



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ

ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ
ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΜΕΝΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ

ΥΠΟ ΔΙΕΓΕΡΣΗ ΕΥΡΕΩΣ ΦΑΣΜΑΤΟΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΩΝ

ΚΟΥΤΣΟΓΟΥΛΑ ΕΥΑΓΓΕΛΙΑ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ

ΜΠΟΥΚΟΒΑΛΑΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

ΑΘΗΝΑ, ΜΑΡΤΙΟΣ 2012



NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY
OF ATHENS

DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING
DIVISION OF GEOTECHNICAL ENGINEERING

NUMERICAL SIMULATION OF THE SEISMIC RESPONSE OF LIQUIFIED LAYER

UNDER EXCITATIONS WITH A WIDE RANGE OF
SPECTRAL FREQUENCIES

KOUTSOGOULA EVANGELIA

DIPLOMA THESIS

SUPERVISOR

BOUCKOVALAS GEORGE

ATHENS, MARCH 2012

You've got to believe and it will
be alright in the end, *my friend*.

Verse from 'What happens tomorrow'
Duran-Duran

ΠΡΟΛΟΓΟΣ ΚΑΙ ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ



Οφείλω να ομολογήσω ότι αυτό το μικρό πρόλογο είχα ξεκινήσει να το γράφω πριν την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου, για το λόγο ότι ένιωσα ευγνωμοσύνη από τη πρώτη στιγμή που την ανέλαβα. Δε θα παραλείψω να αναφερθώ στον ανυπόμονο χαρακτήρα μου, που ευελπιστούσε να τη δει τελειωμένη πριν καν αρχίσει.

Έγραψα αυτή την εργασία με άξονα τον αναγνώστη. Ειλικρινά είχα θέσει ως προσωπικό στόχο να είναι ευανάγνωστη και κατανοητή ώστε οποιοσδήποτε, ακόμα και ένας μη Πολιτικός Μηχανικός να μπορεί να αποκτήσει μια σαφή εικόνα για αυτό το ενδιαφέρον φαινόμενο, για το σκεπτικό με το οποίο κινηθήκαμε, καθώς και για τα τελικά συμπεράσματα. Ίσως από τους γνώστες του αντικειμένου, να φαίνεται ότι πλατείασα σε ορισμένα σημεία ή ακόμα, ότι επαναλήφθηκα ασκόπως. Ωστόσο, ζητώ να μου συγχωρεθεί η οποιαδήποτε κούραση τους προκάλεσα προς χάριν του στόχου που αναφέρω εδώ.

Χαίρομαι πραγματικά που επιβλέπων της εργασίας μου ήταν ο κύριος Γεώργιος Μπουκοβάλας. Θεωρώ ότι έχει το χάρισμα να συνδυάζει επιδέξια τα χαρακτηριστικά ενός επαγγελματία αλλά και ενός όμορφου ανθρώπου. Τον ευχαριστώ που με εμπιστεύτηκε και που με αντιμετώπισε τόσο ως έναν μελλοντικό μηχανικό αλλά και ως άνθρωπο, χωρίς κάποια από τις δύο στάσεις να υπερτερεί της άλλης. Είμαι σίγουρη πως οι συμβουλές του, και η καθοδήγηση του θα είναι ένα από τα πιο πολύτιμα εφόδια στην επαγγελματική μου σταδιοδρομία και του είμαι ευγνώμων.

Ένα ευχαριστώ, επίσης, οφείλω στον Κώστα Ανδριανόπουλο για τη συμβολή του στη διπλωματική αλλά και στους Δημήτρη Καραμήτρο και Ιωάννη Χαλούλο διότι σίγουρα χωρίς αυτούς η εργασία μου δε θα ήταν η ίδια. Συντέλεσαν ώστε όλη αυτή η πορεία πέρα από εκπαιδευτικά ενδιαφέροντα να είναι και αρκετά διασκεδαστική. Υπήρχε ένα τόσο όμορφο και ευχάριστο πνεύμα συνεργασίας που είχα ευχηθεί, θυμάμαι, να μπορούσε να ήταν έτσι όλη μου η ακαδημαϊκή πορεία.

Στο σημείο αυτό δε θα παραλείψω να ευχαριστήσω και τη μητέρα μου, κυρίως για το ότι μου είχε ανέκαθεν τυφλή εμπιστοσύνη στο θέμα του διαβάσματος, συνεπώς οποιοσδήποτε λόγος του στυλ «θα τα καταφέρεις» της φαινόταν περιττός. Ήξερε ότι θα τα κατάφερα.

Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Κύριο μου, για αυτό που μου χάρισε και για ο,τιδήποτε άλλο μου έχει χαρίσει στη ζωή μου. Τον ευχαριστώ τόσο για τη καθοδήγηση, όσο και για τη στήριξη, την αγάπη, τη χαρά, την ευτυχία.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ πριν το τέλος και στον Ηλεκτρολόγο Μηχανολόγο Μηχανικό, Αναστάσιο Θωμάτο για τη βοήθεια του σε αρκετά σημεία της εργασίας και κυρίως για την απέραντη, ειλικρινά, υπομονή και κατανόηση.

Τέλος, θα ήθελα να αφιερώσω τη διπλωματική μου στον πατέρα μου γιατί είμαι σίγουρη πως θα ήταν πολύ περήφανος να γνωρίζει ότι τόσα μαθητικά χρόνια συντελούσε ώστε να με φτάσει στο τελικό σημείο, στην απόκτηση του τίτλου σπουδών μου.

Σας ευχαριστώ όλους σας θερμά! Γνωστούς και άγνωστους γιατί μέσα από τη μικρή αλλά και μεγάλη αλληλεπίδραση μας, συντελέσατε στην *ιδέα...*

Λία

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	15
SUMMARY	17
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ	19
1.1 ΣΚΟΠΟΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	19
1.2 ΔΟΜΗ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	21
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ	23
2.1 ΓΕΝΙΚΑ	23
2.2 ΙΣΤΟΡΙΚΑ ΠΕΡΙΣΤΑΤΙΚΑ	23
2.3 ΠΡΟΗΓΗΘΕΙΣΑ ΕΡΕΥΝΑ	28
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ	31
3.1. ΓΕΝΙΚΑ	31
3.2. ΤΟ ΦΥΣΙΚΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ	31
3.3 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ	33
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΣΕΙΣΜΙΚΕΣ ΔΙΕΓΕΡΣΕΙΣ	39
4.1. ΓΕΝΙΚΑ	39
4.2. ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΩΝ ΔΙΕΓΕΡΣΕΩΝ	39
4.3 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΙΕΓΕΡΣΕΩΝ	43
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ	49
5.1 ΓΕΝΙΚΑ	49
5.2 ΕΠΙΛΟΓΗ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗΣ	49
5.3 ΧΡΟΝΟΪΣΤΟΡΙΕΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ	51
5.4 ΦΑΣΜΑΤΑ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ	55

5.5 ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΣΕΙΣΜΙΚΟΥ ΚΥΜΑΤΟΣ ΣΤΟ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΜΕΝΟ ΣΤΡΩΜΑ	56
--	----

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΔΕΙΚΤΕΣ ΠΟΣΟΤΙΚΗΣ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ

6.1 ΓΕΝΙΚΑ	61
6.2 ΔΕΙΚΤΗΣ I_{ARIAS}	62
6.3 ΛΟΓΟΣ ΦΑΣΜΑΤΩΝ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ : ΜΙΚΡΕΣ ΠΕΡΙΟΔΟΙ	65
6.4 ΛΟΓΟΣ ΦΑΣΜΑΤΩΝ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ : ΜΕΣΑΙΕΣ ΠΕΡΙΟΔΟΙ	67
6.5 ΛΟΓΟΣ ΦΑΣΜΑΤΩΝ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ : ΜΕΓΑΛΕΣ ΠΕΡΙΟΔΟΙ	69
6.6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	71

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ

7.1 ΓΕΝΙΚΑ	73
7.2 ΕΠΙΛΟΓΗ ΠΕΡΙΟΔΩΝ ΜΕΛΕΤΗΣ	73
7.3 ΟΡΙΣΜΟΣ ΚΡΙΣΙΜΗΣ ΤΙΜΗΣ ΔΕΙΚΤΩΝ	74
7.4 ΕΠΑΝΑΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΔΙΕΓΕΡΣΕΩΝ	75
7.5 ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΚΑΤΑΤΑΞΗΣ ΔΙΕΓΕΡΣΕΩΝ	76
7.6 ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΟΥ ΔΕΙΚΤΗ I_{ARIAS}	78
7.7 ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΛΟΓΟΥ ΦΑΣΜΑΤΩΝ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΣΤΙΣ ΜΙΚΡΕΣ ΠΕΡΙΟΔΟΥΣ	81
7.8 ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΟΥ ΛΟΓΟΥ ΦΑΣΜΑΤΩΝ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΣΤΙΣ ΜΕΣΑΙΕΣ ΠΕΡΙΟΔΟΥΣ	84
7.9 ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΟΥ ΛΟΓΟΥ ΦΑΣΜΑΤΩΝ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΣΤΙΣ ΜΕΓΑΛΕΣ ΠΕΡΙΟΔΟΥΣ	86
7.10 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	88

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΩΝ ΜΕ ΑΡΜΟΝΙΚΕΣ ΔΙΕΓΕΡΣΕΙΣ

8.1 ΓΕΝΙΚΑ	93
8.2 ΑΠΟΚΛΙΣΕΙΣ ΣΤΟΝ ΔΕΙΚΤΗ I_{ARIAS}	93
8.3 ΑΠΟΚΛΙΣΕΙΣ ΣΤΟ ΛΟΓΟ ΦΑΣΜΑΤΙΚΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ	97

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

9.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	101
9.2 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΕΡΕΥΝΑ	103

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α:	107
ΧΡΟΝΟΪΣΤΟΡΙΕΣ ΚΑΙ ΕΛΑΣΤΙΚΑ ΦΑΣΜΑΤΑ	107
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β:	113
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ: ΧΡΟΝΟΪΣΤΟΡΙΕΣ	113
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ:	175
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ: ΕΛΑΣΤΙΚΑ ΦΑΣΜΑΤΑ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ	175

CONTENTS



SUMMARY (IN GREEK)	15
SUMMARY (IN ENGLISH)	17
CHAPTER 1: INTRODUCTION	19
1.1 PURPOSE OF THESIS	19
1.2 STRUCTURE OF THESIS	21
CHAPTER 2: LITERATURE SURVEY	23
2.1 GENERALLY	23
2.2 CASE STUDIES	23
2.3 PREVIOUS RESEARCH	28
CHAPTER 3: NUMERICAL SIMULATION	31
3.1. GENERALLY	31
3.2. THE PHYSICAL PROBLEM	31
3.3 METHODOLOGY OF NUMERICAL SIMULATION	33
CHAPTER 4: SEISMIC EXCITATIONS	39
4.1. GENERALLY	39
4.2. CHOICE OF EXCITATIONS	39
4.3 EXCITATIONS' EDITING	43
CHAPTER 5: NUMERICAL ANALYSES' RESULTS	49
5.1 GENERALLY	49
5.2 CHOICE OF THE PRESENTED RESULTS	49
5.3 TIMEHISTORIES OF SEISMIC RESPONSE	51
5.4 SEISMIC RESPONSE SPECTRA	55

5.5 SHEAR WAVE VELOCITY IN THE LIQUIFIED LAYER	56
CHAPTER 6: INDEXES FOR SEISMIC RESPONSE	61
<hr/>	
6.1 GENERALLY	61
6.2 INDEX I_{ARIAS}	62
6.3 SPECTRAL RESPONSE RATIO : ΜΙΚΡΕΣ ΠΕΡΙΟΔΟΙ	65
6.4 SPECTRAL RESPONSE RATIO : ΜΕΣΑΙΕΣ ΠΕΡΙΟΔΟΙ	67
6.5 SPECTRAL RESPONSE RATIO : ΜΕΓΑΛΕΣ ΠΕΡΙΟΔΟΙ	69
6.6 CONCLUSIONS	71
CHAPTER 7: EVALUATION OF NUMERICAL ANALYSES' RESULTS	73
<hr/>	
7.1 GENERALLY	73
7.2 CHOICE OF THE STUDIED PERIODS	73
7.3 DEFINITION OF INDEXES' CRITICAL VALUES	74
7.4 EXCITATIONS' REGROUPING	75
7.5 REGROUPING CRITERION	76
7.6 VARIATION OF THE I_{ARIAS} INDEX	78
7.7 VARIATION OF THE SPECTRAL RESPONSE RATIO IN SMALL PERIODS	81
7.8 VARIATION OF THE SPECTRAL RESPONSE RATIO IN MEDIUM PERIODS	84
7.9 VARIATION OF THE SPECTRAL RESPONSE RATIO IN LONG PERIODS	86
7.10 CONCLUSIONS	88
CHAPTER 8: COMPARISON OF REAL WITH HARMONIC EXCITATIONS	93
<hr/>	
8.1 GENERALLY	93
8.2 DIFFERENCES IN THE I_{ARIAS} INDEX	93
8.3 DIFFERENCES IN THE SPECTRAL RESPONSE RATIO	97
CHAPTER 9: CONCLUSIONS – SUGGESTIONS	101
<hr/>	
9.1 CONCLUSIONS	101
9.2 SUGGESTIONS FOR RESEARCH	103
CHAPTER 10: BIBLIOGRAPHY	105
<hr/>	

APPENDIX A:	107
<hr/>	
TIMEHISTORIES AND ELASTIC SPECTRA OF SEISMIC EXCITATIONS' RESPONSE	107
APPENDIX B:	113
<hr/>	
NUMERICAL ANALYSES' RESULTS: TIME HISTORIES	113
APPENDIX Γ:	175
<hr/>	
NUMERICAL ANALYSES' RESULTS: ELASTIC RESPONSE SPECTRA	175

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 για τα οποίο λίγα σχετικά στοιχεία είναι γνωστά. Ειδικότερα ο τρόπος με τον οποίο το έδαφος μεταβάλλει τη μορφή της εδαφικής κίνησης τόσο από άποψη επιταχύνσεων όσο και από άποψη περιόδων. Στην παρούσα εργασία μελετάται η συμπεριφορά ενός αμμώδους εδάφους υπό πραγματικές συνθήκες διεγέρσεως, μέσω αριθμητικών αναλύσεων, και ποσοτικοποιείται η εδαφική απόκριση με παράμετρο το πάχος του ρευστοποιημένου στρώματος.

Από προηγούμενη έρευνα πάνω στο ίδιο θέμα (Θεοχάρης, 2011), αλλά υπό αρμονικές συνθήκες διέγερσης, βρέθηκε ότι το πάχος είναι παράγοντας απομείωσης της κίνησης και μάλιστα για τιμές αυτού μεγαλύτερες από $H_{cr}=(0.20-0.40)\lambda$. Το λ της σχέσης είναι το μήκος κύματος της διέγερσης στο ρευστοποιημένο στρώμα και ισούται με $V_{s_{liq}}*T_{exc}$ όπου T_{exc} είναι η περίοδος της διέγερσης και $V_{s_{liq}}$ η ταχύτητα διάδοσης του σεισμικού κύματος στο ρευστοποιημένο στρώμα η οποία είναι ίση με το $0.25-0.40$ της αρχικής ταχύτητας του κύματος [$V_{s_{liq}}=(0.25-0.40)V_{s_0}$].

Η ανομοιομορφία των πραγματικών διεγέρσεων, ωστόσο, τόσο ως προς την επιτάχυνση και την περίοδο όσο και προς την εναλλαγή των χαρακτηριστικών αυτών ανά παλμό φαίνεται να είναι ο κύριος παράγοντας για την διαφοροποίηση των αποτελεσμάτων. Τελικώς το κριτήριο αυτό του Θεοχάρη (2011) περιορίστηκε σε συγκεκριμένο πλήθος διεγέρσεων μικρού εύρους περιόδων (κατηγορία Α), όπου το λ της σχέσης ορίστηκε με βάση τη μέγιστη περίοδο στο φάσμα της εκάστοτε διέγερσης (T_{max}). Επίσης, η ταχύτητα του κραδασμού στο ρευστοποιημένο στρώμα βρέθηκε να ισούται με $0.30-0.50$ της αρχικής [$V_{s_{liq}}=(0.25-0.40)V_{s_0}$].

Υπήρχε όμως και ένα πλήθος διεγέρσεων με μεγαλύτερο εύρος περιόδων, που κατατάχτηκε σε δύο κατηγορίες (Β και Γ), για το οποίο η σεισμική κίνηση έδειχνε να είναι σταθερή ή και να ενισχύεται και για τα 12 μελετηθέντα πάχη άμμου. Για τις διεγέρσεις αυτές δεν ήταν δυνατό να οριστεί κρίσιμο πάχος πέρα του οποίου υπήρχε απομείωση της σεισμικής κίνησης. Ωστόσο, η ενίσχυση που προσέδιδαν δε ξεπέρανε την αντίστοιχη των αρμονικών, ήτοι 2.5.

Σε περαιτέρω διερεύνηση για το πόσο δυσμενής είναι η συμπεριφορά των διεγέρσεων κατηγορίας Β, Γ στην φασματική επιτάχυνση, βρέθηκε ότι η μέγιστο λόγος φασμάτων απόκρισης που μπορεί να δεχτεί μια κατασκευή εξαρτάται τόσο από τους ορόφους της όσο και από το πάχος του εδάφους. Έτσι, ο λόγος φασμάτων απόκρισης βρέθηκε

(α) για μονώροφες κατασκευές και για πάχη $H < 0.15\lambda_{max}$, ίση με 2.5 ενώ για πάχη $H > 0.15\lambda_{max}$ ίση με 4

(β) για πολυώροφες κατασκευές και για πάχη $H < 0.15\lambda_{max}$, περίπου ίση με 1 ενώ για πάχη μεγαλύτερα αυτού ίση με 1.5.

Απομείωση του λόγου φασμάτων απόκρισης πραγματοποιούνταν μόνο για τις διεγέρσεις της κατηγορίας Α και για πάχη μεγαλύτερα από $0.20-0.40$ του μεγαλύτερου μήκους κύματος της διέγερσης [$H > (0.20-0.40)\lambda_{max}$].

Τα ανωτέρω συμπεράσματα αναπαριστώνται σε ποσοτικά διαγράμματα τα οποία δείχνουν τις μεταβολές της εδαφικής απόκρισης και του λόγου φασμάτων απόκρισης σε συνάρτηση με το στρώμα του εδάφους για τις κατηγορίες Α, Β, Γ.

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 present thesis, the behavior of the liquefied layer is being studied under real excitations with the use of numerical analyses. Additionally, the ground response is being quantified in terms of the liquefied layer's thickness.

From previous study on this subject (Theocharis, 2011), based on harmonic conditions of excitations, was found that the layer's thickness is one of the factors that contribute to the reduction of the ground response, especially when it is greater than $H_{cr}=(0.20-0.40)\lambda$. The parameter λ of the above relation is the wave length of the excitation in the liquefied layer and is equal to $V_{s_{liq}}*T_{exc}$, where T_{exc} is the excitation's period and $V_{s_{liq}}$ is the velocity of the shear wave in the liquefied layer. The velocity in the liquefied layer is equal to 0.25-0.40 of the initial shear wave velocity [$V_{s_{liq}}=(0.25-0.40)V_{s_0}$].

The non-uniformity of the real excitations, however, as far as it concerns acceleration and period, as well as their switch between the excitation's pulses seems to be the main factor for the differences between the results for real and for harmonic excitations. Based on this study, Theocharis's criterion was confined to a specific group of excitations with a well defined spectral peak (group A), where λ of the relation was defined according to the maximum period of the excitation's spectra (T_{max}). The shear wave velocity in the liquefied layer, was, also, found to be equal to 0.30-0.50 of the initial velocity ($V_{s_{liq}}=(0.30-0.50)V_{s_0}$).

However, there were some excitations with wider spectral content, which was categorized in groups B and Γ , for which the ground motion seemed to be steady or to be amplified, for all the 12 studied sand thicknesses. For these excitations, it was not possible to define a critical thickness beyond of which, a reduction in ground motion could exist. Fortunately, for these excitations, the amplification was not larger than those of the harmonic, namely 2.5.

Further investigation on how defrimental is this amplification on spectral acceleration, was found that the maximum spectral amplification that a building can take depends on its number of stores and on liquefied layer's thickness. So,

- (a) For one-store buildings and for layer's thickness $H<0.15\lambda_{max}$, amplification takes the value 2.5 while for thickness $H>0.15\lambda_{max}$ takes the value 4.
- (b) For multi-store buildings and for layer's thickness $H<0.15\lambda_{max}$, it's almost equal to 1 while for thickness $H>0.15\lambda_{max}$ is equal to 1.5.

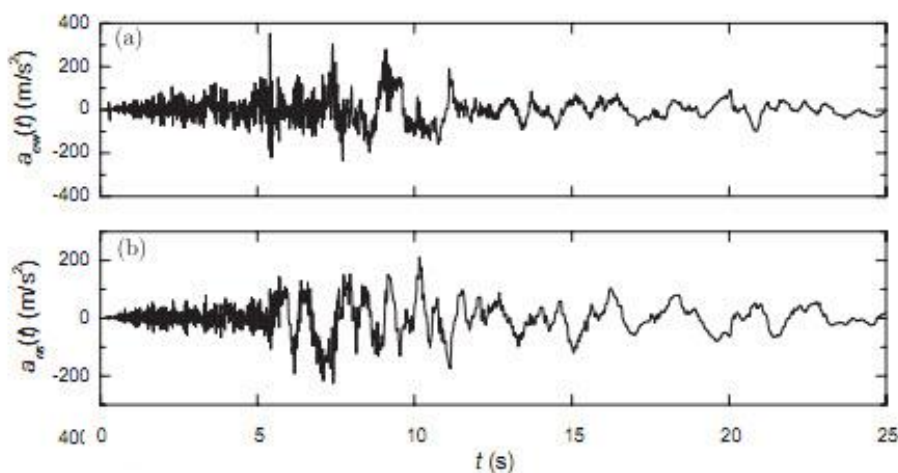
Reduction of spectral acceleration by 50%, seemed to happen only for excitations of group A for layer's thickness greater than 0.20-0.40 of the maximum wave length [$H>(0.20-0.40)\lambda_{max}$].

The above results are being shown in diagrams which represent the variations of seismic response and spectral acceleration, in accordance to the layer's thickness for groups A, B and Γ

1.1 ΣΚΟΠΟΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο σεισμός είναι μια δράση η οποία πλήττει άμεσα την ανωδομή, χάριν στη μετάδοση 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 , τείνει να μηδενισθεί. 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 ανωδομή.

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.

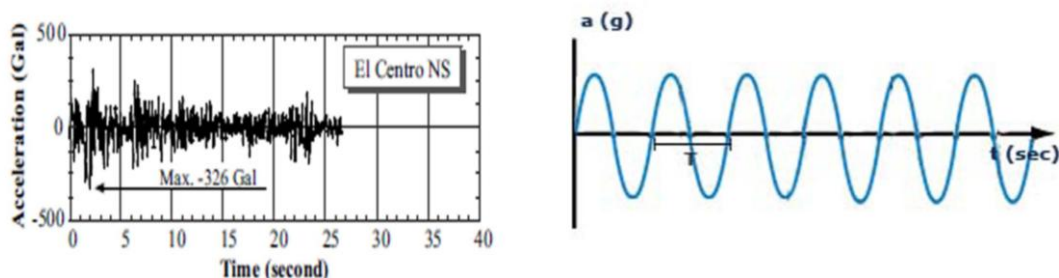


Σχήμα 1.1. Επιταχυνσιογραφήματα με εμφανή την παρουσία της ρευστοποίησης από την περιοχή Amagasaki, μετά το σεισμό του Kobe M6.9 στην Ιαπωνία (1995). Στην πάνω εικόνα παρουσιάζεται η ΔΑ οριζόντια συνιστώσα ενώ κάτω, η ΒΝ οριζόντια συνιστώσα του σεισμού (Zhang, 2009).

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.

Αριθμητική διερεύνηση του συγκεκριμένου θέματος από τον Θεοχάρη (2011), αποδεικνύει 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. Ειδικότερα, όταν το πάχος του ρευστοποιημένου στρώματος είναι 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. Ας σημειωθεί ωστόσο, ότι το συμπέρασμα της εργασίας προέκυψε θεωρώντας ως γενεσιουργό αίτιο ρευστοποίησης, αρμονικές διεγέρσεις. Κατά πόσο όμως μια αρμονική διέγερση μπορεί να αντιπροσωπεύσει επαρκώς την πραγματικότητα;

Στη φύση, οι σεισμικές διεγέρσεις δε χαρακτηρίζονται από ομοιόμορφους, επαναλαμβανόμενους κύκλους συγκεκριμένης διάρκειας και πλάτους. Μια πραγματική διέγερση διαθέτει κύκλους, όπου είναι δυνατόν τον κύκλο επιτάχυνσης 0.4g να διαδέχεται κύκλος επιτάχυνσης 0.1g και πολλές φορές, με περίοδο διαφορετική του προηγούμενου του (π.χ Σχήμα 1.2). Μπορεί αυτή η ανομοιομορφία να προκαλέσει εδαφική συμπεριφορά στη ρευστοποίηση παρόμοια με αυτή της αρμονικής διέγερσης ή συμβάλει στη παραγωγή



Σχήμα 1.2 Σύγκριση πραγματικής (αριστερά) με αρμονική (δεξιά) διέγερση. Η πραγματική διέγερση έχει ληφθεί από το σεισμό του El Centro, Μεξικό, 1940 (Wu & Borja, 2008).

μηχανισμών που επηρεάζουν τη συμπεριφορά του στρώματος και δεν είναι εμφανείς σε αρμονικές συνθήκες ;

Αναλυτικότερα, δεδομένου ότι όλες οι διεγέρσεις δε διαθέτουν το ίδιο πλήθος κύκλων, ούτε την ίδια αλληλουχία καθώς και ότι οι κύκλοι διαφέρουν στο πλάτος, αναμένουμε ότι κάθε διέγερση θα προκαλεί ρευστοποίηση σε διαφορετική χρονική στιγμή. Συνεπώς,

- Πόσο μεγάλη σημασία έχει αν στην χρονική περίοδο μετά τη ρευστοποίηση δρουν στο στρώμα κύκλοι με τη μέγιστη επιτάχυνση της διέγερσης ;
- Κατά πόσο επηρεάζει το διάστημα που η διέγερση δρα στο στρώμα καθώς και με τι αλληλουχία επιταχύνσεων το εντείνει ;
- Κατά πόσο επηρεάζει τη συμπεριφορά του ρευστοποιημένου στρώματος το εύρος των περιόδων που είναι δυνατόν να περιέχει μια διέγερση καθώς και η αλληλουχία τους ;
- Επίσης, αναφορικά με το συμπέρασμα του Θεοχάρη (2011) για το κρίσιμο πάχος του ρευστοποιημένου στρώματος, $H_{cr} = \frac{1}{3} \lambda = \frac{1}{3} V_s T$, (όπου V_s η ταχύτητα του διατμητικού κύματος στο ρευστοποιημένο στρώμα και T η περίοδος της διέγερσης), η T του κριτηρίου, σε ποιά περίοδο της πραγματικής διέγερσης αναφέρεται ;
- Μπορεί μια πραγματική διέγερση να προσομοιωθεί με μια αρμονική για την ικανοποίηση του κριτηρίου και αν ναι, βάση ποιών παραδοχών ;

Εν ολίγοις, μπορούν τα αποτελέσματα του Θεοχάρη (2011) για αρμονικές διεγέρσεις, να επεκταθούν και σε πραγματικές διεγέρσεις ή περιορίζονται σε διεγέρσεις που καλύπτουν συγκεκριμένο σύνολο συνθηκών ;

Στο σημείο αυτό, επικεντρώνεται και η παρούσα εργασία. Συγκεκριμένα, έχει ως στόχο μέσω αριθμητικών αναλύσεων να απαντήσει στα ανωτέρω ερωτήματα, να ερευνησει δηλαδή, την επίδραση της ανομοιομορφίας των πραγματικών διεγέρσεων στον ορισμό του κρίσιμου πάχους, να ορίσει τις παραμέτρους που ασκούν αυτή την επίδραση, καθώς και να αναδιατυπώσει το κριτήριο σε περίπτωση που αυτό θεωρηθεί αναγκαίο. Σε κάθε περίπτωση, η συγκεκριμένη εργασία έρχεται να συνεχίσει και να συμπληρώσει την προηγηθείσα έρευνα, αναπτυσσόμενη σε άξονα παράλληλο με αυτή.

1.2 ΔΟΜΗ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ακολουθεί μια σύντομη ανασκόπηση του τρόπου με τον οποίον είναι δομημένη η εργασία, έτσι ώστε ο αναγνώστης να μπορεί να ακολουθήσει το σκεπτικό αντιμετώπισης του προβλήματος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Σε πρώτο στάδιο, κρίνεται αναγκαίο να οριστεί ποιος είναι ο σκοπός της εργασίας, ποια η ανάγκη για την οποία προβήκαμε στη συγκεκριμένη έρευνα καθώς και το πρακτικό της ενδιαφέρον. Έχοντας ορίσει τον σκοπό, μπορούν να καθοριστούν όλες οι μετέπειτα ενέργειες εφόσον άξονας τους θα είναι η ικανοποίηση του. Όπως αναφέρθηκε και στην ενότητα 1.1, ως στόχος έχει τεθεί η εύρεση εκείνου του πάχους ρευστοποίησης πάνω από το οποίο, η εδαφική κίνηση θα είναι δραστικά απομειωμένη υπό την επιβολή πραγματικών διεγέρσεων καθώς και η ενίσχυση/ απομείωση του σεισμικού κραδασμού παρουσία μιας ρευστοποιημένης στρώσης εδάφους.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Ακολουθεί μια σύντομη ανασκόπηση της διεθνούς βιβλιογραφίας πάνω στο θέμα. Το κεφάλαιο αυτό εξυπηρετεί διπλό σκοπό. Καταρχάς, μας δίνει ένα γνωστικό υπόβαθρο πάνω στο οποίο μπορούμε να βασιστούμε για την παρούσα ανάλυση αλλά ταυτόχρονα μας υποδεικνύει σε ποιό επίπεδο έχει φτάσει η έως τώρα έρευνα στο υπό μελέτη θέμα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Παρουσιάζεται το πρόβλημα σαφώς ορισμένο (εδαφικό προφίλ, μηχανικά χαρακτηριστικά) καθώς και όλα τα δεδομένα και οι παραδοχές στις οποίες βασιστήκαμε για την αριθμητική προσομοίωση του.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Πριν προβούμε στην παραμετρική ανάλυση, γίνεται αναφορά στην δεύτερη σημαντική συνιστώσα του προβλήματος, τη **διέγερση**. Αν και θα μπορούσε το κεφάλαιο αυτό να αποτελέσει τμήμα του Κεφαλαίου 3, στην ενότητα που παρουσιάζει το πρόβλημα, αποφασίζεται να παρουσιαστεί ξεχωριστά, λόγω της έκτασης του. Ας μην λησμονηθεί ότι οι επιβαλλόμενες διεγέρσεις εφόσον ορίζουν την περίοδο T , συνιστούν κύρια παράμετρο της έρευνας. Όπως είχε γίνει νύξη και στην ενότητα 1.1, ο Θεοχάρης (2011) κατέληξε ότι το κρίσιμο πάχος H_{cr} , είναι συνάρτηση του μήκους κύματος ($\lambda = V_s / T$). Απαιτείται, επομένως, λεπτομερής έκθεση των χαρακτηριστικών των διεγέρσεων (περίοδος, διάρκεια, κύκλοι φόρτισης, φασματικό περιεχόμενο) διότι ενδεχομένως, μπορεί να επηρεάσουν τα αποτελέσματα της έρευνας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Μετά την ολοκλήρωση των αριθμητικών αναλύσεων, ακολουθεί η παρουσίαση των αποτελεσμάτων τους. Στο κεφάλαιο επεξηγείται λοιπόν, λεπτομερώς με ποια κριτήρια επιλέχθηκαν τα αποτελέσματα των αναλύσεων που παρουσιάζονται ενώ ενδεικτικά παρατίθενται κάποια εξ αυτών. Επιπροσθέτως, υπολογίζεται η ταχύτητα του σεισμικού κύματος στο ρευστοποιημένο στρώμα ως ένδειξη απομείωσης των μηχανικών χαρακτηριστικών του, λόγω της ρευστοποίησης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Το επόμενο βήμα είναι η **ποσοτικοποίηση της εδαφικής κίνησης** με τον ορισμό ενός συνόλου δεικτών μέσω των οποίων θα υποδηλώνεται το πώς και το πόσο, μεταβάλλονται τα υπό εξέταση μεγέθη με τη μεταβολή του πάχους και της επιβαλλόμενης διέγερσης. Στην προκειμένη περίπτωση τα μεγέθη αυτά είναι η επιφανειακή επιτάχυνση και η φασματική επιτάχυνση ενώ το ενδιαφέρον εστιάζεται στη τιμή αυτών στη κορυφή σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές αυτών στη βάση. Οι δείκτες που χρησιμοποιούνται για την ποσοτικοποίηση είναι ο I_{arias} , όπως και στην εργασία του Θεοχάρη Α. (2011), καθώς και η μέση τιμή της φασματικής ενίσχυσης για μικρές, μεσαίες και μεγάλες περιόδους.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: Οι δείκτες του Κεφαλαίου 6, αναπαριστώνται σε κοινό διάγραμμα για την εξαγωγή συμπερασμάτων. Γίνεται **αξιολόγηση των αποτελεσμάτων των αριθμητικών αναλύσεων** ενώ παράλληλα παρουσιάζονται οι αποκλίσεις από τις αρμονικές διεγέρσεις τόσο ποιοτικά όσο και ποσοτικά .

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: Γίνεται προσπάθεια ερμηνείας της μορφής των δεικτών για αρμονικές και πραγματικές διεγέρσεις.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9: Τέλος, επιγραμματικά, αναφέρονται τα **συμπεράσματα** που προέκυψαν από την εργασία καθώς και προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10: Παρουσιάζεται η **βιβλιογραφία** από την οποία αντλήθηκε τμήμα του θεωρητικού μέρους της εργασίας. Σε αυτή εμπεριέχονται και οι πηγές των όσων σχημάτων και εικόνων χρησιμοποιήθηκαν.

Τέλος, στο Παραρτήμα Α παρουσιάζονται στοιχεία των σεισμικών διεγέρσεων ενώ στα Παραρτήματα Β και Γ περιλαμβάνονται τα λεπτομερή αποτελέσματα των αναλύσεων για ανεξάρτητη επισκόπηση από τον αναγνώστη.

2.1 ΓΕΝΙΚΑ

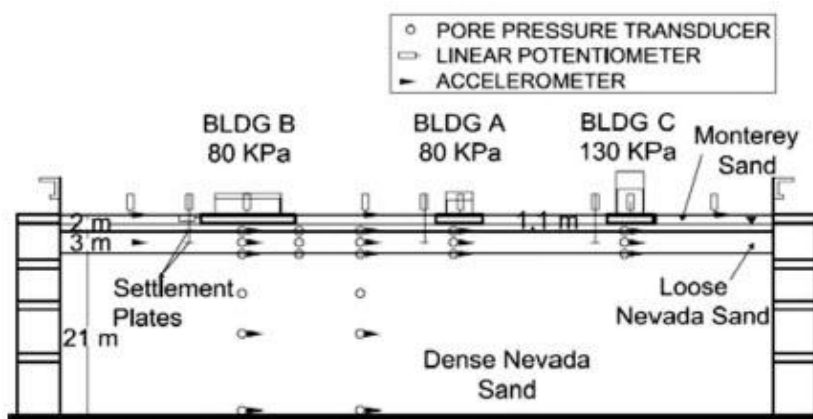
Το κεφάλαιο αυτό είναι αφιερωμένο σε ιστορικά περιστατικά στα οποία δεν είναι εμφανής η απομείωση της επιφανειακής επιτάχυνσης παρά το γεγονός ότι το υποκείμενο αμμώδες υπόστρωμα έχει ρευστοποιηθεί. Η αναφορά σε αντίστοιχα περιστατικά, θεωρείται αναγκαία δεδομένου ότι επιβεβαιώνει αναμφισβήτητα το γεγονός ότι η ρευστοποίηση του εδάφους, δεν οδηγεί de-facto σε δραστική απομείωση της σεισμικής διέγερσης, αλλά μπορεί ακόμη και να την ενισχύει. Γίνεται επιπροσθέτως, εκτενής αναφορά στη διπλωματική του Θεοχάρη, (2011) η οποία είναι πρόδρομη της παρούσης.

2.2 ΙΣΤΟΡΙΚΑ ΠΕΡΙΣΤΑΤΙΚΑ

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.

Εξίρρηση 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 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.

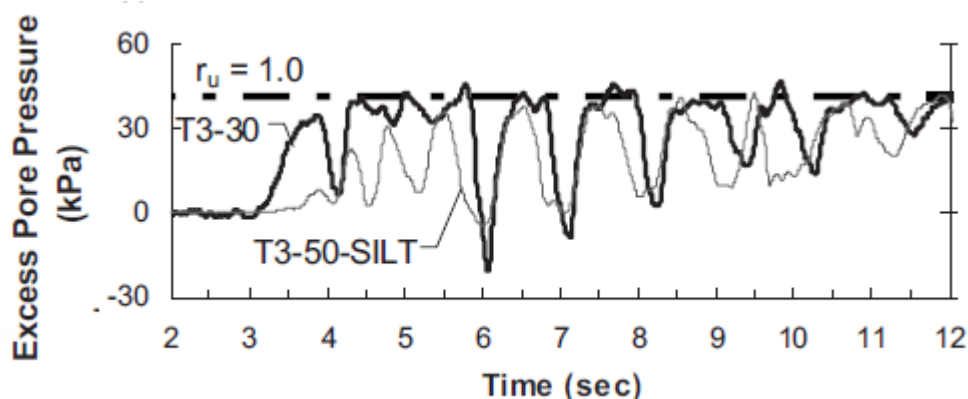


Σχήμα 2.1. Μοντέλο φυγοκεντριστή για το πείραμα T3-30.

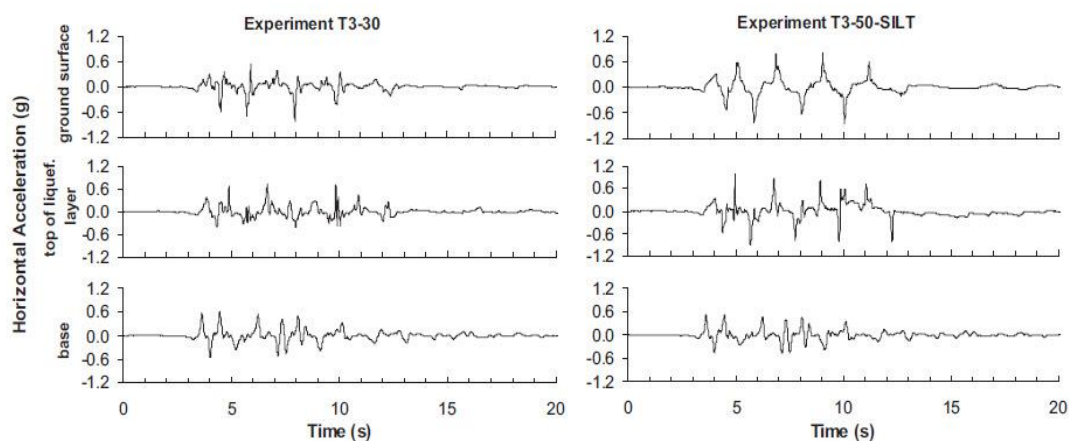
Στο Σχήμα 2.1 παρουσιάζεται το προφίλ του φυγοκεντριστή εφοδιασμένο με τον εξοπλισμό. Με μαύρο βέλος αναπαρίσταντο οι επιταχυνσιογράφοι και με άσπρο κυκλάκι τα πιεζόμετρα. Αρκετός εξοπλισμός έχει αφαιρεθεί από το σχήμα για λόγους ευκρίνειας.

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 υπερπιέσεων πόρων για το περιστατικό με $a_{max}=0.55g$. Με αχνή γραμμή παρουσιάζονται οι υπερπιέσεις για το πείραμα T3-50-SILT και με έντονη γραμμή, οι υπερπιέσεις 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 παραπλήσια 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 $a_{\max}=0.19g$.

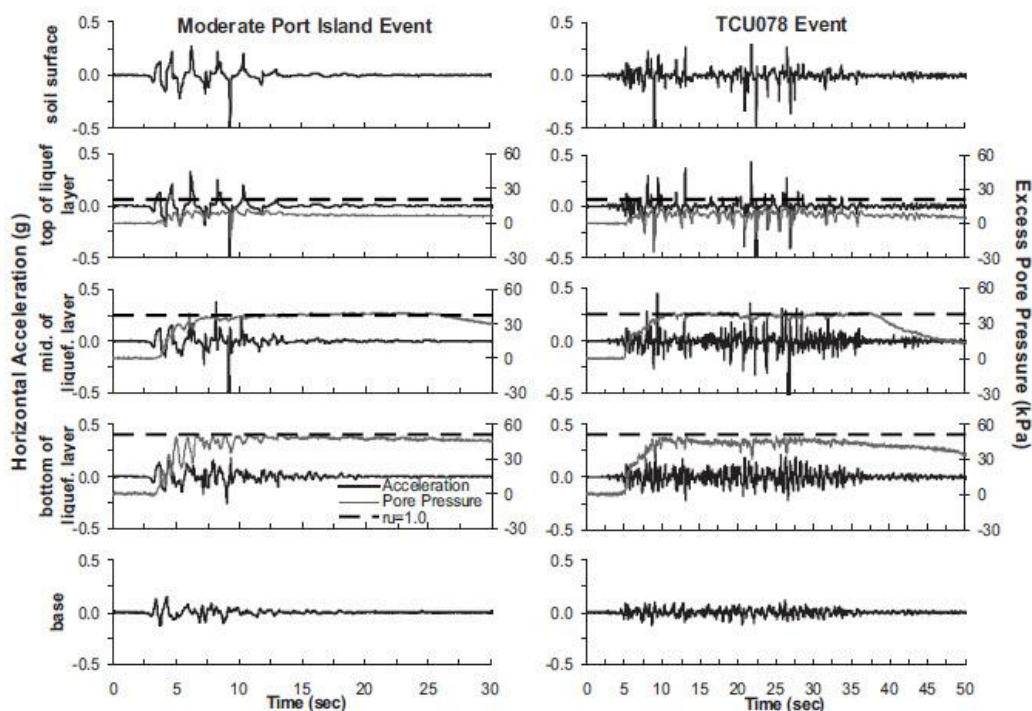
Ακολούθως, (Σχήμα 2.4) παρουσιάζονται οι επιταχύνσεις και οι πιέσεις πόρων σε χαρακτηριστικά σημεία της εδαφικής τομής (βάση μοντέλου, βάση άμμου, μέσο άμμου, κορυφή άμμου, επιφάνεια μοντέλου) για τα δύο περιστατικά.

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. 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 u_v 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., Archuleta R. και Lavalle D. (2005). Οι ερευνητές έθεσαν ως ευρύτερο στόχο να αποδείξουν πως επιφανειακά επιταχυνσιογραφήματα από ισχυρούς σεισμούς (όπως Superstition Hills M6.6, Kushi-Oki 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.

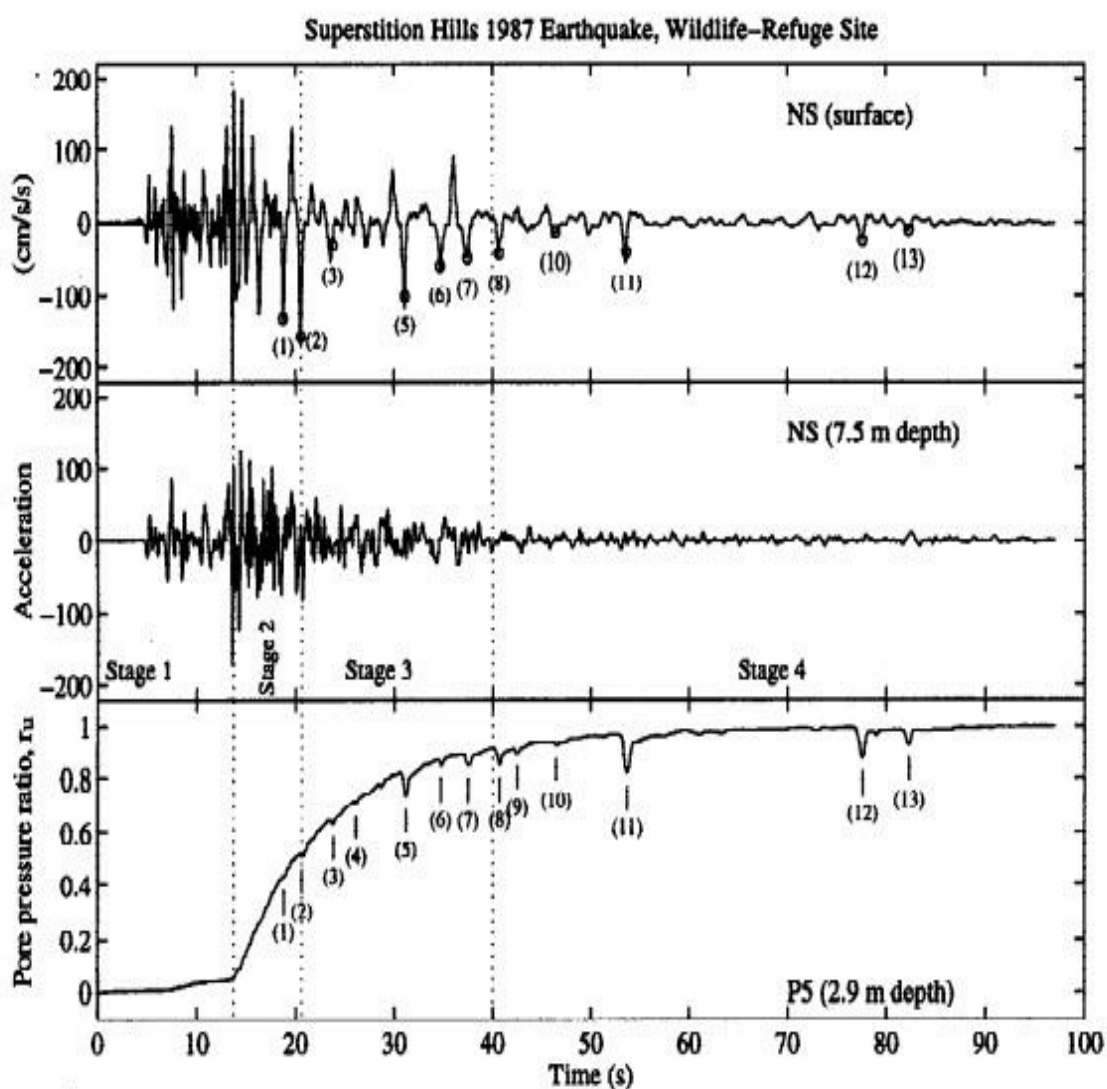
Αναφορικά με τα επιφανειακά επιταχυνσιογραφήματα που προέρχονται από ρευστοποιημένα εδάφη, σημειώνουν την παρατηρούμενη ενίσχυση που παρουσιάζεται σε αυτά, η οποία αντιτίθεται στην αναμενόμενη απομείωση. Ωστόσο, την αποδίδουν στη διαστολική συμπεριφορά της άμμου η οποία μπορεί να ανακτά την διατμητική 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, παραταύτα, ότι οι επιταχύνσεις αυτές οφείλονται σε τοπικά χαρακτηριστικά και όχι στη διέγερση.



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 ($a_{max}=0.13g$).

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 λύ, στα ακόλουθα 4.3 m από χαλαρή ιλυώδη άμμο και τέλος από σκληρή άργιλο. Η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα 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 υπερπίεσεων των πόρων στο βάθος των 2.9m (Elgamal & Zeghal, 1996).

2.3 ΠΡΟΗΓΗΘΕΙΣΑ ΕΡΕΥΝΑ

Από αριθμητική ανάλυση του Θεοχάρη (2011) πάνω στο ίδιο θέμα, 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

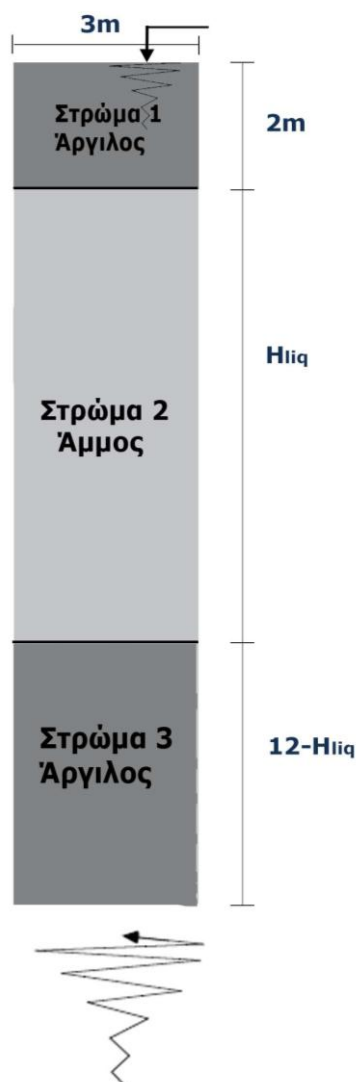
$$I_{\alpha} = \frac{\pi}{2g} \int_0^{\infty} a(t)^2 dt \quad (2.2)$$

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 70% 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 .

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 του προβλήματος.



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

- Η δεσπόζουσα περίοδος της διέγερσης, T
- Η σχετική πυκνότητα του στρώματος της άμμου, Dr και
- Η 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 Dr ενσωματώθηκαν στο τελικό αποτέλεσμα μέσω του μήκους κύματος του ρευστοποιημένου στρώματος, λ_{liq} (2.2).

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

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

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. Προέκυψε ως συνάρτηση της αρχικής ταχύτητας διάδοσης του κύματος $V_{so}=G_{max}/\rho$ και μάλιστα ίση με

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

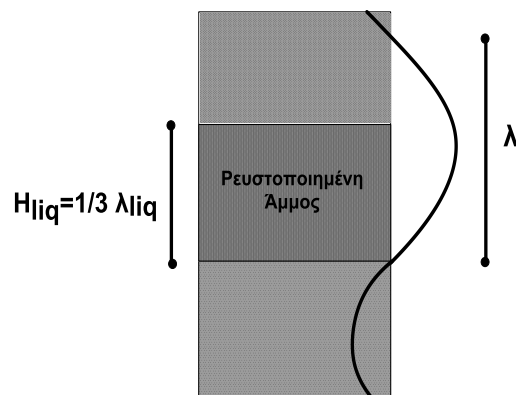
Το συμπέρασμα έρχεται σε καλή συμφωνία με τη σχέση

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

όπου για τιμές του $r_u=0.99$ (ρευστοποίηση του στρώματος) λαμβάνει την τιμή 0.34.

Τελικώς, διατυπώθηκε, ότι η ρευστοποίηση του αμμώδους 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

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



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

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 K 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 $V_{s_{liq}} = \frac{1}{3} V_{s_0}$, ενώ στα αργιλικά στρώματα δόθηκε μια συνήθη 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 ($H_1/\lambda_1, V_{s1}$).

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

k κυματικός αριθμός $k=2\pi/\lambda=2\pi/V_s T$

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

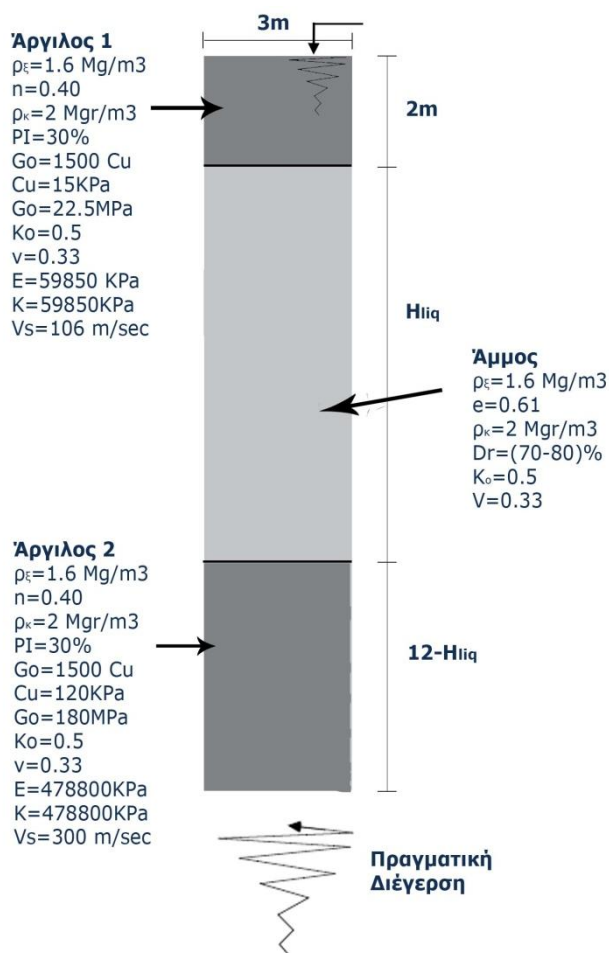
V_{s2} διατμητική ταχύτητα κύματος στο στρώμα άμμου

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

3.1. ΓΕΝΙΚΑ

Το κεφάλαιο αυτό διαχωρίζεται σε δύο, κυρίως μέρη. Στο πρώτο μέρος (3.1), παρουσιάζεται το πρόβλημα, με την περιγραφή της γεωμετρίας, των μηχανικών χαρακτηριστικών του εδαφικού προφίλ καθώς και των επιβαλλόμενων διεγέρσεων. Στο δεύτερο μέρος (3.2) γίνεται λόγος για το πώς το φυσικό πρόβλημα το οποίο παρουσιάστηκε στην ενότητα 3.1 θα μορφωθεί, προκειμένου εν συνεχεία να επιλυθεί μέσω της αριθμητικής ανάλυσης. Θα παρουσιαστεί τόσο ο κώδικας μέσω του οποίου θα γίνει η προσομοίωση, καθώς και οι παραδοχές που θεωρήθηκαν για αυτή.

3.2. ΤΟ ΦΥΣΙΚΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ



3.2.1 ΕΔΑΦΙΚΗ ΤΟΜΗ

Το εδαφικό προφίλ το οποίο θα χρησιμοποιηθεί στη παρούσα διπλωματική εργασία είναι το ίδιο με αυτό που χρησιμοποιήθηκε στην εργασία του Θεοχάρη Α. (2011), προκειμένου να είναι συγκρίσιμα τα αποτελέσματα της ανάλυσης.

Παρατίθεται το εδαφικό προφίλ της ενότητας 2.1 εφοδιασμένο με τα μηχανικά χαρακτηριστικά των στρωμάτων για ευκολία του αναγνώστη (Σχήμα 3.1).

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 (εκτός και αν διερευνηθεί παραμετρικά) ίσο με 2m, ενώ το πάχος του κάτω, μεταβάλλεται αναλόγως της

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

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_x , κορεσμένη πυκνότητα $\rho_{κορ}$, συντελεστή ουδέτερης ώθησης γαιών K_0 , λόγο Poisson ν) και διαφορετικά μηχανικά χαρακτηριστικά (μέτρο ελαστικότητας E , μέτρο ογκομετρικής συμπίεσότητας K , αστράγγιστη διατμητική αντοχή C_u , μέτρο δυσστησίας 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.

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

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 δυσστησίας λαμβάνει τιμές ίσες με $G_0=22.50\text{ MPa}$, $G_0=180\text{ MPa}$ για την υποκείμενη και την υπερκείμενη 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 αντίστοιχα με τις τιμές των μέτρων δυσστησίας 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_x και η κορεσμένη ρ_k πυκνότητα, ο συντελεστής ουδέτερης ώθησης K_0 και ο λόγος του Poisson ν , είναι οι ίδιοι όπως και στα αργιλικά στρώματα, λαμβάνοντας τιμές $\rho_x=1.60\text{ Mg/m}^3$, $\rho_k=2.00\text{ Mg/m}^3$, $K_0=0.50$ και $\nu=0.33$, αντίστοιχα.

Αξίζει να σημειωθεί, ότι η εν λόγω άμμος έχει τα χαρακτηριστικά της άμμου Nevada, της άμμου δηλαδή, που χρησιμοποιείται σε πειράματα φυγοκεντριστή και επίσης έχει χρησιμοποιηθεί για τη βαθμονόμηση του κατασταστικού προσομοιώματος των αναλύσεων. Τα όρια του δείκτη πόρων e της άμμου Nevada κυμαίνονται από $e_{\max}=0.88$ έως $e_{\min}=0.51$ (Παπαδημητρίου, 1999) με αντίστοιχη διακύμανση της σχετικής πυκνότητας Dr .

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 θα αποτελέσουν τα χαρακτηριστικά της βασικής ανάλυσης. Οι τιμές των παραμέτρων που ορίστηκαν ανωτέρω θα παραμένουν σταθερές ενώ θα επέρχεται μεταβολή στο πάχος της άμμου.

3.2.2 ΣΕΙΣΜΙΚΕΣ ΔΙΕΓΕΡΣΕΙΣ

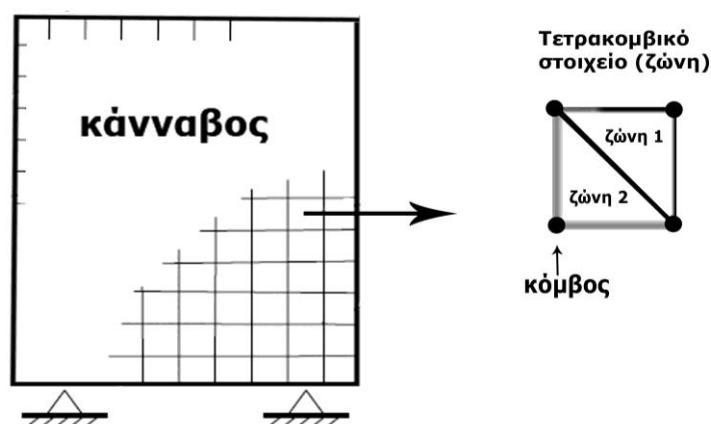
Στη βάση του προσομοιώματος πρόκειται να ασκηθεί ένα σύνολο χαρακτηριστικών πραγματικών διεγέρσεων προκειμένου να αξιολογηθεί η συμπεριφορά της ρευστοποιημένης άμμου. Οι επιλεγθείσες διεγέρσεις με τα χαρακτηριστικά τους (περίοδος, διάρκεια, κύκλοι φόρτισης, φασματικό περιεχόμενο) θα παρουσιαστούν εκτενώς στο επόμενο κεφάλαιο (Κεφάλαιο 4).

3.3 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗΣ ΠΡΟΣΟΜΙΩΣΗΣ

3.3.1 ΚΩΔΙΚΑΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΔΙΑΦΟΡΩΝ FLAC

Η εντόνως μη γραμμική συμπεριφορά της άμμου στο ανωτέρω δυναμικό πρόβλημα απαιτούσε τη χρήση λογισμικού το οποίο θα διέθετε δύο κυρίως χαρακτηριστικά. Κατά πρώτον, θα μπορούσε να αναπαραστήσει επαρκώς τη συμπεριφορά της άμμου με τη διάθεση προηγμένων καταστατικών μοντέλων και κατά δεύτερον, θα μπορούσε να αντιμετωπίσει το πρόβλημα με το ελάχιστο δυνατό υπολογιστικό κόστος.

Ο κώδικας πεπερασμένων διαφορών FLAC 5.0 κάλυπτε τις δύο αυτές απαιτήσεις. Ο κώδικας παρέχει τη δυνατότητα εισαγωγής σε αυτόν, με τη μορφή .dll, καταστατικών μοντέλων γραμμένων από τον χρήστη (UDM, User Defined Model). Δυνατότητα αρκετά χρήσιμη στην παρούσα περίπτωση, εφόσον η συμπεριφορά της άμμου δεν μπορεί να περιγραφεί από τα



Σχήμα 3.2. Σχηματική αναπαράσταση του καννάβου, των ζωνών, των υποζωνών και των κόμβων στο FLAC.

συνήθη καταστατικά μοντέλα όπως το Mohr-Coulomb.

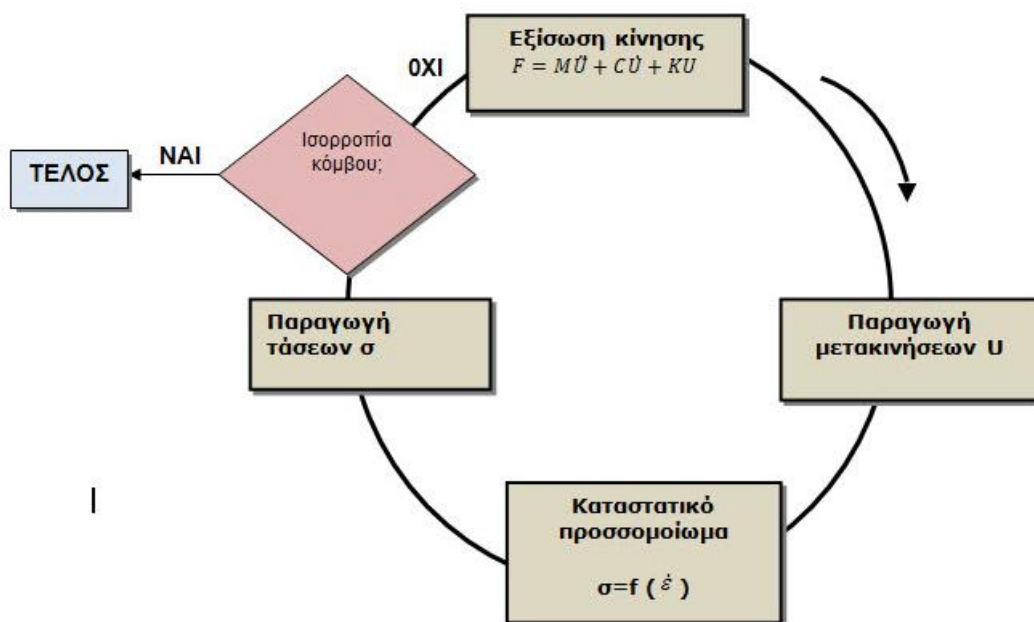
Ακόμη, η χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων διαφορών από τον κώδικα πλεονεκτεί σε προβλήματα που περιλαμβάνουν πολύπλοκους καταστατικούς νόμους σε σχέση με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Ο κύριος λόγος είναι ότι οι τιμές της απόκρισης του κάθε βήματος υπολογίζονται μόνο με βάση τιμές μεγεθών από το προηγούμενο βήμα. Κατά αυτό τον τρόπο, δεν απαιτούνται επαναλήψεις σε κάθε κόμβο κατά τον υπολογισμό των τάσεων, ακόμη και όταν ο καταστατικός νόμος είναι εντόνως μη γραμμικός, όπως είναι σε προβλήματα ρευστοποίησης. Η ευστάθεια της, ωστόσο, εξαρτάται άμεσα από το μέγεθος

του χρονικού βήματος το οποίο οφείλει να είναι μικρότερο από τη μέγιστη ταχύτητα διάδοσης της διέγερσης, μεταξύ των ζωνών.

Με βάση τον κώδικα, το μοντέλο διακριτοποιείται σε ένα πλήθος πεπερασμένων στοιχείων ή ζωνών σε καθένα από τα οποία εφαρμόζεται το σύνολο των διαφορικών εξισώσεων που διέπει τη φυσική του προβλήματος. Κάθε στοιχείο είναι τετρακομβικό και υποδιαιρείται σε δύο υποζώνες (Σχήμα 3.2). Λόγω της χρήσης των πεπερασμένων διαφορών, γίνεται αναγωγή των παραγώγων των διαφορικών εξισώσεων ώστε να μην αναφέρονται πλέον σε απειροστή μεταβολή του εκάστοτε μεγέθους αλλά σε πεπερασμένη.

Μια αδρή αναπαράσταση του τρόπου λειτουργίας του FLAC παρατίθεται στο Σχήμα 3.3. Οι συνοριακές συνθήκες του προβλήματος εισάγονται στο πρόβλημα με τη μορφή μετακινήσεων U (ή ταχυτήτων \dot{U} ή επιταχύνσεων \ddot{U}) ή με τη μορφή δυνάμεων F οι οποίες ασκούνται σε κόμβους του καννάβου.

Στην περίπτωση επιβολής δυνάμεων, 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 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, ($\sum F \neq 0$) τότε η μη ισορροπούσα δύναμη παράγει νέες επιταχύνσεις και ο κύκλος επαναλαμβάνεται.

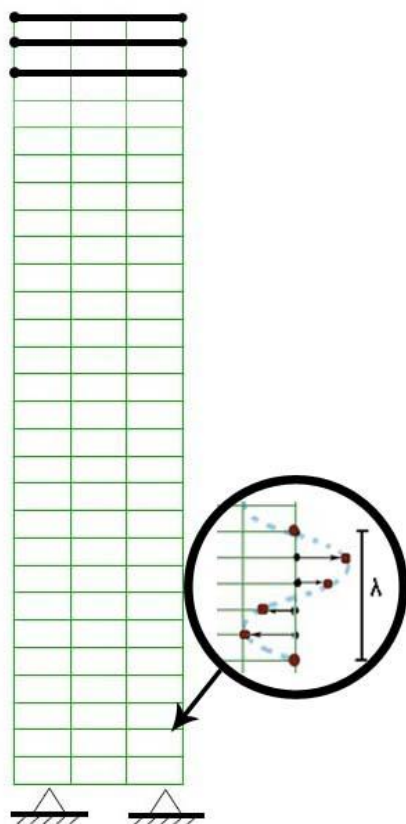


Σχήμα 3.3 Αλγόριθμος επίτευξης τελικής ισορροπίας στο FLAC. Οι συμβολισμοί M, C, K εκφράζουν τα μητρώα μάζας, απόσβεσης και δυσκαμψίας αντίστοιχα. Τα F, U εκφράζουν τα μητρώα δύναμης και μετακίνησης.

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, ο κύκλος επαναλαμβάνεται ανά χρονικό βήμα (timestep) Δt , το οποίο είναι τόσο μικρό ώστε η πληροφορία (u, σ) να μην κινείται από τη μια ζώνη στην άλλη, αργότερα από τη ταχύτητα διάδοσης της διέγερσης.

3.3.2 ΚΑΝΝΑΒΟΣ

Το εδαφικό προφίλ διαφοροποιήθηκε δημιουργώντας κάνναβο με στοιχεία διαστάσεων $0.5m \times 1.0m$, με τελικό αποτέλεσμα, ο κάνναβος να διαθέτει 28 στοιχεία στη κατακόρυφη διάσταση και 3 στοιχεία στην οριζόντιο διάσταση όπως και στην εργασία του Θεοχάρη, Α. (2011). Το διακριτοποιημένο εδαφικό προφίλ παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.4.



Σχήμα 3.4. Διακριτοποίηση καννάβου σε τετρακομβικά στοιχεία διαστάσεων $0.50 m \times 1.00m$. 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 κύματος λ μέσω της οριζόντιας μετατόπισης των κόμβων.

Στόχος της διακριτοποίησης είναι ο κάνναβος να είναι τόσο πυκνός ώστε να μην έχουμε απώλεια πληροφορίας από την ανάλυση (δεδομένου ότι τα αποτελέσματα, τάσεις και παραμόρφώσεις, λαμβάνονται στους κόμβους του καννάβου) αλλά και τόσο αραιός ώστε να μειώνουμε τον υπολογιστικό χρόνο.

Δεδομένου ότι μια από τις κρισιμότερους παραμέτρους της ανάλυσης είναι το μήκος κύματος, λ , προκύπτει ότι ο κάνναβος πρέπει να είναι τόσο πυκνός καθ'ύψος, ώστε ακόμα και το μικρότερο μήκος κύματος να είναι εμφανές με το τέλος της ανάλυσης, μέσω των οριζόντιων μετατοπίσεων των κόμβων.

Γνωρίζοντας ότι οι ταχύτητες σε ένα ρευστοποιημένο στρώμα είναι της τάξης $V_{s_{liq}}=50m/sec$ και η ελάχιστη περίοδος της ανάλυσης είναι $T_{min}=0.10 sec$ προκύπτει το ελάχιστο μήκος κύματος ίσο με $\lambda_{min}=V_{s_{liq}} \cdot T_{min}=5.00m$.

Από το εμπειρικό κριτήριο, ότι κάθε ζώνη πρέπει να έχει ύψος ίσο με $\lambda/10$ προκύπτει ότι ζώνη με ύψος $0.50m$ είναι επαρκής ώστε τα αποτελέσματα της ανάλυσης να είναι αντιπροσωπευτικά (Σχήμα 3.4).

3.3.3 ΣΥΝΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

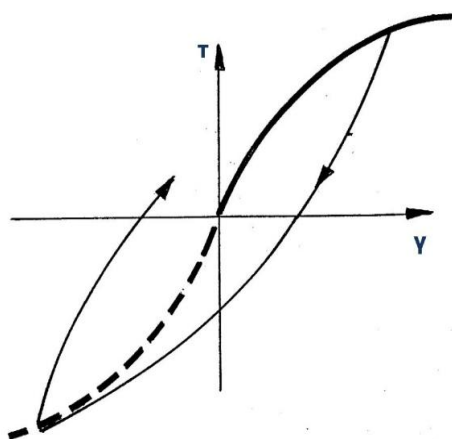
Οι συνοριακές συνθήκες που έχουν επιλεγεί για το αριθμητικό προσομοίωμα είναι άρθρωση στη βάση και οριζόντια ιδεατά καλώδια καθ'ύψος του καννάβου. Τα ιδεατά καλώδια δεσμεύουν τους ακριανούς κόμβους ανά $0.50m$ ύψους ώστε

να έχουν κοινή οριζόντια και κατακόρυφη μετακίνηση (Σχήμα 3.4) 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 κύματα στη βάση του καννάβου, υφίστανται πλήρη ανάκλαση, χωρίς να διαχωρίζονται σε διερχόμενα και ανακλώμενα.

3.3.4 ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ

Όπως παρουσιάστηκε και στην ενότητα 3.2.1 απαιτείται ο ορισμός ενός καταστατικού προσομοιώματος για τον υπολογισμό των τάσεων σε κάθε κύκλο του κώδικα. Η επιλογή του προσομοιώματος έγινε με βάση την επιδιωκόμενη αντίδραση του κάθε στρώματος στη διέγερση.



Εικόνα 3.5. Ελαστικό-υστερητική μη γραμμική συμπεριφορά εδάφους σε ανακυκλική φόρτιση με βάση το μοντέλο Ramberg-osgood. Είναι εμφανής η μείωση του τέμνον μέτρου δυσκαμψίας $G=\tau/\gamma$, με την αύξηση της διατμητικής παραμόρφωσης γ .

συμπεριφέρεται ελαστικά όχι όμως και γραμμικά. Χρησιμοποιείται λοιπόν, το μοντέλο Ramberg-osgood το οποίο μπορεί να αποδώσει επαρκώς την υστερητική της συμπεριφορά στις μικρές παραμορφώσεις (Σχήμα 3.5). 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 αργίλου, 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 είναι το μοντέλο το οποίο έχει αναπτυχθεί από τους Μπουκοβάλας, Παπαδημητρίου και Ανδριανόπουλος (2006) με στόχο να προσομοιάσει τη συμπεριφορά αμμώδων, κορεσμένων εδαφών υπό ανακυκλική φόρτιση.

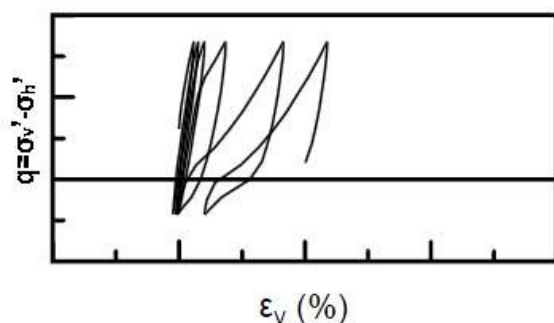
Ποιοτικά, το καταστατικό προσομοίωμα έχει αναπτυχθεί βασισμένο στη θεωρία κρίσιμης κατάστασης (Roscoe, Schofield & Wroth 1958) που αποτελεί μια πιο προχωρημένη αντίληψη στο τρόπο συμπεριφοράς των εδαφών κατά τη φόρτιση τους. Βάση της θεωρίας, η αστοχία εξαρτάται από την απόσταση του υπό μελέτη σημείου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

Αν και στα τρία στρώματα, αναπτύσσονται υπερπίεσεις πόρων ΔU (μείωση ενεργών τάσεων σ_v'), η υποκείμενη άργιλος έχει υψηλή αντοχή ώστε να μην οδηγείται σε αστοχία τόσο γρήγορα όσο η άμμος, όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 3.2.1. Στην υπερκείμενη άργιλο πάλι, η οποία έχει μεγάλες πιθανότητες αστοχίας, δεν πρόκειται οι κόκκοι της να χάσουν τη μεταξύ τους επαφή, ώστε να υποστεί ρευστοποίηση. Και αυτό, διότι, η αργιλική δομή δεν επιτρέπει πλήρη αποχωρισμό αυτών.

Με το σκεπτικό ότι, κατά τη διέγερση, η κάτω άργιλος, υφίσταται μικρότερες παραμορφώσεις σε σχέση με την άμμο, λόγω υψηλής αντοχής, θεωρούμε ότι σε μεγάλο βαθμό

επιφάνεια (Critical State Line) η οποία υποδηλώνεται μέσω της παραμέτρου ψ (state parameter).

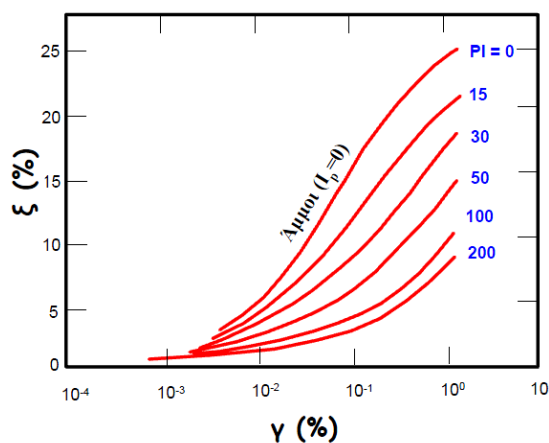
Οι παραμορφώσεις στο μοντέλο ισούνται με το άθροισμα μιας ελαστικής και μιας πλαστικής συνιστώσας ($\epsilon = \epsilon_{el} + \epsilon_{pl}$). Η ελαστική συνιστώσα εκφράζει τη μη γραμμική, υστερητική συμπεριφορά του εδάφους, στις μικρές παραμορφώσεις ενώ η πλαστική συνιστώσα την παραμένουσα παραμόρφωση μετά την είσοδο του στοιχείου στην πλαστική περιοχή.



Στο Σχήμα 3.6 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.

Σχήμα 3.6. Ποιοτική αναπαράσταση της σχέσης τάσεων παραμορφώσεων σε τριαξονική δοκιμή ρευστοποίησης για την άμμο Nevada με βάση το μοντέλο των Μπουκοβάλας, Παπαδημητρίου και Ανδριανόπουλος (2006).

3.3.5 ΥΣΤΕΡΗΤΙΚΗ ΑΠΟΣΒΕΣΗ



Σχήμα 3.7 Πειραματική καμπύλη $\xi(\%)$ - $\gamma(\%)$ από τους Vucetic & Dobry (1991). Για παραμορφώσεις μικρότερες του 10^{-5} , η τιμή του ξ είναι 2%.

Τα καταστατικά προσομοιώματα που χρησιμοποιήθηκαν στις αναλύσεις προβλέπουν μηδενική απόσβεση ($\xi=0$) για $\gamma=0$, που δεν ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα. Για την πλήρη απόδοση της συμπεριφοράς της άμμου, απαιτείται η προσθήκη της απόσβεσης του εδάφους η οποία είναι υστερητικής φύσης και οφείλεται στην αναδιάταξη των κόκκων κατά τη διάρκεια της κίνησης.

Στην ανάλυση θα χρησιμοποιηθεί απόσβεση τύπου local damping και για τα τρία στρώματα. Η απόσβεση τύπου local damping, εκφράζει την κατανάλωση ενέργειας ανά κόμβο του καννάβου μέσω της δημιουργίας δύναμης με φορά αντίθετη της φοράς του διανύσματος της ταχύτητας στον

κόμβο. Στον κώδικα, ορίζεται μέσω της σταθεράς $AI = \xi_{min} * \pi$ όπου το ξ_{min} αντιπροσωπεύει το λόγο απόσβεσης στις μικρές παραμορφώσεις ($\gamma < 10^{-5}$).

Ο αρχικός λόγος απόσβεσης ξ_{min} είναι περίπου ίσος με 2% όπως φαίνεται και στις πειραματικές καμπύλες ξ, γ του Σχήματος 3.7 για παραμορφώσεις $\gamma < 10^{-5}$.

4.1. ΓΕΝΙΚΑ

Το κεφάλαιο αυτό είναι αφιερωμένο στις πραγματικές διεγέρσεις που θα επιβληθούν στην βάση του καννάβου για την πραγματοποίηση των αριθμητικών αναλύσεων σεισμικής απόκρισης του ρευστοποιημένου εδάφους. Αρχικά εξηγείται η φιλοσοφία επιλογής τους ώστε να εξυπηρετούν τους σκοπούς της εργασίας. Παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά τους, και η επεξεργασία στην οποία επιβλήθηκαν, πριν εισαχθούν τελικώς, στον κώδικα των αριθμητικών αναλύσεων.

4.2. ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΩΝ ΔΙΕΓΕΡΣΕΩΝ

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

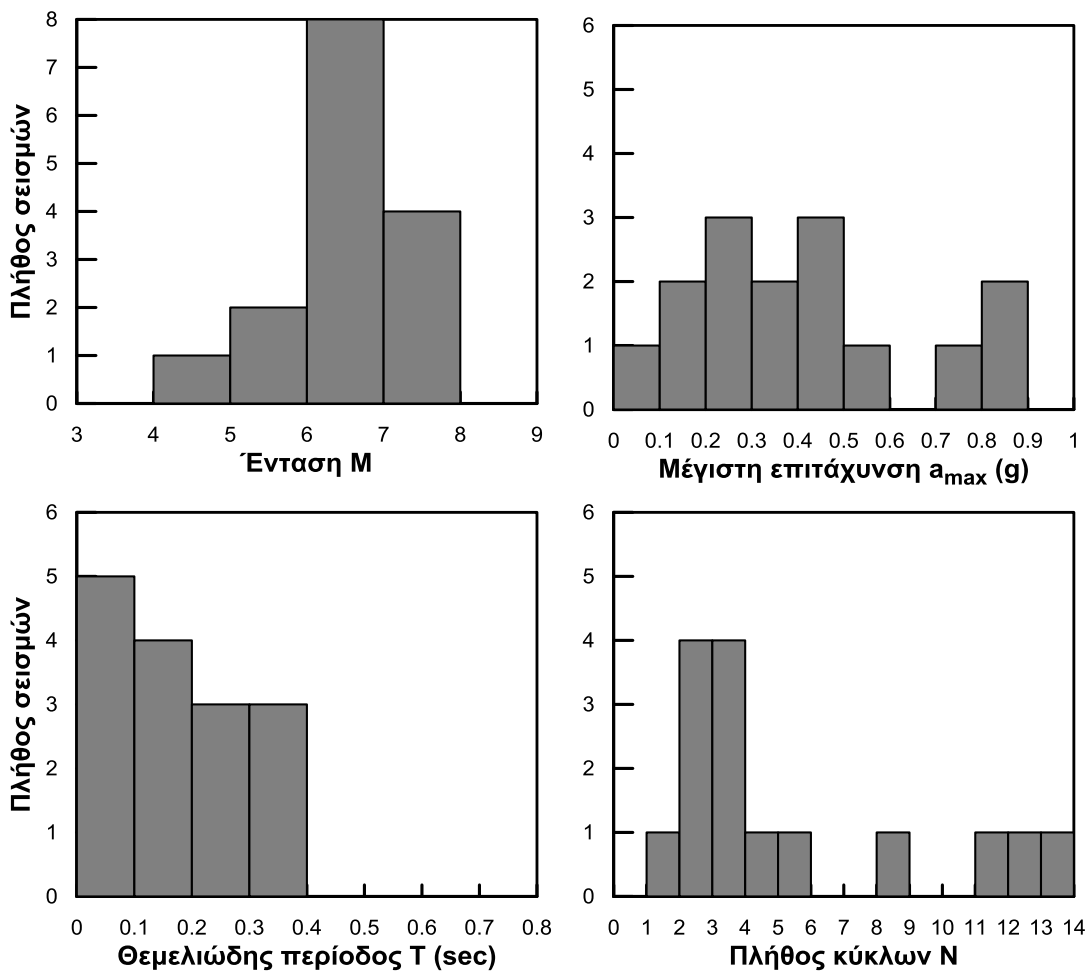
Συνολικά, πρόκειται για 15 διεγέρσεις που προέρχονται από περιστατικά εντός και εκτός ελλαδικού χώρου. Χαρακτηρίζονται από εύρος περιόδου T από 0.10 έως 0.60 sec, έντασης M από 4.9 έως 7.9, μέγιστης επιτάχυνσης a_{max} από 0.10g έως 0.87g και πλήθος σημαντικών κύκλων N από 2 έως 11.50.

Διευκρινίζεται ότι οι «σημαντικοί κύκλοι» κάθε διεγερσης εκτιμήθηκαν με το ακόλουθο σκεπτικό. 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 διεγερσης 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 4.1. παρουσιάζονται οι σεισμοί με τα ανωτέρω στοιχεία και στο Σχήμα 4.1. η κατανομή των σεισμών βάση των στοιχείων αυτών.

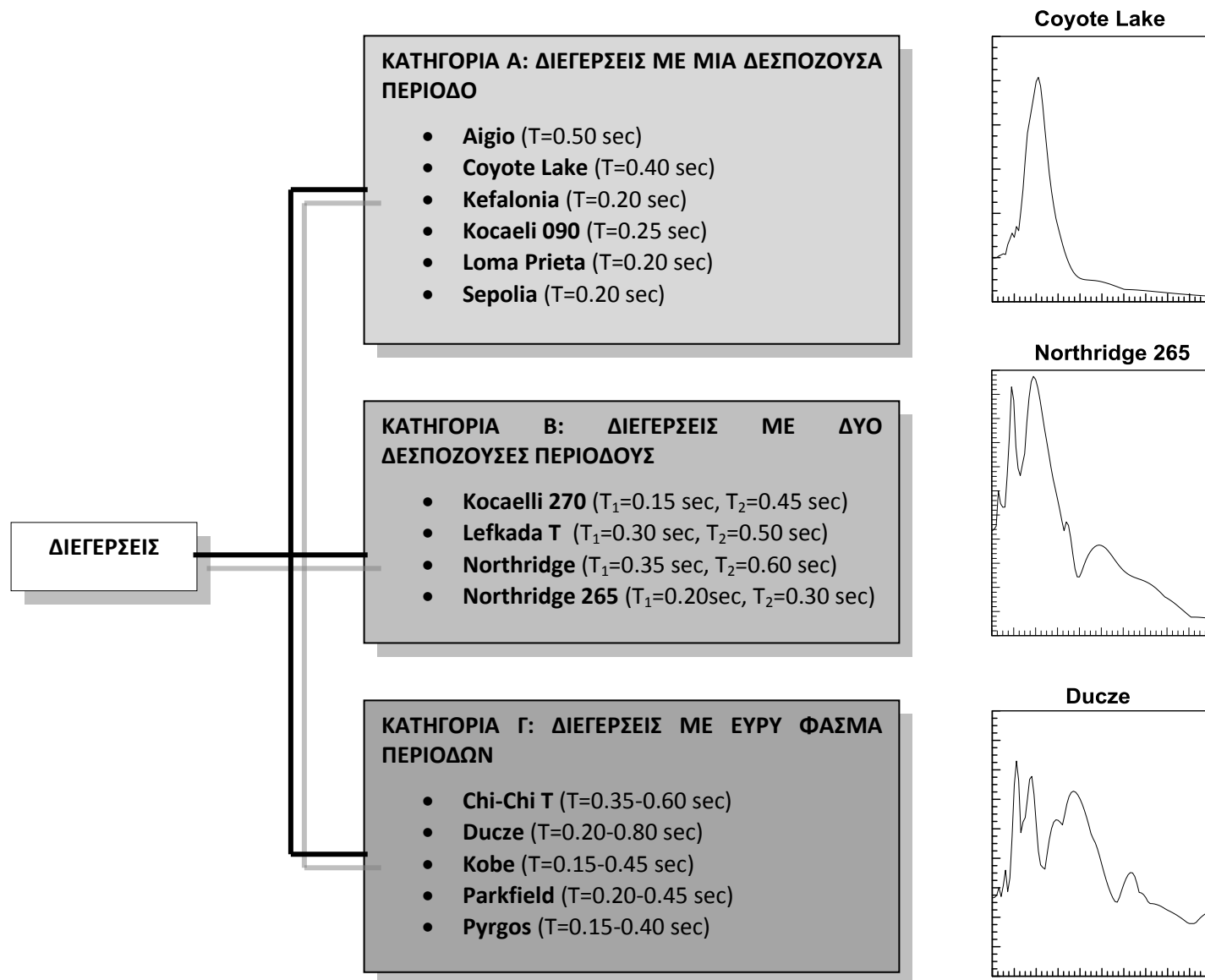
Διέγερση	Ένταση M	Μέγιστη Επιτάχυνση a_{\max} (g)	Περίοδος T (sec)	Σημαντικοί κύκλοι N
Aigio (1995)	6.2	0.39	0.50	2.00
Chi-Chi (1999)	6.8	0.77	0.35	3.00
Coyote Lake (1979)	5.7	0.10	0.40	4.50
Ducze (1999)	7.9	0.54	0.20	3.50
Kefalonia (1983)	6.2	0.24	0.20	9.00
Kobe (1995)	7.2	0.82	0.15	3.50
Kocaeli 090 (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

Πίνακας 4.1. Διεγέρσεις αναλύσεων.



Σχήμα 4.1. Κατανομή των διεγέρσεων με βάση την ένταση τους M , τη μέγιστη επιτάχυνση a_{max} τη θεμελιώδη περίοδο T και το πλήθος των κύκλων N .

Ας σημειωθεί, ότι η προσοχή μας επικεντρώθηκε στο φασματικό περιεχόμενο των σεισμών αυτών. 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. Ο προβληματισμός μας λοιπόν, στάθηκε σε διεγέρσεις που με βάση το φάσμα τους, παρουσιάζουν περισσότερες της μιας, χαρακτηριστικές περιόδους T . Με βάση το συγκεκριμένο κριτήριο, ακολούθησε η κατάταξη των διεγέρσεων σε τρεις κατηγορίες.



Σχήμα 4.2 Κατηγοριοποίηση σεισμικών διεγέρσεων με βάση το πλήθος των χαρακτηριστικών τους περιόδων.

4.3 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΙΕΓΕΡΣΕΩΝ

Παρατηρώντας τις αρμονικές διεγέρσεις που χρησιμοποιήθηκαν στη διπλωματική εργασία του 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 στα πρώτα 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, ως συνυπολογιστεί πως ο χρόνος αυτός παρουσιάζονταν σε μεγάλα πάχη άμμου, δικαιολογημένα βέβαια, εφόσον ο παλμός που προκαλούσε τη ρευστοποίηση του μέσου, διέσχιζε μεγαλύτερη απόσταση ($t=\frac{H}{V_{sliq}}$).

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.

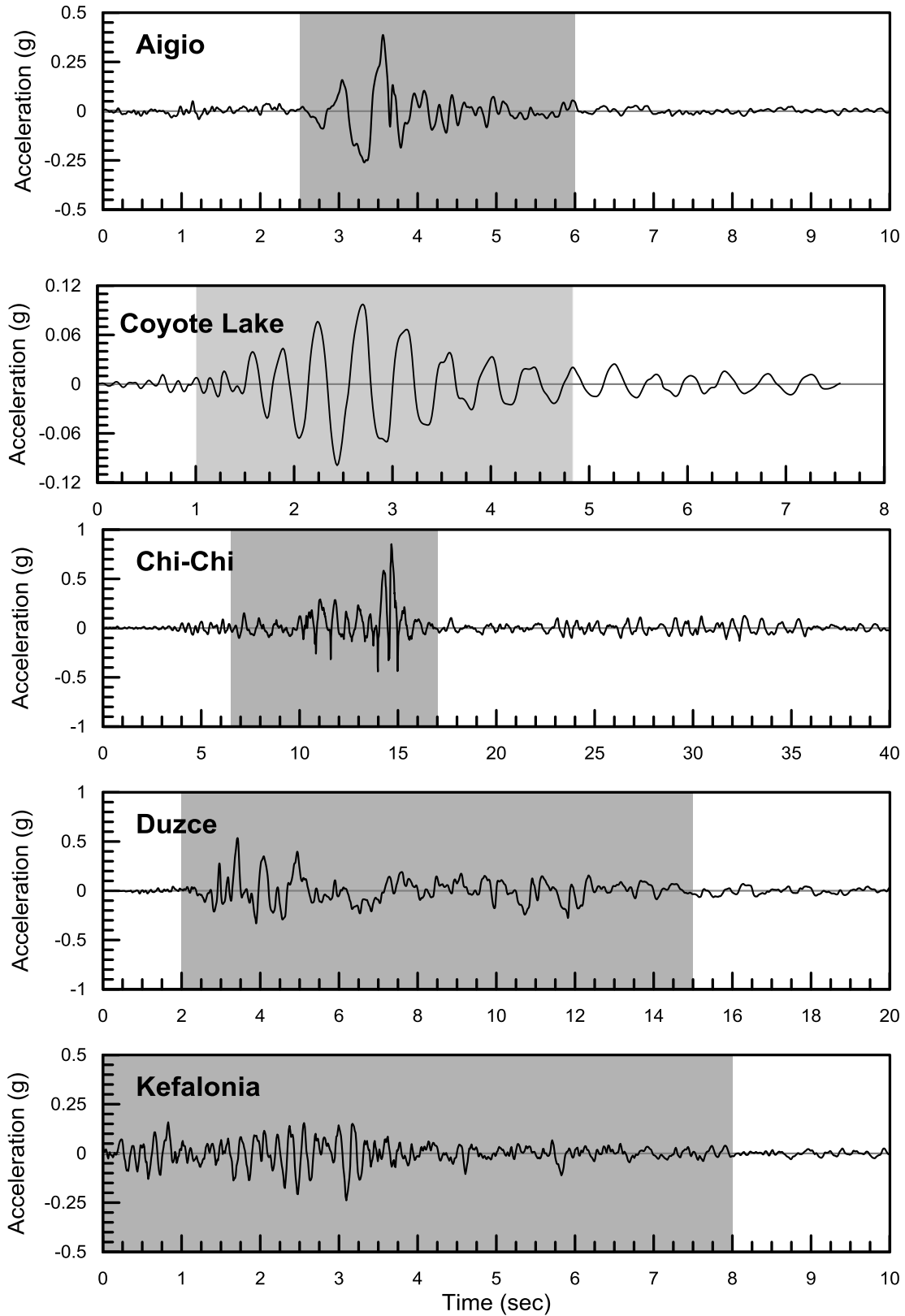
Προκειμένου, λοιπόν, οι πραγματικές διεγέρσεις να έρχονται σε αντιστοιχία με τις αρμονικές, θέσαμε σαν επιμέρους στόχο, η ρευστοποίηση που προκαλούν να γίνεται όσο το δυνατόν ταχύτερα. Για το λόγο αυτό, ορίσαμε όλες οι διεγέρσεις να παρουσιάζουν ενεργό επιτάχυνση ίση με 0.30g. Κατά συνέπεια, τα επιταχυνσιογραφήματα 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 4.2 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 περιόδους 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).

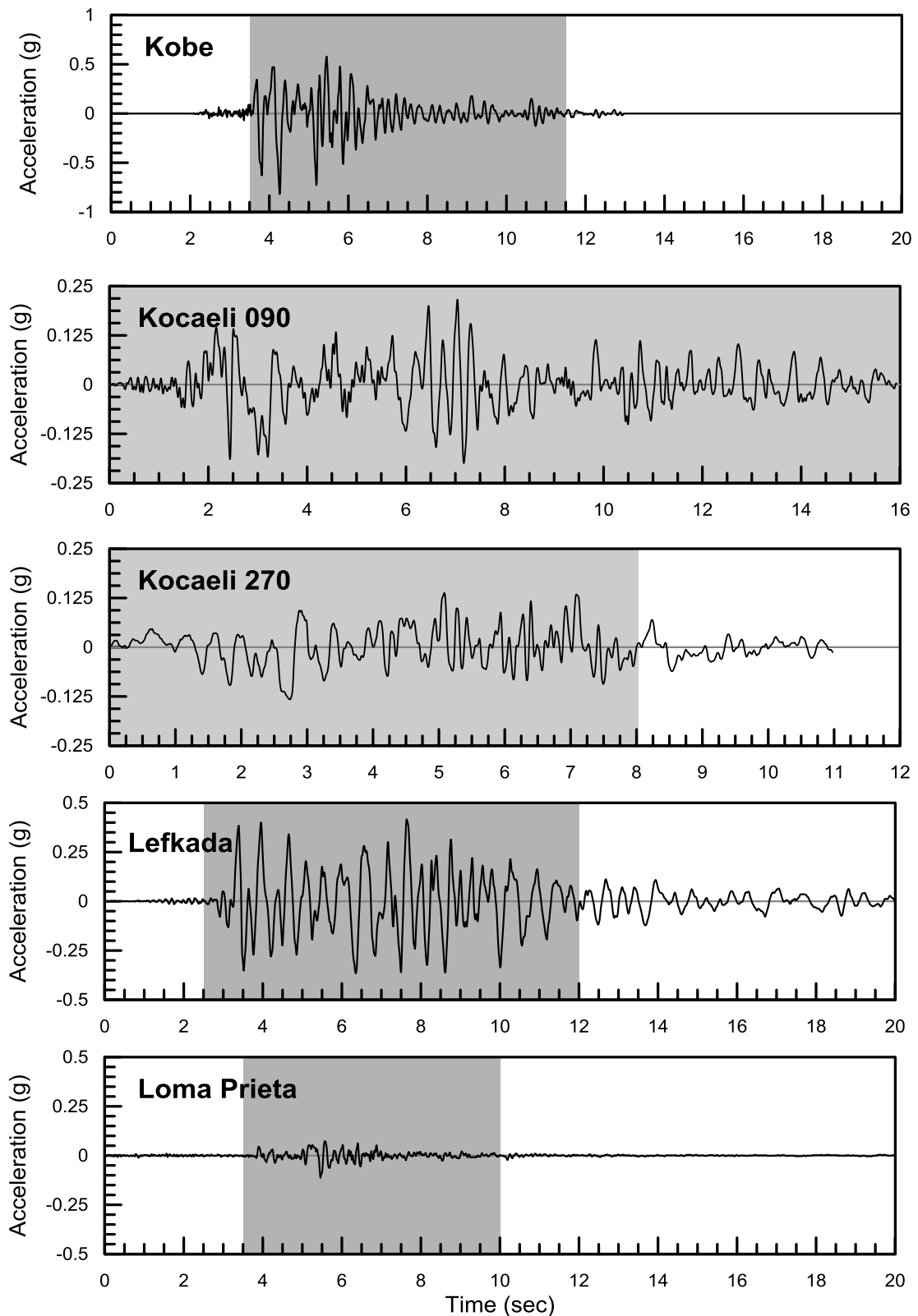
Στις επόμενες σελίδες, παρουσιάζονται τα επιταχυνσιογραφήματα των διεγέρσεων. Με γκρι φόντο ορίζεται το αποκομμένο τμήμα. Επιπλέον, στο Παράρτημα Α, παρατίθενται οι διεγέρσεις με το φάσμα τους και με τα διαγράμματα επιτάχυνσης, ταχύτητας και μετατόπισης για το τμήμα της διέγερσης με το οποίο τελικώς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

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

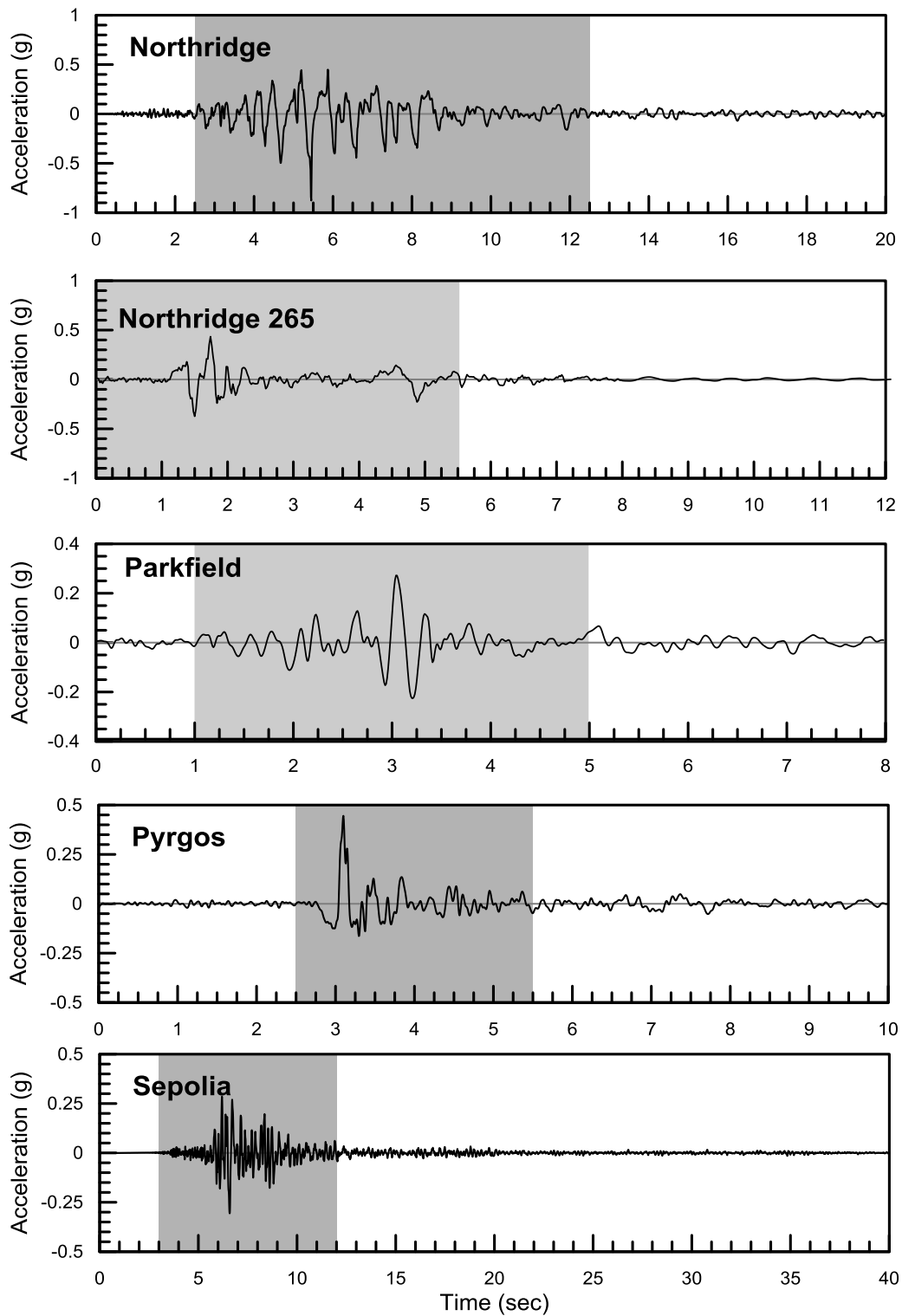
Πίνακας 4.2. Μέγιστες τιμές των επιταχυνσιογραφημάτων μετά την επεξεργασία (*scaling*).



Σχήμα 4.3. 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 4.4. 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 4.5. Τμήμα από τα επιταχυνσιογραφήματα των διεγέρσεων *Northridge*, *Northridge 265*, *Parkfield*, *Pyrgos* και *Sepolia* που θα χρησιμοποιηθεί τελικώς για τη διεξαγωγή των αριθμητικών αναλύσεων.

5.1 ΓΕΝΙΚΑ

Μετά τον ορισμό του προβλήματος και της αριθμητικής του προσομοίωσης, ακολουθεί η επίλυση του, μέσω του κώδικα FLAC. Η εδαφική τομή με τα χαρακτηριστικά που παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 3, επιλύεται για 12 διαφορετικά πάχη άμμου και για καθεμιά από τις επιβαλλόμενες διεγέρσεις του Κεφαλαίου 4. Για καθεμιά από τις 15 παρουσιασθείσες διεγέρσεις εκτελέστηκαν 12 αναλύσεις, καθεμιά, για κάθε διαφορετικό πάχος άμμου. Στις αναλύσεις το πάχος μεταβαλλόταν ανά 1m, στο εύρος 1-12 m. Διεξήχθησαν, τελικώς, 180 αναλύσεις.

Ας σημειωθεί, ότι οι εξεταζόμενοι παράμετροι του προβλήματος αφορούσαν χαρακτηριστικά της διέγερσης, με κυριότερη παράμετρο την περίοδο T ή γενικότερα το φασματικό περιεχόμενο της διέγερσης. Έτσι, αν και στις αρμονικές διεγέρσεις παρουσιάστηκε σημαντική η συμβολή της σχετικής πυκνότητας D_r στην απόκριση του εδάφους, στη συγκεκριμένη εργασία, δε μελετήθηκε η επίδραση της. Συνεπώς, σε όλες τις αναλύσεις, η τιμή της θεωρήθηκε σταθερή και ίση με $D_r=60\%$.

Επιπροσθέτως, το πρόβλημα επιλύθηκε υπό αστράγγιστες συνθήκες φόρτισης (συντελεστής διαπερατότητας για την άμμο, $k \cong 0.0021 \text{cm/sec}$). Η μέγιστη επιτάχυνση της διέγερσης ήταν και εκείνος ένας παράγοντας του οποίου η συνεισφορά απαλείφθηκε οριζόντια, όπως αναφέραμε και στο Κεφάλαιο 4, ενεργό επιτάχυνση για όλες τις διεγέρσεις ίση με 0.30g. Η παραδοχή αυτή, όρισε οι μέγιστες επιταχύνσεις να κινούνται στο εύρος (0.43-0.77)g, με συνέπεια, τα συμπεράσματα της έρευνας να αφορούν μόνο ισχυρές διεγέρσεις.

Τα λεπτομερή αποτελέσματα των αναλύσεων παρουσιάζονται στα Παραρτήματα Β και Γ, ενώ στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται μόνον ενδεικτικά κάποια εξ αυτών. Επιπλέον, λαμβάνεται μια πρώτη εικόνα για την επίδραση του πάχους στην επιφανειακή επιτάχυνση, με την παρουσίαση των αποτελεσμάτων της διέγερσης Northridge 265.

5.2 ΕΠΙΛΟΓΗ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗΣ

Όπως έχει αναφερθεί αρκετές φορές στην παρούσα εργασία, στόχος της είναι να οριστεί το πάχος πέρα από το οποίο η ρευστοποίηση απομειώνει δραστικά την εδαφική κίνηση. Για το λόγο αυτό, απαιτούνται δύο στοιχεία. Πρώτον, ένα σύνολο αποτελεσμάτων μέσω των οποίων θα φανερώνεται η απομείωση και δεύτερων, ένας δείκτης που θα υποδηλώνει πόσο μεγάλη είναι αυτή η απομείωση (ποσοτικοποίηση απόκρισης).

Επιπρόσθετα, η επίδραση της ρευστοποίησης μπορεί να περιγραφεί και από τα απομειωμένα μεγέθη, όπως είναι η ταχύτητα του διατμητικού κύματος στο ρευστοποιημένο στρώμα, V_{slip} . Έτσι, θα αποτελέσει και αυτή αντικείμενο μελέτης για την εξαγωγή συμπερασμάτων.

Συγκεκριμένα, για την επιλογή των αποτελεσμάτων των αριθμητικών αναλύσεων που θα παρουσιασθούν, αναλογιστήκαμε το πώς μπορούμε να δούμε καταρχάς, αν έχει ρευστοποιηθεί το στρώμα και κατά δεύτερον, αν η ρευστοποίηση αυτή, έχει προκαλέσει απομείωση της εδαφικής κίνησης.

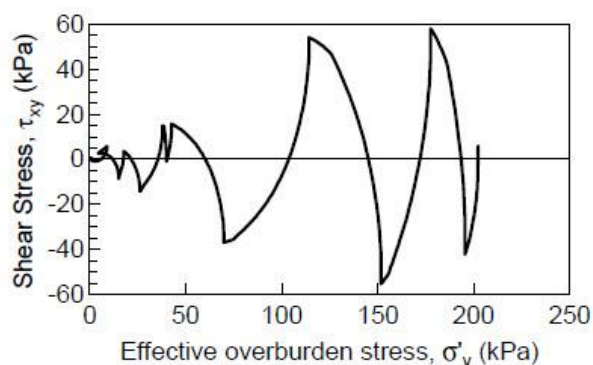
Στην εργασία χρησιμοποιούνται πέντε τρόποι, που βοηθούν να απαντηθούν τα ανωτέρω ερωτήματα.

Χρονοϊστορία δείκτη πόρων r_u

Εξ' ορισμού ένα στρώμα θεωρείται ρευστοποιημένο όταν οι υπερπιέσεις πόρων έχουν αυξηθεί τόσο, ώστε αντίστοιχα οι ενεργές τάσεις να τείνουν στο μηδέν. Μια σύντομη αναπαράσταση της αύξησης των υπερπιέσεων σε σχέση με τις ενεργές, είναι μέσω του λόγου υπερπιέσεων πόρων $r_u = \frac{\Delta u}{\sigma_{vo'}}$. Τη στιγμή που ο λόγος αυτός λαμβάνει τιμή ίση με 0.80 θεωρείται ότι το στρώμα έχει απολέσει αρκετή από τη διατμητική του αντοχή και έχει ρευστοποιηθεί.

• Διαδρομή ενεργών τάσεων

Η διαδρομή των τάσεων σε όρους διατμητικής τάσης τ και ενεργού τάσης σ_v' είναι ένας ακόμα τρόπος που υποδεικνύει τη ρευστοποίηση του στρώματος. Αναμένουμε μείωση των ενεργών τάσεων σε καθεστώς ρευστοποίησης λόγω ανάληψης του φορτίου από το νερό των πόρων. Στο Σχήμα 5.1, παρουσιάζεται η απομείωση των ενεργών τάσεων σε ρευστοποιημένο έδαφος. Ενώ η ενεργός τάση, αρχικά, έχει τιμή γύρω στα 210 kPa, τελικώς προσεγγίζει το μηδέν. Την ίδια συμπεριφορά ακολουθεί και η διατμητική τάση.



Σχήμα 5.1. Διαδρομή τάσεων σε ρευστοποιημένο στρώμα (Yoshida, 2000).

• Επιταχυνσιογραφήματα στην κορυφή σε σχέση με επιταχυνσιογραφήματα στη βάση.

Ο πιο άμεσος τρόπος για να οριστεί ότι σε ένα στρώμα έχει τελικώς απομειωθεί η επιτάχυνση στην κορυφή του, λόγω της ρευστοποίησης του, αποτελεί η σύγκριση του επιταχυνσιογραφήματος στην κορυφή, σε σχέση με το επιταχυνσιογράφημα στη βάση του. Ακόμα και αν παρατηρείται εδαφική κίνηση στο επιταχυνσιογράφημα κορυφής, περιμένουμε να είναι αρκετά μικρότερη από την κίνηση στη βάση.

• Λόγος φάσματος κορυφής άμμου προς φάσμα βάσης άμμου.

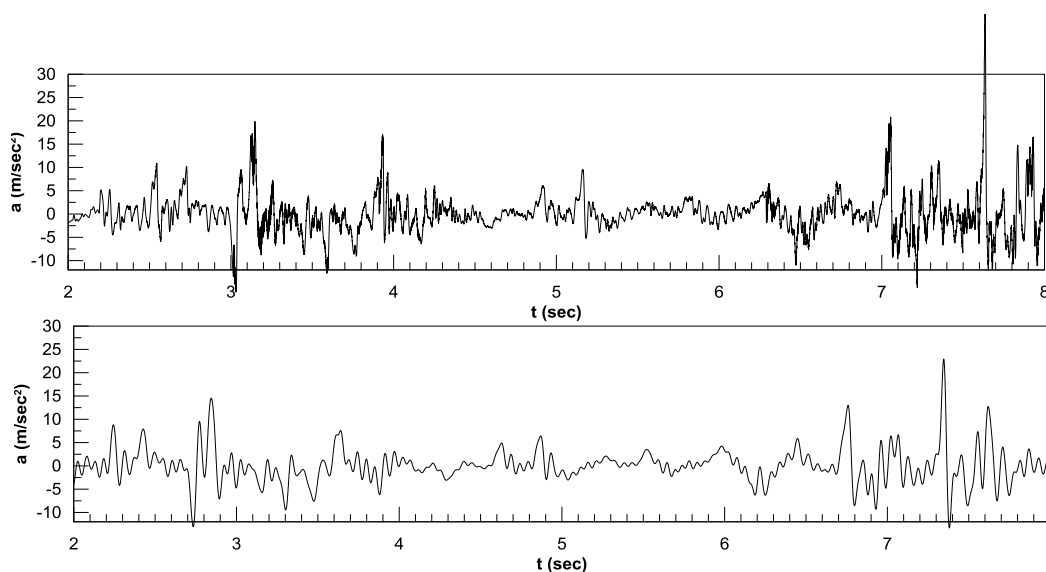
Ο λόγος των ελαστικών φασμάτων κορυφής προς τα ελαστικά φάσματα βάσης, υποδεικνύει τις περιόδους που ενισχύθηκαν κατά τη ρευστοποίηση του στρώματος. Το φάσμα στην κορυφή ενός ρευστοποιημένου στρώματος, αναμένουμε πως θα ενισχύει τις μεγάλες τιμές περιόδων σε σχέση με το φάσμα βάσης, εφόσον το μέτρο δυστημσίας του εδάφους θα έχει απομειωθεί ($T = \frac{4H}{V_s} = \frac{4H}{\sqrt{\frac{G}{\rho}}}$).

5.3 ΧΡΟΝΟΪΣΤΟΡΙΕΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ

Τα παραπάνω στοιχεία εμπεριέχονται αναλυτικά στα Παραρτήματα Β και Γ. Τα επιταχυνσιογραφήματα στην κορυφή και στην βάση της άμμου, η χρονοϊστορία του λόγου υπερπιέσεων πόρων r_u και η διαδρομή των τάσεων παρουσιάζονται στο παράρτημα Β. Τα δύο τελευταία στοιχεία έχουν επιλεγθεί να ληφθούν στο μέσο της άμμου, θεωρώντας ότι αποτελεί αντιπροσωπευτικό στοιχείο του στρώματος καθώς και ότι ρευστοποίηση σε αυτό, αποτελεί εμπόδιο για τη διάδοση της κίνησης στην επιφάνεια. Ακόμη, το μέσο της άμμου δεν επηρεάζεται από φαινόμενα διεπιφάνειας όπως επηρεάζονται τα σημεία στη βάση και στην κορυφή αυτής, λόγω γεινίασης με την άργιλο. Θεωρώντας ότι ρευστοποίηση έχουμε για τιμή r_u ίση με 0.80, στο διάγραμμα που απεικονίζεται η χρονοϊστορία του r_u , το 0.80 σημειώνεται με διακεκομμένη γραμμή ώστε να είναι εύκολα εμφανής ο χρόνος έναρξης της ρευστοποίησης.

Ας αναφερθεί ακόμη, ότι τα επιταχυνσιογραφήματα στην κορυφή και στη βάση της άμμου έχουν φιλτραριστεί. Η διαδικασία αυτή, θεωρήθηκε απαραίτητη εφόσον, τα επιταχυνσιογραφήματα όπως είχαν εξαχθεί από το FLAC, παρουσίαζαν έντονο υψίσυχο αριθμητικό θόρυβο. Ο θόρυβος αυτός, σε ορισμένες περιπτώσεις, έδινε επιταχύνσεις της τάξης των 30 m/sec^2 και δυσχέραινε αρκετά την εικόνα των επιταχυνσιογραφήματων καθώς και δυσκόλευε την εξαγωγή συμπεράσματος για την απομείωση της επιτάχυνσης.

Η διαδικασία του φιλτραρίσματος πραγματοποιήθηκε με το λογισμικό SeisSignal και με χρήση της μεθόδου Butterworth τάξης (order) 8, για αποκοπή συχνοτήτων μεγαλύτερων από 20Hz. Η τιμή των 20Hz ορίστηκε, διότι αποτελεί κοινώς αποδεκτή τιμή ενώ ταυτόχρονα δεν αλλοιώνει το ενεργειακό περιεχόμενο των επιταχυνσιογραφήματων βάσης. Στο Σχήμα 5.2. παρουσιάζεται το επιταχυνσιογράφημα κορυφής της διέγερσης Kocaeli 090 για πάχος άμμου 1m. Είναι εμφανές ότι το φιλτράρισμα δεν παραποίησε την πληροφορία του αρχικού επιταχυνσιογράμματος. Στα 7.5sec του αφιλτράριστου επιταχυνσιογραφήματος, παρουσιάζεται μια από τις πλασματικές επιταχύνσεις. Ακόμη, στο Σχήμα 5.3, παρουσιάζονται τα αντίστοιχα φάσματα για το φιλτραρισμένο και αφιλτράριστο επιταχυνσιογράφημα. Το φάσμα έχει παραμείνει ίδιο μετά το φιλτράρισμα με απουσία μόνο των ενισχύσεων που αντιστοιχούσαν σε περιόδους μικρότερες των 0.05sec ή σε συχνότητες μεγαλύτερες των $1/0.05=20 \text{ Hz}$.

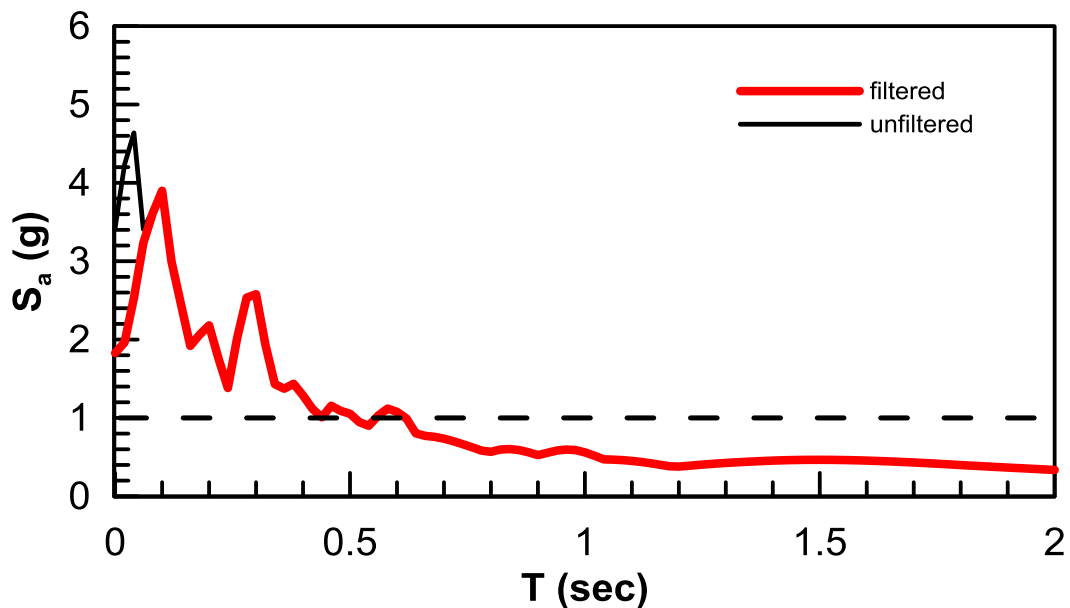


Σχήμα 5.2. Άνω το αφιλτράριστο και κάτω το φιλτραρισμένο επιταχυνσιογράφημα κορυφής της διέγερσης Kocaeli 090 για πάχος άμμου 1m.

Η format της παρουσίασης στο εν λόγω Παράρτημα, παρουσιάζεται στα σχήματα 5.4 και 5.5, όπου απεικονίζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων για τη διέγερση του Northridge 265 και για τα πάχη 2m και 10m. Παρατίθενται τα επιταχυνσιογραφήματα σε χαρακτηριστικά σημεία στον κάρναβο καθώς επίσης, οι διαδρομές τάσεων και οι ιστορίες του r_u .

Είναι φανερό ότι η επιτάχυνση στην κορυφή της άμμου, έχει απομειωθεί αρκετά στο πάχος των 10m σε αντίθεση με τα 2m.

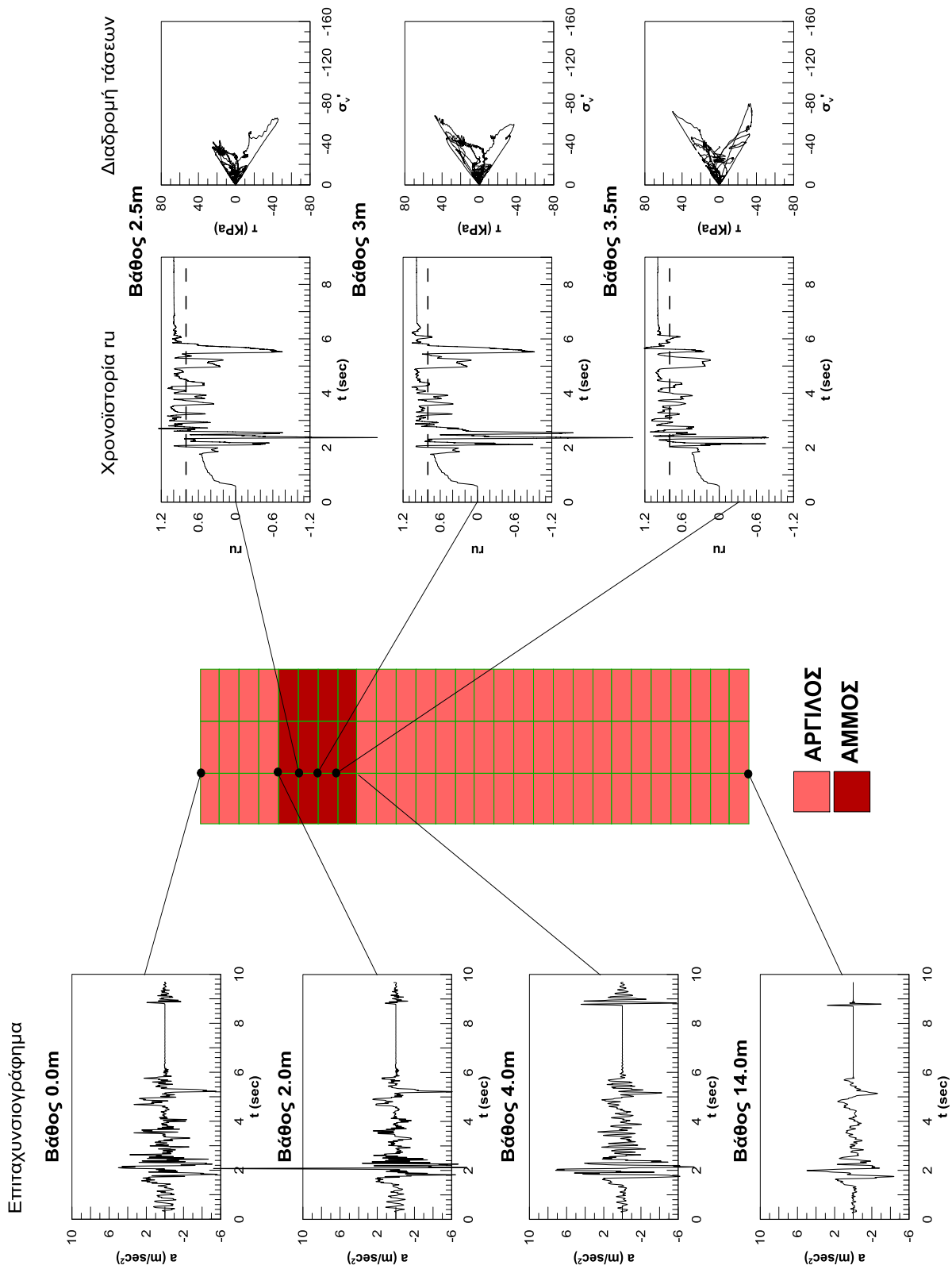
Το αξιοπρόσεκτο είναι ότι το επιταχυνσιογράφημα της κορυφής για το πάχος των 10m, αν και έχει σχεδόν μηδενίσει το τμήμα της διέγερσης με τις υψηλές τιμές επιταχύνσεων (2-3 sec), έχει ενισχύσει το τελευταίο κομμάτι της διέγερσης (4.5-6 sec). Συμπερασματικά, στα επιταχυνσιογραφήματα κορυφής και των δύο παχών, παρουσιάζονται ενισχύσεις.



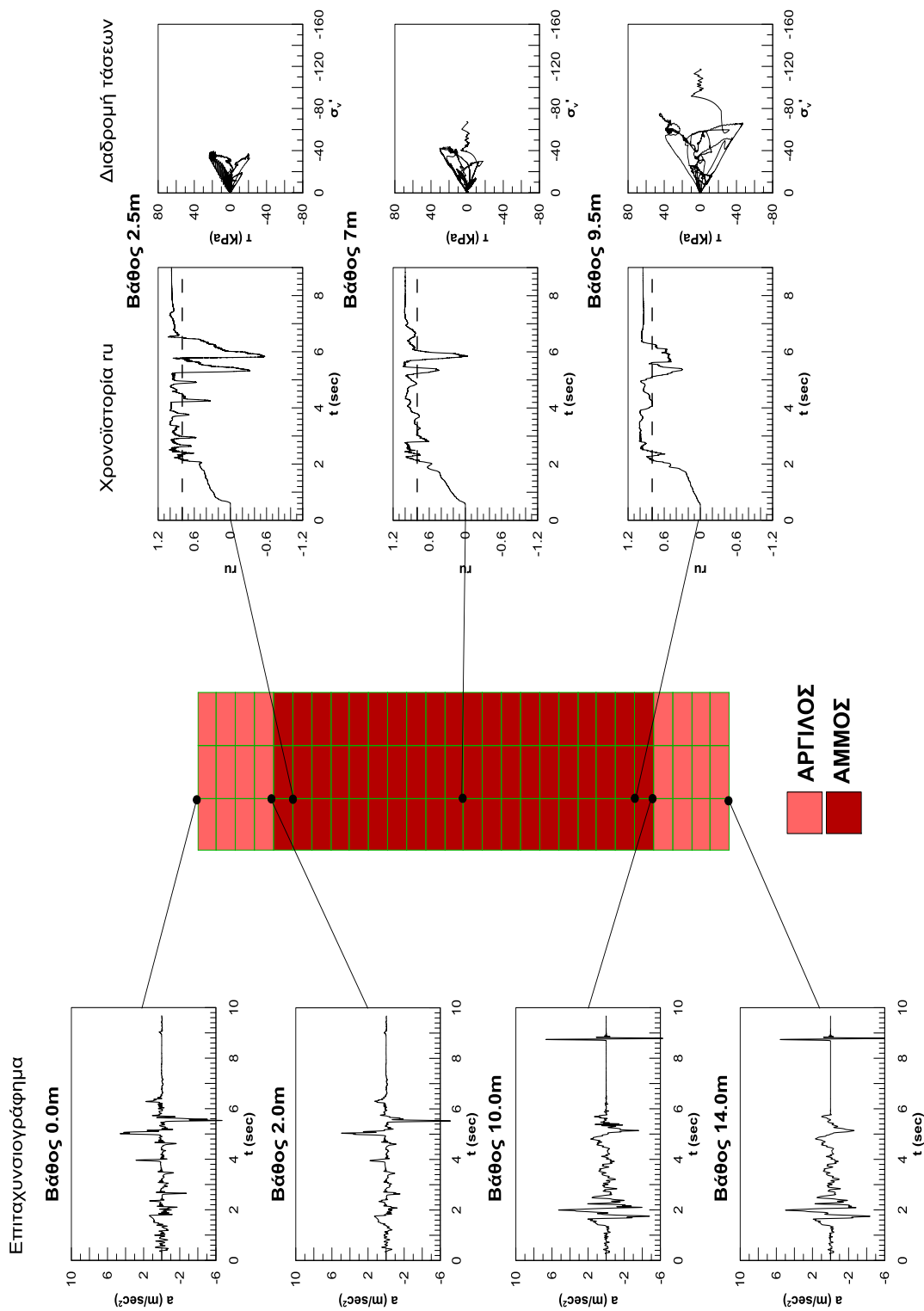
Σχήμα 5.3 Φιλτραρισμένο (παχιά γραμμή) και αφιλτράριστο (λεπτή γραμμή) φάσμα επιταχυνσιογραφήματος κορυφής της διέγερσης Kocaeli 090 για πάχος άμμου 1m.

Παρατηρείται, ακόμη, μια πλήρης αντιστοιχία μεταξύ των επιταχυνσιογραφημάτων της ιστορίας r_u και της διαδρομής τάσεων. Στα σημεία στα οποία παρουσιάζονται ενισχύσεις, ο λόγος r_u απομειώνεται σημειακά ενώ αντίστοιχα στη διαδρομή τάσεων, η τιμή της σ_v αυξάνεται (διαστολικότητα). Η έντονη διαστολικότητα που παρουσιάζεται στο πάχος των 10m (βάθος 9.5m) και φαίνεται να μην αντιστοιχεί ποσοτικά σε αντίστοιχη απομείωση του r_u , μπορεί να αποδοθεί στο γεγονός ότι το συγκεκριμένο σημείο βρίσκεται σε μεγαλύτερο βάθος από τα υπόλοιπα, άρα λόγω των υπερκειμένων, παρουσιάζει μεγαλύτερη αντοχή.

Ακόμη, παρατηρώντας τη ιστορία των r_u σε κάθε βάθος ξεχωριστά παρατηρούμε ότι η ρευστοποίηση πραγματοποιείται σχεδόν και όχι απόλυτα, ταυτόχρονα σε όλα τα βάθη του αμμώδους στρώματος. Αναφορικά επίσης, με το χρόνο ρευστοποίησης, προκύπτει ότι ρευστοποίηση πραγματοποιείται τη στιγμή που το ισχυρό τμήμα της διέγερσης, διέρχεται από το στρώμα. Ο χρόνος ρευστοποίησης διαφοροποιείται, ωστόσο, στα διάφορα βάθη, επειδή στα 10m, ο χτύπος χρειάζεται περισσότερο χρόνο, μέχρι να φτάσει στο μέσο.



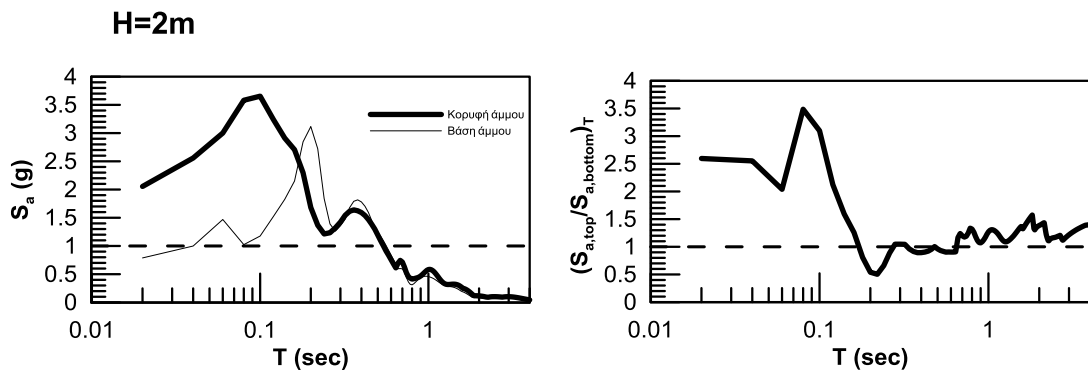
Σχήμα 5.4. Παρουσίαση αποτελεσμάτων για τη διέγερση Northridge 265 και για πάχος άμμου 2m.



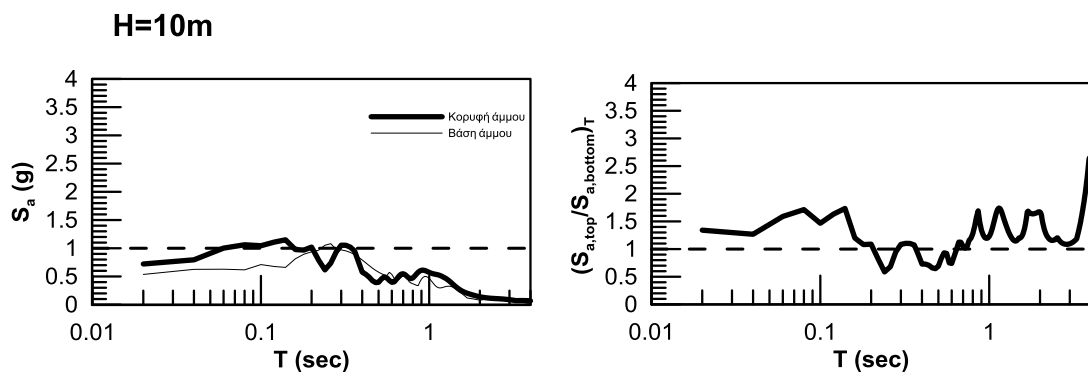
Σχήμα 5.5. Παρουσίαση αποτελεσμάτων για τη διέγερση Northridge 265 και για πάχος άμμου 10m.

5.4 ΦΑΣΜΑΤΑ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ

Στο Παράρτημα Γ, γίνεται παρουσίαση των ελαστικών φασμάτων για κάθε πάχος διέγερσης, σε λογαριθμική κλίμακα περιόδων. Απεικονίζονται σε κοινό διάγραμμα τα φάσματα που αντιστοιχούν στα επιταχυνσιογραφήματα βάσης και κορυφής της άμμου καθώς και ο λόγος των φασμάτων για κάθε περίοδο T . Τα φάσματα έχουν ληφθεί από το πρόγραμμα Seismosignal, έχουν παραχθεί για λόγο απόσβεσης 5%, ενώ αντιστοιχούν στα φιλτραρισμένα επιταχυνσιογραφήματα.



Σχήμα 5.6. Ελαστικά φάσματα για το επιταχυνσιογράφημα κορυφής και βάσης (αριστερά) καθώς και ο λόγος τους (δεξιά) για τη διέγερση Northridge 265 και για πάχος ίσο με 2m.



Σχήμα 5.7. Ελαστικά φάσματα για το επιταχυνσιογράφημα κορυφής και βάσης (αριστερά) καθώς και ο κανονικοποιημένος λόγος τους (δεξιά) για τη διέγερση Northridge 265 και για το πάχος ίσο με 10m.

Η format της παρουσίασης στο εν λόγω παράρτημα φαίνεται στα Σχήματα 5.6 και 5.7, όπου παρουσιάζονται τα ελαστικά φάσματα στην κορυφή και στη βάση του κάθε στρώματος καθώς και ο λόγος τους για τη διέγερση του Northridge 265 και για ρευστοποιήσιμες στρώσεις πάχους 2m και 10m αντίστοιχα .

Στο πάχος των 2m, φαίνεται ότι ακόμα και μετά τη ρευστοποίηση, παρουσιάζεται μικρή ενίσχυση στις μικρές περιόδους ($\cong 0.10$ sec) και έντονη απομείωση στις μεγάλες. Στο πάχος των 10m, η έντονη απομείωση εντοπίζεται σε ενδιάμεσες περιόδους $T=0.15-0.70$ sec, ενώ για μεγαλύτερες και μικρότερες περιόδους δεν παρουσιάζονται άξια λόγου φαινόμενα εδαφικής επίδρασης.

5.5 ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΣΕΙΣΜΙΚΟΥ ΚΥΜΑΤΟΣ ΣΤΟ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΜΕΝΟ ΣΤΡΩΜΑ

Ο υπολογισμός της ταχύτητας του διατμητικού κύματος μέσα στο ρευστοποιημένο στρώμα αποτέλεσε ένα από τα κύρια μελήματα της συγκεκριμένης εργασίας. Ο Θεοχάρης (2011) απέδειξε ότι ένα στρώμα από την έναρξη της ρευστοποίησης του, μπορεί να προσομοιωθεί με ένα ισοδύναμο ελαστικό μέσο με σταθερά μηχανικά χαρακτηριστικά. Ακόμα και αν πραγματοποιείται σταδιακή απομείωση του G από την αρχική τιμή του, υπάρχει μια μέση τιμή αυτού που μπορεί να αντιπροσωπεύσει όλο το στρώμα. Με το ίδιο σκεπτικό, το στρώμα μπορεί να χαρακτηριστεί και από μια μέση σταθερή τιμή ταχύτητας $V_{s_{liq}}$.

Για τον υπολογισμό της ταχύτητας, επιβάλαμε έναν παλμό στη βάση του καννάβου, αρκετά αργότερα από την επιβολή της κύριας διέγερσης. Ο παλμός χαρακτηρίζονταν από περίοδο 0.10 sec και επιτάχυνση 0.30g. Στόχος ήταν να μετρήσουμε το χρόνο που χρειάζεται το πρώτο 0.01g του παλμού να φτάσει από τη βάση στην κορυφή της άμμου και στη συνέχεια, για την εύρεση της ταχύτητας, να διαιρέσουμε το πάχος του στρώματος με το χρόνο αυτό. Σε ορισμένες περιπτώσεις και ειδικά στα μεγάλα πάχη (από 8 m και πάνω), λόγω έντονης απομείωσης των μηχανικών χαρακτηριστικών, δεν ήταν ορατός ο παλμός στην επιφάνεια για αυτό και τέθηκε στα πάχη αυτά, με μέγιστη επιτάχυνση ίση με 0.50g.

Η τιμή 0.01g ορίστηκε ως η πιο αντιπροσωπευτική για την είσοδο του παλμού, για το λόγο ότι είχε μια τάξη μεγέθους μεγαλύτερη, από εκείνη του αριθμητικού θορύβου που μεσολαβούσε πριν την παρουσία του παλμού και ο οποίος θόρυβος, ήταν της τάξης (0.0001-0.001)g. Ας σημειωθεί ότι ο παλμός απεικονίζεται μόνο στα επιταχυνσιογραφήματα βάσης, κορυφής και όχι στα υπόλοιπα διαγράμματα των παραρτημάτων.

Στον Πίνακα 5.1 που ακολουθεί, παρατίθενται όλες οι ταχύτητες μετάδοσης σεισμικών κυμάτων που υπολογίσθηκαν κατ'αυτό τον τρόπο.

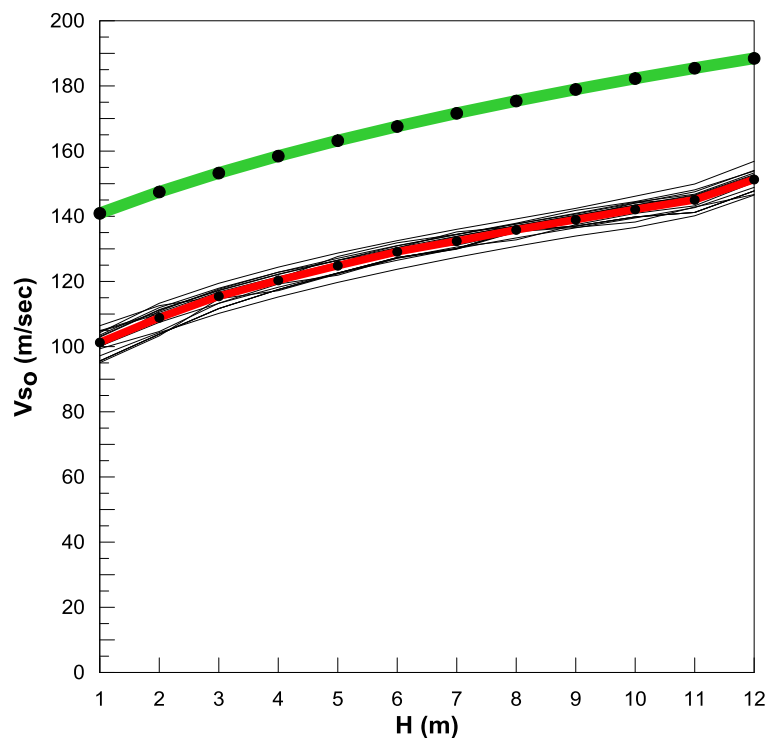
ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΟΥ ΚΥΜΑΤΟΣ ΣΤΟ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΜΕΝΟ ΣΤΡΩΜΑ Vsliq															
H	Aigio	Chi-Chi	Coyote Lake	Ducze	Kefalonia	Kobe	Kocaeli 090	Kocaeli 270	Lefkada	Loma Prieta	Northridge	Northridge 265	Pyrgos	Parkfield	Sepolia
1	26.72	75.33	44.57	44.06	46.38	45.81	56.04	53.83	84.39	28.69	63.20	38.80	41.54	42.24	42.52
2	28.48	49.50	38.63	38.98	32.31	42.35	36.04	40.68	70.38	33.00	40.22	36.38	42.73	36.73	30.99
3	25.31	38.03	47.24	39.73	34.49	36.71	42.82	38.39	54.69	35.75	39.19	37.43	41.41	39.38	43.56
4	38.10	38.95	46.03	42.94	37.87	46.08	40.55	26.55	41.30	40.27	56.574	43.27	39.28	40.81	32.00
5	34.23	37.58	35.25	44.95	48.25	49.59	34.14	28.85	48.48	52.80	43.04	42.55	34.54	35.34	33.44
6	29.91	45.42	42.32	35.03	45.03	40.16	42.12	35.00	56.96	32.43	30.76	35.36	35.99	43.59	32.65
7	32.94	42.76	32.81	36.32	34.54	46.81	38.74	29.47	55.57	34.30	33.90	36.15	27.80	37.96	36.73
8	28.99	43.25	36.03	30.47	25.27	42.54	35.57	26.59	46.44	33.07	43.41	41.54	31.39	38.28	36.26
9	36.30	29.28	32.65	34.75	32.93	39.67	31.73	46.46	48.50	37.21	35.09	40.40	39.47	36.47	35.58
10	29.77	32.02	34.92	33.12	38.85	34.61	40.04	43.47	46.74	36.67	40.09	35.99	31.78	39.24	34.84
11	28.81	31.67	36.07	37.76	36.11	36.08	34.39	47.54	40.59	36.84	39.72	38.75	37.42	36.02	34.37
12	34.97	47.37	36.90	35.06	36.96	40.35	40.98	58.00	53.32	39.82	43.73	45.17	38.02	38.04	39.52

Πίνακας 5.1. Ταχύτητες στο ρευστοποιημένο στρώμα για τις διεγέρσεις των αναλύσεων

Προκειμένου να επιβεβαιωθεί το συμπέρασμα του Θεοχάρη ότι η ταχύτητα στο ρευστοποιημένο στρώμα V_{slq} ισούται με το 1/3 περίπου της αρχικής ταχύτητας του κύματος V_{so} , θεωρήθηκε σκόπιμο να βρεθεί και η αρχική ταχύτητα του κύματος, πριν τη ρευστοποίηση.

Για την εύρεση της, ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία όπως για την ταχύτητα στο ρευστοποιημένο στρώμα. Διαφοροποιήσεις πρόεκυψαν ως προς την τιμή που θα θεωρούνταν αντιπροσωπευτική ως είσοδο της διέγερσης. Σε περιπτώσεις που η διέγερση ξεκινούσε με αρνητικές τιμές επιτάχυνσης ορίστηκε ως τιμή υπολογισμού το $-0.01g$ ενώ σε περιπτώσεις που η διέγερση ξεκινούσε με θετικές τιμές, ορίστηκε ως αντιπροσωπευτική τιμή το $0.01g$. Αποφεύχθηκε να γίνει χρήση αποκλειστικά της θετικής τιμής διότι σε περίπτωση που η διέγερση ξεκινούσε με αρνητικές τιμές, το $0.01g$ της βάσης, πιθανότατα θα είχε ενισχυθεί με αποτέλεσμα να μην αντιστοιχεί στο $0.01g$ της κορυφής, αλλά σε κάποια άλλη μεγαλύτερη τιμή. Συνεπώς, με τον συγκεκριμένο τρόπο, θα είχαμε υπερεκτιμήσει την αρχική ταχύτητα.

Ακολουθώντας, στο Σχήμα 5.8 απεικονίζεται η αρχική τιμή της ταχύτητας για τα πάχη των διεγέρσεων. Όπως αναμενόταν, όλες οι διεγέρσεις δίνουν μια μέση, κοινή τιμή της αρχικής ταχύτητας για τα διάφορα πάχη. Η μέση τιμή απεικονίζεται με κόκκινη, παχιά γραμμή στο διάγραμμα.



Σχήμα 5.8. Μεταβολή της αρχικής ταχύτητας V_{so} με το πάχος, για υπολογισμό της μέσω διάδοσης της διέγερσης (κόκκινη γραμμή) και μέσω αναλυτικής σχέσης (πράσινη γραμμή).

Στο ίδιο διάγραμμα και με πράσινη, παχιά γραμμή, απεικονίζεται η θεωρητική τιμή της ταχύτητας για κάθε πάχος, βάση των σχέσεων, 5.1 και 5.2. Το G της σχέσης υπολογίζεται σύμφωνα με τη 5.2. (Andrianopoulos et al, 2010):

$$V_{s_o} = \sqrt{\frac{G_o}{\rho}} \quad (5.1)$$

$$G_o = \frac{\beta p_a}{(0.3 + 0.7e^2)} \sqrt{\frac{p}{p_a}} \quad (5.2)$$

Όπου

ρ η πυκνότητα του υλικού

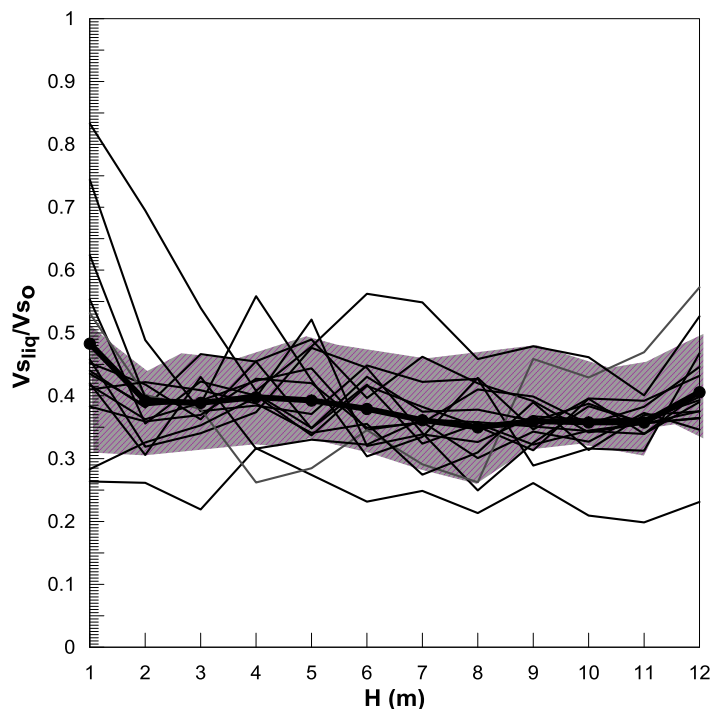
β σταθερά που για δυναμικά προβλήματα λαμβάνει την τιμή 600

e δείκτης πόρων (για $D_r=60\%$, $e=0.66$)

p μέση ενεργός οκταεδρική τάση

p_a ατμοσφαιρική πίεση ίση με 100 kPa

Παρατηρείται μια απόκλιση μεταξύ των τιμών της θεωρητικής σχέσης και των τιμών που προέκυψαν από τις αριθμητικές αναλύσεις. Το αίτιο της απόκλισης θα πρέπει να αναζητηθεί στην καταστατική προσομοίωση της σεισμικής απόκρισης του εδάφους και δε θα μας απασχολήσει περαιτέρω. Έτσι, στα ακόλουθα θα χρησιμοποιήσουμε τις τιμές που προέκυψαν απευθείας από τη διάδοση της διέγερσης ως πλέον ρεαλιστικές.



Σχήμα 5.9. Μεταβολή του λόγου $V_{s_{IIq}}/V_{s_o}$ με το πάχος για όλες τις διεγέρσεις. Με γραμμοσκίαση ορίζεται το κύριο εύρος και με μαύρη παχιά γραμμή απεικονίζεται η μέση τιμή του $V_{s_{IIq}}/V_{s_o}$ για κάθε πάχος.

Στο Σχήμα 5.9 αναπαρίσταται η μεταβολή του λόγου $V_{s_{liq}}/V_{s_0}$ συναρτήσει του πάχους του ρευστοποιημένης στρώσης για όλες τις διεγέρσεις καθώς και η μέση τιμή αυτού. Παρατηρούμε, εκ μιας πρώτης όψευς, ότι ο λόγος καλύπτει το εύρος 0.25-0.55. Ωστόσο, με μια προσεκτικότερη ματιά, φαίνεται ότι η πλειονότητα των διεγέρσεων ανήκει στο διάστημα 0.30-0.50 (σκιαγραφημένο τμήμα γραφήματος). Ο λόγος $V_{s_{liq}}/V_{s_0}$, είναι ελαφρώς μεγαλύτερος από εκείνον για αρμονικές διεγέρσεις, όπου είχε ευρεθεί να κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 0.25-0.40.

Επίσης, αξίζει να επισημανθεί πως ορισμένες διεγέρσεις παρουσιάζουν έντονες διακυμάνσεις με αποτέλεσμα ένα μεγάλο μέρος τους να βρίσκεται εκτός αυτού του ορίου. Παρόλα αυτά, βασισμένοι στη μέση τιμή του λόγου, μπορούμε χονδρικά να πούμε πως η ταχύτητα του διατμητικού κύματος στο ρευστοποιημένο στρώμα ισούται με το 40%, της αρχικής.

ΔΕΙΚΤΕΣ ΠΟΣΟΤΙΚΗΣ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ

ΤΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ

6

6.1 ΓΕΝΙΚΑ

Όπως προαναφέρθηκε στην εισαγωγή, ο απώτερος στόχος της παρούσας έρευνας είναι να εκτιμηθεί η απομείωση 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 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.

Επισημαίνεται, όμως, ότι οι δείκτες αυτοί είναι επαρκείς μόνον για αρμονική διέγερση δεδομένου ότι στην περίπτωση αυτή, δεν έχει έννοια το φασματικό περιεχόμενο του σεισμού. Έτσι, στην παρούσα εργασία θα διατηρηθεί, βεβαίως, ο δείκτης I_{arias} αλλά θα πρέπει να εισαχθούν και δείκτες οι οποίοι αφορούν το φασματικό περιεχόμενο της σεισμικής κίνησης. Πιο συγκεκριμένα, θα χρησιμοποιηθεί η μέση τιμή του λόγου των ελαστικών φασμάτων απόκρισης στην επιφάνεια και στη βάση του ρευστοποιημένου στρώματος για τρεις χαρακτηριστικές τιμές περιόδων:

- A. μικρών περιόδων $T=0.05-0.15$ sec (που αντιστοιχούν σε κτίρια 1-2 ορόφων)
- B. μεσαίων περιόδων $T=0.15-0.45$ sec (που αντιστοιχούν σε πολυώροφα κτίρια) και
- Γ. μεγάλων περιόδων $T=0.45-1.5$ sec (υψηλά κτίρια, πυλώνες γεφυρών κλπ)

Στις παραγράφους που ακολουθούν θα εξετασθούν οι ανωτέρω δείκτες σε σχέση με το πάχος του ρευστοποιημένου στρώματος και τον τύπο της σεισμικής διέγερσης (κατηγορίες Α, Β, Γ Κεφαλαίου 4). Τα αποτελέσματα θα παρουσιασθούν μόνο για μια διέγερση από κάθε μια κατηγορία και συγκεκριμένα

- Coyote Lake, για την κατηγορία Α
- Northridge 265, για την κατηγορία Β και
- Ducze για την κατηγορία Γ

Επιπλέον, στο παρόν κεφάλαιο θα γίνει η σύγκριση των διαφόρων δεικτών τόσο για ολόκληρο το σεισμικό κραδασμό όσο και για το τμήμα αυτού μετά τη ρευστοποίηση του εδάφους, προκειμένου να διαπιστωθεί ποια θεώρηση αποδίδει καλύτερα την επίδραση της ρευστοποίησης.

Ας σημειωθεί ότι οι δείκτες έχουν υπολογιστεί βάση των φιλτραρισμένων επιταχυνσιογραφημάτων ώστε να απαλοιφθεί η επίδραση του θορύβου, ο οποίος λόγω των σημειακών υψηλών τιμών της επιτάχυνσης που προσέδιδε, θα έδινε, ίσως, παραπλανητικές τιμές σε αυτούς.

6.2 ΔΕΙΚΤΗΣ I_{ARIAS}

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

$$I_{\alpha} = \frac{\pi}{2g} \int_0^{\infty} a(t)^2 dt \quad (6.1)$$

και κατ'επέκταση ο σχετικός δείκτης I_{arias} ορίζεται ως $I_{\text{arias}} = \frac{I_{\alpha \text{ κορυφής}}}{I_{\alpha \text{ βάσης}}}$ (6.2).

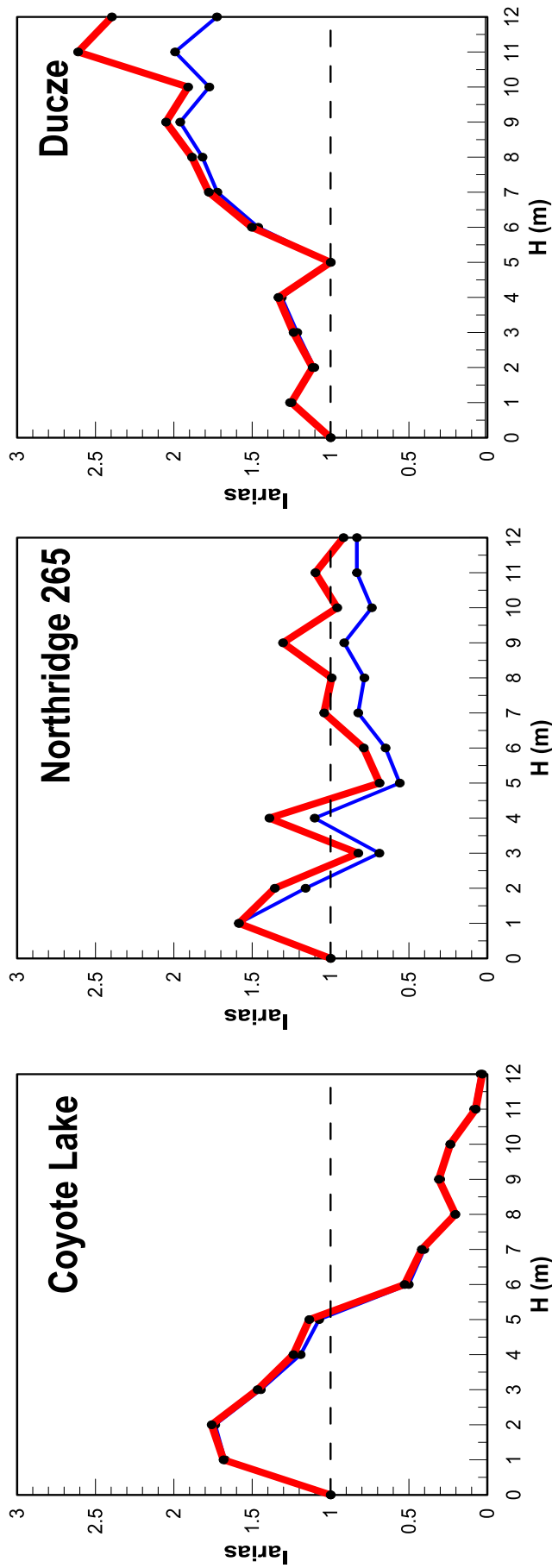
Από φυσικής άποψης, ο I_{α} εκφράζει το μέγεθος της ταχύτητας για το σημείο στο οποίο αναφέρεται αφού και οι προκύπτουσες μονάδες είναι m/sec. Λόγω της παρουσίας του τετραγώνου στον τύπο, διαφαίνεται ότι ο δείκτης δε λαμβάνει εξίσου υπόψη όλες τις τιμές της επιτάχυνσης αλλά δίνει έμφαση στις υψηλές τιμές,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

Η μεταβολή του εν λόγω δείκτη με το πάχος της ρευστοποιημένης στρώσης παρουσιάζεται στο Σχήματα 6.1 για τις διεγέρσεις Coyote Lake, Northridge 265 και Duzce, αντίστοιχα. Σε κάθε σχήμα παρουσιάζονται ξεχωριστά οι τιμές του εν λόγω δείκτη για ολόκληρη τη διέγερση, με μπλε γραμμή, καθώς και για το τμήμα της διέγερσης μετά τη ρευστοποίηση ($r_u > 0.8$) με κόκκινη γραμμή.

Το πρώτο πράγμα το οποίο παρατηρείται, είναι ότι η διαφοροποίηση μεταξύ ολόκληρου του κραδασμού και του τμήματος μετά τη ρευστοποίηση, σε ορισμένα σημεία, είναι αρκετά μεγάλη. Ιδιαίτερα στην περίπτωση του Northridge 265, η θεώρηση υπολογισμού του I_{arias} για το τμήμα μετά τη ρευστοποίηση, οδηγεί συστηματικά σε μεγαλύτερες τιμές του I_{arias} ,

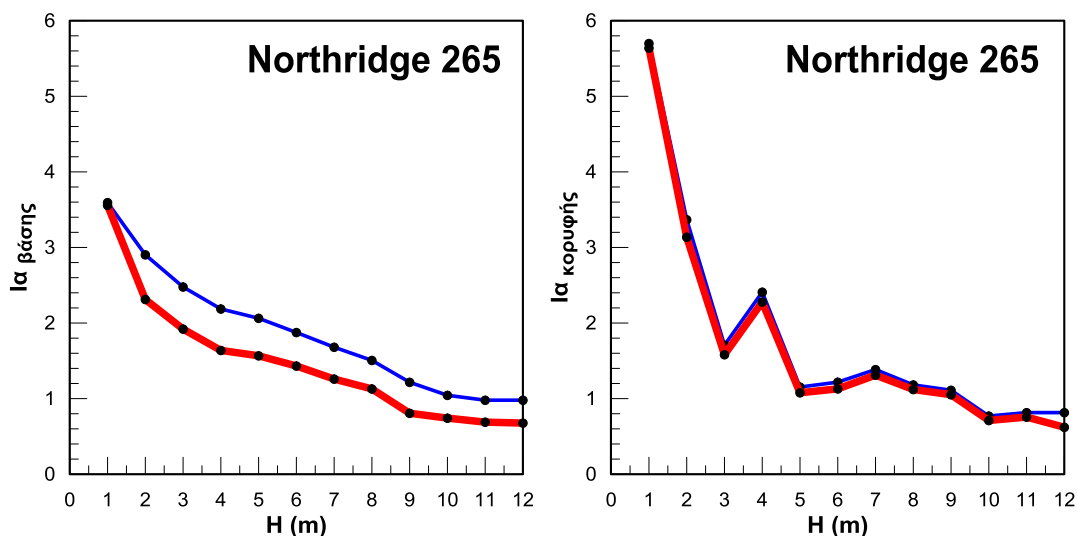
Η παρατήρηση αυτή είναι αντίθετη ως προς την προσδοκώμενη εικόνα. Αναμέναμε ότι όσο μεγάλωνε το πάχος του ρευστοποιημένου στρώματος, θα είχαμε όντως έντονες διαφοροποιήσεις στις δύο θεωρήσεις αλλά με τον I_{arias} να παίρνει μεγαλύτερες τιμές για τη θεώρηση όλης της διέγερσης. Η εικόνα αυτή ερχόταν σε πλήρη συμφωνία με το γεγονός ότι σε μεγαλύτερα βάθη η ρευστοποίηση έρχεται καθυστερημένα οπότε μεσολαβεί μεγαλύτερο τμήμα της διέγερσης πριν τη ρευστοποίηση το οποίο δε θα συμπεριλαμβανόταν στη δεύτερη θεώρηση και έτσι θα παίρναμε μικρότερες τιμές για αυτή.

Ωστόσο, η μορφή που τελικά λαμβάνουμε οφείλεται στο εξής γεγονός. Ο δείκτης I_{arias} , όπως προαναφέρθηκε, συνίσταται από το λόγο του I_{α} στην κορυφή προς τον I_{α} στη βάση. Ο $I_{\alpha \text{ βάσης}}$ για όλη τη διέγερση είναι μεγαλύτερος από τον $I_{\alpha \text{ βάσης}}$ για το τμήμα της διέγερσης που αντιστοιχεί στη ρευστοποίηση. Το πόσο μεγαλύτερος είναι εξαρτάται από τη διάρκεια του τμήματος πριν τη ρευστοποίηση καθώς και από την ενίσχυση που έχει λάβει το τμήμα αυτό από το υποκείμενο αργιλικό στρώμα. Με την ίδια λογική και ο $I_{\alpha \text{ κορυφής}}$ θα έπρεπε να είναι μεγαλύτερος για την πρώτη σε σχέση με τη δεύτερη θεώρηση. Παραταύτα, δεν είναι. Ο $I_{\alpha \text{ κορυφής}}$ και για τις δύο θεωρήσεις έχει παραπλήσια τιμή. Αν και ο $I_{\alpha \text{ κορυφής}}$ για την πρώτη θεώρηση συμπεριλαμβάνει το τμήμα της διέγερσης πριν τη ρευστοποίηση, το οποίο έχει σχεδόν ίδια διάρκεια με το τμήμα που συμπεριλαμβάνει και ο αντίστοιχος $I_{\alpha \text{ βάσης}}$, το τμήμα αυτό δεν είναι σημαντικά ενισχυμένο για την κορυφή σε σχέση με τη βάση. Ο λόγος είναι ότι από την έναρξη της διέγερσης, το έδαφος συμπεριφέρεται μη γραμμικά οπότε παρατηρείται απομείωση της επιτάχυνσης στην κορυφή του στρώματος. Τελικά, προκύπτει ότι ο $I_{\alpha \text{ βάσης}}$ είναι κρισιμότερος από τον $I_{\alpha \text{ κορυφής}}$ για τον καθορισμό της τιμής του I_{arias} . Εφόσον, λοιπόν, ο $I_{\alpha \text{ βάσης}}$ είναι μεγαλύτερος για τη θεώρηση όλης της διέγερσης, ο I_{arias} προκύπτει μικρότερος για τη θεώρηση αυτή.



Σχήμα 6.1 Μεταβολή του δείκτη I_{arias} με το πάχος H του ρευστοποιημένου στρώματος, με τη θεώρηση της πλήρους διέγερσης (μπλε γραμμή) και με τη θεώρηση του ρευστοποιημένου τμήματος (κόκκινη γραμμή).

Τα ανωτέρω επιβεβαιώνονται στο Σχήμα 6.2 για την περίπτωση του Northridge 265. Παρατίθενται ο $I_{\alpha\beta\acute{\alpha}\sigma\eta\varsigma}$ και ο $I_{\alpha\kappa\omicron\rho\upsilon\phi\eta\varsigma}$ για όλη τη διέγερση (μπλε γραμμή) και για το τμήμα της διέγερσης μετά τη ρευστοποίηση (κόκκινη γραμμή).



Σχήμα 6.2 Μεταβολή του $I_{\alpha\beta\acute{\alpha}\sigma\eta\varsigma}$ (αριστερά) και του $I_{\alpha\kappa\omicron\rho\upsilon\phi\eta\varsigma}$ (δεξιά) με το πάχος H του ρευστοποιημένου στρώματος για όλη τη διέγερση (μπλε γραμμή) και για το τμήμα της διέγερσης μετά τη ρευστοποίηση (κόκκινη γραμμή).

Ας προστεθεί στα ανωτέρω ότι δεν αναμένουμε την ίδια συμπεριφορά σε κάθε διέγερση. Θα υπάρχουν διεγέρσεις που θα υπακούουν στην αρχική σκέψη και αυτό διότι παρά τη μη γραμμική συμπεριφορά του εδάφους, θα μπορέσει να υπάρξει συντονισμός μεταξύ της άμμου και του τμήματος πριν τη ρευστοποίηση ώστε ο $I_{\alpha\kappa\omicron\rho\upsilon\phi\eta\varsigma}$ για όλη τη διέγερση να προκύψει μεγαλύτερος σε σχέση με αυτόν για το ρευστοποιημένο τμήμα. Τοιούτως, ο $I_{\alpha\text{ri}\alpha\varsigma}$ για το ρευστοποιημένο στρώμα θα είναι μεγαλύτερος ή ίσος με αυτόν για όλη τη διέγερση (περίπτωση Coyote Lake, Σχήμα 6.1).

Το δεύτερο θέμα το οποίο θα πρέπει να μας απασχολήσει είναι η ευαισθησία αυτού του δείκτη ως προς την επίδραση του πάχους της ρευστοποιήσιμης στρώσης. Έτσι, παρατηρείται ότι η τιμή του $I_{\alpha\text{ri}\alpha\varsigma}$

- ξεκινά από την τιμή 1 για πάχος $H=0\text{m}$ για όλες τις διεγέρσεις
- αυξάνεται και έχει τιμές μεγαλύτερες της μονάδας (έως και 1.7) για πάχη από 1-5m.
- ενώ, από τα 5 m και πάνω, ακολουθεί διαφορετική συμπεριφορά για κάθε διέγερση. Ο $I_{\alpha\text{ri}\alpha\varsigma}$ για την Coyote Lake αρχίζει να μειώνεται σταδιακά ενώ στα 12m καταλήγει να λαμβάνει τιμές μικρότερες από 0.10. Στο Northridge265 παρουσιάζεται μείωση του δείκτη μόνο στα πάχη 5-6m ενώ από τα 7 m και κάτω αυξάνεται λαμβάνοντας τελικώς, τιμή περί της μονάδας. Στο Ducze, σε αντίθεση με τις άλλες δύο διεγέρσεις, μόνο στο πάχος των 5 m λαμβάνει, σημειακά, τιμή ίση με μονάδα και εν συνεχεία αυξάνεται έως και την τιμή 2.5 για το πάχος των 12m.

Διευκρινίζεται ότι η ανωτέρω μορφή της συσχέτισης $I_{\alpha\text{ri}\alpha\varsigma}$ - H στην περίπτωση της Coyote Lake (χαρακτηρίζεται από μια δεσπόζουσα περίοδο) είναι πρακτικά ταυτόσημη με αυτή του Θεοχάρη (2011) για αρμονική διέγερση. Η μορφή του δείκτη για τις υπόλοιπες δύο διεγέρσεις παρουσιάζει κοινή μορφή με εκείνη των αρμονικών μόνο στα δύο πρώτα, από τα παραπάνω, στάδια.

Η ανωτέρω διαφοροποίηση θα πρέπει να αποδοθεί στο ευρύ φασματικό περιεχόμενο των σεισμικών διεγέρσεων κατηγορίας Β και Γ, σε αντίθεση με την αρμονική διέγερση. Στην περίπτωση αρμονικής διέγερσης, η αύξηση της ιδιοπεριόδου ταλάντωσης του ρευστοποιημένου στρώματος T_{soil} , οδηγεί σε συνεχώς αυξανόμενες τιμές του λόγου T_{soil}/T_{exc} και σε μονοσήμαντη πρακτικά απομείωση της εδαφικής κίνησης. Αντίθετα, στις πραγματικές σεισμικές διεγέρσεις, οι οποίες περιλαμβάνουν πολλές αρμονικές συνιστώσες, με περιόδους μεγαλύτερες της δεσπόζουσας περιόδου του κραδασμού, η αύξηση της ιδιοπεριόδου ταλάντωσης λόγω ρευστοποίησης, ενεργοποιεί σταδιακά τις αρμονικές συνιστώσες του κραδασμού με τις μεγαλύτερες περιόδους, με αποτέλεσμα τις παρατηρούμενες δευτερογενείς εδαφικές ενισχύσεις στις διεγέρσεις των Northridge 265 και Ducez.

Όπως και να έχει το πράγμα όμως, είναι χαρακτηριστικό ότι οι τιμές στο Σχήμα 6.2 δεν μειώνονται κάτω από 0.30-0.40 και επομένως το κριτήριο «πλήρους ρευστοποίησης» και απομείωσης του σεισμικού κραδασμού που χρησιμοποίησε ο Θεοχάρης (2011), ήτοι $I_{arias} \leq 0.20$, δεν μπορεί να εφαρμοσθεί για πραγματικές διεγέρσεις και θα πρέπει να αναθεωρηθεί.

6.3 ΛΟΓΟΣ ΦΑΣΜΑΤΩΝ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ : ΜΙΚΡΕΣ ΠΕΡΙΟΔΟΙ

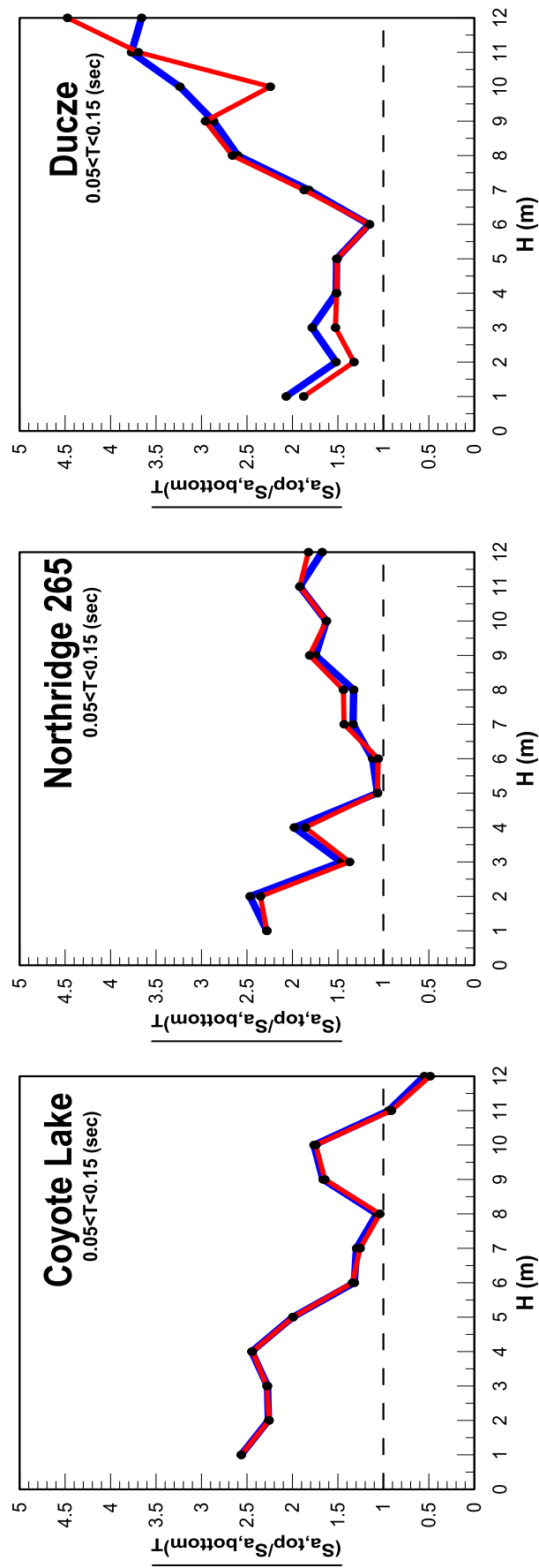
Η μεταβολή λόγου φασμάτων απόκρισης με το πάχος της ρευστοποιημένης στρώσης H , για μικρές περιόδους ($0.05 < T < 0.15$ sec) παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.3 για τις τρεις εξεταζόμενες διεγέρσεις (Coyote Lake, Northridge 265 και Ducez). Σε κάθε σχήμα παρουσιάζονται ξεχωριστά οι τιμές του εν λόγω δείκτη για ολόκληρη τη διέγερση, με μπλε γραμμή, καθώς και για το τμήμα της διέγερσης μετά τη ρευστοποίηση ($r_u > 0.8$) με κόκκινη γραμμή.

Παρατηρείται ότι η μέση φασματική ενίσχυση που προκύπτει είτε λαμβάνοντας υπόψη όλη τη διέγερση, είτε το τμήμα της διέγερσης μετά τη ρευστοποίηση του στρώματος είναι κοινή για τις διεγέρσεις Coyote Lake και Northridge 265 ενώ διαφοροποιείται αρκετά σε κάποια σημεία της διέγερσης Ducez. Επισημαίνεται όμως ότι ακόμη και αυτή η διαφοροποίηση είναι σαφώς μικρότερη από την αντίστοιχη του I_{arias} .

Η κοινή μορφή των διαγραμμάτων για όλη τη διέγερση και για το τμήμα αυτής μετά τη ρευστοποίηση, επί την πλειονότητα των τιμών του πάχους H , αποδεικνύει ότι οι μικρές περίοδοι παρουσιάζουν τις υψηλότερες τιμές επιτάχυνσης στο τμήμα μετά τη ρευστοποίηση και όχι στο τμήμα πριν αυτής.

Επισημαίνεται ακόμη, ότι η μεταβολή της μέσης φασματικής ενίσχυσης με το πάχος H δεν παρουσιάζει κοινή μορφή για τις τρεις διεγέρσεις. Η μέση φασματική ενίσχυση

- για πάχος $H=1m$ ξεκινάει και για τις τρεις διεγέρσεις από μια τιμή της τάξης 2-2.5
- ως τα 5 m παρουσιάζει χονδρικά μια τάση απομείωσης αγγίζοντας την τιμή της μονάδας και μη λαμβάνοντας τιμή μικρότερη αυτής ενώ
- από τα 5 m και πάνω, η απομείωση αυτή συνεχίζεται με διακυμάνσεις στη διέγερση της Coyote Lake ενώ στις διεγέρσεις Northridge 265 και Ducez, η μέση φασματική ενίσχυση αρχίζει να αυξάνεται ξανά. Ειδικότερα στην περίπτωση του Ducez, η φασματική ενίσχυση ξεπερνά την τιμή που είχε για πάχος 1m (2-2.5) και αγγίζει την τιμή 4.



Σχήμα 6.3 Μεταβολή της μέσης φασματικής ενίσχυσης με το πάχος H του ρευστοποιημένου στρώματος για μικρές τιμές περιόδων ($0.05 < T < 0.15$ sec). Η μέση φασματική ενίσχυση απεικονίζεται με μπλε, για όλη τη διάρκεια και με κόκκινο, για το τμήμα της διέγερσης μετά τη ρευστοποίηση.

Συμπερασματικά, οι μικρές περιόδους της διέγερσης ($0.05 < T < 0.15$ sec) ακόμη και μετά τη ρευστοποίηση, εμφανίζονται στο επιταχυνσιογράφημα της κορυφής του αμμώδους στρώματος τόσο στα μικρά όσο και στα μεγάλα πάχη αυτού. Επιπλέον, παρουσιάζονται σημαντικά ενισχυμένες σε σχέση με τη βάση του στρώματος της άμμου, λαμβάνοντας τιμές ακόμη και διπλάσιες αυτών που είχαν.

Η εικόνα αυτή έρχεται σε αντίθεση τόσο με της έως τώρα κοινή λογική όσο και με τα αποτελέσματα αρμονικών διεγέρσεων. Η έως τώρα γνώση υπαγόρευε ότι ένα ρευστοποιημένο στρώμα θα φίλτραρε τις υψηλές συχνότητες της διέγερσης και θα άφηνε μόνο τις χαμηλές. Ο Θεοχάρης (2011) απόδειξε ότι σε περίπτωση αρμονικών διεγέρσεων είναι δυνατόν να περάσουν και οι υψηλές συχνότητες, σε περίπτωση που το πάχος του ρευστοποιημένου στρώματος είναι μικρότερο από το κρίσιμο πάχος $H_{cr} = 1/3 \lambda$ όπου το λ συμβολίζει το μήκος κύματος της διέγερσης. Στην περίπτωση πραγματικών διεγέρσεων παρατηρείται ότι υψηλές συχνότητες μπορούν να παρουσιαστούν και στα μεγάλα πάχη και μάλιστα κατά πολύ ενισχυμένες.

6.4 ΛΟΓΟΣ ΦΑΣΜΑΤΩΝ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ : ΜΕΣΑΙΕΣ ΠΕΡΙΟΔΟΙ

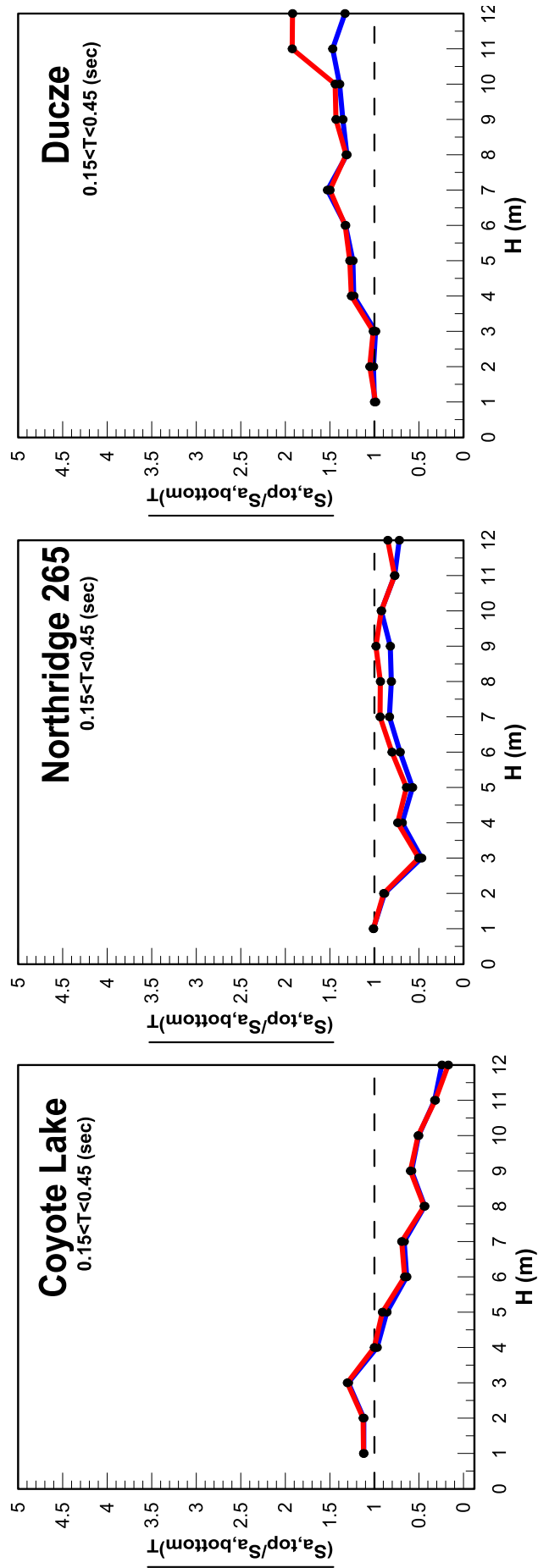
Στο Σχήμα 6.4 παρατίθεται η μεταβολή του λόγου φασμάτων απόκρισης με το πάχος της ρευστοποιημένης στρώσης H , για μεσαίες τιμές περιόδων ($0.15 < T < 0.45$ sec), για τις τρεις διεγέρσεις. Σε κάθε σχήμα παρουσιάζονται τόσο οι τιμές του εν λόγω δείκτη για ολόκληρη τη διέγερση, με μπλε γραμμή, όσο και για το τμήμα της διέγερσης μετά τη ρευστοποίηση ($r_u > 0.8$) με κόκκινη γραμμή.

Στην περίπτωση μεσαίων περιόδων, η μορφή της φασματικής ενίσχυσης για όλη τη διέγερση και για το ρευστοποιημένο τμήμα ταυτίζεται ακόμα περισσότερο, σε σχέση με τις μικρές περιόδους.

Ακόμη, παρατηρείται ότι η φασματική ενίσχυση παρουσιάζει κοινή μορφή με την περίπτωση των μικρών περιόδων με τη διαφορά ότι λαμβάνει μικρότερες τιμές. Αναλυτικότερα,

- για πάχος $H=1$ m και για όλες τις διεγέρσεις, η φασματική ενίσχυση λαμβάνει τιμή ίση με τη μονάδα
- ως τα 2 m κινείται περί της μονάδας
- ενώ από τα 3 m και κάτω στην Coyote Lake ξεκινά να απομειώνεται, λαμβάνοντας συνεχώς τιμές μικρότερες της μονάδας. Στη διέγερση του Northridge 265 παρατηρείται μια απομείωση της, έως τα 3m, χωρίς τελικά να λαμβάνει τιμές μεγαλύτερες της μονάδας και τέλος, στο Ducze, η μέση φασματική ενίσχυση δεν απομειώνεται καθόλου και αυξάνεται σταδιακά με το βάθος έως την τιμή 2.

Θα μπορούσε να λεχθεί ότι οι μεσαίες περιόδους παρουσιάζονται στο επιταχυνσιογράφημα της κορυφής της άμμου και μετά τη ρευστοποίηση, μόνο στη διέγερση του Ducze και για μεγάλα πάχη άμμου. Αντιθέτως στις διεγέρσεις των Coyote Lake και Northridge 265 το ρευστοποιημένο στρώμα φιλτράρει τις μεσαίες περιόδους, μη αφήνοντας τις να διέλθουν μέσα από αυτό.



Σχήμα 6.4 Μεταβολή της μέσης φασματικής ενίσχυσης με το πάχος H του ρευστοποιημένου στρώματος για μεσαίες τιμές περιόδων ($0.15 < T < 0.45$ sec). Η μέση φασματική ενίσχυση απεικονίζεται με μπλε, για όλη τη διάρκεια και με κόκκινο, για το τμήμα της διάρκειας μετά τη ρευστοποίηση.

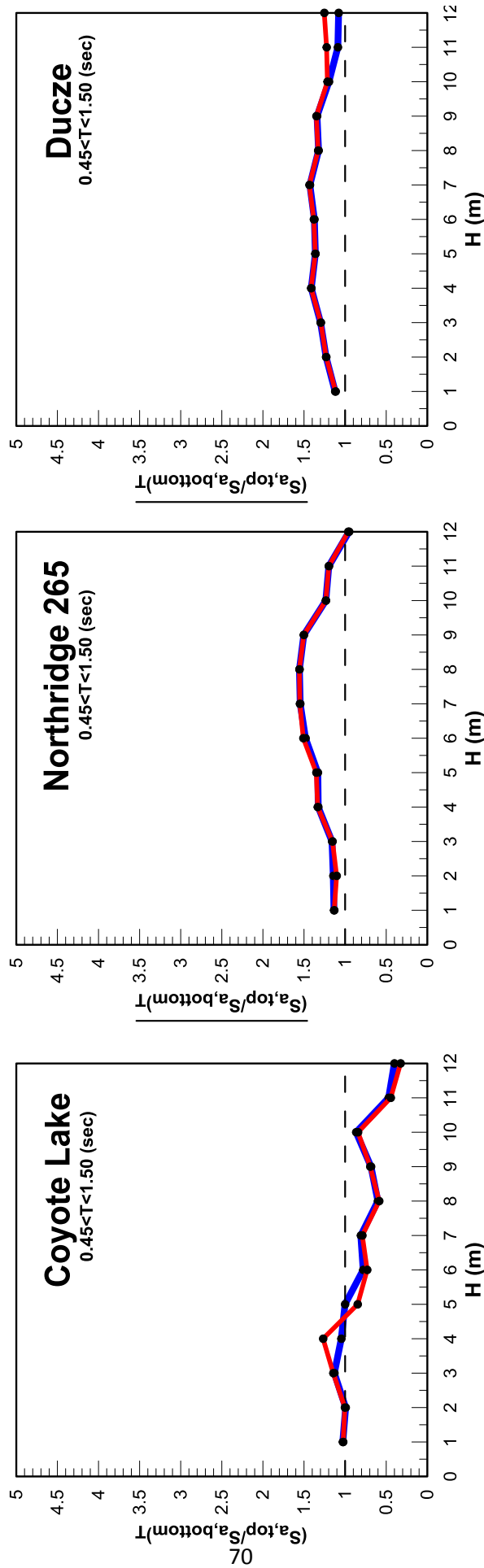
6.5 ΛΟΓΟΣ ΦΑΣΜΑΤΩΝ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ : ΜΕΓΑΛΕΣ ΠΕΡΙΟΔΟΙ

Η μεταβολή λόγου φασμάτων απόκρισης με το πάχος της ρευστοποιημένης στρώσης H , για μεσαίες τιμές περιόδων ($0.45 < T < 1.50$ sec) παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.5 για τις διεγέρσεις Coyote Lake, Northridge 265 και Ducze αντίστοιχα. Σε κάθε σχήμα παρουσιάζονται ξεχωριστά οι τιμές του δείκτη για ολόκληρη τη διέγερση, με μπλε γραμμή, καθώς και για το τμήμα της διέγερσης μετά τη ρευστοποίηση ($r_u > 0.8$) με κόκκινη γραμμή.

Όπως και στην περίπτωση των μεσαίων περιόδων, η μορφή του λόγου φασμάτων για πριν και μετά τη ρευστοποίηση είναι σχεδόν η ίδια για το σύνολο των τιμών του πάχους του ρευστοποιημένου στρώματος.

Εκ μιας πρώτης όψευς, οι μεγάλες περίοδοι ενισχύονται μόνο στα μεγάλα πάχη των διεγέρσεων Northridge 265 και Ducze. Ειδικότερα,

- για πάχος $H=1\text{m}$ και για όλες τις διεγέρσεις η φασματική ενίσχυση λαμβάνει τιμή ίση με τη μονάδα
- από τα 2m και κάτω, η φασματική ενίσχυση για τη διέγερση της Coyote Lake αρχίζει σταδιακά και απομειώνεται. Αντιθέτως, στις διεγέρσεις Northridge 265 και Ducze η φασματική ενίσχυση αυξάνεται, λαμβάνοντας τιμές έως 1.5 στα 7m.
- Από τα 7m και κάτω και στις τρεις διεγέρσεις παρατηρείται απομείωση της φασματικής ενίσχυσης. Στην Coyote Lake η φασματική ενίσχυση φτάνει την τιμή 0.30 στα 12m ενώ στις Northridge 265 και Ducze, αν και στο προηγούμενο διάστημα, η φασματική ενίσχυση είναι συνεχώς πάνω από την μονάδα, γίνεται ίση με αυτή για πάχος άμμου ίσο με 12 m.



Σχήμα 6.5 Μεταβολή της μέσης φασματικής ενίσχυσης με το πάχος H του ρευστοποιημένου στρώματος για μεγάλες τιμές περιόδων ($0.45 < T < 1.50 \text{ sec}$). Η μέση φασματική ενίσχυση απεικονίζεται με μπλε, για όλη τη διεύθυνση και με κόκκινο, για το τμήμα της διεύθυνσης μετά τη ρευστοποίηση.

6.6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Μετά την παρουσίαση των δεικτών τόσο για ολόκληρη τη διέγερση όσο και για το ρευστοποιημένο τμήμα καθώς και μετά την παρατήρηση της μεταβολής τους με το πάχος για τρεις χαρακτηριστικούς κραδασμούς, μπορούμε να καταλήξουμε σε κάποια βασικά συμπεράσματα.

- Δεδομένου ότι ο Θεοχάρης (2011) υπολόγισε τον I_{arias} για όλη τη διέγερση και όχι για το ρευστοποιημένο τμήμα μόνο, καθώς επίσης, ότι οι τυχόν αποκλίσεις στον υπολογισμό του I_{arias} με τη μια ή την άλλη θεώρηση, δημιουργούν ποσοτικές και όχι ποιοτικές διαφοροποιήσεις και υπό συγκεκριμένες συνθήκες μόνο, επιλέγεται η θεώρηση της πλήρους διέγερσης για τον υπολογισμό του I_{arias} .
- Όσον αφορά το λόγο απόκρισης των φασμάτων, η θεώρηση της πλήρους διέγερσης είναι εξίσου ικανοποιητική με αυτή του ρευστοποιημένου τμήματος, όπως φαίνεται και από τα Σχήματα 6.3 έως 6.5. Λαμβάνοντας υπόψη, ακόμη, ότι η θεώρηση της πλήρους διέγερσης διατηρεί τις αρχικές συνθήκες υποβολής του κραδασμού κρίνεται καταλληλότερη για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων.
- Μετά την πρώτη παρουσίαση των δεικτών για καθεμία από τις διεγέρσεις των κατηγοριών Α, Β, Γ προκύπτει ότι όσο μεταβαίνουμε από την κατηγορία Α στην κατηγορία Γ τόσο εντονότερες είναι οι αποκλίσεις των αποτελεσμάτων από εκείνων της αρμονικής διέγερσης.
- Φαίνεται ότι κραδασμοί με περισσότερες της μιας περιόδου, μπορούν να ενισχυθούν σε όλα τα πάχη του στρώματος και έτσι να προσδώσουν υψηλές τιμές τόσο στον I_{arias} όσο και στους λόγους των φασμάτων για μικρές, μεσαίες και μεγάλες περιόδους.

Αναλυτικότερα, με αφορμή την Coyote Lake, αναμένουμε ότι η μεταβολή του I_{arias} με το πάχος H για διεγέρσεις με μια δεσπόζουσα περίοδο θα είναι παραπλήσια με εκείνη των αρμονικών διεγέρσεων. Όσον αφορά τη φασματική ενίσχυση, λόγω μιας χαρακτηριστικής περιόδου στο φάσμα της Coyote Lake ($T=0.40\text{sec}$), περιμέναμε να έχουμε ενίσχυση μόνο στις μεσαίες περιόδους και για πάχη μικρότερα του $1/3 (V_s \cdot T)$ ή διαφορετικά του πάχους των 5m (θέτοντας μια μέση τιμή για την ταχύτητα στο ρευστοποιημένο στρώμα ίση με 40 m/sec).

- Συνεπώς, αν και για τις μεσαίες περιόδους έχουμε ενίσχυση στην Coyote Lake έως τα 5m, ενίσχυση έχουμε και στις μικρές περιόδους και μάλιστα μεγαλύτερη από εκείνη στις μεσαίες περιόδους. Η παρουσία των μικρών περιόδων θα μπορούσε να αποδοθεί στην παραμόρφωση που δέχθηκε η διέγερση κατά τη διάδοση της στην άργιλο βάσης. Η ενίσχυση των μικρών περιόδων, ωστόσο, δε μπορεί να δικαιολογηθεί προς το παρόν, στα μεγάλα πάχη.

Στις περιπτώσεις κραδασμών με περισσότερες της μιας χαρακτηριστικές περιόδους, που πρώτη φορά εξετάζονται σε συνάρτηση με το πάχος του αμμώδους στρώματος, παρατηρούμε αποκλίνουσα συμπεριφορά σε όλους του δείκτες, σε σχέση με τις αρμονικές διεγέρσεις.

- Από το διάγραμμα του I_{arias} για τις διεγέρσεις Northridge 265 και Ducze φαίνεται να μην ορίζεται κάποιο κρίσιμο πάχος πέρα του οποίου έχουμε απομείωση της σεισμικής κίνησης ενώ παράλληλα σημειώνεται πως ο σεισμικός κραδασμός ενισχύεται για την πλειοψηφία των παχών.

Αναφορικά με τη φασματική ενίσχυση,

- μόνο το Northridge 265 φαίνεται να απομειώνει τις μεσαίες περιόδους ($0.15 < T < 0.45 \text{ sec}$) αν και οι χαρακτηριστικές του περιόδοι είναι 0.20 και 0.30 sec.

- Το Ducez παρουσιάζεται να ενισχύει όλες τις περιόδους σε όλα τα πάχη προσφέροντας μεγαλύτερη ενίσχυση στις μικρές περιόδους και μικρότερη στις μεγάλες.
- Αξιοσημείωτες και πάλι οι ενισχύσεις των μικρών περιόδων σε όλα τα πάχη για τις διεγέρσεις Northridge 265 και Ducez.

7.1 ΓΕΝΙΚΑ

Για τη διεξαγωγή πρακτικών συμπερασμάτων προβαίνουμε στην εξέταση του δείκτη I_{arias} καθώς και του λόγου φασμάτων απόκρισης για τις διεγέρσεις των εξεταζόμενων κατηγοριών Α, Β, Γ. Στο προηγούμενο κεφάλαιο έγινε μια πρώτη αναπαράσταση της μορφής των δεικτών για τις διεγέρσεις Coyote Lake, Aigio και Northridge 265 ως αντιπροσωπευτικές για κάθε κατηγορία. Αναμένεται πως και οι υπόλοιπες διεγέρσεις της ίδιας κατηγορίας θα ακολουθούν την ίδια μορφή.

Στο στάδιο αυτό δε θα αρκεστούμε μόνο στην αναπαράσταση των δεικτών αλλά και στην συσχέτιση τους ως προς τον λόγο Η/λ ώστε να ελεγχθεί αν το μήκος κύματος είναι ένας από τους παράγοντες, που σε συνδυασμό με το πάχος του στρώματος, επηρεάζουν τις τιμές των δεικτών. Για τον ορισμό του λ, προαπαιτείται τόσο η ταχύτητα του σεισμικού κραδασμού στο ρευστοποιημένο στρώμα, όσο και η περίοδος της διέγερσης. Δεδομένου, ωστόσο, ότι οι πραγματικές διεγέρσεις διαθέτουν εύρος περιόδων σε σχέση με τις αρμονικές, προχωράμε στην εύρεση της αντιπροσωπευτικής περιόδου που θα ορίσει το μήκος κύματος για την κανονικοποίηση.

Τέλος, στο κεφάλαιο αυτό, σημειώνονται οι οποίες αποκλίσεις σε σχέση με τις αρμονικές διεγέρσεις, παρουσιάζονται τροποποιήσεις ενώ παράλληλα γίνεται προσπάθεια εξαγωγής πρακτικών συμπερασμάτων, οδηγιών.

7.2 ΕΠΙΛΟΓΗ ΠΕΡΙΟΔΩΝ ΜΕΛΕΤΗΣ

Ακόμα και πραγματικές διεγέρσεις που διαθέτουν μια καλά ορισμένη περίοδο, χαρακτηρίζονται από ένα εύρος περιόδων γύρω από αυτή, οι οποίες ορίζουν ένα διαφορετικό λ σε σχέση με τη δεσπόζουσα.

Στην προσπάθεια ορισμού αυτού του εύρους, κάναμε την ακόλουθη σύμβαση. Ορίσαμε τις ακραίες περιόδους του εύρους ως εκείνες που αντιστοιχούν σε φασματική επιτάχυνση ίση με

$$S_a = \frac{S_{a_{max}} - S_{a(T=0 \text{ sec})}}{2} \quad (7.1)$$

Όπου S_a φασματική επιτάχυνση

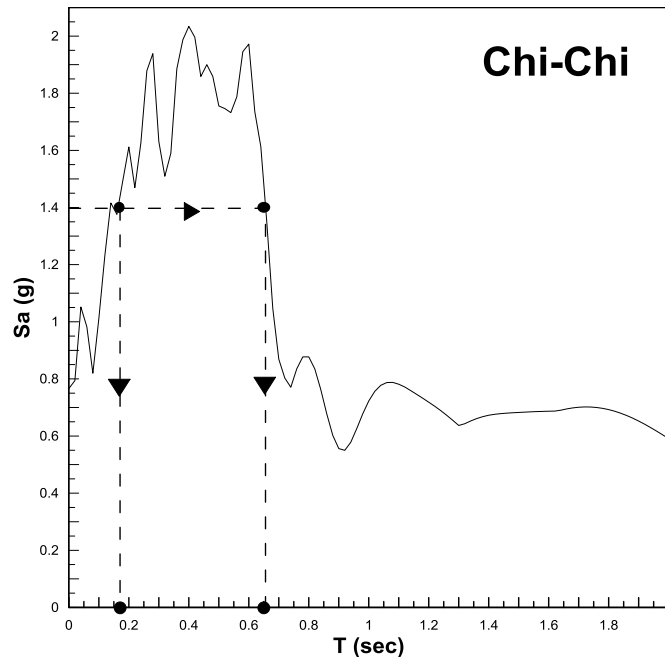
$S_{a_{max}}$ μέγιστη επιτάχυνση φάσματος

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

Με αυτόν τον τρόπο, θεωρήσαμε, ότι μπορούσαμε να καλύψουμε ένα ευρύ φάσμα περιόδων γύρω από τη/τις δεσπόζουσες. Μια γραφική απεικόνιση της σύμβασης παρουσιάζεται στο Σχήμα 7.1 για τη διέγερση του Chi-Chi. Όπως φαίνεται και από το σχήμα το μελετηθέν εύρος είναι το 0.15-0.65sec.

Από το επιλεγμένο εύρος αποφασίσαμε να μελετήσουμε τα άκρα του, δηλαδή τις T_{min} , T_{max} καθώς και τη μέση τιμή αυτών, την \bar{T} . Βάση αυτών των T υπολογίζονται τα αντίστοιχα λ , τα οποία ονομάζονται λ_{min} , λ_{max} και $\bar{\lambda}$.

Δεδομένου, επίσης, ότι το μήκος κύματος απαιτεί και τη γνώση της ταχύτητας στο ρευστοποιημένο στρώμα, θεωρήσαμε μια μέση τιμή αυτής για κάθε διέγερση. Αποφύγαμε τον υπολογισμό του μήκους κύματος με βάση τη ταχύτητα σε κάθε πάχος ξεχωριστά λόγω των διακυμάνσεων που παρουσίαζε αυτή. Δε θέλαμε λόγω αύξησης της ταχύτητας σε δύο διαδοχικά πάχη το δεύτερο να παρουσίαζε μικρότερο λόγο H/λ σε σχέση με το πρώτο.



Σχήμα 7.1 Διαδικασία εύρεσης εύρους περιόδων μελέτης για τη διέγερση του Chi-Chi.

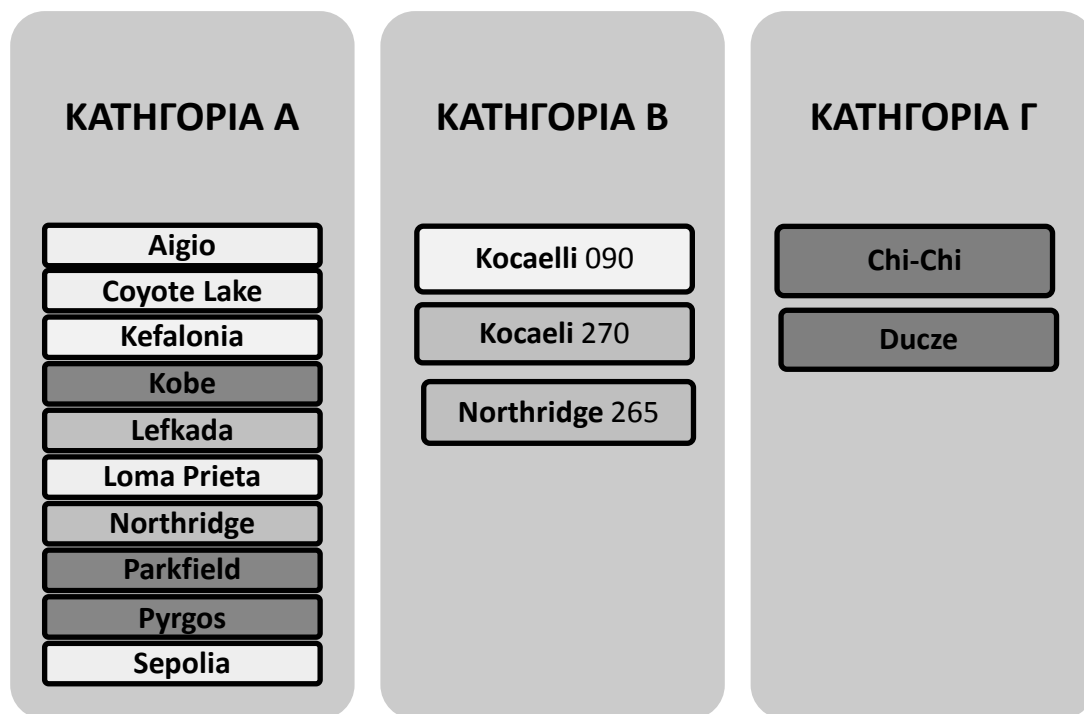
7.3 ΟΡΙΣΜΟΣ ΚΡΙΣΙΜΗΣ ΤΙΜΗΣ ΔΕΙΚΤΩΝ

Ο Θεοχάρης (2011) όρισε το πάχος του στρώματος, πέρα του οποίου παρατηρείται απομείωση τη εδαφικής κίνησης, για κάθε διέγερση, ύστερα από παρατήρηση της μορφής των επιταχυνσιογραφημάτων κορυφής και βάσης αλλά και της μορφής της διαδρομής των τάσεων. Δυστυχώς, η ίδια διαδικασία δε μπορεί να εφαρμοστεί στη δικιά μας περίπτωση. Από παρατήρηση των επιταχυνσιογραφημάτων κορυφής και βάσης φαίνεται πως στην πλειονότητα των περιπτώσεων, δε παρατηρείται ολοσχερής απομείωση της σεισμικής κίνησης, τουλάχιστον όχι με τη μορφή των διαγραμμάτων του Θεοχάρη. Σημειακές ενισχύσεις παρατηρούνται και στα 12m ενώ από τα διαγράμματα της διαδρομής των τάσεων είναι έντονη η επίδραση της διαστολικότητας. Για το λόγο αυτό, θα θεωρήσουμε δεδομένο πως ο I_{arias} σε περιπτώσεις απομείωσης της σεισμικής κίνησης, λαμβάνει την τιμή 0.30 και με βάση αυτή την τιμή θα πορευτούμε για την εύρεση της κρίσιμης τιμής του λόγου H/λ .

Δεδομένου, επίσης, ότι θα μελετήσουμε κατηγορίες με αποκλίνουσα συμπεριφορά μεταξύ τους, όπως διαφάνηκε και στο Κεφάλαιο 6, οι κρίσιμες τιμές των δεικτών θα αφορούν τα σημεία, στα οποία παρατηρείται μεταβολή της μορφής του δείκτη όπως αύξηση ή μείωση του.

7.4 ΕΠΑΝΑΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΔΙΕΓΕΡΣΕΩΝ

Από την απεικόνιση και μόνο του δείκτη I_{arias} παρουσιάστηκαν αποκλίνουσες συμπεριφορές ακόμα και στις διεγέρσεις της ίδιας κατηγορίας. Το γεγονός αυτό μας οδήγησε στη επανακαταξή τους, όχι με κριτήριο το πλήθος των κορυφών τους, αλλά με βάση τη συμπεριφορά τους ως προς τον δείκτη I_{arias} . Η τελική κατάταξη των διεγέρσεων παρουσιάζεται στον Πίνακα 7.1. Κάθε διεγέρση έχει απεικονισθεί με διαφορετική απόχρωση του γκρι, ώστε να φαίνεται σε ποια κατηγορία άνηκε προηγουμένως. Από τον Πίνακα 7.1, παρατηρείται πως οι περισσότερες διεγέρσεις ανήκουν πλέον στην κατηγορία Α, ακόμα και αυτές που πρωτίστως ανήκαν στην κατηγορία Γ.



	Διέγερση πρώην κατηγορίας Α
	Διέγερση πρώην κατηγορίας Β
	Διέγερση πρώην κατηγορίας Γ

Πίνακας 7. Ανακατηγοριοποιημένες διεγέρσεις βάση της μορφής του δείκτη I_{arias} τους, με το πάχος.

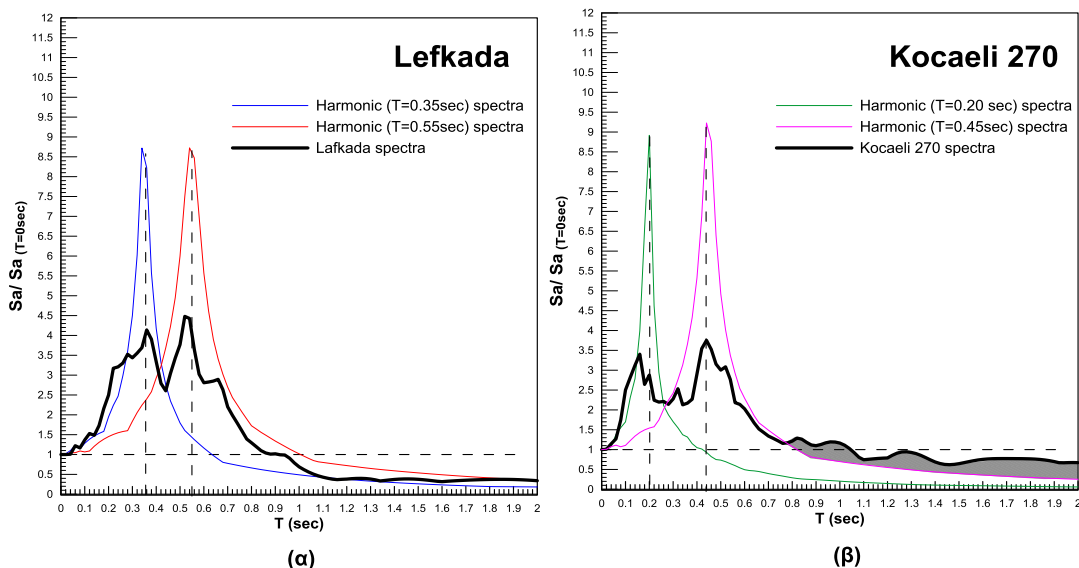
7.5 ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΚΑΤΑΤΑΞΗΣ ΔΙΕΓΕΡΣΕΩΝ

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} .

Προκαλώντας έκπληξη το γεγονός πως οι περισσότερες διεγέρσεις συμπεριφέρθηκαν σαν αρμονικές (διεγέρσεις κατηγορίας A), εστίασαμε στο λόγο που οδηγεί μια διέγερση να συμπεριφερθεί τοιούτως.

Σε πρώτο στάδιο, απεικονίσαμε σε κοινό διάγραμμα το φάσμα μιας αρμονικής διέγερσης και εκείνο της διέγερσης της Lefkada ώστε να δούμε ποιο ήταν εκείνο το στοιχείο που την ανάγκασε να μετακινηθεί από την κατηγορία B στην A. 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 $T=0sec$, ($S_{a(T=0sec)}$) 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 μετα την ανακατάταξη παρέμεινε στην κατηγορία B.

Στο Σχήμα 7.5 παρουσιάζονται τα ανωτέρω. Είναι εμφανές πως κάθε κορυφή μπορεί να αναπαρασταθεί επαρκώς από μια αρμονική με την ίδια περίοδο με αυτή. Παραταύτα, η προσοχή μας επικεντρώθηκε στις μεγάλες περιόδους από 0.80sec έως και 2sec, όπου προφανώς δεν αποτελούν συνήθεις δεσπόζουσες περιόδους. Παρατηρήσαμε πως το 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).

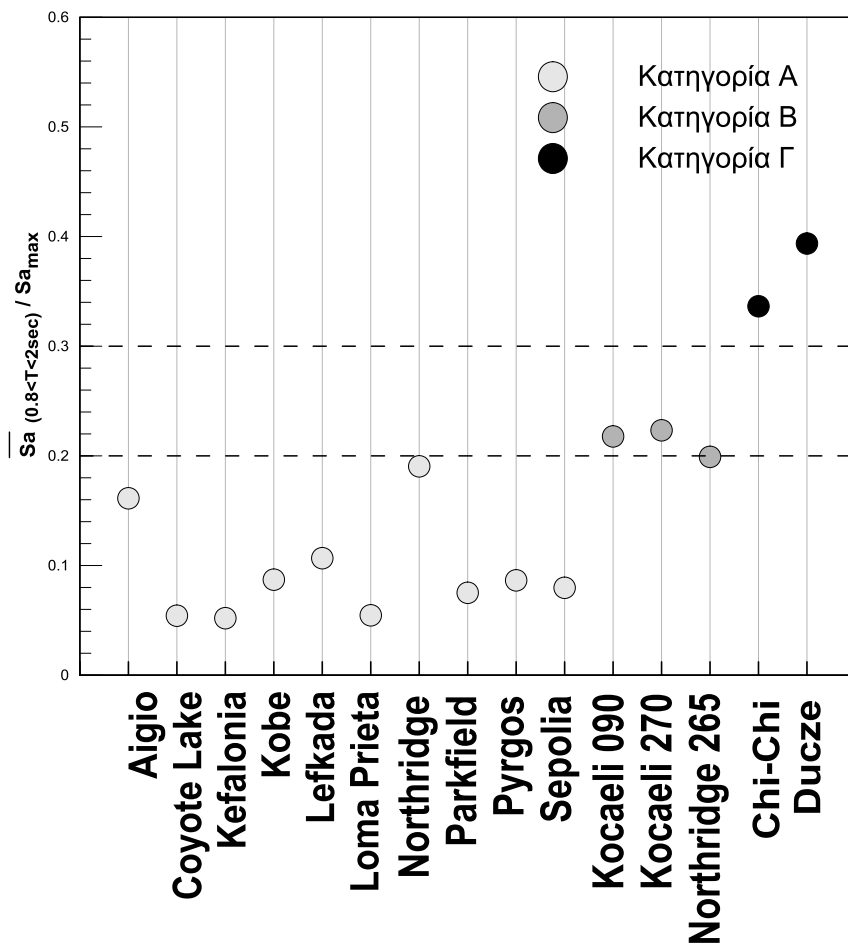


Σχήμα 7.2 Κανονικοποιημένα φάσματα ως προς την μέγιστη επιτάχυνση του εδάφους ($S_{a(T=0sec)}$) για τις διεγέρσεις της Lefkada (α) και του Kocaeli270 (β) (παχιά γραμμή). Στα ίδια διαγράμματα απεικονίζονται οι κανονικοποιημένες αρμονικές που έχουν κοινή περίοδο με εκείνες των κορυφών των διεγέρσεων (λεπτή γραμμή).

Η διαφορά αυτή μας οδήγησε στο να βρούμε τη μέση φασματική επιτάχυνση σε αυτό το διάστημα και να ορίσουμε ποιο ποσοστό της μέγιστης επιτάχυνσης αποτελούσε ή διαφορετικά το λόγο $\bar{S}_{a(0.8 < T < 2sec)} / S_{a,max}$.

Στο Σχήμα 7.6 φαίνεται η τιμή του λόγου $\bar{S}_{a(0.8 < T < 2sec)} / S_{a,max}$ για όλες τις διεγέρσεις. Φαίνεται πως βάση του λόγου προκύπτει ένας πολύ καλός διαχωρισμός των κατηγοριών. Θα μπορούσε να ειπωθεί πως μια διεγερση με

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



Σχήμα 7.3 Απεικόνιση του λόγου $\bar{S}_{a(0.8 < T < 2sec)} / S_{a,max}$ 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).

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

7.6 ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΟΥ ΔΕΙΚΤΗ I_{ARIAS}

Στα επόμενα σχήματα παρουσιάζεται η μεταβολή του δείκτη I_{arias} για τις τρεις κατηγορίες διεγέρσεων. Παρουσιάζεται τόσο η μεταβολή του δείκτη με το πάχος H αλλά και οι κανονικοποιημένοι λόγοι H/λ_{min} , $H/\bar{\lambda}$, H/λ_{max} . Με γκρι γραμμή παρουσιάζεται η μεταβολή του δείκτη και για αρμονικές διεγέρσεις, ενώ έχει γραμμοσκιαστεί το τμήμα που καταλαμβάνουν οι πραγματικές διεγέρσεις ώστε να είναι ευδιάκριτη η μορφή της τάσης τους (trend).

Διεγέρσεις της κατηγορίας A

Στο Σχήμα 7.4, παρουσιάζεται η μεταβολή του δείκτη I_{arias} με το πάχος H καθώς και με τον λόγο H/λ_{min} , $H/\bar{\lambda}$ και H/λ_{max} . Πριν την κανονικοποίηση, διακρίνονται δύο ομάδες διεγέρσεων, κάθε μια από τις οποίες φαίνεται να απομειώνεται σε διαφορετική τιμή του πάχους. Η πρώτη ομάδα αποτελείται από τις διεγέρσεις Pyrgos, Parkfied, Kefalonia, Sepolia και Loma Prieta ενώ η δεύτερη από τις Aigio, Coyote Lake, Lefkada και Northridge. Παρατηρώντας τα φάσματα τους διαφαίνεται ότι οι διεγέρσεις της πρώτης ομάδας έχουν μέγιστες περιόδους, βάση της σύμβασης, περί τα 0.30 sec με 0.40 sec σε αντίθεση με εκείνες της δεύτερης κατηγορίας, οι οποίες παρουσιάζουν μέγιστες περιόδους 0-60-0.70sec. Συμπεραίνεται ότι ο παράγοντας περίοδος επηρεάζει αισθητά το κρίσιμο πάχος.

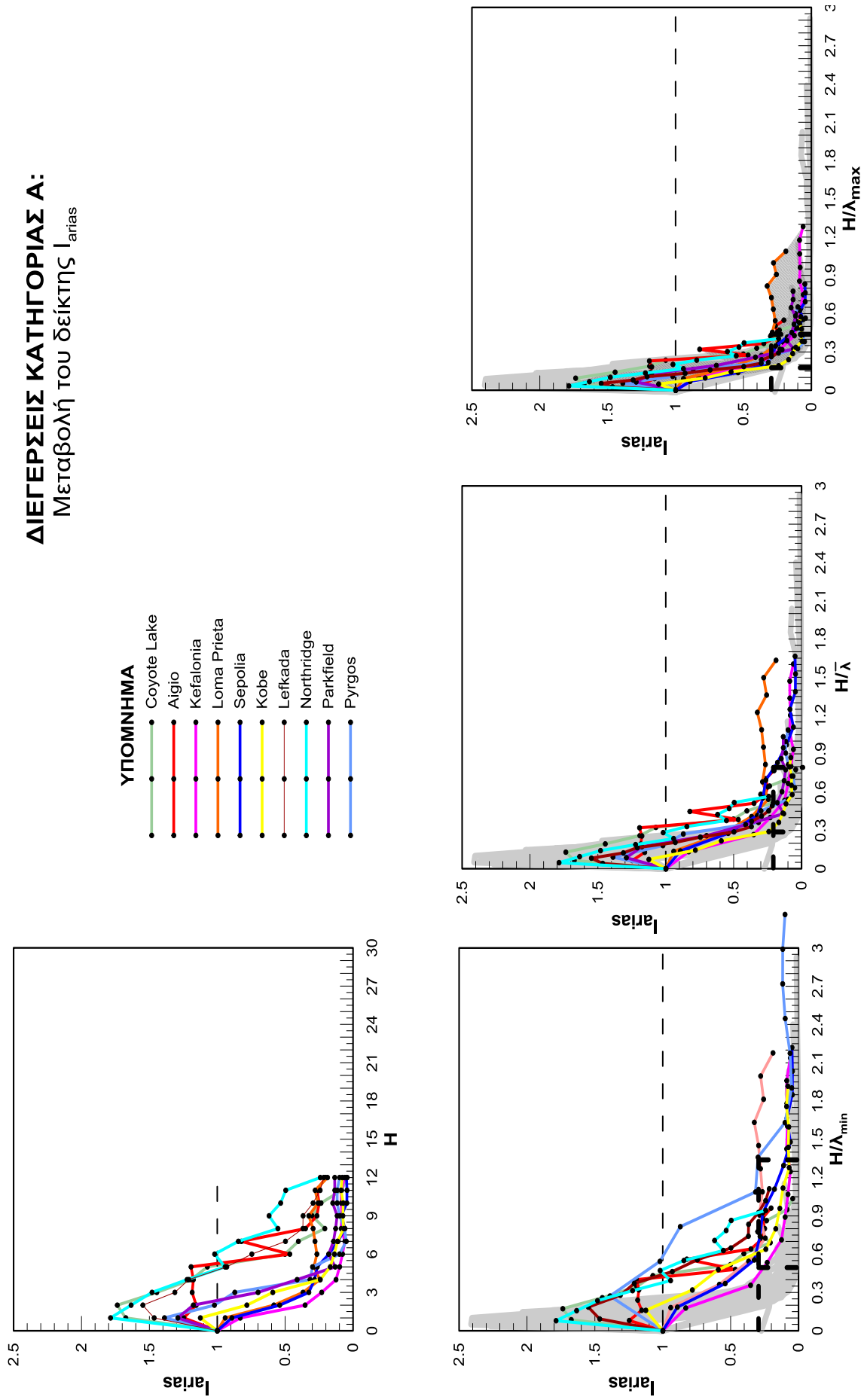
Κανονικοποίηση ως προς το μήκος κύματος συνεπώς και ως προς την περίοδο της κάθε διέγερσης, μειώνει αισθητά το εύρος των διεγέρσεων και ορίζει ένα κρίσιμο πάχος πέρα του οποίου η απομείωση της σεισμικής απόκρισης είναι αισθητή ($I_{arias} \approx 0.30$). Συγκεκριμένα, στην περίπτωση που ο $I_{arias} \approx 0.30$ και η κανονικοποίηση ορίζεται ως προς το

- ελάχιστο μήκος κύματος, το κρίσιμο πάχος ορίζεται στο $H_{cr}/\lambda_{min} = 0.50-1.30$
- μέσο μήκος κύματος, το κρίσιμο πάχος λαμβάνει την τιμή $H_{cr}/\bar{\lambda} = 0.03-0.60$
- μέγιστο μήκος κύματος, το κρίσιμο πάχος ορίζεται στο $H_{cr}/\lambda_{max} = 0.20-0.40$.

Από την απεικόνιση του δείκτη για κάθε μήκος κύματος λ_{min} , λ_{max} , $\bar{\lambda}$ προκύπτει πως κανονικοποίηση του πάχους H , ως προς το μικρότερο μήκος κύματος δε προσφέρει δραστική μείωση του εύρους H/λ . Ακόμη παρατηρείται πως τα μήκη κύματος λ_{min} , λ_{max} φέρνουν τις διεγέρσεις κοντά και δίνουν πανομοιότυπη σύγκλιση του εύρους. Επιπλέον, στην περίπτωση της κανονικοποίησης ως προς το λ_{max} , το εύρος ταυτίζεται με το αντίστοιχο των αρμονικών (υπενθυμίζεται ότι υπό αρμονικές συνθήκες το εύρος διακύμανσης του H_{cr}/λ ήταν 0.20-0.45). Δεδομένου λοιπόν, ότι το μήκος κύματος λ_{max} είναι πιο αντιπροσωπευτικό για την ποσοτικοποίηση του κρίσιμου πάχους, θα επικεντρωθούμε στη μεταβολή του δείκτη για το λόγο H/λ_{max} ώστε να ποσοτικοποιήσουμε τη σεισμική απόκριση.

Συνεπώς, ο δείκτης I_{arias} σε όλες τις περιπτώσεις, παίρνει τη γνώριμη μορφή από τις αρμονικές διεγέρσεις με 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, λίγο μικρότερη, δηλαδή, από εκείνη που προσέδιδαν οι αρμονικές, ήτοι 2.50.

ΔΙΕΓΕΡΣΕΙΣ ΚΑΤΗΓΟΡΙΑΣ Α:
Μεταβολή του δείκτη I_{arias}

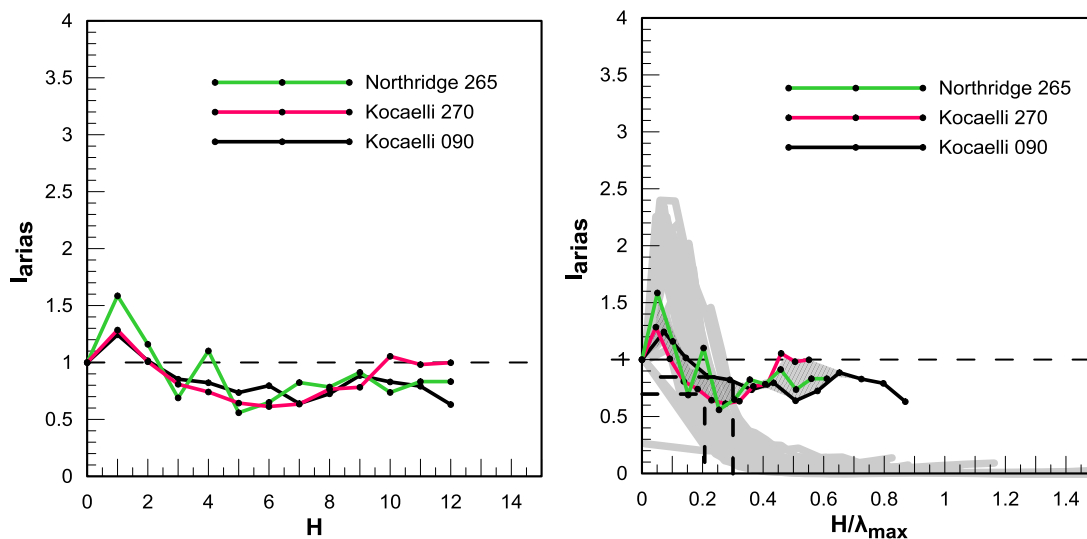


Σχήμα 7.4 Μεταβολή του δείκτη I_{arias} για τις διεγέρσεις της κατηγορίας Α, ως προς το πάχος H και ως προς τους κανονικοποιημένους λόγους H/Λ_{min} , H/Λ , H/Λ_{max} . Με γκρι, σκινό χρώμα παρουσιάζεται η μεταβολή του I_{arias} για τις αρμονικές διεγέρσεις.

Διεγέρσεις της κατηγορίας Β

Στο Σχήμα 7.5, παρουσιάζεται η μεταβολή του δείκτη I_{arias} με το πάχος H καθώς και με τον λόγο H/λ_{max} . Εκ πρώτης όψευς, φαίνεται πως στη συγκεκριμένη κατηγορία διεγέρσεων υπάρχει σύγκλιση πριν καν την κανονικοποίηση τους, εφόσον όπως και στις αντίστοιχες της κατηγορίας Α, οι μέγιστες περιόδους τους είναι κοινές, περί το 0.50sec. Η κοινή τους περίοδος T_{max} δε θα διαφοροποιεί τη συμπεριφορά της μιας από την άλλη για τον I_{arias} αλλά αναμένεται να μην τη διαφοροποιεί, ούτε κατά τη μελέτη του λόγου φασμάτων απόκρισης.

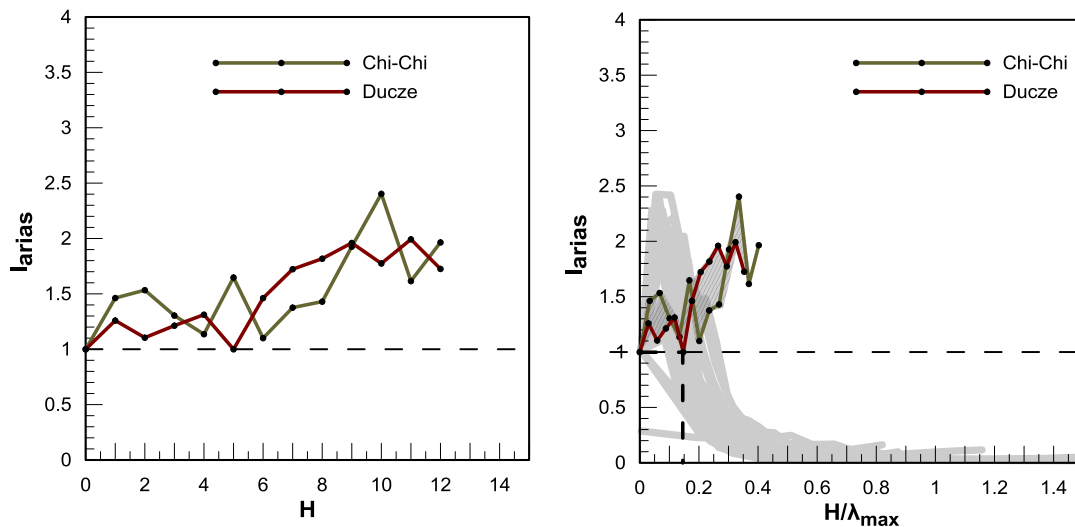
Οι διεγέρσεις της κατηγορίας Β παρουσιάζουν εντόνως αποκλίνουσα συμπεριφορά με τις αρμονικές διεγέρσεις. Θα μπορούσε να λεχθεί ότι οι διεγέρσεις της κατηγορίας Β ακολουθούν έως ένα σημείο τη συμπεριφορά των αρμονικών, με ενισχύσεις στα μικρά πάχη και εν συνεχεία μικρή απομείωση του δείκτη I_{arias} ώστε να λαμβάνει κατώτατη τιμή ίση με 0.70-0.90 για $H/\lambda_{max}=0.20-0.30$. 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).



Σχήμα 7.5 Μεταβολή του δείκτη I_{arias} για τις διεγέρσεις της κατηγορίας Β, ως προς το πάχος H και ως προς τον κανονικοποιημένο λόγο H/λ_{max} . Με γκρι, αχνό χρώμα παρουσιάζεται η μεταβολή του I_{arias} για τις αρμονικές διεγέρσεις.

Διεγέρσεις της Κατηγορίας Γ

Στην κατηγορία Γ, οι διεγέρσεις των Chi-Chi και Ducez παρουσιάζουν συμπεριφορά πολύ διαφορετική από αυτές που έχουν έως τώρα συναντηθεί. Στο Σχήμα 7.6, φαίνονται οι τιμές του I_{arias} με το πάχος και με το λόγο H/λ_{max} . Το Ducez και το Chi-Chi, διαθέτοντας μέγιστες περιόδους, με βάση τη σύμβαση, ίσες με 0.7 και 0.9 αντίστοιχα, παρουσιάζουν σχεδόν κοινή διακύμανση πριν τη κανονικοποίησή τους.



Σχήμα 7.6 Μεταβολή του δείκτη I_{arias} για τις διεγέρσεις της κατηγορίας Γ ως προς το πάχος H και ως προς τον κανονικοποιημένο λόγο H/λ_{max} . Με γκρι, αχνό χρώμα παρουσιάζεται η μεταβολή του I_{arias} για τις αρμονικές διεγέρσεις.

Όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις, οι διεγέρσεις αυτές ακολουθούν τη μορφή των αρμονικών ως το πάχος $H=0.15\lambda$ και από εκεί και ύστερα φαίνεται να ενισχύονται παρά να απομειώνονται με το να παίρνουν έως και 2.5 φορές μεγαλύτερες τιμές επιταχύνσεων σε σχέση με τη βάση.

7.7 ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΛΟΓΟΥ ΦΑΣΜΑΤΩΝ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΣΤΙΣ ΜΙΚΡΕΣ ΠΕΡΙΟΔΟΥΣ

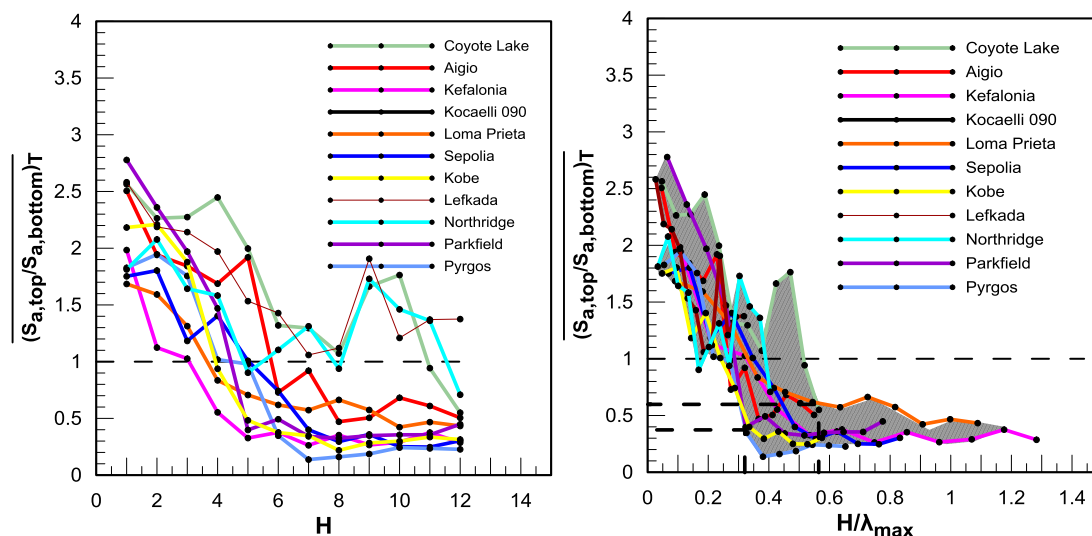
Στα Σχήματα 7.7, 7.8, 7.9 παρουσιάζεται η μεταβολή του λόγου φασμάτων απόκρισης για τις μικρές περιόδους ($0.05 < T < 0.15 \text{sec}$) συναρτήσει του πάχους του ρευστοποιημένου στρώματος H αλλά και του κανονικοποιημένου λόγου H/λ_{max} . Στο διάγραμμα με το κανονικοποιημένο λόγο έχει σκιαγραφηθεί το τμήμα που ορίζουν οι διεγέρσεις ώστε να μπορεί να χαρακτηριστεί η τάση τους ως προς τις τιμές του λόγου H/λ_{max} (trend).

Διεγέρσεις της κατηγορίας Α

Η μεταβολή του λόγου φασμάτων απόκρισης με το πάχος για τις διεγέρσεις της κατηγορίας Α παρουσιάζεται στο Σχήμα 7.7. 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 I_{arias} . 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 $I_{arias}=0.30-0.55$. Περιμένουμε πως και σε περίπτωση αρμονικών διεγέρσεων, θα λαμβάναμε την ίδια εικόνα.

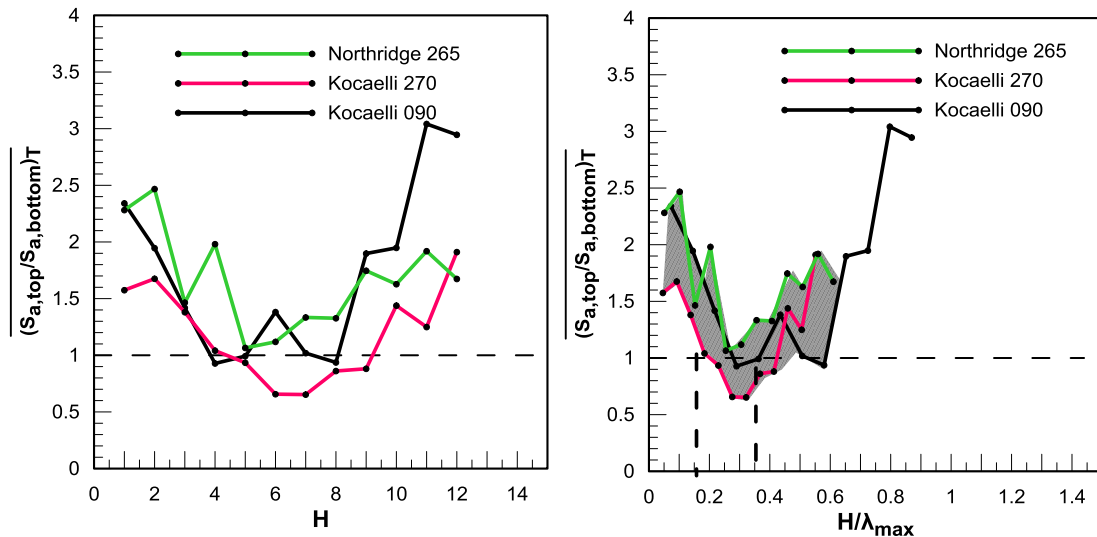
Η εικόνα του λόγου φασμάτων απόκρισης είναι η αναμενόμενη από άποψη συμπεριφοράς. Μικρά πάχη που χαρακτηρίζονται από μικρές τιμές περιόδων θα ενισχύουν τις μικρές περιόδους ενώ αντίθετα πάχη που χαρακτηρίζονται από υψηλές τιμές περιόδων θα απομειώνουν τις μικρές περιόδους.



Σχήμα 7.7 Μεταβολή του δείκτη του λόγου φασμάτων απόκρισης για τις μικρές περιόδους των διεγέρσεων της κατηγορίας A, ως προς το πάχος H και ως προς τον κανονικοποιημένο λόγο H/λ_{max} .

Διεγέρσεις της Κατηγορίας B

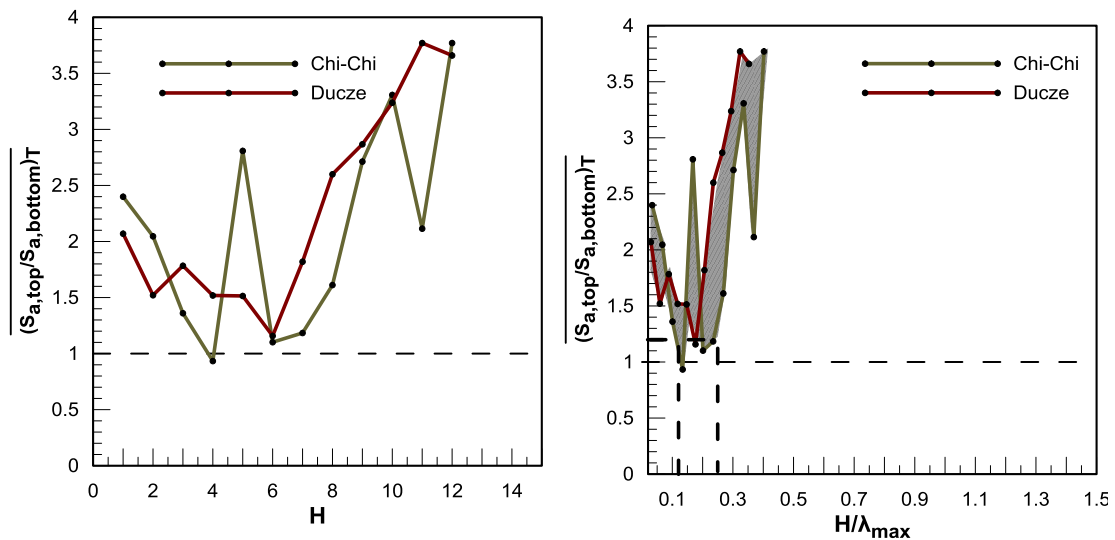
Στις διεγέρσεις της κατηγορίας B, (Σχήμα 7.8) φαίνεται πως η κανονικοποίηση προσέθεσε μικρή μείωση του κρίσιμου εύρους H/λ_{max} λόγω της κοινής περιόδου των διεγέρσεων. Η μορφή της καμπύλης είναι ίδια με εκείνη του I_{arias} με τη διαφορά, όμως, πως παρουσιάζει σημειακή απομείωση ενώ στο μεγαλύτερο μέρος της ενισχύει τη φασματική επιτάχυνση. Συγκεκριμένα, ο λόγος φασμάτων απόκρισης απομειώνεται στα πάχη $H=0.25-0.35\lambda$ 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 7.8 Μεταβολή του δείκτη του λόγου φασμάτων απόκρισης για τις μικρές περιόδους των διεγέρσεων της κατηγορίας Β, ως προς το πάχος H και ως προς τον κανονικοποιημένο λόγο H/λ_{max} .

Διεγέρσεις της κατηγορίας Γ

Η κανονικοποίηση δε μειώνει το εύρος των απεικονιζόμενων διεγέρσεων όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.9. Το Ducze και το Chi-Chi της κατηγορίας Γ, ενισχύουν συνεχώς τη φασματική επιτάχυνση δίνοντας της ελάχιστη τιμή ίση με 1 στα μεσαία πάχη (4-7m) ή για $H = 0.10-0.25\lambda$. 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.



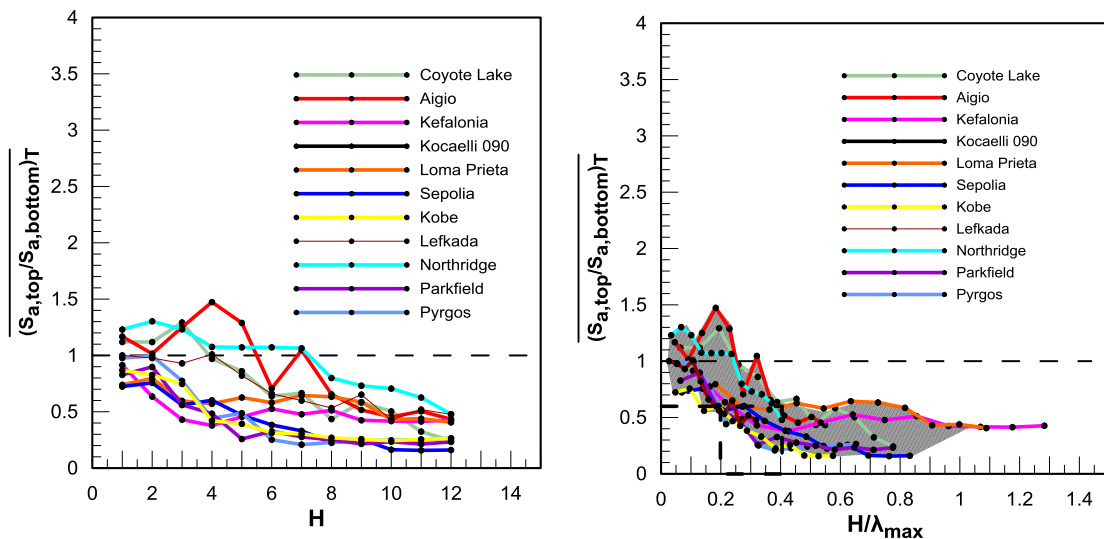
Σχήμα 7.9 Μεταβολή του δείκτη του λόγου φασμάτων απόκρισης για τις μικρές περιόδους των διεγέρσεων της κατηγορίας Γ, ως προς το πάχος H και ως προς τον κανονικοποιημένο λόγο H/λ_{max} .

7.8 ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΟΥ ΛΟΓΟΥ ΦΑΣΜΑΤΩΝ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΣΤΙΣ ΜΕΣΑΙΕΣ ΠΕΡΙΟΔΟΥΣ

Στα Σχήματα 7.10, 7.11 και 7.12 παρουσιάζεται η μεταβολή του λόγου φασμάτων απόκρισης για τις μεσαίες περιόδους συναρτήσει του πάχους του ρευστοποιημένου στρώματος H αλλά και του κανονικοποιημένου λόγου H/λ_{\max} . Στο διάγραμμα με το κανονικοποιημένο λόγο έχει σκιαγραφηθεί όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις το trend των διεγέρσεων.

Διεγέρσεις της Κατηγορίας Α

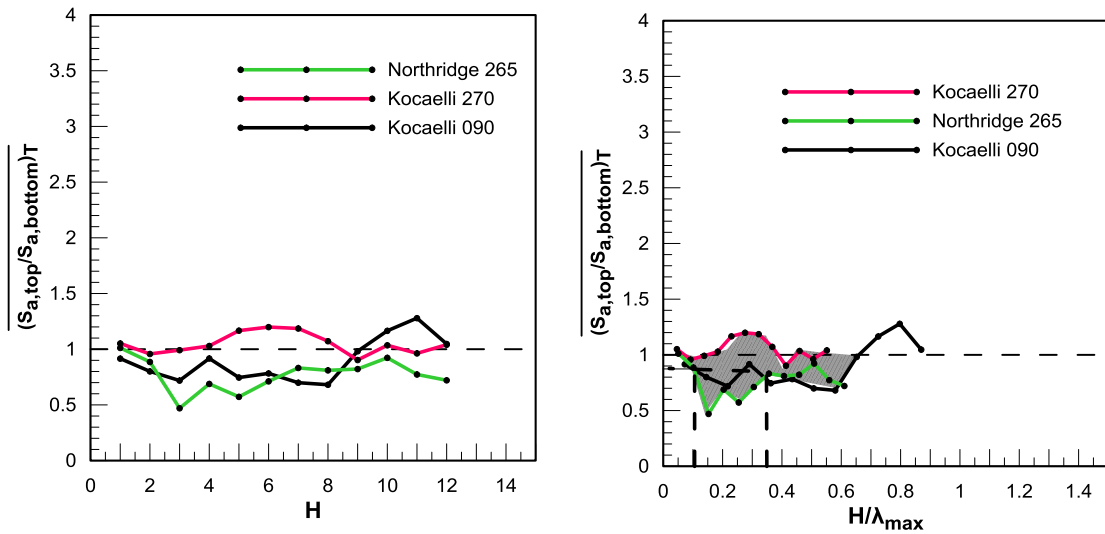
Ο λόγος φασμάτων απόκρισης παρουσιάζεται πρακτικά απομειωμένη στις μεσαίες περιόδους για όλα τα πάχη και περισσότερο για μεγάλα. Απομείωση αυτής στο μισό πραγματοποιείται για πάχη $H=0.20-0.40\lambda$. Όπως και αναμενόταν, καθώς το πάχος του στρώματος μεγαλώνει, μεγαλώνει και η ιδιοπερίοδος του, με αποτέλεσμα να μη μπορεί να ενισχύει τις μεσαίες περιόδους.



Σχήμα 7.10 Μεταβολή του δείκτη του λόγου φασμάτων απόκρισης για τις μεσαίες περιόδους των διεγέρσεων της κατηγορίας Α, ως προς το πάχος H και ως προς τον κανονικοποιημένο λόγο H/λ_{\max} .

Διεγέρσεις της κατηγορίας Β

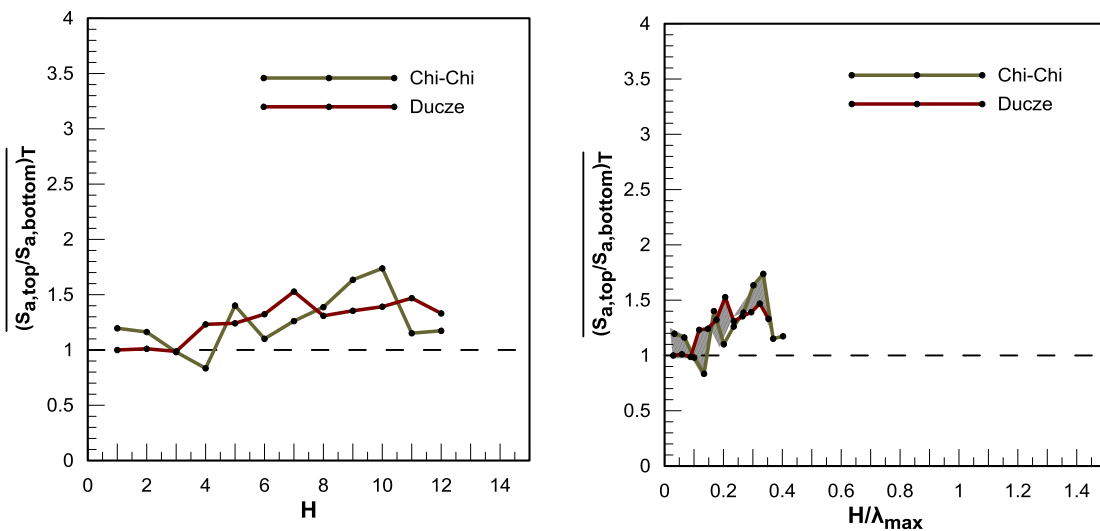
Για τις διεγέρσεις της κατηγορίας Β, ο λόγος φασμάτων απόκρισης κινείται περι της μονάδας για όλα τα πάχη. Ερμηνεία αυτού, σημαίνει πως οι μεσαίες περίοδοι (0.15-0.45) που συνήθως συνιστούν τις συνήθεις τιμές περιόδων για τις διεγέρσεις, δεν απομειώνονται μετά από κάποιο πάχος αλλά διατηρούνται σταθερές. Αξίζει ωστόσο, να σημειωθεί πως οι διεγέρσεις Northridge 265 και Kocaelli 090 οι οποίες απομείωναν τις μικρές περιόδους στο διάστημα $0.15-0.35\lambda_{\max}$ στο ίδιο διάστημα φαίνεται να απομειώνουν τις μεσαίες περιόδους ενώ αντίστοιχα το Kocaelli 270 το οποίο απομείωνε τις μικρές περιόδους σε αυτό το εύρος παχών, φαίνεται να ενισχύει τις μεσαίες. Φαίνεται σαν απομείωση των μεσαίων περιόδων να μεταφράζεται ως ενίσχυση των μικρών και αντίστροφα.



Σχήμα 7.11 Μεταβολή του δείκτη του λόγου φασμάτων απόκρισης για τις μεσαίες περιόδους των διεγέρσεων της κατηγορίας Β, ως προς το πάχος H και ως προς τον κανονικοποιημένο λόγο H/λ_{max} .

Διεγέρσεις της κατηγορίας Γ

Η κατηγορία Γ σε αντίθεση με όλες τις προηγούμενες φαίνεται να μην απομειώνει το λόγος 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 7.12 Μεταβολή του δείκτη του λόγου φασμάτων απόκρισης για τις μεσαίες περιόδους των διεγέρσεων της κατηγορίας Γ, ως προς το πάχος H και ως προς τον κανονικοποιημένο λόγο H/λ_{max} .

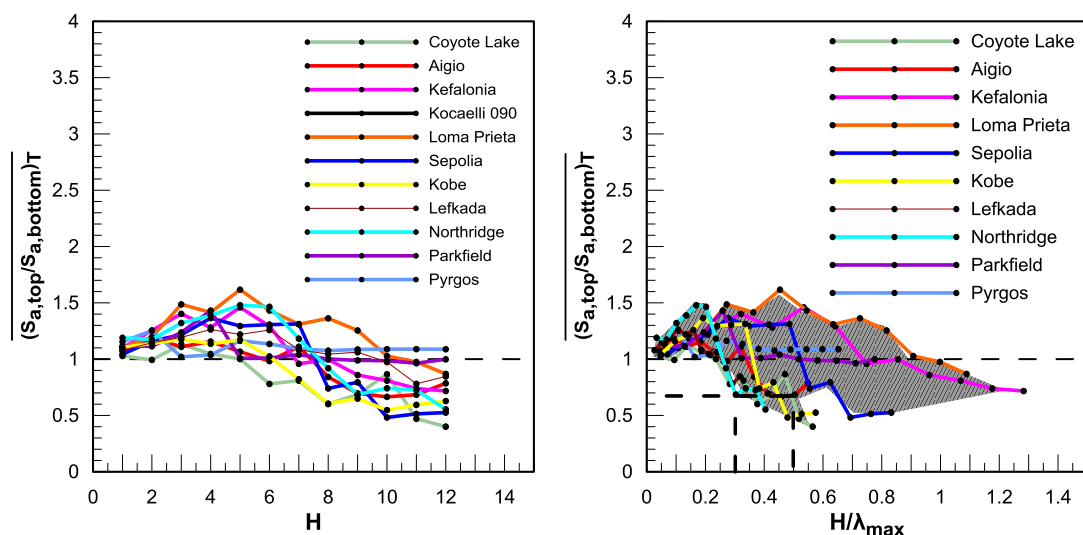
7.9 ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΟΥ ΛΟΓΟΥ ΦΑΣΜΑΤΩΝ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΣΤΙΣ ΜΕΓΑΛΕΣ ΠΕΡΙΟΔΟΥΣ

Στα Σχήματα 7.13, 7.14, 7.15 παρουσιάζεται η μεταβολή του λόγου φασμάτων απόκρισης για τις μεγάλες περιόδους συναρτήσεως του πάχους του ρευστοποιημένου στρώματος H αλλά και του κανονικοποιημένου λόγου H/λ_{\max} . Στο διάγραμμα με το κανονικοποιημένο λόγο το trend των τάσεων έχει σκιαγραφηθεί.

Διεγέρσεις της κατηγορίας A

Στη συγκεκριμένη περίπτωση φαίνεται πως κανονικοποίηση με το λόγο λ_{\max} όχι μόνο δε δίνει μια καλύτερη εικόνα αλλά δυσχεραίνει και την υπάρχουσα. Το εύρος των παχών για τα οποία παρουσιάζεται ενίσχυση στις μεγάλες περιόδους αυξάνεται σημαντικά μετά τη κανονικοποίηση. Είναι εμφανές πως το μήκος κύματος δεν είναι αυτό το οποίο επηρεάζει την ενίσχυση των μεγάλων περιόδων. Από τη μορφή της καμπύλης διαφαίνεται πως δεν μπορεί να οριστεί κάποιο πάχος πέρα από το οποίο έχουμε απομείωση των μεγάλων περιόδων αφενός διότι οι διεγέρσεις δείχνουν μια τάση απομείωσης, χωρίς αυτή όμως να σταθεροποιείται από ένα σημείο και μετά, και αφετέρου διότι, δεν είναι ευδιάκριτο το εύρος του H/λ για το οποίο η απομείωση πραγματοποιείται. Παραταύτα, φανερώνεται πως η μέγιστη ενίσχυση πραγματοποιείται στα μεγάλα πάχη και είναι ίση με 1.6.

Επίσης, εντύπωση προκαλεί το γεγονός της ενίσχυσης των μεγάλων περιόδων περισσότερο σε διεγέρσεις οι οποίες δεν παρουσιάζουν περιόδους μεγαλύτερες από 0.45 στο φάσμα τους (Kefalonia, Loma Prieta, Sepolia). Από την άλλη πλευρά, διεγέρσεις με περίοδο περί τα 0.50-0.70 sec, φαίνεται να προσφέρουν μικρότερη ενίσχυση στα μικρά και στα μεσαία πάχη ενώ παράλληλα φαίνεται να παρουσιάζουν κάποια τάση απομείωσης στο εύρος 0.25-0.45.

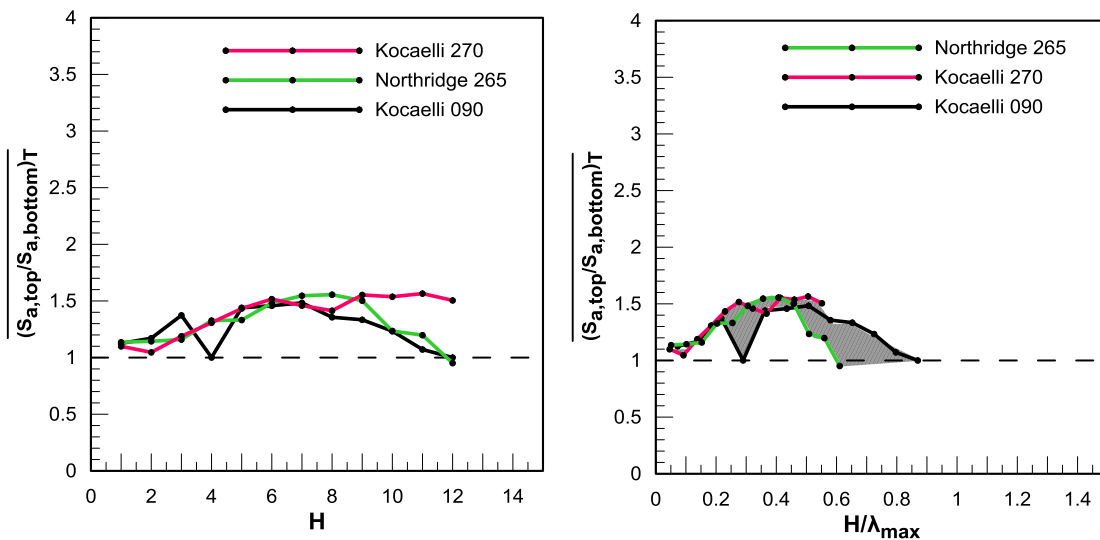


Σχήμα 7.13 Μεταβολή του δείκτη του λόγου φασμάτων απόκρισης για τις μεγάλες περιόδους των διεγέρσεων της κατηγορίας A, ως προς το πάχος H και ως προς τον κανονικοποιημένο λόγο H/λ_{\max} .

Διεγέρσεις της κατηγορίας Β

Οι διεγέρσεις της κατηγορίας Β, 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.

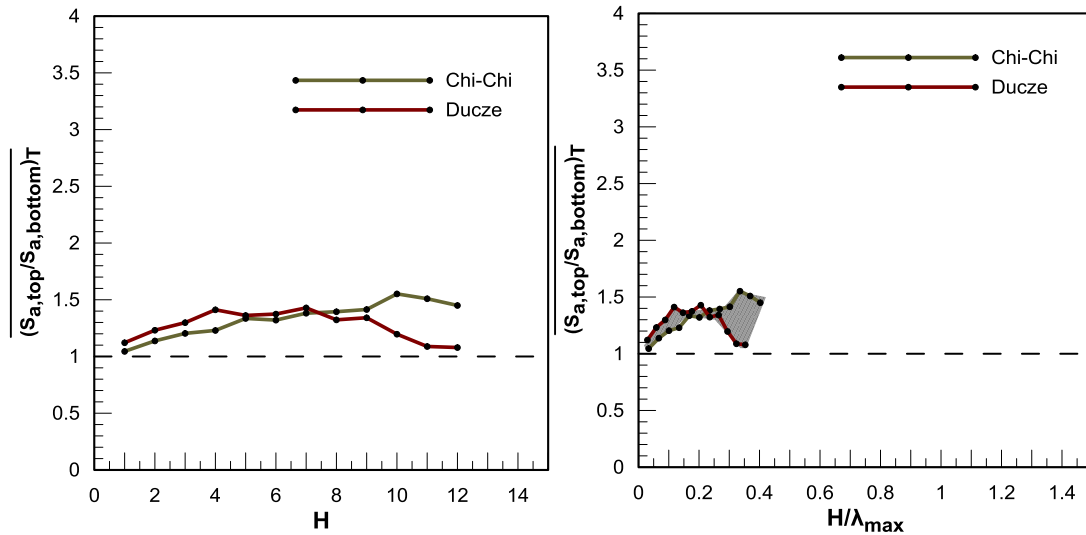
Τέλος, θα μπορούσε να λεχθεί πως η καμπύλη έχει λίγο έως πολύ κοινή μορφή με εκείνη της κατηγορίας Α, για τις διεγέρσεις όμως που παρουσιάζουν μικρές περιόδους (Kefalonia, Loma Prieta, Serolia).



Σχήμα 7.14 Μεταβολή του δείκτη του λόγου φασμάτων απόκρισης για τις μεγάλες περιόδους των διεγέρσεων της κατηγορίας Β, ως προς το πάχος H και ως προς τον κανονικοποιημένο λόγο H/λ_{max} .

Διεγέρσεις της κατηγορίας Γ

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.

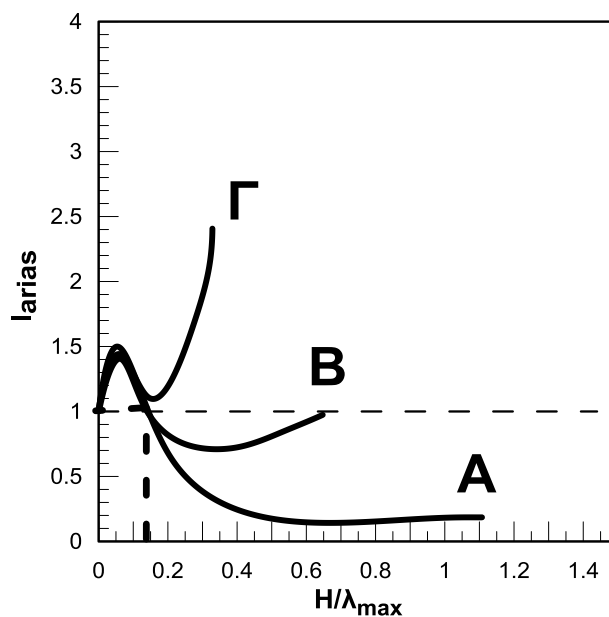


Σχήμα 7.15 Μεταβολή του δείκτη του λόγου φασμάτων απόκρισης για τις μεγάλες περιόδους των διεγέρσεων της κατηγορίας Γ, ως προς το πάχος H και ως προς τον κανονικοποιημένο λόγο H/λ_{max} .

7.10 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Δείκτης I_{arias}

Συνοψίζοντας, οι γενικές τάσεις όλων των κατηγοριών ως προς τη μεταβολή του I_{arias} παρουσιάζονται στο Σχήμα 7.16. Το σχήμα παρουσιάζει χαρακτηριστικές μορφές των καμπυλών, ποιοτικά σχεδιασμένες, έτσι ώστε να ταυτίζονται με τη καμπύλη που διέρχεται από το μέσο, του εύρους κάθε κατηγορίας. Παρατηρείται πως καθώς μεταβαίνουμε από τη κατηγορία Α στην κατηγορία Γ δεν παρατηρείται απομείωση αλλά ενίσχυση. Η κατηγορία Α ενισχύεται στα μικρά πάχη ($H=0.15\lambda_{max}$) ενώ απομειώνεται έως και 30% για πάχη μεγαλύτερα από $H=(0.20-0.40)\lambda_{max}$.



Σχήμα 7.16 Μέση μεταβολή του δείκτη I_{arias} για τις διεγέρσεις των κατηγοριών Α, Β, Γ.

Διεγέρσεις της κατηγορίας Β μπορούν και απομειώνονται μετά τη ρευστοποίηση του στρώματος έως και 0.80 για $H/\lambda_{\max}=0.30$. Εν συνεχεία, για μεγαλύτερα πάχη, οι κραδασμοί ενισχύονται. Ωστόσο, δε μπορούμε να πούμε αν από εκεί και έπειτα ενισχύουν την κίνηση ή την απομειώνουν δεδομένου του ότι δεν έχουμε στοιχεία για μεγαλύτερα πάχη. Έως το πάχος των 12 m που μελετάμε ωστόσο, ενισχύονται.

Τέλος οι διεγέρσεις κατηγορίας Γ ενισχύονται σε όλα τα πάχη. Προσφέρουν στα μικρά πάχη ενίσχυση έως και 1.5 φορές, απομειώνονται σημειακά στο εύρος περί το $H/\lambda_{\max}=0.15$ και τέλος ενισχύονται και πάλι έως και 2.50. Η τάση τους από εκεί και πέρα είναι άγνωστη όπως και στις διεγέρσεις της κατηγορίας Β.

Όπως φαίνεται και από το σχήμα οι διεγέρσεις έχουν κοινή συμπεριφορά για τα μικρά πάχη, ενισχύοντας τις έως και 1.5 φορές ενώ ξεκινούν να ακολουθούν διαφορετική συμπεριφορά μετά το πάχος $H=0.15\lambda_{\max}$.

Λόγος Φασμάτων απόκρισης

Όσον αφορά το λόγο φασμάτων απόκρισης, το Σχήμα 7.17, μας δίνει μια πολύ καλή εικόνα της συμπεριφοράς των κατηγοριών Α, Β, Γ για τις μικρές, τις μεσαίες και τις μεγάλες περιόδους.

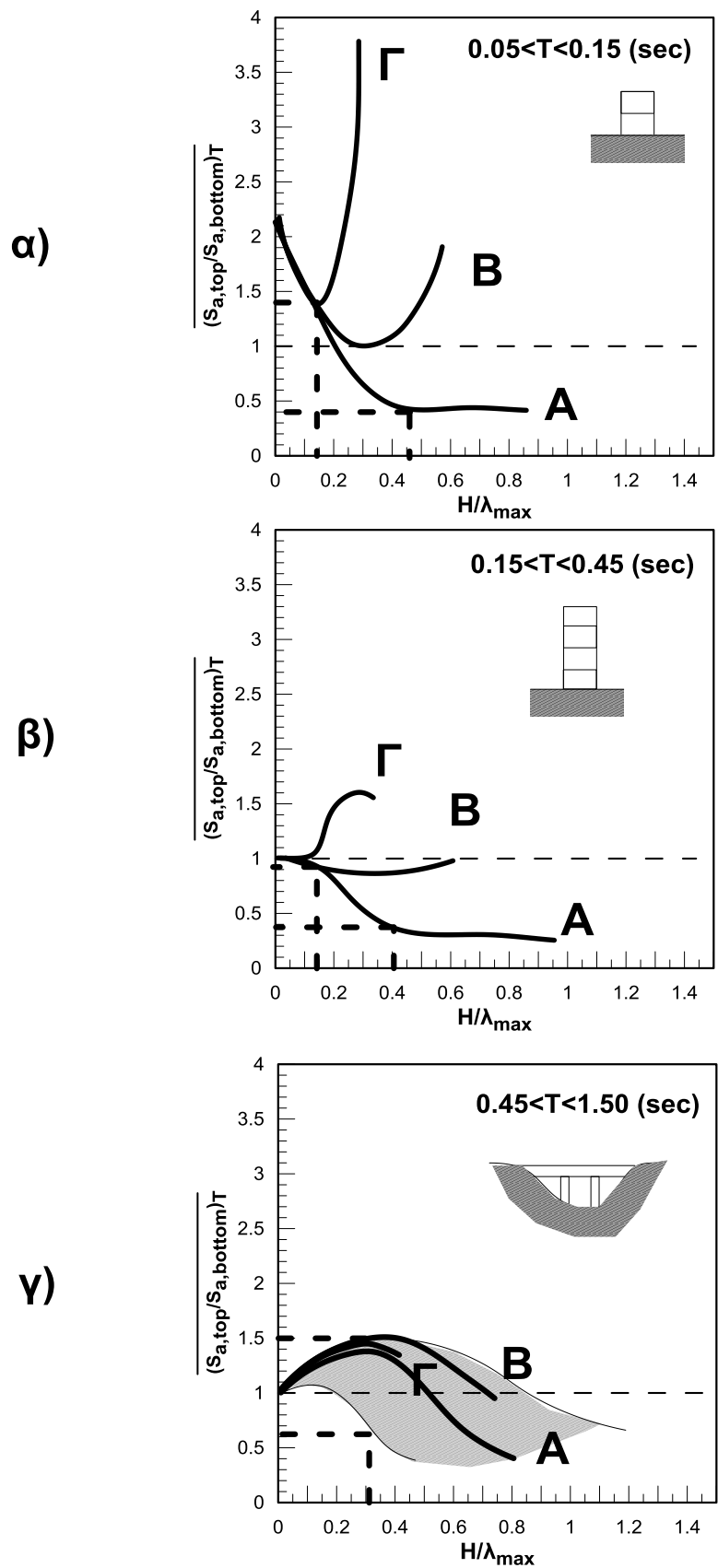
Μικρές περιόδους ενισχύονται από όλες τις κατηγορίες με ιδιαίτερα από την κατηγορία Γ. Οι κατηγορίες παρουσιάζουν κοινή συμπεριφορά έως την τιμή $H=0.15\lambda_{\max}$ (μικρά πάχη), όπως και στην περίπτωση του I_{arias} και από εκεί και πέρα οι συμπεριφορές τους διαφοροποιούνται και πάλι. Μόνο η κατηγορία Α φαίνεται να απομειώνει δραστικά τη φασματική επιτάχυνση στις μικρές περιόδους έως και 40% για $H=(0.20-0.45)\lambda_{\max}$. Αντιθέτως, οι κατηγορίες Β, Γ την ενισχύουν δραματικά με τη Γ να την πολλαπλασιάζει έως και 4 φορές περισσότερο.

Επιπρόσθετα, οι μεσαίες περιόδους φαίνεται να απομειώνονται από τις διεγέρσεις των κατηγοριών Α και Β, με εντονότερη την απομείωση στη Α. Η Α μπορεί να απομειώσει το λόγο φασμάτων απόκρισης στο μισό για πάχη $H>0.40\lambda_{\max}$. Η κατηγορία Γ πάλι, ενισχύει τις μεσαίες περιόδους ειδικά στα μεγάλα πάχη έως και 1.5 φορά.

Τέλος, όλες οι κατηγορίες παρουσιάζονται να έχουν κοινή συμπεριφορά στις μεγάλες περιόδους εφόσον, οι κατηγορίες Β και Γ ανήκουν στο εύρος της κατηγορίας Α (σκιαγραφημένο τμήμα) και ακολουθούν τη μορφή της. Ενισχύσεις παρουσιάζονται στις μεσαίες περιόδους κυρίως.

Εν ολίγοις,

- οι διεγέρσεις της κατηγορίας Α οι οποίες διαθέτουν περιόδους στο διάστημα από 0.10 έως και 0.60 sec (εύρος μικρών και μεγάλων περιόδων), ενισχύουν τις μικρές, τις μεσαίες και τις μεγάλες περιόδους στα μικρά πάχη και τις απομειώνουν μετά το κρίσιμο πάχος $H>(0.20-0.40)\lambda_{\max}$. Ειδικά στην περίπτωση των μεγάλων περιόδων μερικές εξ αυτών δεν τις απομειώνουν καθόλου.
- Οι διεγέρσεις της κατηγορίας Β ενισχύουν τις μικρές περιόδους στα μικρά και στα μεγάλα πάχη ενώ στα μεσαία πάχη που τις απομειώνουν $H\cong(0.215-0.35)\lambda_{\max}$, φαίνεται να ενισχύουν τις μεσαίες περιόδους. Στις μεγάλες περιόδους δίνουν ενισχύσεις σε όλα τα πάχη.
- Οι διεγέρσεις της κατηγορίας Γ, τέλος, φαίνεται να ενισχύουν τόσο τις μικρές όσο και τις μεσαίες και τις μεγάλες περιόδους σε όλα τα πάχη.



Σχήμα 7.17 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 Α, Β, Γ.

Πρακτικά συμπεράσματα που προκύπτουν από την προηγούμενη διερεύνηση και μπορούν να εφαρμοσθούν στην πράξη είναι τα ακόλουθα.

- Το κριτήριο του Θεοχάρη (2011) για δραστική απομείωση της σεισμικής κίνησης έχει ισχύ αλλά περιορισμένη για το πάχη από 1- 12 m που μελετούνται. Πλήρης εφαρμογή βρίσκει μόνο στις διεγέρσεις της κατηγορίας Α, οι οποίες παρουσιάζουν φάσματα αντίστοιχα των αρμονικών. Αναμένουμε σύγκλιση τάσεων με τις αρμονικές για τις κατηγορίες Β, Γ με τη γνώση μεγαλύτερων παχών.
- Η μέγιστη ενίσχυση που μπορεί να δεχθεί μια σεισμική διέγερση είναι 1.50 και μπορεί να πραγματοποιηθεί σε μικρά πάχη $H < 0.15\lambda$.
- Μονώροφες κατασκευές εδραζόμενες σε μικρά πάχη ρευστοποιήσιμου εδάφους μπορούν να δεχθούν επιτάχυνση έως και 2.5 φορές μεγαλύτερη σε σχέση με εκείνη στη βάση του ρευστοποιημένου στρώματος.
- Πολυώροφες κατασκευές εδραζόμενες σε μικρά πάχη άμμου, στην πλειονότητα των περιπτώσεων, δέχονται επιταχύνσεις μικρότερες από εκείνες που θα δέχονταν σε περίπτωση απουσίας του ρευστοποιημένου στρώματος.
- Πολυώροφες κατασκευές εδραζόμενες σε ρευστοποιημένο έδαφος μεγάλου πάχους δέχονται μικρότερες επιταχύνσεις σε σχέση με γειτονικές μονώροφες κατασκευές. Συγκεκριμένα, μια μονώροφη κατασκευή μπορεί να δεχτεί έως και 2 φορές μεγαλύτερη επιτάχυνση σε σχέση με τη μονώροφη.
- Πυλώνες γεφυρών δέχονται έως και 1.5 φορά μεγαλύτερη σεισμική δύναμη σε σχέση με την αντίστοιχη του εδάφους όταν εδράζονται σε μεσαίου πάχους εδάφη.
- Γενικά προτιμάται μια μονώροφη κατασκευή να χτίζεται πάνω σε μεγάλο πάχος άμμου και όχι σε μικρό στην περίπτωση που υπάρχουν αυξημένες πιθανότητες ρευστοποίησης αυτού.

8.1 ΓΕΝΙΚΑ

Το κεφάλαιο αυτό θα αφιερωθεί στο να επιχειρήσουμε να κατανοήσουμε, σε θεωρητικό στάδιο τουλάχιστον, ποιοι είναι οι βασικοί μηχανισμοί που διαφοροποιούν τα αποτελέσματα των αρμονικών από τις πραγματικές διεγέρσεις. Συγκεκριμένα, θα γίνει μια απόπειρα ερμηνείας των ποσοτικών διαφορών στον δείκτη I_{arias} και στον δείκτη του λόγου φασμάτων απόκρισης. Υπενθυμίζεται πως ο I_{arias} υπό αρμονικές συνθήκες διέγερσης, λάμβανε τις τιμές $I_{arias}=0.20-0.30$, ενώ υπό πραγματικές διεγέρσεις λαμβάνει την ίδια τιμή μόνο για διεγέρσεις της κατηγορίας Α. Επιπλέον, θα προσπαθήσουμε να εξηγήσουμε κάποιες οξύμωρες εικόνες ως προς το λόγος φασμάτων απόκρισης σε σχέση με την αναμενόμενη εικόνα.

Αν και σε μερικά σημεία δεν καταφέρνουμε να ερμηνεύσουμε επαρκώς τα διαγράμματα, παρουσιάζονται παρατηρήσεις επί του αντικειμένου που σίγουρα θα βοηθήσουν σε μελλοντική έρευνα.

8.2 ΑΠΟΚΛΙΣΕΙΣ ΣΤΟΝ ΔΕΙΚΤΗ I_{ARIAS}

Ένα από τα πρώτα ερωτήματα που θα μας απασχολήσει είναι το γιατί δεν έχουμε σημαντική απομείωση του δείκτη I_{arias} στις διεγέρσεις των κατηγοριών Β, Γ αλλά αντιθέτως αύξηση του.

Η φυσική σημασία των αποτελεσμάτων του Θεοχάρη έχει να κάνει με το φαινόμενο του συντονισμού. Ο Θεοχάρης όρισε πως όταν

$$H > 1/3V_{s_{liq}} \Rightarrow H > 1/3 \lambda * T_{exc} \Rightarrow 3 * H / \lambda > T_{exc} \Rightarrow T_{soil} > 1.3 T_{exc}$$

πραγματοποιείται δραστική απομείωση της σεισμικής κίνησης.

Σίγουρα αναμένουμε όταν

- $T_{soil} < T_{exc}$ να βρισκόμαστε σε περιοχή συντονισμού με μερική ενίσχυση της σεισμικής διέγερσης
- $T_{soil} = T_{exc}$ να έχουμε συντονισμό (ενίσχυση) και όταν
- $T_{soil} > T_{exc}$ να έχουμε απομείωση της σεισμικής κίνησης και συγκεκριμένα, όταν $T_{soil} = 1.3 T_{exc}$ να έχουμε σημαντική απομείωση αυτής.

Παρατηρούμε λοιπόν ότι η ενίσχυση της σεισμικής κίνησης αφορά τη σχέση των περιόδων της διέγερσης και του ρευστοποιημένου εδάφους. Αναμένουμε λοιπόν, πως αν το έδαφος ενισχύει παλμούς με περίοδο μικρότερη από τη δική του μπορούμε να βρούμε τη μέγιστη δυνατή περίοδο της διέγερσης (T_{max}) και με βάση αυτή να ορίσουμε το πάχος που θα έχει περίοδο μεγαλύτερη ίση με αυτή ώστε η σεισμική κίνηση στα υπόλοιπα πάχη μόνο να απομειώνεται.

Διαπιστώνεται λοιπόν, πως διεγέρσεις που διαθέτουν μεγάλες περιόδους ($\cong 1 \text{ sec}$) και με $V_{slq}=40\text{m/sec}$, θα προκαλούν ενισχύσεις σε πάχη μικρότερα του $1/3*\lambda=1/3V_{slq}*T=1/3*40*1=13.3\text{m}$, συνεπώς σε όλα τα πάχη της έρευνας μας.

Για την εξήγηση του φαινομένου, συνεπώς, θα βρούμε το κρίσιμο πάχος όπου με βάση τον Θεοχάρη (2011), θα έπρεπε να πραγματοποιείται απομείωση της σεισμικής κίνησης

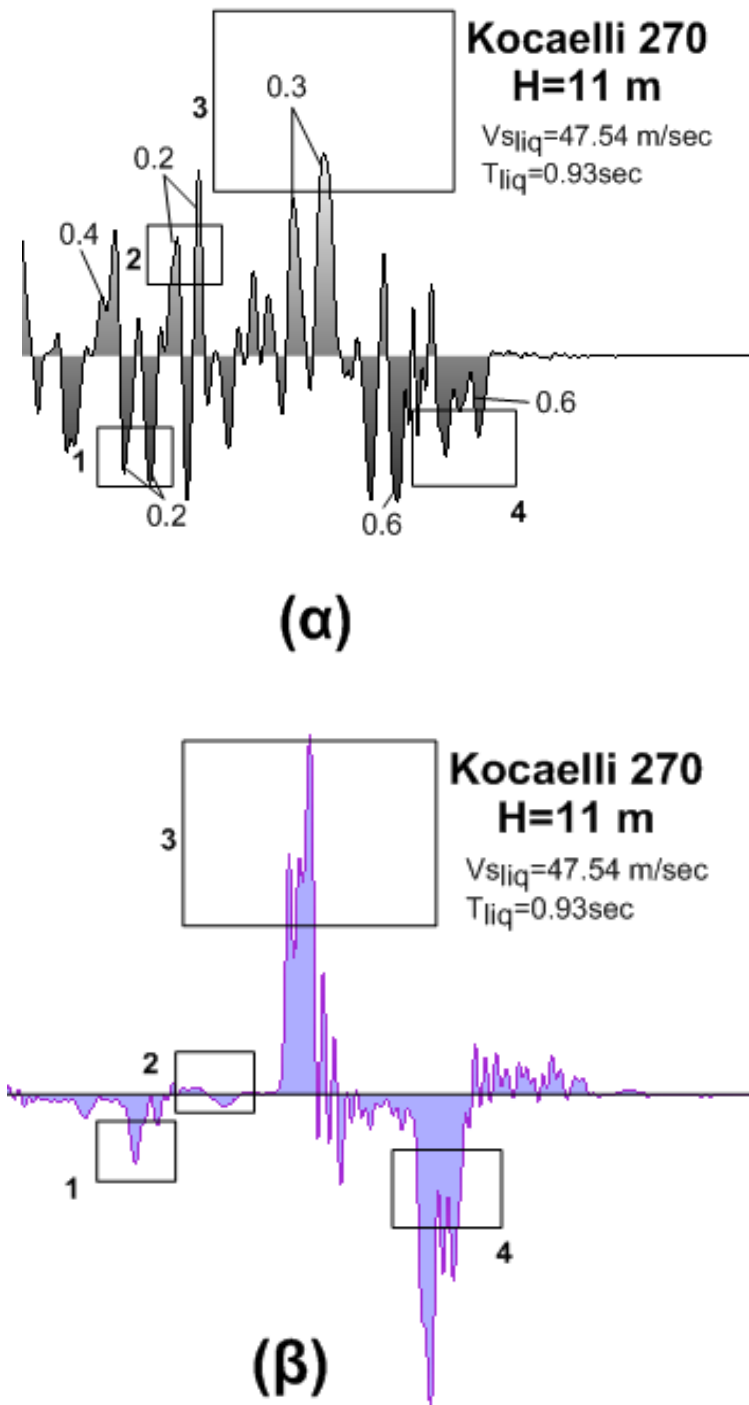
Στον Πίνακα 8.1 παρουσιάζονται τα μήκη κύματος βάση της T_{max} καθώς και τα αντίστοιχα κρίσιμα πάχη βάση του κριτηρίου του Θεοχάρη (2011). Φαίνεται πως η διεγερση του Ducze ικανοποιεί το συγκεκριμένο κριτήριο και αυτό μπορεί να δικαιολογήσει εν μέρει, τη συνεχώς αυξανόμενη συμπεριφορά του ως προς τον I_{arias} αν και δε ξέρουμε πως θα συμπεριφερόταν σε μεγαλύτερα πάχη.

Βάση του Πίνακα 8.1, επίσης, παρατηρείται πως σε αρκετές διεγέρσεις το κρίσιμο πάχος είναι αρκετά μεγάλο όπως στην περίπτωση της Lefkada και του Ducze για τις οποίες λαμβάνει την τιμή 12.59m και 11.33m αντίστοιχα. Εντύπωση προκαλεί, ακόμα, το γεγονός πως διεγέρσεις που τελικώς κατατάχτηκαν στην κατηγορία A (Lefkada, Northridge) παρουσιάζουν μεγάλο κρίσιμο πάχος από τη στιγμή που ο I_{arias} τους απομειώνεται από μικρά σχετικά πάχη.

Διέγερση	T_{max} (sec)	Μέση Vs (m/sec)	$H_{cr}=1/3\lambda$ (m)
ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ Α			
AIGIO	0.7	31.21	7.28
COYOTE LAKE	0.55	38.62	7.08
KEFALONIA	0.25	37.41	3.12
KOBE	0.5	41.73	6.95
LEFKADA T	0.7	53.95	12.59
LOMA PRIETA	0.3	36.74	3.67
NORTHRIDGE	0.7	42.41	9.90
PARKFIELD	0.4	38.68	5.16
PYRGOS	0.5	36.78	6.13
SEPOLIA	0.4	36.04	4.81
ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ Β			
KOKAELLI 090	0.35	39.57	4.62
KOKAELLI 270	0.55	39.57	7.25
NORTHRIDGE 265	0.5	42.41	7.07
ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ Γ			
CHICHI	0.7	42.60	9.94
DUCZE	0.9	37.76	11.33

Πίνακας 8.1 Μελετηθείσες διεγέρσεις κατηγοριοποιημένες βάση της συμπεριφοράς τους, κατά I_{arias} . Παρουσιάζονται τα αναγκαία μεγέθη (T_{max} , Vs) για την εξαγωγή του πάχους, κάτω από το οποίο αναμένεται σημαντική απομείωση της σεισμικής κίνησης.

Από παρατήρηση των επιταχυνσιογραφήματων όλων των διεγέρσεων (Παράρτημα Β) διαπιστώθηκε ότι υπήρχαν παλμοί που αν και μετά το κρίσιμο πάχος $H_{cr}=1/3\lambda_{max}$ θα έπρεπε να απομειώνονταν, σε ορισμένες περιπτώσεις παρέμεναν σταθεροί ενώ σε άλλες παρουσίαζαν ενίσχυση.



Σχήμα 8.1 Τμήμα του επιταχυνσιογραφήματος βάσης (α) και τμήμα του επιταχυνσιογραφήματος κορυφής (β) από τη διέγερση Kocaeli 270 για το πάχος των 11m. Στο σχήμα (α) έχουν αναγραφεί οι περίοδοι σημαντικών παλμών.

Οι παλμοί αυτοί παρουσιάζονταν στο κομμάτι μετά τη ρευστοποίηση, ειδικότερα, σε σημεία όπου υπήρχε μετάβαση από μια μικρή σε μια μεγάλη περίοδο ή σε σημεία στα οποία παρουσιάζονταν ένας ισχυρός παλμός ή σε σημεία στα οποία μεταξύ δύο θετικών παλμών ήταν μικρός ο αρνητικός και αντίστροφα (ανομοιόμορφη αλληλουχία).

Επιπρόσθετα, οι παλμοί αυτοί χαρακτηρίζονταν από σχετικά μεγάλες τιμές περιόδων (0.6, 0.8, 1) και σπανίως από μεσαίες (0.4, 0.5) ενώ η μορφή τους ήταν αρκετά ανομοιόμορφη.

Για την κατανόηση των ανωτέρω παρουσιάζεται ακολούθως το τελευταίο τμήμα της διέγερσης Kocaeli270, το οποίο παρουσιάζει ενίσχυση σε πάχος μεγαλύτερο του κρίσιμου (11m). Με μαύρο έχει σκιαγραφηθεί το επιταχυνσιογράφημα βάσης (α) και με μπλε το επιταχυνσιογράφημα κορυφής (β). Από παρατήρηση των σημείων 1, 2, 3, 4 προκύπτει πως

- Στο σημεία 1,3 του επιταχυνσιογραφήματος βάσης παρατηρούνται δύο παλμοί, στο ενδιάμεσο των οποίων ο θετικός και ο αρνητικός παλμός αντίστοιχα είναι πολύ μικροί (ανομοιόμορφη αλληλουχία). Η σχεδόν μηδενική παρουσία του ενδιάμεσου παλμού καθιστά τη συγκεκριμένη αλληλουχία μη αρμονική. Από το επιταχυνσιογράφημα βάσης πάλι, οι παλμοί στο σημείο 1 δεν έχουν ενισχυθεί σε αντίθεση με εκείνους του σημείου 3 που παρουσιάζονται σημαντικά ενισχυμένοι αν και οι δύο έχουν περιόδους μικρότερες του T_{soil} . Μια πιθανή ερμηνεία του παραπάνω θα μπορούσε να αποτελέσει το ότι λόγω της μειωμένης δυσκαμψίας του, το έδαφος δεν μπόρεσε να ακολουθήσει τη φορά του θετικού παλμού (σημείο 1) ή του αρνητικού (σημείο 3) λόγω της μικρής του περιόδου και έτσι είναι σαν να δέχτηκε δύο διαδοχικούς παλμούς ίδιας περιόδου. Στο σημείο 1 ωστόσο, η πρόσθεση των παλμών αυτών έδωσε μια περίοδο της τάξης των 0.40 sec ενώ στο 3, μια περίοδο της τάξης των 0.60 sec. Η τελευταία, εφόσον ανήκει πλησιέστερα στην περιοχή του συντονισμού, ενισχύθηκε σε σχέση με την 0.4sec.
- Στο σημείο 4 μπορεί να δωθεί μια παρόμοια εξήγηση για την ενίσχυση με την επαλληλία των διαδοχικών παλμών περιόδου 0.60.
- Στο σημείο 2, πάλι, παρουσιάζεται μια καθαρώς αρμονική αλληλουχία παλμών η οποία χαρακτηρίζεται από περίοδο 0.20 sec. Όπως αναμενόταν, η αλληλουχία αυτή απομειώθηκε πλήρως, επιβεβαιώνοντας το συμπέρασμα του Θεοχάρη (2011).

Στο σημείο αυτό αποκτάται μια εικόνα της βασικής διαφοράς μεταξύ αρμονικών και πραγματικών διεγέρσεων. Στην αρμονική η διαδοχή σταθερών παλμών τόσο από άποψη περιόδου όσο και άποψη επιτάχυνσης αναγκάζουν το έδαφος να λάβει σταθερές ιδιομορφές με την πάροδο του χρόνου. Η ανομοιορφία όμως προς τις παραμέτρους αυτές, στην περίπτωση των πραγματικών, παρέχει τη δυνατότητα στο έδαφος να ενισχύει ομάδες ανομοιόμορφων παλμών σε μεγάλα πάχη, εφόσον ως ομάδα έχουν μεγαλύτερη περίοδο και μπορούν να συντονιστούν με αυτό.

Άλλωστε όπως αναφέρθηκε και στην ενότητα 7.5, η ενίσχυση που μπορούν να δώσουν οι μεγάλες περίοδοι τις διέγερσης σε σχέση με εκείνη που δίνουν οι ισοδύναμες αρμονικές, αποτελεί και το κριτήριο κατάταξης των διεγέρσεων. Συνεπώς διεγέρσεις οι οποίες έχουν τη δυνατότητα να ενισχύσουν περισσότερο της μεγάλες περιόδους από ότι οι αντίστοιχες αρμονικές, είναι και αυτές που θα παρουσιάζουν σημειακές ενισχύσεις (spikes) στα μεγάλα πάχη. Όσο μεγαλύτερη είναι η ενίσχυση τόσο μεγαλύτερη είναι η επιτάχυνση που λαμβάνουν τα spikes άρα και η τιμή του I_{arias} . Αναμένεται πως όσο μεγαλώνει το πάχος η ενίσχυση που θα μπορούν να προσφέρουν οι διεγέρσεις θα είναι συνεχώς μικρότερη άρα από κάποιο πάχος και έπειτα θα πραγματοποιείται μόνο απομείωση της κίνησης.

Στην παρουσία των spikes και στις νέες συνθήκες που επιβάλουν στον εδαφικό σκελετό μπορούν αν αποδωθούν και οι έντονες διακυμάνσεις της ταχύτητας σε ορισμένες διεγέρσεις οι οποίες κατ'ουσίαν διέυρυναν το εύρος του λόγου $V_{s_{liq}}/V_{s_0}$ από 0.25-0.40 σε 0.30-0.50.

Ας λάβουμε επίσης, υπόψη και άλλους δευτερεύοντες παράγοντες που μπορεί να επηρέαζαν τη τιμή του I_{arias} όπως

- Το πλήθος των εν δυνάμει ανομοιομορφων αλληλουχιών στο επιταχυνσιογράφημα.
- Τη διάρκεια της εκάστοτε διέγερσης, δεδομένου ότι σε διεγέρσεις μεγαλύτερης διάρκειας, το πλήθος των σημειακών ενισχύσεων αυξάνεται άρα και η τιμή του I_{arias}
- Το πλήθος των παλμών που είχαν περίοδο ίση με τη δεσπόζουσα του φάσματος, στο επιταχυνσιογράφημα βάσης. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτών αποτέλεσαν οι διεγέρσεις των Lefkada και Northridge οι οποίες αν και παρουσιάζουν spikes ως τα 12 m, αυτά δε παρουσιάζονται αρκετά ενισχυμένα και εκτός αυτού, ήταν λίγα σε πλήθος σε σχέση με τους υπόλοιπους παλμούς που πρακτικά είχαν απομειωθεί πλήρως. Ο I_{arias} κατά συνέπεια λάμβανε τιμές μικρότερες της μονάδας αν και δεν απομειωνόταν τόσο απότομα όσο στις υπόλοιπες διεγέρσεις της κατηγορίας Α.

8.3 ΑΠΟΚΛΙΣΕΙΣ ΣΤΟ ΛΟΓΟ ΦΑΣΜΑΤΩΝ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ

Η μορφή του λόγου φασμάτων απόκρισης μπορεί να δικαιολογηθεί αν λάβουμε υπόψη πως το ρευστοποιημένο έδαφος μεταβάλλει τους παλμούς της διέγερσης της βάσης, όχι απλώς ενισχύοντας τους ή απομειώνοντας τους, αλλά τροποποιώντας τις περιόδους τους.

Αρχικά θα σταθούμε σε δύο σημεία τα οποία θα διευκολύνουν την κατανόηση της μεταβολής του λόγου φασμάτων απόκρισης. Το πρώτο από αυτά έγκειται στην παρατήρηση πως στα μικρά πάχη, το έδαφος ακολουθεί τους παλμούς της διέγερσης με περίοδο μικρότερη από αυτή των παλμών.

Το στοιχείο αυτό είναι ευδιάκριτο τόσο στην περίπτωση των αρμονικών όσο και στην περίπτωση των πραγματικών διεγέρσεων. Στο Σχήμα 4.2, παρουσιάζεται η παρατήρηση αυτή για το τμήμα της διέγερσης της Lefkada αλλά και της αρμονικής διέγερσης με $T=0.3$ sec. Έχει απεικονισθεί σε κοινό διάγραμμα το επιταχυνσιογράφημα βάσης και το επιταχυνσιογράφημα κορυφής ώστε να είναι εμφανής η μείωση της περιόδου.

Οι παραγόμενες περίοδοι από το ρευστοποιημένο έδαφος είναι σχετικά μικρές (<0.15 sec) με αποτέλεσμα να παρουσιάζονται στο φάσμα κορυφής στην πλειονότητα των περιπτώσεων ακόμα και αν στο επιταχυνσιογράφημα βάσης δεν παρουσιάζονται τόσο μικρές περίοδοι. Ας σημειωθεί, ακόμη, ότι η παρουσία τους συνήθως υφίσταται στα πρώτα 5m.

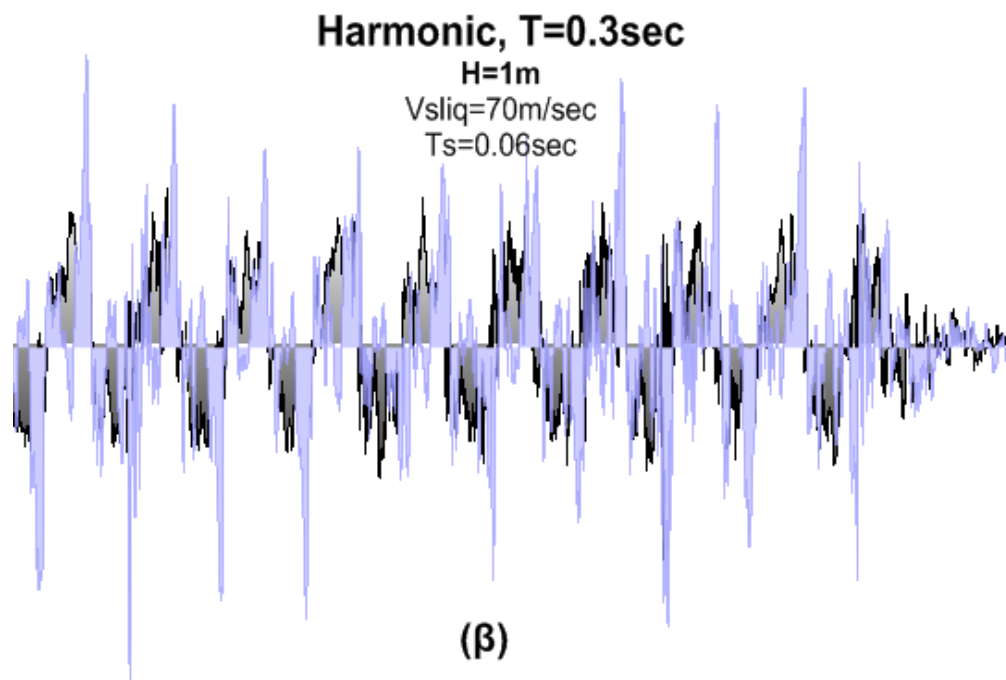
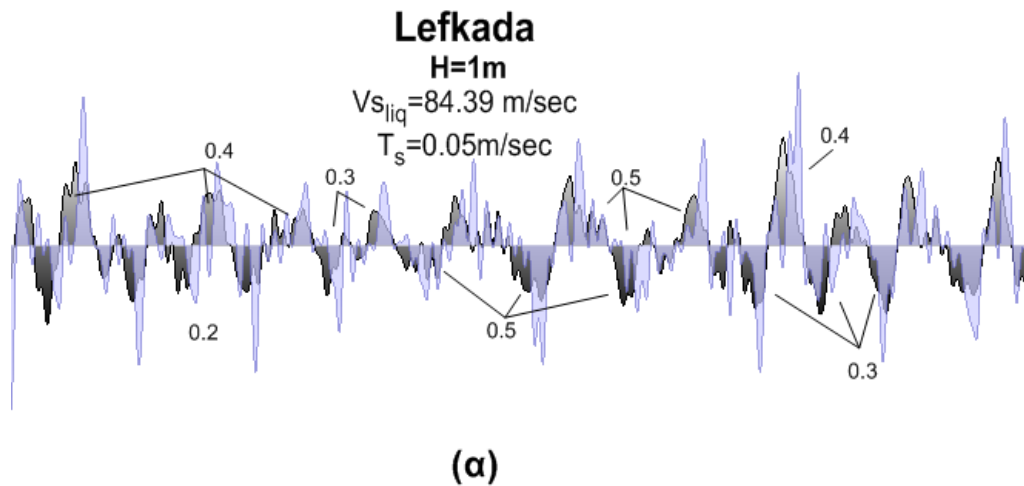
Το δεύτερο στοιχείο είναι ότι στην περίπτωση που παρουσιάζονται spikes με υψηλές τιμές επιτάχυνσης, συνήθως συνοδεύονται με δευτερεύουσες ταλαντώσεις του εδάφους μικρών όμως περιόδων. Τέτοιες ταλαντώσεις παρουσιάζονται και στο Σχήμα 4.1, μετά τα σημείο 3. Πιθανότατα συμβολίζουν την επαναφορά του εδάφους στις «υπο ρευστοποίηση» συνθήκες μετά την σημειακή ενίσχυση

Μεταβολή του λόγου φασμάτων απόκρισης στις μικρές περιόδους ($0.05 < T < 0.15$ sec)

Είναι σαφές πως διεγέρσεις που παρουσιάζουν στο φάσμα τους περιόδους μικρότερες ή ίσες από 0.15sec (πλειοψηφία διεγέρσεων κατηγορίας Α) θα απομειώνουν τις μικρές περιόδους για $H > H_{cr}$. Όντως από την αντίστοιχη καμπύλη για τις μικρές περιόδους, λαμβάνουμε πως για $H > (0.20-0.40)\lambda_{max}$ έχουμε απομείωση του λόγου φασμάτων απόκρισης στο μισό.

Για διεγέρσεις πάλι που δε παρουσιάζουν μικρές περιόδους στο φάσμα τους (πλειοψηφία διεγέρσεων Β, Γ) θα παρουσιάζουν και αυτές ενισχυμένες τις μικρές περιόδους περίπου για πάχη $< 5m$ λόγω του πρώτου στοιχείου που εξηγήθηκε ανωτέρω. Για πάχη μεγαλύτερα

από 5m, θα υπάρχει ενίσχυση μόνο στις περιπτώσεις που οι μικρές περίοδοι είναι συνοδευτικές των spike.



Σχήμα 4.2 Επιταχυνσιογράφημα κορυφής (μπλε σκιαγράφιση) σε κοινό διάγραμμα με το επιταχυνσιογράφημα βάσης (μαύρη σκιαγράφιση) για τις διέγερση της Lefkada και της αρμονικής με $T=0.3 \text{ sec}$ για το πάχος του 1m. Στο Σχήμα (α) έχουν αναγραφεί οι περίοδοι χαρακτηριστικών παλμών.

- **Μεταβολή του λόγου φασμάτων απόκρισης στις μεσαίες περιόδους (0.15<T<0.45sec)**

Όπως και στις μικρές περιόδους έτσι και εδώ, όσες διεγέρσεις παρουσιάζουν περιόδους από 0.15-0.45sec, αναμένεται να τις ενισχύουν στα μικρά πάχη και να της απομειώνουν μετά το κρίσιμο πάχος $H > (0.20-0.40)\lambda_{\max}$. Η παρατήρηση επιβεβαιώνεται από την παρουσία του κριτηρίου στο αντίστοιχο διάγραμμα για τις διεγέρσεις της κατηγορίας Α καθώς και εκείνων της κατηγορίας Γ. Οι μεσαίες περίοδοι διατηρούνται σταθερές ή ενισχύονται μόνο στην περίπτωση που συνιστούν spikes (κατηγορία Β, Γ).

- **Μεταβολή του λόγου φασμάτων απόκρισης στις μεγάλες περιόδους (0.45<T<1.50sec)**

Το οξύμωρο με τις μεγάλες περιόδους είναι πως ενώ θα έπρεπε να εμφανίζονται ενισχυμένες μόνο για τις διεγέρσεις που παρουσιάζουν περιόδους από 0.45-1.50sec ή για τις διεγέρσεις που έχουν δυναμικό για spikes παρουσιάζονται και για εκείνες που έχουν μόνο μικρές περιόδους (Loma Prieta, Kefalonia) και μάλιστα περισσότερο ενισχυμένες.

Ωστόσο, η ενίσχυση των μικρών περιόδων διαφέρει από διέγερση σε διέγερση.

- Από τη μια υπάρχουν οι διεγέρσεις οι οποίες διαθέτουν περιόδους στο κάτω όριο του συγκεκριμένου διαστήματος (~0.45sec) οπότε μετά το κρίσιμο πάχος τις απομειώνουν (Aigio, Northridge).
- Διεγέρσεις οι οποίες διαθέτουν περιόδους στο άνω όριο του διαστήματος (~1sec) οπότε ενισχύονται έως και τα 12m (Chi-Chi, Duce).
- Διεγέρσεις οι οποίες παράγουν spikes με περιόδους σε αυτό το διάστημα (Kocaeli 270)
- Διεγέρσεις οι οποίες δεν έχουν καθόλου μεγάλες περιόδους στο φάσμα τους αλλά οι απομειωμένοι παλμοί, λόγω της μικρής ταχύτητας του εδάφους, φτάνουν στην επιφάνεια της άμμου με μεγαλύτερη περίοδο από αυτή που αρχικά είχαν. Συνεπώς επειδή η φασματική επιτάχυνση της βάσης είναι σχεδόν μηδενική δίνει στο λόγο του λόγου φασμάτων απόκρισης μεγάλες τιμές (π.χ Kefalonia).

Βάση του τελευταίου αναμένουμε πως μικρότερο λόγος φασμάτων απόκρισης θα παρουσιάζουν διεγέρσεις οι οποίες έχουν περιόδους από 0.45-1.50sec στη βάση τους γιατί θα δίνουν μικρότερους λόγους.

9.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Κλείνοντας την παρούσα εργασία ολοκληρώνουμε ένα πρώτο μέρος της μελέτης πάνω στη συμπεριφορά του εδάφους υπό πραγματικές συνθήκες διεγέρσεως. Αναφορικά με τους στόχους της παρούσας εργασίας, όπως ετέθησαν στην Εισαγωγή (Κεφάλαιο 1), προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα.

(α) Η ταχύτητα μετάδοσης σεισμικών κυμάτων S ($V_{s_{liq}}$) παραμένει πρακτικά σταθερή για πάχη ρευστοποιήσιμου εδάφους $H_{liq} \geq (4-5)m$. Η τιμή που προέκυψε από τις αριθμητικές αναλύσεις είναι ίση με $0.40 \pm 0.10 V_{s_0}$ για πάχη πάνω από 5m και $0.45 \pm 0.05 V_{s_0}$ για μικρότερα πάχη. Συγκριτικά αναφέρεται ότι οι αντίστοιχες τιμές που προέκυψαν για αρμονικές διεγέρσεις είναι 0.30 ± 0.10 , για $H/\lambda > 1/3$, συμφωνεί δηλαδή ικανοποιητικά με τα αποτελέσματα της παρούσης μελέτης.

(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} , όπου $\lambda_{max} = V_{s_{liq}} T_{max}$ και T_{max} , η μέγιστη περίοδος του φάσματος για $S_a = \frac{S_{a_{max}} - S_a(T=0 \text{ sec})}{2}$.

(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 ($\bar{S}_{a(0.8 < T < 2 \text{ sec})} / S_{a,max} < 0.20$)

- 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 ($0.05 < T < 0.15 \text{ sec}$) 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 ($T=0.15 \text{ sec}$ έως 0.45 sec), 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 $H/\lambda_{max} \cong 0.30$.

(ε) Για σεισμικές διεγέρσεις με μεσαίο εύρος σημαντικών περιόδων, κατηγορία Β, ($0.20 < \bar{S}_{a(0.8 < T < 2 \text{ sec})} / S_{a,max} < 0.30$)

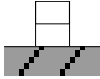
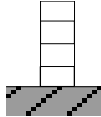
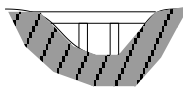
- Η μεταβολή του I_{arias} διαφοροποιείται από την αντίστοιχη για αρμονικές διεγέρσεις. Ενώ αρχικά παρουσιάζει ίδια μορφή με εκείνη των αρμονικών, δηλαδή απομείωση από τη τιμή 1.5 έως την τιμή 0.70, για $H/\lambda_{max}>0.30$ αυξάνεται και πάλι πλησιάζοντας τη μονάδα.
- Η μεταβολή του λόγου φασμάτων απόκρισης για μικρές περιόδους ($0.05<T<0.15$ sec) παρουσιάζει αντίστοιχα συμπεράσματα με τη μορφή του I_{arias} . Απομείωση από τη τιμή 2.5 πάλι 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 A, 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, ($\bar{S}_{a(0.8<T<2sec)}/S_{a,max}>0.30$)

- 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 I_{arias} . 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 A και B, 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 κατ'ουσίαν 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:

		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
<p>A: Απομείωση, E: Ενίσχυση, X:καμιά επίδραση, ?: θα πρέπει να διερευνηθεί περαιτέρω</p>				

Ας μη λησμονηθεί ωστόσο, πως όλα τα δυσμενή αποτελέσματα σχετικά με την ενίσχυση της εδαφικής κίνησης σε συνθήκες ρευστοποίησης είναι γιατί έχουμε μελετήσει κάποια από τις δυσχερέστερες περιπτώσεις. Έχουμε να κάνουμε με 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 Θεοχάρη (2011), όσο πιο μαλακή είναι η άμμος αλλά και όσο ισχυρότερη είναι η διέγερση, τόσο μεγαλύτερη είναι η ενίσχυση της.

9.2 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΕΡΕΥΝΑ

Τέλος επισημαίνεται ότι τα ανωτέρω συμπεράσματα έχουν κυρίως ποιοτικό χαρακτήρα. Έτσι, παρότι αναδεικνύουν πέραν κάθε αμφιβολίας τη σημασία του φασματικού περιεχομένου της διέγερσης για τη σεισμική απόκριση εδαφών με ρευστοποίηση, απέχουν ακόμα από ένα ποσοτικό προσδιορισμό της εν λόγω σεισμικής απόκρισης. Για το σκοπό αυτό

- Θα χρειασθούν περισσότερες παραμετρικές αναλύσεις. Χαρακτηριστικά απαιτείται μελέτη μεγαλύτερου εύρους παχών για τις διεγέρσεις των κατηγοριών Β, Γ ώστε να μελετηθεί η συμπεριφορά τους και να βρεθεί το πάχος απομείωσης, εφόσον υπο τις παρούσες συνθήκες κάτι τέτοιο δεν ήταν ευδιάκριτο.
- Απαιτείται, επίσης, εμπειριστατωμένη ανάλυση πραγματικών καταγραφών στην επιφάνεια του ρευστοποιημένου εδάφους.
- Κρίνεται επίσης, αναγκαίο η έρευνα πάνω στις πραγματικές διεγέρσεις να διερευνηθεί για διαφορετικούς συνδυασμούς σχετικής πυκνότητας D_r αλλά και διαφορετικής έντασης διεγέρσεων ακόμα και με τις διεγέρσεις της παρούσας εργασίας.
- Τέλος, δεδομένου ότι η έρευνα αυτή έδωσε ένα πρώτο στίγμα για την ενίσχυση 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.

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

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

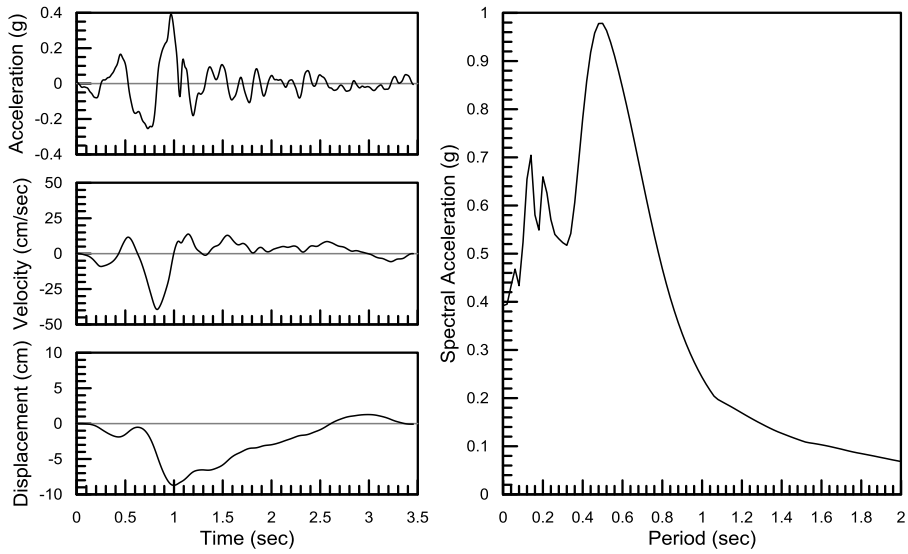
Yoshida, N. and Ito, K. (1999), **Liquefaction of improved ground at Port Island, Japan, during the 1995 Hyogoken-nanbu earthquake**, Proc., 2nd International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, Lisboa, Portugal, pp. 531-536

Zhang, R.R (2009), **A recording –based approach for identifying seismic site liquefaction and nonlinearity via HHT data analysis**, World Scientific Publishing, Vol. 1, pp 98

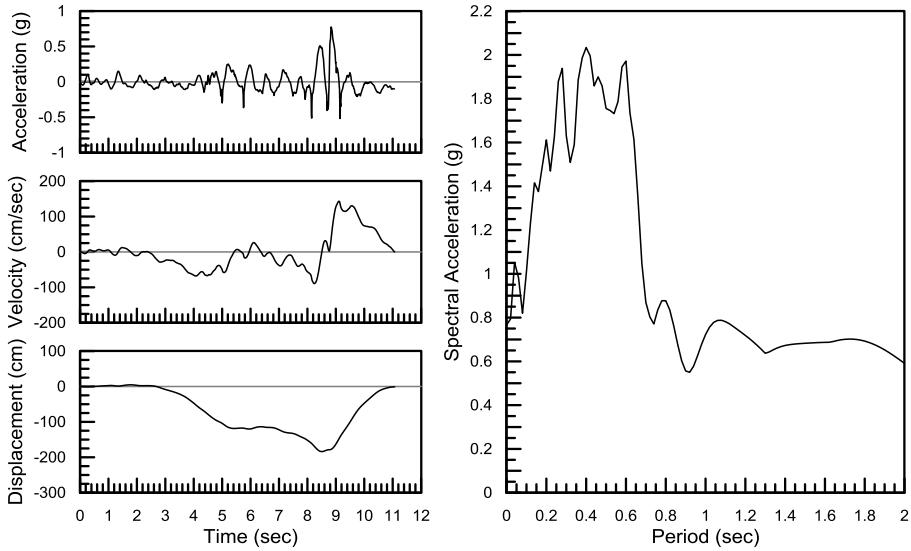
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α:

ΧΡΟΝΟΪΣΤΟΡΙΕΣ ΚΑΙ ΕΛΑΣΤΙΚΑ ΦΑΣΜΑΤΑ
ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΔΙΕΓΕΡΣΕΩΝ

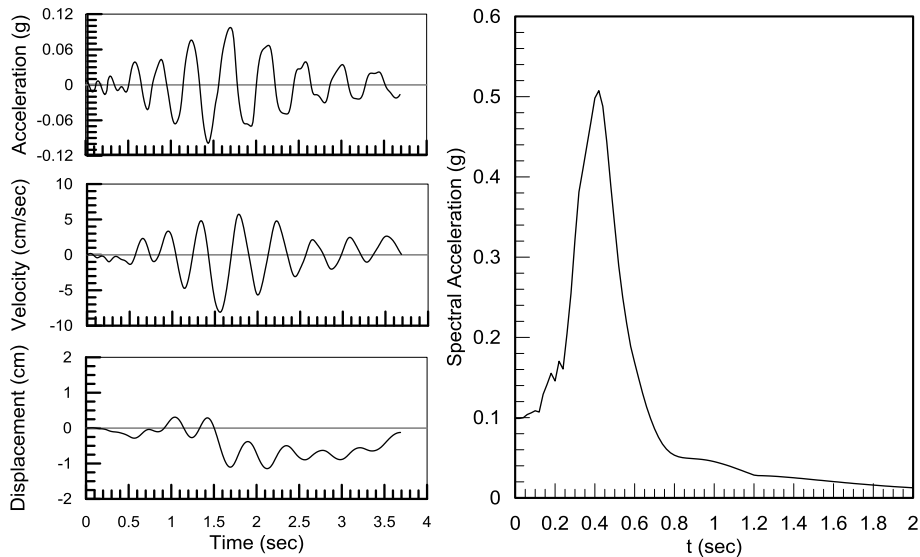
Aigio



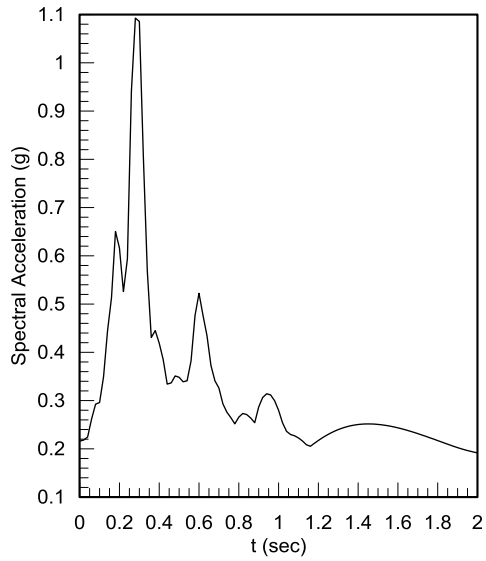
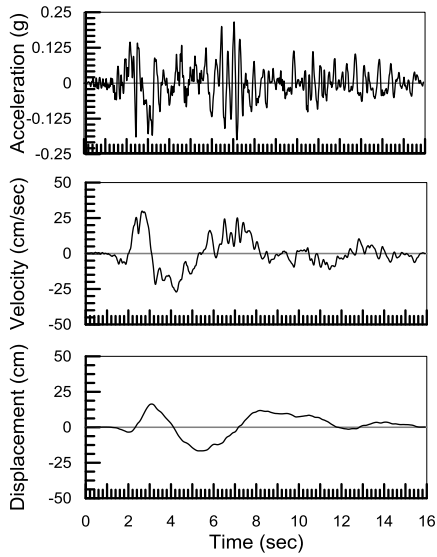
Chi-Chi



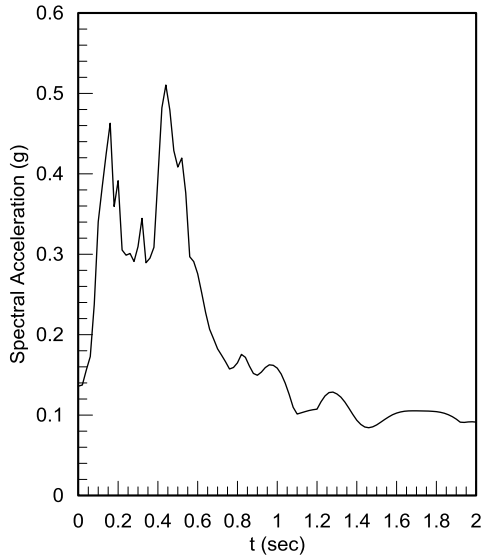
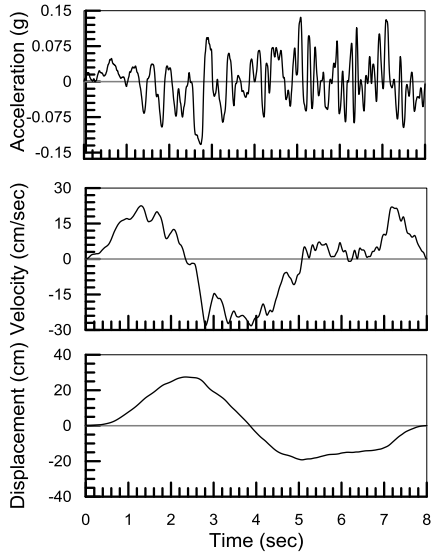
Coyote Lake



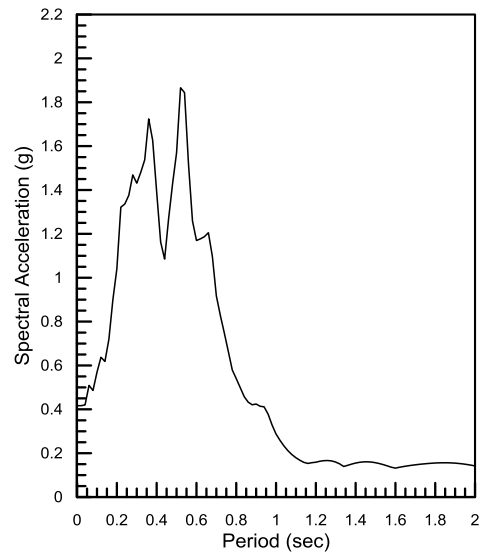
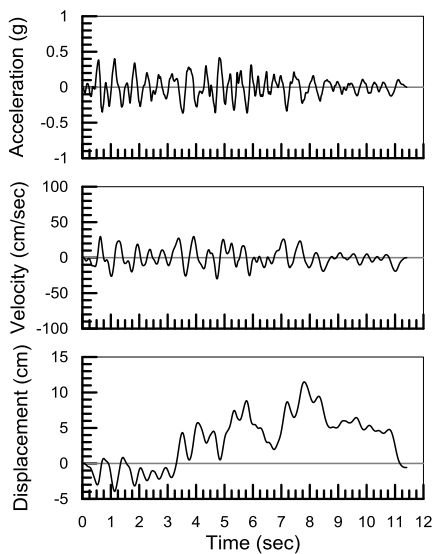
Kocaeli 090



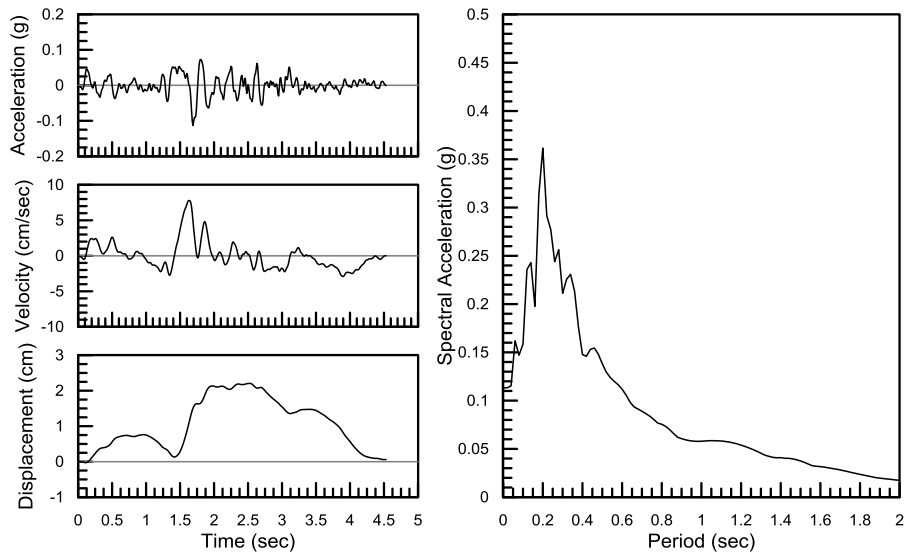
Kocaeli 270



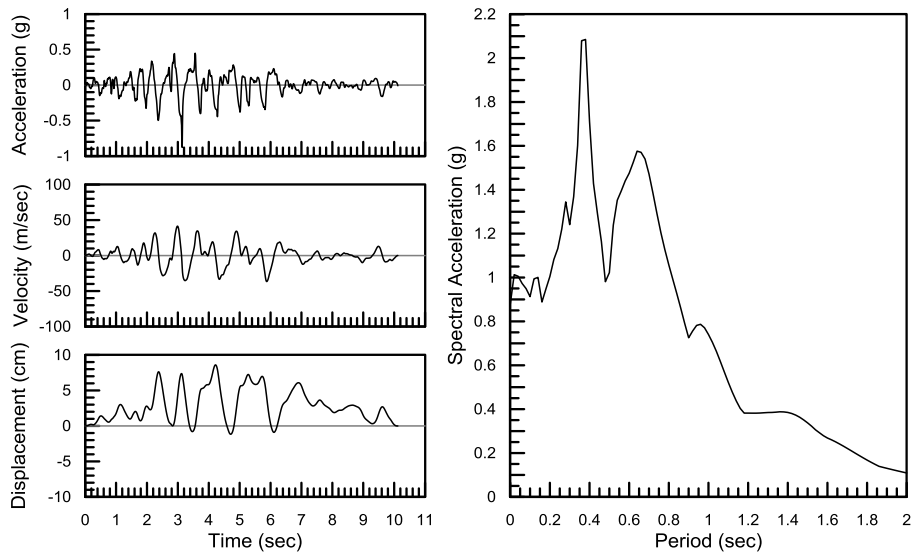
Lefkada



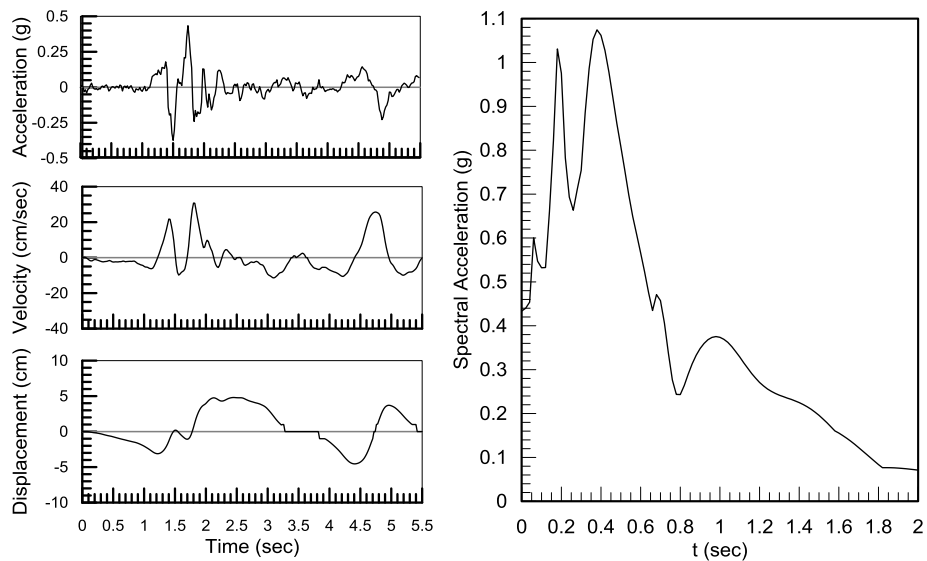
Loma Prieta



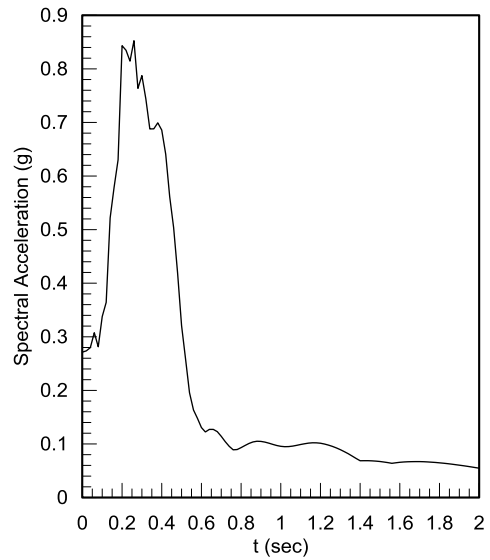
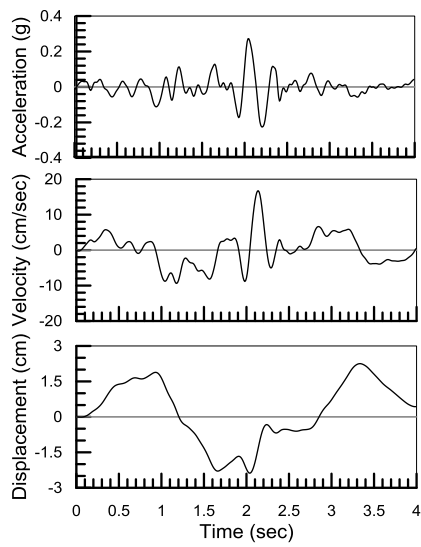
Northridge



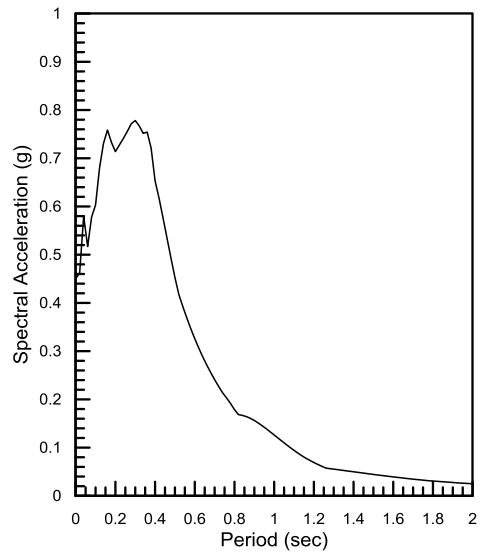
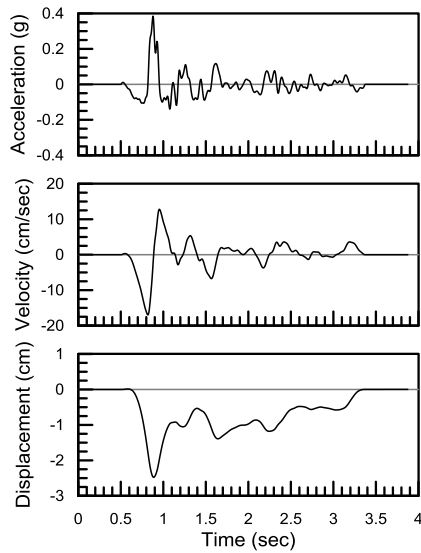
Northridge 265



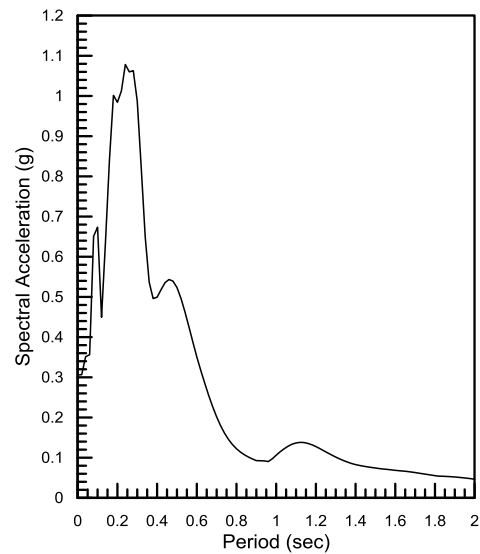
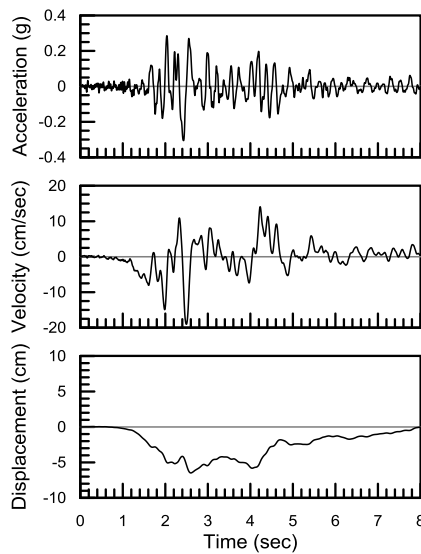
Parkfield



Pyrgos



Sepolia

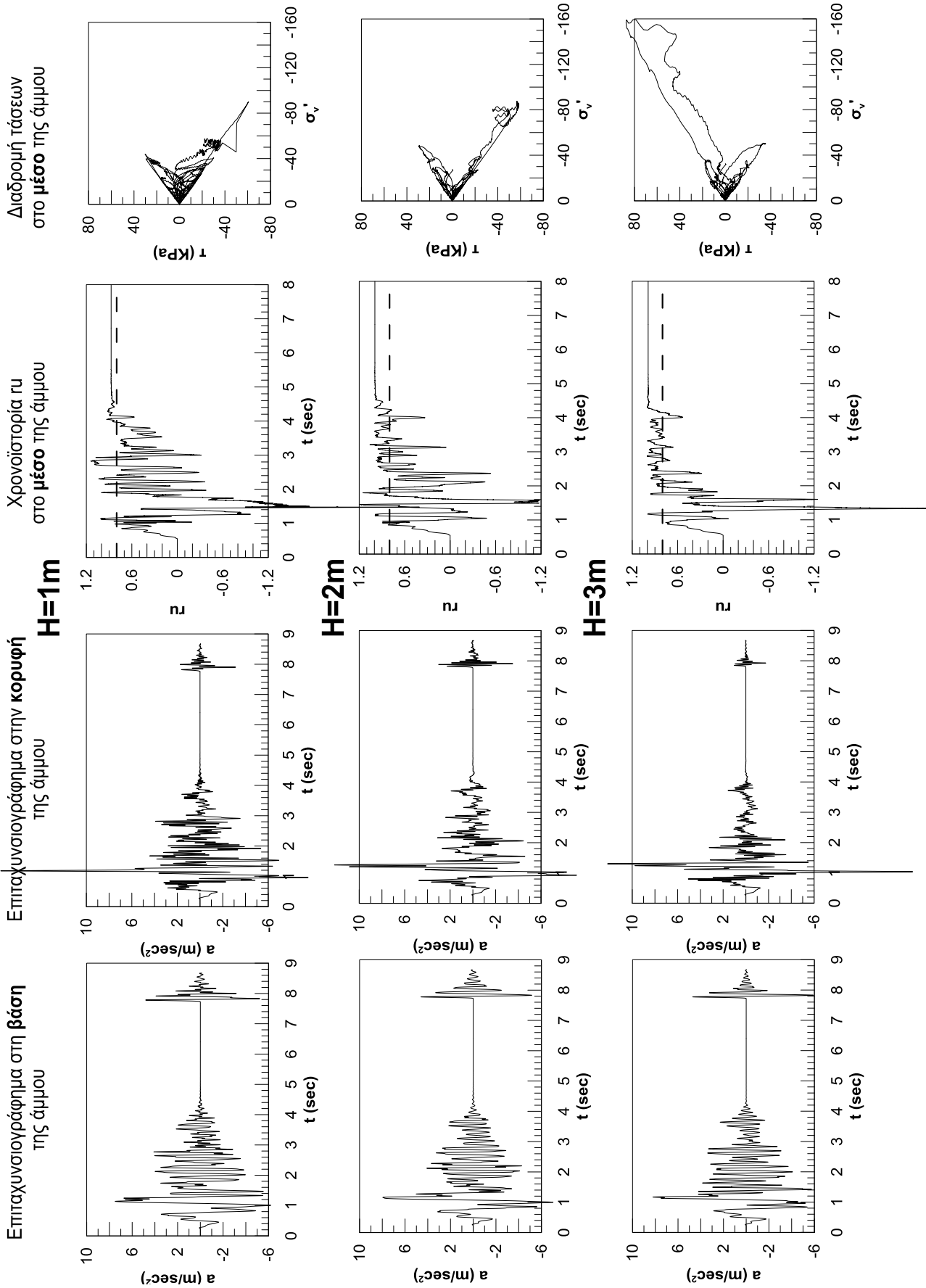


ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β:

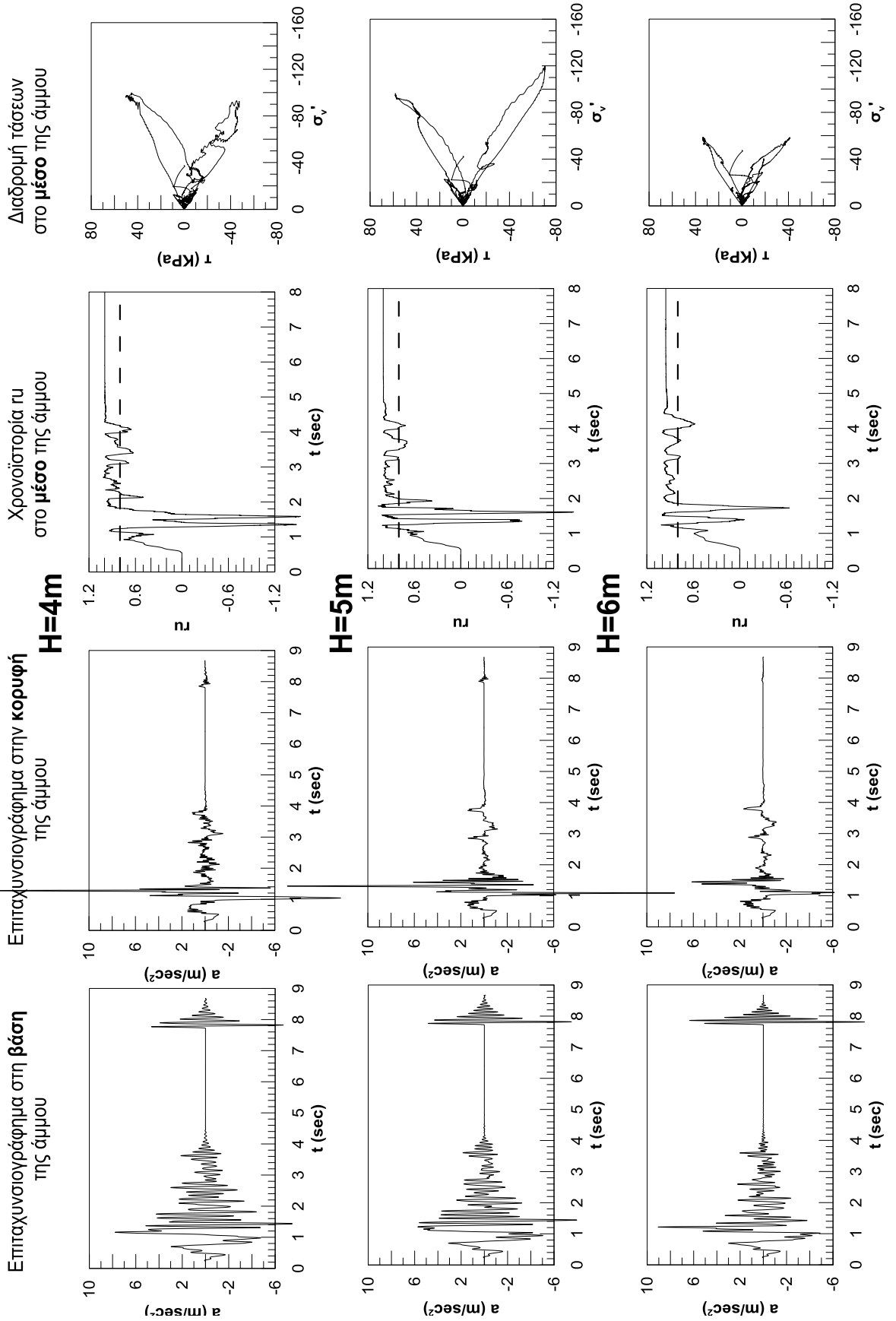
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ:

ΧΡΟΝΟΪΣΤΟΡΙΕΣ

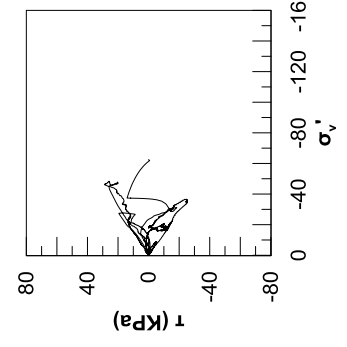
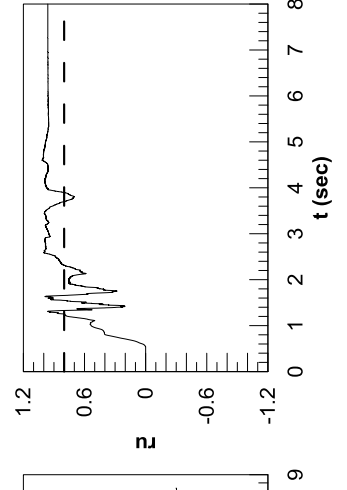
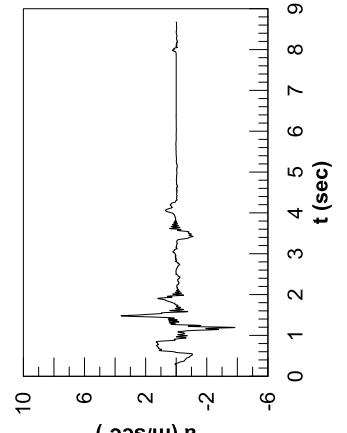
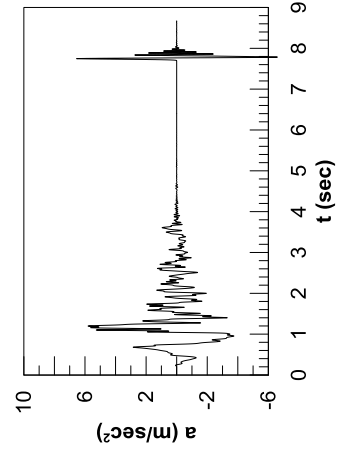
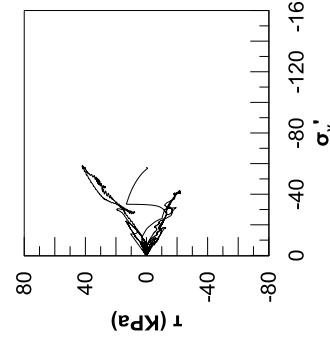
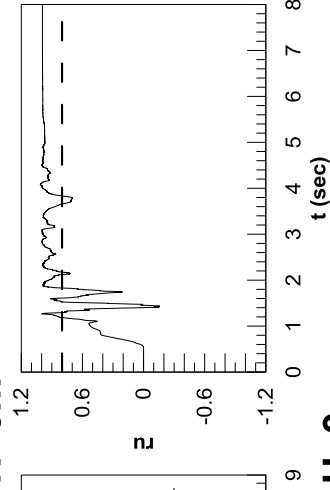
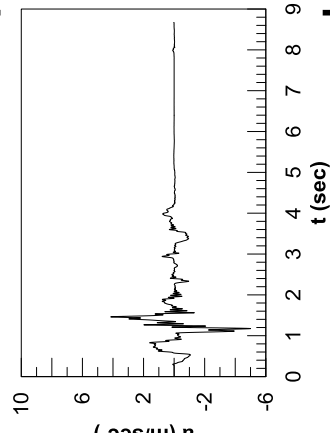
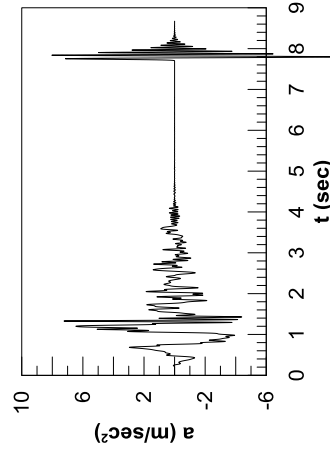
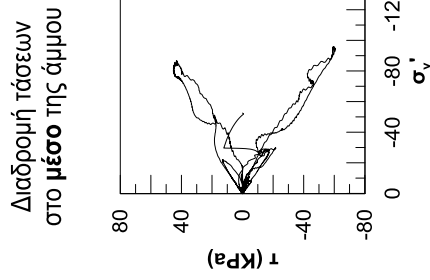
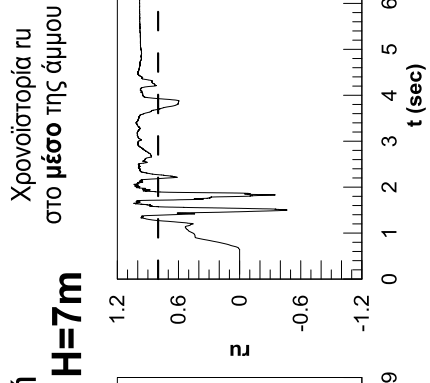
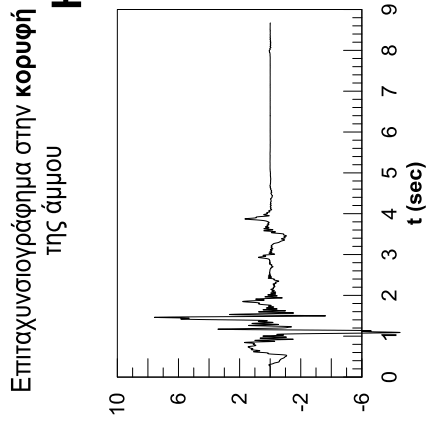
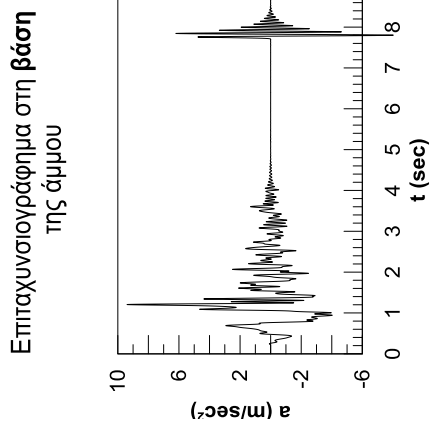
Αίγιο M6.2: $a_{max}=0,58g$



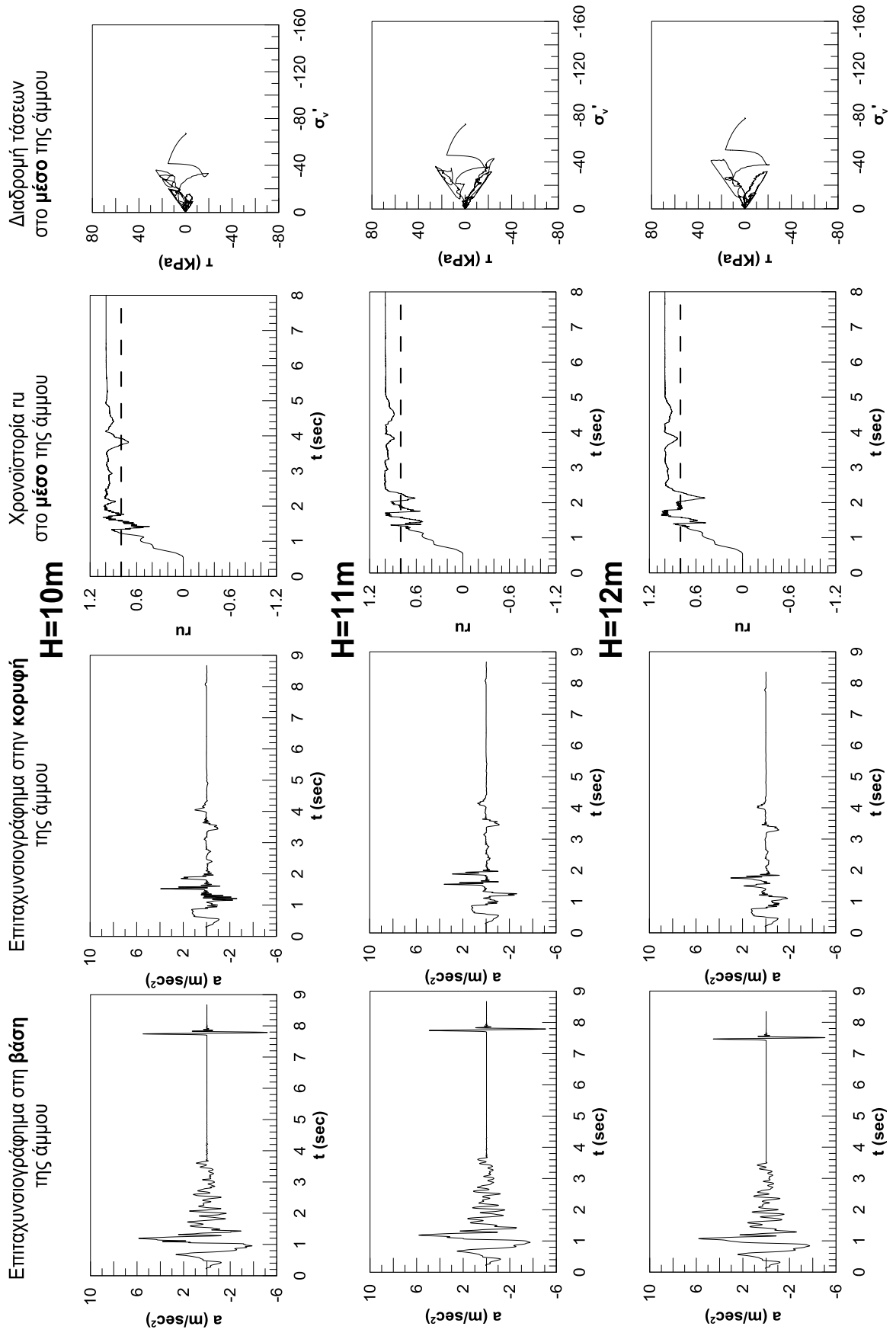
Aigio M6.2: $a_{max}=0,58g$



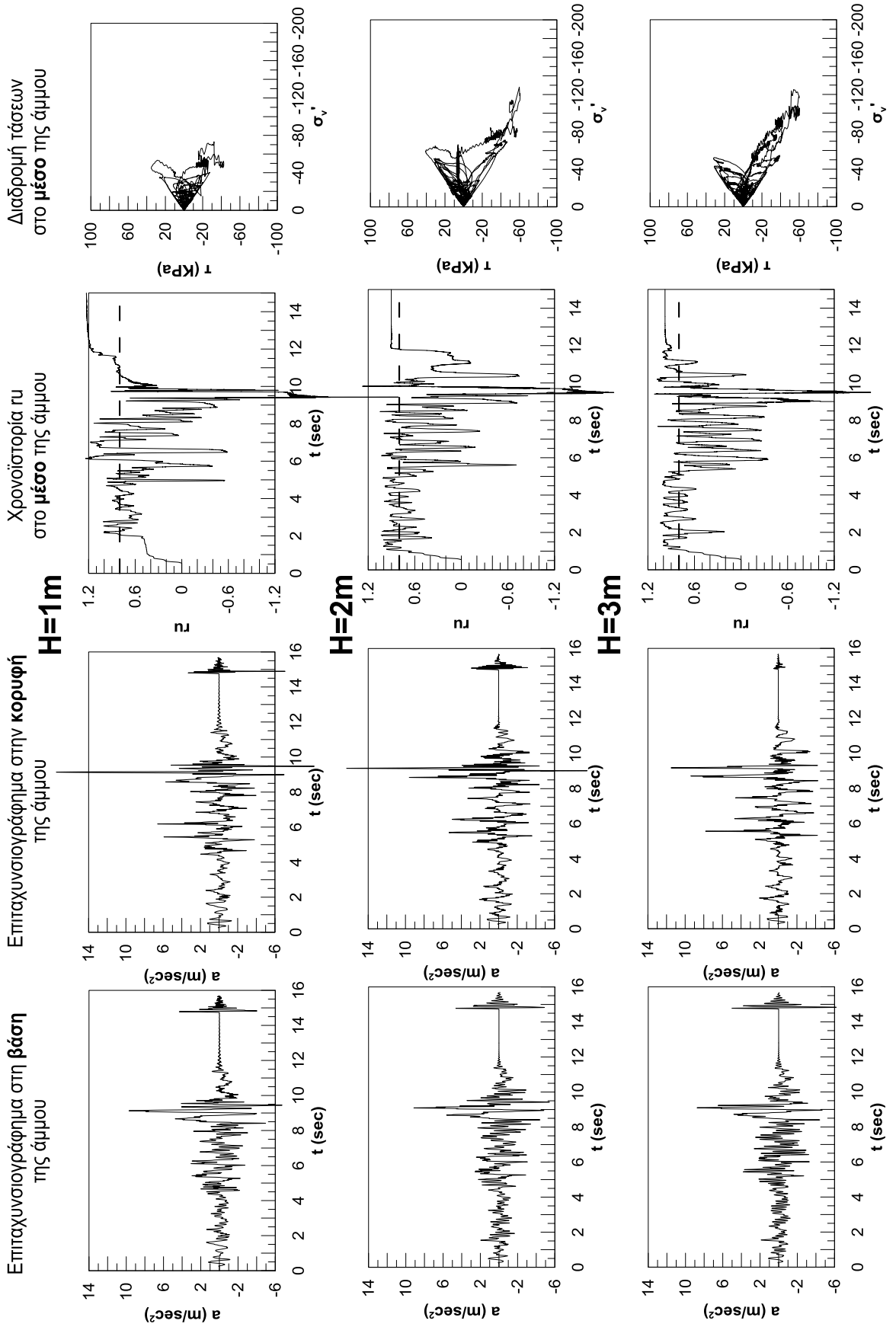
Aigio M6.2: $a_{max}=0,58g$



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

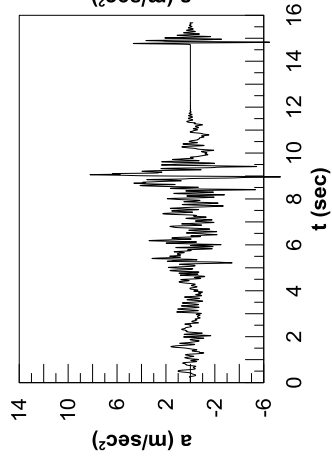


Chi-Chi M6.8: $a_{max}=0,52g$

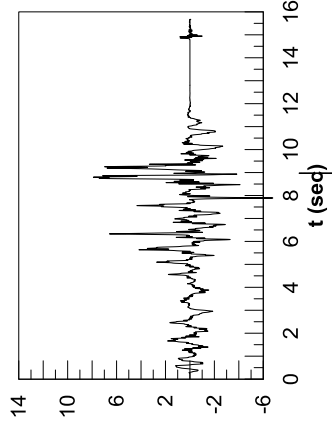


Chi-Chi M6.8: $a_{max}=0,52g$

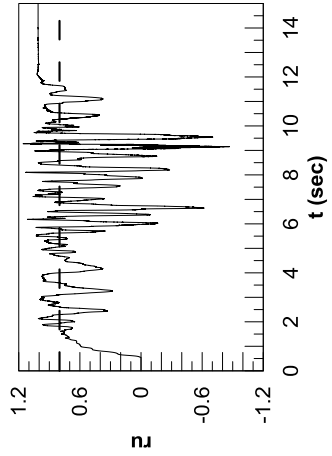
Επιταχυνσιογράφημα στη βάση της άμμου



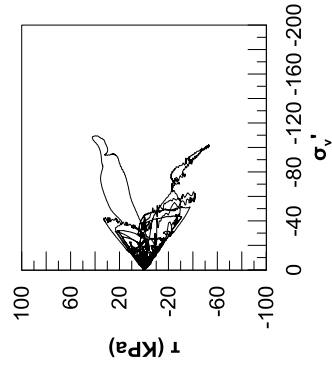
Επιταχυνσιογράφημα στην κορυφή της άμμου



Χρονοϊστορία γι στο μέσο της άμμου



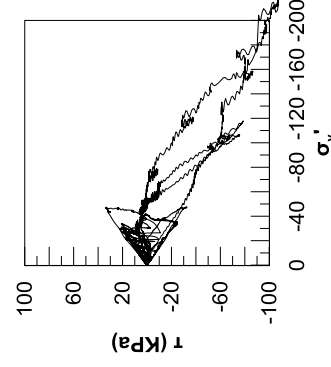
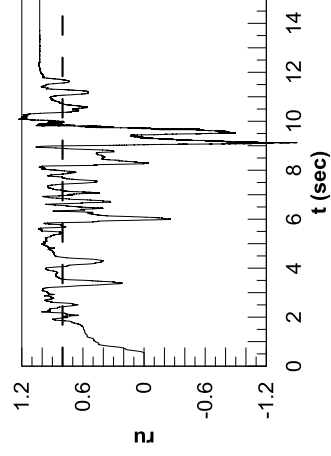
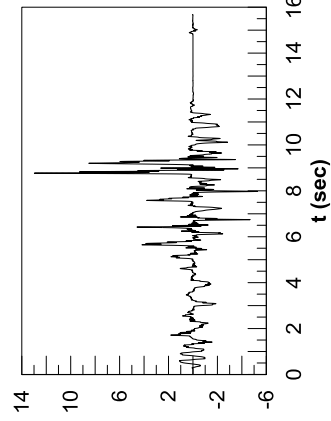
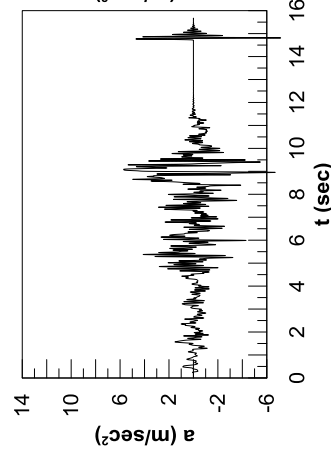
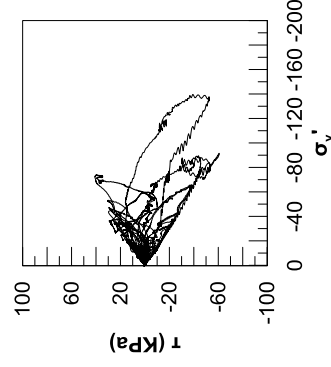
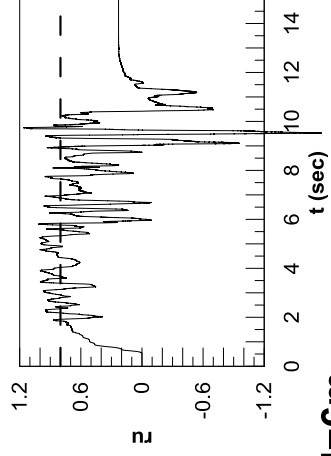
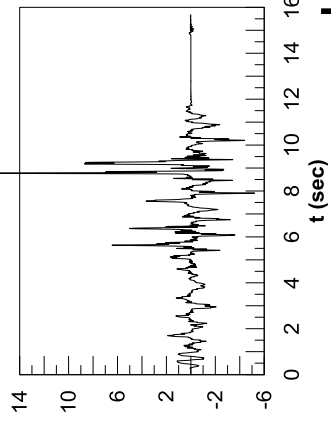
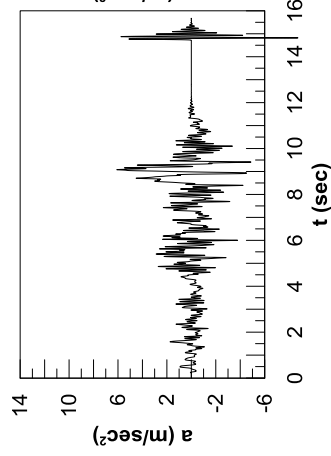
Διαδρομή τάσεων στο μέσο της άμμου



H=4m

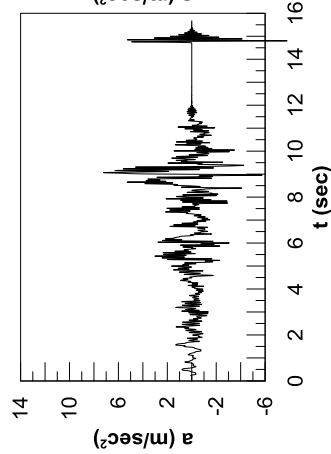
H=5m

H=6m

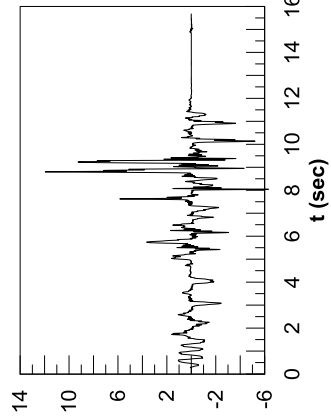


Chi-Chi M6.8: $a_{max}=0,52g$

Επιταχυνσιογράφημα στη **βάση**
της άμμου

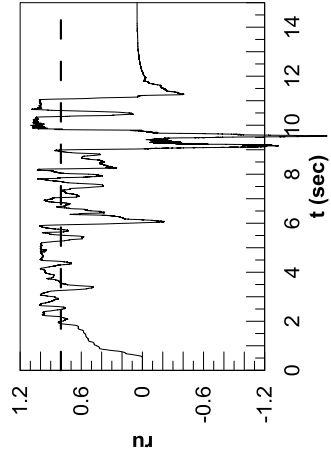


Επιταχυνσιογράφημα στην **κορυφή**
της άμμου

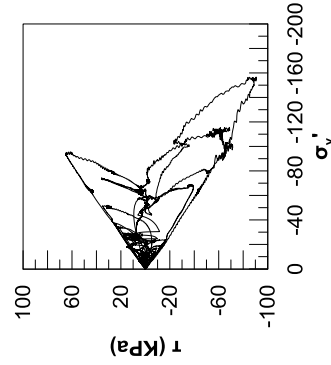


H=7m

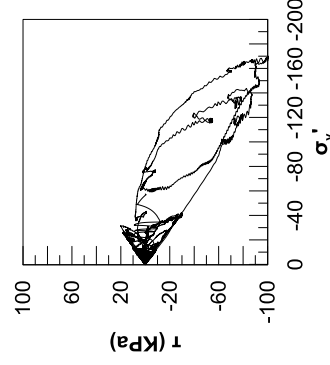
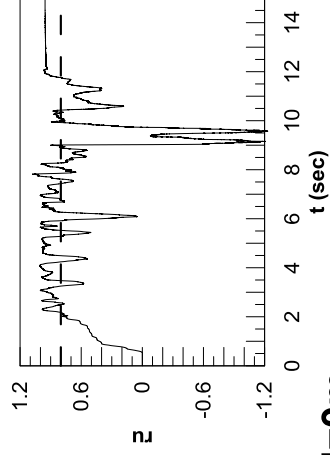
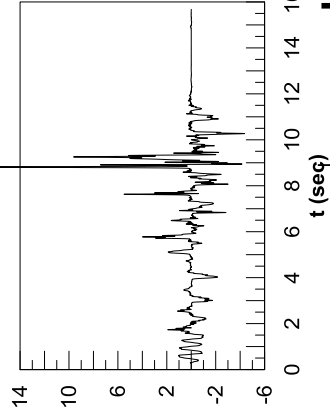
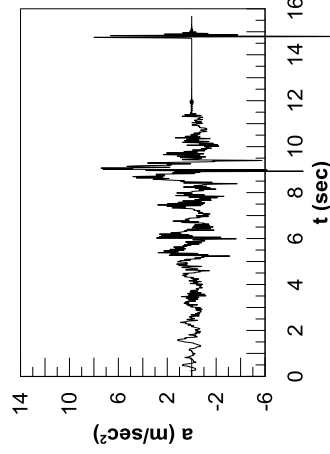
Χρονοϊστορία σ_v
στο μέσο της άμμου



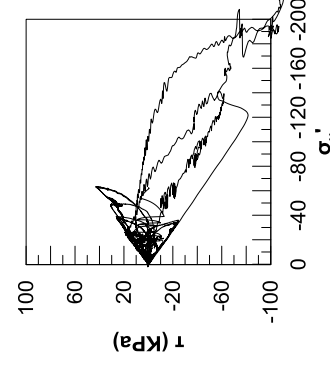
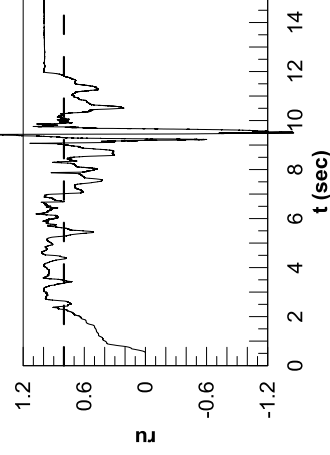
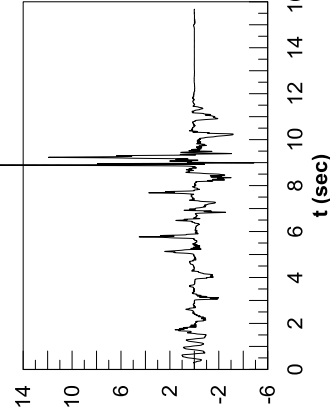
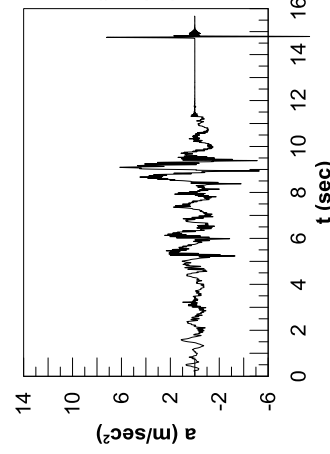
Διαδρομή τάσεων
στο μέσο της άμμου



H=8m

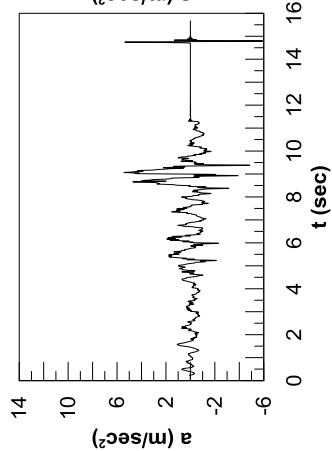


H=9m

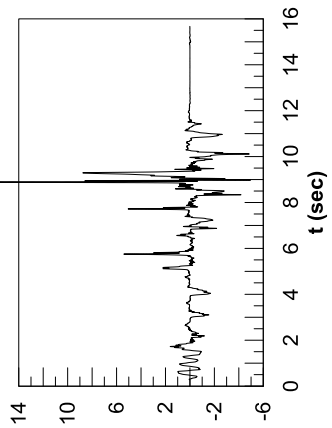


Chi-Chi M6.8: $a_{max}=0,52g$

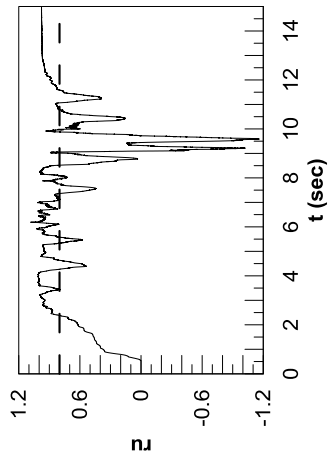
Επιταχυνσιογράφημα στη βάση της άμμου



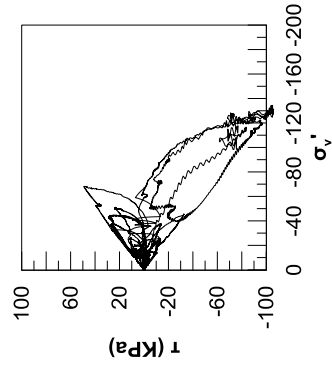
Επιταχυνσιογράφημα στην κορυφή της άμμου



Χρονοϊστορία γι στο μέσο της άμμου



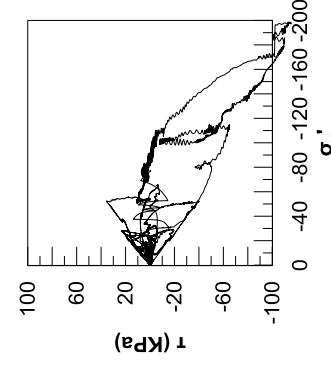
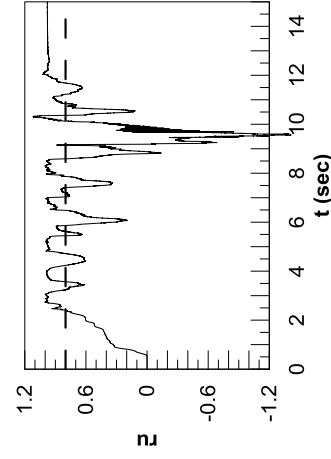
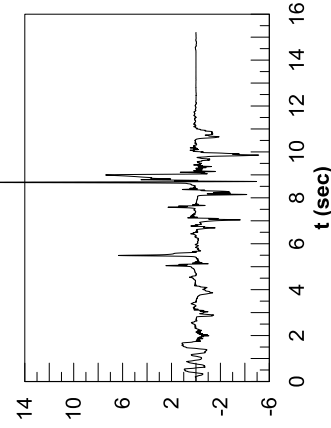
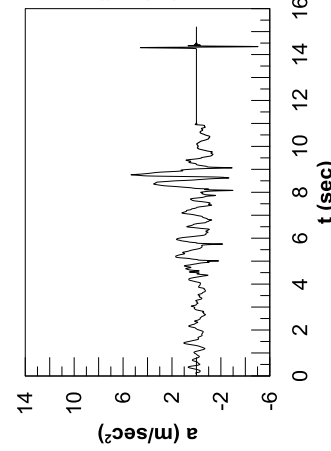
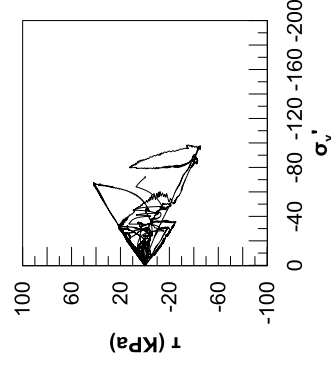
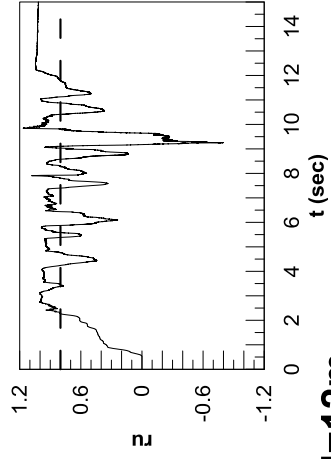
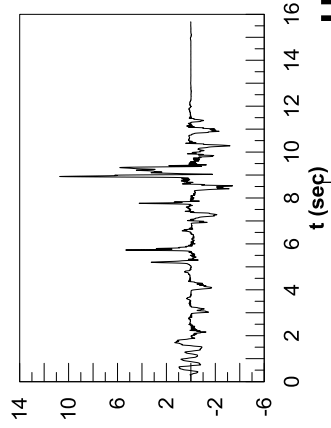
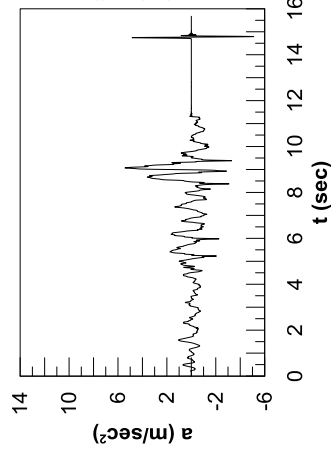
Διαδρομή τάσεων στο μέσο της άμμου



H=10m

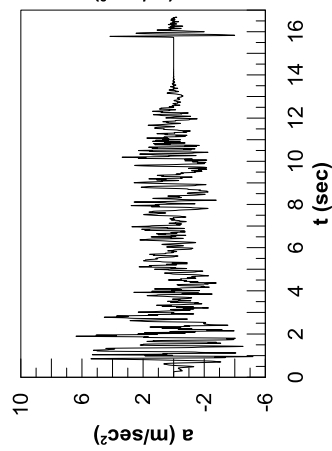
H=11m

H=12m

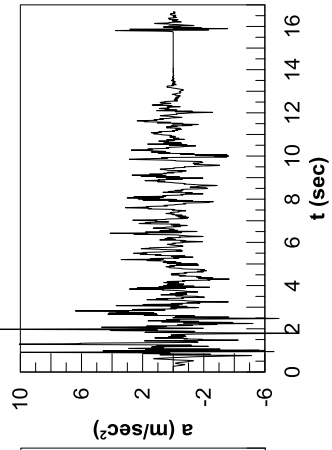


Ducze M7.9: $a_{\max}=0,43g$

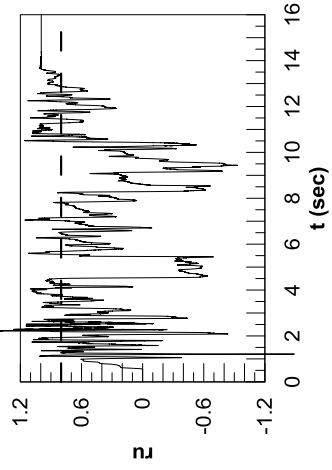
Επιταχυνσιογράφημα στη **βάση**
της άμμου



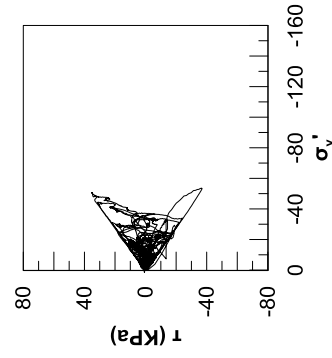
Επιταχυνσιογράφημα στην **κορυφή**
της άμμου



Χρονοϊστορία γι
στο **μέσο** της άμμου



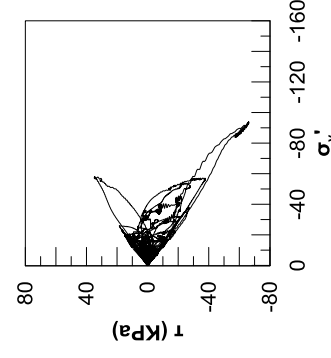
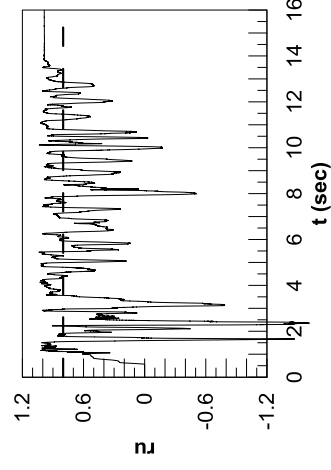
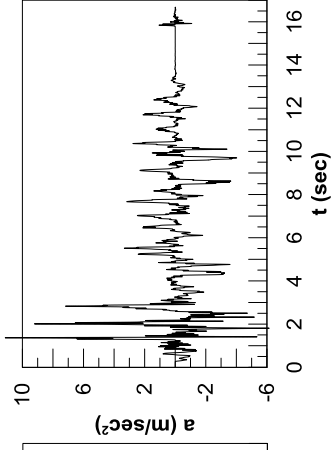
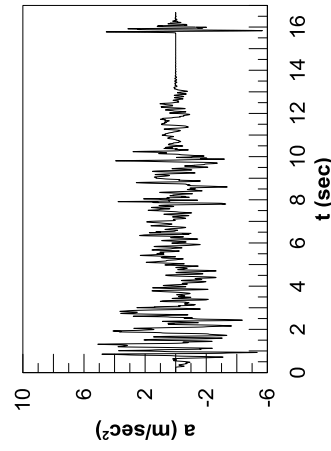
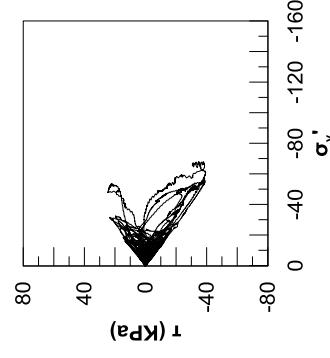
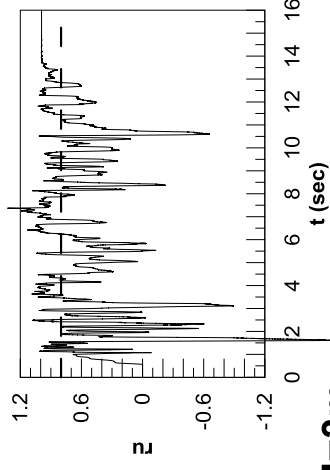
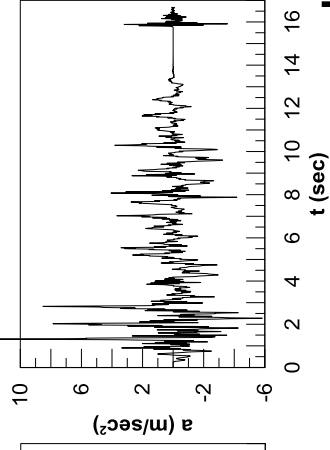
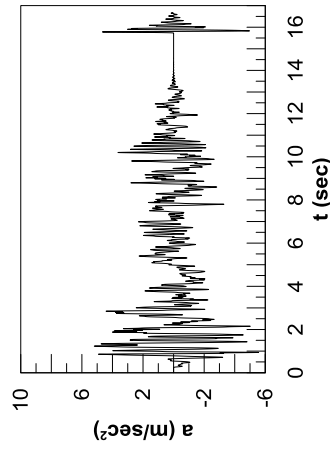
Διαδρομή τάσεων
στο **μέσο** της άμμου



H=1m

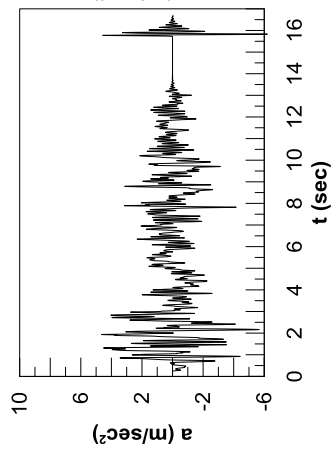
H=2m

H=3m

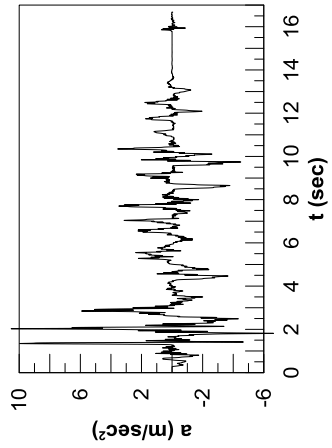


Ducze M7.9: $a_{max}=0,43g$

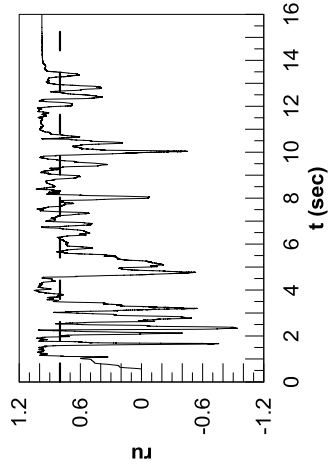
Επιταχυνσιογράφημα στη **βάση**
της άμμου



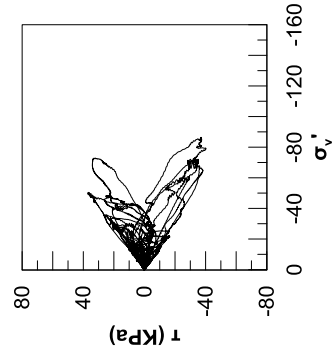
Επιταχυνσιογράφημα στην **κορυφή**
της άμμου



Χρονοϊστορία γι
στο μέσο της άμμου



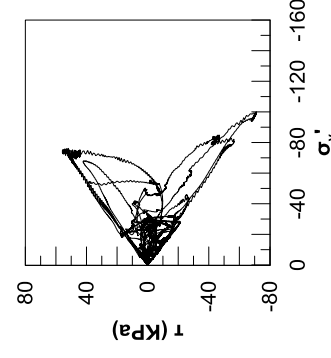
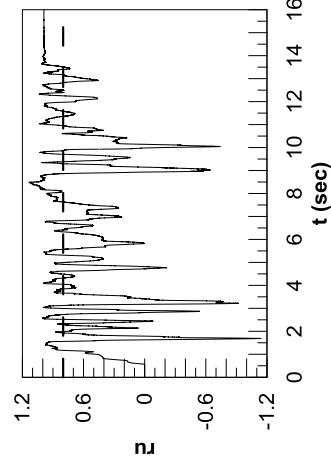
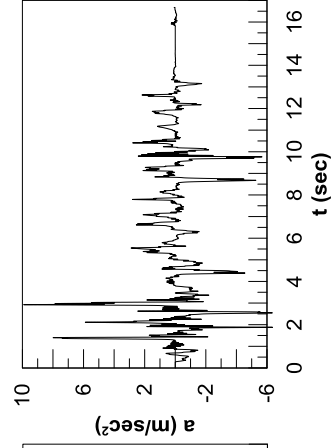
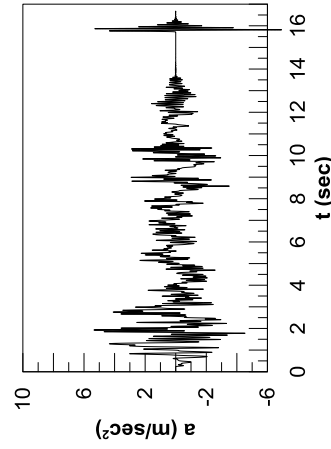
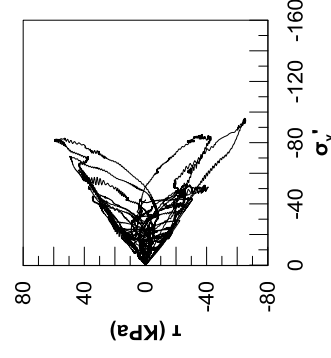
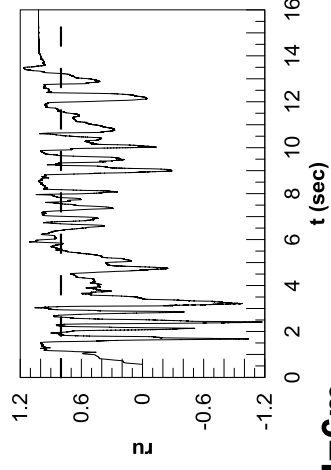
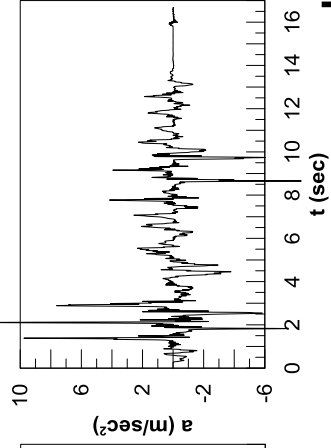
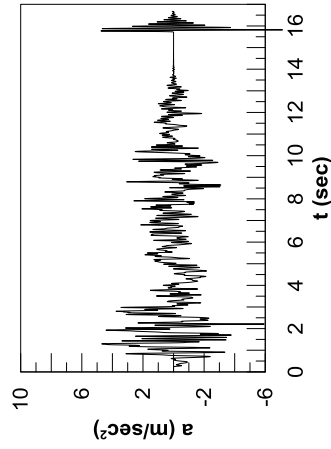
Διαδρομή τάσεων
στο μέσο της άμμου



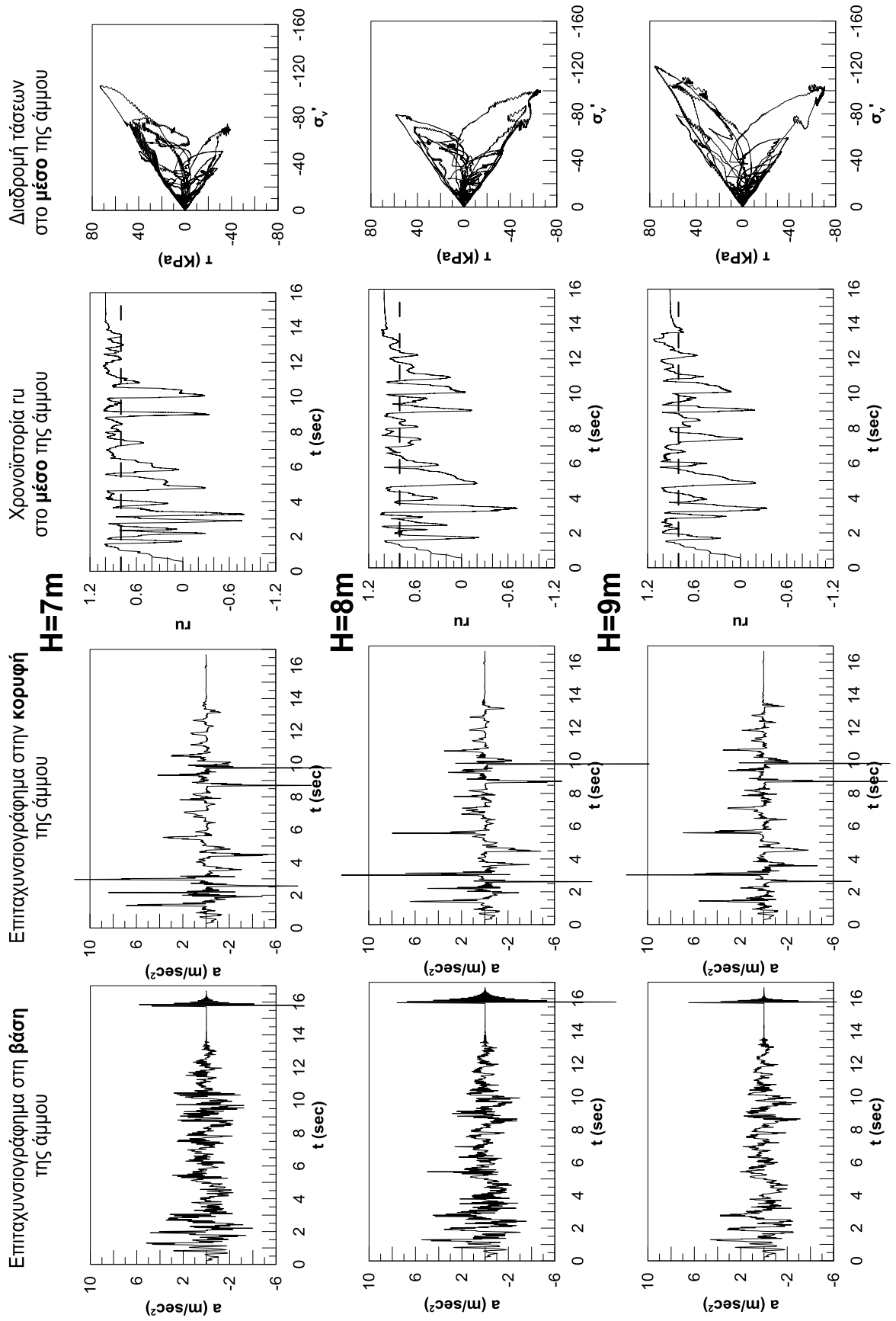
H=4m

H=5m

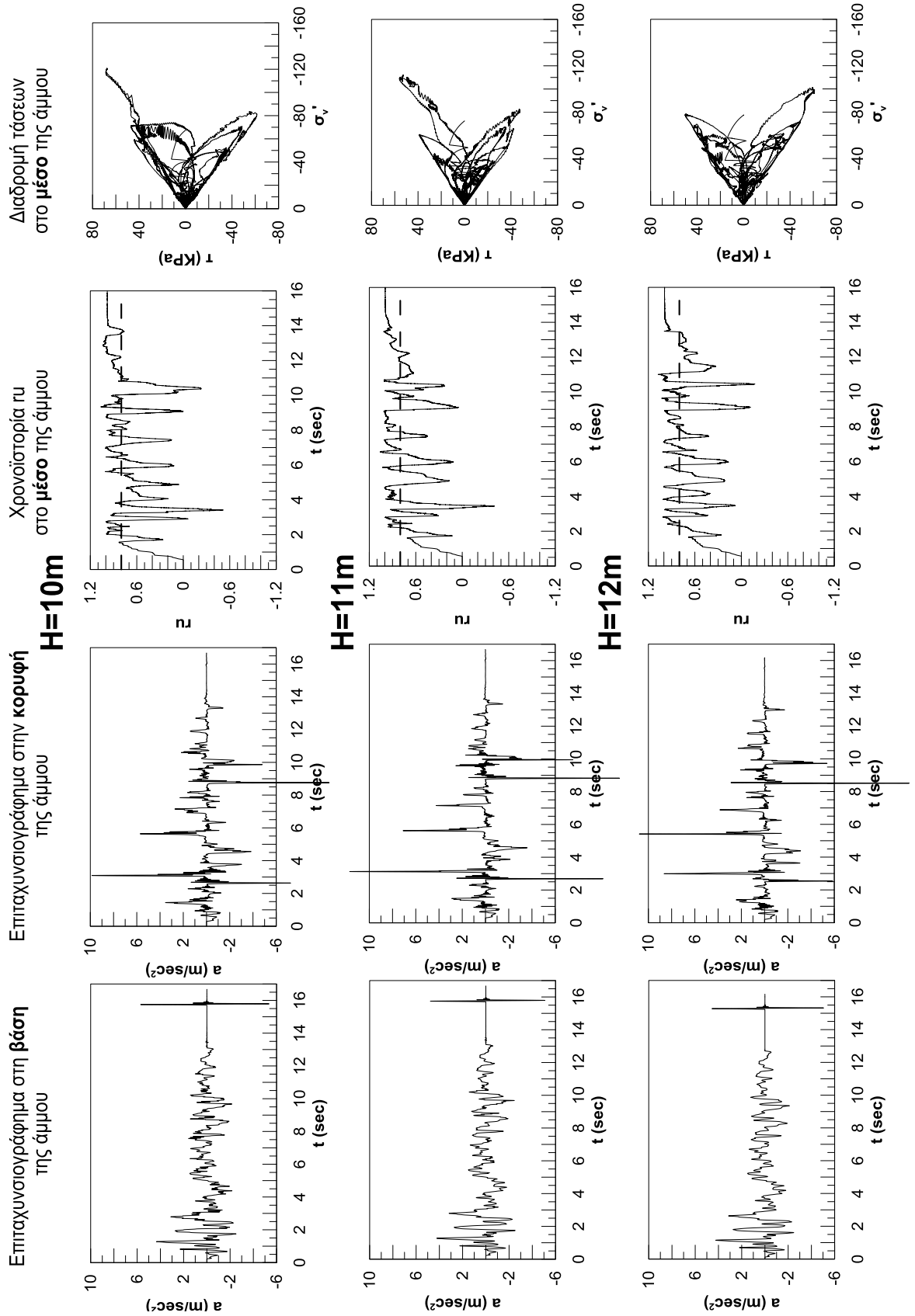
H=6m



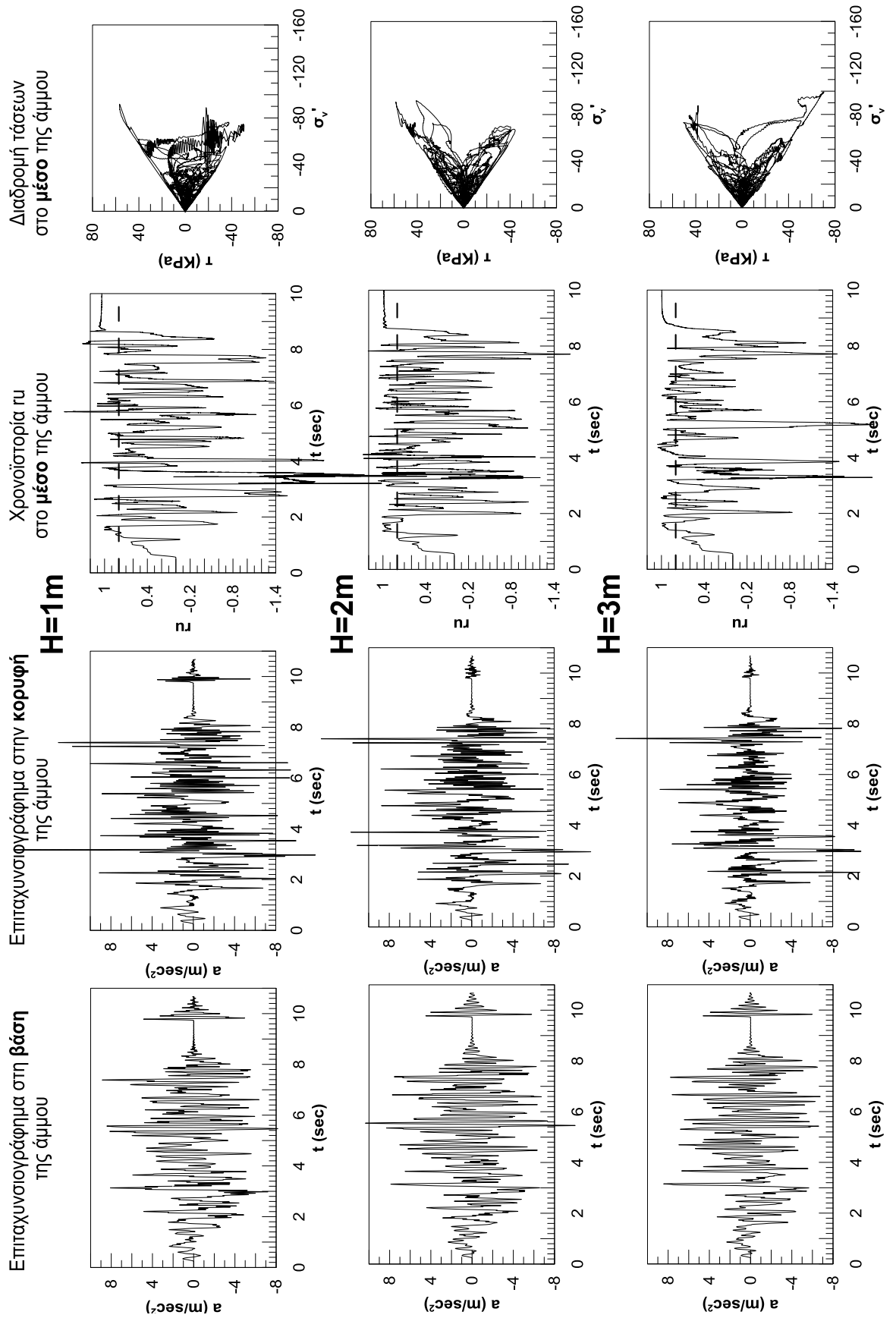
Ducze M7.9: $a_{max}=0,43g$



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

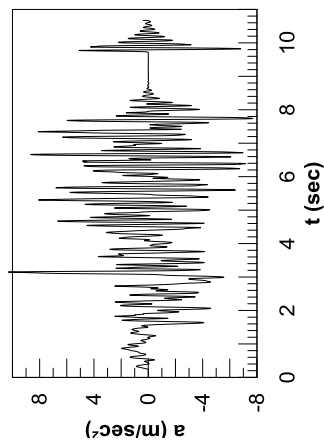


Kocaeli 270 M7.5: $a_{max}=0,46g$

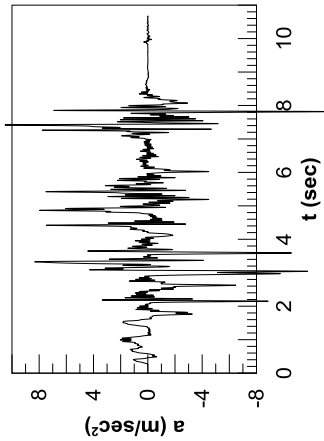


Κοσαελλι 270 M7.5: $a_{\max}=0,46g$

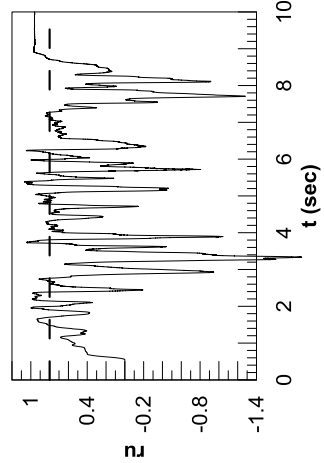
Επιταχυνσιογράφημα στη βάση της άμμου



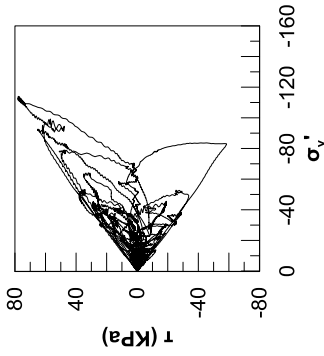
Επιταχυνσιογράφημα στην κορυφή της άμμου



Χρονοϊστορία σ_v στο μέσο της άμμου



Διαδρομή τάσεων στο μέσο της άμμου



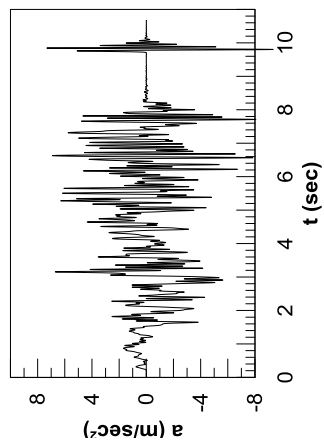
H=4m

H=5m

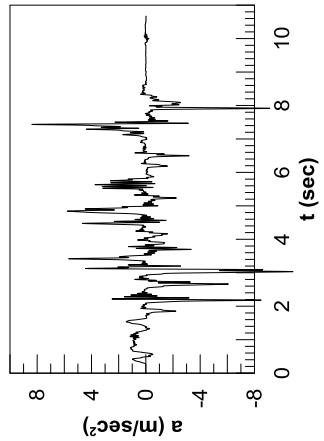
H=6m

Κοσαελλι 270 M7.5: $a_{max}=0,46g$

Επιταχυνσιογράφημα στη βάση της άμμου

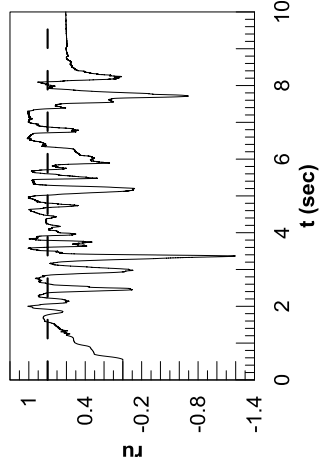


Επιταχυνσιογράφημα στην κορυφή της άμμου



H=7m

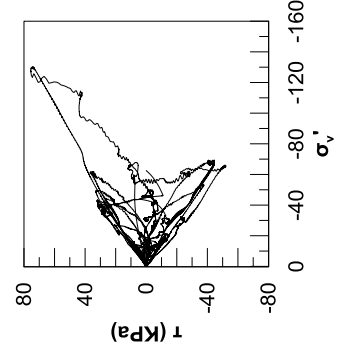
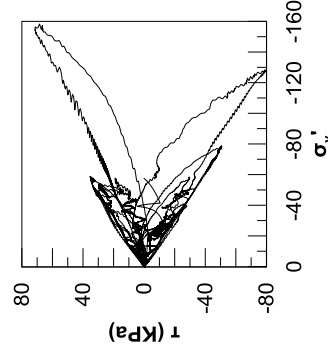
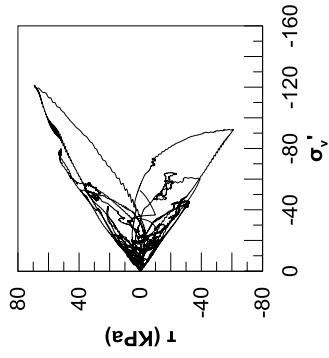
Χρονοϊστορία γυ στο μέσο της άμμου



H=8m

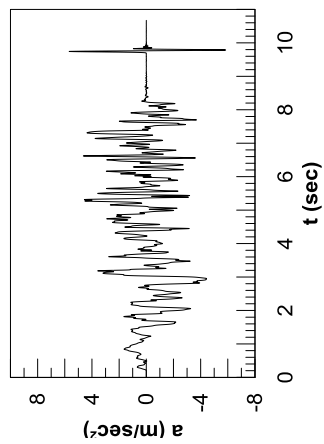
H=9m

Διαδρομή τάσεων στο μέσο της άμμου

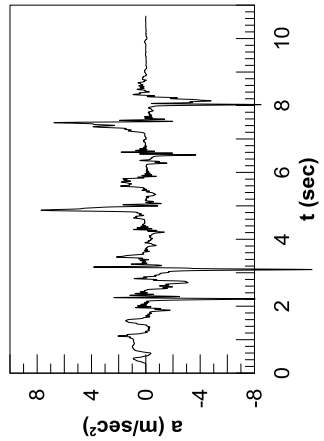


Κοσαελλι 270 M7.5: $a_{max}=0,46g$

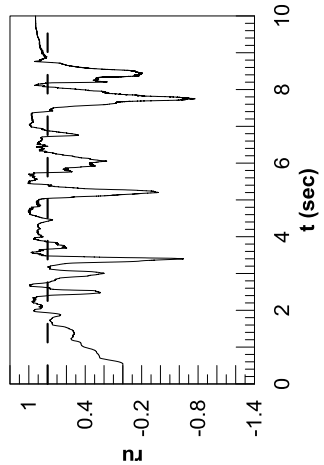
Επιταχυνσιογράφημα στη βάση της άμμου



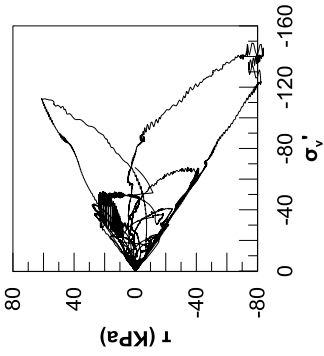
Επιταχυνσιογράφημα στην κορυφή της άμμου



Χρονοϊστορία γυ στο μέσο της άμμου



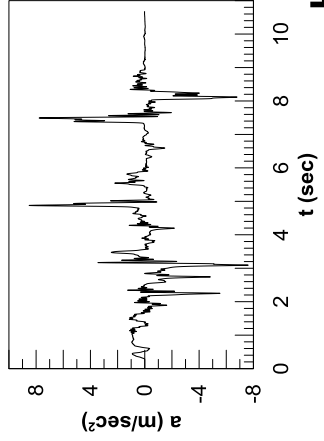
Διαδρομή τάσεων στο μέσο της άμμου



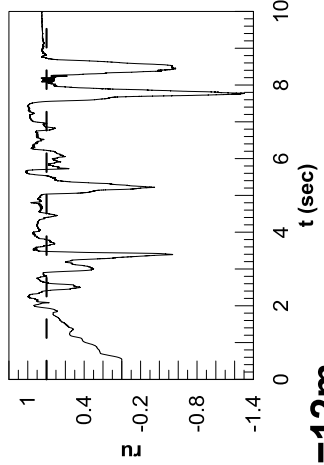
H=10m

H=11m

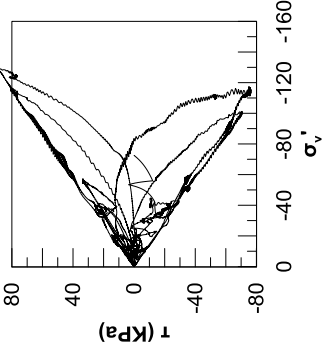
Επιταχυνσιογράφημα στην κορυφή της άμμου



Χρονοϊστορία γυ στο μέσο της άμμου

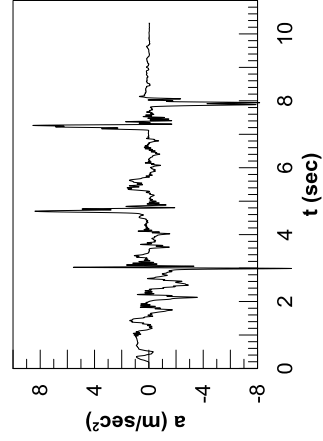


Διαδρομή τάσεων στο μέσο της άμμου

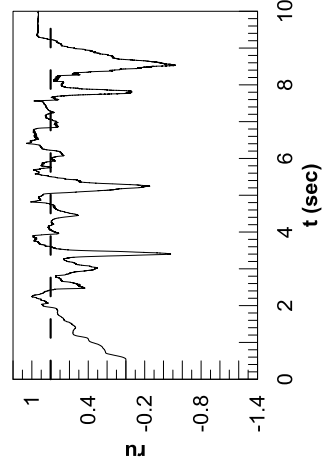


H=12m

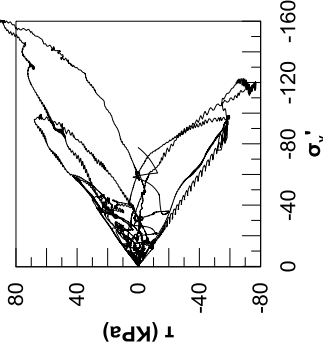
Επιταχυνσιογράφημα στην κορυφή της άμμου



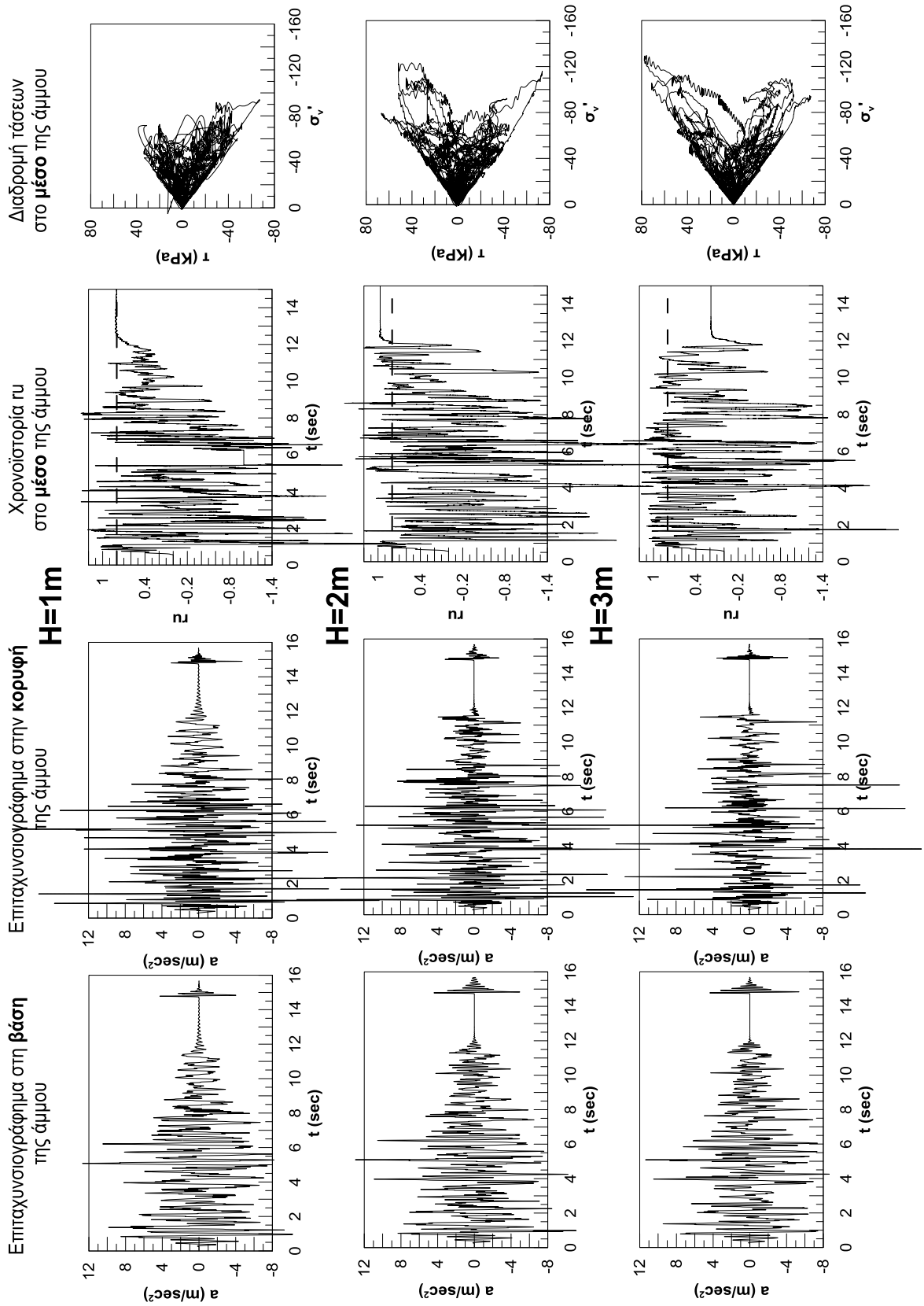
Χρονοϊστορία γυ στο μέσο της άμμου



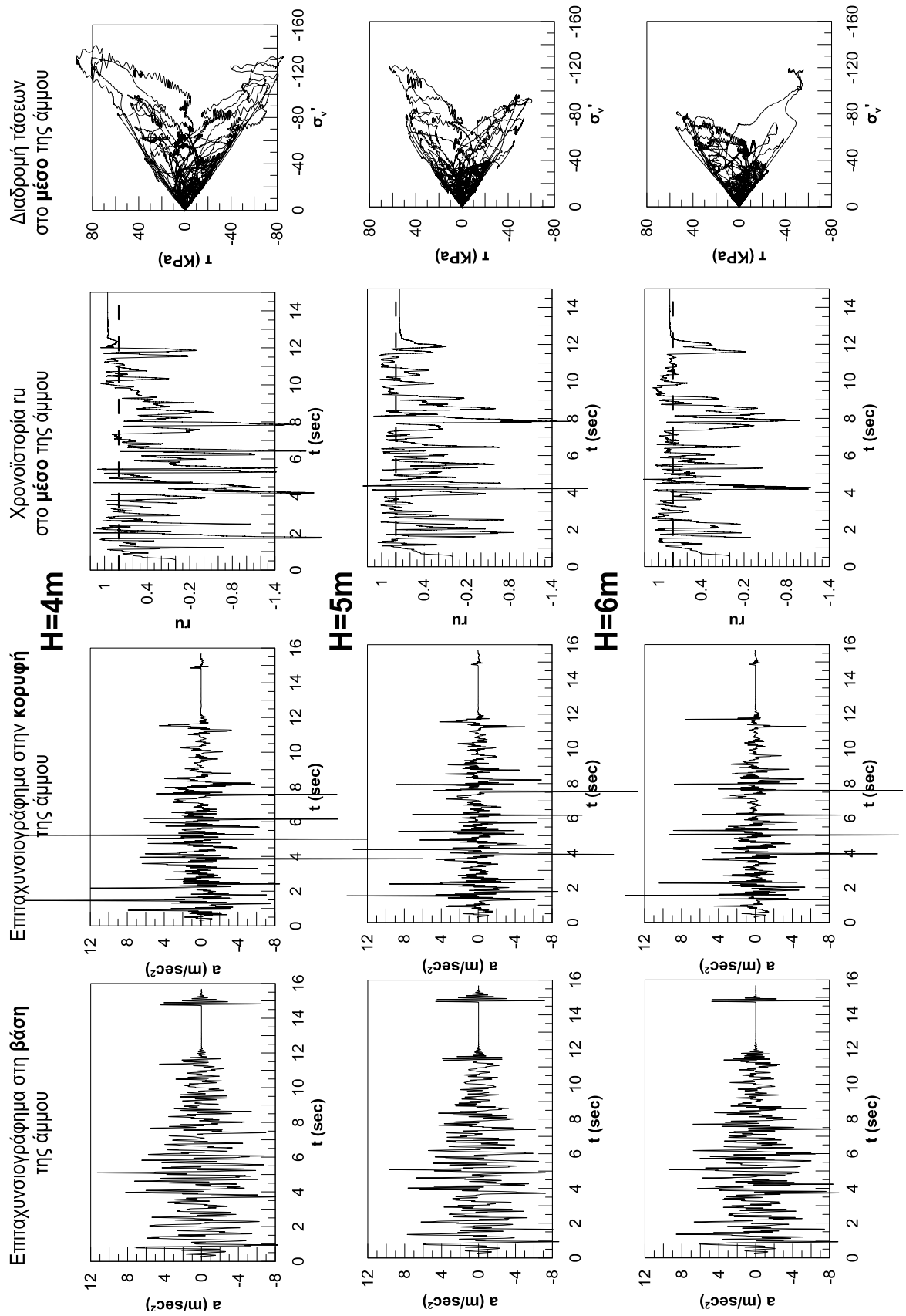
Διαδρομή τάσεων στο μέσο της άμμου



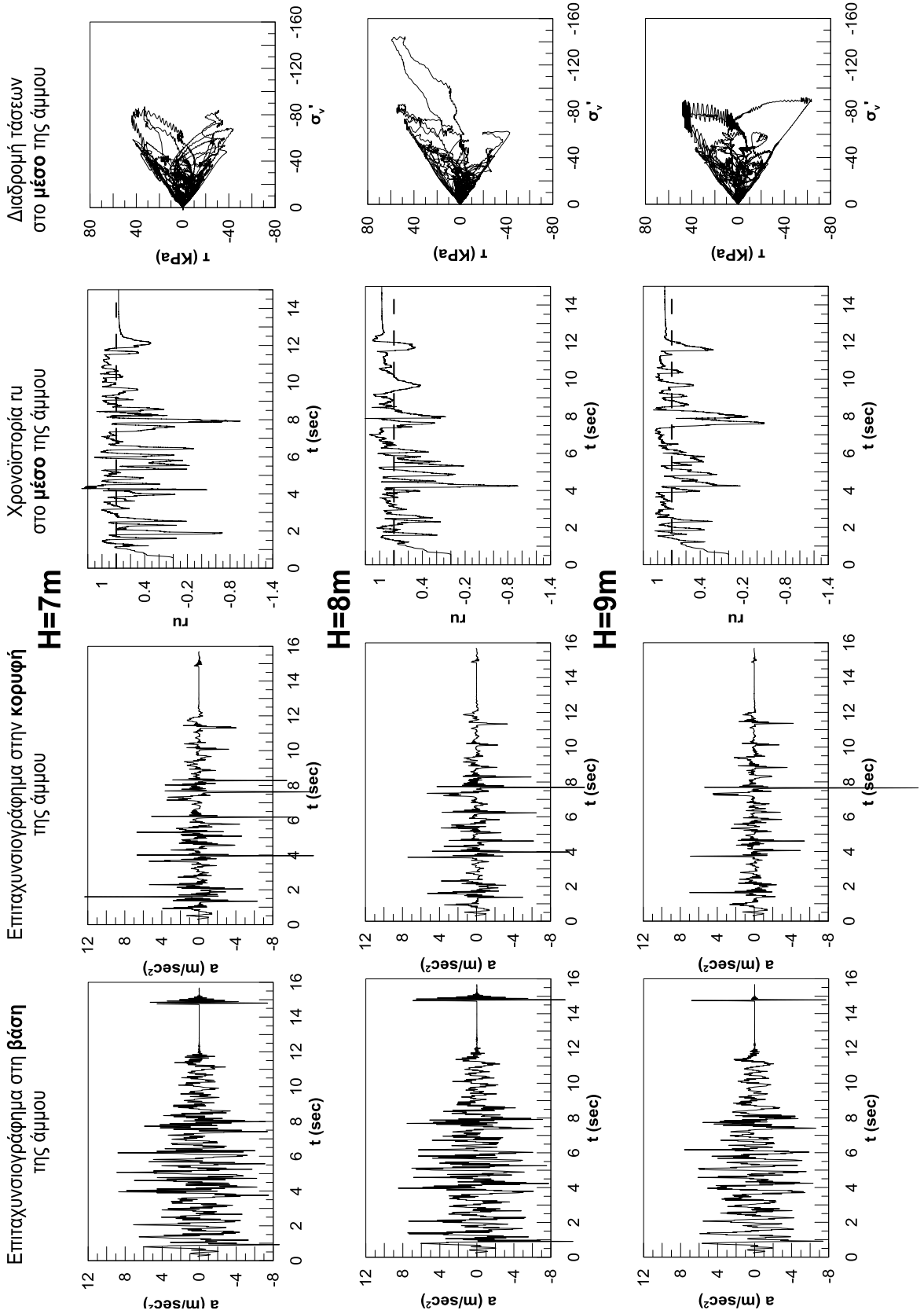
Lefkada M6.3: $a_{max}=0,57g$



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

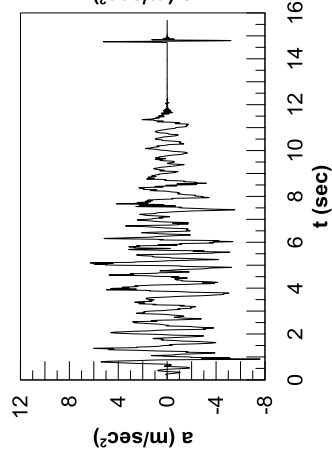


Lefkada M6.3: $a_{max}=0,57g$

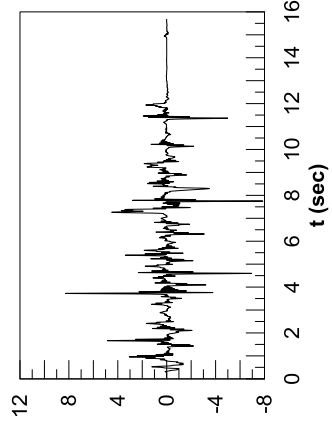


Lefkada M6.3: $a_{max}=0,57g$

Επιταχυνσιογράφημα στη βάση της άμμου

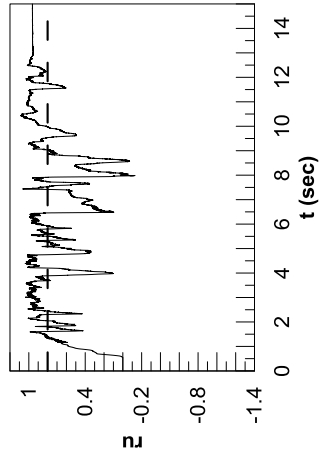


Επιταχυνσιογράφημα στην κορυφή της άμμου

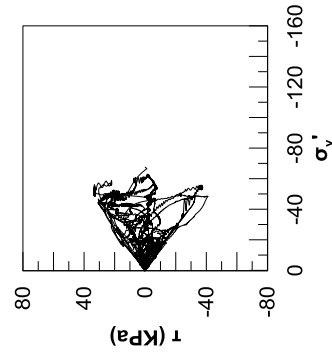


Χρονοϊστορία σ_v στο μέσο της άμμου

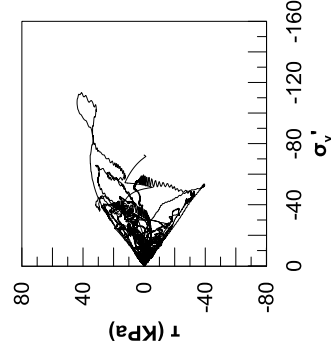
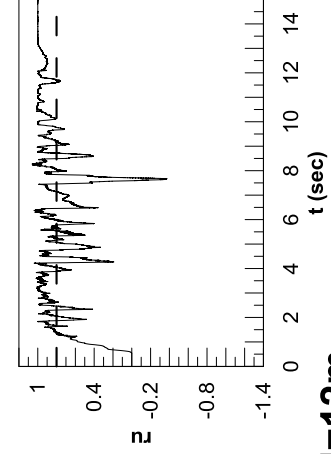
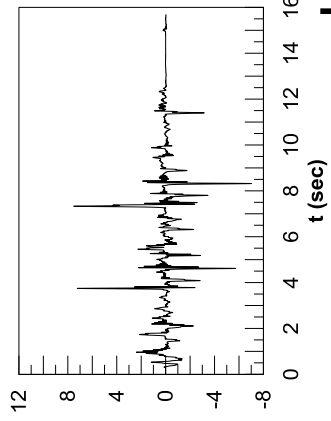
H=10m



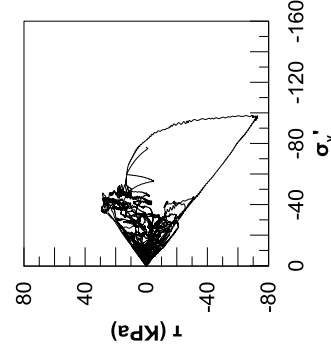
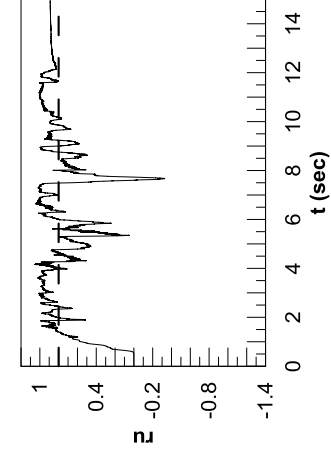
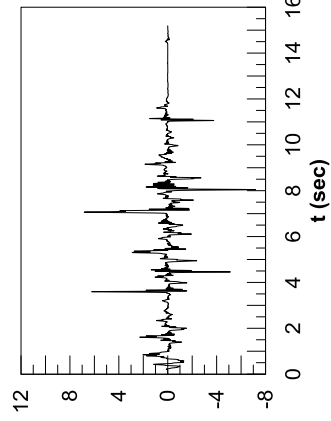
Διαδρομή τάσεων στο μέσο της άμμου



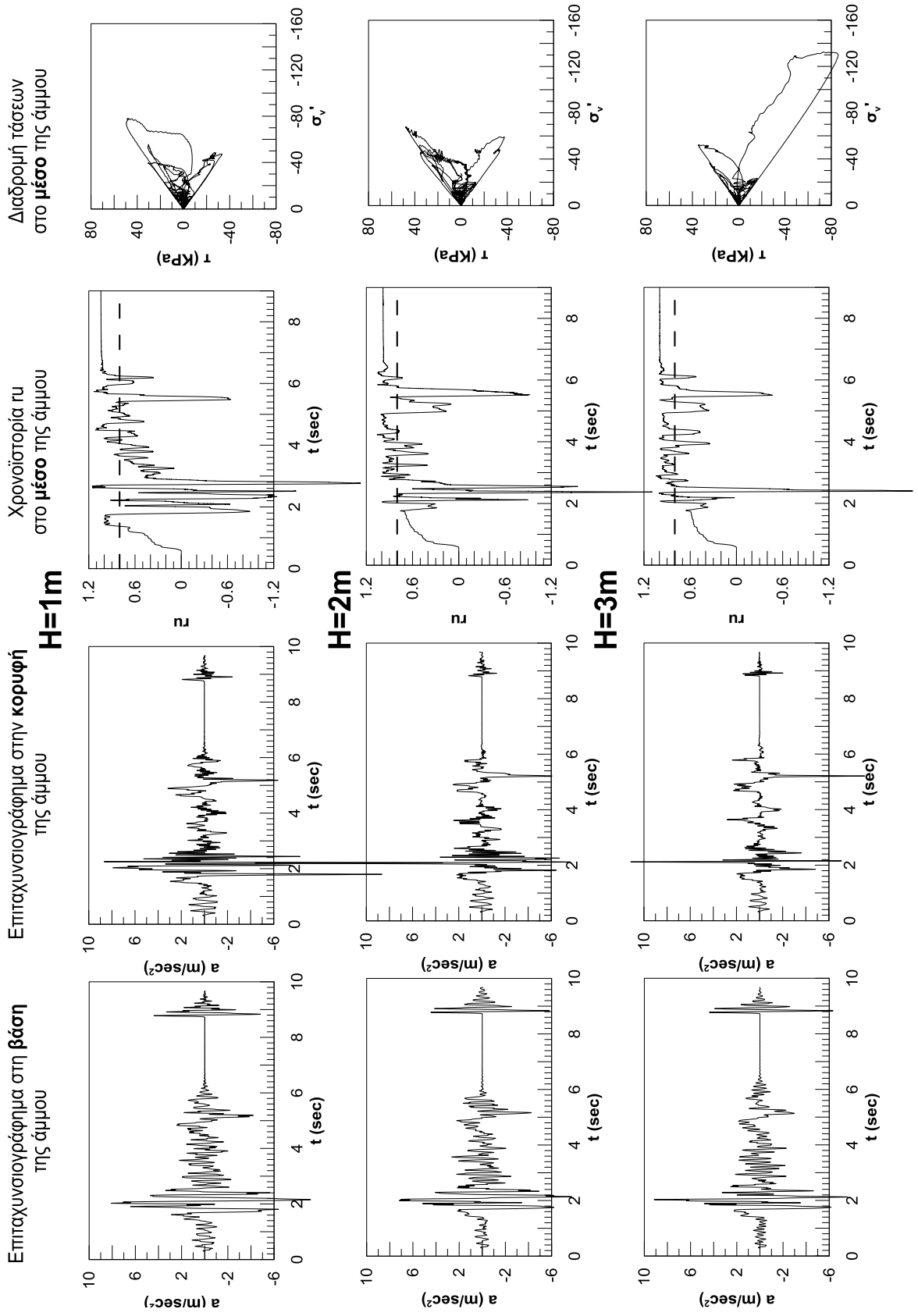
H=11m



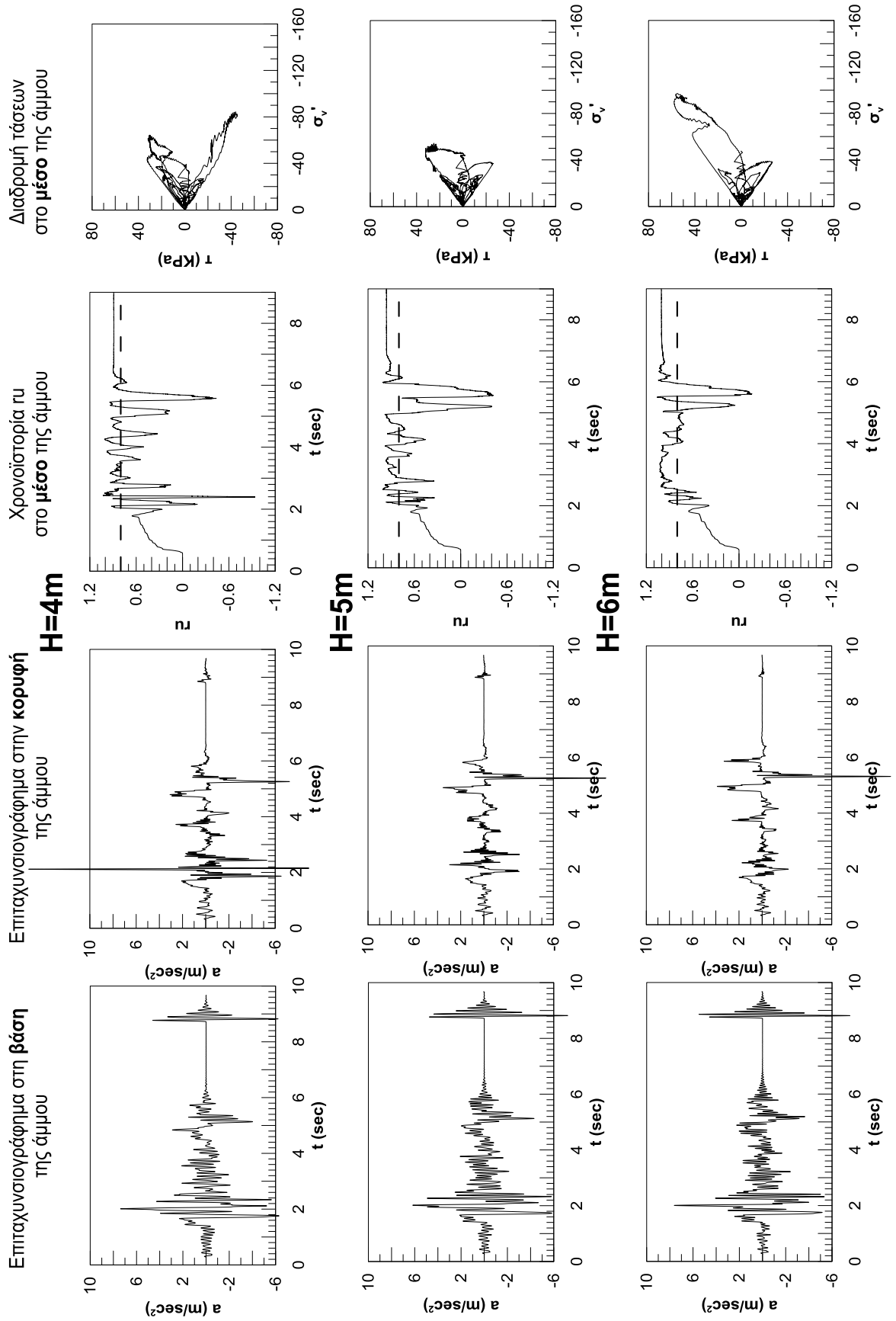
H=12m



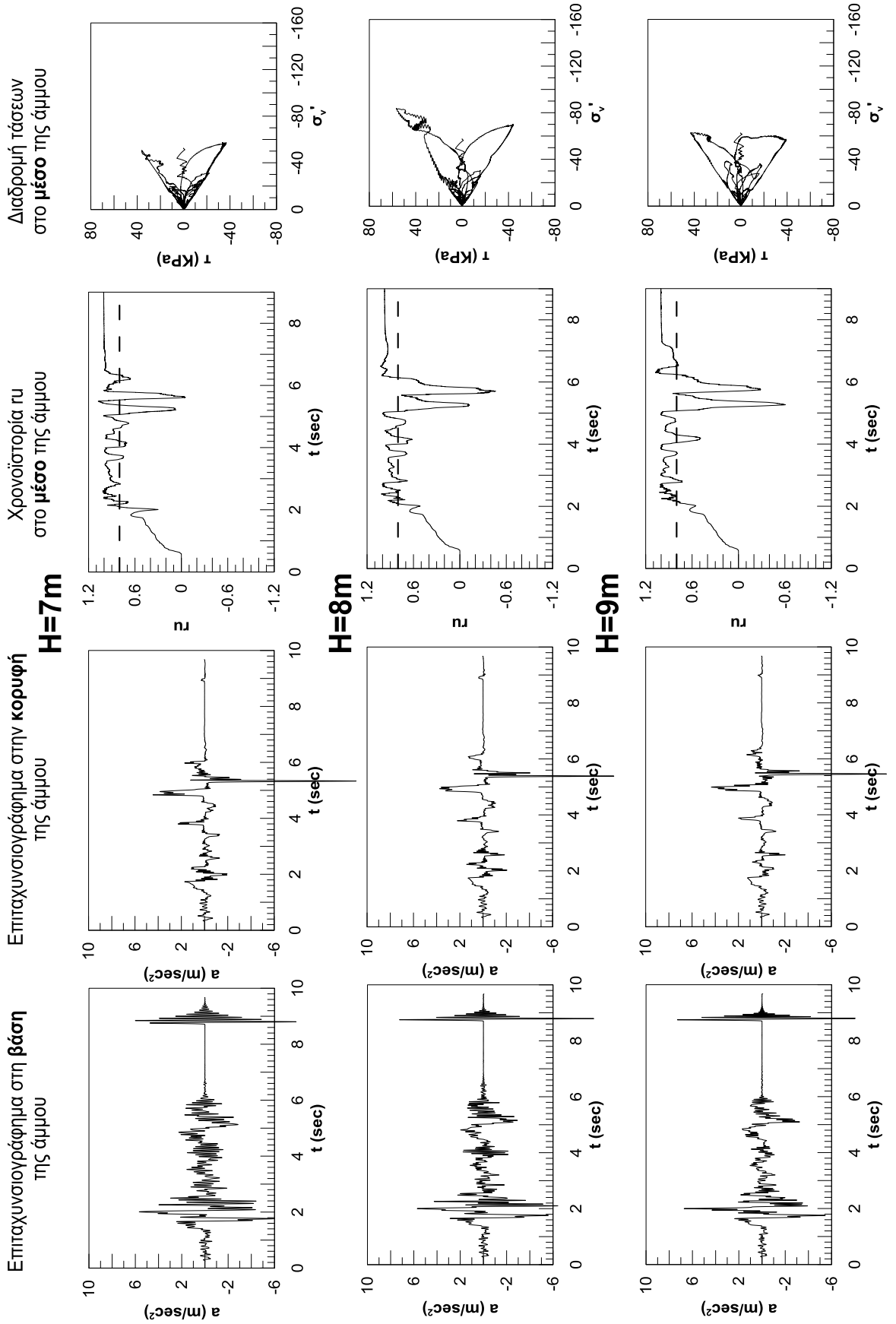
Northridge 265 M6.7: $a_{max}=0,53g$



Northridge 265 M6.7: $a_{max}=0,53g$

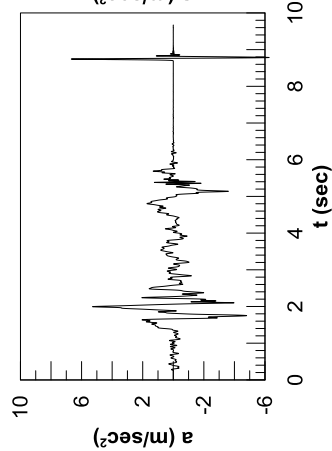


Northridge 265 M6.7: $a_{max}=0,53g$

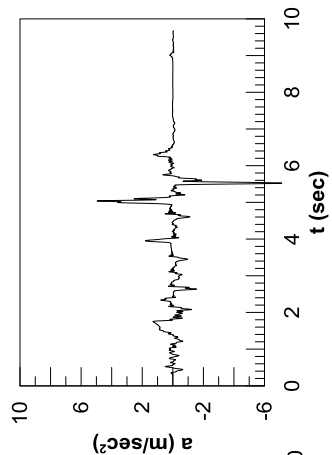


Northridge 265 M6.7: $a_{max}=0,53g$

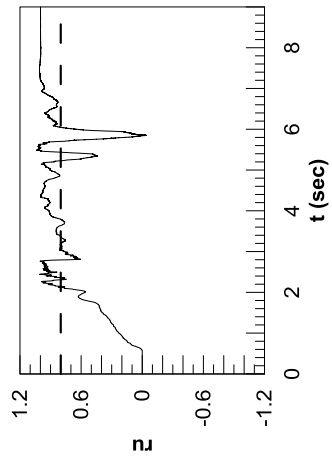
Επιταχυνσιογράφημα στη βάση της άμμου



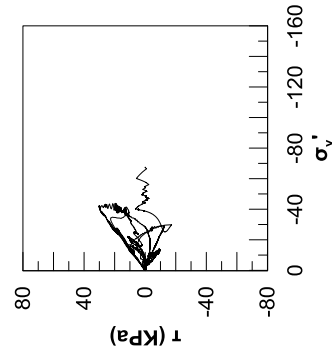
Επιταχυνσιογράφημα στην κορυφή της άμμου



Χρονοϊστορία τ στο μέσο της άμμου



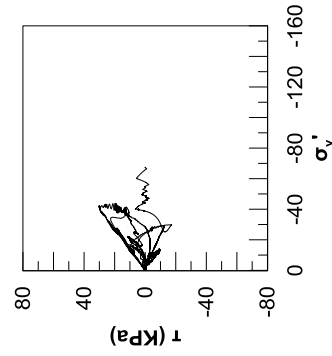
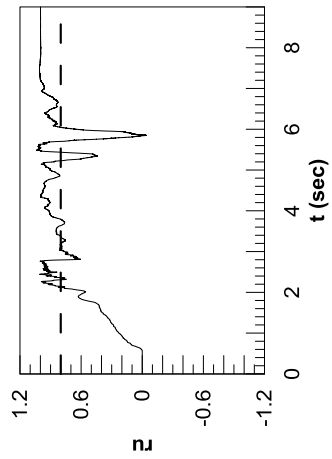
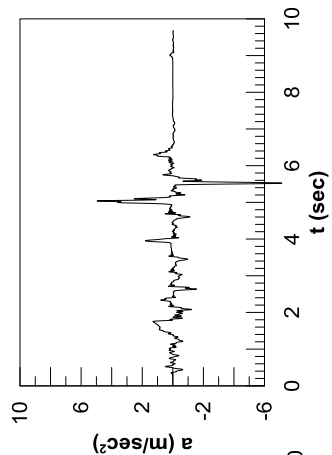
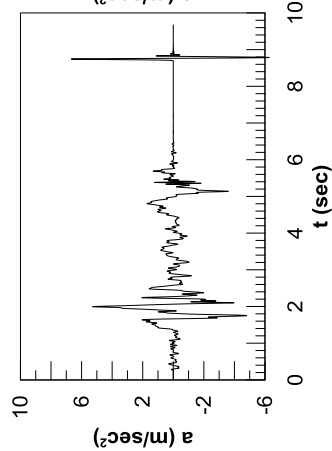
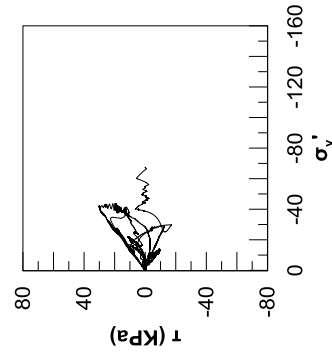
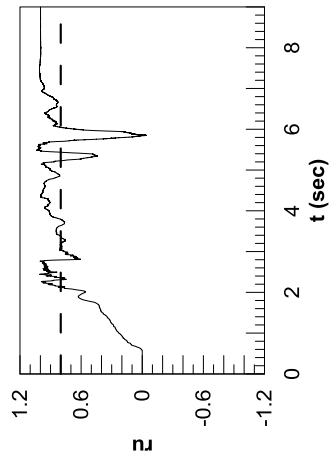
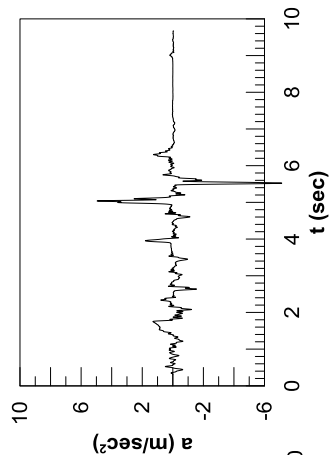
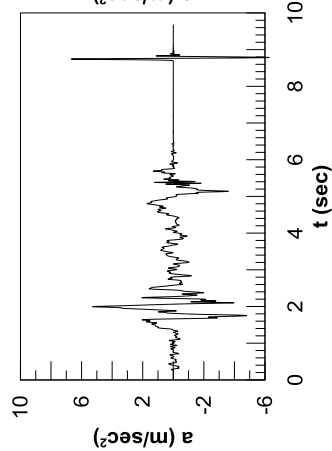
Διαδρομή τάσεων στο μέσο της άμμου



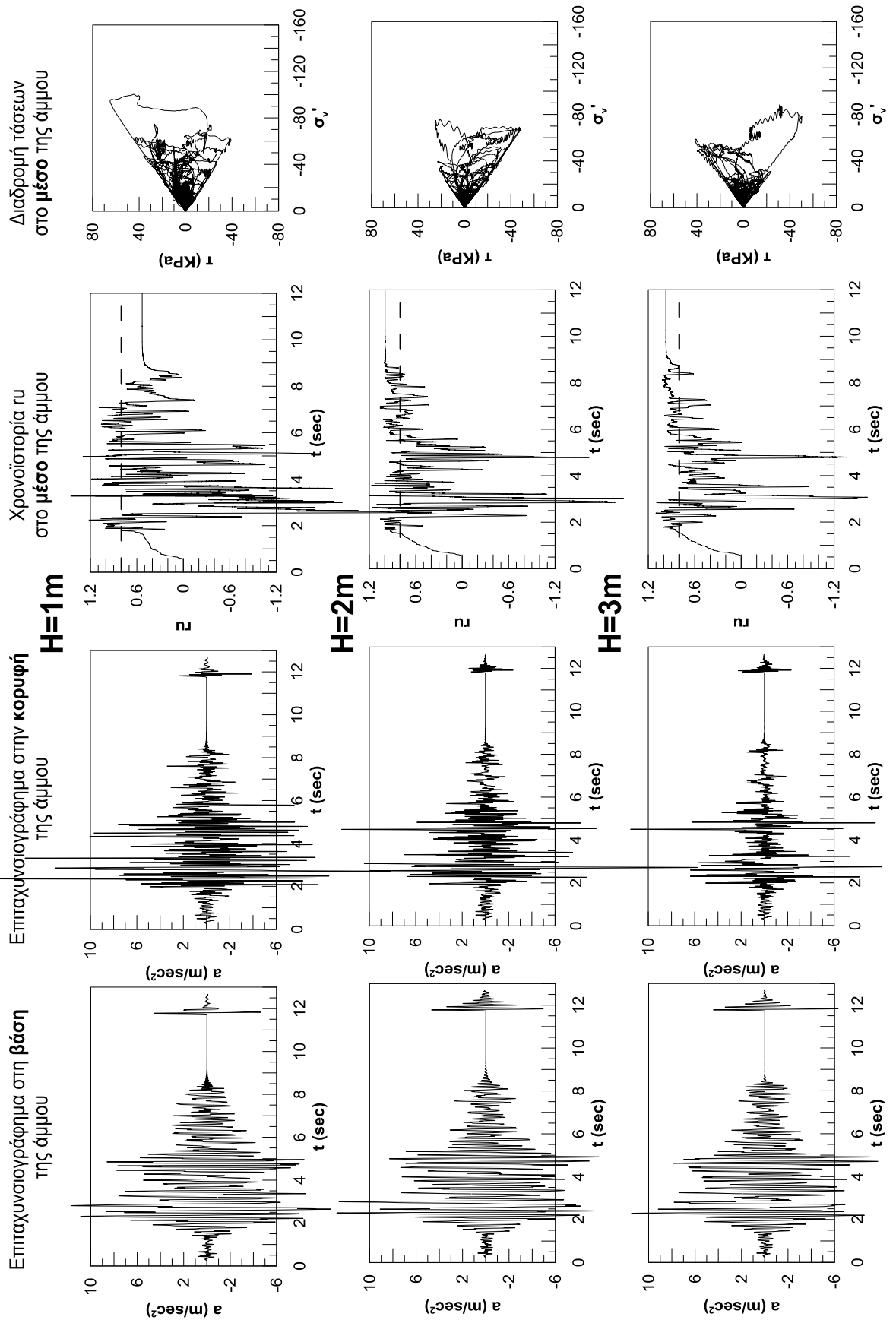
H=10m

H=11m

H=12m

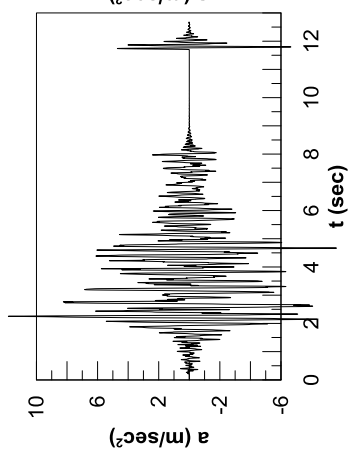


Sepolia M5.8: $a_{\max}=0,63g$

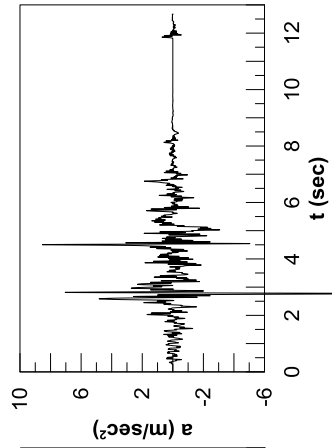


Sepolia M5.8: $a_{max}=0,63g$

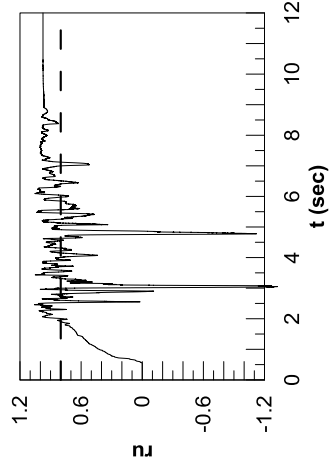
Επιταχυνσιογράφημα στη βάση της άμμου



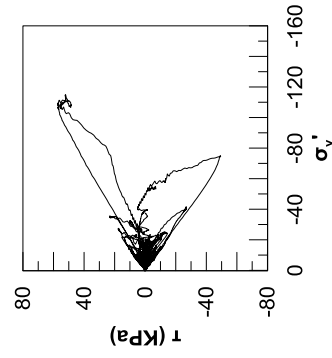
Επιταχυνσιογράφημα στην κορυφή της άμμου



Χρονοϊστορία γι στο μέσο της άμμου

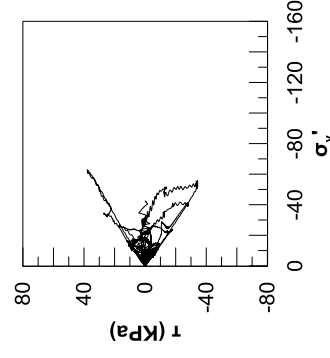
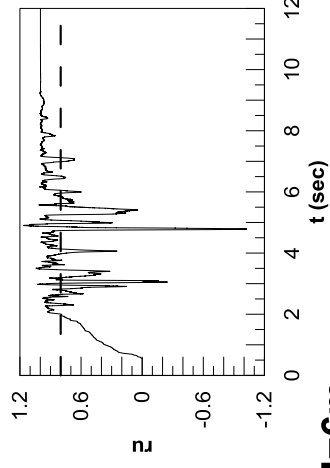
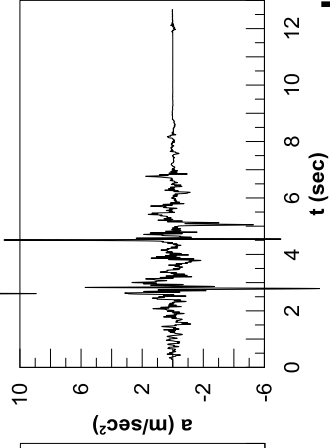
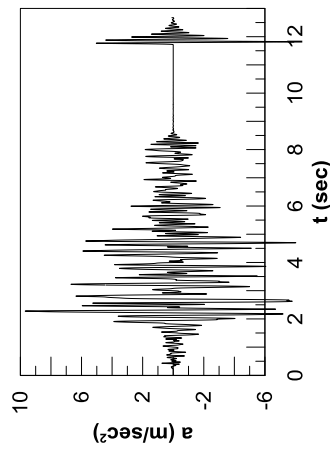


Διαδρομή τάσεων στο μέσο της άμμου

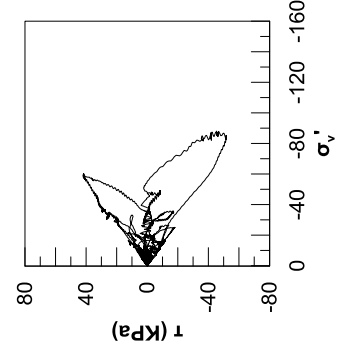
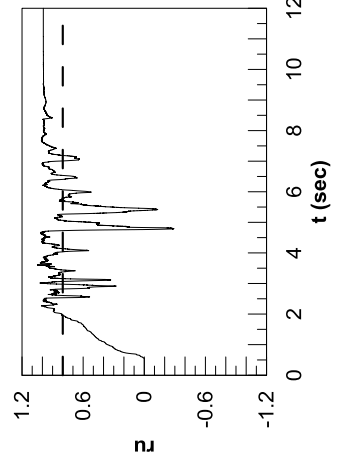
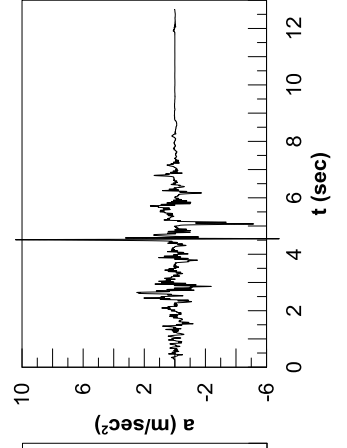
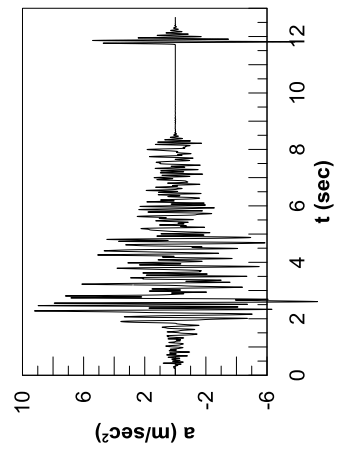


H=4m

H=5m

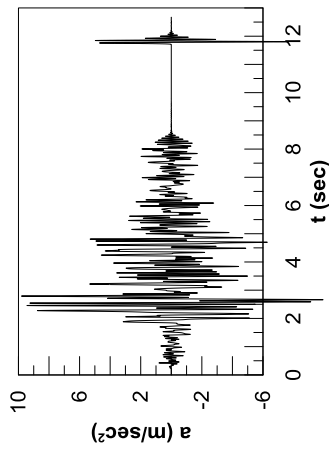


H=6m

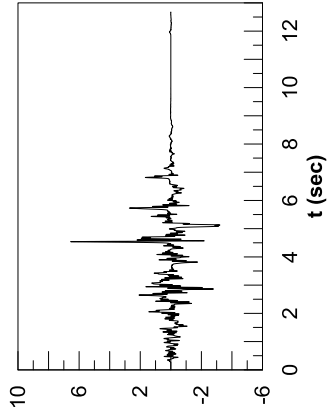


Sepolia M5.8: $a_{\max}=0,63g$

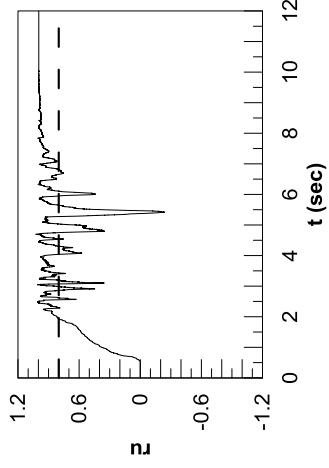
Επιταχυνσιογράφημα στη βάση της άμμου



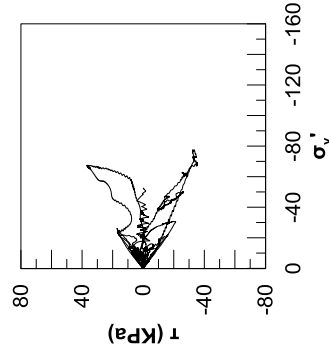
Επιταχυνσιογράφημα στην κορυφή της άμμου



Χρονοϊστορία τ στο μέσο της άμμου



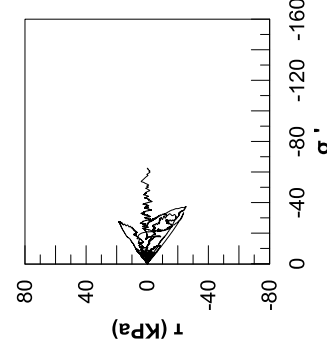
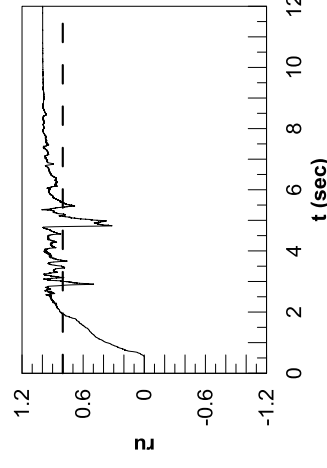
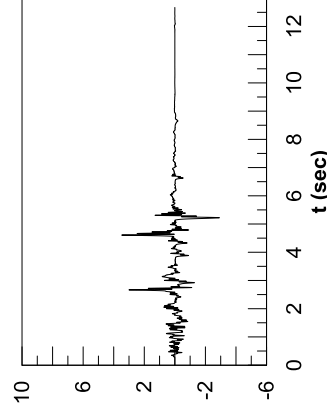
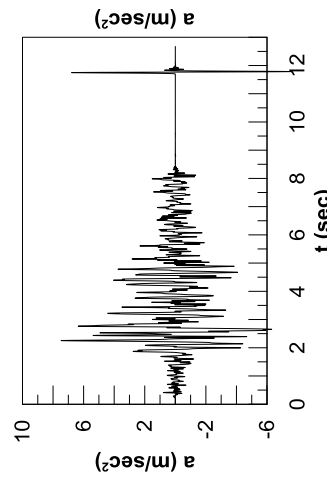
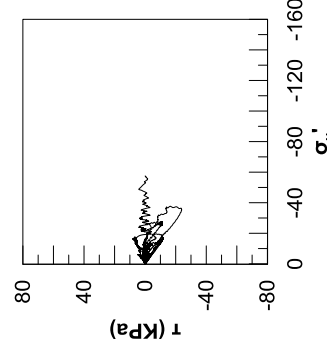
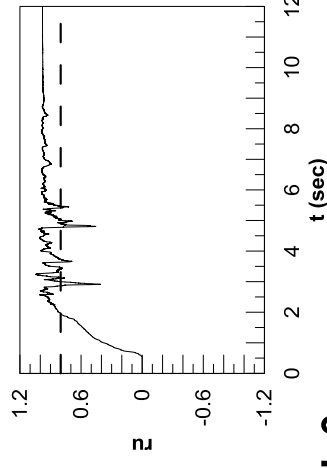
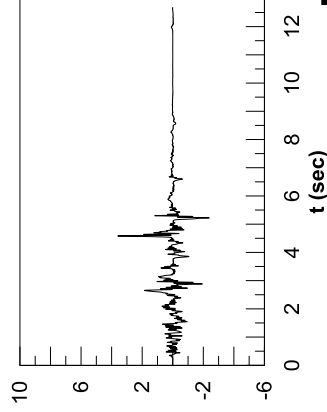
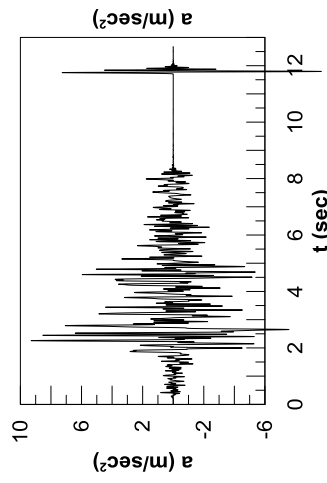
Διαδρομή τάσεων στο μέσο της άμμου



H=7m

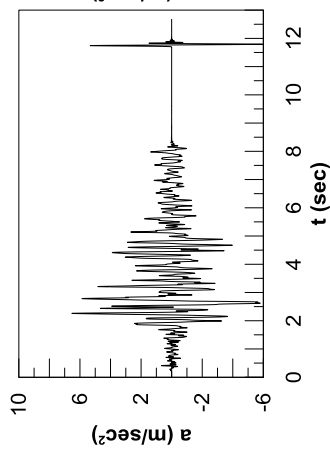
H=8m

H=9m

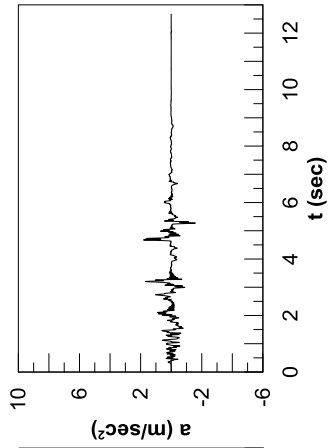


Sepolia M5.8: $a_{\max}=0,63g$

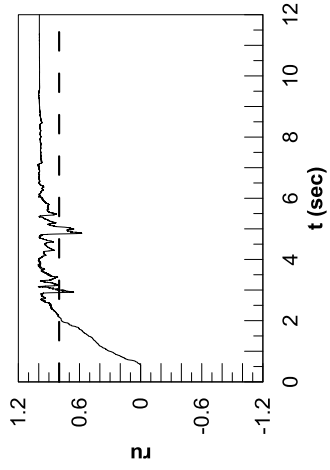
Επιταχυνσιογράφημα στη βάση της άμμου



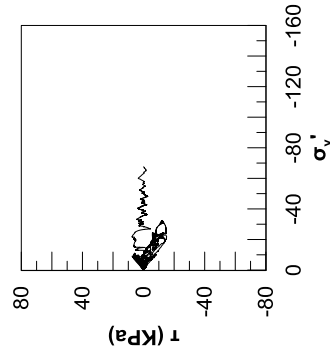
Επιταχυνσιογράφημα στην κορυφή της άμμου



Χρονοϊστορία γι στο μέσο της άμμου



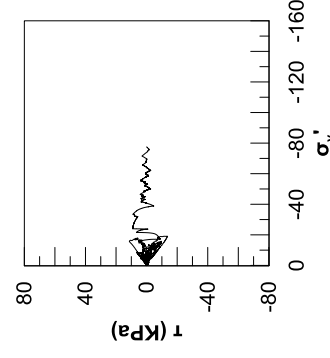
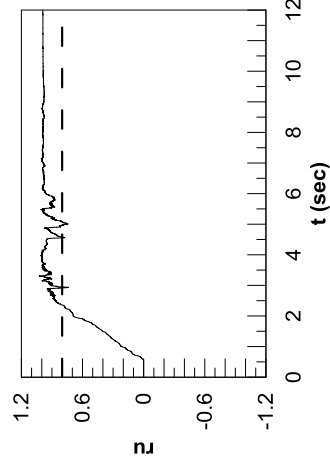
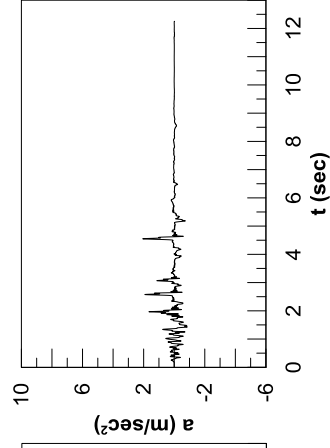
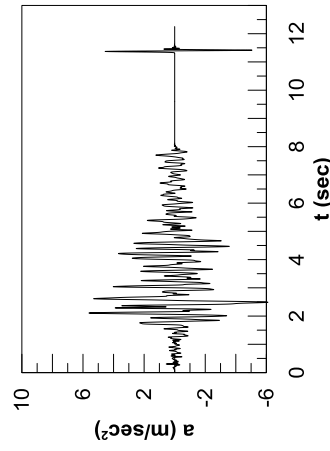
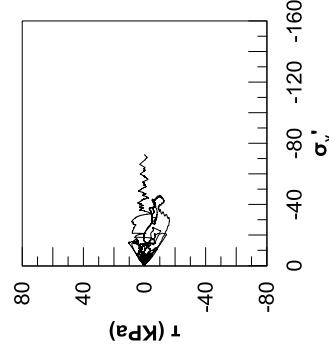
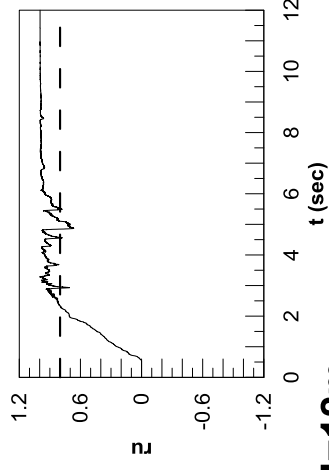
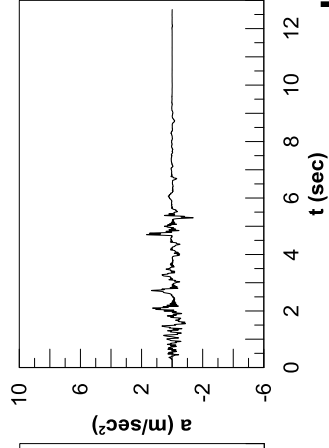
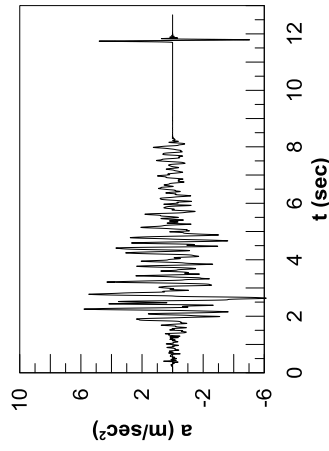
Διαδρομή τάσεων στο μέσο της άμμου



H=10m

H=11m

H=12m

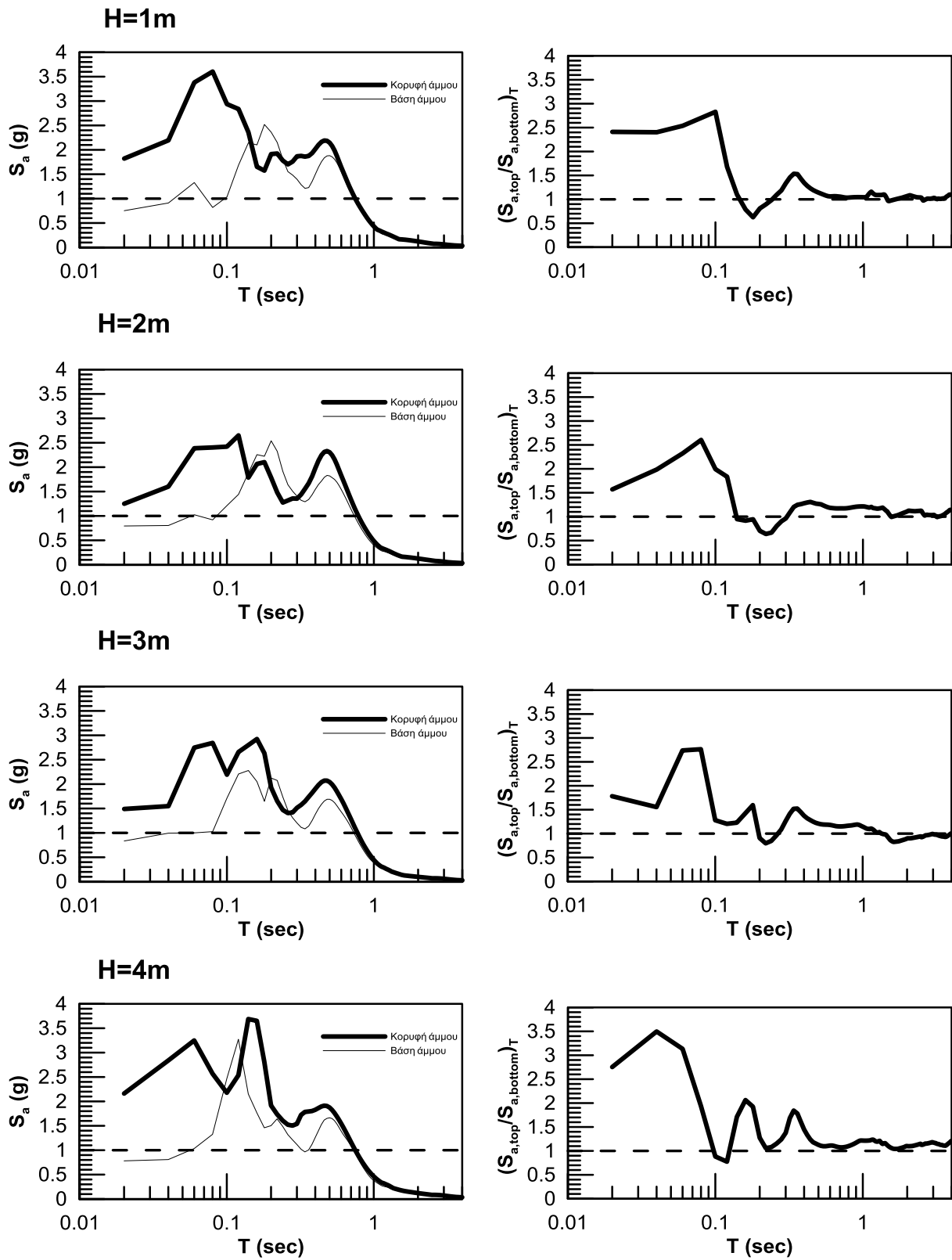


ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ:

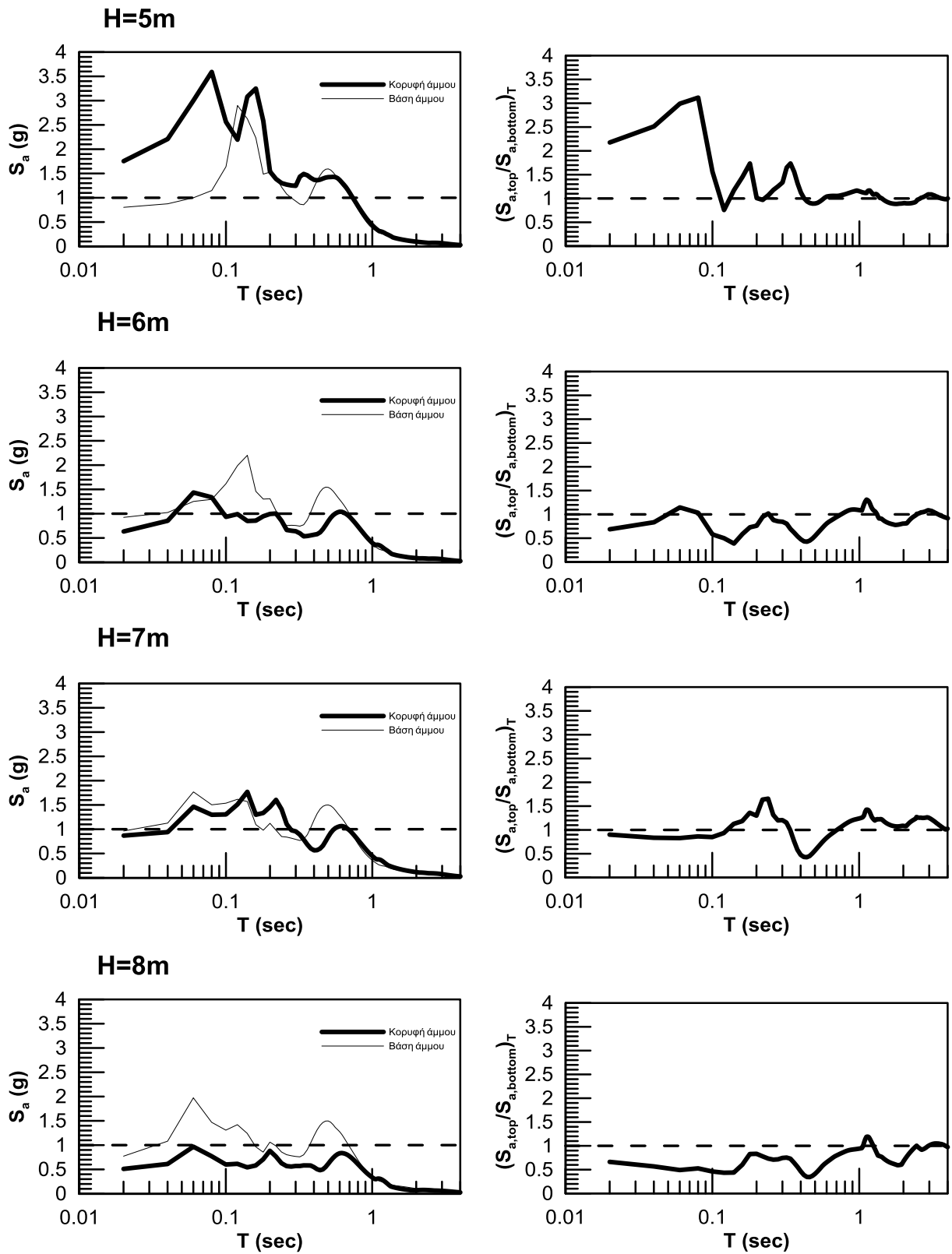
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ:

ΕΛΑΣΤΙΚΑ ΦΑΣΜΑΤΑ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ

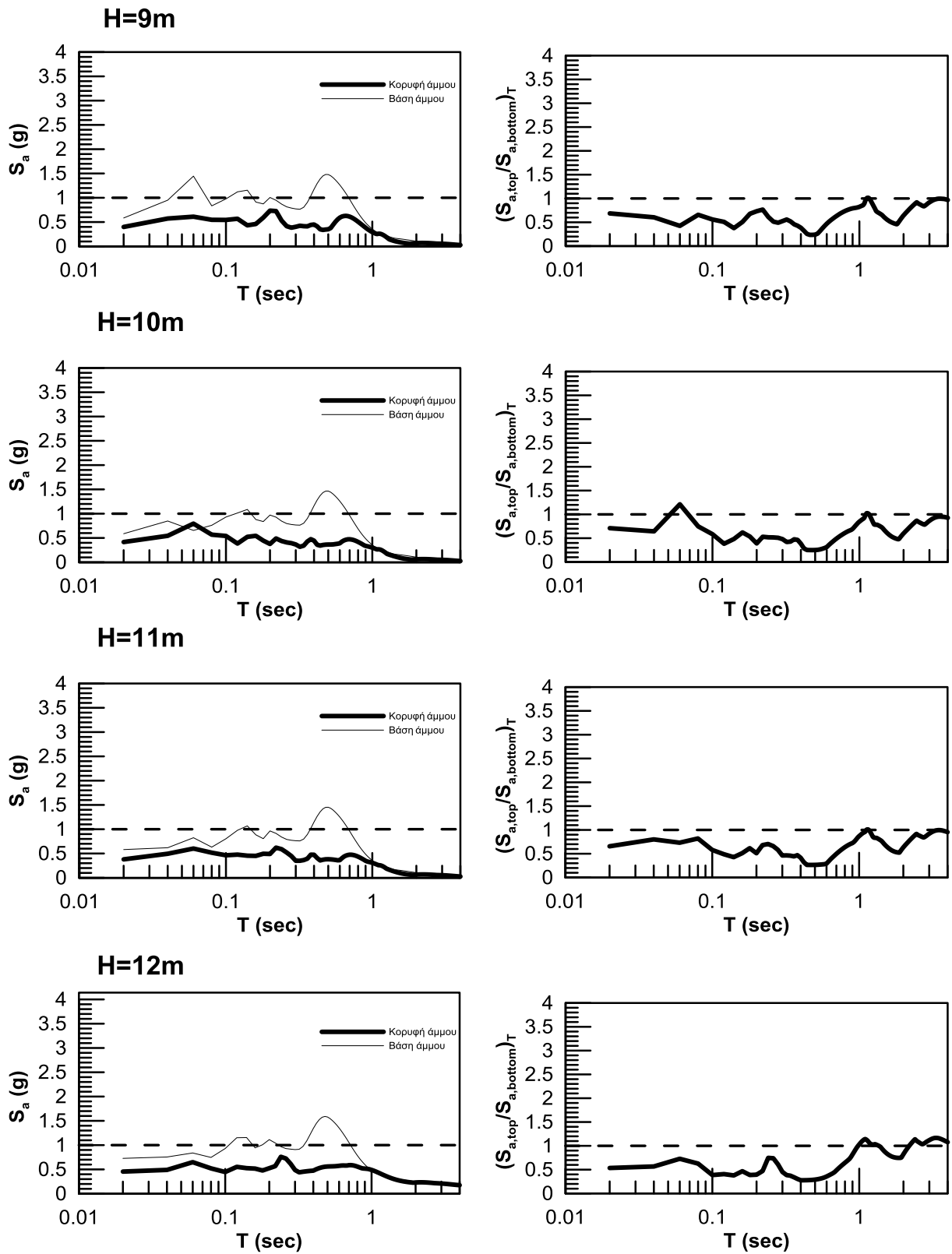
Aigio M6.2: $a_{max}=0.58g$



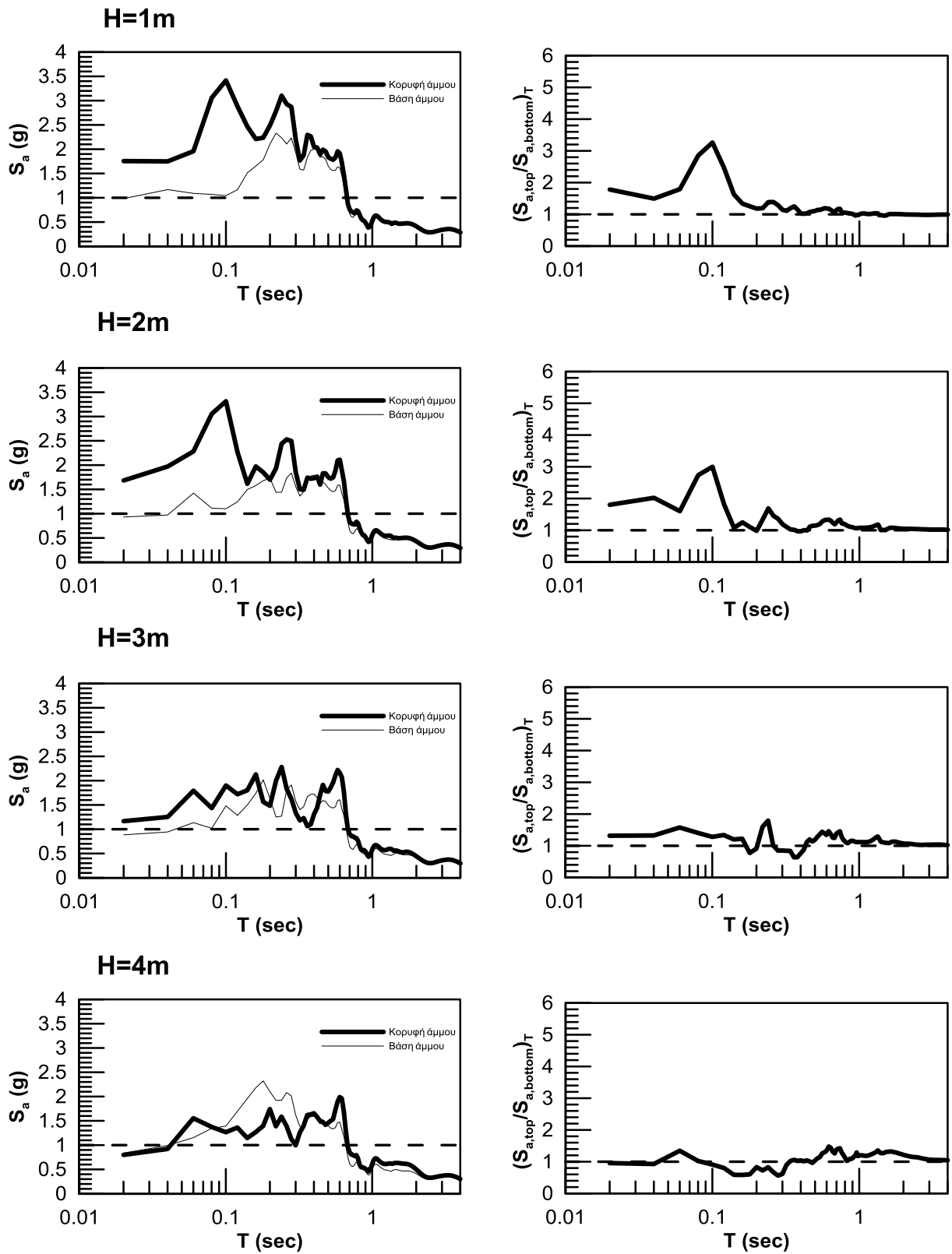
Aigio M6.2: $a_{max}=0.58g$



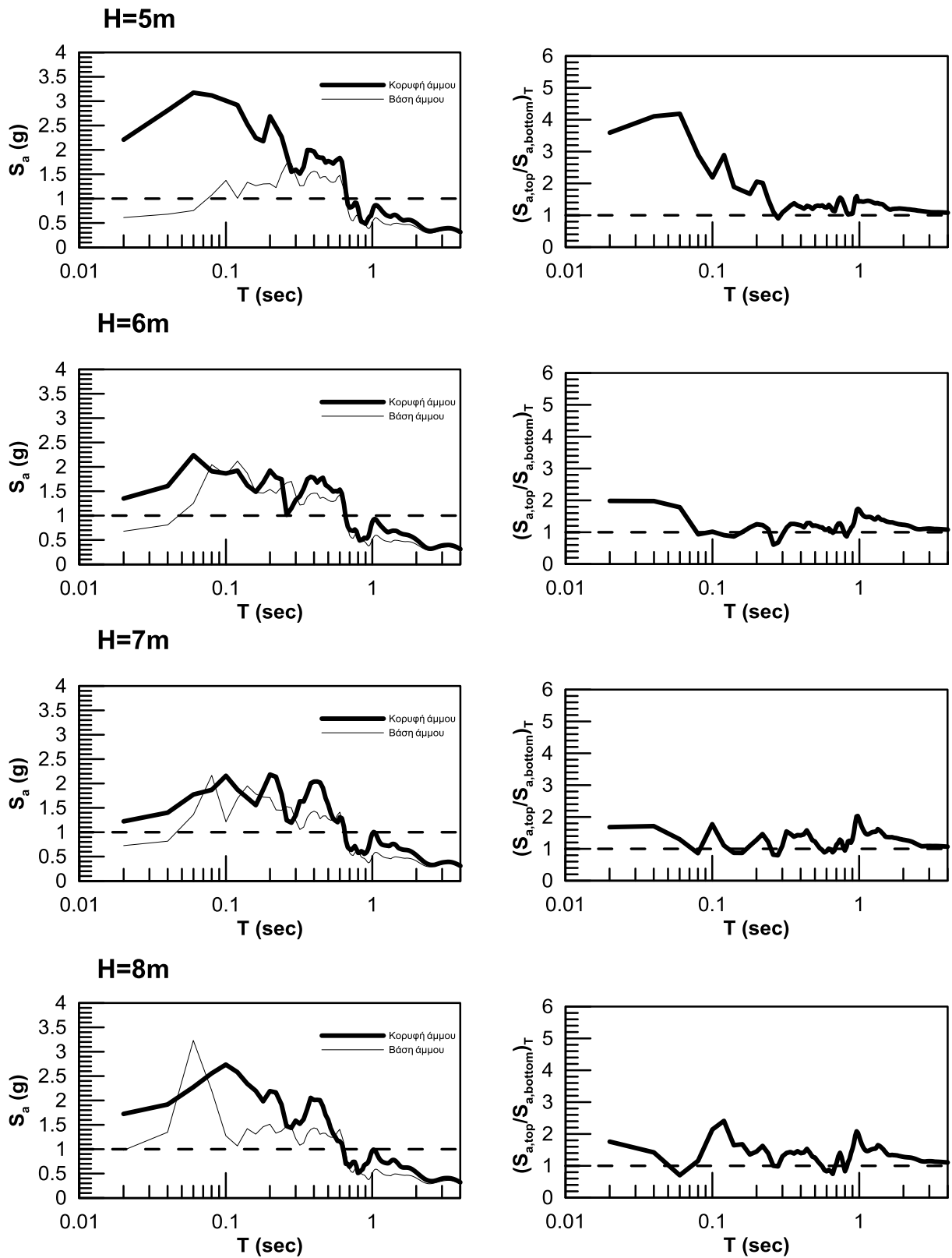
Aigio M6.2: $a_{max}=0.58g$



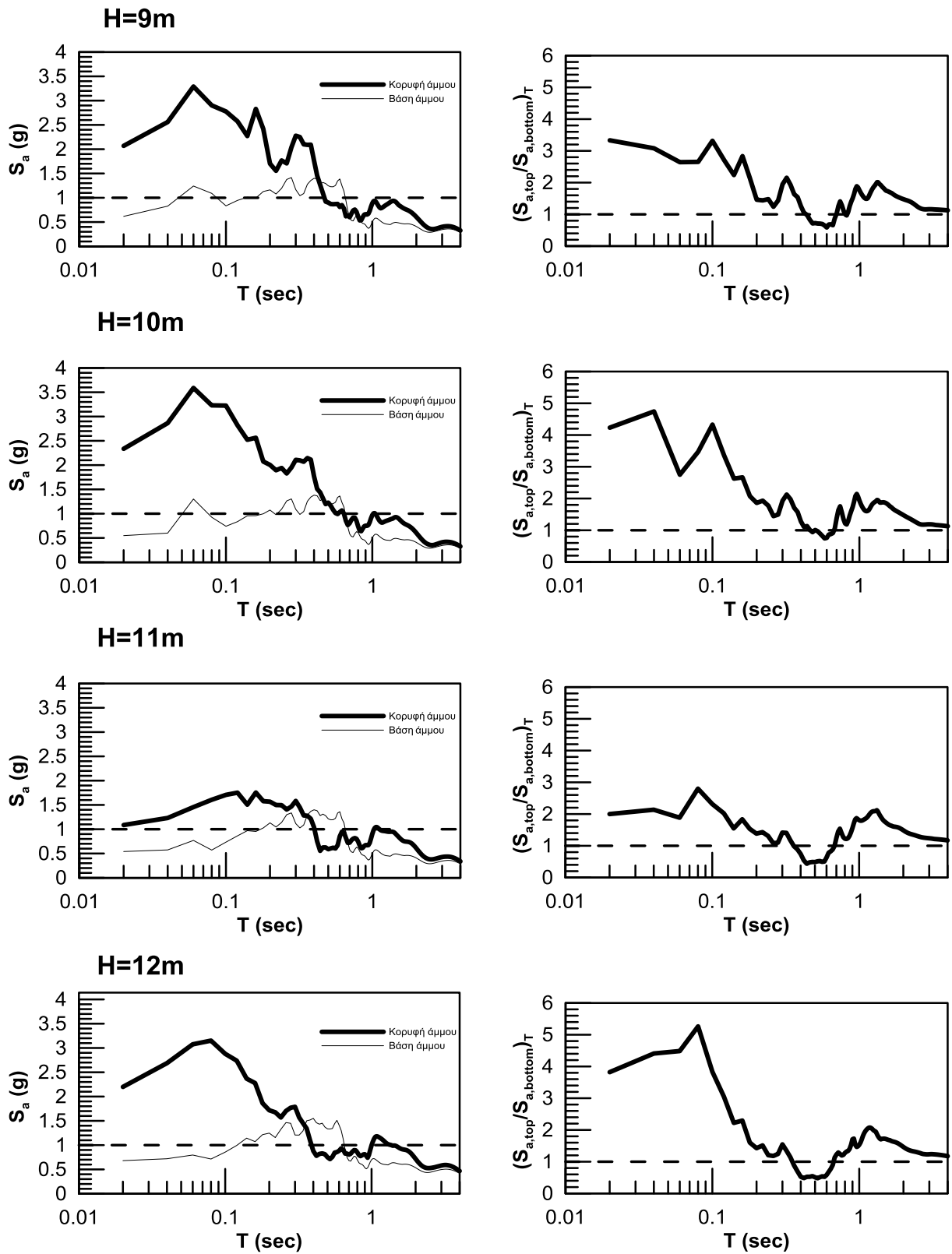
Chi-Chi M6.8: $a_{max}=0.52g$



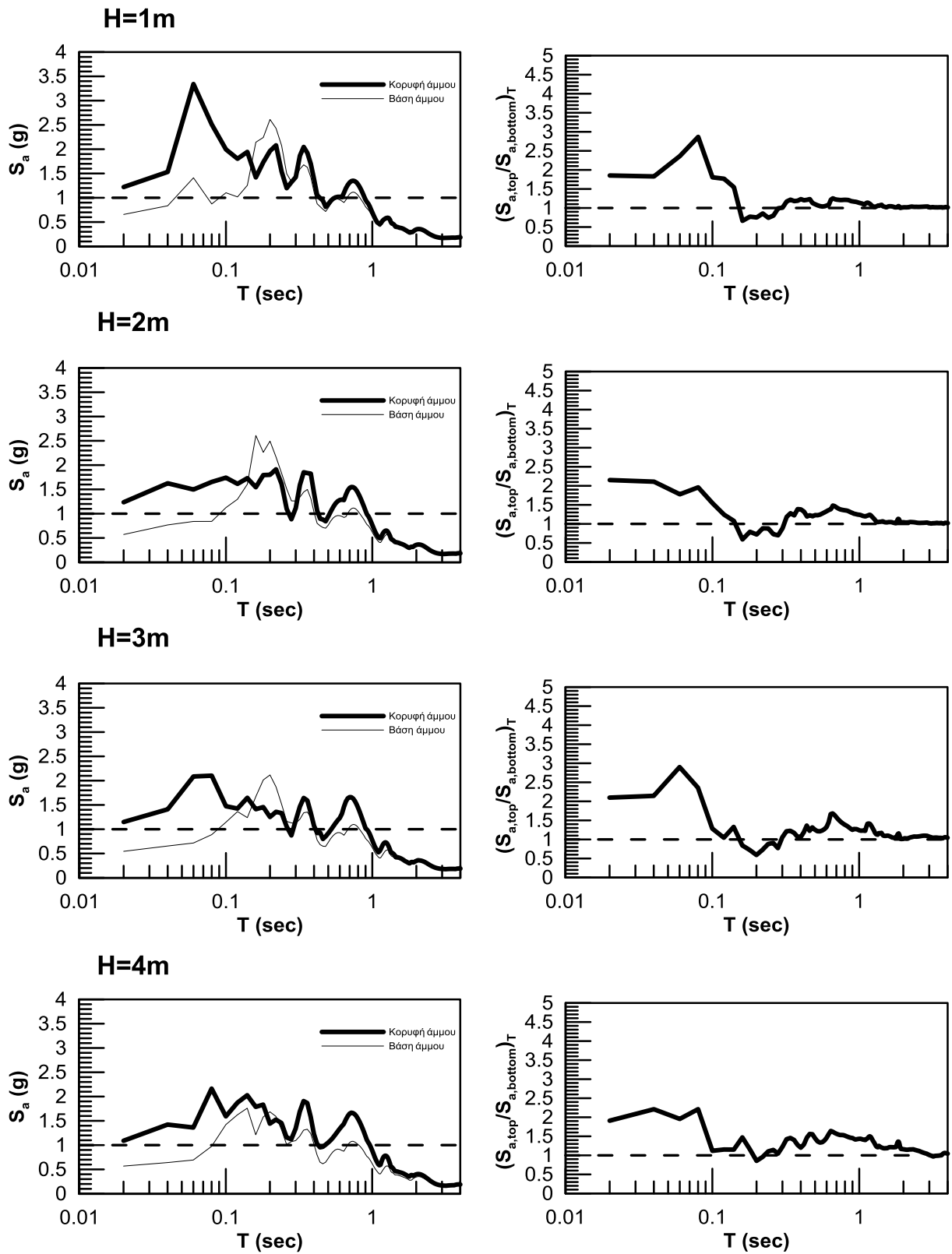
Chi-Chi M6.8: $a_{max}=0.52g$



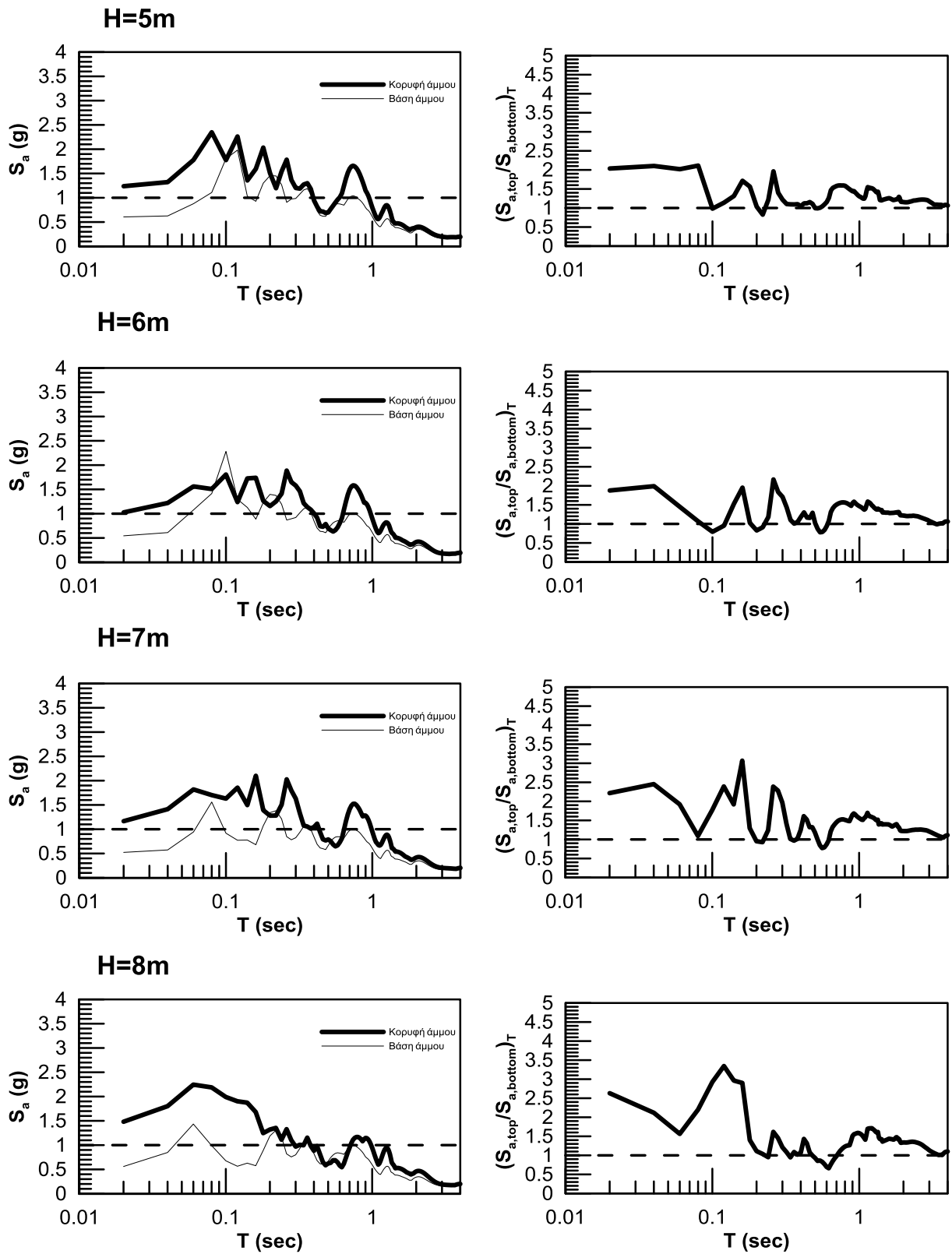
Chi-Chi M6.8: $a_{max}=0.52g$



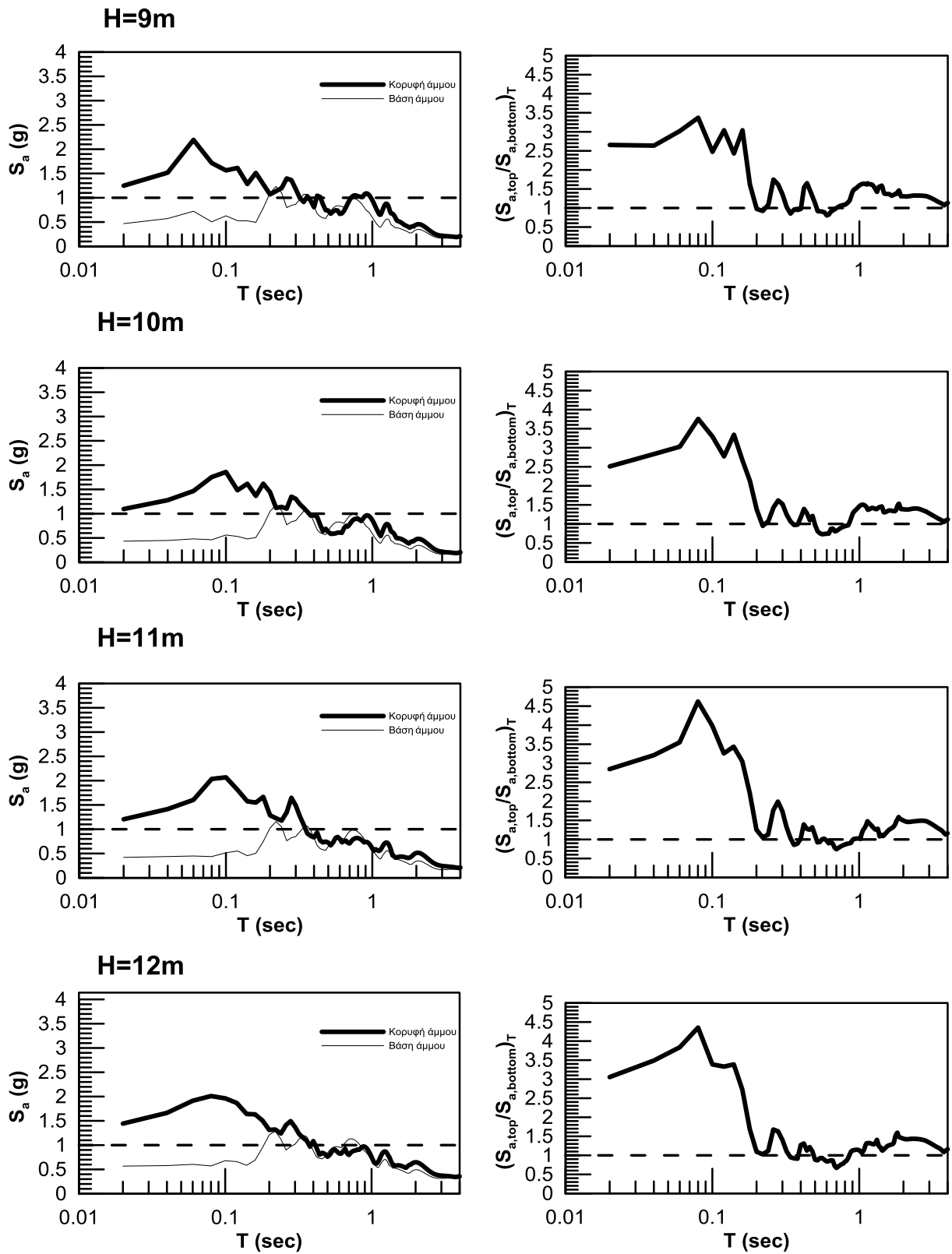
Ducze M7.9: $a_{max}=0.43g$



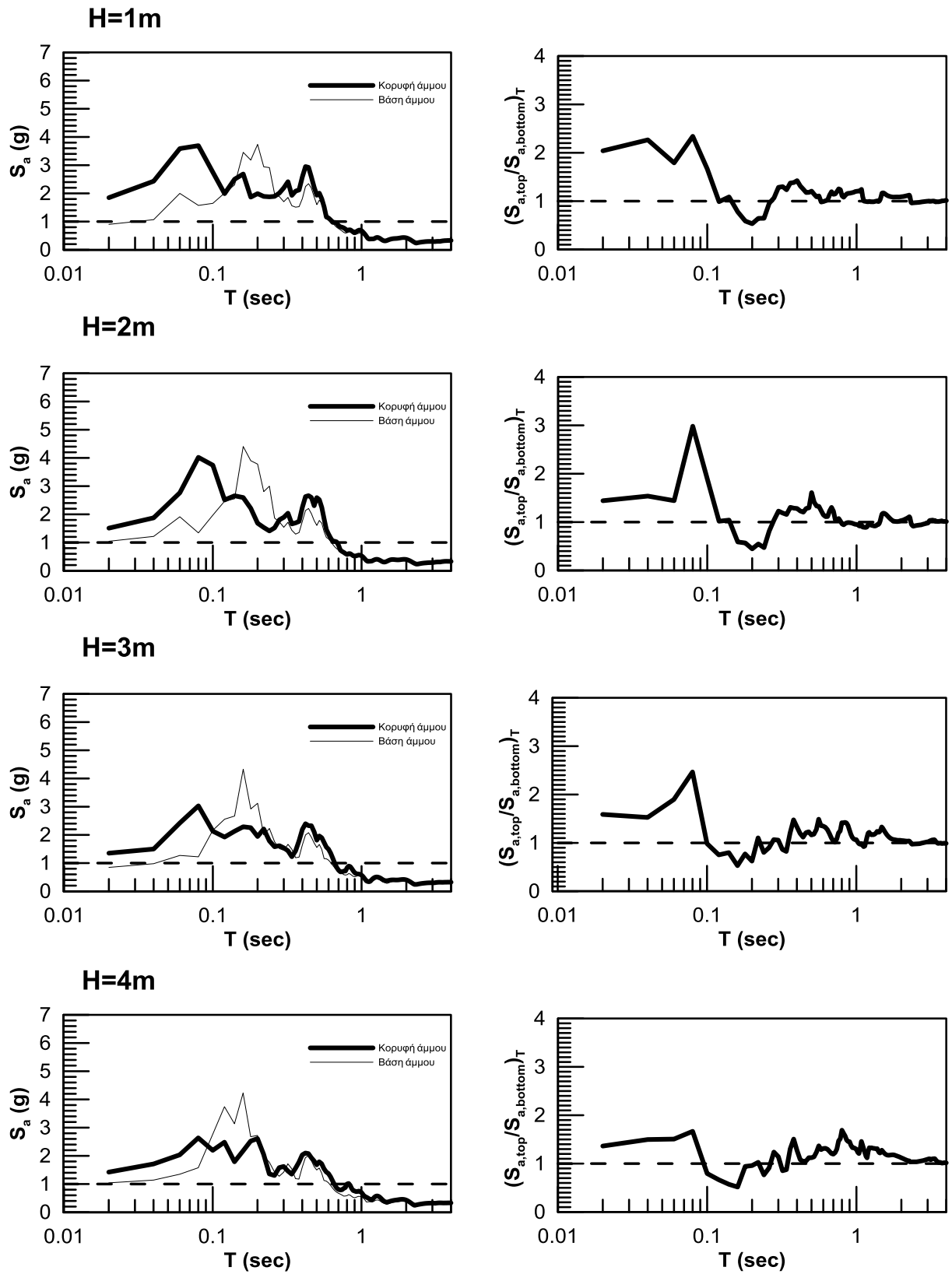
Ducze M7.9: $a_{max}=0.43g$



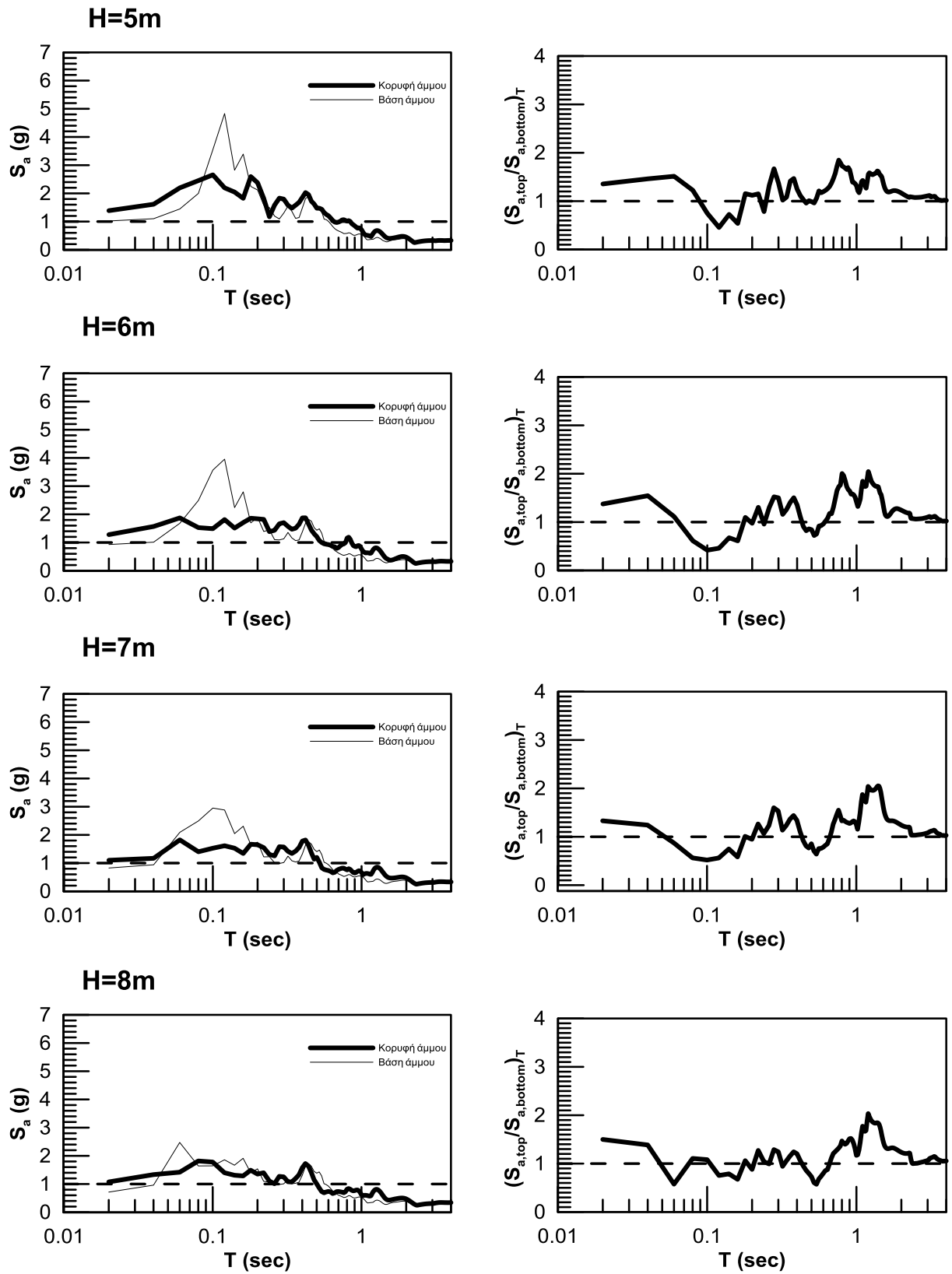
Ducze M7.9: $a_{max}=0.43g$



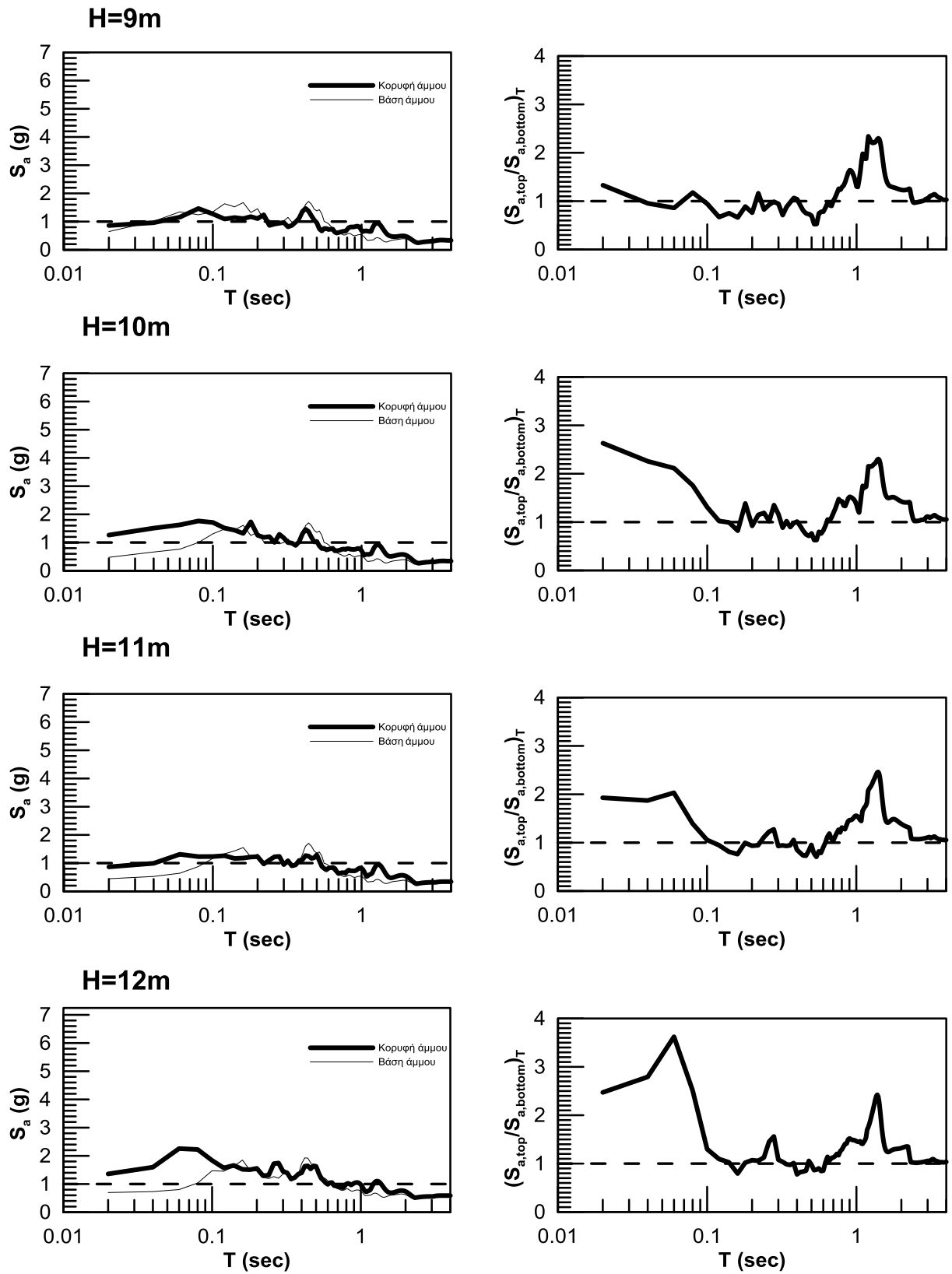
Kocaeli270 M7.5: $a_{max}=0.46g$



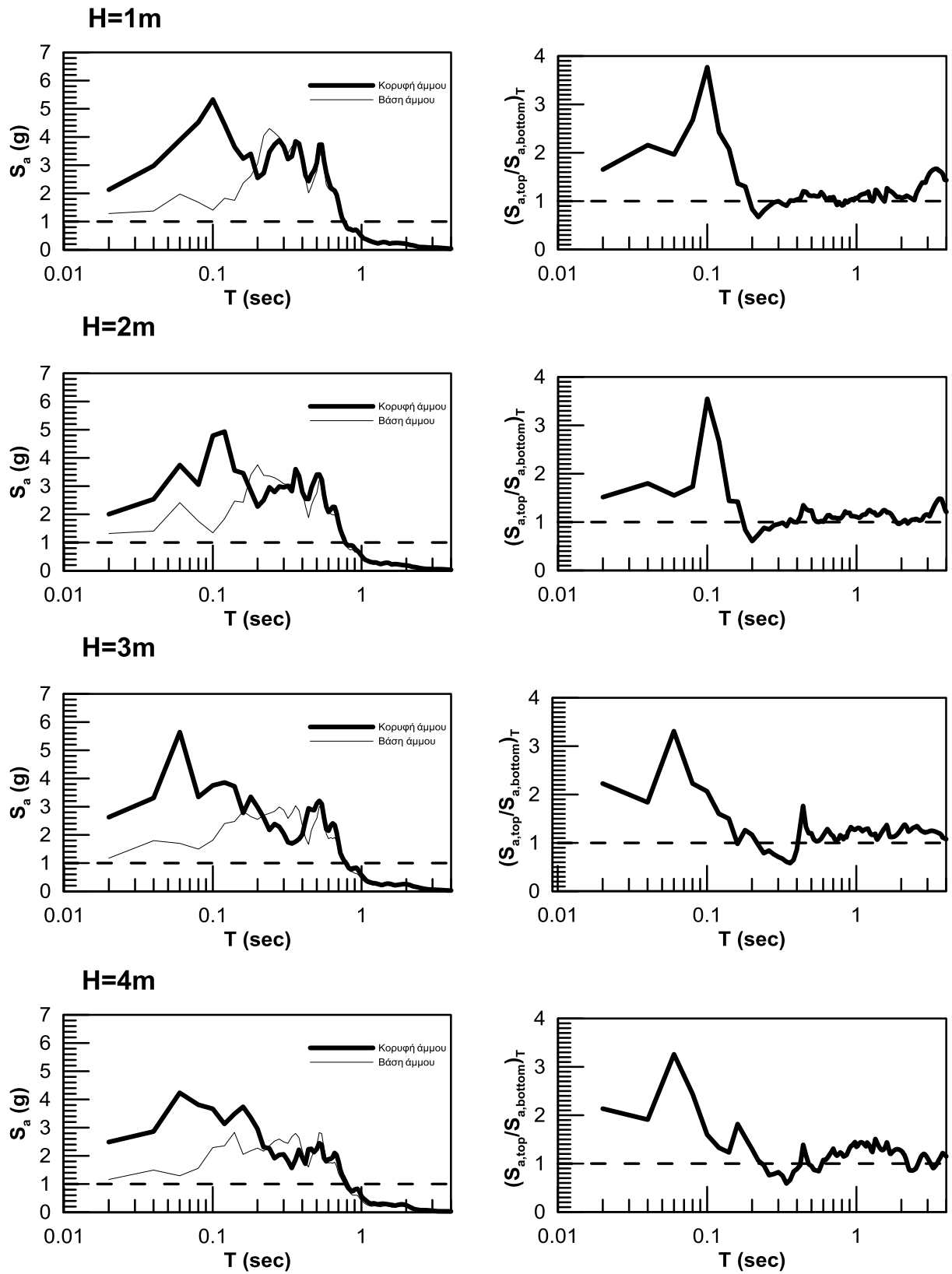
Kocaeli270 M7.5: $a_{max}=0.46g$



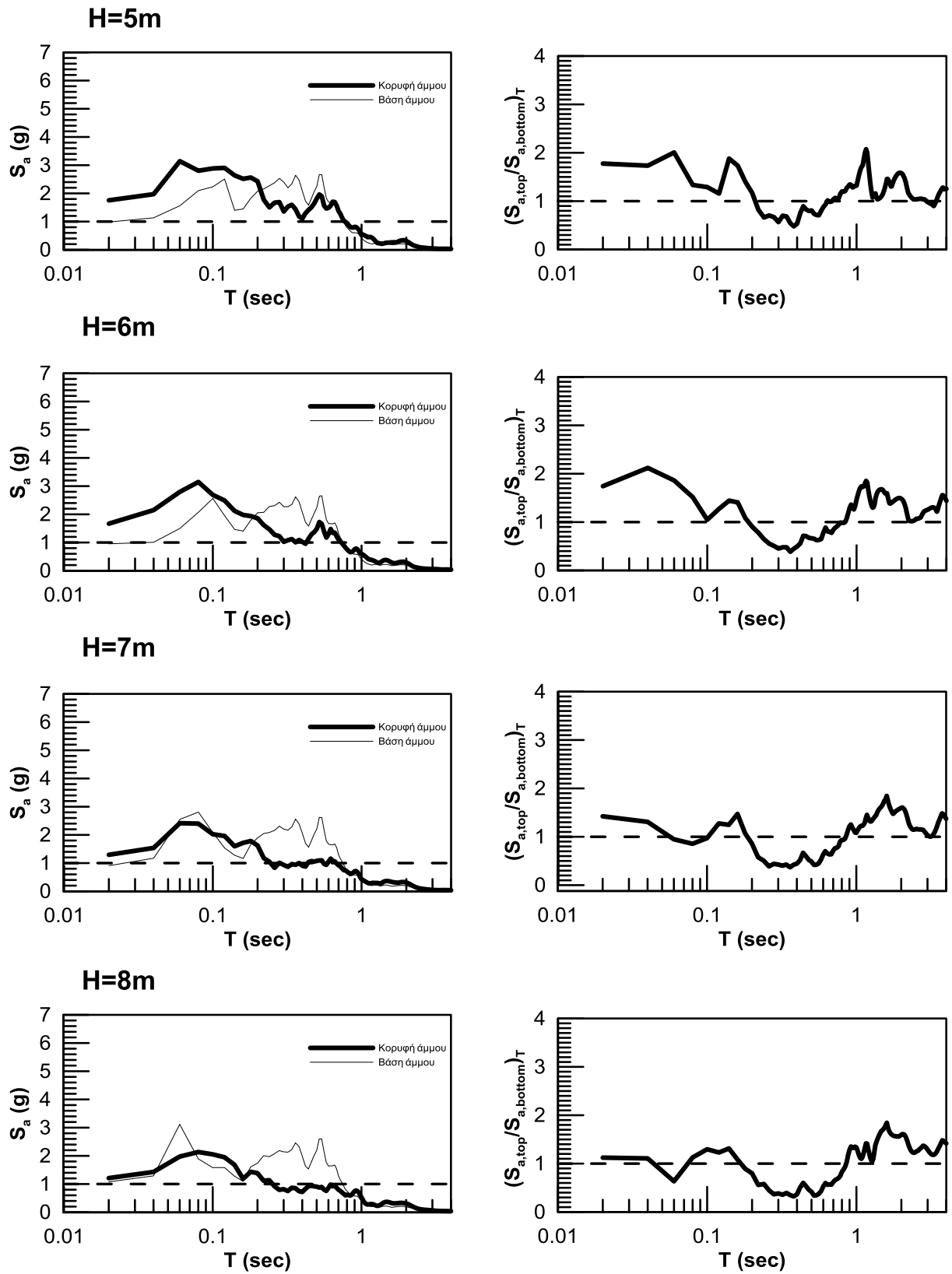
Kocaeli270 M7.5: $a_{max}=0.46g$



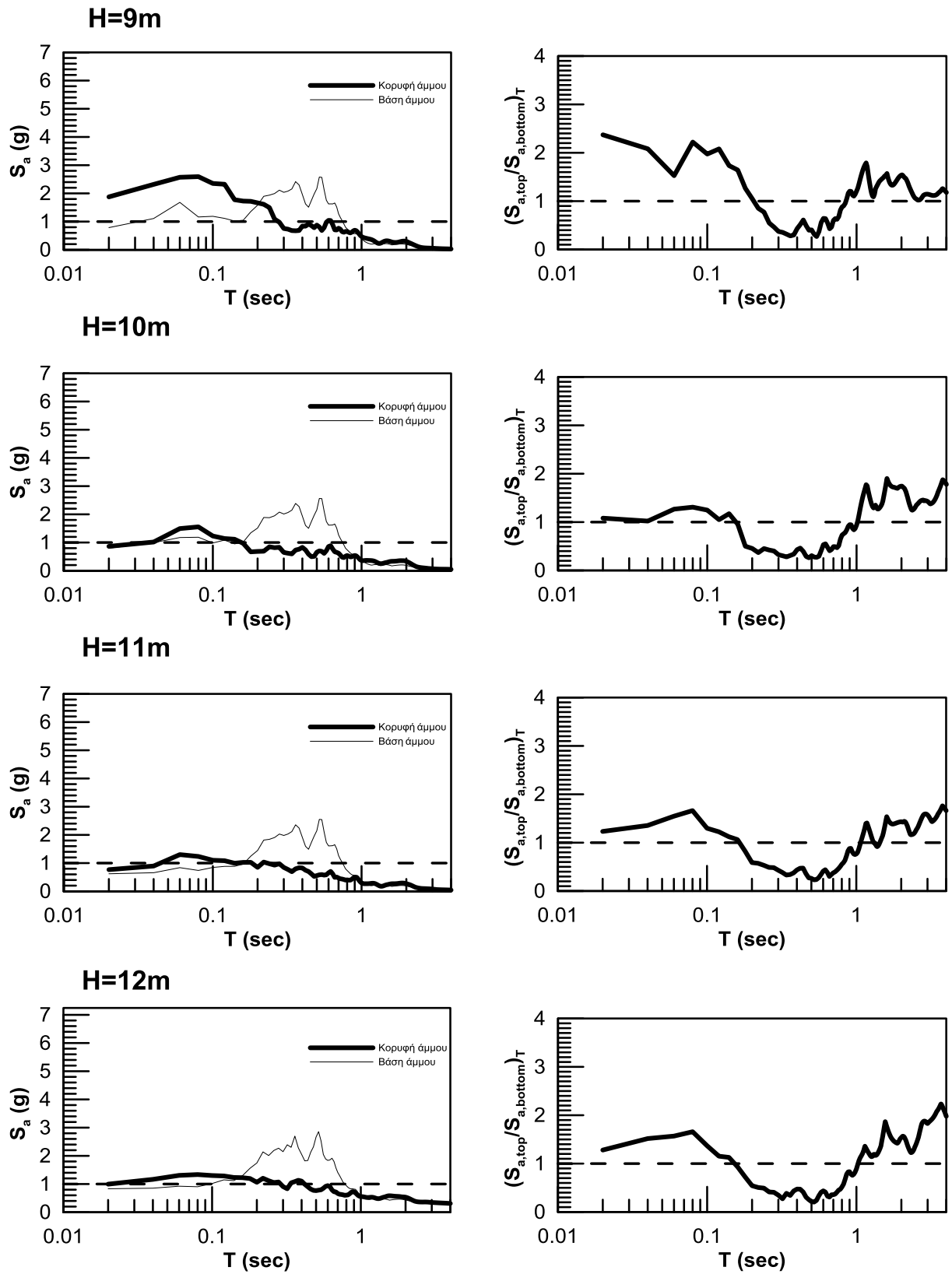
Lefkada M6.3: $a_{max}=0.57g$



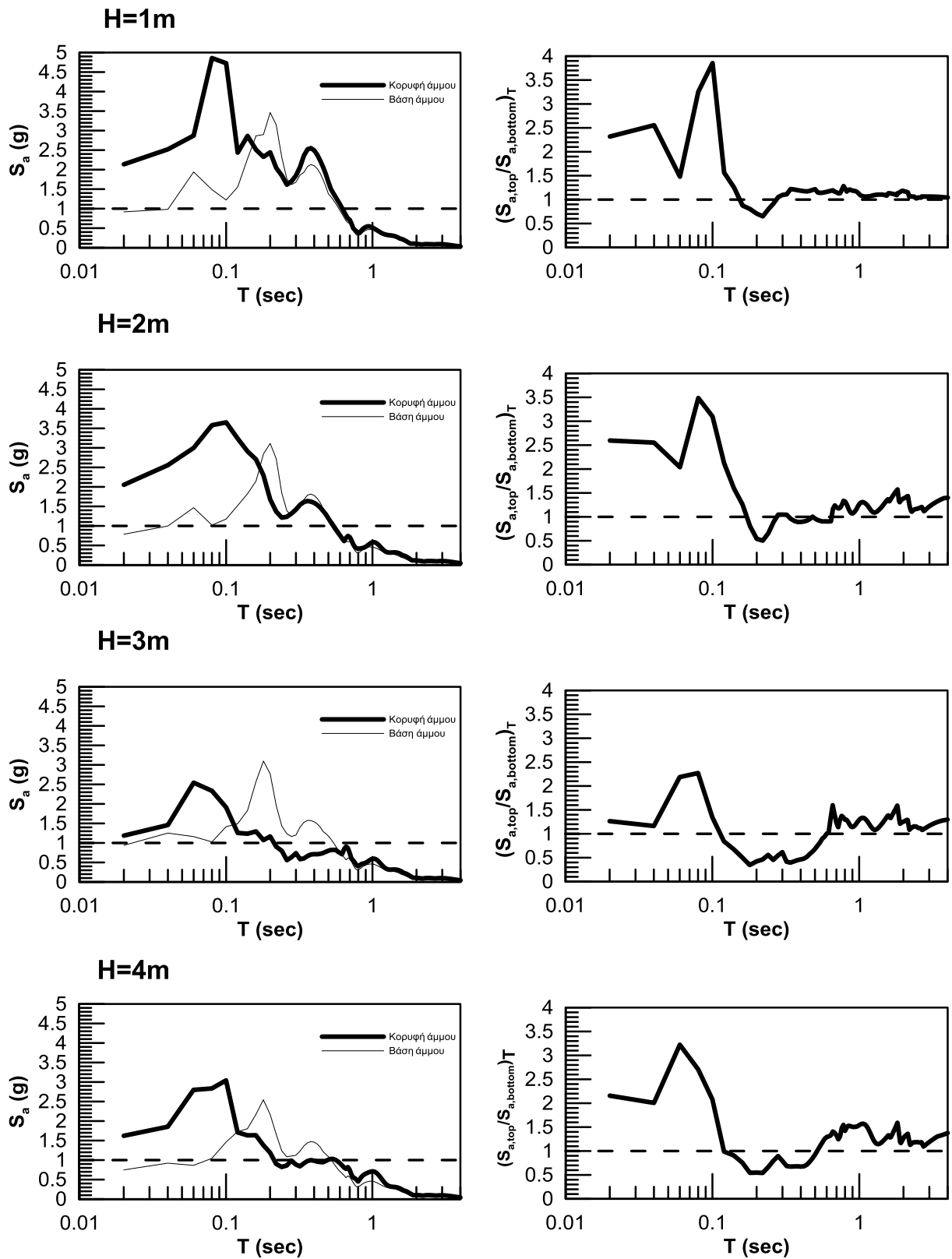
Lefkada M6.3: $a_{max}=0.57g$



Lefkada M6.3: $a_{max}=0.57g$

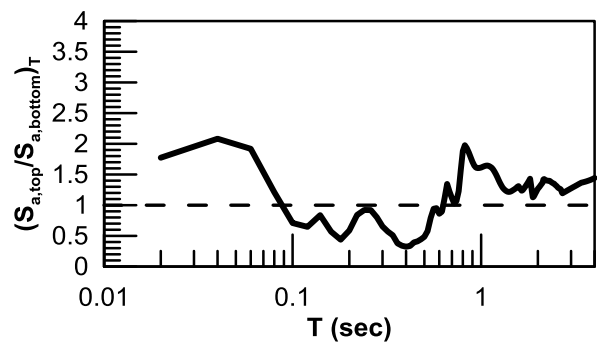
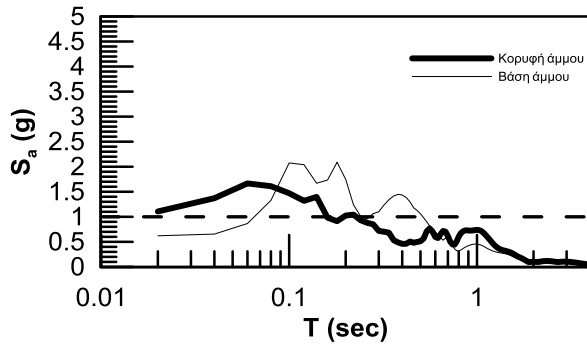


Northridge 265 M6.7: $a_{max}=0.53g$

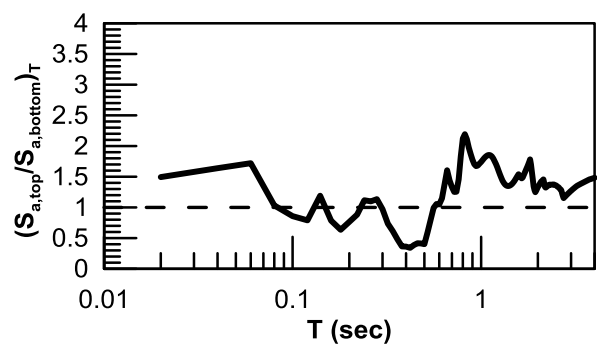
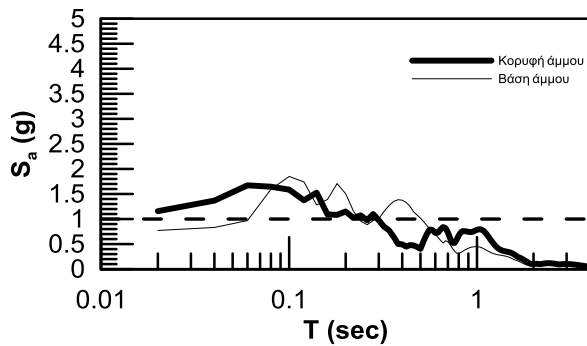


Northridge 265 M6.7: $a_{max}=0.53g$

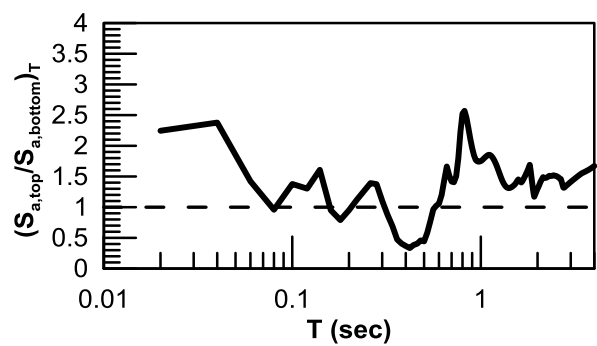
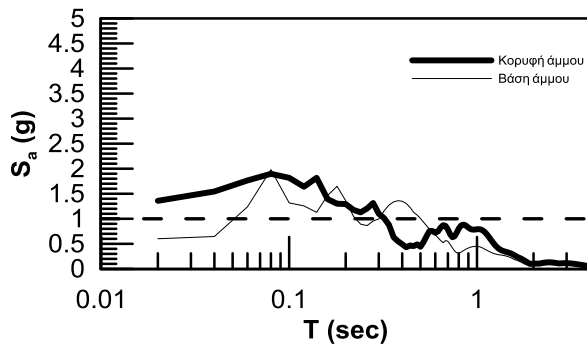
H=5m



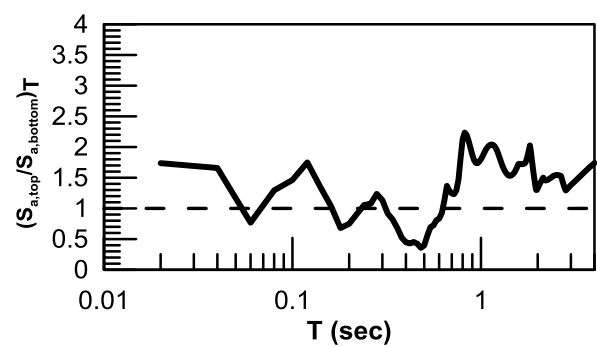
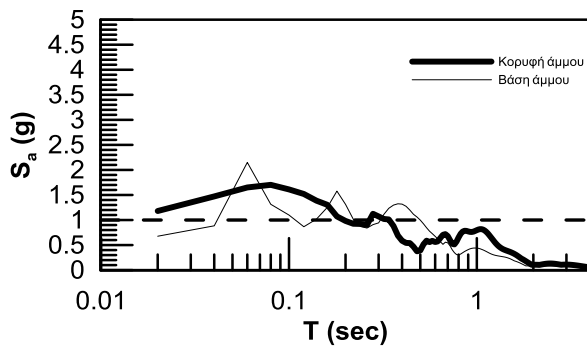
H=6m



H=7m

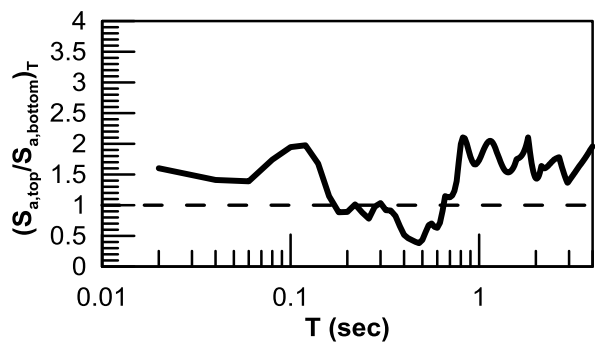
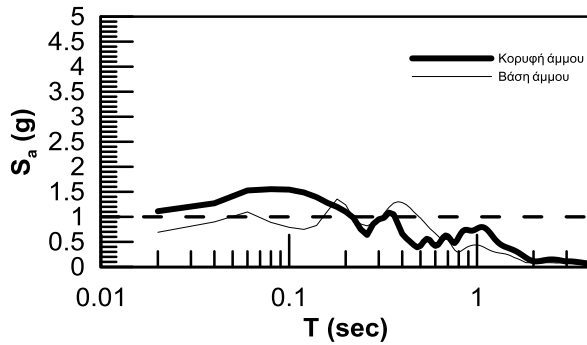


H=8m

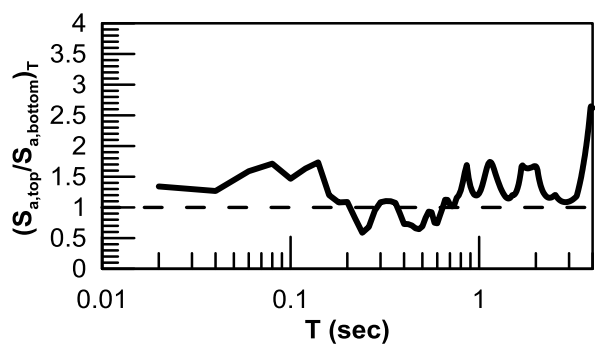
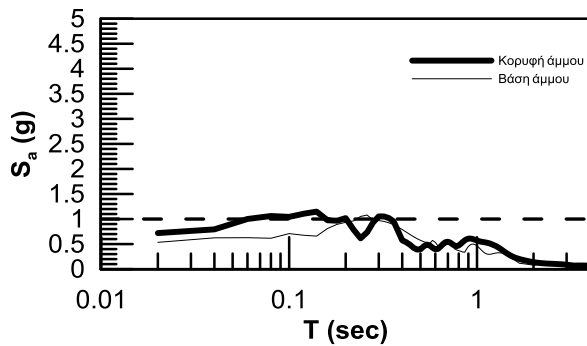


Northridge 265 M6.7: $a_{max}=0.53g$

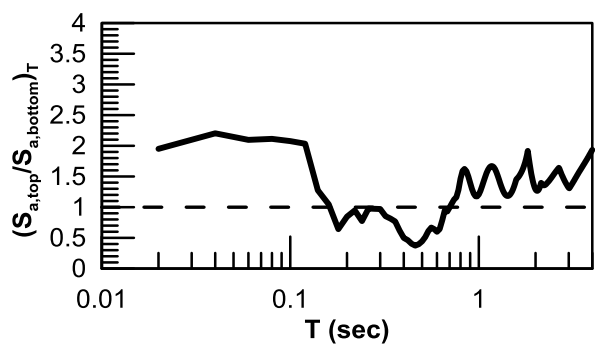
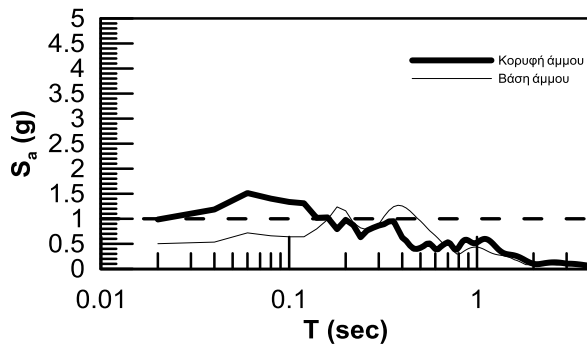
H=9m



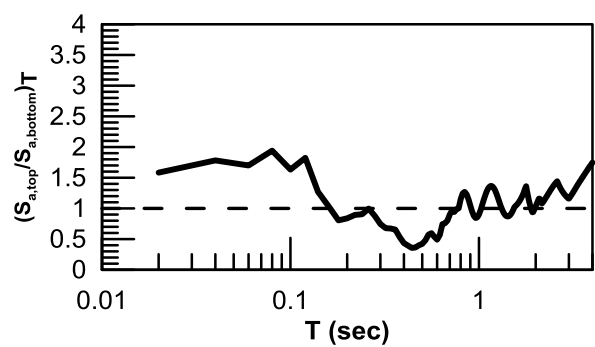
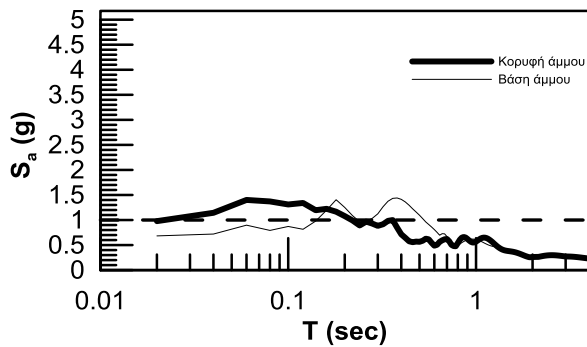
H=10m



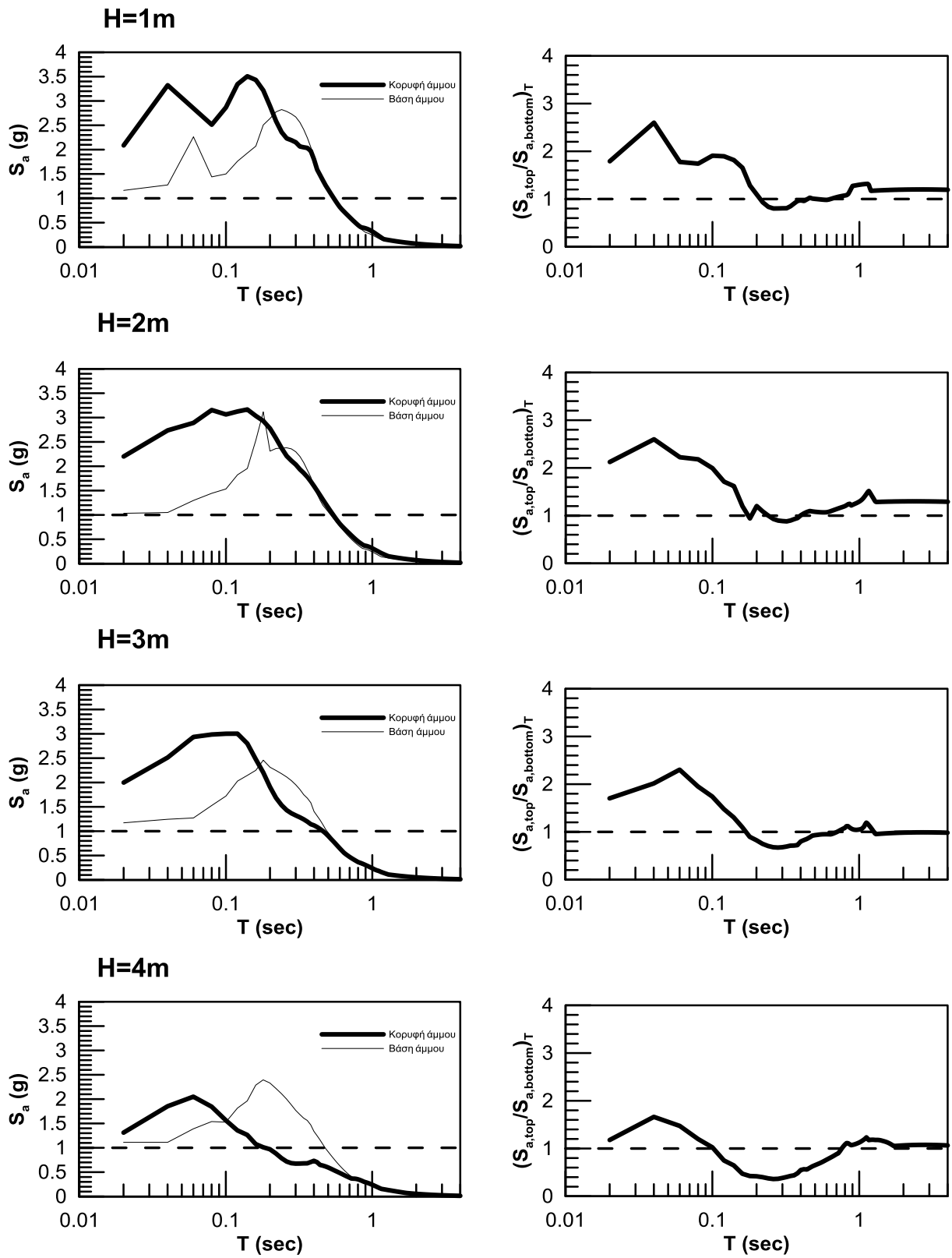
H=11m



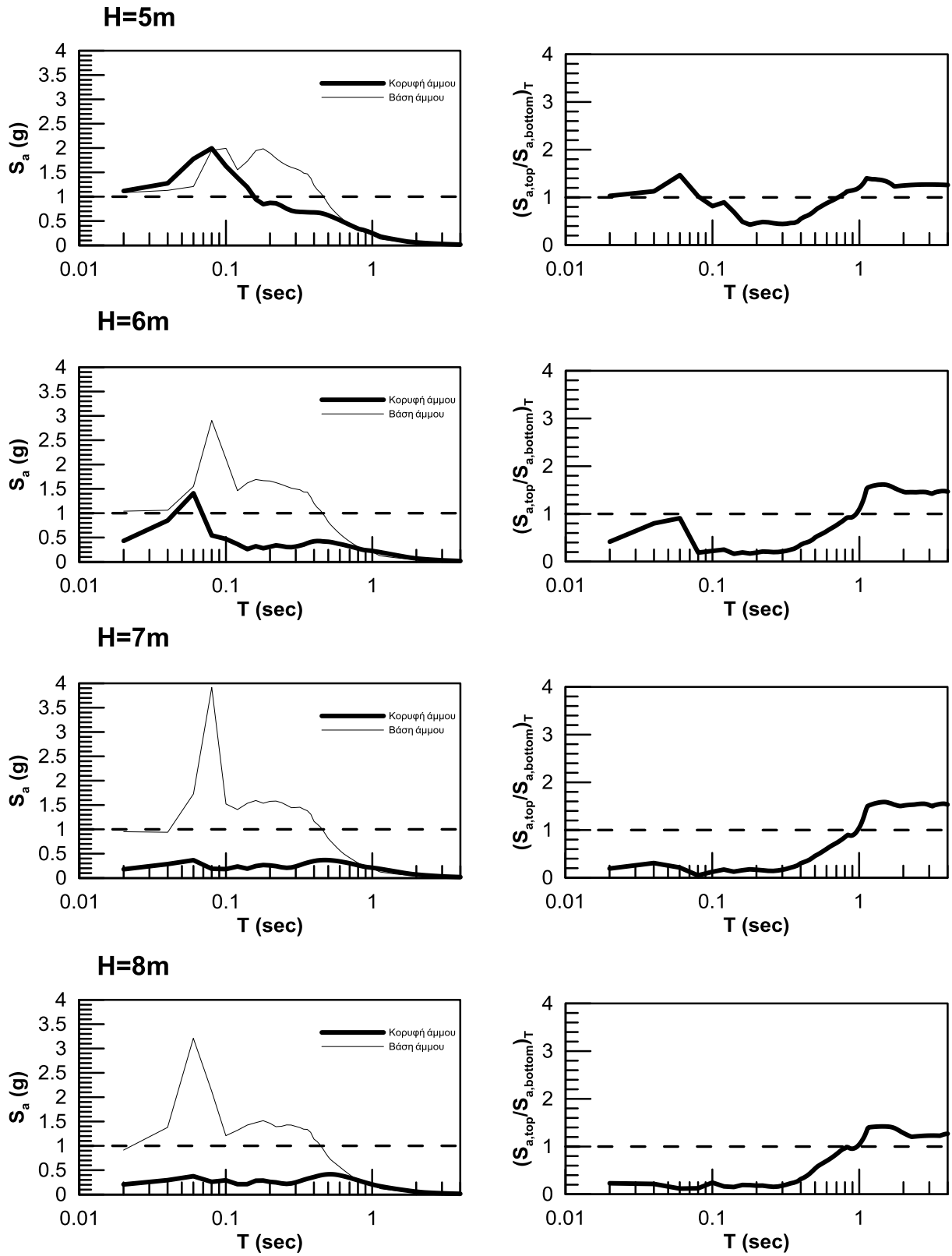
H=12m



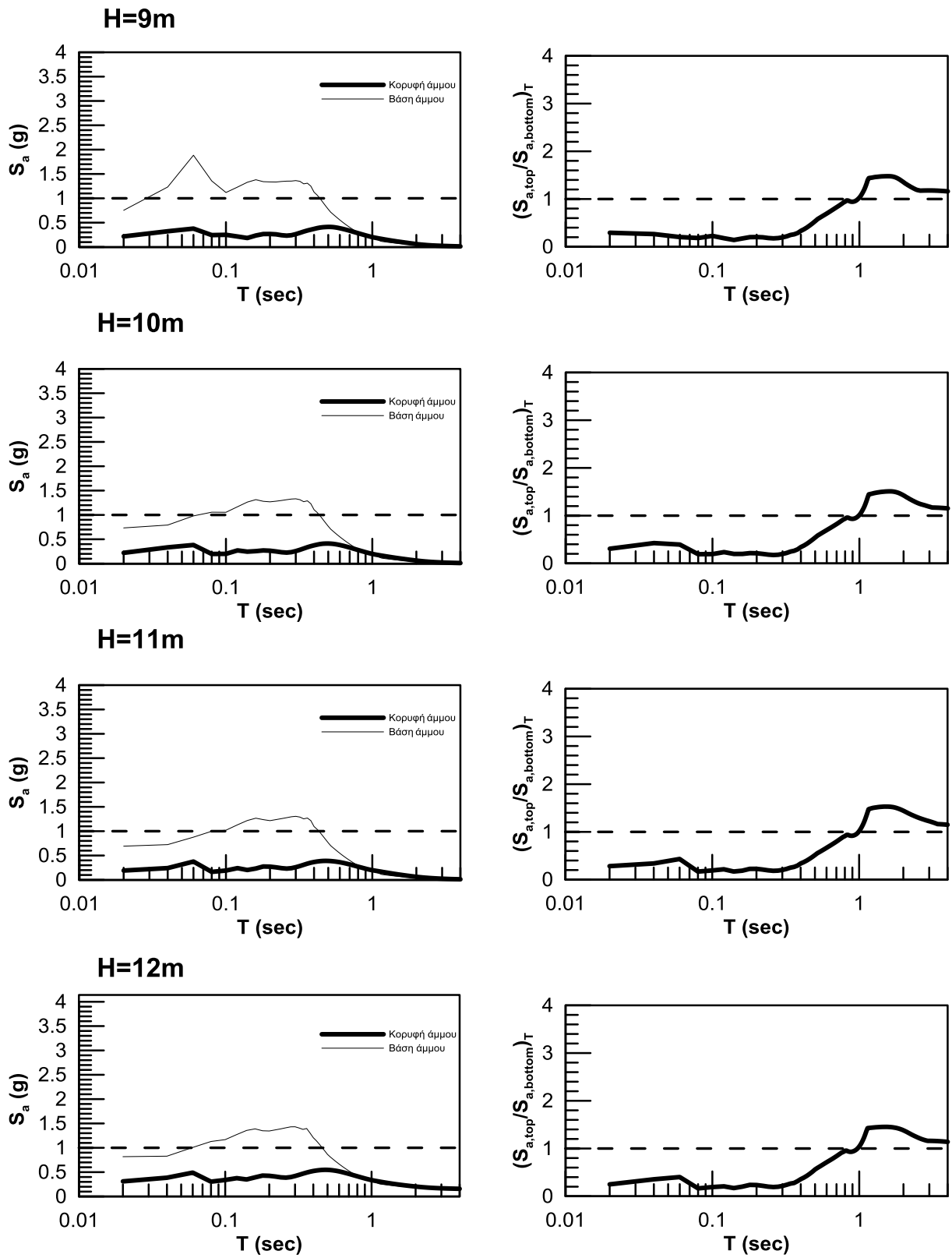
Pyrgos M4.9: $a_{max}=0.77g$



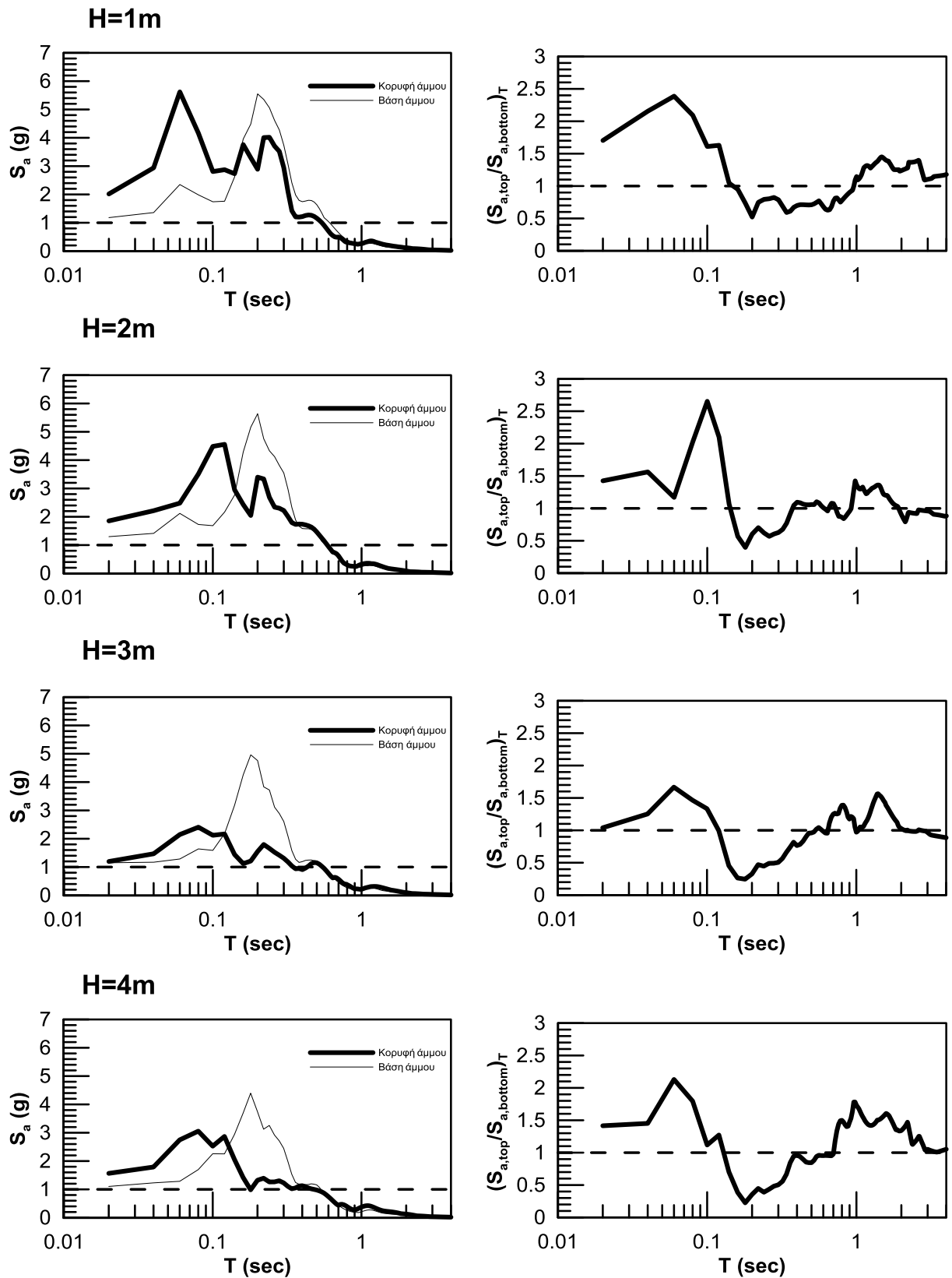
Pyrgos M4.9: $a_{max}=0.77g$



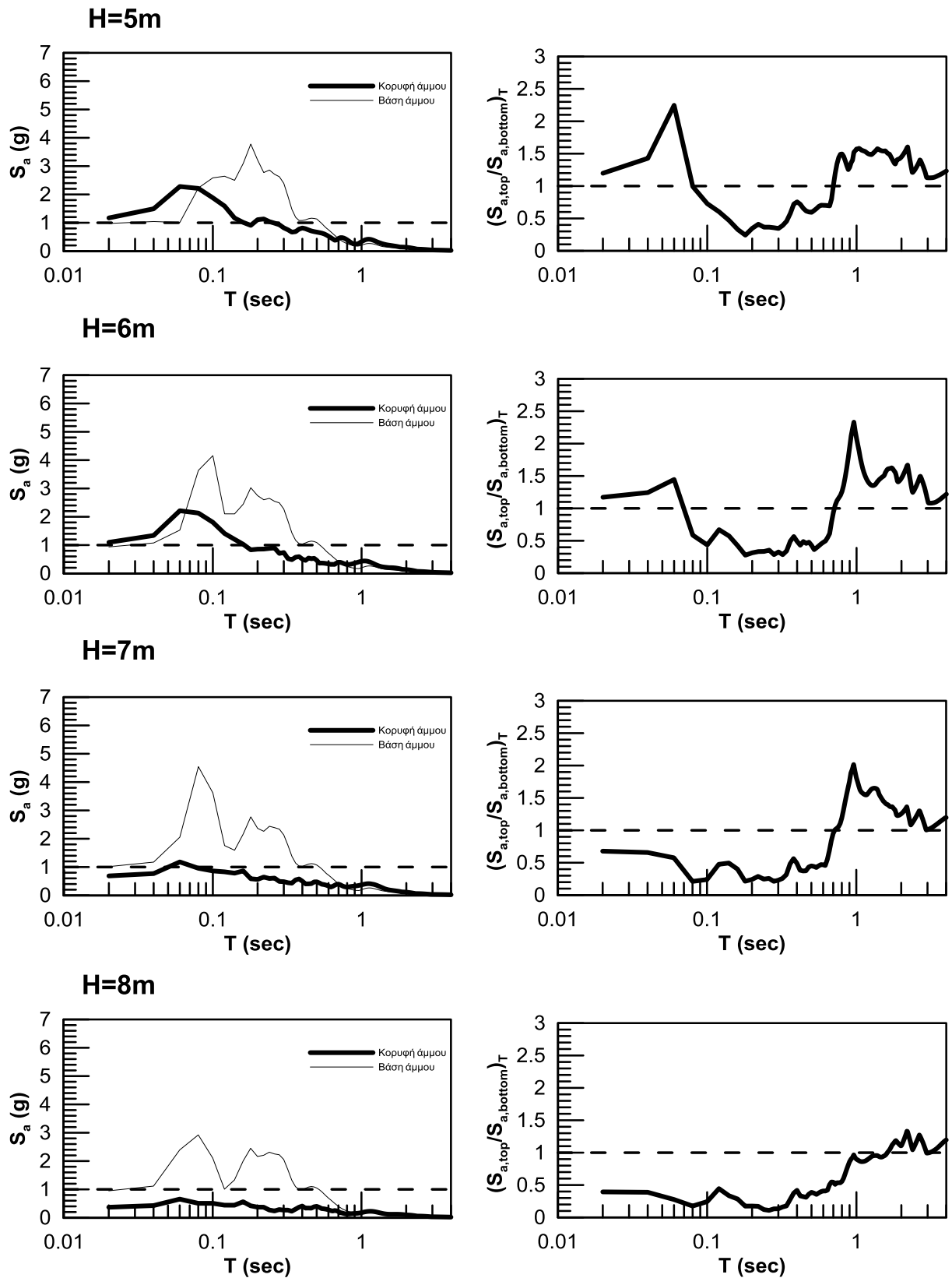
Pyrgos M4.9: $a_{max}=0.77g$



Sepolia M5.8: $a_{max}=0.63g$



Sepolia M5.8: $a_{max}=0.63g$



Sepolia M5.8: $a_{max}=0.63g$

