



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
"ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ"

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

*Αριθμητική προσομοίωση της σεισμικής απόκρισης
ρευστοποιημένου εδάφους με ισοδύναμη γραμμική
ανάλυση*



ΤΣΑΚΑΛΗ ΣΟΦΙΑ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΜΠΟΥΚΟΒΑΛΑΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ, καθ. ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ, ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2013



NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS

POSTGRADUATE COURSE OF STUDIES

ANALYSIS AND DESIGN OF EARTHQUAKE RESISTANT STRUCTURES

THESIS

Numerical simulation of seismic response of liquefied soil with the equivalent linear method



TSAKALI SOFIA

SUPERVISOR: BOUCKOVALAS GEORGE, prof. NTUA

ATHENS, FEBROUARY 2013

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες προς τον καθηγητή του Ε.Μ.Π. κ. Γ. Μπουκοβάλα, επιβλέποντα της μεταπτυχιακής εργασίας, για την ευκαιρία και την καθοδήγηση που μου προσέφερε. Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Κ. Ανδριανόπουλο, Δρ. Πολιτικό Μηχανικό ΕΜΠ, για τις συμβουλές και τη συνεχή στήριξη που μου παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας εργασίας. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους δικούς μου ανθρώπους για την υπομονή και τη συμπαράσταση που μου έδειξαν στο διάστημα αυτό.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περίληψη/ Summary	1
1. Εισαγωγή	5
1.1 Σκοπός της εργασίας	5
1.2 Δομή εργασίας	6
2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση	8
2.1 Γενικά	8
2.2 Ιστορικά Περιστατικά	8
2.3 Προηγηθείσα έρευνα	14
3. Περιγραφή αριθμητικών Αναλύσεων FLAC	21
3.1 Γενικά	21
3.2 Εδαφικά προφίλ	21
3.3 Σεισμικές διεγέρσεις	23
3.4 Μεθοδολογία αριθμητικών αναλύσεων	30
3.5 Αποτελέσματα αριθμητικών αναλύσεων Flac	37
3.5.1 Μεταβολή του δείκτη Iarias	37
3.5.2 Μεταβολή του λόγου φασμάτων για μικρές περιόδους	39
3.5.3 Μεταβολή του λόγου φασμάτων για μεσαίες περιόδους	41
3.5.4 Μεταβολή του λόγου φασμάτων για μεγάλες περιόδους	43
4. Περιγραφή αριθμητικών Αναλύσεων EERA	45
4.1 Γενικά	45
4.2 Μεθοδολογία	45
4.3 Βασικά δεδομένα	46
4.3.1 Γεωμετρία	46
4.3.2 Πυκνότητα στρώσεων	47
4.3.3 Ταχύτητα μετάδοσης σεισμικών κυμάτων	47
4.3.4 Σεισμικό υπόβαθρο	47
4.3.5 Ιξωδο-ελαστική συμπεριφορά στρώσεων	49
4.3.6 Σεισμική διέγερση	50
4.4 Τυπικά αποτελέσματα	51
4.4.1 Επιταχυνσιογραφήματα	51
4.4.2 Φάσματα	53
4.4.3 Δείκτες ποσοτικής εκτίμησης σεισμικής κίνησης	57
5. Αξιολόγηση Αριθμητικών Αναλύσεων	63
5.1 Γενικά	63
5.2 Δείκτης Arias	63
5.3 Φάσματα απόκρισης σε μικρές περιόδους	69
5.4 Φάσματα απόκρισης σε μεσαίες περιόδους	73
5.5 Φάσματα απόκρισης σε μεγάλες περιόδους	77

6.	Διερεύνηση αποτελεσμάτων	81
6.1	Γενικά	81
6.2	Ταχύτητα διάδοσης διατμητικού κύματος στο βραχώδες υπόβαθρο	81
6.3	Ταχύτητα διάδοσης διατμητικού κύματος στο ρευστοποιήσιμο στρώμα	83
6.4	Μέθοδος ανάλυσης	91
6.5	Λόγος ενεργού προς μέγιστη παραμόρφωση	97
7.	Συμπεράσματα-Προτάσεις	99
7.1	Συμπεράσματα	99
7.2	Προτάσεις	103
	Βιβλιογραφία	104

Παραρτήματα

A. ΔΙΕΓΕΡΣΕΙΣ

(ΦΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΗΣ, ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ)

B. ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΙΟΓΡΑΦΗΜΑΤΑ

Γ. ΦΑΣΜΑΤΑ

Δ. ΔΕΙΚΤΕΣ

Περίληψη

Η ρευστοποίηση εδάφους είναι ένα από τα σημαντικότερα κεφάλαια της γεωτεχνικής σεισμικής μηχανικής. Η συμπεριφορά του εδάφους, ωστόσο, στη ρευστοποίηση αποτελεί ένα σύνθετο και πολύπλοκο πρόβλημα και ειδικότερα ο τρόπος με τον οποίο το έδαφος μεταβάλλει τη μορφή της εδαφικής κίνησης τόσο από άποψη επιταχύνσεων όσο και από άποψη περιόδων.

Στα πλαίσια παλιότερης έρευνας στον τομέα Γεωτεχνικής ΕΜΠ (Θεοχάρης, 2011) βρέθηκε ότι υπό **αρμονικές συνθήκες διέγερσης**, το πάχος του στρώματος που ρευστοποιείται είναι παράγοντας απομείωσης της κίνησης. Ακολούθησε έρευνα στο ίδιο τμήμα από την Κουτσογούλα Ε., 2012 για τη συμπεριφορά ενός αμμώδους εδάφους υπό **πραγματικές συνθήκες διεγέρσεως**, μέσω αριθμητικών αναλύσεων. Σημειώνεται ότι και οι δυο έρευνες **πραγματοποιήθηκαν μέσω του κώδικα πεπερασμένων διαφορών (FLAC) κάνοντας χρήση του μη-γραμμικού καταστατικού προσομοιώματος NTUA-SAND.**

Στην παρούσα εργασία το φαινόμενο της ρευστοποίησης και της επακόλουθης απομείωσης/ενίσχυσης της εδαφικής κίνησης στην επιφάνεια του εδάφους μελετάται μέσω της **ισοδύναμης γραμμικής μεθόδου (Schnabel et al. 1972)**, με το πρόγραμμα **Eera**. Στόχος της εργασίας τίθεται να εξεταστεί αν η ανάλυση με τη μέθοδο αυτή καταλήγει στα ίδια συμπεράσματα με τις αριθμητικές αναλύσεις μέσω του κώδικα πεπερασμένων διαφορών. Οι αναλύσεις πραγματοποιούνται για **πραγματικές διεγέρσεις** ενώ η δυσκαμψία του ρευστοποιημένου εδάφους λαμβάνεται από τα αποτελέσματα των μη-γραμμικών αναλύσεων.

Τα αποτελέσματα των αναλύσεων παρουσιάζονται ανά κατηγορία διέγερσης (όπως έχει οριστεί από την προηγούμενη έρευνα) και σχολιάζονται με βάση την τιμή που λαμβάνουν ορισμένοι δείκτες. Πιο συγκεκριμένα, οι παρακάτω δείκτες μελετώνται, παρουσιάζονται και συγκρίνονται με τους αντίστοιχους της Ε. Κουτσογούλας, 2012:

- α) I_{avg} , λόγος I_{avg} Intensity κορυφής και βάσης του στρώματος άμμου που ρευστοποιείται,
- β) Μέση τιμή λόγου φασμάτων κορυφής και βάσης του στρώματος άμμου που ρευστοποιείται για ΜΙΚΡΕΣ ΠΕΡΙΟΔΟΥΣ,
- γ) Μέση τιμή λόγου για ΜΕΣΑΙΕΣ ΠΕΡΙΟΔΟΥΣ
- δ) Μέση τιμή λόγου φασμάτων για ΜΕΓΑΛΕΣ ΠΕΡΙΟΔΟΥΣ

Από τη σύγκριση των μεθόδων προκύπτει:

- 1) Ο δείκτης I_{avg} λαμβάνει συστηματικά μεγαλύτερες τιμές με το Eera, με εξαίρεση τις διεγέρσεις κατηγορίας Α για $H/\lambda_{max} > 0.2$ και της κατηγορίας Β για $H/\lambda_{max} > 0.4$
- 2) Στο εύρος των μικρών περιόδων ($T < 0.15$) ο λόγος φασμάτων είναι συστηματικά μικρότερος μέσω των αναλύσεων Eera και οι διαφορές είναι και ποιοτικές. Ενώ με τις αναλύσεις Eera παρουσιάζεται απόσβεση (με εξαίρεση τα μικρά πάχη στρώματος άμμου) με τις αναλύσεις Flac παρουσιάζεται ενίσχυση της σεισμικής κίνησης μέσω του στρώματος που ρευστοποιείται.

3) Στο εύρος των μεσαίων περιόδων ($0.15 < T < 0.45 \text{sec}$) παρουσιάζεται σύγκλιση των μεθόδων για την κατηγορία A των διεγέρσεων

4) Στο εύρος των μεγάλων περιόδων ($0.45 < T < 1.5 \text{sec}$) σύγκλιση των μεθόδων ποιοτικά με το Eera να δίνει συστηματικά μεγαλύτερες τιμές.

Τέλος μέσω της διερεύνησης που πραγματοποιείται, οι παρατηρηθείσες διαφορές μεταξύ των δυο μεθόδων ανάλυσης αποδίδονται:

A) Στο γεγονός ότι δεν επαρκεί η γνώση της δυσκαμψίας του ρευστοποιημένου εδάφους για να προσομοιώσει το φαινόμενο

B) Στη διαφορά που υπάρχει μεταξύ των δυο μεθόδων ανάλυσης (εν χρόνω ολοκλήρωση με FLAC έναντι ανάλυσης σε πεδίο συχνοτήτων με EERA)

Summary

Soil liquefaction is among the most important chapters in soil dynamics. However, the behavior of soil, under liquefaction conditions, is a complex and complicated problem for which no much knowledge is known. This is especially true for the way that the liquefied layer modifies the waveform because of changes on acceleration and period.

In the framework of previous studies on this subject conducted by the Geotechnical section of NTUA (Theoharis, 2011) it was found that for **harmonic excitations**, the thickness of the liquified layer is one of the factors that contribute to the reduction of the ground response. A later research was conducted by Koutsogoula E. (2012) for the response of a liquefied sand layer under **real excitations**, by means of arithmetic analysis. It is noted that both researches were carried out using **a finite difference software (FLAC) and a non-linear model (NTUA-SAND, Andrianopoulos et al. 2010) for the simulation of the behavior of the liquefied sand.**

In the present thesis, the liquefaction phenomenon and the resulting reduction/amplification of the soil movement is studied using **the equivalent linear method (Schnabel et al. 1972)**, by means of software **Eera**. The aim of the present study is to determine whether the analysis with this method differentiates the results of the analysis using the finite difference method. The analyses are carried out for **real excitations** and the stiffness of the liquefied sand is taken based on the results of the non-linear analyses.

The excitations are categorized into three groups (according to previous research) and the results are presented for each of the groups. Comments are given for the values of the following indicators, which were also examined in the previous study of E. Koutsogoula, 2012:

- a) Iarias, ratio of Arias Intensity of the top and the bottom of the liquefied sand layer
- b) Average value of the ratio of spectras of the top and the bottom of the liquefied sand layer for SMALL PERIODS,
- c) Average value of spectral ratio for MEDIUM PERIODS
- d) Average value of spectral ratio for LARGE PERIODS

From the comparison of the two methods of analysis the following are concluded:

- 1) Using Eera results to higher values of Iarias, except for the case of excitations of category A for $H/\lambda_{\max} > 0.2$ and category B for $H/\lambda_{\max} > 0.4$
- 2) For small values of periods ($0.05 < T < 0.15 \text{sec}$), the ratio of spectras between the top and the bottom of the liquefied sand layer takes lower values when using Eera and the differences are both quantitative and qualitative. While using Eera the soil movement is reduced due to the presence of the liquified sand (except from the case where the thickness of the sand layer is small), when using Flac the soil movements is reduced.

3) For medium values of periods ($0.15 < T < 0.45 \text{sec}$), the results of the two methods of analysis for category A of excitations present acceptable convergence.

4) For large values of periods ($0.45 < T < 1.5 \text{sec}$), the two methods converge qualitatively while Eera results to systematically higher values.

Finally, by the investigation which was carried out, the differences between the two methods of analysis are attributed to the following factors:

A) The knowledge of the stiffness of the liquefied sand is not enough in order to model its behavior with the equivalent linear method

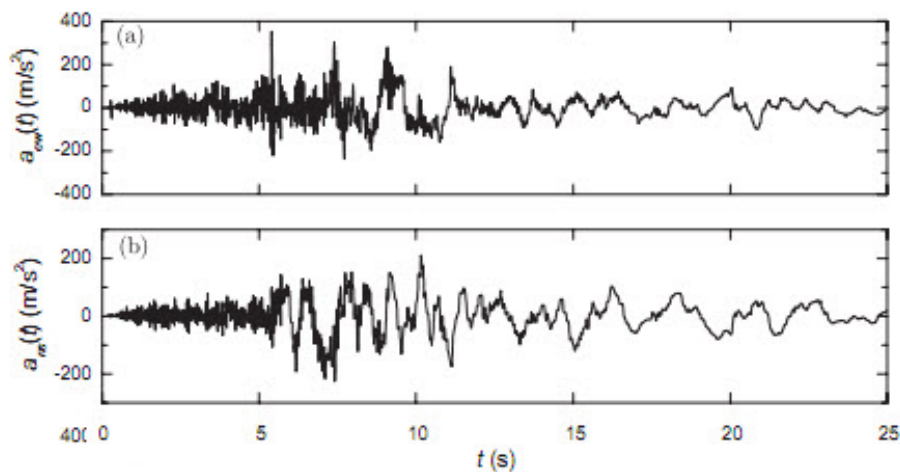
B) The difference between the two methods of analysis (time domain analysis with FLAC whereas frequency domain analysis with EERA)

1. Εισαγωγή

1.1 Σκοπός της εργασίας

Η σεισμική δράση πλήττει άμεσα τις κατασκευές εξαιτίας της μετάδοσης των σεισμικών κυμάτων μέσω του εδάφους. Το έδαφος είναι ο αγωγός διάδοσης των κυμάτων και κάθε αλλαγή στη συμπεριφορά του κατά τη διάρκεια του σεισμού, συνεπάγεται επιπτώσεις στη διάδοση αυτή. Ειδικότερα στην περίπτωση που ένα στρώμα της εδαφικής τομής ρευστοποιείται, δυσχεραίνεται η μετάδοση του σεισμικού κραδασμού, εφόσον η ταχύτητα μετάδοσης του, V_s , λαμβάνει πολύ μικρές τιμές. Άμεσο επακόλουθο είναι η αδυναμία μεταφοράς των κυμάτων τελικώς στην επιφάνεια, γεγονός που επιφέρει σημαντική απομείωση και στην επιφανειακή επιτάχυνση, παραγωγό της σεισμικής έντασης στην ανώδομή.

Η επίδραση αυτή της ρευστοποίησης είναι οπτικά εμφανής στα επιταχυνσιογραφήματα σταθμών που έχουν τοποθετηθεί πάνω σε τέτοια προφίλ. Για παράδειγμα, στο Σχήμα 1.1 παρουσιάζεται επιταχυνσιογράφημα το οποίο έχει ληφθεί από την περιοχή Amagasaki της Ιαπωνίας, στην οποία παρουσιάστηκε έντονη ρευστοποίηση. Παρατηρείται σημαντική απομείωση της επιτάχυνσης μετά τα 10 sec, χρονική στιγμή κατά την οποία πιθανολογείται ότι ξεκίνησε η ρευστοποίηση του υποκείμενου στρώματος.



Σχήμα 1.1 Επιταχυνσιογραφήματα με εμφανή την παρουσία της ρευστοποίησης από την περιοχή Amagasaki, μετά το σεισμό του Kobe M6.9 στην Ιαπωνία (1995). Στην πάνω εικόνα παρουσιάζεται η ΔΑ οριζόντια συνιστώσα ενώ κάτω, η ΒΝ οριζόντια συνιστώσα του σεισμού (Zhang, 2009)

Αν και η απομείωση της επιφανειακής επιτάχυνσης είναι συνήθης στην περίπτωση ρευστοποίησης, ιστορικά περιστατικά (Superstition Hills $M=6.6$) αποδεικνύουν το αντίθετο. Υπάρχουν δηλαδή, περιπτώσεις όπου, αν και το έδαφος έχει ρευστοποιηθεί, δεν έχει απομειωθεί αντίστοιχα και η επιτάχυνση.

Στα πλαίσια διερεύνησης του φαινομένου έχουν ήδη πραγματοποιηθεί δύο διπλωματικές εργασίες στον τομέα Γεωτεχνικής ΕΜΠ. Παρακάτω συνοψίζονται τα αποτελέσματα των αριθμητικών διερευνήσεων:

α) Α. Θεοχάρης, 2011 (κώδικας πεπερασμένων διαφορών, *Flac*): αποδεικνύεται για αρμονικές διεγέρσεις ότι το πάχος του ρευστοποιημένου στρώματος σε συνδυασμό με το μήκος κύματος της διέγερσης είναι αποφασιστικής σημασίας για την απομείωση ή μη, της επιφανειακής επιτάχυνσης. Συγκεκριμένα, για πάχος ρευστοποιημένου στρώματος μεγαλύτερο ή ίσο από το 0.20-0.40 του μήκος κύματος της εκάστοτε διέγερσης στο ρευστοποιημένο στρώμα (λ_{liq}), η ευεργετική επίδραση της ρευστοποίησης είναι εμφανής στην επιτάχυνση.

β) Ε. Κουτσογούλα, 2012 (κώδικας πεπερασμένων διαφορών, *Flac*): αποδεικνύεται για πραγματικές διεγέρσεις ότι η σεισμική απόκριση εξαρτάται και από τα χαρακτηριστικά της σεισμικής διέγερσης (πέραν της δεσπόζουσας περιόδου). Σημαντικό ρόλο παίζει και το εύρος των σημαντικών φασματικών περιόδων της κάθε διέγερσης. Πρακτικά, προκύπτει ότι η επίδραση της ρευστοποίησης μπορεί να είναι ευεργετική ή δυσμενής ανάλογα με το ανηγμένο πάχος του ρευστοποιήσιμου στρώματος και την ιδιοπερίοδο ταλάντωσης της ανωδομής.

Στην παρούσα εργασία διεξάγονται αριθμητικές αναλύσεις μέσω της ισοδύναμης γραμμικής μεθόδου (Schnabel et al. 1972) σε προσομοίωμα που βρίσκεται σε αντιστοιχία με αυτό της Ε. Κουτσογούλας, λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματα των μη-γραμμικών αναλύσεων των προηγούμενων διπλωματικών εργασιών. Πιο συγκεκριμένα, ελέγχεται κατά πόσο μπορεί η ισοδύναμη γραμμική μέθοδος να προσομοιώσει την απόκριση ρευστοποιημένης άμμου, έχοντας ως δεδομένη τη δυσκαμψία αυτής όπως αυτή προέκυψε από τις μη-γραμμικές αναλύσεις.

Όπως είναι γνωστό, οι αναλύσεις μέσω πεπερασμένων διαφορών απαιτούν σημαντικό υπολογιστικό χρόνο. Κρίνεται επομένως σκόπιμο από πρακτικής πλευράς, να διερευνηθεί αν υπάρχει δυνατότητα επίλυσης του ίδιου προβλήματος με την ισοδύναμη γραμμική μέθοδο που απαιτεί λιγότερο υπολογιστικό χρόνο.

1.2 Δομή εργασίας

Ακολουθεί μια σύντομη ανασκόπηση του τρόπου με τον οποίον είναι δομημένη η εργασία.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Αρχικά ορίζεται ο σκοπός της εργασίας, η ανάγκη για την οποία διεξήχθη η συγκεκριμένη έρευνα, καθώς και το πρακτικό της ενδιαφέρον. Όπως αναφέρθηκε και στην ενότητα 1.1, μέσω της εργασίας αυτής διερευνάται αν η

σεισμική κίνηση ενισχύεται ή αποσβένεται κατά τη διάδοσή της μέσω μιας ρευστοποιημένης στρώσης εδάφους. Στόχος της εργασίας είναι αν η μελέτη του υπό εξέταση φαινομένου μέσω της ισοδύναμης γραμμικής μεθόδου καταλήγει στα ίδια συμπεράσματα με αντίστοιχες αναλύσεις μέσω πεπερασμένων στοιχείων που έχουν πραγματοποιηθεί στα πλαίσια παλιότερων ερευνών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Ακολουθεί μια σύντομη ανασκόπηση της διεθνούς **βιβλιογραφίας** πάνω στο θέμα. Αρχικά παρουσιάζονται ιστορικά περιστατικά του υπό μελέτη φαινομένου καθώς και τα αποτελέσματα της διεθνούς έρευνας. Στη συνέχεια, περιγράφονται συνοπτικά τα αποτελέσματα της έρευνας που έχει διεξαχθεί στον τομέα γεωτεχνικής του ΕΜΠ στα πλαίσια δυο διπλωματιών εργασιών (Α. Θεοχάρης, 2011 και Ε. Κουτσογούλα, 2012).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται με μεγαλύτερη λεπτομέρεια η μεθοδολογία των αριθμητικών αναλύσεων της Κουτσογούλα Ε. (2012), οι οποίες πραγματοποιήθηκαν μέσω του κώδικα πεπερασμένων διαφορών Flac. Τα αποτελέσματα αυτών των αναλύσεων χρησιμοποιούνται στη συνέχεια για να συγκριθούν με τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας. Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάζονται οι βασικές παραδοχές που έγιναν στις 2Δ αριθμητικές αναλύσεις (εδαφικό προφίλ, διεγέρσεις) αλλά και τα αποτελέσματα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η μεθοδολογία και τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων μέσω της ισοδύναμης γραμμικής μεθόδου που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας έρευνας. Παρατίθενται τυπικά αποτελέσματα ενδεικτικά για κάποιες από τις εξεταζόμενες διεγέρσεις.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Στην ενότητα αυτή γίνεται η σύγκριση των αποτελεσμάτων των αναλύσεων μέσω της ισοδύναμης γραμμικής μεθόδου και του κώδικα πεπερασμένων στοιχείων, συνολικά για όλες τις εξεταζόμενες διεγέρσεις.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Στο κεφάλαιο αυτό διερευνάται η επίδραση ορισμένων παραμέτρων στα αποτελέσματα των αναλύσεων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: Τέλος, επιγραμματικά, αναφέρονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την εργασία καθώς και προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

Τέλος, στο Παραρτήμα Α παρουσιάζονται τα στοιχεία των σεισμικών διεγέρσεων που μελετήθηκαν. Στα Παραρτήματα Β, Γ και Δ περιλαμβάνονται τα λεπτομερή αποτελέσματα των αναλύσεων της παρούσας εργασίας. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται ανά εξεταζόμενη διέγερση και για λόγους σύγκρισης παρατίθενται μαζί με τα αποτελέσματα των αναλύσεων μέσω προγράμματος πεπερασμένων διαφορών που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια παλιότερων ερευνών.

2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση

2.1 Γενικά

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφονται ιστορικά περιστατικά στα οποία δεν είναι εμφανής η απομείωση της επιφανειακής επιτάχυνσης παρά το γεγονός ότι το υποκείμενο αμμώδες υπόστρωμα έχει ρευστοποιηθεί. Η αναφορά σε αντίστοιχα περιστατικά, θεωρείται αναγκαία δεδομένου ότι επιβεβαιώνει αναμφισβήτητα το γεγονός ότι η ρευστοποίηση του εδάφους, δεν οδηγεί οπωσδήποτε σε δραστική απομείωση της σεισμικής διέγερσης, αλλά μπορεί ακόμη και να την ενισχύει. Γίνεται επιπροσθέτως, αναφορά στα ευρήματα των διπλωματικών του Α. Θεοχάρη (2011) και της Ε. Κουτσογούλα, (2012) οι οποίες είναι πρόδρομες της παρούσης.

2.2 Ιστορικά Περιστατικά

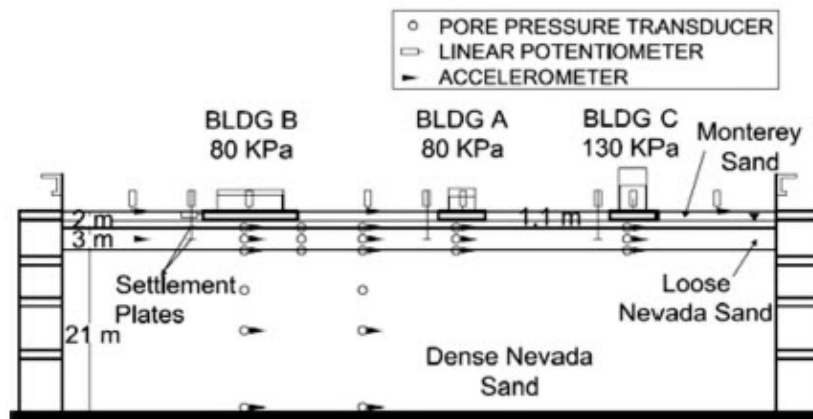
Περιστατικά που παρουσιάζουν το φαινόμενο επαρκώς δεν είναι πολλά στη βιβλιογραφία λόγω των περιορισμένων καταγραφών επιτάχυνσης στην επιφάνεια του ρευστοποιημένου εδάφους καθώς και των αντίστοιχων καταγραφών στο βραχώδες υπόβαθρο. Εκλείπουν επίσης, μετρήσεις των πιέσεων πόρων στο αμμώδες στρώμα ως απόδειξη της ρευστοποίησης του. Πολλοί ερευνητές χρησιμοποιούν περιστατικά στα οποία παρουσιάζεται το φαινόμενο χωρίς όμως, να αποτελεί στόχο της έρευνας τους. Κατά συνέπεια, κάποιες φορές το φαινόμενο απλώς παρατίθεται ως παρατήρηση και άλλες φορές, δε σχολιάζεται καθόλου.

Εξαιρεση αποτελεί η εργασία των Dashti et al (2010), οι οποίοι έθεσαν ως στόχο της εργασίας τους, τον καθορισμό των μηχανισμών που επηρεάζουν τις καθιζήσεις κτιρίων, με επιφανειακές θεμελιώσεις, σε ρευστοποιημένα εδάφη. Η εύρεση των μηχανισμών πραγματοποιήθηκε με τη διεξαγωγή τριών πειραμάτων φυγοκεντρική (T3-30, T3-50-SILT, T6-30) .

Από τους μηχανισμούς του εδάφους που ενδεχομένως θα επηρέαζαν τις καθιζήσεις, εξετάστηκαν η σχετική πυκνότητα D_r και το πάχος H . Τα πειράματα διαφοροποιήθηκαν ανά δύο, σε κάποιο από τα προαναφερθέντα χαρακτηριστικά, προκειμένου να είναι εμφανής η επίδραση του εκάστοτε χαρακτηριστικού στην καθίζηση. Συνεπώς, το πείραμα T3-30, συνίστατο από 3m άμμου Nevada, σχετικής πυκνότητας $D_r=30\%$, το πείραμα T3-50-SILT από 3m άμμου Nevada, σχετικής πυκνότητας $D_r=50\%$ και το T6-30 από 6m άμμου Nevada, σχετικής πυκνότητας $D_r=30\%$. Και στα τρία πειράματα, η άμμος καλυπτόταν από άμμο Monterey (πάχους 2m) ενώ εδραζόταν σε πυκνή άμμο Nevada ($D_r=90\%$). Ειδικότερα, στο πείραμα T3-50-SILT, το αμμώδες στρώμα ήταν εφοδιασμένο επιφανειακά και με 0.02mm αργίλου ώστε να εμποδίζεται η απότομη απομείωση των υδατικών πιέσεων λόγω

κατακόρυφης ροής. Πάνω στην εδαφική τομή του μοντέλου, είχαν τοποθετηθεί τρία κτίρια A, B, C με διαφορετικές διαστάσεις.

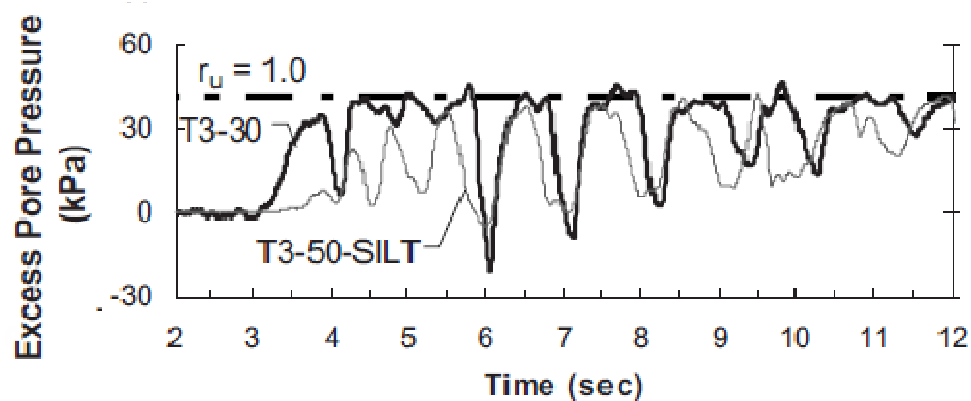
Στο Σχήμα 2.1 παρουσιάζεται το προφίλ του φυγοκεντριστή εφοδιασμένο με τον εξοπλισμό. Με μαύρο βέλος αναπαρίσταντο οι επιταχυνσιογράφοι και με άσπρο κυκλάκι τα πιεζόμετρα. Αρκετός εξοπλισμός έχει αφαιρεθεί από το σχήμα για λόγους ευκρίνειας.



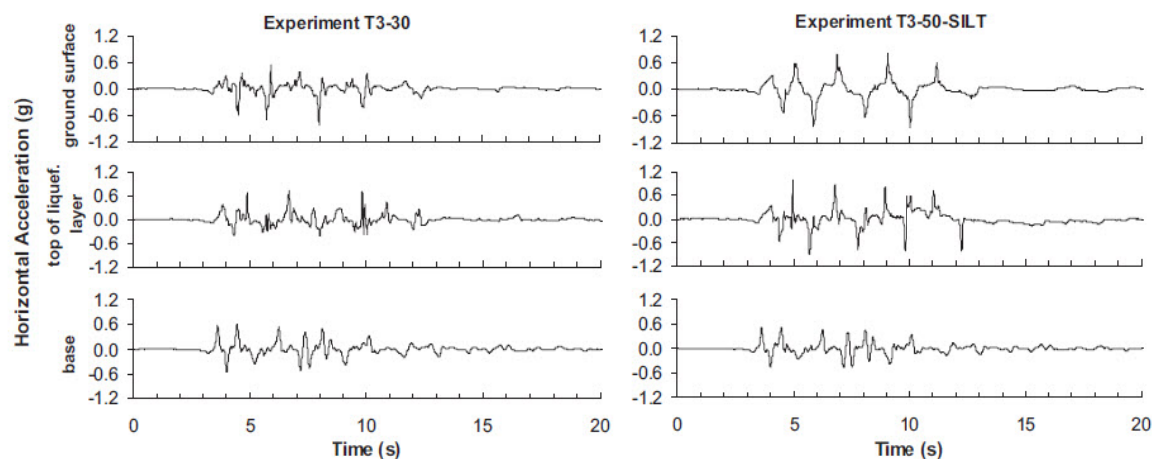
Σχήμα 2.1 Μοντέλο φυγοκεντριστή για το πείραμα T3-30

Η επιβαλλόμενη διέγερση προερχόταν από το σεισμό του Kobe (1995), στην περιοχή Port Island. Προκειμένου να ληφθεί υπόψη το μέγεθος της σεισμικής δόνησης στις προκαλούμενες καθιζήσεις, η ίδια διέγερση επιβλήθηκε τροποποιημένη (scaled) ως προς τις επιταχύνσεις. Τη μια φορά με υποδιπλασιασμό των τιμών της επιτάχυνσης ώστε $a_{\max}=0.19g$ και την άλλη φορά με πολλαπλασιασμό αυτών, ώστε $a_{\max}=0.55g$.

Οι ερευνητές για συγκριτικούς λόγους, μελέτησαν τις καθιζήσεις και κάτω από τα κτίρια και στο ελεύθερο πεδίο (σε περιοχή μακριά από αυτά). Στα επιταχυνσιογραφήματα του ελεύθερου πεδίου, κατά τη διάρκεια της διέγερσης, τα στρώματα ρευστοποιήθηκαν. Προκειμένου να φανερωθεί η επίδραση της σχετικής πυκνότητας, μελετήθηκαν αρχικά τα πειράματα T3-30 και T3-50-SILT που διαφοροποιούνταν ως προς την παράμετρο αυτή. Ειδικότερα, για το περιστατικό της υψηλής επιτάχυνσης ($a_{\max}=0.55g$), στο μέσο του στρώματος, οι υπερπιέσεις πόρων αυξήθηκαν σταδιακά, παίρνοντας τη μορφή του Σχήματος 2.2. Όπως φαίνεται και στο σχήμα, η πυκνή άμμος του T3-50-SILT, ρευστοποιήθηκε ($r_u=1$), 2-3sec μετά τη χαλαρή του T3-30, γεγονός που αποδόθηκε στην δυσκολία ανάπτυξης υπερπιέσεων σε αυτή.



Σχήμα 2.2 Χρονοιστορίες υπερπίεσεων πόρων για το περιστατικό με $a_{max}=0.55g$. Με αχνή γραμμή παρουσιάζονται οι υπερπίεσεις για το πείραμα T3-50-SILT και με έντονη γραμμή, οι υπερπίεσεις για το πείραμα T3-30



Σχήμα 2.3 Επιταχυνσιογραφήματα στη βάση του ρευστοποιημένου στρώματος, στην κορυφή του και στην επιφάνεια του μοντέλου (από κάτω προς τα πάνω). Αριστερά τα επιταχυνσιογραφήματα για το πείραμα T3-30 και δεξιά για το πείραμα T3-50-SILT

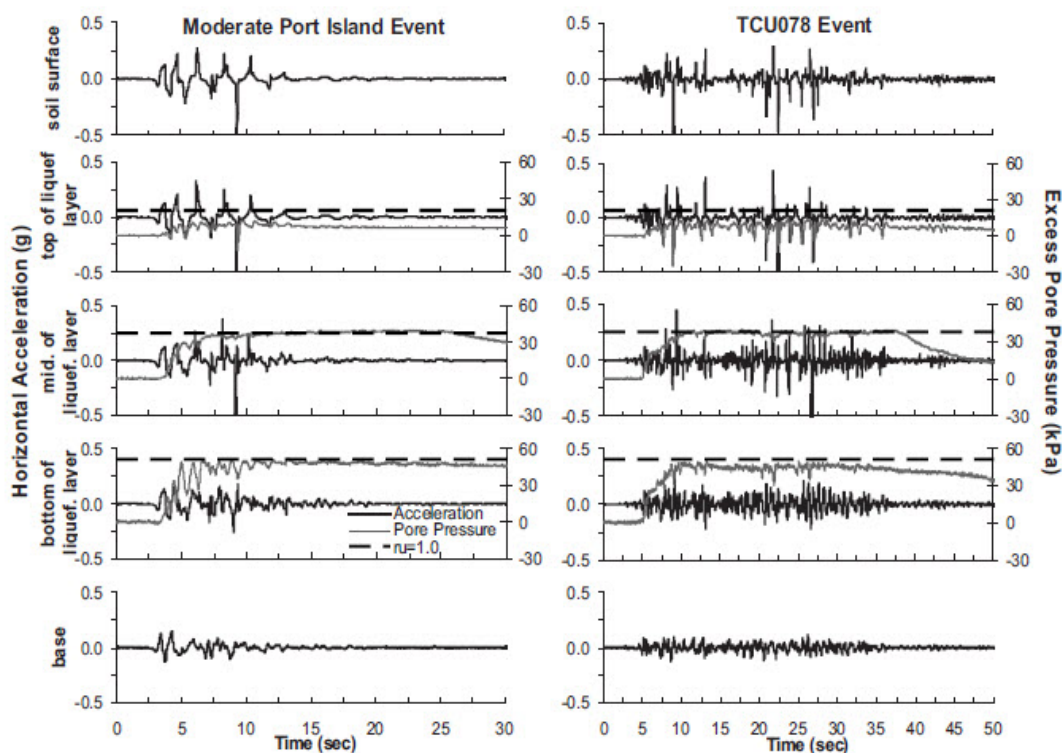
Ωστόσο, παρά τη ρευστοποίηση της άμμου, η επιφανειακή επιτάχυνση όχι μόνο δεν απομειώθηκε σε κανένα από αυτά, αλλά ενισχύθηκε επιπλέον. Στο Σχήμα 2.3, παρουσιάζονται τα επιταχυνσιογραφήματα στη βάση του ρευστοποιημένου στρώματος, στην κορυφή του, καθώς και στην επιφάνεια του μοντέλου. Όπως σημείωσαν και οι ερευνητές, παρατηρήθηκαν υψηλές τιμές επιτάχυνσης στην κορυφή της άμμου και για τις δύο περιπτώσεις, οι οποίες ήταν εντονότερες για σχετική πυκνότητα άμμου 50% (πείραμα T3-50-SILT). Οι υψηλές τιμές της επιτάχυνσης αποδόθηκαν στην διαστολική συμπεριφορά της, η οποία ήταν εντονότερη για μεγάλες τιμές σχετικής πυκνότητας. Κατά την αποτόνωση των υπερπίεσεων πόρων, η άμμος είχε τη δυνατότητα να επανακτά τη δυσκαμψία της και να παρουσιάζει υψηλές τιμές επιτάχυνσης.

Σχετικά με την επίδραση του πάχους της άμμου (μελέτη πειραμάτων T3-30 και T6-30), τα αποτελέσματα του πειράματος T6-30 δεν παρουσιάστηκαν αλλά ούτε και σχολιάστηκαν. Οι ερευνητές ανέφεραν ότι τα συμπεράσματα ήταν πασιπλήσια με εκείνα προηγούμενων περιστατικών και πειραμάτων φυγοκεντριστή, όπου το πάχος της άμμου ήταν μεγάλο. Παραταύτα, αναφέρθηκε ότι πιθανότατα ένα αμμώδες στρώμα, μεγάλου πάχους, θα προκαλούσε απομείωση της επιτάχυνσης.

Οι ίδιοι ερευνητές, ωστόσο, ως συνέχεια της μελέτης τους πάνω στις καθιζήσεις κτιρίων, σε άλλο άρθρο τους, επανέλαβαν την εκτέλεση του πειράματος T3-50, μόνο που αυτή τη φορά επέβαλαν τη διέγερση που καταγράφηκε στο σταθμό TCU078 κατά το σεισμό του Chi-Chi (1999). Η επιλογή της διέγερσης έγινε λόγω της μεγάλης του διάρκειας και λόγω του αργού ρυθμού απόδοσης ενέργειας. Ο σεισμός παρουσίαζε μέγιστη επιτάχυνση 0.13g και ήταν συγκρίσιμος με την καταγραφή στο Port Island που είχε $a_{max}=0.19g$.

Ακολούθως, (Σχήμα 2.4) παρουσιάζονται οι επιταχύνσεις και οι πιέσεις πόρων σε χαρακτηριστικά σημεία της εδαφικής τομής (βάση μοντέλου, βάση άμμου, μέσο άμμου, κορυφή άμμου, επιφάνεια μοντέλου) για τα δύο περιστατικά.

Παρότι ο σεισμός του Chi-Chi χαρακτηρίζεται από μικρότερη περίοδο και μεγαλύτερη διάρκεια, έδωσε ίδια ποιοτικά επιταχυνσιογραφήματα με τη διέγερση του Port Island. Υψηλές σημειακές επιταχύνσεις σημειώθηκαν μετά την έναρξη της ρευστοποίησης.



Σχήμα 2.4 Επιταχυνσιογραφήματα στη βάση μοντέλου, στη βάση άμμου, στο μέσο άμμου, στην κορυφή άμμου και τέλος ,στην επιφάνεια του μοντέλου (από κάτω προς τα πάνω) για το πείραμα T3-50. Αριστερά τα επιταχυνσιογραφήματα για τη διέγερση Port Island ($a_{max}=0.19g$) και δεξιά για τη διέγερση του Chi-Chi ($a_{max}=0.13g$)

Ειδοποιός διαφορά παρουσιάστηκε στον χρόνο έναρξης αυτής και για τις δύο περιπτώσεις. Το στρώμα ρευστοποιήθηκε 3 sec αργότερα κατά τη διέγερση του Chi-Chi (10 sec) σε σχέση με τη διέγερση του Port Island, πιθανότατα λόγω απουσίας ισχυρού παλμού, στο προηγούμενο διάστημα. Ας σημειωθεί ακόμη, ότι απομείωση των υπερπιέσεων πόρων στους χρόνους που παρατηρούνται σημειακές ενισχύσεις της επιτάχυνσης, δεν παρουσιάζονται στο μέσο του στρώματος, ως ένδειξη διαστολικότητας. Μετα την ρευστοποίηση, οι υπερπιέσεις πόρων φαίνονται να παρουσιάζουν σταθερή τιμή ενώ το r_u ισούται με τη μονάδα.

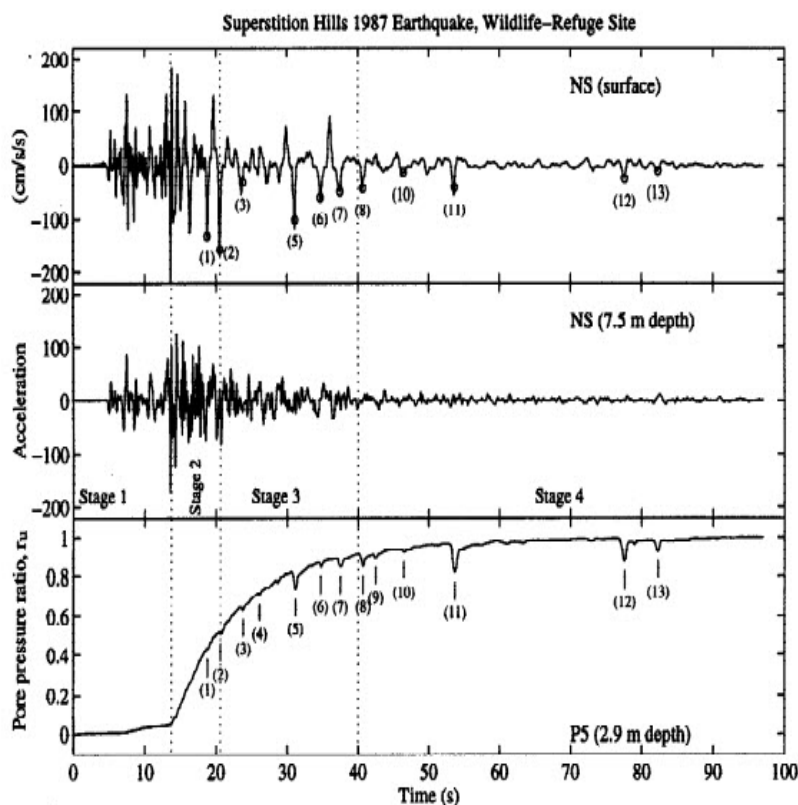
Επιταχυνσιογραφήματα τα οποία αν και προέρχονται από ρευστοποιημένες περιοχές παρουσιάζουν σημειακή ενίσχυση (peaks), συμπεριλαμβάνονται και στη μελέτη των Bonilla L. F. et al. (2005). Οι ερευνητές έθεσαν ως ευρύτερο στόχο να αποδείξουν πως επιφανειακά επιταχυνσιογραφήματα από ισχυρούς σεισμούς (όπως Superstition Hills M6.6, Kushiro-Okii M7.6 κ.α) με μορφή όπως το επιταχυνσιογράφημα κορυφής για το Port Island του Σχήματος 2.4, οφείλονται στη μη γραμμική συμπεριφορά του εδάφους και μπορούν να αποτελέσουν απόδειξη για αυτή.

Αναφορικά με τα επιφανειακά επιταχυνσιογραφήματα που προέρχονται από ρευστοποιημένα εδάφη, σημειώνουν την παρατηρούμενη ενίσχυση που

παρουσιάζεται σε αυτά, η οποία αντιτίθεται στην αναμενόμενη απομείωση. Ωστόσο, την αποδίδουν στη διαστολική συμπεριφορά της άμμου η οποία μπορεί να ανακτά την διατμητική της αντοχής υπό ανακυκλική φόρτιση. Η επαναφορά της αντοχής επιφέρει στιγμιαίες, υψηλές τιμές διατμητικής τάσης που απεικονίζεται στο επιταχυνσιογράφημα, με υψηλές τιμές επιτάχυνσης, ακόμα και μετά τη ρευστοποίηση. Σημειώνουν, παρά ταύτα, ότι οι επιταχύνσεις αυτές οφείλονται σε τοπικά χαρακτηριστικά και όχι στη διέγερση.

Μια από τις ρευστοποιημένες περιοχές με την ανωτέρω συμπεριφορά αποτέλεσε το Wildlife Liquefaction Array μετά το σεισμό του Superstition Hills, $M=6.6$. Η περιοχή αποτελείται στα 2.5 πρώτα μέτρα από ιλύ, στα ακόλουθα 4.3 m από χαλαρή λυώδη άμμο και τέλος από σκληρή άργιλο. Η στάθμη του υδροφόρου οριζοντα είναι στα 2m με συνέπεια να καθιστά τα εδάφη αυτά επιρρεπή σε ρευστοποίηση

Στο Σχήμα 2.5 παρουσιάζεται το επιταχυνσιογράφημα στην κορυφή (άνω) και το επιταχυνσιογράφημα στη βάση του αμμώδους προφίλ (κάτω). Η παρουσία της ρευστοποίησης είναι εμφανής από την αύξηση της περιόδου μετά τα πρώτα 20 sec. Παρά τη ρευστοποίηση, παρουσιάζονται σημειακές ενισχύσεις της επιτάχυνσης στην επιφάνεια



Σχήμα 2.5 Επιταχυνσιογραφήματα και λόγος πιέσεων πόρων από την περιοχή Wildlife Liquefaction Array από το σεισμό Superstition Hills, $M=6.6$. Το άνω επιταχυνσιογράφημα προέρχεται από την επιφάνεια του εδάφους ενώ το κάτω από τη βάση του ρευστοποιημένου στρώματος (βάθος 7.5m). Παρατίθεται, επίσης, η εξέλιξη του λόγου υπερπιέσεων των πόρων στο βάθος των 2.9m (Elgamal & Zeghal, 1996).

2.3 Προηγούμενη έρευνα

Στη διπλωματική εργασία του Θεοχάρη (2011), η οποία βασίστηκε σε μη-γραμμικές 2Δ αριθμητικές αναλύσεις, τέθηκε ως στόχος ο προσδιορισμός εκείνου του πάχους του ρευστοποιήσιμου στρώματος H_{cr} πέρα του οποίου θα παρατηρούνταν έντονα απομείωση της επιφανειακής επιτάχυνσης υπό **αρμονικές συνθήκες διέγερσης**. Ως εδαφικό προφίλ μελέτης, χρησιμοποιήθηκε ρευστοποιήσιμη κορεσμένη εδαφική στρώση περιβαλλόμενη από δύο αργιλικά στρώματα (Σχήμα 2.6).

Εφόσον προσδιορίστηκαν τα χαρακτηριστικά των εδαφικών στρωμάτων και της αρμονικής διέγερσης, πραγματοποιήθηκε διερεύνηση με μεταβλητό το πάχος του εδαφικού στρώματος (βασική ανάλυση). Στη διερεύνηση, το πάχος της άμμου μεταβαλλόταν ανά 1m στο εύρος (1-12)m .



Παράλληλα , το φαινόμενο της απομείωσης της εδαφικής επιτάχυνσης ή διαφορετικά της εμφανούς εκδήλωσης ρευστοποίησης ποσοτικοποιήθηκε με αρκετούς δείκτες με πιο αξιόπιστο τον δείκτη I_{arias} όπου

$$I_{arias} = \frac{I_{\alpha, \text{κορυφής}}}{I_{\alpha, \text{βάσης}}} \quad (2.1)$$

με

$$I_{\alpha} = \frac{\pi}{2g} \int_0^{\infty} a(t)^2 dt \quad (2.2)$$

όπου το ολοκλήρωμα των τετραγώνων των επιταχύνσεων $a(t)$ ορίζεται από την έναρξη της διέγερσης έως το τέλος της.

Εμφανής ρευστοποίηση διαπιστώθηκε ότι πραγματοποιούνταν για τιμές του $I_{arias}=0.20$. Δηλαδή για 80% απομείωση της εδαφικής κίνησης στην επιφάνεια της άμμου, σε σχέση με την κίνηση που παράγονταν στην βάση της.

Έτσι, από τη βασική ανάλυση (για $a_{max}=0.30g$ και $T=0.30sec$) προέκυψε ένα κρίσιμο πάχος H_{cr} για την άμμο περίπου ίσο με 7m .

Σχήμα 2.6. Εδαφικό προφίλ που χρησιμοποιήθηκε για τη διεξαγωγή της ανάλυσης του Θεοχάρη Α.(2011). Το πάχος της άμμου είναι μεταβλητό.

Με αλλαγή των συνθηκών του προβλήματος ωστόσο, για γενίκευση του συμπεράσματος, διαπιστώθηκε ότι το κρίσιμο πάχος δεν διατηρούνταν σταθερό αλλά μεταβαλλόταν σε ένα εύρος από 2-7 m, ανάλογα με τις παρακάτω παραμέτρους.

- Δεσπόζουσα περίοδος της διέγερσης, T
- Σχετική πυκνότητα του στρώματος της άμμου, D_r και
- Διαπερατότητα της άμμου K (σε περίπτωση που επιτρεπόταν μερική στράγγιση αυτής)

Αντίθετα, ούτε τα χαρακτηριστικά του αργλικού υπόβαθρου ούτε η μέγιστη επιτάχυνση της διέγερσης $a_{\max}=0.30g$ μετέβαλλαν σημαντικά την τιμή του H_{cr} , όπως είχε προκύψει από τη βασική ανάλυση.

Η επίδραση της δεσπόζουσας περιόδου T καθώς και της σχετικής πυκνότητας D_r ενσωματώθηκαν στο τελικό αποτέλεσμα μέσω του μήκους κύματος του ρευστοποιημένου στρώματος, λ_{liq} (2.2).

$$\lambda_{liq} = \frac{V_{sliq}}{T} \quad (2.3)$$

$$V_{sliq} = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (2.4)$$

όπου G μέτρο δυστημσίας στο ρευστοποιημένο στρώμα
 ρ πυκνότητα υλικού

Συνεπώς, ως παράμετρος του προβλήματος, τέθηκε πλέον, όχι το H της άμμου αλλά ο αδιάστατος λόγος H/λ .

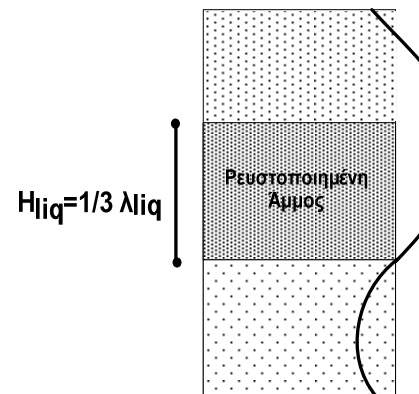
Η ταχύτητα που αναγράφηκε στον τύπο του λ ήταν η ταχύτητα του κύματος στο ρευστοποιημένο στρώμα. Από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων των αναλύσεων προέκυψε ως συνάρτηση της αρχικής ταχύτητας διάδοσης του κύματος $V_{so}=G_{\max}/\rho$ και μάλιστα ίση με

$$V_{sliq} = (0.25 - 0.40) \cong \frac{1}{3} V_{so} \quad (2.5)$$

Το συμπέρασμα έρχεται σε καλή συμφωνία με τη σχέση

$$\frac{V_{sliq}}{V_{so}} = \sqrt[4]{1 - r_u} \quad (2.6)$$

όπου για τιμές του $r_u=0.99$ (ρευστοποίηση του στρώματος) λαμβάνει την τιμή 0.32.



Σχήμα 2.7. Γραφική απεικόνιση του κριτηρίου $H_{cr}=0,3 \lambda_{liq}$.

Τελικώς, διατυπώθηκε, ότι η ρευστοποίηση του αμμόδους στρώματος ($r_u = \Delta U / \sigma_{vo}' \cong 0.90$) δεν οδηγεί μονοσήμαντα σε απομείωση της εδαφικής κίνησης. Απαιτείται το πάχος του στρώματος να είναι μεγαλύτερο από

$$H_{cr} = (0.20 - 0.40)\lambda \cong \frac{1}{3}\lambda = \frac{1}{3} V_s T = \frac{1}{9} V_{so} T \quad (2.7)$$

για να θεωρηθεί εμφανής η απομείωση της επιτάχυνσης.

Στο Σχήμα 2.7 παρουσιάζεται γραφική απεικόνιση του ανωτέρω κριτηρίου.

Στο τελικό συμπέρασμα, όπως φαίνεται, δε λήφθηκε υπόψη η διαπερατότητα της άμμου Κ για αυτό και το αποτέλεσμα αφορά συνθήκες αστράγγιστης φόρτισης.

Εκτός της αριθμητικής επίλυσης, πραγματοποιήθηκε και αναλυτική όπου τα στρώματα θεωρήθηκαν ιξωδοελαστικά. Η ρευστοποίηση της άμμου λήφθηκε υπόψη με υψηλή τιμή του λόγου απόσβεσης σε αυτή ($\xi=25\%$) και $V_{sliq} = \frac{1}{3} V_{so}$, ενώ στα αργιλικά στρώματα δόθηκε μια συνήθους τιμή για το λόγο απόσβεσης ίση με $\xi_1 = \xi_2 = 2\%$ και $V_s = 106 \text{ m/sec}$ για την άνω στρώση και $V_s = 300 \text{ m/sec}$ για την κάτω στρώση.

Στο αποτέλεσμα της επίλυσης (Εξίσωση 2.8), είναι εμφανής η επίδραση του H_2/λ_2 στην απόκριση του σχηματισμού αλλά επίσης και χαρακτηριστικά της αργιλικής επικάλυψης τα οποία δεν διερευνήθηκαν επαρκώς στην αριθμητική επίλυση (H_1/λ_1 , V_{s1}).

$$F = \frac{U_{\text{κορυφή}}}{U_{\text{βάση}}} = \frac{\cos(k_1 * H_1)}{\cos(k_1 * H_1) \cdot \cos(k_2 * H_2) - \frac{V_{s1} * \rho_1}{V_{s2} * \rho_2} \cdot \sin(k_1 * H_1) \cdot \sin(k_2 * H_2)} \quad (2.8)$$

κ κυματικός αριθμός $\kappa = 2\pi/\lambda = 2\pi/V_s T$

K_1 κυματικός αριθμός για την αργιλική επικάλυψη

K_2 κυματικός αριθμός στρώματος άμμου

H_1 πάχος αργιλικής επικάλυψης

H_2 πάχος στρώματος άμμου

ρ_1 πυκνότητα αργιλικής επικάλυψης

ρ_2 πυκνότητα στρώματος άμμου

V_{s1} διατμητική ταχύτητα κύματος στην αργιλική επικάλυψη

V_{s2} διατμητική ταχύτητα κύματος στο στρώμα άμμου

Ο αστερίσκος (*) συμβολίζει την επίδραση της υστερητικής απόσβεσης στα μεγέθη στα οποία απεικονίζεται.

Στα πλαίσια διερεύνησης της επίδρασης της μορφής της διέγερσης στα αποτελέσματα, πραγματοποιήθηκε η διπλωματική της Ε. Κουτσογούλα (2012) στην οποία επαναλήφθηκαν οι αναλύσεις του Θεοχάρη Α. (2011) **με πραγματικές όμως καταγραφές**. Το εδαφικό προφίλ ήταν και στις δυο περιπτώσεις το ίδιο προκειμένου τα αποτελέσματα να είναι συγκρίσιμα. Όπως προέκυψε, η επίδραση της μορφής της διέγερσης επηρεάζει σημαντικά τα αποτελέσματα. Η ανομοιομορφία των πραγματικών διεγέρσεων, τόσο ως προς την επιτάχυνση και την περίοδο όσο και προς την εναλλαγή των χαρακτηριστικών αυτών ανά παλμό φάνηκε να είναι ο κύριος παράγοντας για την διαφοροποίηση των αποτελεσμάτων. Τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων με πραγματικές διεγέρσεις συνοψίζονται παρακάτω.

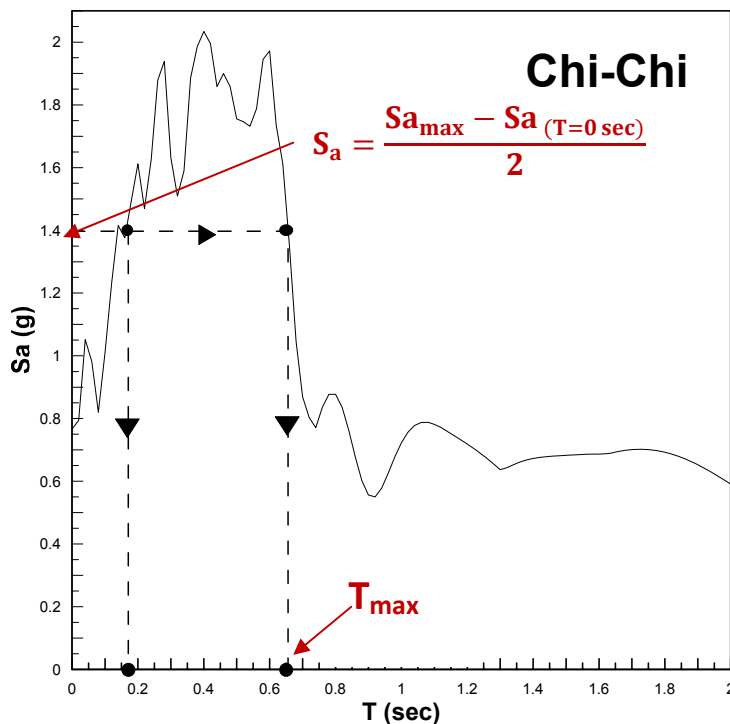
(α) Η ταχύτητα μετάδοσης σεισμικών κυμάτων S (V_{slq}) παραμένει πρακτικά σταθερή για πάχη ρευστοποιήσιμου εδάφους $H_{liq} \geq (4-5)m$. Η τιμή που προέκυψε από τις αριθμητικές αναλύσεις είναι ίση με $0.40 \pm 0.10 V_{so}$ για πάχη πάνω από 5m και $0.45 \pm 0.05 V_{so}$ για μικρότερα πάχη.

(β) Όπως και στην περίπτωση των αρμονικών διεγέρσεων, η επίδραση του πάχους του ρευστοποιημένης στρώσης, μπορεί να ποσοτικοποιηθεί αρκετά ικανοποιητικά εάν χρησιμοποιηθεί το ανηγμένο πάχος H/λ_{max} . Το λ_{max} ορίστηκε ως το μήκος κύματος που αντιστοιχεί στη μέγιστη περίοδο που θεωρείται χαρακτηριστική για την κάθε διέγερση ($\lambda_{max} = V_{slq} T_{max}$). Η περίοδος T_{max} , είναι η μέγιστη περίοδος του φάσματος για $S_a = \frac{S_{a_{max}} - S_{a(T=0 \text{ sec})}}{2}$

όπου S_a φασματική επιτάχυνση

$S_{a_{max}}$ μέγιστη επιτάχυνση φάσματος

$S_{a(T=0 \text{ sec})}$ φασματική επιτάχυνση ίση με $T=0 \text{ sec}$.



Σχήμα 2.8 Διαδικασία εύρεσης εύρους περιόδων μελέτης για τη διέγερση του Chi-Chi.

(γ) Αντίθετα με τα αποτελέσματα των αρμονικών διεγέρσεων, για πραγματικές διεγέρσεις η σεισμική απόκριση εξαρτάται και από τα χαρακτηριστικά της σεισμικής διέγερσης (πέραν της δεσπόζουσας περιόδου). Σημαντικό ρόλο παίζει και το εύρος των σημαντικών φασματικών περιόδων της κάθε διέγερσης, όπως παρουσιάζεται πιο συγκεκριμένα ακολούθως.

(δ) Για σεισμικές διεγέρσεις με μικρό εύρος σημαντικών περιόδων (κατηγορία Α- βλέπε κεφάλαιο 3.3)

- Η μεταβολή του I_{arias} είναι αντίστοιχη με αυτή για αρμονικές διεγέρσεις, μειούμενη δραστικά με την αύξηση του ανηγμένου πάχους H_{liq}/λ_{max} , από 2.3 σε 0.40.
- Η μεταβολή του λόγου φασμάτων απόκρισης για μικρές περιόδους ($0.05 < T < 0.15$ sec) παρουσιάζει αντίστοιχα συμπεράσματα με τη μορφή του I_{arias} , υποδεικνύοντας την ευεργετική εν γένει επίδραση της ρευστοποίησης.
- Το ίδιο ισχύει και για το λόγο φασματικής ενίσχυσης για μεσαίες περιόδους ($T=0.15$ sec έως 0.45sec), μόνο που τώρα το μέσο εύρος διακύμανσης είναι μεταξύ 1.00 και 0.40.
- Τέλος, η μεταβολή του λόγου φασμάτων απόκρισης για μεγάλες περιόδους δεν είναι μονοσήμαντη συνάρτηση του ανηγμένου πάχους H/λ_{max} . Αρχικά αυξάνεται από 1.00 σε 1.40 περίπου και ακολούθως μειώνεται σε τιμές 0.40 ή και μικρότερες. Η μέγιστη ενίσχυση εντοπίζεται σε ανηγμένα πάχη $H/\lambda_{max} \approx 0.30$.

(ε) Για σεισμικές διεγέρσεις με μεσαίο εύρος σημαντικών περιόδων (κατηγορία Β- βλέπε κεφάλαιο 3.3)

- Η μεταβολή του I_{arias} διαφοροποιείται από την αντίστοιχη για αρμονικές διεγέρσεις. Ενώ αρχικά παρουσιάζει ίδια μορφή με εκείνη των αρμονικών, δηλαδή απομείωση από τη τιμή 1.5 έως την τιμή 0.70, για $H/\lambda_{max} > 0.30$ αυξάνεται και πάλι πλησιάζοντας τη μονάδα.
- Η μεταβολή του λόγου φασμάτων απόκρισης για μικρές περιόδους ($0.05 < T < 0.15$ sec) παρουσιάζει αντίστοιχα συμπεράσματα με τη μορφή του I_{arias} . Απομείωση από την τιμή 2.5 για $H/\lambda_{max} = 0.30$ και μετά πάλι αύξηση.
- Για το λόγο φασματικής ενίσχυσης για μεσαίες περιόδους ($T=0.15$ sec έως 0.45 sec), ο λόγος φασμάτων απόκρισης κινείται περί της μονάδας.
- Τέλος, η μεταβολή του λόγου φασμάτων απόκρισης για μεγάλες περιόδους είναι παρόμοια με εκείνη της κατηγορίας Α, παρουσιάζοντας και αυτή μέγιστη ενίσχυση 1.50 για ανηγμένα πάχη $H/\lambda_{max} \approx 0.30$.

(στ) Για σεισμικές διεγέρσεις με σχετικά μεγάλο εύρος σημαντικών περιόδων, (κατηγορία Γ- βλέπε κεφάλαιο 3.3)

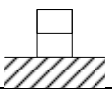
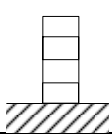
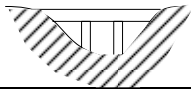
- Η μεταβολή του I_{arias} είναι συνεχώς αυξητική. Ενώ αρχικά παρουσιάζει ίδια μορφή με εκείνη των αρμονικών, δηλαδή απομείωση από τη τιμή 1.5 έως την τιμή 1.00, για $H/\lambda_{max} = 0.15$, στη συνέχεια αυξάνεται και πάλι πλησιάζοντας την τιμή 2.5.

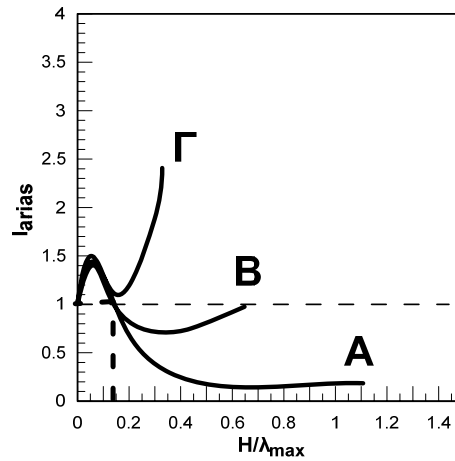
- Η μεταβολή του λόγου φασμάτων απόκρισης για μικρές περιόδους ($0.05 < T < 0.15$ sec) είναι παρόμοια με εκείνη του δείκτη Iarias.. Στα μεγάλα πάχη λαμβάνει τη μέγιστη δυνατή τιμή, περίπου ίση με 4.
- Για το λόγο φασματικής ενίσχυσης για μεσαίες περιόδους ($T=0.15$ sec έως 0.45 sec), ο λόγος φασμάτων απόκρισης αυξάνεται και πάλι για όλα τα πάχη μόνο που η μέγιστη τιμή που προσεγγίζει είναι εκείνη του 1.7.
- Τέλος, η μεταβολή του λόγου φασμάτων απόκρισης για μεγάλες περιόδους ταυτίζεται με την αντίστοιχη των κατηγοριών Α και Β, παρουσιάζοντας μέγιστη ενίσχυση 1.50 για ανηγμένα πάχη $H/\lambda_{max} \approx 0.30$.

(ζ) Θα μπορούσε να λεχθεί ότι το ενεργειακό περιεχόμενο της διέγερσης και ο τρόπος κατανομής του είναι αυτός που διαφοροποιεί τα αποτελέσματα των αρμονικών από τις πραγματικές διεγέρσεις. Συγκεκριμένα, οι διαφορετικές περίοδοι αλλά και οι διαφορετικές επιταχύνσεις από τον ένα παλμό στον άλλο, διαφοροποιούν την εικόνα ως προς τη ενίσχυση της εδαφικής κίνησης που δίνουν οι αρμονικές διεγέρσεις. Συνεπώς, περίοδοι που στο φάσμα της εκάστοτε διέγερσης δε προσέφεραν μεγάλες φασματικές επιταχύνσεις ώστε να ληφθούν υπόψη στον υπολογισμό του μήκους κύματος, λ_{max} , συντονίζονταν με τα μεγάλα πάχη της άμμου και έδιναν ενισχύσεις.

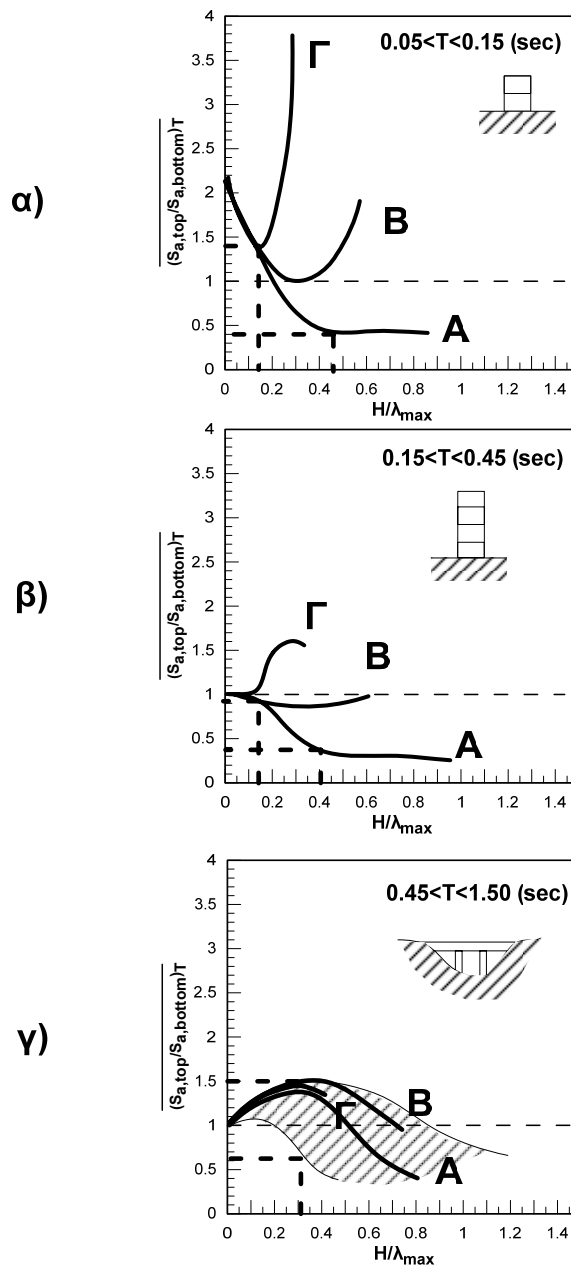
(η) Από πρακτικής σκοπιάς, προκύπτει ότι η επίδραση της ρευστοποίησης μπορεί να είναι ευεργετική ή δυσμενής ανάλογα με το ανηγμένο πάχος του ρευστοποιήσιμου στρώματος και την ιδιοπερίοδο ταλάντωσης της ανωδομής. Τα σχετικά με αυτό το θέμα, συμπεράσματα συνοψίζονται στον ακόλουθο πίνακα και σχήματα. Σημειώνεται ότι τα ανωτέρω αποτελέσματα αφορούν μια σχετικά μαλακή άμμο ($D_r=60\%$) που υποβάλλεται σε ισχυρές διεγέρσεις με συνήθη μέγιστη τιμή επιτάχυνσης από $0.43g$ (Ducze) έως και $0.70g$ (Pyrgos). Βάση των αποτελεσμάτων του Α. Θεοχάρη (2011), όσο πιο μαλακή είναι η άμμος αλλά και όσο ισχυρότερη είναι η διέγερση, τόσο μεγαλύτερη είναι η ενίσχυση της.

Πίνακας 2.1 Αποτελέσματα αριθμητικών αναλύσεων (πραγματικές διεγέρσεις)

		T (sec)		
		0.05-0.15	0.15-0.45	0.45-1.50
				
ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ Α		A ($H/\lambda_{max} > 0.30$)	A ($H/\lambda_{max} > 0.30$)	A ($H/\lambda_{max} > 0.30$)
ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ Β		E (?)	X	E
ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ Γ		E (?)	E	E
Α: Απομείωση, Ε: Ενίσχυση, Χ:καμμία επίδραση, ?: θα πρέπει να διερευνηθεί περαιτέρω				



Σχήμα 2.9 Μέση μεταβολή του δείκτη I_{arias} για τις διεγέρσεις των κατηγοριών A, B, Γ.



Σχήμα 2.9 Ποιοτική αναπαράσταση της μεταβολής του λόγου φασμάτων απόκρισης για τις μικρές περιόδους (α), για τις μεσαίες περιόδους (β) και για τις μεγάλες περιόδους (γ) για τις κατηγορίες A, B, Γ.

3. Περιγραφή αριθμητικών Αναλύσεων FLAC

3.1 Γενικά

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται με μεγαλύτερη λεπτομέρεια τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων της Κουτσογούλα Ε. (2012), που χρησιμοποιούνται στη συνέχεια για να συγκριθούν με τα αποτελέσματα της παρούσης εργασίας. Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάζονται οι βασικές παραδοχές που έγιναν στις 2D αριθμητικές αναλύσεις (εδαφικό προφίλ, διεγέρσεις) αλλά και τα αποτελέσματα ανά κατηγορία διεγερσης όπως περιγράφεται ακολούθως.

3.2 Εδαφικά προφίλ

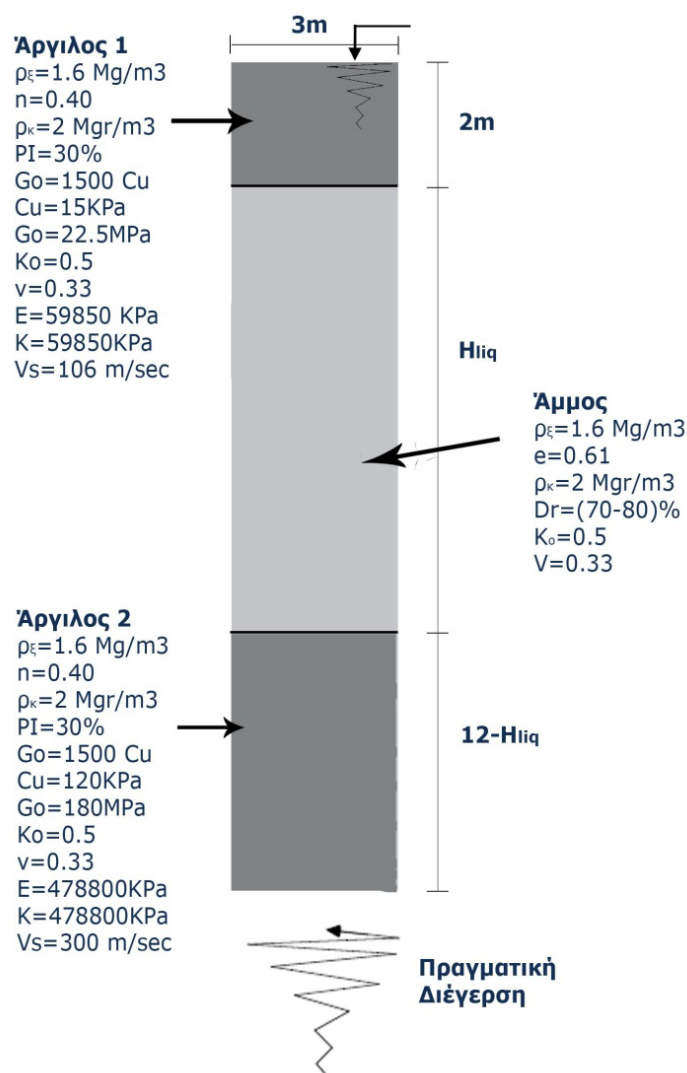
Στο σχήμα 3.1 παρουσιάζεται το εδαφικό προφίλ που χρησιμοποιήθηκε στις αριθμητικές αναλύσεις της Ε. Κουτσογούλας (2012) με τα μηχανικά χαρακτηριστικά των στρωμάτων.

Πρόκειται, για τριστρωτη, κορεσμένη εδαφική στήλη, συνολικού ύψους 14m και πλάτους 3m. Ένα στρώμα άμμου περιβάλλεται από δύο αργιλικά εκ των οποίων το άνω, έχει σταθερό ύψος ίσο με 2m, ενώ το πάχος του κάτω, μεταβάλλεται αναλόγως της μεταβολής του πάχους του αμμώδους στρώματος, ώστε τελικώς το συνολικό τους ύψος να είναι 14m.

Η υπερκείμενη και η υποκείμενη άργιλος έχουν κοινά φυσικά χαρακτηριστικά (ξηρή πυκνότητα ρ_s , κορεσμένη πυκνότητα $\rho_{κορ}$, συντελεστή ουδέτερης ώθησης γαιών K_0 , λόγο Poisson ν) και διαφορετικά μηχανικά χαρακτηριστικά (μέτρο ελαστικότητας E , μέτρο ογκομετρικής συμπίεστικότητας K , αστράγγιστη διατμητική αντοχή C_u , μέτρο δυστημψίας G_0 και ταχύτητα διατμητικών κυμάτων, V_s). Οι τιμές των παραμέτρων αυτών, είναι μεγαλύτερες για το υποκείμενο στρώμα ενδεικτικά της υψηλότερης αντοχής του.

Ας σημειωθεί επίσης, ότι η υποκείμενη άργιλος, έχει ορισθεί με υψηλές τιμές παραμέτρων ώστε να μην παρουσιάζεται αστοχία σε αυτή. Η αστοχία είναι ανεπιθύμητη γιατί στην περίπτωση αυτή, δε θα ήταν δυνατή η απομόνωση της συμπεριφορά της ρευστοποιημένης άμμου (στόχος της εργασίας), εφόσον θα επηρεάζονταν άμεσα από την αστοχία του υποκείμενου στρώματος.

Συνοπώς, βάση των ανωτέρω, οι άνω και κάτω άργιλοι έχουν ξηρή πυκνότητα $\rho_s=1.6\text{Mg}/\text{m}^3$, πυκνότητα κορεσμού $\rho_k=2.0\text{Mg}/\text{m}^3$, πορώδες $n=0.40$, δείκτη πλαστιμότητας $PI=30\%$, συντελεστή ουδέτερης ώθησης γαιών $K_0=0.5$ και λόγο Poisson $\nu=0.33$.



Σχήμα 3.1 Εδαφική στήλη με τα χαρακτηριστικά των στρωμάτων για τη βασική ανάλυση. Το πάχος της άμμου αποτελεί παράμετρο του προβλήματος και είναι μεταβλητό

Το μέτρο ελαστικότητας για την άνω άργιλο είναι $E=59850 \text{ kPa}$, έναντι $E=K=478800 \text{ kPa}$, για την κάτω άργιλο ενώ το μέτρο ισότροπης συμπίεσης K παίρνει τις ίδιες τιμές για τις δύο άργιλους. Ακόμη, η αστράγγιστη διατμητική αντοχή είναι $C_u=15 \text{ KPa}$ και $C_u=120 \text{ KPa}$ για την άνω και κάτω άργιλο αντίστοιχα, ενώ το μέτρο δυστημσίας λαμβάνει τιμές ίσες με $G_o=22.50 \text{ MPa}$, $G_o=180 \text{ MPa}$ για την υποκειμένη και την υπερκειμένη στρώση. Τέλος, η ταχύτητα διατμητικών κυμάτων ισούται με $V_s=106 \text{ m/s}$ για την άνω στρώση και $V_s=300 \text{ m/s}$ για την κάτω στρώση σε αντιστοιχία με τις τιμές των μέτρων δυστημσίας που παρουσιάστηκαν ανωτέρω ($V_s=\sqrt{\frac{G}{\rho}}$).

Όσον αφορά το στρώμα της άμμου, της έχουν αποδοθεί μέσα χαρακτηριστικά πυκνότητας με δείκτη πόρων $e=0.61$ και σχετική πυκνότητα $Dr=60\%$. Η ξηρή ρ_s και η κορεσμένη ρ_k πυκνότητα, ο συντελεστής ουδέτερης ώθησης K_o και ο λόγος του Poisson ν , είναι οι ίδιοι όπως και στα αργιλικά στρώματα, λαμβάνοντας τιμές $\rho_s=1.60 \text{ Mg/m}^3$, $\rho_k=2.00 \text{ Mgr/m}^3$, $K_o=0.50$ και $\nu=0.33$, αντίστοιχα.

Όπως φαίνεται από τα ανωτέρω, χαρακτηριστικά ελαστικότητας (E , K , G , ν) και χαρακτηριστικά αστοχίας κατά Mohr Coulomb ($c = C_u$, $\phi = \phi_u$) έχουν δοθεί στα αργιλικά στρώματα ενώ έχουν παραβλεφθεί για το αμμώδες στρώμα. Ο λόγος είναι ότι το καταστατικό προσομοίωμα που θα χρησιμοποιηθεί για την άμμο είναι αρκετά πιο εξελιγμένο, λαμβάνοντας υπόψη πολλές παραμέτρους, ώστε να μπορεί να προσομοιάσει επαρκώς τη μη γραμμική συμπεριφορά της άμμου υπό ανακυκλική φόρτιση, σε σχέση με πιο συνήθη όπως το Mohr-coulomb .

Ας σημειωθεί τέλος, ότι τα ανωτέρω χαρακτηριστικά των στρωμάτων αποτέλεσαν τα χαρακτηριστικά της βασικής ανάλυσης. Οι τιμές των παραμέτρων που ορίστηκαν ανωτέρω παρέμειναν σταθερές ενώ το πάχος της άμμου μεταβαλλόταν.

3.3 Σεισμικές διεγέρσεις

Ακολουθώς, παρουσιάζονται οι πραγματικές διεγέρσεις που επιβλήθηκαν στην βάση του καννάβου για την πραγματοποίηση των αριθμητικών αναλύσεων σεισμικής απόκρισης του ρευστοποιημένου εδάφους. Αρχικά, παρουσιάζονται τα κριτήρια επιλογής των διεγέρσεων και η κατηγοριοποίηση τους. Στη συνέχεια δίνονται τα βασικά χαρακτηριστικά τους, και η επεξεργασία στην οποία επιβλήθηκαν, πριν εισαχθούν τελικώς, στον κώδικα των αριθμητικών αναλύσεων.

Οι πραγματικές διεγέρσεις οι οποίες επιλέχθηκε να εφαρμοστούν στη βάση του καννάβου ήταν τόσες, ώστε να καλύπτουν ένα επαρκές εύρος χαρακτηριστικών (περιόδου T , έντασης M , μέγιστης επιτάχυνσης a_{max} και πλήθος κύκλων N).

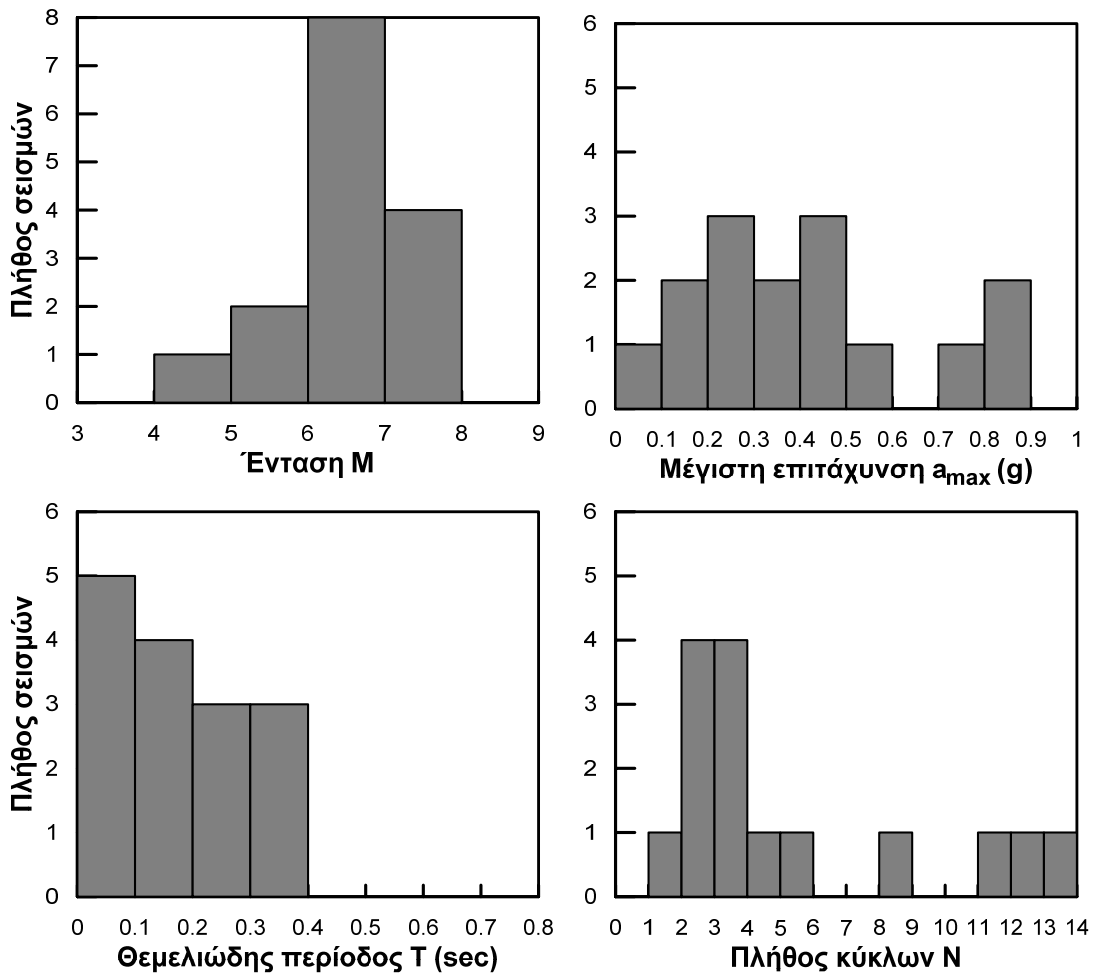
Συνολικά, πρόκειται για 15 διεγέρσεις που προέρχονται από περιστατικά εντός και εκτός ελλαδικού χώρου. Χαρακτηρίζονται από εύρος περιόδου T από 0.10 έως 0.60 sec, έντασης M από 4.9 έως 7.9, μέγιστης επιτάχυνσης a_{max} από 0.10g έως 0.87g και πλήθος σημαντικών κύκλων N από 2 έως 11.50.

Διευκρινίζεται ότι οι «σημαντικοί κύκλοι» κάθε διέγερσης εκτιμήθηκαν με την ακόλουθη διαδικασία. Κάθε κορυφή με αρνητική ή θετική τιμή μέγιστης επιτάχυνσης μεγαλύτερη κατά απόλυτο τιμή, από την a_{eff} λήφθηκε ως μισός κύκλος. Η a_{eff} υπολογίστηκε από τον τύπο $a_{max} * \frac{M-1}{10}$, με a_{max} τη μέση τιμή της μέγιστης αρνητικής και της μέγιστης θετικής τιμής, κατά απόλυτο, του επιταχυνσιογραφήματος ($a_{max} = \frac{|\max a_s + \min a_s|}{2}$). Επιπλέον, ως περίοδος της διέγερσης ορίστηκε εκείνη, όπου με βάση το φάσμα της, παρουσίαζε τη μέγιστη ενίσχυση. Ας προστεθεί πάνω σε αυτό, ότι σε κάποιες διεγέρσεις, υπήρχαν περίοδοι που έδιναν φασματικές ενισχύσεις εξίσου σημαντικές με την ενίσχυση της περιόδου που τελικώς επιλέχθηκε.

Στο Πίνακα 3.1 παρουσιάζονται οι σεισμοί με τα ανωτέρω στοιχεία και στο Σχήμα 3.2 η κατανομή των σεισμών βάση των στοιχείων αυτών.

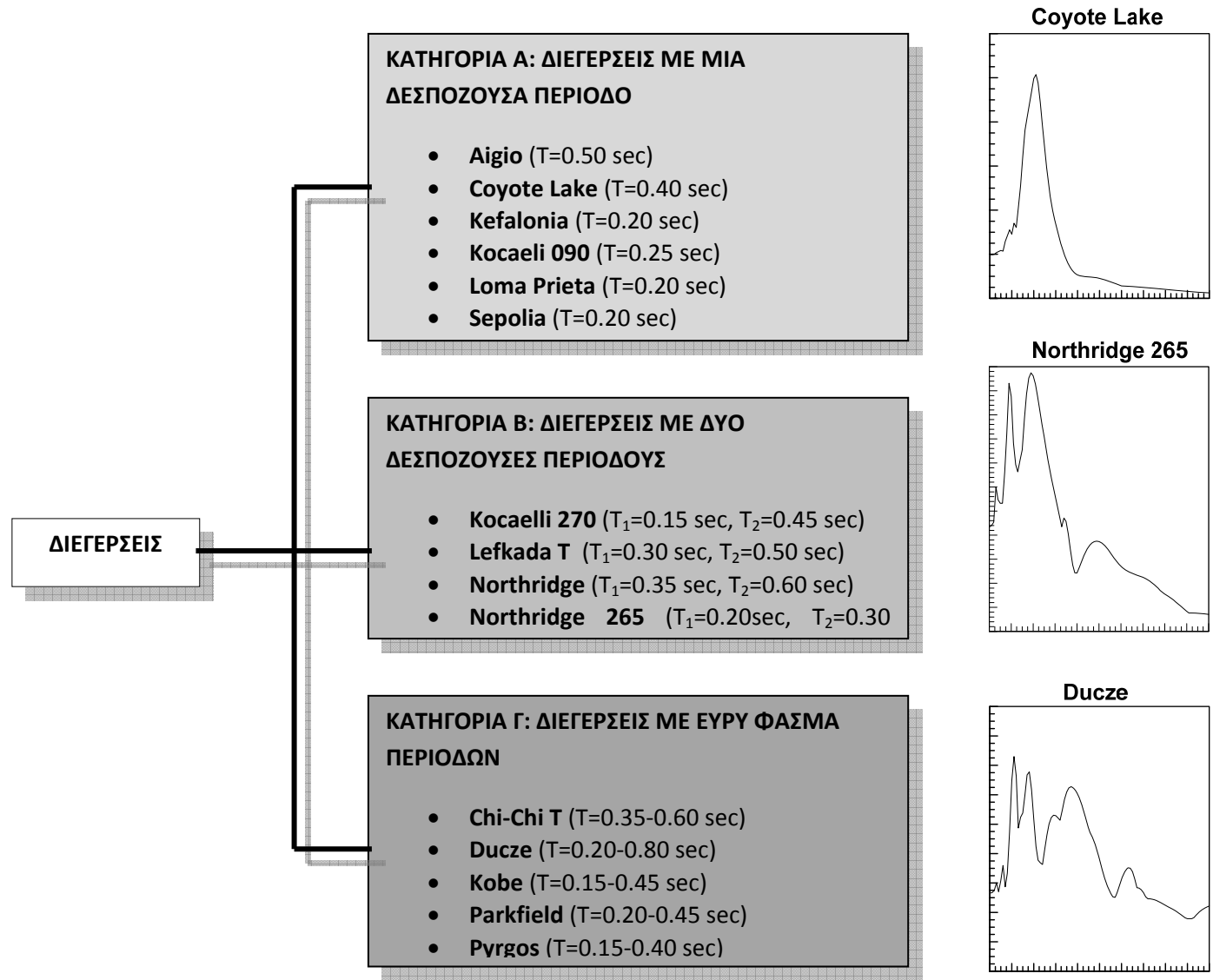
Πίνακας 3.1 Διεγέρσεις αναλύσεων

Διέγερση	Ένταση M	Μέγιστη Επιτάχυνση a_{max} (g)	Περίοδος T (sec)	Σημαντικοί κύκλοι N
Aigio (1995)	6.2	0.39	0.50	2.00
Chi-Chi (1999)	6.8	0.77	0.35	3.00
Coyote Lake (1979)	5.7	0.10	0.40	4.50
Ducze (1999)	7.9	0.54	0.20	3.50
Kefalonia (1983)	6.2	0.24	0.20	9.00
Kobe (1995)	7.2	0.82	0.15	3.50
Kocaeli 090 (1999)	7.51	0.22	0.25	13.00
Kocaeli 270 (1999)	7.5	0.14	0.45	14.00
Lefkada T (2003)	6.3	0.42	0.50	12.00
Loma Prieta (1989)	6.9	0.11	0.20	2.50
Northridge (1994)	6.7	0.88	0.35	3.50
Northridge 265 (1994)	6.7	0.43	0.30	4.00
Parkfield (2004)	6.2	0.27	0.30	3.00
Pyrgos (1993)	4.9	0.45	0.30	3.00
Sepolia (1999)	5.8	0.31	0.20	5.50



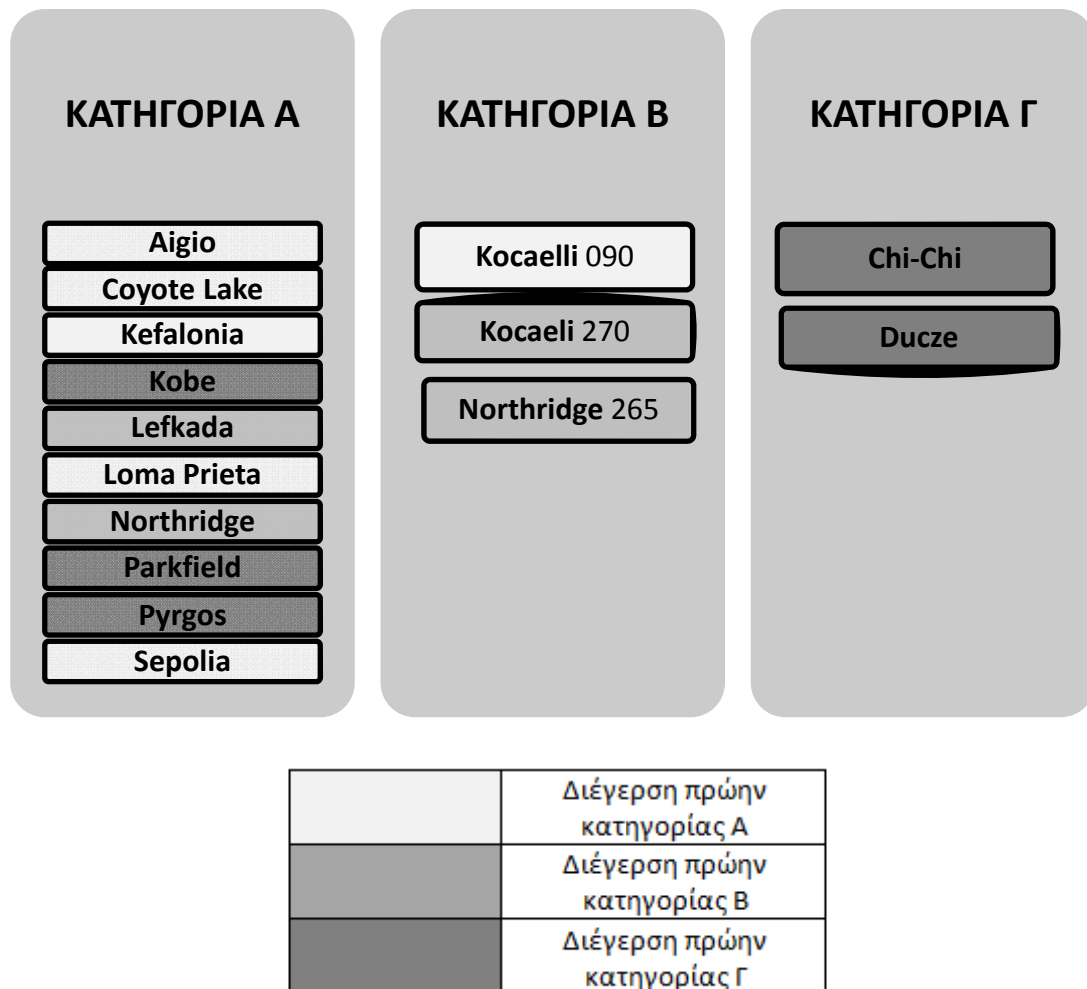
Σχήμα 3.2. Κατανομή των διεγέρσεων με βάση την ένταση τους M , τη μέγιστη επιτάχυνση a_{max} , τη θεμελιώδη περίοδο T και το πλήθος των κύκλων N .

Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο, το κρίσιμο πάχος H_{cr} για αρμονικές συνθήκες διέγερσης, είναι συνάρτηση του μήκους κύματος λ_{liq} στο ρευστοποιημένο στρώμα, συνεπώς και της περιόδου T της διέγερσης. Ακολουθεί η κατάταξη των διεγέρσεων με βάση το εύρος των χαρακτηριστικών περιόδων που παρουσιάζει το φάσμα τους.



Σχήμα 3.3 Κατηγοριοποίηση σεισμικών διεγέρσεων με βάση το πλήθος των χαρακτηριστικών τους περιόδων.

Κατά την απεικόνιση του δείκτη I_{arias} , όπως προέκυψε από τις αριθμητικές αναλύσεις μέσω του FLAC, παρουσιάστηκαν αποκλίνουσες συμπεριφορές ακόμα και στις διεγέρσεις της ίδιας κατηγορίας κατά το Σχήμα 3.3. Έτσι πραγματοποιήθηκε επανακατηγοριοποίηση των διεγέρσεων με κριτήριο τη συμπεριφορά τους ως προς τον δείκτη I_{arias} . Η τελική κατάταξη των διεγέρσεων παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.4. Κάθε διεγερση έχει απεικονισθεί με διαφορετική απόχρωση του γκρι, ώστε να φαίνεται σε ποια κατηγορία άνηκε προηγουμένως. Είναι φανερό ότι οι περισσότερες διεγέρσεις ανήκουν στην νέα κατηγορία Α, ακόμα και αυτές που πρωτίστως άνηκαν στην κατηγορία Γ.



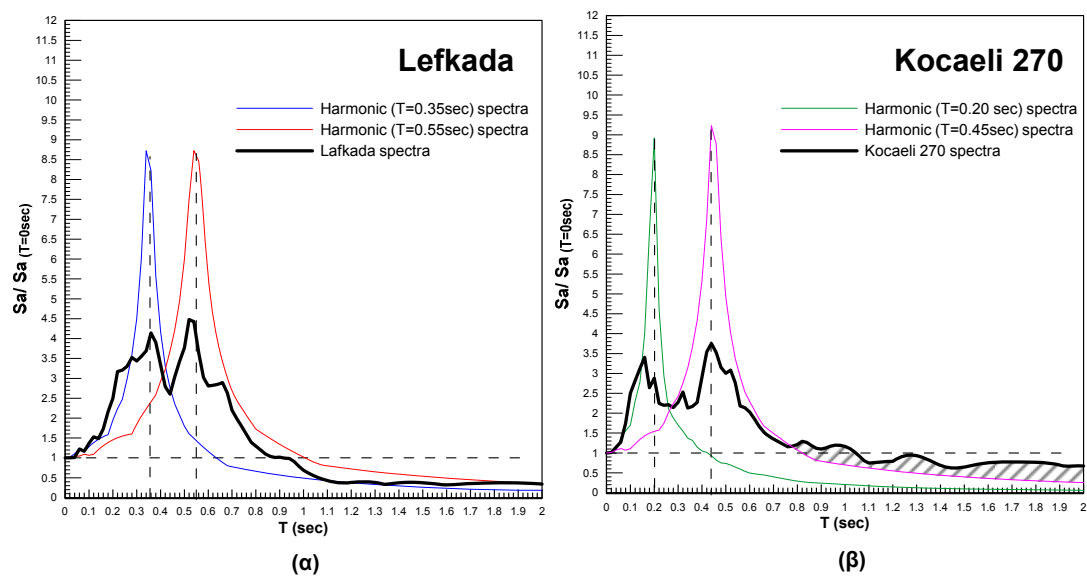
Σχήμα 3.4 Ανακατηγοριοποιημένες διεγέρσεις βάση της μορφής του δείκτη I_{arias} τους, με το πάχος.

Η επανακατηγοριοποίηση υπέδειξε πως το πλήθος των κορυφών δεν είναι εκείνο το στοιχείο που διαφοροποιεί τη συμπεριφορά των σεισμικών διεγέρσεων ως προς τη μορφή του I_{arias} .

Στο σχήμα 3.5 απεικονίζεται σε κοινό διάγραμμα το φάσμα μιας αρμονικής διεγέρσης και εκείνο της διεγέρσης της Lefkada προκειμένου να εντοπιστεί η αιτία

που η διέγερση από την αρχική κατηγορία Β κατατάσσεται στη νέα κατηγορία Α. Δεδομένου ότι η Lefkada χαρακτηρίζεται από δύο καλώς ορισμένες κορυφές με περιόδους 0.35 sec και 0.55 sec απεικονίστηκαν δύο αρμονικές με τις αντίστοιχες περιόδους. Για ευκολία σύγκρισης των δύο φασμάτων, η φασματική επιτάχυνση S_a κανονικοποιήθηκε ως προς τη φασματική επιτάχυνση που αντιστοιχεί στην $T=0\text{sec}$, ($S_a(T=0\text{sec})$) ώστε τα δύο φάσματα να έχουν κοινή αρχή. Σε δεύτερο στάδιο, επαναλήφθηκε η διαδικασία για τη διέγερση Kocaeli 270 που παρουσιάζει πανομοιότυπο φάσμα με εκείνο της Lefkada, η οποία όμως μετά την ανακατάταξη παρέμεινε στην κατηγορία Β.

Είναι εμφανές πως κάθε κορυφή μπορεί να αναπαρασταθεί επαρκώς από μια αρμονική με την ίδια περίοδο με αυτή. Παραταύτα, στις μεγάλες περιόδους από 0.80sec έως και 2sec, όπου προφανώς δεν αποτελούν συνήθεις δεσιπόζουσες περιόδους παρατηρήθηκε ότι η διέγερση Kocaeli 270 στο διάστημα αυτό δεν ακολουθεί τη μορφή της αρμονικής, δηλαδή συνεχή μείωση της φασματικής επιτάχυνσης όπως κάνει η διέγερση της Lefkada. Αντιθέτως, έχει μια σχεδόν σταθερή τιμή ενώ η φασματική επιτάχυνση για αυτές τις περιόδους είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη της αρμονικής (σκιαγραφημένο τμήμα).

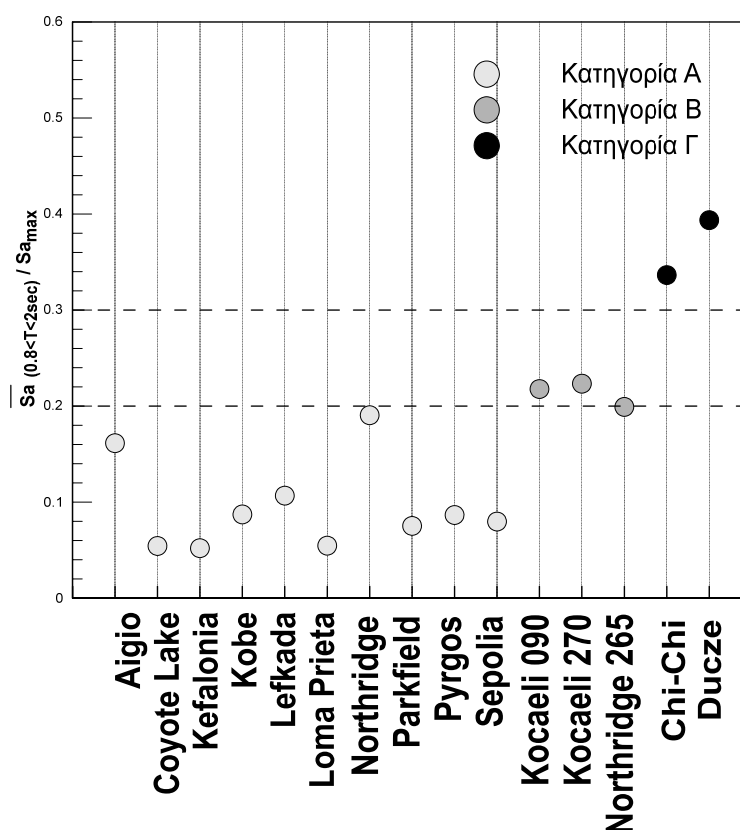


Σχήμα 3.5 Κανονικοποιημένα φάσματα ως προς την μέγιστη επιτάχυνση του εδάφους ($S_{a(T=0\text{sec})}$) για τις διεγέρσεις της Lefkada (α) και του Kocaeli270 (β) (παχιά γραμμή). Στα ίδια διαγράμματα απεικονίζονται οι κανονικοποιημένες αρμονικές που έχουν κοινή περίοδο με εκείνες των κορυφών των διεγέρσεων (λεπτή γραμμή).

Εξαιτίας αυτής της παρατήρησης, στο Σχήμα 3.6 παρουσιάζεται η τιμή του λόγου $\bar{S}_{a(0.8<T<2\text{sec})}/S_{a,\text{max}}$ για όλες τις διεγέρσεις. Θα μπορούσε να ειπωθεί πως μια διέγερση με

- $\bar{S}_{a(0.8<T<2\text{sec})}/S_{a,\text{max}} < 0.20$ ανήκει στην Κατηγορία Α
- $0.20 < \bar{S}_{a(0.8<T<2\text{sec})}/S_{a,\text{max}} < 0.30$ ανήκει στην Κατηγορία Β
- $\bar{S}_{a(0.8<T<2\text{sec})}/S_{a,\text{max}} > 0.30$ ανήκει στην κατηγορία Γ

Συμπερασματικά, η φασματική επιτάχυνση που δίνουν οι μεγάλες περιόδου σε μια πραγματική διέγερση σε σχέση με εκείνη που δίνουν οι αντίστοιχες περιόδου σε μια αρμονική, είναι ο παράγοντας που οδηγεί έναν κραδασμό να καταταχτεί στις κατηγορίες Α, Β, Γ.



Σχήμα 3.6 Απεικόνιση του λόγου $\bar{S}_a(0.8 < T < 2 \text{sec}) / S_{a \max}$ για τις μελετηθείσες διεγέρσεις. Με τις διαβαθμίσεις του γκρι, συμβολίζονται οι κατηγορίες (η πιο ανοιχτόχρωμη αντιστοιχεί στην κατηγορία Α και η πιο σκουρόχρωμη στην κατηγορία Γ).

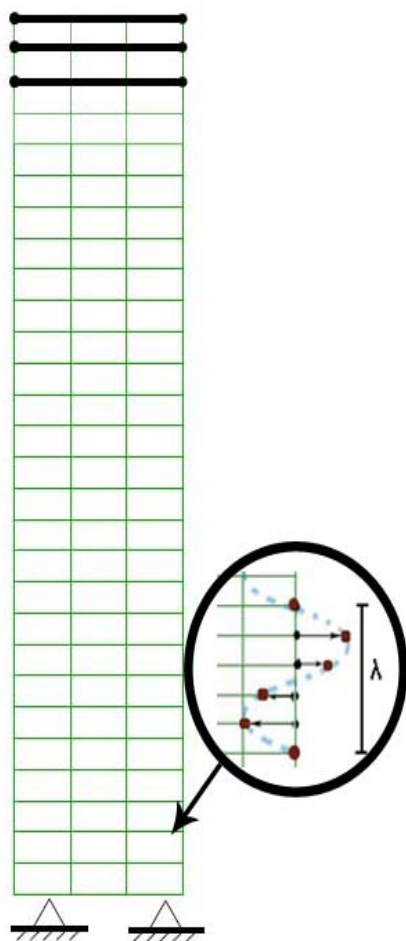
Τελικά, επιλέγεται αυτή η κατηγοριοποίηση των διεγέρσεων (με βάση δηλαδή το σχήμα 3.4) προκειμένου να παρουσιαστούν και να σχολιαστούν στη συνέχεια τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων μέσω πεπερασμένων στοιχείων (Κουτσογούλα Ε., 2012) και μέσω της ισοδύναμης γραμμικής μεθόδου (παρούσα εργασία).

3.4 Μεθοδολογία αριθμητικών αναλύσεων

Για τις αριθμητικές αναλύσεις χρησιμοποιήθηκε ο κώδικας πεπερασμένων διαφορών FLAC5.0.

Κάνναβος

Για την προσομοίωση του εδαφικού προφίλ χρησιμοποιήθηκε κάνναβος με στοιχεία διαστάσεων $0.5\text{m} \times 1.0\text{m}$, με τελικό αποτέλεσμα, ο κάνναβος να διαθέτει 28 στοιχεία στη κατακόρυφη διάσταση και 3 στοιχεία στην οριζόντια διάσταση όπως και στην εργασία του Α. Θεοχάρη (2011). Το διακριτοποιημένο εδαφικό προφίλ παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.6.



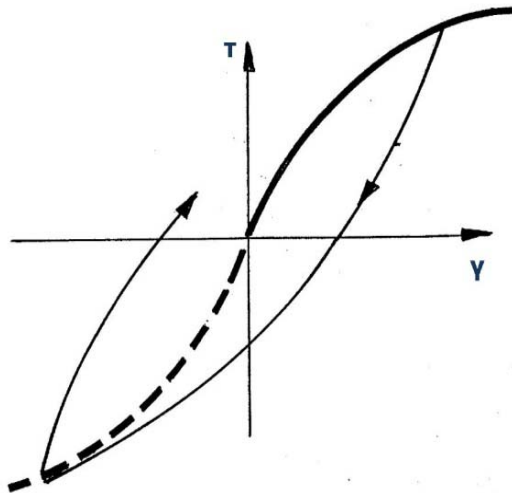
Σχήμα 3.7. Διακριτοποίηση καννάβου σε τετρακομβικά στοιχεία διαστάσεων $0.50\text{ m} \times 1.00\text{m}$. Αρθρώσεις στη βάση και ιδεατά καλώδια καθ' ύψος του καννάβου. Παρουσιάζονται ενδεικτικά τα τρία πρώτα ιδεατά καλώδια στην κορυφή. Σε μεγέθυνση, παρατίθεται η μορφή του μήκους κόματος λ μέσω της οριζόντιας μετατόπισης των κόμβων

Συνοριακές συνθήκες που έχουν επιλεχθεί για το αριθμητικό προσομοίωμα είναι άρθρωση στη βάση και οριζόντια ιδεατά καλώδια καθ' ύψος του καννάβου. Τα ιδεατά καλώδια δεσμεύουν τους ακριανούς κόμβους ανά 0.50m ύψους ώστε να έχουν κοινή οριζόντια και κατακόρυφη μετακίνηση (Σχήμα 3.7) ενώ η διατομή τους, η πυκνότητα και το μέτρο ελαστικότητας τους είναι σχεδόν μηδενικά.

Η βάση θεωρείται άκαμπτη και αμετακίνητη κατά την οριζόντια και την κατακόρυφη διεύθυνση. Άμεσο επακόλουθο της συγκεκριμένης θεώρησης, είναι, ότι τα προσπίπτοντα κόμματα στη βάση του καννάβου, υφίστανται πλήρη ανάκλαση, χωρίς να διαχωρίζονται σε διερχόμενα και ανακλώμενα.

Καταστατικό προσομοίωμα

Η επιλογή του προσομοιώματος έγινε με βάση την επιδιωκόμενη αντίδραση του κάθε στρώματος στη διέγερση. Όσον αφορά την άργιλο επειδή υφίσταται μικρότερες παραμορφώσεις σε σχέση με την άμμο, λόγω συνοχής, θεωρήθηκε ότι σε μεγάλο βαθμό συμπεριφέρεται



Εικόνα 3.8 Έλαστικό-υστερητική μη γραμμική συμπεριφορά εδάφους σε ανακυκλική φόρτιση με βάση το μοντέλο Ramberg-Osgood. Είναι εμφανής η μείωση του τμήνου μέτρου δυσκαμψίας $G=\tau/\gamma$, με την αύξηση της διατμητικής παραμόρφωσης γ .

ελαστικά όχι όμως και γραμμικά. Χρησιμοποιήθηκε επομένως, το μοντέλο Ramberg-Osgood το οποίο μπορεί να αποδώσει επαρκώς την υστερητική της συμπεριφορά στις μικρές παραμορφώσεις (Σχήμα 3.8). Δεν παραλείπεται το γεγονός, ωστόσο, ότι μπορεί να αστοχήσει, για αυτό και το μοντέλο Ramberg-Osgood εφοδιάζεται με το κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb για την συμπεριφορά στις μεγάλες παραμορφώσεις. Το μοντέλο Ramberg-Osgood εφόσον είναι εφοδιασμένο με το κριτήριο Mohr-

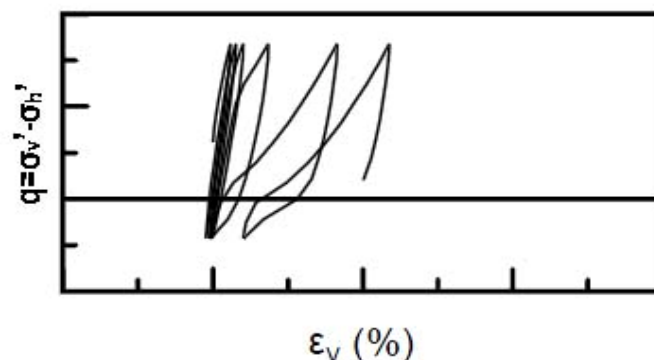
Coulomb, μπορεί να αναπαραστήσει επαρκώς και τη συμπεριφορά της άνω άργιλου, η οποία πιθανολογείται κατά μεγάλο βαθμό, ότι θα πλαστικοποιηθεί.

Αντιθέτως, η κορεσμένη άμμος λόγω του νερού των πόρων και της επακόλουθης ρευστοποίησης της, μπορεί να προβεί σε έντονη πλαστική συμπεριφορά για την ίδια διέγερση. Εξαιτίας της ανωτέρω συμπεριφοράς, κρίνεται ότι ένα πιο σύνθετο και εξειδικευμένο μοντέλο, πρέπει να χρησιμοποιηθεί για να προσομοιάσει τη συμπεριφορά αυτής. Το μοντέλο αυτό ονομάζεται NTUA-SAND (Andrianopoulos et al. 2010) και έχει αναπτυχθεί με στόχο να προσομοιάσει τη συμπεριφορά αμμώδων, κορεσμένων εδαφών υπό ανακυκλική φόρτιση.

Ποιοτικά, το καταστατικό προσομοίωμα έχει αναπτυχθεί βασισμένο στη θεωρία κρίσιμης κατάστασης (Roscoe, Schofield & Wroth 1958) που αποτελεί μια πιο προχωρημένη αντίληψη στο τρόπο συμπεριφοράς των εδαφών κατά τη φόρτιση τους. Βάση της θεωρίας, η αστοχία εξαρτάται από την απόσταση του υπό μελέτη σημείου από την κρίσιμη επιφάνεια (Critical State Line) η οποία υποδηλώνεται μέσω της παραμέτρου ψ (state parameter).

Οι παραμορφώσεις στο μοντέλο ισούνται με το άθροισμα μιας ελαστικής και μιας πλαστικής συνιστώσας ($\epsilon=\epsilon_{el}+\epsilon_{pl}$). Η ελαστική συνιστώσα εκφράζει τη μη γραμμική,

υστερητική συμπεριφορά του εδάφους, στις μικρές παραμορφώσεις ενώ η πλαστική συνιστώσα την παραμένουσα παραμόρφωση μετά την είσοδο του στοιχείου στην πλαστική περιοχή .



Σχήμα 3.9 Ποιοτική αναπαράσταση της σχέσης τάσεων παραμορφώσεων σε τριαξονική δοκιμή ρευστοποίησης για την άμμο Nevada με βάση το NTUA-SAND (Andrianopoulos et al. 2010)

Στο Σχήμα 3.9 παρουσιάζεται η μη γραμμική συμπεριφορά της άμμου Nevada κατά τη διάρκεια ανακυκλικής φόρτισης. Είναι εμφανής η απουσία σταθερών βρόγχων υστέρησης, η μείωση της δυσκαμψίας καθώς και η αύξηση της παραμένουσας παραμόρφωσης ανά κύκλο φόρτισης.

Επεξεργασία διεγέρσεων

Παρατηρώντας τις αρμονικές διεγέρσεις που χρησιμοποιήθηκαν στη διπλωματική εργασία του Α. Θεοχάρη (2011), διαπιστώθηκε ότι προκαλούν ρευστοποίηση στο μέσο της άμμου ($r_u=0.80$ για πρώτη φορά) σε σύντομο διάστημα από την έναρξη τους (μέσα στους πρώτους 1-2 κύκλους δόνησης). Ωστόσο, δε συνέβη το ίδιο και με τις πραγματικές. Υπήρχαν περιπτώσεις όπου η ρευστοποίηση ξεκινούσε 3sec αργότερα από την έναρξη της διέγερσης. Στη παρατήρηση αυτή, ας συνυπολογιστεί πως ο χρόνος αυτός παρουσιάζονταν σε μεγάλα πάχη άμμου, δικαιολογημένα βέβαια, εφόσον ο παλμός που προκαλούσε τη ρευστοποίηση του μέσου, διέσχιζε μεγαλύτερη απόσταση.

Συνέπεια του ανωτέρω, ήταν ότι το επιταχυνσιογράφημα που λαμβανόταν στην επιφάνεια της άμμου, περιείχε ένα σημαντικό κομμάτι που αντιστοιχούσε σε διάστημα πριν την ρευστοποίηση και παρουσίαζε ενίσχυση. Μάλιστα, σε περιπτώσεις διεγέρσεων μικρής διάρκειας, το διάστημα στο οποίο δεν είχαμε ρευστοποίηση ήταν περίπου ίσο με το μισό χρόνο της διέγερσης. Ακολούθως, ο χρόνος που απέμενε ήταν αρκετά μικρός για να είναι εμφανή τα σημάδια της ρευστοποίησης και για να μπορεί να αξιολογηθεί η επίδραση της στην απομείωση της εδαφικής κίνησης.

Προκειμένου, λοιπόν, οι πραγματικές διεγέρσεις να έρχονται σε αντιστοιχία με τις αρμονικές, θέσαμε σαν επιμέρους στόχο, η ρευστοποίηση που προκαλούν να γίνεται

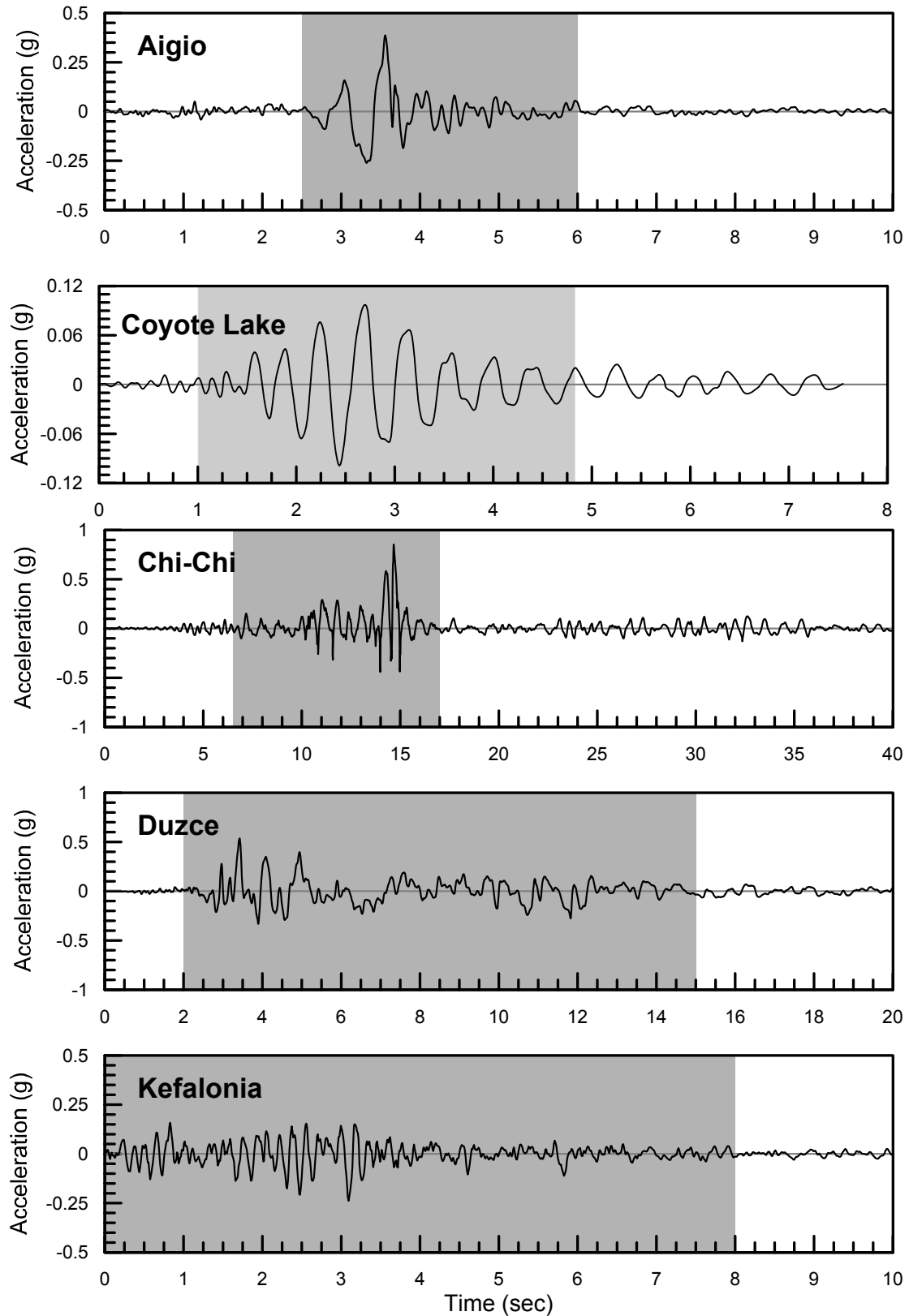
όσο το δυνατόν ταχύτερα. Για το λόγο αυτό, ορίσαμε όλες οι διεγέρσεις να παρουσιάζουν ενεργό επιτάχυνση ίση με 0.30g. Κατά συνέπεια, τα επιταχυνσιογραφήματα πολλαπλασιάστηκαν (scaling) με έναν συντελεστή $\lambda = \frac{a_{max,req}}{a_{max}}$ όπου $a_{max,req} = a_{eff} * \frac{10}{M-1} = 0.30g * \frac{10}{M-1}$ όπου a_{max} η αρχική μέγιστη τιμή του επιταχυνσιογραφήματος. Στον Πίνακα 3.2 παρουσιάζονται οι νέες τιμές μέγιστης επιτάχυνσης για τις διεγέρσεις.

Δεδομένου ότι οι διεγέρσεις είχαν μεγάλη διάρκεια, παράμετρος που αύξανε τον υπολογιστικό χρόνο, κρατήθηκε μόνο το τμήμα της διέγερσης που περιείχε τους σημαντικούς κύκλους, το τμήμα δηλαδή με τις υψηλές τιμές επιτάχυνσης. Επιπλέον, προβλέφθηκε, τα επιταχυνσιογραφήματα να περικοπούν έτσι ώστε στο τελικό κομμάτι, να περιέχονται οι χαρακτηριστικές περιόδοι της διέγερσης, με στόχο το φάσμα όλης της διέγερσης να μην διαφοροποιείται αρκετά για το αποκομμένο τμήμα. Τέλος, έγινε η διόρθωση των αποκομμένων επιταχυνσιογραφημάτων μέσω του λογισμικού Seismosignal, ώστε στο τέλος της διέγερσης να παρουσιάζουν μηδενική παραμένουσα μετατόπιση (baseline correction).

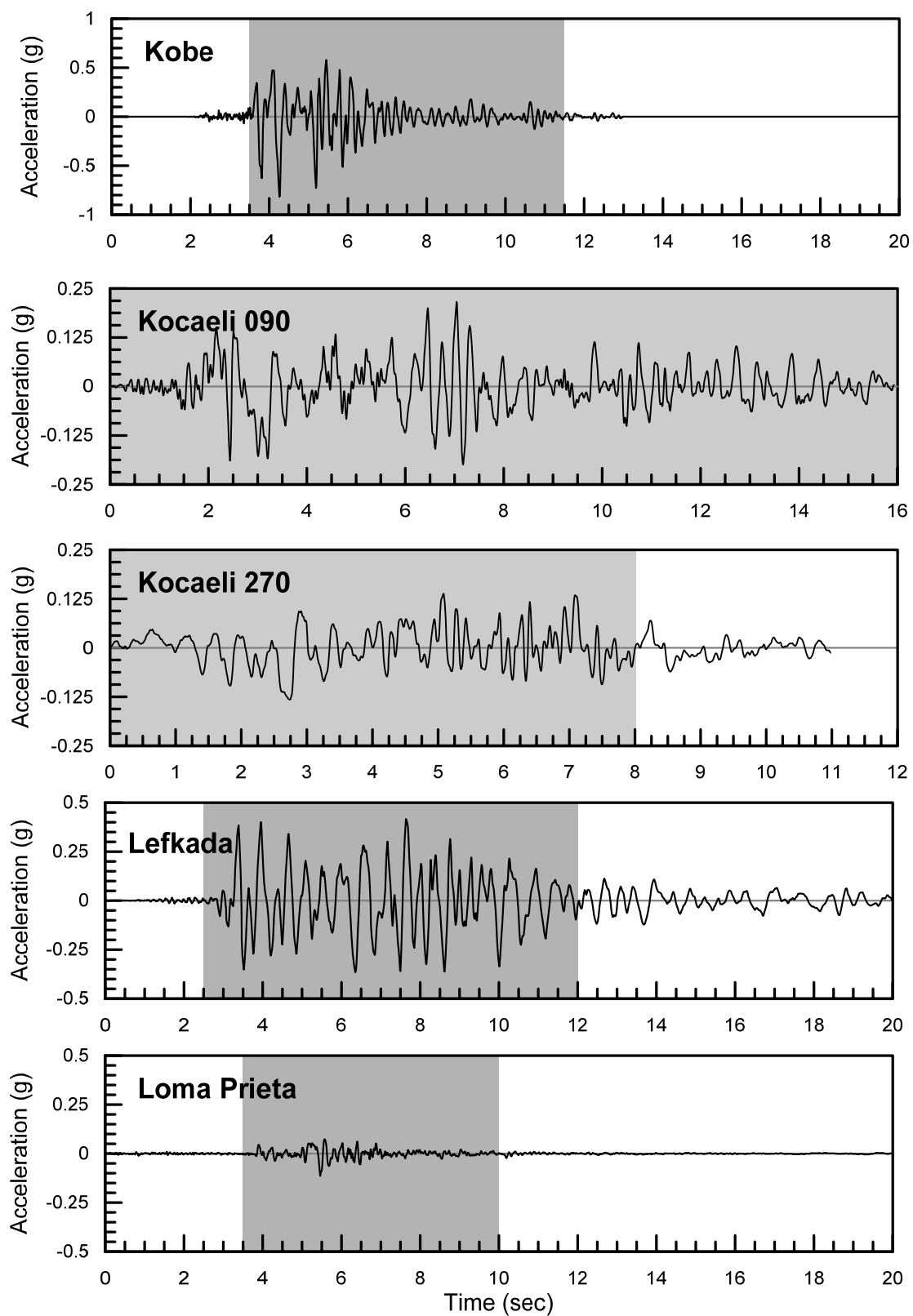
Στις επόμενες σελίδες, παρουσιάζονται τα επιταχυνσιογραφήματα των διεγέρσεων. Με γκρι φόντο ορίζεται το αποκομμένο τμήμα. Επιπλέον, στο Παράρτημα Α, παρατίθενται οι διεγέρσεις με το φάσμα τους και με τα διαγράμματα επιτάχυνσης, ταχύτητας και μετατόπισης για το τμήμα της διέγερσης με το οποίο τελικώς πραγματοποιήθηκαν οι αριθμητικές αναλύσεις.

Πίνακας 3.2 Μέγιστες τιμές των επιταχυνσιογραφημάτων μετά την επεξεργασία (scaling)

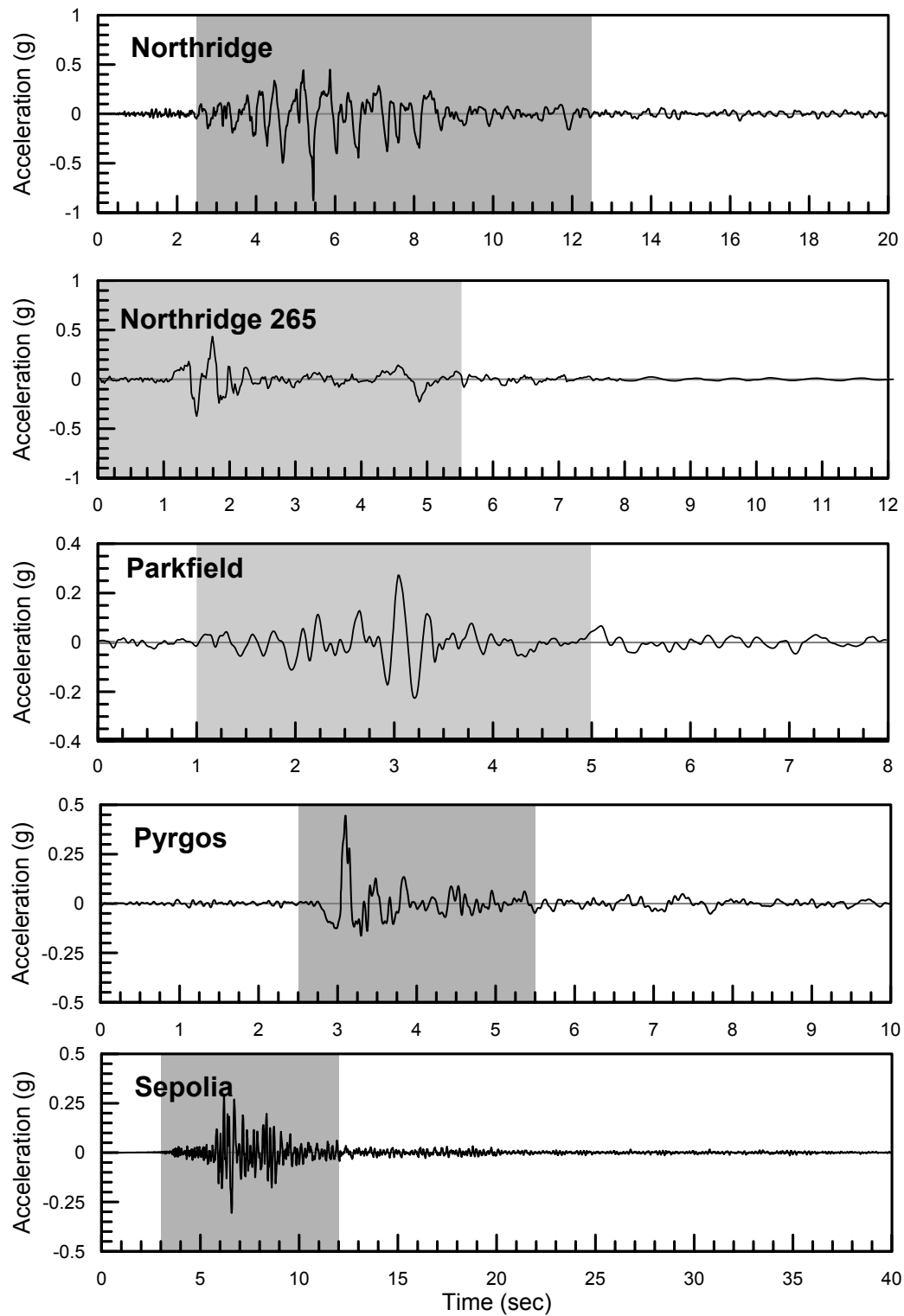
ΔΙΕΓΕΡΣΗ	a_{max} (g)
Aigio	0.58
Chi-Chi	0.52
Coyote Lake	0.64
Ducze	0.43
Kefalonia	0.58
Kobe	0.48
Kocaeli 090	0.46
Kocaeli 270	0.46
Lefkada T	0.57
Loma Prieta	0.51
Northridge	0.53
Northridge 265	0.53
Parkfield	0.58
Pyrgos	0.77
Sepolia	0.63



Σχήμα 3.10 Τμήμα από τα επιταχυνσιογραφήματα των διεγέρσεων Aigio, Coyote Lake, Chi-Chi, Duzce και Kefalonia που θα χρησιμοποιηθεί τελικώς για τη διεξαγωγή των αριθμητικών αναλύσεων



Σχήμα 3.11 Τμήμα από τα επιταχυνσιογραφήματα των διεγέρσεων Kobe, Kocaeli 0.90, Kocaeli 270, Lefkada και Loma Prieta που θα χρησιμοποιηθεί τελικώς για τη διεξαγωγή των αριθμητικών αναλύσεων



Σχήμα 3.12 Τμήμα από τα επιταχυνσιογραφήματα των διεγέρσεων Northridge, Northridge 265, Parkfield, Pyrgos και Sepolia που θα χρησιμοποιηθεί τελικώς για τη διεξαγωγή των αριθμητικών αναλύσεων

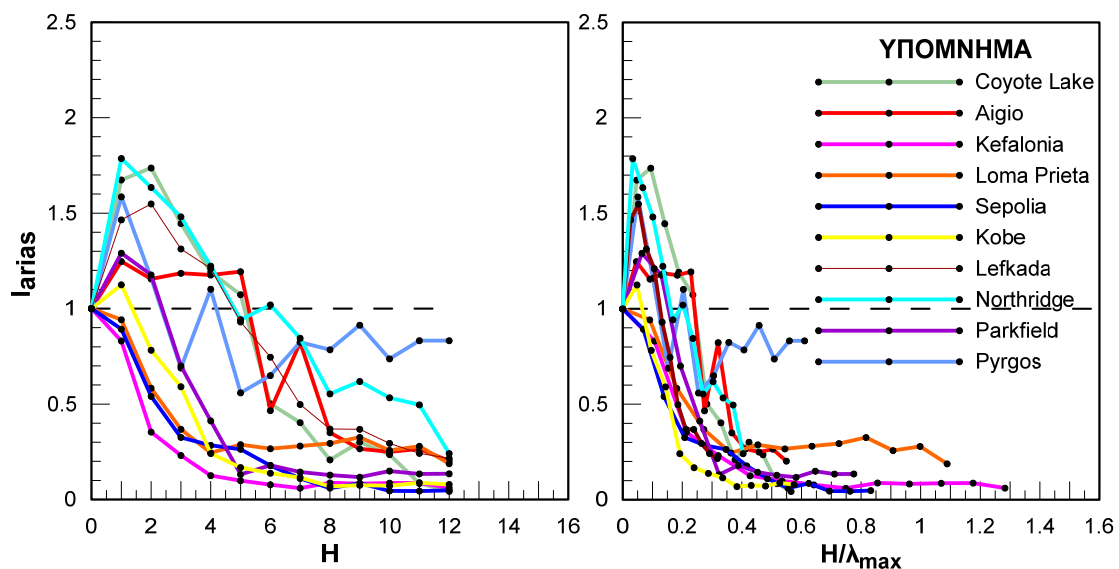
3.5 Αποτελέσματα αριθμητικών αναλύσεων Flac

3.5.1 Μεταβολή του δείκτη I_{arias}

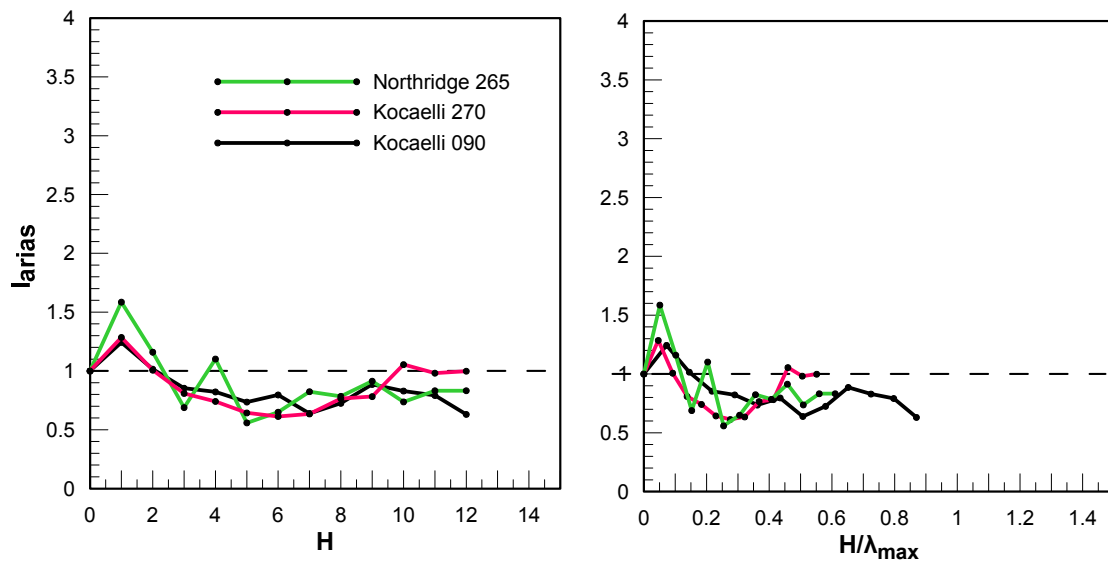
Στα επόμενα σχήματα (3.14 έως 3.16) παρουσιάζεται η μεταβολή του δείκτη I_{arias} για τις τρεις κατηγορίες διεγέρσεων.

Όσον αφορά τις διεγέρσεις κατηγορίας A, παρατηρούμε την παρουσία ενισχύσεων σε μικρά πάχη ($I_{arias} < 1$), μια σταδιακή απομείωση της σεισμικής απόκρισης στα μεσαία πάχη και τέλος σταθεροποίηση σε μια αρκετά μικρή τιμή για μεγάλες τιμές του πάχους. Αξίζει να σημειωθεί πως ενίσχυση πραγματοποιείται μόνο στα μικρά πάχη και η μέγιστη τιμή αυτής είναι 1.80. Σημειώνεται, ότι η μορφή του δείκτη I_{arias} αυτής της κατηγορίας διεγέρσεων είναι ανάλογη αυτής που παρουσιάζουν αρμονικές διεγέρσεις όπως παρουσιάστηκαν σε προγενέστερη έρευνα (Θεοχάρης 2011). Από την απεικόνιση του δείκτη ως προς το κανονικοποιημένο πάχος προσφέρει δραστική μείωση του εύρους H/λ

Οι διεγέρσεις της κατηγορίας B παρουσιάζουν ενισχύσεις στα μικρά πάχη και εν συνεχεία μικρή απομείωση του δείκτη I_{arias} ώστε να λαμβάνει κατώτατη τιμή ίση με 0.70-0.90 για πάχη 5-7m. Πέρα αυτού του εύρους και για πάχη μεγαλύτερα από εκείνα των 7m, φαίνεται να αυξάνουν την τιμή του I_{arias} χωρίς όμως να προσδίδουν ενίσχυση (I_{arias} συνεχώς μικρότερος της μονάδας). Τόσο στα διαγράμματα ως προς το πάχος όσο και ως προς το κανονικοποιημένο πάχος, οι εξεταζόμενες διεγέρσεις παρουσιάζουν αποτελέσματα που συγκλίνουν.

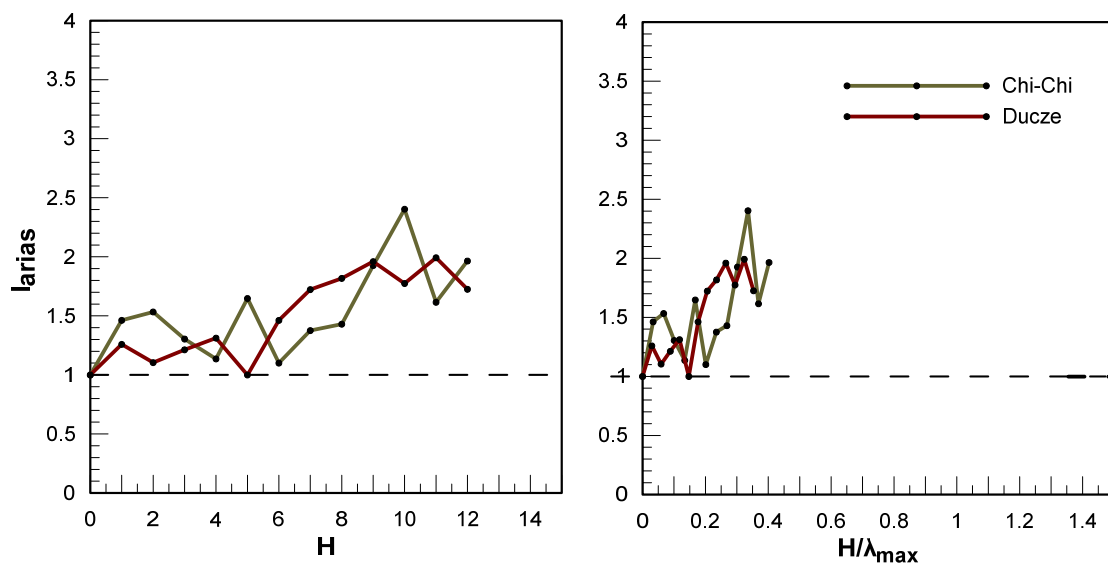


Σχήμα 3.13 Μεταβολή του δείκτη I_{arias} για τις διεγέρσεις της κατηγορίας A, ως προς το πάχος H



Σχήμα 3.14 Μεταβολή του δείκτη I_{arias} για τις διεγέρσεις της κατηγορίας Β, ως προς το πάχος H

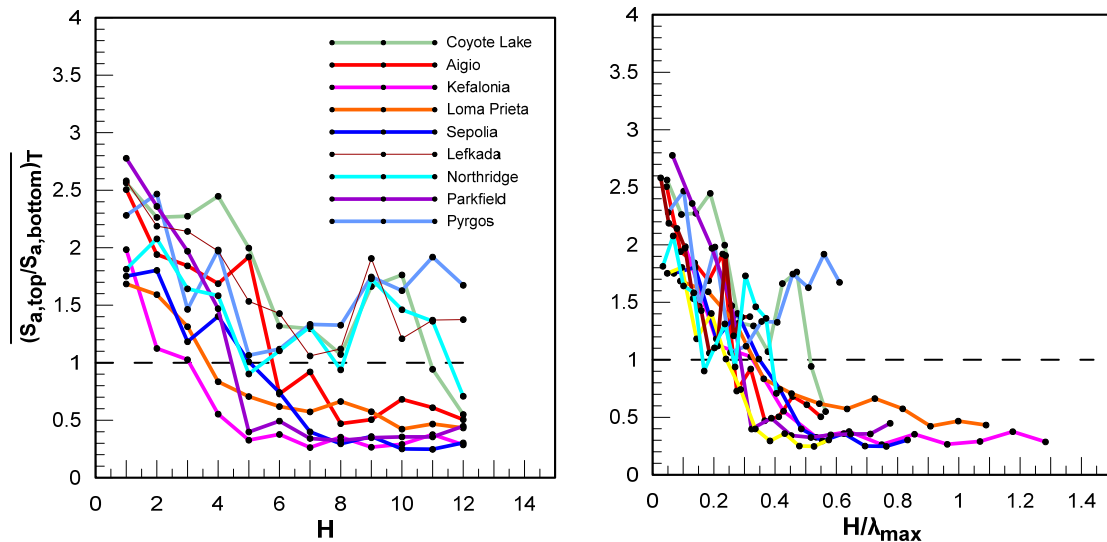
Στην κατηγορία Γ, οι διεγέρσεις των Chi-Chi και Duceze παρουσιάζουν συμπεριφορά πολύ διαφορετική από αυτές των κατηγοριών Α και Β. Οι διεγέρσεις αυτές φαίνεται να ενισχύονται τόσο για μικρά όσο και για μεγάλα πάχη στρώματος άμμου. Συγκεκριμένα, σε μεγάλα πάχη στρώματος άμμου παρουσιάζουν έως και 2.5 φορές μεγαλύτερες τιμές επιταχύνσεων σε σχέση με τη βάση.



Σχήμα 3.15 Μεταβολή του δείκτη I_{arias} για τις διεγέρσεις της κατηγορίας Γ, ως προς το πάχος H

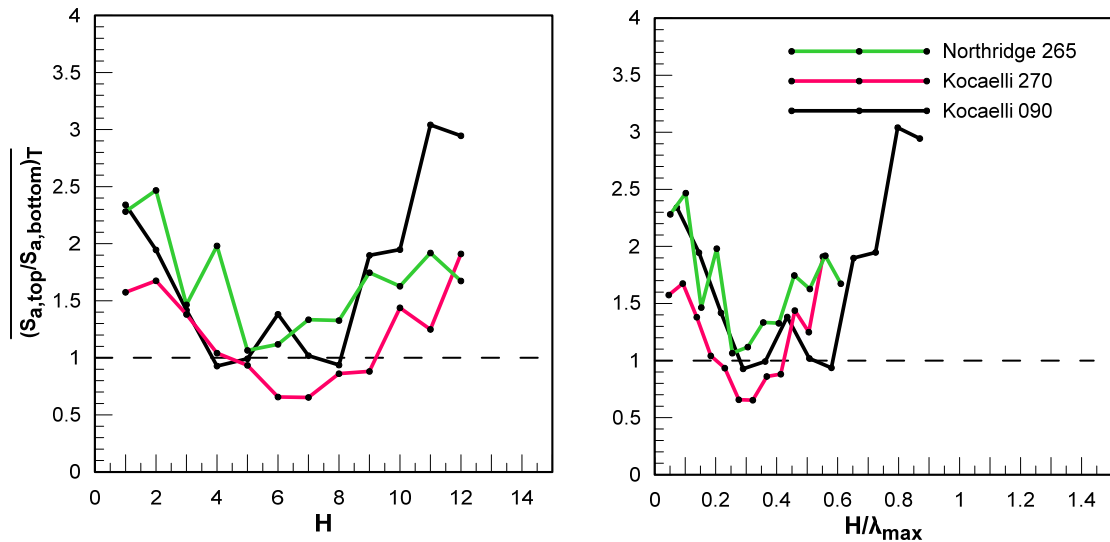
3.5.2 Μεταβολή του λόγου φασμάτων για μικρές περιόδους

Η μεταβολή του λόγου φασμάτων απόκρισης με το πάχος και με το κανονικοποιημένο πάχος για τις διεγέρσεις της κατηγορίας A παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.16. Από το Σχήμα διαφαίνεται η έντονη απομείωση του εύρους των τιμών του κρίσιμου πάχους, μετά την κανονικοποίηση αυτού με το μήκος κύματος λ_{max} . Η μορφή της καμπύλης για τις μικρές περιόδους είναι παραπλήσια με εκείνη του Iarias. Ο λόγος φασμάτων απόκρισης λαμβάνει υψηλές τιμές στα μικρά πάχη από 1.80 έως και 2.80 ενώ αρχίζει και απομειώνεται από εκεί και ύστερα παίρνοντας κατώτατη τιμή ίση από 0.20 έως 0.60 για Iarias=0.30-0.55. Η εικόνα του λόγου φασμάτων απόκρισης είναι η αναμενόμενη από άποψη συμπεριφοράς. Μικρά πάχη που χαρακτηρίζονται από μικρές τιμές περιόδων θα ενισχύουν τις μικρές περιόδους ενώ αντίθετα μεγάλα πάχη που χαρακτηρίζονται από υψηλές τιμές περιόδων θα απομειώνουν τις μικρές περιόδους.



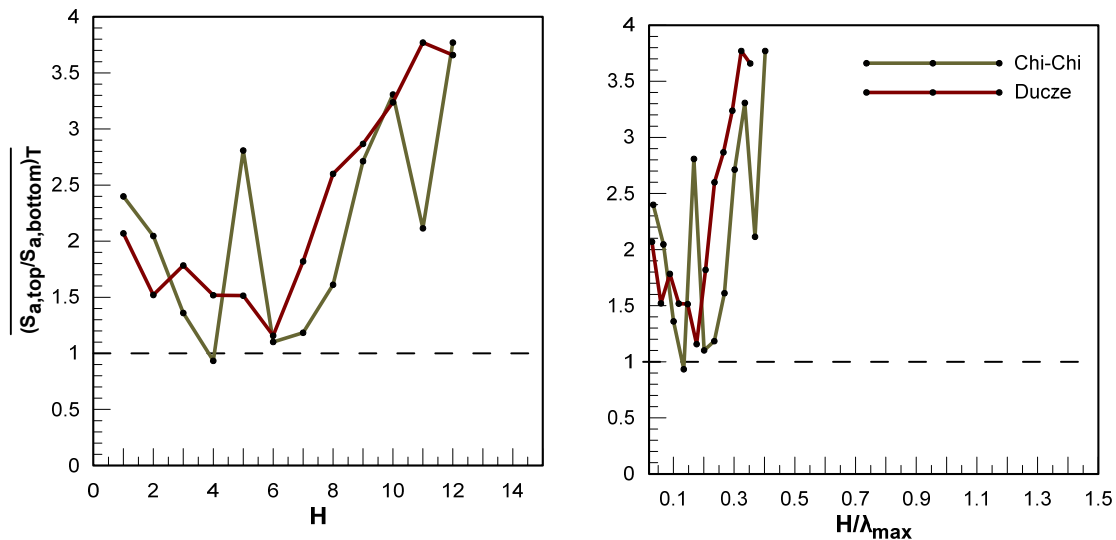
Σχήμα 3.16 Μεταβολή του δείκτη του λόγου φασμάτων απόκρισης για τις μικρές περιόδους των διεγέρσεων της κατηγορίας A, ως προς το πάχος H

Στις διεγέρσεις της κατηγορίας B, (Σχήμα 3.17) φαίνεται πως ο λόγος φασμάτων απόκρισης απομειώνεται στα πάχη $H=5-8m$ ελάχιστα παίρνοντας τιμές από 0.80 έως 1.00. Αντιθέτως στα μικρά και στα μεγάλα πάχη η φασματική επιτάχυνση παρουσιάζεται ενισχυμένη λαμβάνοντας τη μεγαλύτερη τιμή της, στα μεγάλα πάχη, ίση με 1.50-3.00 σε αντίθεση με τα μικρά πάχη όπου είναι ίση με 1.50-2.30.



Σχήμα 3.17 Μεταβολή του δείκτη του λόγου φασμάτων απόκρισης για τις μικρές περιόδους των διεγέρσεων της κατηγορίας Β, ως προς το πάχος H

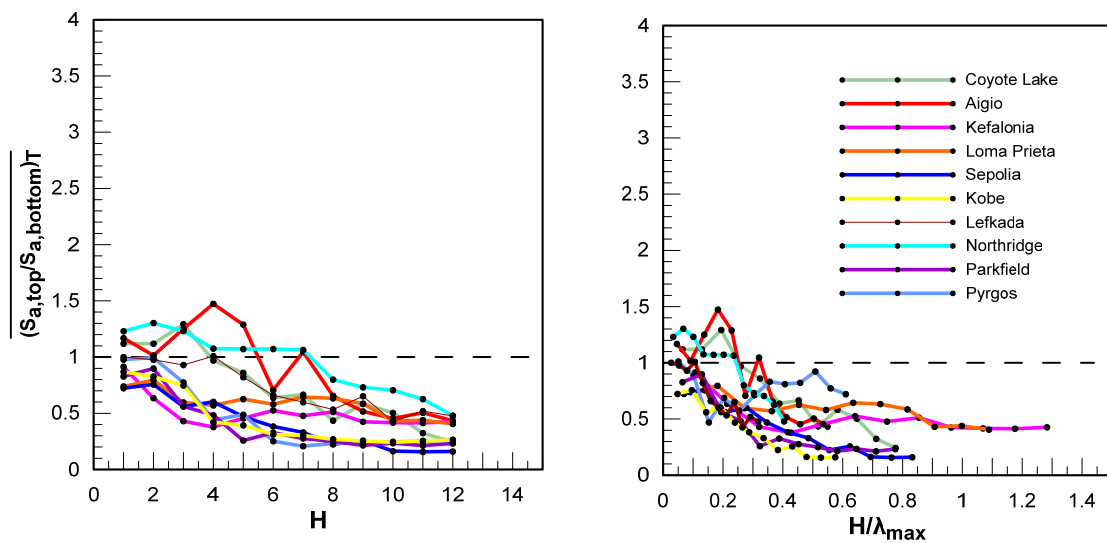
Όσον αφορά τις διεγέρσεις της κατηγορίας Γ (Σχήμα 3.18), παρατηρούμε ότι ενισχύουν συνεχώς τη φασματική επιτάχυνση δίνοντας της ελάχιστη τιμή ίση με 1 στα μεσαία πάχη (4-7m). Όπως και οι διεγέρσεις της κατηγορίας Β, ενισχύουν περισσότερο τα μικρά και τα μεγάλα πάχη, προσφέροντας μεγαλύτερη ενίσχυση στα μεγάλα σε σχέση με τα μικρά. Συμπερασματικά, ο λόγος φασμάτων απόκρισης ξεκινάει από την τιμή 2.00-2.50 στα μικρά πάχη, φτάνει την τιμή 1 στα μεσαία και τελικώς αυξάνεται και πάλι έως την τιμή 3.80 στα μεγάλα. Η κανονικοποίηση δε μειώνει το εύρος των απεικονιζόμενων διεγέρσεων.



Σχήμα 3.18 Μεταβολή του δείκτη του λόγου φασμάτων απόκρισης για τις μικρές περιόδους των διεγέρσεων της κατηγορίας Β, ως προς το πάχος H

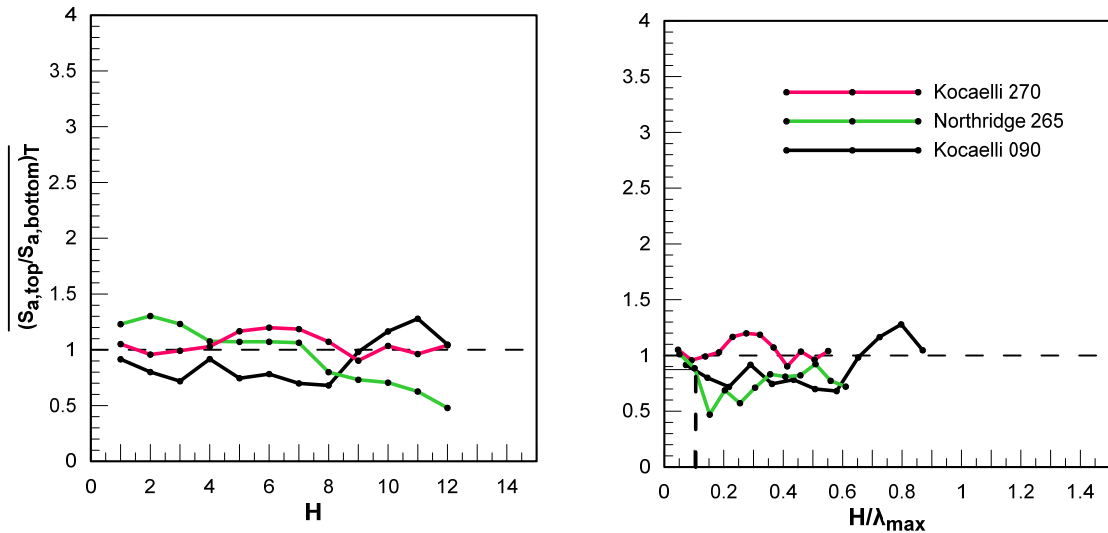
3.5.3 Μεταβολή του λόγου φασμάτων για μεσαίες περιόδους

Στο σχήμα 3.19 παρουσιάζεται ο λόγος φασμάτων απόκρισης για διεγέρσεις κατηγορίας A. Παρατηρούμε απομείωση του λόγου φασμάτων στις μεσαίες περιόδους για όλα τα πάχη και περισσότερο για μεγάλα. Όπως και αναμενόταν, καθώς το πάχος του στρώματος μεγαλώνει, μεγαλώνει και η ιδιοπερίοδος του, με αποτέλεσμα να μη μπορεί να ενισχύει τις μεσαίες περιόδους. Παρατηρούμε ότι η κανονικοποίηση του πάχους του στρώματος της άμμου ως προς το μέγιστο μήκος κύματος μειώνει το εύρος των παρατηρούμενων διαφορών μεταξύ των εξεταζόμενων διεγέρσεων.



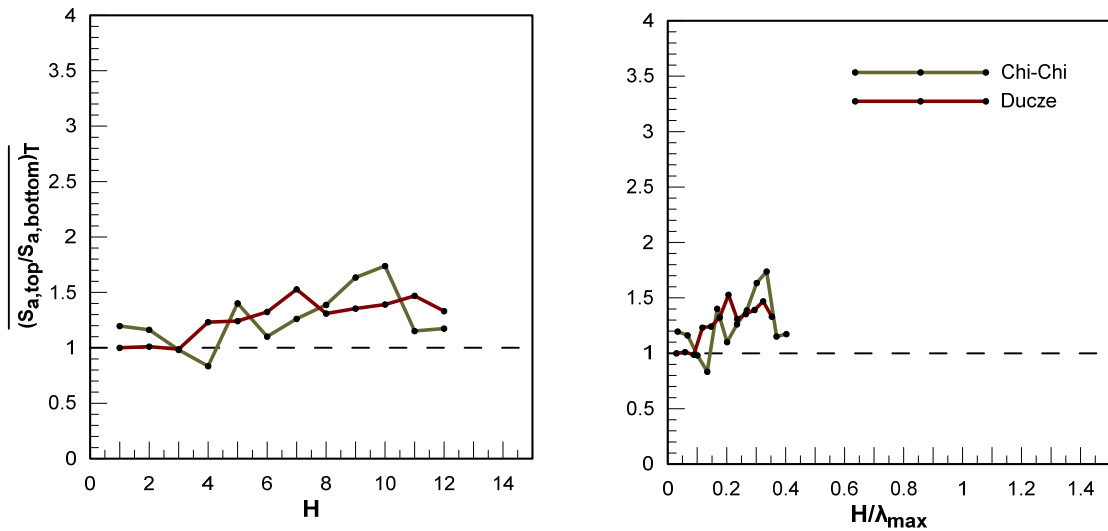
Σχήμα 3.19 Μεταβολή του δείκτη του λόγου φασμάτων απόκρισης για τις μεσαίες περιόδους των διεγέρσεων της κατηγορίας A

Για τις διεγέρσεις της κατηγορίας B (Σχήμα 3.20), ο λόγος φασμάτων απόκρισης κινείται κοντά στη μονάδα για όλα τα πάχη. Ερμηνεία αυτού, σημαίνει πως οι μεσαίες περιόδοι (0.15-0.45) που συνήθως συνιστούν τις συνήθεις τιμές περιόδων για τις διεγέρσεις, δεν απομειώνονται μετά από κάποιο πάχος αλλά διατηρούνται σταθερές.



Σχήμα 3.20 Μεταβολή του δείκτη του λόγου φασμάτων απόκρισης για τις μεσαίες περιόδους των διεγέρσεων της κατηγορίας Β

Η κατηγορία Γ (Σχήμα 3.21) σε αντίθεση με όλες τις προηγούμενες φαίνεται να μην απομειώνει το λόγο φασμάτων απόκρισης στις μεσαίες περιόδους αλλά να την ενισχύει, ειδικά στα μεγάλα πάχη, όπου μπορεί να της δώσει έως και την τιμή 1.60. Η ακόλουθη εικόνα είναι αρκετά οξύμωρη, εάν κανείς υποθέσει πως το έδαφος στα μεγάλα πάχη λογικά θα ενισχύει μόνο τις μεγάλες περιόδους μιας διέγερσης και όχι τις μεσαίες ή ακόμα χειρότερα τις μικρές, όπως φαίνεται να κάνουν οι διεγέρσεις αυτές.

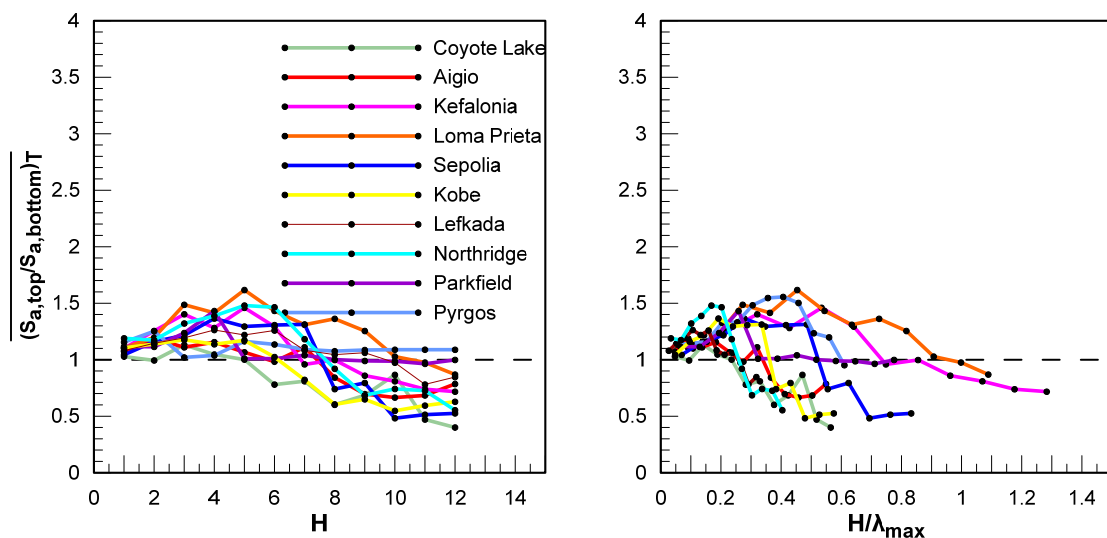


Σχήμα 3.21 Μεταβολή του δείκτη του λόγου φασμάτων απόκρισης για τις μεσαίες περιόδους των διεγέρσεων της κατηγορίας Γ

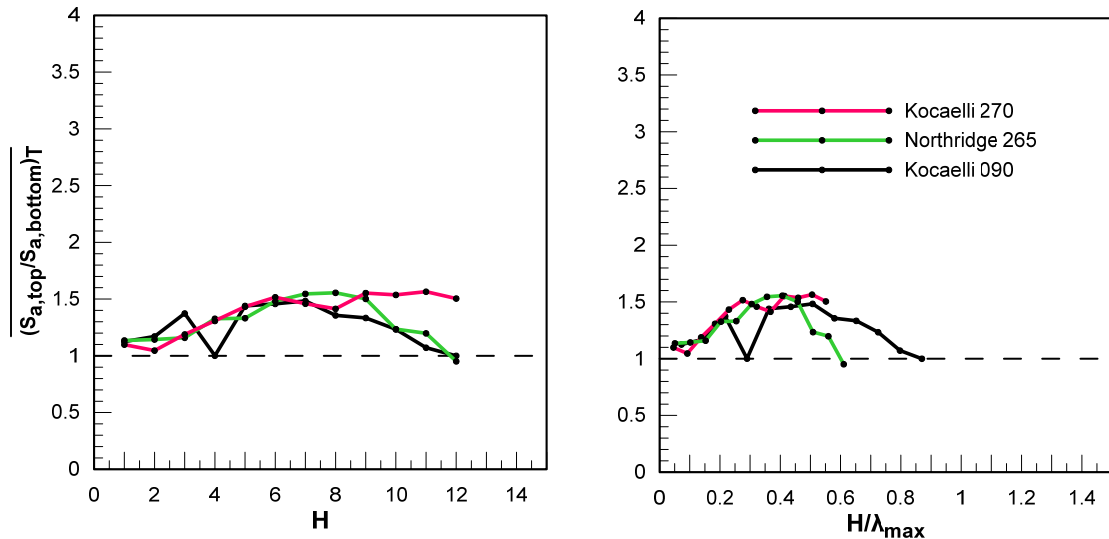
3.5.4 Μεταβολή του λόγου φασμάτων για μεγάλες περιόδους

Για τις διεγέρσεις της κατηγορίας A (Σχήμα 3.22), ο λόγος φασμάτων απόκρισης είναι μεγαλύτερος της μονάδας για πάχη μικρότερα από 8m ενώ για μεγαλύτερα πάχη παρατηρείται απομείωση της σεισμικής κίνησης. Η παρατήρηση αυτή έρχεται σε αντίθεση με το αναμενόμενο ενίσχυση της σεισμικής κίνησης στις μεγάλες περιόδους για μεγάλα πάχη στρώματος. Σε αυτήν την περίπτωση παρατηρούμε επίσης ότι η κανονικοποίηση του πάχους του στρώματος της άμμου ως προς τη μέγιστη τιμή του μήκους κύματος όπως έχει οριστεί δεν προσφέρει μείωση του εύρους στο οποίο παρατηρούνται διαφορές μεταξύ των διεγέρσεων

Οι διεγέρσεις της κατηγορίας B (Σχήμα 3.23), ενισχύουν τη φασματική επιτάχυνση των μεγάλων περιόδων έως και 1.50 στα μεσαία/μεγάλα πάχη. Τάσεις απομείωσης παρουσιάζονται στα μικρά και μεγάλα πάχη χωρίς όμως ο λόγος φασμάτων απόκρισης να λαμβάνει τιμές μικρότερες της μονάδας. Οι διεγέρσεις της κατηγορίας αυτής παρουσιάζουν περιόδους περί το 0.50-0.60 συνεπώς μπορεί να δικαιολογηθεί ο λόγος φασμάτων απόκρισης στα μεγάλα πάχη.

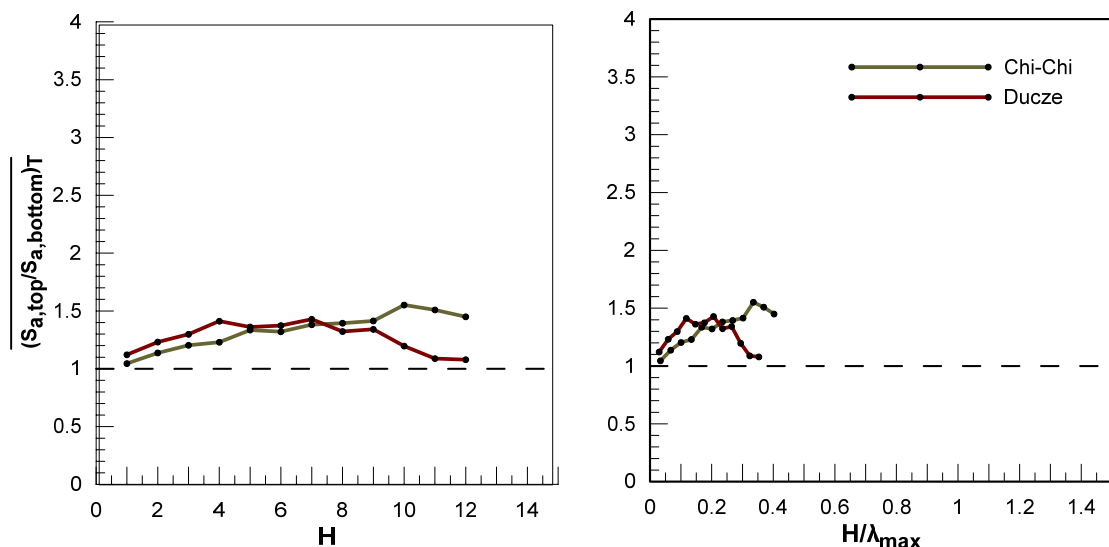


Σχήμα 3.22 Μεταβολή του δείκτη του λόγου φασμάτων απόκρισης για τις μεγάλες περιόδους των διεγέρσεων της κατηγορίας A



Σχήμα 3.23 Μεταβολή του δείκτη του λόγου φασμάτων απόκρισης για τις μεγάλες περιόδους των διεγέρσεων της κατηγορίας Β

Τέλος για τις διεγέρσεις της κατηγορίας Γ, η συμπεριφορά είναι ίδια με εκείνη στις προηγούμενες περιόδους, δηλαδή συνεχής ενίσχυση σε όλα τα πάχη, μόνο που η μέγιστη τιμή που λαμβάνει είναι 1.50. Ας σημειωθεί πως η ενίσχυση στις μεγάλες περιόδους είναι μικρότερη από την αντίστοιχη στις μικρές περιόδους. Ειδικά στα μεγάλα πάχη όπου το έδαφος έχει μεγάλες περιόδους, ενισχύονται περισσότερο οι μικρές από ότι οι μεγάλες περιόδοι παρά το ότι οι μεγάλες είναι αυτές που πλησιάζουν την ιδιοπερίοδο του.



Σχήμα 3.24 Μεταβολή του δείκτη του λόγου φασμάτων απόκρισης για τις μεγάλες περιόδους των διεγέρσεων της κατηγορίας Γ

4. Περιγραφή αριθμητικών Αναλύσεων EERA

4.1 Γενικά

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η μεθοδολογία και τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων μέσω της ισοδύναμης γραμμικής μεθόδου (πρόγραμμα Eera). Πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις για 10 διαφορετικές διεγέρσεις και για πάχη στρώματος άμμου από 1m έως 12m (ανά 1m). Επομένως, πραγματοποιήθηκαν συνολικά 120 αριθμητικές αναλύσεις, οι οποίες αποτέλεσαν τις βασικές αναλύσεις και τα αποτελέσματα των οποίων σε επόμενο κεφάλαιο, συγκρίνονται με τα αντίστοιχα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων μέσω πεπερασμένων στοιχείων που έχουν προκύψει από παλιότερη έρευνα (Ε. Κουτσογούλα, 2012). Στο παράρτημα Β παρατίθενται ανά διεγερση και ανά εξεταζόμενο πάχος στρώματος άμμου, τα επιταχυνσιογραφήματα κορυφής και βάσης του στρώματος άμμου. Κατά αντιστοιχία, στο παράρτημα Β παρουσιάζονται τα φάσματα στην κορυφή και στη βάση του στρώματος της άμμου καθώς και ο λόγος τους. Τέλος, στο παράρτημα Γ παρατίθενται οι εξεταζόμενοι δείκτες (Iarias, μέση τιμή λόγου φασμάτων για μικρές, μεσαίες και μεγάλες περιόδους). Σημειώνεται ότι πέραν των βασικών αναλύσεων που προαναφέρθηκαν, πραγματοποιήθηκαν επιπλέον 43 αναλύσεις στα πλαίσια προσδιορισμού των βασικών παραμέτρων που επηρεάζουν το υπό εξέταση φαινόμενο. Τα αποτελέσματα αυτών των αναλύσεων παρουσιάζονται και σχολιάζονται στο επόμενο κεφάλαιο (Κεφάλαιο 5).

4.2 Μεθοδολογία

Οι 1-Δ αναλύσεις σεισμικής απόκρισης του φυσικού εδάφους που περιγράφονται ακολούθως πραγματοποιήθηκαν με την ευρέως γνωστή *ισοδύναμη γραμμική μέθοδο* (Schnabel et al. 1972). Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, για τυχούσα σεισμική διέγερση, οι διαφορικές εξισώσεις της μετάδοσης σεισμικών κυμάτων επιλύονται με χρήση της ανάλυσης Fourier (frequency domain analysis). Συγκεκριμένα:

- η τυχούσα σεισμική διέγερση αναλύεται σε πεπερασμένο αριθμό αρμονικών διεγέρσεων,
- η απόκριση της εδαφικής στήλης υπολογίζεται αναλυτικά για κάθε μια αρμονική συνιστώσα της διέγερσης, και
- όλες οι επιμέρους συνιστώσες που υπολογίσθηκαν κατ' αυτόν τον τρόπο επαλληλίζονται με αντίστροφη μεθοδολογία Fourier, προκειμένου να δώσουν την τελική απόκριση στην επιφάνεια του εδάφους.

Η ακριβής εφαρμογή της ανωτέρω μεθοδολογίας προϋποθέτει ένα γραμμικώς βιοκοελαστικό μέσο, με σταθερό μέτρο διατμητικής παραμόρφωσης (G) και σταθερό λόγο υστερητικής απόσβεσης (ξ). Η πραγματική μη γραμμική συμπεριφορά του εδάφους

υπό δυναμική-επαναλαμβανόμενη φόρτιση, όπου τόσο το (G) όσο και το (ξ) αποτελούν συναρτήσεις της επιβαλλόμενης διατμητικής παραμόρφωσης (γ), λαμβάνεται υπόψη με επαναληπτική εφαρμογή της ανωτέρω μεθοδολογίας. Κατ' αυτή, οι χρησιμοποιούμενες τιμές των παραμέτρων (G) και (ξ) τροποποιούνται διαδοχικά μέχρι να γίνουν τελικώς συμβατές με τις αντίστοιχες τιμές της διατμητικής παραμόρφωσης (γ) που προκύπτουν από την ανάλυση.

Τα βασικά δεδομένα τα οποία απαιτούνται για την εφαρμογή της ανωτέρω μεθοδολογίας περιλαμβάνουν:

- Το βάθος και το πάχος των διάφορων εδαφικών στρώσεων.
- Την πυκνότητα μάζας (ρ) της κάθε στρώσης.
- Την ταχύτητα μετάδοσης σεισμικών (διατμητικών) κυμάτων (V_s) της κάθε στρώσης, ή το αντίστοιχο ελαστικό μέτρο διάτμησης ($G_o = \rho V_s^2$).
- Το βάθος και τις ιδιότητες (V_s και ρ) του «σεισμικού υποβάθρου».
- Τις καμπύλες (G/G_o - γ) και (ξ - γ) που περιγράφουν τη μη γραμμική ιξωδο-ελαστική συμπεριφορά της κάθε στρώσης.
- Τη σεισμική διέγερση, υπό μορφή επιταχυνσιογράμματος, και την εδαφική στρώση στην οποία επιβάλλεται.

4.3 Βασικά δεδομένα

Τα βασικά δεδομένα που απαιτούνται για την προσομοίωση και που αναφέρονται επιγραμματικά στην ανωτέρω παράγραφο ελήφθησαν έτσι ώστε να είναι να είναι ανάλογα των παραδοχών που έχουν γίνει στην προγενέστερη έρευνα (Ε. Κουτσογούλα 2012) των αριθμητικών αναλύσεων FLAC, προκειμένου τα αποτελέσματα να είναι συγκρίσιμα. Στα παρακάτω κεφάλαια συνοψίζονται οι βασικές παραδοχές των αριθμητικών αναλύσεων EERA.

4.3.1 Γεωμετρία

Το εδαφικό προφίλ είναι όμοιο με αυτό που παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.1 των αριθμητικών αναλύσεων FLAC. Το πάχος της ρευστοποιήσιμης άμμου είναι μεταβαλλόμενο από 0 έως 12m, με βήμα 1m. Σε κάθε βήμα το πάχος της υποκείμενης αργίλου (Αργίλος 2, στο σχήμα 3.1) είναι και αυτό μεταβαλλόμενο έτσι ώστε το συνολικό πάχος της άμμου και της υποκείμενης αργίλου να είναι ίσο με 12m.

4.3.2 Πυκνότητα στρώσεων

Η πυκνότητα των τριών εδαφικών στρώσεων είναι η πυκνότητα των κορεσμένων στρώσεων όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.1 ($2\text{Mg}/\text{m}^3$ και για τα τρία στρώματα).

4.3.3 Ταχύτητα μετάδοση σεισμικών κυμάτων

Για τα αργιλικά στρώματα Άργιλος 1 και 2 του σχήματος 3.1, ταχύτητα μετάδοσης των σεισμικών κυμάτων ελήφθη ίση με $106\text{m}/\text{sec}$ και $300\text{m}/\text{sec}$ αντίστοιχα, όπως και στις αριθμητικές αναλύσεις FLAC.

Όσον αφορά το στρώμα της άμμου το οποίο ρευστοποιείται, η ταχύτητα μετάδοσης των σεισμικών κυμάτων επιλέχτηκε ίση με την ταχύτητα μετάδοσης του σεισμικού κύματος στο ρευστοποιηθέν στρώμα όπως είχε προκύψει από τις αριθμητικές αναλύσεις FLAC. Στον Πίνακα 4.1 που ακολουθεί παρουσιάζονται οι τιμές της ταχύτητας μετάδοσης των σεισμικών κυμάτων για τις διάφορες διεγέρσεις και πάχη στρώματος άμμου που ρευστοποιείται. Σημειώνεται ότι για τις βασικές αναλύσεις η ταχύτητα διάδοσης των διατμητικών κυμάτων στην αμμώδη στρώση θεωρήθηκε σταθερή καθ' ύψος του στρώματος αυτού.

4.3.4 Σεισμικό υπόβαθρο

Για το σεισμικό υπόβαθρο επιλέχτηκε ταχύτητα μετάδοσης των σεισμικών κυμάτων ίση με $2000\text{m}/\text{sec}$ και πυκνότητα $2,2\text{Mg}/\text{m}^3$. Τα μεγέθη αυτά αποτελούν συνήθεις τιμές για σεισμικό υπόβαθρο, ενώ η επίδρασή τους στα αποτελέσματα εξετάζεται σε επόμενο κεφάλαιο.

Πίνακας 4.1. Ταχύτητες στο ρευστοποιημένο στρώμα για τις διεγέρσεις των αναλύσεων με βάση τις αριθμητικές αναλύσεις FLAC

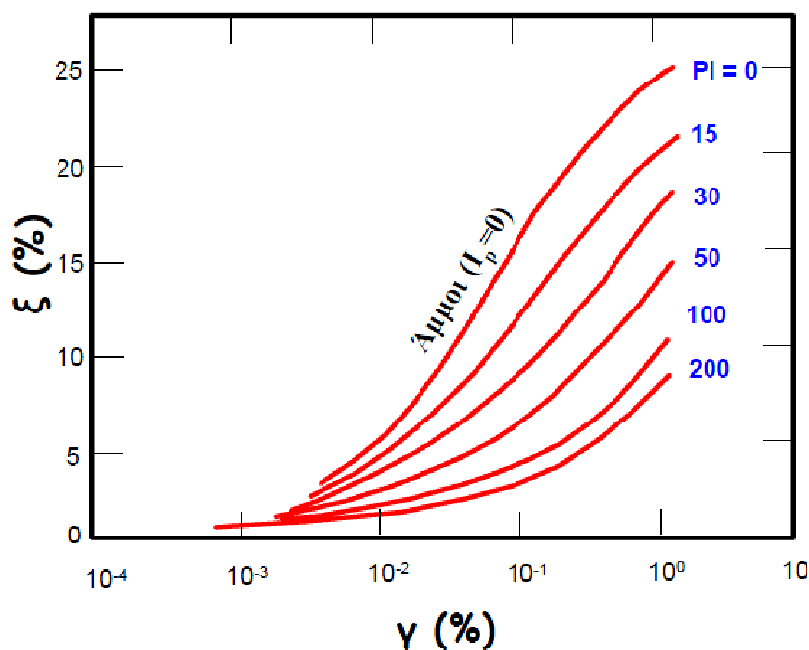
ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΟΥ ΚΥΜΑΤΟΣ ΣΤΟ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΜΕΝΟ ΣΤΡΩΜΑ Vslip										
H	Aigio	Chi-Chi	Coyote Lake	Ducze	Kobe	Kocaeli 090	Lefkada	Northridge	Northridge 265	Sepolia
1	26.72	75.33	44.57	44.06	45.81	56.04	84.39	63.20	38.80	42.52
2	28.48	49.50	38.63	38.98	42.35	36.04	70.38	40.22	36.38	30.99
3	25.31	38.03	47.24	39.73	36.71	42.82	54.69	39.19	37.43	43.56
4	38.10	38.95	46.03	42.94	46.08	40.55	41.30	56.574	43.27	32.00
5	34.23	37.58	35.25	44.95	49.59	34.14	48.48	43.04	42.55	33.44
6	29.91	45.42	42.32	35.03	40.16	42.12	56.96	30.76	35.36	32.65
7	32.94	42.76	32.81	36.32	46.81	38.74	55.57	33.90	36.15	36.73
8	28.99	43.25	36.03	30.47	42.54	35.57	46.44	43.41	41.54	36.26
9	36.30	29.28	32.65	34.75	39.67	31.73	48.50	35.09	40.40	35.58
10	29.77	32.02	34.92	33.12	34.61	40.04	46.74	40.09	35.99	34.84
11	28.81	31.67	36.07	37.76	36.08	34.39	40.59	39.72	38.75	34.37
12	34.97	47.37	36.90	35.06	40.35	40.98	53.32	43.73	45.17	39.52

4.3.5 Ιξωδο-ελαστική συμπεριφορά στρώσεων

Για την προσομοίωση της ιξωδοελαστικής συμπεριφοράς των εδαφικών στρώσεων χρησιμοποιήθηκαν οι καμπύλες Dobry-Vucetic που παρατίθενται στο Σχήμα 4.1 και τον Πίνακα 4.2 που ακολουθούν.

Πιο συγκεκριμένα, για τις δυο αργλικές στρώσεις χρησιμοποιήθηκαν οι καμπύλες μεταβολής του μέτρου διάτμησης και της απόσβεσης που αντιστοιχούν σε δείκτη πλαστικότητας $PI=7.5-22.5\%$. Για την αμμώδη στρώση θεωρήθηκε ελαστική συμπεριφορά με αρχική ταχύτητα διάδοσης (και κατά αντιστοιχία μέτρο διάτμησης) όπως είχε προκύψει για το ρευστοποιημένο στρώμα (V_{sliq}) από τις αριθμητικές αναλύσεις μέσω πεπερασμένων στοιχείων (Πίνακας 4.1). Επομένως, το αρχικό μέτρο διάτμησης ($G=\rho V_{sliq}^2$) θεωρήθηκε σταθερό κατά τη διάρκεια των αναλύσεων (δηλαδή ανεξάρτητο της παραμόρφωσης). Αντίθετα για την απόσβεση της αμμώδους στρώσης χρησιμοποιήθηκε η καμπύλη Dobry Vucetic που αντιστοιχεί σε δείκτη πλαστικότητας $PI=0-7.5\%$.

Η επιλογή των συγκεκριμένων καταστατικών προσομοιωμάτων και η επίδρασή τους στα τελικά αποτελέσματα σχολιάζεται και μελετάται στο Κεφάλαιο 5.



Σχήμα 4.1 Πειραματική καμπύλη $\xi(\%)$ - $\gamma(\%)$ από τους Vucetic & Dobry (1991)

Πίνακας 4.2: Καμπύλες G/G_{max} και ξ συναρτήσει της διατμητικής παραμόρφωσης γ

Dobry- Vucetic (PI=0-7.5%)			Dobry- Vucetic (PI=7.5-22.5%)		
γ (%)	G/G_{max}	ξ (%)	γ (%)	G/G_{max}	ξ (%)
0.0001	1	0.1	0.0001	1	0.03
0.0003	1	0.3	0.0003	1	0.10
0.001	1	0.9	0.001	0.99	0.31
0.0032	1	2.3	0.0032	0.96	0.95
0.01	1	5.3	0.01	0.88	2.50
0.0316	1	9.1	0.0316	0.74	5.5
0.1	1	13.2	0.1	0.55	9.6
0.316	1	16.2	0.316	0.36	13.5
1	1	18.2	1	0.23	16.4
3.16	1	19.5	3.16	0.18	17.4
10	1	20.0	10	0.18	17.4

4.3.6 Σεισμική διέγερση

Χρησιμοποιήθηκαν τα επιταχυνσιογραφήματα των σεισμικών διεγέρσεων που είχαν χρησιμοποιηθεί και στις αριθμητικές αναλύσεις FLAC (Σχήματα 3.10 έως 3.12) προκειμένου τα αποτελέσματα να είναι συγκρίσιμα. Υπενθυμίζεται ότι τα επιταχυνσιογραφήματα αυτά έχουν υποστεί επεξεργασία προκειμένου η ενεργός επιτάχυνση να είναι ίση με 0.30g αλλά και έχει κρατηθεί μόνο το τμήμα της διέγερσης που περιείχε τους σημαντικούς κύκλους, το τμήμα δηλαδή με τις υψηλές τιμές επιτάχυνσης. Η σεισμική διέγερση επιβλήθηκε στο υπόβαθρο. Στον Πίνακα 4.3 που ακολουθεί συνοψίζονται τα βασικά χαρακτηριστικά των διεγέρσεων που χρησιμοποιήθηκαν καθώς και η κατηγοριοποίησή τους με βάση τα όσα περιγράφονται στο Κεφάλαιο 3.3..

Πίνακας 4.3 Βασικά χαρακτηριστικά διεγέρσεων των αριθμητικών αναλύσεων

Διέγερση	Ένταση M	Μέγιστη Επιτάχυνση a_{max} (g)	Περίοδος T (sec)	Σημαντικοί κύκλοι N	a_{max} (g) μετά την επεξεργασία	Κατηγορία	
						Αρχική	Τελική
Aigio	6.2	0.39	0.50	2.00	0.58	A	A
Chi-Chi	6.8	0.77	0.35	3.00	0.52	Γ	Γ
Coyote Lake	5.7	0.10	0.40	4.50	0.64	A	A
Ducze	7.9	0.54	0.20	3.50	0.43	Γ	Γ
Kobe	7.2	0.82	0.15	3.50	0.48	Γ	A
Kocaeli 090	7.51	0.22	0.25	13.00	0.46	A	B
Lefkada T	6.3	0.42	0.50	12.00	0.57	B	A
Northridge	6.7	0.88	0.35	3.50	0.53	B	A
Northridge 265	6.7	0.43	0.30	4.00	0.53	B	B
Sepolia	5.8	0.31	0.20	5.50	0.63	A	A

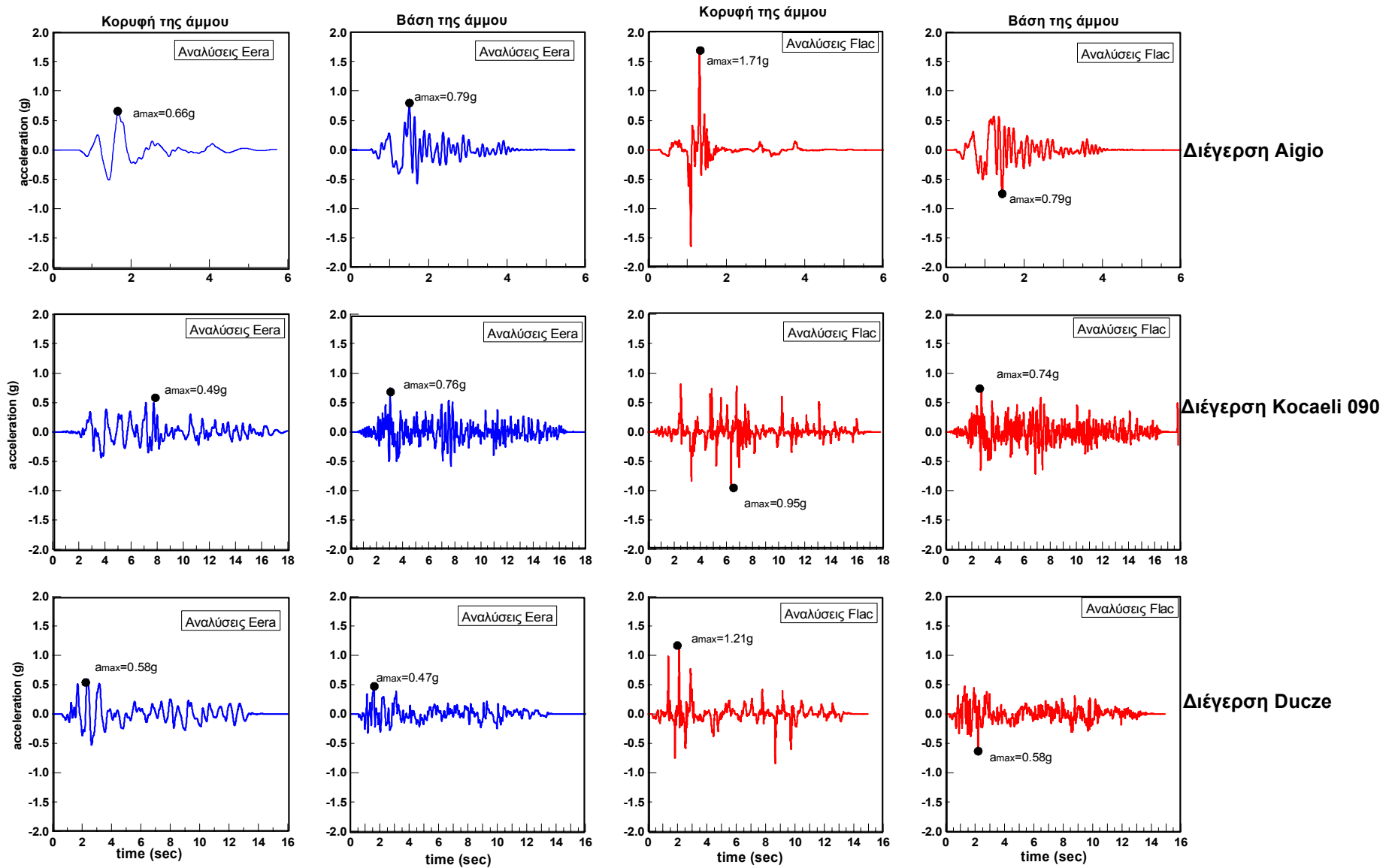
4.4 Τυπικά αποτελέσματα

4.4.1 Επιταχυνσιογραφήματα

Τα επιταχυνσιογραφήματα στην κορυφή και στην βάση της άμμου για καθεμιά από τις εξεταζόμενες διεγέρσεις και για κάθε πάχος ρευστοποιήσιμου στρώματος παρουσιάζονται αναλυτικά στο παράρτημα Β. Για λόγους σύγκρισης, κάθε επιταχυνσιογράφημα που έχει προκύψει από τις αριθμητικές αναλύσεις EERA συνοδεύεται από το αντίστοιχο επιταχυνσιογράφημα που έχει προκύψει από τις αναλύσεις FLAC (Λ. Κουτσογούλα, 2012). Στο Σχήμα 4.2 που ακολουθεί παρατίθενται ενδεικτικά για στρώση άμμου πάχους 5m και για τη διέγερση Aigio (τελική κατηγορία Α), Kocaeli090 (τελική κατηγορία Β) και Ducze (τελική κατηγορία Γ) τα αντίστοιχα επιταχυνσιογραφήματα.

Παρατηρούμε σημαντικές διαφορές μεταξύ των δυο τρόπων ανάλυσης (EERA και FLAC). Πιο συγκεκριμένα, για τις διεγέρσεις Aigio και Kocaeli 090, ενώ με τις αναλύσεις EERA οδηγούμαστε σε απομείωση της σεισμικής κίνησης μέσω του στρώματος της άμμου (15% και 35% απομείωση της μέγιστης επιτάχυνσης αντίστοιχα για τις δυο διεγέρσεις), με τις αναλύσεις Flac προβλέπεται ενίσχυση (110% και 25% αύξηση της μέγιστης επιτάχυνσης). Αντίθετα, για τη διέγερση Ducze και οι δυο τρόποι ανάλυσης προβλέπουν ενίσχυση της σεισμικής κίνησης με όμως σημαντικά μεγαλύτερη τιμή με την ανάλυση μέσω Flac (23% αύξηση της μέγιστης επιτάχυνσης κατά Eera και 108% αύξηση κατά Flac).

Τα παραπάνω συμπεράσματα δεν αποτελούν το γενικό κανόνα καθώς τα αποτελέσματα διαφοροποιούνται για διαφορετικά πάχη στρώματος άμμου και διαφορετικές διεγέρσεις. Συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα σχολιάζονται στο επόμενο κεφάλαιο, ενώ στην παρούσα ενότητα παρατίθενται ενδεικτικά.



Σχήμα 4.2 Επιταχυνσιογραφήματα στην κορυφή και τη βάση της άμμου για τη Διέγερση Αίγιο, Κωκκαλι 090 και Δυτζε με πάχος στρώματος 5m

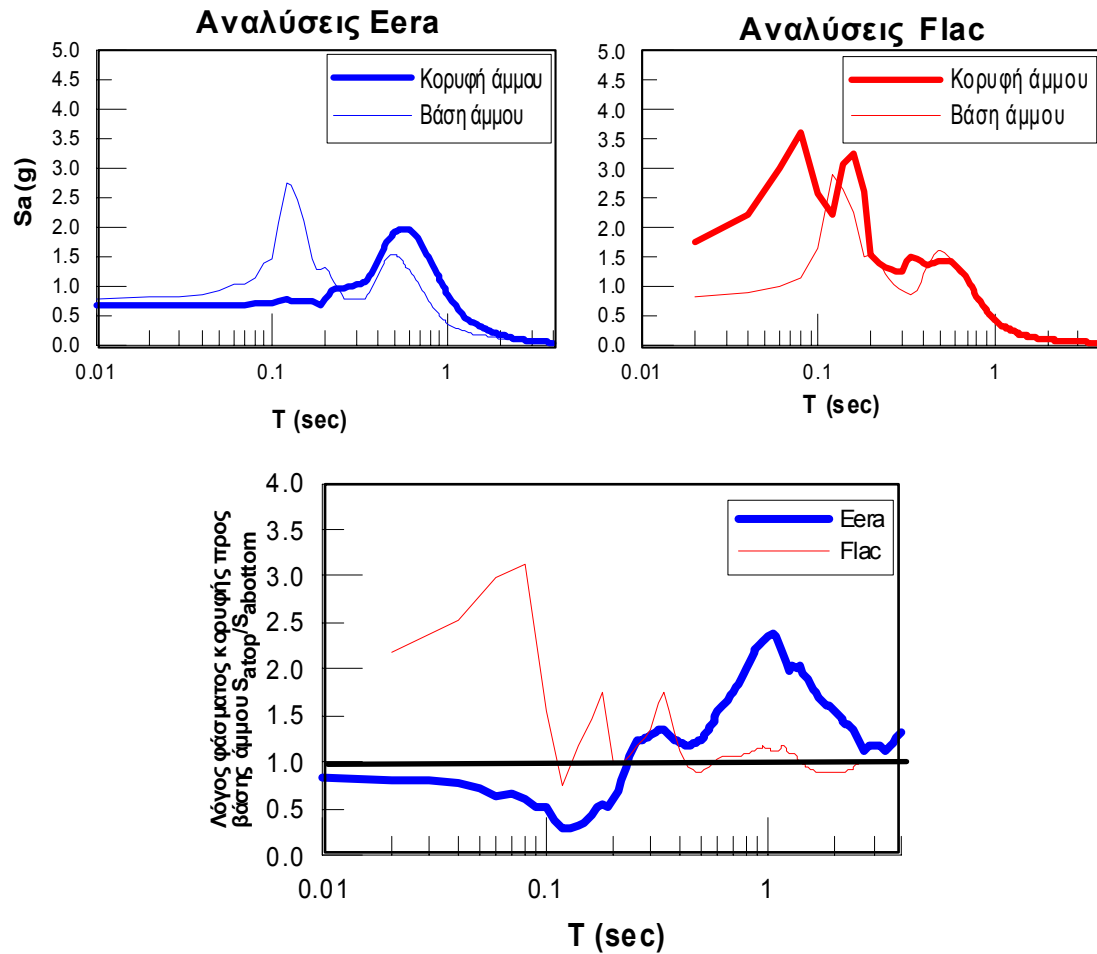
4.4.2 Φάσματα

Τα ελαστικά φάσματα απόκρισης στην κορυφή και στην βάση της άμμου (στρώμα που ρευστοποιείται) για καθεμιά από τις εξεταζόμενες διεγέρσεις και για κάθε πάχος ρευστοποιήσιμου στρώματος παρουσιάζονται σε κοινό διάγραμμα σε λογαριθμική κλίμακα στο παράρτημα Γ. Τα φάσματα έχουν ληφθεί από το πρόγραμμα Seismosignal, έχουν παραχθεί για λόγο απόσβεσης 5% και αντιστοιχούν στα φιλτραρισμένα επιταχυνσιογραφήματα.

Στο ίδιο παράρτημα για καθεμιά από τις εξεταζόμενες περιπτώσεις, παρουσιάζεται και ο λόγος φασματος κορυφής προς βάση της αμμόδους στρώσης. Η τιμή του λόγου των φασμάτων κορυφής προς βάσης (μεγαλύτερη ή μικρότερη της μονάδας) καθορίζει αν τελικά προκύπτει ενίσχυση της εδαφικής κίνησης εξαιτίας της παρουσίας της στρώσης της άμμου ή απομείωση της σεισμικής κίνησης. Για λόγους σύγκρισης, παρουσιάζονται και τα αντίστοιχα φάσματα κορυφής και βάσης της αμμόδους στρώσης (σε κοινό διάγραμμα) όπως έχουν προκύψει από τις αναλύσεις FLAC (Ε. Κουτσογούλα, 2012). Οι λόγοι φασμάτων κορυφής προς βάση που προκύπτουν από τις αναλύσεις EERA παρουσιάζονται σε κοινό διάγραμμα με αντίστοιχους λόγους που έχουν προκύψει από τις αναλύσεις FLAC. Τα αποτελέσματα σχολιάζονται εκτενώς σε επόμενο κεφάλαιο.

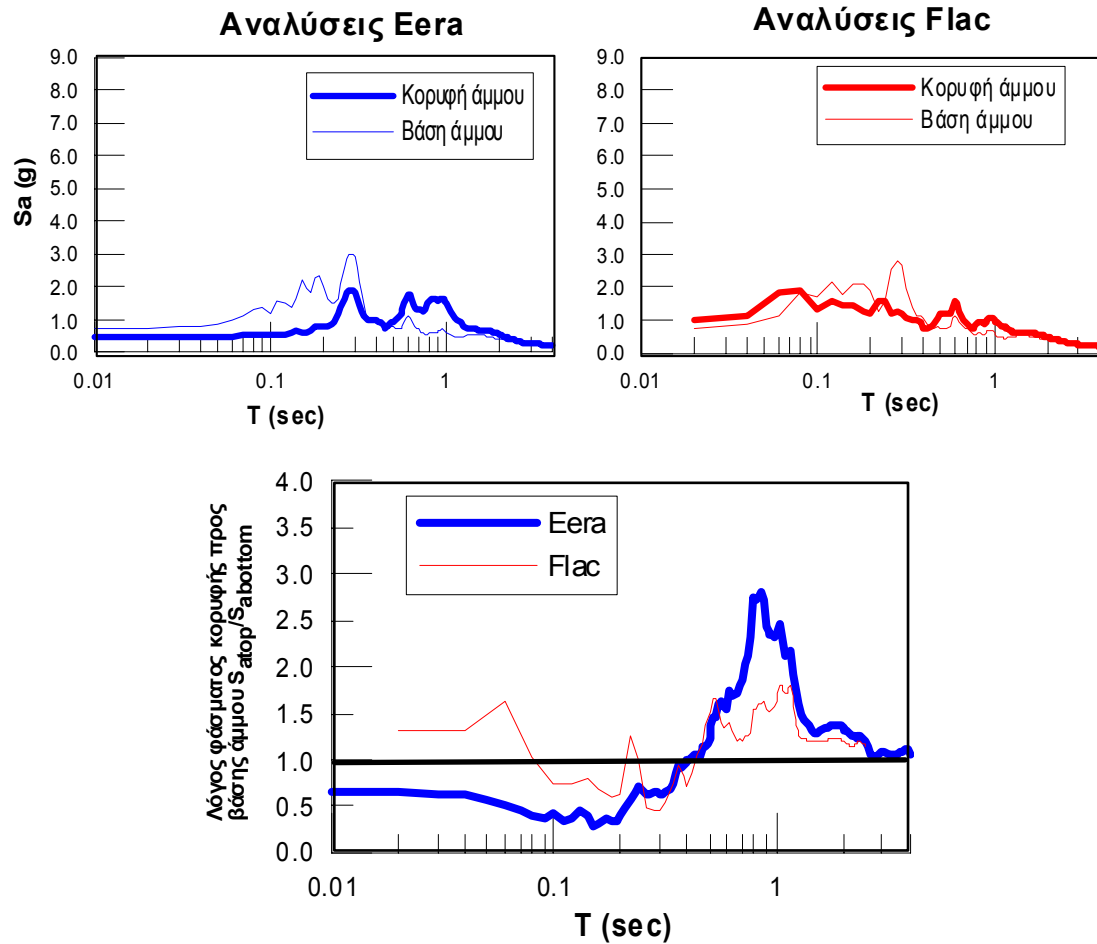
Στα Σχήματα 4.3, 4.4 και 4.5 που ακολουθούν παρατίθενται για στρώση άμμου πάχους 5m και για τη διέγερση Αίγιο (τελική κατηγορία Α), Kocaeli090 (τελική κατηγορία Β) και Ducze (τελική κατηγορία Γ) τα αντίστοιχα φάσματα κορυφής και βάσης του στρώματος της άμμου.

Όσον αφορά τη διέγερση του Αίγιο (κατηγορία Α), παρατηρούμε ότι με τις αναλύσεις Eera προβλέπεται μέγιστη φασματική επιτάχυνση στην κορυφή του στρώματος της άμμου ίση με 2.0g περίπου για περίοδο $T_a=0.5\text{sec}$. Αντίθετα, οι αναλύσεις Flac προβλέπουν μέγιστη φασματική ενίσχυση στην κορυφή του στρώματος της άμμου για $T=0.08\text{Sec}$ και ίση με περίπου 3.5g. Όσον αφορά, τη βάση της άμμου οι δυο μέθοδοι ανάλυσης οδηγούν σε περίπου ίδια φάσματα (μέγιστη φασματική ενίσχυση για $T=0.12\text{sec}$ ίση με 2.5g περίπου). Η ουσιαστική διαφορά των δυο μεθόδων παρατηρείται στις μικρές περιόδους όπου οι αναλύσεις Eera προβλέπουν απόσβεση της σεισμικής κίνησης μέσω του στρώματος της άμμου ενώ οι αναλύσεις Flac ενίσχυση. Στο σημείο αυτό επαναλαμβάνεται ότι τα αποτελέσματα αυτά αφορούν ενδεικτικά ένα συγκεκριμένο πάχος αμμόδους στρώσης και η συνολική αξιολόγηση γίνεται σε επόμενο κεφάλαιο.



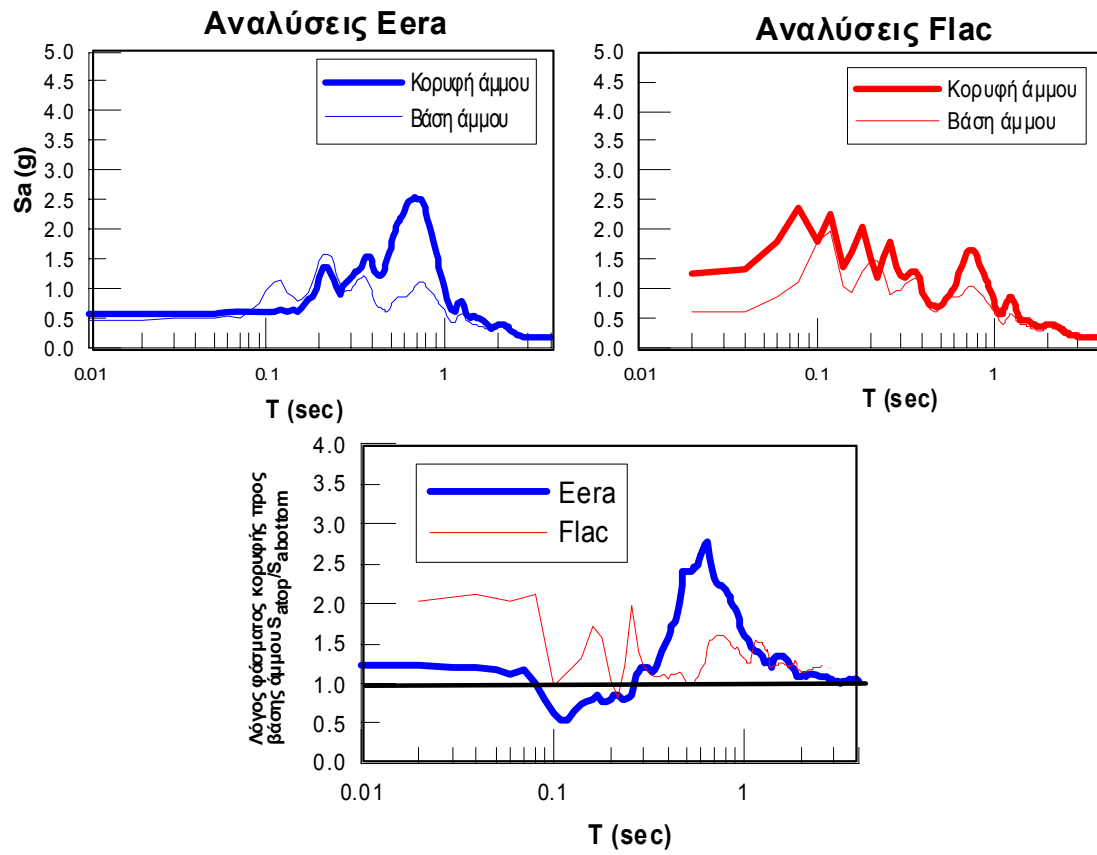
Σχήμα 4.3 Φάσματα στην κορυφή και τη βάση της άμμου και λόγος φασμάτων κορυφής προς βάση άμμου, για τη διέγερση Αίγιο με πάχος στρώματος 5m

Στα φάσματα της διέγερσης Kocaeli 090 (κατηγορία Β), παρατηρούμε και πάλι ότι όσον αφορά τα φάσματα βάσης οι δυο μέθοδοι ανάλυσης παρουσιάζουν κοινά αποτελέσματα (για $T=0.3\text{sec}$ μέγιστη φασματική ενίσχυση περίπου 3.0g). Όσον αφορά τα φάσματα στην κορυφή του στρώματος της άμμου, η ανάλυση Eera προβλέπει απόσβεση της σεισμικής κίνησης στις μικρές περιόδους και ενίσχυση στις μεγάλες. Στο αντίστοιχο φάσμα που προκύπτει από την ανάλυση Flac παρατηρούμε μικρή απόσβεση της κίνησης στις μεσαίες περιόδους, ενώ στις υπόλοιπες οι διαφορές φάσματος κορυφής και βάσης άμμου είναι μικρές (έως 1.5 φορά ενίσχυση). Σε απόλυτα μεγέθη πάντως, οι διαφορές στα φάσματα κορυφής της άμμου μεταξύ των δυο τρόπων ανάλυσης είναι μικρότερες για τη διέγερση αυτή (Kocaeli 090, κατηγορία Β) σε σχέση με την προηγούμενη (Αίγιο, κατηγορία Α).



Σχήμα 4.4 Φάσματα στην κορυφή και τη βάση της άμμου και λόγος φασμάτων κορυφής προς βάση άμμου, για τη διέγερση Kocaeli 090 με πάχος στρώματος 5m

Τέλος για τη διέγερση Ducze (κατηγορία Γ), παρατηρούμε μικρή διαφοροποίηση μεταξύ των δυο τρόπων ανάλυσης και στο φάσμα βάσης της άμμου. Η ουσιαστική διαφορά όμως είναι και πάλι στο φάσμα κορυφής όπου ενώ και οι δυο μέθοδοι προβλέπουν μια μέγιστη φασματική ενίσχυση περίπου 2.5g, η ανάλυση Eera προβλέπει ότι αυτή συμβαίνει για μεγάλες περιόδους ($T=0.7\text{sec}$) ενώ η ανάλυση Flac για μικρές ($T=0.07\text{sec}$).



Σχήμα 4.5 Φάσματα στην κορυφή και τη βάση της άμμου και λόγος φασμάτων κορυφής προς βάση άμμου, για τη διέγερση *Ducze* με πάχος στρώματος 5m

4.4.3 Δείκτες ποσοτικής εκτίμησης σεισμικής κίνησης

Όπως προαναφέρθηκε στην εισαγωγή, στόχος της παρούσας έρευνας είναι να αξιολογηθεί κατά πόσον οι αριθμητικές αναλύσεις με το EERA και με τον κώδικα πεπερασμένων διαφορών FLAC περιγράφουν όμοια την απομείωση ή ενίσχυση που επιφέρει η ρευστοποίηση στη σεισμική κίνηση της επιφάνειας του εδάφους. Για το σκοπό αυτό, τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων θα πρέπει να αξιολογηθούν, βάση κάποιων δεικτών (μονοσήμαντα ορισμένων παραμέτρων της σεισμικής κίνησης) οι οποίοι να είναι αντιπροσωπευτικοί της σεισμικής κίνησης και να μπορούν, πιθανόν, να χρησιμοποιηθούν στο μέλλον για το σχεδιασμό των κατασκευών.

Στη διπλωματική του Α. Θεοχάρη (2011), εξετάστηκαν διάφοροι τέτοιοι δείκτες οι οποίοι είχαν ουσιαστικά να κάνουν είτε με την απομείωση της μέγιστης σεισμικής επιτάχυνσης, είτε με την ανάπτυξη ικανής υπερπίεσης πόρων στο μέσο του ρευστοποιημένου στρώματος. Από τους δείκτες αυτούς, χαρακτηρίστηκε τελικώς ως πλέον αντιπροσωπευτικός ο δείκτης I_{arias} , ο οποίος εκφράζει τον λόγο της Arias Intensity στην κορυφή προς τη βάση του ρευστοποιημένου στρώματος. Οι δείκτες αυτοί είναι επαρκείς μόνον για αρμονική διέγερση δεδομένου ότι στην περίπτωση αυτή, δεν έχει έννοια το φασματικό περιεχόμενο του σεισμού.

Στη διπλωματική εργασία της Ε. Κουτσογούλας (2012) χρησιμοποιήθηκε ο δείκτης I_{arias} αλλά και η μέση τιμή του λόγου των ελαστικών φασμάτων απόκρισης στην επιφάνεια και στη βάση του ρευστοποιημένου στρώματος για τρεις χαρακτηριστικές τιμές περιόδων:

- Α. μικρών περιόδων $T=0.05-0.15$ sec (που αντιστοιχούν σε κτίρια 1-2 ορόφων)
- Β. μεσαίων περιόδων $T=0.15-0.45$ sec (που αντιστοιχούν σε πολώροφα κτίρια) και
- Γ. μεγάλων περιόδων $T=0.45-1.5$ sec (υψηλά κτίρια, पुलώνες γεφυρών κλπ)

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε ο δείκτης I_{arias} και η μέση τιμή του λόγου φασμάτων.

Υπενθυμίζεται ότι ο δείκτης Arias Intensity (Arturo Arias, 1970) ορίζεται ως:

$$I_{\alpha} = \frac{\pi}{2g} \int_0^{\infty} a(t)^2 dt \quad (4.1)$$

και
$$I_{arias} = \frac{I_{\alpha, \text{κορυφής}}}{I_{\alpha, \text{βάσης}}} \quad (4.2)$$

Από φυσικής άποψης, ο δείκτης Arias Intensity εκφράζει το μέγεθος της ταχύτητας για το σημείο στο οποίο αναφέρεται αφού και οι προκύπτουσες μονάδες είναι m/sec. Λόγω της παρουσίας του τετραγώνου στον τύπο, διαφαίνεται ότι ο δείκτης δε λαμβάνει εξίσου υπόψη όλες τις τιμές της επιτάχυνσης αλλά δίνει έμφαση στις υψηλές τιμές, εφόσον επιταχύνσεις μικρότερες της μονάδας υψωμένες στο τετράγωνο, γίνονται ακόμα μικρότερες.

Στο Παράρτημα Δ παρουσιάζονται αναλυτικά για κάθε διέγερση ο δείκτης *I_{arias}* σε συνάρτηση με το πάχος του στρώματος της ρευστοποιήσιμης άμμου. Συγκεκριμένα, παρουσιάζονται σε κοινό διάγραμμα τα αποτελέσματα των αναλύσεων EERA και FLAC. Στο ίδιο παράρτημα περιλαμβάνεται και για τα δυο είδη αναλύσεων (EERA και FLAC) σε κοινούς άξονες η μέση τιμή του λόγου φασμάτων για μικρές, μεσαίες και μεγάλες περιόδους όπως ορίστηκαν προηγουμένως.

Στο Σχήμα 4.6 παρουσιάζονται για τη διέγερση Aigio, Kocaeli 090 και Ducze ο δείκτης *I_{arias}* και η μέση τιμή του λόγου φασμάτων για μικρές περιόδους, μεσαίες και μεγάλες (τα αποτελέσματα για όλες τις διεγέρσεις σχολιάζονται σε επόμενο κεφάλαιο). Στο Σχήμα 4.7, παρουσιάζονται οι εξεταζόμενοι δείκτες ως προς το αδιαστατοποιημένο πάχος του στρώματος της άμμου H/λ_{max} .

Δείκτης *I_{arias}*

Παρατηρούμε ότι για τη διέγερση Aigio (κατηγορία Α), τόσο οι αναλύσεις με το Eera όσο και με το Flac, προβλέπουν λόγο *I_{arias}* μεγαλύτερο της μονάδας για πάχη στρώματος άμμου μικρότερα από 5m ενώ για μεγαλύτερα πάχη και οι δυο μέθοδοι προβλέπουν απόσβεση της σεισμικής κίνησης μέσω του στρώματος της άμμου. Ωστόσο, οι αναλύσεις με το Eera προβλέπουν συστηματικά (για όλα τα πάχη στρώματος άμμου με εξαίρεση το $H=3m$) μεγαλύτερες τιμές του δείκτη *I_{arias}*. Όσον αφορά το διάγραμμα ως προς το αδιαστατοποιημένο πάχος, παρατηρούμε 'τοι σε αυτήν περίπτωση και με τις δυο μεθόδους ανάλυσης προκύπτει ενίσχυση της εδαφικής κίνησης για αδιαστατοποιημένο πάχος μικρότερο από 0.2, ενώ για μεγαλύτερες τιμές σημειώνεται τιμή *I_{arias}* μικρότερη της μονάδας. Πρακτικά βλέπουμε ότι η αδιαστατοποίηση μείωσε το εύρος όπου σημειώνονταν διαφορές μεταξύ των δυο μεθόδων ανάλυσης.

Στη διέγερση Kocaeli 090 (κατηγορία Β), η ανάλυση μέσω του Flac προβλέπει δείκτη *I_{arias}* ελαφρώς μεγαλύτερο της μονάδας για πάχος στρώματος άμμου μικρότερο από 2m, ενώ για τις υπόλοιπες περιπτώσεις (άμμος με πάχος μεγαλύτερο από 2m) απόσβεση της σεισμικής κίνησης ($I_{arias}=0.60-0.80$ περίπου). Η ανάλυση μέσω του Eera οδηγεί σε τιμή του δείκτη *I_{arias}* μικρότερο της μονάδας για στρώμα άμμου με πάχος μεγαλύτερο από 5m, ενώ για μικρότερα πάχη οδηγεί σε ενισχύσεις ($I_{arias_{max}}=2.0$ για $H=1m$). Με την αδιαστατοποίηση του πάχους του στρώματος της άμμου ως προς το λ_{max} μειώνεται το εύρος όπου παρατηρούνται διαφορές μεταξύ των δυο τρόπων ανάλυσης.

Τέλος, όσον αφορά τη διέγερση Ducze (κατηγορία Γ) και οι δυο μέθοδοι ανάλυσης καταλήγουν σε ενίσχυση της εδαφικής κίνησης μέσω του στρώματος της άμμου. Για πάχος στρώματος άμμου μεγαλύτερο από 8m οι δυο μέθοδοι ανάλυσης συγκλίνουν σημαντικά, ενώ για μικρότερα πάχη η ανάλυση μέσω Eera δίνει συστηματικά μεγαλύτερες τιμές λόγου *I_{arias}* σε σχέση με τις αναλύσεις μέσω Flac.

Μέση τιμή λόγου φασμάτων-Μικρές περιόδους

Όσον αφορά τη διέγερση Aigio, παρατηρούμε ότι η ανάλυση μέσω Eera έχει ως αποτέλεσμα την απόσβεση της σεισμικής κίνησης μέσω του στρώματος της άμμου για όλα τα πάχη του στρώματος της άμμου. Αντίθετα, η ανάλυση με Flac προβλέπει απόσβεση της σεισμικής κίνησης μόνο για πάχη άμμου μεγαλύτερα από 6m. Μάλιστα για μεγάλα πάχη στρώματος άμμου (>8m), οι δυο μέθοδοι συγκλίνουν σημαντικά. Η ουσιαστική διαφορά των δυο μεθόδων εντοπίζεται στα μικρά πάχη στρώματος άμμου, όπου η ανάλυση μέσω Flac προβλέπει ενίσχυση έως και 2.5 της σεισμικής κίνησης μέσω του στρώματος που ρευστοποιείται. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης Flac είναι πιο κοντά σε αυτό που θα περίμενε κανείς, δεδομένου ότι τα μικρά πάχη στρώματος άμμου (μικρή ιδιοπερίοδος) συντονίζονται στις μικρές περιόδους.

Στη διέγερση Kocaeli 090, παρατηρούμε ότι για μικρό πάχος στρώματος άμμου (<4m) και οι δυο μέθοδοι ανάλυσης οδηγούν σε ενίσχυση της σεισμικής κίνησης με το Flac να δίνει ωστόσο συστηματικά μεγαλύτερες ενισχύσεις (μέγιστη τιμή λόγου φασμάτων κορυφής προς βάση 2.5 έναντι 1.5 που δίνει το Eera). Για ενδιάμεσα πάχη στρώματος άμμου (2m<H<8m) οι δυο μέθοδοι προβλέπουν λόγο φάσματος κορυφής προς βάση της άμμου που βρίσκεται κοντά στη μονάδα (καμία επίδραση στρώματος άμμου). Η μεγάλη διαφορά στα αποτελέσματα παρατηρείται για τα μεγάλα πάχη όπου το μεν Flac οδηγεί σε ενίσχυση της εδαφικής κίνησης (μέγιστη τιμή του λόγου ίση με 3) ενώ το Eera οδηγεί σε απομείωση (μέση τιμή του λόγου φασμάτων σταθερή και ίση περίπου με 0.60-0.70).

Τα αποτελέσματα των αναλύσεων για τη διέγερση Ducze διαφέρουν για όλα τα πάχη του στρώματος της άμμου με εξαίρεση ίσως για H=1m όπου και οι δυο μέθοδοι τουλάχιστον ποιοτικά προβλέπουν ενίσχυση της εδαφικής κίνησης. Από εκεί και πέρα όμως τα αποτελέσματα διαφοροποιούνται ουσιαστικά αφού η ανάλυση μέσω Eera έχει ως αποτέλεσμα απόσβεση της κίνησης (σταθερή τιμή του λόγου φάσματος κορυφής προς βάση, περίπου 0.70-0.80), ενώ η ανάλυση με το Flac, έχει ως αποτέλεσμα σημαντικές ενισχύσεις (έως και 3.7 για H=11m).

Σημειώνεται ότι η αδιαστατοποίηση του πάχους ως προς λ_{max} δεν έχει νόημα σε αυτή την περίπτωση για καμία από τις τρεις εξεταζόμενες διεγέρσεις αφού ούτως ή άλλως οι δυο μέθοδοι ανάλυσης καταλήγουν σε διαφορετικά αποτελέσματα.

Μέση τιμή λόγου φασμάτων-Μεσαίες περιόδους

Για τη διέγερση Aigio παρατηρούμε ότι τα αποτελέσματα των δυο μεθόδων ανάλυσης συγκλίνουν σημαντικά. Συγκεκριμένα, προβλέπεται ενίσχυση της σεισμικής κίνησης για πάχος άμμου μικρότερο από 5m και απόσβεση για μεγαλύτερο από 5m, τόσο με την ανάλυση Eera όσο και με την ανάλυση Flac. Σε αυτήν την περίπτωση που τα αποτελέσματα των δυο μεθόδων ούτως ή άλλως, η αδιαστατοποίηση του πάχους δεν παίζει ιδιαίτερο ρόλο.

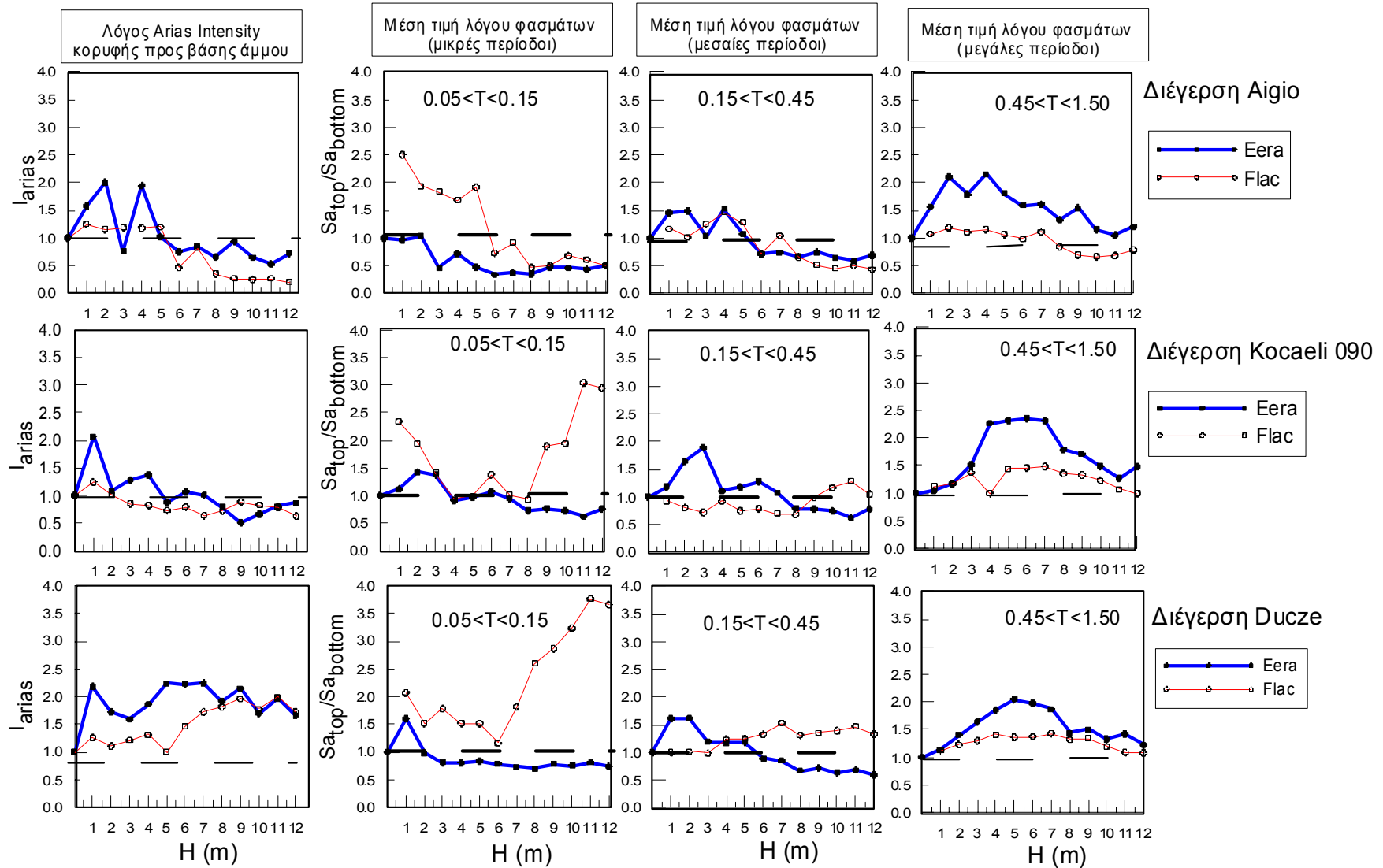
Στη διέγερση Kocaeli 090, παρατηρούμε ότι τα αποτελέσματα των δυο μεθόδων ανάλυσης δεν συμφωνούν. Ενώ το Flac οδηγεί σε απόσβεση της σεισμικής κίνησης (λόγος φασμάτων έως και 0.60) για άμμο με πάχος μικρότερο από 9m και μικρή ενίσχυση για μεγαλύτερα πάχη, η ανάλυση μέσω Eera προβλέπει ενισχύσεις για πάχη μικρότερα από 7m και αποσβέσεις για μεγαλύτερα πάχη.

Ανάλογα ισχύουν και για τη διέγερση Ducze. Η ανάλυση με Eera οδήγησε σε ενίσχυση για πάχη έως 6m και απόσβεση για μεγαλύτερα πάχη, ενώ η ανάλυση με Flac σε ενίσχυση για όλα τα πάχη με λόγο φασμάτων περί το 1.5 (εξαιρέση αποτελούν οι περιπτώσεις με ππάχος άμμου μικρότερο από 3m όπου ο λόγος φάσματος κορυφής προς βάση είναι περίπου ίσο με 1.0).

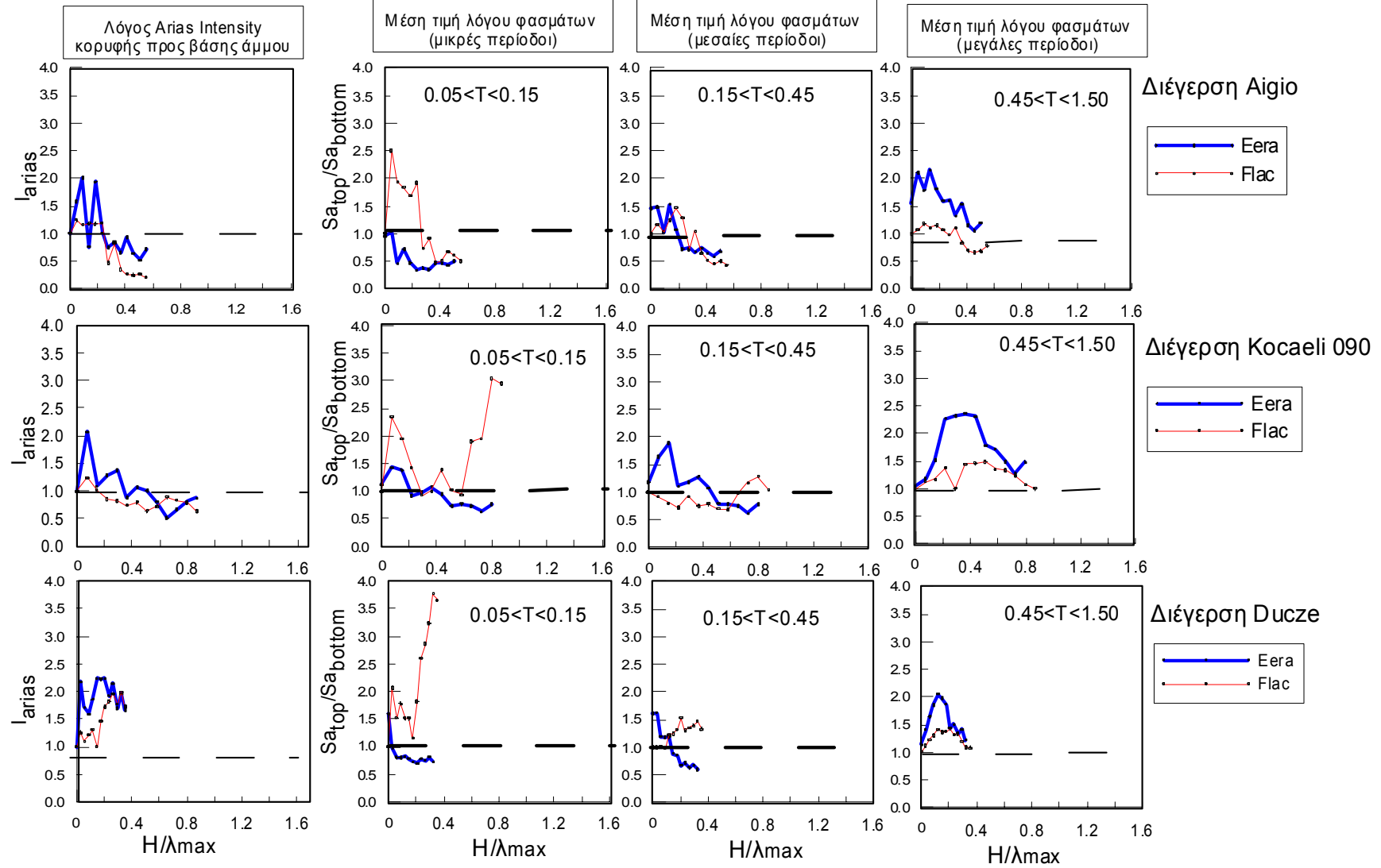
Μέση τιμή λόγου φασμάτων-Μεγάλες περιόδου

Όσον αφορά τη διέγερση Aigio, η ανάλυση μέσω του Eera οδηγεί σε ενίσχυση της σεισμικής κίνησης για όλα τα πάχη του στρώματος της άμμου, με τις μεγαλύτερες ενισχύσεις να λαμβάνουν χώρα για μικρά πάχη άμμου ($H < 6m$) με μέγιστη τιμή του λόγου φασμάτων ίση με 2.1. Το Flac, οδηγεί σε ενίσχυση της σεισμικής κίνησης για μικρά πάχη άμμου ($H < 6m$), που όμως είναι σημαντικά μικρότερη σε σχέση με την προβλεπόμενη από το Eera ενίσχυση (μέγιστη τιμή του λόγου φασμάτων ίση με 1.2). Για μεγαλύτερη πάχη άμμου μάλιστα, το Flac οδηγεί σε απόσβεση της σεισμικής κίνησης (λόγος φασμάτων έως και 0.60 μικρότερη τιμή)

Τέλος, όσον αφορά τις διεγέρσεις Kocaeli και Ducze και οι δυο μέθοδοι προβλέπουν ενίσχυση της εδαφικής κίνησης για όλα τα μελετηθέντα πάχη στρώματος άμμου. Ωστόσο, οι ενισχύσεις που προβλέπονται από το Eera είναι συστηματικά μεγαλύτερες και για τις δυο διεγέρσεις. Μέγιστη τιμή του λόγου φασμάτων 2.5 και 2.0 για Kocaeli και Ducze αντίστοιχα κατά Eera ενώ για τις αναλύσεις Flac οι αντίστοιχες τιμές είναι 1.50 και 1.10).



Σχήμα 4.6 Λόγος I_{arias} και μέση τιμή λόγου φασμάτων στην κορυφή και τη βάση της άμμου ως προς H για τις διεγέρσεις Αιγίο, Κocaeli 090 και Duzce



Σχήμα 4.7 Λόγος I_{arias} και μέση τιμή λόγου φασμάτων στην κορυφή και τη βάση της άμμου ως προς H/λ_{max} για τις διεγέρσεις Aigio, Kocaeli 090 και Duzce

5. Αξιολόγηση Αριθμητικών Αναλύσεων

5.1 Γενικά

Στο παρόν κεφάλαιο εξετάζεται η μεταβολή του δείκτη *I*_{arias} καθώς και του λόγου φασμάτων απόκρισης συγκεντρωτικά για όλες τις εξεταζόμενες διεγέρσεις ανά κατηγορία (Α, Β, Γ). Στο προηγούμενο κεφάλαιο παρουσιάστηκε ενδεικτικά για τις διεγέρσεις Aigio, Kocaeli 090 και Ducez (ως αντιπροσωπευτικές για καθεμιά από τις τρεις κατηγορίες) η μεταβολή των παραπάνω δεικτών με το πάχος *H* του στρώματος της άμμου αλλά και με το αδιαστατοποιημένο πάχος H/λ_{max} .

Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται και συγκρίνονται μεταξύ τους προέρχονται από 1-Δ αναλύσεις σεισμικής απόκρισης με την ισοδύναμη γραμμική μέθοδο frequency domain analysis-Eera) και από αναλύσεις μέσω του κώδικα πεπερασμένων διαφορών Flac (προγενέστερη έρευνα, Ε. Κουτσογούλα 2012). Στόχος της παρούσας ενότητας είναι να αξιολογηθεί κατά πόσον οι δυο μέθοδοι ανάλυσης οδηγούν σε όμοια συμπεράσματα αλλά και να διερευνηθούν τα αίτια στα οποία πιθανόν να οφείλονται οι διαφορές στα αποτελέσματα που τελικά παρατηρούνται μεταξύ των δυο μεθόδων ανάλυσης.

5.2 Δείκτης Arias

Στα σχήματα 5.1 και 5.2 παρουσιάζεται η μεταβολή του δείκτη *I*_{arias} με το πάχος του στρώματος της άμμου *H* και με το αδιαστατοποιημένο πάχος H/λ_{max} , όπως προέκυψε από τις αναλύσεις Flac (προγενέστερη έρευνα) και τις αναλύσεις Eera (παρούσα έρευνα). Οι διεγέρσεις που παρουσιάζονται στα σχήματα αυτά ανήκουν στην κατηγορία Α των διεγέρσεων.

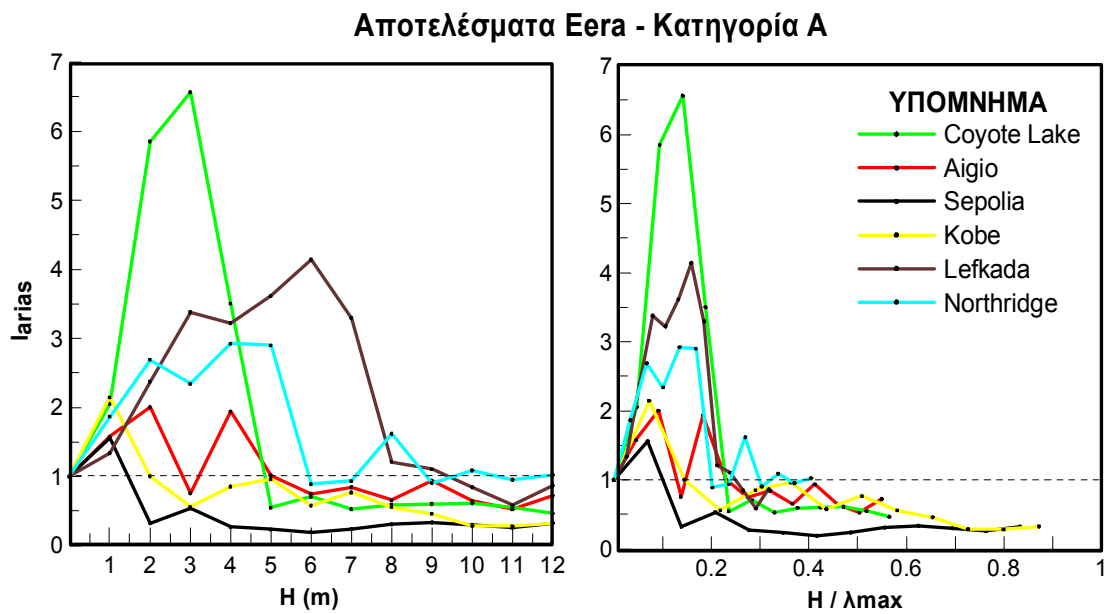
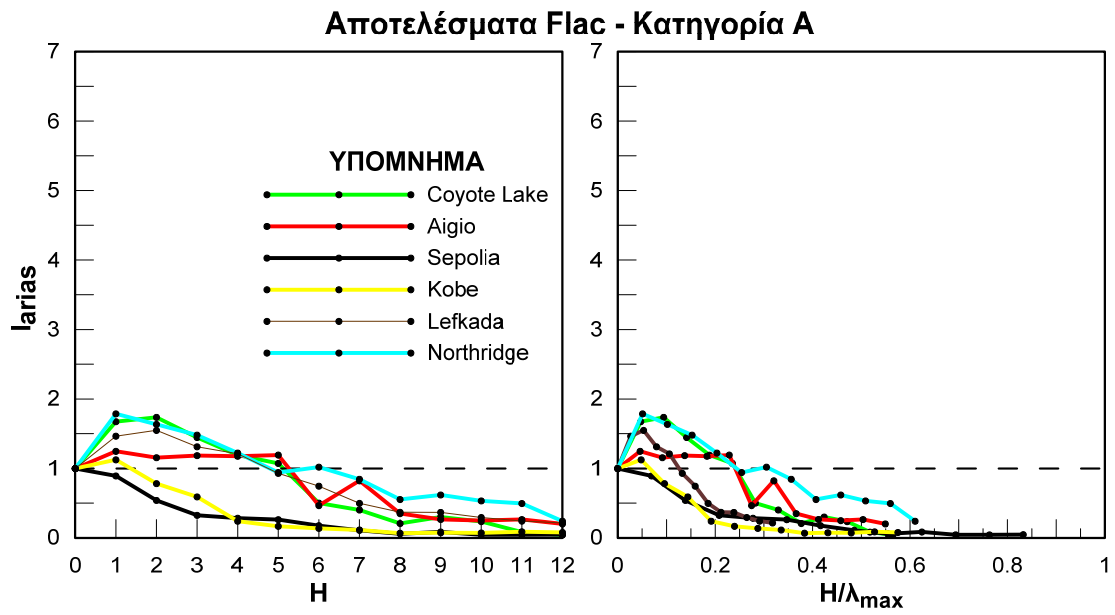
Παρατηρούμε ότι για τις διεγέρσεις Serolia και Kobe και οι δυο μέθοδοι ανάλυσης προβλέπουν τιμές του δείκτη *I*_{arias} μικρότερες της μονάδας για όλα τα εξεταζόμενα πάχη στρώματος άμμου (με εξαίρεση την περίπτωση $H=1m$ όπου οι αναλύσεις Eera προβλέπουν ενίσχυση της εδαφικής κίνησης). Για τη διεγέρση Serolia η σύγκλιση των μεθόδων είναι σημαντική ενώ για τη διεγέρση Kobe οι αναλύσεις Flac προβλέπουν γενικώς υψηλότερες τιμές του δείκτη.

Στις διεγέρσεις Coyote, Aigio και Northridge παρατηρούνται σημαντικότερες διαφορές σε σχέση με τις προηγούμενες διεγέρσεις. Μέσω των αναλύσεων Flac προβλέπεται ενίσχυση της εδαφικής κίνησης για μικρά πάχη στρώματος άμμου ($H \leq 5m$), ενώ για μεγαλύτερα πάχη άμμου ο δείκτης *I*_{arias} λαμβάνει τιμές μικρότερες της μονάδας. Η μέγιστη τιμή του δείκτη *I*_{arias} με αυτή τη μέθοδο ανάλυσης

παρουσιάζεται για πάχος άμμου $H=2m$ και είναι περίπου ίση με 2. Με τις αναλύσεις Eera παρατηρείται ότι για πάχος άμμου μικρότερο από 5m περίπου έχουμε όπως και με τις αναλύσεις Flac ενίσχυση της εδαφικής κίνησης, αλλά αυτή τη φορά ο δείκτης I_{arias} λαμβάνει σημαντικά μεγαλύτερες τιμές (έως και 7 για τη διέγερση Coyote Lake). Για μεγαλύτερα πάχη στρώματος άμμου οι αναλύσεις Eera οδηγούν σε τιμές του δείκτη I_{arias} μικρότερες της μονάδας, που όμως είναι γενικώς υψηλότερες σε σχέση με αυτές που καταλήγουν οι αναλύσεις Eera.

Τέλος, για τη διέγερση της Λευκάδας οι δυο μέθοδοι δίνουν τελείως διαφορετικά αποτελέσματα. Μέσω των αναλύσεων FLAC υπολογίζονται τιμές του δείκτη μεγαλύτερες της μονάδας (με μέγιστη τιμή όση με 1.5) για πάχος στρώματος άμμου μικρότερο από 5m ενώ για μεγαλύτερα πάχη ο δείκτης λαμβάνει τιμές μικρότερες της μονάδας. Αντίθετα, τα αποτελέσματα των αναλύσεων Eera όπως παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.2 δείχνουν ότι ο δείκτης λαμβάνει μέγιστη τιμή ίση με 4 για πάχος στρώματος άμμου $H=6m$, ενώ για να πραγματοποιηθεί απόσβεση της κίνησης απαιτείται το στρώμα της άμμου να έχει πάχος πάνω από 10m.

Όσον αφορά τα διαγράμματα που παρουσιάζουν τη μεταβολή του δείκτη I_{arias} με το αδιαστοποιημένο πάχος του στρώματος (H/λ_{max}), παρατηρούμε μείωση του εύρους στο οποίο παρουσιάζονται ενισχύσεις. Συγκεκριμένα, θα μπορούσα να λεχθεί ότι οι αναλύσεις τόσο μέσω του κώδικα πεπερασμένων διαφορών όσο και μέσω της ισοδύναμης γραμμικής μεθόδου, οδηγούν σε ενίσχυση της εδαφικής κίνησης μέσω του στρώματος της άμμου στο πεδίο $H/\lambda_{max} < 0.25$. Για μεγαλύτερες τιμές του αδιαστοποιημένου πάχους και οι δυο μέθοδοι ανάλυσης προβλέπουν απομείωση της εδαφικής κίνησης μέσω του στρώματος της άμμου και για τις 6 εξεταζόμενες διεγέρσεις. Ωστόσο, οι αναλύσεις EERA δίνουν γενικώς μεγαλύτερες τιμές I_{arias} τόσο για $H/\lambda_{max} < 0.25$ (μέγιστη τιμή του δείκτη I_{arias} 1.5 έως 6.5 σε σύγκριση με το FLAC το οποίο δίνει τιμές μέχρι 2) αλλά και για $H/\lambda_{max} > 0.25$ (ελάχιστη τιμή EERA περίπου 0.2 σε αντίθεση με το 0.05 του FLAC).

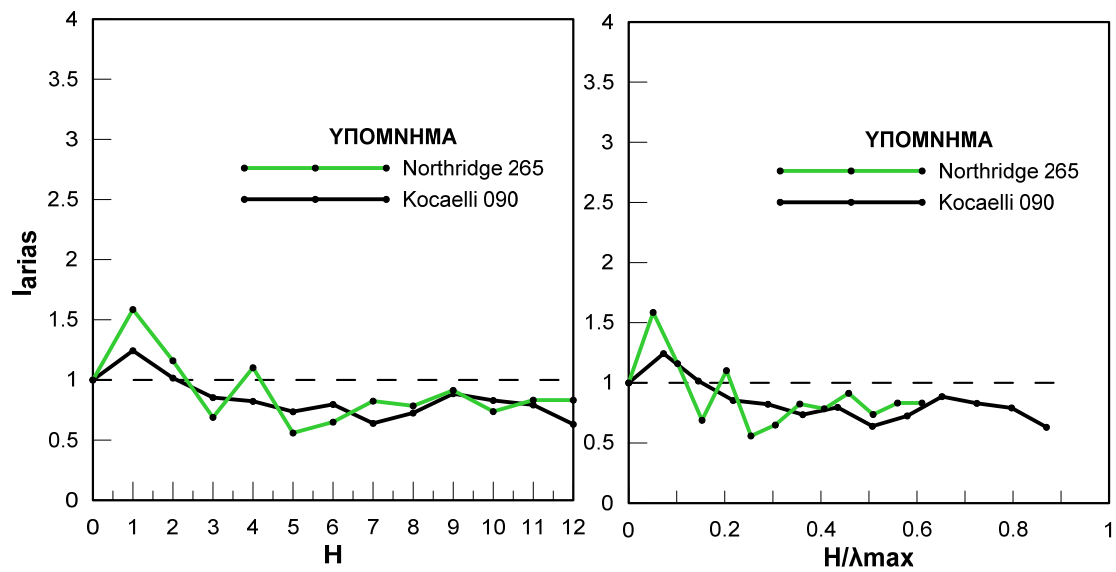


Στα σχήματα 5.3 και 5.4 παρουσιάζεται η τιμή του δείκτη I_{arias} για τις διεγέρσεις κατηγορίας Β. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων $Flac$ συνοψίζονται ως εξής: μικρές ενισχύσεις για πάχη στρώματος άμμου μικρότερα από 2m (με μέγιστη τιμή I_{arias} ίση με 1.5) ενώ για μεγαλύτερα πάχη ο δείκτης απόσβεση της κίνησης. Μέσω των αναλύσεων $Eera$, για πάχη στρώματος άμμου μικρότερα από 6m αυτή τη φορά παρουσιάζονται ενισχύσεις, ενώ για μεγαλύτερα αποσβέσεις. Γενικά, πάντως με το $Eera$ οδηγούμαστε σε μεγαλύτερες τιμές του δείκτη I_{arias} σε σχέση με $Flac$, όπως και με την κατηγορία Α των διεγέρσεων. Το πάχος του στρώματος άμμου για το οποίο ο δείκτης αλλάζει από μεγαλύτερος της μονάδας σε μικρότερος είναι 2m για τις αναλύσεις $Flac$ και 6m για τις αναλύσεις $Eera$. Για τα μεγάλα πάχη στρώματος άμμου ($H > 6m$) οι δυο μέθοδοι ανάλυσης παρουσιάζουν αποτελέσματα με ικανοποιητική σύγκλιση.

Όσον αφορά τα διαγράμματα με το αδιαστοποιημένο πάχος στρώματος H/λ_{max} , παρατηρούμε ότι και πάλι υπάρχει διαφορά μεταξύ των δυο αναλύσεων στην τιμή H/λ_{max} πέραν της οποίας παρουσιάζεται απομείωση της εδαφικής κίνησης. Ενώ με τις αναλύσεις $Flac$ απομείωση παρατηρείται για $H/\lambda_{max} > 0.10$, με τις αναλύσεις $Eera$ παρατηρείται για $H/\lambda_{max} > 0.30$. Από ποιοτικής τουλάχιστον πλευράς, θα μπορούσε να λεχθεί ότι η χρήση του αδιαστατοποιημένου λόγου H/λ_{max} για τη μεταβολή του δείκτη I_{arias} περιορίζει το εύρος στο οποίο παρατηρούνται διαφορές μεταξύ των δυο τρόπων ανάλυσης. Έτσι για τιμές H/λ_{max} μεγαλύτερες από 0.10 έως 0.30 και οι δυο μέθοδοι προβλέπουν απόσβεση της σεισμικής κίνησης μέσω του στρώματος που ρευστοποιείται.

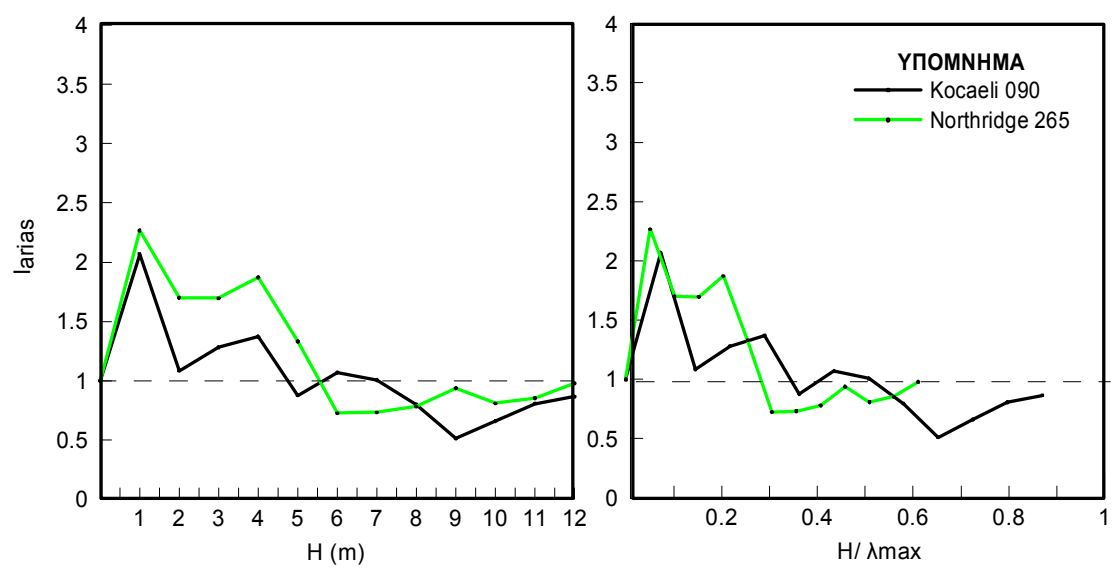
Τέλος, ο δείκτης I_{arias} των διεγέρσεων κατηγορίας Γ παρουσιάζεται στα σχήματα 5.5 και 5.6. Για όλα τα εξεταζόμενα πάχη στρώματος άμμου και με τις δυο μεθόδους ανάλυσης, προβλέπεται τιμή του δείκτη I_{arias} μεγαλύτερη της μονάδας. Όμως, ενώ με τις αναλύσεις μέσω $Flac$ ο δείκτης λαμβάνει τη μέγιστη τιμή (περίπου ίση με 2.5) για μεγάλα πάχη ($H=10m$) στρώματος άμμου, με τις αναλύσεις $Eera$ ο δείκτης λαμβάνει μέγιστη τιμή για μικρά πάχη στρώματος άμμου (ίση με 3.5 για $H=3m$) για τη διέγερση $Chichi$ και για μεσαία και μεγάλα πάχη για τη διέγερση $Ducze$. Όσον αφορά τα διαγράμματα μεταβολής του δείκτη I_{arias} με το λόγο H/λ_{max} , αυτό που παρατηρείται είναι ότι για τις δυο εξεταζόμενες διεγέρσεις για πάχος στρώματος 0-12m, ο λόγος H/λ_{max} περιορίζεται σε τιμές μικρότερες από 0.40. Έτσι η μέγιστη τιμή του δείκτη I_{arias} για τις αναλύσεις $Flac$ λαμβάνεται για $H/\lambda_{max} \approx 0.30$ ενώ για τις αναλύσεις $Eera$ για $H/\lambda_{max} \approx 0.10$.

Αποτελέσματα Flas-Κατηγορία Β

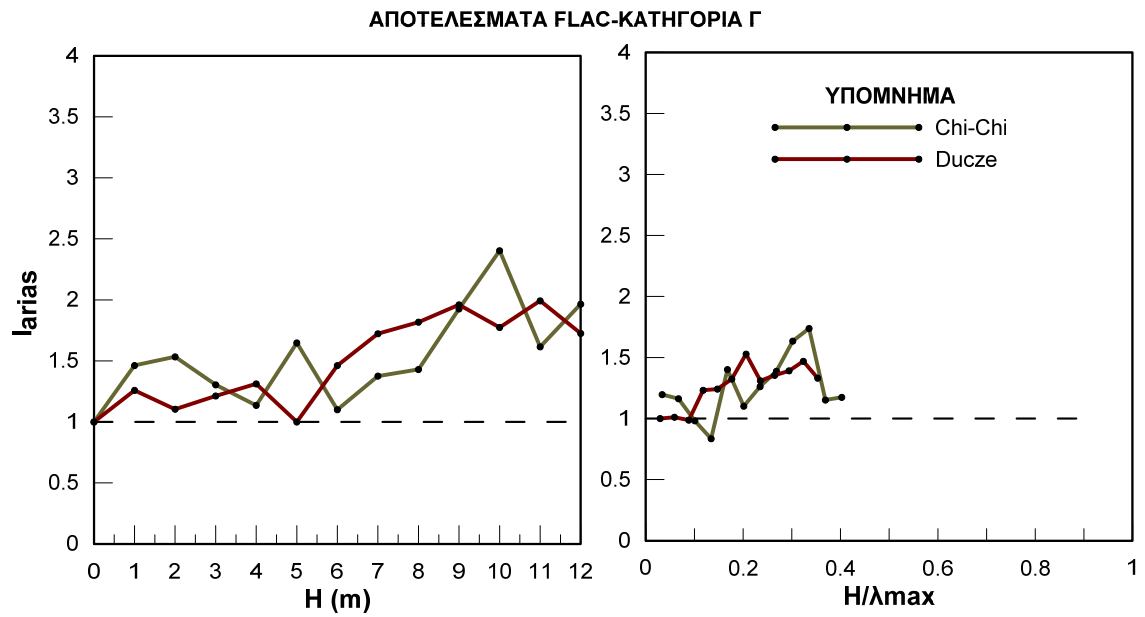


Σχήμα 5.3 Δείκτης Iarias, για τις διεγέρσεις κατηγορίας Β –Αποτελέσματα Flas

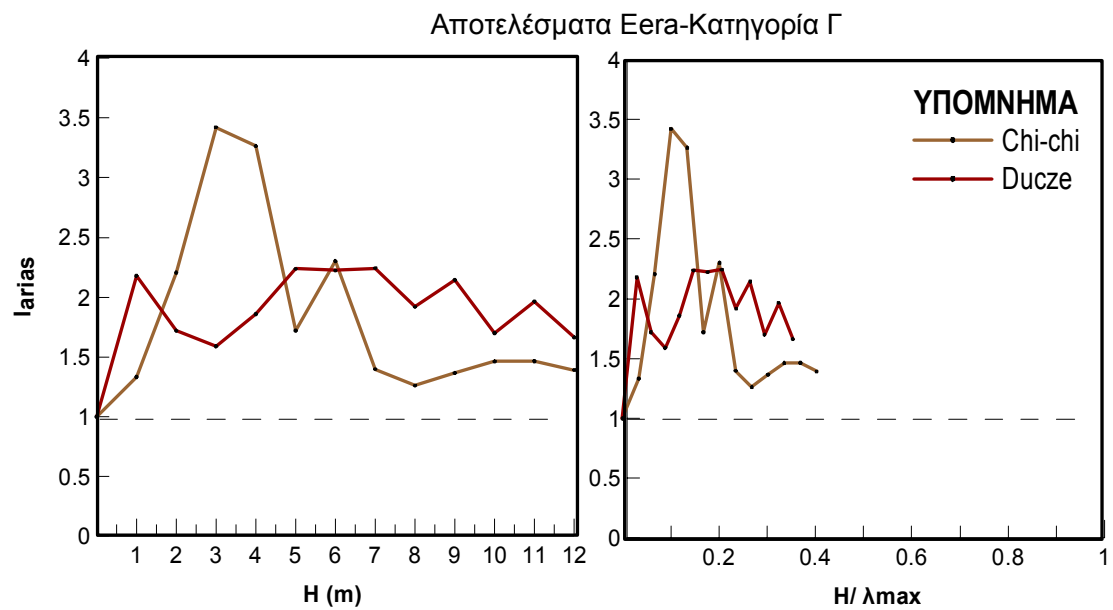
Αποτελέσματα Eera-Κατηγορία Β



Σχήμα 5.4 Δείκτης Iarias, για τις διεγέρσεις κατηγορίας Β –Αποτελέσματα Eera



Σχήμα 5.5 Δείκτης *Iarias*, για τις διεγέρσεις κατηγορίας Γ –Αποτελέσματα *Flac*



Σχήμα 5.6 Δείκτης *Iarias*, για τις διεγέρσεις κατηγορίας Γ–Αποτελέσματα *Eera*

5.3 Φάσματα απόκρισης σε μικρές περιόδους

Στα σχήματα 5.7 και 5.8 παρουσιάζεται η μέση τιμή του λόγου φασμάτων για μικρές περιόδους ($0.05 < T < 0.15 \text{ sec}$) για τις διεγέρσεις κατηγορίας A, όπως προέκυψαν από τις αριθμητικές αναλύσεις μέσω Flac και Eera, αντίστοιχα. Παρατηρούμε ότι οι δυο μέθοδοι ανάλυσης δίνουν διαφορετικά αποτελέσματα όχι μόνο ποσοτικά αλλά και ποιοτικά, δηλαδή ενώ με τη μια μέθοδο ανάλυσης η εδαφική κίνηση ενισχύεται (FLAC) μέσω του στρώματος άμμου για την άλλη αποσβένεται (Eera). Ομοιότητες στα αποτελέσματα παρατηρούνται για τις διεγέρσεις Kobe και Serolia για πάχη στρώματος άμμου μεγαλύτερα από 4m και για τη διέγερση Aigio για πάχη μεγαλύτερα από 6m όπου και οι δυο μέθοδοι καταλήγουν σε απόσβεση της εδαφικής κίνησης μέσω του στρώματος της άμμου. Υπενθυμίζεται ότι και για το δείκτη Iarias τα αποτελέσματα των συγκεκριμένων τριών διεγέρσεων παρουσίαζαν ομοιότητες ενώ για τις υπόλοιπες διεγέρσεις υπήρχαν ουσιαστικές διαφορές.

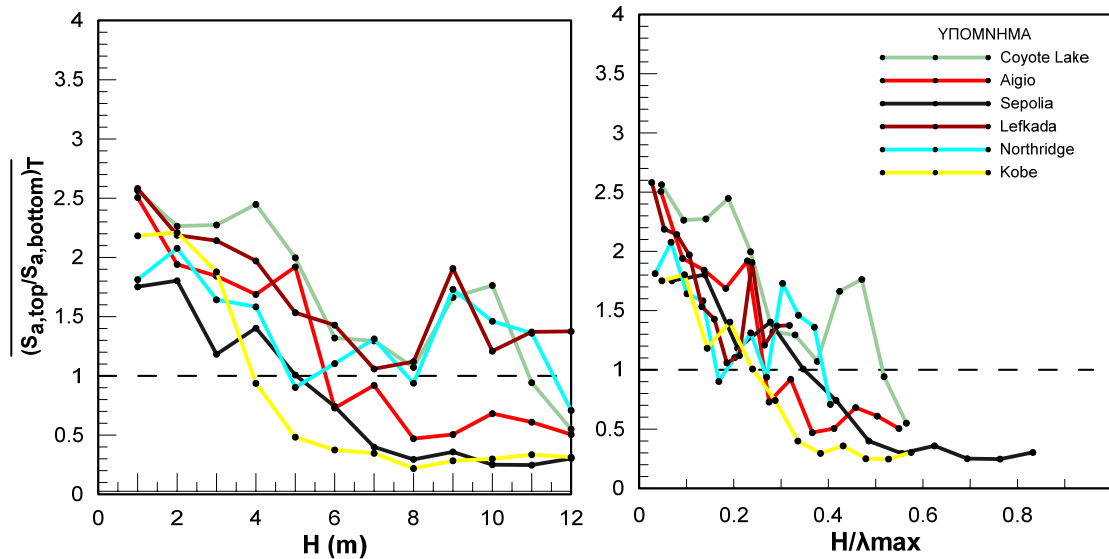
Όσον αφορά την αδιαστατοποίηση που έχει γίνει ως προς το μέγιστο μήκος κύματος λ_{max} , διαπιστώνεται γενικά ότι και για τους δυο τρόπους ανάλυσης οδηγεί σε μείωση του εύρους (σε σχέση με τα διαγράμματα ως προς H) στο οποίο βρίσκονται τα αποτελέσματα των διαφόρων διεγέρσεων. Έτσι, τα αποτελέσματα των αναλύσεων μέσω Flac, θα μπορούσαν να συνοψιστούν ως εξής: ενίσχυση της εδαφικής κίνησης στο πεδίο $H/\lambda_{max} < 0.20$ και απομείωση της εδαφικής κίνησης για $H/\lambda_{max} > 0.40$. Αντίστοιχα, για τα αποτελέσματα μέσω Eera θα μπορούσε να λεχθεί ότι παρατηρούνται τιμές του λόγου φασμάτων κορυφής προς βάση της άμμου μεγαλύτερες της μονάδας για $H/\lambda_{max} < 0.10$ και μικρότερες της μονάδας για $H/\lambda_{max} > 0.10$. Εξαιρέση για τα παραπάνω αποτελεί η διέγερση Coyote Lake, για την οποία και με τις δυο μεθόδους ανάλυσης παρουσιάζεται αποκλίνουσα συμπεριφορά σε σχέση με τις υπόλοιπες διεγέρσεις (απόσβεση για μεγαλύτερα πάχη αλλά και αδιαστατοποιημένα πάχη) αλλά και οι μεγαλύτερες τιμές εδαφικής ενίσχυσης.

Στα σχήματα 5.9 και 5.10 παρουσιάζεται η μεταβολή της μέσης τιμής του λόγου φασμάτων κορυφής και βάσης του στρώματος άμμου για μικρές περιόδους με το πάχος του στρώματος της άμμου για τις δυο διαφορετικές μεθόδους ανάλυσης και για διεγέρσεις κατηγορίας B. Παρατηρούμε ότι δεν υπάρχει καμία ομοιότητα μεταξύ των αποτελεσμάτων που έχουν προκύψει με τις δυο διαφορετικές μεθόδους ανάλυσης. Με τις αναλύσεις με το FLAC παρουσιάζεται ενίσχυση της εδαφικής κίνησης για όλα τα πάχη στρώματος άμμου, με τις μεγαλύτερες τιμές ενίσχυσης να εμφανίζονται για το μικρά και τα μεγάλα πάχη άμμου ($H < 4\text{m}$ ή $H > 9\text{m}$), ενώ για τα μεσαία πάχη ($4 < H < 9\text{m}$) ο εξεταζόμενος λόγος φασμάτων λαμβάνει τιμές έως και 1.5.

Στα σχήματα 5.11 και 5.12, παρουσιάζονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα για τις διεγέρσεις της κατηγορίας Γ. Παρατηρούμε ότι και για αυτές τις διεγέρσεις οι δυο μέθοδοι ανάλυσης, καταλήγουν σε διαφορετικά αποτελέσματα. Έτσι, ενώ με τις αναλύσεις Flac, η εδαφική κίνηση φαίνεται να ενισχύεται για όλα τα πάχη στρώματος άμμου (ειδικά για το μεγάλα πάχη ο λόγος φάσματος κορυφής προς βάση

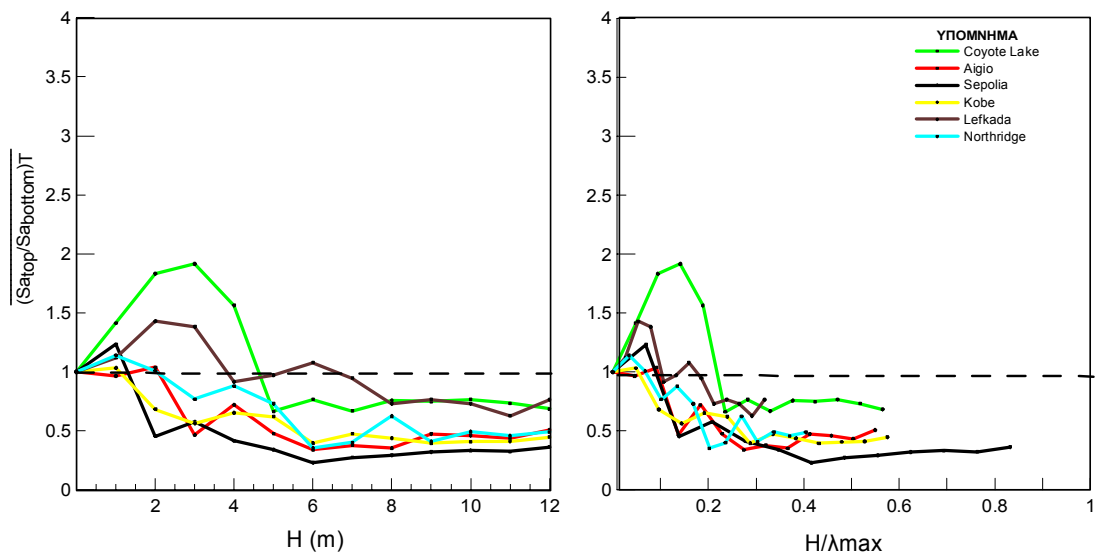
φτάνει έως και 3.5), με τις αναλύσεις Eera η εδαφική κίνηση αποσβένεται για όλα τα πάχη (μέση τιμή λόγου φάσματος κορυφής προς βάση ίση με 0.5 περίπου για όλα τα πάχη στρώματος άμμου) με εξαίρεση ίσως τα μικρά πάχη ($H=1\text{m}$ και $H=2\text{m}$).

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ FLAC-ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ Α

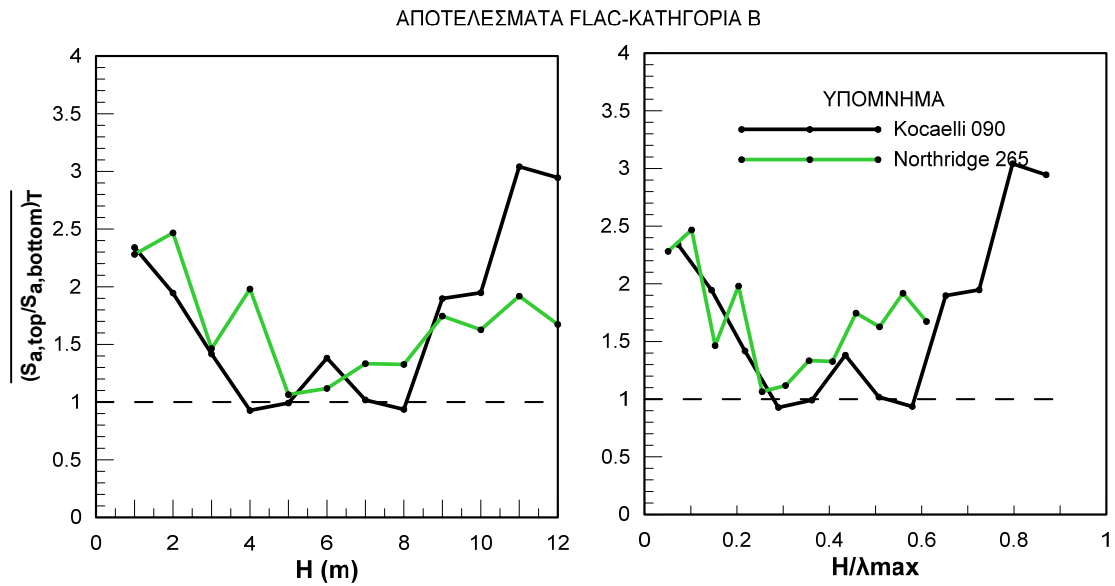


Σχήμα 5.7 Λόγος φάσματος κορυφής προς βάση άμμου, για τις διεγέρσεις κατηγορίας Α- Αποτελέσματα Flac για ΜΙΚΡΕΣ ΠΕΡΙΟΔΟΥΣ

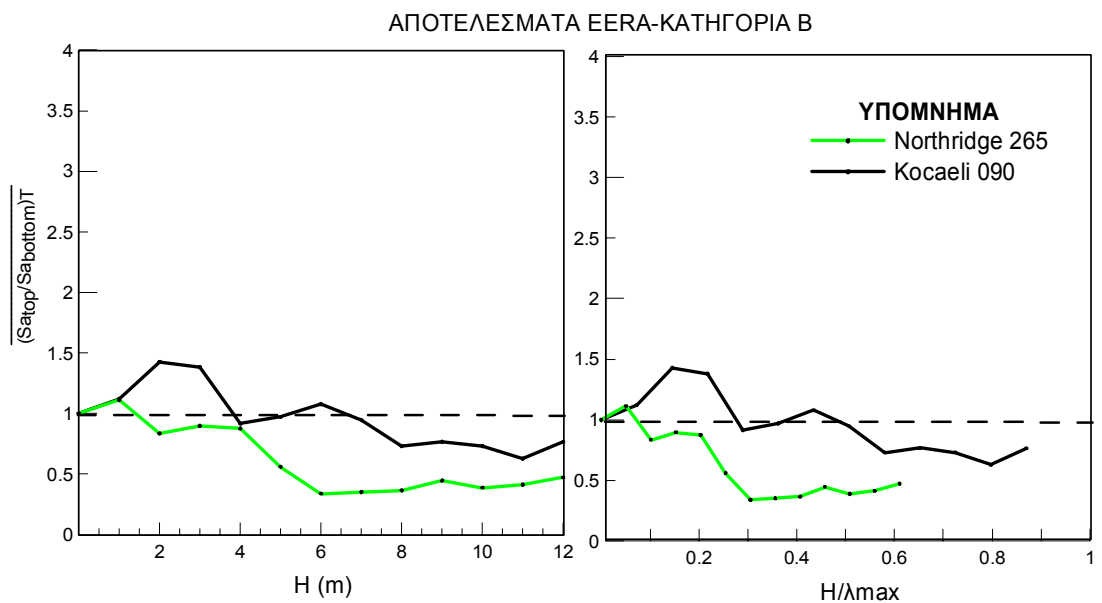
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΕΡΑ-ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ Α



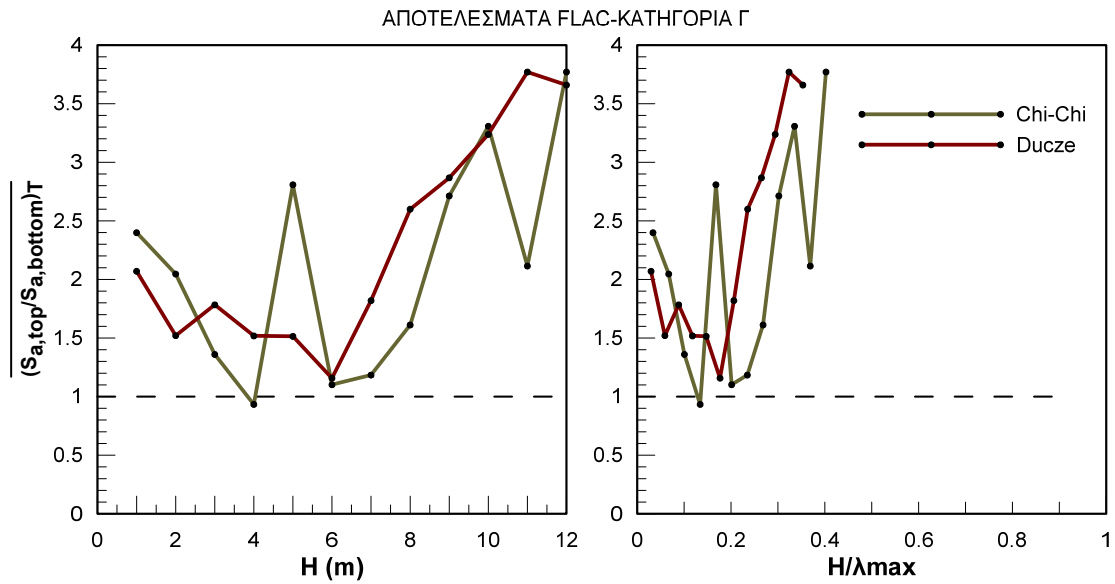
Σχήμα 5.8 Λόγος φάσματος κορυφής προς βάση άμμου, για τις διεγέρσεις κατηγορίας Α- Αποτελέσματα Eera για ΜΙΚΡΕΣ ΠΕΡΙΟΔΟΥΣ



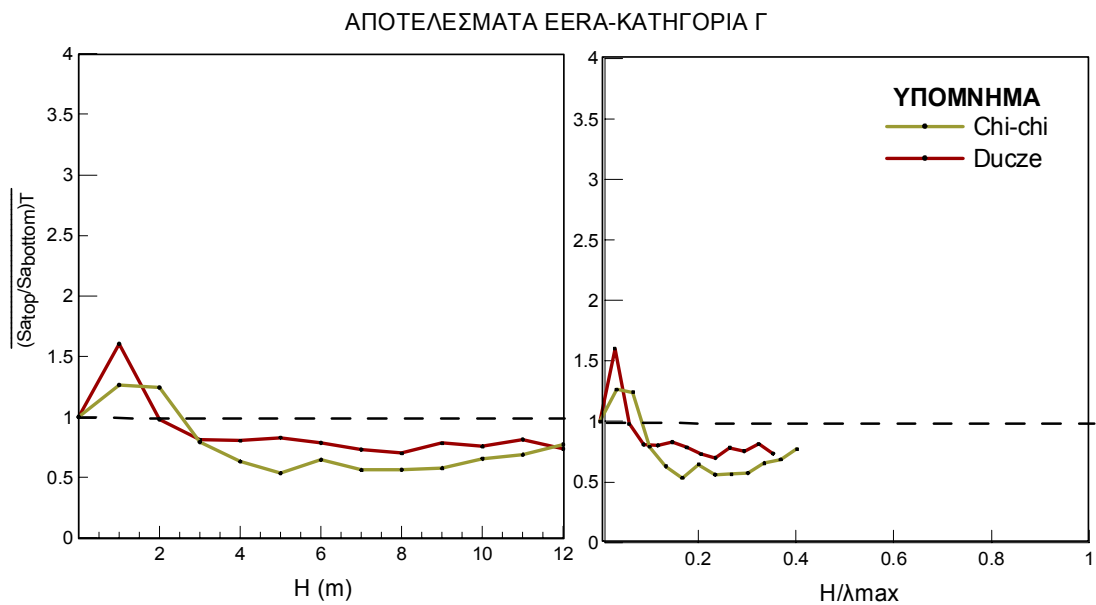
Σχήμα 5.9 Λόγος φάσματος κορυφής προς βάσης άμμου, για τις διεγέρσεις κατηγορίας Β- Αποτελέσματα Flac για ΜΙΚΡΕΣ ΠΕΡΙΟΔΟΥΣ



Σχήμα 5.10 Λόγος φάσματος κορυφής προς βάσης άμμου, για τις διεγέρσεις κατηγορίας Β- Αποτελέσματα Eera για ΜΙΚΡΕΣ ΠΕΡΙΟΔΟΥΣ



Σχήμα 5.11 Λόγος φάσματος κορυφής προς βάσης άμμου, για τις διεγέρσεις κατηγορίας Γ- Αποτελέσματα Flac για ΜΙΚΡΕΣ ΠΕΡΙΟΔΟΥΣ



Σχήμα 5.12 Λόγος φάσματος κορυφής προς βάσης άμμου, για τις διεγέρσεις κατηγορίας Γ- Αποτελέσματα Eera για ΜΙΚΡΕΣ ΠΕΡΙΟΔΟΥΣ

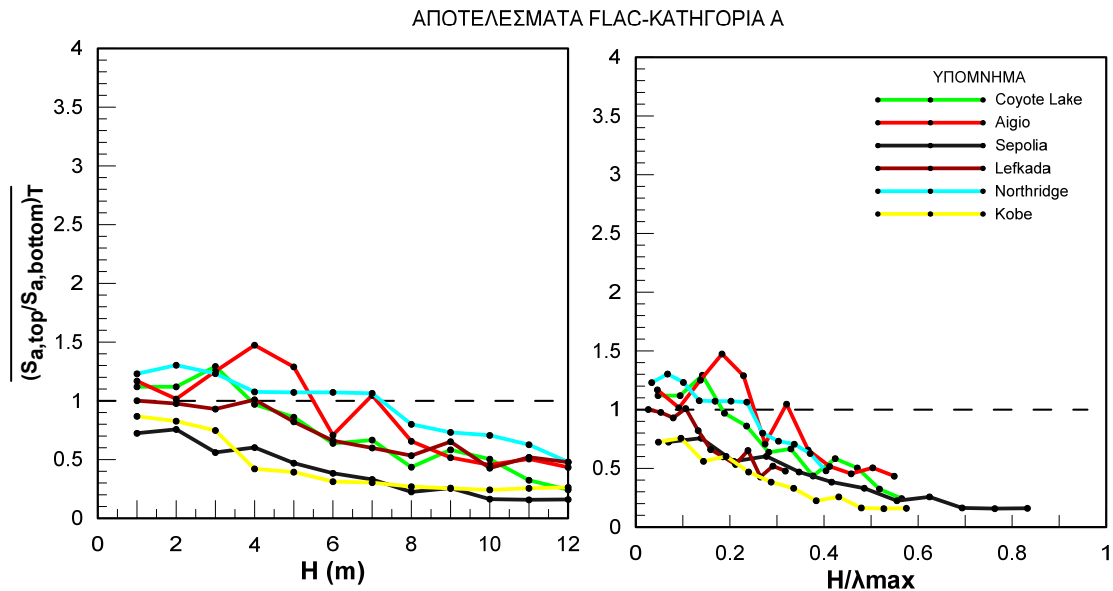
5.4 Φάσματα απόκρισης σε μεσαίες περιόδους

Στα σχήματα 5.13 και 5.14 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δυο μεθόδων ανάλυσης στο εύρος των μεσαίων περιόδων ($0.15 < T < 0.45 \text{sec}$) που αφορούν τη μέση τιμή του λόγου φάσματος κορυφής προς βάση του στρώματος της άμμου. Με τον κώδικα πεπερασμένων διαφορών παρατηρούμε ότι ο εξεταζόμενος δείκτης λαμβάνει τιμές μεγαλύτερες της μονάδας μόνο για τις διεγέρσεις Northridge, Coyote Lake και Aigio και για μικρά πάχη στρώματος άμμου. Για τις υπόλοιπες διεγέρσεις παρατηρείται ότι ο λόγος φασμάτων λαμβάνει τιμές μικρότερες της μονάδας για όλα τα πάχη στρώματος άμμου και μάλιστα όσο αυξάνει το πάχος της άμμου τόσο μειώνεται και ο λόγος φασμάτων. Με τις αναλύσεις Eera, όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 5.14, παρατηρείται μια ενίσχυση της εδαφικής κίνησης μέσω του στρώματος της άμμου για τα μικρά πάχη, ενώ για πάχη στρώματος άμμου μεγαλύτερα από 4m έως 6m περίπου, η εδαφική κίνηση αποσβένεται. Παρατηρείται ότι από τα μεσαία πάχη και μετά όπου ο λόγος φασμάτων λαμβάνει τιμή μικρότερη της μονάδας, όσο αυξάνεται το πάχος του στρώματος της άμμου τόσο μειώνεται η τιμή του λόγου φασμάτων. Έτσι, οι δυο αναλύσεις για πάχη στρώματος άμμου μεγαλύτερα από 4-6m οδηγούν σε απομείωση της εδαφικής κίνησης με τις αναλύσεις μέσω Flac να προβλέπουν συστηματικά μικρότερες τιμές του λόγου φάσματος κορυφής προς βάση σε σχέση με τις αναλύσεις μέσω Eera.

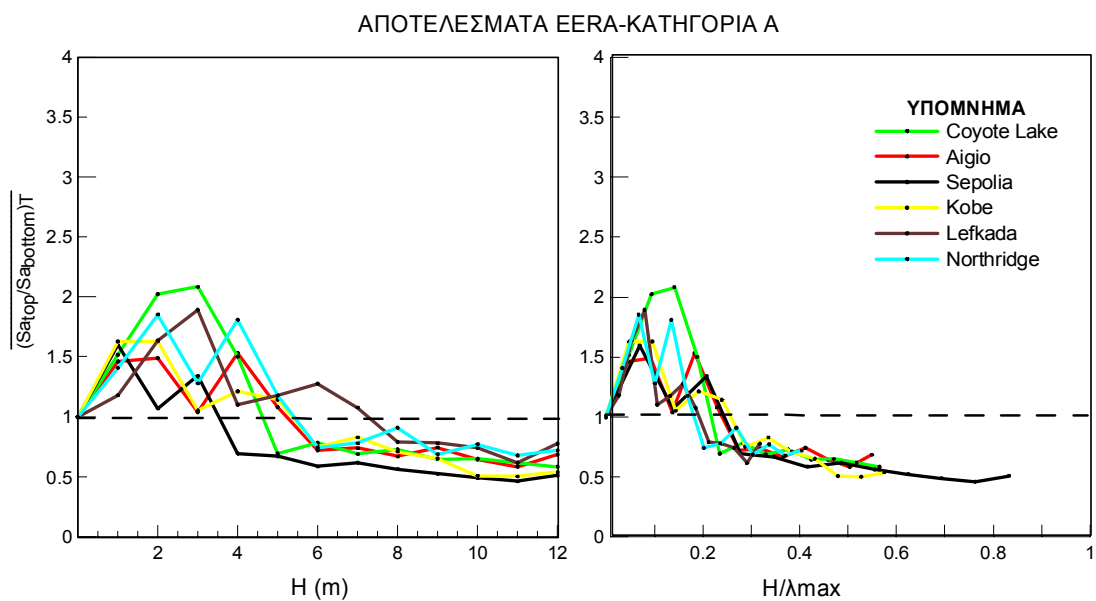
Όσον αφορά τα αντίστοιχα αδιαστοποιημένα γραφήματα αυτό που γίνεται άμεσα αντιληπτό είναι το γεγονός ότι τα αποτελέσματα των διαφορετικών διεγέρσεων (και για τους δυο τρόπους ανάλυσης) παρουσιάζουν διαφορές μεταξύ τους σε μικρότερο εύρος H/λ_{\max} σε σχέση με τα αντίστοιχα διαγράμματα ως προς H . Για τις αναλύσεις μέσω Flac, θα μπορούσε επομένως να λεχθεί ότι για κάποιες διεγέρσεις (διεγέρσεις Northridge, Coyote Lake και Aigio) παρατηρείται ενίσχυση της εδαφικής κίνησης για τιμές $H/\lambda_{\max} < 0.2$ ενώ για μεγαλύτερες τιμές H/λ_{\max} και για τις υπόλοιπες διεγέρσεις παρατηρείται απόσβεση της εδαφικής κίνησης. Για τις αναλύσεις μέσω της ισοδύναμης γραμμικής μεθόδου, παρατηρείται απομείωση της εδαφικής κίνησης για $H/\lambda_{\max} > 0.2$, ενώ για $H/\lambda_{\max} < 0.2$ η εδαφική κίνηση ενισχύεται.

Για τις διεγέρσεις κατηγορίας B, παρατηρούμε στα σχήματα 5.15 και 5.16 ότι οι δυο μέθοδοι ανάλυσης καταλήγουν σε διαφορετικά αποτελέσματα. Συγκεκριμένα, με τις αναλύσεις μέσω Eera προβλέπονται ενισχύσεις της εδαφικής κίνησης για μικρά πάχη στρώματος άμμου (μέγιστη τιμή του λόγου φασμάτων περίπου ίση με 2.0) και αποσβέσεις για μεγαλύτερα πάχη και για τις δυο εξεταζόμενες διεγέρσεις. Με τις αναλύσεις μέσω του κώδικα πεπερασμένων διαφορών Flac, παρατηρούμε ότι η διεγερση Northridge παρουσιάζει λόγο φασμάτων κορυφής προς βάση μικρότερο της μονάδας για όλα τα εξεταζόμενα πάχη στρώματος της άμμου ενώ η διεγερση Kocaeli090 παρουσιάζει ανάλογη συμπεριφορά με εξαίρεση τα μεγάλα πάχη στα οποία παρατηρείται ενίσχυση της εδαφικής κίνησης.

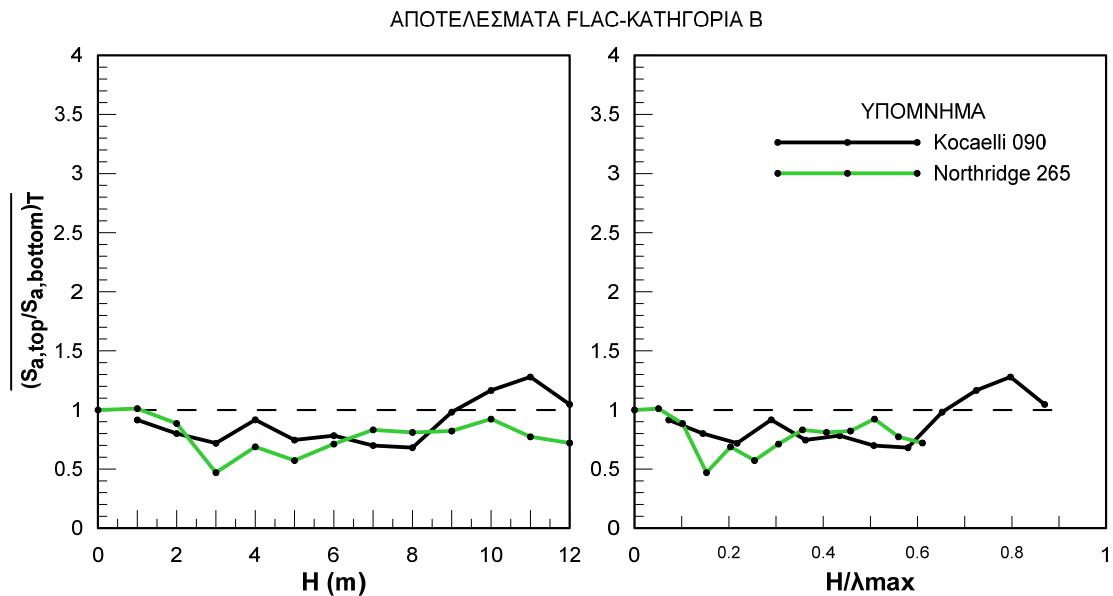
Στα αδιαστατοποιημένα διαγράμματα, παρατηρούμε ότι για τις αναλύσεις μέσω της ισοδύναμης γραμμικής μεθόδου η αδιαστατοποίηση δεν οδηγεί σε μείωση του εύρους όπου παρατηρούνται διαφορές μεταξύ διεγέρσεων σε όρους H/λ_{max} . Αντίθετα, με τις αναλύσεις Flac παρατηρείται ότι η διαφορά μεταξύ των δυο διεγέρσεων που εξετάζονται - μικρή ενίσχυση για τη διέγερση Kocaeli 090 για μεγάλα πάχη στρώματος - σημειώνεται για μεγάλες τιμές H/λ_{max} (>0.6). Για τη διέγερση Northridge 265, τα εξεταζόμενα πάχη στρώματος άμμου αφορούν τιμές $H/\lambda_{max} < 0.6$



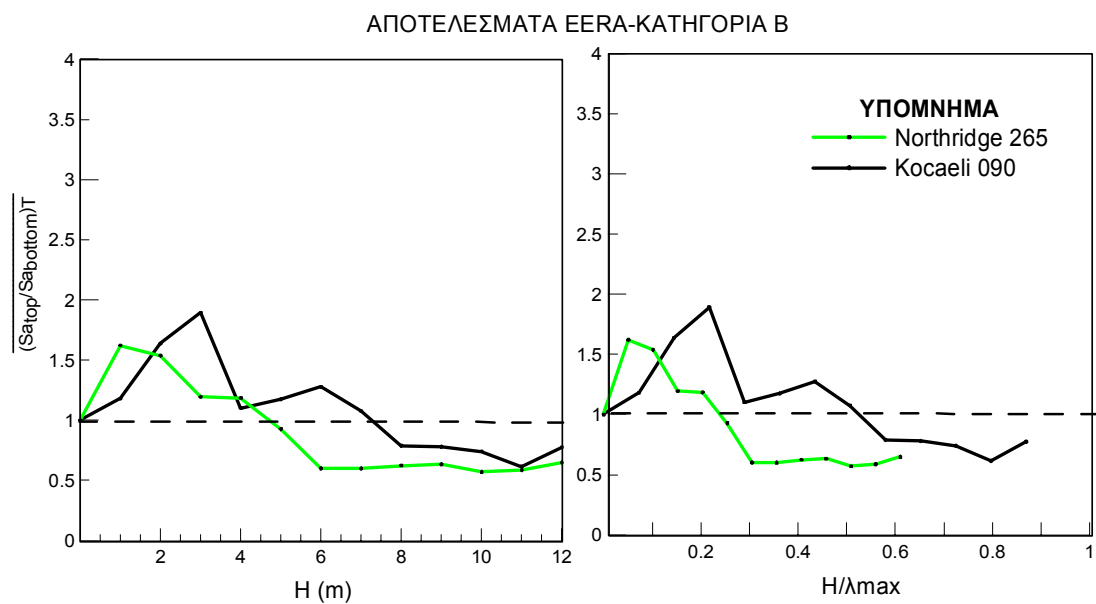
Σχήμα 5.13 Λόγος φάσματος κορυφής προς βάσης άμμου, για τις διεγέρσεις κατηγορίας Α- Αποτελέσματα Flac για ΜΕΣΑΙΕΣ ΠΕΡΙΟΔΟΥΣ



Σχήμα 5.14 Λόγος φάσματος κορυφής προς βάσης άμμου, για τις διεγέρσεις κατηγορίας Α- Αποτελέσματα Eera για ΜΕΣΑΙΕΣ ΠΕΡΙΟΔΟΥΣ



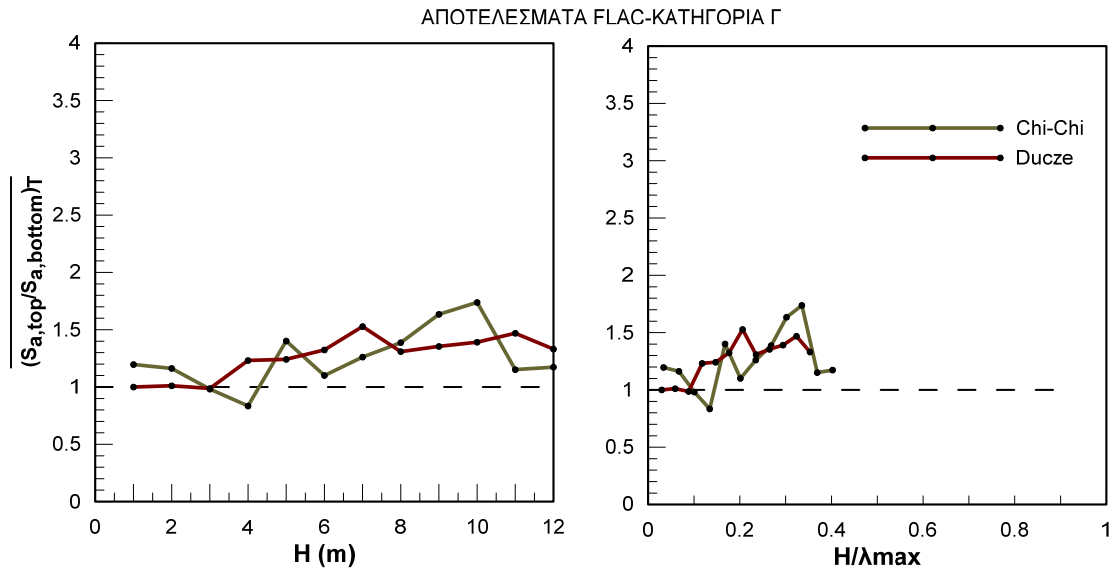
Σχήμα 5.15 Λόγος φάσματος κορυφής προς βάσης άμμου, για τις διεγέρσεις κατηγορίας Β- Αποτελέσματα Flac για ΜΕΣΑΙΕΣ ΠΕΡΙΟΔΟΥΣ



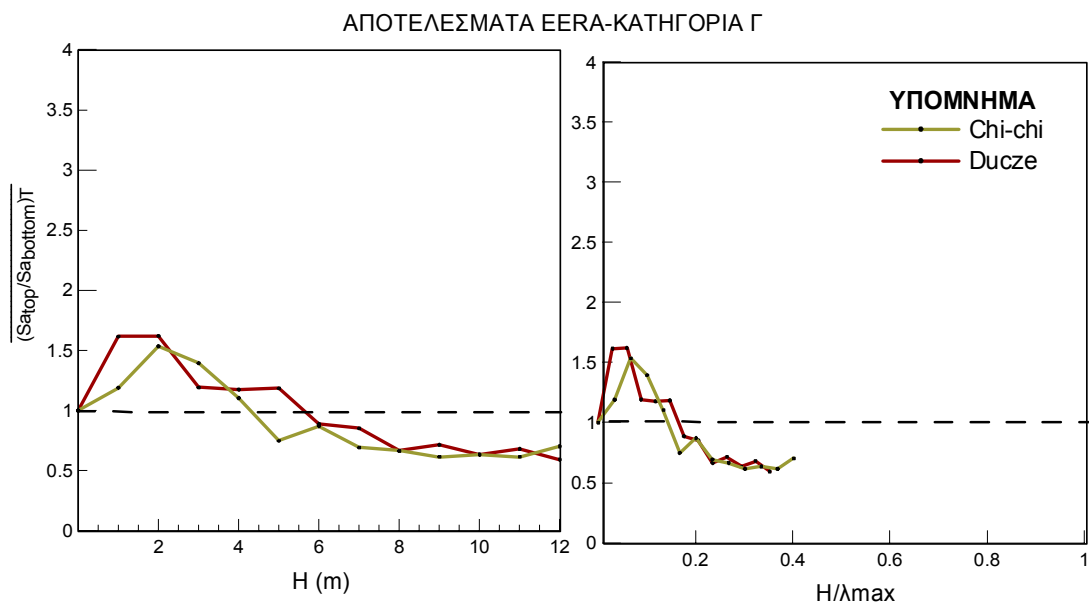
Σχήμα 5.16 Λόγος φάσματος κορυφής προς βάσης άμμου, για τις διεγέρσεις κατηγορίας Β- Αποτελέσματα Eera για ΜΕΣΑΙΕΣ ΠΕΡΙΟΔΟΥΣ

Τέλος, για τις διεγέρσεις κατηγορίας Γ παρατηρούμε ότι δεν υπάρχουν ομοιότητες στα αποτελέσματα που προκύπτουν από τις δυο μεθόδους ανάλυσης. Έτσι ενώ οι αναλύσεις Flac καταλήγουν σε ενίσχυση της εδαφικής κίνησης για όλα σχεδόν τα πάχη στρώματος άμμου (με εξαίρεση ίσως τα μικρά πάχη όπου ο εν λόγω δείκτης βρίσκεται κοντά στη μονάδα), οι αναλύσεις Eera προβλέπουν ενίσχυση για μικρά

πάχη ($H < 5m$) και απόσβεση για τα μεγαλύτερα. Η ουσιαστική διαφορά των δυο μεθόδων (ποιοτική) εντοπίζεται στα μεγάλα πάχη στρώματος ενώ στα μικρά πάχη η διαφορά είναι τουλάχιστον μόνο ποσοτική. Όσο για τα αντίστοιχα διαγράμματα ως προς το αδιαστατοποιημένο πάχος, παρατηρείται μείωση του εύρους σε όρους H/λ_{max} στο οποίο παρατηρούνται διαφορές μεταξύ των διεγέρσεων.



Σχήμα 5.17 Λόγος φάσματος κορυφής προς βάσης άμμου, για τις διεγέρσεις κατηγορίας Γ- Αποτελέσματα Flac για ΜΕΣΑΙΕΣ ΠΕΡΙΟΔΟΥΣ



Σχήμα 5.18 Λόγος φάσματος κορυφής προς βάσης άμμου, για τις διεγέρσεις κατηγορίας Γ- Αποτελέσματα Eera για ΜΕΣΑΙΕΣ ΠΕΡΙΟΔΟΥΣ

5.5 Φάσματα απόκρισης σε μεγάλες περιόδους

Στα σχήματα 5.19 και 5.20 παρουσιάζεται η μέση τιμή του λόγου φασμάτων κορυφής και βάσης άμμου, στο πεδίο των μεγάλων περιόδων ($T > 0.45$) για τις διεγέρσεις κατηγορίας Α.

Οι αναλύσεις με τον κώδικα πεπερασμένων διαφορών έχουν ως αποτέλεσμα μικρές ενισχύσεις της εδαφικής κίνησης μέσω του στρώματος της άμμου για πάχη στρώματος άμμου μικρότερα από 5-8m ή για λόγο H/λ_{max} μικρότερο από 0.2-0.4 (με εξαίρεση τη διεγερση Sepolia, η οποία σχολιάζεται παρακάτω). Η αδιαστατοποίηση του πάχους του στρώματος της άμμου ως προς τη μέγιστη τιμή του μήκους κύματος στο ρευστοποιημένο στρώμα δεν προσφέρει ουσιαστική μείωση των διαφορών που παρατηρούνται μεταξύ των αποτελεσμάτων που αφορούν διαφορετικές διεγέρσεις.

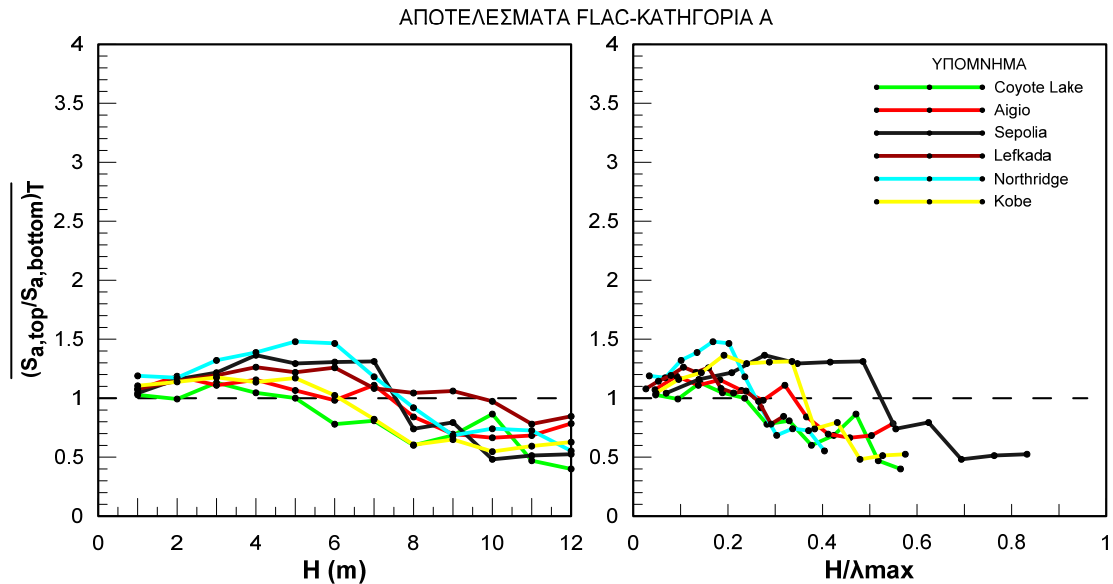
Με τις αναλύσεις μέσω της ισοδύναμης γραμμικής μεθόδου, παρατηρούνται ενισχύσεις της εδαφικής κίνησης για όλα τα εξεταζόμενα πάχη στρώματος άμμου. Η μέγιστη τιμή του λόγου φασμάτων είναι περίπου ίση με 2.4 (η αντίστοιχη τιμή για τις αναλύσεις Flac είναι 1.5). Η αδιαστατοποίηση του πάχους του στρώματος της άμμου, περιορίζει τις παρατηρηθείσες διαφορές μεταξύ των διαφορετικών διεγέρσεων.

Ιδιαίτερη μνεία γίνεται για τη διεγερση Sepolia, για την οποία ενώ στα διαγράμματα της μέσης τιμής του λόγου φασμάτων ως προς το πάχος H τα αποτελέσματα είναι ανάλογα των υπόλοιπων διεγέρσεων, στα διαγράμματα ως προς H/λ_{max} τα αποτελέσματα παρουσιάζουν διαφορές σε σχέσεις με τις υπόλοιπες διεγέρσεις. Η παρατήρηση αυτή ισχύει και για τις δυο μεθόδους ανάλυσης και οφείλεται στην μικρή τιμή λ_{max} που προκύπτει για όλα τα εξεταζόμενα πάχη στρώματος άμμου εξαιτίας της μικρής τιμής T_{max} που έχει προκύψει.

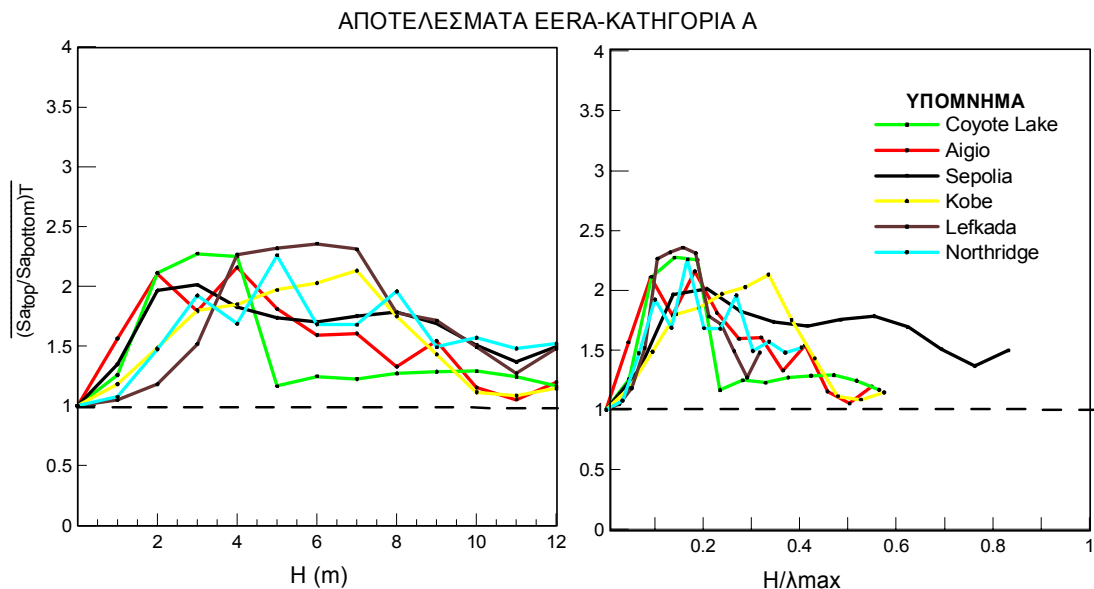
Τα αντίστοιχα αποτελέσματα που αφορούν τις διεγέρσεις κατηγορίας Β παρουσιάζονται στα σχήματα 5.21 και 5.22. Σε αυτήν την περίπτωση παρατηρούνται σημαντικές ομοιότητες μεταξύ των δυο διαφορετικών τρόπων ανάλυσης. Για όλα τα εξεταζόμενα πάχη και με τις δυο μεθόδους η σεισμική κίνηση ενισχύεται μέσω του στρώματος της άμμου. Η μέγιστη ενίσχυση με τις αναλύσεις Flac είναι ίση με 1.5 ενώ με τις αναλύσεις Eera 2.3 και παρατηρείται και για τις δυο διεγέρσεις στα μεσαία πάχη στρώματος άμμου (5-9m για το Flac και 3-7m) για το Eera. Η αδιαστατοποίηση του πάχους του στρώματος της άμμου ως προς τη μέγιστη τιμή του μήκους κύματος όπως έχει οριστεί προηγουμένως, φαίνεται να οδηγεί σε μεγαλύτερη διασπορά των αποτελεσμάτων των διαφορετικών διεγέρσεων και για τους δυο τρόπους ανάλυσης.

Τέλος, στα σχήματα 5.23 και 5.24 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που αφορούν τις διεγέρσεις της κατηγορίας Γ. Για αυτήν την κατηγορία διεγέρσεων παρατηρούνται τιμές του εξεταζόμενου δείκτη μεγαλύτερες της μονάδας για όλα τα πάχη ρευστοποιημένου στρώματος (1 έως 12m) και για με τις δυο μεθόδους ανάλυσης. Με τις αναλύσεις με το Eera η μέγιστη τιμή που λαμβάνει ο εν λόγω δείκτης είναι ίση με

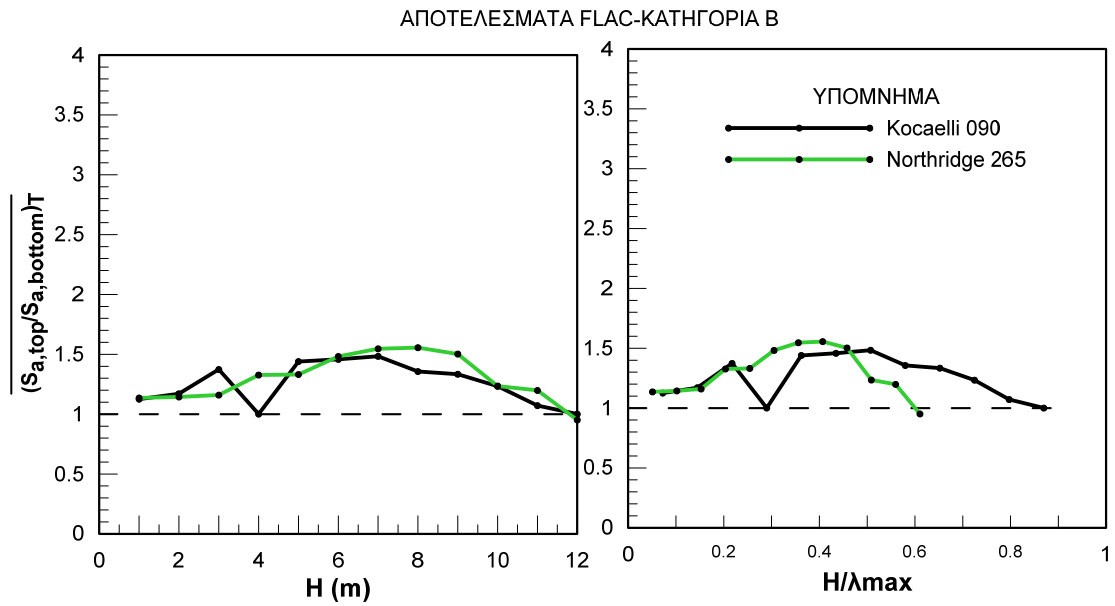
2 και αφορά πάχη στρώματος 2 έως 7m ή λόγο H/λ_{max} από 0.10 έως 0.20, δηλαδή η αδιαστατοποίηση του πάχους μειώνει σημαντικά τις διαφορές που παρατηρούνται μεταξύ των εξεταζόμενων διεγέρσεων. Με τις αναλύσεις μέσω Flac, η μέγιστη τιμή του λόγου φασμάτων είναι περίπου ίση με 1.5 και παρατηρείται για ένα σημαντικό εύρος H (μεγαλύτερο από 4m) ή για H/λ_{max} (μεγαλύτερο από 0.10)



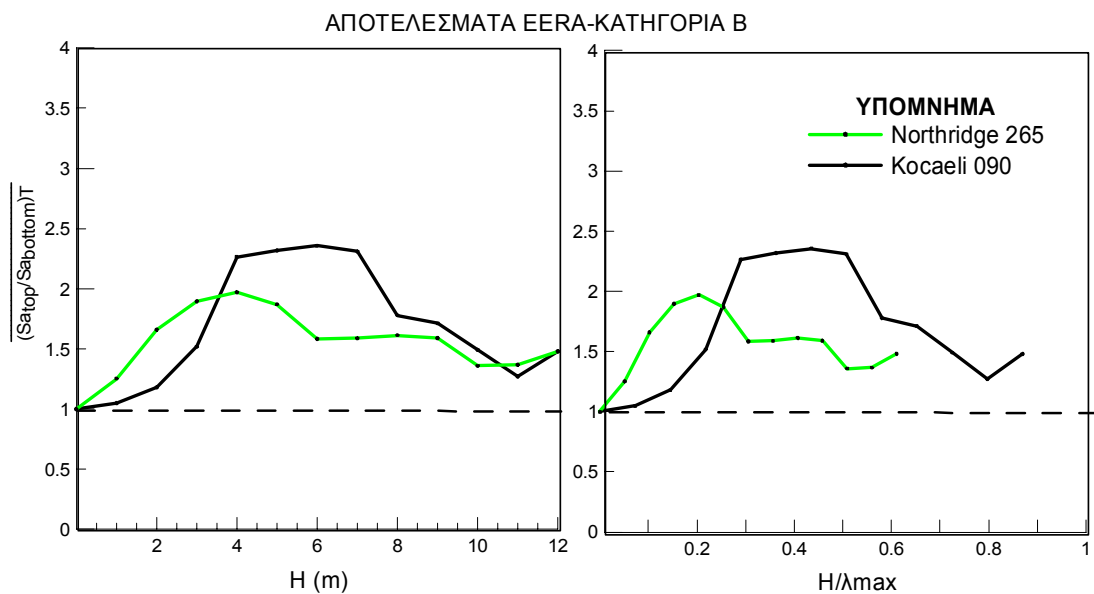
Σχήμα 5.19 Λόγος φάσματος κορυφής προς βάσης άμμου, για τις διεγέρσεις κατηγορίας Α- Αποτελέσματα Flac για ΜΕΓΑΛΕΣ ΠΕΡΙΟΔΟΥΣ



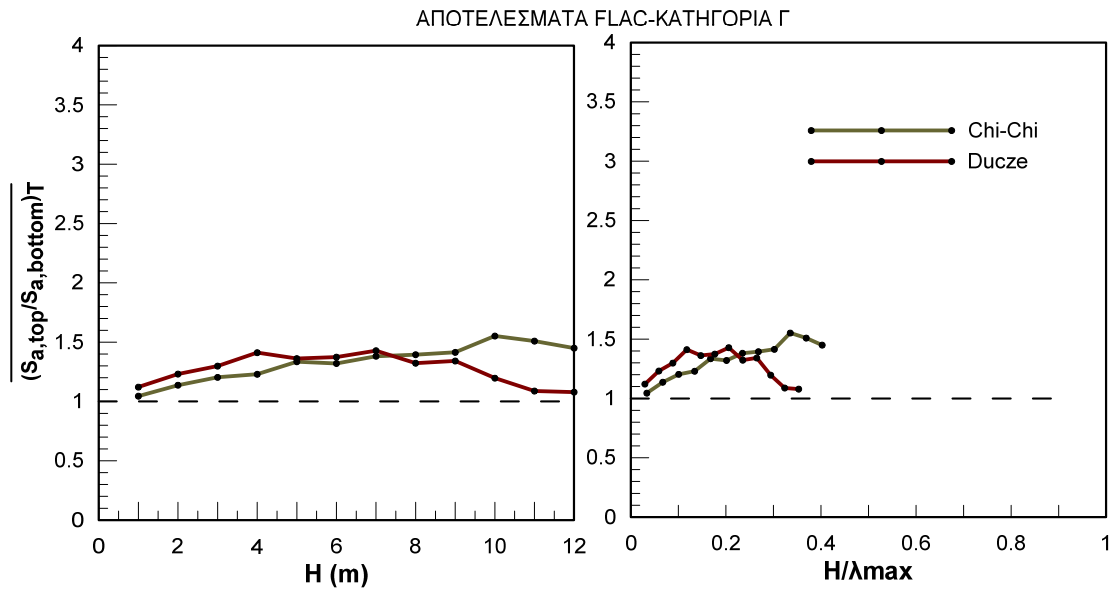
Σχήμα 5.20 Λόγος φάσματος κορυφής προς βάσης άμμου, για τις διεγέρσεις κατηγορίας Α- Αποτελέσματα Eera για ΜΕΓΑΛΕΣ ΠΕΡΙΟΔΟΥΣ



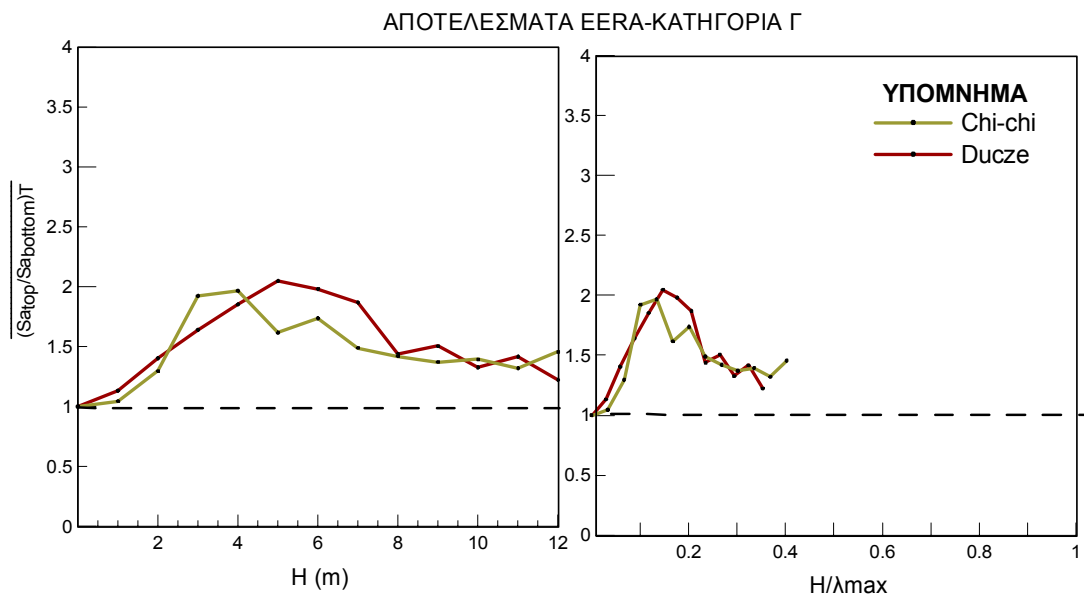
Σχήμα 5.21 Λόγος φάσματος κορυφής προς βάσης άμμου, για τις διεγέρσεις κατηγορίας Β-Αποτελέσματα Flac για ΜΕΓΑΛΕΣ ΠΕΡΙΟΔΟΥΣ



Σχήμα 5.22 Λόγος φάσματος κορυφής προς βάσης άμμου, για τις διεγέρσεις κατηγορίας Β-Αποτελέσματα Eera για ΜΕΓΑΛΕΣ ΠΕΡΙΟΔΟΥΣ



Σχήμα 5.23 Λόγος φάσματος κορυφής προς βάση άμμου, για τις διεγέρσεις κατηγορίας Γ- Αποτελέσματα Flac για ΜΕΓΑΛΕΣ ΠΕΡΙΟΔΟΥΣ



Σχήμα 5.24 Λόγος φάσματος κορυφής προς βάση άμμου, για τις διεγέρσεις κατηγορίας Γ- Αποτελέσματα Eera για ΜΕΓΑΛΕΣ ΠΕΡΙΟΔΟΥΣ

6. Διερεύνηση αποτελεσμάτων

6.1 Γενικά

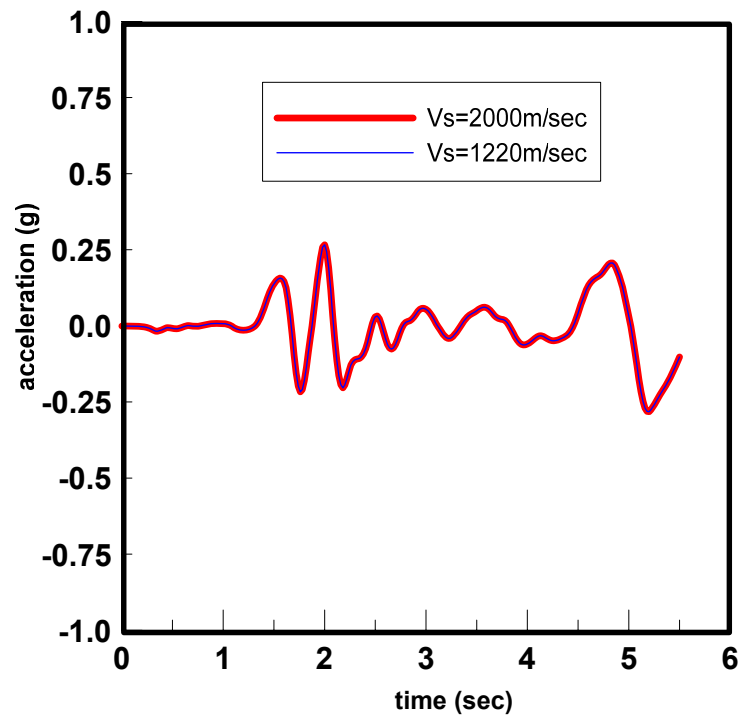
Στην παρούσα ενότητα διερευνάται η επίδραση στα αποτελέσματα ορισμένων παραδοχών που ελήφθησαν κατά την εκτέλεση των παραμετρικών αναλύσεων με την ισοδύναμη γραμμική μέθοδο (Eera). Στόχος του κεφαλαίου αυτού είναι εφ' όσον εντοπιστούν παραδοχές με σημαντική επίδραση στα αποτελέσματα να αξιολογηθεί κατά πόσον θα μπορούσαν να ερμηνεύσουν τις διαφορές που παρουσιάζονται στα αποτελέσματα μέσω της ισοδύναμης γραμμικής μεθόδου και του κώδικα πεπερασμένων διαφορών και οι οποίες παρουσιάστηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια.

6.2 Ταχύτητα διάδοσης διατμητικού κύματος στο βραχώδες υπόβαθρο

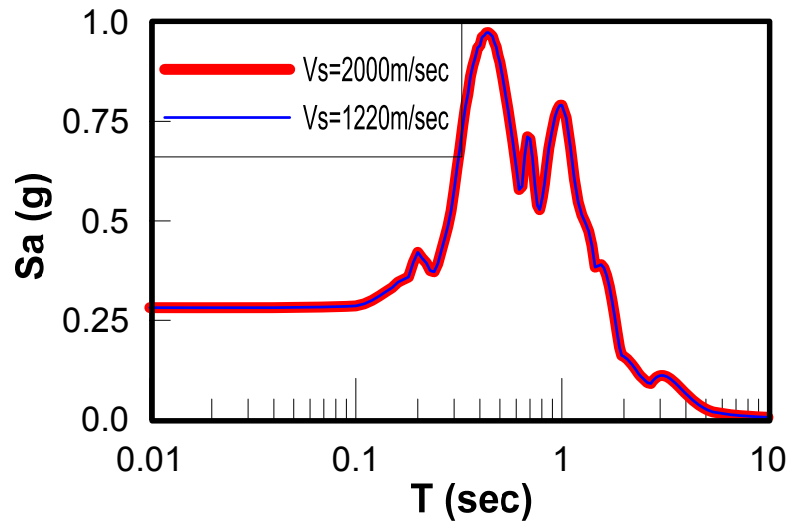
Αρχικά ελέγχθηκε κατά πόσο η ταχύτητα διάδοσης του σεισμικού κύματος στο βραχώδες υπόβαθρο αποτελεί παράμετρο που επηρεάζει το υπό εξέταση φαινόμενο. Η παραδοχή αυτή ελέγχεται μιας και στις αναλύσεις πεπερασμένων διαφορών θεωρήθηκε άκαμπτο υπόβαθρο, ενώ στις αναλύσεις EERA υπήρχε έστω και μικρή απόσβεση ακτινοβολίας. Συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκαν για τη διέγερση Northridge 265 αναλύσεις με την ισοδύναμη γραμμική μέθοδο (Eera) για όλα τα πάχη στρώματος άμμου (από 1 έως 12m) με ταχύτητα διάδοσης V_s διατμητικού κύματος V_s στο βραχώδες υπόβαθρο ίση με 1200m/sec. Υπενθυμίζεται ότι για τις αναλύσεις που παρουσιάστηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια η ταχύτητα διάδοσης των διατμητικών κυμάτων στο βραχώδες υπόβαθρο είχε ληφθεί ίση με 2000m/sec. Η τιμή ταχύτητας διάδοσης κυμάτων 1200m/sec επιλέχτηκε ώστε σε συνδυασμό με την τιμή 2000m/sec (η οποία χρησιμοποιήθηκε στις βασικές να αναλύσεις) να καλύπτει ένα σύνηθες εύρος τιμών που λαμβάνονται για βραχώδες υπόβαθρο.

Η ταχύτητα διάδοσης διατμητικού κύματος στο βραχώδες υπόβαθρο δε φάνηκε να επηρεάζει τα αποτελέσματα (για τις τιμές 1200 και 2000m/sec που ελέγχθηκαν). Ενδεικτικά παρατίθενται τα επιταχυνσιογραφήματα (Σχήμα 6.1) και το φάσμα (Σχήμα 6.2) στην κορυφή της αμμώδους στρώσης πάχους $H=10m$, για τις δυο εξεταζόμενες περιπτώσεις ταχύτητας διάδοσης διατμητικών κυμάτων.

Επομένως, η ταχύτητα διάδοσης των διατμητικών κυμάτων στο βραχώδες υπόβαθρο δεν είναι παράγοντας που επηρεάζει τα αποτελέσματα (για ταχύτητες διάδοσης αντιπροσωπευτικές του συνηθούς εύρους για βραχώδες υπόβαθρο).



Σχήμα 6.1. Επιταχυνσιογράφημα στην κορυφή της άμμου για ταχύτητα διάδοσης κυμάτων στο βραχώδες υπόβαθρο ίση με 1220m/sec και 2000m/sec



Σχήμα 6.2. Φάσμα στην κορυφή της άμμου για ταχύτητα διάδοσης κυμάτων στο βραχώδες υπόβαθρο ίση με 1220m/sec και 2000m/sec

6.3 Ταχύτητα διάδοσης διατμητικού κύματος στο ρευστοποιήσιμο στρώμα

Στο στάδιο αυτό διερευνήθηκε αν η θεώρηση σταθερής τιμής ταχύτητας διάδοσης διατμητικών κυμάτων στο αμμώδες στρώμα είναι καθοριστικός παράγοντας για την εξέλιξη του υπό μελέτη φαινομένου.

Όπως προαναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 4.2.3, ως ταχύτητα διάδοσης των διατμητικών κυμάτων στο αμμώδες στρώμα επιλέχτηκε η τιμή που έχει προκύψει από προγενέστερη έρευνα (Κουτσογούλα 2012) μέσω αριθμητικών αναλύσεων (κώδικας πεπερασμένων διαφορών FLAC) για κάθε περίπτωση διέγερσης και πάχους του στρώματος της άμμου. Υπενθυμίζεται ότι στην εν λόγω διπλωματική εργασία είχε βρεθεί ότι η ταχύτητα μετάδοσης σεισμικών κυμάτων S (V_{sliq}) παραμένει πρακτικά σταθερή για πάχη ρευστοποιήσιμου εδάφους $H_{liq} \geq (4-5)m$. Η τιμή που προέκυψε από τις αριθμητικές αναλύσεις είναι ίση με $0.40 \pm 0.10 V_{so}$ για πάχη πάνω από 5m και $0.45 \pm 0.05 V_{so}$ για μικρότερα πάχη. Ωστόσο στα πλαίσια της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκαν οι ακριβείς τιμές της ταχύτητας διάδοσης των σεισμικών κυμάτων όπως συνοψίζονται στον Πίνακα 4.1.

Στην ενότητα αυτή ελέγχεται αν η θεώρηση μεταβλητής καθ' ύψος ταχύτητας διάδοσης των διατμητικών κυμάτων στο αμμώδες στρώμα επηρεάζει τις εξεταζόμενες παραμέτρους (επιταχυνσιογραφήματα, φάσματα, δείκτης Arias, μέση τιμή λόγου φασμάτων κορυφής προς βάση άμμου). Έτσι, συγκρίνονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων με την ισοδύναμη γραμμική ανάλυση με θεώρηση σταθερής τιμής ταχύτητας διάδοσης στο στρώμα της άμμου με τα αντίστοιχα που προκύπτουν με θεώρηση μεταβλητής ταχύτητας διάδοσης διατμητικών κυμάτων στο στρώμα αυτό.

Συγκεκριμένα, για τις αναλύσεις με μεταβλητή ταχύτητα καθ' ύψος, επιλέχτηκε η ταχύτητα διάδοσης του κύματος να μεταβάλλεται με βάση την ακόλουθη σχέση:

$$V_i = \beta_0 z_i^{1/4} \quad (6.1)$$

όπου V_i η ταχύτητα διάδοσης του διατμητικού κύματος στο βάθος i

β_0 σταθερά που προσδιορίζεται όπως εξηγείται παρακάτω

z_i βάθος του σημείου i μετρούμενο από την επιφάνεια του εδάφους

Η σταθερά β_0 υπολογίζεται έτσι ώστε η θεώρηση μεταβλητής ταχύτητας να ισοδυναμεί με μέση ταχύτητα ίση με αυτή που γίνεται κατά τη θεώρηση σταθερής ταχύτητας (δηλαδή η σταθερά β_0 επιλέγεται ώστε ο απαιτούμενος χρόνος προκειμένου το διατμητικό κύμα να διασχίσει το αμμώδες στρώμα να είναι ο ίδιος).

Πρακτικά το αμμώδες στρώμα υποδιαιρείται σε ζώνες πάχους s και υπολογίζεται η ταχύτητα διάδοσης του κύματος σε αυτό το στρώμα από τη σχέση (5.1) για z ίσο με το βάθος του μέσου του στρώματος.

Έτσι με θεώρηση σταθερής ταχύτητας ισχύει η σχέση:

$$\frac{1}{V} = \frac{t}{H} \quad (6.2)$$

όπου

V η ταχύτητα διάδοσης του διατμητικού κύματος στο αμμώδες στρώμα (Πίνακας 4.1)

t χρόνος που απαιτείται για να διασχίσει το κύμα το στρώμα της άμμου

H πάχος στρώματος άμμου

Με θεώρηση μεταβλητής ταχύτητας ισχύει η σχέση

$$\sum_{i=1}^n \frac{1}{u_i} = \frac{t_1}{s} + \frac{t_2}{s} + \dots + \frac{t_n}{s} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{s} = \frac{t}{s} \quad (6.3)$$

όπου

$u_1 = \frac{s}{t_1}$ ταχύτητα διάδοσης διατμητικού κύματος στο στοιχειώδες στρώμα 1 πάχους s

$u_2 = \frac{s}{t_2}$ ταχύτητα διάδοσης διατμητικού κύματος στο στοιχειώδες στρώμα 2 πάχους s

$u_n = \frac{s}{t_n}$ ταχύτητα διάδοσης διατμητικού κύματος στο στοιχειώδες στρώμα n πάχους s

t_1, t_2, \dots, t_n ο χρόνος που απαιτείται για να διασχίσει το κύμα στο στρώμα 1, 2, ..., n

t χρόνος που απαιτείται για να διασχίσει το κύμα το στρώμα της άμμου

$s=H/n$ το πάχος του κάθε στοιχειώδους στρώματος

Από τις σχέσεις (5.1) και (5.2) συνεπάγεται

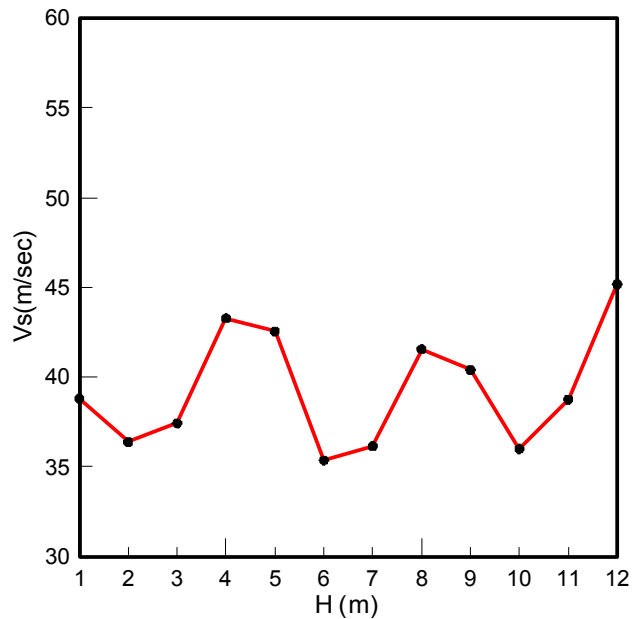
$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{u_i} = \frac{1}{V} \quad (6.4)$$

Έτσι η τιμή της σταθεράς β_0 επιλέγεται (με επαναληπτική διαδικασία) ώστε να επαληθεύεται η σχέση (6.4).

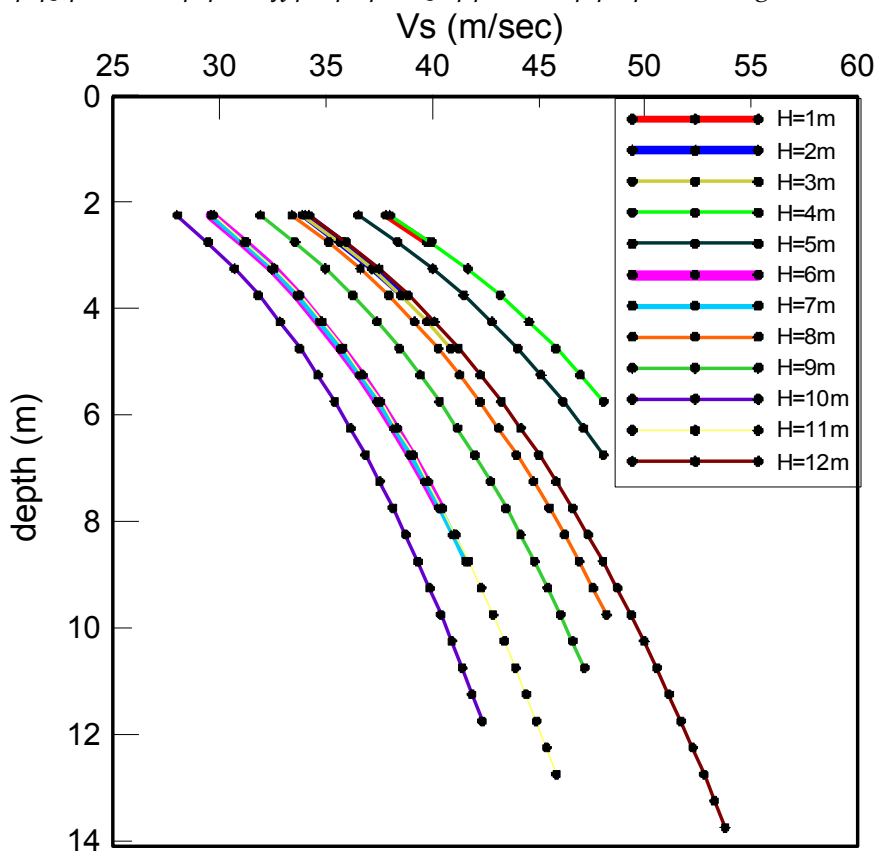
Η παραπάνω διαδικασία εφαρμόστηκε για τη διέγερση Northridge 265. Το αμμώδες στρώμα (με πάχος από 1m έως 12m) χωρίστηκε σε ζώνες πάχους $s=0.5m$ και για κάθε ζώνη υπολογίστηκε η ταχύτητα διάδοσης των κυμάτων από τη σχέση (6.1).

Στο σχήμα 6.3 παρουσιάζονται οι τιμές της ταχύτητας που χρησιμοποιήθηκαν για τις αναλύσεις όπου θεωρήθηκε σταθερή τιμή διάδοσης των διατμητικών κυμάτων στο αμμώδες στρώμα. Στο σχήμα 6.4 παρουσιάζονται οι τιμές της ταχύτητας διάδοσης

διατμητικών κυμάτων στο αμμώδες στρώμα με τη θεώρηση μεταβλητής ταχύτητας καθ' ύψος.



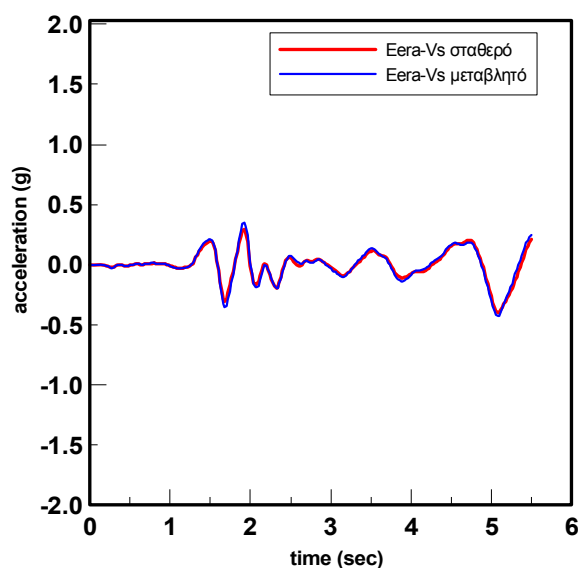
Σχήμα 6.3 Ταχύτητα διάδοσης διατμητικών κυμάτων στο αμμώδες στρώμα με θεώρηση σταθερής τιμής για τα διάφορα πάχη στρώματος άμμου- Διέγερση Northridge 265



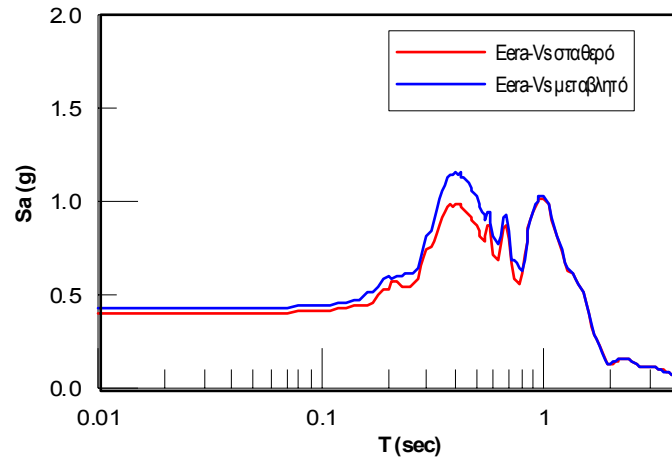
Σχήμα 6.4 Ταχύτητα διάδοσης διατμητικών κυμάτων στο αμμώδες στρώμα με θεώρηση μεταβλητής καθ' ύψος τιμής για τα διάφορα πάχη στρώματος άμμου- Διέγερση Northridge265

Στο Σχήμα 6.5 παρατίθενται ενδεικτικά το επιταχυνσιογράφημα στην κορυφή της αμμώδους στρώσης για πάχος $H=8m$ για τις δυο περιπτώσεις ανάλυσης. Παρατηρούμε ότι δεν υπάρχουν ουσιαστικές διαφορές ανάμεσα στα δυο επιταχυνσιογραφήματα. Ανάλογα ισχύουν και για τις υπόλοιπες εξεταζόμενες περιπτώσεις ανάλυσης (για $H=1$ έως $10m$).

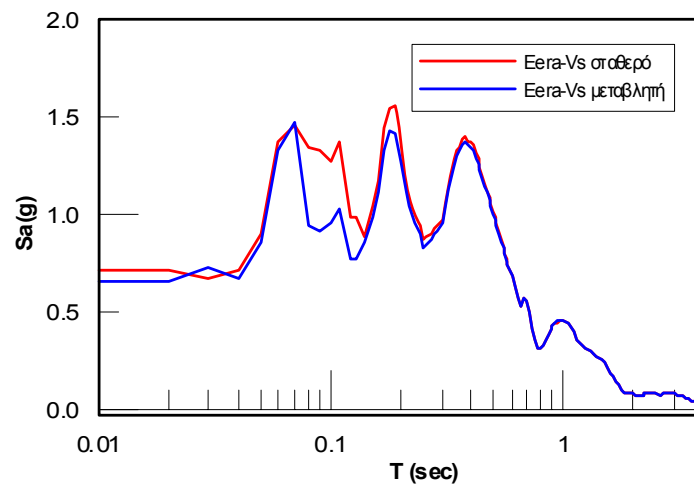
Στα σχήματα 6.6, 6.7 και 6.8 παρουσιάζονται τα φάσματα στην κορυφή της αμμώδους στρώσης, στη βάση καθώς και ο λόγος των παραπάνω, αντίστοιχα. Παρατηρούμε ότι η ανάλυση με θεώρηση σταθερής ταχύτητας διάδοσης των κυμάτων οδηγεί σε ελαφρώς μικρότερες φασματικές ενισχύσεις στην κορυφή της αμμώδους στρώσης. Στη βάση του στρώματος της άμμου, η ανάλυση με θεώρηση σταθερής ταχύτητας διάδοσης κυμάτων οδηγεί για τις μεσαιές περιόδους σε μεγαλύτερες τιμές φασματικής ενίσχυσης, ενώ για τις υπόλοιπες περιόδους οι διαφορές είναι αμελητέες. Τέλος, όσον αφορά το λόγο φάσματος κορυφής προς βάση οι δυο αναλύσεις συγκλίνουν σημαντικά, με την ανάλυση με σταθερή ταχύτητα διάδοσης των κυμάτων να δίνει συστηματικά ελαφρώς μικρότερες τιμές σε σχέση με την ανάλυση με μεταβλητή καθ' ύψος ταχύτητα διάδοσης των κυμάτων.



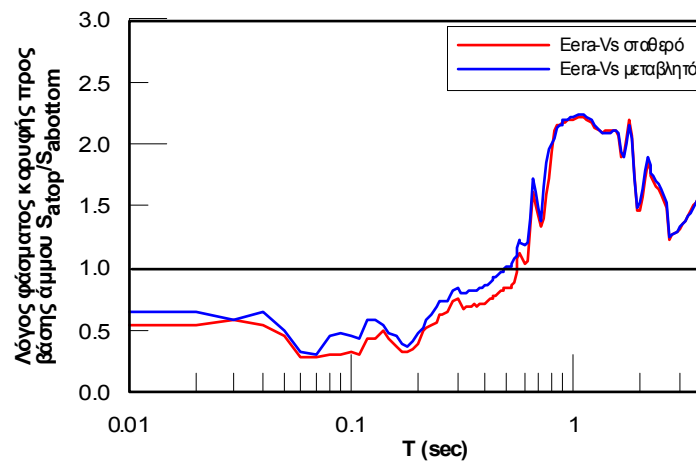
Σχήμα 6.5 Επιταχυνσιογράφημα στην κορυφή της αμμώδους στρώσης για πάχος $H=8m$ για τις δυο περιπτώσεις ανάλυσης



Σχήμα 6.6 Φάσμα στην κορυφή της αμμώδους στρώσης για πάχος $H=8m$ για τις δυο περιπτώσεις ανάλυσης



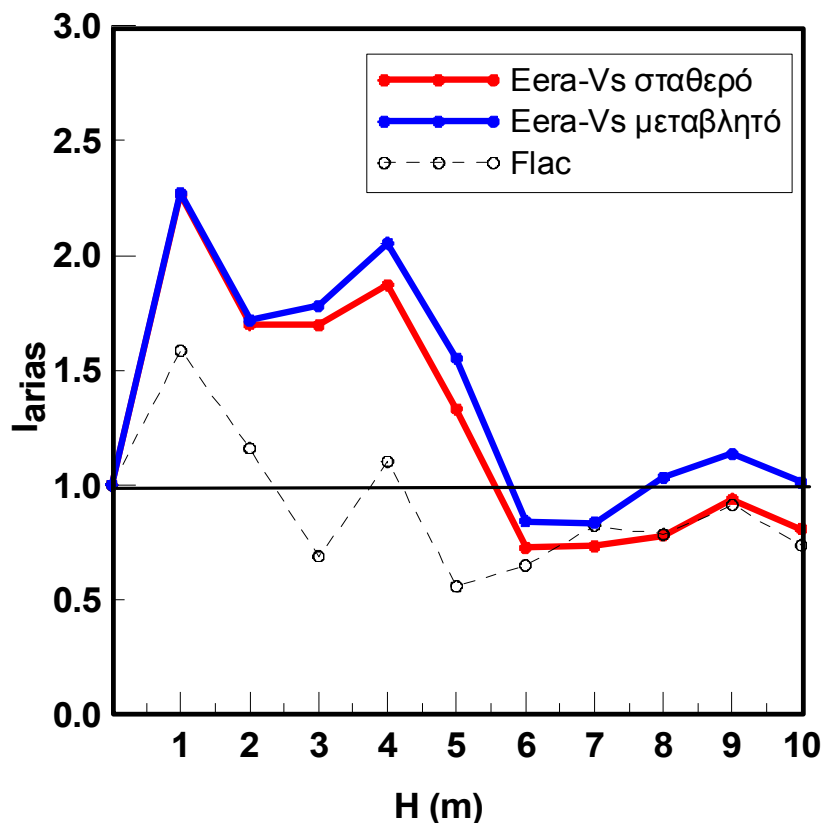
Σχήμα 6.7 Φάσμα στη βάση της αμμώδους στρώσης για πάχος $H=8m$ για τις δυο περιπτώσεις ανάλυσης



Σχήμα 6.8 Λόγος φασμάτων (κορυφή προς βάση) της αμμώδους στρώσης για πάχος $H=8m$ για τις δυο περιπτώσεις ανάλυσης

Στο Σχήμα 6.9 που ακολουθεί παρουσιάζεται η τιμή του λόγου Arias Intensity για τη διέγερση Northridge 265, όπως προκύπτει με τους δυο διαφορετικούς τρόπους ανάλυσης. Συγκεκριμένα, με την κόκκινη γραμμή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων για πάχος στρώματος άμμου από 1m έως 10m με θεώρηση σταθερής τιμής ταχύτητας διάδοσης των διατμητικών κυμάτων στο αμώδες στρώμα όπως συνοψίζονται στον Πίνακα 4.1 και το Σχήμα 6.4. Με την μπλε γραμμή παρουσιάζονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα με θεώρηση μεταβλητής καθ' ύψος ταχύτητας διάδοσης των σεισμικών κυμάτων όπως συνοψίζονται στο Σχήμα 6.9. Για λόγους πληρότητας στο γράφημα παρουσιάζονται και τα αντίστοιχα αποτελέσματα των αναλύσεων FLAC όπως προέκυψαν από προγενέστερη έρευνα.

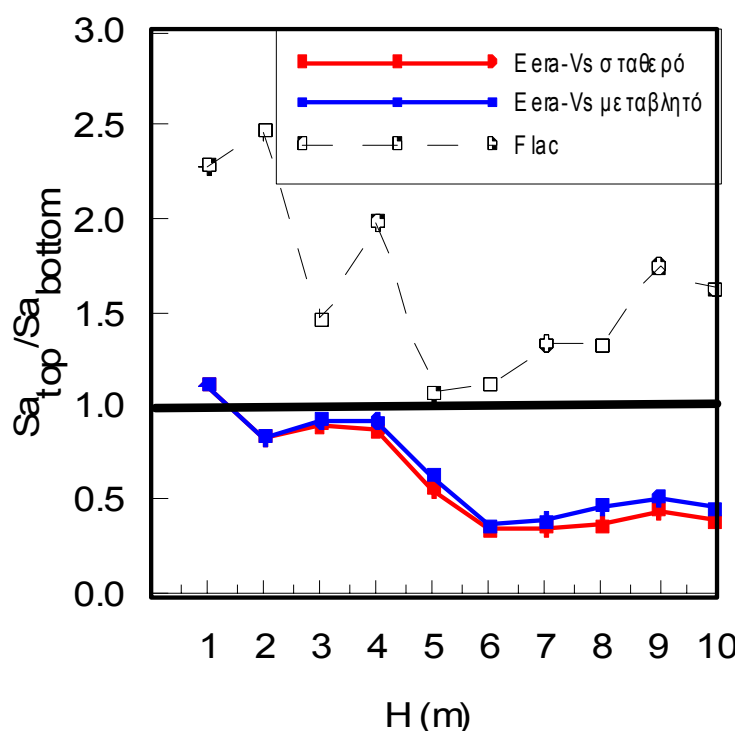
Παρατηρούμε, ότι η μορφή των καμπυλών για τις δυο διαφορετικές θεωρήσεις είναι ίδια. Για πάχος στρώματος άμμου μεγαλύτερο από 2m οι αναλύσεις με σταθερή ταχύτητα δίνουν μικρότερες τιμές I_{arias} με τη διαφορά των δυο καμπυλών να γίνεται μεγαλύτερη για πάχος άμμου μεγαλύτερο από 8m.



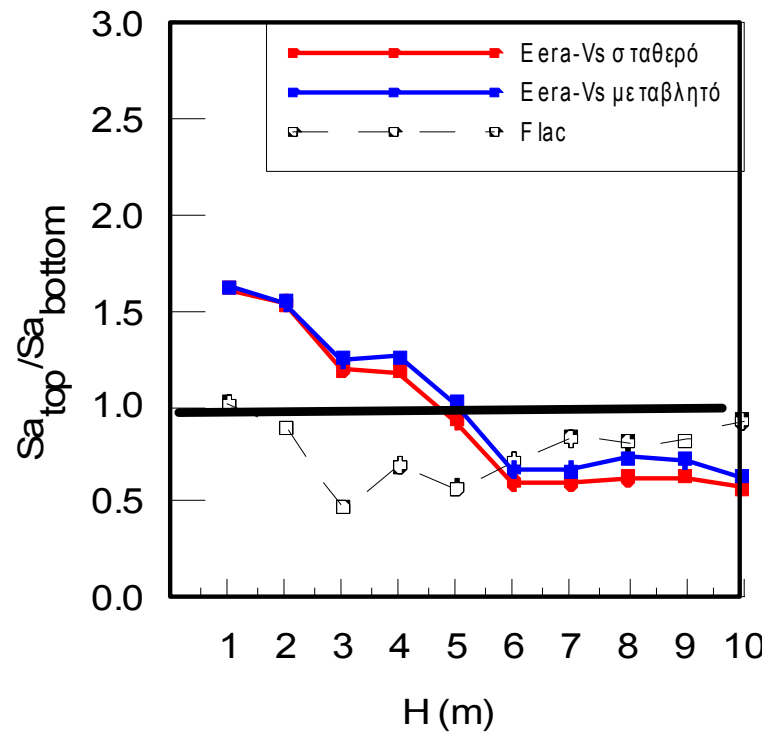
Σχήμα 6.9 Δείκτης I_{arias} για τις δυο περιπτώσεις ανάλυσης Eera (V_s σταθερό και μεταβλητό) καθώς και για τις αναλύσεις Flac

Στα Σχήματα 6.10, 6.11 και 6.12 που ακολουθούν παρουσιάζεται η μέση τιμή του λόγου φασμάτων για τρία διαφορετικά εύρη περιόδων (μικρές, μεσαίες, μεγάλες) για πάχος στρώματος άμμου από 1m έως 10m με τους δυο διαφορετικούς τρόπους ανάλυσης. Συγκεκριμένα, με την κόκκινη γραμμή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων για πάχος στρώματος άμμου από 1m έως 10m με θεώρηση σταθερής τιμής ταχύτητας διάδοσης των διατμητικών κυμάτων στο αμμώδες στρώμα όπως συνοψίζονται στον Πίνακα 4.1. Με την μπλε γραμμή παρουσιάζονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα με θεώρηση μεταβλητής καθ' ύψος ταχύτητας διάδοσης των σεισμικών κυμάτων όπως συνοψίζονται στο Σχήμα 6.4. Για λόγους πληρότητας στο γράφημα παρουσιάζονται και τα αντίστοιχα αποτελέσματα των αναλύσεων FLAC όπως προέκυψαν από προγενέστερη έρευνα.

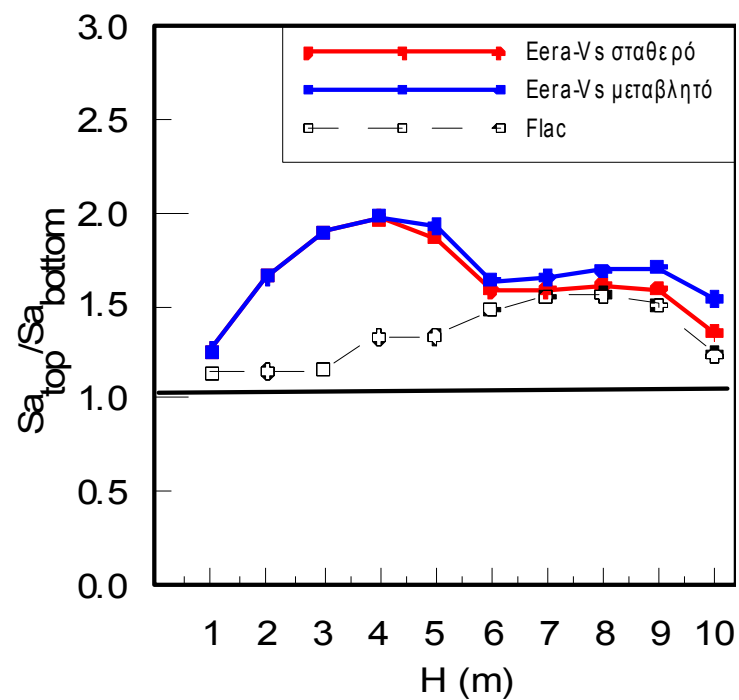
Παρατηρούμε ότι και σε αυτήν την περίπτωση η μορφή των καμπυλών για τις δυο διαφορετικές περιπτώσεις ανάλυσης με το Eera είναι ίδιες και για τα τρία εύρη περιόδων. Ωστόσο, οι αναλύσεις με τη θεώρηση της σταθερής τιμής ταχύτητας διάδοσης των διατμητικών κυμάτων στο αμμώδες στρώμα για πάχος στρώματος μεγαλύτερο από 2m παρουσιάζουν συστηματικά μικρότερες τιμές λόγου φασμάτων. Οι διαφορές όμως αυτές είναι μικρές και δεν μπορούν να δικαιολογήσουν την απόκλιση μεταξύ των αποτελεσμάτων FLAC και EERA.



Σχήμα 6.10 Μέση τιμή λόγου φασμάτων κορυφής προς βάση άμμου για τις δυο περιπτώσεις ανάλυσης Eera (Vs σταθερό και μεταβλητό) καθώς και για τις αναλύσεις Flac για μικρές περιόδους ($0.05\text{sec} < T < 0.15\text{sec}$)



Σχήμα 6.11 Μέση τιμή λόγου φασμάτων κορυφής προς βάση άμμου για τις δυο περιπτώσεις ανάλυσης Eera (Vs σταθερό και μεταβλητό) καθώς και για τις αναλύσεις Flac για μεσαίες περιόδους ($0.15\text{sec} < T < 0.45\text{sec}$)



Σχήμα 6.12 Μέση τιμή λόγου φασμάτων κορυφής προς βάση άμμου για τις δυο περιπτώσεις ανάλυσης Eera (Vs σταθερό και μεταβλητό) καθώς και για τις αναλύσεις Flac για μεγάλες περιόδους ($0.45\text{sec} < T$)

Συνοψίζοντας, *οι δυο διαφορετικές θεωρήσεις για την ταχύτητα διάδοσης των σεισμικών κυμάτων στο αμμώδες στρώμα οδηγούν σε μικρή διαφοροποίηση των εξεταζόμενων δεικτών*. Η θεωρήση σταθερής ταχύτητας διάδοσης διατμητικών κυμάτων έχει σαν αποτέλεσμα μεγαλύτερη απομείωση ή μικρότερη ενίσχυση της σεισμικής κίνησης στην κορυφή του αμώδους στρώματος σε σχέση με τις αναλύσεις όπου η ταχύτητα του σεισμικού κύματος μεταβάλλεται καθ' ύψος του αμμώδους στρώματος. Η διαφορά αυτή παρατηρείται για πάχος του στρώματος της άμμου μεγαλύτερο από 2m. Ωστόσο, η μορφή των καμπυλών των εξεταζόμενων δεικτών είναι η ίδια και για τα δυο είδη αναλύσεων. Τέλος, επισημαίνεται ότι *η θεώρηση της σταθερής τιμής ταχύτητας διάδοσης διατμητικών κυμάτων στο αμμώδες στρώμα κατά τις αναλύσεις με την ισοδύναμη γραμμική μέθοδο δεν μπορεί να θεωρηθεί ότι ερμηνεύει τη διαφοροποίηση που παρατηρείται μεταξύ των αποτελεσμάτων ισοδύναμης γραμμικής μεθόδου και κώδικα πεπερασμένων διαφορών*.

6.4 Μέθοδος ανάλυσης

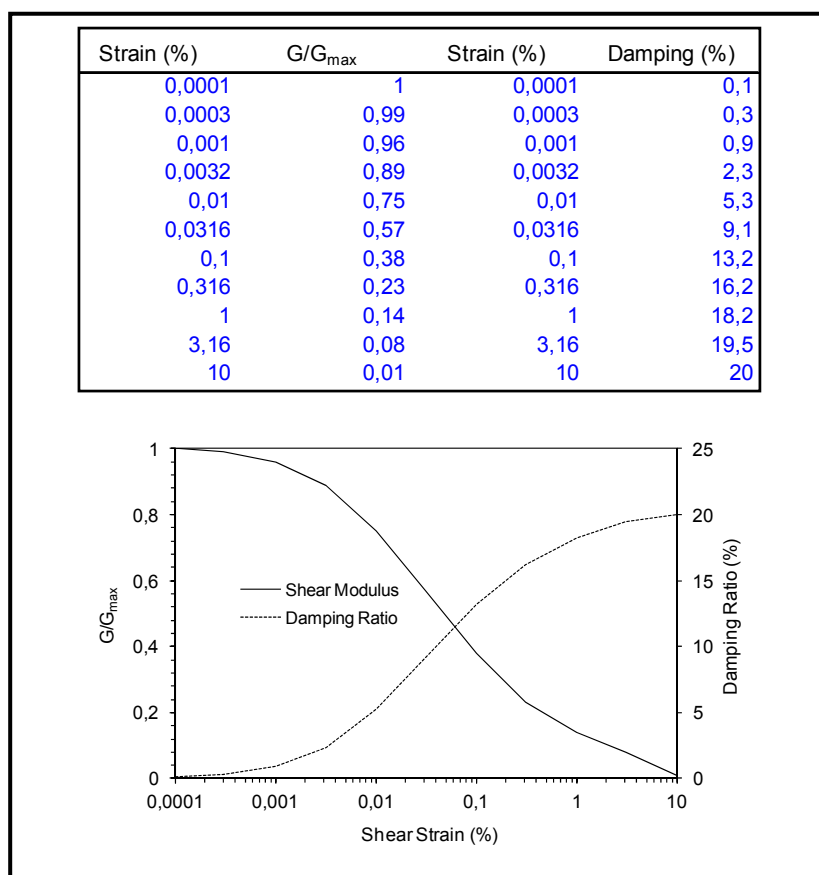
Στις αναλύσεις μέσω της ισοδύναμης γραμμικής μεθόδου που έχουν παρουσιαστεί μέχρι στιγμής, το στρώμα της άμμου έχει θεωρηθεί ότι χαρακτηρίζεται από γραμμική συμπεριφορά ($G/G_{max}=1$). Έτσι για τις αναλύσεις αυτές έχει θεωρηθεί σταθερή τιμή ταχύτητας διάδοσης των διατμητικών κυμάτων μέσω του στρώματος της άμμου, η οποία έχει ληφθεί ίση με αυτή που έχει προκύψει από προγενέστερη έρευνα (Ε. Κουτσογούλα, 2012) για καθεμιά από τις εξεταζόμενες διεγέρσεις. Όσον αφορά τα αργιλικά στρώματα που βρίσκονται πάνω και κάτω από την άμμο, έχουν χρησιμοποιηθεί οι καμπύλες Dobry Vucetic όπως παρουσιάζονται στο κεφάλαιο 4.2.5.

Αντίθετα, στις αναλύσεις που έχουν πραγματοποιηθεί μέσω του κώδικα πεπερασμένων διαφορών Flac, έχει χρησιμοποιηθεί το μη γραμμικό υστερητικό προσομοίωμα Ramberg-Osgood για τα αργιλικά στρώματα και το μοντέλο NTUA-SAND (Andrianopoulos et al. 2010) για το στρώμα της άμμου (τα μοντέλα αυτά περιγράφονται στο κεφάλαιο 3.3.4).

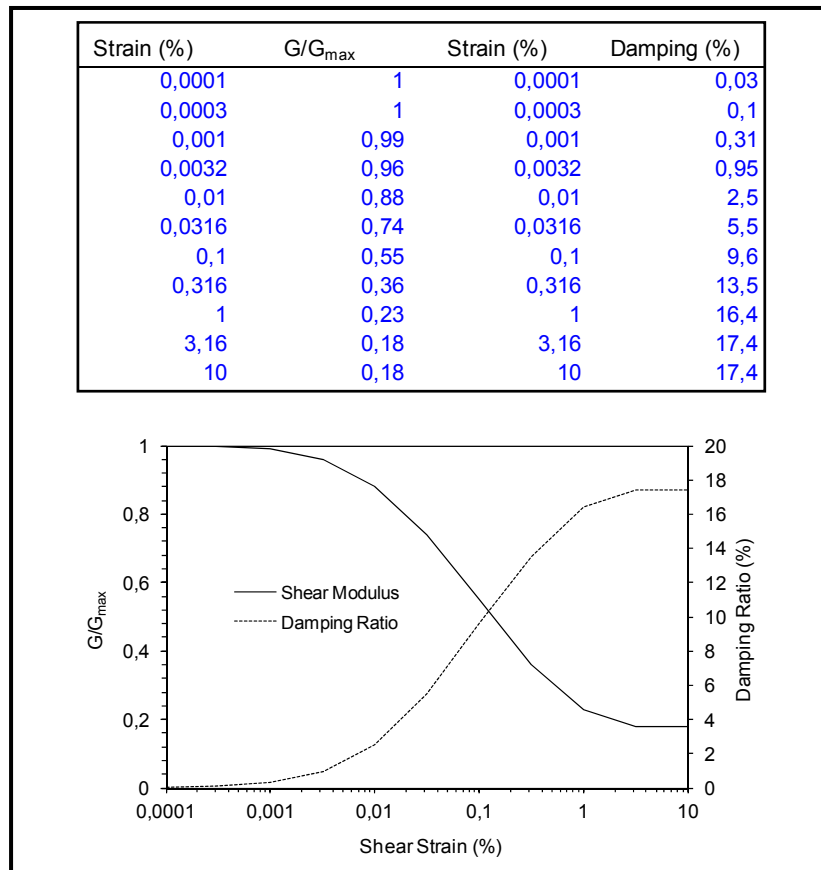
Στόχος της παρούσας ενότητας είναι να διερευνηθεί ποια είναι η επίδραση της μεθόδου ανάλυσης στα εξεταζόμενα μεγέθη. Από τη μία πλευρά έχουμε τις αναλύσεις μέσω του EERA, οποίες είναι ανάλυση στο πεδίο των συχνοτήτων (frequency domain analysis) και επί της ουσίας κάθε επιταχυνσιογράφημα αναλύεται σε πλήθος αρμονικών ταλαντώσεων, γίνεται για κάθε περίοδο ξεχωριστή ανάλυση και στο τέλος σύνθεση των αποτελεσμάτων. Από την άλλη, μέσω του FLAC το πραγματοποιείται ανάλυση στο πεδίο του χρόνου (time-domain analysis) στο οποίο σε κάθε χρονικό βήμα υπολογίζεται η μηχανική απόκριση. Για να συγκρίνουμε τις μεθόδους ανάλυσης έπρεπε να έχουμε το ίδιο G/G_{max} και ξ συναρτήσε του γ . Έτσι στο Eera χρησιμοποιήθηκαν οι καμπύλες Dobry Vucetic για το στρώμα της άμμου ($PI=0-7.5\%$) και στο FLAC έπρεπε να χρησιμοποιηθεί ένα καταστατικό προσομοίωμα που θα δίνει μεν τις καμπύλες του G/G_{max} , ξ αλλά δεν θα δίνει πλαστικές παραμορφώσεις,

υπερπίεσεις πόρων και συνεπώς ρευστοποίηση. Επομένως σε αντίθεση με τις αναλύσεις της Κουτσογούλας (2012), έγινε χρήση του προσομοιώματος Ramberg-Osgood και στην άμμο, και όχι του NTUA_SAND.

Για το σκοπό αυτό πραγματοποιήθηκαν για τη διέγερση Northridge265 πρόσθετες αναλύσεις μέσω Eera και Flac για πάχος στρώματος άμμου από 1 έως 9m. Στις αναλύσεις Eera υποτέθηκε μη γραμμική συμπεριφορά του στρώματος της άμμου με βάση τις καμπύλες Doby Vucetic που παρουσιάζονται στο σχήμα 6.13 και αρχική ταχύτητα διάδοσης των διατμητικών κυμάτων στο στρώμα αυτό ίση με 80m/sec. Για τις αργλικές στρώσεις χρησιμοποιήθηκαν οι καμπύλες Dobry-Vucetic που παρουσιάζονται στο σχήμα 6.14. Έτσι, επιχειρείται να ελεγχθεί αν οι διαφορές των αποτελεσμάτων μεταξύ των δυο μεθόδων ανάλυσης που παρουσιάστηκαν στα κεφάλαια 5.2 έως 5.5 οφείλονται στη διαφορά που υπάρχει μεταξύ των δυο μεθοδολογιών.

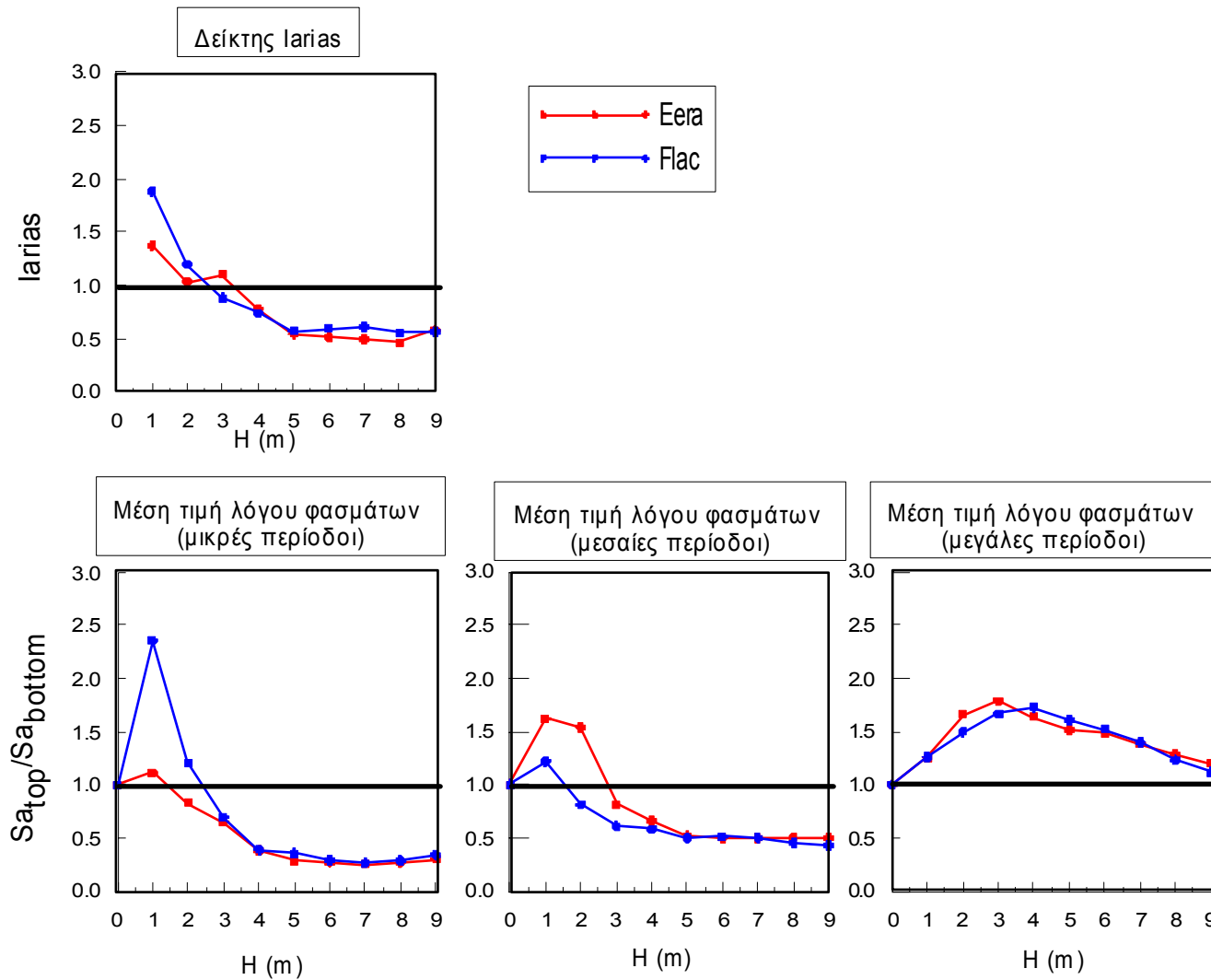


Σχήμα 6.13 Καμπύλες Dobry Vucetic για δείκτη πλαστικότητας $PI=0-7.5\%$



Σχήμα 6.14 Καμπύλες *Dobry Vucetic* για δείκτη πλαστικότητας $PI=7.5-22.5\%$

Στο σχήμα 6.15 που ακολουθεί παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα των αναλύσεων με θεώρηση μη γραμμικής συμπεριφοράς των εδαφικών στρώσεων (καταστατικό προσομοίωμα *Dobry-Vucetic*) μέσω της ισοδύναμης γραμμικής μεθόδου και του κώδικα πεπερασμένων διαφορών. Συγκεκριμένα, παρουσιάζεται για τις δυο μεθόδους ανάλυσης η μεταβολή του δείκτη *Iarias* και της μέσης τιμής του λόγου φασμάτων (μικρές, μεσαίες και μεγάλες περιόδοι) με το πάχος *H* του στρώματος της άμμου.



Σχήμα 6.15 Αποτελέσματα αναλύσεων ισοδύναμης γραμμικής μεθόδου και κώδικα πεπερασμένων διαφορών με θεώρηση ίδιων καταστατικών προσομοιωμάτων για τις εδαφικές στρώσεις για τη διέγερση Northridge 265

Δείκτης Iarias

Παρατηρούμε στο σχήμα 6.15 ότι οι δυο μέθοδοι ανάλυσης συγκλίνουν με ικανοποιητική ακρίβεια. Επομένως, *οι διαφορές που παρατηρούνται στην τιμή του δείκτη Iarias για τη διέγερση Northridge265 μεταξύ των αναλύσεων Flac (time domain analysis) και Eera (frequency domain analysis) για πάχος στρώματος άμμου μεγαλύτερο από 4m δεν οφείλονται στη διαφορετική μεθοδολογία που ακολουθείται από τα δυο προγράμματα. Για μικρά πάχη στρώματος άμμου πιθανόν οι διαφορές να οφείλονται και στη διαφορετική μεθοδολογία που εφαρμόζεται.*

Μέση τιμή λόγου φασμάτων-Μικρές περιόδους

Παρατηρούμε στο σχήμα 6.15 ότι οι δυο μέθοδοι ανάλυσης συγκλίνουν με ικανοποιητική ακρίβεια με τη θεώρηση της άμμου - Dobry Vucetic για πάχη στρώματος άμμου μεγαλύτερα από 2m. Επομένως, *οι διαφορές που παρατηρούνται στη μέση τιμή του λόγου φασμάτων στο εύρος των μικρών περιόδων ($0.05 < T < 0.15$), για τη διέγερση Northridge265, μεταξύ των αναλύσεων Flac (time domain analysis) και Eera (frequency domain analysis): α) πιθανόν να οφείλονται μεταξύ άλλων και στη διαφορετική μεθοδολογία των δυο προγραμμάτων για μικρά πάχη στρώματος άμμου ($H < 2m$), β) δεν οφείλονται στη διαφορετική μεθοδολογία για πάχη στρώματος άμμου μεγαλύτερα από 2m.*

Μέση τιμή λόγου φασμάτων-Μεσαίες περιόδους

Παρατηρώντας το σχήμα 6.15, βλέπουμε ότι οι της παρούσας ενότητας μέσω Flac (μπλε συνεχής γραμμή) και Eera (κόκκινη συνεχής γραμμή) καταλήγουν σε όμοια αποτελέσματα για πάχη στρώματος άμμου μεγαλύτερα από 5m. Αντίθετα, για μικρά πάχη στρώματος άμμου οι αναλύσεις μέσω Eera οδηγούν σε σημαντικά μεγαλύτερες τιμές λόγου φασμάτων κορυφής προς βάση σε σχέση με τις αναλύσεις μέσω Flac. Επομένως, *οι διαφορές που παρατηρούνται στη μέση τιμή του λόγου φασμάτων στο εύρος των μεσαίων περιόδων ($0.15 < T < 0.45$), για τη διέγερση Northridge265, μεταξύ των αναλύσεων Flac (time domain analysis) και Eera (frequency domain analysis): α) πιθανόν να οφείλονται μεταξύ άλλων και στη διαφορετική μεθοδολογία για μικρά πάχη στρώματος άμμου ($H < 4m$), β) δεν οφείλονται στη διαφορετική μεθοδολογία για πάχη στρώματος άμμου μεγαλύτερα από 4m.*

Μέση τιμή λόγου φασμάτων-Μεγάλες περιόδους

Παρατηρώντας το σχήμα 6.15, βλέπουμε ότι οι αναλύσεις με τη θεώρηση της άμμου-Dobry-Vucetic, μέσω Flac (μπλε συνεχής γραμμή) και Eera (κόκκινη συνεχής γραμμή) καταλήγουν σε όμοια αποτελέσματα για όλα τα πάχη στρώματος άμμου. Επομένως, *οι διαφορές που παρατηρούνται στη μέση τιμή του λόγου φασμάτων στο εύρος των μεγάλων περιόδων ($0.45 < T < 1.50$), για τη διέγερση Northridge265, μεταξύ των αναλύσεων Flac (time domain analysis) και Eera (frequency domain analysis) δε φαίνεται να οφείλονται στη διαφορετική μεθοδολογία των προγραμμάτων.*

Συγκεντρωτικά, οι παρατηρηθείσες διαφορές στα αποτελέσματα των αναλύσεων μέσω της ισοδύναμης γραμμικής μεθόδου και του κώδικα πεπερασμένων διαφορών για το δείκτη *Iarías* και τη μέση τιμή του λόγου φασμάτων σε μικρές και μεσαίες περιόδους, για πάχη στρώματος άμμου μικρότερα από 4m, οφείλονται και στη διαφορά του τρόπου ανάλυσης του φαινομένου από τις δυο μεθόδους. Αντίθετα, για μεγαλύτερα πάχη στρώματος άμμου αλλά και για τη μέση τιμή του λόγου φασμάτων στις μεγάλες περιόδους ο διαφορετικός τρόπος προσέγγισης των δυο μεθοδολογιών δεν φαίνεται να ερμηνεύει τις παρατηρηθείσες διαφορές στα αποτελέσματα των βασικών αναλύσεων. Οι παρατηρήσεις αυτές αφορούν τη διέγερση Northridge265.

Στο σημείο αυτό επαναλαμβάνεται ότι η ισοδύναμη γραμμική μέθοδος (Eera) είναι ανάλυση στο πεδίο συχνοτήτων. Η κάθε διέγερση αναλύεται στις βασικές της συνιστώσες κατά Fourier. Για καθεμιά από αυτές τις συνιστώσες με επαναληπτική διαδικασία με βάση το καταστατικό προσομοίωμα των εδαφικών στρώσεων υπολογίζεται το μέτρο διάτμησης και η απόσβεση. Το μέτρο διάτμησης και η απόσβεση υπολογίζονται για μια συγκεκριμένη τιμή διατμητικής παραμόρφωσης γ_{eff} . Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο ο λόγος της ενεργού γ_{eff} προς τη μέγιστη παραμόρφωση γ_{max} σε κάθε βήμα υπολογισμού ελήφθη ίσος με $(M-1)/10$, όπου *M* η σεισμική ένταση κάθε διέγερσης. Έτσι, η απόκριση της εδαφικής στήλης υπολογίζεται αναλυτικά για κάθε μια αρμονική συνιστώσα της διέγερσης για το ίδιο επίπεδο απόσβεσης. Στο τέλος όλες οι επιμέρους συνιστώσες που υπολογίστηκαν επαλληλίζονται με αντίστροφη μεθοδολογία Fourier, προκειμένου να δώσουν την τελική απόκριση στην επιφάνεια του εδάφους.

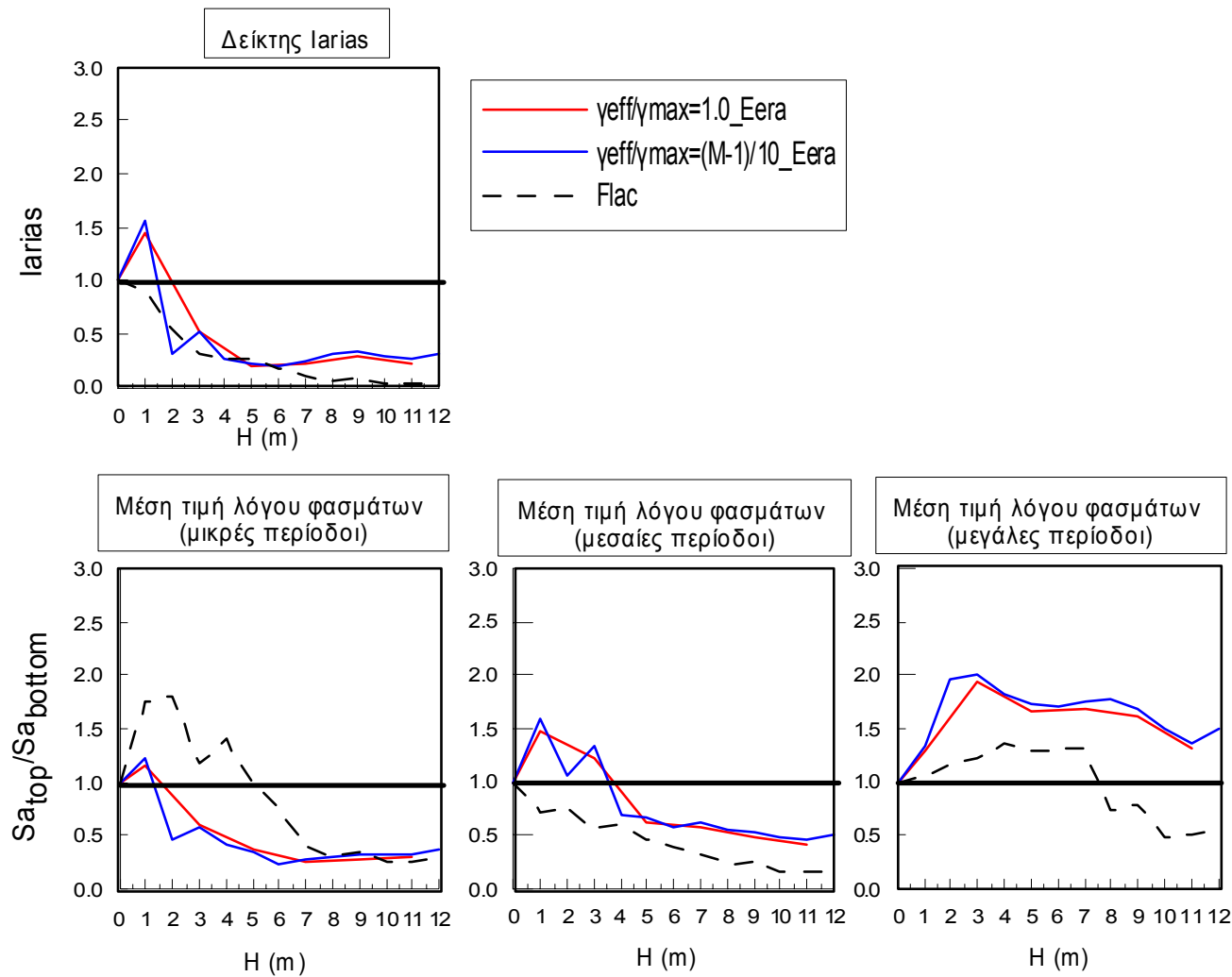
Με τον κώδικα πεπερασμένων διαφορών, η ανάλυση γίνεται σε επίπεδο χρονοϊστορίας. Σε κάθε κόμβο, επιβάλλονται δυνάμεις και από την εξίσωση της κίνησης ($F = M\ddot{U} + C\dot{U} + KU$), παράγονται επιταχύνσεις στους κόμβους (ή με ολοκλήρωση, ταχύτητες \dot{U}) με αποτέλεσμα, την αλλαγή των συντεταγμένων τους. Η αλλαγή αυτή, επιφέρει νέα εντατική κατάσταση στη ζώνη, αλλάζοντας πλέον τις ασκούμενες τάσεις σ_i στους κόμβους. Με τις υπολογισθείσες ταχύτητες του προηγούμενου βήματος, μπορεί να οριστεί ο ρυθμός παραμόρφωσης $\dot{\epsilon}$ και εν συνεχεία, οι νέες τάσεις βάση του καταστατικού προσομοιώματος που χρησιμοποιείται. Οι νέες τάσεις ανάγονται σε δυνάμεις στους κόμβους $F = \sigma A$ (όπου σ τάση και *A* επιφάνεια), και επανεξετάζεται η ισορροπία του κόμβου. Σε περίπτωση που ο κόμβος δεν ισορροπεί, ($\Sigma F \neq 0$) τότε η μη ισορροπούσα δύναμη παράγει νέες επιταχύνσεις και ο κύκλος επαναλαμβάνεται. Με αυτόν τον τρόπο ανάλυσης η απόσβεση που υπολογίζεται σε κάθε βήμα είναι αντίστοιχη της υπολογισθείσας διατμητικής παραμόρφωσης.

6.5 Λόγος ενεργού προς μέγιστη παραμόρφωση

Στις βασικές αναλύσεις μέσω Eera χρησιμοποιήθηκε λόγος της ενεργού γ_{eff} προς τη μέγιστη παραμόρφωση γ_{max} σε κάθε βήμα υπολογισμού ίσος με $(M-1)/10$. Έτσι για όλες τις επί μέρους αρμονικές συνιστώσες της διέγερσης η απόσβεση υπολογίστηκε σε κάθε βήμα για την ίδια τιμή διατμητικής παραμόρφωσης. Αντίθετα, στις αναλύσεις μέσω του κώδικα πεπερασμένων διαφορών, για κάθε τιμή διατμητικής παραμόρφωσης υπολογίζεται και η αντίστοιχη απόσβεση. Προκειμένου να διερευνηθεί αν η επιλογή του λόγου της ενεργού προς τη μέγιστη παραμόρφωση στις αναλύσεις Eera είναι παράγοντας που επηρεάζει τα αποτελέσματα πραγματοποιήθηκαν επιπλέον αναλύσεις. Συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις για τη διέγερση Serolia με τιμή $\gamma_{\text{eff}}/\gamma_{\text{max}}$ ίση με 1.0.

Στο σχήμα 6.16 παρουσιάζονται για τη διέγερση Serolia οι εξεταζόμενοι δείκτες (Iarias και μέση τιμή λόγου φασμάτων για μικρές, μεσαίες και μεγάλες περιόδους) τα αποτελέσματα των αναλύσεων μέσω της ισοδύναμης γραμμικής μεθόδου (Eera) για λόγο ενεργού προς μέγιστη παραμόρφωση ίσο με $(M-1)/10$ (μπλε γραμμή) και με 1.0 (κόκκινη γραμμή). Για λόγους σύγκρισης, στο σχήμα συμπεριλαμβάνονται και με διακεκομμένη γραμμή τα αντίστοιχα αποτελέσματα μέσω του κώδικα πεπερασμένων διαφορών. Είναι φανερό ότι η υιοθέτηση διαφορετικής τιμής λόγου ενεργής προς μέγιστης παραμόρφωσης στην ανάλυση με το Eera δε διαφοροποιεί ουσιαστικά τα αποτελέσματα.

Επομένως, για διέγερση Serolia η θεώρηση διαφορετικής τιμής λόγου ενεργής παραμόρφωσης προς μέγιστη, στις αναλύσεις Eera δεν επηρεάζει σημαντικά τα αποτελέσματα.



Σχήμα 6.16 Αποτελέσματα αναλύσεων ισοδύναμης γραμμικής μεθόδου με θεώρηση διαφορετικής τιμής λόγου $\gamma_{eff}/\gamma_{max}$ για τη διέγερση Sepolia

7. Συμπεράσματα-Προτάσεις

7.1 Συμπεράσματα

Κλείνοντας την παρούσα εργασία συνοψίζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν. Υπενθυμίζεται ότι στόχος της εργασίας είναι η σύγκριση των αποτελεσμάτων (που αφορούν την ενίσχυση/απομείωση της σεισμικής κίνησης μέσω στρώματος που ρευστοποιείται) που προκύπτουν από τις αναλύσεις με την ισοδύναμη γραμμική μέθοδο (παρούσα εργασία) και με τον κώδικα πεπερασμένων διαφορών (προγενέστερη έρευνα). Επομένως, τα συμπεράσματα που συνοψίζονται παρακάτω αφορούν τη σύγκριση των δυο μεθοδολογιών και όχι τόσο αυτά καθ' αυτά τα αποτελέσματα των αναλύσεων που προέκυψαν από τις αναλύσεις της παρούσας εργασίας.

Α) Ο δείκτης I_{arias} λαμβάνει συστηματικά μεγαλύτερες τιμές κατά τις αναλύσεις με το Eera. Οι διαφορές μεταξύ των δυο μεθόδων ανάλυσης είναι και ποιοτικές αφού παρουσιάζονται διαφορές στην τιμή H ή H/λ_{max} για την οποία ο δείκτης λαμβάνει τη μέγιστη τιμή. Εξαιρέση στα παραπάνω αποτελούν οι διεγέρσεις της κατηγορίας Α για $H/\lambda_{max} > 0.2$ και της κατηγορίας Β για $H/\lambda_{max} > 0.4$. Στις περιπτώσεις αυτές οι δυο μεθοδολογίες καταλήγουν σε ίδια αποτελέσματα (απομείωση της κίνησης) αλλά και με ικανοποιητική σύγκλιση.

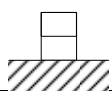
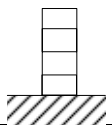
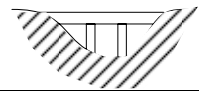
Β) Η μέση τιμή του λόγου φασμάτων στις μικρές περιόδους ($T < 0.15\text{sec}$) προκύπτει συστηματικά μικρότερη μέσω των αναλύσεων Eera σε σχέση με τις αναλύσεις Flac. Ο συγκεκριμένος δείκτης είναι και αυτός στον οποίο παρατηρούνται και οι μεγαλύτερες αποκλίσεις μεταξύ των δυο μεθόδων ανάλυσης. Ειδικά στις διεγέρσεις της κατηγορίας Β, οι διαφορές μεταξύ των δυο μεθόδων είναι και ποιοτικές αφού τα αποτελέσματα με το Eera υποδεικνύουν απομείωση της εδαφικής κίνησης μέσω του στρώματος της άμμου σχεδόν για όλα τα εξεταζόμενα πάχη στρώματος άμμου, ενώ οι αναλύσεις FLAC ενίσχυση για όλα τα εξεταζόμενα πάχη.

Γ) Η μέση τιμή του λόγου φασμάτων στις μεσαίες περιόδους ($0.15 < T < 0.45\text{sec}$) για τις διεγέρσεις της κατηγορίας Α παρουσιάζει αρκετές ομοιότητες με τις δυο μεθόδους αναλύσεις. Με εξαίρεση τα μικρά πάχη στρώματος άμμου ($H < 2\text{m}$) οι δυο μεθοδολογίες καταλήγουν σε κοινά συμπεράσματα με το Eera να δίνει ελαφρώς μεγαλύτερες τιμές. Για τις διεγέρσεις της κατηγορίας Β, τα αποτελέσματα μέσω πεπερασμένων στοιχείων δείχνουν απόσβεση της κίνησης για όλα τα εξεταζόμενα πάχη στρώματος άμμου (με εξαίρεση ίσως τα πολύ μεγάλα), ενώ οι αναλύσεις Eera προβλέπουν ενισχύσεις για $H < 4$ έως και 8m . Τέλος για τις διεγέρσεις της κατηγορίας Γ οι διαφορές εντοπίζονται για τα περισσότερα πάχη στρώματος άμμου. Πρακτικά μέσω του Flac παρατηρείται η τάση για ενίσχυση της εδαφικής κίνησης με την αύξηση του πάχους του στρώματος ενώ με το Eera η τάση είναι αντίθετη (για $H/\lambda_{max} > 0.2$ έχουμε και απόσβεση)

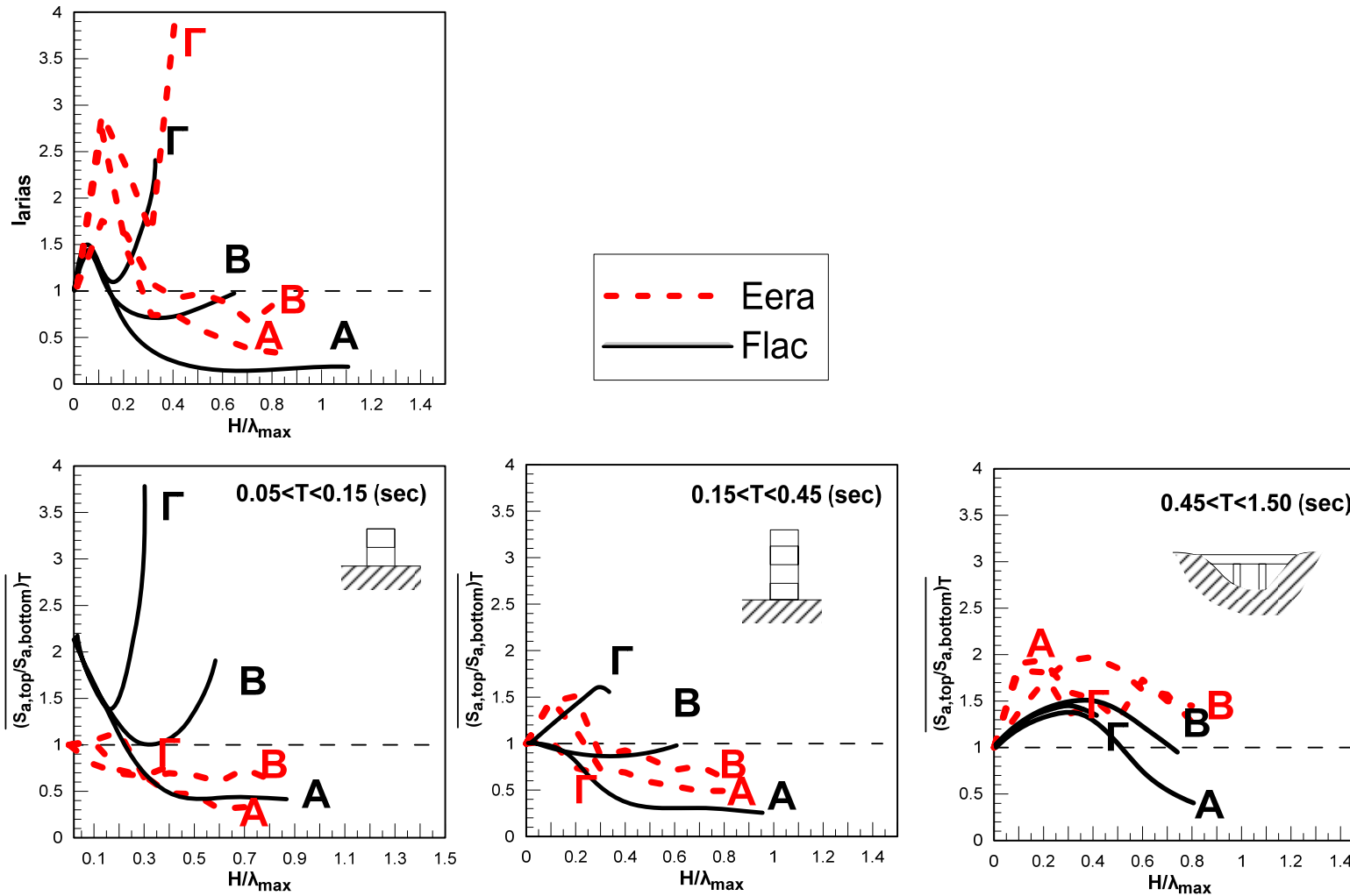
Δ) Η μέση τιμή του λόγου φασμάτων στις μεγάλες περιόδους ($T > 0.45 \text{ sec}$) για τις διεγέρσεις της κατηγορίας Α παρουσιάζει ομοιότητες για τις δυο μεθόδους ανάλυσης με εξαίρεση τις περιπτώσεις μεγάλου πάχους στρώματος άμμου, $H > 8 \text{ m}$ να και το Eera προβλέπει γενικώς μεγαλύτερες τιμές ενίσχυσης. Για τις διεγέρσεις κατηγορίας Β και Γ οι δυο μεθοδολογίες καταλήγουν σε αποτελέσματα που συγκλίνουν (ενίσχυση για όλα τα πάχη στρώματος άμμου) με το Eera να οδηγεί και πάλι σε μεγαλύτερες τιμές ενίσχυσης σε σχέση με το Flac.

Στον πίνακα 7.1 που ακολουθεί συνοψίζονται τα παραπάνω αποτελέσματα. Με μαύρο χρώμα σημειώνονται τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων με την ισοδύναμη γραμμική μέθοδο και με μπλε με το FLAC. Η ένταση της σκιαγράφησης στον πίνακα αυτό σχετίζεται με το μέγεθος των παρατηρούμενων διαφορών μεταξύ των δυο μεθόδων.

Πίνακας 7.1: Σύγκριση αποτελεσμάτων δυο μεθοδολογιών

ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΔΙΕΓΕΡΣΗΣ	T (sec)		
	0.05-0.15	0.15-0.45	0.45-1.50
			
A	Flac: A ($H/\lambda_{\max} > 0.30$) Eera: A ($H/\lambda_{\max} > 0.20$)	Flac: A ($H/\lambda_{\max} > 0.30$) Eera: A ($H/\lambda_{\max} > 0.20$)	Flac: A ($H/\lambda_{\max} > 0.30$) Eera: E
B	Flac: E (?) Eera: A ($H/\lambda_{\max} > 0.30$)	Flac: X Eera: A ($H/\lambda_{\max} > 0.30$)	Flac: E Eera: E
Γ	Flac: E (?) Eera: A ($H/\lambda_{\max} > 0.10$)	Flac: E Eera: A ($H/\lambda_{\max} > 0.20$)	Flac: E Eera: E
A: Απομείωση, E: Ενίσχυση, X: καμιά επίδραση, ?: θα πρέπει να διερευνηθεί περαιτέρω			

Τα αποτελέσματα αυτά συνοψίζονται και στο σχήμα 7.1 που ακολουθεί. Με μαύρη συνεχή γραμμή συνοψίζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων FLAC, ενώ με κόκκινη διακεκομμένη τα αποτελέσματα των αναλύσεων Eera.



Πίνακας 7.1: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα αναλύσεων Flac και Eera (δείκτης I_{rias} και μέση τιμή λόγου φασμάτων για τρία εύρη περιόδων, συναρτήσει του αδιάστατου πάχους H/λ_{max})

Από τη διερεύνηση που πραγματοποιήθηκε στη συνέχεια προκειμένου να διαπιστωθεί ποιοι παράγοντες είναι αυτοί που έχουν ως αποτέλεσμα τις παρατηρηθείσες διαφορές μεταξύ των δυο μεθοδολογιών συμπεραίνεται το εξής:

A) Για πάχη ρευστοποιήσιμου στρώματος μεγαλύτερα από 4m οι διαφορές που παρατηρούνται μεταξύ των αποτελεσμάτων των δυο μεθοδολογιών μπορούν να αποδοθούν μεταξύ άλλων και στο γεγονός ότι δεν επαρκεί η γνώση της δυσκαμψίας του ρευστοποιημένου εδάφους για την προσομοίωση του φαινομένου. Υπενθυμίζεται ότι κατά τις αναλύσεις μέσω της ισοδύναμης γραμμικής μεθόδου, το στρώμα που ρευστοποιείται θεωρήθηκε ελαστικό ($G/G_{max}=1$) με μέτρο διάτμησης που έχει προκύψει με βάση την ταχύτητα διάδοσης του διατμητικού κύματος στο στρώμα από τις αναλύσεις μέσω πεπερασμένων στοιχείων ($G=\rho V_{sliq}^2$). Αντίθετα κατά τις αναλύσεις μέσω Flac για την προσομοίωση του στρώματος της άμμου χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο NTUA-SAND Andrianopoulos et al. (2010).

B) Οι διαφορές που παρουσιάζονται για τις μικρές περιόδους οφείλονται κυρίως στη διαφορετική μεθοδολογία ανάλυσης. Ενώ με την ισοδύναμη γραμμική μέθοδο, η απόκριση της εδαφικής στήλης υπολογίζεται αναλυτικά για κάθε μια αρμονική συνιστώσα της διέγερσης για το ίδιο επίπεδο απόσβεσης, λαμβάνοντας ενιαία τιμή της απόσβεσης για όλες τις περιόδους (αποσβένοντας έτσι πλήρως τις συνιστώσες που αντιστοιχούν σε μικρές περιόδους και αποδίδουν μικρή ανακυκλική διατμητική παραμόρφωση γ_{cyc}) με τον κώδικα πεπερασμένων διαφορών, η απόσβεση που υπολογίζεται σε κάθε βήμα είναι αντίστοιχη της υπολογισθείσας διατμητικής παραμόρφωσης.

7.2 Προτάσεις

Τέλος, επισημαίνεται ότι τα ανωτέρω συμπεράσματα έχουν κυρίως ποιοτικό χαρακτήρα. Θα ήταν χρήσιμο στα πλαίσια μελλοντικής έρευνας να πραγματοποιηθούν τα παρακάτω:

- Πραγματοποίηση περισσότερων παραμετρικών αναλύσεων ειδικά των κατηγοριών Β και Γ. Οι αναλύσεις αυτές θα πρέπει να γίνουν και με τις δυο μεθοδολογίες.
- Κρίνεται επίσης, αναγκαίο η έρευνα πάνω στις πραγματικές διεγέρσεις να διερευνηθεί για διαφορετικούς συνδυασμούς σχετικής πυκνότητας Dr αλλά και διαφορετικής έντασης διεγέρσεων ακόμα και με τις διεγέρσεις της παρούσας εργασίας.
- Απαιτείται, επίσης, εμπειριστατωμένη ανάλυση πραγματικών καταγραφών στην επιφάνεια του ρευστοποιημένου εδάφους.
- Τέλος, δεδομένου ότι απώτερος στόχος τόσο της παρούσας εργασίας όσο και των προηγούμενων που πραγματοποιήθηκαν στον τομέα Γεωτεχνικής του ΕΜΠ είναι ο προσδιορισμός της ενίσχυσης στα εντατικά μεγέθη που θα δεχτούν κατασκευές θεμελιωμένες σε ρευστοποιημένα εδάφη, περαιτέρω έρευνα θα μπορούσε να συντελέσει σε μια πληρέστερη εικόνα και εν συνεχεία σε ένα φάσμα σχεδιασμού για θεμελίωση πάνω σε τέτοια εδάφη. Χρειάζεται μελέτη, ώστε ένα εν δυνάμει ρευστοποιήσιμο έδαφος, να μη θεωρείται πλέον ακατάλληλο, όπως θεωρούνταν έως τώρα αλλά, οικοδομηθέν υπό συνθήκες.

Βιβλιογραφία

Κουτσογούλα, Ε. (2012) **Αριθμητική ανάλυση σεισμικής απόκρισης ρευστοποιημένου εδάφους υπό διέγερση ευρέως φάσματος συχνοτήτων**, Diploma Thesis, Department of Geotechnical Engineering, School of Civil Engineering, National Technical University of Athens

Θεοχάρης, Α. (2011) **Αριθμητική ανάλυση του ρευστοποιημένου στρώματος υπό αρμονική διέγερση**, Diploma Thesis, Department of Geotechnical Engineering, School of Civil Engineering, National Technical University of Athens

Μπουκοβάλας, Γ. (2010), **13 Διαλέξεις σεισμικής μηχανικής**, Αθήνα, Εκδόσεις ΕΜΠ, pp.86

Bonilla, L. F., R. J. Archuleta, and D. Lavallee (2005), **Hysteretic and dilatant behavior of cohesionless soils and their effects on nonlinear site response: Field data observations and modeling**, Bull. Seismol. Soc. Am., Vol. 95, pp. 2373–2395

Dashti, S., Bray, J. D., Pestana, J. M., Riemer, M., and Wilson, D., (2010), **Mechanisms of Seismically Induced Settlement of Buildings with Shallow Foundations on Liquefiable Soil**, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 136, pp. 151–164.

Dashti, S., Bray, J. D., Pestana, J. M., Riemer, M., and Wilson, D., (2010) **Centrifuge Testing to Evaluate and Mitigate Liquefaction-Induced Building Settlement Mechanisms**, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 136, pp. 918-929

Elgamal, A., Zeghal, M., Parra, E. (1996), **Analysis of site liquefaction using downhole array seismic records**, 11th World Conference on Earthquake Engineering, Acapulco, Mexico

Itasca (2005), **FLAC - Fast Lagrangian Analysis of Continua - Version 5.0**, Itasca Consulting Group, Inc., Minneapolis, USA

Martin W. McCann, Jr (1980), **RMS Acceleration and duration of strong ground motion**, Report No.46, Stanford University

Andrianopoulos K. I., Papadimitriou A. G., Bouckovalas G. D. (2010), **“Bounding surface plasticity model for the seismic liquefaction analysis of geostructures”**, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, doi: 10.1016/j.soildyn.2010.04.001

Papadimitriou A., Bouckovalas G., Dafalias Y (1999), **Use of elastoplasticity to simulate cyclic sand behavior**, Proceedings, 2nd International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, Lisbon, Portugal, Vol. 1: 125-130

Wu, W. Borja, R. (eds.) (2008), **Geotechnical Earthquake engineering**, Berlin, Germany, Springer Berlin – Heidelberg, pp 69

Yoshida, N. and Ito, K. (1999), **Liquefaction of improved ground at Port Island, Japan, during the 1995 Hyogoken-nanbu earthquake**, Proc., 2nd International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, Lisboa, Portugal, pp. 531-536

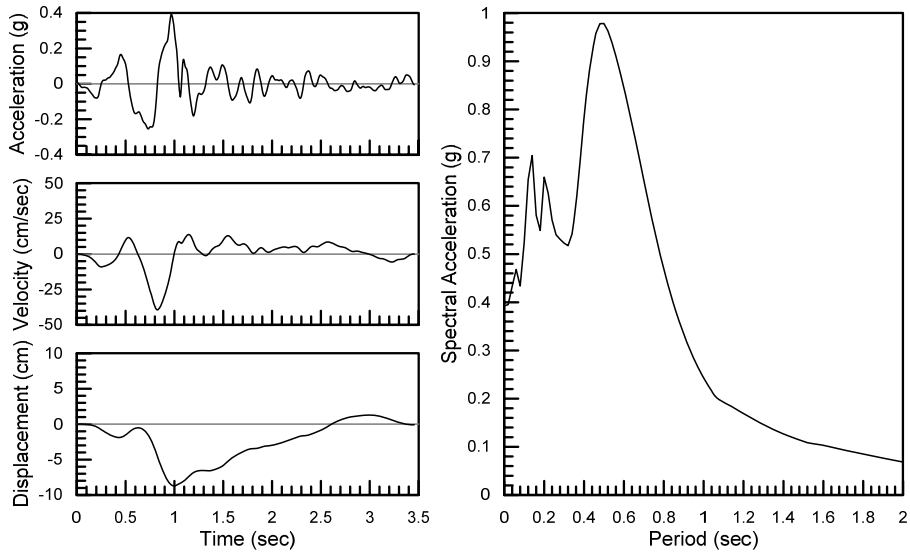
Zhang, R.R (2009), **A recording –based approach for identifying seismic site liquefaction and nonlinearity via HHT data analysis**, World Scientific Publishing

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α:

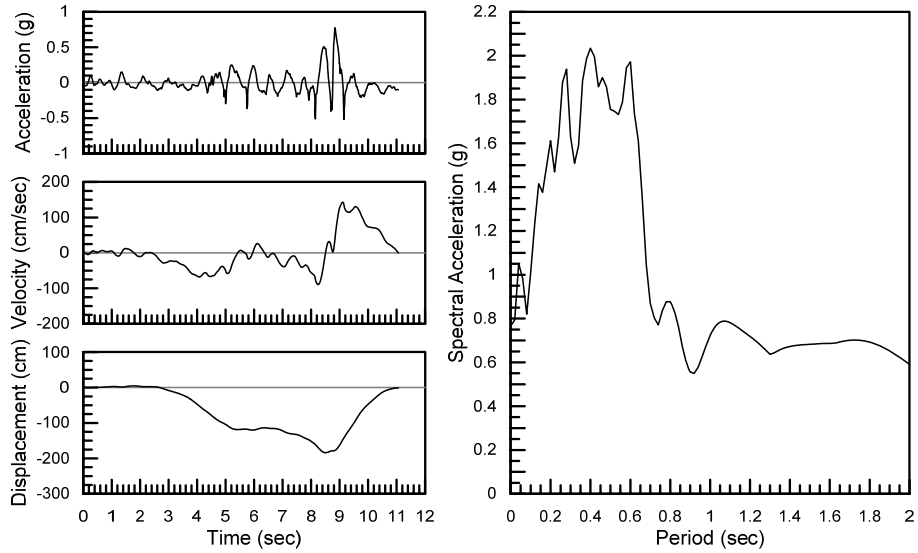
ΧΡΟΝΟΪΣΤΟΡΙΕΣ & ΕΛΑΣΤΙΚΑ ΦΑΣΜΑΤΑ

ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΔΙΕΓΕΡΣΕΩΝ

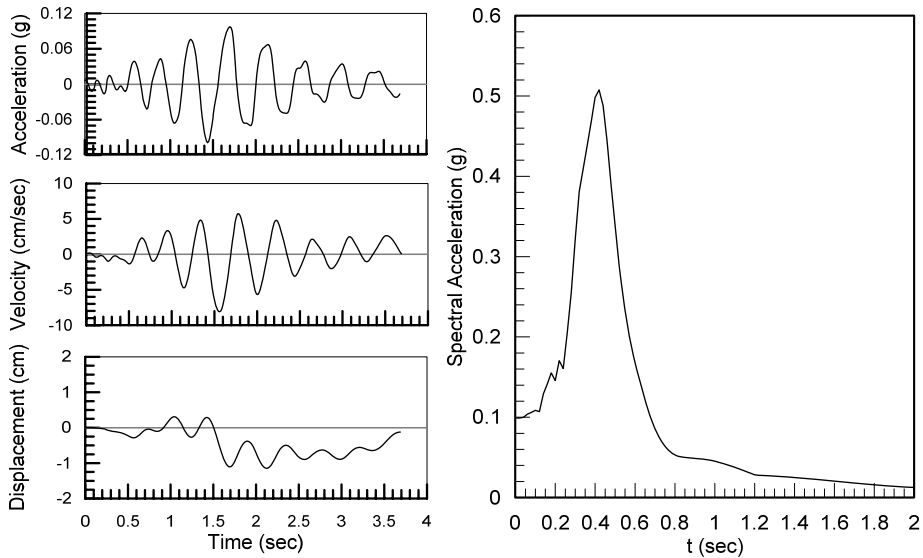
Aigio



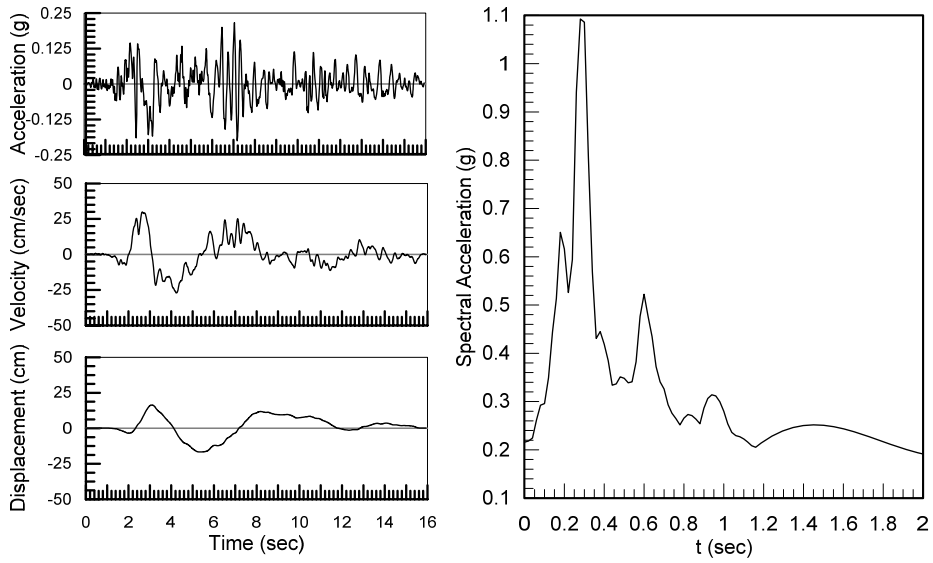
Chi-Chi



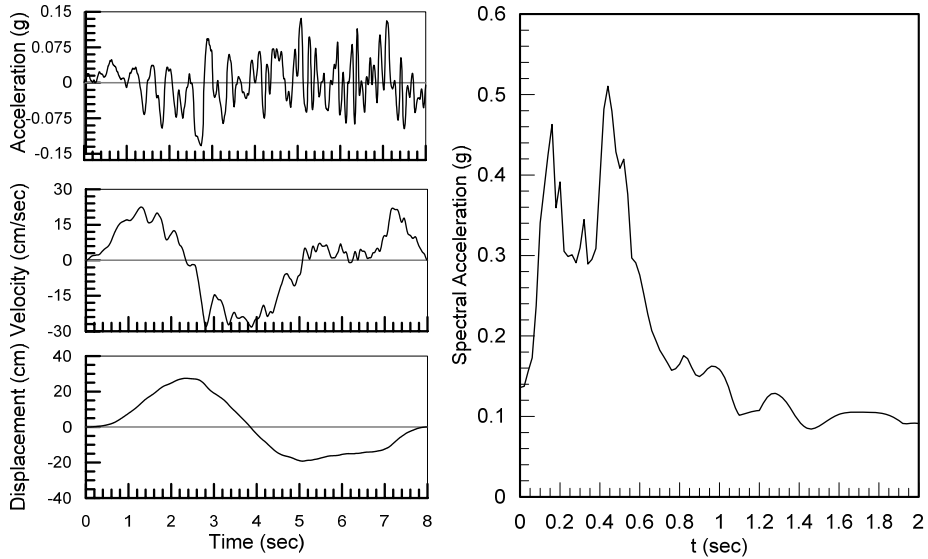
Coyote Lake



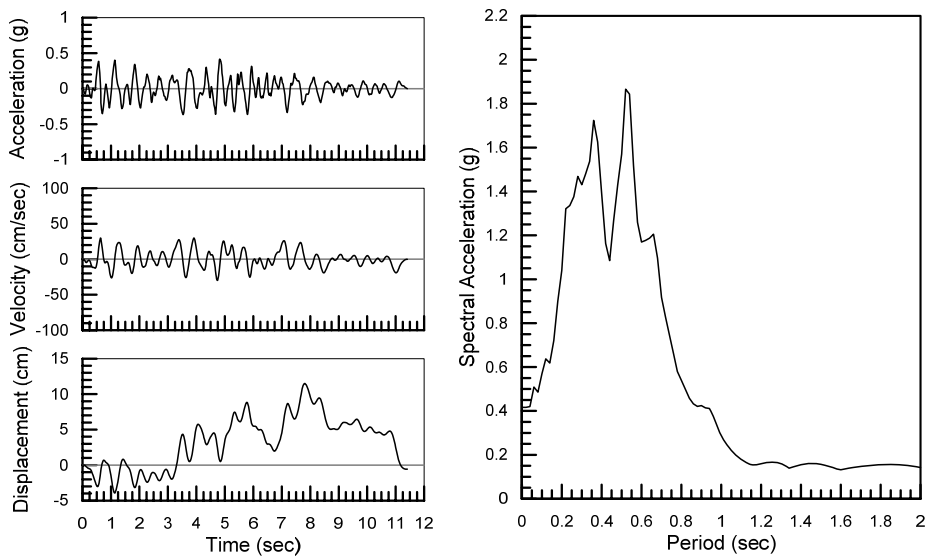
Kocaeli 090



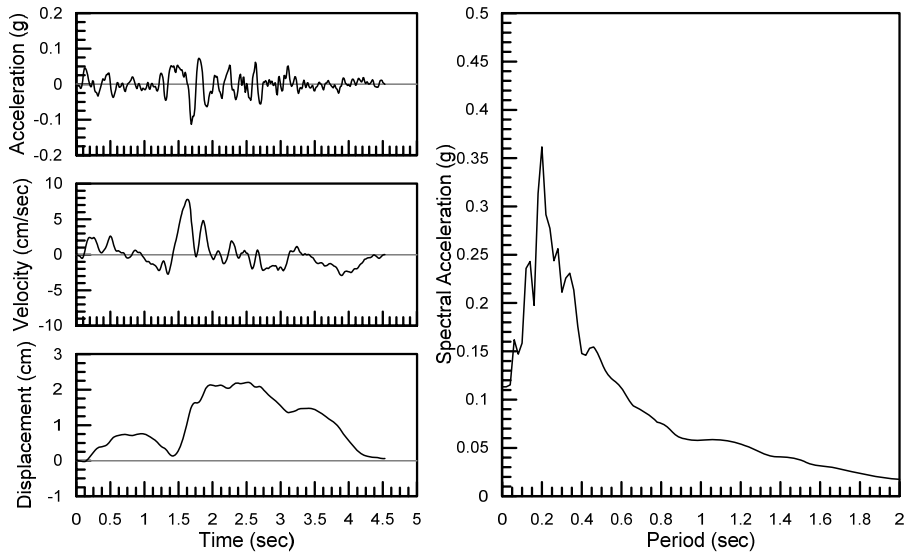
Kocaeli 270



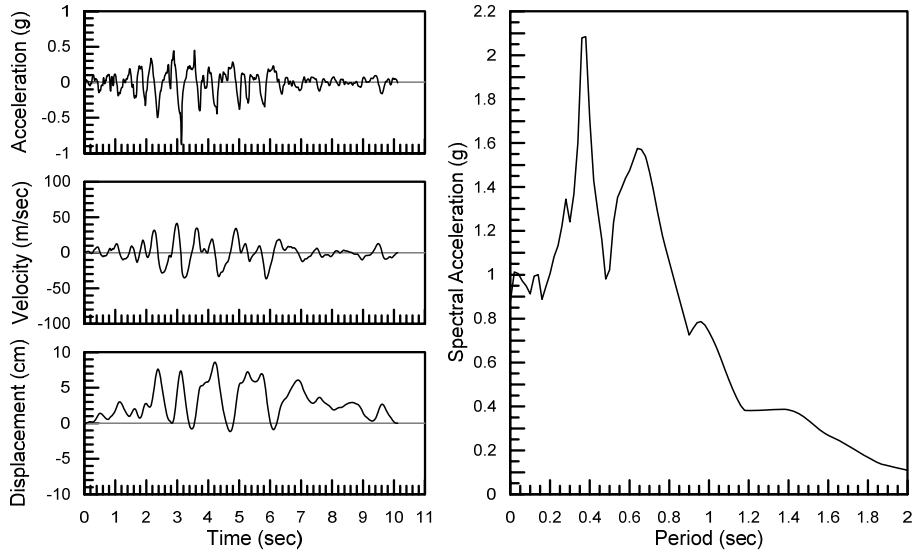
Lefkada



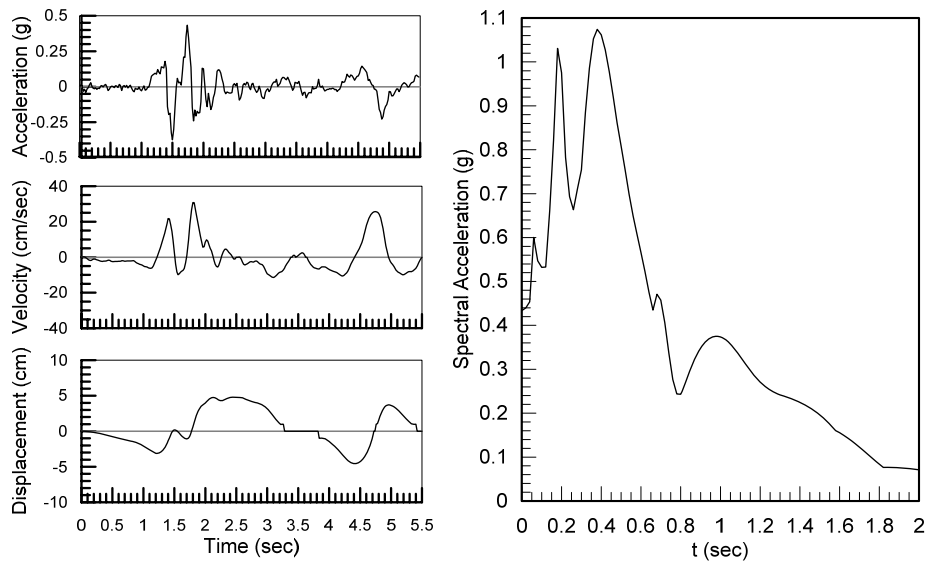
Loma Prieta



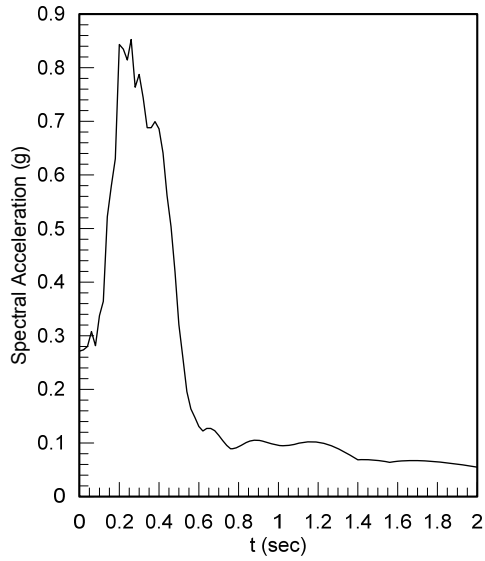
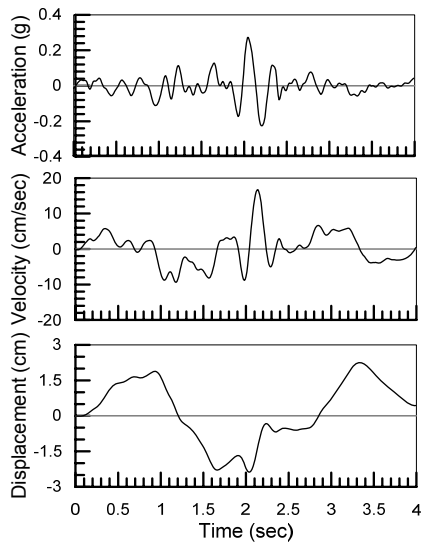
Northridge



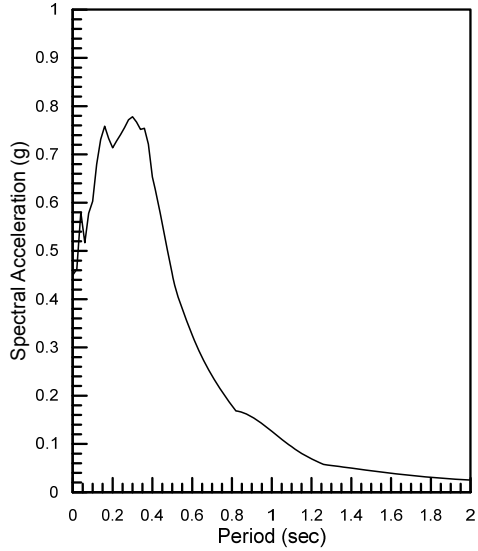
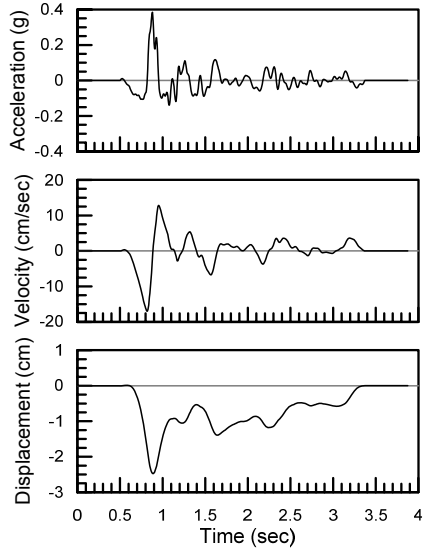
Northridge 265



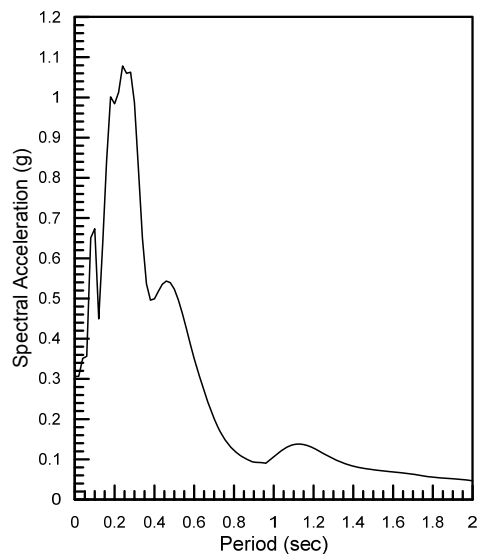
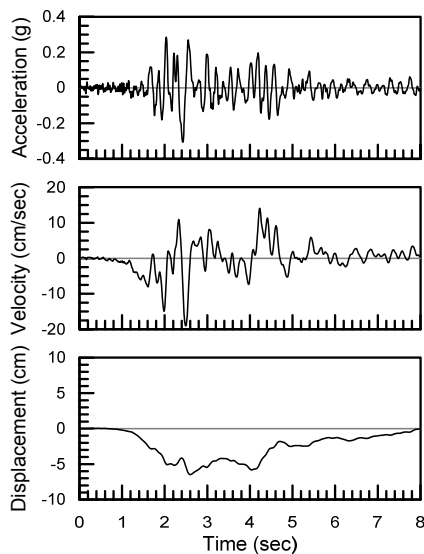
Parkfield



Pyrgos



Sepolia



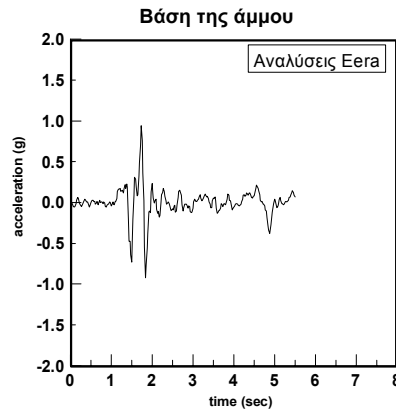
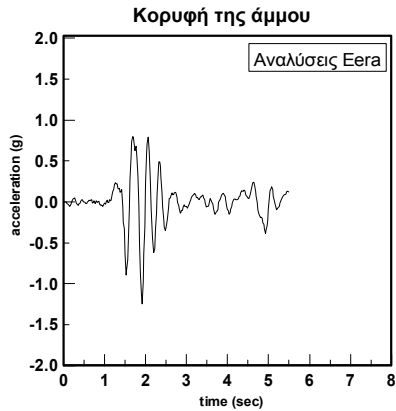
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β:

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ

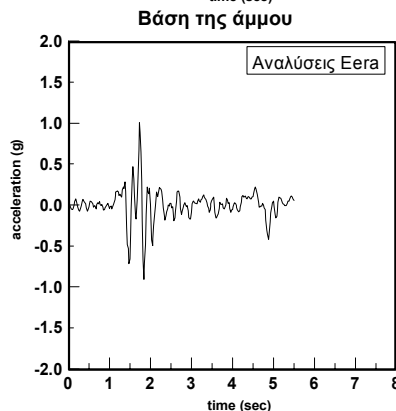
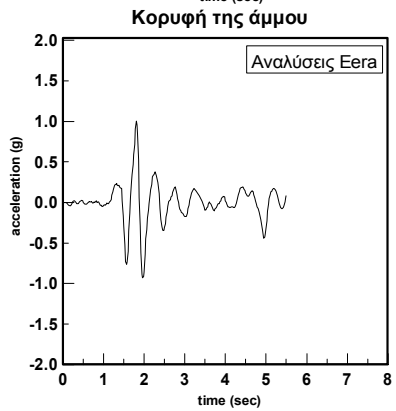
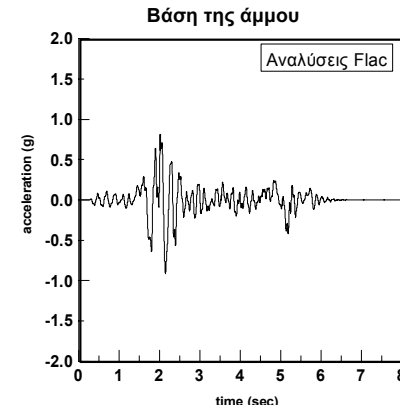
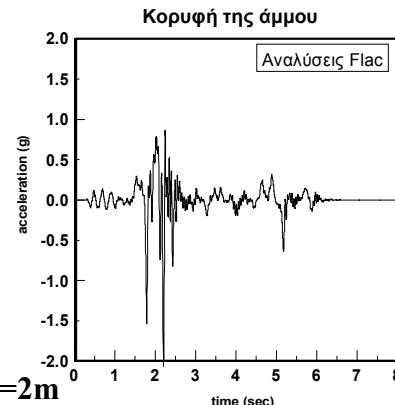
ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ - ΧΡΟΝΟΪΣΤΟΡΙΕΣ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: Επιταχυνσιογραφήματα

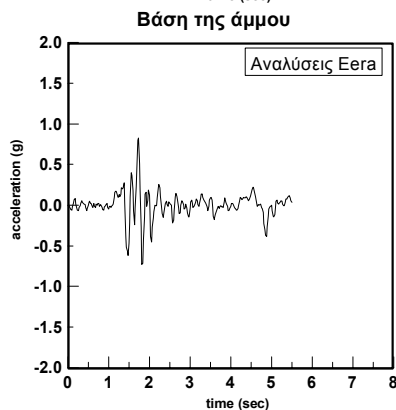
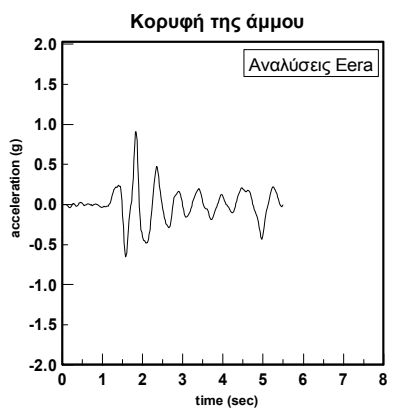
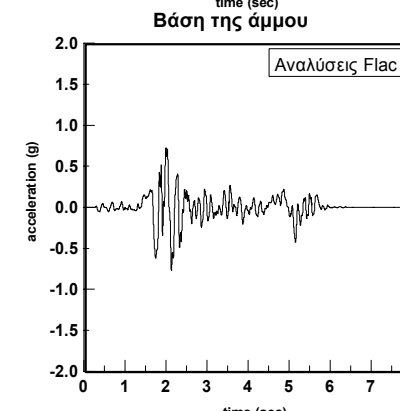
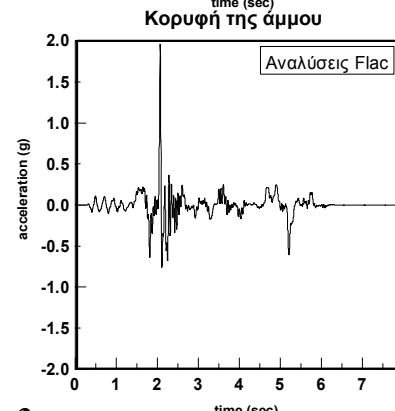
Northridge265 M6.7: $\alpha_{max} = 0,53g$



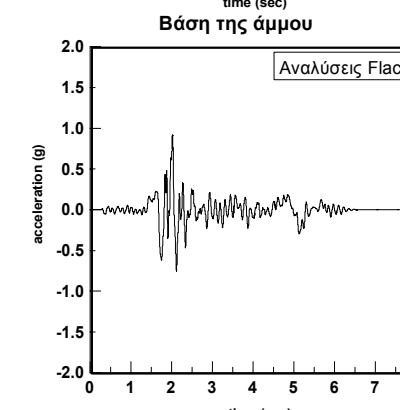
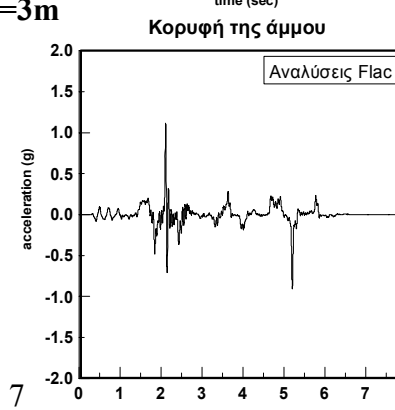
H=1m



H=2m

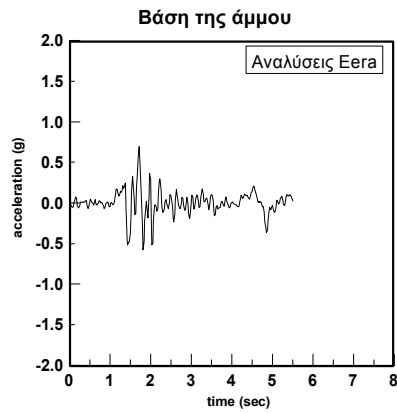
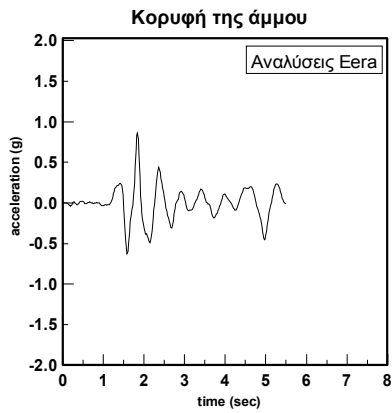


H=3m

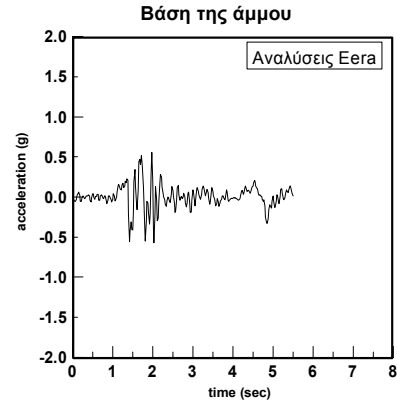
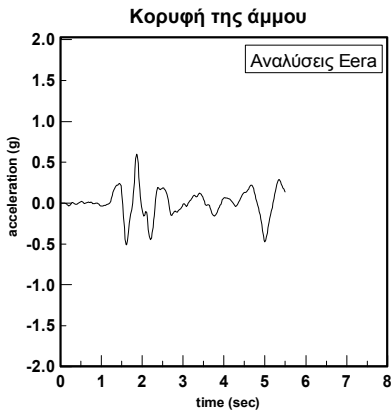
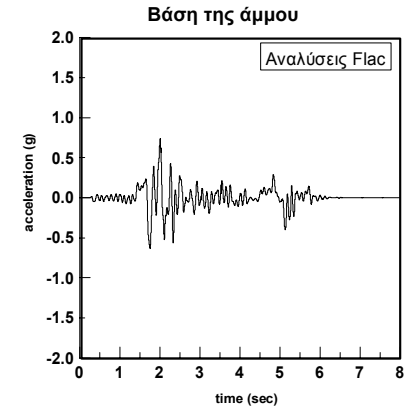
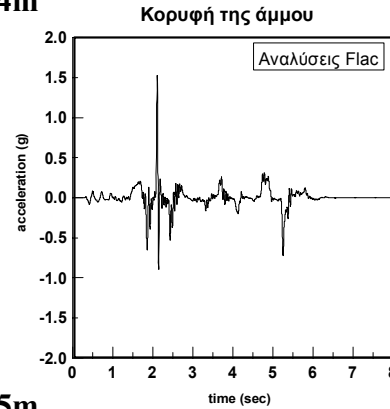


ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: Επιταχυνσιογραφήματα

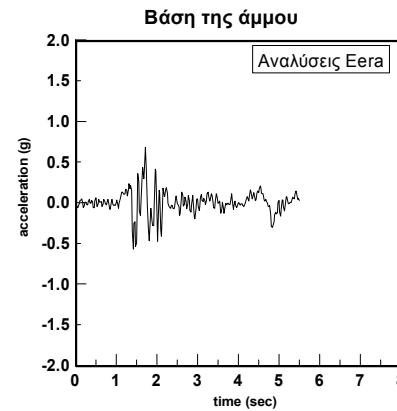
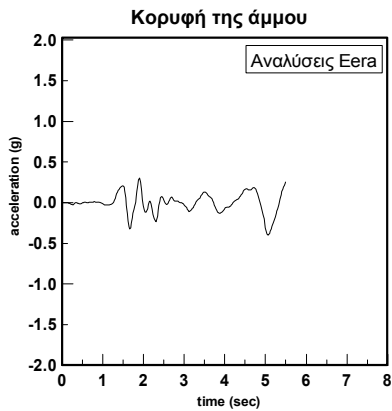
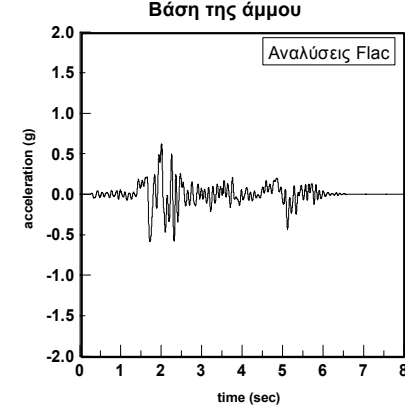
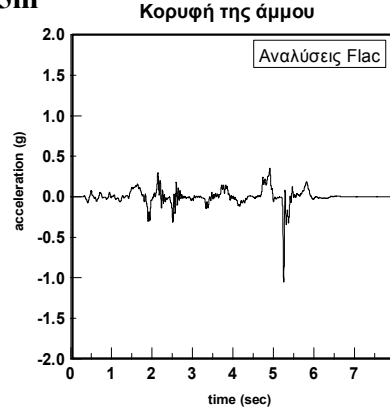
Northridge265 M6.7: $\alpha_{max} = 0,53g$



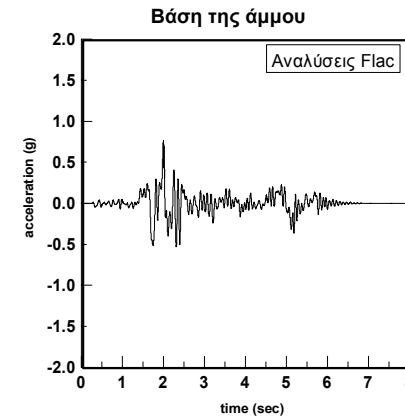
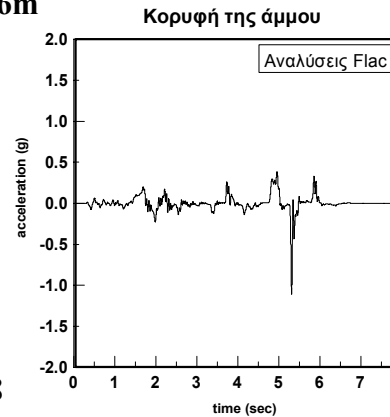
H=4m



H=5m

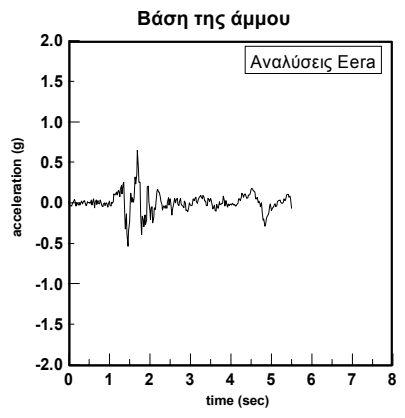
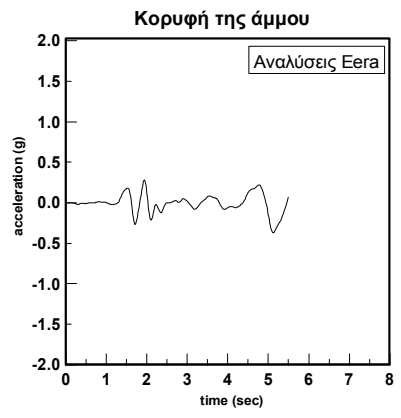
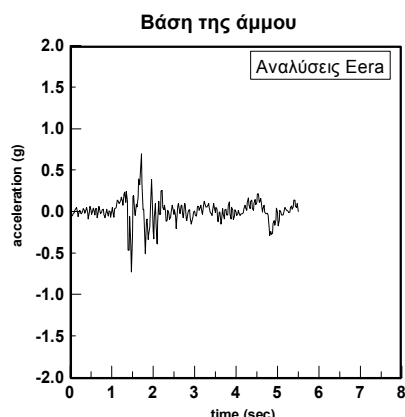
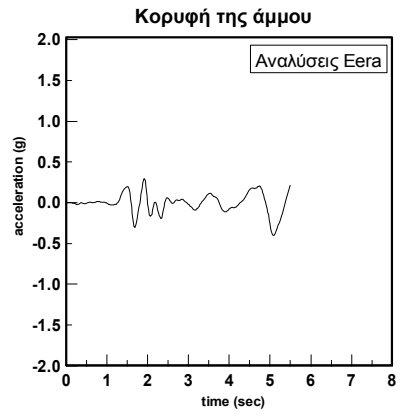
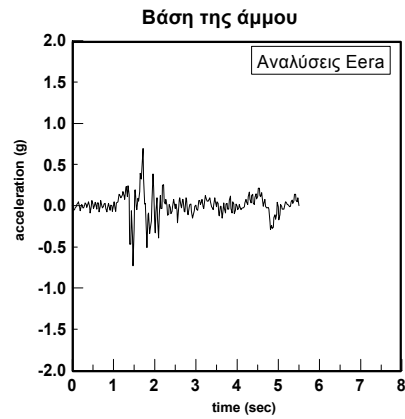
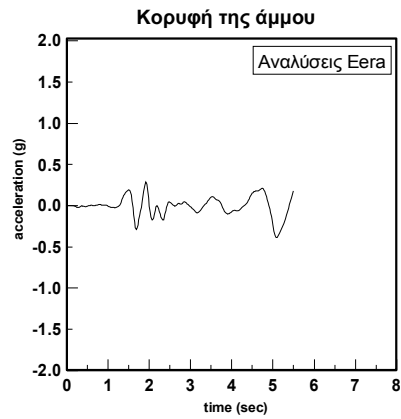


H=6m

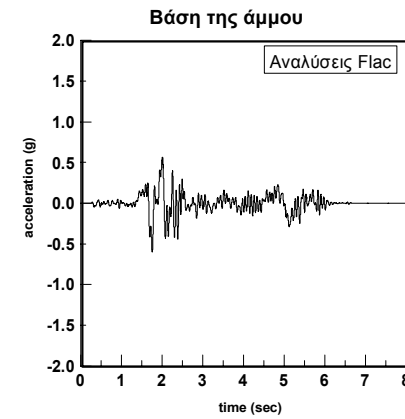
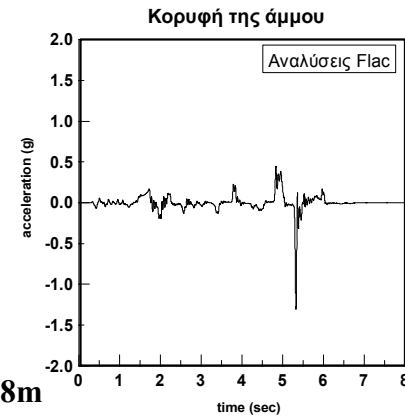


ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: Επιταχυνσιογραφήματα

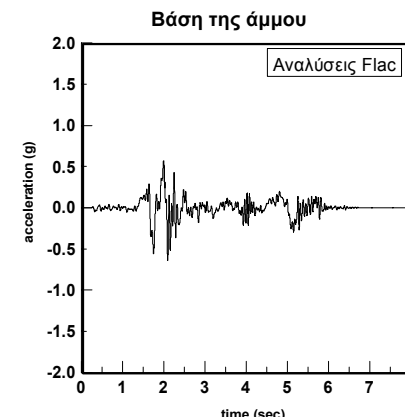
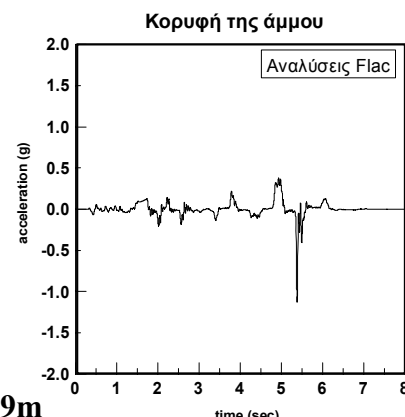
Northridge265 M6.7: $\alpha_{max} = 0,53g$



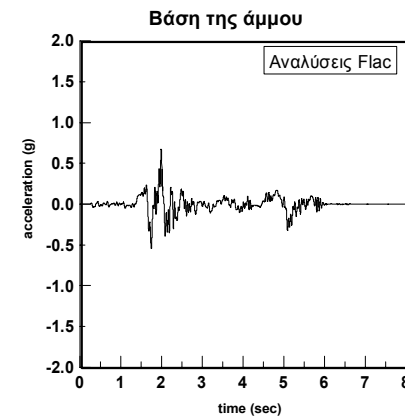
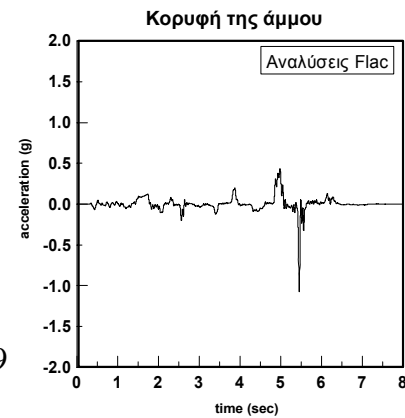
H=7m



H=8m

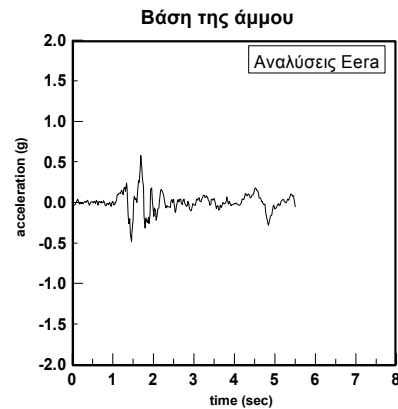
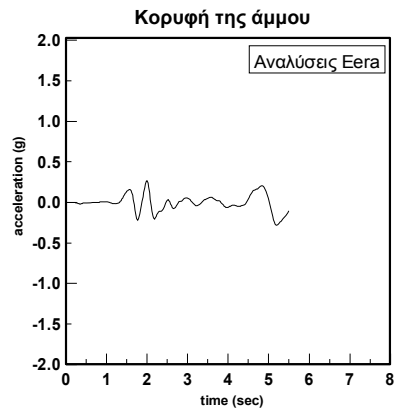


H=9m

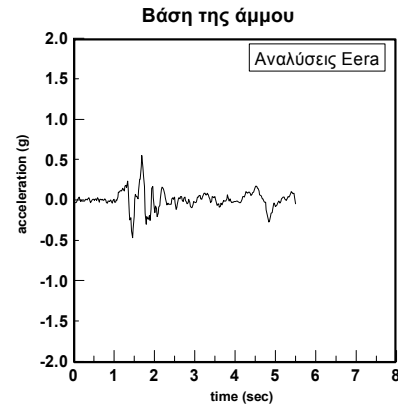
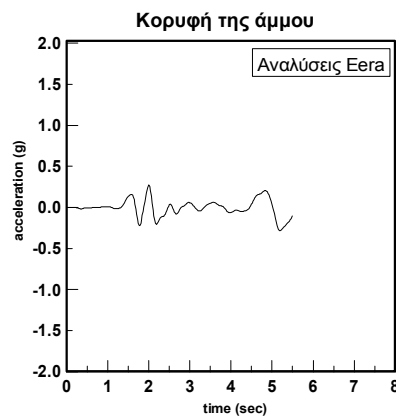
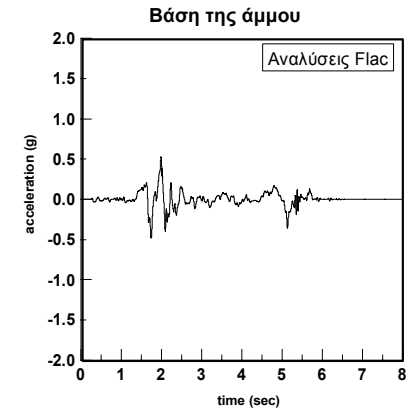
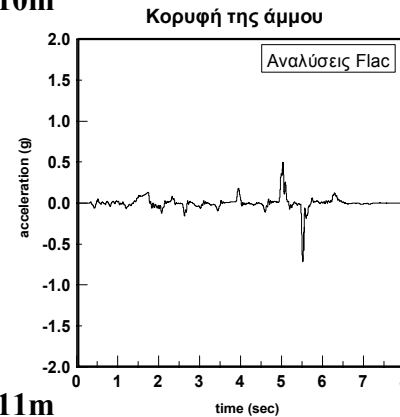


ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: Επιταχυνσιογραφήματα

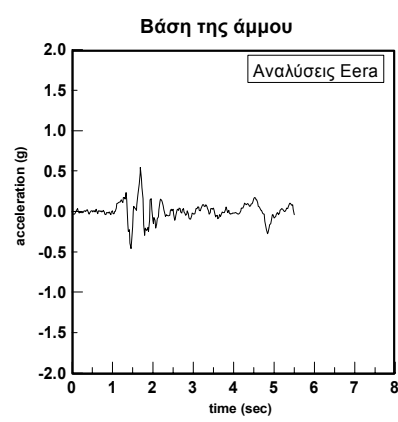
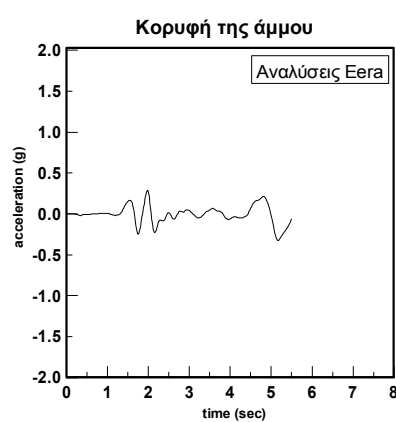
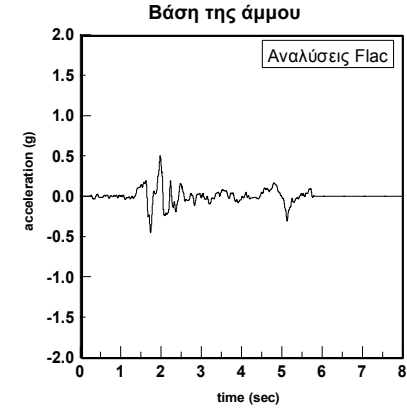
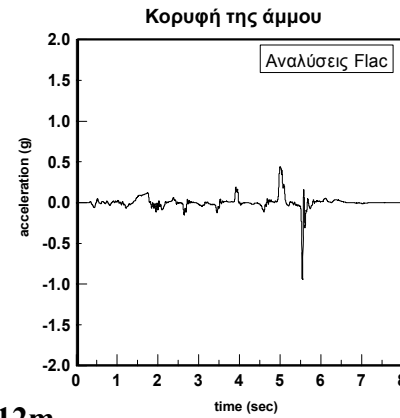
Northridge265 M6.7: $\alpha_{max}=0,53g$



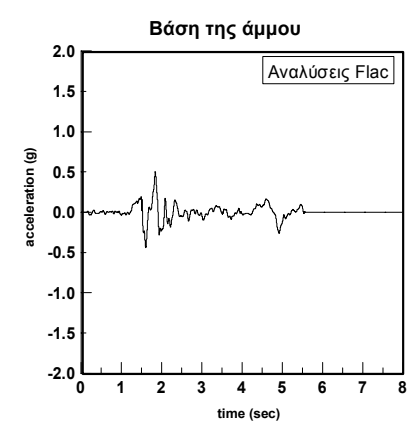
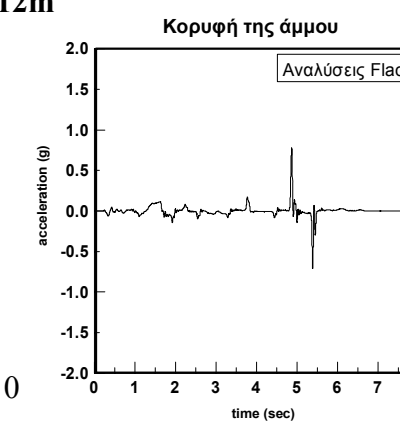
H=10m



H=11m

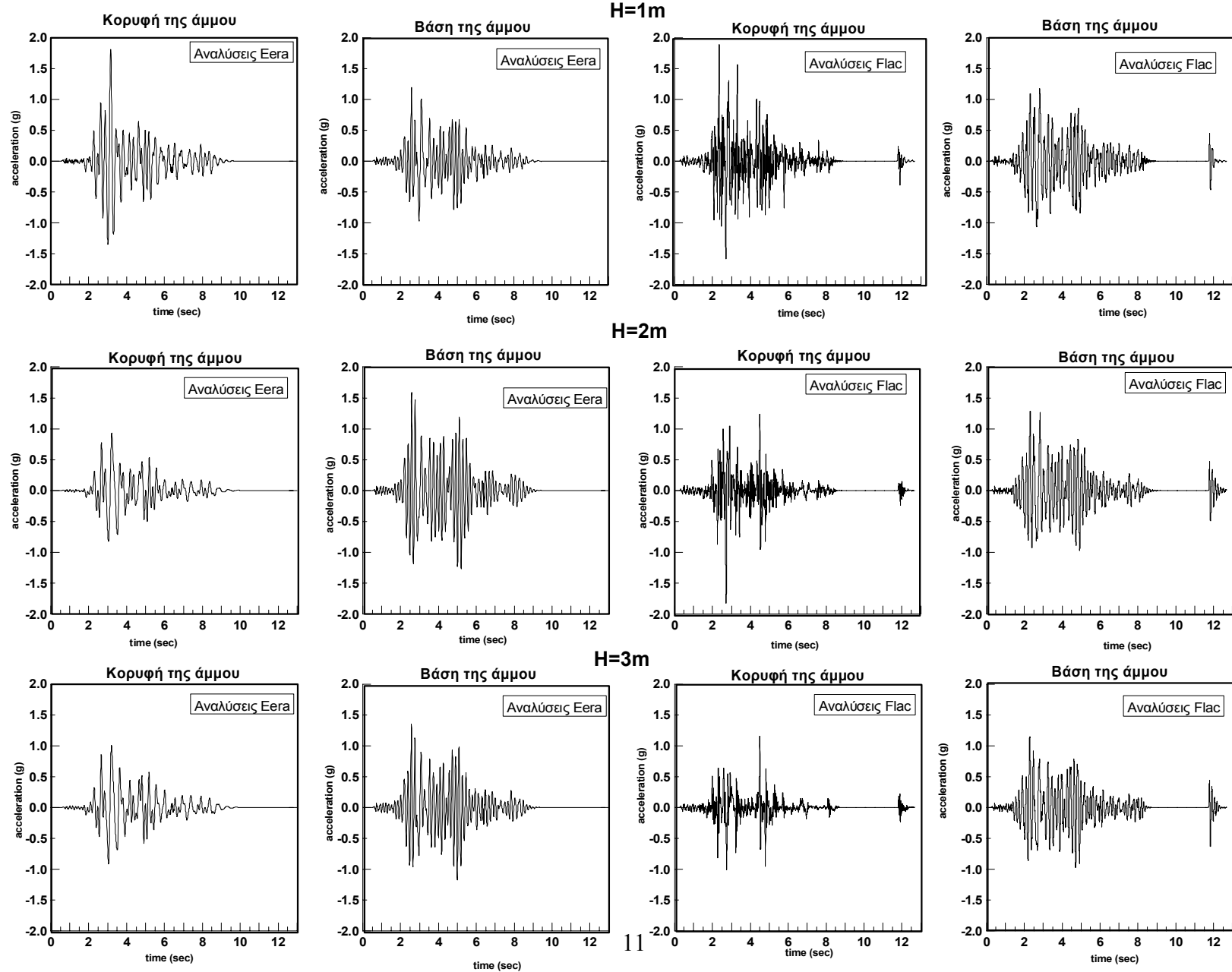


H=12m



ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: Επιταχυνσιογραφήματα

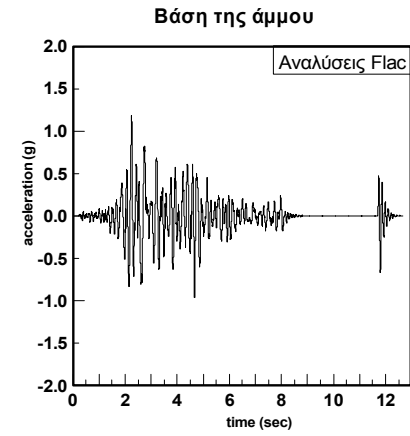
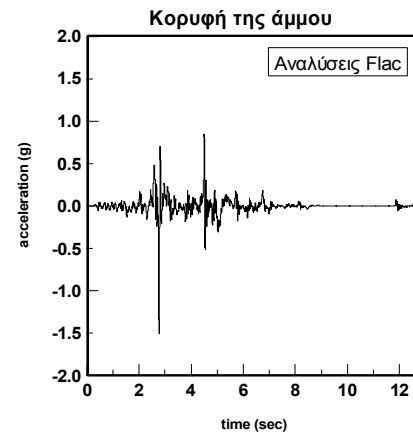
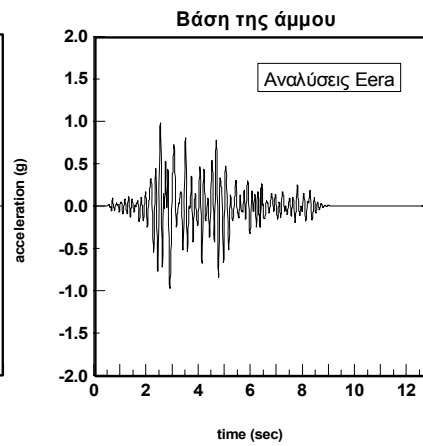
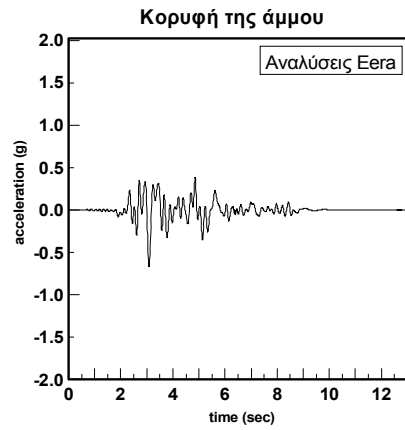
Sepolia M5.8: $\alpha_{\max} = 0,63g$



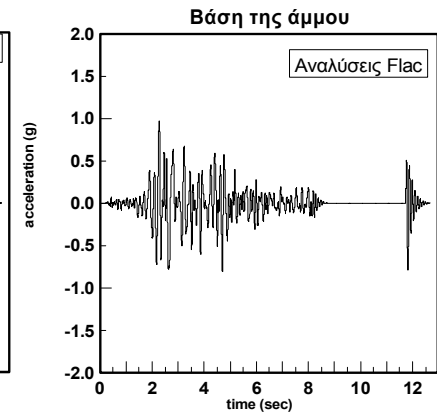
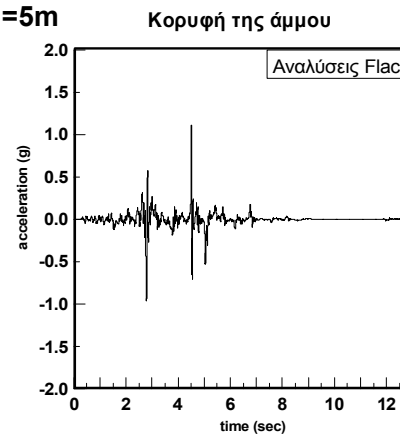
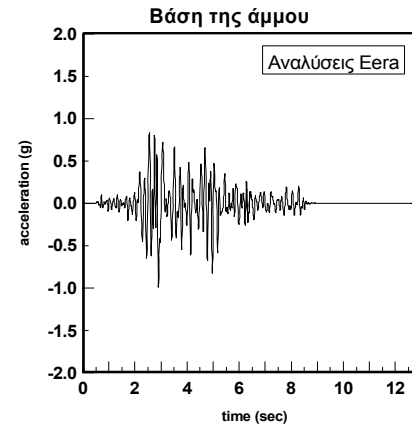
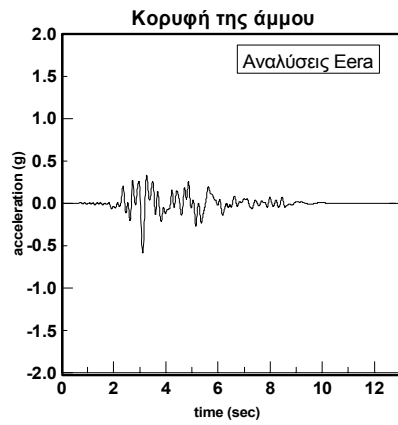
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: Επιταχυνσιογραφήματα

Sepolia M5.8: $\alpha_{\max} = 0,63g$

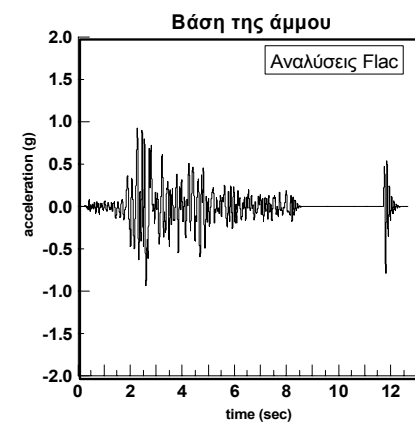
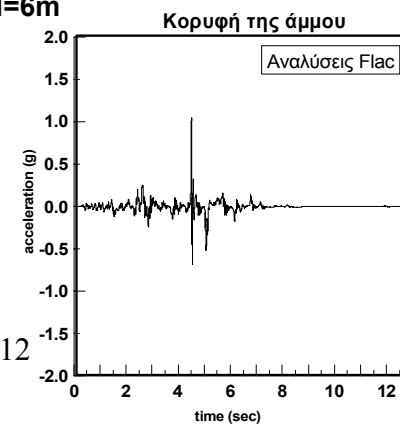
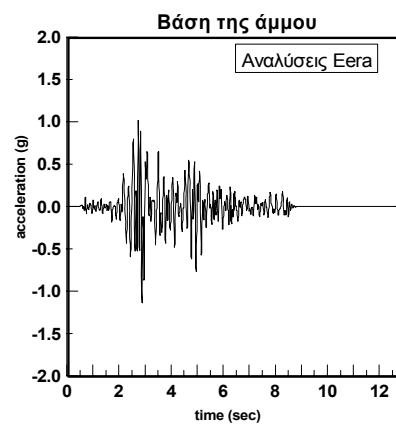
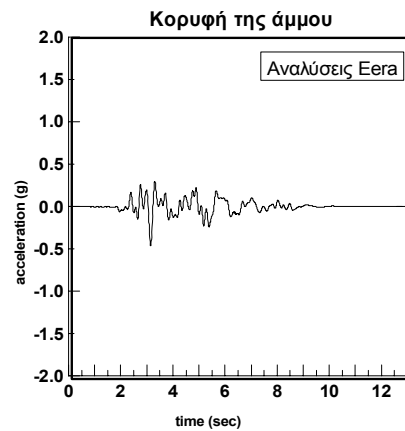
H=4m



H=5m



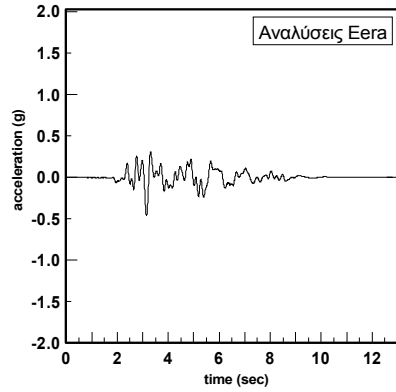
H=6m



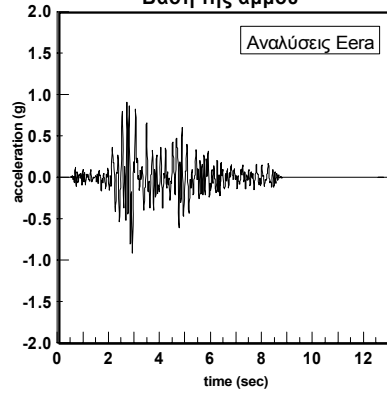
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: Επιταχυνσιογραφήματα

Sepolia M5.8: $\alpha_{\max} = 0,63g$

Κορυφή της άμμου

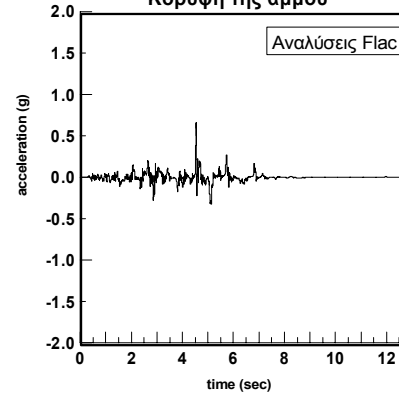


Βάση της άμμου

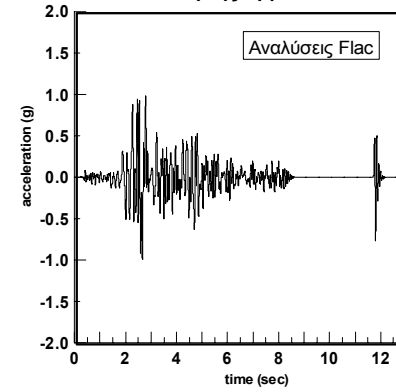


H=7m

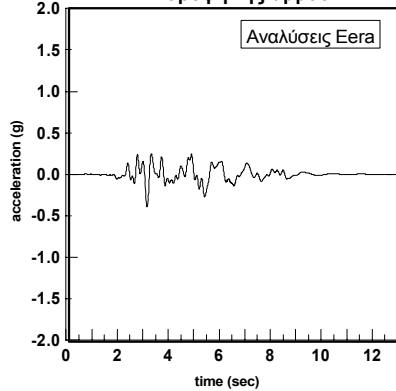
Κορυφή της άμμου



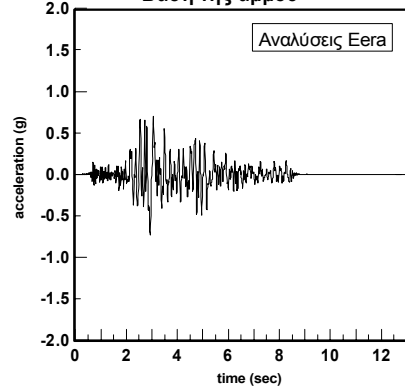
Βάση της άμμου



Κορυφή της άμμου

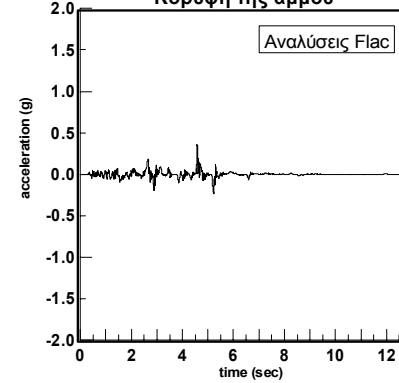


Βάση της άμμου

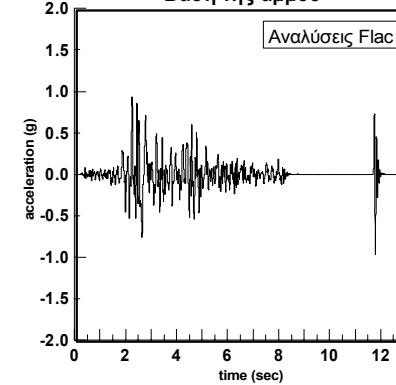


H=8m

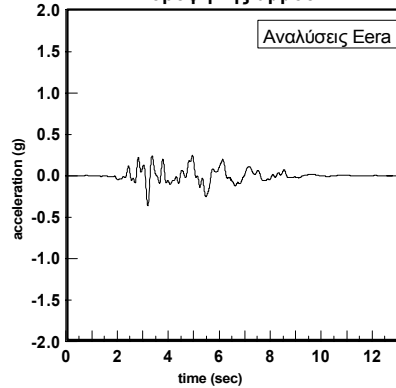
Κορυφή της άμμου



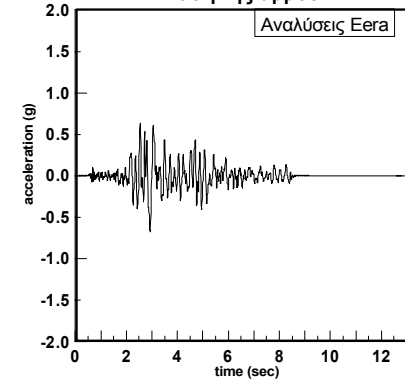
Βάση της άμμου



Κορυφή της άμμου

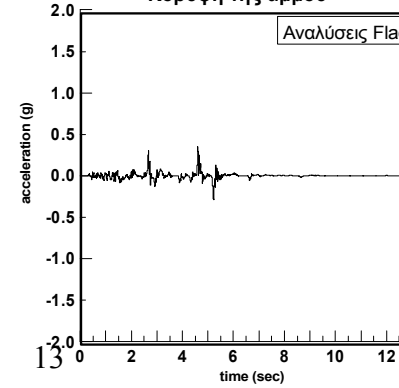


Βάση της άμμου

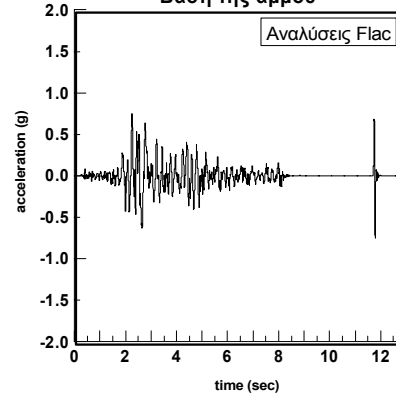


H=9m

Κορυφή της άμμου

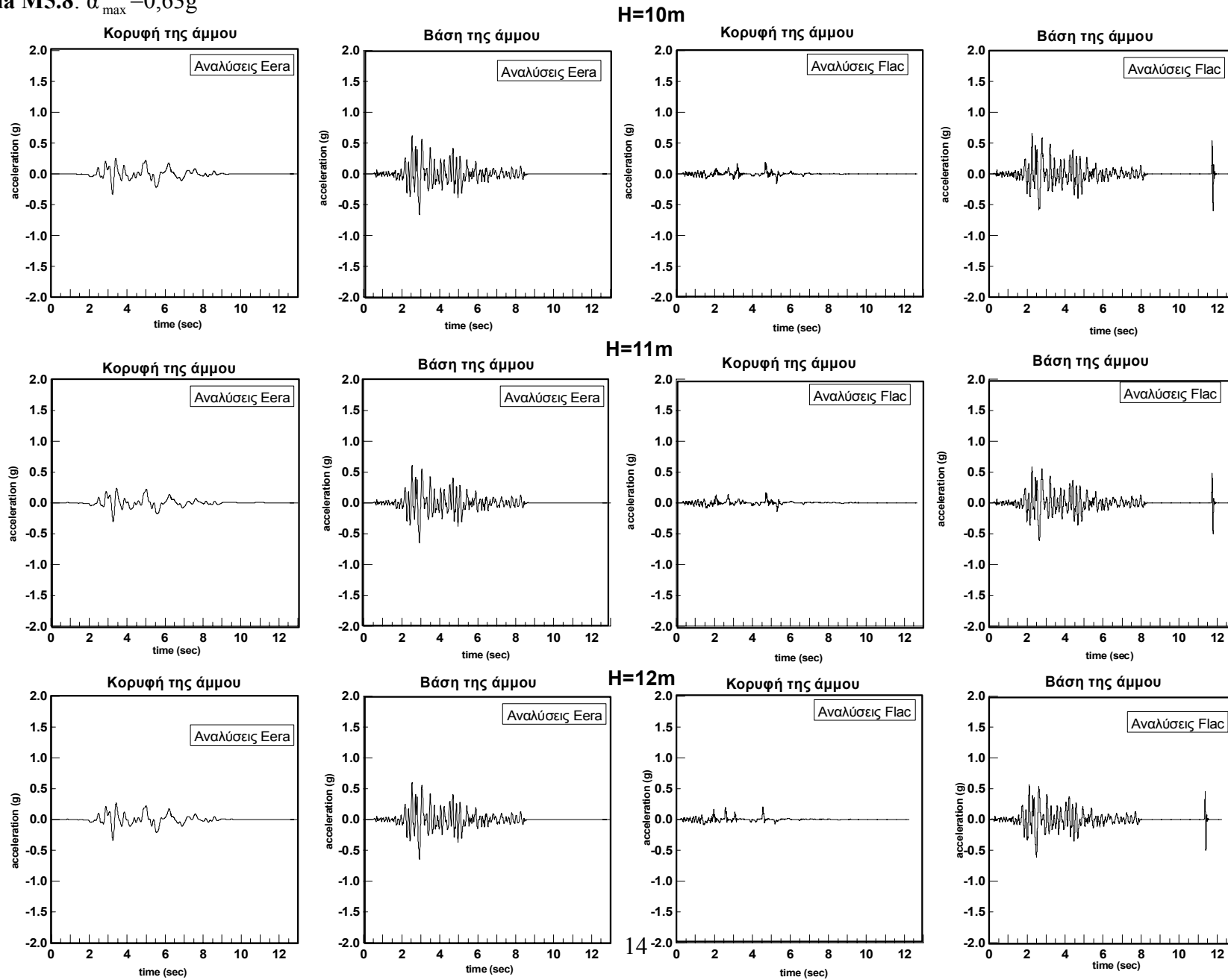


Βάση της άμμου



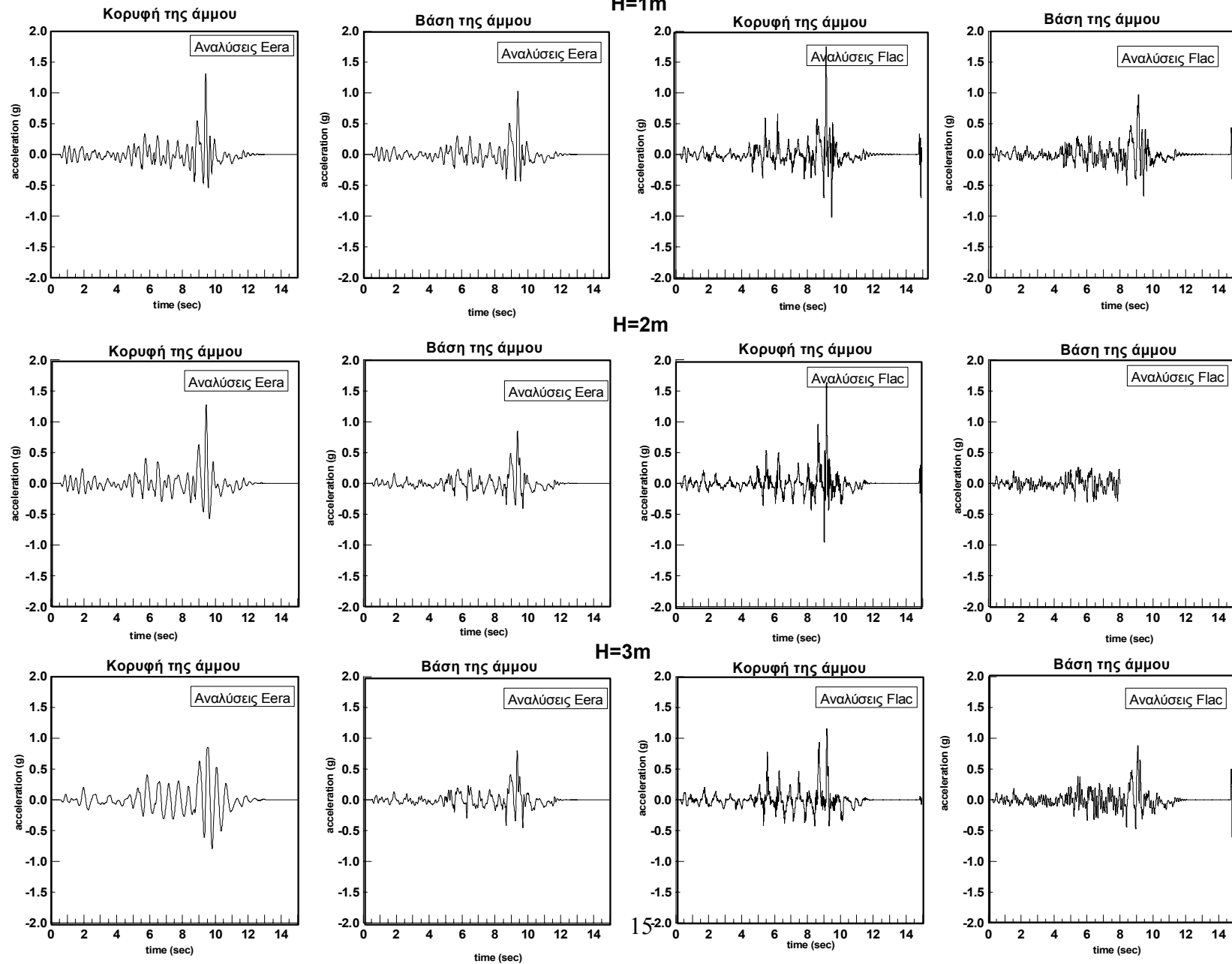
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: Επιταχυνσιογραφήματα

Sepolia M5.8: $\alpha_{\max} = 0,63g$



ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: Επιταχυνσιογραφήματα

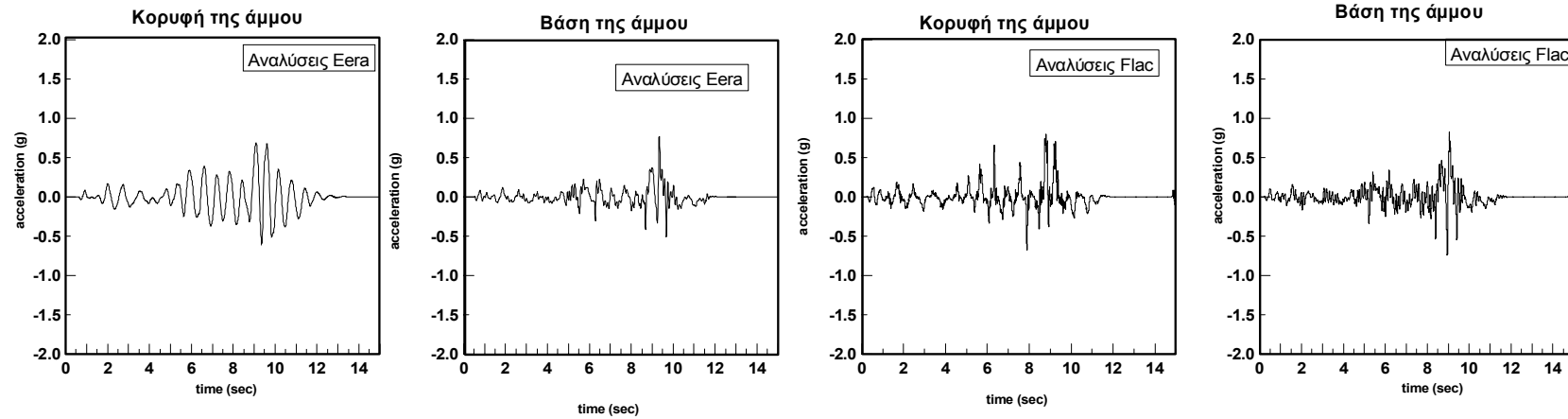
Chichi M6.8: $\alpha_{\max} = 0,52g$



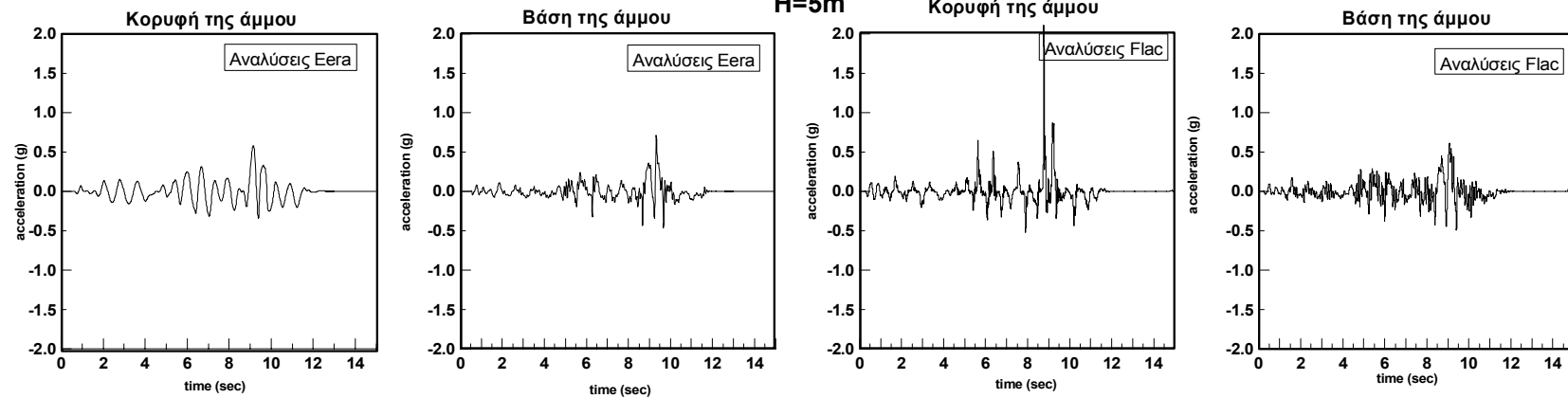
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: Επιταχυνσιογραφήματα

Chichi M6.8: $\alpha_{\max} = 0,52g$

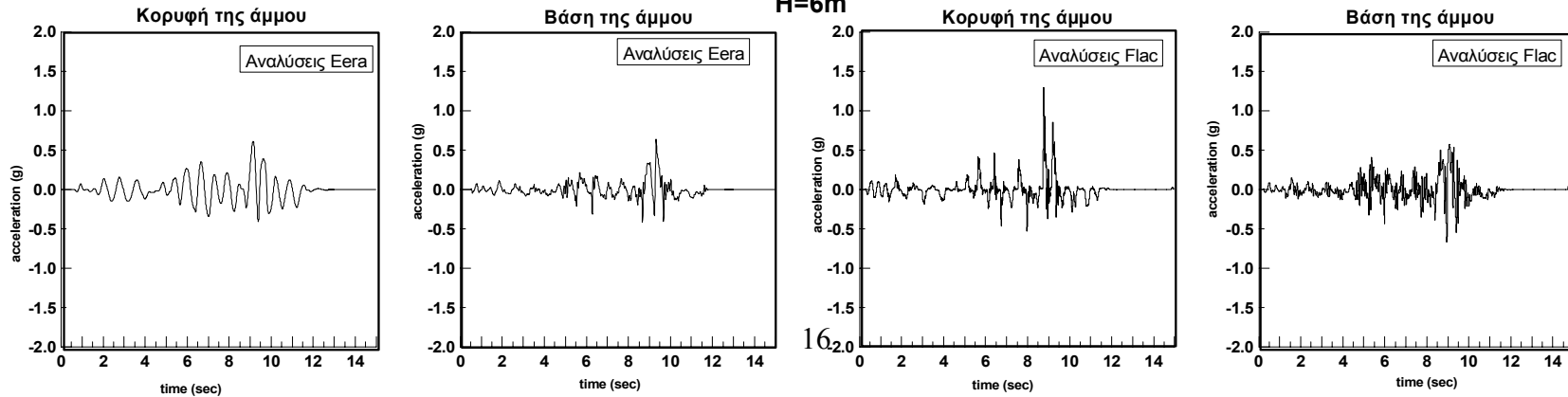
H=4m



H=5m

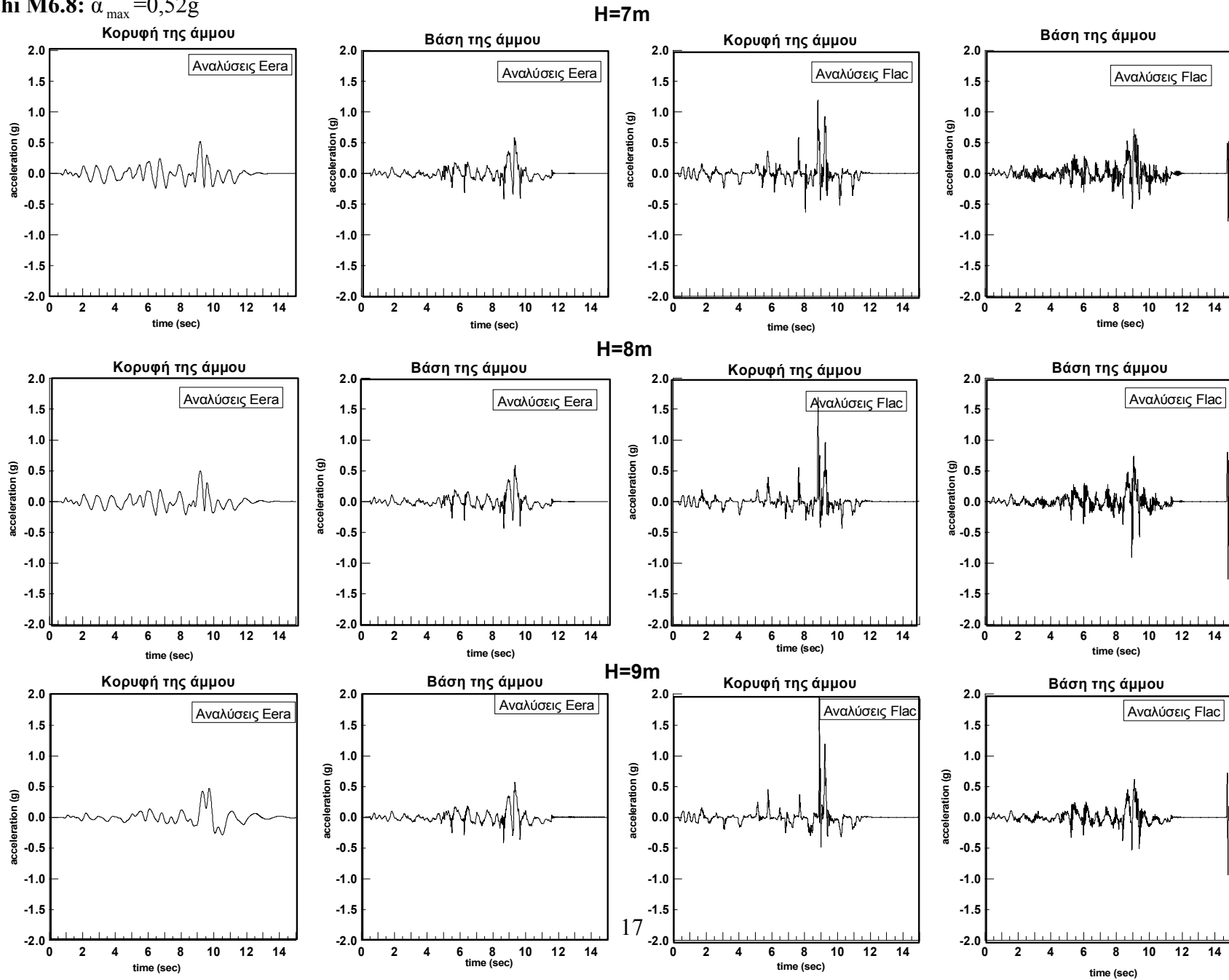


H=6m



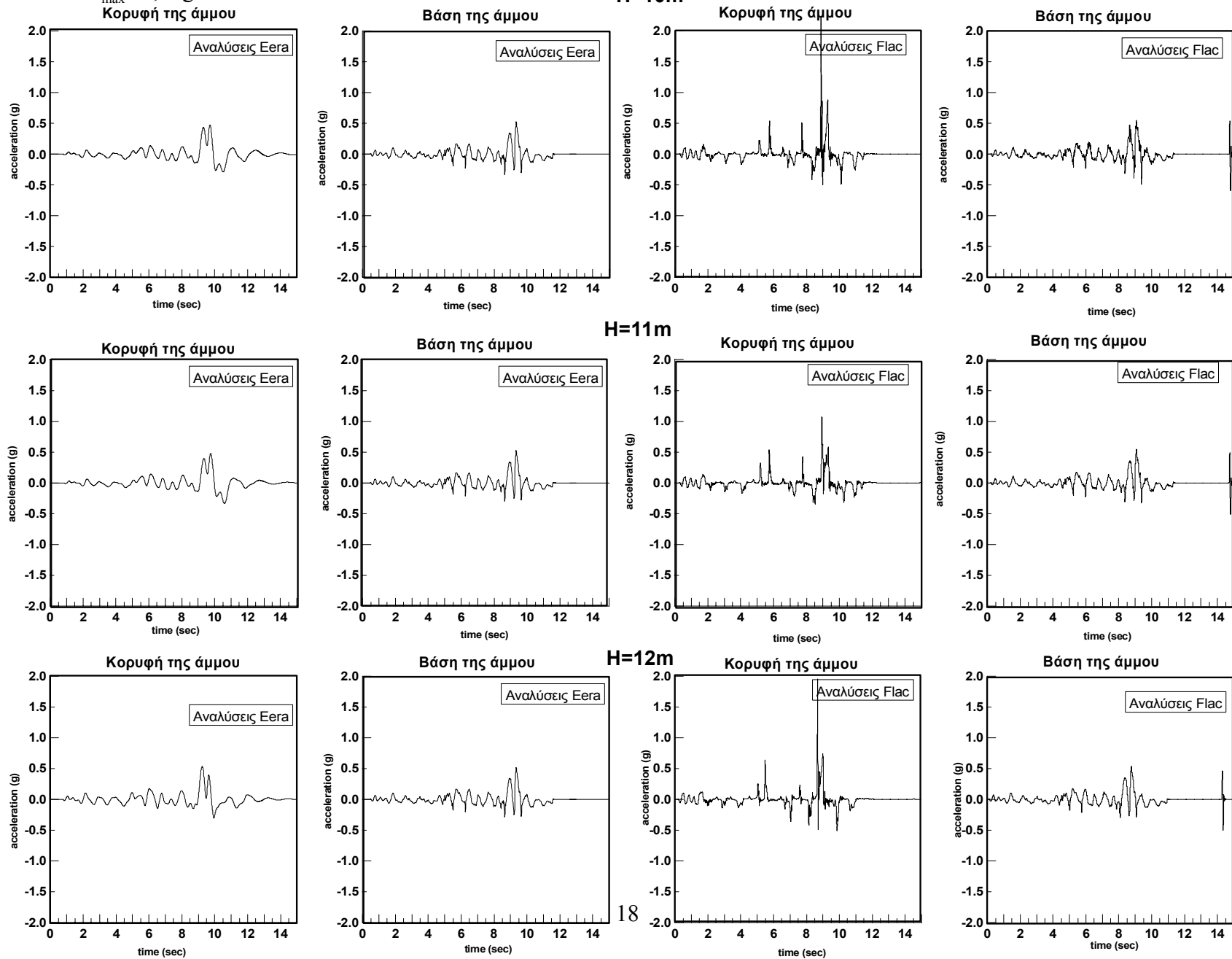
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: Επιταχυνσιογραφήματα

Chichi M6.8: $\alpha_{max} = 0,52g$



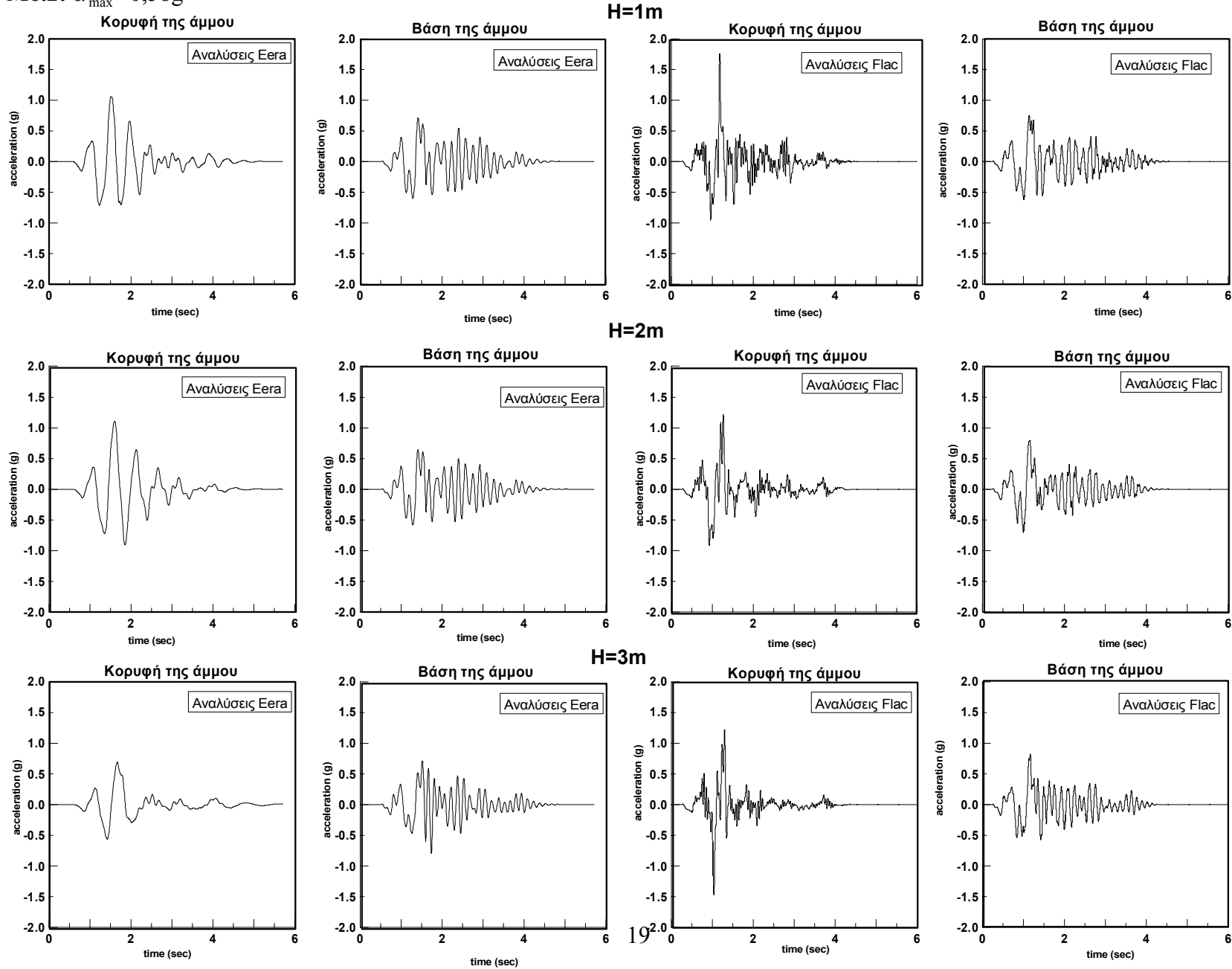
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: Επιταχυνσιογραφήματα

Chichi M6.8: $\alpha_{\max} = 0,52g$



ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: Επιταχυνσιογραφήματα

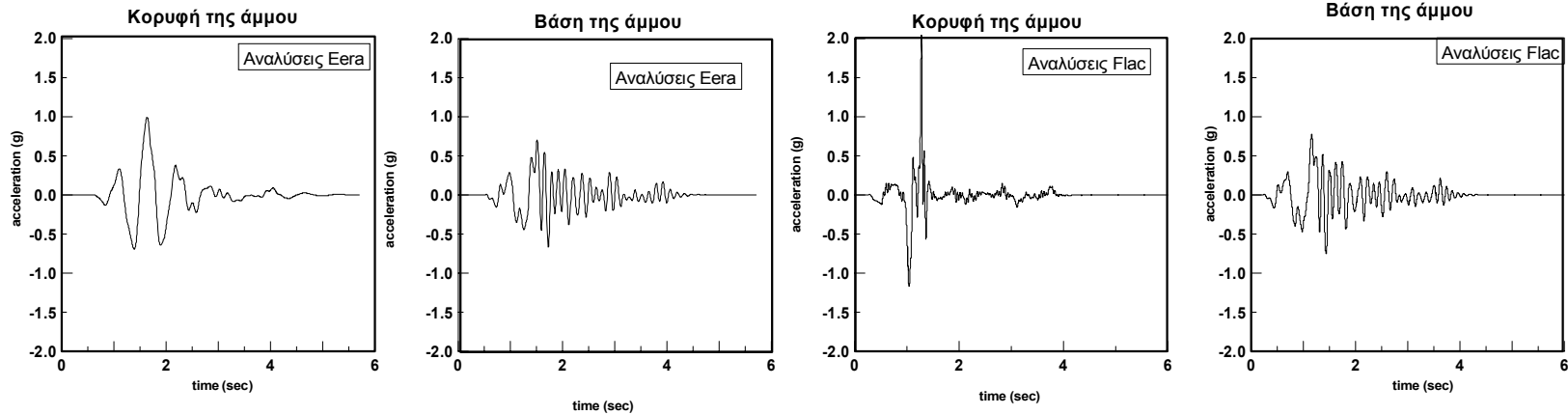
Αίγιο M6.2: $\alpha_{max} = 0,58g$



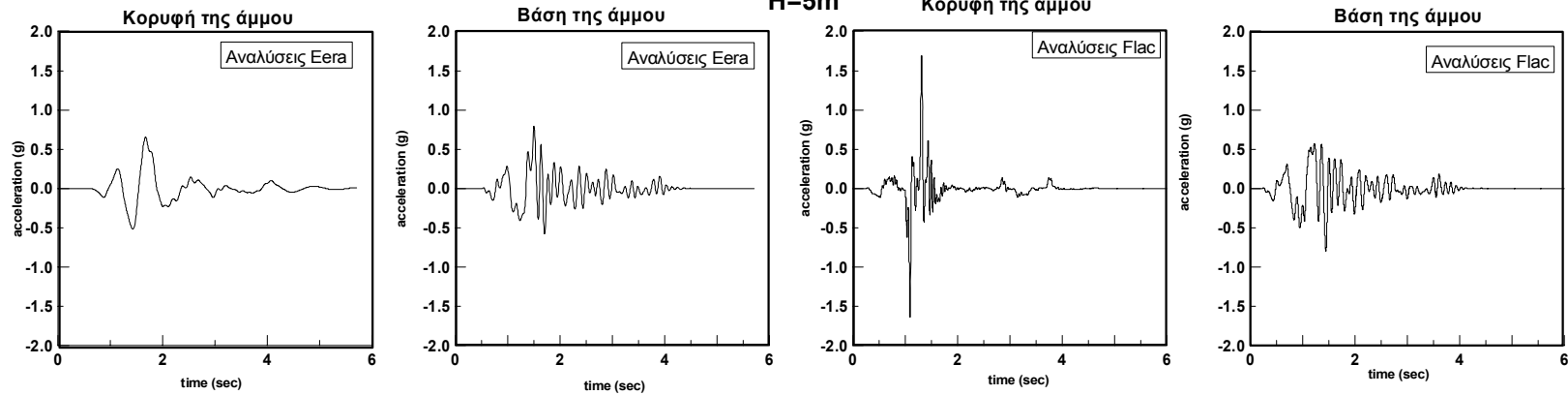
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: Επιταχυνσιογραφήματα

Αίγιο M6.2: $\alpha_{\max} = 0,58g$

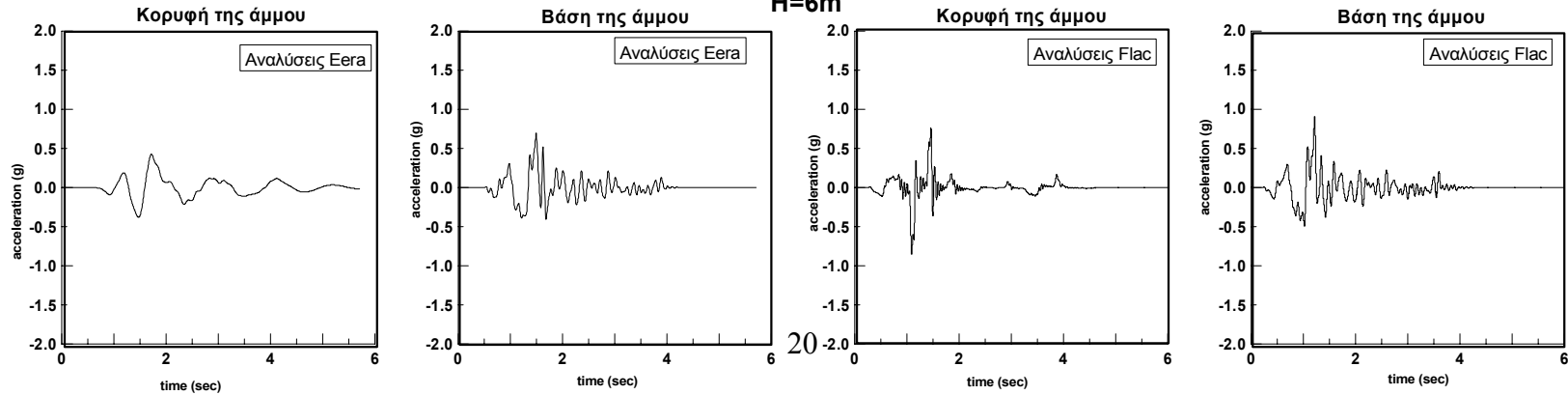
H=4m



H=5m



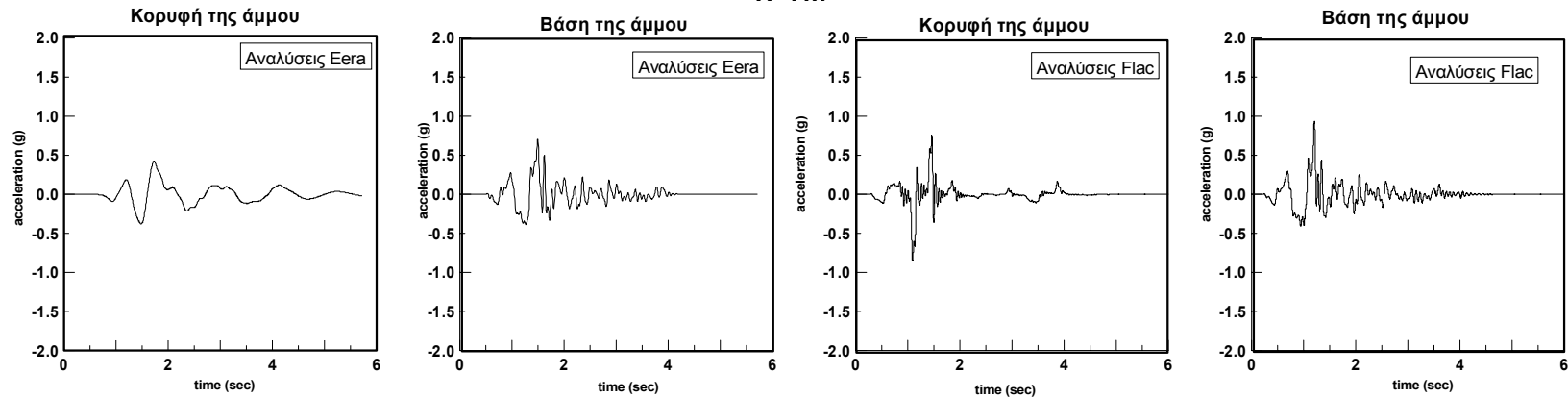
H=6m



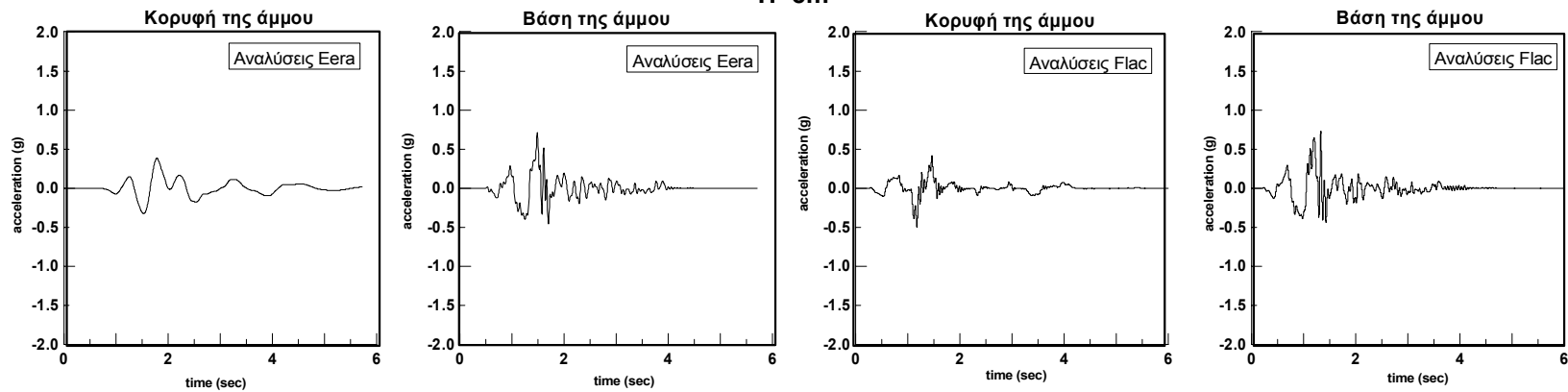
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: Επιταχυνσιογραφήματα

Αίγιο M6.2: $\alpha_{\max} = 0,58g$

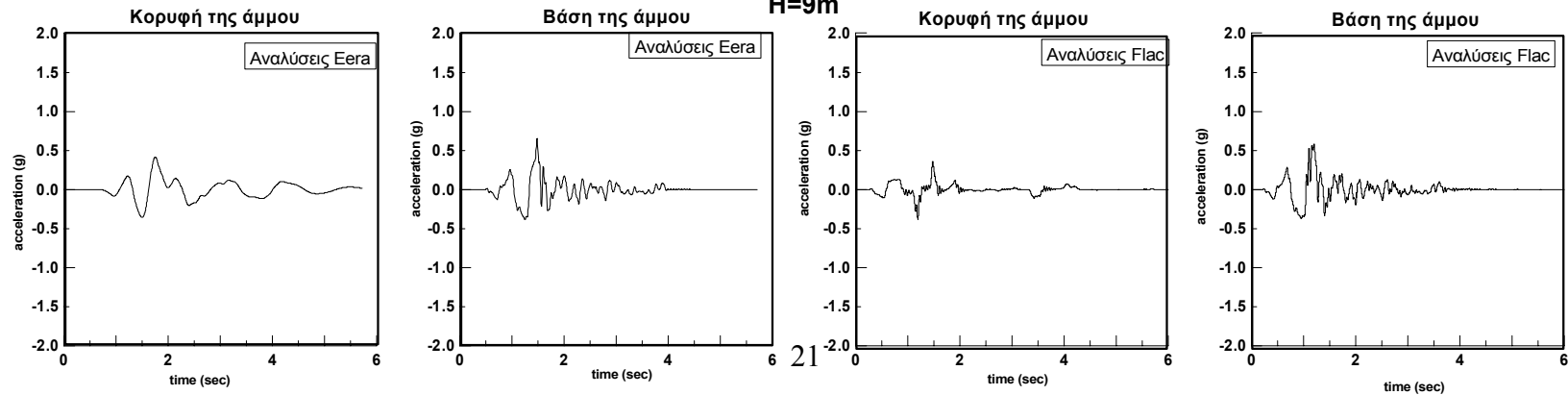
H=7m



H=8m

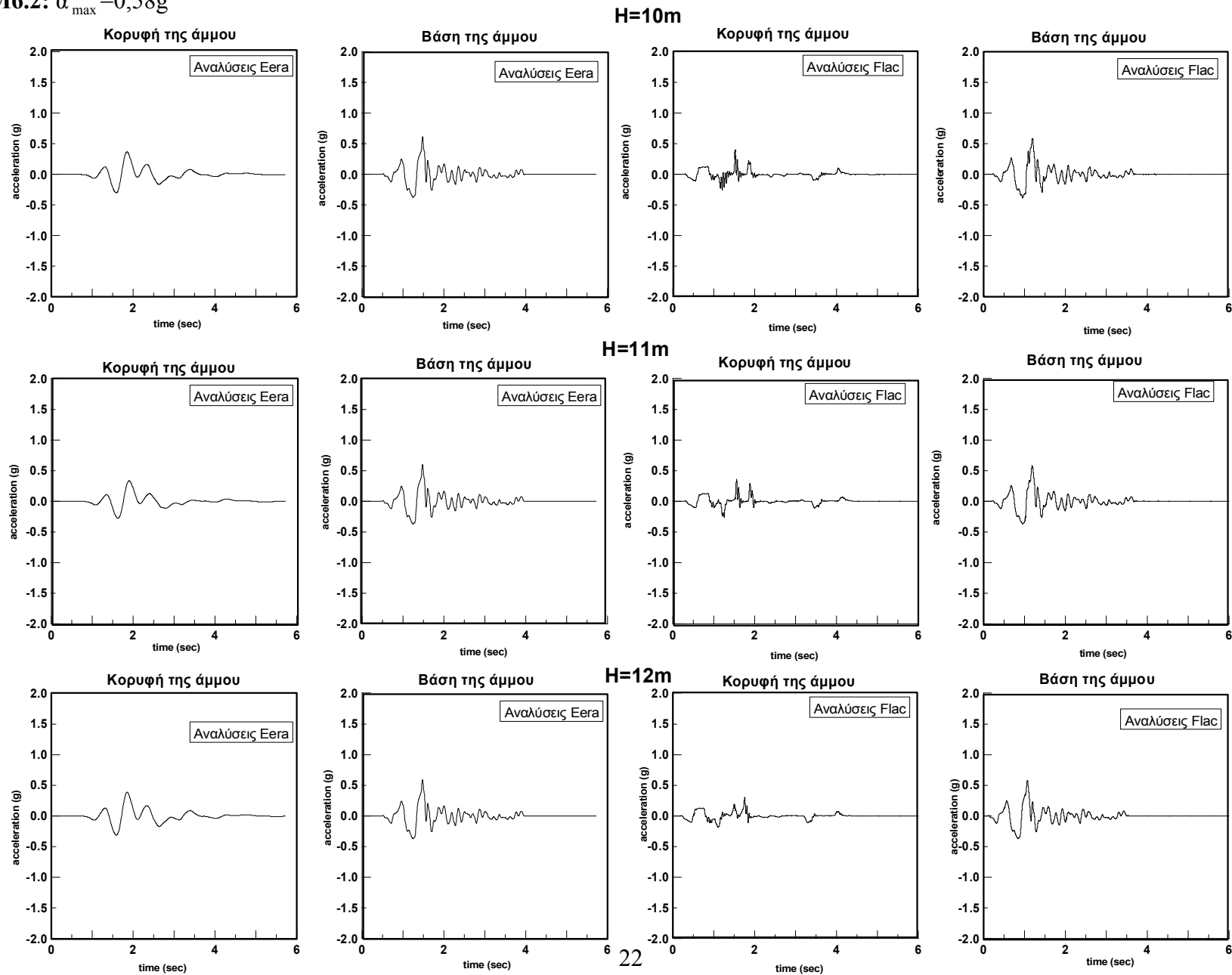


H=9m



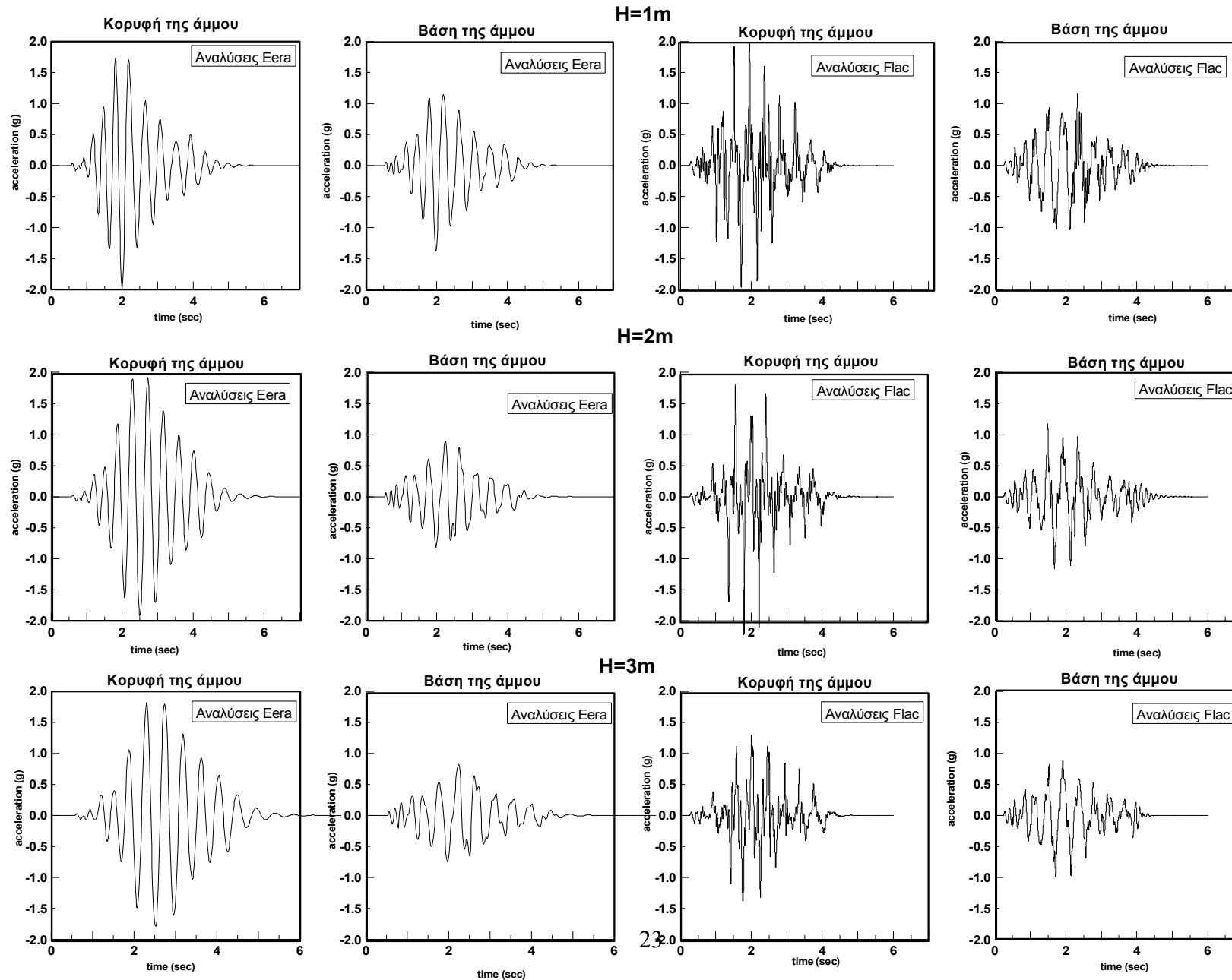
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: Επιταχυνσιογραφήματα

Aigio M6.2: $\alpha_{\max} = 0,58g$



ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: Επιταχυνσιογραφήματα

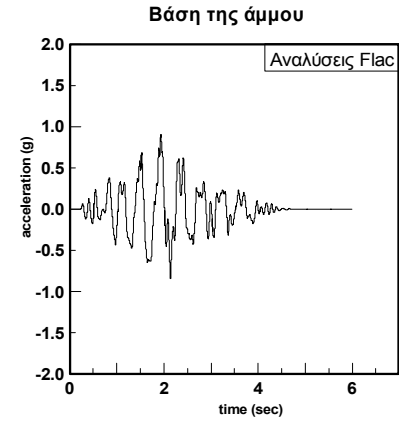
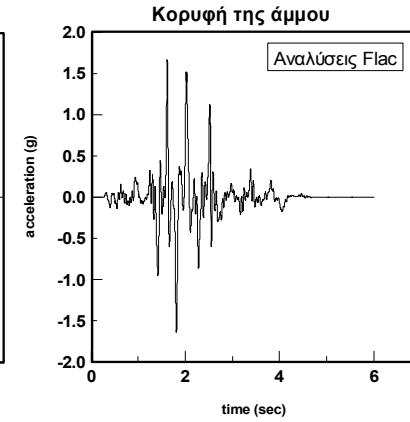
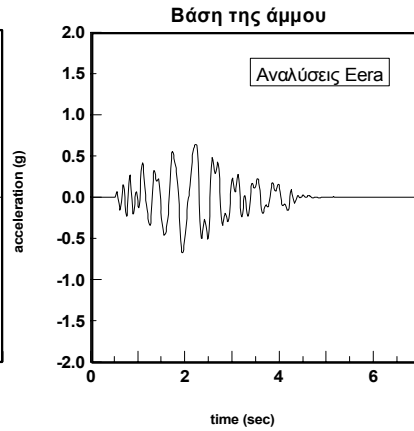
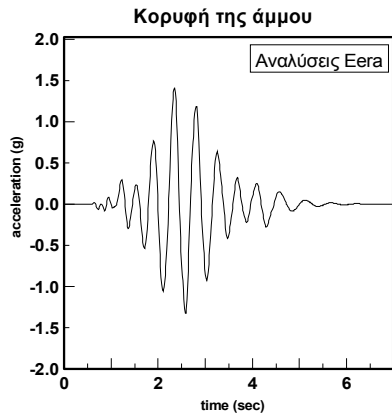
Coyote Lake M5.7: $\alpha_{\max} = 0,64g$



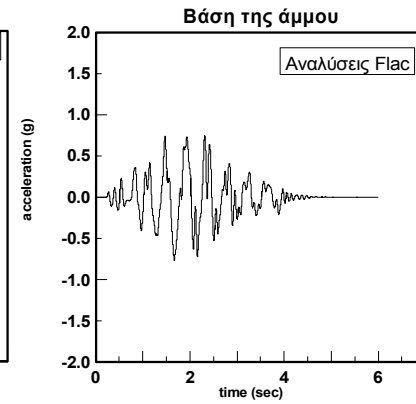
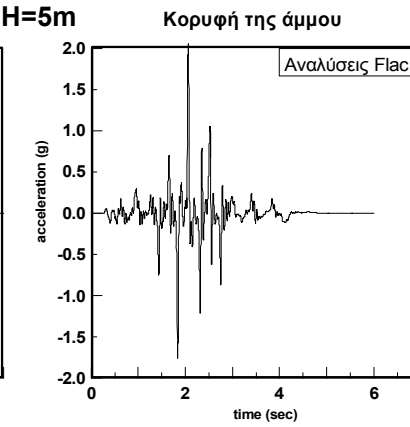
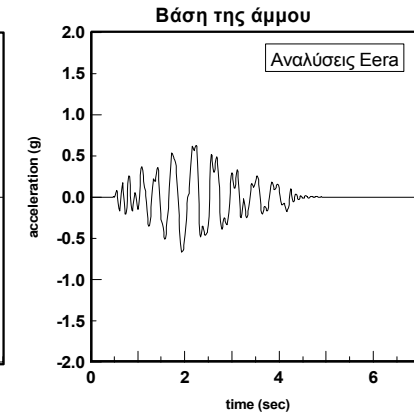
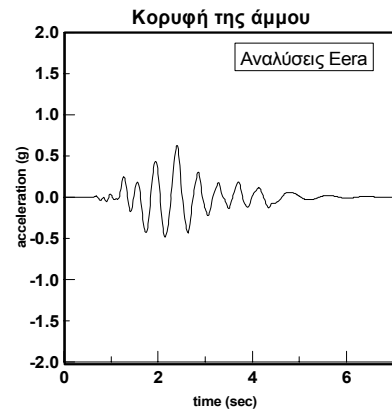
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: Επιταχυνσιογραφήματα

Coyote Lake M5.7: $\alpha_{\max} = 0,64g$

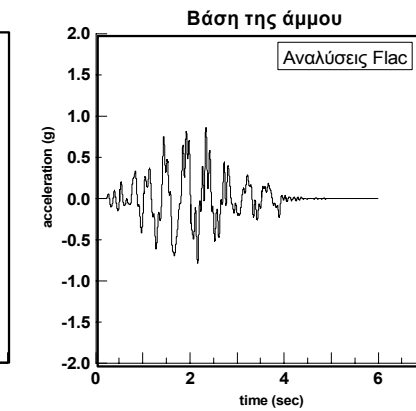
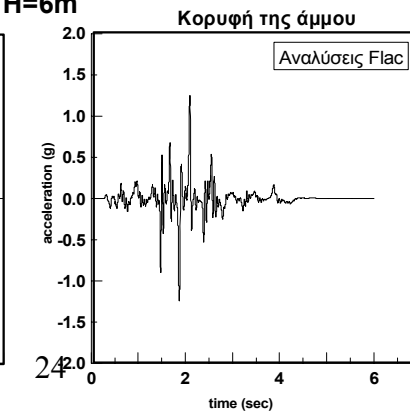
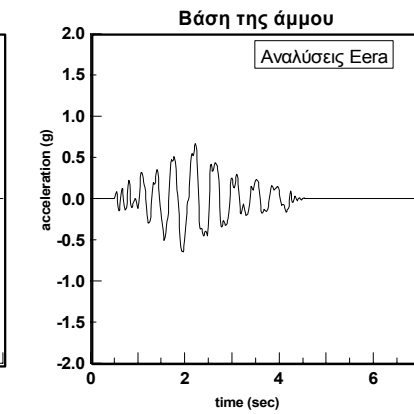
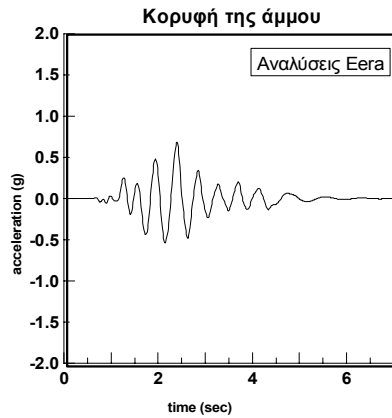
H=4m



H=5m



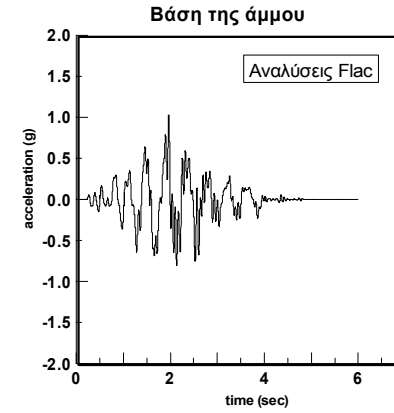
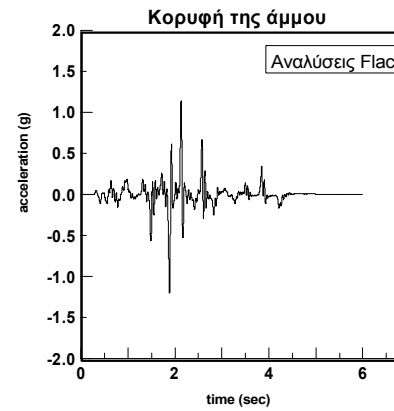
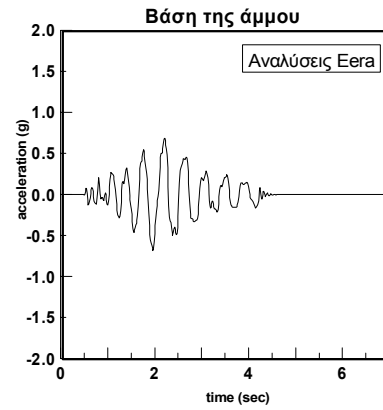
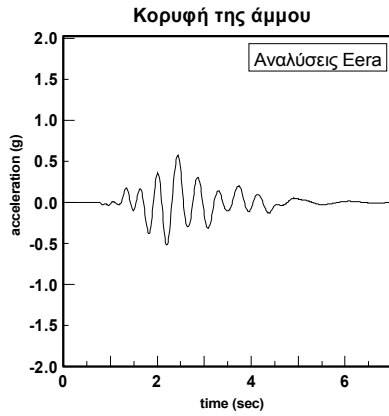
H=6m



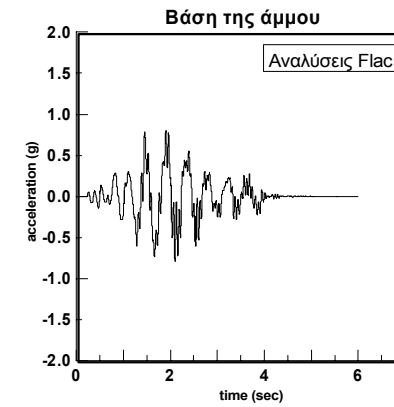
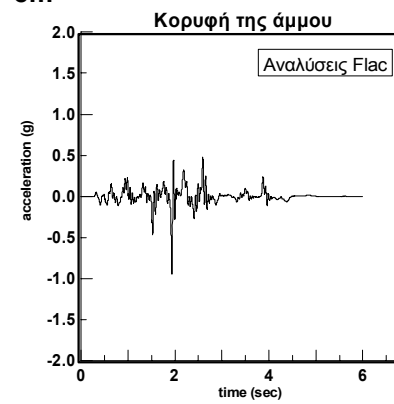
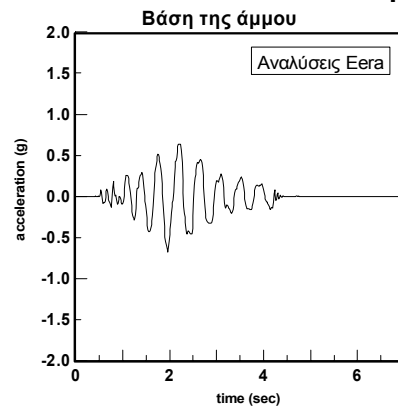
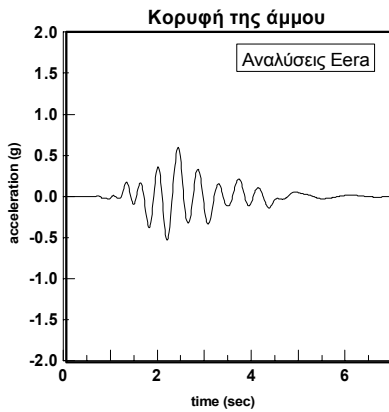
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: Επιταχυνσιογραφήματα

Coyote Lake M5.7: $\alpha_{\max} = 0,64g$

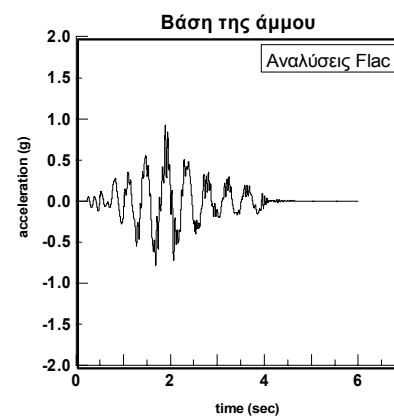
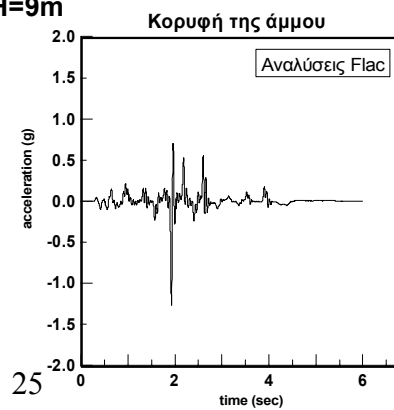
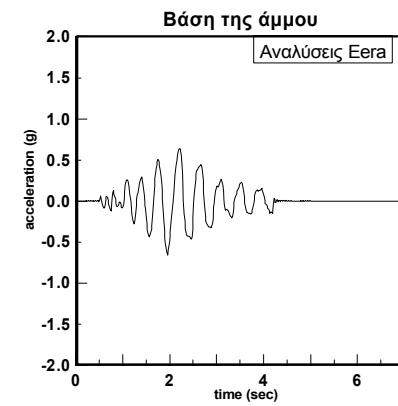
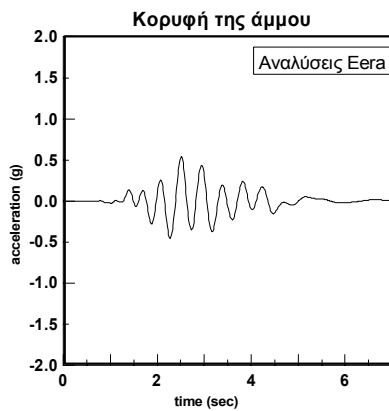
H=7m



H=8m

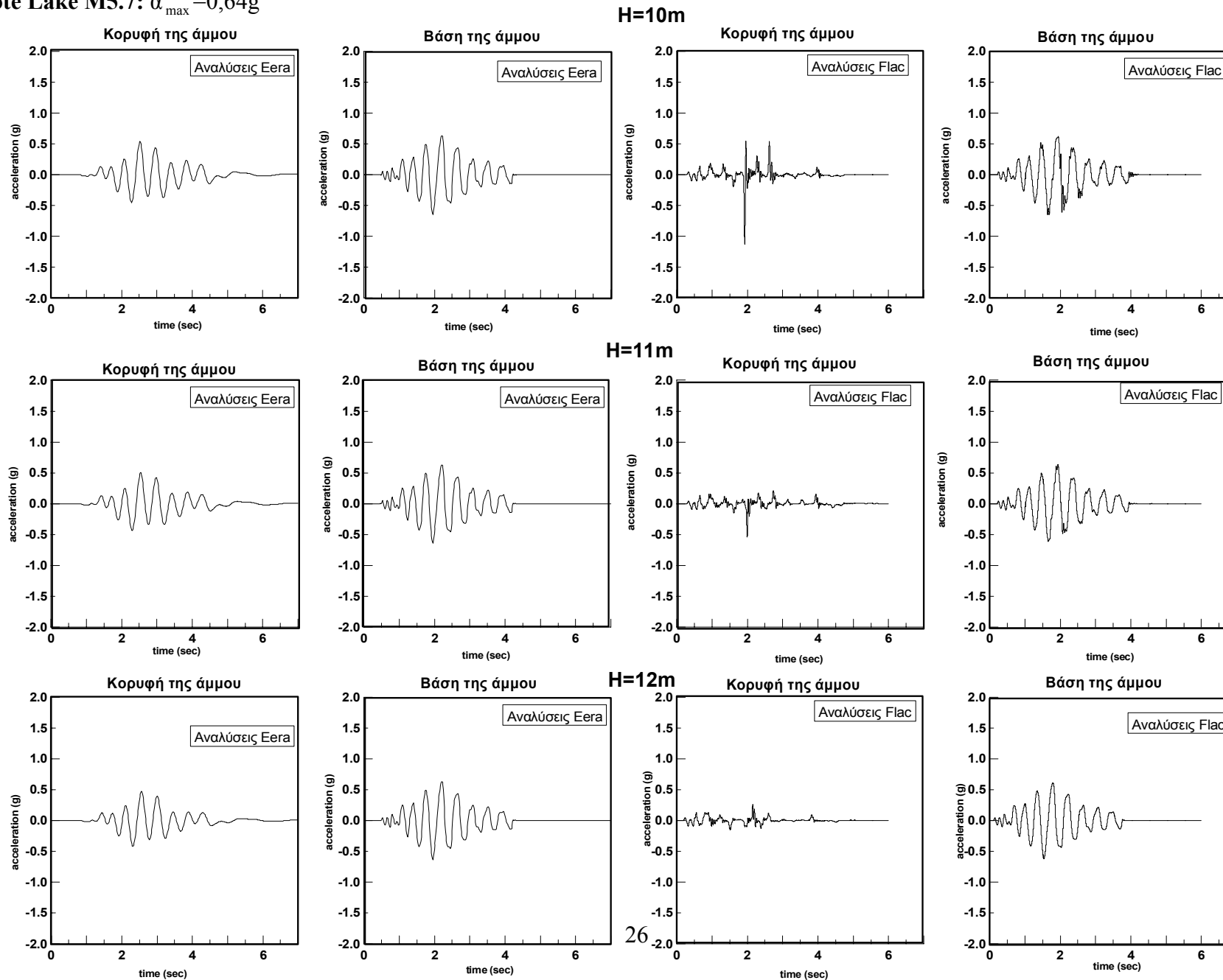


H=9m



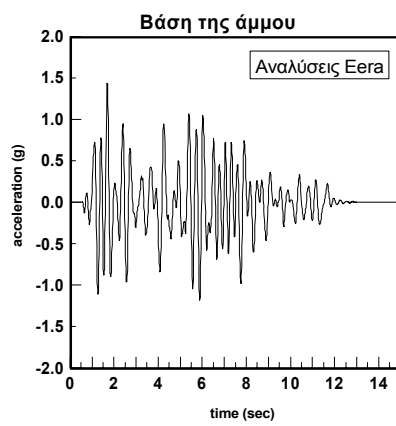
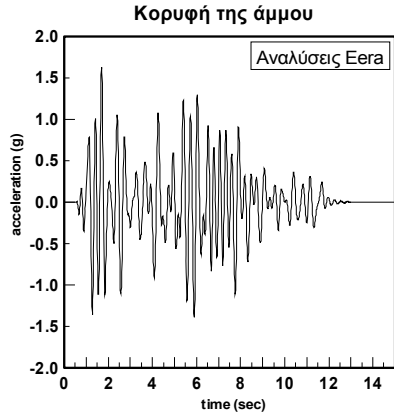
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: Επιταχυνσιογραφήματα

Coyote Lake M5.7: $\alpha_{\max} = 0,64g$

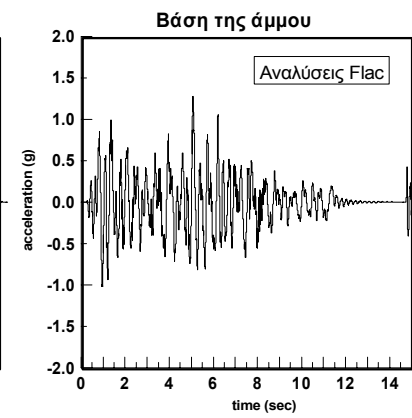
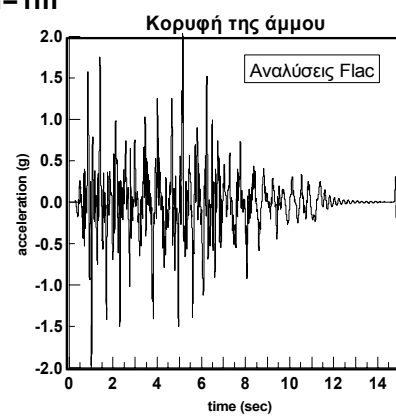


ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: Επιταχυνσιογραφήματα

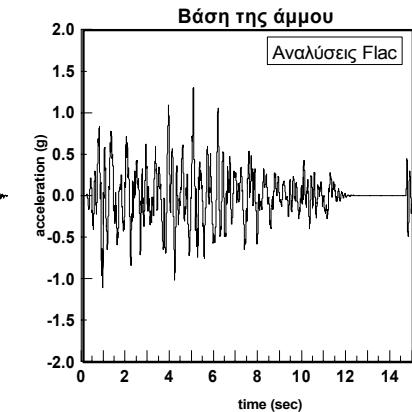
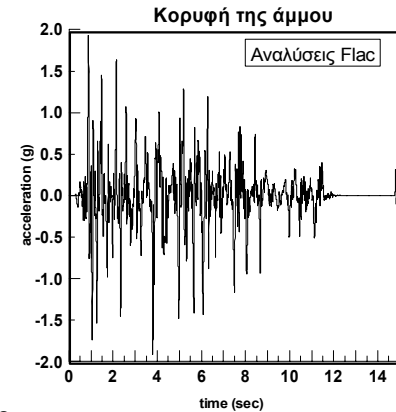
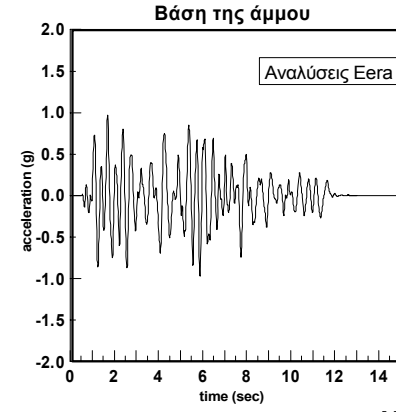
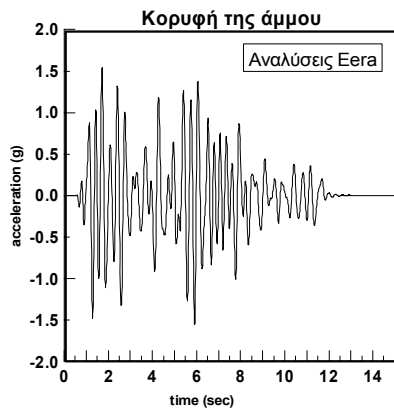
Lefkada M6.3: $\alpha_{\max} = 0,57g$



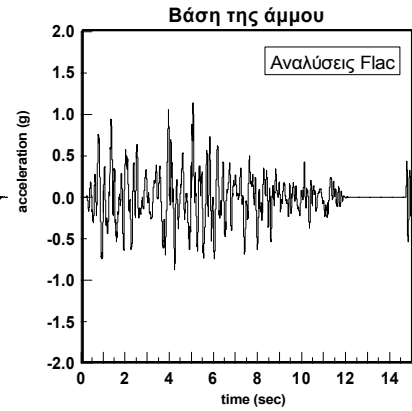
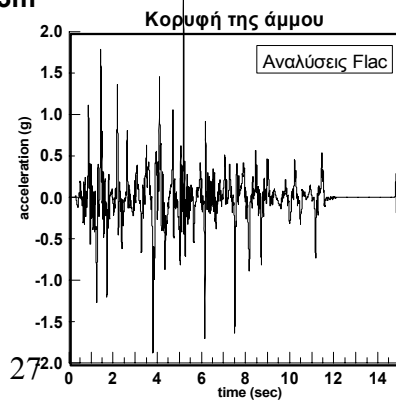
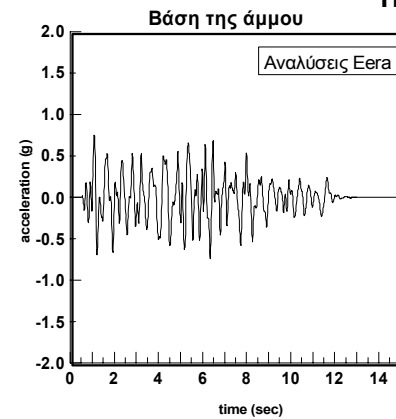
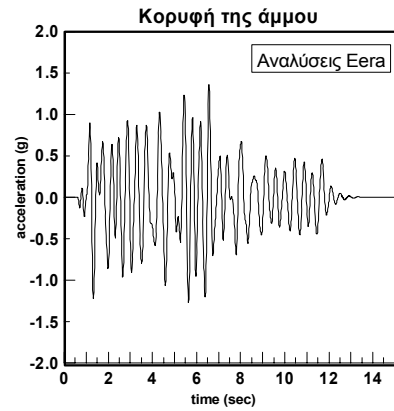
H=1m



H=2m



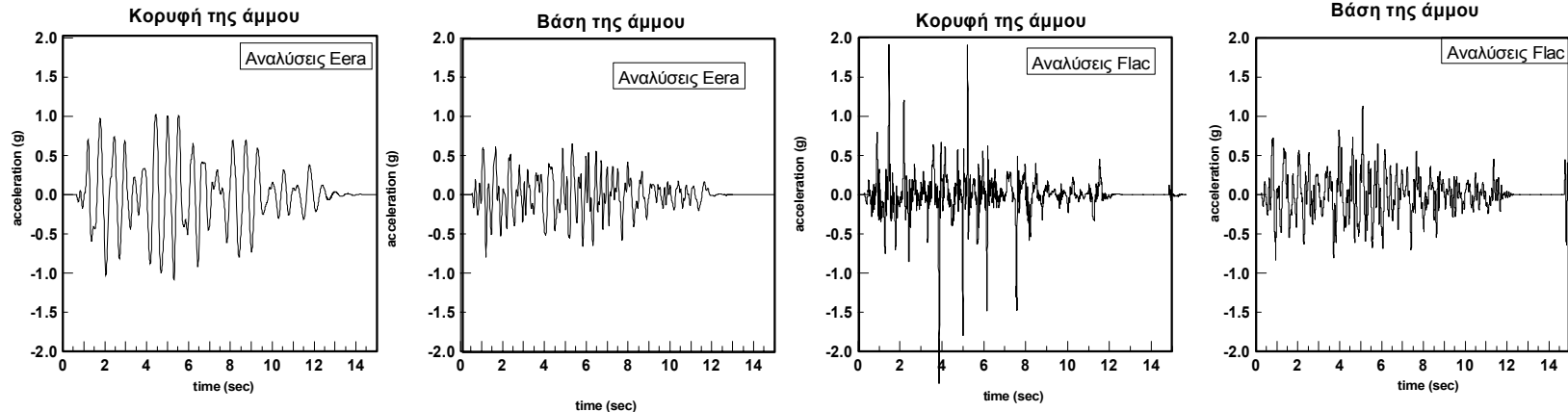
H=3m



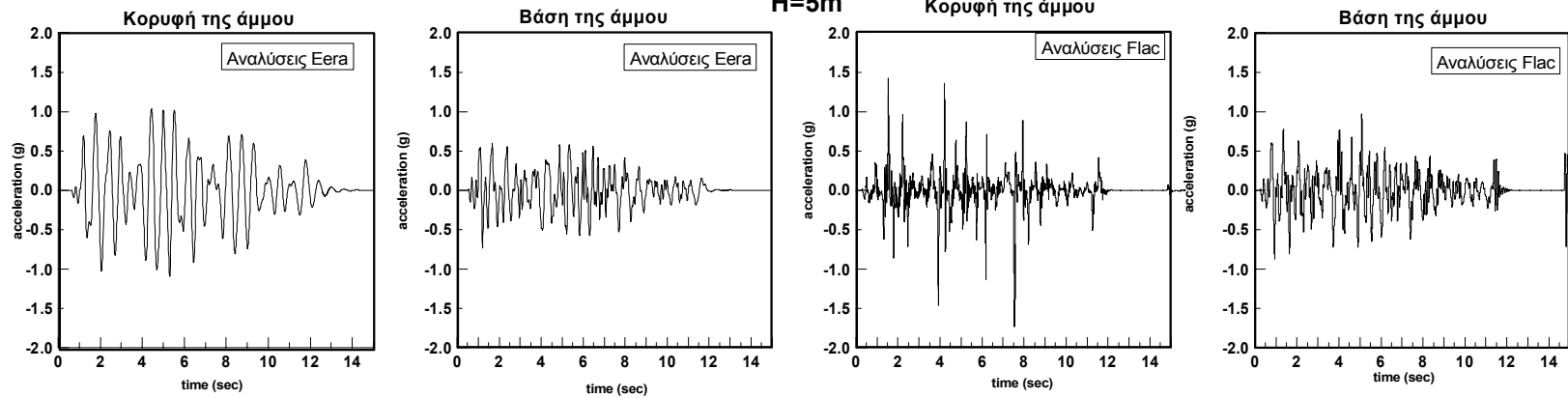
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: Επιταχυνσιογραφήματα

Lefkada M6.3: $\alpha_{\max} = 0,57g$

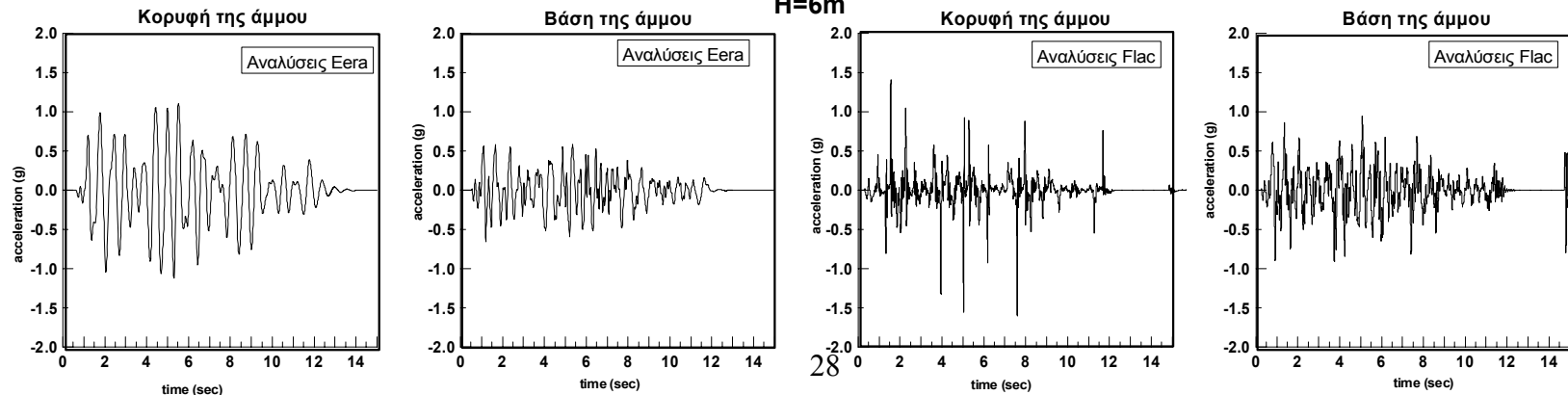
H=4m



H=5m



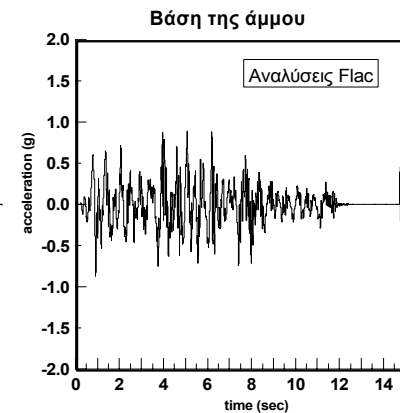
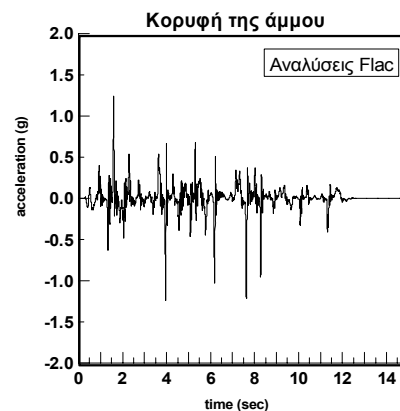
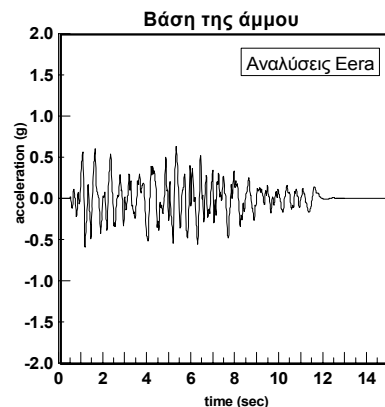
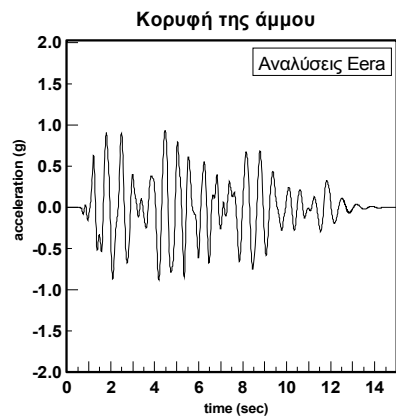
H=6m



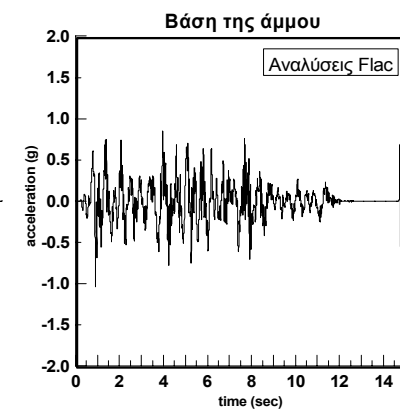
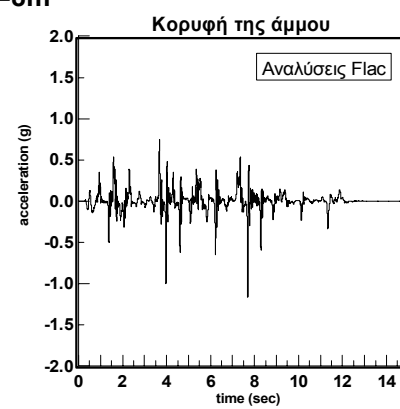
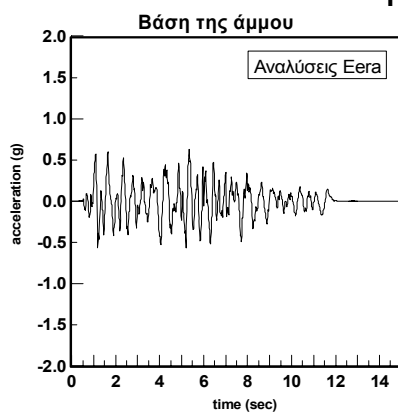
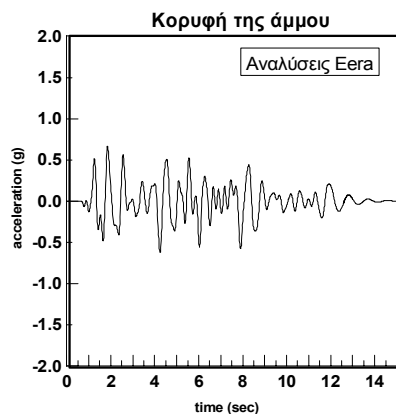
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: Επιταχυνσιογραφήματα

Lefkada M6.3: $\alpha_{\max} = 0,57g$

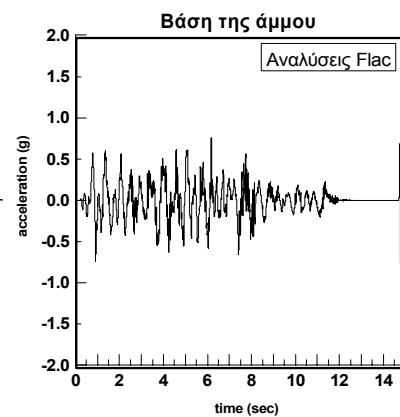
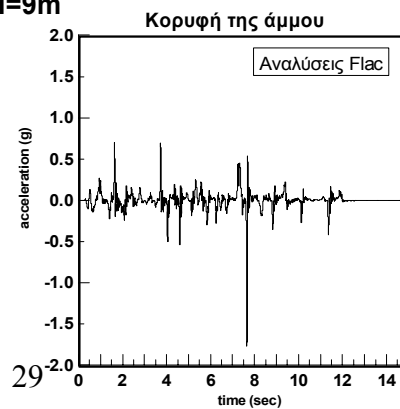
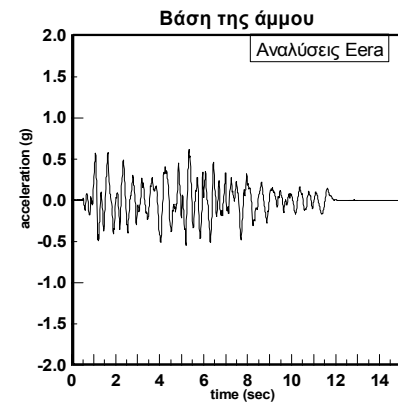
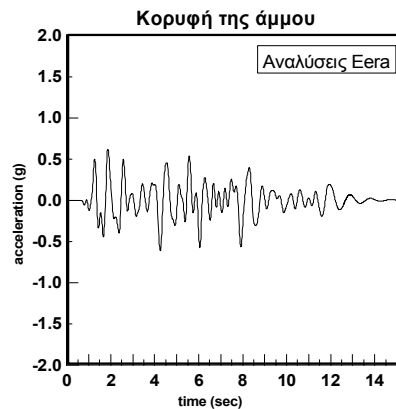
H=7m



H=8m

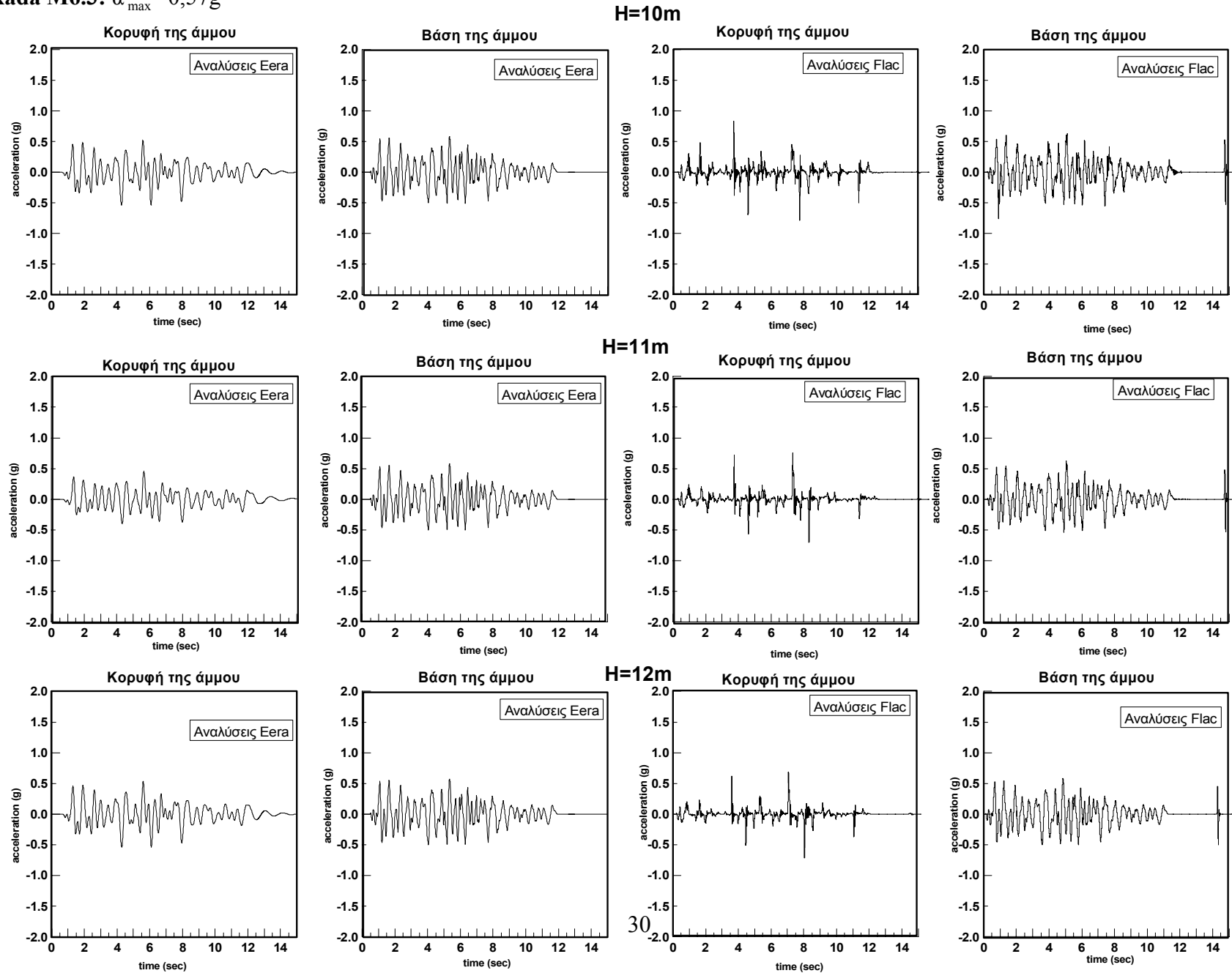


H=9m



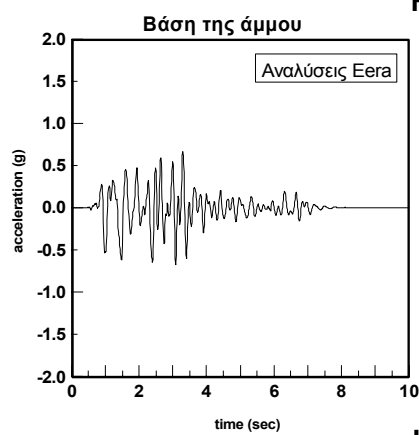
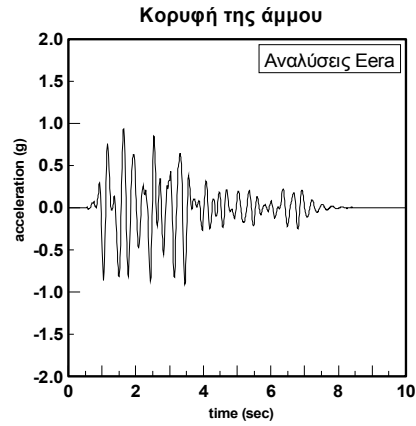
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: Επιταχυνσιογραφήματα

Lefkada M6.3: $\alpha_{\max} = 0,57g$

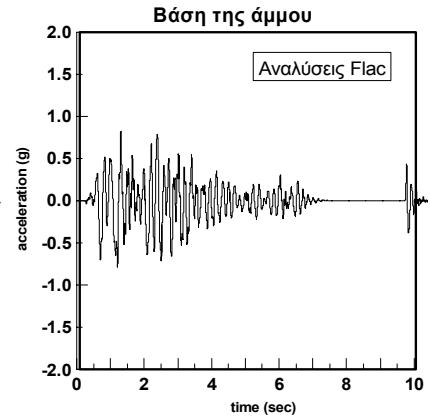
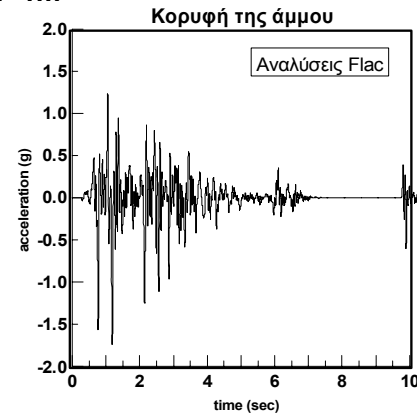


ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: Επιταχυνσιογραφήματα

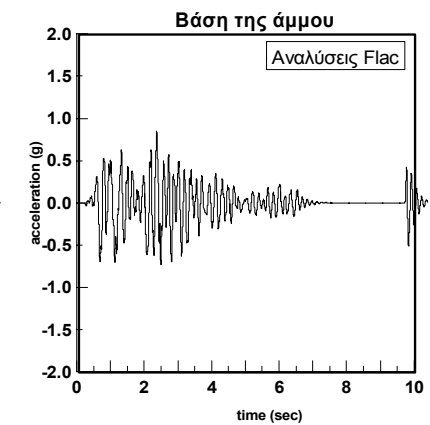
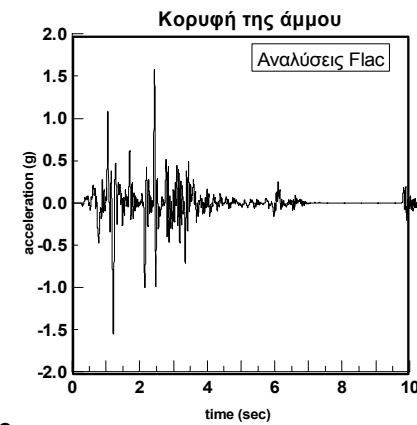
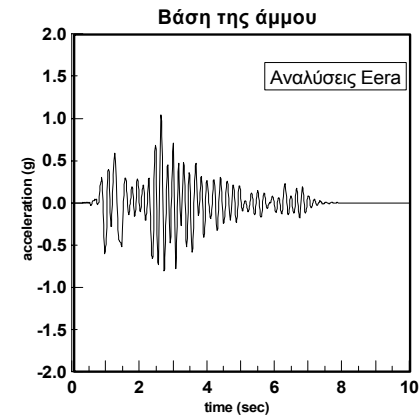
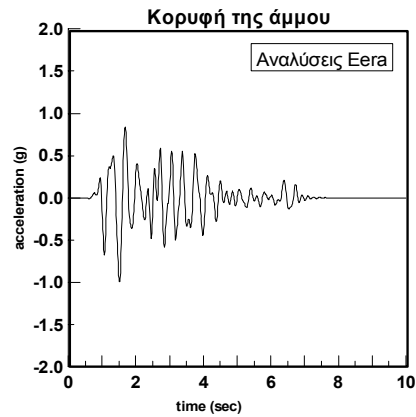
Kobe M7.2: $\alpha_{\max} = 0,48g$



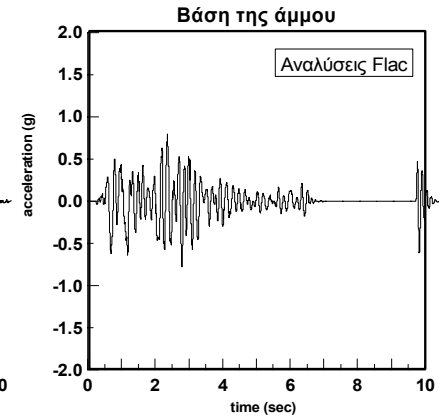
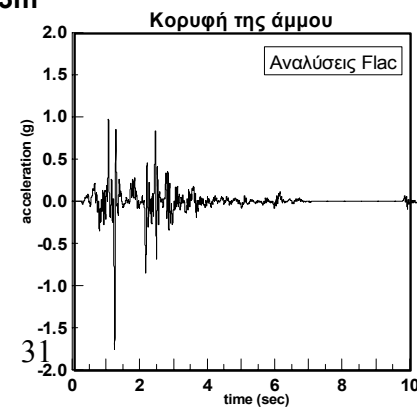
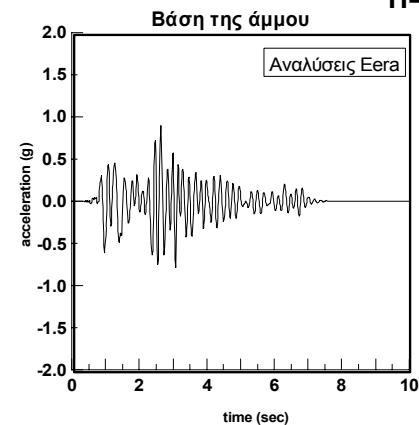
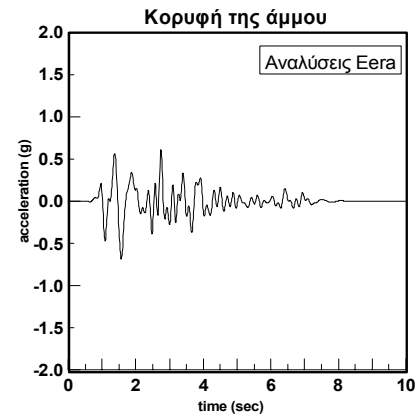
H=1m



H=2m



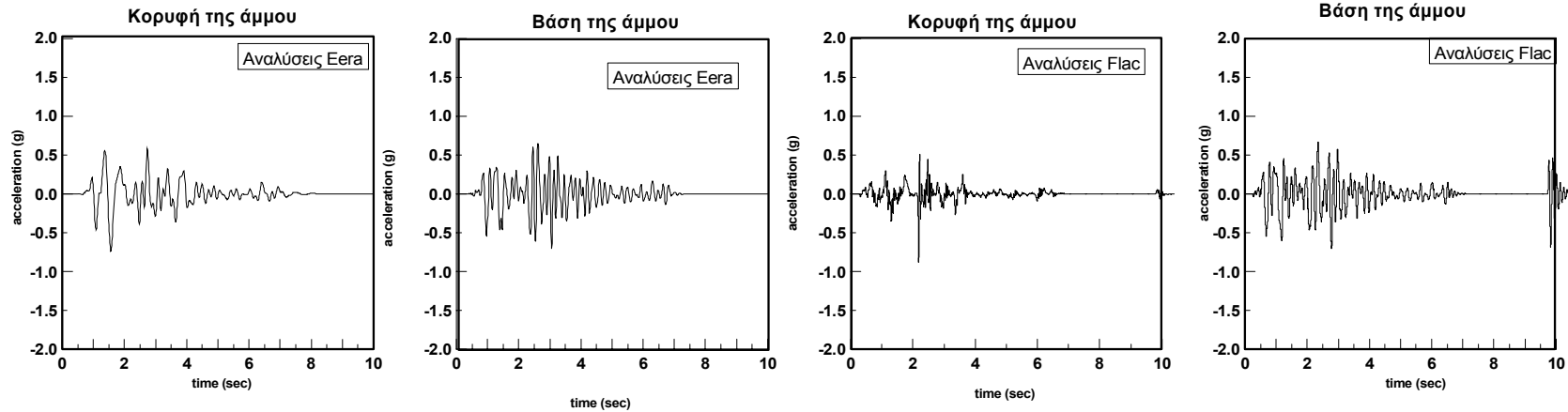
H=3m



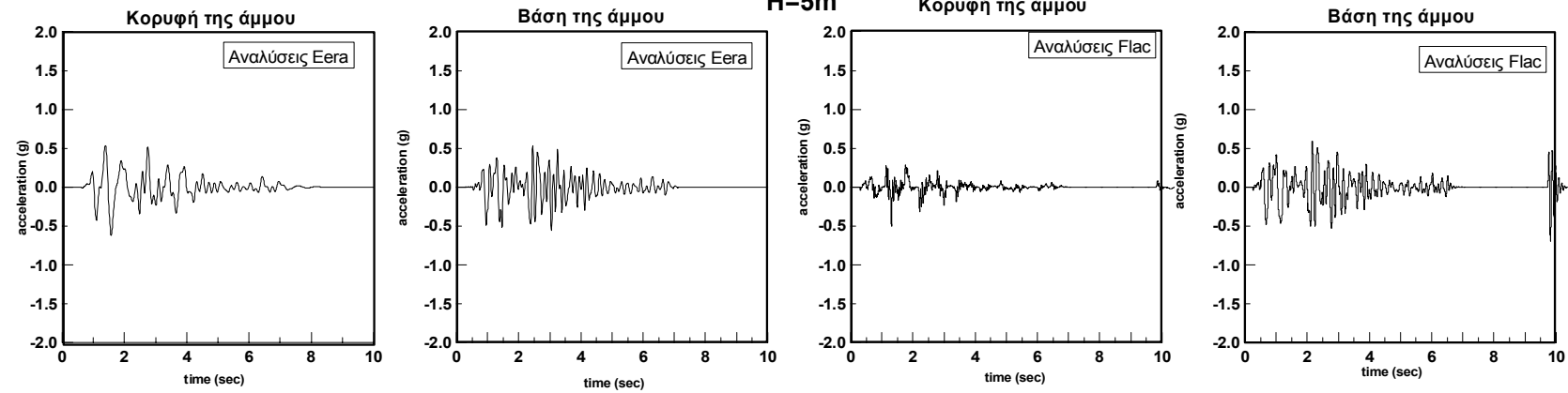
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: Επιταχυνσιογραφήματα

Kobe M7.2: $\alpha_{max} = 0,48g$

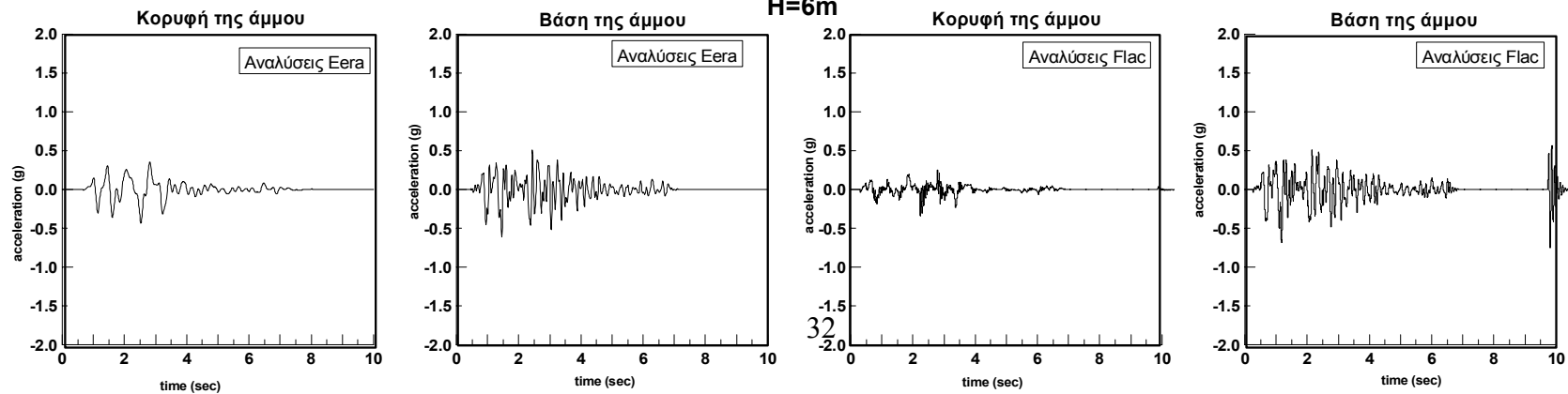
H=4m



H=5m



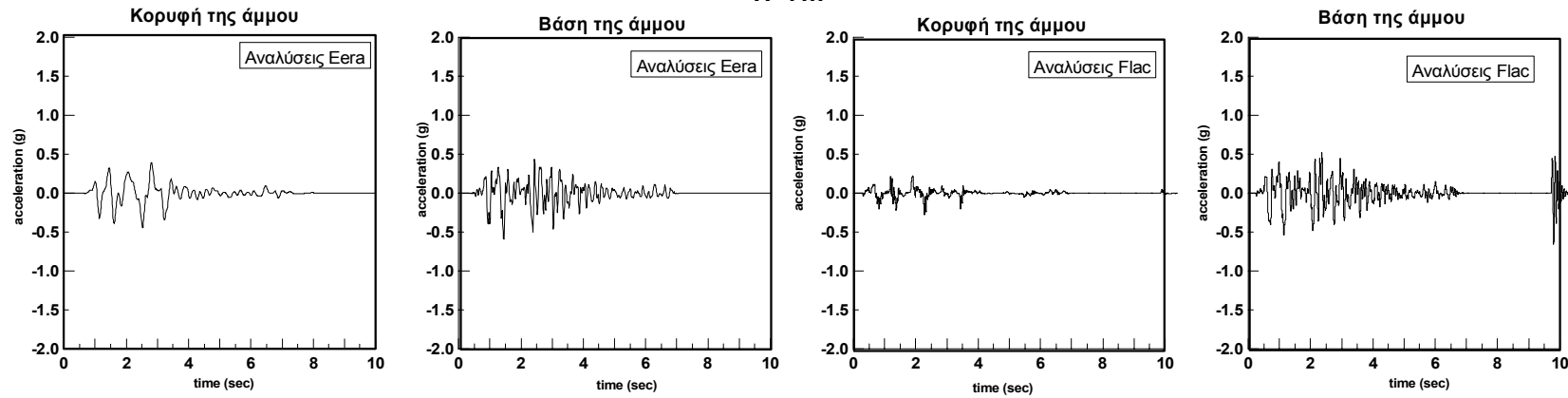
H=6m



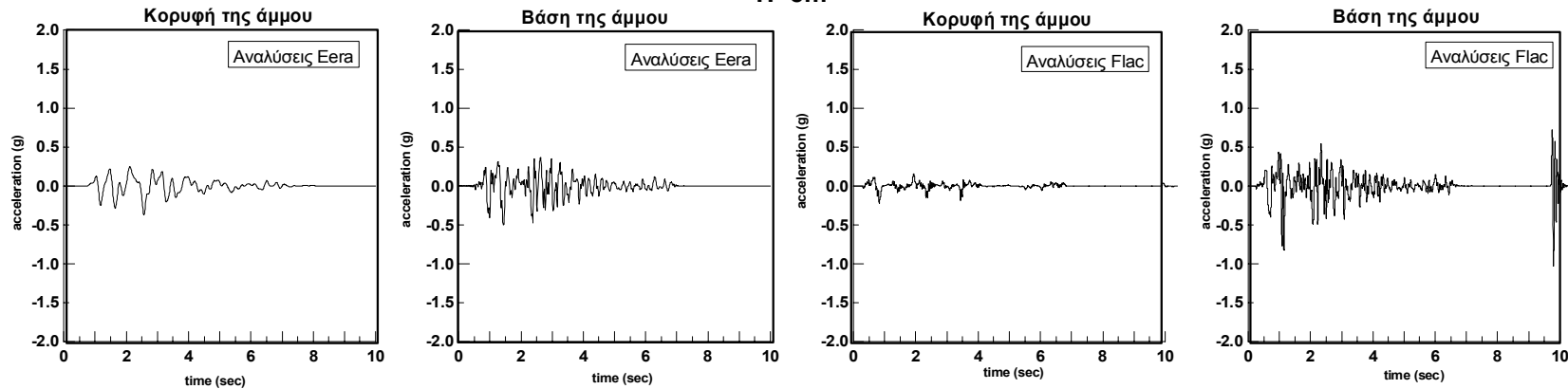
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: Επιταχυνσιογραφήματα

Kobe M7.2: $\alpha_{\max} = 0,48g$

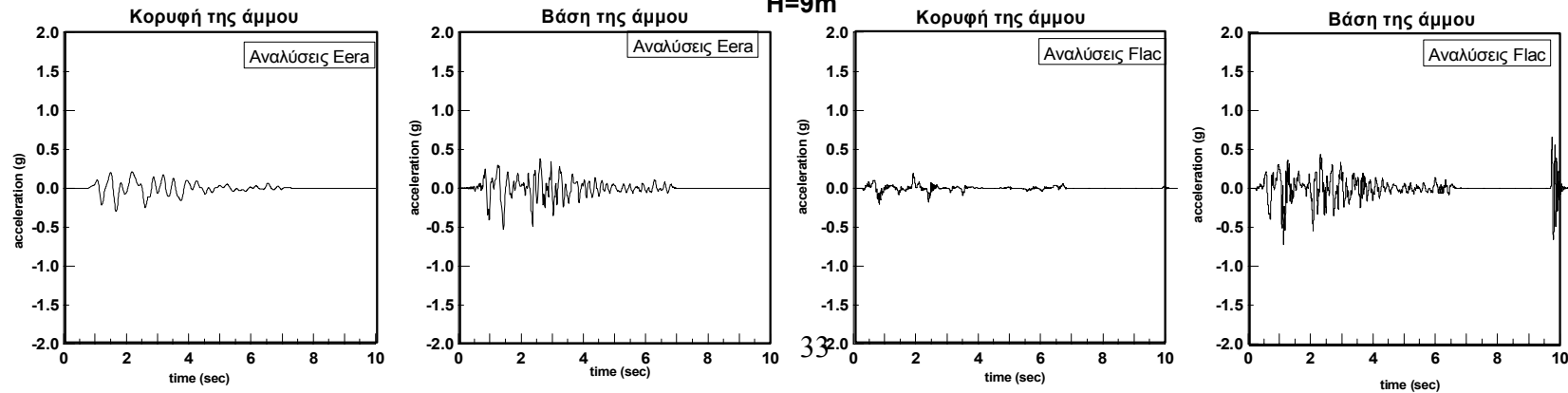
H=7m



H=8m

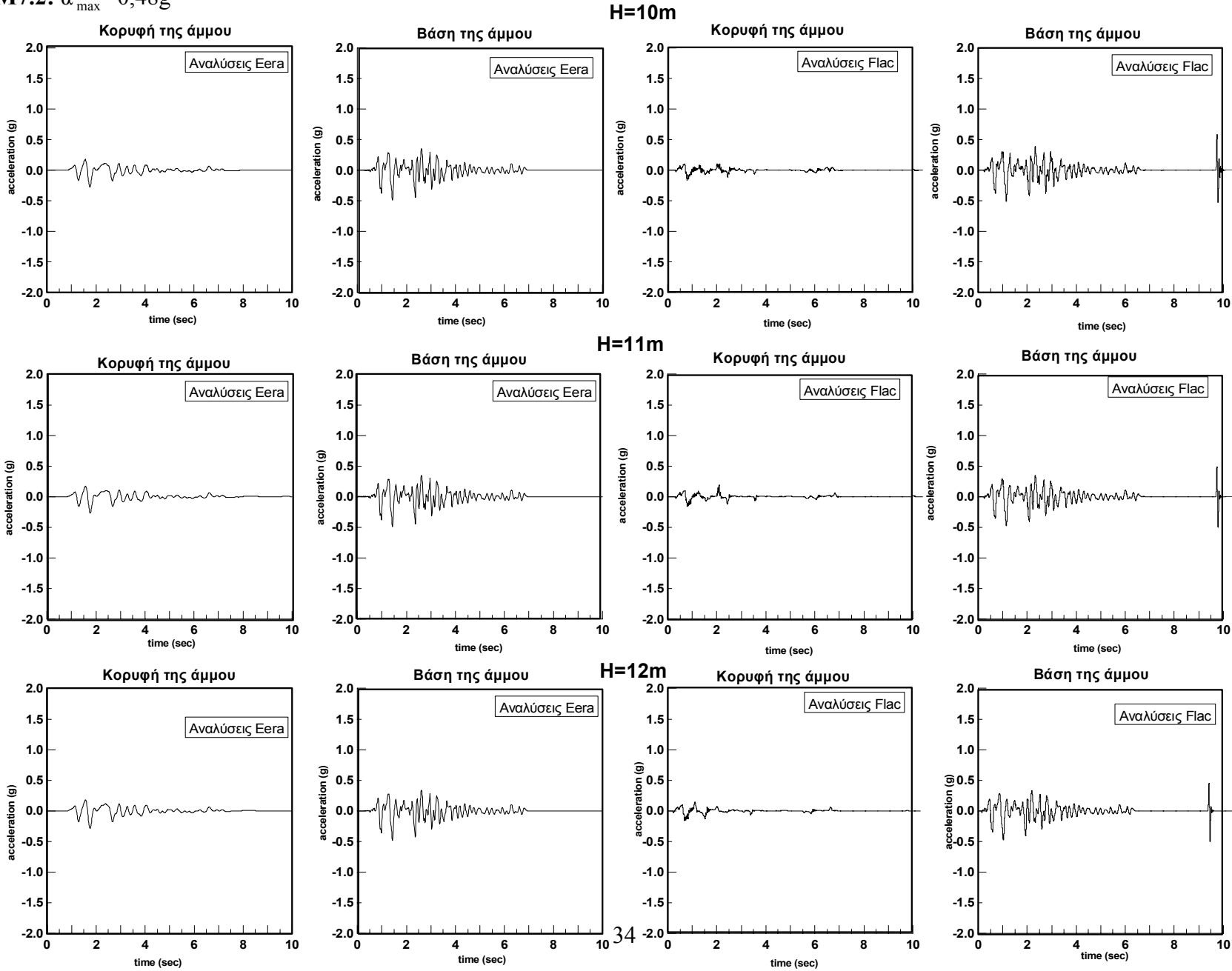


H=9m



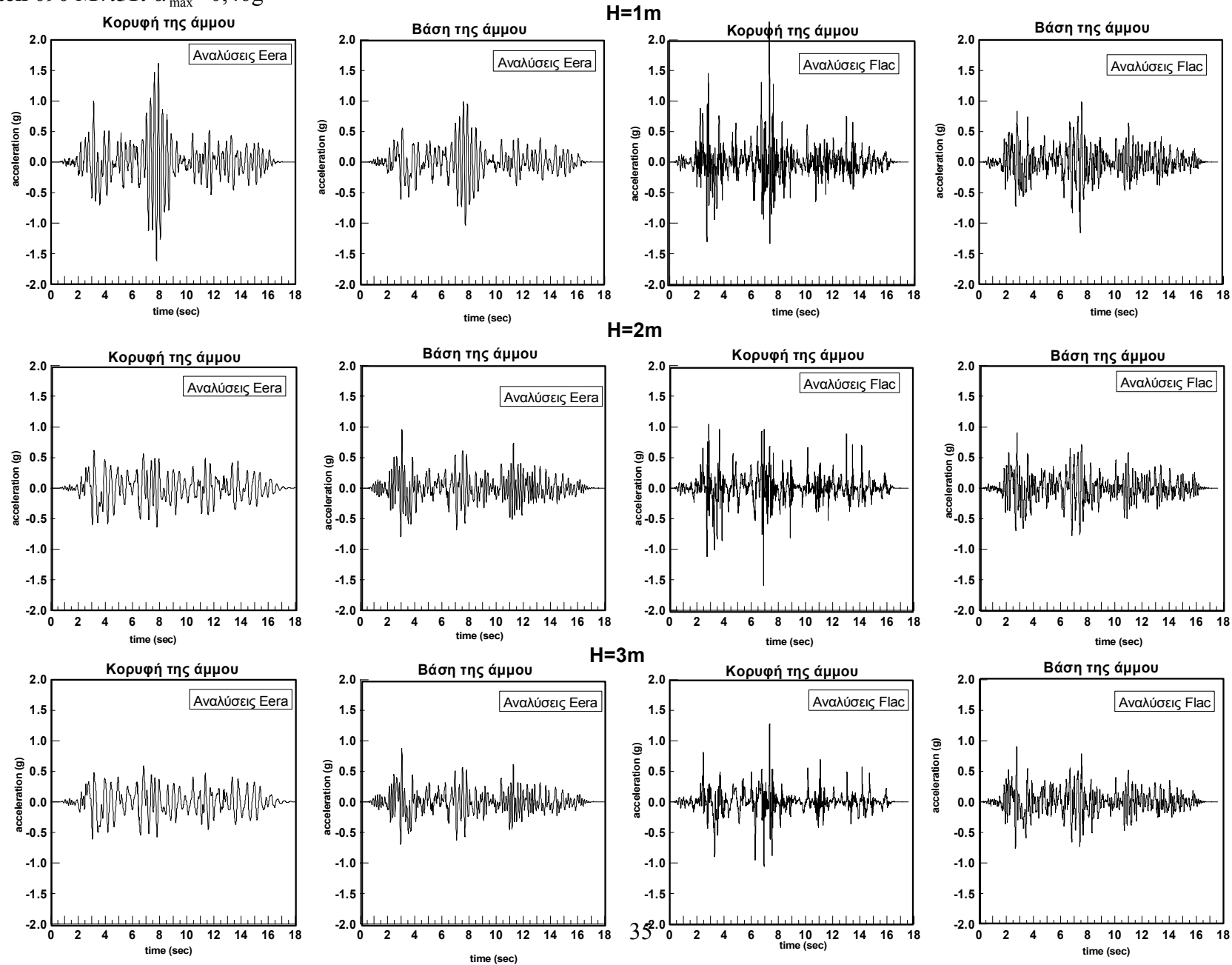
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: Επιταχυνσιογραφήματα

Kobe M7.2: $\alpha_{max} = 0,48g$



ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: Επιταχυνσιογραφήματα

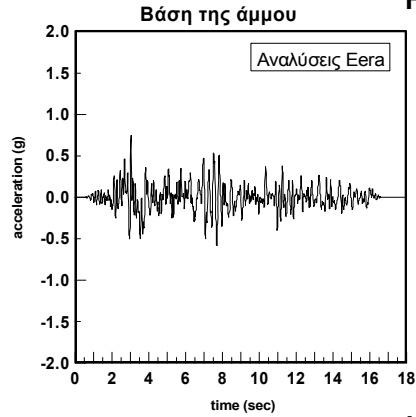
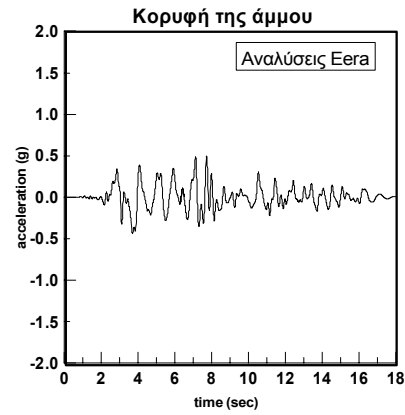
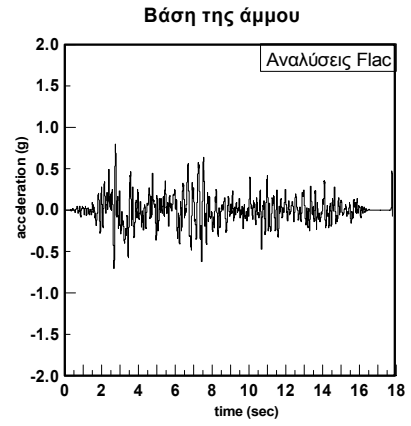
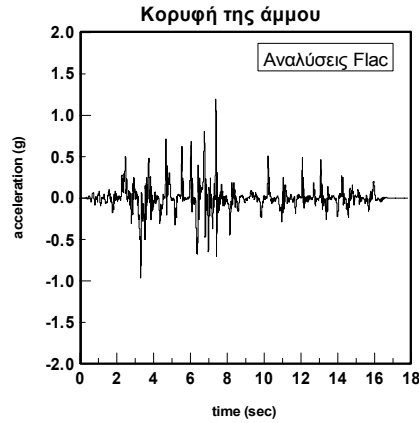
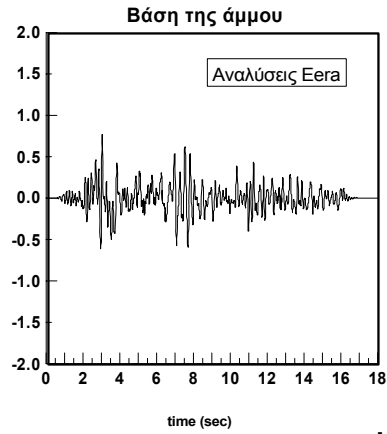
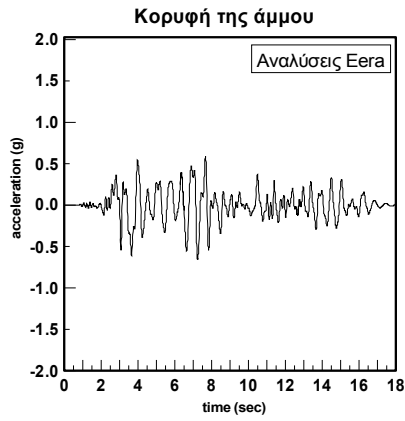
Kocaeli 090 M7.51: $\alpha_{\max} = 0,46g$



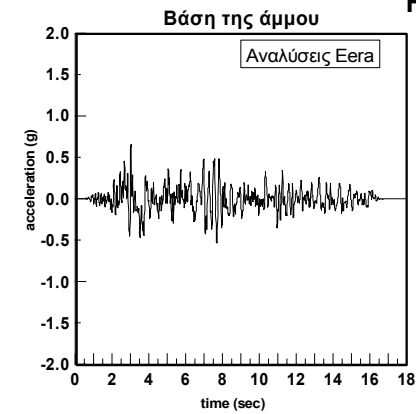
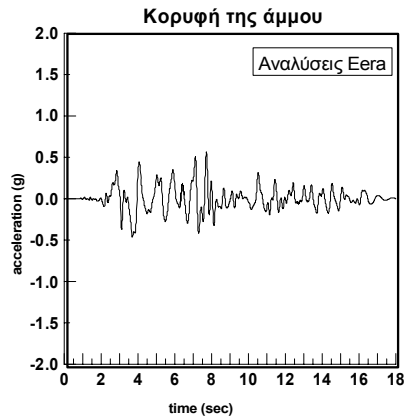
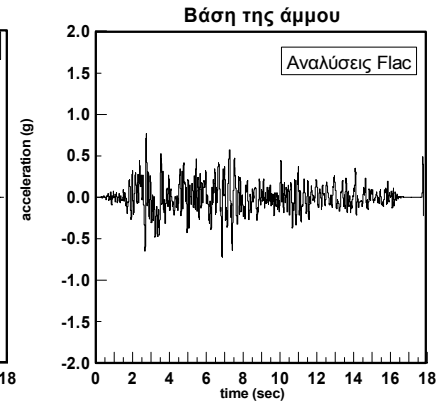
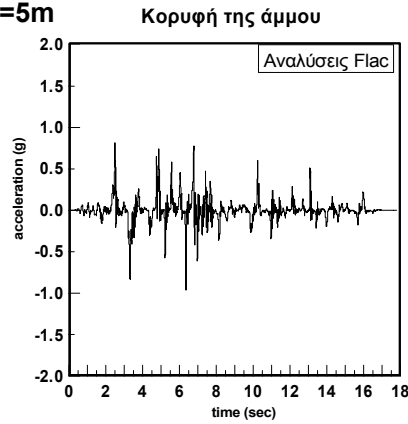
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: Επιταχυνσιογραφήματα

Kocaeli 090 M7.51: $\alpha_{max} = 0,46g$

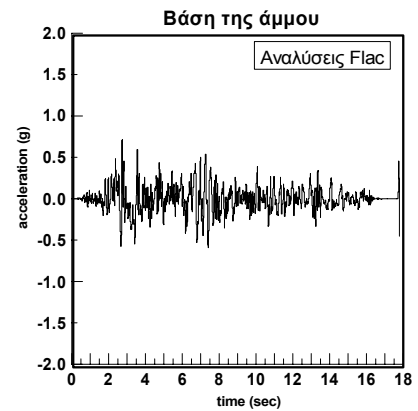
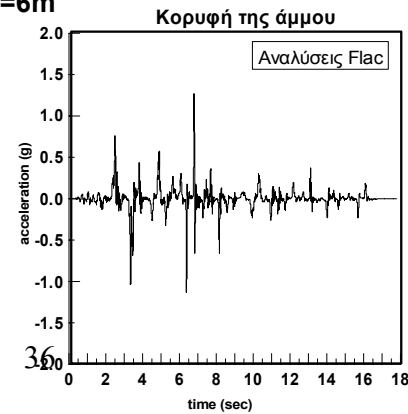
H=4m



H=5m



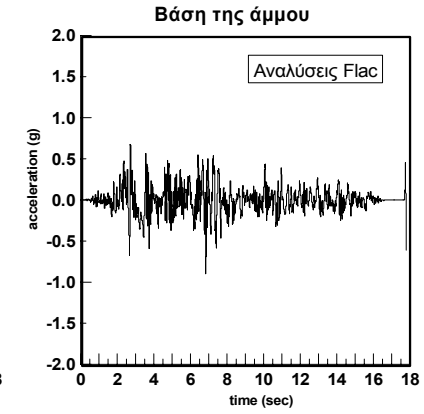
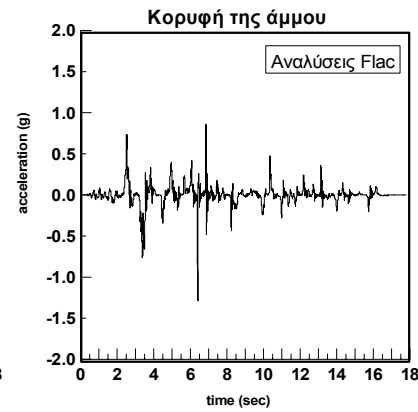
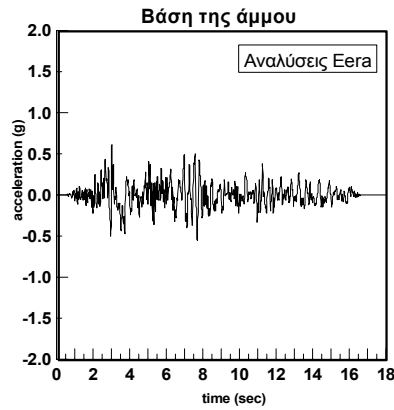
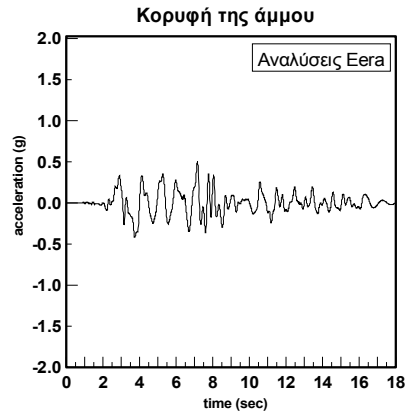
H=6m



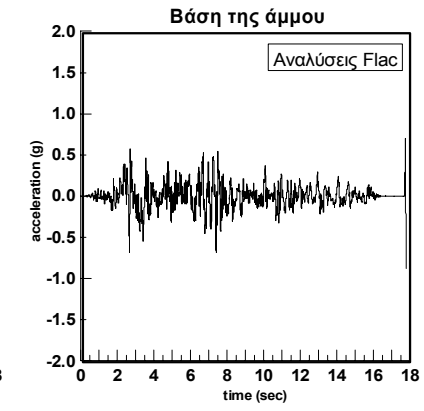
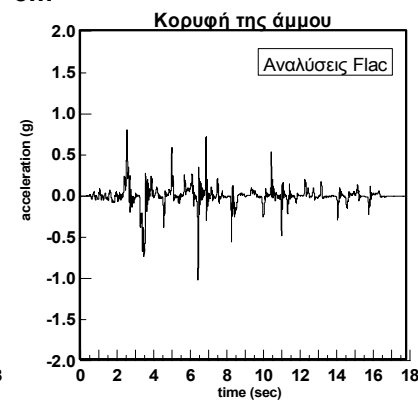
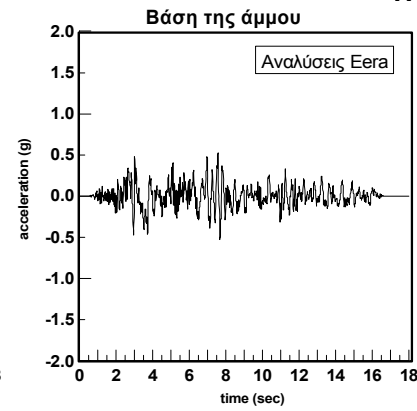
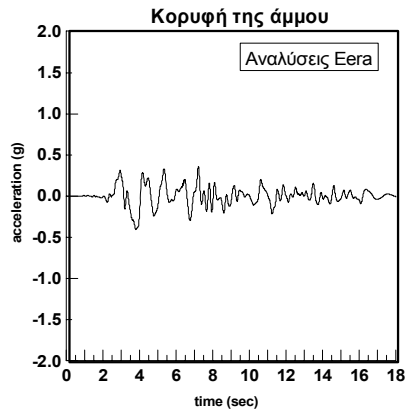
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: Επιταχυνσιογραφήματα

Kocaeli 090 M7.51: $\alpha_{max} = 0,46g$

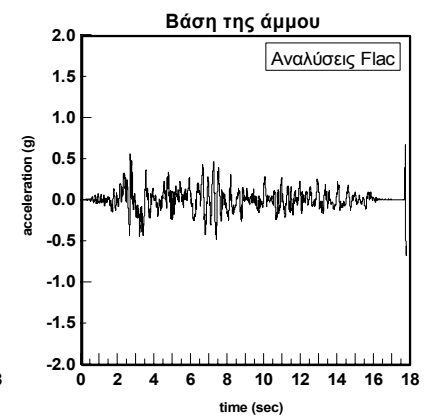
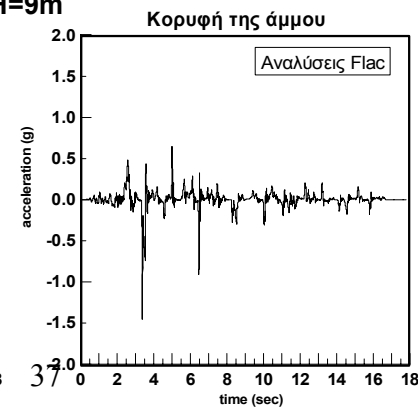
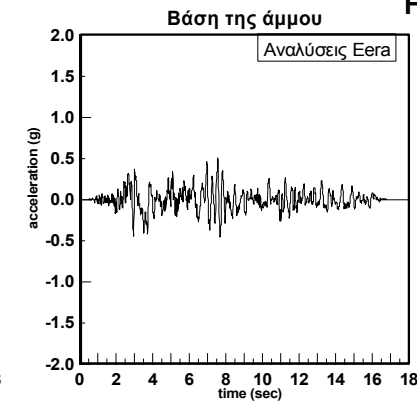
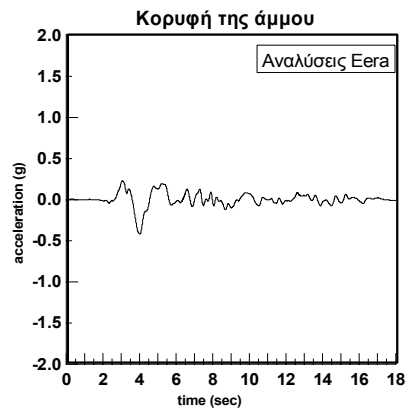
H=7m



H=8m



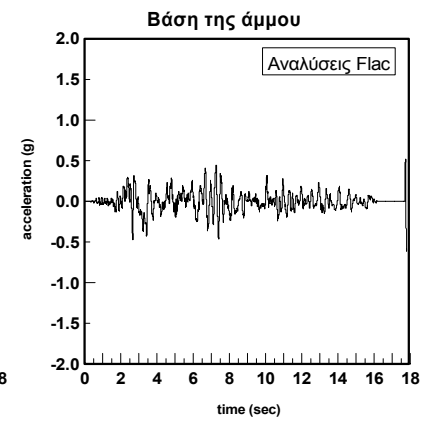
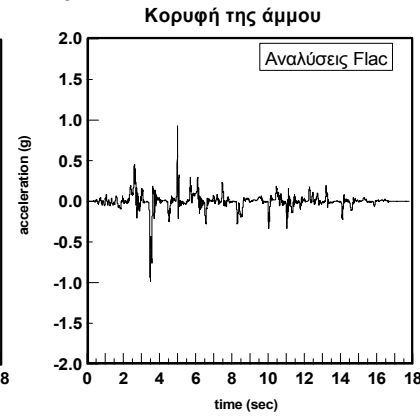
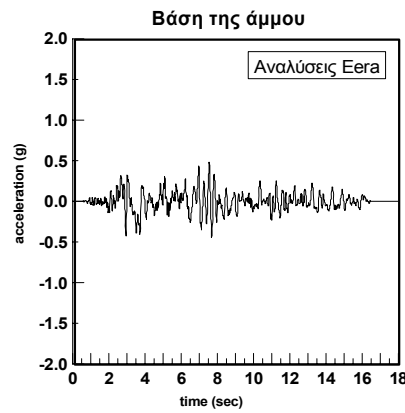
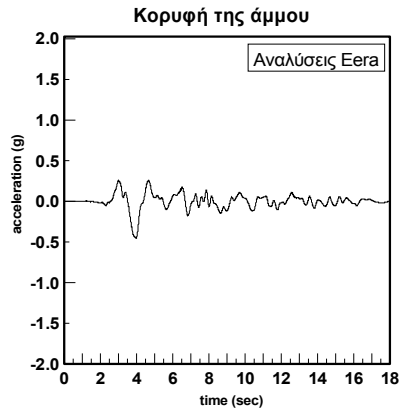
H=9m



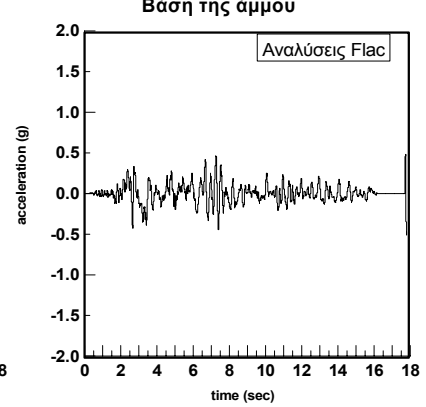
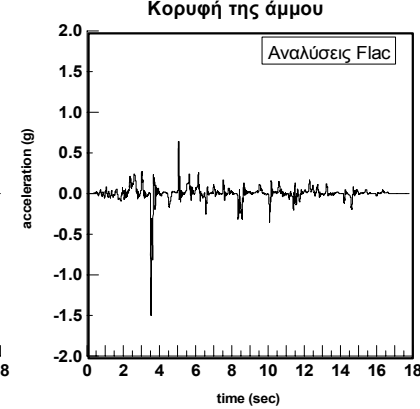
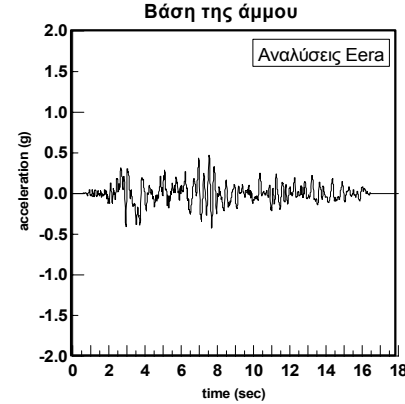
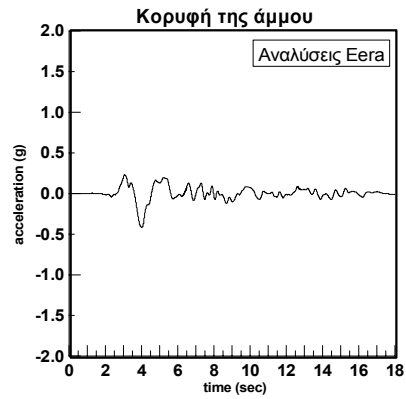
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: Επιταχυνσιογραφήματα

Kocaeli 090 M7.51: $\alpha_{max} = 0,46g$

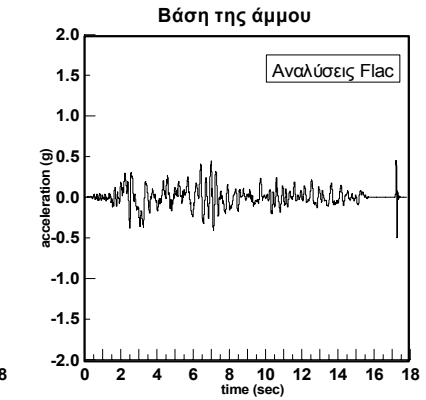
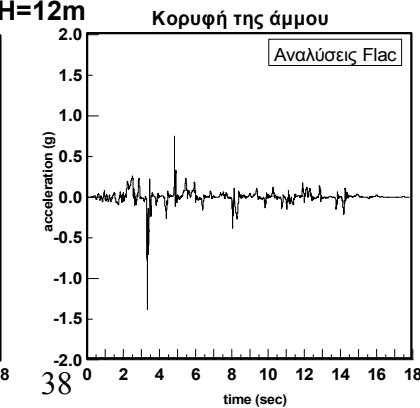
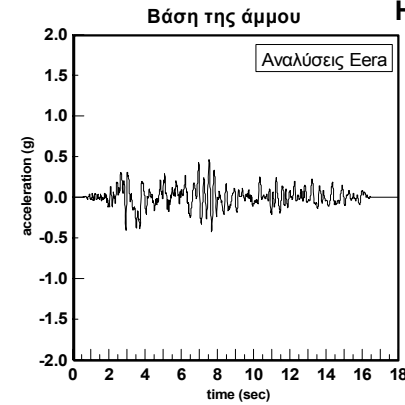
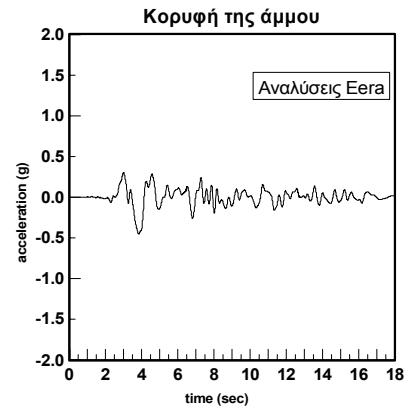
H=10m



H=11m

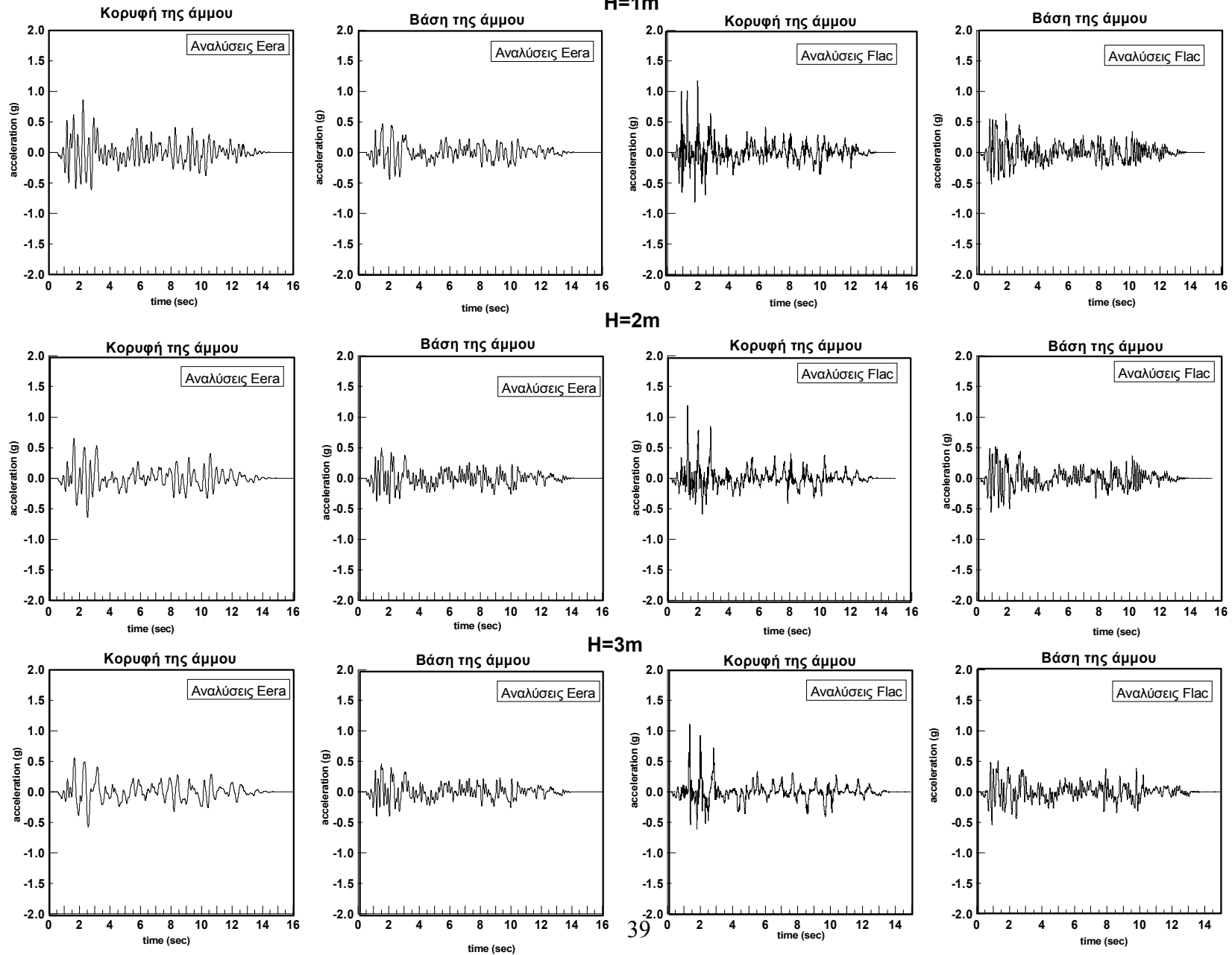


H=12m



ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: Επιταχυνσιογραφήματα

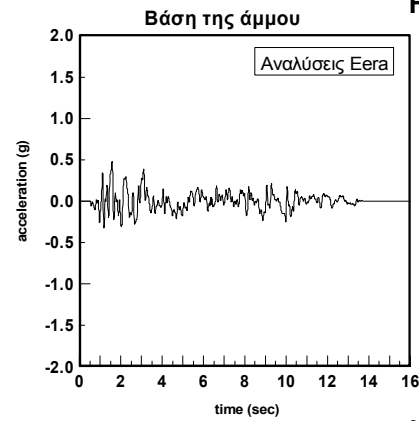
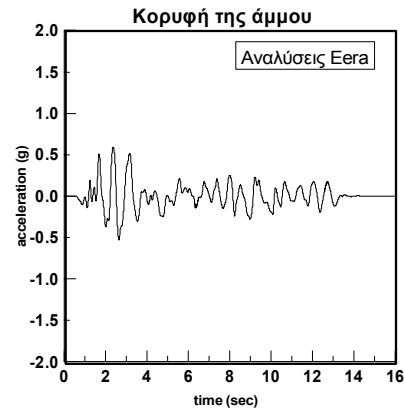
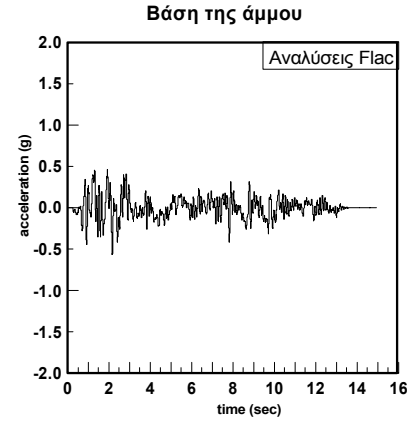
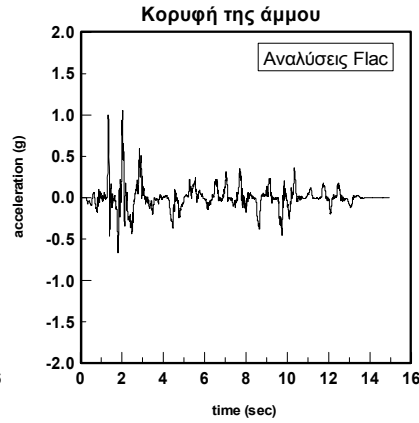
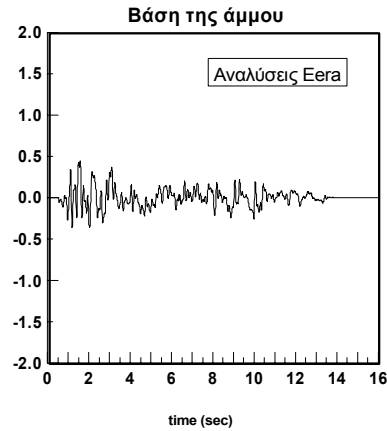
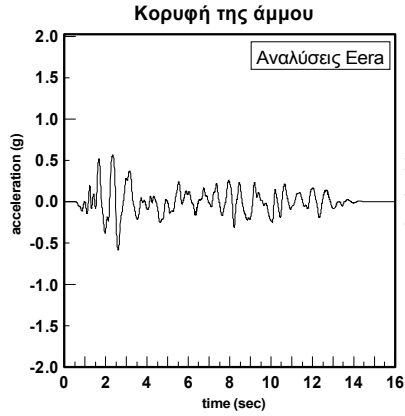
Ducze M7.9: $\alpha_{\max} = 0,43g$



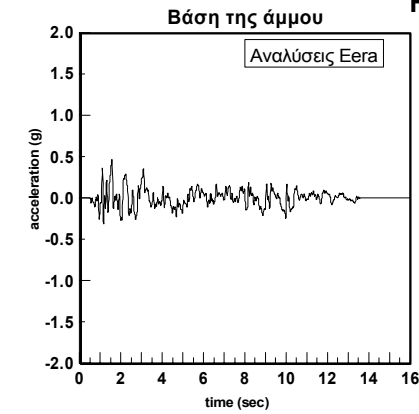
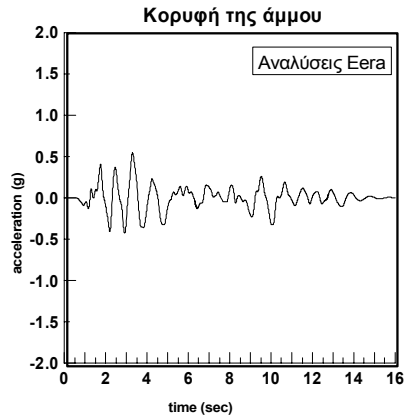
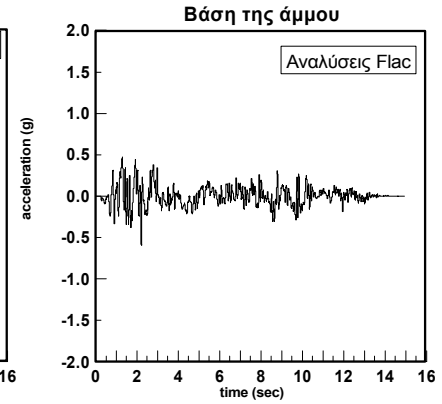
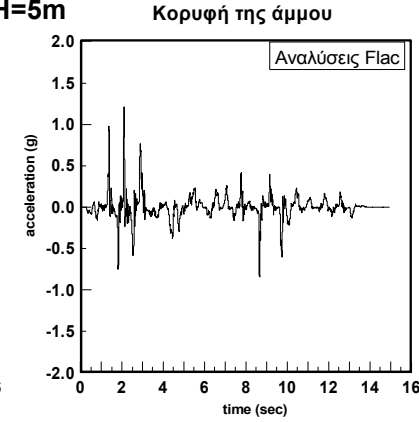
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: Επιταχυνσιογραφήματα

Ducze M7.9: $\alpha_{\max} = 0,43g$

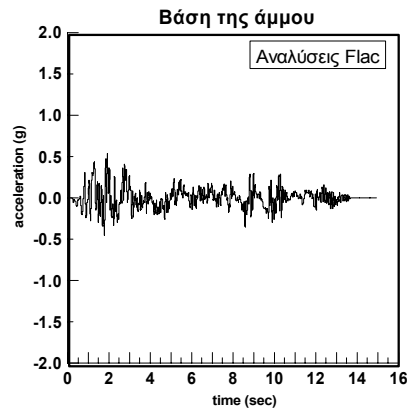
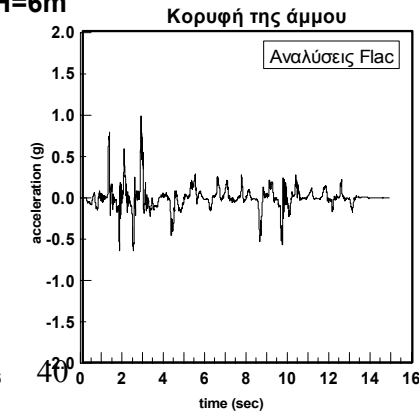
H=4m



H=5m



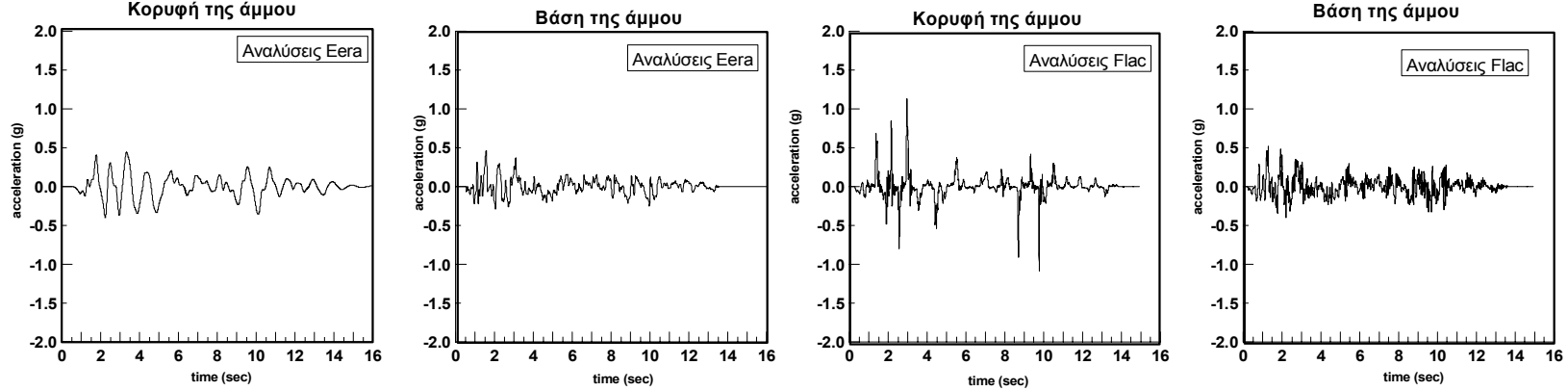
H=6m



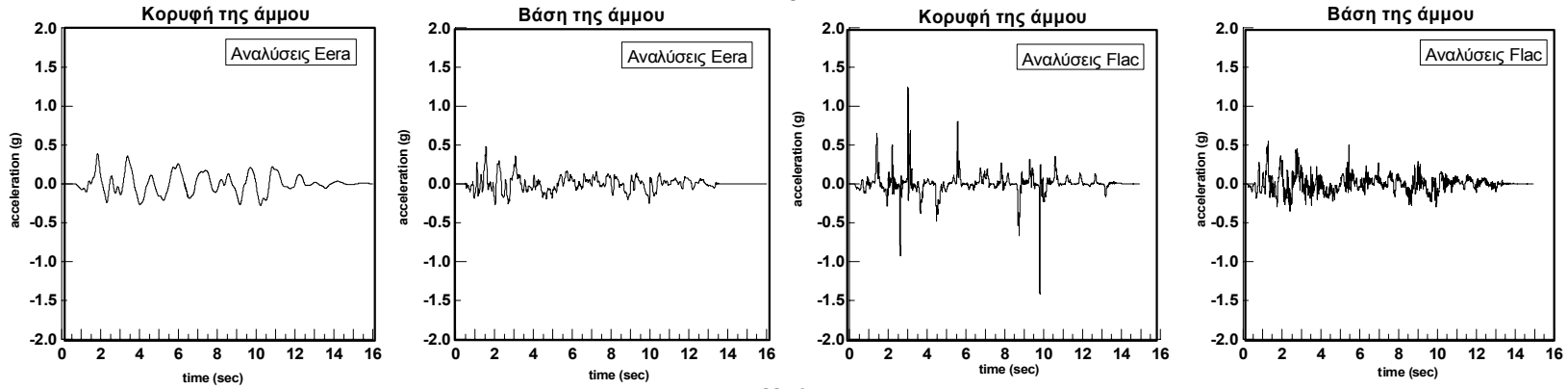
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: Επιταχυνσιογραφήματα

Ducze M7.9: $\alpha_{\max} = 0,43g$
Κορυφή της άμμου

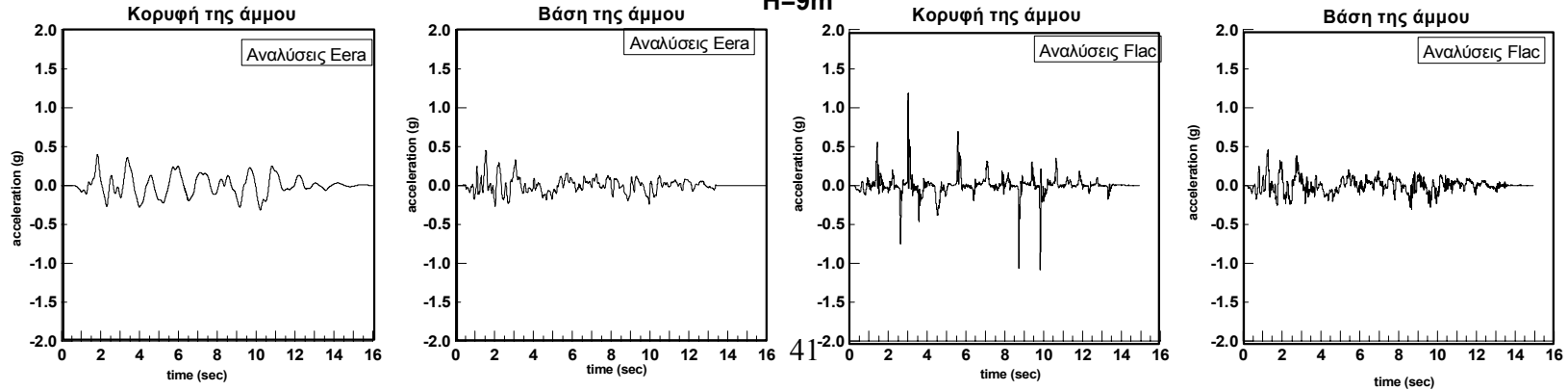
H=7m



H=8m

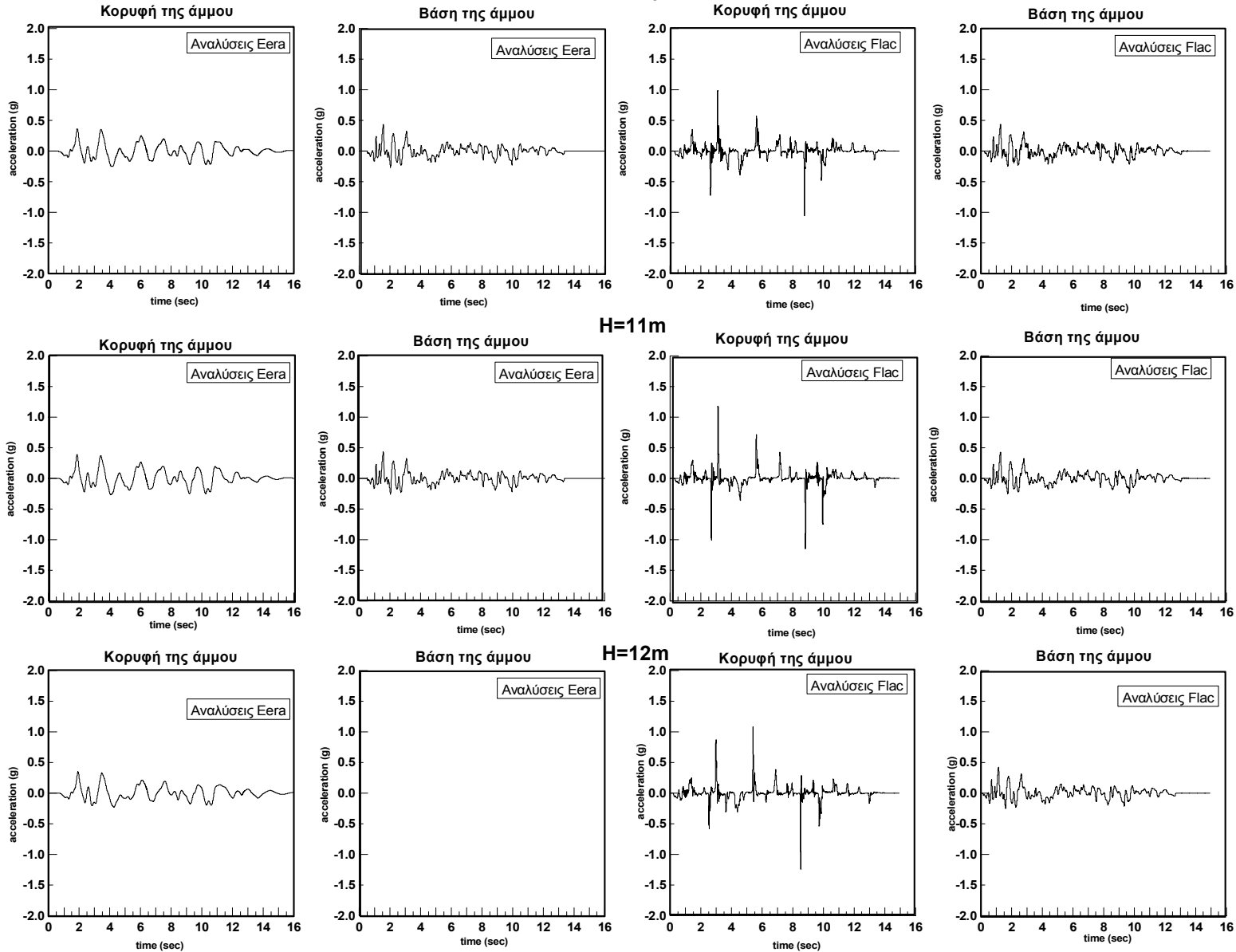


H=9m



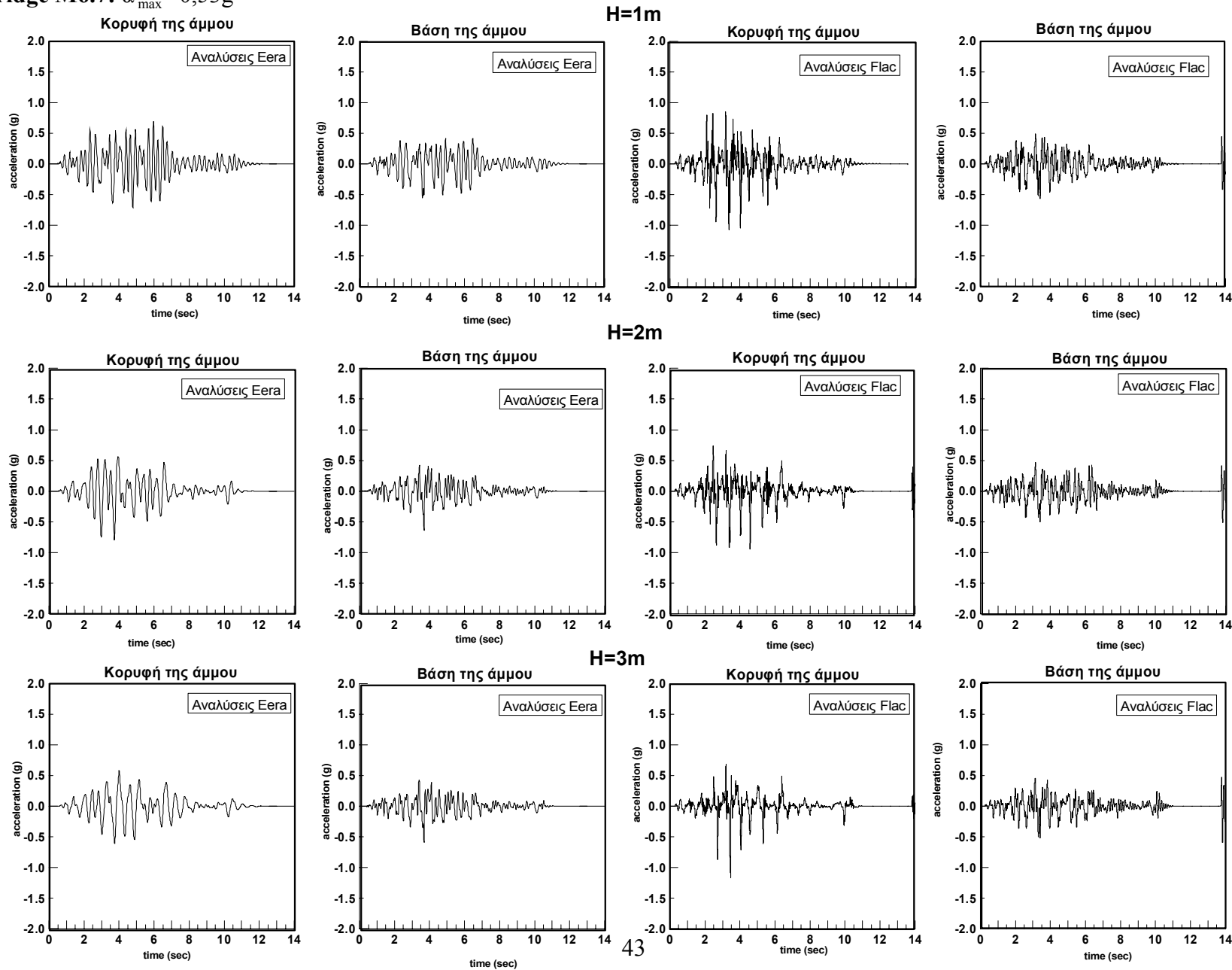
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: Επιταχυνσιογραφήματα

Ducze M7.9: $\alpha_{max} = 0,43g$



ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: Επιταχυνσιογραφήματα

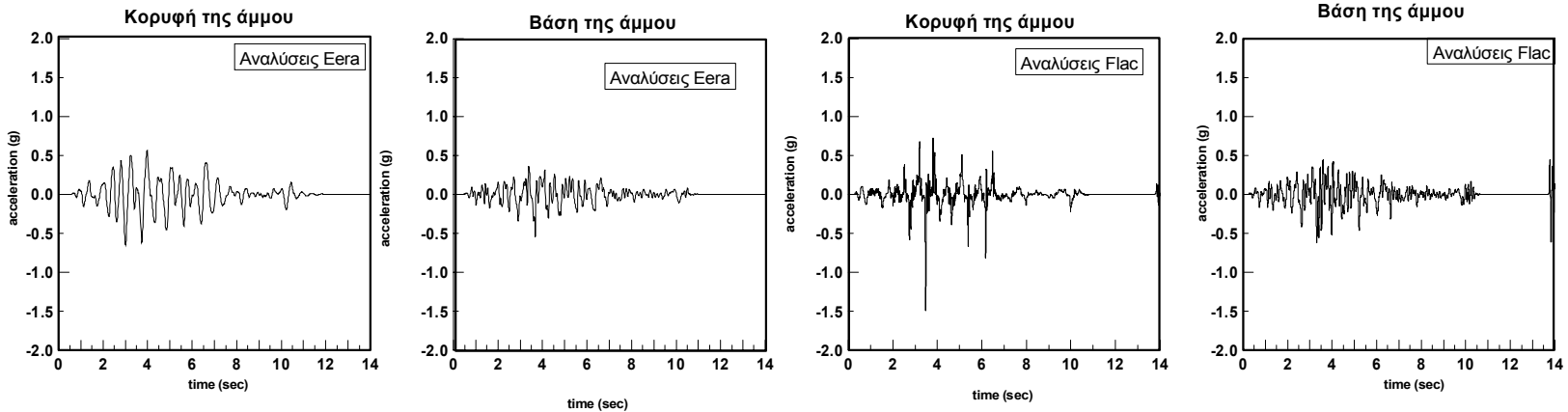
Northridge M6.7: $\alpha_{max} = 0,53g$



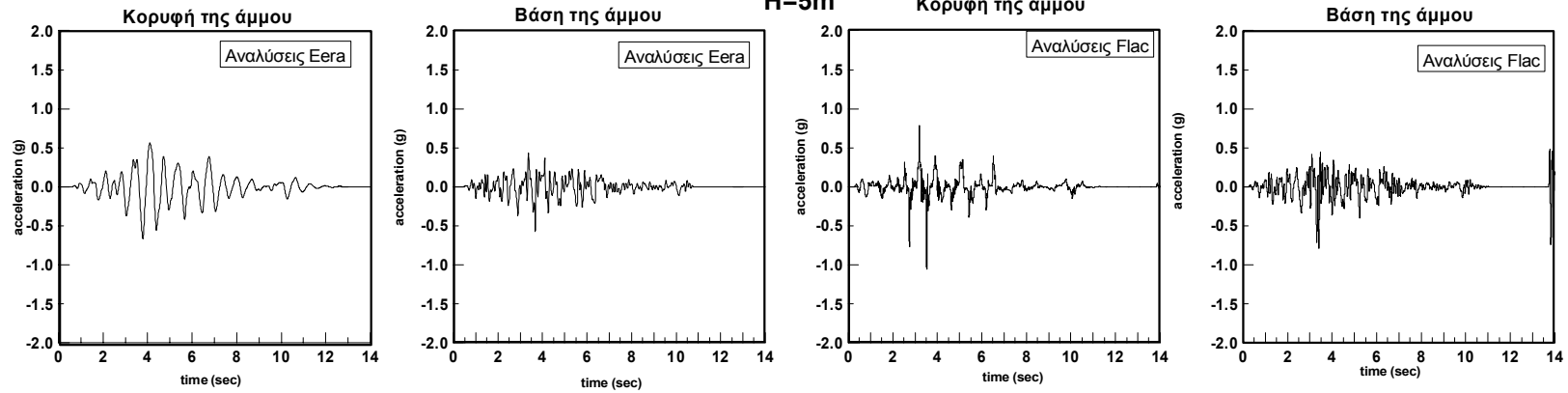
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: Επιταχυνσιογραφήματα

Northridge M6.7: $\alpha_{max} = 0,53g$

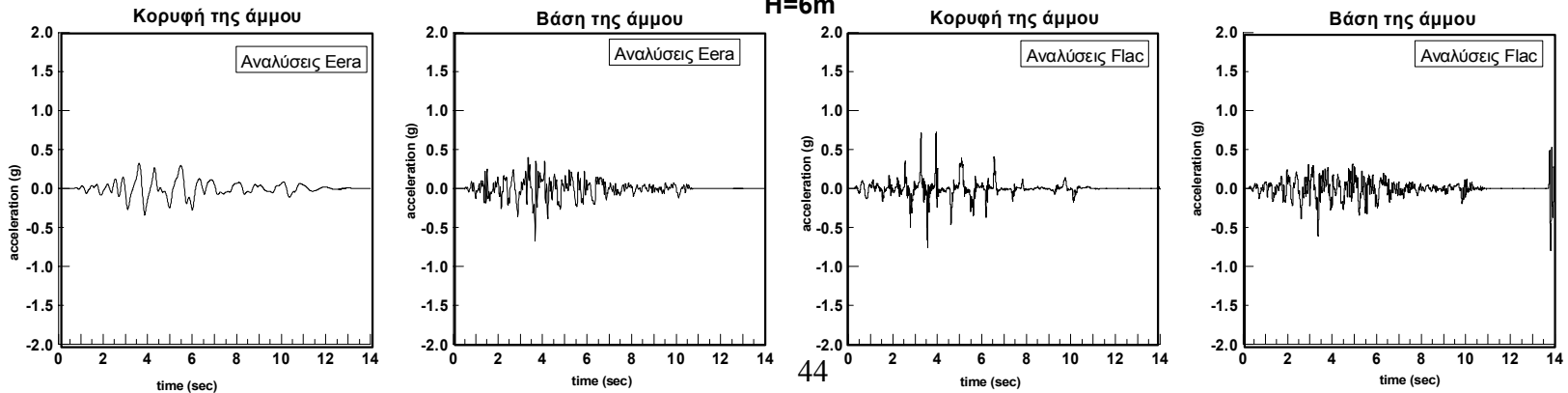
H=4m



H=5m

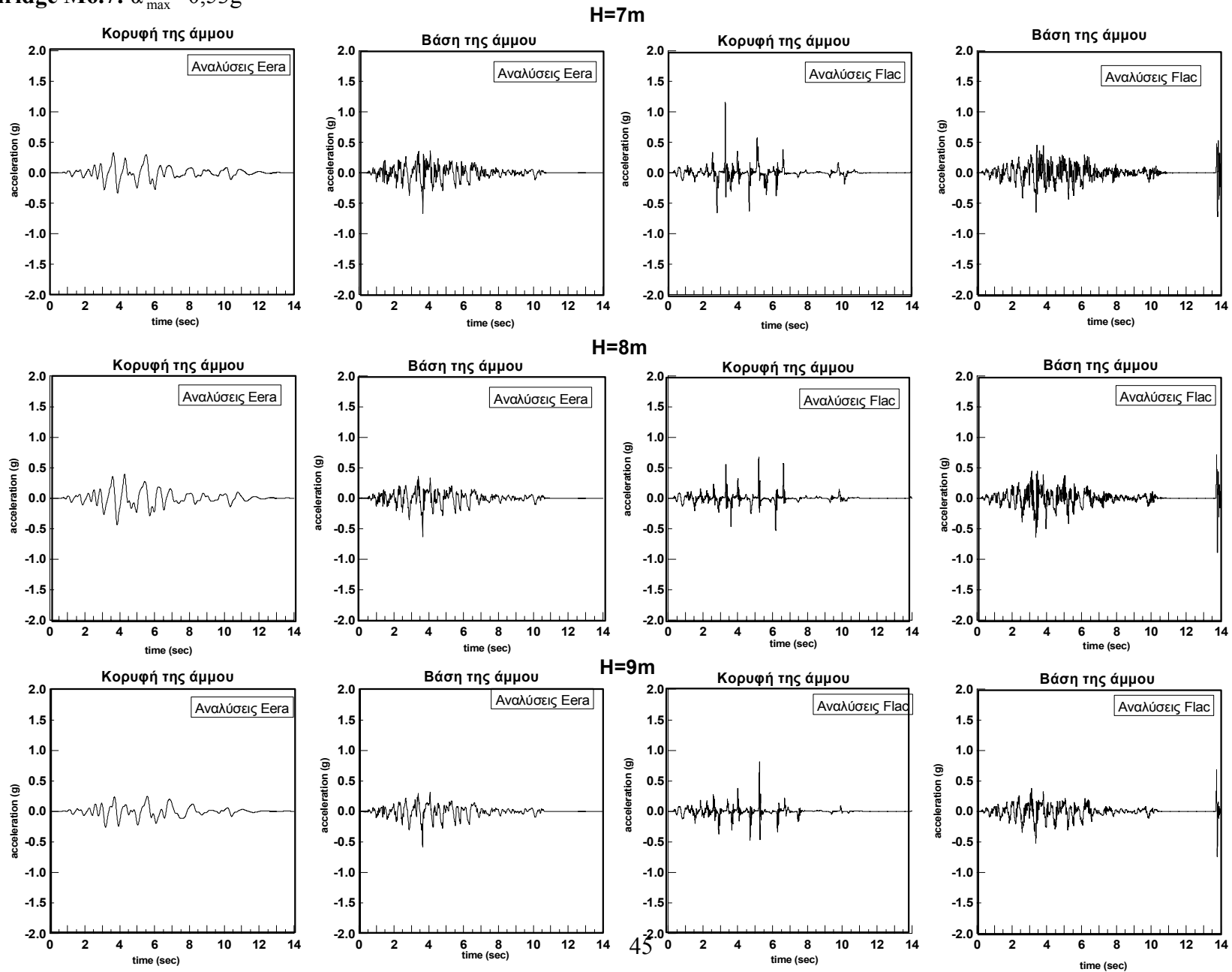


H=6m



ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: Επιταχυνσιογραφήματα

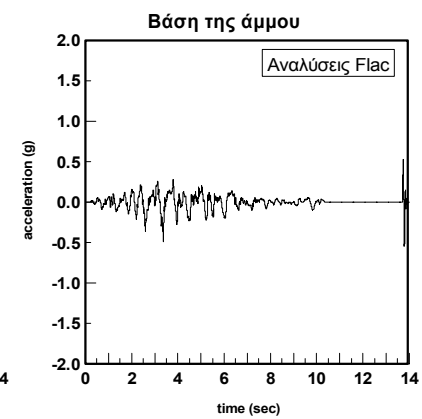
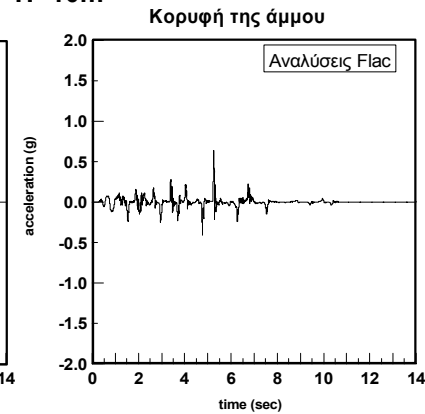
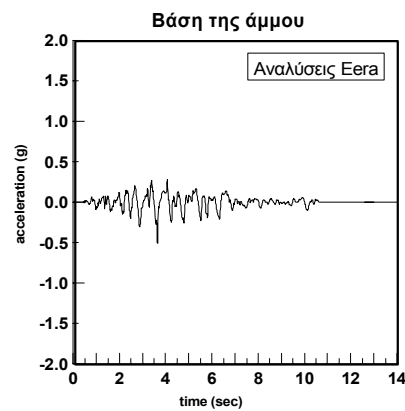
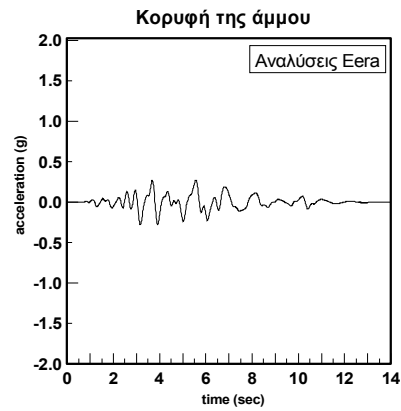
Northridge M6.7: $\alpha_{\max} = 0,53g$



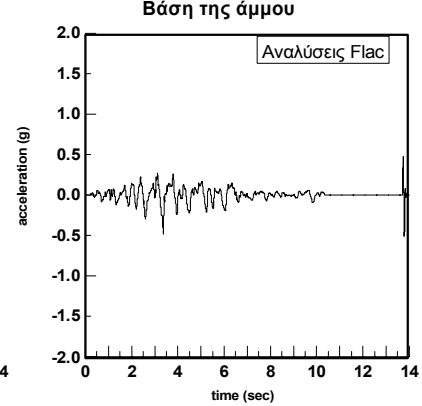
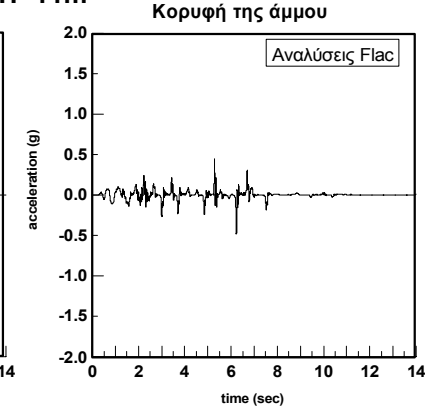
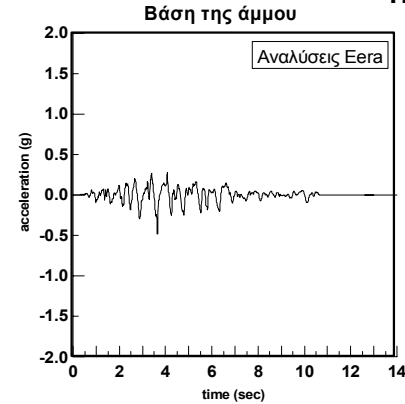
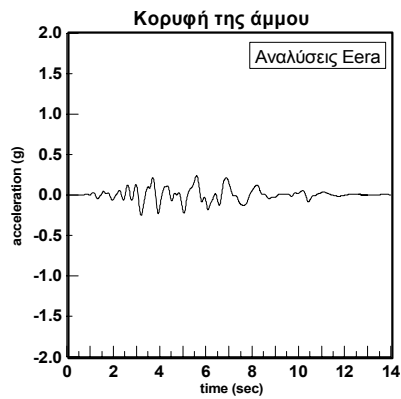
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: Επιταχυνσιογραφήματα

Northridge M6.7: $\alpha_{\max} = 0,53g$

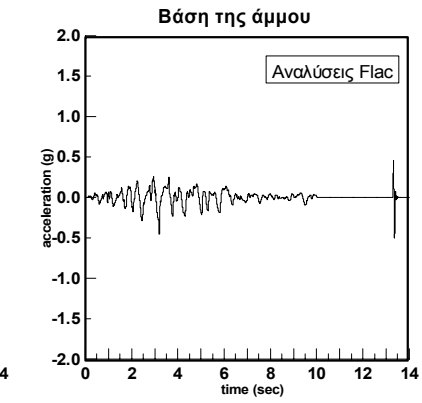
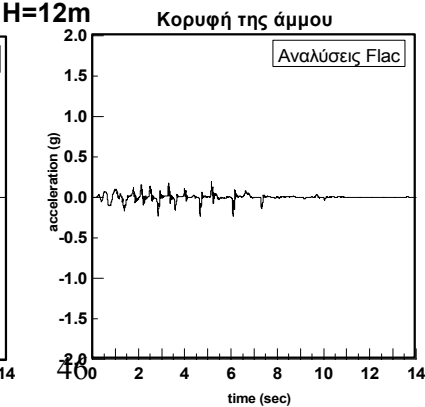
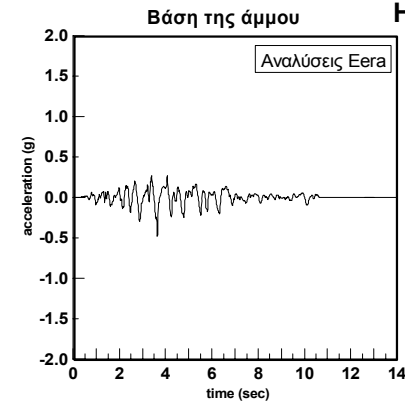
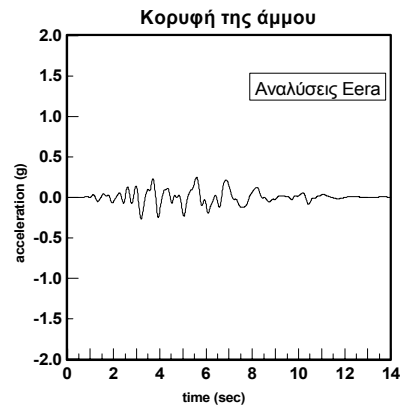
H=10m



H=11m



H=12m



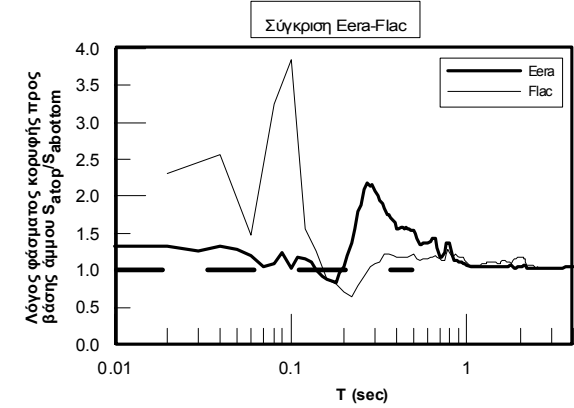
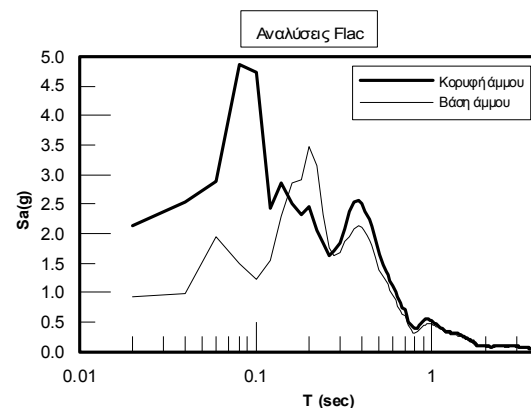
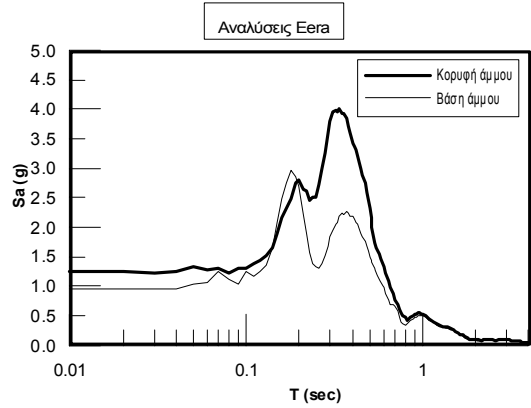
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ:

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ
ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ - ΕΛΑΣΤΙΚΑ
ΦΑΣΜΑΤΑ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ

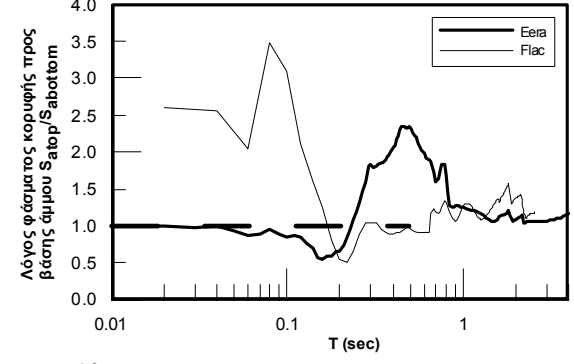
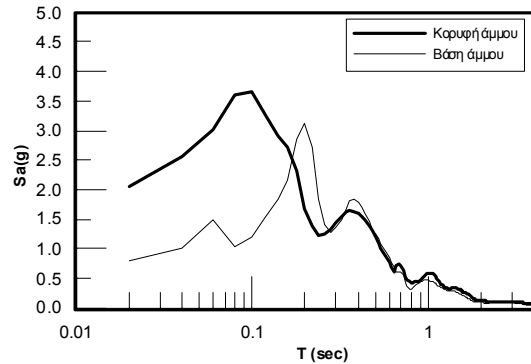
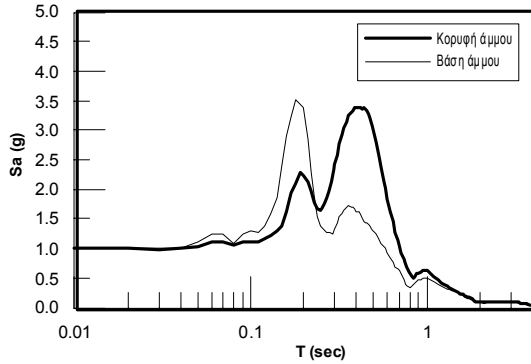
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ: Φάσματα

Northridge265 M6.7: $\alpha_{max} = 0,53g$

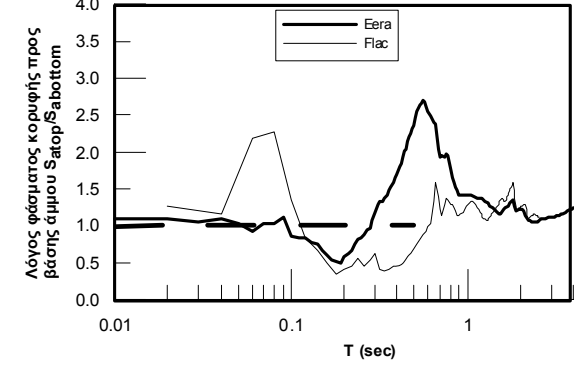
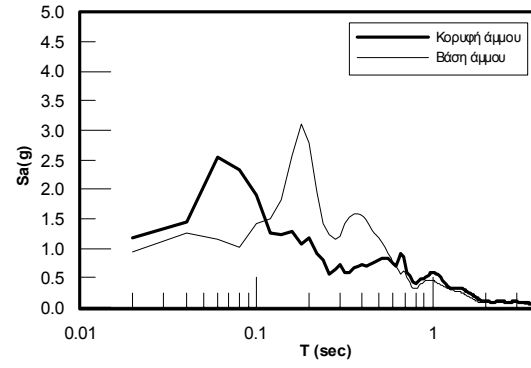
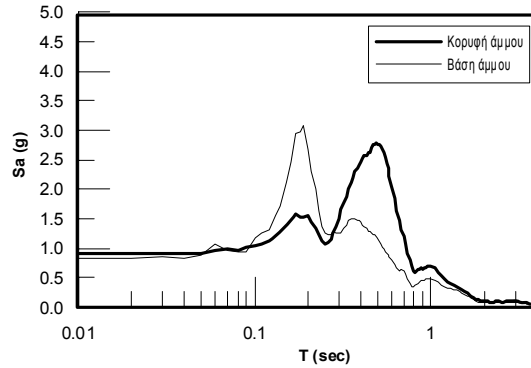
H=1m



H=2m



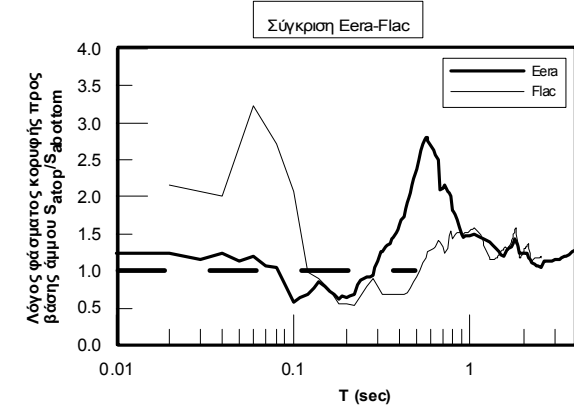
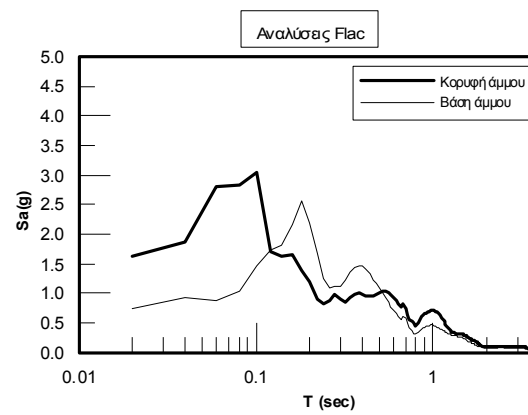
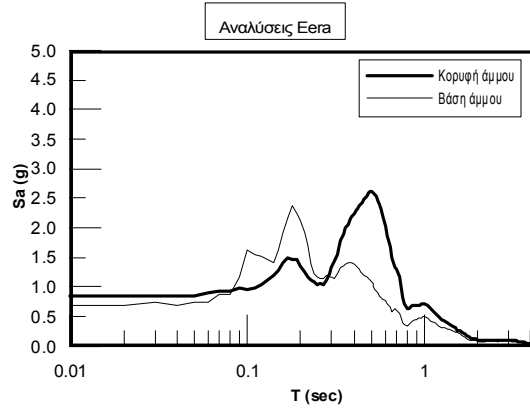
H=3m



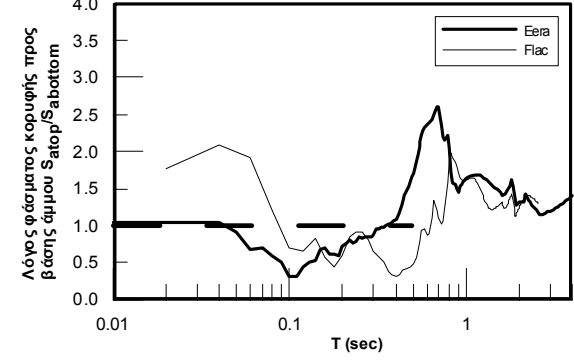
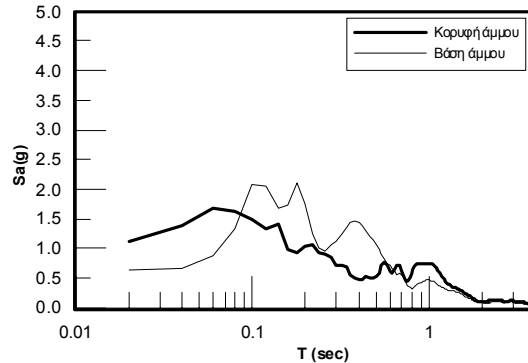
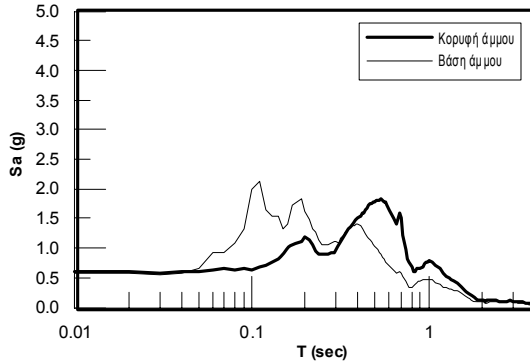
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ: Φάσματα

Northridge265 M6.7: $\alpha_{max} = 0,53g$

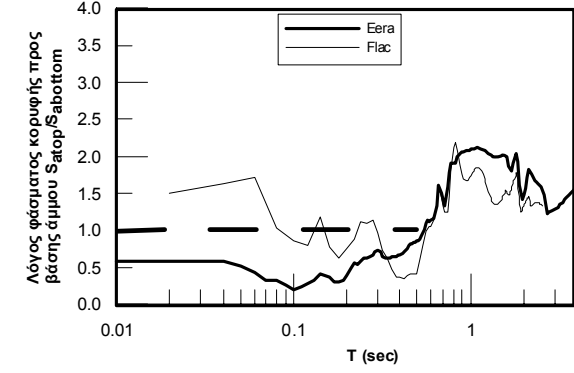
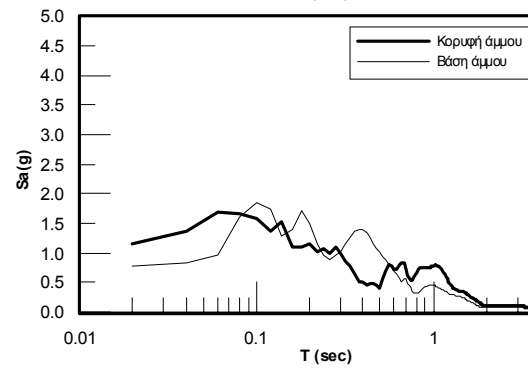
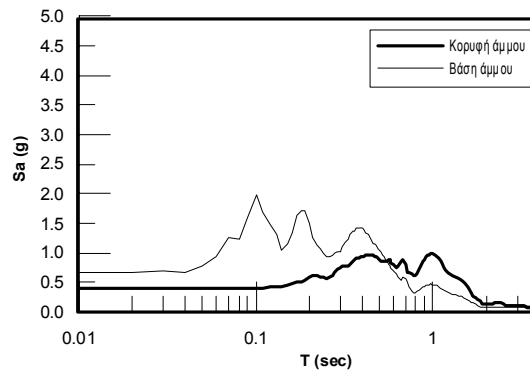
H=4m



H=5m



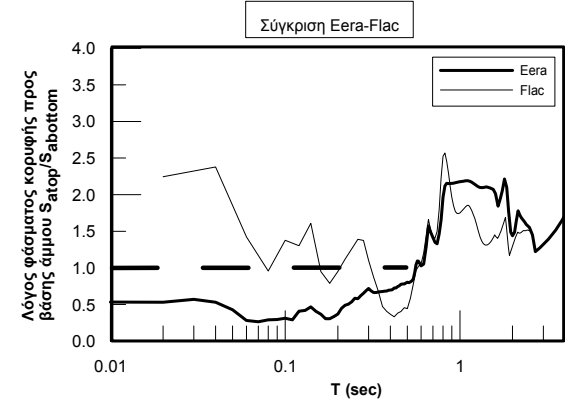
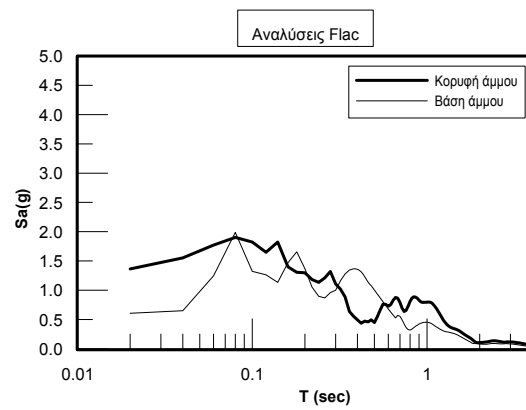
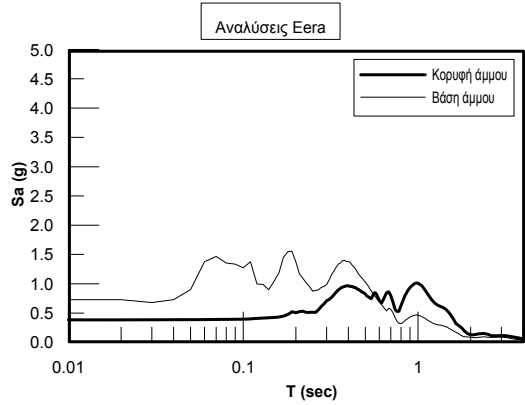
H=6m



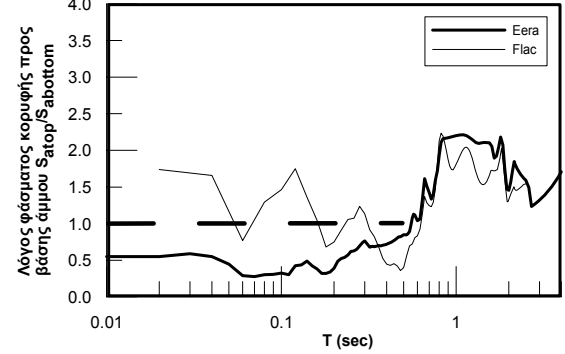
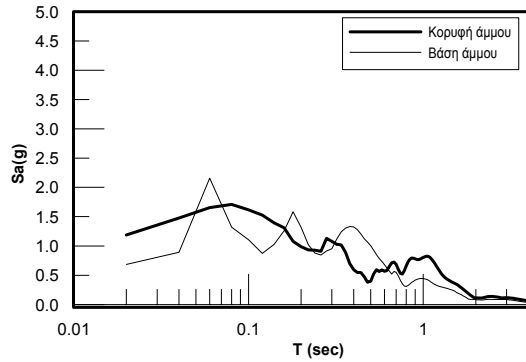
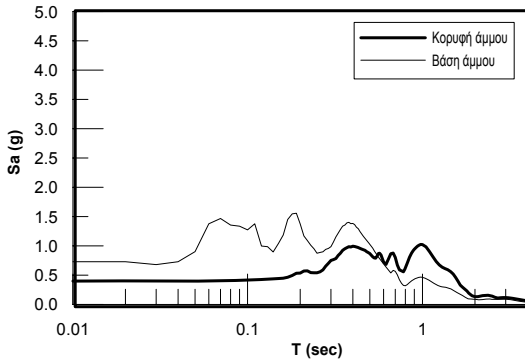
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ: Φάσματα

Northridge265 M6.7: $\alpha_{max} = 0,53g$

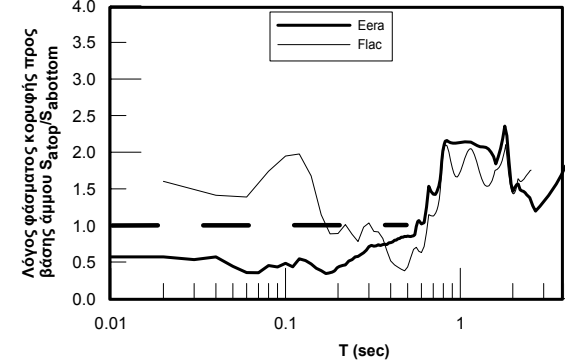
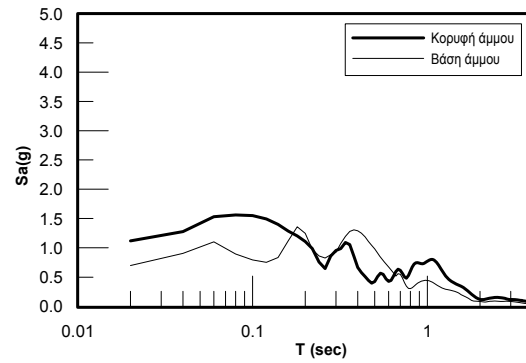
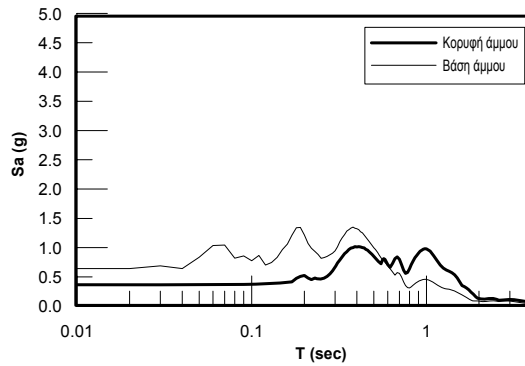
H=7m



H=8m



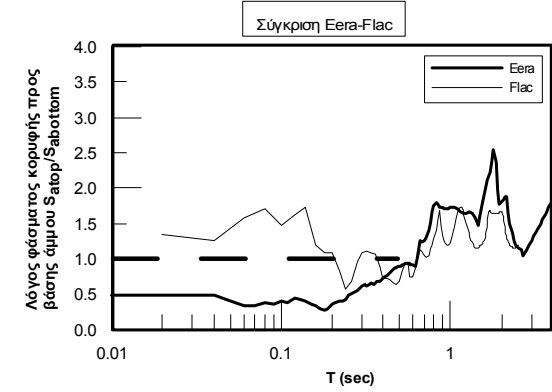
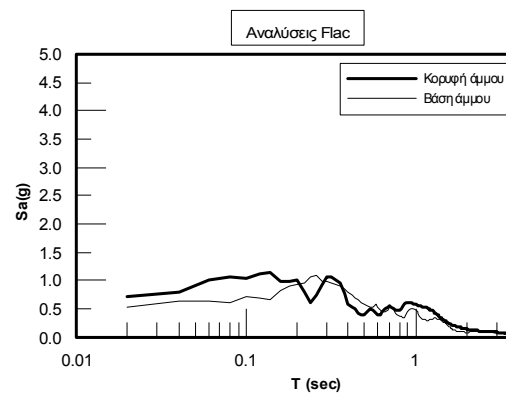
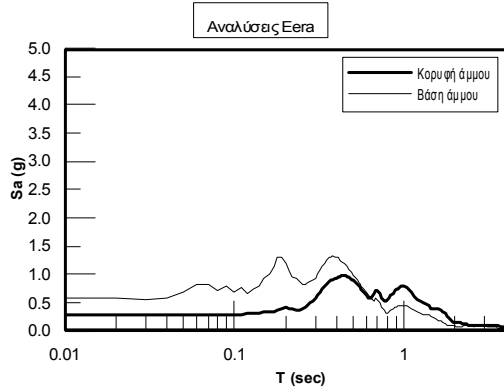
H=9m



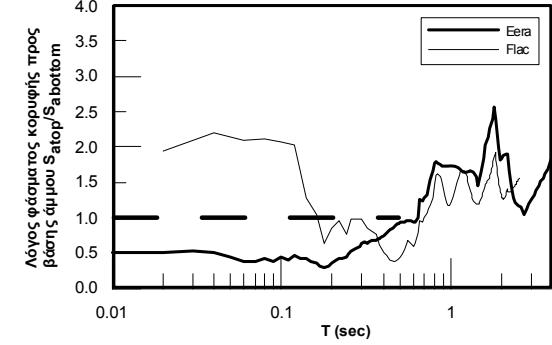
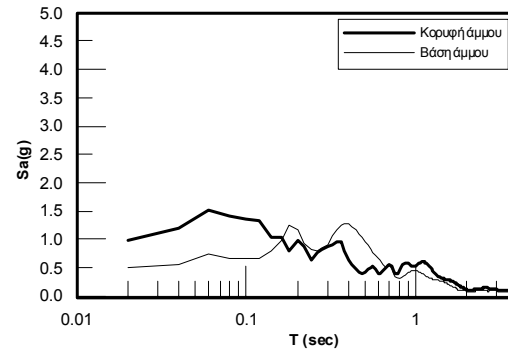
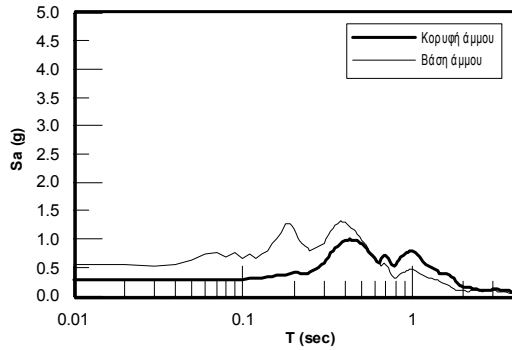
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ: Φάσματα

Northridge265 M6.7: $\alpha_{max} = 0,53g$

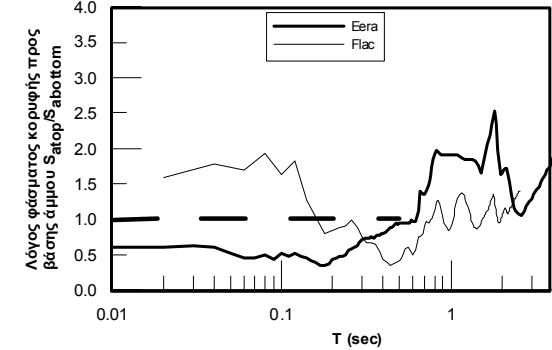
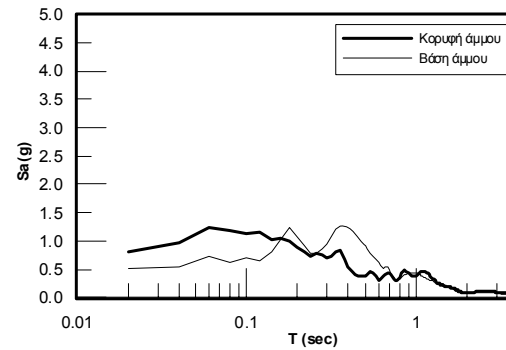
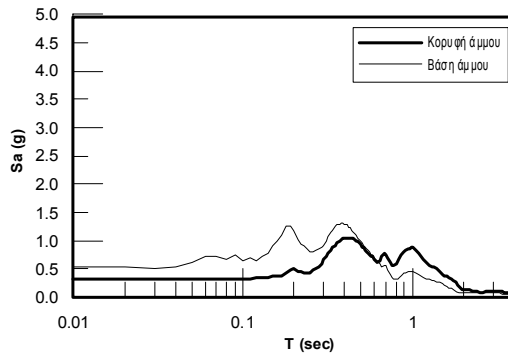
H=10m



H=11m

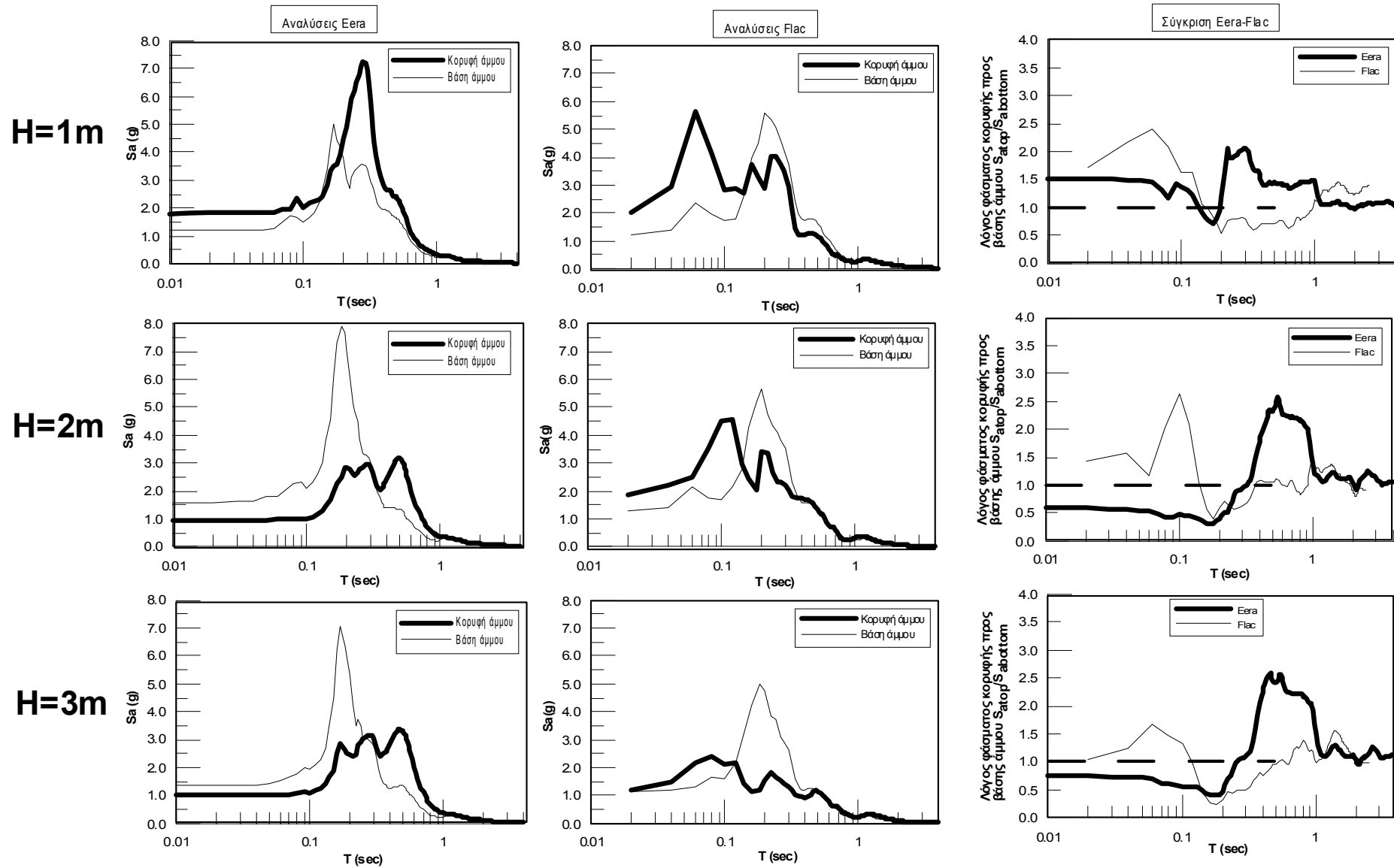


H=12m



ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ: Φάσματα

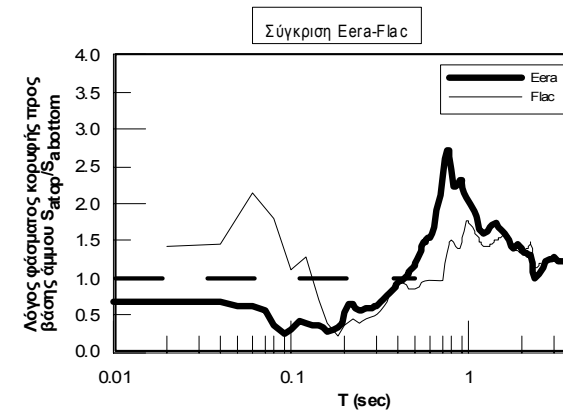
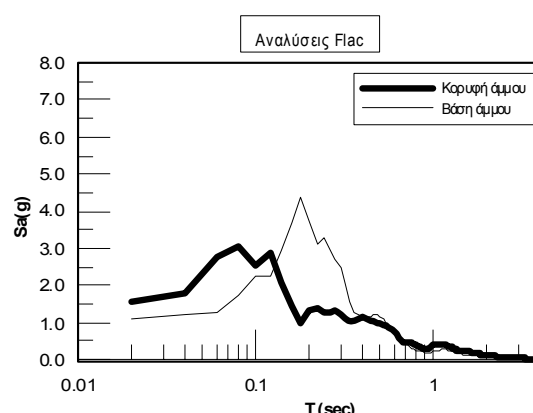
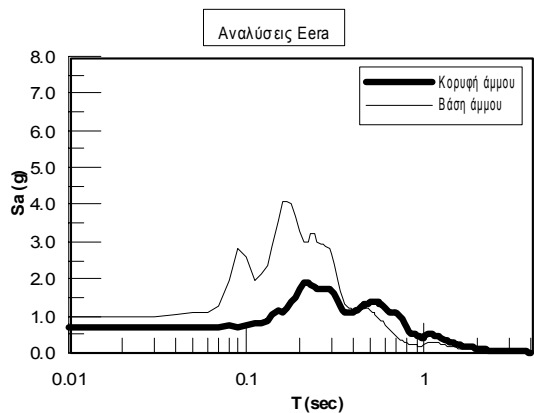
Sepolia M5.8: $\alpha_{max} = 0,63g$



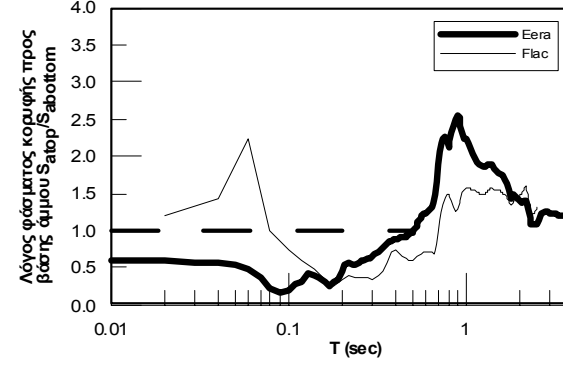
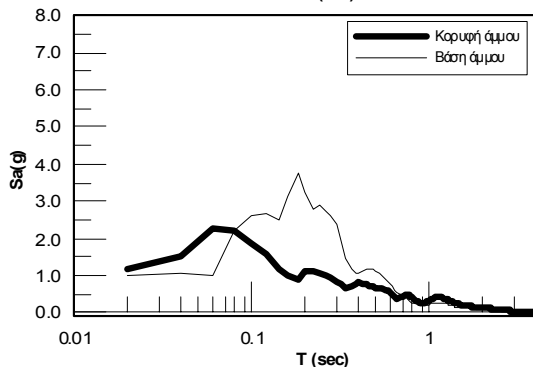
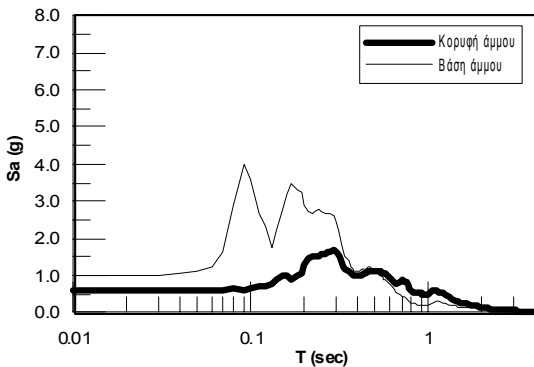
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ: Φάσματα

Sepolia M5.8: $\alpha_{max} = 0,63g$

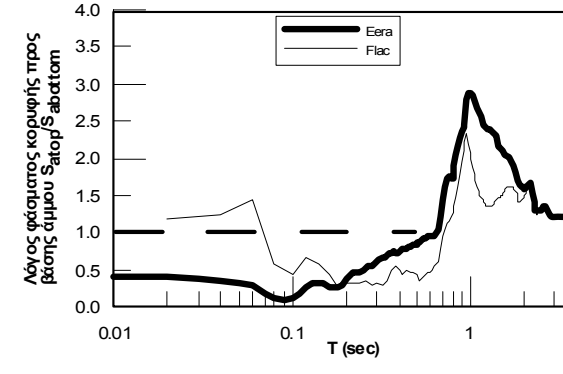
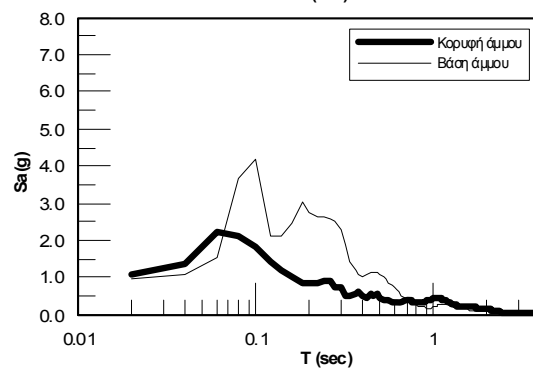
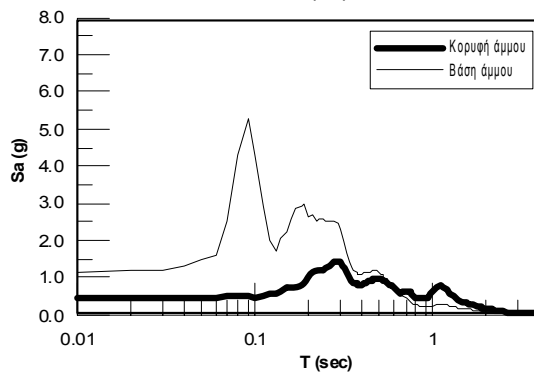
H=4m



H=5m



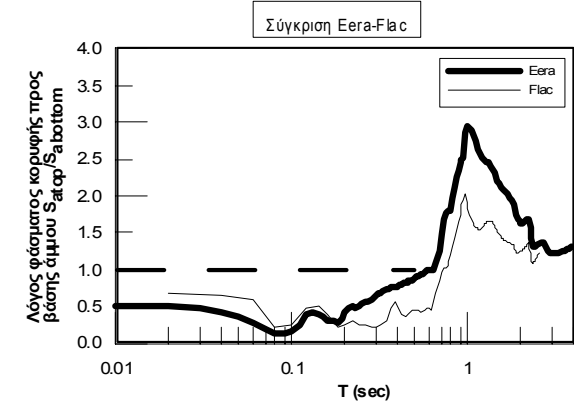
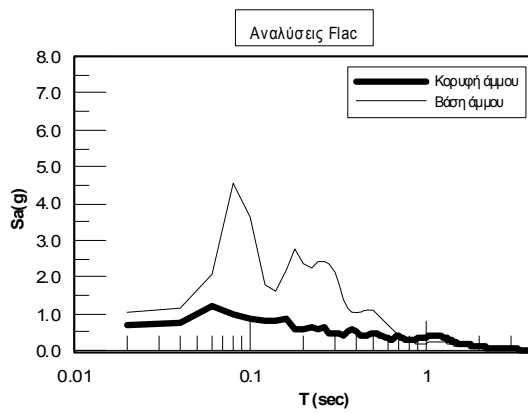
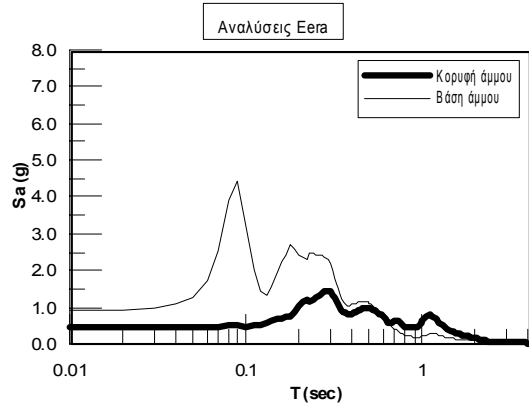
H=6m



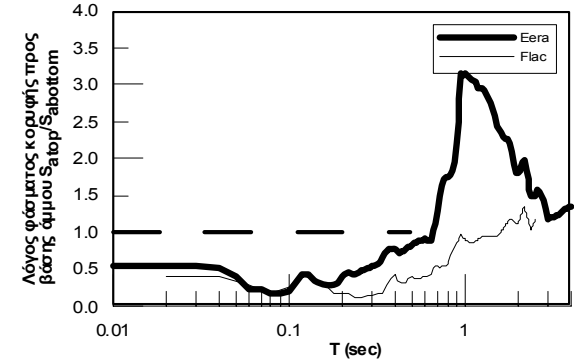
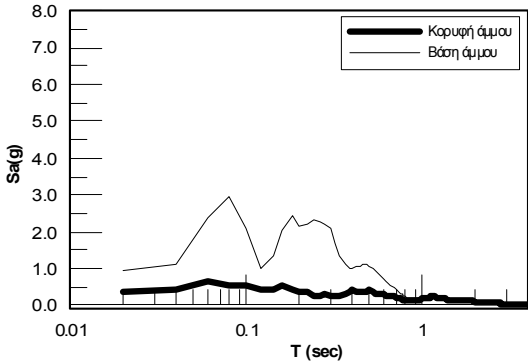
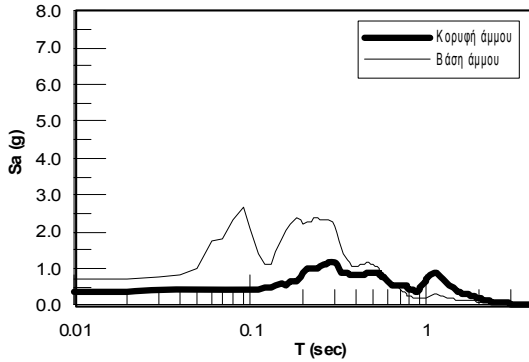
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ: Φάσματα

Sepolia M5.8: $\alpha_{max} = 0,63g$

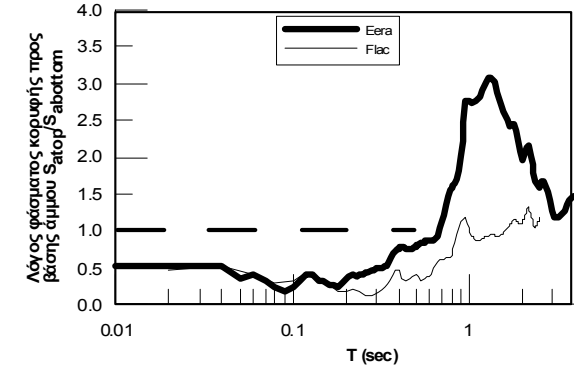
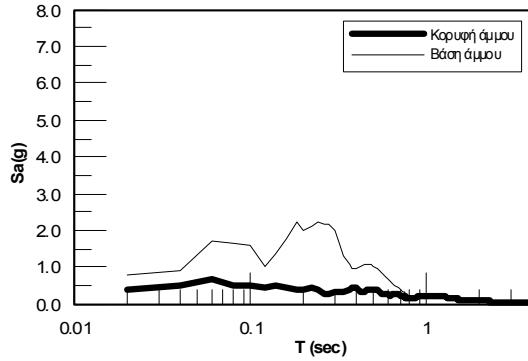
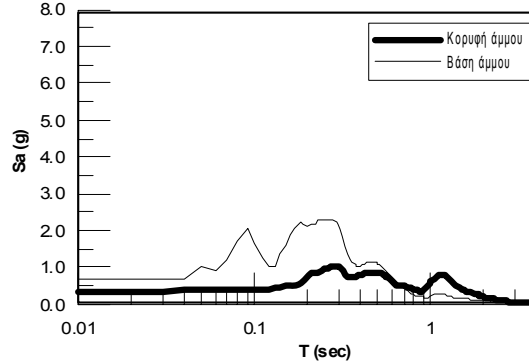
H=7m



H=8m



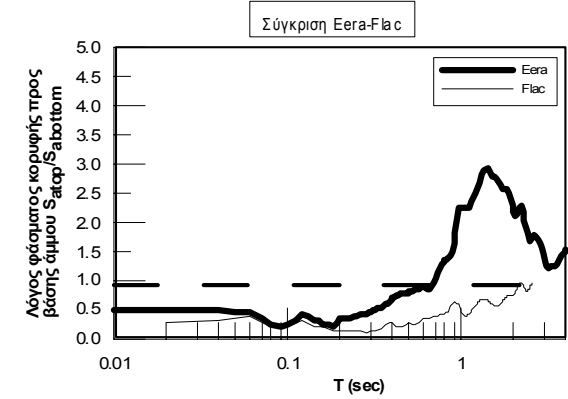
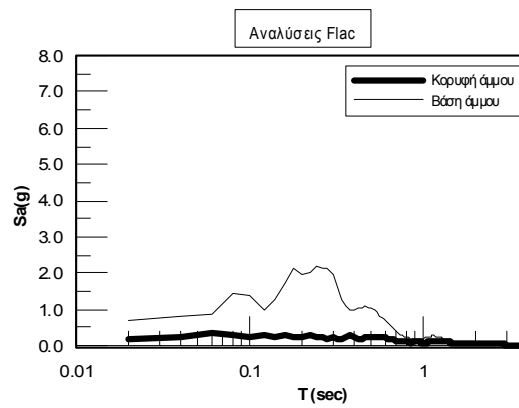
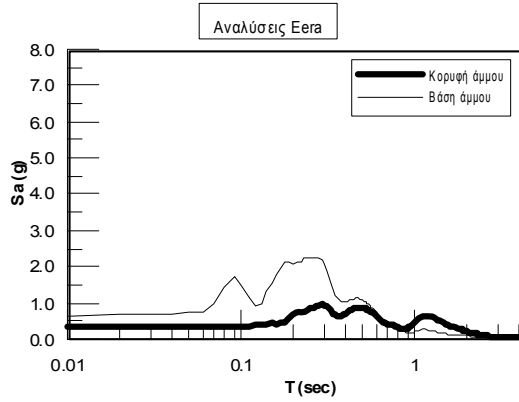
H=9m



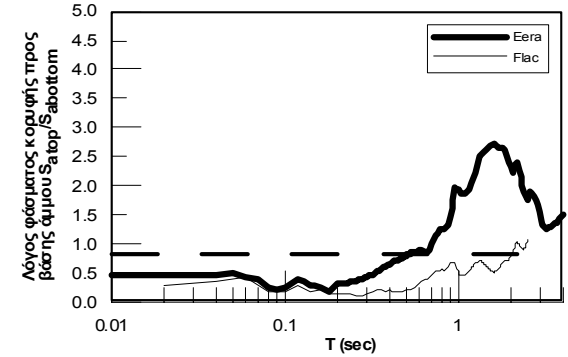
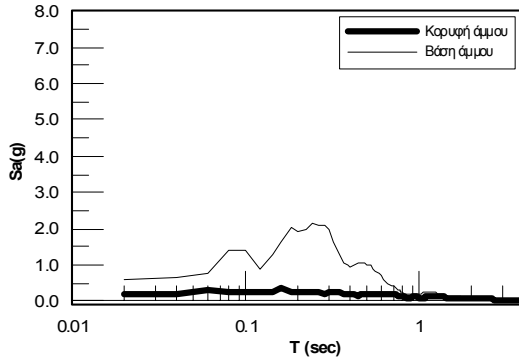
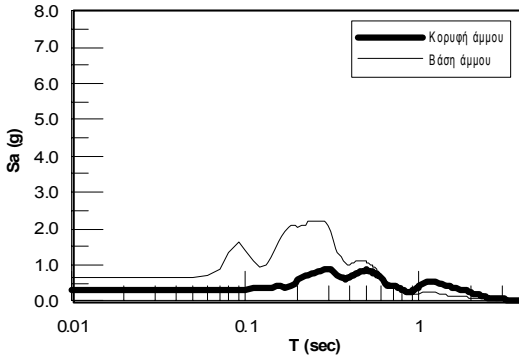
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ: Φάσματα

Sepolia M5.8: $\alpha_{max} = 0,63g$

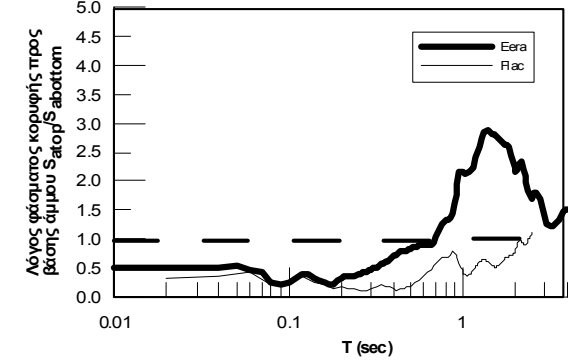
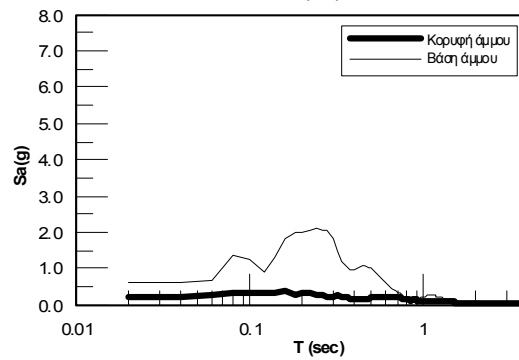
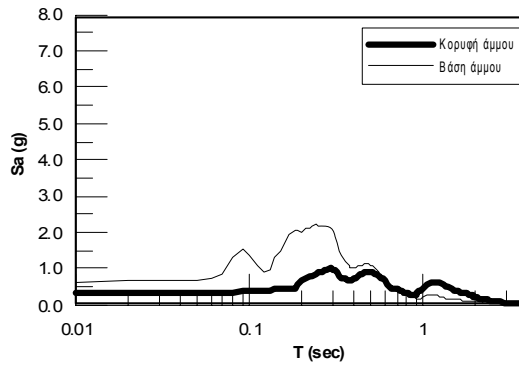
H=10m



H=11m



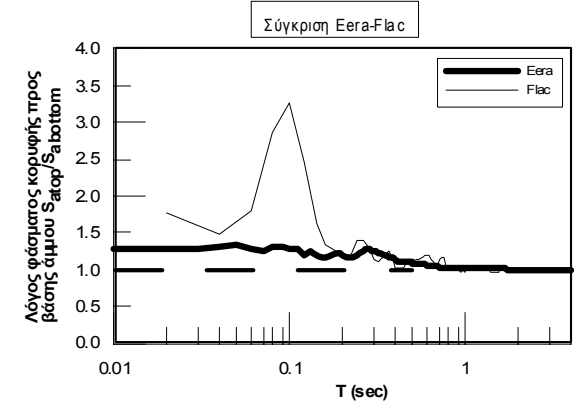
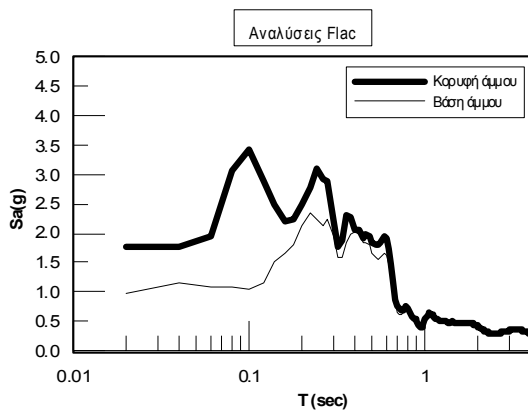
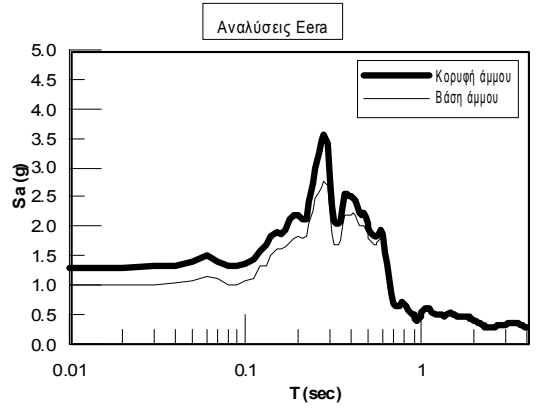
H=12m



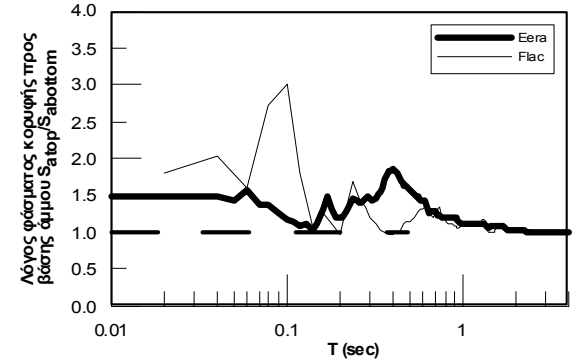
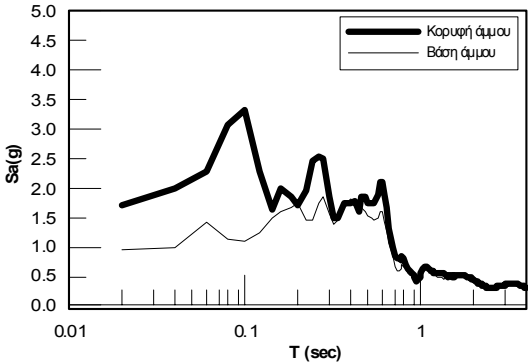
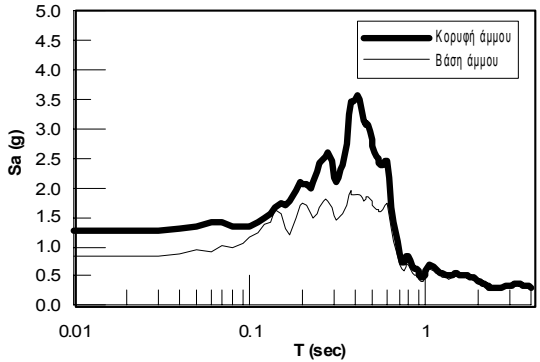
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ: Φάσματα

Chichi M6.8: $\alpha_{max} = 0,52g$

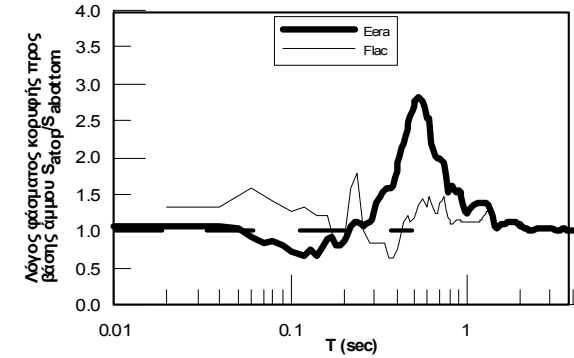
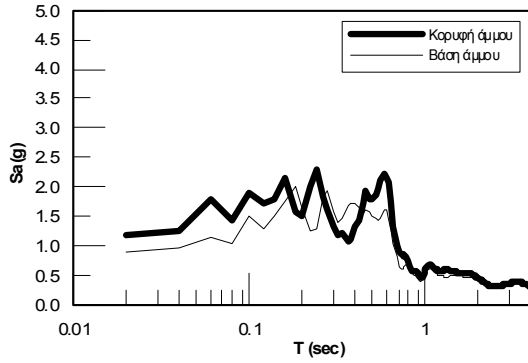
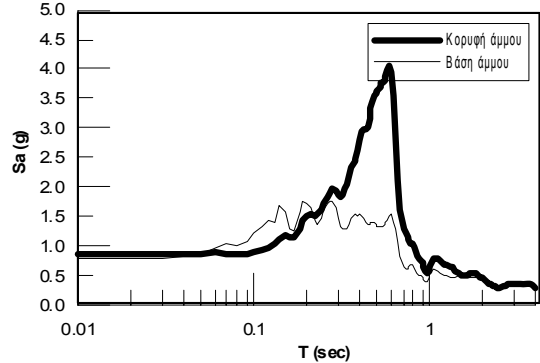
H=1m



H=2m



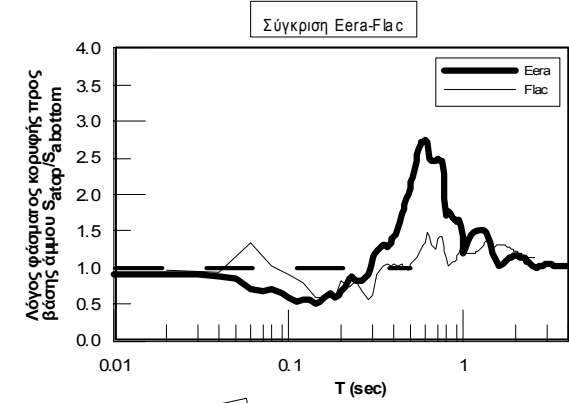
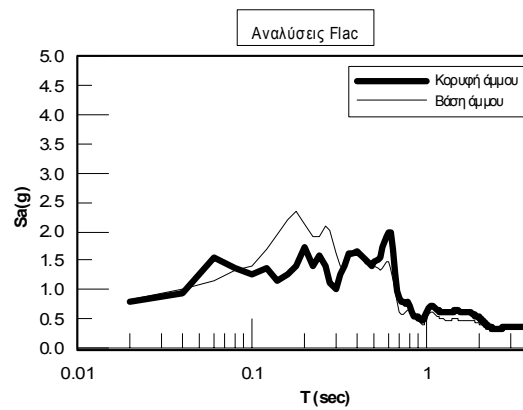
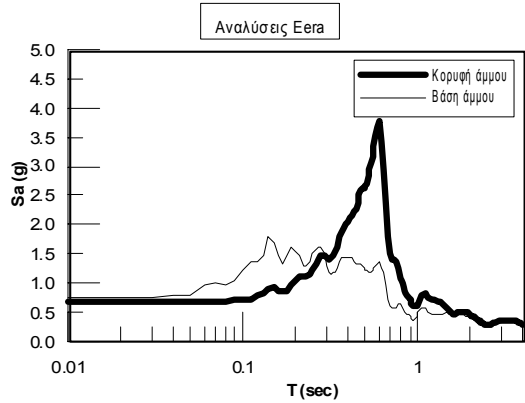
H=3m



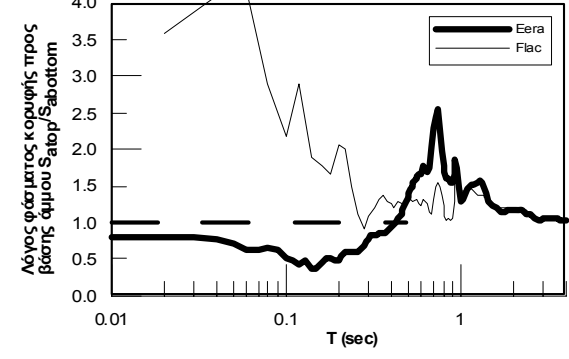
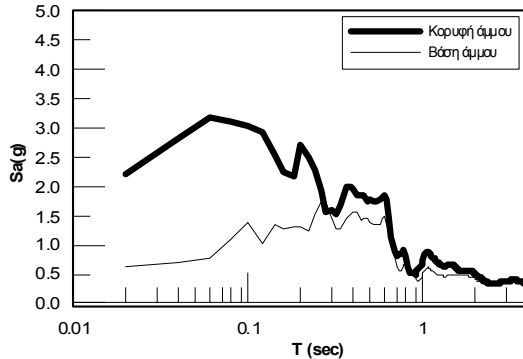
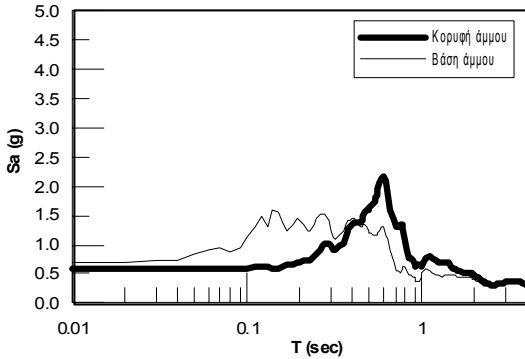
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ: Φάσματα

Chichi M6.8: $\alpha_{max} = 0,52g$

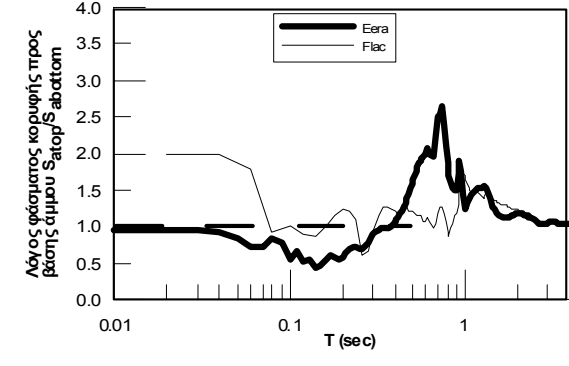
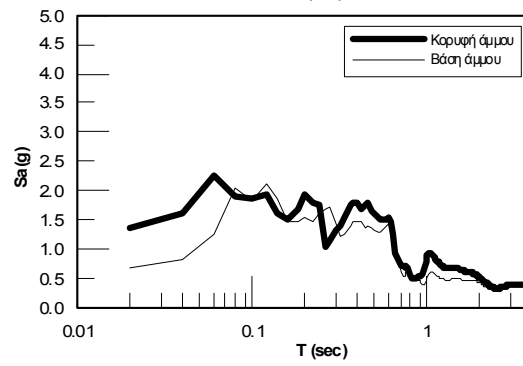
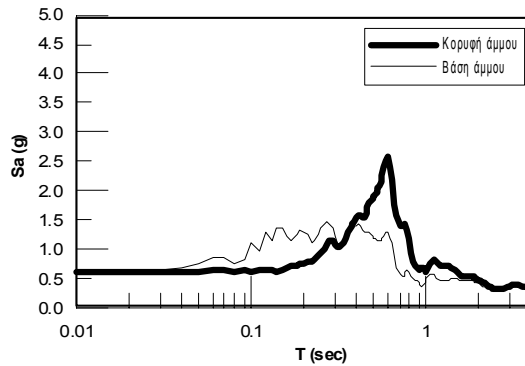
H=4m



H=5m



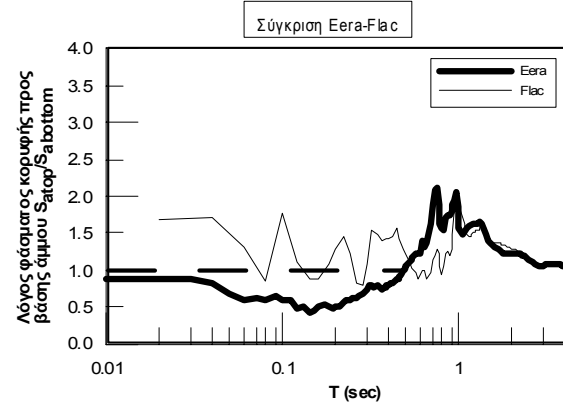
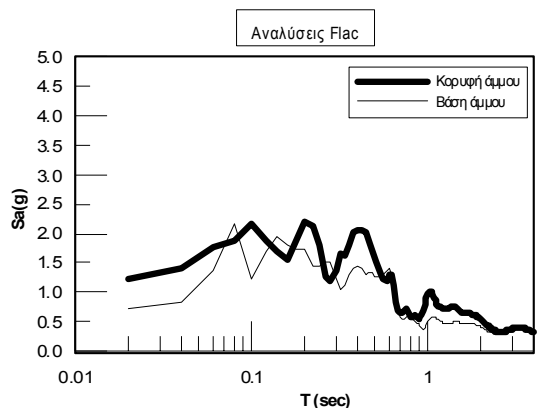
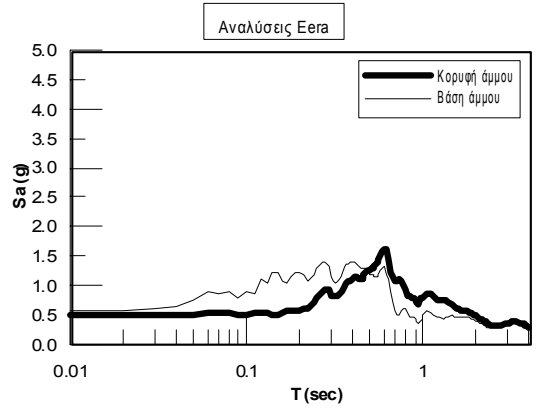
H=6m



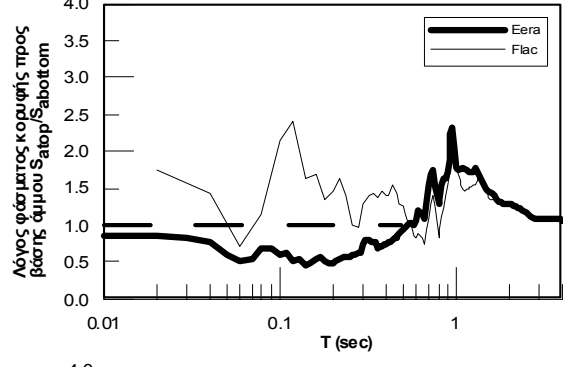
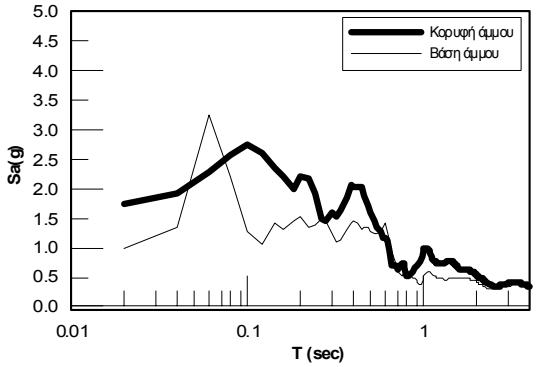
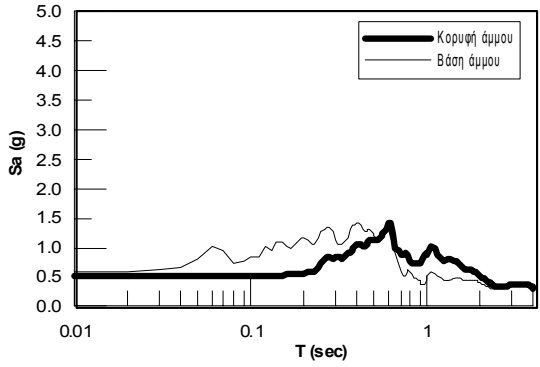
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ: Φάσματα

Chichi M6.8: $\alpha_{max} = 0,52g$

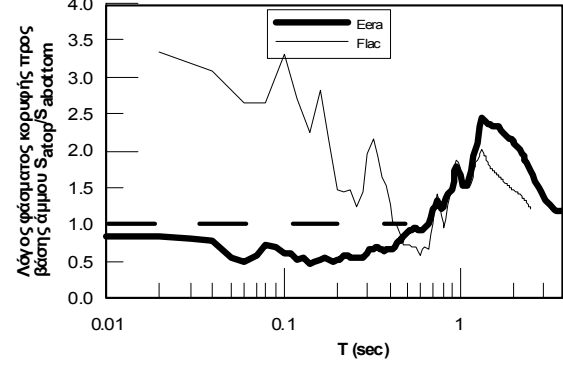
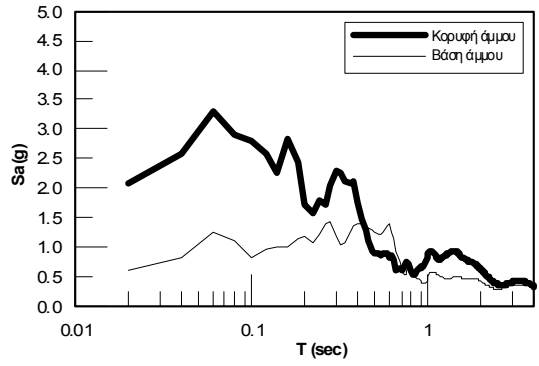
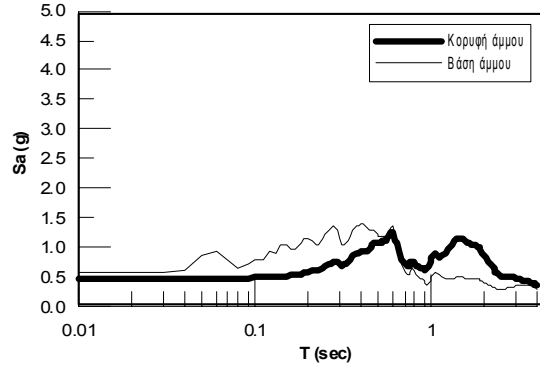
H=7m



H=8m



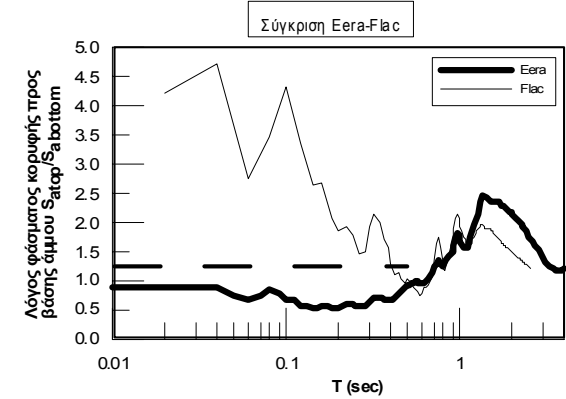
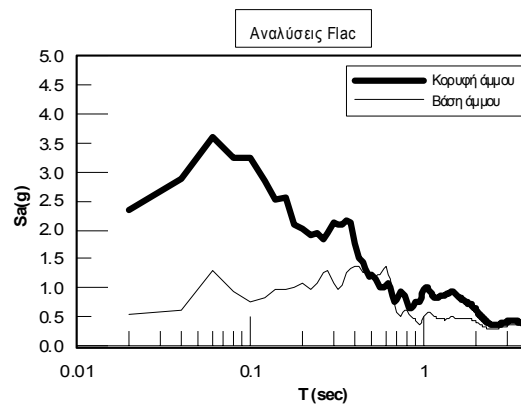
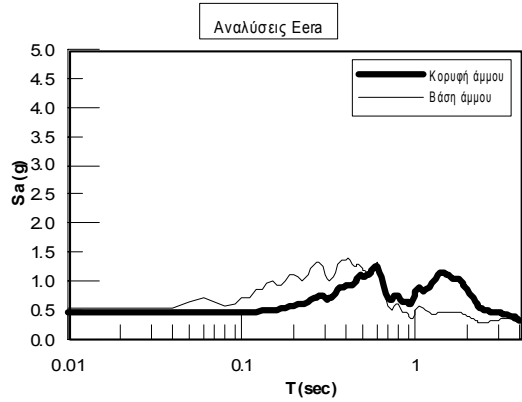
H=9m



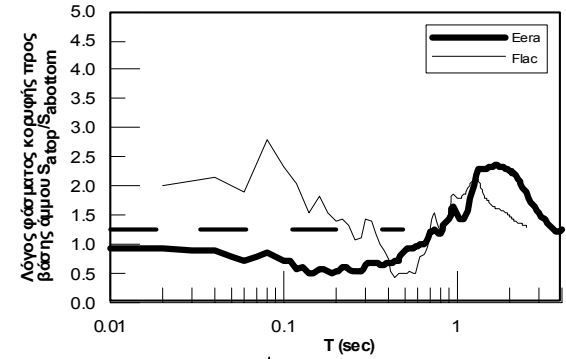
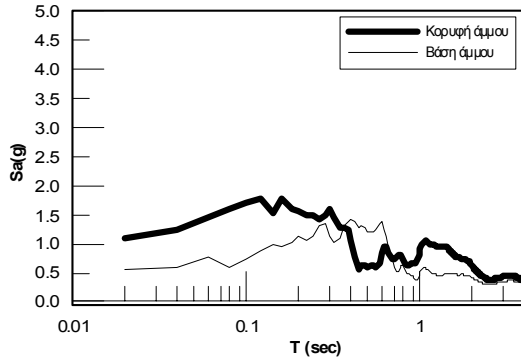
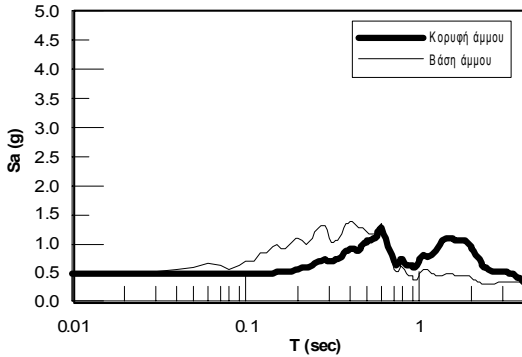
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ: Φάσματα

Chichi M6.8: $\alpha_{max} = 0,52g$

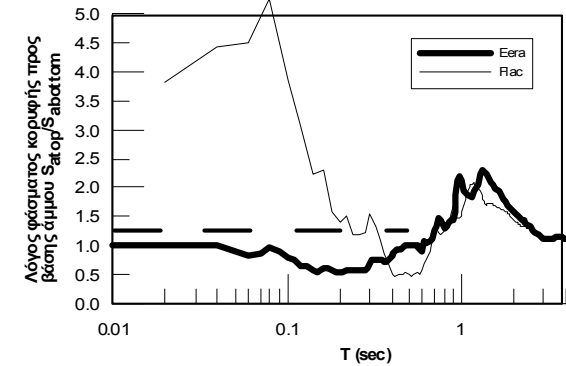
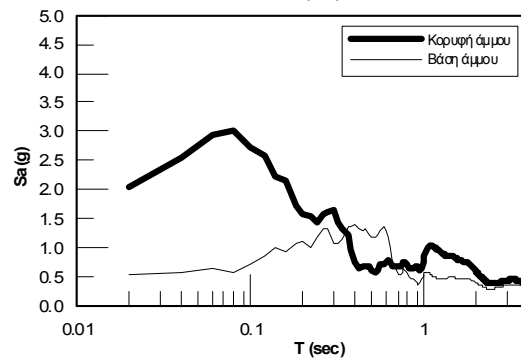
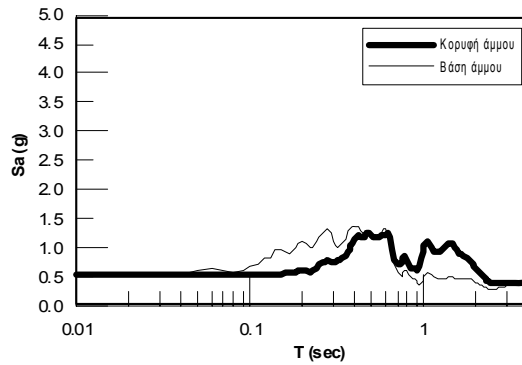
H=10m



H=11m



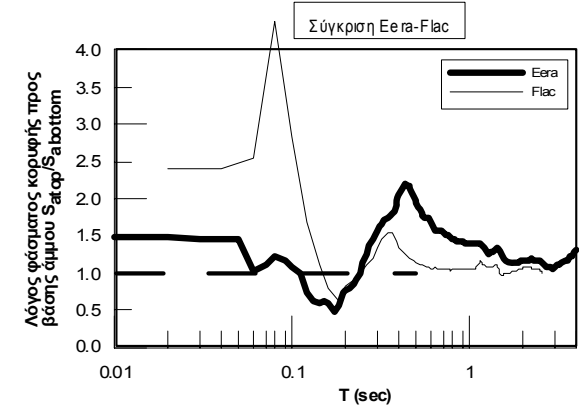
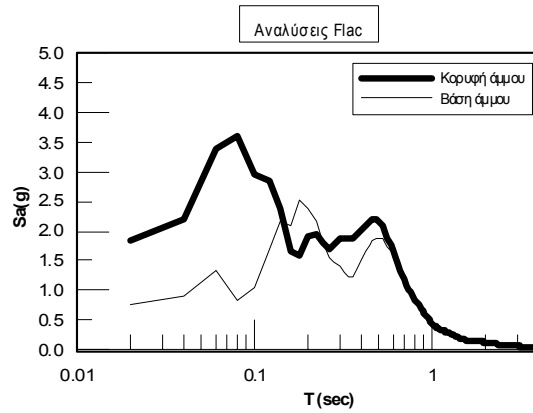
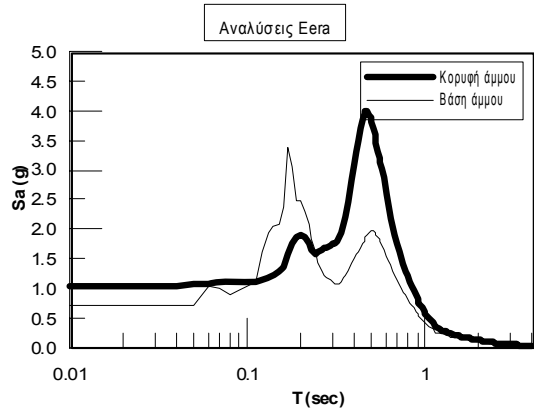
H=12m



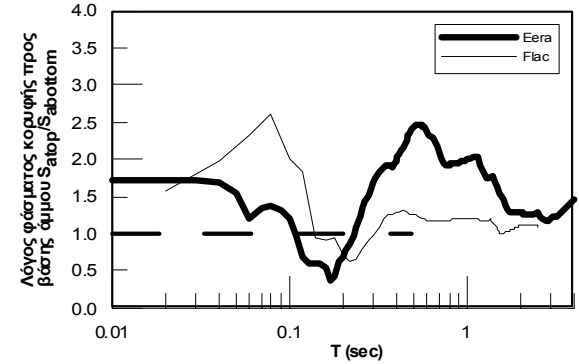
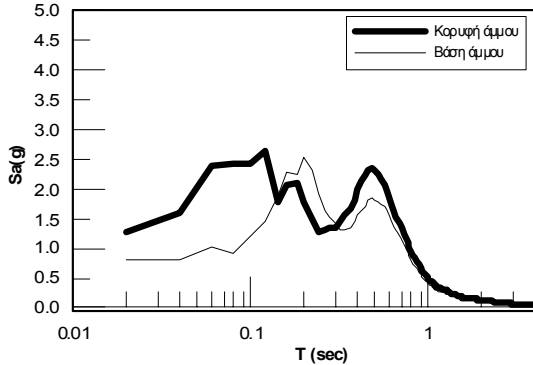
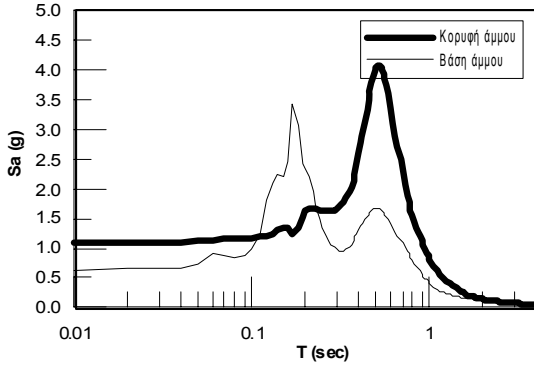
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ: Φάσματα

Aigio M6.2: $\alpha_{max} = 0,58g$

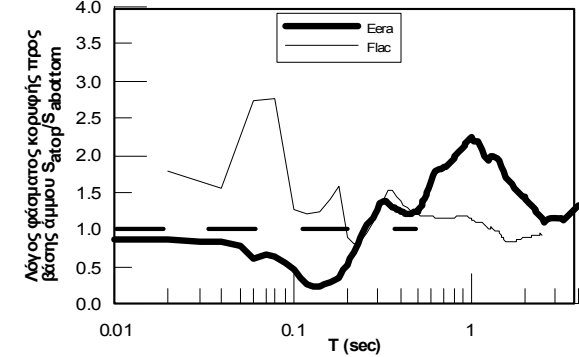
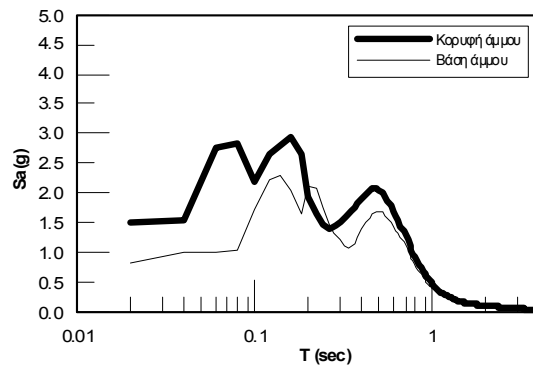
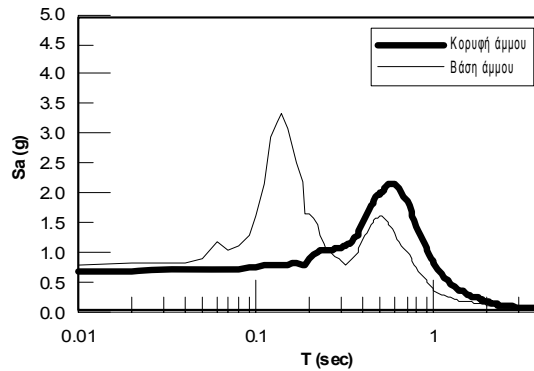
H=1m



H=2m



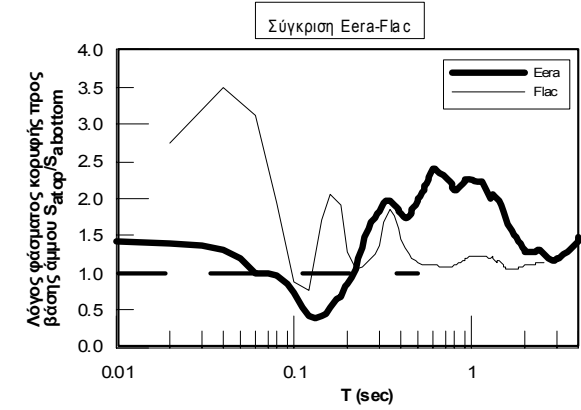
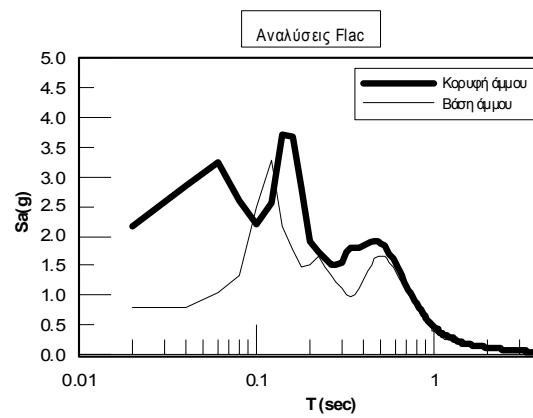
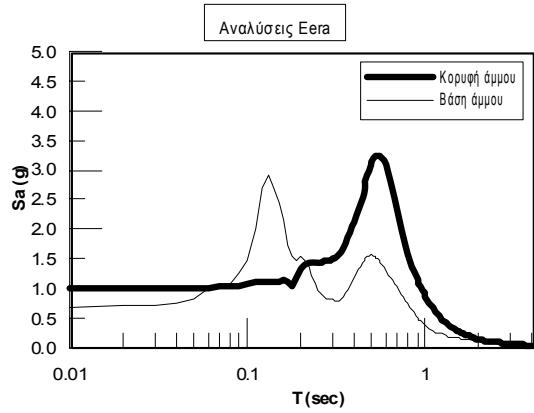
H=3m



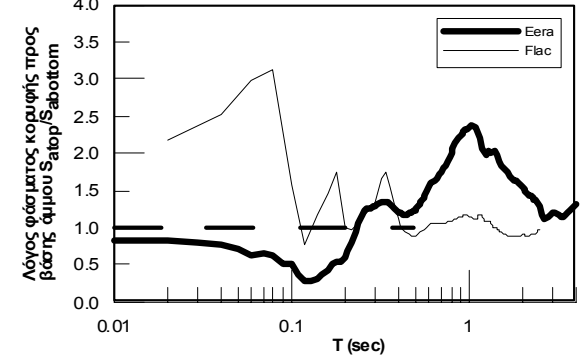
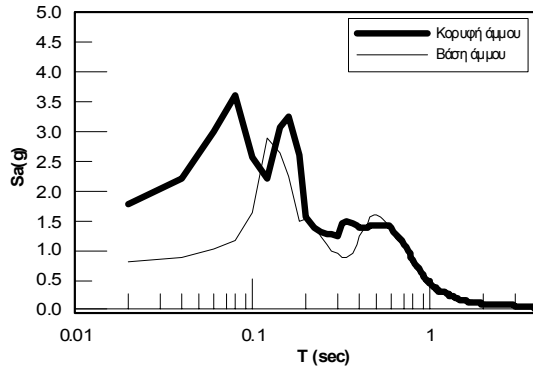
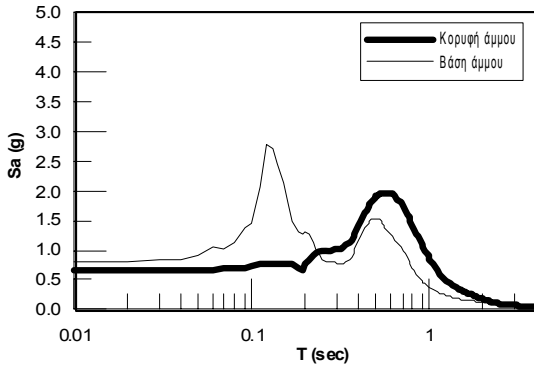
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ: Φάσματα

Aigio M6.2: $\alpha_{max} = 0,58g$

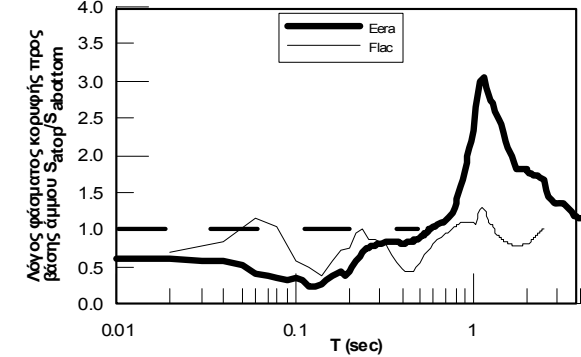
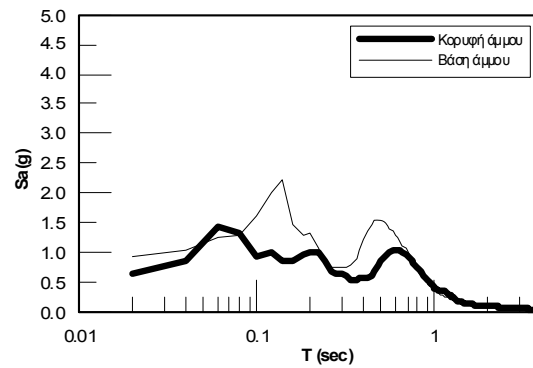
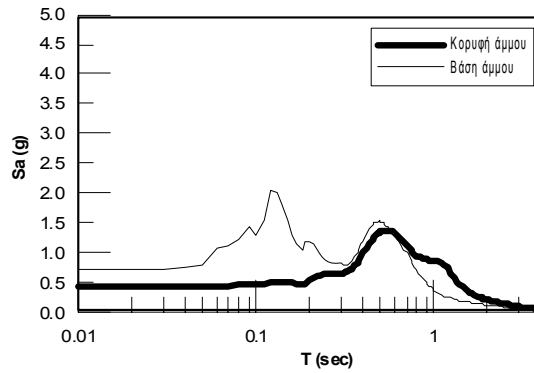
H=4m



H=5m



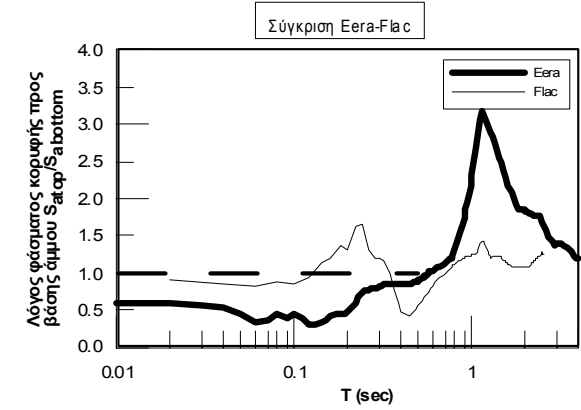
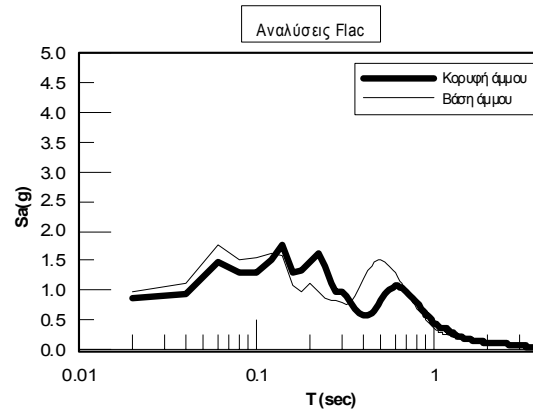
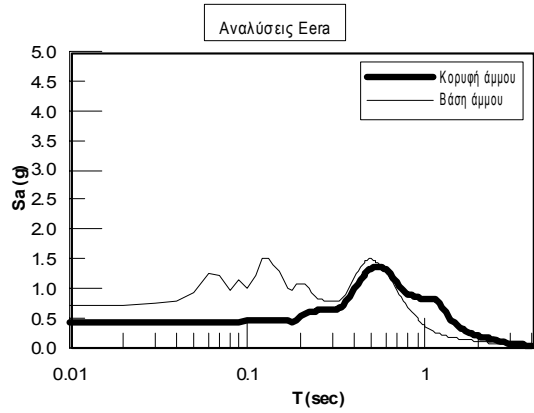
H=6m



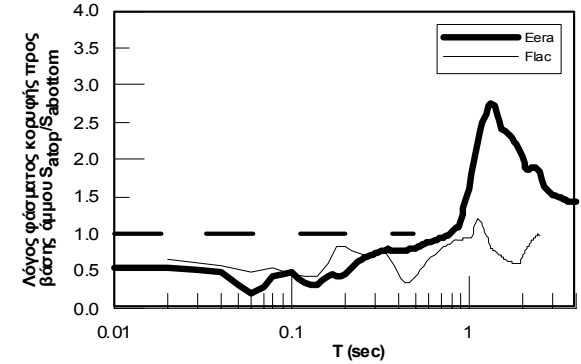
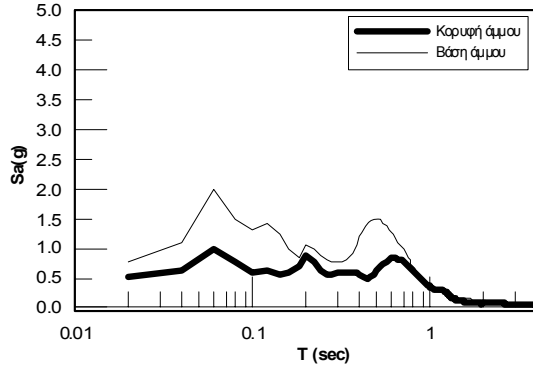
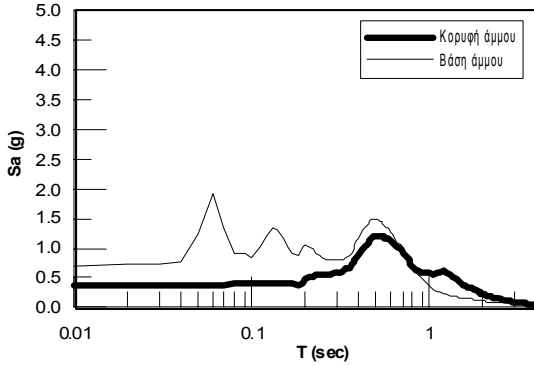
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ: Φάσματα

Aigio M6.2: $\alpha_{max} = 0,58g$

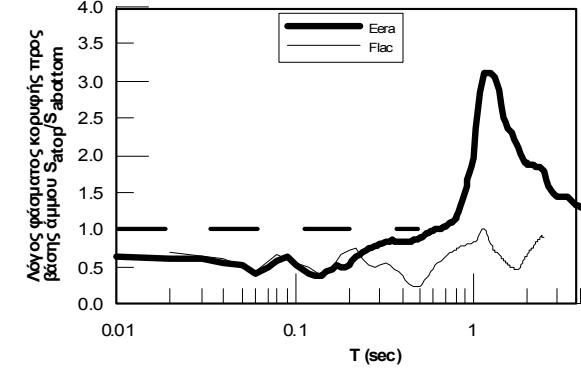
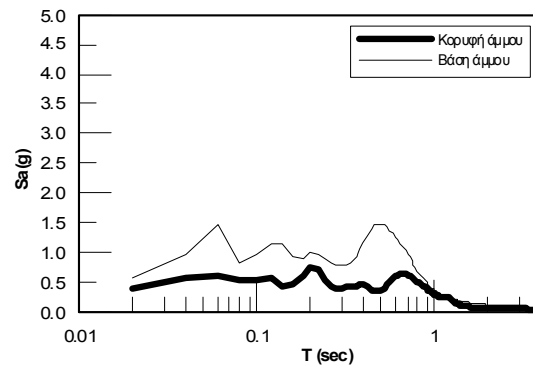
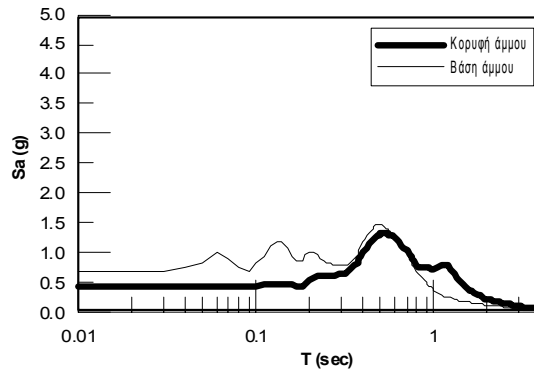
H=7m



H=8m



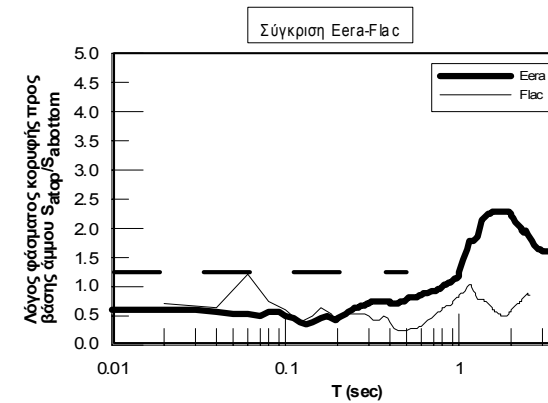
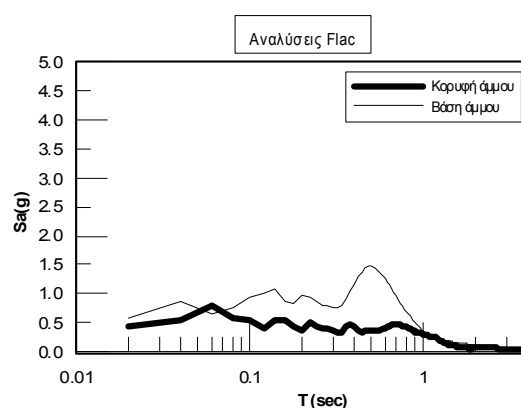
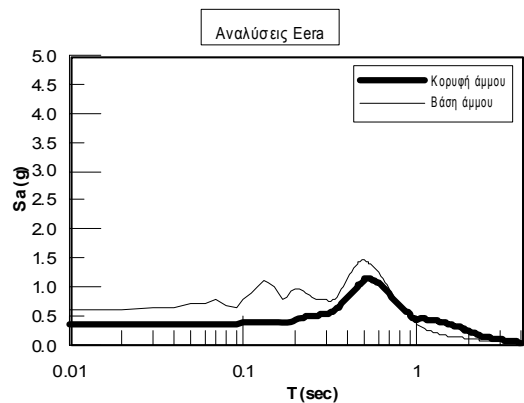
H=9m



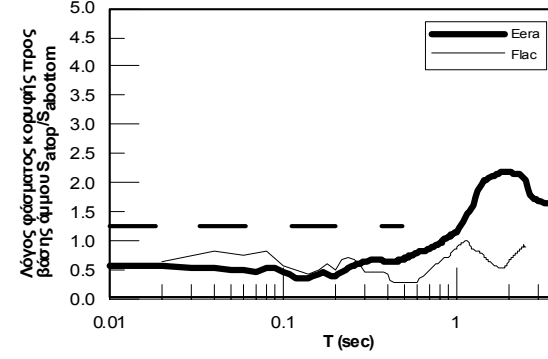
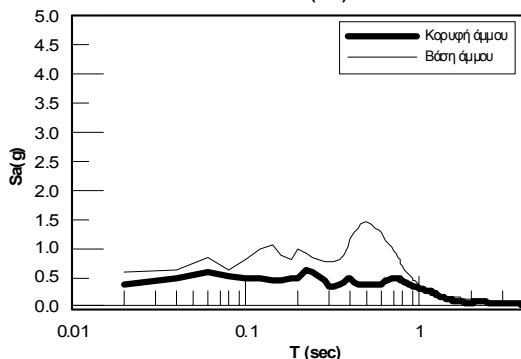
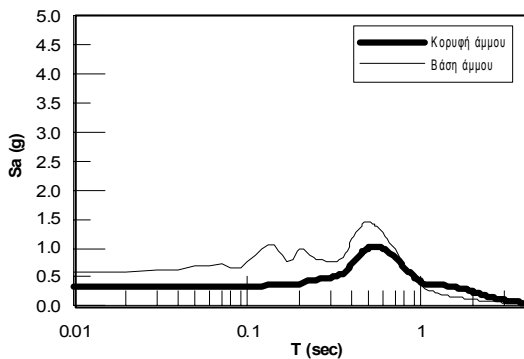
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ: Φάσματα

Αίγιο M6.2: $\alpha_{max} = 0,58g$

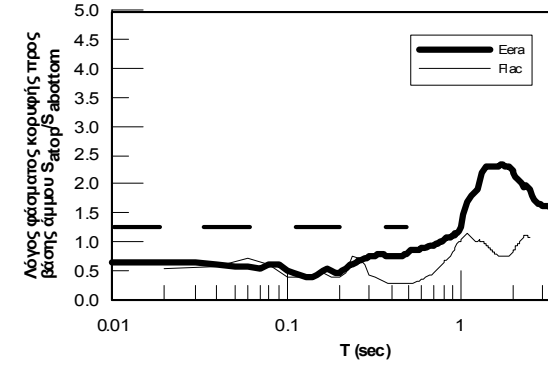
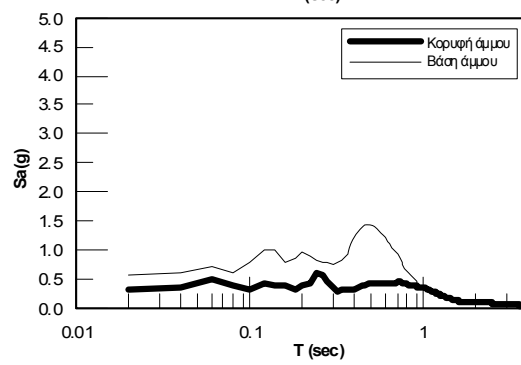
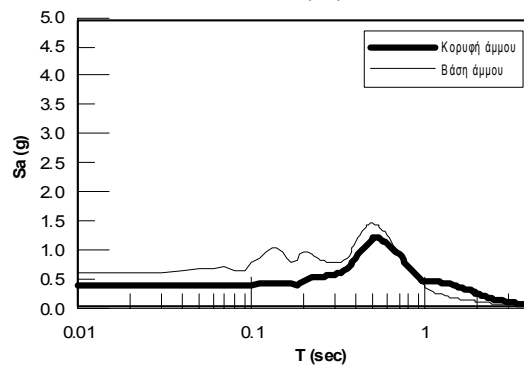
H=10m



H=11m



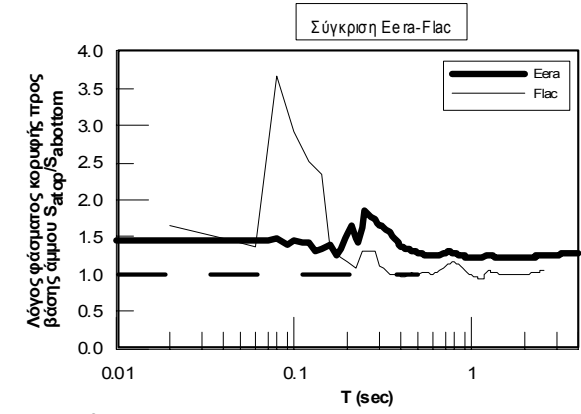
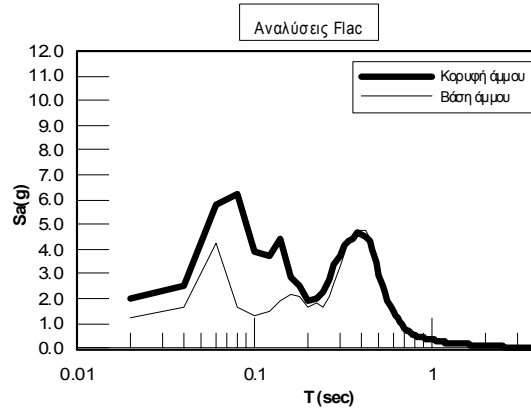
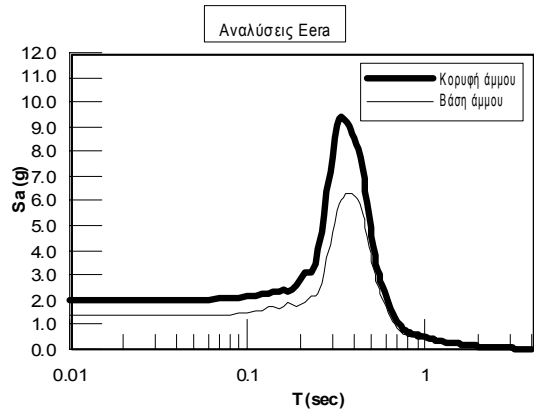
H=12m



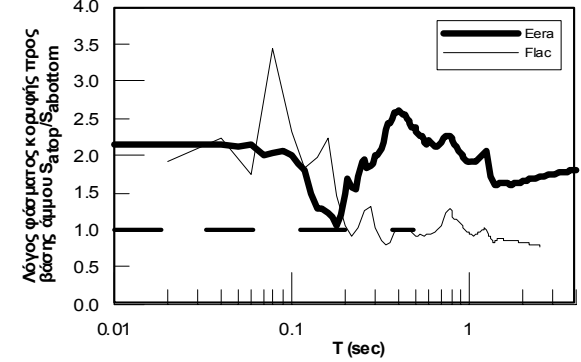
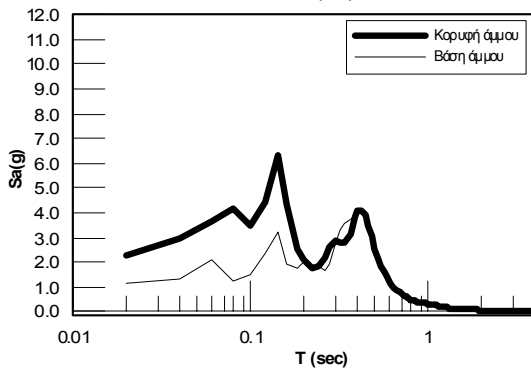
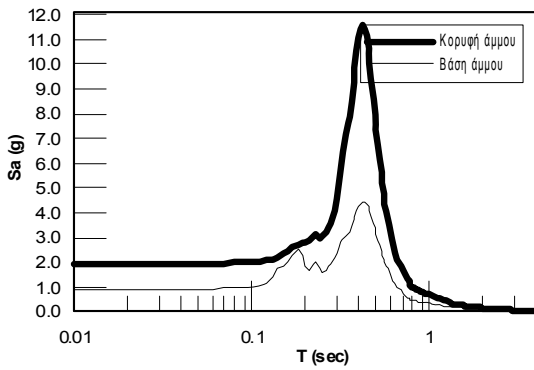
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ: Φάσματα

Coyote Lake M5.7: $\alpha_{max} = 0,47g$

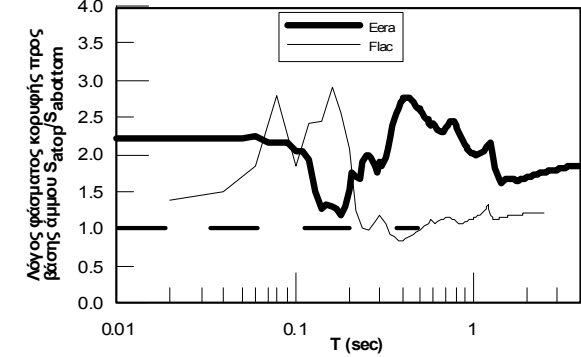
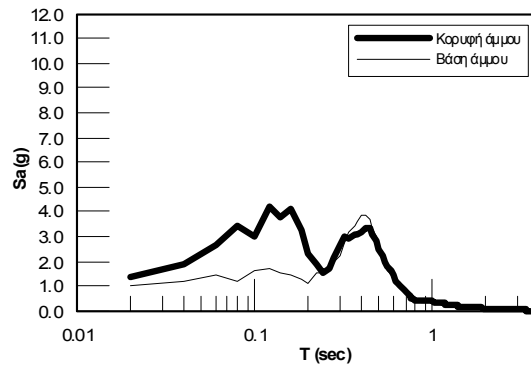
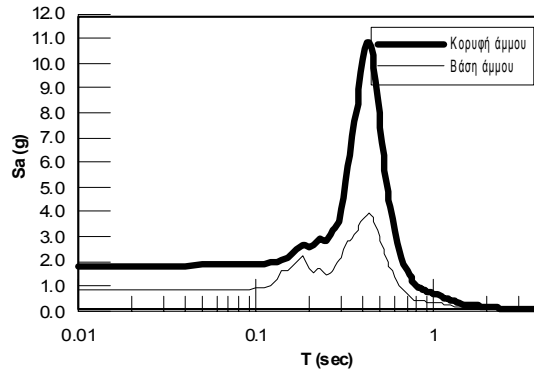
H=1m



H=2m



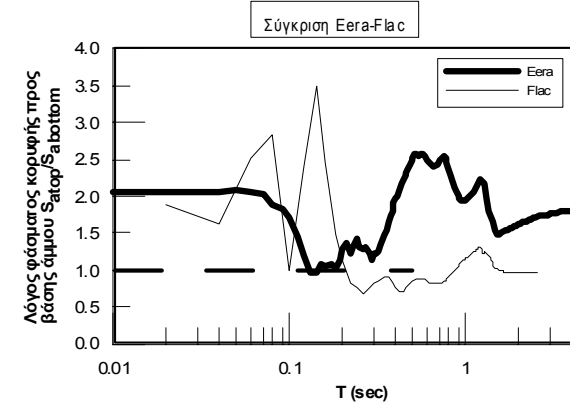
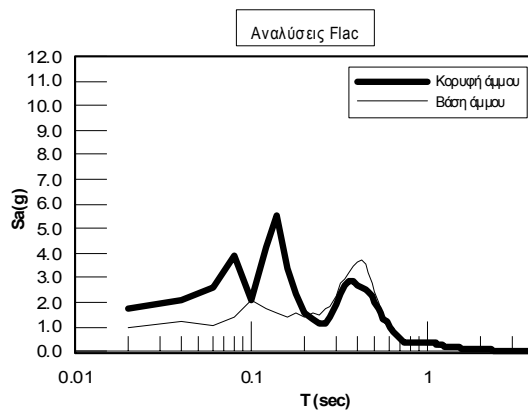
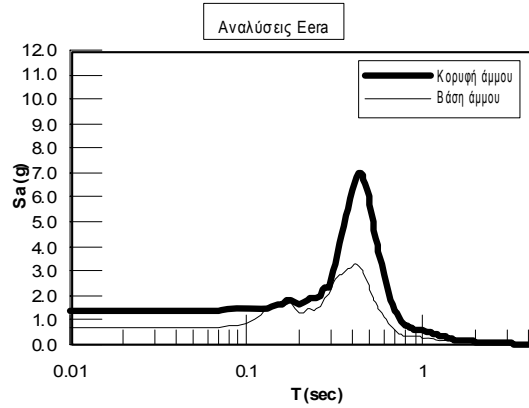
H=3m



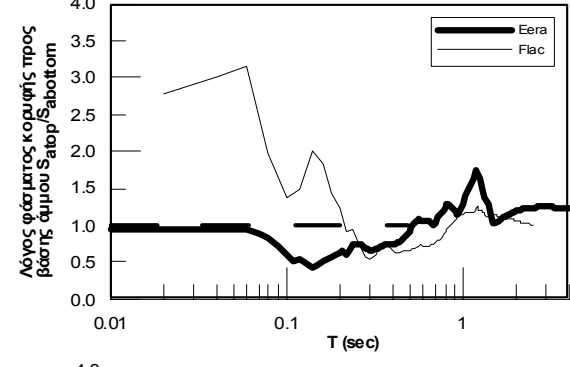
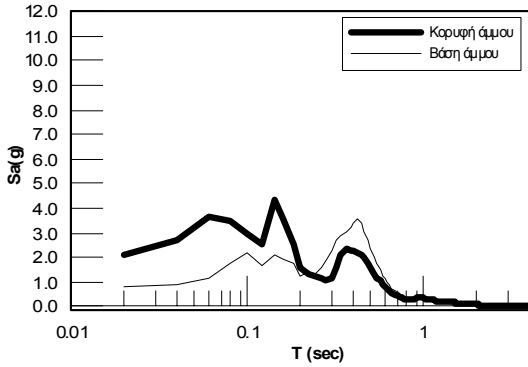
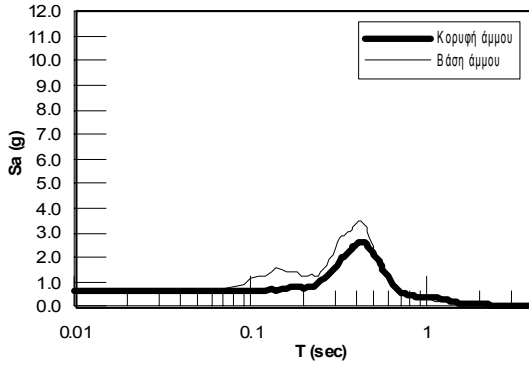
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ: Φάσματα

Coyote Lake M5.7: $\alpha_{max} = 0,47g$

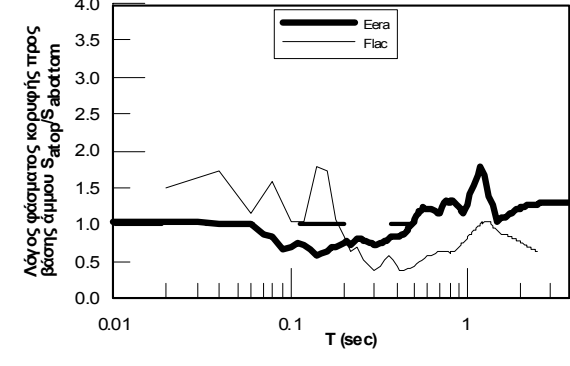
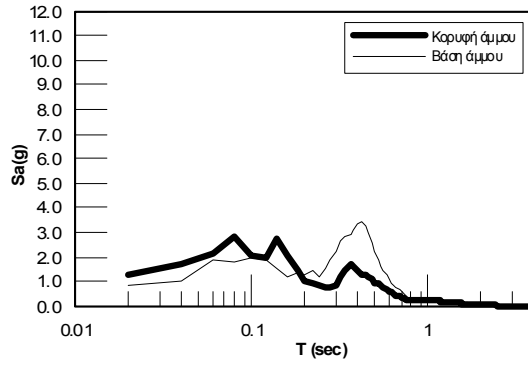
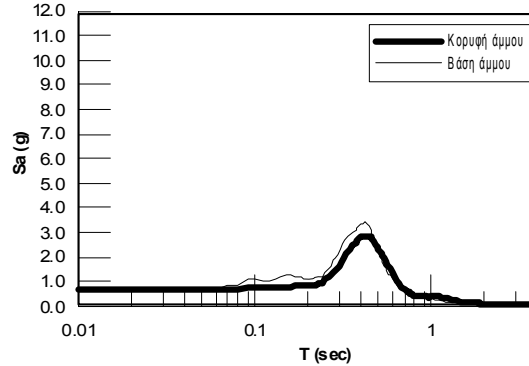
H=4m



H=5m



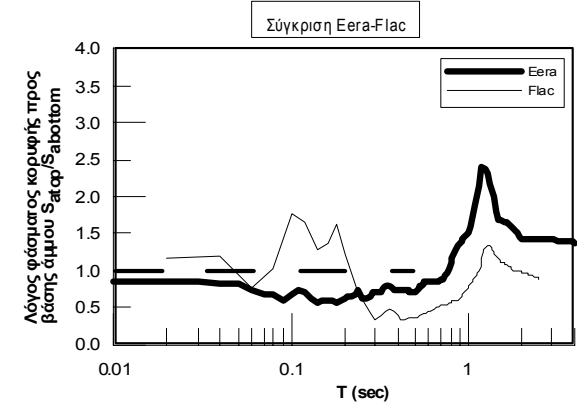
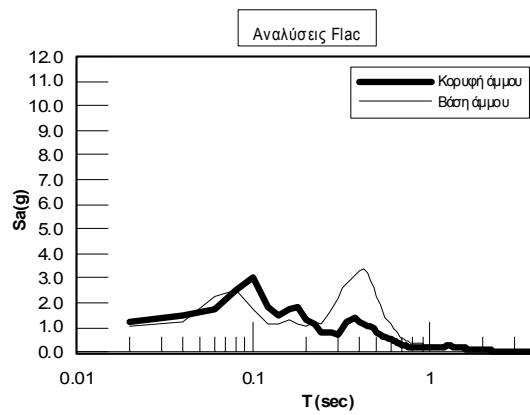
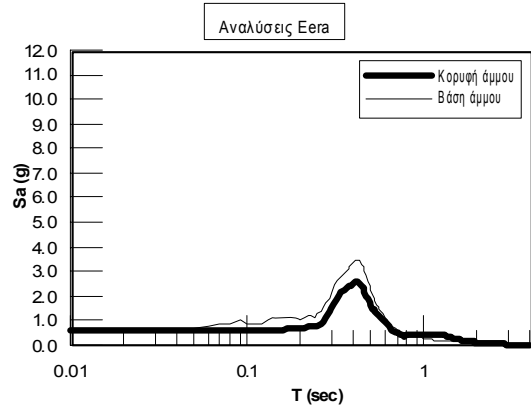
H=6m



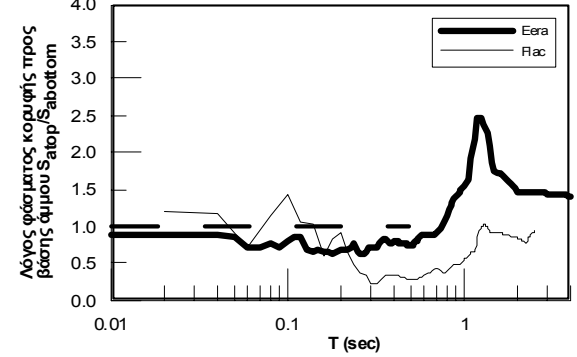
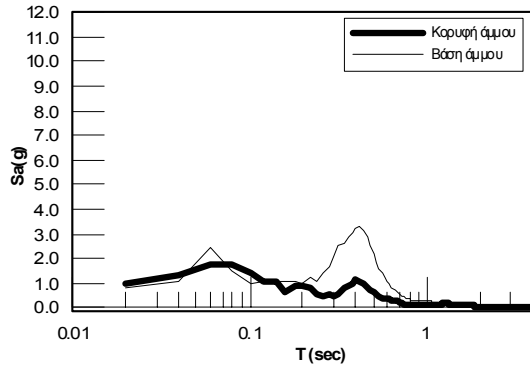
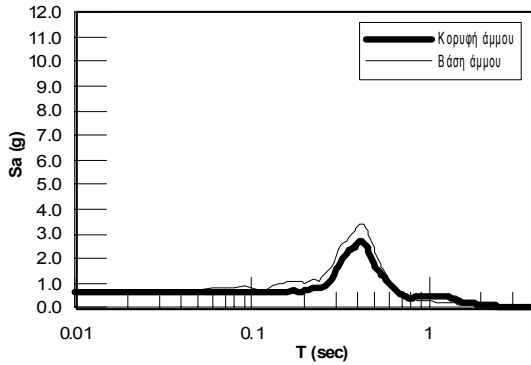
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ: Φάσματα

Coyote Lake M5.7: $\alpha_{max} = 0,47g$

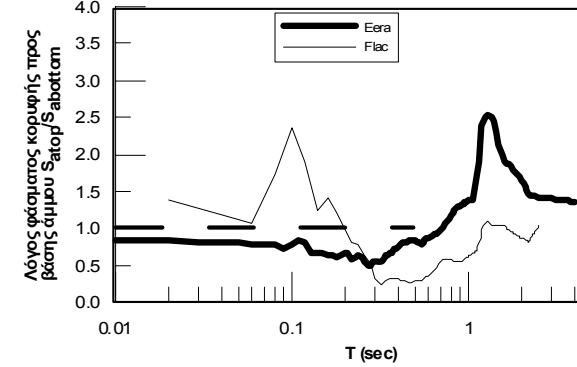
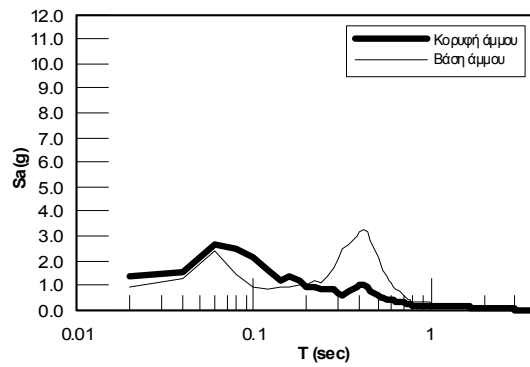
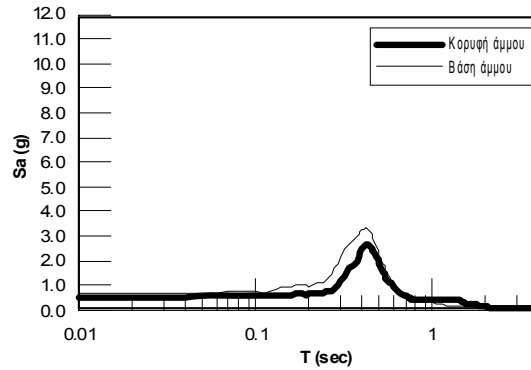
H=7m



H=8m



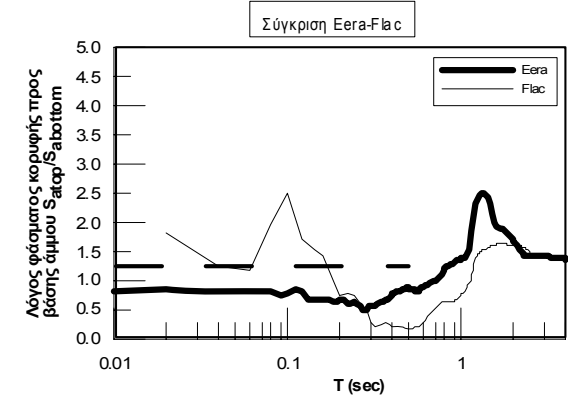
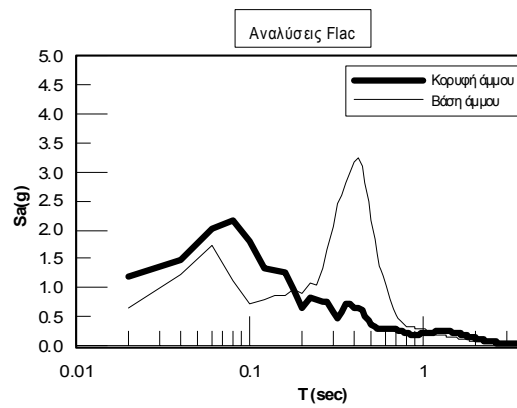
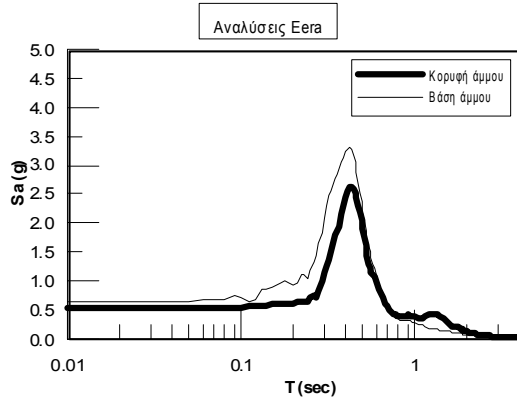
H=9m



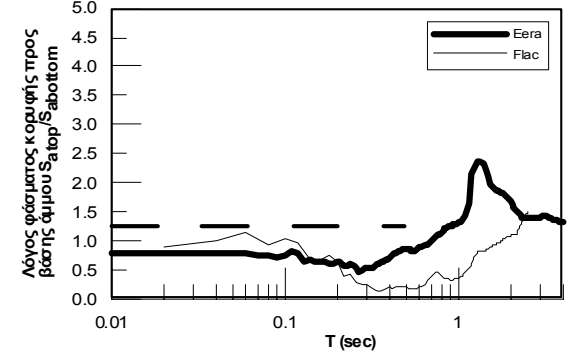
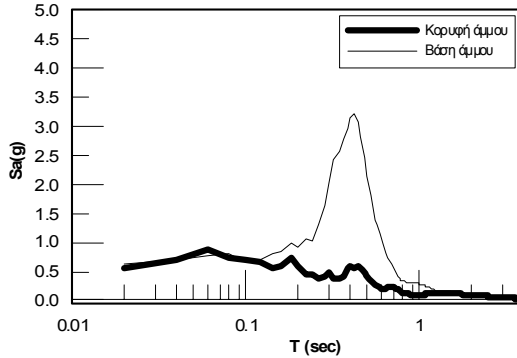
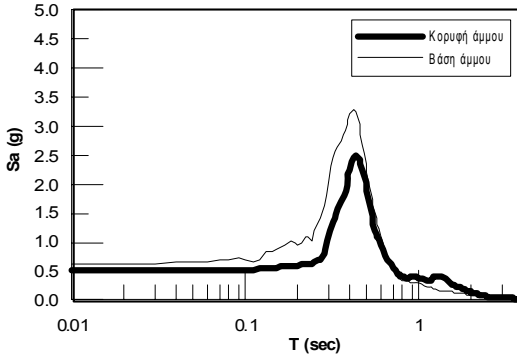
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ: Φάσματα

Coyote Lake M5.7: $\alpha_{max} = 0,47g$

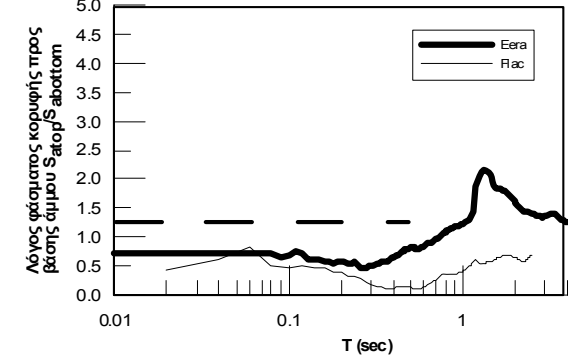
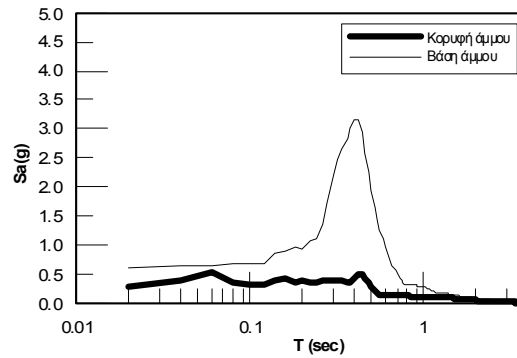
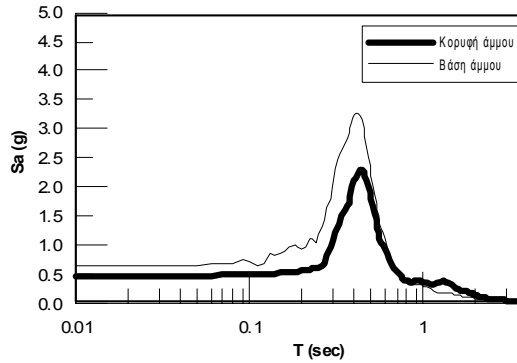
H=10m



H=11m



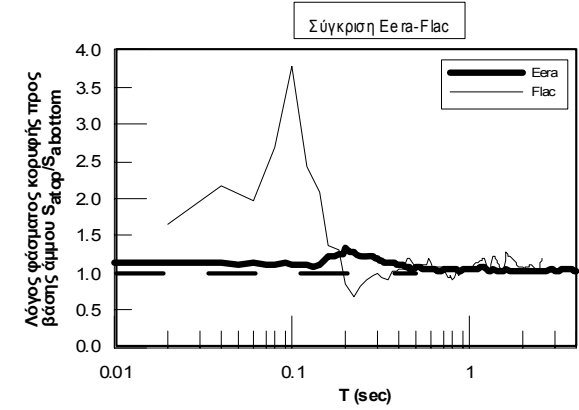
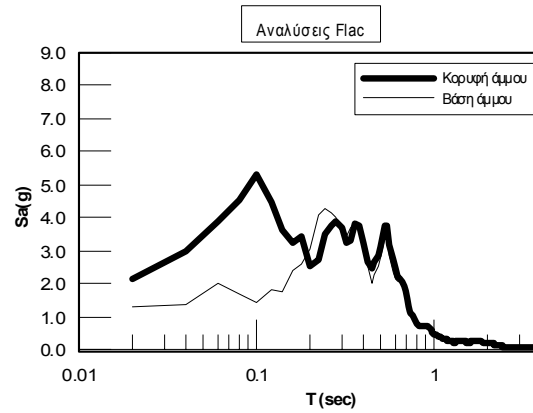
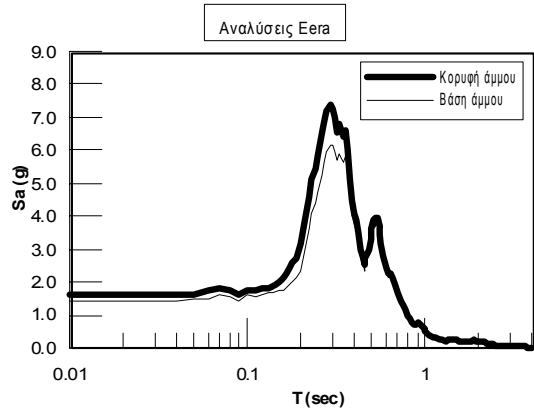
H=12m



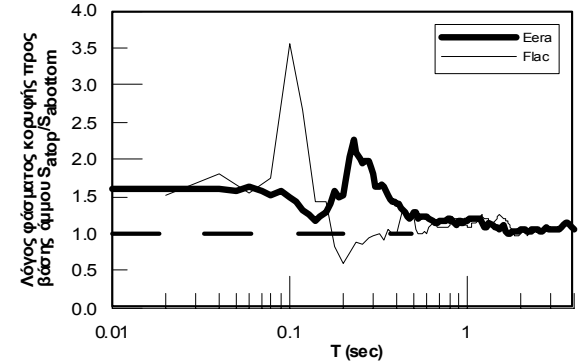
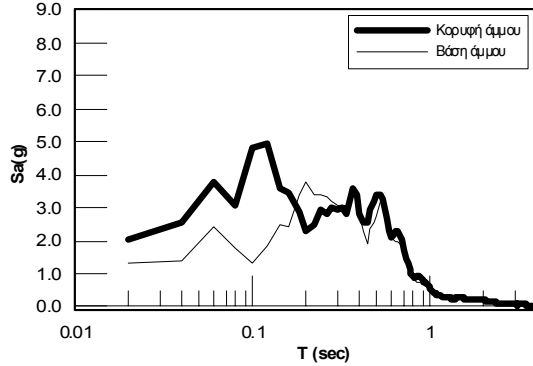
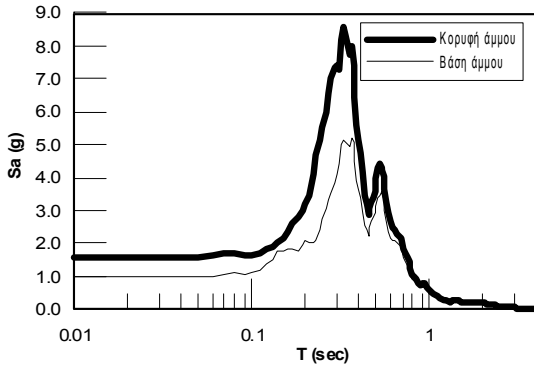
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ: Φάσματα

Lefkada M6.3: $\alpha_{max} = 0,47g$

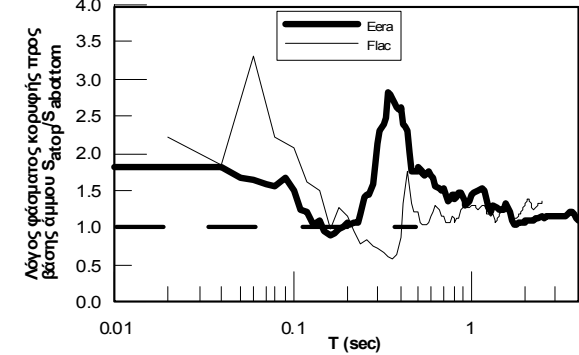
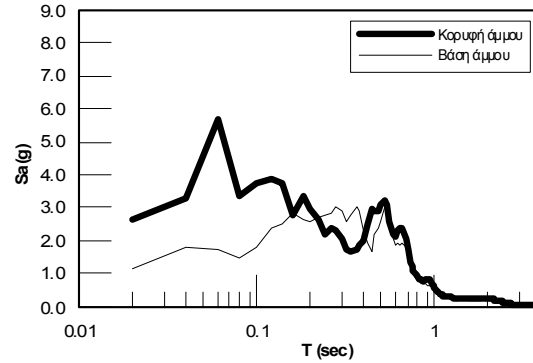
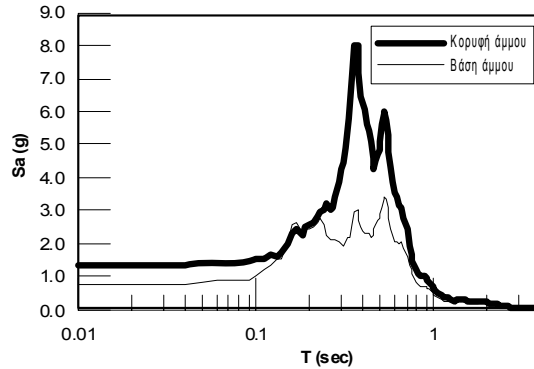
H=1m



H=2m



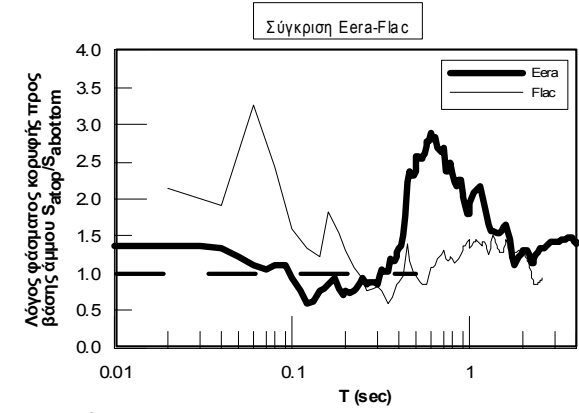
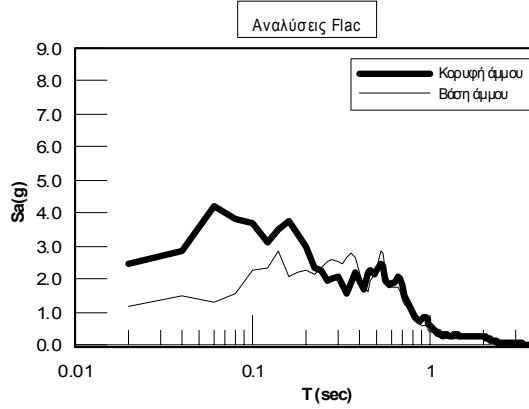
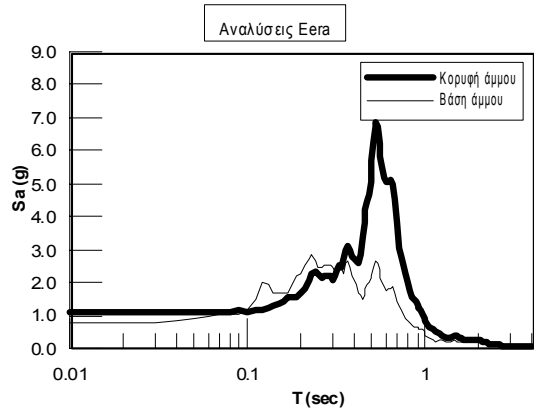
H=3m



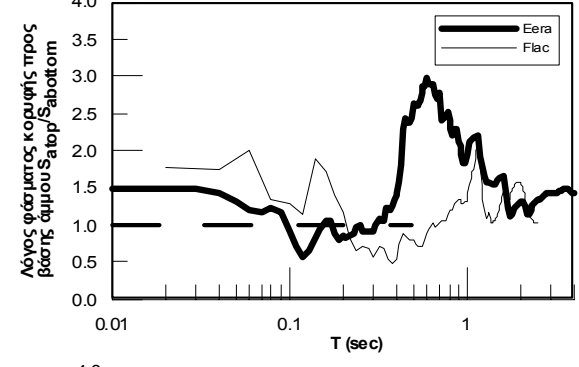
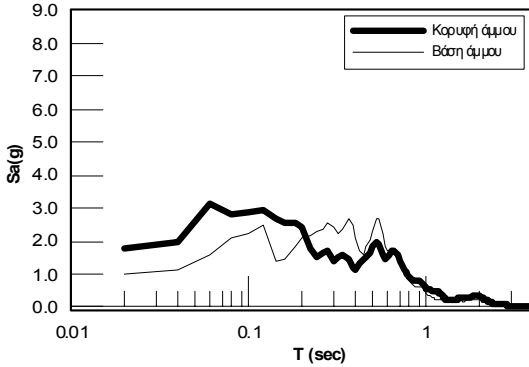
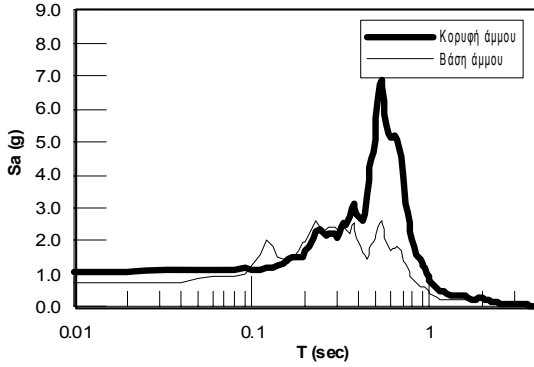
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ: Φάσματα

Lefkada M6.3: $\alpha_{max} = 0,47g$

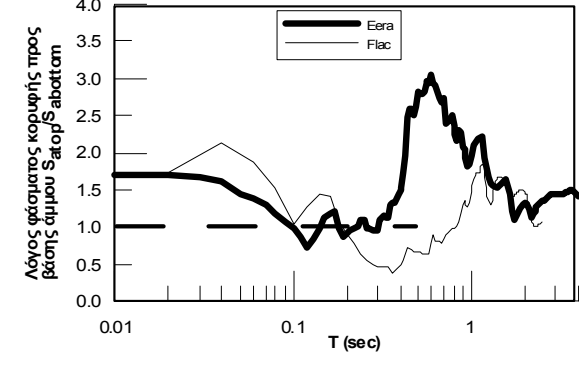
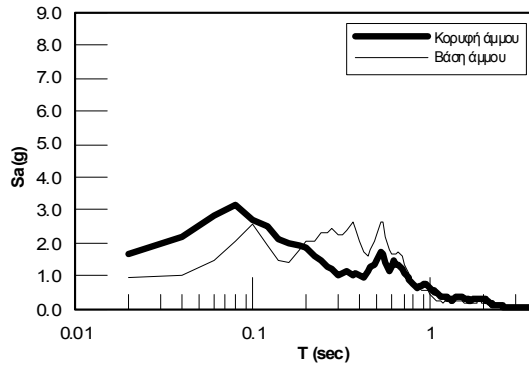
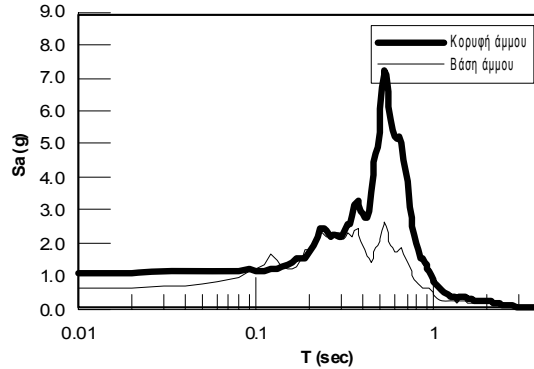
H=4m



H=5m



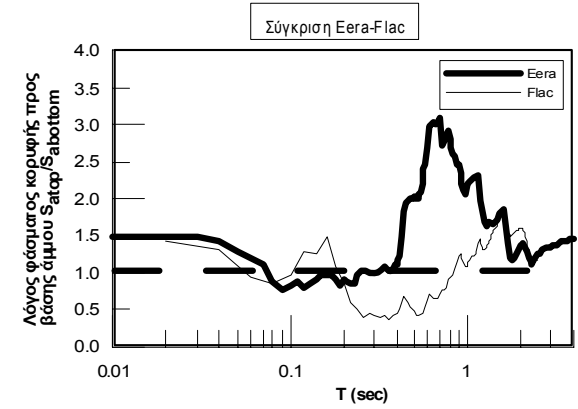
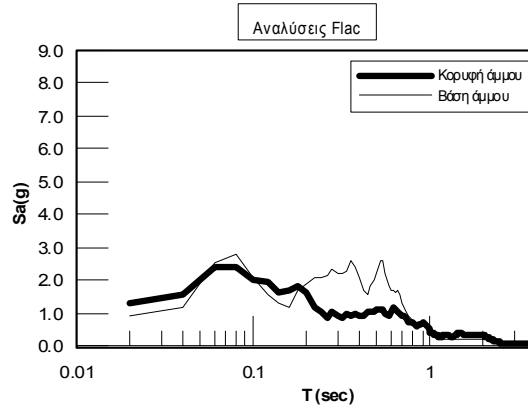
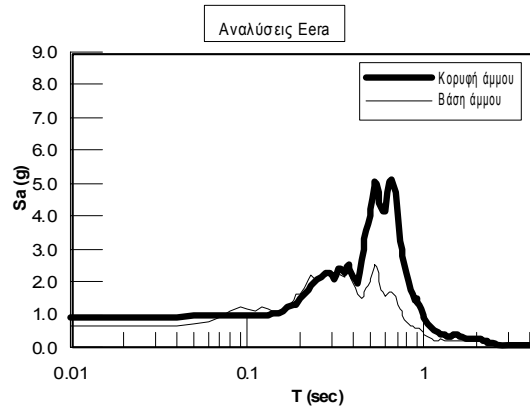
H=6m



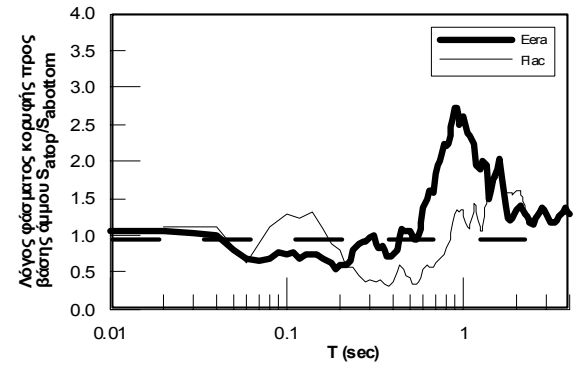
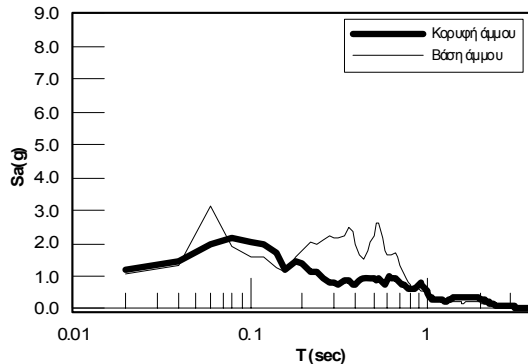
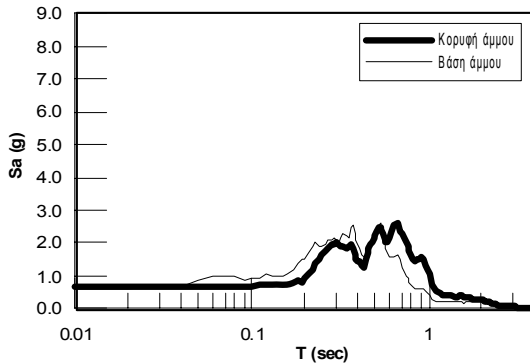
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ: Φάσματα

Lefkada M6.3: $\alpha_{max} = 0,47g$

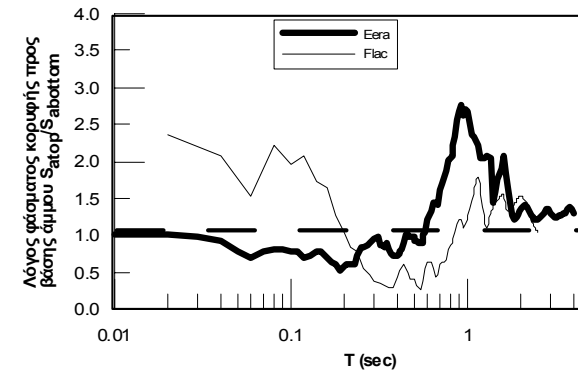
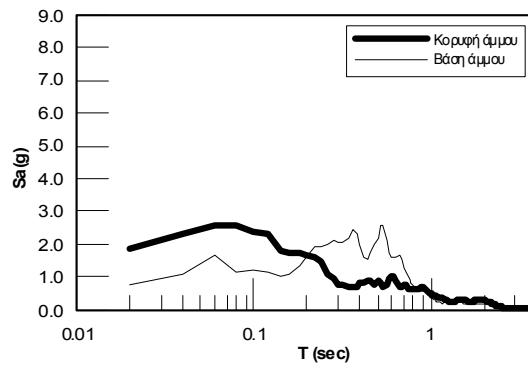
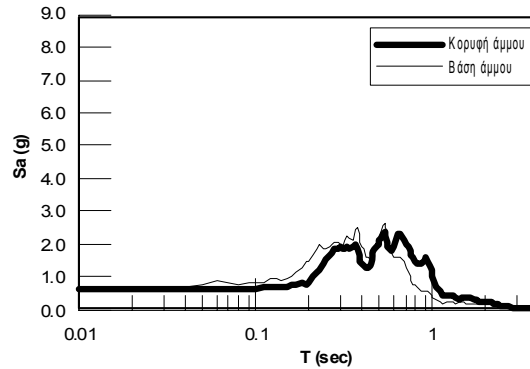
H=7m



H=8m



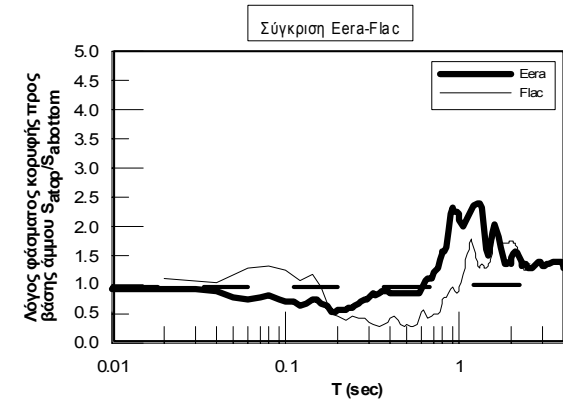
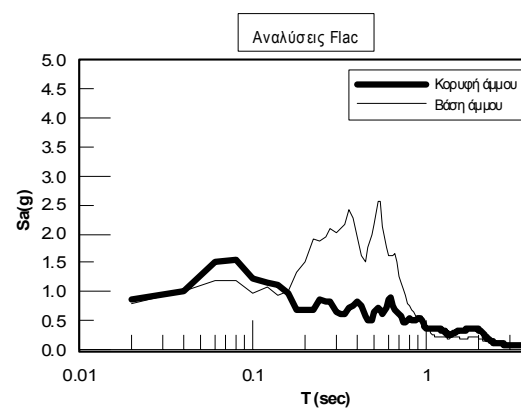
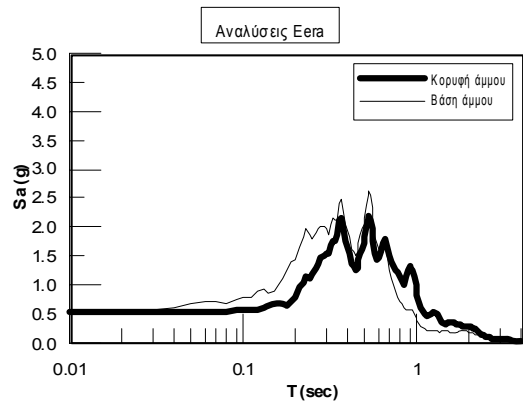
H=9m



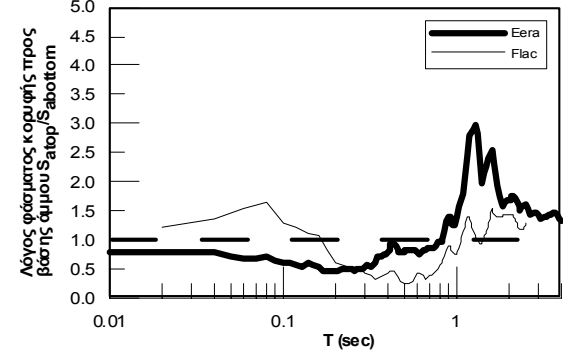
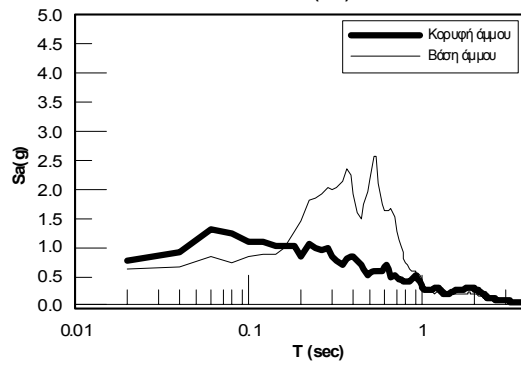
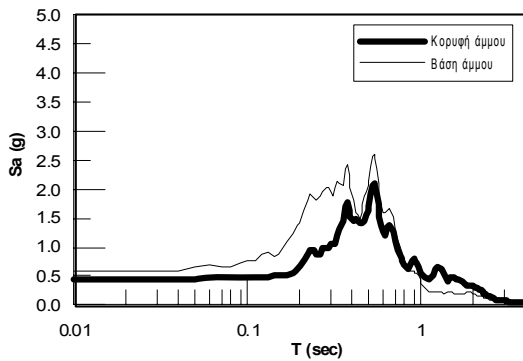
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ: Φάσματα

Lefkada M6.3: $\alpha_{max} = 0,47g$

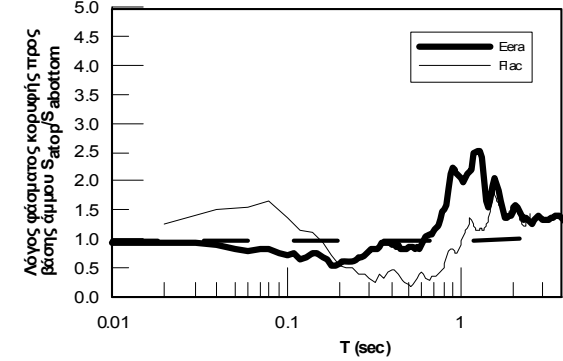
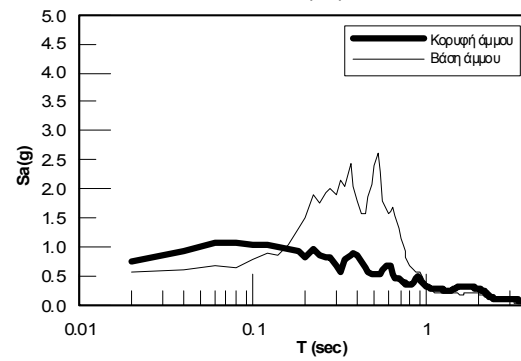
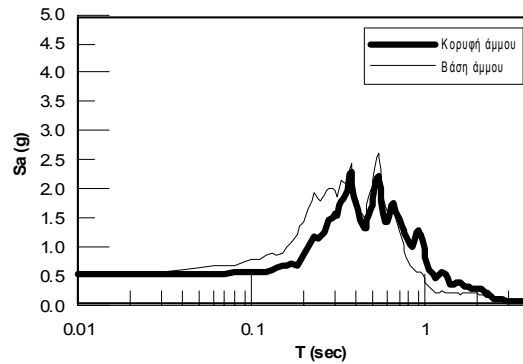
H=10m



H=11m



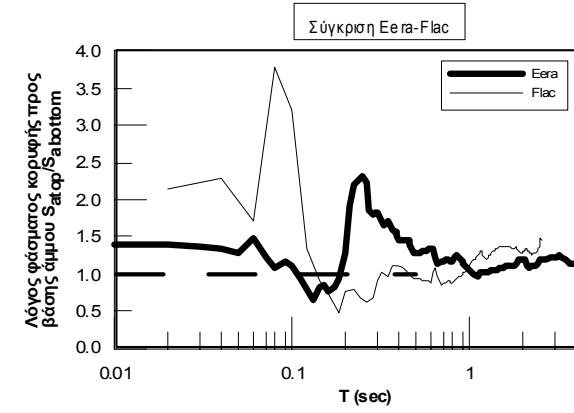
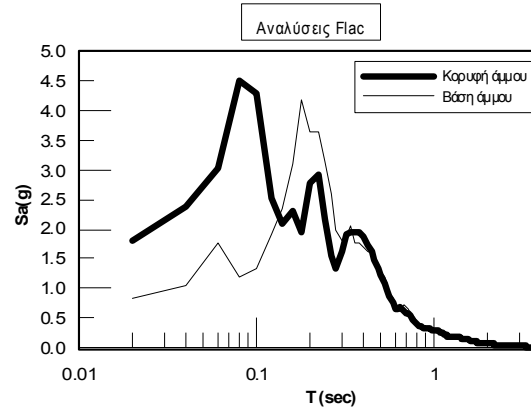
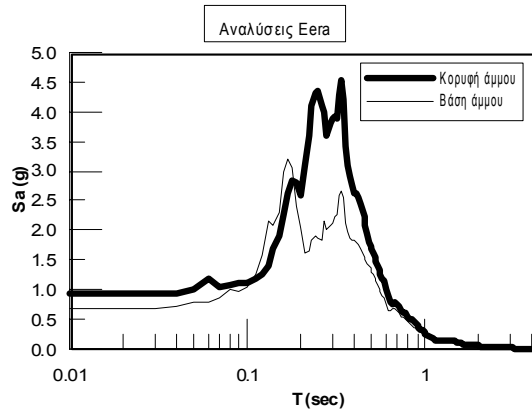
H=12m



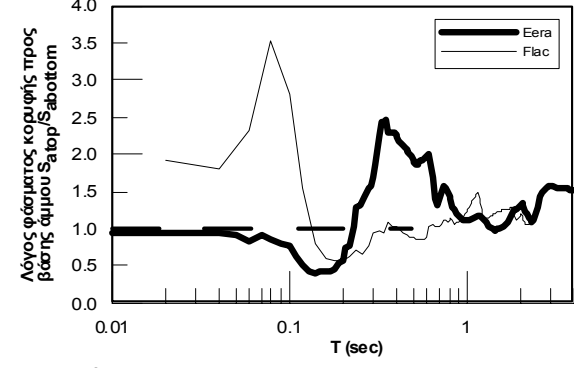
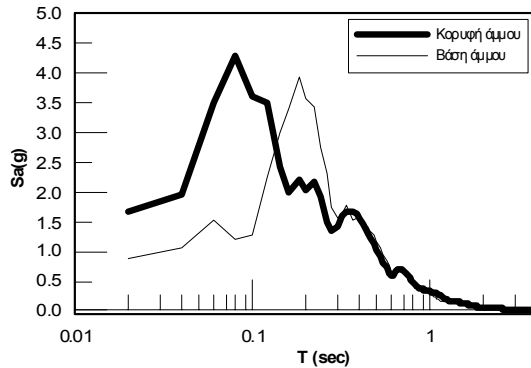
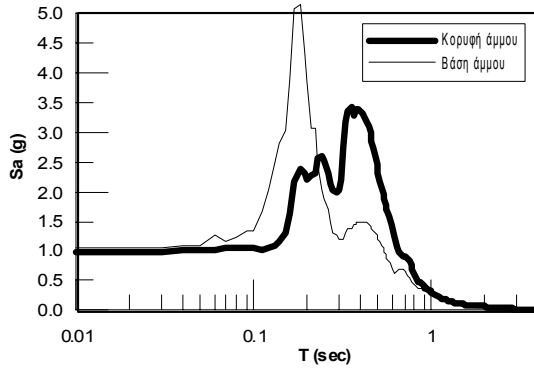
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ: Φάσματα

Kobe M7.2: $\alpha_{max} = 0,48g$

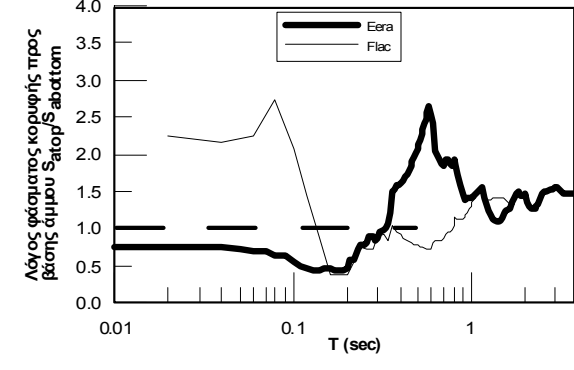
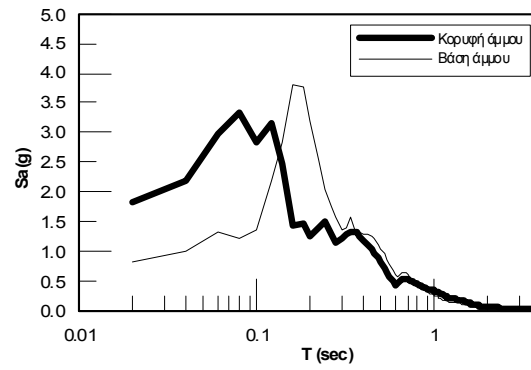
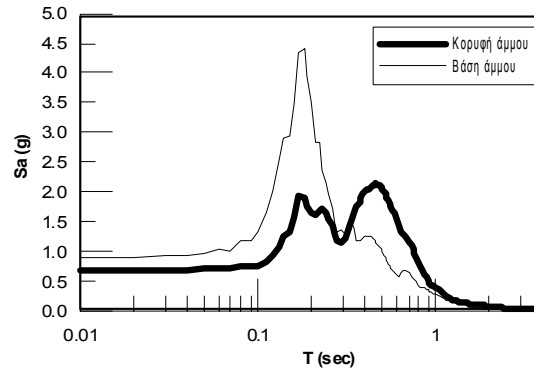
H=1m



H=2m



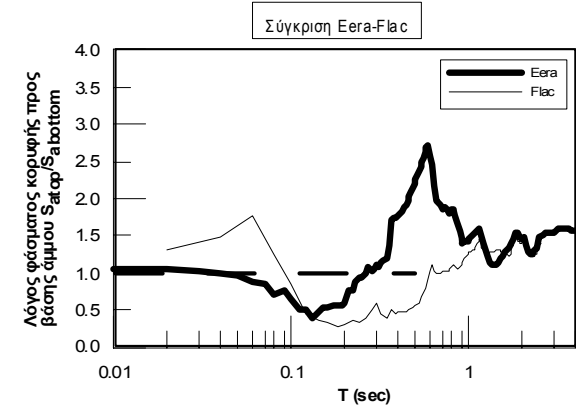
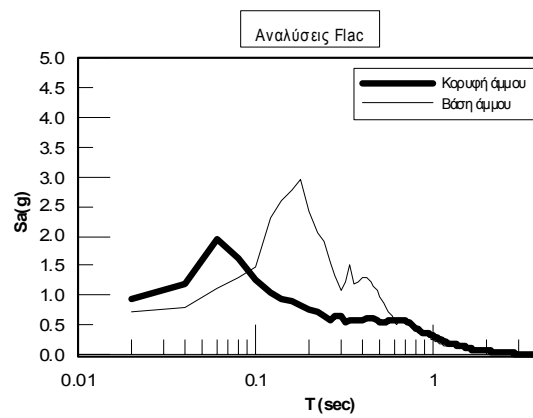
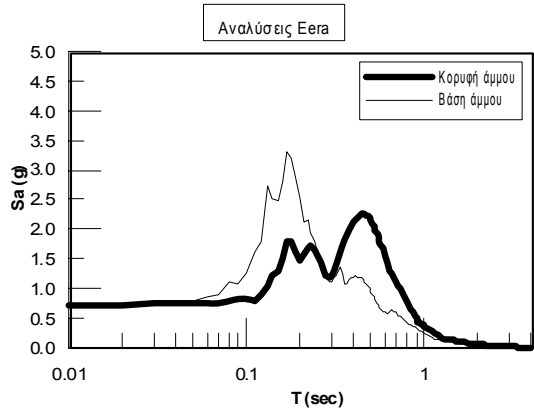
H=3m



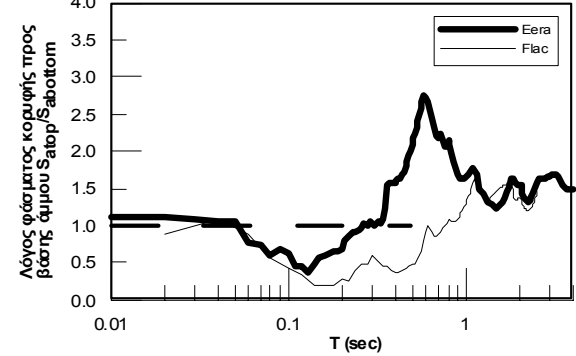
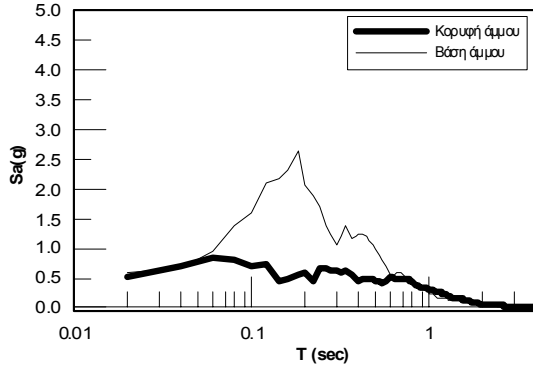
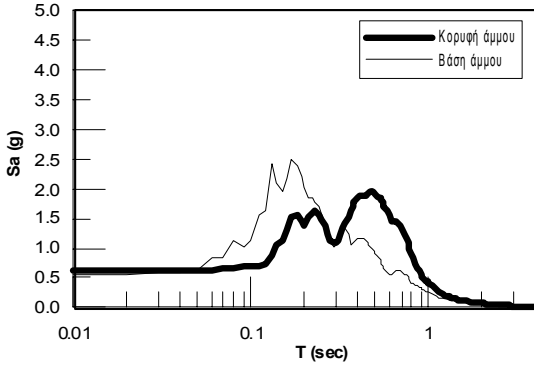
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ: Φάσματα

Kobe M7.2: $\alpha_{max} = 0,48g$

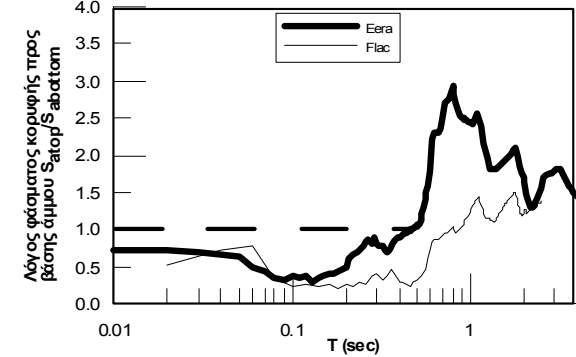
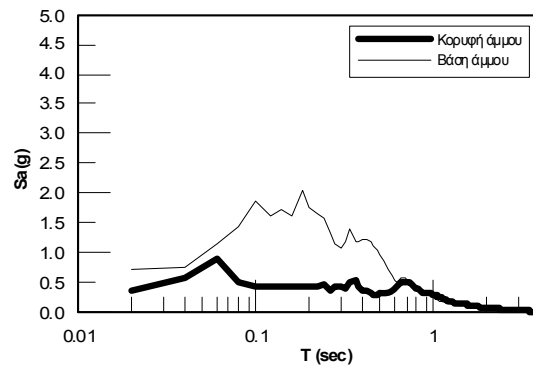
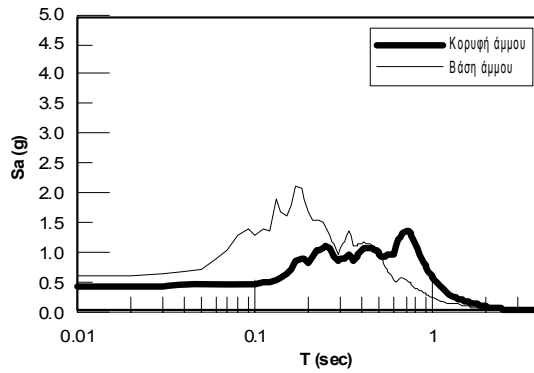
H=4m



H=5m



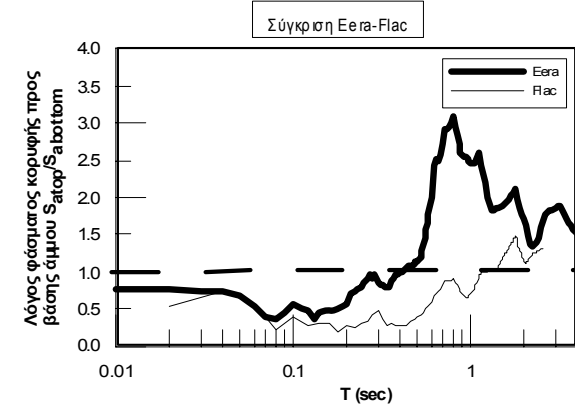
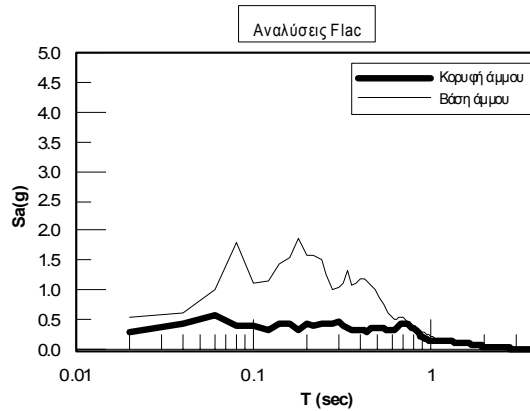
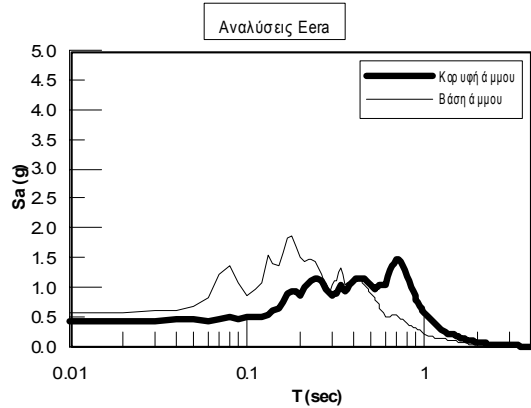
H=6m



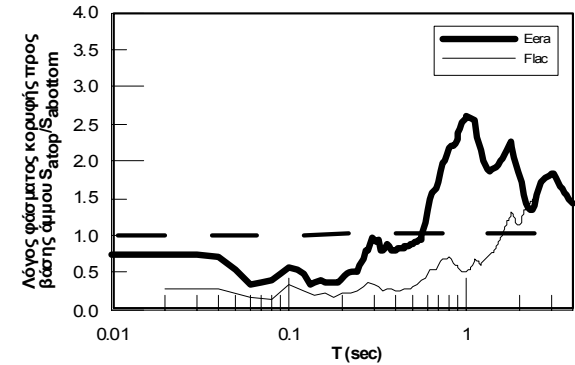
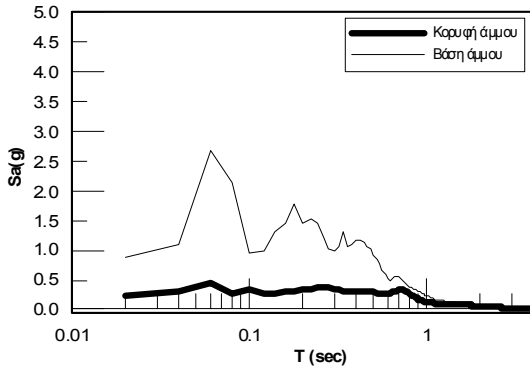
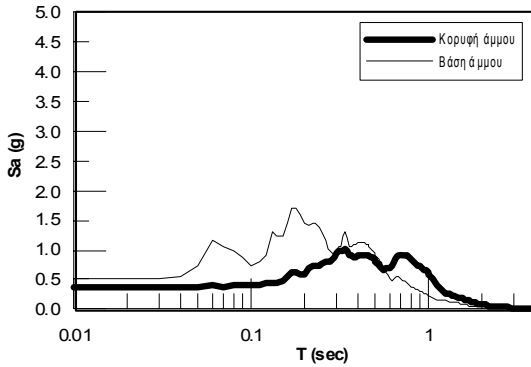
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ: Φάσματα

Kobe M7.2: $\alpha_{max} = 0,48g$

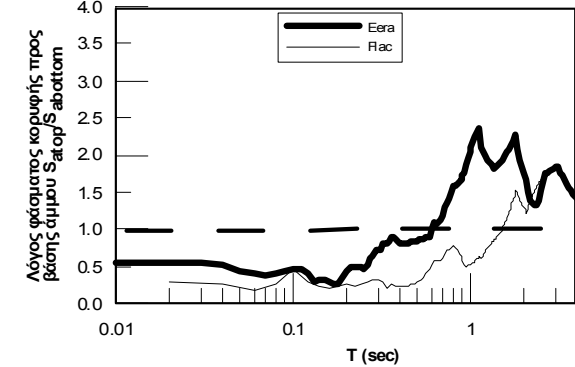
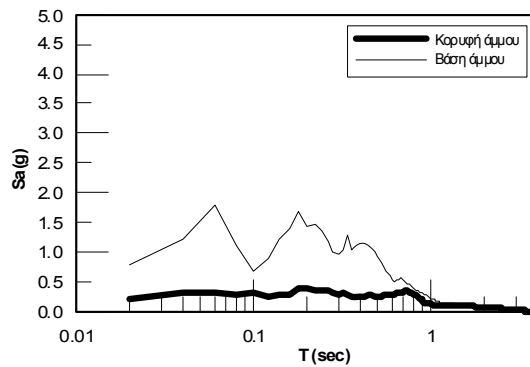
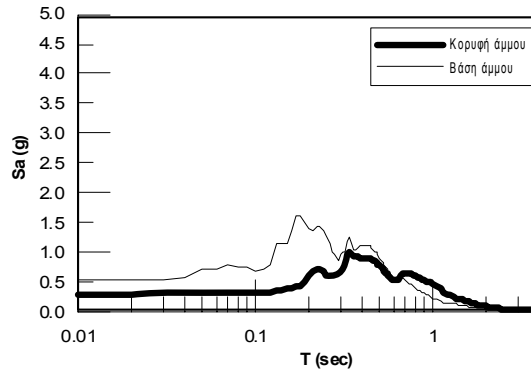
H=7m



H=8m



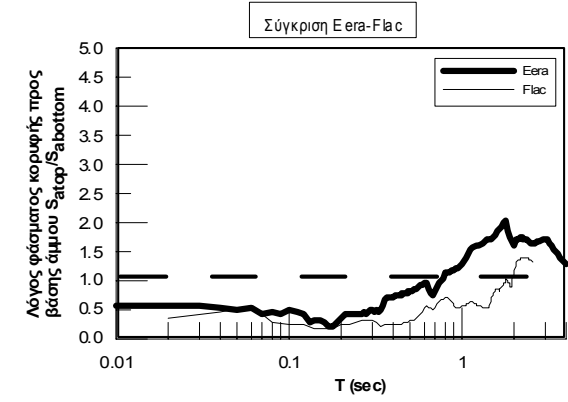
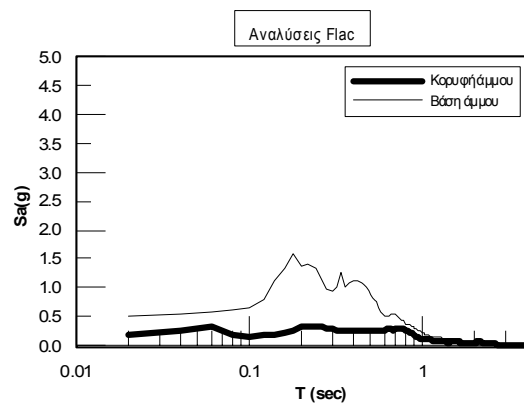
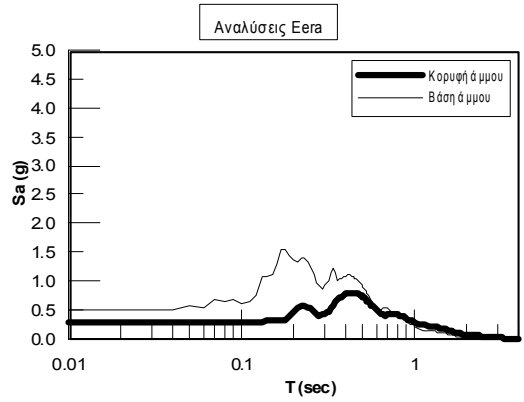
H=9m



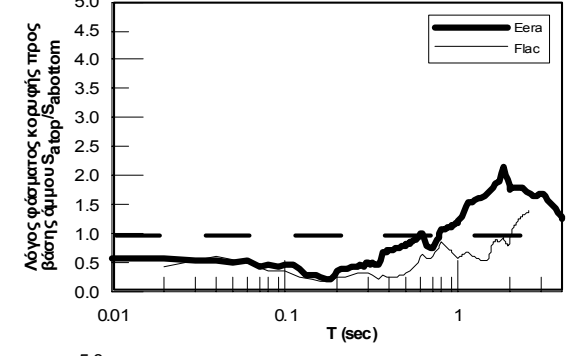
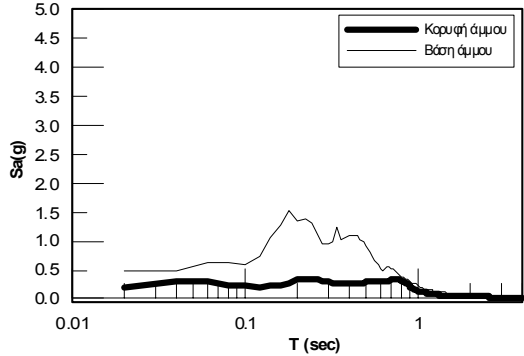
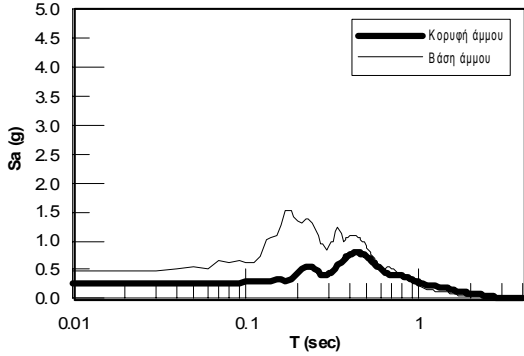
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ: Φάσματα

Kobe M7.2: $\alpha_{max} = 0,48g$

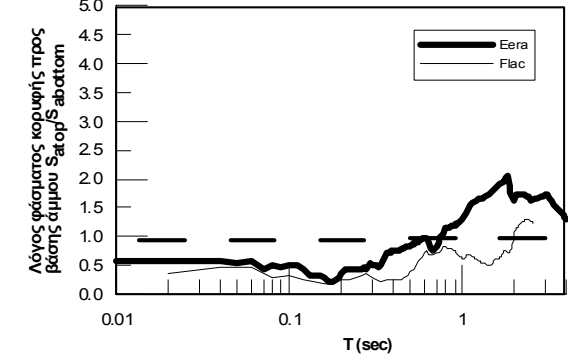
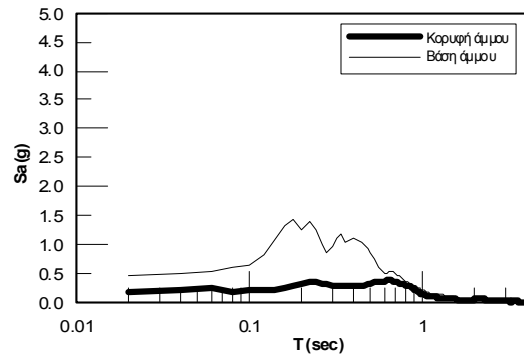
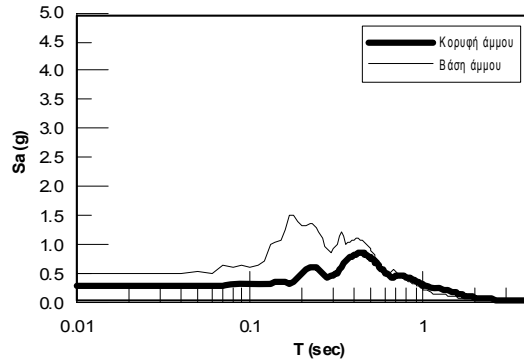
H=10m



H=11m



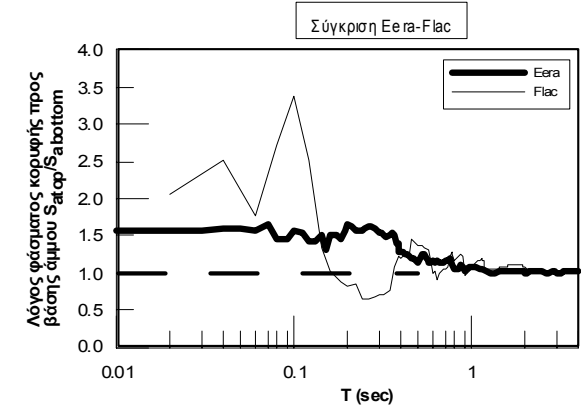
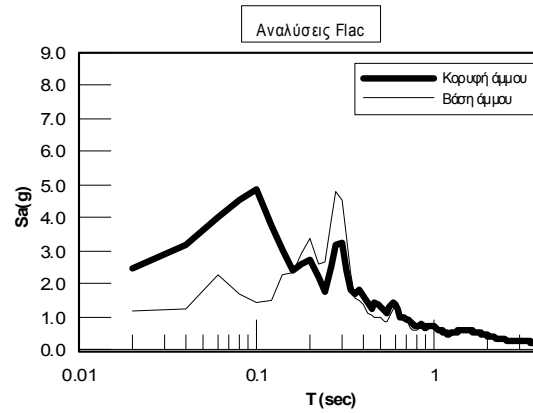
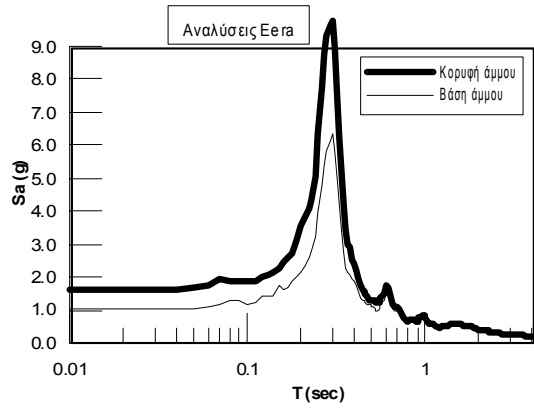
H=12m



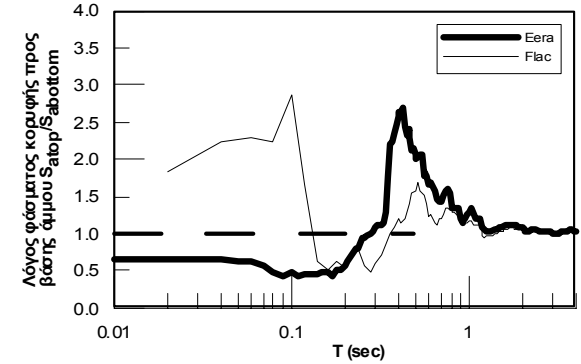
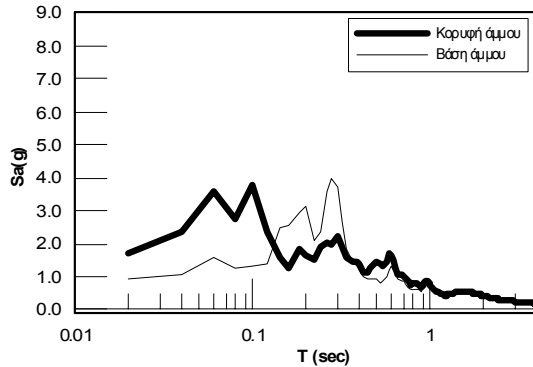
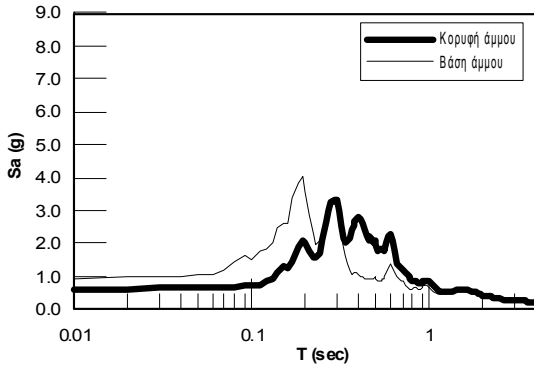
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ: Φάσματα

Kocaeli M7.51: $\alpha_{max} = 0,46g$

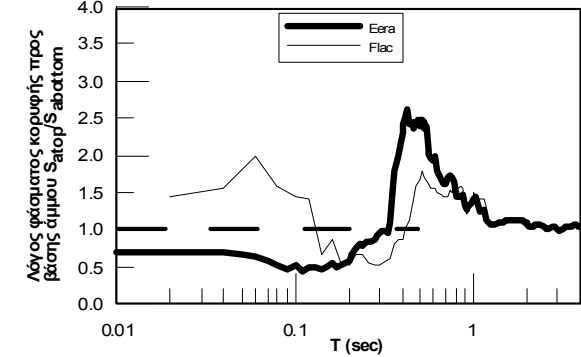
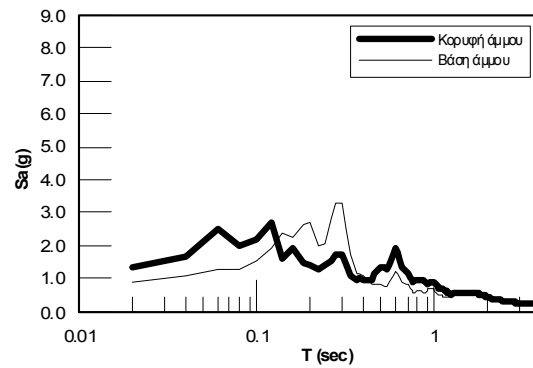
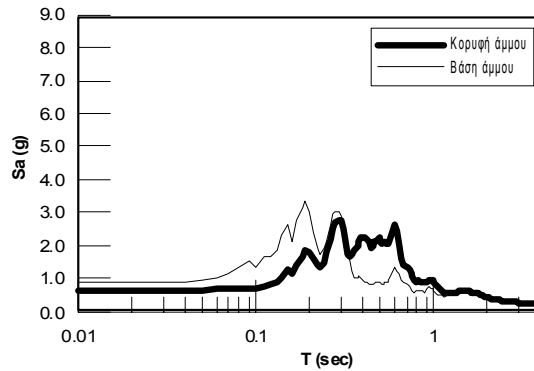
H=1m



H=2m



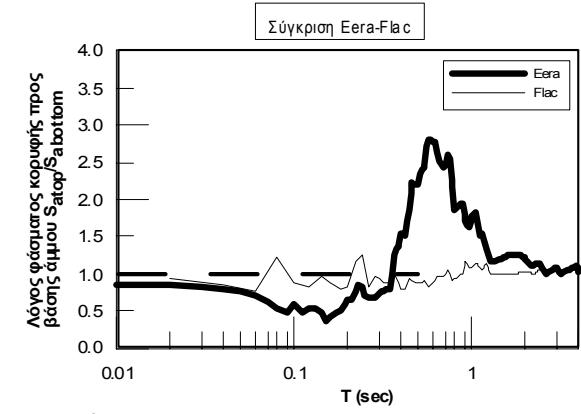
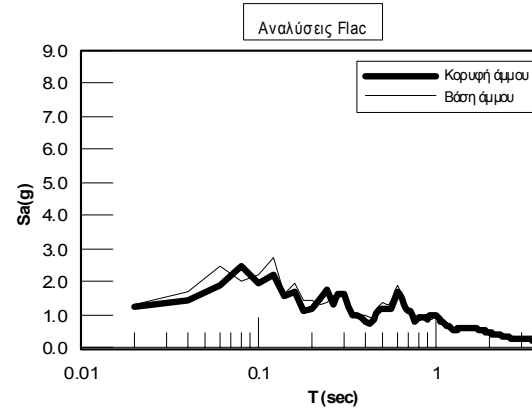
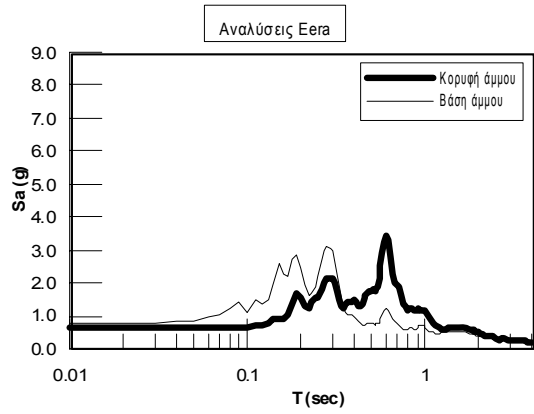
H=3m



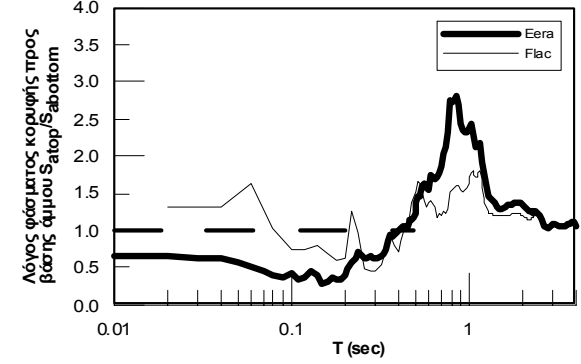
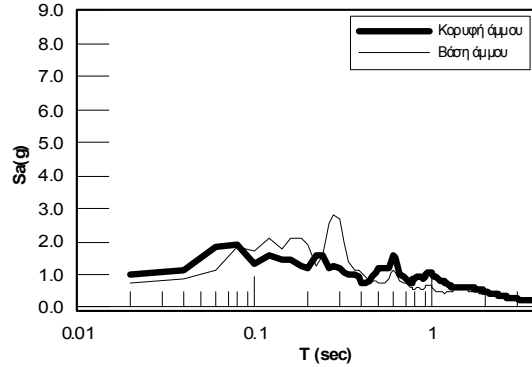
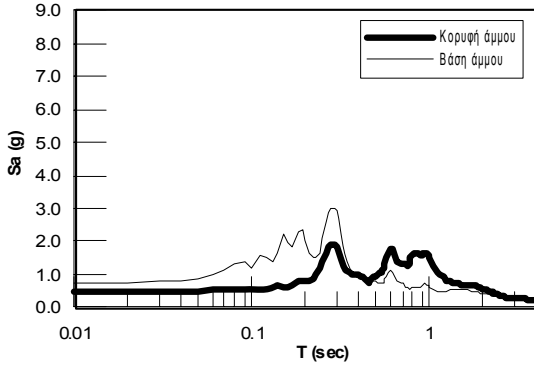
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ: Φάσματα

Kocaeli M7.51: $\alpha_{max} = 0,46g$

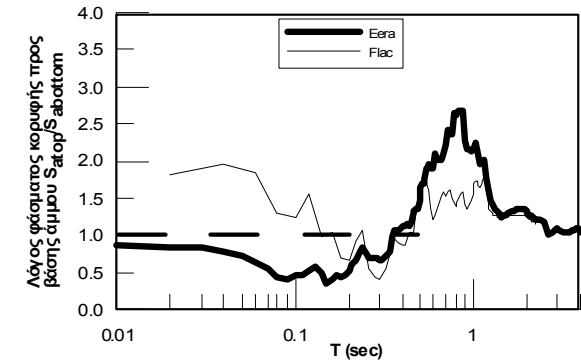
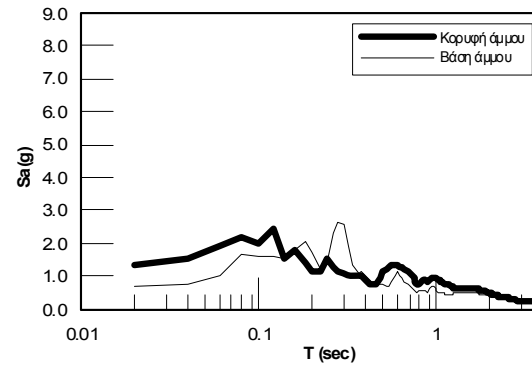
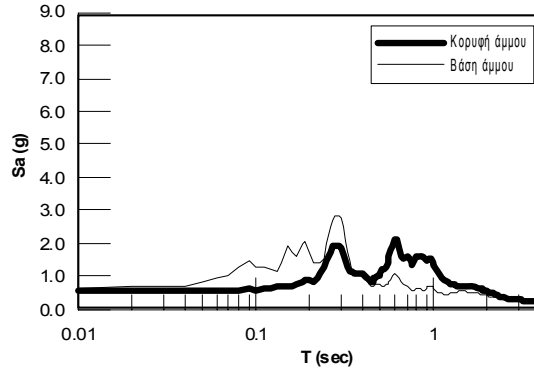
H=4m



H=5m



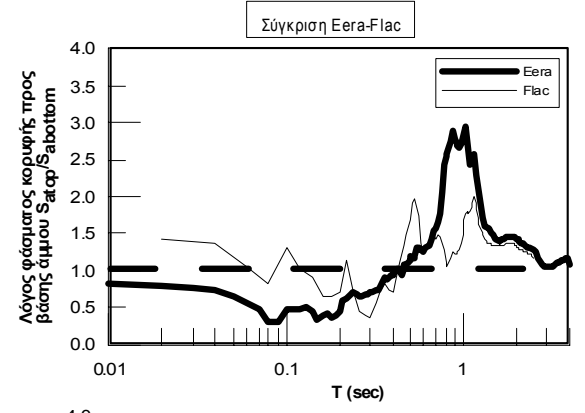
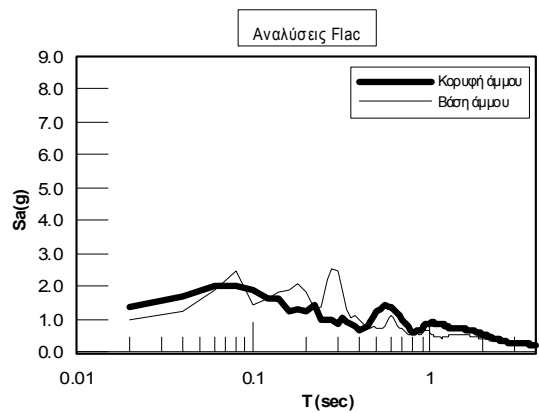
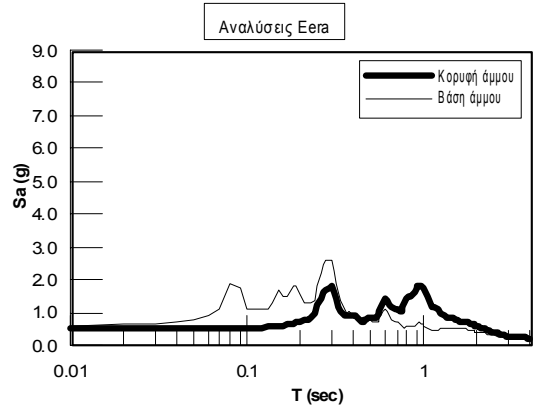
H=6m



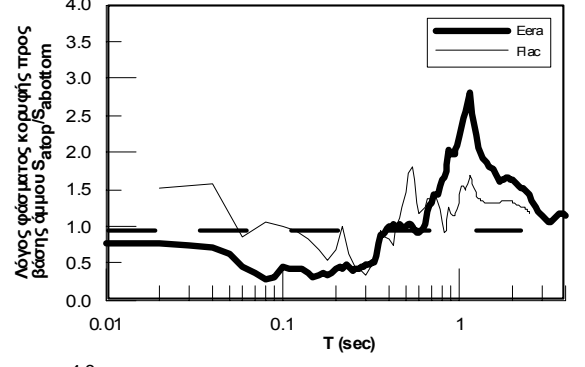
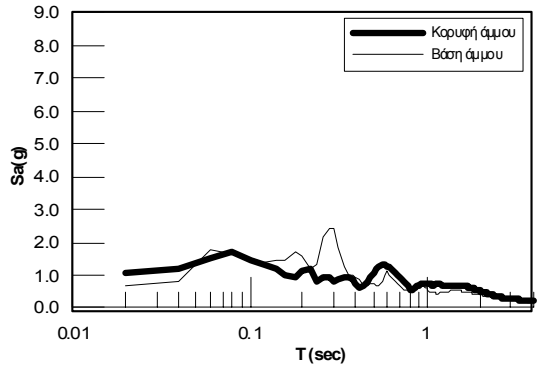
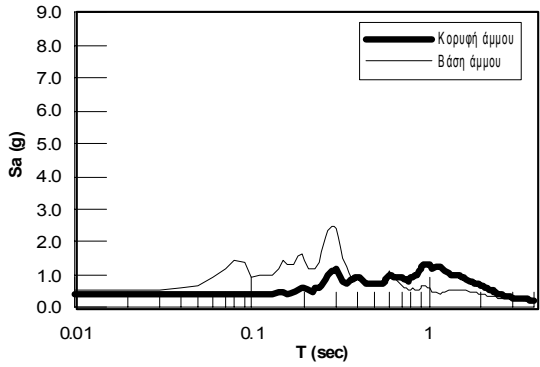
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ: Φάσματα

Kocaeli M7.51: $\alpha_{max} = 0,46g$

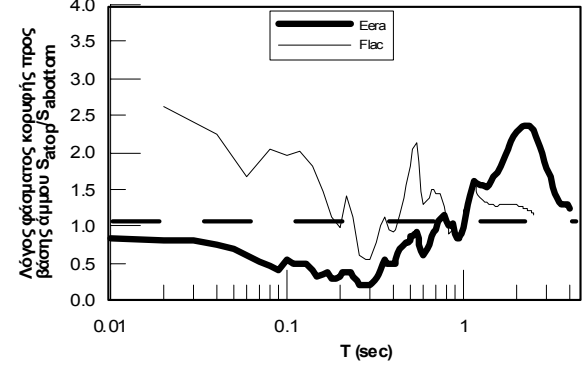
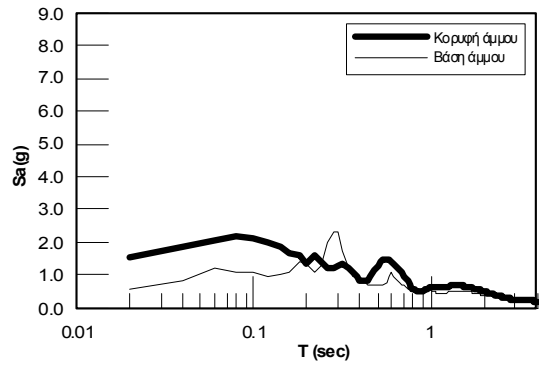
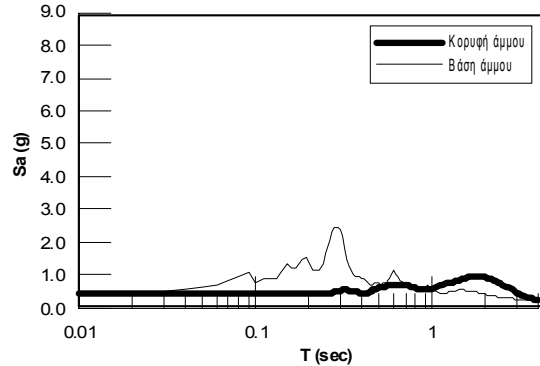
H=7m



H=8m



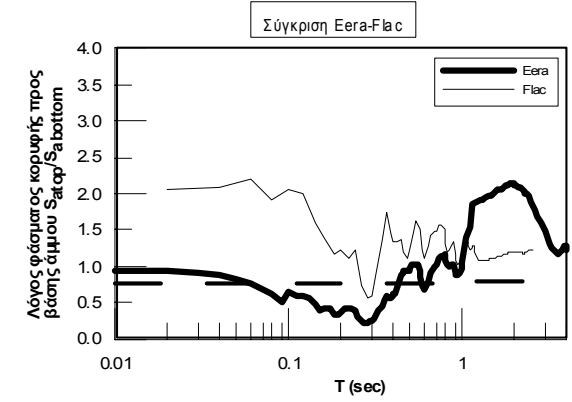
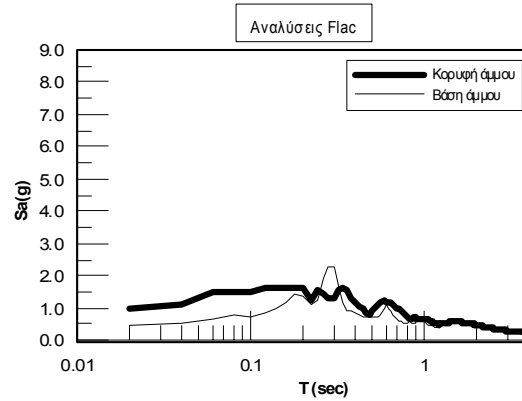
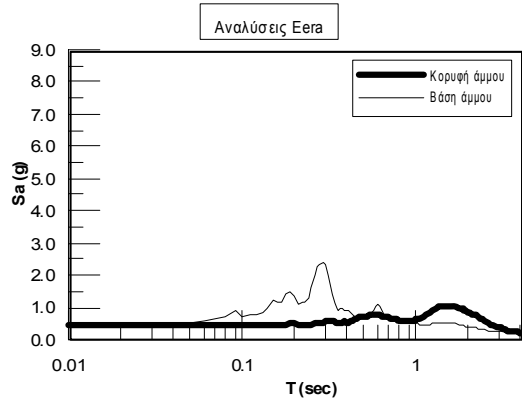
H=9m



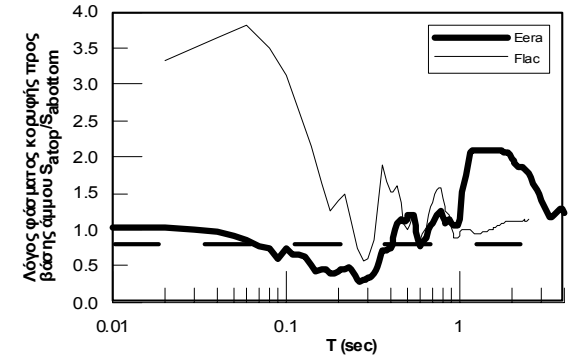
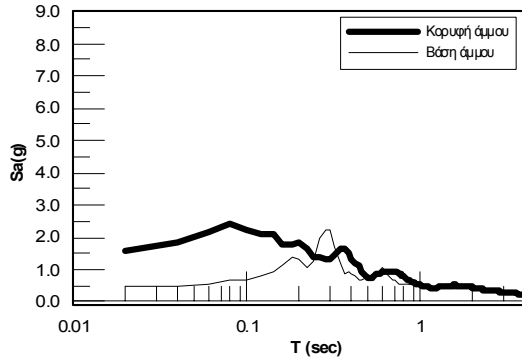
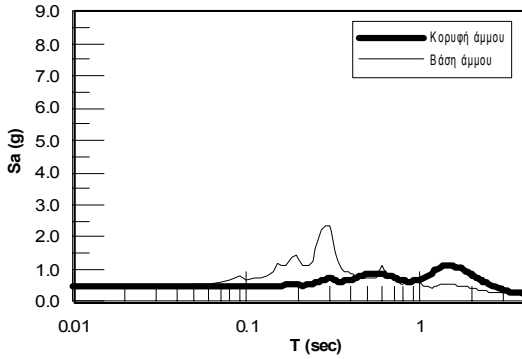
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ: Φάσματα

Kocaeli M7.51: $\alpha_{max} = 0,46g$

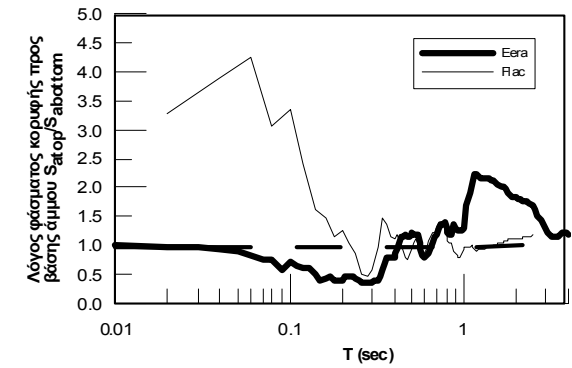
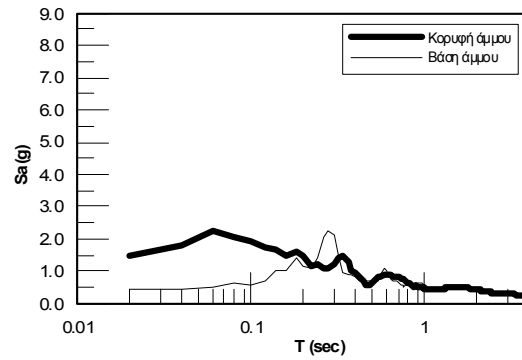
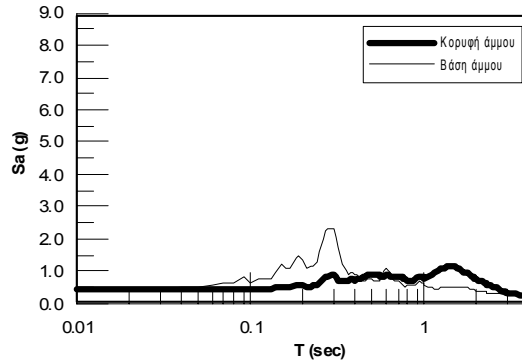
H=10m



H=11m



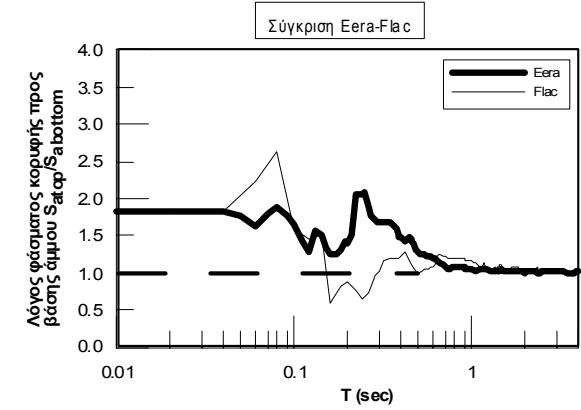
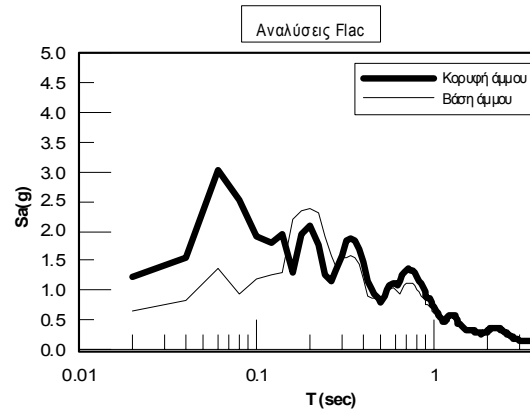
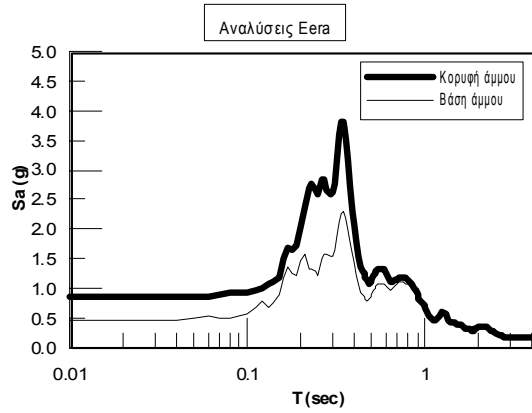
H=12m



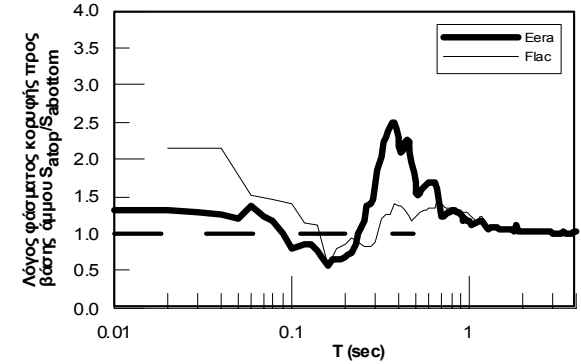
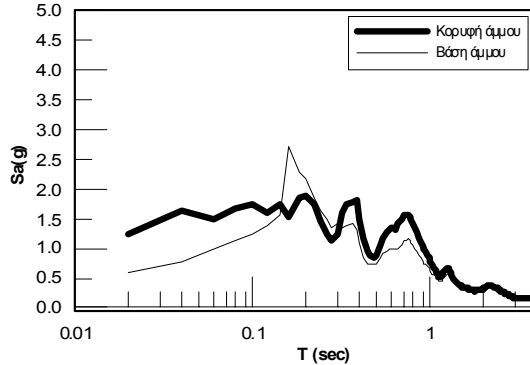
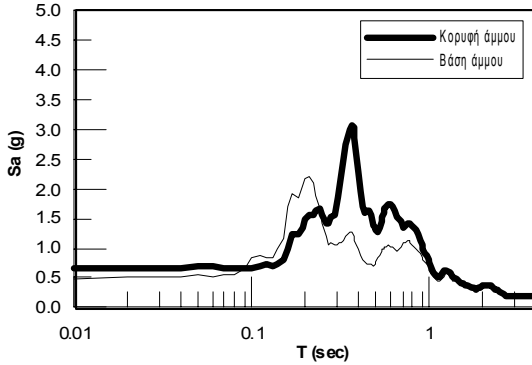
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ: Φάσματα

Ducze M7.9: $\alpha_{max} = 0,43g$

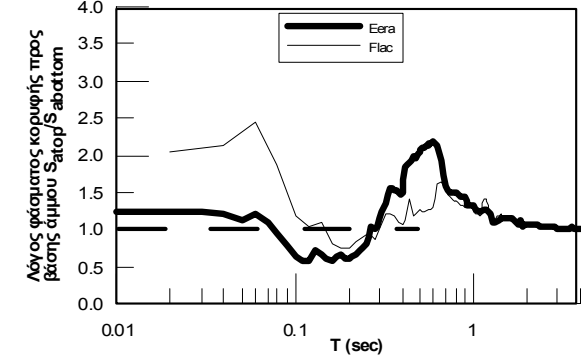
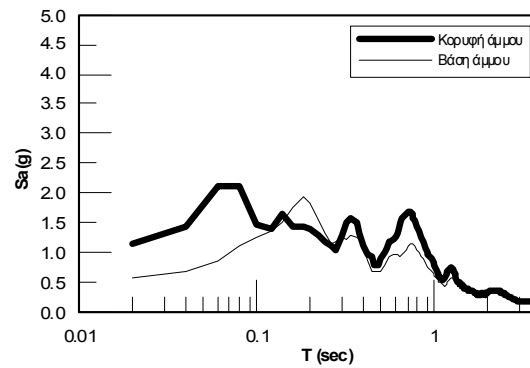
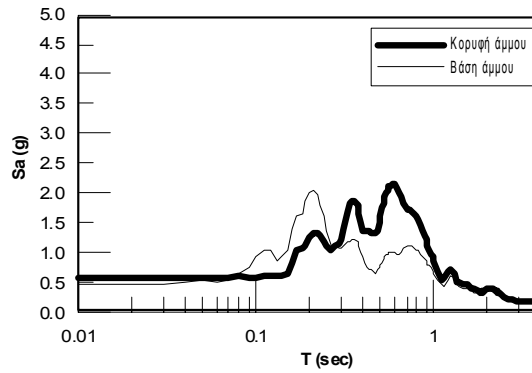
H=1m



H=2m



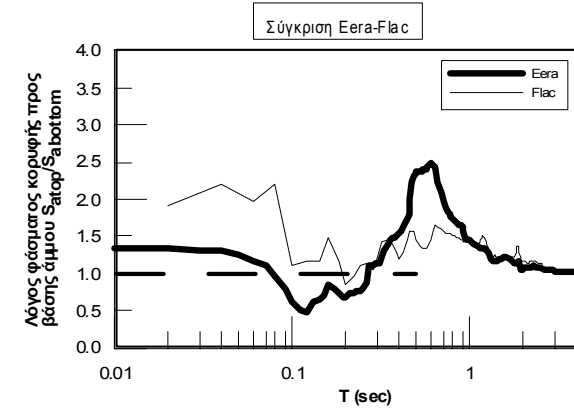
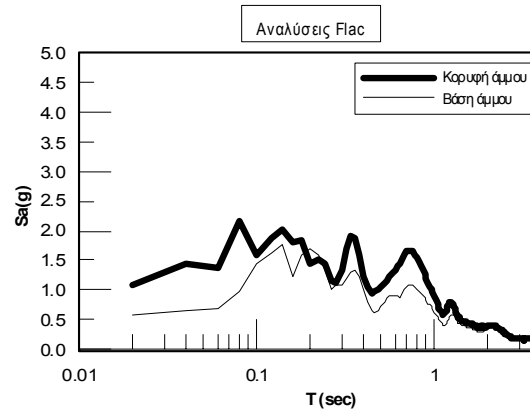
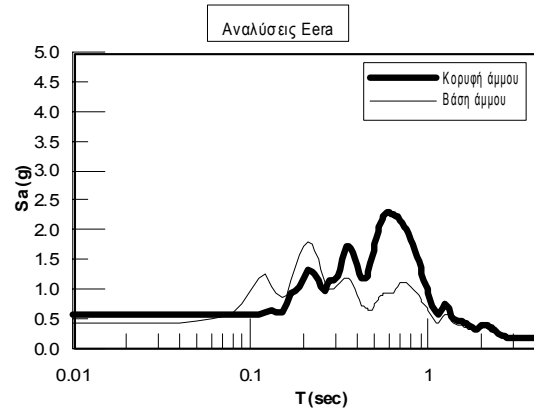
H=3m



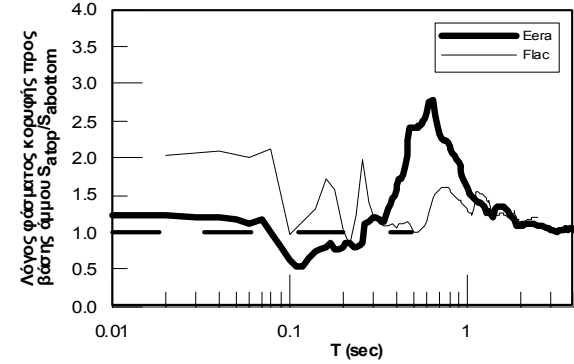
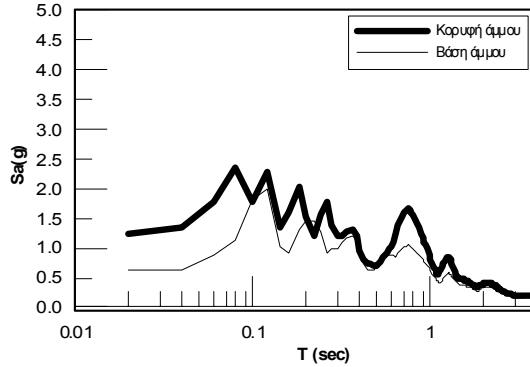
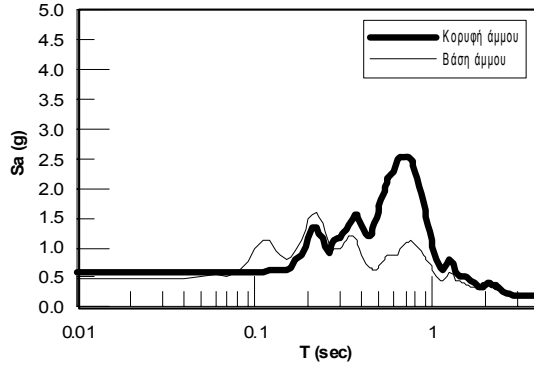
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ: Φάσματα

Ducze M7.9: $\alpha_{max} = 0,43g$

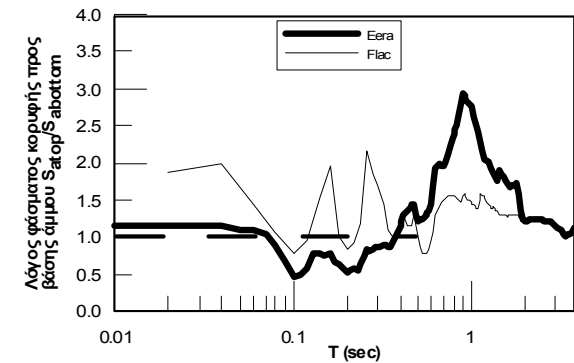
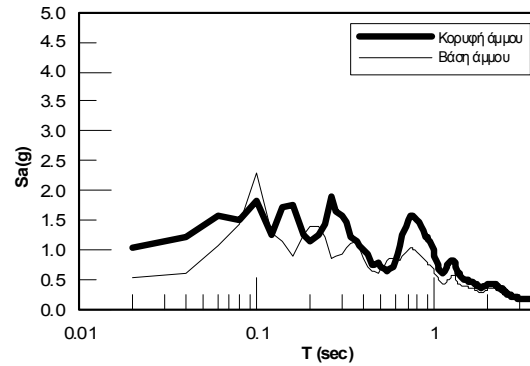
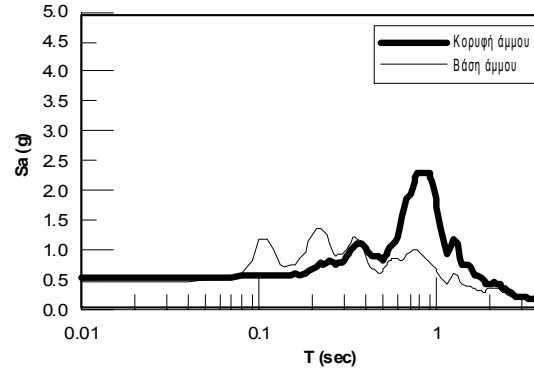
H=4m



H=5m



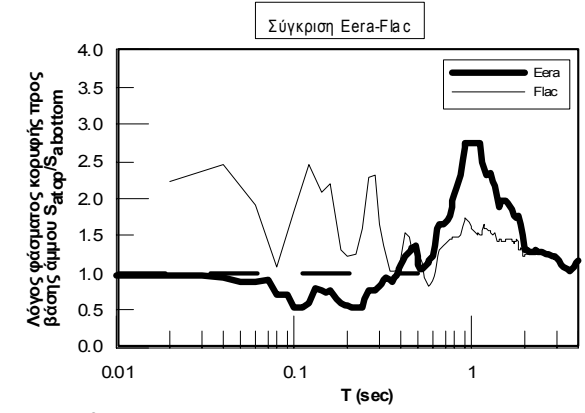
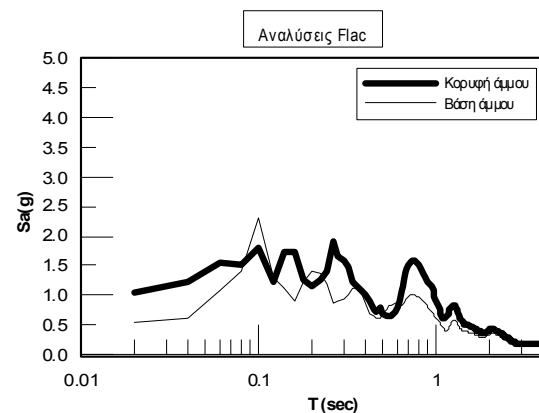
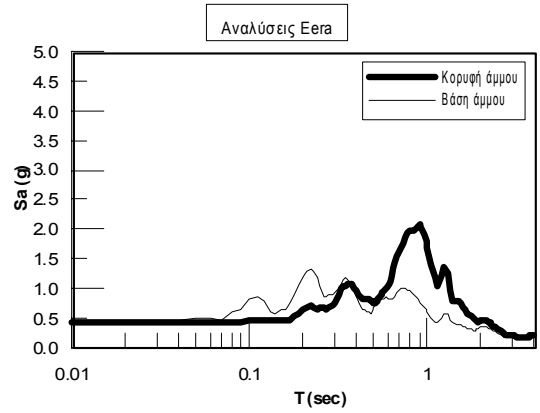
H=6m



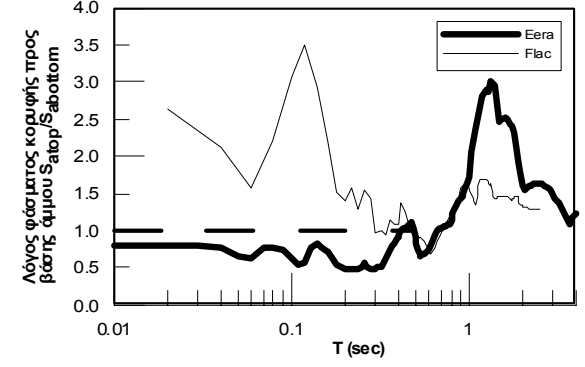
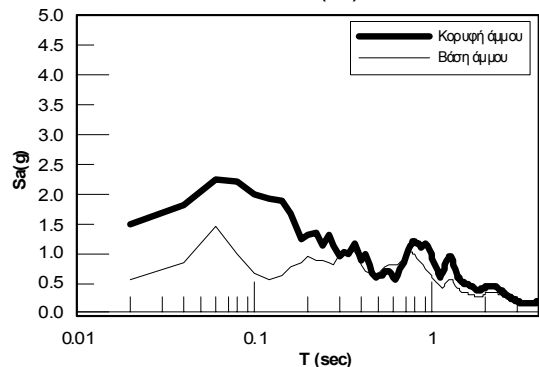
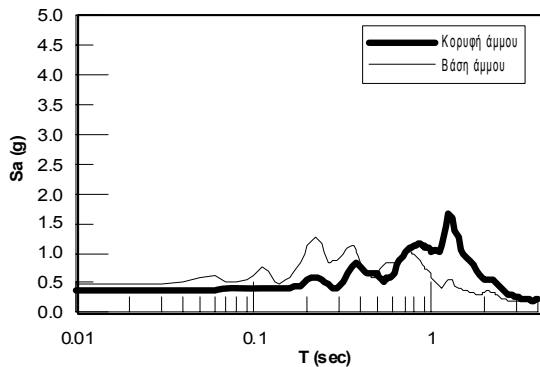
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ: Φάσματα

Ducze M7.9: $\alpha_{max} = 0,43g$

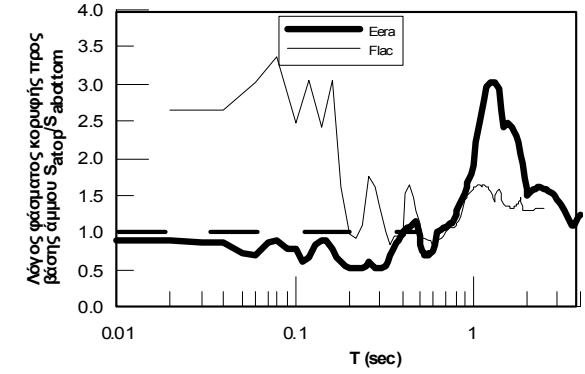
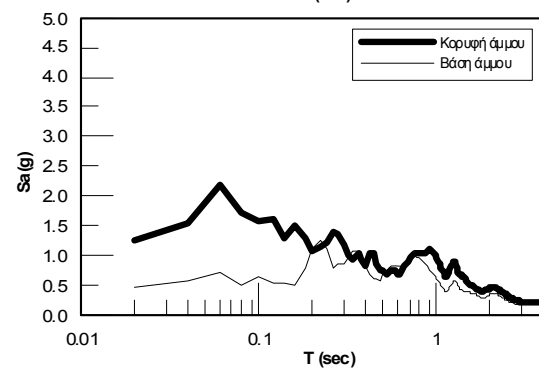
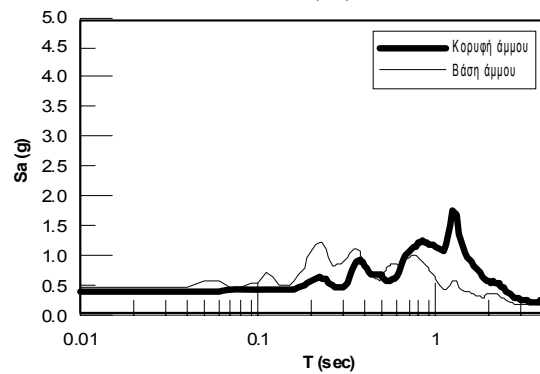
H=7m



H=8m



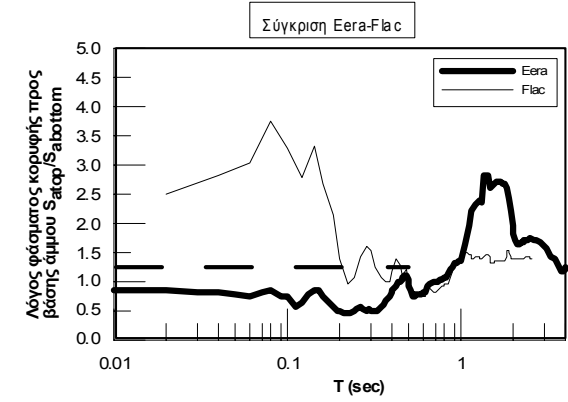
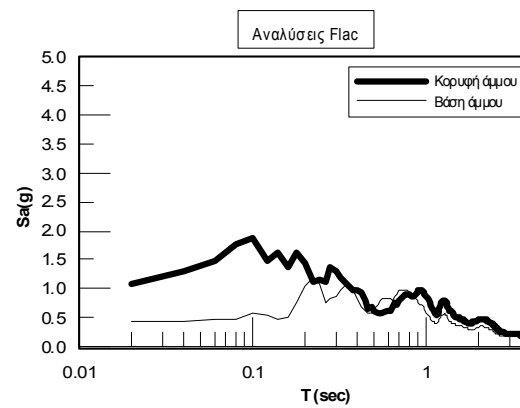
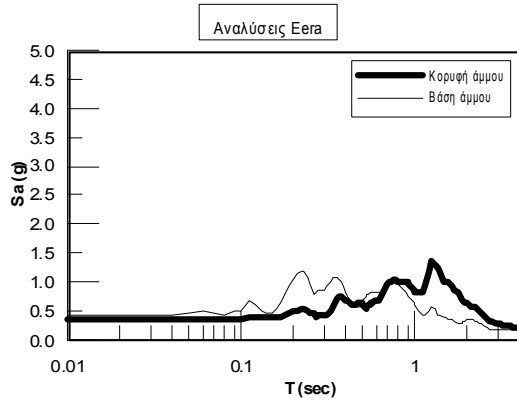
H=9m



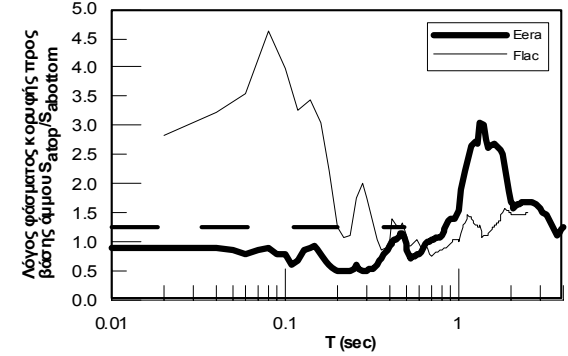
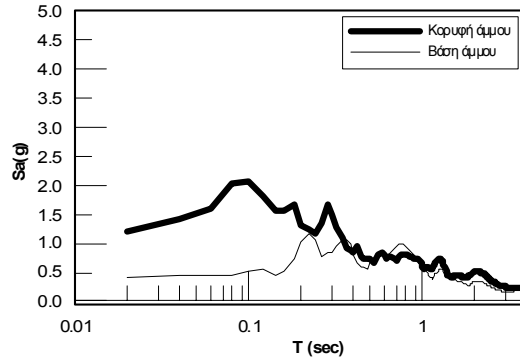
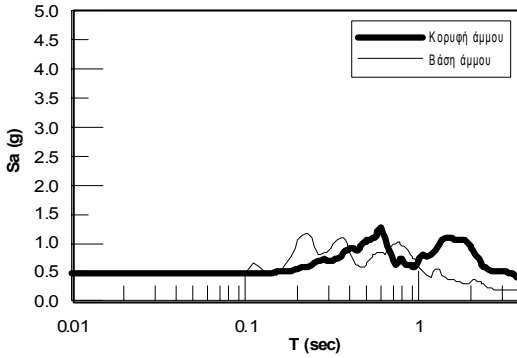
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ: Φάσματα

Ducze M7.9: $\alpha_{max} = 0,43g$

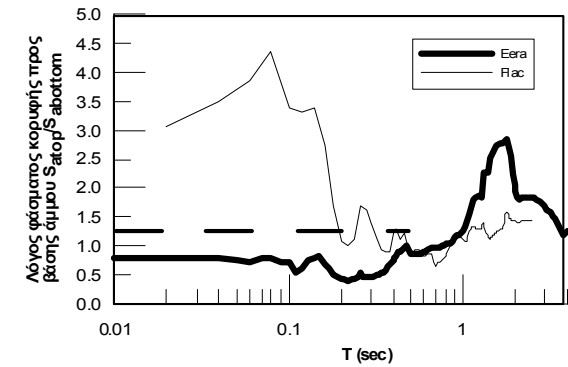
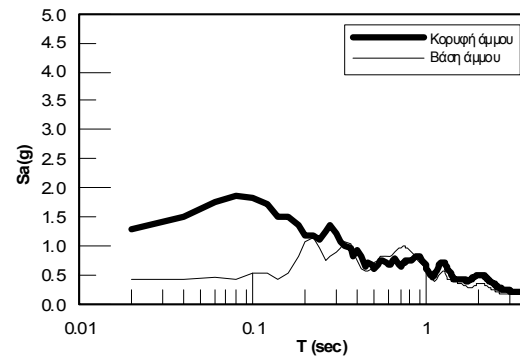
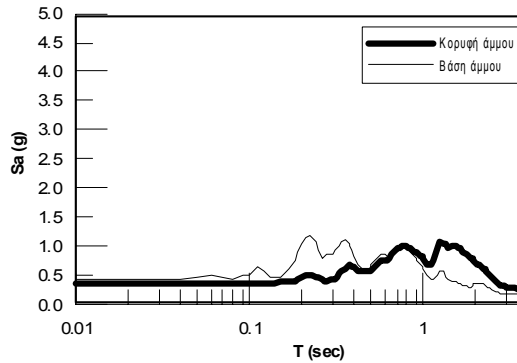
H=10m



H=11m



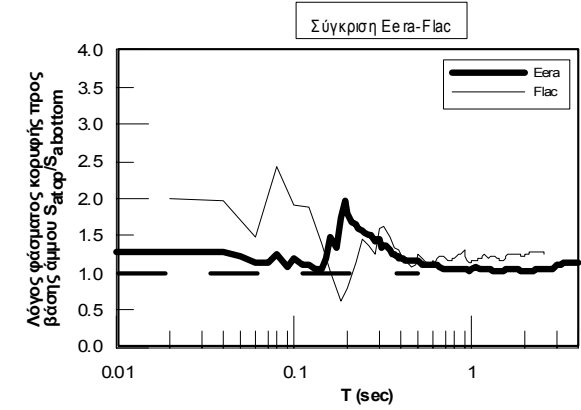
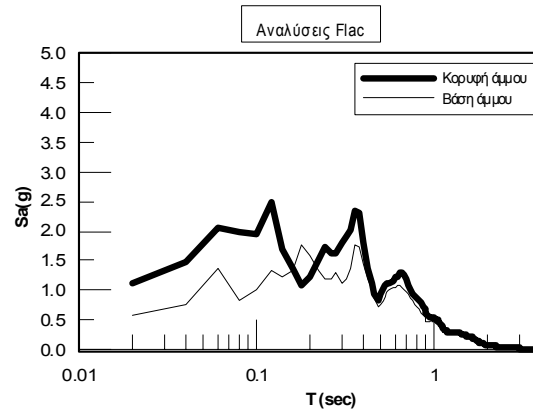
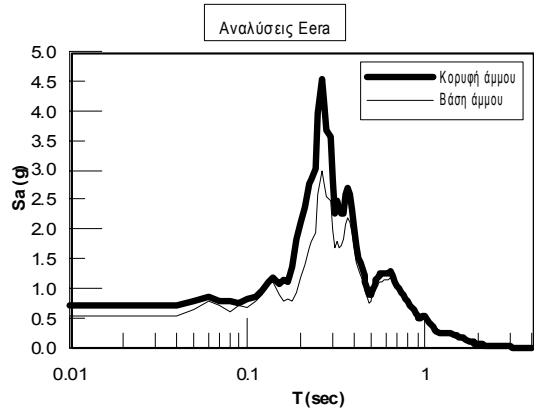
H=12m



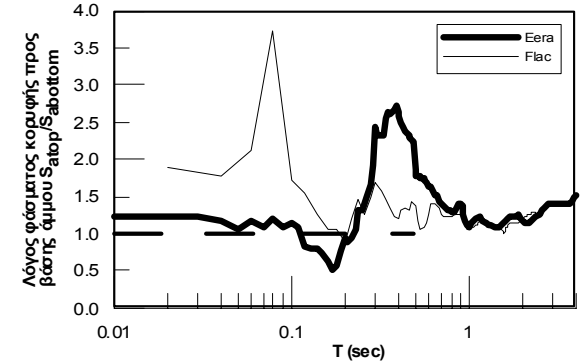
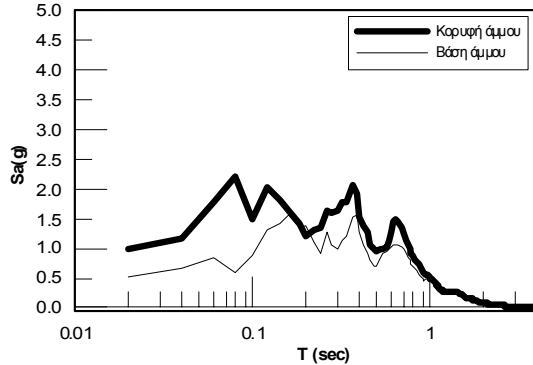
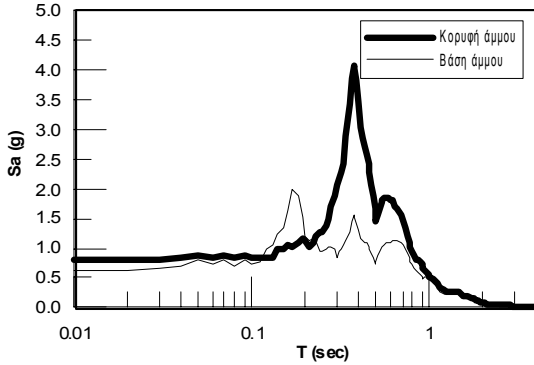
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ: Φάσματα

Northridge M6.7: $\alpha_{max} = 0,53g$

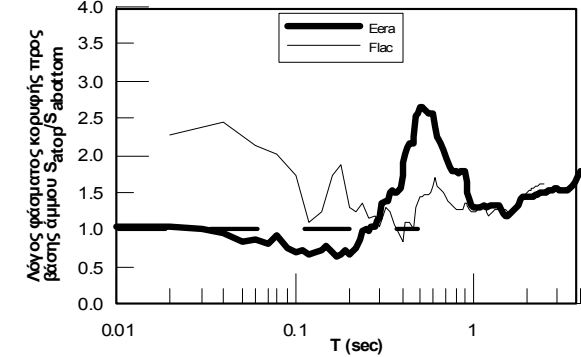
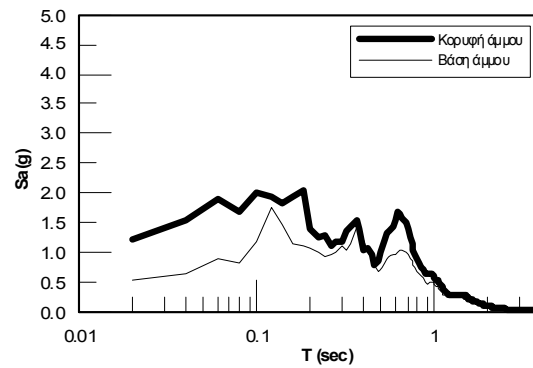
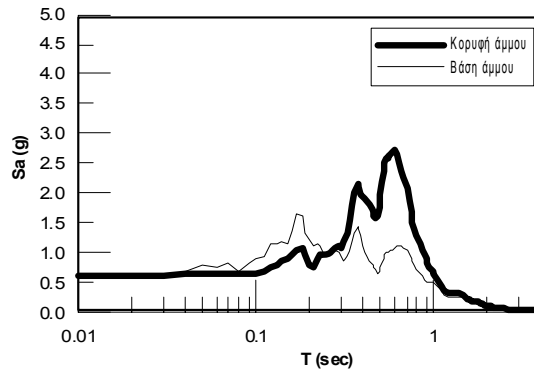
H=1m



H=2m



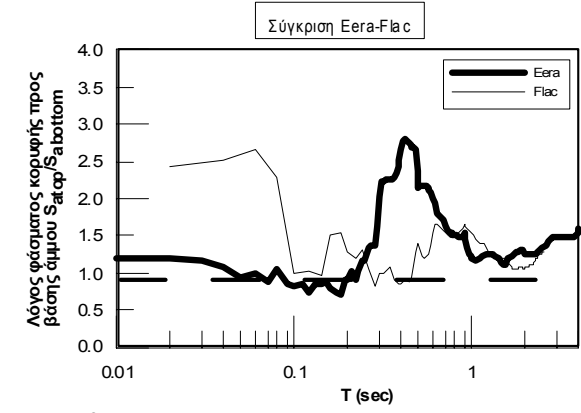
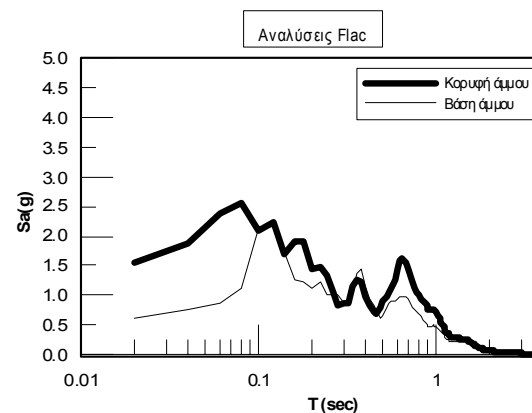
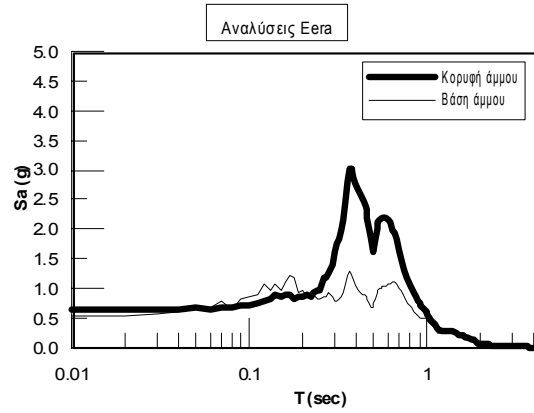
H=3m



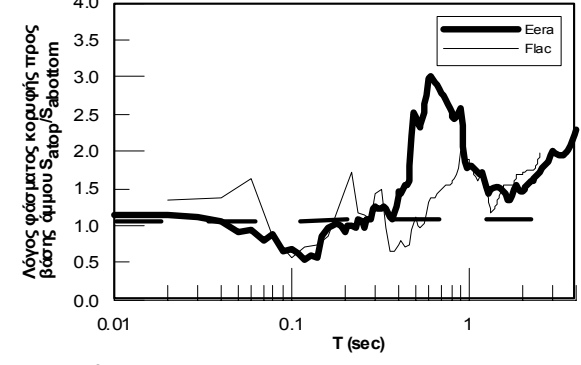
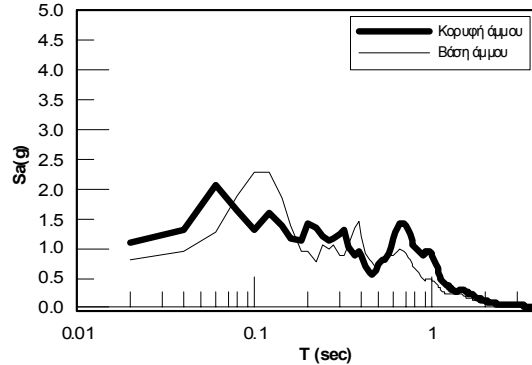
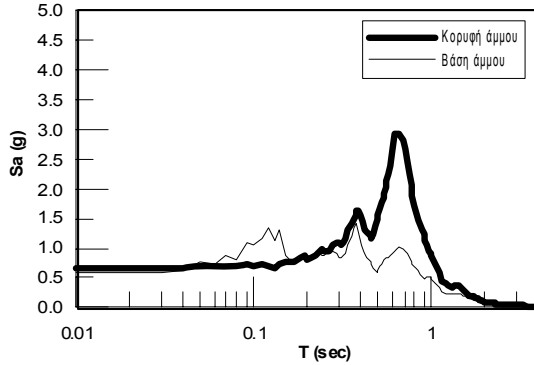
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ: Φάσματα

Northridge M6.7: $\alpha_{max} = 0,53g$

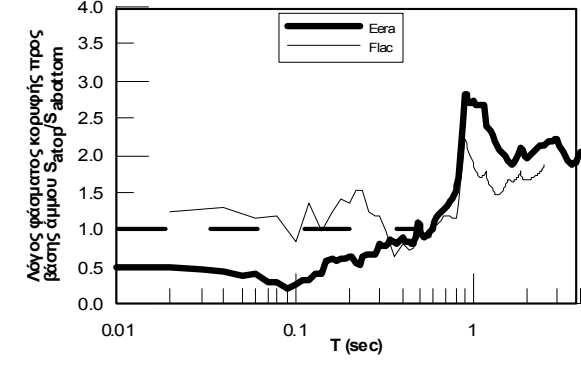
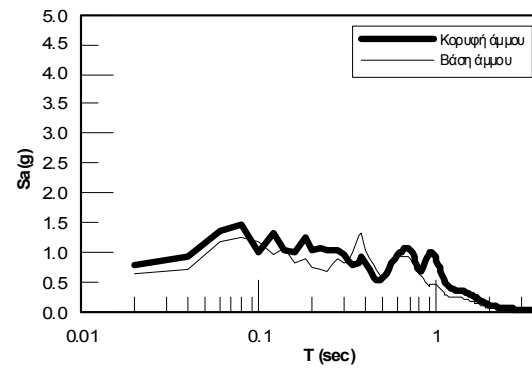
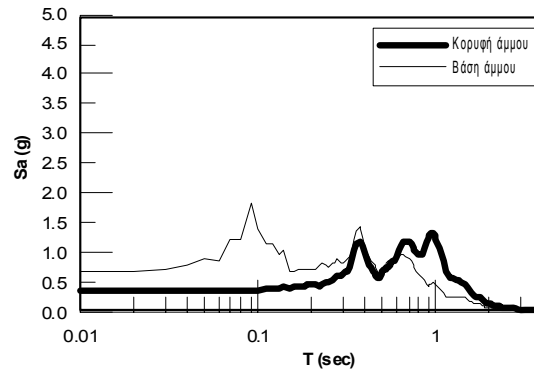
H=4m



H=5m



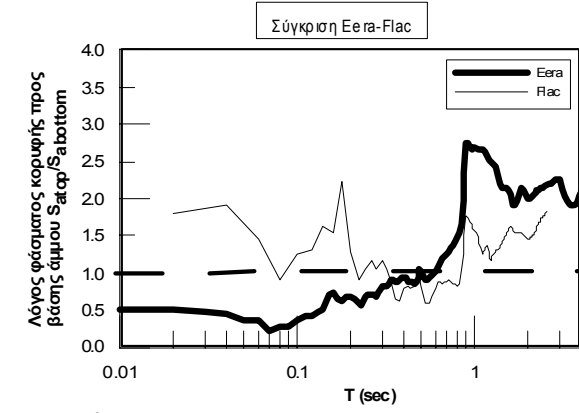
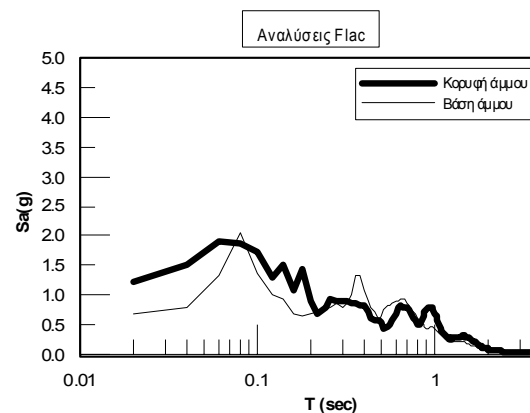
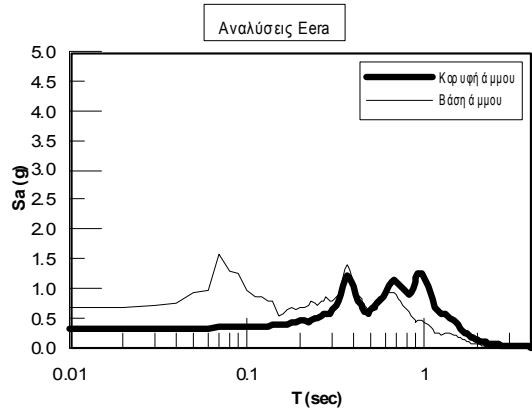
H=6m



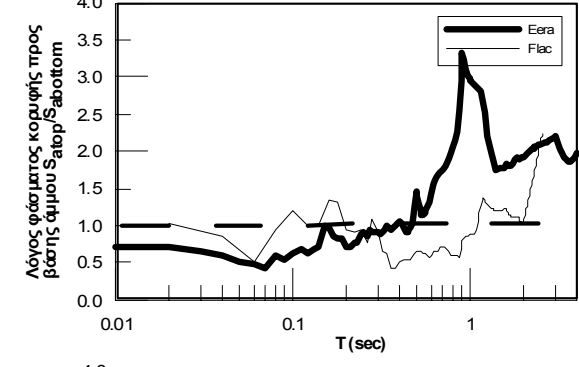
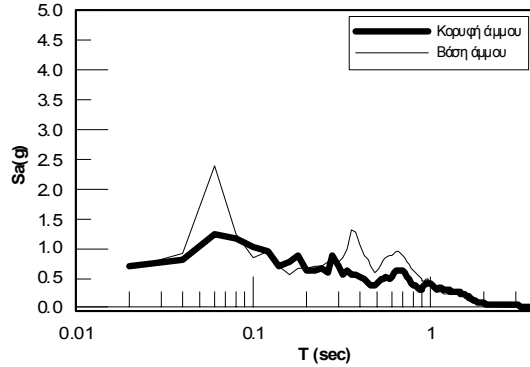
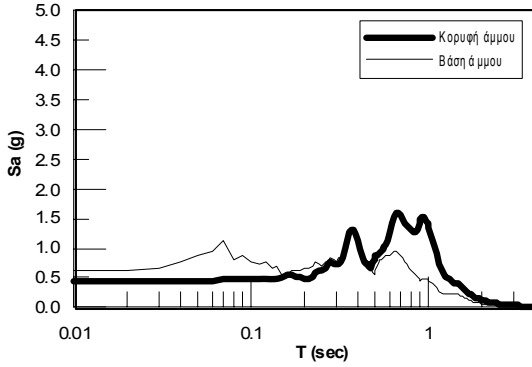
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ: Φάσματα

Northridge M6.7: $\alpha_{max} = 0,53g$

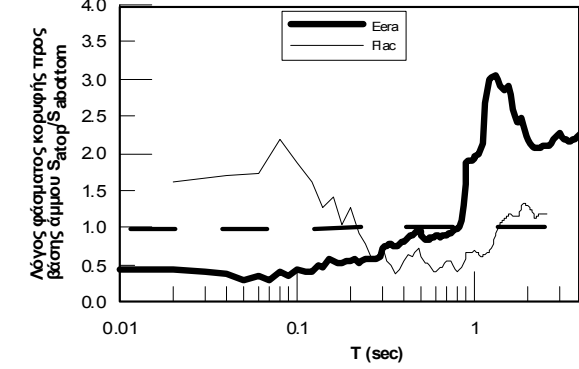
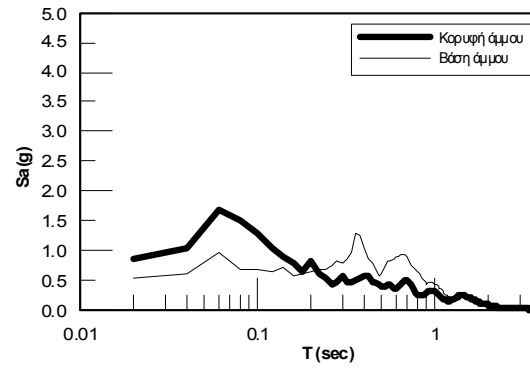
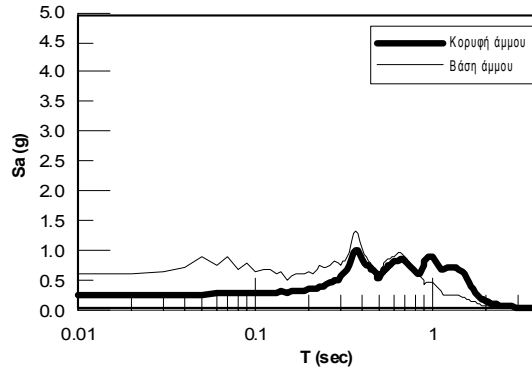
H=7m



H=8m



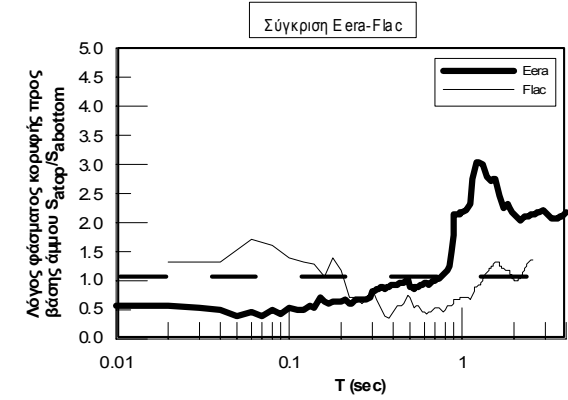
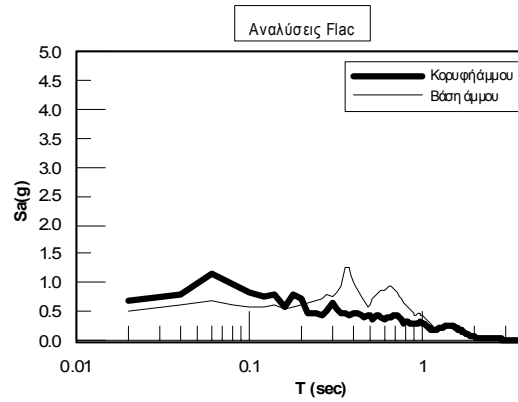
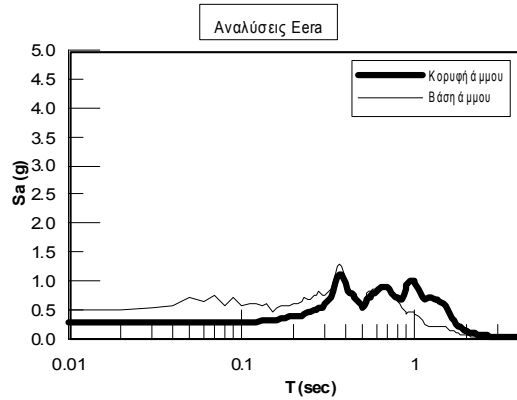
H=9m



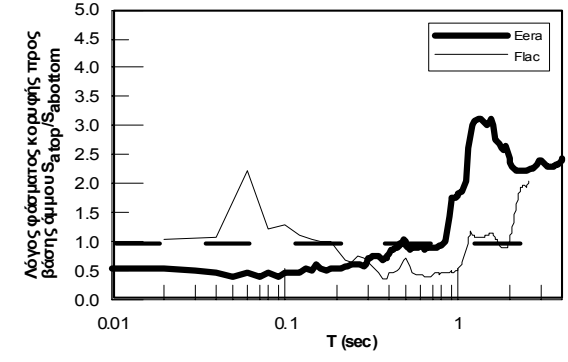
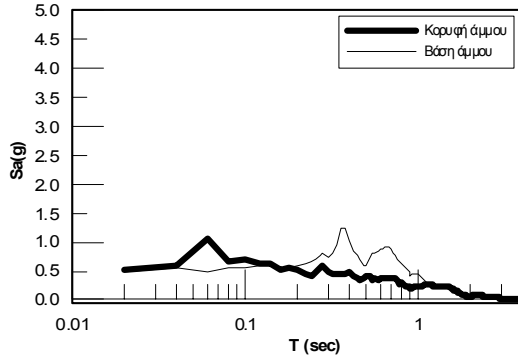
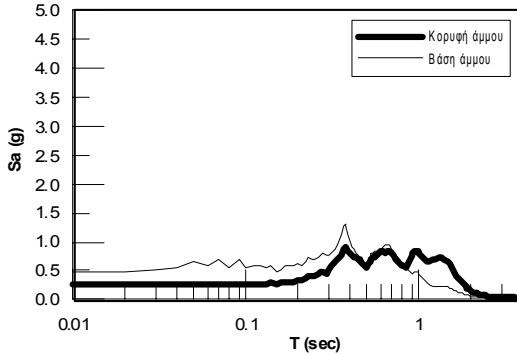
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ: Φάσματα

Northridge M6.7: $\alpha_{max} = 0,53g$

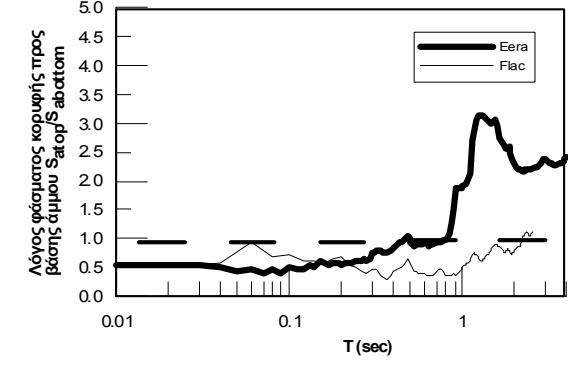
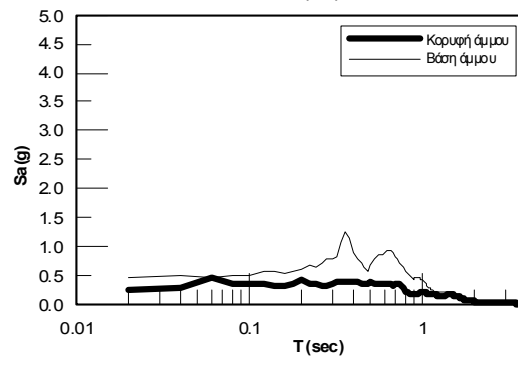
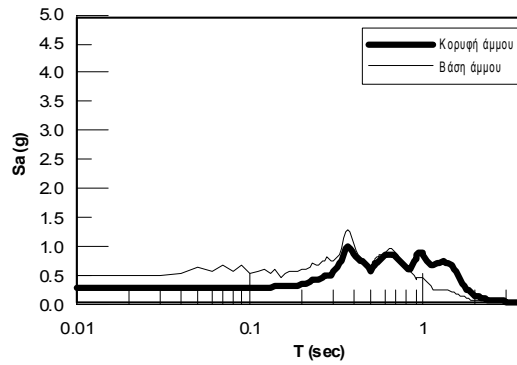
H=10m



H=11m



H=12m

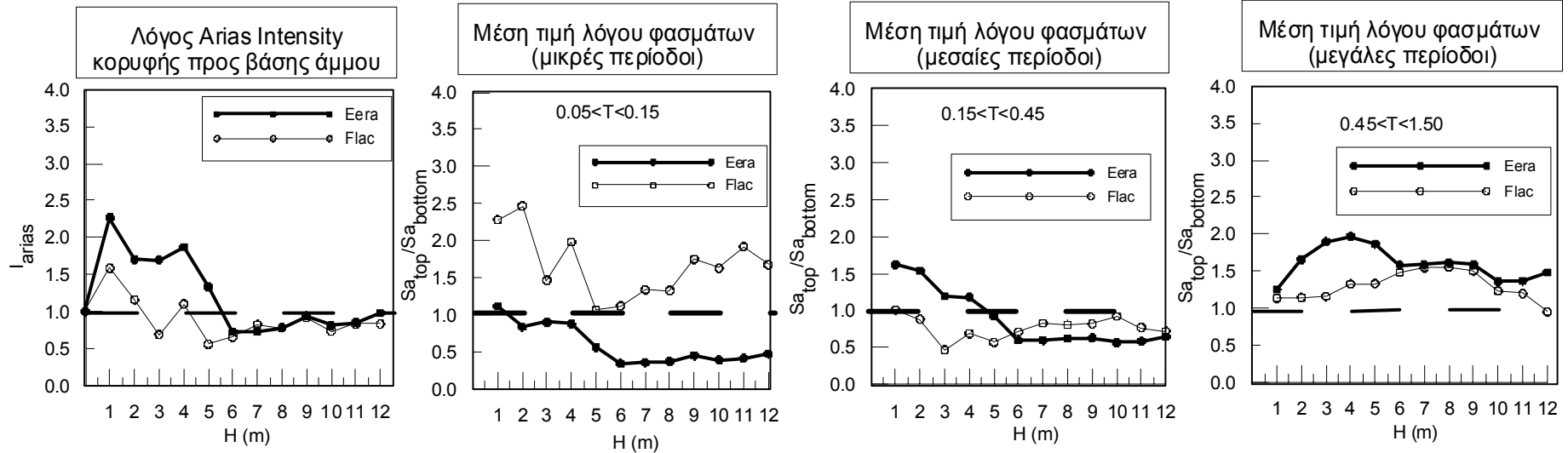


ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ:

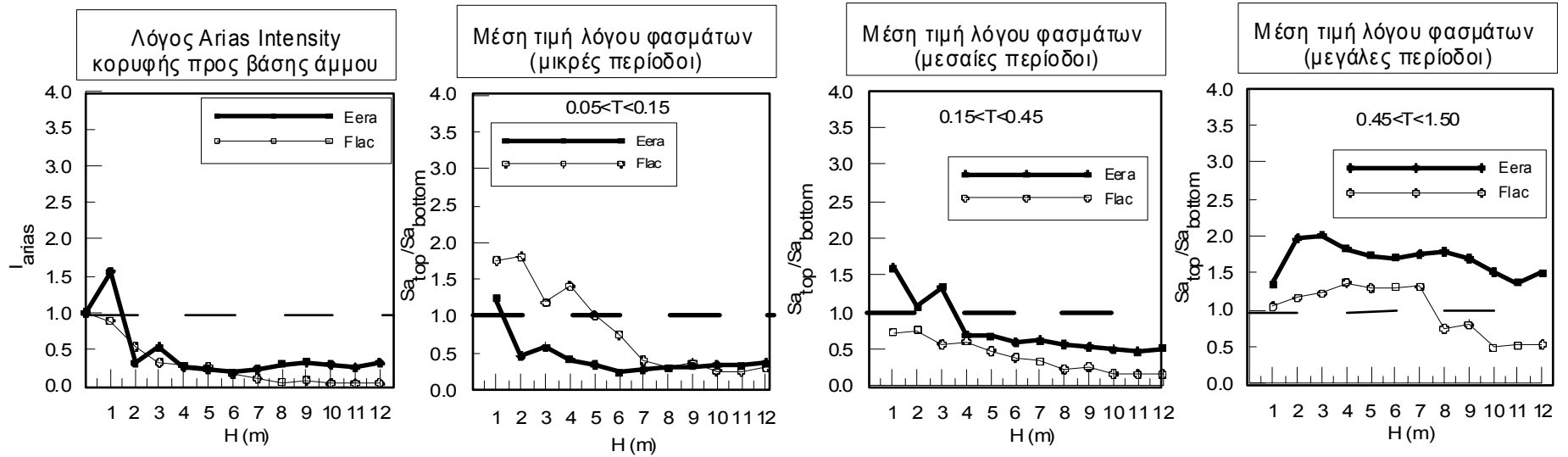
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ
ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ - ΔΕΙΚΤΕΣ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ: Δείκτες

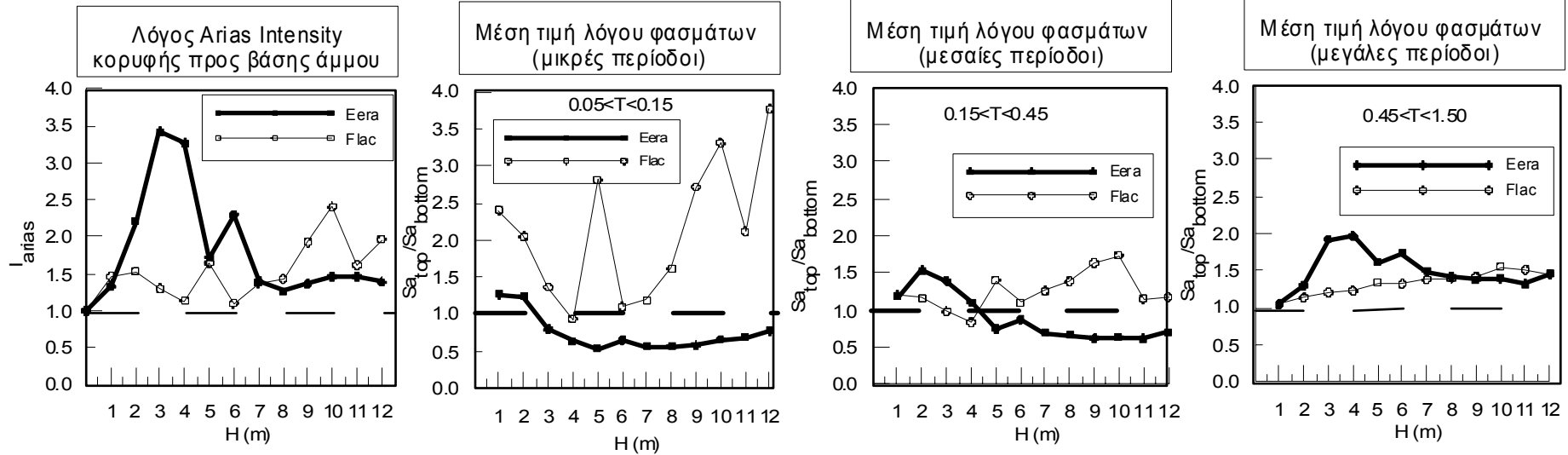
Northridge265 M6.7: $\alpha_{max} = 0,53g$



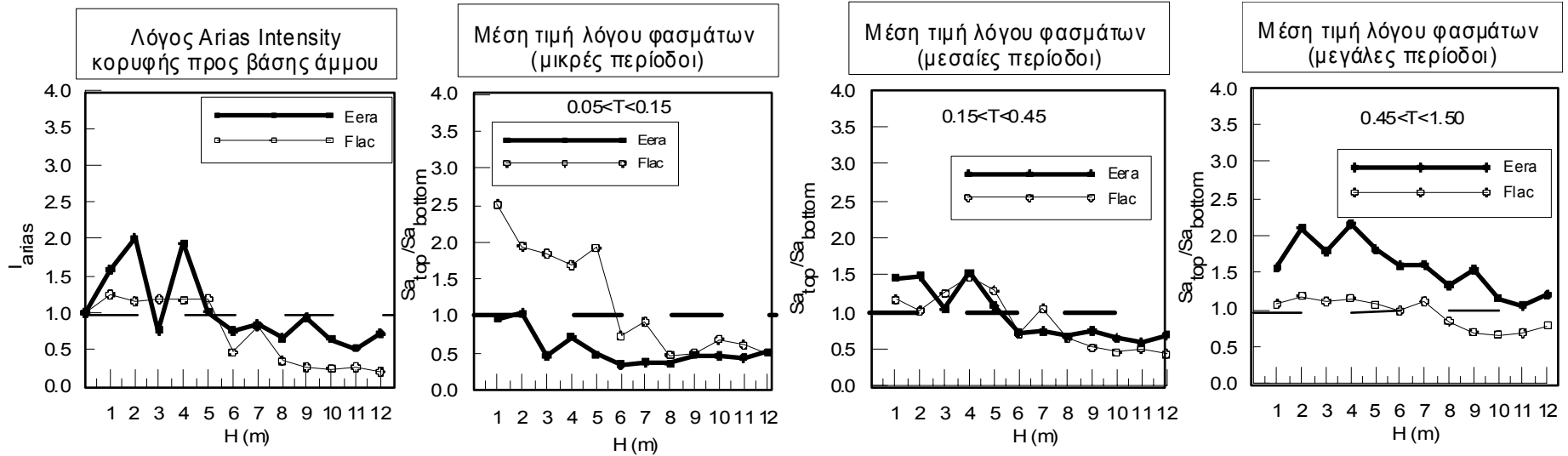
Sepolia M5.8: $\alpha_{max} = 0,63g$



Chichi M6.8: $\alpha_{max} = 0,52g$

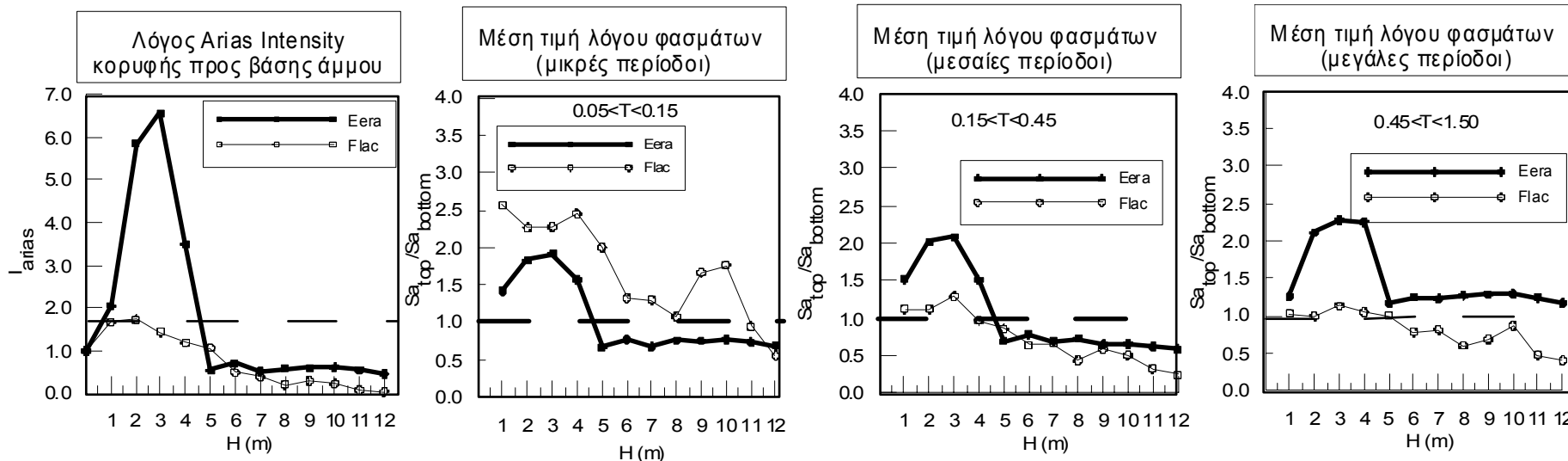


Aigio M6.2: $\alpha_{max} = 0,58g$

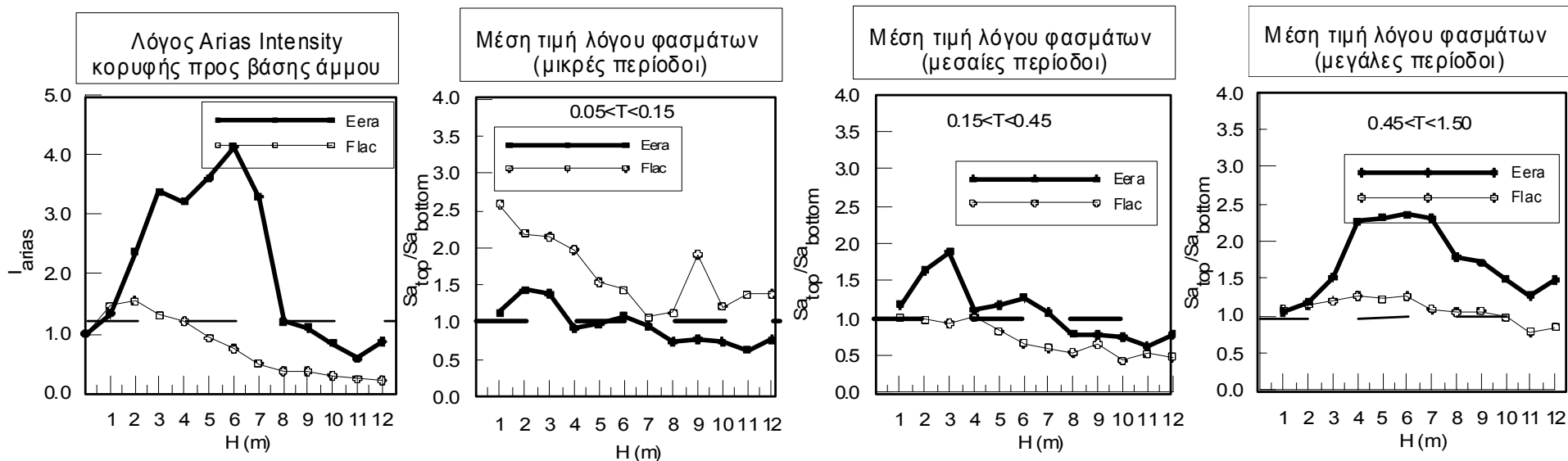


ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ: Δείκτες

Coyote Lake M5.7: $\alpha_{max} = 0,64g$

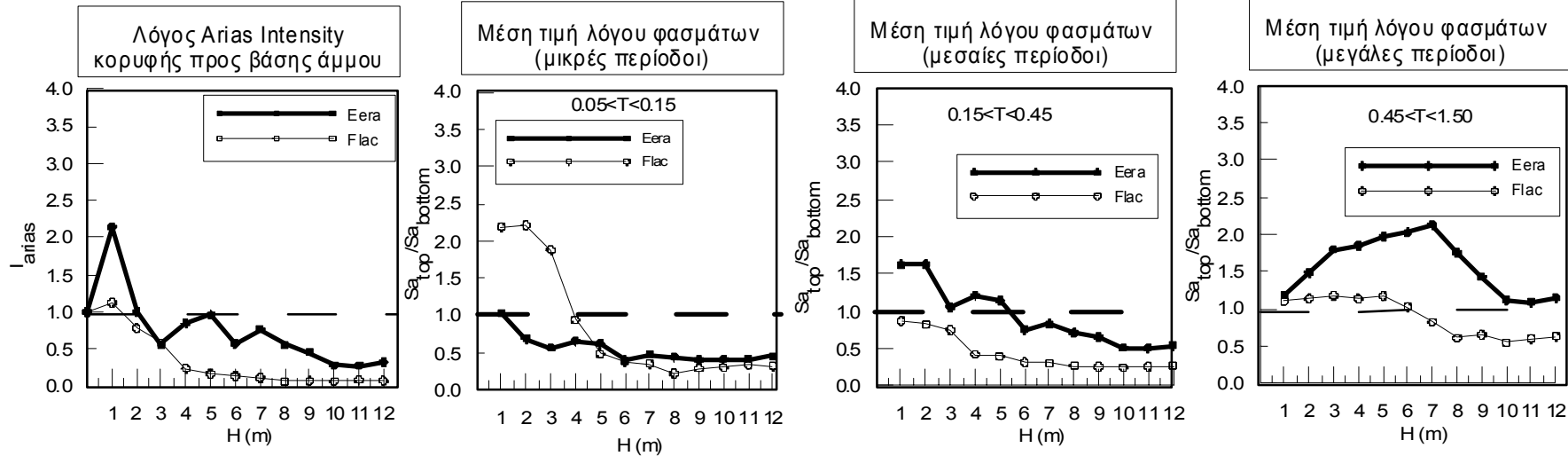


Lefkada M6.3: $\alpha_{max} = 0,57g$

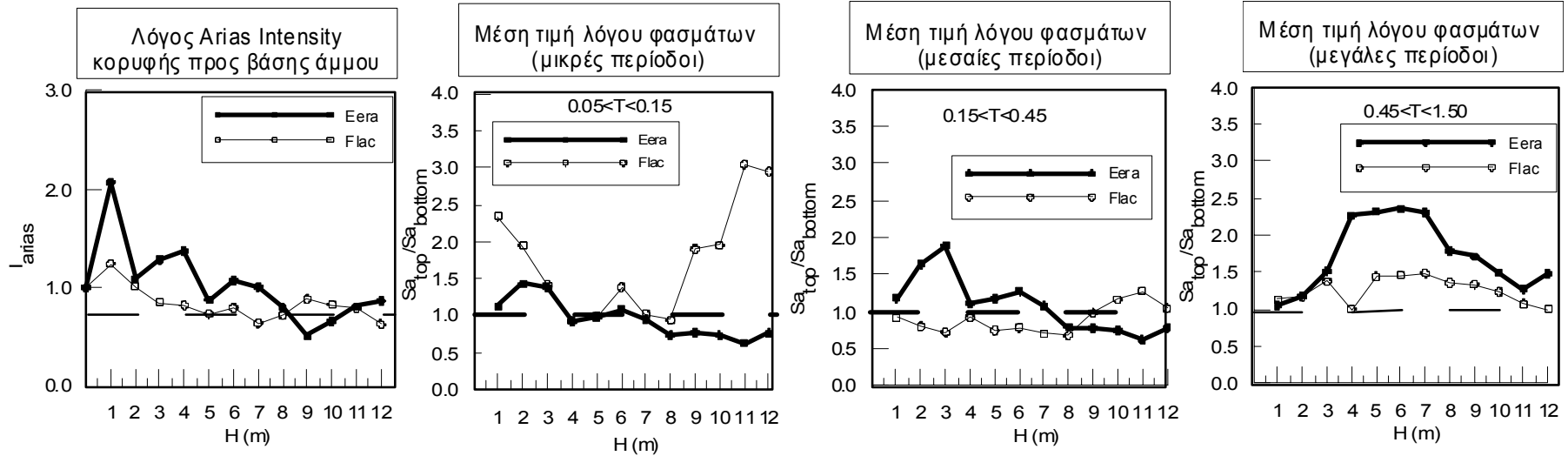


ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ: Δείκτες

Kobe M7.2: $\alpha_{max} = 0,62g$

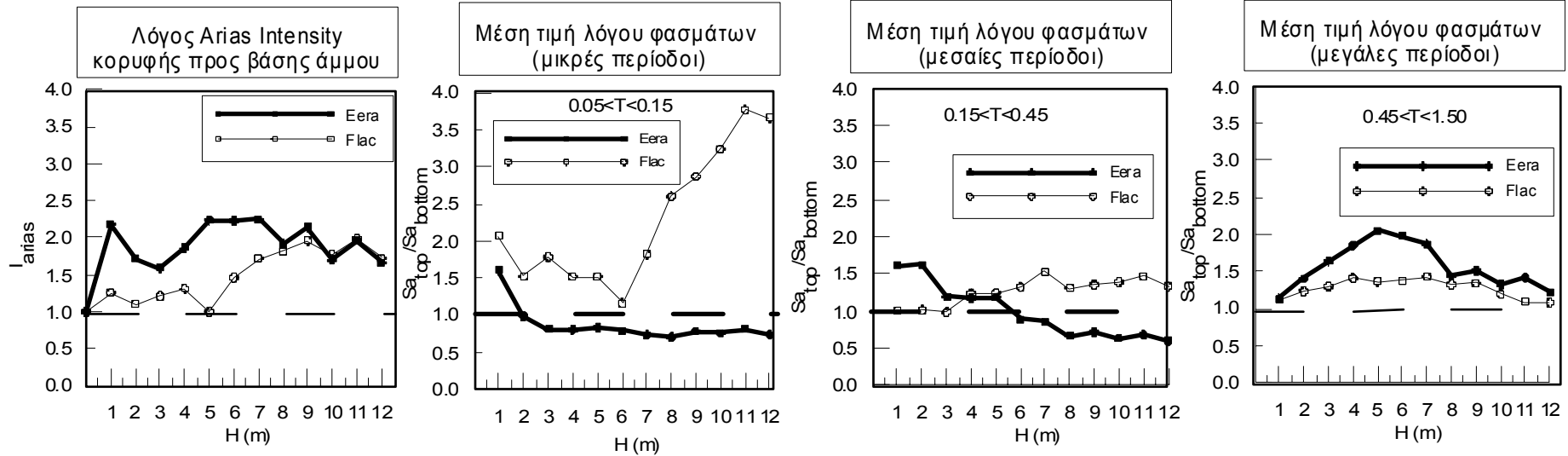


Kocaeli M7.51: $\alpha_{max} = 0,46g$



ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ: Δείκτες

Ducze M7.9: $\alpha_{max} = 0,43g$



Northridge M6.7: $\alpha_{max} = 0,53g$

