αδερφή μου για τη σημαντική βοήθειά της και την ψυχολογική υποστήριξη που μου έδειξε.



## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η διεθνής βιβλιογραφία έχει αρκετές αναφορές στην επίδραση της μορφολογίας του υποβάθρου μιας αλλουβιακής λεκάνης στην σεισμική επιτάχυνση στην επιφάνεια του εδάφους. Στη συντριπτική τους πλειοψηφία, οι βιβλιογραφικές έρευνες αφορούν την παρουσίαση και ανάλυση ιστορικών περιστατικών, χωρίς να γίνεται προσπάθεια γενίκευσης των συμπερασμάτων τους. Με στόχο την εξαγωγή συμπερασμάτων γενικής εφαρμογής, στην παρούσα εργασία αναλύεται η περίπτωση μιας ιδεατής 2Δ εδαφικής λεκάνης τραπεζοειδούς γεωμετρίας και οριζόντιας τοπογραφίας που υποβάλλεται σε κατακορύφως προσπίπτοντα κύματα SV. Ο στόχος της ανάλυσης είναι η διερεύνηση της επίδρασης της γεωμετρίας της λεκάνης, της δυσμησίας του εδάφους και του υποβάθρου, καθώς και των χαρακτηριστικών της σεισμικής διέγερσης στη σεισμική κίνηση της επιφάνειας του εδάφους. Η διερεύνηση πραγματοποιήθηκε με ιξωδο-ελαστικές αριθμητικές αναλύσεις χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών, όπου το έδαφος και το υπόβαθρο θεωρήθηκαν ομοιόμορφα και στη σεισμική διέγερση δόθηκε η μορφή παλμού Ricker με διαφορετικό μήκος κύματος κάθε φορά. Η έμφαση δόθηκε στην ενίσχυση της μέγιστης οριζόντιας επιτάχυνσης και στη μέγιστη παρασιτική κατακόρυφη επιτάχυνση στο έδαφος της κοιλάδας, εν συγκρίσει με την περίπτωση που η κοιλάδα είναι απείρου εύρους (1Δ συνθήκες).

Ως πρώτος στόχος της εργασίας τέθηκε η διακρίβωση των σημαντικών παραμέτρων που επηρεάζουν την ενίσχυση της σεισμικής κίνησης σε μια αλλουβιακή κοιλάδα. Έτσι, πραγματοποιήθηκαν παραμετρικές αριθμητικές αναλύσεις με διαφορετικές τιμές στις παρακάτω παραμέτρους του φυσικού προβλήματος: α) κλίση  $i$  άκρων λεκάνης γ) πλάτος  $B$  λεκάνης στην επιφάνεια του εδάφους, γ) πάχος  $H$  λεκάνης στο κέντρο της, δ) δεσπόζουσα περίοδος  $T_e$  της σεισμικής διέγερσης, ε) ταχύτητα διάδοσης  $V_b$  στο υπόβαθρο, στ) ταχύτητα διάδοσης  $V_s$  διατμητικών κυμάτων στο έδαφος και ζ) λόγος κρίσιμης απόσβεσης  $\xi$ . Οι αναλύσεις υπέδειξαν ότι τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της κοιλάδας  $H$  και  $B$  είναι οι πλέον σημαντικές παράμετροι του προβλήματος, εν συγκρίσει πάντα με το επιβαλλόμενο μήκος κύματος της σεισμικής διέγερσης  $\lambda = V_s T_e$ , καθώς δύνανται να επηρεάσουν και ποιοτικά τη σεισμική απόκριση μιας κοιλάδας. Αντιθέτως, η κλίση  $i$ , ο λόγος απόσβεσης  $\xi$  και ο λόγος εμπέδησης (που είναι ανάλογος του  $V_s/V_b$ ) επηρεάζουν μόνο ποσοτικά τη σεισμική απόκριση.

Στη συνέχεια γίνεται στατιστική επεξεργασία των αριθμητικών αποτελεσμάτων με σκοπό την κατάστρωση προσεγγιστικών σχέσεων εκτίμησης της μέγιστης ενίσχυσης της επιτάχυνσης στην οριζόντια και κατακόρυφη διεύθυνση, λόγω της ύπαρξης της κοιλάδας. Οι εν λόγω σχέσεις δίνουν εκτιμήσεις των μεγεθών αυτών, ως συναρτήσεις των διακριβωθέντων σημαντικών παραμέτρων του προβλήματος. Τέλος, γίνεται μια μελέτη της γεωγραφικής διαφοροποίησης της ενίσχυσης κατά πλάτος της κοιλάδας, με στόχο την πρόταση μιας συντηρητικής περιβάλλουσας σχεδιασμού που θα λαμβάνει υπόψη τις θέσεις όπου η επίδραση της μορφολογίας υποβάθρου

αναμένεται μέγιστη (ενίσχυση) και τις θέσεις όπου η ίδια επίδραση αναμένεται ελάχιστη (απομείωση), εν συγκρίσει με την περίπτωση που η κοιλάδα είναι απείρου εύρους (1Δ συνθήκες).

---

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1ο: Εισαγωγή

---

### 1.1. ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη της επίδρασης της μορφολογίας του υποβάθρου στην επίδραση του εδάφους στη σεισμική κίνηση. Πιο συγκεκριμένα, γίνεται προσπάθεια εντοπισμού των σημαντικότερων παραμέτρων του προβλήματος της ενίσχυσης του σεισμού στην επιφάνεια ιδεατής 2Δ εδαφικής λεκάνης τραπεζοειδούς διατομής και οριζόντιας τοπογραφίας. Μετά τον εντοπισμό και την αδιαστατοποίηση των σημαντικών παραμέτρων του προβλήματος, γίνεται μια προσπάθεια κατάστρωσης προσεγγιστικών σχέσεων εκτίμησης των μεγίστων σεισμικών ενισχύσεων και τη γεωγραφικής διαφοροποίησης της σεισμικής ενίσχυσης κατά πλάτος της κοιλάδας. Με τον τρόπο αυτό πιστεύεται ότι τα όποια συμπεράσματα προκύψουν από την παρούσα εργασία θα μπορούν να τύχουν γενικότερης εφαρμογής για την προσεγγιστική εκτίμηση της επίδρασης της μορφολογίας υποβάθρου και σε πραγματικές περιπτώσεις λεκανών που δεν εμφανίζουν τις απλουστεύσεις σε γεωμετρία, γεωτεχνικές συνθήκες και σεισμική διέγερση που υιοθετήθηκαν, χάριν απλότητας, στην εργασία αυτή.

### 1.2. ΔΙΑΡΘΡΩΣΗ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ

Η εργασία αυτή αποτελείται από 6 κεφάλαια, με το παρόν πρώτο να είναι εισαγωγικό και να παρουσιάζει το αντικείμενο της και την διάρθρωση της. Στο δεύτερο κεφάλαιο παρατίθεται η σχετική με την εργασία βιβλιογραφική έρευνα που έγινε σε διαδικτυακές βάσεις δεδομένων και ανάλογες βιβλιοθήκες, ώστε να αποτυπωθεί η τυπική σεισμική απόκριση κοιλάδων με βάση καταγραφές ή αναλύσεις, να εντοπισθούν οι σημαντικές παράμετροι του προβλήματος από συγκριτική ανάλυση ιστορικών περιστατικών, αλλά και για να διατυπωθούν οι βασικές παραδοχές πάνω στις οποίες βασίστηκαν οι αναλύσεις της παρούσας εργασίας.

Στη συνέχεια, το τρίτο κεφάλαιο περιέχει αρχικά τις απαραίτητες πληροφορίες για το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων το οποίο χρησιμοποιήθηκε στις αναλύσεις (FLAC), όπως τις μαθηματικές αρχές στις οποίες στηρίζεται και τις υπολογιστικές του ικανότητες. Μετά αναλύεται πλήρως η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε στις αναλύσεις, δηλαδή τα χαρακτηριστικά και η μορφή ενός τυπικού καννάβου, ο τρόπος εισαγωγής της σεισμικής διέγερσης στη βάση του, οι

συνοριακές συνθήκες στα άκρα, η μορφή της επιλεχθείσας σεισμικής διέγερσης, αλλά και του τρόπου εκτίμησης των αποτελεσμάτων σε όρους εδαφικής ενίσχυσης λόγω της ύπαρξης μιας πεπερασμένου εύρους κοιλάδας.

Το τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζει τα στοιχεία και τα αποτελέσματα του συνόλου των αναλύσεων που έγιναν για την παρούσα εργασία. Με κατάλληλη επεξεργασία των αποτελεσμάτων αυτών γίνεται ο εντοπισμός των σημαντικότερων παραμέτρων του προβλήματος και μια προσπάθεια αδιαστατοποίησης αυτών, χάριν γενίκευσης των συμπερασμάτων της εργασίας.

Στο πέμπτο κεφάλαιο γίνεται η στατιστική επεξεργασία των αριθμητικών αποτελεσμάτων με στόχο την κατάστρωση προσεγγιστικών σχέσεων εκτίμησης της μέγιστης ενίσχυσης της επιτάχυνσης στην οριζόντια και κατακόρυφη διεύθυνση, λόγω της ύπαρξης της κοιλάδας, ως συναρτήσεις των διακριβωθέντων σημαντικών παραμέτρων του προβλήματος από το τέταρτο κεφάλαιο. Τέλος, γίνεται μια μελέτη της γεωγραφικής διαφοροποίησης της ενίσχυσης κατά πλάτος της κοιλάδας, με στόχο την πρόταση μιας συντηρητικής περιβάλλουσας σχεδιασμού που θα λαμβάνει υπόψη τις θέσεις όπου η επίδραση της μορφολογίας υποβάθρου αναμένεται μέγιστη (ενίσχυση) και τις θέσεις όπου η ίδια επίδραση αναμένεται ελάχιστη (απομείωση), εν συγκρίσει με την περίπτωση που η κοιλάδα είναι απείρου εύρους (1Δ συνθήκες).

Τέλος στο έκτο κεφάλαιο αναφέρονται τα τελευταία συμπεράσματα της εργασίας, οι περιορισμοί στη χρήση των αποτελεσμάτων της εργασίας και με ποίο τρόπο μπορούν αυτά τα συμπεράσματα και αποτελέσματα να βοηθήσουν σε περαιτέρω διερεύνηση του συγκεκριμένου προβλήματος.

---

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2ο: Βιβλιογραφική Έρευνα

---

### 2.1. ΓΕΝΙΚΑ

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται αναφορά κυρίως σε μελέτες με ιστορικά και πειραματικά δεδομένα που έχουν γίνει για πραγματικές εδαφικές λεκάνες ανα τον κόσμο και αφορούν διερεύνηση των (γεωμορφικών) ενισχύσεων από πραγματικές σεισμικές δονήσεις ή τυπικές απλές διεγέρσεις, όπως ο παλμός Ricker που χρησιμοποιείται και στην παρούσα εργασία. Οι λεκάνες που έχουν μελετηθεί και αναφέρονται στη παρούσα εργασία βρίσκονται στις περιοχές του Caracas στη Βενεζουέλα, της Nice στη Γαλλία, του Gyeongju στη Κορέα, της Βόλβης στην Ελλάδα και της Ohba-Ohasi στην Ιαπωνία.

Όπως προκύπτει από τις έρευνες που παρατίθενται στη συνέχεια του παρόντος κεφαλαίου, ο παράγοντας που επηρεάζει τις γεωμορφικές ενισχύσεις και κυρίως ερευνάται στη βιβλιογραφία είναι αυτός της δεσπτόζουσας συχνότητας της διέγερσης, κάτι που αφορά και την παρούσα εργασία, ενώ σε κάποιες από τις περιπτώσεις ερευνάται η επίδραση της απόσβεσης και της δυστημσίας του εδάφους, καθώς και της γωνίας πρόσπτωσης του κύματος στη λεκάνη.

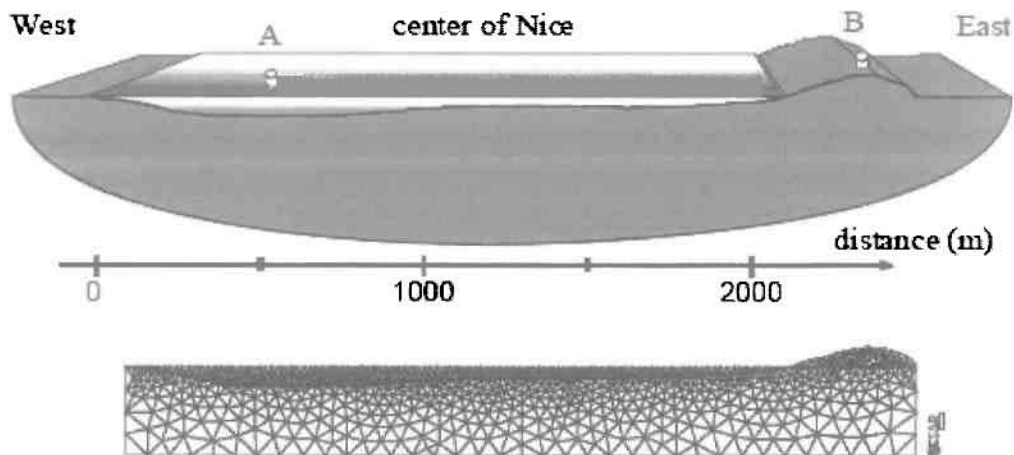
Επισημαίνεται ότι ο ορισμός της γεωμορφικής ενίσχυσης στις διάφορες μελέτες της βιβλιογραφίας δεν είναι πάντα ο ίδιος, και δεν είναι αντίστοιχος με εκείνον που υιοθετείται στην παρούσα εργασία. Πιο συγκεκριμένα, σκοπεύοντας μακροπρόθεσμα στην μελέτη της γεωμορφικής επίδρασης ως μιας κανονιστικής συνάρτησης διόρθωσης της σεισμικής κίνησης υπό 1Δ συνθήκες (δηλαδή των φασμάτων σχεδιασμού υπό 1Δ συνθήκες), στην παρούσα εργασία η γεωμορφική ενίσχυση ορίζεται ως ο λόγος της μέγιστης επιτάχυνσης σε κάποιο σημείο της 2Δ λεκάνης προς την επιτάχυνση του ίδιου σημείου της λεκάνης σε 1Δ συνθήκες διάδοσης κυμάτων. Αντιθέτως, στη βιβλιογραφία ως ενίσχυση συνήθως ορίζεται ο λόγος της μέγιστης επιτάχυνσης σε κάποιο σημείο της 2Δ λεκάνης προς την μέγιστη επιτάχυνση σε κάποιο σταθερό σημείο αναφοράς στο βραχώδες υπόβαθρο, είτε αυτό είναι θαμμένο υπό την εδαφική στρώση (π.χ. Psarropoulos et al) ή αυτό είναι αναδυόμενο (π.χ. Nice, Γαλλία). Ο στόχος της παρούσας παρουσίασης είναι η διακρίβωση των σημαντικών παραμέτρων του φυσικού προβλήματος, ώστε στην υπόλοιπη εργασία να γίνει η αριθμητική διερεύνηση της επίδρασής τους.

## 2.2. ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΣΗΜΑΝΤΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΣΕ 2Δ ΛΕΚΑΝΕΣ

### 2.2.1 Λεκάνη περιοχής Nice, Γαλλία

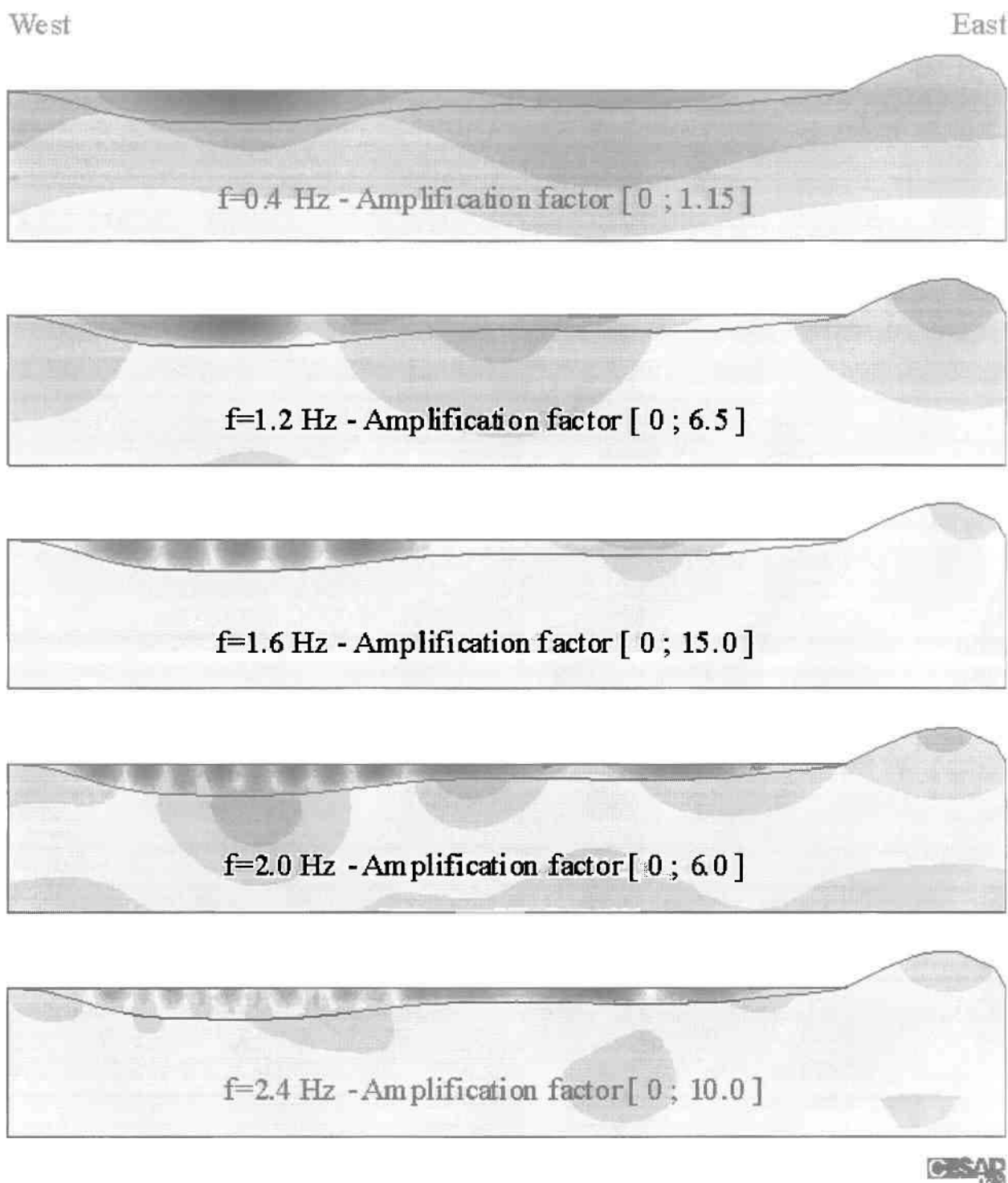
Σύμφωνα με τους Semblat et al (2000), η λεκάνη στη περιοχή της Nice έχει τριγωνικό σχήμα, βάθος περί τα 150μ. και πλάτος περί τα 2000μ. (Σχήμα 2.2.1). Τα χαρακτηριστικά της λεκάνης είναι:

έδαφος (αλλουβιακές αποθέσεις):	$\rho=2000\text{kg/m}^3$	$\mu=180\text{Mpa}$	$V_s=300\text{m/sec}$
βράχος	$\rho=2300\text{kg/m}^3$	$\mu=4500\text{Mpa}$	$V_b=1400\text{m/sec}$



**Σχήμα 2.2.1:** Σκαρίφημα λεκάνης Nice και κάνναβος ανάλυσης

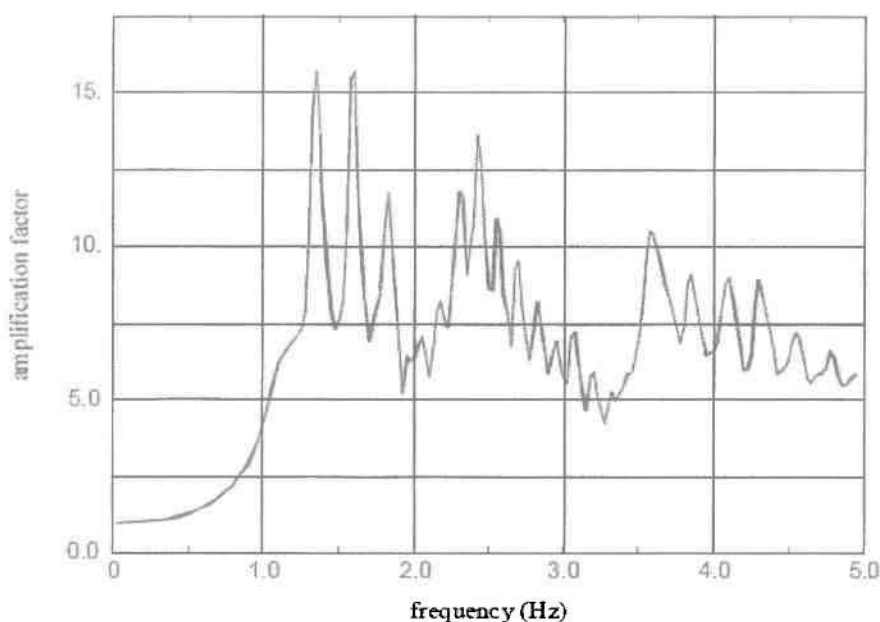
Στο παρακάτω σχήμα (σχήμα 2.2.2) φαίνονται οι ενισχύσεις (από αριθμητικές αναλύσεις) σε τομή της λεκάνης για κατακόρυφη πρόσπτωση SH κύματος σε διάφορες συχνότητες και με μηδενική απόσβεση. Απο το σχήμα φαίνεται ότι οι μεγαλύτερες ενισχύσεις εμφανίζονται στην επιφάνεια της λεκάνης και πιο συγκεκριμένα εκεί όπου η λεκάνη έχει μεγαλύτερο βάθος, ενώ στη περιοχή με μικρότερο βάθος μεγαλύτερες ενισχύσεις εμφανίζονται όσο μεγαλώνουν οι συχνότητες της διέγερσης. Το αποτέλεσμα αυτό υποδηλώνει τη σημαντικότητα του δεσπόζοντος μήκους κύματος  $\lambda$ , αλλά και του πάχους  $H$  της λεκάνης στον καθορισμό της γεωμορφικής επίδρασης.



**Σχήμα 2.2.2:** Υπολογισμός ενισχύσεων για SH κύμα σε διάφορες συχνότητες

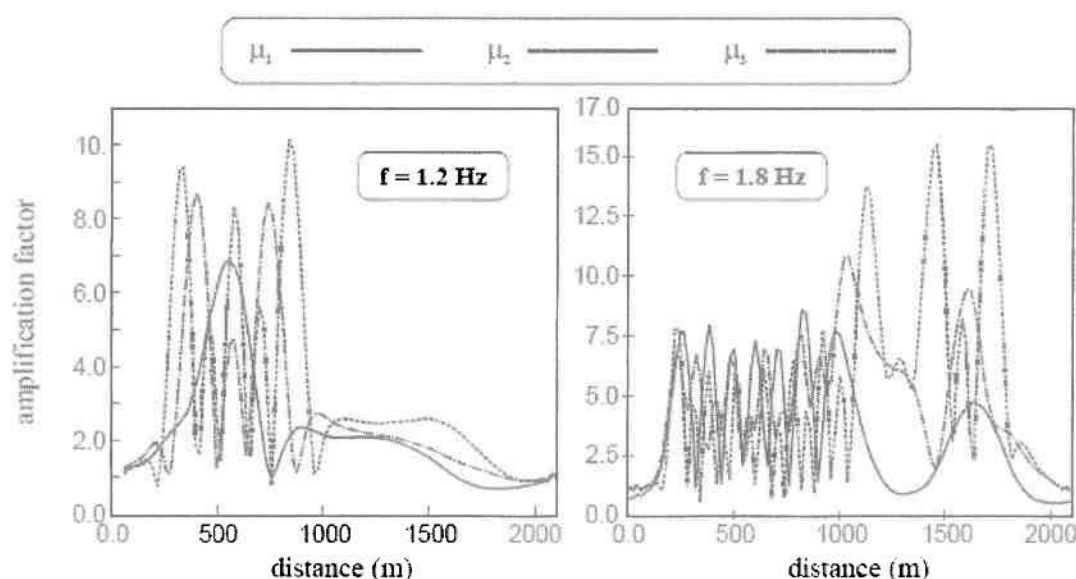
Στη συνέχεια, στο παρακάτω σχήμα (σχήμα 2.2.3) φαίνονται οι μέγιστες τιμές των ενισχύσεων για κατακόρυφη πρόσπτωση SH κύματος διαφόρων συχνοτήτων (έως 5Hz) και με μηδενική απόσβεση, για το σημείο A σε σχέση με το σημείο B όπως αυτά φαίνονται στο σχήμα 2.2.1. Απο το σχήμα φαίνεται ότι οι μέγιστες τιμές των ενισχύσεων εμφανίζονται για τιμές συχνοτήτων από 1,3 έως 1,7Hz.





Σχήμα 2.2.3: Μέγιστες τιμές ενισχύσεων για SH κύμα για συχνότητες έως 5Hz

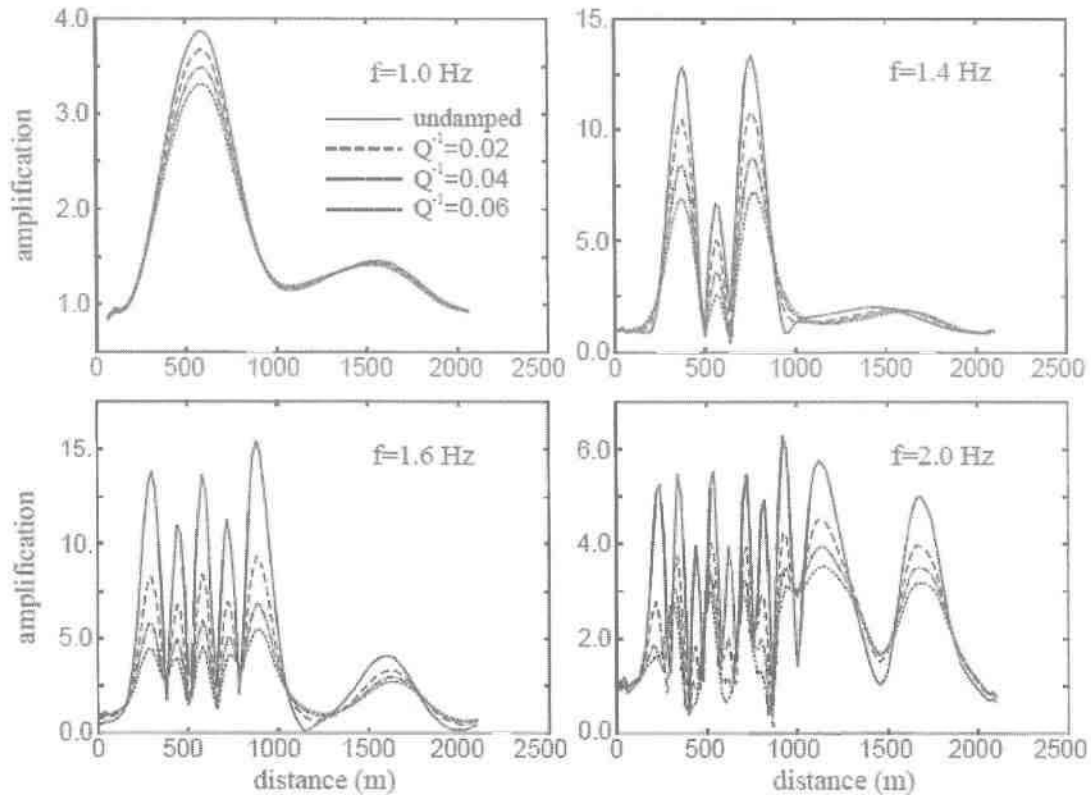
Επιπλέον, από τους ίδιους συγγραφείς, για την λεκάνη της Nice έχει γίνει διερεύνηση της επίδρασης του μέτρου διάτμησης του εδάφους και πάλι για διάφορες δεσπόμενες συχνότητες διέγερσης. Στο σχήμα 2.2.4 φαίνονται οι τιμές των ενισχύσεων στην επιφάνεια του εδάφους για δεσπόμενα συχνότητα  $f=1,2$  και  $1,8\text{Hz}$ , μηδενική απόσβεση και για τιμές του μέτρου διάτμησης ίσες με  $\mu_1=180\text{Mpa}$ ,  $\mu_2=120\text{Mpa}$  και  $\mu_3=90\text{Mpa}$ . Οι μεγαλύτερες ενισχύσεις εμφανίζονται για μικρότερα  $\mu$  και ιδιαίτερα στη ρηχή περιοχή της λεκάνης. Το αποτέλεσμα αυτό υποδεικνύει και πάλι τη σημαντικότητα του δεσπόμενου μήκους κύματος  $\lambda$ , και του πάχους  $H$  της λεκάνης στον καθορισμό της γεωμορφικής ενίσχυσης.



Σχήμα 2.2.4: Ενισχύσεις στην επιφάνεια της λεκάνης για SH κύμα για διάφορες συχνότητες και τιμές  $\mu$

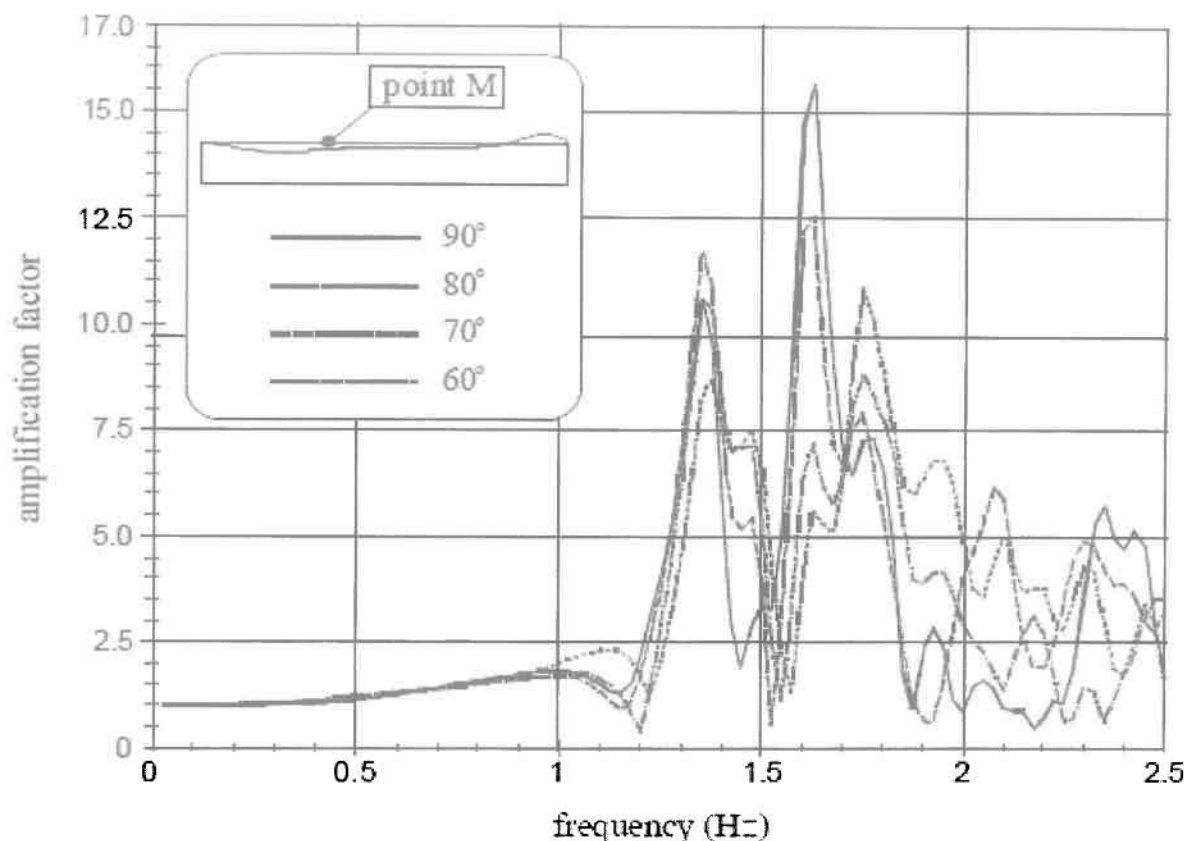


Επιπλέον, διερευνήθηκε η επίδραση του ποσοστού απόσβεσης  $\xi$  στις τιμές των ενισχύσεων, για τιμές της παραμέτρου  $Q^{-1}=0,02$ ,  $0,04$  και  $0,06$ , που αντιστοιχούν σε  $\xi=0,01$ ,  $\xi=0,02$  και  $\xi=0,03$ , αντίστοιχα, και για δεσπόζουσες συχνότητες 1,0 1,4 1,6 και 2,0Hz. Απο το σχήμα 2.2.6 είναι φανερό πως η επίδραση του ποσοστού  $\xi$  είναι αρκετά σημαντική και είναι μεγαλύτερη για μεγάλα πάχη λεκάνης, ενώ στα μικρότερα πάχη η επίδραση του είναι διακριτή μόνο σε μεγάλες συχνότητες. Επίσης είναι λογικό ότι γενικά για μεγαλύτερες τιμές του  $\xi$  οι τιμές των ενισχύσεων είναι σαφώς μικρότερες.



**Σχήμα 2.2.5:** Ενισχύσεις στην επιφάνεια της λεκάνης για SH κύμα για διάφορες συχνότητες και τιμές  $\xi$

Τέλος, στην λεκάνη της Nice διερευνήθηκε και η επίδραση της γωνίας πρόσπτωσης του κύματος σε σταθερο σημείο της επιφάνειας της λεκάνης. Στο σχήμα 2.2.7 φαίνεται η επίδραση για συχνότητες μέχρι 2,5Hz και για γωνίες πρόσπτωσης από  $60^\circ$  έως  $90^\circ$ . Για συχνότητες μέχρι 1,0Hz δεν υπάρχει καμία επίδραση στις τιμές της ενίσχυσης του σταθερού σημείου, αλλά από εκεί και πέρα η επίδραση είναι αρκετά εμφανής. Αυτό φανερώνει ότι για μεγάλα μήκη κύματος  $\lambda$ , δεν είναι τόσο σημαντική παράμετρος η γωνία πρόσπτωσης, όσο είναι για μικρά μήκη κύματος για τα οποία διαφοροποιείται αρκετά η γεωμορφική επίδραση.

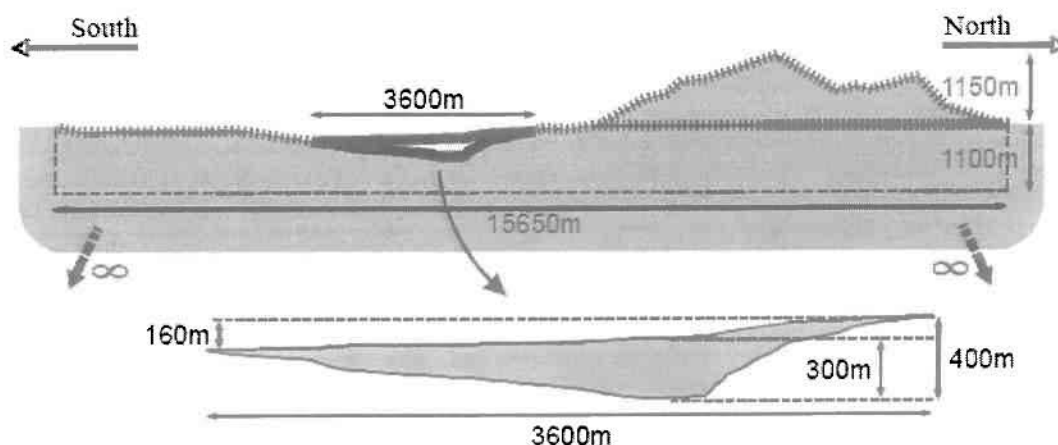


**Σχήμα 2.2.6:** Ενισχύσεις στην επιφάνεια της λεκάνης για SH κύμα για διάφορες συχνότητες και γωνίες πρόσπτωσης του κύματος στο ίδιο σημείο M

### 2.2.2 Λεκάνη περιοχής Caracas, Βενεζουέλα

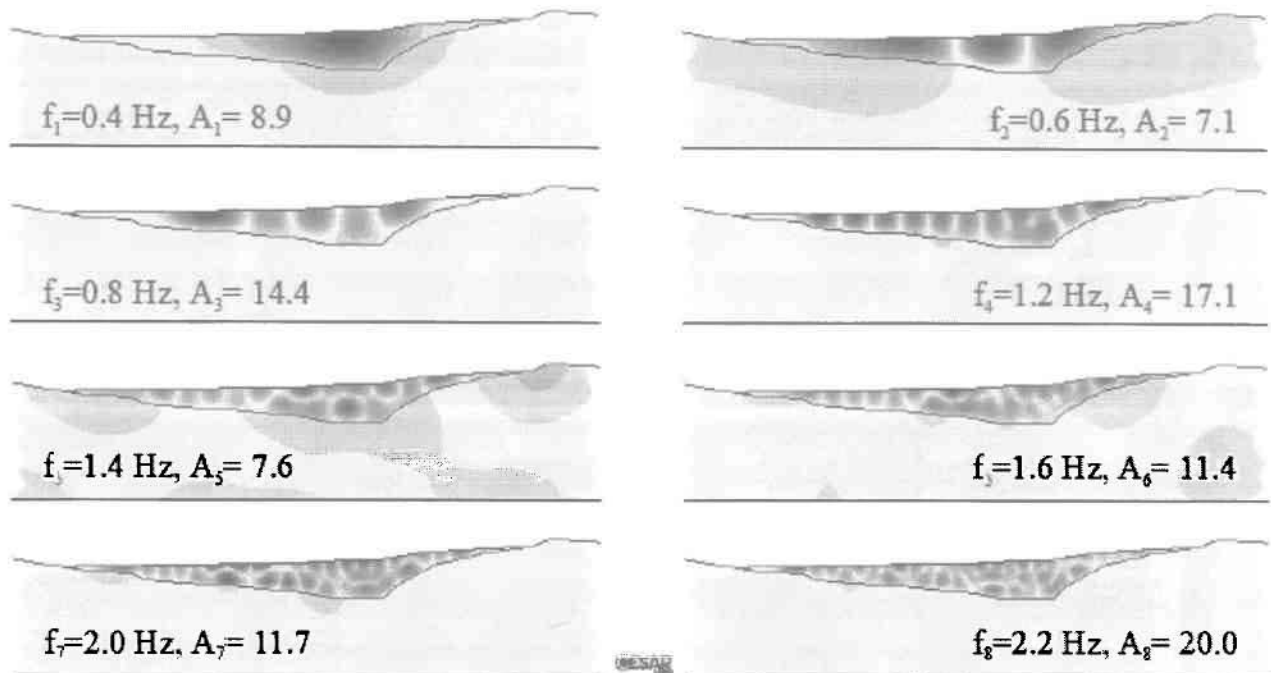
Σύμφωνα με τους Semblat et al (2002), η λεκάνη στη περιοχή του Caracas έχει τριγωνικό σχήμα, βάθος περί τα 400μ. και πλάτος περί τα 3600μ. (Σχήμα 2.2.7). Τα χαρακτηριστικά της λεκάνης είναι:

έδαφος (αλλουβιακές αποθέσεις):  $\rho=2000\text{kg/m}^3$   $\mu=405\text{Mpa}$   $V_s=450\text{m/sec}$   
 βράχος  $\rho=2300\text{kg/m}^3$   $\mu=14375\text{Mpa}$   $V_b=2500\text{m/sec}$



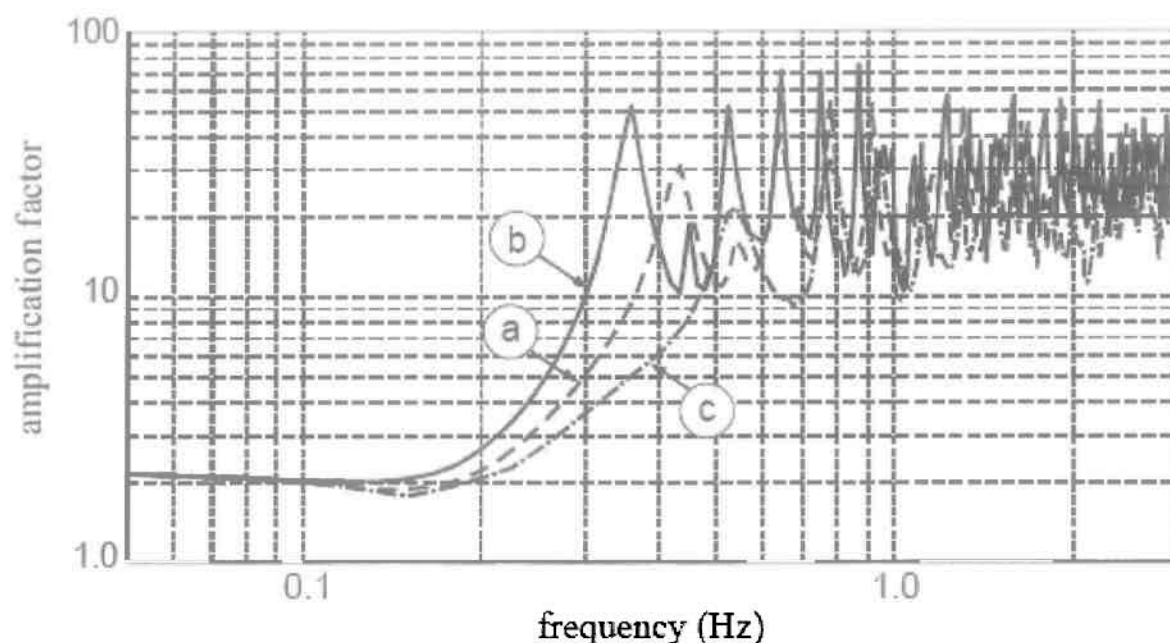
**Σχήμα 2.2.7:** Σκαρίφημα περιοχής λεκάνης Caracas και λεπτομέρεια λεκάνης

Στο παρακάτω σχήμα (σχήμα 2.2.8) φαίνονται οι ενισχύσεις (από αριθμητικές αναλύσεις) σε τομή της λεκάνης για κατακόρυφη διάδοση SH κύματος σε διάφορες συχνότητες και με μηδενική απόσβεση. Απο το σχήμα φαίνεται ότι οι μεγαλύτερες ενισχύσεις εμφανίζονται για συχνότητα 0,80Hz σε σημείο περί τα 2500μ. απο το ανατολικό άκρο της λεκάνης, ενώ αρκετά μεγάλες τιμές ενίσχυσης εμφανίζονται και στις συχνότητες 1,0 με 1,5Hz περί το μέσο της λεκάνης, όπου το πάχος της είναι και σχετικά μεγαλύτερο.



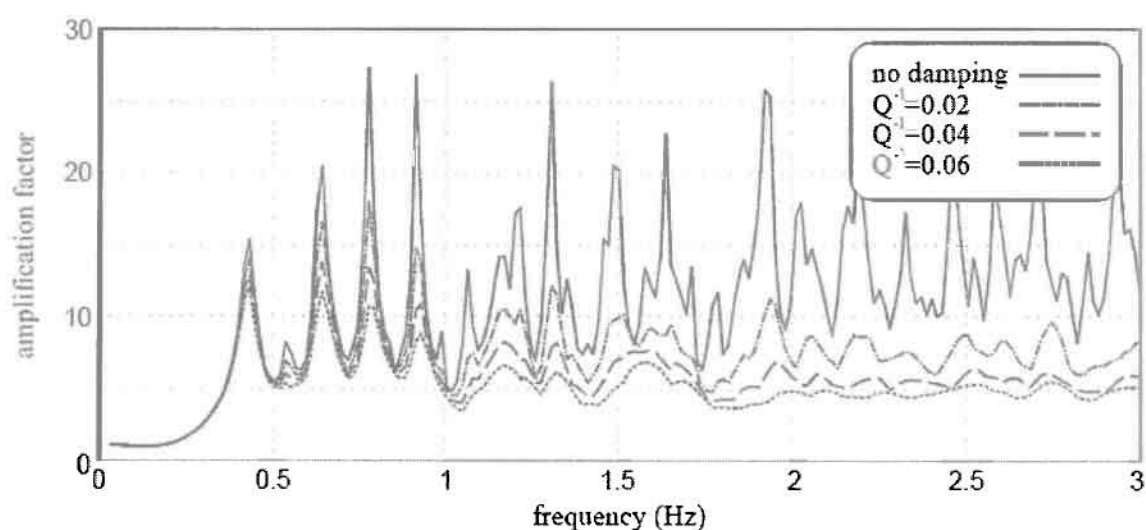
**Σχήμα 2.2.8:** Υπολογισμός ενισχύσεων για SH κύμα σε διάφορες συχνότητες

Επιπλέον, για την λεκάνη του Caracas έχει γίνει διερεύνηση της επίδρασης του μέτρου διάτμησης του εδάφους για διάφορες συχνότητες. Στο σχήμα 2.2.9 εικονίζονται οι μέγιστες τιμές των ενισχύσεων στην επιφάνεια του εδάφους για συχνότητες μέχρι 1,2Hz, μηδενική απόσβεση και για τιμές του μέτρου διάτμησης ίσες με  $\mu_a=405\text{Mpa}$ ,  $\mu_b=270\text{Mpa}$  και  $\mu_c=608\text{Mpa}$ . Για πολύ μικρές συχνότητες δεν υπάρχει εμφανής επίδραση, γιατί ούτως ή άλλως το δεσπόζον μήκος κύματος στο οποίο αντιστοιχούν είναι ιδιαίτερα μεγάλο (σε σχέση πάντα με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της λεκάνης), γεγονός που οδηγεί σε ελαχιστοποίηση της ενίσχυσης. Αντιθέτως, άξια λόγου διαφοροποίηση στις μέγιστες τιμές των ενισχύσεων υπάρχει μόνο στις συχνότητες απο 0,1 έως 0,8Hz, ενώ για μεγαλύτερες τιμές συχνοτήτων η γεωμορφική ενίσχυση είναι συγκρίσιμη.



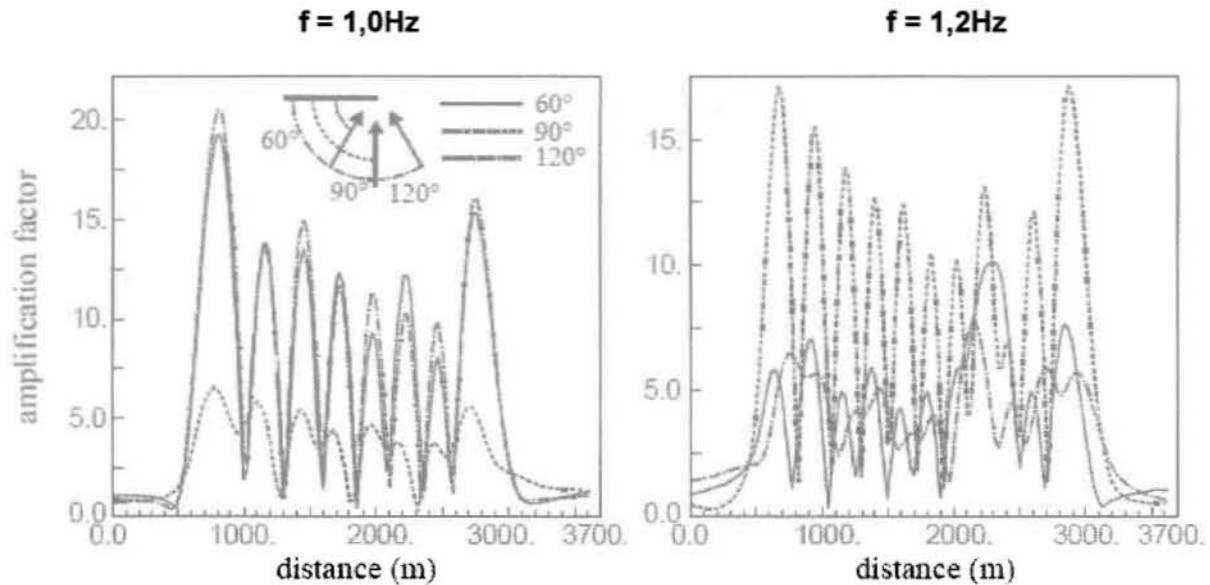
**Σχήμα 2.2.9:** Μέγιστες τιμές ενισχύσεων στην επιφάνεια της λεκάνης για SH κύμα για διάφορες συχνότητες και τιμές  $\mu$

Επιπλέον διερευνήθηκε και η επίδραση του ποσοστού απόσβεσης  $\xi$  στις τιμές των ενισχύσεων, και συγκεκριμένα για τιμές  $Q^{-1}=0,02$ ,  $0,04$  και  $0,06$ , που αντιστοιχούν σε τιμές  $\xi=0,01$ ,  $0,02$  και  $0,03$  και σε συχνότητες έως  $3,0\text{Hz}$ . Απο το σχήμα 2.2.10 είναι φανερό πως η επίδραση του ποσοστού  $\xi$  γίνεται ορατή για συχνότητες μεγαλύτερες των  $0,60\text{Hz}$ , και ειδικώς σε πολύ μεγάλες συχνότητες. Επιπλέον, και όπως αναμενόταν, μεγαλύτερες τιμές του  $\xi$  οδηγούν σε μικρότερες τιμές ενισχύσεων.



**Σχήμα 2.2.10:** Μέγιστες τιμές των ενισχύσεων στη λεκάνη για SH κύμα για διάφορες συχνότητες και τιμές  $\xi$ .

Τέλος, στην λεκάνη του Caracas έχει διερευνηθεί και η επίδραση της γωνίας πρόσπτωσης του κύματος στην επιφάνεια της λεκάνης. Στο σχήμα 2.2.11 φαίνεται η επίδραση για συχνότητες μέχρι 1,0Hz και 1,2Hz για γωνίες πρόσπτωσης από 60° έως 120°. Ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι για συχνότητα 1,0Hz η μεγαλύτερη επίδραση στις τιμές της ενίσχυσης του εμφανίζεται για μη κάθετη πρόσπτωση του κύματος σε αντίθεση με αυτό που συμβαίνει για συχνότητα ίση με 1,2Hz.



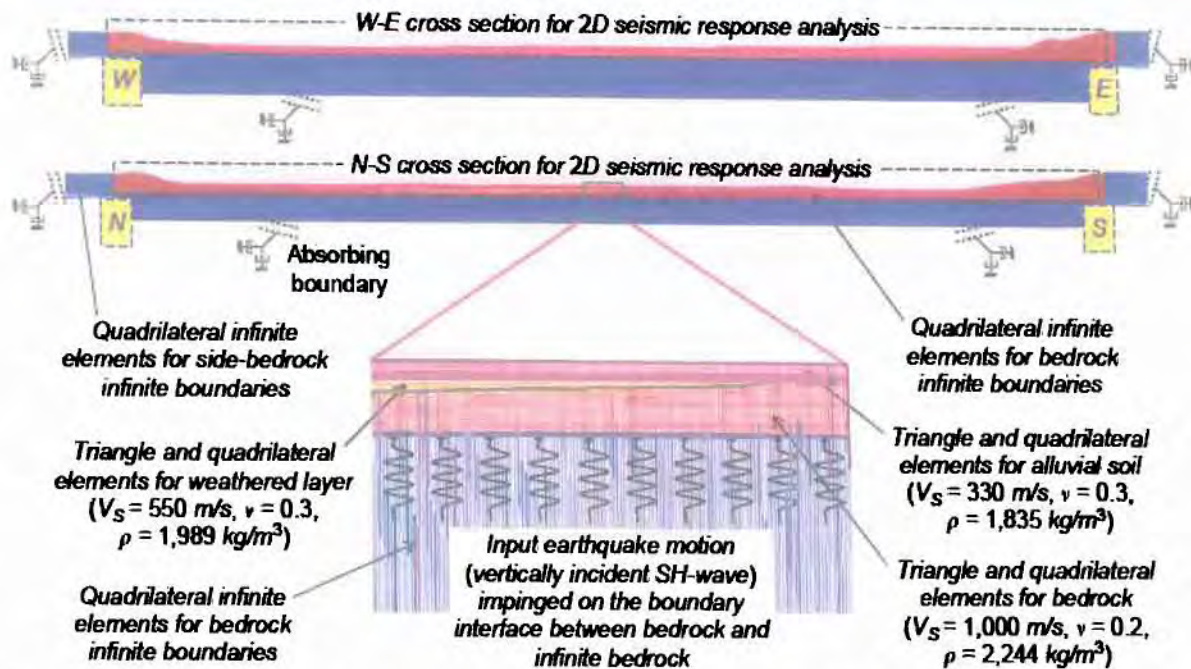
**Σχήμα 2.2.11:** Ενισχύσεις στην επιφάνεια της λεκάνης για SH κύμα για διάφορες συχνότητες και γωνίες πρόσπτωσης του κύματος.

### 2.2.3 Λεκάνη περιοχής Gyeongju, Κίνα

Σύμφωνα με τους Chang-Guk Sun και Choong-Ki Chung (2007), η λεκάνη στη περιοχή της Gyeongju έχει τραπεζοειδές σχήμα, βάθος περί τα 50μ. και πλάτος περί τα 4000μ. N-E και 3500μ. S-W. (Σχήμα 2.2.12). Τα χαρακτηριστικά της λεκάνης είναι:

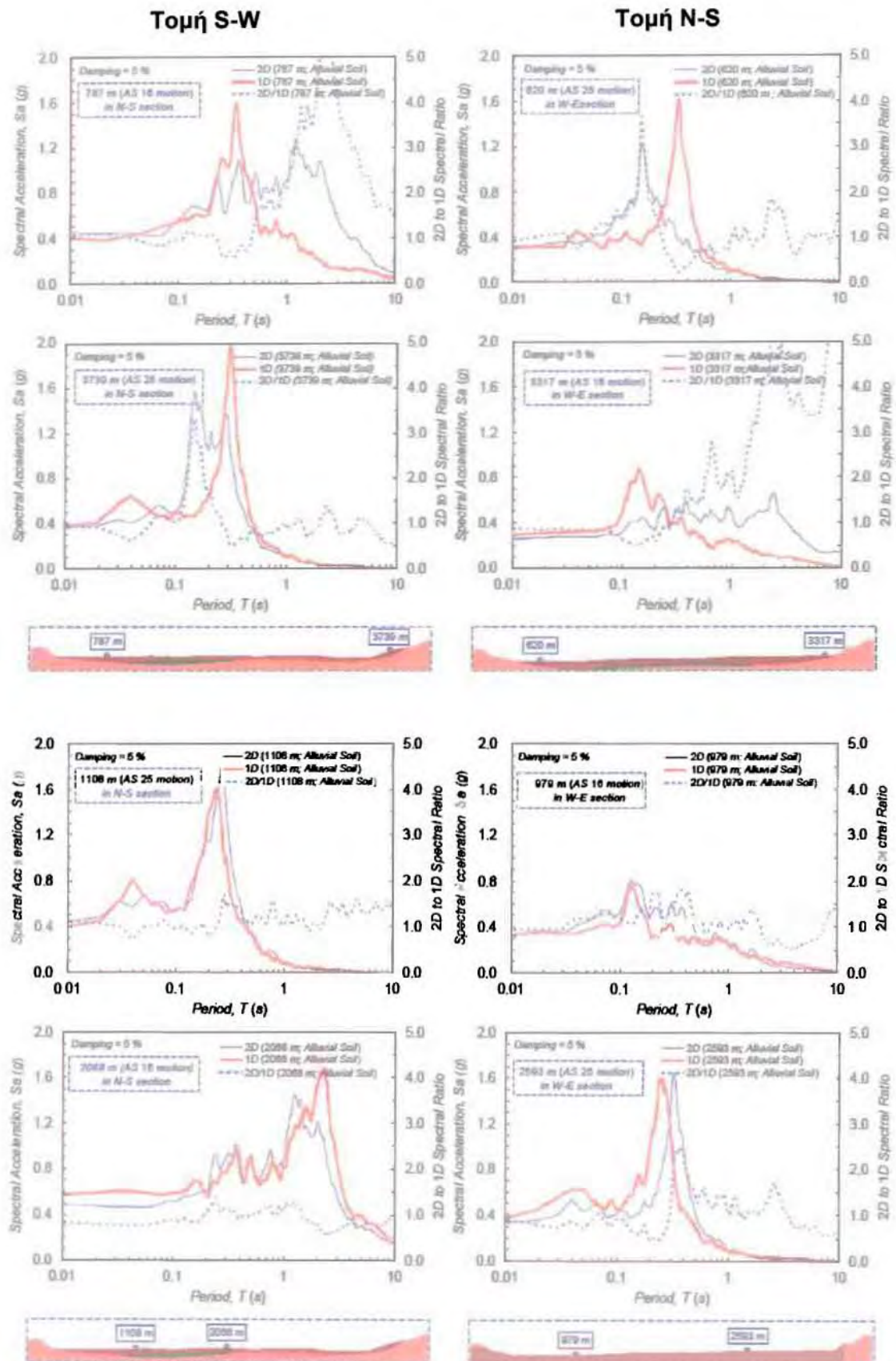
έδαφος (αλλουβιακές αποθέσεις)(άνω μέρος):	$\rho=1835\text{kg/m}^3$	$\nu=0,30$	$V_s=330\text{m/sec}$
έδαφος (αλλουβιακές αποθέσεις)(κάτω μέρος):	$\rho=1989\text{kg/m}^3$	$\nu=0,30$	$V_s=550\text{m/sec}$
βράχος:	$\rho=2244\text{kg/m}^3$	$\nu=0,20$	$V_b=1000\text{m/sec}$





Σχήμα 2.2.12: Σκαρίφημα λεκάνης Gyeongju σε τομές W-E και N-S

Για την μελέτη των ενισχύσεων σε αυτή τη λεκάνη έχει γίνει αριθμητική διερεύνηση για διάφορες περιόδους SH κύματος που εισέρχεται κατακόρυφα στη λεκάνη με ποσοστό απόσβεσης ίσο με 0,05. Πιο συγκεκριμένα, στο σχήμα 2.2.13 φαίνονται οι τιμές των φασματικών επιταχύνσεων για 8 συνολικά σημεία της λεκάνης (4 για κάθε τομή) σε 2Δ και 1Δ ανάλυση για περιόδους μέχρι 10sec. Επίσης στο σχήμα φαίνεται και ο λόγος  $Sa_{(2\Delta)}/Sa_{(1\Delta)}$  δηλαδή η ενίσχυση όπως αυτή ορίζεται και στη παρούσα εργασία (μόνο για τη μέγιστη επιτάχυνση), απ' όπου φαίνεται ότι η φασματική γεωμορφική ενίσχυση της οριζόντιας επιτάχυνσης μπορεί να είναι πολύ μεγαλύτερη εκείνης της μέγιστης επιτάχυνσης, για περιορισμένο όμως εύρος περιόδων διαφορετικό ανά σημείο της επιφάνειας, και ότι αυτές οι πολύ μεγάλες ενισχύσεις μπορούν να εμφανισθούν και για πολύ μεγάλες περιόδους κατασκευής.



Σχήμα 2.2.13: Ενισχύσεις σε 8 σημεία της επιφάνειας της λεκάνης για SH κύμα για διάφορες περιόδους του κύματος.

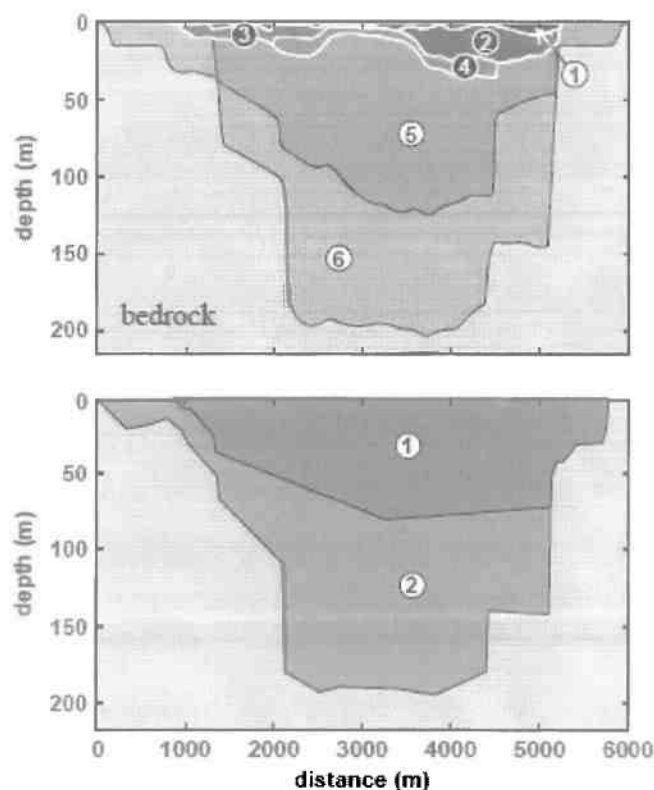
#### 2.2.4 Λεκάνη περιοχής Βόλβη, Ελλάδα

Σύμφωνα με τους J.F Semblat et al (2004), η λεκάνη στη περιοχή της Βόλβης έχει σχετικά τραπεζοειδές σχήμα, βάθος περί τα 200μ. στο βαθύτερο σημείο της και πλάτος περί τα 6000μ. Στο σχήμα 2.2.14 φαίνεται η πραγματική και η προσεγγιστική διαστρωμάτωση της λεκάνης. Τα χαρακτηριστικά της προσεγγιστικής λεκάνης που χρησιμοποιήθηκε στις αναλύσεις είναι:

έδαφος (στρώση 1):  $\rho=2100\text{kg/m}^3$   $\mu=677\text{Mpa}$   $\nu=0,280$

έδαφος (στρώση 2):  $\rho=2200\text{kg/m}^3$   $\mu=3595\text{Mpa}$   $\nu=0,453$

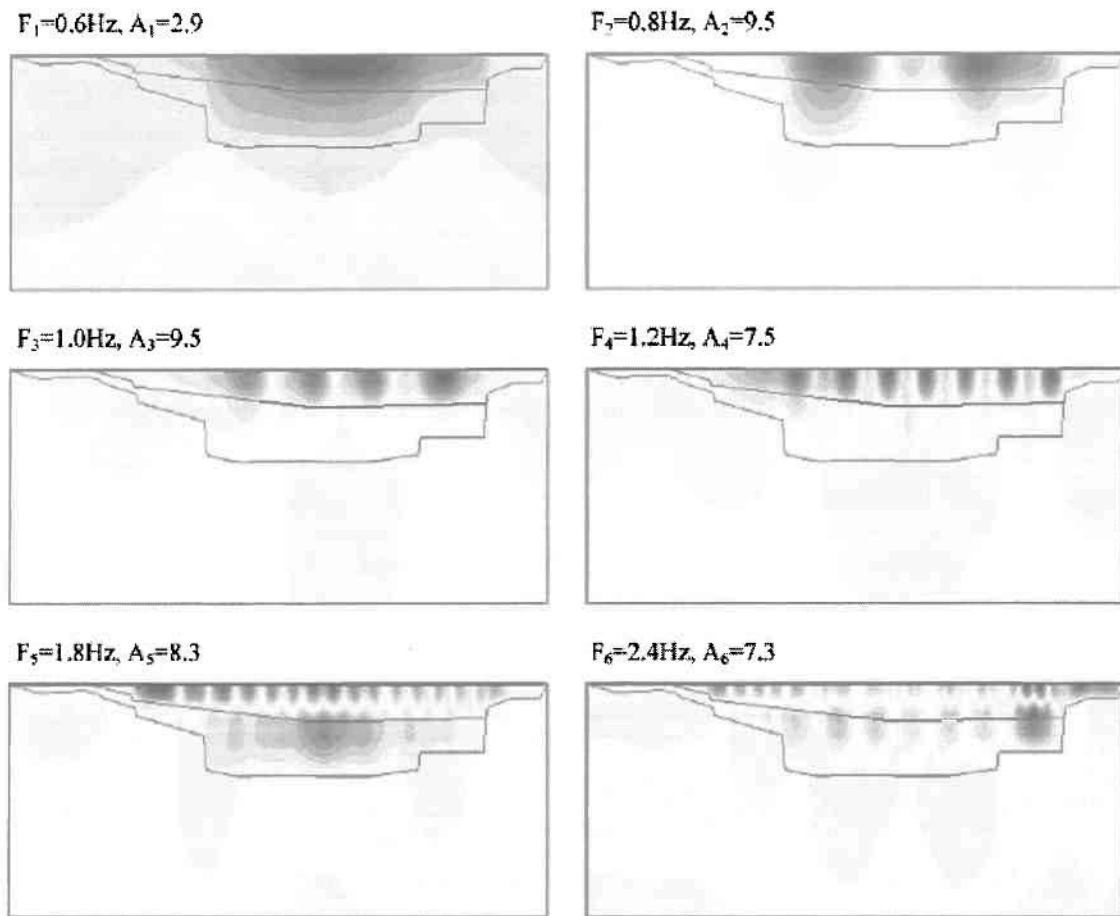
βράχος  $\rho=2600\text{kg/m}^3$   $\mu=4390\text{Mpa}$   $\nu=0,249$



**Σχήμα 2.2.14:** Σκαρίφημα λεκάνης Βόλβης (ακριβής και απλοποιητική μορφή)

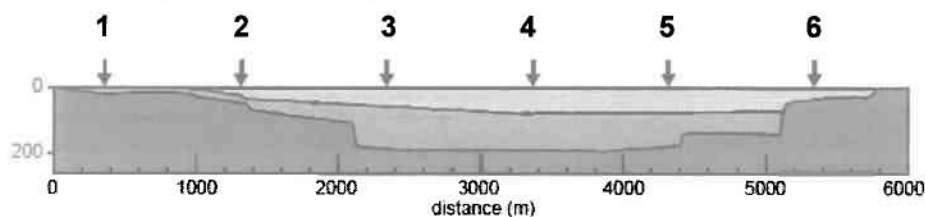
Στο παρακάτω σχήμα (σχήμα 2.2.15) φαίνονται οι γεωμορφικές ενισχύσεις σε τομή της λεκάνης για κατακόρυφη πρόσπτωση SH κύματος σε διάφορες συχνότητες και με μηδενική απόσβεση. Απο το σχήμα φαίνεται ότι οι μεγαλύτερες ενισχύσεις εμφανίζονται στην επιφάνεια της λεκάνης και πιο συγκεκριμένα εκεί όπου η λεκάνη έχει μεγαλύτερο βάθος, ενώ στις περιοχές με μικρότερο βάθος (άκρα λεκάνης) οι ενισχύσεις μεγαλώνουν όσο μεγαλώνουν και οι δεσπόζουσες συχνότητες του κύματος SH.





**Σχήμα 2.2.15:** Υπολογισμός ενισχύσεων για SH κύμα σε διάφορες συχνότητες

Στον παρακάτω πίνακα υπάρχουν οι μέγιστες τιμές των ενισχύσεων για 6 σημεία της επιφάνειας της λεκάνης τα οποία απέχουν το καθένα 1000μ. μεταξύ τους και το καθένα αντιστοιχεί σε διαφορετικό πάχος λεκάνης. Στον πίνακα παρατίθενται η απόσταση κάθε σημείου από το αριστερό άκρο της λεκάνης, η τιμή της μέγιστης ενίσχυσης και η συχνότητα για την οποία εμφανίστηκε αυτή η τιμή.

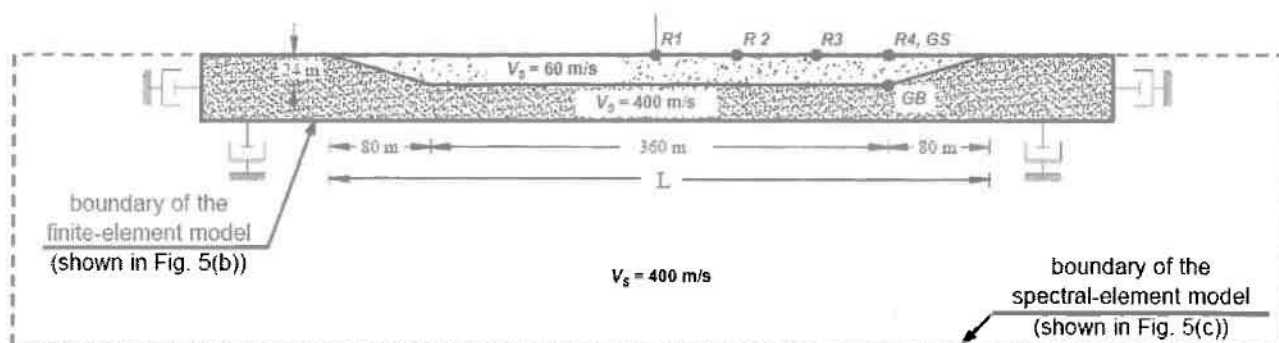


Point	Distance (m)	Maximum amplification	Corresponding frequency (Hz)
1	380	~ 1	
2	1380	9.0	1.9
3	2380	11.0	0.8 and 1.9
4	3380	11.0	0.8 and 1.9
5	4380	11.0	0.8
6	5380	9.0	2.8

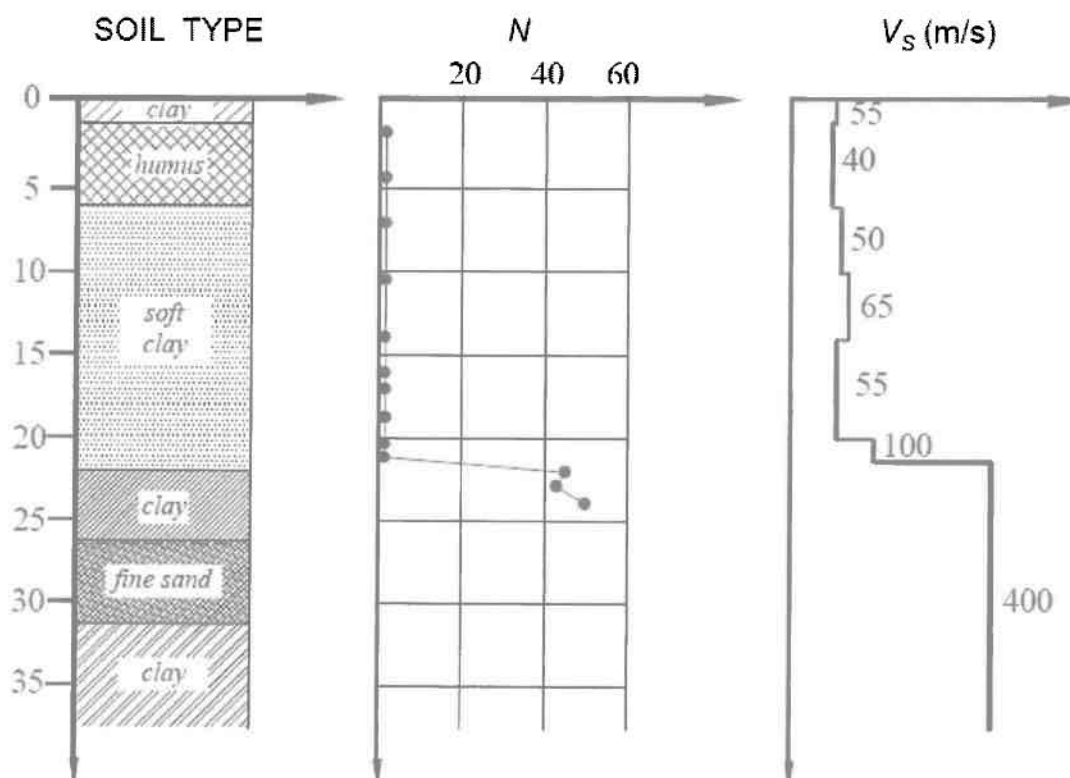
**Πίνακας 2.2.16:** Μέγιστες τιμές ενισχύσεων δεδομένων σημείων της λεκάνης και συχνότητες στις οποίες εμφανίστηκαν

### 2.2.5 Λεκάνη περιοχής Ohba Ohashi, Ιαπωνία

Σύμφωνα με τους Psarropoulos et al (2007), η λεκάνη στη περιοχή της Ohba Ohashi έχει σχετικά τραπεζοειδές σχήμα, βάθος περί τα 24μ. και πλάτος περί τα 360μ. Στο σχήμα 2.2.17 φαίνεται η προσεγγιστική γεωμετρία της λεκάνης. Τα χαρακτηριστικά της προσεγγιστικής λεκάνης που χρησιμοποιήθηκε στις αναλύσεις φαίνονται στον πίνακα 2.2.18.



Σχήμα 2.2.17: Σκαρίφημα λεκάνης Ohba Ohashi. (απλοποιητική μορφή)



Σχήμα 2.2.18: Χαρακτηριστικό εδαφικό προφίλ λεκάνης Ohba Ohashi.

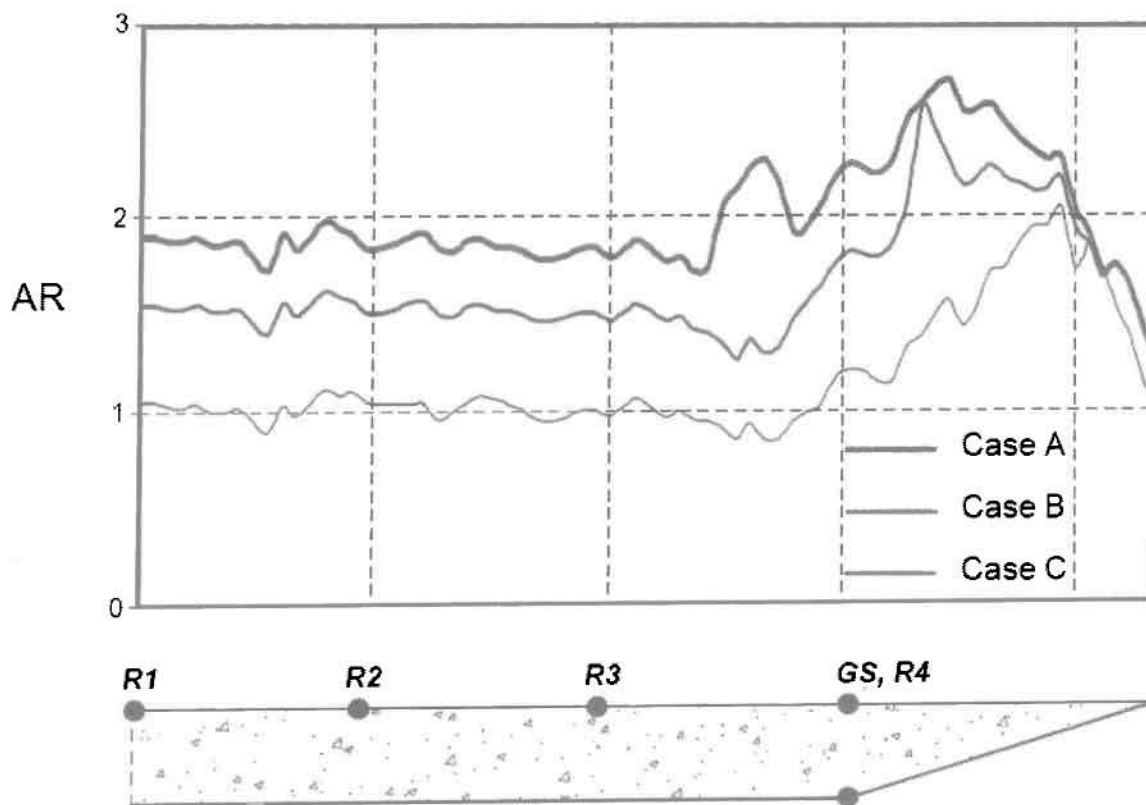
Διερεύνηση των γεωμορφικών ενισχύσεων σε αυτή τη λεκάνη έγινε για διάδοση παλμών Ricker δεσπόζουσας συχνότητας 1Hz και 2Hz και για τις παρακάτω περιπτώσεις συνδυασμών εδαφών-διεγέρσεων:

1<sup>η</sup> περίπτωση ( case A ):  $PI=200$   $PGBA=0,034g$  γραμμικό έδαφος

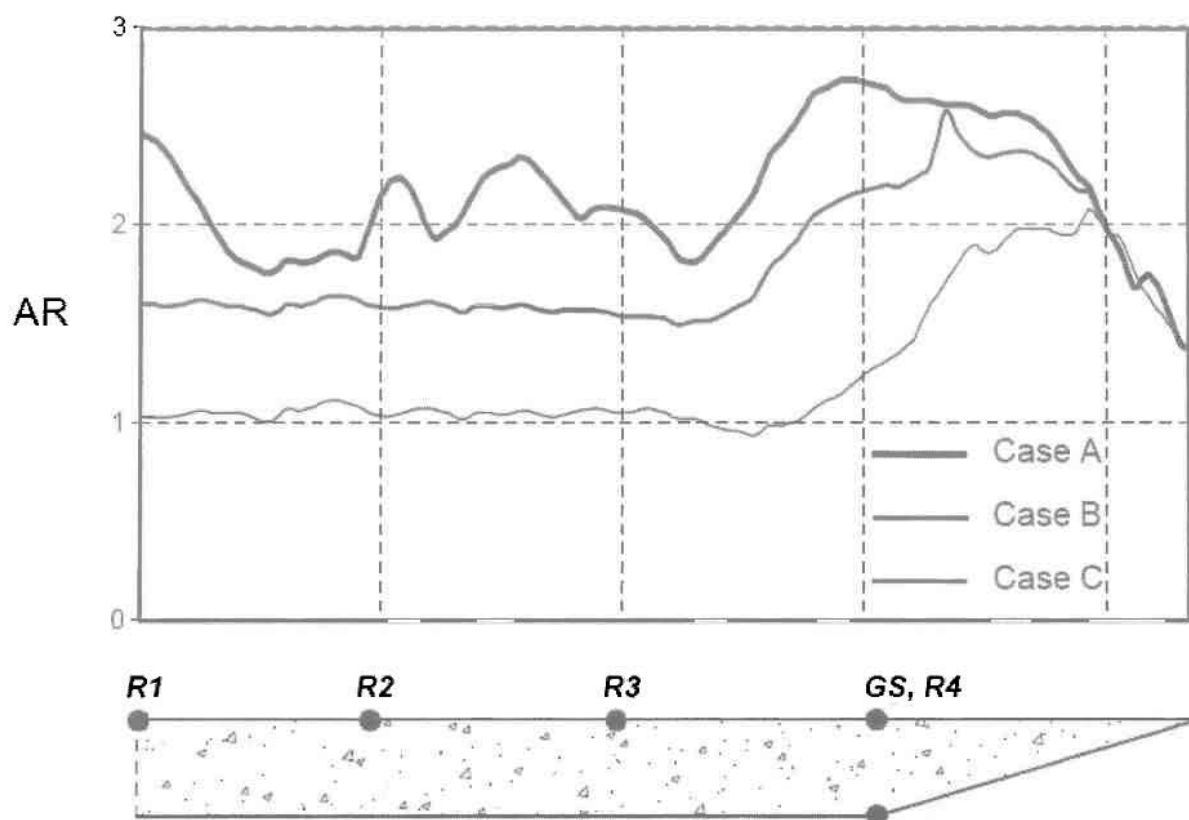
2<sup>η</sup> περίπτωση ( case B ):  $PI=50$   $PGBA=0,034g$  ελαφρώς μη γραμμικό έδαφος

3<sup>η</sup> περίπτωση ( case C ):  $PI=50$   $PGBA=0,340g$  μη γραμμικό έδαφος

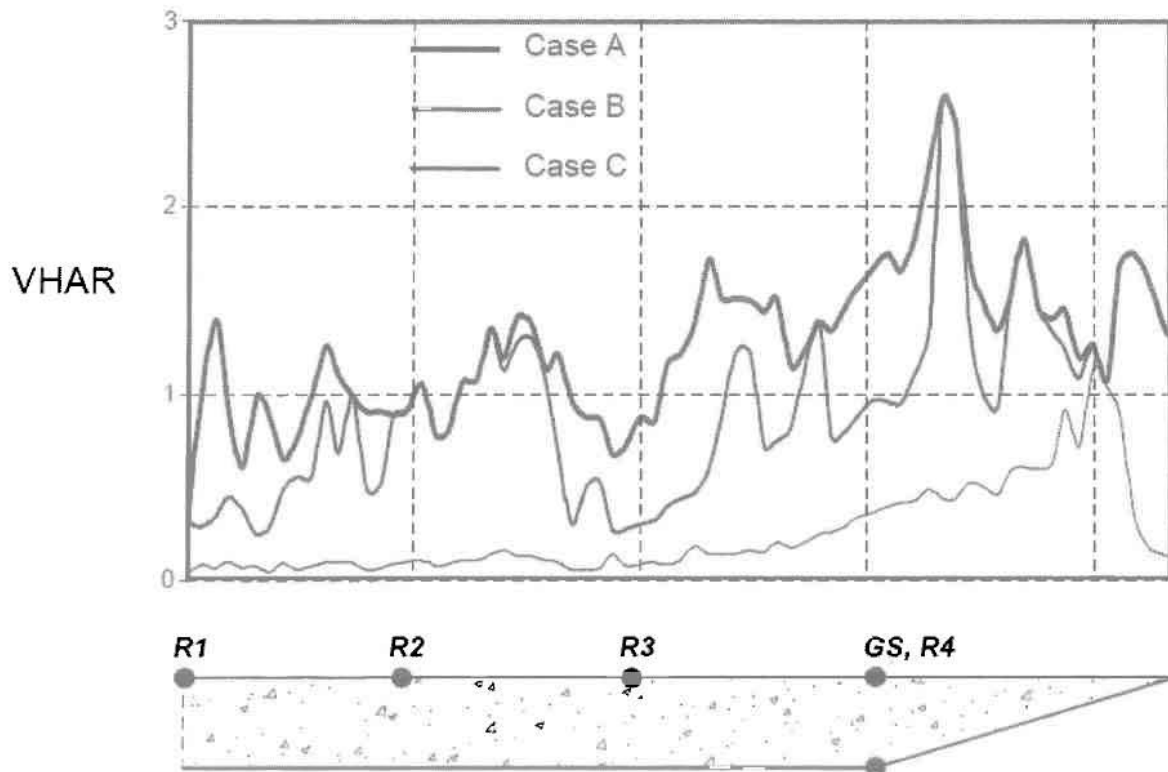
Στα παρακάτω σχήματα (σχήμα 2.2.19 και σχήμα 2.2.20) φαίνονται οι οριζόντιες γεωμορφικές ενισχύσεις για τους παλμούς 1Hz και 2Hz στο δεξιό μέρος της λεκάνης για τις τρεις περιπτώσεις εδαφών, οι οποίες ορίζονται ως ο λόγος της μέγιστης οριζόντιας επιτάχυνσης σε κάθε σημείο της επιφάνειας του εδάφους προς την τιμή που έχει η μέγιστη οριζόντια επιτάχυνση στη «θαμμένη» γωνία της εδαφικής λεκάνης. Γίνεται προφανές ότι όσο πιο γραμμικώς ελαστικά συμπεριφέρεται το έδαφος τόσο μεγαλύτερες είναι οι τιμές των γεωμορφικών ενισχύσεων, ενώ και στις 2 περιπτώσεις συχνοτήτων οι μεγαλύτερες τιμές ενισχύσεων εμφανίζονται πλησίον των άκρων της λεκάνης.



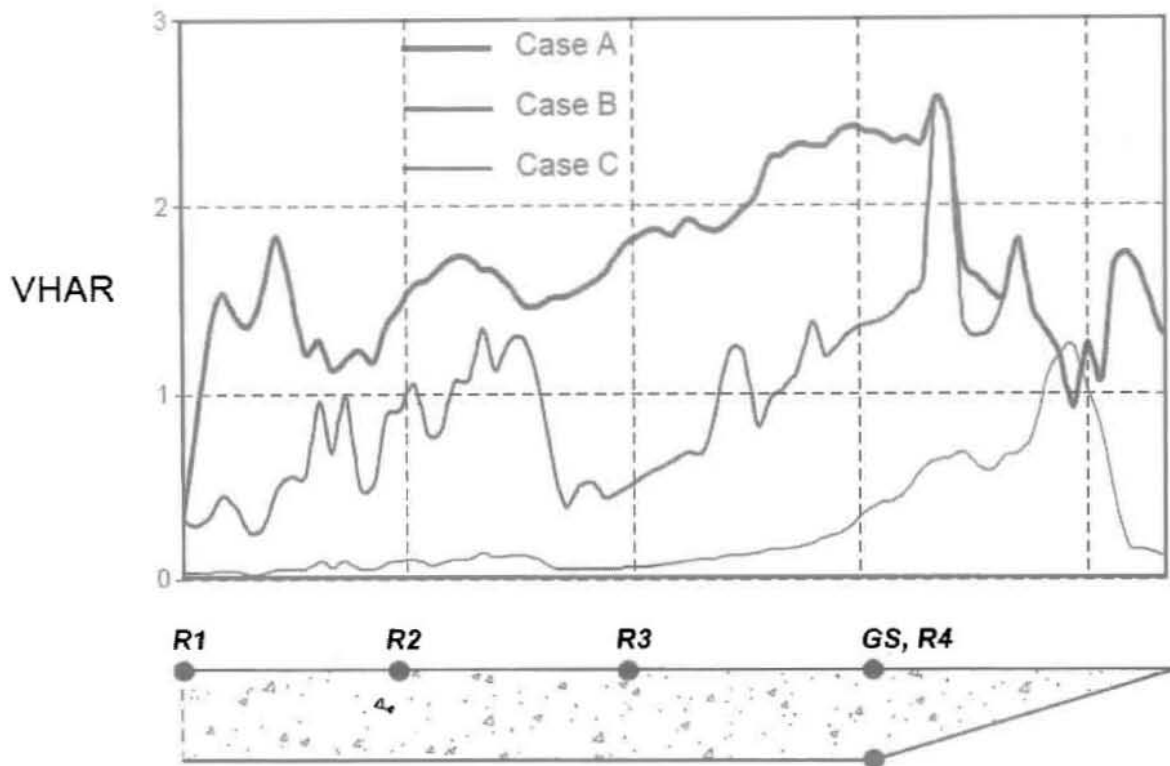
**Σχήμα 2.2.19:** Τιμές οριζόντιων ενισχύσεων για συχνότητα 1Hz κατά μήκος της λεκάνης για τρεις περιπτώσεις εδαφών.



**Σχήμα 2.2.20:** Τιμές οριζόντιων ενισχύσεων για συχνότητα 2Hz κατά μήκος της λεκάνης για τρεις περιπτώσεις εδαφών.



**Σχήμα 2.2.20:** Τιμές λόγου κατακόρυφων προς οριζόντιων ενισχύσεων για συχνότητα 1Hz κατά μήκος της λεκάνης για τρεις περιπτώσεις εδαφών.



**Σχήμα 2.2.20:** Τιμές λόγου κατακόρυφων προς οριζόντιων ενισχύσεων για συχνότητα 2Hz κατά μήκος της λεκάνης για τρεις περιπτώσεις εδαφών.

Στα ανωτέρω σχήματα (σχήμα 2.2.20 και σχήμα 2.2.21) φαίνεται ο λόγος των κατακόρυφων προς τις οριζόντιες ενισχύσεις κατά μήκος του δεξιού μέρους της λεκάνης για τις τρεις περιπτώσεις εδαφών και τις συχνότητες πάλι των 1Hz και 2Hz. Όπως προκύπτει, οι κατακόρυφες ενισχύσεις μηδενίζονται στο κέντρο της λεκάνης και παίρνουν τις μέγιστες τιμές τους πλησίον των άκρων αυτής.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3ο: Μεθοδολογία Αριθμητικών Αναλύσεων

### 3.1. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ

Για την περάτωση αυτής της εργασίας, πραγματοποιήθηκε μία σειρά αριθμητικών αναλύσεων, στις οποίες λαμβάνοντας υπόψη και προηγούμενες μελέτες για την επίδραση της μορφολογίας του υποβάθρου, επιλέχθηκαν οι κατάλληλες παράμετροι του προβλήματος σε κάθε μια από τις αναλύσεις, ώστε να ληφθούν τα παρακάτω αναφερθέντα αποτελέσματα. 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 της 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:

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

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

$d_{max}$  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 στον ελάχιστο λόγο  $A/(V_p d_{max})$  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

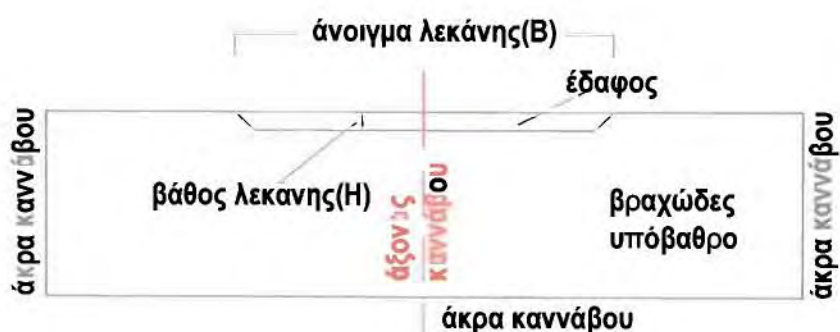


να μειωθεί η επίδραση της αδράνειας στο ελάχιστο, οι επιβαλλόμενες ταχύτητες στο σύνορο πρέπει να είναι μικρές. Αυτό ισχύει και για τη στατική επίλυση καθώς, λόγω του χαρακτήρα του κώδικα, η επίδραση της αδράνειας υπεισέρχεται και σ' αυτή την ανάλυση.

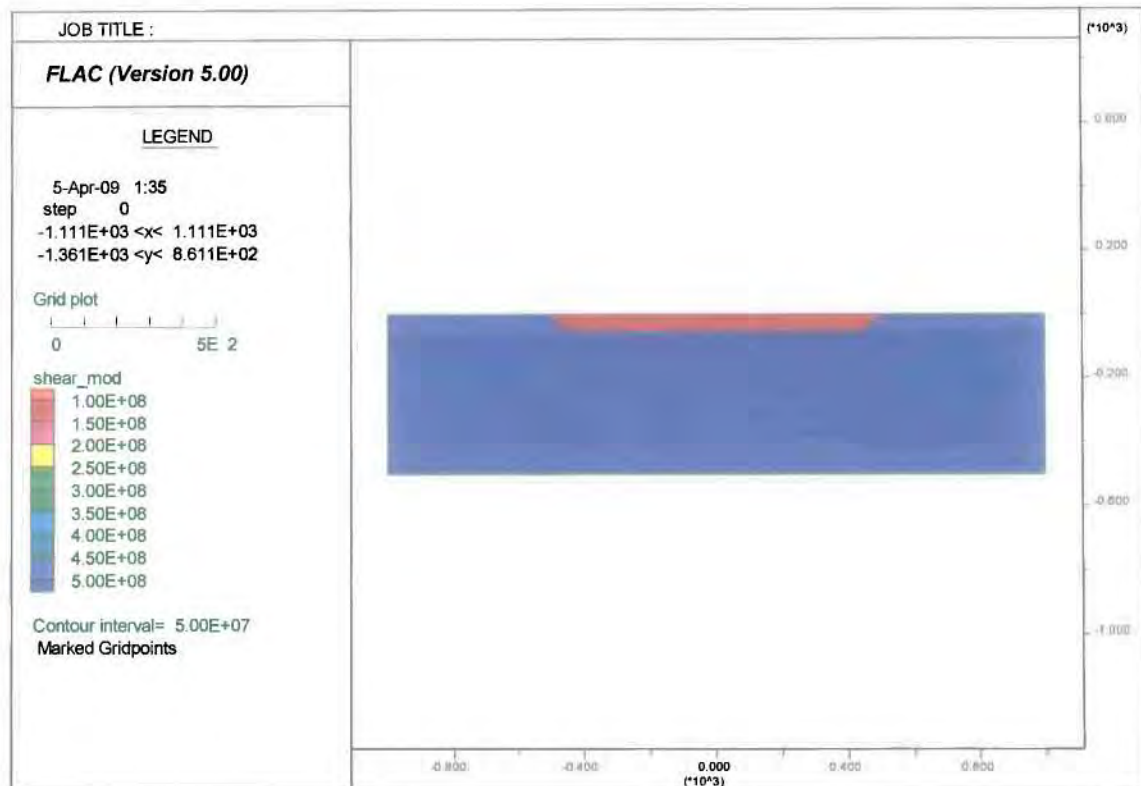
### 3.2. ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ

Για την παρούσα εργασία εκτίμησης της σεισμικής ενίσχυσης λόγω της επίδρασης του υποβάθρου έγιναν 21 διαφορετικές «ομάδες» αναλύσεων με τη βοήθεια του προγράμματος FLAC. Κάθε μία από τις «ομάδες» αυτές αποτελείται από τρεις επιμέρους αναλύσεις ως εξής:

Α) σύστημα βραχώδες υπόβαθρο - εδαφική λεκάνη, για το οποίο δημιουργήθηκαν κάνναβοι ύψους ίσο με το εκάστοτε βάθος λεκάνης προσαυξημένο κατά 450μ. του υποκείμενου βραχώδους υποβάθρου. Αριστερά και δεξιά από τα άκρα της λεκάνης οι κάνναβοι επεκτείνονται κατά 500μ (βλέπε Σχήμα 3.2.1). Αυτός ο κάνναβος αφορά την πραγματική 2D απόκριση της λεκάνης υπό σεισμική διέγερση. Στο Σχήμα 3.2.2 παρουσιάζεται ένας ενδεικτικός κάνναβος για μια τέτοια ανάλυση με  $H = 50\mu$  και  $B = 1000\mu$  και αποτελείται από  $400 \times 110$  ζώνες, με πύκνωση στην περιοχή της εδαφικής λεκάνης όπως αυτός δημιουργείται από το πρόγραμμα ανάλυσης (FLAC)



**Σχήμα 3.2.1:** Σκαρίφημα συστήματος υπόβαθρου - εδαφικής λεκάνης

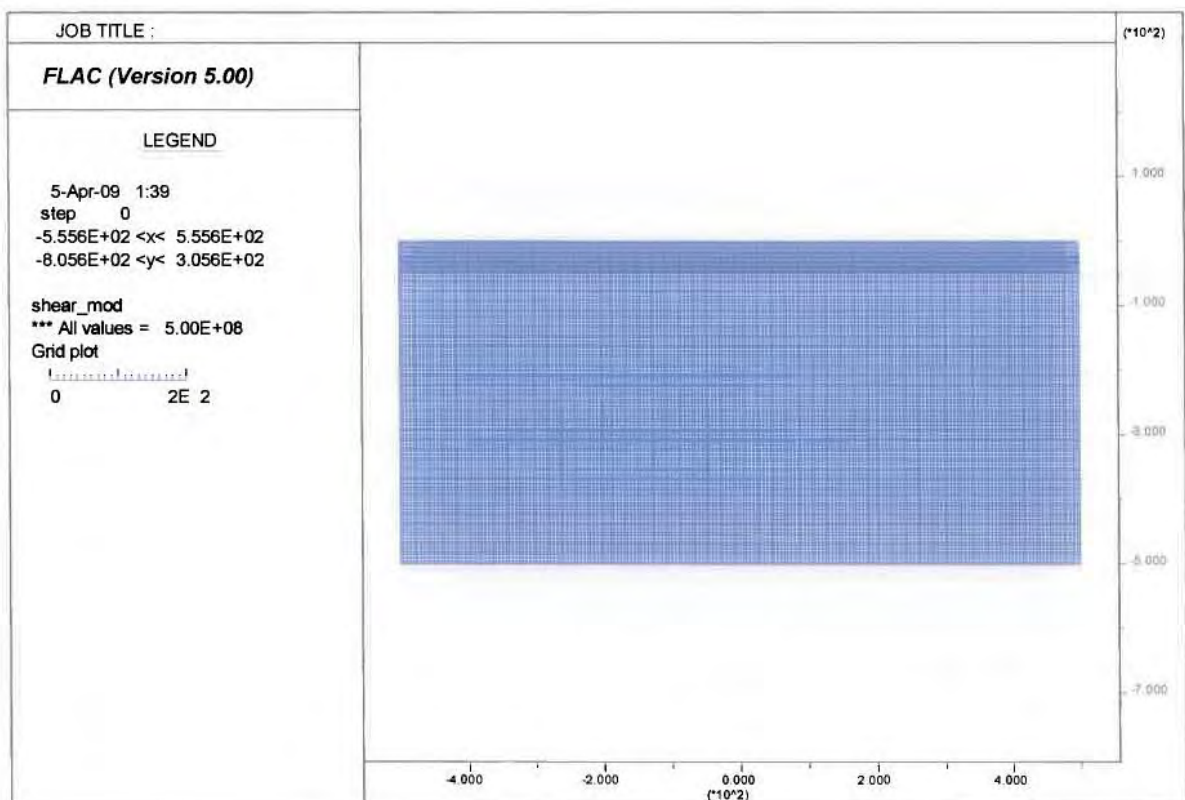


**Σχήμα 3.2.2:** Ενδεικτικός κάνναβος ανάλυσης συστήματος υπόβαθρου - εδαφικής λεκάνης

Β) σύστημα βραχώδες υπόβαθρο - έδαφος, για το οποίο δημιουργήθηκαν κάνναβοι αντίστοιχοι της πρώτης ανάλυσης με την διαφορά ότι καθ' όλο το μήκος της επιφάνειας υπάρχει έδαφος σε ύψος ίσο με αυτό της αντίστοιχης λεκάνης, του οποίου υπόκεινται 450μ βραχώδους υποβάθρου (βλέπε σχήμα 3.2.3). Αυτός ο κάνναβος αφορά την θεωρητικώς 1Δ σεισμική απόκριση της λεκάνης υπό σεισμική διέγερση, μια απόκριση πραγματική μόνο για λεκάνη απείρου μήκους Β. Χάριν απλότητας και απαλοιφής οποιασδήποτε τεχνητής επίδρασης του καννάβου στα αποτελέσματα, για την ανάλυση του συστήματος βραχώδους υποβάθρου – εδάφους χρησιμοποιήθηκε ίδια διακριτοποίηση σε στοιχεία με την ανάλυση του συστήματος βραχώδους υποβάθρου – εδαφικής λεκάνης. Η μόνη διαφορά έγκειται στις παραμέτρους μηχανικής συμπεριφοράς των εκάστοτε στοιχείων του καννάβου. Στο Σχήμα 3.2.4 παρουσιάζεται ένας ενδεικτικός κάνναβος για μια τέτοια ανάλυση με  $H = 50\mu$  και  $B = 1000\mu$  και αποτελείται από  $200 \times 110$  ζώνες, με πύκνωση στην περιοχή της εδαφικής λεκάνης όπως αυτός δημιουργείται απο το πρόγραμμα ανάλυσης (FLAC)



**Σχήμα 3.2.3:** Σκαρίφημα συστήματος οριζοντίου έδαφους επί βραχώδους υπόβαθρου



**Σχήμα 3.2.4:** Ενδεικτικός κάνναβος ανάλυσης συστήματος υπόβαθρου - εδαφος

Γ) σύστημα βραχώδες υπόβαθρο, για το οποίο δημιουργήθηκαν κάνναβοι αντίστοιχοι του προηγούμενου, με τη διαφορά ότι σε όλο τον κάνναβο υπάρχει μόνο βράχος (βλέπε σχήμα



3.2.4). Αυτός ο κάνναβος αφορά την θεωρητικώς 1Δ σεισμική απόκριση του βραχώδους υποβάθρου, μια απόκριση πραγματική μόνο σε πολύ μεγάλη (οιωνεί άπειρη) οριζόντια απόσταση από τη λεκάνη. Χάριν απλότητας και απαλοιφής οποιασδήποτε τεχνητής επίδρασης του καννάβου στα αποτελέσματα, για την ανάλυση του συστήματος βραχώδους υποβάθρου χρησιμοποιήθηκε ίδια διακριτοποίηση σε στοιχεία με την ανάλυση του συστήματος βραχώδους υποβάθρου – εδαφικής λεκάνης. Η μόνη διαφορά έγκειται στις παραμέτρους μηχανικής συμπεριφοράς των εκάστοτε στοιχείων του καννάβου.



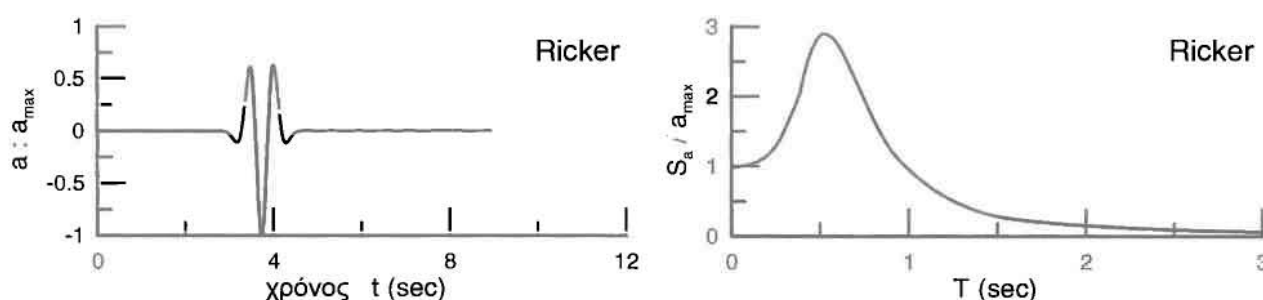
**Σχήμα 3.2.5:** Σκαρίφημα συστήματος βράχου

Σχετικά με τη μόρφωση των καννάβων για τις αναλύσεις της παρούσας εργασίας γίνονται οι κάτωθι παρατηρήσεις:

- Στην ελεύθερη επιφάνεια των καννάβων υπάρχει αριστερα και δεξιά της λεκάνης ένα περιθώριο 500μ. ώστε να αποφευχθεί η πιθανή επίδραση των ορίων του καννάβου λόγω τεχνητών ανακλάσεων στην απόκριση της λεκάνης.
- Ανεξαρτήτου του βάθους της λεκάνης, το βάθος του βραχώδους υποβάθρου κάτω από αυτήν είναι κάθε φορά το ίδιο (450μ.), ώστε να είναι συγκρίσιμα τα μεγέθη ενίσχυσης στην επιφάνεια του εδάφους από όλες τις αναλύσεις.
- Οι κάνναβοι έχουν μορφωθεί έτσι ώστε στην επιφάνεια να υπάρχουν κόμβοι ανα 5μ. και έτσι να υπάρχουν αποτελέσματα για τα ίδια σημεία σε κάθε ανάλυση.

**Σεισμική διέγερση συστήματος**

Για την προσομοίωση του σεισμού στα προαναφερθέντα συστήματα, ως διέγερση χρησιμοποιήθηκε ο απλός παλμός Ricker σε χαμηλές σχετικά συχνότητες (απο 1 έως 10Hz). Ο παλμός εισήχθη ως χρονοϊστορία οριζόντιας διατμητικής τάσης στο κάτω μέρος των κανάβων (σε συνδυασμό με «απορροφητήρες»), ούτως ώστε να προσομοιωθούν κατακόρυφα προσπίπτοντα κύματα SV από τον υποκείμενο ημίχωρο. Η συνολική διάρκεια της επιβαλλόμενης διέγερσης ήταν 6 δευτ, αλλά η ισχυρή κίνηση της διέγερσης είναι γενικώς πολύ μικρότερη. Το Σχήμα 3.2.6 παρουσιάζει τη χρονοϊστορία επιτάχυνσης και το ελαστικό φάσμα απόκρισης ενός τυπικού παλμού Ricker, με δεσπόμενη περίοδο  $T_e=0.5\text{sec}$ .



**Σχήμα 3.2.6:** Τυπικός παλμός Ricker, με δεσπόμενη περίοδο  $T_e=0.5\text{sec}$ .

**Απόσβεση συστήματος**

Οι αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία ήταν ιξωδο-ελαστικές, χάριν απλότητας. Σε τέτοιου είδους αναλύσεις, η πραγματικώς υστερητική απόσβεση των γεωυλικών προσομοιώνεται μέσω της απόσβεσης Rayleigh, η οποία είναι εξαρτώμενη από την συχνότητα. Πιο συγκεκριμένα, το μητρώο απόσβεσης  $C$  της εξίσωσης κίνησης του υλικού σημείου συσχετίζεται με τα μητρώα μάζας  $M$  και δυσκαμψίας  $K$  σύμφωνα με τη σχέση:

$$C = \alpha M + \beta K \quad (3.1)$$

όπου:

$$\alpha = \xi_{\min} \omega_{\min}$$

$$\beta = \xi_{\min} / \omega_{\min}$$

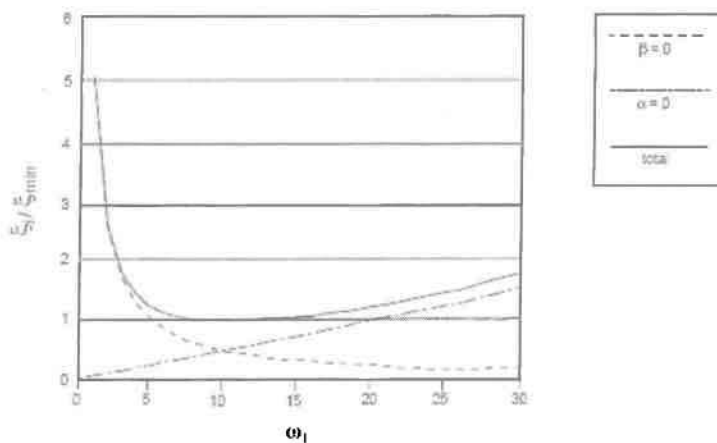
Η εν λόγω συσχέτιση της τελικής τιμής της απόσβεσης  $\xi$  με την κυκλική συχνότητα  $\omega$  αποτυπώνεται στο Σχήμα 3.2.7. Όπως προκύπτει, παρουσιάζει ελάχιστη τιμή  $\xi = \xi_{\min}$  για συχνότητα  $\omega = \omega_{\min}$  ( $=10\text{rad/s}$ , στο Σχήμα 3.2.6) και τιμές  $\xi > \xi_{\min}$  για τιμές  $\omega$  τόσο μικρότερες

όσο και μεγαλύτερες του  $\omega_{\min}$ . Έτσι, το ζητούμενο είναι η βαθμονόμηση των  $\xi_{\min}$  και  $\omega_{\min}$  ώστε να ανταποκρίνονται στις ανάγκες της κάθε ανάλυσης.

Δεδομένου ότι η εξάρτηση της απόσβεσης  $\xi$  από τη συχνότητα  $\omega$  δεν είναι μια ρεαλιστική θεώρηση για την υστερητική απόσβεση των γεωυλικών, σχετικώς ρεαλιστικές προσομοιώσεις επιτυγχάνονται με βαθμονόμηση της απόσβεσης Rayleigh ώστε να δίνει τις επιθυμητές τιμές  $\xi$  στις συχνότητες που κυρίως ενδιαφέρουν. Στο υπό μελέτη πρόβλημα, οι συχνότητες που κυρίως ενδιαφέρουν είναι εκείνες μεταξύ της δεσπόζουσας περιόδου της διέγερσης  $\omega_e$  και της ιδιοπεριόδου ταλάντωσης της εδαφικής στρώσης  $\omega_s$ , καθώς η δεσπόζουσα περίοδος της τελικής ταλάντωσης των υλικών σημείων του εδάφους θα έχει τιμή μεταξύ των δύο αυτών ακραίων τιμών. Χάριν απλότητας, στην παρούσα εργασία η εκτίμηση του  $\omega_{\min}$  γίνεται θεωρώντας τη δεσπόζουσα περίοδο στην οποία αντιστοιχεί ίση με τη μέση τιμή μεταξύ των δύο προαναφερθέντων περιόδων ενδιαφέροντος, δηλαδή σύμφωνα με τη σχέση:

$$\omega_{\min} = \frac{2}{\left( \frac{1}{\omega_e} + \frac{1}{\omega_s} \right)} \quad (3.2)$$

Για την προσομοίωση της σεισμικής απόκρισης σχετικά μικρής έντασης επιλέχθηκε μια σχετικά μικρή τιμή  $\xi_{\min} = 5\%$ , η οποία οδηγεί γενικώς σε σχετικά μεγάλες ενισχύσεις που δε φθίνουν γρήγορα με την απόσταση. Από εκεί και πέρα όμως, οι παραμετρικές αναλύσεις που εκτελέστηκαν διερεύνησαν και την επίδραση της τιμής του  $\xi$  στις εκτιμώμενες γεωμορφικές επιδράσεις στη μέγιστη σεισμική επιτάχυνση του εδάφους.



**Σχήμα 3.2.7:** Απόσβεση Rayleigh σε συνάρτηση με τη συχνότητα (ενδεικτικό γράφημα)

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4ο: Επίδραση μορφολογίας υποβάθρου στη σεισμική κίνηση

### 4.1. ΓΕΝΙΚΑ

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, για κάθε περίπτωση 2Δ λεκάνης έγιναν 3 διαφορετικές αναλύσεις (εδαφική λεκάνη, οριζόντιο έδαφος επί υποβάθρου, υπόβαθρο), για κάθε μια από τις οποίες εκτιμήθηκε η μέγιστη οριζόντια και η μέγιστη παρασιτική επιτάχυνση σε κάθε σημείο της ελεύθερης επιφάνειας. Πιο συγκεκριμένα, για κάθε σημείο της ελεύθερης επιφάνειας της ανάλυσης εδαφικής λεκάνης εκτιμήθηκε η μέγιστη οριζόντια επιτάχυνση  $P_{HA}$ , και αντίστοιχα απο την ανάλυση υποβάθρου μια ενιαία τιμή  $P_{HAr}$  και απο την ανάλυση οριζοντίου εδάφους επί υποβάθρου η  $P_{HAs}$ . Επιπλέον αυτών, εκτιμήθηκε και η μέγιστη παρασιτική κατακόρυφη επιτάχυνση  $P_{VA}$  για κάθε σημείο της ελεύθερης επιφάνειας της ανάλυσης εδαφικής λεκάνης. Ο όρος «παρασιτική» εισάγεται εδώ, καθώς η εισερχόμενη κίνηση είναι αμιγώς οριζόντια (κατακόρυφα προσπίπτοντα κύματα SV) και κάθε κατακόρυφη ταλάντωση οφείλεται αποκλειστικά στις ανακλάσεις στα κεκλιμένα όρια της εδαφικής λεκάνης. Συνεπώς, οι αντίστοιχες τιμές των  $P_{VAr}$  και  $P_{VAs}$  που προκύπτουν από τις αναλύσεις υποβάθρου και οριζοντίου εδάφους επί υποβάθρου είναι μηδενικές.

Σημειώνεται, ότι οι αναλύσεις αποτυπώνουν και ολόκληρη τη хроνοϊστορία επιτάχυνσης σε κάθε σημείο, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει και σε μελέτη της επίδρασης της μορφολογίας υποβάθρου (γεωμορφική επίδραση) σε ολόκληρο το ελαστικό φάσμα απόκρισης. Παρόλα αυτά, στην παρούσα εργασία η έμφαση δόθηκε στη μελέτη της γεωμορφικής επίδρασης στη μέγιστη σεισμική επιτάχυνση και μόνο, χάριν απλότητας.

Δεδομένων των ανωτέρω μεγεθών, ορίζεται η **οριζόντια γεωμορφική ενίσχυση  $A_H$**  σε κάθε θέση της επιφάνειας ως ο λόγος της μέγιστης οριζόντιας επιτάχυνσης ενός σημείου της επιφάνειας δεδομένης της ύπαρξης της λεκάνης ( $P_{HA}$ ) προς την μέγιστη οριζόντια επιτάχυνση αν δεν υπήρχε η λεκάνη ( $P_{HAr}$  ή  $P_{HAs}$ ). Πιο συγκεκριμένα, αν το σημείο της επιφάνειας είναι εδαφικό, τότε η οριζόντια γεωμορφική ενίσχυση ορίζεται ως  $A_H = P_{HA}/P_{HAs}$ , ενώ αν το σημείο της επιφάνειας είναι επί του αναδυόμενου βραχώδους υποβάθρου, τότε  $A_H = P_{HA}/P_{HAr}$ .

Αντίστοιχα, ορίζεται και η **παρασιτική κατακόρυφη γεωμορφική ενίσχυση  $A_V$**  σε κάθε θέση της επιφάνειας ως ο λόγος της μέγιστης παρασιτικής κατακόρυφης επιτάχυνσης ενός σημείου

της επιφάνειας δεδομένης της ύπαρξης της λεκάνης (PVA) προς την μέγιστη οριζόντια επιτάχυνση αν δεν υπήρχε η λεκάνη (PHA<sub>g</sub> ή PHAs). Πιο συγκεκριμένα, αν το σημείο της επιφάνειας είναι εδαφικό, τότε η παρασιτική κατακόρυφη γεωμορφική ενίσχυση ορίζεται ως  $A_v = PVA/PHAs$ , ενώ αν το σημείο της επιφάνειας είναι επί του αναδυόμενου βραχώδους υποβάθρου, τότε  $A_v = PVA/PHA_g$ . Σημειώνεται ότι ο ορισμός της  $A_v$  ως συνάρτηση των PHAs και PHA<sub>g</sub> είναι επακόλουθο του γεγονότος ότι  $PVAs = PVA_g = 0$ , όπως επεξηγείται παραπάνω.

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι ο εντοπισμός των γεωμετρικών και μηχανικών χαρακτηριστικών της λεκάνης που επηρεάζουν τη γεωμορφική ενίσχυση στην επιφάνεια αυτής, αλλά και εκτός του μήκους της. Στην συνέχεια, γίνεται μια προσπάθεια αδιαστατοποίησης των χαρακτηριστικών αυτών, με στόχο τη γενίκευση των συμπερασμάτων για κάθε 2D λεκάνη τραπεζοειδούς διατομής. Τέλος, γίνεται προσπάθεια κατάστρωσης προσεγγιστικών σχέσεων εκτίμησης των μεγίστων τιμών της γεωμορφικής ενίσχυσης, δεδομένων πάντα των αδιαστατοποιημένων γεωμετρικών και μηχανικών χαρακτηριστικών της λεκάνης.

Χάριν μιας πρώτης (αλλά σχετικά πλήρους) διερεύνησης, στην εργασία αυτή έγιναν 21 «ομάδες» αναλύσεων, τα χαρακτηριστικά των οποίων εκτιμήθηκαν με βάση τη βιβλιογραφία. Παρακάτω παρατίθεται η πλήρης λίστα των χαρακτηριστικών αυτών των αναλύσεων (Πίνακας 4.1.1). Σημειώνεται ότι στον πίνακα αυτό,  $H$  και  $B$  είναι το πάχος και το πλάτος της 2D τραπεζοειδούς λεκάνης, ενώ  $i$  είναι η κλίση των μη-παράλληλων πλευρών της λεκάνης. Επιπλέον,  $V_s$  είναι η ταχύτητα διάδοσης των διατμητικών κυμάτων στο ομοιόμορφο έδαφος, ενώ  $V_b$  είναι η αντίστοιχη ταχύτητα διάδοσης των διατμητικών κυμάτων στον ομοιόμορφο βράχο (υπόβαθρο). Τέλος, απόσβεση  $\xi$  είναι η τιμή της  $\xi_{min}$  που επελέγη για τη δεσπίζουσα περίοδο ταλάντωσης της εδαφικής λεκάνης (βλέπε Σχήμα 3.2.6), ενώ  $T_e$  είναι η δεσπίζουσα περίοδος της εισερχόμενης διέγερσης από το υπόβαθρο. Αντίστοιχα με τα ανωτέρω, μπορεί να ορισθεί και το δεσπίζον μήκος κύματος στο έδαφος  $\lambda_s = V_s T_e$ , αλλά και το δεσπίζον μήκος κύματος στο βράχο  $\lambda_b = V_b T_e$ .



ανάλυση	H(m)	B(m)	Vs(m/sec)	Vb(m/sec)	Κλίση(°)	απόσβεση	Te(sec)
#1	20	400	500	1000	45	0,05	0,2
#2	20	1000	500	1000	45	0,05	0,2
#3	50	1000	250	500	45	0,05	1,0
#4	50	1000	250	1000	45	0,05	1,0
#5	50	1000	500	666,66	45	0,05	0,5
#6	50	1000	500	1000	45	0,05	0,1
#7	50	1000	500	1000	45	0,05	0,2
#8	50	200	500	1000	45	0,05	0,5
#9	50	400	500	1000	45	0,05	0,5
#10	50	1000	500	1000	45	0,05	0,5
#11	50	1000	500	1000	45	0,05	1,0
#12	50	1000	250	2500	45	0,05	1,0
#13	50	400	500	1000	45	0,05	0,2
#14	50	200	500	1000	45	0,05	0,1
#15	20	800	500	1000	45	0,05	0,4
#16	50	1000	250	500	30	0,05	1,0
#17	50	1000	250	500	60	0,05	1,0
#18	50	1000	250	500	90	0,05	1,0
#19	50	1000	250	500	45	0,01	1,0
#20	50	1000	250	500	45	0,12	1,0
#21	50	1000	250	500	45	0,20	1,0

**Πίνακας 4.1.1:** πίνακας «ομάδων» αναλύσεων για τη γεωμορφική ενίσχυση 2Δ εδαφικών λεκανών τραπεζοειδούς διατομής.

Για την επιλογή των παραμέτρων στις προαναφερθείσες αναλύσεις γίνονται οι παρακάτω παρατηρήσεις:

- Για λόγους ευκολίας στην ανάλυση των αποτελεσμάτων, η πυκνότητα του εδάφους  $\rho_s$  και του βραχώδους υποβάθρου  $\rho_b$  ελήφθη ίσο με  $1.8\text{t/m}^3$ , ούτως ώστε ο λόγος εμπέδησης  $a=(\rho_s V_s)/(\rho_b V_b)$  να εξαρτάται μόνο απο τον λόγο των ταχυτήτων διάδοσης των διατμητικών κυμάτων στον βράχο και στο έδαφος. Τούτου δοθέντως, οι τιμές για τις ταχύτητες διάδοσης  $V_s$  και  $V_b$  έχουν επιλεγεί έτσι ώστε ο λόγος εμπέδησης  $a$  να παίρνει τιμές 0.75, 0.50, 0.25 και 0.10 για τις διάφορες αναλυθείσες περιπτώσεις.
- Οι τιμές των κλίσεων των μη-παραλλήλων πλευρών της λεκάνης επιλέγησαν αυθαίρετα να κυμαίνονται από  $i=30^\circ$  έως  $90^\circ$ , ώστε να διερευνηθεί η γεωμορφική επίδραση σε

σχετικά απότομες λεκάνες (στα άκρα). Για τιμές κλίσεων μικρότερες των  $30^\circ$  εκτιμάται ότι η γεωμορφική επίδραση θα είναι εν γένει μικρή.

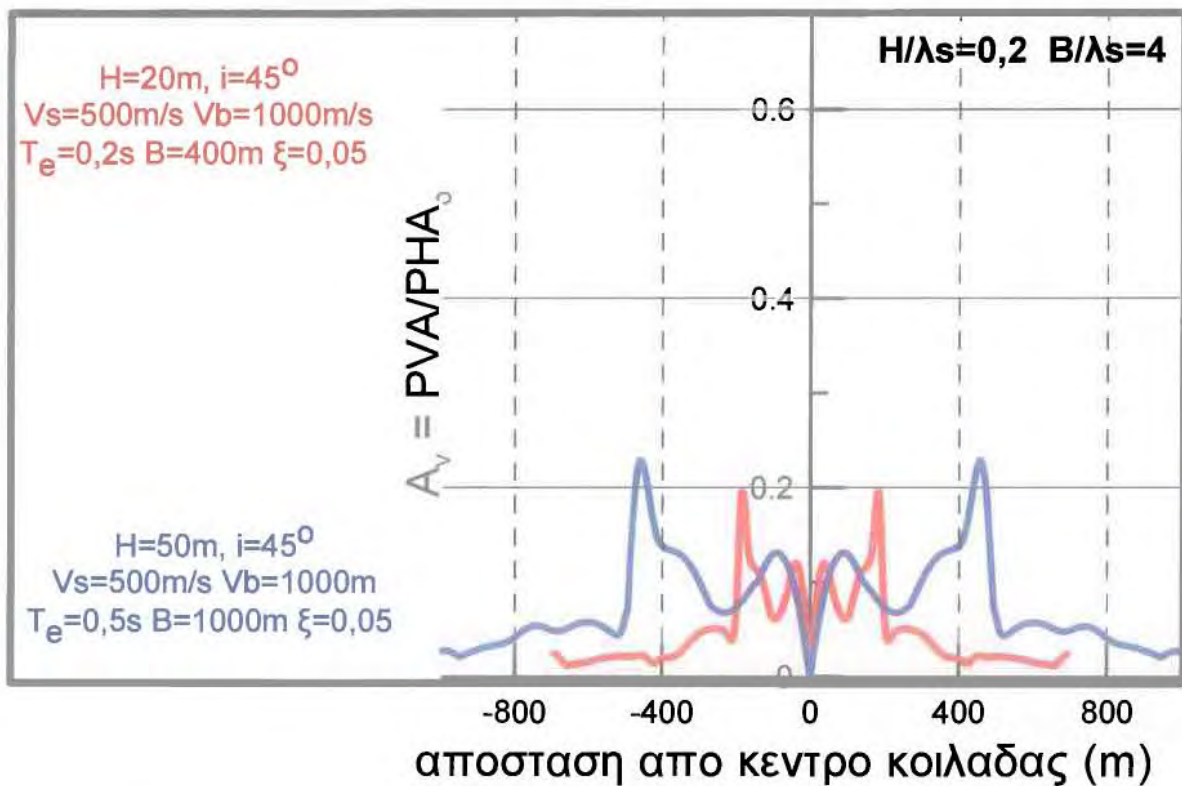
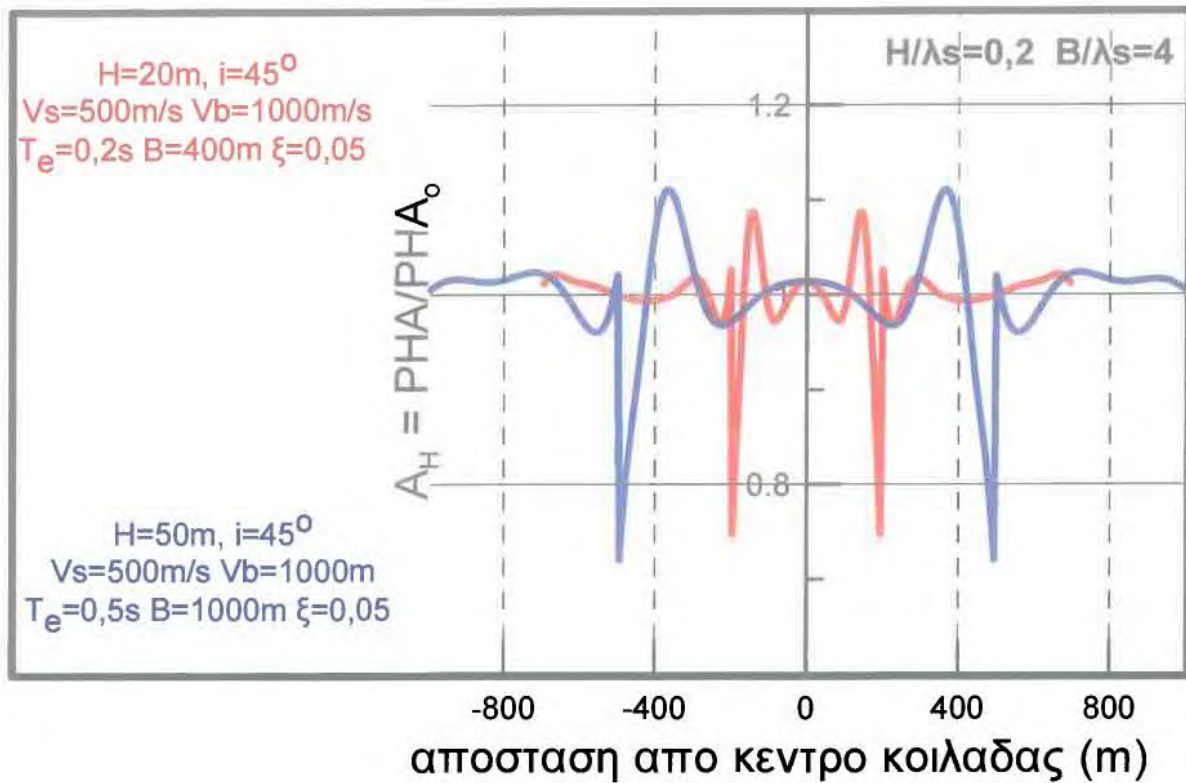
- Η διακύμανση της  $T_e = 0.1 - 1.0\text{sec}$  επελέγη ώστε να καλύψει όλα τα πιθανά εύρη δεσπόζουσων περιόδων σεισμικής κίνησης που αναμένονται στην πράξη.

## 4.2. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΛΕΚΑΝΗΣ

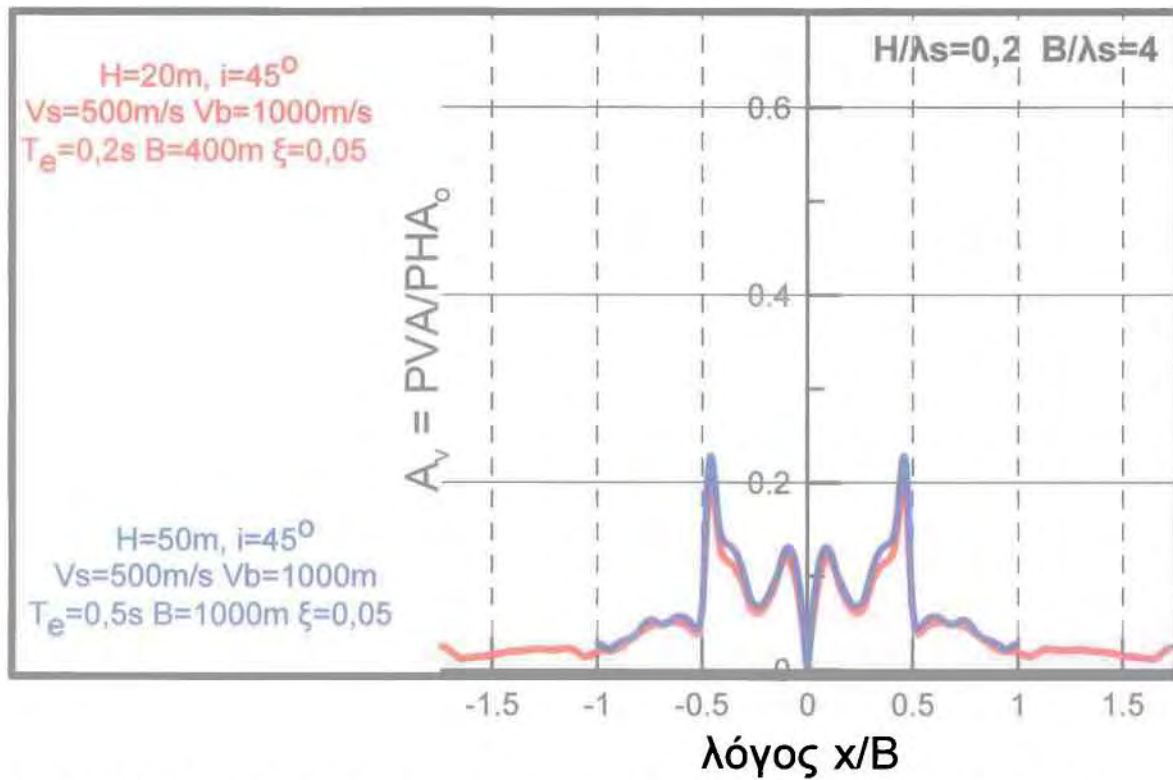
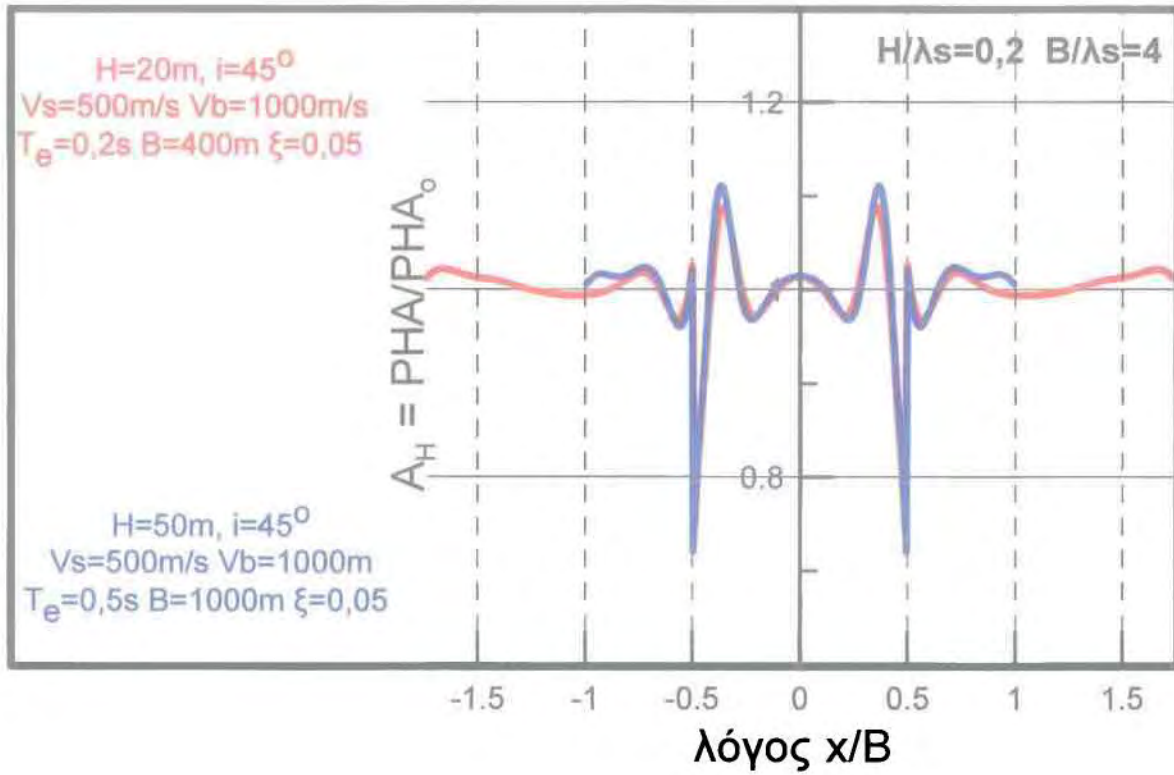
### 4.2.1. Επίδραση πάχους $H$ και πλάτους $B$ λεκάνης

Για τη διερεύνηση της επίδρασης του πάχους  $H$  και του πλάτους  $B$  της λεκάνης στις γεωμορφικές επιδράσεις  $A_H$  και  $A_V$  επιλέγονται προς παρουσίαση τα αποτελέσματα των αναλύσεων #1 και #10. Στις αναλύσεις αυτές, οι τιμές των υπολοίπων παραμέτρων ( $V_s$ ,  $V_b$ ,  $i$ ,  $\xi$ ) είναι ίδιες, και αυτό που διαφέρει είναι το πάχος  $H$  ( $= 20$  και  $50\mu$ ), το πλάτος  $B$  ( $= 400$  και  $1000\mu$ ) αλλά και η δεσπόζουσα περίοδος της διέγερσης  $T_e$  ( $= 0.2$  και  $0.5\text{s}$ ). Έτσι, στο Σχήμα 4.2.1 παρουσιάζεται η διαφοροποίηση των  $A_H$  και  $A_V$  ως συνάρτηση της οριζόντιας απόστασης  $x$  από τον άξονα συμμετρίας της εκάστοτε λεκάνης, με βάση τα αποτελέσματα από τις 2 αναλύσεις. Όπως προκύπτει οι δύο περιπτώσεις οδηγούν σε διαφορετικές γεωμορφικές ενισχύσεις για τις ίδιες οριζόντιες αποστάσεις  $x$  από τον άξονα συμμετρίας της κοιλάδας. Στη συνέχεια, στο Σχήμα 4.2.2 και 4.2.3 παρουσιάζονται τα ίδια αποτελέσματα γεωμορφικής ενίσχυσης ως συνάρτηση της οριζόντιας απόστασης  $x$ , αδιαστατοποιημένης ως προς το πλάτος  $B$  και το δεσπόζον μήκος κύματος  $\lambda_s$ , αντίστοιχα. Όπως προκύπτει, η γεωμορφική ενίσχυση (σε όρους  $A_H$  και  $A_V$ ) για δύο εντελώς διαφορετικές περιπτώσεις εδαφικών λεκανών είναι εντελώς ίδια, αν η οριζόντια απόσταση  $x$  από το κέντρο της λεκάνης αδιαστατοποιηθεί ως συνάρτηση είτε του πλάτους  $B$  ή του δεσπόζοντος κύματος  $\lambda_s$ . Αυτό προκύπτει γιατί οι δύο εντελώς διαφορετικές περιπτώσεις εδαφικών λεκανών αντιστοιχούν σε ίδιο λόγο αδιάστατου πάχους  $H/\lambda_s$ , αλλά και ίδιο λόγο αδιάστατου πλάτους  $B/\lambda_s$ , παρά το γεγονός ότι τα  $H$ ,  $B$  και  $\lambda_s$  των δύο περιπτώσεων λεκανών είναι εντελώς διαφορετικά. Το γεγονός αυτό υποδεικνύει ότι οι τιμές των αδιάστατων λόγων  $H/\lambda_s$  και  $B/\lambda_s$  είναι καθοριστικές παράμετροι για τον καθορισμό της γεωμορφικής ενίσχυσης 2D λεκανών τραπεζοειδούς διατομής. Επιπλέον παρατηρούνται τα παρακάτω ποιοτικά συμπεράσματα:

- Οι μέγιστες τιμές  $A_H$  και  $A_V$  παρατηρούνται πλησίον των άκρων της κοιλάδας, αλλά ακριβώς στην άκρη της η τιμή των  $A_H$  και  $A_V$  πέφτει ραγδαία, καθώς εκεί η εδαφική στρώση έχει πολύ μικρό πάχος και η ταλάντωση είναι πρακτικώς ίση με εκείνη του αναδυόμενου βραχώδους υποβάθρου.
- Από την άλλη μεριά, η  $A_H$  στο κέντρο της κοιλάδας πρακτικώς τείνει στην τιμή 1.0 υποδεικνύοντας ότι στο κέντρο της κοιλάδας έχουμε πρακτικώς 1D κατακόρυφη μετάδοση κυμάτων, που δεν επηρεάζεται από τις ανακλάσεις στα άκρα της. Αντίστοιχα, η  $A_V$  στο κέντρο της κοιλάδας πρακτικώς τείνει στο 0.0, υποδεικνύοντας και πάλι ότι τα επιφανειακά κύματα Rayleigh που δημιουργούνται στα άκρα της κοιλάδας και ταξιδεύουν προς το κέντρο της έχουν πρακτικώς αποσβεσθεί.

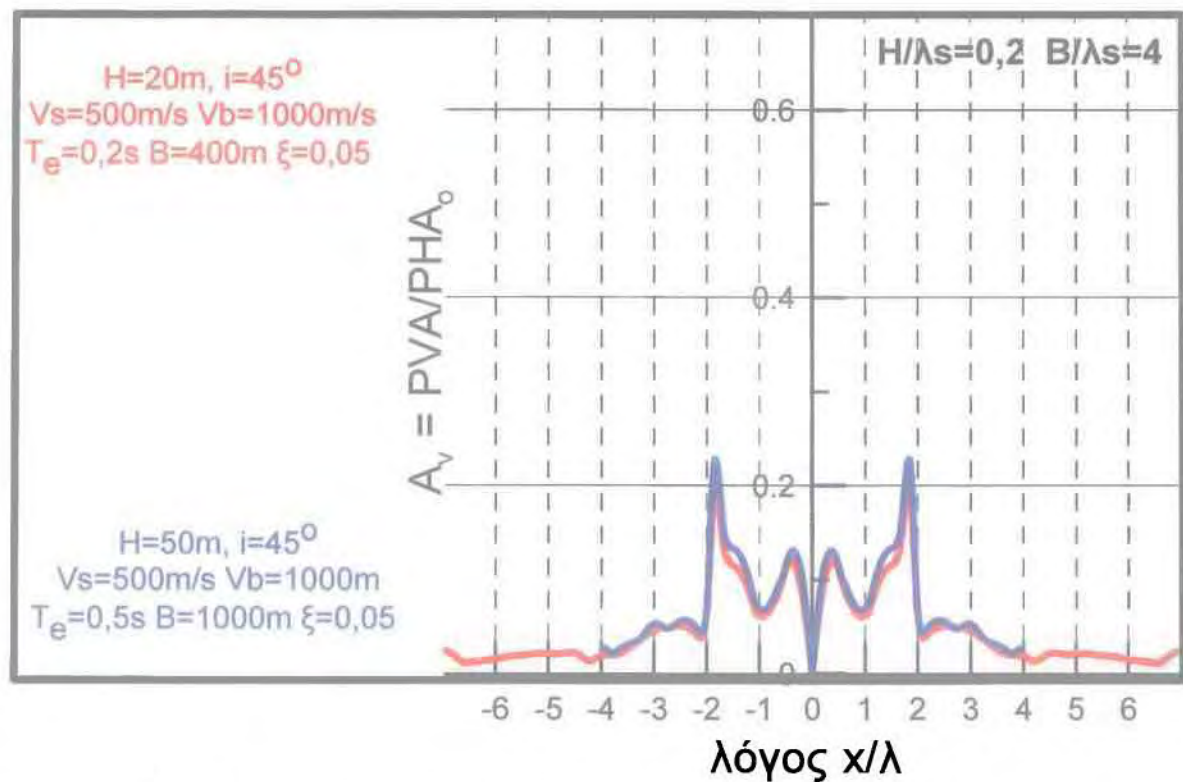
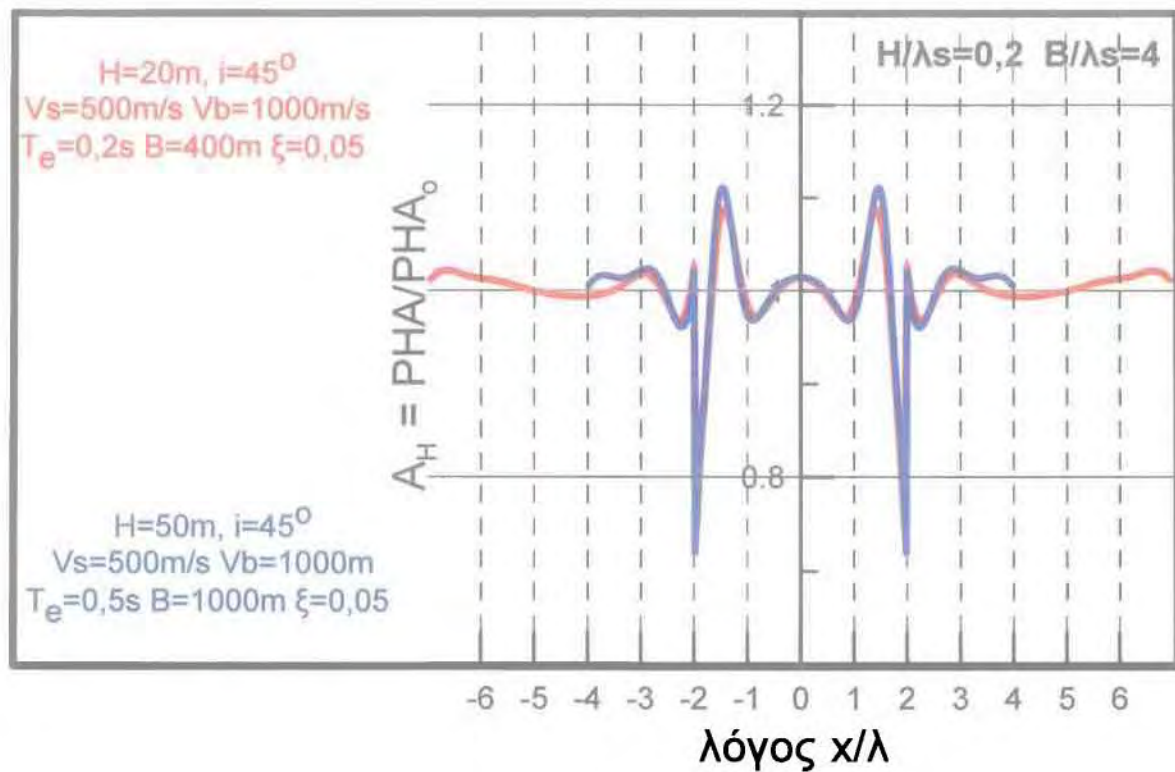


**Σχήμα 4.2.1** Οριζόντιες και κατακόρυφες γεωμορφικές ενισχύσεις αναλύσεων #1 και #10, ως συνάρτηση της απόστασης  $x$  από το κέντρο της κοιλάδας.



**Σχήμα 4.2.2:** Οριζόντιες και κατακόρυφες γεωμορφικές ενισχύσεις αναλύσεων #1 και #10, ως συνάρτηση της απόστασης  $x$  από το κέντρο της κοιλάδας αδιαστατοποιημένης ως προς το εύρος  $B$  αυτής.



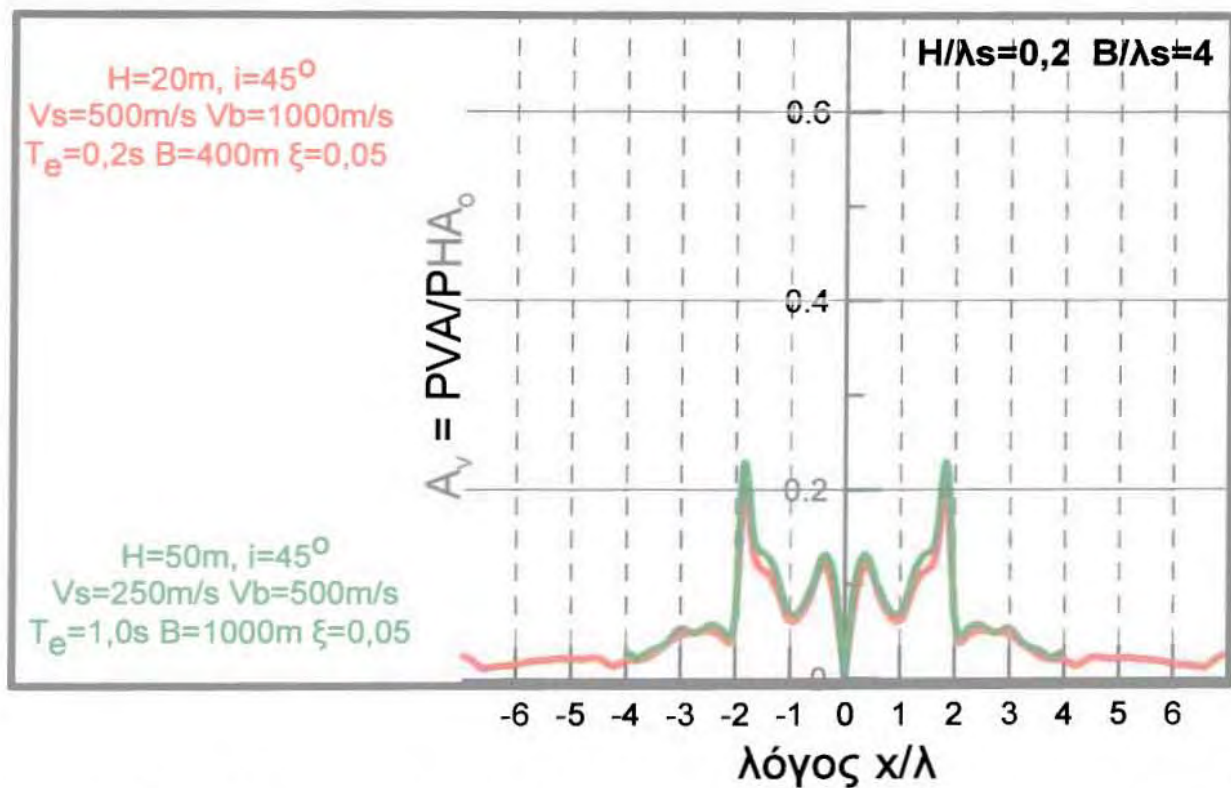
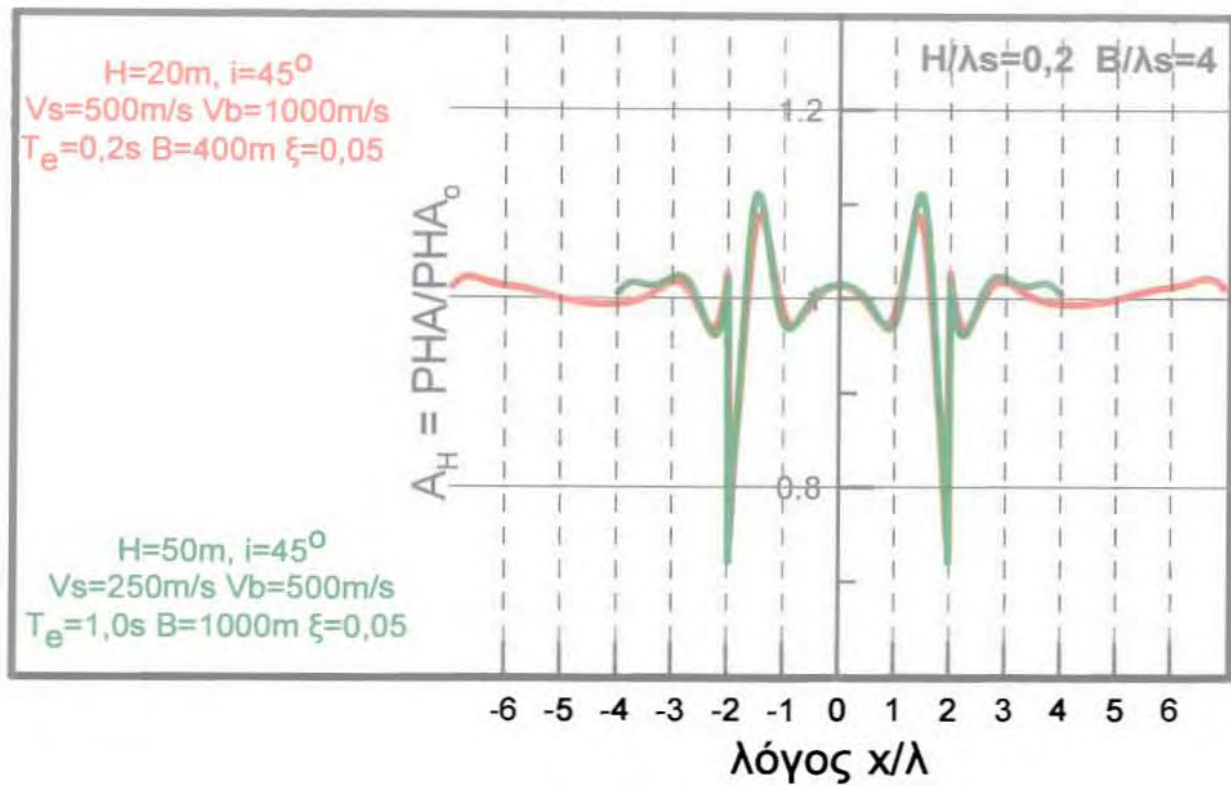


**Σχήμα 4.2.3:** Οριζόντιες και κατακόρυφες γεωμορφικές ενισχύσεις αναλύσεων #1 και #10, ως συνάρτηση της απόστασης  $x$  από το κέντρο της κοιλάδας αδιαστατοποιημένης ως προς το δεσπόζον μήκος κύματος  $\lambda_s$  εντός αυτής.

#### **4.2.2. Επίδραση της δυσκαμψίας εδάφους $V_s$ και υποβάθρου $V_b$**

Με βάση τα αποτελέσματα της παραγράφου 4.2.1, σημαντικές παράμετροι διαμόρφωσης της γεωμορφικής ενίσχυσης είναι οι αδιάστατοι λόγοι πάχους  $H/\lambda_s$  και πλάτους  $B/\lambda_s$  μιας 2Δ εδαφικής λεκάνης τραπεζοειδούς διατομής. Στην παράγραφο αυτή διερευνάται η σημαντικότητα της δυσκαμψίας του εδάφους  $V_s$  και του υποβάθρου  $V_b$ . Για το σκοπό αυτό συγκρίνονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων #1 και #3 που αφορούν εδαφικές λεκάνες που έχουν ίδιες τιμές των  $H/\lambda_s$  και  $B/\lambda_s$ , ίδια κλίση πρανών  $i$ , ίδια απόσβεση  $\xi$ , αλλά διαφορετικές τιμές των  $V_s$  και  $V_b$ . Οι γεωμορφικές ενισχύσεις παρουσιάζονται συναρτήσει της αδιάστατης απόστασης  $x/\lambda_s$ , και προκύπτουν πρακτικώς ταυτόσημες. Αυτό συνεπάγεται ότι δεν έχουν σημασία οι τιμές των  $V_s$  και  $V_b$ , αντίστοιχα, αλλά η σχετική τιμή αυτών, η οποία είναι ίση με 0.5 και στις δύο περιπτώσεις λεκανών. Πιο συγκεκριμένα αποδεικνύεται ότι καθοριστική παράμετρος της γεωμορφικής ενίσχυσης είναι και ο λόγος εμπέδησης  $a=(\rho_s V_s)/(\rho_b V_b)$ , ο οποίος στις αναλύσεις της παρούσας εργασίας ισούται απλουστευτικά με  $a=V_s/V_b$ , καθώς  $\rho_s = \rho_b$ .





**Σχήμα 4.2.4:** Οριζόντιες και κατακόρυφες γεωμορφικές ενισχύσεις αναλύσεων #1 και #3, ως συνάρτηση της απόστασης  $x$  από το κέντρο της κοιλάδας αδιαστατοποιημένης ως προς το δεσπόζον μήκος κύματος  $\lambda_s$  εντός αυτής.

#### 4.3. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΣΗΜΑΝΤΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΣΤΗ ΓΕΩΜΟΡΦΙΚΗ ΕΝΙΣΧΥΣΗ

Με βάση την προηγούμενη παράγραφο, ως καθοριστικές παράμετροι στον καθορισμό της γεωμορφικής ενίσχυσης προκύπτουν οι τιμές του αδιάστατου πάχους  $H/\lambda_s$  και πλάτους  $B/\lambda_s$  της εδαφικής λεκάνης, αλλά και η τιμή του λόγου εμπέδησης  $a$ . Πέραν αυτών, είναι προφανές, ότι καθοριστική σημασία θα παίζουν και η κλίση των πρηνών του υποβάθρου  $i$  στις άκρες της 2Δ λεκάνης, αλλά και η τιμή της απόσβεσης  $\xi$ . Έτσι, στην παρούσα παράγραφο διερευνάται η επίδραση όλων των ανωτέρω καθοριστικών παραμέτρων στη γεωμορφική ενίσχυση. Έτσι, στον Πίνακα 4.3.1 παρουσιάζεται η λίστα με τις εκτελεσθείσες αναλύσεις που έχουν ήδη παρουσιαστεί στον Πίνακα 4.1.1, αλλά με τις τιμές των σημαντικών παραμέτρων που τις χαρακτηρίζουν.

ανάλυση	$H/\lambda_s$	$B/\lambda_s$	$a$	Κλίση( $^\circ$ )	απόσβεση
#1	0,20	4	0,50	45	0,05
#2	0,20	10	0,50	45	0,05
#3	0,20	4	0,50	45	0,05
#4	0,20	4	0,25	45	0,05
#5	0,20	4	0,75	45	0,05
#6	0,10	2	0,50	45	0,05
#7	0,50	10	0,50	45	0,05
#8	0,20	0,80	0,50	45	0,05
#9	0,20	1,60	0,50	45	0,05
#10	0,20	4	0,50	45	0,05
#11	0,10	2	0,50	45	0,05
#12	0,20	4	0,10	45	0,05
#13	0,50	4	0,50	45	0,05
#14	1,0	4	0,50	45	0,05
#15	0,10	4	0,50	45	0,05
#16	0,20	4	0,50	30	0,05
#17	0,20	4	0,50	60	0,05
#18	0,20	4	0,50	90	0,05
#19	0,20	4	0,50	45	0,01
#20	0,20	4	0,50	45	0,12
#21	0,20	4	0,50	45	0,20

**Πίνακας 4.3.1:** πίνακας τιμών χαρακτηριστικών παραμέτρων αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας εργασίας (βλέπε και Πίνακα 4.1.1).

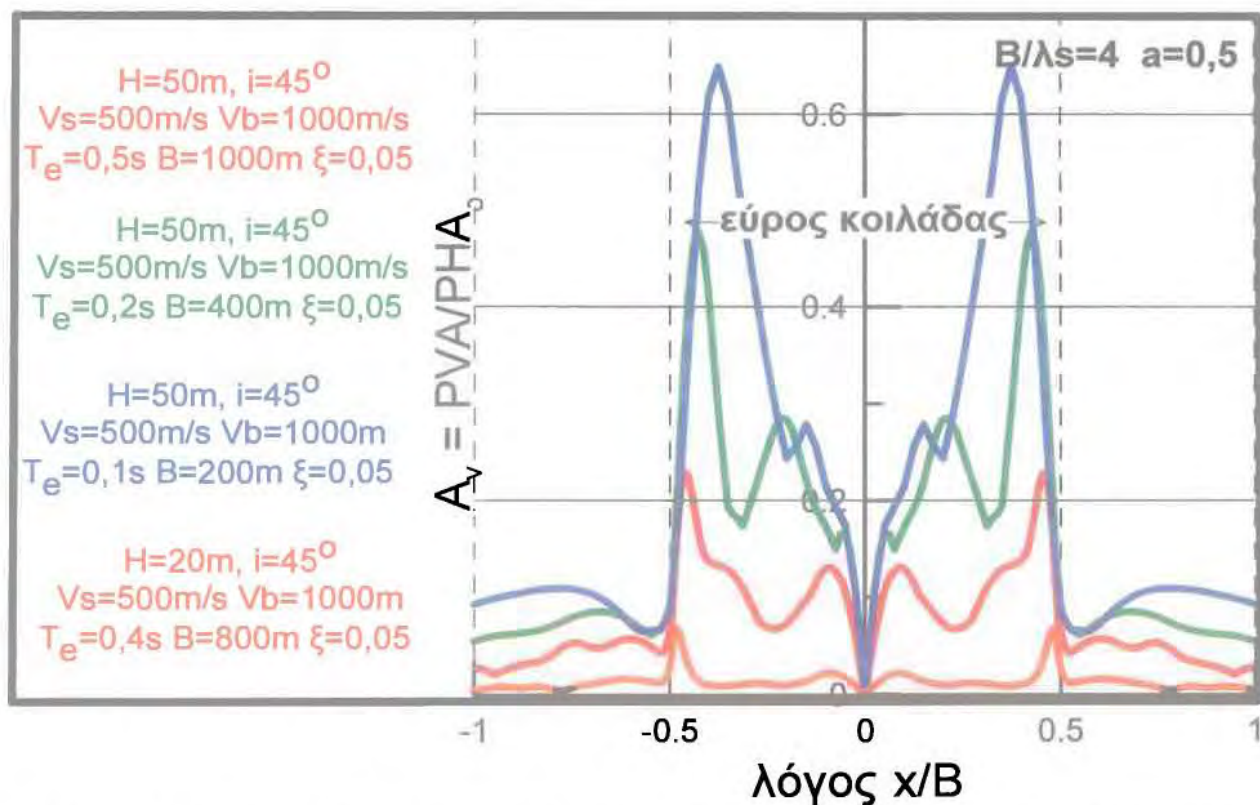
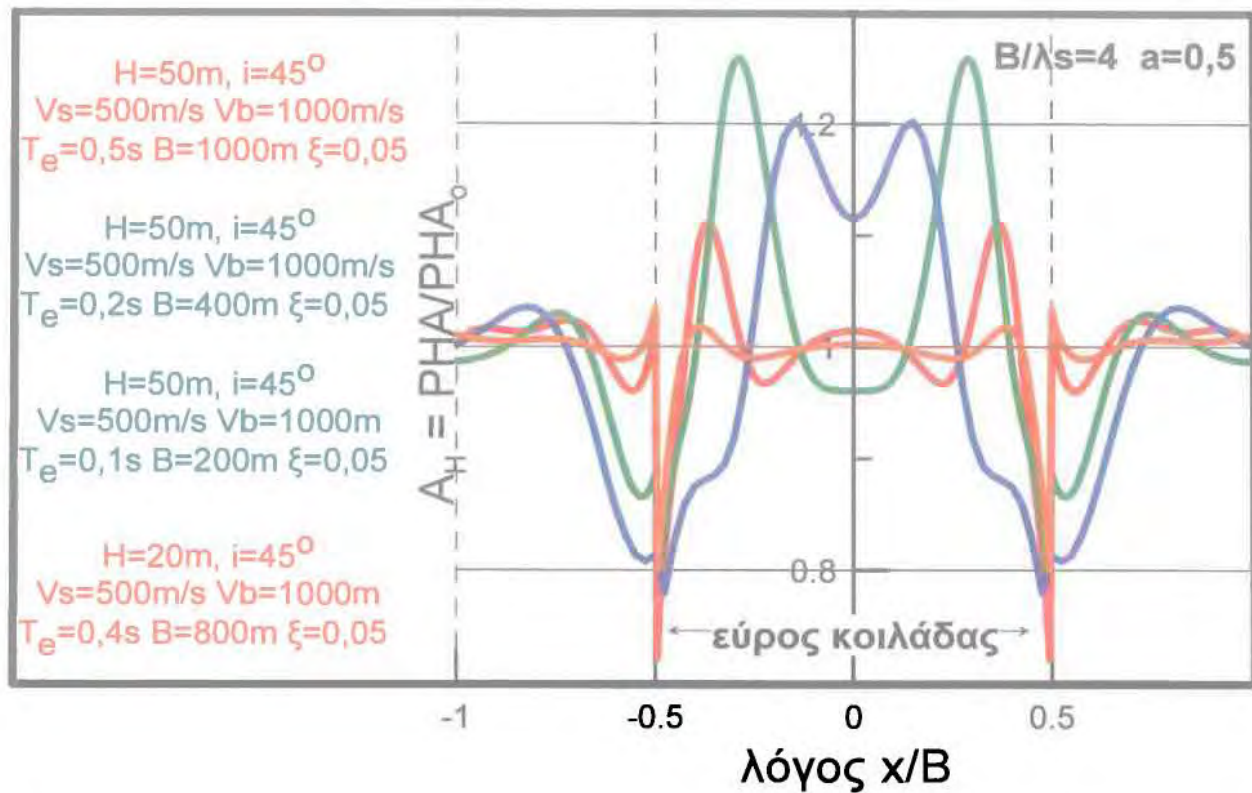
#### 4.3.1. Επίδραση αδιάστατου πάχους λεκάνης $H/\lambda_s$

Σύμφωνα με τον Πίνακα 4.3.1, για τη διερεύνηση της επίδρασης του αδιάστατου λόγου  $H/\lambda_s$  στη γεωμορφική ενίσχυση εκτελέστηκαν διάφορες παραμετρικές αναλύσεις. Πιο συγκεκριμένα, για τις ανάγκες της σύγκρισης επιλέγονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων #10, #13, #14 και #15, στις οποίες η τιμή του λόγου  $H/\lambda_s$  παίρνει αντίστοιχα τις τιμές 0,20 0,50 1,0 και 0,10, αλλά οι τιμές όλων των άλλων σημαντικών παραμέτρων παραμένουν ίδιες και ίσες με: αδιάστατο πλάτος  $B/\lambda_s = 4$ , λόγος εμπίδησης  $a = 0.5$ , γωνία κλίσης των πρανών στα άκρα της 2Δ λεκάνης  $\theta=45^\circ$  και ποσοστό απόσβεσης  $\xi=0.05$ .

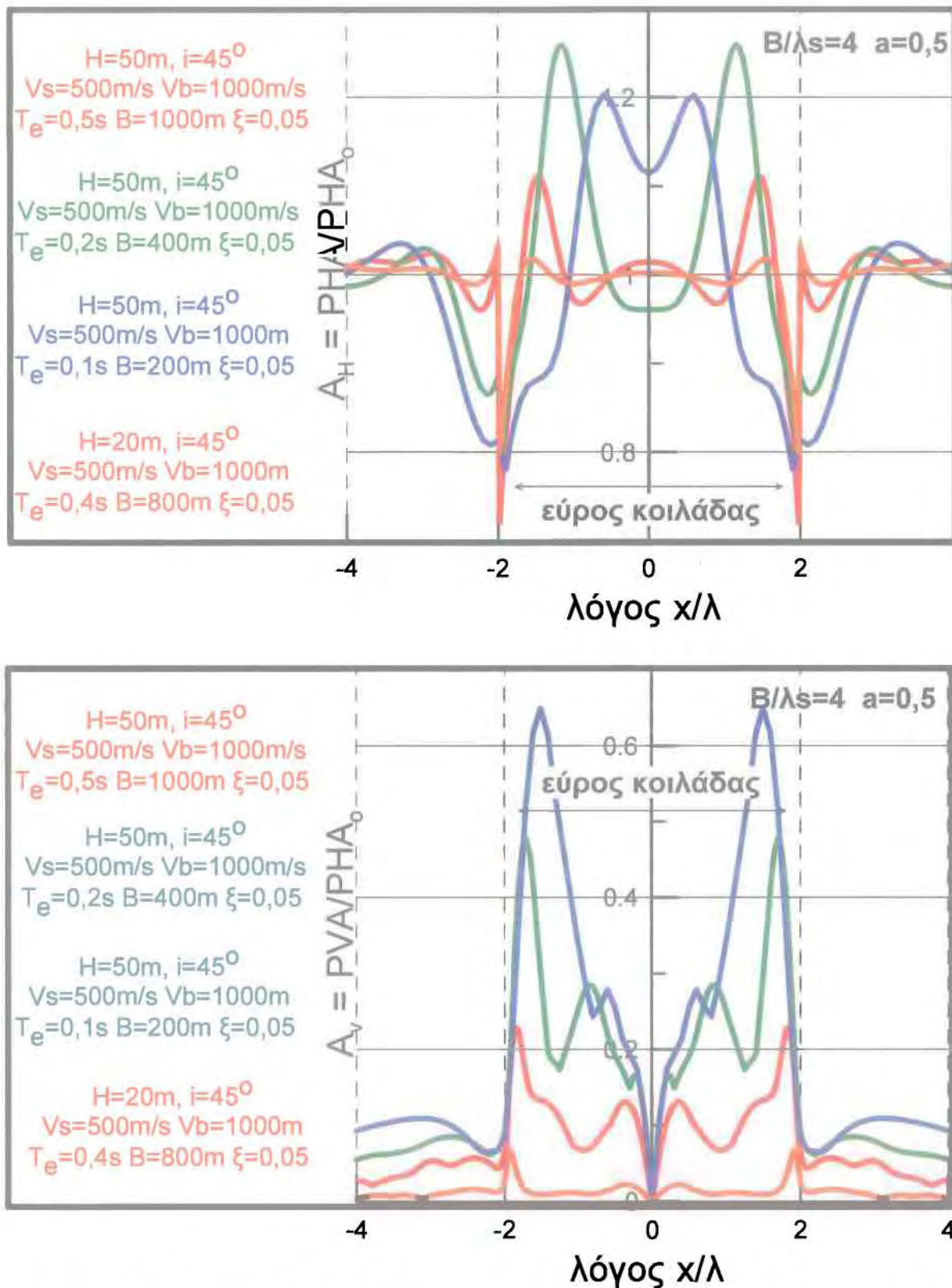
Η σύγκριση γίνεται στα Σχήματα 4.3.1 και 4.3.2, και η γεωμορφική ενίσχυση σε όρους  $A_H$  και  $A_V$  παρουσιάζεται ως συνάρτηση της απόστασης  $x$ , αδιαστατοποιημένης ως προς  $B$  και  $\lambda$ , αντίστοιχα. Όπως προκύπτει, η επίδραση του λόγου  $H/\lambda_s$  στις οριζόντιες και κατακόρυφες ενισχύσεις είναι σημαντική. Παρόλα αυτά υπάρχουν κάποια κοινά χαρακτηριστικά, όπως η απομείωση της γεωμορφικής ενίσχυσης ( $A_H \ll 1$  με  $A_V$  μικρό αλλά υπαρκτό) στην άκρη της κοιλάδας, ένα σημείο που πρακτικώς ταλαντώνεται όπως το αναδυόμενο υπόβαθρο. Από εκεί και πέρα, προκύπτουν σημαντικές διαφοροποιήσεις:

- Όσο μεγαλύτερου πάχους είναι η εδαφική λεκάνη (μεγαλύτερου  $H/\lambda_s$ ), τόσο πιο έντονη αποδεικνύεται η γεωμορφική επιδείνωση  $A_V$  καθ' όλο σχεδόν το μήκος της λεκάνης. Μάλιστα, οι μέγιστες τιμές της  $A_V$  εμφανίζονται πλησίον της άκρης της λεκάνης (σε απόσταση  $x/B = 0,37 - 0,48$  ή  $x/\lambda_s = 1,50 - 2,0$  από το μέσο). Από την άλλη μεριά, η τιμή της  $A_V$  τείνει στο μηδέν στο κέντρο της.
- Η επίδραση του αδιάστατου πάχους  $H/\lambda_s$  στην γεωμορφική επιδείνωση  $A_H$  είναι πιο περίπλοκη. Πιο συγκεκριμένα, για σχετικά αβαθείς κοιλάδες ( $H/\lambda_s < 0.5$ ), οι μέγιστες τιμές της  $A_H$  αυξάνουν με το αδιάστατο πάχος  $H/\lambda_s$  και εμφανίζονται πλησίον της άκρης της κοιλάδας (σε απόσταση  $x/B = 0,15 - 0,38$  ή  $x/\lambda_s = 0,60 - 1,50$  από το μέσο), όπως συμβαίνει ποιοτικά και με την  $A_V$ . Αντίστοιχα, όσο πιο αβαθής είναι η κοιλάδα, τόσο πιο μικρή είναι η γεωμορφική ενίσχυση, και πάλι αντίστοιχα ποιοτικά με την  $A_V$ . Όμως για βαθιές κοιλάδες ( $H/\lambda_s = 1.0$ ), οι μέγιστες τιμές  $A_H$  προκύπτουν περί το μέσο της, υποδεικνύοντας ότι η σύμπτωση των κυμάτων Rayleigh στο κέντρο τους διαφοροποιούν τη συνολική σεισμική τους απόκριση, και μεταθέτουν την περιοχή υψηλών ενισχύσεων, από πλησίον των άκρων στο κέντρο τους.





**Σχήμα 4.3.1:** Επίδραση αδιάστατου πάχους  $H/\lambda_s$  στις οριζόντιες και κατακόρυφες γεωμορφικές ενισχύσεις αναλύσεων #10, #13, #14 και #15, ως συνάρτηση της απόστασης  $x$  από το κέντρο της κοιλάδας αδιαστατοποιημένης ως προς το εύρος  $B$  αυτής.



**Σχήμα 4.3.2:** Επίδραση αδιάστατου πάχους  $H/l_s$  στις οριζόντιες και κατακόρυφες γεωμορφικές ενισχύσεις αναλύσεων #10, #13, #14 και #15, ως συνάρτηση της απόστασης  $x$  από το κέντρο της κοιλάδας αδιαστατοποιημένης ως προς το δεσπόζον μήκος κύματος  $l_s$  εντός αυτής.

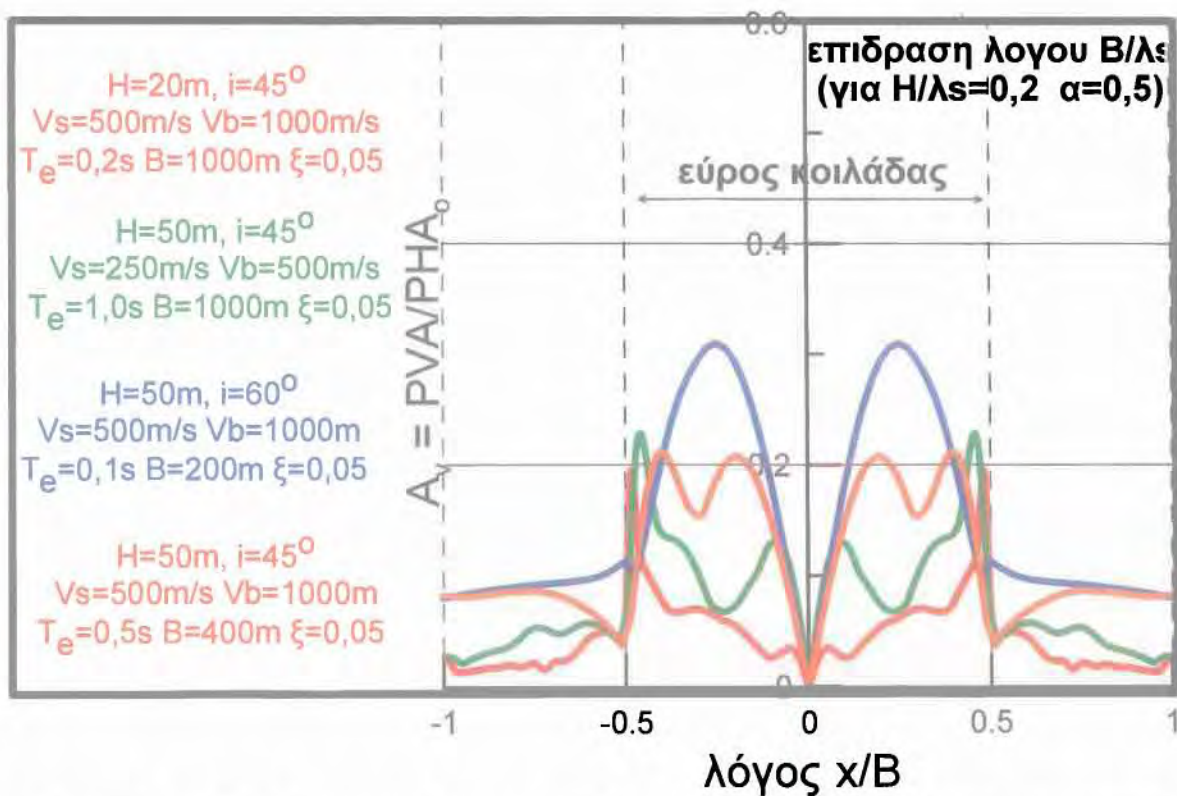
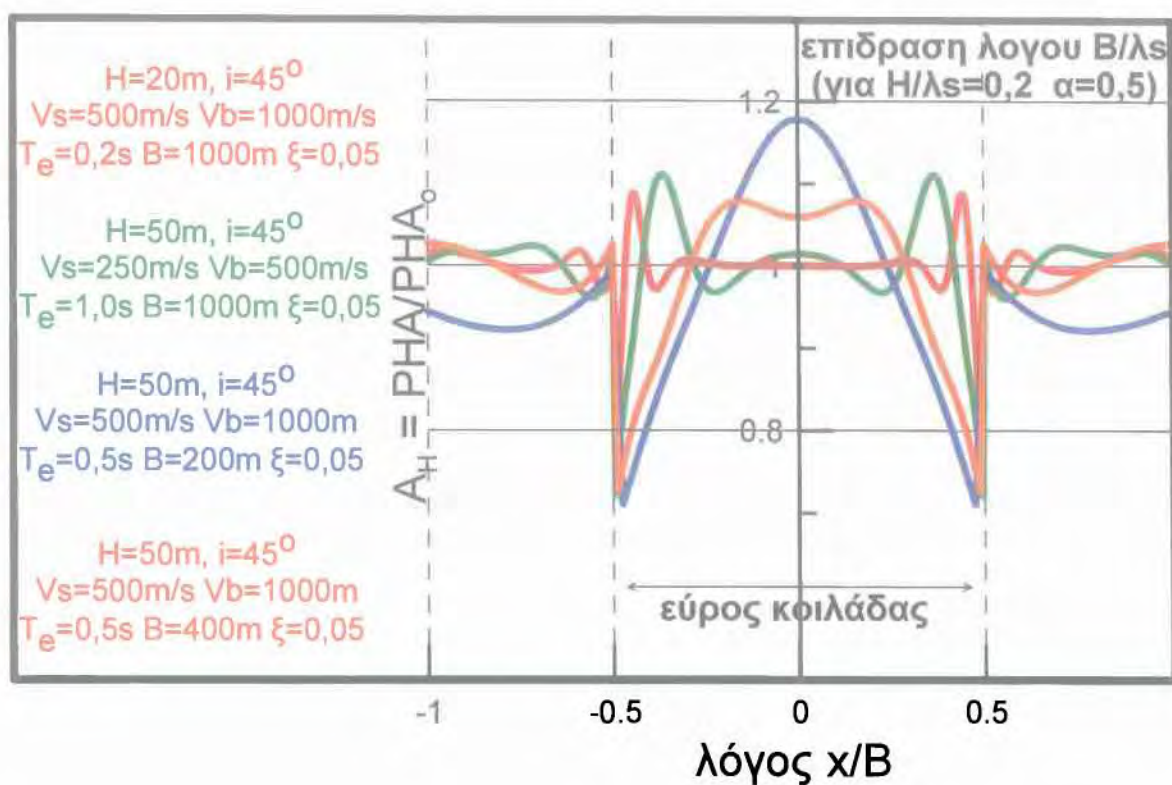
#### 4.3.2. Επίδραση αδιάστατου πλάτους λεκάνης B/λs

Σύμφωνα με τον Πίνακα 4.3.1, για τη διερεύνηση της επίδρασης του αδιάστατου λόγου B/λs στη γεωμορφική ενίσχυση εκτελέσθηκαν διάφορες παραμετρικές αναλύσεις. Πιο συγκεκριμένα, για τις ανάγκες της σύγκρισης επιλέγονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων #2, #3, #8 και #9, στις οποίες η τιμή του λόγου B/λs παίρνει αντίστοιχα τις τιμές 10,0 , 4,0 , 0,8 και 1,6 , αλλά οι τιμές όλων των άλλων σημαντικών παραμέτρων παραμένουν ίδιες και ίσες με: αδιάστατο πάχος H/λs = 0,2, λόγος εμπέδησης a = 0.5, γωνία κλίσης των πρανών στα άκρα της 2Δ λεκάνης i=45° και ποσοστό απόσβεσης ξ=0.05 .

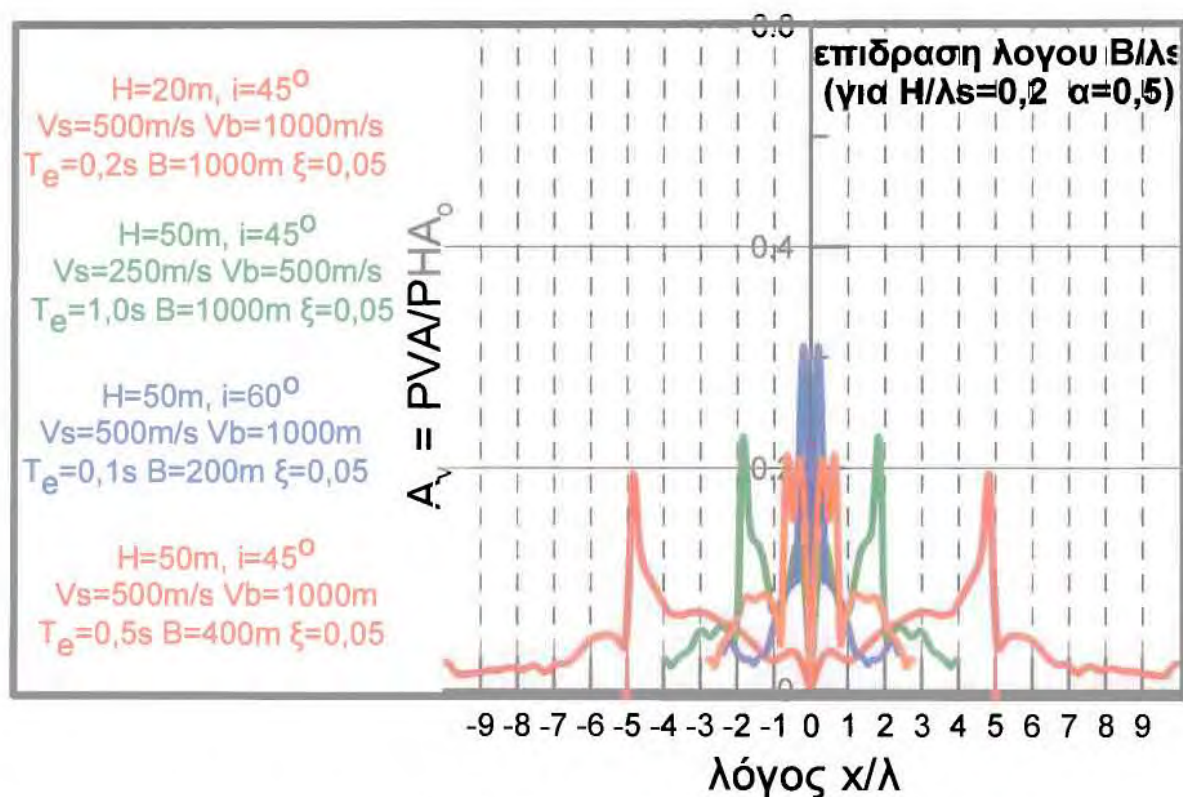
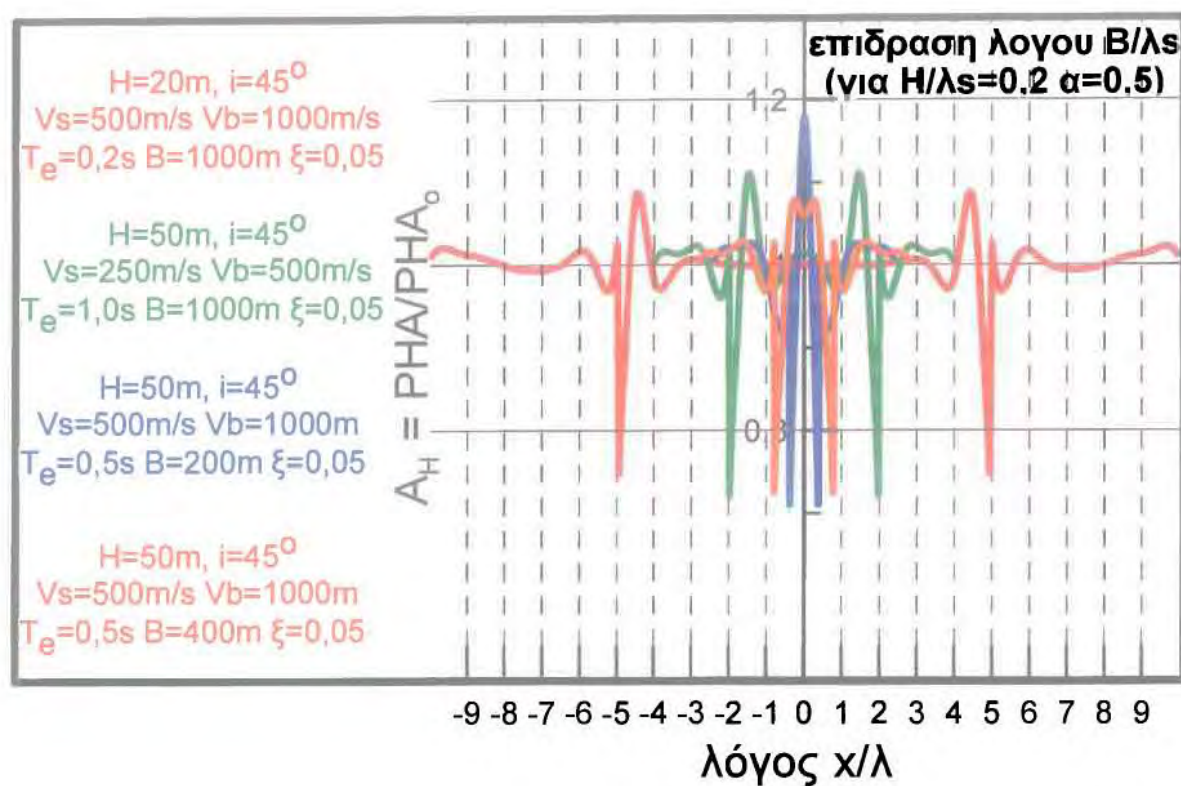
Η σύγκριση γίνεται στα Σχήματα 4.3.3 και 4.3.4, και η γεωμορφική ενίσχυση σε όρους A<sub>H</sub> και A<sub>V</sub> παρουσιάζεται ως συνάρτηση της απόστασης x, αδιαστατοποιημένης ως προς B και λ, αντίστοιχα. Προφανώς, η χρήση της αδιάστατης απόστασης x/λ δεν είναι δόκιμη όταν ο λόγος B/λs είναι τόσο διαφορετικός. Παρόλα αυτά, όπως προκύπτει, η επίδραση του λόγου B/λs στις οριζόντιες και κατακόρυφες ενισχύσεις είναι σημαντική όπως συμβαίνει και στη περίπτωση του λόγου H/λs. Το κοινό χαρακτηριστικό είναι και πάλι η απομείωση της γεωμορφικής ενίσχυσης (A<sub>H</sub> << 1 με A<sub>V</sub> μικρό αλλά υπαρκτό) στην άκρη της κοιλάδας. Οι βασικές διαφοροποιήσεις που παρατηρούνται σε αυτές τις συγκρίσεις είναι:

- Όσο πιο στενή είναι η εδαφική λεκάνη (μικρό πλάτος B/λs), τόσο πιο έντονη αποδεικνύεται η γεωμορφική επιδείνωση A<sub>V</sub> καθ' όλο σχεδόν το πλάτος της λεκάνης. Μάλιστα, οι μέγιστες τιμές της A<sub>V</sub> εμφανίζονται πλησίον της άκρης της λεκάνης (σε απόσταση x/B περί το 0,48 από το κέντρο της) για πλατειές λεκάνες (B/λs ≥ 2-3), και προς το κέντρο της (σε απόσταση x/B περί το 0,25 από το κέντρο της) στις στενές (B/λs ≤ 2-3). Σε όλες τις περιπτώσεις η τιμή της A<sub>V</sub> τείνει στο μηδέν στο κέντρο της.
- Η επίδραση του πλάτους B/λs στην γεωμορφική επιδείνωση A<sub>H</sub> είναι αντίστοιχη με αυτή του αδιάστατου πάχους H/λs. Πιο συγκεκριμένα, για πλατειές κοιλάδες (B/λs > 2-3), οι μέγιστες τιμές της A<sub>H</sub> εμφανίζονται πλησίον της άκρης της κοιλάδας (σε απόσταση x/B = 0,36 – 0,48 από το κέντρο της). Αντίστοιχα, όσο πιο στενή είναι η κοιλάδα (B/λs < 2-3), οι μέγιστες τιμές της A<sub>H</sub> προκύπτουν περί το μέσο της, υποδεικνύοντας ότι η σύμπτωση των κυμάτων Rayleigh στο κέντρο τους διαφοροποιούν τη συνολική σεισμική τους απόκριση, και μεταθέτουν την περιοχή υψηλών ενισχύσεων, από πλησίον των άκρων στο κέντρο τους.





**Σχήμα 4.3.3:** Επίδραση αδιάστατου πλάτους  $B/\lambda_s$  στις οριζόντιες και κατακόρυφες γεωμορφικές ενισχύσεις αναλύσεων #2, #3, #8 και #9, ως συνάρτηση της απόστασης  $x$  από το κέντρο της κοιλάδας αδιαστατοποιημένης ως προς το εύρος  $B$  αυτής.



**Σχήμα 4.3.4:** Επίδραση αδιάστατου πλάτους  $B/\lambda_s$  στις οριζόντιες και κατακόρυφες γεωμορφικές ενισχύσεις αναλύσεων #2, #3, #8 και #9, ως συνάρτηση της απόστασης  $x$  από το κέντρο της κοιλάδας αδιαστατοποιημένης ως προς το δεσπόζον μήκος κύματος  $\lambda_s$  εντός αυτής.

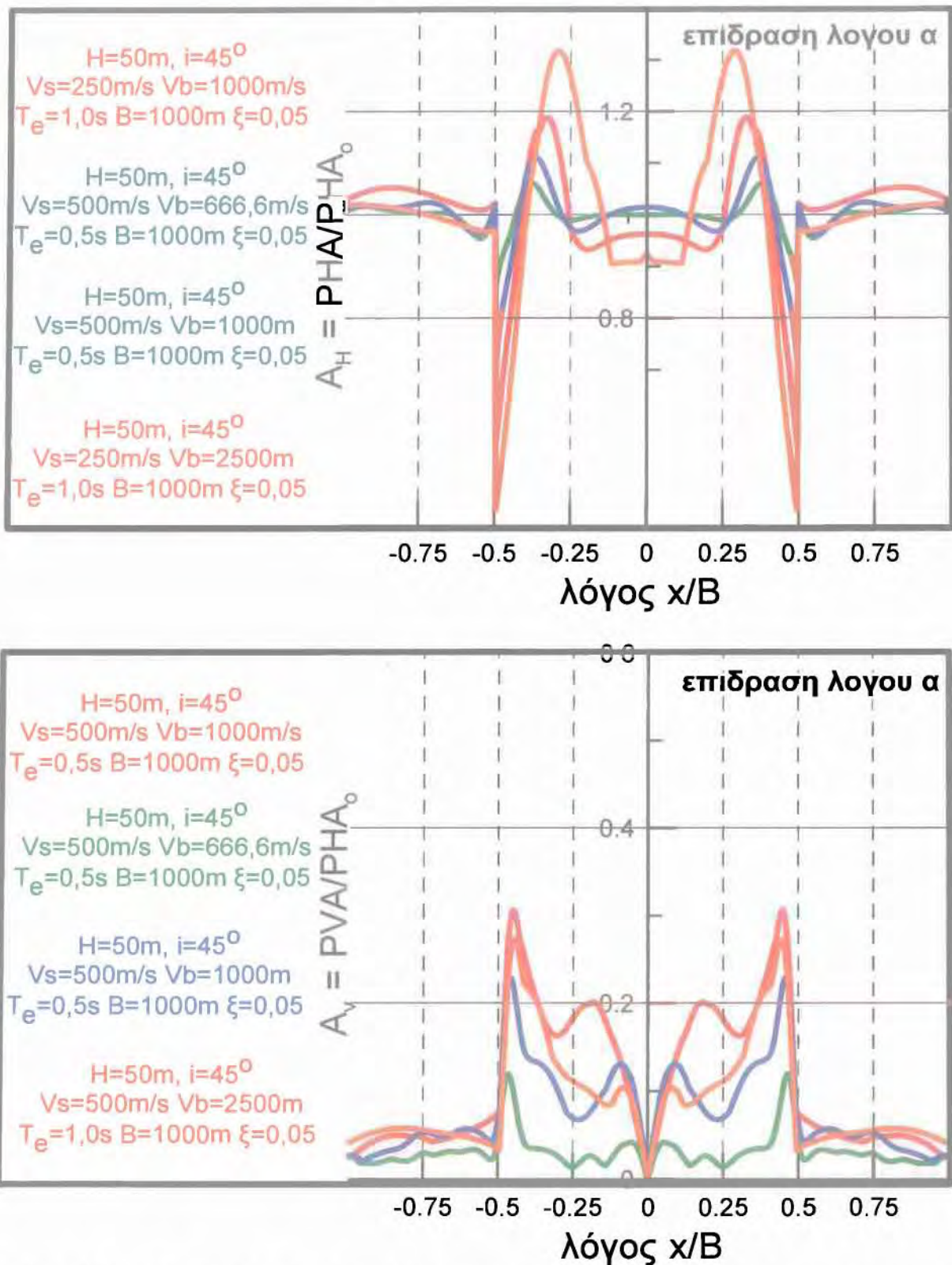
#### 4.3.3. Επίδραση λόγου εμπέδησης $a$

Σύμφωνα με τον Πίνακα 4.3.1, για τη διερεύνηση της επίδρασης του λόγου εμπέδησης  $a$  στη γεωμορφική ενίσχυση εκτελέσθηκαν διάφορες παραμετρικές αναλύσεις. Πιο συγκεκριμένα, για τις ανάγκες της σύγκρισης επιλέγονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων #4, #5, #10 και #12, στις οποίες η τιμή του λόγου  $a$  παίρνει αντίστοιχα τις τιμές 0,25 0,75 0,50 και 0,10, αλλά οι τιμές όλων των άλλων σημαντικών παραμέτρων παραμένουν ίδιες και ίσες με: αδιάστατο πάχος  $H/\lambda_s = 0,2$ , αδιάστατο πλάτος  $B/\lambda_s = 4$ , γωνία κλίσης των πρανών στα άκρα της 2Δ λεκάνης  $i=45^\circ$  και ποσοστό απόσβεσης  $\xi=0,05$ .

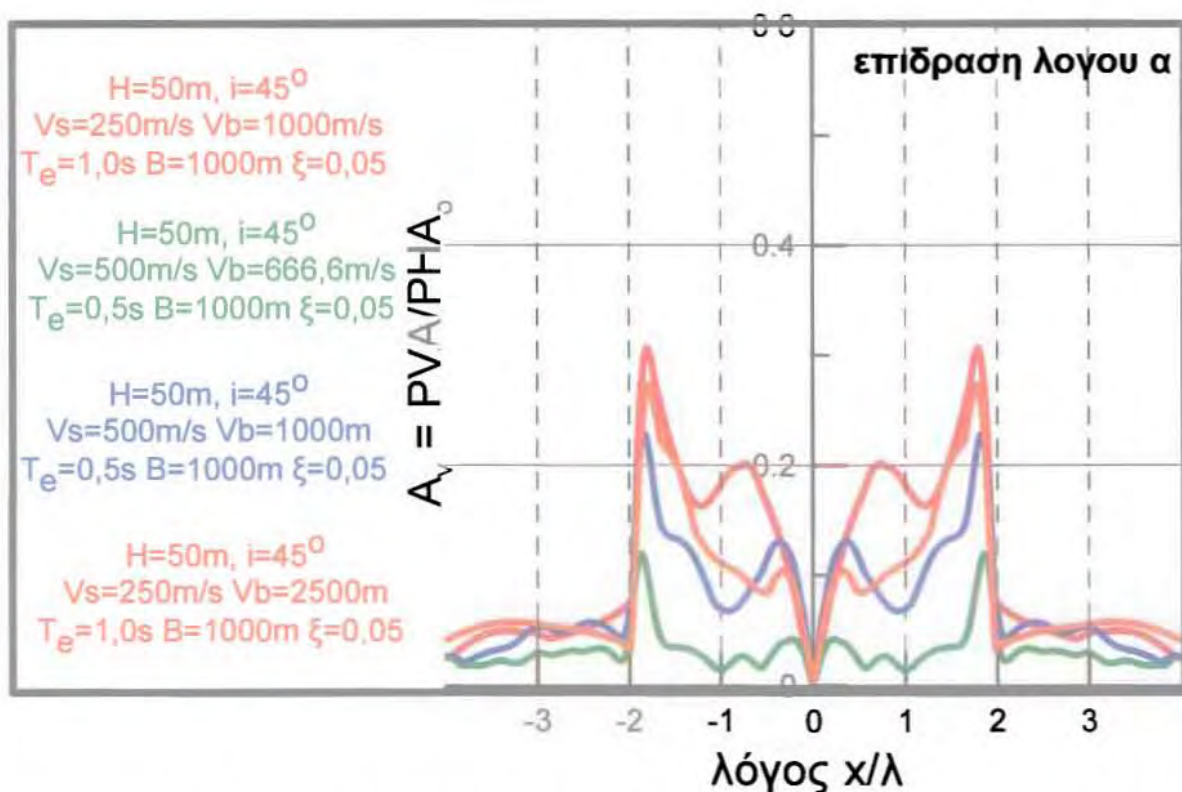
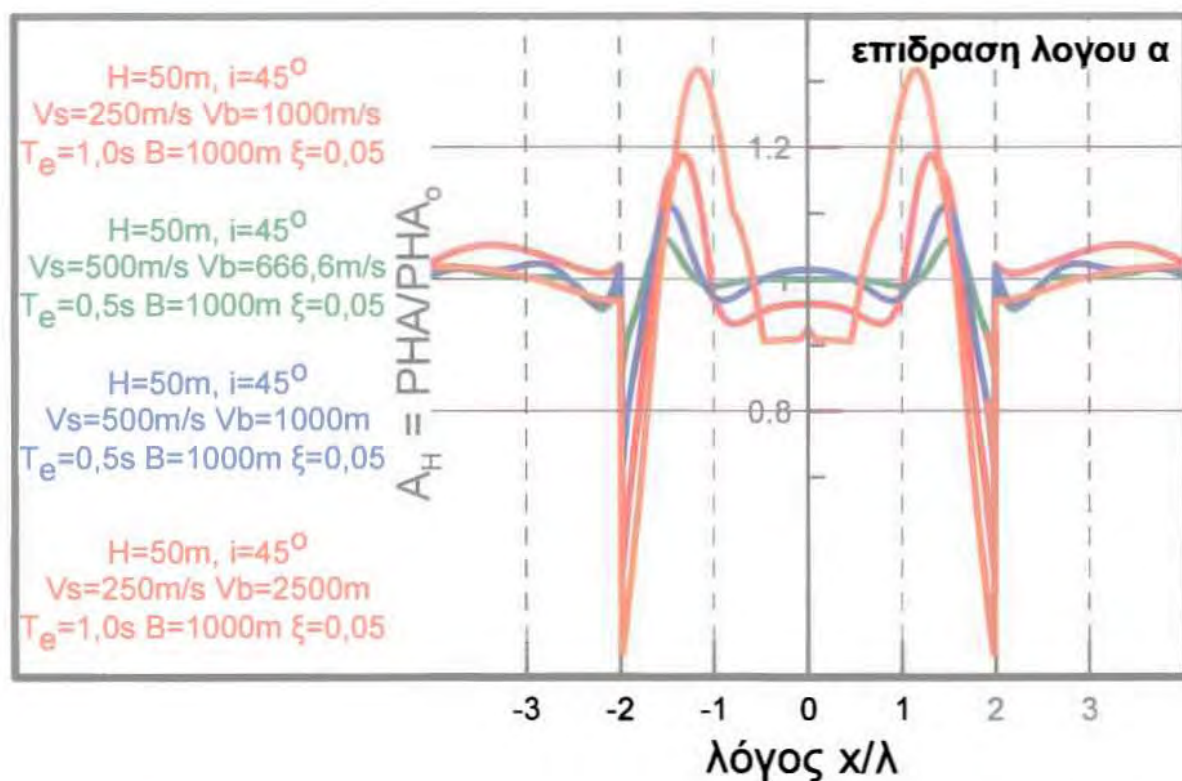
Η σύγκριση γίνεται στα Σχήματα 4.3.5 και 4.3.6, και η γεωμορφική ενίσχυση σε όρους  $A_H$  και  $A_V$  παρουσιάζεται ως συνάρτηση της απόστασης  $x$ , αδιαστατοποιημένης ως προς  $B$  και  $\lambda$ , αντίστοιχα. Και πάλι, όπως προκύπτει, η επίδραση του λόγου εμπέδησης στις οριζόντιες και κατακόρυφες ενισχύσεις είναι εξίσου σημαντική με τις περιπτώσεις του λόγων  $H/\lambda_s$  και  $B/\lambda_s$ . Οι βασικές παρατηρήσεις αυτών των συγκρίσεων είναι:

- Όσο μικρότερος είναι ο λόγος εμπέδησης, τόσο πιο έντονη αποδεικνύεται η γεωμορφική επιδείνωση  $A_V$  καθ' όλο σχεδόν το πλάτος της λεκάνης. Οι μέγιστες τιμές της  $A_V$  εμφανίζονται πλησίον της άκρης της λεκάνης, δηλαδή σε απόσταση  $x/B$  περί το 0,45-0,50 από το κέντρο της, ή  $x/\lambda_s$  έως 0,2 από την άκρη της. Σε όλες τις περιπτώσεις η τιμή της  $A_V$  τείνει στο μηδέν στο κέντρο της. Εξαίρεση στον ανωτέρω κανόνα αποτελεί η ανάλυση για  $a=0,1$ , η οποία δίνει τιμές γεωμορφικής ενίσχυσης  $A_V$  αντίστοιχες με την τιμή  $a=0,25$ .
- Ο λόγος εμπέδησης  $a$  επιδρά μειωτικά και στην γεωμορφική επιδείνωση  $A_H$ . Πιο συγκεκριμένα, όσο μικρότερες είναι οι τιμές του  $a$ , τόσο μεγαλύτερες γίνονται οι μέγιστες τιμές της  $A_H$  οι οποίες εμφανίζονται πλησίον της άκρης της κοιλάδας, δηλαδή σε απόσταση  $x/B = 0,29 - 0,40$  από το κέντρο της, ή  $x/\lambda_s$  περί το 0,4-1,20 από την άκρη. Οι τιμές της  $A_H$  περί το μέσο της λεκάνης είναι περίπου ίσες με 1,0 για λόγο  $a > 0,50$  ενώ μπορεί να γίνουν και μικρότερες του 1,0 για λόγους εμπέδησης  $a < 0,50$ .





**Σχήμα 4.3.5:** Επίδραση λόγου εμπέδησης α στις οριζόντιες και κατακόρυφες γεωμορφικές ενισχύσεις αναλύσεων #4, #5, #10 και #12, ως συνάρτηση της απόστασης x από το κέντρο της κοιλάδας αδιαστατοποιημένης ως προς το εύρος B αυτής.



**Σχήμα 4.3.6:** Επίδραση λόγου εμπέδησης α στις οριζόντιες και κατακόρυφες γεωμορφικές ενισχύσεις αναλύσεων #4, #5, #10 και #12, ως συνάρτηση της απόστασης  $x$  από το κέντρο της κοιλάδας αδιαστατοποιημένης ως προς το δεσπόζον μήκος κύματος  $\lambda_s$  εντός αυτής.

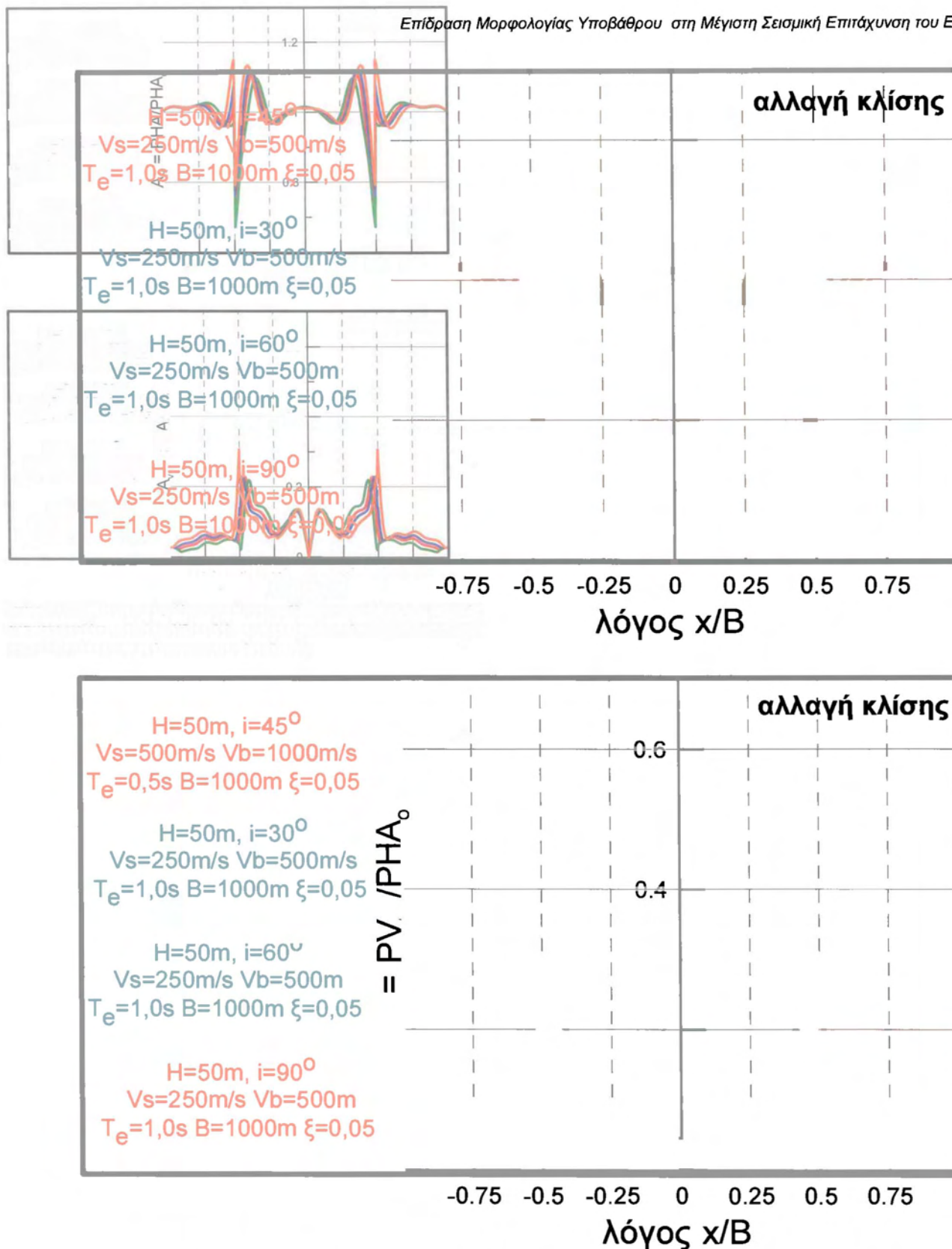
#### **4.3.4. Επίδραση γωνίας κλίσης ί πρανών υποβάθρου στα άκρα της κοιλάδας**

Σύμφωνα με τον Πίνακα 4.3.1, για τη διερεύνηση της επίδρασης της γωνίας κλίσης των πρανών της λεκάνης στη γεωμορφική ενίσχυση εκτελέσθηκαν διάφορες παραμετρικές αναλύσεις. Πιο συγκεκριμένα, για τις ανάγκες της σύγκρισης επιλέγονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων #3, #16, #17 και #18, στις οποίες η κλίση  $i$  παίρνει αντίστοιχα τις τιμές  $45^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $60^\circ$  και  $90^\circ$ , αλλά οι τιμές όλων των άλλων σημαντικών παραμέτρων παραμένουν ίδιες και ίσες με: αδιάστατο πάχος  $H/\lambda_s = 0,2$ , αδιάστατο πλάτος  $B/\lambda_s = 4$ , λόγος εμπίδησης  $a=0.5$  και ποσοστό απόσβεσης  $\xi=0.05$ .

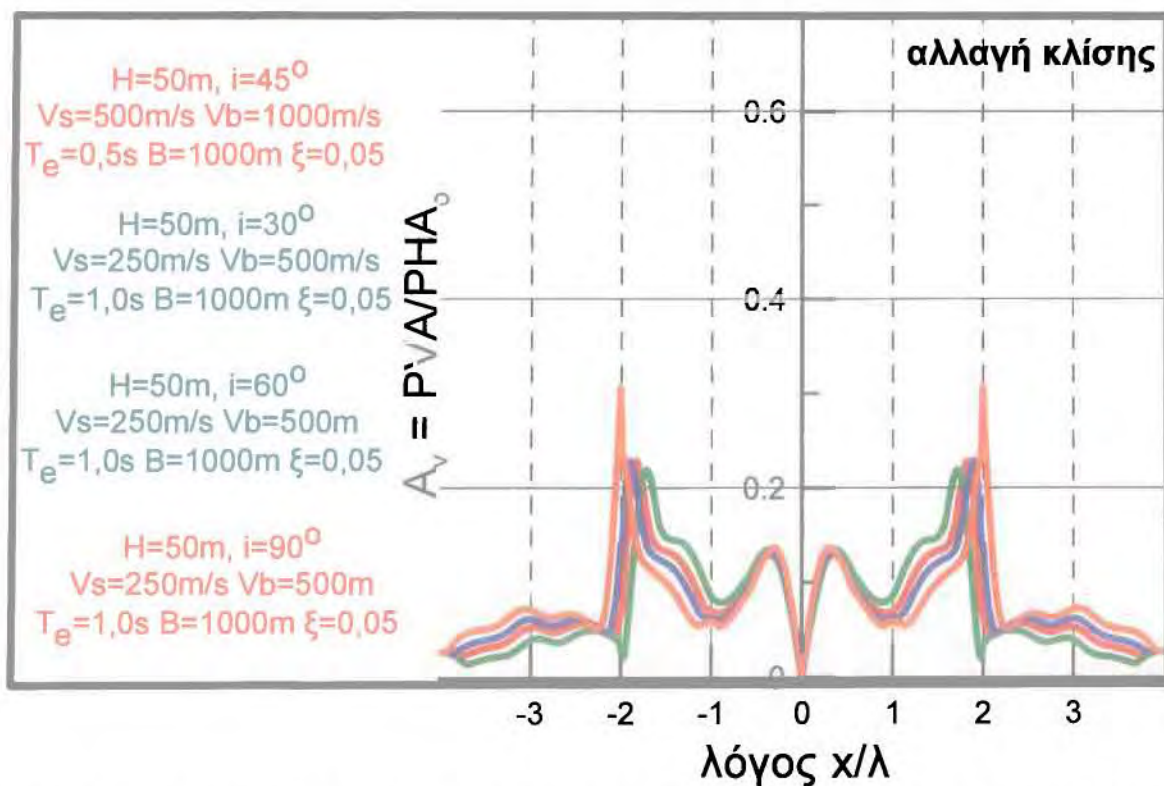
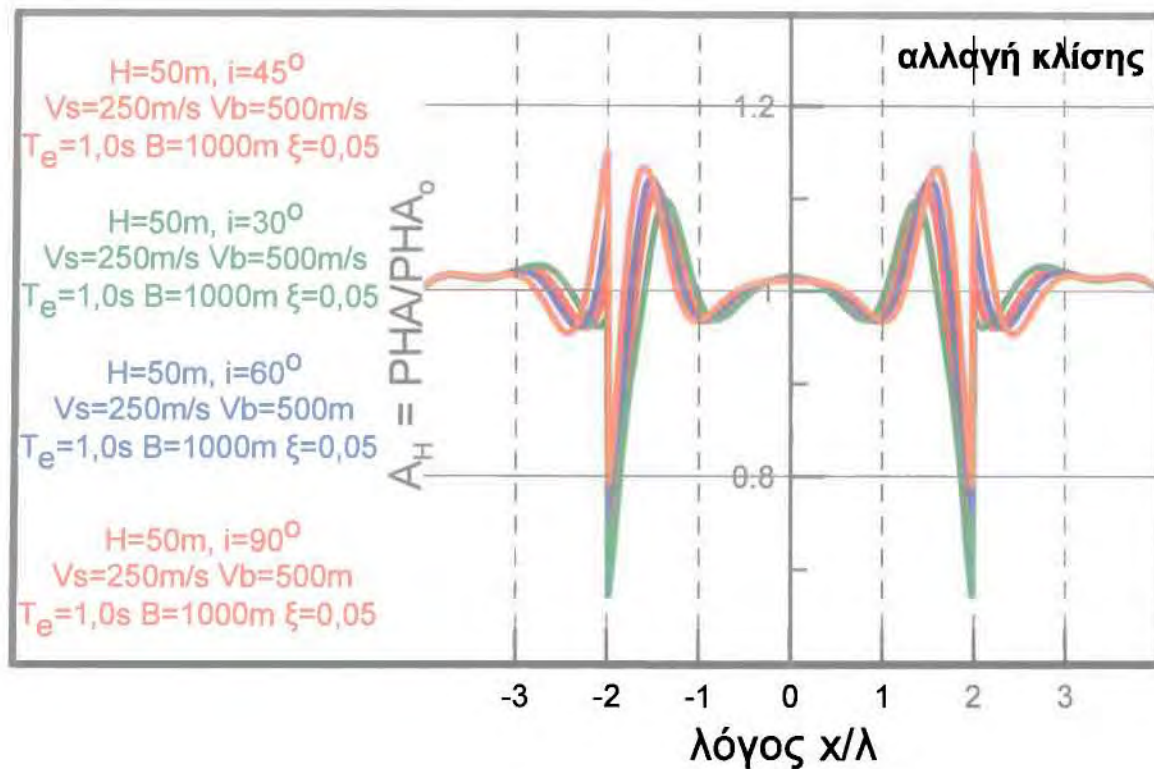
Η σύγκριση γίνεται στα Σχήματα 4.3.7 και 4.3.8, και η γεωμορφική ενίσχυση σε όρους  $A_H$  και  $A_V$  παρουσιάζεται ως συνάρτηση της απόστασης  $x$ , αδιαστατοποιημένης ως προς  $B$  και  $\lambda$ , αντίστοιχα. Όπως προκύπτει, η επίδραση της κλίσης στις οριζόντιες και κατακόρυφες γεωμορφικές ενισχύσεις είναι δευτερεύουσας σημασίας σε σχέση με τις επιδράσεις των βασικών παραμέτρων  $H/\lambda_s$ ,  $B/\lambda_s$  και  $a$  που αναλύονται παραπάνω. Οι βασικές παρατηρήσεις επι αυτών των συγκρίσεων είναι:

- Τα διαγράμματα της γεωμορφικής επιδείνωσης  $A_V$  καθ' όλο σχεδόν το πλάτος της λεκάνης για τις διάφορες κλίσεις είναι ποιοτικά ίδια και παρουσιάζουν μικρές ποσοτικές διαφορές. Οι μέγιστες τιμές της  $A_V$  εμφανίζονται πλησίον της άκρης της λεκάνης, δηλαδή σε απόσταση  $x/B$  περί το 0,42 έως 0.50 από το κέντρο της, ή καλύτερα σε αποστάσεις  $x/\lambda_s$  από 0 έως 0.3 από το άκρο της. Άξιο επισήμανσης είναι το γεγονός ότι για μικρότερες κλίσεις υπάρχει μετάθεση της θέσης της μέγιστης  $A_V$  προς το κέντρο της λεκάνης, ενώ για  $i=90^\circ$  προκύπτει η συνολικά μέγιστη  $A_V$  και αυτή ακριβώς στην άκρη της λεκάνης. Σε όλες τις περιπτώσεις η τιμή της  $A_V$  τείνει στο μηδέν στο κέντρο της.
- Ομοίως και στην γεωμορφική επιδείνωση  $A_H$  τα διαγράμματα είναι ποιοτικά ίδια. Πιο συγκεκριμένα, σε μικρότερες κλίσεις πρανών υποβάθρου αναλογούν μικρότερες μέγιστες τιμές της  $A_H$  οι οποίες εμφανίζονται πλησίον της άκρης της κοιλάδας, δηλαδή σε απόσταση  $x/B = 0,34 - 0,40$  από το κέντρο της, ή καλύτερα σε απόσταση  $x/\lambda_s = 0$  έως 0.7 από την άκρη της. Αντίστοιχα με ότι συμβαίνει για την  $A_V$ , παρατηρείται μετάθεση της θέσης της μέγιστης τιμής  $A_H$  προς το κέντρο της λεκάνης όσο μικρότερη είναι η κλίση των πρανών του υποβάθρου.





**Σχήμα 4.3.7:** Επίδραση γωνίας κλίσης πρανών στις οριζόντιες και κατακόρυφες γεωμορφικές ενισχύσεις αναλύσεων #3, #16, #17 και #18, ως συνάρτηση της απόστασης  $x$  από το κέντρο της κοιλάδας αδιαστατοποιημένης ως προς το εύρος  $B$  αυτής.



**Σχήμα 4.3.8:** Επίδραση γωνίας κλίσης πρηνών στις οριζόντιες και κατακόρυφες γεωμορφικές ενισχύσεις αναλύσεων #3, #16, #17 και #18, ως συνάρτηση της απόστασης  $x$  από το κέντρο της κοιλάδας αδιαστατοποιημένης ως προς το δεσπόζον μήκος κύματος  $\lambda$ ς εντός αυτής.

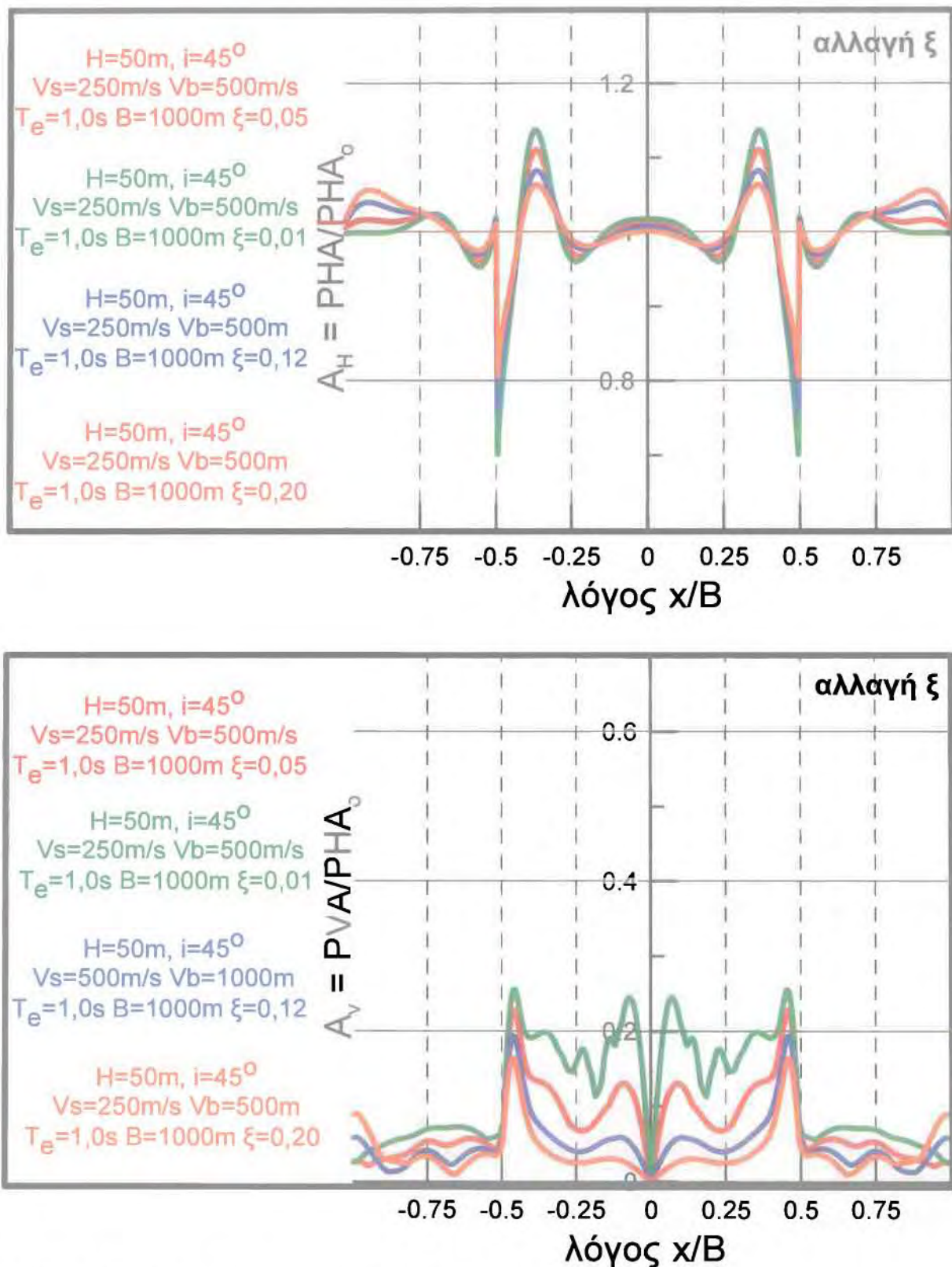
#### 4.3.5. Επίδραση ποσοστού απόσβεσης εδάφους $\xi$

Σύμφωνα με τον Πίνακα 4.3.1, για τη διερεύνηση της επίδρασης του ποσοστού απόσβεσης του εδάφους  $\xi$  στη γεωμορφική ενίσχυση εκτελέστηκαν διάφορες παραμετρικές αναλύσεις. Πιο συγκεκριμένα, για τις ανάγκες της σύγκρισης επιλέγονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων #3, #19, #20 και #21, στις οποίες το ποσοστό απόσβεσης  $\xi$  παίρνει αντίστοιχα τις τιμές 0,05 0,01 0,12 και 0,20, αλλά οι τιμές όλων των άλλων σημαντικών παραμέτρων παραμένουν ίδιες και ίσες με: αδιάστατο πάχος  $H/\lambda_s = 0,2$ , αδιάστατο πλάτος  $B/\lambda_s = 4$ , λόγος εμπέδησης  $a=0.5$  και κλίση πρανών στα άκρα λεκάνης  $i=45^\circ$ .

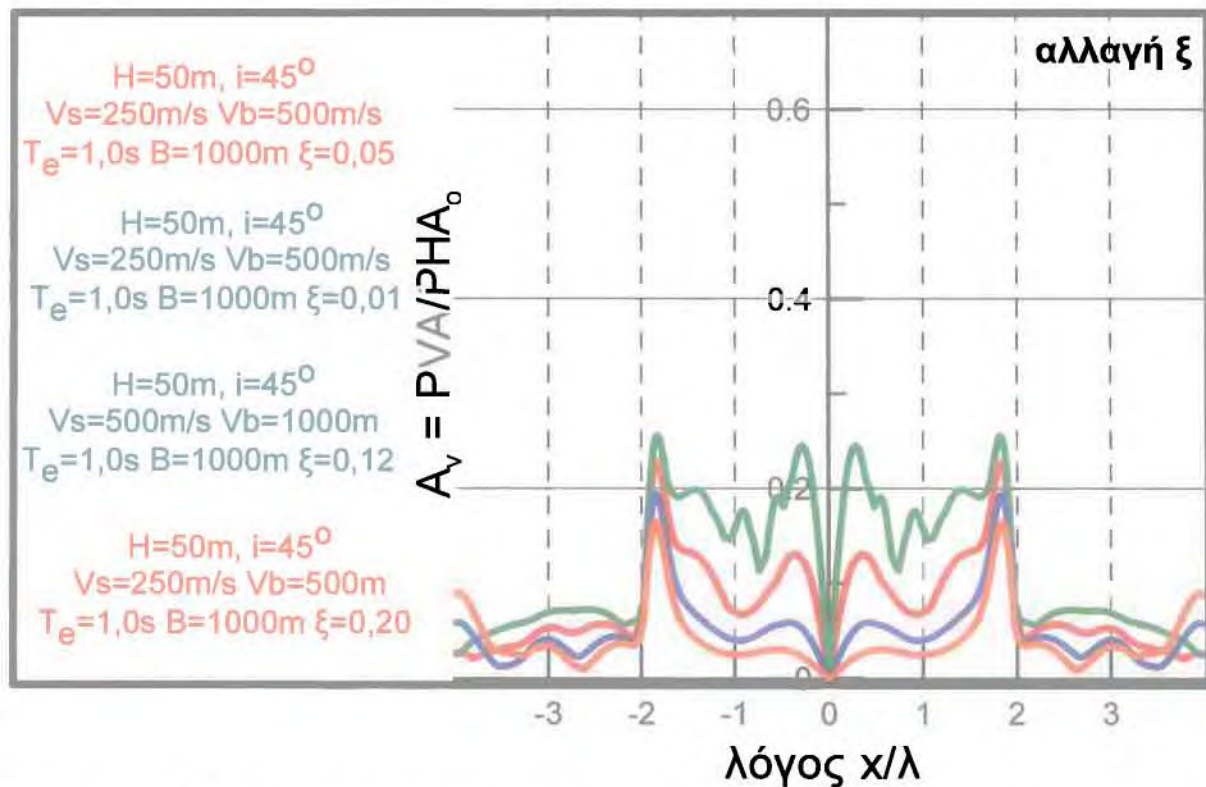
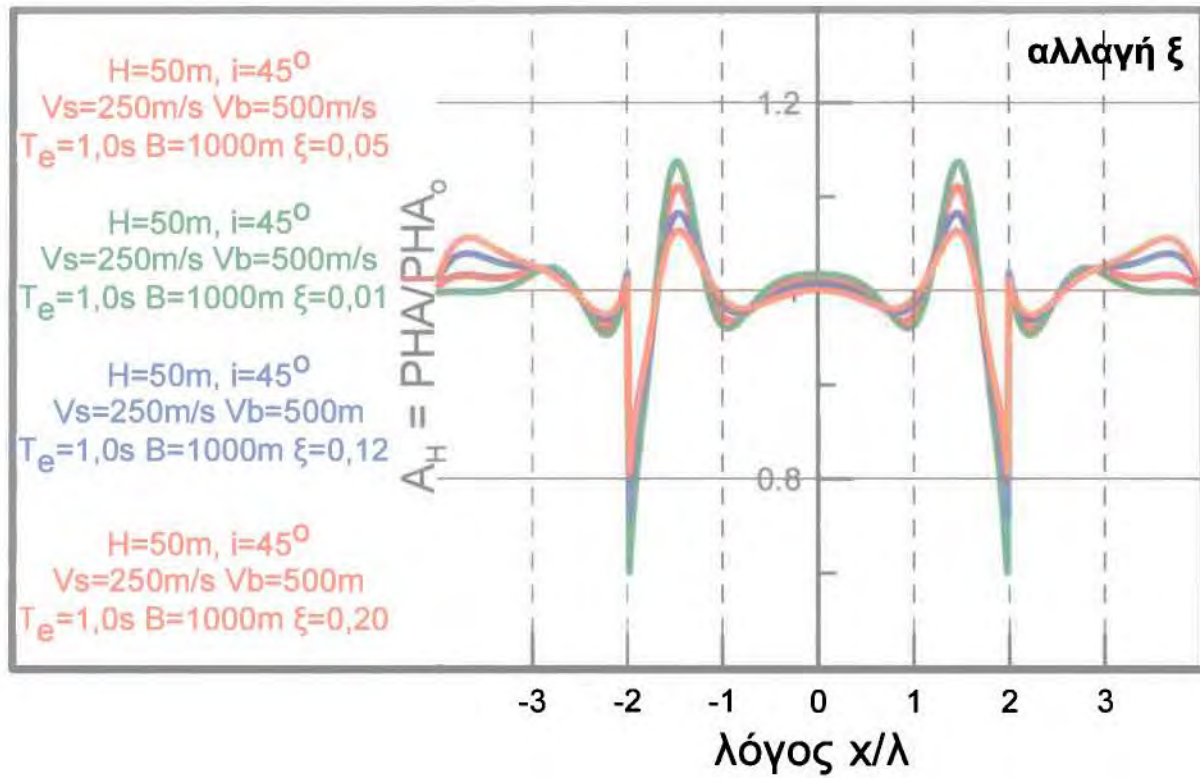
Η σύγκριση γίνεται στα Σχήματα 4.3.9 και 4.3.10, και η γεωμορφική ενίσχυση σε όρους  $A_H$  και  $A_V$  παρουσιάζεται ως συνάρτηση της απόστασης  $x$ , αδιαστατοποιημένης ως προς  $B$  και  $\lambda$ , αντίστοιχα. Όπως προκύπτει, η επίδραση του ποσοστού απόσβεσης στις οριζόντιες και κατακόρυφες γεωμορφικές ενισχύσεις είναι δευτερεύουσας σημασίας σε σχέση με τις επιδράσεις των βασικών παραμέτρων  $H/\lambda_s$ ,  $B/\lambda_s$  και  $a$  που αναλύονται παραπάνω. Οι βασικές παρατηρήσεις επι αυτών των συγκρίσεων είναι:

- Στα διαγράμματα της γεωμορφικής επιδείνωσης  $A_V$  τα αποτελέσματα είναι τα αναμενόμενα, δηλαδή για μεγαλύτερες τιμές του ποσοστού απόσβεσης  $\xi$  (που αντιστοιχούν σε ισχυρές διεγέρσεις) οι ενισχύσεις είναι σαφώς μικρότερες. Οι μέγιστες τιμές της  $A_V$  εμφανίζονται πλησίον της άκρης της λεκάνης, σε απόσταση  $x/B = 0,47$  από τη μέση της λεκάνης, ή σε απόσταση  $x/\lambda_s = 0,2$  από την άκρη της. Σε όλες τις περιπτώσεις η τιμή της  $A_V$  τείνει στο μηδέν στο κέντρο της.
- Η επίδραση του ποσοστού απόσβεσης  $\xi$  στη γεωμορφική επιδείνωση  $A_H$  είναι αντίστοιχη, δηλαδή τα μεγαλύτερα ποσοστά απόσβεσης  $\xi$  (που αντιστοιχούν σε ισχυρές διεγέρσεις) οδηγούν σε μικρότερες τιμές  $A_H$ . Όσον αφορά στις θέσεις που εμφανίζονται οι μέγιστες τιμές  $A_H$ , αυτές προκύπτουν επίσης πλησίον της άκρης της κοιλάδας, σε απόσταση  $x/B = 0,37$  από τη μέση της κοιλάδας ή σε απόσταση  $x/\lambda_s = 0,55$  από την άκρη της.





**Σχήμα 4.3.9:** Επίδραση ποσοστού απόσβεσης στις οριζόντιες και κατακόρυφες γεωμορφικές ενισχύσεις αναλύσεων #3, #19, #20 και #21, ως συνάρτηση της απόστασης  $x$  από το κέντρο της κοιλάδας αδιαστατοποιημένης ως προς το εύρος  $B$  αυτής.



**Σχήμα 4.3.10:** Επίδραση ποσοστού απόσβεσης στις οριζόντιες και κατακόρυφες γεωμορφικές ενισχύσεις αναλύσεων #3, #19, #20 και #21, ως συνάρτηση της απόστασης  $x$  από το κέντρο της κοιλάδας αδιαστατοποιημένης ως προς το δεσπόζον μήκος κύματος  $\lambda_s$  εντός αυτής.

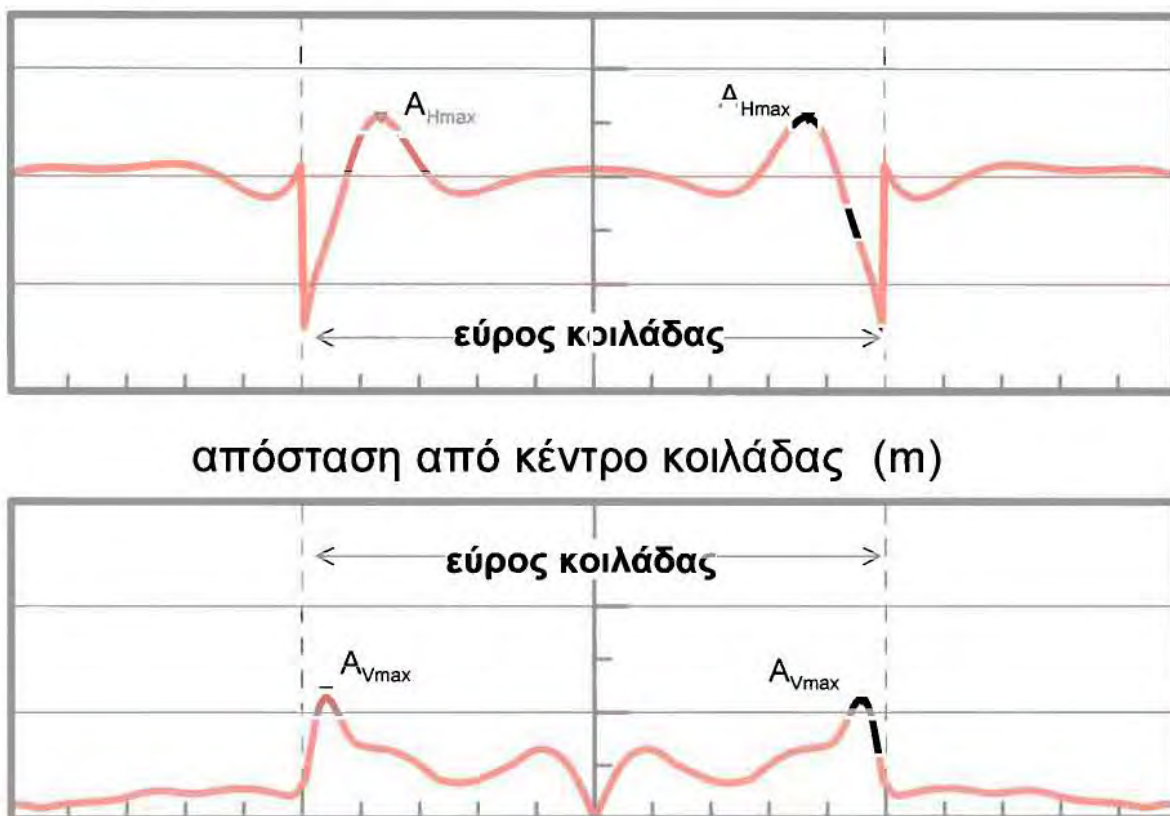


## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5ο: Στατιστική επεξεργασία αριθμητικών αποτελεσμάτων

### 5.1. ΓΕΝΙΚΑ

Στο Σχήμα 5.1 δίνονται τα τυπικά αποτελέσματα γεωμορφικής ενίσχυσης  $A_H$  και  $A_V$  για μια 2Δ κοιλάδα τραπεζοειδούς διατομής πάχους  $H$  και εύρους  $B$ , όπως προκύπτουν με βάση τις αναλύσεις που παρουσιάζονται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 4. Με βάση το σχήμα αυτό προκύπτει συμμετρία της γεωμορφικής ενίσχυσης ως προς τον άξονα συμμετρίας της λεκάνης και ότι ενδιαφέρον, από πρακτικής σκοπιάς, παρουσιάζουν δύο χαρακτηριστικές τιμές της γεωμορφικής ενίσχυσης, δηλαδή οι:

- $A_{Hmax}$  που είναι η μέγιστη γεωμορφική ενίσχυση της οριζόντιας επιτάχυνσης στην επιφάνεια του εδάφους της λεκάνης, και η
- $A_{Vmax}$  που είναι η μέγιστη γεωμορφική ενίσχυση της παρασιτικής κατακόρυφης επιτάχυνσης στην επιφάνεια του εδάφους της λεκάνης.



**Σχήμα 5.1:** Τυπικά αποτελέσματα οριζόντιων και κατακόρυφων γεωμορφικών ενισχύσεων

Έτσι, στις παραγράφους που ακολουθούν γίνεται μια προσπάθεια κατάστρωσης προσεγγιστικών σχέσεων εκτίμησης των τιμών  $A_{Hmax}$  και  $A_{Vmax}$  συναρτήσει των βασικών



παραμέτρων του προβλήματος της γεωμορφικής ενίσχυσης, δηλαδή του αδιάστατου πάχους  $H/\lambda_s$ , του αδιάστατου πλάτους  $B/\lambda_s = 4$ , του λόγου εμπέδησης  $a$ , της κλίσης πρανών στα άκρα λεκάνης  $i$  και του ποσοστού απόσβεσης  $\xi$  του εδάφους.

Σκοπός των δυο προσεγγιστικών σχέσεων αυτών είναι η γενίκευση των αποτελεσμάτων που παρουσιάζονται εδώ και για συνδυασμούς 2Δ λεκάνης τραπεζοειδούς διατομής – σεισμικής διέγερσης που δεν αναλύθηκαν στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, τουλάχιστον για τα μεγέθη πρακτικού ενδιαφέροντος από απόψεως σχεδιασμού.

Επιπλέον, στο παρόν κεφάλαιο διερευνάται και η γεωγραφική διαφοροποίηση της γεωμορφικής ενίσχυσης, με στόχο τον ορισμό γεωγραφικών περιβαλλουσών που θα καθορίζουν συντηρητικά τις περιοχές μιας 2Δ λεκάνης τραπεζοειδούς διατομής όπου αναμένονται σημαντικές ενισχύσεις.

Πιο συγκεκριμένα, για την κατάστρωση των προσεγγιστικών σχέσεων για τις παραμέτρους σχεδιασμού  $A_{Hmax}$  και  $A_{Vmax}$  επιλέχθηκαν μαθηματικές μορφές οι οποίες να είναι συμβατές με τη φυσική σημασία καθενός από τις σημαντικές παραμέτρους του προβλήματος. Ειδικότερα:

- i) για  $B=0$  δεν υπάρχει εδαφική λεκάνη άρα εξ' ορισμού η ενίσχυση  $A_H = 1$  και  $A_V = 0$
- ii) για  $H=0$  δεν υπάρχει εδαφική λεκάνη, άρα εξ' ορισμού η ενίσχυση  $A_H = 1$  και  $A_V = 0$
- iii) για  $\xi=0$  (θεωρητική περίπτωση) η ενίσχυση απειρίζεται,

Συνεπώς, η γενική μορφή των προσεγγιστικών σχέσεων έχει ως ακολούθως:

$$A_{Hmax} = 1 + b_1 \left( \frac{B}{\lambda_s} \right)^{b_2} \left( \frac{H}{\lambda_s} \right)^{b_3} \xi^{b_4} a^{b_5} i^{b_6} \quad (5.1.1)$$

$$A_{Vmax} = c_1 \left( \frac{B}{\lambda_s} \right)^{c_2} \left( \frac{H}{\lambda_s} \right)^{c_3} \xi^{c_4} a^{c_5} i^{c_6} \quad (5.1.2)$$

όπου:  $i$  η κλίση του υποβάθρου στις άκρες της 2Δ εδαφικής λεκάνης

**$B/\lambda_s$**  το πλάτος  $B$  της λεκάνης αδιαστατοποιημένο ως προς το δεσπόζον μήκος κύματος  $\lambda_s$  στο έδαφος ( $\lambda_s = V_s T_e$ , όπου  $T_e$  η δεσπόμενη περίοδος της διέγερσης)

**$H/\lambda_s$**  το πάχος  $H$  της λεκάνης αδιαστατοποιημένο ως προς το δεσπόζον μήκος κύματος  $\lambda_s$  στο έδαφος ( $\lambda_s = V_s T_e$ , όπου  $T_e$  η δεσπόμενη περίοδος της διέγερσης)

**$\xi$**  το ποσοστό απόσβεσης του εδάφους

**$a$**  ο λόγος εμπέδησης εδάφους-υποβάθρου, όπου  $a = (\rho_s V_s) / (\rho_b V_b)$  με  $\rho_s$  και  $\rho_b$  η πυκνότητα του εδάφους και του υποβάθρου και  $V_s$  και  $V_b$  η ταχύτητα διάδοσης των διατμητικών κυμάτων στο έδαφος και το υπόβαθρο, και

**$b_1$  έως  $b_6$**  είναι σταθερές προς εκτίμηση για τη σχέση 5.1.1 και

**$c_1$  έως  $c_6$**  είναι σταθερές προς εκτίμηση για τη σχέση 5.1.2, αντίστοιχα.

ανάλυση	$B/\lambda_s$	$H/\lambda_s$	$a$	$i$	$\xi$	$A_{Hmax}$	$A_{Vmax}$
#1	4	0,20	0,50	45	0,05	1,088	0,196
#2	10	0,20	0,50	45	0,05	1,088	0,195
#3	4	0,20	0,50	45	0,05	1,111	0,229
#4	4	0,20	0,25	45	0,05	1,189	0,307
#5	4	0,20	0,75	45	0,05	1,061	0,119
#6	2	0,10	0,50	45	0,05	1,189	0,652
#7	10	0,50	0,50	45	0,05	1,254	0,473
#8	0,80	0,20	0,50	45	0,05	1,179	0,310
#9	1,60	0,20	0,50	45	0,05	1,079	0,212
#10	4	0,20	0,50	45	0,05	1,111	0,229
#11	2	0,10	0,50	45	0,05	1,039	0,073
#12	4	0,20	0,10	45	0,05	1,318	0,273
#13	4	0,50	0,50	45	0,05	1,260	0,478
#14	4	0,10	0,50	45	0,05	1,202	0,650
#15	4	0,10	0,50	45	0,05	1,035	0,068
#16	4	0,20	0,50	30	0,05	1,097	0,219
#17	4	0,20	0,50	60	0,05	1,121	0,229
#18	4	0,20	0,50	90	0,05	1,151	0,307
#19	4	0,20	0,50	45	0,01	1,138	0,255
#20	4	0,20	0,50	45	0,12	1,083	0,194
#21	4	0,20	0,50	45	0,20	1,064	0,165

**Πίνακας 5.1.1:** Τιμές των  $A_{Hmax}$  και  $A_{Vmax}$  συναρτήσει των παραμέτρων  $B/\lambda_s$ ,  $H/\lambda_s$ ,  $a$ ,  $i$  και  $\xi$  των αναλύσεων.

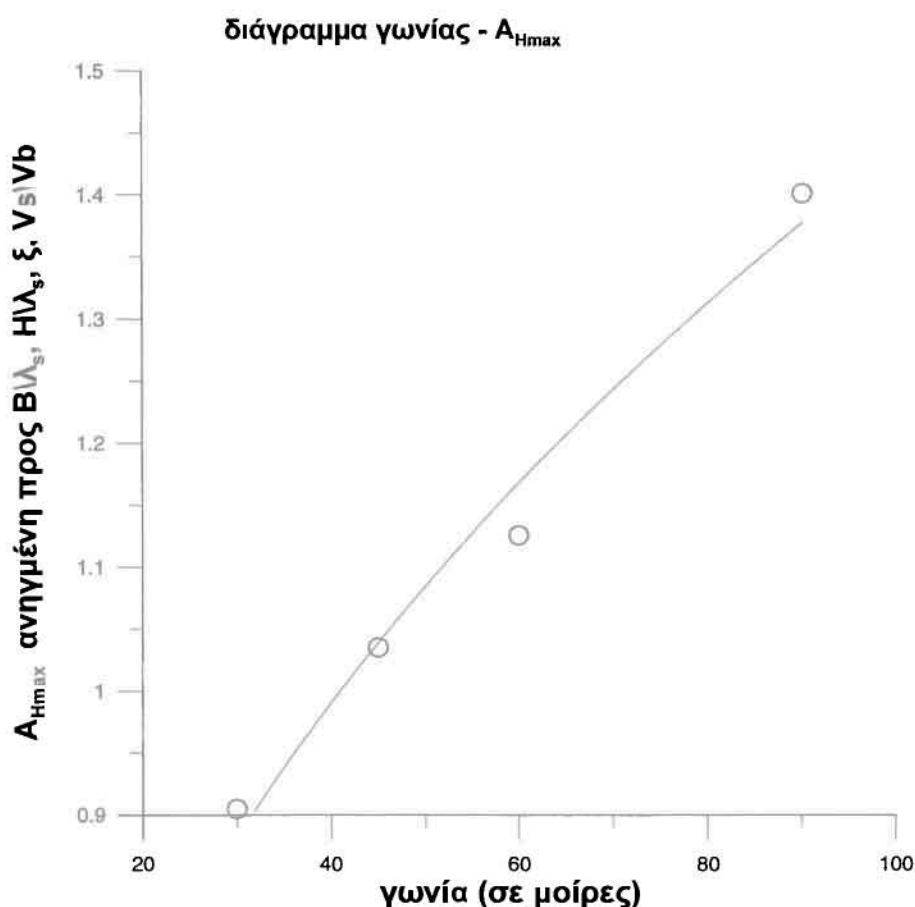
### 5.2.5 Συσχέτιση $A_{Hmax}$ με $i$

Στο Σχήμα 5.2.5 διερευνάται η γωνία κλίσης των πρανών της λεκάνης στην τιμή της  $A_{Hmax}$  ανηγμένης ως προς την επίδραση των  $B/\lambda_s$ ,  $H/\lambda_s$ , του ποσοστού απόσβεσης  $\xi$  και του λόγου εμπίδησης  $a$ . Πιο συγκεκριμένα, στο Σχήμα 5.2.5 η τιμή της γωνίας κλίσης συναρτάται με τον

$$\text{ορο: } \frac{(A_{Hmax} - 1)}{0.045 \left(\frac{B}{\lambda_s}\right)^{0.2044} \left(\frac{H}{\lambda_s}\right)^{0.3803} \xi^{-0.2187} \left(\frac{Vs}{Vb}\right)^{-0.6341}}$$

που προκύπτει με βάση τη σχέση 5.2.4, με βάση τα αποτελέσματα και των 21 αναλύσεων της παρούσας εργασίας. Όπως προκύπτει, η ανηγμένη τιμή της  $A_{Hmax}$  αυξάνεται ως συνάρτηση της γωνίας κλίσης των πρανών. Με βάση τη σχέση 5.2.4 και τη συσχέτιση του Σχήματος 5.2.5, η βέλτιστη προσέγγιση των αποτελεσμάτων της  $A_{Hmax}$  ως προς  $B/\lambda_s$ ,  $H/\lambda_s$ , ποσοστό απόσβεσης  $\xi$ , λόγο εμπίδησης  $a$  και γωνία κλίσης πρανών  $i$  διαμορφώνεται ως:

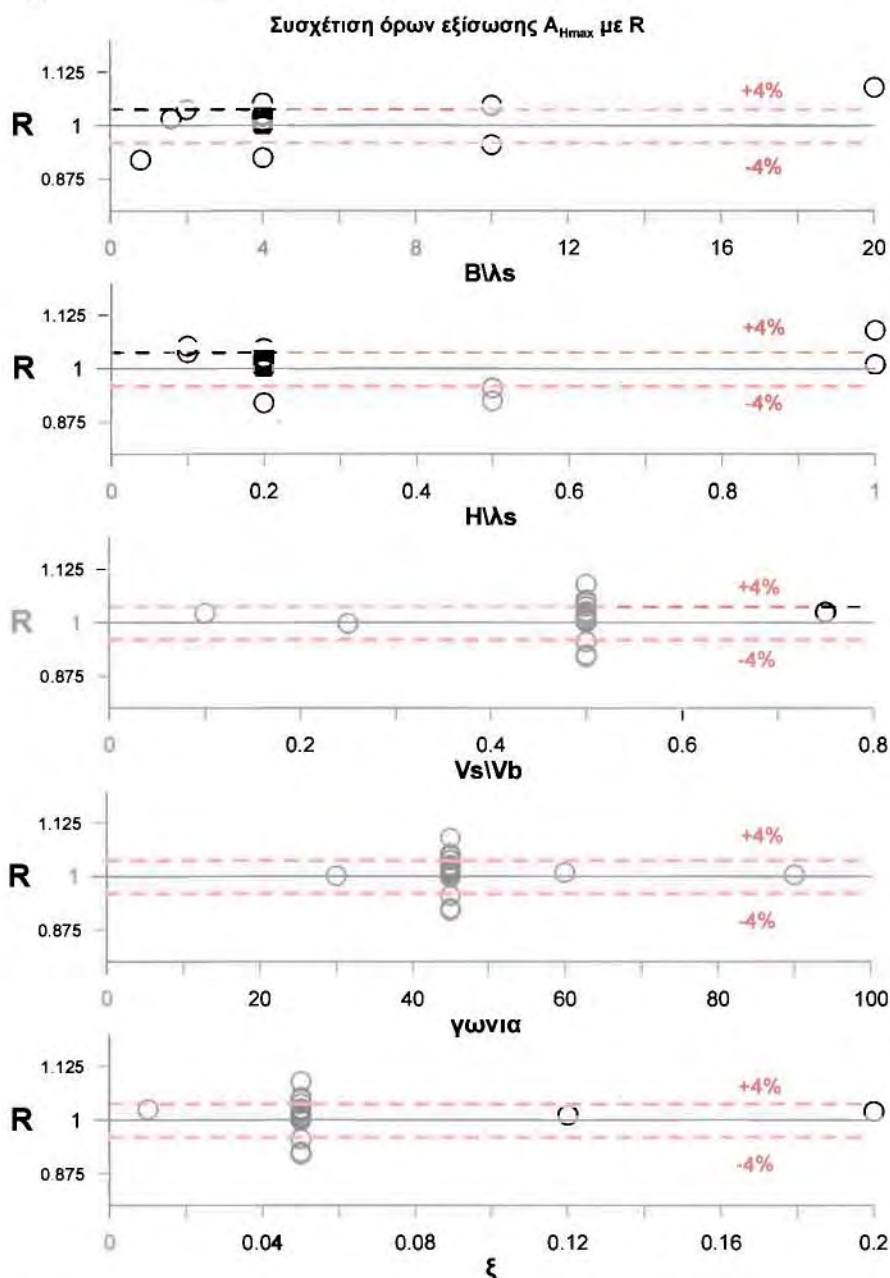
$$A_{Hmax} = 1 + 0.010 \left(\frac{B}{\lambda_s}\right)^{0.2044} \left(\frac{H}{\lambda_s}\right)^{0.3803} \xi^{-0.2187} \left(\frac{Vs}{Vb}\right)^{-0.6341} i^{0.41} \quad (5.2.5)$$



**Σχήμα 5.2.5:** Επίδραση της γωνίας κλίσης των πρανών στην τιμή της  $A_{Hmax}$  ανηγμένης ως προς  $B/\lambda_s$ ,  $H/\lambda_s$ , ποσοστού απόσβεσης  $\xi$  και λόγου εμπίδησης  $a$  με βάση τις 21 αναλύσεις της παρούσας εργασίας

5.2.6 Εκτίμηση σχετικού λάθους σχέσης εκτίμησης  $A_{Hmax}$ 

Ορίζοντας ως  $R$  το λόγο της εκτιμώμενης  $A_{Hmax}$  ως προς την αντίστοιχη τιμή από την αριθμητική ανάλυση (βλέπε Πίνακα 5.1.1) γίνεται δυνατή η εκτίμηση του σχετικού λάθους της τελικής μορφής της σχέσης 5.1.1, δηλαδή της σχέσης 5.2.5. Πιο συγκεκριμένα, στο Σχήμα 5.2.6 παρουσιάζεται η επίδραση των πέντε παραμέτρων του προβλήματος στο σχετικό λάθος  $R$  εκτίμησης της  $A_{Hmax}$ , το οποίο ορίζεται εδώ ως ο λόγος της  $A_{Hmax}$  όπως προβλέπεται από τη σχέση 5.2.5, προς την τιμή της  $A_{Hmax}$  για την ίδια περίπτωση λεκάνης-σεισμού όπως προέκυψε από την αριθμητική ανάλυση. Όπως προκύπτει, δεν υπάρχει συστηματική επίδραση των  $B/\lambda_s$ ,  $H/\lambda_s$ ,  $\xi$ ,  $i$  και  $\alpha$  στο σχετικό λάθος  $R$ , και συνεπώς η σχέση 5.2.5 είναι ακριβής με τυπική απόκλιση του σχετικού λάθους  $\pm 4,0\%$ .



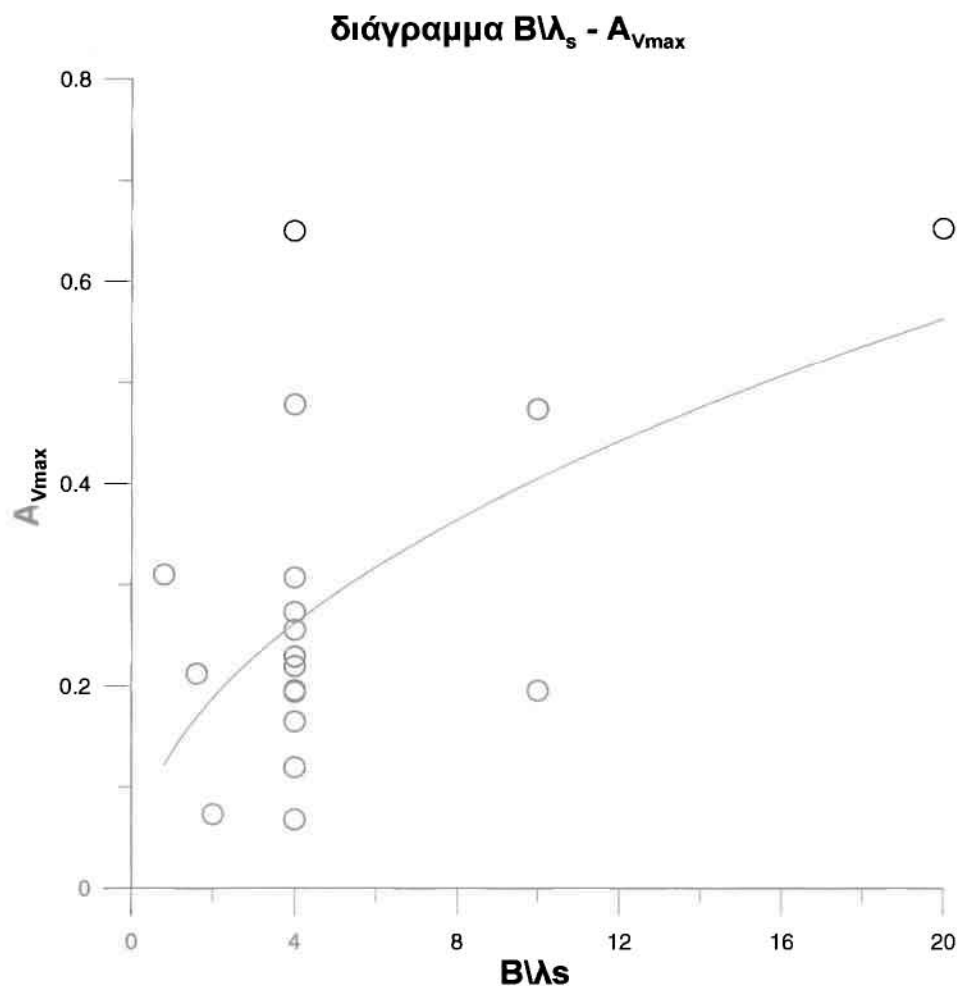
**Σχήμα 5.2.6:** Επίδραση των σημαντικών παραμέτρων του προβλήματος στο σχετικό λάθος  $R$  εκτίμησης της  $A_{Hmax}$

### 5.3. ΣΧΕΣΗ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΗΣ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ ΤΗΣ ΠΑΡΑΣΙΤΙΚΗΣ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΗΣ

#### 5.3.1 Συσχέτιση $B/\lambda_s$ με $A_{Vmax}$

Στο Σχήμα 5.3.1 παρουσιάζεται η συσχέτιση της  $A_{Vmax}$  με το αδιάστατο πλάτος λεκάνης  $B/\lambda_s$  με βάση τα αποτελέσματα και των 21 αναλύσεων της παρούσας εργασίας. Όπως προκύπτει, η τιμή της  $A_{Vmax}$  αυξάνει ως συνάρτηση του  $B/\lambda_s$ , αλλά παρουσιάζει αρκετή διασπορά ως αποτέλεσμα του εύρους μεταβολής των υπολοίπων παραμέτρων του προβλήματος ( $H/\lambda_s$ ,  $a$ ,  $i$ ,  $\xi$ ), όπως παρουσιάζεται και στον Πίνακα 5.1.1. Η σχέση βέλτιστης προσέγγισης των αποτελεσμάτων της σχέσης  $A_{Vmax}$  με  $B/\lambda_s$  που παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.3.1 είναι η:

$$A_{Vmax} = 0.1352 \left( \frac{B}{\lambda_s} \right)^{0.4763} \quad (5.3.1)$$



**Σχήμα 5.3.1:** Επίδραση του αδιάστατου πλάτους  $B/\lambda_s$  στην τιμή της  $A_{Vmax}$  με βάση τις 21 αναλύσεις της παρούσας εργασίας



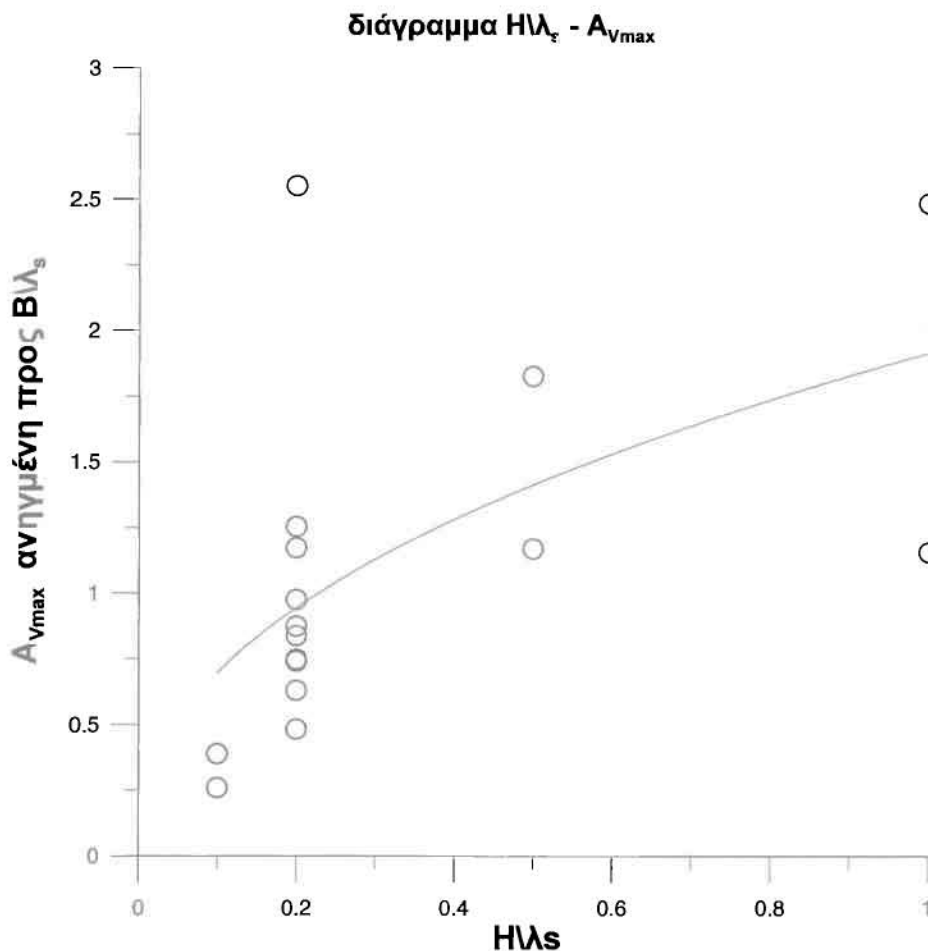
5.3.2 Συσχέτιση  $H/\lambda_s$  με  $A_{Vmax}$ 

Στο Σχήμα 5.3.2 διερευνάται η επίδραση του αδιάστατου πάχους λεκάνης  $H/\lambda_s$  στην τιμή της  $A_{Vmax}$  ανηγμένης ως προς την επίδραση του  $B/\lambda_s$ . Πιο συγκεκριμένα, στο Σχήμα 5.3.2 η τιμή του  $H/\lambda_s$  συναρτάται με τον όρο:

$$\frac{(A_{Vmax})}{0.1352 \left( \frac{B}{\lambda_s} \right)^{0.4763}}$$

που προκύπτει με βάση τη σχέση 5.3.1, με βάση τα αποτελέσματα και των 21 αναλύσεων της παρούσας εργασίας. Όπως προκύπτει, η ανηγμένη τιμή της  $A_{Vmax}$  αυξάνει ως συνάρτηση του  $H/\lambda_s$ , αλλά παρουσιάζει αρκετή διασπορά ως αποτέλεσμα του εύρους μεταβολής των υπολοίπων παραμέτρων του προβλήματος ( $a$ ,  $i$ ,  $\xi$ ), όπως παρουσιάζεται και στον Πίνακα 5.1.1. Με βάση τη σχέση 5.3.1 και τη συσχέτιση του Σχήματος 5.3.2, η βέλτιστη προσέγγιση των αποτελεσμάτων της  $A_{Vmax}$  ως προς  $B/\lambda_s$  και  $H/\lambda_s$  διαμορφώνεται ως:

$$A_{Vmax} = 0.2589 \left( \frac{B}{\lambda_s} \right)^{0.4763} \left( \frac{H}{\lambda_s} \right)^{0.4389} \quad (5.3.2)$$



**Σχήμα 5.3.2:** Επίδραση του αδιάστατου πάχους  $H/\lambda_s$  στην τιμή της  $A_{Vmax}$  ανηγμένης ως προς  $B/\lambda_s$ , με βάση τις 21 αναλύσεις της παρούσας εργασίας.

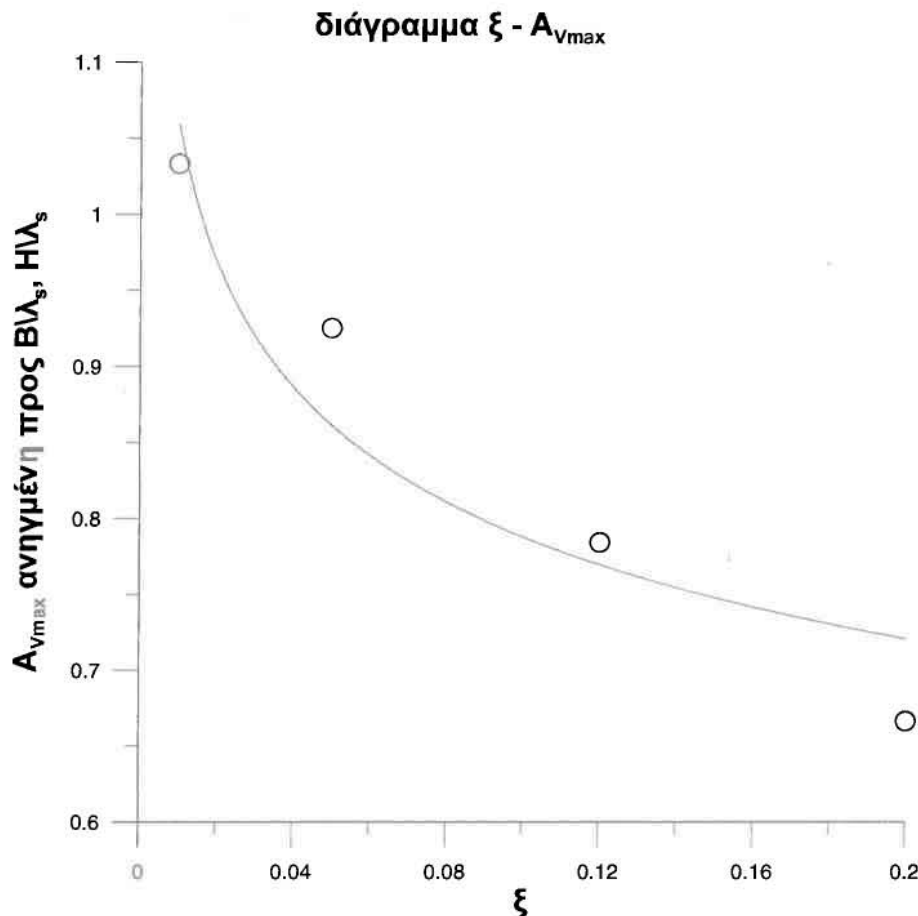
5.3.3 Συσχέτιση  $\xi$  με  $A_{Vmax}$ 

Στο Σχήμα 5.3.3 διερευνάται η επίδραση του ποσοστού απόσβεσης  $\xi$  στην τιμή της  $A_{Vmax}$  ανηγμένης ως προς την επίδραση των  $B/\lambda_s$  και  $H/\lambda_s$ . Πιο συγκεκριμένα, στο Σχήμα 5.3.3 η τιμή του ποσοστού απόσβεσης  $\xi$  συναρτάται με τον όρο:

$$\frac{(A_{Vmax})}{0.2589 \left(\frac{B}{\lambda_s}\right)^{0.4763} \left(\frac{H}{\lambda_s}\right)^{0.4389}}$$

που προκύπτει με βάση τη σχέση 5.3.2, με βάση τα αποτελέσματα και των 21 αναλύσεων της παρούσας εργασίας. Όπως προκύπτει, η ανηγμένη τιμή της  $A_{Vmax}$  μειώνεται ως συνάρτηση του  $\xi$ , αλλά δεν παρουσιάζει πλέον σημαντική διασπορά, καθώς οι βασικές παράμετροι του προβλήματος ( $H/\lambda_s$  και  $B/\lambda_s$ ) έχουν ήδη ληφθεί υπόψη. Με βάση τη σχέση 5.3.2 και τη συσχέτιση του Σχήματος 5.3.3, η βέλτιστη προσέγγιση των αποτελεσμάτων της  $A_{Vmax}$  ως προς  $B/\lambda_s$ ,  $H/\lambda_s$  και  $\xi$  διαμορφώνεται ως:

$$A_{Vmax} = 0.1517 \left(\frac{B}{\lambda_s}\right)^{0.4763} \left(\frac{H}{\lambda_s}\right)^{0.4389} \xi^{-0.1285} \quad (5.3.3)$$



**Σχήμα 5.3.3:** Επίδραση του ποσοστού απόσβεσης  $\xi$  στην τιμή της  $A_{Vmax}$  ανηγμένης ως προς  $B/\lambda_s$  και  $H/\lambda_s$ , με βάση τις 21 αναλύσεις της παρούσας εργασίας.

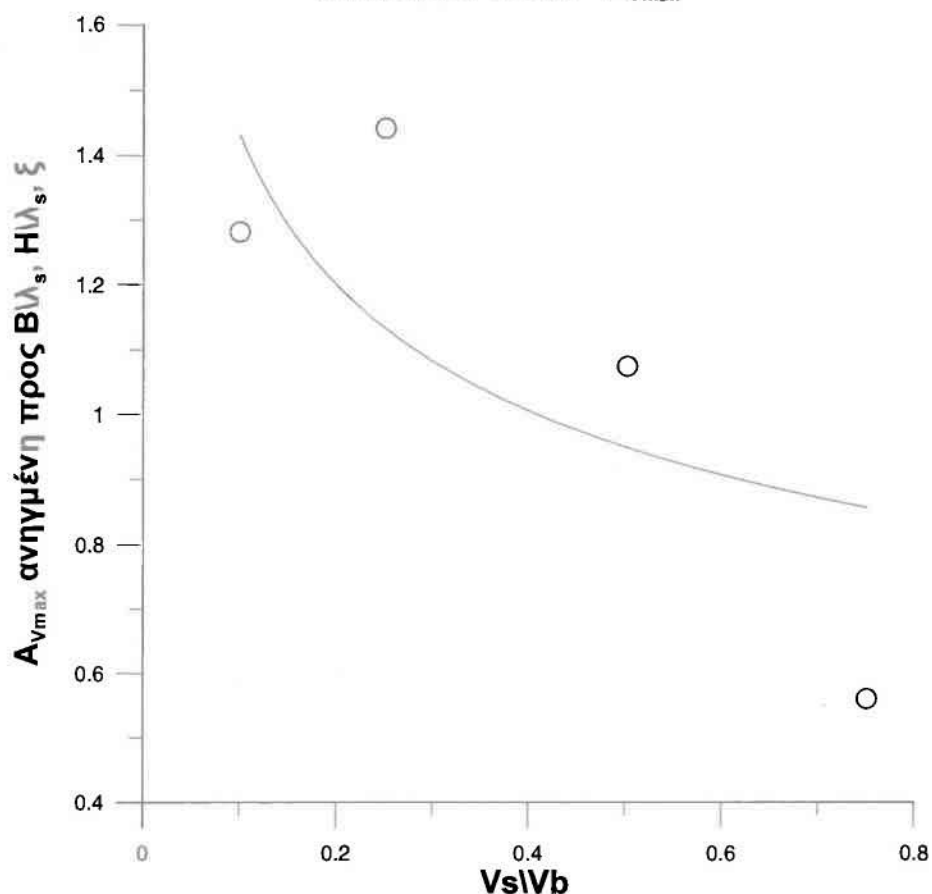
5.3.4 Συσχέτιση  $a$  με  $A_{Vmax}$ 

Στο Σχήμα 5.3.4 διερευνάται η επίδραση του λόγου εμπέδησης  $a$  στην τιμή της  $A_{Vmax}$  ανηγμένης ως προς την επίδραση των  $B/\lambda_s$ ,  $H/\lambda_s$  και του ποσοστού απόσβεσης  $\xi$ . Πιο συγκεκριμένα, στο Σχήμα 5.3.4 η τιμή του λόγου εμπέδησης συναρτάται με τον όρο:

$$\frac{(A_{Vmax})}{0.1517 \left(\frac{B}{\lambda_s}\right)^{0.4763} \left(\frac{H}{\lambda_s}\right)^{0.4389} \xi^{-0.1285}}$$

που προκύπτει με βάση τη σχέση 5.3.3, με βάση τα αποτελέσματα και των 21 αναλύσεων της παρούσας εργασίας. Όπως προκύπτει, η ανηγμένη τιμή της  $A_{Vmax}$  μειώνεται ως συνάρτηση του λόγου εμπέδησης. Με βάση τη σχέση 5.3.3 και τη συσχέτιση του Σχήματος 5.3.4, η βέλτιστη προσέγγιση των αποτελεσμάτων της  $A_{Hmax}$  ως προς  $B/\lambda_s$ ,  $H/\lambda_s$ , ποσοστό απόσβεσης  $\xi$  και λόγο εμπέδησης  $a$  διαμορφώνεται ως:

$$A_{Vmax} = 0.121 \left(\frac{B}{\lambda_s}\right)^{0.4763} \left(\frac{H}{\lambda_s}\right)^{0.4389} \xi^{-0.1285} \left(\frac{V_s}{V_b}\right)^{-0.2546} \quad (5.3.4)$$

διάγραμμα  $V_s/V_b$  -  $A_{Vmax}$ 

**Σχήμα 5.3.4:** Επίδραση του λόγου εμπέδησης  $a$  στην τιμή της  $A_{Vmax}$  ανηγμένης ως προς  $B/\lambda_s$ ,  $H/\lambda_s$  και ποσοστού απόσβεσης  $\xi$  με βάση τις 21 αναλύσεις της παρούσας εργασίας

### 5.3.5 Συσχέτιση $i$ με $A_{Vmax}$

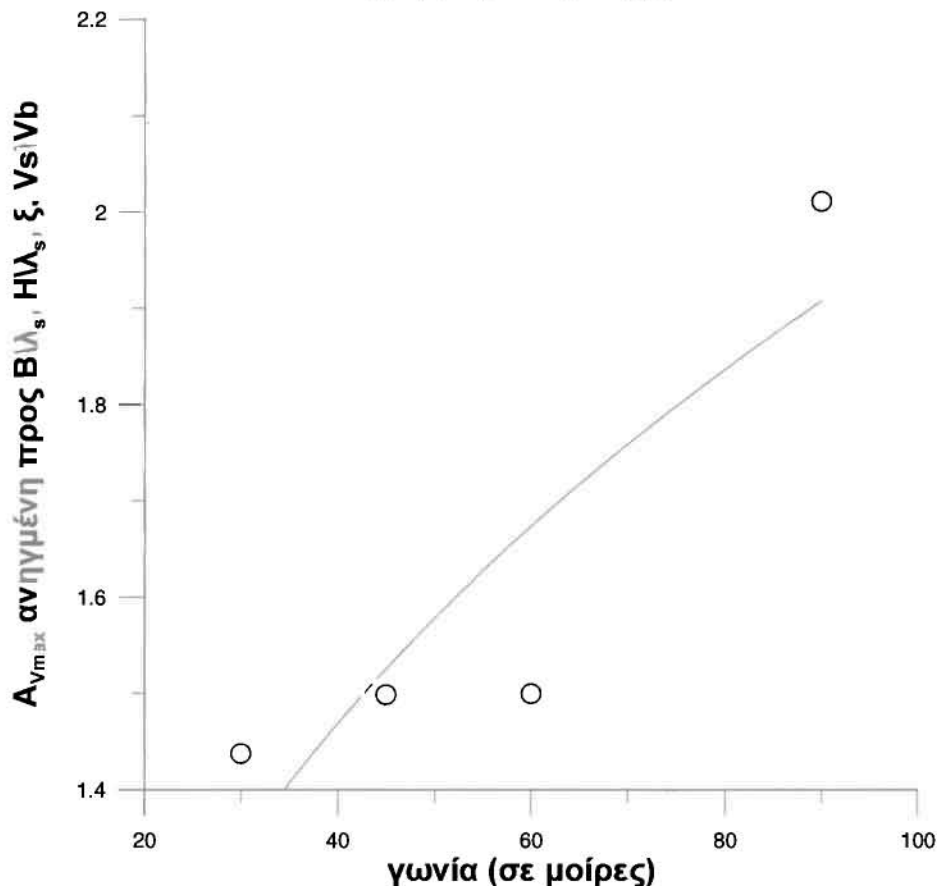
Στο Σχήμα 5.3.5 διερευνάται η γωνία κλίσης των πρανών της λεκάνης στην τιμή της  $A_{Vmax}$  ανηγμένης ως προς την επίδραση των  $B/\lambda_s$ ,  $H/\lambda_s$ , του ποσοστού απόσβεσης  $\xi$  και του λόγου εμπίδσης  $a$ . Πιο συγκεκριμένα, στο Σχήμα 5.3.5 η τιμή της γωνίας κλίσης συναρτάται με τον

$$\text{ορο: } \frac{(A_{Vmax})}{0.121 \left(\frac{B}{\lambda_s}\right)^{0.4763} \left(\frac{H}{\lambda_s}\right)^{0.4389} \xi^{-0.1285} \left(\frac{Vs}{Vb}\right)^{-0.2546}}$$

που προκύπτει με βάση τη σχέση 5.3.4, με βάση τα αποτελέσματα και των 21 αναλύσεων της παρούσας εργασίας. Όπως προκύπτει, η ανηγμένη τιμή της  $A_{Hmax}$  αυξάνεται ως συνάρτηση της γωνίας κλίσης των πρανών. Με βάση τη σχέση 5.3.4 και τη συσχέτιση του Σχήματος 5.2.5, η βέλτιστη προσέγγιση των αποτελεσμάτων της  $A_{Hmax}$  ως προς  $B/\lambda_s$ ,  $H/\lambda_s$ , ποσοστό απόσβεσης  $\xi$ , λόγο εμπίδσης  $a$  και γωνία κλίσης πρανών  $i$  διαμορφώνεται ως:

$$A_{Vmax} = 0.035 \left(\frac{B}{\lambda_s}\right)^{0.48} \left(\frac{H}{\lambda_s}\right)^{0.44} \xi^{-0.13} \left(\frac{Vs}{Vb}\right)^{-0.25} i^{0.32} \quad (5.3.5)$$

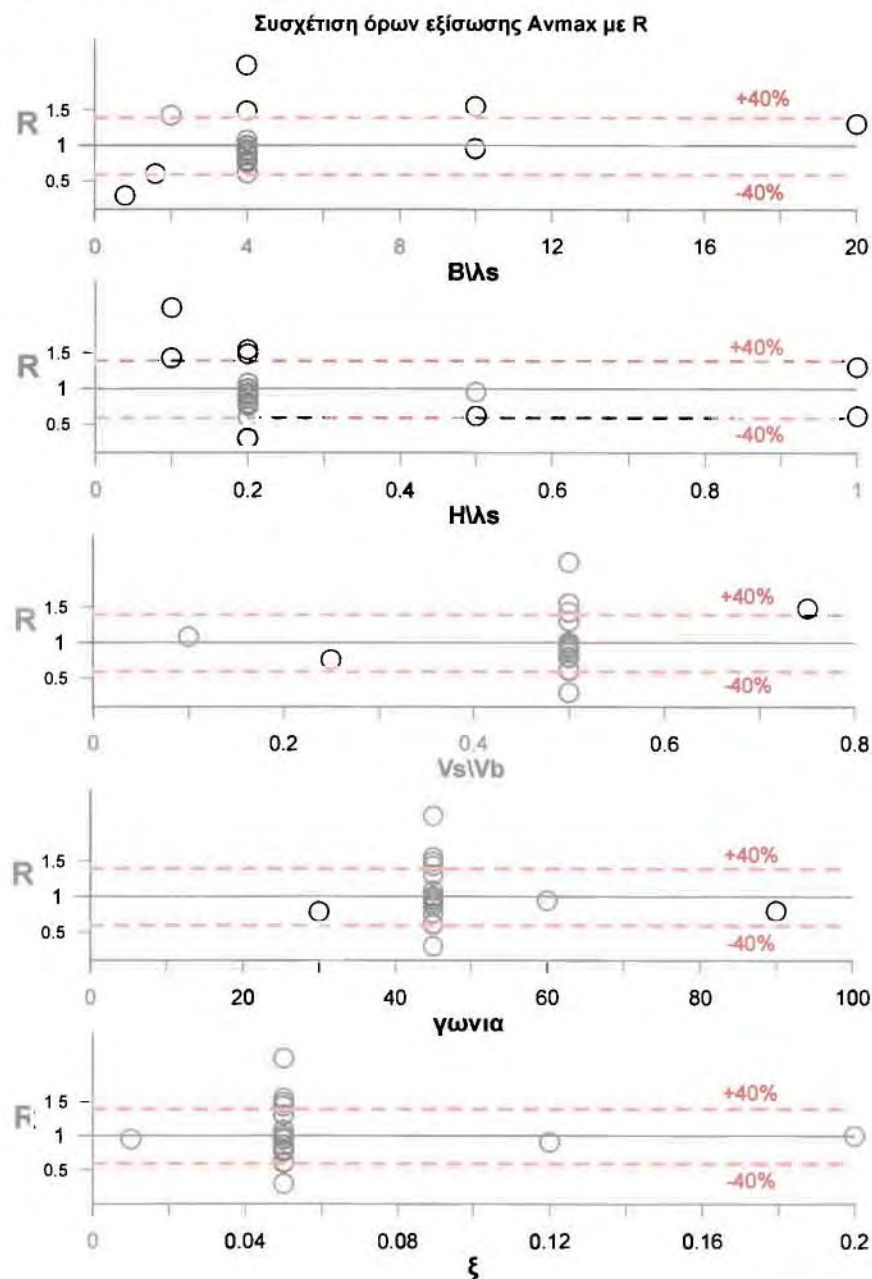
διάγραμμα γωνίας -  $A_{Vmax}$



**Σχήμα 5.3.5:** Επίδραση της γωνίας κλίσης των πρανών στην τιμή της  $A_{Vmax}$  ανηγμένης ως προς  $B/\lambda_s$ ,  $H/\lambda_s$ , ποσοστού απόσβεσης  $\xi$  και λόγου εμπίδσης  $a$  με βάση τις 21 αναλύσεις της παρούσας εργασίας

### 5.3.6 Εκτίμηση σχετικού λάθους σχέσης εκτίμησης $A_{Vmax}$

Ορίζοντας ως  $R$  το λόγο της εκτιμώμενης  $A_{Vmax}$  ως προς την αντίστοιχη τιμή από την αριθμητική ανάλυση (βλέπε Πίνακα 5.1.1) γίνεται δυνατή η εκτίμηση του σχετικού λάθους της τελικής μορφής της σχέσης 5.1.2, δηλαδή της σχέσης 5.3.5. Πιο συγκεκριμένα, στο Σχήμα 5.2.6 παρουσιάζεται η επίδραση των πέντε παραμέτρων του προβλήματος στο σχετικό λάθος  $R$  εκτίμησης της  $A_{Hmax}$ , το οποίο ορίζεται εδώ ως ο λόγος της  $A_{Vmax}$  όπως προβλέπεται από τη σχέση 5.3.5, προς την τιμή της  $A_{Vmax}$  για την ίδια περίπτωση λεκάνης-σεισμού όπως προέκυψε από την αριθμητική ανάλυση. Όπως προκύπτει, υπάρχει συστηματική επίδραση των  $B/\lambda_s$ ,  $H/\lambda_s$ ,  $\xi$ ,  $i$  και  $\alpha$  στο σχετικό λάθος  $R$ , και συνεπώς η σχέση 5.3.5 δεν είναι ακριβής με τυπική απόκλιση του σχετικού λάθους  $\pm 40\%$ .



**Σχήμα 5.3.6:** Επίδραση των σημαντικών παραμέτρων του προβλήματος στο σχετικό λάθος  $R$  εκτίμησης της  $A_{Vmax}$

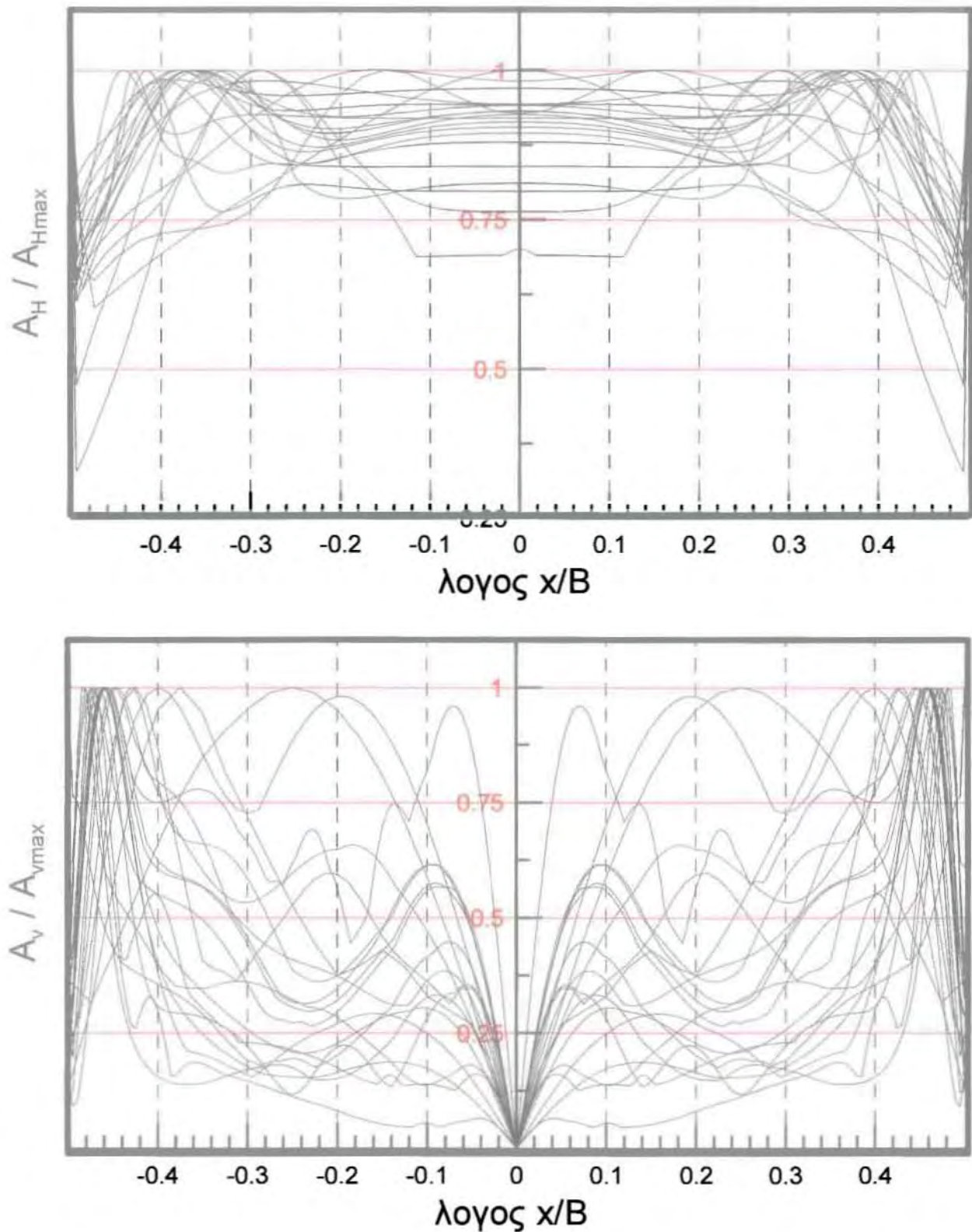


#### 5.4. ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΗ ΔΙΑΦΟΡΟΠΟΙΗΣΗΣ ΓΕΩΜΟΡΦΙΚΩΝ ΕΝΙΣΧΥΣΕΩΝ

Με στόχο τη μελέτη της γεωγραφικής διαφοροποίησης της γεωμορφικής ενίσχυσης από όλες τις εκτελεσθείσες αναλύσεις, στο Σχήμα 5.4.1 παρουσιάζονται οι λόγοι  $A_H/A_{Hmax}$  και  $A_V/A_{Vmax}$  όπως αυτοί μεταβάλλονται κατά πλάτος της εκάστοτε λεκάνης. Όπως προκύπτει από το Σχήμα 5.4.1.α, οι μέγιστες τιμές της  $A_H$  εμφανίζονται συνήθως για λόγους  $x/B$  (όπου  $x$  η απόσταση του σημείου από τον άξονα της λεκάνης) με τιμές από 0,30 έως 0,40. Παρόλα αυτά υπάρχουν εξαιρέσεις όπου η  $A_{Hmax}$  εμφανίζεται εγγύτερα στα άκρα της λεκάνης (για  $x/B = 0.4 - 0.45$ ), αλλά και περιπτώσεις όπου εμφανίζεται εγγύτερα στο κέντρο της (για  $x/B = 0 - 0.18$ ). Αντιθέτως, οι μέγιστες τιμές της  $A_V$  εμφανίζονται σχεδόν πάντα πλησίον των άκρων της λεκάνης, για τιμές  $x/B$  από 0,42 έως 0,48, ενώ αντιθέτως, η  $A_V$  μηδενίζεται πάντα στο κέντρο της λεκάνης, λόγω συμμετρίας.

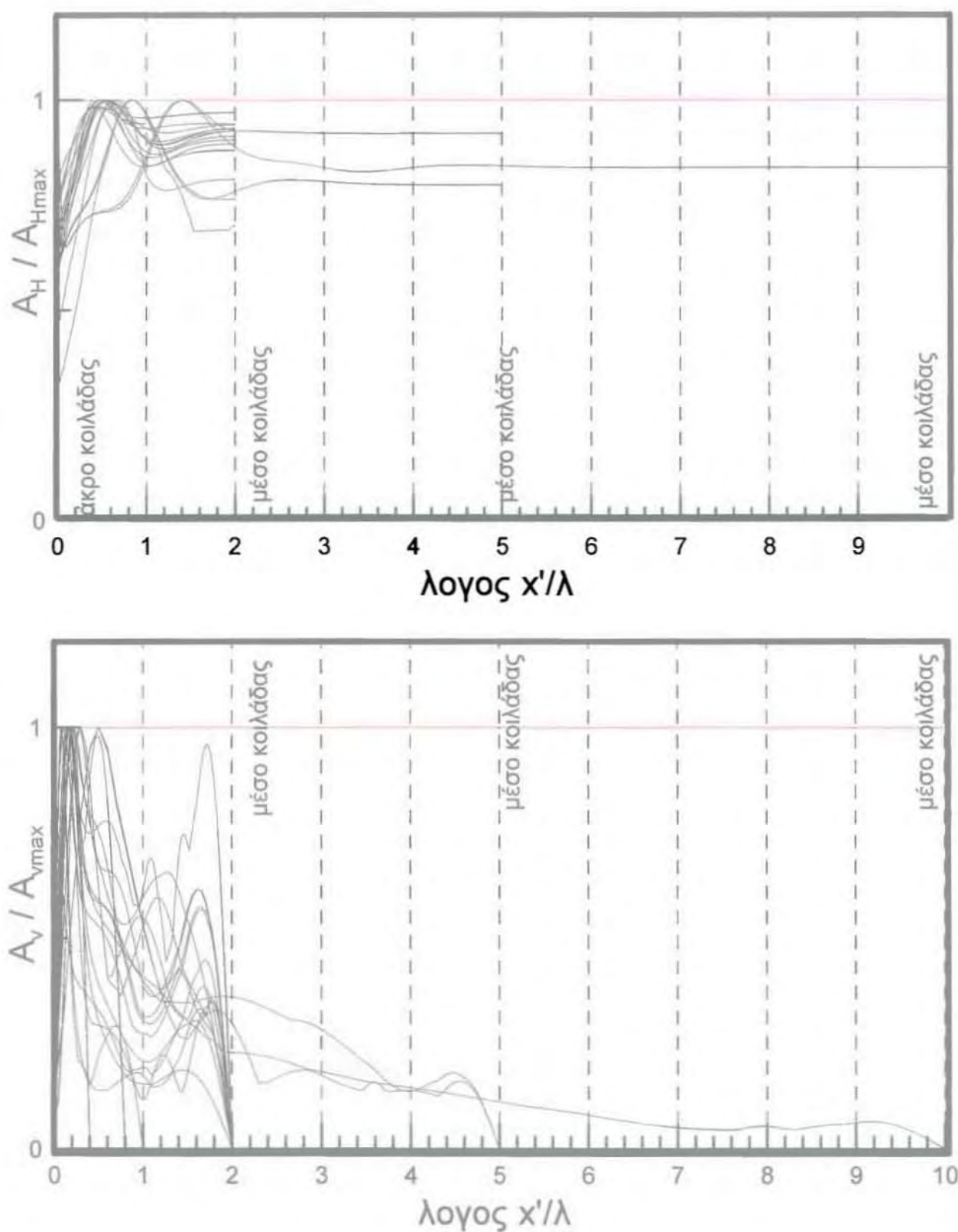
Με βάση το Σχήμα 5.4.1, δεν μπορεί να ορισθεί μια περιοχή εδαφικής λεκάνης στην οποία θα αναμένονται πάντα οι μέγιστες τιμές  $A_H$ , ενώ αντιθέτως, για τις μέγιστες τιμές  $A_V$  μπορεί πιο εύκολα να ορισθεί μια τέτοια περιοχή, πλησίον των άκρων της λεκάνης (π.χ. για  $x/B = 0.38 - 0.48$ ). Έτσι, στο Σχήμα 5.4.2 παρουσιάζονται οι ίδιοι λόγοι  $A_H/A_{Hmax}$  και  $A_V/A_{Vmax}$  όπως αυτοί μεταβάλλονται κατά πλάτος της εκάστοτε λεκάνης, αλλά οι αποστάσεις  $x'$  προσμετρώνται τώρα από την άκρη της εκάστοτε λεκάνης και αδιαστατοποιούνται ως προς το δεσπόζον μήκος διατμητικών κυμάτων  $\lambda$  στην εδαφική λεκάνη. Με χρήση της αδιαστατοποίησης αυτής προκύπτει ότι οι μέγιστες τιμές  $A_{Hmax}$  αναμένονται σε κάθε περίπτωση σε αποστάσεις  $x'/\lambda = 0.4 - 1.4$ , με τις πλείστες των περιπτώσεων να εμφανίζονται σε αποστάσεις  $x'/\lambda = 0.4 - 0.9$ . Αντίστοιχα, οι μέγιστες τιμές  $A_{Vmax}$  εμφανίζονται σε αποστάσεις  $x'/\lambda = 0 - 0.5$  από την άκρη της κοιλάδας, ενώ και πάλι η τιμή της  $A_V$  μηδενίζεται στο κέντρο της κοιλάδας, ανεξαρτήτως της τιμής  $x'/\lambda$  στην οποία αυτή αντιστοιχεί.

Περιβάλλουσες λόγου A ως προς x/B



**Σχήμα 5.4.1:** Συγκεντρωτικό διάγραμμα διαφοροποίησης λόγων  $A_H/A_{Hmax}$  και  $A_V/A_{Vmax}$  ως προς την απόσταση  $x$  από το κέντρο της κοιλάδας, αδιαστατοποιημένη ως προς το εύρος της  $B$ , με βάση τις 21 αναλύσεις τις παρούσας εργασίας.

### Περιβάλλουσες λόγου A ως προς $x'/\lambda$



**Σχήμα 5.4.2:** Συγκεντρωτικό διάγραμμα διαφοροποίησης λόγων  $A_H/A_{Hmax}$  και  $A_V/A_{Vmax}$  ως προς την απόσταση  $x'$  από την άκρη της κοιλάδας, αδιαστατοποιημένη ως προς το δεσπόζον μήκος διατμητικού κύματος  $\lambda$ , με βάση τις 21 αναλύσεις τις παρούσας εργασίας

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6ο: Συμπεράσματα - Προτάσεις

### 6.1. ΓΕΝΙΚΑ

Η παρούσα διπλωματική εργασία ασχολείται με τον υπολογισμό των οριζόντιων και κατακόρυφων παρασιτικών ενισχύσεων της μέγιστης σεισμικής επιτάχυνσης στην επιφάνεια του εδάφους λόγω μη επίπεδης μορφολογίας του βραχώδους υποβάθρου. Ειδικότερα, μελετάται η περίπτωση 2Δ εδαφικής λεκάνης τραπεζοειδούς μορφής με ιξωδο-ελαστικό ομοιόμορφο έδαφος επί ιξωδο-ελαστικού βραχώδους υποβάθρου το οποίο διεγείρεται με κατακόρυφα κύματα SV μορφής παλμού Ricker. Συνολικά εκτελέστηκαν αναλύσεις για 21 περιπτώσεις συνδυασμών εδαφικής λεκάνης – σεισμικής διέγερσης, από τις οποίες προέκυψαν τα συμπεράσματα που συνοψίζονται στην παράγραφο 6.2. Η παρούσα εργασία έχει τους περιορισμούς που συνοψίζονται στην παράγραφο 6.3, όπου και σκιαγραφείται και η πιθανή μελλοντική εργασία σε αντίστοιχο αντικείμενο.

### 6.2. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Με βάση τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων που παρουσιάζονται στην παρούσα εργασία προκύπτουν τα παρακάτω βασικά συμπεράσματα:

- Η ύπαρξη μη επίπεδου βραχώδους υποβάθρου και η δημιουργία κλειστής εδαφικής λεκάνης οδηγεί σε ανακλάσεις των κατακορύφως προσπιπτόντων σεισμικών κυμάτων στις διεπιφάνειες εδάφους-υποβάθρου προς το εσωτερικό της λεκάνης, με συνέπεια γεωμορφικές ενισχύσεις της οριζόντιας επιτάχυνσης και εμφάνιση παρασιτικών κατακόρυφων επιταχύνσεων στην επιφάνεια του εδάφους.
- Οι (γεωμορφικές) ενισχύσεις της οριζόντιας επιτάχυνσης  $A_H$  και οι (γεωμορφικές) εμφανίσεις παρασιτικής κατακόρυφης επιτάχυνσης  $A_V$  είναι συναρτήσεις της θέσης μελέτης, της γεωμετρίας της λεκάνης, των μηχανικών χαρακτηριστικών του εδάφους και του υποβάθρου, αλλά και των χαρακτηριστικών της σεισμικής διέγερσης.
- Οι γεωμορφικές ενισχύσεις της οριζόντιας επιτάχυνσης  $A_H$  φθάνουν κατά μέγιστο το 1.30 σε σχέση με την οριζόντια επιτάχυνση στην επιφάνεια του εδάφους αν το βραχώδες υπόβαθρο ήταν επίπεδο (1Δ συνθήκες), τουλάχιστον για το εύρος παραμέτρων που διερευνήθηκε εδώ. Αντίστοιχα, για το ίδιο εύρος παραμέτρων της παρούσας μελέτης, οι γεωμορφικές εμφανίσεις της παρασιτικής κατακόρυφης επιτάχυνσης  $A_V$  φθάνουν κατά μέγιστο το 0.65 σε σύγκριση και πάλι με την οριζόντια επιτάχυνση στην επιφάνεια του εδάφους αν το βραχώδες υπόβαθρο ήταν επίπεδο (1Δ συνθήκες).



- Οι σημαντικές παράμετροι που επηρεάζουν τις οριζόντιες και κατακόρυφες γεωμορφικές ενισχύσεις είναι το αδιάστατο πάχος της εδαφικής λεκάνης  $H/\lambda_s$ , το αδιάστατο πλάτος της λεκάνης  $B/\lambda_s$  και ο λόγος εμπέδησης  $a=\rho_b V_b/\rho_s V_s$  (Σημείωση:  $\lambda_s=V_s T_e$  είναι το δεσπόμενο μήκος των κυμάτων SV στο έδαφος, με  $V_s$  την εν λόγω ταχύτητα διάδοσης και  $T_e$  τη δεσπόμενη περίοδο αυτών). Δευτερευόντως, τις γεωμορφικές ενισχύσεις επηρεάζουν το ποσοστό απόσβεσης  $\xi$  του εδάφους και η γωνία κλίσης  $i$  του υποβάθρου στις άκρες της λεκάνης.
- Σε ό,τι αφορά στις μέγιστες τιμές των  $A_{Hmax}$  και  $A_{Vmax}$ , η στατιστική επεξεργασία έδωσε ότι:
  - μειώνονται ως συναρτήσεις του ποσοστού απόσβεσης  $\xi$  και του λόγου εμπέδησης  $a$
  - αυξάνονται ως συναρτήσεις του αδιάστατου πάχους  $H/\lambda_s$ , του αδιάστατου πλάτους  $B/\lambda_s$  και της κλίσης  $i$  των πρανών του υποβάθρου στην άκρη της κοιλάδας
- Επί τη βάση των ανωτέρω παρατηρήσεων, προτείνονται προσεγγιστικές σχέσεις εκτίμησης των  $A_{Hmax}$  και  $A_{Vmax}$  ως συναρτήσεις των διακριβωθέντων σημαντικών παραμέτρων του προβλήματος:  $H/\lambda_s$ ,  $B/\lambda_s$ ,  $a$ ,  $\xi$  και  $i$ . Οι σχέσεις αυτές έχουν τυπική απόκλιση του σχετικού λάθους ίση με  $+3.9\%$  και  $\pm 40\%$ , αντίστοιχα.
- Οι μέγιστες τιμές των  $A_{Hmax}$  και  $A_{Vmax}$  εμφανίζονται συνήθως πλησίον των άκρων της λεκάνης, εκτός και αν πρόκειται για στενές ή/και παχειές κοιλάδες, όπου οι μέγιστες τιμές των  $A_{Hmax}$  εμφανίζονται στο κέντρο της λεκάνης. Αντιθέτως, λόγω συμμετρίας η τιμή της  $A_V$  στο κέντρο της κοιλάδας είναι πάντα μηδενική. Πιο συγκεκριμένα, οι μέγιστες τιμές  $A_{Hmax}$  αναμένονται σε κάθε περίπτωση σε αποστάσεις  $x'/\lambda = 0.4 - 1.4$ , με τις πλείστες των περιπτώσεων να εμφανίζονται σε αποστάσεις  $x'/\lambda = 0.4 - 0.9$ . Αντίστοιχα, οι μέγιστες τιμές  $A_{Vmax}$  εμφανίζονται σε αποστάσεις  $x'/\lambda = 0 - 0.5$  από την άκρη της κοιλάδας, ενώ η τιμή της  $A_V$  μηδενίζεται στο κέντρο της κοιλάδας, ανεξαρτήτως της τιμής  $x'/\lambda$  στην οποία αυτή αντιστοιχεί.

### 6.3. ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ – ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΈΡΕΥΝΑ

Η εργασία αυτή και τα συμπεράσματα της αφορούν αποκλειστικά περιπτώσεις 2D εδαφικής λεκάνης τραπεζοειδούς μορφής με ιξωδο-ελαστικό ομοιόμορφο έδαφος επί ιξωδο-ελαστικού βραχώδους υποβάθρου το οποίο διεγείρεται με κατακόρυφα κύματα SV μορφής παλμού Ricker. Συνεπώς, η μελλοντική έρευνα θα μπορούσε να στοχεύσει στην αναίρεση των ανωτέρω περιορισμών. Για παράδειγμα, θα μπορούσαν να διερευνηθούν 2D λεκάνες τριγωνικής ή και ελλειψοειδούς μορφής, ή να γίνουν αναλύσεις για πιο ρεαλιστικές 3D γεωμετρίες υποβάθρου. Επιπλέον, μελλοντικές αναλύσεις θα μπορούσαν να γίνουν για μη-γραμμικό έδαφος επί ιξωδο-ελαστικού υποβάθρου για καλύτερη προσομοίωση της επίδρασης της έντασης της σεισμικής διέγερσης στις γεωμορφικές ενισχύσεις. Τέλος, θα μπορούσε να διερευνηθεί και η επίδραση

της γωνίας πρόσπτωσης των κυμάτων από το υπόβαθρο, κάτι που θα οδηγούσε σε μη συμμετρική απόκριση ακόμη και συμμετρικών λεκανών ομοιόμορφου εδάφους.

Πέραν των ανωτέρω, και με οδηγό τις ήδη πραγματοποιηθείσες αναλύσεις, στο μέλλον θα μπορούσαν να γίνουν συμπληρωματικές αναλύσεις που να καλύπτουν περιπτώσεις με τιμές των σημαντικών παραμέτρων που δεν έχουν διερευνηθεί και για τις οποίες η επίδραση δεν είναι ξεκάθαρη. Αυτές οι αναλύσεις θα έδιναν τη δυνατότητα για αυξημένης αξιοπιστίας σχέσεις εκτίμησης των  $A_{Hmax}$  και  $A_{Vmax}$ . Πιο σημαντικά όμως, η μελέτη θα μπορούσε να επεκταθεί στη γεωμορφική επιδείνωση ολόκληρου του ελαστικού φάσματος απόκρισης στην επιφάνεια του εδάφους, και όχι μόνο σε εκείνη της μέγιστης επιτάχυνσης.

---

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7ο: Βιβλιογραφία

---

1. Mohanty W., Yanger Walling, Vaccari F., Tripathy T., Panza G. (2008) "Modelling of SH- and P-SV wave fields and seismic microzonation based on response spectra for Talchir Basin, India" *Engineering Geology* 104:80-97
2. Pratt T. (2006) "Site Response, Basin Effects, and Attenuation in the Puget Lowland, Washington State, U. S." *U. S. Geological Survey* 81:283-289
3. L. Driad-Lebeau, N. Lokmanea,c, J.F. Semblat, G. Bonnet (2008) "Local amplification of deep mining induced vibrations Part 1: Experimental evidence for site effects in a coal basin" *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 29:39-50
4. S.J. Lee, D. Komatitsch, B.S. Huang, J. Tromp (2009) "Effects of Topography on Seismic-Wave Propagation: An Example from Northern Taiwan" *Bulletin of the Seismological Society of America* 99:314-325
5. J.F.Semblat, A.M. Duval, P. Dangla (2002) "Seismic site effects in a deep alluvial basin : Numerical analysis by the bountary element method" *Computers and Geotechnics*
6. J.F. Semblat, A.M. Duval , P. Dangla (2000) " Numerical Analysis of Seismic Wave Amplification in Nice (France) and comparisons with experiments" *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 19:347-362
7. J.F. Semblat , P. Dangla, M. Kham, A.M. Duval (2002) "Seismic site effects for shallow and deep alluvial basins: in-depth motion and focusing effect" *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 22:849-854
8. J.F. Semblat, M. Kham, E. Parara, P.Y. Bard, K. Pitilakis, K. Makra, D. Raptakis (2004) "Seismic wave amplification: Basin geometry vs soil layering" *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 25:529-538
9. C.G. Sun, C.K. Chung (2006) "Assessment of site effects of a shallow and wide basin using geotechnical information-based spatial characterization" *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 28:1028-1044
10. B. Gatmiri, C. Arson (2007) "Seismic site effects by an optimized 2D BE/FE method II. Quantification of site effects in two-dimensional sedimentary valleys" *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 28:646-661
11. P. N. Psarropoulos, T. Tazoh, G. Gazetas, M. Apostolou (2007) "Linear and Nonlinear Valley Amplification Effects on Seismic Ground Motion" *Soils and Foundations Journal*

12. M. Ewald, H. Igel, K.G. Hinzen, F. Scherbaum (2006) "Basin-related effects on ground motion for earthquake scenarios in the Lower Rhine Embayment" *Geophysics Journal* 166:197-212
13. J. P. Narayan (2005) "Study of Basin-edge Effects on the Ground Motion Characteristics Using 2.5-D Modelling" *Pure and Applied Geophysics* 162:273-289
14. F.J. Chavez-Garcia (2003) "Site effects in Parkway Basin: Comparison between observations and 3-D modeling" *Geophysics Journal* 154:633-646