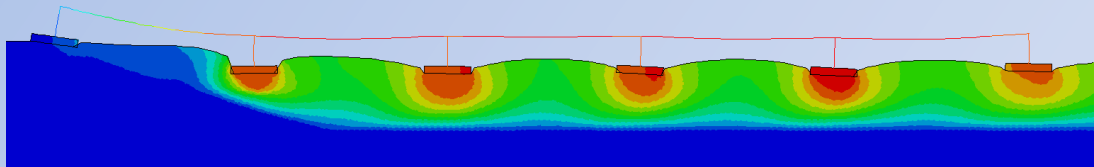




Διπλωματική Εργασία
Δανάη Τσιραντωνάκη

Επιβλέποντες:
Καθηγητής Γ. Γκαζέτας
Δρ. Φ. Γελαγώτη

**Σεισμική Απόκριση Γέφυρας
επί Εδαφικής Κοιλιάδας**



**Seismic Response of a Bridge
on a Sedimentary Valley**

Diploma Thesis

Danai Tsirantonaki

Supervised by:

Professor G. Gazetas

Dr. F. Gelagoti

Αθήνα, Νοέμβριος 2012

Ευχαριστίες

Τελειώνοντας αυτή την εργασία, θα ήθελα να ευχαριστήσω αρχικά τον Καθηγητή κ. Γ. Γκαζέτα, ο οποίος με ενέπνευσε με το μάθημά του και μου έδωσε την ευκαιρία να ασχοληθώ με ένα αντικείμενο που μου άρεσε τόσο πολύ.

Ένα πολύ μεγάλο ευχαριστώ θέλω να πω στην Dr. Φ. Γελαγώτη, για την υπέροχη συνεργασία και καθοδήγηση σε όλη τη διάρκεια της διπλωματικής, καθώς και στον Dr. Ρ. Κουρκουλή για τις πολύτιμες συμβουλές του στα διάφορα στάδιά της.

Ακόμα,

σε όλη την ομάδα του εργαστηρίου για το πολύ όμορφο κλίμα που υπήρχε αυτούς τους μήνες, στην οικογένεια μου για τη σταθερή υποστήριξη, και τέλος, στους φίλους μου που με συγκίνησαν με την απεριόριστη στήριξή τους στις πιο ζόρικες στιγμές, ιδιαίτερα τις τελευταίες μέρες,

θα ήθελα να πω:

Ευχαριστώ!

Περίληψη

Στο πρώτο μέρος εξετάζεται η σεισμική απόκριση κοιλάδας με ανομοιογενές έδαφος. Αρχικά, περιγράφονται οι μηχανισμοί ενίσχυσης που δημιουργούνται σε μια κοιλάδα με ομοιογενές έδαφος και παρατίθενται τυπικά αποτελέσματα τόσο για τη θεώρηση ελαστικού όσο και για τη θεώρηση μή-γραμμικού εδάφους. Έπειτα, εξετάζεται πώς επιδρά η ανομοιογένεια του ελαστικού εδάφους συγκρίνοντας τα αποτελέσματα του ομοιογενούς εδαφικού προφίλ με ένα ανομοιογενές στο οποίο η ταχύτητα των διατμητικών κυμάτων αυξάνεται γραμμικά με το βάθος. Η επίδραση της κατανομής της ταχύτητας εξετάζεται συγκρίνοντας τα παραπάνω αποτελέσματα με ένα “παραβολικό” και ένα “υπερβολικό” ανομοιογενές εδαφικό προφίλ. Οι παραπάνω συγκρίσεις επαναλαμβάνονται και για τη θεώρηση μή-γραμμικού εδάφους.

Στο δεύτερο μέρος διερευνάται η σεισμική απόκριση γέφυρας εδραζόμενης σε κοιλάδα με ομοιογενές έδαφος. Επιλέγεται η μελέτη δύο στατικών προσομοιωμάτων για τη γέφυρα, καθώς και δύο διαφορετικών θέσεων έδρασής της στην κοιλάδα. Στην περίπτωση που το έδαφος είναι ελαστικό, διαπιστώνεται η ιδιαίτερα μεγάλη καταπόνηση της γέφυρας και το πρόβλημα αποδομείται προκειμένου να κατανοηθούν τα αίτια της καταπόνησης αυτής. Και στην περίπτωση του μή-γραμμικού εδάφους, η καταπόνηση για την ακραία θέση της γέφυρας στην κοιλάδα προέκυψε έντονη, παρά τον ευεργετικό ρόλο της ανελαστικότητας του εδάφους. Επίσης, λόγω των παραμενουσών παραμορφώσεων του ανελαστικού εδάφους, η κατανομή των εντατικών μεγεθών στο φορέα μετά το τέλος της διέγερσης προκύπτει σημαντικά διαφορετική από ότι στο τέλος της στατικής φόρτισης.

Abstract

In the first part, the seismic response of a valley with inhomogeneous soil is examined. Firstly, the amplification mechanisms which exist in a valley with homogeneous soil are described and typical results for elastic and for non-linear soil are given. The effect of the soil inhomogeneity is investigated by comparing the results of the elastic homogeneous soil profile with those of an inhomogeneous profile in which the velocity of the shear waves is a linear function of the depth. These results are also compared with a “hyperbolic” and a “parabolic” inhomogeneous profile, so that the effect of the shear wave velocity distribution is examined. The above mentioned comparisons are repeated for the case of soil non-linearity.

In the second part, the seismic response of a bridge on the top of a sedimentary valley with homogeneous soil is examined. Two configurations and two different positions of the bridge in the valley are chosen. In the case of the elastic soil, significant moments occur at the bridge piers, and the problem is decomposed, so that the reasons for such an occurrence are understood. Also in the case of soil non-linearity, when the bridge is placed at the edge of the valley, significant moments continue to exist despite the beneficial role of the soil non-linearity. Moreover, because of the permanent deformation of the non-linear soil, the distribution of the internal forces of the bridge after the end of the excitation is remarkably different from that at the end of the static loading.

Πίνακας περιεχομένων

ΜΕΡΟΣ Α': Απόκριση Κοιλιάδας με Ανομοιογενές Έδαφος

Κεφάλαιο 1: Ορισμός του προβλήματος, αριθμητική προσομοίωση

1.1. Ορισμός του προβλήματος.....	3
1.2. Αριθμητική προσομοίωση	4
1.3. Καταστατικό προσομοίωμα εδάφους και αριθμητική προσομοίωση.....	6
Σχήματα 1 ^{ου} κεφαλαίου	9

Κεφάλαιο 2: Ομοιογενές Έδαφος

2.1. Ελαστικό ομοιογενές έδαφος.....	19
2.2. Ανελαστικό ομοιογενές έδαφος.....	23
Σχήματα 2 ^{ου} κεφαλαίου	25

Κεφάλαιο 3: Ελαστικό Ανομοιογενές Έδαφος

3.1. Γραμμικώς αυξανόμενη ταχύτητα $V_{S,soil}$	35
3.2. Επίδραση της κατανομής της $V_{S,soil}$	39
Σχήματα 3 ^{ου} κεφαλαίου	43

Κεφάλαιο 4: Μή-γραμμικό ανομοιογενές Έδαφος

4.1. Γραμμικώς αυξανόμενη ταχύτητα $V_{S,soil}$	59
4.2. Επίδραση της κατανομής της $V_{S,soil}$	62
Σχήματα 4 ^{ου} κεφαλαίου	65

ΜΕΡΟΣ Β': Σεισμική απόκριση γέφυρας επί εδαφικής κοιλάδας

Κεφάλαιο 5: Ορισμός του προβλήματος, σχεδιασμός, προσομοίωση

5.1. Ορισμός του προβλήματος.....	79
5.2. Συμβατικός σχεδιασμός της ανωδομής	82
5.3. Αριθμητικά προσομοιώματα	88
Σχήματα 5 ^{ου} κεφαλαίου	91

Κεφάλαιο 6: Γέφυρα εδραζόμενη σε κοιλάδα με ελαστικό έδαφος

6.1. Έδραση γέφυρας στην θέση 1 της κοιλάδας.....	109
6.2. Έδραση γέφυρας στην θέση 2 της κοιλάδας.....	117
6.3. Σεισμικές διεγέρσεις πραγματικών καταγραφών	118
6.4. Συμπεράσματα.....	123
Σχήματα 6 ^{ου} κεφαλαίου	127

Κεφάλαιο 7: Γέφυρα εδραζόμενη σε κοιλάδα με ανελαστικό έδαφος

7.1. Έδραση γέφυρας στην θέση 1 της κοιλάδας.....	193
7.2. Έδραση γέφυρας στην θέση 2 της κοιλάδας.....	196
7.3. Σεισμικές διεγέρσεις πραγματικών καταγραφών	197
7.4. Συμπεράσματα.....	199
Σχήματα 7 ^{ου} κεφαλαίου	201
Σχετική βιβλιογραφία	237

ΜΕΡΟΣ Α'

ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΕΔΑΦΙΚΗΣ ΚΟΙΛΑΔΑΣ ΜΕ
ΑΝΟΜΟΙΟΓΕΝΕΣ ΕΔΑΦΟΣ

Κεφάλαιο 1

Ορισμός του προβλήματος, αριθμητική προσομοίωση

1.1. Ορισμός του προβλήματος

Στο πρώτο μέρος εξετάζεται η απόκριση της εδαφικής κοιλάδας του **Σχήματος 1.1**, όταν το έδαφος της είναι ανομοιογενές. Η απόκρισή της συγκρίνεται με την απόκρισή της για θεώρηση ομοιογενούς εδάφους. Τα εδαφικά χαρακτηριστικά του βραχώδους υπόβαθρου και του εδάφους της κοιλάδας στην θεώρηση της ομοιογένειας παρουσιάζονται στο **Σχήμα 1.2**.

Εξεταζόμενα εδαφικά προφίλ

Εξετάστηκαν συνολικά τέσσερα εδαφικά προφίλ, το ομοιογενές και τρία ανομοιογενή. Η κατανομή των ταχυτήτων των διατμητικών κυμάτων για τα προφίλ αυτά σε σχέση με το βάθος παρουσιάζεται στο **Σχήμα 1.3**. Το ομοιογενές έχει ταχύτητα $V_{s,soil} = 100 \text{ m/s}$. Στο πρώτο ανομοιογενές προφίλ, που στα παρακάτω θα αναφέρεται ως **γραμμικώς αυξανόμενο**, η ταχύτητα αυξάνεται γραμμικά με το βάθος ως εξής:

$$V_s(z) = 40 + 5 \times z$$

Στο δεύτερο ανομοιογενές προφίλ, το οποίο θα αναφέρεται ως **παραβολικό**, η ταχύτητα αυξάνεται με το βάθος σύμφωνα με την σχέση:

$$V_s(z) = 60 + 12 \times \sqrt{z}$$

Τέλος, στο προφίλ που θα ονομάζεται **υπερβολικό**, η συνάρτηση της ταχύτητας ως προς το βάθος είναι:

$$V_s(z) = 60 + z^{1.5}$$

Στην επιφάνεια του εδάφους, το γραμμικώς αυξανόμενο προφίλ έχει ταχύτητα $V_s = 40 \text{ m/s}$, ενώ το παραβολικό και το υπερβολικό προφίλ έχουν $V_s = 60 \text{ m/s}$. Όλα τα ανομοιογενή προφίλ, έχουν σε βάθος $z = 12 \text{ m}$, δηλαδή στο μέσον του εδαφικού στρώματος, μέση ταχύτητα $\bar{V}_s = 100 \text{ m/s}$, δηλαδή ίση με αυτή του ομοιογενούς προφίλ που εξετάστηκε.

Επιβαλλόμενες διεγέρσεις

Σε πρώτο στάδιο, το πρόβλημα αναλύθηκε με την βοήθεια **παλμικών διεγέρσεων τύπου Ricker** διαφόρων χαρακτηριστικών συχνοτήτων, οι χρονοϊστορίες και τα φάσματα των οποίων φαίνονται στο **Σχήμα 1.4**. Ο λόγος που χρησιμοποιούνται οι παλμικές διεγέρσεις αυτές είναι ότι είναι αρκετά αντιπροσωπευτικές των πραγματικών διεγέρσεων, χωρίς να έχουν τις λεπτομέρειες των τελευταίων οι οποίες θα καθιστούσαν πιο δυσχερή την ανάλυση.

Έπειτα, για να διερευνηθεί ο ρόλος των λεπτομερειών του επιταχυνσιογραφήματος (όπως διάρκεια, αριθμός κύκλων φόρτισης και συχνοτικό περιεχόμενο) η δισδιάστατη απόκριση της κοιλάδας μελετήθηκε και με την χρήση των εξής πραγματικών καταγραφών: *Lefkada 2003*, (Λευκάδα, 2003), *JMA 000* (Kobe, 1995), *Pacoima Dam 164* (San Fernando, 1971), *Lucerne 275* (Landers, 1992), *Jensen 292* (Northridge, 1994), *Rinaldi 228* (Northridge, 1994). Οι χρονοϊστορίες και τα αντίστοιχα φάσματα απόκρισης απεικονίζονται στο **Σχήμα 1.5**.

1.2. Αριθμητική προσομοίωση

Η εδαφική κοιλάδα προσομοιώθηκε αριθμητικά στον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS, όπως απεικονίζεται στο **Σχήμα 1.6**. Στην προσομοίωση χρησιμοποιήθηκαν τετραεδρικά συνεχή στοιχεία επίπεδης παραμόρφωσης, των οποίων οι διαστάσεις επελέγησαν, ώστε το μικρότερο αναμενόμενο μήκος κύματος να αντιστοιχεί σε 10 στοιχεία. Στην εδαφική κοιλάδα, όπου τα μήκη κύματος είναι μικρότερα, πραγματοποιήθηκε πυκνότερη διακριτοποίηση (**Σχήμα 1.6 (β)**), ώστε η

μέγιστη διάσταση στοιχείου να μην ξεπερνά το 1.5 m. Η συμπεριφορά του εδάφους ως διατμητικός πρόβολος επιτεύχθηκε με την χρήση κατάλληλων κινηματικών περιορισμών μεταξύ των πλευρικών συνόρων κάθε εδαφικής στήλης. Το υποκείμενο υπέδαφος αντικαταστάθηκε με την χρήση αποσβεστήρων κατάλληλης σταθεράς, στην βάση των οποίων επιβλήθηκαν οι διεγέρσεις. Τα σύνορα τοποθετήθηκαν αρκετά απομακρυσμένα, ώστε η απόκριση της κοιλάδας να μην επηρεαστεί από πιθανές ανακλάσεις. Καθώς απομακρυνόμαστε από την κοιλάδα προς τα σύνορα, η διακριτοποίηση γίνεται πιο αραιή, ώστε να μειωθεί το υπολογιστικό κόστος.

Πέρα από την απομάκρυνση των συνόρων, η κίνηση ελεύθερου πεδίου στα άκρα της κοιλάδας εξασφαλίστηκε και με την χρήση υβριδικών συνόρων (**Σχήμα 1.6 (δ)**). Πρόκειται για εδαφικές στήλες εκατέρωθεν του κυρίως προσομοιώματος (με τα εδαφικά χαρακτηριστικά του βραχώδους υποστρώματος) μεγάλης ακαμψίας οι οποίες κινούνται ως διατμητικοί πρόβολοι και συνδέονται με το κυρίως μοντέλο με την χρήση αποσβεστήρων. Λόγω της μεγαλύτερης ακαμψίας τους, το κυρίως προσομοίωμα “αναγκάζεται να υπακούσει” την συμπεριφορά τους, με αποτέλεσμα να εξασφαλίζεται η κίνηση ελευθέρου πεδίου στα άκρα του. Η αποτελεσματικότητα των συνόρων απεικονίζεται στο **Σχήμα 1.7**, στο οποίο φαίνεται η σύγκριση της χρονοϊστορίας της επιβαλλόμενης διέγερσης και αυτής που προκύπτει στην επιφάνεια της άκαμπτης στήλης με την χρονοϊστορία που προκύπτει στο σύνορο της επιφανείας του κυρίως προσομοιώματος για την διέγερση Ricker 1. Όπως φαίνεται, οι χρονοϊστορίες πρακτικά ταυτίζονται, με μόνο πολύ μικρές διαφοροποιήσεις, οι οποίες παρατηρούνται μετά τον κυρίως παλμό.

Η απόκριση λόγω της μονοδιάστατης ενίσχυσης με την οποία συγκρίθηκε η απόκριση της κοιλάδας υπολογίστηκε με την βοήθεια της εδαφικής στήλης του **Σχήματος 1.8**. Χρησιμοποιήθηκαν τέσσερις τέτοιες εδαφικές στήλες, για έδαφος βάθους 6, 12, 18 και 24 μέτρων αντίστοιχα. Για τα ενδιάμεσα βάθη η σύγκριση έγινε με την βοήθεια γραμμικής παρεμβολής. Η εξασφάλιση της συμπεριφοράς διατμητικού προβόλου έγινε με την βοήθεια κατάλληλων κινηματικών περιορισμών μεταξύ των πλευρικών συνόρων, ενώ η διέγερση επιβλήθηκε με την βοήθεια αποσβεστήρων κατάλληλης σταθεράς.

Κατά την θεώρηση ελαστικότητας του εδάφους, λήφθηκε υπ' όψιν για το έδαφος ένας μικρός συντελεστής απόσβεσης $\xi = 2\%$. Η συμπεριφορά του βραχώδους υποβάθρου θεωρήθηκε ελαστική σε όλες τις αναλύσεις, με συντελεστή απόσβεσης $\xi = 1\%$. Οι συντελεστές αυτοί υλοποιήθηκαν στον κώδικα ABAQUS με την βοήθεια των καμπύλων Rayleigh οι οποίες απεικονίζονται στο **Σχήμα 1.9**.

Η προσομοίωση του ανομοιογενούς ελαστικού εδάφους έγινε με την βοήθεια υπορουτίνας, με την οποία συσχετίστηκε η κατανομή της ταχύτητας του εκάστοτε εδαφικού προφίλ με τις γεωστατικές τάσεις. Επειδή σε αυτές τις αναλύσεις τοποθετήθηκε αναγκαστικά βάρος στο προσομοίωμα, τοποθετήθηκαν στηρίξεις κατά την κατακόρυφη διεύθυνση στην βάση του προσομοιώματος.

1.3. Καταστατικό προσομοίωμα μή-γραμμικού εδάφους και αριθμητική προσομοίωση

Για την μή-γραμμική συμπεριφορά του εδάφους χρησιμοποιήθηκε το κριτήριο διαρροής Von Mises, σύμφωνα με το οποίο η μέγιστη τάση διαρροής για αργίλους ορίζεται ως:

$$\sigma_y = \sqrt{3} \times S_u,$$

όπου S_u η αστράγγιστη διατμητική αντοχή.

Η συμπεριφορά της αργίλου θεωρείται ελαστική μέχρι την τάση

$$\sigma_0 = \sigma_y / \lambda,$$

Όπου σ_y η τάση διαρροής που ορίστηκε παραπάνω και λ παράμετρος που ορίζεται κατά την βαθμονόμηση.

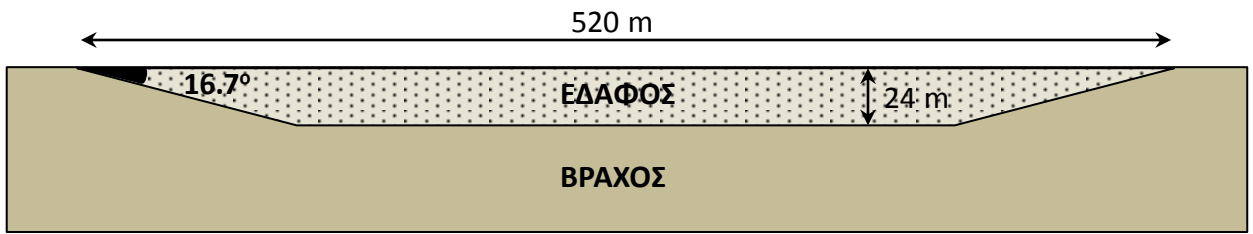
Το παραπάνω καταστατικό προσομοίωμα έχει εισαχθεί στον κώδικα ABAQUS μέσω υπορουτίνας. Η βαθμονόμηση του προσομοιώματος απαιτεί την γνώση της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής του εδάφους S_u , της αρχικής δυσκαμψίας G_0 και των καμπυλών $G-\gamma$.

Για να επιτευχθεί η καλύτερη προσέγγιση των θεωρητικών ή πειραματικών καμπυλών, κατά την βαθμονόμηση χρησιμοποιούνται διαφορετικές τιμές της παραμέτρου λ για διαφορετικές περιοχές της διατμητικής παραμόρφωσης γ .

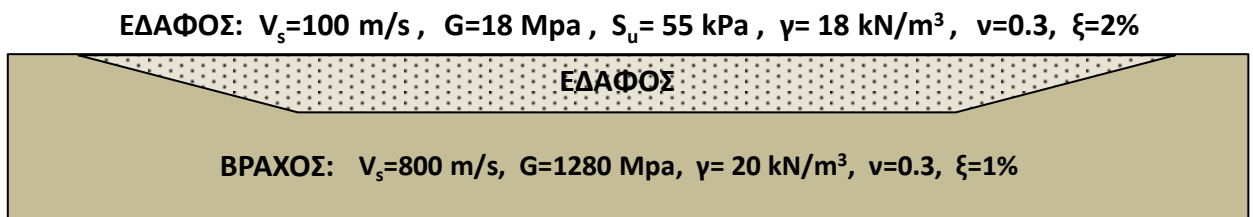
Επίσης, επειδή η μόρφωση του βρόγχου της ανακυκλικής φόρτισης γίνεται σύμφωνα με το κριτήριο Masing το οποίο υπερεκτιμά την απόσβεση στις μεγάλες παραμορφώσεις, πραγματοποιήθηκε το εξής τέχνασμα: Το μέτρο ελαστικότητας της αποφόρτισης ορίστηκε να μειώνεται με την αύξηση της παραμόρφωσης, ενώ το τέμνον μέτρο ελαστικότητας να παραμένει αμετάβλητο. Με το τέχνασμα αυτό, ο λόγος G/G_0 παραμένει ανεπηρέαστος, ενώ ο βρόγχος υστέρησης και συνεπώς ο λόγος απόσβεσης μειώνεται.

Η βαθμονόμηση του εδάφους έγινε με βάση τα παραπάνω και τις πραγματικές πειραματικές καμπύλες εδαφικού υλικού από το υπέδαφος της Βόλβης και φαίνεται στο **Σχήμα 1.10**.

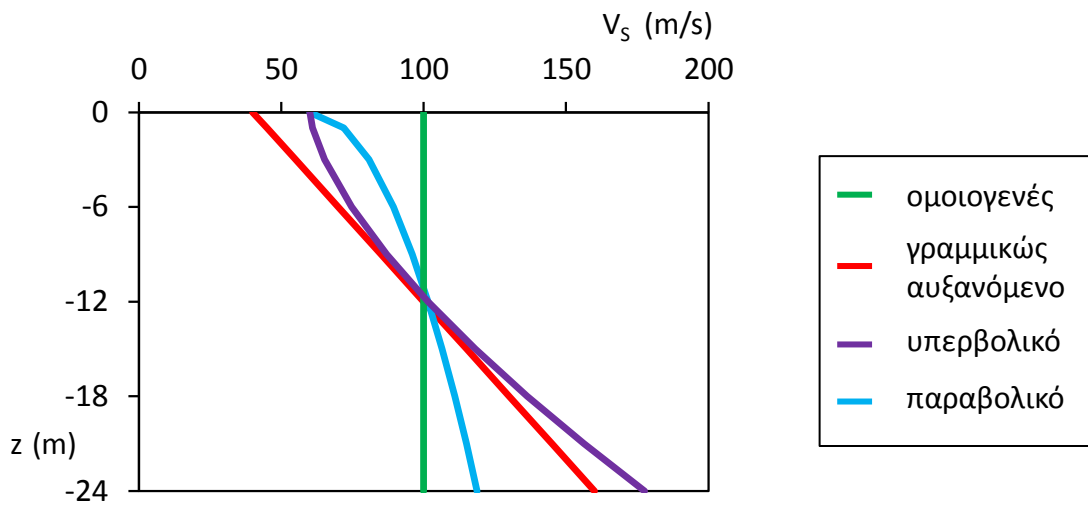
Σχήματα κεφαλαίου **1**



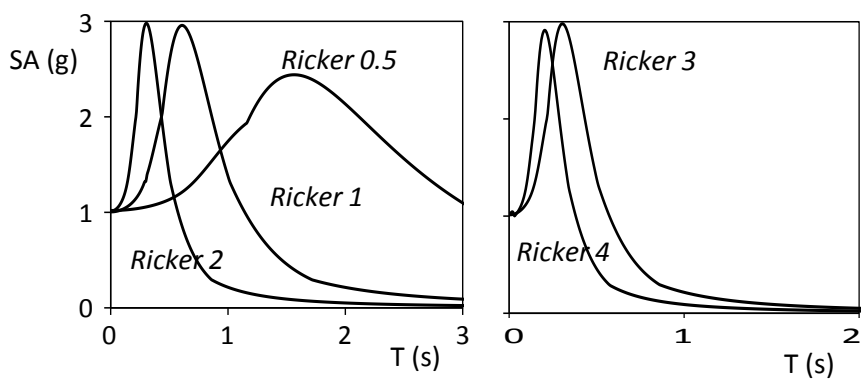
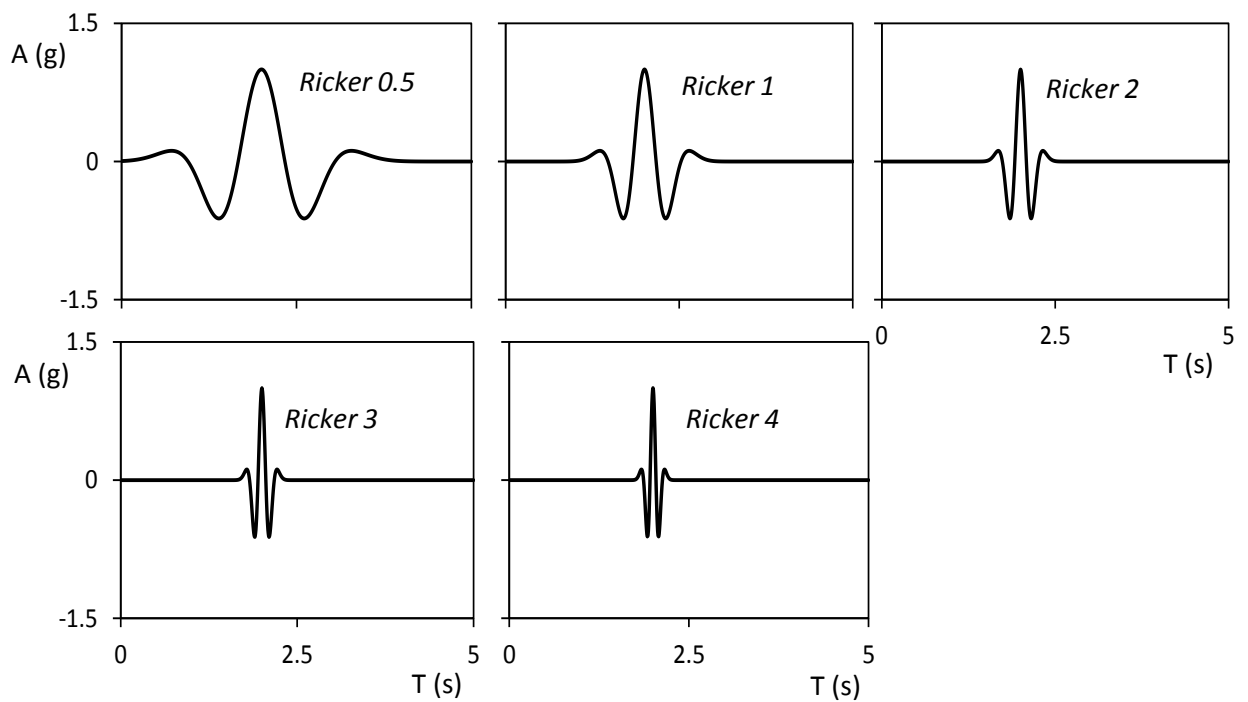
Σχήμα 1.1: Γεωμετρία της κοιλάδας.



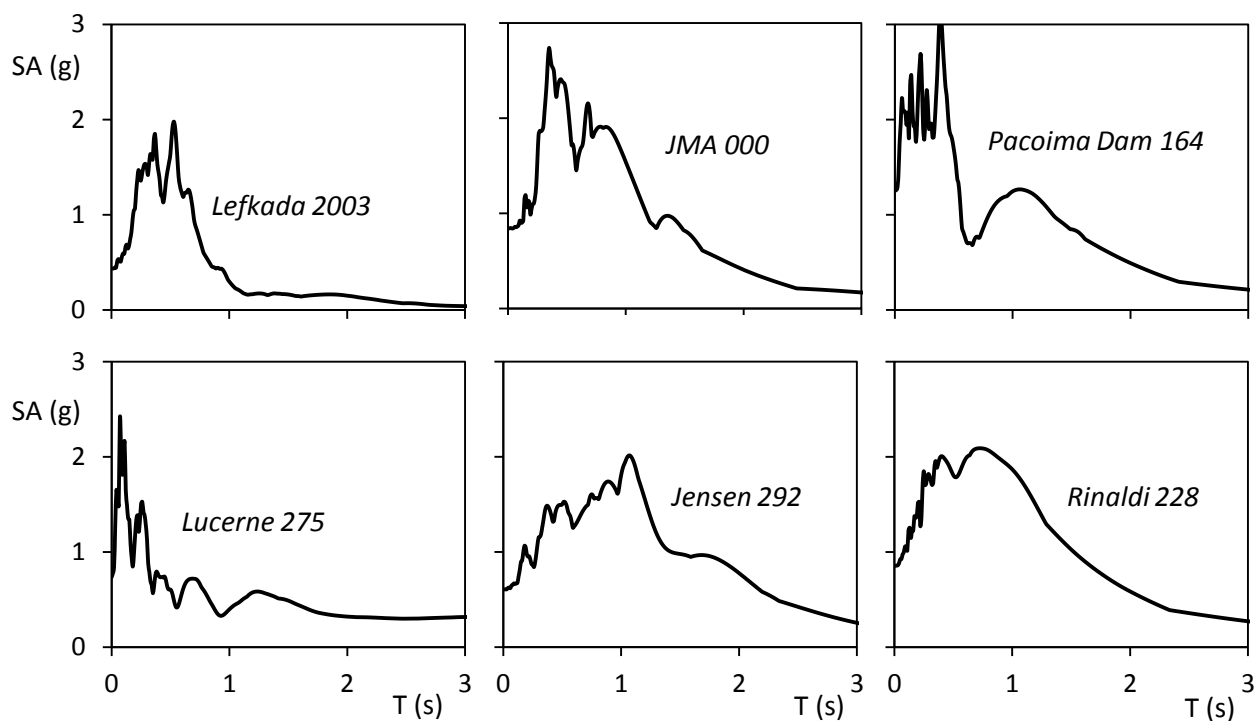
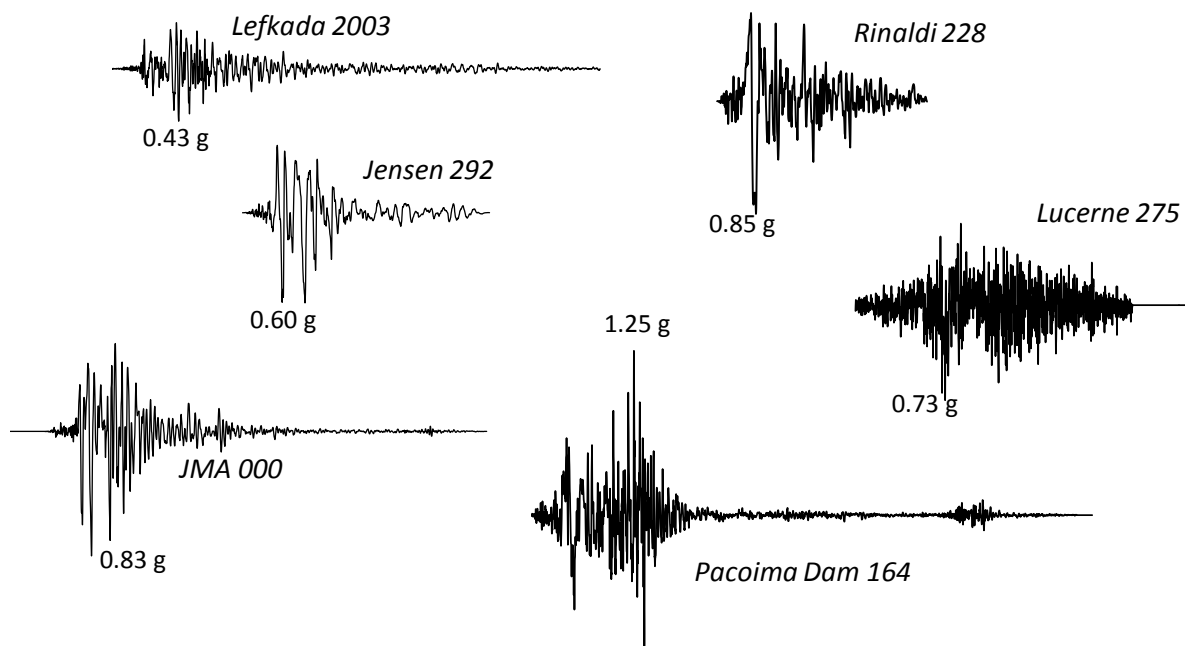
Σχήμα 1.2: Εδαφικά χαρακτηριστικά της εδαφικής κοιλάδας και του βραχώδους υπόβαθρου.



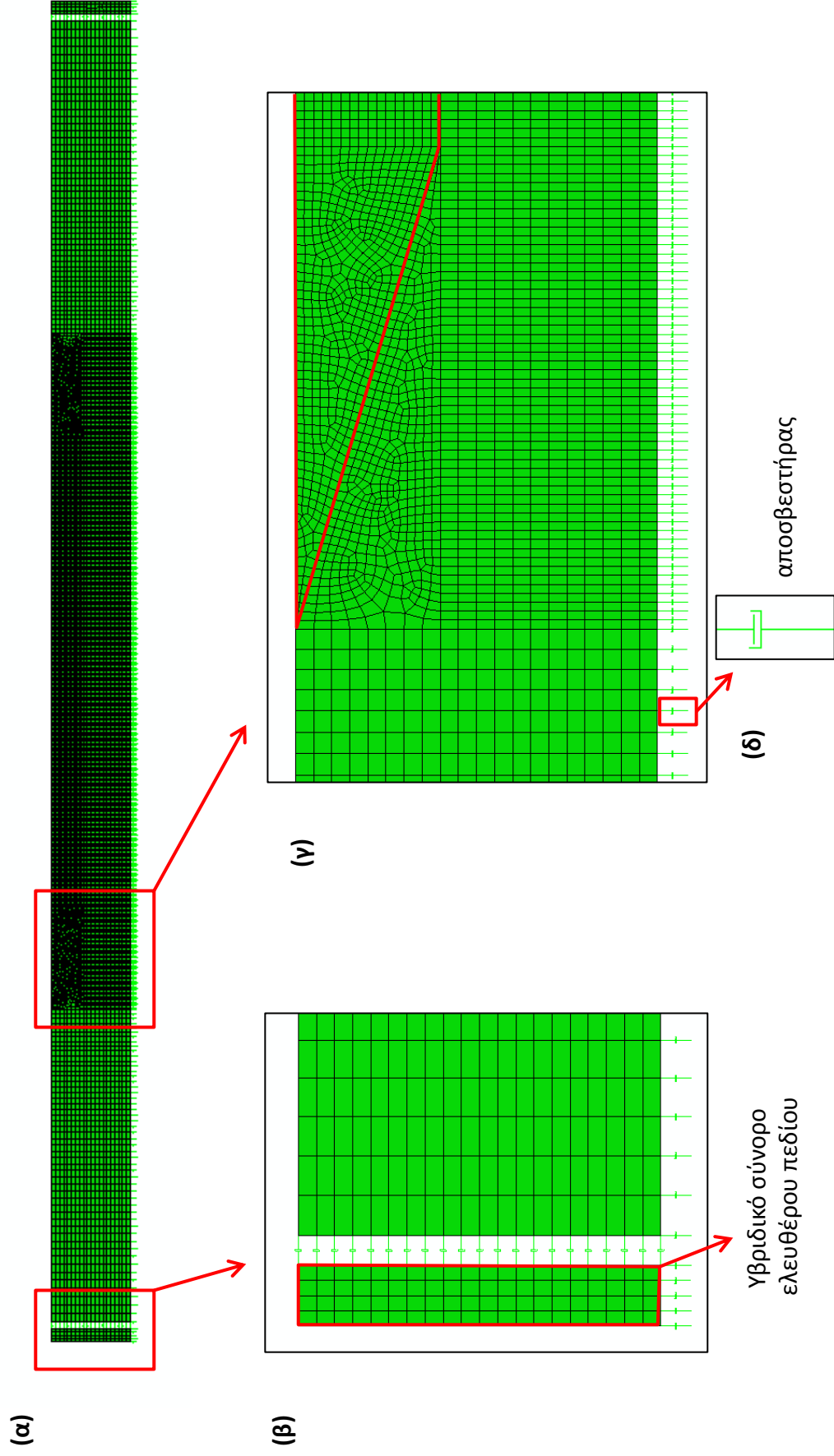
Σχήμα 1.3: Κατανομές ταχυτήτων των εδαφικών προφίλ που χρησιμοποιήθηκαν.



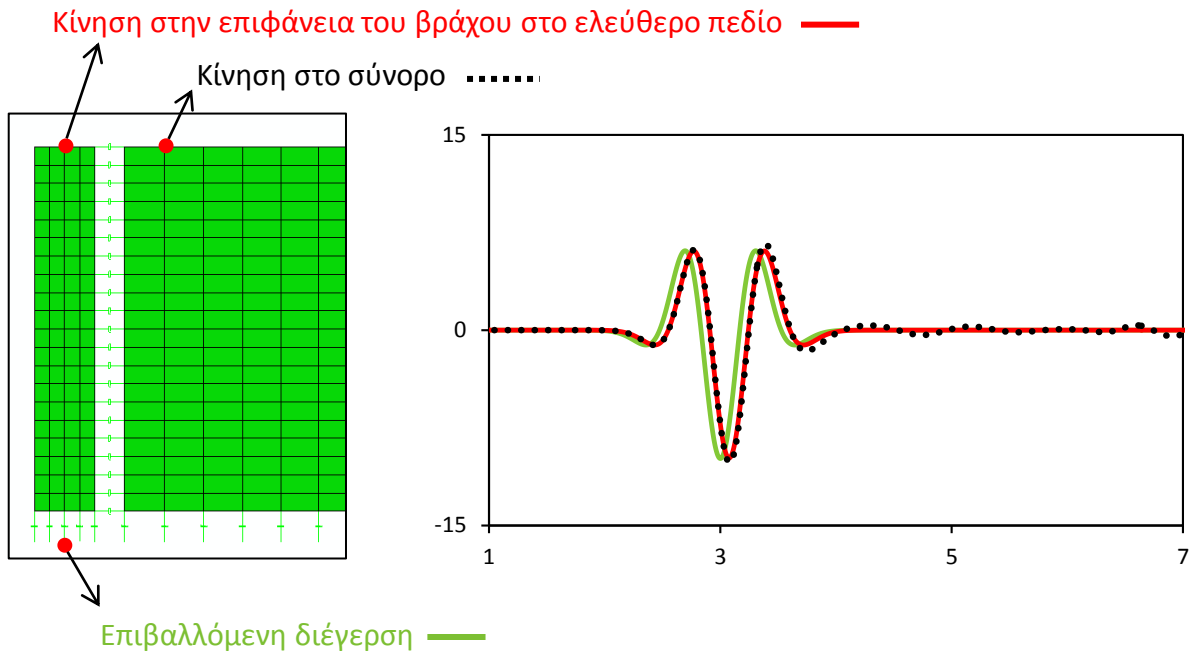
Σχήμα 1.4: Χρονοϊστορίες και ελαστικά φάσματα απόκρισης για τους παλμούς Ricker με συχνότητες από $f = 0.5$ Hz έως $f = 4$ Hz που χρησιμοποιήθηκαν για τη μελέτη της απόκρισης της εδαφικής κοιλάδας.



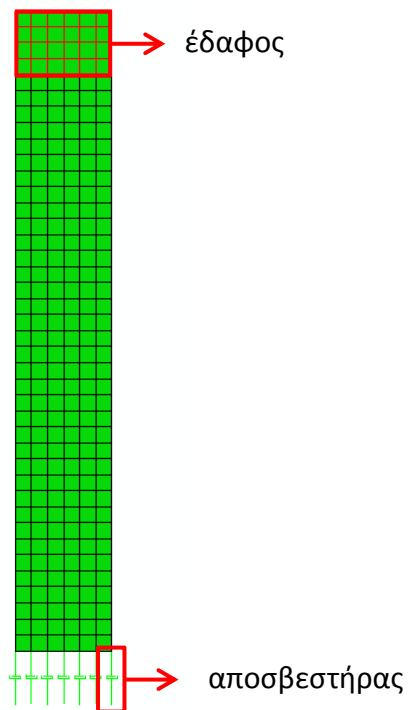
Σχήμα 1.5: Χρονοϊστορίες και ελαστικά φάσματα απόκρισης των πραγματικών σεισμικών καταγραφών που χρησιμοποιήθηκαν για τη μελέτη της απόκρισης της εδαφικής κοιλάδας.



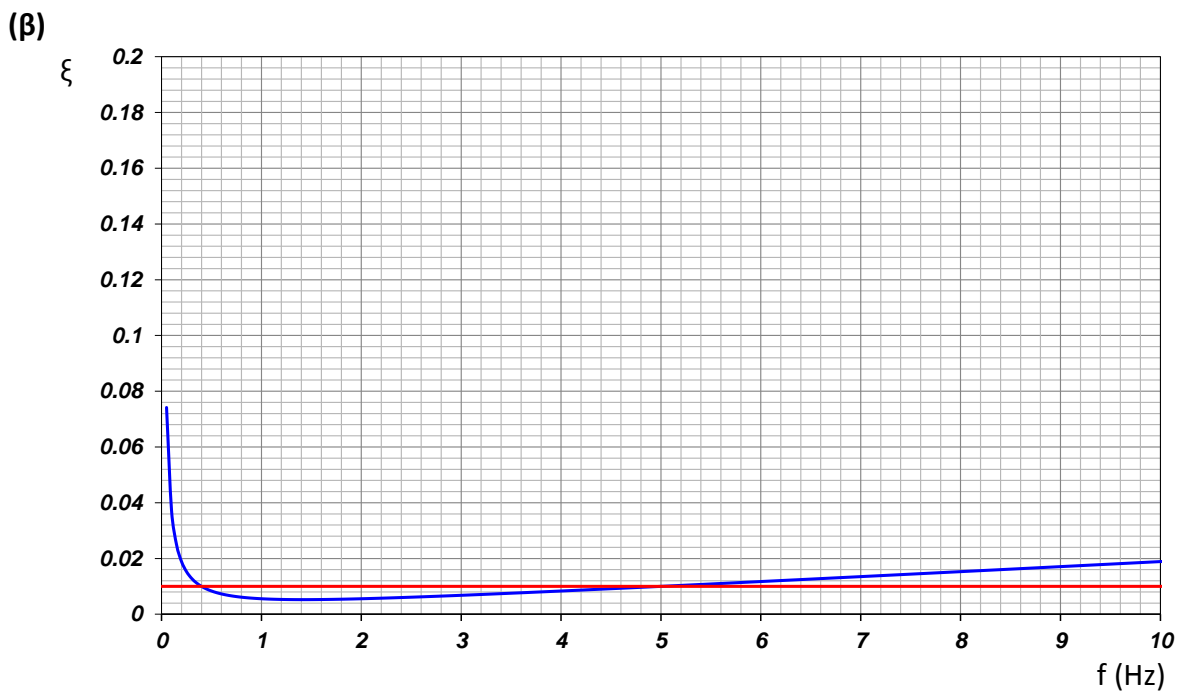
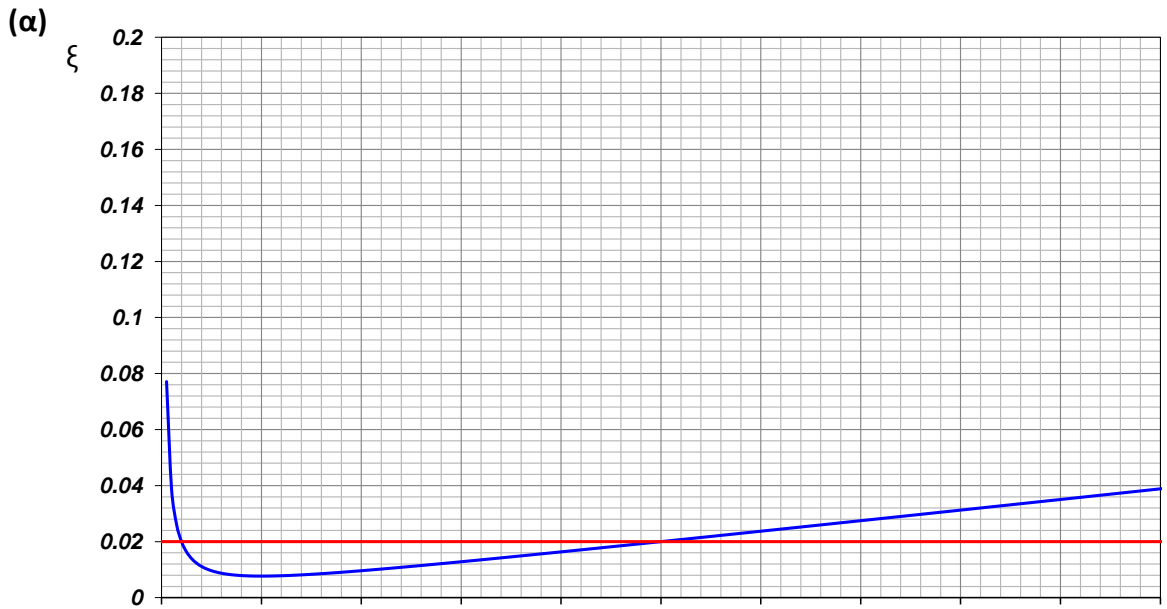
Σχήμα 1.6: (α) Αριθμητικό προσομοίωμα της εδαφικής κοιλιάδας. (β) Υβριδικό σύνορο ελευθέρου πεδίου. Πρόκειται για εδαφική στήλη μεγάλης ακαμψίας η οποία συμπεριφέρεται ως διατηρητικός πρόβολος και μεταδίδει την κίνηση του ελεύθερου πεδίου στο υπόλοιπο προσομοίωμα μέσω αποσβεστήρων. (γ) Υψηλή διακριτοποίηση στην περιοχή της εδαφικής κοιλιάδας. (δ) Αποσβεστήρες για την “αντικατάσταση” του υλοκείμενου εδάφους και την επιβολή της διέγερσης.



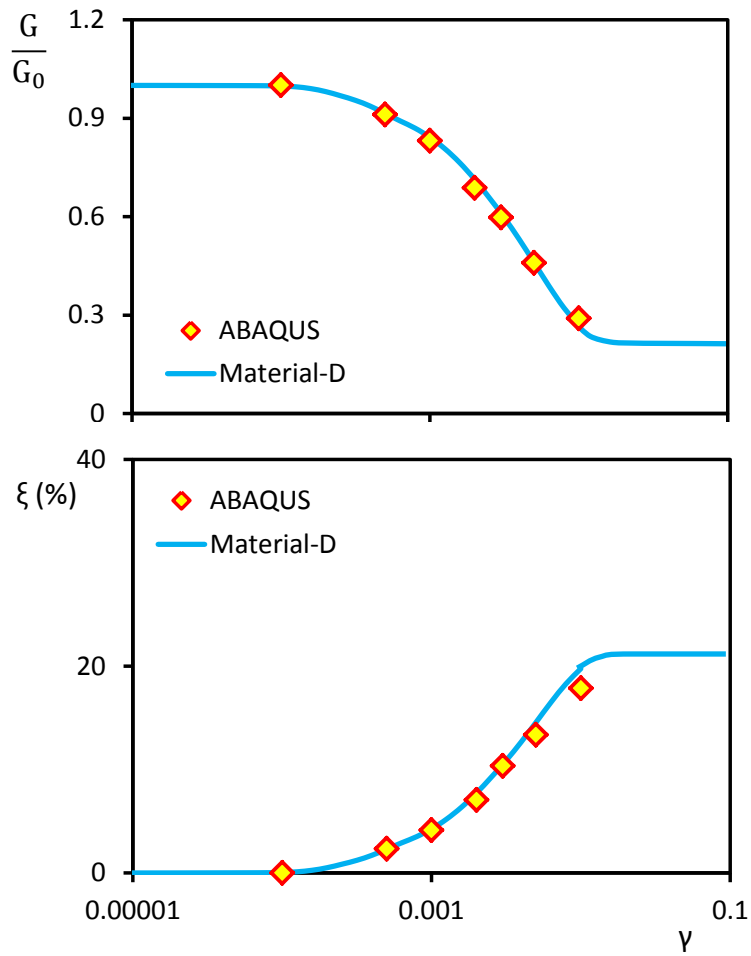
Σχήμα 1.7: Λειτουργία του υβριδικού συνόρου. Σύγκριση χρονοϊστοριών της επιτάχυνσης της επιβαλλόμενης διέγερσης, της επιτάχυνσης στην βραχώδη επιφάνεια ελεύθερου πεδίου και της επιτάχυνσης στο σύνορο του κυρίως τμήματος του προσομοιώματος. Ελαστικό ομοιογενές έδαφος κοιλάδας με $V_S = 100$ m/s. Διέγερση: Ricker 1.



Σχήμα 1.8: Αριθμητικό προσομοίωμα εδαφικής στήλης με μονοδιάστατη γεωμετρία.



Σχήμα 1.9: Καμπύλες υπολογισμού της απόσβεσης Rayleigh **(α)** για έδαφος ($\xi = 2\%$) και **(β)** για βράχο ($\xi = 1\%$).



Σχήμα 1.10: Βαθμονόμηση του εδαφικού αριθμητικού προσομοιώματος. Σύγκριση των αριθμητικά υπολογισμένων από τον κώδικα ABAQUS τιμών του λόγου G/G_0 και του συντελεστή απόσβεσης ξ με τις πειραματικές καμπύλες του υλικού D από τη Βόλβη.

Κεφάλαιο 2

Ομοιογενές έδαφος

2.1. Ελαστικό ομοιογενές έδαφος

Στο υποκεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται συνοπτικά οι μηχανισμοί ενίσχυσης της οριζόντιας εδαφικής επιτάχυνσης και δημιουργίας της παρασιτικής κατακόρυφης επιτάχυνσης οι οποίοι οφείλονται στην ύπαρξη κοιλάδας με ομοιογενές ελαστικό έδαφος διεγερόμενης με SV κύματα, καθώς και οι βασικές παράμετροι που επηρεάζουν τα φαινόμενα αυτά.

2.1.1. Μηχανισμοί δημιουργίας δισδιάστατων φαινομένων

Ο πρώτος βασικός μηχανισμός δημιουργίας δισδιάστατων φαινομένων σε μια εδαφική κοιλάδα σχετίζεται με την **διάθλαση των κυμάτων στην γωνία της κοιλάδας**. Καταρχάς, η οριζόντια επιτάχυνση ενισχύεται λόγω της συμβολής των κυμάτων μετά από την διάθλασή τους και τις διαδοχικές ανακλάσεις στις διεπιφάνειες της κοιλάδας, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 2.1**. Η συμβολή μπορεί να πραγματοποιείται είτε μεταξύ διαφορετικών διαθλώμενων κυμάτων είτε μεταξύ των διαθλώμενων κυμάτων και της κυρίως διέγερσης. Επίσης, η διάθλαση των κυμάτων έχει ως αποτέλεσμα την **δημιουργία παρασιτικής κατακόρυφης επιτάχυνσης (Σχήμα 2.2)**. Η επιτάχυνση αυτή μπορεί να έχει ιδιαίτερη σημασία για της κατασκευές, καθώς προέρχεται από S κύματα και όχι P, με αποτέλεσμα να έχει συχνοτικό περιεχόμενο που τις επηρεάζει. Χαρακτηριστική είναι η μορφή των χρονοϊστοριών που οφείλονται στον μηχανισμό αυτό, καθώς παρατηρείται ενίσχυση του κυρίως παλμού της διέγερσης και μικρή διάρκεια της απόκρισης (**Σχήμα 2.3**).

Ο δεύτερος βασικός μηχανισμός σχετίζεται με την δημιουργία επιφανειακών **Rayleigh κυμάτων** στην γωνία της κοιλάδας. Τα Rayleigh κύματα έχουν ελλειπτική τροχιά κίνησης, δηλαδή η κίνησή τους έχει και οριζόντια και κατακόρυφη συνιστώσα. Έτσι, όταν αυτά συμβάλλουν ενισχυτικά είτε μεταξύ τους είτε με τα εισερχόμενα SV κύματα, μπορεί να προκαλέσουν σημαντικές τιμές ιδιαίτερα της οριζόντιας, αλλά και της κατακόρυφης επιτάχυνσης (**Σχήμα 2.4**). Τα φαινόμενα της συμβολής συνήθως παρατηρούνται κοντά στο κεντρικό τμήμα της κοιλάδας. Οι χρονοϊστορίες χαρακτηρίζονται από μεγάλη διάρκεια (**Σχήμα 2.5 (α)**). Επίσης, επειδή τα κύματα αυτά είναι διασκορπιζόμενα, οι χρονοϊστορία της κατακόρυφης επιτάχυνσης παρουσιάζει την χαρακτηριστική μορφή του διακροτήματος, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 2.5 (β)**.

2.1.2. Επίδραση μήκους κύματος

Ένας παράγοντας που επηρεάζει την δημιουργία δισδιάστατων φαινομένων στην εδαφική κοιλάδα είναι το μήκος κύματος που αντιστοιχεί στην ταχύτητα διάδοσης των κυμάτων του εδάφους της κοιλάδας για δεδομένη συχνότητα διέγερσης. Μεγάλη ταχύτητα διάδοσης σημαίνει και αντίστοιχα μεγάλο μήκος κύματος για την δεδομένη συχνότητα. Όταν όμως το μήκος κύματος είναι μεγάλο σε σχέση με το πάχος της κοιλάδας, η εισερχόμενη ακτινοβολία παύει να αντιλαμβάνεται την ύπαρξη της κοιλάδας, με αποτέλεσμα τα φαινόμενα που οφείλονται στην δισδιάστατη γεωμετρία της να εκλείπουν. Αντίθετα, όσο πιο μικρό είναι το μήκος κύματος, τόσο πιο ευαίσθητη γίνεται η διέγερση στην γεωμετρία αυτή, με αποτέλεσμα τα φαινόμενα που οφείλονται στην διάθλαση των κυμάτων στην γωνία της κοιλάδας να γίνονται πιο έντονα. Στο **Σχήμα 2.6** γίνεται η παραπάνω σύγκριση για την κατανομή του **συντελεστή επιδείνωσης AG**, δηλαδή του συντελεστή της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης σε κάθε σημείο της κοιλάδας προς την αντίστοιχη ενίσχυση που θα οφειλόταν στην μονοδιάστατη ενίσχυση του εδάφους, καθώς και της **κατακόρυφης επιτάχυνσης της κοιλάδας αδιαστατοποιημένης ως προς την μέγιστη PGA της επιβαλλόμενης διέγερσης**. Παρατηρούμε την σχεδόν μονοδιάστατη απόκριση της επιφάνειας και την πολύ μικρή κατακόρυφη επιτάχυνση στην περίπτωση του μεγάλου μήκους κύματος (V_s

= 200 m/s), σε αντίθεση με την αρκετά σημαντική δισδιάστατη ενίσχυση και κατακόρυφη επιτάχυνση στην περίπτωση του μικρού μήκους κύματος ($V_s = 100$ m/s).

2.1.3. Επίδραση συχνοτικού περιεχομένου της διέγερσης

Επίσης καθοριστική παράμετρος για την απόκριση της εδαφικής κοιλάδας είναι η συχνότητα της εισερχόμενης ακτινοβολίας. Πράγματι, αυτή επηρεάζει το μήκος κύματος για δεδομένη ταχύτητα διάδοσης διατμητικών κυμάτων του εδάφους της κοιλάδας, με αποτέλεσμα, όπως αναλύθηκε παραπάνω, να επηρεάζεται η ευαισθησία της «αντίληψης» της δισδιάστατης γεωμετρίας της κοιλάδας από την προσπίπτουσα ακτινοβολία. Ακόμα, η δημιουργία των κυμάτων Rayleigh και το πλάτος τους εξαρτώνται από την συχνότητα της ακτινοβολίας, με αποτέλεσμα για ορισμένες συχνότητες τα φαινόμενα συμβολής στο κέντρικό τμήμα της κοιλάδας να είναι εντονότερα, όπως για παράδειγμα στην περίπτωση του Ricker 1 στο **Σχήμα 2.7**.

2.1.4. Επίδραση της απόσβεσης

Παρ' όλο που το έδαφος στις παραπάνω περιπτώσεις είναι ελαστικό, παρουσιάζει μια μικρή απόσβεση (Παράγραφος 1.2), η οποία επηρεάζει την απόκριση. Στο **Σχήμα 2.8** συγκρίνονται η απόκριση με $\xi = 2\%$ και η απόκριση για το πλήρως ελαστικό πρόβλημα (με $\xi = 0$) για δύο διεγέρσεις διαφορετικής συχνότητας. Διαπιστώνεται ότι για την διέγερση με Ricker 1 η επίδραση της απόσβεσης είναι αμελητέα. Αυτό αιτιολογείται, καθώς για την δεσπόζουσα συχνότητα της διέγερσης αυτής η τιμή της απόσβεσης για την επιλεγμένη καμπύλη Rayleigh είναι μόλις $\xi = 0.8\%$.

Αντίθετα, στην περίπτωση της διέγερσης Ricker 3, παρατηρείται ότι στην κατανομή του AG, η παρουσία της απόσβεσης εξαλείφει τις δύο «μύτες» που υπάρχουν στο πλήρως ελαστικό πρόβλημα στα $x = \pm 135$ m. Η παρουσία τους και το γεγονός ότι εξαφανίζονται ακόμα και με μικρή παρουσία της απόσβεσης επιχειρείται να ερμηνευτεί στο **Σχήμα 2.9**. Στο **Σχήμα 2.9 (β)** παρουσιάζονται όλες οι πιθανές διαδρομές που υπολογίστηκε ότι μπορεί να ακολουθήσει ένα διαθλώμενο κύμα για να καταλήξει στο $x = -135$ m. Υπολογίστηκε μέσω αυτών, ότι το 1^ο πιθανό κύμα που

θα μπορούσε να συμβάλει με την κυρίως διέγερση είναι το SV κύμα 2, το οποίο όμως φτάνει με καθυστέρηση $\Delta t = 1 \text{ s}$. Δεδομένου ότι το απόλυτο μέγιστο παρουσιάζεται την στιγμή $t = 1.3 \text{ s}$, ο παλμός θα έπρεπε να φτάνει στην βάση της κοιλάδας την $t = 0.3 \text{ s}$, κάτι που δεν ισχύει. Επομένως, η κυρίως διέγερση δεν μπορεί παρά να συμβάλει με κύμα Rayleigh. Πραγματι, στο **Σχήμα 2.9 (γ)** παρουσιάζονται οι χρονοϊστορίες διάφορων σημείων στην κοιλάδα, καθώς και η μονοδιάστατη απόκριση. Αρχικά όλες οι χρονοϊστορίες ταυτίζονται με την μονοδιάστατη, αλλά στην συνέχεια εμφανίζεται μια διαταραχή που ταξιδεύει από το άκρο της κοιλάδας προς το κέντρο. Η ταχύτητα αυτής της διαταραχής υπολογίζεται σε $c = 180 \text{ m/s}$. Η αντίστοιχη ταχύτητα φάσης Rayleigh κυμάτων βρέθηκε από την κατάλληλη καμπύλη διασποράς. Παρόλο που για το εδαφικό προφίλ του προβλήματός μας ισχύει $G_2/G_1 \approx 70$, χρησιμοποιήθηκε η καμπύλη διασποράς του Kanai (1951) για λόγο $G_2/G_1 = 20$ (**Σχήμα 2.9 (δ)**). Για την διέγερση Ricker 3 ισχύει:

$$\lambda/H = (100/4.3)/24 = 1$$

και σύμφωνα με την καμπύλη αυτή προκύπτει $c \approx 110 \text{ m/s}$. Όμως, επειδή ο λόγος G_2/G_1 στην περίπτωση μας είναι αρκετά μεγαλύτερος, η ταχύτητα αναμένεται να είναι και μεγαλύτερη, όπως και είναι.

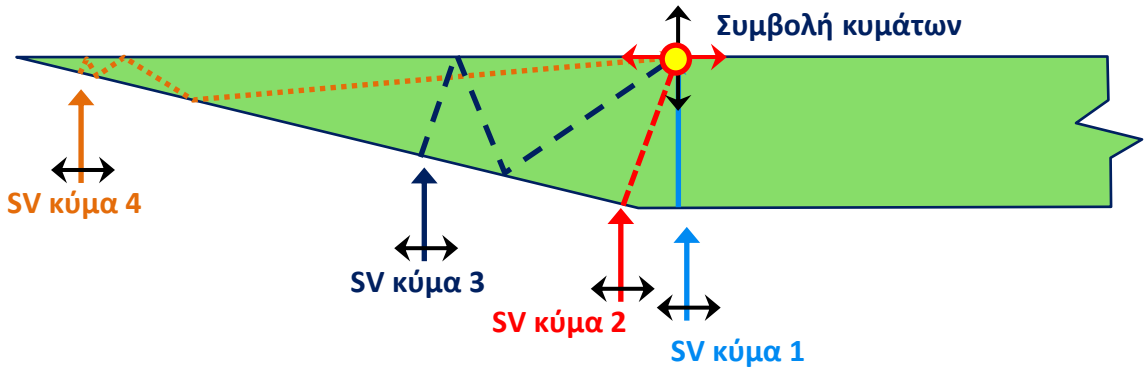
Στην περίπτωση απόσβεσης ίσης με $\xi = 2 \%$, τα επιφανειακά κύματα αποσβαίνονται, καθώς είναι ιδιαίτερα ευαίσθητα στην ύπαρξή της. Έτσι, παύει να υπάρχει το μέγιστο στο σημείο αυτό.

2.2. Ανελαστικό ομοιογενές έδαφος

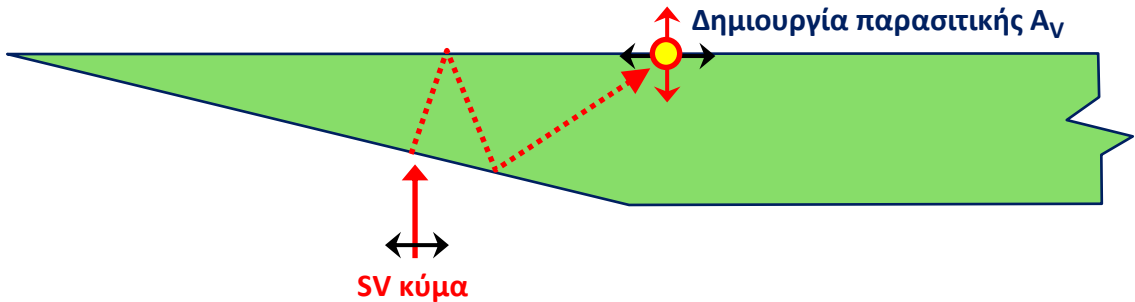
Η ανελαστικότητα του εδάφους έχει πολύ μεγάλη επίδραση στην απόκριση της εδαφικής κοιλάδας. Στις περισσότερες περιπτώσεις, ο ρόλος της είναι ευεγερτικός, καθώς η συνεπαγόμενη ύπαρξη αυξημένης απόσβεσης προκαλεί εξασθένιση της διέγερσης που φτάνει στην επιφάνεια. Επίσης, έχει ως αποτέλεσμα την απόσβεση των κυμάτων Rayleigh, τα οποία πλέον δε φτάνουν στο κέντρο της κοιλάδας και έτσι δε σημειώνονται φαινόμενα συμβολής. Μια τέτοια περίπτωση επίδρασης της ανελαστικότητας είναι για την διέγερση Ricker 1 που παρουσιάζεται στο **Σχήμα 2.10 (α)**.

Αντίθετα, στο **Σχήμα 2.10 (β)** παρουσιάζεται ο ελαφρώς δυσμενής ρόλος της μη-γραμμικότητας στην διέγερση Ricker 0.5. Το αίτιο της μεταβολής της επίδρασης της μη-γραμμικότητας στην διέγερση αυτή είναι το εξής: Καθώς η το έδαφος αρχίζει να εκδηλώνει μη-γραμμική συμπεριφορά, το ενεργό μέτρο διάτμησης του εδάφους μειώνεται και συνεπώς μειώνεται η ενεργός ταχύτητα διάδοσης των διατμητικών κυμάτων. Επομένως για δεδομένη συχνότητα, και το μήκος κύματος της διέγερσης μειώνεται. Έτσι και σύμφωνα με όσα λέχθηκαν στην **Παράγραφο 2.1.2**, η διέγερση γίνεται πιο ευαίσθητη στην γεωμετρία της κοιλάδας, με αποτέλεσμα να εκδηλώνονται φαινόμενα που οφείλονται στην διάθλαση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Ο δυσμενής αυτός ρόλος της μη-γραμμικότητας παρατηρείται κυρίως σε διεγέρσεις, οι οποίες στην περίπτωση ελαστικού εδάφους είχαν μεγάλο μήκος κύματος και δεν ήταν ευαίσθητες στην γεωμετρία της κοιλάδας. Επίσης, στην περίπτωση διεγέρσεων με πολλούς κύκλους, οι πρώτοι κύκλοι δημιουργούν μια ζώνη πλαστικοποίησης. Κατά τους επόμενους κύκλους φόρτισης, τα κύματα “παγιδεύονται” μεταξύ της πλαστικοποιημένης ζώνης και της επιφάνειας του εδάφους, με αποτέλεσμα να προκαλείται επιπλέον ενίσχυση.

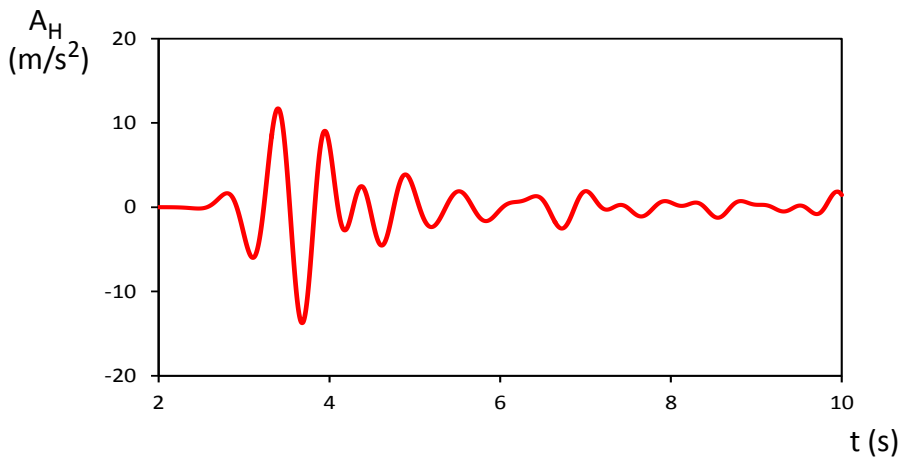
Σχήματα κεφαλαίου **2**



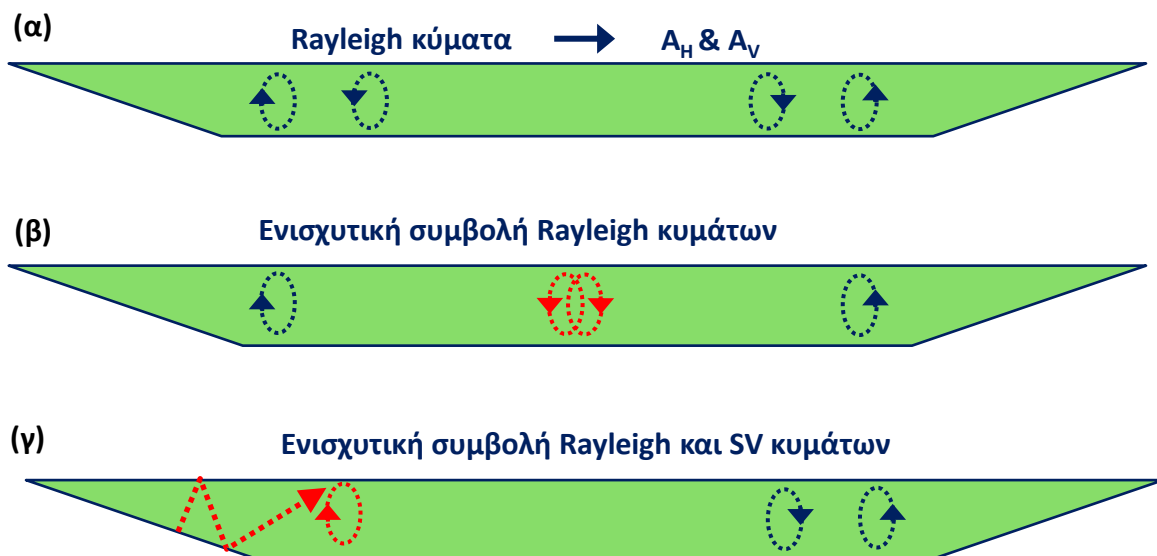
Σχήμα 2.1: Μηχανισμός ενίσχυσης της οριζόντιας επιτάχυνσης λόγω συμβολής των διαθλώμενων κυμάτων στη γωνία της κοιλάδας.



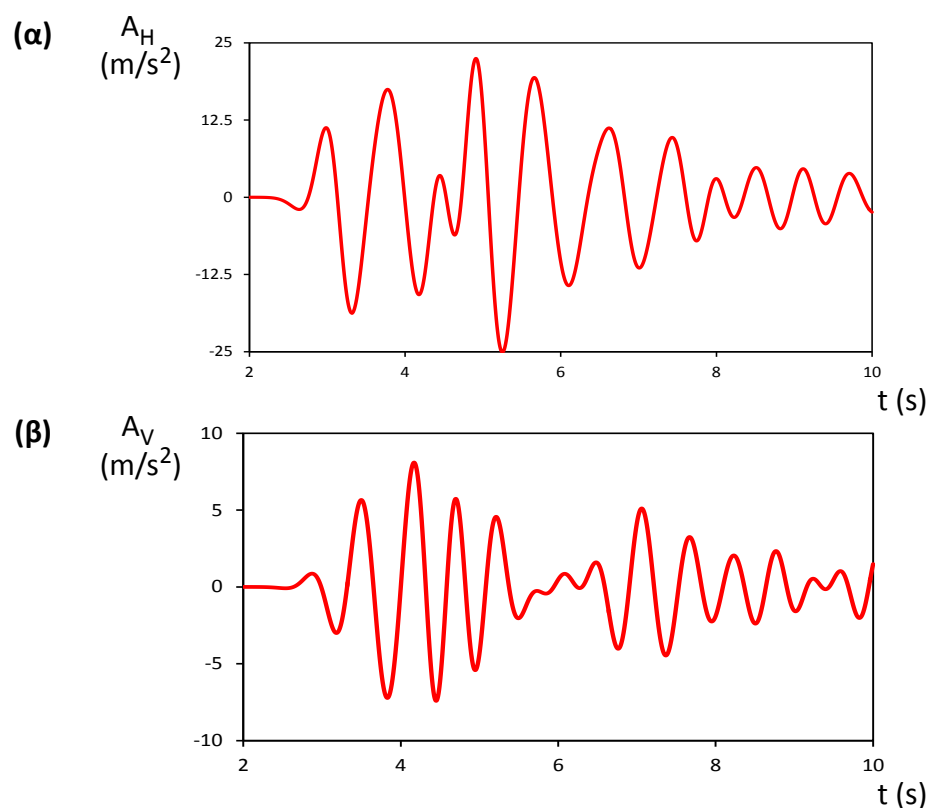
Σχήμα 2.2: Μηχανισμός δημιουργίας παρασιτικής κατακόρυφης επιτάχυνσης λόγω των διαθλώμενων κυμάτων στη γωνία της κοιλάδας.



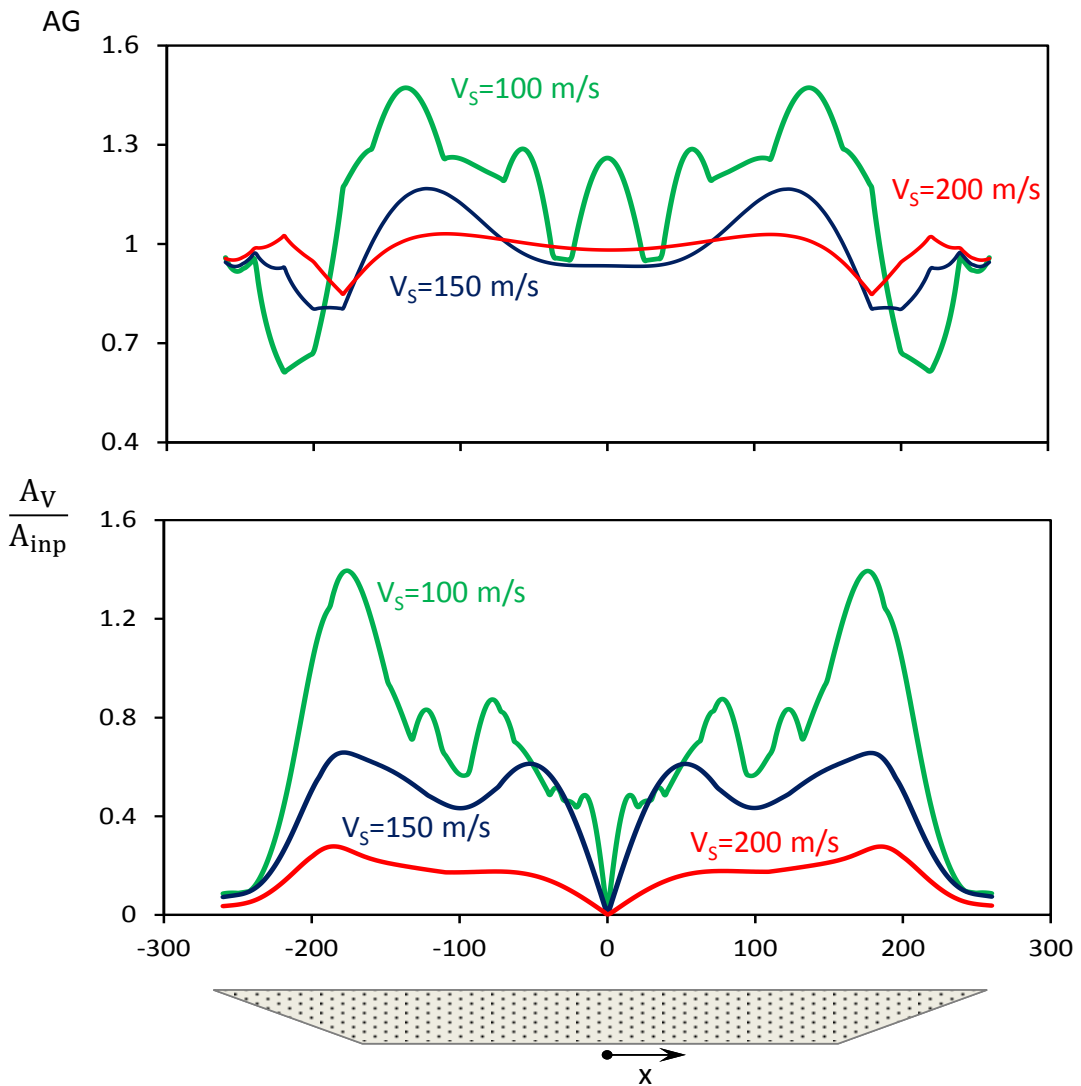
Σχήμα 2.3: Χρονοϊστορία οριζόντιας επιτάχυνσης στην επιφάνεια της κοιλάδας στο $x = 180$ m. Διέγερση Ricker 1, $V_{S, \text{soil}} = 100$ m/s. Ενίσχυση κυρίως παλμού και μικρή διάρκεια απόκρισης.



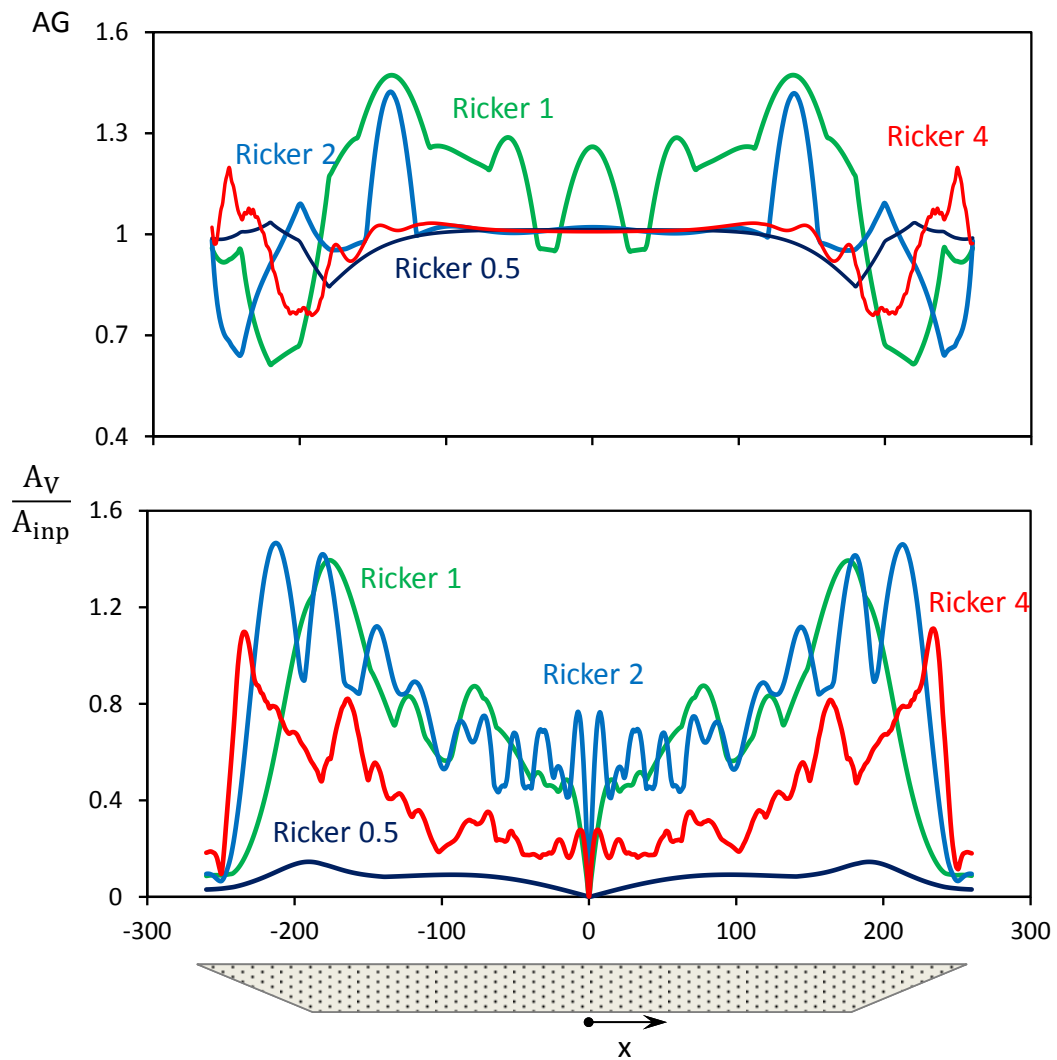
Σχήμα 2.4: Μηχανισμός δημιουργίας οριζόντιας και κατακόρυφης επιτάχυνσης λόγω (α) της ελλειπτικής τροχιάς κίνησης των Rayleigh κυμάτων, (β) της ενισχυτικής συμβολής τους και (γ) της ενισχυτικής συμβολής Rayleigh και SV κυμάτων.



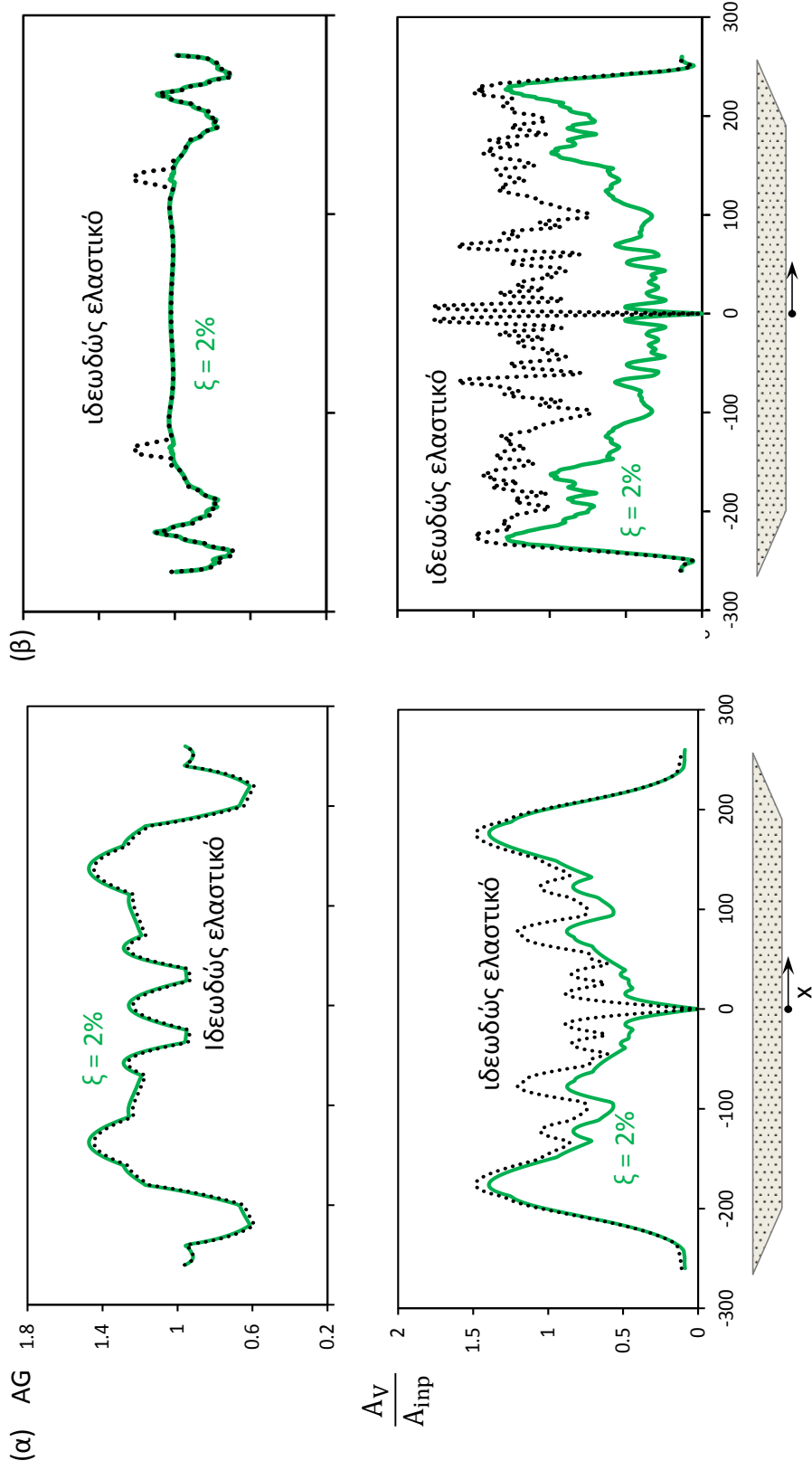
Σχήμα 2.5: Χρονοϊστορίες (α) οριζόντιας επιτάχυνσης στην επιφάνεια της κοιλάδας στο $x = 180$ m και (β) κατακόρυφης επιτάχυνσης στο $x = -140$ m. Διέγερση Ricker 1, $V_{S, \text{soil}} = 100$ m/s. Αύξηση της διάρκειας διέγερσης. Στο (β) διακρίνεται η μορφή του διακροτήματος.



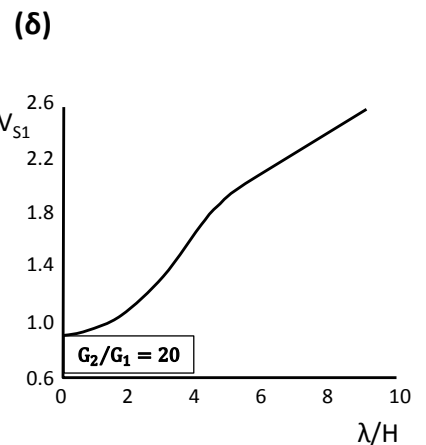
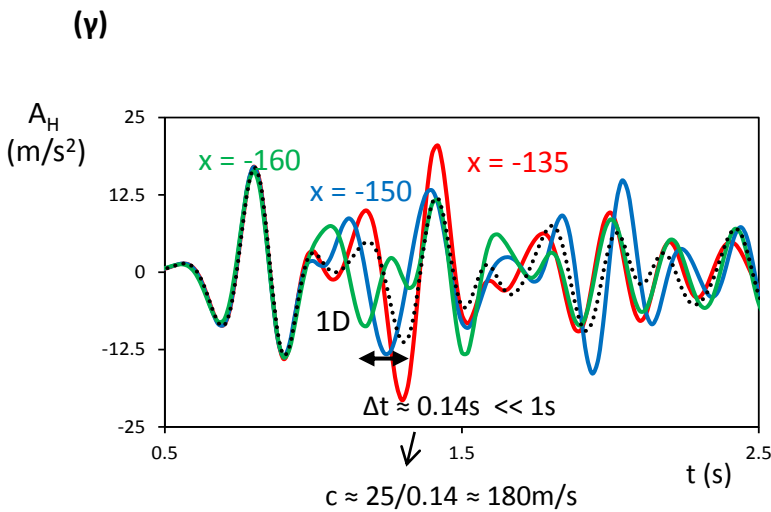
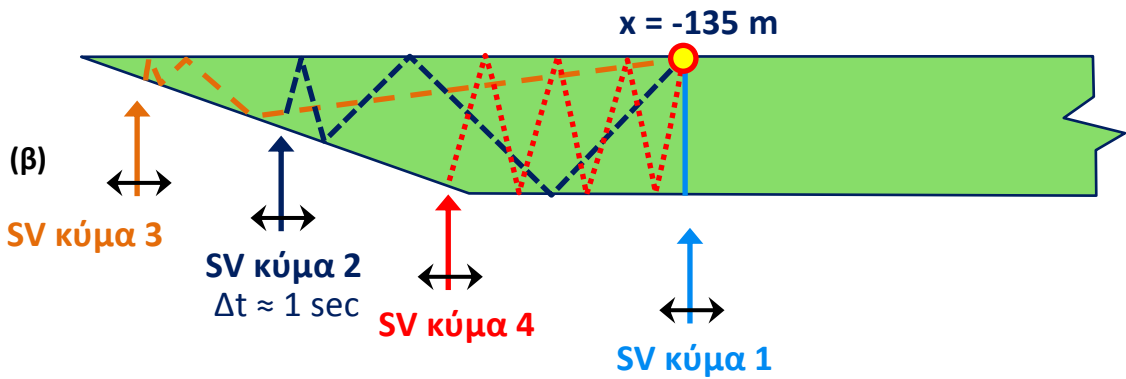
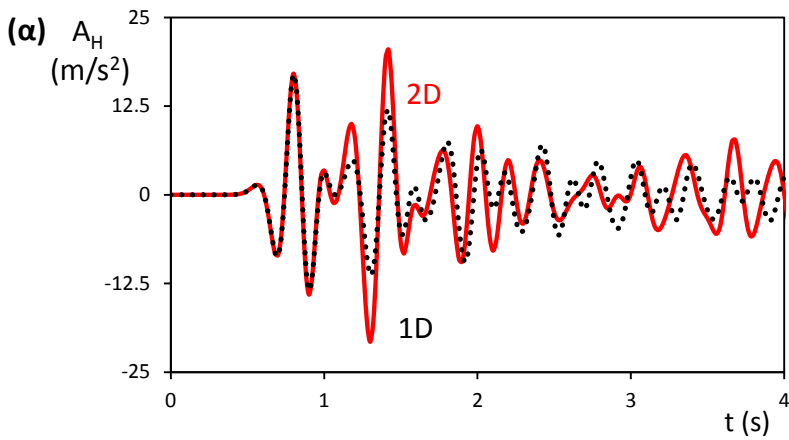
Σχήμα 2.6: Επίδραση της ταχύτητας διάδοσης και άρα του μήκους κύματος των διατμητικών κυμάτων στην ενίσχυση της οριζόντιας διέγερσης και τη δημιουργία κατακόρυφης επιτάχυνσης. Διέγερση: **Ricker 1**, $\xi = 2\%$.



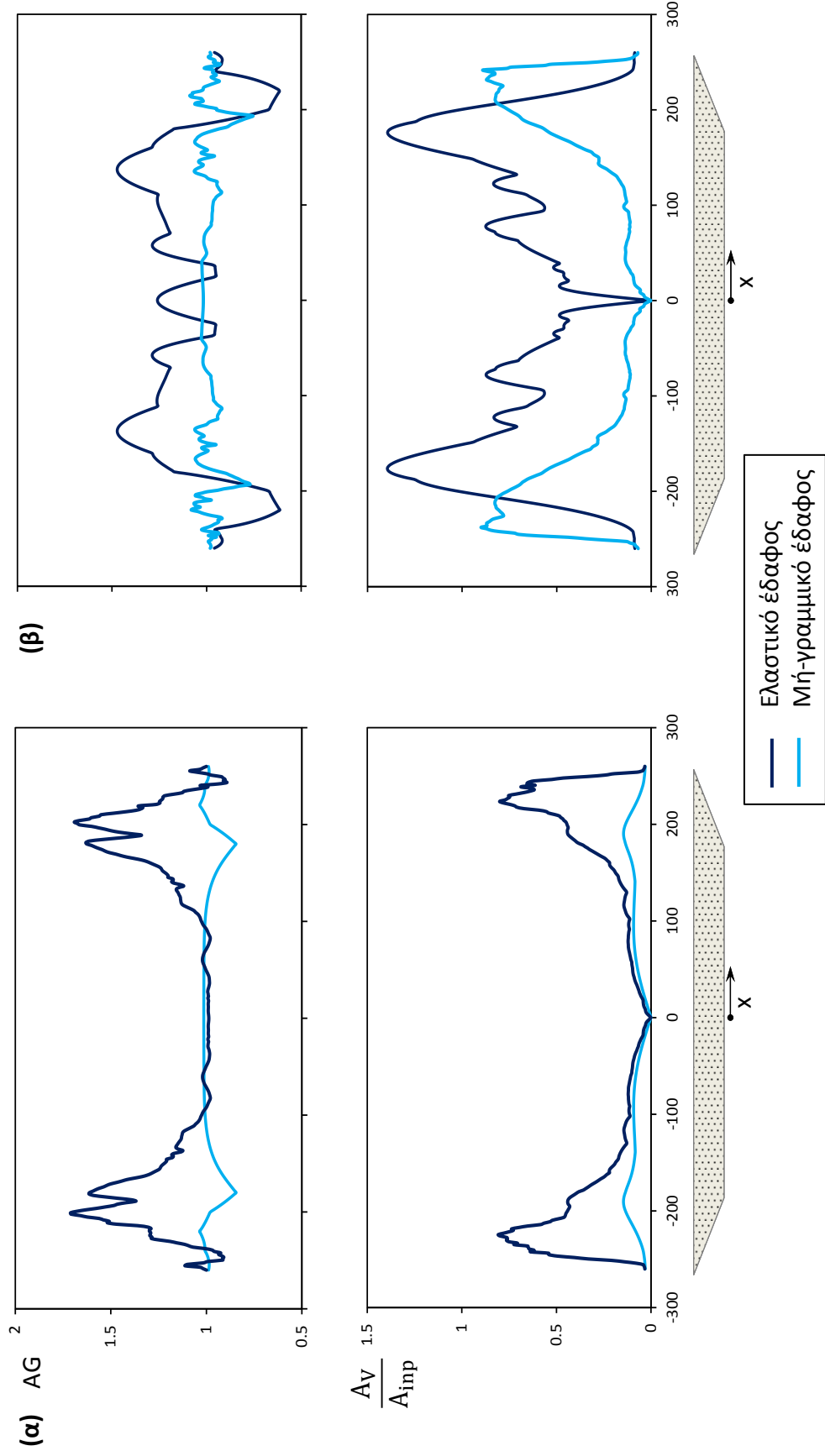
Σχήμα 2.7: Επίδραση της συχνότητας της διέγερσης στην ενίσχυση της οριζόντιας διέγερσης και τη δημιουργία κατακόρυφης επιτάχυνσης. $V_{S, soil}=100 \text{ m/s}^2$, $\xi = 2\%$.



Σχήμα 2.8: Επίδραση της απόσβεσης του εδάφους. $V_{s, soil} = 100 \text{ m/s}^2$. (α) Διέγερση: Ricker 1, (β) Διέγερση: Ricker 3.



Σχήμα 2.9: Ερμηνεία μηχανισμού ενίσχυσης στο σημείο $x = -135$ m στην περίπτωση διέγερσης Ricker 3 πλήρως ελαστικού εδάφους με $V_{S, \text{soil}} = 100$ m/s, $\xi = 2\%$. **(α)** Σύγκριση χρονοϊστοριών οριζόντιας επιτάχυνσης στο $x = -135$ m και της μονοδιάστατης απόκρισης. **(β)** Πιθανές διαδρομές των διαθλώμενων κυμάτων που μπορούν να συμβάλλουν στο σημείο αυτό. **(γ)** Χρονοϊστορίες διαφορετικών σημείων στην επιφάνεια της κοιλάδας και της μονοδιάστατης απόκρισης. Προκύπτει ότι η διαταραχή που συμβάλλει προσθετικά με την κυρίως διέγερση δε γίνεται να είναι διαθλώμενο κύμα. **(δ)** Καμπύλη διασποράς Kanai (1951).



Σχήμα 2.10: Κατανομή της οριζόντιας και της αδιαστατοποιημένης κατακόρυφης επιτάχυνσης για τις διεγέρσεις **(α)** Ricker 0.5 και **(β)** Ricker 1. Έδαφος ομοιογενές με $V_{S, soil} = 100$ m/s. Σύγκριση μεταξύ ελαστικού και μη-γραμμικού εδάφους.

Κεφάλαιο 3

Ελαστικό ανομοιογενές έδαφος

3.1. Γραμμικώς αυξανόμενη ταχύτητα $V_{S,soil}$

Στο κεφάλαιο αυτό αναλύεται η επίδραση της ανομοιογένειας του εδάφους, όταν η ταχύτητα διάδοσης των διατμητικών κυμάτων $V_{S, soil}$ αυξάνεται γραμμικά με το βάθος. Το ανομοιογενές προφίλ που εξετάζεται συγκρίνεται με το ομοιογενές προφίλ που έχει ταχύτητα διάδοσης ίση με την μέση ταχύτητα του ανομοιογενούς, δηλαδή $\bar{V}_{S,soil} = 100 \text{ m/s}$ (Σχήμα 1.3).

Στο Σχήμα 3.1 παρουσιάζεται η επίδραση της συχνότητας της διέγερσης στην απόκριση της επιφάνειας του ανομοιογενούς εδάφους. Παρατηρούνται παρόμοια φαινόμενα με τα αντίστοιχα που αναλύθηκαν στην Παράγραφο 2.1 για το ομοιογενές έδαφος. Δηλαδή, μεγαλοπερίοδες διεγέρσεις, όπως το Ricker 0.5, δεν αντιλαμβάνονται την παρουσία της κοιλάδας και δεν επηρεάζουν την απόκρισή της. Αντίθετα, σημαντική ενίσχυση λόγω των δισδιάστατων φαινομένων στο μεγαλύτερο τμήμα της κοιλάδας παρουσιάζεται στην διέγερση με την ενδιάμεση συχνότητα Ricker 1. Τέλος, στην υψίσυχη διέγερση Ricker 3 παρατηρείται σημαντική ενίσχυση στα άκρα της κοιλάδας, ενώ στο κεντρικό τμήμα η απόκριση είναι ουσιαστικά μονοδιάστατη.

Έπειτα, συγκρίνονται στο Σχήμα 3.2 για τις διεγέρσεις Ricker 1 και Ricker 3 οι κατανομές του AG και της αδιαστατοποιημένης κατακόρυφης επιτάχυνσης για το ομοιογενές και το ανομοιογενές προφίλ, ώστε να κατανοηθεί η επίδραση της ανομοιογένειας του εδάφους. Τα κύρια χαρακτηριστικά που παρατηρούνται στην περίπτωση του ανομοιογενούς προφίλ είναι η σημαντική ενίσχυση της οριζόντιας

επιτάχυνσης στα άκρα της κοιλάδας για την υψίσυχνη διέγερση, καθώς και η μείωση της παρασιτικής κατακόρυφης επιτάχυνσης και για τις δύο διεγέρσεις.

Τα φαινόμενα αυτά ερμηνεύονται με την βοήθεια των Σχημάτων 3.3 και 3.4. Στο Σχήμα 3.3 απεικονίζονται οι τροχιές που διαγράφουν τα κύματα στην περίπτωση κοιλάδας με ανομοιογενές έδαφος. Οι τροχιές δε θα είναι πλέον ευθείες, όπως στην περίπτωση του ομοιογενούς εδάφους, αλλά καμπύλες, καθώς τα κύματα θα υφίστανται διαδοχικές διαθλάσεις με την μείωση της ταχύτητας. Έτσι, όταν φτάνουν κοντά στην επιφάνεια του εδάφους, θα είναι σχεδόν κατακόρυφα, με αποτέλεσμα η παρασιτική κατακόρυφη επιτάχυνση που έδιναν λόγω της κλίσης τους στο ομοιογενές προφίλ να προκύπτει μειωμένη.

Επίσης, καθώς η ταχύτητα αυξάνεται με το βάθος, τα σημεία της κοιλάδας με μικρό βάθος, δηλαδή οι γωνίες της κοιλάδας, χαρακτηρίζονται από μικρή ταχύτητα διάδοσης. Επομένως, τα μήκη κύματος που αντιστοιχούν στις περιοχές αυτές είναι μικρότερα και σύμφωνα και με την Παράγραφο 2.1.2, η διέγερση γίνεται πολύ ευαίσθητη στην γεωμετρία της κοιλάδας, ακόμα και για μια όχι υπερβολικά υψηλή συχνότητα.

Στο Σχήμα 3.5 παρουσιάζονται τα συνθετικά σειсмоγραφήματα για τις παραπάνω διεγέρσεις στο ανομοιογενές προφίλ. Όπως ήταν αναμενόμενο, το Ricker 0.5 δεν αντιλαμβάνεται την κοιλάδα.

Το Ricker 1 αντιλαμβάνεται την γεωμετρία της κοιλάδας και διαδίδεται κατά μήκος της επιφάνειας στην γωνία της κοιλάδας με μια φαινόμενη ταχύτητα, η οποία γραφικά υπολογίστηκε ίση με $C_{\alpha} = 270 \text{ m/s}$. Επίσης, για την διέγερση αυτή προκαλούνται επιφανειακά κύματα, τα οποία διαδίδονται προς το μέσον της κοιλάδας, όπου συμβάλλουν. Η φασική τους ταχύτητα προκύπτει γραφικά αρχικά περίπου ίση με $c = 200 \text{ m/s}$ και στην συνέχεια μειωμένη $c = 170 \text{ m/s}$, ενώ η ομαδική περίπου $u = 70 \text{ m/s}$. Τα αποτελέσματα αυτά θα αναλυθούν περισσότερο στην επόμενη παράγραφο. Αξίζει ωστόσο να σημειωθεί, ότι φτάνουν στο κέντρο της κοιλάδας περίπου την $t = 7 \text{ s}$ και επομένως αυξάνουν την διάρκεια της διέγερσης.

Τέλος, το **Ricker 3** φαίνεται να αντιλαμβάνεται πλήρως την γεωμετρία της κοιλάδας, καθώς φαίνεται καθαρά η μονοδιάστατη απόκριση του κεντρικού της τμήματος και η διάθλαση της ακτινοβολίας στα άκρα της. Επίσης καθαρά φαίνεται και η διάδοση κυμάτων Rayleigh με ταχύτητα γραφικά υπολογισμένη ίση με **$c = 75 \text{ m/s}$** . Τα κύματα αυτά έχουν μικρό πλάτος και για το λόγο αυτό δεν επηρεάζουν ουσιαστικά την απόκριση της κοιλάδας.

Στο **Σχήμα 3.6** φαίνονται μερικές χαρακτηριστικές χρονοϊστορίες επιταχύνσεων για το ανομοιογενές προφίλ. Οι χρονοϊστορίες (α) έως (γ) αφορούν την διέγερση Ricker 1. Αξιοσημείωτο είναι ότι ήδη για $x = -160 \text{ m}$ διακρίνεται η χαρακτηριστική μορφή του διακροτήματος των Rayleigh κυμάτων και παρατηρείται αυξημένη διάρκεια της διέγερσης. Αυτό φαίνεται καθαρά ιδιαίτερα στο σχήμα (γ), όπου από τις επιταχύνσεις έχει αφαιρεθεί η συνιστώσα που θα προέκυπτε από την μονοδιάστατη ενίσχυση και επομένως έχουν απομονωθεί τα δισδιάστατα φαινόμενα. Σε αυτό το διάγραμμα έχουν σχεδιαστεί οι περιβάλλουσες της κάθε ομάδας. Η ομαδική ταχύτητα υπολογίζεται έτσι ίση με την ταχύτητα με την οποία κινείται η ομάδα και η οποία είναι:

$$u = \Delta u / \Delta t = (160 - 100) / 0.9 = 67 \text{ m/s}$$

δηλαδή πρακτικά ίση με αυτή που υπολογίστηκε παραπάνω από το συνθετικό σειсмоγράφημα. Επίσης, στο σχήμα αυτό φαίνεται ότι στο κέντρο της κοιλάδας η επιτάχυνση λόγω των δισδιάστατων φαινομένων έχει διπλάσια μέγιστη τιμή από ότι τα πιο απομακρυσμένα σημεία, στο καθένα από τα οποία υπάρχουν μάλιστα δύο ομάδες κυμάτων. Αυτό είναι ενδεικτικό του ότι στο κέντρο συμβάλλουν τα κύματα που διαδίδονται από τα άκρα της κοιλάδας, με αποτέλεσμα να διπλασιάζεται το μέγιστο. Κατόπιν συνεχίζουν να διαδίδονται προς το άλλο άκρο της κοιλάδας, με λίγο μειωμένο πλάτος. Έτσι προκύπτει η δεύτερη ομάδα που παρατηρείται σε κάθε χρονοϊστορία του σχήματος.

Στο **Σχήμα 3.6 (δ)** απεικονίζεται η χρονοϊστορία της επιτάχυνσης στο σημείο της μέγιστης ενίσχυσης για την διέγερση Ricker 3. Όπως φαίνεται, η ενίσχυση πραγματοποιείται στην αρχή της χρονοϊστορίας και οφείλεται σε συμβολή με τον κυρίως παλμό, ενώ δεν παρατηρείται αυξημένη διάρκεια της διέγερσης.

Τέλος, στο **Σχήμα 3.7** παρουσιάζονται ορισμένα φάσματα οριζόντιας και κατακόρυφης επιτάχυνσης για ομοιογενές και ανομοιογενές προφίλ και για διέγερση Ricker 1. Οι φασματικές οριζόντιες επιταχύνσεις είναι μεγαλύτερες στο ανομοιογενές προφίλ, ενώ οι κατακόρυφες είναι μικρότερες. Επίσης, στα σημεία που είναι κοντά στο κέντρο της κοιλάδας παρατηρείται μια κορυφή σε σχετικά μεγάλες περιόδους.

Σεισμικές καταγραφές

Στα **Σχήματα 3.8 έως 3.10** συγκρίνονται τα διαγράμματα των συντελεστών τοπογραφικής ενίσχυσης και των αδιαστατοποιημένων κατακόρυφων μετακινήσεων μεταξύ των δύο εδαφικών προφίλ για έξι σεισμικές καταγραφές.

Μείωση της κατακόρυφης επιτάχυνσης σύμφωνα με τα παραπάνω παρατηρείται στις σεισμικές διεγέρσεις Lefkada 2003, JMA 000, Rinaldi 228 και Jensen 292. Στην περίπτωση της υψίσυχνης διέγερσης Lucerne 275, παρατηρείται αύξηση της τιμής της κατακόρυφης επιτάχυνσης και υψηλή ενίσχυση στα άκρα της κοιλάδας, αντίστοιχα με την περίπτωση του Ricker 3.

Όσον αφορά στην τοπογραφική ενίσχυση του κεντρικού τμήματος της κοιλάδας, τα αποτελέσματα αποκλίνουν ιδιαίτερα μεταξύ τους. Έτσι, για την διέγερση JMA 000 παρατηρείται σημαντική ενίσχυση στην περίπτωση του ανομοιογενούς εδάφους, ενώ για την Rinaldi 228, παρατηρείται πολύ μειωμένη ενίσχυση σε σχέση με αυτήν του ομοιογενούς προβλήματος. Ιδιαίτερα το τελευταίο είναι αρκετά παράδοξο, καθώς η διέγερση Rinaldi έχει αντίστοιχο συχνοτικό περιεχόμενο με το Ricker 1, για το οποίο η συμπεριφορά στο κέντρο της κοιλάδας στο ανομοιογενές πρόβλημα ήταν αρκετά αυξημένη. Συμπεραίνεται λοιπόν η επίδραση της ανομοιογένειας του εδάφους στην απόκριση της κοιλάδας εξαρτάται ιδιαίτερα από τις λεπτομέρειες της φόρτισης.

3.2. Επίδραση της κατανομής της $V_{S,soil}$

Στην παράγραφο αυτή θα εξεταστεί η συμπεριφορά ορισμένων διαφορετικών ανομοιογενών προφίλ. Η κατανομή της ταχύτητας των διατμητικών κυμάτων για τα προφίλ αυτά φαίνεται στο **Σχήμα 1.3**.

Στο **Σχήμα 3.11** συγκρίνονται οι κατανομές του συντελεστή επιδείνωσης AG και της αδιαστατοποιημένης κατακόρυφης επιτάχυνσης για τα διαφορετικά εδαφικά προφίλ, όταν η διέγερση είναι Ricker 1. Όσον αφορά στην κατανομή του AG, τα διαγράμματα παρουσιάζουν παρόμοια μορφή. Η βασική διαφορά που παρουσιάζουν τα διαγράμματα είναι στο κέντρο της κοιλάδας. Όλα τα ανομοιογενή προφίλ παρουσιάζουν μεγαλύτερη ενίσχυση από το ομοιογενές, ενώ την μέγιστη παρουσιάζει το παραβολικό. Επίσης, παρατηρείται ότι το παραβολικό και το ομοιογενές προφίλ έχουν παρόμοια συμπεριφορά και η ενίσχυση που παρουσιάζουν είναι πιο έντονη προς τα άκρα της κοιλάδας, από ότι στο υπερβολικό και στο γραμμικώς αυξανόμενο προφίλ.

Η ανομοιογένεια του εδάφους φαίνεται να προκαλεί μείωση της κατακόρυφης επιτάχυνσης ανεξάρτητα από τον τύπο της κατανομής, όπως φαίνεται από το δεύτερο διάγραμμα του **Σχήματος 3.11**. Η κατακόρυφη επιτάχυνση για όλα τα ανομοιογενή προφίλ, είναι μόνο της τάξης του **60%** του πλάτους της διέγερσης, σε αντίθεση με το ομοιογενές που έφτανε το **150%**. Το γεγονός αυτό ερμηνεύτηκε λόγω των διαδοχικών διαθλάσεων στην προηγούμενη παράγραφο.

Στο **Σχήμα 3.12** φαίνονται τα συνθετικά σειсмоγραφήματα των οριζόντιων επιταχύνσεων για τα παραπάνω προφίλ και διέγερση Ricker 1.

Στο **ομοιογενές προφίλ** η διαταραχή διαδίδεται κατά μήκος της επιφάνειας στην γωνία της κοιλάδας με μια φαινόμενη ταχύτητα, η οποία ορίζεται ως η ταχύτητα με την οποία αντιλαμβάνεται την διάδοση του κύματος στην επιφάνεια της κοιλάδας ένας παρατηρητής. Για το ομοιογενές προφίλ η ταχύτητα αυτή υπολογίζεται ίση με:

$$C_{\alpha} = V_S / \sin\psi = 100 / \sin 17^{\circ} \approx 350 \text{ m/s}$$

όπου $\psi = 17^\circ$ η γωνία της κοιλάδας,

και γραφικά υπολογίζεται στο **Σχήμα 3.12 (α)** ίση με $c_\alpha = 325 \text{ m/s}$, δηλαδή παραπλήσια με αυτή που υπολογίστηκε.

Επίσης, στο διάγραμμα φαίνεται καθαρά η δημιουργία και διάδοση των Rayleigh κυμάτων, με ομαδική ταχύτητα που προκύπτει γραφικά ίση με $u = 170 \text{ m/s}$ και ταχύτητα φάσης $c = 230 \text{ m/s}$. Και εδώ η σύγκριση έγινε με την καμπύλη διασποράς του Kanai (1951) για λόγο $G_2/G_1 = 20$ (**Σχήμα 2.9 (δ)**), παρ'όλο που για το εδαφικό προφίλ του προβλήματός μας ισχύει $G_2/G_1 \approx 70$. Για την διέγερση του Ricker 1 ισχύει:

$$\lambda/H = (100/1.4)/24 = 3$$

και επομένως προκύπτει $c \approx 130 \text{ m/s}$. Όμως, επειδή ο λόγος G_2/G_1 στην περίπτωση μας είναι αρκετά μεγαλύτερος, η ταχύτητα είναι λογικό να έχει προκύψει μεγαλύτερη.

Αντίθετα, στο εδαφικό προφίλ με την **γραμμικώς αυξανόμενη ταχύτητα** το Ricker 1 διαδίδεται στην επιφάνεια της γωνίας της κοιλάδας με φαινόμενη ταχύτητα, η οποία δεν είναι σταθερή, καθώς η ταχύτητα των διατμητικών κυμάτων μεταβάλλεται. Επίσης, η τροχιά των κυμάτων είναι καμπύλη και όχι ευθεία πλέον, οπότε η παραπάνω σχέση με την οποία υπολογίστηκε η φαινόμενη ταχύτητα για το ομοιογενές προφίλ δεν ισχύει. **Γραφικά** η μέση τιμή της υπολογίστηκε από το **Σχήμα 3.12 (β)** ίση με $C_\alpha = 270 \text{ m/s}$, δηλαδή μικρότερη από ότι προέκυψε για το ομοιογενές προφίλ. Το γεγονός αυτό είναι λογικό, γιατί ενώ τα δύο προφίλ έχουν ίδια μέση ταχύτητα, η διαδρομή που διανύει η προσπίπτουσα ακτινοβολία στο ανομοιογενές είναι μεγαλύτερη, καθώς οι τροχιές των κυμάτων είναι καμπύλες και όχι ευθείες όπως στο ανομοιογενές.

Ακόμα, στο συνθετικό σειсмоγράφημα για την διέγερση Ricker 1 φαίνεται η δημιουργία και η διάδοση επιφανειακών Rayleigh κυμάτων, τα οποία διαδίδονται

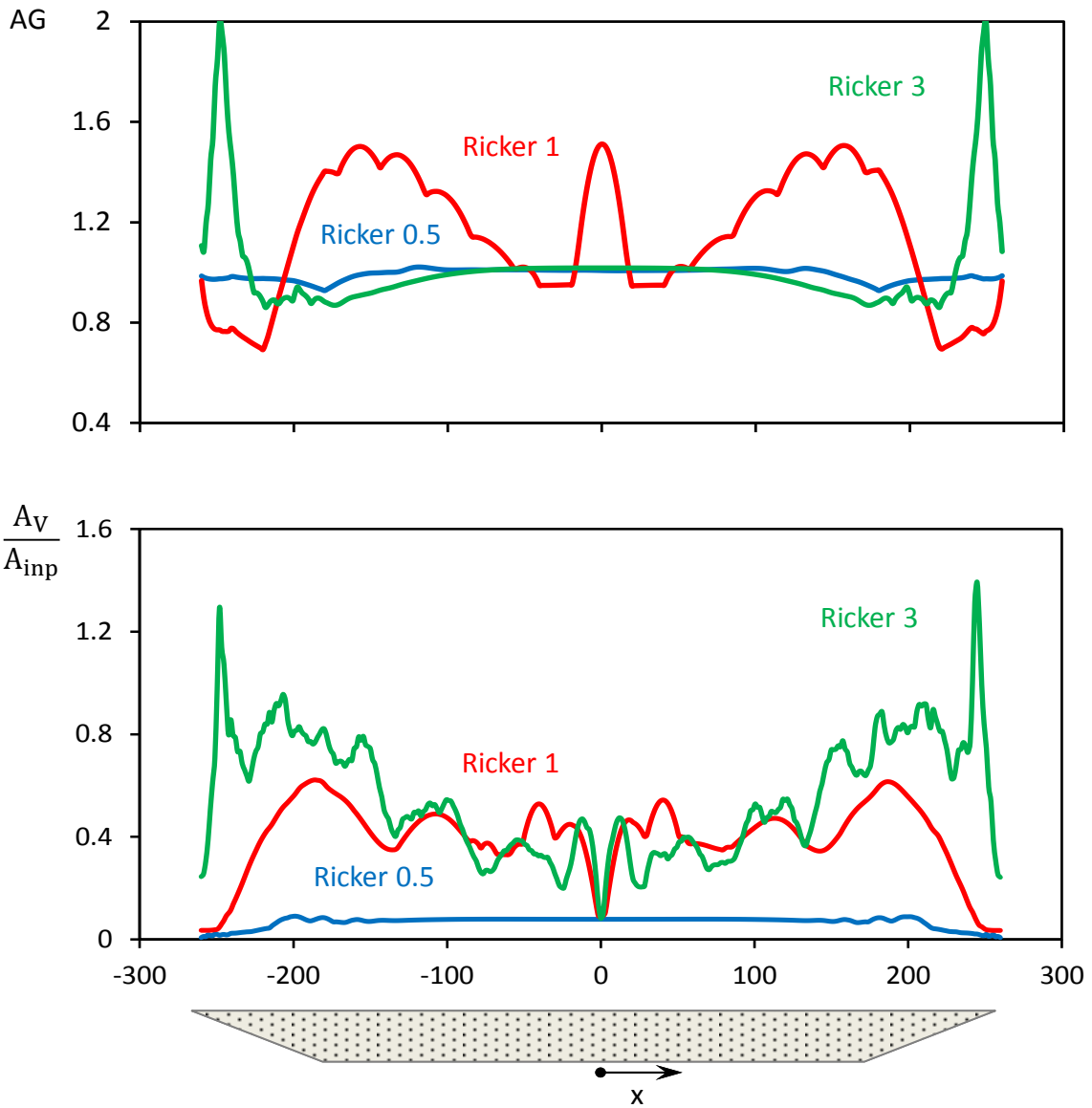
από τα άκρα στο κέντρο της κοιλάδας, όπου συμβάλλουν μεταξύ τους. Τα επιφανειακά κύματα φαίνονται πολύ πιο καθαρά στο ανομοιογενές από ότι στο ομοιογενές προφίλ, για αυτό προκαλούν την μεγάλη ενίσχυση που φαίνεται και στο **Σχήμα 3.2** στο κέντρο της κοιλάδας. Η ταχύτητα φάσης με την οποία διαδίδονται αυτά αρχικά υπολογίζεται γραφικά ίση με $c = 300 \text{ m/s}$ δηλαδή παραπλήσια με του ομοιογενούς προφίλ. Αντίθετα, η ομαδική ταχύτητα των κυμάτων προκύπτει $u = 70 \text{ m/s}$, όπως αναλύθηκε στην προηγούμενη παράγραφο, δηλαδή σημαντικά μικρότερη από την αντίστοιχη του ομοιογενούς προφίλ.

Στο παραβολικό προφίλ, το οποίο είναι μια ενδιάμεση κατάσταση μεταξύ του ομοιογενούς και του προφίλ με την γραμμικώς αυξανόμενη ταχύτητα, οι τιμές των ταχυτήτων που έχουν προκύψει, όπως φαίνονται στο **Σχήμα 3.12 (γ)** είναι ενδιάμεσες μεταξύ των δύο άλλων προφίλ. Αντίθετα, το υπερβολικό προφίλ δε διαφέρει πολύ από το γραμμικώς αυξανόμενο, με αποτέλεσμα τα συνθετικά σειсмоγραφήματα για τα δύο προφίλ να είναι σχεδόν πανομοιότυπα (**Σχήματα 3.12 (β) και (δ)**).

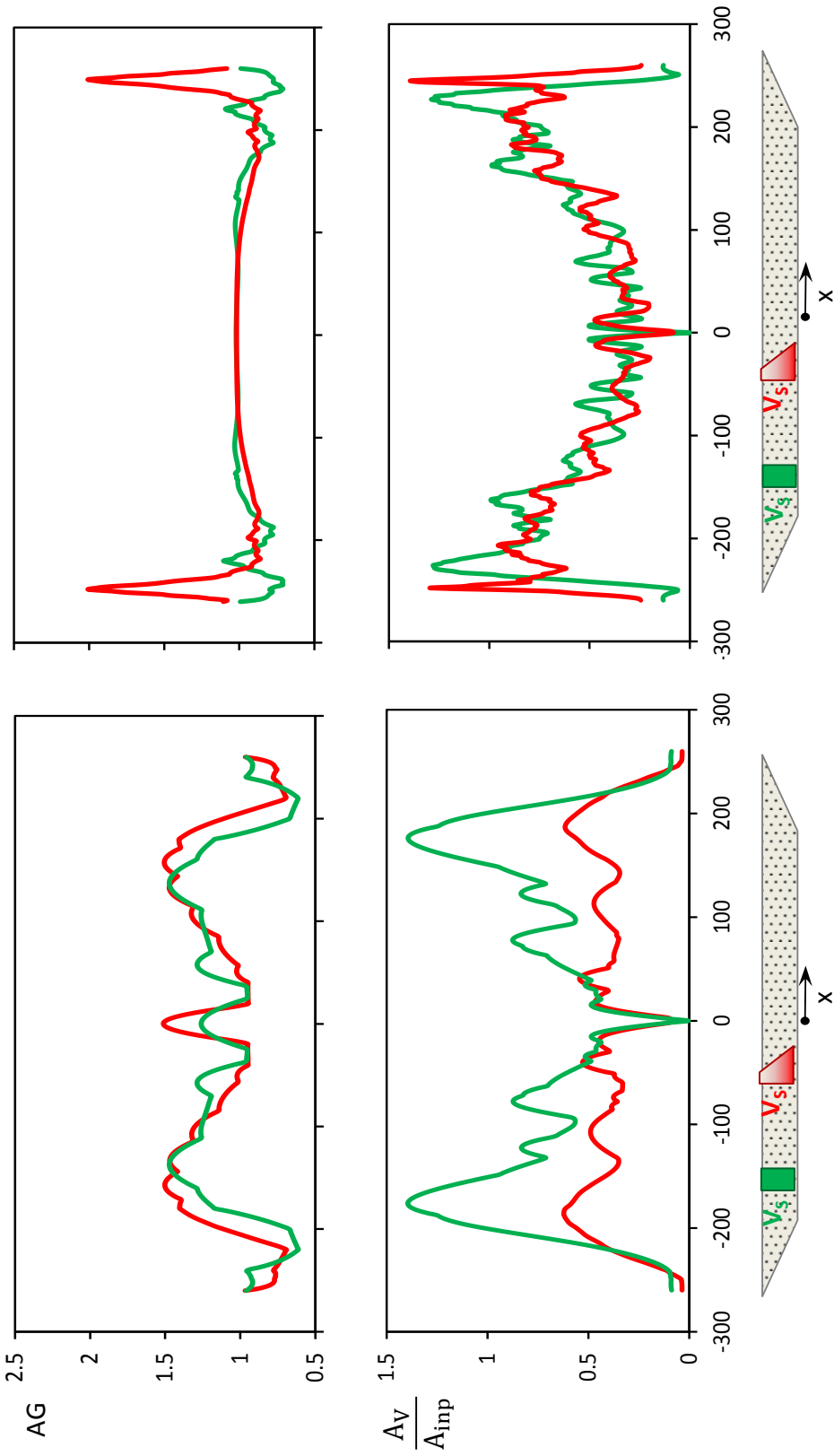
Παρόμοια συμπεράσματα προκύπτουν και από τα συνθετικά σειсмоγραφήματα κατακόρυφων επιταχύνσεων του **Σχήματος 3.13**. Οι τιμές των ταχυτήτων έχουν προκύψει λίγο διαφορετικές από αυτές στα σειсмоγραφήματα των οριζόντιων επιταχύνσεων, αλλά αυτό μπορεί να οφείλεται στην ανακρίβεια της γραφικής μεθόδου. Παρ'όλ'αυτά, εξακολουθεί να ισχύει ότι η μεγαλύτερη ταχύτητα διάδοσης παρουσιάζεται στο ομοιογενές προφίλ, ενώ οι μικρότερες στο υπερβολικό και στο προφίλ με την γραμμικώς αυξανόμενη ταχύτητα. Στα δύο αυτά προφίλ οι ταχύτητες είναι περίπου ίσες. Τέλος, οι ταχύτητες που προκύπτουν για το παραβολικό προφίλ παίρνουν ενδιάμεσες τιμές.

Τέλος, στο **Σχήμα 3.14** παρουσιάζονται τα διανύσματα επιταχύνσεων για το ανομοιογενές προφίλ με την γραμμικώς αυξανόμενη ταχύτητα σε δύο χρονικές στιγμές. Σε αυτά διακρίνεται η χαρακτηριστική ελλειπτική κίνηση των κυμάτων Rayleigh.

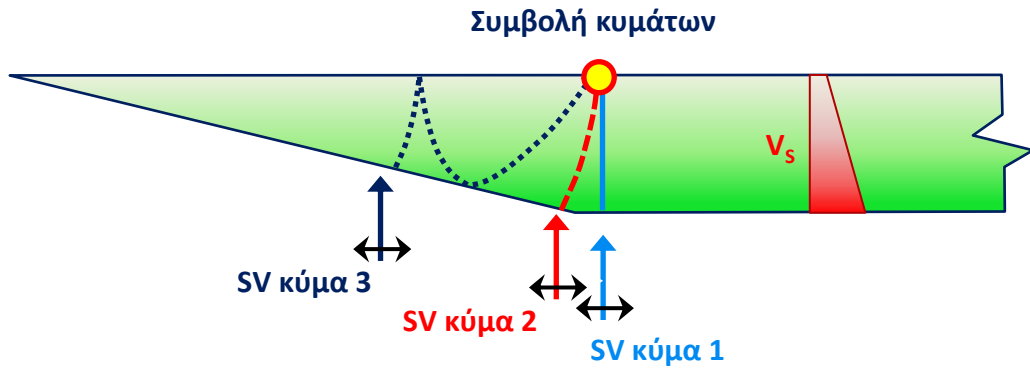
Σχήματα κεφαλαίου 3



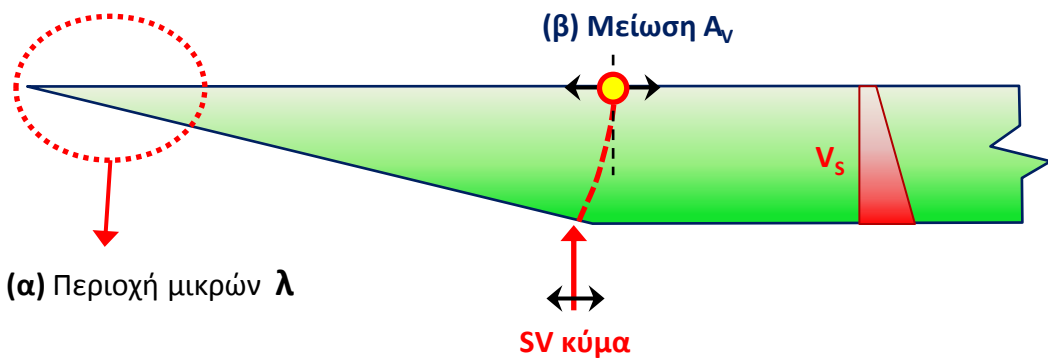
Σχήμα 3.1: Επίδραση της συχνότητας της διέγερσης στην ενίσχυση της οριζόντιας και τη δημιουργία της κατακόρυφης επιτάχυνσης στην περίπτωση ανομοιογενούς εδάφους με γραμμικώς αυξανόμενη V_s και $\tilde{V}_{s, soil} = 100$ m/s, $\xi = 2\%$.



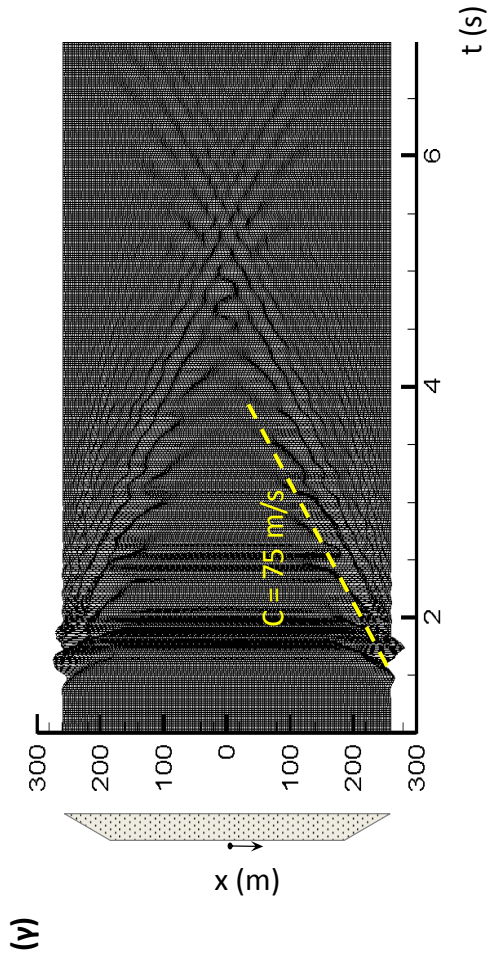
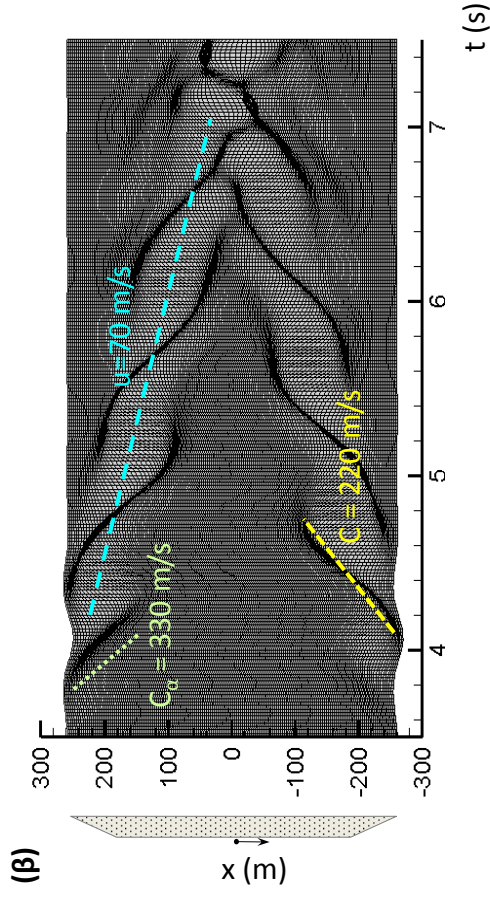
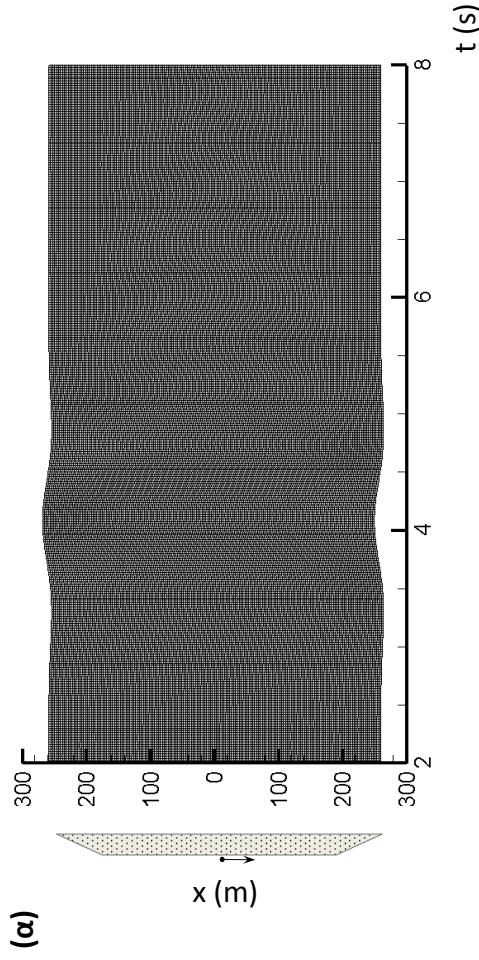
Σχήμα 3-2: Επίδραση της ανομοιογένειας του εδάφους για **(α)** Διέγερση: Ricker 1, **(β)** Διέγερση: Ricker 3. Ομοιογενές εδαφικό προφίλ: $V_{s, soil} = 100$ m/s². Ανομοιογενές γραμμικό προφίλ: Γραμμικώς αυξανόμενη V_s και $\tilde{V}_{s, soil} = 100$ m/s.



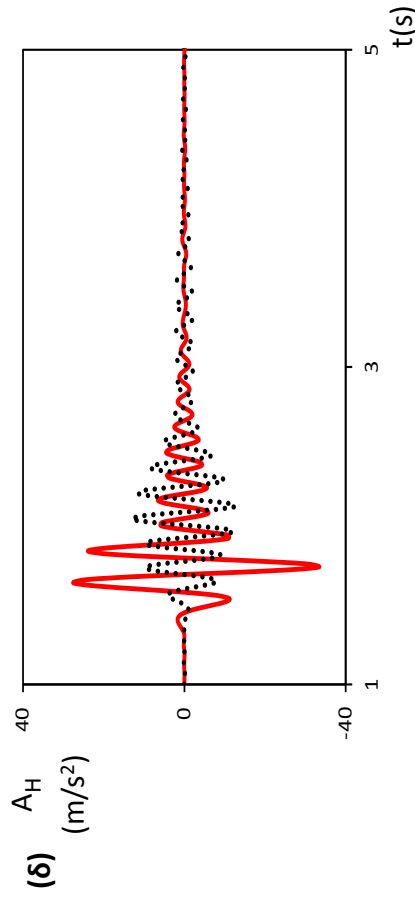
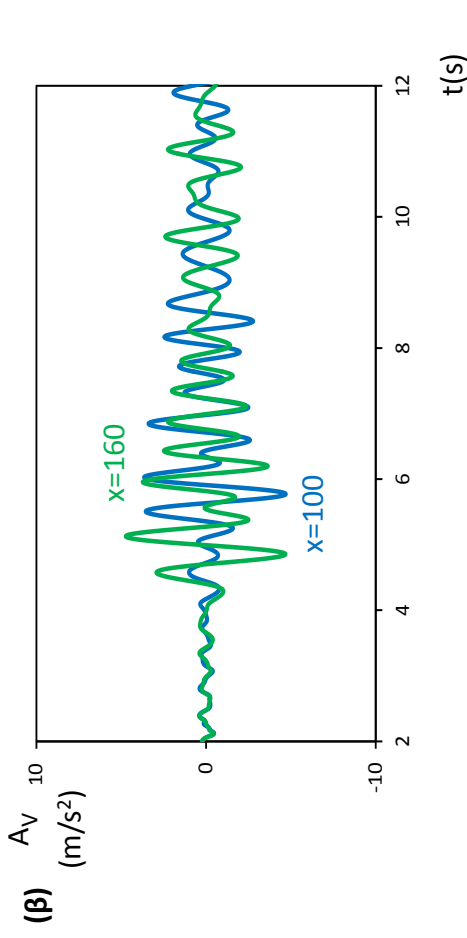
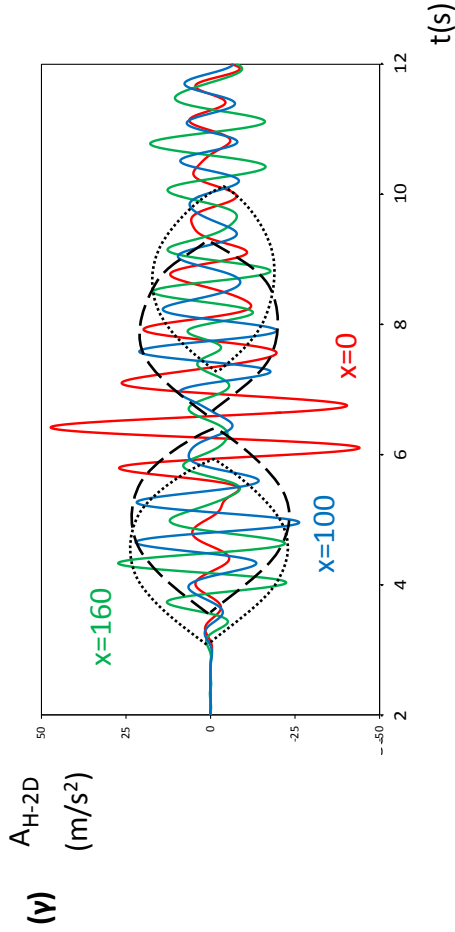
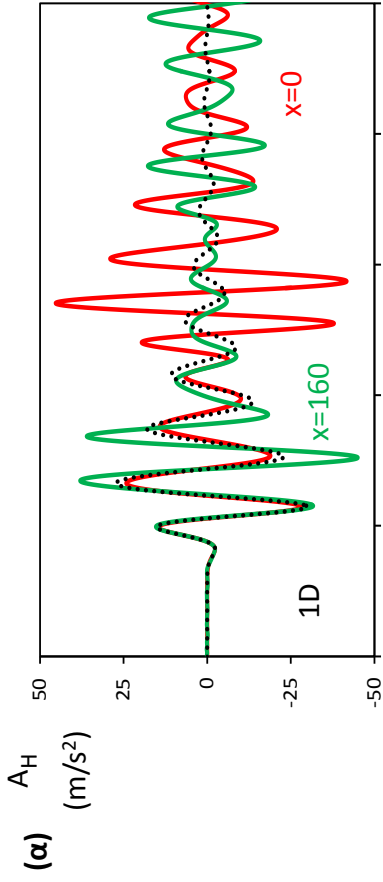
Σχήμα 3.3: Στο ανομοιογενές εδαφικό προφίλ με γραμμικώς αυξανόμενη V_s , τα κύματα διαθλώνται από συνεχώς, καθώς ανεβαίνουν στα ψηλότερα τμήματα του εδάφους, με αποτέλεσμα οι τροχιές που διαγράφουν να είναι παραβολικές.



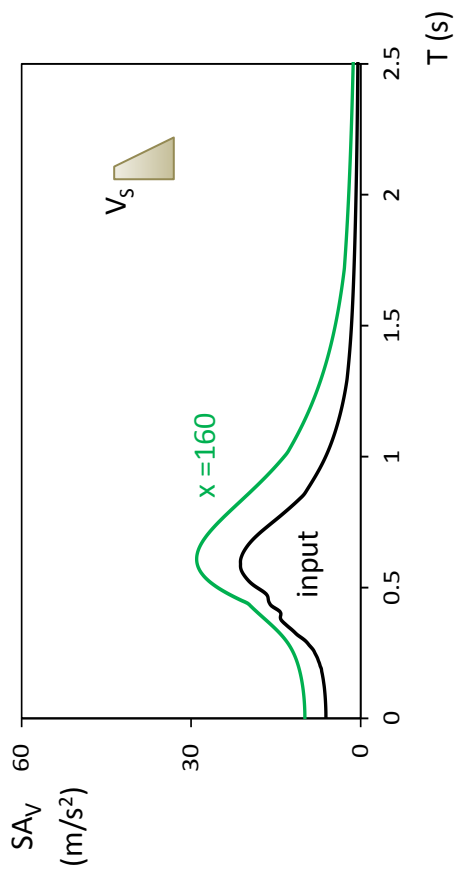
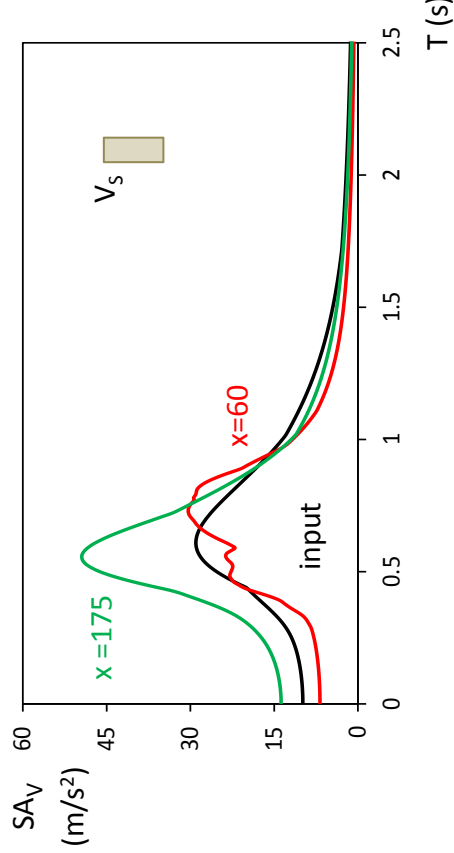
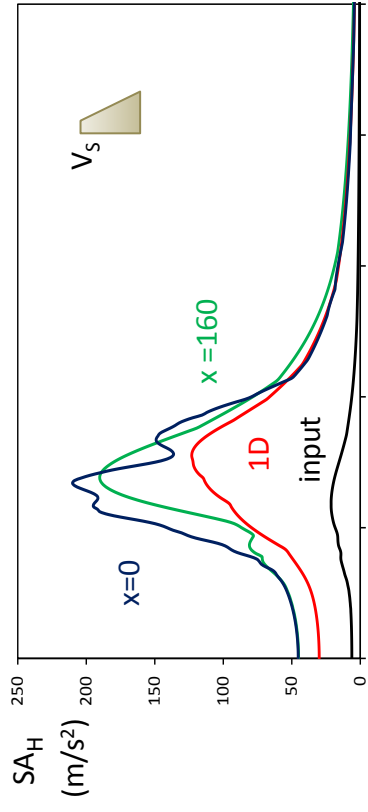
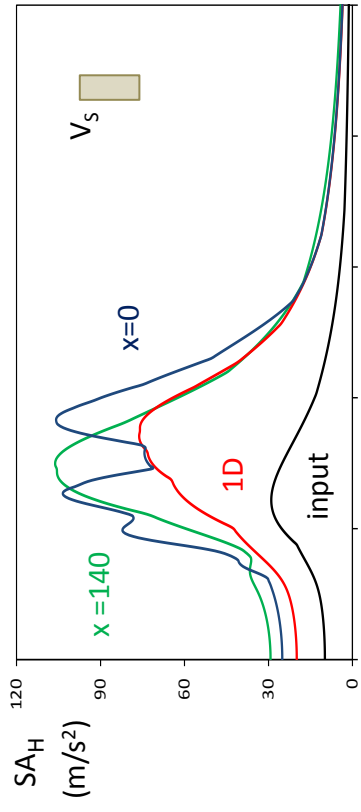
Σχήμα 3.4: (α) Λόγω της ανομοιογένειας του εδάφους, η **γωνία της κοιλιάδας** παρουσιάζει μικρή διατμητική ταχύτητα και επομένως **μικρό λ** και συνεπώς είναι περισσότερο ευαίσθητη στη διάθλαση. (β) Οι διαδοχικές διαθλάσεις έχουν ως αποτέλεσμα η τροχιά του κύματος κοντά στην επιφάνεια να γίνεται σχεδόν κατακόρυφη και επομένως να **προκαλεί μειωμένη κατακόρυφη επιτάχυνση**.



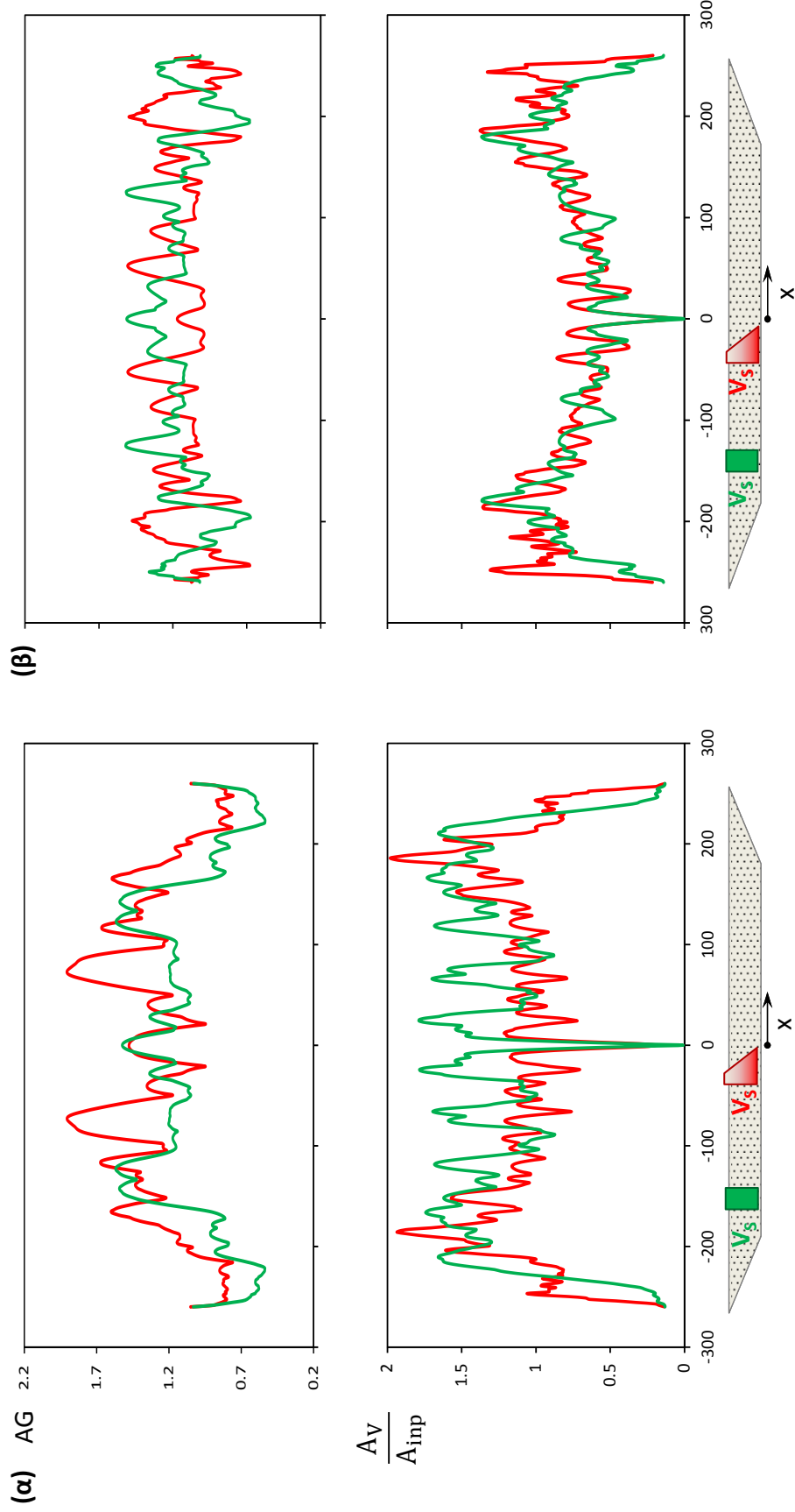
Σχήμα 3.5: Συνθετικά σεισμογραφήματα οριζόντιων επιταχύνσεων για ανομοιογές γραμμικό προφίλ με γραμμικώς αυξανόμενη V_s και $\dot{V}_{s, \text{soil}} = 100 \text{ m/s}$. (α) Διέγερση: **Ricker 0.5**, (β) Διέγερση: **Ricker 1**, (γ) Διέγερση: **Ricker 3**.



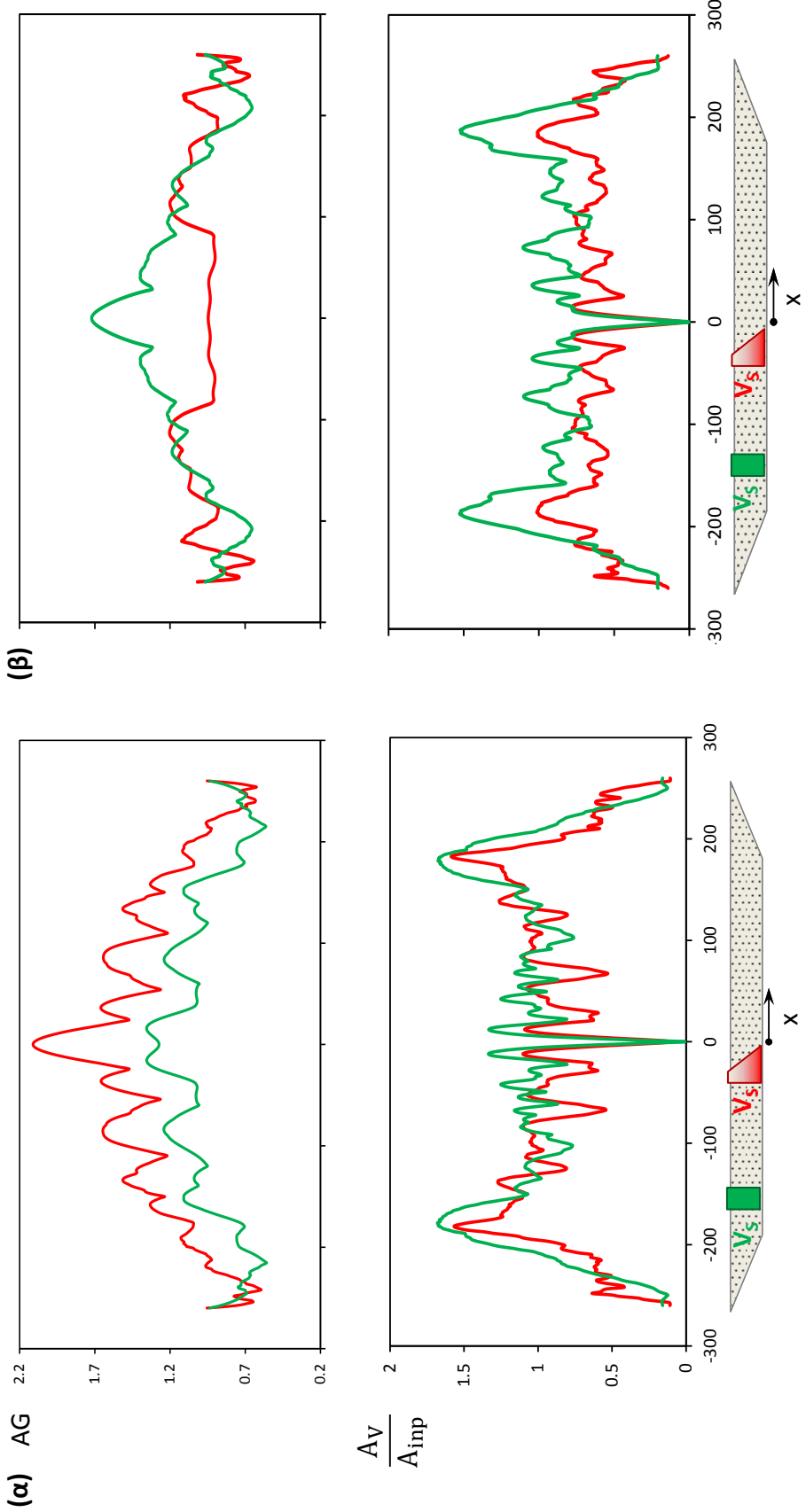
Σχήμα 3.6: Χρονοϊστορίες **(α)** οριζόντιας επιτάχυνσης στα σημεία $x = 160$ m και $x = 0$ m και της αντίστοιχης επιτάχυνσης λόγω μονοδιάστατης ενίσχυσης για διέγερση **Ricker 1**, **(β)** κατακόρυφης επιτάχυνσης στα σημεία $x = 160$ και $x = 100$ m για διέγερση **Ricker 1**, **(γ)** οριζόντιας επιτάχυνσης οφειλόμενης **μόνο στα διαδιάστατα φαινόμενα** στα σημεία $x=0$, $x = 100$ και $x = 160$ m για διέγερση **Ricker 1**. Στο σχήμα έχουν περιγραφεί οι «ομάδες» των επιταχύνσεων. **(δ)** Χρονοϊστορία οριζόντιας επιτάχυνσης στο σημείο $x = 250$ m και της αντίστοιχης επιτάχυνσης λόγω μονοδιάστατης ενίσχυσης για διέγερση **Ricker 3**. Όλα τα διαγράμματα αναφέρονται σε ανομοιογενές έδαφος με γραμμικώς αυξανόμενη ταχύτητα και $\bar{V}_{S, \text{soil}} = 1.00$ m/s.



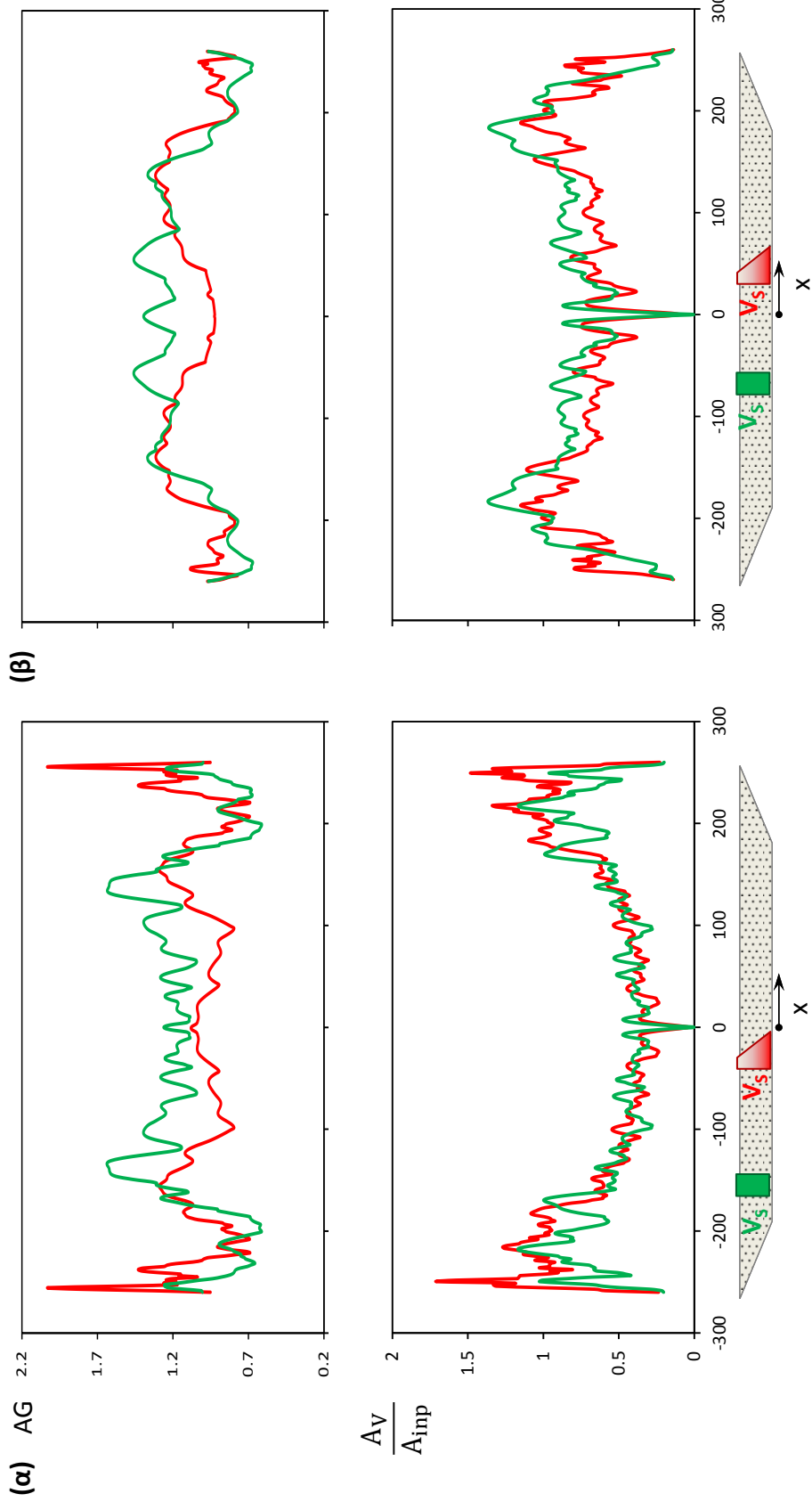
Σχήμα 3.7: Φασματικές οριζόντιες και κατακόρυφες επιταχύνσεις σε διάφορα σημεία της κοιλάδας για διέγερση Ricker 1. **(α)** Ομοιογενές εδαφικό προφίλ με $V_{S, soil}=100$ m/s². **(β)** Ανομοιογενές γραμμικό προφίλ με γραμμικώς αυξανόμενη V_S και $\tilde{V}_{S, soil} = 100$ m/s.



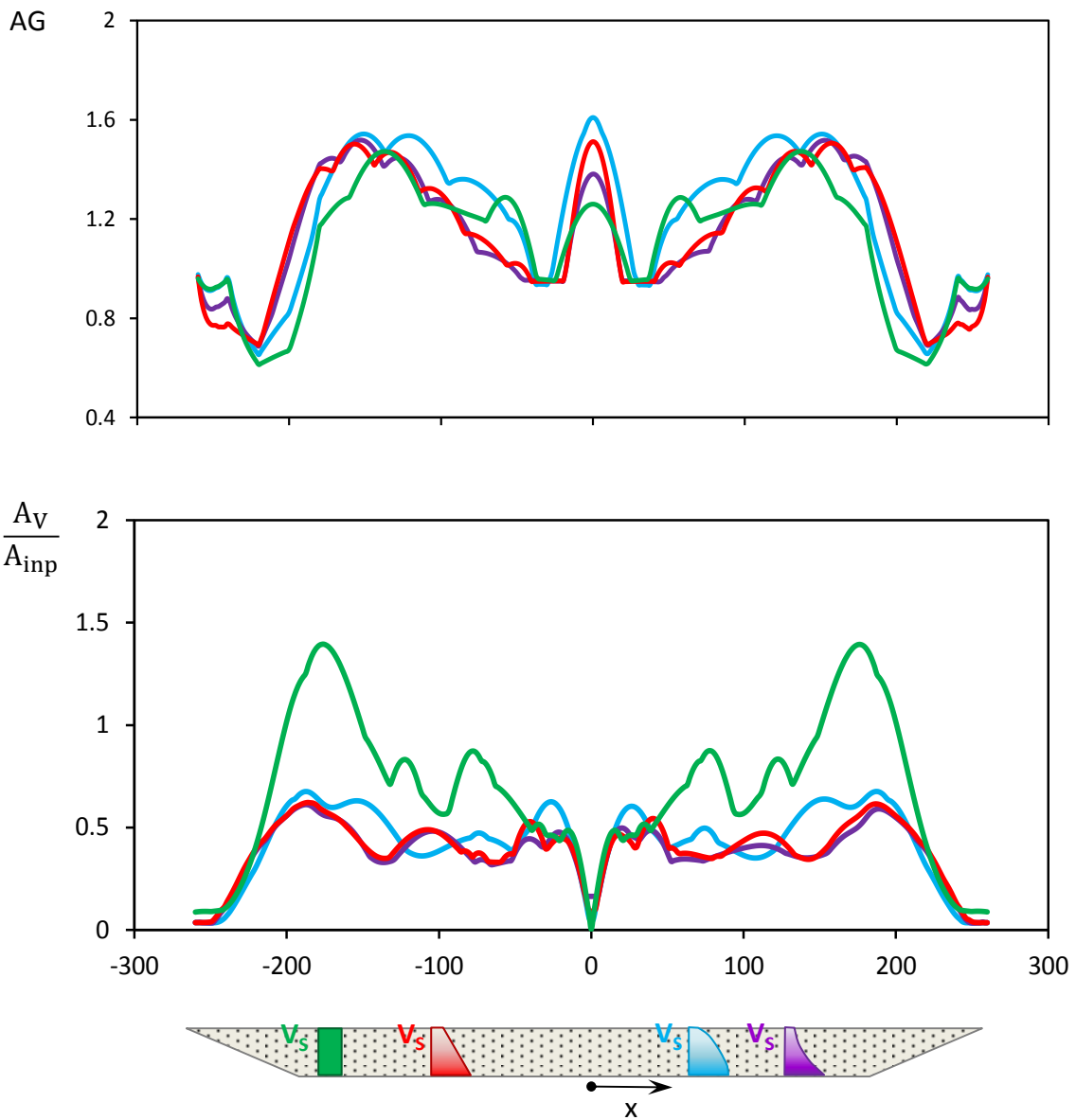
Σχήμα 3.8: Κατανομή της οριζόντιας και της αδιαστατοποιημένης κατακόρυφης επιτάχυνσης για τις πραγματικές διέγερσεις **(α)** Lefkada 2003 και **(β)** Rascoima Dam 164. Σύγκριση μεταξύ ομοιογενούς εδαφικού προφίλ με $V_s = 100$ m/s και ανομοιογενούς με γραμμικώς αυξανόμενη ταχύτητα με $\tilde{V}_{s, soil} = 100$ m/s.



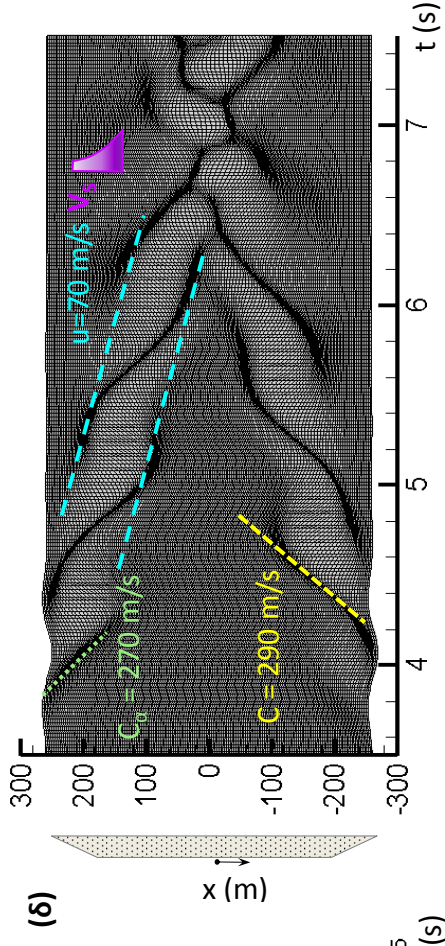
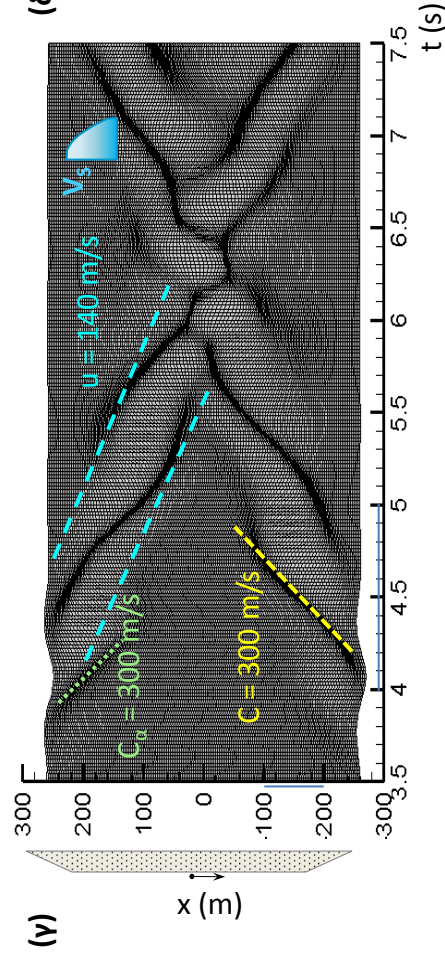
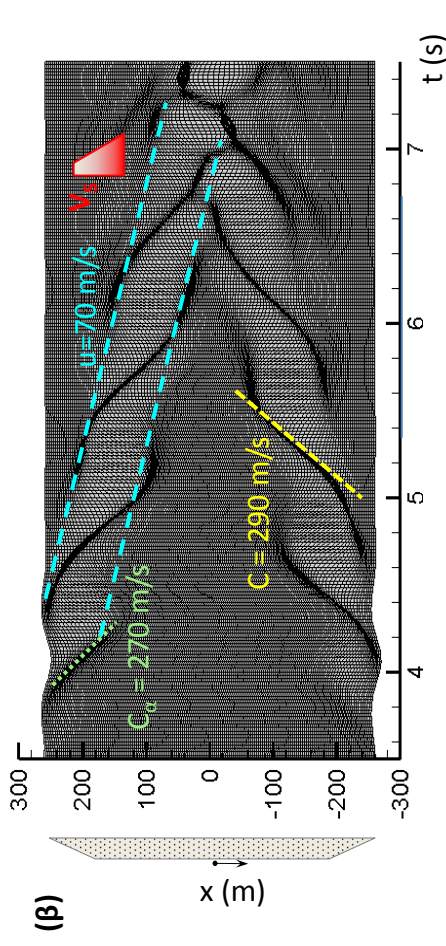
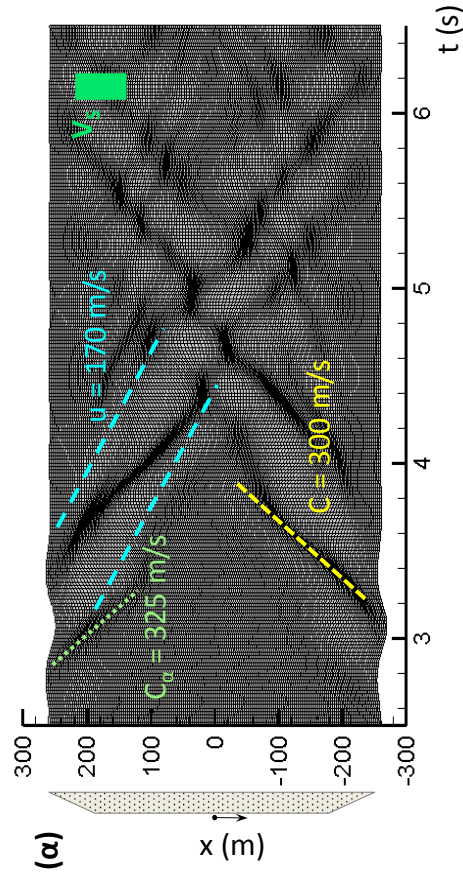
Σχήμα 3.9: Κατανομή της οριζόντιας και της αδιαστατοποιημένης κατακόρυφης επιτάχυνσης για τις πραγματικές διενέργειες (α) JMA 000 και (β) Jensen 292. Σύγκριση μεταξύ ομοιογενούς εδαφικού προφίλ με $V_s = 100$ m/s και ανομοιογενούς με γραμμικώς αυξανόμενη ταχύτητα με $\bar{V}_{s, soil} = 100$ m/s.



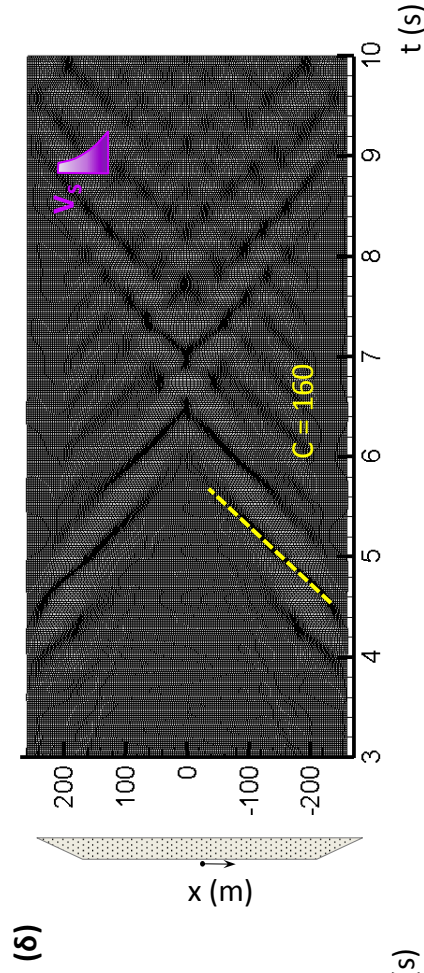
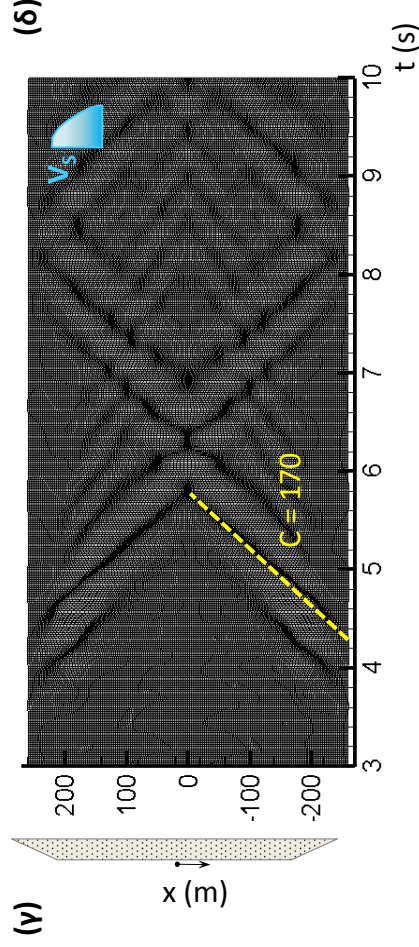
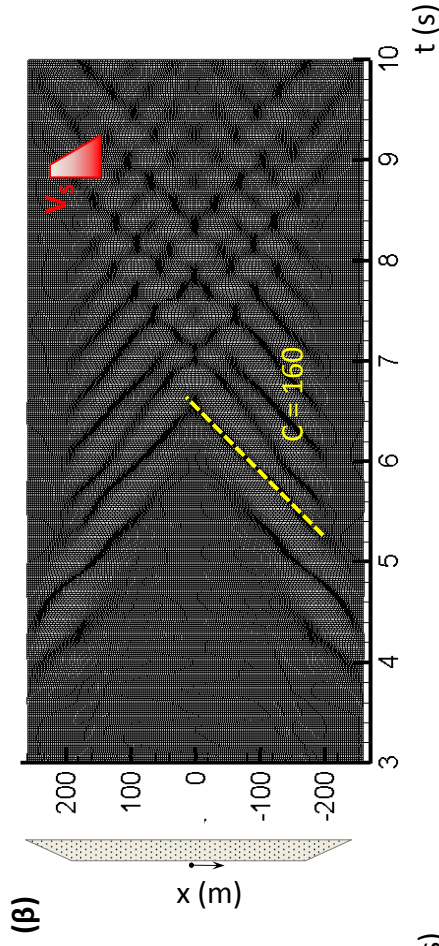
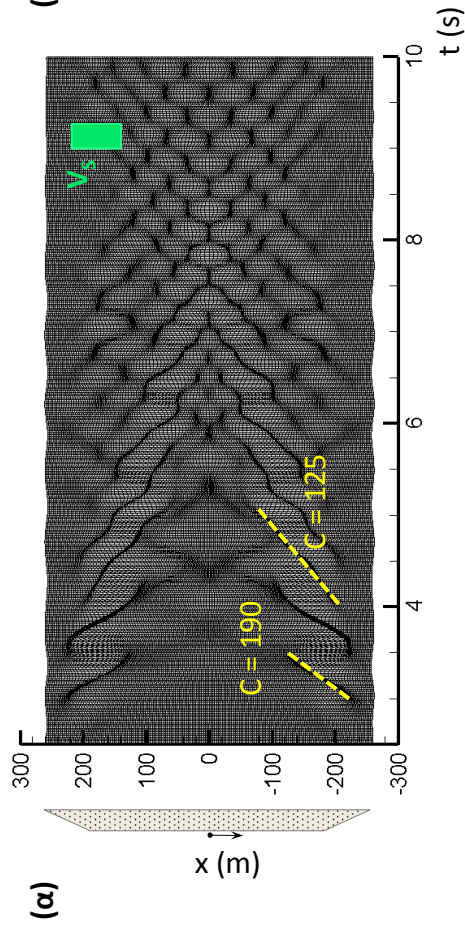
Σχήμα 3.10: Κατανομή της οριζόντιας και της αδιαστατοποιημένης κατακόρυφης επιτάχυνσης για τις πραγματικές διεγέρσεις (α) Lucerne 275 και (β) Rinaldi 228. Σύγκριση μεταξύ ομοιογενούς εδαφικού προφίλ με $V_s = 100$ m/s και ανομοιογενούς με γραμμικώς αυξανόμενη ταχύτητα με $\tilde{V}_{s, soil} = 100$ m/s.



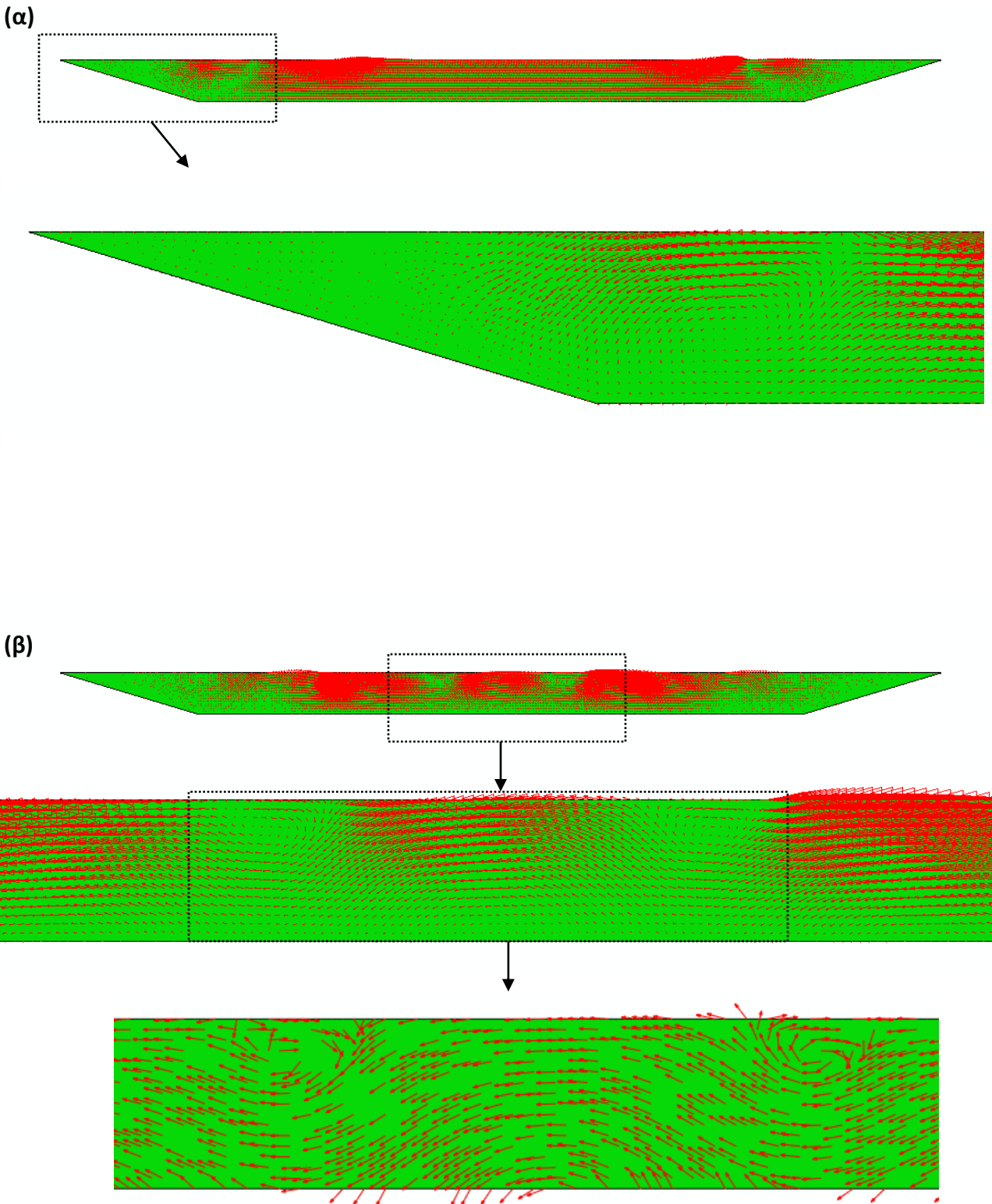
Σχήμα 3.11: Επίδραση της μορφής της ανομοιογένειας του εδάφους στην ενίσχυση της οριζόντιας και τη δημιουργία της κατακόρυφης επιτάχυνσης. Διέγερση Ricker 1, θεώρηση ελαστικού εδάφους. Όλα τα εδαφικά προφίλ έχουν σε βάθος $z = 12$ m ίδια ταχύτητα $\tilde{V}_{s, soil} = 100$ m/s.



Σχήμα 3.12: Συνθετικά σεισμογραφήματα οριζόντιων επιταχύνσεων για (α) ομοιογένες εδαφικό προφίλ, (β) ανομοιογένες γραμμικό προφίλ με γραμμικώς αυξανόμενη V_s , (γ) ανομοιογένες παραβολικό προφίλ και (δ) ανομοιογένες υπερβολικό προφίλ. Όλα τα προφίλ έχουν σε βάθος $z = 12 \text{ m}$ $\vec{V}_{s, \text{soil}} = 100 \text{ m/s}$. Διέγερση: **Ricker 1**.



Σχήμα 3.13: Συνθετικά σειсмоγραφήματα κατακόρυφων επιταχύνσεων για (α) ομοιογένες εδαφικό προφίλ, (β) ανομοιογένες γραμμικό προφίλ με γραμμικώς αυξανόμενη V_s , (γ) ανομοιογένες παραβολικό προφίλ και (δ) ανομοιογένες υπερβολικό προφίλ. Όλα τα προφίλ έχουν σε βάθος $z = 12$ m $\bar{V}_{s, soil} = 100$ m/s. Διέγερση: **Ricker 1**.



Σχήμα 3.14: Διανύσματα επιτάχυνσης **(α)** τη χρονική στιγμή $t = 5.6$ s και **(β)** τη χρονική στιγμή $t = 7.6$ s. Ανομοιογενές έδαφος με γραμμικώς αυξανόμενη V_S και $\tilde{V}_{S, \text{soil}} = 100$ m/s, $\xi = 2\%$. Διακρίνεται η ελλειπτική κίνηση των Rayleigh κυμάτων.

Κεφάλαιο 4

Μή-γραμμικό ανομοιογενές έδαφος

4.1. Γραμμικώς αυξανόμενη ταχύτητα $V_{S,soil}$

Στο κεφάλαιο αυτό αναλύεται η επίδραση της μή-γραμμικότητας του εδάφους, όταν αυτό είναι ανομοιογενές με ταχύτητα γραμμικώς αυξανόμενη με το βάθος, στην απόκριση της κοιλάδας.

Στο Σχήμα 4.1 απεικονίζεται η επίδραση της συχνότητας στην απόκριση κοιλάδας με μή-γραμμικό ανομοιογενές έδαφος με γραμμικώς αυξανόμενη ταχύτητα. Όπως και στο ομοιογενές έδαφος (Σχήμα 2.10), έτσι και εδώ διαπιστώνεται ότι στο κεντρικό τμήμα της κοιλάδας η απόκριση έχει γίνει πρακτικά μονοδιάστατη ανεξάρτητα της συχνότητας της διέγερσης, γεγονός που οφείλεται στην αυξημένη απόσβεση που συνεπάγεται η ύπαρξη της μή-γραμμικότητας του εδάφους.

Για να διαπιστωθεί καλύτερα ο ρόλος της μή-γραμμικότητας του εδάφους, συγκρίνονται στο Σχήμα 4.2 (α) η απόκριση της κοιλάδας με ελαστικό και με μή-γραμμικό ανομοιογενές έδαφος υπό την διέγερση Ricker 1. Εμφανής είναι ο ευεργητικός ρόλος της ανελαστικότητας του εδάφους. Η σημαντική ενίσχυση που υπήρχε στην περίπτωση του ελαστικού εδάφους στο μεγαλύτερο τμήμα της κοιλάδας παύει να υπάρχει και η απόκριση γίνεται ουσιαστικά μονοδιάστατη. Η περιοχή στην οποία παρατηρούνταν εξασθένηση της διέγερσης έχει μάλιστα μεταφερθεί προς το εσωτερικό της κοιλάδας. Το μόνο τμήμα στο οποίο η απόκριση του εδάφους είναι δυσμενέστερη για το μή-γραμμικό έδαφος από ότι για το ελαστικό, είναι τα άκρα της κοιλάδας. Σε αυτά, ενώ για την θεώρηση ελαστικού εδάφους παραρούνταν εξασθένηση της διέγερσης, με την παρουσία της μή-

γραμμικότητας ο συντελεστής επιδείνωσης λαμβάνει τιμές της τάξης του 1.2. Η κινητοποιημένη μή-γραμμικότητα του εδάφους και η συνεπαγόμενη μείωση του μέτρου διάτμησης του εδάφους από G_0 σε G προκαλεί μείωση της αρχικής ταχύτητας του εδάφους και επομένως και μείωση του μήκους κύματος. Έτσι, η επιβαλλόμενη διέγερση γίνεται περισσότερο ευαίσθητη στην γεωμετρία της κοιλάδας, όπως επεξηγήθηκε και στην **Παράγραφο 2.2**.

Ομοίως, η παρασιτική κατακόρυφη επιτάχυνση σχεδόν παύει να υφίσταται στο κεντρικό τμήμα της κοιλάδας, γεγονός που επίσης οφείλεται στην αυξημένη απόσβεση λόγω της μή-γραμμικότητας. Ωστόσο, σε μια αρκετά ευρεία περιοχή στις γωνίες της κοιλάδας δεν παρατηρείται αντίστοιχη μείωση. Στην περιοχή αυτή η ταχύτητα είναι σχεδόν σταθερή και περίπου ίση με την μέγιστη αντίστοιχη τιμή της ελαστικής θεώρησης του εδάφους. Η περιοχή αυτή ταυτίζεται με την περιοχή όπου παρατηρήθηκε η επιπλέον ενίσχυση της οριζόντιας επιτάχυνσης και αποδίδεται στο ίδιο αίτιο, δηλαδή στην μείωση του μήκους κύματος που συνεπάγεται η μείωση του μέτρου διάτμησης λόγω της μή-γραμμικότητας.

Κατόπιν, οι κατανομές των επιταχύνσεων για τις διεγέρσεις Ricker 1 και Ricker 0.5 με θεώρηση της μή-γραμμικότητας του εδάφους συγκρίνονται μεταξύ του ομοιογενούς και του ανομοιογενούς προφίλ με την γραμμικώς αυξανόμενη ταχύτητα (**Σχήμα 4.2 (β)**). Όταν η διέγερση είναι Ricker 1, διαπιστώνεται ότι στα άκρα της κοιλάδας η ενίσχυση της οριζόντιας επιτάχυνσης για το ανομοιογενές προφίλ είναι μεγαλύτερη. Επίσης, στο κεντρικό τμήμα, η ανομοιογένεια κάνει την απόκριση εντελώς μονοδιάστατη, χωρίς ούτε τις μικρές διακυμάνσεις που παρατηρούνται στην περίπτωση του ομοιογενούς εδάφους. Τέλος, η περιοχή εξασθένισης της διέγερσης έχει διευρυνθεί και μετατοπιστεί ελαφρώς προς το εσωτερικό της κοιλάδας. Αυτά τα φαινόμενα εξηγούνται από το γεγονός ότι στο ανομοιογενές προφίλ η ταχύτητα διάδοσης των κυμάτων κοντά στην επιφάνεια είναι πολύ μικρότερη από το ομοιογενές προφίλ. Αντίστοιχα μικρότερη είναι και η αντοχή του εδάφους στα επιφανειακά στρώματα. Η αυξημένη απόσβεση που αναπτύσσεται σε αυτά έχει ως αποτέλεσμα τα επιφανειακά κύματα να αποσβαινούνται πριν φτάσουν στο κέντρο της κοιλάδας, με αποτέλεσμα η απόκριση σε αυτό να είναι εντελώς μονοδιάστατη. Επίσης, τα άκρα της κοιλάδας έχουν πολύ

μικρό βάθος και επομένως σημαντικά μικρότερη ταχύτητα και αντοχή από το ομοιογενές έδαφος στις αντίστοιχες θέσεις. Όπως είδαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο, ακόμα και στην ελαστική θεώρηση η προσπίπτουσα ακτινοβολία αντιλαμβάνεται περισσότερο την γεωμετρία της κοιλάδας. Η επιπλέον μείωση του μήκους κύματος στις γωνίες της κοιλάδας λόγω της θεώρησης της μή-γραμμικότητας καθιστά το φαινόμενο αυτό πιο έντονο και έτσι η διάθλαση και “παγίδευση” της σχετικά μεγαλοπερίοδης διέγερσης στις γωνίες της κοιλάδας να προκαλεί ενίσχυση της απόκρισης.

Ομοίως, και η κατακόρυφη επιτάχυνση είναι μετατοπισμένη ελαφρώς προς τα άκρα στην περίπτωση του ανομοιογενούς εδάφους. Επίσης, στο κεντρικό τμήμα της κοιλάδας είναι πρακτικά ανύπαρκτη. Τέλος, το γεγονός ότι παρουσιάζει μικρότερες τιμές από την περίπτωση του ελαστικού εδάφους, σχετίζεται με την καμπυλότητα των τροχιών της διέγερσης, αντίστοιχα με το ομοιογενές έδαφος.

Πραγματικές καταγραφές

Η απόκριση της εδαφικής κοιλάδας στο ανομοιογενές μή-γραμμικό έδαφος συγκρίνεται με την αντίστοιχη ελαστική απόκριση για τις τέσσερις σεισμικές διεγέρσεις που χρησιμοποιήθηκαν στα **Σχήματα 4.3 και 4.4**. Τα φαινόμενα που παρατηρήθηκαν στην περίπτωση των παλμικών διεγέρσεων Ricker, παρατηρούνται και εδώ. Πράγματι, για όλες τις διεγέρσεις η απόκριση στο κεντρικό τμήμα της κοιλάδας είναι εντελώς μονοδιάστατη. Επίσης, κατακόρυφη επιτάχυνση υπάρχει μόνο στο τμήμα της επιφάνειας πάνω από την γωνία της κοιλάδας και έχει περίπου σταθερή τιμή στο τμήμα αυτό. Τέλος, για όλες τις διεγέρσεις παρατηρείται αυξημένη ενίσχυση της οριζόντιας επιτάχυνσης στα άκρα της κοιλάδας. **Δηλαδή, ο τρόπος που επιδρά η μή-γραμμικότητα στην απόκριση της κοιλάδας με ανομοιογενές έδαφος δεν είναι ιδιαίτερα ευαίσθητος στις λεπτομέρειες της διέγερσης.**

Στη συνέχεια η απόκριση των παραπάνω καταγραφών συγκρίνεται με την μή-γραμμική απόκριση αυτών στην περίπτωση του ομοιογενούς εδάφους (**Σχήματα 4.5 και 4.6**). Σε όλες τις περιπτώσεις παρατηρείται απόλυτη “ισοπέδωση” της απόκρισης του ανομοιογενούς εδάφους στο κέντρο της κοιλάδας, καθώς δεν

υπάρχουν καν οι μικρές διακυμάνσεις που υπάρχουν στην περίπτωση του ομοιογενούς εδάφους. Επίσης, η απόκριση του ανομοιογενούς εδάφους στα άκρα της κοιλάδας είναι αυξημένη σε σχέση με το ομοιογενές, ενώ η κατακόρυφη επιτάχυνση παρουσιάζεται μειωμένη. Η σύγκριση αυτή είναι σε συμφωνία με την αντίστοιχη ανάλυση με τους παλμούς Ricker.

4.2. Επίδραση της κατανομής της $V_{s,soil}$

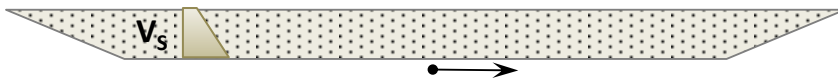
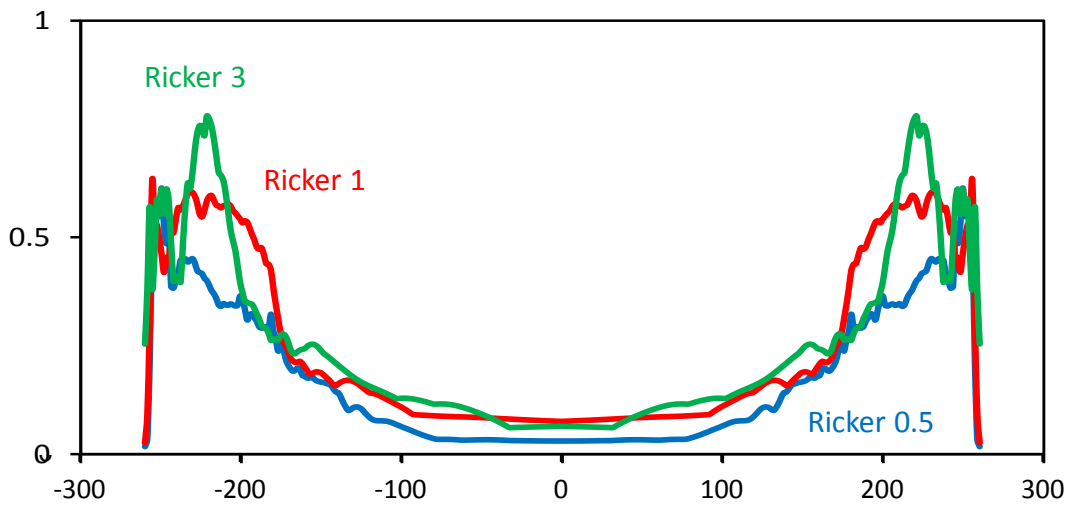
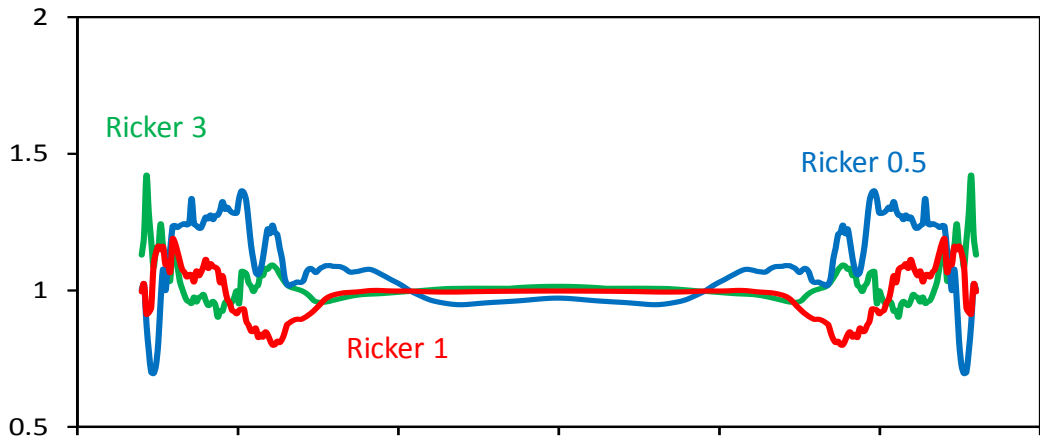
Στην παράγραφο αυτήν, εξετάζεται η επίδραση του τύπου της κατανομής της ταχύτητας του εδάφους στην απόκριση της επιφάνειας της εδαφικής κοιλάδας, όταν αυτό συμπεριφέρεται μή-γραμμικά. Τα προφίλ που συγκρίνονται είναι το ομοιογενές, το ανομοιογενές με την ταχύτητα των διατμητικών κυμάτων γραμμικώς αυξανόμενη με το βάθος, το παραβολικό και το υπερβολικό ανομοιογενές, όπως ορίστηκαν στην **Παράγραφο 1.1**. Η διέγερση που χρησιμοποιείται για την σύγκριση αυτή είναι παλμός Ricker χαρακτηριστικής συχνότητας 1.

Στο Σχήμα 4.7 παρουσιάζεται η κατανομή του συντελεστή επιδείνωσης και της αδιαστατοποιημένης κατακόρυφης επιτάχυνσης κατά μήκος της κοιλάδας για τα διαφορετικά προφίλ. Παρατηρούμε ότι η οριζόντια επιτάχυνση παρουσιάζει μια μικρή ενίσχυση στα άκρα της κοιλάδας για όλα τα ανομοιογενή προφίλ, σε αντίθεση με το ομοιογενές. Η ενίσχυση αυτή εξηγείται λόγω της μικρότερης αντοχής και του μικρότερου μήκους κύματος που αντιστοιχεί στα επιφανειακά εδαφικά στρώματα, όπως αναλύθηκε και παραπάνω. Το παραβολικό προφίλ που έχει μεγαλύτερη ταχύτητα από το υπερβολικό κοντά στην επιφάνεια, έχει μικρότερη ενίσχυση από εκείνο.

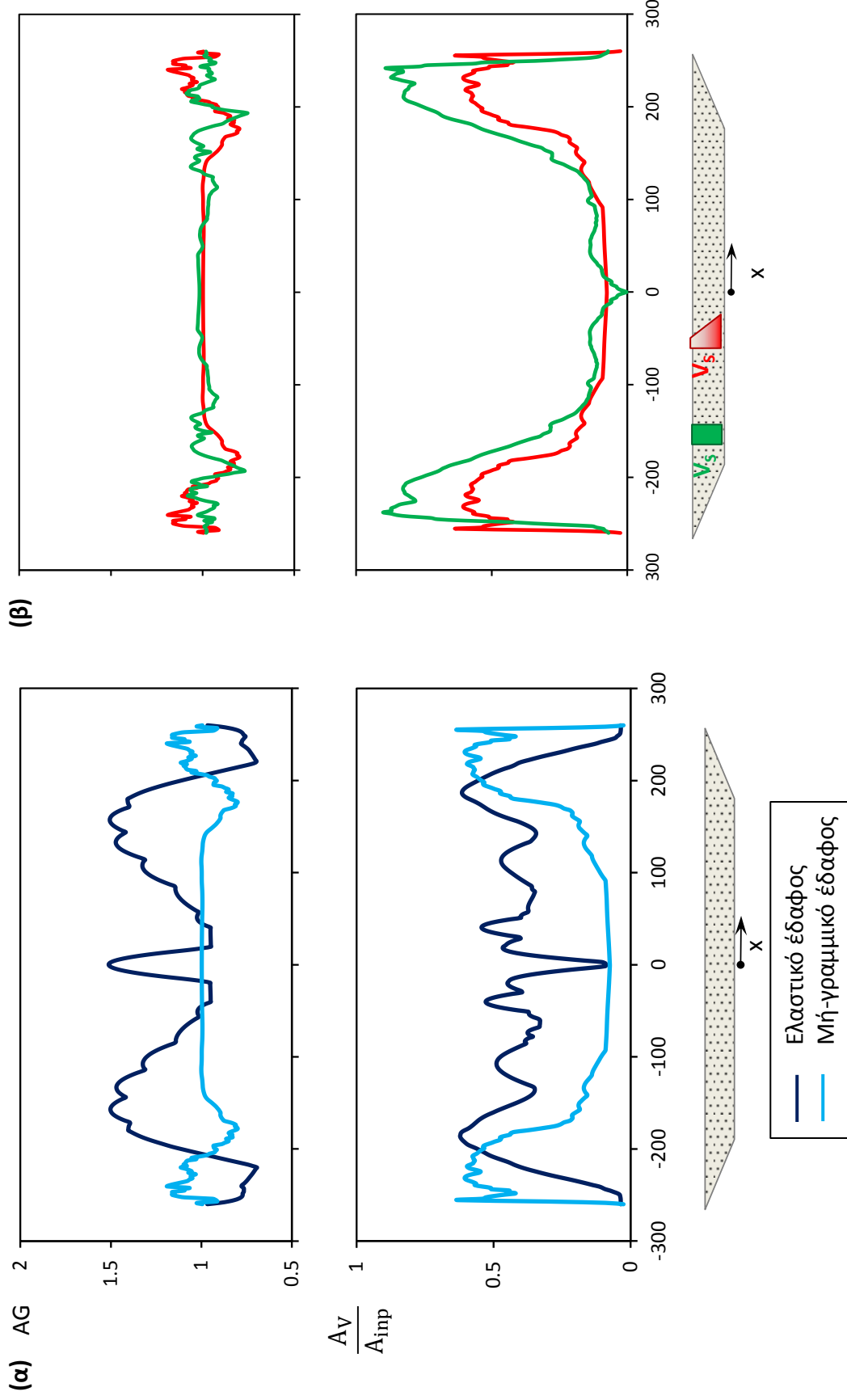
Ενδιαφέρον παρουσιάζει η χωρική κατανομή της κατακόρυφης επιτάχυνσης, καθώς έχει πανομοιότυπη μορφή για όλα τα ανομοιογενή προφίλ, ανεξάρτητα από τον τύπο της ανομοιογένειας. Δηλαδή πάνω από τις γωνίες της κοιλάδας είναι περίπου σταθερή και περίπου ίση με το 60% του πλάτους της επιβαλλόμενης διέγερσης και στη συνέχεια μειώνεται απότομα και παραμένει αμελητέα σε ολόκληρο το κεντρικό τμήμα της κοιλάδας.

Τα συνθετικά σειсмоγραφήματα για τις παραπάνω περιπτώσεις απεικονίζονται στα **Σχήματα 4.8** έως **4.10**. Σε αυτά φαίνεται καθαρά η διάδοση επιφανειακών Rayleigh κυμάτων, τα οποία όμως αποσβάνονται γρήγορα. Ιδιαίτερα στα ανομοιογενή εδαφικά προφίλ, η απόσβεση είναι ακόμα πιο έντονη. Επίσης η ταχύτητα με την οποία διαδίδονται στην επιφάνεια είναι μικρότερη από το ομοιογενές προφίλ. Όπως είχε αναλυθεί και στο προηγούμενο κεφάλαιο για την περίπτωση του ελαστικού εδάφους, μεγαλύτερη ταχύτητα διάδοσης των Rayleigh κυμάτων παρουσιάζεται στο ομοιογενές έδαφος, ενδιάμεση στο παραβολικό προφίλ και μικρότερη στο υπερβολικό και το γραμμικώς αυξανόμενο προφίλ, τα οποία παρουσιάζουν πολύ παρόμοια συμπεριφορά. Στο **Σχήμα 4.10** απεικονίζεται το σειсмоγράφημα της κατακόρυφης επιτάχυνσης στη γωνία της κοιλάδας.

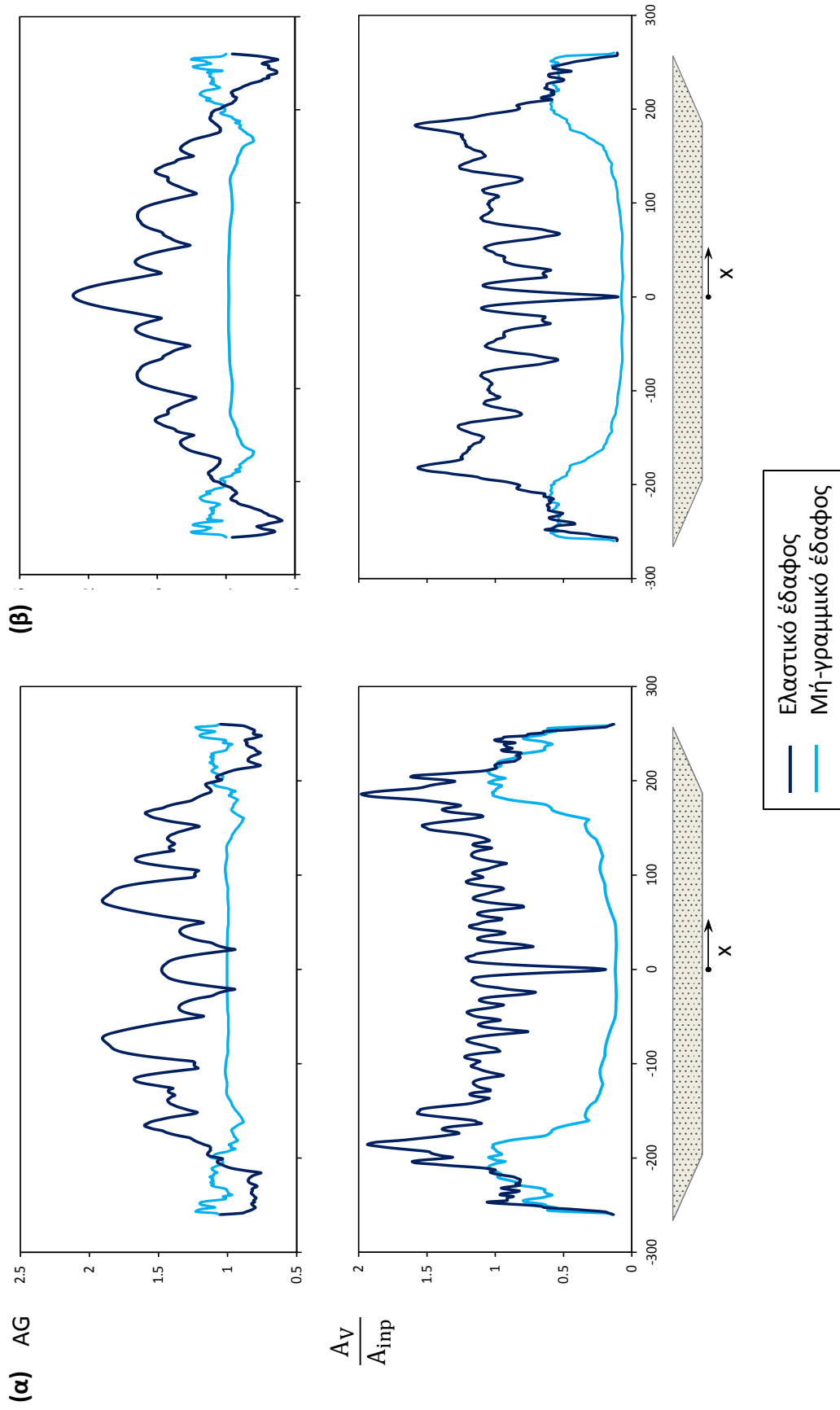
Σχήματα κεφαλαίου **4**



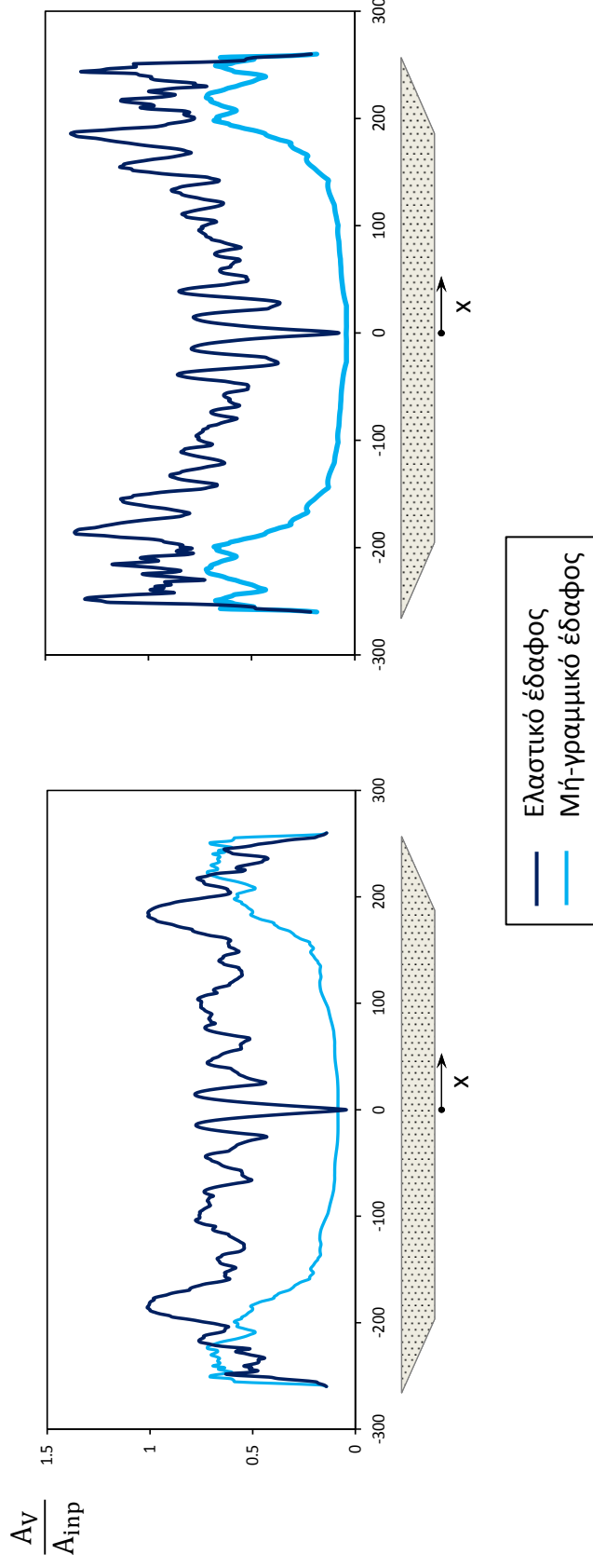
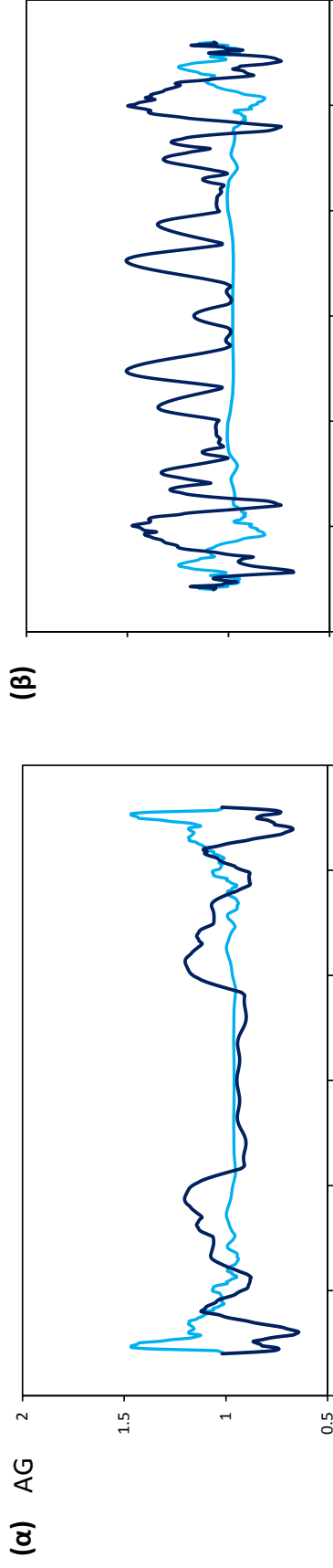
Σχήμα 4.1: Επίδραση της συχνότητας της διέγερσης στην ενίσχυση της οριζόντιας και τη δημιουργία της κατακόρυφης επιτάχυνσης στην περίπτωση μή-γραμμικού ανομοιογενούς εδάφους με γραμμικώς αυξανόμενη V_s και $\tilde{V}_{s, \text{soil}} = 100 \text{ m/s}$, $\xi = 2\%$.



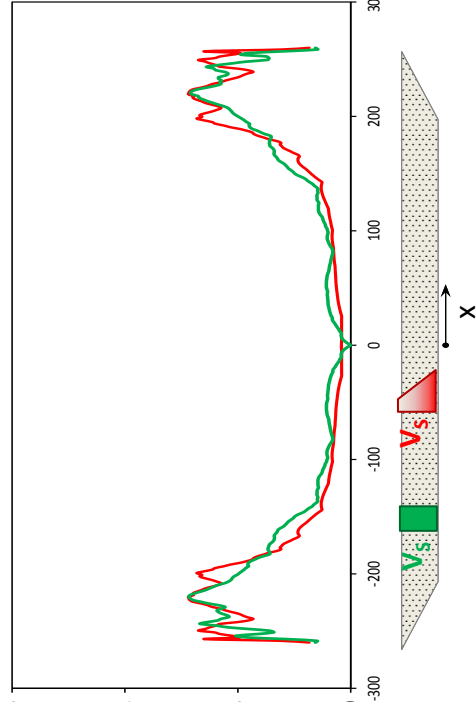
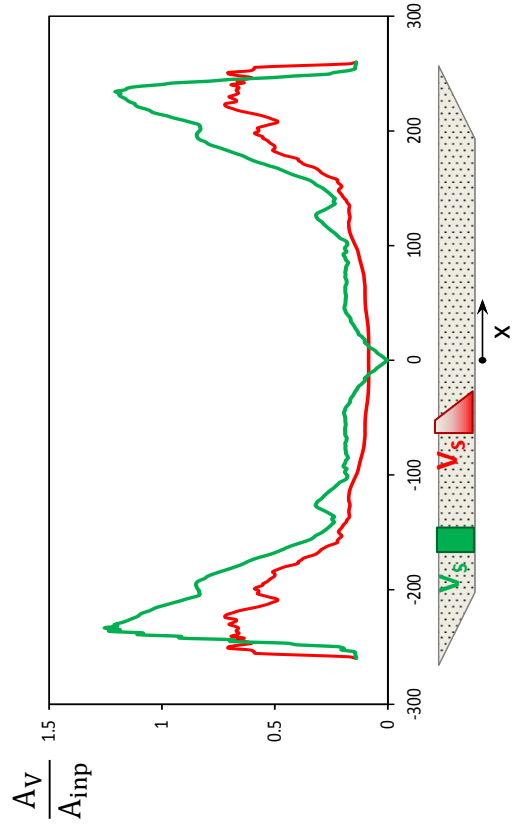
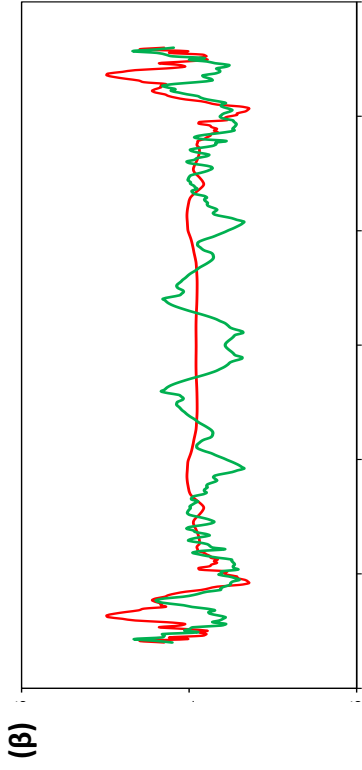
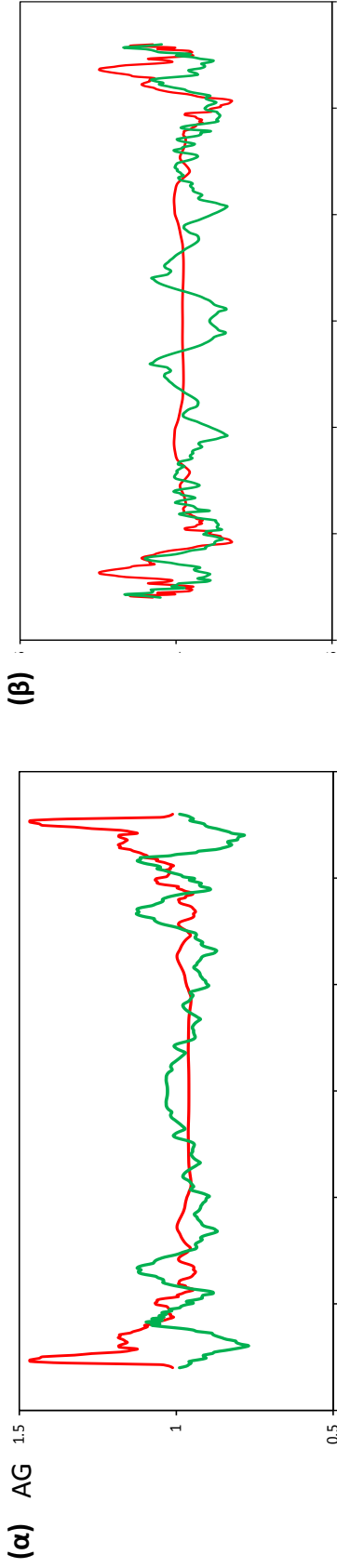
Σχήμα 4.2: Κατανομή της οριζόντιας και της αδιαστατοποιημένης κατακόρυφης επιτάχυνσης για τον παλμό Ricker 1. **(α)** Σύγκριση μεταξύ ελαστικού και μη-γραμμικού εδάφους. Έδαφος ανομοιογενές με γραμμικώς αυξανόμενη ταχύτητα και $\tilde{V}_{S, soil} = 100$ m/s. **(β)** Σύγκριση μεταξύ ομοιογενούς μη-γραμμικού εδαφικού προφίλ με $V_s = 100$ m/s και ανομοιογενούς με γραμμικώς αυξανόμενη ταχύτητα και $\tilde{V}_{S, soil} = 100$ m/s.



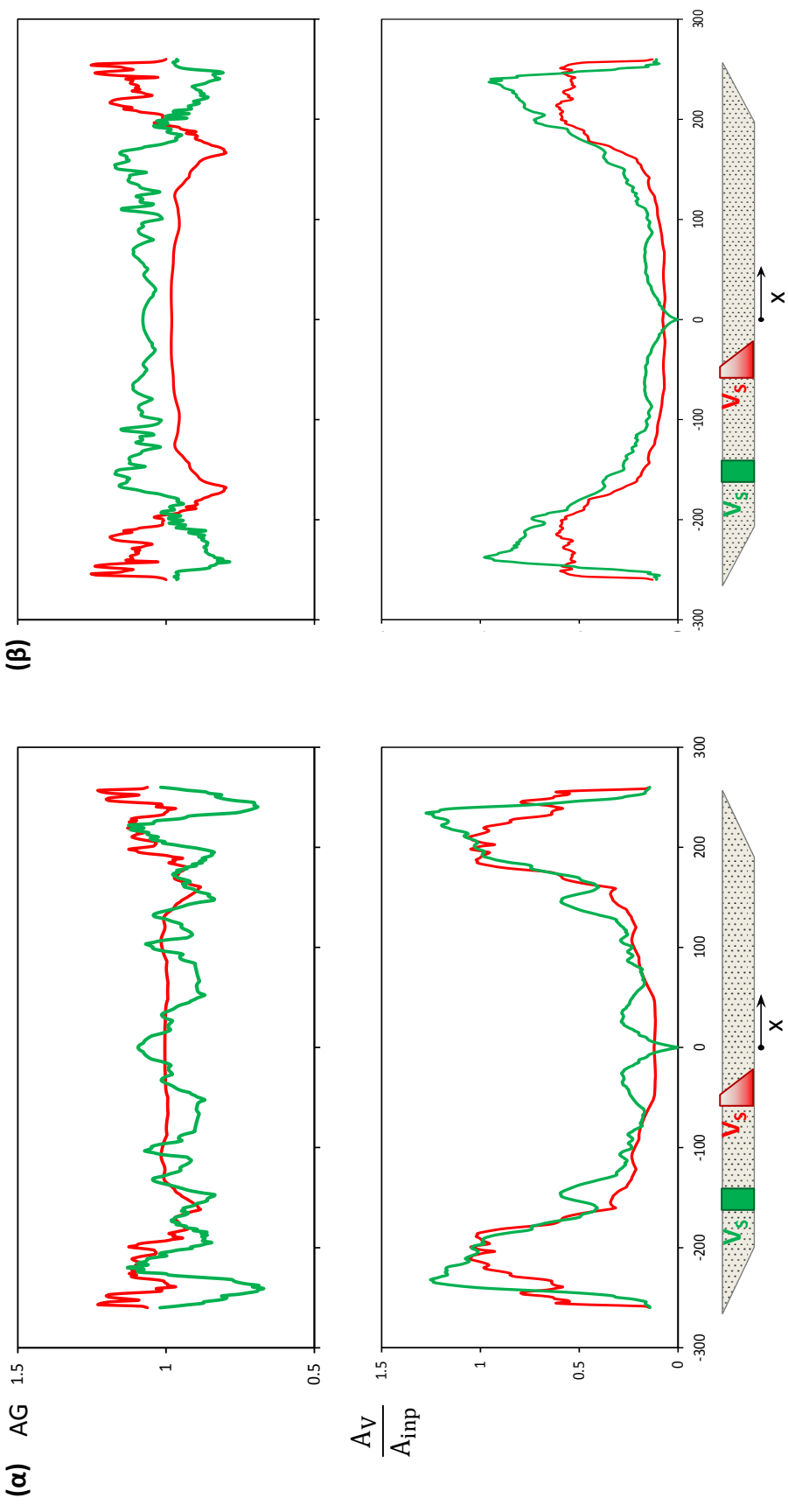
Σχήμα 4.3: Κατανομή της οριζόντιας και της αδιαστατοποιημένης κατακόρυφης επιτάχυνσης για τις πραγματικές διέγερσεις (α) Lefkada 2003 και (β) JMA 000. Έδαφος ανομοιογενές με γραμμικώς αυξανόμενη ταχύτητα και $\bar{V}_{S, soil} = 100$ m/s. Σύγκριση μεταξύ ελαστικού και μή-γραμμικού εδάφους.



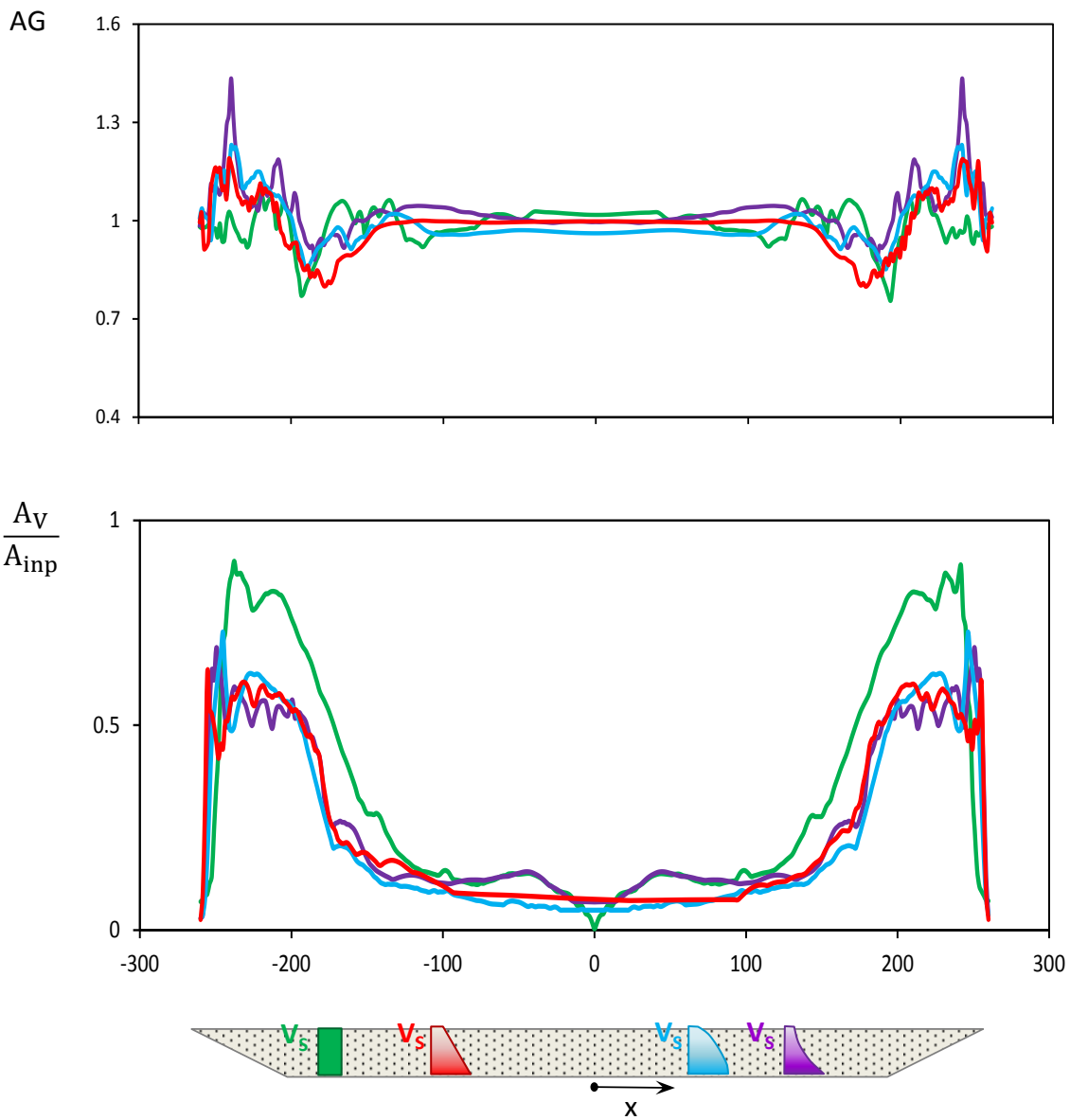
Σχήμα 4.4: Κατανομή της οριζόντιας και της αδιαστατοποιημένης κατακόρυφης επιτάχυνσης για τις πραγματικές διέγερσεις (α) Lefkada 2003 και (β) JMA 000. Έδαφος ανομοιογενές με γραμμικώς αυξανόμενη ταχύτητα και $\bar{V}_{s, soil} = 100$ m/s. Σύγκριση μεταξύ ελαστικού και μή-γραμμικού εδάφους.



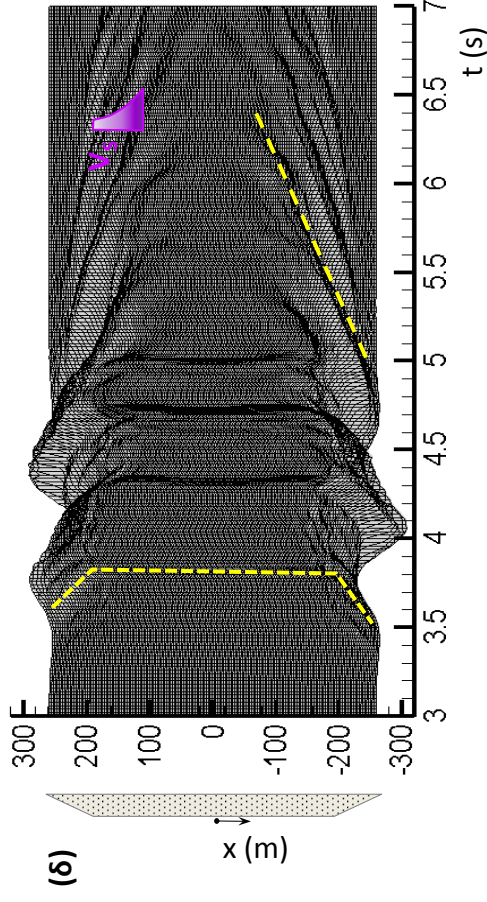
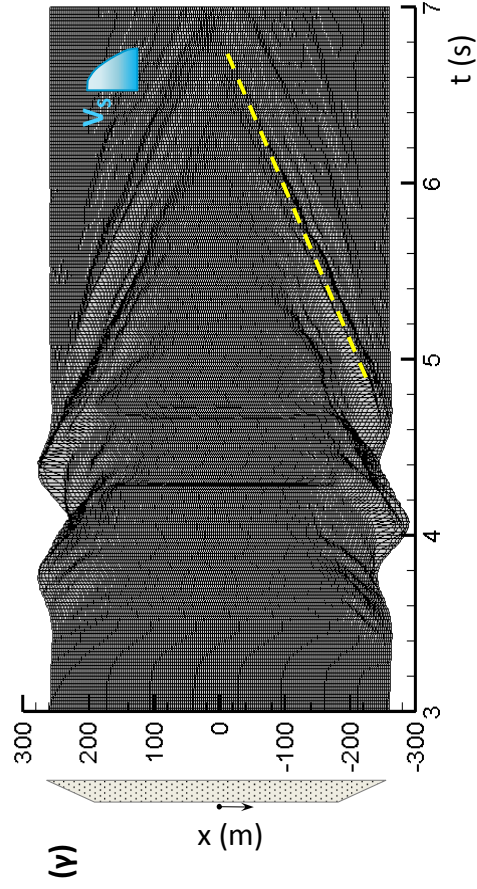
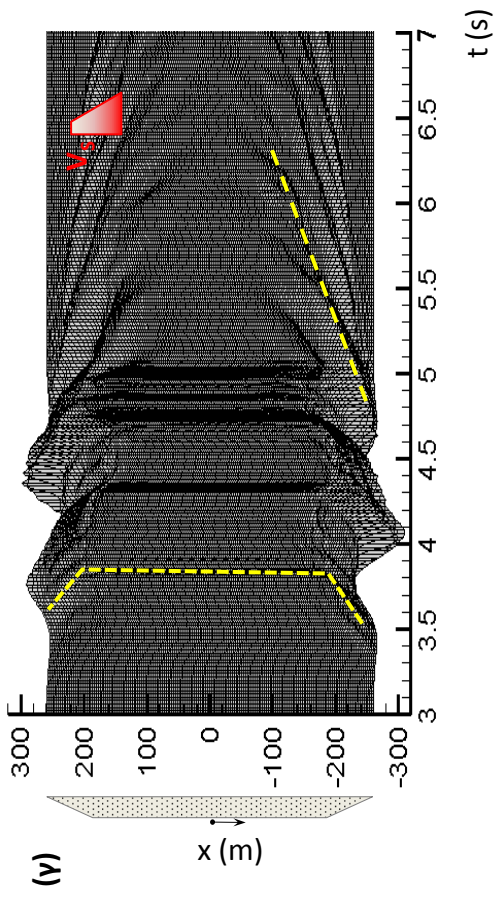
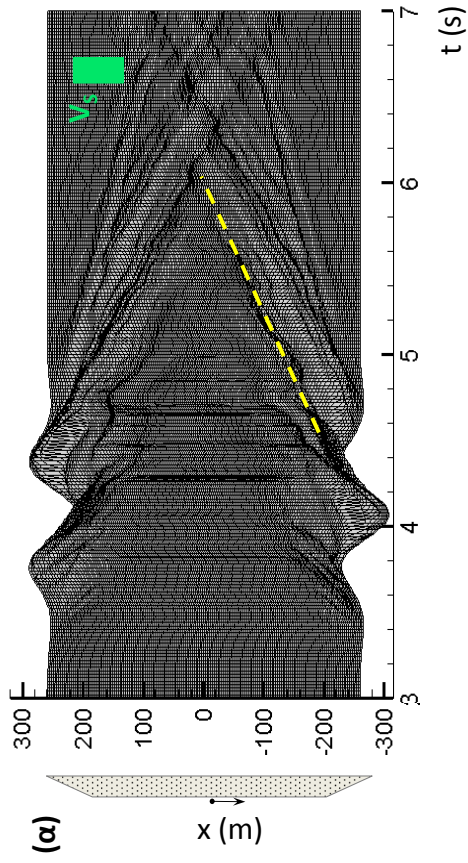
Σχήμα 4-5: Κατανομή της οριζόντιας και της αδιαστατοποιημένης κατακόρυφης επιτάχυνσης για τις πραγματικές διέγερσεις (α) Jensen 292 και (β) Rascoima Dam 164. Έδαφος μή-γραμμικό. Σύγκριση μεταξύ ομοιογενούς εδαφικού προφίλ με $V_S = 100$ m/s και ανομοιογενούς με γραμμικώς αυξανόμενη ταχύτητα και $\tilde{V}_{S, soil} = 100$ m/s.



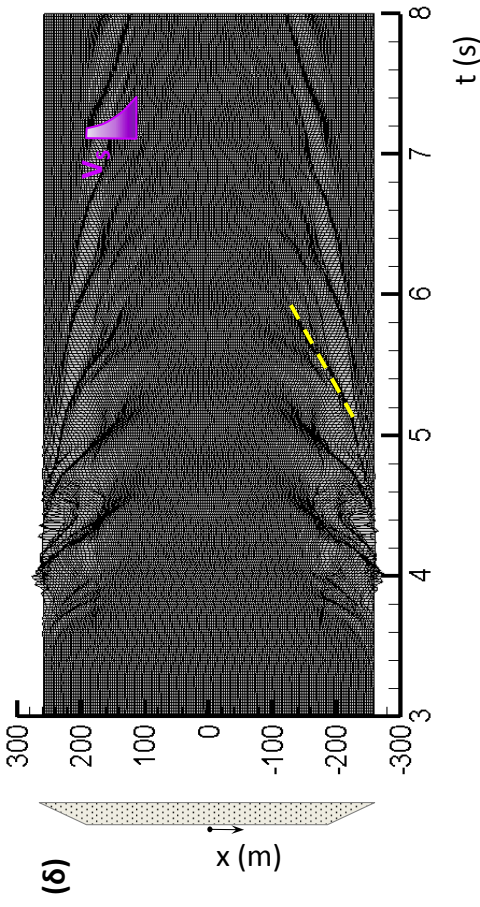
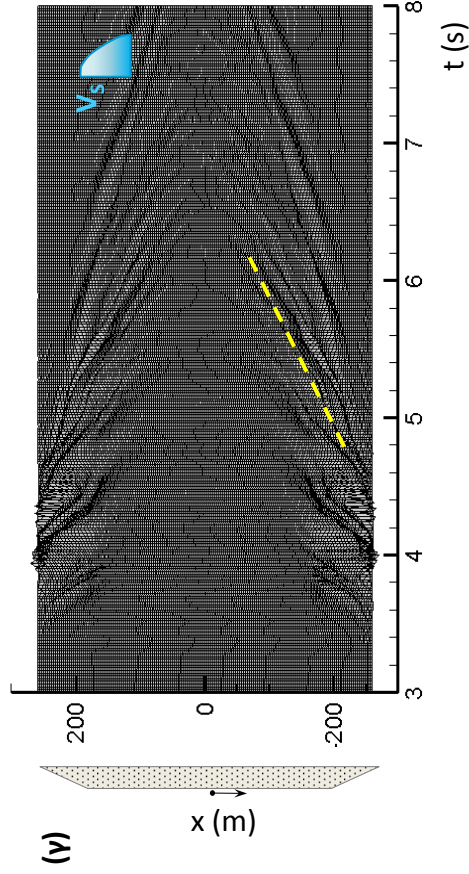
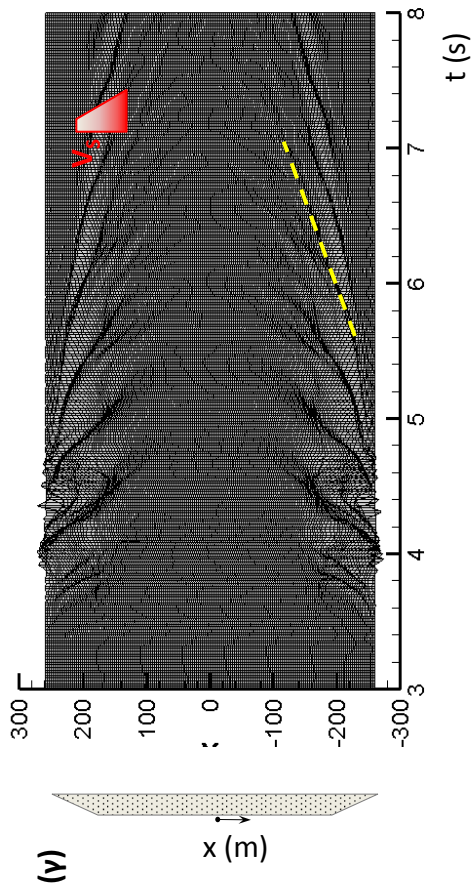
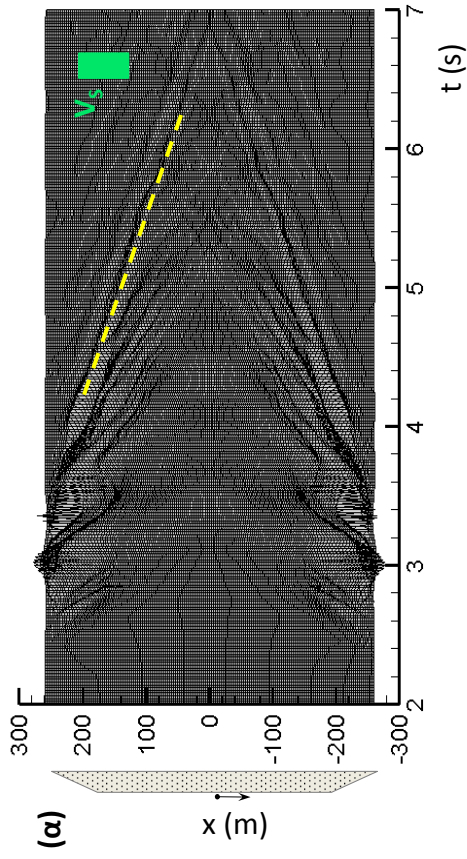
Σχήμα 4.6: Κατανομή της οριζόντιας και της αδιαστατοποιημένης κατακόρυφης επιτάχυνσης για τις πραγματικές διέγερσεις (α) Lefkada 2003 και (β) JMA 000. Έδαφος μή-γραμμικό. Σύγκριση μεταξύ ομοιογενούς εδαφικού προφίλ με $V_s = 100$ m/s και ανομοιογενούς με γραμμικώς αυξανόμενη ταχύτητα και $\tilde{V}_{s, soil} = 100$ m/s.



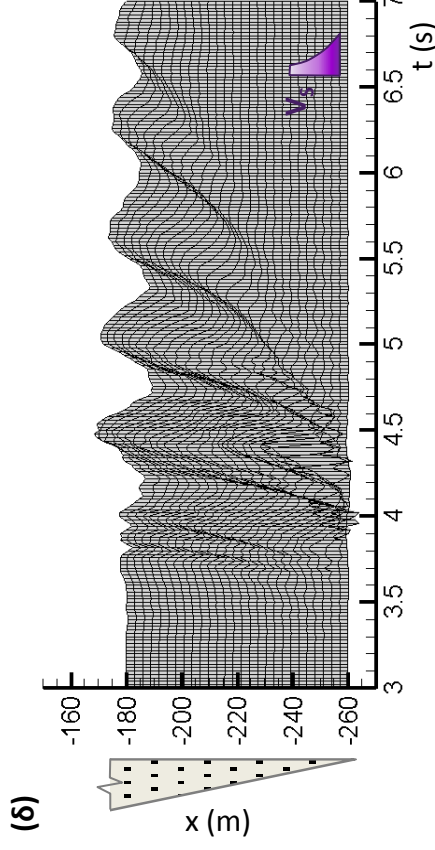
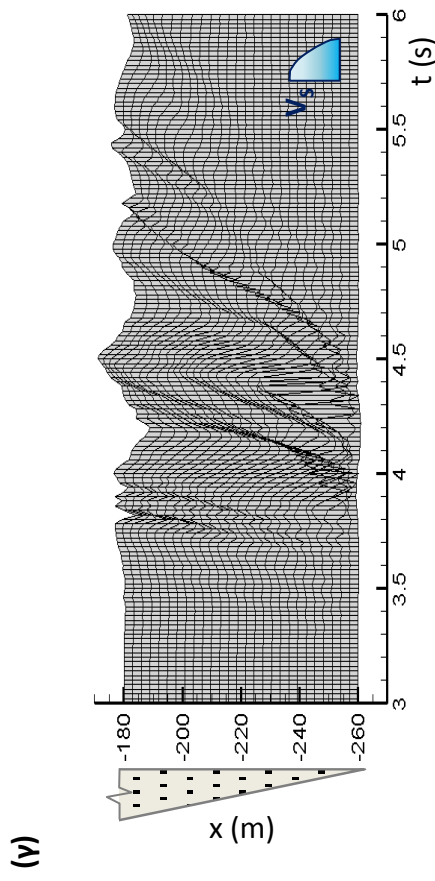
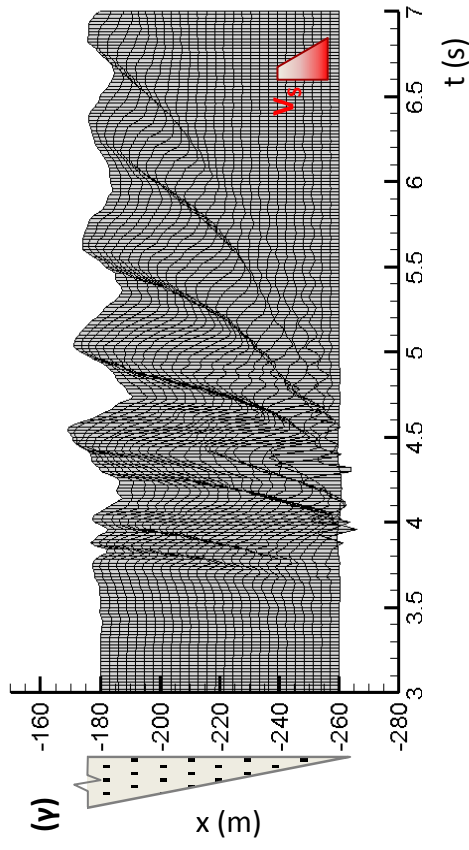
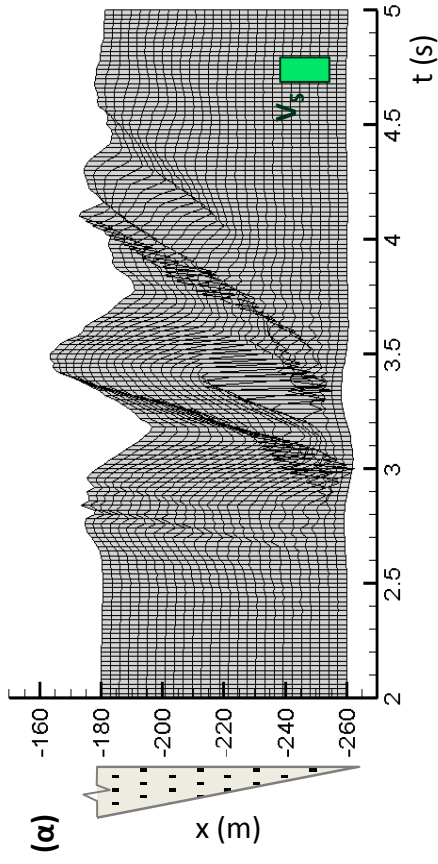
Σχήμα 4.7: Επίδραση του τύπου ανομοιογένειας του εδάφους στην ενίσχυση της οριζόντιας και τη δημιουργία της κατακόρυφης επιτάχυνσης. Όλα τα προφίλ έχουν σε βάθος $z = 12 \text{ m}$ $\tilde{V}_{s, \text{soil}} = 100 \text{ m/s}$. Διέγερση: **Ricker 1**, έδαφος **μή-γραμμικό**.



Σχήμα 4.8: Συνθετικά σεισμογραφήματα **οριζόντιων** επιταχύνσεων για **(α)** ομοιογενές εδαφικό προφίλ, **(β)** ανομοιογενές γραμμικό προφίλ με γραμμικώς αυξανόμενη V_s , **(γ)** ανομοιογενές παραβολικό προφίλ και **(δ)** ανομοιογενές υπερβολικό προφίλ. Όλα τα προφίλ έχουν σε βάθος $z = 12 \text{ m}$ $\dot{V}_{S, \text{soil}} = 100 \text{ m/s}$. Διέγερση: **Ricker 1**, έδαφος μή-γραμμικό. Διακρίνεται η διάδοση των Rayleigh κυμάτων, τα οποία όμως αποσβάνονται.



Σχήμα 4.9: Συνθετικά σεισμογραφήματα επιταχύνσεων για **(α)** ομοιογενές εδαφικό προφίλ, **(β)** ανομοιογενές γραμμικό προφίλ με γραμμικώς αυξανόμενη V_s , **(γ)** ανομοιογενές παραβολικό προφίλ και **(δ)** ανομοιογενές υπερβολικό προφίλ. Όλα τα προφίλ έχουν σε βάθος $z = 12 \text{ m}$ $\vec{V}_{S, \text{soil}} = 100 \text{ m/s}$. Διέγερση: **Ricker 1**, έδαφος μή-γραμμικό.



Σχήμα 4.10: Συνθετικά σεισμογραφήματα κατακόρυφων επιταχύνσεων στη **γωνία της κοιλάδας** για **(α)** ομοιογενές εδαφικό προφίλ, **(β)** ανομοιογενές γραμμικό προφίλ με γραμμικώς αυξανόμενη V_s , **(γ)** ανομοιογενές παραβολικό προφίλ και **(δ)** ανομοιογενές υπερβολικό προφίλ. Όλα τα προφίλ έχουν σε βάθος $z = 12 \text{ m}$ $\vec{V}_{s, \text{soil}} = 100 \text{ m/s}$. Διέγερση: **Ricker 1**, έδαφος μή-γραμμικό.

ΜΕΡΟΣ Β'

ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΓΕΦΥΡΑΣ ΘΕΜΕΛΙΩΜΕΝΗΣ
ΣΕ ΕΔΑΦΙΚΗ ΚΟΙΛΑΔΑ

Κεφάλαιο 5

Ορισμός προβλήματος, σχεδιασμός, προσομοίωση

5.1. Ορισμός του Προβλήματος

5.1.1. Γεωμετρία και στατικός φορέας της γέφυρας

Η γέφυρα της οποίας η αλληλεπίδραση με την κοιλάδα εξετάζεται στο μέρος αυτό, φαίνεται στο **Σχήμα 5.1(α)**. Η γέφυρα αποτελείται από πέντε ίσα ανοίγματα με συνολικό μήκος 250μ. Το κατάστρωμα της γέφυρας, το οποίο αποτελείται από δύο λωρίδες κυκλοφορίας και μια βοηθητική, έχει συνολικό πλάτος 7μ. και είναι κατασκευασμένο από προεντεταμένο σκυρόδεμα διατομής, όπως στο **Σχήμα 5.1(β)**. Τα βάθρα της γέφυρας έχουν ύψος 8 μέτρα, κυκλική διατομή διαμέτρου $D=2.2\text{m}$ και αποτελούνται από οπλισμένο σκυρόδεμα (**Σχήμα 5.1(γ)**). Η θεμελίωση της γέφυρας πραγματοποιήθηκε με επιφανειακά θεμέλια διαστάσεων $12 \times 2 \times 2 \text{ m}$ (**Σχήμα 5.1(δ)**).

Το έδαφος της κοιλάδας, στο οποίο θεμελιώθηκε η γέφυρα, είναι μαλακή άργιλος με $V_s = 100 \text{ m/s}$, $G = 18 \text{ MPa}$, $S_u = 55 \text{ kPa}$, $\nu = 0.3$, $\gamma_{εδ} = 18 \text{ kN/m}^3$ και συντελεστή απόσβεσης Rayleigh $\xi = 2\%$. Η απόκριση της γέφυρας εξετάστηκε αρχικά για ελαστικό έδαφος και μετά για μή-γραμμικό. Η βαθμονόμηση του μή-γραμμικού ανελαστικού εδάφους περιγράφεται στο **Κεφάλαιο 1**.

Για την γέφυρα εξετάστηκαν δύο στατικά προσομοιώματα. Στο πρώτο, το κατάστρωμα θεωρήθηκε, απλοποιητικά, πακτωμένο σε όλα τα βάθρα, ώστε να γίνει

μια αρχική εκτίμηση των επιπτώσεων της παρουσίας της κοιλάδας στην κατασκευή. Στο δεύτερο προσομοίωμα πραγματοποιήθηκε η πιο ρεαλιστική θεώρηση της ύπαρξης εφεδράνων μεταξύ καταστρώματος και ακροβάθρων (**Σχήμα 5.2**).

5.1.2. Επιλογή θέσεων της γέφυρας στην κοιλάδα

Η συμπεριφορά της γέφυρας εξαρτάται από την θέση στην οποία αυτή θα τοποθετηθεί, καθώς η απόκριση στην επιφάνεια της κοιλάδας διαφοροποιείται από σημείο σε σημείο. Έτσι, επιλέχθηκαν οι εξής δύο διαφορετικές θέσεις για την γέφυρα:

- **Θέση 1:** Αρχικά, η γέφυρα τοποθετήθηκε στο **άκρο** της κοιλάδας, με το πρώτο βάθρο στο $x = -250 \text{ m}$ και το τελευταίο στο $x = 0 \text{ m}$ (**Σχήμα 5.3(α)**). Στην θέση αυτή μελετάται η επίδραση των φαινομένων που κυριαρχούν στην γωνία της κοιλάδας, τα οποία σχετίζονται με την διάθλαση και “παγίδευση” των εισερχομένων κυμάτων στην γωνία της κοιλάδας.
- **Θέση 2:** Κατόπιν, η γέφυρα τοποθετήθηκε στο **μέσον** της κοιλάδας, συμμετρικά προς το κέντρο, με τα ακραία βάθρα να βρίσκονται στο $x = -125 \text{ m}$ και $x = +125 \text{ m}$ (**Σχήμα 5.3(β)**). Η θέση αυτή επιτρέπει την μελέτη της αλληλεπίδρασης με την γέφυρα των φαινομένων που κυριαρχούν στο κέντρο της κοιλάδας, τα οποία σχετίζονται περισσότερο με την διάδοση και την συμβολή επιφανειακών κυμάτων.

5.1.3. Σεισμικές Διεγέρσεις

Ricker 1

Αρχικά, η μελέτη της απόκρισης της γέφυρας έγινε με χρήση ενός παλμού Ricker, καθώς οι παλμοί αυτού του τύπου έχει βρεθεί ότι αντιπροσωπεύουν πολύ ικανοποιητικά πραγματικές σεισμικές διεγέρσεις, χωρίς να έχουν τις λεπτομέρειες των τελευταίων οι οποίες θα καθιστούσαν την παραπάνω μελέτη δυσχερή. Συγκεκριμένα, επελέγη παλμός **Ricker χαρακτηριστικής συχνότητας $f_0 = 1 \text{ Hz}$**

(**Σχήμα 5.4**), καθώς για την συχνότητα αυτή, η απόκριση στο ελεύθερο πεδίο για το ελαστικό έδαφος είναι ιδιαίτερα έντονη (**Σχήμα 5.5**).

Lefkada 2003

Η καταγραφή αυτή προέρχεται από τον ομώνυμο σεισμό μεγέθους M 6.5 και αποτελεί μια από τις δυσμενέστερες καταγραφές στον ελληνικό χώρο. Χαρακτηριστικό του είναι το μεγάλο πλήθος των ισχυρών κύκλων του, ενώ παρουσιάζει ενδιάμεσο συχνοτικό περιεχόμενο. Η χρονοϊστορία και το ελαστικό φάσμα του απεικονίζονται στο **Σχήμα 5.4**, ενώ η απόκριση του ελευθέρου πεδίου της κοιλιάδας στο **Σχήμα 5.6** για ελαστικό, και στο **Σχήμα 5.7** για ανελαστικό έδαφος.

JMA 000

Η καταγραφή αυτή προέρχεται από τον σεισμό του Kobe 1995. Πρόκειται για μια καταγραφή με την ιδιαίτερα μεγάλη $PGA=0.83g$ με μεγάλο εύρος σημαντικών περιόδων. Επειδή η διέγερση είναι πολύ δυσμενέστερη από τον σεισμό σχεδιασμού, έχει υποστεί υποκλιμάκια αναγωγή, ώστε να αποκτήσει το επιθυμητό μέγεθος. (Χρονοϊστορία και ελαστικό φάσμα στο **Σχήμα 5.4**, απόκριση ελεύθερου πεδίου στα **Σχήματα 5.6, 5.7**).

Jensen 292

Η καταγραφή αυτή προέρχεται από τον σεισμό του Northridge 1994 και παρουσιάζει σημαντικές τιμές φασματικής επιτάχυνσης για ένα πολύ μεγάλο εύρος περιόδων. Και αυτή η διέγερση έχει υποκλιμακωθεί στην θεώρηση του ελαστικού εδάφους. (Χρονοϊστορία και ελαστικό φάσμα στο **Σχήμα 5.4**, απόκριση ελεύθερου πεδίου στα **Σχήματα 5.6, 5.7**).

5.2. Συμβατικός σχεδιασμός της ανωδομής

5.2.1. Φορτία

Για τον σχεδιασμό της ανωδομής χρησιμοποιήθηκαν οι εξής συνδυασμοί φόρτισης:

- ✓ **1.35g+1.50q** για τον έλεγχο των βάθρων της γέφυρας στην οριακή κατάσταση αστοχίας (Ο.Κ.Α.) υπό την επιβολή στατικής φόρτισης,
- ✓ **1.00g+1.00q** για τον έλεγχο του καταστρώματος σε οριακή κατάσταση λειτουργικότητας (Ο.Κ.Λ.) υπό την επιβολή στατικής φόρτισης,
- ✓ **1.00g+0.30q** για τον έλεγχο των βάθρων της γέφυρας στην οριακή κατάσταση αστοχίας υπό την επιβολή σεισμικής φόρτισης.

5.2.2. Ιδιοπερίοδος κατασκευής

Εγκάρσια διεύθυνση

Η ροπή αδράνειας του βάθρου είναι:

$$I = \frac{\pi \cdot d^4}{64} = \frac{\pi \cdot 2.2^4}{64} = 1.15 m^4$$

Το μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος **C30/35** είναι **E=32 GPa**. Επομένως, η δυσκαμψία της γέφυρας κατά την εγκάρσια διεύθυνση είναι:

$$K = \frac{3 \cdot E \cdot J}{h^3} = \frac{3 \cdot 30500 \cdot \left(\frac{1.15}{2}\right)}{8^3} = 102.75 \text{ MN/m},$$

όπου $J = I/2$, η ροπή αδρανείας της ρηγματωμένης διατομής.

Η ισοδύναμη συγκεντρωμένη μάζα του μονοβάθμιου ταλαντωτή προκύπτει από το βάρος που αντιστοιχεί στην κορυφή ενός βάθρου, για τον σεισμικό συνδυασμό φόρτισης **g+0.3q**:

$$m = W/g = 6100/9.81 = 621 \text{ Mg}.$$

Άρα, η ιδιοπερίοδος της κατασκευής κατά την **εγκάρσια** διεύθυνση προκύπτει:

$$T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{m}{k}} = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{621}{102750}} \approx 0.50 \text{ s}$$

Διαμήκης διεύθυνση

Η πρώτη ιδιοπερίοδος της κατασκευής στην διαμήκη διεύθυνση βρέθηκε με την βοήθεια του κώδικα ABAQUS ίση με **T = 0.34 s**.

5.2.3. Σχεδιασμός βάθρων γέφυρας έναντι σεισμού σχεδιασμού (Ε.Κ.8)

Φασματική επιτάχυνση σχεδιασμού για ανελαστική συμπεριφορά της κατασκευής (Ε.Κ.8)

Η γέφυρα σχεδιάστηκε για ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας **ZII**, δηλαδή για μέγιστη σεισμική επιτάχυνση **a_{gR} = 0.24g**. Το έδαφος στο οποίο θεμελιώθηκε είναι άργιλος βάθους 24m με αστράγγιστη διατμητική αντοχή **S_u = 55 kPa** και **V_s = 100 m/s**, και επομένως ανήκει στην **κατηγορία D** σύμφωνα με τον Ε.Κ.8. (Πίνακας 5.1)

Subsoil class	Description of stratigraphic profile	V _{s,30} (m/s)	N _{SPT} (bl/30cm)	S _u (kPa)
D	Deposits of loose-to-medium cohesionless soil (with or without some soft cohesive layers), or of predominantly soft-to-firm cohesive soil	< 180	< 15	< 70

Πίνακας 5. 1: Ιδιότητες εδάφους κατηγορίας D σύμφωνα με τον Ε.Κ.8

Οι παράμετροι για αυτό το έδαφος θεμελίωσης φαίνονται στον **Πίνακα 5.2**.

Ground type	S	T _B	T _C	T _D
D	1.35	0.20	0.80	2.00

Πίνακας 5. 2: Παράμετροι εδάφους κατηγορίας D κατά τον Ε.Κ.8.

Η κατασκευή ανήκει στην κατηγορία σπουδαιότητας II ($\gamma_I=1.00$) και ο συντελεστής συμπεριφοράς θεωρήθηκε υπέρ της ασφαλείας $q = 2.00$.

Για τον σεισμικό σχεδιασμό κρίσιμη είναι η εγκάρσια διεύθυνση της κατασκευής, επομένως η φασματική επιτάχυνση θα υπολογιστεί με βάση την ιδιοπερίοδο στην εγκάρσια διεύθυνση. Για το δεδομένο έδαφος, ισχύει $T_B < T < T_C$, άρα η φασματική επιτάχυνση σχεδιασμού για ανελαστική συμπεριφορά της κατασκευής προκύπτει:

$$S_d(T) = \gamma_I \times a_{gR} \times S \times \frac{2.5}{q} = 1.0 \times 0.24g \times 1.35 \times \frac{2.5}{2.0} = \mathbf{0.405g}$$

Σεισμική ροπή σχεδιασμού

Επομένως, η αδρανειακή δύναμη του σεισμού σχεδιασμού θα είναι:

$$Q_{eq} = m \times S_d = 621 \times 0.4g = 2471kN$$

και η ροπή που προκύπτει στην βάση του βάρου:

$$M_{eq} = Q_{eq} \times h = 2471 \times 8 = \mathbf{19765 kNm}.$$

5.2.4. Στατική επίλυση

Για τον σχεδιασμό πραγματοποιήθηκε η στατική επίλυση του φορέα για τα δύο στατικά προσομοιώματα που εξετάζονται, δηλαδή **μέ** και **χωρίς θεώρηση αρμών** μεταξύ καταστρώματος και ακραίων βάθρων. Εξετάστηκε, τόσο η περίπτωση έδρασης σε ομοιόμορφο έδαφος και λαμβάνοντας υπ' όψιν την **ευκαμψία της θεμελίωσης**, όσο και η περίπτωση έδρασης σε δίστρωτο έδαφος, λαμβάνοντας υπ' όψιν και την ευκαμψία της θεμελίωσης. Το εδαφικό προφίλ διαφέρει προφανώς από βάρου σε βάρου στην περίπτωση αυτή. Η διαφοροποίηση έγινε, επειδή ο φορέας παραμορφώνεται λόγω των τοπικών εδαφικών συνθηκών (**Σχήματα 5.8 και 5.9**), με αποτέλεσμα να αναπτύσσει διαφορετικά εντατικά μεγέθη, απ' ότι εάν εδραζόταν σε στρώση εδάφους σταθερού πάχους. Τα διαγράμματα των εντατικών

μεγεθών που προκύπτουν για τις παραπάνω περιπτώσεις παρουσιάζονται στα **Σχήματα 5.8 – 5.13**.

Όπως φαίνεται από τα παραπάνω σχήματα, η ύπαρξη της εδαφικής κοιλάδας και των τοπικών εδαφικών συνθηκών έδρασης που συνεπάγεται, έχει ως αποτέλεσμα την πρόκληση διαφορικών καθιζήσεων στην γέφυρα και την ανάπτυξη παραμορφώσεων, και άρα επιπλέον εντατικών μεγεθών στον φορέα, ακόμα και για την στατική φόρτιση.

5.2.5. Σχεδιασμός βάθρων γέφυρας

Κρίσιμος για την διαστασιολόγηση των βάθρων είναι ο σεισμικός σχεδιασμός, για τον οποίο έχει προκύψει ροπή $M_{eq} = 20 \text{ MNm}$ στην βάση του βάθρου. Η αξονική δύναμη που αντιστοιχεί στην ροπή αυτή είναι $N_{sd} = 6000 \text{ kN}$.

Η διατομή των βάθρων είναι κυκλική, διαμέτρου $D=2.20\text{m}$ και είναι κατασκευασμένη από οπλισμένο σκυρόδεμα. Το πάχος της επικάλυψης είναι $c=0.10\text{m}$ και το σκυρόδεμα είναι **C30/35**, με θλιπτική αντοχή σχεδιασμού:

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_M} = \frac{30}{1.5} = 20 \text{ MPa}$$

και ο χάλυβας **S500** με αντοχή σχεδιασμού:

$$f_{yd} = \frac{500}{1.15} = 435 \text{ MPa}$$

Για οπλισμό **100Ø35**, δηλαδή $\rho = 2,5\%$ και για $N_{sd} = 6000\text{kN}$, προκύπτει ροπή αντοχής $M_{Rd} = 26 \text{ MNm} > M_{eq}$.

5.2.6. Σχεδιασμός επιφανειακών θεμελίων

Έλεγχος φέρουσας ικανότητας

A. Στατική φόρτιση

Υπό την στατική φόρτιση μεγαλύτερη καταπόνηση υφίστανται τα ακραία θεμέλια, τα οποία δέχονται τα εξής εντατικά μεγέθη:

M_{Ed}	2200kNm
Q_{Ed}	1100kN
N_{Ed}	3710kN

Πίνακας 5.3: Εντατικά μεγέθη στην βάση ακραίου βάθρου υπό στατική φόρτιση

Για τα μεγέθη αυτά προκύπτει εκκεντρότητα:

$$e = \frac{M+Q \cdot h}{N} = \frac{2200+1100 \cdot 2}{3710} = 1.19m < l/3 = 4m$$

Ο έλεγχος έναντι φέρουσας ικανότητας γίνεται κατά **DIN4017** για λοξή και έκκεντρη φόρτιση.

Το φορτίο θραύσης δίνεται από τον τύπο:

$$V_b = a' \cdot b' \cdot (c \cdot N_c \cdot k_c \cdot v'_c + \gamma_1 \cdot d \cdot N_d \cdot k_d \cdot v'_d + \gamma_2 \cdot b' \cdot N_b \cdot k_b \cdot v'_b)$$

Όπου:

- $a' = a - 2e_a = 12m$, $b' = b - 2e_b = 9.63m$ τα ενεργά μήκη,
- $c = S_u = 55kPa$ η συνοχή του εδάφους,
- $d = 0$ το βάθος θεμελίωσης, $\gamma_2 = 18kN/m^3$,
- $N_c = 5$, $N_d = 1$, $N_b = 0$ οι συντελεστές φέρουσας ικανότητας κατά DIN4017
- $v'_c = 1 + 0.2 \cdot \frac{b'}{a'} = 1.16$, $v'_d = 1.0$, $v'_b = 1.0$ οι συντελεστές σχήματος και
- $k_c = 0.5 + 0.5 \cdot \sqrt{1 - \frac{H_b}{a' \cdot b' \cdot c_u}}$ ο συντελεστής για λοξή φόρτιση για καθαρώς συνεκτικό έδαφος και φορτίο παράλληλο προς την μικρή πλευρά, με H_b την οριζόντια δύναμη θραύσης.

Για την εύρεση του συντελεστή k_c , ακολουθείται επαναληπτική διαδικασία, από την οποία προκύπτει $k_c=0.57$ και $V_b=21\text{MN}$, δηλαδή συντελεστής ασφαλείας έναντι θραύσης **SF = 5.67**.

B. Σεισμική φόρτιση

Υπό την σεισμική φόρτιση τα εντατικά μεγέθη του βάρου είναι τα εξής:

M_{Ed}	19765kNm
Q_{Ed}	2470kN
N_{Ed}	6000kN

Πίνακας 5.4: Εντατικά μεγέθη στην βάση ακραίου βάρου υπό σεισμική φόρτιση

Για τα μεγέθη αυτά προκύπτει εκκεντρότητα:

$$e = \frac{M+Q \cdot h}{N} = \frac{19765+2470 \cdot 2}{6600} = 3.74\text{m} < l/3 = 4\text{m}$$

Ο έλεγχος έναντι φέρουσας ικανότητας γίνεται με **DIN4017** για λοξή και έκκεντρη φόρτιση.

Προκύπτουν: $a'=12\text{m}$, $b'=4.5\text{m}$, $v'_c = 1.08$. Οι υπόλοιποι συντελεστές παραμένουν ίδιοι. Με την επαναληπτική διαδικασία προκύπτει ο συντελεστής $k_c=0.53$ και $V_b=8600\text{kN}$, δηλαδή συντελεστής ασφαλείας **SF = 1.30**.

5.3. Αριθμητικά προσομοιώματα

5.3.1. Προσομοίωμα ανωδομής

Η προσομοίωση της ανωδομής είναι κοινή σε όλα τα παρακάτω εδαφικά προσομοιώματα. Το κατάστρωμα και τα βάρη της ανωδομής, προσομοιώθηκαν με ελαστικά δισδιάστατα στοιχεία δοκού, μήκους 1m. Τα θεμέλια προσομοιώθηκαν με ελαστικά τετραεδρικά συνεχή στοιχεία επίπεδης παραμόρφωσης, διαστάσεων 1×1m. Τα στοιχεία της διεπιφάνειας μεταξύ εδάφους και ανωδομής επιλέχτηκαν έτσι, ώστε να επιτυγχάνεται συνεχής επαφή μεταξύ θεμελίων και εδάφους. Σε όλα τα προσομοιώματα, η εκτός επιπέδου διάσταση του εδάφους πολλαπλασιάστηκε με τον συντελεστή σχήματος, δηλαδή 1.2 κατά Meyerhof για το τετραγωνικό θεμέλιο, ώστε η τρισδιάστατη πραγματικότητα να αντιπροσωπευτεί πιο ικανοποιητικά από την δισδιάστατη προσέγγιση.

Τέλος, στην περίπτωση θεώρησης εφεδράνων, αυτά προσομοιώθηκαν με την χρήση ενός μη γραμμικού ελατηρίου στην οριζόντια διεύθυνση, το οποίο έχει βαθμονομηθεί, όπως φαίνεται στο σχήμα **Σχήμα 5.16 (β)**. Η μετακίνηση κατά την κατακόρυφη διεύθυνση εμποδίστηκε με την χρήση ενός ελαστικού ελατηρίου, υψηλής δυσκαμψίας στην διεύθυνση αυτή.

5.3.2. Προσομοιώματα εδάφους

Για την μελέτη της απόκρισης της κατασκευής εδραζόμενης στην εδαφική κοιλάδα, χρησιμοποιήθηκαν τα παρακάτω αριθμητικά προσομοιώματα, τα οποία είναι όλα υλοποιημένα στον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων **ABAQUS**:

A. Γέφυρα εδραζόμενη στην εδαφική κοιλάδα

Το έδαφος για το πλήρες πρόβλημα (**Σχήματα 5.17, 5.18**) προσομοιώθηκε, όπως περιγράφεται στην **Παράγραφο 1**.

B. Αριθμητικό προσομοίωμα γέφυρας εδραζόμενης σε έδαφος με μονοδιάστατη γεωμετρία

Το προσομοίωμα αυτό παρουσιάζεται στο **Σχήμα 5.19**. Τόσο το έδαφος όσο και ο βράχος έχουν προσομοιωθεί με στοιχεία επίπεδης παραμόρφωσης, διαστάσεων 1×1m. Η βάση του μοντέλου είναι δεσμευμένη για τις μετακινήσεις στην κατακόρυφη διεύθυνση, ενώ το δεξί και το αριστερό σύνορο του εδάφους έχουν δεσμευτεί κινηματικά, ώστε το έδαφος να κινείται σαν διατμητικός πρόβολος. Η διέγερση επιβάλλεται στο προσομοίωμα μέσω αποσβεστήρων που είναι τοποθετημένοι στην βάση του.

Γ. Αριθμητικό προσομοίωμα γέφυρας εδραζόμενης σε αμιγές έδαφος

Η μόνη διαφορά του προσομοιώματος αυτό με το παραπάνω είναι, ότι σε αυτό δεν υπάρχει βράχος κάτω από το έδαφος, αλλά η κατασκευή εδράζεται σε ένα αμιγές στρώμα εδάφους (**Σχήμα 5.20**).

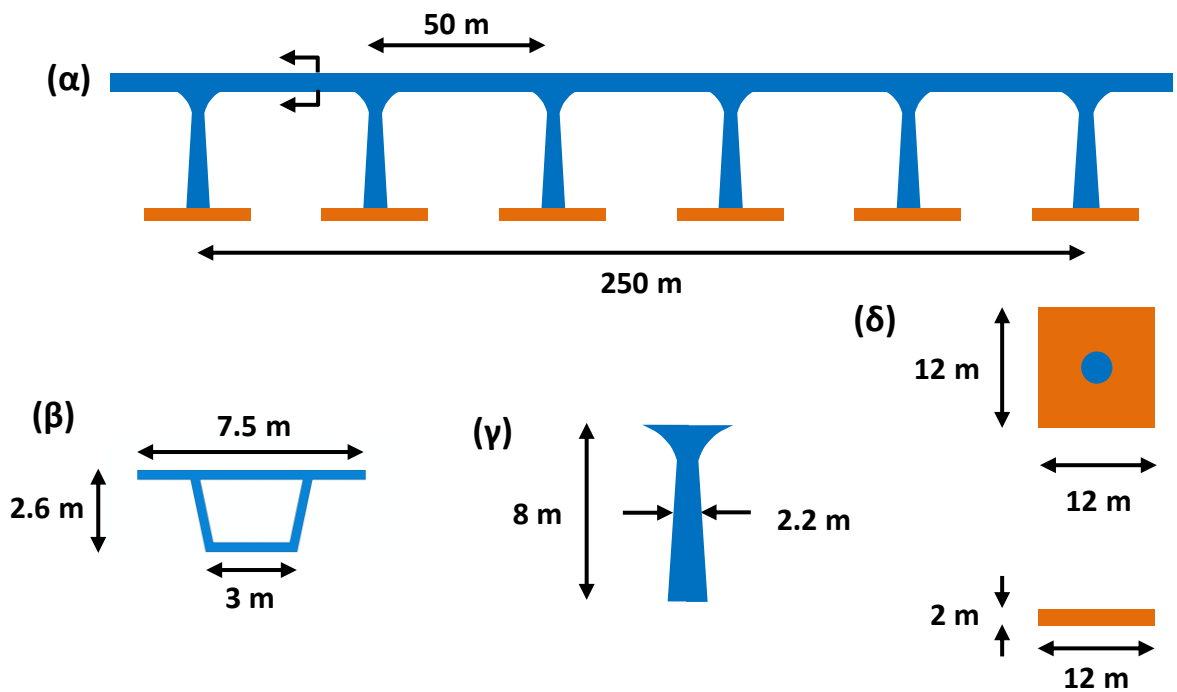
Δ. Αριθμητικό προσομοίωμα γέφυρας εδραζόμενης σε ανεξάρτητες, αμιγώς εδαφικές στήλες

Στο προσομοίωμα αυτό (**Σχήμα 5.21**), τα βάρθρα της γέφυρας εδράζονται σε ανεξάρτητες εδαφικές στήλες. Κάθε στήλη λειτουργεί ως διατμητικός πρόβολος και μπορεί να κινείται ανεξάρτητα από τις υπόλοιπες. Η λειτουργία αυτή εξασφαλίζεται με την χρήση κινηματικών δεσμεύσεων μεταξύ του δεξιού και του αριστερού άκρου της κάθε στήλης.

Ε. Αριθμητικό προσομοίωμα γέφυρας εδραζόμενης σε ανεξάρτητες, εδαφικές στήλες με θεώρηση της δυσκαμψίας

Η διαφορά αυτού του μοντέλου με το παραπάνω είναι ότι η πρώτη εδαφική στήλη δεν είναι αμιγώς εδαφική, αλλά αποτελείται από ένα εδαφικό στρώμα πάχους 3 μέτρων πάνω σε βράχο (**Σχήμα 5.22**), δηλαδή προσομοιώνει με ακρίβεια τις τοπικές εδαφικές συνθήκες κάτω από το κέντρο του πρώτου θεμελίου. Έτσι, λαμβάνεται υπόψη η αυξημένη σύνθετη δυσκαμψία του θεμελίου αυτού, λόγω του ιδιαίτερου μικρού πάχους της υποκείμενης εδαφικής στρώσης.

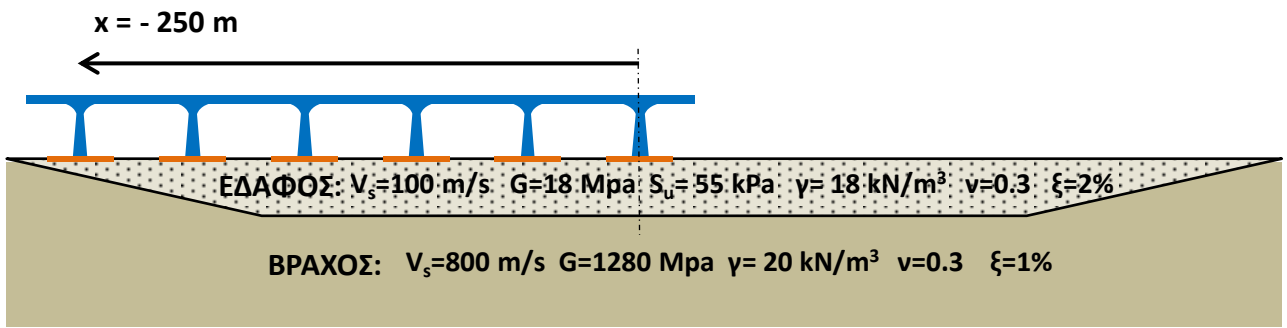
Σχήματα κεφαλαίου 5



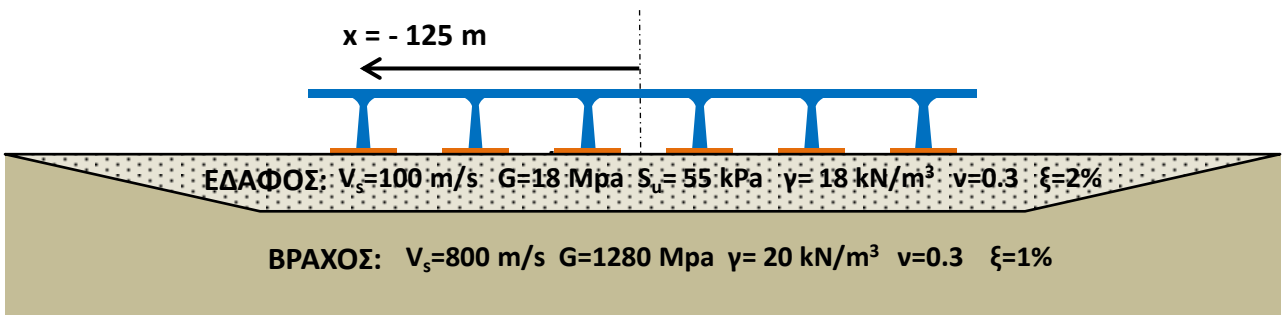
Σχήμα 5.1: (α) Σκαρίφημα γέφυρας, (β) διατομή καταστρώματος, (γ) λεπτομέρεια βάθρου, (δ) κάτοψη και διατομή θεμελίου.



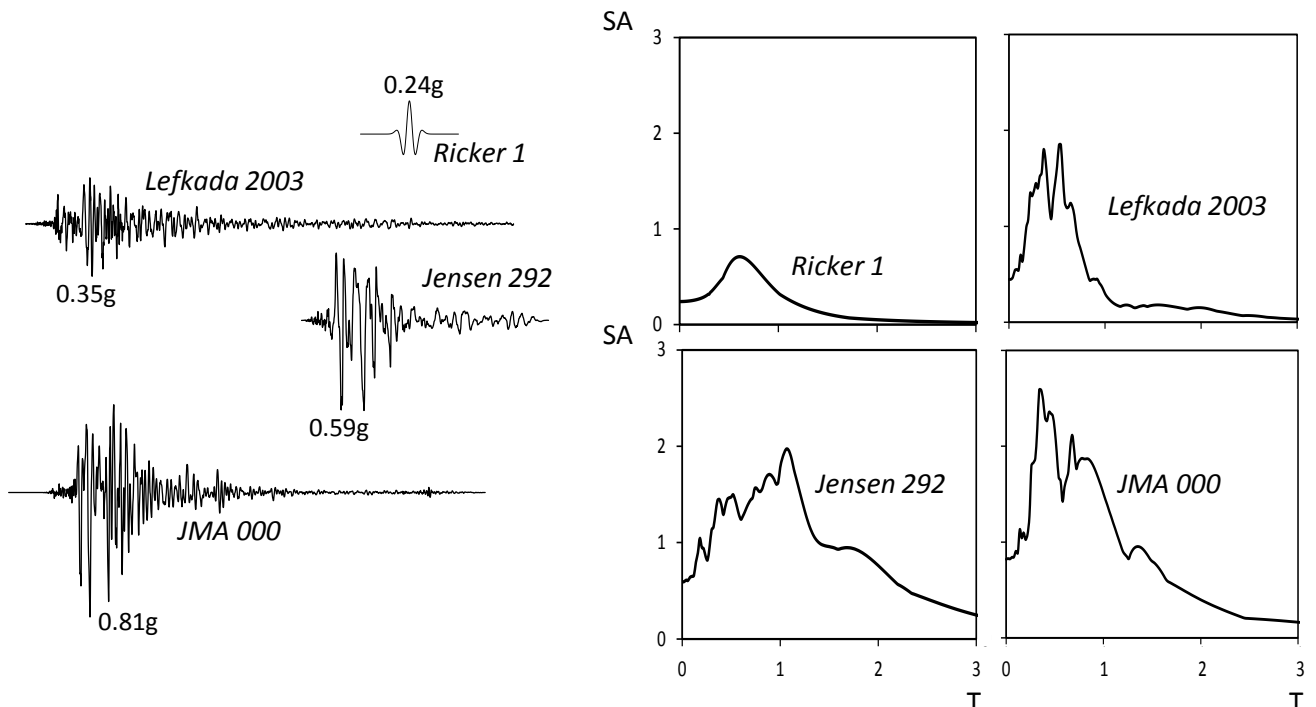
Σχήμα 5.2: Σκαρίφημα γέφυρας με εφάδρανα μεταξύ καταστρώματος και ακρόβαθρων.



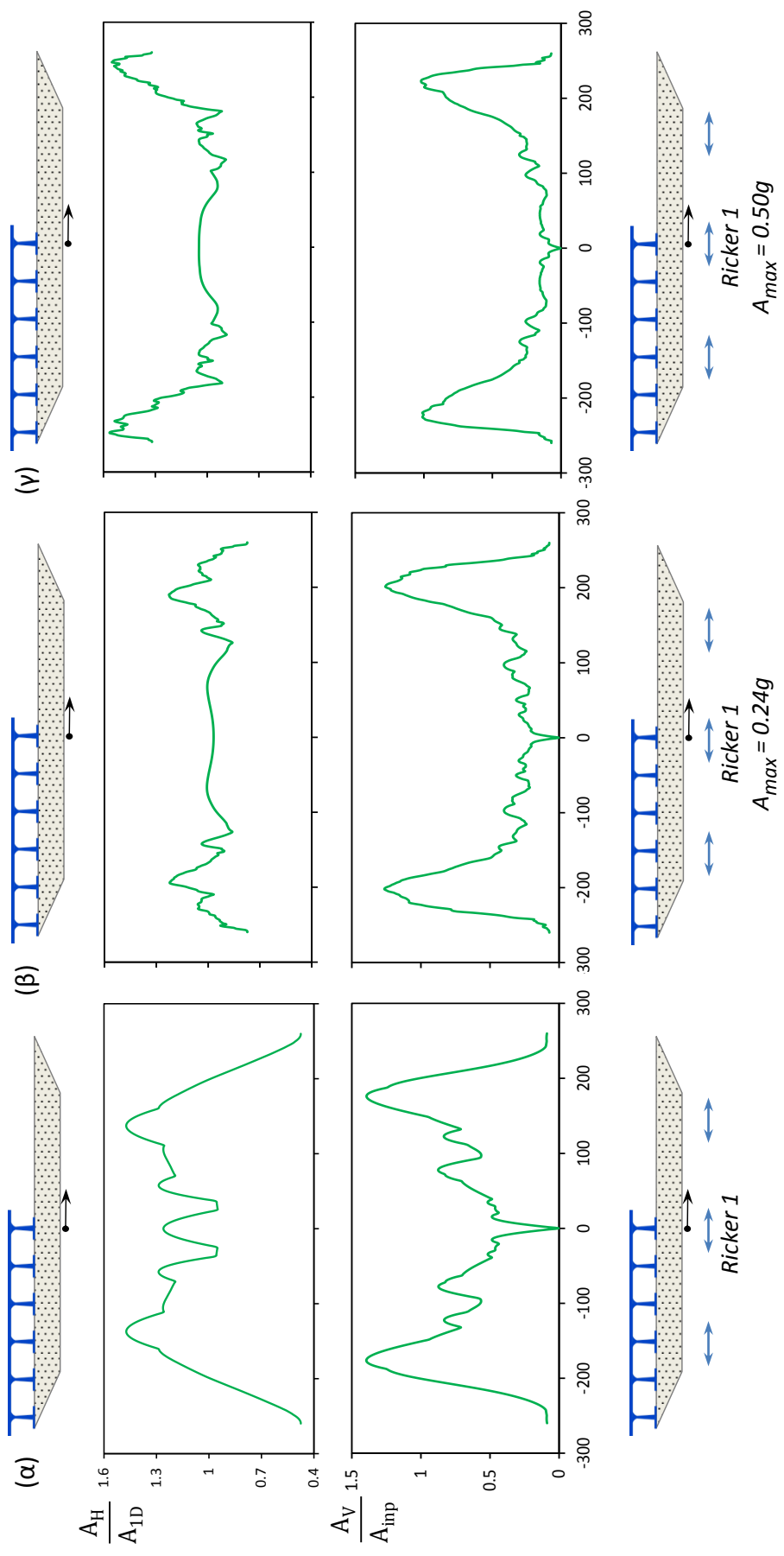
Σχήμα 5.3(α): Θέση 1 της γέφυρας στην κοιλάδα.



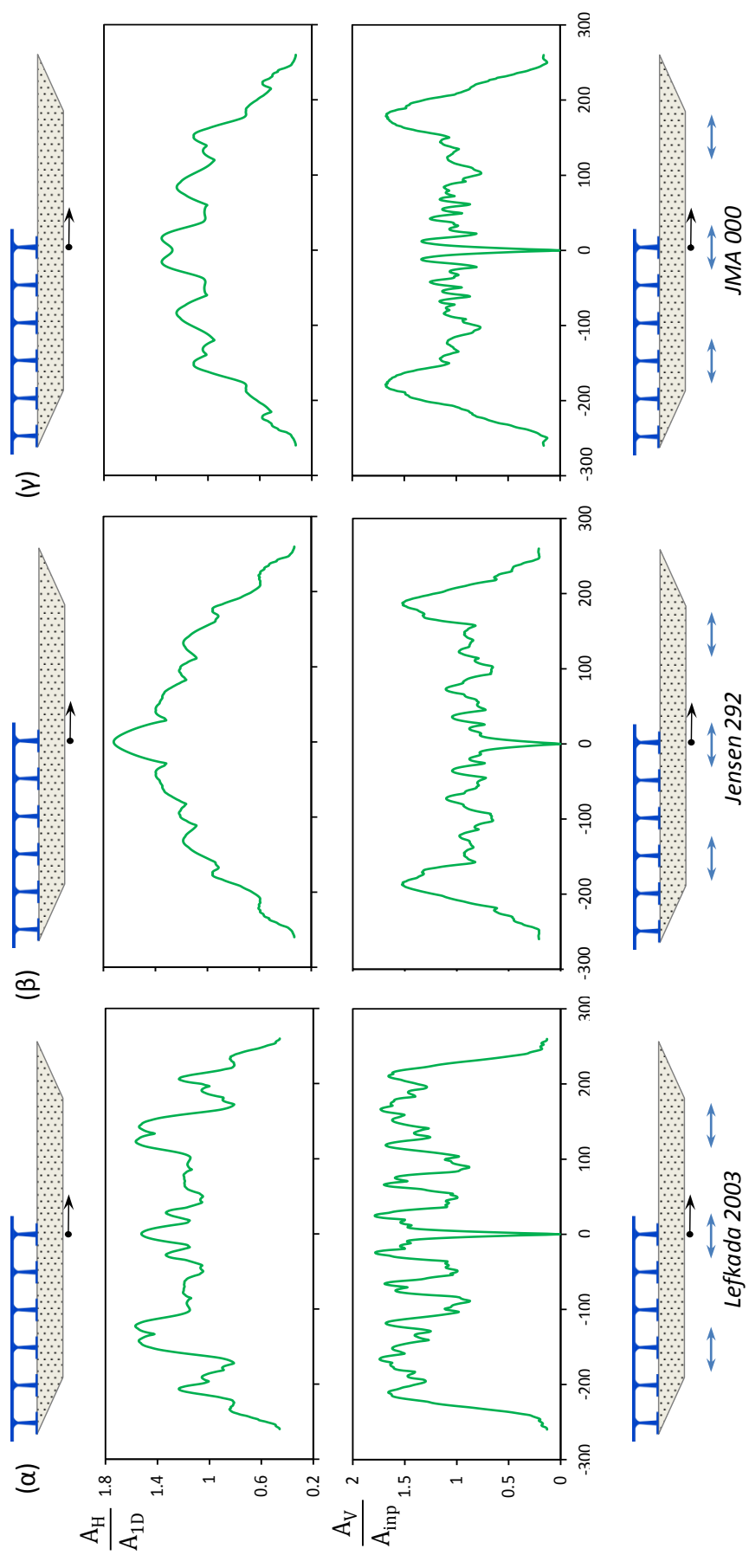
Σχήμα 5.3(β): Θέση 2 της γέφυρας στην κοιλάδα.



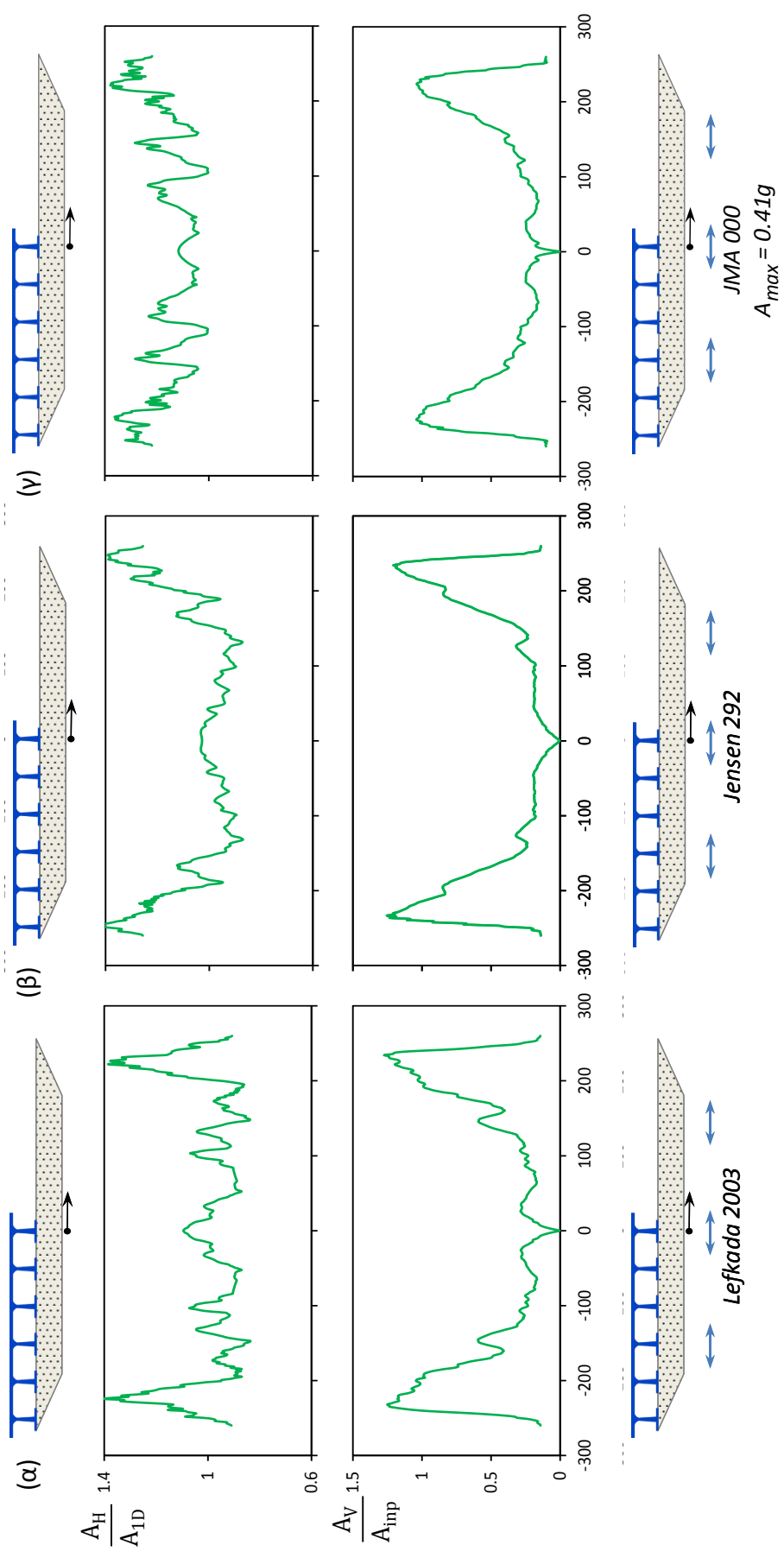
Σχήμα 5.4: Χρονοϊστορίες και ελαστικά φάσματα απόκρισης για τις διεγέρσεις Ricker 1, Lefkada 2003, Jensen 292 και JMA 000 που χρησιμοποιήθηκαν για τη μελέτη της συμπεριφοράς της γέφυρας.



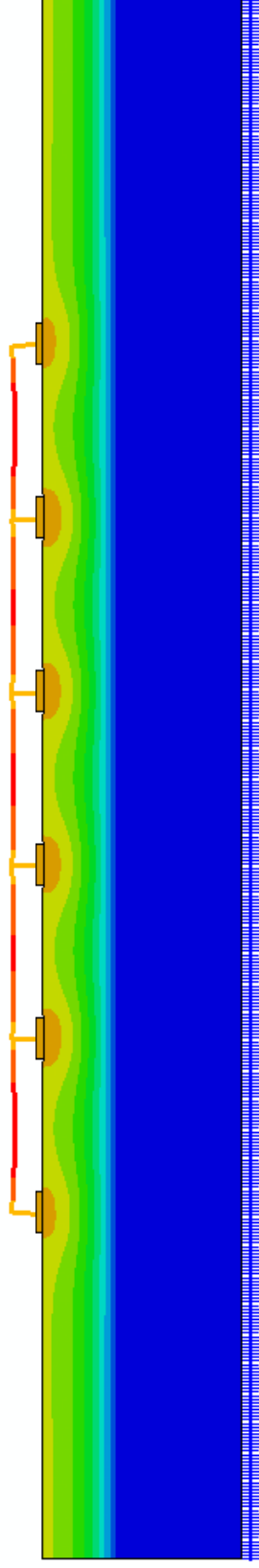
Σχήμα 5.5: Διαγράμματα αδιαστατοποιημένων επιταχύνσεων στο ελεύθερο πεδίο για διεγερση Ricker 1, με θεώρηση (α) ελαστικού εδάφους, (β) ανελαστικού εδάφους και $A_{max} = 0.24g$ και (γ) ανελαστικού εδάφους και $A_{max} = 0.50g$.



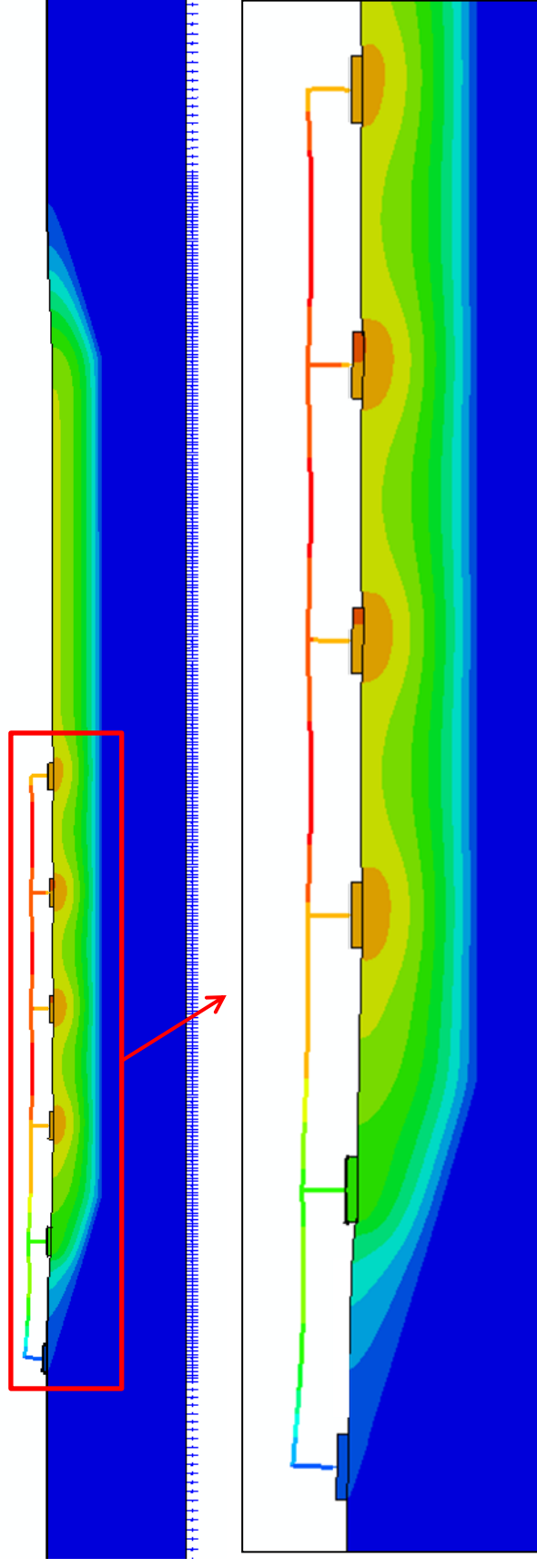
Σχήμα 5.6: Διαγράμματα αδισστατοποιημένων επιταχύνσεων στο ελεύθερο πεδίο με θεώρηση ελαστικού εδάφους για τις σεισμικές διεγέρσεις (α) **Lefkada 2003**, (β) **Jensen 292** (Northridge, 1994) και (γ) **JMA 000** (Kobe, 1995).



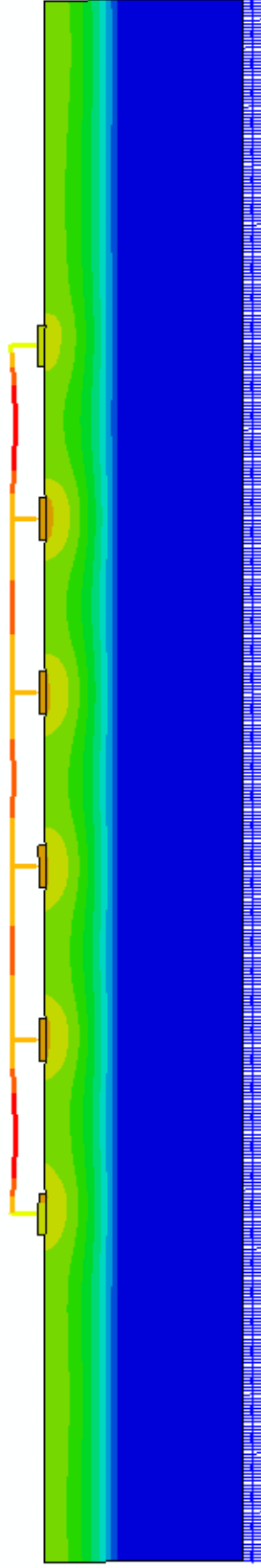
Σχήμα 5.6: Διαγράμματα αδιαστατοποιημένων επιταχύνσεων στο ελεύθερο πεδίο με θεώρηση **ανελαστικού** εδάφους για τις σεισμικές διεγέρσεις (α) **Lefkada 2003**, (β) **Jensen 292** (Northridge, 1994) και (γ) **JMA 000** (Kobe, 1995). Η διεγέρση JMA 000 έχει κλιμακωθεί, ώστε **PGA=0.41g**.



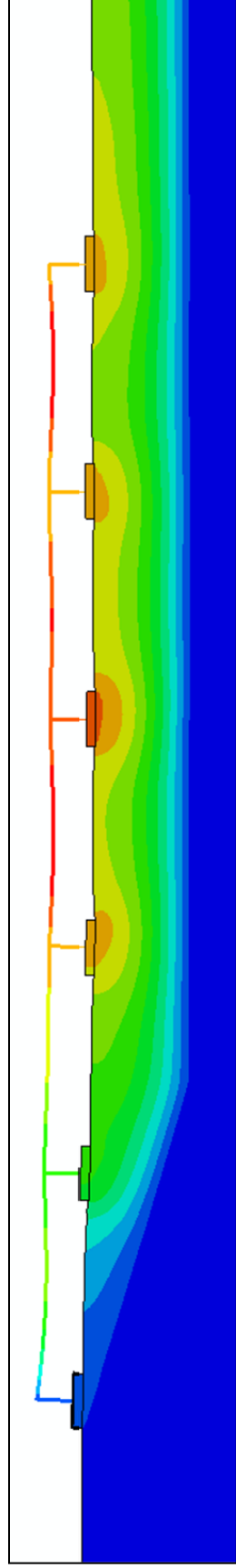
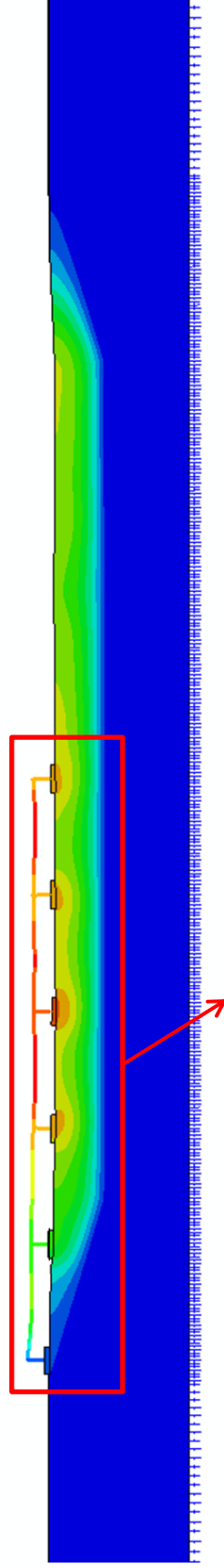
Σχήμα 5.8 (α): Παραμορφωμένος φορέας υπό στατική φόρτιση. Θεώρηση πακτώσεων στα ακρόβαθρα και μονοδιάστατη γεωμετρία του εδάφους.



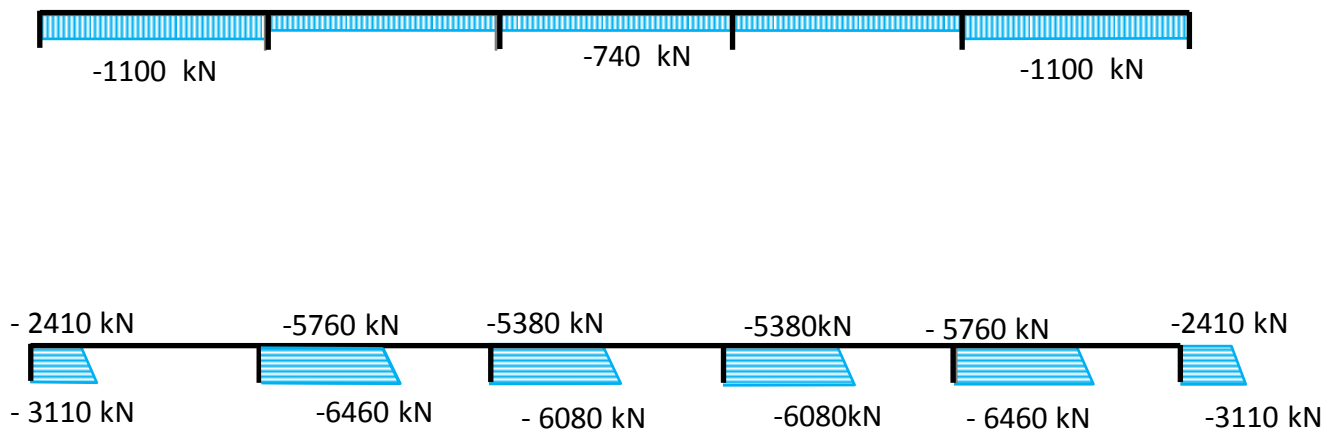
Σχήμα 5.8 (β): Παραμορφωμένος φορέας υπό στατική φόρτιση. Θεώρηση πακτώσεων στα ακρόβαθρα και φορέας στη θέση 1 της κολιάδας



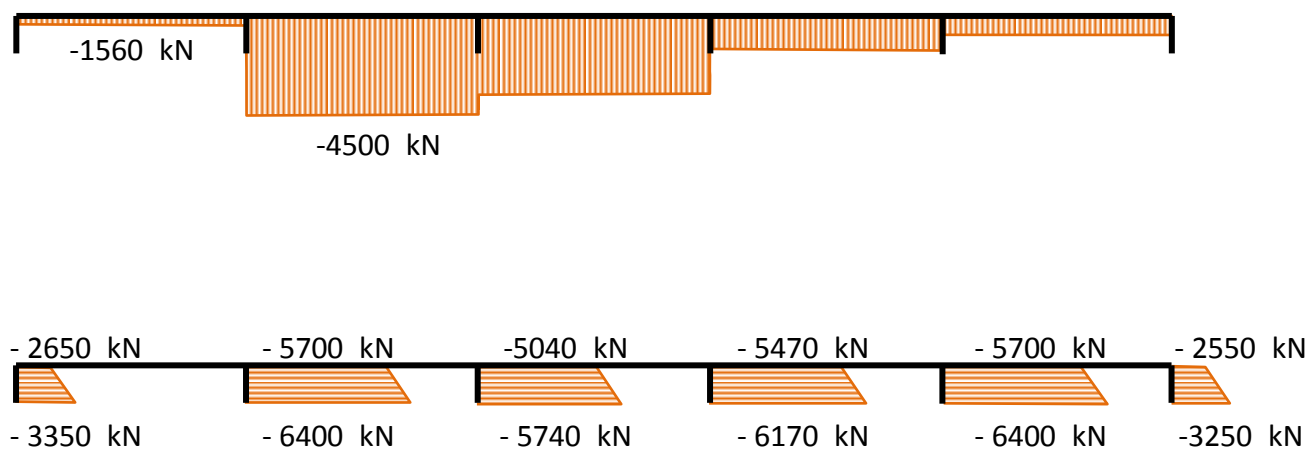
Σχήμα 5.9 (α): Παραμορφωμένος φορέας υπό στατική φόρτιση. Θεώρηση εφεδράνων στα ακρόβαθρα και μονοδιάστατη γεωμετρία του εδάφους.



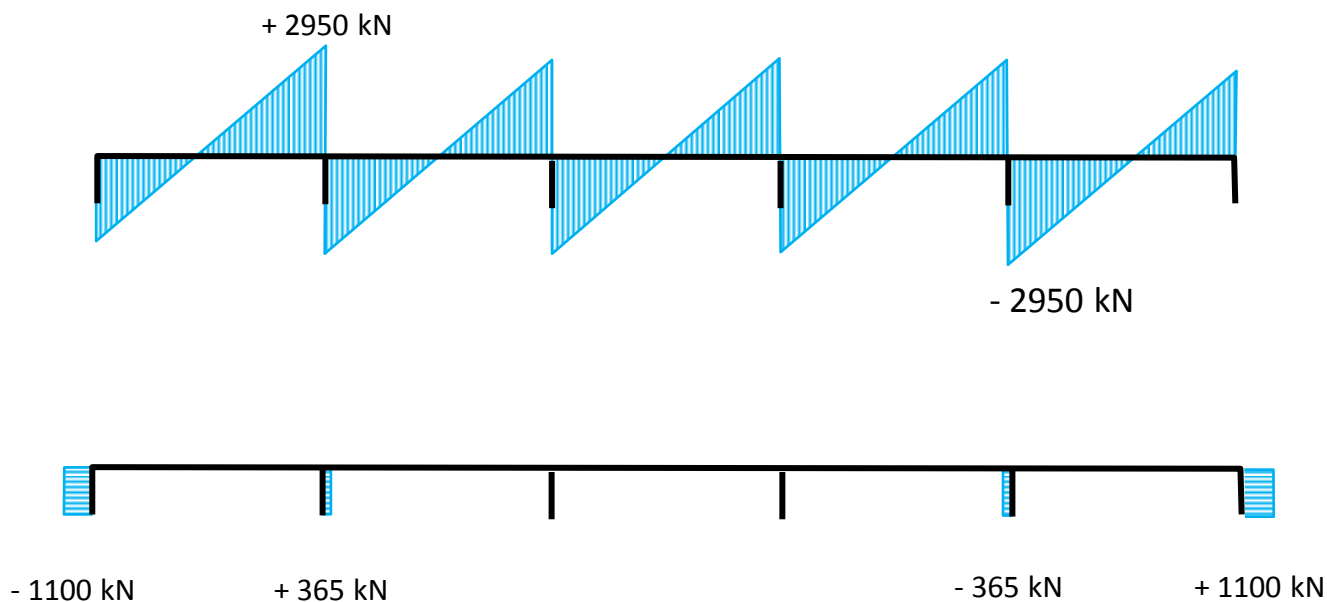
Σχήμα 5.9 (β): Παραμορφωμένος φορέας υπό στατική φόρτιση. Θεώρηση εφεδράνων στα ακρόβαθρα και φορέας στη θέση 1 της κοιλάδας.



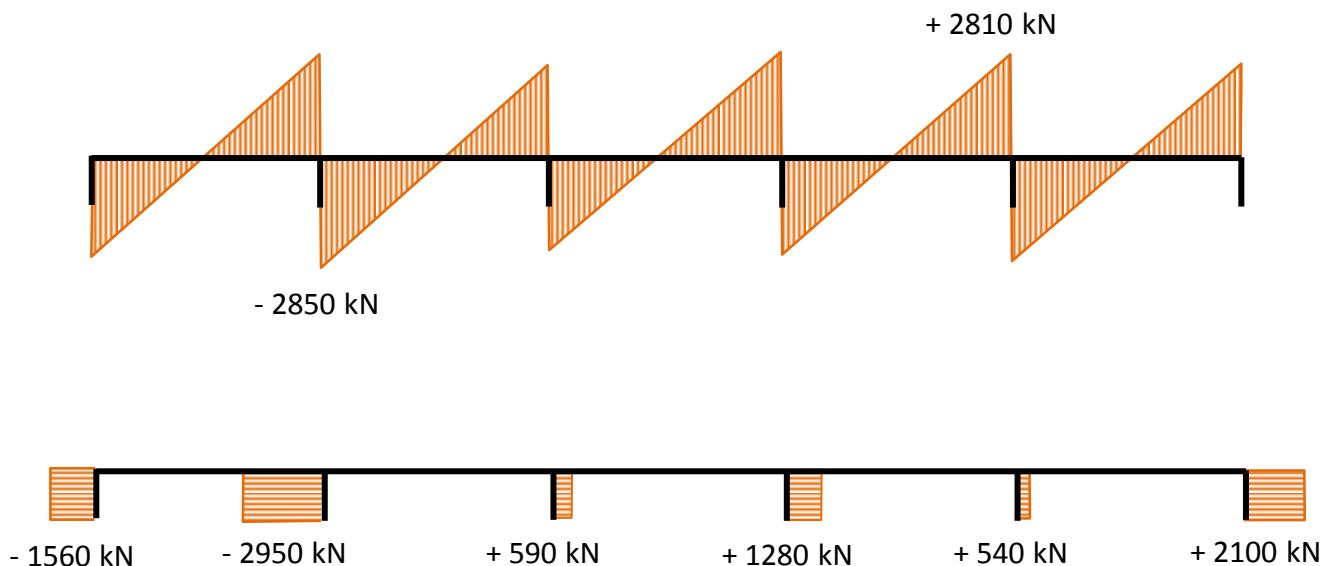
Σχήμα 5.10 (α): Διάγραμμα αξονικών δυνάμεων υπό στατική φόρτιση – θεώρηση πακτώσεων στα ακρόβαθρα – μονοδιάστατη γεωμετρία του εδάφους



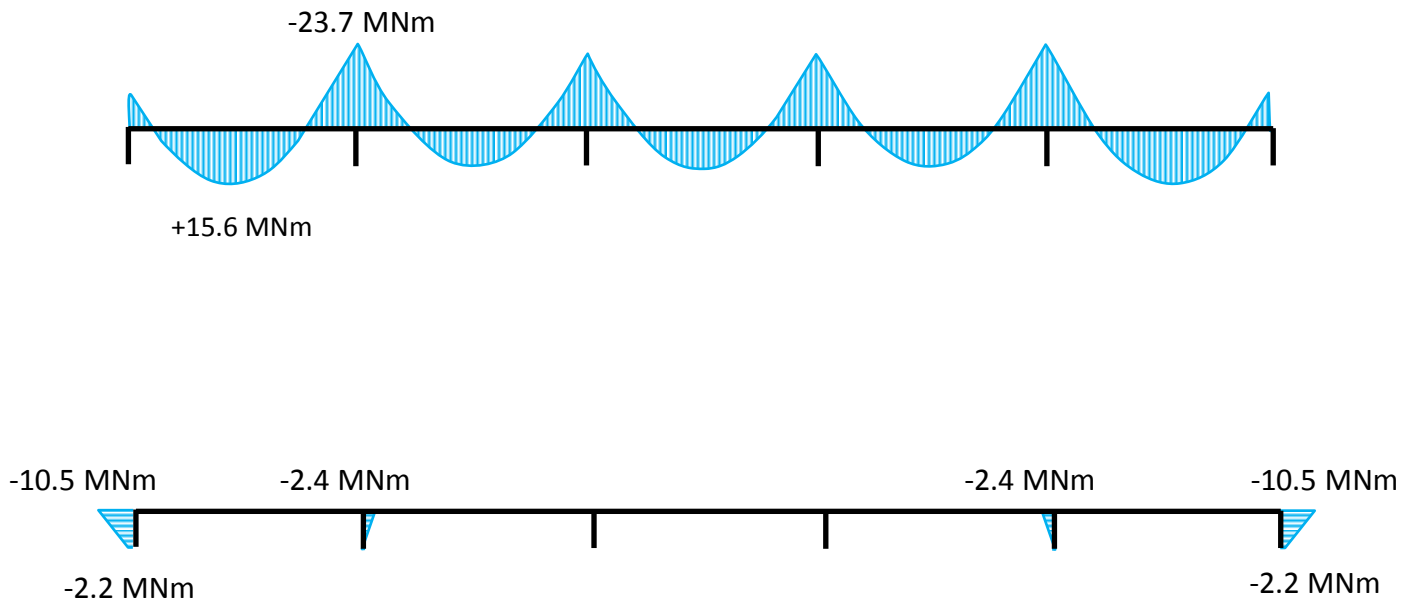
Σχήμα 5.10 (β): Διάγραμμα αξονικών δυνάμεων υπό στατική φόρτιση – θεώρηση πακτώσεων στα ακρόβαθρα – φορέας στη θέση 1 της κοιλάδας



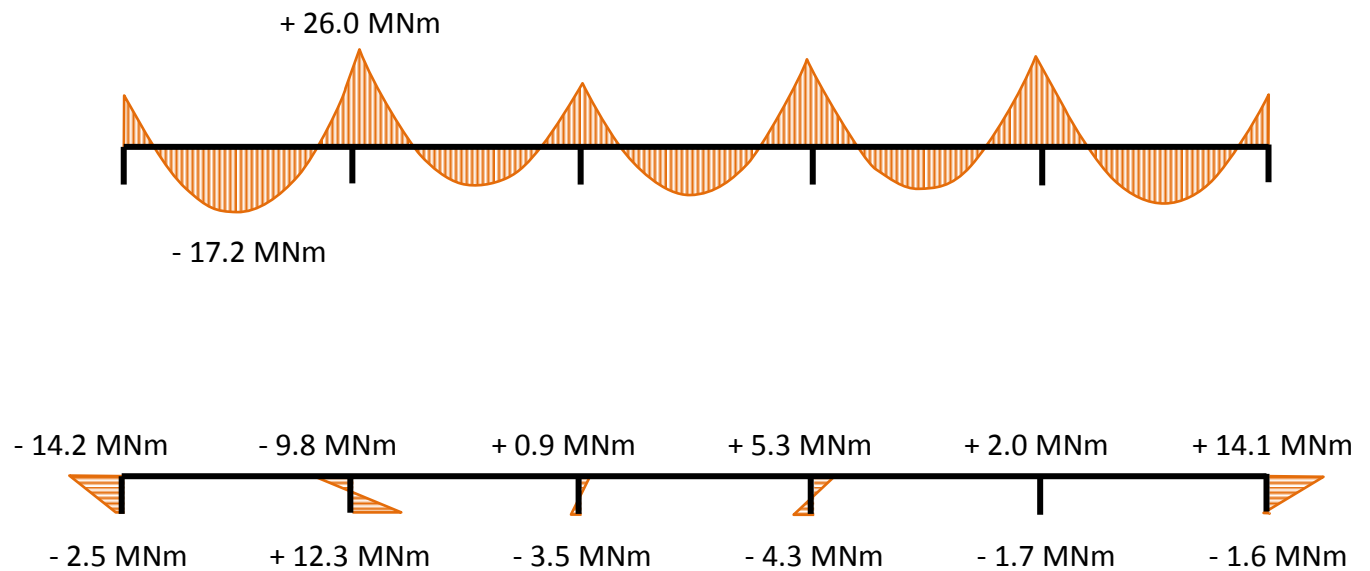
Σχήμα 5.11 (α): Διάγραμμα τεμνουσών δυνάμεων υπό στατική φόρτιση – θεώρηση πακτώσεων στα ακρόβαθρα - μονοδιάστατη γεωμετρία του εδάφους



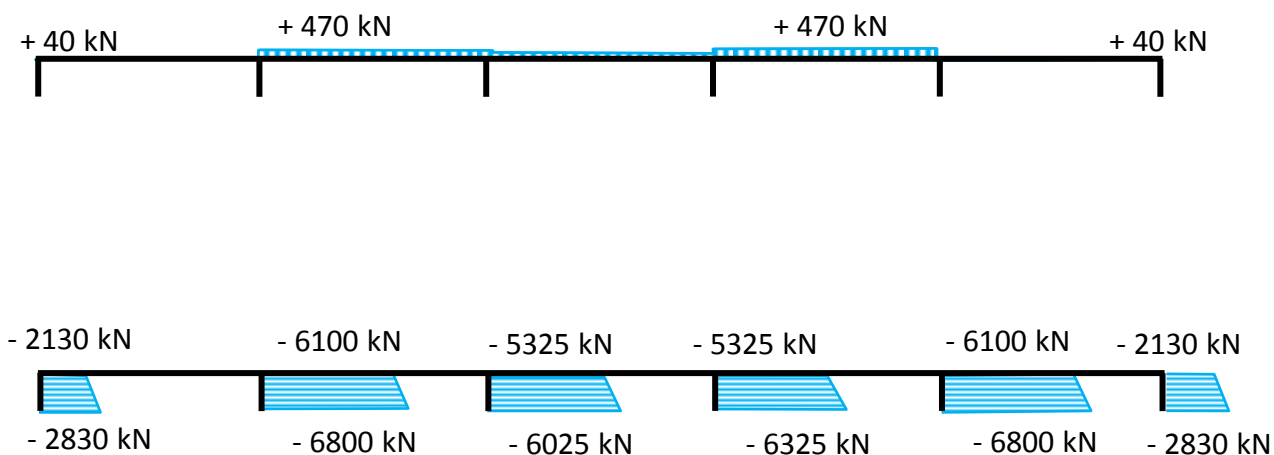
Σχήμα 5.11 (β): Διάγραμμα τεμνουσών δυνάμεων υπό στατική φόρτιση – θεώρηση πακτώσεων στα ακρόβαθρα – φορέας στη θέση 1 της κοιλάδας



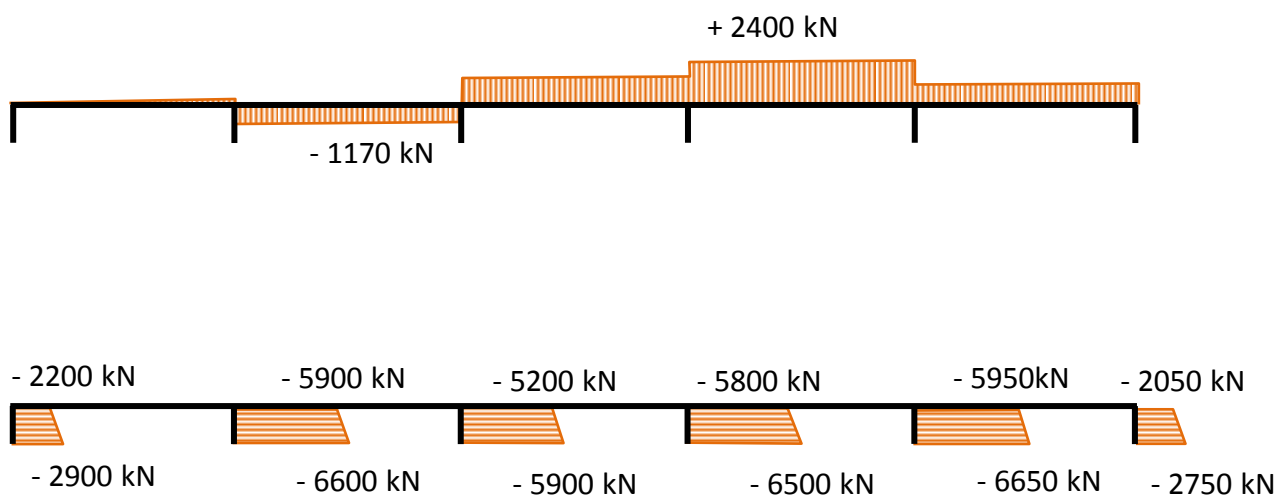
Σχήμα 5.12 (α): Διάγραμμα καμπτικών ροπών υπό στατική φόρτιση – θεώρηση πακτώσεων στα ακρόβαθρα – μονοδιάστατη γεωμετρία του εδάφους



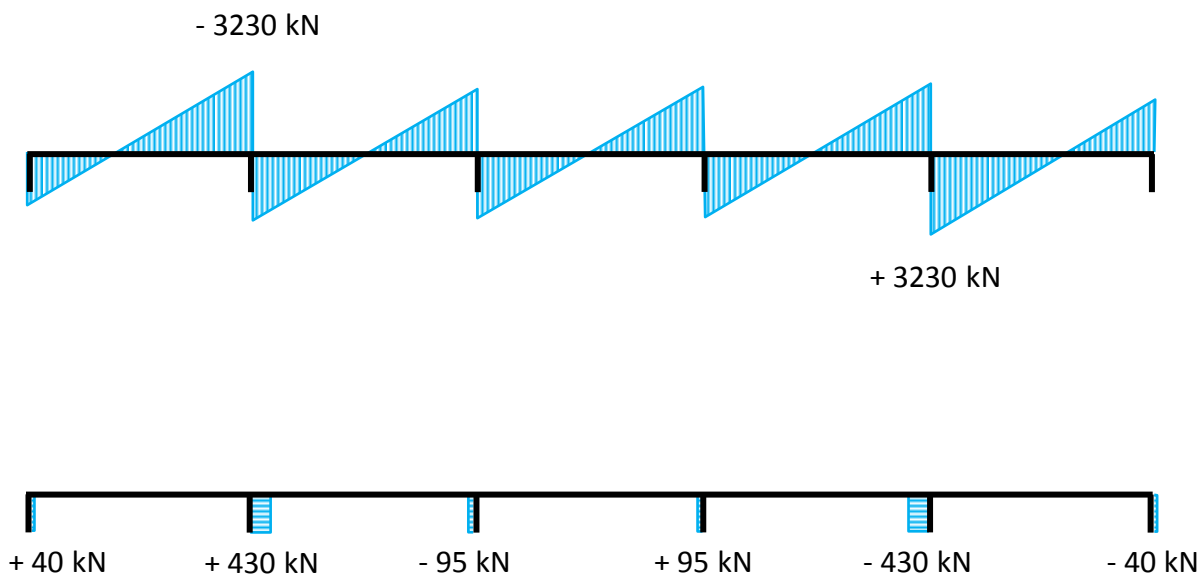
Σχήμα 5.12 (β): Διάγραμμα καμπτικών ροπών υπό στατική φόρτιση – θεώρηση πακτώσεων στα ακρόβαθρα – φορέας στη θέση 1 της κοιλάδας



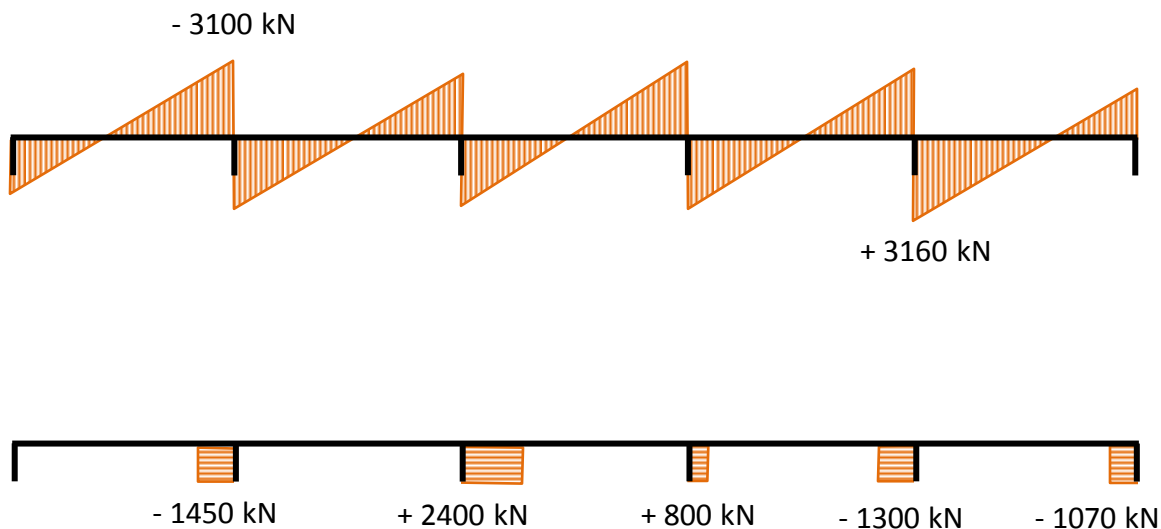
Σχήμα 5.13 (α): Διάγραμμα αξονικών δυνάμεων υπό στατική φόρτιση – θεώρηση εφεδράνων στα ακρόβαθρα – μονοδιάστατη γεωμετρία του εδάφους



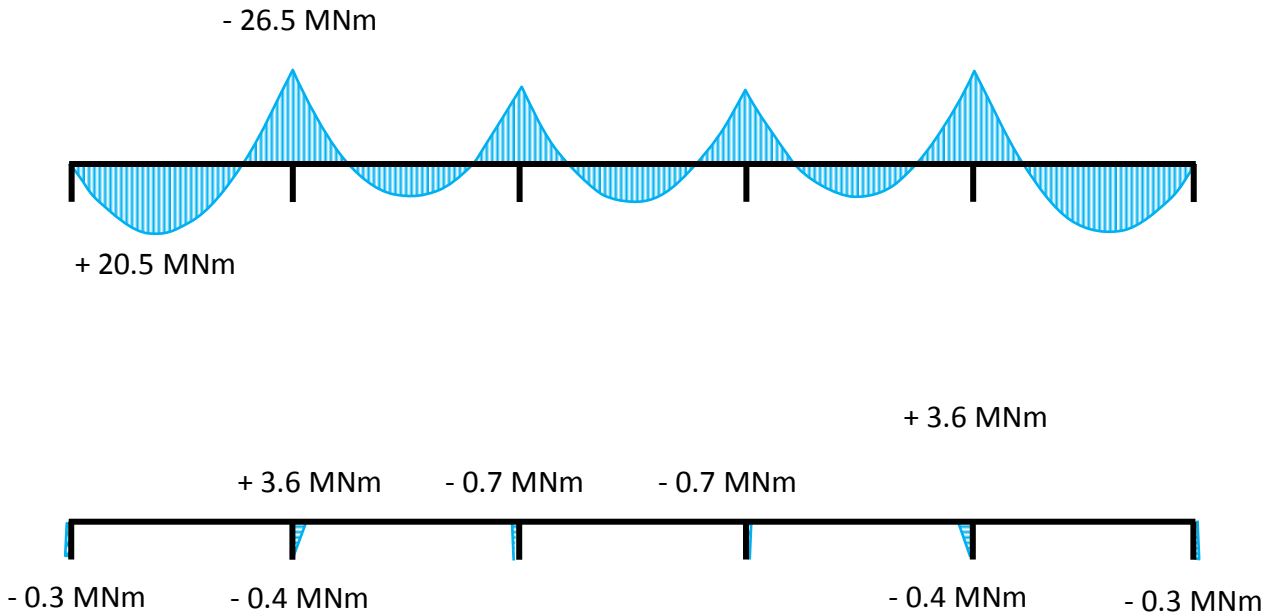
Σχήμα 5.13 (β): Διάγραμμα αξονικών δυνάμεων υπό στατική φόρτιση – θεώρηση εφεδράνων στα ακρόβαθρα – φορέας στη θέση 1 της κοιλάδας



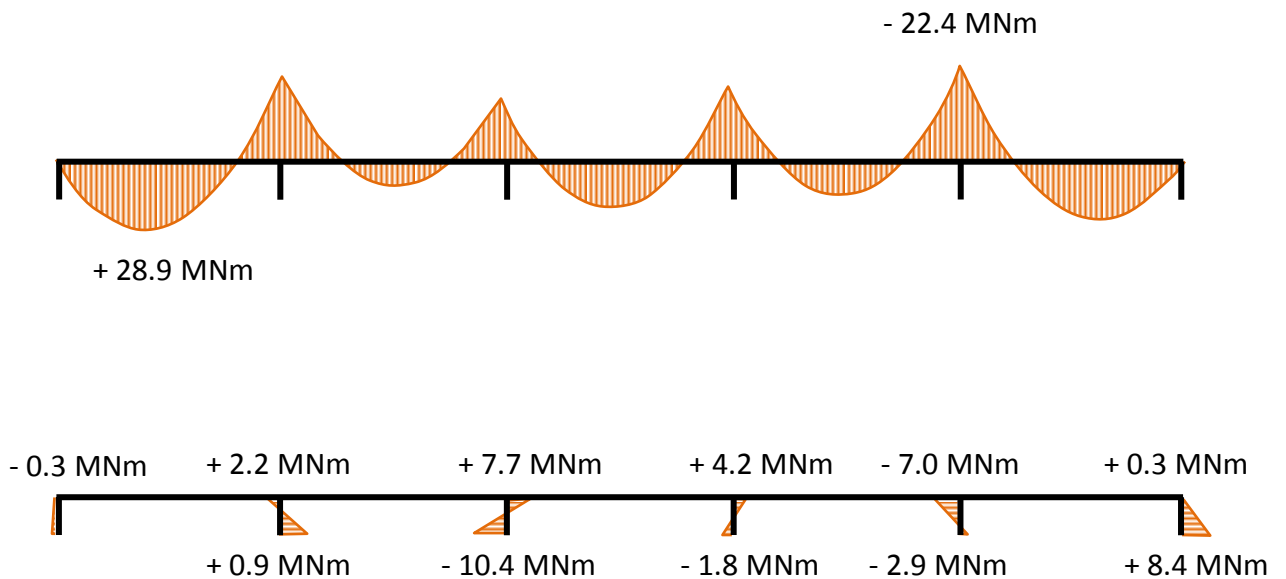
Σχήμα 5.14 (α): Διάγραμμα τεμνουσών δυνάμεων υπό στατική φόρτιση – θεώρηση εφεδράνων στα ακρόβαθρα – μονοδιάστατη γεωμετρία του εδάφους



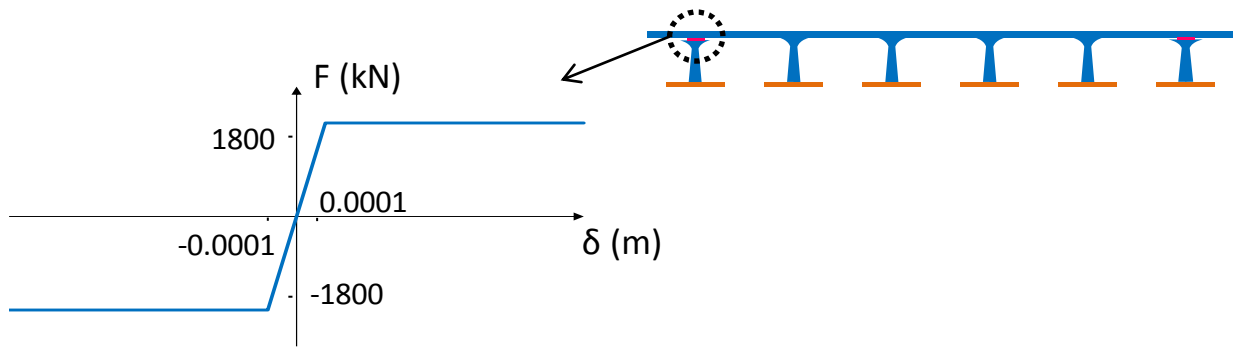
Σχήμα 5.14 (β): Διάγραμμα τεμνουσών δυνάμεων υπό στατική φόρτιση – θεώρηση εφεδράνων στα ακρόβαθρα – φορέας στη θέση 1 της κοιλάδας



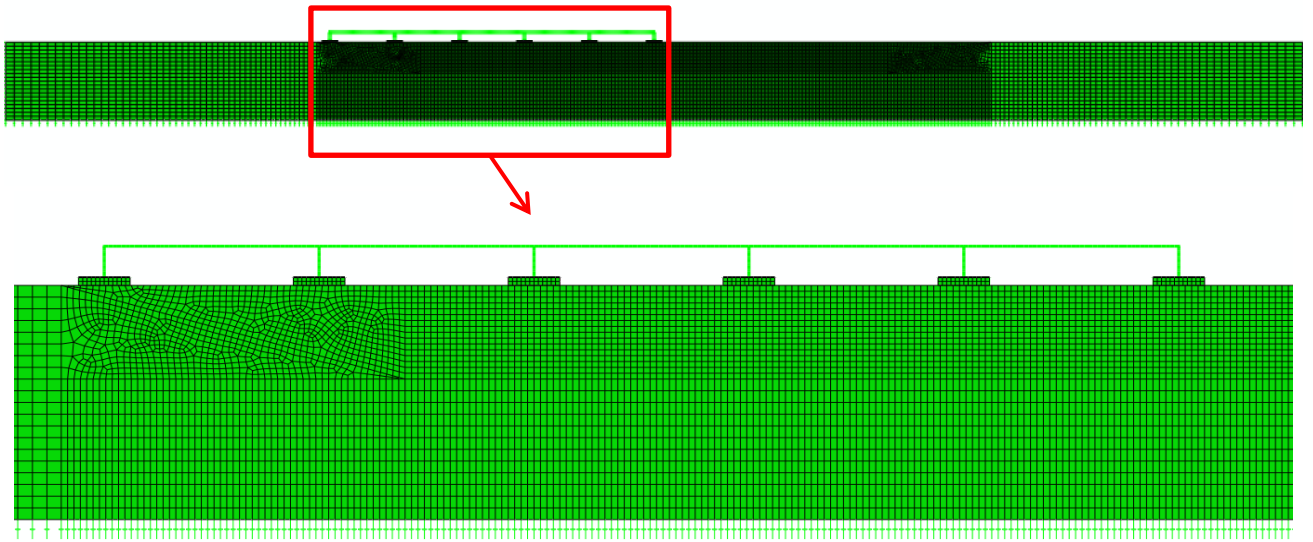
Σχήμα 5.15 (α): Διάγραμμα καμπτικών ροπών υπό στατική φόρτιση – θεώρηση εφεδράνων στα ακρόβαθρα – μονοδιάστατη γεωμετρία του εδάφους



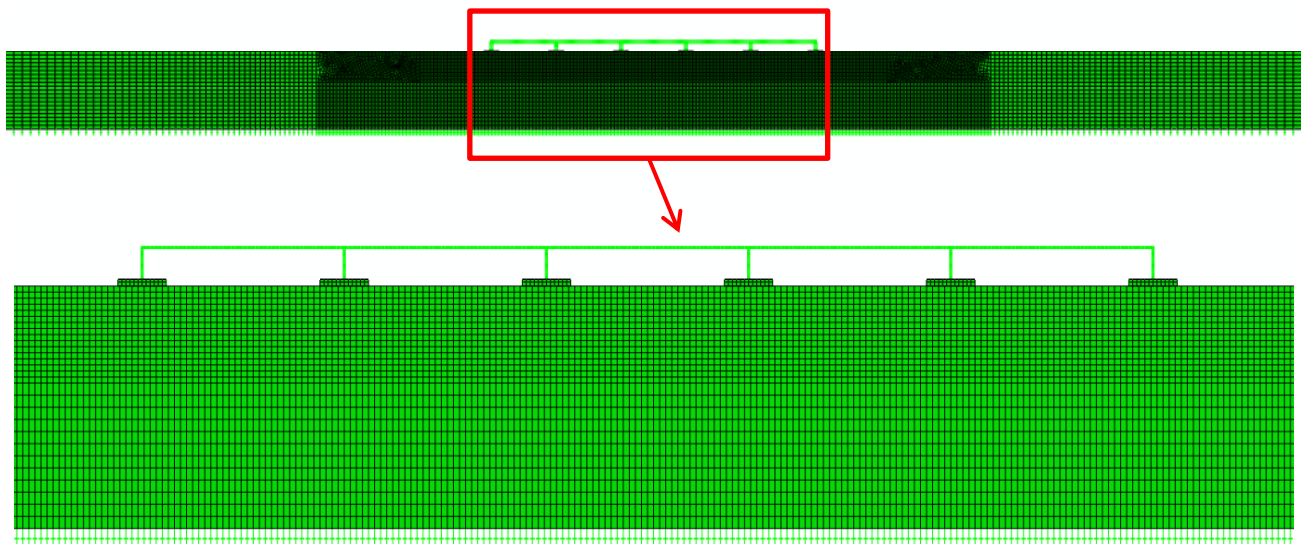
Σχήμα 5.15 (β): Διάγραμμα καμπτικών ροπών υπό στατική φόρτιση – θεώρηση εφεδράνων στα ακρόβαθρα – φορέας στη θέση 1 της κοιλάδας



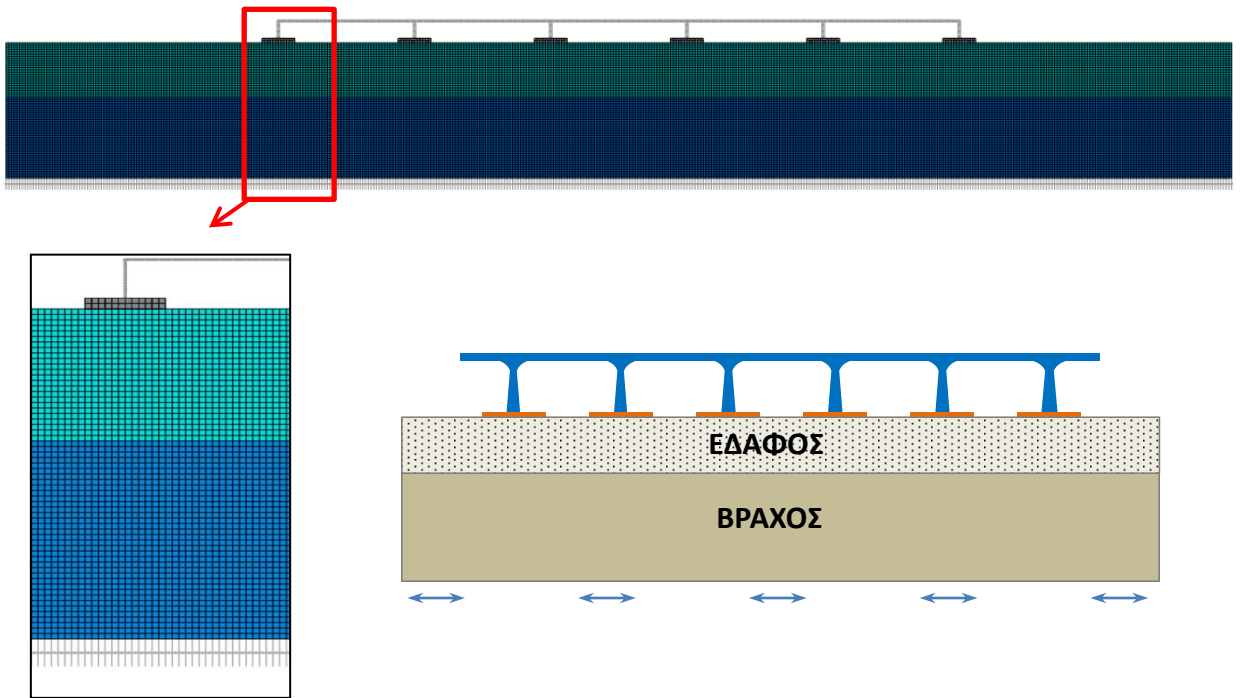
Σχήμα 5.16: Βαθμονόμηση μη-γραμμικού ελατηρίου για την προσομοίωση του εφεδράνου.



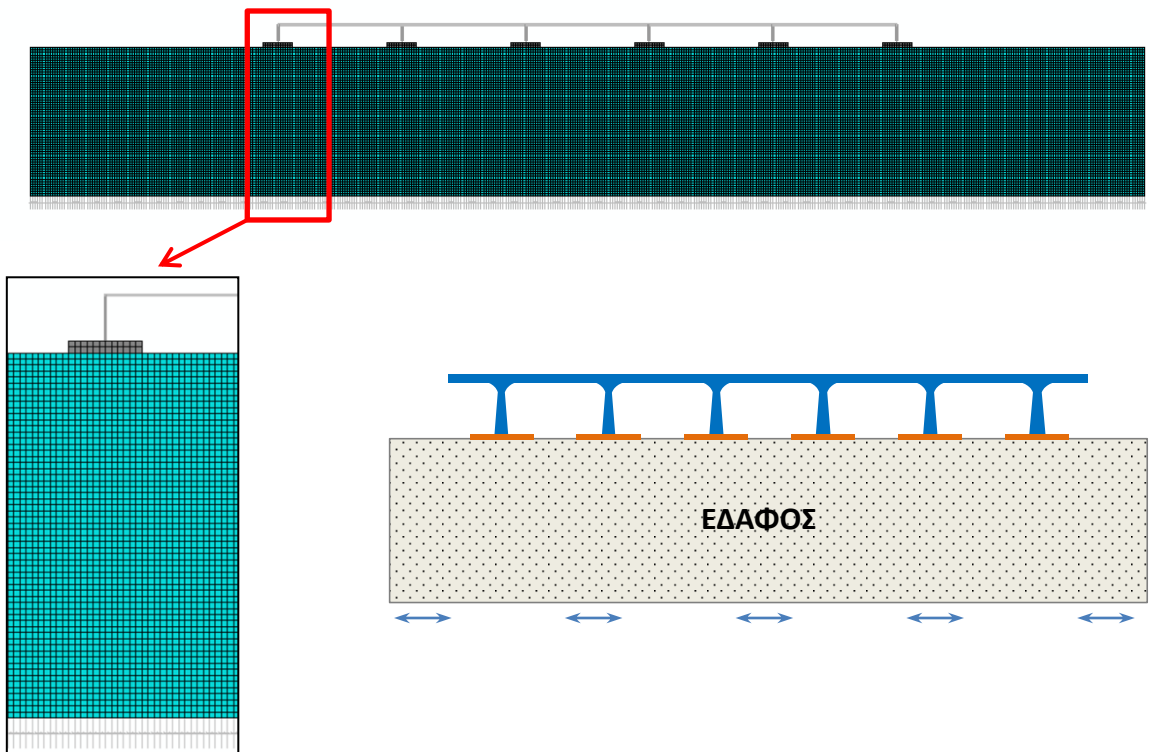
Σχήμα 5.17: Προσομοίωμα στον κώδικα ABAQUS της γέφυρας στη **θέση 1** της κοιλάδας



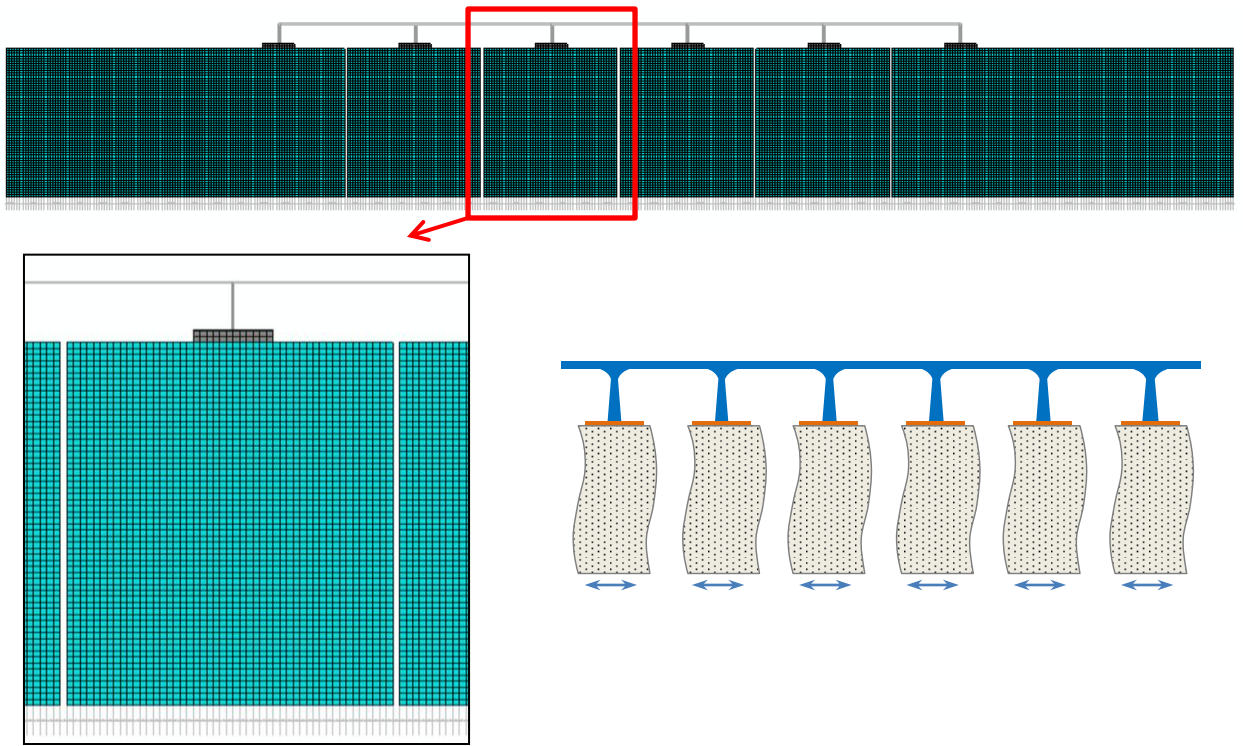
Σχήμα 5.18: Προσομοίωμα στον κώδικα ABAQUS της γέφυρας στη **θέση 2** της κοιλάδας



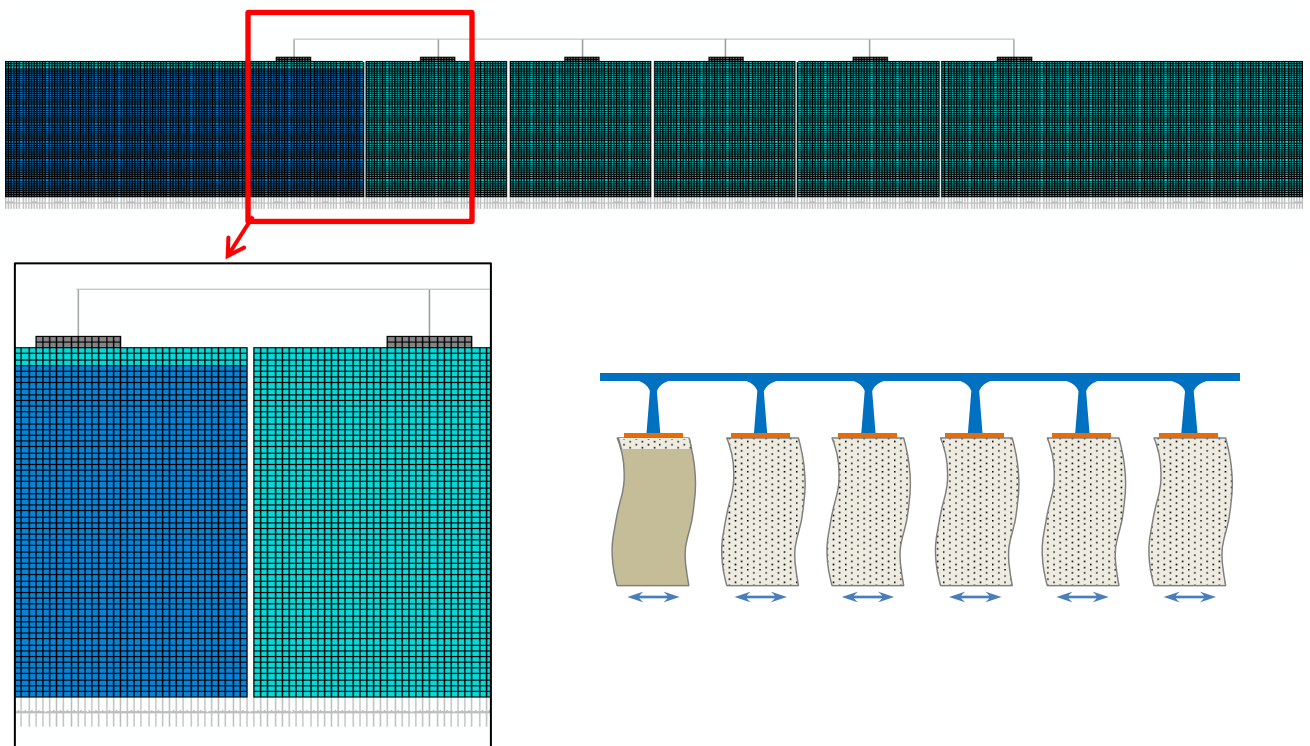
Σχήμα 5.19: Σκαρίφημα και προσομοίωμα στον κώδικα ABAQUS της γέφυρας θεμελιωμένης σε έδαφος με μονοδιάστατη γεωμετρία.



Σχήμα 5.20: Σκαρίφημα και προσομοίωμα στον κώδικα ABAQUS της γέφυρας θεμελιωμένης σε αμιγές έδαφος.



Σχήμα 5.21: Σκαρίφημα και προσομοίωμα στον κώδικα ABAQUS της γέφυρας θεμελιωμένης σε ανεξάρτητες αμιγώς εδαφικές στήλες.



Σχήμα 5.22: Σκαρίφημα και προσομοίωμα στον κώδικα ABAQUS της γέφυρας θεμελιωμένης σε ανεξάρτητες εδαφικές στήλες με θεώρηση της πραγματικής εδαφικής δυσκαμψίας για το πρώτο θεμέλιο.

Κεφάλαιο 6

Γέφυρα εδραζόμενη σε κοιλάδα με ελαστικό έδαφος

6.1. Έδραση γέφυρας στην θέση 1 της κοιλάδας

6.1.1. Περίπτωση συνεχούς καταστρώματος, χωρίς την θεώρηση αρμών

A. Απόκριση της κοιλάδας

Η πρώτη περίπτωση που εξετάζεται είναι η απόκριση της γέφυρας, όταν αυτή είναι τοποθετημένη στο άκρο της κοιλάδας (θέση 1, **Σχήμα 5.3(α)**), και για την θεώρηση συνεχούς καταστρώματος χωρίς αρμούς. Για να φανεί η σημασία της δισδιάστατης γεωμετρίας του εδάφους, τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την ανάλυση για την σεισμική διέγερση συγκρίνονται σε μορφή χρονοϊστοριών με τα αποτελέσματα για την έδραση της γέφυρας σε έδαφος με μονοδιάστατη γεωμετρία. Τα μεγέθη που παρουσιάζονται στις χρονοϊστορίες έχουν προκύψει, έπειτα από αφαίρεση των αντίστοιχων στατικών μεγεθών. Με τον τρόπο αυτό απομονώνεται η επίδραση της κοιλάδας στην σεισμική απόκριση της ανωδομής, χωρίς να επηρεάζονται από τις αρχικές διαφορικές καθιζήσεις που οφείλονται στην δισδιάστατη γεωμετρία του αναγλύφου. Σε πρώτο στάδιο ως διέγερση έχει χρησιμοποιηθεί ο παλμός **Ricker 1**.

Αρχικά, παρουσιάζονται στα **Σχήματα 6.1-6.3** οι χρονοϊστορίες των επιταχύνσεων στις βάσεις των θεμελίων της γέφυρας, οι οποίες αντικατοπτρίζουν μερικώς τα διαγράμματα των **AG και της Ay** για το ελεύθερο πεδίο κατά μήκος της κοιλάδας. Έτσι, η κατακόρυφη επιτάχυνση παρουσιάζει τα μέγιστα στις βάσεις του δεύτερου και του τρίτου θεμελίου, ενώ είναι αμελητέα κάτω από τα ακραία θεμέλια, ακριβώς όπως παρουσιάζεται και στο **Σχήμα 5.5**. Παρομοίως, η οριζόντια επιτάχυνση παίρνει τις

μέγιστες τιμές της στις βάσεις του τρίτου και του έκτου θεμελίου, όπως φαίνεται και στο **διάγραμμα AG**, ενώ παρουσιάζεται απομειωμένη στην βάση του πρώτου θεμελίου.

Επίσης, από τις χρονοϊστορίες φαίνεται ότι στα θεμέλια που είναι κοντά στο άκρο της κοιλάδας, οι μεγάλες τιμές της επιτάχυνσης παρουσιάζονται στην αρχή, ταυτόχρονα με τον κύριο παλμό, ενώ στα θεμέλια που βρίσκονται κοντά στο κέντρο της κοιλάδας η μέγιστη τιμή της επιτάχυνσης παρατηρείται λίγο καθυστερημένη και γενικά η διάρκεια της διέγερσης και ο αριθμός των κύκλων παρουσιάζονται αυξημένοι, λόγω της διάδοσης των Rayleigh κυμάτων.

Στην συνέχεια, στα **Σχήματα 6.4 - 6.6** παρουσιάζονται οι χρονοϊστορίες των ροπών στην κορυφή και την βάση των βάθρων της κατασκευής. Σε όλες τις περιπτώσεις, η απόκριση των βάθρων στην περίπτωση του εδάφους με την δισδιάστατη γεωμετρία είναι μεγαλύτερη, τόσο σε μέγιστο όσο και σε διάρκεια, από την μονοδιάστατη. Ωστόσο, η ιδιαίτερα δυσμενής επίδραση της κοιλάδας φαίνεται στην απόκριση των δύο ακραίων βάθρων που είναι πλησιέστερα στο άκρο της κοιλάδας, καθώς και του έκτου βάθρου που βρίσκεται ακριβώς στο κέντρο της.

Συγκεκριμένα, **η δυσμενέστερη απόκριση παρατηρείται στην βάση του πρώτου βάθρου**, το οποίο βρίσκεται στο άκρο της κοιλάδας. Η μέγιστη ροπή του φτάνει τα **80 MNm**, δηλαδή ξεπερνά κατά πολύ την ροπή αντοχής του που είναι 26 MNm. Επίσης, ροπές οι οποίες ξεπερνούν τα 40MNm, παρουσιάζονται στην κορυφή του παραπάνω υποστυλώματος, καθώς και στην βάση του έκτου υποστυλώματος. Ελαφρώς μικρότερες από αυτές, αλλά κοντά στα 40MNm, είναι και οι ροπές που παρουσιάζονται στις κορυφές του δεύτερου και του έκτου υποστυλώματος.

Σε όλες τις παραπάνω περιπτώσεις, η ροπή που αναπτύσσεται στα παραπάνω βάθρα λόγω της σεισμικής απόκρισης στην κοιλάδα, ξεπερνά κατά πολύ την ροπή αντοχής τους, παρά'όλο που η σεισμική διέγερση που εφαρμόστηκε, έχει μέγεθος αντίστοιχο με αυτό του σεισμού σχεδιασμού. Αντίθετα, στην περίπτωση της μονοδιάστατης γεωμετρίας του εδάφους η ροπή που αναπτύσσεται λόγω της σεισμικής διέγερσης, μένει σταθερά κάτω από τα 20MNm, όπως φαίνεται από τις αντίστοιχες χρονοϊστορίες. Άρα και η συνολική ροπή προκύπτει μικρότερη από την ροπή αντοχής.

Στο **Σχήμα 6.7**, παρουσιάζονται επίσης το drift και η τέμνουσα για τα ακραία υποστυλώματα, τα οποία είναι επίσης σημαντικά μεγαλύτερα από την θεώρηση του

μονοδιάστατου εδάφους, ιδιαίτερα για το πρώτο υποστύλωμα, στο οποίο το drift πλησιάζει το 1%.

Ενώ μεγαλύτερη καταπόνηση από ροπές και τέμνουσες υφίστανται τα ακραία βάρθρα, όσον αφορά τις αξονικές δυνάμεις, η μεγαλύτερη αύξηση παρουσιάζεται στο δεύτερο και στο πέμπτο βάρθρο (**Σχήμα 6.7**), στα σημεία δηλαδή όπου παρουσιάζει μέγιστα και η κατακόρυφη εδαφική επιτάχυνση. Επίσης, στα σημεία αυτά, παρατηρούνται και αυξημένες καθιζήσεις, όπως φαίνεται στα **Σχήματα 6.9 - 6.11**.

Σημαντική αύξηση υπάρχει και στις ροπές στο κατάστρωμα (**Σχήματα 6.12 - 6.13**). Οι μεγαλύτερες αυξήσεις παρατηρούνται στις στηρίξεις στα αριστερά του πρώτου ανοίγματος και στα δεξιά του τελευταίου ανοίγματος. Αντίστοιχα, αυξημένα είναι και τα υπόλοιπα εντατικά μεγέθη (**Σχήματα 6.14 - 6.16**). Αξιοσημείωτη είναι η εμφάνιση αξονικής δύναμης λόγω της διέγερσης στο μεσαίο άνοιγμα, καθώς λόγω της έδρασης της γέφυρας σε έδαφος με δισδιάστατη γεωμετρία, έχει χαθεί η συμμετρία του φορέα.

Για να γίνει περισσότερο κατανοητός ο τρόπος με τον οποίο καταπονείται ο φορέας δίνεται στα **Σχήματα 6.17 - 6.18** το διάγραμμα των καμπτικών ροπών και η εικόνα του παραμορφωμένου φορέα τις χρονικές στιγμές της μέγιστης καταπόνησης του πρώτου και του τελευταίου βάρθρου.

B. Αποδόμηση του προβλήματος

Στην συνέχεια, επιχειρείται να κατανοηθούν οι μηχανισμοί με τους οποίους προκαλείται η αυξημένη απόκριση της γέφυρας, δηλαδή σε ποιο βαθμό συμβάλλουν η αύξηση της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης, η παρασιτική κατακόρυφη επιτάχυνση και ο ασυγχρονισμός και ασυγχρωτισμός της εδαφικής κίνησης που προκαλούνται λόγω της παρουσίας της κοιλάδας.

Επίδραση της επιπρόσθετης ενίσχυσης

Αρχικά, εξετάζεται αν η επιπλέον ενίσχυση του κραδασμού που προκαλείται λόγω της κοιλάδας, είναι η αιτία της αυξημένης καταπόνησης της γέφυρας. Για το λόγο αυτό, ολόκληρη η γέφυρα διεγείρεται με κίνηση την δυσμενέστερη απόκριση στην επιφάνεια της κοιλάδας. Συγκεκριμένα, ως διέγερση λαμβάνεται η επιτάχυνση από το έκτο θεμέλιο, το οποίο βρίσκεται στο κέντρο της κοιλάδας. Για να μπορέσει η γέφυρα να

διεγερθεί με αυτήν ακριβώς την κίνηση, χρησιμοποιήθηκε το **προσομοίωμα της γέφυρας εδραζόμενης σε αμιγές έδαφος (παράγραφος 5.3.2, Σχήμα 5.20)**, ώστε η διέγερση που τοποθετείται στην βάση του, να μην ενισχύεται, αλλά να φτάνει πρακτικά αναλλοίωτη στα θεμέλια της γέφυρας.

Όπως φαίνεται στα **Σχήματα 6.19 και 6.20**, για την διέγερση αυτή, η χρονοϊστορία της επιτάχυνσης είναι ίδια στις βάσεις όλων των θεμελίων και παρουσιάζει μεγαλύτερο μέγιστο και μεγαλύτερη διάρκεια από τις αντίστοιχες χρονοϊστορίες στην περίπτωση της κοιλάδας. Παρ' όλ' αυτά, οι ροπές που προκύπτουν λόγω αυτής της επιτάχυνσης, αν και μεγαλύτερες από αυτές που προκύπτουν για το προσομοίωμα του μονοδιάστατου εδάφους, είναι σημαντικά μικρότερες από τις ροπές που προκύπτουν στην περίπτωση της έδρασης στην κοιλάδα (**Σχήμα 6.21**).

Από τα παραπάνω γίνεται σαφές, ότι δεν είναι η αύξηση της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης η βασική αιτία καταπόνησης της γέφυρας. **Με άλλα λόγια, δε θα αρκούσε απλώς η εισαγωγή ενός συντελεστή που θα αύξανε την μέγιστη φασματική επιτάχυνση σχεδιασμού της γέφυρας, για να προβλεφτεί η συμπεριφορά της στην εδαφική κοιλάδα.**

Επίδραση της διαφορετικότητας της οριζόντιας εδαφικής επιτάχυνσης και επίδραση της κατακόρυφης παρασιτικής επιτάχυνσης

Σε δεύτερο στάδιο, εξετάστηκε αν η καταπόνηση της γέφυρας οφείλεται στον **ασυγχρονισμό και τον ασυγχρωτισμό** της κίνησης ή με άλλα λόγια η διαφορετικότητα στην κίνηση των βάθρων. Αρχικά, ελέγχθηκε η επίδραση της διαφορετικότητας της οριζόντιας κίνησης. Για το λόγο αυτό, χρησιμοποιήθηκε **το προσομοίωμα με τις ανεξάρτητες αμιγώς εδαφικές στήλες (παράγραφος 5.3.2, Σχήμα 5.21)** και κάθε εδαφική στήλη διεγέρθη με την οριζόντια επιτάχυνση που είχε το αντίστοιχο θεμέλιο στο προσομοίωμα της κοιλάδας.

Στην συνέχεια, αντίστοιχα ερευνήθηκε και η επίδραση της παρασιτικής κατακόρυφης επιτάχυνσης στην καταπόνηση της κατασκευής. Για την διερεύνηση αυτή χρησιμοποιήθηκε πάλι το προσομοίωμα με τις ανεξάρτητες εδαφικές στήλες, αλλά αυτή την φορά κάθε στήλη διεγέρθη με την αντίστοιχη κατακόρυφη επιτάχυνση. Οι επιταχύνσεις που τελικά προέκυψαν στις βάσεις των θεμελίων για την διαφορετική

οριζόντια και για την διαφορετική κατακόρυφη κίνηση συγκριτικά με τις αντίστοιχες επιταχύνσεις του προσομοιώματος της κοιλάδας φαίνονται στα **Σχήματα 6.24-6.26**.

Η σύγκριση των ροπών των βάθρων για τις παραπάνω περιπτώσεις παρουσιάζεται στα **Σχήματα 6.27-6.28**. Σε αυτά φαίνεται ο καθοριστικός ρόλος της διαφορετικότητας της οριζόντιας κίνησης στην απόκριση της γέφυρας. **Οι χρονοϊστορίες των ροπών που είχαν προκύψει στο αρχικό προσομοίωμα της κοιλάδας σχεδόν ταυτίζονται με τις ροπές που οφείλονται αποκλειστικά στην διαφορετική οριζόντια κίνηση**. Η μόνη διαφορά παρατηρείται στην βάση του πρώτου θεμελίου, όπου παρατηρείται σημαντική απόκλιση μεταξύ των δύο χρονοϊστοριών των ροπών. Αντίθετα, η κατακόρυφη επιτάχυνση, όπως είναι αναμενόμενο, πρακτικά δεν προκαλεί ροπές στα βάθρα της γέφυρας. Αντίστοιχη συμπεριφορά παρουσιάζουν οι τέμνουσες και τα drift των βάθρων (**Σχήμα 6.29**). Αντίθετα, στην δημιουργία αξονικών δυνάμεων στα βάθρα, συνεισφέρουν τόσο η κατακόρυφη όσο και η οριζόντια επιτάχυνση (**Σχήμα 6.30**).

Όσον αφορά στα εντατικά μεγέθη στο κατάστρωμα, παρατηρείται, ότι επίσης το κύριο αίτιο δημιουργίας τους είναι η διαφορετική οριζόντια διέγερση (**Σχήματα 6.32-6.35**), ενώ η συνεισφορά της παρασιτικής κατακόρυφης επιτάχυνσης είναι αμελητέα. Η συμβολή της **κατακόρυφης επιτάχυνσης** είναι σχετικά σημαντική μόνο στις **ροπές στήριξης** του δεύτερου και τέταρτου ανοίγματος (**Σχήμα 6.31**).

Στα **Σχήματα 6.36-6.38** φαίνεται η αντίστοιχη σύγκριση για τις χρονοϊστορίες των στροφών και των καθιζήσεων. Από αυτά συνεπάγεται η άμεση σχέση της κατακόρυφης επιτάχυνσης και των καθιζήσεων, ενώ αντίθετα, οι στροφές των θεμελίων φαίνονται να σχετίζονται με την οριζόντια επιτάχυνση.

Σύγκριση με την επαλληλία των διαφορετικών οριζόντιων και κατακόρυφων επιταχύνσεων

Για να επιβεβαιωθεί η ορθότητα των παραπάνω συγκρίσεων, αλλά και για να διαπιστωθεί, αν υπάρχει κάποιος μηχανισμός που δεν έχει ληφθεί μέχρι τώρα υπόψη, τα μεγέθη για την διαφορετική οριζόντια και την διαφορετική κατακόρυφη κίνηση, τα οποία παρουσιάστηκαν παραπάνω, επαλληλίστηκαν και στην συνέχεια συγκρίθηκαν με αυτά του προσομοιώματος της κοιλάδας. Δεδομένου ότι όλα τα υλικά στην ανάλυση μας είναι ελαστικά, η επαλληλία θα πρέπει να δίνει ακριβώς τα αποτελέσματα του αρχικού προσομοιώματος με την δισδιάστατη γεωμετρία του εδάφους.

Η σύγκριση φαίνεται στα **Σχήματα 6.39-6.50**. Σχεδόν σε όλες τις περιπτώσεις, η επαλληλία λειτουργεί αρκετά αποτελεσματικά. Η μόνη μεγάλη απόκλιση είναι **στην βάση του πρώτου θεμελίου, όπου η επαλληλία υποτιμά αρκετά την αναπτυσσόμενη ροπή**. Επίσης, ελαφρώς υποτιμημένα είναι τα drift και τα υπόλοιπα εντατικά μεγέθη του φορέα, καθώς και οι στροφές των θεμελίων, με εξαίρεση του πρώτου, στο οποίο η στροφή προκύπτει αρκετά μεγαλύτερη από την αντίστοιχη στην κοιλάδα.

Επίδραση της μεταβολής της δυσκαμψίας

Τέλος, επιχειρήθηκε να εξηγηθεί η απόκλιση της πραγματικής ροπής του πρώτου βάρου από την ροπή που υπολογίστηκε με την χρήση της επαλληλίας. Το γεγονός ότι ταυτόχρονα η ροπή αυτή υποτιμήθηκε και η στροφή του πρώτου θεμελίου υπερτιμήθηκε από την επαλληλία, πιθανόν δικαιολογείται από το ότι η διαφορετική δυσκαμψία του εδάφους της θεμελίωσης, λόγω των τοπικών εδαφικών συνθηκών δε λαμβάνεται υπόψη στο προσομοίωμα των ανεξάρτητων εδαφικών στηλών. Για να εξακριβωθεί αυτό, χρησιμοποιήθηκε **το προσομοίωμα με την θεώρηση της δυσκαμψίας (παράγραφος 5.3.2, Σχήμα 5.22)**, στο οποίο λαμβάνεται υπόψη η αυξημένη δυσκαμψία του πρώτου βάρου. Η επιτάχυνση στην βάση του πρώτου θεμελίου σε σχέση με αυτή που είχε στο αρχικό δισδιάστατο προσομοίωμα φαίνεται στο **Σχήμα 6.51**.

Στα **Σχήματα 6.51-6.53** παρουσιάζονται οι χρονοϊστορίες των ροπών, της τέμνουσας δύναμης και του drift του πρώτου βάρου και οι ροπές του πρώτου ανοίγματος στο κατάστρωμα, οι οποίες ταυτίζονται σχεδόν με τις χρονοϊστορίες των αντίστοιχων μεγεθών στην περίπτωση της κοιλάδας. Η στροφή του πρώτου θεμελίου (**Σχήμα 6.52**) προκύπτει μικρότερη από αυτήν της κοιλάδας, όπως συστηματικά είχαν προκύψει και για τα υπόλοιπα θεμέλια κατά την σύγκριση των μεγεθών της επαλληλίας (**Σχήματα 6.48-6.50**). Συμπεραίνεται λοιπόν, ότι η **αυξημένη σύνθετη δυσκαμψία του πρώτου βάρου** παρεμποδίζει σε ένα βαθμό την στροφή του και ταυτόχρονα **αυξάνει πολύ την ροπή που το καταπονεί**.

6.1.2. Περίπτωση καταστρώματος με την θεώρηση αρμών

A. Απόκριση της κοιλάδας

Στην συνέχεια, εξετάζεται η περίπτωση της γέφυρας τοποθετημένης στο άκρο της κοιλάδας με την θεώρηση αρμών μεταξύ του καταστρώματος και των ακραίων βάθρων. Οι χρονοϊστορίες των επιταχύνσεων στις βάσεις των θεμελίων παρουσιάζονται στα **Σχήματα 6.54 - 6.55** και πρακτικά η διαφορά τους από την προηγούμενη θεώρηση του συνεχούς καταστρώματος (**Σχήματα 6.1 - 6.3**) είναι η εμφάνιση υψίσυχων διακυμάνσεων στην βάση του πρώτου θεμελίου, οι οποίες πιθανόν οφείλονται σε συνδυασμένη δράση του εφέδρανου και ανακλάσεων στο βράχο.

Όπως είναι αναμενόμενο, η καταπόνηση της γέφυρας, ιδιαίτερα στα ακραία βάθρα, έχει ανακουφιστεί λόγω της παρουσίας των εφεδράνων. Οι χρονοϊστορίες των ροπών των βάθρων παρουσιάζονται στα **Σχήματα 6.56 - 6.57**. Σε αυτές φαίνεται, η μείωση της ροπής των ακραίων βάθρων. Ωστόσο, τώρα έχει **αυξηθεί η ροπή στο δεύτερο βάθρο**, η οποία αγγίζει τα **50 MNm** στην κορυφή του. Παρομοίως, αυξημένες, αν και όχι σημαντικά, είναι οι ροπές στο πέμπτο βάθρο.

Και στο κατάστρωμα, στην περίπτωση της έδρασης σε κοιλάδα οι ροπές παρουσιάζονται αρκετά αυξημένες, αν και όχι τόσο, όσο στην περίπτωση του συνεχούς καταστρώματος (**Σχήματα 6.59 και 6.12**). Η αύξηση αυτή πλέον δεν περιορίζεται στο πρώτο φάτνωμα, αλλά παρατηρείται και στο δεύτερο.

Η μετακίνηση των εφεδράνων φαίνεται σε μορφή χρονοϊστορίας στο **Σχήμα 6.59**. Η μέγιστη μετακίνησή του 1^{ου} εφεδράνου φτάνει τα **11cm** και συμβαίνει την στιγμή του μεγίστου της καμπτικής ροπής του δεύτερου βάθρου. Η μορφή του παραμορφωμένου φορέα και το διάγραμμα των καμπτικών ροπών την στιγμή της μέγιστης καταπόνησης της κατασκευής παρουσιάζονται στο **Σχήμα 6.60**. Διακρίνεται καθαρά, ότι η μεγάλη μετακίνηση στο εφέδρανο προκαλεί την παραμόρφωση του φορέα, η οποία μεταφράζεται σε μεγάλη ροπή στην κορυφή του δεύτερου βάθρου.

B. Αποδόμηση του προβλήματος

Το πρόβλημα επιχειρήθηκε να αποδομηθεί και εδώ με τρόπο όμοιο με την περίπτωση του συνεχούς φορέα:

Επίδραση της επιπρόσθετης ενίσχυσης

Παρόλο που η διέγερση που επιβλήθηκε στην γέφυρα μέσω **του προσομοιώματος με το αμιγές έδαφος** ήταν δυσμενέστερη αυτής που προκύπτει από την κοιλάδα, και στην περίπτωση αυτή οι ροπές που προέκυψαν στο δεύτερο βάθρο, ήταν ήταν μικρότερες από αυτές του πλήρους προσομοιώματος της κοιλάδας. (**Σχήματα 6.61 και 6.62**) Αποδείχτηκε δηλαδή πάλι, ότι η **αυξημένη καταπόνηση δεν οφείλεται απλώς στην επιπλέον ενίσχυση** που προκαλείται από την κοιλάδα.

Επίδραση της διαφορετικότητας της οριζόντιας εδαφικής επιτάχυνσης και επίδραση της κατακόρυφης παρασιτικής επιτάχυνσης

Πάλι με την βοήθεια του προσομοιώματος των ανεξάρτητων εδαφικών στηλών, διαπιστώθηκε ο **καθοριστικός ρόλος της διαφορετικότητας της οριζόντιας κίνησης** στην καταπόνηση του φορέα. Εδώ μάλιστα, οι χρονοϊστορίες των εντατικών μεγεθών που προέκυψαν μόνο λόγω της οριζόντιας κίνησης και αυτές του πλήρους προσομοιώματος πρακτικά ταυτίζονται (**Σχήματα 6.63 και 6.64**). Η κατακόρυφη επιτάχυνση φαίνεται μόνο να συμβάλει στην ανάπτυξη ροπών στο κατάστρωμα.

Σύγκριση με την επαλληλία των διαφορετικών οριζόντιων και κατακόρυφων επιταχύνσεων

Παρόλη την πολύ καλή προσέγγιση της απόκρισης της γέφυρας μόνο με την οριζόντια διέγερση με το πλήρες μοντέλο, πραγματοποιήθηκε και η σύγκριση με τα μεγέθη που προέκυψαν από την επαλληλία της διαφορετικής οριζόντιας και διαφορετικής κατακόρυφης κίνησης (**Σχήματα 6.65 και 6.66**). Η σύγκριση επιβεβαιώνει

την πρακτικά πλήρη ταύτιση με το αρχικό πρόβλημα, επομένως δεν απαιτείται περαιτέρω διερεύνηση.

6.2. Έδραση γέφυρας στην θέση 2 της κοιλάδας

6.2.1. Περίπτωση συνεχούς καταστρώματος, χωρίς την θεώρηση αρμών

Στην περίπτωση αυτή, η γέφυρα με την θεώρηση συνεχούς καταστρώματος είναι τοποθετημένη στο κέντρο της κοιλάδας (Θέση 2, **Σχήμα 5.3(β)**), όπου το υποκείμενο έδαφος έχει ομοιόμορφο πάχος και η ενίσχυση της διέγερσης προέρχεται βασικά από την διάδοση και την συμβολή επιφανειακών κυμάτων. Το πρόβλημα για αυτήν την περίπτωση είναι συμμετρικό, επομένως εξετάζονται μόνο τα 3 πρώτα βάρθρα.

Στο **Σχήμα 6.67** φαίνονται οι επιταχύνσεις στις βάσεις των θεμελίων 1 και 3, τα οποία παρουσιάζουν και την πιο έντονη απόκριση. Τα βάρθρα αυτά αναπτύσσουν αρκετά μεγάλες ροπές, μέχρι και **40 MNm** ($M_{Rd} = 26 \text{ MNm}$), οι οποίες, όπως φαίνεται από τις χρονοϊστορίες στο **Σχήμα 6.68**, χαρακτηρίζονται από το μεγάλο αριθμό των κύκλων και συνεπώς την αυξημένη διάρκεια. Αντίστοιχη αύξηση παρατηρείται και στην τέμνουσα δύναμη και το drift των βάρθρων, καθώς και στα εντατικά μεγέθη του καταστρώματος (**Σχήματα 6.69** και **6.70**).

Ο παραμορφωμένος φορέας και το αντίστοιχο διάγραμμα των καμπτικών ροπών την στιγμή της μέγιστης καταπόνησης φαίνονται στο **Σχήμα 6.71**. Αξιοσημείωτη είναι η μορφή του παραμορφωμένου φορέα, καθώς δεν παρουσιάζει συμμετρία, όπως θα ήταν αναμενόμενο. Αντίθετα, είναι εμφανή τα 'φουσκώματα' του εδάφους, τα οποία οφείλονται στην διάδοση των Rayleigh κυμάτων. Αυτά παραμορφώνουν το έδαφος με μη συμμετρικό τρόπο, με αποτέλεσμα και η ανωδομή να χάνει την συμμετρία της.

Παρόλο που στην περίπτωση αυτή η απόκριση της γέφυρας είναι πιο ήπια, και πάλι η επίδραση της κοιλάδας θα οδηγούσε στην αστοχία της, ενώ σημαντικό φαινόμενο είναι και ο αυξημένος αριθμός των κύκλων της διέγερσης.

6.2.2. Περίπτωση καταστρώματος με την θεώρηση αρμών

Αντίστοιχη είναι η συμπεριφορά της κατασκευής και στην περίπτωση ύπαρξης εφεδράνων μεταξύ ακρόβαθρων και καταστρώματος. Οι επιταχύνσεις στις βάσεις των θεμελίων είναι ίδιες, πέρα από μερικές υψίσυχνες διακυμάνσεις που οφείλονται στην ύπαρξη του εφέδρανου (**Σχήμα 6.72**). Τα εντατικά μεγέθη εμφανίζονται και πάλι αυξημένα σε σχέση με την περίπτωση έδρασης της ανωδομής σε έδαφος με μονοδιάστατη γεωμετρία και εμφανίζουν επίσης αυξημένο αριθμό κύκλων (**Σχήματα 6.73-6.75**). Ωστόσο, η καταπόνηση της γέφυρας είναι μειωμένη σε σχέση με την περίπτωση του συνεχούς καταστρώματος, καθώς ο φορέας ανακουφίζεται λόγω της ύπαρξης των εφεδράνων. Οι χρονοϊστορίες των μετακινήσεων των εφεδράνων παρουσιάζονται στο **Σχήμα 6.76**, με την μέγιστη μετακίνηση των εφεδράνων να αγγίζει τα **8cm**. Ο παραμορφωμένος φορέας και τα διαγράμματα των ροπών την στιγμή της μέγιστης καταπόνησης φαίνονται στο **Σχήμα 6.77**, όπου επίσης παρατηρείται η ασυμμετρία του φορέα λόγω των 'φουσκωμάτων' της εδαφικής επιφάνειας που οφείλονται στην διάδοση των Rayleigh κυμάτων.

6.3. Σεισμικές διεγέρσεις από πραγματικές καταγραφές

Στην συνέχεια, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την διέγερση του μοντέλου με πραγματικές καταγραφές, για να διαπιστωθεί αν τα παραπάνω συμπεράσματα είναι αντιπροσωπευτικά και για διεγέρσεις με διαφορετικό συχνοτικό περιεχόμενο και πόσο σημαντική είναι η επίδραση των λεπτομερειών της διέγερσης. Η καταγραφή **Lefkada2003** χρησιμοποιήθηκε ως διέγερση, τόσο για το προσομοίωμα με την θεώρηση συνεχούς καταστρώματος, όσο και για την θεώρηση αρμών στα ακρόβαθρα. Οι διεγέρσεις **JMA000** και **Jensen292** χρησιμοποιήθηκαν μόνο για την θεώρηση του συνεχούς καταστρώματος.

6.3.1. Lefkada 2003

A. Περίπτωση συνεχούς καταστρώματος χωρίς την θεώρηση αρμών

Η διέγερση έχει υποκλιμάκια αναχθεί, ώστε να έχει $PGA=0.21g$ και οι ροπές που προκύπτουν, τουλάχιστον για την ανάλυση του εδάφους με την μονοδιάστατη γεωμετρία, να είναι μικρότερες από την ροπή αντοχής.

Γέφυρα στην θέση 1

Στα **Σχήματα 6.78 – 6.80** φαίνονται οι επιταχύνσεις στις βάσεις των θεμελίων. Μεγαλύτερη ενίσχυση της οριζόντιας συνιστώσας παρατηρείται κάτω από το 6^ο θεμέλιο, ενώ η κατακόρυφη παρουσιάζει τις μέγιστες τιμές κάτω από το 2^ο και το 3^ο θεμέλιο, τιμές αντίστοιχες με τις αναμενόμενες με βάση τα διαγράμματα του ελεύθερου πεδίου (**Σχήμα 5.6**).

Κατόπιν, στα **Σχήματα 6.81 - 6.83** παρουσιάζονται οι ροπές στα βάθρα 1, 2, 4 και 6, τα οποία καταπονούνται περισσότερο. Τα βάθρα 1 και 2 συμφωνούν με την ανάλυση που προηγήθηκε, καθώς η μεγαλύτερη καταπόνηση παρατηρείται στην βάση του βάθρου 1 και στις κορυφές των βάθρων 1 και 2. Οι ροπές στα βάθρα αυτά φτάνουν τα **50MNm**, δηλαδή **ξεπερνούν την ροπή αντοχής τους**. Ομοίως αυξημένες προκύπτουν και οι ροπές στο φάτνωμα 1, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 6.83**.

Το βάθρο 6 επίσης παρουσιάζει αυξημένη καταπόνηση, αν και μικρότερη από αυτήν που είχε προκύψει για το Ricker1. Η διαφοροποίηση αυτή, όπως και το γεγονός ότι εδώ καταπονείται ιδιαίτερα και το 4^ο υποστύλωμα, δικαιολογούνται από το διαφορετικό συχνοτικό περιεχόμενο και τις λεπτομέρειες του παλμού, οι οποίες άλλωστε αντικατοπτρίζονται και στο διαφορετική κατανομή των επιταχύνσεων στο ελεύθερο πεδίο που απεικονίζεται στα **Σχήματα 5.5 και 5.6**.

Τέλος οι μεγαλύτερες τιμές καθιζήσεων παρατηρούνται κάτω από τα θεμέλια 2 και 3, δηλαδή αυτά με την μεγαλύτερη κατακόρυφη επιτάχυνση, ενώ οι μεγαλύτερες στροφές κάτω από τα 4 και 6, με την σημαντική οριζόντια επιτάχυνση αντίστοιχα (**Σχήμα 6.84**).

Γέφυρα στην θέση 2

Στα **Σχήματα 6.85** και **6.86** φαίνονται οι επιταχύνσεις κάτω από τα θεμέλια. Η οριζόντια επιτάχυνση είναι πιο ενισχυμένη κάτω από το θεμέλιο 1, ενώ η κατακόρυφη κάτω από το 1 και το 3, όπως φαίνεται και στο **σχήμα 5.6**. Επειδή όμως η καταπόνηση των βάθρων δεν εξαρτάται μόνο από την ενίσχυση της επιτάχυνσης κάτω από το θεμέλιο, αλλά και από την διαφορετικότητα της κίνησης με τα άλλα θεμέλια, πιο καταπονημένα παρουσιάζονται τα βάθρα 2 και 3. Αντίστοιχα, αυξημένες ροπές παρουσιάζονται και στο κατάστρωμα στις στηρίξεις των φατνωμάτων 1 και 3, στην δημιουργία των οποίων συμβάλλει πιθανότατα και η κατακόρυφη επιτάχυνση των βάθρων 1 και 3.

B. Περίπτωση καταστώματος με θεώρηση αρμών

Η διέγερση τώρα έχει υποκλιμάκια αναχθεί, ώστε να έχει $PGA=0.17g$, ώστε οι ροπές που προκύπτουν να είναι μικρότερες από την ροπή αντοχής για την ανάλυση του εδάφους με την μονοδιάστατη γεωμετρία.

Γέφυρα στην θέση 1

Οι επιταχύνσεις κάτω από τα θεμέλια είναι όμοιες με την παραπάνω περίπτωση, με εξαίρεση τις υψίσυχνες διακυμάνσεις κάτω από το 1^ο θεμέλιο (**Σχήμα 6.89**). Όπως φαίνεται από τις ροπές του **σχήματος 6.90**, η καταπόνηση του φορέα τώρα δεν είναι ιδιαίτερα δυσμενέστερη από την καταπόνηση λόγω μονοδιάστατης ενίσχυσης. Παρ'όλα αυτά, και πάλι προκύπτει οριακά μεγαλύτερη από την ροπή αντοχής, ενώ μερικές μεμονωμένες τιμές ροπών προκύπτουν σημαντικά μεγαλύτερες. Αντίθετα, σημαντική αύξηση των ροπών παρατηρείται στο κατάστρωμα, σύμφωνα με το **σχήμα 6.91**, ενώ οι στροφές και οι καθιζήσεις σε μορφές χρονοϊστοριών παρουσιάζονται στο **σχήμα 6.92**.

Το γεγονός, ότι η επίδραση της κοιλάδας είναι πολύ μικρή στην περίπτωση αυτή, μπορεί να εξηγηθεί από το ότι και η διαφορετικότητα στην κίνηση των δύο πρώτων θεμελίων δεν είναι τόσο έντονη για την διέγερση αυτή, όπως φαίνεται και στην

κατανομή των επιταχύνσεων του ελεύθερου πεδίου στο **σχήμα 5.6**. Για το λόγο αυτό, και στην περίπτωση του συνεχούς καταστρώματος η ροπή που είχε αναπτυχθεί στο 1^ο βάθρο ήταν μικρότερη από ότι στην περίπτωση διέγερσης της κοιλιάδας με το Ricker 1.

Γέφυρα στην θέση 2

Και στην περίπτωση αυτή, η καταπόνηση του φορέα είναι πιο έντονη από ότι την περίπτωση έδρασης του σε μονοδιάστατο έδαφος, με τρόπο παρόμοιο, αν και ελαφρώς πιο ήπιο, με την περίπτωση του φορέα με το συνεχές κατάστρωμα (**Σχήματα 6.93 και 6.94**).

6.3.2. JMA 000

Η διέγερση αυτή έχει υποκλιμάκια αναχθεί, ώστε να έχει $PGA=0.20g$ και οι ροπές που προκύπτουν να είναι μικρότερες από την ροπή αντοχής για την ανάλυση του εδάφους με την μονοδιάστατη γεωμετρία.

Γέφυρα στην θέση 1

Τα αποτελέσματα αυτής της διέγερσης ακολουθούν τις γενικές τάσεις που προέκυψαν από την ανάλυση που έγινε με το Ricker 1, με πολύ μεγάλες ροπές να αναπτύσσονται στην βάση του 1^{ου} υποστρώματος και με μικρότερες, αλλά επίσης σημαντικές ροπές στις κορυφές των 2 πρώτων υποστρωμάτων (**Σχήμα 6.97**). Μικρότερες, αλλά ακόμα ροπές που θα οδηγούσαν σε αστοχία αναπτύσσονται και στα βάθρα 4 και 6 (**Σχήμα 6.98**). Επίσης αυξημένες είναι και οι ροπές στο κατάστρωμα (**Σχήμα 6.99**).

Γέφυρα στην θέση 2

Στην θέση 2, αντίστοιχα με την μελέτη περίπτωσης με διέγερση το Ricker1, περισσότερο καταπονούνται τα βάθρα 1 και 3, καθώς και οι στηρίξεις των ανοιγμάτων 1 και 3 (**Σχήματα 6.101 – 6.103**).

6.3.3. Jensen 292

Η διέγερση αυτή έχει υποκλιμάκια αναχθεί, ώστε να έχει $PGA=0.24g$ και οι ροπές που προκύπτουν να είναι μικρότερες από την ροπή αντοχής για την ανάλυση του εδάφους με την μονοδιάστατη γεωμετρία.

Γέφυρα στην θέση 1

Αξίζει να σημειωθεί, ότι η συμπεριφορά της διέγερσης αυτής είναι ακόμα πιο έντονη ακόμα και στην περίπτωση του μονοδιάστατου εδάφους, καθώς η δεσπόζουσα περίοδος της διέγερσης είναι πιο κοντά στην ιδιοπερίοδο του μονοδιάστατου σχηματισμού και αυτό φαίνεται από τις χρονοϊστορίες των επιταχύνσεων (**Σχήματα 6.104 και 6.105**), οι οποίες παρουσιάζουν μεγαλύτερες τιμές από τις αντίστοιχες του Ricker, αν και οι δύο διεγέρσεις είχαν το ίδιο PGA.

Παρόλ'αυτά, και εδώ οι πιο εντυπωσιακές ροπές εμφανίζονται στην βάση του 1^{ου} υποστύλωματος, ενώ πολύ μεγάλες ροπές εμφανίζονται και στις κορυφές του 1^{ου} και του 2^{ου} υποστύλωματος, καθώς και στο 6^ο υποστύλωμα (**Σχήματα 6.107 και 6.108**). Επίσης, σημαντικά για αυτή την διέγερση προκύπτουν και τα drift στα βάθρα αυτά (**Σχήματα 6.109 και 6.110**), τα οποία ξεπερνούν και το 1%. Αντίστοιχα, αυξημένες παρουσιάζονται οι ροπές στο 1^ο και το 5^ο φάτνωμα (**σχήμα 6.11**).

Η παραπάνω συμπεριφορά, αν και πιο έντονη ακόμα, είναι αντίστοιχη με αυτήν που παρουσιάζει η γέφυρα στην ανάλυση με το Ricker 1 και εξηγούνται με τους μηχανισμούς που αναλύθηκαν κατά την αποδόμηση του προβλήματος.

Γέφυρα στην θέση 2

Και για αυτή την διέγερση περισσότερο καταπονούνται τα ανοίγματα και τα βάθρα 1 και 3 του φορέα, μόνο που τώρα παρουσιάζουν και αυξημένο drift. (**Σχήματα 6.114 - 6.117**)

6.4. Συμπεράσματα

Συνοπτικά, οι **μηχανισμοί** με τους οποίους επιδρά η παρουσία του δισδιάστατου εδαφικού αναγλύφου στην απόκριση της γέφυρας θεμελιωμένης στην κοιλάδα με θεώρηση ελαστικού εδάφους είναι:

- Η **διαφορετικότητα της οριζόντιας κίνησης** κατά μήκος της κοιλάδας, η οποία προκαλεί την μεγαλύτερη καταπόνηση της κατασκευής προκαλώντας αύξηση των ροπών στα βάθρα και στο κατάστρωμα.
- Η **παρασιτική κατακόρυφη συνιστώσα**, η οποία δεν προκαλεί ιδιαίτερη καταπόνηση στα βάθρα, αλλά προκαλεί ροπές στο κατάστρωμα, στις στηρίξεις των ανοιγμάτων. Επίσης, είναι υπεύθυνη για τις καθιζήσεις και τις αξονικές δυνάμεις των βάθρων. Γενικά, ο ρόλος της πάντως στην πλήρως ελαστική ανάλυση που πραγματοποιήθηκε **δε** φάνηκε ιδιαίτερα σημαντικός.
- Η **επιπλέον εδαφική ενίσχυση** που προκαλείται από την γεωμετρία της κοιλάδας, αποδείχτηκε ότι δεν είναι ο πιο καταστρεπτικός μηχανισμός της κοιλάδας, δηλαδή ο σχεδιασμός της ανωδομής με απλώς αυξημένη φασματική επιτάχυνση σχεδιασμού **δε** θα αποτελούσε αποτελεσματική λύση.
- Στην περίπτωση που το κατάστρωμα της γέφυρας θεωρηθεί **συνεχές**, χωρίς αρμούς, πολύ σημαντικό ρόλο παίζει και η **διαφορετική σύνθετη δυσκαμψία** που έχουν τα θεμέλια λόγω των διαφορετικών υποκείμενων εδαφικών συνθηκών. Έτσι, το θεμέλιο που βρίσκεται στο άκρο της κοιλάδας και συνεπώς παρουσιάζει αυξημένη δυσκαμψία, αναπτύσσει μεγαλύτερα εντατικά μεγέθη στην προσπάθεια του να αντισταθεί στις επιβαλλόμενες παραμορφώσεις. Αυτό αντιμετωπίζεται αποτελεσματικά με την **χρήση εφεδράνων**, τα οποία ουσιαστικά του επιτρέπουν να κινηθεί ελεύθερα, με αποτέλεσμα το βάθρο να ανακουφιστεί από τα επιπλέον εντατικά μεγέθη.

Η **θεώρηση αρμών** στο κατάστρωμα, ανακουφίζει όπως είναι αναμενόμενο την απόκριση της κατασκευής. Πράγματι, οι αρμοί έχουν ως αποτέλεσμα την μείωση της καταπόνησης των υποκείμενων βάρων. Με τον τρόπο αυτό, αντιμετωπίζεται και το πρόβλημα της διαφορετικής σύνθετης δυσκαμψίας των θεμελίων που αναφέρεται παραπάνω. Τα εφέδρανα, όπως έχουν προσομοιωθεί εδώ, ενώ δεν αναπτύσσουν καθόλου μετακινήσεις στην περίπτωση της μονοδιάστατης γεωμετρίας του εδάφους, παρουσιάζουν περίπου **10 cm** μετακίνηση στην περίπτωση της εδαφικής κοιλάδας. Συνεπώς, αν η δισδιάστατη αυτή γεωμετρία αγνοηθεί, τα εφέδρανα είναι πιθανόν να υποδιαστασιοποιηθούν. Επίσης, αξίζει να σημειωθεί, ότι στην περίπτωση ύπαρξης εφεδράνων, οι συνεπαγόμενες μετακινήσεις οδηγούν σε αυξημένη καταπόνηση των διπλανών τους βάρων.

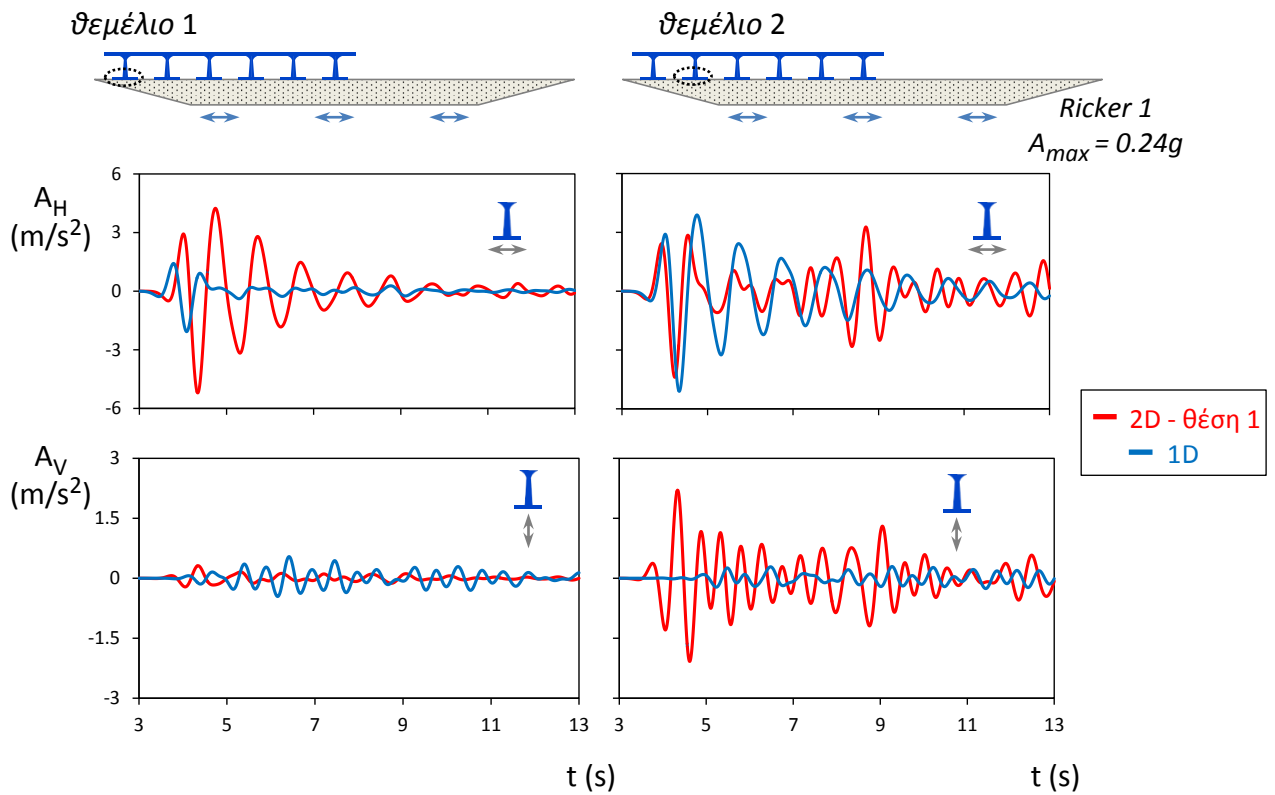
Δυσμενέστερη από τις δύο θέσεις της γέφυρας, προέκυψε η **θέση 1** της κοιλάδας, καθώς στην θέση αυτή είναι πιο έντονος κατά κανόνα ο **ασυγχρονισμός και ο ασυγχρωτισμός** της κίνησης, καθώς το ένα θεμέλιο δέχεται διέγερση απομειωμένη από ότι θα προέκυπτε από την μονοδιάστατη ενίσχυση, ενώ το άλλο σημαντικά ενισχυμένη. Επίσης, στην περιοχή αυτή αναπτύσσονται και οι διαφορετικές εδαφικές δυσκαμψίες. Παρ'όλ' αυτά στην **θέση 2**, σημαντικό χαρακτηριστικό είναι η μεγάλη διάρκεια της αυξημένης καταπόνησης, η οποία οφείλεται στα κύματα Rayleigh. Επίσης, λόγω της ιδιαίτερης παραμόρφωσης που προκαλούν τα κύματα αυτά στην εδαφική επιφάνεια, η παραμόρφωση του φορέα χάνει την αρχική συμμετρία της.

Τα παραπάνω χαρακτηριστικά, τα οποία μελετήθηκαν αναλυτικά για την περίπτωση διέγερσης με Ricker 1, έχουν ισχύ και στην περίπτωση των **πραγματικών διεγέρσεων**. Πράγματι, παρά τις διαφορές που συνεπάγονται το διαφορετικό συχνοτικό περιεχόμενο και οι λεπτομέρειες των διεγέρσεων, σε γενικές γραμμές τα φαινόμενα που παρατηρήθηκαν ήταν ίδια.

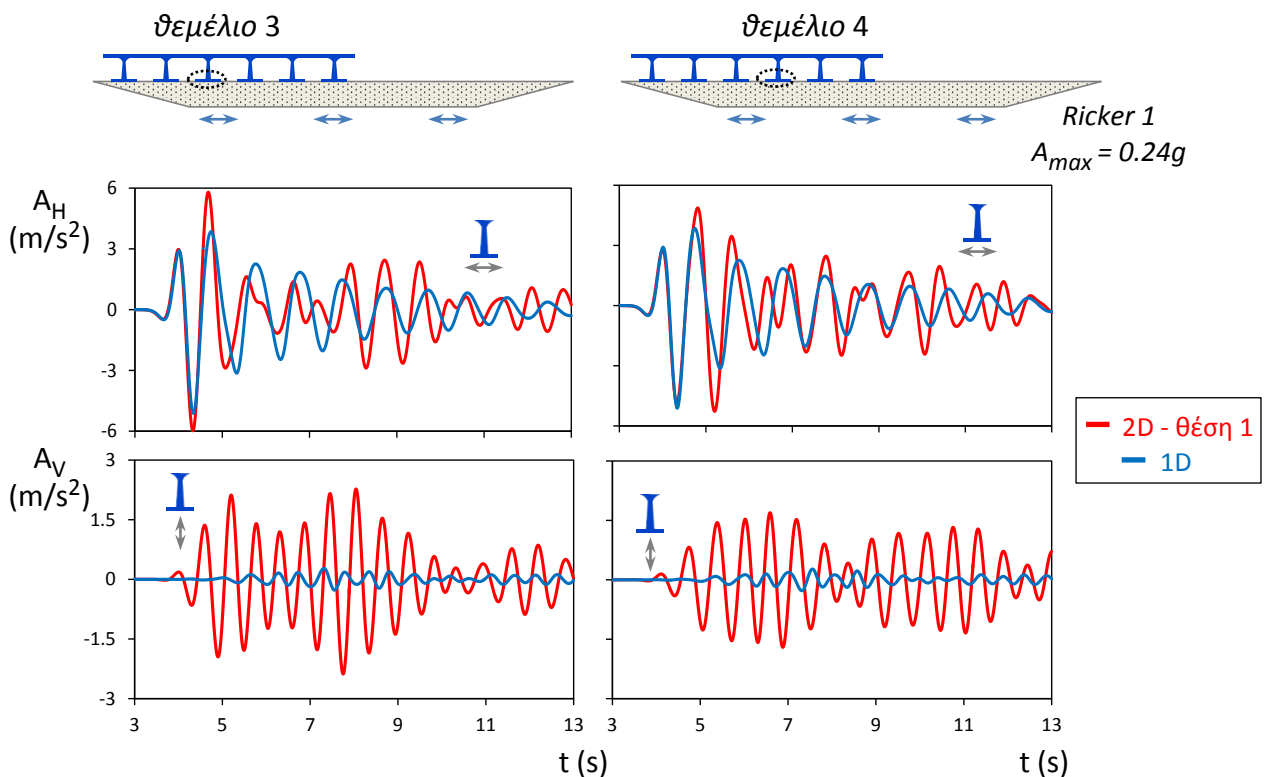
Τέλος, αξίζει να σημειωθεί, ότι αν και από τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στις χρονοϊστορίες έχουν αφαιρεθεί τα στατικά μεγέθη, η παρουσία της εδαφικής

κοιλιάδας έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία διαφορικών καθιζήσεων και συνεπώς την ανάπτυξη επιπλέον εντατικών μεγεθών στο φορέα ήδη από την **στατική φόρτιση**.

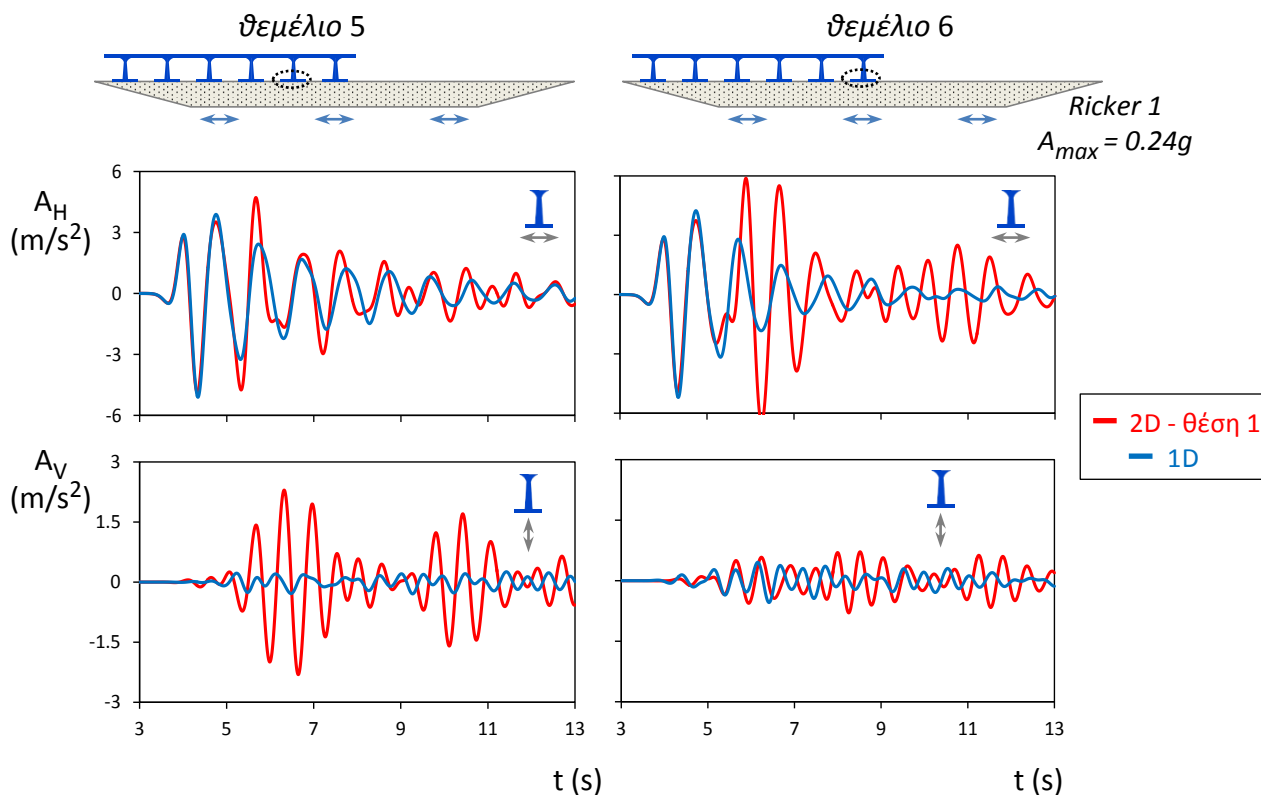
Από τα παραπάνω συμπεραίνεται, ότι το δισδιάστατο υποκείμενο εδαφικό ανάγλυφο μπορεί έχει σημαντική επίδραση στην συμπεριφορά της γέφυρας και η άγνοια της παρουσίας του ενδέχεται να οδηγήσει σε σημαντική υποδιαστασιολόγηση της γέφυρας. Επειδή όμως στην πραγματικότητα, ούτε το έδαφος ούτε η ανωδομή είναι πλήρως ελαστικά, απαιτείται περαιτέρω διερεύνηση.



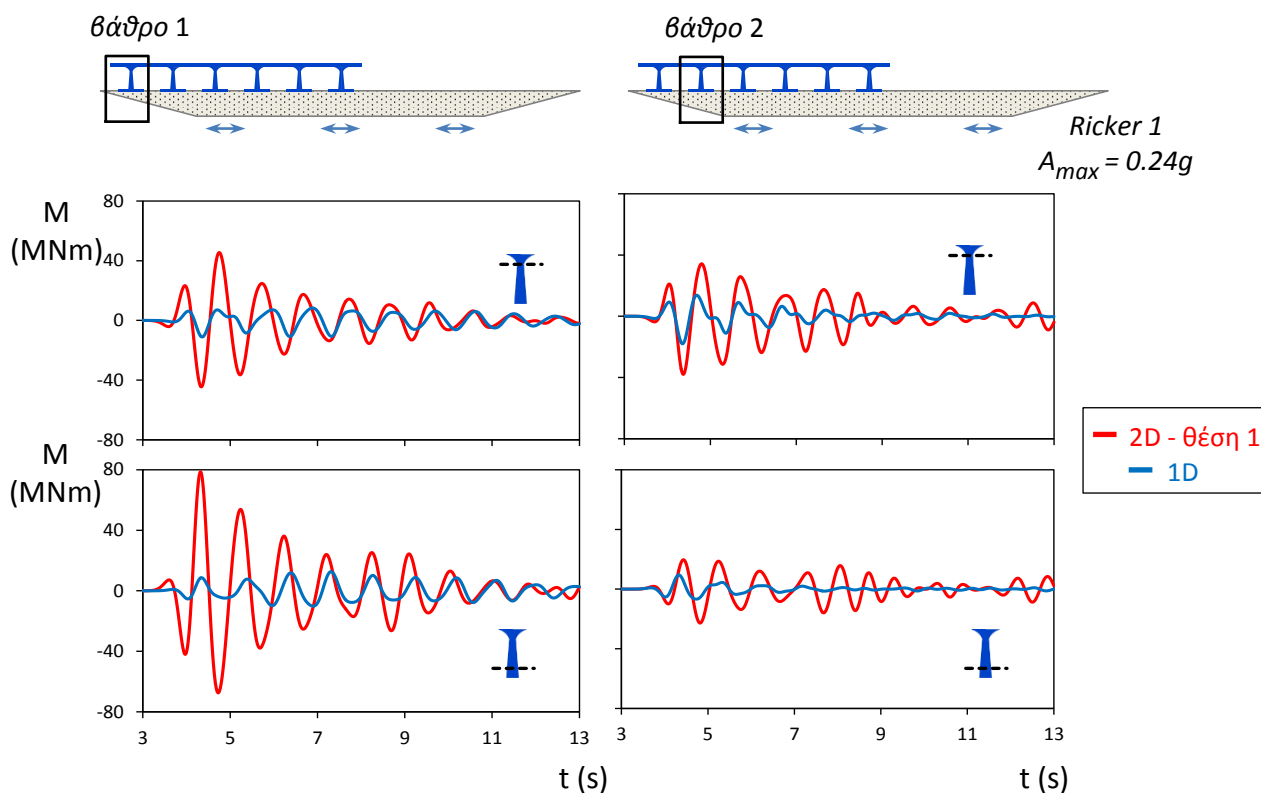
Σχήμα 6.1: Χρονοϊστορίες επιταχύνσεων στις βάσεις των θεμελίων 1 και 2. Μελέτη περίπτωσης: Διέγερση Ricker 1, θεωρήση συνεχούς καταστρώματος, γέφυρα στη θέση 1, θεωρήση ελαστικού εδάφους.



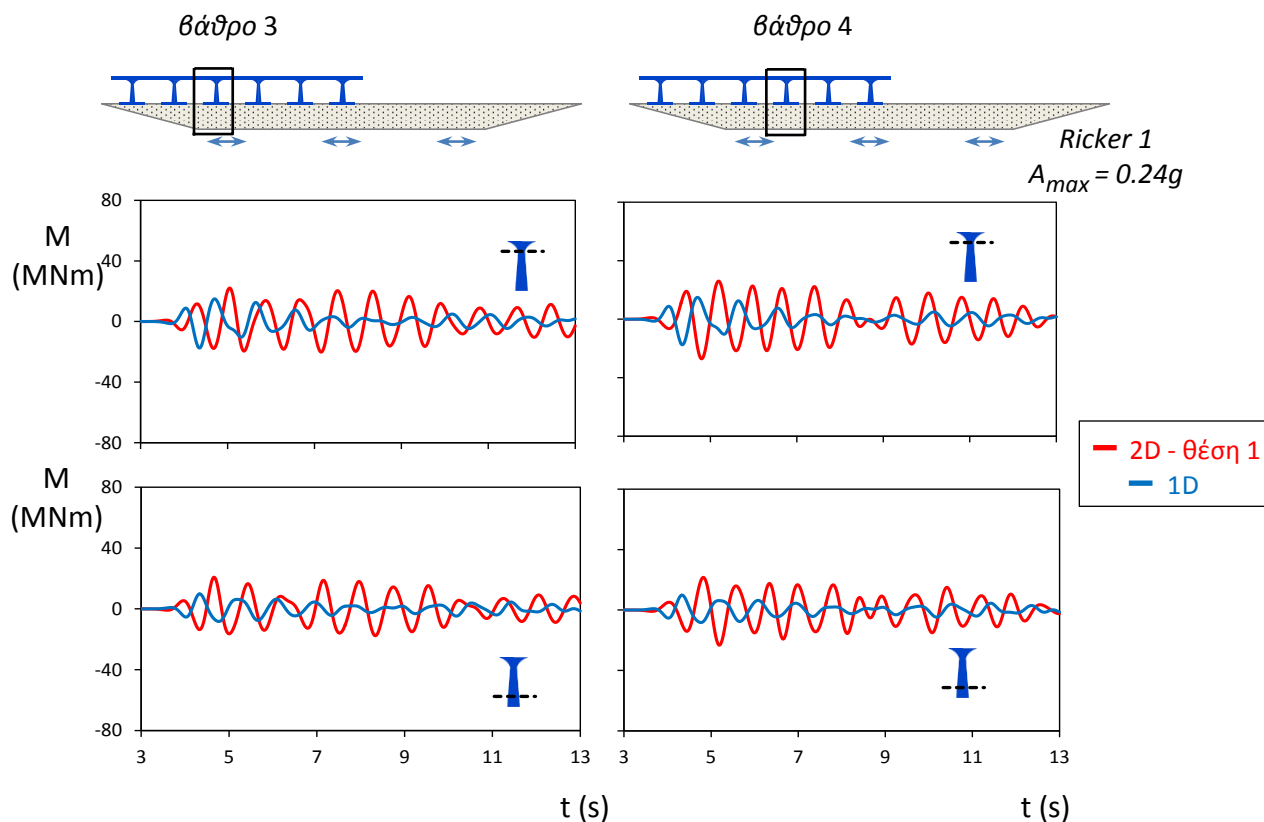
Σχήμα 6.2 : Χρονοϊστορίες επιταχύνσεων στις βάσεις των θεμελίων 3 και 4. Μελέτη περίπτωσης: Διέγερση Ricker 1, θεωρήση συνεχούς καταστρώματος, γέφυρα στη θέση 1, θεωρήση ελαστικού εδάφους.



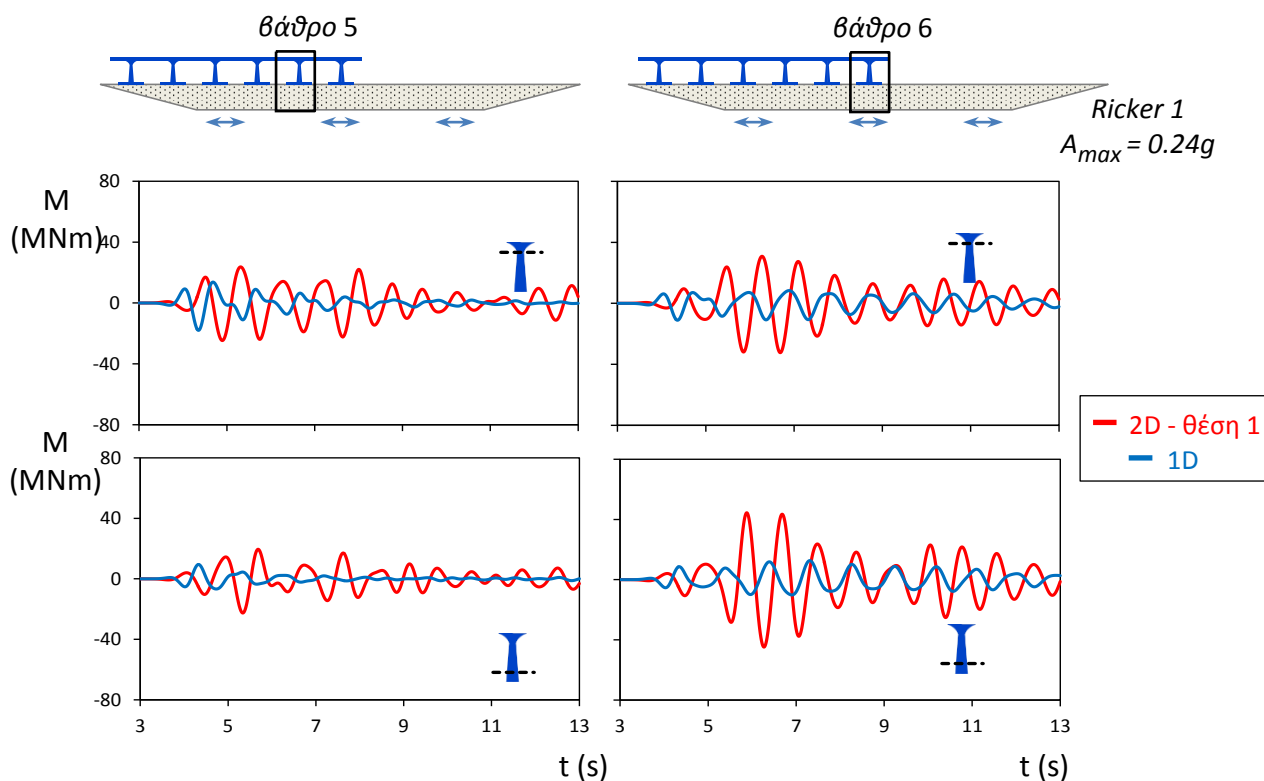
Σχήμα 6.3: Χρονοϊστορίες επιταχύνσεων στις βάσεις των θεμελίων 5 και 6. Μελέτη περίπτωσης: Διέγερση Ricker 1, θεώρηση συνεχούς καταστρώματος, γέφυρα στη θέση 1, θεώρηση ελαστικού εδάφους.



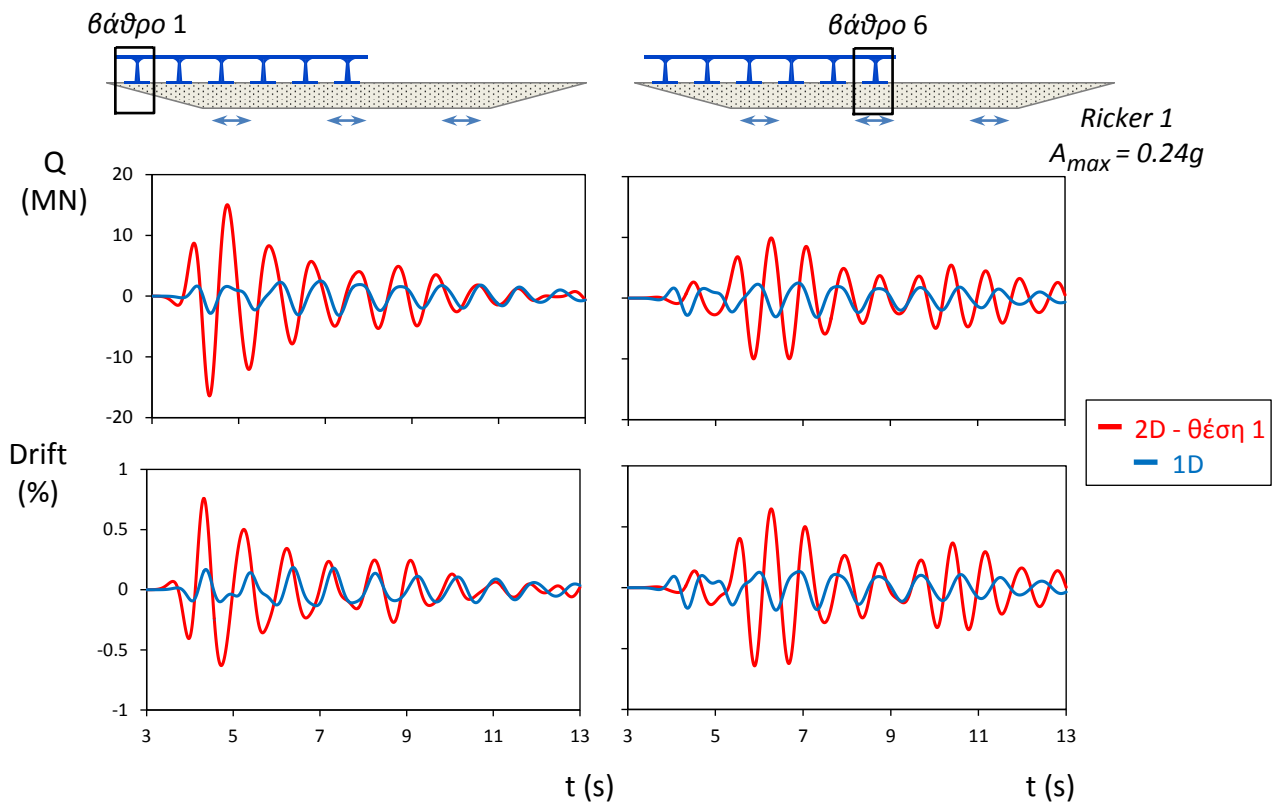
Σχήμα 6.4: Χρονοϊστορίες καμπτικών ροπών στα βάθρα 1 και 2 του φορέα. Μελέτη περίπτωσης: Διέγερση Ricker 1, θεώρηση συνεχούς καταστρώματος, γέφυρα στη θέση 1, θεώρηση ελαστικού εδάφους.



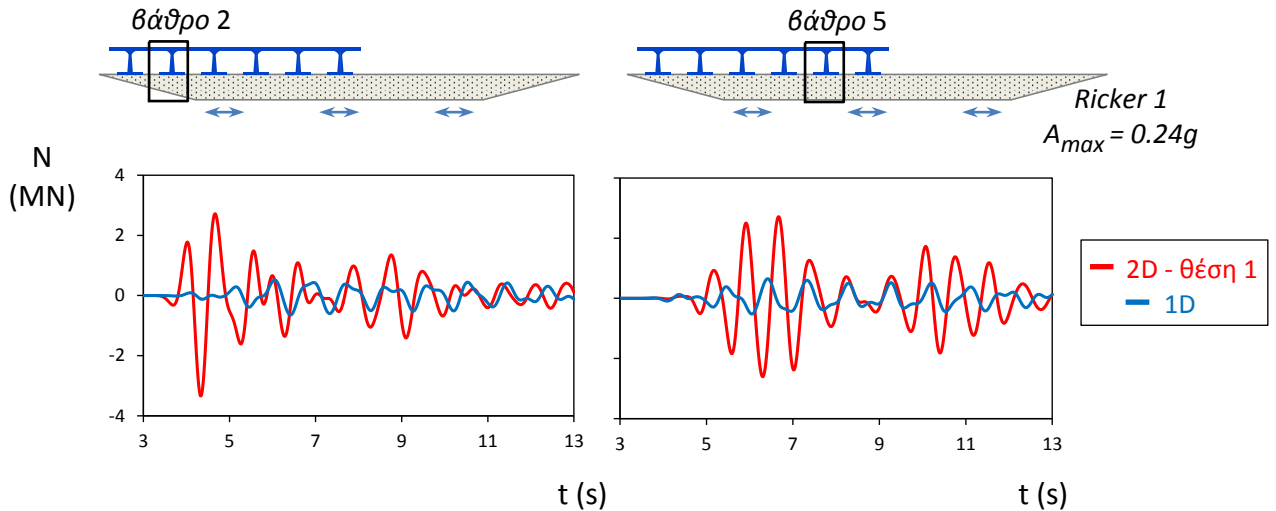
Σχήμα 6.5: Χρονοϊστορίες καμπτικών ροπών στα βάθρα 3 και 4 του φορέα. Μελέτη περίπτωσης: Διέγερση Ricker 1, θεωρία συνεχούς καταστρώματος, γέφυρα στη θέση 1, θεωρία ελαστικού εδάφους.



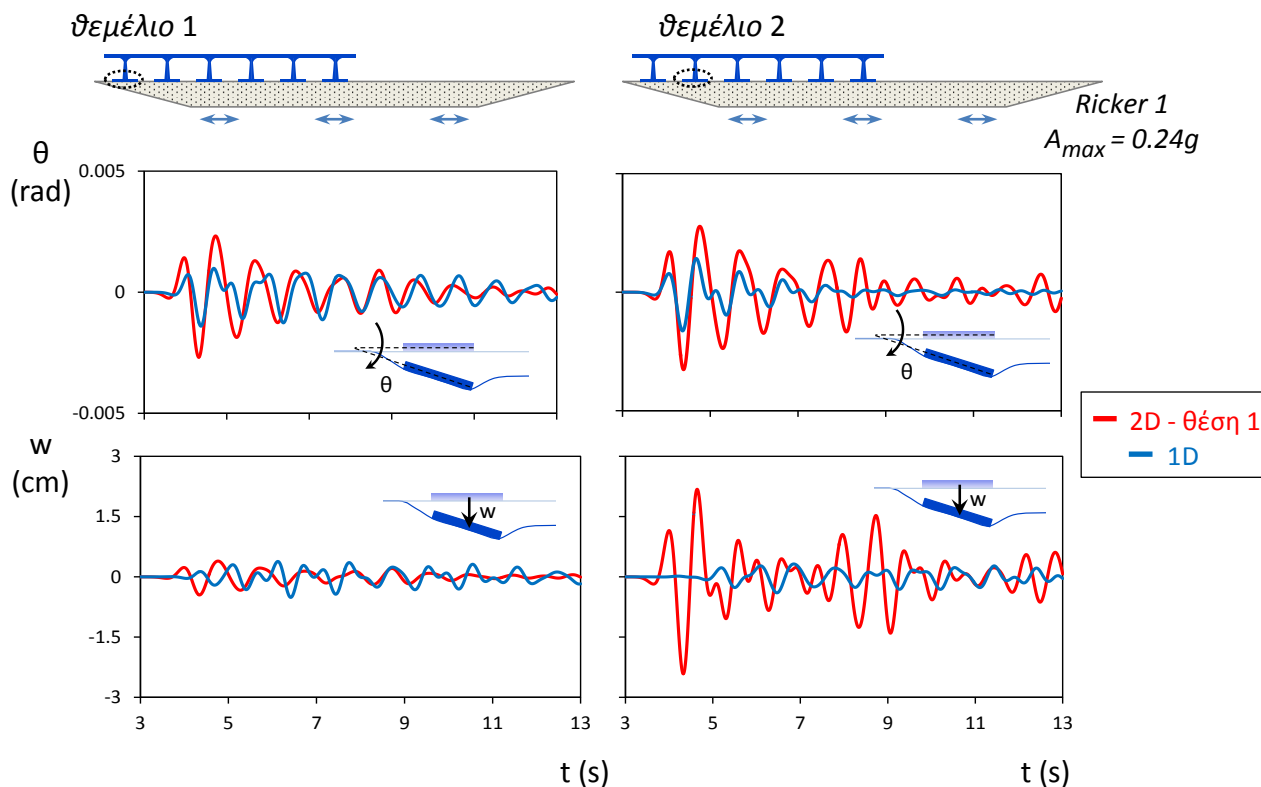
Σχήμα 6.6: Χρονοϊστορίες καμπτικών ροπών στα βάθρα 5 και 6 του φορέα. Μελέτη περίπτωσης: Διέγερση Ricker 1, θεωρία συνεχούς καταστρώματος, γέφυρα στη θέση 1, θεωρία ελαστικού εδάφους.



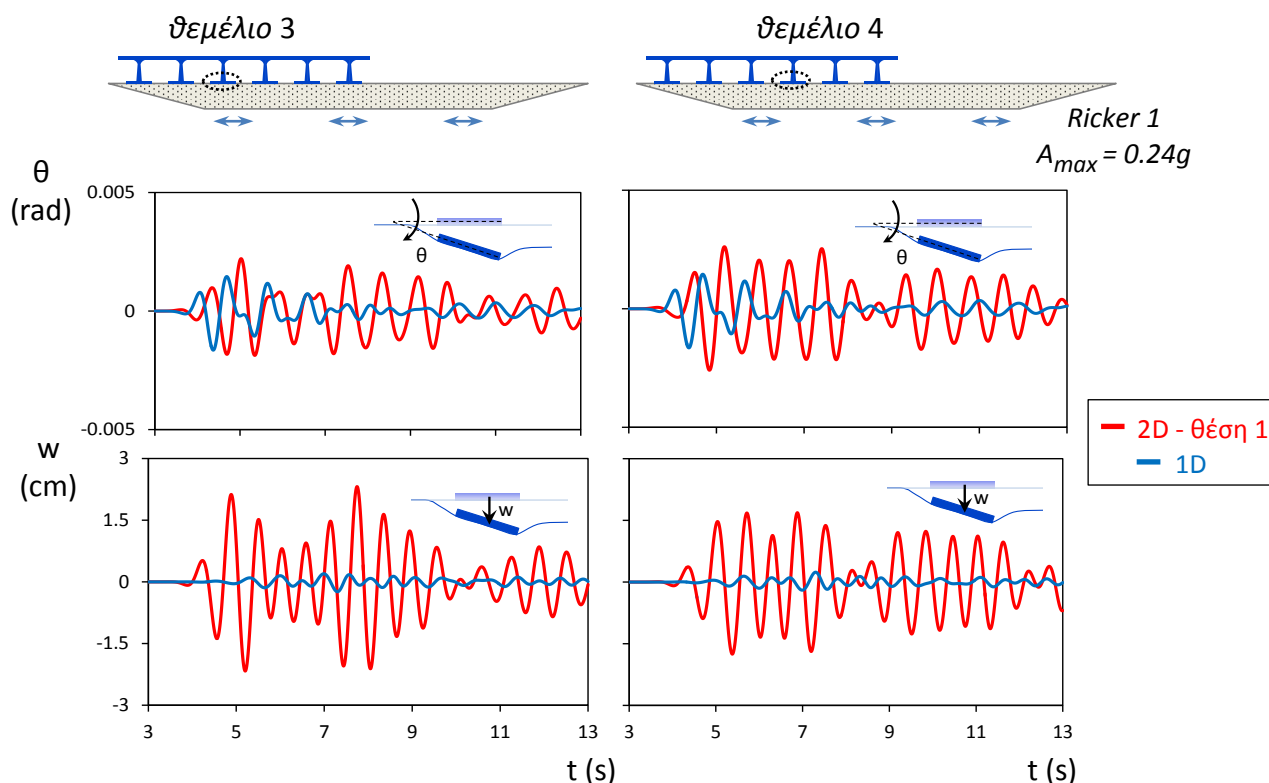
Σχήμα 6.7: Χρονοϊστορίες drift στα βάθρα 1 και 6 του φορέα. Μελέτη περίπτωσης: Διέγερση Ricker 1, θεώρηση συνεχούς καταστρώματος, γέφυρα στη θέση 1, θεώρηση ελαστικού εδάφους.



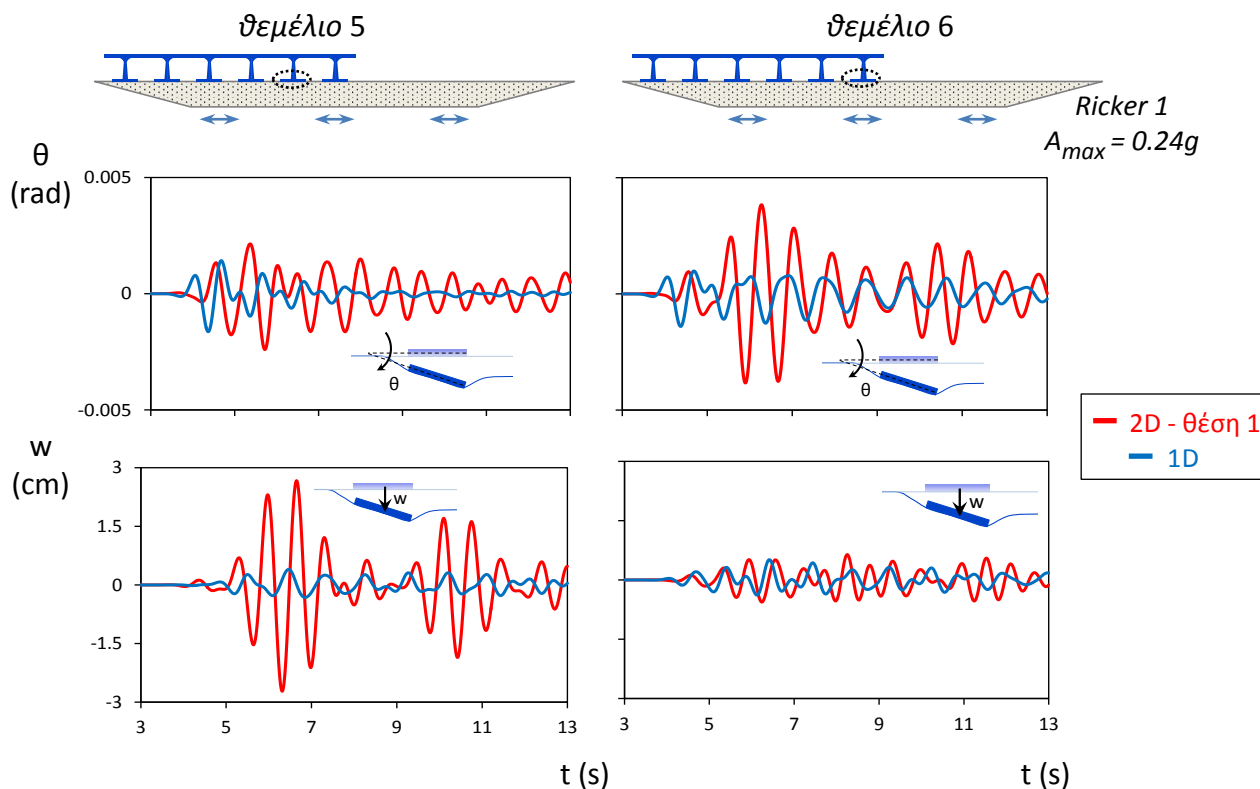
Σχήμα 6.8: Χρονοϊστορίες αξονικών δυνάμεων στα βάθρα 2 και 5 του φορέα. Μελέτη περίπτωσης: Διέγερση Ricker 1, θεώρηση συνεχούς καταστρώματος, γέφυρα στη θέση 1, θεώρηση ελαστικού εδάφους.



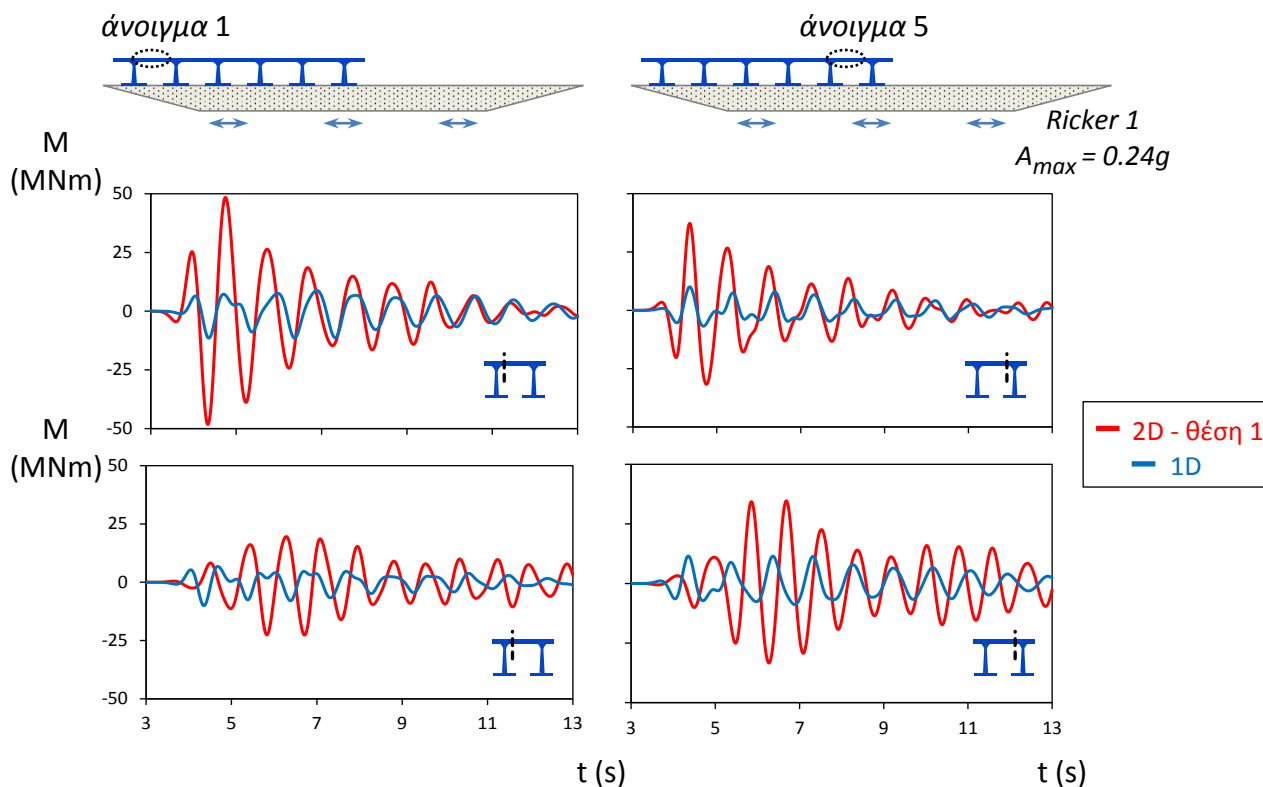
Σχήμα 6.9: Χρονοϊστορίες στροφών και καθιζήσεων στις βάσεις των θεμελίων 1 και 2. Μελέτη περίπτωσης: Διέγερση Ricker 1, θεώρηση συνεχούς καταστρώματος, γέφυρα στη θέση 1, θεώρηση ελαστικού εδάφους.



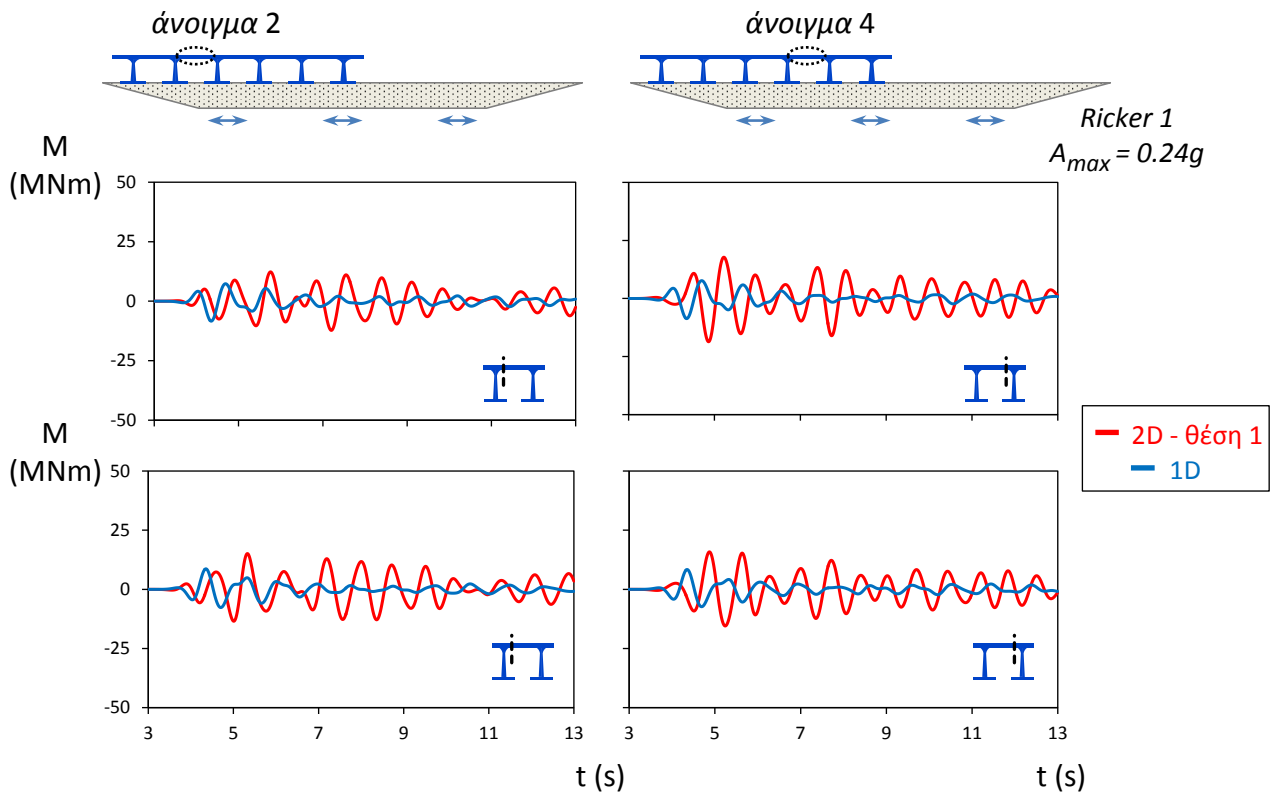
Σχήμα 6.10: Χρονοϊστορίες στροφών και καθιζήσεων στις βάσεις των θεμελίων 3 και 4. Μελέτη περίπτωσης: Διέγερση Ricker 1, θεώρηση συνεχούς καταστρώματος, γέφυρα στη θέση 1, θεώρηση ελαστικού εδάφους.



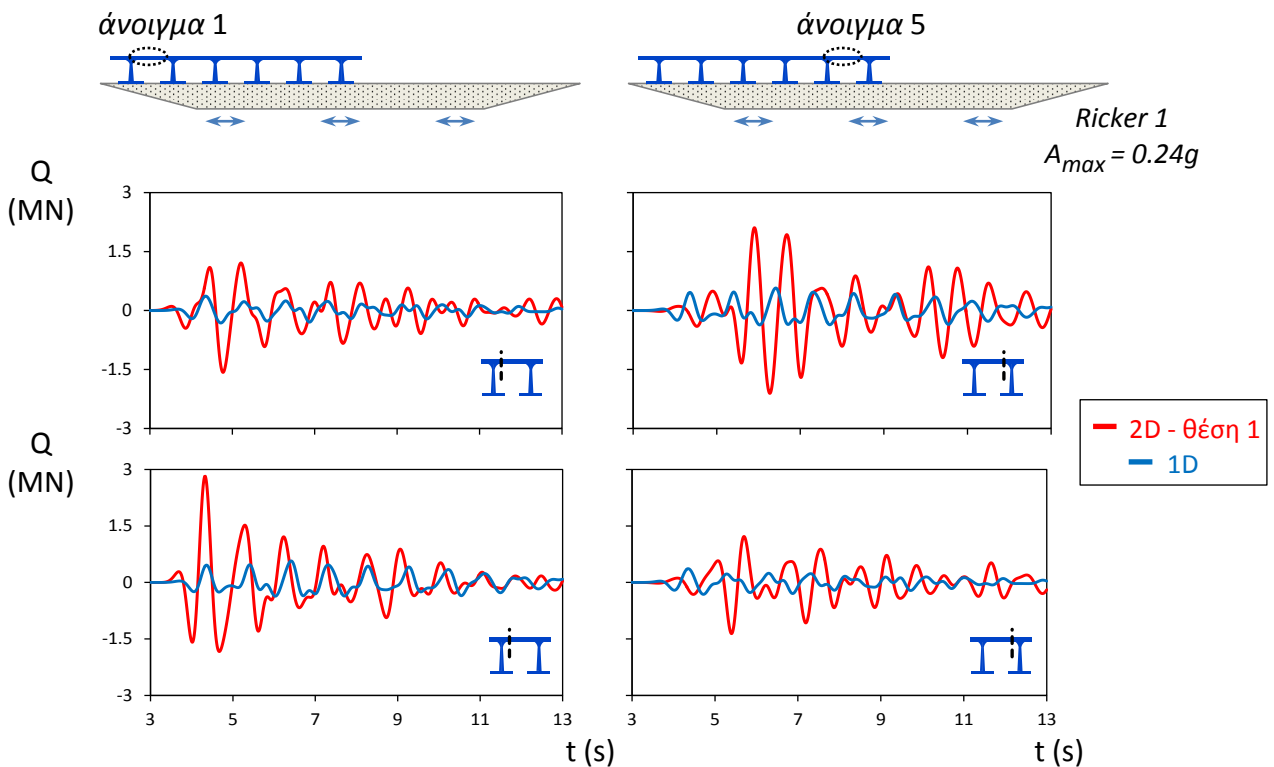
Σχήμα 6.11 : Χρονοϊστορίες στροφών και καθιζήσεων στις βάσεις των θεμελίων 5 και 6. Μελέτη περίπτωσης: Διέγερση Ricker 1, θεώρηση συνεχούς καταστρώματος, γέφυρα στη θέση 1, θεώρηση ελαστικού εδάφους.



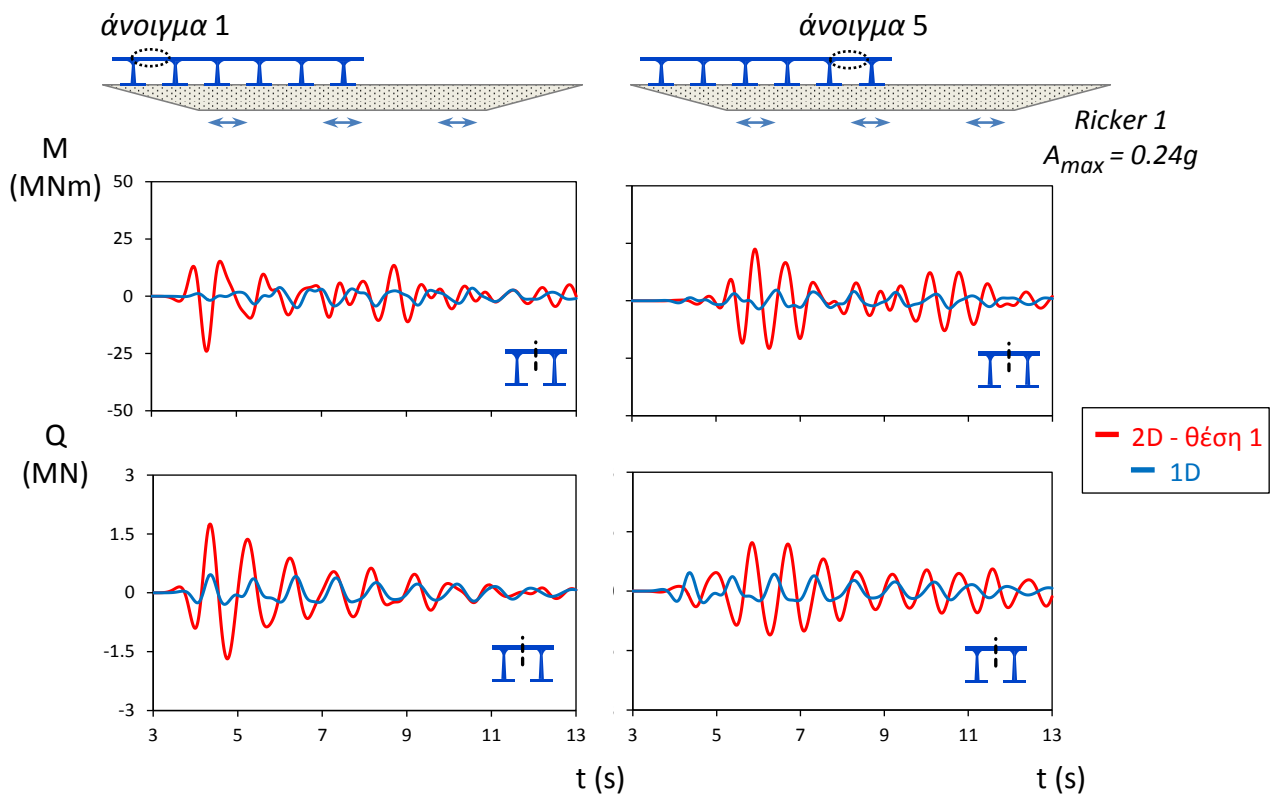
Σχήμα 6.12 : Χρονοϊστορίες καμπτικών ροπών στήριξης στα ανοίγματα 1 και 5 του φορέα. Μελέτη περίπτωσης: Διέγερση Ricker 1, θεώρηση συνεχούς καταστρώματος, γέφυρα στη θέση 1, θεώρηση ελαστικού εδάφους.



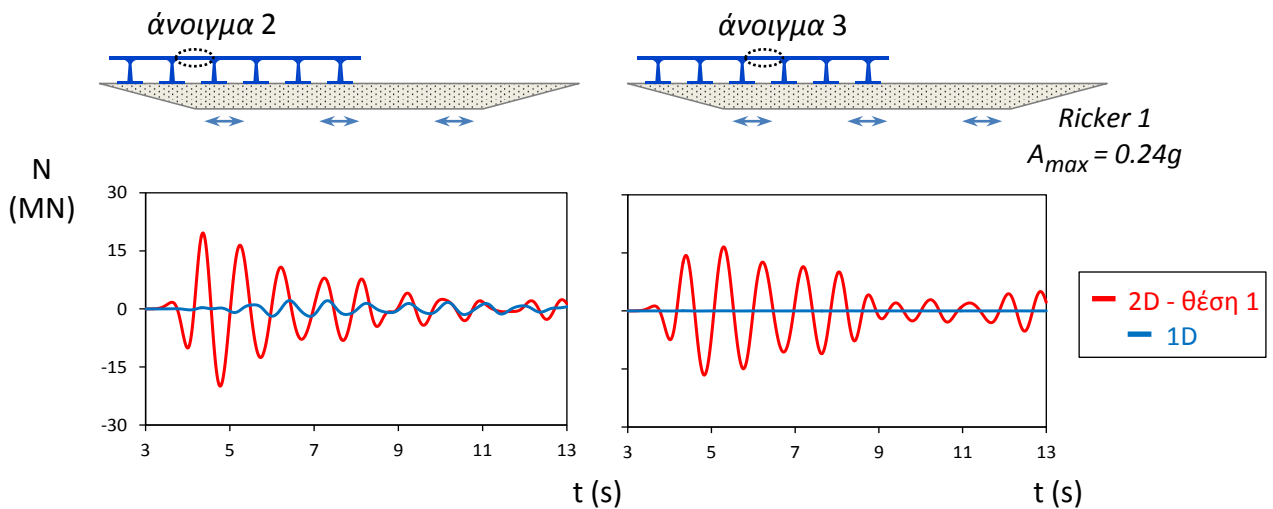
Σχήμα 6.13: Χρονοϊστορίες καμπτικών ροπών στήριξης στα ανοίγματα 2 και 4 του φορέα . Μελέτη περίπτωσης: Διέγερση Ricker 1, θεώρηση συνεχούς καταστρώματος, γέφυρα στη θέση 1, θεώρηση ελαστικού εδάφους.



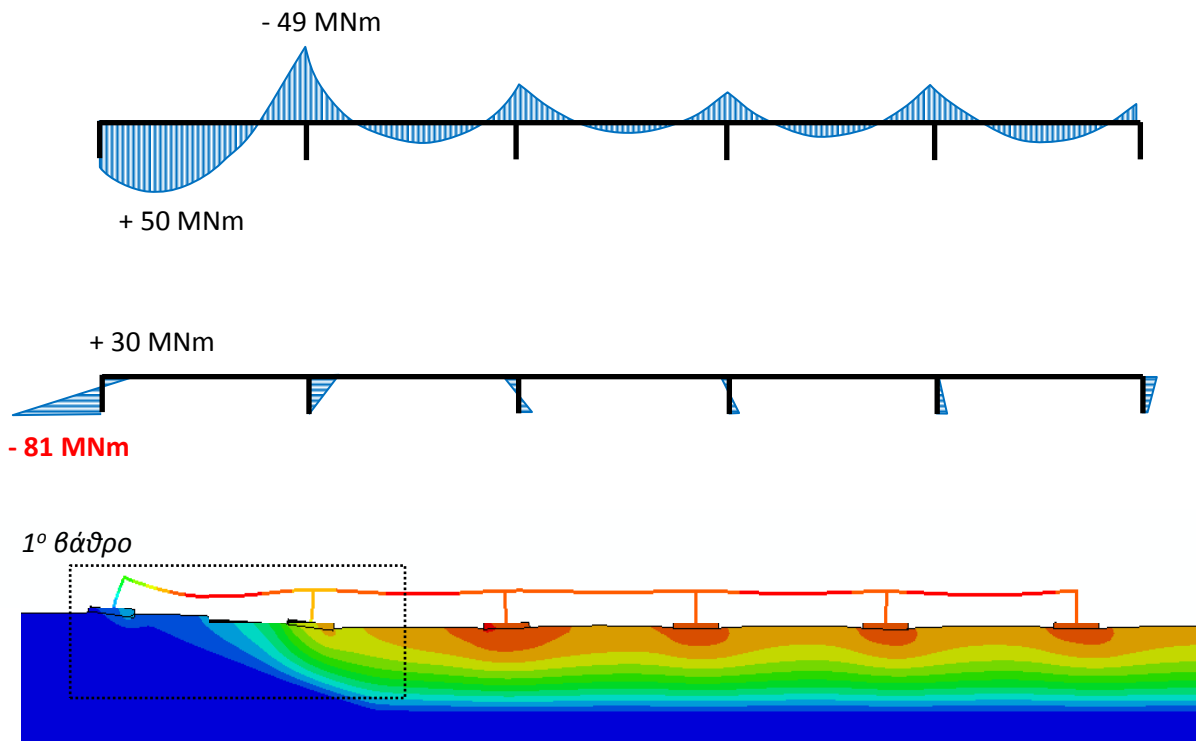
Σχήμα 6.14: Χρονοϊστορίες τεμνουσών δυνάμεων στήριξης στα ανοίγματα 1 και 5 του φορέα. Μελέτη περίπτωσης: Διέγερση Ricker 1, θεώρηση συνεχούς καταστρώματος, γέφυρα στη θέση 1, θεώρηση ελαστικού εδάφους.



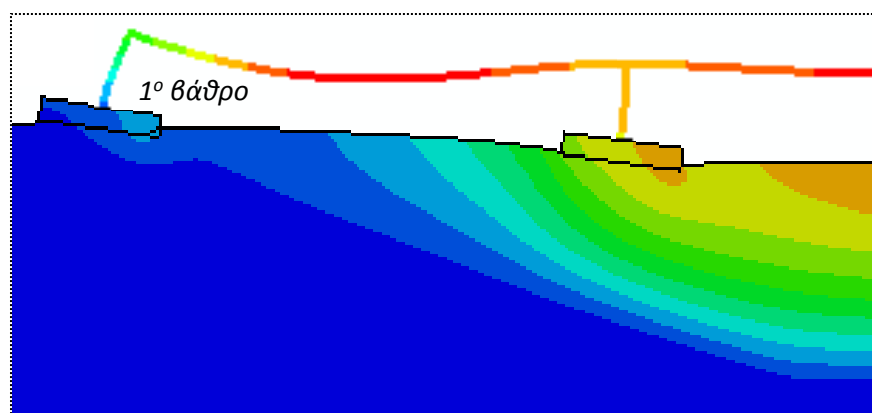
Σχήμα 6.15: Χρονοϊστορίες καμπτικών ροπών και τεμνουσών δυνάμεων στα μέσα των ανοιγμάτων 1 και 5 του φορέα . Μελέτη περίπτωσης: Διέγερση Ricker 1, θεώρηση συνεχούς καταστρώματος, γέφυρα στη θέση 1, θεώρηση ελαστικού εδάφους.



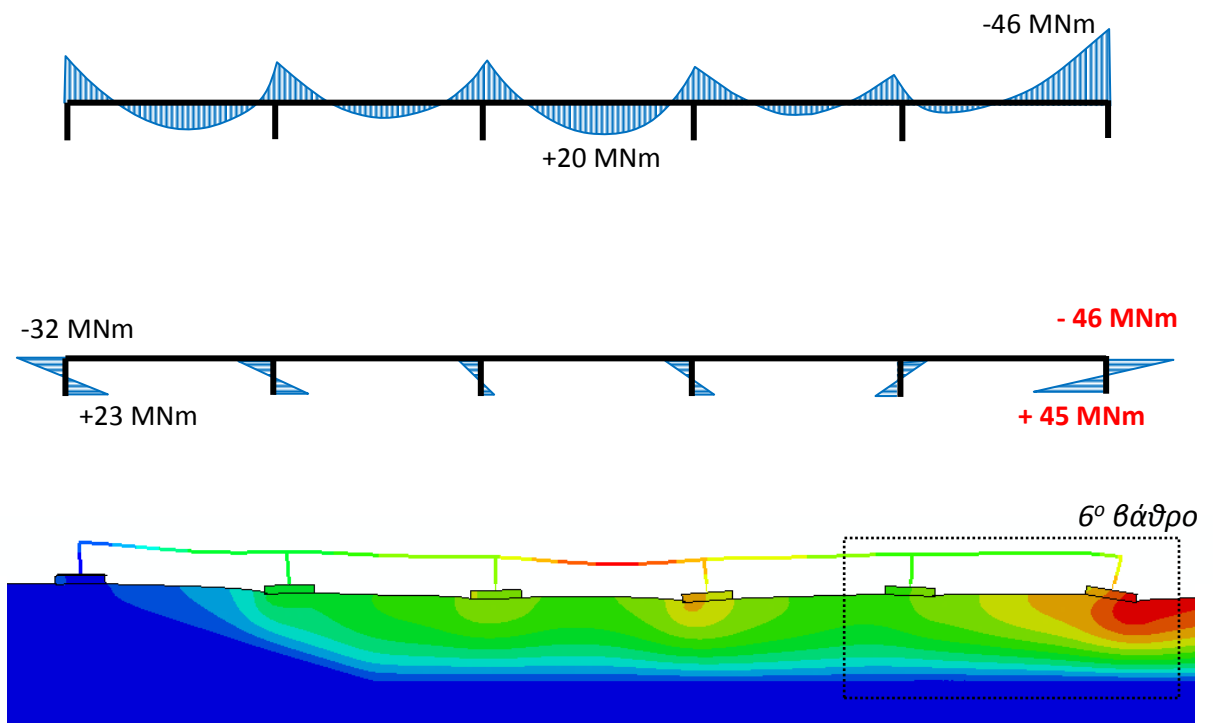
Σχήμα 6.16: Χρονοϊστορίες αξονικών δυνάμεων στα ανοίγματα 2 και 3 του φορέα . Μελέτη περίπτωσης: Διέγερση Ricker 1, θεώρηση συνεχούς καταστρώματος, γέφυρα στη θέση 1, θεώρηση ελαστικού εδάφους.



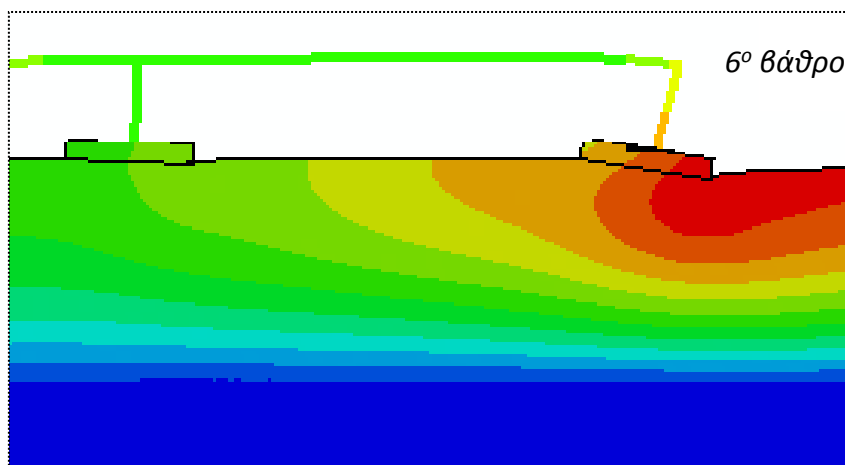
Σχήμα 6.17(α): Διάγραμμα καμπτικών ροπών και παραμορφωμένος φορέας τη στιγμή της μέγιστης καταπόνησης του πρώτου βάθρου ($t=4.325s$). Μελέτη περίπτωσης: Διέγερση Ricker 1, θεώρηση συνεχούς καταστρώματος, γέφυρα στη θέση 1, θεώρηση ελαστικού εδάφους.



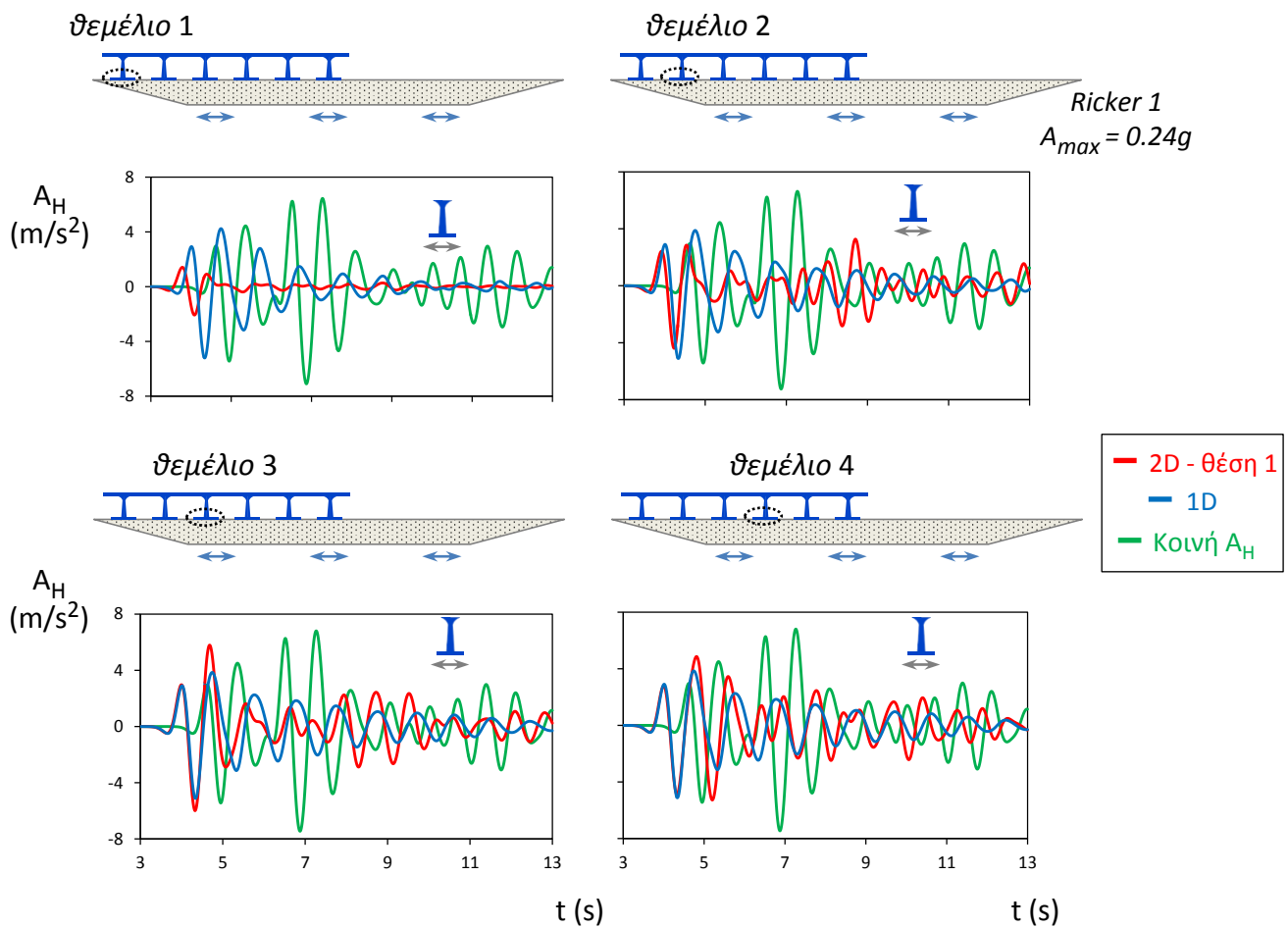
Σχήμα 6.17(β): Λεπτομέρεια παραμορφωμένου φορέα.



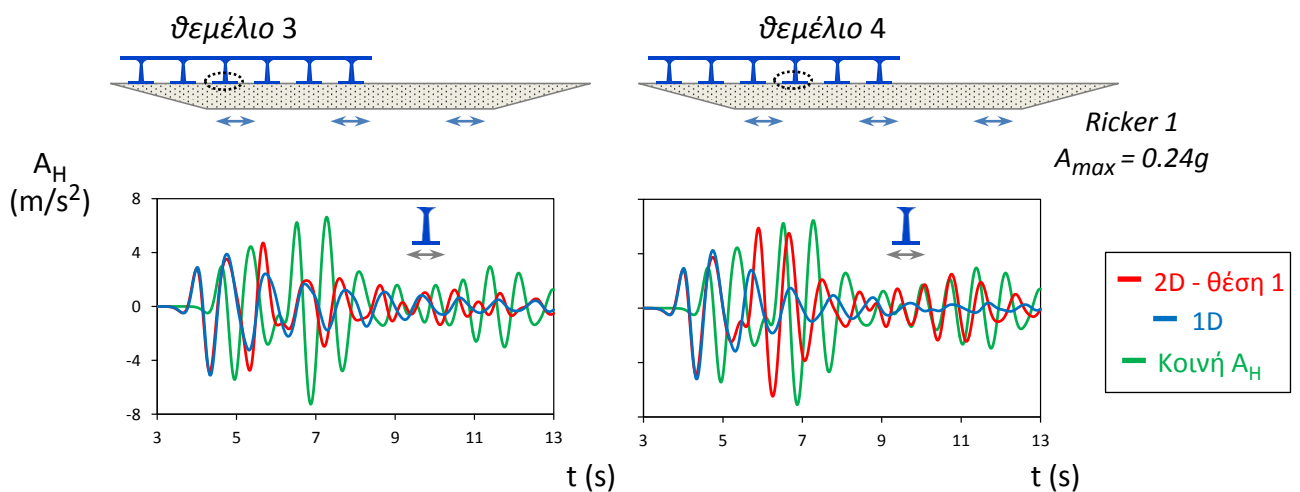
Σχήμα 6.18(α): Διάγραμμα καμπτικών ροπών και παραμορφωμένος φορέας τη στιγμή της μέγιστης καταπόνησης του έκτου βάρδου ($t=6.675s$). Μελέτη περίπτωσης: Διέγερση Ricker 1, θεώρηση συνεχούς καταστρώματος, γέφυρα στη θέση 1, θεώρηση ελαστικού εδάφους.



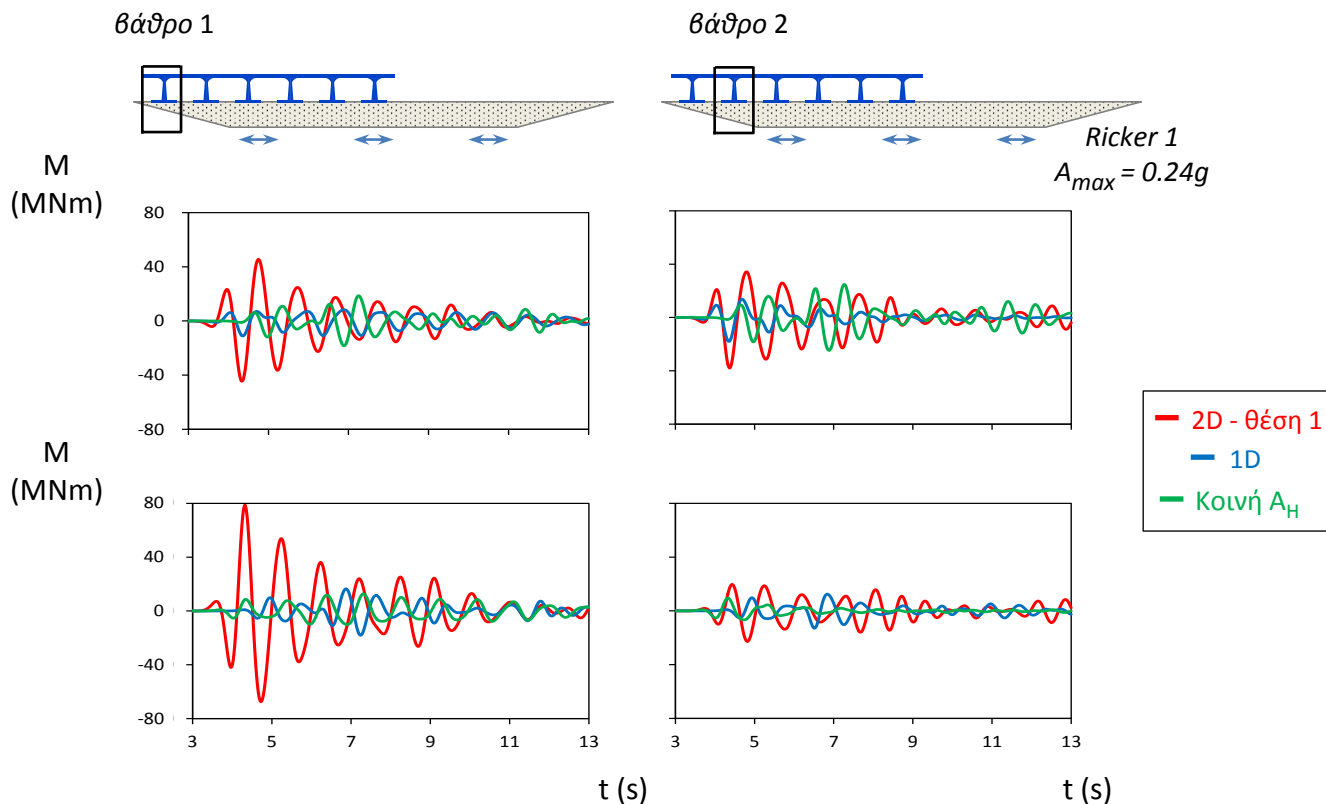
Σχήμα 6.18(β): Λεπτομέρεια παραμορφωμένου φορέα.



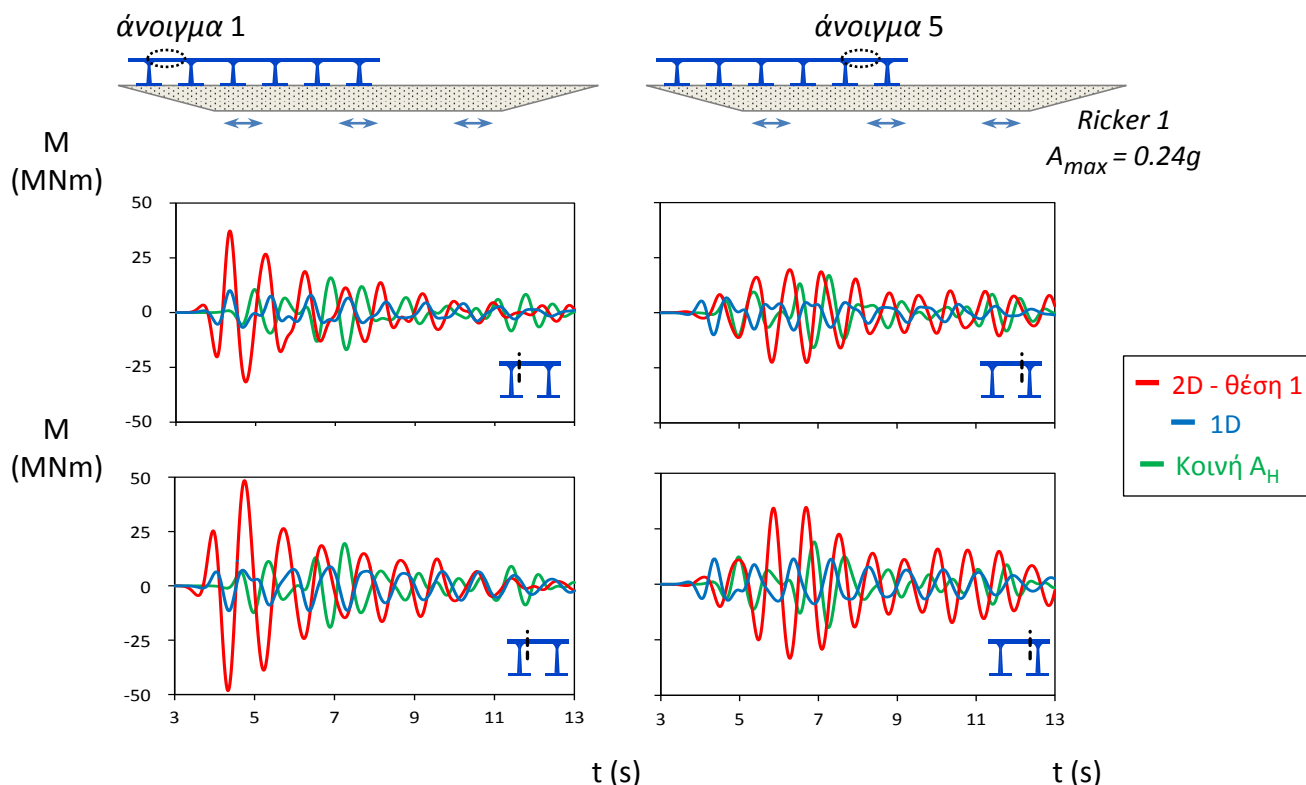
Σχήμα 6.19: Χρονοϊστορίες οριζοντίων επιταχύνσεων στις βάσεις των θεμελίων 1, 2, 3, 4. Σύγκριση με την απόκριση του φορέα διεγερόμενου υπό κοινή αυξημένη A_H . Μελέτη περίπτωσης: Διέγερση Ricker 1, θεώρηση συνεχούς καταστρώματος, γέφυρα στη θέση 1, θεώρηση ελαστικού εδάφους.



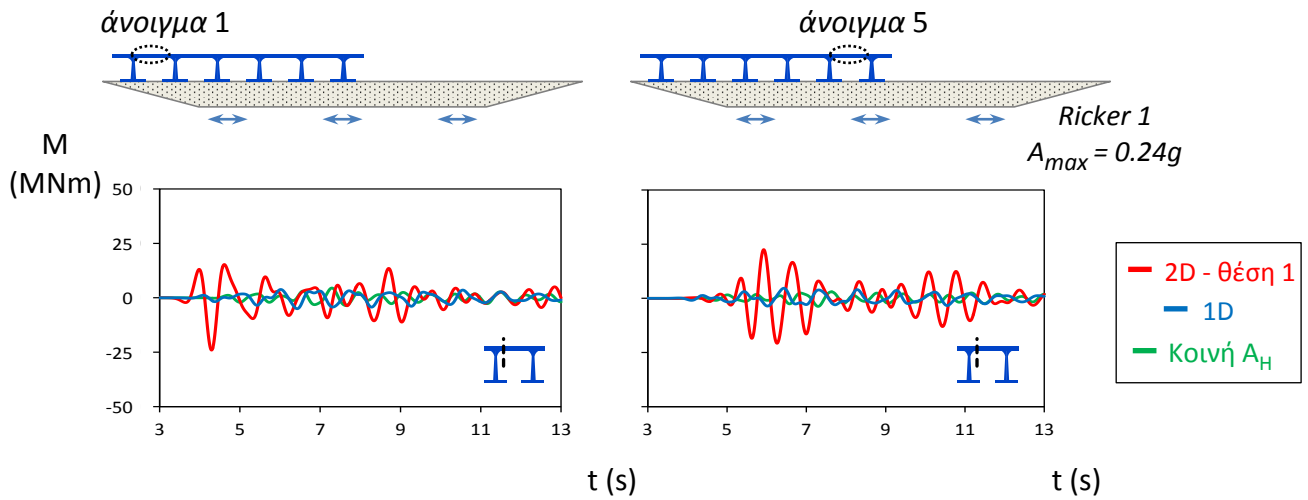
Σχήμα 6.20: Χρονοϊστορίες οριζοντίων επιταχύνσεων στις βάσεις των θεμελίων 5, 6. Σύγκριση με την απόκριση του φορέα διεγερόμενου υπό κοινή αυξημένη A_H . Μελέτη περίπτωσης: Διέγερση Ricker 1, θεώρηση συνεχούς καταστρώματος, γέφυρα στη θέση 1, θεώρηση ελαστικού εδάφους.



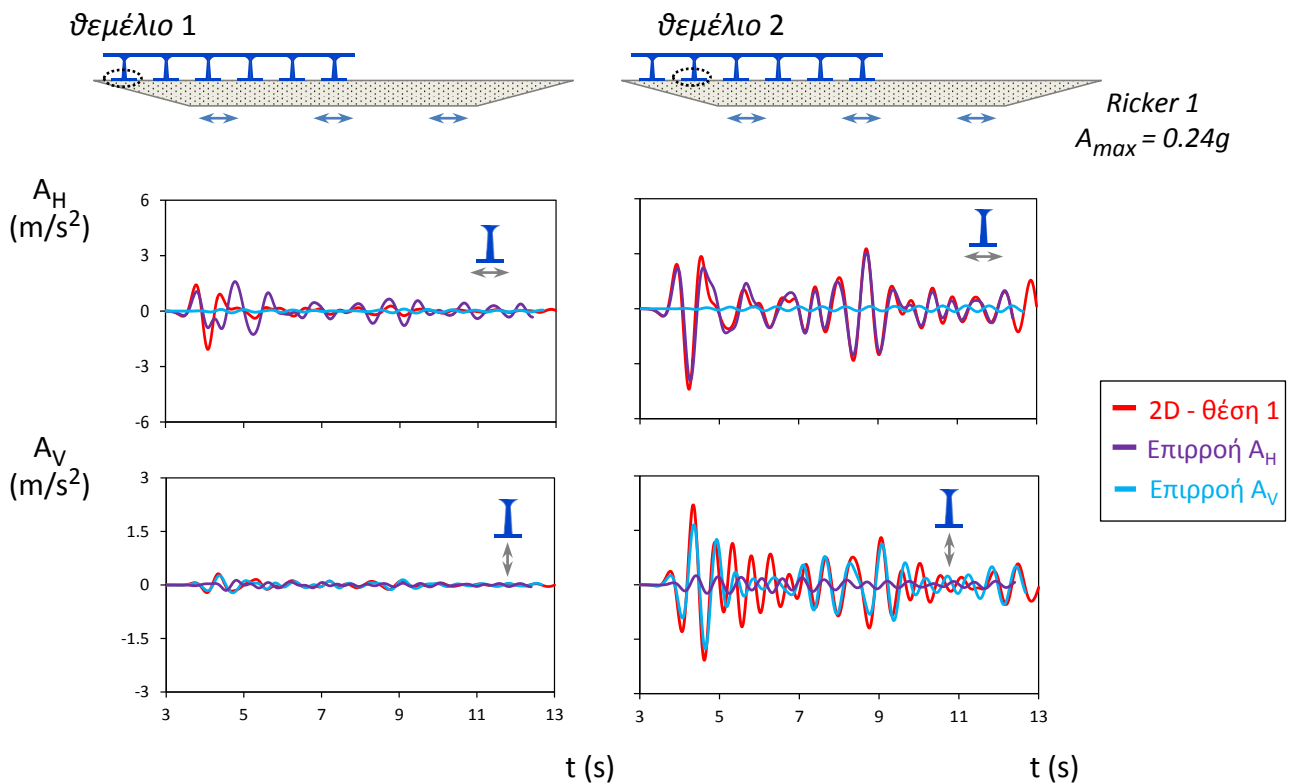
Σχήμα 6.21: Χρονοϊστορίες καμπτικών ροπών στα βάθρα 1 και 2 του φορέα. Σύγκριση με την απόκριση του φορέα διεγερόμενου υπό κοινή αυξημένη A_H . Μελέτη περίπτωσης: Διέγερση Ricker 1, θεώρηση συνεχούς καταστρώματος, γέφυρα στη θέση 1, θεώρηση ελαστικού εδάφους.



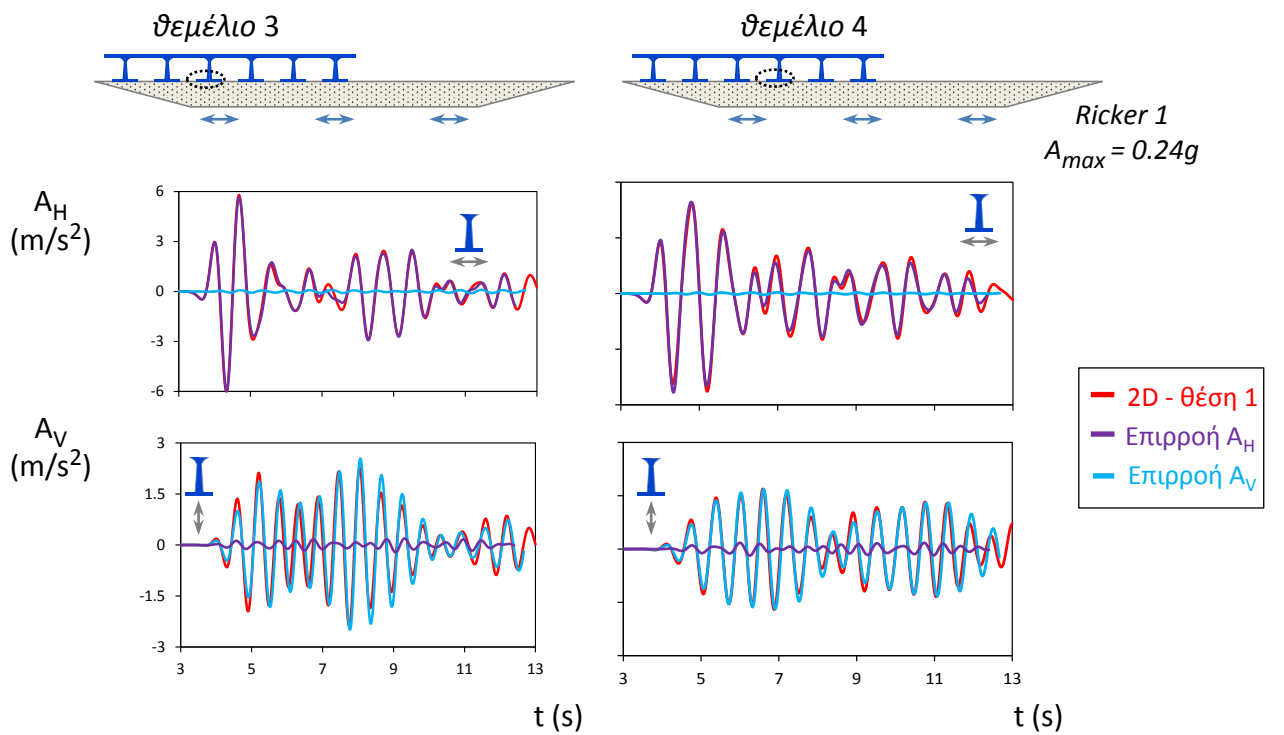
Σχήμα 6.22: Χρονοϊστορίες καμπτικών ροπών στήριξης στα ανοίγματα 1 και 5 του φορέα. Σύγκριση με την απόκριση του φορέα διεγερόμενου υπό κοινή αυξημένη A_H . Μελέτη περίπτωσης: Διέγερση Ricker 1, θεώρηση συνεχούς καταστρώματος, γέφυρα στη θέση 1, θεώρηση ελαστικού εδάφους.



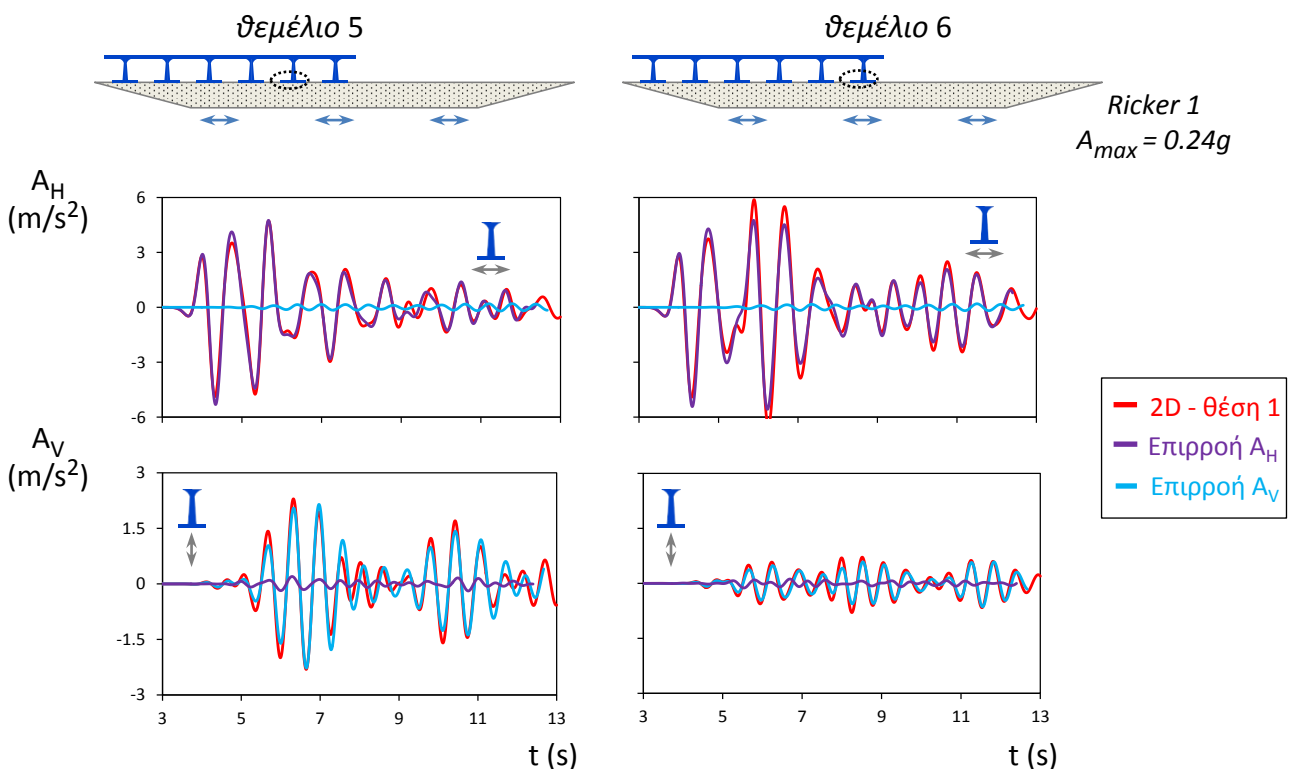
Σχήμα 6.23 : Χρονοϊστορίες καμπτικών ροπών στα μέσα των ανοιγμάτων 1 και 5 του φορέα. Σύγκριση με την απόκριση του φορέα διεγερόμενου υπό κοινή αυξημένη A_H . Μελέτη περίπτωσης: Διέγερση Ricker 1, θεωρήση συνεχούς καταστρώματος, γέφυρα στη θέση 1, θεωρήση ελαστικού εδάφους.



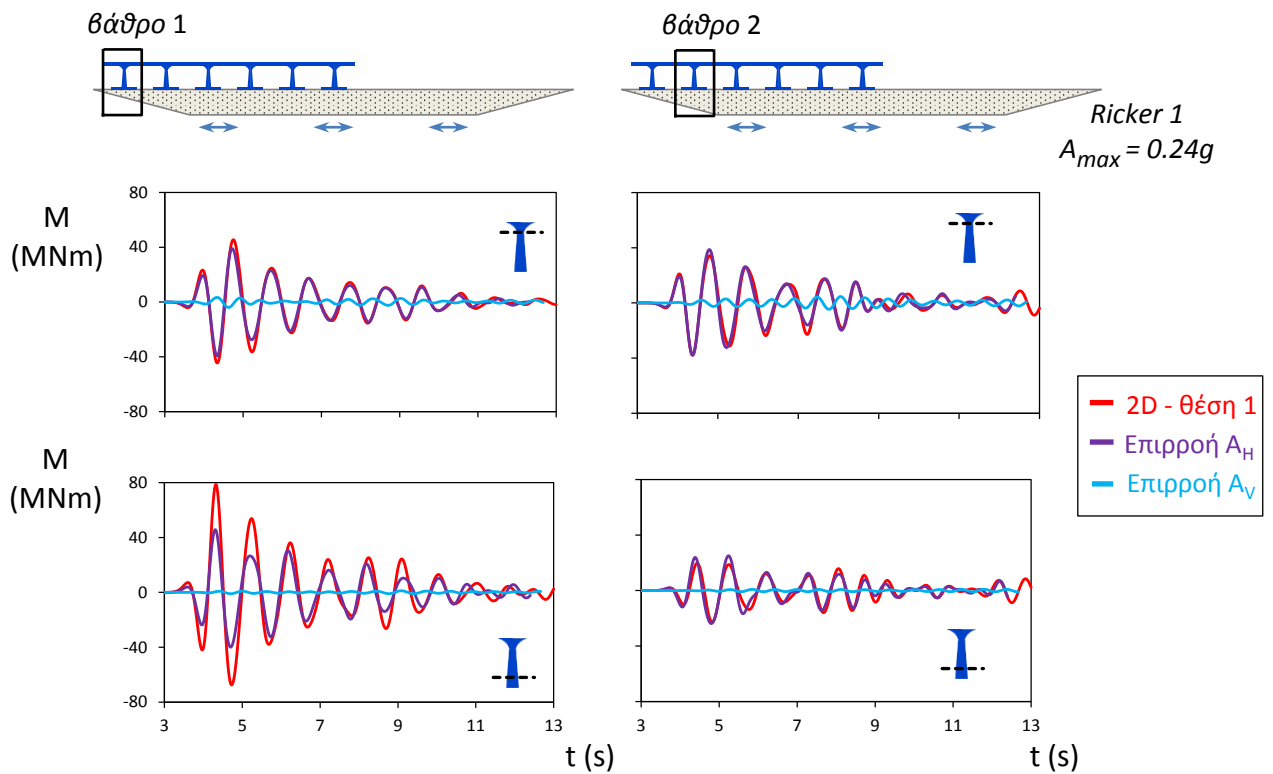
Σχήμα 6.24: Χρονοϊστορίες επιταχύνσεων στις βάσεις των θεμελίων 1 και 2. Σύγκριση με τις αποκρίσεις του φορέα υπό **διαφορετική οριζόντια** και υπό **διαφορετική κατακόρυφη** διέγερση. Μελέτη περίπτωσης: Διέγερση Ricker 1, θεωρήση συνεχούς καταστρώματος, γέφυρα στη θέση 1, θεωρήση ελαστικού εδάφους.



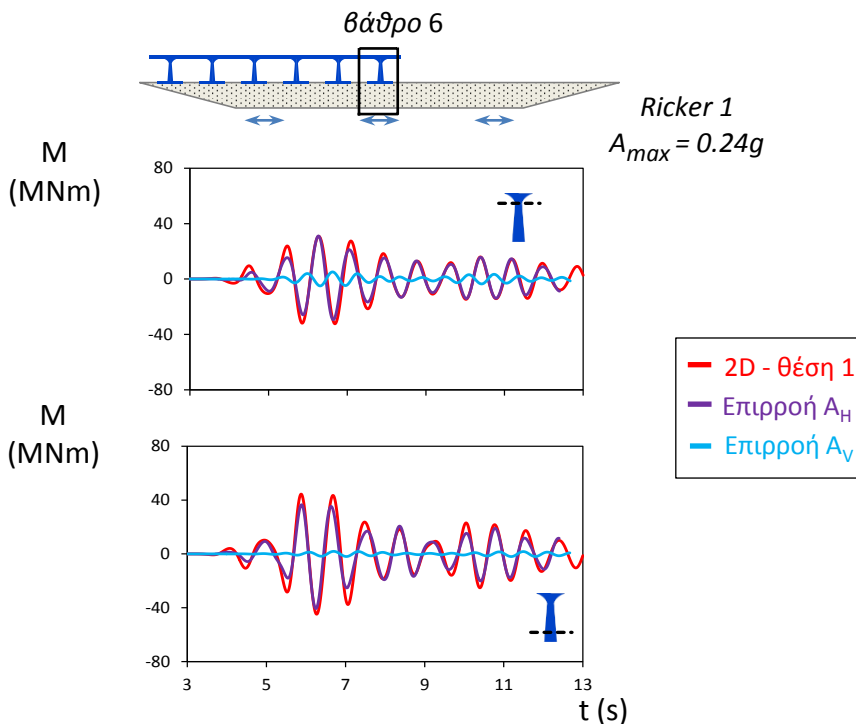
Σχήμα 6.25: Χρονοϊστορίες επιταχύνσεων στις βάσεις των θεμελίων 3 και 4. Σύγκριση με τις αποκρίσεις του φορέα υπό διαφορετική οριζόντια και υπό διαφορετική κατακόρυφη διέγερση. Μελέτη περίπτωσης: Διέγερση Ricker 1, θεωρήση συνεχούς καταστρώματος, γέφυρα στη θέση 1, θεωρήση ελαστικού εδάφους.



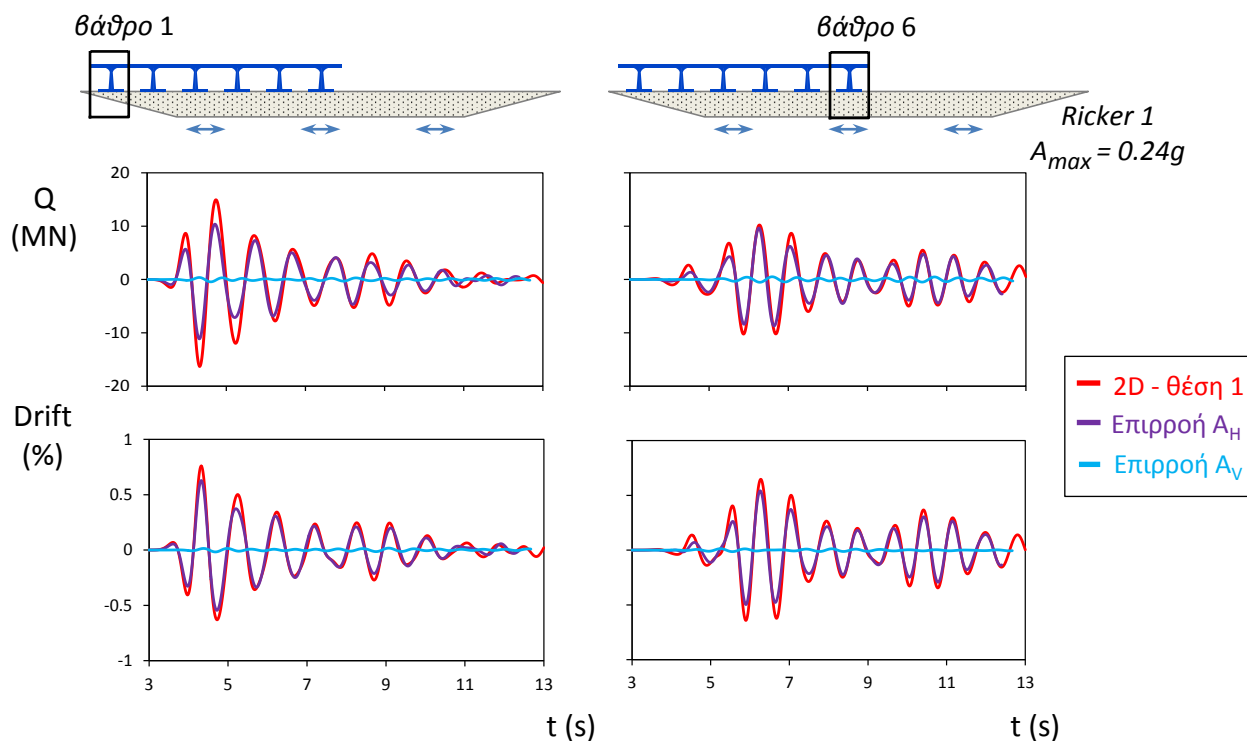
Σχήμα 6.26: Χρονοϊστορίες επιταχύνσεων στις βάσεις των θεμελίων 5 και 6. Σύγκριση με τις αποκρίσεις του φορέα υπό διαφορετική οριζόντια και υπό διαφορετική κατακόρυφη διέγερση. Μελέτη περίπτωσης: Διέγερση Ricker 1, θεωρήση συνεχούς καταστρώματος, γέφυρα στη θέση 1, θεωρήση ελαστικού εδάφους.



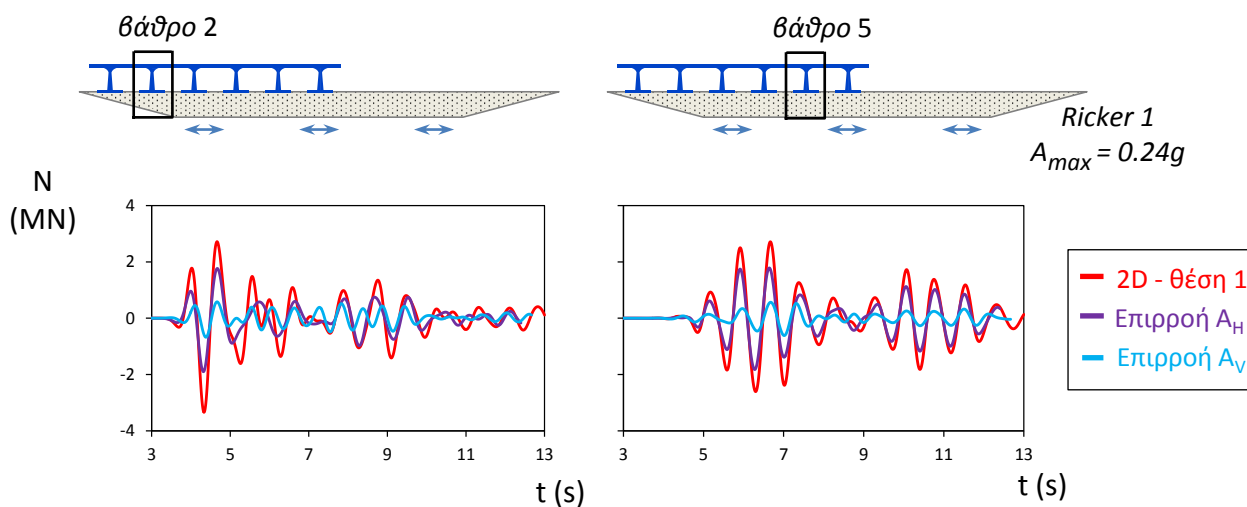
Σχήμα 6.27: Χρονοϊστορίες καμπτικών ροπών στα βάθρα 1 και 2 του φορέα . Σύγκριση με τις αποκρίσεις του φορέα υπό διαφορετική οριζόντια και υπό διαφορετική κατακόρυφη διέγερση. Μελέτη περίπτωσης: Διέγερση Ricker 1, θεώρηση συνεχούς καταστρώματος, γέφυρα στη θέση 1, θεώρηση ελαστικού εδάφους.



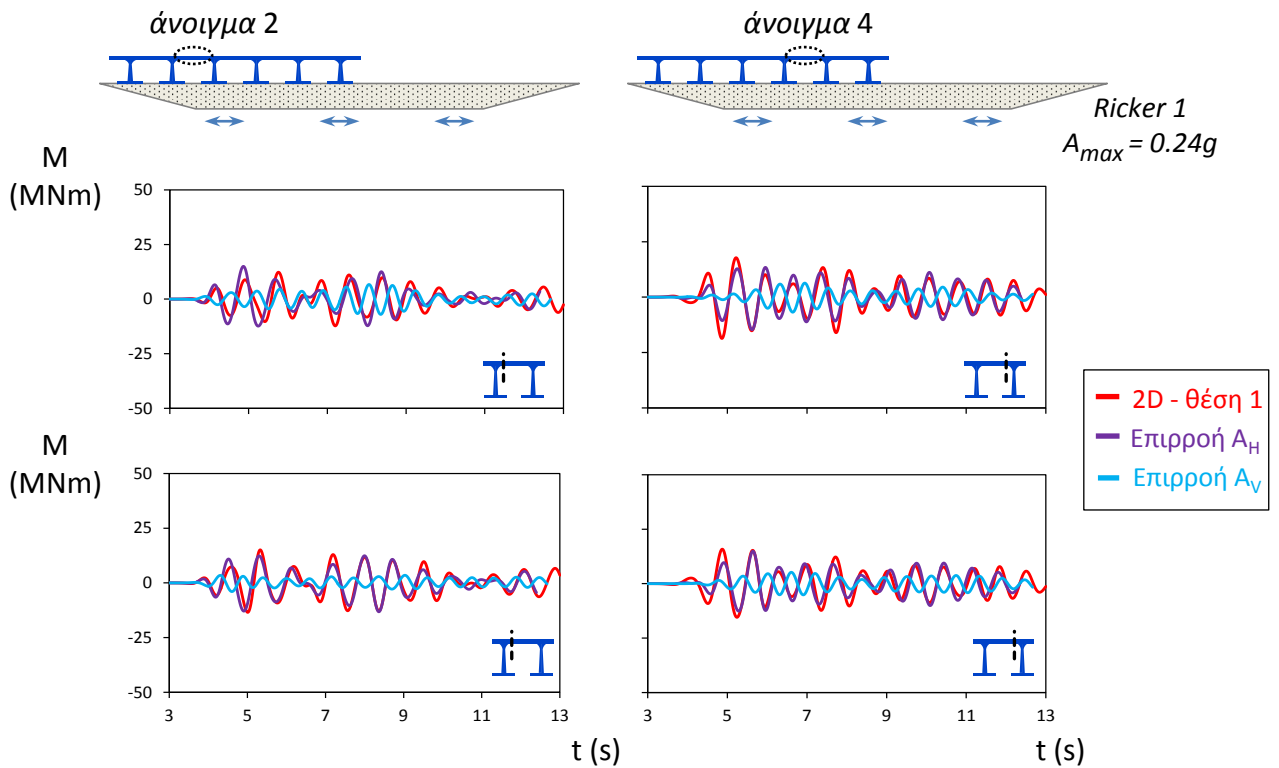
Σχήμα 6.28: Χρονοϊστορίες καμπτικών ροπών στα βάθρα του φορέα. Σύγκριση με τις αποκρίσεις του φορέα υπό διαφορετική οριζόντια και υπό διαφορετική κατακόρυφη διέγερση. Μελέτη περίπτωσης: Διέγερση Ricker 1, θεώρηση συνεχούς καταστρώματος, γέφυρα στη θέση 1, θεώρηση ελαστικού εδάφους.



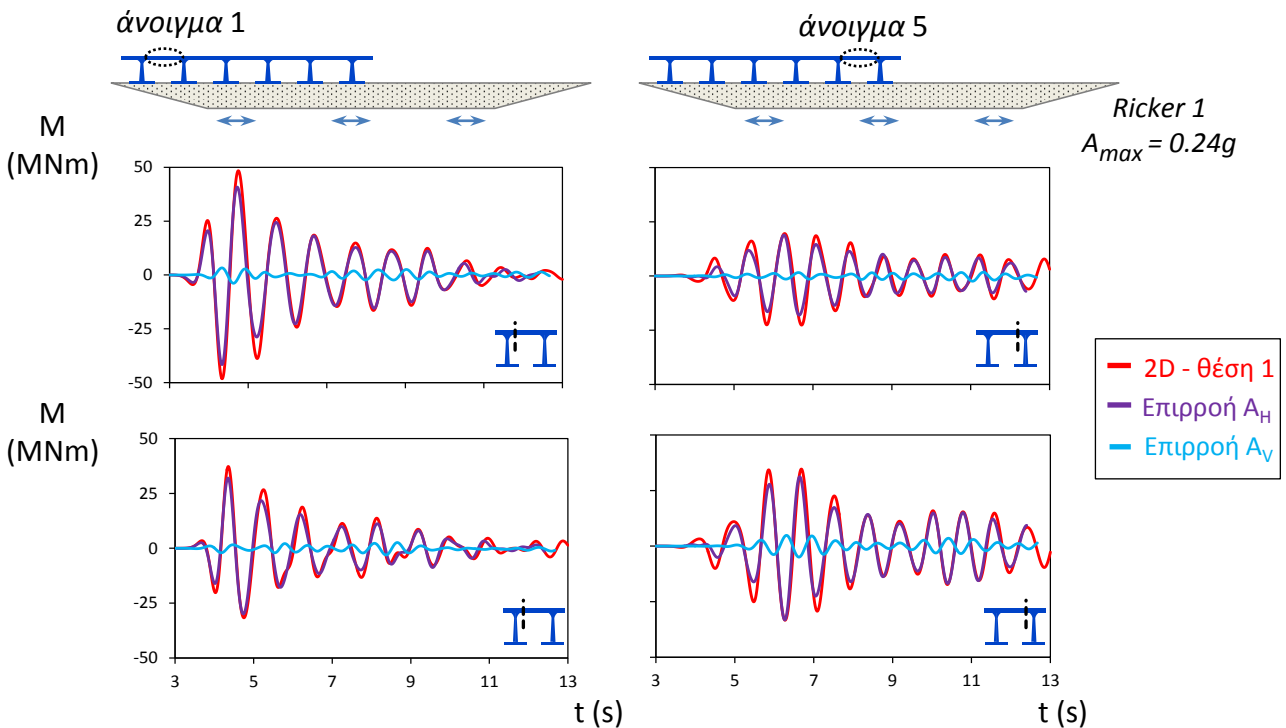
Σχήμα 6.29: Χρονοϊστορίες drift στα ακραία βάθρα του φορέα . Σύγκριση με τις αποκρίσεις του φορέα υπό διαφορετική οριζόντια και υπό διαφορετική κατακόρυφη διέγερση. Μελέτη περίπτωσης: Διέγερση Ricker 1, θεώρηση συνεχούς καταστρώματος, γέφυρα στη θέση 1, θεώρηση ελαστικού εδάφους.



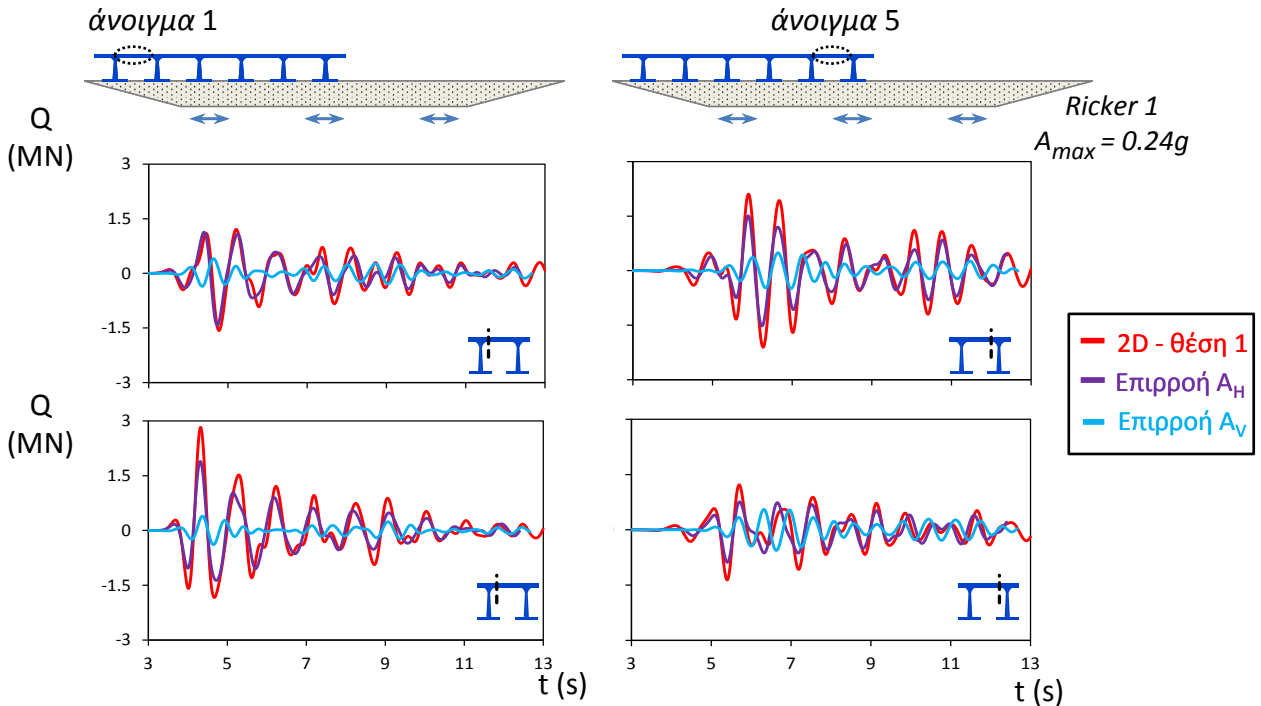
Σχήμα 6.30: Χρονοϊστορίες αξονικών δυνάμεων στα βάθρα 2 και 5 του φορέα. Σύγκριση με τις αποκρίσεις του φορέα υπό διαφορετική οριζόντια και υπό διαφορετική κατακόρυφη διέγερση. Μελέτη περίπτωσης: Διέγερση Ricker 1, θεώρηση συνεχούς καταστρώματος, γέφυρα στη θέση 1, θεώρηση ελαστικού εδάφους.



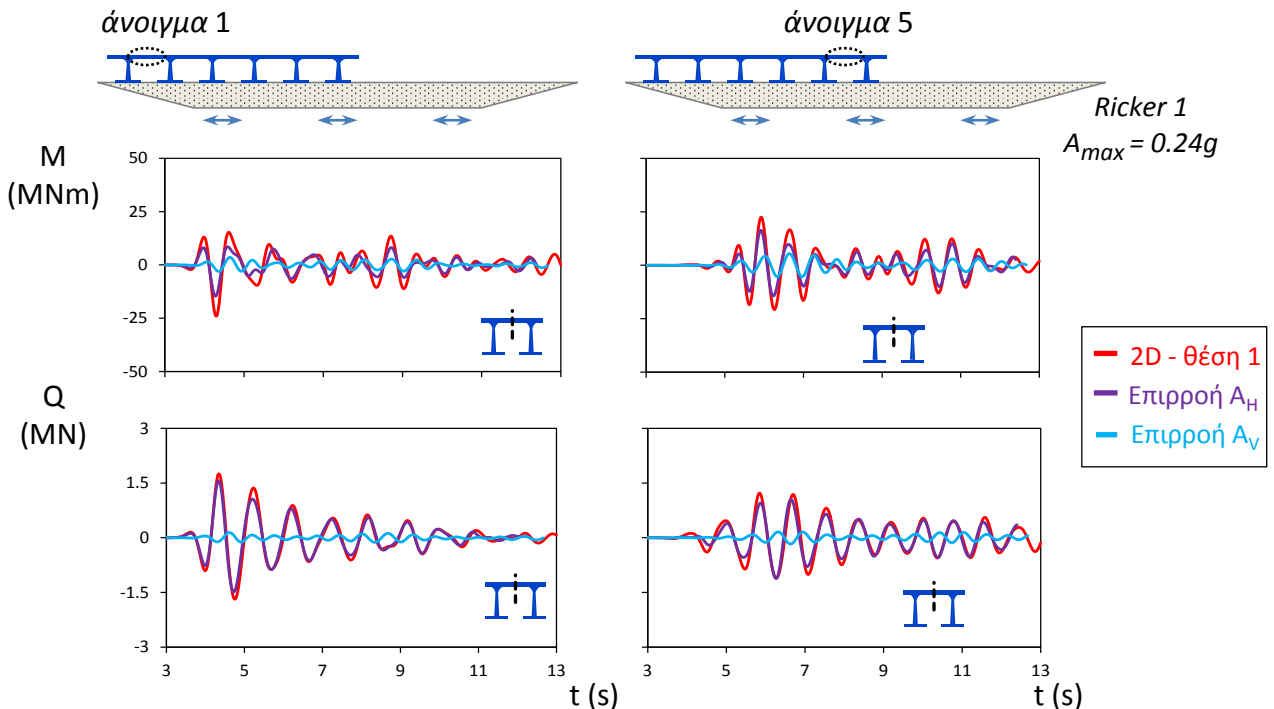
Σχήμα 6.31: Χρονοϊστορίες καμπτικών ροπών στήριξης στα ανοίγματα 2 και 4 του φορέα . Σύγκριση με τις αποκρίσεις του φορέα υπό διαφορετική οριζόντια και υπό διαφορετική κατακόρυφη διέγερση. Μελέτη περίπτωσης: Διέγερση Ricker 1, θεώρηση συνεχούς καταστρώματος, γέφυρα στη θέση 1, θεώρηση ελαστικού εδάφους.



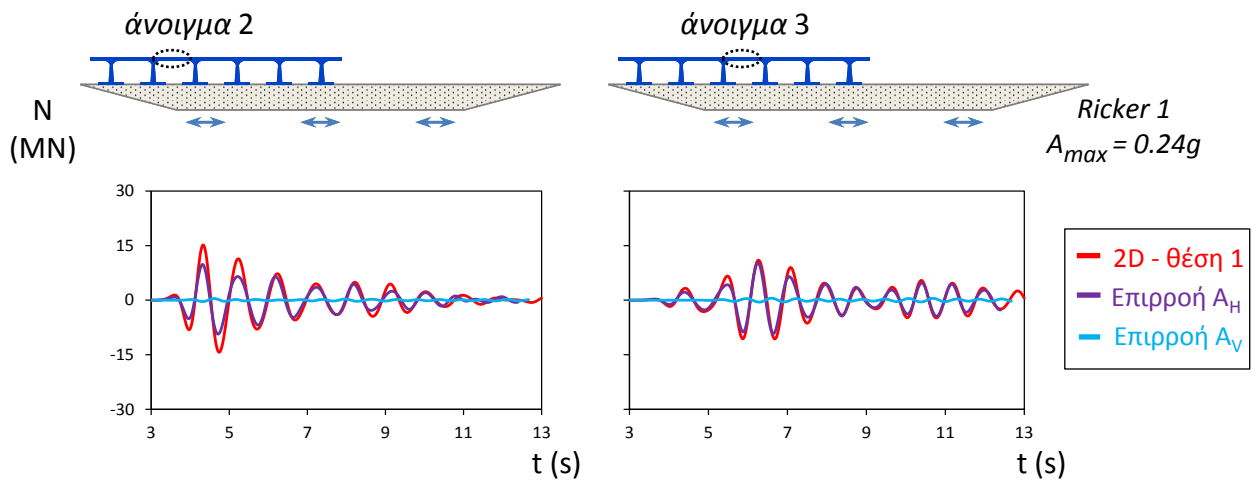
Σχήμα 6.32: Χρονοϊστορίες καμπτικών ροπών στήριξης στα ανοίγματα 1 και 5 του φορέα. Σύγκριση με τις αποκρίσεις του φορέα υπό διαφορετική οριζόντια και υπό διαφορετική κατακόρυφη διέγερση. Μελέτη περίπτωσης: Διέγερση Ricker 1, θεώρηση συνεχούς καταστρώματος, γέφυρα στη θέση 1, θεώρηση ελαστικού εδάφους.



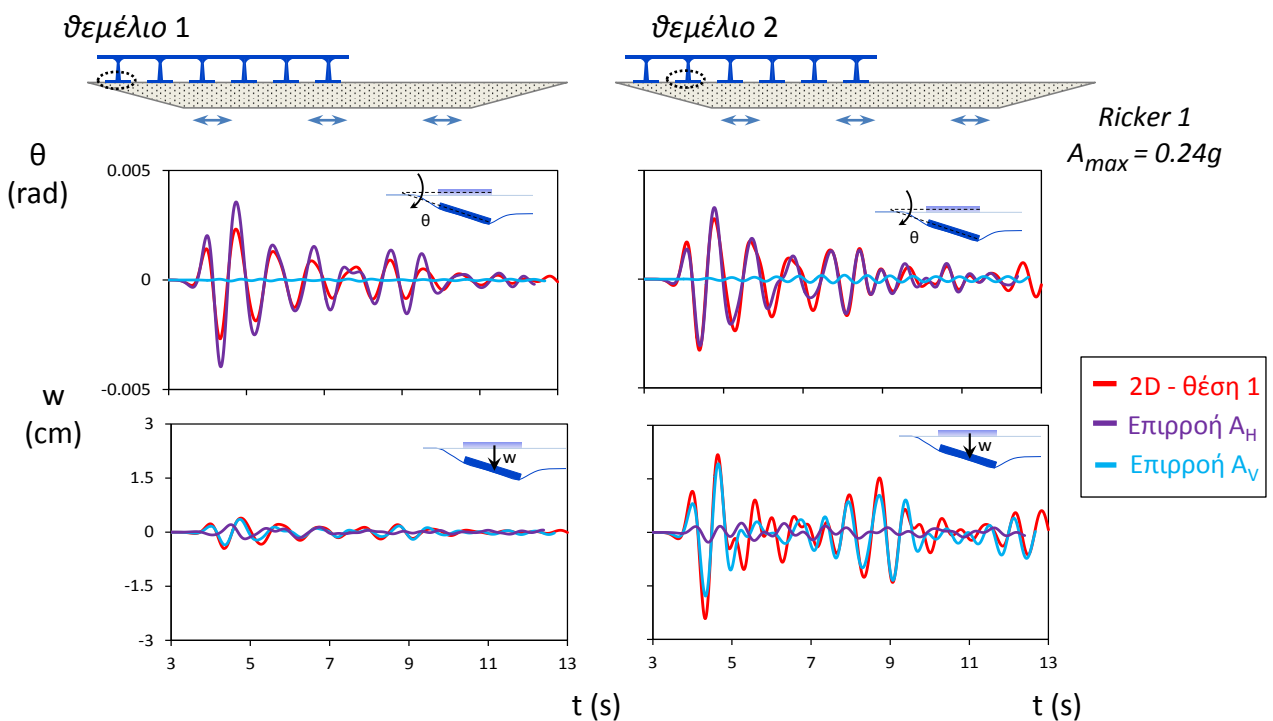
Σχήμα 6.33: Χρονοϊστορίες τεμνουσών δυνάμεων στήριξης στα ανοίγματα 1 και 5 του φορέα. Σύγκριση με τις αποκρίσεις του φορέα υπό διαφορετική οριζόντια και υπό διαφορετική κατακόρυφη διέγερση. Μελέτη περίπτωσης: Διέγερση Ricker 1, θεώρηση συνεχούς καταστρώματος, γέφυρα στη θέση 1, θεώρηση ελαστικού εδάφους.



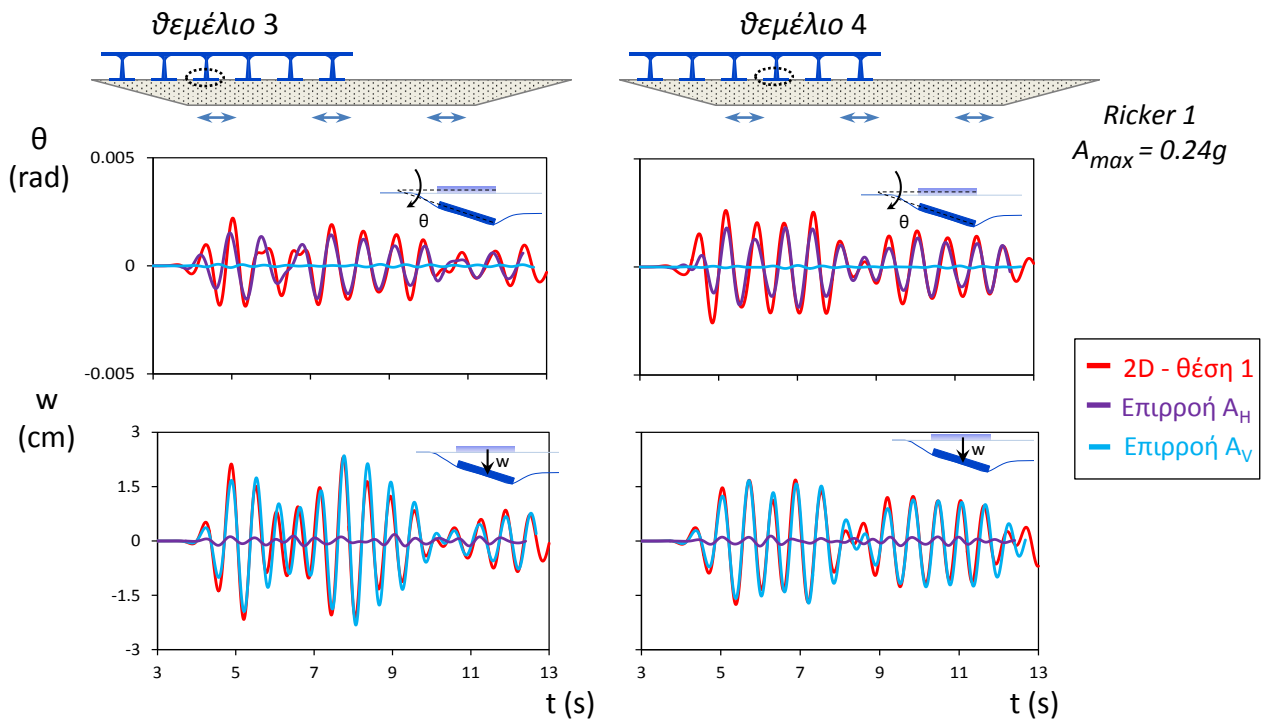
Σχήμα 6.34: Χρονοϊστορίες καμπτικών ροπών και τεμνουσών δυνάμεων στα μέσα των ανοιγμάτων 1 και 5 του φορέα. Σύγκριση με τις αποκρίσεις του φορέα υπό διαφορετική οριζόντια και υπό διαφορετική κατακόρυφη διέγερση. Μελέτη περίπτωσης: Διέγερση Ricker 1, θεώρηση συνεχούς καταστρώματος, γέφυρα στη θέση 1, θεώρηση ελαστικού εδάφους.



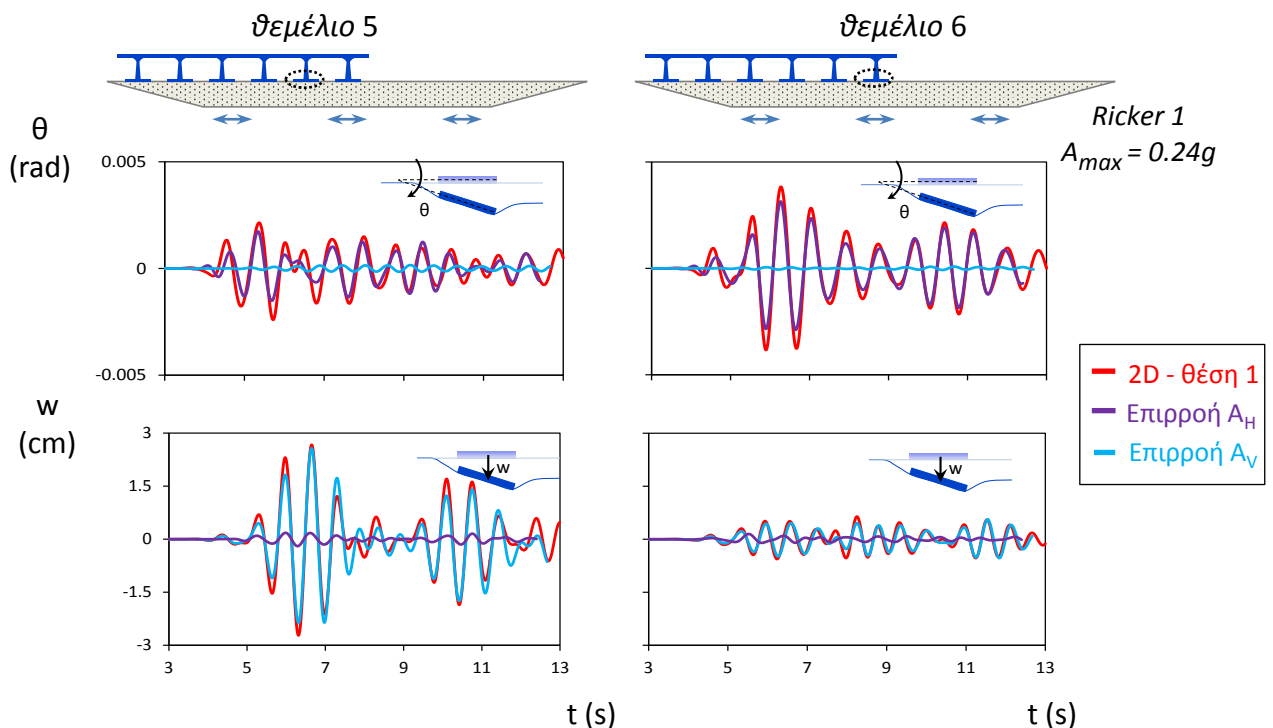
Σχήμα 6.35: Χρονοϊστορίες αξονικών δυνάμεων στα ανοίγματα 2 και 3 του φορέα. Σύγκριση με τις αποκρίσεις του φορέα υπό διαφορετική οριζόντια και υπό διαφορετική κατακόρυφη διέγερση. Μελέτη περίπτωσης: Διέγερση Ricker 1, θεώρηση συνεχούς καταστρώματος, γέφυρα στη θέση 1, θεώρηση ελαστικού εδάφους.



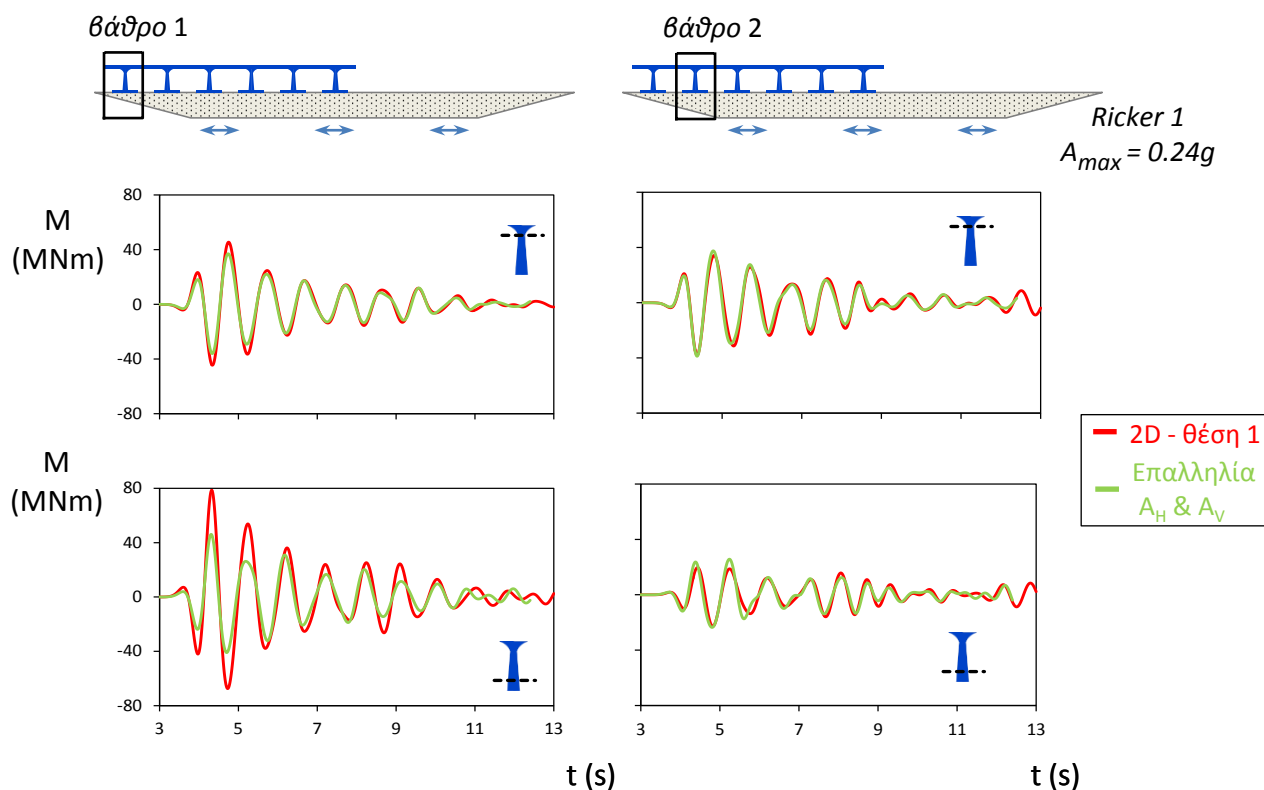
Σχήμα 6.36: Χρονοϊστορίες στροφών και καθιζήσεων στις βάσεις των θεμελίων. Σύγκριση με τις αποκρίσεις του φορέα υπό διαφορετική οριζόντια και υπό διαφορετική κατακόρυφη διέγερση. Μελέτη περίπτωσης: Διέγερση Ricker 1, θεώρηση συνεχούς καταστρώματος, γέφυρα στη θέση 1, θεώρηση ελαστικού εδάφους.



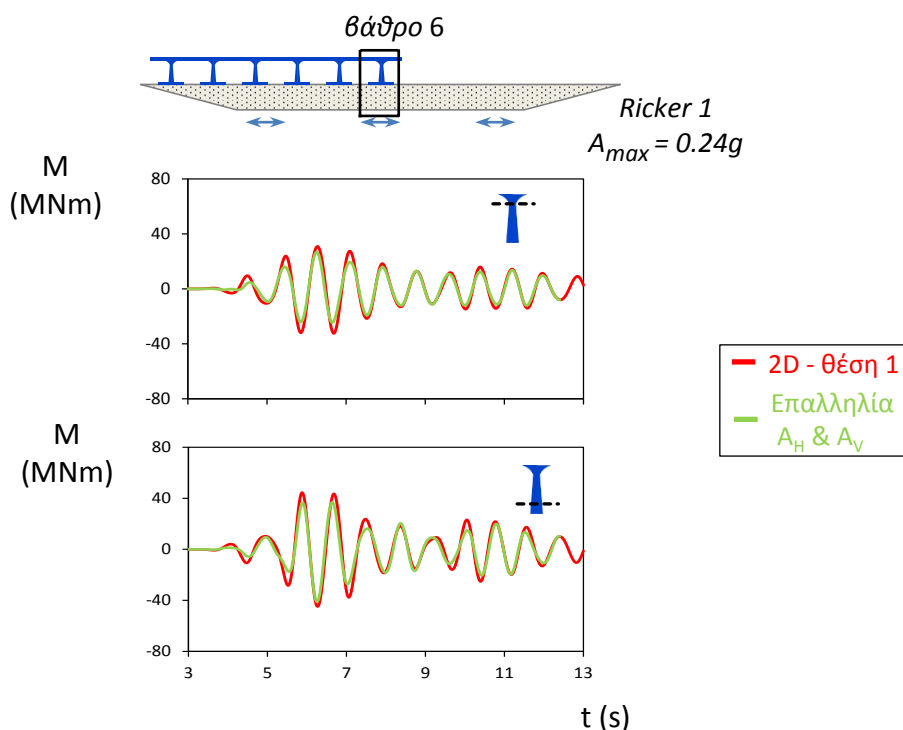
Σχήμα 6.37: Χρονοϊστορίες στροφών και καθιζήσεων στις βάσεις των θεμελίων 3 και 4. Σύγκριση με τις αποκρίσεις του φορέα υπό διαφορετική οριζόντια και υπό διαφορετική κατακόρυφη διέγερση. Μελέτη περίπτωσης: Διέγερση Ricker 1, θεώρηση συνεχούς καταστρώματος, γέφυρα στη θέση 1, θεώρηση ελαστικού εδάφους.



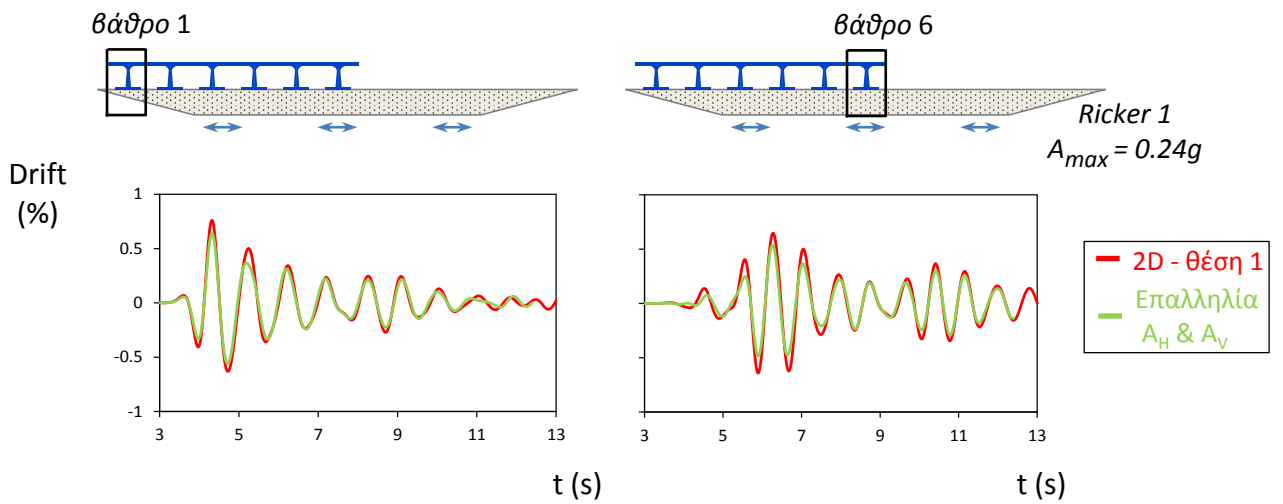
Σχήμα 6.38: Χρονοϊστορίες στροφών και καθιζήσεων στις βάσεις των θεμελίων 5 και 6. Σύγκριση με τις αποκρίσεις του φορέα υπό διαφορετική οριζόντια και υπό διαφορετική κατακόρυφη διέγερση. Μελέτη περίπτωσης: Διέγερση Ricker 1, θεώρηση συνεχούς καταστρώματος, γέφυρα στη θέση 1, θεώρηση ελαστικού εδάφους.



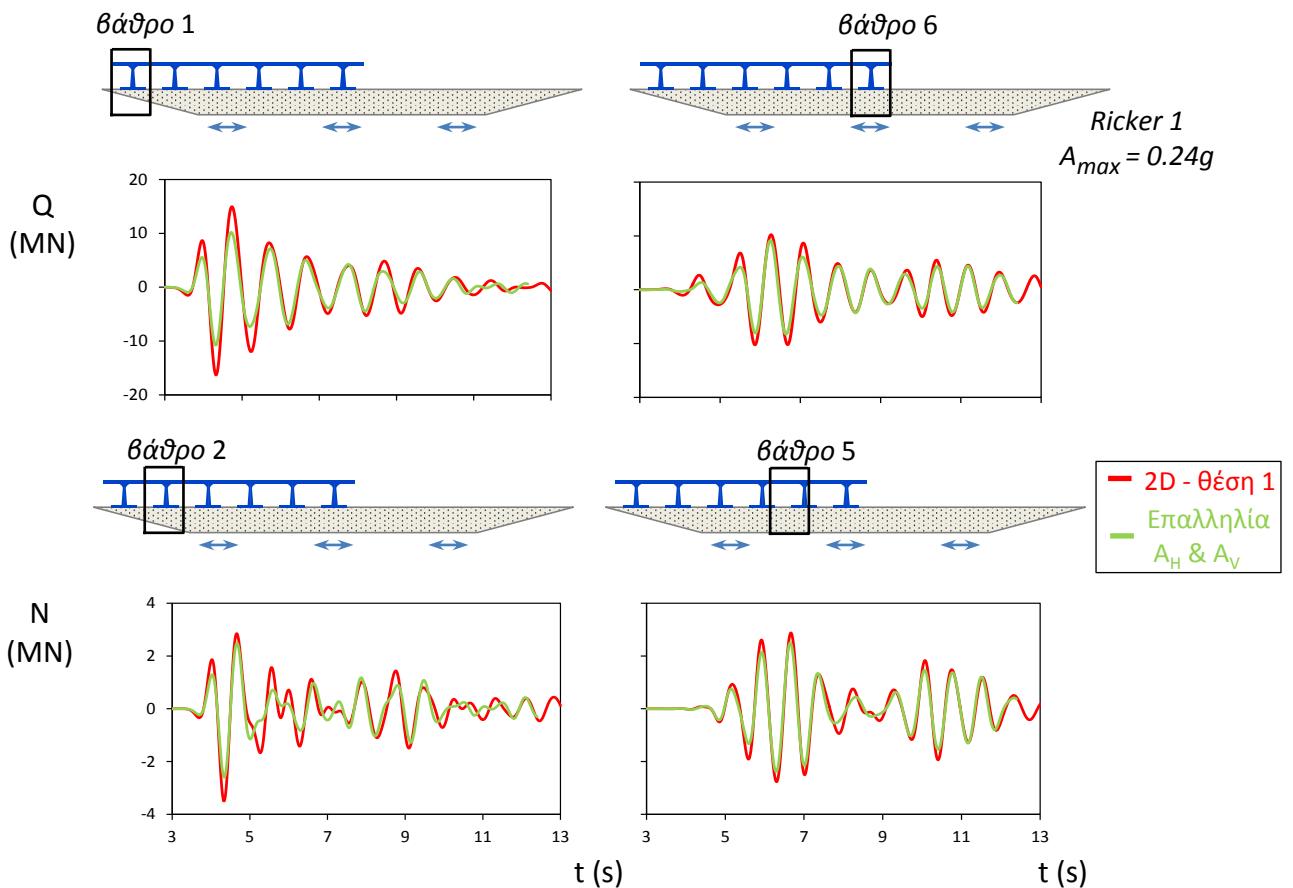
Σχήμα 6.39: Χρονοϊστορίες καμπτικών ροπών στα βάρθρα 1 και 2 του φορέα. Σύγκριση με την επαλληλία των αποκρίσεων για διαφορετική οριζόντια και διαφορετική κατακόρυφη διέγερση. Μελέτη περίπτωσης: Διέγερση Ricker 1, θεωρήση συνεχούς καταστρώματος, γέφυρα στη θέση 1, θεωρήση ελαστικού εδάφους.



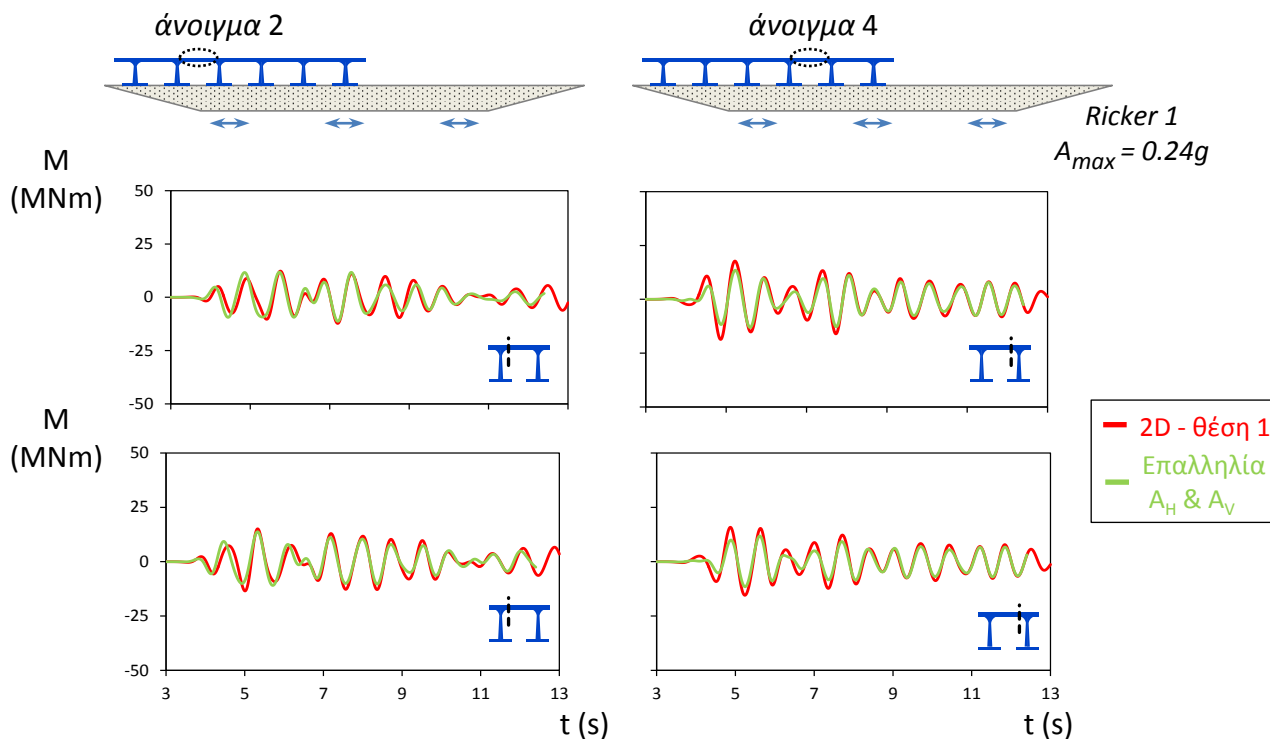
Σχήμα 6.40: Χρονοϊστορίες καμπτικών ροπών στο βάρθρο 6 του φορέα. Σύγκριση με την επαλληλία των αποκρίσεων για διαφορετική οριζόντια και διαφορετική κατακόρυφη διέγερση. Μελέτη περίπτωσης: Διέγερση Ricker 1, θεωρήση συνεχούς καταστρώματος, γέφυρα στη θέση 1, θεωρήση ελαστικού εδάφους.



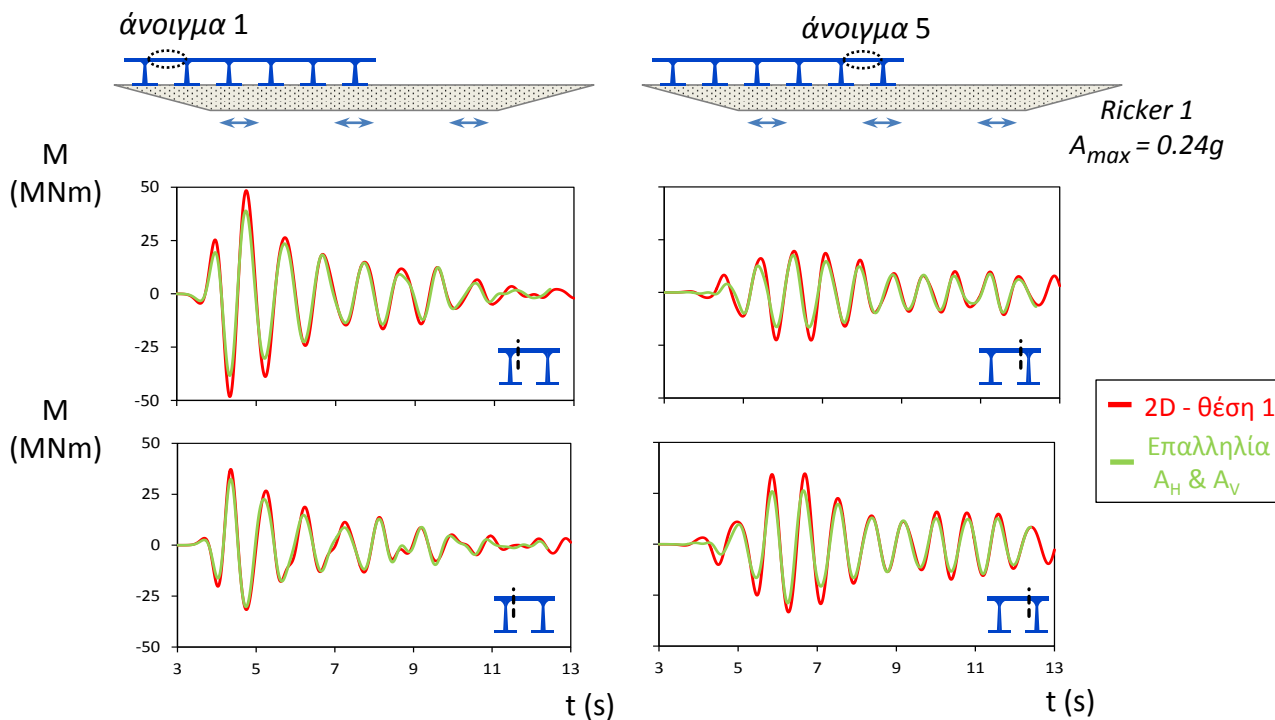
Σχήμα 6.41: Χρονοϊστορίες drift στα βάθρα 1 και 6 του φορέα. Σύγκριση με την επαλληλία των αποκρίσεων για διαφορετική οριζόντια και διαφορετική κατακόρυφη διέγερση. Μελέτη περίπτωσης: Διέγερση Ricker 1, θεώρηση συνεχούς καταστρώματος, γέφυρα στη θέση 1, θεώρηση ελαστικού εδάφους.



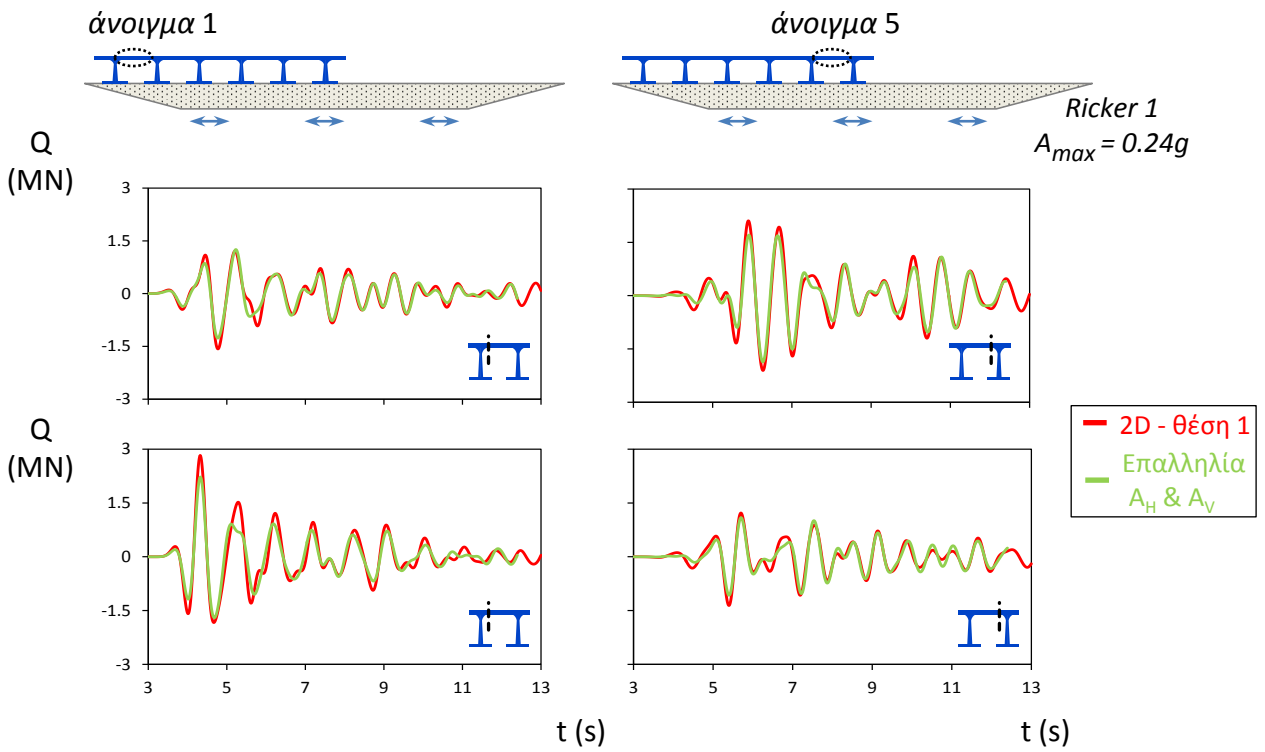
Σχήμα 6.42: Χρονοϊστορίες τεμνουσών δυνάμεων στα βάθρα 1 και 6 του φορέα και αξονικών δυνάμεων στα βάθρα 2 και 5 του φορέα. Σύγκριση με την επαλληλία των αποκρίσεων για διαφορετική οριζόντια και διαφορετική κατακόρυφη διέγερση. Μελέτη περίπτωσης: Διέγερση Ricker 1, θεώρηση συνεχούς καταστρώματος, γέφυρα στη θέση 1, θεώρηση ελαστικού εδάφους.



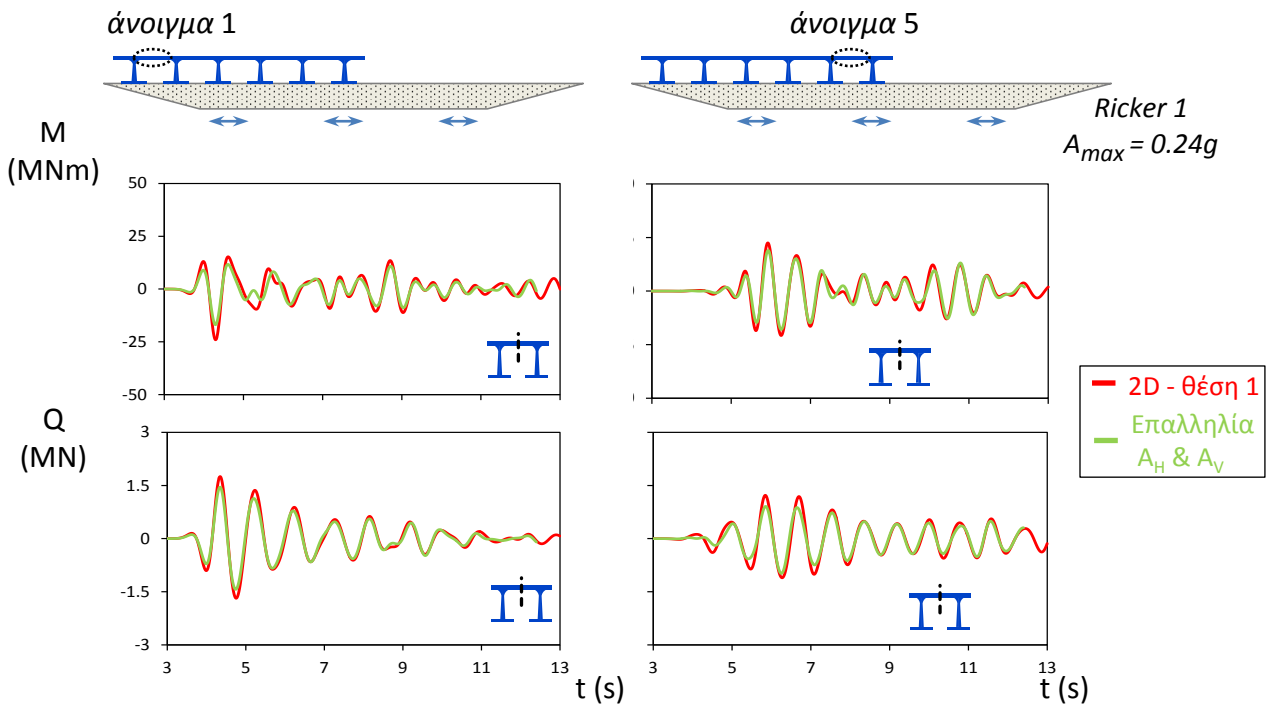
Σχήμα 6.43: Χρονοϊστορίες καμπτικών ροπών στήριξης στα ανοίγματα 2 και 4 του φορέα. Σύγκριση με την επαλληλία των αποκρίσεων για διαφορετική οριζόντια και διαφορετική κατακόρυφη διέγερση. Μελέτη περίπτωσης: Διέγερση Ricker 1, θεώρηση συνεχούς καταστρώματος, γέφυρα στη θέση 1, θεώρηση ελαστικού εδάφους.



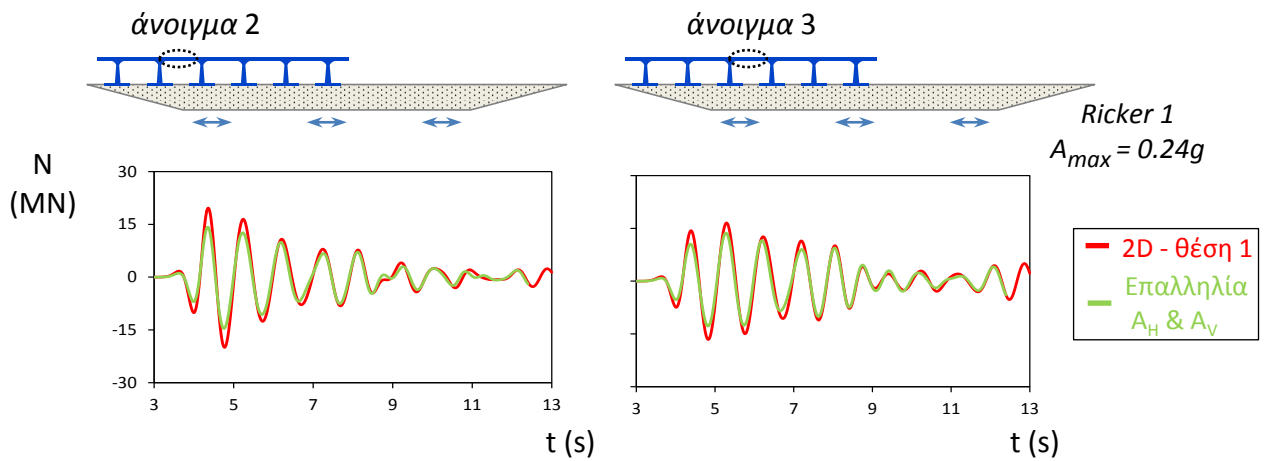
Σχήμα 6.44: Χρονοϊστορίες καμπτικών ροπών στήριξης στα ανοίγματα 1 και 5 του φορέα. Σύγκριση με την επαλληλία των αποκρίσεων για διαφορετική οριζόντια και διαφορετική κατακόρυφη διέγερση. Μελέτη περίπτωσης: Διέγερση Ricker 1, θεώρηση συνεχούς καταστρώματος, γέφυρα στη θέση 1, θεώρηση ελαστικού εδάφους.



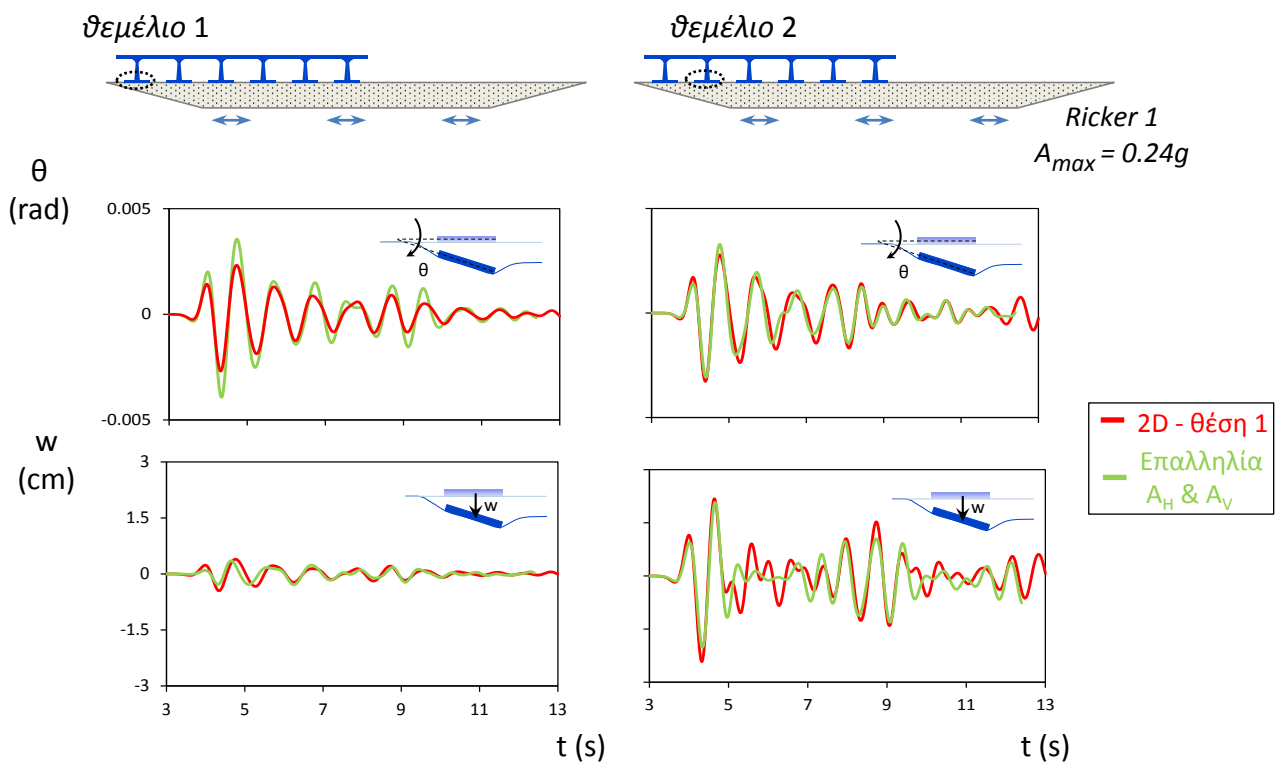
Σχήμα 6.45: Χρονοϊστορίες τεμνουσών δυνάμεων στήριξης στα ανοίγματα 1 και 5 του φορέα. Σύγκριση με την επαλληλία των αποκρίσεων για διαφορετική οριζόντια και διαφορετική κατακόρυφη διέγερση. Μελέτη περίπτωσης: Διέγερση Ricker 1, θέωρηση συνεχούς καταστρώματος, γέφυρα στη θέση 1, θεώρηση ελαστικού εδάφους.



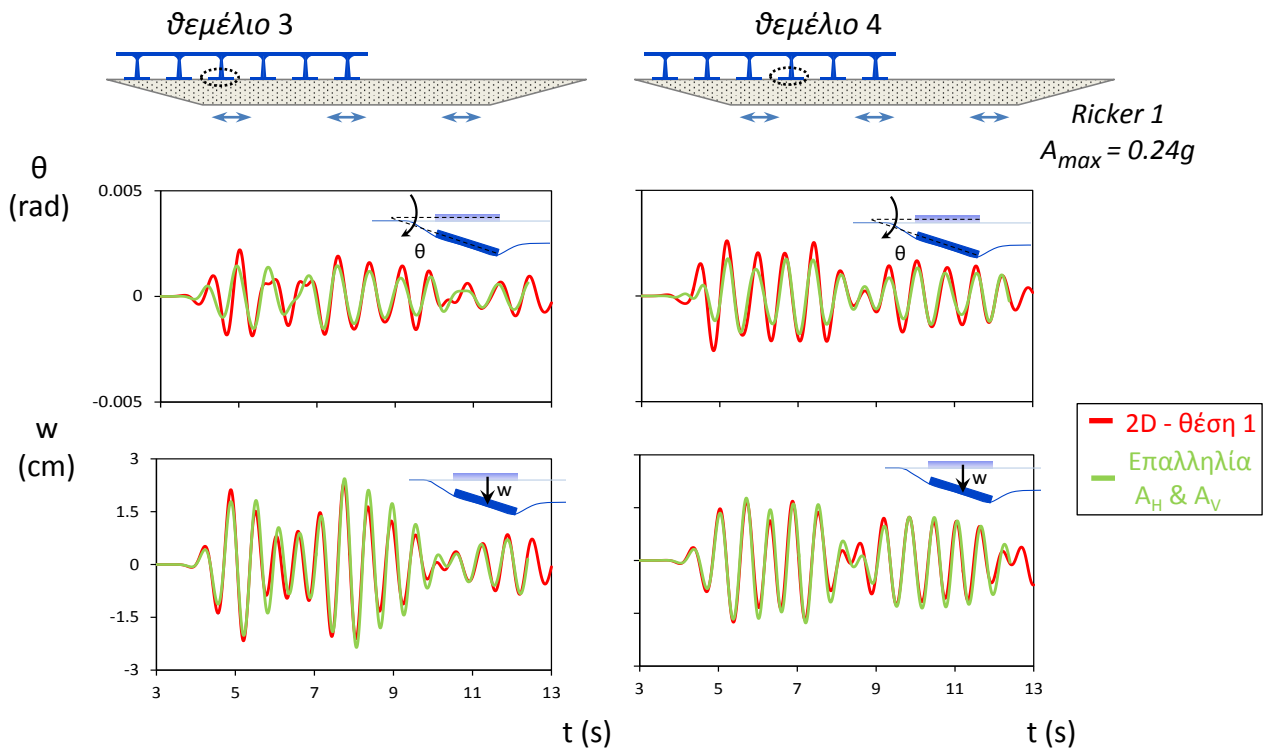
Σχήμα 6.46: Χρονοϊστορίες καμπτικών ροπών και τεμνουσών δυνάμεων στα μέσα των ανοιγμάτων 1 και 5 του φορέα. Σύγκριση με την επαλληλία των αποκρίσεων για διαφορετική οριζόντια και διαφορετική κατακόρυφη διέγερση. Μελέτη περίπτωσης: Διέγερση Ricker 1, θέωρηση συνεχούς καταστρώματος, γέφυρα στη θέση 1, θεώρηση ελαστικού εδάφους.



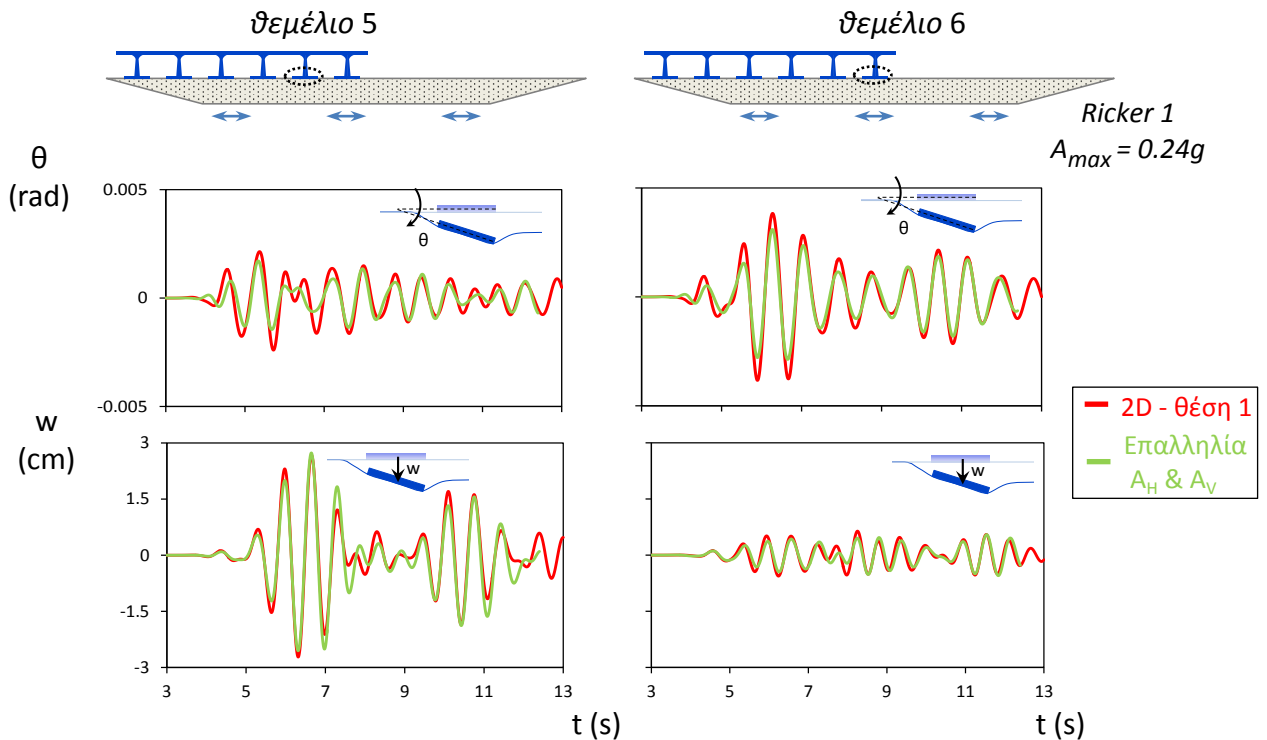
Σχήμα 6.47: Χρονοϊστορίες αξονικών δυνάμεων στα ανοίγματα 2 και 3 του φορέα. Σύγκριση με την επαλληλία των αποκρίσεων για διαφορετική οριζόντια και διαφορετική κατακόρυφη διέγερση. Μελέτη περίπτωσης: Διέγερση Ricker 1, θεώρηση συνεχούς καταστρώματος, γέφυρα στη θέση 1, θεώρηση ελαστικού εδάφους.



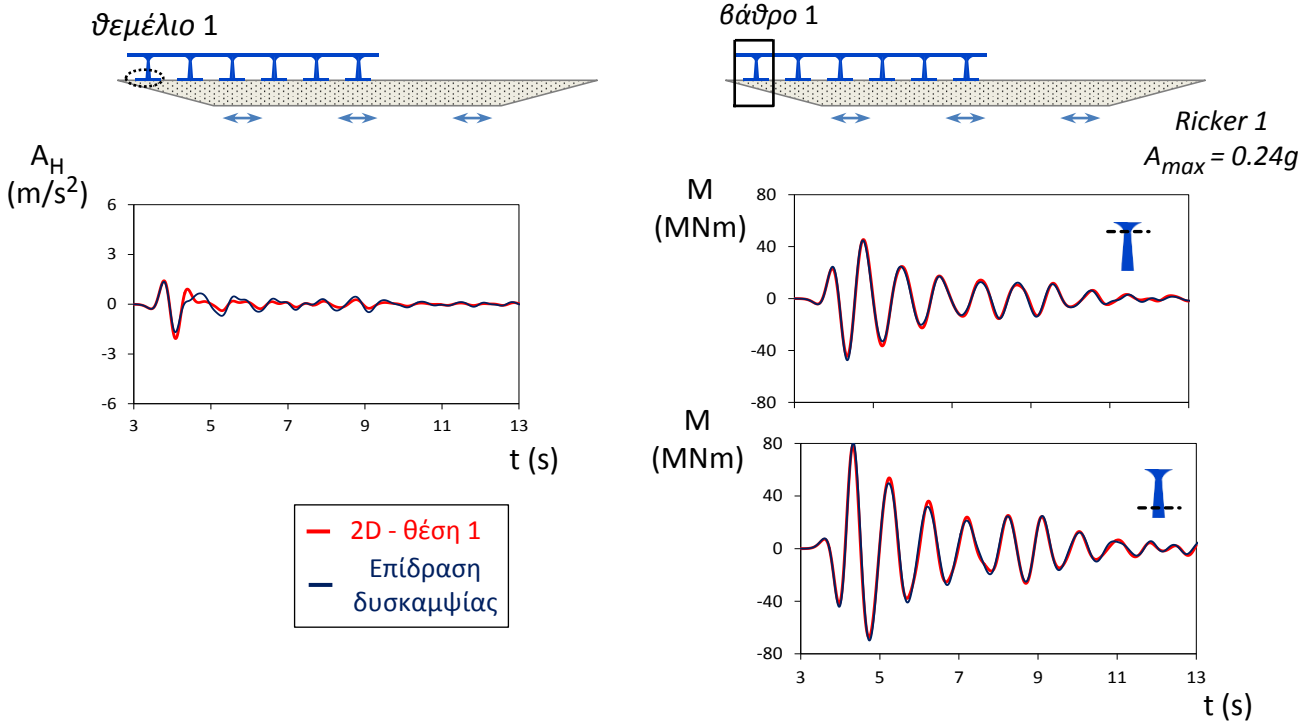
Σχήμα 6.48: Χρονοϊστορίες στροφών και καθιζήσεων στις βάσεις των θεμελίων 1 και 2 του φορέα. Σύγκριση με την επαλληλία των αποκρίσεων για διαφορετική οριζόντια και διαφορετική κατακόρυφη διέγερση. Μελέτη περίπτωσης: Διέγερση Ricker 1, θεώρηση συνεχούς καταστρώματος, γέφυρα στη θέση 1, θεώρηση ελαστικού εδάφους.



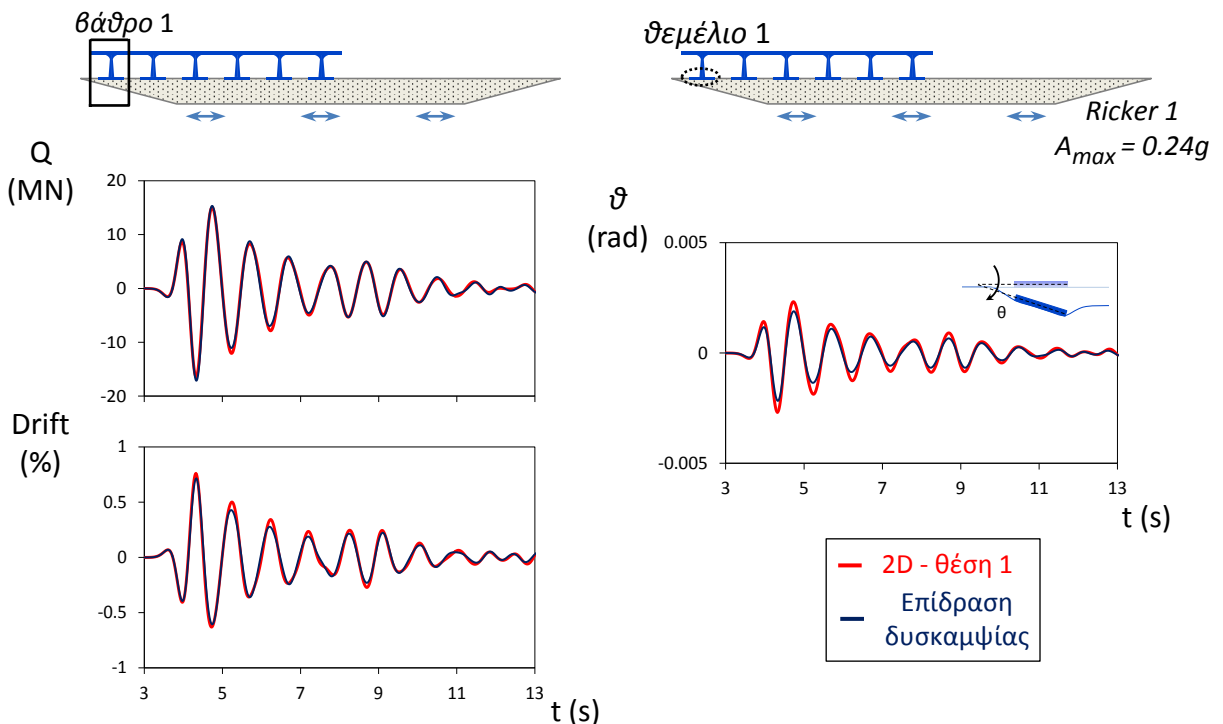
Σχήμα 6.49: Χρονοϊστορίες στροφών και καθιζήσεων στις βάσεις των θεμελίων 3 και 4 του φορέα. Σύγκριση με την επαλληλία των αποκρίσεων για διαφορετική οριζόντια και διαφορετική κατακόρυφη διέγερση. Μελέτη περίπτωσης: Διέγερση Ricker 1, θεώρηση συνεχούς καταστρώματος, γέφυρα στη θέση 1, θεώρηση ελαστικού εδάφους.



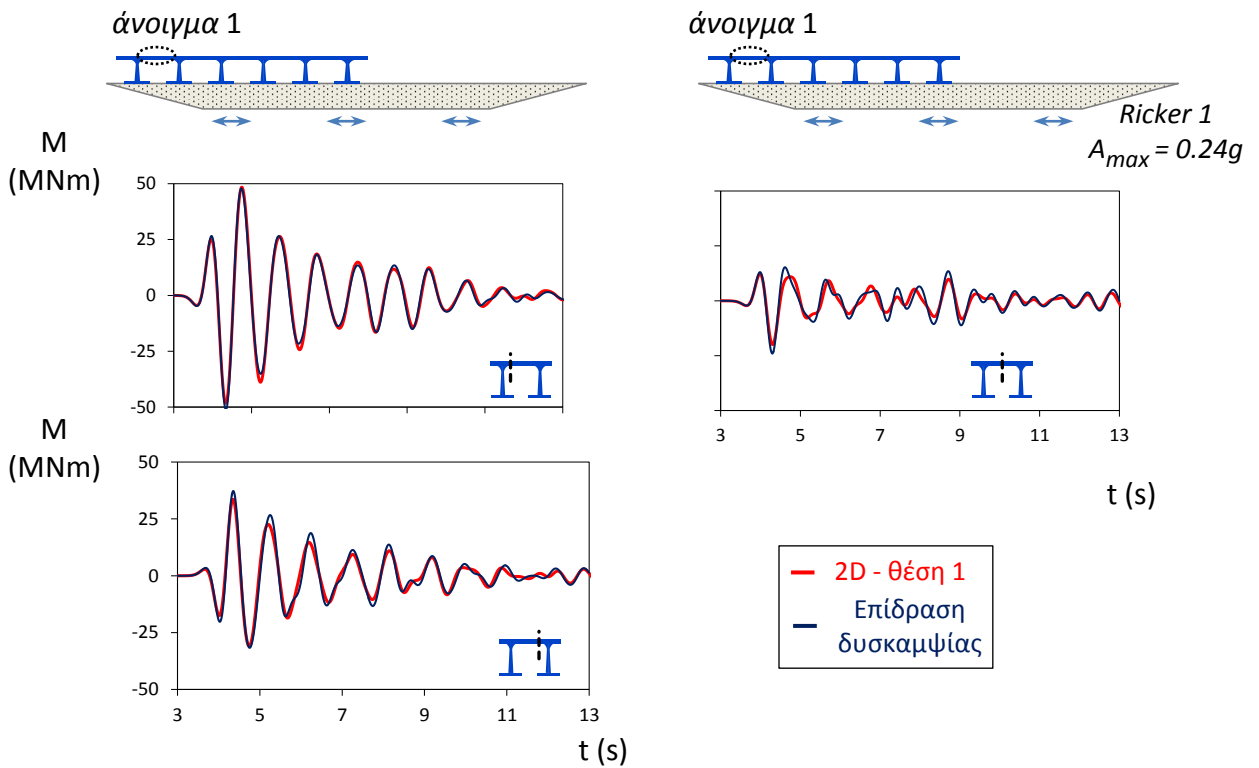
Σχήμα 6.50: Χρονοϊστορίες στροφών και καθιζήσεων στις βάσεις των θεμελίων 5 και 6 του φορέα. Σύγκριση με την επαλληλία των αποκρίσεων για διαφορετική οριζόντια και διαφορετική κατακόρυφη διέγερση. Μελέτη περίπτωσης: Διέγερση Ricker 1, θεώρηση συνεχούς καταστρώματος, γέφυρα στη θέση 1, θεώρηση ελαστικού εδάφους.



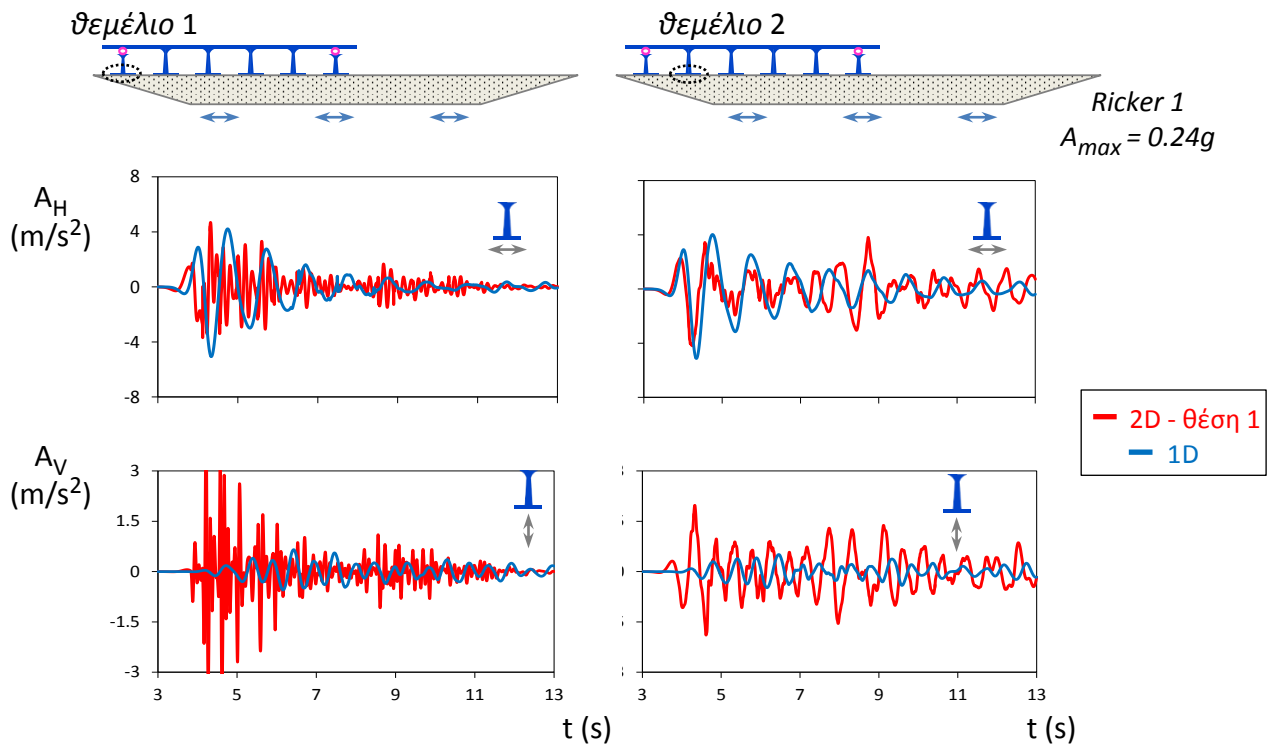
Σχήμα 6.51: Χρονοϊστορίες οριζόντιας επιτάχυνσης στη βάση του πρώτου θεμελίου και καμπτικής ροπής του πρώτου βάρου του φορέα. Σύγκριση με την απόκριση για διαφορετική οριζόντια διέγερση με θεώρηση **πραγματικής σύνθετης δυσκαμψίας** του θεμελίου 1. Μελέτη περίπτωσης: Διέγερση Ricker 1, θεώρηση συνεχούς καταστρώματος, γέφυρα στη θέση 1, θεώρηση ελαστικού εδάφους.



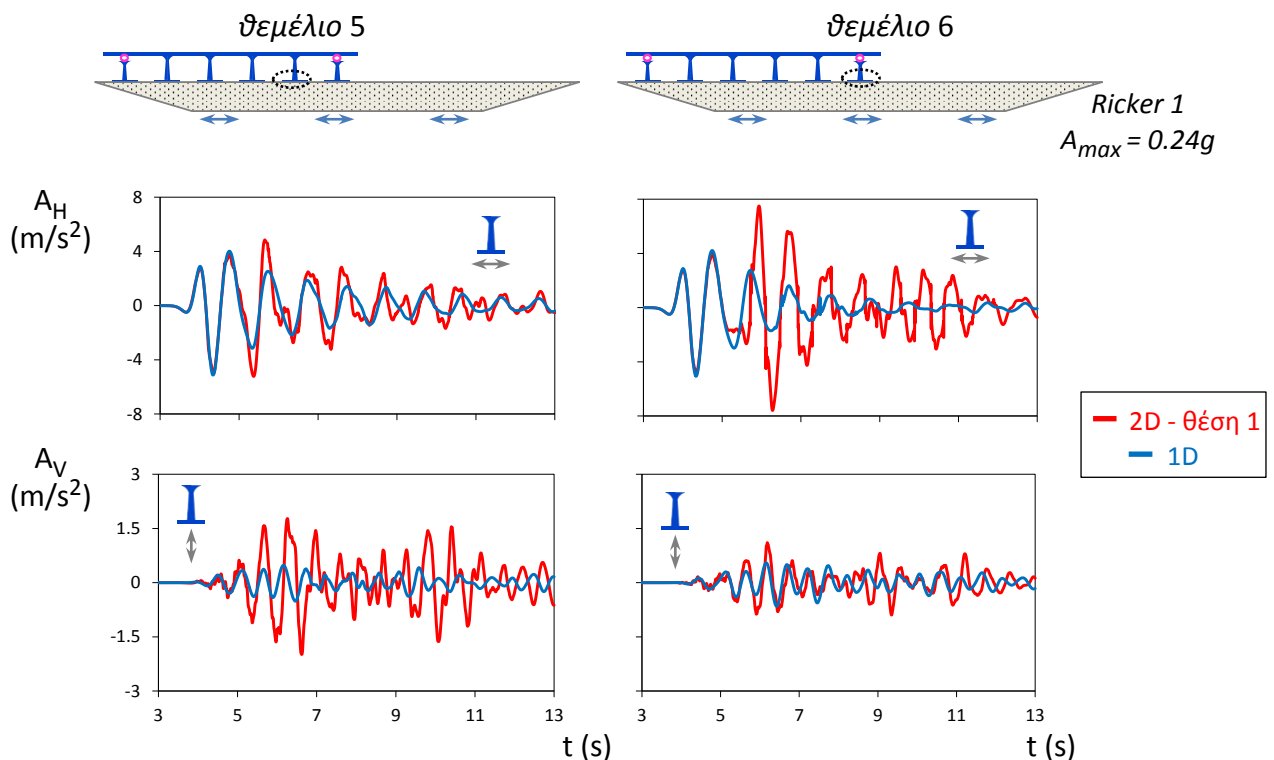
Σχήμα 6.52: Χρονοϊστορίες τέμνουσας δύναμης και drift του πρώτου βάρου και στροφής του πρώτου θεμελίου του φορέα. Σύγκριση με την απόκριση για διαφορετική οριζόντια διέγερση με θεώρηση πραγματικής σύνθετης δυσκαμψίας του θεμελίου 1. Μελέτη περίπτωσης: Διέγερση Ricker 1, θεώρηση συνεχούς καταστρώματος, γέφυρα στη θέση 1, θεώρηση ελαστικού εδάφους.



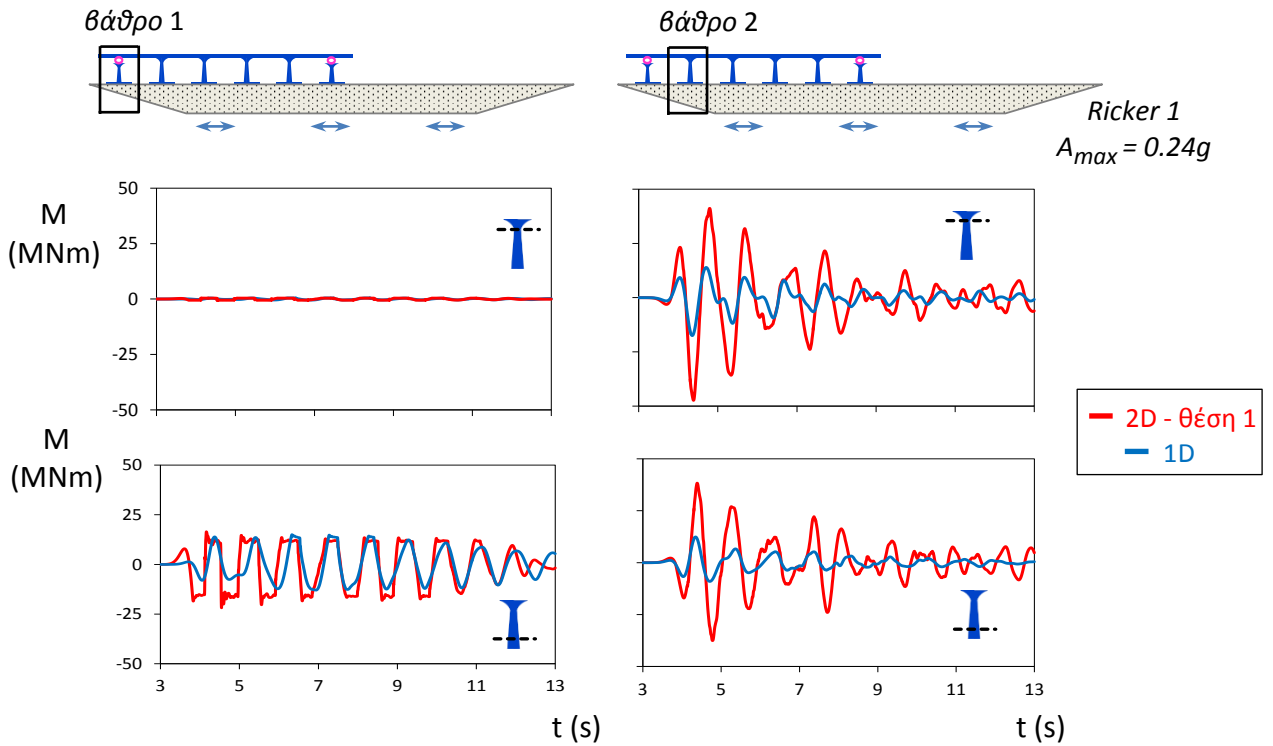
Σχήμα 6.53: Χρονοϊστορίες καμπτικών ροπών στο πρώτο άνοιγμα του φορέα. Σύγκριση με την απόκριση για διαφορετική οριζόντια διέγερση με θεώρηση πραγματικής σύνθετης δυσκαμψίας του θεμελίου 1. Μελέτη περίπτωσης: Διέγερση Ricker 1, θεώρηση συνεχούς καταστρώματος, γέφυρα στη θέση 1, θεώρηση ελαστικού εδάφους.



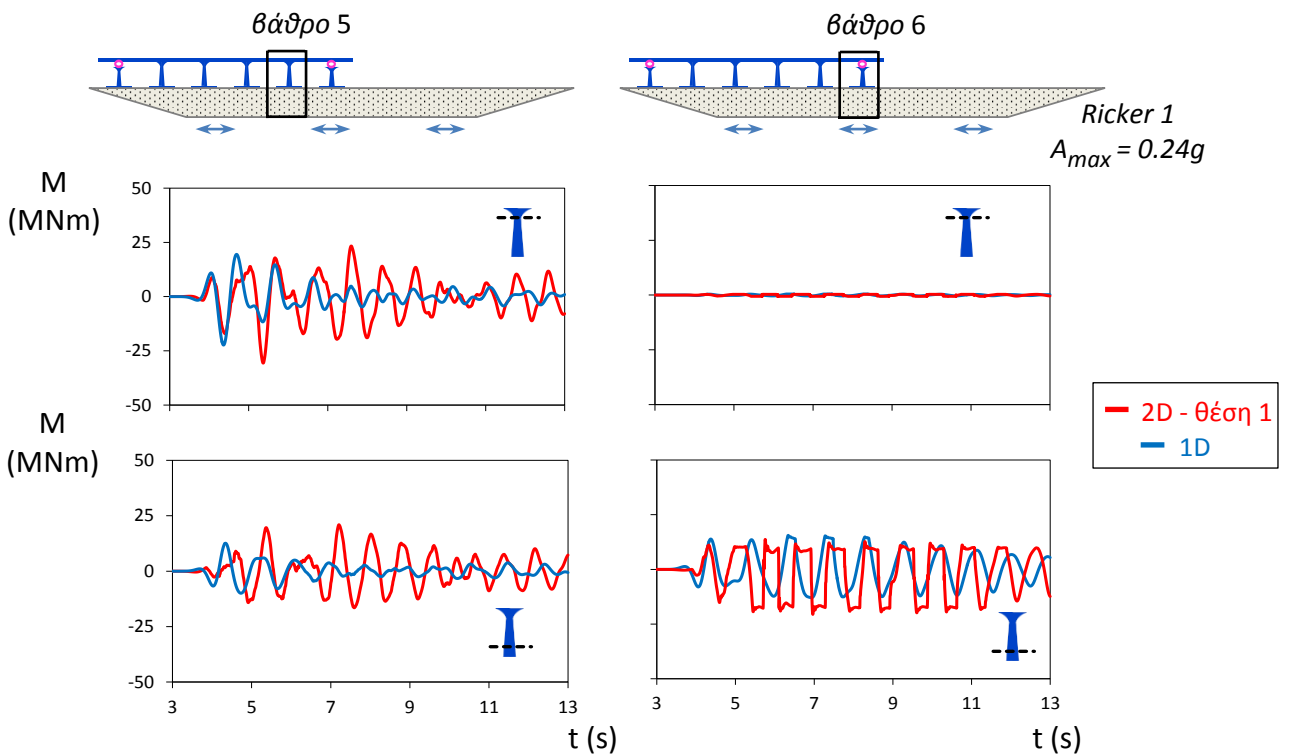
Σχήμα 6.54: Χρονοϊστορίες επιταχύνσεων στις βάσεις των θεμελίων 1 και 2. Μελέτη περίπτωσης: Διέγερση Ricker 1, θεώρηση **εφεδράνων** μεταξύ καταστρώματος και ακροβάθρων, γέφυρα στη θέση 1, θεώρηση ελαστικού εδάφους.



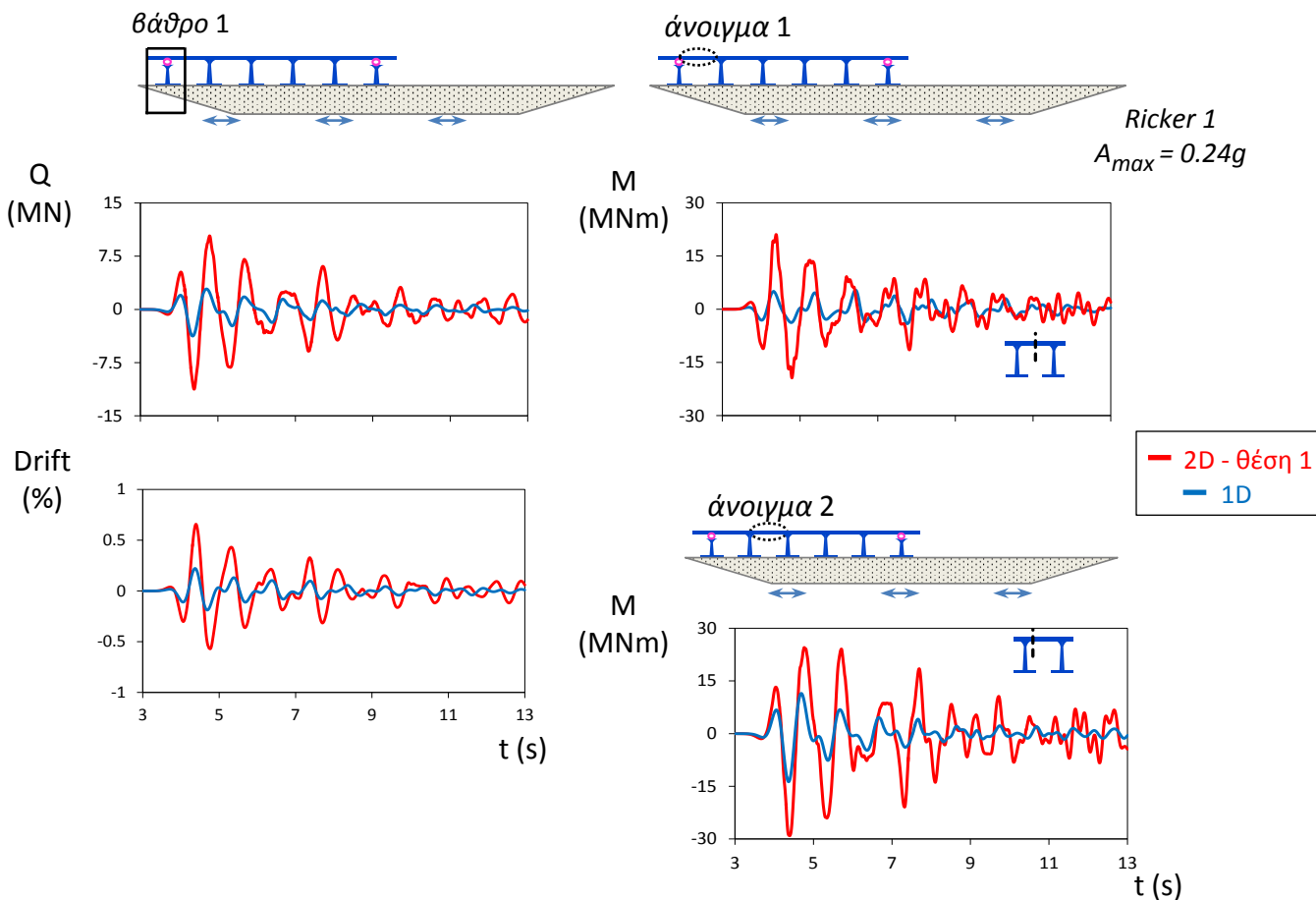
Σχήμα 6.55: Χρονοϊστορίες επιταχύνσεων στις βάσεις των θεμελίων 5 και 6. Μελέτη περίπτωσης: Διέγερση Ricker 1, θεώρηση εφεδράνων μεταξύ καταστρώματος και ακροβάθρων, γέφυρα στη θέση 1, θεώρηση ελαστικού εδάφους.



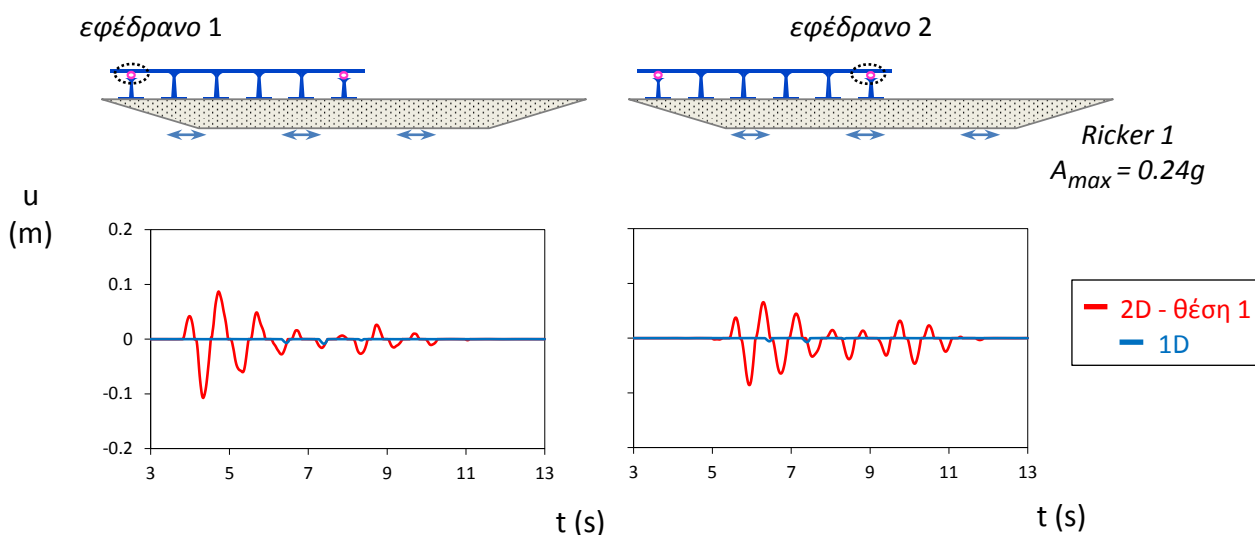
Σχήμα 6.56: Χρονοϊστορίες καμπτικών ροπών των βάθρων 1 και 2. Μελέτη περίπτωσης: Διέγερση Ricker 1, θεώρηση εφεδράνων μεταξύ καταστρώματος και ακροβάθρων, γέφυρα στη θέση 1, θεώρηση ελαστικού εδάφους.



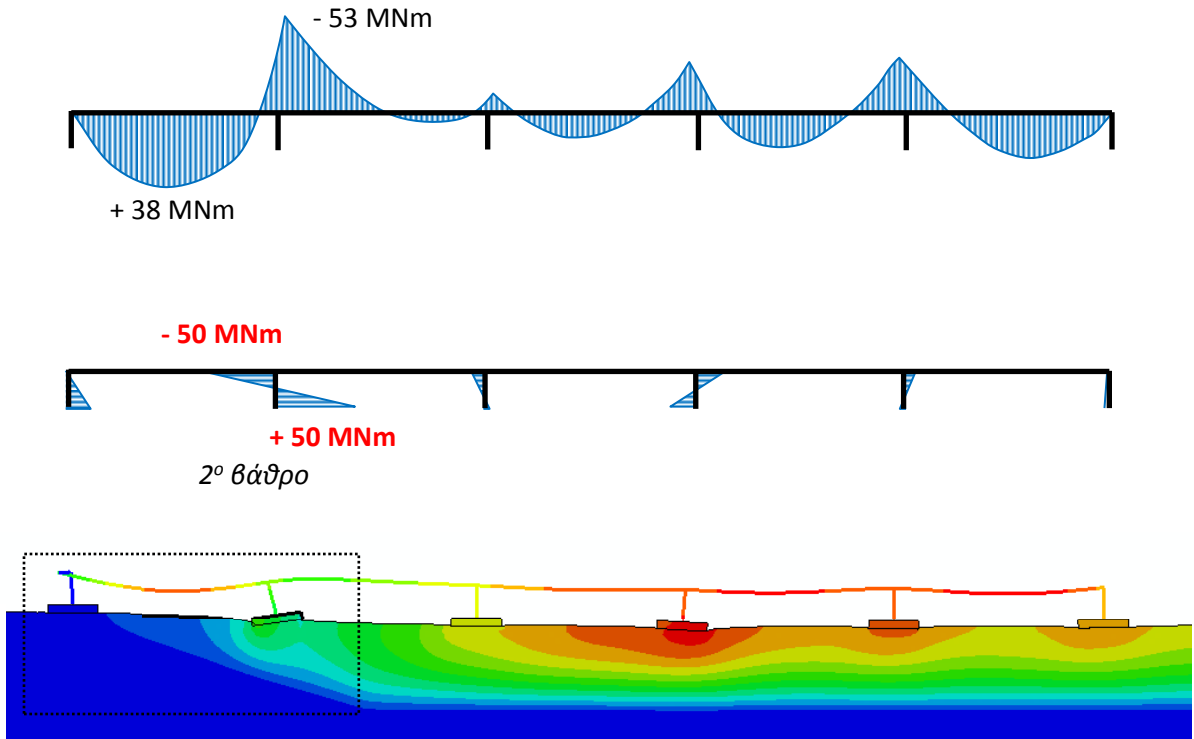
Σχήμα 6.57: Χρονοϊστορίες καμπτικών ροπών των βάθρων 5 και 6. Μελέτη περίπτωσης: Διέγερση Ricker 1, θεώρηση εφεδράνων μεταξύ καταστρώματος και ακροβάθρων, γέφυρα στη θέση 1, θεώρηση ελαστικού εδάφους.



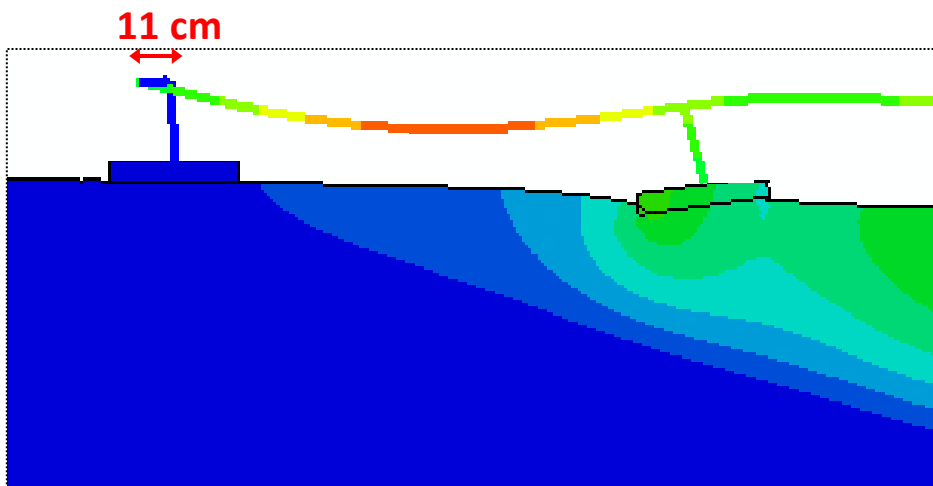
Σχήμα 6.58: Χρονοϊστορίες τέμνουσας δύναμης και drift του βάθρου 1 και καμπτικών ροπών στο άνοιγμα 1 και τη στήριξη του ανοίγματος 2. Μελέτη περίπτωσης: Διέγερση Ricker 1, θεώρηση εφεδράνων μεταξύ καταστρώματος και ακροβάθρων, γέφυρα στη θέση 1, θεώρηση ελαστικού εδάφους.



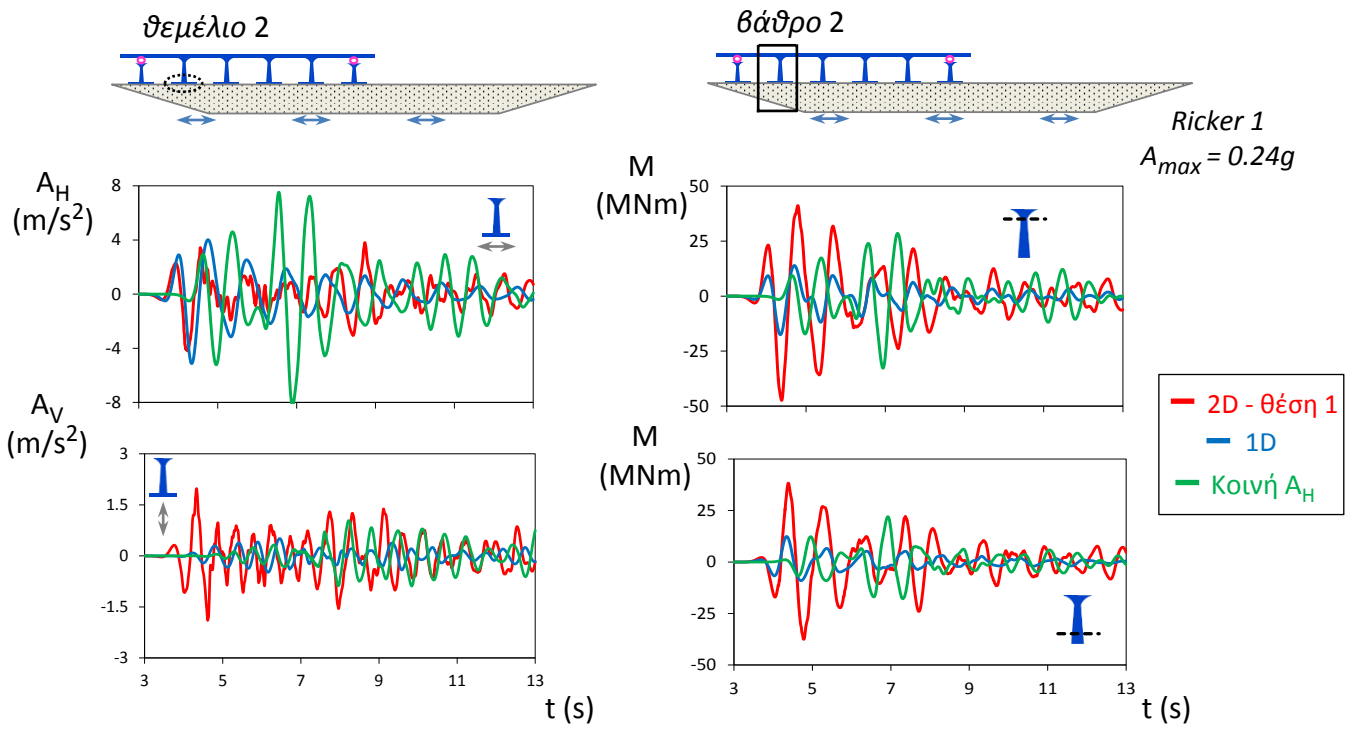
Σχήμα 6.59: Χρονοϊστορίες μετακινήσεων των εφεδράνων. Μελέτη περίπτωσης: Διέγερση Ricker 1, θεώρηση εφεδράνων μεταξύ καταστρώματος και ακροβάθρων, γέφυρα στη θέση 1, θεώρηση ελαστικού εδάφους.



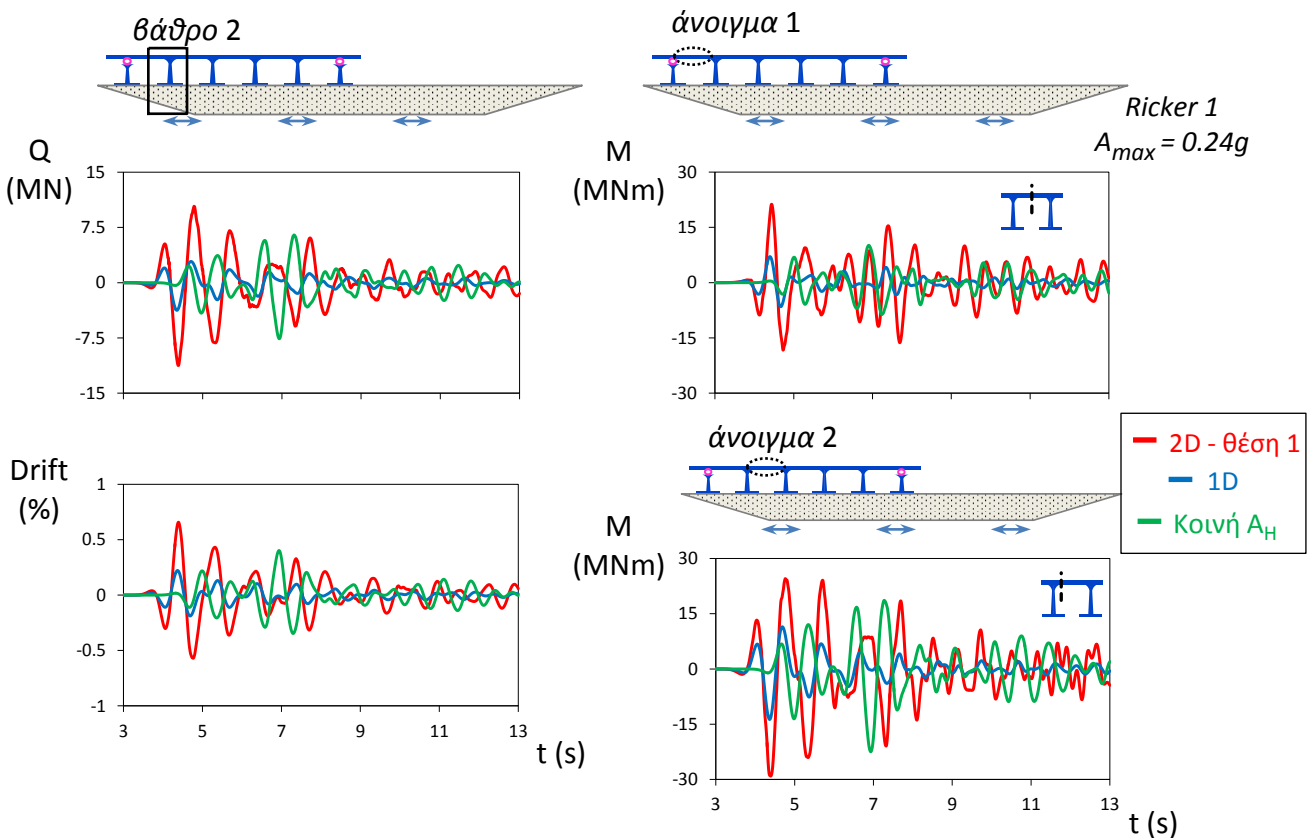
Σχήμα 6.60(α): Διάγραμμα καμπτικών ροπών και παραμορφωμένος φορέας τη στιγμή της μέγιστης καταπόνησης του δεύτερου βάρδου ($t=4.795s$). Μελέτη περίπτωσης: Διέγερση Ricker 1, θεώρηση εφεδράνων μεταξύ καταστρώματος και ακροβάθρων, γέφυρα στη θέση 1, θεώρηση ελαστικού εδάφους.



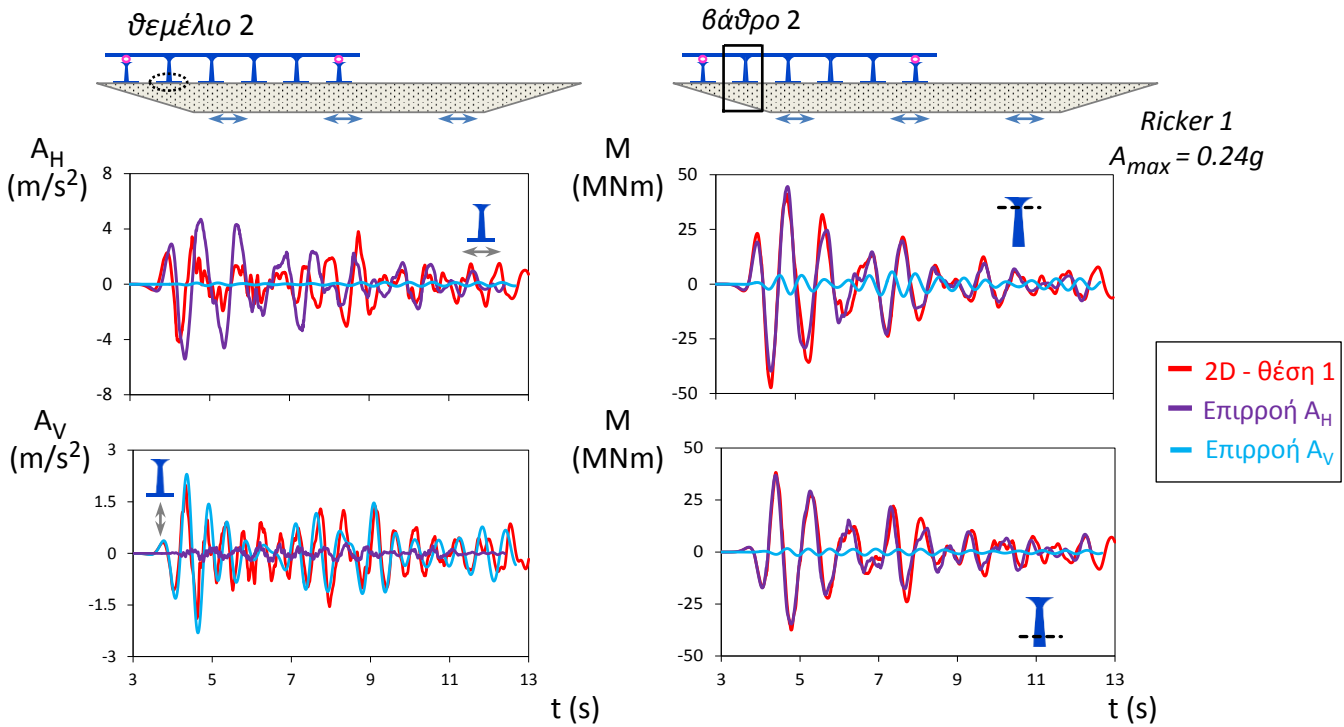
Σχήμα 6.60(β): Λεπτομέρεια παραμορφωμένου φορέα.



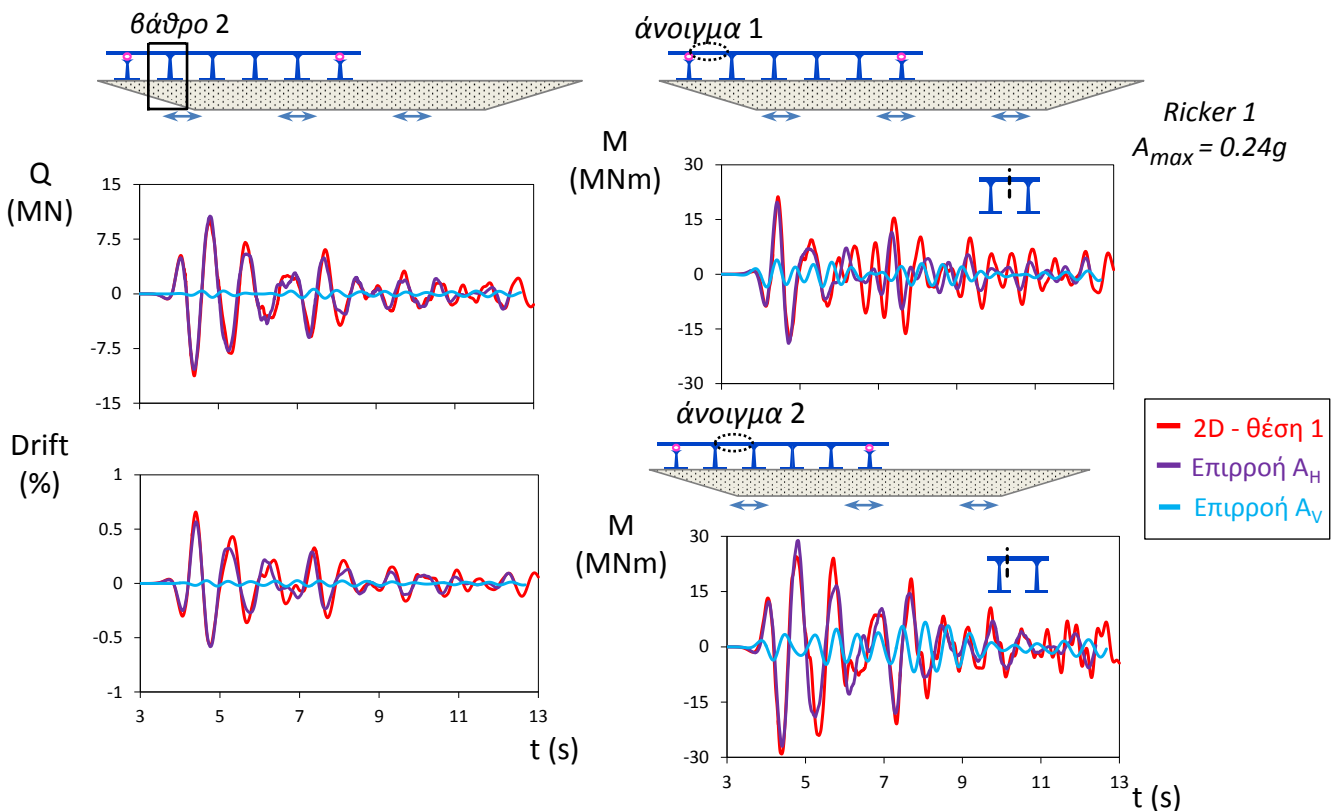
Σχήμα 6.61: Χρονοϊστορίες επιταχύνσεων στη βάση του θεμελίου 2 και καμπτικών ροπών του βάθρου 2. Σύγκριση με με την απόκριση του φορέα διεγερόμενου υπό κοινή αυξημένη A_H . Μελέτη περίπτωσης: Διέγερση Ricker 1, θεωρήση εφεδράνων μεταξύ καταστρώματος και ακροβάθρων, γέφυρα στη θέση 1, θεωρήση ελαστικού εδάφους.



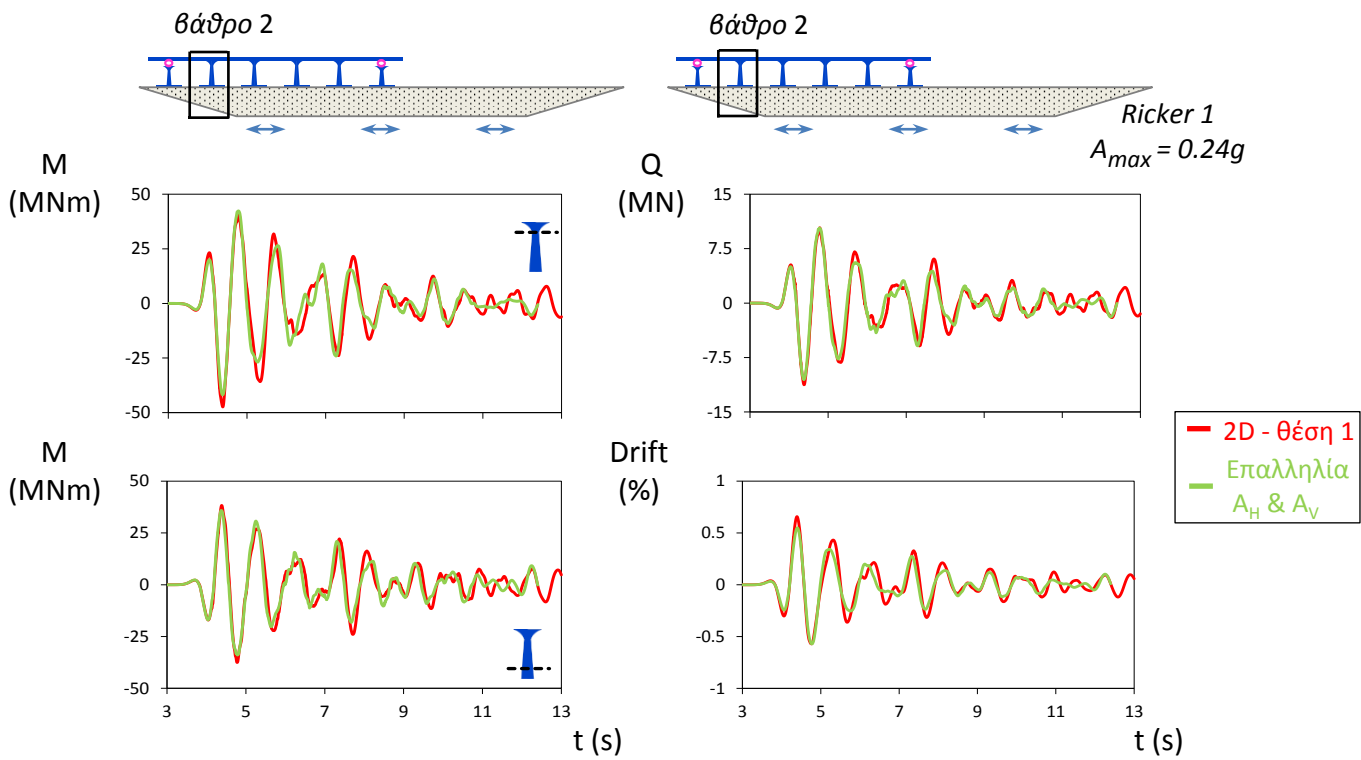
Σχήμα 6.62: Χρονοϊστορίες τέμνουσας δύναμης και drift του βάθρου 2 και καμπτικών ροπών του ανοίγματος 1 και στήριξης του ανοίγματος 2. Σύγκριση με με την απόκριση του φορέα διεγερόμενου υπό κοινή αυξημένη A_H . Μελέτη περίπτωσης: Διέγερση Ricker 1, θεωρήση εφεδράνων μεταξύ καταστρώματος και ακροβάθρων, γέφυρα στη θέση 1, θεωρήση ελαστικού εδάφους.



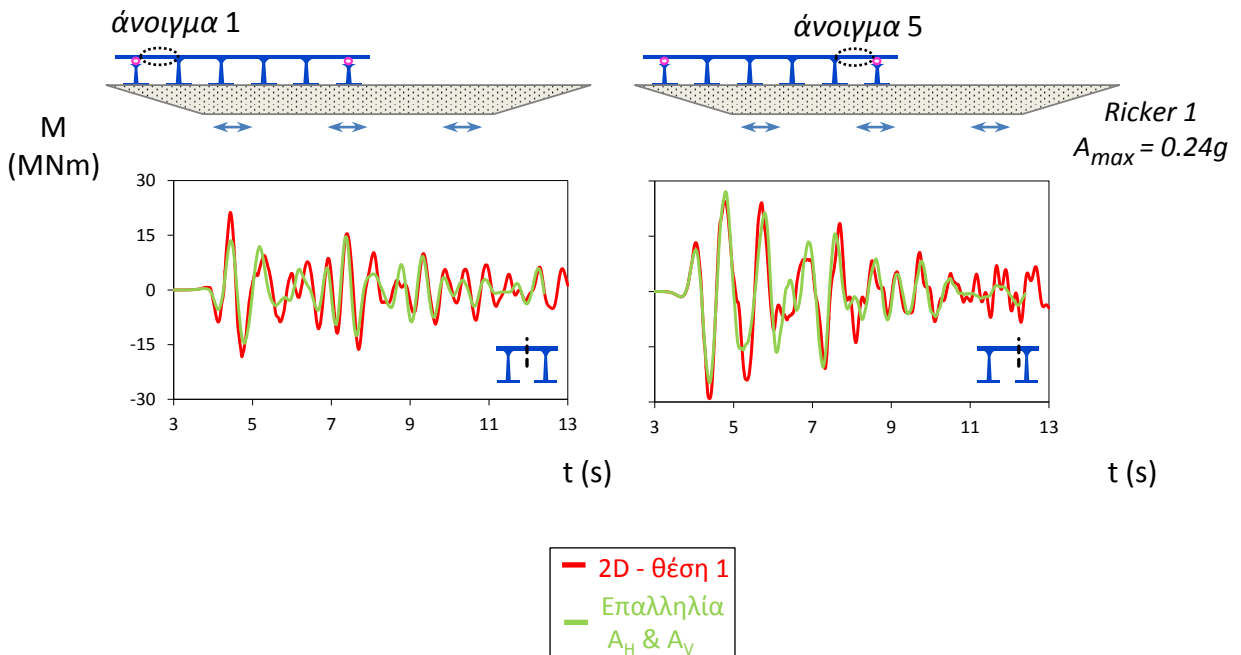
Σχήμα 6.63: Χρονοϊστορίες επιταχύνσεων στη βάση του θεμελίου 2 και καμπτικών ροπών του βάθρου 2. Σύγκριση με τις αποκρίσεις του φορέα υπό διαφορετική οριζόντια και υπό διαφορετική κατακόρυφη διέγερση. Μελέτη περίπτωσης: Διέγερση Ricker 1, θεώρηση εφεδράνων μεταξύ καταστρώματος και ακροβάθρων, γέφυρα στη θέση 1, θεώρηση ελαστικού εδάφους.



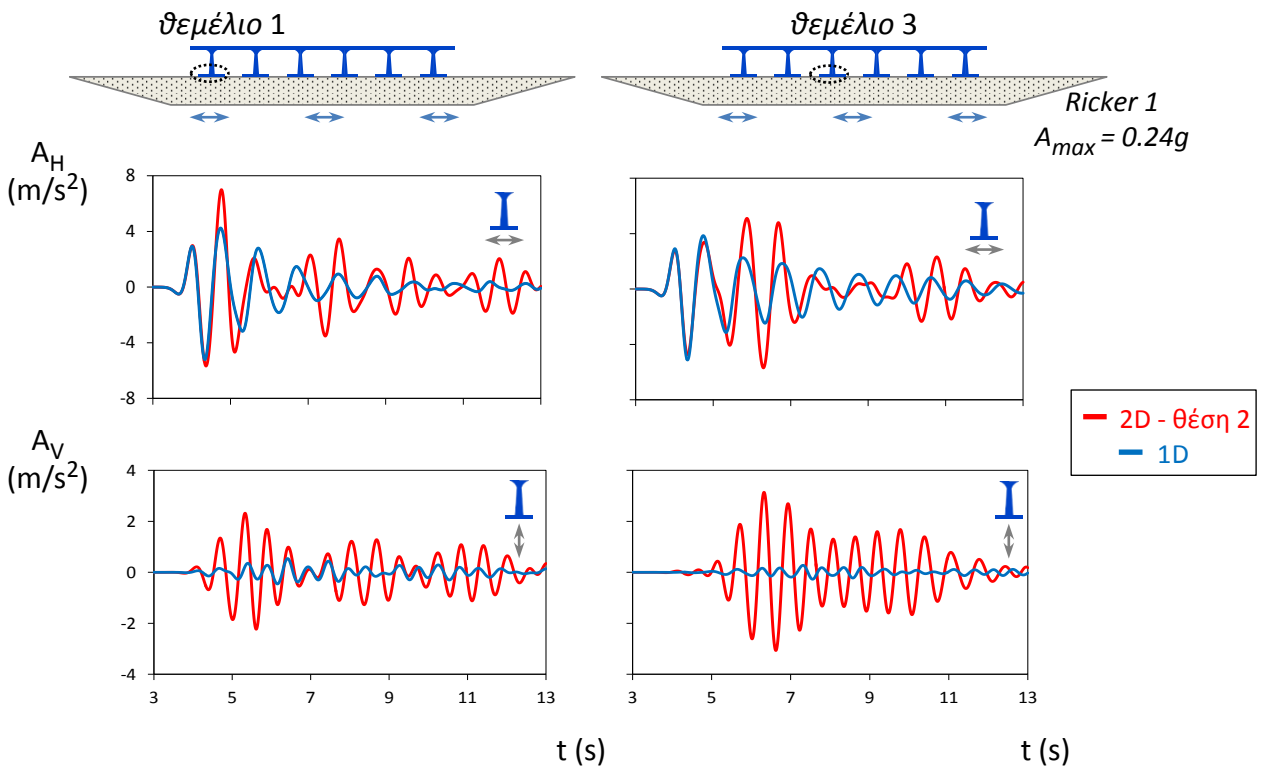
Σχήμα 6.64: Χρονοϊστορίες τέμνουσας δύναμης και drift του βάθρου 2 και καμπτικών ροπών του ανοίγματος 1 και στήριξης του ανοίγματος 2. Σύγκριση με τις αποκρίσεις του φορέα υπό διαφορετική οριζόντια και υπό διαφορετική κατακόρυφη διέγερση. Μελέτη περίπτωσης: Διέγερση Ricker 1, θεώρηση εφεδράνων μεταξύ καταστρώματος και ακροβάθρων, γέφυρα στη θέση 1, θεώρηση ελαστικού εδάφους.



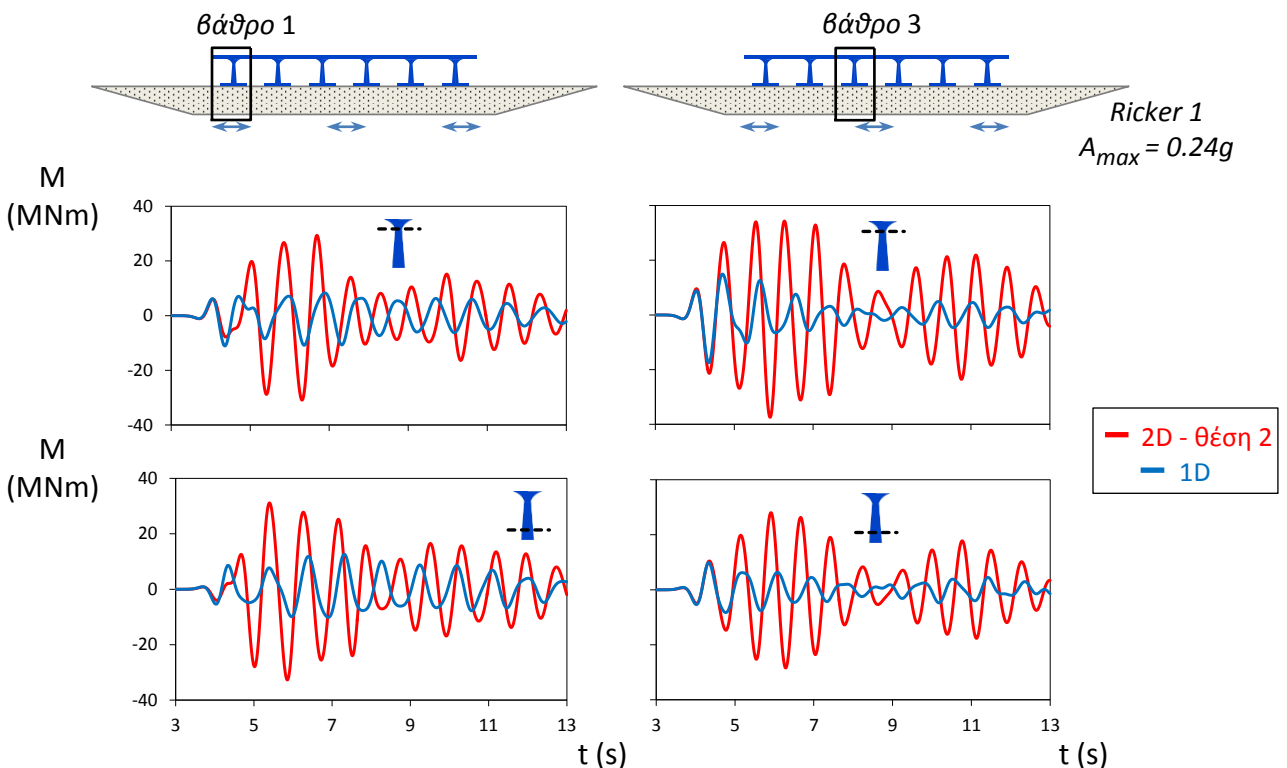
Σχήμα 6.65: Χρονοϊστορίες καμπτικών ροπών, τέμνουσας δύναμης και drift του βάθρου 2. Σύγκριση με την επαλληλία των αποκρίσεων για διαφορετική οριζόντια και διαφορετική κατακόρυφη διέγερση. Μελέτη περίπτωσης: Διέγερση Ricker 1, θεώρηση εφεδράνων μεταξύ καταστρώματος και ακροβάθρων, γέφυρα στη θέση 1, θεώρηση ελαστικού εδάφους.



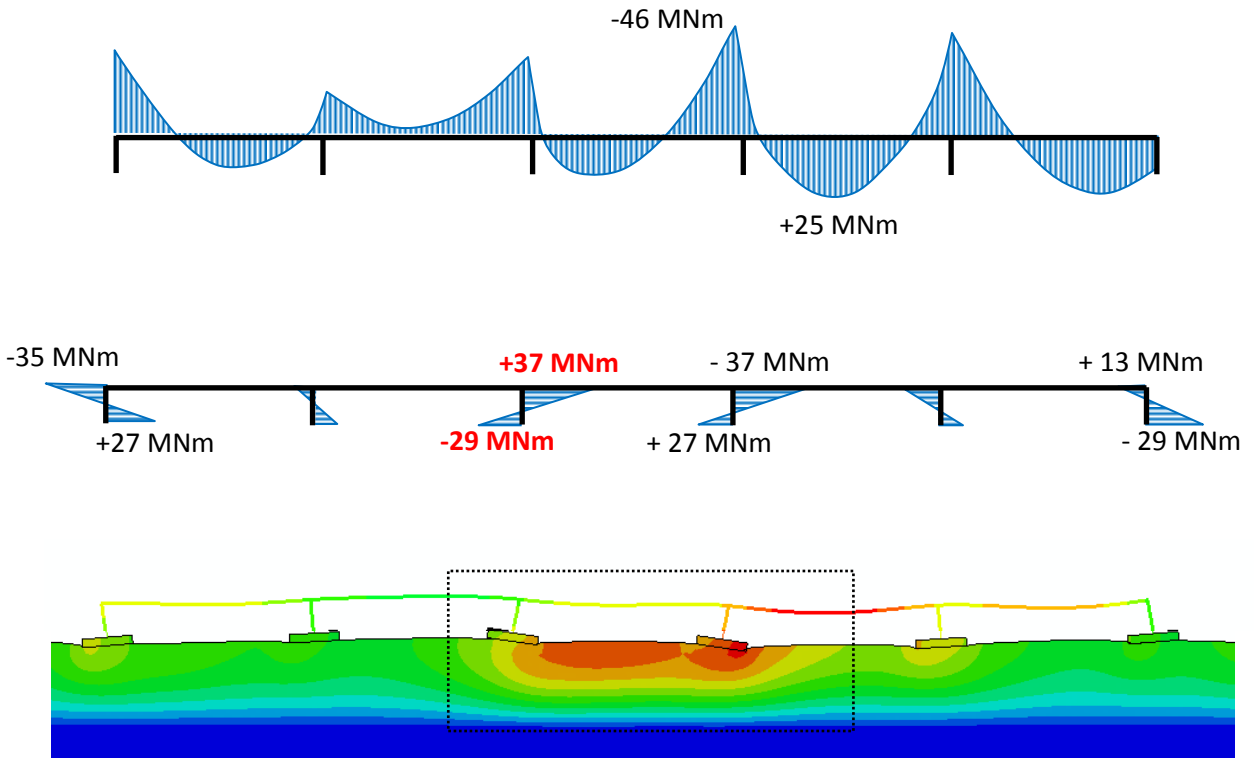
Σχήμα 6.66: Χρονοϊστορίες καμπτικών ροπών του ανοίγματος 1 και στήριξης του ανοίγματος 2. Σύγκριση με την επαλληλία των αποκρίσεων για διαφορετική οριζόντια και διαφορετική κατακόρυφη διέγερση. Μελέτη περίπτωσης: Διέγερση Ricker 1, θεώρηση εφεδράνων μεταξύ καταστρώματος και ακροβάθρων, γέφυρα στη θέση 1, θεώρηση ελαστικού εδάφους



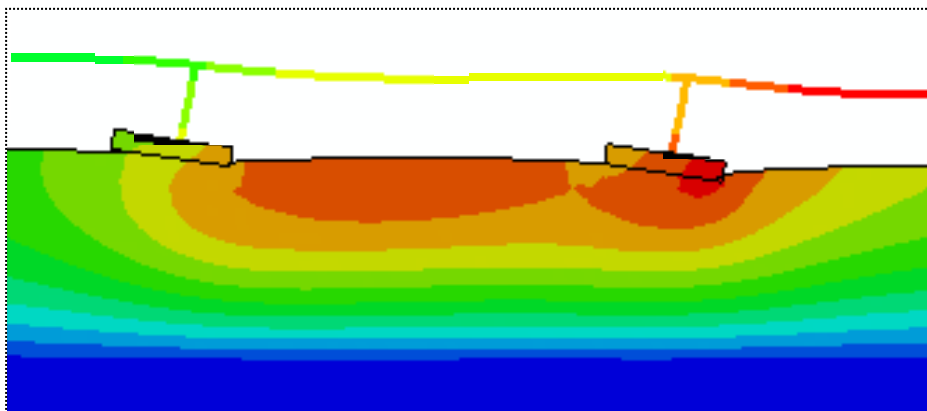
Σχήμα 6.67: Χρονοϊστορίες επιταχύνσεων στις βάσεις των θεμελίων 1 και 3. Μελέτη περίπτωσης: Διέγερση Ricker 1, θεώρηση συνεχούς καταστρώματος, γέφυρα στη **θέση 2**, θεώρηση ελαστικού εδάφους.



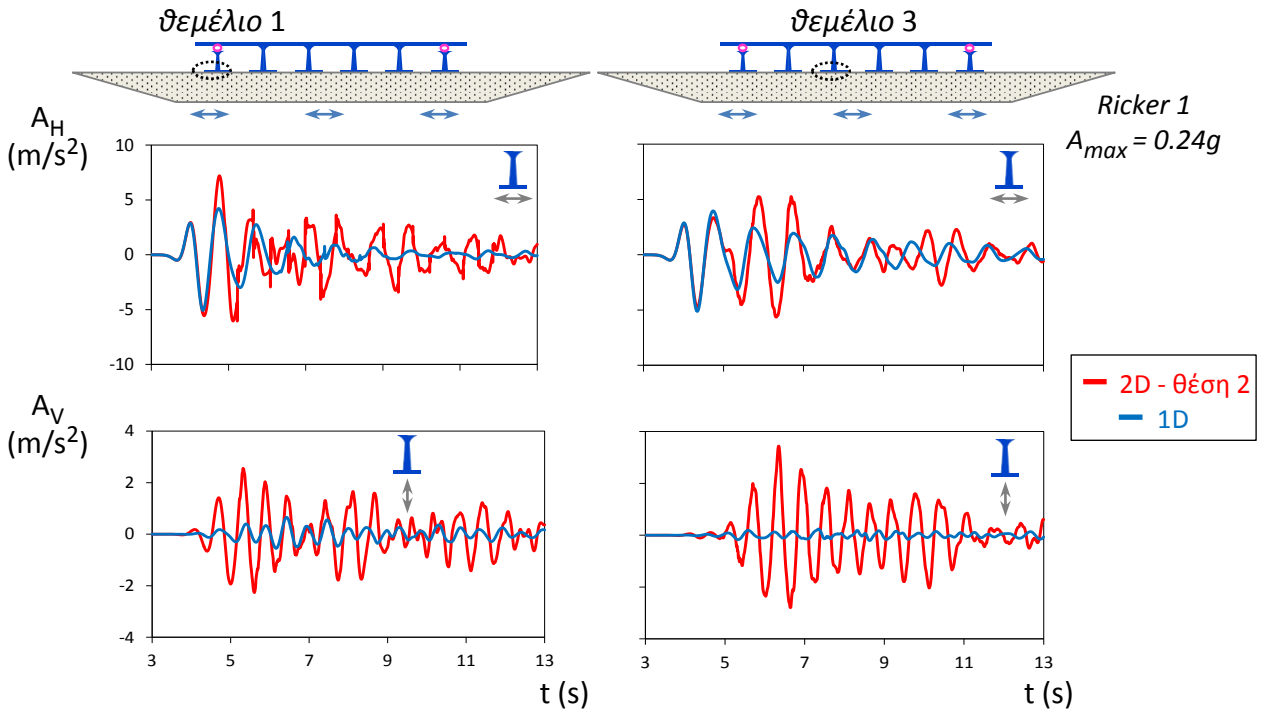
Σχήμα 6.68: Χρονοϊστορίες καμπτικών ροπών στα βάθρα 1 και 3 του φορέα. Μελέτη περίπτωσης: Διέγερση Ricker 1, θεώρηση συνεχούς καταστρώματος, γέφυρα στη **θέση 2**, θεώρηση ελαστικού εδάφους.



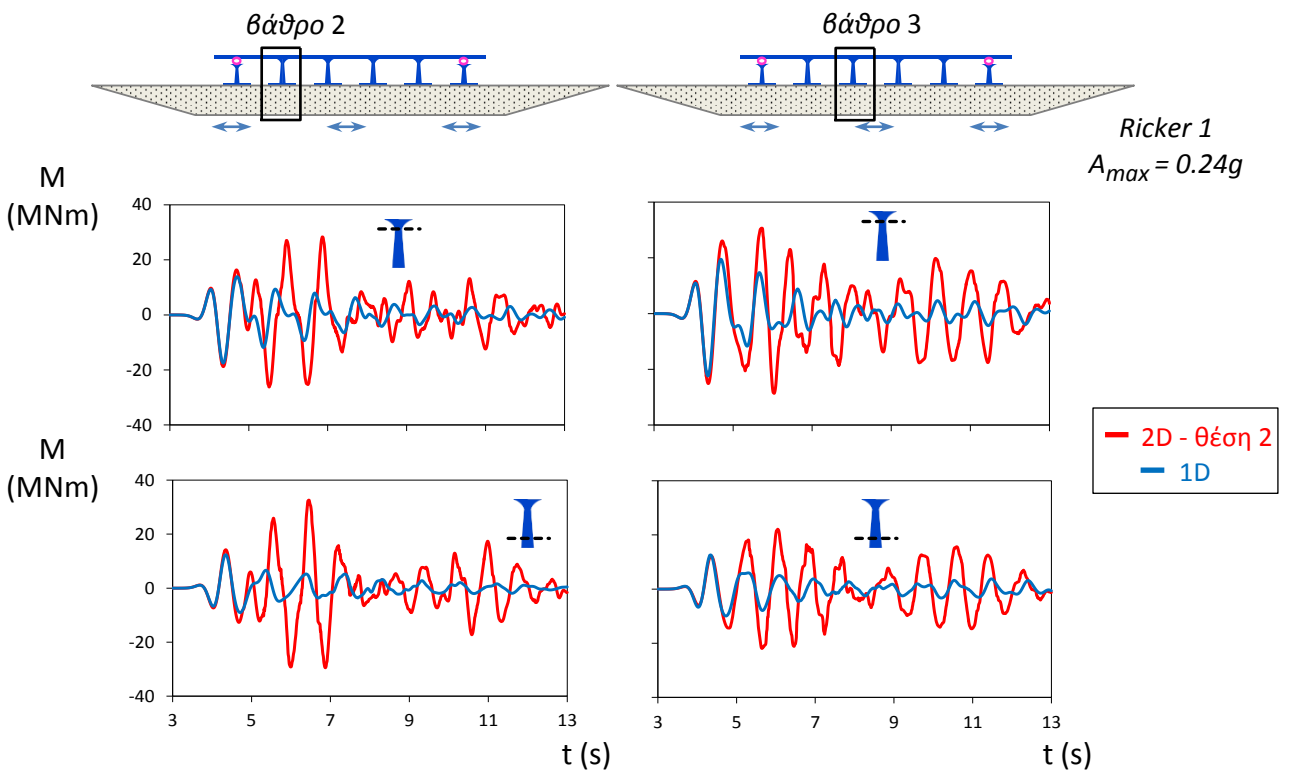
Σχήμα 6.71(α): Διάγραμμα καμπτικών ροπών και παραμορφωμένος φορέας τη στιγμή $t=5.925s$. Μελέτη περίπτωσης: Διέγερση Ricker 1, θεώρηση συνεχούς καταστρώματος, γέφυρα στη θέση 2, θεώρηση ελαστικού εδάφους. Εμφανή είναι τα 'φουσκώματα' του εδάφους λόγω των Rayleigh κυμάτων.



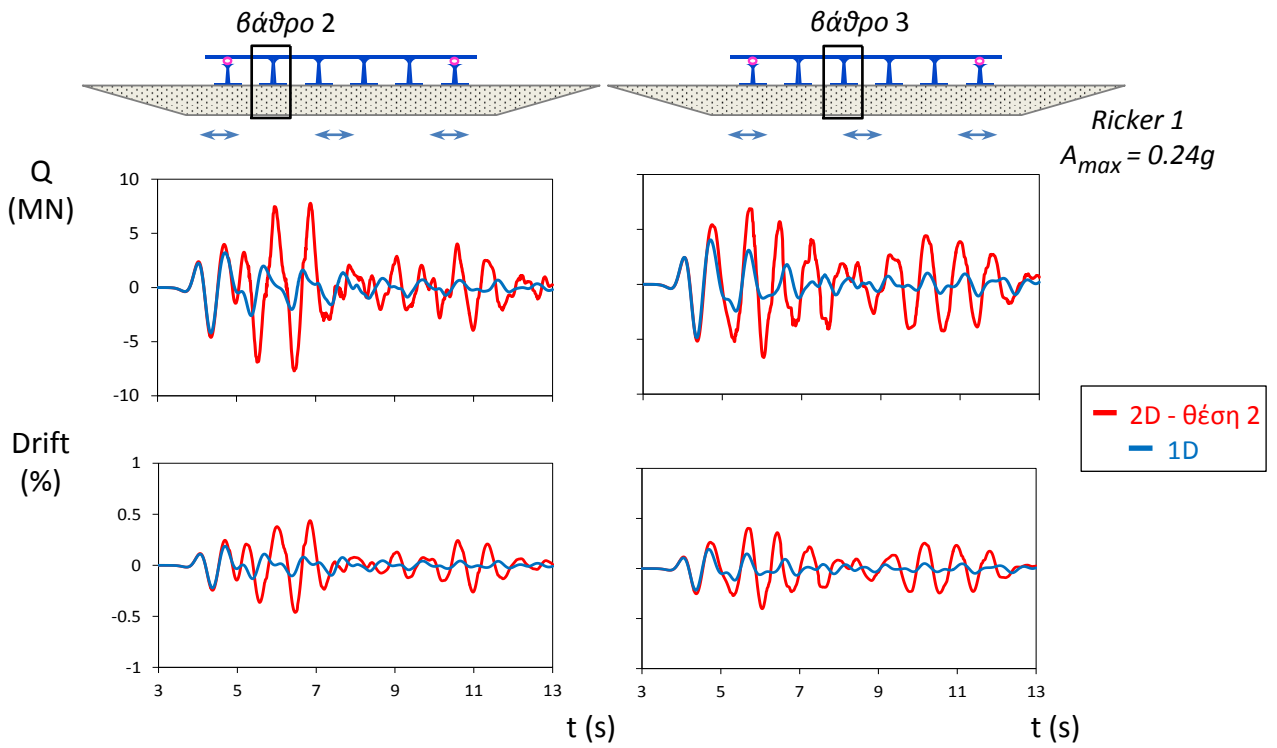
Σχήμα 6.71(β): Λεπτομέρεια παραμορφωμένου φορέα.



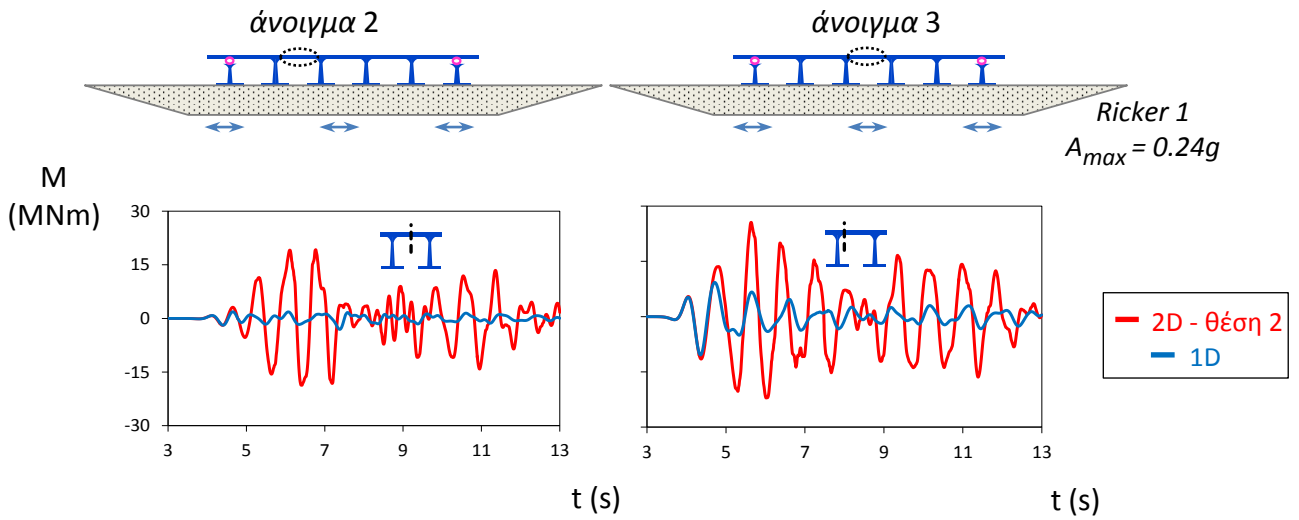
Σχήμα 6.72: Χρονοϊστορίες επιταχύνσεων στις βάσεις των θεμελίων 1 και 3. Μελέτη περίπτωσης: Διέγερση Ricker 1, θεωρήση **εφεδράνων** μεταξύ καταστρώματος και ακροβάθρων, γέφυρα στη θέση 2, θεωρήση ελαστικού εδάφους.



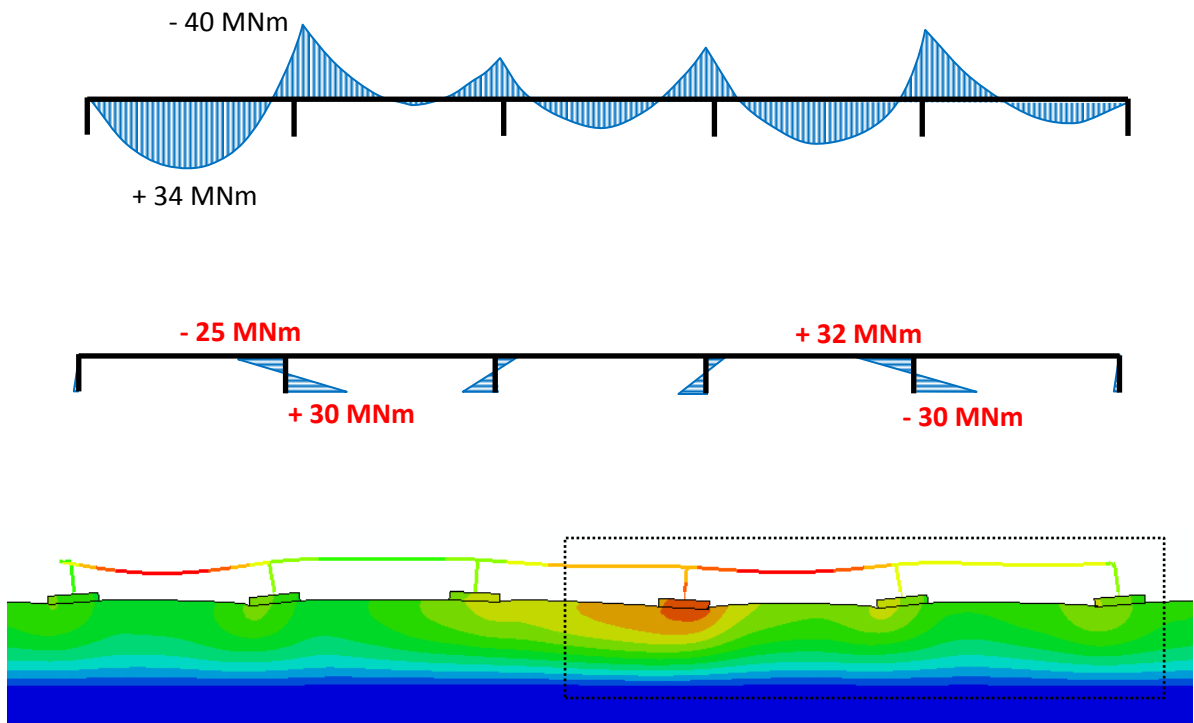
Σχήμα 6.73: Χρονοϊστορίες καμπτικών ροπών στα βάρθρα 2 και 3 του φορέα. Μελέτη περίπτωσης: Διέγερση Ricker 1, θεωρήση εφεδράνων μεταξύ καταστρώματος και ακροβάθρων, γέφυρα στη θέση 2, θεωρήση ελαστικού εδάφους.



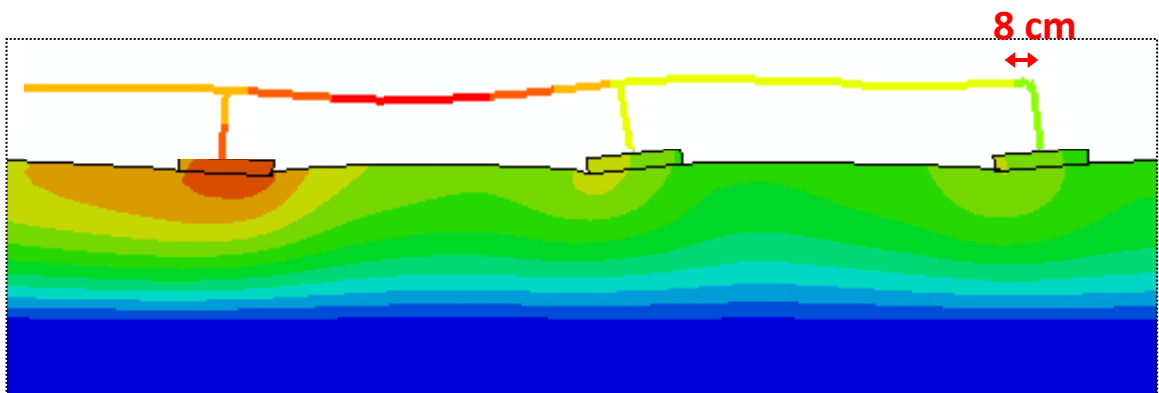
Σχήμα 6.74: Χρονοϊστορίες τεμνουσών δυνάμεων και drift στα βάθρα 2 και 3 του φορέα. Μελέτη περίπτωσης: Διέγερση Ricker 1, θεώρηση εφεδράνων μεταξύ καταστρώματος και ακροβάθρων, γέφυρα στη θέση 2, θεώρηση ελαστικού εδάφους.



Σχήμα 6.75: Χρονοϊστορίες καμπτικών ροπών στα ανοίγματα 2 και 3 του φορέα και αξονικής δύναμης στο άνοιγμα 2. Μελέτη περίπτωσης: Διέγερση Ricker 1, θεώρηση εφεδράνων μεταξύ καταστρώματος και ακροβάθρων, γέφυρα στη θέση 2, θεώρηση ελαστικού εδάφους.



Σχήμα 6.77(α): Διάγραμμα καμπτικών ροπών και παραμορφωμένος φορέας τη στιγμή $t=6.720s$. Μελέτη περίπτωσης: Διέγερση Ricker 1, **θεώρηση εφεδράνων μεταξύ καταστρώματος και ακροβάθρων**, γέφυρα στη θέση 2, θεώρηση ελαστικού εδάφους. Εμφανή είναι τα **‘φουσκώματα’** του εδάφους λόγω των Rayleigh κυμάτων.



Σχήμα 6.77(β): Λεπτομέρεια παραμορφωμένου φορέα.

Κεφάλαιο 7

Γέφυρα εδραζόμενη σε κοιλάδα με ανελαστικό έδαφος

7.1. Έδραση γέφυρας στην θέση 1 της κοιλάδας

A. Πλάτος διέγερσης $A_{\max}=0.24g$

Στην περίπτωση που το έδαφος είναι ανελαστικό, οι επιταχύνσεις που φτάνουν στην επιφάνεια της κοιλάδας είναι μειωμένες, όπως φαίνεται και στο διάγραμμα του **Σχήματος 5.5 (β)** και στα **Σχήματα 7.1** έως **7.3**. Από το **Σχήμα 5.5(β)** η οριζόντια επιτάχυνση στην βάση του 2^{ου} θεμελίου αναμένεται ελαφρώς ενισχυμένη σε σχέση με αυτή για το μονοδιάστατο προφίλ του εδάφους. Παρ'όλ' αυτά, κάτι τέτοιο δε φαίνεται στο **Σχήμα 7.1**, καθώς σε αυτό οι επιταχύνσεις λόγω μονοδιάστατου και δισδιάστατου προφίλ παρουσιάζουν ίδια τάξη μεγίστου. Αυτό σημαίνει, ότι η ενίσχυση που παρουσιάζεται στο ελεύθερο πεδίο, η οποία δεν είναι πολύ μεγάλη και είναι συγκεντρωμένη σε ένα σημείο, **ισοπεδώνεται από τον κινηματικό περιορισμό που επιβάλλει η παρουσία του θεμελίου**. Η παρασιτική κατακόρυφη επιτάχυνση είναι σημαντική μόνο στην βάση του 2^{ου} θεμελίου (**Σχήμα 7.1**), όπως αναμένεται και από το διάγραμμα στο **Σχήμα 5.5(β)**. Και αυτή προκύπτει μικρότερη από αυτή που θα αναμενόταν με βάση το παραπάνω διάγραμμα, αλλά η τιμή της παραμένει σημαντική.

Παρ'όλο που οι επιταχύνσεις στις βάσεις των θεμελίων, με εξαίρεση την κατακόρυφη επιτάχυνση στο 2^ο θεμέλιο, δεν προέκυψαν δυσμενέστερες από την θεώρηση μονοδιάστατης γεωμετρίας του εδάφους, τα 2 πρώτα βάθρα παρουσιάζουν ιδιαίτερα αυξημένες ροπές, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 7.4**. Ιδιαίτερα το βάθρο 1

παρουσιάζει στην βάση του ροπή ίση με **40 MNm**, δηλαδή τετραπλάσια της αντίστοιχης που παρουσιάζεται για το μονοδιάστατο έδαφος, και φυσικά μεγαλύτερη από την ροπή αντοχής του βάθρου. Στην κορυφή του παρουσιάζεται επίσης αυξημένη ροπή που φτάνει τα **30 MNm**, ενώ και στην κορυφή του 2^{ου} βάθρου υπάρχει μια μικρή αύξηση. Οι ιδιαίτερα μεγάλες ροπές αυτές είναι **ταυτόχρονες με τον κύριο παλμό** της διέγερσης. Πέρα από αυτές όμως, παρατηρείται και η ύπαρξη **παραμενουσών ροπών** μετά το τέλος της διέγερσης, της τάξης των **5 MNm**, κυρίως στα 2 πρώτα βάθρα. Οι ίδιες τάσεις παρατηρούνται και στις ροπές των 2 πρώτων φατνωμάτων του καταστρώματος (**Σχήμα 7.8**). Αντίθετα, τα υπόλοιπα βάθρα, ουσιαστικά αποκρίνονται σαν να μην υπήρχε η κοιλάδα (**Σχήματα 7.5 και 7.6**).

Ένα πιθανό αίτιο για την αύξηση των ροπών είναι η παρουσία της σχετικά μεγάλης τιμής της κατακόρυφης επιτάχυνσης του βάθρου 2. Επειδή μάλιστα, το έδαφος είναι ανελαστικό, η επιτάχυνση οδηγεί στην πλαστικοποίηση του εδάφους και την δημιουργία **αυξημένων μόνιμων καθιζήσεων στο 2^ο βάθρο**, οι οποίες, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 7.9**, πραγματοποιούνται ταυτόχρονα με τον κύριο παλμό της κατακόρυφης επιτάχυνσης. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με το ότι, το 1^ο βάθρο πρακτικά δεν καθιζάνει, έχει ως αποτέλεσμα την παραμόρφωση του φορέα και την ανάπτυξη εντατικών μεγεθών. Επειδή το έδαφος είναι ανελαστικό και οι παραμορφώσεις του πλαστικές, τα μεγέθη αυτά θα παραμείνουν και μετά το τέλος της σεισμικής διέγερσης του φορέα. Επομένως, συμπεραίνεται ότι ο μηχανισμός δημιουργίας των **παραμενουσών ροπών** στα πρώτα 2 βάθρα είναι η **αυξημένη παρασιτική κατακόρυφη επιτάχυνση** σε συνδυασμό με την **ανελαστικότητα** του εδάφους. Αξίζει να σημειωθεί επίσης, ότι η κατακόρυφη επιτάχυνση και οι συνεπαγόμενες καθιζήσεις έχουν ως αποτέλεσμα την δημιουργία **αξονικών δυνάμεων** στα βάθρα (**Σχήμα 7.7**), οι οποίες επηρεάζουν την αντοχή τους.

Ωστόσο, ο παλμός της αυξημένης παρασιτικής επιτάχυνσης, έρχεται καθυστερημένα σε σχέση με τον κύριο παλμό της οριζόντιας διέγερσης και με τις ταυτόχρονες με αυτόν ιδιαίτερα μεγάλες ροπές που παρατηρούνται στα δύο πρώτα

βάθρα. Άρα, η κατακόρυφη επιτάχυνση δεν μπορεί να είναι το αίτιο της συμπεριφοράς αυτής. Καθώς η τιμή της οριζόντιας επιτάχυνσης είναι ίση ή και μικρότερη από αυτήν για το μονοδιάστατο έδαφος, και μάλιστα η κίνηση μεταξύ των δύο βάθρων δεν είναι ιδιαίτερα διαφορετική, το μόνο πιθανό αίτιο που μένει, σύμφωνα με την ανάλυση για το ελαστικό έδαφος που πραγματοποιήθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, είναι η **επίδραση της δυσκαμψίας**. Πράγματι, η επίδραση της δυσκαμψίας στο προηγούμενο κεφάλαιο είχε αποδειχτεί ότι προκαλούσε πρόσθετη ροπή περίπου **30 MNm** στην βάση του 1^{ου} βάθρου του πακτωμένου φορέα (**Σχήματα 6.39 και 6.53**), δηλαδή περίπου ίδια με την πρόσθετη ροπή που προκαλείται στην περίπτωση αυτή.

Οι στροφές και οι καθιζήσεις του φορέα φαίνονται στα **σχήματα 7.8 έως 7.10**, στα οποία διακρίνεται η παρουσία μικρών παραμενουσών στροφών σε όλα τα θεμέλια και οι διαφορικές παραμένουσες καθιζήσεις στα 3 πρώτα θεμέλια για την περίπτωση του δισδιάστατου εδαφικού αναγλύφου. Η μορφή του παραμορφωμένου φορέα και το αντίστοιχο διάγραμμα καμπτικών ροπών την στιγμή της μέγιστης καταπόνησης του 1^{ου} βάθρου παρουσιάζεται στο **Σχήμα 7.12**, ενώ ο παραμορφωμένος φορέας και οι παραμένουσες ροπές στο τέλος της διέγερσης παρουσιάζονται στο **Σχήμα 7.13**.

B. Πλάτος διέγερσης $A_{max}=0.50g$

Η ίδια ανάλυση πραγματοποιήθηκε και για διέγερση Ricker 1 πλάτους 0.50g για να διαπιστωθούν οι πιθανές διαφορές λόγω της διαφορετικής κινητοποίησης της ανελαστικότητας του εδάφους. Η κατανομή των επιταχύνσεων στο ελεύθερο πεδίο φαίνεται στο **Σχήμα 5.6 (γ)** και οι χρονοϊστορίες των επιταχύνσεων στις βάσεις των 2 πρώτων βάθρων στο **Σχήμα 7.14**. Παρατηρούμε ότι το θεμέλιο 1 δεν έχει αυξημένη επιτάχυνση σε σχέση με την μονοδιάστατη περίπτωση, αντίθετα από ότι φαίνεται στο διάγραμμα του **Σχήματος 5.6 (γ)**, γεγονός που δείχνει ότι το θεμέλιο και εδώ 'τρώνει' την επιπλέον ενίσχυση.

Οι ροπές στα βάθρα και τα φατνώματα 1 και 2 φαίνονται στα **Σχήμα 7.15 και 7.16** αντίστοιχα, και οι καθιζήσεις και στροφές των δύο πρώτων θεμελίων φαίνονται στο **Σχήμα 7.17**. Ο παραμορφωμένος φορέας την στιγμή της μέγιστης καταπόνησης του

βάθρου φαίνεται στο **Σχήμα 7.18**. Στο **Σχήμα 7.19** συγκρίνονται ο παραμορφωμένος φορέας και οι καμπτικές ροπές πριν την έναρξη της διέγερσης και μετά το τέλος της. Είναι εμφανής η παραμένουσα καθίζηση του 2^{ου} βάθρου, καθώς και η μεταβολή στην κατανομή των ροπών κάμψης του φορέα λόγω της παραμόρφωσης του εδάφους.

Όπως φαίνεται από τα σχήματα αυτά, παρατηρούνται ίδιες τάσεις με την περίπτωση του παλμού με πλάτος 0.24g, αλλά τα αποτελέσματα είναι ακόμα πιο έντονα, καθώς η διέγερση είναι αυξημένη. Βέβαια, τα μεγέθη που αναπτύσσονται δεν είναι διπλασιασμένα, όπως είναι το πλάτος της διέγερσης, καθώς ο αυξημένος βαθμός κινητοποίησης της ανελαστικότητας του εδάφους, έχει ως αποτέλεσμα την μερική απομείωση των φαινομένων στην επιφάνεια.

7.2. Έδραση γέφυρας στην θέση 2 της κοιλάδας

A. Πλάτος διέγερσης $A_{max}=0.24g$

Επειδή στο κέντρο της κοιλάδας η απόκριση επηρεάζεται κατά κύριο λόγο από τα επιφανειακά κύματα, στην περίπτωση που το έδαφος είναι ανελαστικό και επομένως παρουσιάζει μεγάλη απόσβεση, τα κύματα Rayleigh δε φτάνουν στο κέντρο, με αποτέλεσμα η απόκριση να γίνεται **πρακτικά μονοδιάστατη**. Αυτό φαίνεται από τις χρονοϊστορίες των επιταχύνσεων στο **Σχήμα 7.20**. Συνεπώς, όπως φαίνεται και στα **Σχήματα 7.21 - 7.23**, η κατασκευή καταπονείται σχεδόν εξίσου με την περίπτωση της μονοδιάστατης γεωμετρίας του εδάφους. Η μόνη διαφορά που παρατηρείται είναι η αύξηση των καθιζήσεων, λόγω της ελάχιστης κατακόρυφης συνιστώσας που υπάρχει. Ο αντίστοιχος παραμορφωμένος φορέας φαίνεται στο **Σχήμα 7.24**. Αξίζει να σημειωθεί ότι η επιφάνεια του εδάφους δεν παρουσιάζει πλέον τα 'φουσκώματα' που παρουσίαζε στην περίπτωση του ελαστικού εδάφους λόγω της διάδοσης των κυμάτων Rayleigh και ο φορέας δεν έχει χάσει την συμμετρία του.

B. Πλάτος διέγερσης $A_{max}=0.50g$

Το μεγαλύτερο πλάτος της διέγερσης και συνεπώς η μεγαλύτερη κινητοποίηση της ανελαστικότητας, κάνουν το κεντρικό τμήμα της κοιλάδας ακόμα πιο 'αναίσθητο' στην ύπαρξη του δισδιάστατου αναγλύφου. Έτσι, όπως φαίνεται στις χρονοϊστορίες των **Σχημάτων 7.25-7.27** και στον παραμορφωμένο φορέα του **Σχήματος 7.28**, οι επιταχύνσεις και η καταπόνηση του φορέα πρακτικά ταυτίζεται με την περίπτωση έδρασης του σε μονοδιάστατο έδαφος. Η μόνη διαφορά που παρατηρείται και πάλι είναι μια μικρή αύξηση των καθιζήσεων.

7.3. Σεισμικές διεγέρσεις από πραγματικές καταγραφές

7.3.1. Lefkada 2003

Γέφυρα στην θέση 1

Για την διέγερση αυτή, μεγαλύτερη ενίσχυση παρουσιάζει η οριζόντια επιτάχυνση κάτω από το 1^ο θεμέλιο, αντίθετα απ' ό τι φαίνεται στο ελεύθερο πεδίο. Επειδή όμως και στην θεώρηση της μονοδιάστατης γεωμετρίας του εδάφους, η απόκριση στην επιφάνεια μεταβάλλεται λόγω της παρουσίας της ανωδομής, η σύγκριση των διαγραμμάτων με και χωρίς ανωδομή είναι μόνο ενδεικτική. Σημαντική κατακόρυφη συνιστώσα υπάρχει στην βάση του 2^{ου} θεμελίου (**Σχήμα 7.29**). Όπως και στην ανάλυση με το Ricker, έτσι κι εδώ, μεγαλύτερες ροπές παρουσιάζονται στην βάση, αλλά και στην κορυφή του 1^{ου} βάθρου, ενώ παραμένουσες ροπές και καθιζήσεις εμφανίζονται στο δεύτερο βάθρο (**Σχήματα 7.31 και 7.35**). Για την διέγερση αυτή και το παραμένον drift γίνεται αρκετά σημαντικό (1%). (**Σχήμα 7.33**). Επίσης, αναπτύσσονται σημαντικές αξονικές δυνάμεις, ιδιαίτερα στο 2^ο βάθρο, το οποίο παρουσίασε και τις μεγαλύτερες καθιζήσεις λόγω της μεγαλύτερης κατακόρυφης επιτάχυνσης με την οποία καταπονήθηκε.

Γέφυρα στην θέση 2

Όπως είναι αναμενόμενο, και για αυτήν την διέγερση η απόκριση της γέφυρας είναι πρακτικά όμοια με την περίπτωση έδρασης της σε έδαφος με μονοδιάστατη γεωμετρία. Η μόνη διαφορά είναι οι λίγο αυξημένες ροπές στις στηρίξεις των φατνωμάτων, οι οποίες οφείλονται στην ύπαρξη μικρής παρασιτικής κατακόρυφης επιτάχυνσης στις βάσεις των θεμελίων (**Σχήματα 7.37-7.39**).

7.3.2. JMA 000

Η διέγερση αυτή έχει υποκλιμάκια αναχθεί, ώστε να έχει $PGA=0.24g$ και οι ροπές που προκύπτουν να είναι μικρότερες από την ροπή αντοχής για την ανάλυση του εδάφους με την μονοδιάστατη γεωμετρία.

Γέφυρα στην θέση 1

Και για την διέγερση JMA, η παρασιτική κατακόρυφη επιτάχυνση είναι έντονη στην βάση του 2^{ου} θεμελίου (**Σχήμα 7.40**). Κατά τα υπόλοιπα, οι επιταχύνσεις είναι πρακτικά όμοιες με την περίπτωση της μονοδιάστατης γεωμετρίας του εδάφους, εκτός την χρονοϊστορία της οριζόντιας επιτάχυνσης βάση του 1^{ου} θεμελίου που είναι αρκετά πιο υψίσυχηνη. Η απόκριση πάντως της κατασκευής, όπως φαίνεται στα **Σχήματα 7.40 – 7.44**, ακολουθεί το μοτίβο που περιγράφηκε και παραπάνω, δηλαδή πολύ υψηλές ροπές στο 1^ο βάθρο και στην κορυφή του 2^{ου}, καθιζήσεις και αξονικές δυνάμεις στο 2^ο βάθρο και παραμένουσες ροπές στην βάση του. Τα drift του 2^{ου} βάθρου για την διέγερση αυτή ξεπερνούν το 1%. Οι ροπές στα 2 πρώτα φατνώματα του καταστρώματος παρουσιάζονται ιδιαίτερα αυξημένες, ενώ δημιουργούνται και παραμένουσες ροπές στις στηρίξεις των φατνωμάτων εκατέρωθεν του 2^{ου} βάθρου.

Γέφυρα στην θέση 2

Στην θέση 2 η απόκριση για την θεώρηση έδρασης της γέφυρας σε μονοδιάστατο και σε δισδιάστατο έδαφος είναι πρακτικά ίδια, με μικρές μόνο διαφορές, όπως φαίνεται στα **Σχήματα 7.45 – 7.48**.

7.3.3. Jensen 292

Γέφυρα στην θέση 1

Τα ίδια φαινόμενα που παρατηρήθηκαν και για τις παραπάνω διεγέρσεις παρατηρούνται και για την διέγερση αυτή, όπως φαίνεται στα **Σχήματα 7.49 – 7.53**. Αξίζει να σημειωθεί ότι το drift εδώ ξεπερνά το 2% για το 1^ο βάθρο και ότι η **επιπλέον καθίζηση** του 2^{ου} θεμελίου στην περίπτωση της κοιλάδας αγγίζει τα **20 cm**.

Γέφυρα στην θέση 2

Ομοίως και στην περίπτωση αυτή, η επίδραση της κοιλάδας στην απόκριση της κατασκευής δεν είναι σημαντική, όπως φαίνεται και στα **Σχήματα 7.54 – 7.57**, με μόνη διαφορά την ανάπτυξη ροπών στα βάθρα 2 και 3 και στις στηρίξεις του φατνώματος 2, οι οποίες οφείλονται στις διαφορικές καθιζήσεις που αναπτύσσει ο φορέας.

7.4. Συμπεράσματα

Συνοπτικά, η ανελαστικότητα του εδάφους ουσιαστικά εξουδετερώνει το μεγαλύτερο μέρος της επίδρασης της κοιλάδας. Ακόμα και όταν η γέφυρα είναι τοποθετημένη στην θέση 1 της κοιλάδας, δηλαδή εδράζεται σε θέσεις που στο ελεύθερο πεδίο είχαν ελαφρώς αυξημένη απόκριση, ο **κινηματικός περιορισμός που επιβάλλει το θεμέλιο, «τρώει» την επιπλέον ενίσχυση**. Μια ακόμα παρατήρηση που αφορά τις οριζόντιες επιταχύνσεις είναι ότι η οριζόντια επιτάχυνση στην βάση του 1^{ου} θεμελίου για την δισδιάστατη θεώρηση του εδάφους προκύπτει πιο υψίσυχη από ότι στα υπόλοιπα θεμέλια και την θεώρηση έδρασης σε στρώση εδάφους με σταθερό πάχος. Αυτό μπορεί να οφείλεται σε ανακλάσεις στο βράχο. Η **κατακόρυφη παρασιτική επιτάχυνση** είναι ιδιαίτερα σημαντική για όλες τις διεγέρσεις στο $x = -200$ m, δηλαδή στην βάση του 2^{ου} θεμελίου.

Ο πρώτος βασικός μηχανισμός που επιδρά στην απόκριση της γέφυρας στην **θέση 1**, όταν το έδαφος είναι ανελαστικό, είναι η επίδραση της **μεγαλύτερης σύνθετης δυσκαμψίας** του 1^{ου} θεμελίου, στην οποία οφείλονται οι **αυξημένες ροπές στο 1^ο**

βάθρο και στην κορυφή του 2^{ου} βάρου, οι οποίες είναι ταυτόχρονες με τον κύριο παλμό της οριζόντιας διέγερσης, ακριβώς όπως και στην περίπτωση του ελαστικού εδάφους που εξετάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Η επίδραση αυτή της δυσκαμψίας μπορεί να αντιμετωπιστεί με την **τοποθέτηση εφεδράνου** μεταξύ του 1^{ου} βάρου και του καταστρώματος.

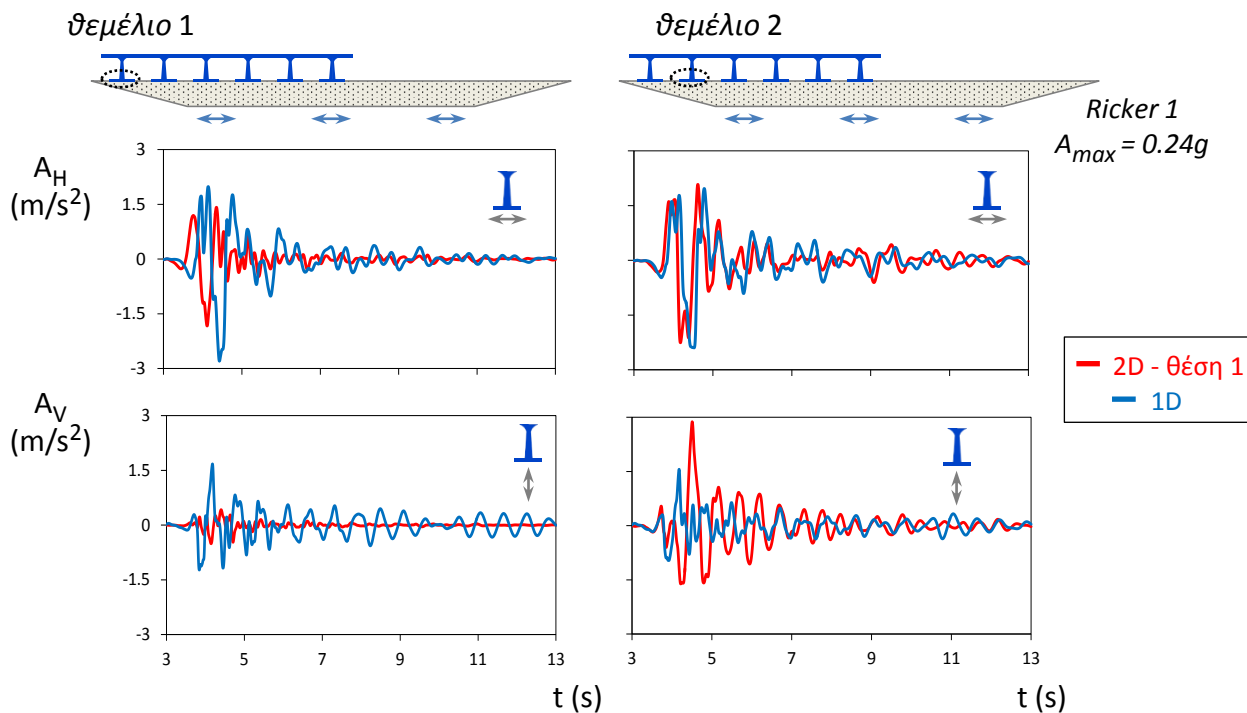
Ο δεύτερος βασικός μηχανισμός είναι η σημαντική **παρασιτική κατακόρυφη συνιστώσα που διεγείρει το 2^ο θεμέλιο**. Η συνιστώσα αυτή προκαλεί **επιπλέον μόνιμες καθιζήσεις**, οι οποίες έχουν ως συνέπεια την παραμόρφωση του φορέα και την **ανάπτυξη παραμενουσών ροπών** σε αυτόν. Η κατακόρυφη επιτάχυνση έχει επίσης ως συνέπεια την ανάπτυξη αξονικών δυνάμεων στα βάρη, όπως και στην περίπτωση του ελαστικού φορέα. Μόνο που τώρα, λόγω της πλαστικοποίησης του εδάφους παρουσιάζονται μειωμένες, ενώ τελικά υπάρχει και μια παραμένουσα δύναμη λόγω της μόνιμης καθίζησης.

Όταν η γέφυρα τοποθετείται στην **θέση 2** της κοιλάδας, η απόκρισή της είναι πρακτικά μονοδιάστατη. Οι μόνες διαφοροποιήσεις που παρατηρήθηκαν ήταν σε διεγέρσεις οι οποίες εμφάνισαν μικρές κατακόρυφες επιταχύνσεις σε κάποιο από τα θεμέλια, με αποτέλεσμα την δημιουργία καθιζήσεων, και συνεπώς παραμορφώσεων του φορέα, και την ανάπτυξη εντατικών μεγεθών.

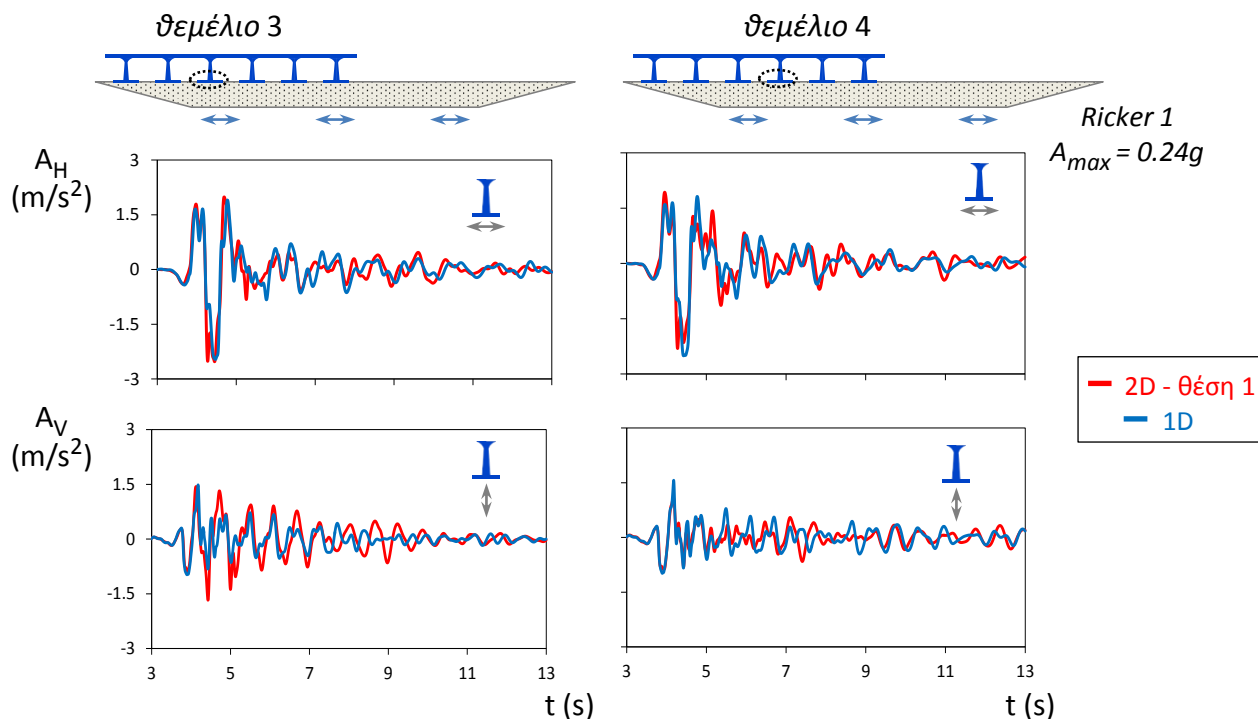
Αξιοσημείωτο είναι ότι τα αποτελέσματα παρουσιάζουν τα παραπάνω κοινά σημεία για **όλες** τις διεγέρσεις που χρησιμοποιήθηκαν, και παρά τις διαφορές τους τόσο σε συχνοτικό περιεχόμενο, όσο σε λεπτομέρειες της διέγερσης, προκάλεσαν μικροδιαφορές μόνο στην απόκριση.

Συμπερασματικά, ο ρόλος της μη γραμμικότητας του εδάφους λειτουργεί ανακουφιστικά στην απόκριση της κατασκευής που εδράζεται στην κοιλάδα. Παρ' όλα αυτά, δεν την αναιρεί εντελώς, και θα πρέπει να λαμβάνεται υπ' όψιν στο σχεδιασμό. Για να προκύψουν όμως πιο συγκεκριμένα συμπεράσματα, θα πρέπει να γίνει περαιτέρω διερεύνηση στο τι θα συνέβαινε, αν ο φορέας είχε εφέδρανα στα ακρόβαθρα, αν η συμπεριφορά του δεν ήταν ελαστική κλπ.

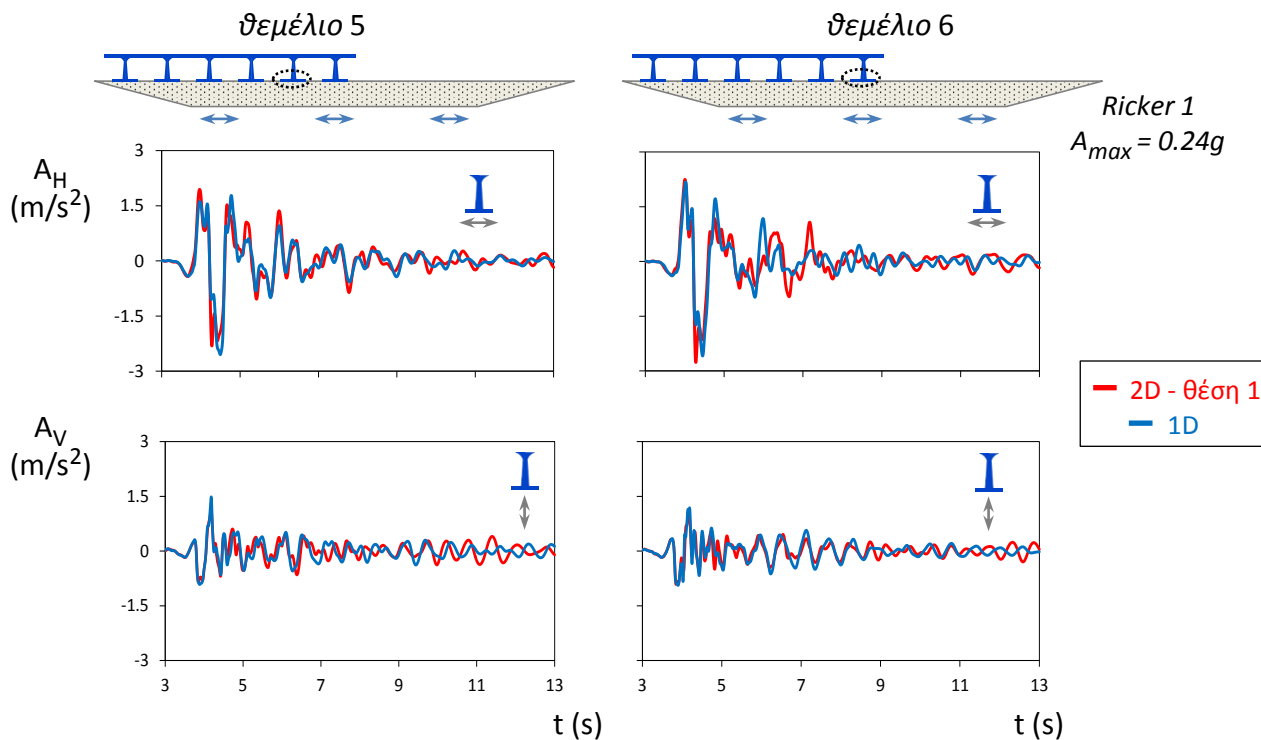
Σχήματα κεφαλαίου 7



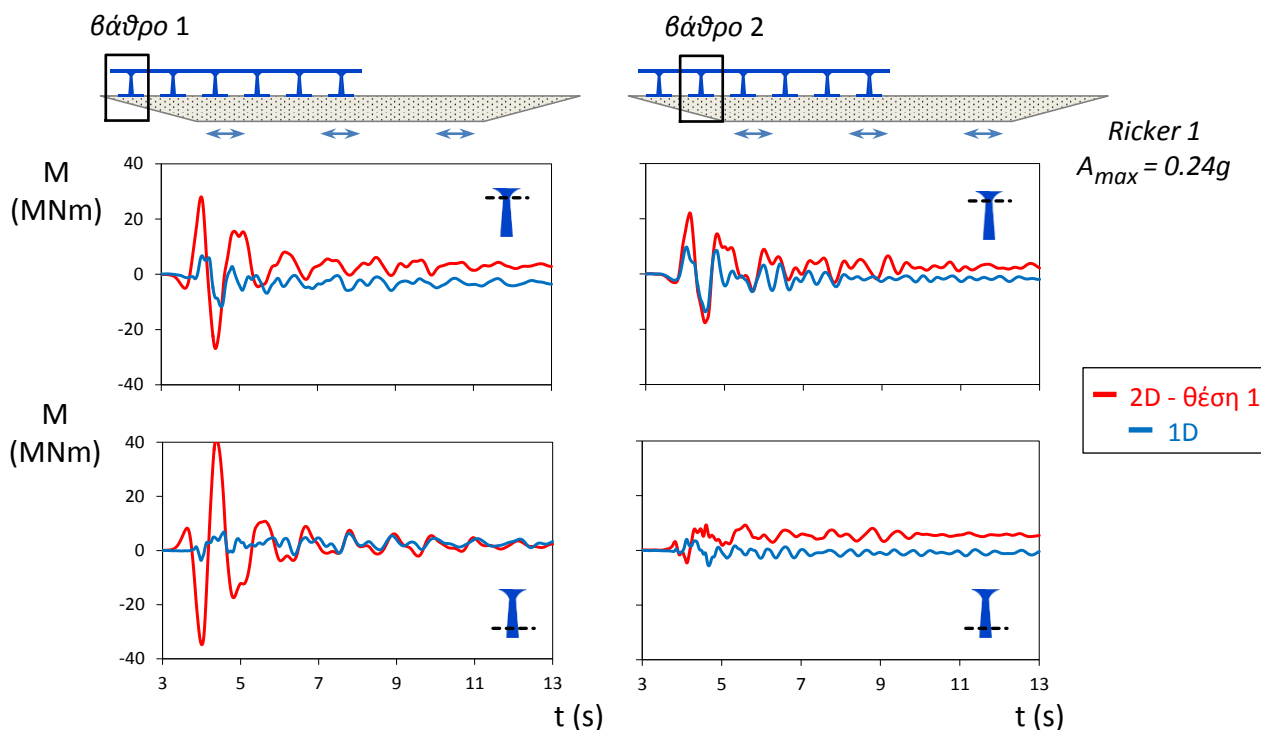
Σχήμα 7.1: Χρονοϊστορίες οριζόντιας και παρασιτικής επιτάχυνσης στις βάσεις των θεμελίων 1 και 2. Μελέτη περίπτωσης: Διέγερση Ricker 1 με $PGA=0.24g$, θεώρηση συνεχούς καταστρώματος, γέφυρα στη θέση 1, θεώρηση μη γραμμικού εδάφους.



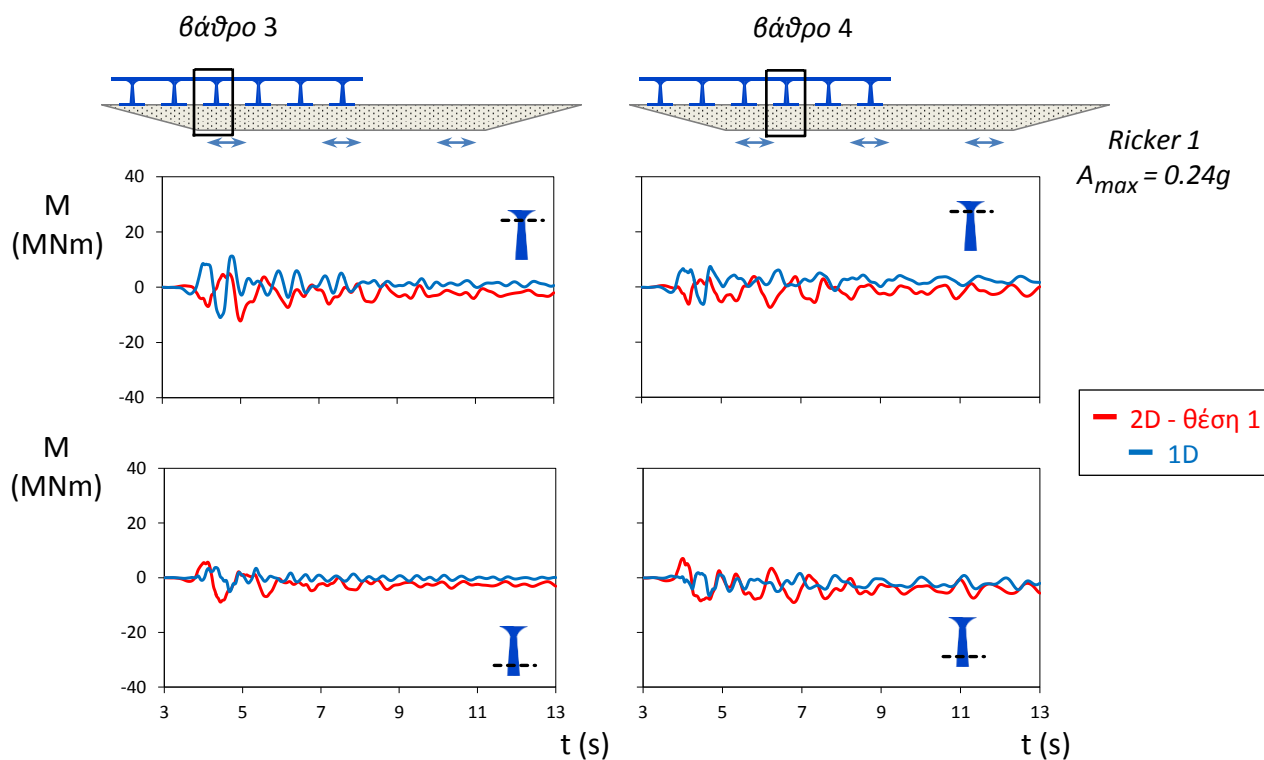
Σχήμα 7.2: Χρονοϊστορίες οριζόντιας και παρασιτικής επιτάχυνσης στις βάσεις των θεμελίων 3 και 4. Μελέτη περίπτωσης: Διέγερση Ricker 1 με $PGA=0.24g$, θεώρηση συνεχούς καταστρώματος, γέφυρα στη θέση 1, θεώρηση μη γραμμικού εδάφους.



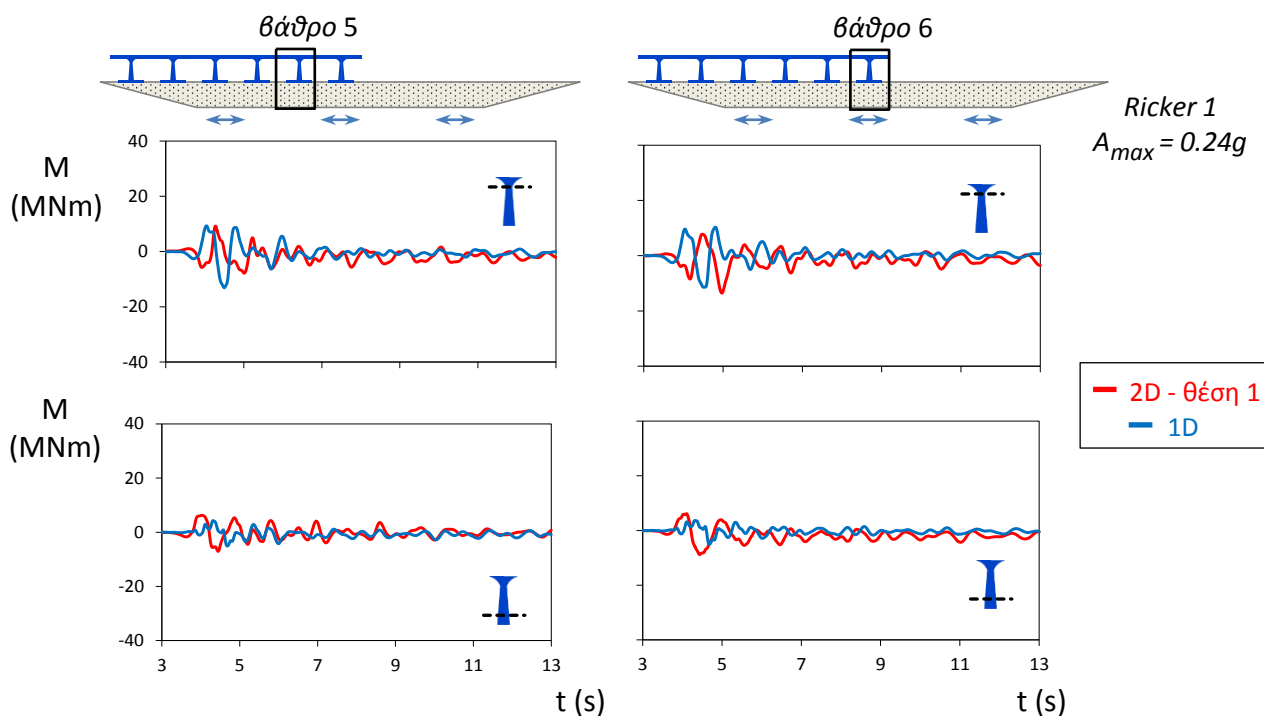
Σχήμα 7.3: Χρονοϊστορίες οριζόντιας και παρασιτικής επιτάχυνσης στις βάσεις των θεμελίων 5 και 6. Μελέτη περίπτωσης: Διέγερση Ricker 1 με $PGA=0.24g$, θεώρηση συνεχούς καταστρώματος, γέφυρα στη θέση 1, θεώρηση μη γραμμικού εδάφους.



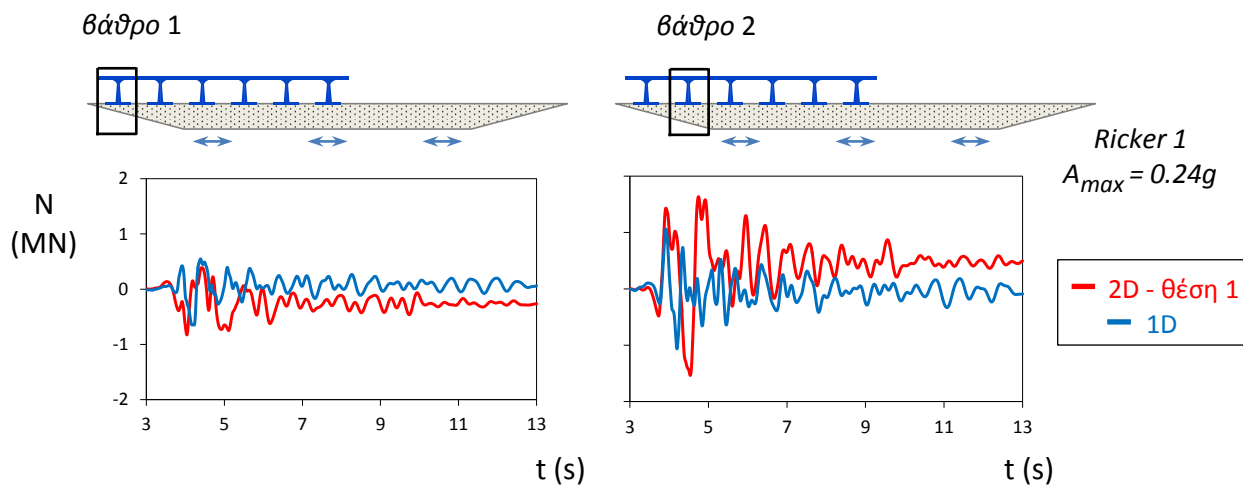
Σχήμα 7.4: Χρονοϊστορίες καμπτικών ροπών στα βάθρα 1 και 2 του φορέα. Μελέτη περίπτωσης: Διέγερση Ricker 1 με $PGA=0.24g$, θεώρηση συνεχούς καταστρώματος, γέφυρα στη θέση 1, θεώρηση μη γραμμικού εδάφους.



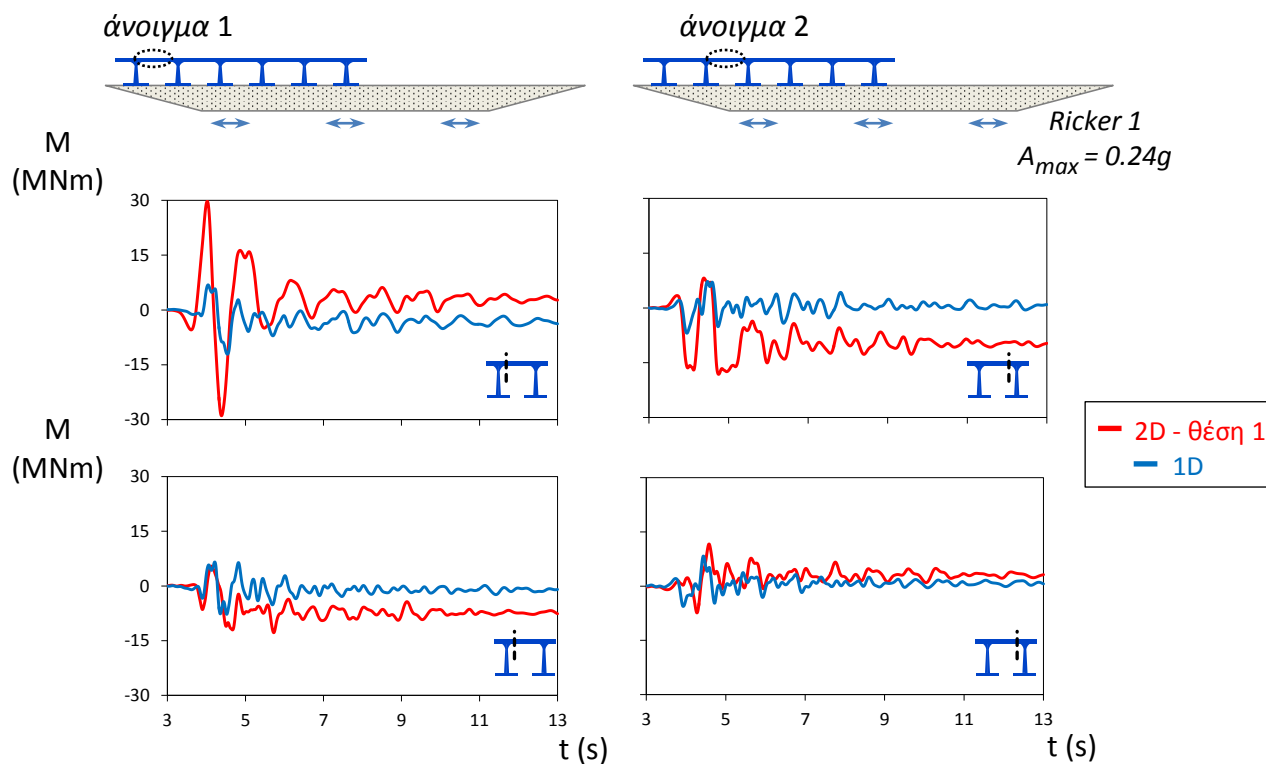
Σχήμα 7.5: Χρονοϊστορίες καμπτικών ροπών στα βάρθρα 3 και 4 του φορέα. Μελέτη περίπτωσης: Διέγερση Ricker 1 με $PGA=0.24g$, θεώρηση συνεχούς καταστρώματος, γέφυρα στη θέση 1, θεώρηση μη γραμμικού εδάφους.



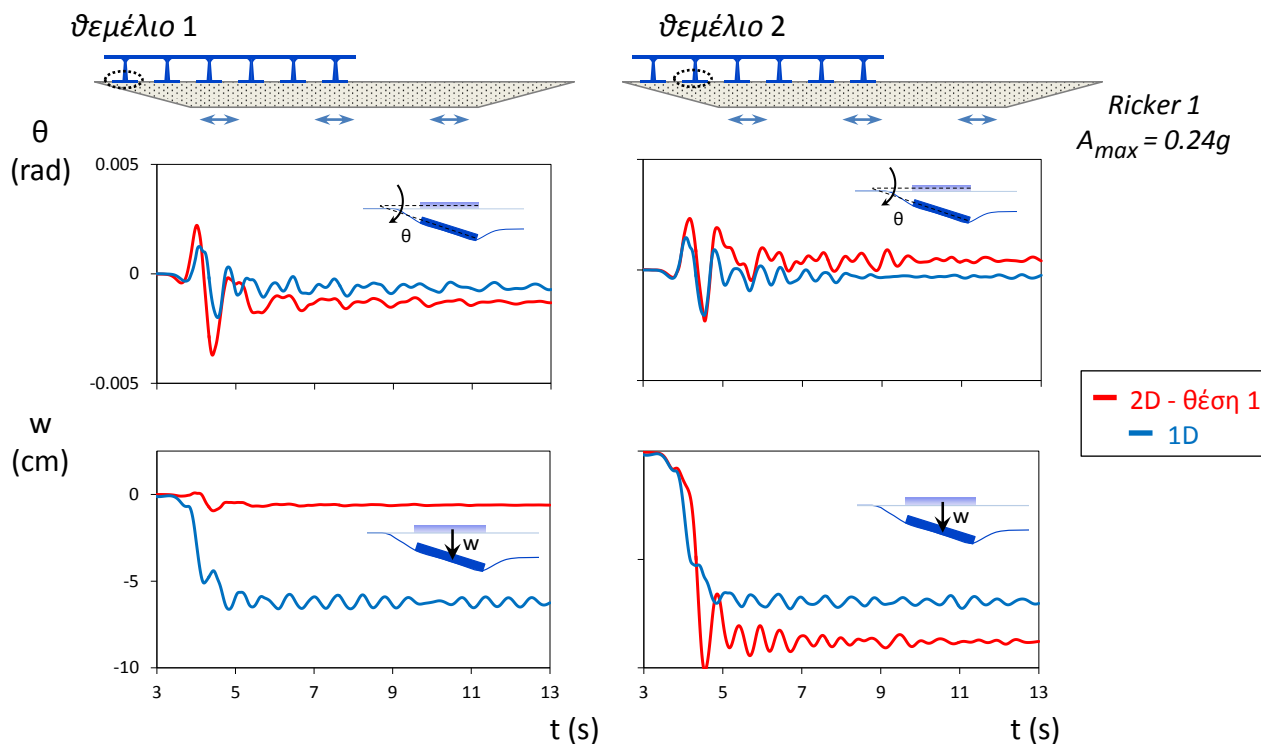
Σχήμα 7.6: Χρονοϊστορίες καμπτικών ροπών στα βάρθρα 5 και 6 του φορέα. Μελέτη περίπτωσης: Διέγερση Ricker 1 με $PGA=0.24g$, θεώρηση συνεχούς καταστρώματος, γέφυρα στη θέση 1, θεώρηση μη γραμμικού εδάφους.



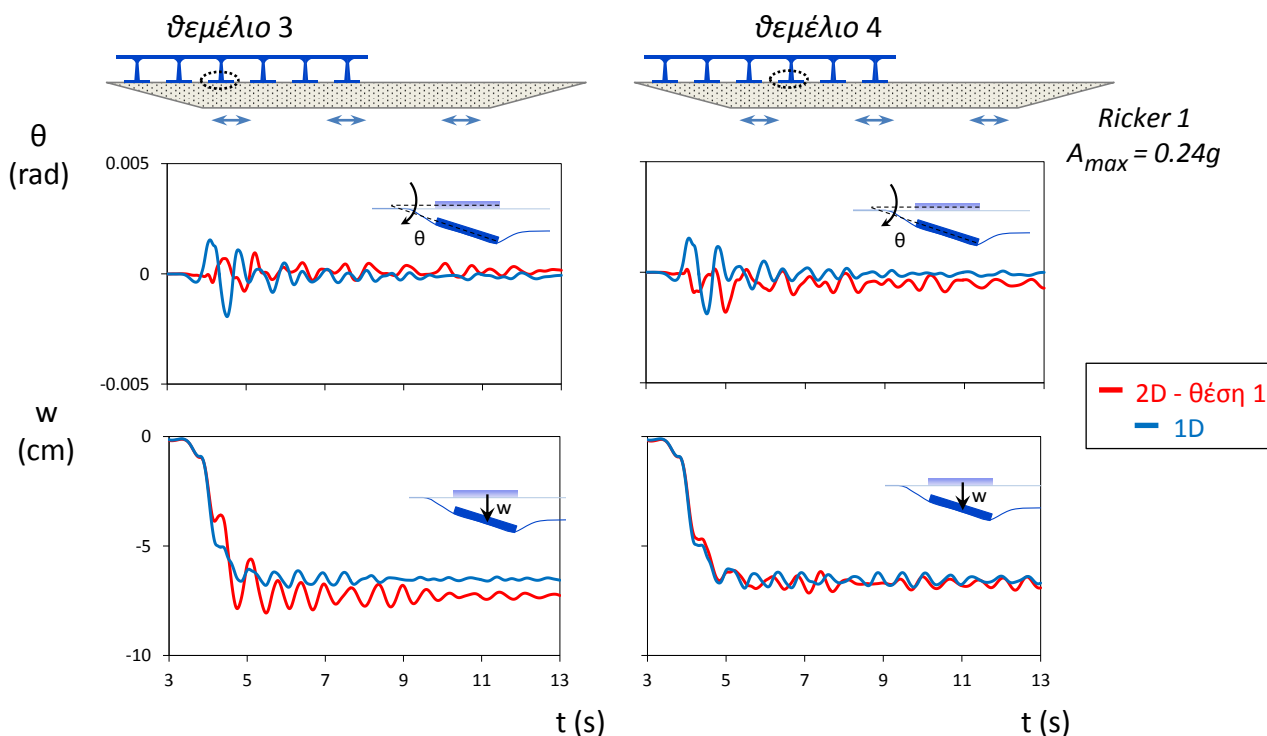
Σχήμα 7.7: Χρονοϊστορίες αξονικών δυνάμεων στα βάθρα 1 και 2 του φορέα. Μελέτη περίπτωσης: Διέγερση Ricker 1 με $PGA=0.24g$, θεώρηση συνεχούς καταστρώματος, γέφυρα στη θέση 1, θεώρηση μη γραμμικού εδάφους.



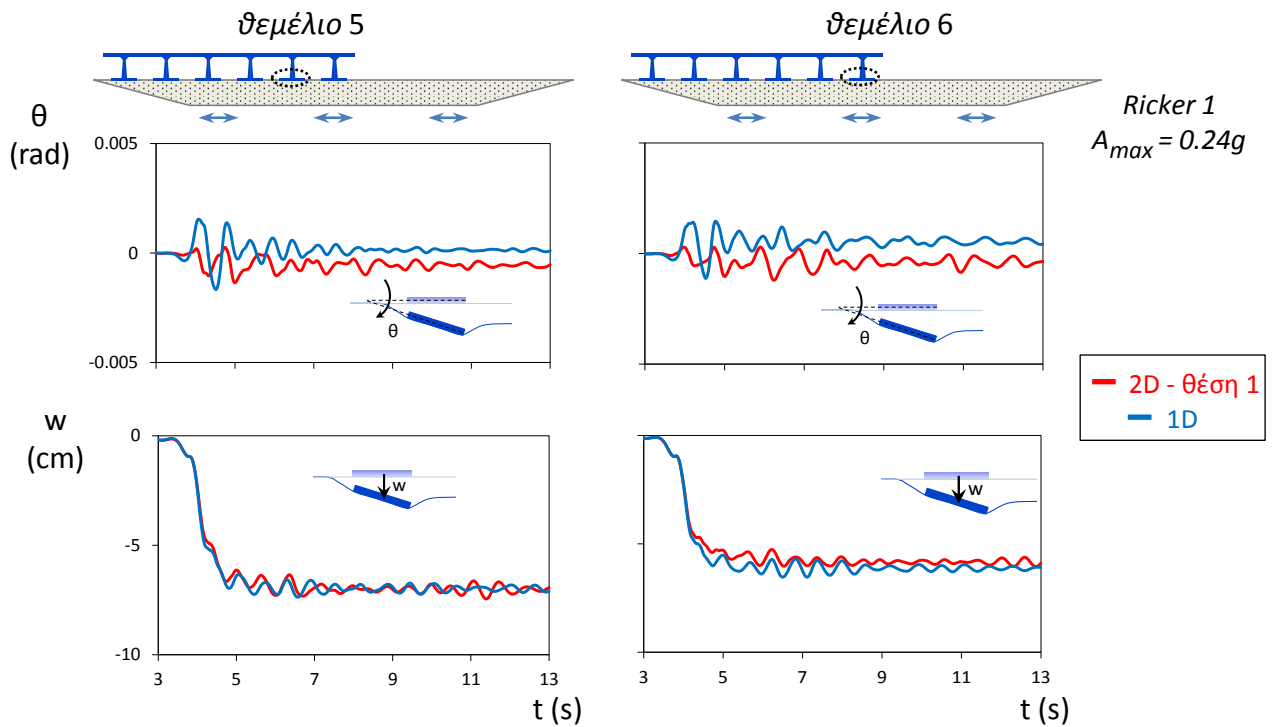
Σχήμα 7.8: Χρονοϊστορίες καμπτικών ροπών στηρίξεων στα ανοίγματα 1 και 2 του φορέα. Μελέτη περίπτωσης: Διέγερση Ricker 1 με $PGA=0.24g$, θεώρηση συνεχούς καταστρώματος, γέφυρα στη θέση 1, θεώρηση μη γραμμικού εδάφους.



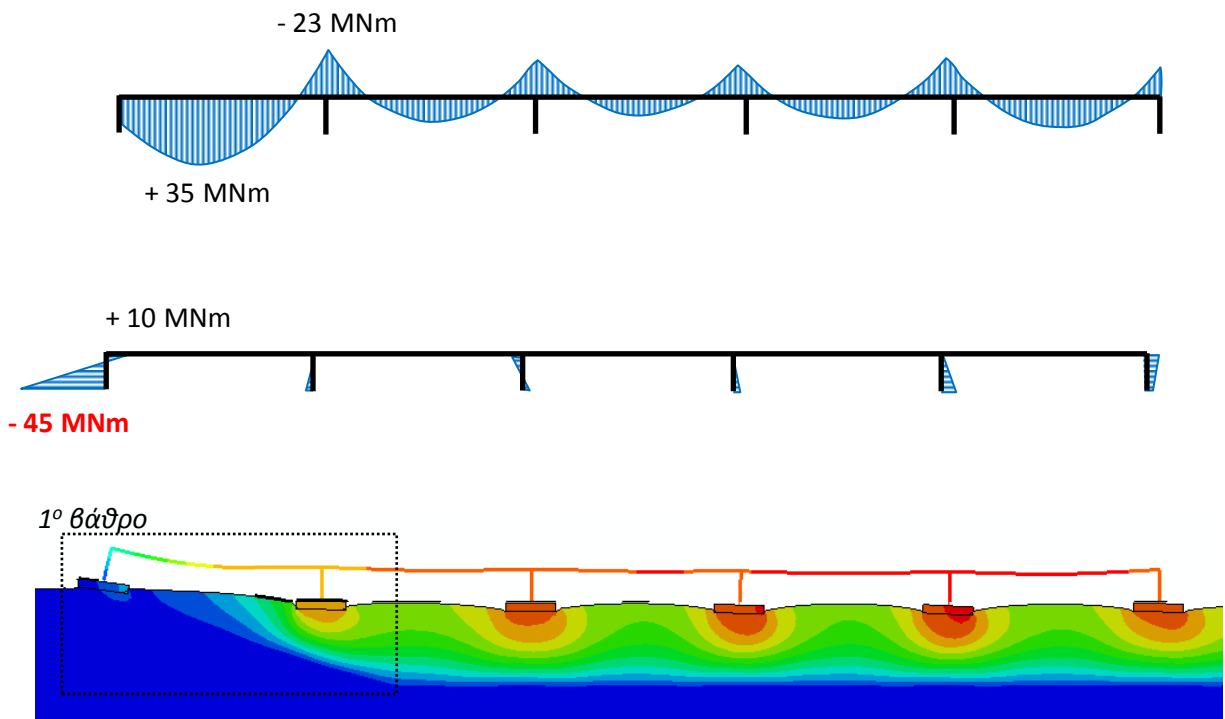
Σχήμα 7.9: Χρονοϊστορίες στροφών και καθιζήσεων στα θεμέλια 1 και 2 του φορέα. Μελέτη περίπτωσης: Διέγερση Ricker 1 με $PGA=0.24g$, θεώρηση συνεχούς καταστρώματος, γέφυρα στη θέση 1, θεώρηση μη γραμμικού εδάφους.



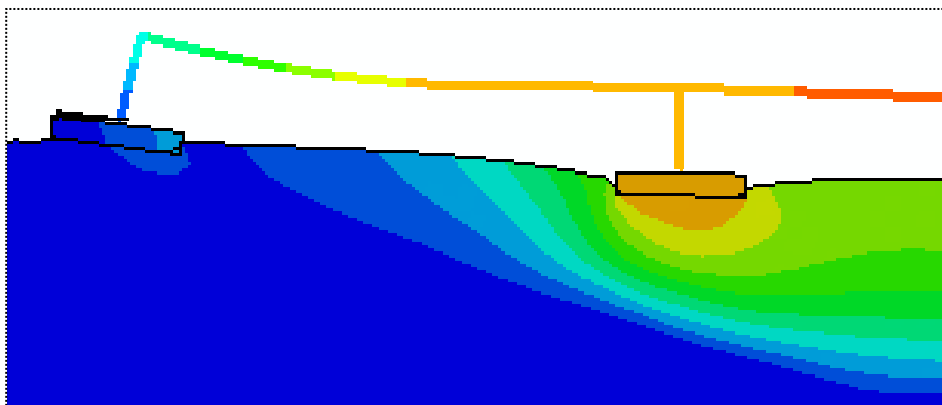
Σχήμα 7.10: Χρονοϊστορίες στροφών και καθιζήσεων στα θεμέλια 3 και 4 του φορέα. Μελέτη περίπτωσης: Διέγερση Ricker 1 με $PGA=0.24g$, θεώρηση συνεχούς καταστρώματος, γέφυρα στη θέση 1, θεώρηση μη γραμμικού εδάφους.



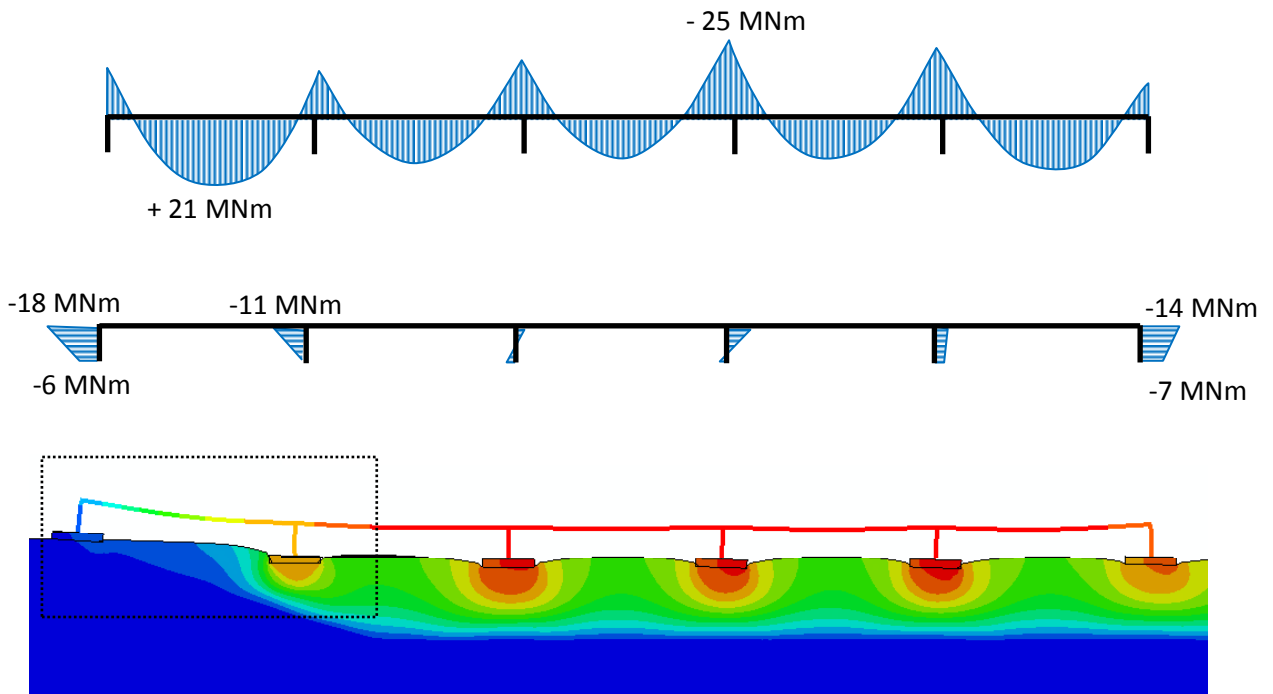
Σχήμα 7.11: Χρονοϊστορίες στροφών και καθιζήσεων στα θεμέλια 5 και 6 του φορέα. Μελέτη περίπτωσης: Διέγερση Ricker 1 με $PGA=0.24g$, θεώρηση συνεχούς καταστρώματος, γέφυρα στη θέση 1, θεώρηση μη γραμμικού εδάφους.



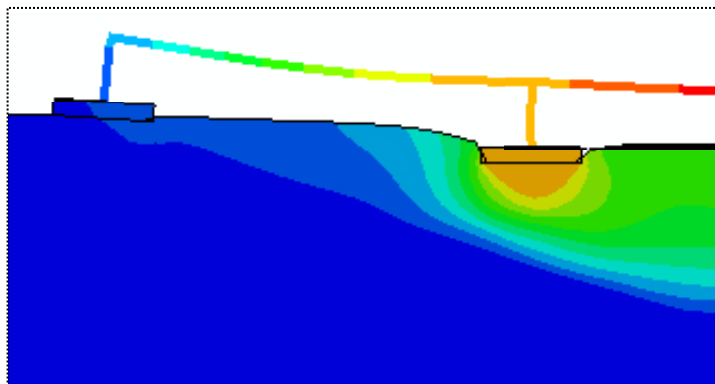
Σχήμα 7.12(α): Διάγραμμα καμπτικών ροπών και παραμορφωμένος φορέας τη στιγμή της μέγιστης καταπόνησης του 1^{ου} βάθρου ($t=4.375s$). Μελέτη περίπτωσης: Διέγερση Ricker 1 με $PGA=0.24g$, θεώρηση συνεχούς καταστρώματος, γέφυρα στη θέση 1, θεώρηση μη γραμμικού εδάφους.



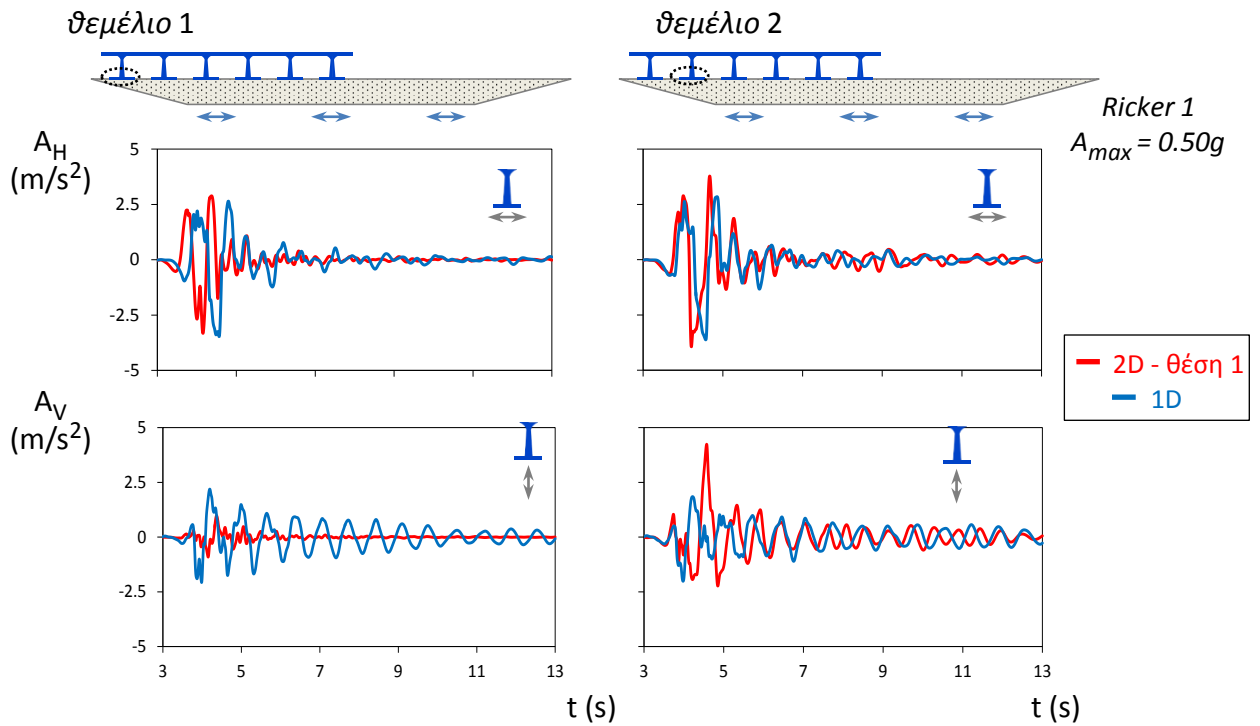
Σχήμα 7.12(β): Λεπτομέρεια παραμορφωμένου φορέα.



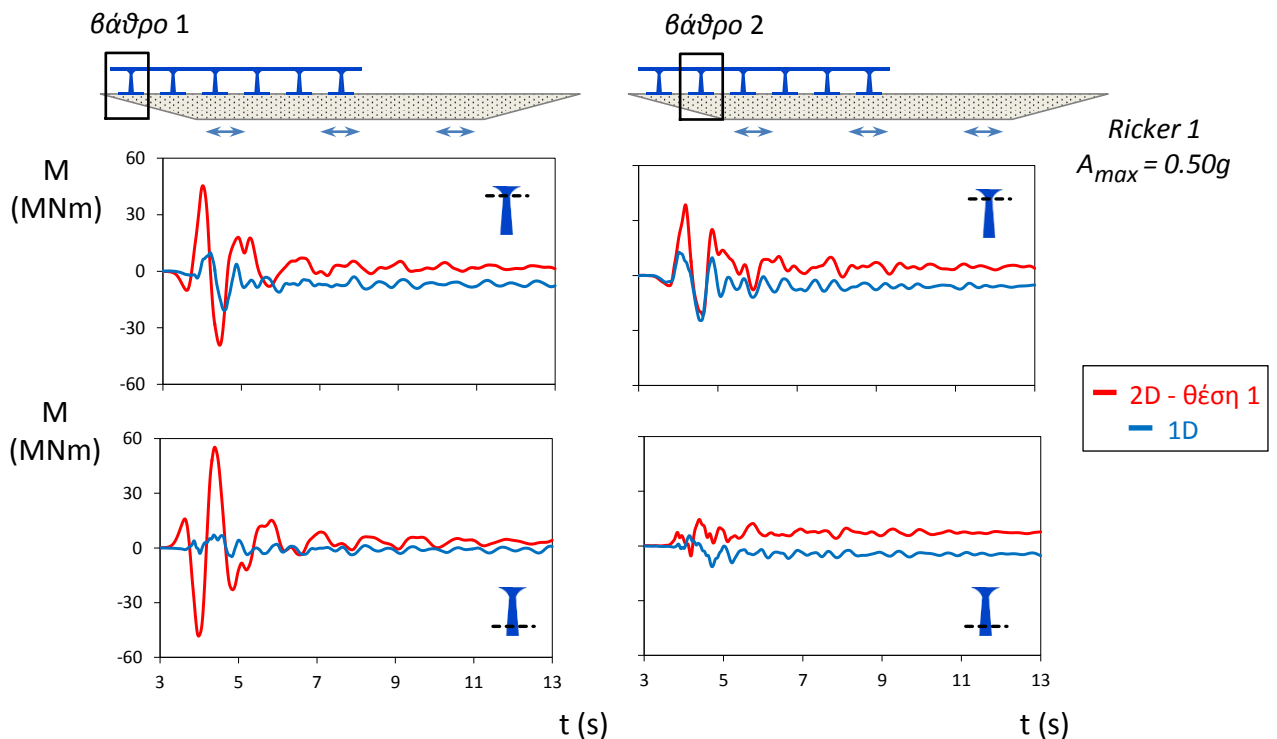
Σχήμα 7.13(α): Διάγραμμα καμπτικών ροπών και παραμορφωμένος φορέας **μετά το τέλος της διέγερσης**. Μελέτη περίπτωσης: Διέγερση Ricker 1 με $PGA=0.24g$, θεώρηση συνεχούς καταστρώματος, γέφυρα στη θέση 1, θεώρηση μη γραμμικού εδάφους.



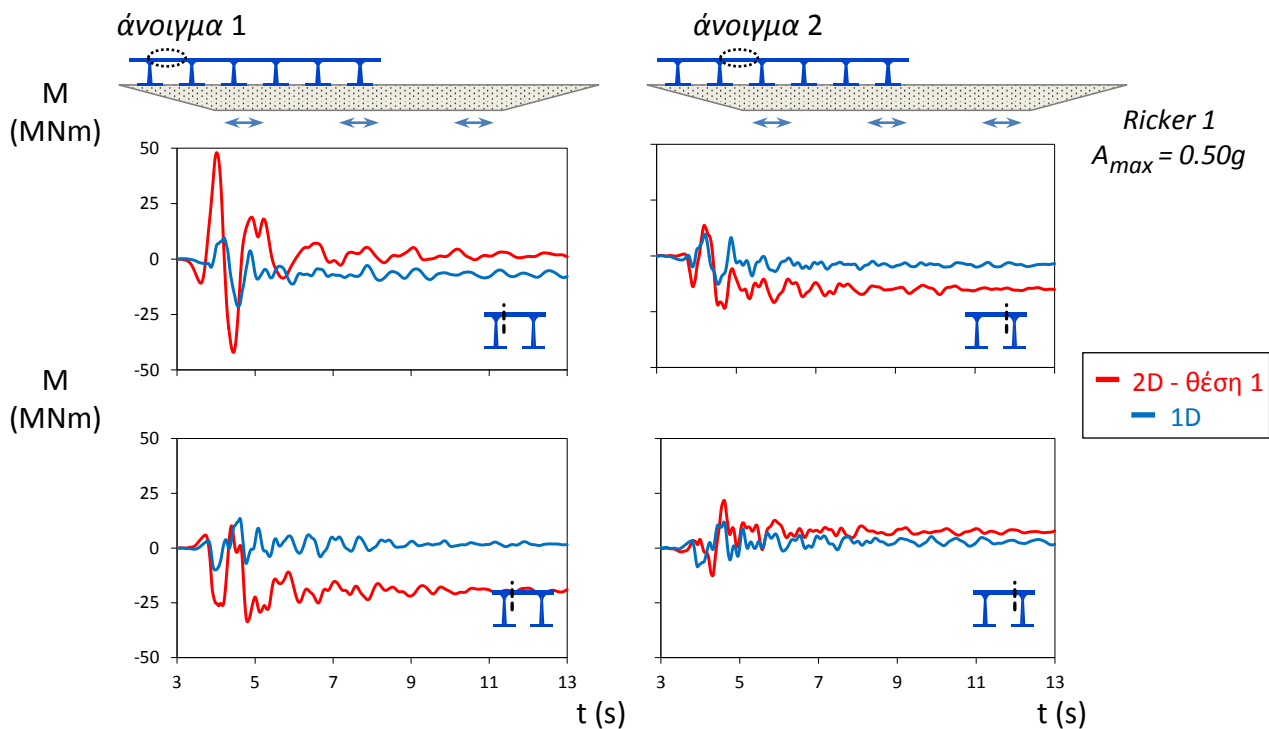
Σχήμα 7.13(β): Λεπτομέρεια παραμορφωμένου φορέα.



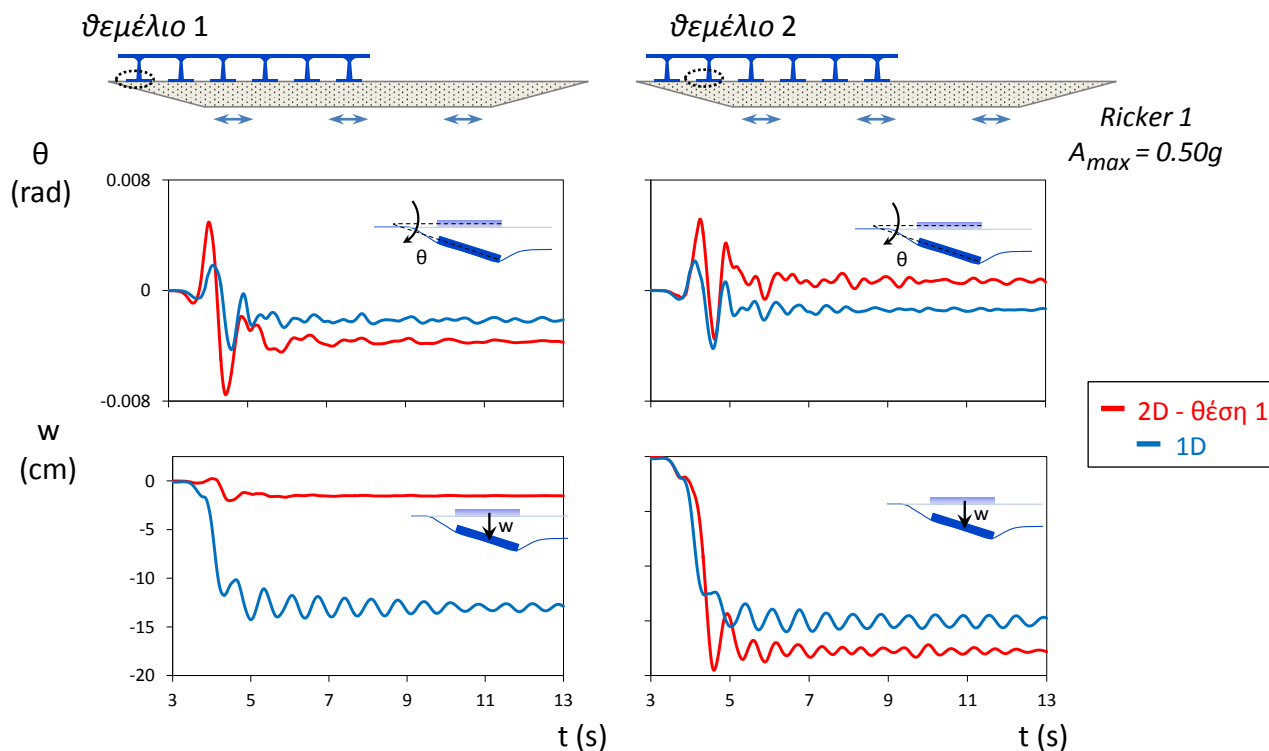
Σχήμα 7.14: Χρονοϊστορίες οριζόντιας και παρασιτικής επιτάχυνσης στις βάσεις των θεμελίων 1 και 2. Μελέτη περίπτωσης: Διέγερση Ricker 1 με $PGA=0.50g$, θεώρηση συνεχούς καταστρώματος, γέφυρα στη θέση 1, θεώρηση μη γραμμικού εδάφους.



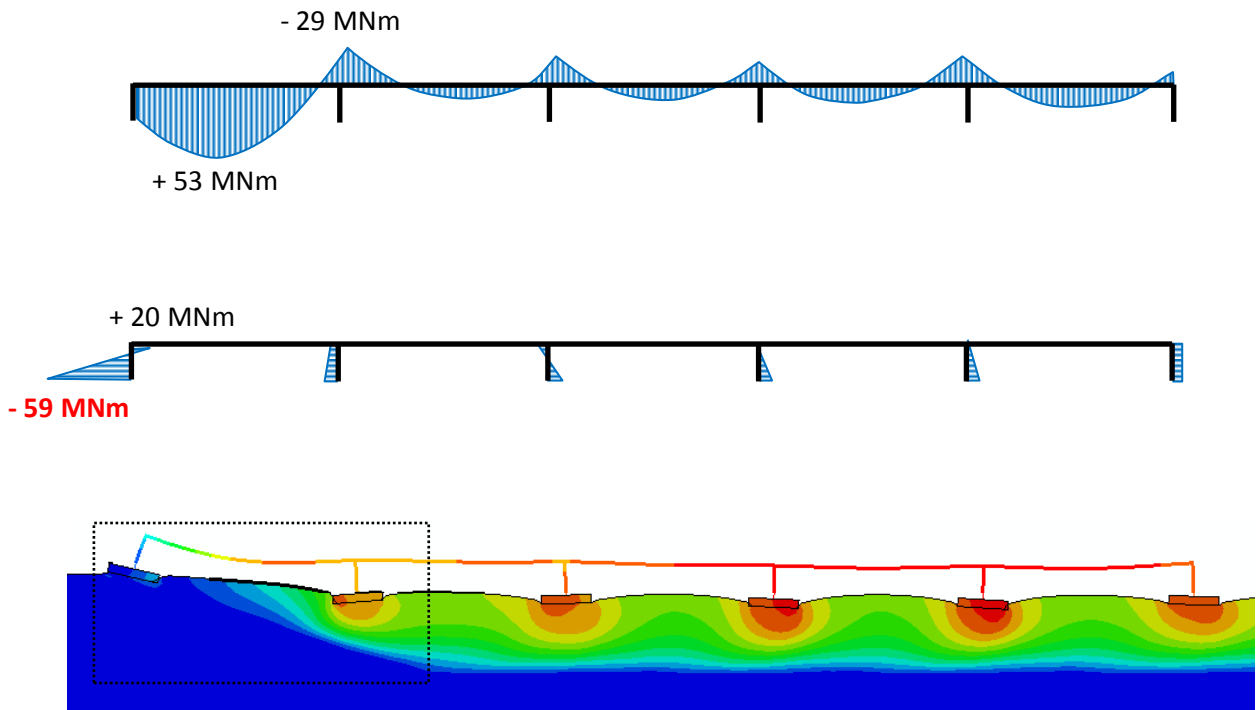
Σχήμα 7.15: Χρονοϊστορίες καμπτικών ροπών στα βάθρα 1 και 2 του φορέα. Μελέτη περίπτωσης: Διέγερση Ricker 1 με $PGA=0.50g$, θεώρηση συνεχούς καταστρώματος, γέφυρα στη θέση 1, θεώρηση μη γραμμικού εδάφους.



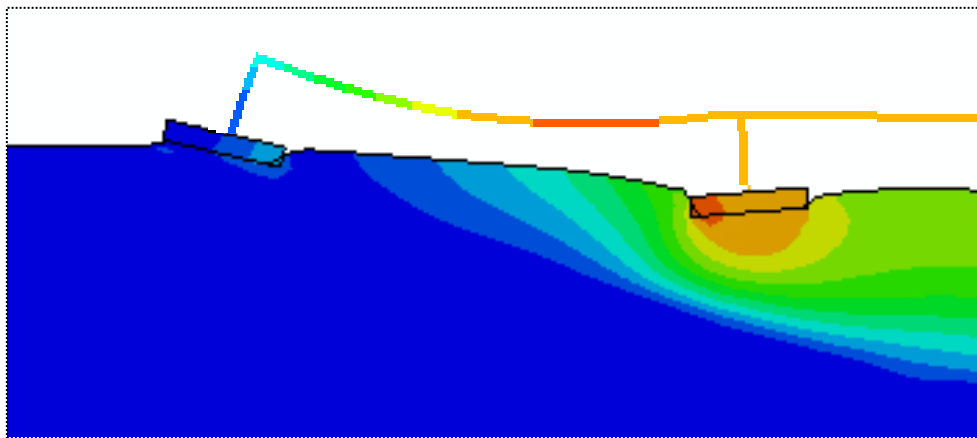
Σχήμα 7.16: Χρονοϊστορίες καμπτικών ροπών στηρίξεων στα ανοίγματα 1 και 2 του φορέα. Μελέτη περίπτωσης: Διέγερση Ricker 1 με $PGA=0.50g$, θεώρηση συνεχούς καταστρώματος, γέφυρα στη θέση 1, θεώρηση μη γραμμικού εδάφους.



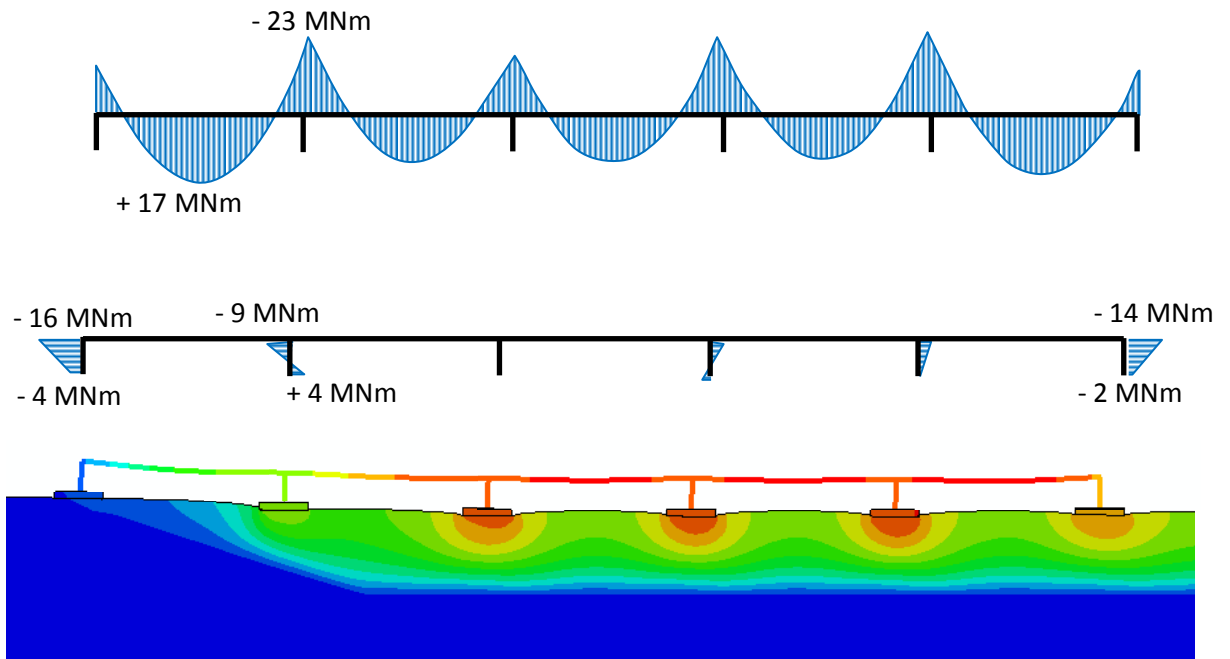
Σχήμα 7.17: Χρονοϊστορίες στροφών και καθιζήσεων στα θεμέλια 1 και 2 του φορέα. Μελέτη περίπτωσης: Διέγερση Ricker 1 με $PGA=0.50g$, θεώρηση συνεχούς καταστρώματος, γέφυρα στη θέση 1, θεώρηση μη γραμμικού εδάφους.



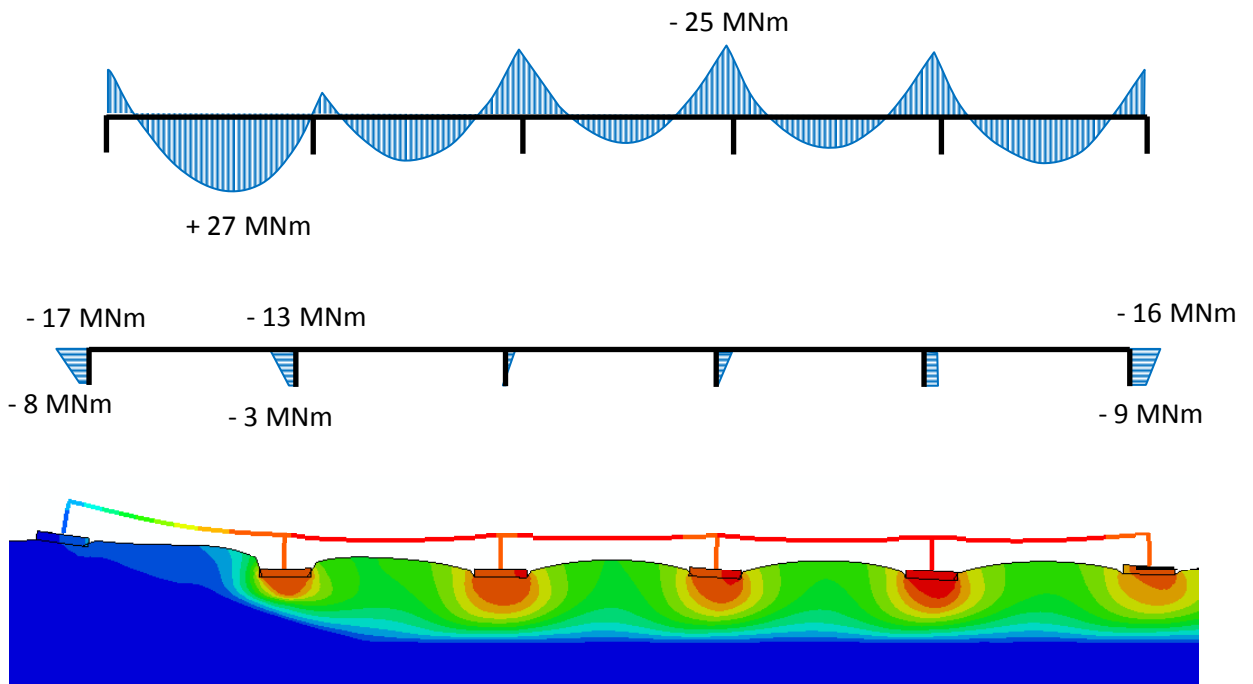
Σχήμα 7.18(α): Διάγραμμα καμπτικών ροπών και παραμορφωμένος φορέας τη στιγμή της μέγιστης καταπόνησης του 1^{ου} βάθρου ($t=4.375s$). Μελέτη περίπτωσης: Διέγερση Ricker 1 με $PGA=0.50g$, θεώρηση συνεχούς καταστρώματος, γέφυρα στη θέση 1, θεώρηση ελαστικού εδάφους.



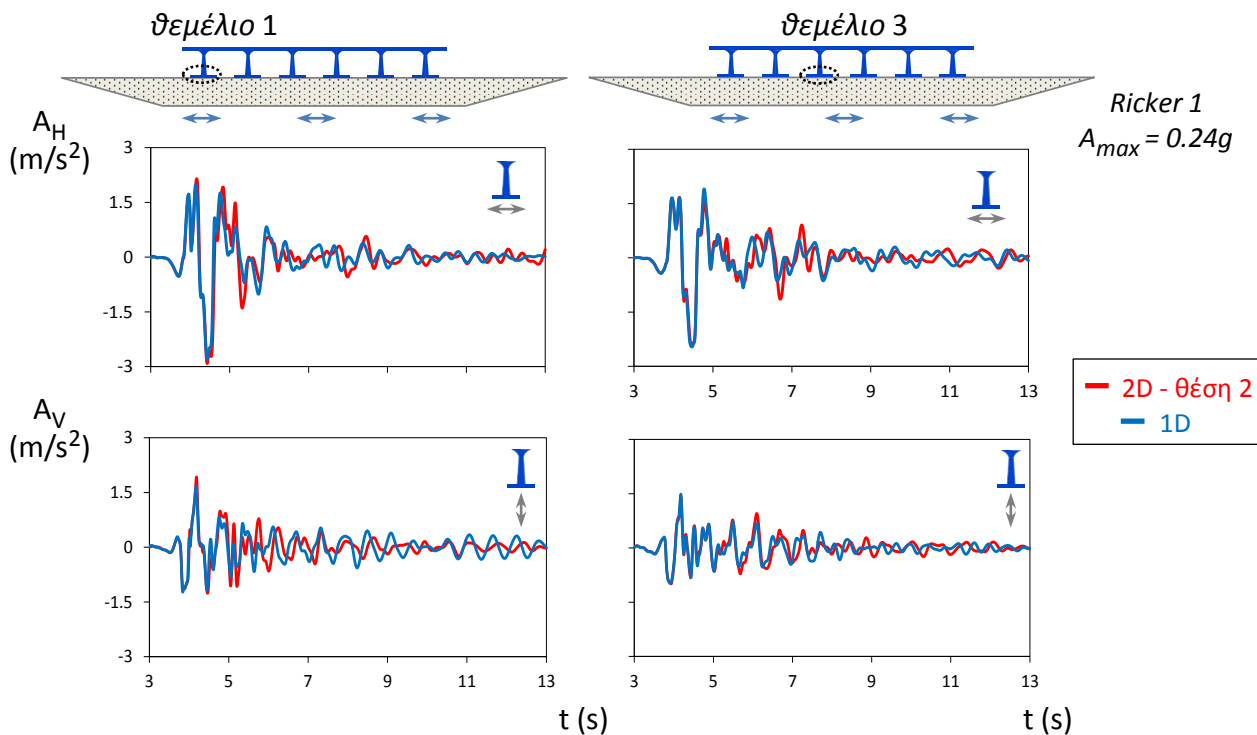
Σχήμα 7.18(β): Λεπτομέρεια παραμορφωμένου φορέα.



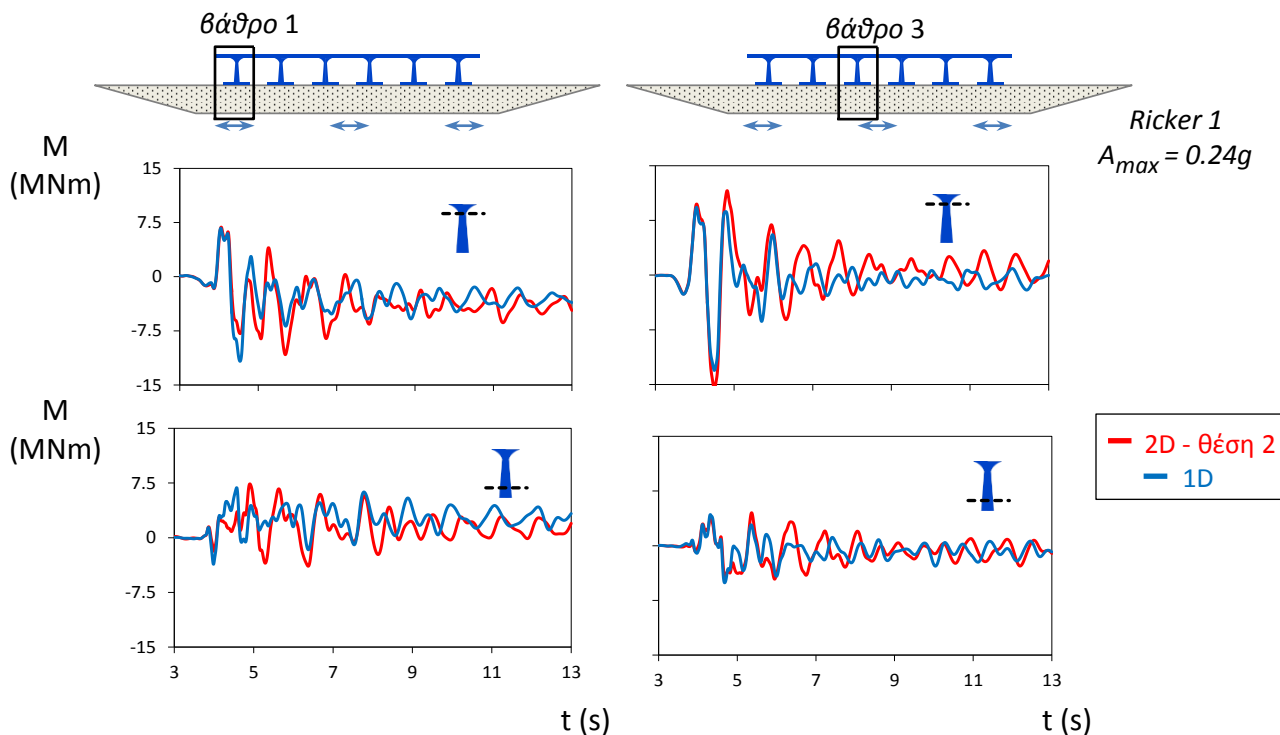
Σχήμα 7.19(α): Διάγραμμα καμπτικών ροπών και παραμορφωμένος φορέας **πριν την έναρξη της διέγερσης**. Μελέτη περίπτωσης: Θεώρηση συνεχούς καταστρώματος, γέφυρα στη θέση 1, θεώρηση μη γραμμικού εδάφους.



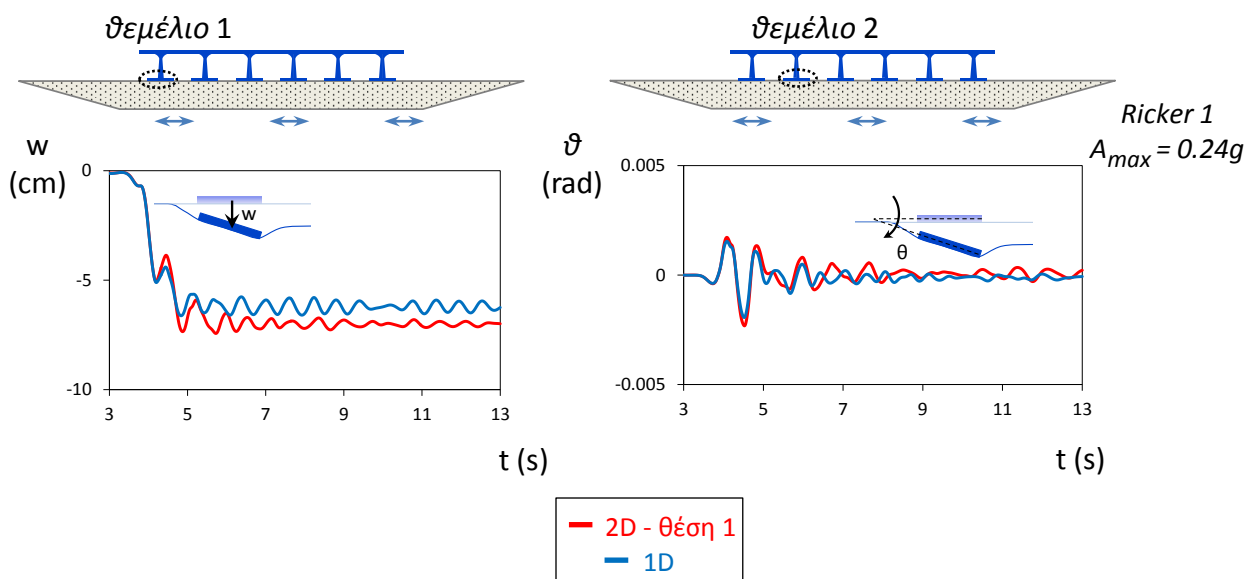
Σχήμα 7.19(β): Διάγραμμα καμπτικών ροπών και παραμορφωμένος φορέας **μετά το τέλος της διέγερσης**. Μελέτη περίπτωσης: Διέγερση Ricker 1 με $\text{PGA}=0.50\text{g}$, θεώρηση συνεχούς καταστρώματος, γέφυρα στη θέση 1, θεώρηση ελαστικού εδάφους.



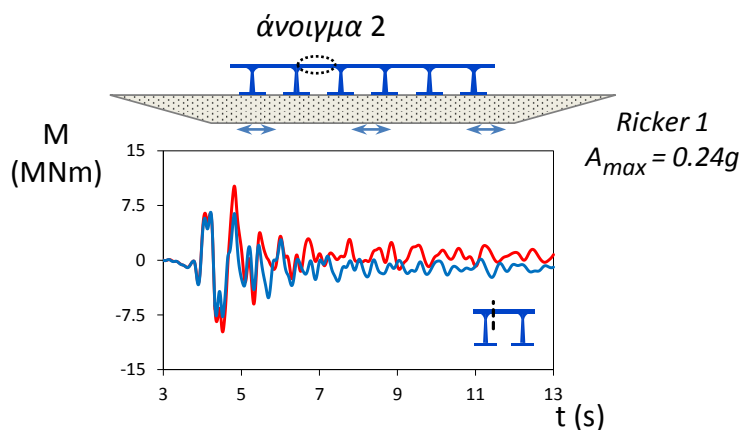
Σχήμα 7.20: Χρονοϊστορίες οριζόντιας και παρασιτικής κατακόρυφης επιτάχυνσης στις βάσεις των θεμελίων 1 και 3. Μελέτη περίπτωσης: Διέγερση Ricker 1 με $PGA=0.24g$, θεώρηση συνεχούς καταστρώματος, **γέφυρα στη θέση 2**, θεώρηση μη γραμμικού εδάφους.



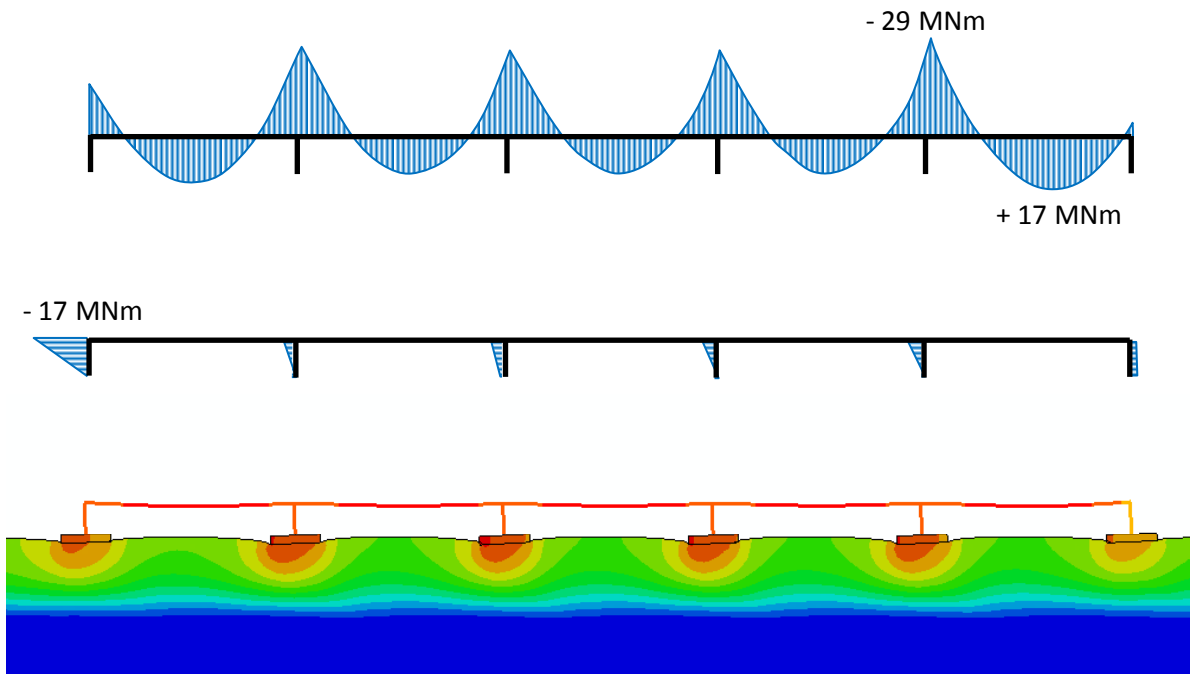
Σχήμα 7.21: Χρονοϊστορίες καμπτικών ροπών στα βάθρα 1 και 3 του φορέα. Μελέτη περίπτωσης: Διέγερση Ricker 1 με $PGA=0.24g$, θεώρηση συνεχούς καταστρώματος, **γέφυρα στη θέση 2**, θεώρηση μη γραμμικού εδάφους.



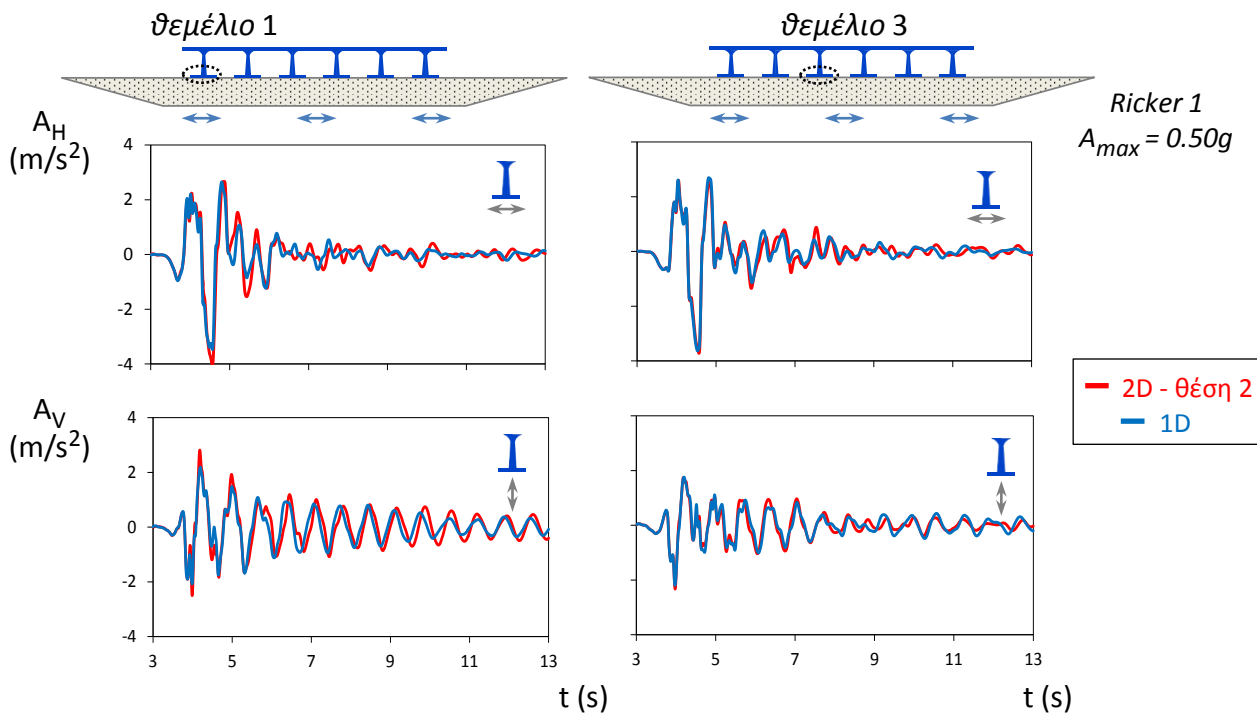
Σχήμα 7.22: Χρονοϊστορίες καθίζησης του 1^{ου} και στροφής του 3^{ου} θεμελίου και ροπή του 2^{ου} ανοίγματος. Μελέτη περίπτωσης: Διέγερση Ricker 1 με $PGA=0.24g$, θεώρηση συνεχούς καταστρώματος, γέφυρα στη θέση 2, θεώρηση μη γραμμικού εδάφους.



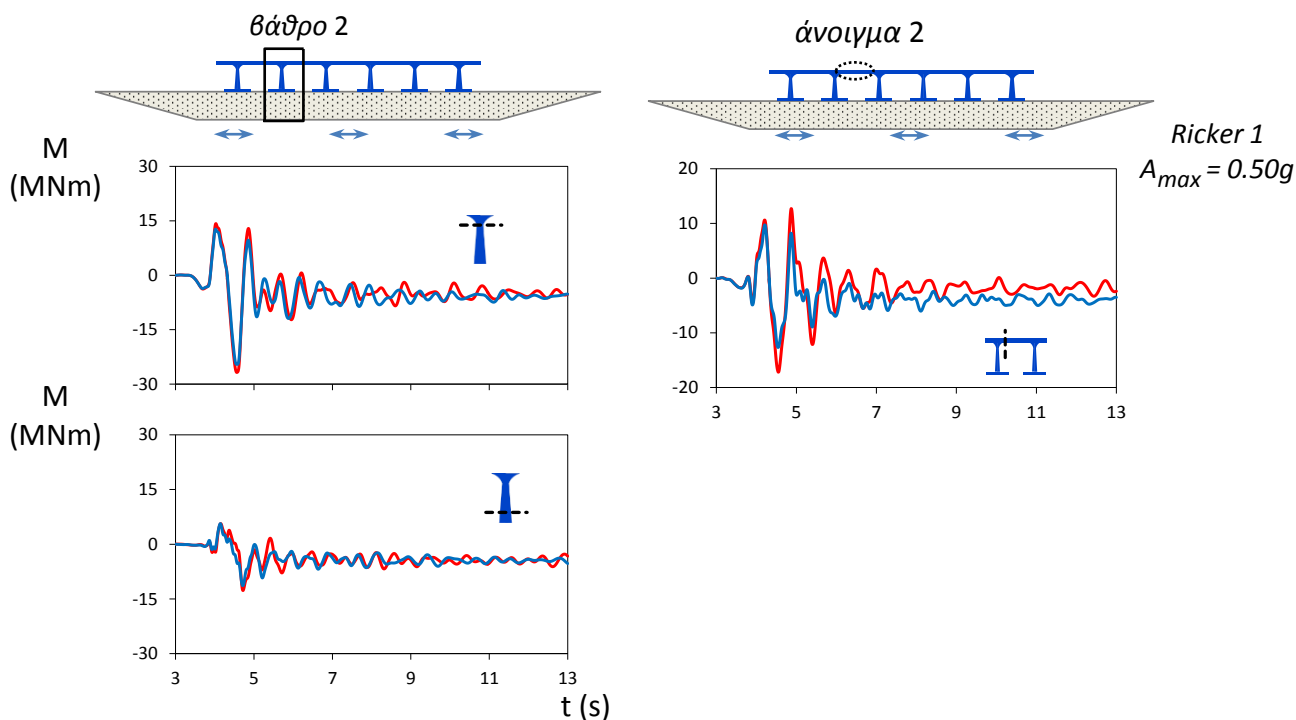
Σχήμα 7.23: Χρονοϊστορία ροπής του 2^{ου} ανοίγματος. Μελέτη περίπτωσης: Διέγερση Ricker 1 με $PGA=0.24g$, θεώρηση συνεχούς καταστρώματος, γέφυρα στη θέση 2, θεώρηση μη γραμμικού εδάφους.



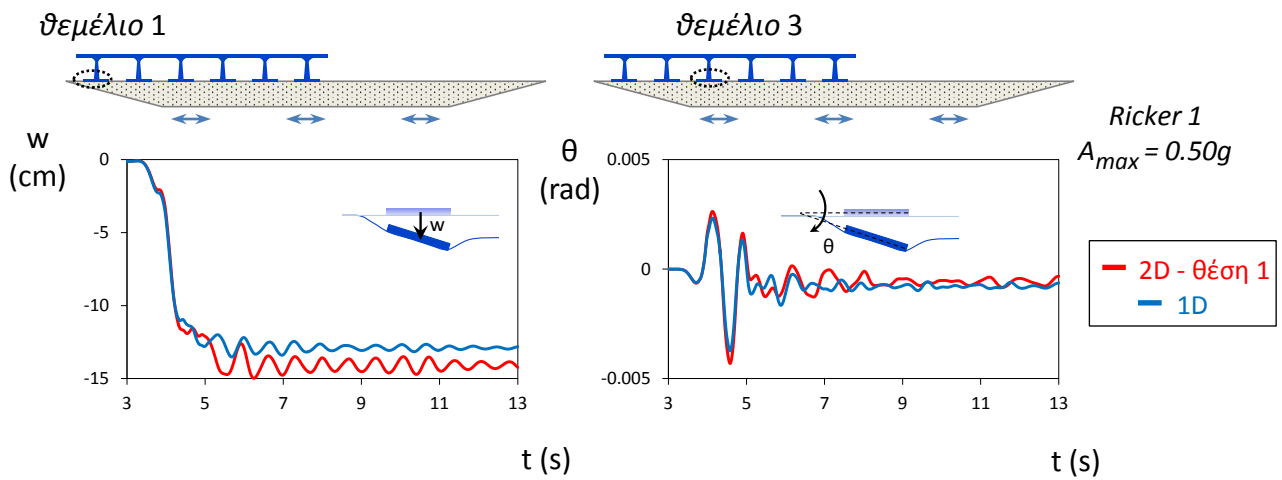
Σχήμα 7.24: Διάγραμμα καμπτικών ροπών και παραμορφωμένος φορέας τη στιγμή $t=4.050s$. Μελέτη περίπτωσης: Διέγερση Ricker 1 με $PGA=0.24g$, θεώρηση συνεχούς καταστρώματος, **γέφυρα στη θέση 2**, θεώρηση μη γραμμικούεδάφους.



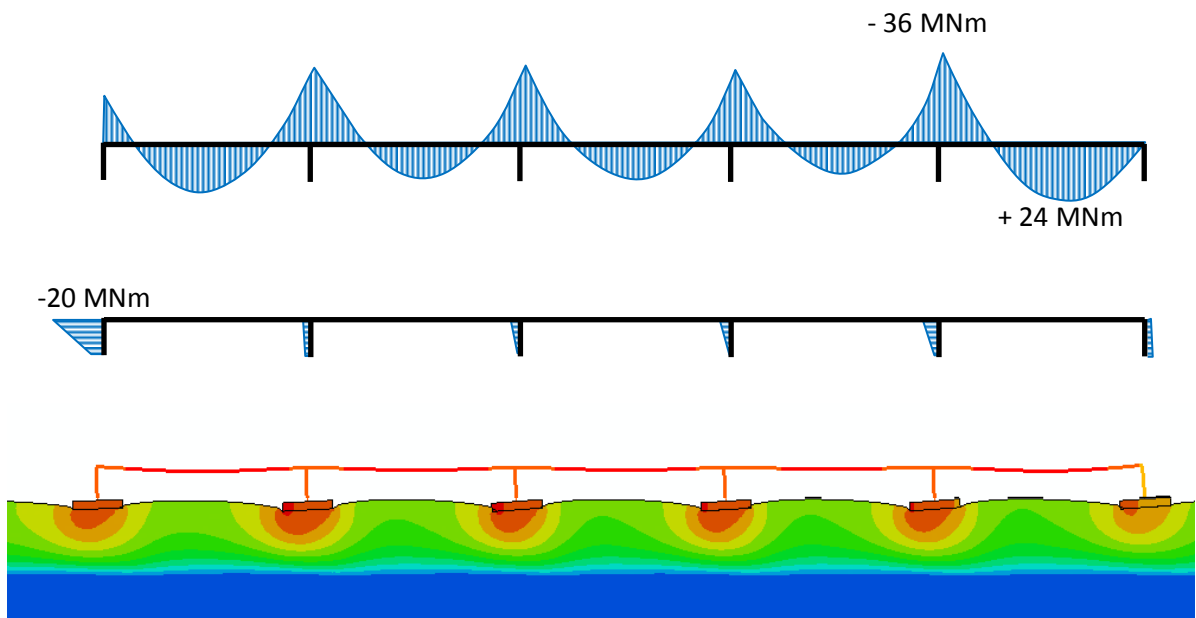
Σχήμα 7.25: Χρονοϊστορίες οριζόντιας και παρασιτικής κατακόρυφης επιτάχυνσης στις βάσεις των θεμελίων 1 και 3. Μελέτη περίπτωσης: Διέγερση Ricker 1 με $PGA=0.50g$, θεώρηση συνεχούς καταστρώματος, γέφυρα στη θέση 2, θεώρηση μη γραμμικού εδάφους.



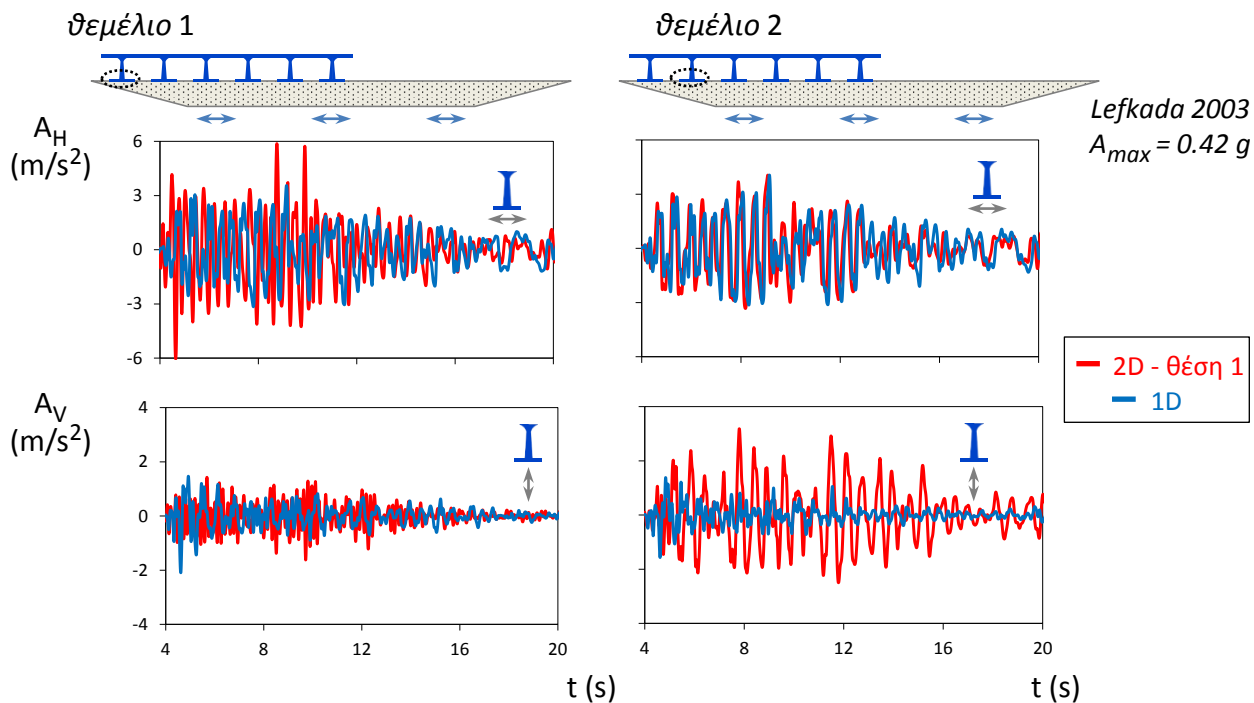
Σχήμα 7.26: Χρονοϊστορίες καμπτικών ροπών στο βάθρο 2 και το φάντωμα 2 του φορέα. Μελέτη περίπτωσης: Διέγερση Ricker 1 με $PGA=0.50g$, θεώρηση συνεχούς καταστρώματος, γέφυρα στη θέση 2, θεώρηση μη γραμμικού εδάφους.



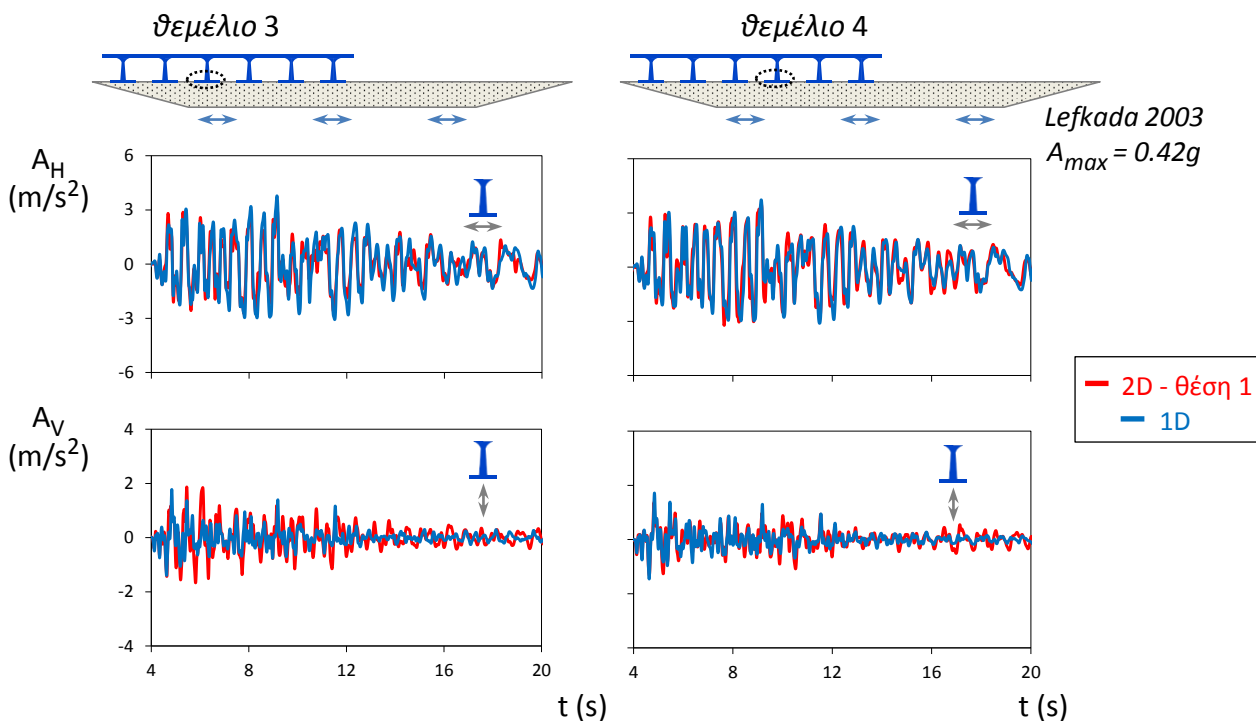
Σχήμα 7.27: Χρονοϊστορίες καθίζησης του 1^{ου} και στροφής του 3^{ου} θεμελίου. Μελέτη περίπτωσης: Διέγερση Ricker 1 με $PGA=0.50g$, θεώρηση συνεχούς καταστρώματος, γέφυρα στη θέση 2, θεώρηση μη γραμμικού εδάφους.



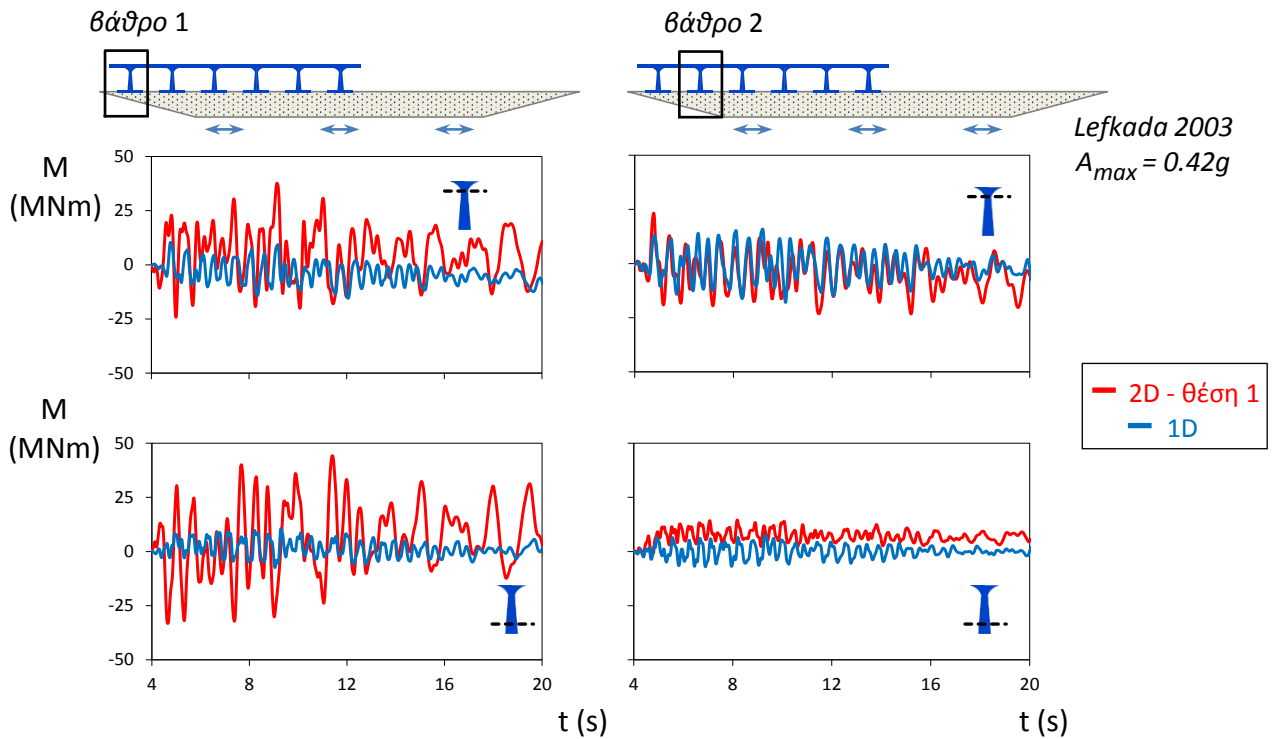
Σχήμα 7.28: Διάγραμμα καμπτικών ροπών και παραμορφωμένος φορέας τη στιγμή $t=4.200s$ Μελέτη περίπτωσης: Διέγερση Ricker 1 με $PGA=0.50g$, θεώρηση συνεχούς καταστρώματος, γέφυρα στη θέση 2, θεώρηση μη γραμμικού εδάφους.



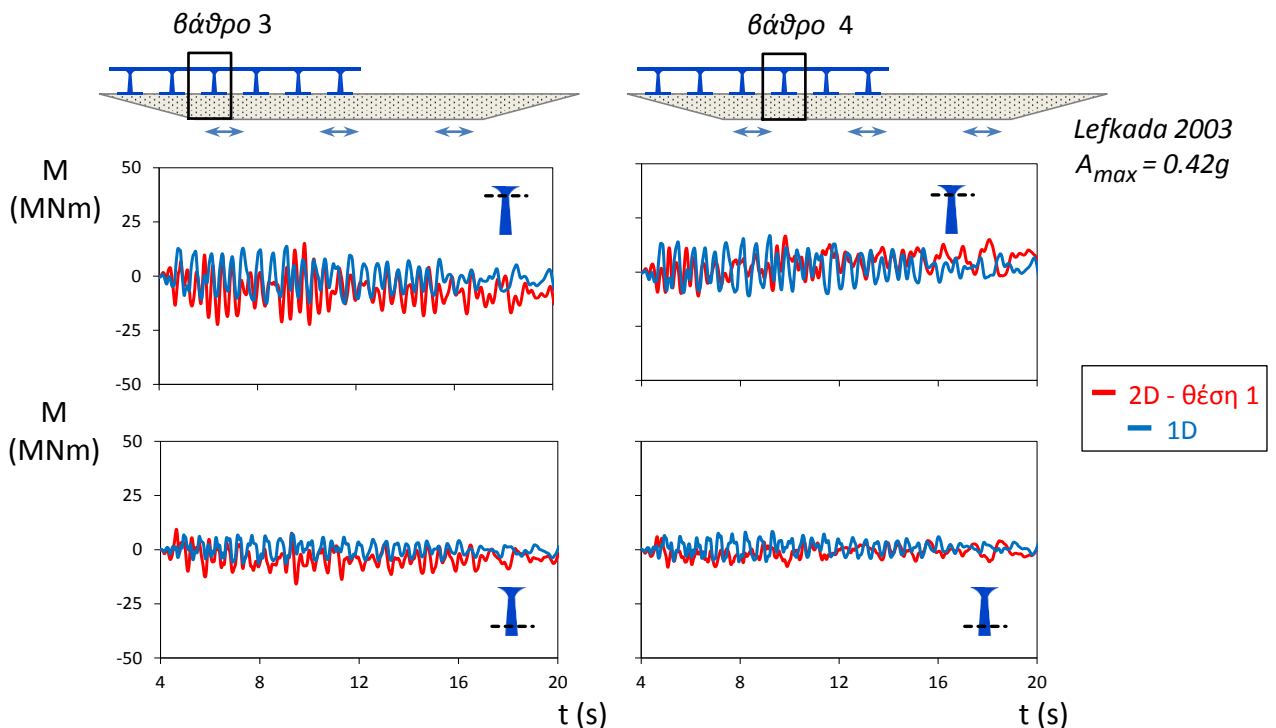
Σχήμα 7.29: Χρονοϊστορίες οριζόντιας και παρασιτικής κατακόρυφης επιτάχυνσης στις βάσεις των θεμελίων 1 και 2. Μελέτη περίπτωσης: Διέγερση Lefkada 2003 (PGA=0.42g), θεώρηση συνεχούς καταστρώματος, γέφυρα στη θέση 1, θεώρηση μη γραμμικού εδάφους.



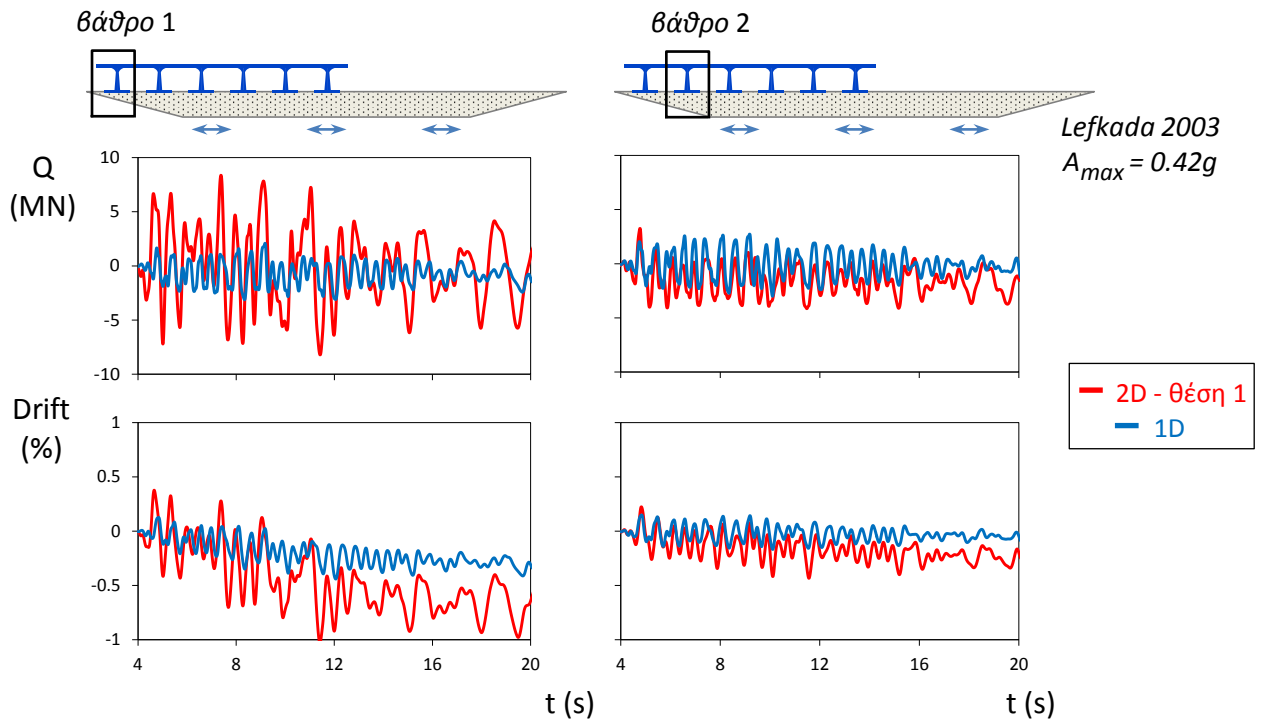
Σχήμα 7.30: Χρονοϊστορίες οριζόντιας και παρασιτικής κατακόρυφης επιτάχυνσης στις βάσεις των θεμελίων 3 και 4. Μελέτη περίπτωσης: Διέγερση Lefkada 2003 (PGA=0.42g), θεώρηση συνεχούς καταστρώματος, γέφυρα στη θέση 1, θεώρηση μη γραμμικού εδάφους.



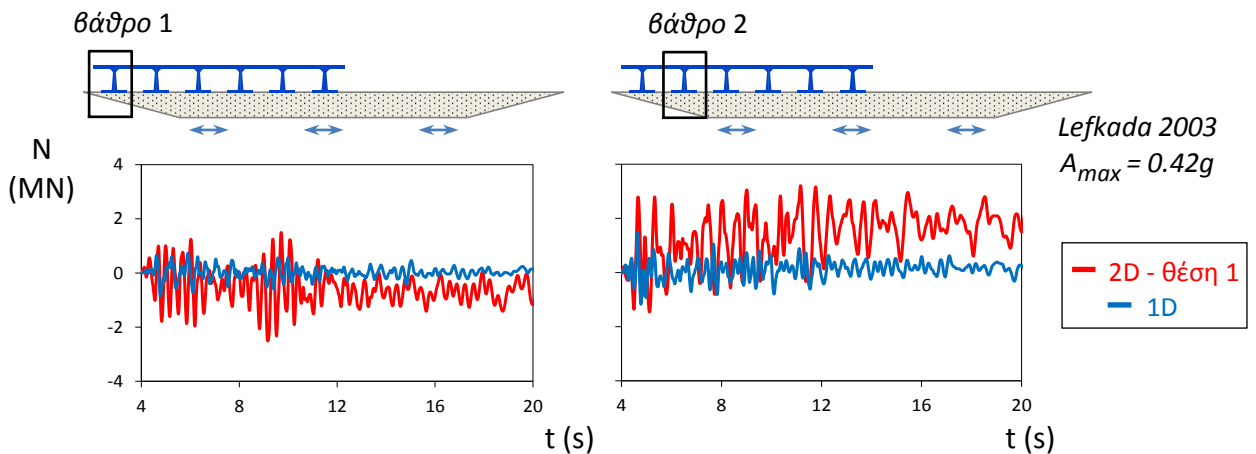
Σχήμα 7.31: Χρονοϊστορίες καμπτικών ροπών στα βάθρα 1 και 2 του φορέα. Μελέτη περίπτωσης: Διέγερση Lefkada 2003 ($PGA=0.42g$), θεώρηση συνεχούς καταστρώματος, γέφυρα στη θέση 1, θεώρηση μη γραμμικού εδάφους.



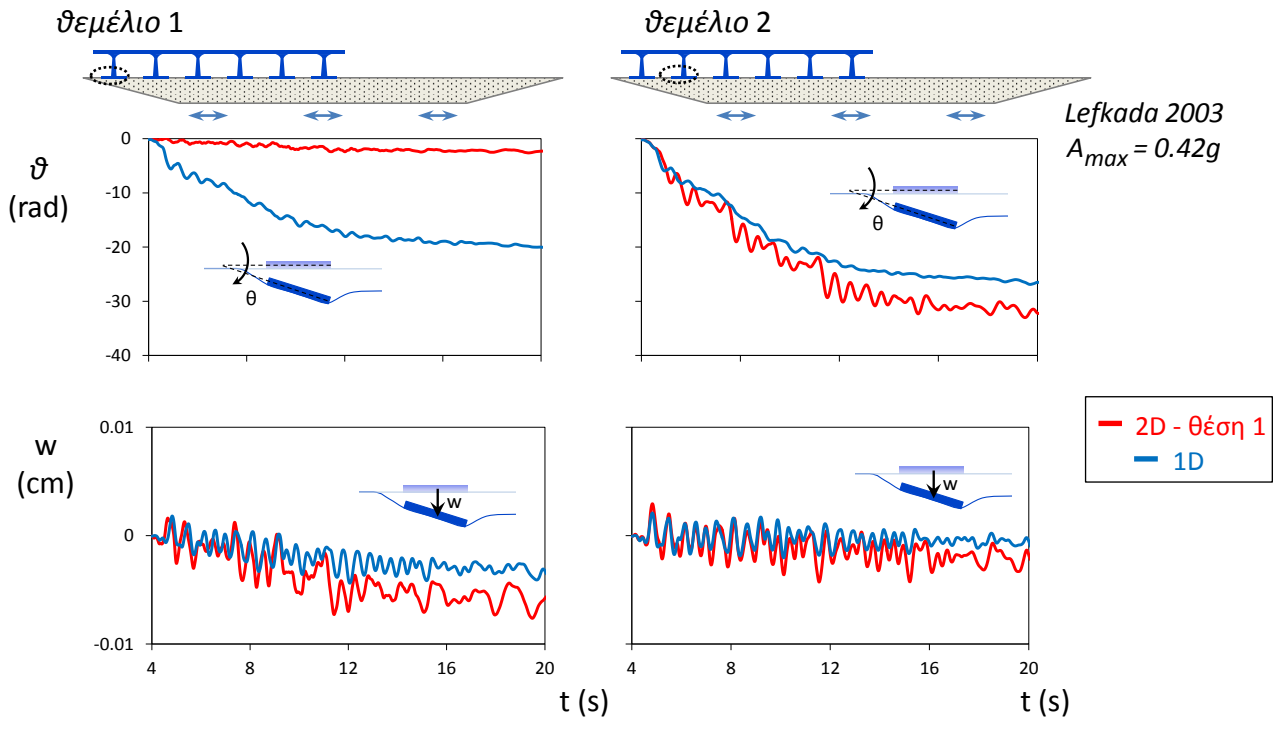
Σχήμα 7.32: Χρονοϊστορίες καμπτικών ροπών στα βάθρα 3 και 4 του φορέα. Μελέτη περίπτωσης: Διέγερση Lefkada 2003 ($PGA=0.42g$), θεώρηση συνεχούς καταστρώματος, γέφυρα στη θέση 1, θεώρηση μη γραμμικού εδάφους.



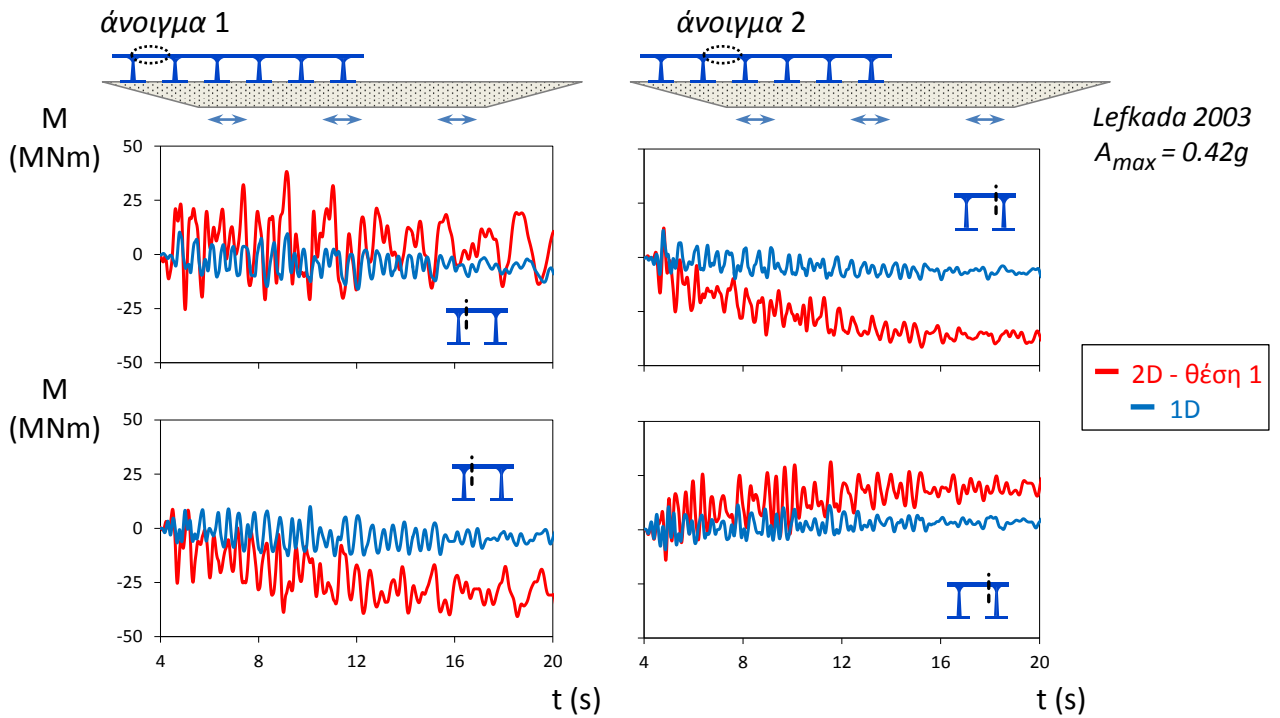
Σχήμα 7.33: Χρονοϊστορίες τεμνουσών δυνάμεων και drifts στα βάθρα 1 και 2 του φορέα. Μελέτη περίπτωσης: Διέγερση Lefkada 2003 (PGA=0.42g), θεώρηση συνεχούς καταστρώματος, γέφυρα στη θέση 1, θεώρηση μη γραμμικού εδάφους.



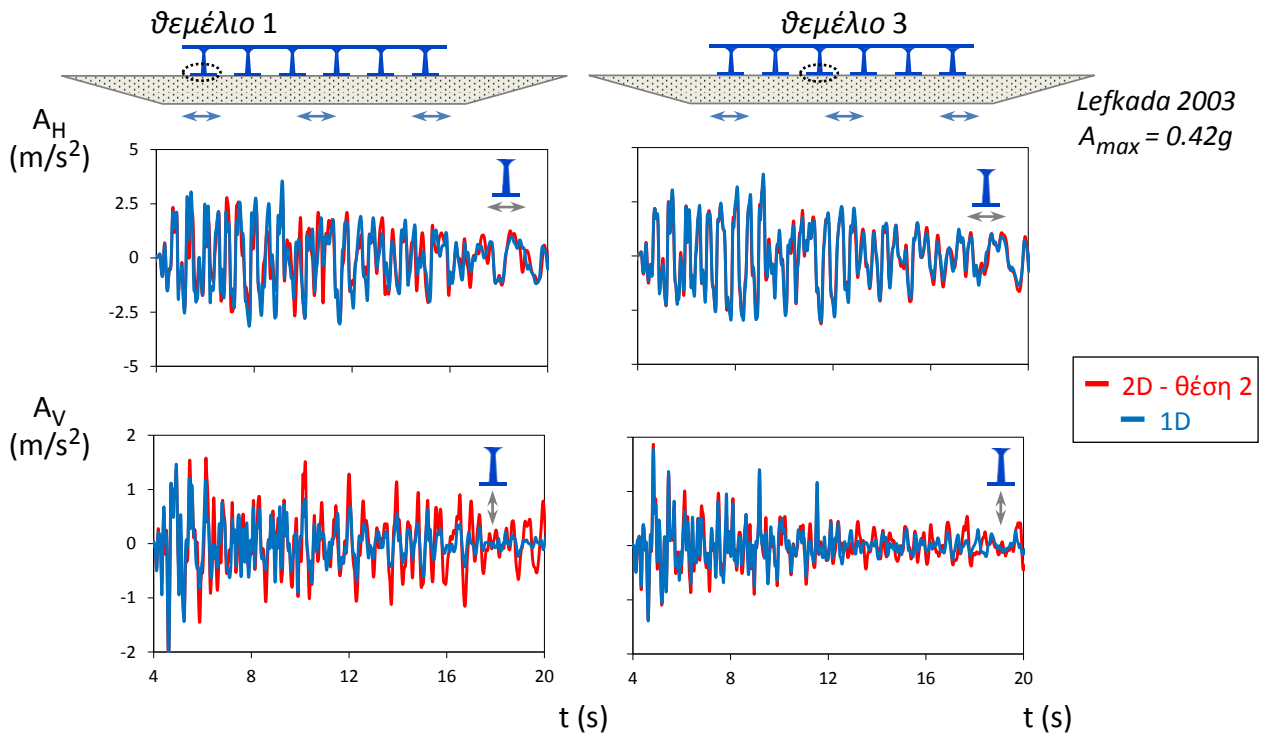
Σχήμα 7.34: Χρονοϊστορίες αξονικών δυνάμεων στα βάθρα 1 και 2 του φορέα. Μελέτη περίπτωσης: Διέγερση Lefkada 2003 (PGA=0.42g), θεώρηση συνεχούς καταστρώματος, γέφυρα στη θέση 1, θεώρηση μη γραμμικού εδάφους.



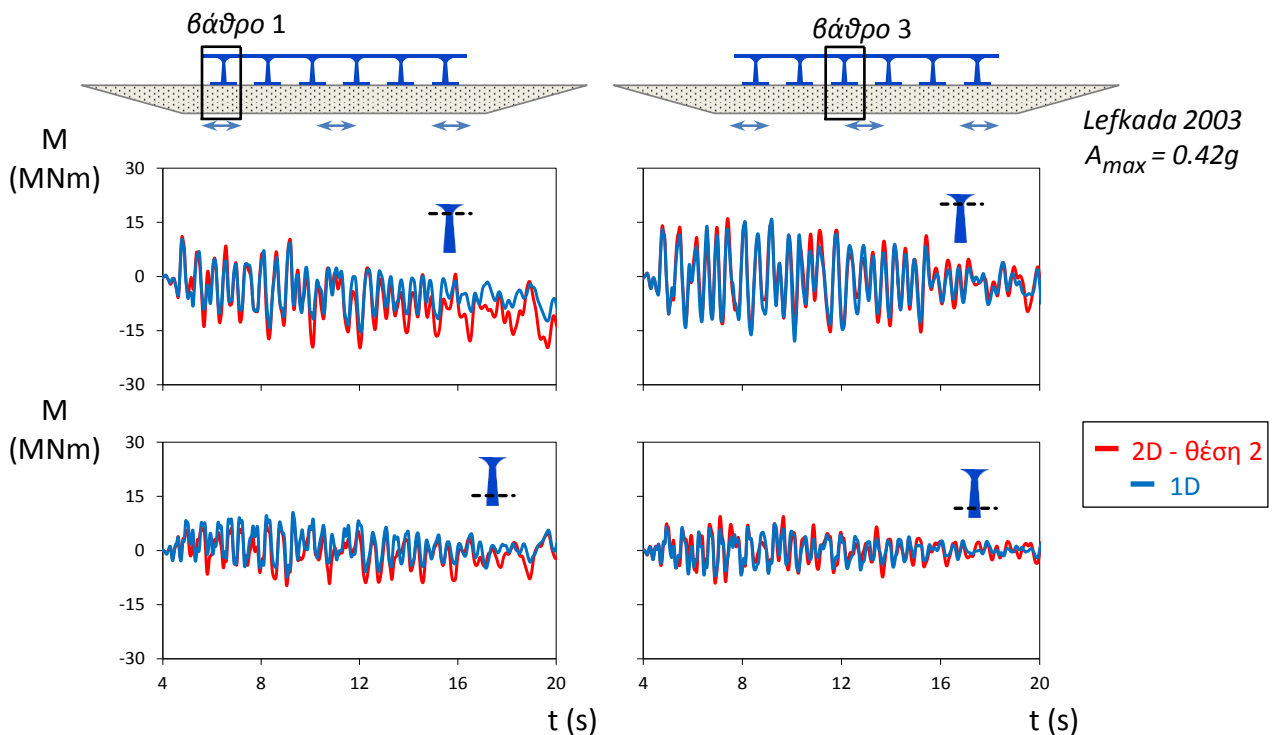
Σχήμα 7.35: Χρονοϊστορίες καθιζήσεων και στροφών των θεμελίων 1 και 2. Μελέτη περίπτωσης: Διέγερση Lefkada 2003 (PGA=0.42g) , θεώρηση συνεχούς καταστρώματος, γέφυρα στη θέση 1, θεώρηση μη γραμμικού εδάφους.



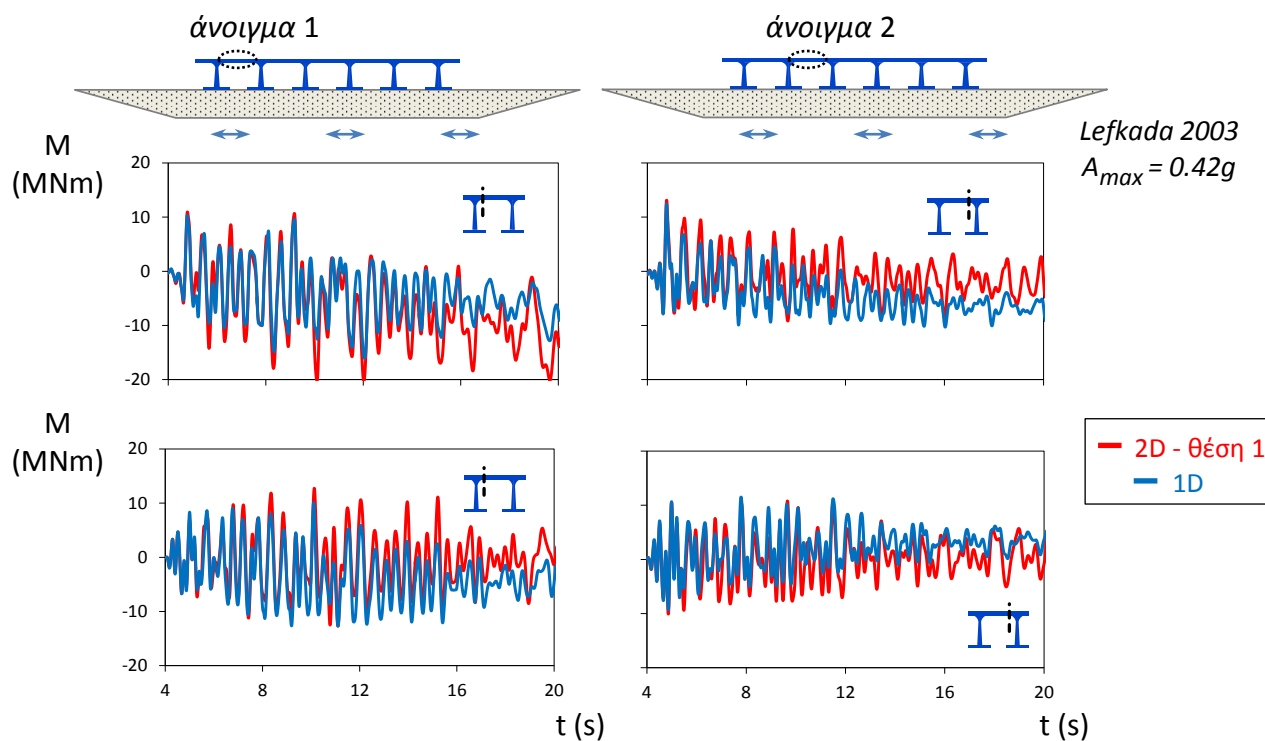
Σχήμα 7.36: Χρονοϊστορίες καμπτικών ροπών στήριξης στο 1^ο και 2^ο άνοιγμα του φορέα. Μελέτη περίπτωσης: Διέγερση Lefkada 2003 (PGA=0.42g) , θεώρηση συνεχούς καταστρώματος, γέφυρα στη θέση 1, θεώρηση μη γραμμικού εδάφους.



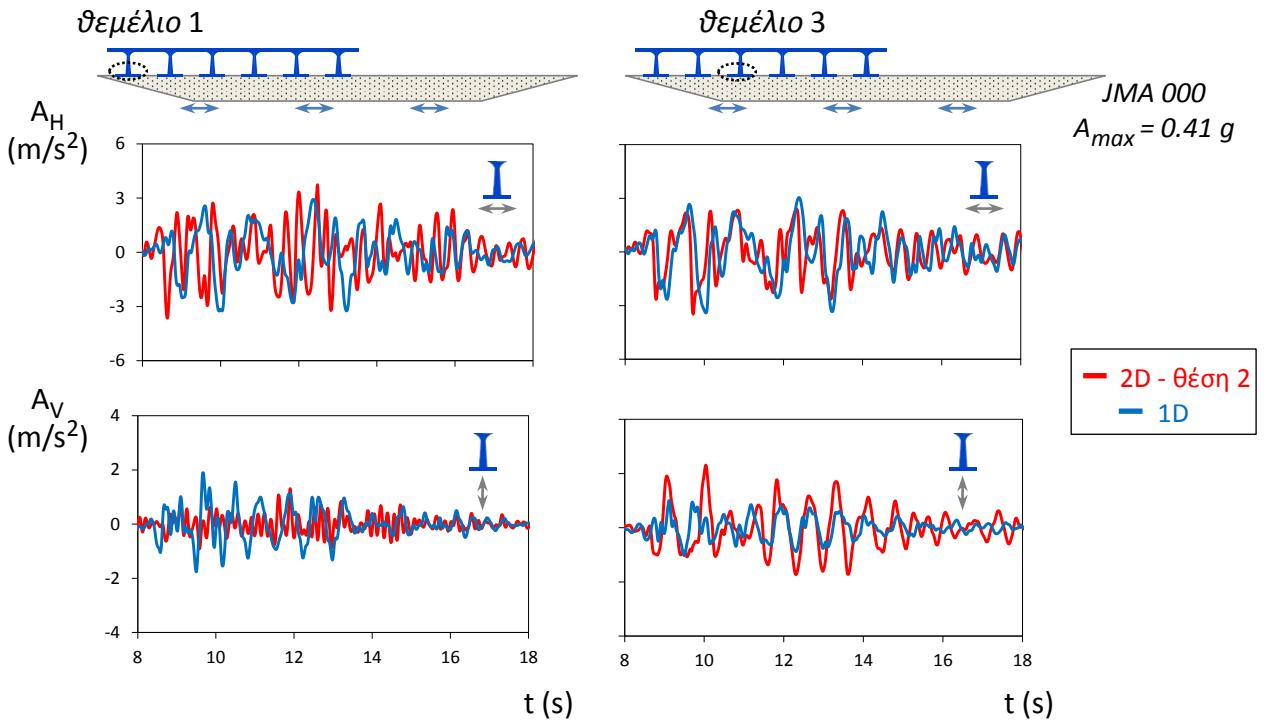
Σχήμα 7.37: Χρονοϊστορίες οριζόντιας και παρασιτικής κατακόρυφης επιτάχυνσης στις βάσεις των θεμελίων 1 και 3. Μελέτη περίπτωσης: Διέγερση Lefkada 2003 (PGA=0.42g) , θεώρηση συνεχούς καταστρώματος, **γέφυρα στη θέση 2**, θεώρηση μη γραμμικού εδάφους.



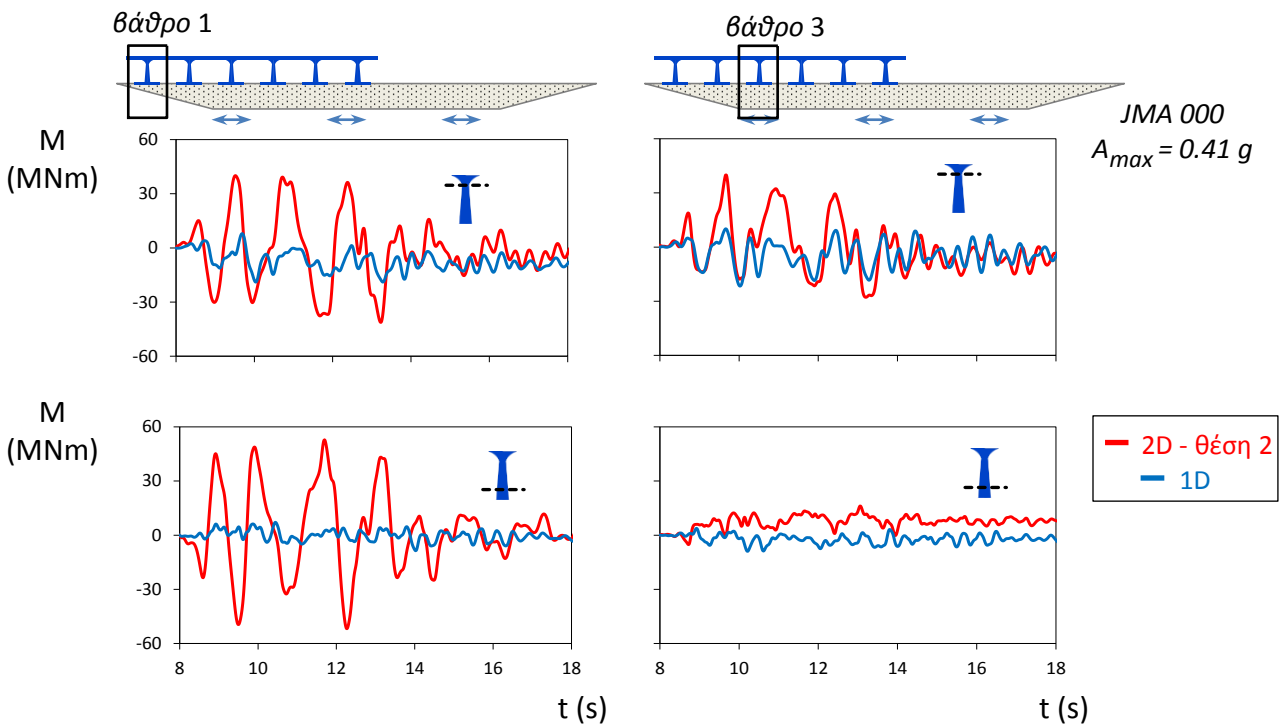
Σχήμα 7.38: Χρονοϊστορίες καμπτικών ροπών στα βάθρα 1 και 3 του φορέα. Μελέτη περίπτωσης: Διέγερση Lefkada 2003 (PGA=0.42g) , θεώρηση συνεχούς καταστρώματος, **γέφυρα στη θέση 2**, θεώρηση μη γραμμικού εδάφους.



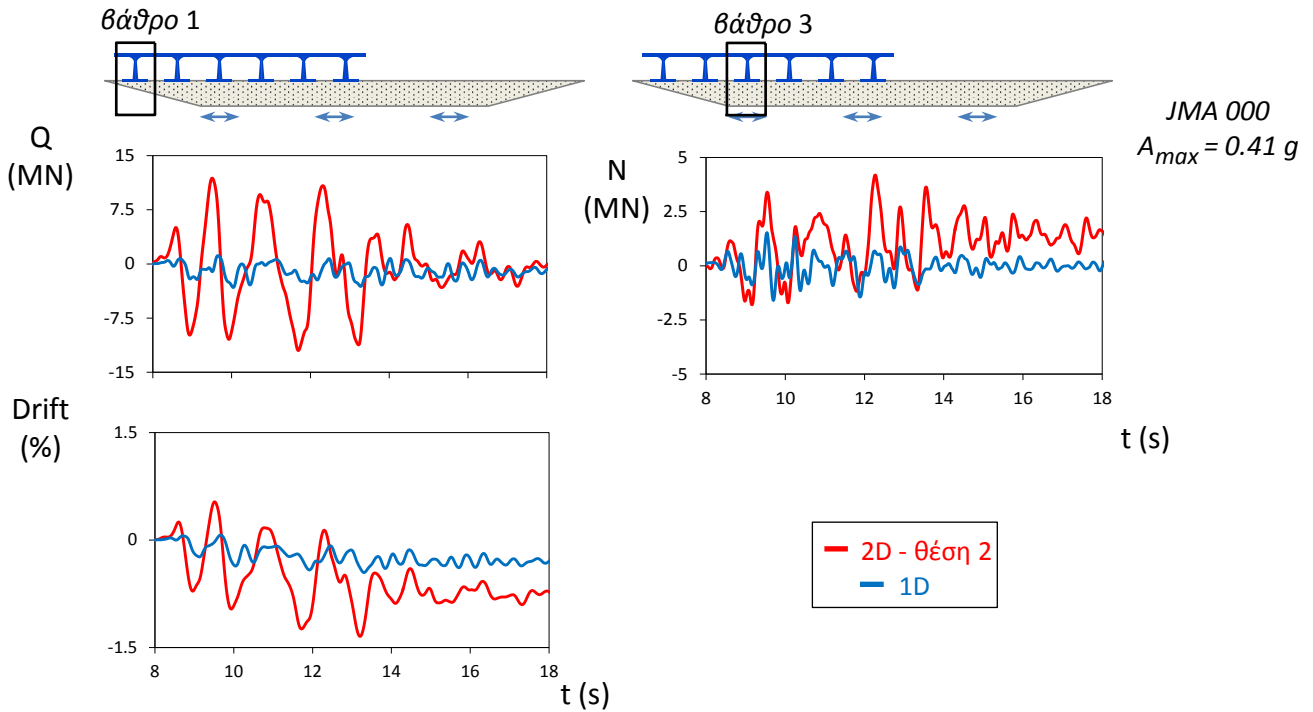
Σχήμα 7.39: Χρονοϊστορίες καμπτικών ροπών στήριξης στο 1^ο και 2^ο άνοιγμα του . Μελέτη περίπτωσης: Διέγερση Lefkada 2003 (PGA=0.42g) , θεώρηση συνεχούς καταστρώματος, γέφυρα στη θέση 2, θεώρηση μη γραμμικού εδάφους.



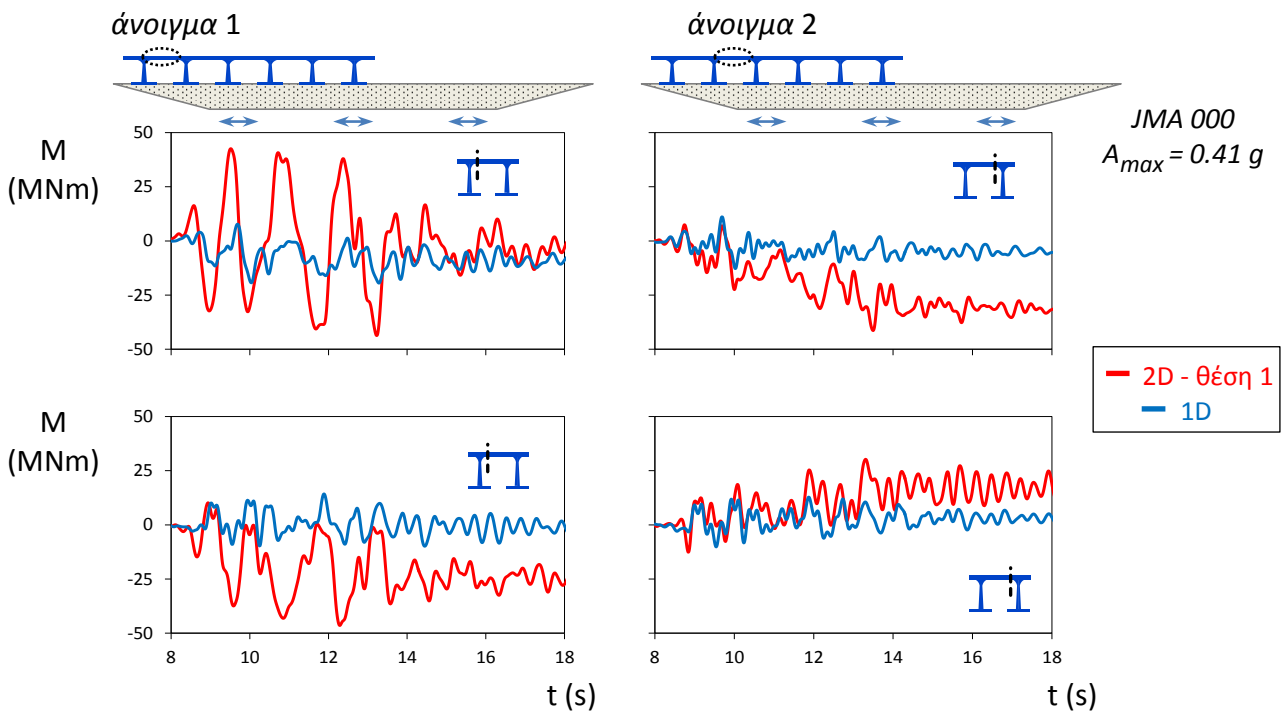
Σχήμα 7.40: Χρονοϊστορίες οριζόντιας και παρασιτικής κατακόρυφης επιτάχυνσης στις βάσεις των θεμελίων 1 και 2. Μελέτη περίπτωσης: **Διέγερση JMA 000 υποκλιμάκια ανηγμένη, ώστε PGA=0.41g**, θεώρηση συνεχούς καταστρώματος, **γέφυρα στη θέση 1**, θεώρηση μη γραμμικού εδάφους.



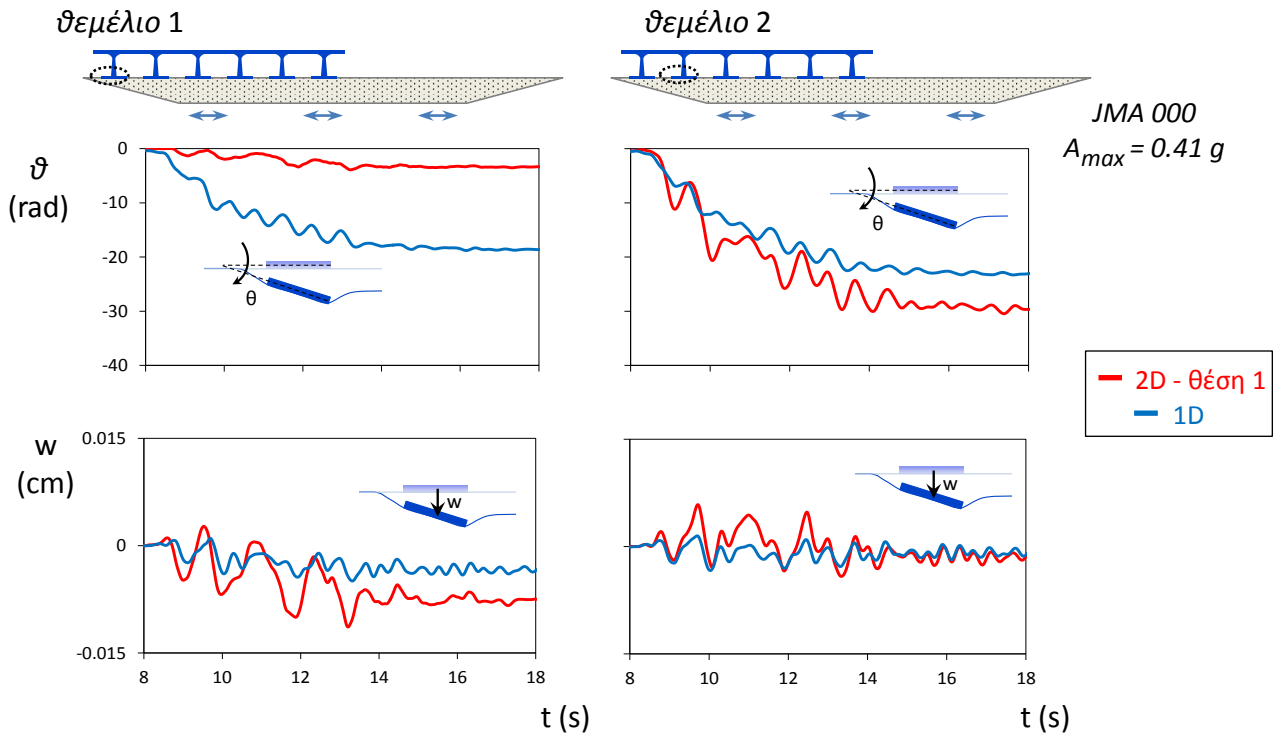
Σχήμα 7.41: Χρονοϊστορίες καμπτικών ροπών του 1^{ου} και 2^{ου} βάρου του φορέα. Μελέτη περίπτωσης: Διέγερση JMA 000 υποκλιμάκια ανηγμένη, ώστε PGA=0.41g, θεώρηση συνεχούς καταστρώματος, γέφυρα στη θέση 1, θεώρηση μη γραμμικού εδάφους.



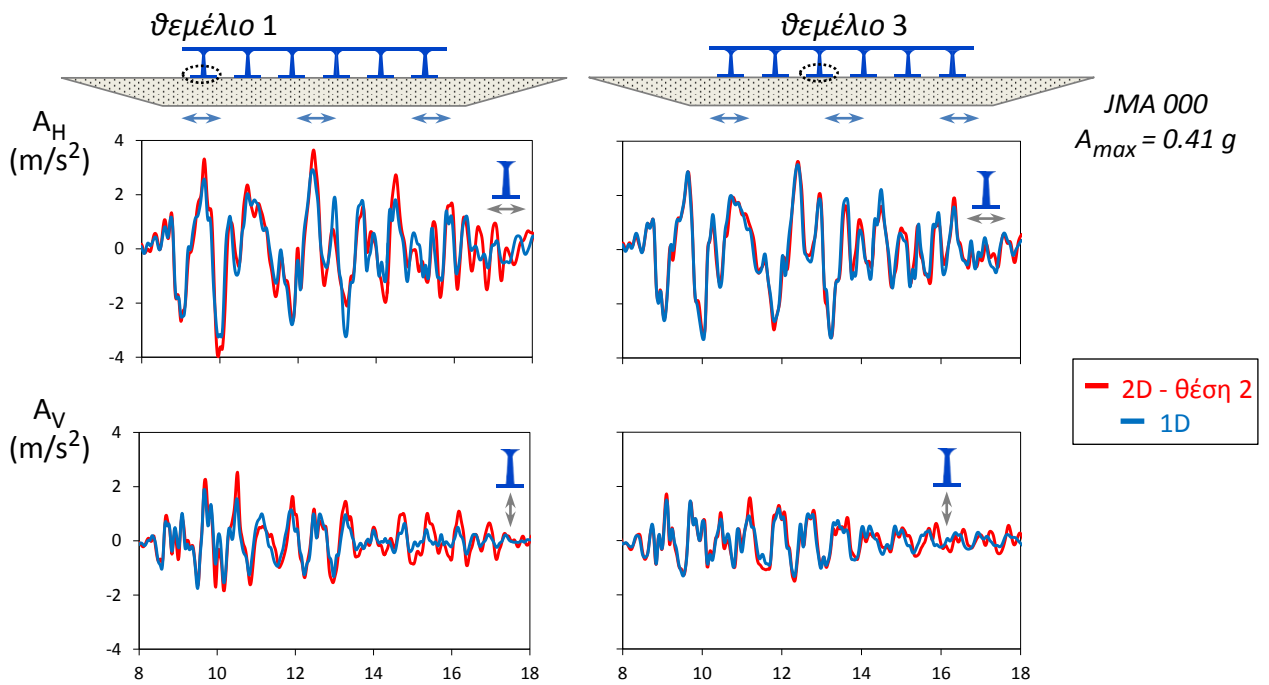
Σχήμα .742: Χρονοϊστορίες τέμνουσας δύναμης και drift του 1^{ου} και αξονικής δύναμης του 2^{ου} βάθρου του φορέα. Μελέτη περίπτωσης: Διέγερση JMA 000 υποκλιμάκια ανηγμένη, ώστε $PGA=0.41g$, θεώρηση συνεχούς καταστρώματος, γέφυρα στη θέση 1, θεώρηση μη γραμμικού εδάφους.



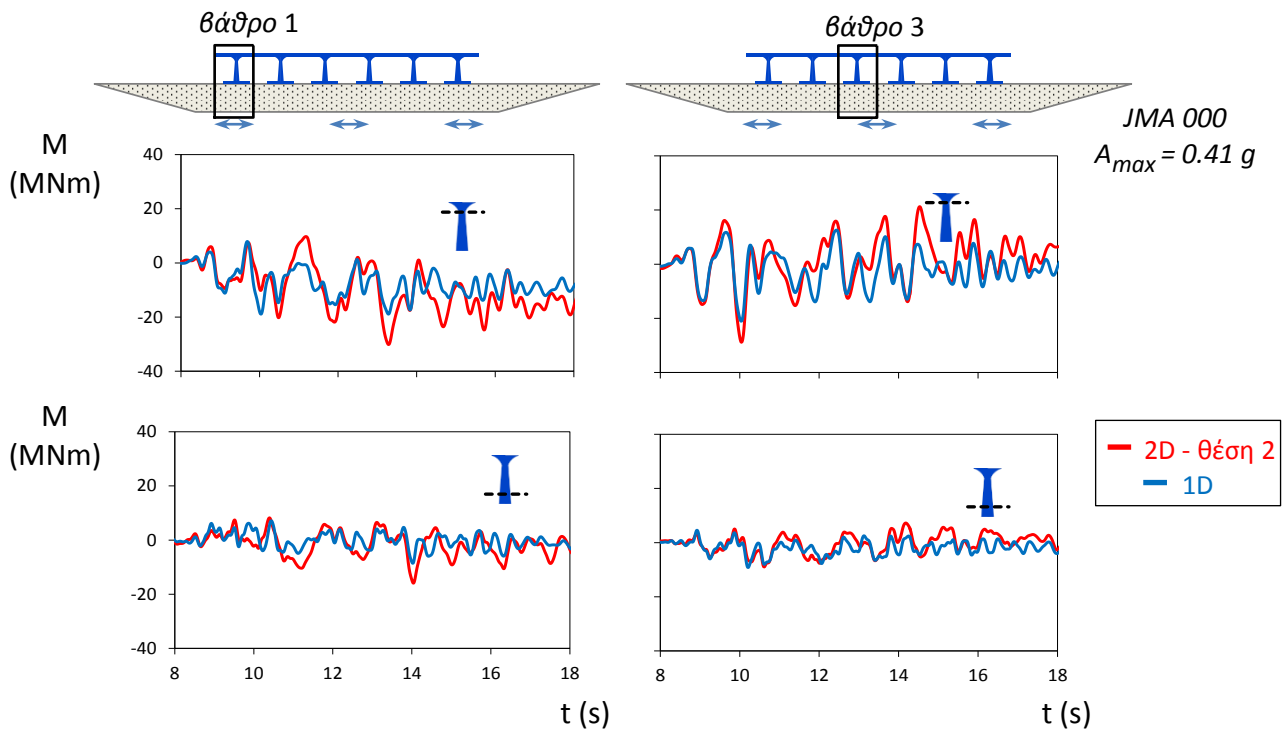
Σχήμα 7.43: Χρονοϊστορίες καμπτικών ροπών στήριξης του 1^{ου} και 2^{ου} ανοίγματος του φορέα. Μελέτη περίπτωσης: Διέγερση JMA 000 υποκλιμάκια ανηγμένη, ώστε $PGA=0.41g$, θεώρηση συνεχούς καταστρώματος, γέφυρα στη θέση 1, θεώρηση μη γραμμικού εδάφους.



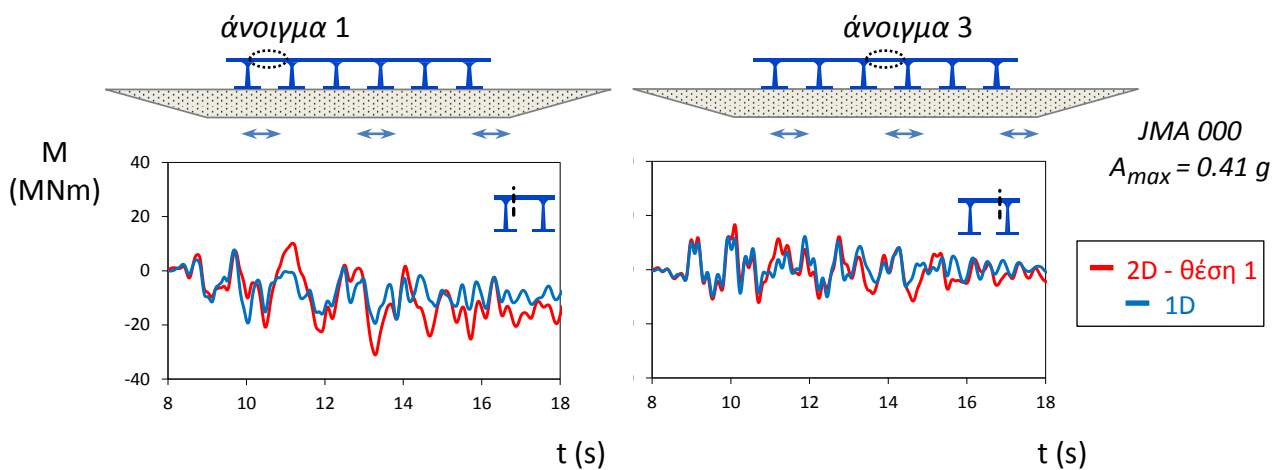
Σχήμα 7.44: Χρονοϊστορίες καθιζήσεων και στροφών των θεμελίων 1 και 2. Μελέτη περίπτωσης: Διέγερση JMA 000 υποκλιμάκια ανηγμένη, ώστε $PGA=0.41g$, θεώρηση συνεχούς καταστρώματος, γέφυρα στη θέση 1, θεώρηση μη γραμμικού εδάφους.



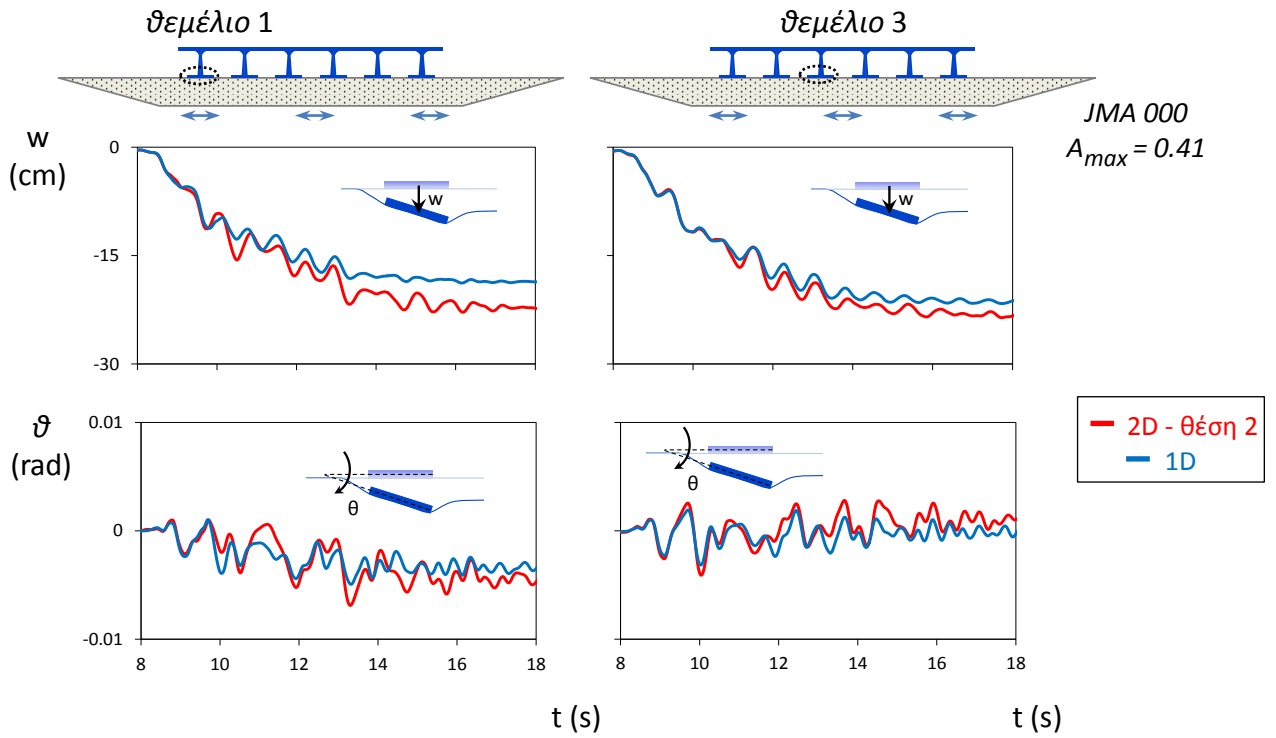
Σχήμα 7.45: Χρονοϊστορίες οριζόντιας και παρασιτικής κατακόρυφης επιτάχυνσης στις βάσεις των θεμελίων 1 και 3. Μελέτη περίπτωσης: Διέγερση JMA 000 υποκλιμάκια ανηγμένη, ώστε $PGA=0.41g$, θεώρηση συνεχούς καταστρώματος, γέφυρα στη θέση 2, θεώρηση μη γραμμικού εδάφους.



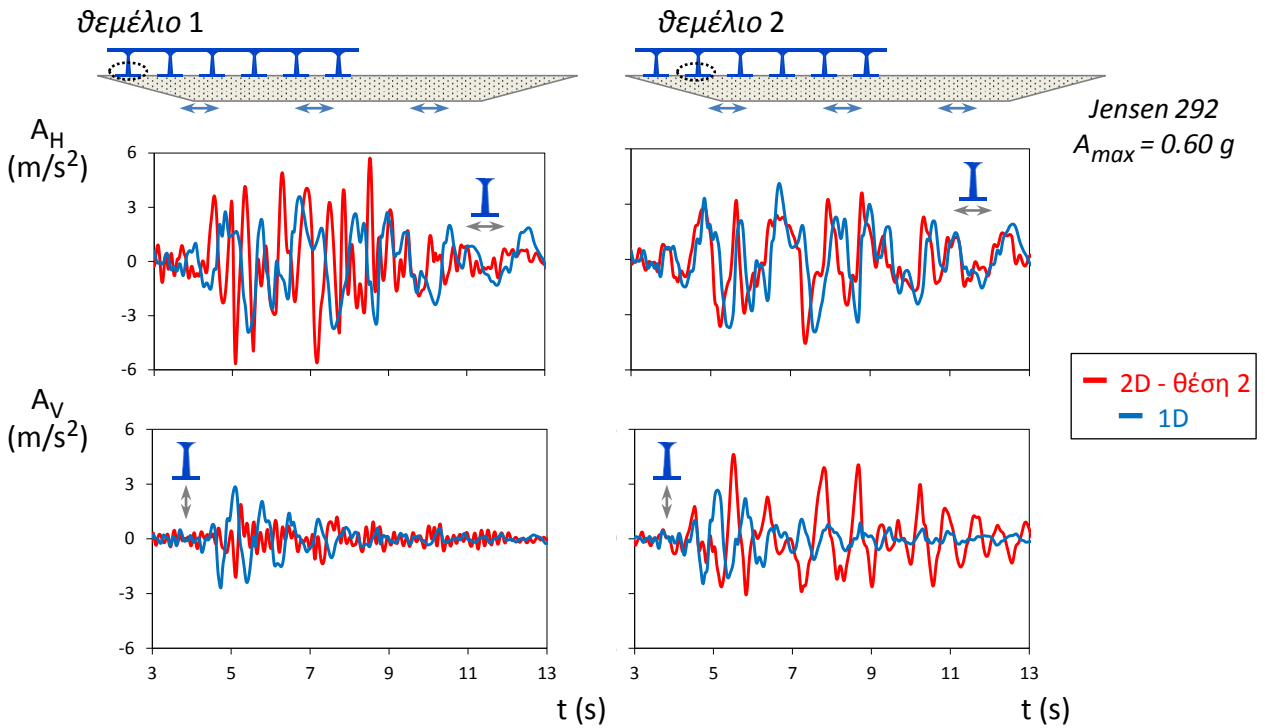
Σχήμα 7.46: Χρονοϊστορίες καμπτικών ροπών στα βάθρα 1 και 3 του φορέα. Μελέτη περίπτωσης: Διέγερση JMA 000 υποκλιμακία ανηγμένη, ώστε $PGA=0.41g$, θεώρηση συνεχούς καταστρώματος, γέφυρα στη θέση 2, θεώρηση μη γραμμικού εδάφους.



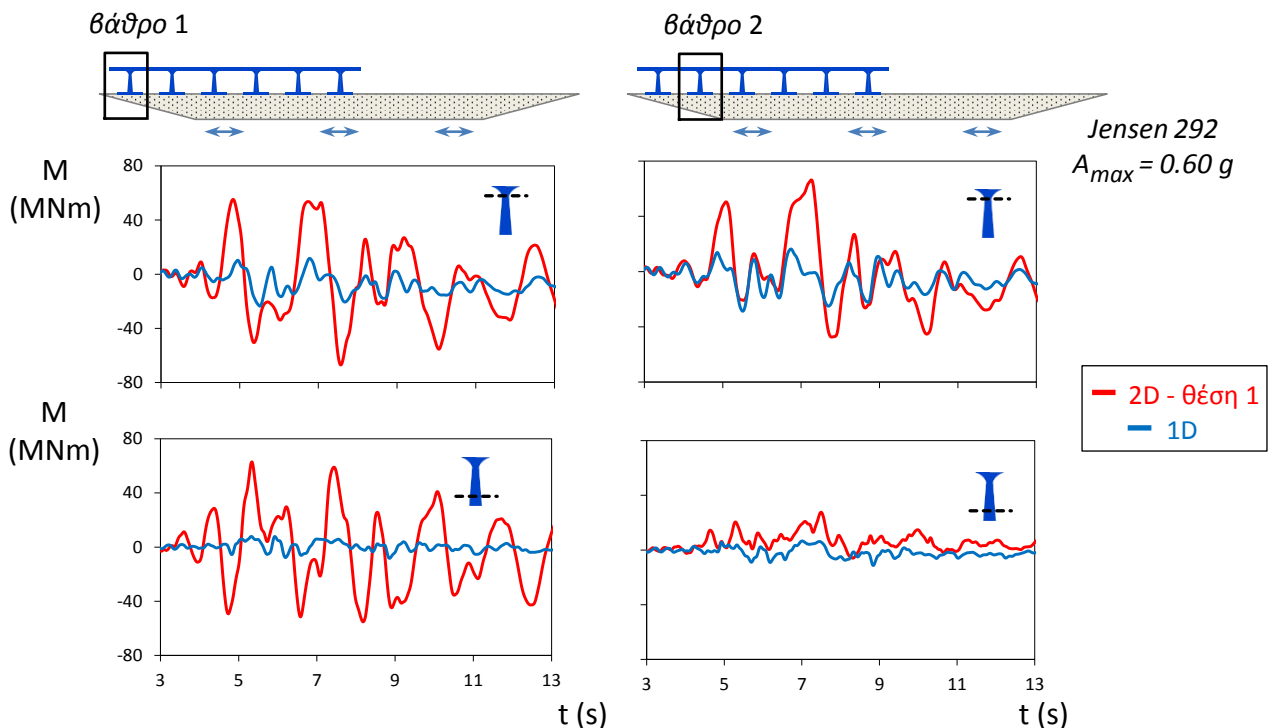
Σχήμα 7.47: Χρονοϊστορίες καμπτικών ροπών στήριξης στο 1^ο και 3^ο άνοιγμα του φορέα. Μελέτη περίπτωσης: Διέγερση JMA 000 υποκλιμακία ανηγμένη, ώστε $PGA=0.41g$, θεώρηση συνεχούς καταστρώματος, γέφυρα στη θέση 2, θεώρηση μη γραμμικού εδάφους.



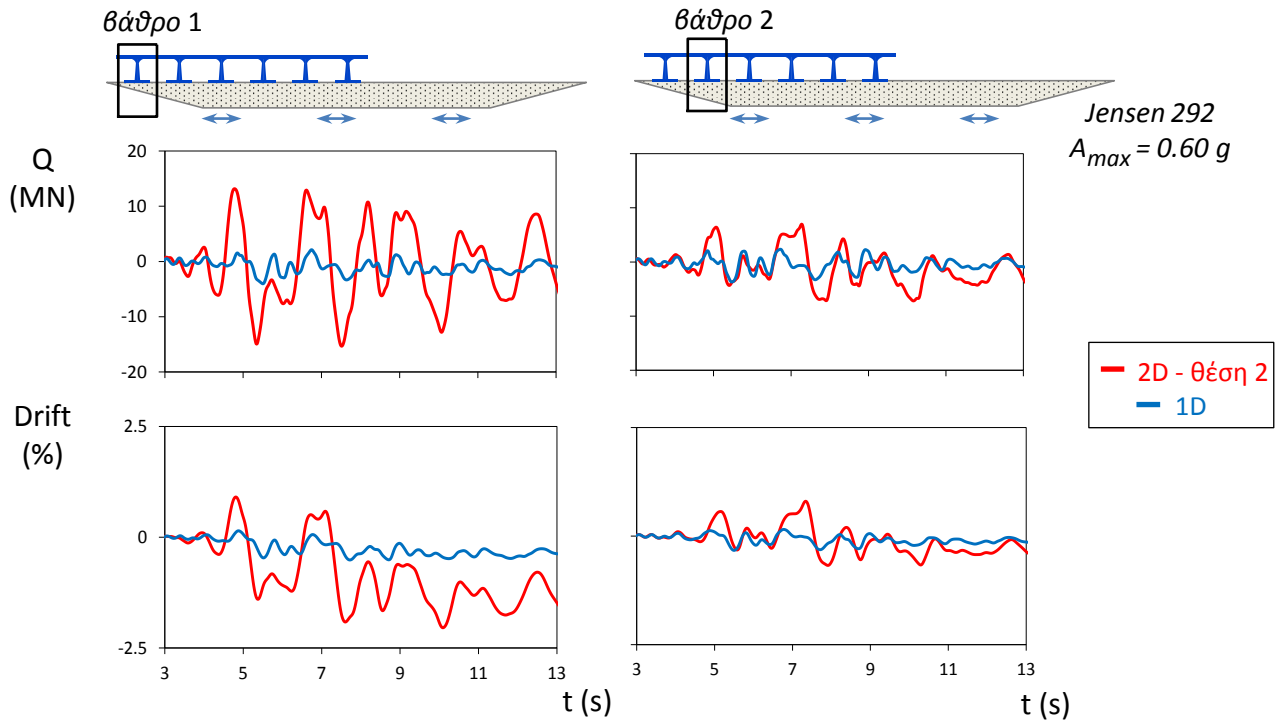
Σχήμα 7.48: Χρονοϊστορίες καθιζήσεων και στροφών των θεμελίων 1 και 3. Μελέτη περίπτωσης: Διέγερση JMA 000 υποκλιμάκια ανηγμένη, ώστε $PGA=0.41g$, θεωρήση συνεχούς καταστρώματος, γέφυρα στη θέση 2, θεωρήση μη γραμμικού εδάφους.



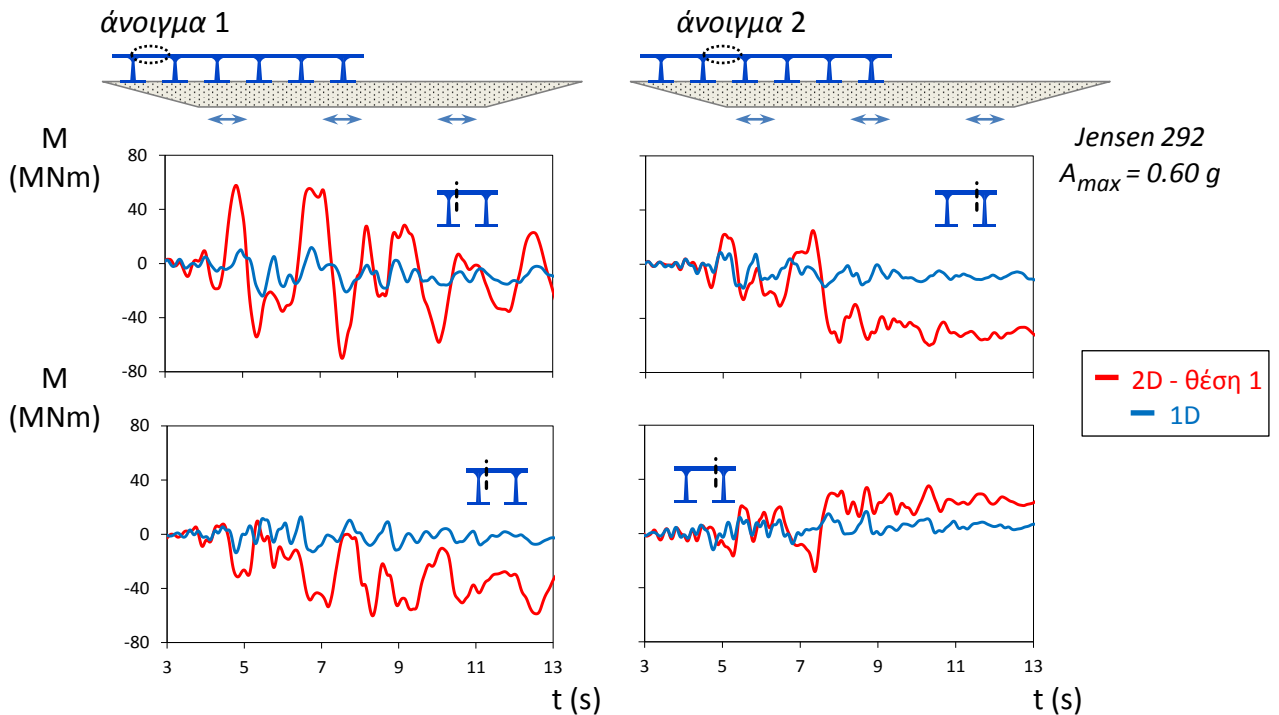
Σχήμα 7.49: Χρονοϊστορίες οριζόντιας και παρασιτικής κατακόρυφης επιτάχυνσης στις βάσεις των θεμελίων 1 και 2. Μελέτη περίπτωσης: Διέγερση **Jensen 292 (PGA=0.60g)**, θεώρηση συνεχούς καταστρώματος, **γέφυρα στη θέση 1**, θεώρηση μη γραμμικού εδάφους.



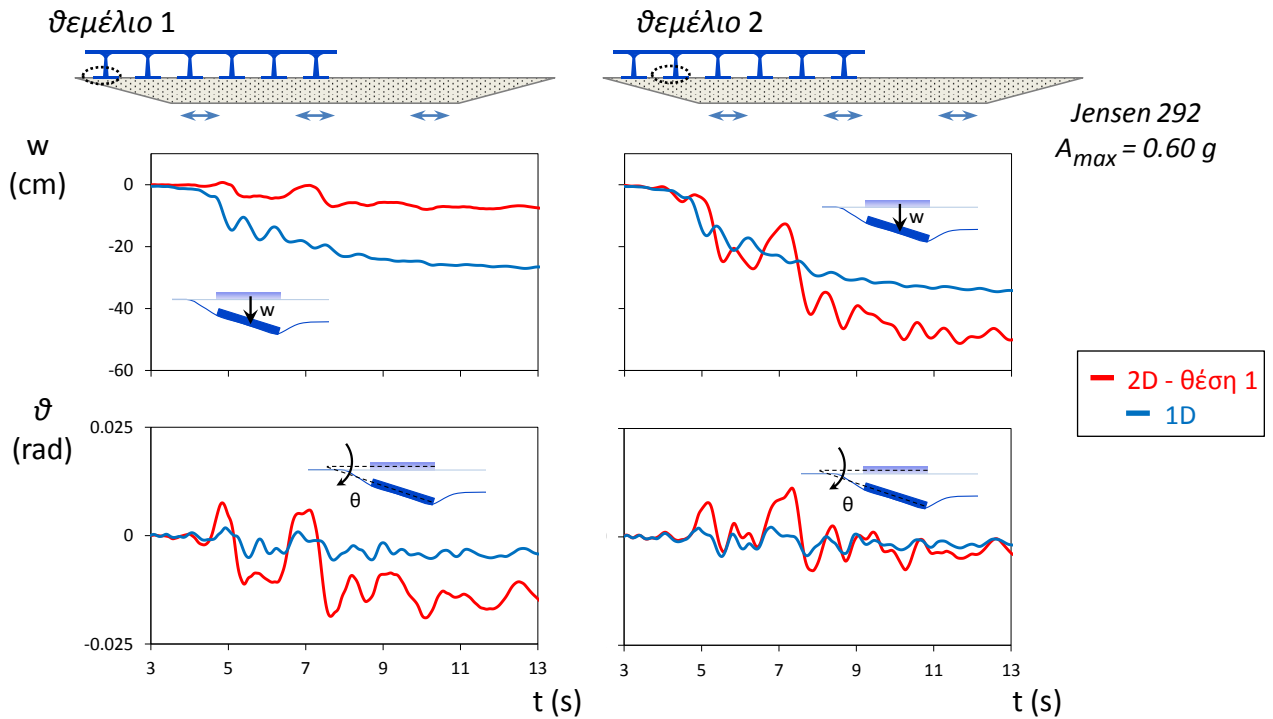
Σχήμα 7.50: Χρονοϊστορίες καμπτικών ροπών του 1^{ου} και 2^{ου} βάθρου του φορέα. Μελέτη περίπτωσης: Διέγερση Jensen 292 (PGA=0.60g), θεώρηση συνεχούς καταστρώματος, **γέφυρα στη θέση 1**, θεώρηση μη γραμμικού εδάφους.



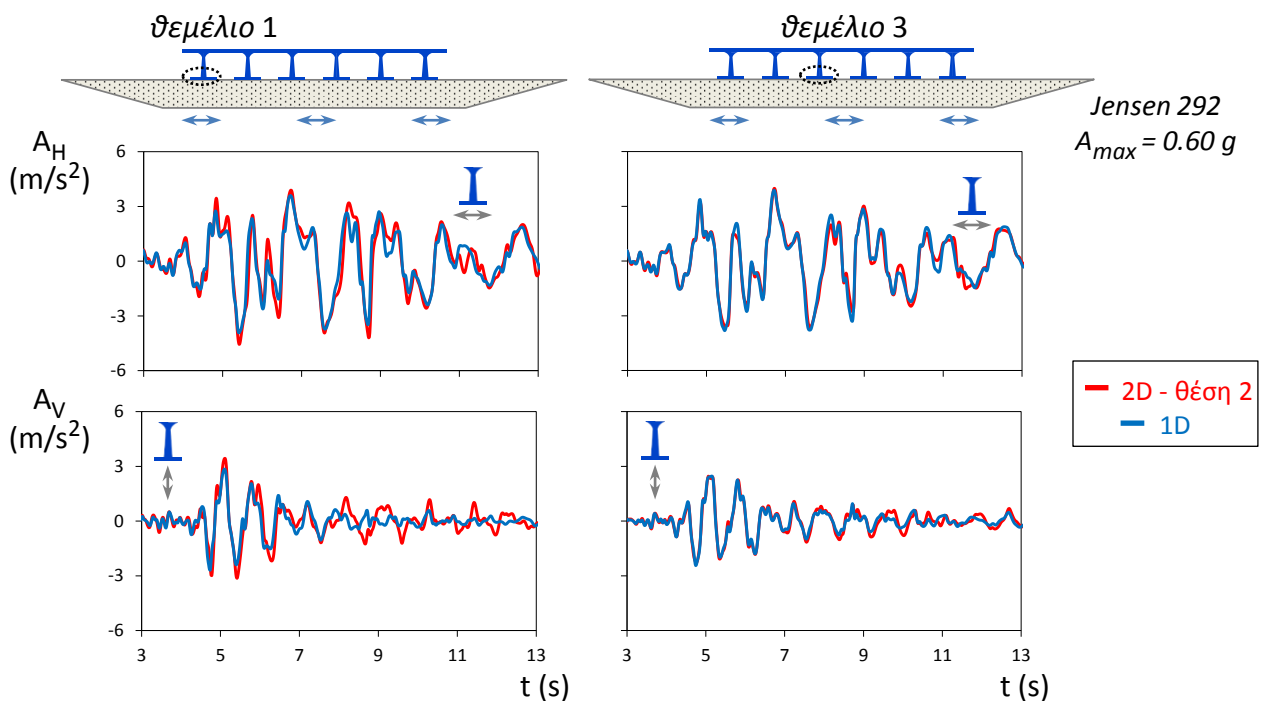
Σχήμα 7.51: Χρονοϊστορίες τεμνουσών δυνάμεων και drift για το 1^ο και το 2^ο βάθρο του φορέα. Μελέτη περίπτωσης: Διέγερση Jensen 292 (PGA=0.60g), θεώρηση συνεχούς καταστρώματος, γέφυρα στη θέση 1, θεώρηση μη γραμμικού εδάφους.



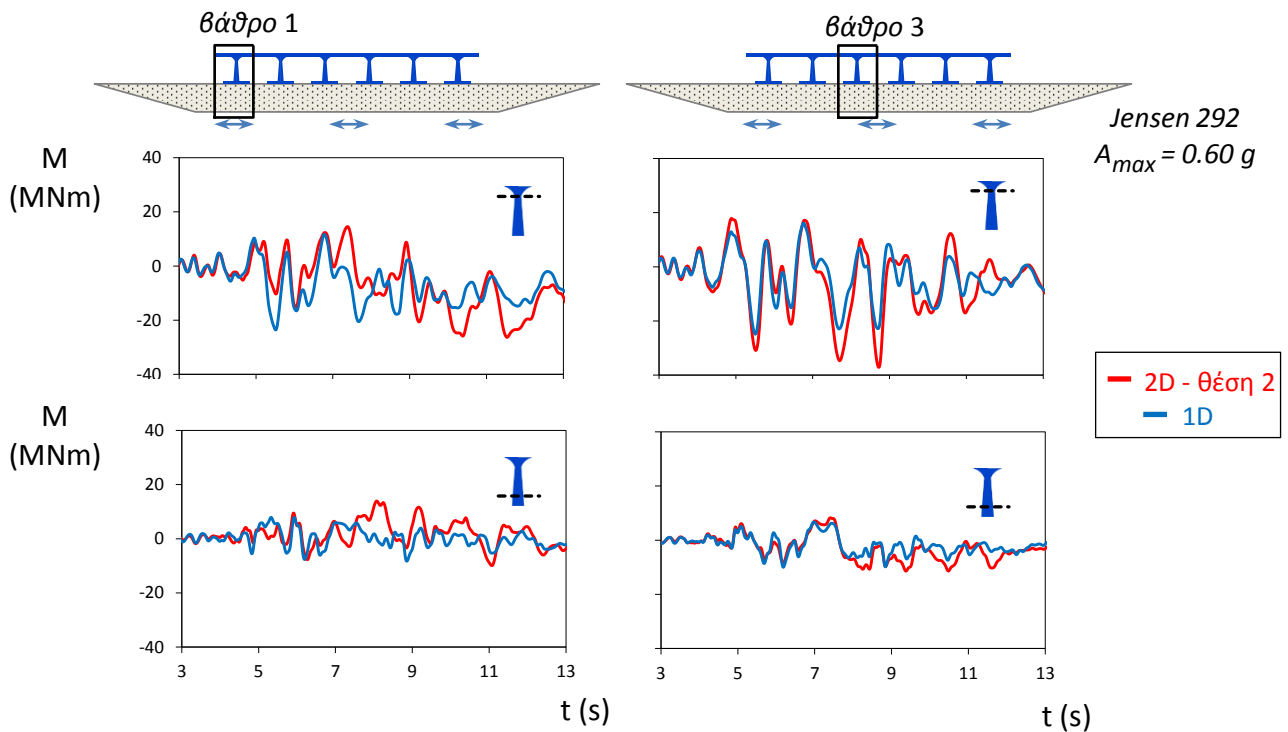
Σχήμα 7.52: Χρονοϊστορίες καμπτικών ροπών στήριξης στο 1^ο και 2^ο άνοιγμα του φορέα. Μελέτη περίπτωσης: Διέγερση Jensen 292 (PGA=0.60g), θεώρηση συνεχούς καταστρώματος, γέφυρα στη θέση 1, θεώρηση μη γραμμικού εδάφους.



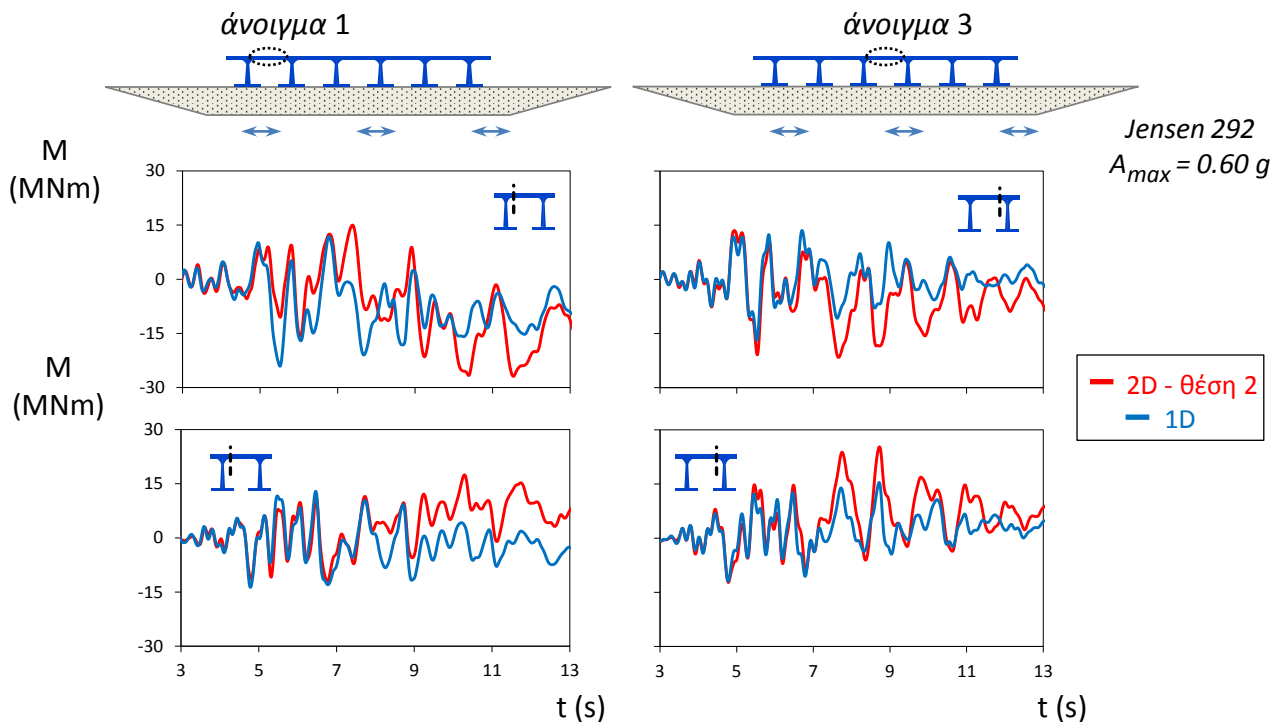
Σχήμα 7.53: Χρονοϊστορίες καθιζήσεων και στροφών του 1^{ου} και 2^{ου} θεμελίου του φορέα. Μελέτη περίπτωσης: Διέγερση Jensen 292 (PGA=0.60g), θεωρήση συνεχούς καταστρώματος, γέφυρα στη θέση 1, θεωρήση μη γραμμικού εδάφους.



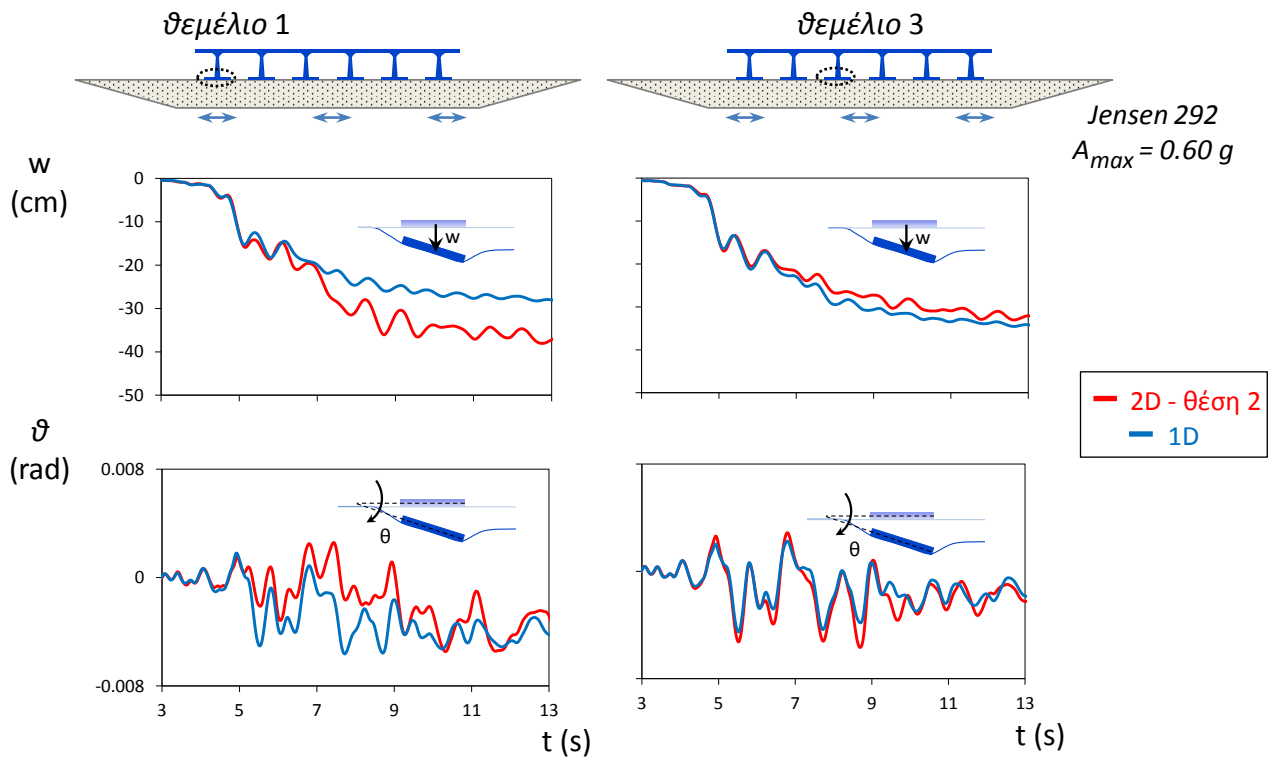
Σχήμα 7.54: Χρονοϊστορίες οριζόντιας και παρασιτικής κατακόρυφης επιτάχυνσης στις βάσεις των θεμελίων 1 και 3. Μελέτη περίπτωσης: Διέγερση Jensen 292 (PGA=0.60g), θεωρήση συνεχούς καταστρώματος, γέφυρα στη θέση 2, θεωρήση μη γραμμικού εδάφους.



Σχήμα 7.55: Χρονοϊστορίες καμπτικών ροπών του 1^{ου} και 3^{ου} βάθρου του φορέα. Μελέτη περίπτωσης: Διέγερση Jensen 292 (PGA=0.60g), θεώρηση συνεχούς καταστρώματος, γέφυρα στη θέση 2, θεώρηση μη γραμμικού εδάφους.



Σχήμα 7.56: Χρονοϊστορίες καμπτικών ροπών στήριξης στο 1^ο και το 3^ο άνοιγμα του φορέα. Μελέτη περίπτωσης: Διέγερση Jensen 292 (PGA=0.60g), θεώρηση συνεχούς καταστρώματος, γέφυρα στη θέση 2, θεώρηση μη γραμμικού εδάφους.



Σχήμα 7.57: Χρονοϊστορίες καθιζήσεων και στροφών του 1^{ου} και 3^{ου} θεμελίου του φορέα. Μελέτη περίπτωσης: Διέγερση Jensen 292 (PGA=0.60g), θεώρηση συνεχούς καταστρώματος, γέφυρα στη θέση 2, θεώρηση μη γραμμικού εδάφους.

Σχετική βιβλιογραφία

- Bard P.-Y. & Bouchon M. (1985), "The two-dimensional resonance of sediment-filled valleys", *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 75, No. 2, pp. 519-541.
- Dakoulas P. & Gazetas G. (1986), "Seismic shear vibration of embankment dams in semi-cylindrical valleys", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol.14, 19-40.
- Gazetas G. & Dobry R. (1984), "Radiation damping paradox"
- Gazetas G. & Yegian M. K. (1979), "Shear and Rayleigh Waves in Soil Dynamics", *Journal of the Geotechnical Engineering Division*.
- Sanchez-Sesma F. J. & Esquivel J. A. (1979), "Ground motion on alluvial valleys under incident plane SH Waves", *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 69, No. 4, pp. 1107-1120.
- Bard P.-Y., (1997), "Local effects on strong ground motion: Basic physical phenomena and estimation methods for microzoning studies". in SERINA- Seismic Risk: An Integrated Seismological, Geotechnical and Structural Approach (ITSAK Ed.), Thessaloniki.
- Kawase H. & Aki K. (1989), "A study on the response of a soft basin for incident S, P and Rayleigh waves with special reference to the long duration observed in Mexico City", *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 79, No. 5, pp. 1361-1382.
- Moczo P., Labak P., Kristek J. & Hron F. (1996), "Amplification and Differential Motion due to an Antiplane 2D Resonance in the Sediment Valleys Embedded in a Layer over the Half-Space", *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 86, No. 5, pp. 1434-1446.
- Chavez-Garcia F. J. & Salazar L. (2002), "Strong Motion in Central Mexico: A Model Based on Data Analysis and Simple Modeling", *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 92, No. 8, pp. 3087-3101.

- Carbonari S., Dezi F. & Leoni G. (2011), "Seismic soil-structure interaction in multi-span bridges: Application to a railway bridge", *Wiley Online Library, (wileyonlinelibrary.com)*, January 2011.
- Sanchez-Sesma F. J. (1983), "Diffraction of elastic waves by three-dimensional surface irregularities", *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 73, No. 6, pp. 1621-1636.
- Chavez-Garcia F. J., Ramos-Martinez J. & Romero-Jimenez E. (1995), "Surface-Wave Dispersion Analysis in Mexico City", *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 85, No. 4, pp. 1116-1126.
- Gelagoti, F., R. Kourkoulis (2012), "Nonlinear Dimensional Analysis of Trapezoidal Valleys Subjected to Vertically Propagating SV Waves", *Bull. Seismol. Soc. Am.*, Vol. 102, No. 3, pp., June 2012, doi: [10.1785/0120110182](https://doi.org/10.1785/0120110182)
- Zhang, B., and A. S. Papageorgiou (1996). Simulation of the response of the Marina District basin, San Francisco, California, to the 1989 Loma Prieta earthquake, *Bull. Seismol. Soc. Am.* 86, no. 5, 1382–1400.
- Bard, P. Y., and M. Bouchon (1980b), "The seismic response of sediment filled valleys. Part 2. The case of incident P and SV waves", *Bull. Seismol. Soc. Am.* 70, no. 5, 1921–1941.
- Gelagoti, F., R. Kourkoulis, I. Anastasopoulos, T. Tazoh, and G. Gazetas (2010), "Seismic wave propagation in a very soft alluvial valley: Sensitivity to ground-motion details and soil nonlinearity, and generation of a parasitic vertical component", *Bull. Seismol. Soc. Am.* 100, 6, 3035–3054, doi [10.1785/0120100002](https://doi.org/10.1785/0120100002).
- Kanai, K. (1951). "On the group velocity of dispersive surface waves", *Bull. Earthq. Res. Inst. Tokyo Univ.* 29, 49–60.
- Papageorgiou, A. S., and J. Kim (1991). "Study of the propagation and amplification of seismic waves in Caracas Valley with reference to the 29 July 1967 earthquake: SH waves", *Bull. Seismol. Soc. Am.* 81, no. 6, 2214–2233.

Trifunac, M. D. (1971). "Surface motion of a semi-cylindrical alluvial valley for incident plane SH waves", *Bull. Seismol. Soc. Am.* 61, 1755–1770.

Gazetas, G. (1982). "Vibrational characteristics of soil deposits with variable wave velocity", *International Journal For Numerical And Analytical Methods In Geomechanics*. Vol. 6. 1-20 (1982)

Vrettos, Ch. (1990). "In-plane vibrations of soil deposits with variable shear modulus: i. surface waves", *international journal for numerical and analytical methods in geomechanics*. Vol. 14, 209-222

Vardoulakis, I. (1988), "Dispersion law of Rayleigh-type waves in a compressible Gibson half-space", *International Journal For Numerical And Analytical Methods In Geomechanics*, vol. 12, 639-655

Gazetas, G., Dakoulas, P. (1992), "Seismic analysis and design of rockfill dams: state-of-the-art", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 11 (1992) 27-61

Gazetas, G. (1987), "Seismic response of earth dams: some recent Developments", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 1987, Vol. 6, No. 1

Gazetas, G., P.V. Kallou, P.N. Psarropoulos (2002), "Topography and Soil Effects in the MS 5.9 Parnitha (Athens) Earthquake: The Case of Adames", *Natural Hazards* 27: 133-169. 2002.

Eurocode 2