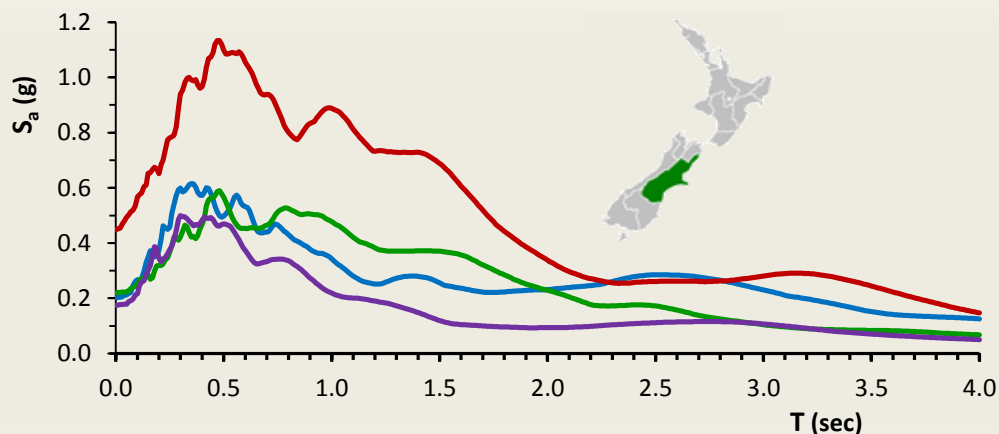




Διπλωματική Εργασία  
**Σταύρου Παναγούλια**

Επιβλέποντες:  
Καθηγητής Γ. Γκαζέτας, Δρ. Ε. Γαρίνη

**ΟΙ ΣΕΙΣΜΟΙ ΤΟΥ CANTERBURY :  
ΦΑΣΜΑΤΑ ΕΛΑΣΤΙΚΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΚΑΙ ΠΛΑΤΟΥΣ FOURIER  
ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΕΔΑΦΟΥΣ ΜΕ ΕΛΑΣΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ**



**CANTERBURY EARTHQUAKES:  
RESPONSE AND FOURIER AMPLITUDE SPECTRA  
DYNAMIC SOIL AMPLIFICATION BY LINEAR METHODS**

*Diploma Thesis by*  
**Stavros Panagoulis**

*Supervised by:*  
**Professor G. Gazetas, Dr. E. Garini**



Με το πέρας των προπτυχιακών μου σπουδών στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, αισθάνομαι πως ένα πολύ σημαντικό μέρος της ζωής μου ολοκληρώθηκε. Νιώθω βαθύτατη υποχρέωση να ευχαριστήσω όλους όσους στάθηκαν δίπλα μου όλα αυτά τα χρόνια και συνετέλεσαν καθοριστικά σε αυτό.

Η αλήθεια είναι πως δεν μπορεί κάποιος να νιώθει “μηχανικός” απλώς με την αποφοίτησή του. Είμαι ευγνώμων γιατί όντως μπορεί να μην αισθάνομαι έτσι, αλλά τουλάχιστον γνωρίζω καλά τι σημαίνει να είσαι. Γι’ αυτό φρόντισαν οι καθηγητές μου όλα αυτά τα χρόνια, με τη καθοδήγησή και τις συμβουλές τους. Είναι αλήθεια πως ο καθηγητής μου, ο κ. Γκαζέτας, πρωτοστάτησε στο έργο αυτό. Το σημαντικότερο πράγμα που με δίδαξε θεωρώ πως είναι “η ακρίβεια μηχανικού”, όπως λέει κι ο ίδιος! Η φράση αυτή περικλείει όλη την επιστήμη της μηχανικής, τη νοοτροπία με την οποία ένας μηχανικός οφείλει να αντιμετωπίζει και να επιλύει τα προβλήματα. Πέραν αυτού όμως, το μεράκι, η αφοσίωση, το πάθος και η αγάπη του κ. Γκαζέτα για το “λειτουργημά” μας, πολύ δύσκολα σε αφήνει ανέπαφο. Πρόκειται για έναν Καθηγητή που πραγματικά έχει μια απίστευτη ικανότητα να εμπνέει τους φοιτητές του και να τους δίνει την εντύπωση πως ακόμα και το πιο δύσκολο πράγμα μπορεί να λυθεί με την απλούστερη μέθοδο. Οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στον κ. Γκαζέτα, όχι μόνο για τη συνεργασία μας τους τελευταίους μήνες, αλλά για όλες τις στιγμές που η επικοινωνία μαζί του με δίδαξε πράγματα ουσιαστικά, με τον πιο απλό τρόπο.

Χωρίς τη βοήθεια της δεν θα μπορούσα να ολοκληρώσω το τελευταίο μέρος των σπουδών μου. Πάντα ήταν παρούσα σε ότι κι αν χρειάστηκα, σε ότι κι αν ζήτησα, σε όποιο ενδιασμό κι αν είχα. Το ενδιαφέρον της και η αφοσίωσή της με ενέπνεαν σε κάθε μας “meeting”. Σίγουρα σε μεγάλο βαθμό η παρούσα εργασία αποτελεί και δική της δημιουργία. Ευαγγελία Γ. σε ευχαριστώ πάρα πολύ για όλα!

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τη Τασιοπούλου Παναγιώτα, η οποία με τη συμμετοχή της στην επίλυση των προβλημάτων που κατά καιρούς ανέκυπταν, συνέβαλε ουσιαστικά στην ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας.

Κλείνοντας, δε μπορώ να μην ευχαριστήσω την οικογένειά μου, τους φίλους μου και τους ανθρώπους που ήταν δίπλα μου όλα αυτά τα χρόνια, ο καθένας με τον δικό του ξεχωριστό τρόπο. Ήταν το στήριγμά μου σε κάθε δύσκολη στιγμή. Μου έδιναν κουράγιο να συνεχίσω όποτε με κατέβαλαν οι δυσκολίες. Ήταν πάντα εκεί στις όμορφες στιγμές και στις επιτυχίες μου, για να τις μοιραστώ μαζί τους.

Σας ευχαριστώ!





*Σε όσους αγαπώ...*



Η παρούσα εργασία μελετά τις καταγραφές των σεισμικών γεγονότων του Darfield, την 3<sup>η</sup> Σεπτεμβρίου του 2010 ( $M_w$  7.1), και του Christchurch, τον Φεβρουάριο ( $M_w$  6.2), τον Ιούνιο ( $M_w$  6.0,  $M_w$  5.8) και τον Δεκέμβριο ( $M_w$  5.8,  $M_w$  5.9) του 2011. Επικεντρώνεται στη διερεύνηση των φασμάτων αποκρίσεως και πλάτους Fourier που προκύπτουν από κάθε καταγραφή 20 περίπου επιταχυνσιογραφικών σταθμών, συμπεριλαμβανομένων και όσων εδράζονται στο κέντρο της πόλης του Christchurch (CBGS, CCCC, CHHC, CMHS, CRLZ, DFHS, HORC, HPSC, HVSC, KROC, NNBS, PRPC, REHS, RHSC, SHLC, SMTC, LPCC, SWNC). Η σπουδαιότερη παρατήρηση από τα εν λόγω φάσματα είναι το έντονο μακροπερίοδο περιεχόμενο των καταγραφών, ιδιαίτερα σε περιόδους μεταξύ 2-3.5 sec. Το φαινόμενο αυτό μπορεί να είναι αποτέλεσμα εδαφικής ενίσχυσης, ρευστοποίησης ή του μηχανισμού διαρρήξεως των ρηγμάτων. Ως εκ τούτου, μελετάται ο ρόλος της εδαφικής ενίσχυσης στα χαρακτηριστικά των καταγραφών μέσω ισοδύναμων ελαστικών αναλύσεων. Οι γεωτεχνικές ιδιότητες των εδαφικών προφίλ βασίστηκαν σε βιβλιογραφικές αναφορές (Wood et al., 2011; Tonkin & Taylor, 2011). Ερευνώνται δύο είδη εδαφικών προφίλ: (i) ρηχά εδαφικά προφίλ που αποτελούνται από τα ανώτερα 25-30 m εδάφους, (ii) βαθιά εδαφικά προφίλ που φτάνουν σε βάθος 350-400 m, έως το βραχώδες υπόβαθρο. Οι χρονοϊστορίες των επιταχύνσεων που προκύπτουν στην επιφάνεια κάθε καταγραφικού σταθμού συγκρίνονται με τις καταγεγραμμένες. Επίσης, διερευνάται η δυνατότητα ύπαρξης ενός μοναδικού δικανονικοποιημένου φάσματος, με βάση τα δεδομένα από όλα τα παραπάνω σεισμικά γεγονότα στην περιοχή του Canterbury.



## *ABSTRACT*

---

Ground motion records from the 2010 September, Darfield ( $M_w$  7.1) mainshock and the 2011 Canterbury earthquakes of Christchurch at February ( $M_w$  6.2), June ( $M_w$  6.0,  $M_w$  5.8) and December ( $M_w$  5.8,  $M_w$  5.9) are studied, focusing on the induced elastic response and Fourier amplitude spectra. Roughly twenty station recordings are employed, including all the stations at CBD site. Namely these stations are: CBGS, CCCC, CHHC, CMHS, CRLZ, DFHS, HORC, HPSC, HVSC, KPOC, NNBS, PRPC, REHS, RHSC, SHLC, SMTC, LPCC, SWNC. The main observation, from both the elastic response and Fourier spectra of the ground motions, is the low frequency content of the recordings, especially in the period range of 2-3.5 seconds. Such large period components could be the outcome of soil amplification, soil liquefaction, or source-mechanism related effects. Herein, the influence of soil amplification on record characteristics is examined by equivalent linear analyses. Geotechnical properties of the soil profiles utilized in this study are adopted from the literature (Wood et al., 2011; Tonkin & Taylor, 2011). Two versions of soil profile are investigated: (i) “shallow” profiles, which comprise the upper 25-30 m of soil; and (ii) “deep” profiles, which extent down to 350-400 m until the volcanic bedrock. The resulting acceleration time-histories at the surface of each station are compared to the actual recordings. A unique bi-normalized spectrum for the Canterbury area is under investigation, based on the data from the six earthquakes.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

<b>Εισαγωγή</b> .....	1
1.1 Αντικείμενο εργασίας.....	3
1.2 Διάρθρωση εργασίας.....	4

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

<b>Τα σεισμικά γεγονότα</b> .....	7
2.1 Η Νέα Ζηλανδία και το γεωτεκτονικό της περιβάλλον.....	9
2.2 Ενεργά και κρυφά ρήγματα στην περιοχή του Canterbury.....	10
2.3 Ιστορικά σεισμικά γεγονότα στη Νέα Ζηλανδία.....	11
2.4 Οι σεισμοί του Canterbury.....	12
2.4.1 Ο σεισμός του Darfield.....	13
2.4.2 Ο σεισμός της 26 <sup>ης</sup> Δεκεμβρίου του 2010 (Boxing Day EQ).....	14
2.4.3 Ο σεισμός του Φεβρουαρίου.....	14
2.4.4 Οι σεισμοί του Ιουνίου.....	15
2.4.5 Οι σεισμοί του Δεκεμβρίου.....	16
2.5 Σύγκριση μεταξύ των σεισμών του Canterbury.....	16
<b>Σχήματα &amp; εικόνες</b> .....	19

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

<b>Γεωλογικά δεδομένα και εδαφικά προφίλ</b> .....	41
3.1 Το υπέδαφος του Canterbury.....	43
3.2 Τα εδάφη στο Christchurch.....	43
3.2.1 Η γεωλογία της περιοχής.....	43
3.2.2 Οι υδροφορείς.....	44
3.2.3 Ο ρόλος του εδάφους στα σεισμικά γεγονότα.....	45
3.2.4 Τα εδαφικά προφίλ στο CBD.....	47
3.2.4.1 “Τυπικά” εδαφικά προφίλ.....	47
3.2.4.2 Τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά του CBD.....	47
3.3 Τα εδαφικά προφίλ των επιταχυνσιογραφικών σταθμών.....	48
<b>Σχήματα &amp; εικόνες</b> .....	51

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

<b>Δεδομένα και φασματικές αναλύσεις</b> .....	71
4.1 Το δίκτυο των επιταχυνσιογραφικών σταθμών.....	73
4.2 Επιταχυνσιογραφικοί σταθμοί προς μελέτη.....	73
4.3 Επεξεργασία της εδαφικής κίνησης.....	75

4.3.1	Φάσματα Fourier .....	76
4.3.2	Φάσματα αποκρίσεως.....	76
4.3.3	Καθοριστικοί παράγοντες επιρροής των φασμάτων .....	77
4.4	Δεσπόζουσα περίοδος $T_p$ .....	77
4.5	Διερεύνηση των φασμάτων αποκρίσεως και πλάτους Fourier των επιταχυνσιογραφικών σταθμών του Canterbury.....	78
	<b>Σχήματα &amp; εικόνες</b> .....	<b>85</b>

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

### Αποτελέσματα ισοδύναμων ελαστικών αναλύσεων

	<b>με το λογισμικό SHAKE2000</b> .....	<b>215</b>
5.1	Εισαγωγή.....	217
5.2	Ισοδύναμες ελαστικές αναλύσεις.....	217
5.3	Η καταγραφή στο βραχώδες υπόβαθρο του σταθμού LPCC.....	219
5.4	Αποτελέσματα και συγκρίσεις .....	220
5.4.1	Επιταχυνσιογραφικός σταθμός CBGS.....	220
5.4.2	Επιταχυνσιογραφικός σταθμός CCCC.....	223
5.4.3	Επιταχυνσιογραφικός σταθμός CHHC.....	223
5.4.4	Επιταχυνσιογραφικός σταθμός CMHS.....	224
5.4.5	Επιταχυνσιογραφικός σταθμός HPSC.....	225
5.4.6	Επιταχυνσιογραφικός σταθμός HVSC.....	225
5.4.7	Επιταχυνσιογραφικός σταθμός KPOC.....	226
5.4.8	Επιταχυνσιογραφικός σταθμός NNBS.....	227
5.4.9	Επιταχυνσιογραφικός σταθμός PRPC.....	227
5.4.10	Επιταχυνσιογραφικός σταθμός RHSC.....	228
5.4.11	Επιταχυνσιογραφικός σταθμός SHLC.....	229
5.5	Παραμετρικές αναλύσεις στον σταθμό REHS .....	229
5.5.1	Εδαφικό προφίλ των Wood et al .....	229
5.5.2	Εδαφικό προφίλ των Cubrinovski et al.....	230
5.5.3	Εδαφικό προφίλ από γεώτρηση στον σταθμό REHS.....	230
5.6	Συμπεράσματα.....	234
	<b>Σχήματα &amp; εικόνες</b> .....	<b>237</b>

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

	<b>Διερεύνηση δεδομένων</b> .....	<b>381</b>
6.1	Διερεύνηση του βάθους ύπαρξης του βραχώδους υποβάθρου .....	383
6.1.1	Επιταχυνσιογραφικός σταθμός CBGS.....	383
6.1.2	Επιταχυνσιογραφικός σταθμός CCCC.....	384
6.1.3	Συμπεράσματα.....	384
6.2	Διερεύνηση διεγείροντα κραδασμού και εδαφικών προφίλ.....	385
6.2.1	Αναλύσεις με βάση τον επιταχυνσιογραφικό σταθμό CBGS.....	386
6.2.2	Αναλύσεις με βάση τον επιταχυνσιογραφικό σταθμό CCCC.....	386
6.2.3	Συμπεράσματα.....	387



<b>Σχήματα &amp; εικόνες</b> .....	389
------------------------------------	-----

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7**

<b>Δι – κανονικοποίηση του φάσματος αποκρίσεως</b> .....	423
<b>7.1</b> Εισαγωγή.....	425
<b>7.2</b> Τα βήματα προς τη δικανονικοποίηση του φάσματος αποκρίσεως.....	425
<b>7.3</b> Εφαρμογή στους σεισμούς του Canterbury.....	427
<b>7.4</b> Συμπεράσματα.....	433
<b>7.5</b> Σύγκριση με ένα “ιδανικό” δικανονικοποιημένο φάσμα αποκρίσεως.....	434
<b>Σχήματα &amp; εικόνες</b> .....	437

<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</b> .....	453
---------------------------	-----



# Κεφάλαιο 1

---

*Εισαγωγή*



# Εισαγωγή

---

## 1.1 Αντικείμενο και σκοπός της εργασίας

Η σεισμική ακολουθία στο Canterbury της Νέας Ζηλανδίας τη περίοδο 2010 – 11 αποτέλεσε αιχμή στην ιστορία της. Οι καταστροφικές συνέπειες της σεισμικής αυτής έξαρσης, κυρίως στη πόλη του Christchurch αλλά και σε προάστια – επαρχίες κοντά σε αυτό, άλλαξαν τη ζωή των ντόπιων κατοίκων. Πέραν όμως των πολιτικοκοινωνικών και οικονομικών επιπτώσεων, οι εν λόγω σεισμοί ήταν ιδιαίτερης σημασίας και από καθαρά επιστημονική σκοπιά.

Σε χρονική περίοδο ενός έτους 6 ισχυρά σεισμικά γεγονότα έπληξαν το Νότιο νησί της Νέας Ζηλανδίας και ιδιαιτέρως τη πόλη Christchurch στα ανατολικά της πεδιάδας του Canterbury. Όπως γίνεται σαφές στα πρώτα κεφάλαια της παρούσας διπλωματικής εργασίας οι σεισμοί ήταν σημαντικοί όχι μόνο λόγω της εντάσεως τους αλλά και λόγω της εγγύτητας στη πόλη των ρηγμάτων που τους προκάλεσαν. Η ιδιαίτερη γεωμορφολογία της περιοχής επηρέασε καθοριστικά τη σεισμική διέγερση. Η μεγάλη κοιλάδα του Canterbury σε συνδυασμό με τα αλλουβιακά εδάφη που καλύπτουν το βραχώδες υπόβαθρο της περιοχής, δημιούργησαν τις προϋποθέσεις για εμφάνιση ιδιαίτερων γεωτεχνικών – εδαφικών φαινομένων.

Δεδομένης της έντονης σεισμικής δραστηριότητας σε όλη τη χώρα, η Νέα Ζηλανδία κατατάσσεται στην ελίτ των σεισμικά προηγμένων χωρών. Ένα εκτενές δίκτυο επιταχυνσιογραφικών σταθμών καλύπτει όλη τη χώρα από το βορειότερο έως το νοτιότερο σημείο της. Η ύπαρξη ενός τέτοιου δικτύου αποτελεί τεράστιο πλεονέκτημα για την παρακολούθηση και την διερεύνηση σεισμικών φαινομένων, όπως αυτά που έλαβαν χώρα τη περίοδο 2010 – 2011 στο Canterbury. Έχοντας στη διάθεση μας ένα τέτοιο εύρος δεδομένων, η επιστημονική έρευνα αποκτά ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Βέβαια, όπως θα γίνει σαφές και στα επόμενα κεφάλαια παρά τον πλούτο δεδομένων που σχετίζονται με τις καταγραφές των σεισμικών γεγονότων, τα στοιχεία σχετικά με τα εδαφικά – γεωτεχνικά δεδομένα της περιοχής είναι ελλιπή. Οι γεωλογικοί χάρτες της περιοχής αρκούνται μονάχα σε γενικές περιγραφές του ευρύτερου γεωλογικού υποβάθρου, χωρίς να διευκρινίζουν πιο λεπτομερή δεδομένα και χαρακτηριστικά.

Στη παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται προσπάθεια εκμετάλλευσης των επιταχυνσιογραφικών δεδομένων από τα σεισμικά γεγονότα του Canterbury με στόχο τη μελέτη των ελαστικών φασμάτων απόκρισης και των φασμάτων πλάτους Fourier. Προς αυτή τη κατεύθυνση μελετώνται τα εν λόγω φάσματα που προκύπτουν από τις καταγραφές 18 συνολικά επιταχυνσιογράφων στην περιοχή του Canterbury και ειδικότερα κοντά στη πόλη του Christchurch. Στόχος της μελέτης είναι ο προσδιορισμός της δεσπόζουσας περιόδου κάθε σεισμικής καταγραφής.

Επιπρόσθετα, θα διερευνήσουμε την επιρροή των ανώτερων εδαφικών σχηματισμών στη διάδοση των σεισμικών κυμάτων από το βραχώδες υπόβαθρο προς την επιφάνεια. Ο ρόλος του εδάφους στην μεταβολή των δεδομένων της σεισμικής κίνησης είναι ένα φαινόμενο που έχει επισημανθεί κατά κόρον σε παλαιότερα σεισμικά γεγονότα ανά τον κόσμο. Η ιδιαίτερη γεωμορφολογία της περιοχής θα διαδραματίσει καθοριστικό ρόλο στις αναλύσεις μας, θέτοντας αρκετά εμπόδια και θολώνοντας το τοπίο. Σε αυτό φυσικά συμβάλλει η γενικότερη απροσδιοριστία και έλλειψη ακριβέστερων δεδομένων σχετικά με τις εδαφικές ιδιότητες των εν λόγω σχηματισμών.

Τέλος, έχοντας ως δεδομένες τις δεσπόζουσες περιόδους από τη μελέτη των φασμάτων αποκρίσεως και πλάτους Fourier, θα επιχειρήσουμε να κανονικοποιήσουμε το φάσμα επιταχύνσεων. Το έναυσμα για τη μελέτη αυτή προήλθε από τη διπλωματική εργασία της Κ. Ζιωτοπούλου (Αικατερίνη Ζιωτοπούλου, 2007). Είναι γεγονός ότι παγκοσμίως οι αντισεισμικοί κανονισμοί προτείνουν φάσματα σχεδιασμού αποτελούμενα από τμήματα – κλάδους τα οποία ορίζουν την αντίστοιχη επιτάχυνση σχεδιασμού ανάλογα με την εκάστοτε ιδιοπερίοδο ταλάντωσης του εν λόγω συστήματος. Τα φάσματα αυτά είναι κανονικοποιημένα μονάχα ως προς τον κατακόρυφο άξονα, δηλαδή τον άξονα των φασματικών επιταχύνσεων, με βάση την μέγιστη εδαφική επιτάχυνση  $g_{ga}$  (peak ground acceleration). Προχωρώντας ένα βήμα παραπέρα, θα επιχειρήσουμε τη κανονικοποίηση των φασμάτων και ως προς τον οριζόντιο άξονα, των περιόδων.

## **1.2 Διάρθρωση της εργασίας**

Στο κεφάλαιο 2 παρουσιάζεται το γεωτεκτονικό περιβάλλον της Νέας Ζηλανδίας και σχολιάζονται τα κύρια ρήγματα της χώρα αλλά και τα η χρονοϊστορία εξέλιξης των σεισμικών γεγονότων στη χώρα έως το 2010. Εκτενώς παρουσιάζονται οι σεισμοί του Canterbury. Αναλύονται στοιχεία σχετικά με τα χαρακτηριστικά των σεισμών αλλά και με τις αστοχίες (εδαφικές και δομικές) που προκάλεσαν στο Christchurch.

Στο κεφάλαιο 3 γίνεται παρουσίαση των γεωλογικών δεδομένων της περιοχής. Σχολιάζεται το υπέδαφος, οι συνθήκες που οδήγησαν στη δημιουργία τόσο ιδιαίτερων εδαφικών χαρακτηριστικών αλλά και ο ρόλος που γενικά διαδραματίζουν οι εδαφικοί σχηματισμοί στην διάδοση των σεισμικών κυμάτων. Επικεντρώνουμε τις αναφορές μας στο κέντρο της πόλης του Christchurch (CBD – Central Business District) και επισημαίνουμε τα κυριότερα χαρακτηριστικά των εδαφών του. Τέλος παραθέτουμε τα εδαφικά προφίλ στα οποία βασιστήκαμε για τη πραγματοποίηση των αναλύσεών μας.

Στο κεφάλαιο 4 παραθέτουμε στοιχεία σχετικά με το εκτενές δίκτυο επιταχυνσιογραφικών σταθμών που υπάρχει στη Νέα Ζηλανδία. Επισημαίνουμε τους σταθμούς που επιλέξαμε προς μελέτη και σχολιάζουμε τις μεθόδους επεξεργασίας της εδαφικής κίνησης που χρησιμοποιήσαμε. Το κεφάλαιο κλείνει με

την επιλογή της δεσπόζουσας περιόδου για κάθε μία καταγραφή χωριστά. Η δυσκολία προσδιορισμού μίας μοναδικής δεσπόζουσας περιόδου μας οδήγησε στην υιοθέτηση τριών “υποψήφια” τιμών, τις οποίες ονομάσαμε βραχεία (short), μεσαία (medium) και μακρά (long) αντίστοιχα.

Στο κεφάλαιο 5 συγκεντρώνονται τα αποτελέσματα των ισοδύναμων ελαστικών αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν με τον κώδικα SHAKE2000. Στόχος των αναλύσεων είναι η διερεύνηση του ρόλου του εδάφους στη διάδοση των σεισμικών κυμάτων προς την εδαφική επιφάνεια. Ως διεγείροντας κραδασμός στο βραχώδες υπόβαθρο κάθε επιταχυνσιογραφικού σταθμού χρησιμοποιήθηκε αυτός που προέκυψε από αντίστροφη ισοδύναμη ελαστική ανάλυση στον σταθμό LPCC. Ο εν λόγω σταθμός είναι ο μοναδικός στην περιοχή που εδράζεται σε έδαφος κατηγορίας B (rock) με βάση τον αντισεισμικό κανονισμό της Νέας Ζηλανδίας (NZS 1170.5:2004). Ειδικά για τον σταθμό REHS, έγιναν παραμετρικές αναλύσεις με χρήση λεπτομερέστερων εδαφικών προφίλ.

Στο κεφάλαιο 6 τίθενται υπό διερεύνηση τα εδαφικά προφίλ που χρησιμοποιήθηκαν στις αναλύσεις του προηγούμενου κεφαλαίου. Επίσης ελέγχεται η ορθότητα της χρήσης του κραδασμού που προέκυψε στο βραχώδες υπόβαθρο του σταθμού LPCC ως διεγείροντας κραδασμός στη βάση των υπολοίπων σταθμών. Ο έλεγχος αυτός γίνεται μεταξύ των σταθμών CBGS και CCCC που εδράζονται στο κέντρο της πόλης του Christchurch και απέχουν μεταξύ τους περίπου 2.5 km.

Στο κεφάλαιο 7 επιχειρείται η δικανονικοποίηση του φάσματος αποκρίσεως των κατασκευών με βάση τα αποτελέσματα των δεσποζουσών περιόδων του κεφαλαίου 4. Γίνεται σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων της δικανονικοποίησης για τους σεισμούς του Canterbury και των αντίστοιχων αποτελεσμάτων από την εργασία της Κ. Ζιωτοπούλου, που αποτέλεσε και το κινητήριο ερέθισμα για αυτή την διερεύνηση.





# Κεφάλαιο 2

---

*Τα σεισμικά γεγονότα*



## Τα σεισμικά γεγονότα

---

### 2.1 Η Νέα Ζηλανδία και το γεωτεκτονικό της περιβάλλον

Η Νέα Ζηλανδία είναι μία νησιωτική χώρα στα νοτιοδυτικά του Ειρηνικού Ωκεανού, περίπου 1500 km ανατολικά της Αυστραλίας. Αποτελείται κυρίως από δύο μεγάλης έκτασης νησιά, το Βόρειο και το Νότιο (North and South Islands) αλλά και από άλλες μικρότερες νησιωτικές ομάδες. Λόγω της απομονωμένης θέσης που κατέχει στον παγκόσμιο πολιτικό χάρτη άργησε πολύ να κατοικηθεί, κάτι που έγινε το 1250 – 1300 από τους Πολυνήσιους. Ο πληθυσμός της ανέρχεται περίπου στα 4.5 εκατομμύρια κατοίκους (εκτίμηση Ιουνίου 2012). Οι τρεις μεγαλύτερες πόλεις της είναι το Auckland και το Wellington (πρωτεύουσα) στο Βόρειο νησί ενώ στο Νότιο το Christchurch (βλ. **εικόνα 2.1**).

Η θέση της Νέας Ζηλανδίας από γεωτεκτονική σκοπιά την καθιστά μία από τις πιο σεισμογενείς χώρες ανά τον κόσμο. Η έντονη σεισμική και ηφαιστειακή δραστηριότητα σχεδόν σε όλη την έκταση της χώρας είναι αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης των δύο τεκτονικών πλακών, του Ειρηνικού Ωκεανού και της Αυστραλίας. Οι πλάκες αυτές αποτελούν τμήματα του φλοιού της γης και βρίσκονται συνεχώς σε σχετική κίνηση μεταξύ τους. Οι περισσότεροι σεισμοί προκαλούνται στο ανώτερο εύθραυστο τμήμα των πλακών, βάθους μεταξύ 10 και 50 km.

Οι περισσότεροι σεισμοί παγκοσμίως συμβαίνουν στα όρια μεταξύ των τεκτονικών πλακών της Γης. Η πλάκα του Ειρηνικού Ωκεανού είναι η μεγαλύτερη από όλες και η ταχύτερα κινούμενη. Τα όρια της, συχνά αποκαλούμενα ως “the ring of fire” (το δαχτυλίδι της φωτιάς), προκαλούν πολυάριθμα σεισμικά γεγονότα και ηφαιστειακές εκρήξεις ετησίως.

Η Νέα Ζηλανδία ουσιαστικώς εδράζεται στο όριο μεταξύ των δύο αυτών τεκτονικών πλακών. Οι πλάκες στο συγκεκριμένο σημείο έχουν ετήσια σχετική μετακίνηση περίπου 35 – 45 mm. Η **εικόνα 2.2** απεικονίζει τη θέση της χώρας η οποία σχεδόν “κόβεται στα δύο” από το σύνορο των πλακών. Τα δύο τόξα στο Βόρειο και το Νότιο νησί δείχνουν τη κατεύθυνση μετακίνησης των τεκτονικών πλακών. Η πλάκα του Ειρηνικού Ωκεανού κινείται περίπου με 45 mm/year προς τα δυτικά ενώ η Αυστραλιανή με 35 mm/year προς την αντίθετη κατεύθυνση. Έτσι δημιουργείται ένα καθεστώς “σύνθλιψης” της Νέας Ζηλανδίας.

Στην **εικόνα 2.3** παρουσιάζονται οι ετήσιες παραμορφώσεις που προκαλούνται σε όλη την έκταση της χώρας λόγω της σχετικής μετατόπισης των δύο τεκτονικών πλακών. Οι μετρήσεις πραγματοποιούνται μέσω δορυφόρων αξιοποιώντας την τεχνολογία GPS (Global Positioning System). Η συσσωρευμένη μετατόπιση αναπόφευκτα οδηγεί σε σεισμική δραστηριότητα. Οι περιοχές που βρίσκονται στη περιοχή των έντονα κόκκινων γραμμών τείνουν να υποβάλλονται σε περισσότερους σεισμούς.

## 2.2 *Ενεργά και κρυφά ρήγματα στην περιοχή του Canterbury*

Με τον όρο ρήγμα (fault) ονομάζουμε τη διακοπή της συνέχειας μιας ομάδας στρωμάτων πετρωμάτων του στερεού φλοιού της Γης, η οποία συμβαίνει κατά επίπεδη επιφάνεια και σε μεγάλη έκταση. Προκαλούνται από τη κίνηση των λιθοσφαιρικών πλακών της Γης. Όταν οι τάσεις που δημιουργούνται λόγω της σχετικής μετακίνησης τους ξεπερνούν το όριο θραύσης του πετρώματος προκαλείται διάρρηξη και σημαντική μετακίνηση στα δύο τεμάχια που δημιουργούνται. Τα ρήγματα αποτελούν την απόκριση των γεωλογικών σχηματισμών σε σύνθλιψη, εφελκυσμό ή διάτμηση. Στην **εικόνα 2.4** παρουσιάζονται οι διάφοροι τύποι ρηγμάτων που γενικά συναντάμε στη φύση σε κατηγορίες ανάλογα με τη γενεσιουργό μετακίνηση που τα προκαλεί.

Οι γεωλόγοι εκφράζουν την άποψη ότι για ένα ρήγμα υπάρχουν ενδείξεις μετακίνησης έστω και για μία φορά για τη περίοδο των 100,000 τελευταίων ετών τότε θα πρέπει να θεωρείται πιθανό ενεργό ρήγμα για να προκαλέσει σεισμικό συμβάν. Αν οι ενδείξεις αυτές μαρτυρούν μετακίνηση για τα τελευταία 5000 χρόνια τότε το ρήγμα θα πρέπει να θεωρείται ικανό για ισχυρό σεισμό και καταστροφές σε ακτίνα 50 km. Από τη στιγμή που ένα ρήγμα σχηματίζεται, θα συνεχίσει να προκαλεί μετασεισμούς για εκατοντάδες ή χιλιάδες χρόνια μετά ενώ το έδαφος της γύρω περιοχής θα μετατοπίζεται καθέτως και οριζοντίως. Τέτοια φαινόμενα έχουν συμβάλει στην δημιουργία των περισσότερων οροσειρών στη Νέα Ζηλανδία.

Η περιοχή του Canterbury εκτείνεται στο Νότιο νησί της Νέας Ζηλανδίας καλύπτοντας μία έκταση 45346 km<sup>2</sup> (**εικόνα 2.5**). Η πόλη του Christchurch ανήκει στη συγκεκριμένη περιοχή. Τα βαθύτερα και παλαιότερα βραχώδη στρώματα στο Canterbury αποτελούνται από συμπιεσμένους ιζηματογενείς βράχους (sandstones και mudstones) που ονομάζονται γραουβάκες (greywacke). Χαρακτηριστική είναι η **εικόνα 2.6** που παρουσιάζει έναν απλοποιημένο γεωλογικό χάρτη της χώρας. Το υπέδαφος της αποτελείται από σχιστόλιθους, γραουβάκες, ηφαιστειακά πετρώματα και ένα κάλυμμα ιζημάτων. Οι γραουβάκες έχουν πάρει το όνομά τους από τη γρι όψη που τις χαρακτηρίζει (γρι βράχος). Αποτελούν είδος χερσαίων ψαμμιτών με κλαστικό υλικό πλήρωσης μεγαλύτερο του 15 %. Αποτέθηκαν στην περιοχή προτού η Νέα Ζηλανδία αποκολληθεί από την υπέρ – ήπειρο που ανήκε, την Gondwana. Με το πέρασμα εκατομμυρίων ετών (περίπου 80 – 25 εκατομμύρια χρόνια πριν) αυτοί οι βραχώδεις σχηματισμοί διαβρώθηκαν και καλύφθηκαν από επίγεια και θαλάσσια ιζήματα. Οι ηφαιστιογενείς εκρήξεις συνέβαλλαν στη δημιουργία του όρους Peninsula περίπου 11 – 6 εκατομμύρια χρόνια πριν. Τα τελευταία 2 εκατομμύρια χρόνια η εποχή των παγετώνων διαδραμάτισε καθοριστικό ρόλο στη διαμόρφωση των γεωλογικών σχηματισμών. Με το λιώσιμο των πάγων τα ποτάμια που δημιουργήθηκαν στις Νότιες Άλπεις κάλυψαν του υποκείμενος βράχους της πεδιάδας του Canterbury με αλλουβιακές προσχώσεις χαλικιών πάχους 200 έως 600 μέτρων. Με τον αποχωρισμό της Νέας Ζηλανδίας από την υπέρ - ήπειρο Gondwana, οι βραχώδεις σχηματισμοί θρυμματίστηκαν δημιουργώντας ένα πλούσιο σύστημα ρηγμάτων εκτεινόμενων σε όλη την περιοχή κάτω από την πεδιάδα του Canterbury και από τα όρη Peninsula.

Το ρήγμα Alpine (Alpine fault) είναι το πιο γνωστό στη περιοχή. Καλύπτει τη δυτική πλευρά των Νότιων Άλπεων και έχει μήκος 650 km. Στην **εικόνα 2.7** απεικονίζεται το συγκεκριμένο ρήγμα καθώς και άλλα 100 περίπου ενεργά ρήγματα στη περιοχή ικανά να προκαλέσουν ισχυρούς σεισμούς. Επίσης είναι ορατά και τα ρήγματα στο Βόρειο νησί με κυριότερο το ρήγμα Wellington.

Η φύση της σύγκρουσης μεταξύ των τεκτονικών πλακών κάτω ακριβώς από το Νότιο νησί οδηγεί σε σεισμούς μικρού εστιακού βάθους, που συνήθως είναι και οι πιο καταστρεπτικοί. Η **εικόνα 2.8** που προβάλλει τα επίκεντρα όλων των σεισμικών γεγονότων στη Νέα Ζηλανδία την τελευταία δεκαετία επιβεβαιώνει την παραπάνω παρατήρηση. Η πλειοψηφία τους συμβαίνει σε μικρό εστιακό βάθος (μικρότερο των 40 km) και καλύπτει σχεδόν όλη την έκταση της χώρας, χαράσσοντας ουσιαστικά τη προβολή του συνόρου των τεκτονικών πλακών της Αυστραλίας και του Ειρηνικού στο χάρτη. Επίσης το μεγάλο βάθος των αλλουβιακών προσχώσεων κάτω από την κοιλάδα του Canterbury ουσιαστικώς κρύβει τα περισσότερα ρήγματα εμποδίζοντας την χαρτογράφησή τους και την κατάταξή τους σε ενεργά ή μη. Στην **εικόνα 2.9** παρουσιάζονται κάποια χαρτογραφημένα ενεργά ρήγματα κοντά στην πόλη του Christchurch. Το ρήγμα Greendale ήταν που προκάλεσε τον σεισμό της 3<sup>ης</sup> Σεπτεμβρίου ( $M_w = 7.1$ ) στο Darfield. Όπως φαίνεται και στον χάρτη κάτω από τη πόλη του Christchurch δεν υπάρχει μόνο ένα ενεργό ρήγμα αλλά περισσότερα. Το ρήγμα του Port Hills και τα ρήγματα που προκάλεσαν του σεισμούς στις 26 Δεκεμβρίου του 2010 (Boxing Day) και στις 13 Ιουνίου του 2011.

### **2.3 Ιστορικά σεισμικά γεγονότα στη Νέα Ζηλανδία**

Δεδομένων των γεωτεκτονικών συνθηκών που επικρατούν στη Νέα Ζηλανδία, όπως περιγράφηκαν παραπάνω, δεν αποτελεί έκπληξη το γεγονός ότι οι σεισμοί είναι ένα καθημερινό φαινόμενο. Φυσικά εκδηλώνονται όχι μόνο ασθενείς – μικρής έντασης σεισμοί αλλά και ισχυρότεροι που προκαλούν λειτουργικές και δομικές βλάβες στις κατασκευές και στην χειρότεροι περίπτωση απώλεια ανθρώπινων ζωών.

Στην **εικόνα 2.10** παρουσιάζονται όλοι οι σεισμοί μικρού εστιακού βάθους και μεγέθους  $M_w \geq 6.5$  που συνέβησαν στη Νέα Ζηλανδία από το 1840 έως και το 2011. Ο πιο ισχυρός σεισμός στη περιοχή παραμένει εκείνος που συνέβη το 1855 στο Waiararua με εκτιμώμενο μέγεθος 8.2. Παρατηρούμε πως η περίοδος από το 1929 έως το 1942 απέφερε ιδιαιτέρως ισχυρά σεισμικά γεγονότα. Από το 1929 έως το 1931 υπήρξαν 5 σεισμοί με μέγεθος κοντά στο 7. Αυτοί περιελάμβαναν τον σεισμό του Buller στις 16 Ιουνίου του 1929 που προκάλεσε 17 θανάτους και τον σεισμό του Napier στις 3 Φεβρουαρίου του 1931, στον οποίο θανατώθηκαν 256 άνθρωποι. Από το 2000 και μετά υπάρχει μία αύξηση των σεισμών μεγέθους 7 ή παραπάνω. Όμως έως τον Σεπτέμβριο του 2010 όλοι είχαν συμβεί σε περιοχές μακριά από κατοικήσιμες ζώνες. Η **εικόνα 2.11** επιβεβαιώνει τα ανωτέρω απεικονίζοντας τη σεισμική ακολουθία της χώρα από το 1960 έως το 2011. Οι σεισμοί μεγέθους μεγαλύτερο του 7 (πράσινο χρώμα) συνέβησαν στις αρχές του 21<sup>ου</sup> αιώνα ενώ

παρατηρείται μια γενικότερη αύξηση των σεισμικών συμβάντων κάθε μεγέθους με τη πάροδο των χρόνων.

## 2.4 Οι σεισμοί του Canterbury

Με τον όρο “οι σεισμοί του Canterbury” αποκαλούνται οι σεισμοί ή οι μετασεισμοί που έλαβαν χώρας στη περιοχή του Canterbury μετά την 4<sup>η</sup> Σεπτεμβρίου του 2010 (Royal Commission’s Terms of Reference). Στη παρούσα εργασία με τον όρο αυτό αναφερόμαστε στους 5 σεισμούς που έπληξαν την περίοδο από την 4<sup>η</sup> Σεπτεμβρίου του 2010 έως την 23<sup>η</sup> Δεκεμβρίου του 2011. Πρόκειται για τους σεισμούς της 4<sup>ης</sup> Σεπτεμβρίου του 2010, της 26<sup>ης</sup> Δεκεμβρίου του 2010, της 22<sup>ης</sup> Φεβρουαρίου του 2011, της 13<sup>ης</sup> Ιουνίου του 2011 και της 23<sup>ης</sup> Δεκεμβρίου του ίδιου έτους.

Οι σεισμοί του Canterbury θεωρούνται ξεχωριστοί για δύο λόγους. Πρώτον, η ένταση των σεισμών ήταν ασυνήθιστα υψηλή για μια περιοχή που ανήκει σε μία μέτρια ζώνη σεισμικής δραστηριότητας (εικόνα 2.12). Δεύτερον, τα ρήγματα που προκάλεσαν τους σεισμούς ήταν κοντά ή και κάτω από την πόλη του Christchurch, η οποία όμως διαθέτει ένα πολύ πλούσιο δίκτυο επιταχυνσιογραφικών σταθμών. Έτσι ήταν δυνατή η πλήρης καταγραφή των φαινομένων σε μία ευρεία γεωγραφική ζώνη καθιστώντας του συγκεκριμένους σεισμούς ιδανικό σενάριο μελέτης.

Ο πρώτος σεισμός αυτής της ακολουθίας, στις 4 Σεπτεμβρίου του 2010 (3 Σεπτεμβρίου με βάση το UTC – universal time coordinated) είχε μέγεθος  $M_w = 7.1$ . Ο επόμενος σεισμός έλαβε χώρα στις 26 Δεκεμβρίου του ίδιου έτους με μέγεθος  $M_w = 4.7$ . Παρά το μικρό του μέγεθος θεωρείται σημαντικός επειδή συνέβη ακριβώς κάτω από το κέντρο τη πόλης του Christchurch σε πολύ μικρό εστιακό βάθος, προκαλώντας αρκετές δομικές αστοχίες. Περίπου πέντε μήνες μετά τον πρώτο σεισμό ακολούθησε εκείνος της 22<sup>ης</sup> Φεβρουαρίου του 2011 με τη διάρρηξη του ρήγματος του Port Hills. Είχε μέγεθος  $M_w = 6.2$  και επίκεντρο 42 km μακριά από του Σεπτεμβρίου, δίπλα την πόλη του Christchurch. Ύστερα από 4 μήνες περίπου, στις 13 Ιουνίου του 2011, ένας ακόμη σεισμός μεγέθους  $M_w = 6$  συνέβη στην ίδια περιοχή. Τέλος στις 23 Δεκεμβρίου του έτους αυτού συνέβη ο τελευταίος σεισμός της ακολουθίας με μέγεθος  $M_w = 5.9$ .

Το χαρακτηριστικό αυτής της έξαρσης σεισμικών γεγονότων στην ευρύτερη περιοχή του Canterbury είναι οι ασυνήθιστα υψηλές τιμές μέγιστων εδαφικών επιταχύνσεων ( $PGA$  – peak ground acceleration) που καταγράφηκαν, ιδίως στην πόλη του Christchurch. Πριν από αυτούς η μέγιστη εδαφική επιτάχυνση που είχε καταγραφεί ήταν 0.6 g, στο σεισμό της Inangahua το 1968. Αντίθετα οι μέγιστες εδαφικές επιταχύνσεις που καταγράφηκαν το τελευταίο έτος είχαν τιμές διπλάσιες ή και τριπλάσιες του 0.6 g.

### 2.4.1 Ο σεισμός του *Darfield*

Στις 4 Σεπτεμβρίου του 2010 στις 4.35 πμ για την Νέα Ζηλανδία ή στις 3 Σεπτεμβρίου στις 16.35 μμ (UTC) για τον “δυτικό κόσμο”, ένας σεισμός μεγέθους  $M_w = 7.1$  χτύπησε τη πόλη του Christchurch και την ευρύτερη περιοχή του Canterbury, με εστιακό βάθος 11 km. Το επίκεντρο του ήταν περίπου 40 km δυτικά του Christchurch, κοντά στη περιοχή του Darfield από την οποία πήρε και το όνομά του (**εικόνα 2.13**). Προκλήθηκε από ένα άγνωστο έως τότε ρήγμα κάτω από την πεδιάδα του Canterbury. Ήταν ένα γεγονός σπάνιο για τα μέχρι τότε δεδομένα διότι έλαβε χώρα σε μία περιοχή που είχε αρκετά χαμηλά σεισμική δραστηριότητα σε σύγκριση με άλλες περιοχές της χώρας. Εκτιμήσεις κάνουν λόγο για μία περίοδο επαναληψιμότητας του γεγονότος που αγγίζει τα 8000 χρόνια.

Η ένταση του σεισμού ήταν μεγάλη (**εικόνα 2.14**). Προκάλεσε εκτεταμένες βλάβες κυρίως σε κατασκευές από μη οπλισμένη τοιχοποιία και σε παλαιά πετρόκτιστα κτήρια στο Christchurch και στις γύρω περιοχές. Επίσης στα ανατολικά προάστια της πόλης και στη περιοχή του Kaiaroι υπήρξαν σημαντικά φαινόμενα ρευστοποίησης του εδάφους που εκδηλώθηκαν με την παρουσία πολυάριθμων “κρατήρων αμμοϊλύος” στην επιφάνεια και την οριζόντια – πλευρική εξάπλωση του εδάφους που προκάλεσε ζημιές σε κατοικίες και υποδομές. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι η διάρρηξη έφτασε έως την επιφάνεια και το ίχνος του ρήγματος κάλυψε μία απόσταση περίπου 29.5 km περνώντας μέσα από καλλιεργήσιμες εκτάσεις στα δυτικά του Christchurch (**εικόνα 2.15**). Επίσης εκτιμάται πως η έκτασή του καλύπτει ακόμη 10 km κάτω από την επιφάνεια του εδάφους. Το ρήγμα Greendale, όπως ονομάστηκε, ήταν άγνωστο μέχρι τότε. Η **εικόνα 2.16** απεικονίζει το εν λόγω ρήγμα, το επίκεντρο του κύριου σεισμού και των μετασεισμών που ακολούθησαν έως την 21<sup>η</sup> Φεβρουαρίου του 2011.

Όπως φαίνεται και στην ίδια εικόνα η κίνηση του ρήγματος ήταν κυρίως δεξιόστροφης οριζόντιας ολίσθησης σε συνδυασμό με ανάστροφη κίνηση μικρής γωνίας με την οριζόντιο (strike – slip and thrust). Είχε κατά μέσο όρο οριζόντια παραμόρφωση 2.5 m και φτάνοντας σημειακά μία μέγιστη τιμή 5 m. Η αντίστοιχη μέγιστη τιμή για τη κατακόρυφη διεύθυνση ήταν 1.5 m. Η επιφανειακή εκδήλωση της διάρρηξης δεν ήταν μία συνεχής γραμμή. Υπήρχαν ίχνη του ρήγματος που χωρίζονταν από αποστάσεις περίπου 1 km. Θεωρείται πως η διάρρηξη αρχικώς δεν ξεκίνησε από το ρήγμα Greendale αλλά από κάποιο κρυφό ρήγμα που τέμνεται με αυτό και ονομάζεται ρήγμα Charing Cross. Αφού η διάρρηξη ξεκίνησε στο τελευταίο επεκτάθηκε στο ρήγμα Greendale και στη συνέχεια εξαπλώθηκε και στις δύο κατευθύνσεις κατά μήκος του αλλά κυρίως προς τα ανατολικά, δηλαδή προς το Christchurch. Αυτό φαίνεται καλύτερα στην **εικόνα 2.17** που παρουσιάζει τις μετακινήσεις εκατέρωθεν του ρήγματος όπως καταγράφηκαν από τον δορυφόρο. Η πράσινη εσοχή που σχηματίζεται με κατεύθυνση από το ρήγμα Greendale προς το επίκεντρο υποδηλώνει την παρουσία του κρυφού ρήγματος Charing Cross.

Δεδομένου ότι η διάρρηξη κατά μήκος του ρήγματος Greendale κατευθύνθηκε κυρίως προς τη πόλη, τα σεισμικά κύματα που απελευθερώθηκαν στην αρχή του φαινομένου ενισχύθηκαν από τα επόμενα που ακολούθησαν μέσω της εξάπλωσης



προς τα ανατολικά. Αυτή η ενισχυτική συμβολή των κυμάτων προς τη κύρια κατεύθυνση διάδοσης της διάρρηξης ονομάζεται “κατευθυντικότητα” (directivity). Αποτέλεσμα του φαινομένου ήταν η αύξηση της έντασης του κραδασμού προς την πόλη του Christchurch και η μείωση της προς την αντίθετη μεριά. Επιπρόσθετα η διάρκεια του κραδασμού στην πόλη είναι αρκετά μικρότερη σε σχέση με την αντίθετη κατεύθυνση.

Οι μέγιστες εδαφικές επιταχύνσεις στον επιταχυνσιογραφικό σταθμό του Greendale έφτασαν τα 1.3 g και τα 0.3 g στη πόλη του Christchurch. Στην **εικόνα 2.18** παρουσιάζονται οι μέγιστες τιμές επιταχύνσεων στην επιφάνεια του εδάφους όπως αυτές καταγράφηκαν από διάφορους σταθμούς στο Christchurch και γύρω από αυτό. Πέραν αυτού όμως οι καταγραφές της περιοχής παρουσίασαν περίπλοκα χαρακτηριστικά και έντονες διαφοροποιήσεις από σημείο σε σημείο. Αιτία φαίνεται πως είναι τόσο τα φαινόμενα κοιλάδας (basin effects) που αναπτύχθηκαν εξαιτίας της γεωμορφολογίας της περιοχής όσο και τα εδαφικά χαρακτηριστικά που παρουσιάζουν έντονη ποικιλία ανά λίγες δεκάδες μέτρα.

#### ***2.4.2 Ο σεισμός της 26<sup>ης</sup> Δεκεμβρίου του 2010 (Boxing Day EQ)***

Τον Δεκέμβριο του 2010 ξεκίνησε μία αλληλουχία σεισμικών συμβάντων στη πόλη του Christchurch, με αφετηρία την 26<sup>η</sup> του μήνα και το σεισμό μεγέθους  $M_w = 4.7$  στις 10.30 πμ τοπική ώρα. Παρ’ όλο που η διάρκεια και η ένταση του φαινομένου ήταν μικρή, προκάλεσε αρκετές βλάβες στο κέντρο της πόλης (CBD – Central Business District) χάριν στο ότι συνέβη κάτω ακριβώς από αυτή και σε εστιακό βάθος περίπου 4 km. Το επίκεντρο του ήταν 1.8 km βορειοδυτικά του Καθεδρικού Ναού της πόλης. Ο μηχανισμός της διάρρηξης ήταν και δεξιόστροφη οριζόντια ολίσθηση και το ρήγμα είχε διεύθυνση περίπου Ανατολής Δύσης, έχοντας γωνία 74° με τον Βορρά.

Η **εικόνα 2.19** απεικονίζει τις μέγιστες εδαφικές επιταχύνσεις που καταγράφηκαν στη πόλη από τον σεισμό αυτό. Η μεγαλύτερη εξ αυτών υπήρξε στους Βοτανικούς Κήπους (Christchurch Botanic Gardens) με τιμή 0.4 g. Φαινόμενα κατευθυντικότητας δεν παρουσιάστηκαν στο σεισμό αυτό.

#### ***2.4.3 Ο σεισμός του Φεβρουαρίου***

Ο καταστρεπτικότερος σεισμός στο Canterbury τη περίοδο 2010 – 11 ήταν αυτός που έλαβε χώρα στις 22 Φεβρουαρίου του 2011 στις 12.51 μμ, με μέγεθος  $M_w = 6.2$ , επίκεντρο περίπου 10 km νοτιοανατολικά από το Christchurch και εστιακό βάθος 5 km (**εικόνα 2.20**). Προκλήθηκε από τη διάρρηξη του ρήγματος Port Hills, άγνωστου μέχρι τότε. Ο προσανατολισμός του ήταν Βορειοανατολικός – Νοτιοδυτικός φτάνοντας σε βάθος 1 km κάτω από την επιφάνεια, έχοντας συνολικό μήκος περίπου 10 km. Το ρήγμα σε αυτή τη περίπτωση δεν είχε επιφανειακή εμφάνιση. Ο



μηχανισμός της διάρρηξης ήταν περίπλοκος συνδυάζοντας δεξιόστροφη πλευρική ολίσθηση με ανάστροφη διάρρηξη μικρής κλίσης ως προς την οριζόντιο (right – lateral strike slip and thrust). Η διάρρηξη προκάλεσε μία μέγιστη ολίσθηση 2.5 – 4 m μέτρων σε ένα βάθος 4 – 5 km ενώ το επίπεδο του ρήγματος καταβυθίζεται με γωνία 68°. Στην **εικόνα 2.21** παρουσιάζεται το επίκεντρο του σεισμού και οι ακόλουθοι μετασεισμοί σε σχέση με το σεισμικό συμβάν του Darfield. Η σχέση μεταξύ των δύο αυτών σεισμικών γεγονότων φαίνεται καλύτερα στις **εικόνες 2.22 και 2.23**. Όπως θα αναλύσουμε και παρακάτω πολλοί επιστήμονες υιοθετούν την άποψη πως το ρήγμα του Port Hills είναι απλά μία προέκταση του ρήγματος Greendale. Οι **εικόνες 2.24 και 2.25** δίνουν στοιχεία σχετικά με το προσανατολισμό του ρήγματος αλλά και τις τελικές μετατοπίσεις των δύο τεμαχών του.

Το σεισμικό αυτό γεγονός οδήγησε στην πλήρη κατάρρευση δύο κτηρίων στο κέντρο του Christchurch (CBD), του Canterbury Television (CTV) και του Pyne Gould Corporation (PGC). Οι δύο αυτές καταρρεύσεις προκάλεσαν το θάνατο 115 και 18 ανθρώπων αντιστοίχως (**εικόνα 2.26**). Επίσης προκάλεσε μερική κατάρρευση και σοβαρές ζημιές σε πολλά άλλα κτήρια. Καταγράφηκαν 185 συνολικά θάνατοι και πολλοί τραυματισμοί.

Οι κραδασμοί που προκλήθηκαν στην περιοχή ήταν ιδιαίτερως ισχυροί. Στον επιταχυνσιογραφικό σταθμό του Heathcote Valley (HSVC) καταγράφηκαν μέγιστες κατακόρυφες και οριζόντιες επιταχύνσεις 2.2 g και 1.7 g αντίστοιχα. Στο κέντρο της πόλης (CBD) καταγράφηκε οριζόντια επιτάχυνση 0.8 g. Η **εικόνα 2.27** παρουσιάζει τις μέγιστες εδαφικές επιταχύνσεις στην περιοχή. Σε σύγκριση με τις μέγιστες οριζόντιες επιταχύνσεις που αναπτύχθηκαν στον σεισμό του Darfield, σε ακτίνα 5 km από το ρήγμα του Port Hills αυτές από τον σεισμό του Φεβρουαρίου ήταν μεγαλύτερες. Αντίθετα, σε μεγαλύτερες αποστάσεις, αναλογικά για τα δύο ρήγματα, οι μέγιστες τιμές των επιταχύνσεων από τον παλαιότερο σεισμό του Σεπτεμβρίου ήταν μεγαλύτερες (**εικόνα 2.28**).

Αιτία της παρουσίας τόσο υψηλών επιταχύνσεων στο Christchurch είναι το μικρό βάθος ύπαρξης του ρήγματος Port Hills αλλά και η εγγύτητα στη πόλη. Εκτεταμένες ρευστοποιήσεις συνέβησαν σε όλο το Christchurch και κυρίως στα ανατολικά προάστια, όπως το Shirley και το Bexley. Επίσης η ανάπτυξη φαινομένων κοιλάδας σε συνδυασμό με τη τοπογραφία της περιοχής και την υψηλή στάθμη του υδροφορέα ενέτειναν την καταστρεπτικότητα του φαινομένου.

#### **2.4.4 Οι σεισμοί του Ιουνίου**

Δύο σημαντικά σεισμικά γεγονότα έλαβαν χώρα στις 13 Ιουνίου του 2011 με επίκεντρο το προάστιο Sumner κοντά στην πόλη του Christchurch. Ο πρώτος σεισμός μεγέθους  $M_w = 5.8$ . Μία ώρα περίπου αργότερα, στις 2.20 μμ (τοπική ώρα), εκδηλώθηκε ο δεύτερος, μεγέθους  $M_w = 6$ , με εστιακό βάθος 6 km, 10 km ανατολικά της πόλης (**εικόνα 2.29**). Η διάρρηξη που τους προκάλεσε ήταν δεξιόστροφης

πλευρικής ολίσθησης (right – lateral strike – slip) με προσανατολισμό Βορειοδυτικό προς Νοτιοανατολικό.

Οι σεισμοί έγιναν ιδιαίτερα αισθητοί στα νότια και ανατολικά προάστια του Christchurch, όπου και υπήρξε εκτεταμένη ρευστοποίηση. Επίσης προκλήθηκαν καταρρεύσεις των ήδη ευάλωτων κτηρίων στο κέντρο της πόλης. Κατολισθήσεις βράχων και πλαγιών σημειώθηκαν στα νότια του Port Hills. Οι μέγιστες εδαφικές επιταχύνσεις ήταν και πάλι υψηλές. Οι οριζόντιες έφτασαν τη τιμή των 2 g στο Sumner και τα 0.4 g στο CBD. Η **εικόνα 2.30** παρουσιάζει την κατανομή αυτών των επιταχύνσεων στην ευρύτερη περιοχή.

Η **εικόνα 2.31** προβάλλει τα επίπεδα των δύο ρηγμάτων που προκάλεσαν τους σεισμούς του Φεβρουαρίου και του Ιουνίου αντίστοιχα. Όπως αναφέραμε και προηγουμένως κανένα από τα δύο δεν αναδύθηκε έως την επιφάνεια. Η μετακινήσεις που απεικονίζονται συνέβησαν από 7 – 8 km έως 1 km κάτω από την επιφάνεια του εδάφους. Τα βέλη απεικονίζουν τη διεύθυνση ολίσθησης των ρηγμάτων και έχουν μέγεθος ανάλογο με το μέγεθος αυτής. Φυσικά οι μετατοπίσεις εξαιτίας του σεισμού του Φεβρουαρίου είναι αρκετά μεγαλύτερες. Τα τετράγωνα που σχηματίζουν τα επίπεδα των ρηγμάτων έχουν διάσταση 1 km επί 1 km.

#### **2.4.5 Οι σεισμοί του Δεκεμβρίου**

Στις 23 Δεκεμβρίου του 2011 ένας ακόμη ισχυρός σεισμός έπληξε τη πόλη του Christchurch. Είχε μέγεθος  $M_w = 5.8$  και συνέβη στις 0.58 πμ (UTC). Είχε επίκεντρο 6 km μακριά από την ακτή του New Brighton. Ακολούθησαν πολλοί μετασεισμοί, ένας εκ των οποίων είχε μέγεθος  $M_w = 5.9$  και συνέβη στις 2.18 πμ (UTC). Τα εστιακά βάθη των σεισμών ήταν 5 και 7 km αντίστοιχα (**εικόνα 2.32**).

Η ακολουθία των μετασεισμών του Δεκεμβρίου εντοπίζεται ανατολικά της αντίστοιχης των μετασεισμών της 13<sup>ης</sup> Ιουνίου. Οι επιταχύνσεις που καταγράφηκαν ήταν σχετικά μικρότερες. Μία μόνο υψηλή καταγραφή εδαφικής επιτάχυνσης καταγράφηκε στη παραλία του Brighton, η οποία θεωρήθηκε αποτέλεσμα των τοπικών εδαφικών συνθηκών.

#### **2.5 Σύγκριση μεταξύ των σεισμών του Canterbury**

Η **εικόνα 2.33** περιέχει έναν πίνακα στον οποίο συγκρίνονται τα κυριότερα χαρακτηριστικά των σεισμών του Canterbury. Οι αποστάσεις που σημειώνονται με αστερίσκο είναι σε σχέση με το επίκεντρο του σεισμού και όχι σε σχέση με το ίχνος του ρήγματος. Ο σεισμός του Φεβρουαρίου είναι σαφώς πιο καταστρεπτικός από όλους τους υπόλοιπους, ιδιαίτερα όσον αφορά το κέντρο της πόλης του Christchurch (CBD). Τα μέσα ελαστικά φάσματα επιταχύνσεων του **σχήματος 2.1** επιβεβαιώνουν την παραπάνω παρατήρηση. Κάθε ένα από αυτά αντιπροσωπεύει το

μέσο όρο των φασμάτων αποκρίσεως των καταγραφικών σταθμών CBGS, CHHC, CCCC και REHS που βρίσκονται στο CBD. Η διαφορά του μέσου φάσματος του σεισμού του Φεβρουαρίου από τα υπόλοιπα είναι αισθητή. Για όλες τις κατασκευές ο σεισμός αυτός προκάλεσε τις μεγαλύτερες φασματικές επιταχύνσεις. Για τα σπίτια και τα χαμηλά κτήρια με ιδιοπερίοδο έως 0.5 sec οι υπόλοιποι σεισμοί ήταν εξίσου επίπονοι. Για ιδιοπεριόδους κτηρίων από 0.5 έως 2 sec (έως 15-όροφα) δεύτερος σε καταπόνηση έρχεται ο σεισμός του Ιουνίου, ενώ για μεγαλύτερες ο σεισμός του Darfield (Σεπτεμβρίου) καταλαμβάνει τη θέση αυτή.

Η **εικόνα 2.34** παρουσιάζει όλη τη σεισμική ακολουθία της περιόδου 2010 – 11 στο Canterbury. Οι κύκλοι διαφόρου μεγέθους παρουσιάζουν τους μετασεισμούς που ακολούθησαν κάθε ένα σεισμικό γεγονός. Επίσης είναι εμφανή τα ρήγματα Greendale, Port Hills και άλλα τα οποία προκάλεσαν τους σεισμούς αυτούς. Δεδομένου του μεγέθους και του προσανατολισμού του ρήγματος Greendale θα μπορούσαμε να ισχυριστούμε πως όλα τα υπόλοιπα κάτω από την πόλη του Christchurch αποτελούν προεκτάσεις του ρήγματος αυτού. Ειδικά δε το ρήγμα του Port Hills είναι σχεδόν συνευθειακό με αυτό (εικόνες 2.20, 2.21 και 2.22). Έτσι υπάρχουν επιστήμονες που ισχυρίζονται ότι ουσιαστικά οι σεισμοί που ακολούθησαν τον πρώτο μεγάλο σεισμό του Σεπτεμβρίου στο Darfield αποτελούν μετασεισμούς και όχι νέα κύρια σεισμικά γεγονότα. Από την άλλη όμως, οι περισσότεροι ισχυρίζονται πως απλά το ρήγμα Greendale “πυροδότησε” τη διάρρηξη των ρηγμάτων κάτω από το Christchurch. Άλλωστε τα επίκεντρα των σεισμών του Darfield και του Φεβρουαρίου απέχουν περίπου 42 km.

Η **εικόνα 2.35** απεικονίζει το σύνολο των μετασεισμών μεγέθους  $M_w > 3$  που έλαβαν χώρα μετά από κάθε κύριο σεισμικό γεγονός στο Canterbury. Είναι εμφανής η προοδευτική παραβολική αύξηση του αριθμού των μετασεισμών και η εκδήλωση του νέου κύριου σεισμού όταν οι καμπύλες τείνουν να σταθεροποιηθούν ύστερα από ορισμένο χρονικό διάστημα. Μετά από κάθε σεισμικό γεγονός σημειώνεται έξαρση των μετασεισμών που το ακολουθούν ανάλογη με την κλίση της καμπύλης.

Όλοι οι σεισμοί του Canterbury ήταν μικρού εστιακού βάθους, έως 10 km. Τέτοιου είδους σεισμοί προκαλούν κραδασμούς μεγαλύτερης έντασης σε περιοχές κοντά στο ρήγμα σε σχέση με τους σεισμούς μεγαλύτερου εστιακού βάθους. Η διασπορά της εκλυόμενης ενέργειας από τους ρηχούς σεισμούς είναι μικρότερη. Έτσι επηρεάζουν κυρίως τις περιοχές στη γειτονία του ρήγματος. Αντίθετα οι βαθείς σεισμοί επηρεάζουν περιοχές σε σαφώς μεγαλύτερη ακτίνα αλλά με μικρότερη ένταση. Το μικρό εστιακό βάθος λοιπόν, εν μέρει αποτελεί μία λογική εξήγηση της μεγάλης έντασης των κραδασμών που καταγράφηκαν στο Christchurch. Εξαίρεση αποτελεί ο σεισμός του Σεπτεμβρίου διότι η πόλη δε βρίσκεται κοντά στο ρήγμα που τον προκάλεσε. Όπως όμως αναφέραμε νωρίτερα τα φαινόμενα κατευθυντικότητας που έλαβαν χώρα ενέτειναν την ένταση των κραδασμών που τελικώς έπληξαν την πόλη.

Οι σεισμοί ήταν αποτέλεσμα συνδυασμού διαρρήξεων οριζόντιας ολίσθησης και ανάστροφης μετακίνησης (strike – slip and thrust). Η διάρρηξη που προκάλεσε τον σεισμό του Σεπτεμβρίου ήταν πολυπλοκότερη περιλαμβάνοντας την ενεργοποίηση

περισσότερων του ενός ρηγμάτων με επιφανειακή εμφάνιση ενός εξ αυτών (ρήγμα Greendale).

Γενικότερα τα ρήγματα που εκτείνονται στην περιοχή του Christchurch σχηματίστηκαν πριν από 25 εκατομμύρια χρόνια περίπου όταν οι μετακινήσεις των τεκτονικών πλακών της Αυστραλίας και του Ειρηνικού διαμόρφωσαν τη γεωμορφολογία της περιοχής. Αυτό συνετέλεσε στον σχηματισμό απότομων ρηγμάτων ως προς την οριζόντιο. Σε συνδυασμό με το μικρό βάθος ύπαρξης τους και τις μεγάλες περιόδους επαναφοράς που έχουν (εξαιτίας του χαμηλού ρυθμού τεκτονικής παραμόρφωσης), είναι ικανά να προκαλέσουν κραδασμούς μεγάλης έντασης στη γύρω περιοχή.

Επιπρόσθετα κάποιοι παράγοντες που φαίνεται να έχουν επιφέρει ενίσχυση των κραδασμών στο Christchurch είναι:

- τα φαινόμενα κατευθυντικότητας (για τους σεισμούς του Σεπτεμβρίου και του Φεβρουαρίου)
- φαινόμενα κοιλάδας λόγω της τοπογραφίας της περιοχής
- η αλληλεπίδραση μεταξύ των εδαφικών στρώσεων των ανώτερων 30 m με τα βαθύτερα αλλουβιακά εδάφη.

# Κεφάλαιο 2

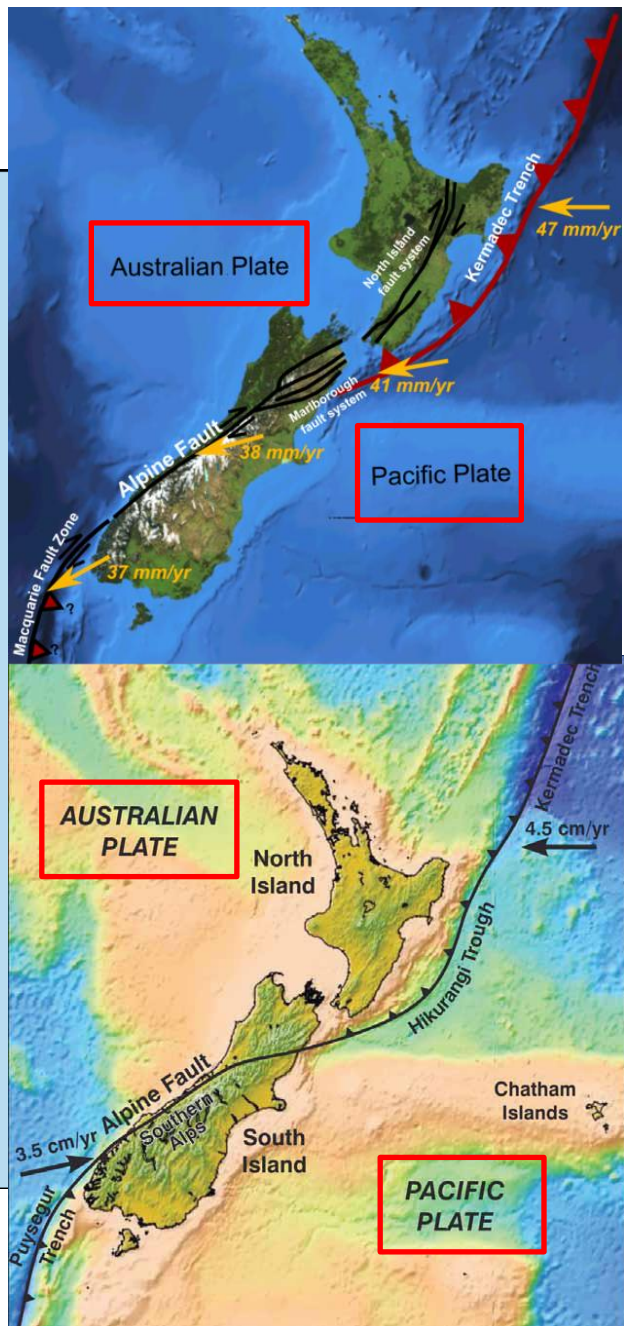
---

*Σχήματα & εικόνες*

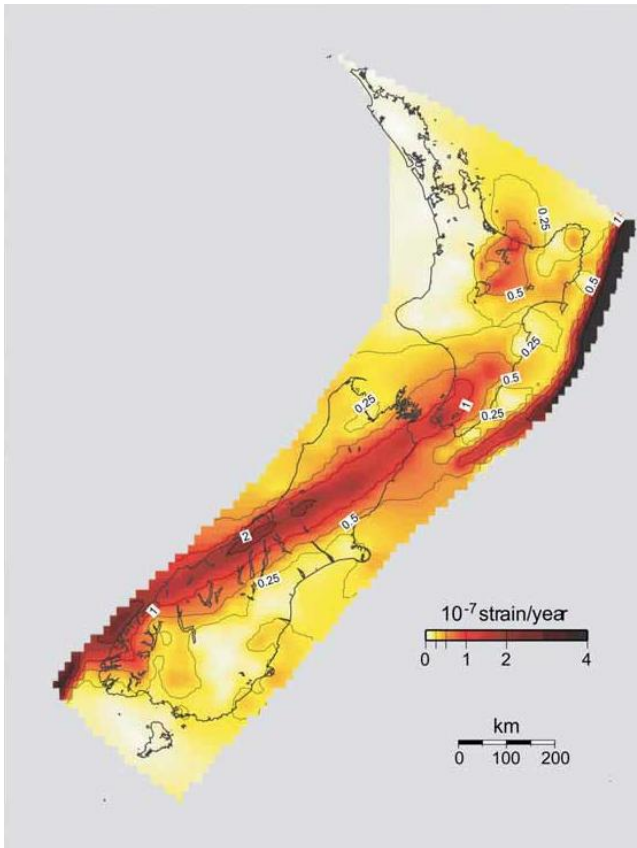




**Εικόνα 2.1:** πολιτικός χάρτης της Νέας Ζηλανδίας (πηγή: USGS)

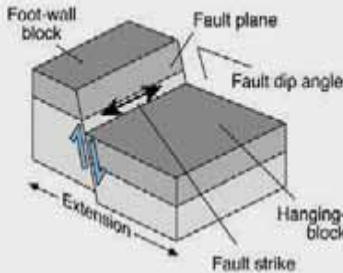


**Εικόνα 2.2:** γεωτεκτονικός χάρτης της Νέας Ζηλανδίας (πηγή: GNS science report 2011/183, July 2011)

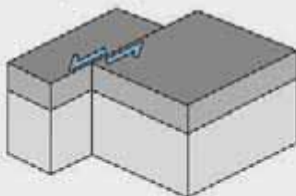


**Εικόνα 2.3:** παραμορφώσεις ανά έτος σε όλη τη Νέα Ζηλανδία λόγω της σχετικής μετακίνησης των τεκτονικών πλακών (πηγή: GNS science report 2011/183, July 2011)

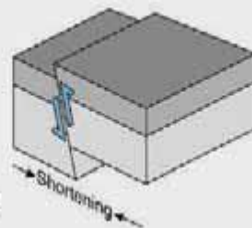
(α) κανονικό ρήγμα (normal)



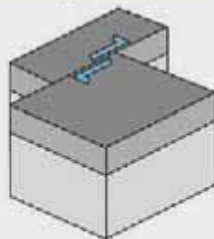
(δ) ρήγμα οριζόντιας ολίσθησης (strike slip) – αριστερή πλαγιολίσθηση



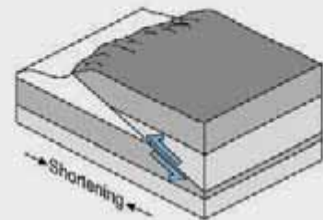
(β) ανάστροφο ρήγμα (reverse) – μεγάλη γωνία με την οριζόντιο



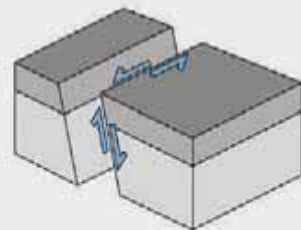
(ε) ρήγμα οριζόντιας ολίσθησης (strike slip) – δεξιά πλαγιολίσθηση



(γ) ανάστροφο ρήγμα (thrust) – μικρή γωνία με την οριζόντιο

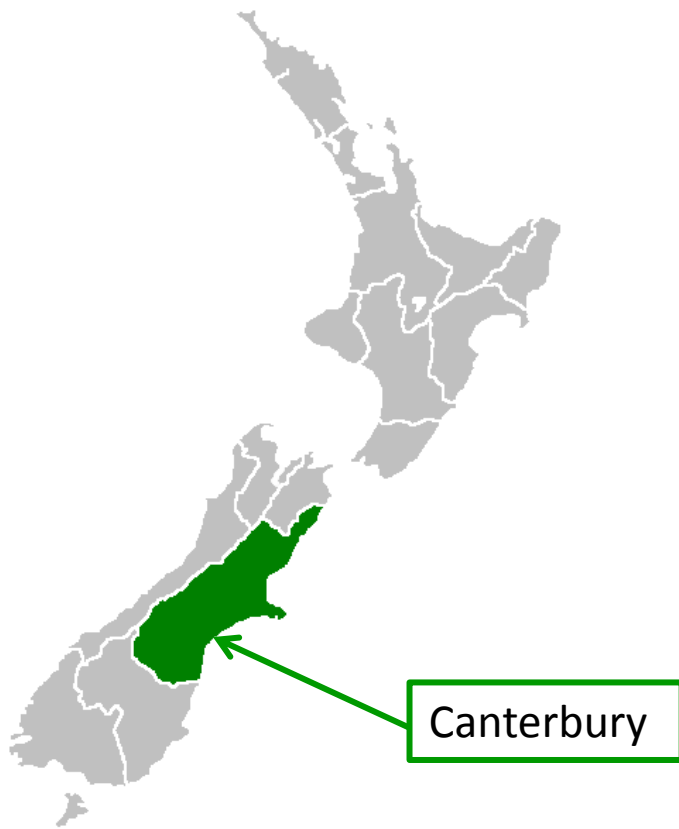


(στ) ρήγμα πλάγιας ολίσθησης (oblique slip)

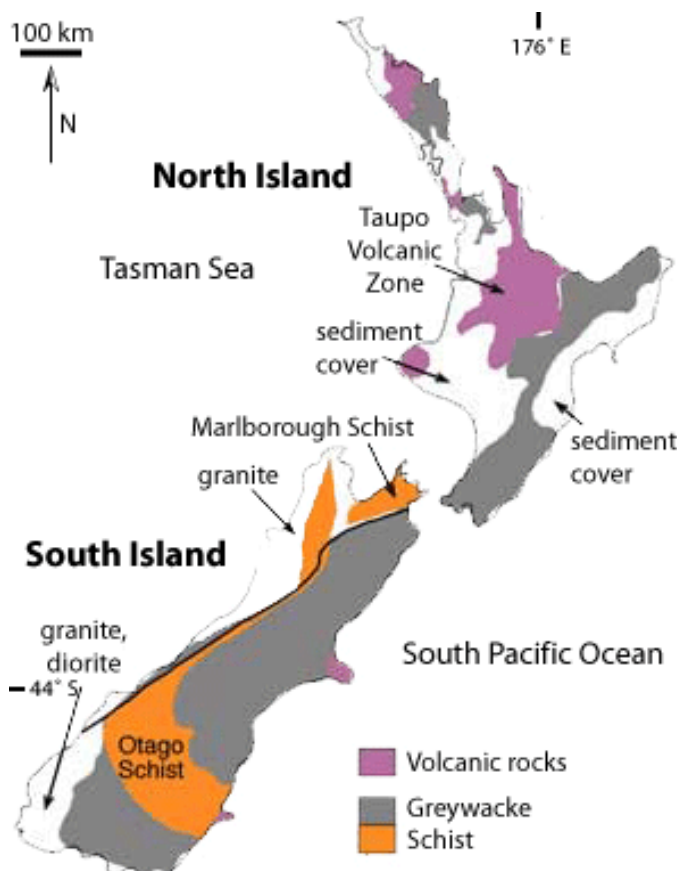


**Εικόνα 2.4:** ομαδοποίηση και ορολογία των ρηγμάτων (Pettinga et al, 2001)

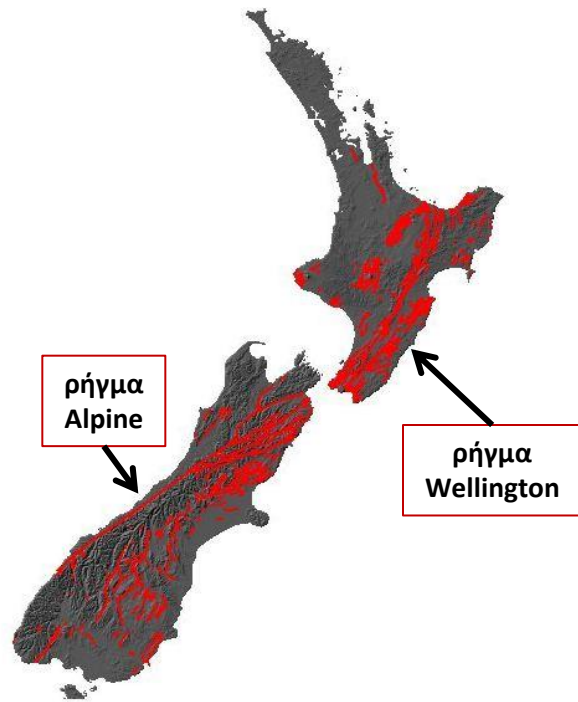




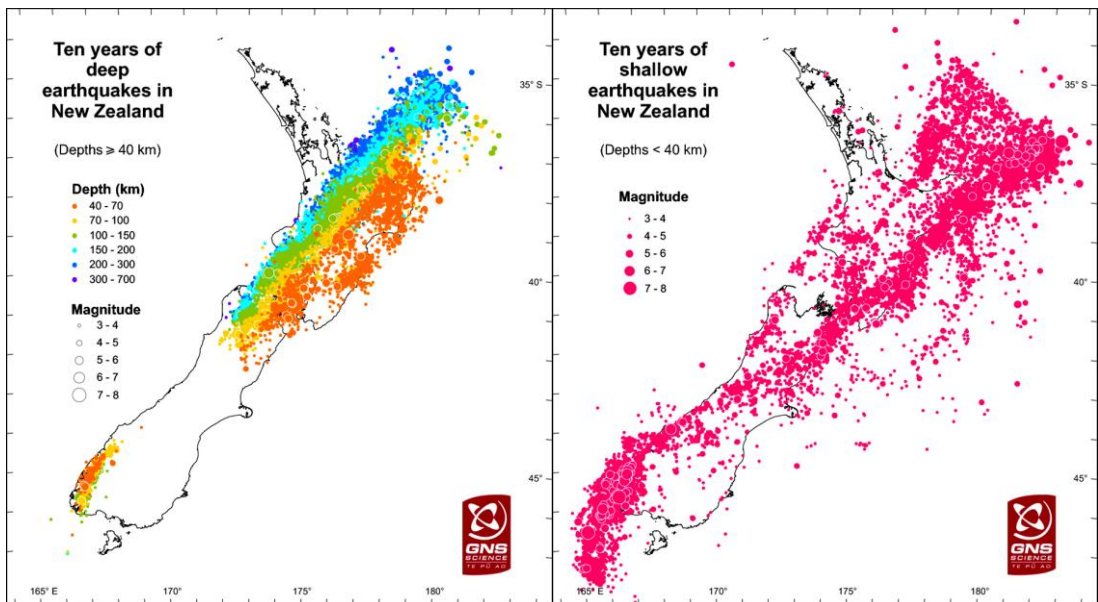
**Εικόνα 2.5:** η περιοχή του Canterbury στη Νέα Ζηλανδία (πηγή: Wikipedia)



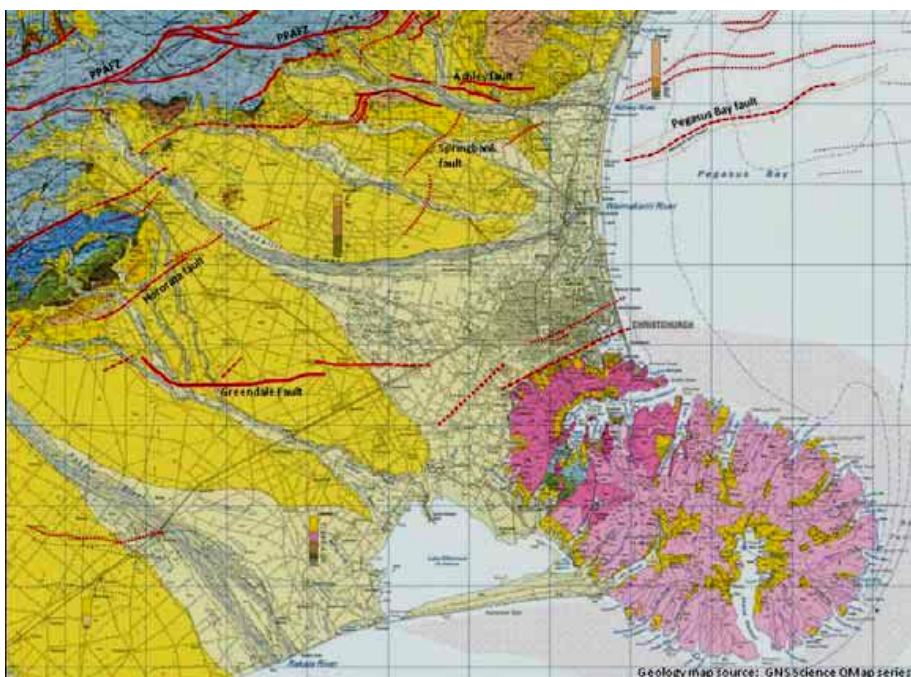
**Εικόνα 2.6:** απλοποιημένος γεωλογικός χάρτης της Νέας Ζηλανδίας (πηγή: Π. Μαρίνος κ.ά., 2010)



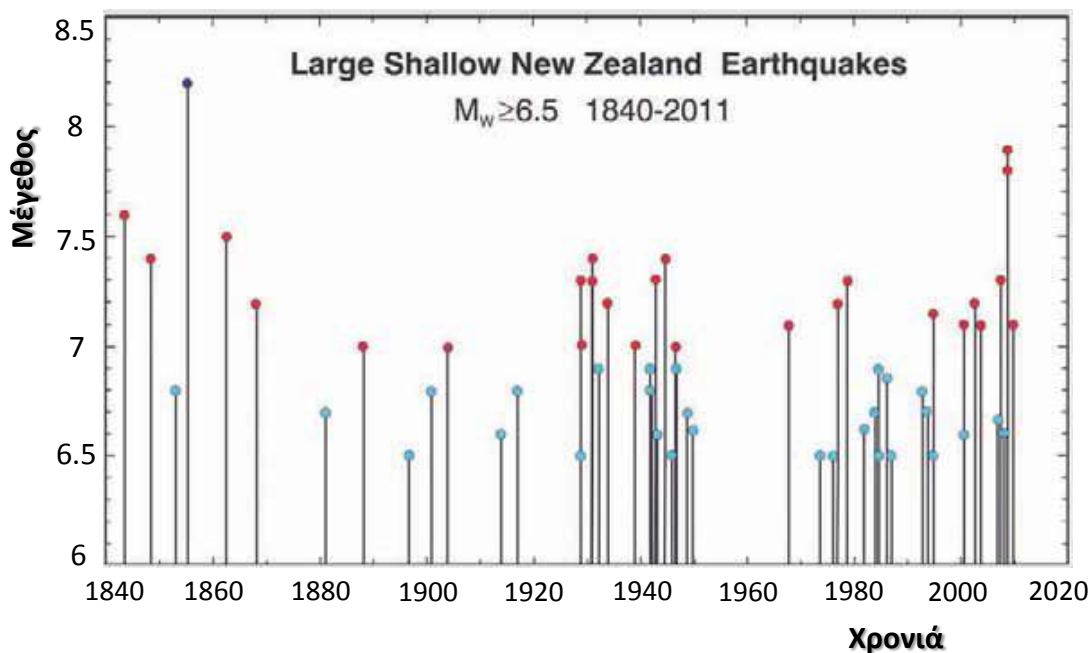
**Εικόνα 2.7:** τα ρήγματα της Νέας Ζηλανδίας (πηγή: GNS)



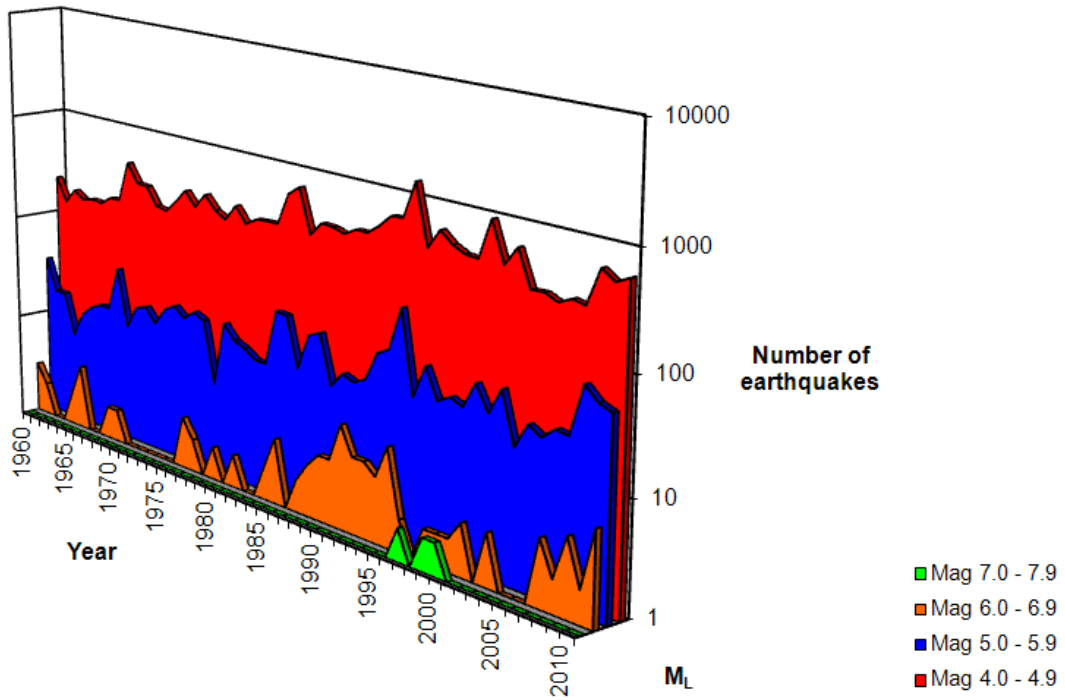
**Εικόνα 2.8:** χάρτης της Νέας Ζηλανδίας με τα σεισμικά γεγονότα των δέκα τελευταίων ετών με εστιακό βάθος μεγαλύτερο (αριστερά) και μικρότερο (δεξιά) των 40 km (πηγή: GNS)



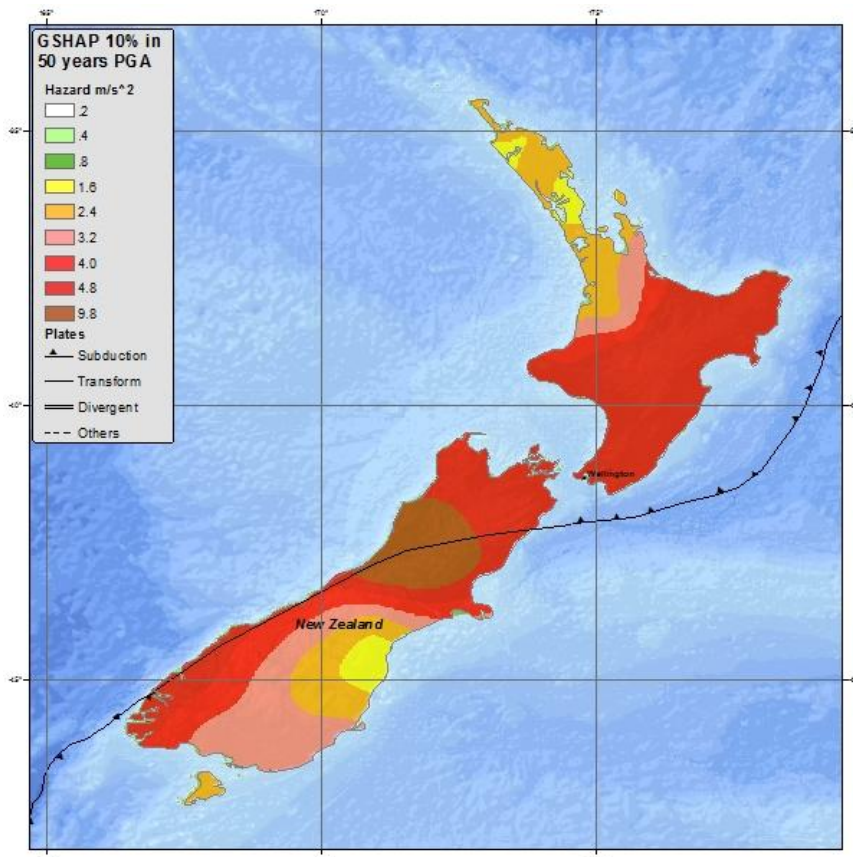
**Εικόνα 2.9:** τα ενεργά ρήγματα κοντά στη πόλη του Christchurch, Οκτώβρης 2011 (πηγή: Evidence to the Royal Commission by Professor Pettinga, University of Canterbury, October 2011)



**Εικόνα 2.10:** σεισμοί μικρού εστιακού βάθους και μεγέθους  $M_w \geq 6.5$  στη Νέα Ζηλανδία, 1840 – 2011 (πηγή: GNS science report 2011/183, July 2011)

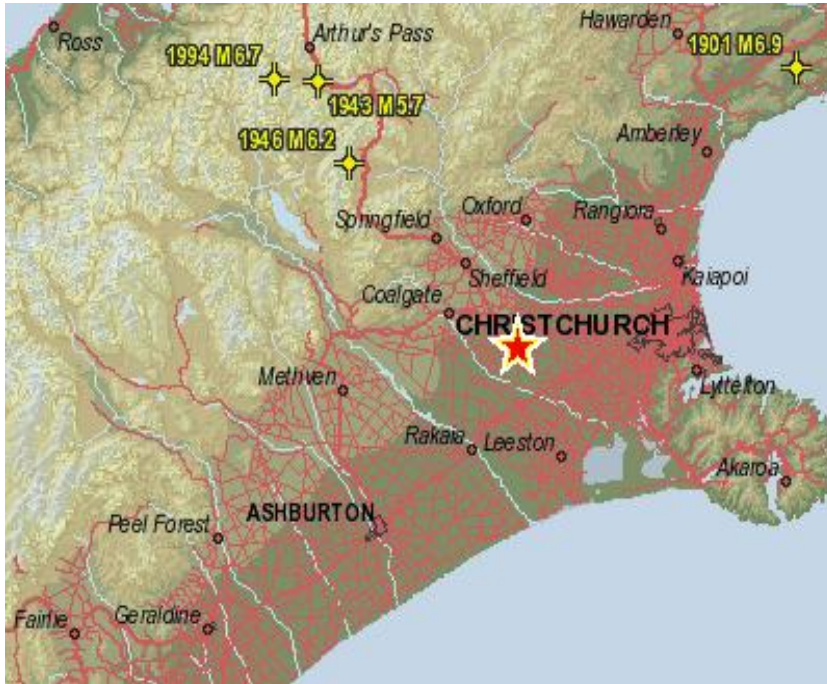


**Εικόνα 2.11:** σεισμικά γεγονότα ανά κατηγορία μεγέθους στη Νέα Ζηλανδία, 1960 – 2011 (πηγή: GNS)

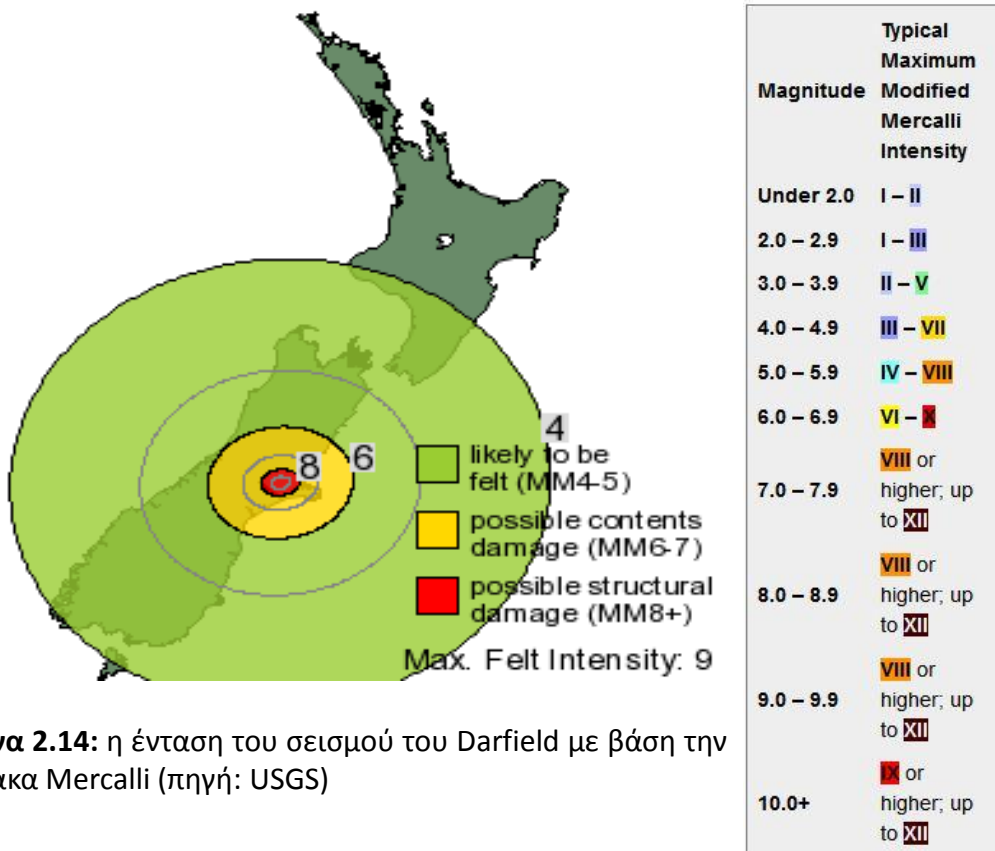


**Εικόνα 2.12:** χάρτης σεισμικής επικινδυνότητας Νέας Ζηλανδίας.





**Εικόνα 2.13:** το επίκεντρο του σεισμού του Darfield (3/9/2010), 40 km δυτικά της πόλης Christchurch (πηγή: USGS)



**Εικόνα 2.14:** η ένταση του σεισμού του Darfield με βάση την κλίμακα Mercalli (πηγή: USGS)



Oblique shearing along much of trace

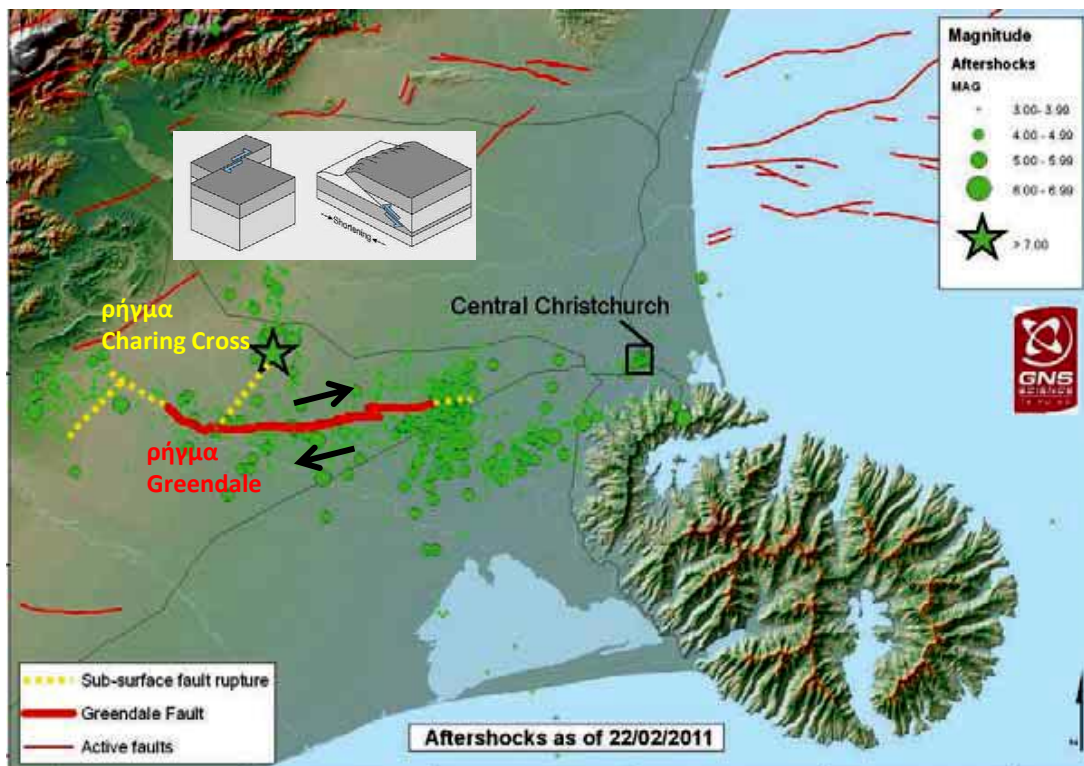
Right lateral offset of up to 4 metres in centre of trace

Trace orientation is east to west

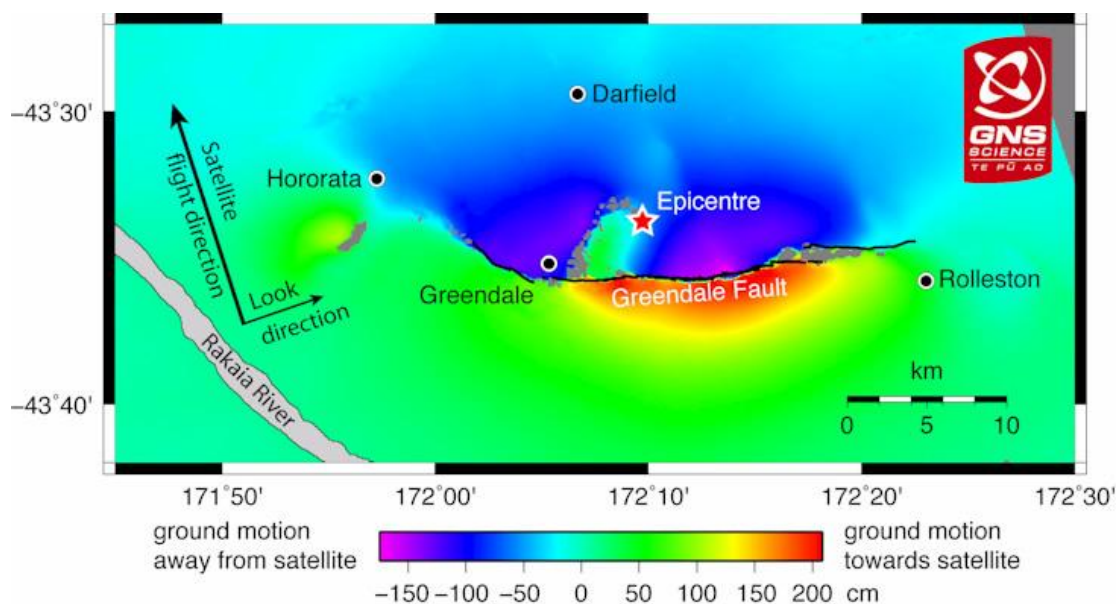
Linesmen prepare to fix power lines near Darfield. Photo / Simon Baker

**Εικόνα 2.15:** το ίχνος του ρήγματος Greendale που προκάλεσε τον σεισμό του Darfield

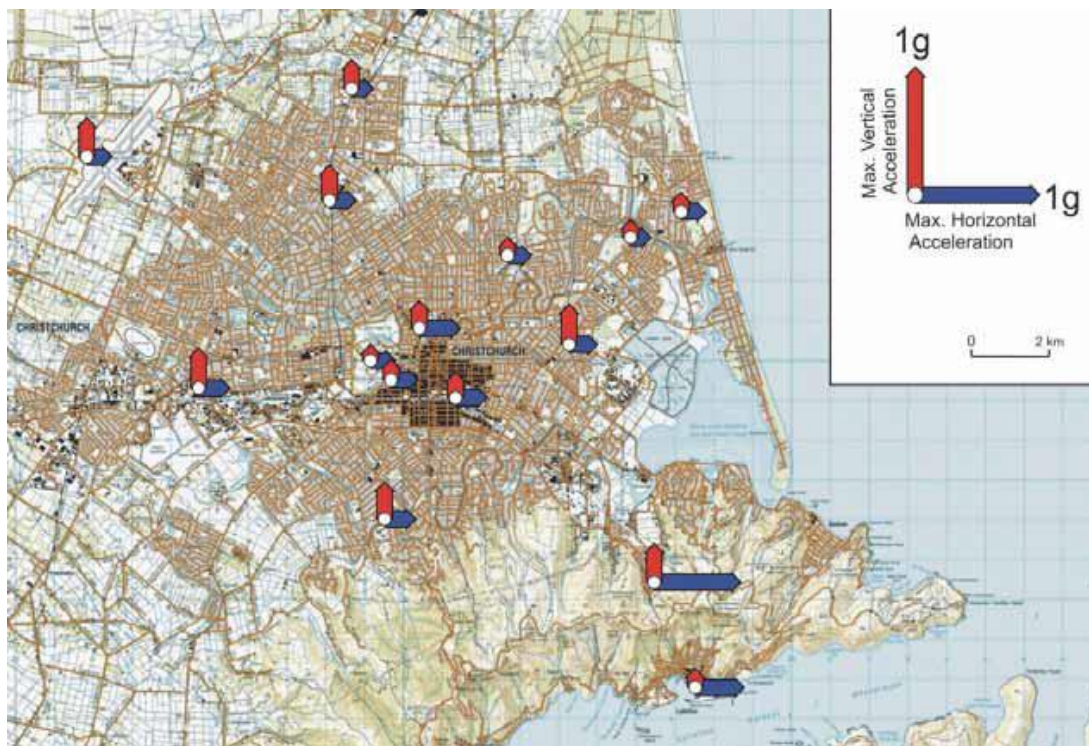




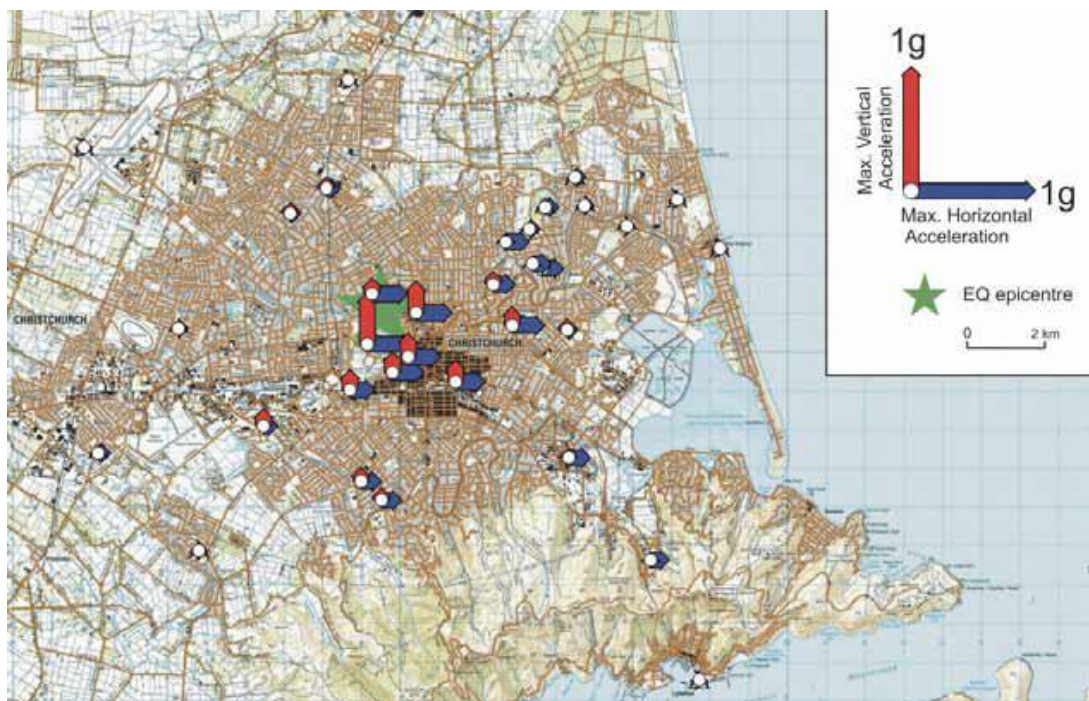
**Εικόνα 2.16:** το ρήγμα Greendale (κόκκινη γραμμή) και το επίκεντρο (πράσινο αστέρι) του σεισμού της 3<sup>ης</sup> Σεπτεμβρίου στο Darfield. Εμφανής είναι και ο μηχανισμός της διάρρηξης (πηγή: GNS)



**Εικόνα 2.17:** το ρήγμα Greendale (μαύρη γραμμή) και το επίκεντρο (κόκκινο αστέρι) του σεισμού της 3<sup>ης</sup> Σεπτεμβρίου στο Darfield. Εμφανής είναι και ο μηχανισμός της διάρρηξης λόγω των παραμορφώσεων όπως αυτές προβάλλονται με τα χρώματα (πηγή: GNS)



**Εικόνα 2.18:** οι μέγιστες εδαφικές επιταχύνσεις στην πόλη του Christchurch στον σεισμό του Darfield (3/9/2010), (πηγή: GNS science report 2011/183, July 2011)

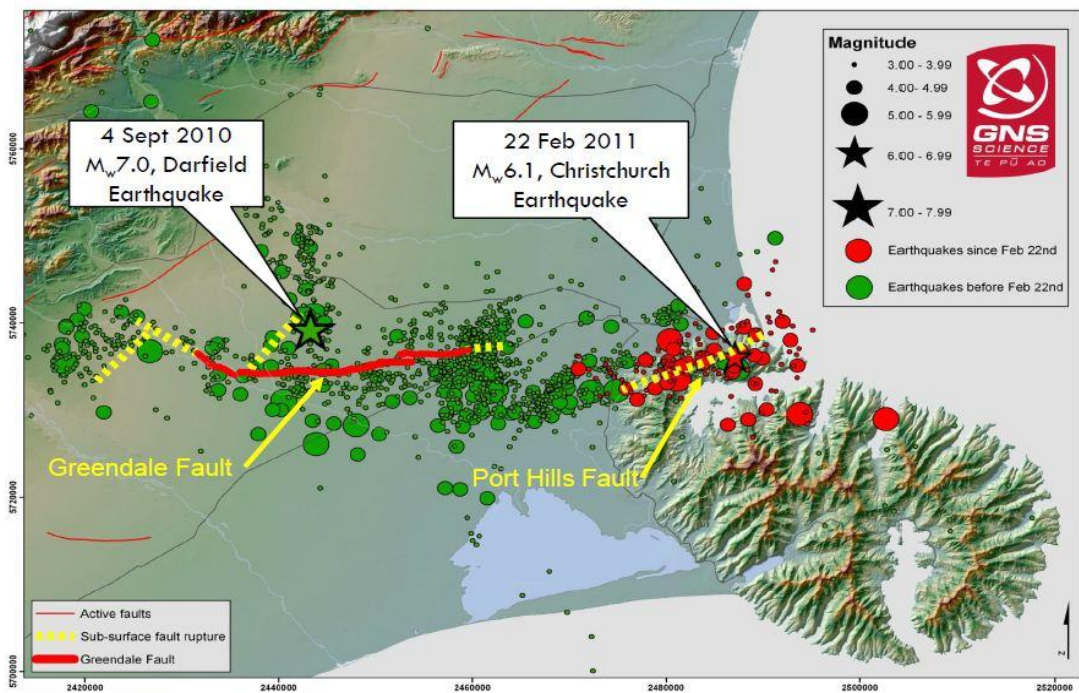


**Εικόνα 2.19:** οι μέγιστες εδαφικές επιταχύνσεις στην πόλη του Christchurch στον σεισμό της 26<sup>ης</sup> Δεκεμβρίου του 2010, (πηγή: GNS science report 2011/183, July 2011)

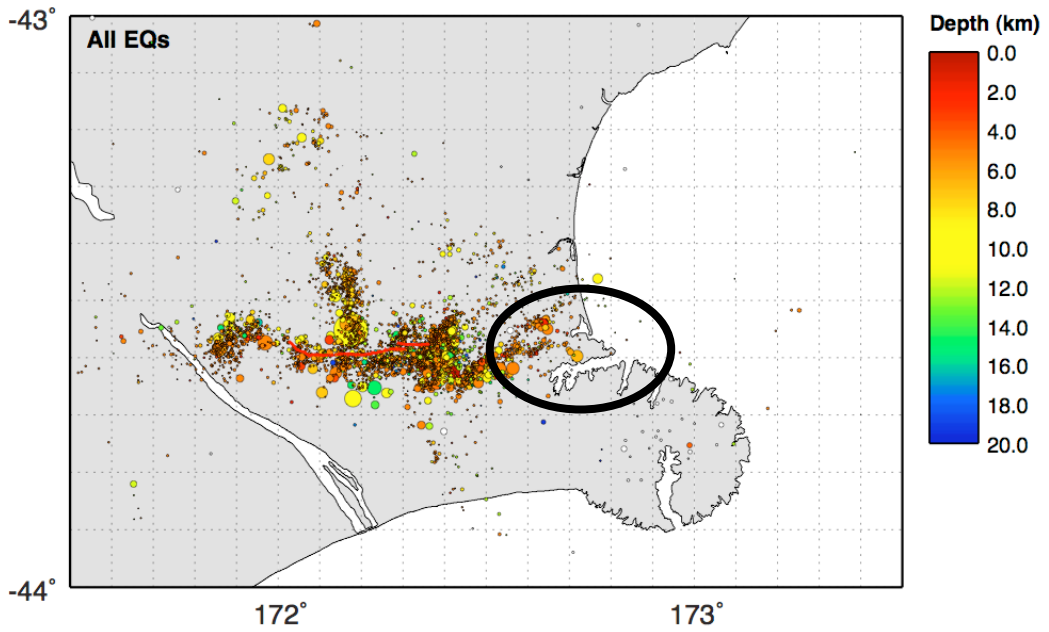




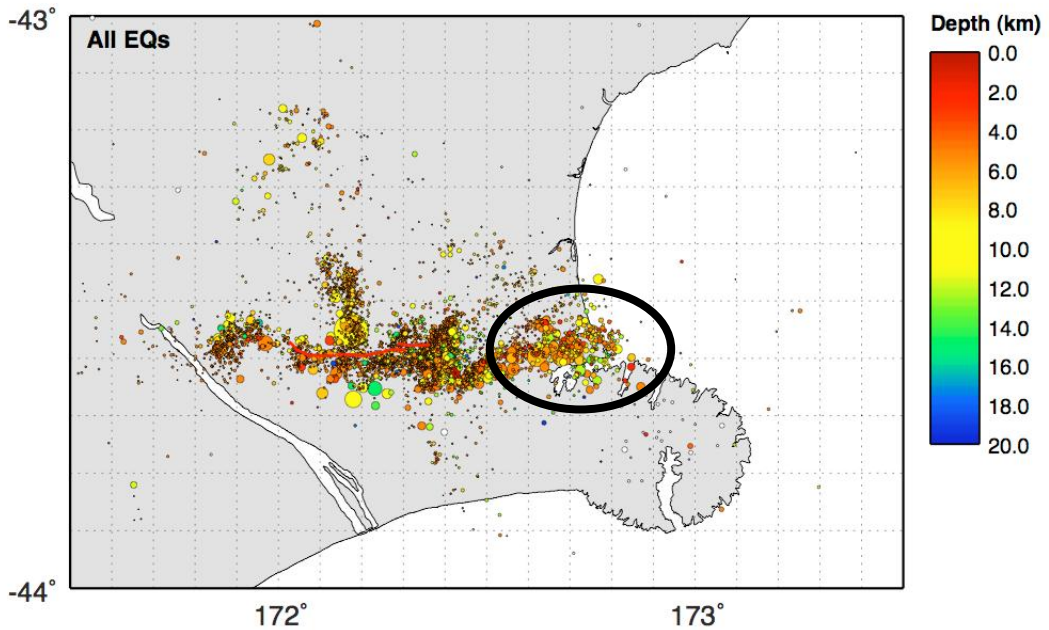
**Εικόνα 2.20:** το επίκεντρο του σεισμού του Φεβρουαρίου (22/2/2011), 10 km νοτιοανατολικά της πόλης Christchurch (πηγή: USGS)



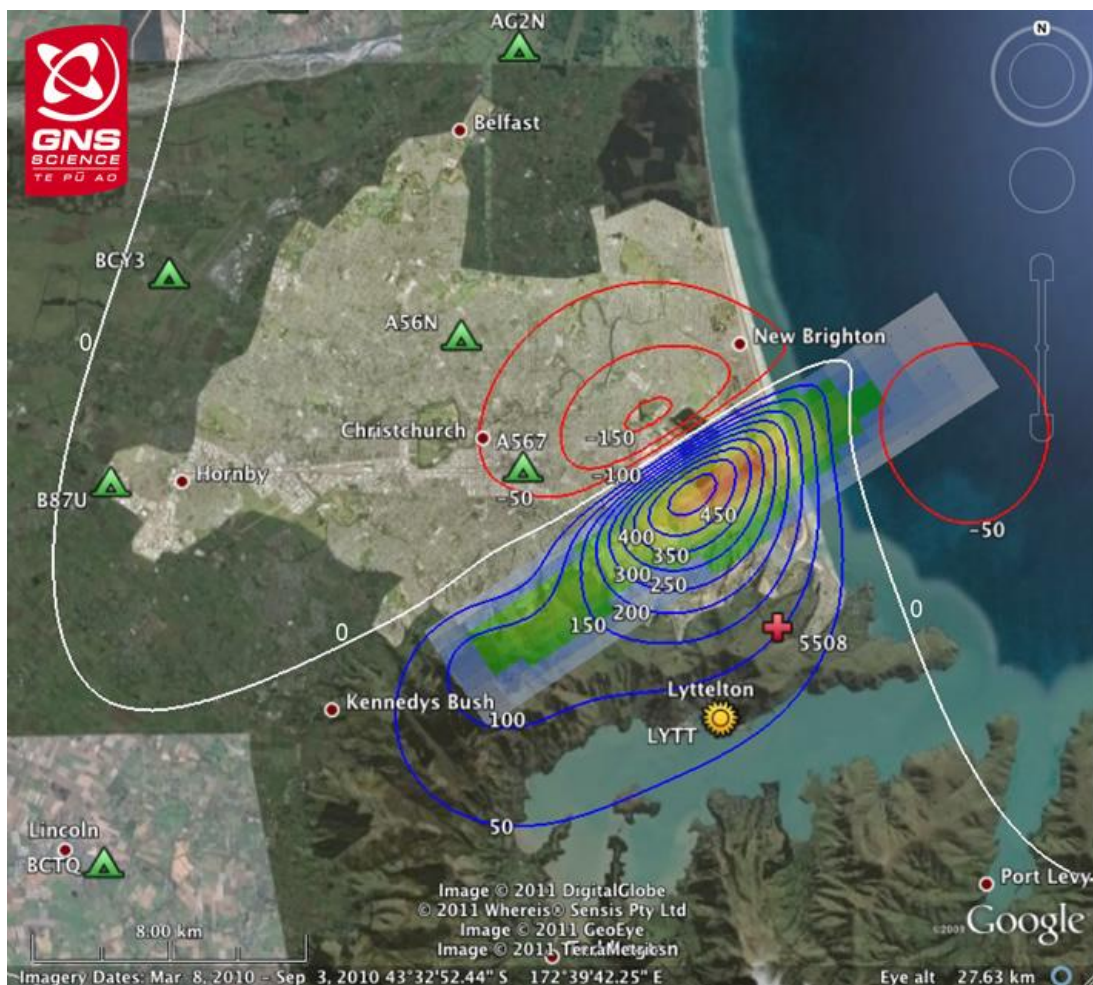
**Εικόνα 2.21:** τα επίκεντρα των σεισμών του Darfield και του Φεβρουαρίου του 2011 (πηγή: GNS)



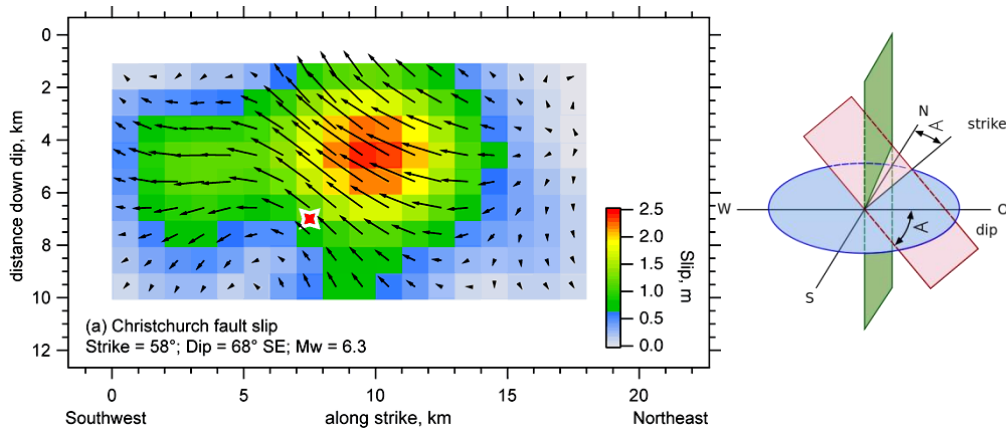
**Εικόνα 2.22:** τα επίκεντρα των μετασεισμών μετά τον κύριο σεισμό του Darfield (3/9/2010) έως τις 20/2/2011, (πηγή: Gavin Hayes, 2011)



**Εικόνα 2.23:** τα επίκεντρα των μετασεισμών την περίοδο 3/9/2010 έως 2/3/2011, αφού συνέβη και ο σεισμός του Φεβρουαρίου, (πηγή: Gavin Hayes, 2011)



**Εικόνα 2.24:** το επίπεδο του ρήγματος Port Hills που προκάλεσε τον σεισμό του Φεβρουαρίου. Οι χρωματιστές γραμμές συμβολίζουν των ανύψωση (μπλε) και τη καταβύθιση (κόκκινη) του εδάφους εξαιτίας της ολίσθησης του ρήγματος. Η άσπρη γραμμή συμβολίζει την ισοϋψή που έμεινε σταθερή πριν και μετά τον σεισμό. Τα πράσινα, κόκκινα και κίτρινα σημάδια συμβολίζουν τους σταθμούς από τους οποίους λήφθηκαν οι μετρήσεις (πηγή: GNS)



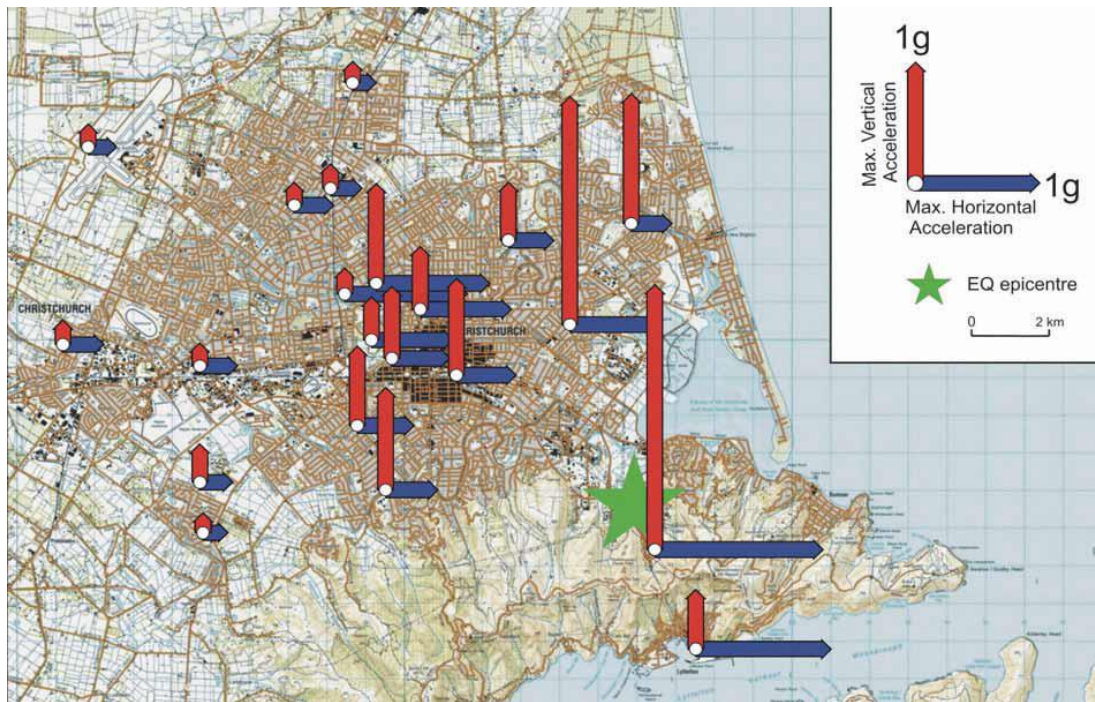
**Εικόνα 2.25:** η ολίσθηση στο μεταίχμιο των δύο πλευρών του ρήγματος (πηγή: GNS)



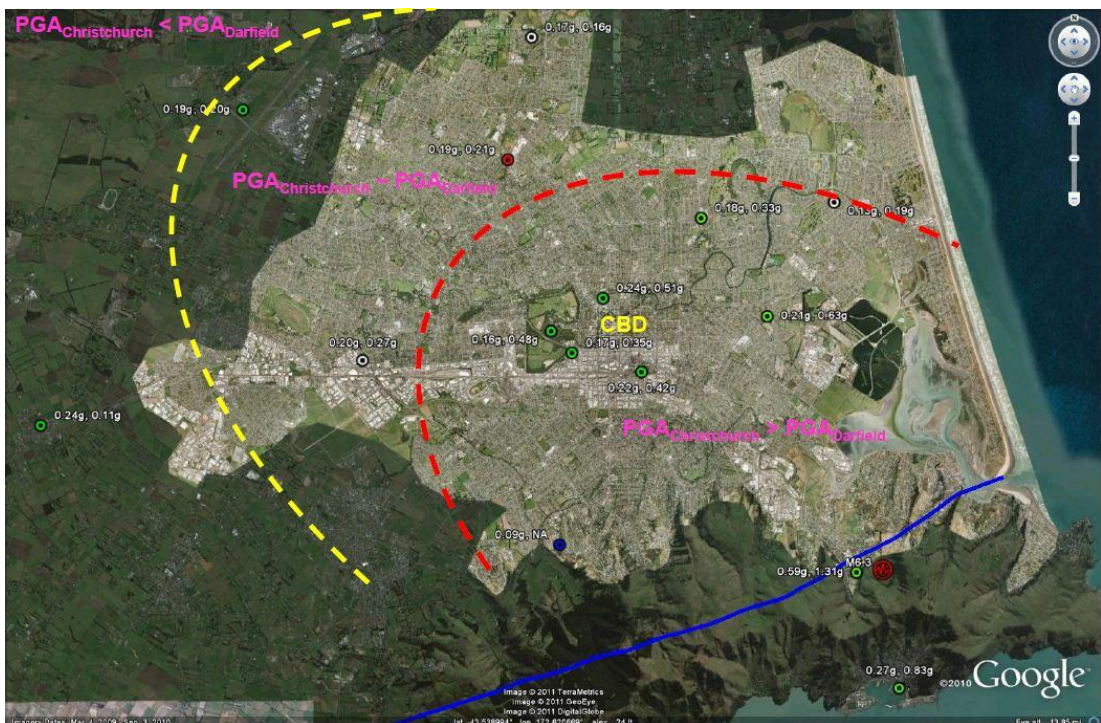


**Εικόνα 2.26:** πλήρης κατάρρευση δύο κτηρίων στο κέντρο του Christchurch (CBD), του Canterbury Television (CTV) και του Pyne Gould Corporation (PGC), από τον σεισμό της 22<sup>ης</sup> Φεβρουαρίου του 2011



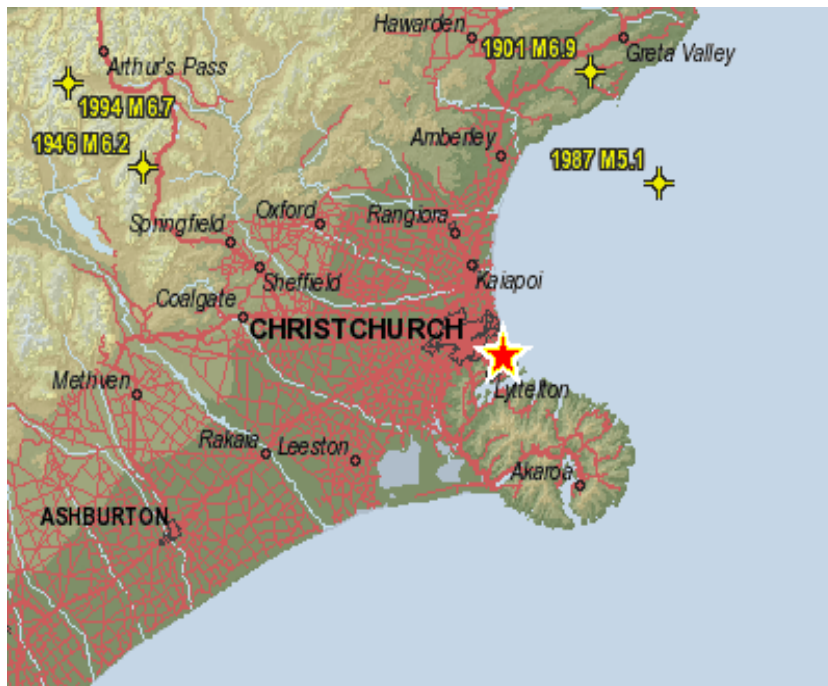


**Εικόνα 2.27:** οι μέγιστες εδαφικές επιταχύνσεις στην πόλη του Christchurch στον σεισμό της 22<sup>ης</sup> Φεβρουαρίου του 2011, (πηγή: GNS science report 2011/183, Ιούλιος 2011)

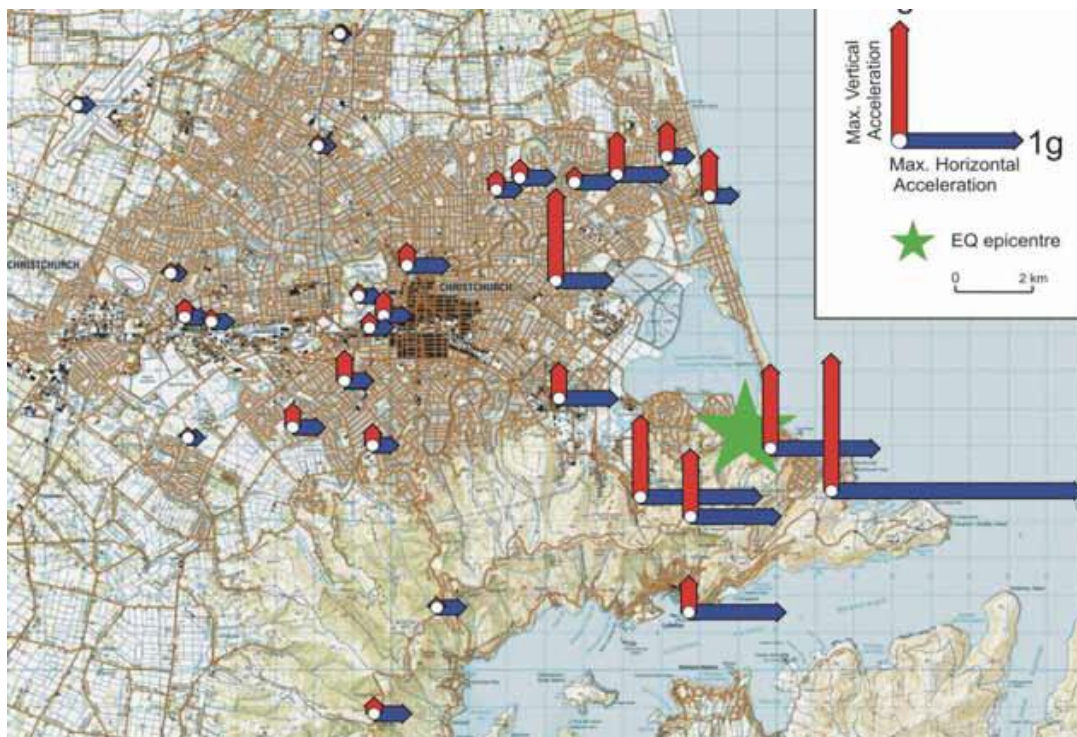


**Εικόνα 2.28:** σύγκριση των μέγιστων εδαφικών επιταχύνσεων στη πόλη του Christchurch από τους σεισμούς του Darfield και του Φεβρουαρίου (αναφέρεται ως Christchurch), (πηγή: Russell A. Green, Ιούνιος 2011)

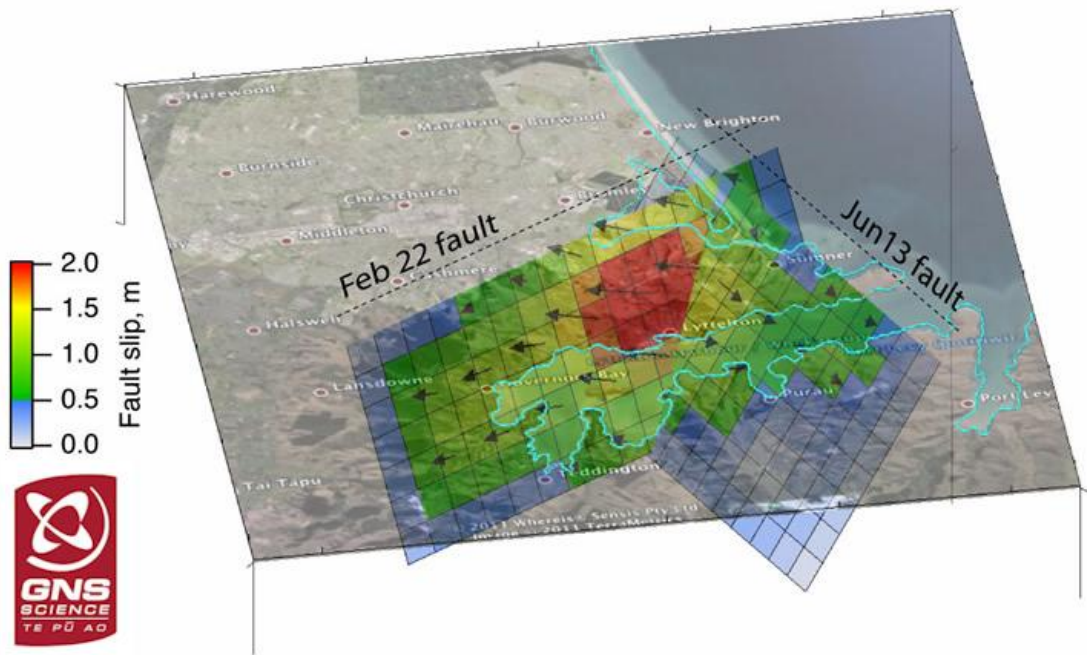




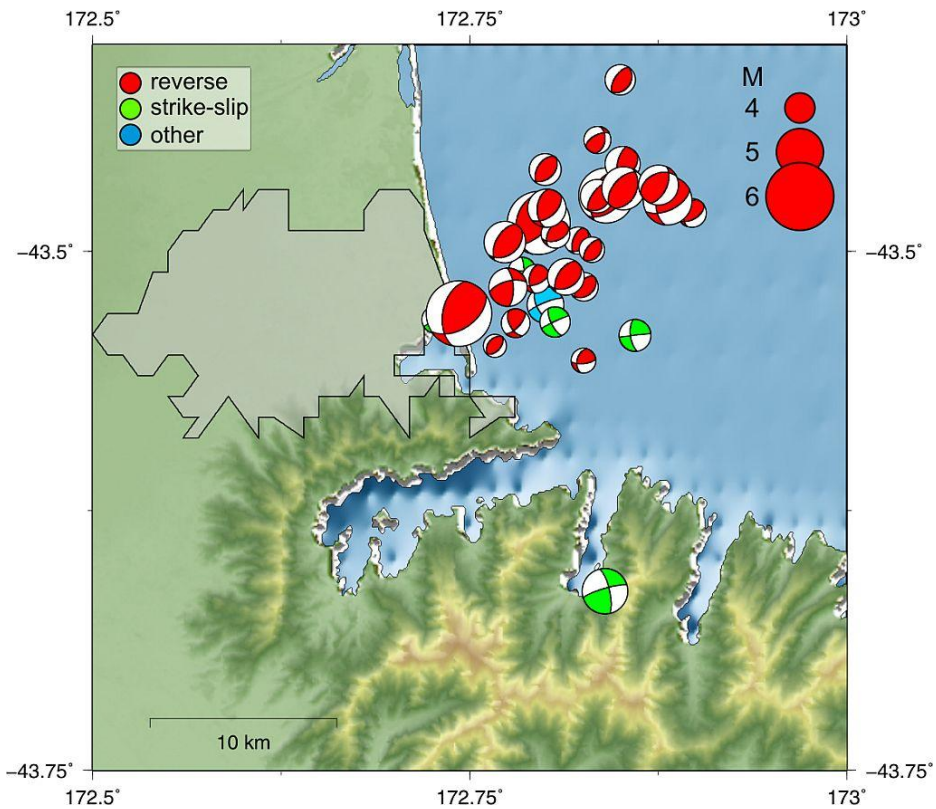
**Εικόνα 2.29:** το επίκεντρο του σεισμού της 13<sup>ης</sup> Ιουνίου του 2011,  $M_w = 6$  (πηγή: USGS)



**Εικόνα 2.30:** οι μέγιστες εδαφικές επιταχύνσεις στην πόλη του Christchurch στον δεύτερο σεισμό της 13<sup>ης</sup> Ιουνίου του 2011,  $M_w = 6$  (πηγή: GNS science report 2011/183, Ιούλιος 2011)



**Εικόνα 2.31:** τρισδιάστατη απεικόνιση των επιπέδων των ρηγμάτων του σεισμού του Φεβρουαρίου του 2011 και του δεύτερου σεισμού της 13<sup>ης</sup> Ιουνίου του 2011,  $M_w = 6$  (πηγή: GNS )

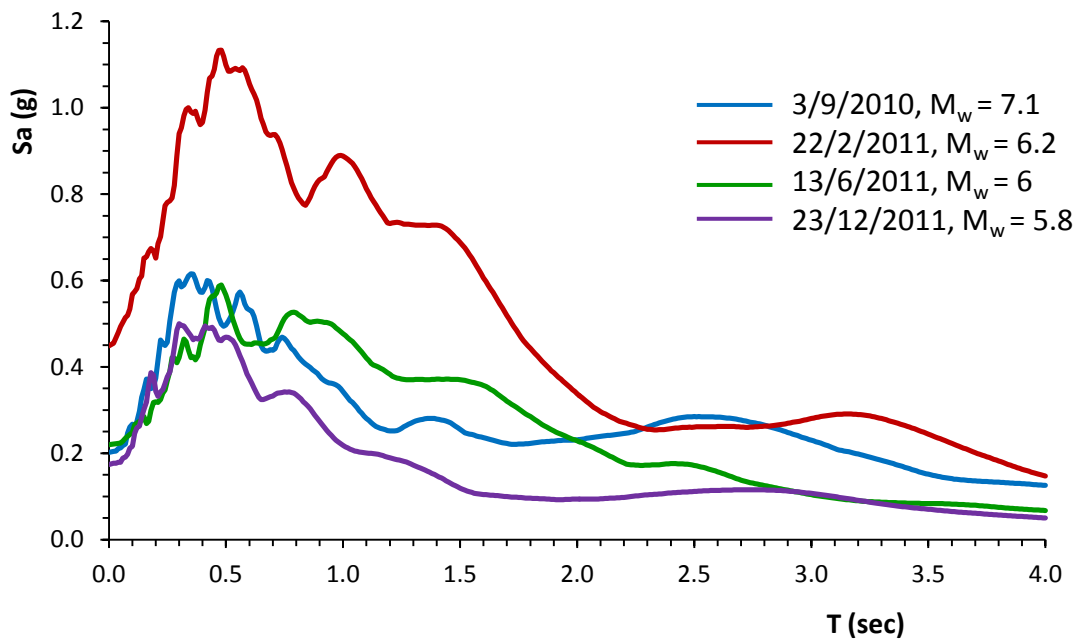


**Εικόνα 2.32:** τα επίκεντρα και η μετασεισμική ακολουθία των δύο σεισμών της 23<sup>ης</sup> Δεκεμβρίου του 2011,  $M_w = 5.8$  και  $M_w = 5.9$  (πηγή: GeoNet )

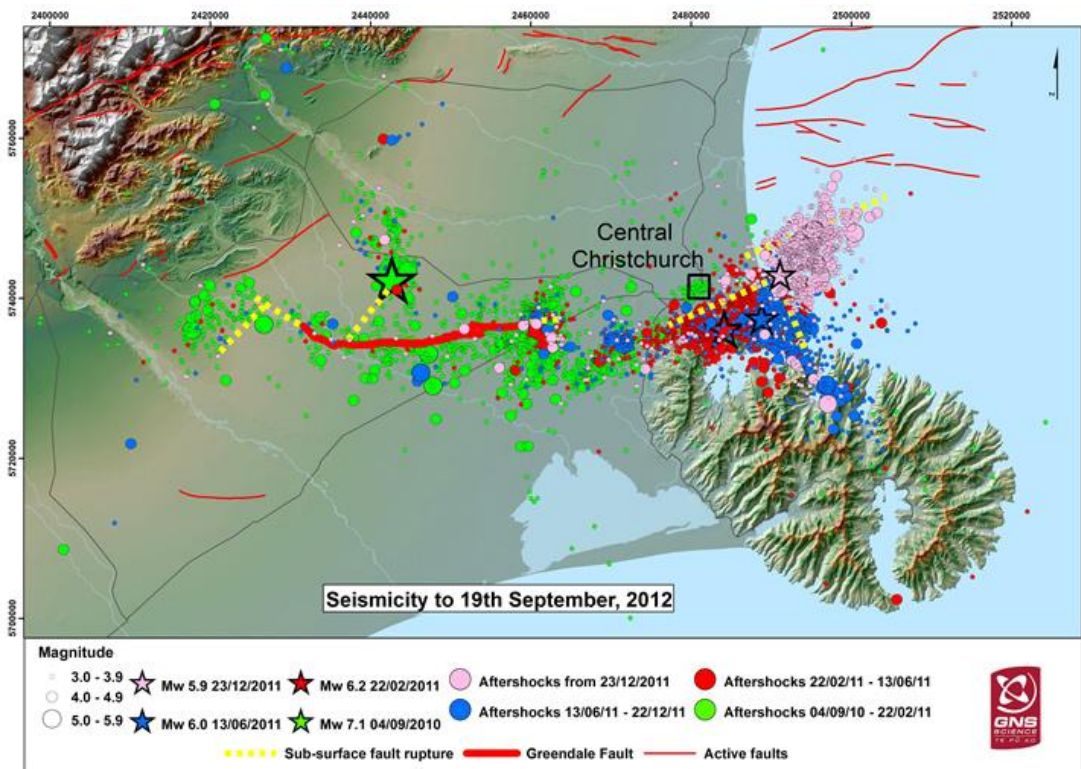
Earthquake		Sep 4 2010	Dec 26 2010	Feb 22 2011	June 13 2011	Dec 23 2011	Dec 23 2011
Magnitude	M <sub>w</sub>	7.1	4.7	6.2	6.0	5.8	5.9
	M <sub>L</sub>	7.1	4.9	6.3	6.3	5.85	6.0
	M <sub>e</sub>	8.0	Not known	6.75	6.7	5.6	6.0
Source fault	Rupture	Complex	Strike-slip	Oblique- reverse	Oblique- reverse	Oblique- reverse	Oblique- reverse
	Orientation	E-W surface rupture	E-W	NE-SW	NE-SW N-S	NE-SW	NE-SW
Max. PGA recorded	Horiz. (g)	0.8	0.4	1.7	2.0	0.4	0.7
	Vert. (g)	1.3	0.5	2.2	1.1	1.0	0.4
	Dist. (km)	1.3	~2*	2	3	13* Horiz. 6* Vert.	8* Horiz. 6* Vert
Max. PGA recorded in CBD	Horiz. (g)	0.3	0.4	0.7	0.4	0.3	0.4
	Vert. (g)	0.2	0.4	0.8	0.2	0.2	0.2
	Dist. (km)	20–22	~ 2–3*	5–9	9–10	13–15*	10–12*
Duration of shaking >0.1g in CBD(s)		8–15	1–1.7	8–10	6–7.5	2–4	3–4

**Εικόνα 2.33:** σύγκριση των κυριότερων χαρακτηριστικών μεταξύ των σεισμών του Canterbury (πηγή: GNS science report 2011/183, Ιούλιος 2011)

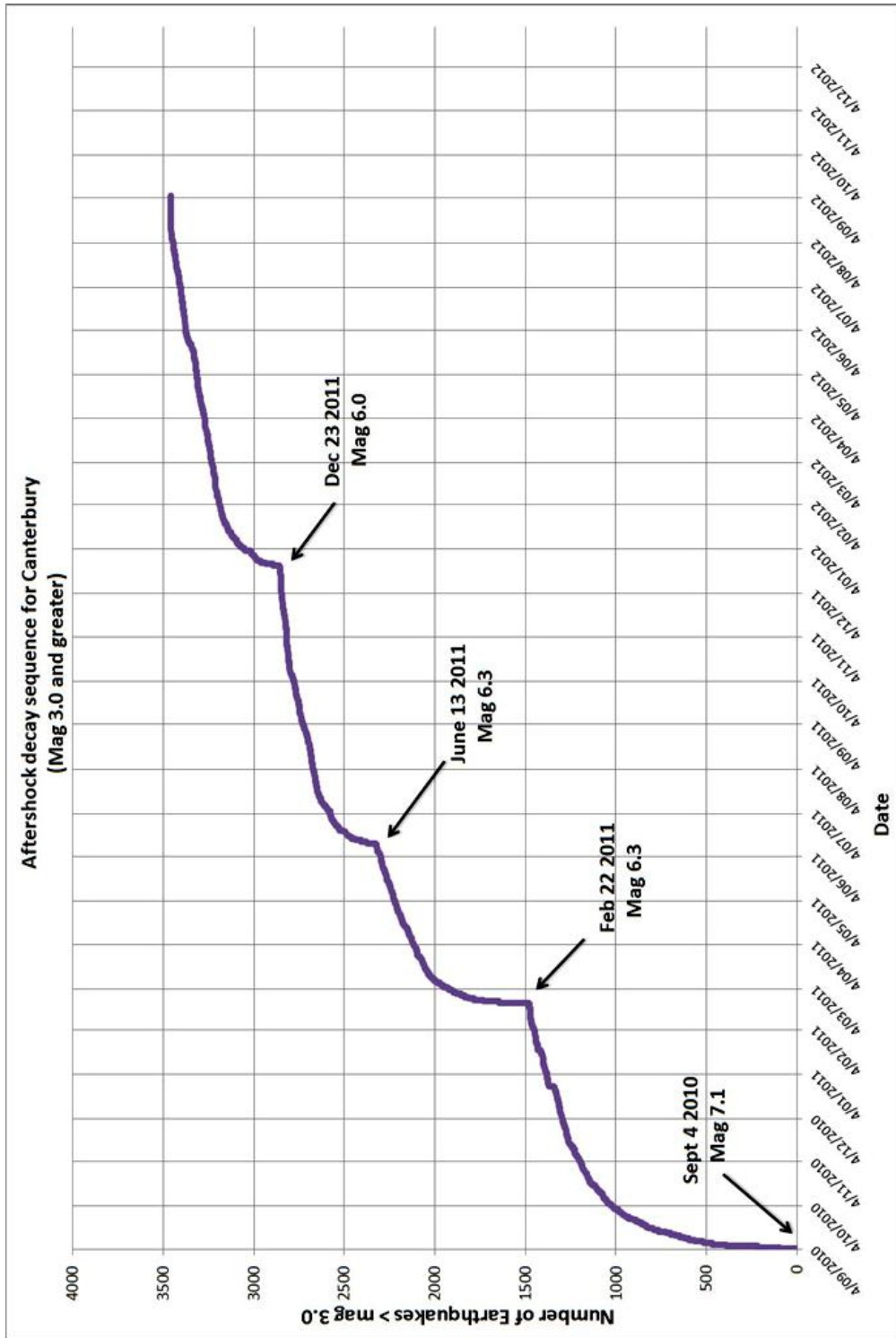




**Σχήμα 2.1:** μέση τιμή ελαστικών φασμάτων αποκρίσεως των σταθμών CBGS, CCCC, CHHC, REHS, που εδράζονται στο CBD.



**Εικόνα 2.34:** η σεισμική δραστηριότητα στο Christchurch έως και τις 19/9/2012. Φαίνονται τα επίκεντρα, τα ρήγματα και οι μετασεισμοί που ακολούθησαν τους σεισμούς του Canterbury (πηγή: GNS)



**Εικόνα 2.34:** οι μετασεισμικοί μεγέθους  $M_w > 3$  που ακολούθησαν μετά από κάθε κύριο σεισμικό γεγονός στο Canterbury (πηγή: GeoNet)

# Κεφάλαιο 3

---

*Γεωλογικά δεδομένα και εδαφικά προφίλ*



## *Γεωλογικά δεδομένα και εδαφικά προφίλ*

---

### *3.1 Το υπέδαφος του Canterbury*

Η πεδιάδα του Canterbury εδράζεται σε μεγάλου βάθους αλλουβιακά εδάφη αν εξαιρέσουμε το νότιο άκρο της όπου υπάρχουν οι πλαγιές του Port Hills και το ηφαίστειο του Lyttelton. Η περιοχή απεικονίζεται στην **εικόνα 3.1**.

Τα γεωμορφολογικά δεδομένα της περιοχής σχετίζονται με τη σύγκρουση των δύο τεκτονικών πλακών, της Αυστραλίας και του Ειρηνικού Ωκεανού, ακριβώς κάτω από τη Νέα Ζηλανδία. Το ρήγμα Alpine στα δυτικά του Νότιου νησιού κυριαρχεί στη περιοχή και συγκεντρώνει τις μεγαλύτερες τεκτονικές παραμορφώσεις ετησίως.

Πολύμορφοι εδαφικοί σχηματισμοί που φτάνουν σε βάθος μεγαλύτερο των 500 m καλύπτουν τη περιοχή. Εναποτέθηκαν εκεί εκατομμύρια χρόνια πριν από τη ροή των ποταμών που ξεκινούσαν από τις Νότιες Άλπεις και κατέληγαν στον κόλπο Pegasus και στον κολπίσκο του Canterbury στην ακτή του Ειρηνικού. Η πεδιάδα του Canterbury καλύπτει έκταση πλάτους 50 km και μήκους 160 km. Ως εκ τούτου οι πεδιάδες του Canterbury αποτελούνται από πολύ βαθιές εδαφικές αποθέσεις. Η **εικόνα 3.2** είναι χαρακτηριστική δίνοντας μια γενική άποψη του υπεδάφους στο Canterbury. Ο συνδυασμός των εδαφικών ιδιοτήτων με τη παρουσία αρτεσιανού υδροφορέα λίγα μόλις μέτρα κάτω από την επιφάνεια επηρεάζουν σε πολύ μεγάλο βαθμό τον διεγείροντα κραδασμό και την απόκριση των θεμελίων των κτηρίων της περιοχής σε αυτόν. Η **εικόνα 3.3** παρουσιάζει μία γενική άποψη της πεδιάδας του Canterbury σε σχέση με τους υπόλοιπους γεωμορφολογικούς σχηματισμούς που την περικλείουν.

### *3.2 Τα εδάφη στο Christchurch*

#### *3.2.1 Η γεωλογία της περιοχής*

Το Christchurch έχει οικοδομηθεί πάνω στα βαθιά αλλουβιακά εδάφη της πεδιάδας του Canterbury, με εξαίρεση το νότιο μέρος της πόλης που εδράζεται στις πλαγιές του Port Hills του όρους Peninsula, που αποτελούν τα διαβρωμένα απομεινάρια του ηφαιστείου του Lyttelton. Τα εδάφη στο Christchurch παρουσιάζουν τεράστια ποικιλία τόσο στην οριζόντια όσο και στην κατακόρυφη διεύθυνση, σε σχετικά πολύ μικρές αποστάσεις. Στα πρώτα 15 – 40 m, τα εδάφη είναι γεωλογικώς νέα και αποτελούνται από συνδυασμούς άμμου, ιλύος και τύρφης με βαλτώδης και θαλάσσιες αποθέσεις. Κάτω από αυτή την ζώνη υπάρχουν παλαιότερες στρώσεις χαλικιών 300 – 500 m αναμιγμένες με στρώσεις άμμου, ιλύος, αργίλου και τύρφης. Ο υδροφορέας στο κέντρο της πόλης (CBD) βρίσκεται σε βάθος 1 – 1.5 m και πέφτει χαμηλότερα έως τα 5 m στην δυτική μεριά. Ο συνδυασμός αυτών των παραγόντων αυξάνει πολύ τον κίνδυνο για ρευστοποίηση.

Τα εδάφη στο κέντρο του Christchurch αποτελούνται από ποτάμιες αποθέσεις των ποταμών Avon, Heathcote και Waimakariri. Οι ποταμοί αυτοί έχουν πλημμυρίσει την περιοχή και συνετέλεσαν σημαντικά στη μορφολογία και τα χαρακτηριστικά των εδαφών. Τα επιφανειακά εδάφη στα ανώτερα 20 m των αποθέσεων, τα οποία είναι και τα πιο σημαντικά για τη θεμελίωση των κατασκευών, αποτελούνται από αλλουβιακά χαλίκια, άμμο και ιλύ. Ο σχηματισμός Springston που κυριαρχεί στη δυτική μεριά του Christchurch αποτελείται από αυτά (εικόνα 3.2). Στην ανατολική μεριά της πόλης κυριαρχούν ποτάμιες, λιμναίες, παραθαλάσσιες και βαλτώδεις αποθέσεις άμμου, ιλύος, αργίλου και τύρφης. Αυτά τα επιφανειακά στρώματα βρίσκονται πάνω από τον σχηματισμό Riccarton Gravel. Η **εικόνα 3.4** απεικονίζει το βάθος ύπαρξης του Riccarton Gravel σε σχέση με την επιφάνεια του εδάφους σε τομή με κατεύθυνση Δύσης – Ανατολής, παράλληλη στους δρόμους Bealey Avenue και Moorhouse Avenue αντίστοιχα. Το βάθος των επιφανειακών αλλουβιακών εδαφικών στρώσεων είναι μικρότερο στα δυτικά (περίπου 10 m) και αυξάνει προς την ακτή (ανατολικά) που φτάνει περίπου τα 40 m. Στο κέντρο της πόλης το βάθος τους κυμαίνεται από 20 έως 25 m. Η **εικόνα 3.5** παρουσιάζει μία γεωλογική τομή κατά μήκος του CBD. Τα κυρίαρχα εδαφικά υλικά είναι οι άμμοι και τα αμμοχάλικα. Η εικόνα προβάλλει γενικευμένα τα εδάφη στη περιοχή επισημαίνοντας τη διαστρωμάτωσή τους και τις βασικότερες ζώνες τους. Οι πραγματικές εδαφικές συνθήκες είναι αρκετά πιο πολύπλοκες ως προς τη γεωμετρία και ως προς τις ιδιότητές τους.

Για να αποδώσουμε καλύτερα τη μεγάλη διαφοροποίηση των επιφανειακών εδαφών, η **εικόνα 3.6** σκιαγραφεί πολύ κοντινές περιοχές στο CBD υποδεικνύοντας τον τύπο των εδαφικών υλικών που επικρατούν στα ανώτερα 7 – 8 m. Στο νοτιοδυτικό μέρος του, αλλουβιακές στρώσεις χαλικιών καλύπτουν τα πρώτα επιφανειακά 2.5 – 3.5 m, ενώ στο νοτιοανατολικό μέρος υπάρχουν ασθενείς στρώσεις ιλύος και τύρφης. Βαθείς και καθαροί σχηματισμοί άμμου κυριαρχούν κατά μήκος του ποταμού Avon. Άλλωστε αυτό είναι και το σημείο έντονης εκδήλωσης φαινομένων ρευστοποίησης από τον σεισμό της 22<sup>ης</sup> Φεβρουαρίου του 2011.

Συγκεντρωτικά, θα λέγαμε πως από γεωτεχνικής σκοπιάς, οι αλλουβιακές στρώσεις χαλικιών που φθάνουν έως την επιφάνεια, η πυκνή έως πολύ πυκνή άμμος σε βάθος περίπου 15 m και ο βαθύτερος σχηματισμός Riccarton Gravel δημιουργούν αρκετά καλές συνθήκες για τη θεμελίωση των κατασκευών. Όμως δεδομένου ότι το Riccarton Gravel είναι ένας υδροφορέας με αρτεσιανή πίεση, αποφεύγεται όπου είναι δυνατό η θεμελίωση πάνω σε αυτό για κατασκευαστικούς και περιβαλλοντικούς (μολύνσεις του υδροφορέα) λόγους.

### **3.2.2 Οι υδροφορείς**

Η ευρύτερη περιοχή του Canterbury διαθέτει άφθονα αποθέματα ύδατος δεδομένου των ποταμών, των ρεμάτων και του πλούσιου υδροφορέα που καλύπτει

το υπέδαφος. Εκτιμάται πως περισσότερα από 10,000 πηγάδια έχουν ανοιχθεί στην αστική ζώνη του Christchurch από το 1860 (Brown and Weeber, 1992). Σήμερα, οι κύριοι ποταμοί στο Christchurch είναι οι Avon και Heathcote (**εικόνα 3.7**), που πηγάζουν από πηγές στη δυτική μεριά της πόλης και εκβάλλουν στο νοτιοανατολικό άκρο της περνώνας μέσα από αυτή, σχηματίζοντας μαιάνδρους. Οι τελευταίοι παρουσιάζονται χαρακτηριστικά στην **εικόνα 3.8**, όπου ο ποταμός Avon διασχίζει το CBD.

Αποτέλεσμα των άφθονων καναλιών και ρεμάτων σε συνδυασμό με το χαμηλό υψόμετρο της πόλης σε σχέση με τη στάθμη της θάλασσας είναι το μικρό βάθος ύπαρξης του υδροφόρου ορίζοντα κατά μήκος του Christchurch. Στα δυτικά προάστια βρίσκεται σε βάθος περίπου 5 m. Όσο πηγαίνουμε ανατολικότερα, σταδιακά προσεγγίζει την επιφάνεια του εδάφους έως τη ακτογραμμή (εικόνα 3.3). Γενικά, στα ανατολικά προάστια του CBD εντοπίζεται σε βάθος 1 – 1.5 m. Οι εποχιακές του διακυμάνσεις είναι σχετικά μικρές, από 0.5 έως 1 m.

### **3.2.3 Ο ρόλος του εδάφους στα σεισμικά γεγονότα**

Οι Cubrinovski και McCahon προσδιόρισαν δύο βασικούς τρόπους με τους οποίους τα σεισμικά κύματα διαδιδόμενα μέσα από αλλουβιακά εδάφη επηρεάζουν την απόκριση του εδάφους και των υποδομών πάνω σε αυτό (Cubrinovski και McCahon, Αύγουστος 2011). Πρώτον, οι υψίσυχνες συνιστώσες των σεισμικών κυμάτων εξασθενούν πιο γρήγορα με την απόσταση που διανύει το κύμα σε σχέση με τις μακροπερίοδες. Αυτό εν γένει προκαλεί διαφοροποίηση του φάσματος απόκρισης με την απόσταση. Έτσι, οι σχηματισμοί άμμων, ιλύος και χαλικιών στο υπέδαφος του CBD ενίσχυσαν τις μακροπερίοδες συνιστώσες των σεισμικών κυμάτων. Επίσης οι αλληλεπιδράσεις με τους επιφανειακούς εδαφικούς σχηματισμούς (άνω 30 m) προκάλεσαν μεγάλη τοπική διαφοροποίηση. Δεύτερον, τα εδάφη αυτά δεχόμενα μόνιμες ή στιγμιαίες – προσωρινές παραμορφώσεις από την δράση των σεισμικών κυμάτων οδήγησαν σε αστοχίες των υποδομών και των κτηρίων που εδράζονταν σε αυτά. Είναι σαφές πως η σύνθεση και οι ιδιότητες των εδαφών κάτω από μία κατασκευή έχει βασική επιρροή στον τρόπο απόκρισής της σε σεισμικά γεγονότα.

Επίσης, ουσιαστικό ρόλο διαδραμάτισε το γεγονός ότι οι συνθήκες για ρευστοποίηση των εδαφών στο CBD είναι “ιδανικές”. Ένα ρευστοποιήσιμο έδαφος μπορεί να μετατραπεί σε δευτερόλεπτα σε ένα “παχύρευστο υλικό” εξαιτίας μίας σεισμικής διέγερσης, χάνοντας την συνοχή του και τη διατμητική του αντοχή. Κατά την ανακυκλιζόμενη σεισμική φόρτιση το ρευστοποιήσιμο υλικό έχει τη τάση να συμπυκνωθεί κάτι που δεν συμβαίνει εύκολα λόγω του αστράγγιστου χαρακτήρα της φόρτισης. Αποτέλεσμα αυτού είναι η μεταβίβαση των ορθών τάσεων που αναπτύσσονται στο νερό των πόρων με επακόλουθο την αύξηση της πίεσης των πόρων. Η αύξηση της τελευταίας προσεγγίζοντας την τιμή της ενεργού τάσεως του εδάφους προκαλεί την έναρξη του φαινομένου. Η διατμητική αντοχή του εδάφους μειώνεται δραματικά με αποτέλεσμα οι κατασκευές μεγάλου όγκου και βάρους να “βυθίζονται” ενώ οι πιο ελαφριές να “επιπλέουν” στην επιφάνεια. Το νερό των

πόρων βρισκόμενο υπό πολύ μεγάλες πιέσεις (πολύ μεγαλύτερες από τις υδροστατικές), κινείται ανοδικά όπου οι πιέσεις είναι μικρότερες συμπαρασύροντας λεπτόκοκκο υλικό. Στις **εικόνες 3.9 και 3.10** παρουσιάζεται η κοκκομετρική διαβάθμιση του ρευστοποιηθέντος υλικού στο Christchurch σε σύγκριση με αντίστοιχα υλικά άλλων περιοχών. Παρατηρούμε πως το υλικό παρουσιάζει ομοιόμορφη κοκκομετρία και αποτελείται εξ ολοκλήρου από άμμο και ιλύ, παράγοντες καθοριστικοί για την ανάπτυξη του φαινομένου της ρευστοποίησης.

Οι εκδηλώσεις του φαινομένου στη περιοχή ήταν εντυπωσιακές και καταστροφικές ταυτόχρονα. Οι Cubrinovski και McCahon υποστηρίζουν πως κάτι τέτοιο θα επαναλαμβάνεται σε κάθε έντονο σεισμικό γεγονός κοντά στην πόλη (Cubrinovski και McCahon, Αύγουστος 2011). Η **εικόνα 3.11** απεικονίζει τις εδαφικές εκτάσεις που ρευστοποιήθηκαν στο CBD του Christchurch από τον σεισμό του Φεβρουαρίου. Η κόκκινη ζώνη έντονη ρευστοποίησης αποτελείται κυρίως από αμμώδη εδάφη και γενικά συμπίπτει με τη διαδρομή του ποταμού Avon και των μικρών παραποτάμων που σχηματίζει. Πέραν του CBD, τα ανατολικά προάστια Avonside, Dallington, Avondale, Bexley, Shirley και Burwood αντιμετώπισαν σοβαρά προβλήματα εξαιτίας της μεγάλης έκτασης του εδάφους που ρευστοποιήθηκε. Επίσης η επαρχία του Kaiaroι, περίπου 15 – 20 km βόρεια του Christchurch, βρέθηκε στο έλεος του φαινομένου.

Τα φαινόμενα ρευστοποίησης στο Christchurch ήταν πολύ σοβαρά κυρίως για τον σεισμό της 22<sup>ης</sup> Φεβρουαρίου του 2011. Όμως μέτρια προς έντονη ρευστοποίηση έλαβε χώρα στους σεισμούς του Darfield και της 13<sup>ης</sup> Ιουνίου. Το γεγονός ότι η ρευστοποίηση εκδηλώθηκε επανειλημμένα 3 φορές σε διάστημα λιγότερο του ενός έτους δεν προκαλεί εντύπωση καθώς η εκδήλωση της μία φορά δεν αποτελεί ανασταλτικό παράγοντα για την επανεμφάνισή της. Στην **εικόνα 3.12** προβάλλονται οι περιοχές του Christchurch στις οποίες παρουσιάστηκε ρευστοποίηση σε σχέση με το εκάστοτε σεισμικό γεγονός που την προκάλεσε. Ολόκληρες περιοχές καλύφθηκαν με αμμοίλυ ενώ η πλευρική εξάπλωση του εδάφους εντός του CBD έφθασε τα 30 cm και σε μεμονωμένα σημεία τα 50 – 70 cm. Στα ανατολικά προάστια της πόλης οι μετατοπίσεις του εδάφους έφθασαν τα 2 m (**εικόνα 3.13**). Το φαινόμενο παρατηρήθηκε σε απόσταση έως και 150 m μακριά από τον ποταμό Avon. Η **εικόνα 3.14** είναι χαρακτηριστική ενώ οι **εικόνες 3.15 και 3.16** σκιαγραφούν τις επιπτώσεις της οριζόντιας εξάπλωσης του εδάφους σε γέφυρες της πόλης του Christchurch. Η **εικόνα 3.17** παρουσιάζει εντυπωσιακές εκφάνσεις του φαινομένου με ανάδυση του ρευστοποιήσιμου υλικού στην επιφάνεια, όπως αυτές καταγράφηκαν από τον φωτογραφικό φακό, στο Christchurch.



### 3.2.4 Τα εδαφικά προφίλ στο CBD

#### 3.2.4.1 “Τυπικά” εδαφικά προφίλ

Στην **εικόνα 3.18** παρουσιάζονται “τυπικά” εδαφικά προφίλ στο κέντρο του Christchurch, στο βορειοδυτικό και νοτιοδυτικό τμήμα του αντίστοιχα. Στο βορειοδυτικό τμήμα (εικόνα 3.14α) η εναλλαγή των εδαφικών στρώσεων είναι πολύ έντονη με τη παρουσία ιλυώδους άμμου στα πρώτα 3 – 4 m, τύρφης στα επόμενα 1 – 1.5 m, αργιλώδους ιλύος με ίχνη οργανικών υλικών παρακάτω, πυκνό αμμοχάλικο και στο τέλος πυκνή έως πολύ πυκνή άμμο. Οι στρώσεις χαλικιών του Riccarton ξεκινούν στα 21 – 23 m. Εξαιτίας των πολύ μαλακών εδαφών που υπάρχουν στα ανώτερα 8 περίπου m, όλα τα εμπορικά κτήρια του κέντρου την τελευταία εικοσαετία έχουν θεμελιωθεί με πασσάλους σε βάθος μεγαλύτερο των 10 m.

Στο νοτιοδυτικό τμήμα του CBD (εικόνα 3.14β) στρώσεις χαλικιών με ιλυώδεις άμμους κυριαρχούν στα πρώτα επιφανειακά μέτρα. Μέσης έως μεγάλης πυκνότητας άμμοι βρίσκονται κάτω από τα πρώτα στρώματα έως τα 15 – 16 m σε συνδυασμό στρώσεις ιλύος και οργανικών υλικών. Οι στρώσεις χαλικιών του Riccarton ξεκινούν σε βάθος περίπου 22 m. Η πλειοψηφία των θεμελιώσεων των κτηρίων εδράζεται στα πρώτα μέτρα χαλικιών.

Η **εικόνα 3.19** παρουσιάζει τρία σχετικώς αντιπροσωπευτικά προφίλ για το προάστιο του Bexley και για το CBD.

Όπως αναλύσαμε και πρωτύτερα ο υδροφόρος ορίζοντας στο CBD βρίσκεται σε βάθος 1.5 – 2 m. Έτσι, τα εδάφη κάτω από αυτό το βάθος είναι πλήρως κορεσμένα και τα κενά μεταξύ των εδαφικών κόκκων/πλακιδίων είναι γεμάτα με νερό.

Ένα ακόμα σημαντικό χαρακτηριστικό των εδαφών του CBD το οποίο επηρεάζει την τάση προς ρευστοποίηση είναι η ηλικία των αποθέσεων. Οι παλαιότερες εδαφικές αποθέσεις είναι πιο δύσκαμπτες και προβάλλουν αντίσταση σε πιθανή ρευστοποίηση. Οι νέοι ή πρόσφατοι εδαφικοί σχηματισμοί είναι περισσότερο ευάλωτοι στο φαινόμενο (Young et al, 2003). Στην **εικόνα 3.20** παρουσιάζεται η ηλικία των υπερκείμενων του Riccarton Gravel εδαφών στο CBD (Brown και Weeber, 1992).

#### 3.2.4.2 Τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά του CBD

Τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά των εδαφών στο κέντρο της πόλης του Christchurch είναι τα παρακάτω:

- Τα πρώτα 20 – 25 m των εδαφών του CBD αποτελούνται από σχετικά πρόσφατα αλλουβιακά εδάφη υπερκείμενα αποθέσεων χαλικιών βάθους 300 – 500 m

- Τα “νέα” αλλουβιακά εδάφη στα επιφανειακά 20 m είναι τα πιο σημαντικά για την θεμελίωση των πολυώροφων κτηρίων. Αυτά αποτελούνται από χαλίκια, άμμους, ιλύες και τύρφη. Διαφοροποιούνται σε μεγάλο βαθμό τόσο οριζοντίως όσο και με το βάθος.
- Τα εδάφη είναι κορεσμένα κάτω από το 1 – 1.5 m.
- Η σύνθεση τους (αμμώδη εδάφη και μη πλαστικοποιημένες ιλύες), η ηλικία τους (σχετικά πρόσφατες αποθέσεις) και το γύρω περιβάλλον (ποταμοί, βάλτοι και θαλάσσια ιζήματα) κάνει τα εν λόγω εδάφη ευάλωτα σε ενδεχόμενη ρευστοποίηση.
- Γενικά οι συνθήκες θεμελιώσεως των κτηρίων στο CBD είναι πολύ ιδιαίτερες και περίπλοκες αποτελώντας πρόκληση για τους γεωτεχνικούς μηχανικούς. Οι συνθήκες γίνονται πιο απαιτητικές αν συμπεριλάβουμε και τον κίνδυνο εκδήλωσης ισχυρών σεισμικών γεγονότων κοντά στη περιοχή.
- Η παρουσία υδροφορέων στα πρώτα 20 – 25 m που μπορεί να επιδεινώσει την σεισμική απόκριση των εδαφών που εδράζονται πάνω από αυτό το βάθος κατά τη διάρκεια ισχυρών σεισμών. Αποτελούν ένα πρόσθετο μηχανισμό αύξησης της πίεσης του νερού στο υπέδαφος εξαιτίας πιθανής ανοδικής ροής του νερού που τροφοδοτείται από αυτούς.

### *3.3 Τα εδαφικά προφίλ των επιταχυνσιογραφικών σταθμών*

Όπως γίνεται σαφές από τα προηγούμενα ο ρόλος του εδάφους και των ιδιοτήτων του στη διάδοση των σεισμικών κυμάτων προς την επιφάνεια είναι σημαντικός. Οι χρονοϊστορίες των επιταχύνσεων που καταγράφηκαν στην επιφάνεια από όλους τους σταθμούς που είναι εγκατεστημένοι στο Christchurch, στα προάστια του και στις επαρχίες κοντά σε αυτό, φέρουν το στίγμα των εδαφικών ιδιοτήτων που μεταβάλλουν την ένταση, τη διάρκεια και το συχνотικό περιεχόμενό του διεγείροντα κραδασμού.

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι η διερεύνηση του βαθμού επιρροής των χαρακτηριστικών του εδάφους της ευρύτερης περιοχής στη διάδοση των σεισμικών κυμάτων προς την επιφάνεια. Το γεγονός ότι η Νέα Ζηλανδία είναι μία χώρα με ιδιαίτερως ανεπτυγμένη αντισεισμική τεχνολογία και νοοτροπία (εξαιτίας της θέσης της στον παγκόσμιο γεωτεκτονικό χάρτη) συμβάλει θετικά στην διεκπεραίωση του στόχου μας. Συγκεκριμένα, η ύπαρξη ενός εκτενέστατου δικτύου επιταχυνσιογραφικών σταθμών που καλύπτει όλη τη χώρα από άκρη σε άκρη μας δίνει τη δυνατότητα επεξεργασίας μεγάλου όγκου καταγεγραμμένων δεδομένων από όλα τα σεισμικά συμβάντα του Canterbury.

Στις ενότητες που προηγήθηκαν έγινε απόλυτα σαφής η τεράστια ποικιλομορφία που διακρίνει τόσο τα εδάφη στο κέντρο του Christchurch όσο και της ευρύτερης

περιοχής. Παρά ταύτα οι πληροφορίες που υπάρχουν σχετικά με τα επιμέρους χαρακτηριστικά των εδαφών είναι μόνο γενικές και αντιπροσωπεύουν τοπικές συνθήκες χωρίς να συμπεριλαμβάνουν συγκεκριμένα γεωτεχνικά δεδομένα.

Για το λόγο αυτό ήταν αναγκαία η εύρεση και η υιοθέτηση εδαφικών προφίλ που θα είναι αντιπροσωπευτικά των εδαφικών ιδιοτήτων σε κοντινή απόσταση από συγκεκριμένους καταγραφικούς σταθμούς, που επιλέξαμε για την έρευνά μας. Οι Wood κ.ά., προκειμένου να χαρακτηρίσουν εκ νέου τα εδάφη στο Christchurch ως προς την κατηγορία την οποία ανήκουν με βάση το Νέο Αντισεισμικό Κανονισμό της Νέας Ζηλανδίας (NZS 1170.5), προχώρησαν σε δοκιμές φασματικής ανάλυσης επιφανειακών κυμάτων (SASW – Spectral Analysis of Surface Waves), δοκιμές πολυκάναλης ανάλυσης επιφανειακών κυμάτων (MASW – Multi-channel Analysis of Surface Waves) και μονοδιάστατες/δισδιάστατες δοκιμές μέτρησης μικροθορύβου σε διάταξη (1D/2D MAM – Microtremor Array Methods), (Wood et al, 2011). Οι δοκιμές εκτελέστηκαν πολύ κοντά σε 18 επιταχυνσιογραφικούς σταθμούς της περιοχής, δηλαδή σε απόσταση 10 – 50 m. Όσον αφορά τον σταθμό LPCC, ο οποίος βρίσκεται στο λιμάνι του Lyttelton και απέχει λίγα μέτρα μόνο από το βραχώδες υπόβαθρο, οι δοκιμές έγιναν σε απόσταση περίπου 300 m, λόγω περιορισμένης πρόσβασης της ερευνητικής ομάδας στη περιοχή του λιμανιού.

Τα **σχήματα 3.1 έως και 3.4** παρουσιάζουν τα εδαφικά προφίλ σε συγκεκριμένους καταγραφικούς σταθμούς όπως προέκυψαν από τα αποτελέσματα της έρευνας των Wood κ.ά. Στα κεφάλαια που ακολουθούν θα περιγράψουμε εκτενέστερα τους εν λόγω σταθμούς και όλο το καταγραφικό δίκτυο σεισμικών κραδασμών που υπάρχει στη Νέα Ζηλανδία. Επίσης θα χρησιμοποιήσουμε ελαστική μεθόδους δυναμικής ενίσχυσης του εδάφους για να αξιολογήσουμε τον βαθμό επίδρασης των τοπικών εδαφικών συνθηκών στη διάδοση των σεισμικών κυμάτων.



# Κεφάλαιο 3

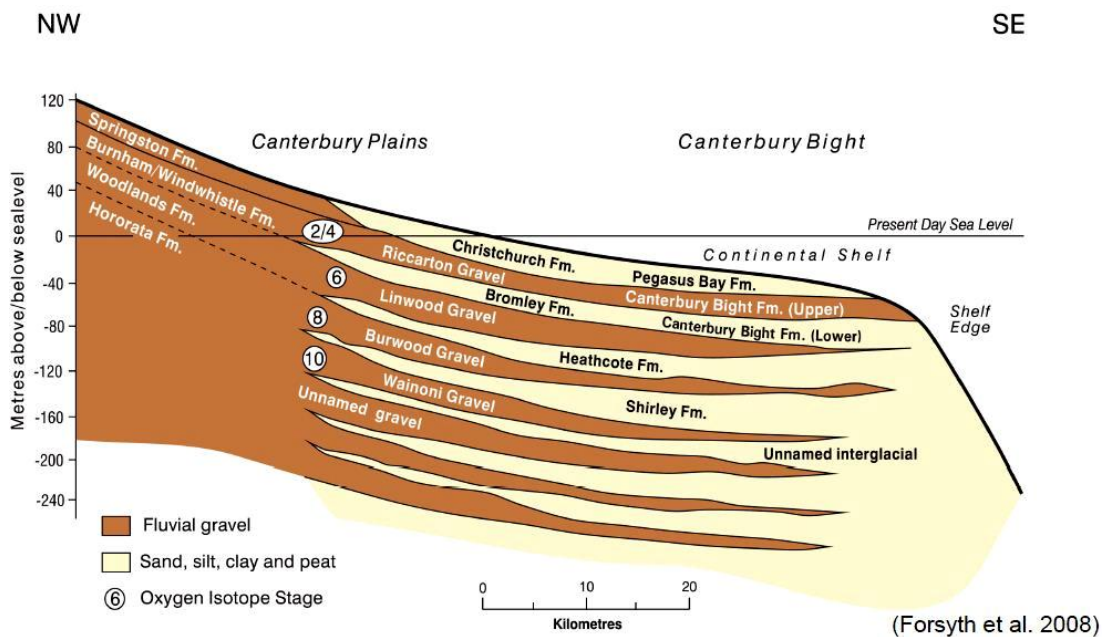
---

*Σχήματα & εικόνες*



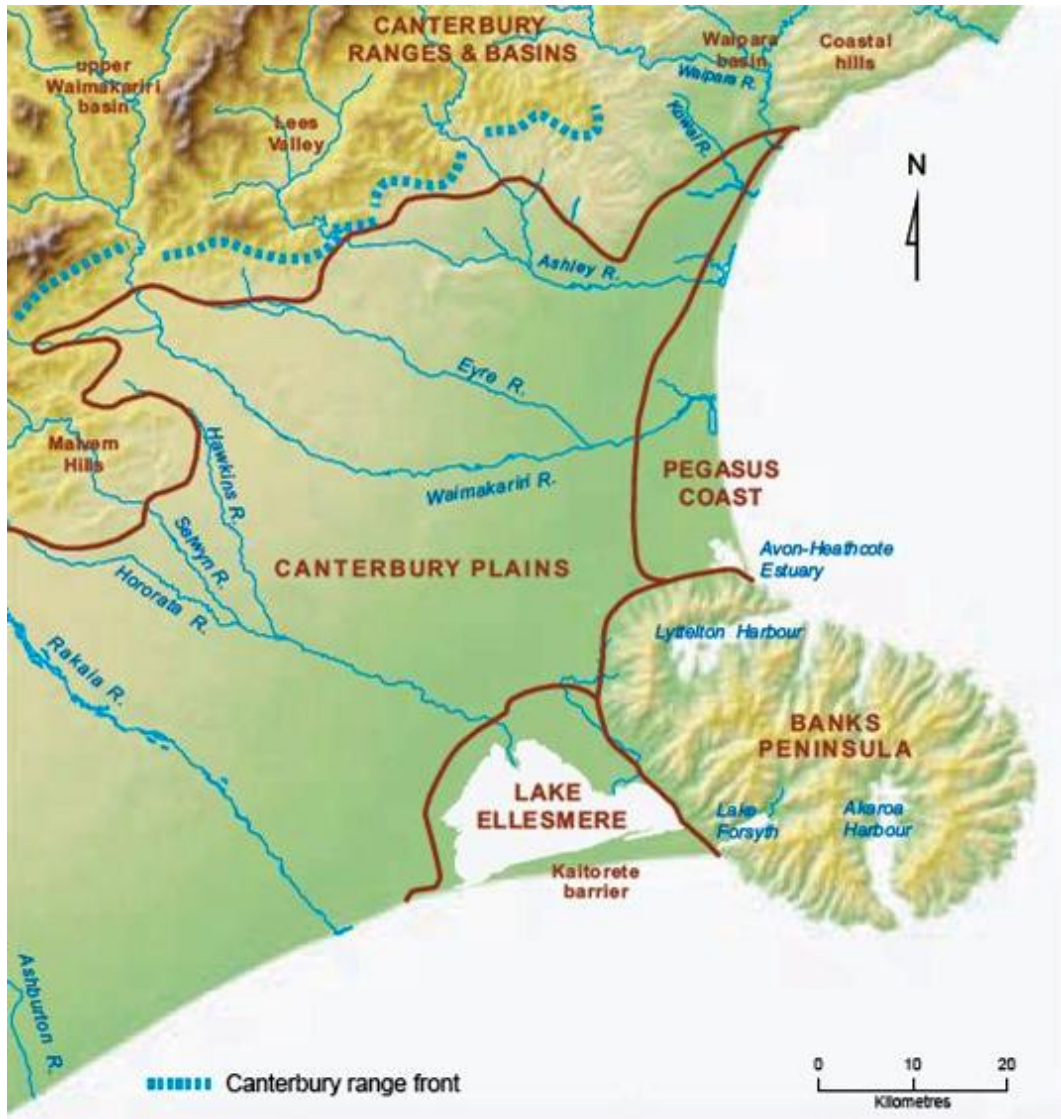


**Εικόνα 3.1:** η πεδιάδα του Canterbury και η πόλη του Christchurch στα ανατολικά της (πηγή: Bing Maps)



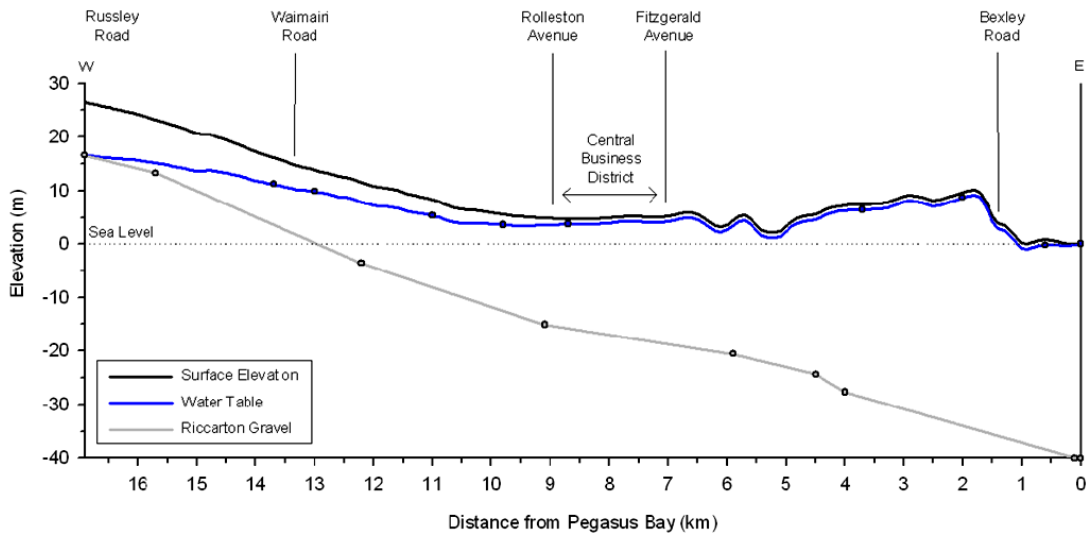
**Εικόνα 3.2:** η μορφολογία του υπεδάφους του Canterbury (πηγή: Russell A. Green, Ιούνιος 2011)



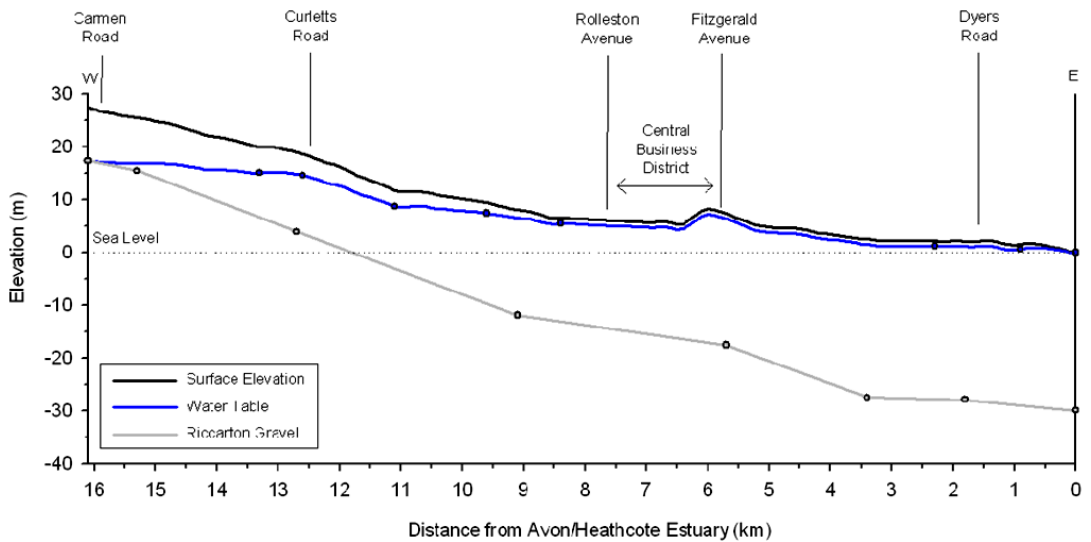


**Εικόνα 3.3:** η πεδιάδα του Canterbury και οι γεωμορφολογικοί σχηματισμοί που την περικλείουν (πηγή: Geology of the Christchurch area, GNS)



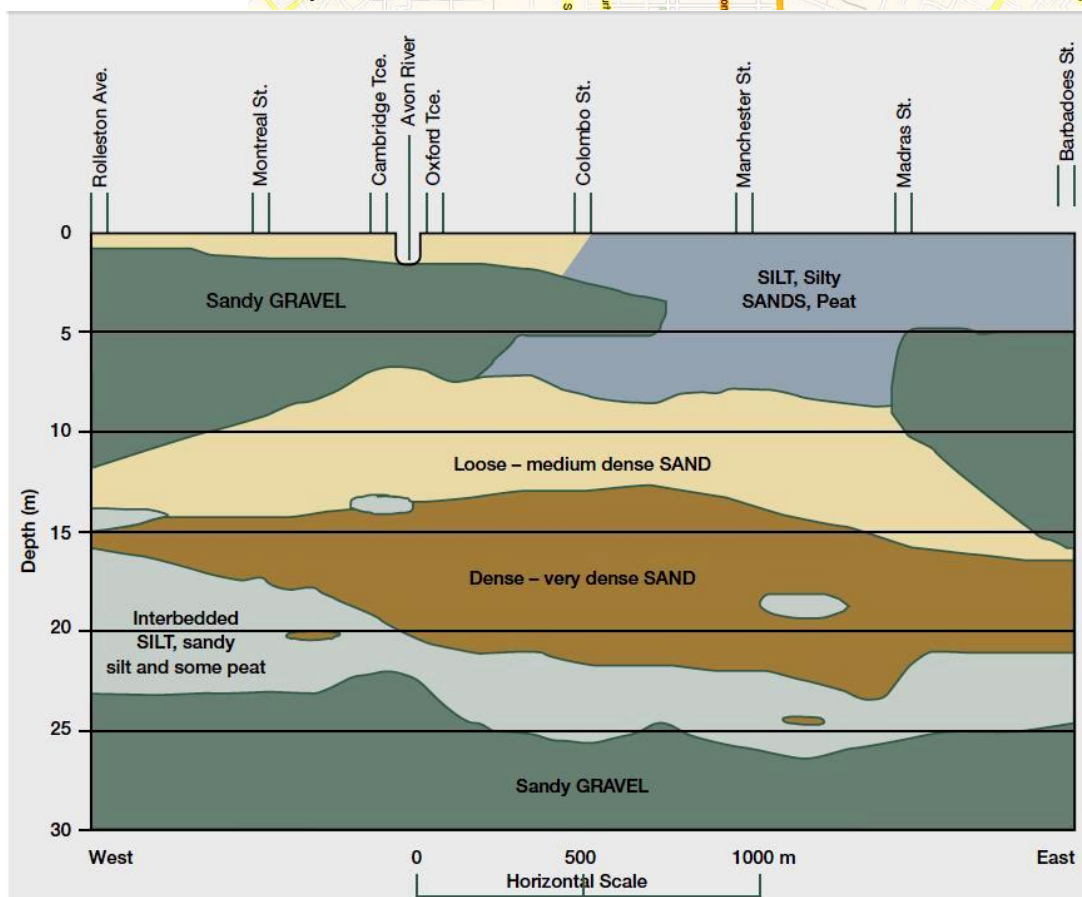
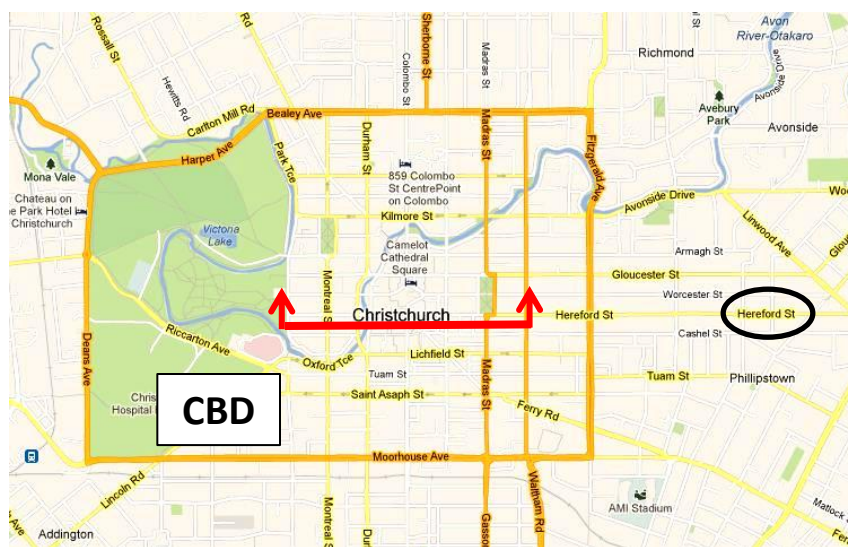


(α)

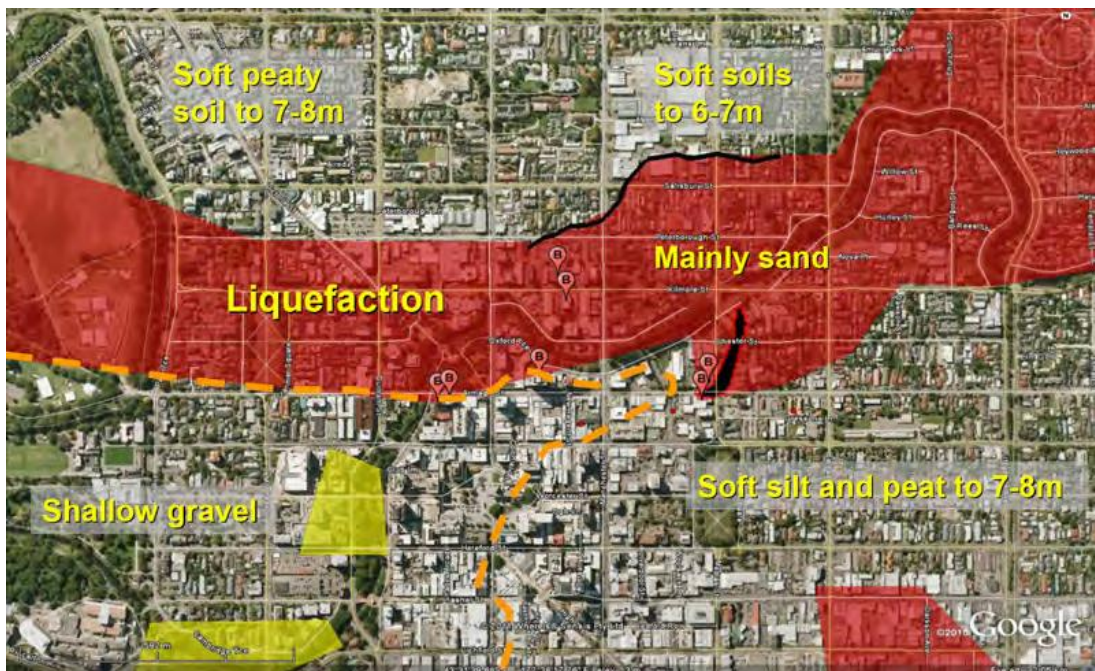


(β)

**Εικόνα 3.4:** τομές με κατεύθυνση Δύσης – Ανατολής χαρακτηριστικές του βάθους στο οποίο βρίσκεται ο σχηματισμός του Riccarton Gravel παράλληλη (α) με την Bealey Avenue και (β) με τη Moorhouse Avenue (πηγή: Cubrinovski και McCahon, Αύγουστος 2011)

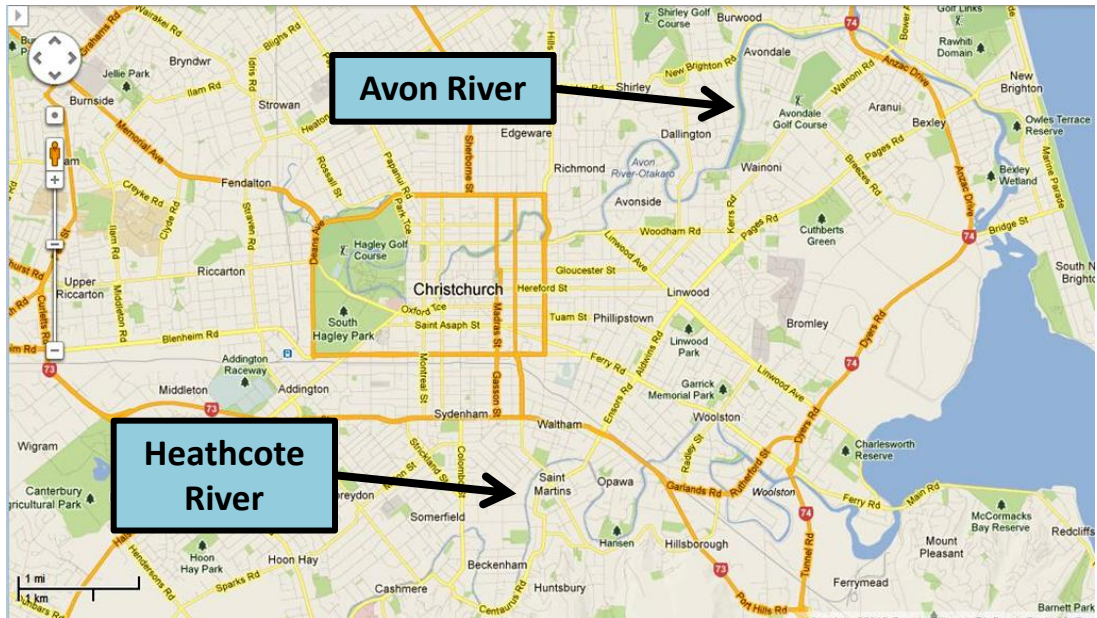


**Εικόνα 3.5:** γεωλογική τομή στο υπέδαφος του CBD στο Christchurch κατά μήκος της οδού Hereford (πηγή: Cubrinovski και McCahon, Αύγουστος 2011)

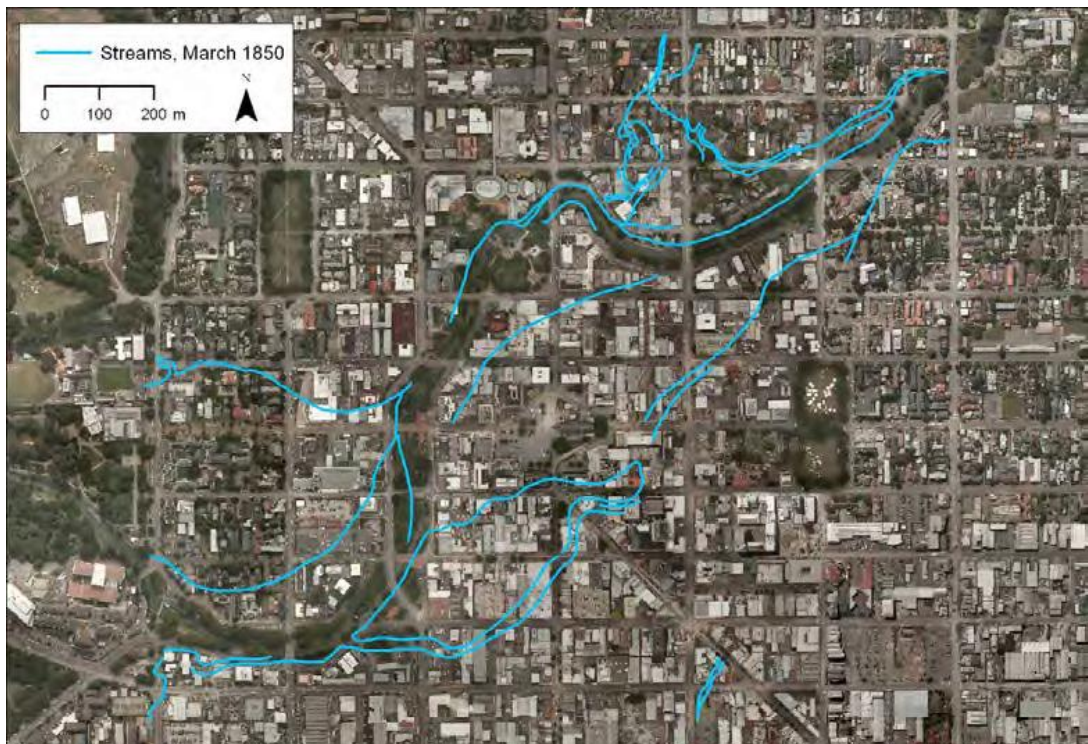


**Εικόνα 3.6:** ζώνες ρευστοποιηθέντος εδάφους στο CBD από τον σεισμό της 22<sup>ης</sup> Φεβρουαρίου του 2011. Επισημαίνονται τα εδαφικά υλικά που κυριαρχούν στις ανώτερες εδαφικές στρώσεις (πηγή: Cubrinovski και McCahon, Αύγουστος 2011)

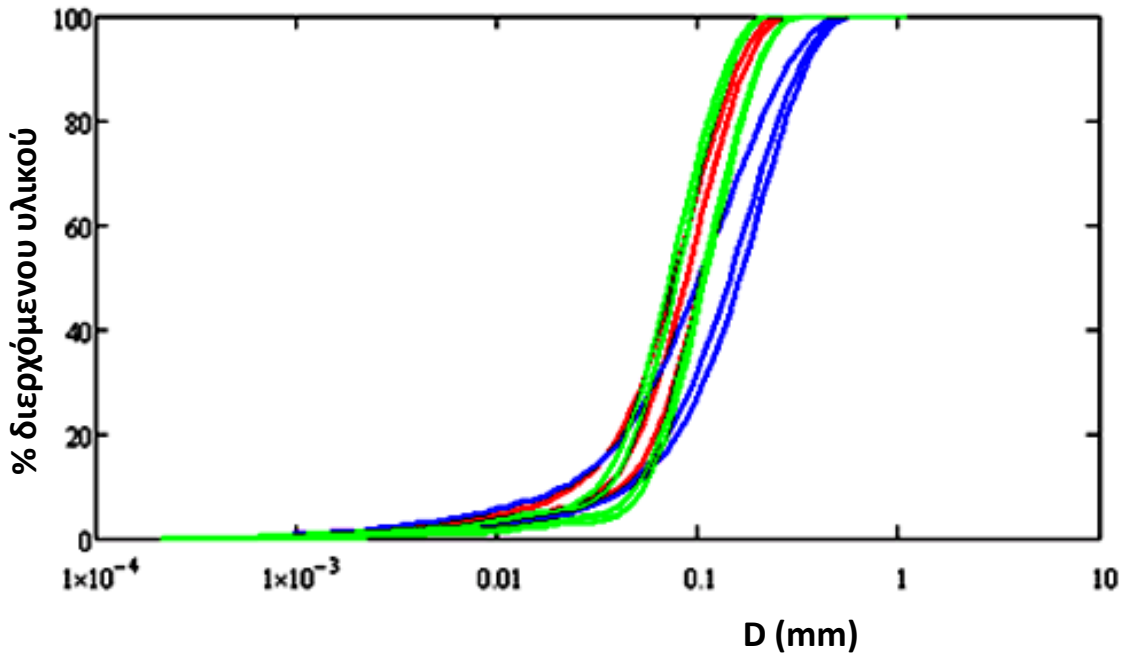




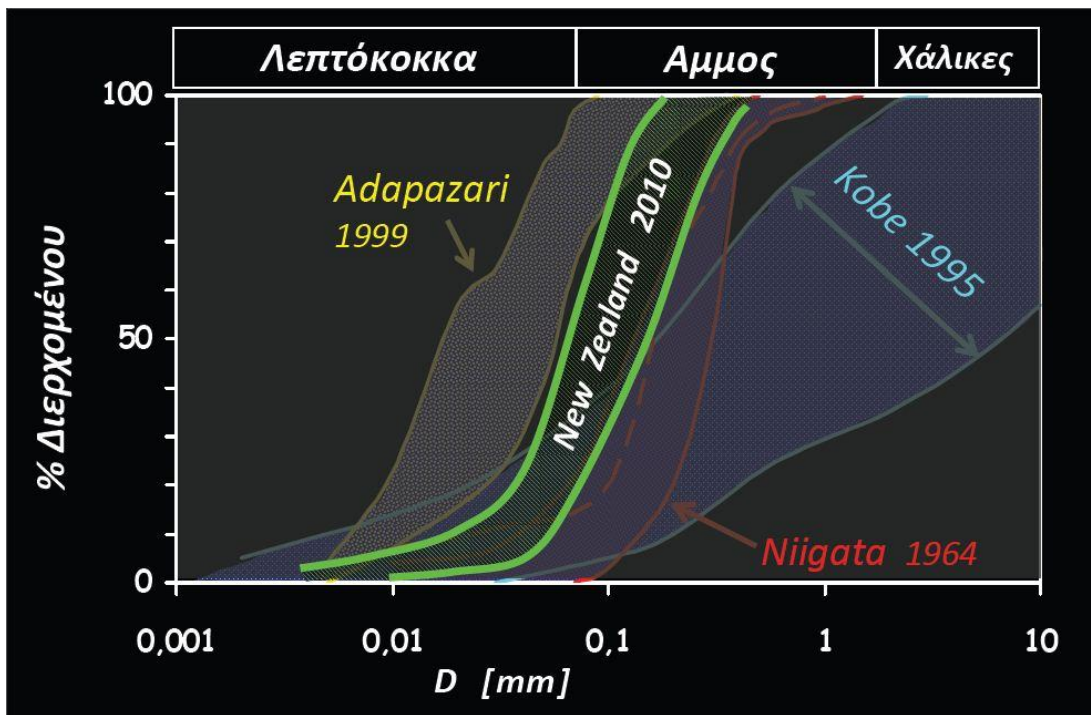
**Εικόνα 3.7:** οι ποταμοί Avon και Heathcote στη πόλη του Christchurch (πηγή: Google Maps)



**Εικόνα 3.8:** η διαδρομή του ποταμού Avon στο κέντρο της πόλης του Christchurch (πηγή: Cubrinovski και McCahon, Αύγουστος 2011)



Εικόνα 3.9: καμπύλες κοκκομετρικής διαβάθμισης από το ρευστοποιηθέν υλικό στο Christchurch (πηγή: Mike Pender, prof of Auckland University)

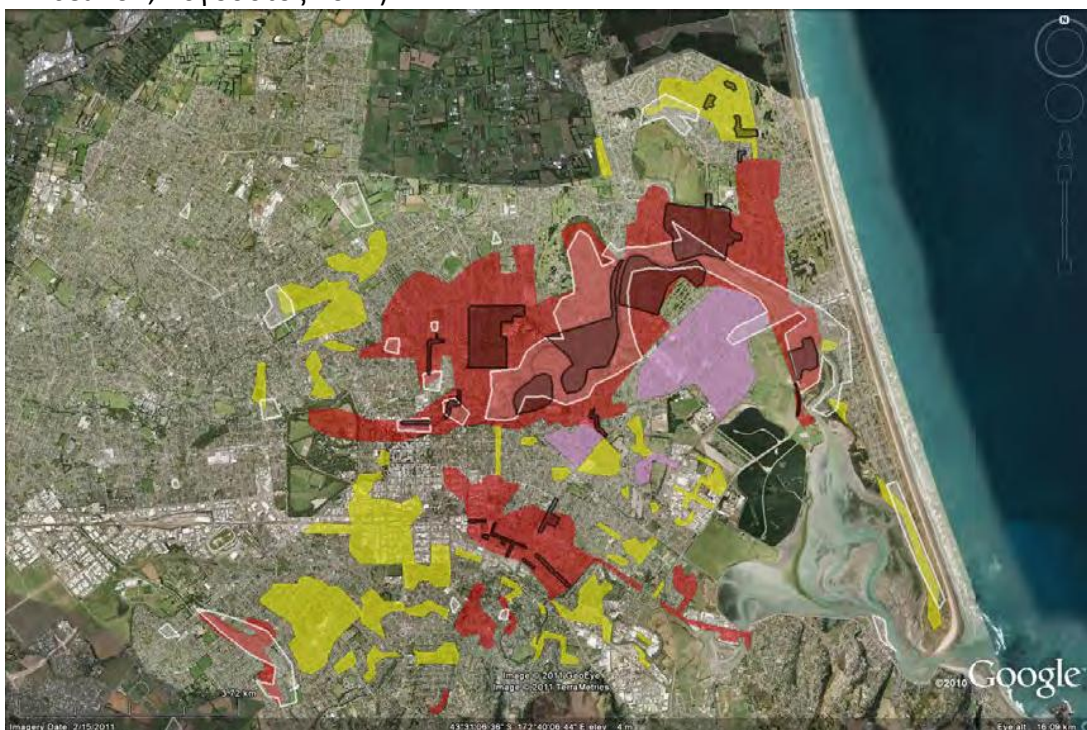


Εικόνα 3.10: καμπύλες κοκκομετρικής διαβάθμισης από εδάφη που ρευστοποιήθηκαν στο Christchurch και σε άλλες περιοχές από παλαιότερους σεισμούς (πηγή: Αθηναϊκή διάλεξη του καθηγητή Γ. Γκαζέτα του ΕΜΠ, 2004)



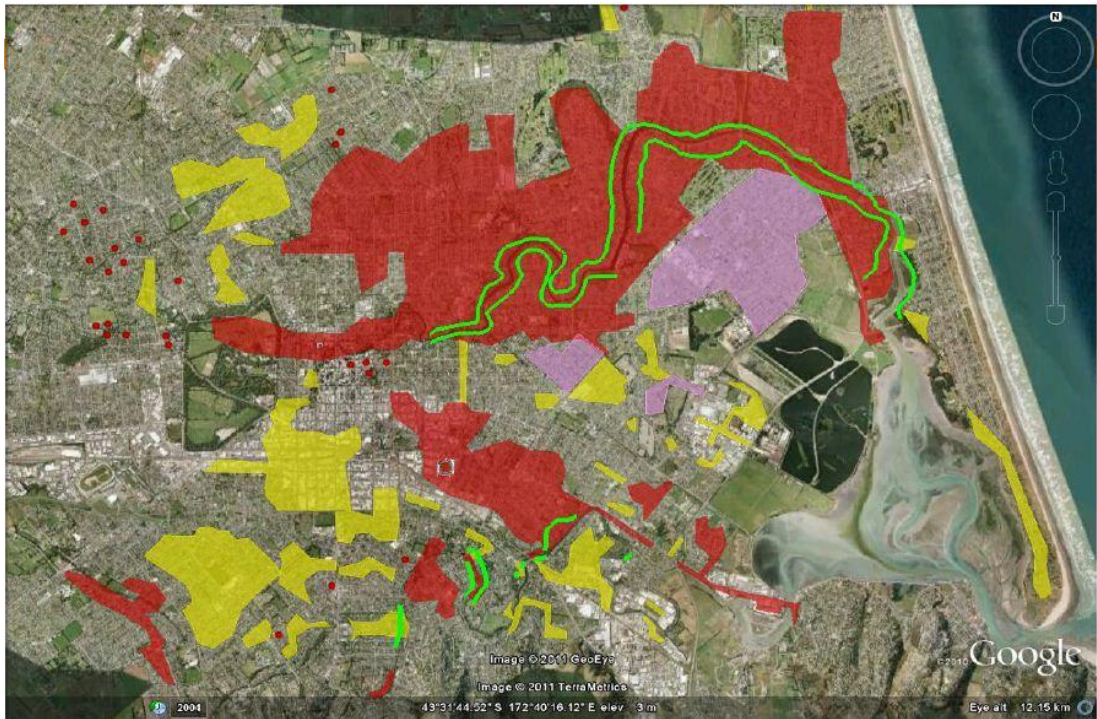


**Εικόνα 3.11:** εδαφικές εκτάσεις που ρευστοποιήθηκαν στο CBD του Christchurch από τον σεισμό της 22<sup>ης</sup> Φεβρουαρίου του 2011. Με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται οι περιοχές μέτριας έως έντονης ρευστοποίησης και με ανοιχτό πράσινο οι αντίστοιχες μέτριας προς χαμηλής (πηγή: Cubrinovski και McCahon, Αύγουστος 2011)



**Εικόνα 3.12:** εδαφικές εκτάσεις που ρευστοποιήθηκαν στο Christchurch από τους σεισμούς του Darfield (άσπρο περίγραμμα), του Φεβρουαρίου (κίτρινο, κόκκινο και φούξια χρώμα) και του Ιουνίου (μαύρο χρώμα), (πηγή: Cubrinovski και McCahon, Αύγουστος 2011)



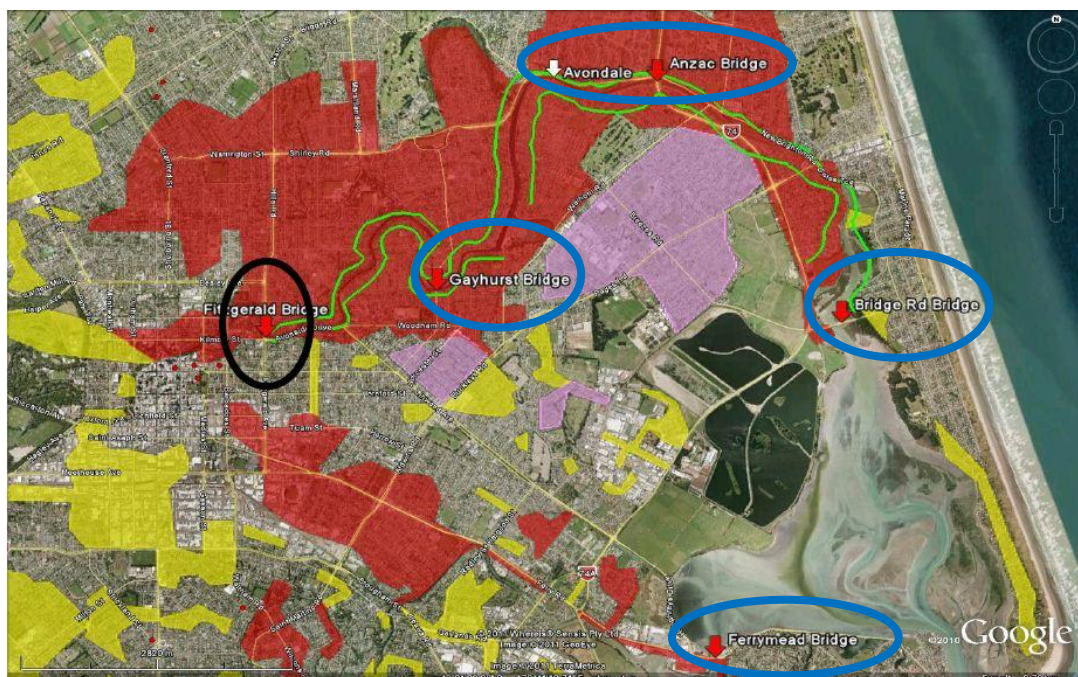


**Εικόνα 3.13:** περιοχές πλευρικής εξάπλωσης του εδάφους στο Christchurch λόγω ρευστοποίησης (πράσινες γραμμές), (πηγή: Russell A. Green, Ιούνιος 2011)



**Εικόνα 3.14:** οριζόντια εξάπλωση του εδάφους λόγω ρευστοποίησης (πηγή: Russell A. Green, Ιούνιος 2011, φωτογραφία από M. Cubrinovski)





**Εικόνα 3.15:** προβλήματα σε γέφυρες εξαιτίας της πλευρικής εξάπλωσης του εδάφους στο Christchurch λόγω ρευστοποίησης, (πηγή: Russell A. Green, Ιούνιος 2011)

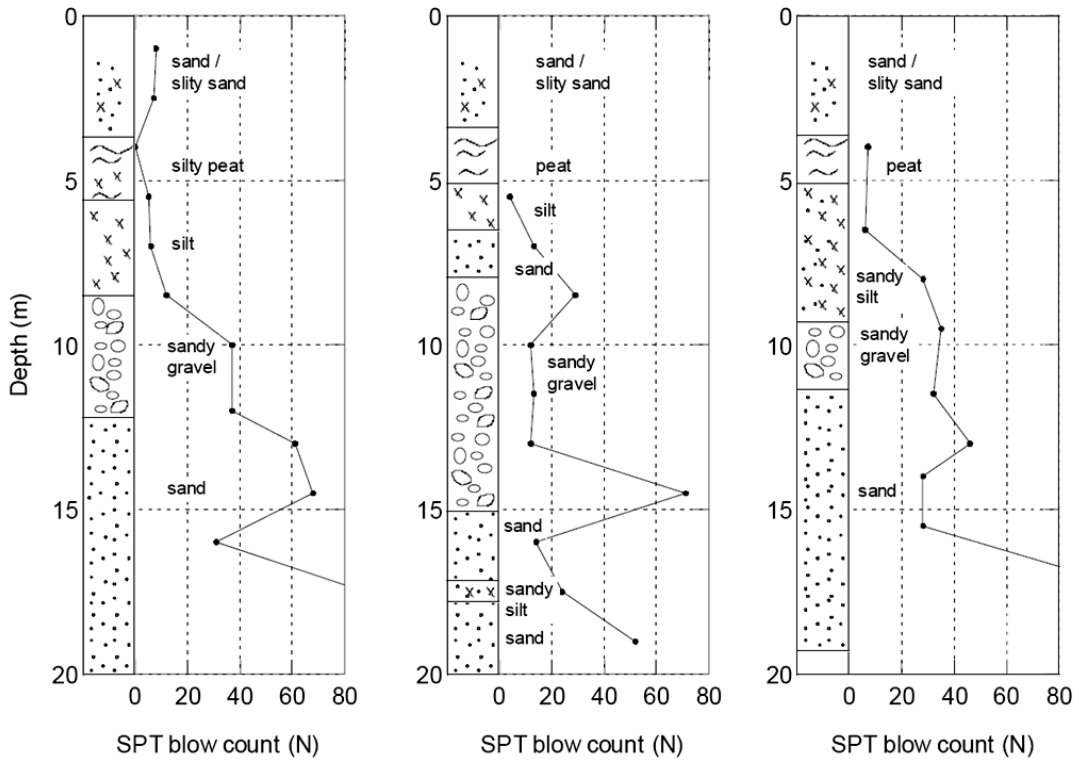


**Εικόνα 3.16:** πλευρική εξάπλωση του εδάφους στη γέφυρα Fitzgerald λόγω ρευστοποίησης, (πηγή: Russell A. Green, Ιούνιος 2011)

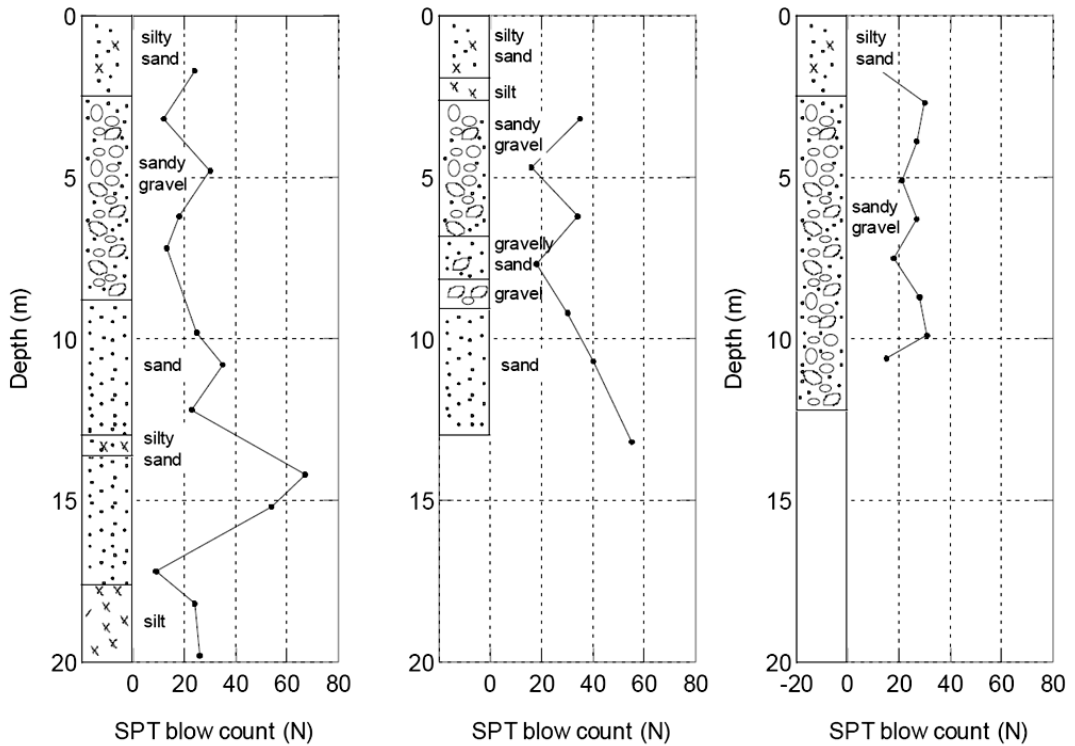




**Εικόνα 3.17:**  
ρευστοποίηση του  
εδάφους στο  
Christchurch.

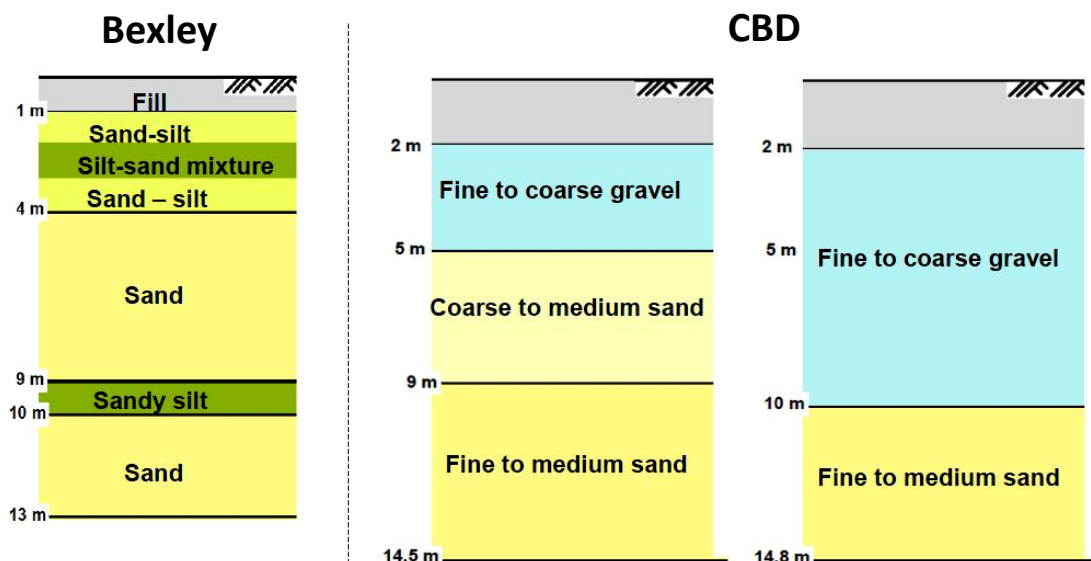


(α)

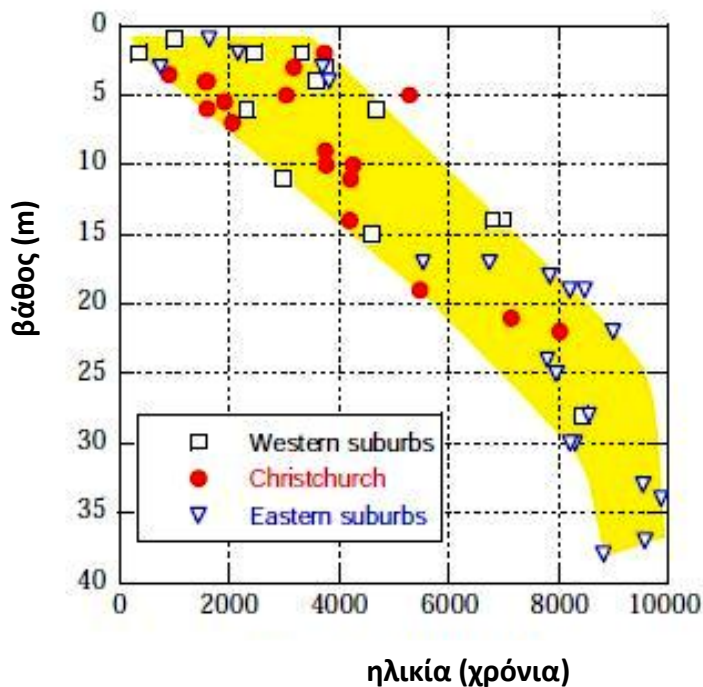


(β)

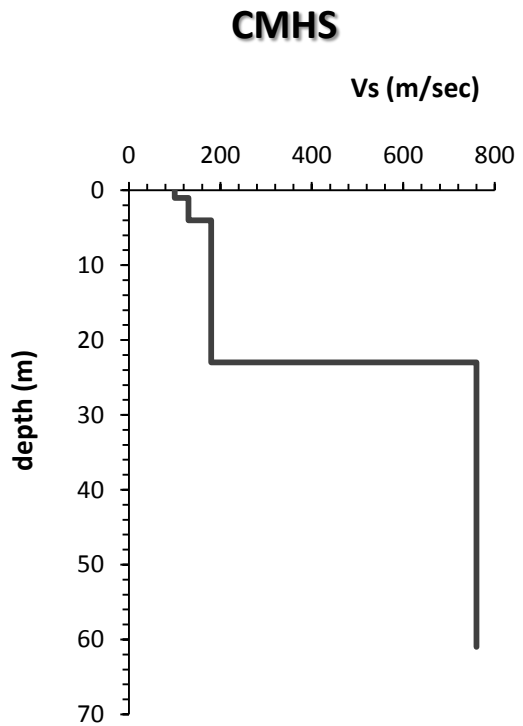
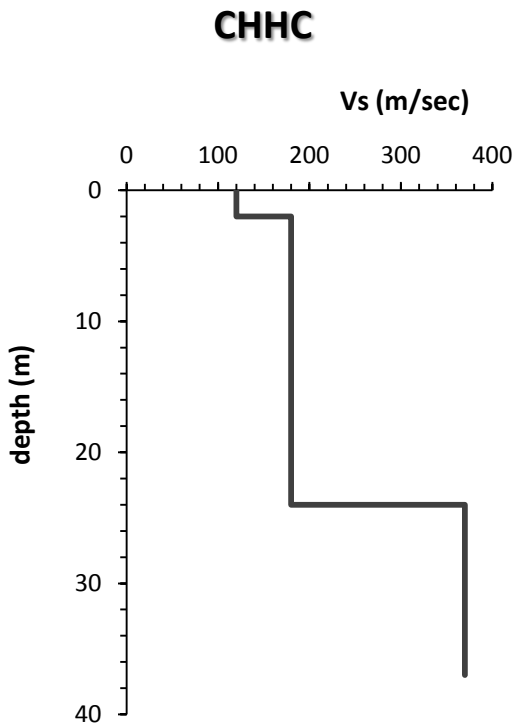
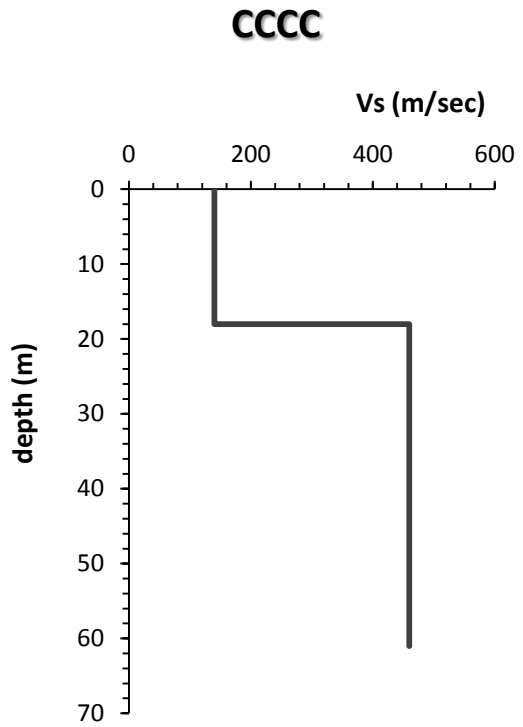
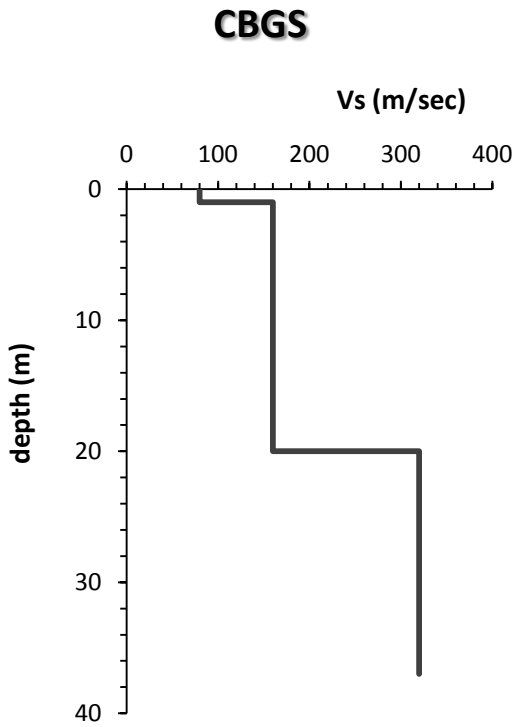
**Εικόνα 3.18:** ‘τυπικά’ εδαφικά προφίλ στο CBD (α) στο βορειοδυτικό μέρος και (β) στο νοτιοδυτικό (πηγή: Cubrinovski και McCahon, Αύγουστος 2011)



**Εικόνα 3.19:** σχετικώς αντιπροσωπευτικά εδαφικά προφίλ για τις περιοχές Bexley και για το CBD του Christchurch από τον καθηγητή M. Cubrinovski, (πηγή: Russell A. Green, Ιούνιος 2011)

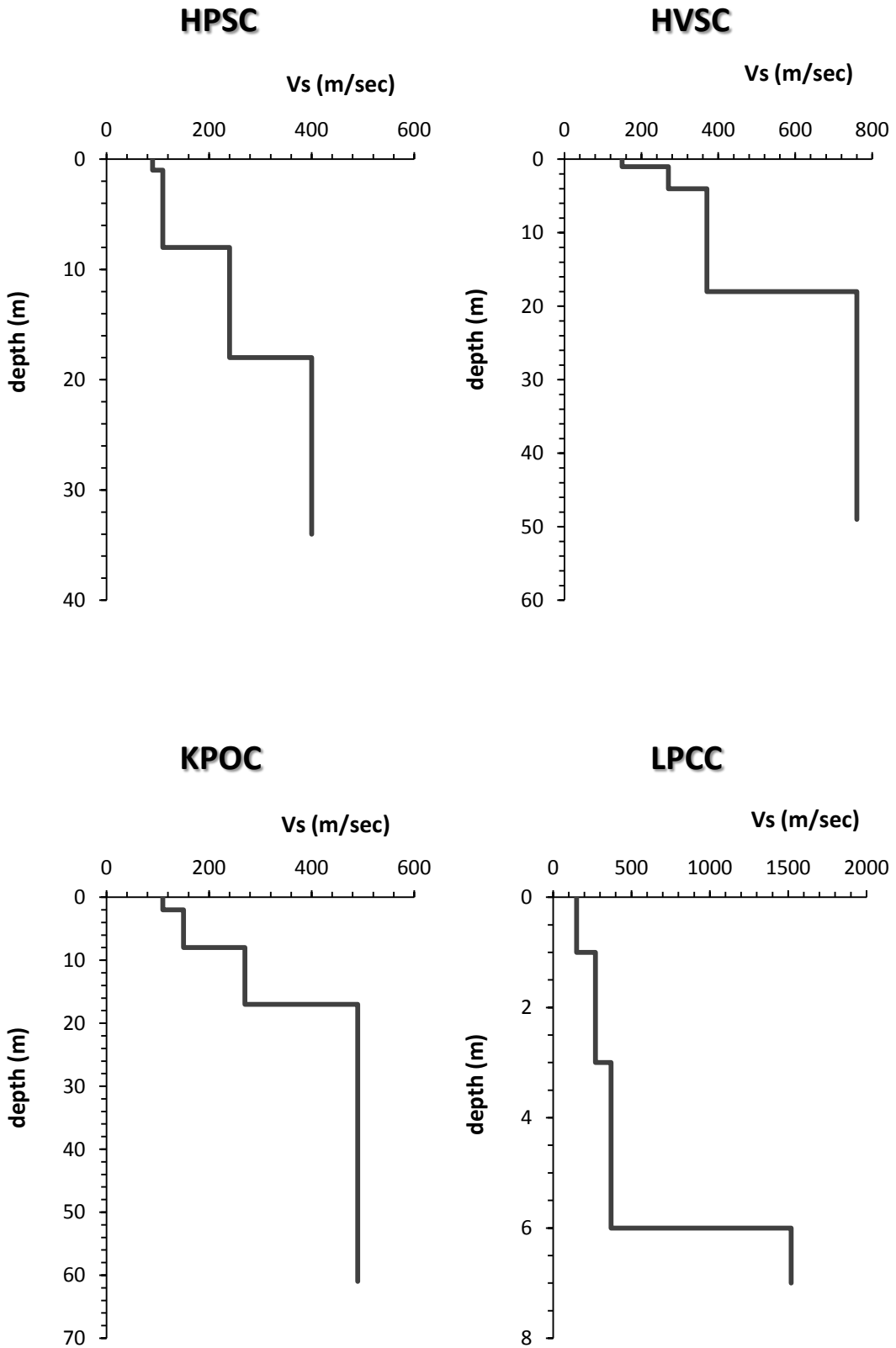


**Εικόνα 3.20:** η ηλικία των εδαφικών στρώσεων που βρίσκονται πάνω από τις στρώσεις του Riccarton gravel (πηγή: Cubrinovski και McCahon, Αύγουστος 2011)

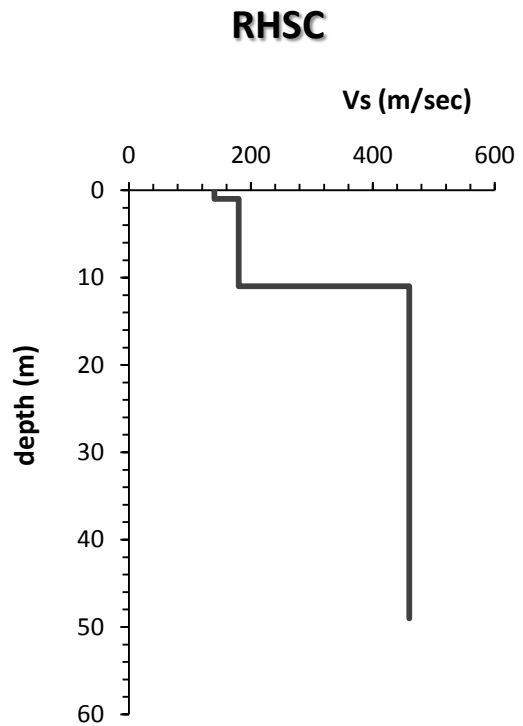
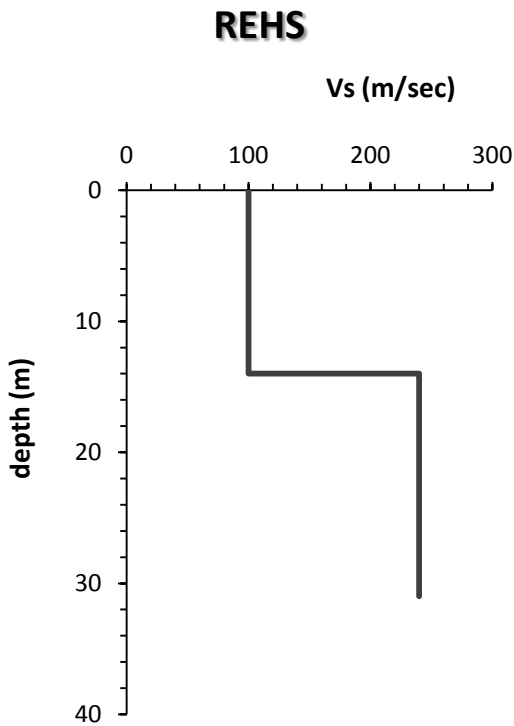
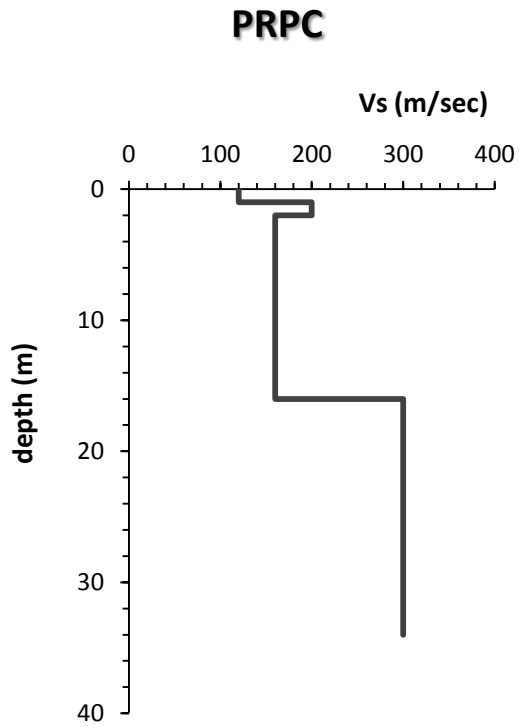
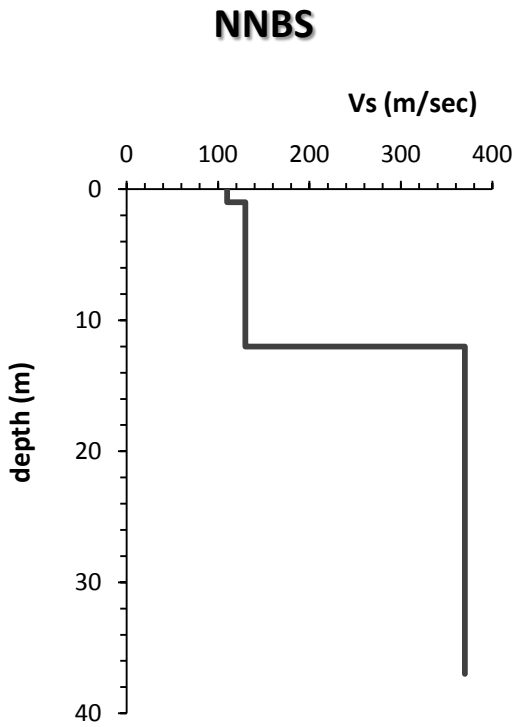


**Σχήμα 3.1:** εδαφικά προφίλ σε όρους ταχύτητας διατμητικών κυμάτων Vs των καταγραφικών σταθμών CBGS, CCCC, CHHC, CMHS



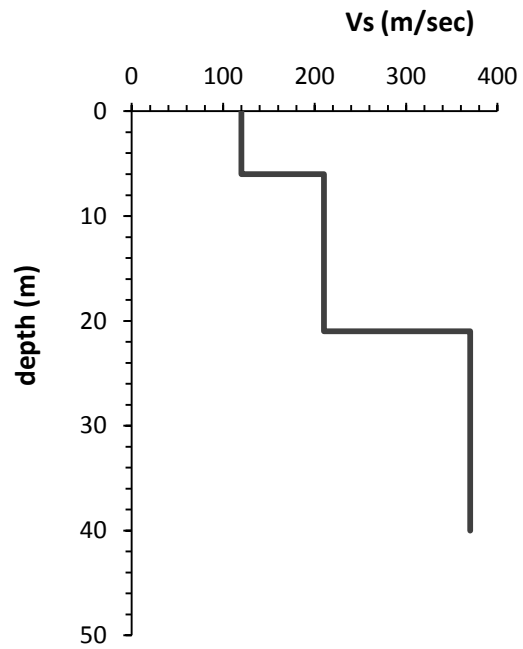


**Σχήμα 3.2:** εδαφικά προφίλ σε όρους ταχύτητας διατμητικών κυμάτων  $V_s$  των καταγραφικών σταθμών HPSC, HVSC, KPOC, LPCC



**Σχήμα 3.3:** εδαφικά προφίλ σε όρους ταχύτητας διατμητικών κυμάτων Vs των καταγραφικών σταθμών NNBS, PRPC, REHS, RHSC

## SHLC



**Σχήμα 3.4:** εδαφικό προφίλ σε όρους ταχύτητας διατμητικών κυμάτων  $V_s$  του καταγραφικού σταθμού SHLC



# Κεφάλαιο 4

---

*Δεδομένα και φασματικές αναλύσεις*





## *Δεδομένα και φασματικές αναλύσεις*

---

### *4.1 Το δίκτυο των επιταχυνσιογραφικών σταθμών*

Όπως έχει ήδη γίνει σαφές από τα κεφάλαια που έχουν προηγηθεί η Νέα Ζηλανδία είναι μία χώρα με πολύ έντονη σεισμική δραστηριότητα. Η θέση της πάνω ακριβώς από το σύνορο μεταξύ των τεκτονικών πλακών της Αυστραλίας και του Ειρηνικού ωκεανού, επιβάλλει τη συνεχή παρακολούθηση των γεωφυσικών αλλαγών που επιβάλλει η σύγκρουσή τους. Περιοχές που διατέμνονται από τα ρήγματα Alpine και Wellington υποφέρουν περισσότερο από σεισμούς και ηφαιστειακές εκρήξεις (στο βόρειο νησί κυρίως). Πέρα από αυτές όμως, κανένα σημείο της χώρας δεν θεωρείται ασφαλές.

Προκειμένου να αντιμετωπίσουν τις απειλές της φύσης οι Νεοζηλανδοί αποφάσισαν να ιδρύσουν από τα μέσα της δεκαετίας του 1950 - 60 το πρόγραμμα GeoNet (New Zealand strong motion and equipment) υπό την αιγίδα του GNS. Στόχος του είναι η προστασία των υποδομών της χώρας από φυσικά φαινόμενα όπως σεισμοί, εκρήξεις ηφαιστειών, τσουνάμι (tsunami) αλλά και η παρακολούθηση των περιβαλλοντικών μεταβολών. Όσον αφορά την επίβλεψη των σεισμικών γεγονότων έχει δημιουργηθεί ένα εκτενές δίκτυο επιταχυνσιογραφικών σταθμών που καλύπτει τη χώρα σε όλα τα σημεία της και είναι σαφώς πυκνότερο στις περιοχές συνεχούς και έντονης σεισμικής δραστηριότητας (περίπου 250 επιταχυνσιογραφικοί σταθμοί). Οι **εικόνες 4.1 και 4.2** προβάλλουν επίκεντρα διάφορων σεισμικών γεγονότων στη Νέα Ζηλανδία και το πλούσιο δίκτυο των επιταχυνσιογραφικών σταθμών που καλύπτει τη χώρα.

### *4.2 Επιταχυνσιογραφικοί σταθμοί προς μελέτη*

Το Christchurch είναι μία πόλη που τα τελευταία δύο χρόνια έχει πολύ έντονη σεισμική δραστηριότητα. Οι σεισμοί του Canterbury έπληξαν το κέντρο και τα προάστια της με σοβαρές συνέπειες ως προς τις υποδομές της και την οικονομία της. Στην **εικόνα 4.3** παρουσιάζεται το δίκτυο των επιταχυνσιογράφων στην ευρύτερη περιοχή του Canterbury. Είναι προφανές πως πρόκειται για ένα πολύ πυκνό δίκτυο το οποίο κατέγραψε επιτυχώς την σεισμική ακολουθία της περιόδου 2010 – 11.

Προκειμένου να μελετήσουμε συστηματικά συγκεκριμένους επιταχυνσιογραφικούς σταθμούς της περιοχής για τα σημαντικότερα σεισμικά γεγονότα του Canterbury, προχωρήσαμε στη επιλογή ορισμένων εξ αυτών. Στην **εικόνα 4.4** επισημαίνονται το κέντρο της πόλης του Christchurch (CBD) και τα σημαντικότερα προάστια της, προκειμένου ο αναγνώστης να έχει μία καλύτερη εικόνα για το όνομα της περιοχής με την οποία σχετίζεται ο κάθε επιταχυνσιογράφος. Ακολουθως, στην **εικόνα 4.5**

παρουσιάζονται ονομαστικώς οι επιταχυνσιογράφοι που βρίσκονται στη πόλη αλλά και στις γύρω περιοχές. Με κόκκινο χρώμα επισημαίνονται οι σταθμοί που επιλέχθηκαν για μελέτη στη παρούσα εργασία.

Η επιλογή των συγκεκριμένων επιταχυνσιογράφων έγινε με βάση το προάστιο στο οποίο εδράζονται, δηλαδή το βαθμό επίδρασης των σεισμικών συμβάντων σε αυτό, σε όρους καταστροφής υποδομών ή γεωτεχνικών αστοχιών, και την ένταση του κραδασμού που κατέγραψαν. Οι σταθμοί αυτοί κατά ονομαστική σειρά είναι οι εξής **18**:

**CBGS, CCCC, CHHC, CMHS, CRLZ, DFHS, HORC, HPSC, HVSC, KPOC, NNBS, PRPC, REHS, RHSC, SHLC, SMTC, LPCC, SWNC.**

Στον **πίνακα 4.1** που ακολουθεί παρουσιάζονται οι παραπάνω επιταχυνσιογραφικοί σταθμοί με την κωδικοποιημένη και αναλυτική ονομασία τους αλλά και τις γεωγραφικές συντεταγμένες της θέσης τους.

**Πίνακας 4.1:** τα ονόματα και οι γεωγραφικές συντεταγμένες των σταθμών που επιλέχθηκαν για μελέτη.

	<b><i>CBD</i></b>	<b><i>όνομα επιταχυνσιογραφικού σταθμού</i></b>	<b><i>γεωγρ. πλάτος</i></b>	<b><i>γεωγρ. μήκος</i></b>
1	CHHC	Christchurch Hospital	-43.535929	172.627523
2	CBGS	Christchurch Botanic Gardens	-43.531010	172.619750
3	CCCC	Christchurch Cathedral College	-43.538085	172.647427
4	REHS	Christchurch Resthaven	-43.523610	172.635020
	<b><i>ΠΡΟΑΣΤΙΑ</i></b>			
5	CMHS	Christchurch Cashmere High School	-43.567280	172.624050
6	DFHS	Darfield High School	-43.491340	172.102040
7	HORC	Hororata School	-43.541300	171.959790
8	HPSC	Hulverstone Drive Pumping Station	-43.50157547	172.702194214
9	HVSC	Heathcote Valley Primary School	-43.579787	172.709423
10	KPOC	Kaiapoi North School	-43.378130	172.663640
11	NNBS	Christchurch North New Brighton School	-43.497090	172.717870
12	PRPC	Pages Road Pumping Station	-43.527476	172.682644
13	RHSC	Riccarton High School	-43.536172	172.564404
14	SHLC	Shirley Library	-43.505336761	172.663391113
15	SMTC	Styx Mill Transfer Station	-43.467529297	172.613861084
16	LPCC	Lyttelton Port Company	-43.607850	172.724778
17	SWNC	Swannanoa School	-43.371100	172.495230
18	CRLZ	Canterbury Ring Laser	-43.576410	172.623100

Στον **πίνακα 4.1** είναι επίσης ορατή η διάκριση των σταθμών ανάλογα με την περιοχή που εδράζονται (CBD/προάστια). Οι σταθμοί CHHC, CBGS, CCCC και REHS, βρίσκονται στο κέντρο της πόλης του Christchurch, ενώ οι υπόλοιποι βρίσκονται στο εκάστοτε προάστιο που εμπεριέχεται στην αναλυτική τους ονομασία.

Η **εικόνα 4.6** προβάλλει τους επιταχυνσιογράφους CBGS, CCCC, CHHC, REHS που εδράζονται στο CBD με βάση τις γεωγραφικές τους συντεταγμένες. Στην **εικόνα 4.7** απεικονίζεται ενδεικτικά ο σταθμός CBGS, ο οποίος βρίσκεται στο ελεύθερο πεδίο, μακριά από γειτονικά κτίσματα.

### 4.3 *Επεξεργασία της εδαφικής κίνησης*

Τα δεδομένα των επιταχυνσιογραφικών σταθμών, που επιλέχθηκαν στην προηγούμενη ενότητα, αξιοποιήθηκαν με στόχο την διερεύνηση κυρίως του συχνοτικού περιεχομένου των καταγεγραμμένων κραδασμών από τους σεισμούς του Canterbury. Φυσικά, ένα τυπικό επιταχυνσιογράφημα μίας οποιασδήποτε συνιστώσας αποτελεί πηγή άντλησης σπουδαίων πληροφοριών για τον μηχανικό. Τα κύρια χαρακτηριστικά αυτού είναι:

- ο το μέγιστο πλάτος της εδαφικής κίνησης
- ο το συχνοτικό περιεχόμενο
- ο η διάρκεια της δόνησης

Το μέγιστο πλάτος της εδαφικής κίνησης σχετίζεται με τη μέγιστη εδαφική επιτάχυνση (κατακόρυφη ή οριζόντια), ταχύτητα και μετακίνηση. Ο βαθμός στον οποίο τα μεγέθη αυτά εξαρτώνται από τις πολύ υψηλές συχνότητες της κίνησης ακολουθεί τη σειρά με την οποία αναφέρθηκαν.

Η διάρκεια του κραδασμού έχει μεγάλη επιρροή στην έκταση των ζημιών που προκαλούν οι σεισμοί. Όσο μεγαλύτερη διάρκεια έχει η εδαφική κίνηση τόσο μειώνεται η δυσκαμψία και η αντοχή των δομικών στοιχείων των κατασκευών, αυξάνεται η πίεση των πόρων σε χαλαρές κορεσμένες άμμους και μειώνεται η ενεργός τάση και η διατμητική αντοχή κ.ά. Είναι γεγονός ότι μία σεισμική δόνηση μεγάλου πλάτους αλλά μικρής διάρκειας μπορεί να μην προκαλέσει σημαντικές ζημιές, αλλά το αντίθετο συνήθως αποδεικνύεται καταστρεπτικό. Φυσικά η διάρκεια της κίνησης είναι άμεση συνάρτηση του μεγέθους του σεισμού, δηλαδή της ενέργειας παραμόρφωσης που εκλύεται από τη θραύση του ρήγματος. Εξαρτάται επίσης από παράγοντες όπως η εστιακή απόσταση και τις τοπικές εδαφικές συνθήκες στη θέση καταγραφής του κραδασμού.

Το συχνοτικό περιεχόμενο της εδαφικής κίνησης συσχετίζεται με τη διαφοροποίηση του πλάτους της κίνησης σε σχέση με τις διάφορες συχνότητες. Οι κυριότερες μέθοδοι με τις οποίες εκτιμάται το συχνοτικό περιεχόμενο των σεισμικών κραδασμών είναι τα *φάσματα Fourier* και τα *φάσματα απόκρισης*.

### 4.3.1 Φάσματα Fourier

Τα φάσματα Fourier έχουν κυρίως ενδιαφέρον για την επιστήμη της τεχνικής σεισμολογίας. Κάθε περιοδική συνάρτηση μπορεί να εκφραστεί ως ένα άθροισμα απλών αρμονικών συναρτήσεων διαφορετικού πλάτους, συχνότητας και φάσης. Έτσι μια περιοδική συνάρτηση της σεισμικής κίνησης μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$\ddot{u}_t = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} c_n \sin(\omega_n t + \varphi_n)$$

όπου  $c_n$  και  $\varphi_n$  είναι το πλάτος και η γωνία φάσης αντίστοιχα για τη  $n$ -οστή αρμονική συνάρτηση της σειράς Fourier και  $\omega_n = 2\pi \frac{n}{T_f}$ .

Τα φάσματα πλάτους Fourier αποτελούν τις γραφικές παραστάσεις του πλάτους Fourier  $c_n$  σε σχέση τη συχνότητα  $\omega_n$ . Επίσης ορίζεται το φάσμα φάσης Fourier ως η γραφική παράσταση της γωνίας φάσης  $\varphi_n$  με την αντίστοιχη συχνότητα  $\omega_n$ . Ο λόγος χρήσης των φασμάτων Fourier είναι η εκτίμηση της συνολικής ενέργειας που περιέχεται σε μία εδαφική κίνηση διάρκειας χρόνου  $t$ . Αν υποθέσουμε ότι  $\ddot{u}_t \neq 0$  στο χρονικό διάστημα  $0 < t < t_1$ , τότε η συνολική ενέργεια  $E$  (δυναμική και κινητική) ενός απλού γραμμικού ταλαντωτή μάζας  $m$  και δυσκαμψίας  $k$  προκύπτει από τη σχέση:

$$c_n = \sqrt{\frac{2E(t_1, \omega_n)}{m}}$$

Οι αιχμές των φασμάτων Fourier σχετίζονται με τις περιόδους για τις οποίες η σεισμική ενέργεια μεγιστοποιείται. Συνήθως ισχυροί σεισμοί προκαλούν εδαφικές κινήσεις με κυρίαρχες τις χαμηλές συχνότητες (μεγάλες περιόδους), ενώ για τους ασθενείς συμβαίνει το αντίθετο.

### 4.3.2 Φάσματα αποκρίσεως

Τα φάσματα αποκρίσεως έχουν εφαρμογή στον αντισεισμικό σχεδιασμό των κατασκευών. Περιγράφουν με σαφήνεια ποια είναι η μέγιστη απόκριση της κατασκευής όταν διεγερθεί με τον εκάστοτε εδαφικό κραδασμό. Αναλυτικότερα, τα φάσματα αυτά αποδίδουν τη μέγιστη απόκριση ενός μονοβάθμιου ταλαντωτή λόγου απόσβεσης  $\xi$ , σε μία συγκεκριμένη εδαφική κίνηση στη βάση του, ως συνάρτηση της ιδιοπεριόδου (ιδιοσυχνότητας) του και του συντελεστή απόσβεσης. Ο ταλαντωτής έχει τη μέγιστη ταλάντωση όταν η ιδιοσυχνότητά του ταυτίζεται με την συχνότητα της διέγερσης.

Τα φάσματα απόκρισης χωρίζονται σε φάσματα επιτάχυνσης, ταχύτητας και μετακίνησης. Η σχετική μετακίνηση ενός μονοβάθμιου ταλαντωτή ο οποίος υποβάλλεται σε μία εδαφική διέγερση  $\ddot{u}_g(t)$ , για  $u_{t=0} = 0$ , δίνεται από τη σχέση (ολοκλήρωμα Duhamel):

$$u(t) = \frac{1}{\omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}} \int_0^t \ddot{u}_g(t) \cdot e^{\zeta \omega_n (t-\tau)} \cdot \sin \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2} (t - \tau) d\tau$$

Παραγωγίζοντας τη παραπάνω σχέση υπολογίζουμε την σχετική ταχύτητα  $v(t) = \dot{u}(t)$  του ταλαντωτή. Παραγωγίζοντας για δεύτερη φορά εκτιμούμε τη σχετική επιτάχυνση  $\ddot{u}(t)$ . Ενδιαφέρον έχει όμως η απόλυτη επιτάχυνση του ταλαντωτή  $|\ddot{u}|(t) = \ddot{u}(t) + \ddot{u}_g(t)$ . Η μέγιστη τιμή  $|\ddot{u}|(t)_{max}$  για τη συγκεκριμένη συνιστώσα της εδαφικής κίνησης, ως συνάρτηση της θεμελιώδους ιδιοσυχνότητας  $\omega_n$  και της απόσβεσης  $\zeta$ , δίνει το φάσμα απόκρισης της απόλυτης επιτάχυνσης  $S_a(\omega, \zeta)$ .

### 4.3.3 Καθοριστικοί παράγοντες επιρροής των φασμάτων

Οι τιμές και η μορφή των φασμάτων Fourier και των φασμάτων απόκρισης εξαρτώνται από παράγοντες όπως το μέγεθος του σεισμού, ο μηχανισμός της διάρρηξης, η απόσταση από τη προβολή του ρήγματος στην επιφάνεια, η τοπική εδαφική γεωμορφολογία και οι εδαφικές συνθήκες – ιδιότητες αλλά και η γεωλογία των στρωμάτων από τα οποία περνούν τα σεισμικά κύματα.

Επίσης, σε κάποιες περιπτώσεις παρατηρούνται διαφορές μεταξύ των δύο οριζόντιων συνιστωσών της καταγραφής. Αυτές συνήθως οφείλονται στον τρόπο διάρρηξης του ρήγματος (κατευθυντικότητα, μόνιμη τεκτονική μετατόπιση), στην εγγύτητα στο ρήγμα και σε φαινόμενα που σχετίζονται με το πεδίο των τριών διαστάσεων.

Όταν το σημείο καταγραφής της εδαφικής κίνησης είναι κοντά στο ρήγμα που την προκάλεσε τα φάσματα αποκρίσεως αποτελούνται κυρίως από υψηλές συχνότητες. Αντίθετα, εάν βρίσκεται μακρύτερα ή εάν το ρήγμα είναι σε μεγαλύτερο βάθος οι υψηλής συχνότητας συνιστώσες της κίνησης φιλτράρονται με την απόσταση και στην επιφάνεια φτάνουν κυρίως μακροπερίοδοι παλμοί. Οι τοπικές εδαφικές συνθήκες διαδραματίζουν εξίσου σημαντικό ρόλο στη μορφή και τις τιμές των φασμάτων. Σε σκληρά εδάφη όπως τα πυκνά αμμοχάλικα και οι στιφρές άργιλοι οι υψηλές συχνότητες υπερσχύουν στην καταγραφή. Εν αντιθέσει, σε χαλαρά ή μαλακά εδάφη υπερέχουν οι μικρές.

### 4.4 Δεσπόζουσα περίοδος $T_p$

Η δεσπόζουσα περίοδος ορίζεται ως η περίοδος ταλάντωσης που αντιστοιχεί στη μέγιστη τιμή του φάσματος πλάτος Fourier. Η μορφή και η μέγιστη/ες τιμή/ες του φάσματος εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά που σχολιάσαμε προηγουμένως.

Υπάρχουν προσεγγιστικά διαγράμματα εκτίμησης της δεσπόζουσας περιόδου (Seed et al, 1969) σε επιφανειακή εκδήλωση βράχου ή στο βραχώδες υπόβαθρο συναρτήσει του μεγέθους του σεισμού και της απόστασης από το επίκεντρο. Όσο αυξάνεται η απόσταση και το μέγεθος τόσο αυξάνεται και η δεσπόζουσα περίοδος  $T_p$ . Φυσικά, ανάλογα διαγράμματα για το έδαφος δεν είναι δυνατόν να υπάρξουν εξαιτίας της περίπλοκης επιρροής που ασκούν τα εδαφικά προφίλ στα σεισμικά κύματα με κατεύθυνση προς την επιφάνεια.

#### *4.5 Διερεύνηση των φασμάτων αποκρίσεως και πλάτους Fourier των επιταχυνσιογραφικών σταθμών του Canterbury*

Στην παρούσα ενότητα επιχειρείται μελέτη των φασμάτων αποκρίσεως και πλάτους Fourier των καταγραφικών σταθμών που επιλέχθηκαν στην ενότητα 4.2. Στόχος της εργασίας στο σημείο αυτό είναι ο προσδιορισμός της δεσπόζουσας περιόδου των φασμάτων για κάθε μία καταγραφή ξεχωριστά. Η διερεύνηση αφορά τις δύο συνιστώσες καταγραφής για κάθε επιταχυνσιογραφικό σταθμό, για τα πέντε κύρια σεισμικά γεγονότα της περιόδου 2010 – 11, στο Canterbury. Αναλυτικότερα τα σεισμικά γεγονότα αυτά είναι τα εξής:

- 3 Σεπτεμβρίου 2010,  $M_w = 7.1$
- 22 Φεβρουαρίου 2011,  $M_w = 6.2$  ( $M_l = 6.3$ )
- 13 Ιουνίου 2011,  $M_w = 5.6$   
 $M_w = 6.0$
- 23 Δεκεμβρίου 2011,  $M_w = 5.8$   
 $M_w = 6.0$

Για τα δύο πρώτα κύρια σεισμικά γεγονότα μελετήθηκαν όλοι οι σταθμοί που προαναφέραμε. Για τα υπόλοιπα σεισμικά γεγονότα μελετήθηκαν οι σημαντικότεροι σταθμοί ανάλογα με τη θέση τους σε σχέση με το εκάστοτε ρήγμα που προκάλεσε τον σεισμό και την ένταση του κραδασμού που κατέγραψαν.

Στόχος μας από την μελέτη των φασμάτων είναι ο προσδιορισμός της δεσπόζουσας περιόδου. Για την επιλογή αυτή θα διερευνηθούν τόσο τα φάσματα αποκρίσεως σε όρους επιταχύνσεων και ταχυτήτων όσο και τα φάσματα πλάτους Fourier.

Στο **σχήμα 4.1** παρουσιάζονται τα φάσματα αποκρίσεως και πλάτους Fourier της συνιστώσας καταγραφής N89W του επιταχυνσιογραφικού σταθμού CBGS, για το σεισμικό γεγονός του Σεπτεμβρίου του 2010 (Darfield). Παρατηρώντας το ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων είναι εμφανής η αιχμή του σε περίοδο  $T = 0.43$  sec. Συνεπώς, με βάση την αιχμή αυτή, θα μπορούσαμε να υιοθετήσουμε ως δεσπόζουσα περίοδο της συγκεκριμένης συνιστώσας την εν λόγω τιμή.

Όμως ο ορισμός της δεσπόζουσας περιόδου, τον οποίο αναπτύξαμε στην προηγούμενη παράγραφο, ουσιαστικώς υποδεικνύει πως για την επιλογή της πρέπει να λαμβάνουμε υπόψη μας το φάσμα του πλάτους Fourier. Στο ίδιο σχήμα,



παρατηρούμε πως πέραν των 0.44 sec, το φάσμα του πλάτους Fourier έχει ακόμη δύο κορυφές. Μία στα 0.78 sec και μία στα 3.09 sec. Συγκρίνοντας τις τιμές αυτές με τις περιόδους για τις οποίες το φάσμα επιταχύνσεων έχει τις κορυφές του, συμπεραίνουμε πως βρίσκονται σε ουσιαστική συμφωνία. Επιπρόσθετα, και το ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων παρουσιάζει αιχμές στις περιόδους αυτές. Γίνεται αντιληπτό πως η σύγκριση μεταξύ των φασμάτων της καταγραφής αντί να απλουστεύσει το πρόβλημα, το περιπλέκει.

Όντας αβέβαιοι για το ποια τιμή περιόδου είναι ορθότερο να επιλεγεί ως δεσπόζουσα, είναι αναγκαία η εύρεση μιας “προσωρινής” λύσης, η οποία στο παρόν σημείο, θα μας λύσει το πρόβλημα και θα μας επιτρέψει να προχωρήσουμε παραπέρα τη μελέτη μας. Η λύση που υιοθετήσαμε ήταν επιλογή περισσότερων της μίας δεσποζουσών περιόδων, δηλαδή τριών. Τις “υποψήφιες” αυτές δεσπόζουσες περιόδους τις επιλέξαμε ως εξής:

- $T_{pshort}$ : η βραχεία περίοδος, η οποία αναφέρεται σε τιμές μικρότερες των 0.7 – 0.8 sec,
- $T_{pmedium}$ : η μεσαία περίοδος που αναφέρεται σε μεσαίες περιόδους των φασμάτων, αμέσως μεγαλύτερη της βραχείας (short),
- $T_{plong}$ : η μακρά περίοδος που αναφέρεται σε μεγαλύτερες περιόδους, πάνω από 1 με 1.5 sec, μεγαλύτερη της βραχείας και της μεσαίας.

Με βάση την παραπάνω κατηγοριοποίηση, στο **σχήμα 4.1** οι τρεις δεσπόζουσες περίοδοι είναι οι εξής:  $T_{pshort} = 0.45$  sec,  $T_{pmedium} = 0.75$  sec,  $T_{plong} = 3.20$  sec.

Να επισημάνουμε πως στο φάσμα του πλάτους Fourier, έχουμε αφαιρέσει τις πολύ υψίσυχνες συνιστώσες της καταγραφής προκειμένου να απαλείψουμε την επιρροή του “θορύβου” στην επιλογή των δεσποζουσών περιόδων. Έτσι επιχειρήσαμε φιλτράρισμα τύπου Butterworth μέσω του λογισμικού SeismoSignal, που έκανε περικοπή στις συχνότητες των 3-5 HZ από τη καταγραφή.

Στα **σχήματα 4.2 έως και 4.122** που ακολουθούν έως το τέλος του παρόντος κεφαλαίου, παρουσιάζονται τα φάσματα αποκρίσεως και πλάτους Fourier και επισημαίνονται οι επιλεγμένες δεσπόζουσες περίοδοι. Οι πίνακες που ακολουθούν συνοψίζουν τα αποτελέσματα.

**Πίνακας 4.2:** επιλεγμένες δεσπόζουσες περίοδοι ( $T_{ps}$ ,  $T_{pM}$ ,  $T_{pL}$ ) για κάθε μία συνιστώσα των επιταχυνσιογραφικών σταθμών που επιλέχθηκαν προς μελέτη για τους σεισμούς 3/Σεπτ/2010, 22/Φεβ/2011, 13/Ιουν/2011 ( $M_w=6.0$ )

<b>Recording Station Code</b>		<b>3/Σεπτεμβρίου/2010 <math>M_w = 7.1</math></b>			<b>22/Φεβρουαρίου/2011 <math>M_I = 6.3 (M_w=6.2)</math></b>			<b>13/Ιουνίου/2011 <math>M_w = 6</math></b>		
		<b><math>T_{ps}</math> (sec)</b>	<b><math>T_{pM}</math> (sec)</b>	<b><math>T_{pL}</math> (sec)</b>	<b><math>T_{ps}</math> (sec)</b>	<b><math>T_{pM}</math> (sec)</b>	<b><math>T_{pL}</math> (sec)</b>	<b><math>T_{ps}</math> (sec)</b>	<b><math>T_{pM}</math> (sec)</b>	<b><math>T_{pL}</math> (sec)</b>
<b>CBGS</b>	<i>N89W</i>	0.45	0.75	3.20	0.48	1.40	3.20	0.45	0.70	2.60
	<i>S01W</i>	0.55	0.75	2.80	0.60	1.05	2.70	0.45	0.85	1.40
<b>CCCC</b>	<i>N26W</i>	0.75	1.00	2.60	0.75	1.45	2.60	-	-	-
	<i>N64E</i>	0.30	0.75	2.40	0.65	1.40	3.10	-	-	-
<b>CHHC</b>	<i>N01W</i>	0.55	0.85	2.65	0.60	1.00	2.60	0.80	1.40	2.30
	<i>S89W</i>	0.40	1.30	3.10	0.45	1.50	3.30	0.50	1.65	2.50
<b>CMHS</b>	<i>N10E</i>	0.70	1.00	2.50	0.40	1.10	1.85	0.35	0.70	1.25
	<i>S80E</i>	0.53	0.95	2.50	0.50	1.00	2.20	0.25	0.70	1.30
<b>DFHS</b>	<i>S17E</i>	0.15	1.10	1.55	-	-	-	-	-	-
	<i>S73W</i>	0.50	1.00	2.80	-	-	-	-	-	-
<b>HORC</b>	<i>N18E</i>	0.27	0.83	2.25	-	-	-	-	-	-
	<i>S72E</i>	0.40	1.10	3.40	-	-	-	-	-	-
<b>HPSC</b>	<i>N04W</i>	0.40	0.90	3.40	0.45	1.10	1.65	0.55	1.05	1.70
	<i>S86W</i>	0.40	0.65	3.00	0.45	1.00	1.75	0.45	0.75	1.45
<b>HVSC</b>	<i>S26W</i>	0.35	0.52	0.95	0.33	0.45	0.80	0.35	0.50	0.70
	<i>S64E</i>	0.35	0.55	1.00	0.30	0.48	1.20	0.35	0.50	0.75

<b>KPOC</b>	<i>N15E</i>	0.50	0.73	2.90	0.50	0.75	1.70	0.50	0.85	1.80
	<i>S75E</i>	0.48	0.73	2.80	0.50	0.70	1.90	0.50	0.90	-
<b>LPCC</b>	<i>N10W</i>	0.20	0.60	2.80	0.20	0.70	3.30	0.15	0.70	1.80
	<i>S80W</i>	0.20	0.50	0.90	0.20	1.05	2.80	0.15	0.60	1.35
<b>NNBS</b>	<i>S13E</i>	0.30	0.73	2.70	0.40	0.65	1.25	0.40	0.80	1.80
	<i>S77W</i>	0.35	0.70	1.80	0.50	1.05	2.00	0.35	0.85	1.40
<b>PRPC</b>	<i>S</i>	0.45	1.40	2.80	0.20	0.45	1.60	0.45	1.00	2.30
	<i>W</i>	0.60	1.40	2.60	0.20	0.45	1.40	0.35	0.80	2.00
<b>REHS</b>	<i>N02E</i>	0.55	1.45	2.80	0.48	0.90	1.35	0.50	1.00	1.40
	<i>S88E</i>	0.60	1.45	2.45	0.70	1.00	1.50	0.60	0.80	2.75
<b>RHSC</b>	<i>N86W</i>	0.33	1.30	3.10	0.55	0.85	2.50	0.29	0.62	1.40
	<i>S04W</i>	0.30	1.50	2.40	0.45	0.65	2.50	0.30	1.30	2.20
<b>SHLC</b>	<i>S40W</i>	0.38	0.62	1.90	0.30	1.05	2.35	0.45	0.95	2.00
	<i>S50E</i>	0.55	0.90	2.50	0.50	0.90	2.90	0.42	1.50	2.60
<b>SMTC</b>	<i>N88W</i>	0.30	0.60	2.70	0.50	0.80	3.00	0.40	0.90	2.00
	<i>S02W</i>	0.72	1.55	2.55	0.60	1.00	2.55	0.54	0.95	2.45
<b>SWNC</b>	<i>N24E</i>	0.20	0.80	1.50	0.32	1.20	2.90	0.28	1.40	3.10
	<i>N66W</i>	0.25	1.35	2.55	0.36	1.05	2.50	0.21	0.80	2.50

**Πίνακας 4.3:** επιλεγμένες δεσπόζουσες περίοδοι ( $T_{ps}$ ,  $T_{pM}$ ,  $T_{pL}$ ) για κάθε μία συνιστώσα των επιταχυνσιογραφικών σταθμών που επιλέχθηκαν προς μελέτη για τους σεισμούς 13/Ιουν/2011 ( $M_w=5.6$ ), 23/Δεκ/2011 ( $M_w=5.8$ ), 23/Δεκ/2011 ( $M_w=6.0$ )

<b>Recording Station Code</b>		<b>13/Ιουνίου/2011 <math>M_w = 5.6</math></b>			<b>23/Δεκεμβρίου/2011 <math>M_w = 5.8</math></b>			<b>23/Δεκεμβρίου/2011 <math>M_w = 6.0</math></b>		
		<b><math>T_{ps}</math> (sec)</b>	<b><math>T_{pM}</math> (sec)</b>	<b><math>T_{pL}</math> (sec)</b>	<b><math>T_{ps}</math> (sec)</b>	<b><math>T_{pM}</math> (sec)</b>	<b><math>T_{pL}</math> (sec)</b>	<b><math>T_{ps}</math> (sec)</b>	<b><math>T_{pM}</math> (sec)</b>	<b><math>T_{pL}</math> (sec)</b>
<b>CBGS</b>	<i>N89W</i>	0.33	-	1.20	0.40	0.85	3.00	0.33	0.85	3.00
	<i>S01W</i>	0.45	0.55	1.25	0.41	0.75	2.90	0.45	0.85	3.40
<b>CCCC</b>	<i>N26W</i>	-	-	-	0.50	1.20	2.50	-	-	-
	<i>N64E</i>	-	-	-	0.42	1.10	2.60	-	-	-
<b>CHHC</b>	<i>N01W</i>	-	-	-	0.33	0.60	2.70	-	-	-
	<i>S89W</i>	-	-	-	0.43	1.20	3.00	-	-	-
<b>CRLZ</b>	<i>E</i>	-	-	-	0.25	0.83	3.15	-	-	-
	<i>N</i>	-	-	-	0.33	0.60	1.20	-	-	-
<b>HPSC</b>	<i>N04W</i>	-	-	-	0.40	1.40	2.00	-	-	-
	<i>S86W</i>	-	-	-	0.40	0.65	2.50	-	-	-
<b>HVSC</b>	<i>S26W</i>	0.20	0.40	0.60	0.37	0.33	0.65	0.30	0.70	1.00
	<i>S64E</i>	0.20	0.35	0.70	0.13	0.27	0.45	0.16	0.36	0.5
<b>LPCC</b>	<i>N10W</i>	0.25	0.70	3.00	-	-	-	0.13	0.53	1.00
	<i>S80W</i>	0.25	0.49	0.70	-	-	-	0.15	0.50	1.10
<b>REHS</b>	<i>N02E</i>	0.33	0.93	1.40	0.53	0.75	1.50	0.42	0.71	1.20
	<i>S88E</i>	0.37	0.55	1.20	0.55	0.75	2.90	0.50	0.95	1.50

Τα αποτελέσματα που συνοψίζονται στους παραπάνω πίνακες αφορούν την επιλογή όλων των “υποψήφιων” δεσποζουσών περιόδων. Αυτά θα χρησιμοποιηθούν στο κεφάλαιο 7 της παρούσας εργασίας, όπου θα διερευνηθεί η δυνατότητα κανονικοποίησης ή μη του φάσματος αποκρίσεως των κατασκευών.



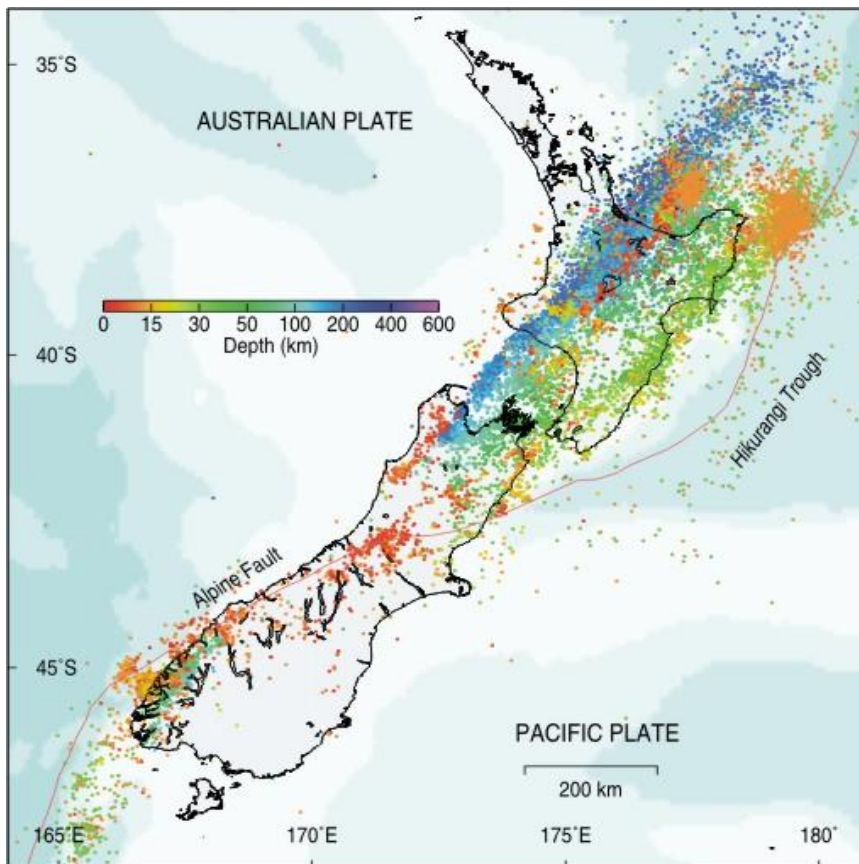


# Κεφάλαιο 4

---

*Σχήματα & εικόνες*

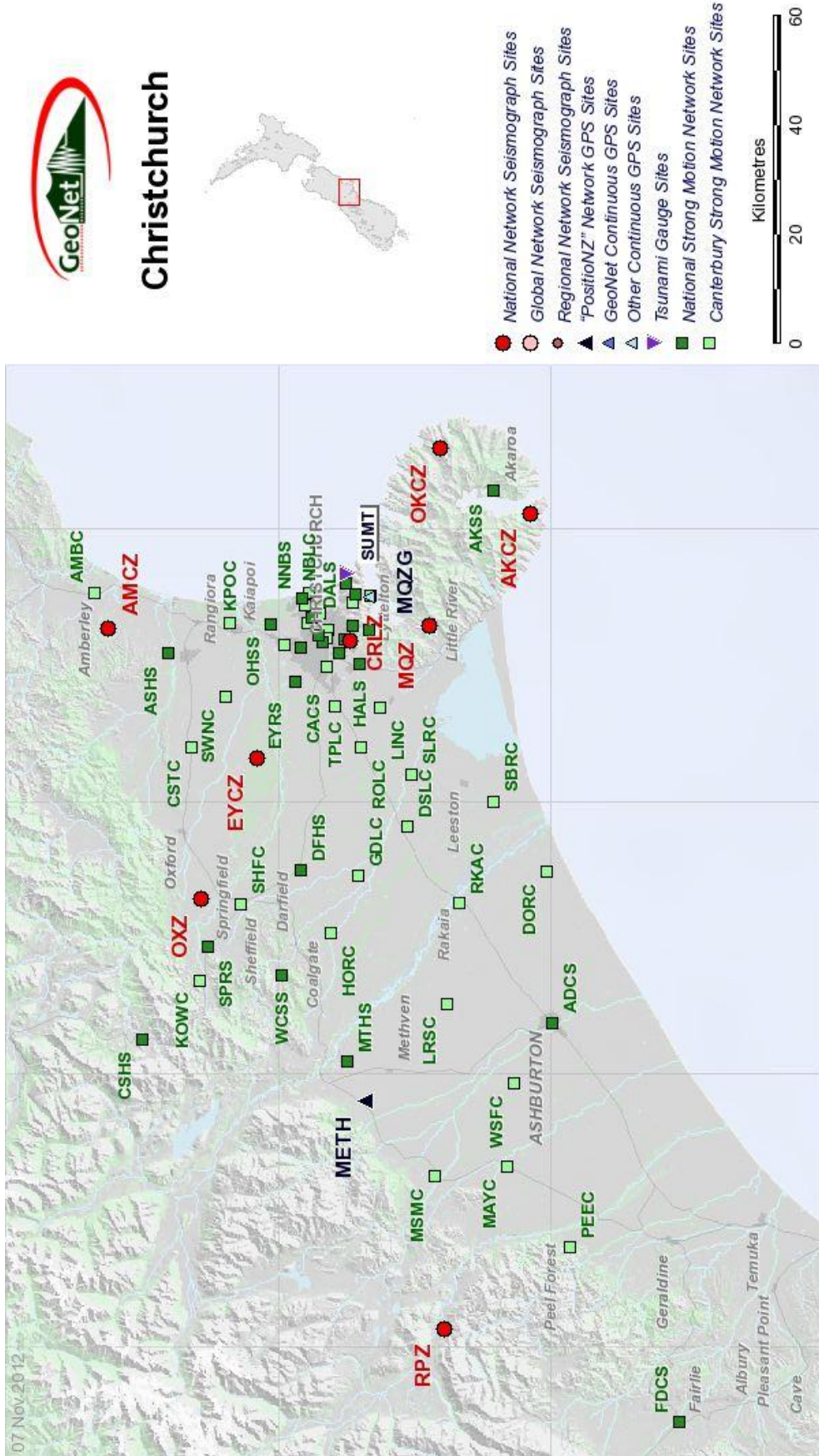




**Εικόνα 4.1:**  
επίκεντρα  
σεισμικών  
γεγονότων στη  
Νέα Ζηλανδία  
(πηγή: Geonet)



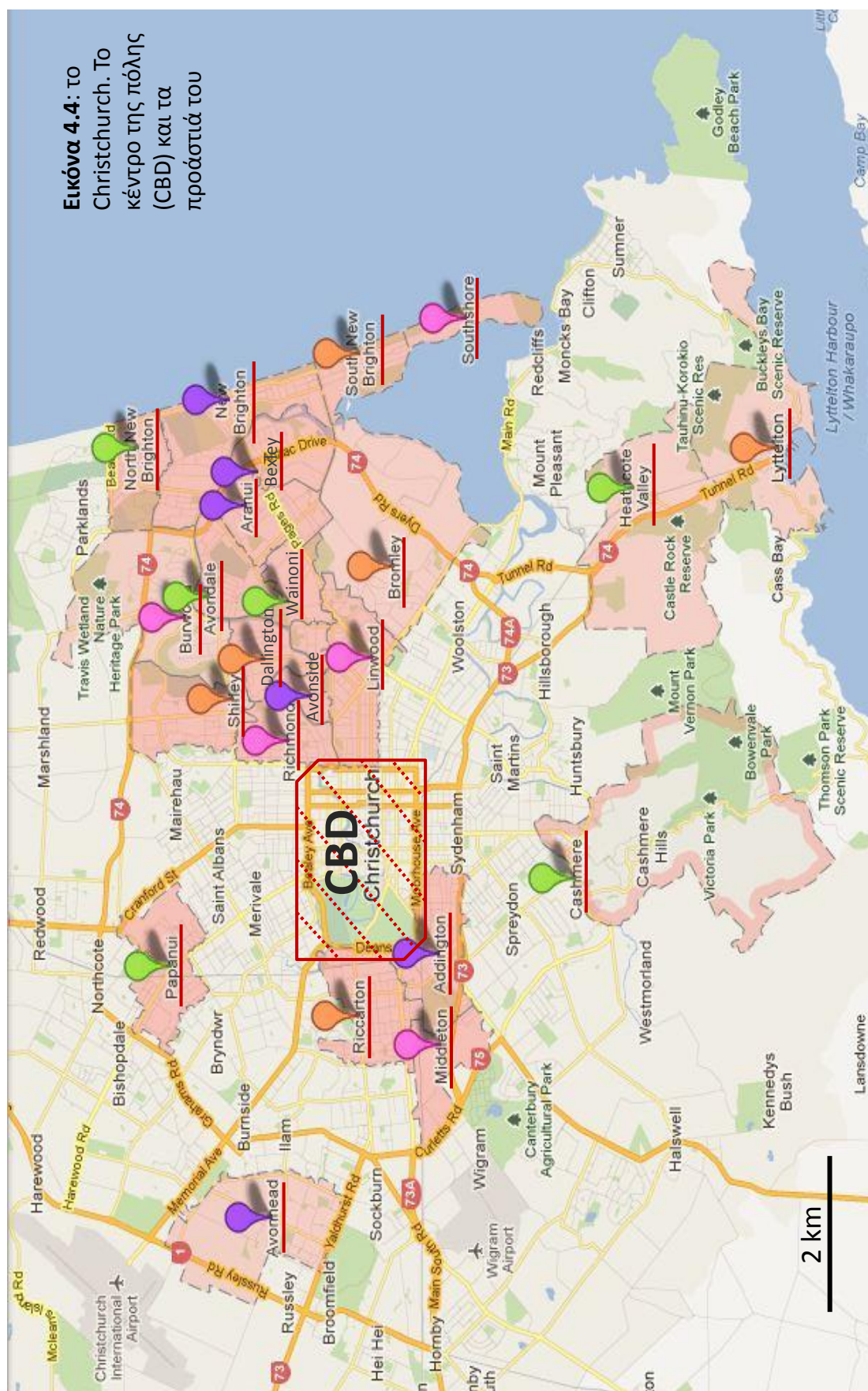
**Εικόνα 4.2:**  
δίκτυο  
επιταχυνσιο-  
γραφικών  
σταθμών στη  
Νέα Ζηλανδία



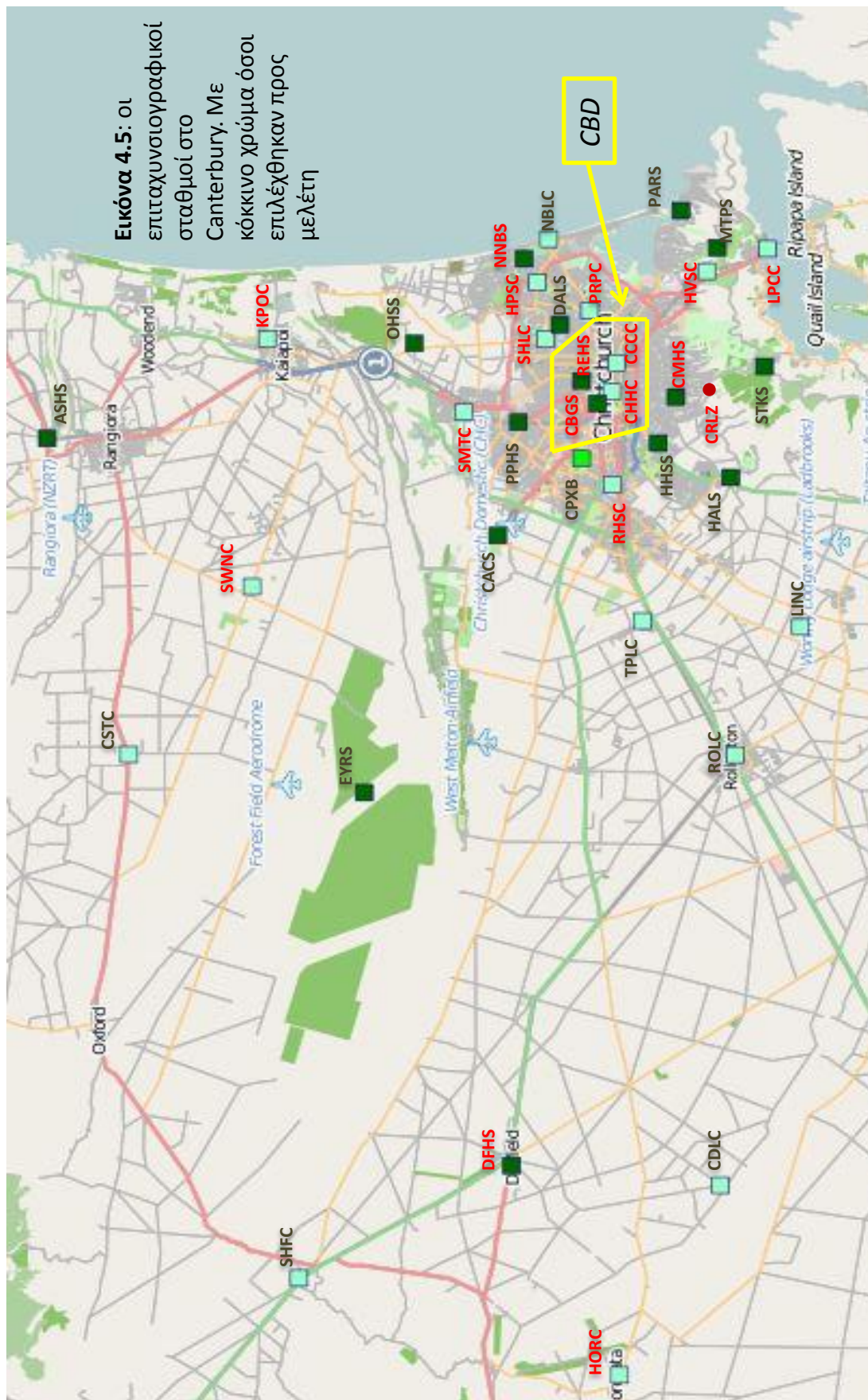
Εικόνα 4.3: επιταχυνσιογραφικοί σταθμοί στο Christchurch (πηγή: GeoNet)



**Εικόνα 4.4:** Το Christchurch. Το κέντρο της πόλης (CBD) και τα προσόδιά του



**Εικόνα 4.5:** οι επιταχυνσιογραφικοί σταθμοί στο Canterbury. Με κόκκινο χρώμα όσους επιλέχθηκαν προς μελέτη







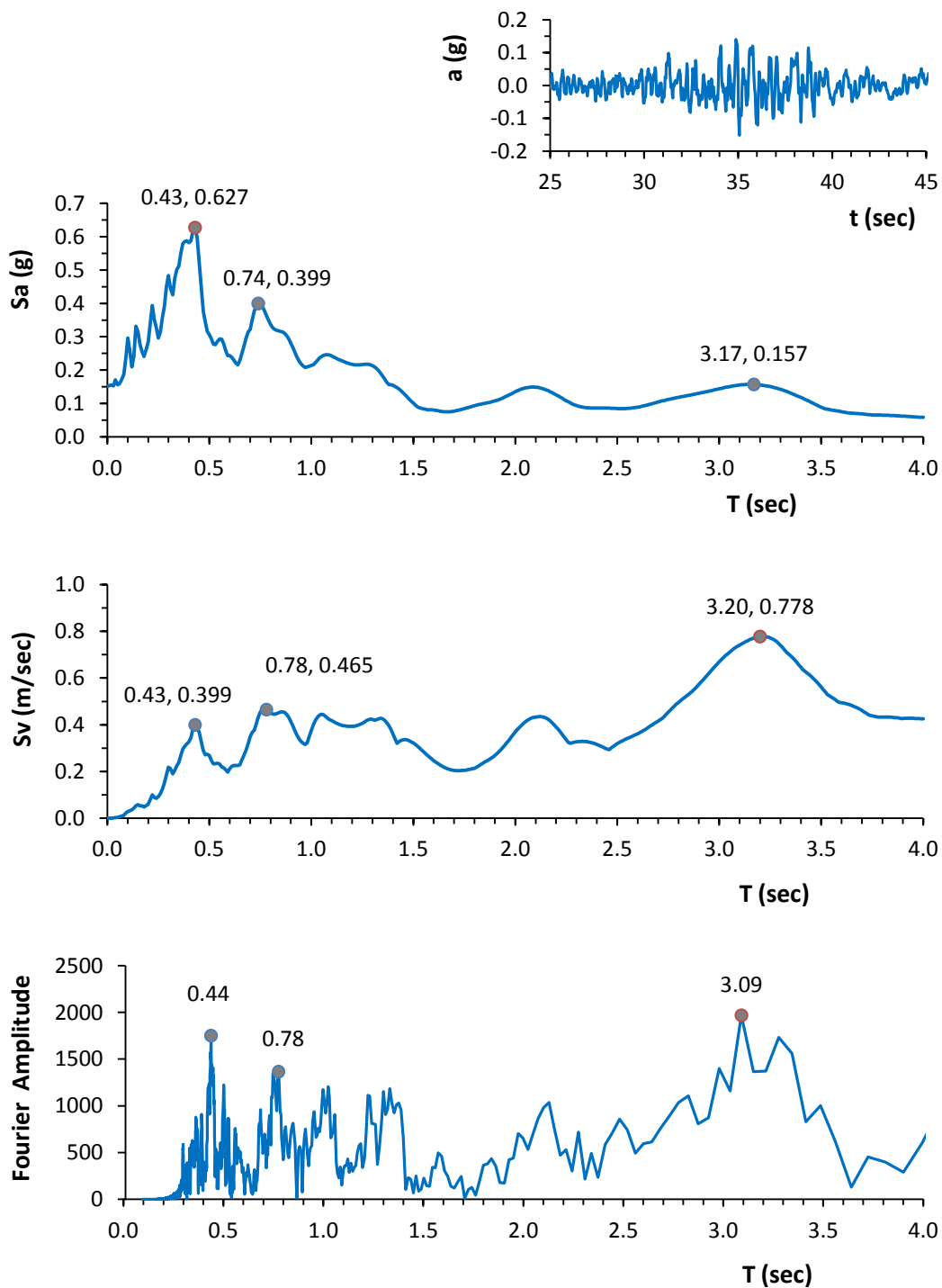
**Εικόνα 4.6:** οι επιταχυνσιογραφικοί σταθμοί στο κέντρο του Christchurch (CBD), CBGS, CCCC, CHHC, REHS



**Εικόνα 4.7:** ο επιταχυνσιογραφικός σταθμός CBGS (πηγή: GNS)

*Darfield*  
**3 Σεπτεμβρίου 2010**  
 $M_w = 7.1$

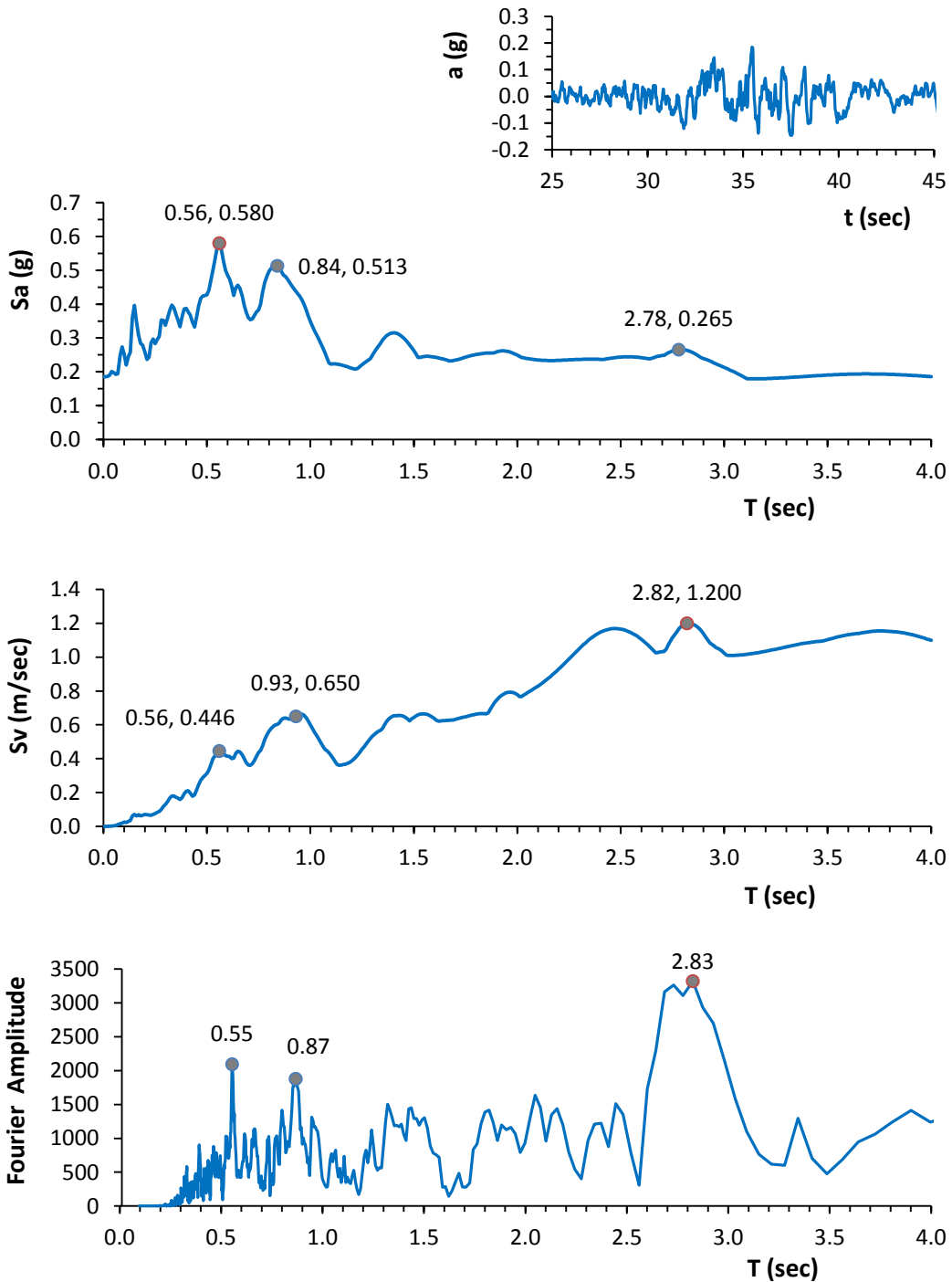
*CBGS - N89W*



**Σχήμα 4.1:** η χρονιοιστορία επιταχύνσεων, τα ελαστικά φάσματα επιταχύνσεων και ταχύτητων και το φάσμα πλάτους Fourier της συνιστώσα N89W του σταθμού CBGS, για το σεισμικό γεγονός της 3<sup>ης</sup> Σεπτεμβρίου του 2010.

*Darfield*  
**3 Σεπτεμβρίου 2010**  
 $M_w = 7.1$

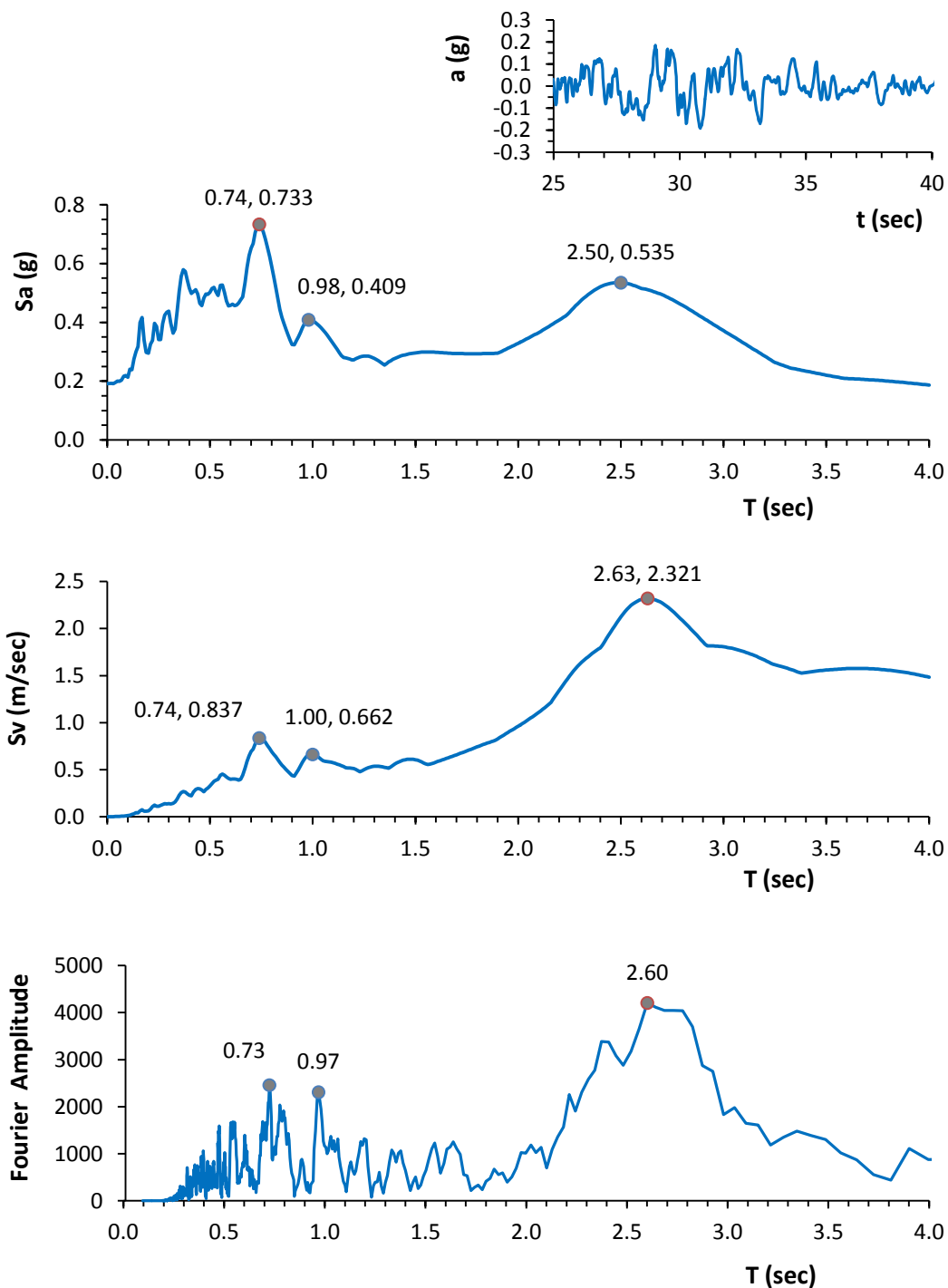
*CBGS - S01W*



**Σχήμα 4.2:** η χρονοϊστορία επιταχύνσεων, τα ελαστικά φάσματα επιταχύνσεων και ταχύτητων και το φάσμα πλάτους Fourier της συνιστώσα S01W του σταθμού CBGS, για το σεισμικό γεγονός της 3<sup>ης</sup> Σεπτεμβρίου του 2010.

**Darfield**  
**3 Σεπτεμβρίου 2010**  
 **$M_w = 7.1$**

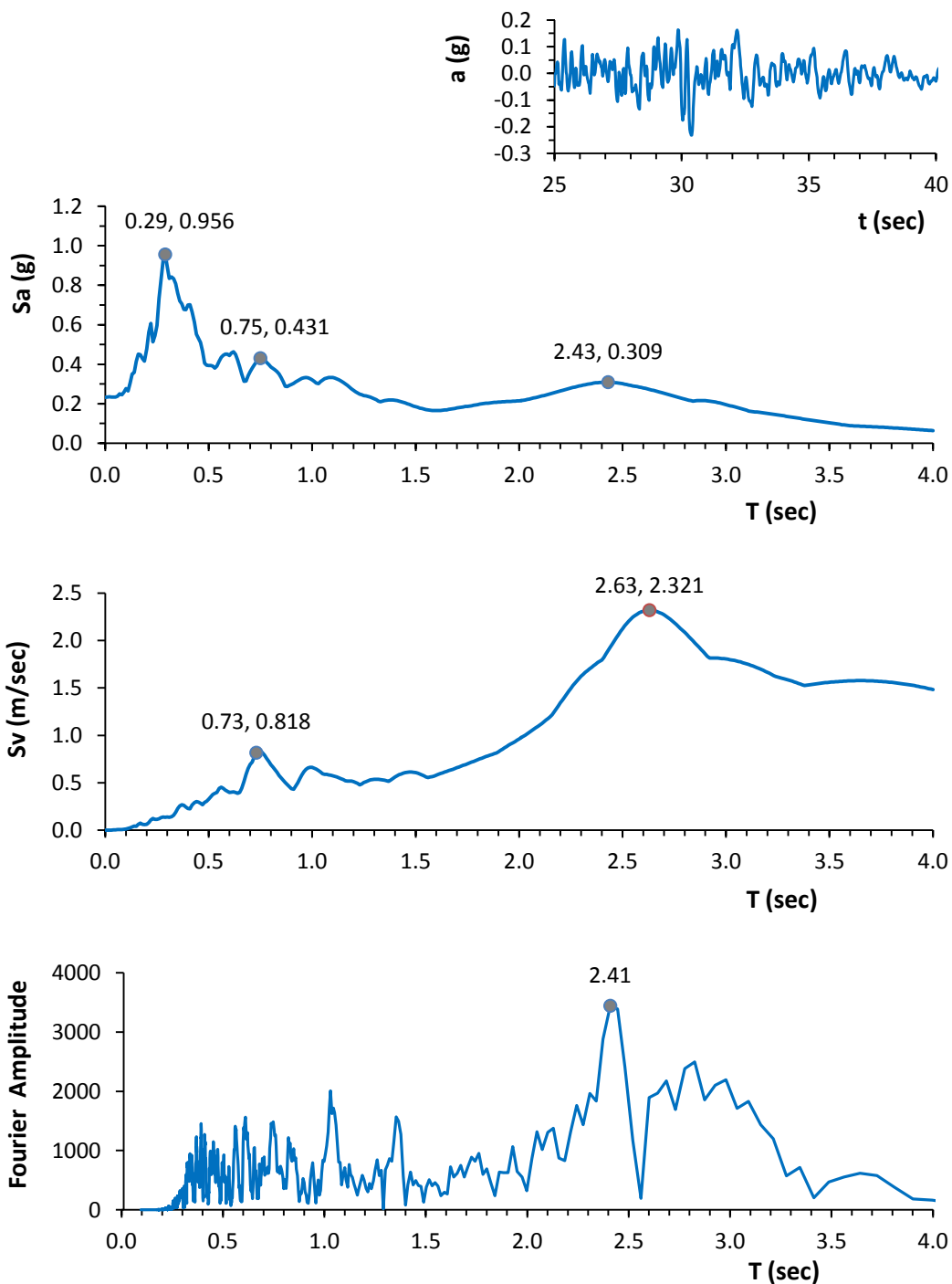
**CCCC - N26W**



**Σχήμα 4.3:** η χρονιοιστορία επιταχύνσεων, τα ελαστικά φάσματα επιταχύνσεων και ταχύτητων και το φάσμα πλάτους Fourier της συνιστώσα N26W του σταθμού CCCC, για το σεισμικό γεγονός της 3<sup>ης</sup> Σεπτεμβρίου του 2010.

*Darfield*  
3 Σεπτεμβρίου 2010  
 $M_w = 7.1$

CCCC - N64E

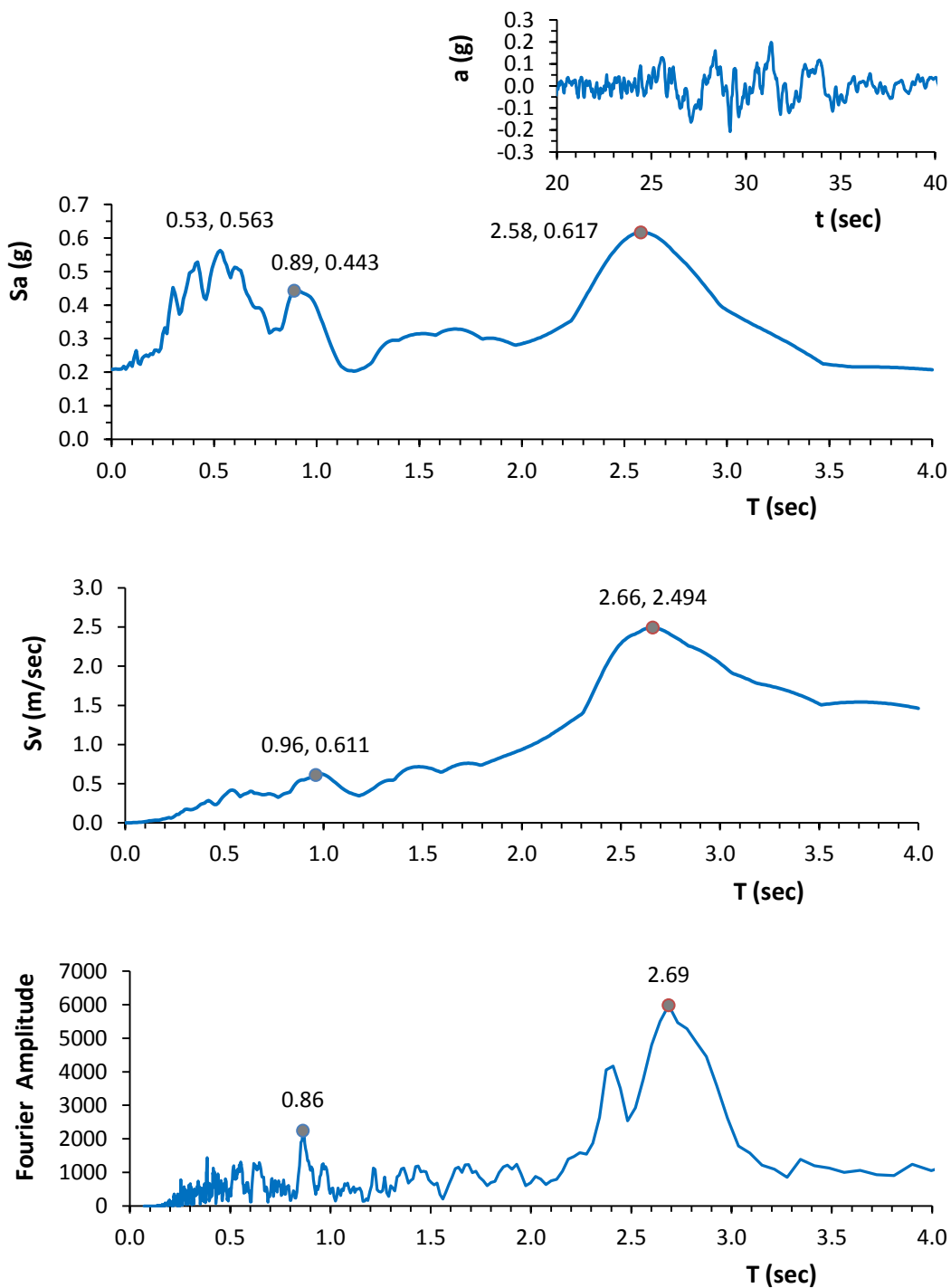


**Σχήμα 4.4:** η χρονιοιστορία επιταχύνσεων, τα ελαστικά φάσματα επιταχύνσεων και ταχύτητων και το φάσμα πλάτους Fourier της συνιστώσα N64E του σταθμού CCCC, για το σεισμικό γεγονός της 3ης Σεπτεμβρίου του 2010.



*Darfield*  
**3 Σεπτεμβρίου 2010**  
 $M_w = 7.1$

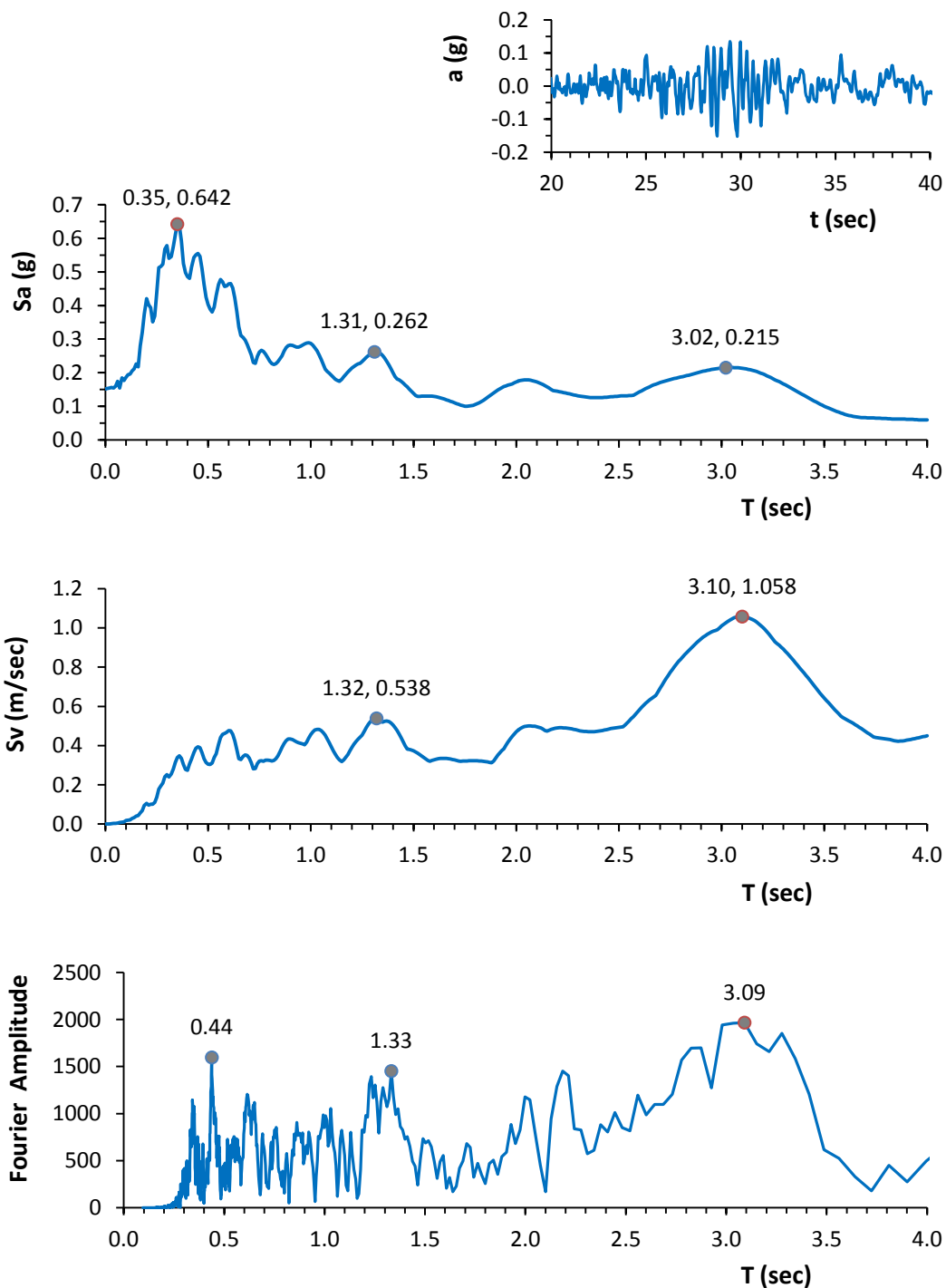
*CHHC - Νο1W*



**Σχήμα 4.5:** η χρονιοιστορία επιταχύνσεων, τα ελαστικά φάσματα επιταχύνσεων και ταχύτητων και το φάσμα πλάτους Fourier της συνιστώσα N01W του σταθμού CHHC, για το σεισμικό γεγονός της 3ης Σεπτεμβρίου του 2010.

*Darfield*  
**3 Σεπτεμβρίου 2010**  
 $M_w = 7.1$

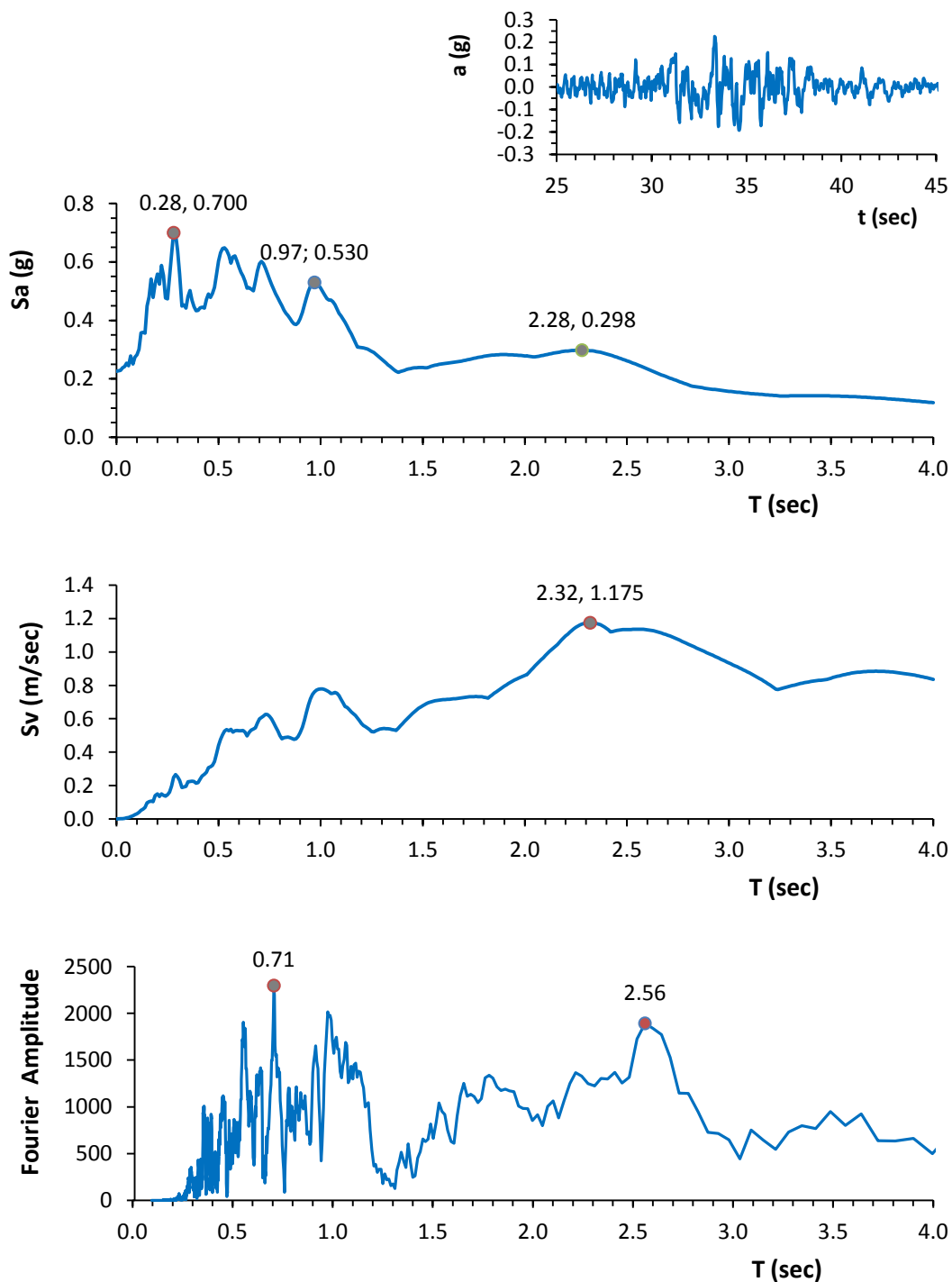
*CHHC - S89W*



**Σχήμα 4.6:** η χρονιοιστορία επιταχύνσεων, τα ελαστικά φάσματα επιταχύνσεων και ταχύτητων και το φάσμα πλάτους Fourier της συνιστώσα S89W του σταθμού CHHC, για το σεισμικό γεγονός της 3<sup>ης</sup> Σεπτεμβρίου του 2010.

*Darfield*  
**3 Σεπτεμβρίου 2010**  
 $M_w = 7.1$

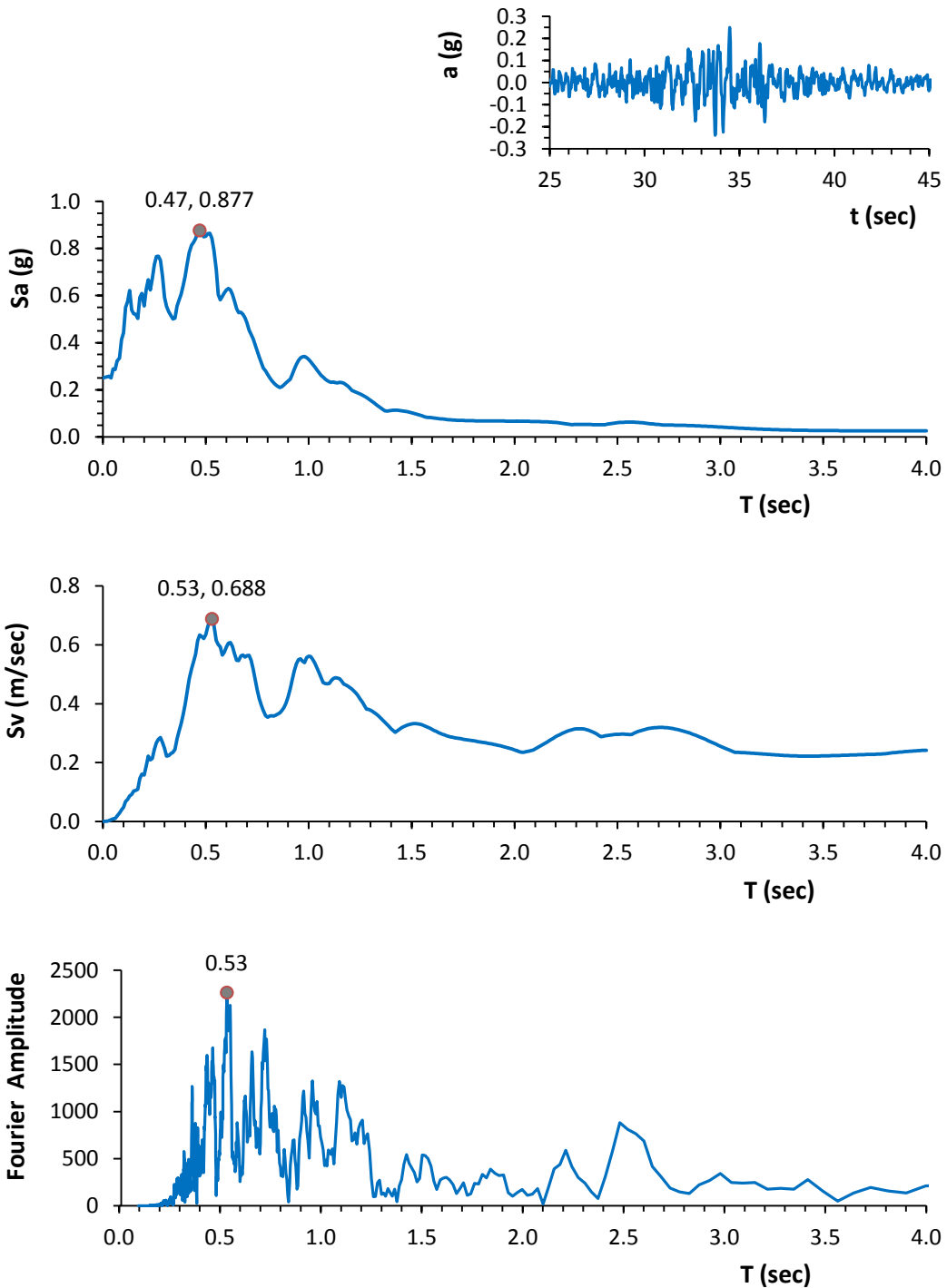
*CMHS - N10E*



**Σχήμα 4.7:** η χρονιοιστορία επιταχύνσεων, τα ελαστικά φάσματα επιταχύνσεων και ταχύτητων και το φάσμα πλάτους Fourier της συνιστώσα N10E του σταθμού CMHS, για το σεισμικό γεγονός της 3<sup>ης</sup> Σεπτεμβρίου του 2010.

*Darfield*  
3 Σεπτεμβρίου 2010  
 $M_w = 7.1$

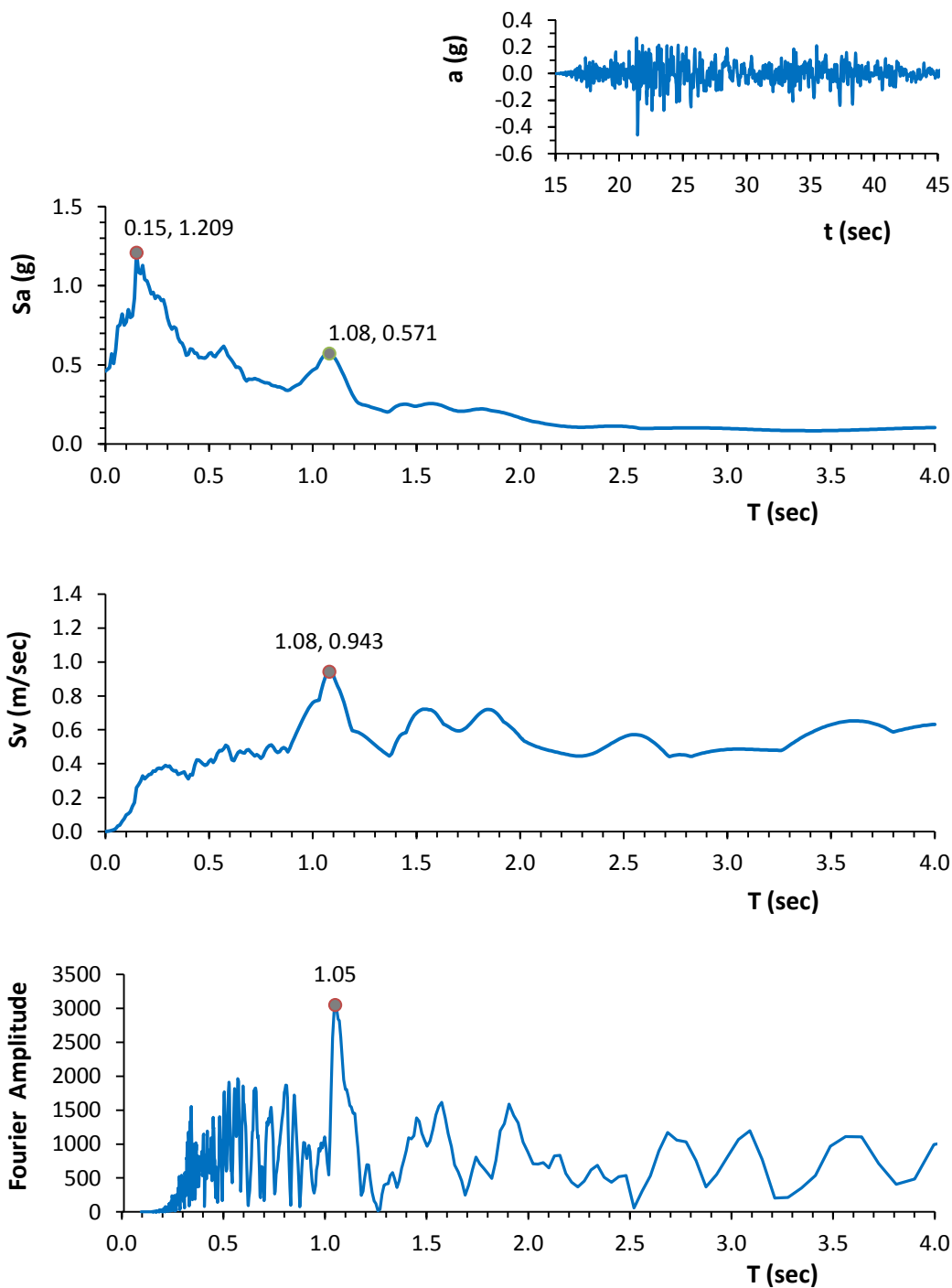
*CMHS - S80E*



**Σχήμα 4.8:** η χρονιοϊστορία επιταχύνσεων, τα ελαστικά φάσματα επιταχύνσεων και ταχυτήτων και το φάσμα πλάτους Fourier της συνιστώσα S80E του σταθμού CMHS, για το σεισμικό γεγονός της 3<sup>ης</sup> Σεπτεμβρίου του 2010.

*Darfield*  
3 Σεπτεμβρίου 2010  
 $M_w = 7.1$

*DFHS - S17E*

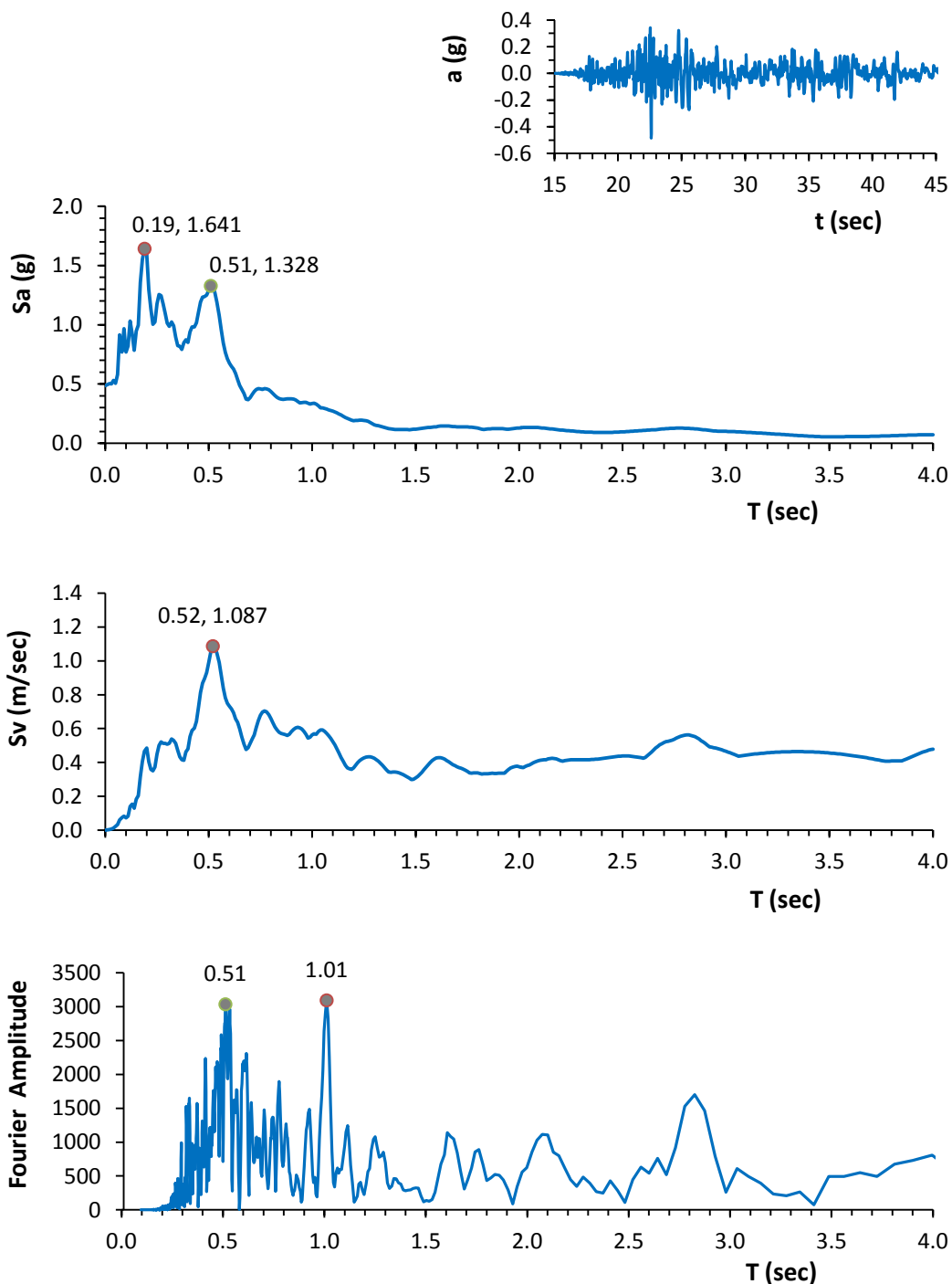


**Σχήμα 4.9:** η χρονιοιστορία επιταχύνσεων, τα ελαστικά φάσματα επιταχύνσεων και ταχύτητων και το φάσμα πλάτους Fourier της συνιστώσα S17E του σταθμού DFHS, για το σεισμικό γεγονός της 3<sup>ης</sup> Σεπτεμβρίου του 2010.



*Darfield*  
3 Σεπτεμβρίου 2010  
 $M_w = 7.1$

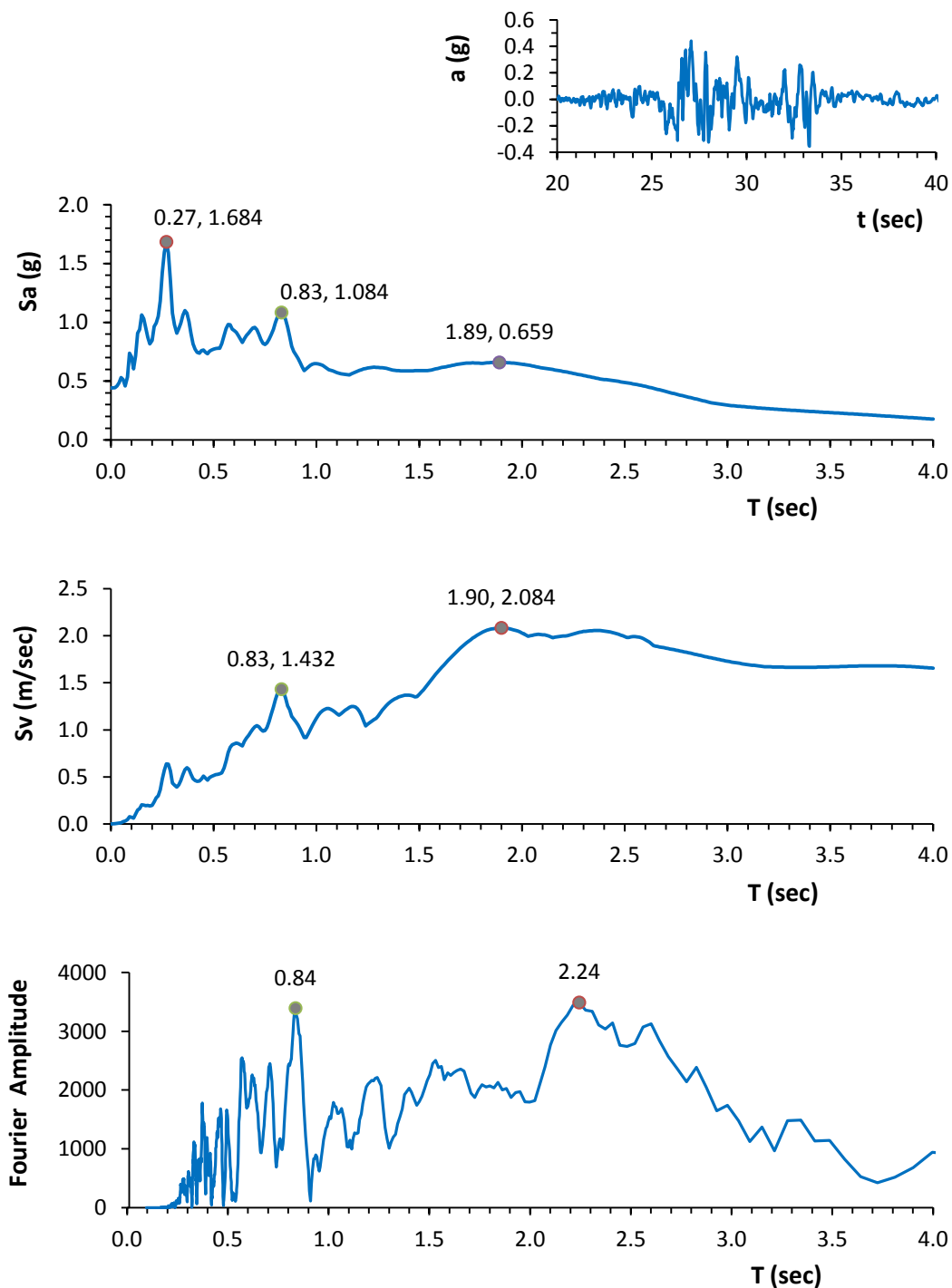
*DFHS - S73W*



**Σχήμα 4.10:** η χρονιοϊστορία επιταχύνσεων, τα ελαστικά φάσματα επιταχύνσεων και ταχύτητων και το φάσμα πλάτους Fourier της συνιστώσα S73W του σταθμού DFHS, για το σεισμικό γεγονός της 3ης Σεπτεμβρίου του 2010.

**Darfield**  
**3 Σεπτεμβρίου 2010**  
 $M_w = 7.1$

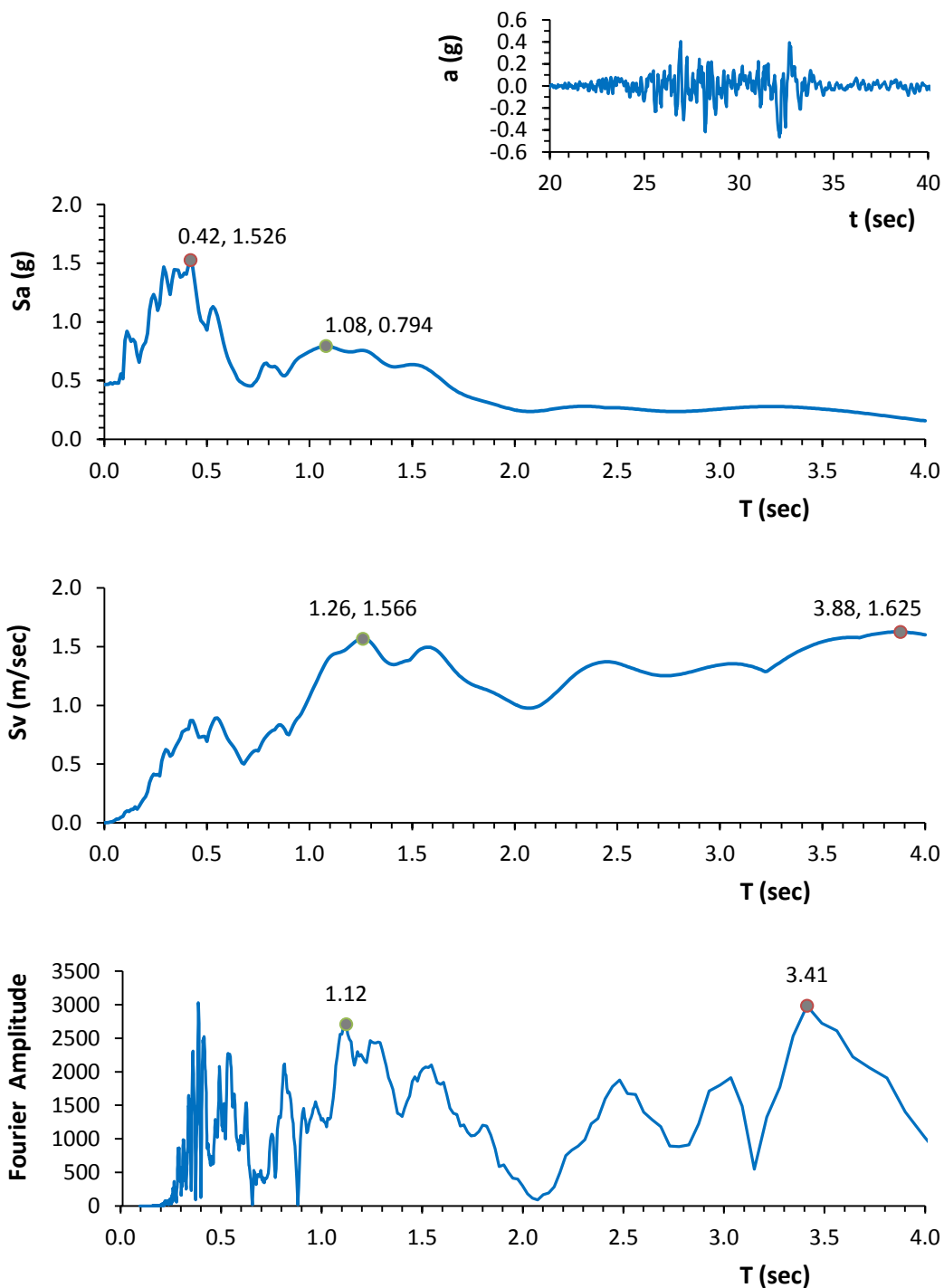
**HORC - N18E**



**Σχήμα 4.11:** η χρονιοϊστορία επιταχύνσεων, τα ελαστικά φάσματα επιταχύνσεων και ταχύτητων και το φάσμα πλάτους Fourier της συνιστώσα N18E του σταθμού HORC, για το σεισμικό γεγονός της 3ης Σεπτεμβρίου του 2010.

*Darfield*  
3 Σεπτεμβρίου 2010  
 $M_w = 7.1$

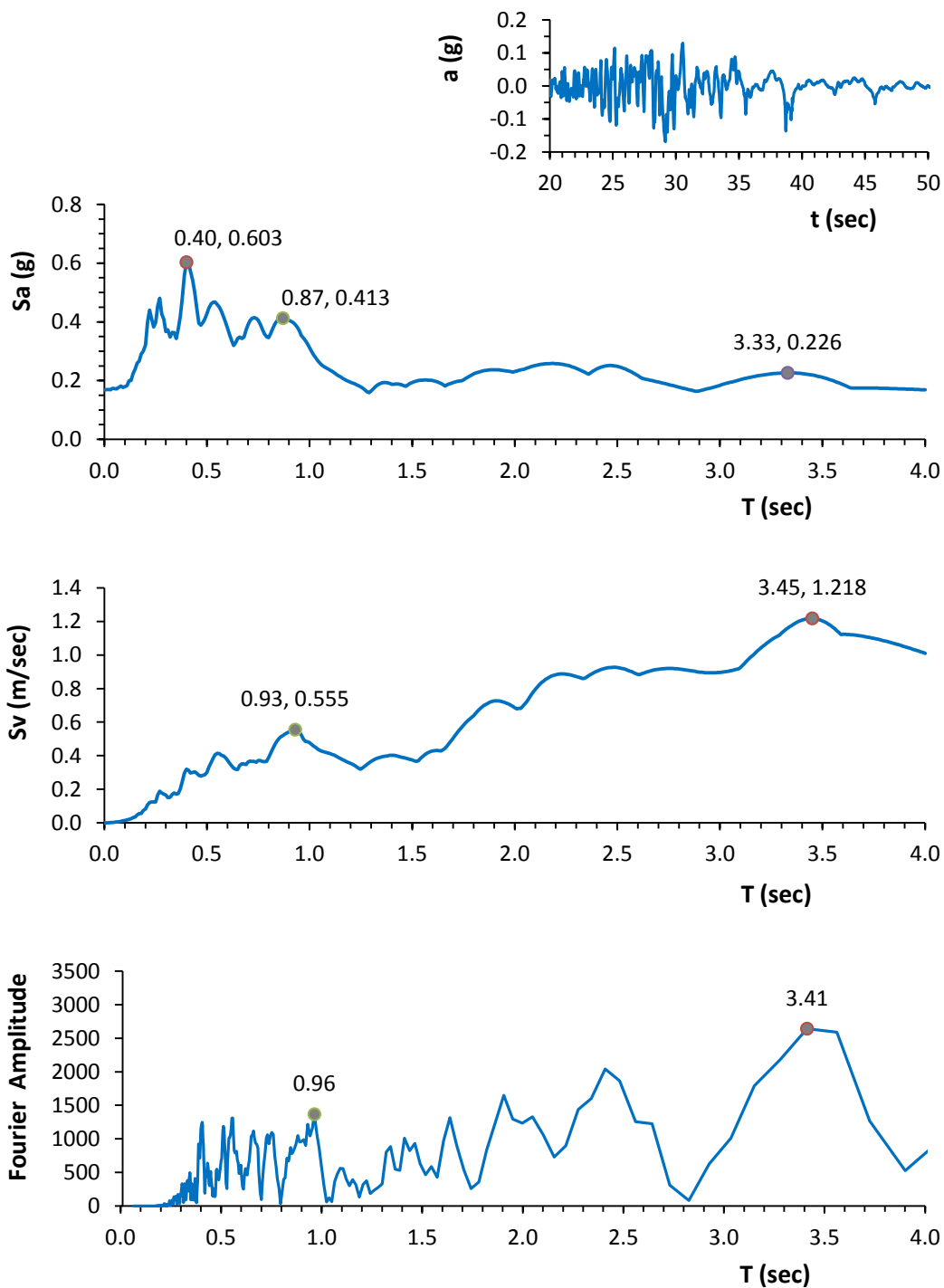
*HORC - S72E*



**Σχήμα 4.12:** η χρονιοστορία επιταχύνσεων, τα ελαστικά φάσματα επιταχύνσεων και ταχύτητων και το φάσμα πλάτους Fourier της συνιστώσα S72E του σταθμού HORC, για το σεισμικό γεγονός της 3ης Σεπτεμβρίου του 2010.

*Darfield*  
**3 Σεπτεμβρίου 2010**  
 $M_w = 7.1$

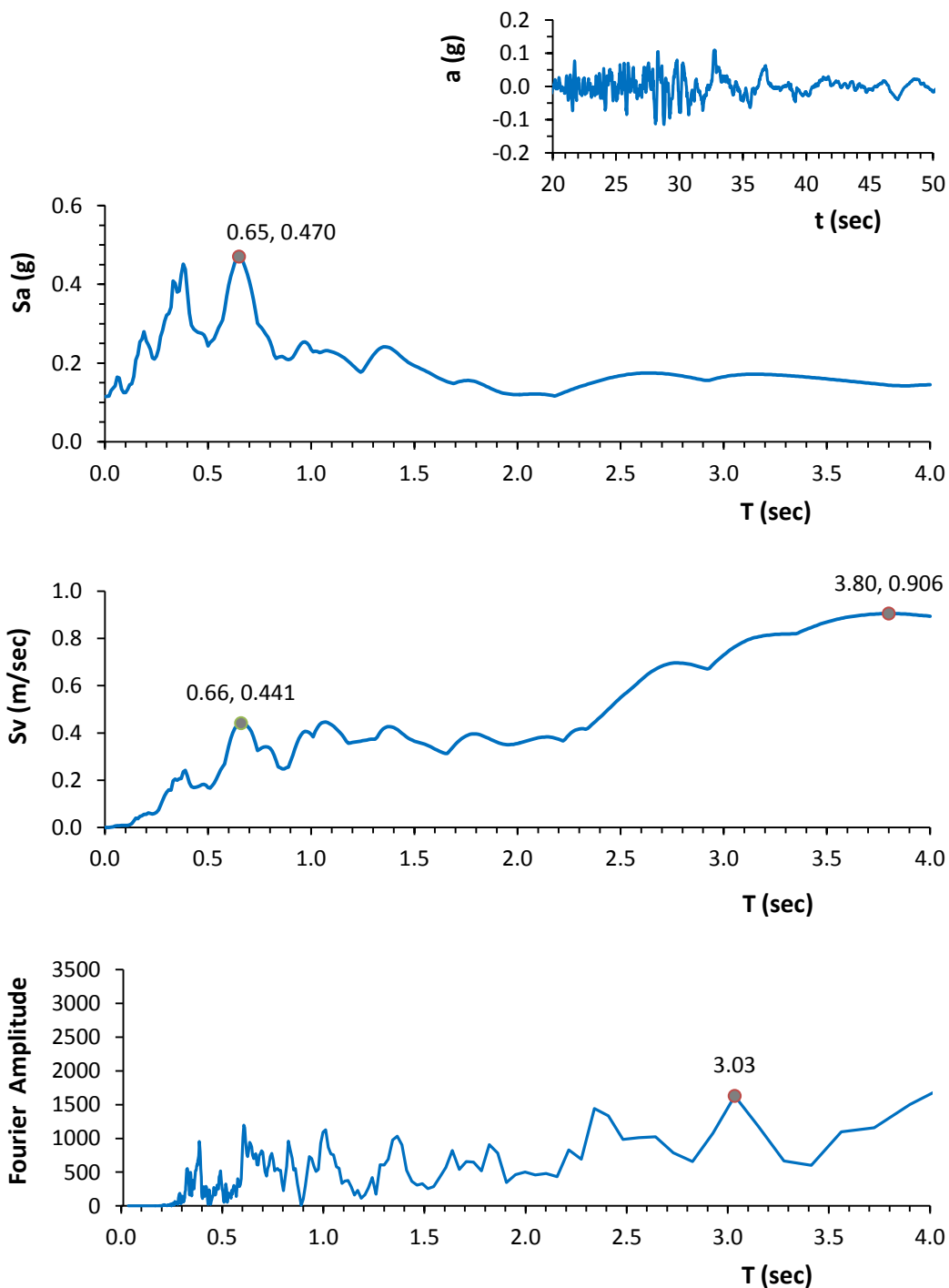
*HPSC - No4W*



**Σχήμα 4.13:** η χρονοϊστορία επιταχύνσεων, τα ελαστικά φάσματα επιταχύνσεων και ταχυτήτων και το φάσμα πλάτους Fourier της συνιστώσα N04W του σταθμού HPSC, για το σεισμικό γεγονός της 3<sup>ης</sup> Σεπτεμβρίου του 2010.

*Darfield*  
**3 Σεπτεμβρίου 2010**  
 $M_w = 7.1$

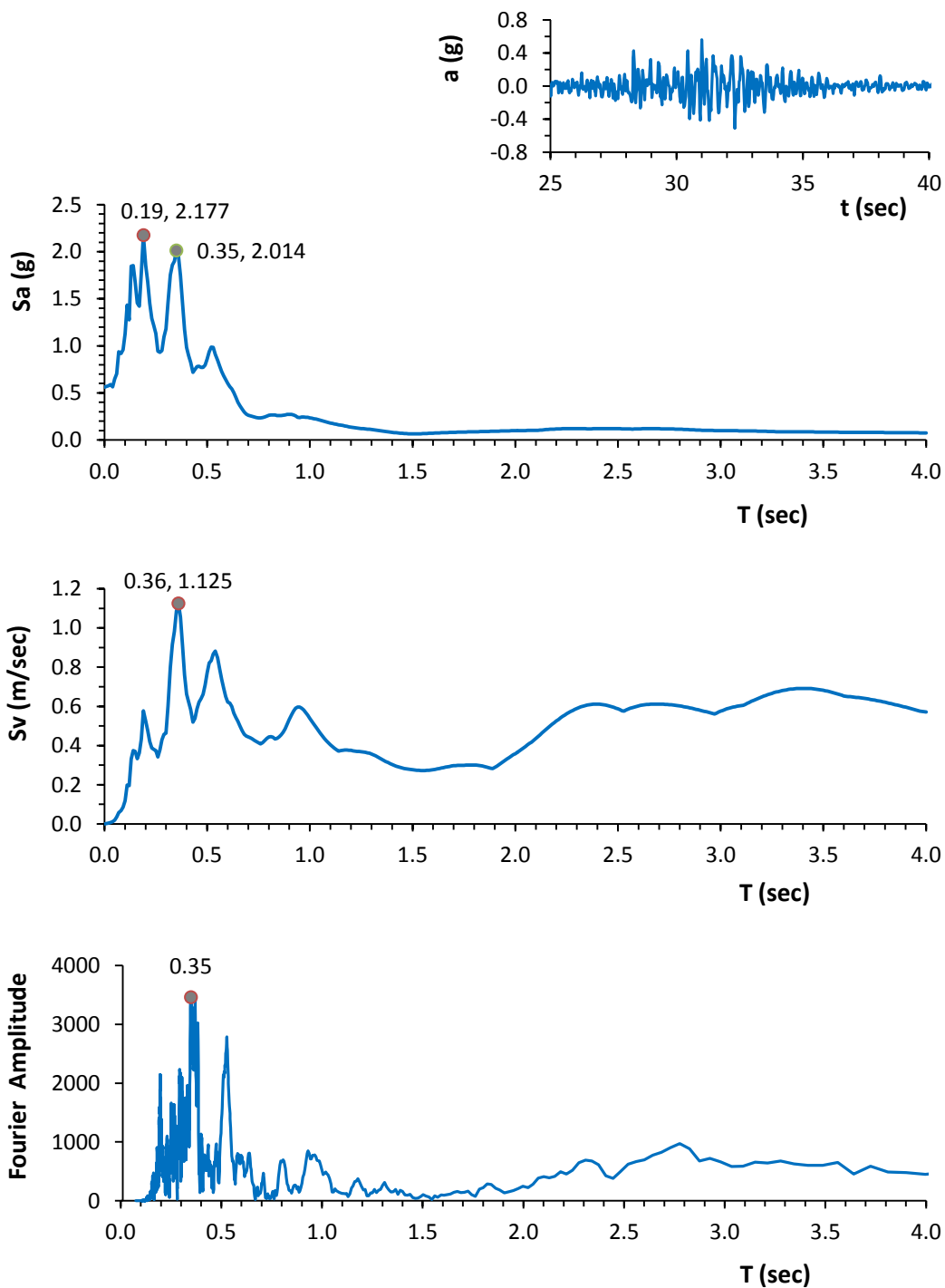
*HPSC - S86W*



**Σχήμα 4.14:** η χρονιοϊστορία επιταχύνσεων, τα ελαστικά φάσματα επιταχύνσεων και ταχύτητων και το φάσμα πλάτους Fourier της συνιστώσα S86W του σταθμού HPSC, για το σεισμικό γεγονός της 3<sup>ης</sup> Σεπτεμβρίου του 2010.

*Darfield*  
3 Σεπτεμβρίου 2010  
 $M_w = 7.1$

*HVSC - S26W*

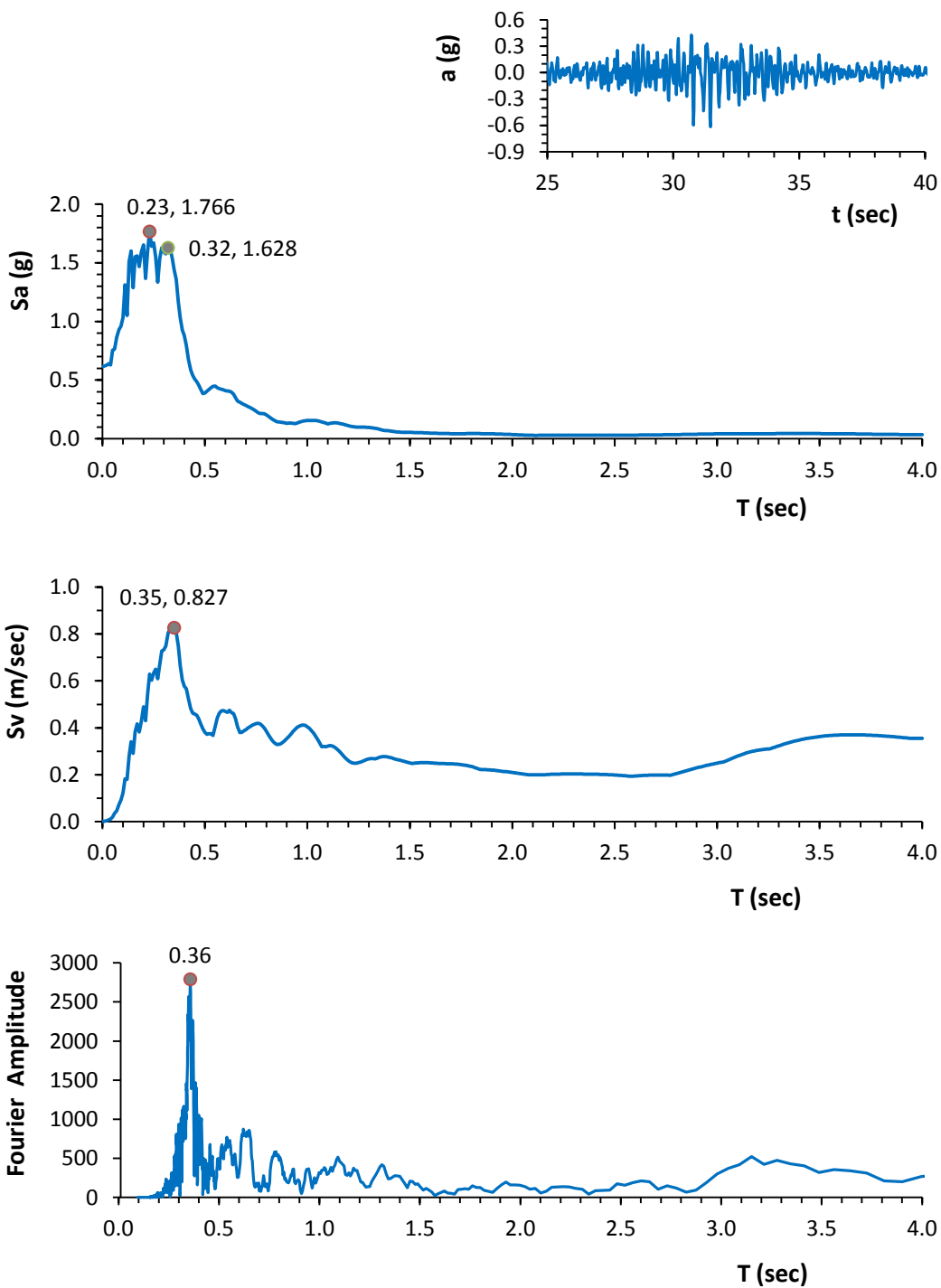


**Σχήμα 4.15:** η χρονιοϊστορία επιταχύνσεων, τα ελαστικά φάσματα επιταχύνσεων και ταχύτητων και το φάσμα πλάτους Fourier της συνιστώσα S26W του σταθμού HVSC, για το σεισμικό γεγονός της 3<sup>ης</sup> Σεπτεμβρίου του 2010.



*Darfield*  
**3 Σεπτεμβρίου 2010**  
 $M_w = 7.1$

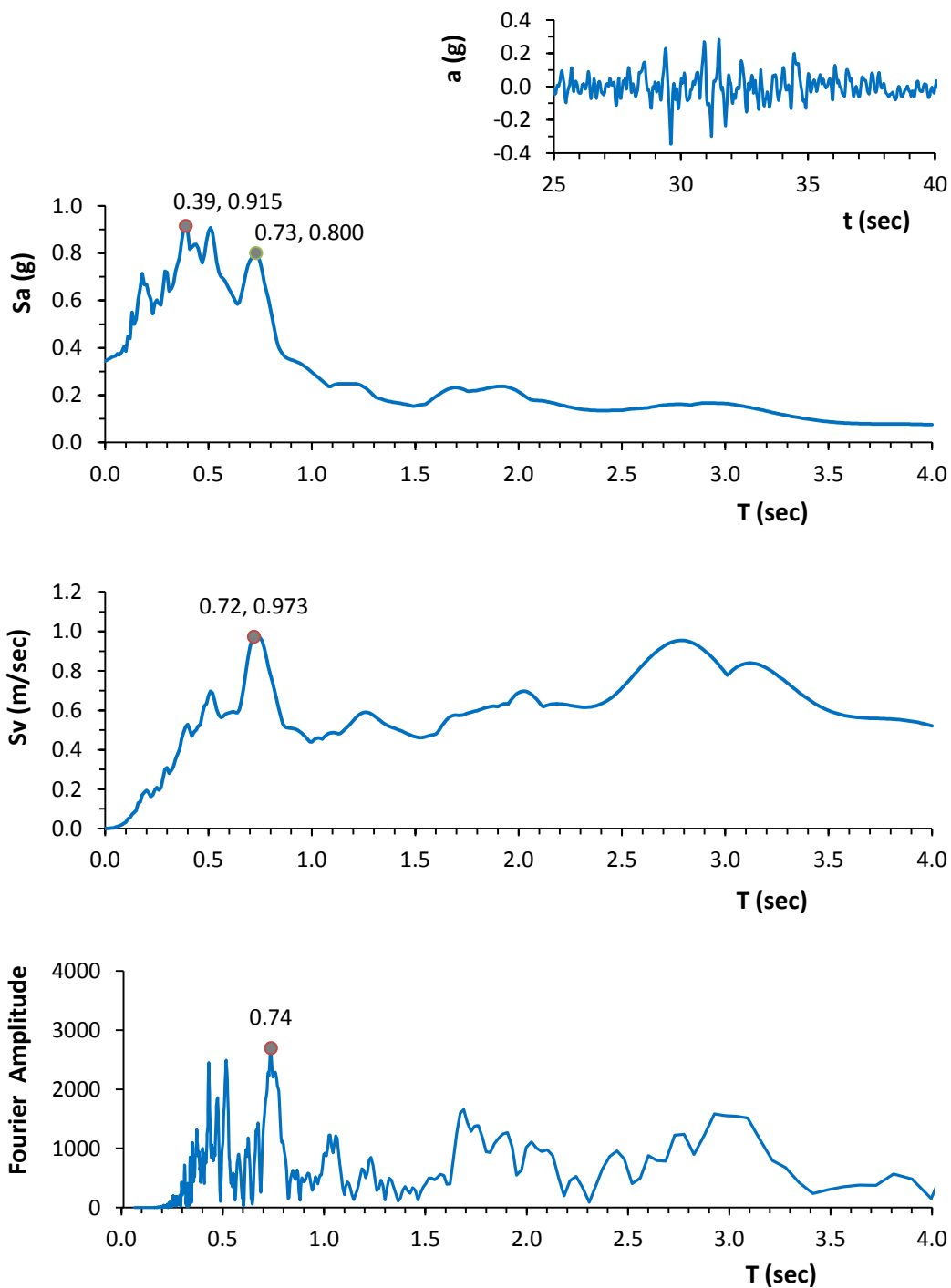
*HVSC - S64E*



**Σχήμα 4.16:** η χρονιοϊστορία επιταχύνσεων, τα ελαστικά φάσματα επιταχύνσεων και ταχύτητων και το φάσμα πλάτους Fourier της συνιστώσα S64E του σταθμού HVSC, για το σεισμικό γεγονός της 3<sup>ης</sup> Σεπτεμβρίου του 2010.

*Darfield*  
3 Σεπτεμβρίου 2010  
 $M_w = 7.1$

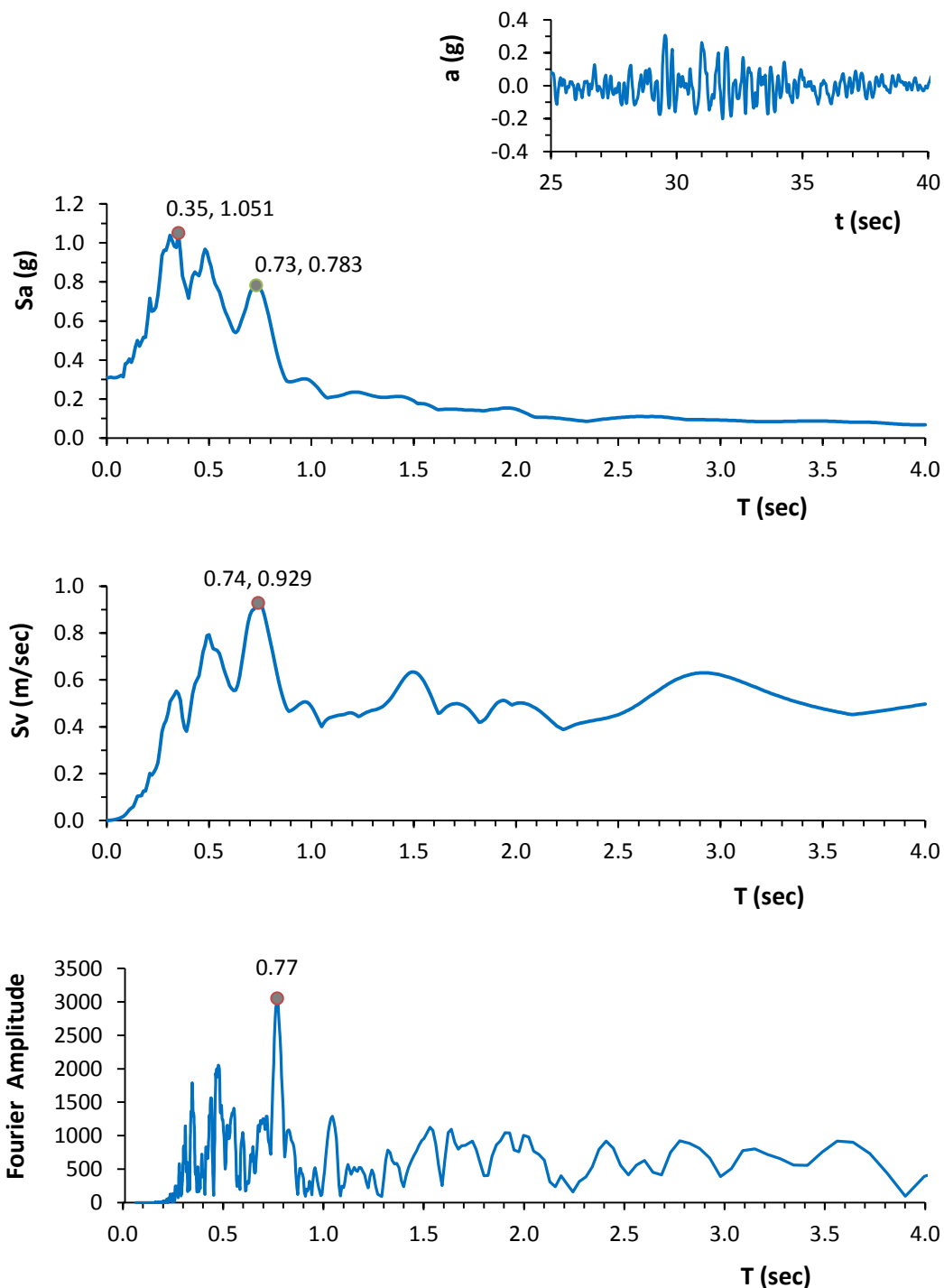
*ΚΡΟC - Ν15Ε*



**Σχήμα 4.17:** η χρονιοϊστορία επιταχύνσεων, τα ελαστικά φάσματα επιταχύνσεων και ταχύτητων και το φάσμα πλάτους Fourier της συνιστώσα N15E του σταθμού ΚΡΟC, για το σεισμικό γεγονός της 3<sup>ης</sup> Σεπτεμβρίου του 2010.

**Darfield**  
**3 Σεπτεμβρίου 2010**  
 **$M_w = 7.1$**

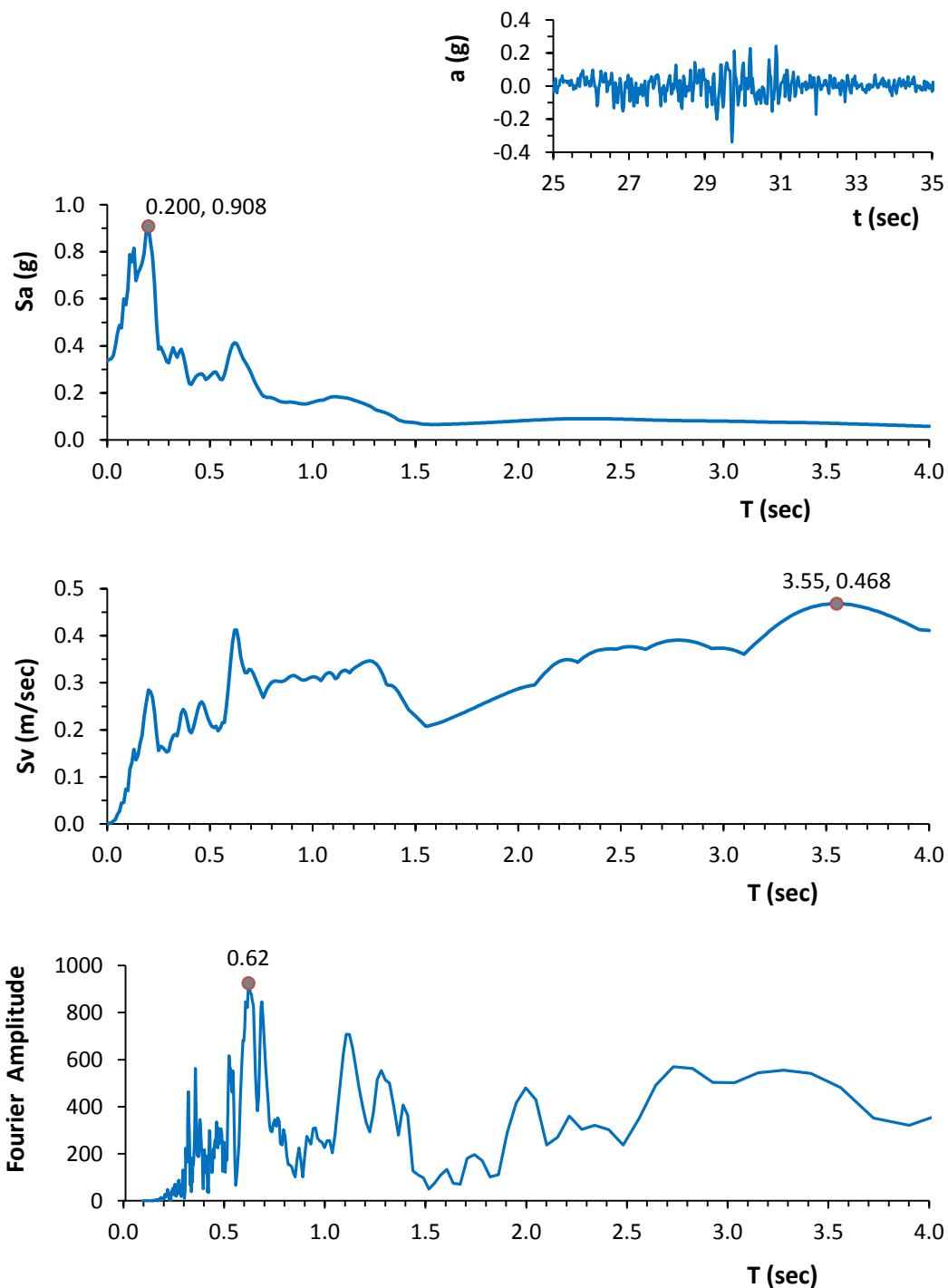
**ΚΡΟΣ - S75E**



**Σχήμα 4.18:** η χρονιοϊστορία επιταχύνσεων, τα ελαστικά φάσματα επιταχύνσεων και ταχύτητων και το φάσμα πλάτους Fourier της συνιστώσα S75E του σταθμού ΚΡΟΣ, για το σεισμικό γεγονός της 3<sup>ης</sup> Σεπτεμβρίου του 2010.

*Darfield*  
**3 Σεπτεμβρίου 2010**  
 $M_w = 7.1$

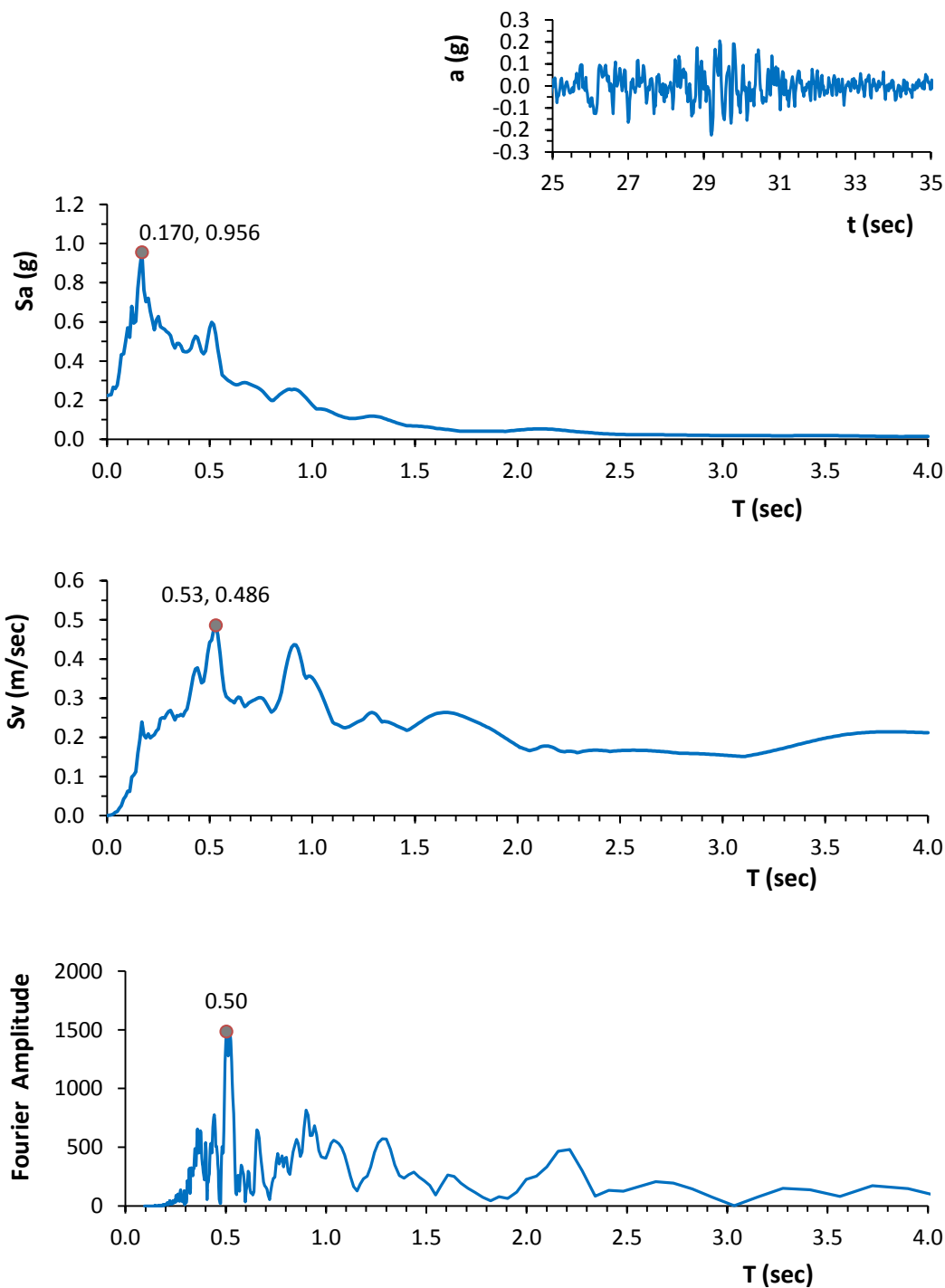
*LPCC - N10W*



**Σχήμα 4.19:** η χρονιοϊστορία επιταχύνσεων, τα ελαστικά φάσματα επιταχύνσεων και ταχυτήτων και το φάσμα πλάτους Fourier της συνιστώσα N10W του σταθμού LPCC, για το σεισμικό γεγονός της 3ης Σεπτεμβρίου του 2010.

*Darfield*  
3 Σεπτεμβρίου 2010  
 $M_w = 7.1$

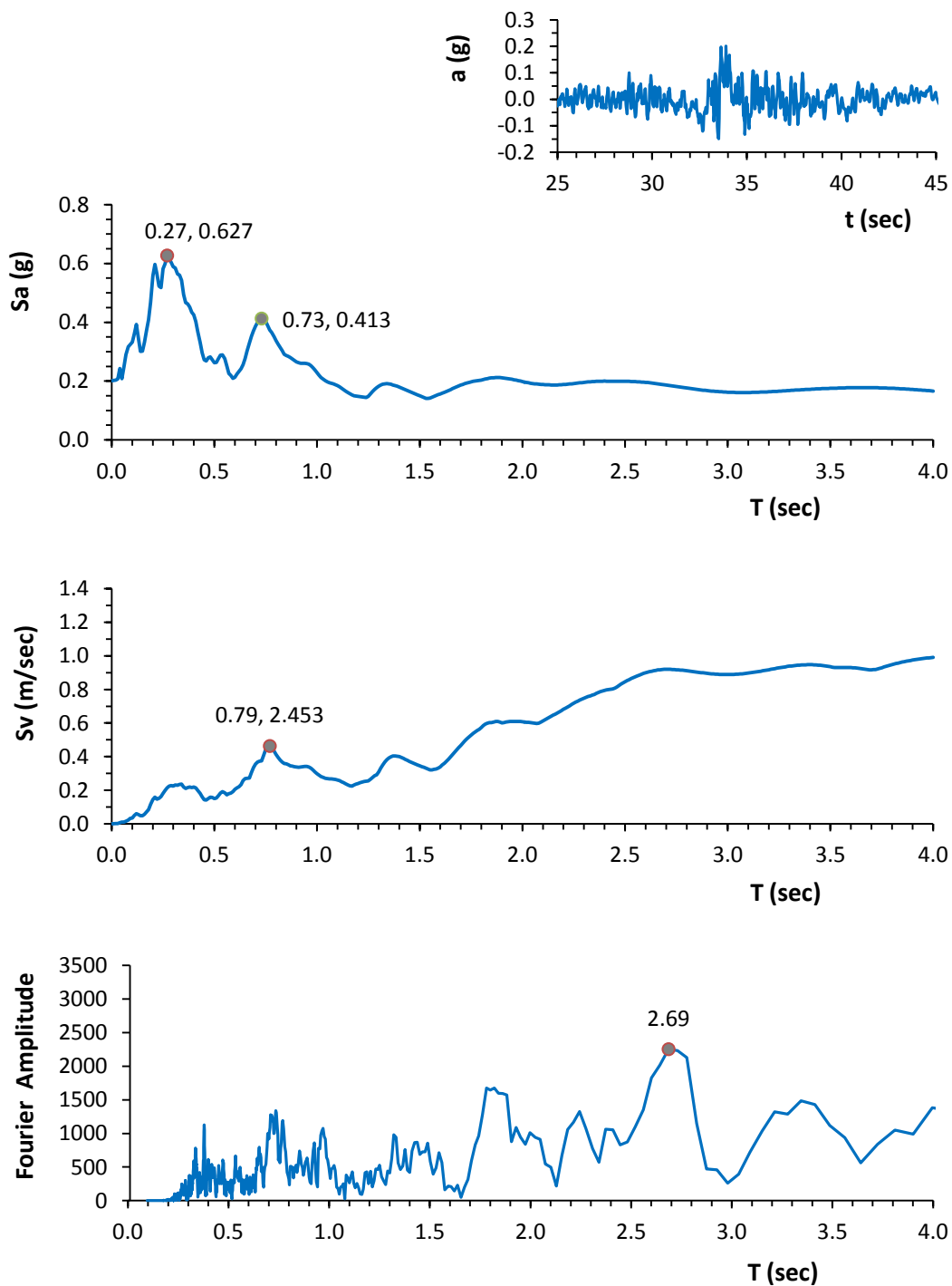
*LPCC - S80W*



**Σχήμα 4.20:** η χρονιοϊστορία επιταχύνσεων, τα ελαστικά φάσματα επιταχύνσεων και ταχυτήτων και το φάσμα πλάτους Fourier της συνιστώσα S80W του σταθμού LPCC, για το σεισμικό γεγονός της 3ης Σεπτεμβρίου του 2010.

*Darfield*  
**3 Σεπτεμβρίου 2010**  
 $M_w = 7.1$

*NNBS - S13E*

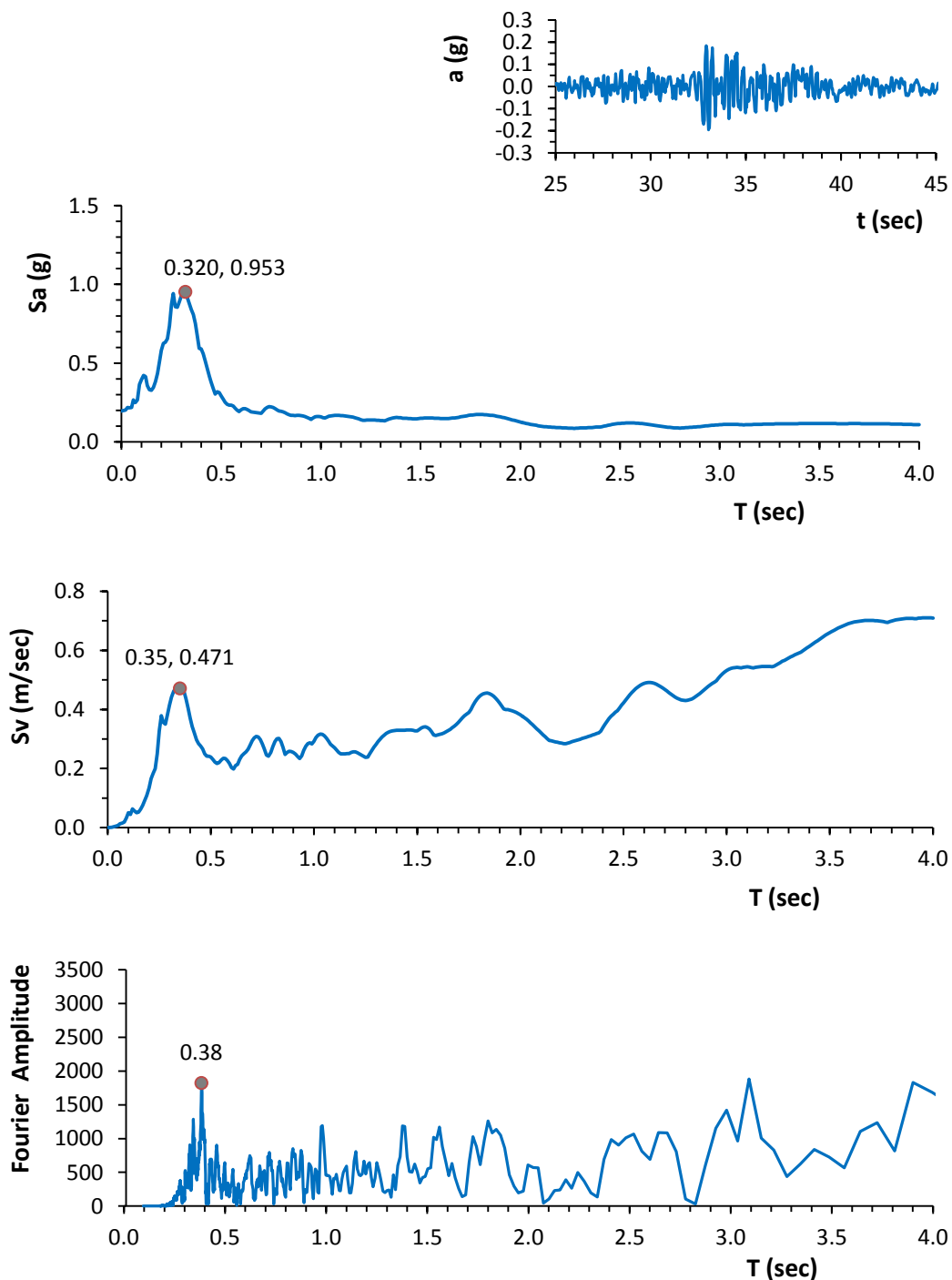


**Σχήμα 4.21:** η χρονιοϊστορία επιταχύνσεων, τα ελαστικά φάσματα επιταχύνσεων και ταχύτητων και το φάσμα πλάτους Fourier της συνιστώσα S13E του σταθμού NNBS, για το σεισμικό γεγονός της 3<sup>ης</sup> Σεπτεμβρίου του 2010.



*Darfield*  
3 Σεπτεμβρίου 2010  
 $M_w = 7.1$

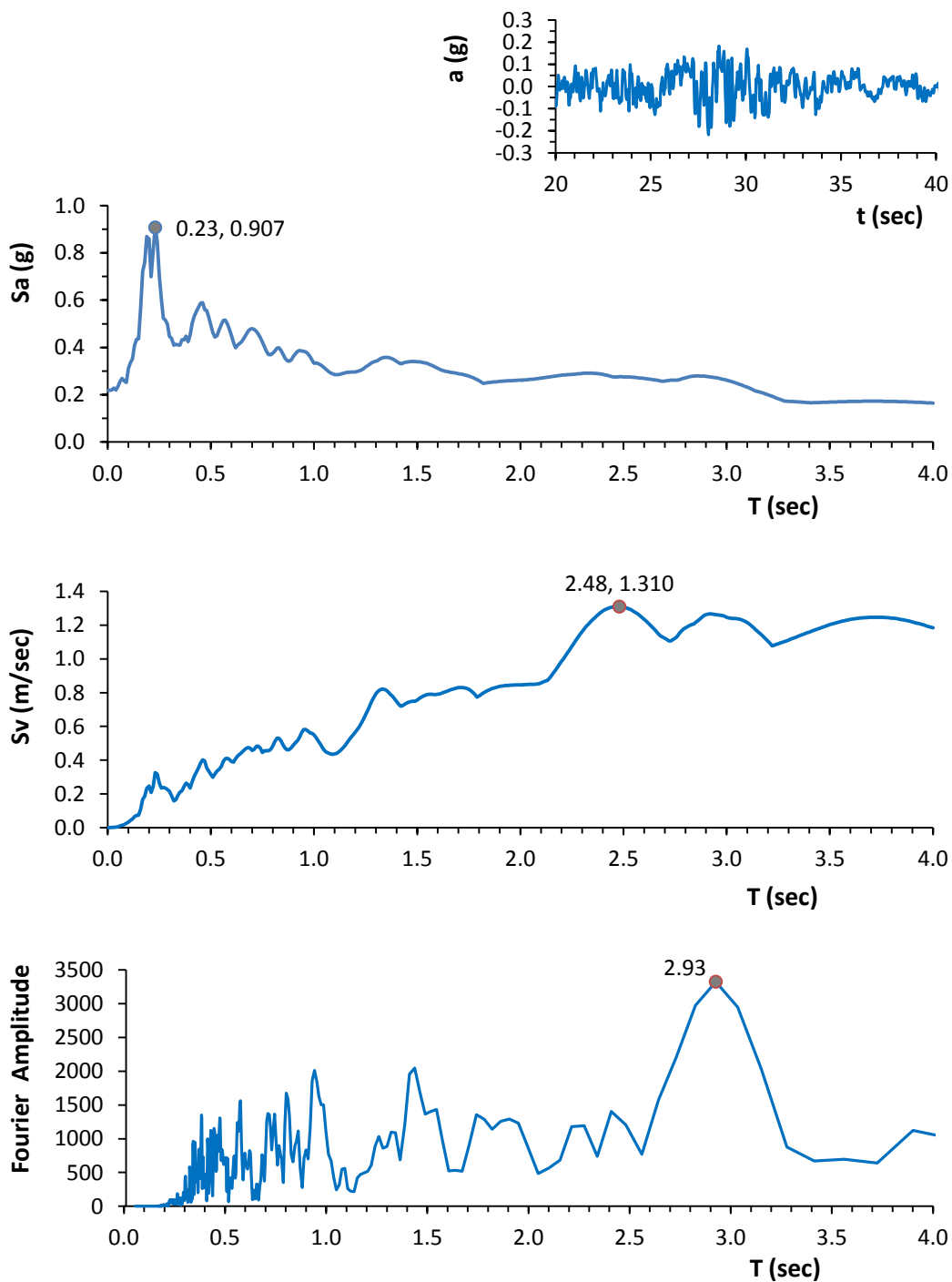
*NNBS - S77W*



**Σχήμα 4.22:** η χρονιοϊστορία επιταχύνσεων, τα ελαστικά φάσματα επιταχύνσεων και ταχύτητων και το φάσμα πλάτους Fourier της συνιστώσα S77W του σταθμού NNBS, για το σεισμικό γεγονός της 3<sup>ης</sup> Σεπτεμβρίου του 2010.

**Darfield**  
**3 Σεπτεμβρίου 2010**  
 **$M_w = 7.1$**

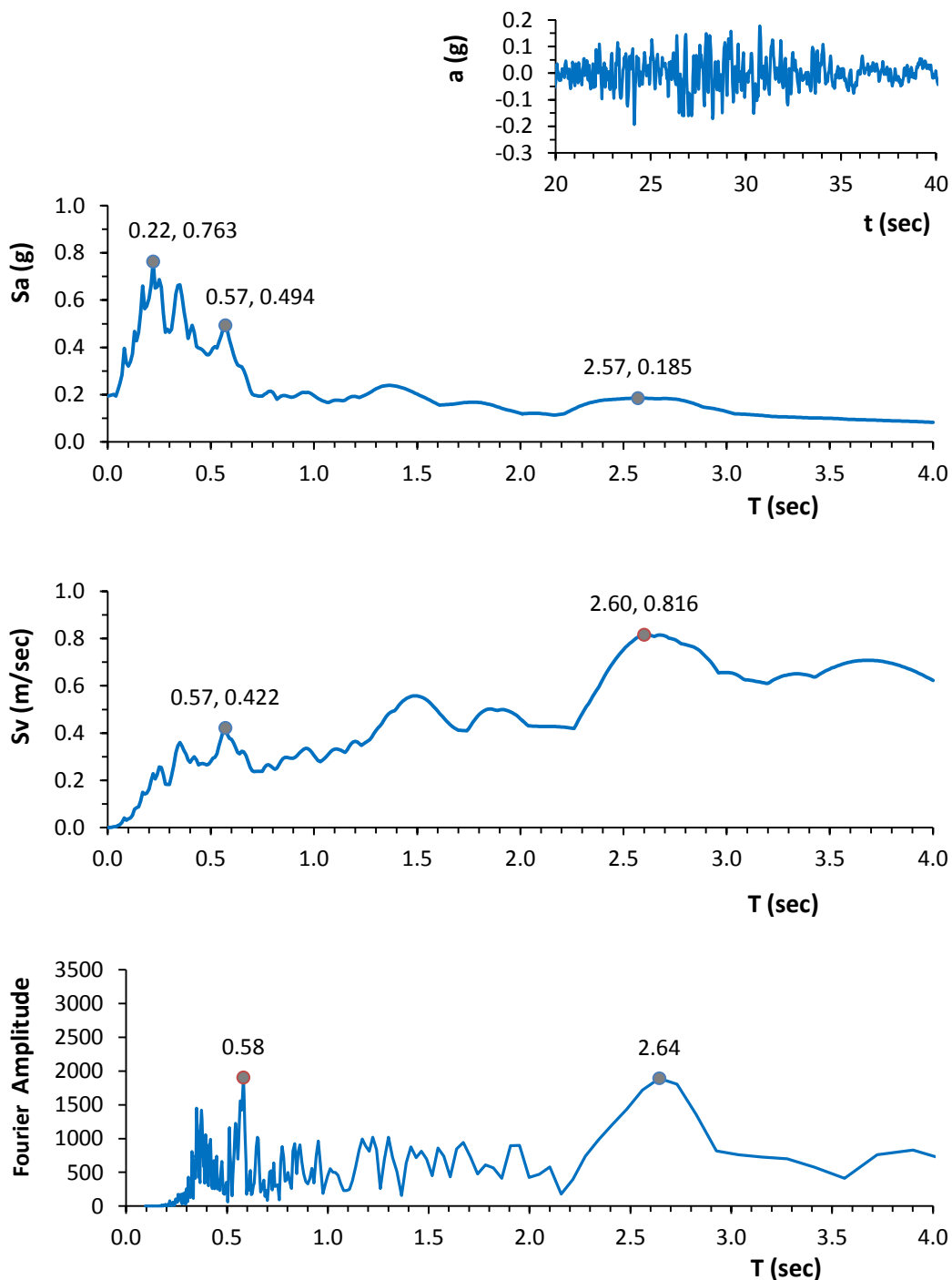
**PRPC - S**



**Σχήμα 4.23:** η χρονιοστορία επιταχύνσεων, τα ελαστικά φάσματα επιταχύνσεων και ταχύτητων και το φάσμα πλάτους Fourier της συνιστώσα S του σταθμού PRPC, για το σεισμικό γεγονός της 3<sup>ης</sup> Σεπτεμβρίου του 2010.

*Darfield*  
**3 Σεπτεμβρίου 2010**  
 $M_w = 7.1$

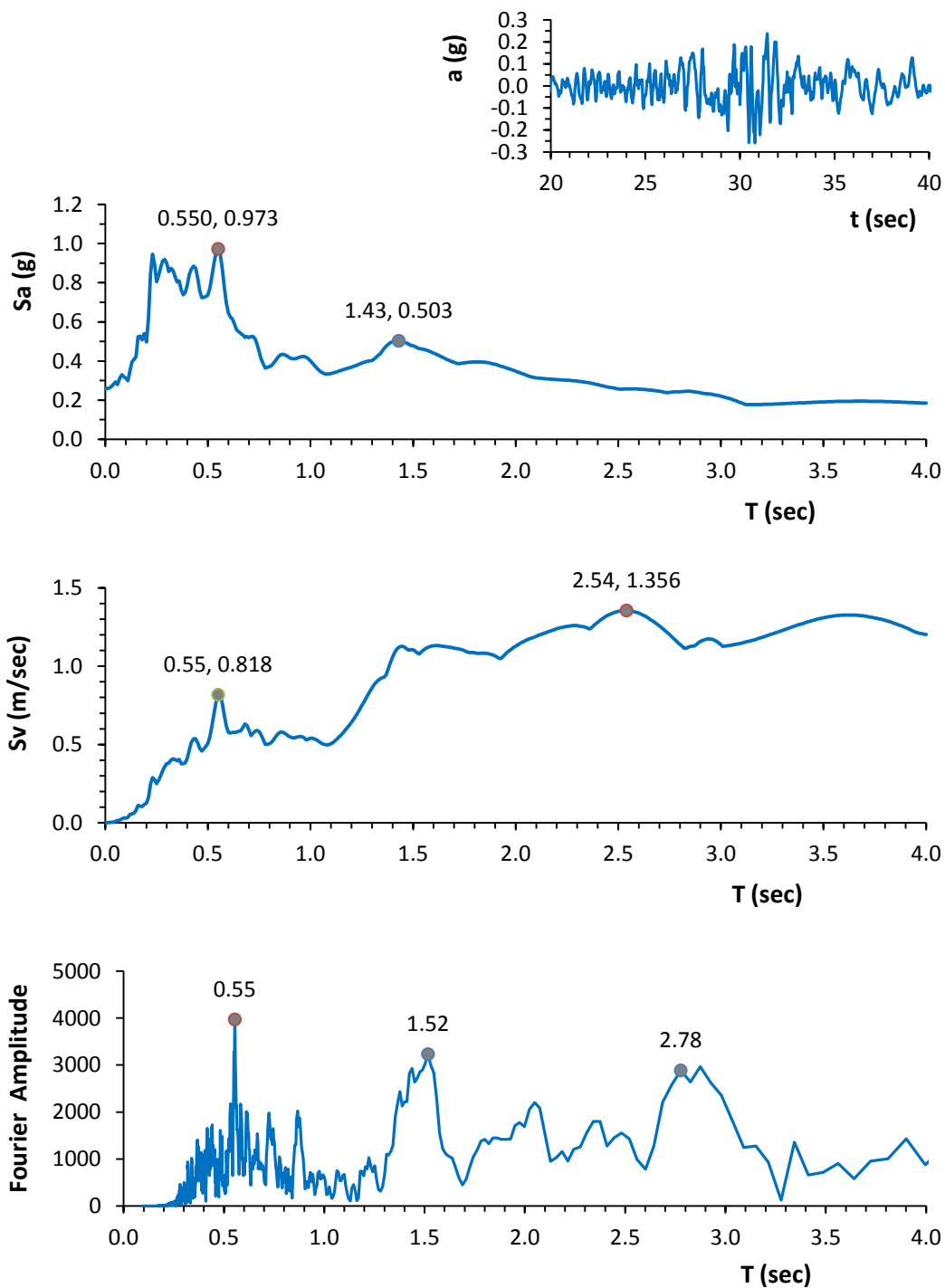
*PRPC - W*



**Σχήμα 4.24:** η χρονιοϊστορία επιταχύνσεων, τα ελαστικά φάσματα επιταχύνσεων και ταχυτήτων και το φάσμα πλάτους Fourier της συνιστώσα W του σταθμού PRPC, για το σεισμικό γεγονός της 3<sup>ης</sup> Σεπτεμβρίου του 2010.

*Darfield*  
3 Σεπτεμβρίου 2010  
 $M_w = 7.1$

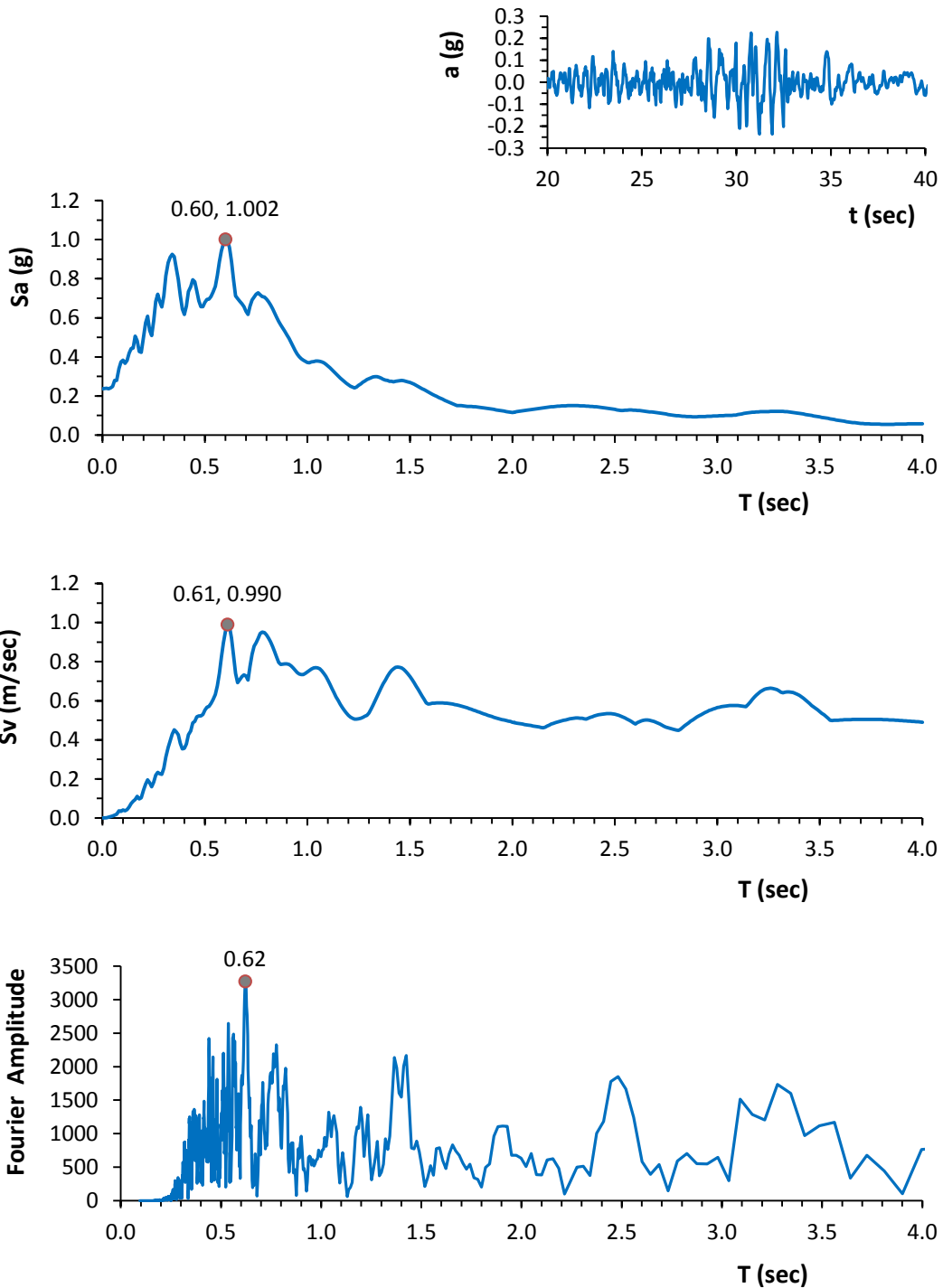
*REHS - N02E*



**Σχήμα 4.25:** η χρονιοϊστορία επιταχύνσεων, τα ελαστικά φάσματα επιταχύνσεων και ταχυτήτων και το φάσμα πλάτους Fourier της συνιστώσα N02E του σταθμού REHS, για το σεισμικό γεγονός της 3ης Σεπτεμβρίου του 2010.

*Darfield*  
3 Σεπτεμβρίου 2010  
 $M_w = 7.1$

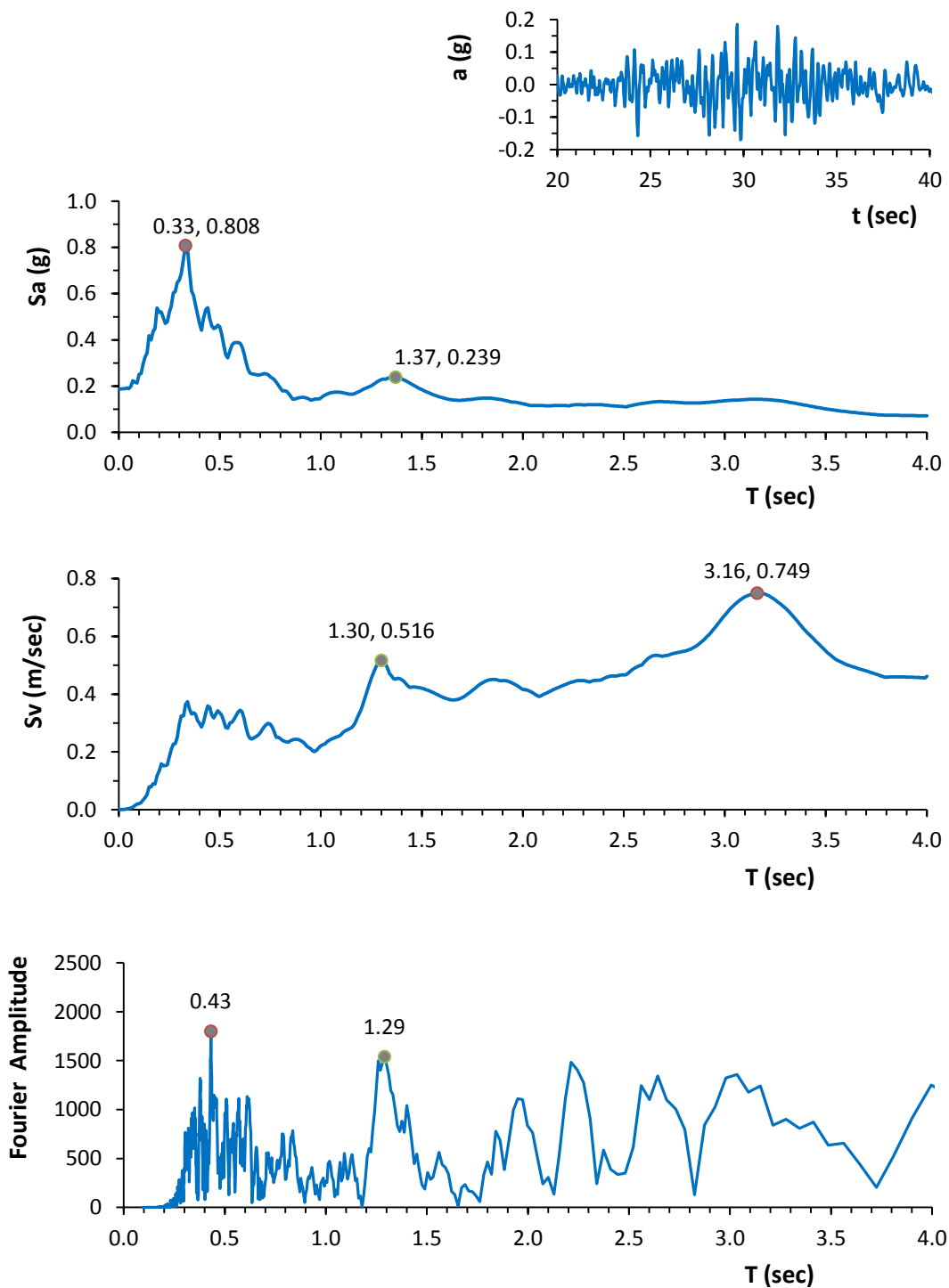
*REHS - S88E*



**Σχήμα 4.26:** η χρονιοϊστορία επιταχύνσεων, τα ελαστικά φάσματα επιταχύνσεων και ταχύτητων και το φάσμα πλάτους Fourier της συνιστώσα S88E του σταθμού REHS, για το σεισμικό γεγονός της 3<sup>ης</sup> Σεπτεμβρίου του 2010.

*Darfield*  
**3 Σεπτεμβρίου 2010**  
 $M_w = 7.1$

*RHSC - N86W*

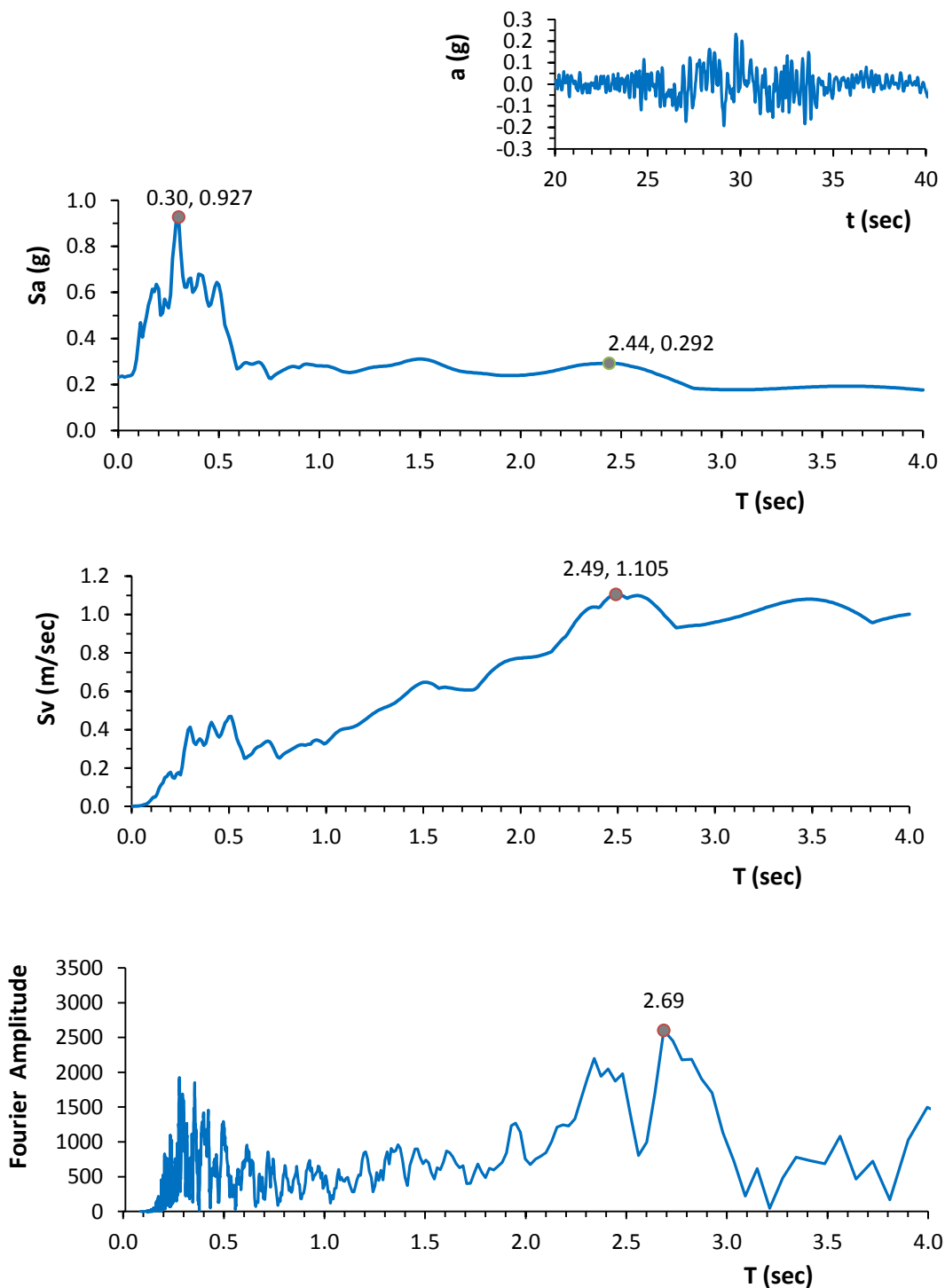


**Σχήμα 4.27:** η χρονιοϊστορία επιταχύνσεων, τα ελαστικά φάσματα επιταχύνσεων και ταχυτήτων και το φάσμα πλάτους Fourier της συνιστώσα N86W του σταθμού RHSC, για το σεισμικό γεγονός της 3<sup>ης</sup> Σεπτεμβρίου του 2010.



*Darfield*  
**3 Σεπτεμβρίου 2010**  
 $M_w = 7.1$

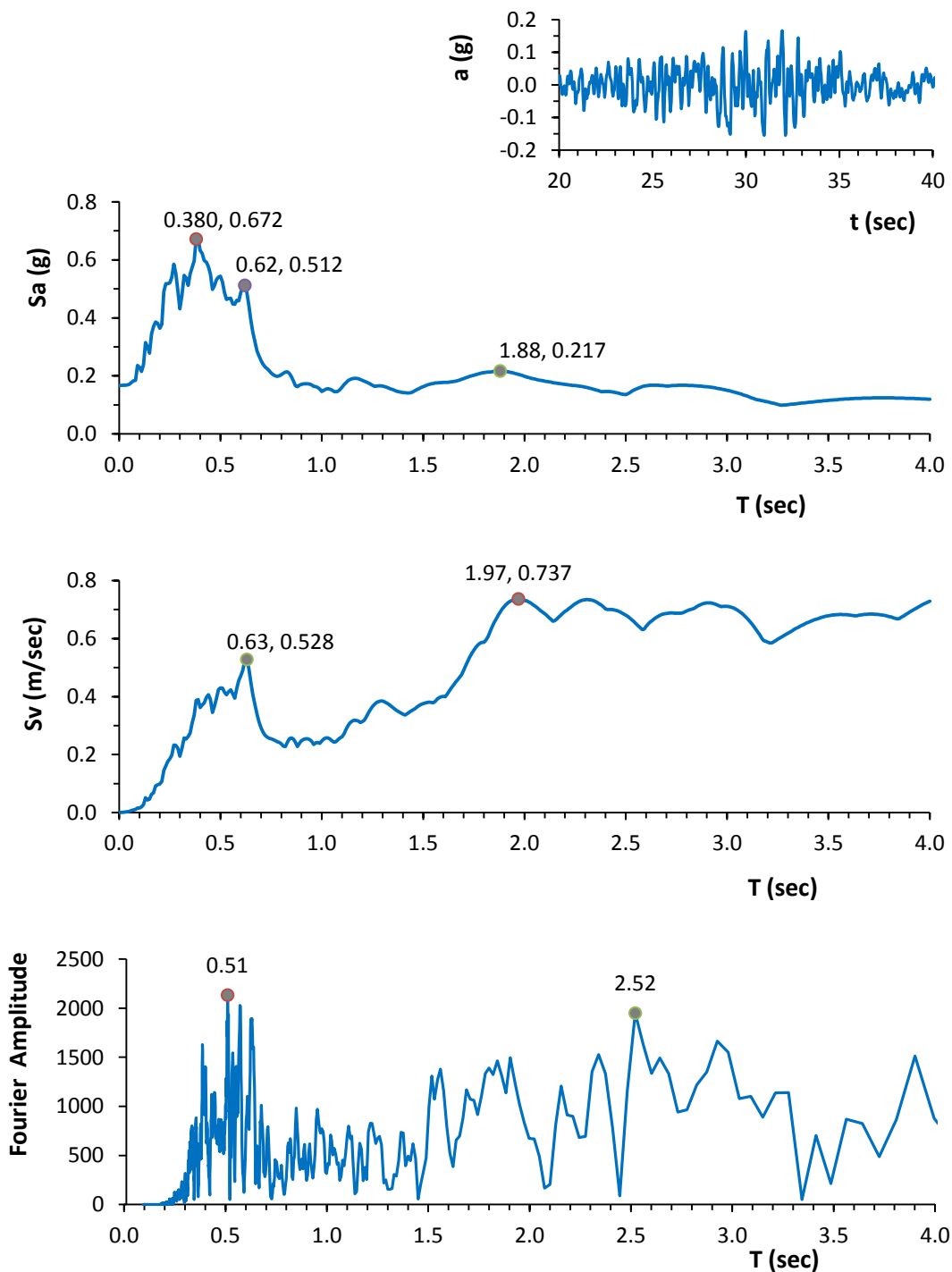
*RHSC - S04W*



**Σχήμα 4.28:** η χρονιοϊστορία επιταχύνσεων, τα ελαστικά φάσματα επιταχύνσεων και ταχύτητων και το φάσμα πλάτους Fourier της συνιστώσα S04W του σταθμού RHSC, για το σεισμικό γεγονός της 3<sup>ης</sup> Σεπτεμβρίου του 2010.

*Darfield*  
**3 Σεπτεμβρίου 2010**  
 $M_w = 7.1$

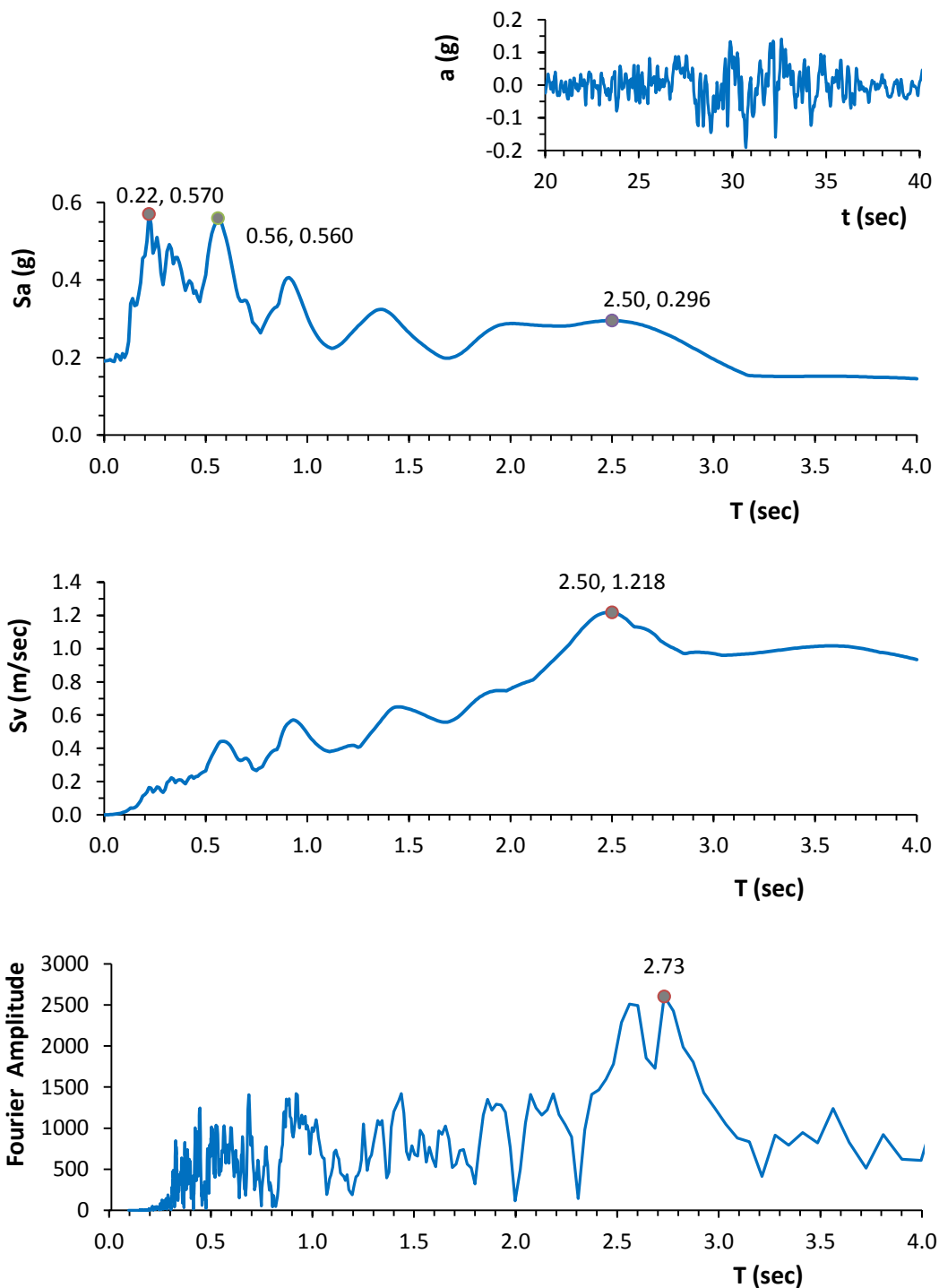
*SHLC - S40W*



**Σχήμα 4.29:** η χρονιοϊστορία επιταχύνσεων, τα ελαστικά φάσματα επιταχύνσεων και ταχύτητων και το φάσμα πλάτους Fourier της συνιστώσα S40W του σταθμού SHLC, για το σεισμικό γεγονός της 3<sup>ης</sup> Σεπτεμβρίου του 2010.

*Darfield*  
3 Σεπτεμβρίου 2010  
 $M_w = 7.1$

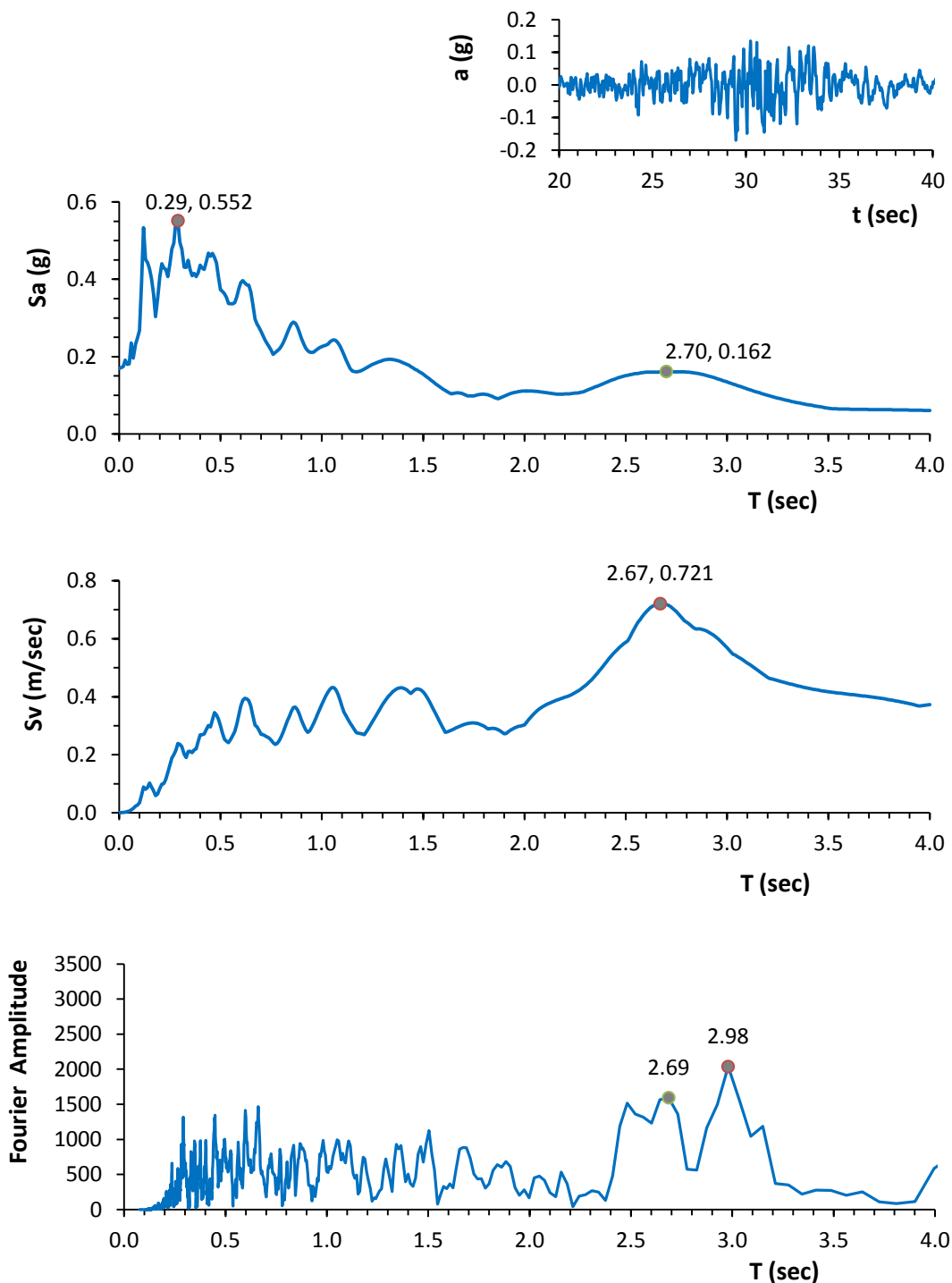
*SHLC - S50E*



**Σχήμα 4.30:** η χρονιοϊστορία επιταχύνσεων, τα ελαστικά φάσματα επιταχύνσεων και ταχύτητων και το φάσμα πλάτους Fourier της συνιστώσα S50E του σταθμού SHLC, για το σεισμικό γεγονός της 3<sup>ης</sup> Σεπτεμβρίου του 2010.

*Darfield*  
**3 Σεπτεμβρίου 2010**  
 $M_w = 7.1$

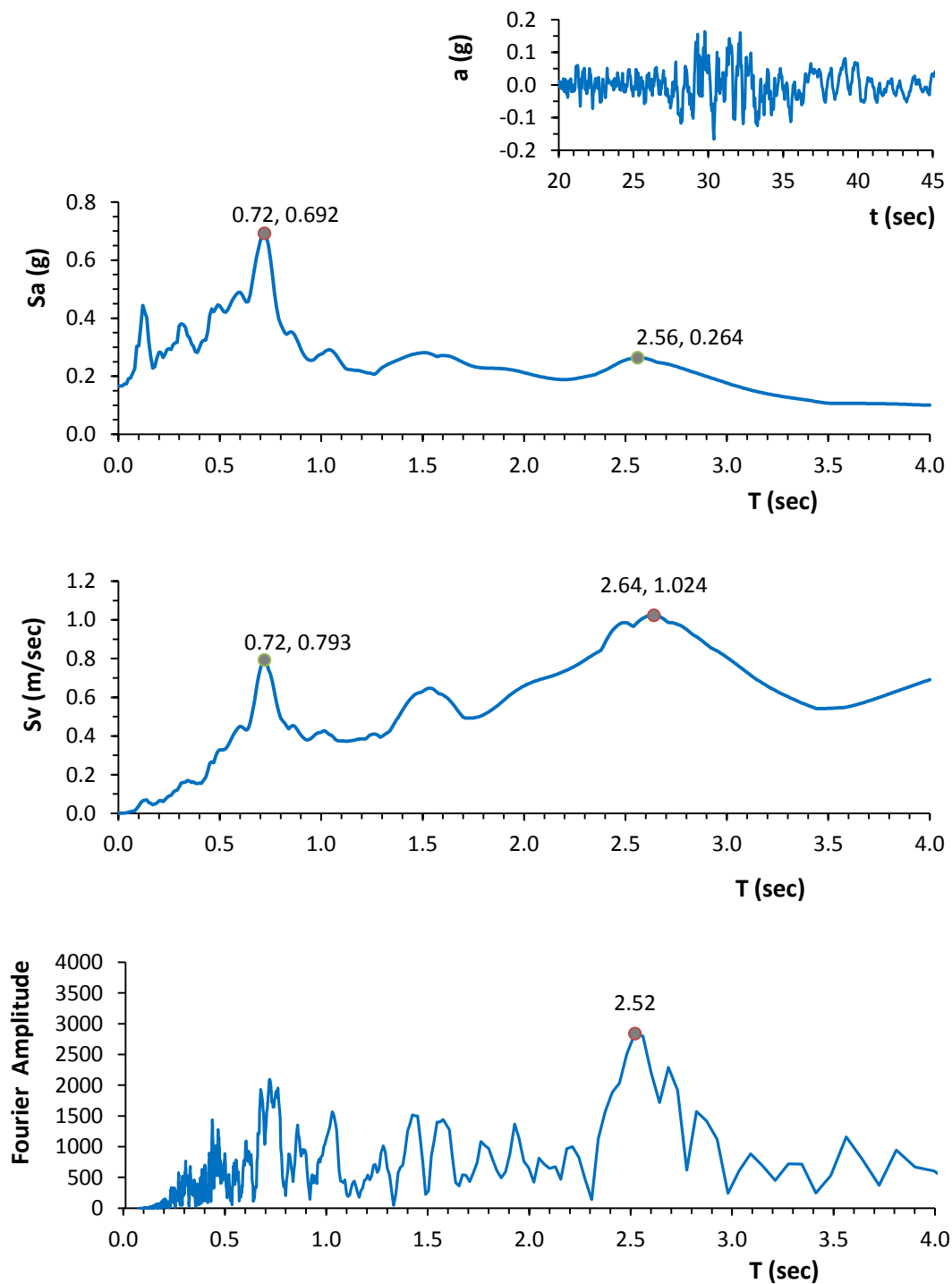
*SMTC - N88W*



**Σχήμα 4.31:** η χρονιοστορία επιταχύνσεων, τα ελαστικά φάσματα επιταχύνσεων και ταχύτητων και το φάσμα πλάτους Fourier της συνιστώσα N88W του σταθμού SMTC, για το σεισμικό γεγονός της 3<sup>ης</sup> Σεπτεμβρίου του 2010.

*Darfield*  
**3 Σεπτεμβρίου 2010**  
 $M_w = 7.1$

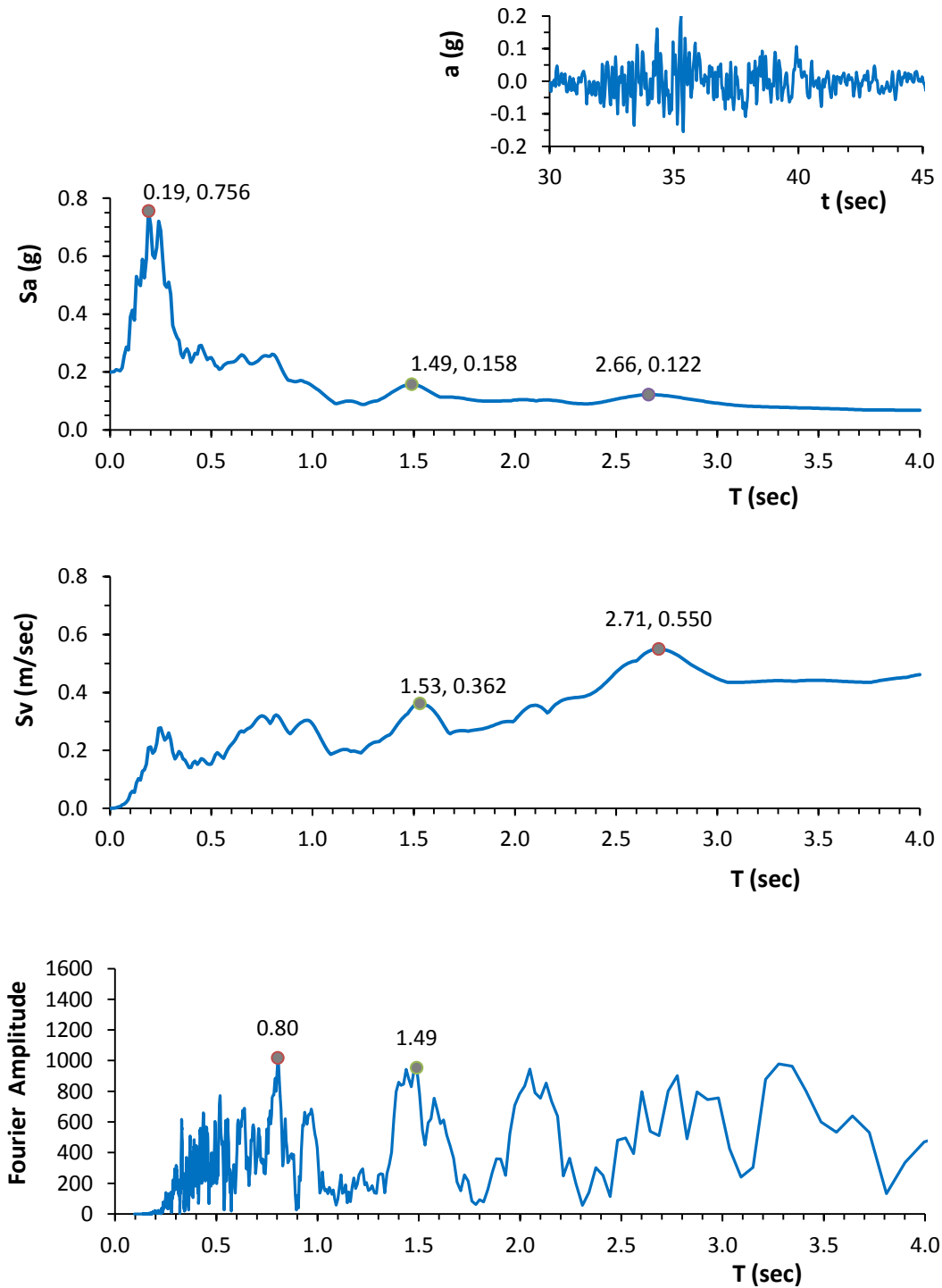
*SMTC - S02W*



**Σχήμα 4.32:** η χρονιοϊστορία επιταχύνσεων, τα ελαστικά φάσματα επιταχύνσεων και ταχύτητων και το φάσμα πλάτους Fourier της συνιστώσα S02W του σταθμού SMTC, για το σεισμικό γεγονός της 3<sup>ης</sup> Σεπτεμβρίου του 2010.

**Darfield**  
**3 Σεπτεμβρίου 2010**  
 $M_w = 7.1$

**SWNC - N24E**

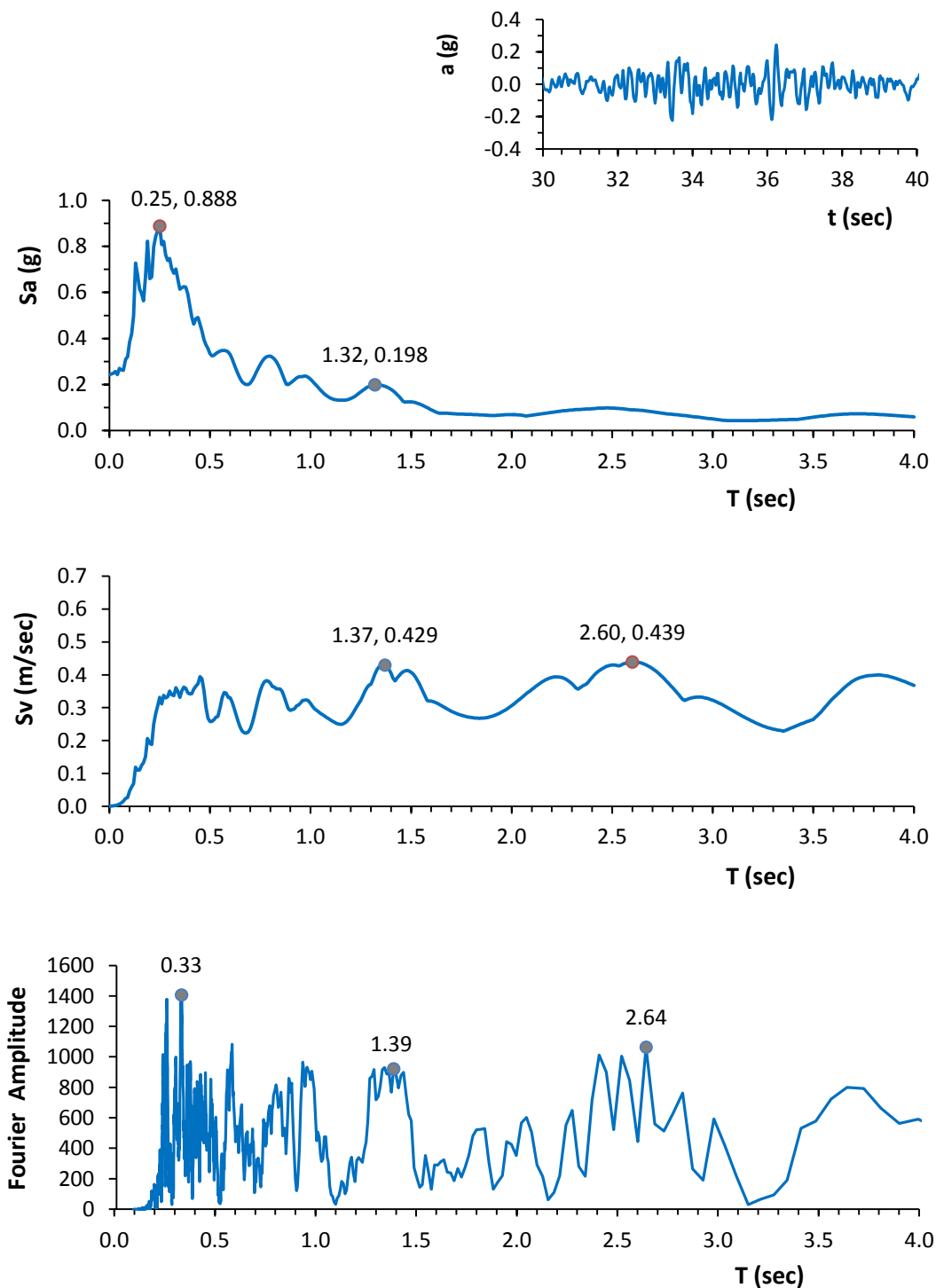


**Σχήμα 4.33:** η χρονιοϊστορία επιταχύνσεων, τα ελαστικά φάσματα επιταχύνσεων και ταχύτητων και το φάσμα πλάτους Fourier της συνιστώσα N24E του σταθμού SWNC, για το σεισμικό γεγονός της 3<sup>ης</sup> Σεπτεμβρίου του 2010.



*Darfield*  
**3 Σεπτεμβρίου 2010**  
 $M_w = 7.1$

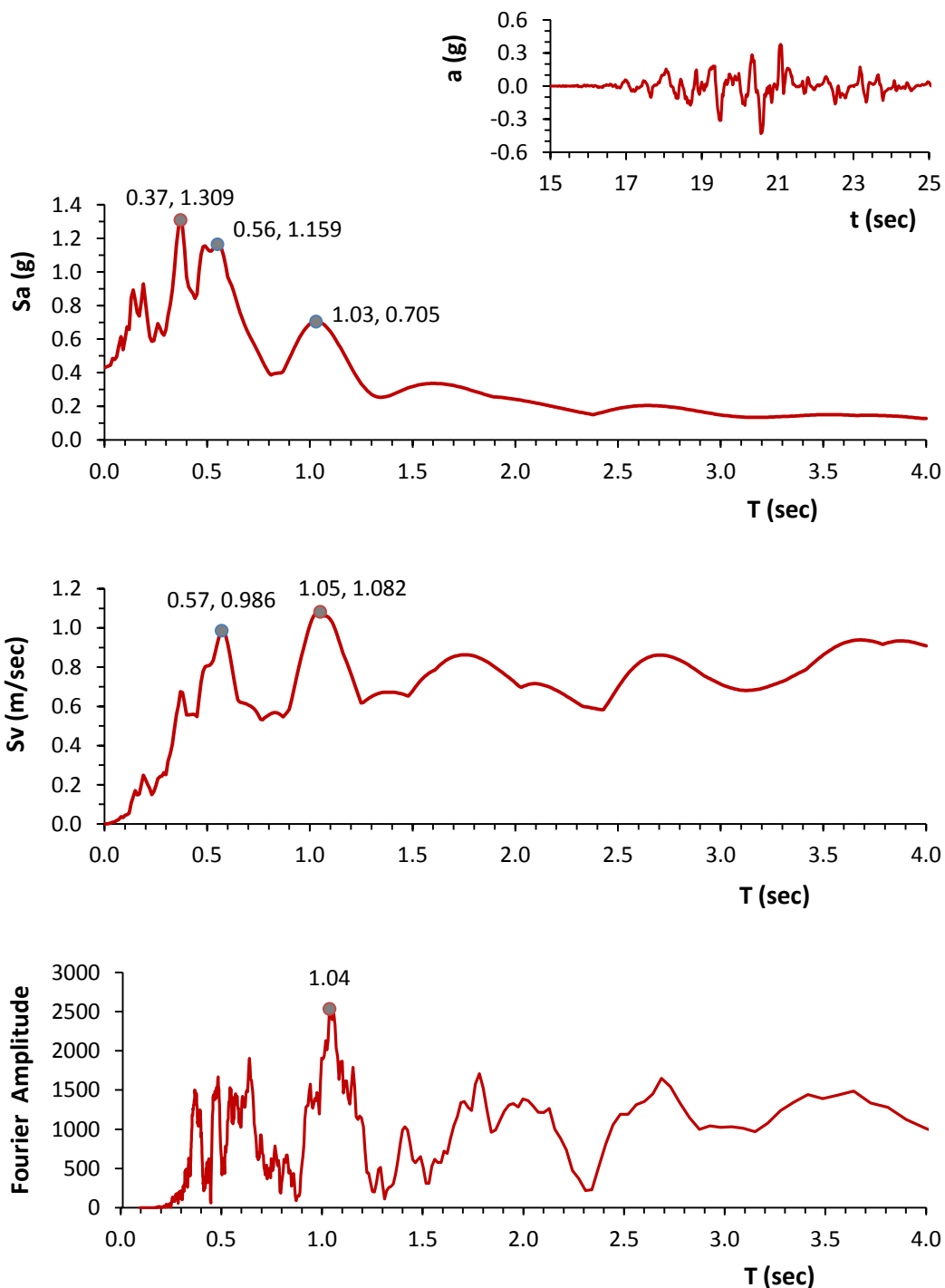
*SWNC - N66W*



**Σχήμα 4.34:** η χρονιοϊστορία επιταχύνσεων, τα ελαστικά φάσματα επιταχύνσεων και ταχυτήτων και το φάσμα πλάτους Fourier της συνιστώσα N66W του σταθμού SWNC, για το σεισμικό γεγονός της 3ης Σεπτεμβρίου του 2010.

**Christchurch**  
**22 Φεβρουαρίου 2011**  
 **$M_1 = 6.3$**

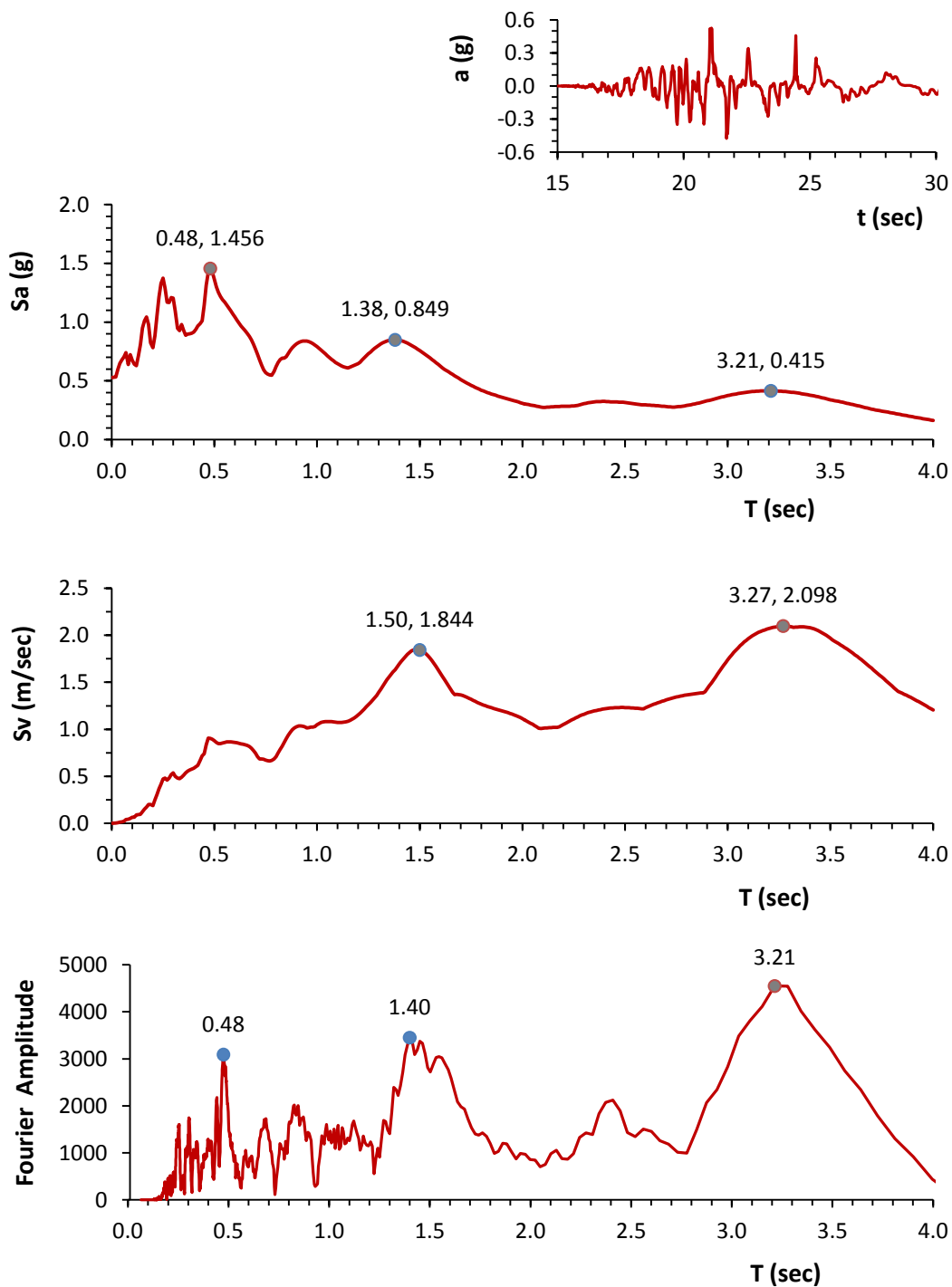
**CBGS - S01W**



**Σχήμα 4.35:** η χρονιοϊστορία επιταχύνσεων, τα ελαστικά φάσματα επιταχύνσεων και ταχύτητων και το φάσμα πλάτους Fourier της συνιστώσα S01W του σταθμού CBGS, για το σεισμικό γεγονός της 22<sup>ης</sup> Φεβρουαρίου του 2011.

**Christchurch**  
**22 Φεβρουαρίου 2011**  
 **$M_1 = 6.3$**

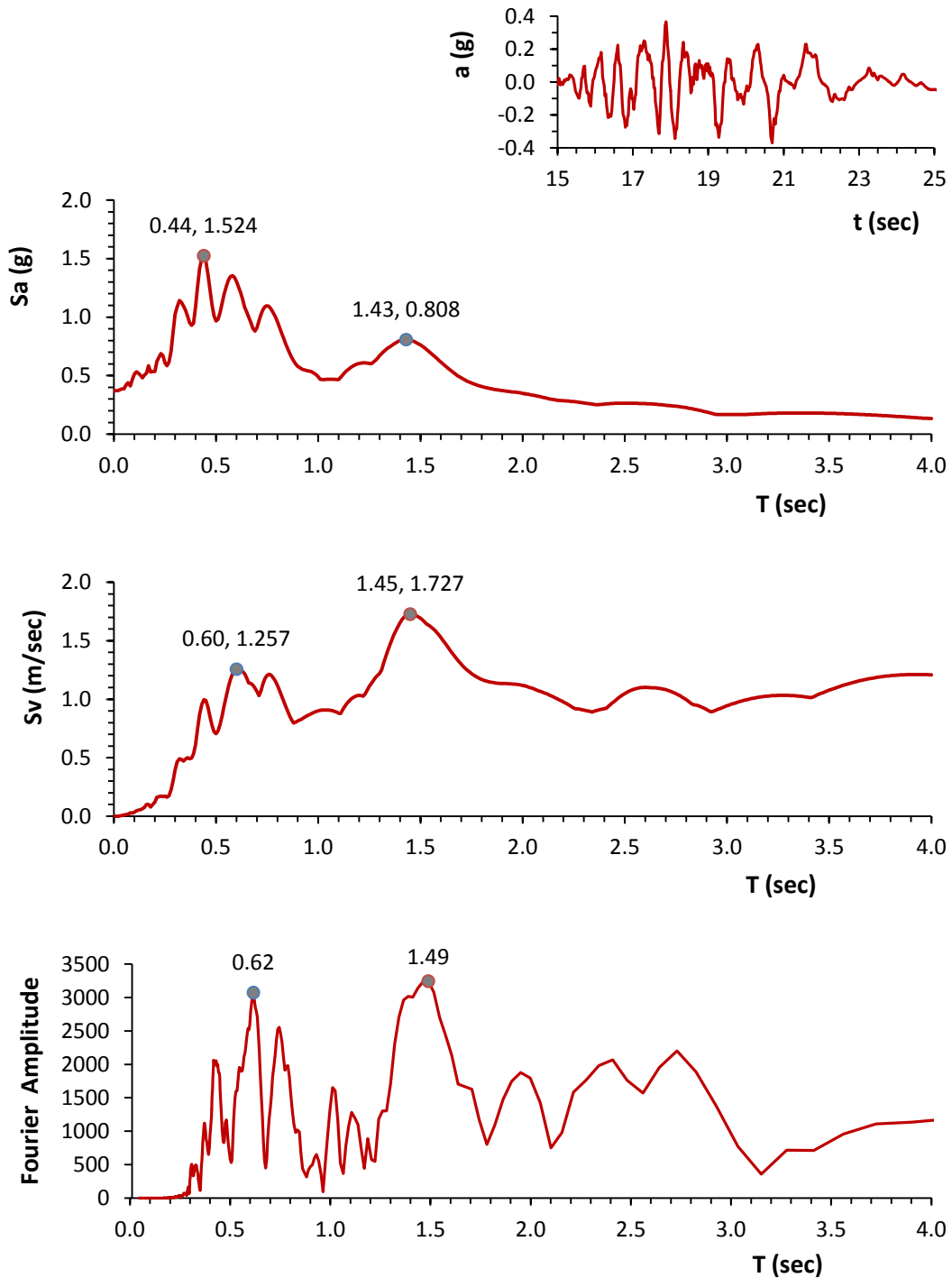
**CBGS - N89W**



**Σχήμα 4.36:** η χρονιοστορία επιταχύνσεων, τα ελαστικά φάσματα επιταχύνσεων και ταχυτήτων και το φάσμα πλάτους Fourier της συνιστώσα N89W του σταθμού CBGS, για το σεισμικό γεγονός της 22<sup>ης</sup> Φεβρουαρίου του 2011.

*Christchurch*  
**22 Φεβρουαρίου 2011**  
 **$M_1 = 6.3$**

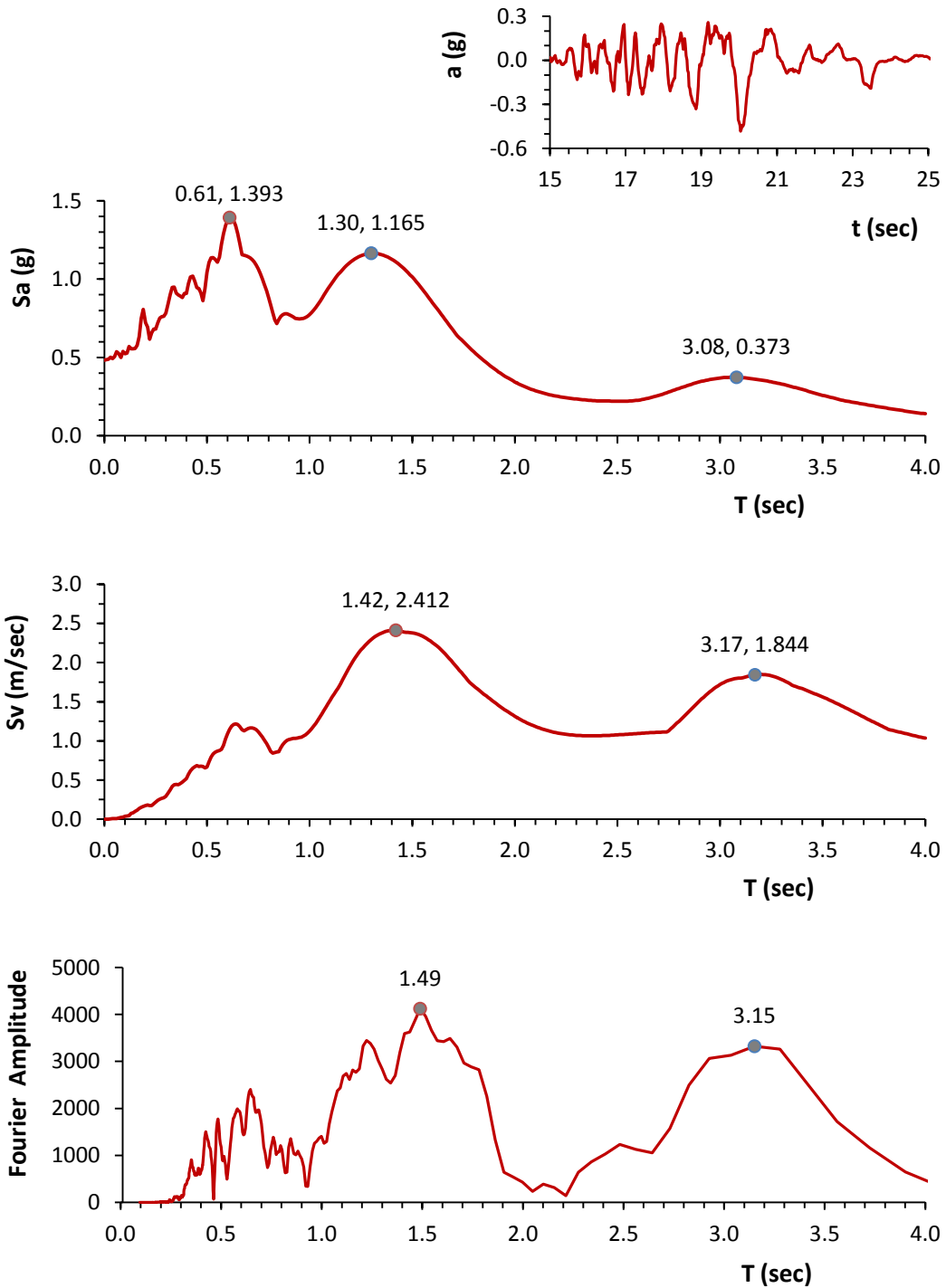
*CCCC - N26W*



**Σχήμα 4.37:** η χρονιοϊστορία επιταχύνσεων, τα ελαστικά φάσματα επιταχύνσεων και ταχυτήτων και το φάσμα πλάτους Fourier της συνιστώσα N26W του σταθμού CCCC, για το σεισμικό γεγονός της 22<sup>ης</sup> Φεβρουαρίου του 2011.

**Christchurch**  
**22 Φεβρουαρίου 2011**  
 **$M_1 = 6.3$**

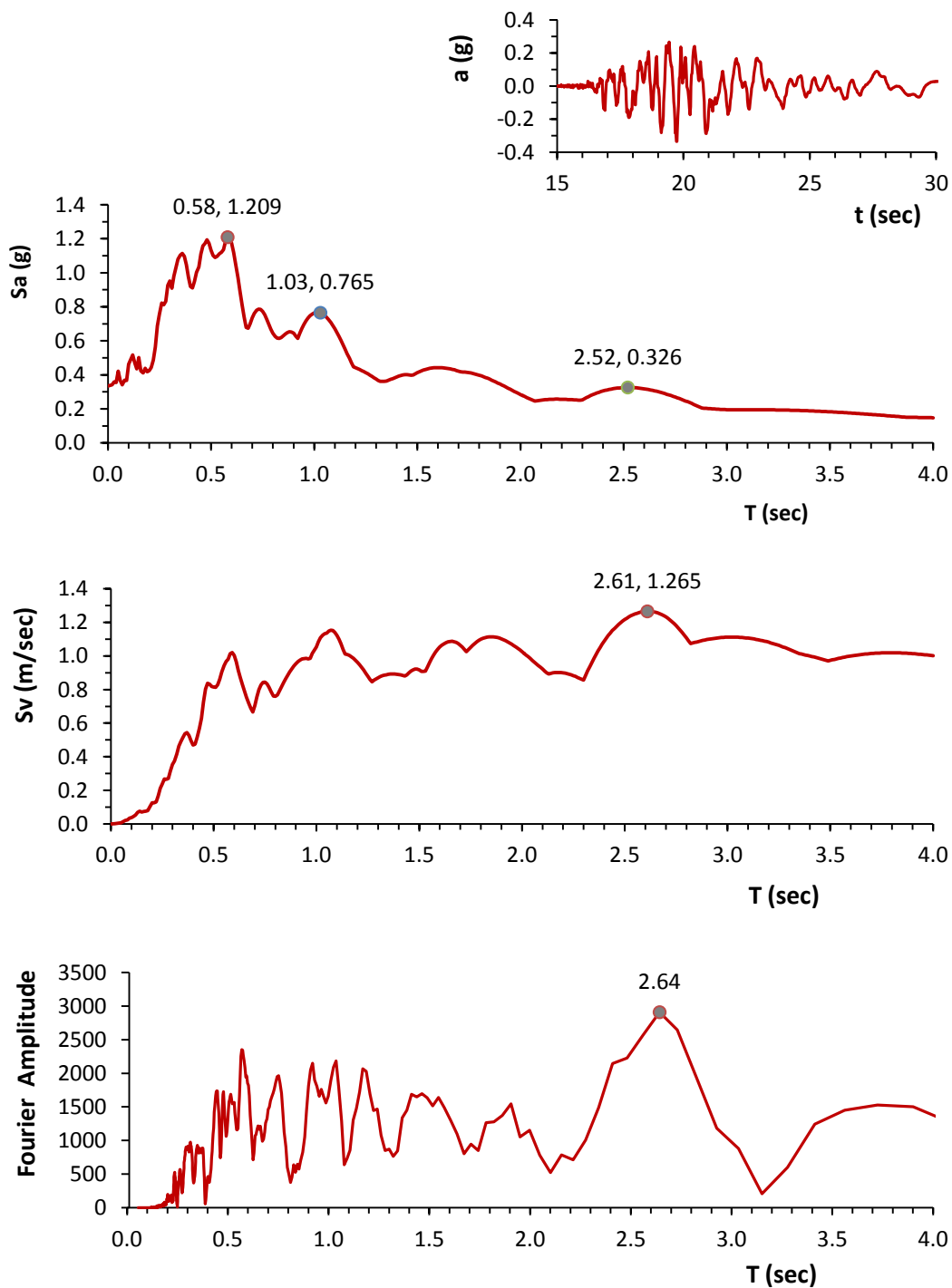
**CCCC - N64E**



**Σχήμα 4.38:** η χρονιοστορία επιταχύνσεων, τα ελαστικά φάσματα επιταχύνσεων και ταχύτητων και το φάσμα πλάτους Fourier της συνιστώσα N64E του σταθμού CCCC, για το σεισμικό γεγονός της 22<sup>ης</sup> Φεβρουαρίου του 2011.

**Christchurch**  
**22 Φεβρουαρίου 2011**  
 **$M_1 = 6.3$**

**CHHC - N01W**

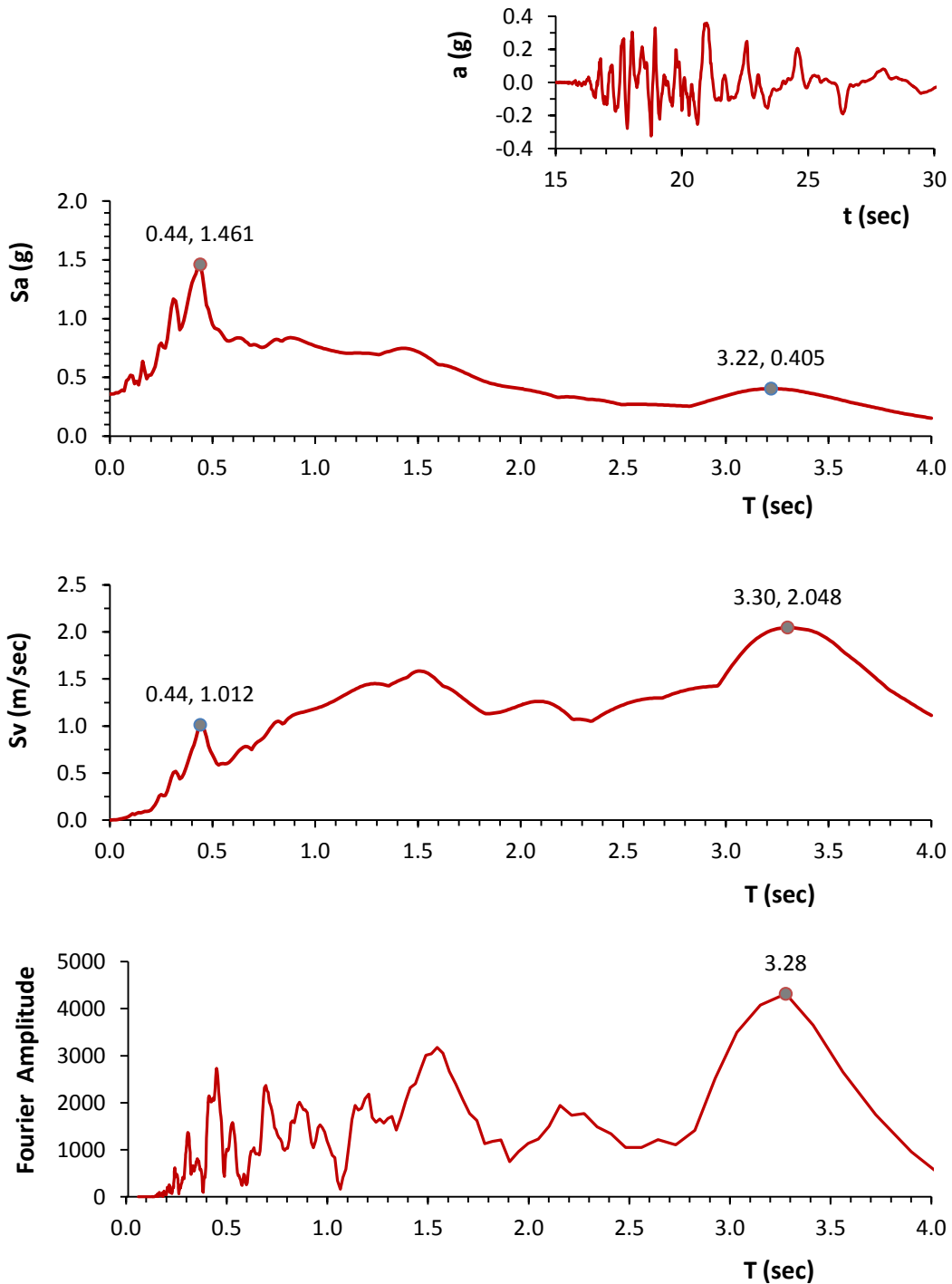


**Σχήμα 4.39:** η χρονιοϊστορία επιταχύνσεων, τα ελαστικά φάσματα επιταχύνσεων και ταχυτήτων και το φάσμα πλάτους Fourier της συνιστώσα N01W του σταθμού CHHC, για το σεισμικό γεγονός της 22<sup>ης</sup> Φεβρουαρίου του 2011.



*Christchurch*  
**22 Φεβρουαρίου 2011**  
 **$M_1 = 6.3$**

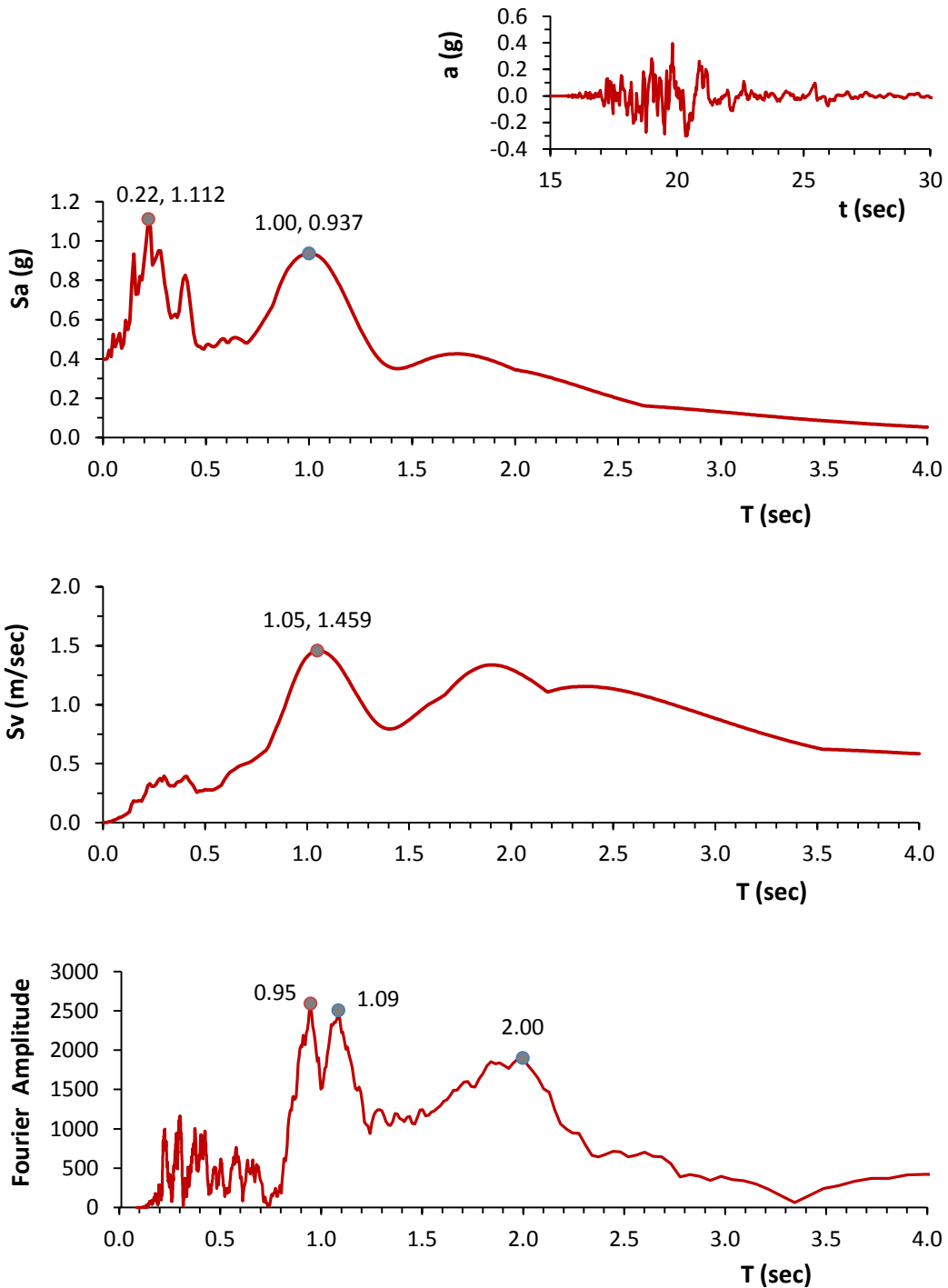
*CHHC - S89W*



**Σχήμα 4.40:** η χρονιοϊστορία επιταχύνσεων, τα ελαστικά φάσματα επιταχύνσεων και ταχύτητων και το φάσμα πλάτους Fourier της συνιστώσα S89W του σταθμού CHHC, για το σεισμικό γεγονός της 22<sup>ης</sup> Φεβρουαρίου του 2011.

**Christchurch**  
**22 Φεβρουαρίου 2011**  
 **$M_1 = 6.3$**

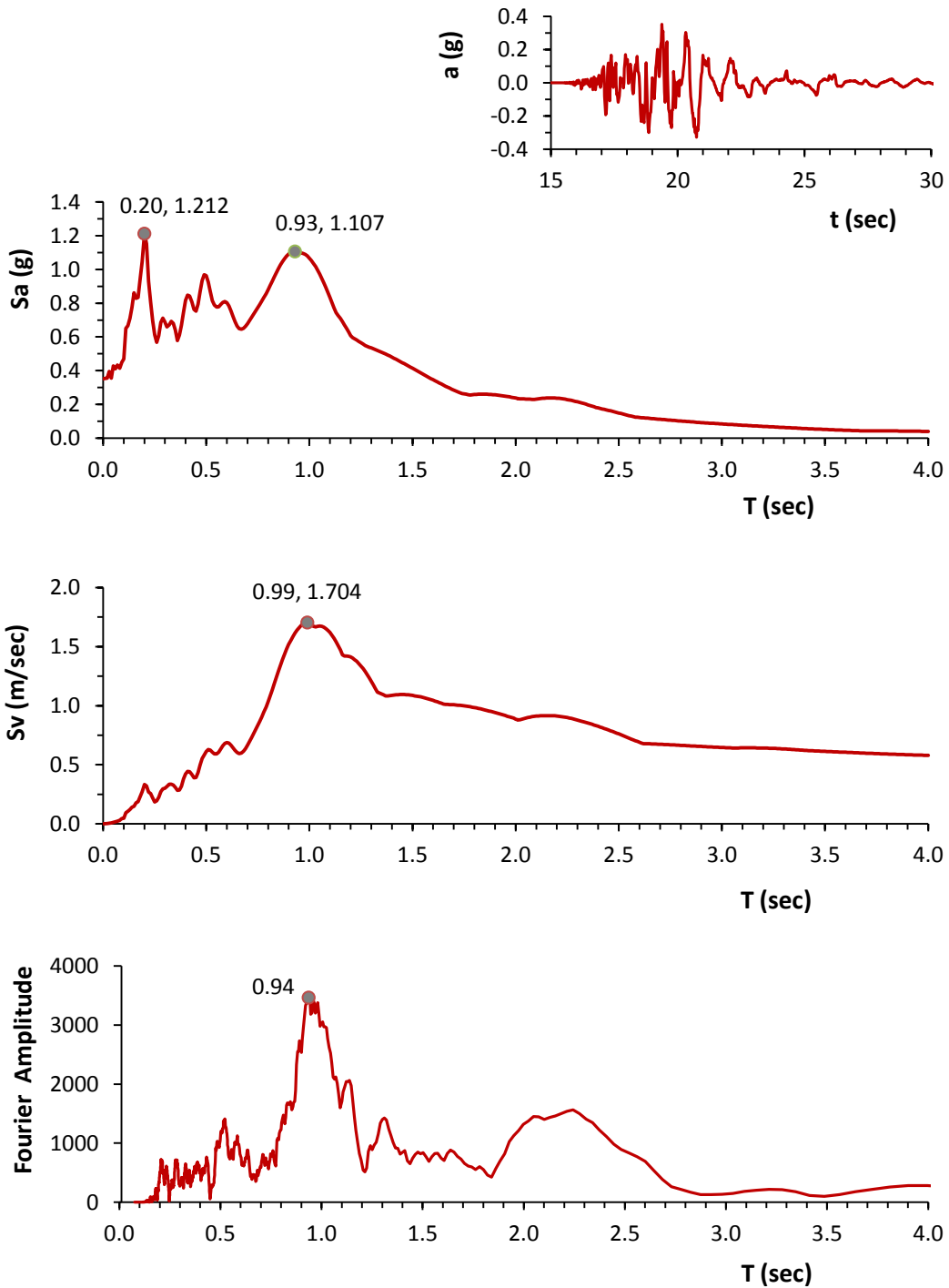
**CMHS - N10E**



**Σχήμα 4.41:** η χρονιοϊστορία επιταχύνσεων, τα ελαστικά φάσματα επιταχύνσεων και ταχύτητων και το φάσμα πλάτους Fourier της συνιστώσα N10E του σταθμού CMHS, για το σεισμικό γεγονός της 22<sup>ης</sup> Φεβρουαρίου του 2011.

**Christchurch**  
**22 Φεβρουαρίου 2011**  
 **$M_1 = 6.3$**

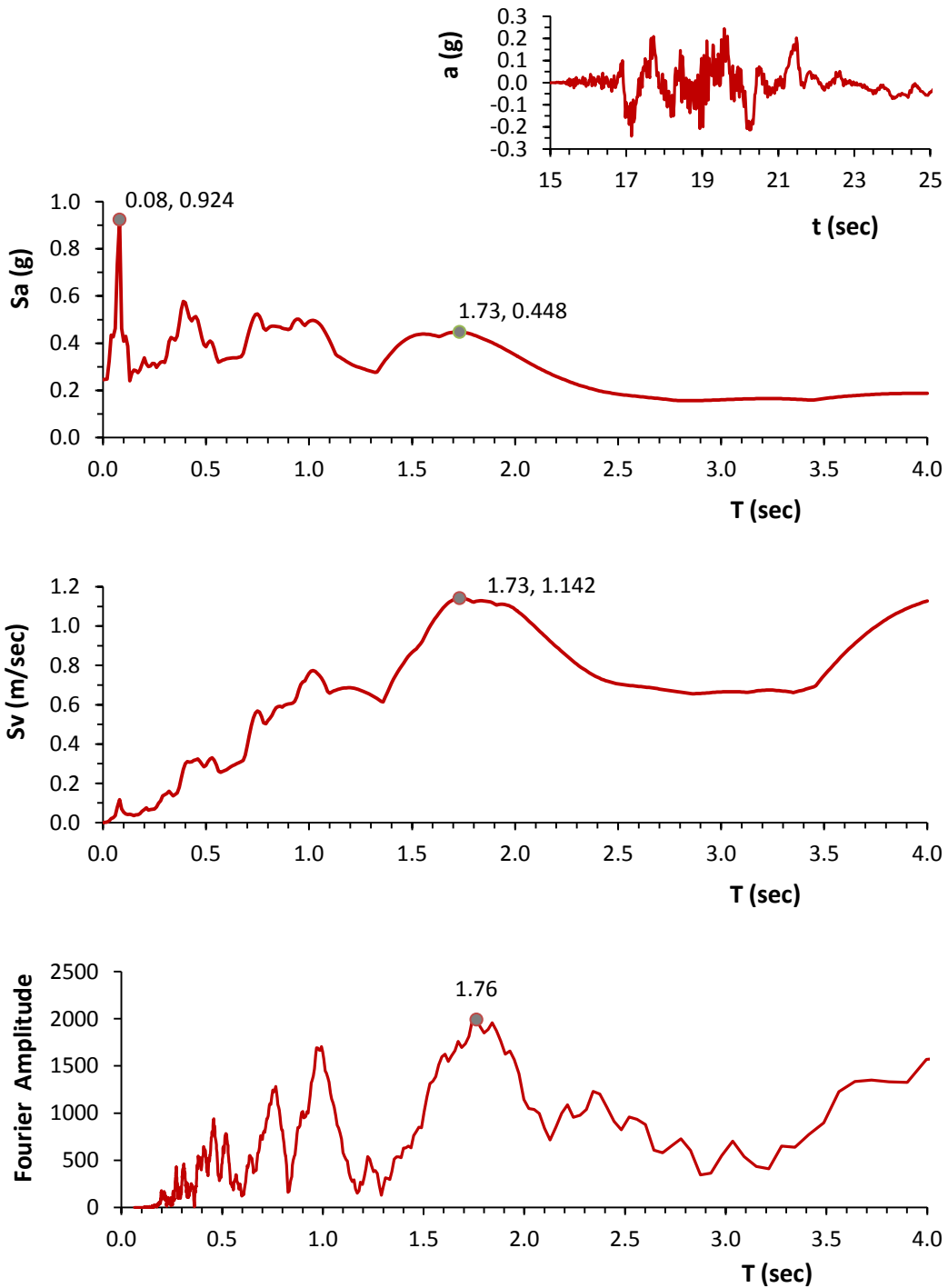
**CMHS - S80E**



**Σχήμα 4.42:** η χρονιοϊστορία επιταχύνσεων, τα ελαστικά φάσματα επιταχύνσεων και ταχύτητων και το φάσμα πλάτους Fourier της συνιστώσα S80E του σταθμού CMHS, για το σεισμικό γεγονός της 22<sup>ης</sup> Φεβρουαρίου του 2011.

*Christchurch*  
**22 Φεβρουαρίου 2011**  
 **$M_1 = 6.3$**

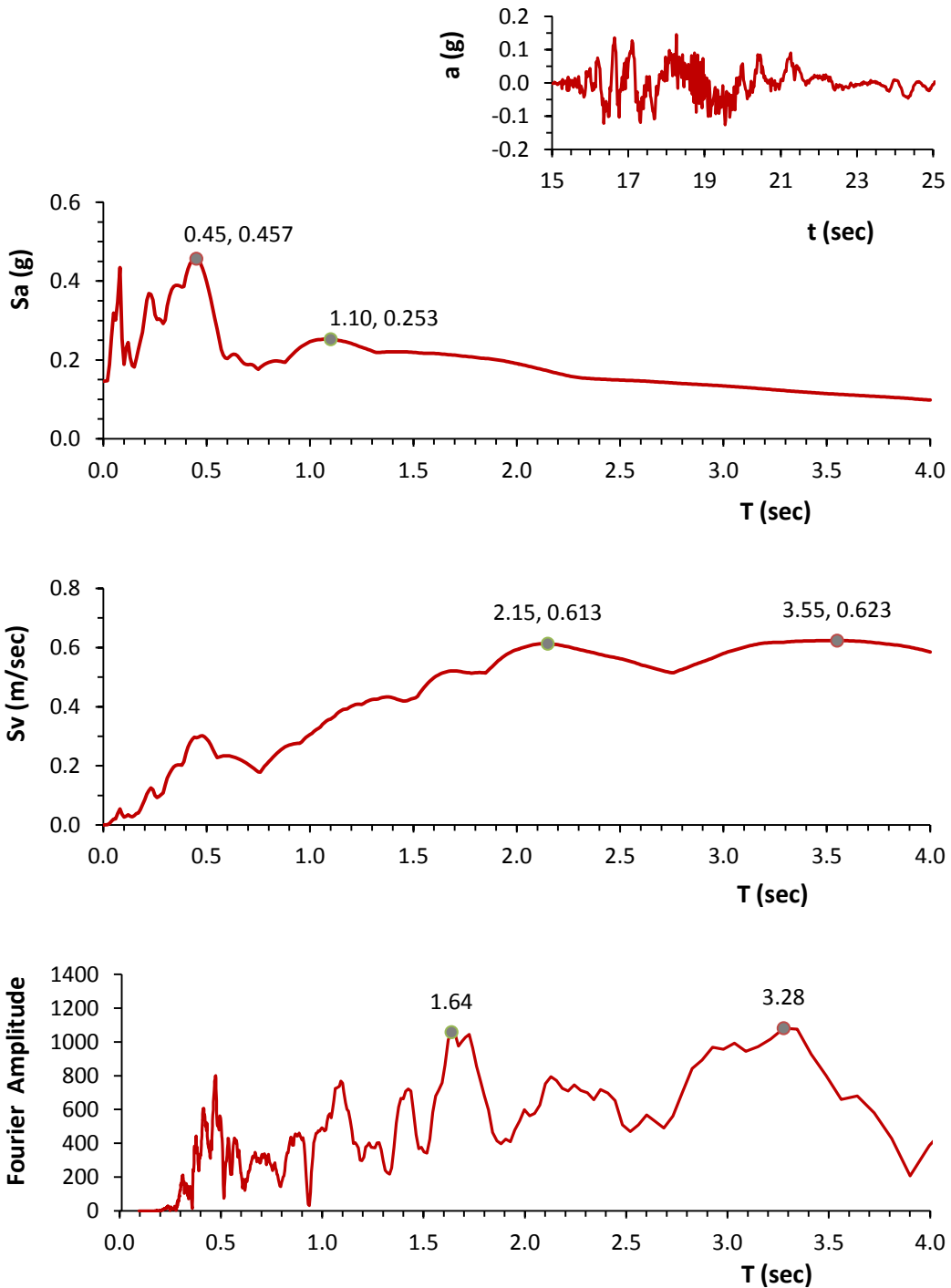
*HPSC - S86W*



**Σχήμα 4.43:** η χρονιοϊστορία επιταχύνσεων, τα ελαστικά φάσματα επιταχύνσεων και ταχύτητων και το φάσμα πλάτους Fourier της συνιστώσα S86W του σταθμού HPSC, για το σεισμικό γεγονός της 22<sup>ης</sup> Φεβρουαρίου του 2011.

*Christchurch*  
**22 Φεβρουαρίου 2011**  
 **$M_1 = 6.3$**

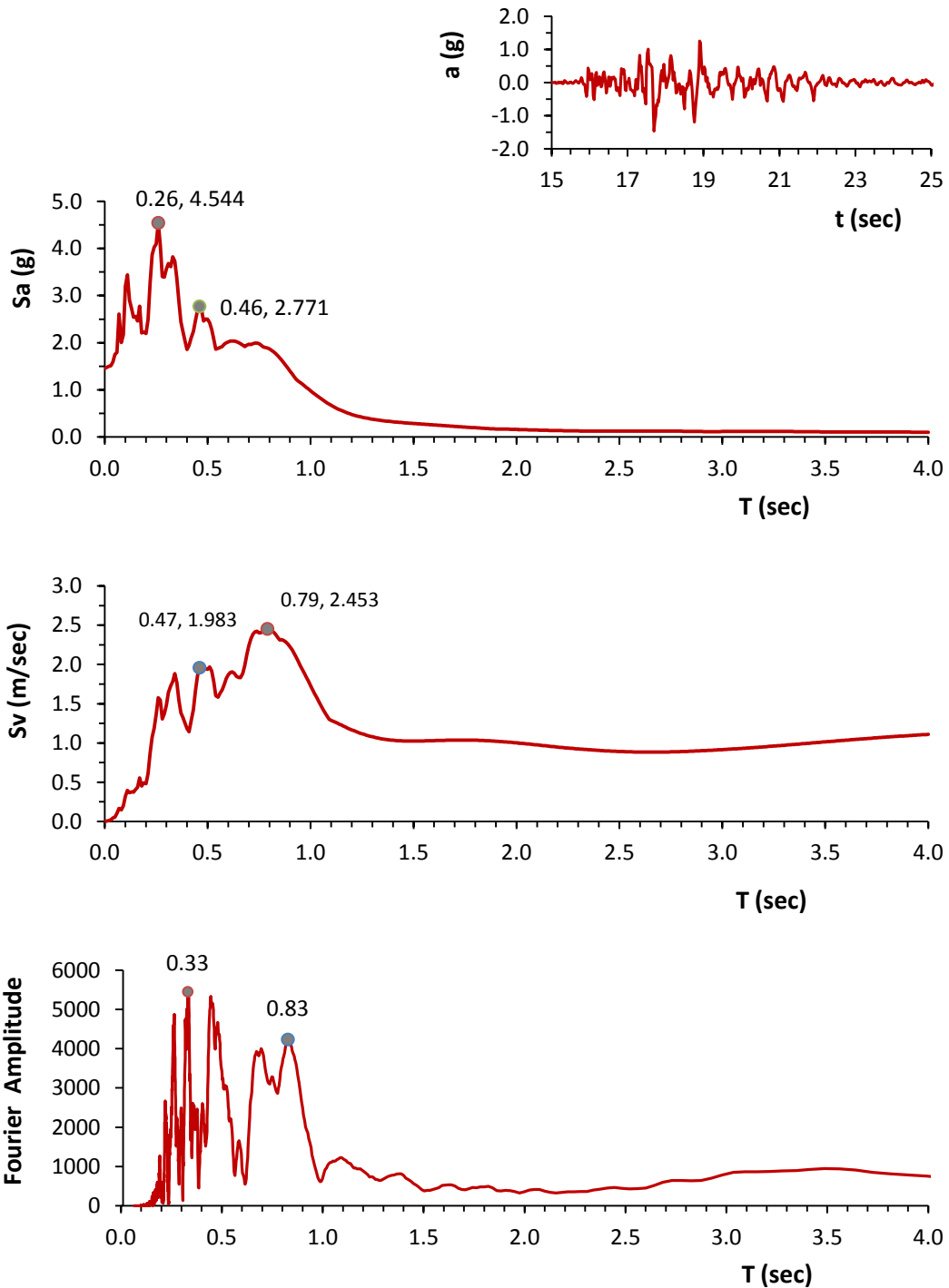
*HPSC - N04W*



**Σχήμα 4.44:** η χρονιοστορία επιταχύνσεων, τα ελαστικά φάσματα επιταχύνσεων και ταχύτητων και το φάσμα πλάτους Fourier της συνιστώσα N04W του σταθμού HPSC, για το σεισμικό γεγονός της 22<sup>ης</sup> Φεβρουαρίου του 2011.

**Christchurch**  
**22 Φεβρουαρίου 2011**  
 **$M_1 = 6.3$**

**HVSC - S26W**

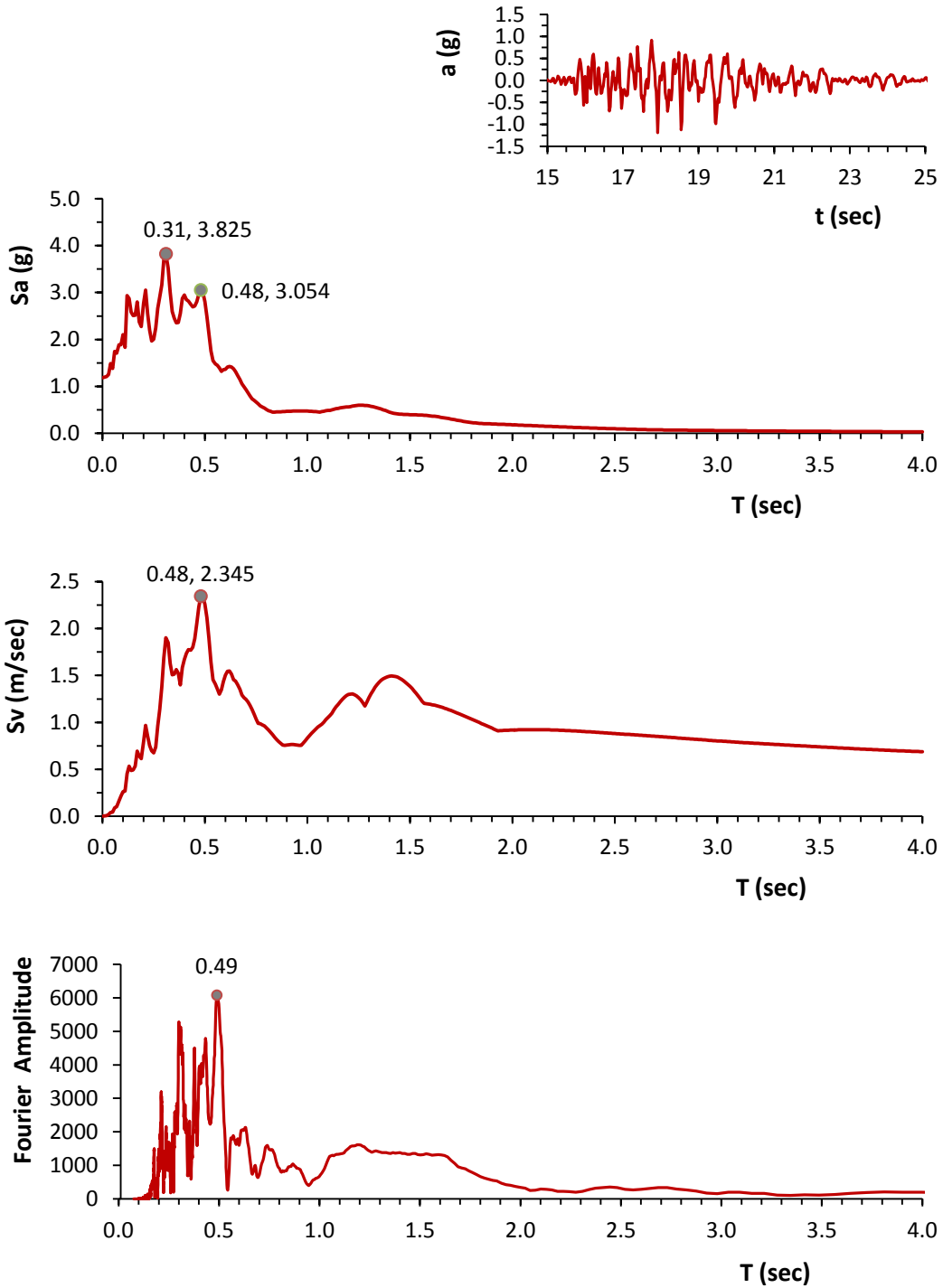


**Σχήμα 4.45:** η χρονιοϊστορία επιταχύνσεων, τα ελαστικά φάσματα επιταχύνσεων και ταχύτητων και το φάσμα πλάτους Fourier της συνιστώσα S26W του σταθμού HVSC, για το σεισμικό γεγονός της 22<sup>ης</sup> Φεβρουαρίου του 2011.



**Christchurch**  
**22 Φεβρουαρίου 2011**  
 **$M_1 = 6.3$**

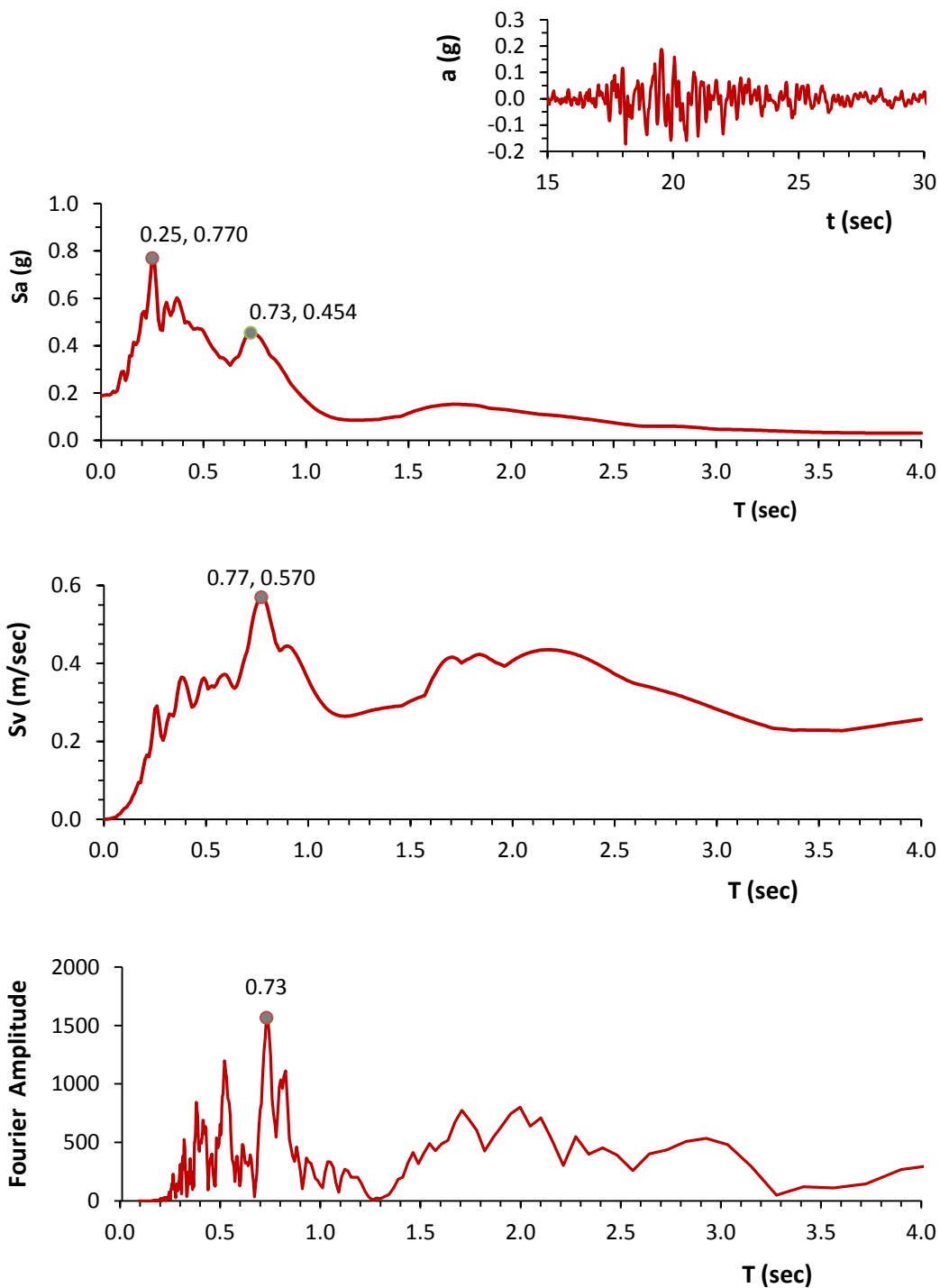
**HVSC - S64E**



**Σχήμα 4.46:** η χρονιοϊστορία επιταχύνσεων, τα ελαστικά φάσματα επιταχύνσεων και ταχύτητων και το φάσμα πλάτους Fourier της συνιστώσα S64E του σταθμού HVSC, για το σεισμικό γεγονός της 22<sup>ης</sup> Φεβρουαρίου του 2011.

**Christchurch**  
**22 Φεβρουαρίου 2011**  
 **$M_1 = 6.3$**

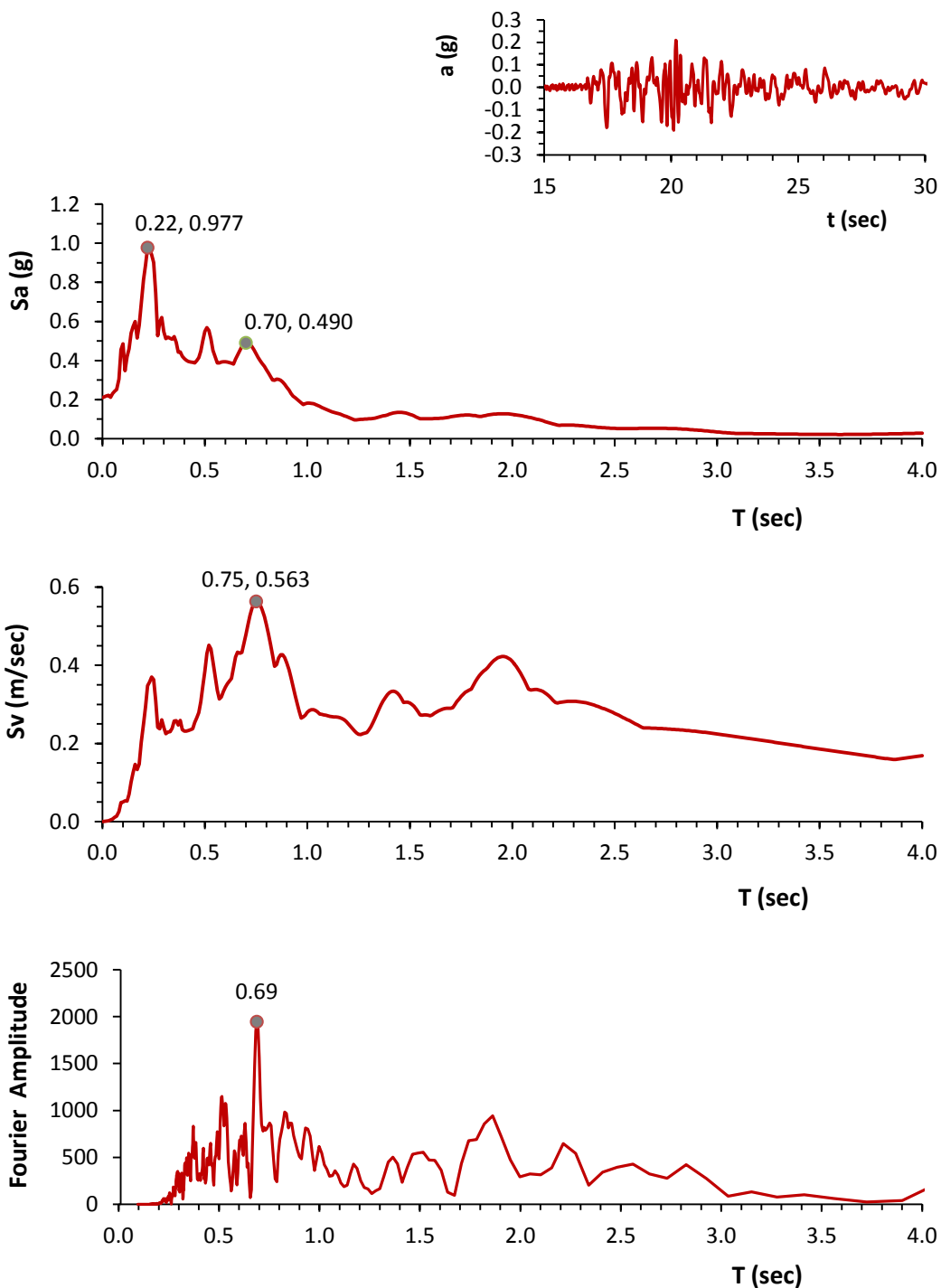
**ΚΡΟC - Ν15Ε**



**Σχήμα 4.47:** η χρονιοϊστορία επιταχύνσεων, τα ελαστικά φάσματα επιταχύνσεων και ταχύτητων και το φάσμα πλάτους Fourier της συνιστώσα N15E του σταθμού ΚΡΟC, για το σεισμικό γεγονός της 22<sup>ης</sup> Φεβρουαρίου του 2011.

**Christchurch**  
**22 Φεβρουαρίου 2011**  
 **$M_1 = 6.3$**

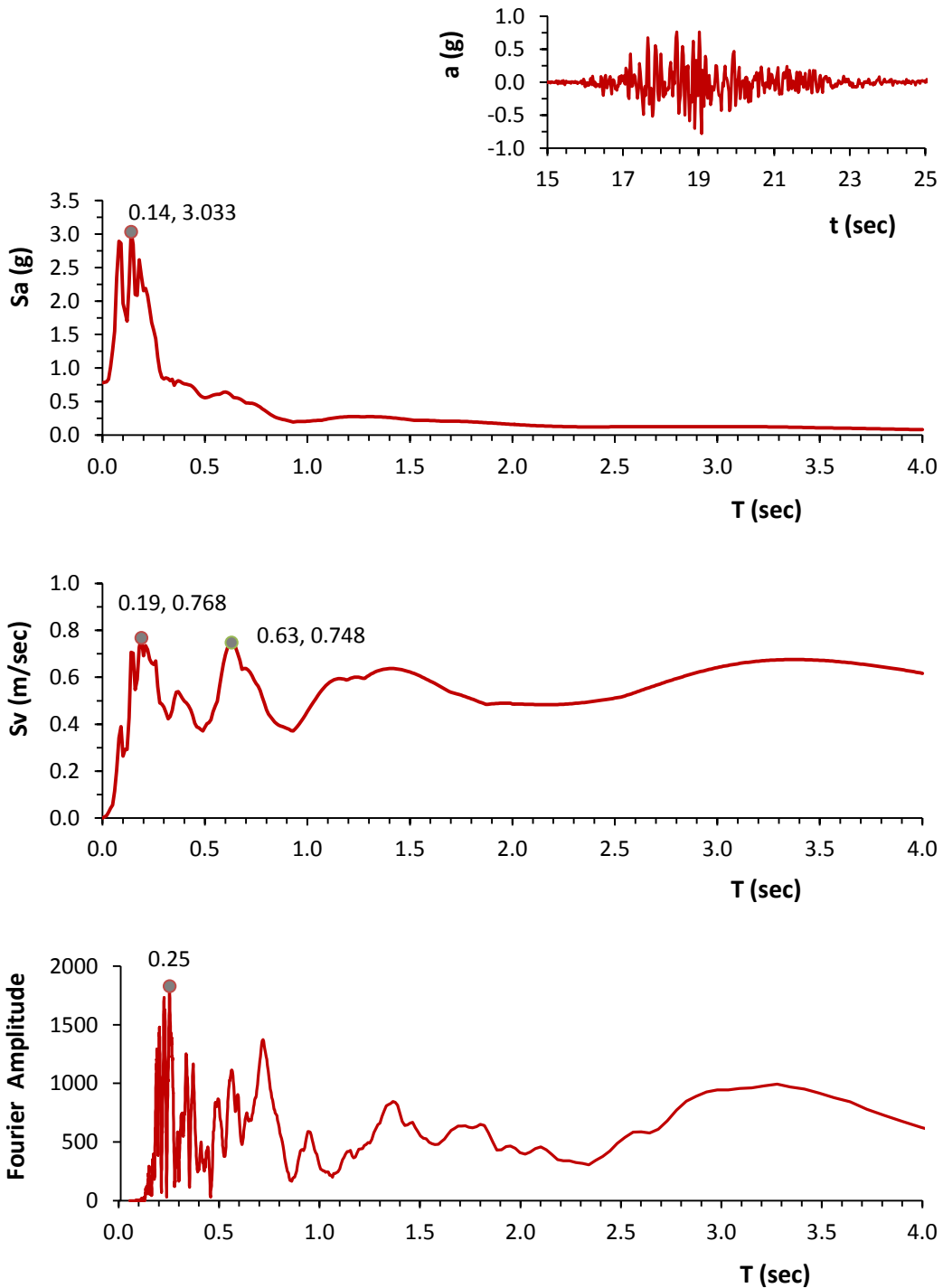
**ΚΡΟC - S75E**



**Σχήμα 4.48:** η χρονιοϊστορία επιταχύνσεων, τα ελαστικά φάσματα επιταχύνσεων και ταχύτητων και το φάσμα πλάτους Fourier της συνιστώσα N15E του σταθμού ΚΡΟC, για το σεισμικό γεγονός της 22<sup>ης</sup> Φεβρουαρίου του 2011.

*Christchurch*  
**22 Φεβρουαρίου 2011**  
 **$M_1 = 6.3$**

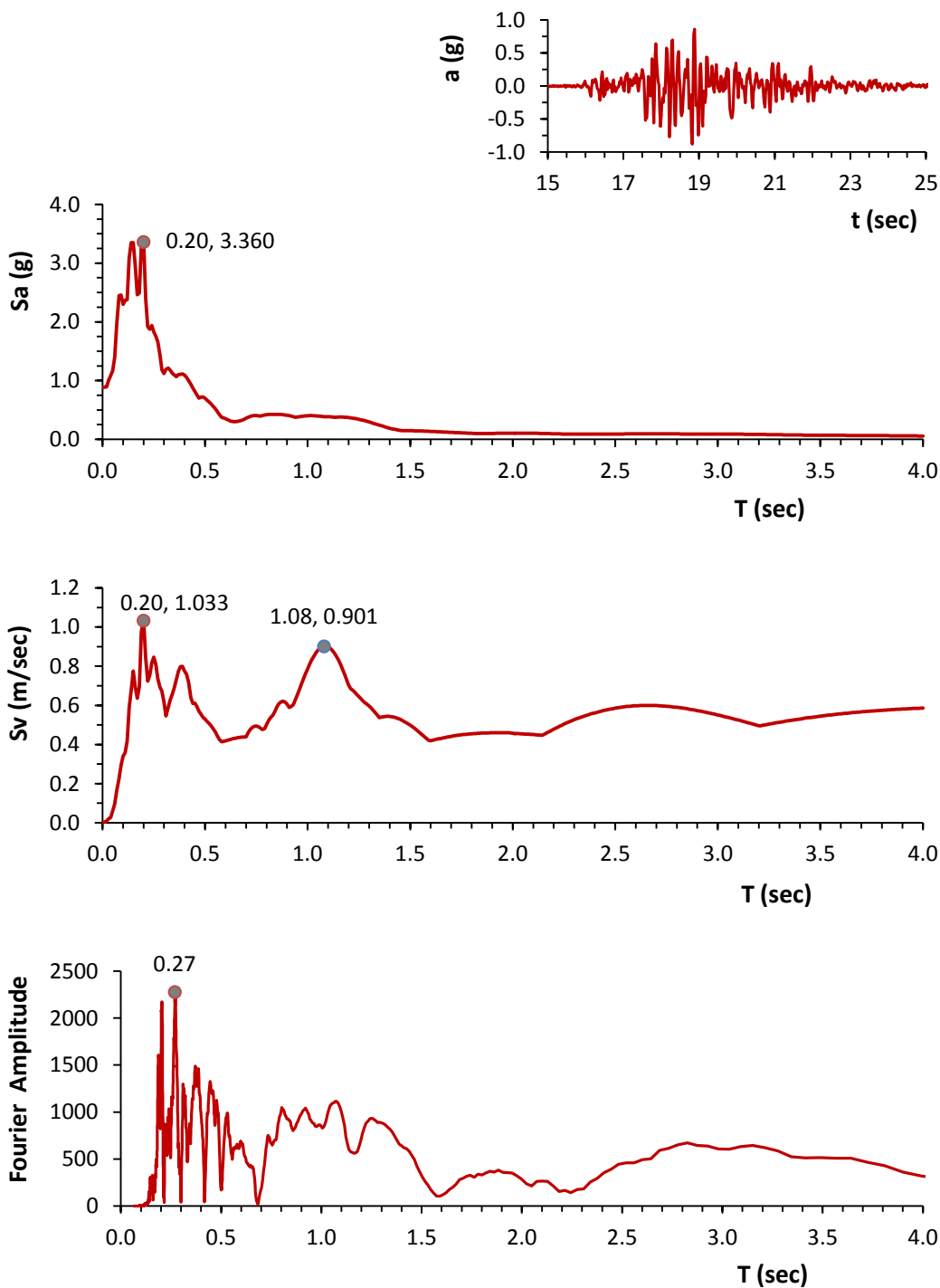
*LPCC - N10W*



**Σχήμα 4.49:** η χρονιοϊστορία επιταχύνσεων, τα ελαστικά φάσματα επιταχύνσεων και ταχυτήτων και το φάσμα πλάτους Fourier της συνιστώσα N10W του σταθμού LPCC, για το σεισμικό γεγονός της 22<sup>ης</sup> Φεβρουαρίου του 2011.

**Christchurch**  
**22 Φεβρουαρίου 2011**  
 **$M_1 = 6.3$**

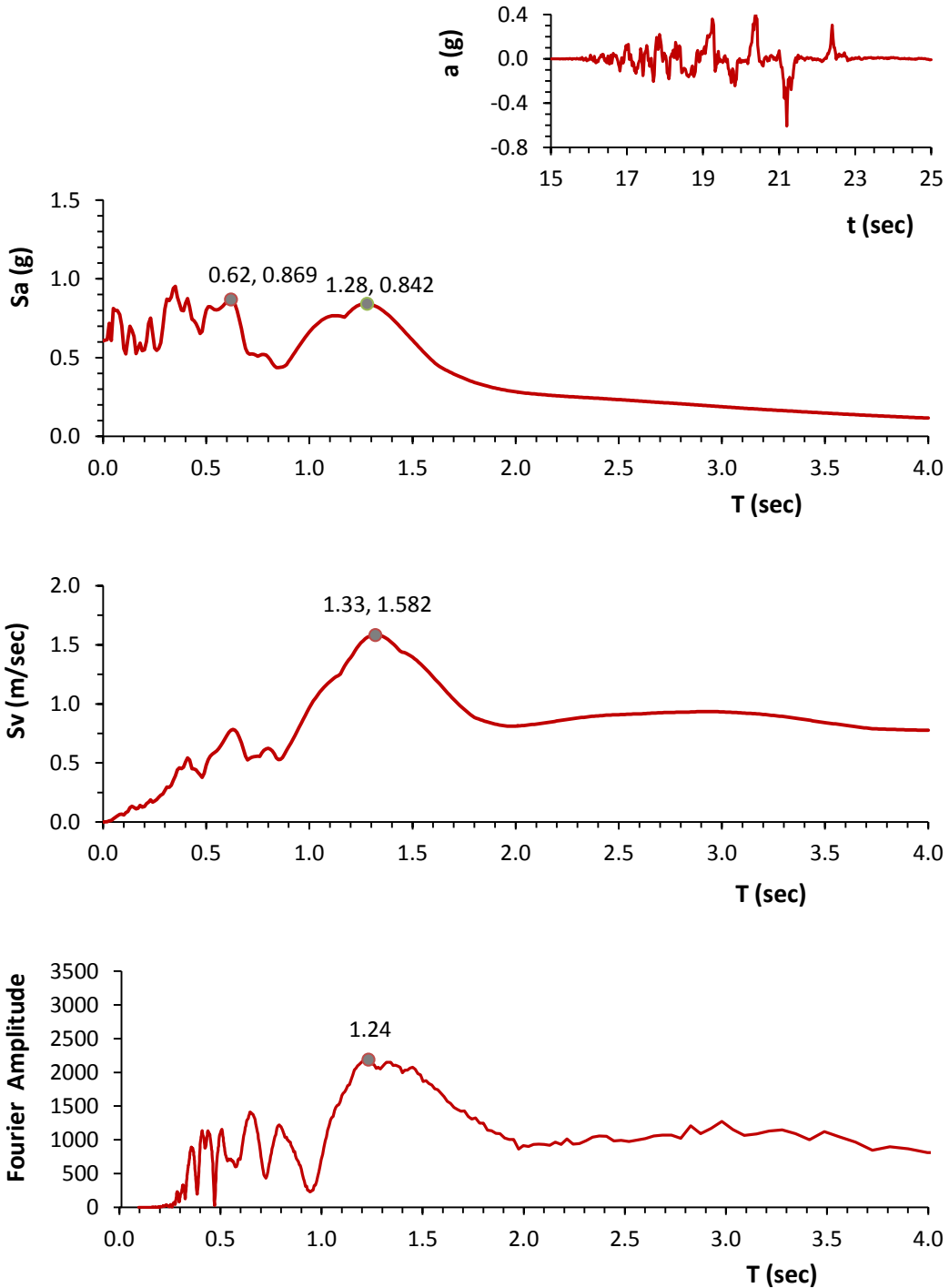
**LPCC - S80W**



**Σχήμα 4.50:** η χρονιοϊστορία επιταχύνσεων, τα ελαστικά φάσματα επιταχύνσεων και ταχύτητων και το φάσμα πλάτους Fourier της συνιστώσα S80W του σταθμού LPCC, για το σεισμικό γεγονός της 22<sup>ης</sup> Φεβρουαρίου του 2011.

**Christchurch**  
**22 Φεβρουαρίου 2011**  
 **$M_1 = 6.3$**

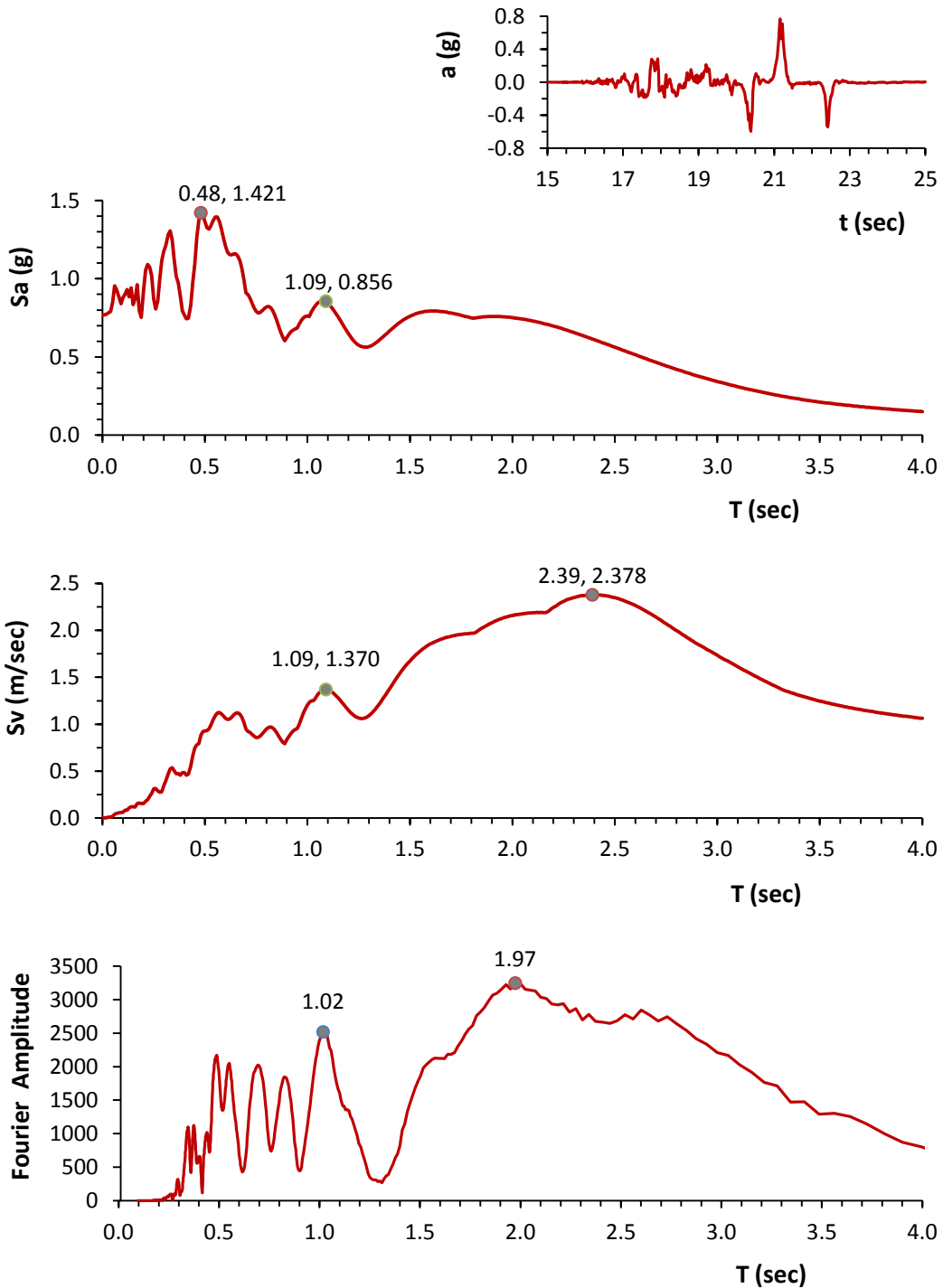
**NNBS - S13E**



**Σχήμα 4.51:** η χρονιοϊστορία επιταχύνσεων, τα ελαστικά φάσματα επιταχύνσεων και ταχύτητων και το φάσμα πλάτους Fourier της συνιστώσα S13E του σταθμού NNBS, για το σεισμικό γεγονός της 22<sup>ης</sup> Φεβρουαρίου του 2011.

**Christchurch**  
**22 Φεβρουαρίου 2011**  
 **$M_1 = 6.3$**

**NNBS - S77W**

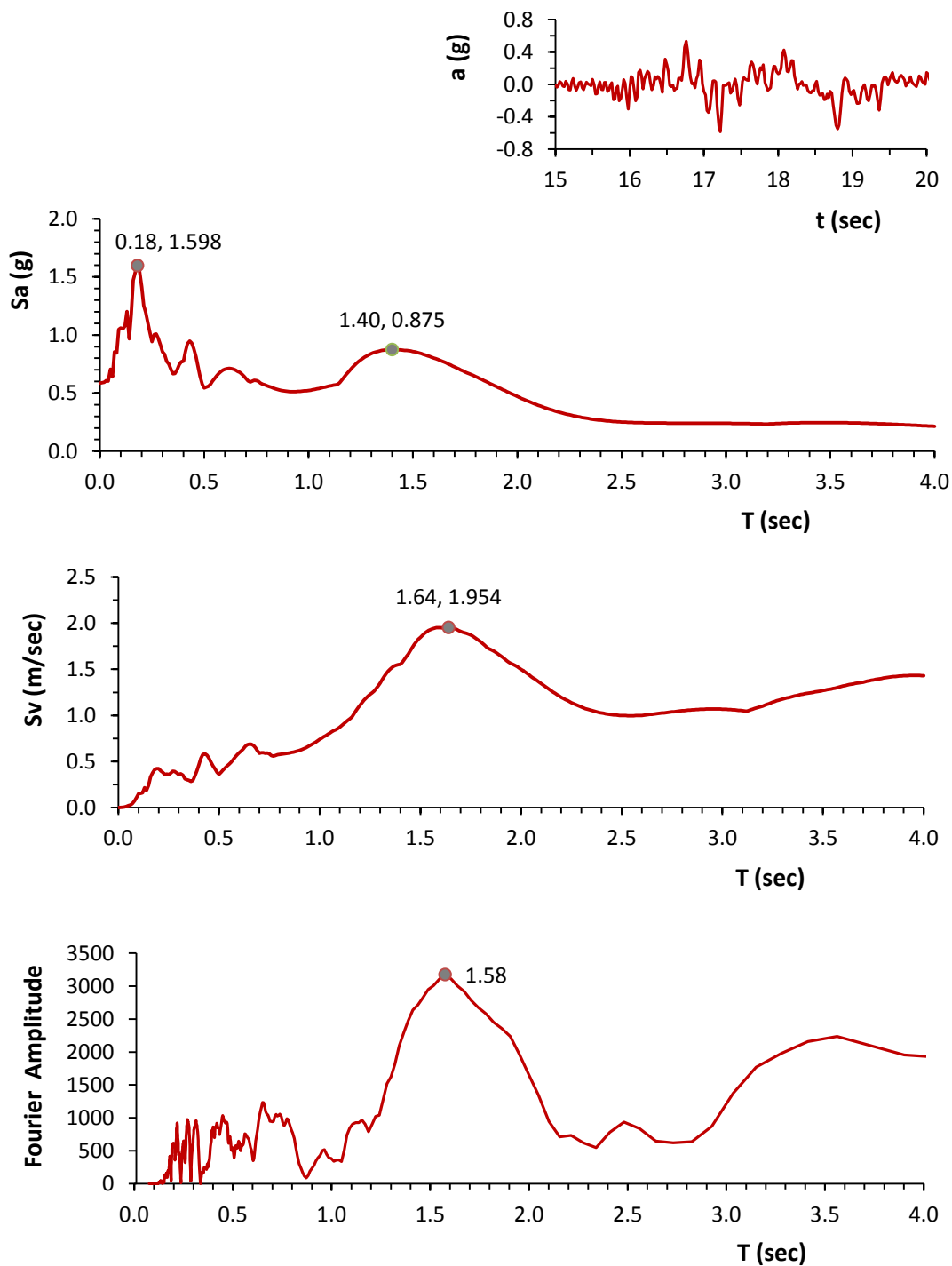


**Σχήμα 4.52:** η χρονιοϊστορία επιταχύνσεων, τα ελαστικά φάσματα επιταχύνσεων και ταχύτητων και το φάσμα πλάτους Fourier της συνιστώσα S77W του σταθμού NNBS, για το σεισμικό γεγονός της 22<sup>ης</sup> Φεβρουαρίου του 2011.



**Christchurch**  
**22 Φεβρουαρίου 2011**  
 **$M_1 = 6.3$**

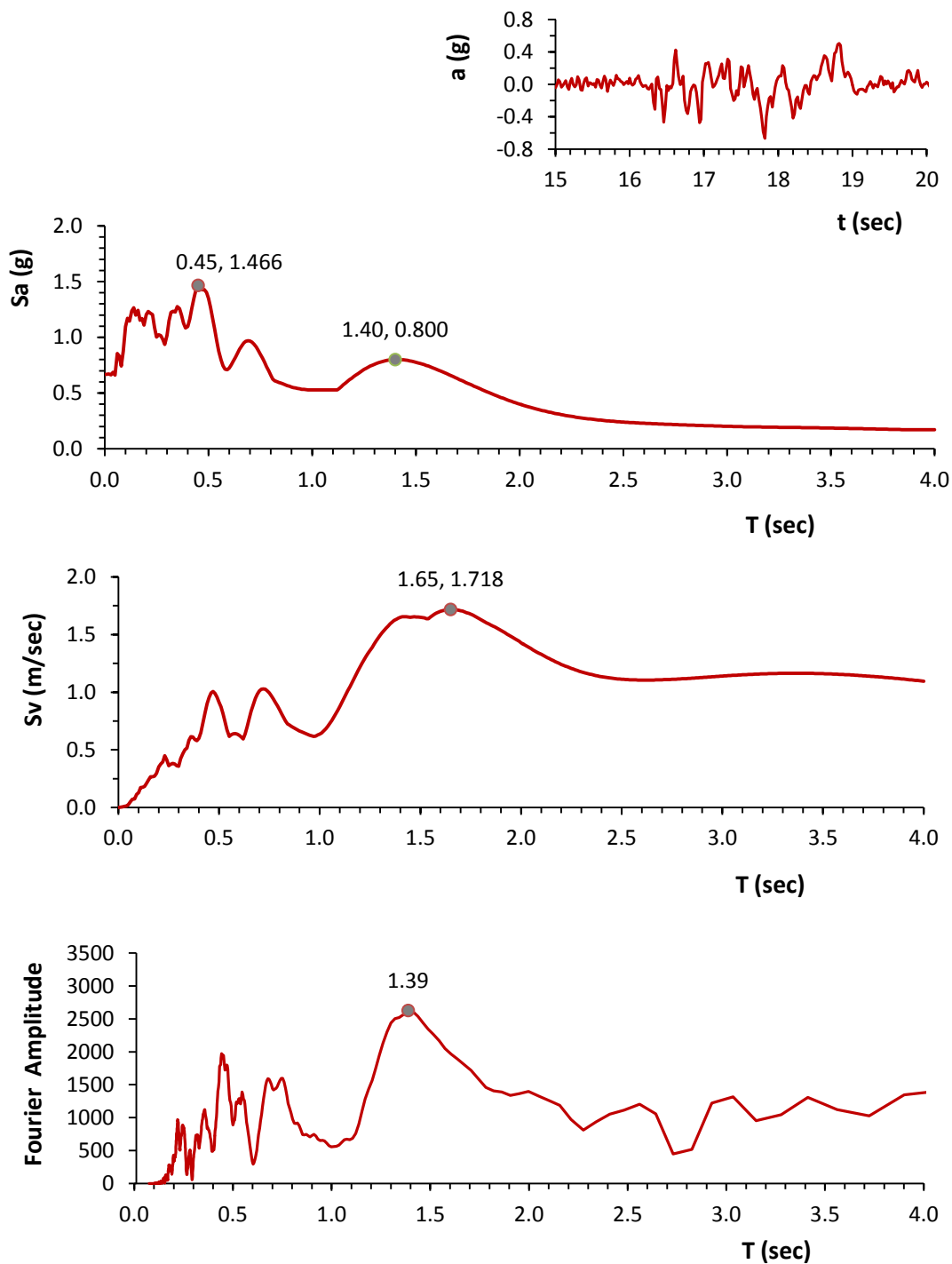
**PRPC - S**



**Σχήμα 4.53:** η χρονιοϊστορία επιταχύνσεων, τα ελαστικά φάσματα επιταχύνσεων και ταχυτήτων και το φάσμα πλάτους Fourier της συνιστώσα S του σταθμού PRPC, για το σεισμικό γεγονός της 22<sup>ης</sup> Φεβρουαρίου του 2011.

**Christchurch**  
**22 Φεβρουαρίου 2011**  
 **$M_1 = 6.3$**

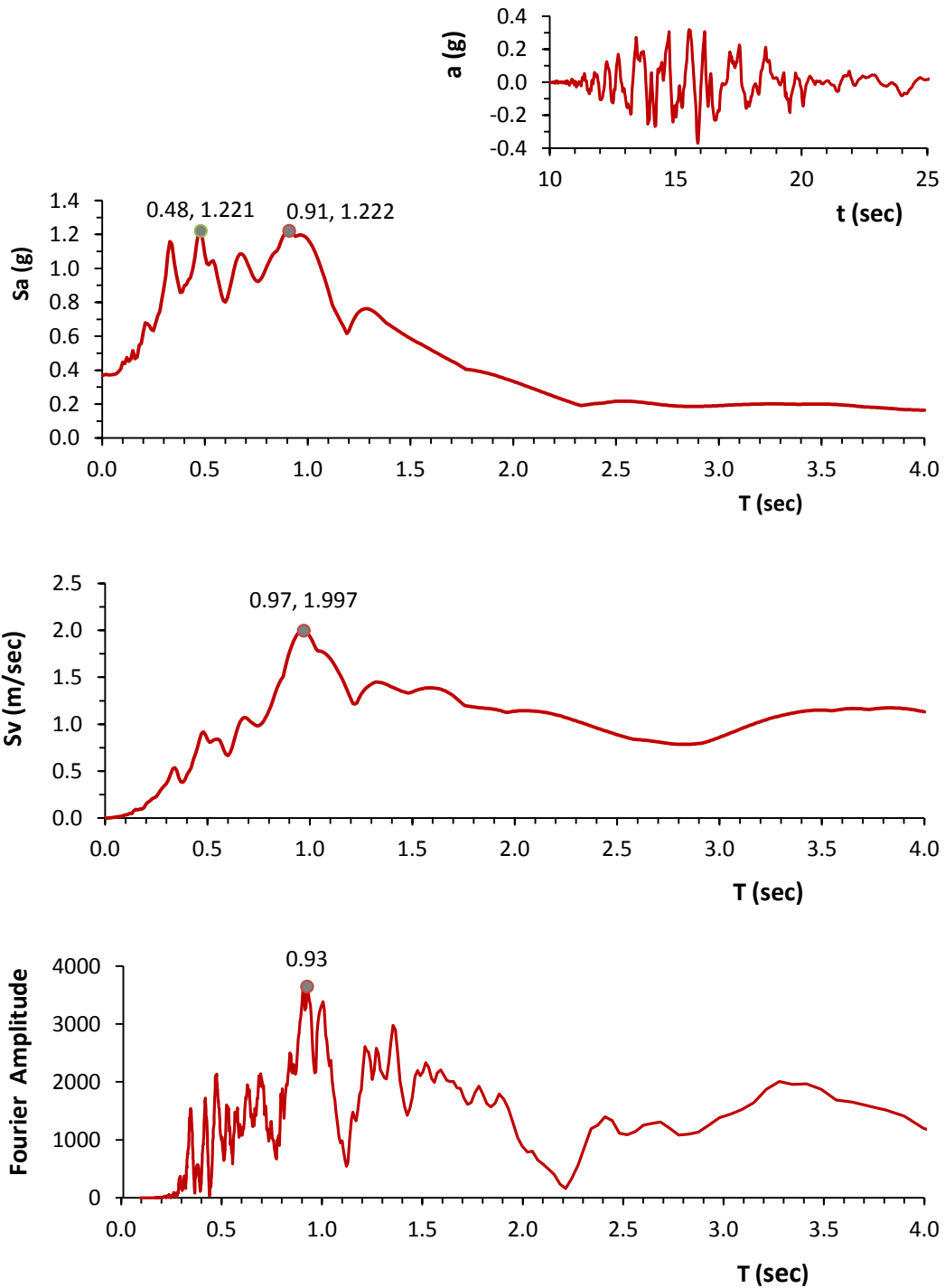
**PRPC - W**



**Σχήμα 4.54:** η χρονιοϊστορία επιταχύνσεων, τα ελαστικά φάσματα επιταχύνσεων και ταχυτήτων και το φάσμα πλάτους Fourier της συνιστώσα W του σταθμού PRPC, για το σεισμικό γεγονός της 22<sup>ης</sup> Φεβρουαρίου του 2011.

*Christchurch*  
**22 Φεβρουαρίου 2011**  
 **$M_1 = 6.3$**

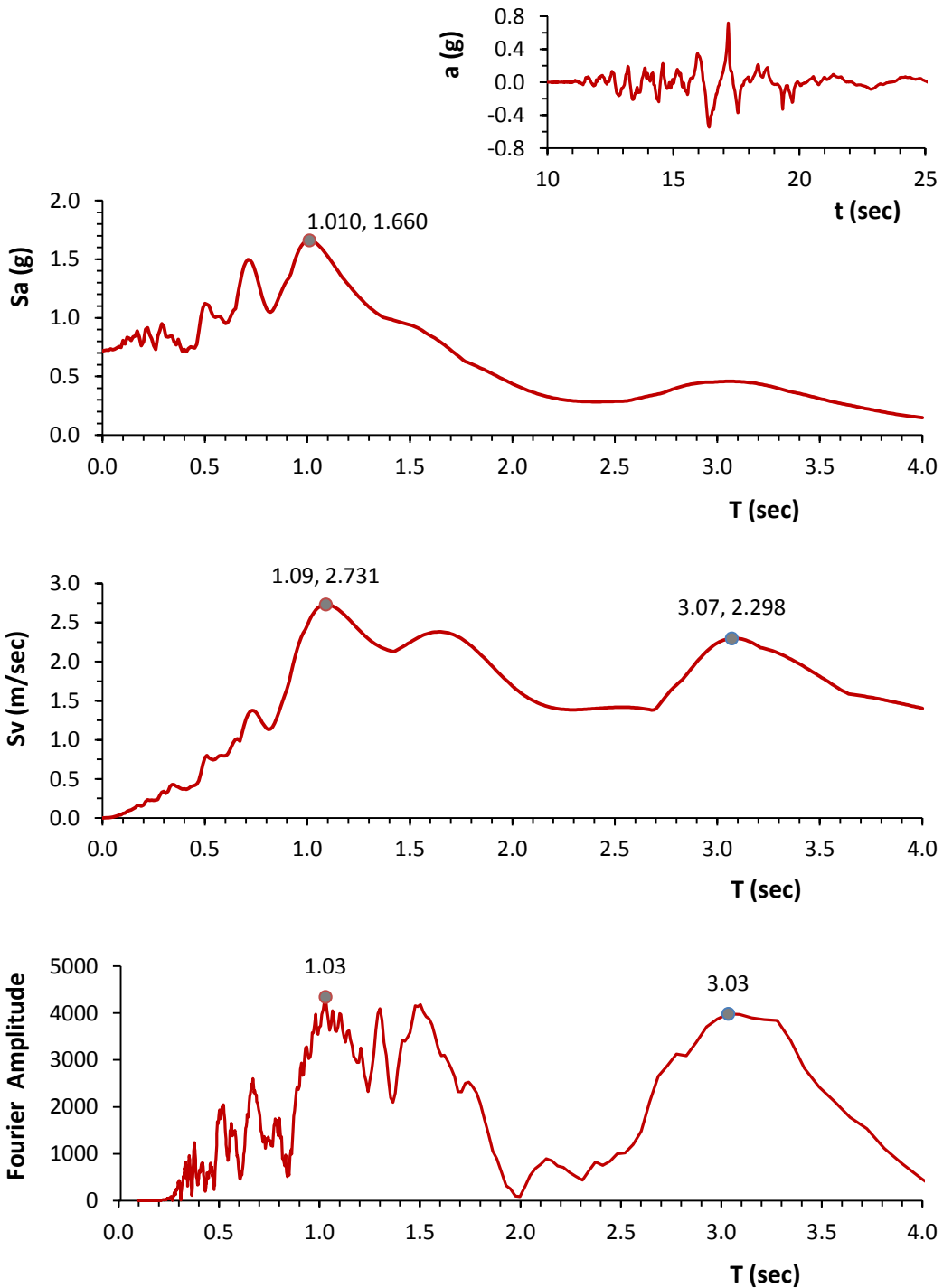
*REHS - N02E*



**Σχήμα 4.55:** η χρονιοϊστορία επιταχύνσεων, τα ελαστικά φάσματα επιταχύνσεων και ταχύτητων και το φάσμα πλάτους Fourier της συνιστώσα N02E του σταθμού REHS, για το σεισμικό γεγονός της 22<sup>ης</sup> Φεβρουαρίου του 2011.

**Christchurch**  
**22 Φεβρουαρίου 2011**  
 **$M_1 = 6.3$**

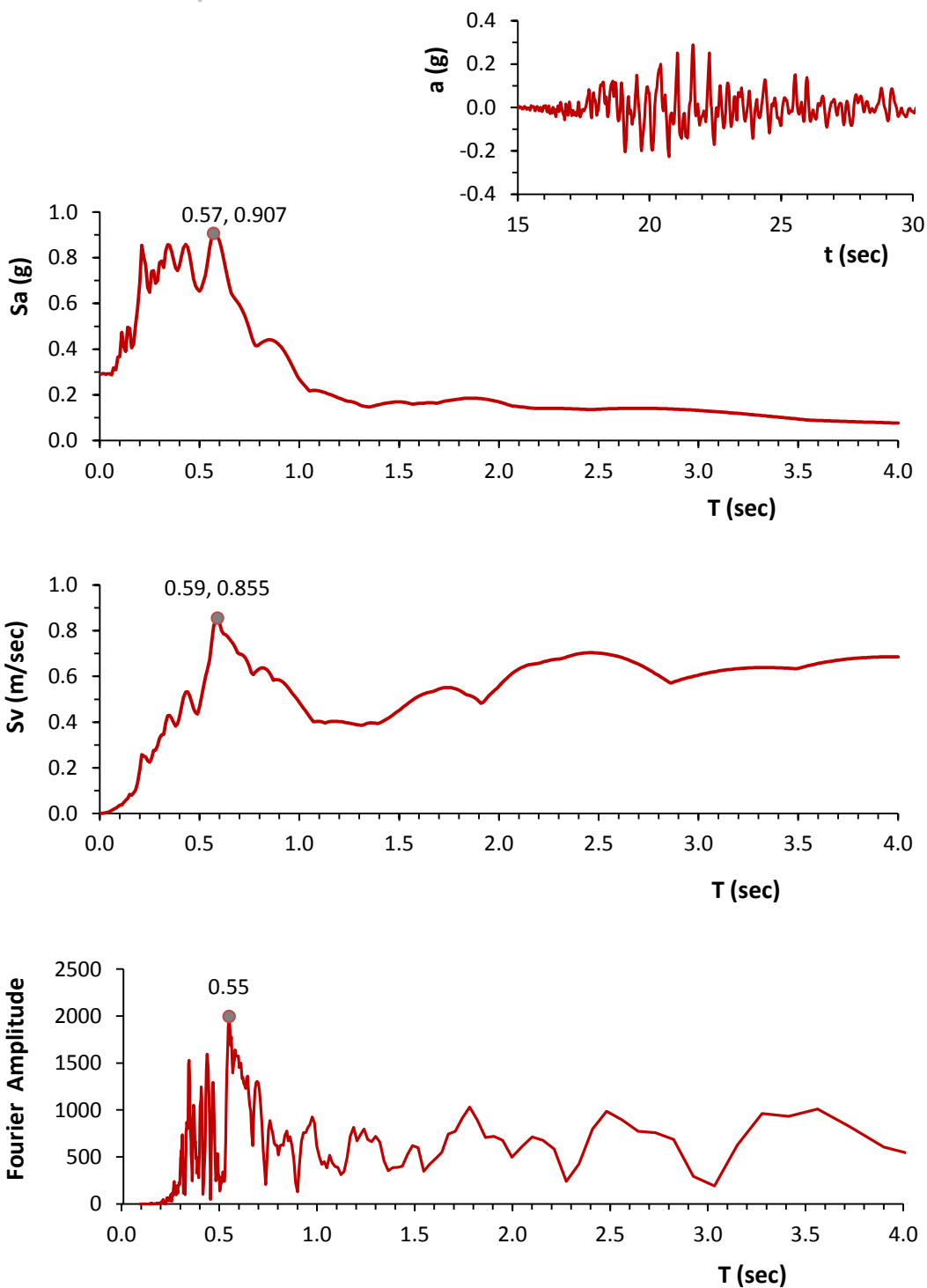
**REHS - S88E**



**Σχήμα 4.56:** η χρονοϊστορία επιταχύνσεων, τα ελαστικά φάσματα επιταχύνσεων και ταχύτητων και το φάσμα πλάτους Fourier της συνιστώσα S88E του σταθμού REHS, για το σεισμικό γεγονός της 22<sup>ης</sup> Φεβρουαρίου του 2011.

**Christchurch**  
**22 Φεβρουαρίου 2011**  
 **$M_1 = 6.3$**

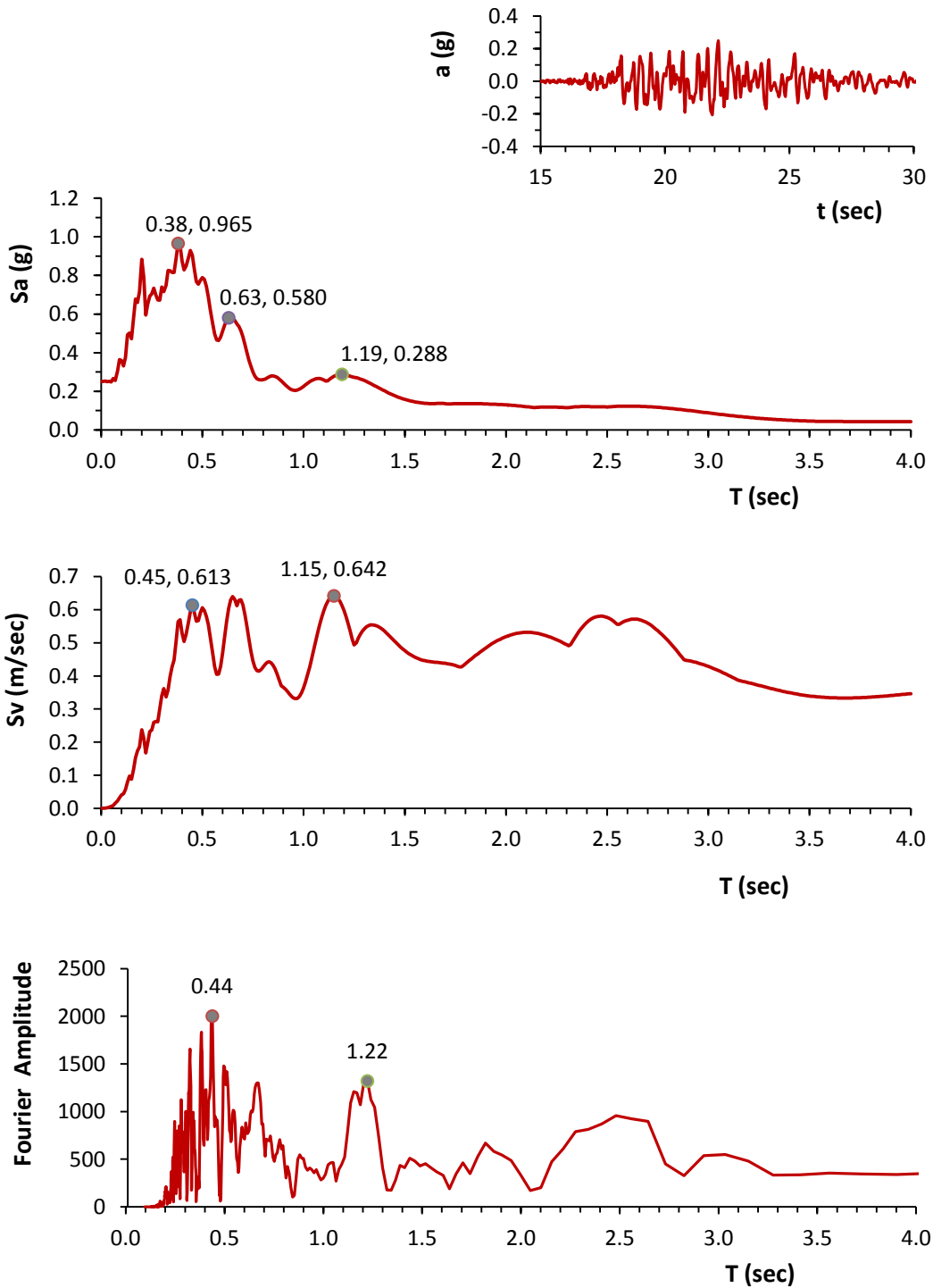
**RHSC - N86W**



**Σχήμα 4.57:** η χρονιοϊστορία επιταχύνσεων, τα ελαστικά φάσματα επιταχύνσεων και ταχυτήτων και το φάσμα πλάτους Fourier της συνιστώσα N86W του σταθμού RHSC, για το σεισμικό γεγονός της 22<sup>ης</sup> Φεβρουαρίου του 2011.

*Christchurch*  
**22 Φεβρουαρίου 2011**  
 **$M_1 = 6.3$**

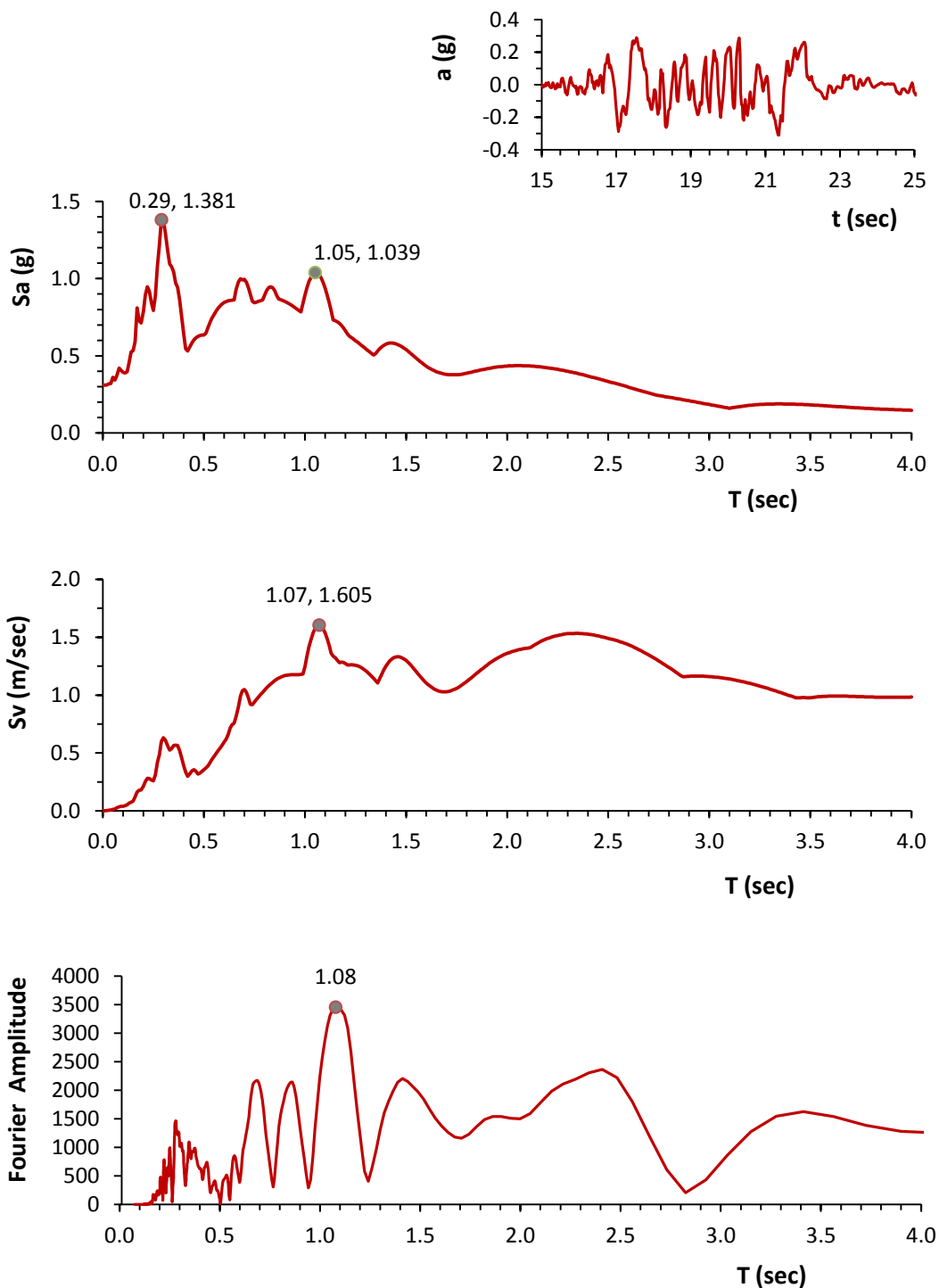
*RHSC - S04W*



**Σχήμα 4.58:** η χρονιοϊστορία επιταχύνσεων, τα ελαστικά φάσματα επιταχύνσεων και ταχύτητων και το φάσμα πλάτους Fourier της συνιστώσα S04W του σταθμού RHSC, για το σεισμικό γεγονός της 22<sup>ης</sup> Φεβρουαρίου του 2011.

*Christchurch*  
**22 Φεβρουαρίου 2011**  
 **$M_1 = 6.3$**

*SHLC - S40W*

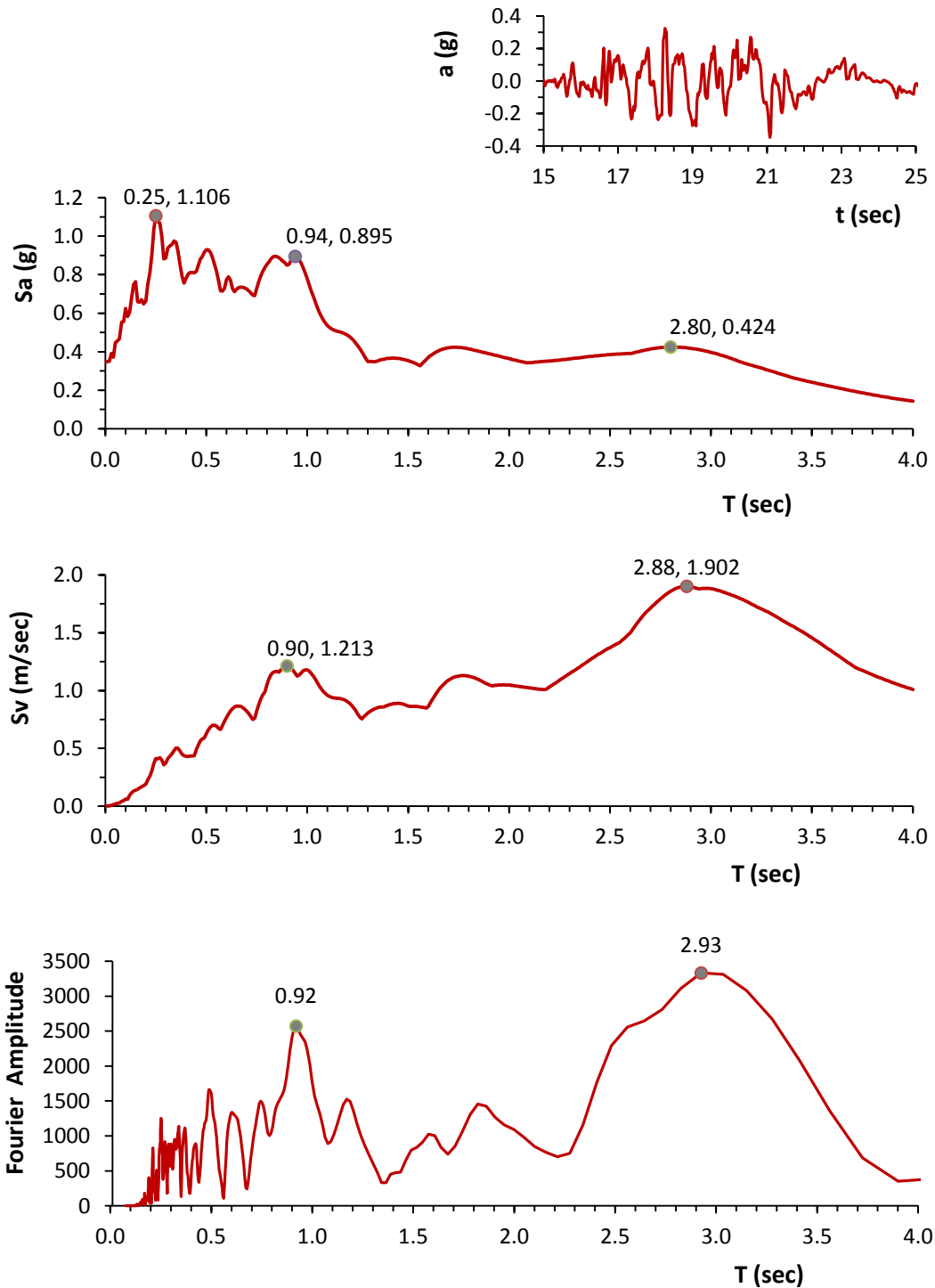


**Σχήμα 4.59:** η χρονιοϊστορία επιταχύνσεων, τα ελαστικά φάσματα επιταχύνσεων και ταχυτήτων και το φάσμα πλάτους Fourier της συνιστώσα S40W του σταθμού SHLC, για το σεισμικό γεγονός της 22<sup>ης</sup> Φεβρουαρίου του 2011.



**Christchurch**  
**22 Φεβρουαρίου 2011**  
 **$M_1 = 6.3$**

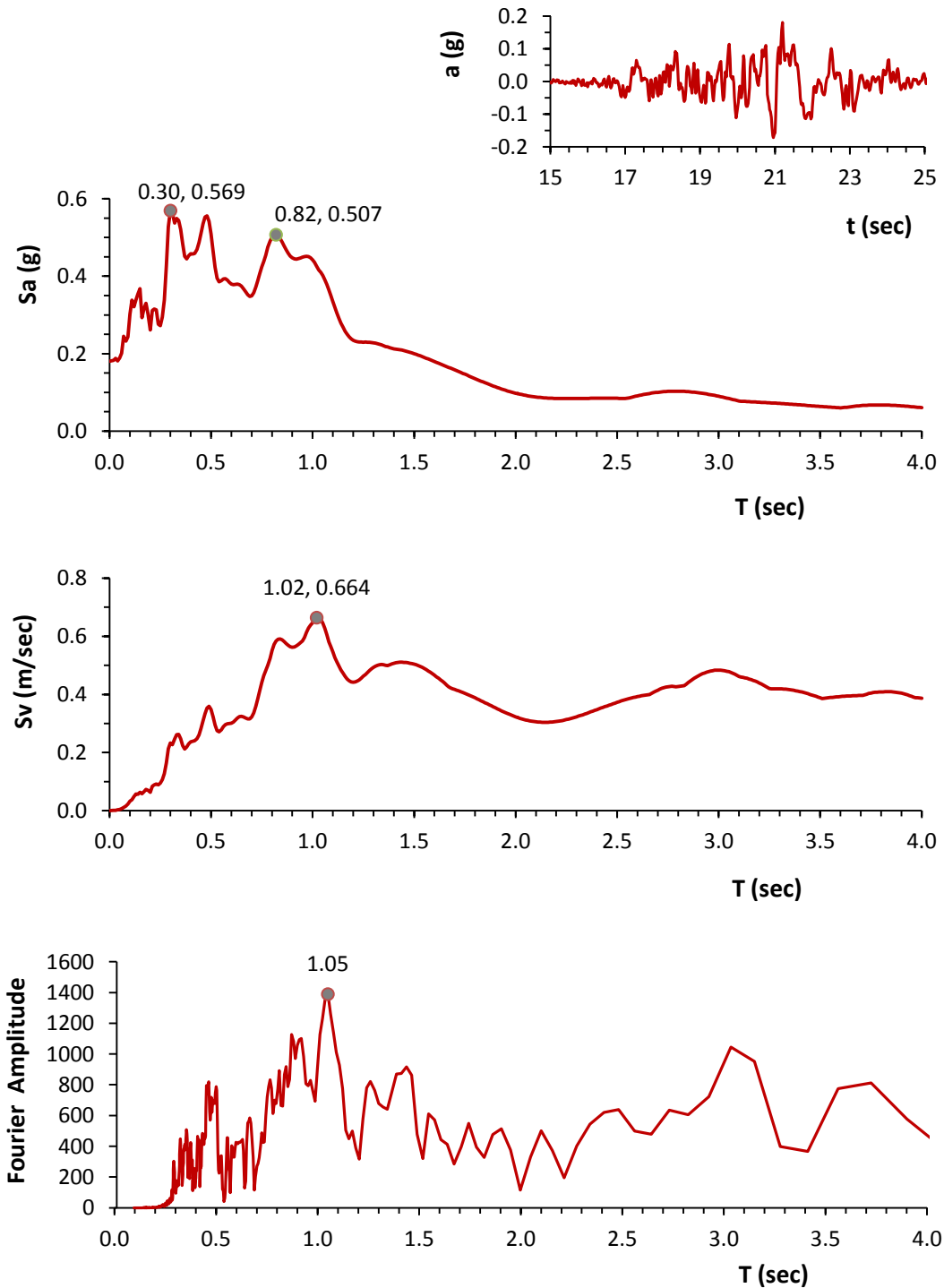
**SHLC - S50E**



**Σχήμα 4.60:** η χρονιοϊστορία επιταχύνσεων, τα ελαστικά φάσματα επιταχύνσεων και ταχύτητων και το φάσμα πλάτους Fourier της συνιστώσα S50E του σταθμού SHLC, για το σεισμικό γεγονός της 22<sup>ης</sup> Φεβρουαρίου του 2011.

**Christchurch**  
**22 Φεβρουαρίου 2011**  
 **$M_1 = 6.3$**

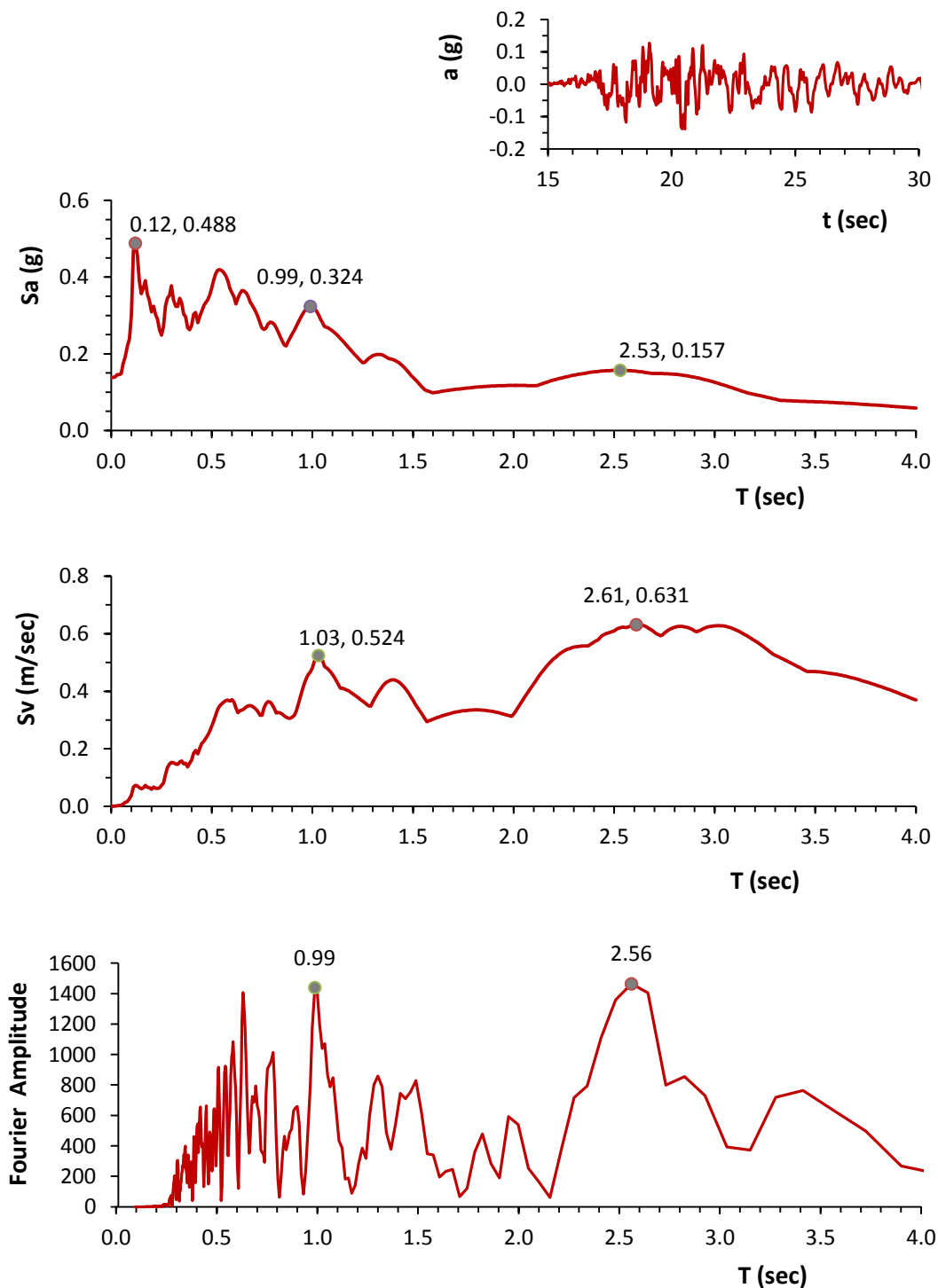
**SMTC - N88W**



**Σχήμα 4.61:** η χρονιοϊστορία επιταχύνσεων, τα ελαστικά φάσματα επιταχύνσεων και ταχυτήτων και το φάσμα πλάτους Fourier της συνιστώσα N88W του σταθμού SMTC, για το σεισμικό γεγονός της 22<sup>ης</sup> Φεβρουαρίου του 2011.

**Christchurch**  
**22 Φεβρουαρίου 2011**  
 **$M_1 = 6.3$**

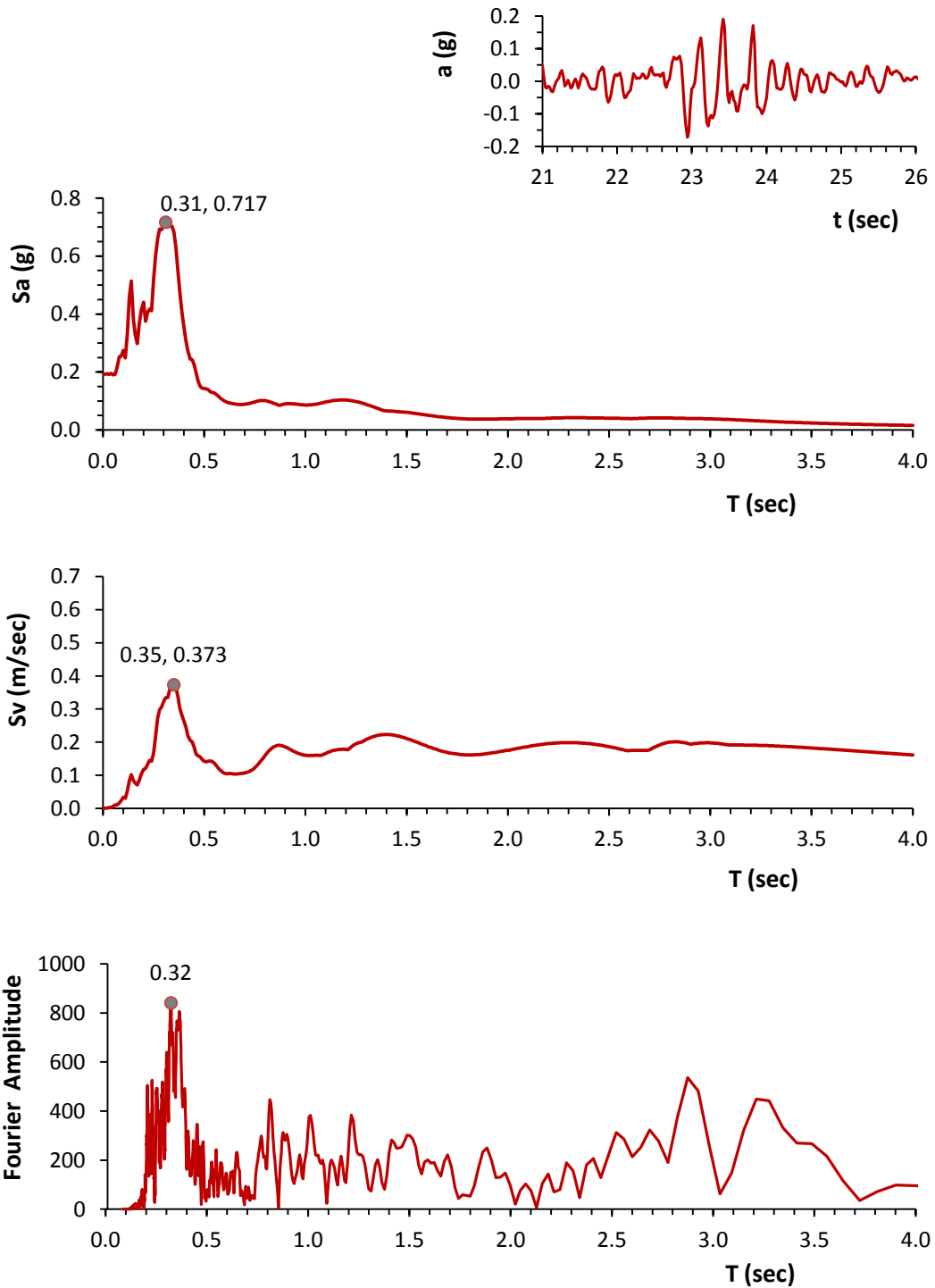
**SMTC - S02W**



**Σχήμα 4.62:** η χρονιοϊστορία επιταχύνσεων, τα ελαστικά φάσματα επιταχύνσεων και ταχύτητων και το φάσμα πλάτους Fourier της συνιστώσα S02W του σταθμού SMTC, για το σεισμικό γεγονός της 22<sup>ης</sup> Φεβρουαρίου του 2011.

**Christchurch**  
**22 Φεβρουαρίου 2011**  
 **$M_1 = 6.3$**

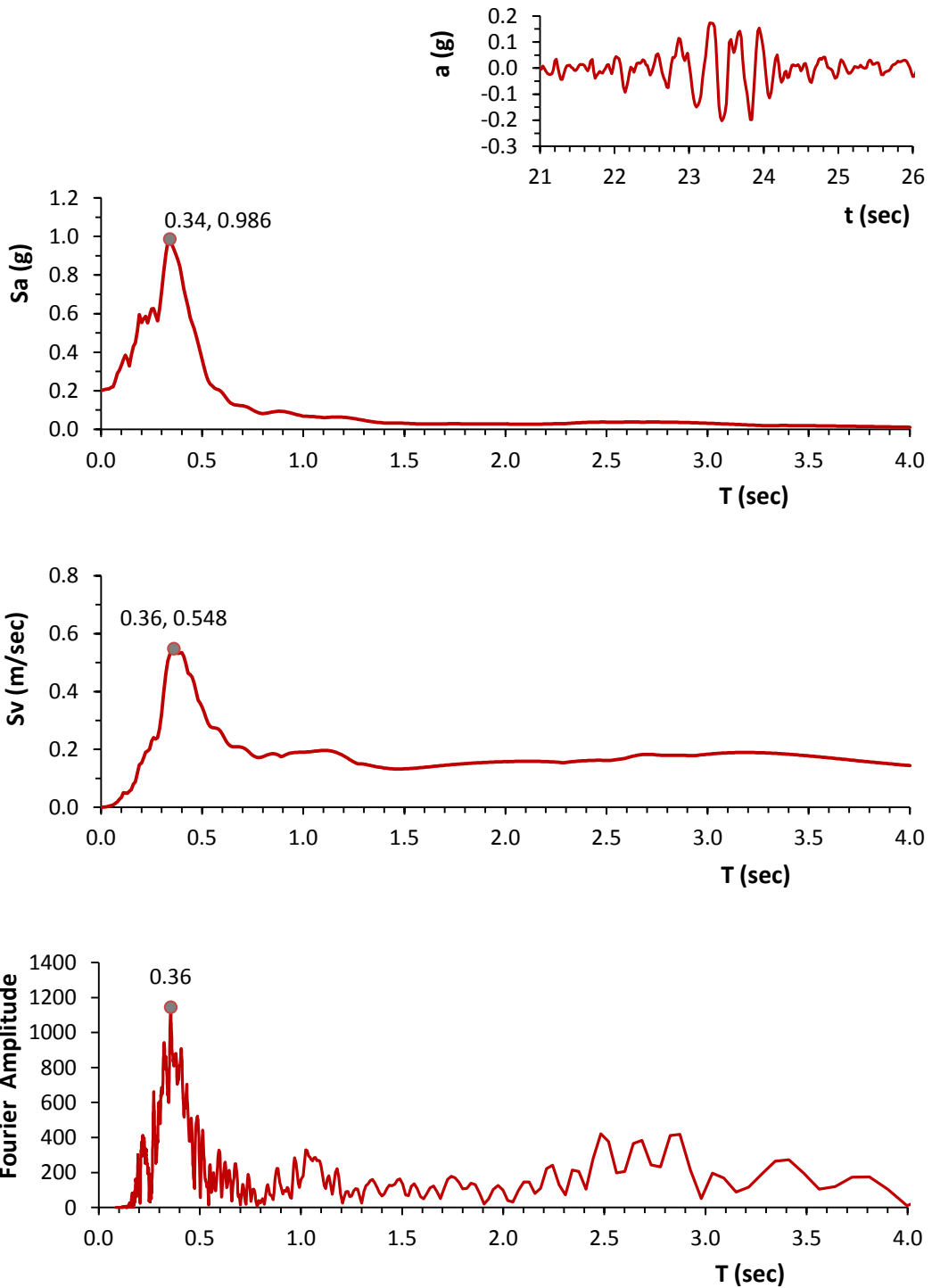
**SWNC - N24E**



**Σχήμα 4.63:** η χρονιοίστορία επιταχύνσεων, τα ελαστικά φάσματα επιταχύνσεων και ταχύτητων και το φάσμα πλάτους Fourier της συνιστώσα N24E του σταθμού SWNC, για το σεισμικό γεγονός της 22<sup>ης</sup> Φεβρουαρίου του 2011.

*Christchurch*  
**22 Φεβρουαρίου 2011**  
 **$M_1 = 6.3$**

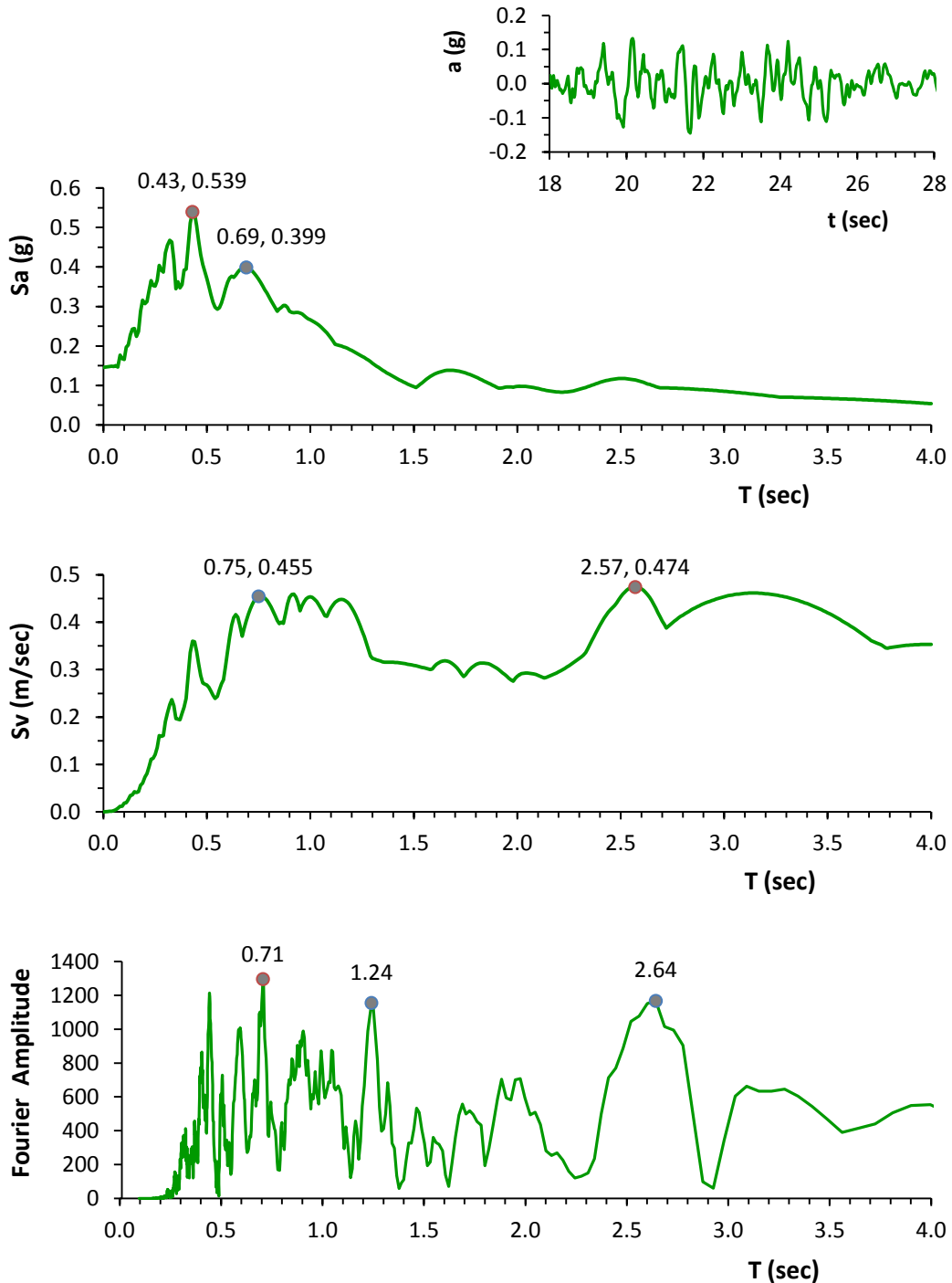
*SWNC - N66W*



**Σχήμα 4.64:** η χρονιοϊστορία επιταχύνσεων, τα ελαστικά φάσματα επιταχύνσεων και ταχυτήτων και το φάσμα πλάτους Fourier της συνιστώσα N66W του σταθμού SWNC, για το σεισμικό γεγονός της 22<sup>ης</sup> Φεβρουαρίου του 2011.

*Christchurch*  
**13 Ιουνίου 2011**  
 **$M_w = 6$**

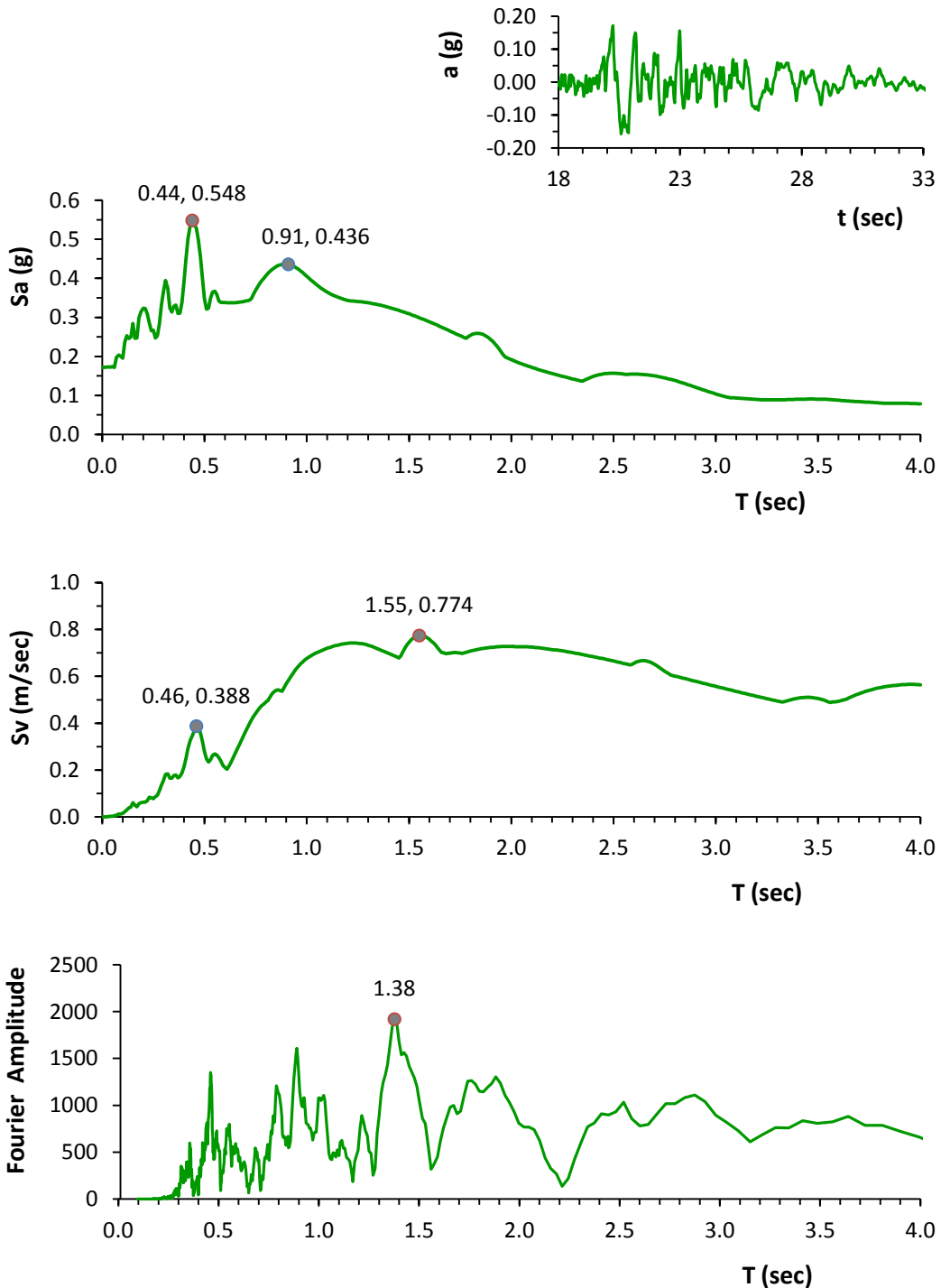
*CBGS - N89W*



**Σχήμα 4.65:** η χρονιοϊστορία επιταχύνσεων, τα ελαστικά φάσματα επιταχύνσεων και ταχυτήτων και το φάσμα πλάτους Fourier της συνιστώσα N89W του σταθμού CBGS, για το σεισμικό γεγονός της 13<sup>ης</sup> Ιουνίου του 2011.

*Christchurch*  
**13 Ιουίου 2011**  
 **$M_w = 6$**

*CBGS - S01W*

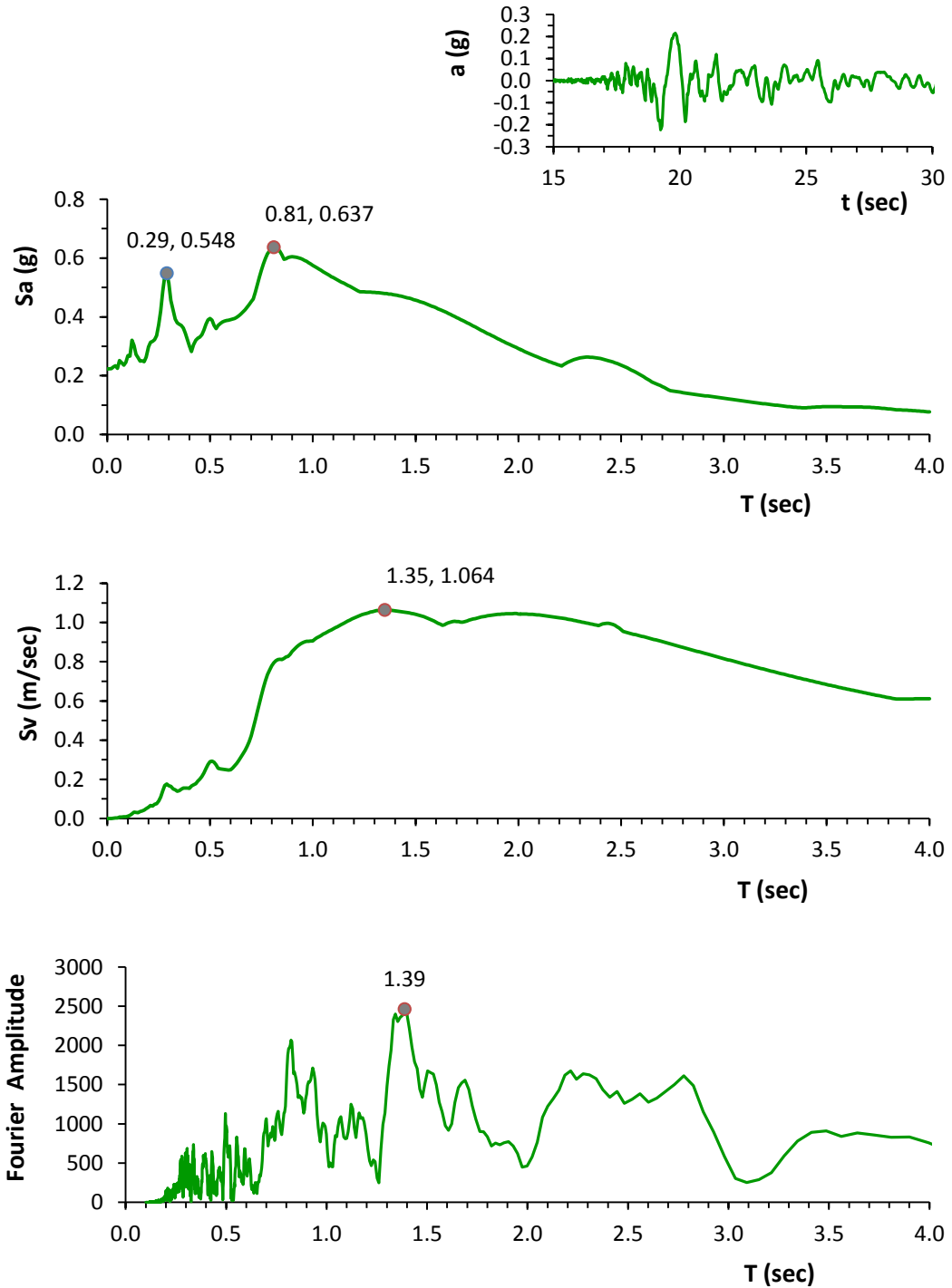


**Σχήμα 4.66:** η χρονιοϊστορία επιταχύνσεων, τα ελαστικά φάσματα επιταχύνσεων και ταχύτητων και το φάσμα πλάτους Fourier της συνιστώσα S01W του σταθμού CBGS, για το σεισμικό γεγονός της 13<sup>ης</sup> Ιουνίου του 2011.



*Christchurch*  
**13 Ιουνίου 2011**  
 **$M_w = 6$**

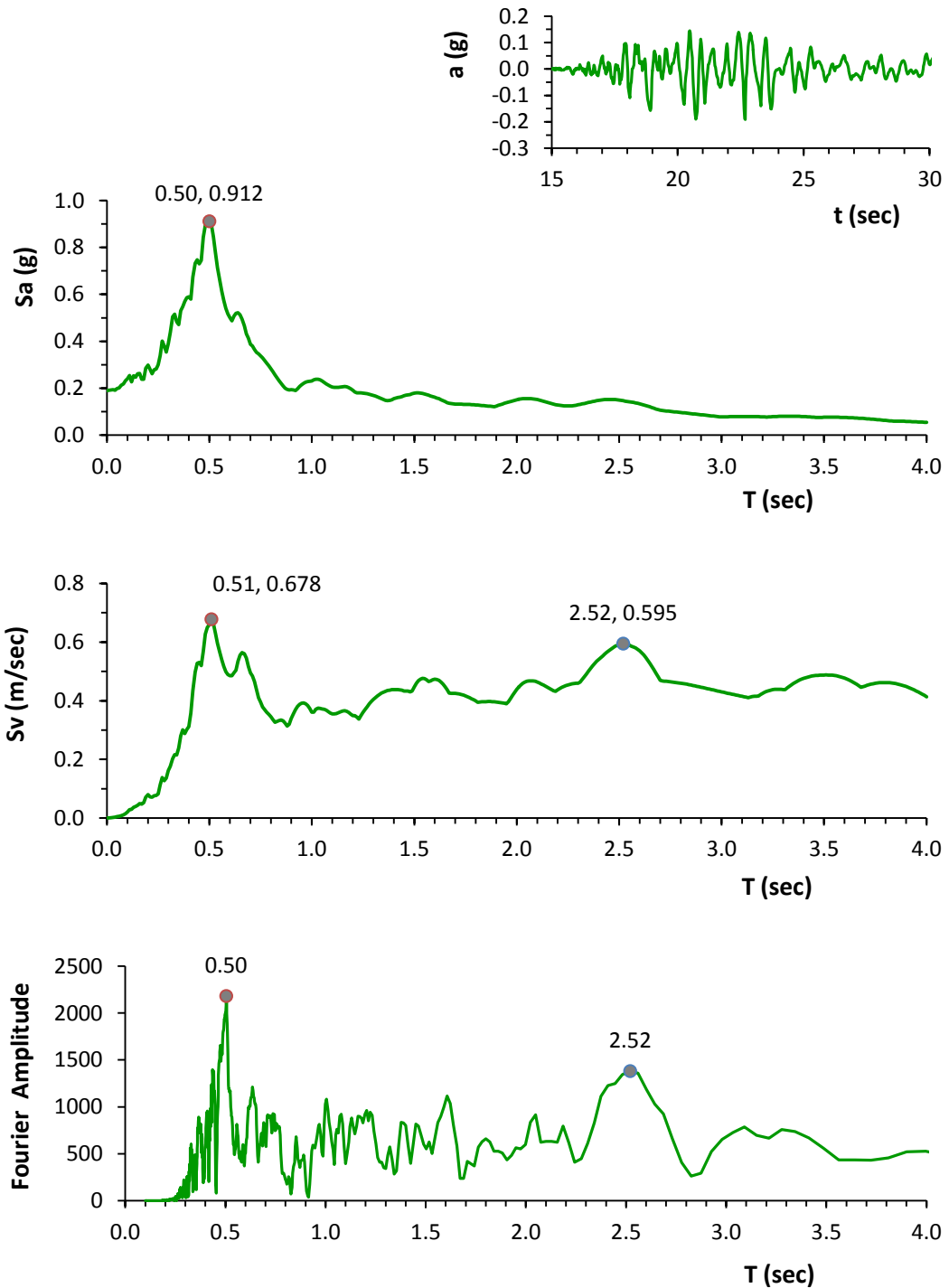
*CHHC - N01W*



**Σχήμα 4.67:** η χρονιοϊστορία επιταχύνσεων, τα ελαστικά φάσματα επιταχύνσεων και ταχυτήτων και το φάσμα πλάτους Fourier της συνιστώσα N01W του σταθμού CHHC, για το σεισμικό γεγονός της 13<sup>ης</sup> Ιουνίου του 2011.

Christchurch  
13 Ιουνίου 2011  
 $M_w = 6$

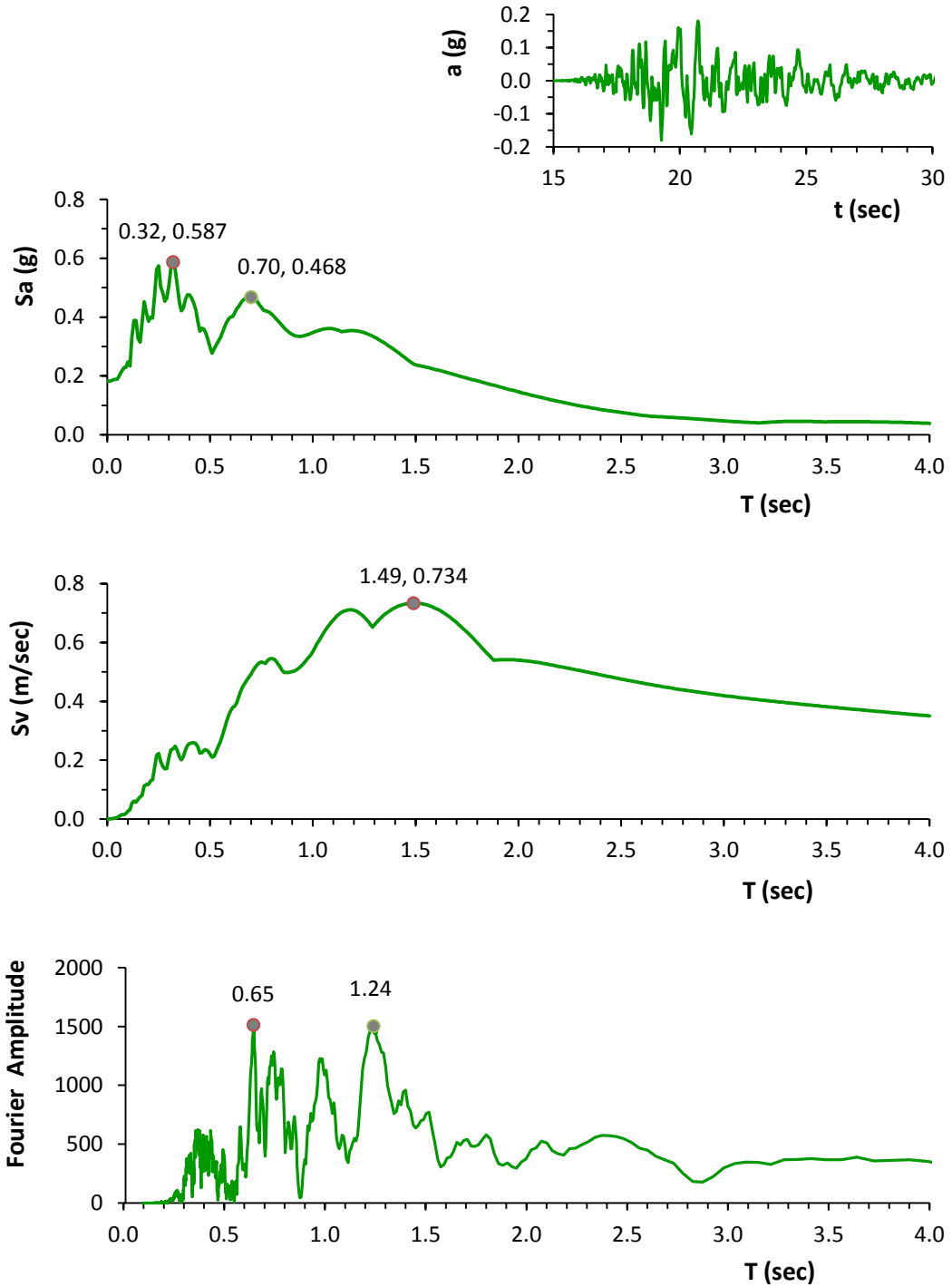
CHHC - S89W



**Σχήμα 4.68:** η χρονιοϊστορία επιταχύνσεων, τα ελαστικά φάσματα επιταχύνσεων και ταχύτητων και το φάσμα πλάτους Fourier της συνιστώσα S89W του σταθμού CHHC, για το σεισμικό γεγονός της 13<sup>ης</sup> Ιουνίου του 2011.

**Christchurch**  
**13 Ιουνίου 2011**  
 **$M_w = 6$**

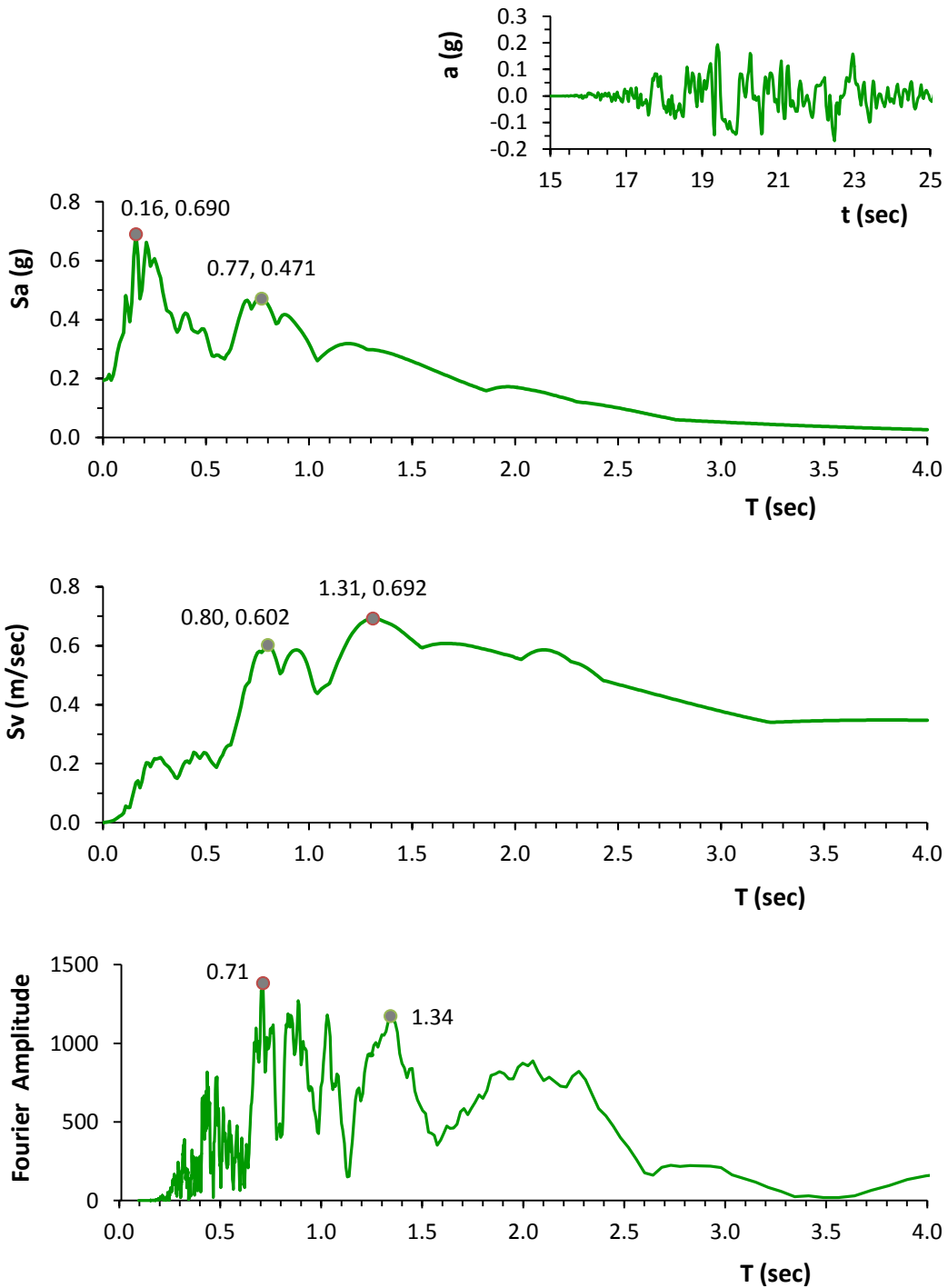
**CMHS - N10E**



**Σχήμα 4.69:** η χρονιοϊστορία επιταχύνσεων, τα ελαστικά φάσματα επιταχύνσεων και ταχύτητων και το φάσμα πλάτους Fourier της συνιστώσα N10E του σταθμού CMHS, για το σεισμικό γεγονός της 13<sup>ης</sup> Ιουνίου του 2011.

**Christchurch**  
**13 Ιουνίου 2011**  
 **$M_w = 6$**

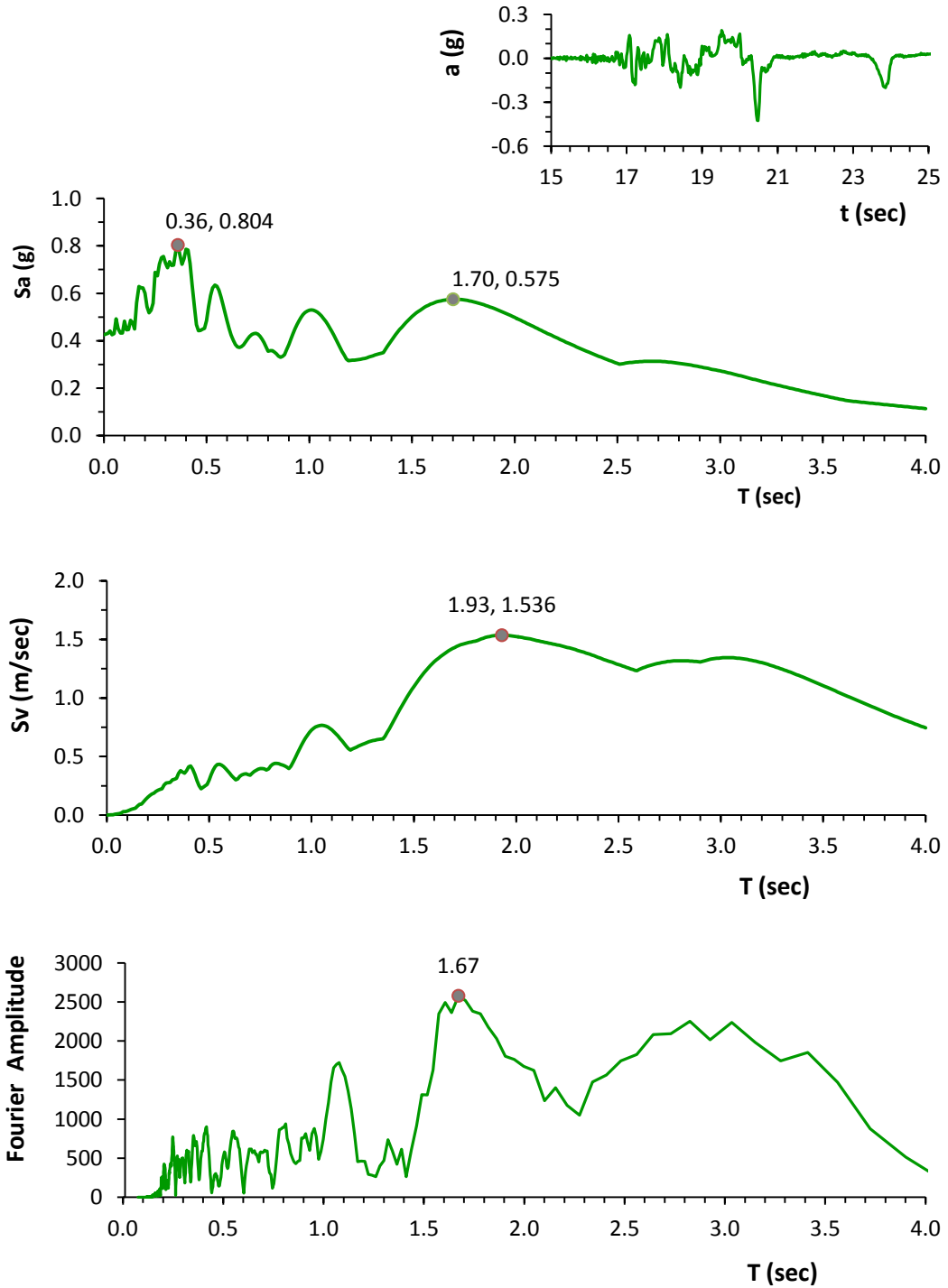
**CMHS - S80E**



**Σχήμα 4.70:** η χρονιοϊστορία επιταχύνσεων, τα ελαστικά φάσματα επιταχύνσεων και ταχύτητων και το φάσμα πλάτους Fourier της συνιστώσα S80E του σταθμού CMHS, για το σεισμικό γεγονός της 13<sup>ης</sup> Ιουνίου του 2011.

*Christchurch*  
**13 Ιουνίου 2011**  
 $M_w = 6$

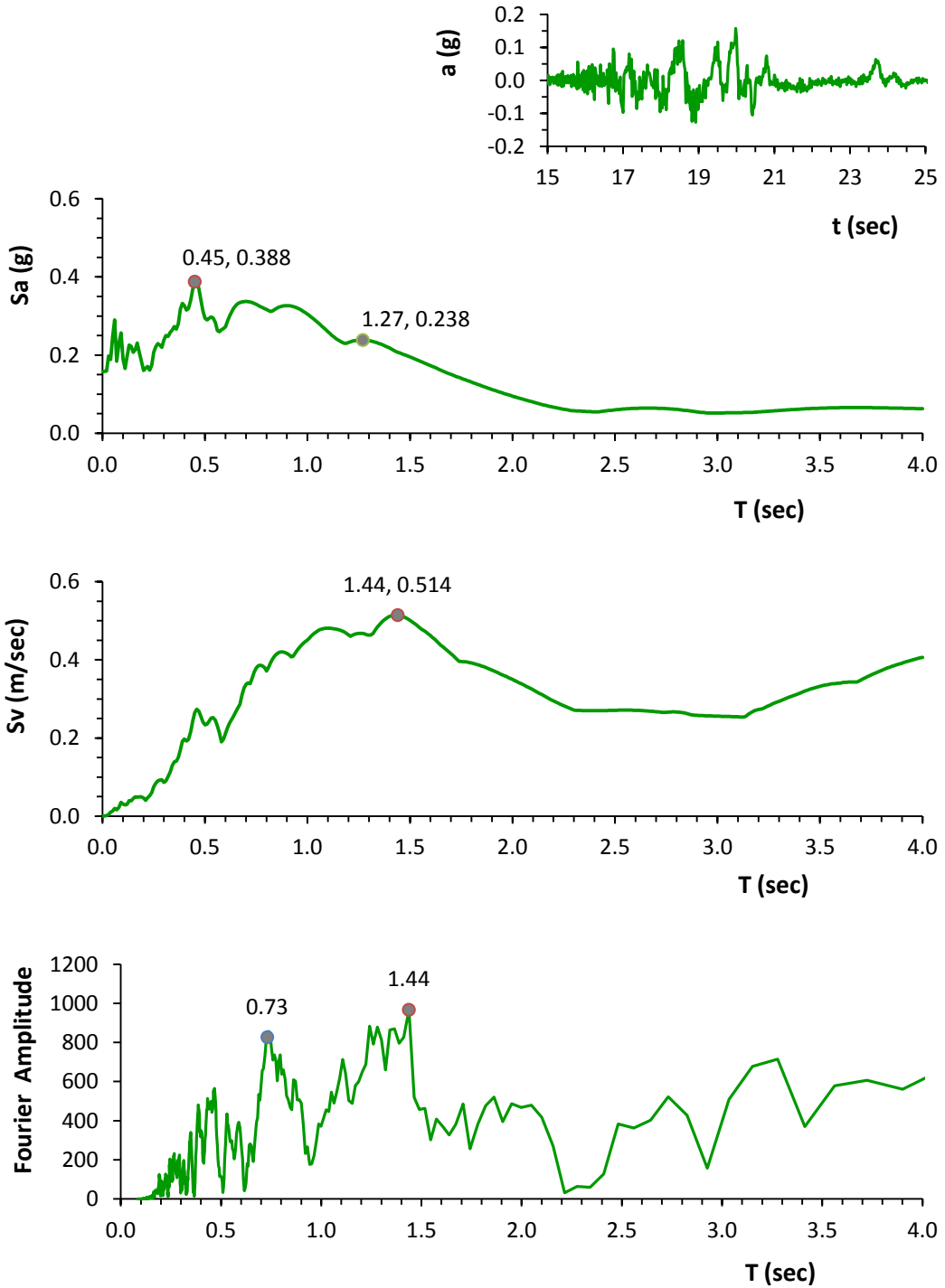
*HPSC - N04W*



**Σχήμα 4.71:** η χρονιοϊστορία επιταχύνσεων, τα ελαστικά φάσματα επιταχύνσεων και ταχυτήτων και το φάσμα πλάτους Fourier της συνιστώσα N04W του σταθμού HPSC, για το σεισμικό γεγονός της 13<sup>ης</sup> Ιουνίου του 2011.

Christchurch  
13 Ιουνίου 2011  
 $M_w = 6$

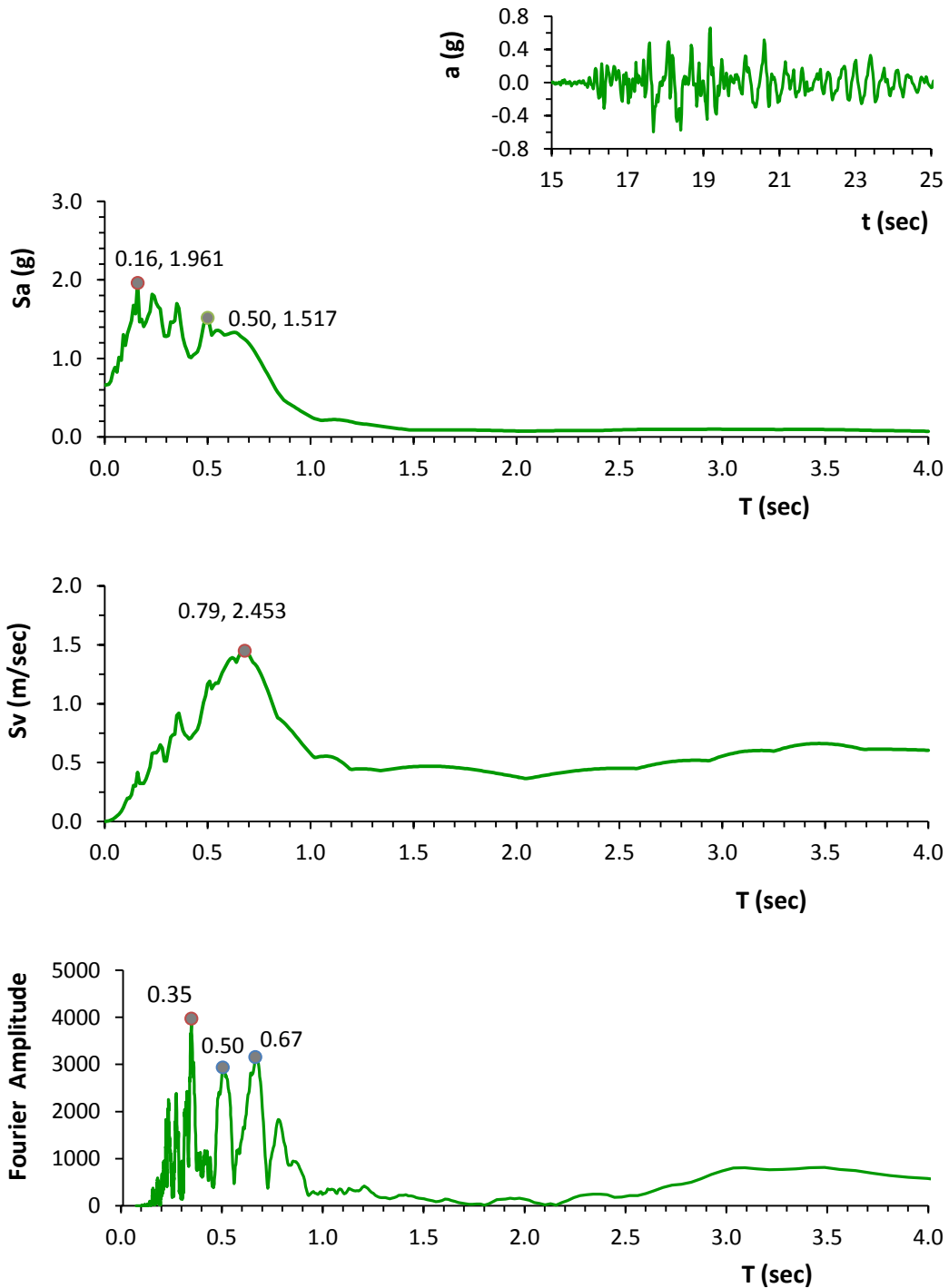
HPSC - S86W



**Σχήμα 4.72:** η χρονιοϊστορία επιταχύνσεων, τα ελαστικά φάσματα επιταχύνσεων και ταχύτητων και το φάσμα πλάτους Fourier της συνιστώσα S86W του σταθμού HPSC, για το σεισμικό γεγονός της 13<sup>ης</sup> Ιουνίου του 2011.

Christchurch  
13 Ιουνίου 2011  
 $M_w = 6$

HVSC - S26W

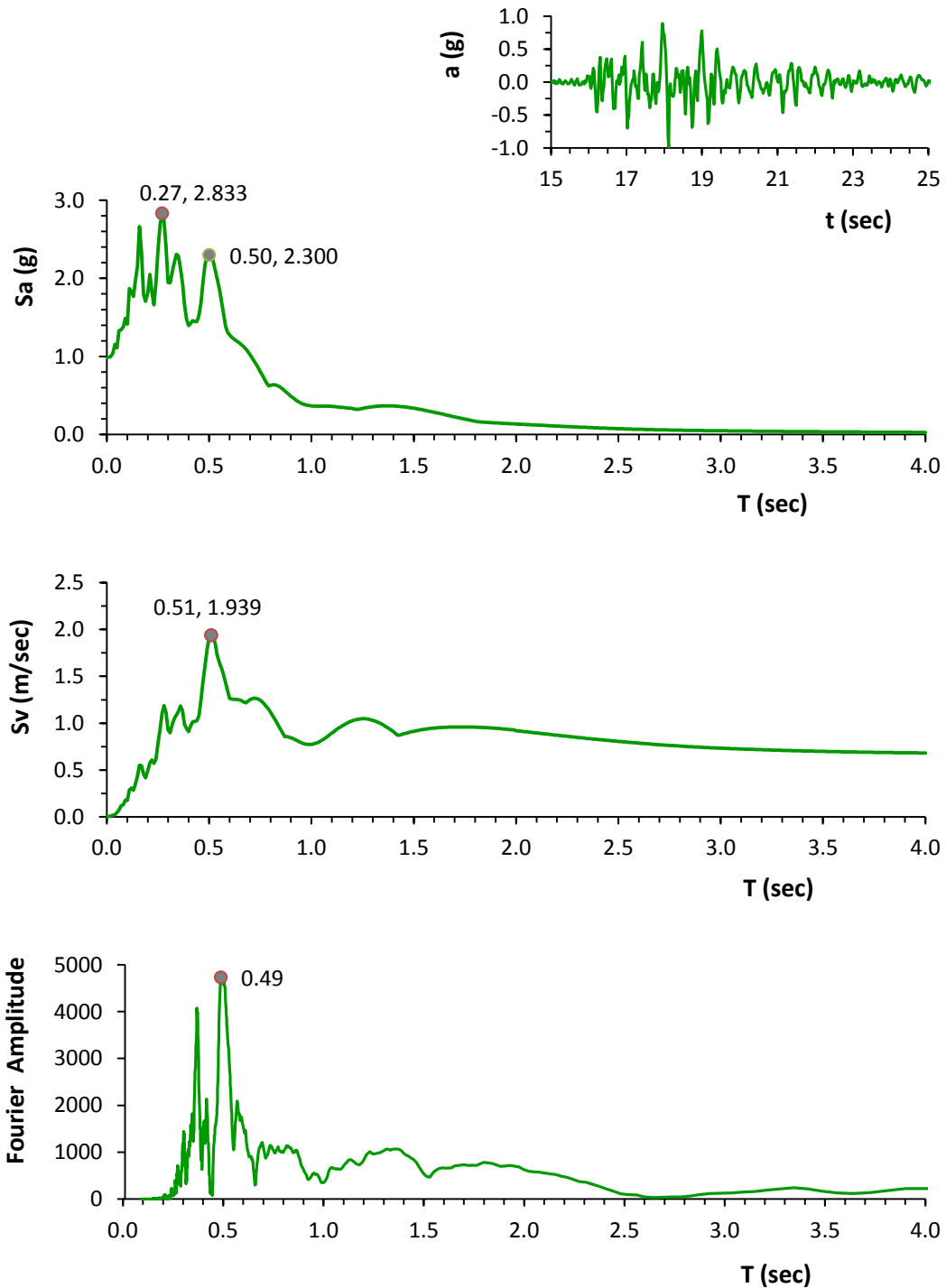


**Σχήμα 4.73:** η χρονιοϊστορία επιταχύνσεων, τα ελαστικά φάσματα επιταχύνσεων και ταχύτητων και το φάσμα πλάτους Fourier της συνιστώσα S26W του σταθμού HVSC, για το σεισμικό γεγονός της 13<sup>ης</sup> Ιουνίου του 2011.



*Christchurch*  
**13 Ιουνίου 2011**  
 **$M_w = 6$**

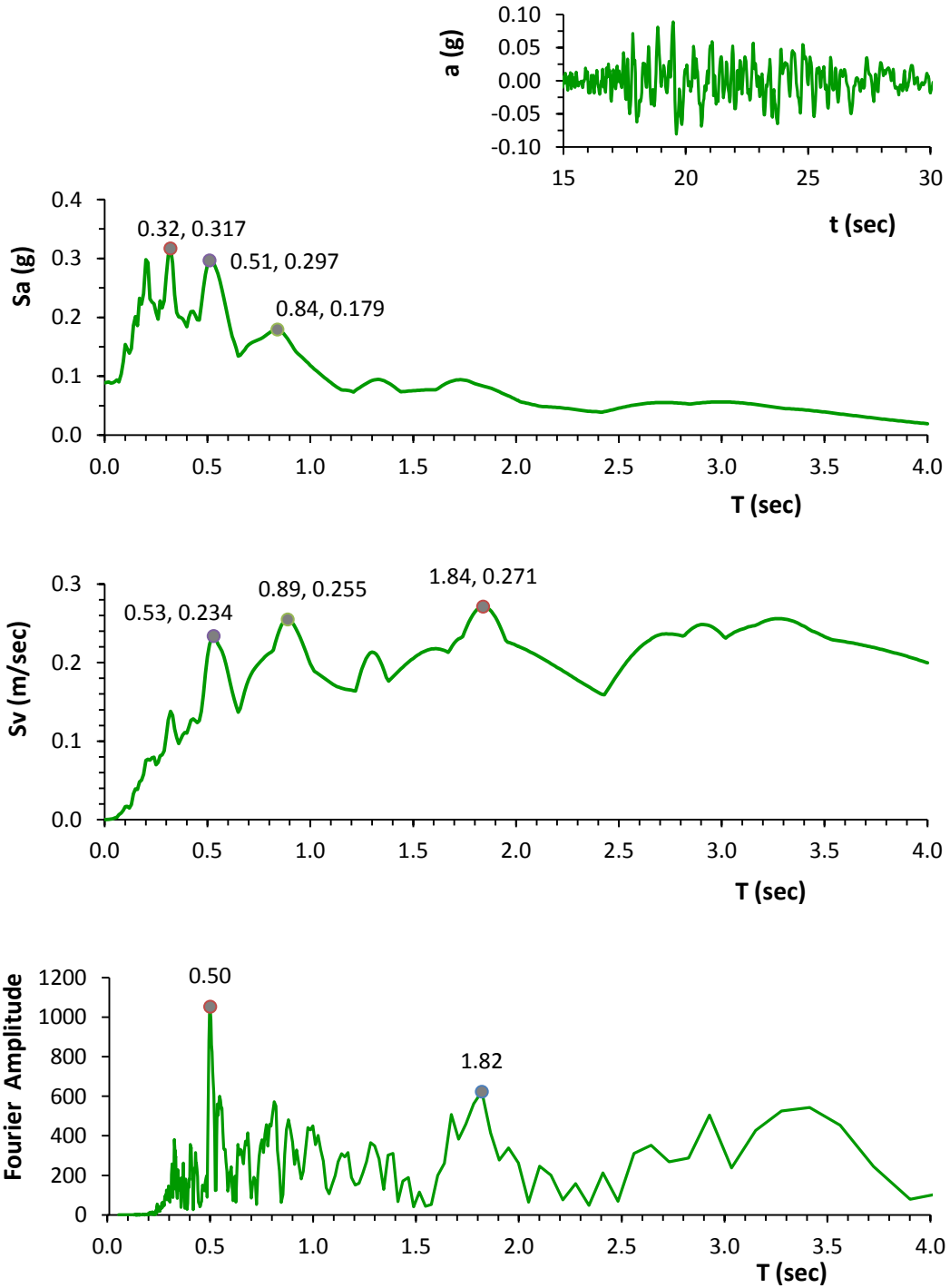
*HVSC - S64E*



**Σχήμα 4.74:** η χρονιοϊστορία επιταχύνσεων, τα ελαστικά φάσματα επιταχύνσεων και ταχύτητων και το φάσμα πλάτους Fourier της συνιστώσα S64E του σταθμού HVSC, για το σεισμικό γεγονός της 13<sup>ης</sup> Ιουνίου του 2011.

**Christchurch**  
**13 Ιουνίου 2011**  
 **$M_w = 6$**

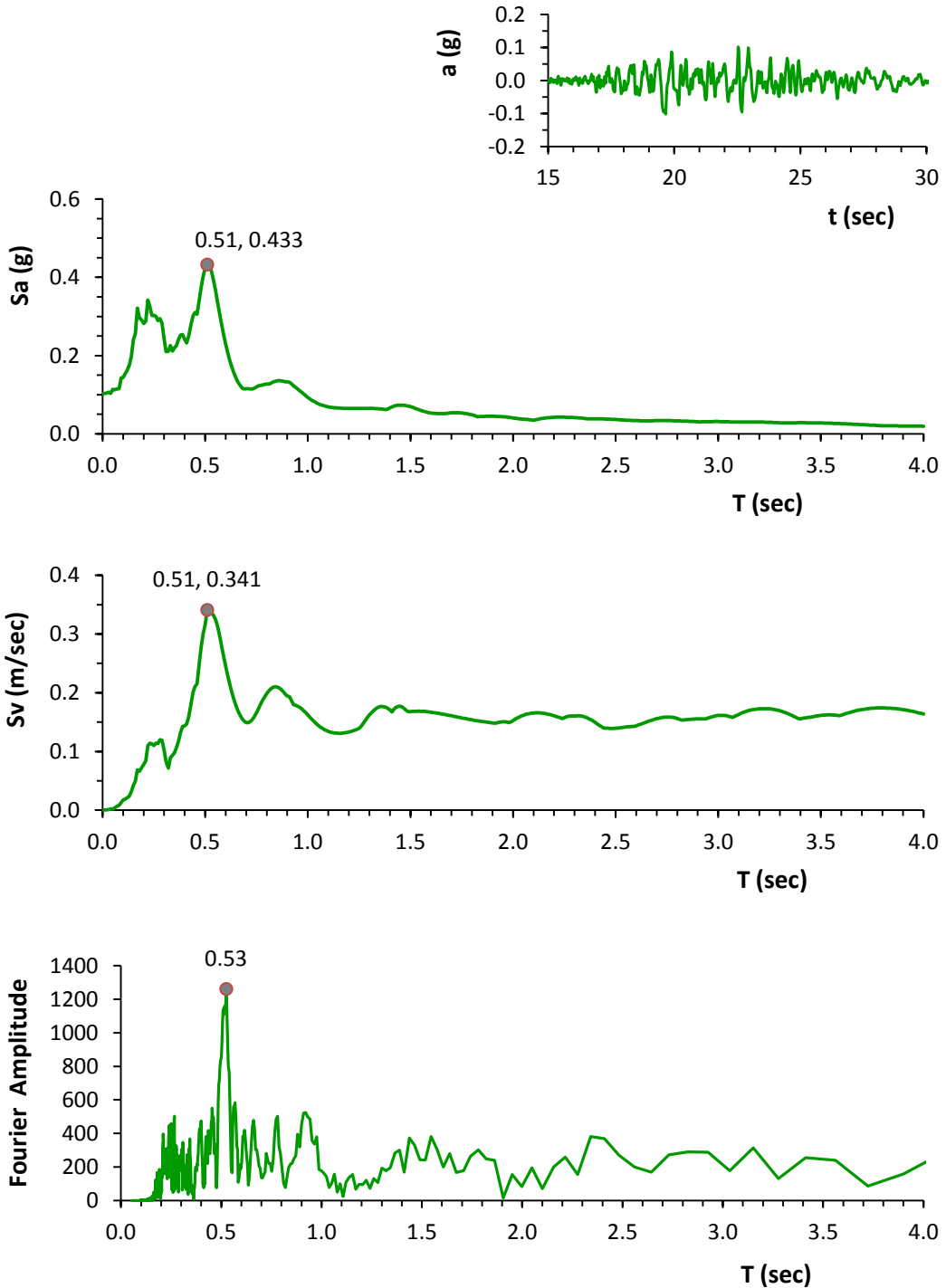
**ΚΡΟC - N15E**



**Σχήμα 4.75:** η χρονιοϊστορία επιταχύνσεων, τα ελαστικά φάσματα επιταχύνσεων και ταχύτητων και το φάσμα πλάτους Fourier της συνιστώσα N15E του σταθμού ΚΡΟC, για το σεισμικό γεγονός της 13<sup>ης</sup> Ιουνίου του 2011.

*Christchurch*  
**13 Ιουνίου 2011**  
 $M_w = 6$

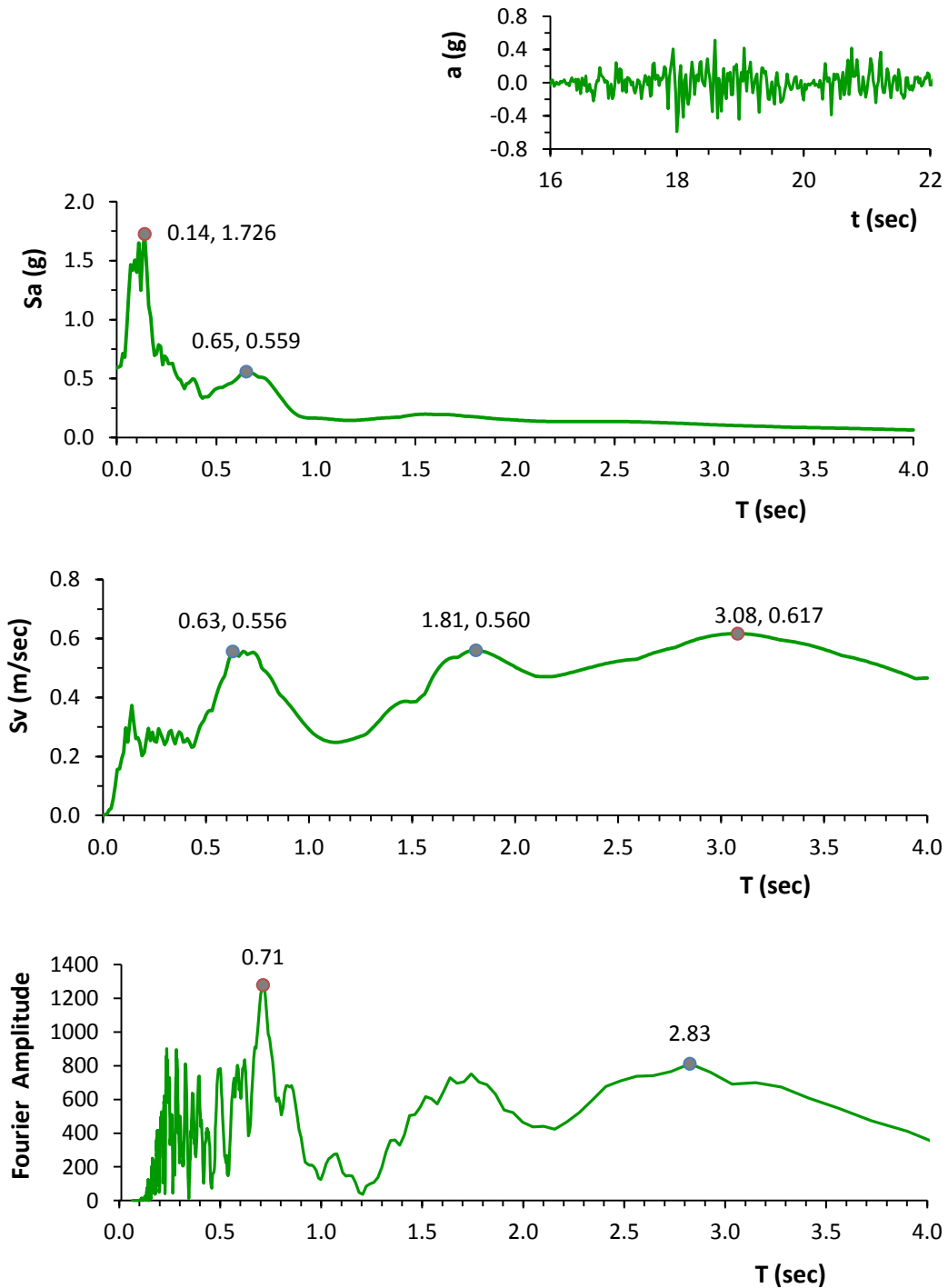
*ΚΡΟC - S75E*



**Σχήμα 4.76:** η χρονιοϊστορία επιταχύνσεων, τα ελαστικά φάσματα επιταχύνσεων και ταχύτητων και το φάσμα πλάτους Fourier της συνιστώσα S75E του σταθμού ΚΡΟC, για το σεισμικό γεγονός της 13<sup>ης</sup> Ιουνίου του 2011.

*Christchurch*  
13 Ιουνίου 2011  
 $M_w = 6$

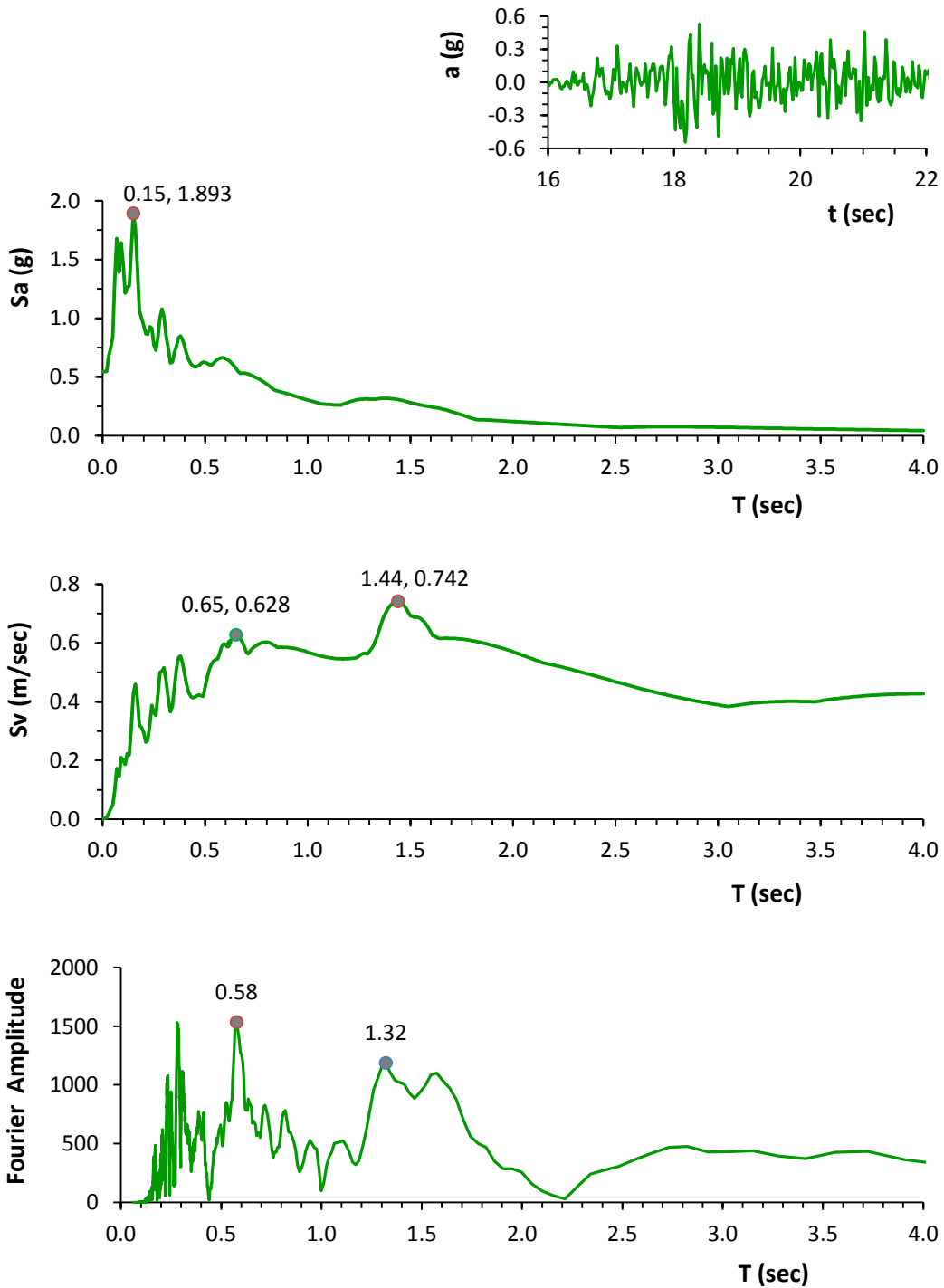
*LPCC - N10W*



**Σχήμα 4.77:** η χρονιοϊστορία επιταχύνσεων, τα ελαστικά φάσματα επιταχύνσεων και ταχυτήτων και το φάσμα πλάτους Fourier της συνιστώσα N10W του σταθμού LPCC, για το σεισμικό γεγονός της 13<sup>ης</sup> Ιουνίου του 2011.

*Christchurch*  
**13 Ιουνίου 2011**  
 $M_w = 6$

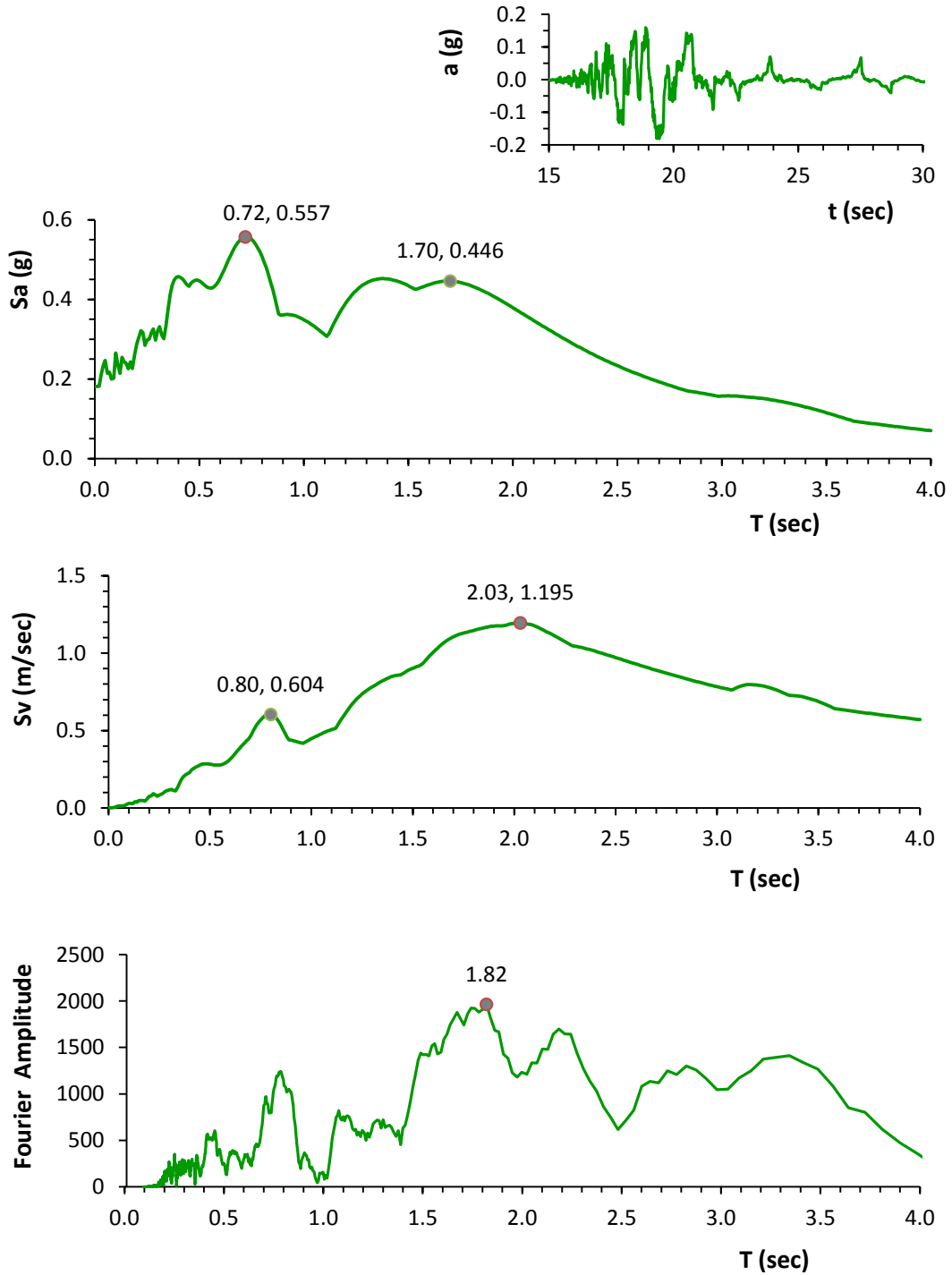
*LPCC - S80W*



**Σχήμα 4.78:** η χρονιοϊστορία επιταχύνσεων, τα ελαστικά φάσματα επιταχύνσεων και ταχύτητων και το φάσμα πλάτους Fourier της συνιστώσα S80W του σταθμού LPCC, για το σεισμικό γεγονός της 13<sup>ης</sup> Ιουνίου του 2011.

**Christchurch**  
**13 Ιουνίου 2011**  
 **$M_w = 6$**

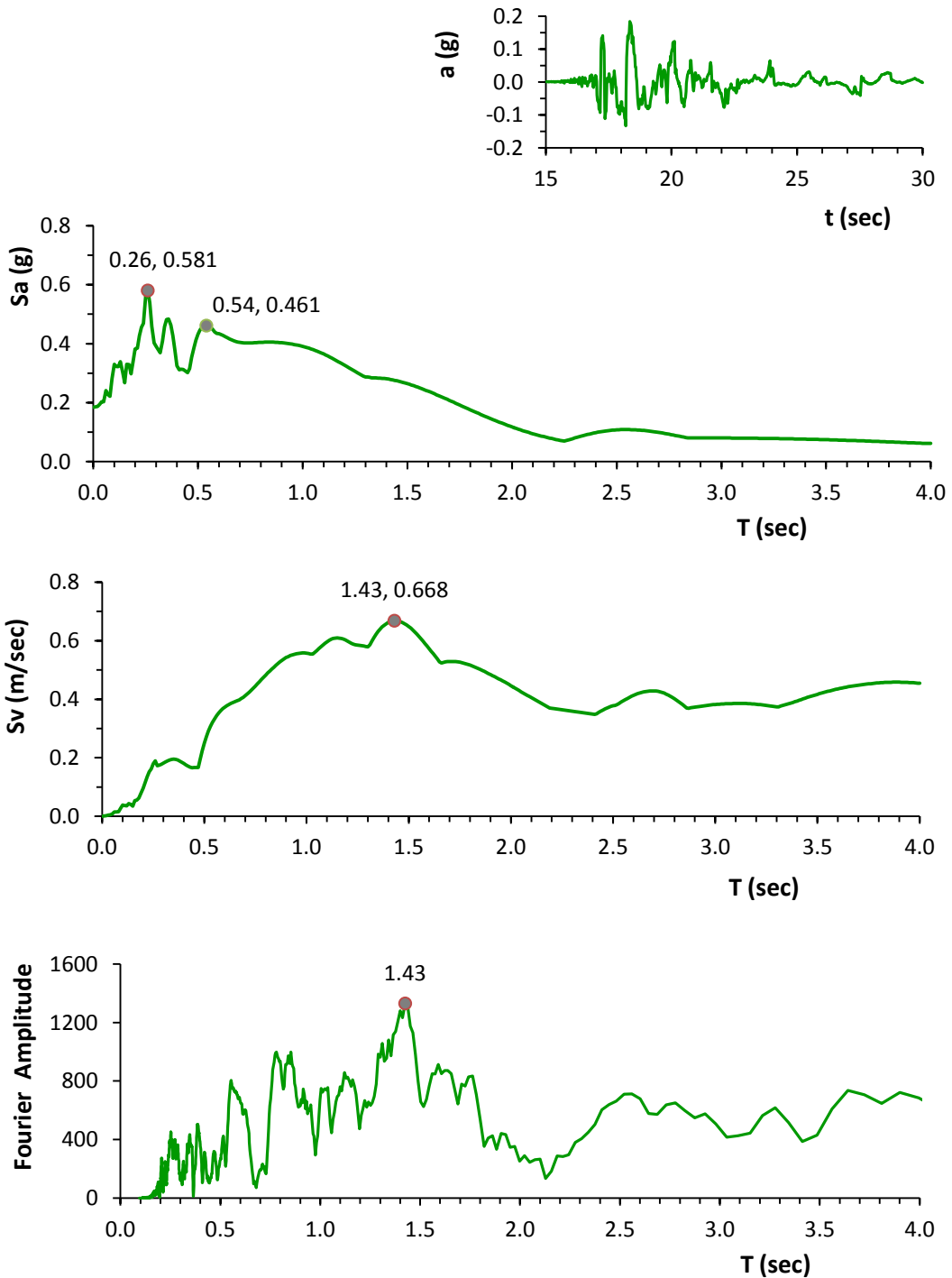
**NNBS - S13E**



**Σχήμα 4.79:** η χρονιοϊστορία επιταχύνσεων, τα ελαστικά φάσματα επιταχύνσεων και ταχύτητων και το φάσμα πλάτους Fourier της συνιστώσα S13E του σταθμού NNBS, για το σεισμικό γεγονός της 13<sup>ης</sup> Ιουνίου του 2011.

**Christchurch**  
**13 Ιουνίου 2011**  
 **$M_w = 6$**

**NNBS - S77W**

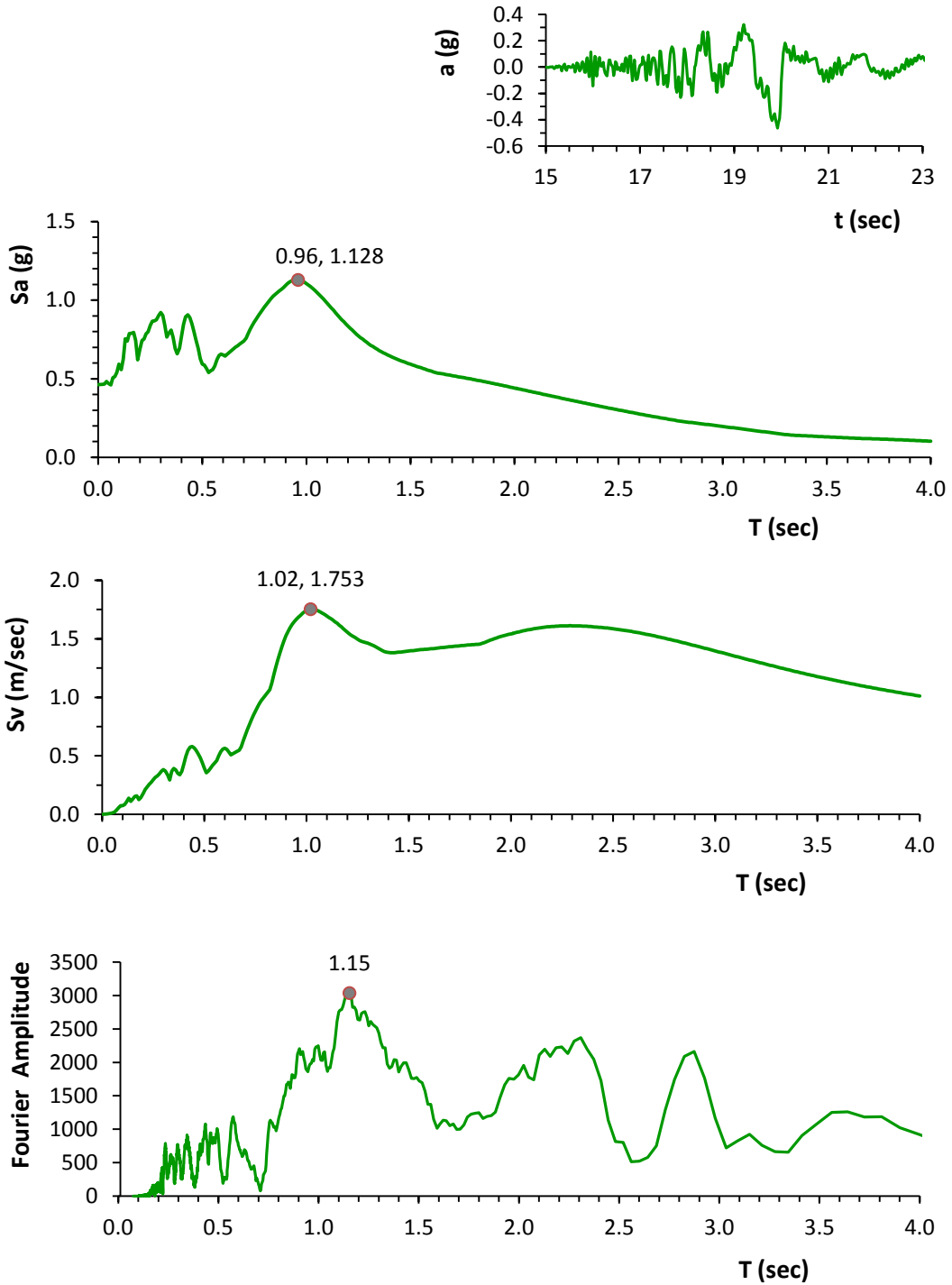


**Σχήμα 4.80:** η χρονιοϊστορία επιταχύνσεων, τα ελαστικά φάσματα επιταχύνσεων και ταχύτητων και το φάσμα πλάτους Fourier της συνιστώσα S77W του σταθμού NNBS, για το σεισμικό γεγονός της 13<sup>ης</sup> Ιουνίου του 2011.



**Christchurch**  
**13 Ιουλίου 2011**  
 **$M_w = 6$**

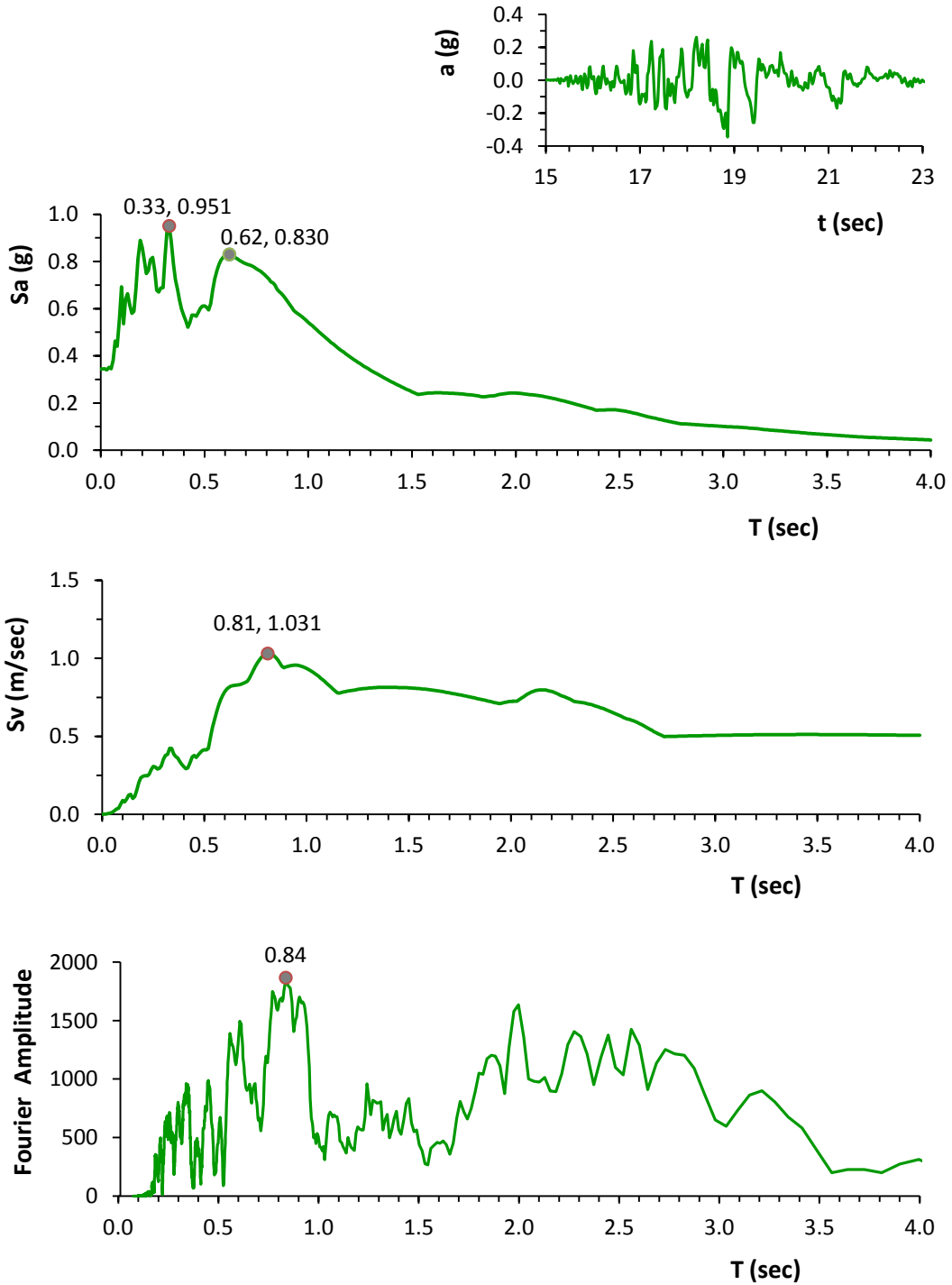
**PRPC - S**



**Σχήμα 4.81:** η χρονιοϊστορία επιταχύνσεων, τα ελαστικά φάσματα επιταχύνσεων και ταχυτήτων και το φάσμα πλάτους Fourier της συνιστώσα S του σταθμού PRPC, για το σεισμικό γεγονός της 13<sup>ης</sup> Ιουλίου του 2011.

*Christchurch*  
**13 Ιουνίου 2011**  
 **$M_w = 6$**

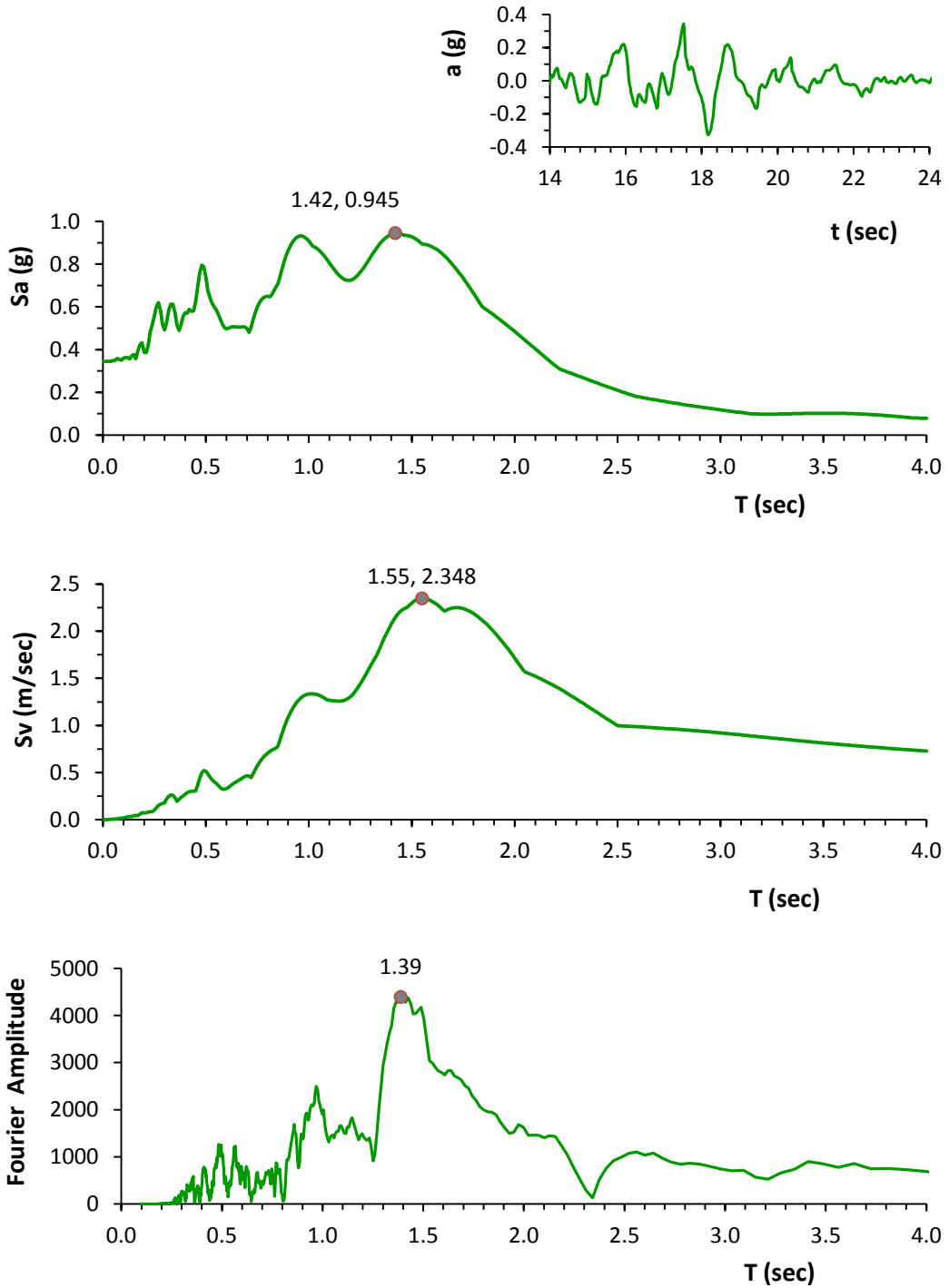
*PRPC - W*



**Σχήμα 4.82:** η χρονιοϊστορία επιταχύνσεων, τα ελαστικά φάσματα επιταχύνσεων και ταχύτητων και το φάσμα πλάτους Fourier της συνιστώσα W του σταθμού PRPC, για το σεισμικό γεγονός της 13<sup>ης</sup> Ιουνίου του 2011.

*Christchurch*  
**13 Ιουνίου 2011**  
 $M_w = 6$

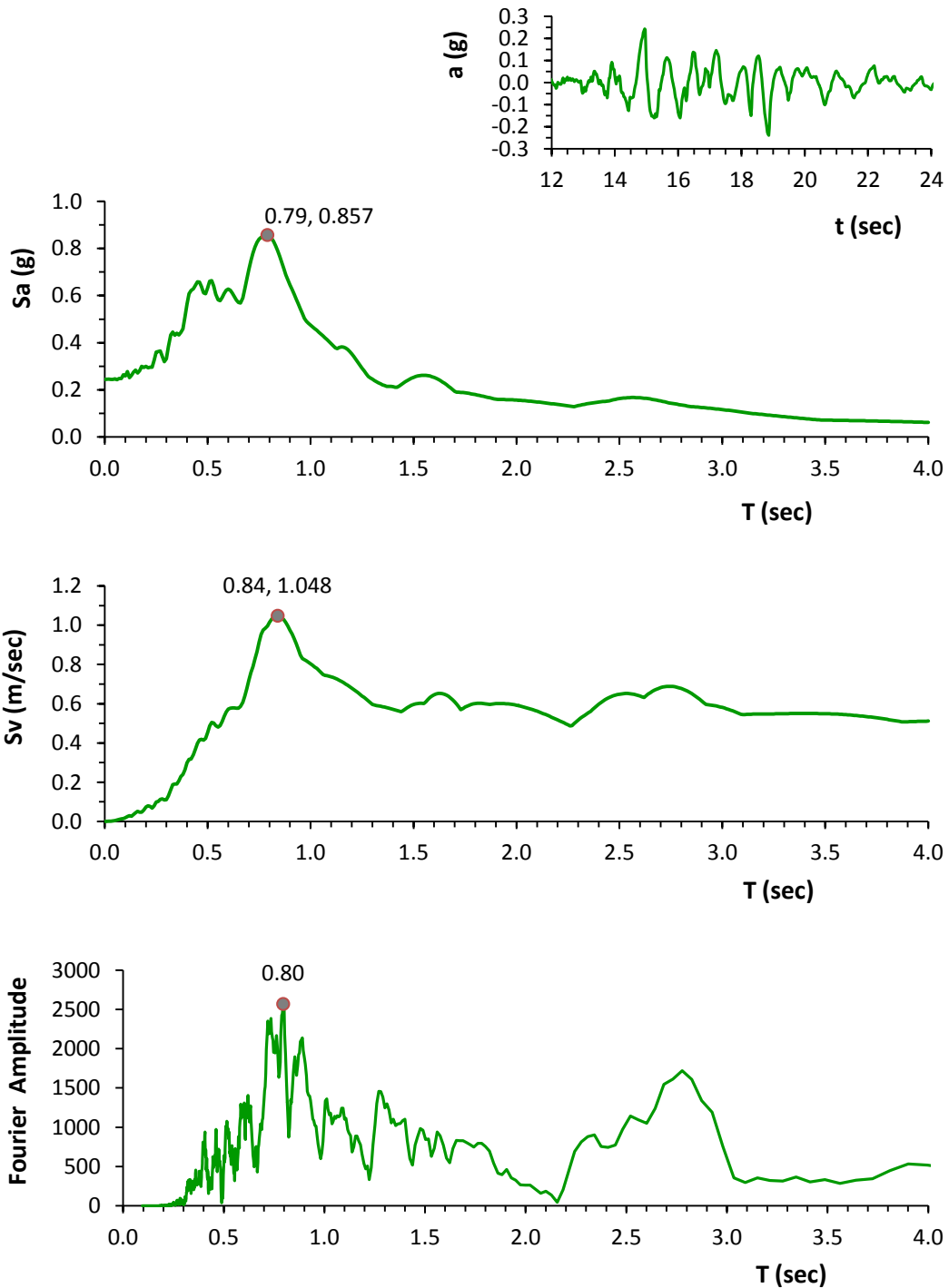
*REHS - N02E*



**Σχήμα 4.83:** η χρονιοϊστορία επιταχύνσεων, τα ελαστικά φάσματα επιταχύνσεων και ταχυτήτων και το φάσμα πλάτους Fourier της συνιστώσα N02E του σταθμού REHS, για το σεισμικό γεγονός της 13<sup>ης</sup> Ιουνίου του 2011.

**Christchurch**  
**13 Ιουνίου 2011**  
 **$M_w = 6$**

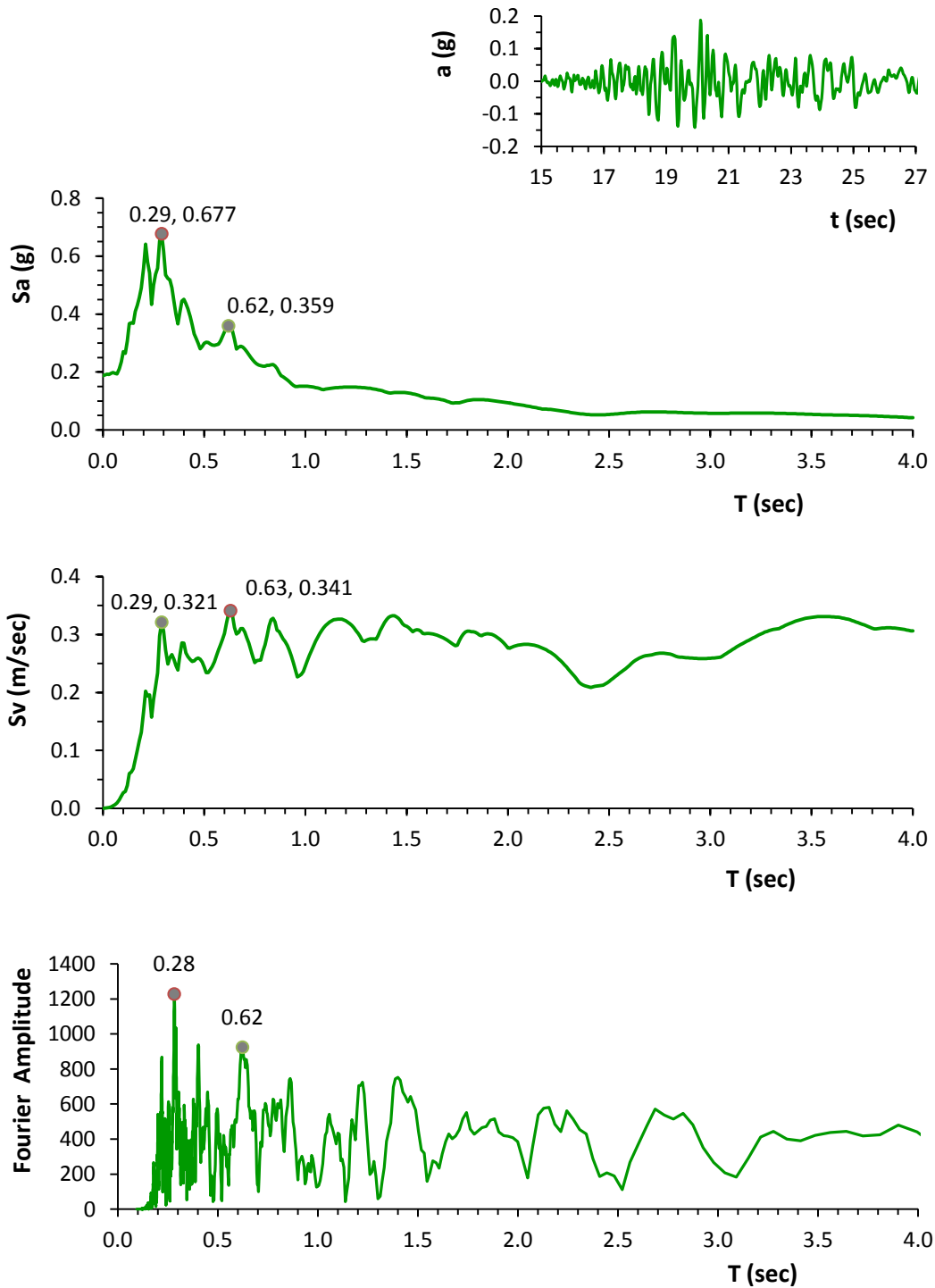
**REHS - S88E**



**Σχήμα 4.84:** η χρονιοϊστορία επιταχύνσεων, τα ελαστικά φάσματα επιταχύνσεων και ταχύτητων και το φάσμα πλάτους Fourier της συνιστώσα S88E του σταθμού REHS, για το σεισμικό γεγονός της 13<sup>ης</sup> Ιουνίου του 2011.

*Christchurch*  
**13 Ιουνίου 2011**  
 $M_w = 6$

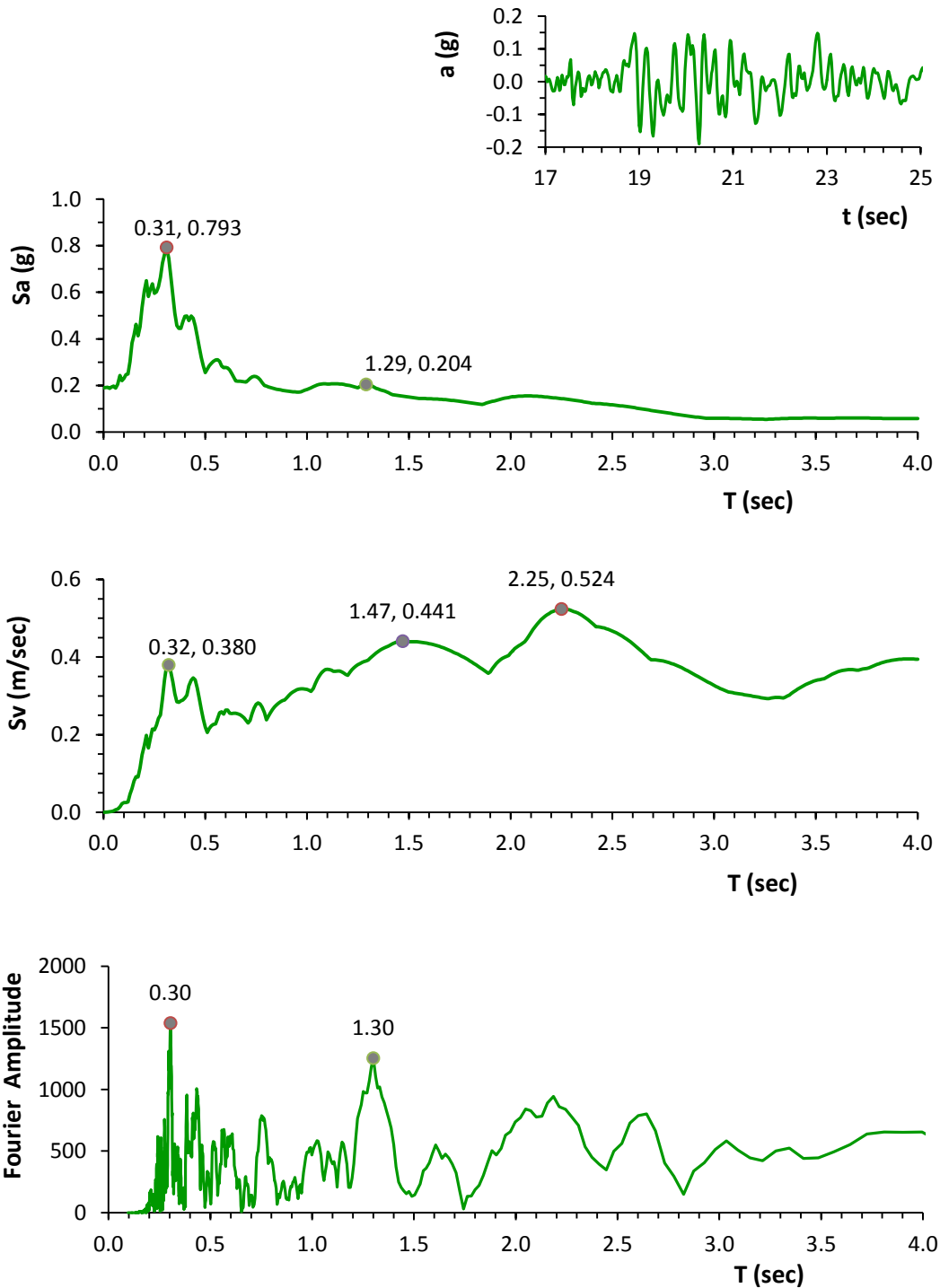
*RHSC - N86W*



**Σχήμα 4.85:** η χρονιοϊστορία επιταχύνσεων, τα ελαστικά φάσματα επιταχύνσεων και ταχυτήτων και το φάσμα πλάτους Fourier της συνιστώσα N86W του σταθμού RHSC, για το σεισμικό γεγονός της 13<sup>ης</sup> Ιουνίου του 2011.

*Christchurch*  
**13 Ιουνίου 2011**  
 $M_w = 6$

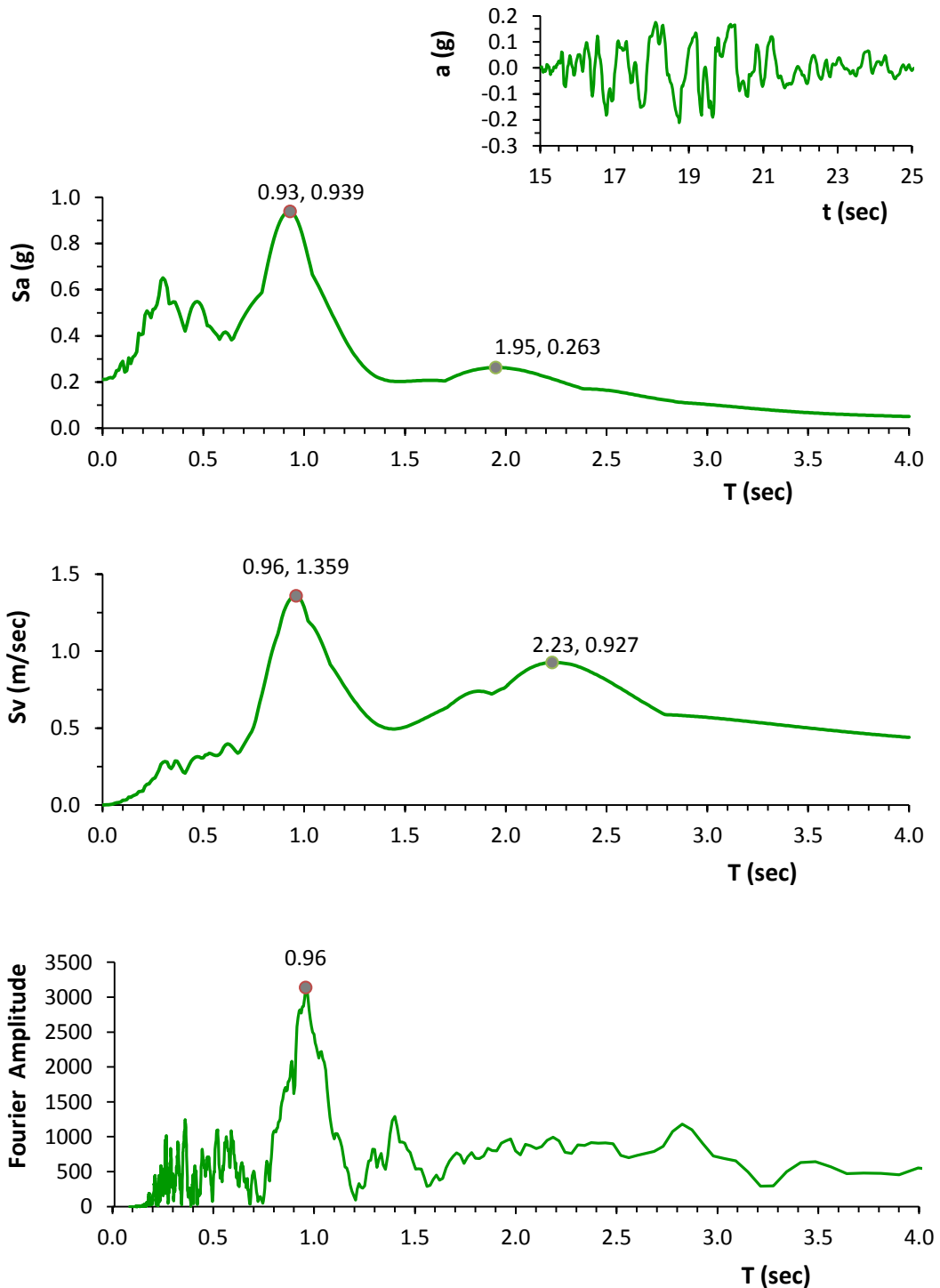
*RHSC - S04W*



**Σχήμα 4.86:** η χρονιοϊστορία επιταχύνσεων, τα ελαστικά φάσματα επιταχύνσεων και ταχυτήτων και το φάσμα πλάτους Fourier της συνιστώσα S04W του σταθμού RHSC, για το σεισμικό γεγονός της 13<sup>ης</sup> Ιουνίου του 2011.

Christchurch  
13 Ιουνίου 2011  
 $M_w = 6$

SHLC - S40W

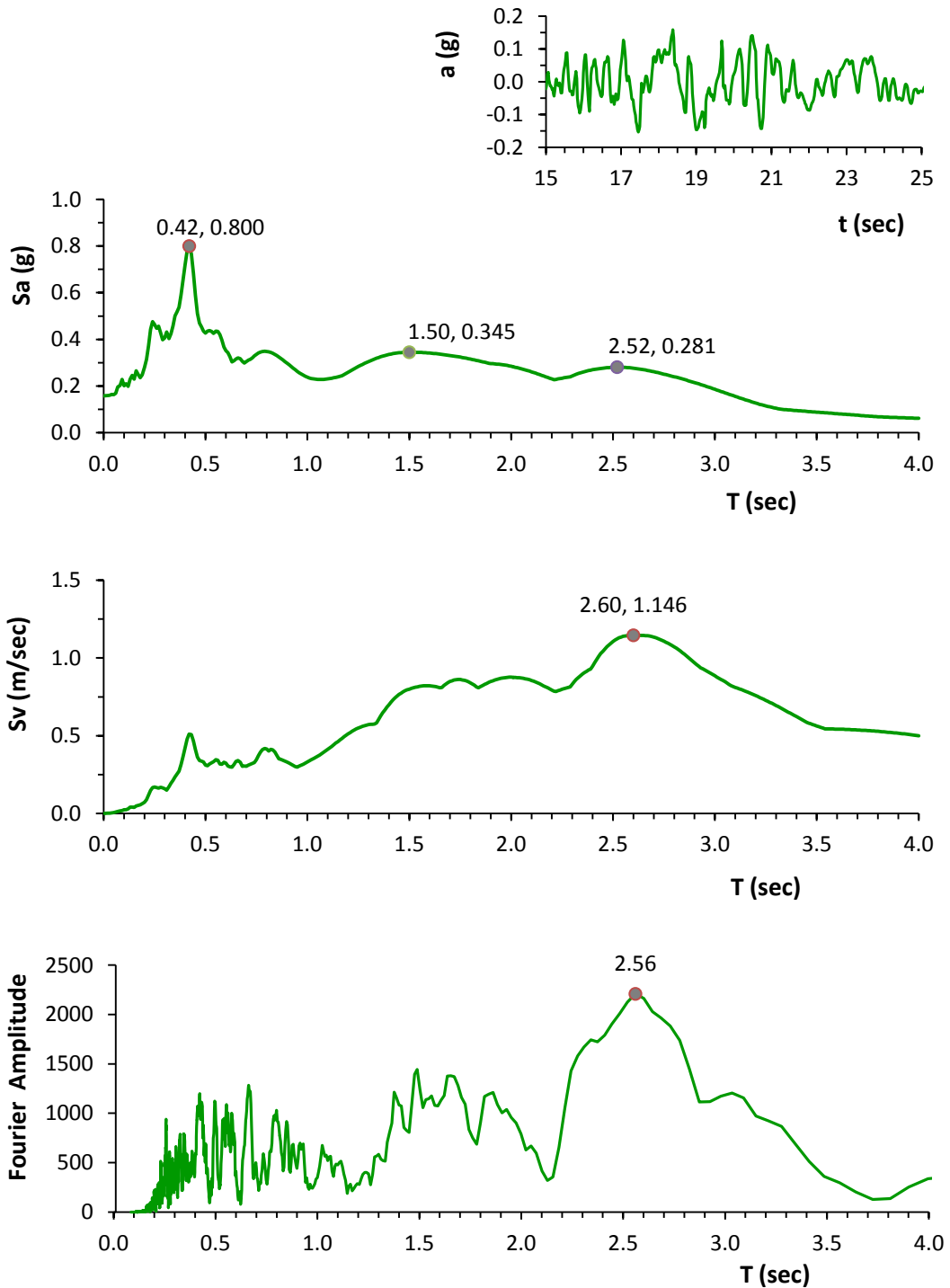


**Σχήμα 4.87:** η χρονιοϊστορία επιταχύνσεων, τα ελαστικά φάσματα επιταχύνσεων και ταχύτητων και το φάσμα πλάτους Fourier της συνιστώσα S40W του σταθμού SHLC, για το σεισμικό γεγονός της 13<sup>ης</sup> Ιουνίου του 2011.



*Christchurch*  
13 Ιουνίου 2011  
 $M_w = 6$

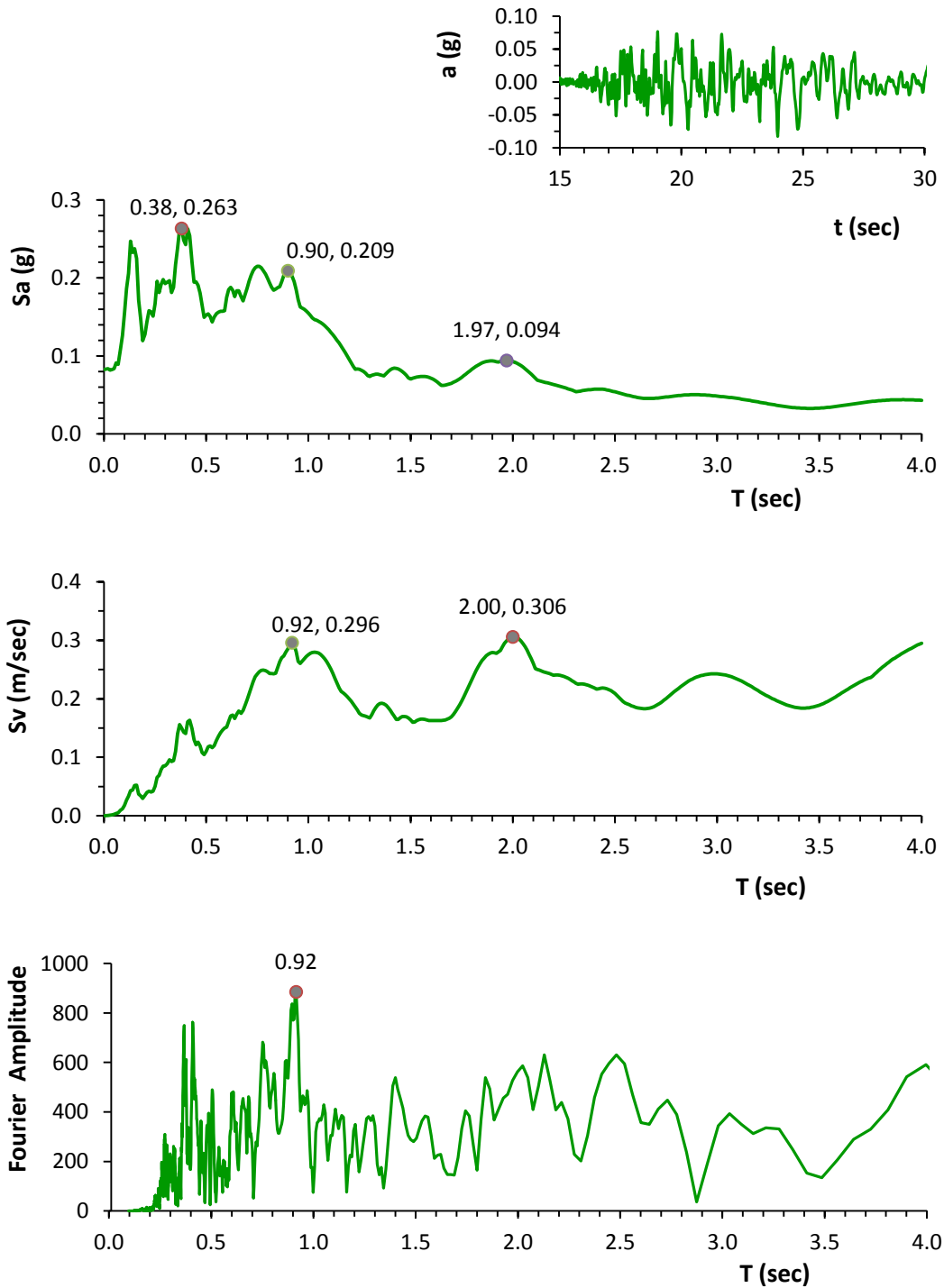
*SHLC - S50E*



**Σχήμα 4.88:** η χρονιοστορία επιταχύνσεων, τα ελαστικά φάσματα επιταχύνσεων και ταχύτητων και το φάσμα πλάτους Fourier της συνιστώσα S50E του σταθμού SHLC, για το σεισμικό γεγονός της 13<sup>ης</sup> Ιουνίου του 2011.

**Christchurch**  
**13 Ιουνίου 2011**  
 **$M_w = 6$**

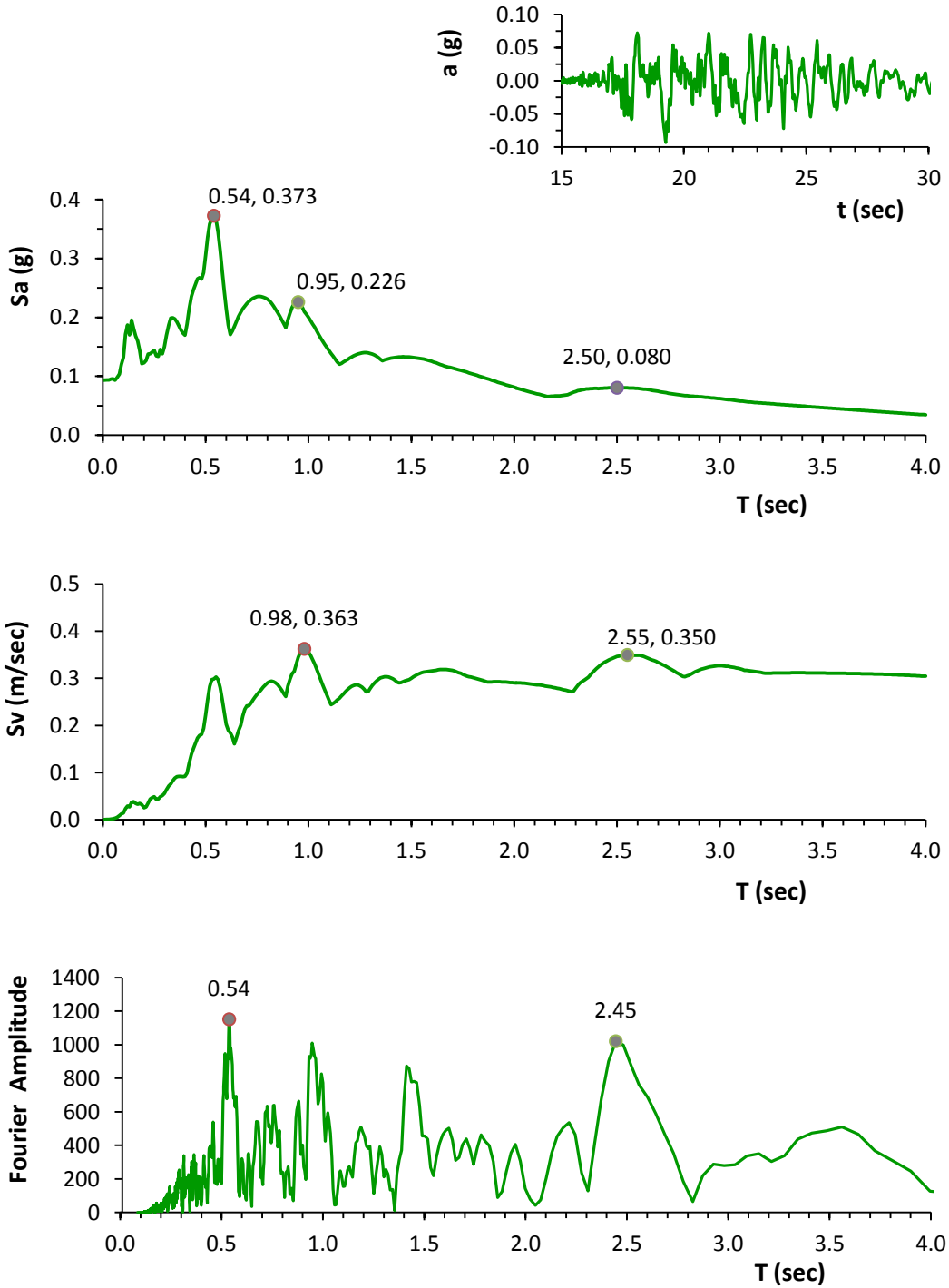
**SMTC - N88W**



**Σχήμα 4.89:** η χρονιοϊστορία επιταχύνσεων, τα ελαστικά φάσματα επιταχύνσεων και ταχυτήτων και το φάσμα πλάτους Fourier της συνιστώσα N88W του σταθμού SMTC, για το σεισμικό γεγονός της 13<sup>ης</sup> Ιουνίου του 2011.

**Christchurch**  
**13 Ιουνίου 2011**  
 $M_w = 6$

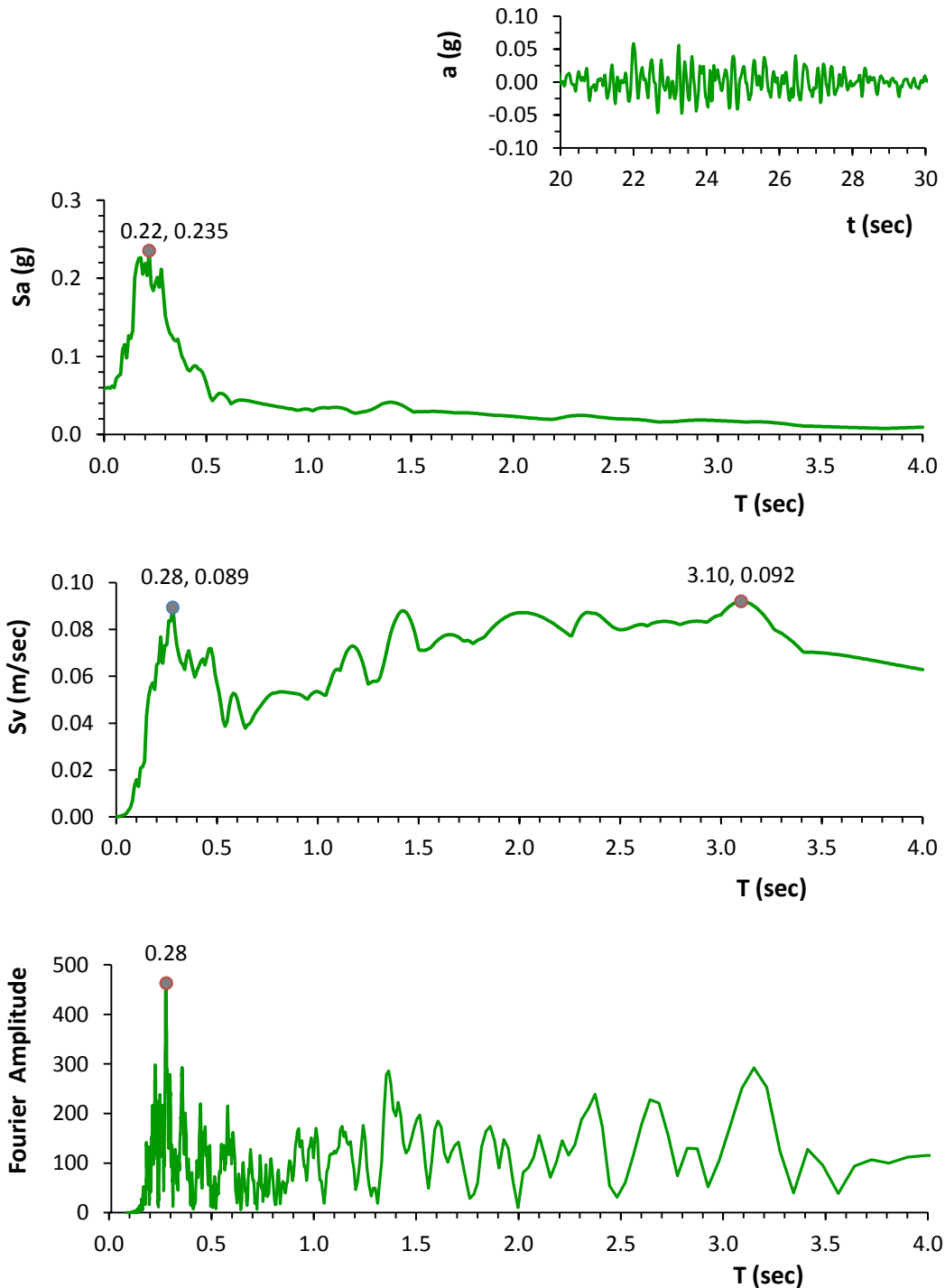
**SMTC - S02W**



**Σχήμα 4.90:** η χρονιοϊστορία επιταχύνσεων, τα ελαστικά φάσματα επιταχύνσεων και ταχύτητων και το φάσμα πλάτους Fourier της συνιστώσα S02W του σταθμού SMTC, για το σεισμικό γεγονός της 13<sup>ης</sup> Ιουνίου του 2011.

*Christchurch*  
**13 Ιουνίου 2011**  
 **$M_w = 6$**

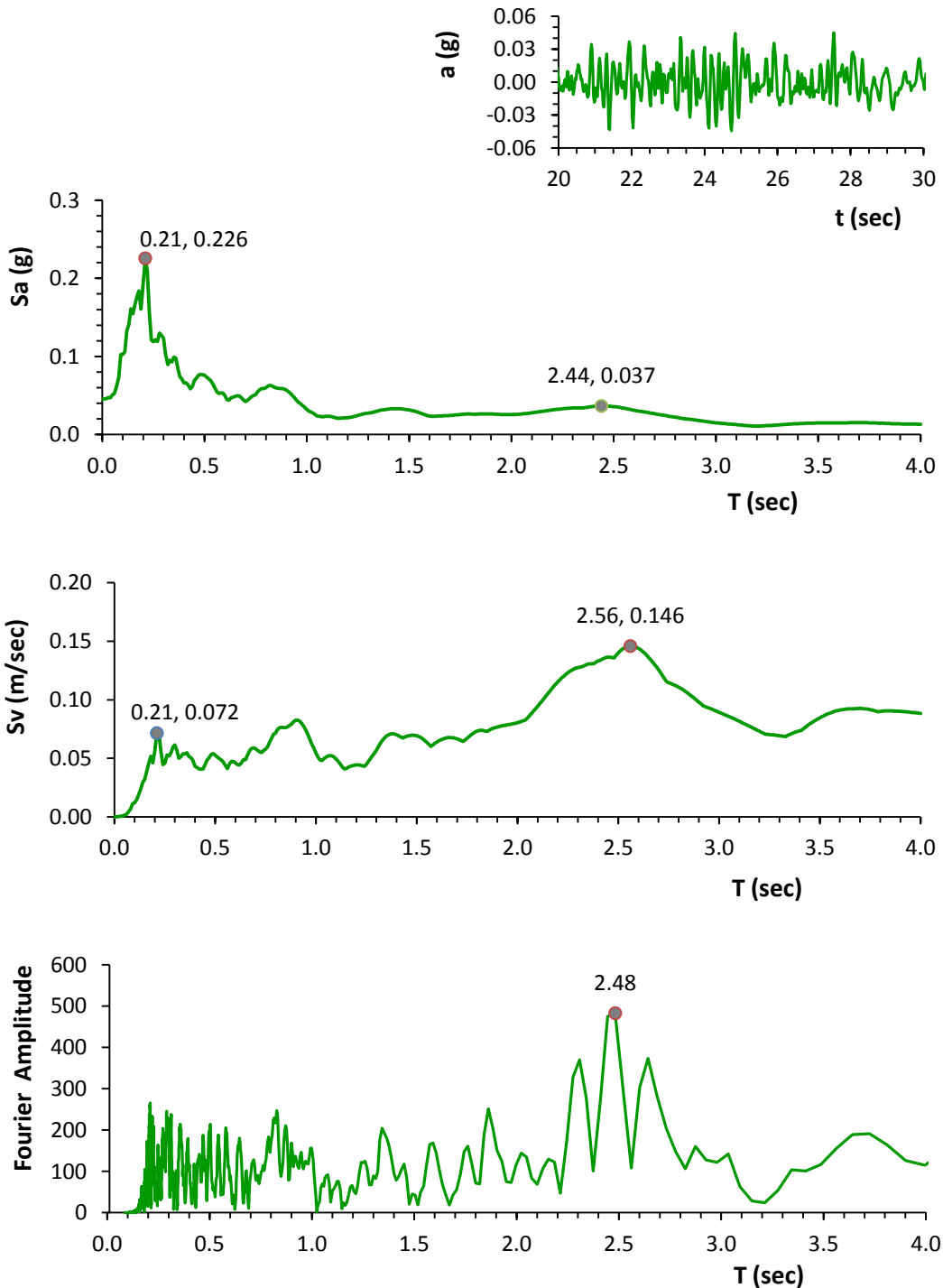
*SWNC - N24E*



**Σχήμα 4.91:** η χρονιοϊστορία επιταχύνσεων, τα ελαστικά φάσματα επιταχύνσεων και ταχύτητων και το φάσμα πλάτους Fourier της συνιστώσα N24E του σταθμού SWNC, για το σεισμικό γεγονός της 13<sup>ης</sup> Ιουνίου του 2011.

*Christchurch*  
13 Ιουνίου 2011  
 $M_w = 6$

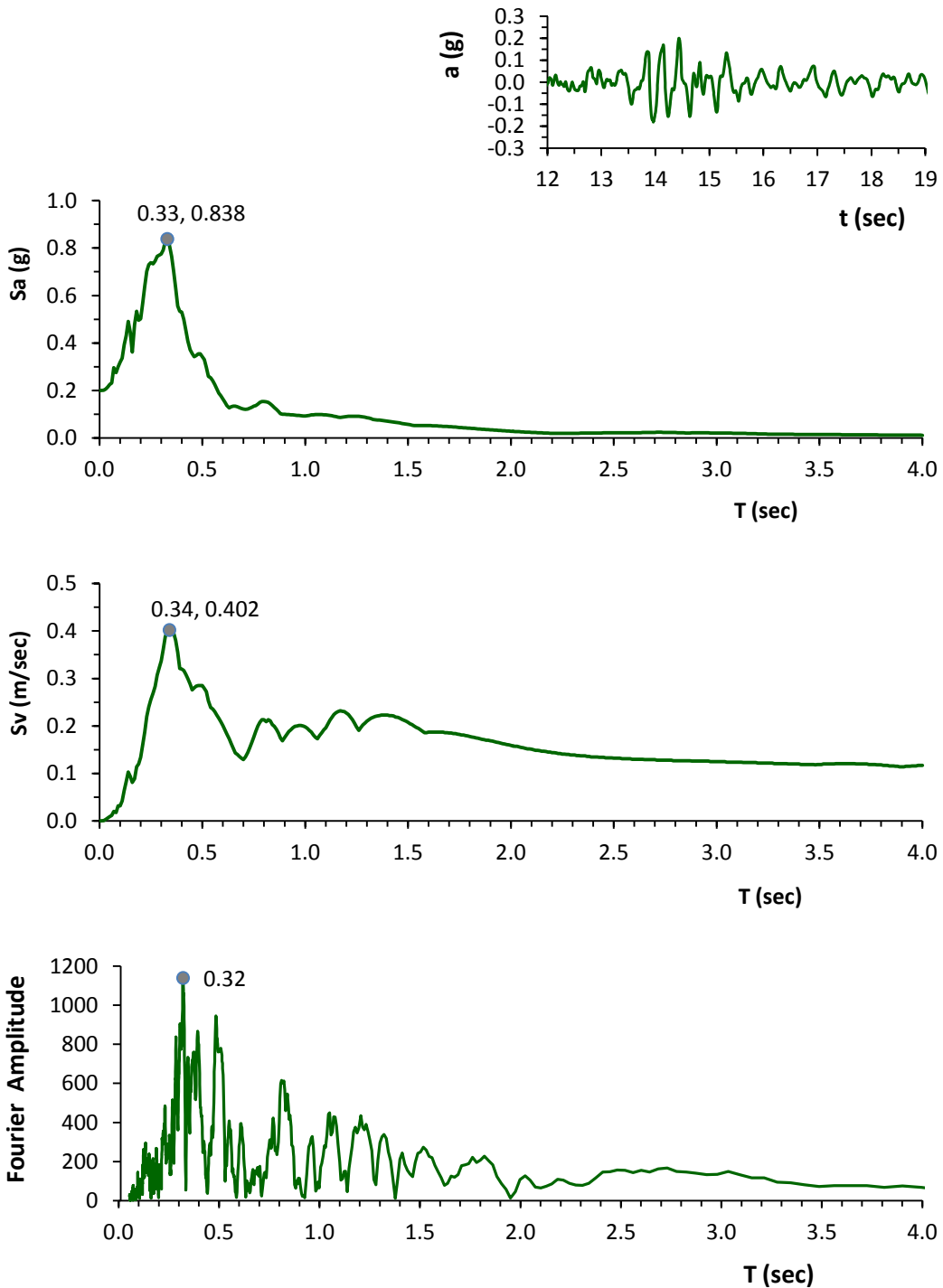
*SWNC - N66W*



**Σχήμα 4.92:** η χρονιοϊστορία επιταχύνσεων, τα ελαστικά φάσματα επιταχύνσεων και ταχυτήτων και το φάσμα πλάτους Fourier της συνιστώσα N66W του σταθμού SWNC, για το σεισμικό γεγονός της 13<sup>ης</sup> Ιουνίου του 2011.

*Christchurch*  
**13 Ιουνίου 2011**  
 **$M_w = 5.6$**

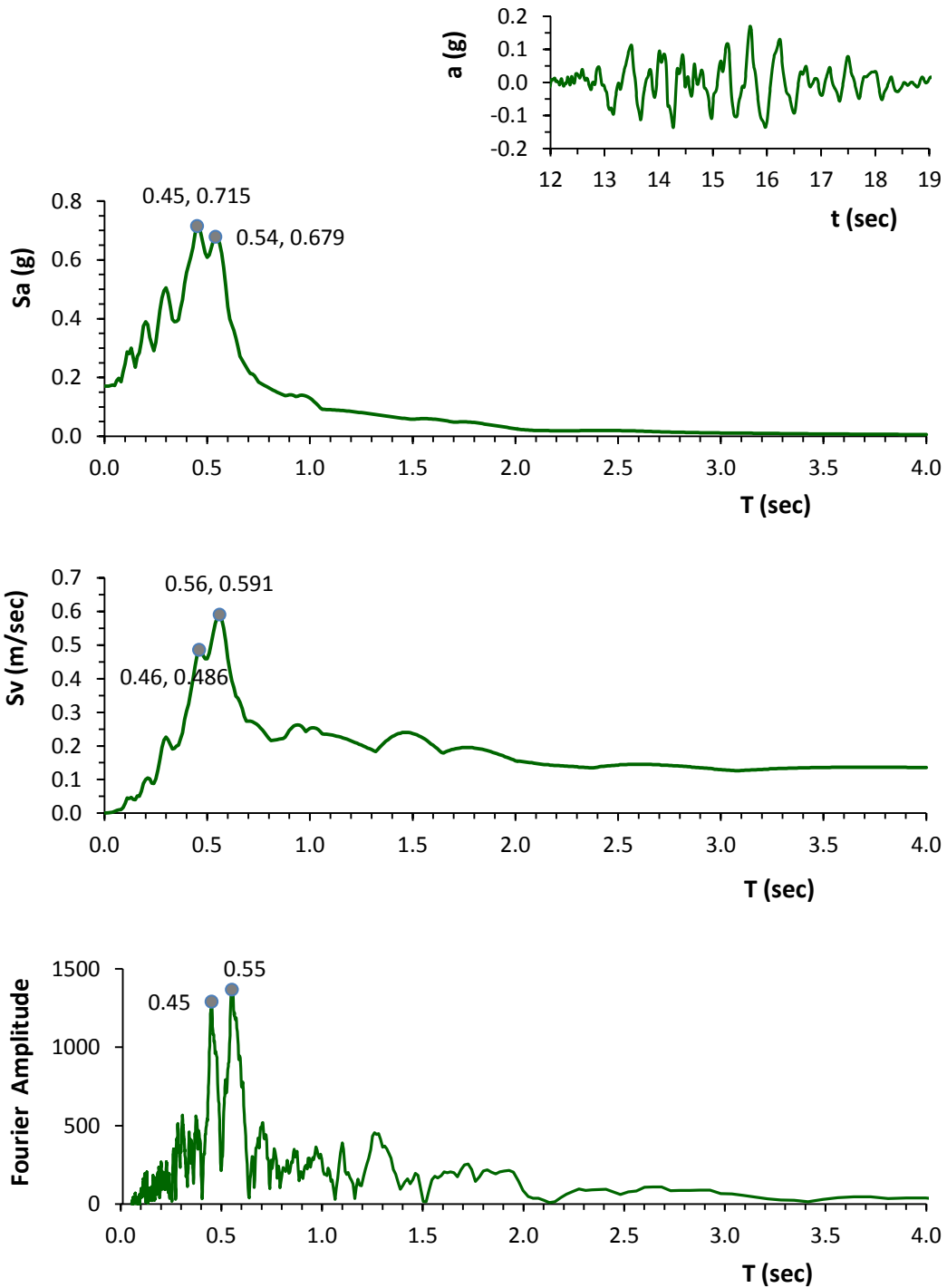
*CBGS - N89W*



**Σχήμα 4.93:** η χρονιοϊστορία επιταχύνσεων, τα ελαστικά φάσματα επιταχύνσεων και ταχύτητων και το φάσμα πλάτους Fourier της συνιστώσα N89W του σταθμού CBGS, για το σεισμικό γεγονός της 13<sup>ης</sup> Ιουνίου του 2011,  $M_w = 5.63$ .

*Christchurch*  
**13 Ιουνίου 2011**  
 **$M_w = 5.6$**

*CBGS - S01W*

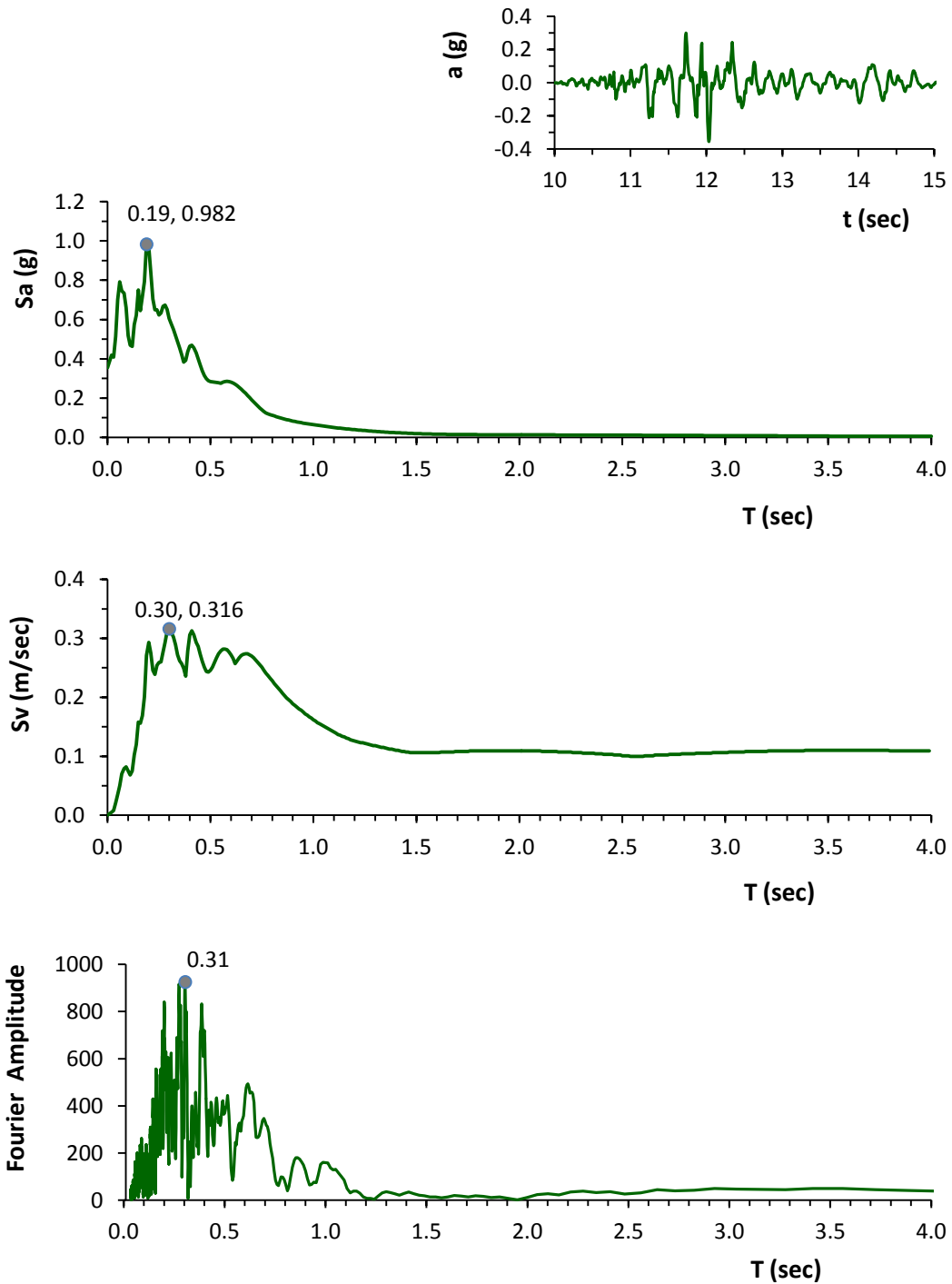


**Σχήμα 4.94:** η χρονιοϊστορία επιταχύνσεων, τα ελαστικά φάσματα επιταχύνσεων και ταχύτητων και το φάσμα πλάτους Fourier της συνιστώσα S01W του σταθμού CBGS, για το σεισμικό γεγονός της 13<sup>ης</sup> Ιουνίου του 2011,  $M_w = 5.63$ .



Christchurch  
13 Ιουνίου 2011  
 $M_w = 5.6$

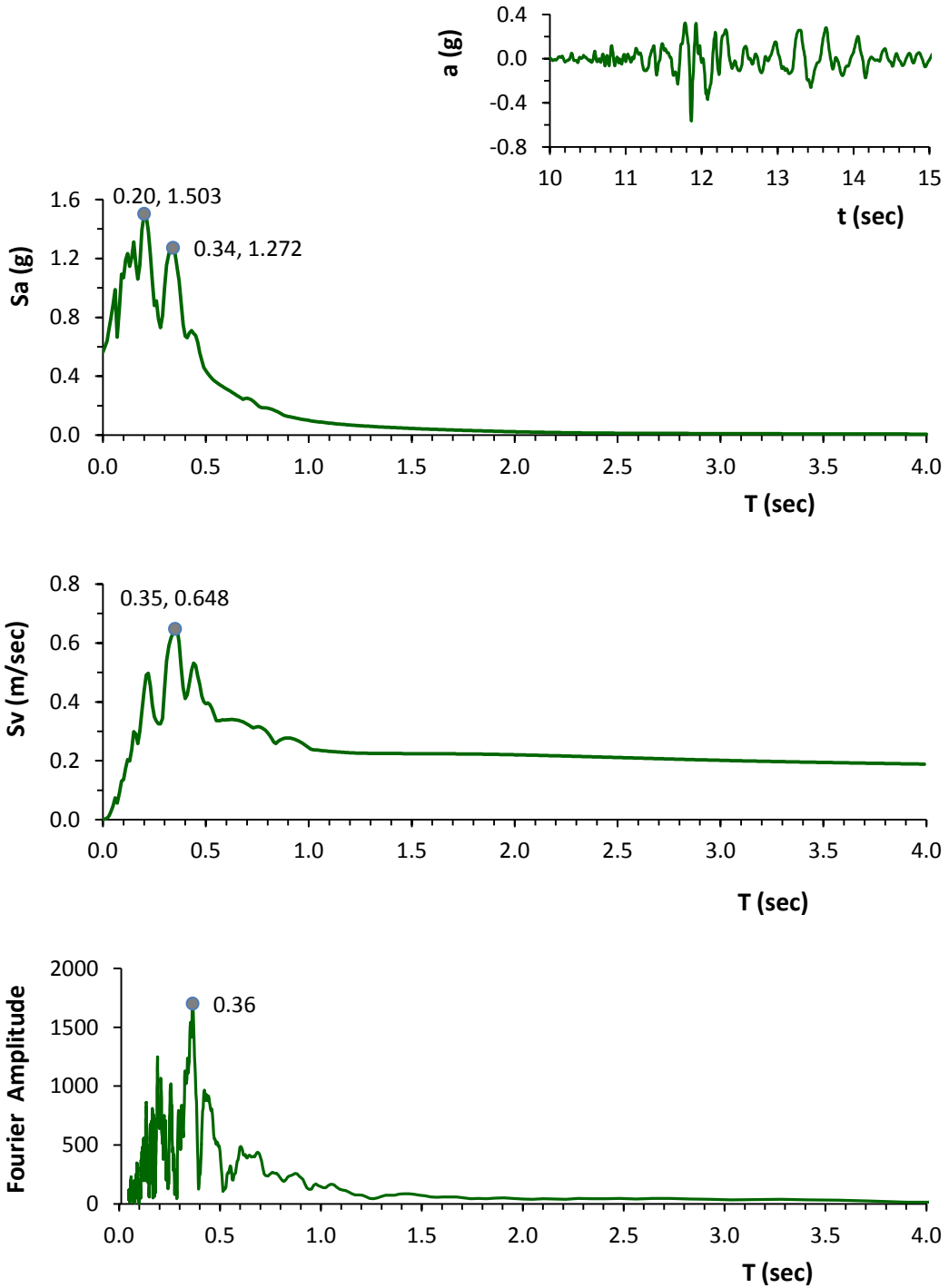
HVSC - S26W



**Σχήμα 4.95:** η χρονιοϊστορία επιταχύνσεων, τα ελαστικά φάσματα επιταχύνσεων και ταχύτητων και το φάσμα πλάτους Fourier της συνιστώσα S26W του σταθμού HVSC, για το σεισμικό γεγονός της 13<sup>ης</sup> Ιουνίου του 2011,  $M_w = 5.63$ .

*Christchurch*  
**13 Ιουνίου 2011**  
 $M_w = 5.6$

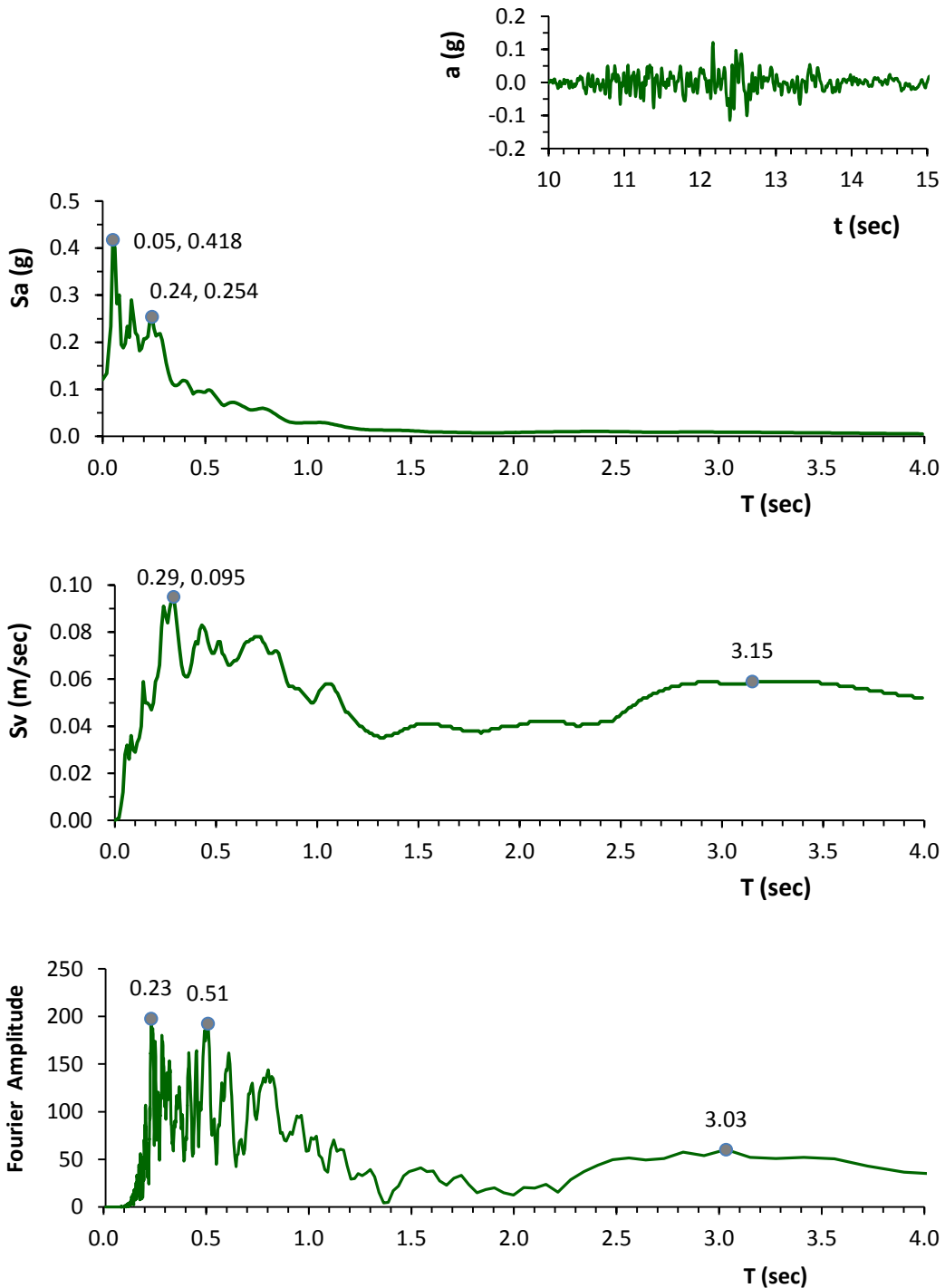
*HVSC - S64E*



**Σχήμα 4.96:** η χρονιοϊστορία επιταχύνσεων, τα ελαστικά φάσματα επιταχύνσεων και ταχύτητων και το φάσμα πλάτους Fourier της συνιστώσα S64E του σταθμού HVSC, για το σεισμικό γεγονός της 13<sup>ης</sup> Ιουνίου του 2011,  $M_w = 5.63$ .

*Christchurch*  
**13 Ιουνίου 2011**  
 $M_w = 5.6$

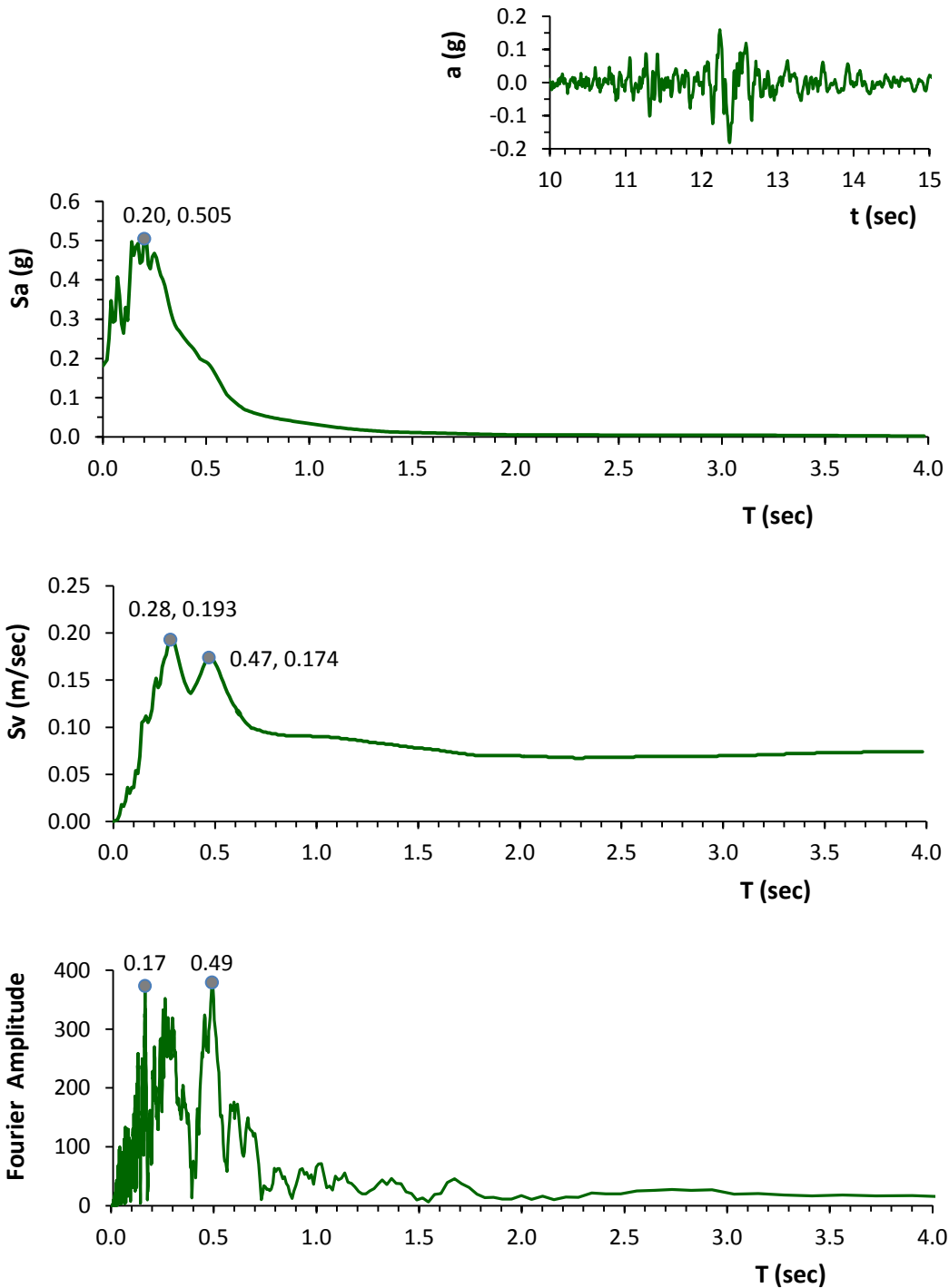
*LPCC - N10W*



**Σχήμα 4.97:** η χρονιοϊστορία επιταχύνσεων, τα ελαστικά φάσματα επιταχύνσεων και ταχυτήτων και το φάσμα πλάτους Fourier της συνιστώσα N10W του σταθμού LPCC, για το σεισμικό γεγονός της 13<sup>ης</sup> Ιουνίου του 2011,  $M_w = 5.63$ .

*Christchurch*  
**13 Ιουνίου 2011**  
 **$M_w = 5.6$**

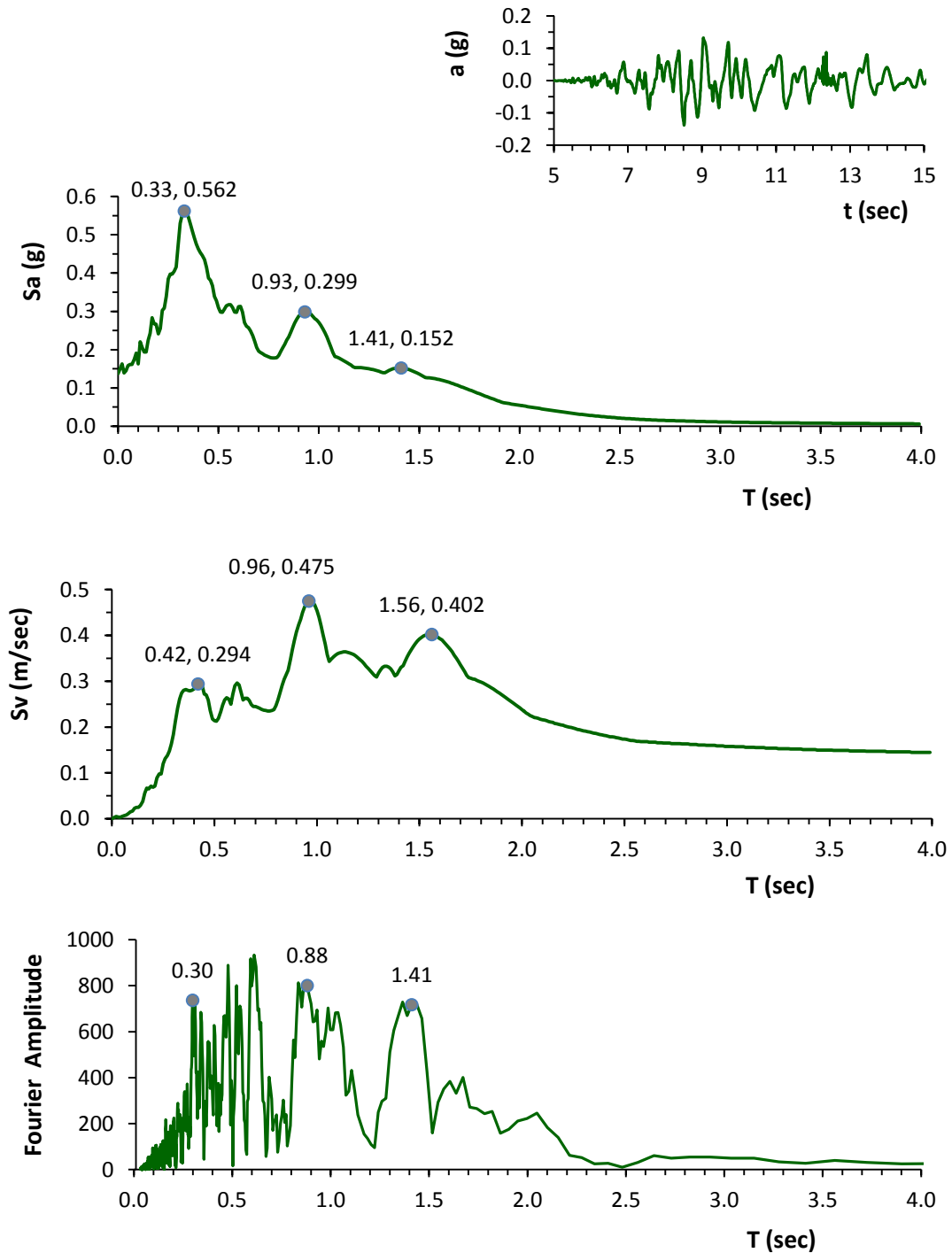
*LPCC - S80W*



**Σχήμα 4.98:** η χρονιοϊστορία επιταχύνσεων, τα ελαστικά φάσματα επιταχύνσεων και ταχύτητων και το φάσμα πλάτους Fourier της συνιστώσα S80W του σταθμού LPCC, για το σεισμικό γεγονός της 13<sup>ης</sup> Ιουνίου του 2011,  $M_w = 5.63$ .

*Christchurch*  
**13 Ιουνίου 2011**  
 $M_w = 5.6$

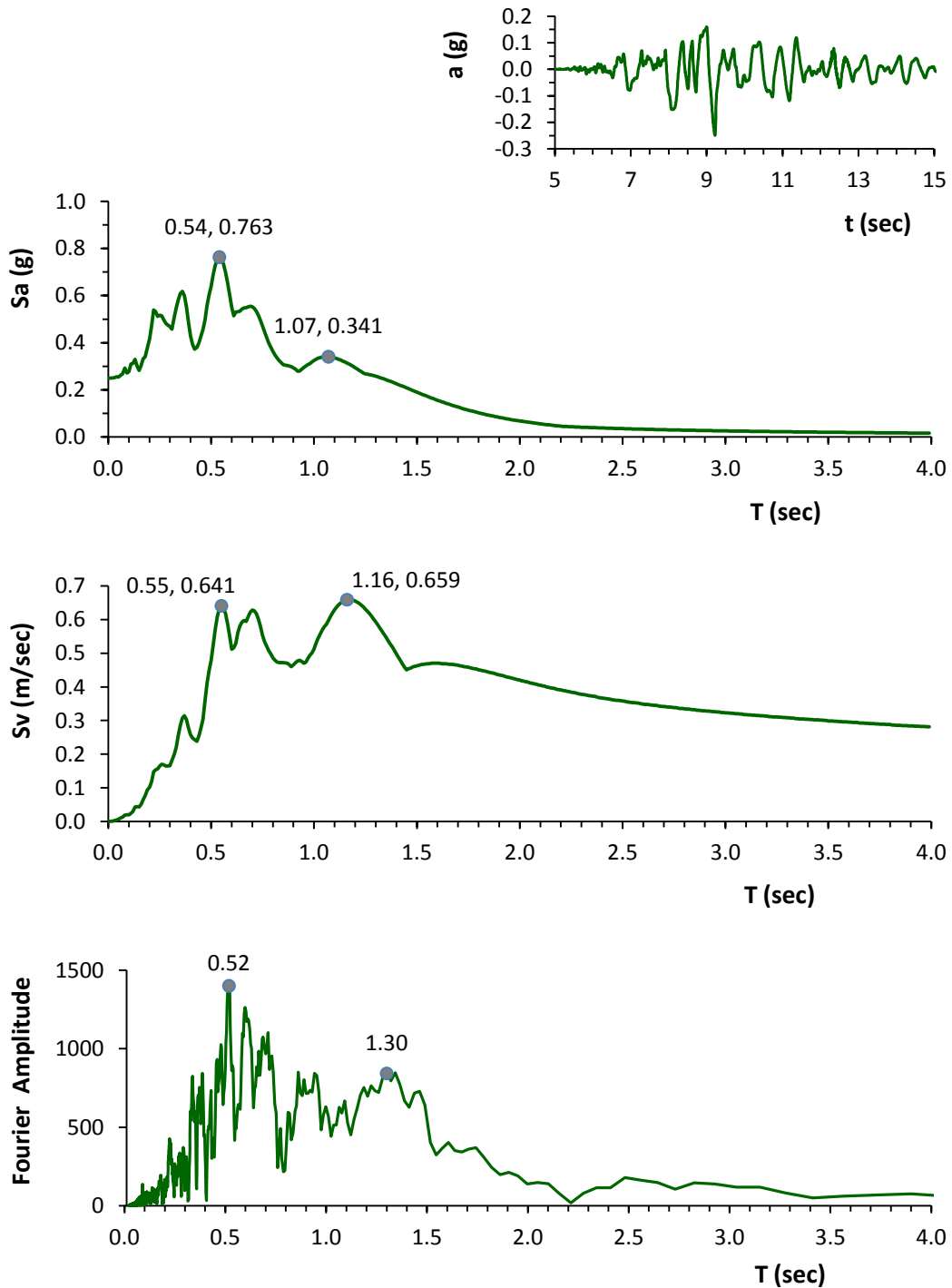
*REHS - NO2E*



**Σχήμα 4.99:** η χρονιοϊστορία επιταχύνσεων, τα ελαστικά φάσματα επιταχύνσεων και ταχυτήτων και το φάσμα πλάτους Fourier της συνιστώσα NO2E του σταθμού REHS, για το σεισμικό γεγονός της 13<sup>ης</sup> Ιουνίου του 2011,  $M_w = 5.63$ .

**Christchurch**  
**13 Ιουίου 2011**  
 **$M_w = 5.6$**

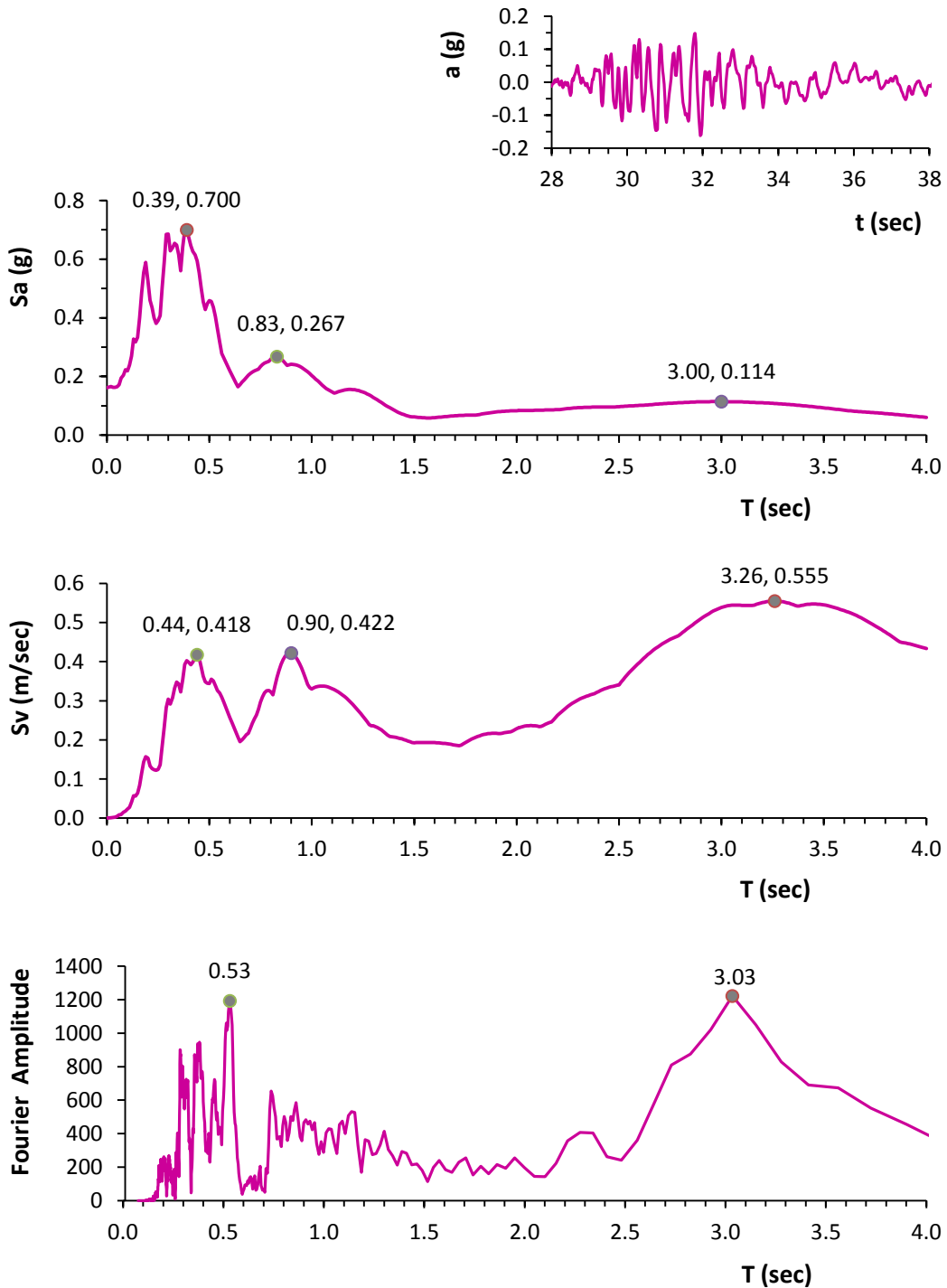
**REHS-S88E**



**Σχήμα 4.100:** η χρονιοιστορία επιταχύνσεων, τα ελαστικά φάσματα επιταχύνσεων και ταχύτητων και το φάσμα πλάτους Fourier της συνιστώσα S88E του σταθμού REHS, για το σεισμικό γεγονός της 13<sup>ης</sup> Ιουίου του 2011,  $M_w = 5.63$ .

*Christchurch*  
23 Δεκεμβρίου 2011  
 $M_w = 5.8$

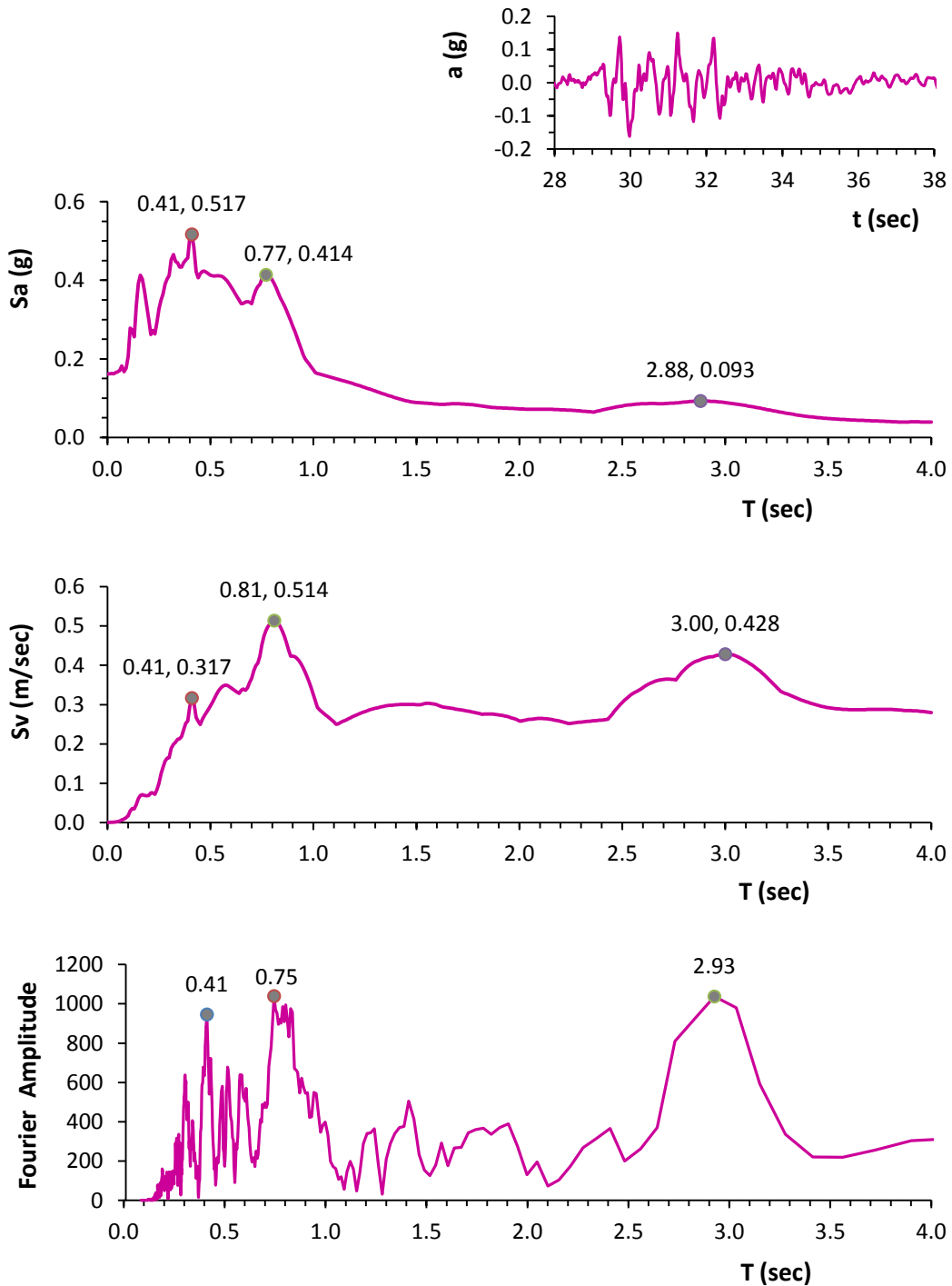
*CBGS - N89W*



**Σχήμα 4.101:** η χρονιοστορία επιταχύνσεων, τα ελαστικά φάσματα επιταχύνσεων και ταχύτητων και το φάσμα πλάτους Fourier της συνιστώσα N89W του σταθμού CBGS, για το σεισμικό γεγονός της 23<sup>ης</sup> Δεκεμβρίου του 2011,  $M_w = 5.8$ .

**Christchurch**  
**23 Δεκεμβρίου 2011**  
 **$M_w = 5.8$**

**CBGS - S01W**

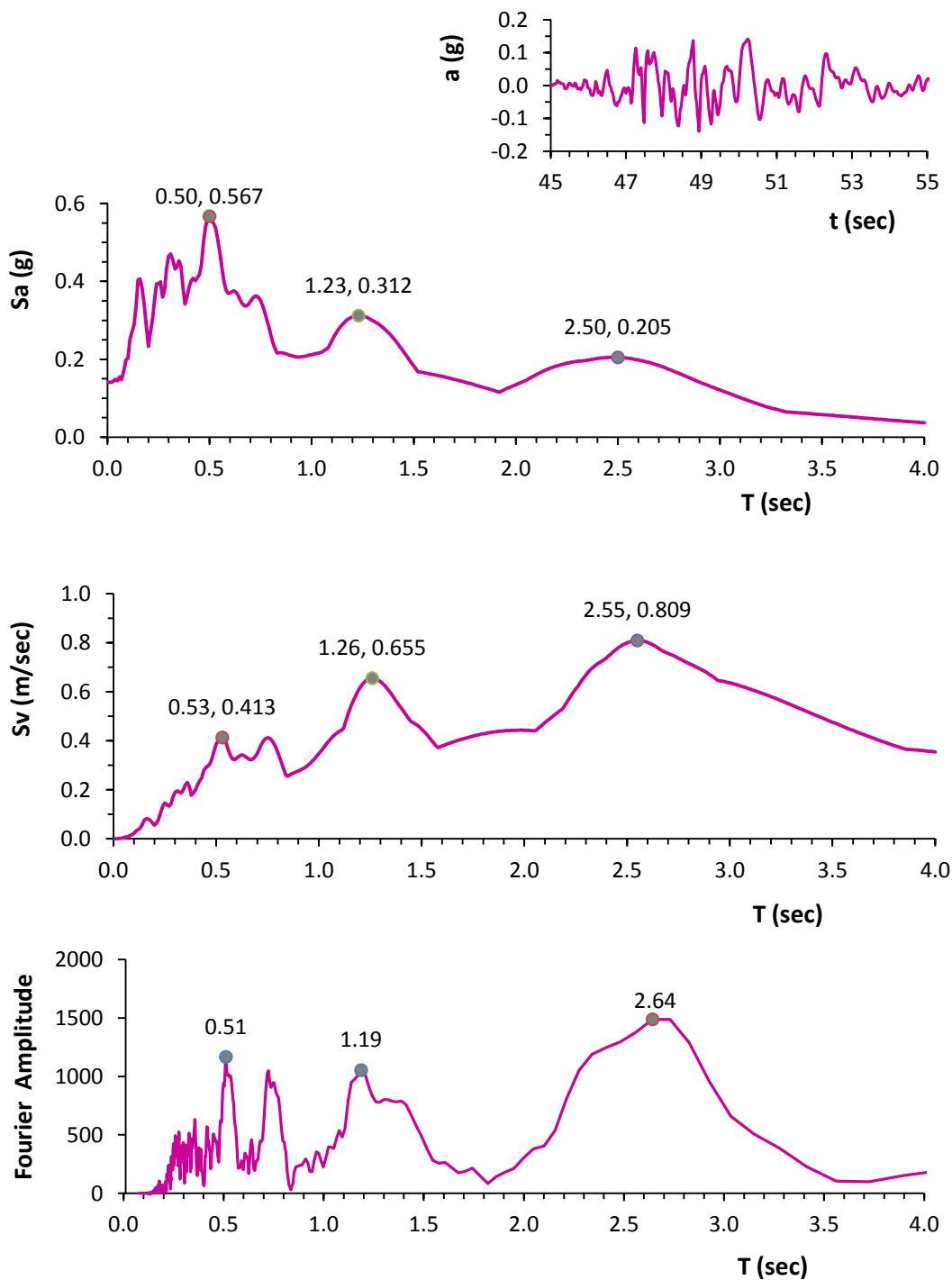


**Σχήμα 4.102:** η χρονιοϊστορία επιταχύνσεων, τα ελαστικά φάσματα επιταχύνσεων και ταχυτήτων και το φάσμα πλάτους Fourier της συνιστώσα S01W του σταθμού CBGS, για το σεισμικό γεγονός της 23<sup>ης</sup> Δεκεμβρίου του 2011,  $M_w = 5.8$ .



**Christchurch**  
**23 Δεκεμβρίου 2011**  
 **$M_w = 5.8$**

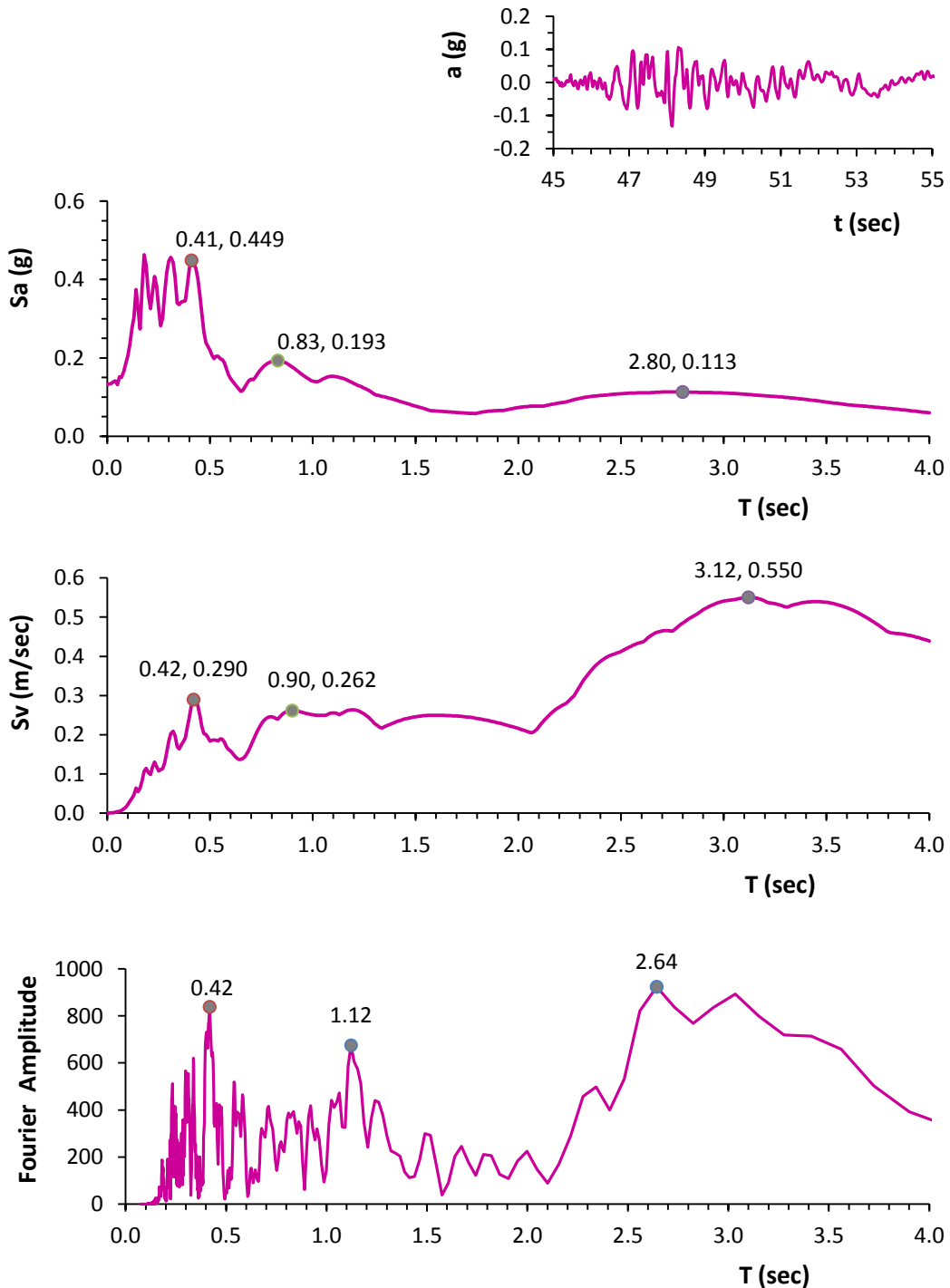
**CCCC – N26W**



**Σχήμα 4.103:** η χρονιοιστορία επιταχύνσεων, τα ελαστικά φάσματα επιταχύνσεων και ταχύτητων και το φάσμα πλάτους Fourier της συνιστώσα N26W του σταθμού CCCC, για το σεισμικό γεγονός της 23<sup>ης</sup> Δεκεμβρίου του 2011,  $M_w = 5.8$ .

**Christchurch**  
**23 Δεκεμβρίου 2011**  
 **$M_w = 5.8$**

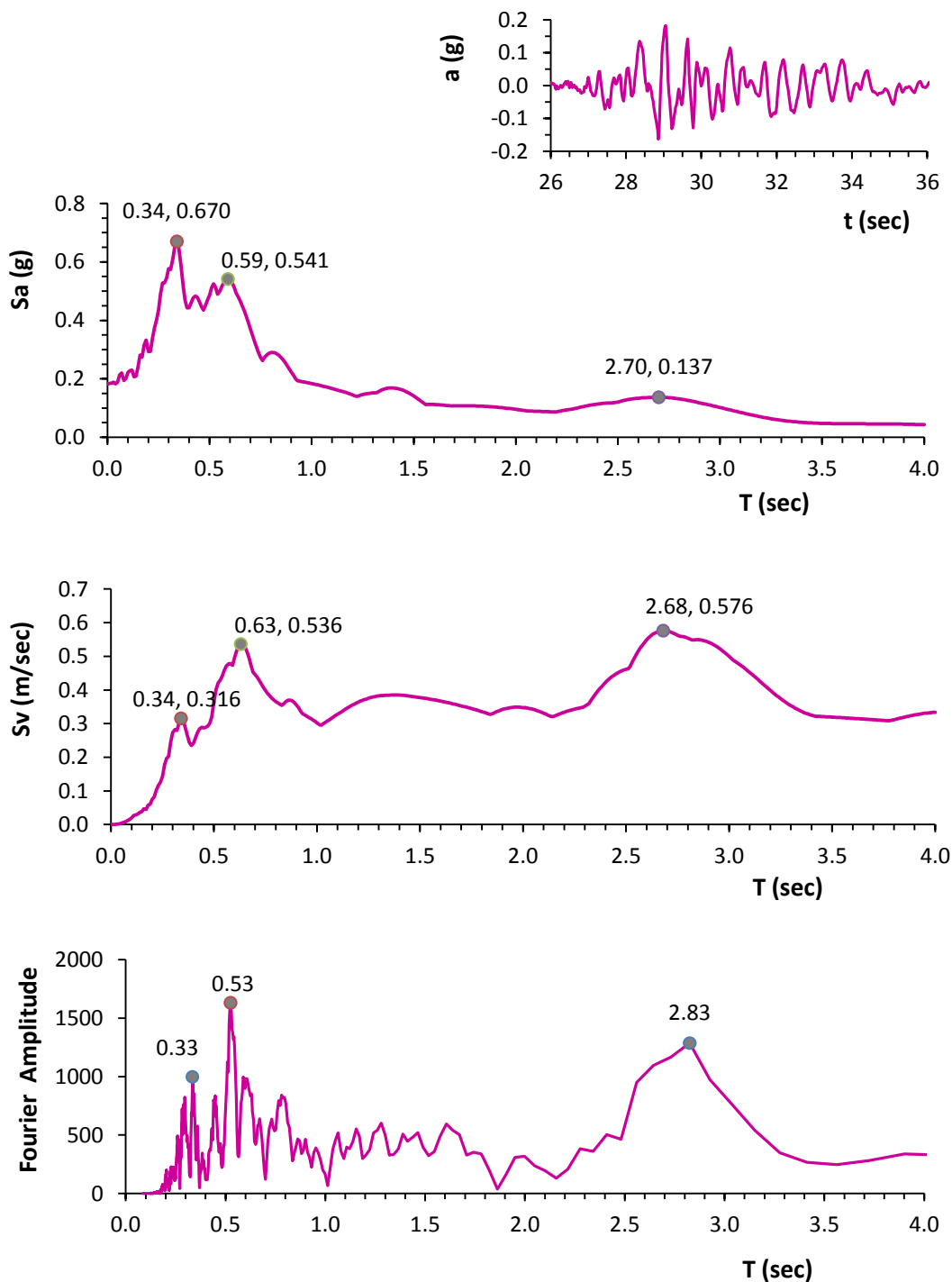
**CCCC - N64E**



**Σχήμα 4.104:** η χρονιοϊστορία επιταχύνσεων, τα ελαστικά φάσματα επιταχύνσεων και ταχύτητων και το φάσμα πλάτους Fourier της συνιστώσα N64E του σταθμού CCCC, για το σεισμικό γεγονός της 23<sup>ης</sup> Δεκεμβρίου του 2011,  $M_w = 5.8$ .

*Christchurch*  
**23 Δεκεμβρίου 2011**  
 $M_w = 5.8$

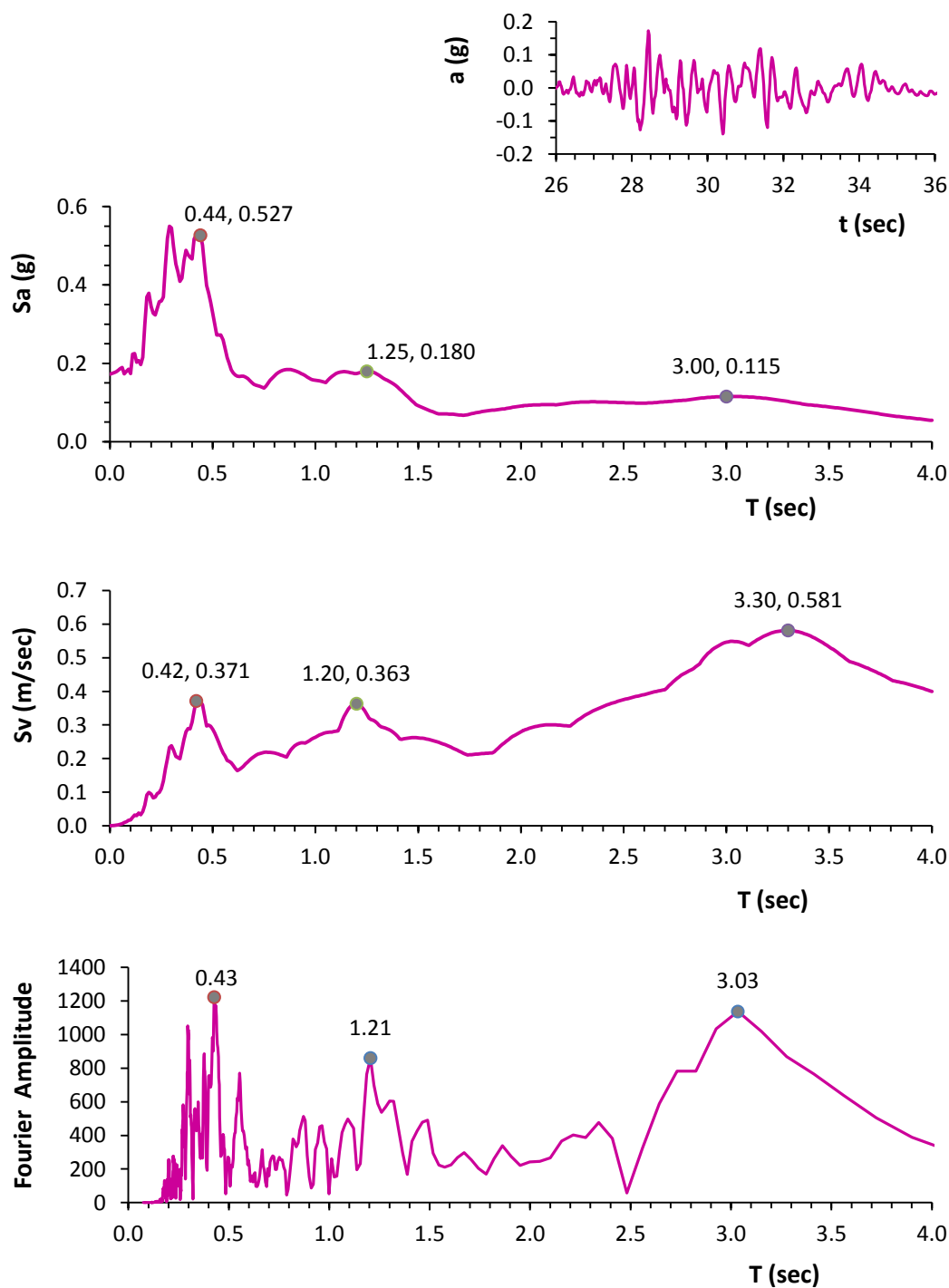
*CHHC - Νο1W*



**Σχήμα 4.105:** η χρονιοϊστορία επιταχύνσεων, τα ελαστικά φάσματα επιταχύνσεων και ταχυτήτων και το φάσμα πλάτους Fourier της συνιστώσα N01W του σταθμού CHHC, για το σεισμικό γεγονός της 23<sup>ης</sup> Δεκεμβρίου του 2011,  $M_w=5.8$ .

**Christchurch**  
**23 Δεκεμβρίου 2011**  
 **$M_w = 5.8$**

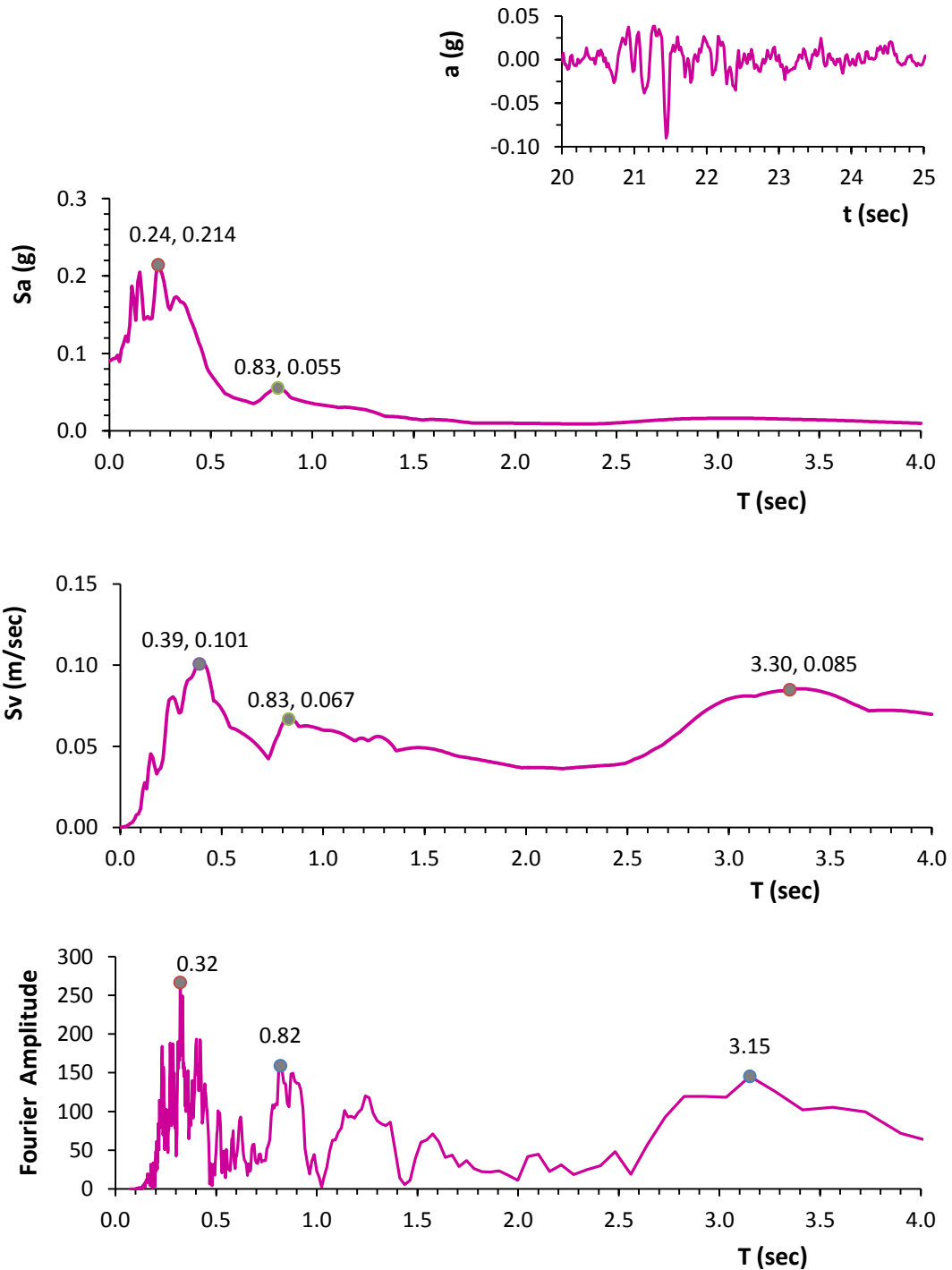
**CHHC - S89W**



**Σχήμα 4.106:** η χρονιοϊστορία επιταχύνσεων, τα ελαστικά φάσματα επιταχύνσεων και ταχυτήτων και το φάσμα πλάτους Fourier της συνιστώσα S89W του σταθμού CHHC, για το σεισμικό γεγονός της 23<sup>ης</sup> Δεκεμβρίου του 2011,  $M_w = 5.8$ .

**Christchurch**  
**23 Δεκεμβρίου 2011**  
 **$M_w = 5.8$**

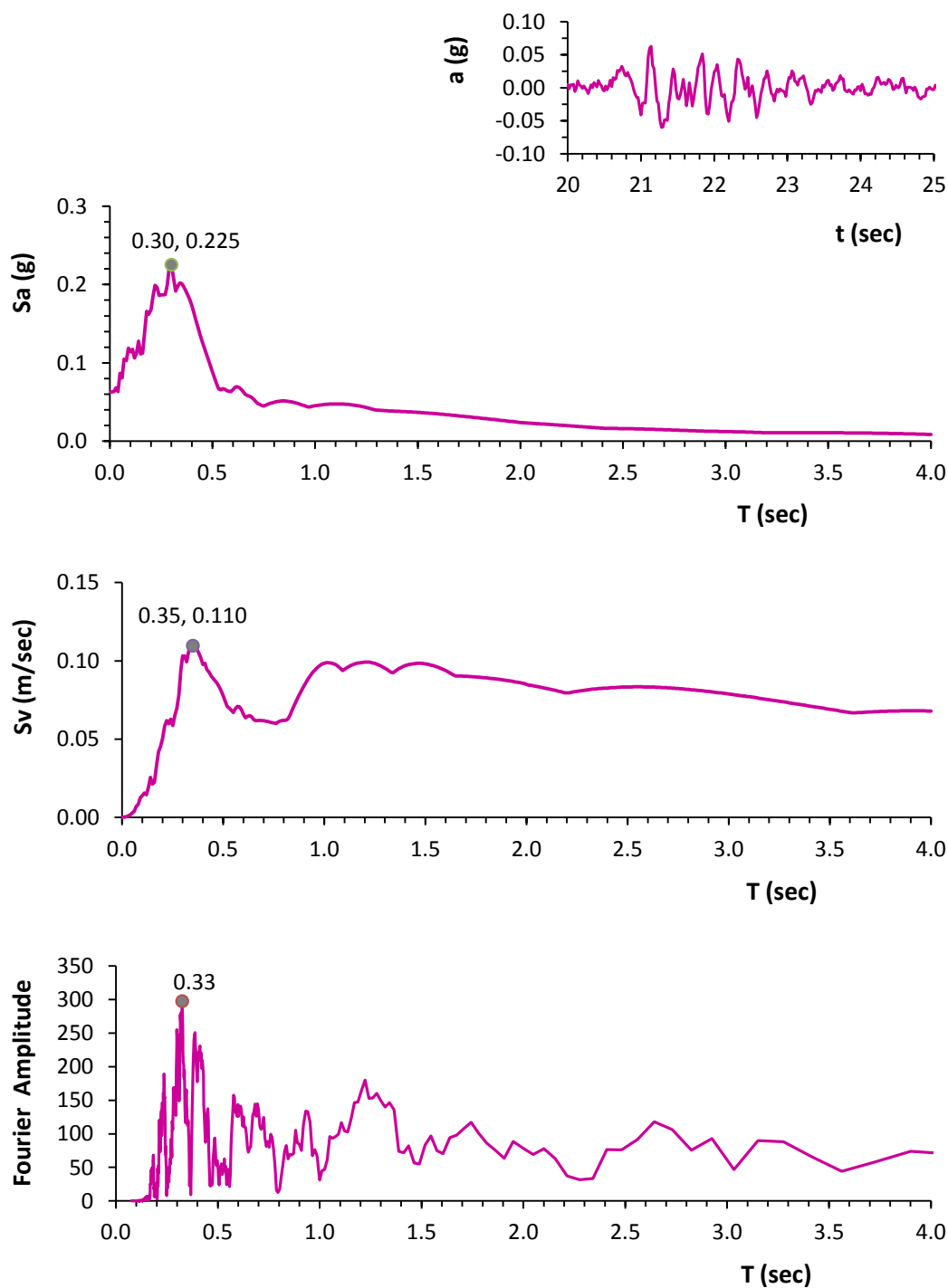
**CRLZ - E**



**Σχήμα 4.107:** η χρονιοϊστορία επιταχύνσεων, τα ελαστικά φάσματα επιταχύνσεων και ταχυτήτων και το φάσμα πλάτους Fourier της συνιστώσα E του σταθμού CRLZ, για το σεισμικό γεγονός της 23<sup>ης</sup> Δεκεμβρίου του 2011,  $M_w = 5.8$ .

**Christchurch**  
**23 Δεκεμβρίου 2011**  
 **$M_w = 5.8$**

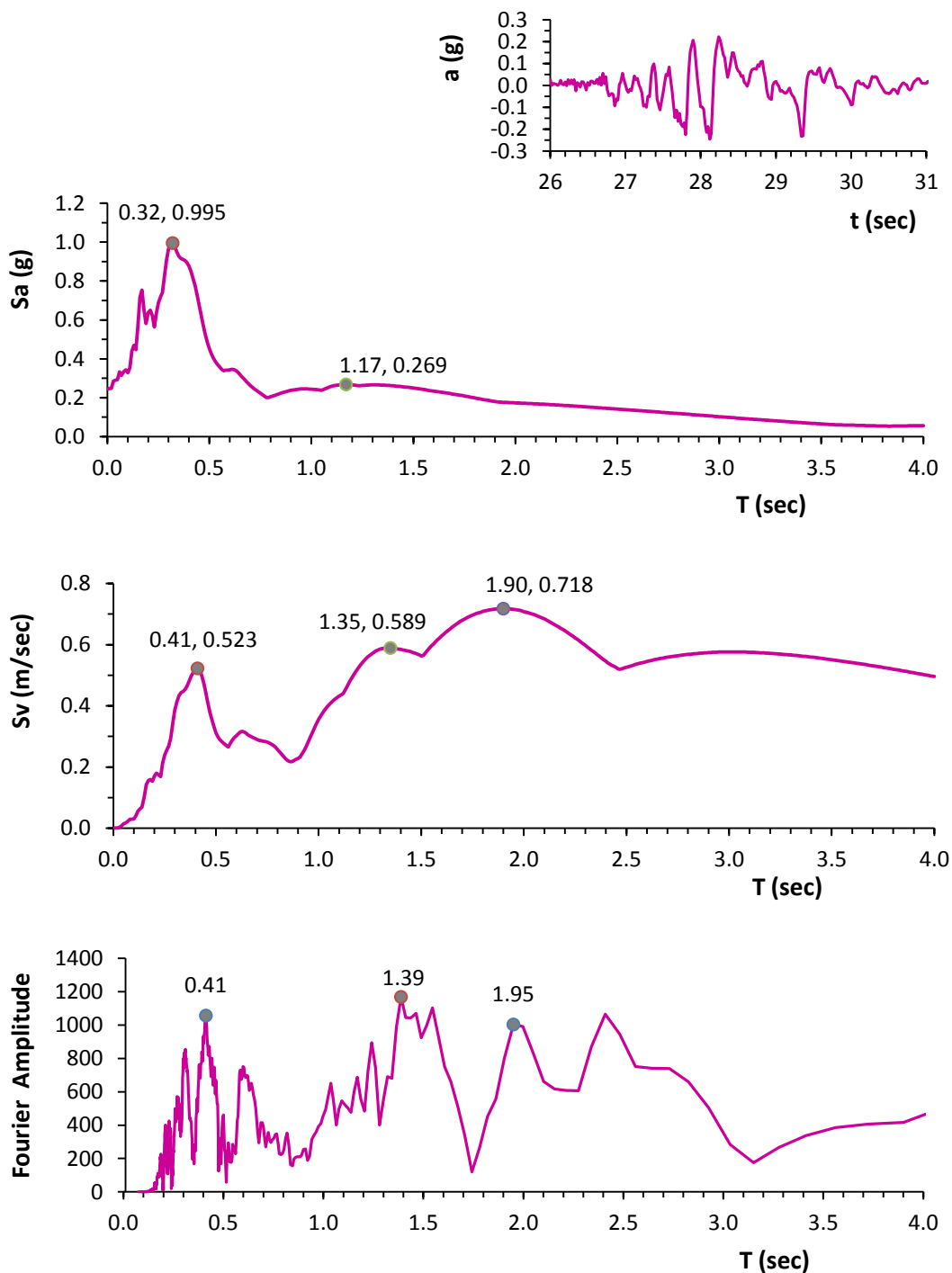
**CRLZ - N**



**Σχήμα 4.108:** η χρονιοϊστορία επιταχύνσεων, τα ελαστικά φάσματα επιταχύνσεων και ταχύτητων και το φάσμα πλάτους Fourier της συνιστώσα N του σταθμού CRLZ, για το σεισμικό γεγονός της 23<sup>ης</sup> Δεκεμβρίου του 2011,  $M_w = 5.8$ .

**Christchurch**  
**23 Δεκεμβρίου 2011**  
 **$M_w = 5.8$**

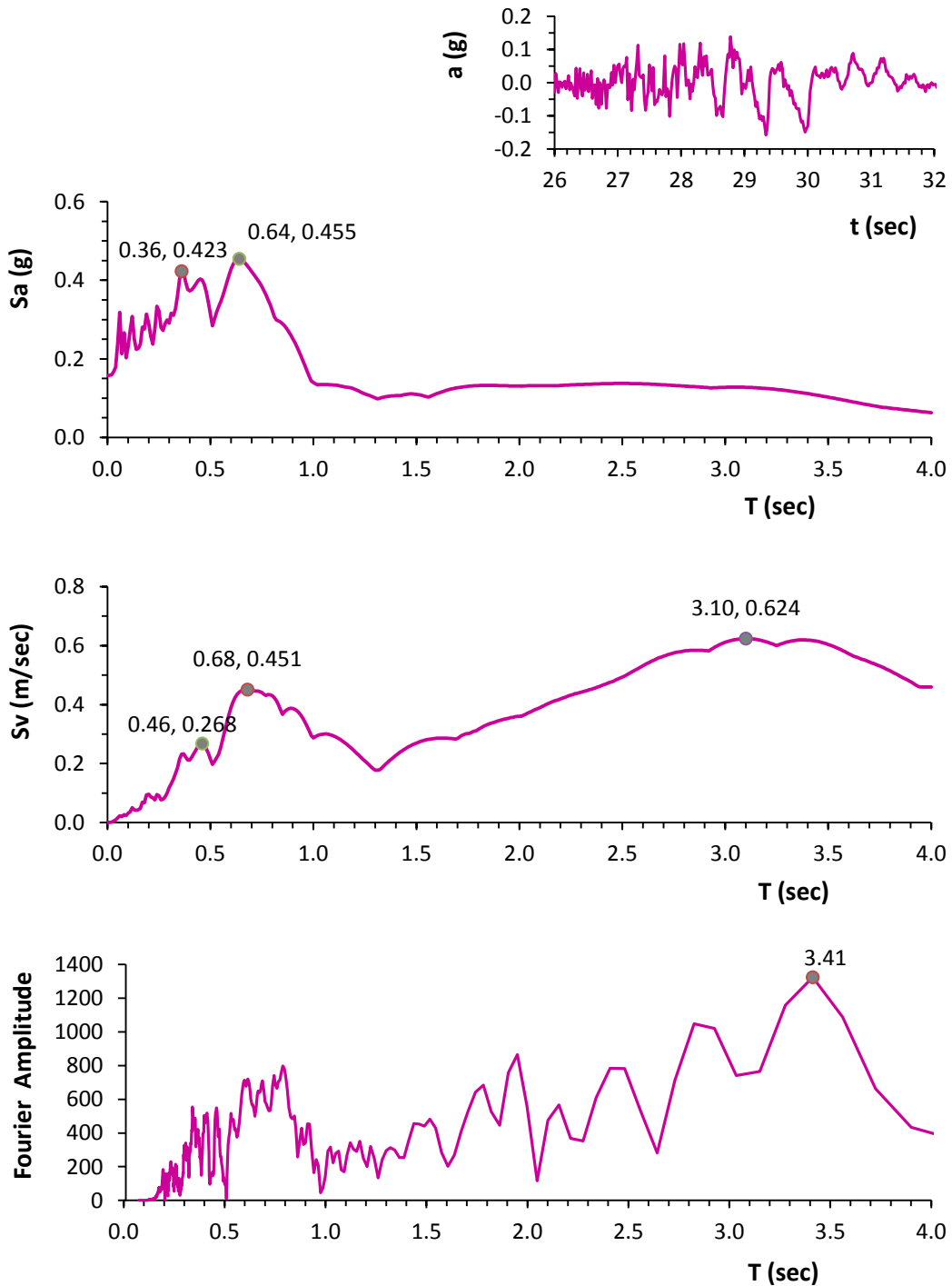
**HPSC - N04W**



**Σχήμα 4.109:** η χρονιοιστορία επιταχύνσεων, τα ελαστικά φάσματα επιταχύνσεων και ταχύτητων και το φάσμα πλάτους Fourier της συνιστώσα N04W του σταθμού HPSC, για το σεισμικό γεγονός της 23<sup>ης</sup> Δεκεμβρίου του 2011,  $M_w = 5.8$ .

*Christchurch*  
23 Δεκεμβρίου 2011  
 $M_w = 5.8$

*HPSC - S86W*

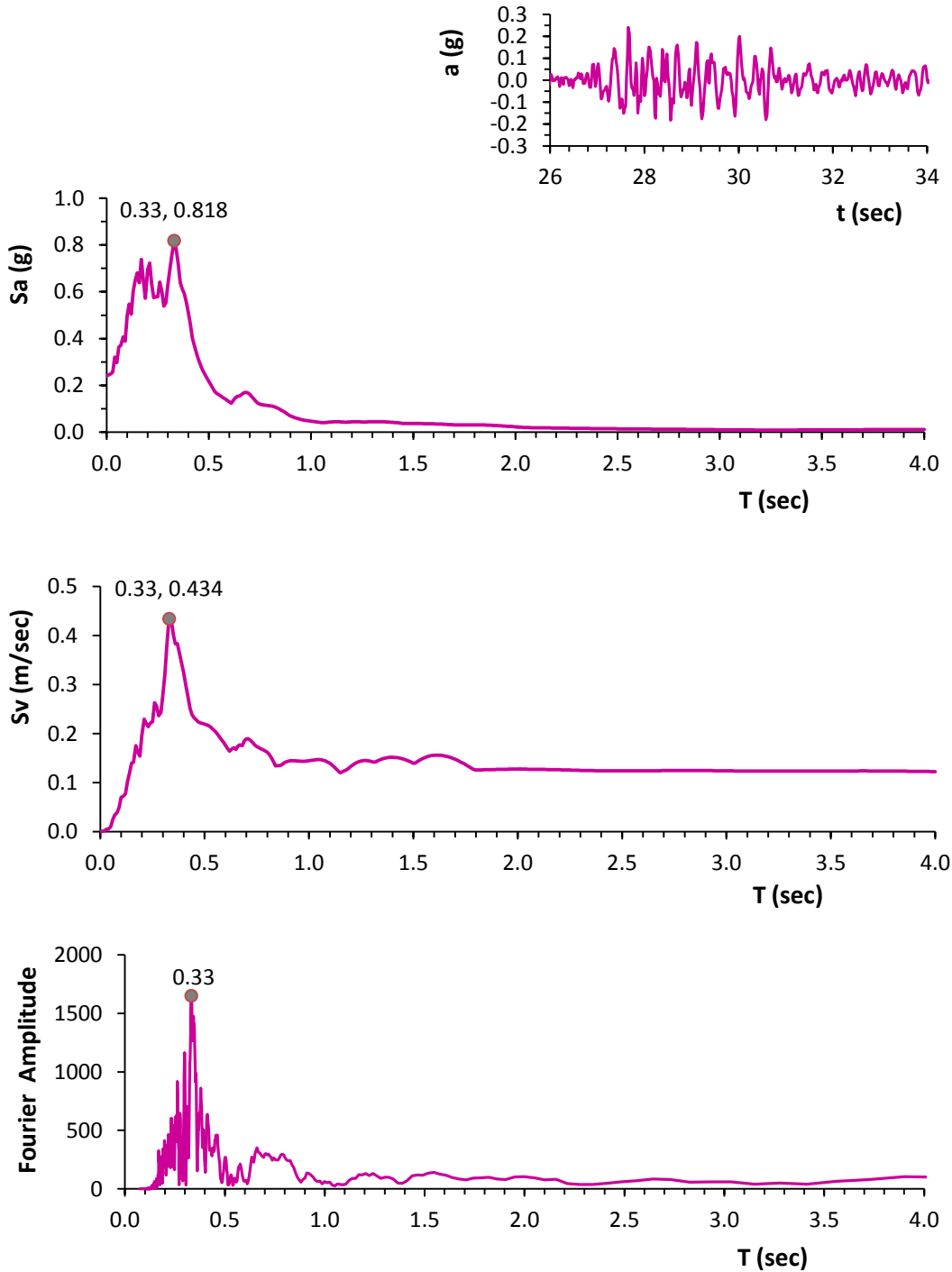


**Σχήμα 4.110:** η χρονιοιστορία επιταχύνσεων, τα ελαστικά φάσματα επιταχύνσεων και ταχυτήτων και το φάσμα πλάτους Fourier της συνιστώσα S86W του σταθμού HPSC, για το σεισμικό γεγονός της 23<sup>ης</sup> Δεκεμβρίου του 2011,  $M_w = 5.8$ .



Christchurch  
23 Δεκεμβρίου 2011  
 $M_w = 5.8$

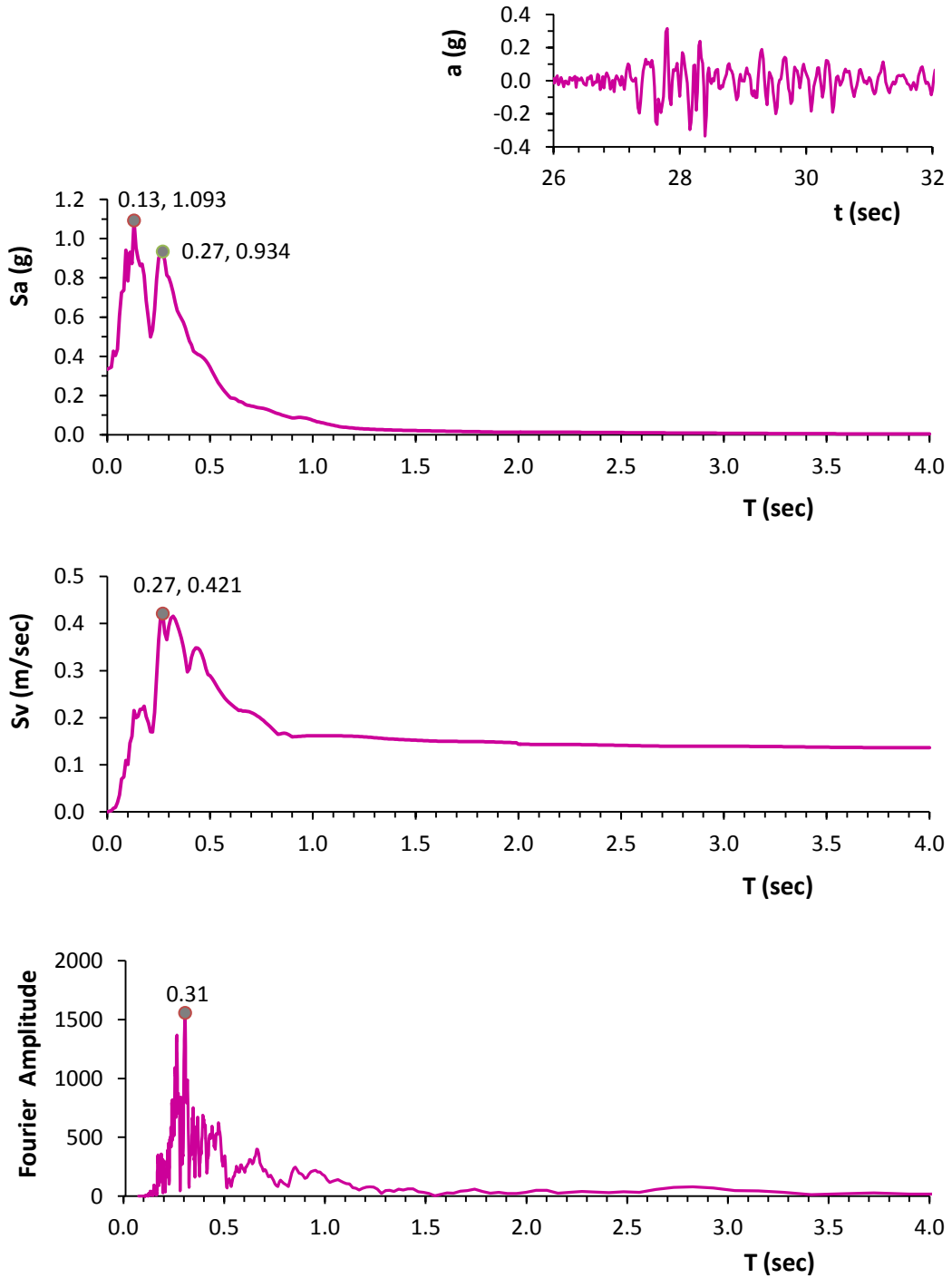
HVSC - S26W



**Σχήμα 4.111:** η χρονιοϊστορία επιταχύνσεων, τα ελαστικά φάσματα επιταχύνσεων και ταχυτήτων και το φάσμα πλάτους Fourier της συνιστώσα S26W του σταθμού HVSC, για το σεισμικό γεγονός της 23<sup>ης</sup> Δεκεμβρίου του 2011,  $M_w = 5.8$ .

**Christchurch**  
**23 Δεκεμβρίου 2011**  
 **$M_w = 5.8$**

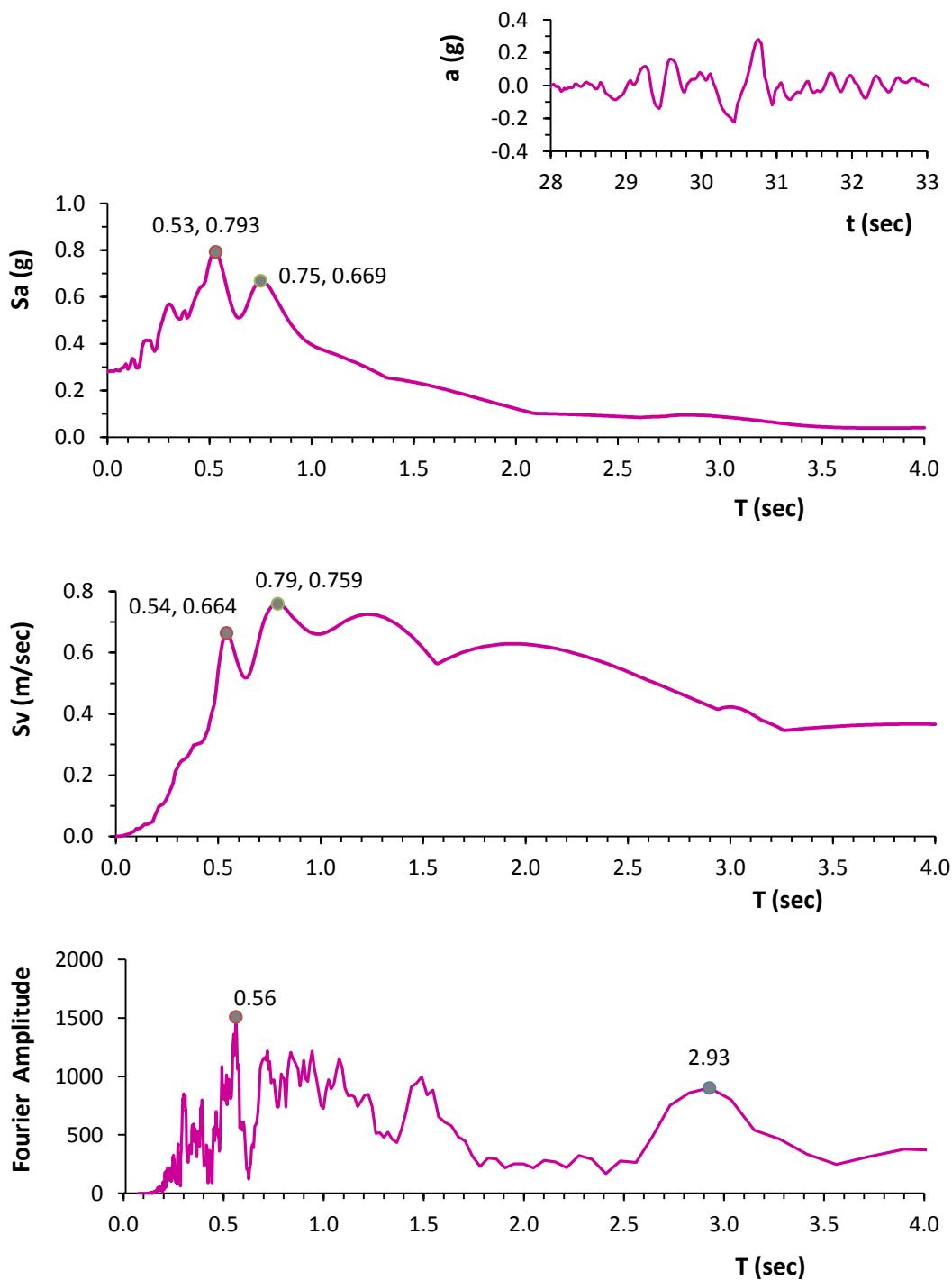
**HVSC - S64E**



**Σχήμα 4.112:** η χρονιοϊστορία επιταχύνσεων, τα ελαστικά φάσματα επιταχύνσεων και ταχύτητων και το φάσμα πλάτους Fourier της συνιστώσα S64E του σταθμού HVSC, για το σεισμικό γεγονός της 23<sup>ης</sup> Δεκεμβρίου του 2011,  $M_w = 5.8$ .

**Christchurch**  
**23 Δεκεμβρίου 2011**  
 **$M_w = 5.8$**

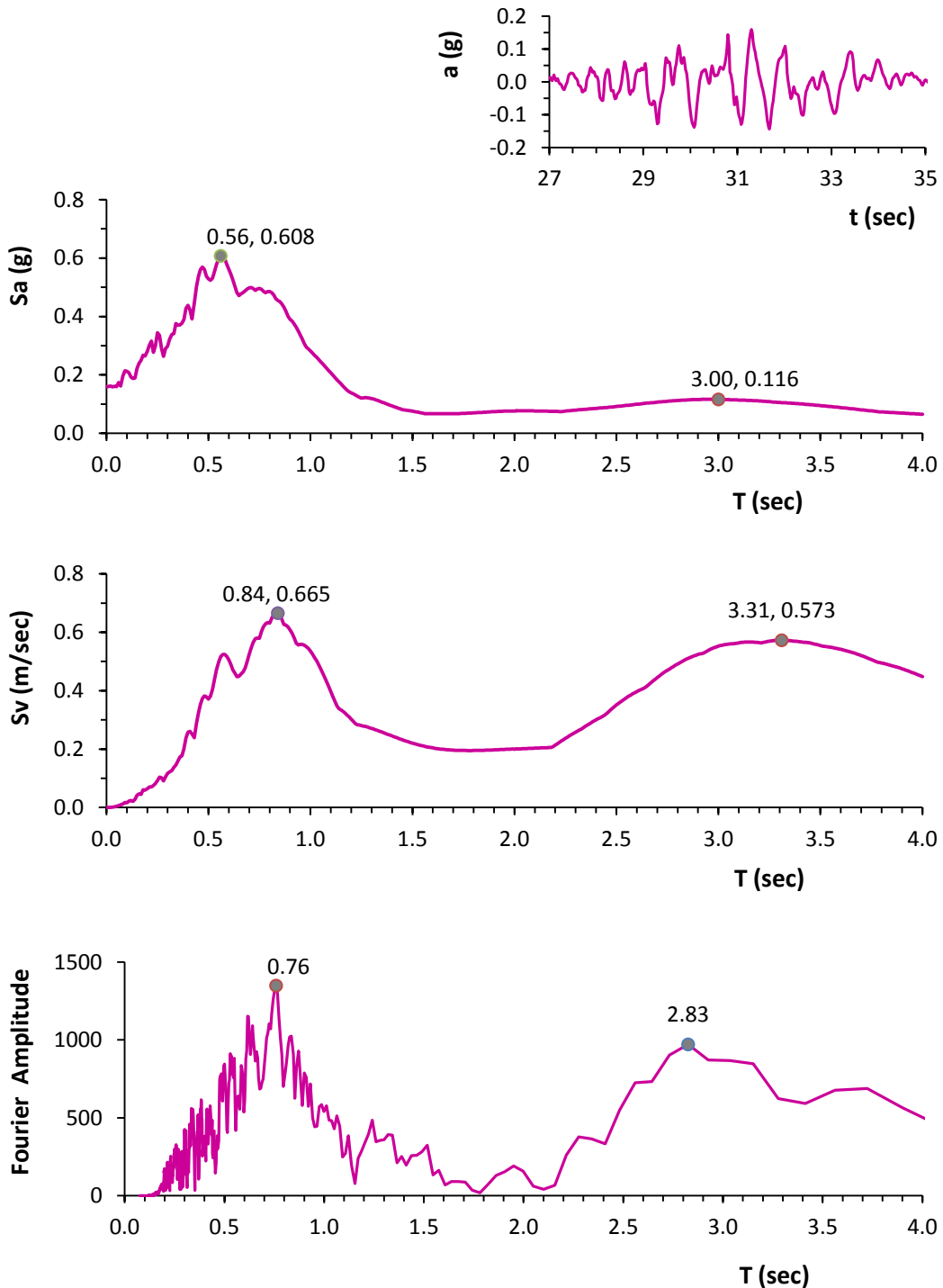
**REHS - NO2E**



**Σχήμα 4.113:** η χρονιοιστορία επιταχύνσεων, τα ελαστικά φάσματα επιταχύνσεων και ταχυτήτων και το φάσμα πλάτους Fourier της συνιστώσα NO2E του σταθμού REHS, για το σεισμικό γεγονός της 23<sup>ης</sup> Δεκεμβρίου του 2011,  $M_w = 5.8$ .

**Christchurch**  
**23 Δεκεμβρίου 2011**  
 **$M_w = 5.8$**

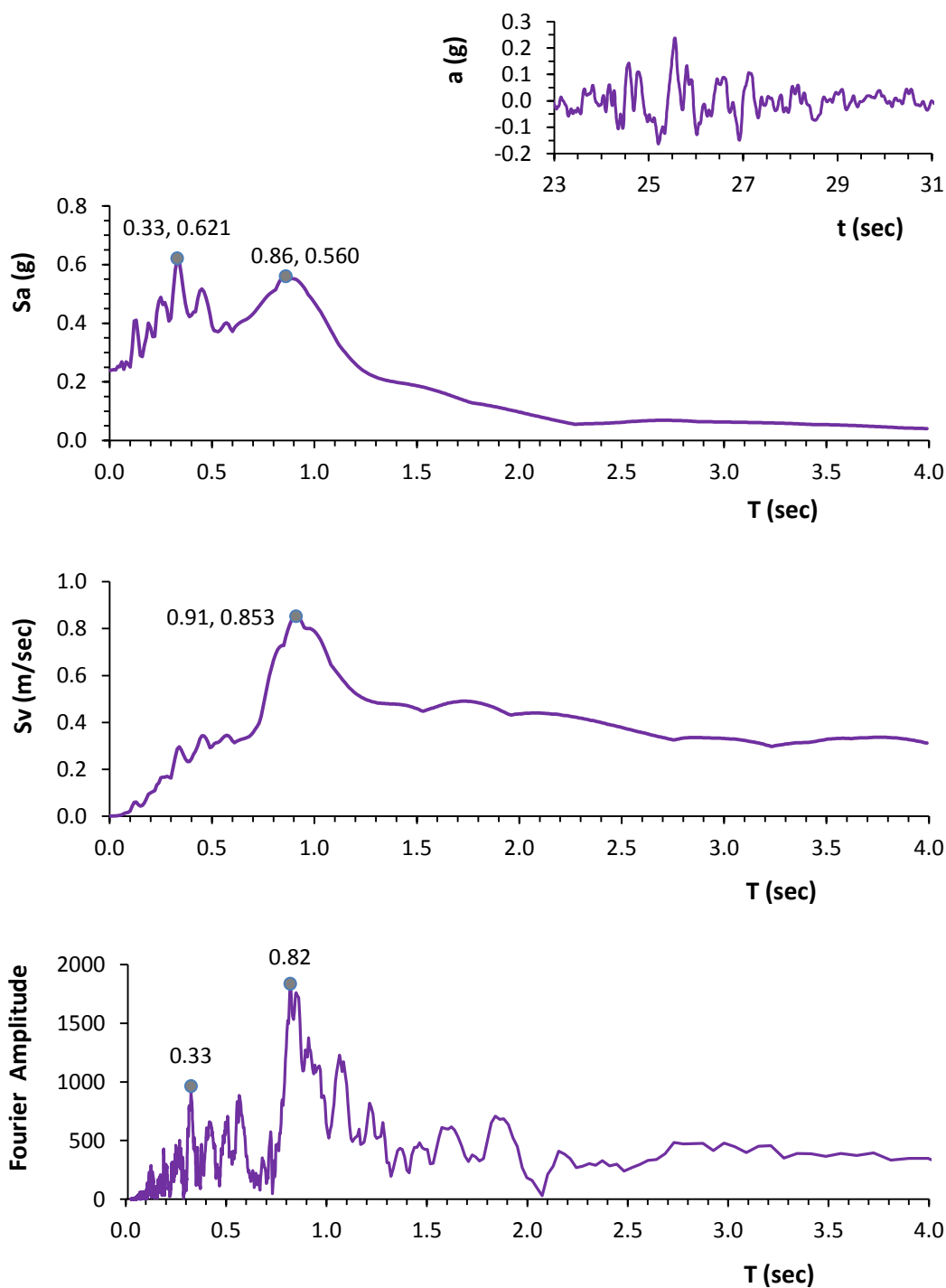
**REHS - S88E**



**Σχήμα 4.114:** η χρονιοϊστορία επιταχύνσεων, τα ελαστικά φάσματα επιταχύνσεων και ταχύτητων και το φάσμα πλάτους Fourier της συνιστώσα S88E του σταθμού REHS, για το σεισμικό γεγονός της 23<sup>ης</sup> Δεκεμβρίου του 2011,  $M_w = 5.8$ .

*Christchurch*  
23 Δεκεμβρίου 2011  
 $M_w = 6$

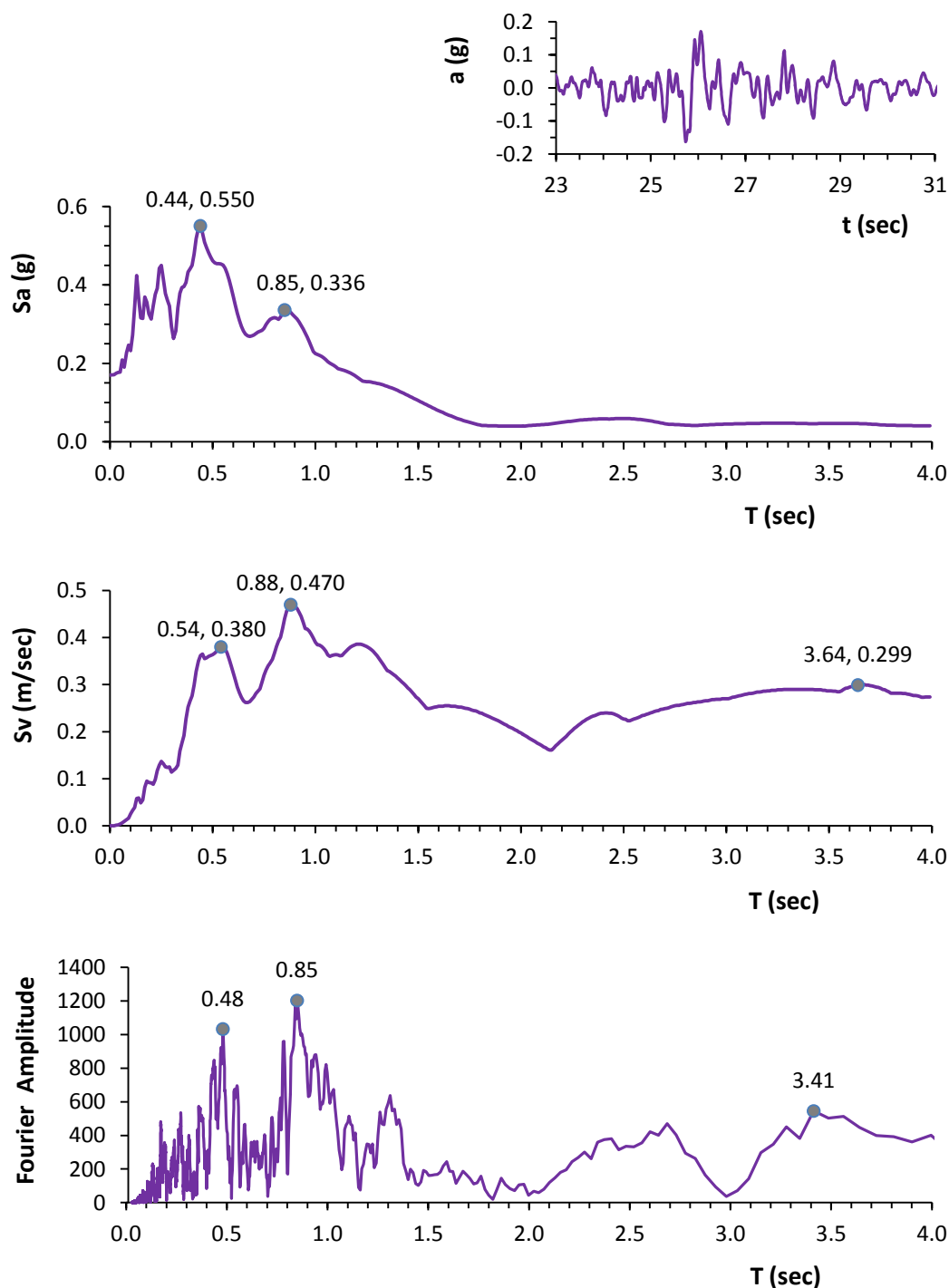
*CBGS - N89W*



**Σχήμα 4.115:** η χρονιοϊστορία επιταχύνσεων, τα ελαστικά φάσματα επιταχύνσεων και ταχυτήτων και το φάσμα πλάτους Fourier της συνιστώσα N89W του σταθμού CBGS, για το σεισμικό γεγονός της 23<sup>ης</sup> Δεκεμβρίου του 2011,  $M_w = 6$ .

**Christchurch**  
**23 Δεκεμβρίου 2011**  
 **$M_w = 6$**

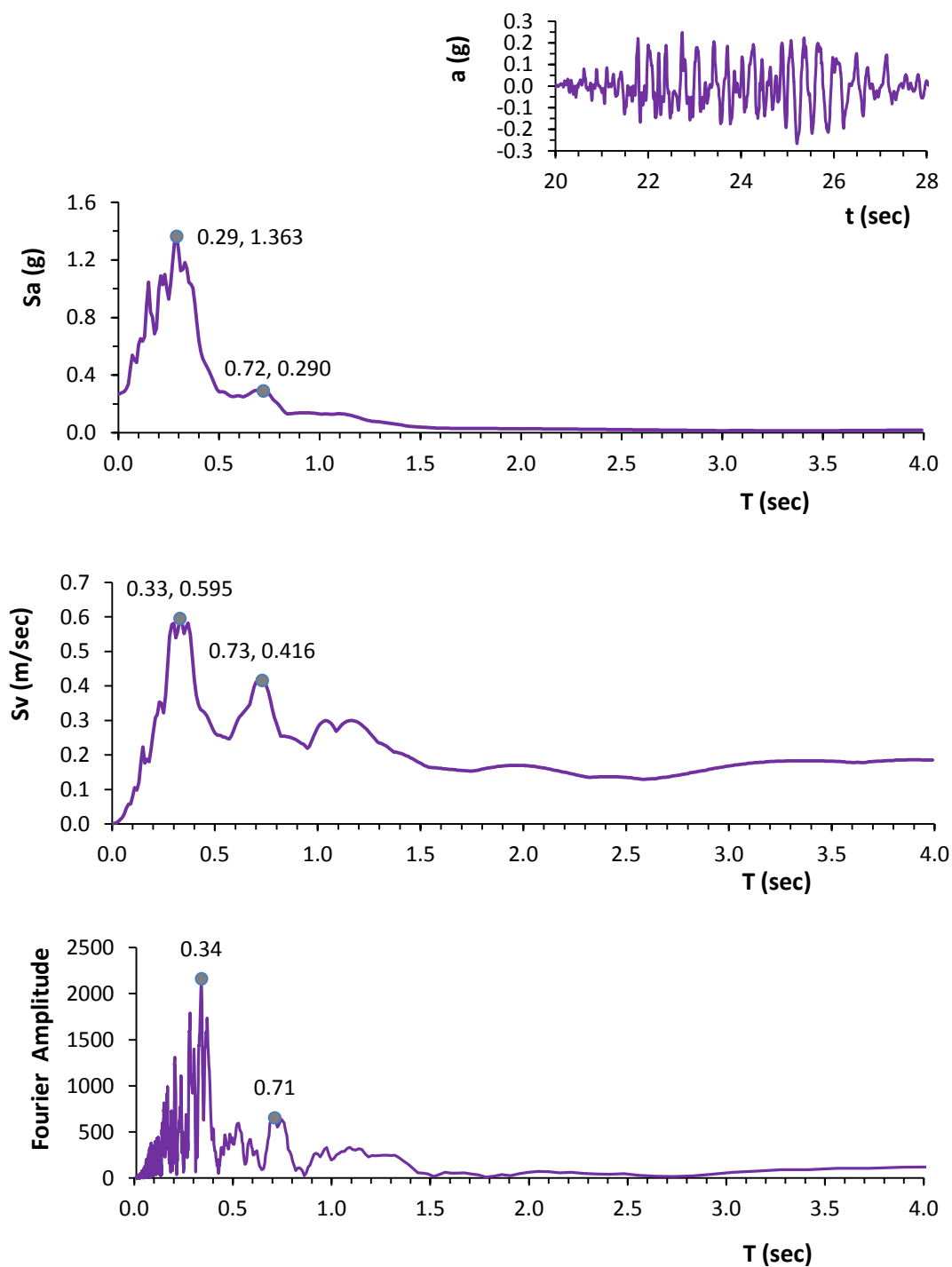
**CBGS - S01W**



**Σχήμα 4.116:** η χρονιοϊστορία επιταχύνσεων, τα ελαστικά φάσματα επιταχύνσεων και ταχυτήτων και το φάσμα πλάτους Fourier της συνιστώσα S01W του σταθμού CBGS, για το σεισμικό γεγονός της 23<sup>ης</sup> Δεκεμβρίου του 2011,  $M_w = 6$ .

*Christchurch*  
23 Δεκεμβρίου 2011  
 $M_w = 6$

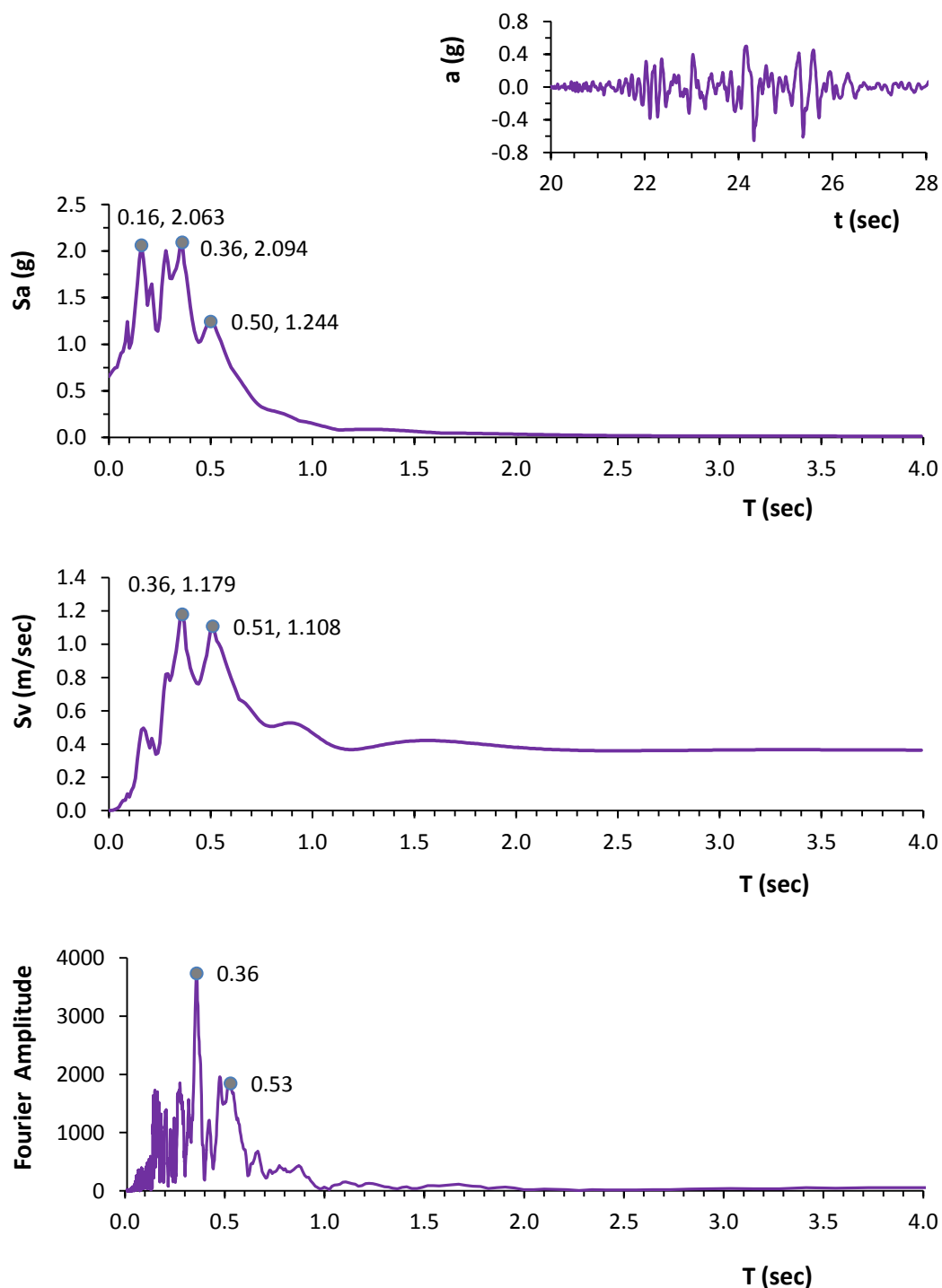
*HVSC - S26W*



**Σχήμα 4.117:** η χρονιοστορία επιταχύνσεων, τα ελαστικά φάσματα επιταχύνσεων και ταχύτητων και το φάσμα πλάτους Fourier της συνιστώσα S26W του σταθμού HVSC, για το σεισμικό γεγονός της 23<sup>ης</sup> Δεκεμβρίου του 2011,  $M_w = 6$ .

**Christchurch**  
**23 Δεκεμβρίου 2011**  
 **$M_w = 6$**

**HVSC - S64E**

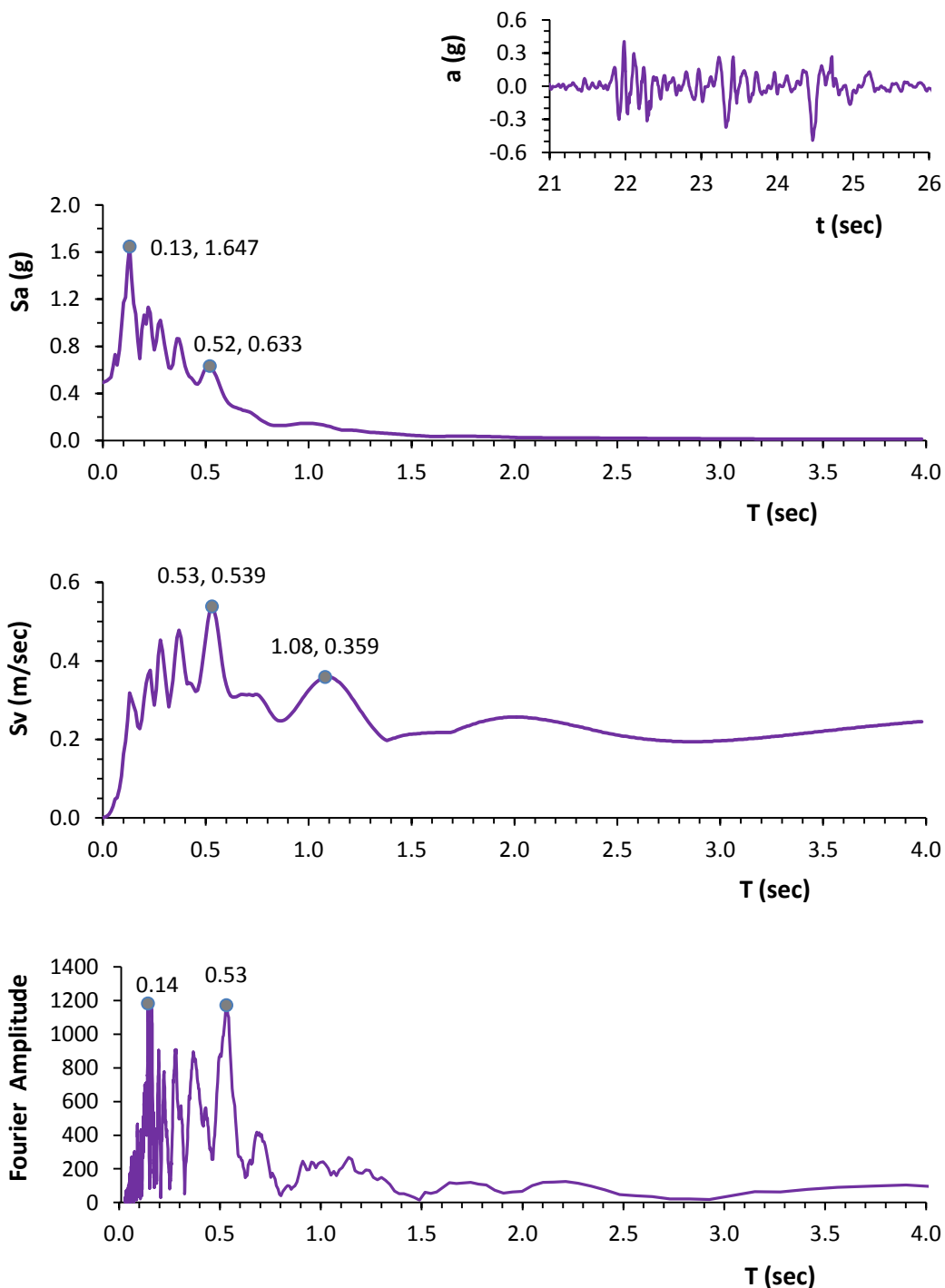


**Σχήμα 4.118:** η χρονιοϊστορία επιταχύνσεων, τα ελαστικά φάσματα επιταχύνσεων και ταχύτητων και το φάσμα πλάτους Fourier της συνιστώσα S64E του σταθμού HVSC, για το σεισμικό γεγονός της 23<sup>ης</sup> Δεκεμβρίου του 2011,  $M_w = 6$ .



*Christchurch*  
**23 Δεκεμβρίου 2011**  
 $M_w = 6$

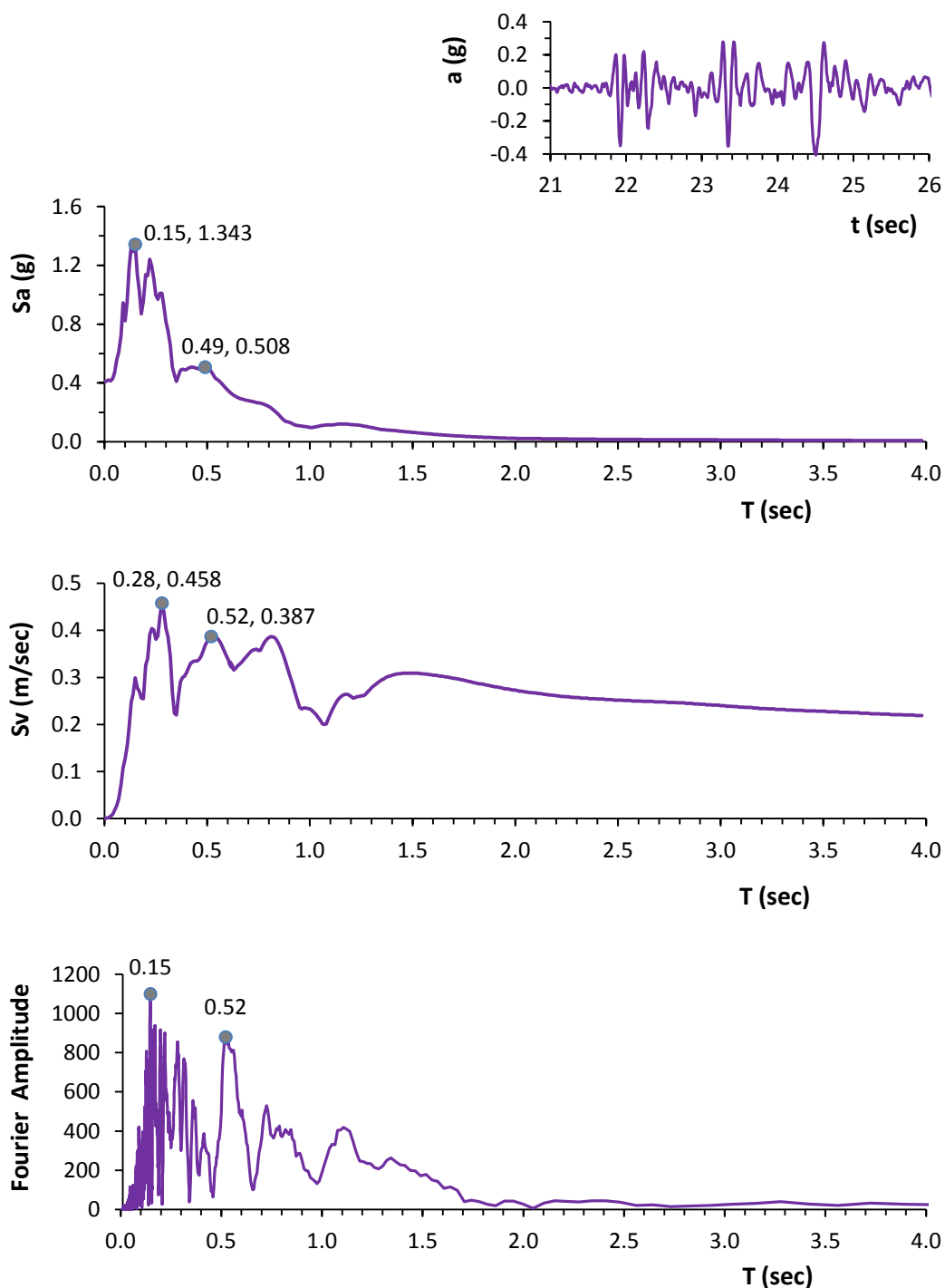
*LPCC - N10W*



**Σχήμα 4.119:** η χρονιοϊστορία επιταχύνσεων, τα ελαστικά φάσματα επιταχύνσεων και ταχυτήτων και το φάσμα πλάτους Fourier της συνιστώσα N10W του σταθμού LPCC, για το σεισμικό γεγονός της 23<sup>ης</sup> Δεκεμβρίου του 2011,  $M_w = 6$ .

**Christchurch**  
**23 Δεκεμβρίου 2011**  
 **$M_w = 6$**

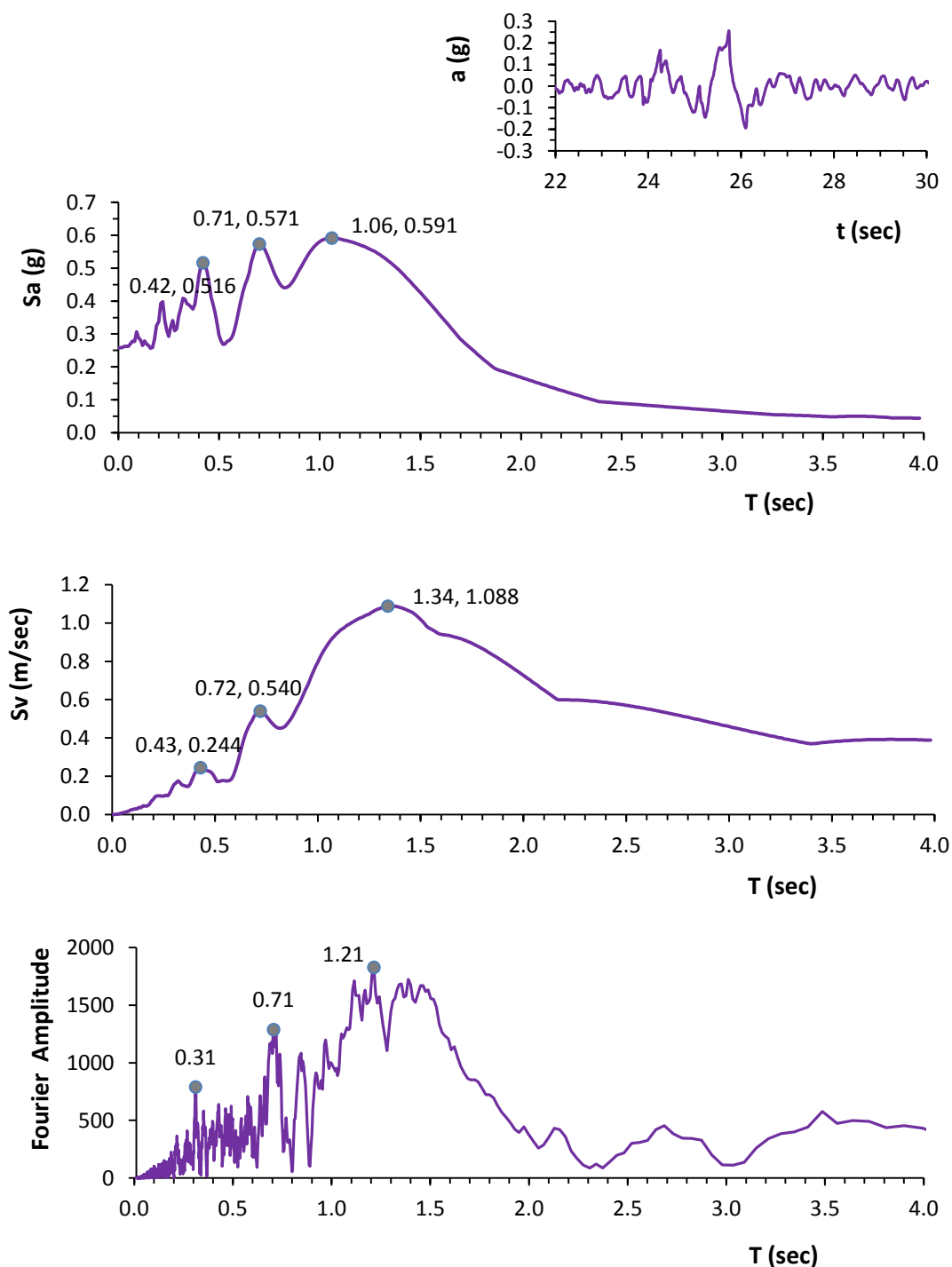
**LPCC - S80W**



**Σχήμα 4.120:** η χρονιοιστορία επιταχύνσεων, τα ελαστικά φάσματα επιταχύνσεων και ταχυτήτων και το φάσμα πλάτους Fourier της συνιστώσα S80W του σταθμού LPCC, για το σεισμικό γεγονός της 23<sup>ης</sup> Δεκεμβρίου του 2011,  $M_w = 6$ .

*Christchurch*  
**23 Δεκεμβρίου 2011**  
 $M_w = 6$

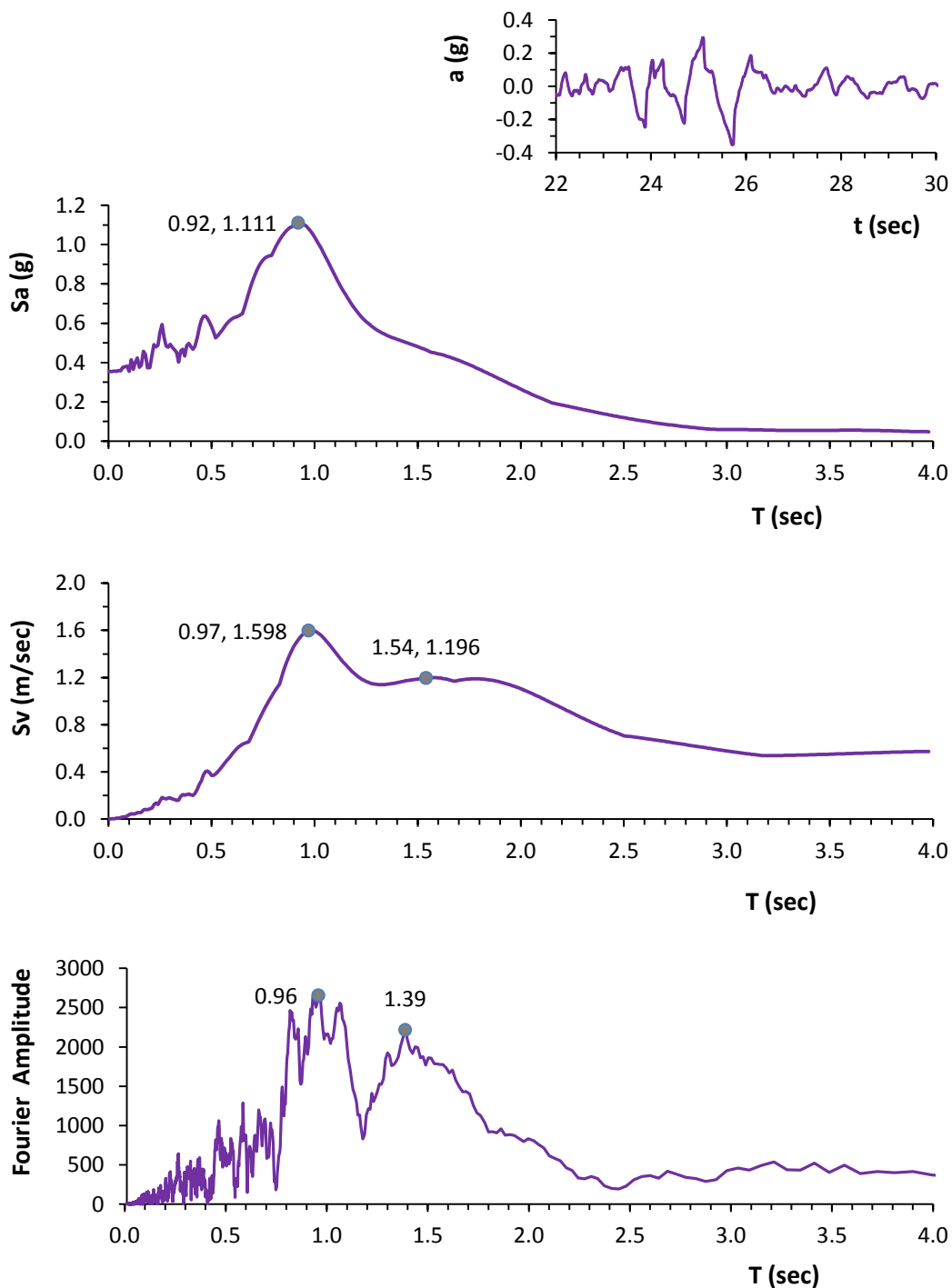
*REHS - NO2E*



**Σχήμα 4.121:** η χρονιοϊστορία επιταχύνσεων, τα ελαστικά φάσματα επιταχύνσεων και ταχυτήτων και το φάσμα πλάτους Fourier της συνιστώσα NO2E του σταθμού REHS, για το σεισμικό γεγονός της 23<sup>ης</sup> Δεκεμβρίου του 2011,  $M_w = 6$ .

*Christchurch*  
23 Δεκεμβρίου 2011  
 $M_w = 6$

*REHS - S88E*



**Σχήμα 4.122:** η χρονιοϊστορία επιταχύνσεων, τα ελαστικά φάσματα επιταχύνσεων και ταχύτητων και το φάσμα πλάτους Fourier της συνιστώσα S88E του σταθμού REHS, για το σεισμικό γεγονός της 23<sup>ης</sup> Δεκεμβρίου του 2011,  $M_w = 6$ .



# Κεφάλαιο 5

---

*Ισοδύναμες ελαστικές αναλύσεις με το λογισμικό  
SHELL2000*



## *Αποτελέσματα ισοδύναμων ελαστικών αναλύσεων με το λογισμικό SHAKE2000*

---

### *5.1 Εισαγωγή*

Το παρόν κεφάλαιο διερευνά τον βαθμό στον οποίο οι ιδιότητες των εδαφικών σχηματισμών, στην ευρύτερη περιοχή του Christchurch, επηρέασαν τη διάδοση των σεισμικών κυμάτων από το βραχώδες υπόβαθρο στην επιφάνεια του εδάφους. Για τον σκοπό αυτό, χρησιμοποιήθηκαν τα εδαφικά προφίλ στο σημείο έδρασης δώδεκα καταγραφικών σταθμών της περιοχής (Wood et al, 2011). Η έρευνα αφορά τα τρία κύρια σεισμικά γεγονότα στη περιοχή την περίοδο 2010 – 11:

- ✓ στις 3 Σεπτεμβρίου του 2010 μεγέθους  $M_w$  7.1, με επίκεντρο στο Darfield
- ✓ στις 22 Φεβρουαρίου του 2011 μεγέθους  $M_i$  6.3, με επίκεντρο στο Christchurch
- ✓ στις 13 Ιουνίου του 2011 μεγέθους  $M_w$  6.0, με επίκεντρο στο Christchurch

Οι σταθμοί προς μελέτη είναι οι εξής δώδεκα:

**CBGS, CCCC, CHHC, CMHS, HPSC, HVSC, KPOC, NNBS, PRPC, REHS, RHSC, SHLC.**

Με βάση την καταγραφή στην επιφάνεια της περιοχής του Lyttelton Port στον επιταχυνσιογραφικό σταθμό LPCC, υπολογίστηκε με αντίστροφη ισοδύναμη ελαστική ανάλυση η αντίστοιχη καταγραφή στο βραχώδες υπόβαθρο του σταθμού. Το εδαφικό προφίλ του σταθμού αυτού θεωρείται κατηγορίας B με βάση τον αντισεισμικό κανονισμό της Νέας Ζηλανδίας (NZS1170.5). Η τελευταία χρησιμοποιήθηκε ως διέγερση στη βάση των εδαφικών προφίλ όλων των ανωτέρω σταθμών. Η μελέτη πραγματοποιήθηκε και για τα τρία κύρια σεισμικά γεγονότα στους σταθμούς CBGS και HVSC. Στο σταθμό CCCC λόγω απουσίας δεδομένων για τον σεισμό του Ιουνίου η μελέτη έγινε μόνο για τους δύο πρώτους. Στους υπόλοιπους σταθμούς μελετήθηκε μονάχα το σεισμικό συμβάν του Φεβρουαρίου καθώς αποτελεί το πιο σημαντικό εκ των τριών. Ειδικότερα, για τον σταθμό REHS έγινε εκτενέστερη παραμετρική διερεύνηση όσον αφορά το εδαφικό προφίλ της περιοχής.

### *5.2 Ισοδύναμες ελαστικές αναλύσεις*

Οι αναλύσεις γίνονται υπό την παραδοχή σεισμικής διέγερσης μέσω κατακορύφως ανερχομένων διατμητικών κυμάτων και αναφέρονται στο “ελεύθερο πεδίο”, δηλαδή στο έδαφος χωρίς παρουσία ανωδομής. Βασίζονται στην θεωρία της 1-διάστατης κυματικής ανάλυσης. Δηλαδή, οι εδαφικές στρώσεις θεωρούνται οριζόντιες, επ’ άπειρον εκτεινόμενες, και η διάδοση του προσπίπτοντος κυματισμού γίνεται σε κατακόρυφη διεύθυνση.



Εφαρμόζεται η μέθοδος της μονοδιάστατης ισοδύναμης γραμμικής ανάλυσης μέσω του λογισμικού SHAKE2000 (Schnabel, Lysmer & Seed, 1972, έκδοση 2000). Στην ισοδύναμη γραμμική ανάλυση επιχειρείται η απόδοση της μη-γραμμικής συμπεριφοράς του εδάφους μέσω μιας σειράς επαναληπτικών βημάτων. Σε κάθε ένα βήμα οι εξαρτώμενες δυναμικές ιδιότητες από την τιμή της διατμητικής παραμόρφωσης ( $\gamma$ ) διατηρούνται σταθερές. Το έδαφος διακριτοποιείται σε επιμέρους εδαφικές στρώσεις, εν συνεχεία δε επιλύεται η κυματική εξίσωση σε κάθε εδαφική στρώση, με ταυτόχρονη ικανοποίηση των συνοριακών συνθηκών που επιβάλλουν την ισότητα των τάσεων και των μετατοπίσεων σε κάθε διεπιφάνεια.

Η μη-γραμμική δυναμική συμπεριφορά του εδάφους προσεγγίζεται ως ισοδύναμη γραμμική ιξωδοελαστική. Υλοποιείται αριθμητικά μέσω επαναληπτικής “θαμιστικής” μεθοδολογίας. Συγκεκριμένα, σε κάθε επανάληψη της γραμμικής ανάλυσης επαναπροσδιορίζονται το μέτρο διατμήσεως  $G$  και ο βαθμός αποσβέσεως  $\xi$  κάθε στοιχείου, ώστε οι τιμές να είναι συμβιβαστές με την διατμητική παραμόρφωση της προηγούμενης ανάλυσης, σύμφωνα με τις πειραματικές καμπύλες ( $G/G_0 : \gamma$ ) και ( $\xi : \gamma$ ). Ως “ισοδύναμη” διατμητική παραμόρφωση σε κάθε στοιχείο λαμβάνεται ένα κλάσμα (εδώ τα 2/3) της μέγιστης υπολογιζόμενης παραμόρφωσης.

Το μέτρο διατμήσεως σχετίζεται με την ταχύτητα διαδόσεως του διατμητικού κύματος  $V_s$  από την σχέση :

$$G_{\max} = \rho V_s^2$$

όπου  $\rho$  : η πυκνότητα του εδαφικού υλικού. Η απομείωση του μέτρου διατμήσεως  $G_{\max}$  και η αύξηση του λόγου υστερητικής απόσβεσης συναρτήσει του πλάτους της διατμητικής παραμόρφωσης στο εδαφικό υλικό κατά την διέλευση των σεισμικών κυμάτων επηρεάζει σημαντικά τον σεισμικό κραδασμό στην επιφάνεια, ιδίως όταν η ένταση του σεισμικού κραδασμού είναι υψηλή.

Στην βιβλιογραφία δίδονται διάφορες καμπύλες απομείωσης του μέτρου διατμήσεως  $G_{\max}$  και αύξησης του λόγου της υστερητικής απόσβεσης με την αύξηση της διατμητικής παραμόρφωσης για διαφορετικά εδαφικά υλικά.

Για τις αναλύσεις με το λογισμικό SHAKE2000 χρησιμοποιήθηκαν τα εδαφικά προφίλ των ανωτέρω καταγραφικών σταθμών όπως παρουσιάζονται στο άρθρο των Wood et al, σε όρους ταχύτητας διατμητικών κυμάτων ( $V_s$ ). Κάθε προφίλ διακριτοποιήθηκε σε ζώνες σταθερής ταχύτητας διατμητικών κυμάτων με βάση τα δεδομένα. Οι ζώνες επιλέχθηκαν πυκνότερες στα επιφανειακά στρώματα για ορθότερη προσέγγιση των αποτελεσμάτων εκεί. Οι τιμές του ειδικού βάρους των εδαφικών σχηματισμών επιλέχθηκαν προσεγγιστικά ως εξής:

- ✓  $\gamma = 18 \text{ KN/m}^3$ , για εδάφη με  $V_s < 150 \text{ m/sec}$ ,
- ✓  $\gamma = 20 \text{ KN/m}^3$ , για εδάφη με  $V_s > 150 \text{ m/sec}$ .

Οι καμπύλες των Vucetic & Dobry (1991) για εδάφη με δείκτη πλασιμότητας (PI) 15 % επιλέχθηκαν από τη βιβλιοθήκη καμπυλών του λογισμικού, ως οι πιο

αντιπροσωπευτικές για τη μεταβολή του μέτρου διατμήσεως ( $G/G_0 : \gamma$ ) και του συντελεστή απόσβεσης ( $\xi : \gamma$ ) των εν λόγω εδαφικών προφίλ. Συμπεραίνοντας ότι η μορφή των καμπυλών αυτών επηρεάζεται σημαντικά από τον δείκτη πλασιμότητας PI, οι ερευνητές έδωσαν τροποποιημένες καμπύλες οι οποίες δείχνουν ότι εδαφικά υλικά με μεγάλο δείκτη πλασιμότητας έχουν πιο ελαστική συμπεριφορά από ότι εδαφικά υλικά με χαμηλό δείκτη πλασιμότητας PI. Η επιλογή αυτή για την παρούσα εργασία έγινε λόγω των γενικών εδαφικών χαρακτηριστικών της περιοχής του Christchurch, όπως αυτά περιγράφηκαν στο κεφάλαιο 3, εξαιτίας της έλλειψης λεπτομερέστερων εδαφικών ιδιοτήτων για τα επιμέρους προφίλ. Οι καμπύλες αυτές χρησιμοποιήθηκαν στις αναλύσεις για όλους τους σταθμούς.

Ειδικότερα για τον σταθμό REHS πέραν αυτών έγιναν διερευνητικές αναλύσεις με πιο λεπτομερή προσδιορισμό των αντίστοιχων καμπυλών, όπως θα παρουσιαστεί λεπτομερώς παρακάτω.

### *5.3 Η καταγραφή στο βραχώδες υπόβαθρο του σταθμού LPCC*

Ο σταθμός LPCC εδράζεται σε έδαφος κατηγορίας B με βάση τον κανονισμό NZS1170.5:2004 της Νέας Ζηλανδίας, δηλαδή σε βράχο (rock). Το προφίλ της ταχύτητας των διατμητικών κυμάτων για την εν λόγω τοποθεσία παρουσιάζεται στο **σχήμα 5.1**. Η παραπάνω θέση γίνεται σαφής παρατηρώντας την ταχύτητα  $V_s$  να ξεπερνά τη τιμή των 1500 m/sec για βάθος μεγαλύτερο των 6 m. Οι καταγραφές στην επιφάνεια για τα τρία σεισμικά συμβάντα, όπως αυτά αναφέρθηκαν προηγουμένως, χρησιμοποιήθηκαν ως δεδομένα για αντίστροφη ισοδύναμη ελαστική ανάλυση με το λογισμικό SHAKE (deconvolution). Τα αποτελέσματα της ανάλυσης συνιστούν τη διέγερση στη βάση – βραχώδες υπόβαθρο του σταθμού.

Από τις δύο συνιστώσες (N10W, S80W) της κάθε καταγραφής στην επιφάνεια του σταθμού LPCC επιλέχθηκε προς μελέτη και αντίστροφη ανάλυση εκείνη με προσανατολισμό Βορρά – Νότου (N10W). Η επιλογή αυτή έγινε ουσιαστικώς αυθαίρετα. Έναυσμα αποτέλεσε το αξιοσημείωτο “φούσκωμα” μεταξύ των 2.5 και 3.5 sec που παρατηρείται εντόνως στη συγκεκριμένη συνιστώσα τόσο στη φασματική επιτάχυνση και ταχύτητα όσο και στο φάσμα πλάτους Fourier (**σχήματα 5.2, 5.4, 5.6**) και στους τρεις σεισμούς. Ως εκ τούτου ένας επιπρόσθετος στόχος των αναλύσεων είναι η διερεύνηση του φαινομένου και η προσπάθεια ερμηνείας του.

Στο **σχήμα 5.1** πέραν της κατανομής της ταχύτητας των διατμητικών κυμάτων ( $V_s$ ) με το βάθος παρουσιάζεται και η κατανομή της μέγιστης επιτάχυνσης ( $\max a$ ), της επί τοις εκατό διατμητικής παραμόρφωσης ( $\gamma \%$ ) και του λόγου των μέτρων διατμήσεως – τελικό προς αρχικό – επίσης με το βάθος. Ο ισχυρός σεισμός στις 22 Φεβρουαρίου κάτω ακριβώς από τη πόλη του Christchurch είναι αυτός με τις μεγαλύτερες τιμές επιτάχυνσης και διατμητικής παραμόρφωσης καθ’ ύψος της εδαφικής στήλης και με τη μεγαλύτερη απομείωση του μέτρου διατμήσεως αντίστοιχα. Ο σεισμός της 3<sup>ης</sup> Σεπτεμβρίου που είχε επίκεντρο τη περιοχή του Darfield, περίπου 40 km δυτικά του

Christchurch, παρά την έντασή του, παρουσιάζεται ως ο λιγότερο ισχυρός, φυσικά εξαιτίας της απόστασης που χωρίζει τις δύο περιοχές.

Στα **σχήματα 5.3, 5.5 και 5.7** απεικονίζονται τα φάσματα επιταχύνσεων και Fourier όπως προκύπτουν από την αντίστροφη γραμμική ανάλυση για κάθε ένα σεισμικό γεγονός αντιστοίχως. Παρατηρούμε πως και στα τρία αποδυναμώνονται μόνο οι φασματικές τιμές για τις μικρές ιδιοπεριόδους ( $T < 0.5$  sec) ενώ για τις μεγαλύτερες παραμένουν αναλλοίωτες. Ο δείκτης φασματικής ενίσχυσης  $\mathcal{A}$  έχει μέγιστο για  $T \approx 0.1$  sec. Η δεσπόμενη ιδιοπερίοδος του εδαφικού σχηματισμού προκύπτει  $T_n = 0.8 - 0.9$  sec, κάτι απολύτως φυσιολογικό δεδομένου των λίγων μέτρων εδάφους (6 m) που υπάρχουν πάνω από το βραχώδες υπόβαθρο.

Είναι ευδιάκριτο πως το “φούσκωμα” που υπάρχει μεταξύ των 2.5 και 3.5 sec στα φάσματα επιταχύνσεων και Fourier δεν αλλοιώνεται καθόλου από την αναστροφή ισοδύναμη ελαστική ανάλυση. Δηλαδή η φύση του εδάφους δεν αποτελεί το γενεσιουργό αίτιο του φαινομένου αυτού. Πιθανότατα η παρουσία αυτών των ασυνήθιστα υψηλών τιμών σε αυτές τις χαμηλές συχνότητες οφείλεται στη φύση του κραδασμού και στο συχνοτικό περιεχόμενο του ίδιου.

Αυτό που παρουσιάζει ενδιαφέρον είναι να ελέγξουμε κατά πόσο το φαινόμενο εντείνεται ή εκλείπει στους υπόλοιπους καταγραφικούς σταθμούς θέτοντας ως διεγείρων κραδασμό αυτόν που προέκυψε στο υπόβαθρο του LPCC και εφαρμόζοντας ισοδύναμες ελαστικές αναλύσεις.

## **5.4 Αποτελέσματα και συγκρίσεις**

Λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματα των αναλύσεων θα προσπαθήσουμε συγκρίνοντας τα μεμονωμένα και συγκεντρωτικά να εξάγουμε χρήσιμα συμπεράσματα σχετικά με το βαθμό στον οποίο η ισοδύναμη ελαστική ανάλυση προσεγγίζει ικανοποιητικά τις πραγματικές καταγραφές στην επιφάνεια κάθε σταθμού.

### **5.4.1 Επιταχυνσιογραφικός σταθμός CBGS**

Στα **σχήματα 5.8 έως και 5.18** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων σχετικά με τον σταθμό CBGS και για τα τρία σεισμικά γεγονότα της περιόδου 2010-11.

Στο **σχήμα 5.8** απεικονίζεται το εδαφικό προφίλ στην περιοχή έδρασης του επιταχυνσιογράφου σε όρους ταχύτητας διατμητικών κυμάτων ( $V_s$ ). Όσον αφορά τις κατανομές των μεγίστων επιταχύνσεων και της ποσοστιαίας διατμητικής παραμόρφωσης ο σεισμός του Φεβρουαρίου επιβάλλει τις μεγαλύτερες τιμές. Αντιστοίχως όσον αφορά το λόγο των μέτρων διατμήσεως, για τον ίδιο σεισμό εμφανίζεται η μεγαλύτερη απομείωση, σε απόλυτη συμφωνία με τη προηγούμενη παρατήρηση. Σε βάθος μεγαλύτερο των 20 m όπου η ταχύτητα των διατμητικών

κυμάτων διπλασιάζεται παρατηρούμε ραγδαία μείωση των διατμητικών παραμορφώσεων και σαφώς μικρότερη απομείωση του μέτρου διατμήσεως αντιστοίχως.

Τα **σχήματα 5.9 έως και 5.11** αφορούν το σεισμό με επίκεντρο το Darfield στις 3 Σεπτεμβρίου του 2010. Στο **σχήμα 5.9**, με τη μαύρη γραμμή απεικονίζεται η χρονοϊστορία και τα αντίστοιχα φάσματα που προέκυψαν στο υπόβαθρο του σταθμού LPCC για τον συγκεκριμένο σεισμό, μέσω της αντίστροφης ισοδύναμης ελαστικής ανάλυσης. Τώρα χρησιμοποιείται ως διεγείρων κραδασμός στη βάση του σταθμού CBGS έχοντας ως αποτέλεσμα τη μπλε γραμμή στην επιφάνεια. Η απομείωση των φασματικών επιταχύνσεων για περιόδους μικρότερες των 0.5 sec περίπου και η αντίστοιχη ενίσχυση τους για μεγαλύτερες περιόδους είναι σαφής. Ο ρόλος του εδαφικού σχηματισμού πάνω από το βραχώδες υπόβαθρο στην απομείωση των υψηλών συχνοτήτων του κραδασμού είναι προφανής, με τον συντελεστή εδαφικής ενίσχυσης να έχει τιμές μικρότερες της μονάδας για περιόδους κάτω από 5 sec και να παρουσιάζει μέγιστο για  $T \approx 0.8$  sec. Το ίδιο ακριβώς φαινόμενο παρατηρείται και στο αντίστοιχο φάσμα Fourier. Αξιοσημείωτο είναι και το γεγονός ότι στις μεγάλες περιόδους ( $T > 2$  sec) υπάρχει πολύ μικρή έως μηδαμινή ενίσχυση τόσο στο φάσμα επιταχύνσεων όσο και στο Fourier. Διαφαίνεται λοιπόν πως η παρουσία του εδάφους δεν επηρεάζει ουσιαστικά το φαινόμενο του “φουσκώματος”, όπως το χαρακτηρίσαμε και προηγουμένως. Η πεποίθηση πως αυτό οφείλεται στο συχνοτικό περιεχόμενο του διεγείροντος κραδασμού αρχίζει να ισχυροποιείται.

Στο **σχήμα 5.10** ορατή είναι η διαφορά που υπάρχει μεταξύ του κραδασμού που προέκυψε στην επιφάνεια μέσω της ανάλυσης με το SHAKE (μπλε γραμμή) σε σχέση με τους καταγεγραμμένους κραδασμούς από τον επιταχυνσιογράφο και για τις δύο συνιστώσες, N89W (πορτοκαλί γραμμή) και S01W (μωβ γραμμή). Η μέγιστη εδαφική επιτάχυνση ( $rga - peak\ ground\ acceleration$ ) δεν διαφέρει αισθητά αλλά το συχνοτικό περιεχόμενο και η διάρκεια του κραδασμού που προέκυψε μέσω της ανάλυσης με το SHAKE διαφέρουν εντόνως από τις πραγματικές καταγραφές στην επιφάνεια του σταθμού CBGS. Η διαφορά αυτή απεικονίζεται και στο φάσμα επιταχύνσεων. Αρχικά παρατηρούμε πως και τα τρία φάσματα έχουν την ίδια περίπου τιμή μέγιστης επιτάχυνσης στην επιφάνεια του εδάφους, κοντά στα 0.2 g. Όμως, το φάσμα που προκύπτει από την ανάλυση με το SHAKE παρουσιάζει κορυφή για  $T = 0.2$  sec κάτι που δεν υπάρχει ούτε στη μία ούτε στην άλλη συνιστώσα της καταγραφής. Η δεύτερη κορυφή του στα 0.6 sec φαίνεται να συμπίπτει σχεδόν με την αντίστοιχη στο φάσμα της συνιστώσας S01W. Για περιόδους μεγαλύτερες του 1.5 sec η τιμή του φάσματος από το SHAKE παραμένει περίπου σταθερή στο 0.1 g έχοντας μεγάλη διαφορά κυρίως από την αντίστοιχη της συνιστώσας S01W που ενισχύει τις επιταχύνσεις φτάνοντας τα 0.3 g.

Το **σχήμα 5.11** επιβεβαιώνει τις ανωτέρω παρατηρήσεις εφόσον το φάσμα Fourier που προκύπτει από την ισοδύναμη ελαστική ανάλυση δεν βρίσκεται σε συμφωνία με τα άλλα δύο. Παρουσιάζει μέγιστο στα 0.7 sec ενώ ουσιαστικά αδυνατεί να αποδώσει την ενίσχυση στις περιόδους μεταξύ 2.5 και 3 sec η οποία δεσπόζει στα άλλα δύο φάσματα (N89W και S01W).

Τα **σχήματα 5.12 έως 5.14** αφορούν το σεισμό με επίκεντρο το Christchurch στις 22 Φεβρουαρίου του 2011. Στο **σχήμα 5.12**, με τη μαύρη γραμμή απεικονίζεται η χρονοϊστορία και τα αντίστοιχα φάσματα που προέκυψαν στο υπόβαθρο του σταθμού LPCC για τον σεισμό του Φεβρουαρίου. Τώρα χρησιμοποιείται ως διεγείρων κραδασμός στη βάση του σταθμού CBGS έχοντας ως αποτέλεσμα τη κόκκινη γραμμή στη επιφάνεια. Τα συμπεράσματα από τα φάσματα επιταχύνσεων και Fourier που προκύπτουν είναι παρόμοια με αυτά του σχήματος 4.9. Η απομείωση των επιταχύνσεων για  $T < 0.7$  sec είναι εντονότερη ενώ σαφής είναι η ενίσχυση για μεγαλύτερες περιόδους, ιδίως περί τα 1.2 sec, με τον συντελεστή εδαφικής ενίσχυσης  $\mathcal{A}$  να παρουσιάζει μέγιστο εκεί.

Στο **σχήμα 5.13**, η χρονοϊστορία που προέκυψε από το λογισμικό διαφέρει από τις άλλες δύο και πάλι στο συχνοτικό περιεχόμενο αλλά και στη διάρκεια. Επίσης αδυνατεί να αποδώσει την αύξηση των περιόδων που παρουσιάζεται κυρίως στη συνιστώσα N89W μετά τα 20 sec, η οποία μαρτυρά την πιθανή εκδήλωση ρευστοποίησης και είναι εμφανής και στο αντίστοιχο φάσμα επιταχύνσεων με τα δύο μέγιστα στα 1 και 1.4 sec (πορτοκαλί γραμμή). Πέραν τούτου στο φάσμα διαφαίνεται και η αδυναμία της ανάλυσης να αποδώσει τη μέγιστη τιμή επιτάχυνσης που παρουσιάζεται και για τις δύο συνιστώσες κοντά στα 0.5 sec. Η παρουσία του εδαφικού προφίλ των 40 περίπου μέτρων φιλτράρει κατά πολύ τις συγκεκριμένες περιόδους μειώνοντας τις αναπτυσσόμενες επιταχύνσεις.

Στο **σχήμα 5.14** το φάσμα Fourier της ανάλυσης με το SHAKE φαίνεται να παρουσιάζει κάποιες ομοιότητες με τα αντίστοιχο της συνιστώσας N89W έχοντας μέγιστο κοντά στο 1.5 sec αλλά και περί τα 3.2 sec.

Τα **σχήματα 5.15 έως 5.17** αφορούν το σεισμό με επίκεντρο το Christchurch στις 13 Ιουνίου του 2011. Στο **σχήμα 5.15** είναι εμφανής η ενίσχυση στο φάσμα επιταχύνσεων για  $T \approx 0.7$  sec, κάτι που παρουσιάζεται και στο φάσμα Fourier αλλά και στο συντελεστή φασματικής ενίσχυσης. Από την άλλη στο **σχήμα 5.16** η ένταση της χρονοϊστορίας όπως προκύπτει από το SHAKE είναι σαφώς μεγαλύτερη από τις δύο συνιστώσες της καταγραφής με εναλλάξ μέγιστα στα 0.2 g και περιόδους μεταξύ 0.5 και 1 sec. Η διαφορά αυτή προβάλλεται ξεκάθαρα και στο φάσμα επιταχύνσεων όπου το προκύπτων από το SHAKE έχει μέγιστα στα 0.1 και 0.7 sec, κάτι που δεν παρουσιάζεται σε κανένα εκ των άλλων δύο. Αντίστοιχα συμπεράσματα προκύπτουν και από το **σχήμα 5.17** όπου τα φάσματα Fourier διαφέρουν αρκετά.

Συγκεντρωτικά, τα αποτελέσματα των ισοδύναμων ελαστικών αναλύσεων όσον αφορά το σταθμό CBGS δεν φαίνεται να είναι σε ουσιαστική συμφωνία με τα αντίστοιχα των πραγματικών καταγραφών. Σε όρους χρονοϊστοριών και φασμάτων οι διαφορές, όπως αναλύθηκαν παραπάνω, υπερτερούν σαφώς έναντι των ομοιοτήτων. Εξάγουμε το συμπέρασμα πως η ισοδύναμη ελαστική ανάλυση αδυνατεί να προσομοιώσει τη πραγματικότητα στη συγκεκριμένη περίπτωση είτε λόγω αβεβαιοτήτων στα δεδομένα μας (τις οποίες θα σχολιάσουμε στο τέλος της ενότητας) είτε λόγω της ίδιας της φύσης της ανάλυσης.

### 5.4.2 Επιταχυνσιογραφικός σταθμός CCCC

Στα **σχήματα 5.18 έως και 5.24** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων σχετικά με τον σταθμό CCCC για τα σεισμικά γεγονότα στις 3 Σεπτεμβρίου του 2010 και στις 22 Φεβρουαρίου του 2011 αντίστοιχα.

Στο **σχήμα 5.18** παρουσιάζεται το εδαφικό προφίλ στην περιοχή έδρασης του επιταχυνσιογράφου σε όρους ταχύτητας διατμητικών κυμάτων ( $V_s$ ). Σχετικά με τις κατανομές των μεγίστων επιταχύνσεων και της ποσοστιαίας διατμητικής παραμόρφωσης ο σεισμός του Φεβρουαρίου επιβάλλει πολύ μεγαλύτερες τιμές, όπως ακριβώς είχαμε σχολιάσει και στον σταθμό CBGS. Όσον αφορά το λόγο των μέτρων διατμήσεως, για τον ίδιο σεισμό εμφανίζεται η μεγαλύτερη απομείωση. Στο βάθος των 18 m όπου η ταχύτητα των διατμητικών κυμάτων περίπου τριπλασιάζεται η γωνιακή παραμόρφωση αγγίζει το 1% ενώ το μέτρο διατμήσεως πέφτει στο 10% του αρχικού!

Στα **σχήματα 5.19 και 5.22** με μπλε και κόκκινη γραμμή αντίστοιχα απεικονίζονται οι χρονοϊστορίες και τα φάσματα που προκύπτουν στην επιφάνεια του σταθμού CCCC μέσω της ισοδύναμης ελαστικής ανάλυσης. Η εδαφική στήλη και εδώ φιλτράρει τις υψίσυχνες συνιστώσες του διεγείροντος κραδασμού (περίπου κάτω από 0.5 sec) και ενισχύει τις μακροπερίοδες (περίπου από 0.5 έως και 2 sec). Το αποτέλεσμα είναι ορατό τόσο στα φάσματα επιταχύνσεων όσο και στα φάσματα Fourier.

Στα **σχήματα 5.20 και 5.23** αντίστοιχα παρατηρούμε πως η ανάλυση με το SHAKE αποδίδει διαφορετικές χρονοϊστορίες όσον αφορά τις συχνότητες, την ένταση και τη διάρκεια του κραδασμού σε σχέση με τις καταγεγραμμένες στις δύο συνιστώσες, N26W και N64E. Η διαφορά αυτή απεικονίζεται ευκρινώς και στα αντίστοιχα φάσματα επιταχύνσεων με εκείνα που προέρχονται από τις αναλύσεις να εμφανίζουν μικρότερες επιταχύνσεις και να έχουν μέγιστα σε διαφορετικές περιόδους. Στο **σχήμα 5.23** αξιοσημείωτη είναι ενίσχυση που υπάρχει και στα τρία φάσματα επιταχύνσεων στις περιόδους 1 έως 1.5 sec παρά τη διαφορά τους στη μέγιστη τιμή. Συμπεραίνουμε λοιπόν πως το έδαφος ενισχύει τις περιόδους αυτές δημιουργώντας στα φάσματα το ανάλογο “φούσκωμα”. Αυτό είναι ορατό και στα φάσματα Fourier του **σχήματος 5.24** τα οποία έχουν κορυφή για  $T \approx 1.4$  sec.

Συμπερασματικά, και στον σταθμό CCCC οι ισοδύναμες ελαστικές αναλύσεις δεν μπορούν να προσεγγίσουν τις πραγματικές καταγραφές με ικανοποιητική ακρίβεια.

### 5.4.3 Επιταχυνσιογραφικός σταθμός CHHC

Στα **σχήματα 5.25 έως και 5.28** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων στον σταθμό CHHC για το σεισμικό γεγονός στις 22 Φεβρουαρίου του 2011. Τα γενικά συμπεράσματα από τα σχήματα αυτά είναι παρόμοια με του σταθμού CCCC, με τη χρονοϊστορία από το SHAKE να μην προσεγγίζει καμία από τις αντίστοιχες των δύο συνιστωσών, N01W και S89W, ως προς τη διάρκεια και το συχνοτικό

περιεχόμενο του κραδασμού (**σχήμα 5.27**). Το φάσμα επιταχύνσεων απεικονίζει με σαφήνεια τη διαφορά αυτή.

Και πάλι είναι εμφανής η αδυναμία της ισοδύναμης ελαστικής ανάλυσης με το λογισμικό SHAKE να προσεγγίσει ικανοποιητικά την καταγεγραμμένη στην επιφάνεια σεισμική ακολουθία.

#### **5.4.4 Επιταχυνσιογραφικός σταθμός CMHS**

Τα **σχήματα 5.29 έως και 5.32** εμπεριέχουν τα αποτελέσματα των αναλύσεων στον σταθμό CMHS για το σεισμικό γεγονός στις 22 Φεβρουαρίου του 2011.

Στο **σχήμα 5.29**, προβάλλεται η κατανομή της ταχύτητας των διατμητικών κυμάτων ( $V_s$ ) με το βάθος. Παρατηρούμε πως σχεδόν τετραπλασιάζεται κάτω από τα πρώτα 25 m περίπου ( $V_s \approx 800$  m/sec), μειώνοντας κατά πολύ τις γωνιακές παραμορφώσεις (περίπου στο 1%) και περιορίζοντας τη μείωση του μέτρου διατμήσεως στο 0.8%. Αυτή η μεγάλη τιμή ταχύτητας διατμητικών κυμάτων για περίπου 40 m βάθους είναι λογικό να περιορίζει το φιλτράρισμα των υψίσυχνων συνιστωσών της διέγερσης στο βραχώδες υπόβαθρο του σταθμού. Απόδειξη αυτού είναι η υψηλή τιμή φασματικών επιταχύνσεων που υπάρχει στο αντίστοιχο φάσμα του **σχήματος 5.30** για περίοδο  $T \approx 0.2$  sec. Φυσικά λόγω της παρουσίας των πρώτων 20 m “μαλακού” εδάφους, υπάρχει ενίσχυση στο φάσμα για περιόδους από 0.5 έως 2 sec, με τον συντελεστή εδαφικής ενίσχυσης να έχει μέγιστο περίπου στο 1 sec.

Στο **σχήμα 5.31** παρατηρούμε πως η χρονοϊστορία που προκύπτει από το SHAKE προσεγγίζει ικανοποιητικά τη διάρκεια του κραδασμού όπως αυτός καταγράφηκε στις συνιστώσες N10E και S80E. Στο ίδιο σχήμα, το φάσμα επιταχύνσεων από το SHAKE, έχοντας την ίδια μέγιστη εδαφική επιτάχυνση ( $rga$ ) με τα άλλα δύο, προσεγγίζει θαυμάσια τη πραγματικότητα για περιόδους μικρότερες των 0.7 sec, έχοντας μέγιστο στα 0.2 sec. Όμως, αυτό δεν συμβαίνει κοντά στο  $T \approx 1$  sec όπου το φάσμα από το SHAKE παρουσιάζει τελείως διαφορετική συμπεριφορά. Απ’ την άλλη το φάσμα Fourier από το SHAKE στο **σχήμα 5.32**, πέραν της κορυφής που παρουσιάζει περί την περίοδο του ενός δευτερολέπτου, δεν εμφανίζει ιδιαίτερες ομοιότητες με τα αντίστοιχα των δύο συνιστωσών της καταγραφής.

Καταλήγοντας, θα λέγαμε πως για τον σταθμό CMHS η ανάλυση με το SHAKE δίνει σαφώς πιο ικανοποιητικά αποτελέσματα σε σχέση με τις αναλύσεις που έγιναν για τους προηγούμενους σταθμούς. Θα λέγαμε πως προσεγγίζει επαρκώς τη πραγματικότητα σε γενικές γραμμές, εξαιρώντας τη περιοχή του ενός δευτερολέπτου που σχολιάσαμε και πρωτίτερα.



#### 5.4.5 Επιταχυνσιογραφικός σταθμός ΗΡSC

Τα **σχήματα 5.33 έως και 5.36** απεικονίζουν τα αποτελέσματα των αναλύσεων στον σταθμό ΗΡSC για το σεισμικό γεγονός στις 22 Φεβρουαρίου του 2011.

Η ανάλυση με το SHAKE δεν παρουσιάζει ικανοποιητικά αποτελέσματα, όπως και στους σταθμούς CBGS, CCCC και CHHC. Ειδικότερα, στο **σχήμα 5.35**, ορατή είναι η διαφορά μεταξύ των φασμάτων επιταχύνσεως. Η ισοδύναμη ελαστική ανάλυση δίνει φάσμα με πολύ μεγαλύτερες τιμές επιταχύνσεων για  $T < 1$  sec, σχεδόν διπλάσιες από τις αντίστοιχες των συνιστωσών N04W και S86W της καταγραφής. Και τα φάσματα Fourier του **σχήματος 5.36** περισσότερες διαφορές παρουσιάζουν παρά ομοιότητες.

Συνεπώς, και στον σταθμό ΗΡSC, η προσπάθεια προσέγγισης των πραγματικών καταγραφών δεν απέδωσε ενθαρρυντικά αποτελέσματα.

#### 5.4.6 Επιταχυνσιογραφικός σταθμός ΗVSC

Στα **σχήματα 5.37 έως και 5.46** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων στον σταθμό ΗVSC και για τα τρία σεισμικά γεγονότα της περιόδου 2010-11.

Στο **σχήμα 5.37**, όπου παρουσιάζεται το προφίλ της ταχύτητας των διατμητικών κυμάτων στο σημείο έδρασης του σταθμού, αξιοσημείωτη είναι η μεγάλη τιμή της από τα πρώτα 5 m ( $V_s \approx 400$  m/sec) και ιδιαίτερα από τα 20 m και κάτω όπου πλησιάζει τα 800 m/sec. Η γωνιακές παραμορφώσεις είναι αρκετά μικρές και στους τρεις σεισμούς, κάτω από 1‰. Η απομείωση των μέτρων διατμήσεως οριακά φτάνει το 50% στο σεισμό του Φεβρουαρίου στο βάθος διπλασιασμού της ταχύτητας από 400 m/sec σε 800 m/sec περίπου. Προφανώς πρόκειται για έναν δύσκαμπτο εδαφικό σχηματισμό που θα ενισχύσει τις επιταχύνσεις των υψηλών συχνοτήτων της διέγερσης.

Τα **σχήματα 5.38 έως και 5.40** σχετίζονται με το σεισμό του Σεπτεμβρίου. Στο **σχήμα 5.38**, ως επαλήθευση της παραπάνω υπόθεσης, παρατηρούμε την ενίσχυση των υψίσυχνων συνιστωσών του διεγείροντος κραδασμού για  $T < 1$  sec, στο φάσμα επιταχύνσεων και στο φάσμα Fourier. Για μεγαλύτερες περιόδους δεν υπάρχει κάτι αντίστοιχο. Επίσης δεν υπάρχει καμία αλλοίωση του “φουσκώματος” που παρουσιάζεται κυρίως στο φάσμα Fourier από τα 2.5 έως και τα 3.5 sec. Ο συντελεστής εδαφικής ενίσχυσης  $\mathcal{A}$  παρουσιάζει μέγιστο για  $T \approx 0.3$  sec.

Παρά την ενίσχυση των επιταχύνσεων στις περιόδους κάτω από 1 sec, στο **σχήμα 5.39** παρατηρούμε πως η χρονοϊστορία του SHAKE μπορεί να μην αποκλίνει σε συχνοτικό περιεχόμενο ως προς τις άλλες δύο αλλά σίγουρα έχει σαφείς διαφορές ως προς τη μέγιστη εδαφική επιτάχυνση ( $\rho ga$ ), τη διάρκεια αλλά και του “σημαντικούς” κύκλους της διέγερσης. Το σύνολο των παραπάνω απεικονίζεται ξεκάθαρα στο συγκεντρωτικό φάσμα επιταχύνσεων. Το φάσμα από το SHAKE παρουσιάζει μέγιστη τιμή στα 0.2 sec περίπου αλλά υπολείπεται αρκετά από τα



αντίστοιχα μέγιστα των φασμάτων των συνιστωσών S26W και S64E της καταγραφής, τα οποία μάλιστα εκτείνονται σε μεγάλο εύρος περιόδων (από 0.1 έως 0.4 sec). Για περιόδους μεγαλύτερες των 0.6 sec τα φάσματα ουσιαστικά ταυτίζονται. Επιπρόσθετα, στο **σχήμα 5.40**, όπου απεικονίζονται τα φάσματα Fourier, είναι ορατή η ομοιότητα και των τριών στις μικρές περιόδους.

Τα **σχήματα 5.41 έως 5.43 και 5.44 έως 5.46** αντίστοιχα παρουσιάζουν τα αποτελέσματα που αφορούν τα σεισμικά γεγονότα του Φεβρουαρίου και του Ιουνίου αντίστοιχα. Θα λέγαμε πως μπορούμε να εξάγουμε ακριβώς τα ίδια συμπεράσματα με τα παραπάνω. Και πάλι η ανάλυση με το SHAKE όντως ενισχύει τις υψηλές συχνότητες της διέγερσης αλλά αδυνατεί να αποδώσει το μέγιστο των φασμάτων επιτάχυνσης για ένα εύρος περιόδων έως και το 1 sec. Η διαφορά φυσικά εντοπίζεται και στις αντίστοιχες χρονοϊστορίες.

Συγκεντρωτικά, η ισοδύναμη ελαστική ανάλυση με το SHAKE μπορεί μόνο ποιοτικά να προσεγγίσει τις καταγεγραμμένες στην επιφάνεια συνιστώσες και των τριών σεισμικών συμβάντων. Σε απόλυτους αριθμούς τα αποτελέσματα της ανάλυσης υστερούν σημαντικά.

#### **5.4.7 Επιταχυνσιογραφικός σταθμός ΚΡΟC**

Τα **σχήματα 5.47 έως και 5.50** απεικονίζουν τα αποτελέσματα των αναλύσεων στον σταθμό HPSC για το σεισμικό γεγονός στις 22 Φεβρουαρίου του 2011.

Στο **σχήμα 5.47** παρατηρούμε τη μεγάλη γωνιακή παραμόρφωση που αναπτύσσεται στα πρώτα μέτρα του εδαφικού σχηματισμού και την έντονη απομείωση του μέτρου διατμήσεως σε αντίθεση με τα βαθύτερα στρώματα που έχουν υψηλότερη ταχύτητα διατμητικής παραμόρφωσης ( $V_s$ ).

Στο **σχήμα 5.48** είναι ευδιάκριτη η ενίσχυση των επιταχύνσεων στο αντίστοιχο φάσμα για περιόδους από 0.3 έως και 1 sec με πολύ μικρή απομείωση για τις μικρότερες περιόδους. Ο συντελεστής φασματικής ενίσχυσης παρουσιάζει μέγιστο στα 0.6 sec. Συγκρίνοντας όμως την χρονοϊστορία επιταχύνσεων που προκύπτει από το SHAKE με τις αντίστοιχες στην επιφάνεια του σταθμού στο **σχήμα 5.49**, παρατηρούμε πως η πρώτη έχει πολύ μεγαλύτερη ένταση με σαφώς ισχυρότερους παλμούς και διπλάσια περίπου μέγιστη εδαφική επιτάχυνση ( $g_a$ ). Το φάσμα επιταχύνσεων στο ίδιο σχήμα επιβεβαιώνει τις παραπάνω παρατηρήσεις. Αναλυτικότερα, το φάσμα που προέκυψε από το SHAKE εμφανίζει δύο μέγιστα, ένα στα 0.2 sec και ένα στα 0.6 sec, περίπου στο 1.5 g. Αντίθετα τα φάσματα των δύο συνιστωσών της καταγραφής είναι πάνω κάτω παρόμοια μεταξύ τους με ένα και μοναδικό μέγιστο στα 0.2 sec της τάξης του 1 g. Στο **σχήμα 5.50**, τα φάσματα Fourier φαίνεται να είναι σε συμφωνία έχοντας μέγιστο στα 0.7 sec.

Λαμβάνοντας υπόψη τα ανωτέρω συμπεραίνουμε πως η ανάλυση υπερεκτιμά αυτή τη φορά την απόκριση του εδάφους στην επιφάνεια χωρίς να δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα, που να είναι σε συμφωνία με τα καταγεγραμμένα.

#### 5.4.8 Επιταχυνσιογραφικός σταθμός NNBS

Τα **σχήματα 5.51 έως και 5.54** συγκεντρώνουν τα αποτελέσματα των αναλύσεων στον σταθμό NNBS για το σεισμικό συμβάν στις 22 Φεβρουαρίου του 2011.

Στο **σχήμα 5.51** παρουσιάζεται το προφίλ του σταθμού σε όρους ταχύτητας διατμητικών κυμάτων. Αξιοσημείωτη είναι η απότομη μεταβολή της γωνιακής παραμόρφωσης και του λόγου των μέτρων διατμήσεως σε βάθος λίγο μεγαλύτερο των 10 m, λόγω του τριπλασιασμού της ταχύτητας εκεί. Παρατηρώντας τις χρονοϊστορίες των πραγματικών καταγραφών στην επιφάνεια του σταθμού στο **σχήμα 5.53** είναι ορατά τα έντονα φαινόμενα ρευστοποίησης και στις δύο συνιστώσες μετά τα 19 sec. Οι περίοδοι αυξάνουν εντυπωσιακά και οι κορυφές των επιταχύνσεων είναι απότομες και σχεδόν στιγμιαίες. Πιθανή εξήγηση του φαινομένου αποτελεί η θεώρηση πλήρους ρευστοποίησης του εδάφους στην περιοχή. Φυσικά η ελαστική ισοδύναμη ανάλυση με το SHAKE αδυνατεί να προσομοιώσει το συγκεκριμένο φαινόμενο. Το φάσμα επιταχύνσεων στο ίδιο σχήμα απεικονίζει ξεκάθαρα αυτή την αδυναμία. Στις περιόδους κάτω από 1 sec περίπου μπορούμε να πούμε πως το φάσμα που προέκυψε από την ανάλυση προσεγγίζει το αντίστοιχο της συνιστώσας S13E. Πέραν του ενός sec όμως, όπου τα φάσματα και των δύο συνιστωσών εμφανίζουν ενίσχυση που φτάνει το 1 g περίπου, το προερχόμενο από το SHAKE φάσμα παρουσιάζει μονάχα μια μικρή ενίσχυση και αυτή αποκλειστικά στη περιοχή των 1.2 sec. Η ίδια παρατήρηση ισχύει και για τα φάσματα Fourier του επόμενου σχήματος (**σχήμα 5.54**).

Καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι εξαιτίας των εντόνως ανελαστικών φαινομένων λόγω της ενεργοποίησης του μηχανισμού ρευστοποίησης του εδάφους, η ισοδύναμη ελαστική ανάλυση, εξ ορισμού, αδυνατεί να προσεγγίσει την εν λόγω συμπεριφορά.

#### 5.4.9 Επιταχυνσιογραφικός σταθμός PRPC

Τα **σχήματα 5.55 έως και 5.58** συγκεντρώνουν τα αποτελέσματα των αναλύσεων στον σταθμό PRPC για το σεισμικό γεγονός στις 22 Φεβρουαρίου του 2011.

Οι παρατηρήσεις σχετικά με τα **σχήματα 5.55 και 5.56** σε γενικές γραμμές κυμαίνονται στα ίδια πλαίσια με εκείνες των αντίστοιχων σχημάτων στους προηγούμενους σταθμούς. Σχολιάζοντας όμως το **σχήμα 5.57**, αξίζει να υπογραμμίσουμε τη διαφορά που υπάρχει μεταξύ της χρονοϊστορίας επιταχύνσεων που προκύπτει από το SHAKE σε σχέση με τις δύο συνιστώσες (S και W) της πραγματικής καταγραφής. Αυτή συνίσταται κυρίως στην απόκλιση των τιμών των μέγιστων εδαφικών επιταχύνσεων ( $rga$ ) και στο συχνοτικό περιεχόμενο των χρονοϊστοριών. Το φάσμα επιταχύνσεων του ίδιο σχήματος δίνει μία πιο σαφή εικόνα των παραπάνω. Εύκολα παρατηρούμε τη κορυφή του φάσματος από το SHAKE για  $T \approx 0.65$  sec, η οποία παρουσιάζεται και στα άλλα δύο φάσματα, S και W. Επίσης κοντά στα 0.2 sec το φάσμα από το SHAKE φαίνεται να προσεγγίζει

σηματικά τουλάχιστον εκείνο της συνιστώσας  $S$  της καταγραφής. Θα λέγαμε όμως πως αυτές είναι οι μόνες ομοιότητες που μπορούμε να εντοπίσουμε. Το φάσμα από το SHAKE αδυνατεί να αποδώσει τόσο τις υψηλές τιμές φασματικής επιτάχυνσης που υπάρχουν στα άλλα δύο για περιόδους κάτω των 0.5 sec, όσο και το “φούσκωμα” που παρουσιάζουν από 1 έως 2 sec περίπου. Το τελευταίο θα λέγαμε πως πιθανότατα είναι αποτέλεσμα ρευστοποίησης του εδάφους, κάτι που φαίνεται πιο καθαρά στις χρονοϊστορίες  $S$  και  $W$  (ιδιαίτέρως στην  $S$ ). Στις ίδιες παρατηρήσεις μας οδηγεί και το **σχήμα 5.58** των φασμάτων Fourier. Οι συνιστώσες της καταγραφής παρουσιάζουν ένα ξεκάθαρο μέγιστο για  $T \approx 1.6$  sec που δεν υπάρχει στο φάσμα Fourier του SHAKE.

Συνεπώς, στον σταθμό PRPC η ισοδύναμη ελαστική ανάλυση με το λογισμικό SHAKE δεν μπορεί να αποδώσει σε ικανοποιητικό βαθμό καμία από τις δύο συνιστώσες της πραγματικής καταγραφής.

#### *5.4.10 Επιταχυνσιογραφικός σταθμός RHSC*

Τα **σχήματα 5.59 έως και 5.62** απεικονίζουν τα αποτελέσματα των αναλύσεων στον σταθμό RHSC για το σεισμικό γεγονός στις 22 Φεβρουαρίου του 2011.

Στο **σχήμα 5.59** παρατηρούμε πως περίπου κάτω από 10 m η ταχύτητα των διατμητικών κυμάτων αυξάνεται περίπου κατά 2.5 φορές με αποτέλεσμα τη ραγδαία μεταβολή τη γωνιακής παραμόρφωσης στο βάθος αυτό αλλά και του λόγου των μέτρων διατμήσεως.

Στο **σχήμα 5.61** μπορούμε να διακρίνουμε τη διαφορά της χρονοϊστορίας επιταχύνσεων από το SHAKE σε σχέση με τις άλλες δύο, που κυρίως έχει να κάνει με τη τιμή της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης ( $\rho g_a$ ). Το φάσμα επιταχύνσεων για  $T = 0$  sec παρουσιάζει ξεκάθαρα τη παρατήρηση αυτή. Γενικά θα λέγαμε πως πέραν αυτής της ουσιώδους διαφοράς τα φάσματα επιταχύνσεων παρουσιάζουν μια σχετική ομοιότητα με τις κορυφές όλων να είναι πολύ κοντά στη τιμή του 1 g για περιόδους κάτω των 0.5 sec. Για  $T \approx 0.6$  sec διακρίνουμε πως και τα τρία φάσματα έχουν μία χαρακτηριστική “καμπούρα”, η οποία αποδίδεται με σαφήνεια από την ανάλυση με το SHAKE, αλλά με ουσιαστική απόκλιση όσον αφορά τη μέγιστη τιμή της φασματικής επιτάχυνσης. Σχετικά με τα φάσματα Fourier του **σχήματος 5.62**, και τα τρία όντως παρουσιάζουν μέγιστα στη περιοχή των 0.5 έως 0.6 sec.

Συμπερασματικά, η ανάλυση με το SHAKE στο σταθμό RHSC μπορεί να αποδώσει σε γενικές γραμμές τα κύρια χαρακτηριστικά των δύο συνιστωσών της πραγματικής καταγραφής. Φυσικά υπάρχουν και ουσιαστικές διαφορές, όπως επισημάναμε προηγουμένως.

#### *5.4.11 Επιταχυνσιογραφικός σταθμός SHLC*

Τα **σχήματα 5.63 έως και 5.66** απεικονίζουν τα αποτελέσματα των αναλύσεων στον σταθμό RHSC για το σεισμικό γεγονός στις 22 Φεβρουαρίου του 2011.

Άξιο σχολιασμού στη παρούσα ανάλυση είναι το **σχήμα 5.65**. Παρατηρούμε πως το φάσμα επιταχύνσεων όπως προκύπτει από το SHAKE διαφέρει αισθητά από τα αντίστοιχα των δύο συνιστωσών, S40W και S50E. Αφενός έχουν διαφορετικές μέγιστες εδαφικές επιταχύνσεις ( $\rho_{ga}$ ). Αφετέρου μετά τα 0.7 sec το φάσμα από το SHAKE αδυνατεί ολοκληρωτικά να αποδώσει τις διαστάσεις του φαινομένου. Τόσο τις μεγάλες φασματικές επιταχύνσεις κοντά στο 1 sec, όσο και το “φούσκωμα” που παρουσιάζεται περί τα 2 και 3 sec στις συνιστώσες S40W και S50E αντίστοιχα. Τα ίδια σχόλια προκύπτουν και από το **σχήμα 5.66** όπου παρουσιάζονται τα φάσματα Fourier.

Συγκεντρωτικά, για τον σταθμό SHLC η ισοδύναμη ελαστική ανάλυση δεν μπορεί να δώσει ικανοποιητικά αποτελέσματα εμφανίζοντας ουσιώδη μειονεκτήματα.

### *5.5 Παραμετρικές αναλύσεις στο σταθμό REHS*

Για τον σταθμό REHS ο οποίος εδράζεται στη βόρεια πλευρά του CBD (central business district), πέραν του εδαφικού προφίλ στο σημείο έδρασης του σταθμού (Wood et al, 2011), έγιναν διερευνητικές ισοδύναμες ελαστικές αναλύσεις με ακόμη δύο προφίλ.

#### *5.5.1 Εδαφικό προφίλ των Wood et al*

Στα **σχήματα 5.67 έως και 5.70** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων για το σταθμό REHS όσον αφορά το σεισμικό γεγονός στις 22 Φεβρουαρίου του 2011 στη πόλη του Christchurch. Στο **σχήμα 5.69** απεικονίζεται το εδαφικό προφίλ στη περιοχή του σταθμού (Wood et al, 2011).

Οι καμπύλες των Vucetic & Dobry (1991) για εδάφη με δείκτη πλασιμότητας (PI) 15 % επιλέχθηκαν από τη βιβλιοθήκη καμπυλών του λογισμικού για τη περιγραφή της μεταβολής του μέτρου διατμήσεως ( $G/G_0 : \gamma$ ) και του συντελεστή απόσβεσης ( $\xi : \gamma$ ), όπως ακριβώς και σε όλες τις προηγούμενες αναλύσεις.

Συμπερασματικά, τα αποτελέσματα της ισοδύναμης ελαστικής ανάλυσης με το SHAKE παρουσιάζουν μεγάλη απόκλιση από τα αντίστοιχα της πραγματικής καταγραφής, κάτι που φαίνεται ξεκάθαρα παρατηρώντας τις χρονοϊστορίες και το φάσμα επιταχύνσεων του **σχήματος 5.69**.

### 5.5.2 *Εδαφικό προφίλ των Cubrinovski et al*

Τα αποτελέσματα των δομικών που έλαβαν χώρα μετά τον σεισμό στις 22 Φεβρουαρίου του 2011 στη περιοχή του CBD (central business district) από τους Cubrinovski et al (Cubrinovski et al, 2012), αποτέλεσαν την αφορμή για μία βαθύτερη διερεύνηση του εδαφικού σχηματισμού κάτω από τον σταθμό REHS. Το σημείο στο οποίο έγιναν οι δοκιμές CPT που αξιοποιήσαμε βρίσκεται περίπου 300 m νοτιοανατολικά του σταθμού REHS, όπως παρουσιάζεται στην **εικόνα 5.2**.

Για τη περιγραφή της μεταβολής του μέτρου διατμήσεως ( $G/G_0 : \gamma$ ) και του συντελεστή απόσβεσης ( $\xi : \gamma$ ), χρησιμοποιήθηκαν οι καμπύλες των Vucetic & Dobry (1991) για εδάφη με δείκτη πλασιμότητας (PI) 15 %.

Τα **σχήματα 5.71 έως και 5.74** συγκεντρώνουν τα αποτελέσματα των γραμμικών αναλύσεων για το σταθμό REHS όσον αφορά το σεισμό στις 22 Φεβρουαρίου του 2011. Στο **σχήμα 5.71** απεικονίζεται το εδαφικό προφίλ σε όρους ταχύτητας διατμητικών κυμάτων ( $V_s$ ) στη περιοχή του σταθμού (Cubrinovski et al, 2012).

Παρατηρώντας τα σχήματα αυτά, βγάζουμε το συμπέρασμα πως και αυτή η ισοδύναμη γραμμική ανάλυση δεν μπορεί να αποδώσει μια ουσιαστική προσέγγιση της πραγματικής καταγραφής. Ειδικότερα στο **σχήμα 5.73** είναι εμφανής η μεγάλη απόκλιση μεταξύ του φάσματος επιταχύνσεων που προέρχεται από το SHAKE και των αντίστοιχων φασμάτων των δύο συνιστωσών της καταγραφής, N02E και S88E. Το πρώτο έχει μέγιστο στα 0.2 sec, ενώ τα άλλα δύο παρουσιάζουν υψηλές τιμές φασματικών επιταχύνσεων σε περιόδους από 1 έως 1.5 sec, που η ισοδύναμη ελαστική ανάλυση αδυνατεί να αποδώσει. Επίσης η συνιστώσα S88E παρουσιάζει χαρακτηριστικό “φούσκωμα” για  $T \approx 3$  sec, το οποίο δεν υπάρχει στο φάσμα της ανάλυσης.

### 5.5.3 *Εδαφικό προφίλ από γεώτρηση στον σταθμό REHS*

Προκειμένου να διερευνήσουμε περαιτέρω την ορθότητα του εδαφικού προφίλ στο σταθμό REHS αλλά και το βαθμό στον οποίο τα αποτελέσματα των αναλύσεων μας μπορούν να προσεγγίσουν τις πραγματικές καταγραφές, ως προς το σεισμικό γεγονός στις 22 Φεβρουαρίου του 2011, χρησιμοποιήσαμε το προφίλ από μία γεώτρηση η οποία έλαβε χώρα δίπλα ακριβώς από το σταθμό. Η εταιρία “Beca Carter Hollings & Ferner Ltd (Beca)” για λογαριασμό του οργανισμού “New Zealand Department of Building and Housing (DBH)” διεξήγαγε έρευνα στην περιοχή προκειμένου να διαπιστωθούν τα αίτια της κατάρρευσης του κτηρίου της Pyne Gould Corporation (PGC) στην οδό 231-233 Cambridge Terrace εξαιτίας του συγκεκριμένου σεισμού (Beca, 2011). Στην **εικόνα 5.3** φαίνεται το σημείο έδρασης του σταθμού REHS και της αντίστοιχης γεώτρησης (BH/CPT 103) στην οποία βασιστήκαμε για να προσδιορίσουμε ένα εδαφικό προφίλ σε όρους ταχύτητας διατμητικών κυμάτων.

Με βάση τη γεώτρηση που παρουσιάζεται στις **εικόνες 5.4 και 5.5**, δημιουργήσαμε ένα γενικευμένο εδαφικό προφίλ χρησιμοποιώντας τη διακριτοποίηση της εδαφικής στήλης στα διάφορα εδαφικά υλικά και τους αντίστοιχους δείκτες αριθμών κρούσεως  $N$  από τη δοκιμή SPT (Standard Penetration Test). Το προφίλ αυτό παρουσιάζεται στην **εικόνα 5.6**.

Προκειμένου να συντάξουμε ένα εδαφικό προφίλ σε όρους διατμητικών ταχυτήτων ( $V_s$ ) επικαλεστήκαμε διάφορες εμπειρικές σχέσεις οι οποίες συνδυάζουν τα μεγέθη  $N$  (SPT) και  $V_s$ . Για κάθε μία από αυτές συντάχθηκε ένα αντίστοιχο εδαφικό προφίλ. Οι σχέσεις αυτές είναι:

- Imai & Yoshimura (1975) :  $V_s = 76 * N^{0.33}$  (γενική για όλα τα εδάφη)
- Sykora & Stokoe (1983) :  $V_s = 100.5 * N^{0.29}$  (για άμμο)
- Kanai (1966) :  $V_s = 19 * N^{0.6}$  (γενική για όλα τα εδάφη)
- Dikmen (2009) :  $V_s = 58 * N^{0.39}$  (γενική για όλα τα εδάφη)
- Dikmen (2009) :  $V_s = 73 * N^{0.33}$  (για άμμο)
- $V_s = 60 * N^{0.36}$  (για ιλύ)
- $V_s = 44 * N^{0.48}$  (για άργιλο)

Οι ειδικές σχέσεις του Dikmen για άμμο, ιλύ και άργιλο χρησιμοποιήθηκαν κάθε μία για το αντίστοιχο εδαφικό στρώμα στην ίδια ανάλυση. Συνολικά λοιπόν προέκυψαν **5 εδαφικά προφίλ** με βάση τις παραπάνω σχέσεις τα οποία παρουσιάζονται στο **σχήμα 5.75**.

Προκειμένου να διερευνήσουμε και την επιρροή που έχουν οι διάφορες καμπύλες απομείωσης του μέτρου διατμήσεως  $G_{max}$  και αύξησης του λόγου της υστερητικής απόσβεσης με την αύξηση της διατμητικής παραμόρφωσης για τα διαφορετικά εδαφικά υλικά για κάθε ένα από τα παραπάνω προφίλ κάναμε **3 σετ αναλύσεων**. Αναλυτικά έχουμε:

- ❖ Στο πρώτο σετ αναλύσεων για κάθε ένα από τα εδαφικά προφίλ χρησιμοποιήθηκαν οι καμπύλες των Vucetic & Dobry (1991) για εδάφη με δείκτη πλασιμότητας (PI) 15 % από τη βιβλιοθήκη καμπυλών του λογισμικού SHAKE. Επίσης έγινε η εξής παραδοχή: για δείκτη  $N \leq 5$  θεωρούμε ελάχιστη τιμή ταχύτητας διατμητικών κυμάτων  $V_s = 60$  m/sec, σε περίπτωση που η τελευταία προκύπτει μικρότερη. Οι εμπειρικές σχέσεις που υιοθετήσαμε κατά γενική ομολογία αδυνατούν να αποδώσουν ορθές τιμές ταχυτήτων για πολύ μικρά  $N$ .

❖ Στο δεύτερο σετ αναλύσεων επιλέχθηκαν διαφορετικές καμπύλες μεταβολής του μέτρου διατμήσεως  $G_{max}$  και του λόγου της υστερητικής απόσβεσης, ανάλογα με τα επιμέρους εδαφικά υλικά όπως παρουσιάζονται στην εικόνα 5.6.  
Έτσι από τη βιβλιοθήκη καμπυλών του λογισμικού επιλέξαμε τα παρακάτω:

1. **Άμμοι:**  $G/G_{max} \rightarrow$  Sand Average,  $G/G_{max} -$  Sand, Average (Seed & Idriss, 1970)  
 $\xi \rightarrow$  Sand Average, Damping for Sand, Average (Seed & Idriss, 1970)
2. **Άργιλοι – Ιλύες:**  $G/G_{max} \rightarrow$  Clay, PI = 20,  $G/G_{max} -$  C3 (Clay PI = 20 – 40, Sun et al, 1988)  
 $\xi \rightarrow$  Clay Average, Damping for Clay, Average (Seed & Idriss, 1970)
3. **Όργανικά εδάφη:**  $G/G_{max} \rightarrow$  Waste,  $G/G_{max} -$ Waste material (Idriss et al, 1995)  
 $\xi \rightarrow$  Waste, Damping for Waste material (Idriss et al, 1995)
4. **Χαλίκι:**  $G/G_{max} \rightarrow$  Rockfill,  $G/G_{max}$ , Rockfill (Gazetas, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 1992)  
 $\xi \rightarrow$  Rockfill, Damping for Rockfill (Gazetas, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 1992)

❖ Στο τρίτο σετ αναλύσεων επίσης επιλέχθηκαν διαφορετικές καμπύλες μεταβολής του μέτρου διατμήσεως  $G_{max}$  και του λόγου της υστερητικής απόσβεσης. Όλες οι καμπύλες προέρχονται αποκλειστικά από τους ερευνητές Vucetic & Dobry, όπως φαίνεται αναλυτικά παρακάτω:

1. **Άμμοι:**  $G/G_{max} \rightarrow$  Soil PI = 15,  $G/G_{max} -$  Soil with PI = 15, OCR = 1 – 15 (Vucetic & Dobry, JGE 1/91)  
 $\xi \rightarrow$  Soil PI = 15, Damping – Soil with PI = 15, OCR = 1 – 8 (Vucetic & Dobry, JGE 1/91)
2. **Άργιλοι – Ιλύες:**  $G/G_{max} \rightarrow$  Soil PI = 50,  $G/G_{max} -$  Soil with PI = 50, OCR = 1 – 15 (Vucetic & Dobry, JGE 1/91)  
 $\xi \rightarrow$  Soil PI = 50, Damping – Soil with PI = 50, OCR = 1 – 8 (Vucetic & Dobry, JGE 1/91)
3. **Όργανικά εδάφη:**  $G/G_{max} \rightarrow$  Soil PI = 200,  $G/G_{max} -$ Soil with PI = 200, OCR = 1 – 15 (Vucetic & Dobry, JGE 1/91)  
 $\xi \rightarrow$  Soil PI = 200, Damping – Soil with PI = 200, OCR = 1 – 8 (Vucetic & Dobry, JGE 1/91)
4. **Χαλίκι:**  $G/G_{max} \rightarrow$  Rockfill,  $G/G_{max}$ , Rockfill (Gazetas, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 1992)  
 $\xi \rightarrow$  Rockfill, Damping for Rockfill (Gazetas, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 1992)

Τα **σχήματα 5.76 έως και 5.95** συγκεντρώνουν τα αποτελέσματα του 1<sup>ου</sup> σετ αναλύσεων και για τα 5 διαφορετικά εδαφικά προφίλ. Όπως φαίνεται καμία από όλες αυτές τις αναλύσεις δεν μπορεί να προσεγγίσει επαρκώς τα αποτελέσματα της πραγματικής καταγραφής στο σταθμό REHS για τον σεισμό του Φεβρουαρίου. Μόνο η τελευταία ανάλυση με το εδαφικό προφίλ όπως προκύπτει από την εμπειρική σχέση των Sykora & Stokoe (σχήματα 5.92 έως 5.95) δίνει μία ικανοποιητική προσέγγιση των φασματικών επιταχύνσεων για περιόδους μικρότερες από 0.6 sec (σχήμα 5.95). Και αυτή όμως αδυνατεί ολοκληρωτικά να αποδώσει τις ιδιαίτερα μεγάλες φασματικές επιταχύνσεις που υπάρχουν και στις δύο συνιστώσες της καταγραφής κοντά στο 1 sec.

Τα **σχήματα 5.96 έως και 5.111** παρουσιάζουν τα αποτελέσματα του 2<sup>ου</sup> σετ αναλύσεων. Και εδώ οι ισοδύναμες ελαστικές αναλύσεις δεν μπορούν να δώσουν ικανοποιητικές προσεγγίσεις. Μόνο για τις περιόδους κάτω από 0.6 sec μπορούμε να πούμε πως υπάρχει ένας σχετικώς ικανοποιητικός βαθμός προσέγγισης.

Τα **σχήματα 5.112 έως και 5.127** απεικονίζουν τα αποτελέσματα του 3<sup>ου</sup> και τελευταίου σετ αναλύσεων για το σταθμό REHS. Ανεξαρτήτως εδαφικού προφίλ τα φάσματα επιταχύνσεων που προκύπτουν από το SHAKE εμφανίζουν μία κορυφή κοντά στα 0.2 sec η οποία δεν παρατηρείται στα φάσματα των δύο συνιστωσών της καταγραφής. Και πάλι οι αναλύσεις δεν προσεγγίζουν καθόλου τις μεγάλες φασματικές επιταχύνσεις κοντά στο 1 sec.

Το **σχήμα 5.128** συγκεντρώνει τα αποτελέσματα των φασμάτων επιτάχυνσης του *πρώτου σετ αναλύσεων* για όλα τα εδαφικά προφίλ που μελετήθηκαν στο σταθμό REHS ( Wood et al, Cubrinovski et al, Dikmen – γενική σχέση, Dikmen – ειδικές σχέσεις, Imai & Yoshimura, Sykora & Stokoe, Kanai). Παρατηρούμε πως όλες οι αναλύσεις δεν μπορούν να προσφέρουν ικανοποιητικά αποτελέσματα σε σχέση με εκείνα των δύο συνιστωσών της καταγραφής. Ιδίως για  $T \approx 1$  sec, όπως αναφέραμε και προηγουμένως, η απόκλιση είναι αισθητή.

Αντιστοίχως το **σχήμα 5.129** συγκεντρώνει τα αποτελέσματα των φασμάτων επιτάχυνσης του *δεύτερου σετ αναλύσεων*. Εδώ παρατηρούμε πως αν εξαιρέσουμε τα αποτελέσματα των αναλύσεων με τα εδαφικά προφίλ των Wood et al και Cubrinovski et al, τα υπόλοιπα προσεγγίζουν με μία σχετική ορθότητα τα φάσματα επιταχύνσεων των συνιστωσών N02E και S88E για  $T < 0.6$  sec. Για μεγαλύτερες περιόδους όμως δεν υπάρχει καμία απολύτως σύγκλιση. Εδώ να σημειώσουμε πως οι αναλύσεις με τα προφίλ των Wood et al και Cubrinovski et al έγιναν μόνο με χρήση των καμπυλών των Vucetic & Dobry (1991) για εδάφη με δείκτη πλασιμότητας (PI) 15 %, λόγω έλλειψης περαιτέρω δεδομένων. Συνεπώς και στα τρία σετ αναλύσεων παρουσιάζονται πανομοιότυπες.

Τέλος στο **σχήμα 5.130** υπάρχουν τα αποτελέσματα του *τρίτου σετ αναλύσεων*. Όλα τα φάσματα επιταχύνσεων όπως προέκυψαν από τις αναλύσεις (εκτός του αντίστοιχου των Wood et al) παρουσιάζουν κορυφή για  $T \approx 0.2$  sec, κάτι το οποίο δεν υπάρχει στα φάσματα της καταγραφής. Επίσης ούτε και τώρα προσεγγίζονται οι μεγάλες φασματικές επιταχύνσεις κοντά στο 1 sec.



Στα **σχήματα 5.131 έως και 5.134** παρουσιάζονται τα φάσματα επιταχύνσεων και οι αντίστοιχες μέγιστες τιμές των επιταχύνσεων σε σχέση με το βάθος της εδαφικής στήλης για κάθε ένα εδαφικό προφίλ. Παρατηρούμε πως τα αποτελέσματα των αναλύσεων 2 και 3, οι οποίες έγιναν με πιο λεπτομερή προσδιορισμό των καμπυλών μεταβολής των  $G_{max}$  και  $\xi$ , ποιοτικά έχουν μικρές διαφορές. Εκείνα της τρίτης ανάλυσης είναι που εμφανίζουν τις μεγαλύτερες φασματικές και εδαφικές επιταχύνσεις.

Στο **σχήμα 5.135** απεικονίζονται συγκεντρωτικά οι μέγιστες επιταχύνσεις του εδάφους σε σχέση με το βάθος για όλα τα εδαφικά προφίλ που χρησιμοποιήσαμε και για όλες τις επιμέρους αναλύσεις. Το αποτέλεσμα από το προφίλ των Wood et al φαίνεται να είναι εκείνο που παρουσιάζει τις μεγαλύτερες διαφορές από όλα τα υπόλοιπα. Στο δεύτερο σετ αναλύσεων τα αποτελέσματα των διάφορων προφίλ, πέραν εκείνου των Wood et al, φαίνεται να βρίσκονται σε σχετική συμφωνία μεταξύ τους.

## 5.6 Συμπεράσματα

Συνοψίζοντας τα συμπεράσματα από τις συγκρίσεις των αναλύσεων σε σχέση με τις πραγματικές καταγραφές στους διάφορους σταθμούς στη περιοχή του Christchurch, επισημαίνουμε τα εξής σημεία:

- στη πλειοψηφία των περιπτώσεων, η ισοδύναμη ελαστική ανάλυση με το λογισμικό SHAKE2000 δεν προσφέρει ικανοποιητικά αποτελέσματα και να αποδώσει επαρκώς τα χαρακτηριστικά των καταγραφών στην επιφάνεια του εδάφους. Με εξαίρεση τους σταθμούς CMHS και RHSC, όπου υπάρχει ένας ικανοποιητικός βαθμός σύγκλισης των αποτελεσμάτων, στους υπόλοιπους οι διαφορές υπερτερούν αισθητά των ομοιοτήτων.
- στον σταθμό REHS, παρατηρώντας κυρίως τα σχήματα 5.128 έως και 5.129, αντιλαμβανόμαστε πως όσο κι αν μεταβάλουμε τις εμπειρικές σχέσεις που αντλήσαμε από τις βιβλιογραφικές αναφορές ή τις καμπύλες μεταβολής του μέτρου διατμήσεως  $G_{max}$  και του λόγου της υστερητικής απόσβεσης  $\xi$ , μπορούμε να έχουμε ικανοποιητικά αποτελέσματα μόνο για περιόδους κάτω από 1 sec.
- αναζητώντας τα αίτια της μη ικανοποιητικής σύγκλισης θα μπορούσαμε να επικαλεστούμε τα παρακάτω:
  - όπως περιγράψαμε και στην ενότητα 5.3, ως διεγείρων κραδασμός για όλες τις παραπάνω αναλύσεις χρησιμοποιήθηκε η χρονοϊστορία επιταχύνσεων στο βραχύδες υπόβαθρο του σταθμού LPCC, όπως προέκυψε από την αντίστροφη γραμμική ελαστική ανάλυση για κάθε ένα σεισμικό γεγονός ξεχωριστά. Φυσικά πρόκειται για μια προσεγγιστική παραδοχή. Ο σταθμός LPCC είναι ο μόνος εκ των σταθμών της περιοχής του Christchurch ο οποίος

εδράζεται σε σημείο όπου ο βράχος απέχει τόσο λίγο από την επιφάνεια του εδάφους (περίπου 6 m). Όμως ο εκάστοτε κραδασμός που κατέγραψε σε κάθε ένα σεισμικό συμβάν ο συγκεκριμένος επιταχυνσιογράφος δεν είναι αντιπροσωπευτικός για το βραχώδες υπόβαθρο κάθε σημείου της ευρύτερης περιοχής. Η διάδοση των σεισμικών κυμάτων που δημιουργούνται στη περιοχή της διάρρηξης επηρεάζεται από ποικίλους παράγοντες, που μεταβάλλουν την ένταση και το συχνοτικό περιεχόμενο του κραδασμού που φτάνει τελικά στην επιφάνεια. Ο προσανατολισμός της κάθε περιοχής ως προς το ρήγμα, η γεωλογία της σεισμογενούς ζώνης, η τοπογραφία και το γεωλογικό υπόβαθρο είναι κάποιοι από αυτούς. Ειδικότερα, όσον αφορά το σεισμικό γεγονός της 22<sup>ης</sup> Φεβρουαρίου του 2011, το ρήγμα που προκλήθηκε ουσιαστικά εκτείνεται ανάμεσα στη περιοχή του Christchurch και του Lyttelton. Ως εκ τούτου ο σταθμός LPCC βρίσκεται σε διαφορετικό τέμαχος του ρήγματος σε σχέση με τους υπόλοιπους καταγραφικούς σταθμούς στην περιοχή του Christchurch. Συνεπώς η καταγραφή που χρησιμοποιήθηκε ως διέγερση στη βάση των παραπάνω σταθμών ενδέχεται να διαφέρει αισθητά από την πραγματική.

- η ισοδύναμη γραμμική ανάλυση μέσω της οποίας το SKAKE προσομοιώνει τη συμπεριφορά του εδάφους δεν μπορεί να προσεγγίσει το πραγματικό φαινόμενο λόγω των παραδοχών στις οποίες στηρίζεται (παράγραφος 5.2). Πιθανότατα η πολυπλοκότητα της σεισμικής ακολουθίας στην περιοχή του Canterbury τη περίοδο 2010 – 11 σε συνδυασμό με την ιδιαίτερη γεωλογία της περιοχής απαιτούν πιο λεπτομερείς και εξειδικευμένες αναλύσεις.
- τα εδαφικά προφίλ, σε όρους ταχύτητας διατμητικών κυμάτων που χρησιμοποιήθηκαν (Wood et al, 2011), ίσως δεν είναι αντιπροσωπευτικά του σημείου έδρασης των καταγραφικών σταθμών. Τη χρονική στιγμή συγγραφής της παρούσας διπλωματικής εργασίας δεν υπήρχε κάποια άλλη πηγή για τη συγκεκριμένη πληροφορία ώστε να είναι δυνατή η μεταξύ τους διασταύρωση.
- στις περιπτώσεις των σταθμών στους οποίους εκδηλώθηκε το φαινόμενο της ρευστοποίησης εξ ορισμού η ισοδύναμη ελαστική ανάλυση δεν να δώσει ικανοποιητικά αποτελέσματα δεδομένης της έντονης μη γραμμικότητας του φαινομένου.
- η επιλογή των καμπυλών των Vucetic & Dobry για εδάφη με δείκτη πλασιμότητας (PI) 15 %, έγινε με αυθαίρετο τρόπο λόγω απουσίας λεπτομερέστερων στοιχείων σχετικά με τα χαρακτηριστικά του εδάφους στις επιμέρους τοποθεσίες των σταθμών. Πιθανώς μία περισσότερο ακριβής επιλογή να έριχνε φως σε κάποια σκοτεινά σημεία του προβλήματος.

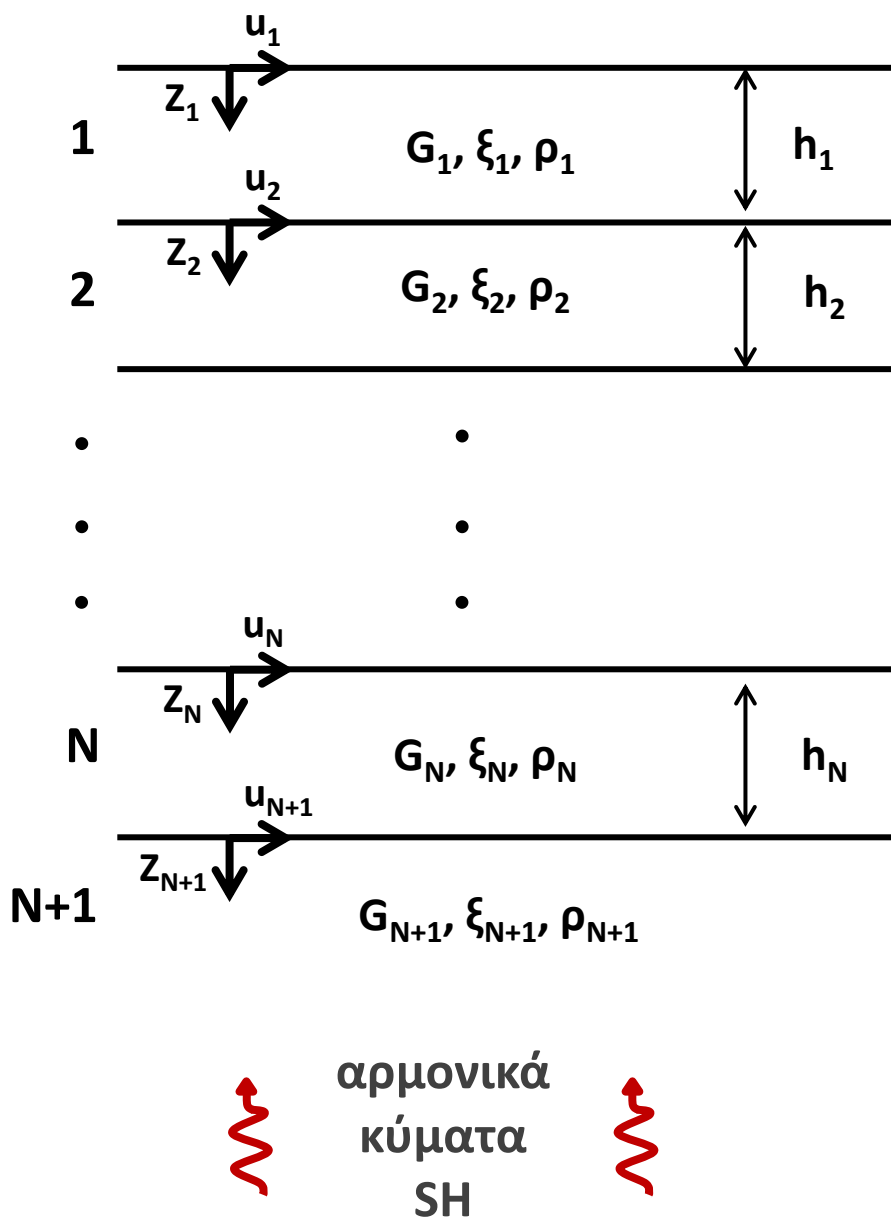


# Κεφάλαιο 5

---

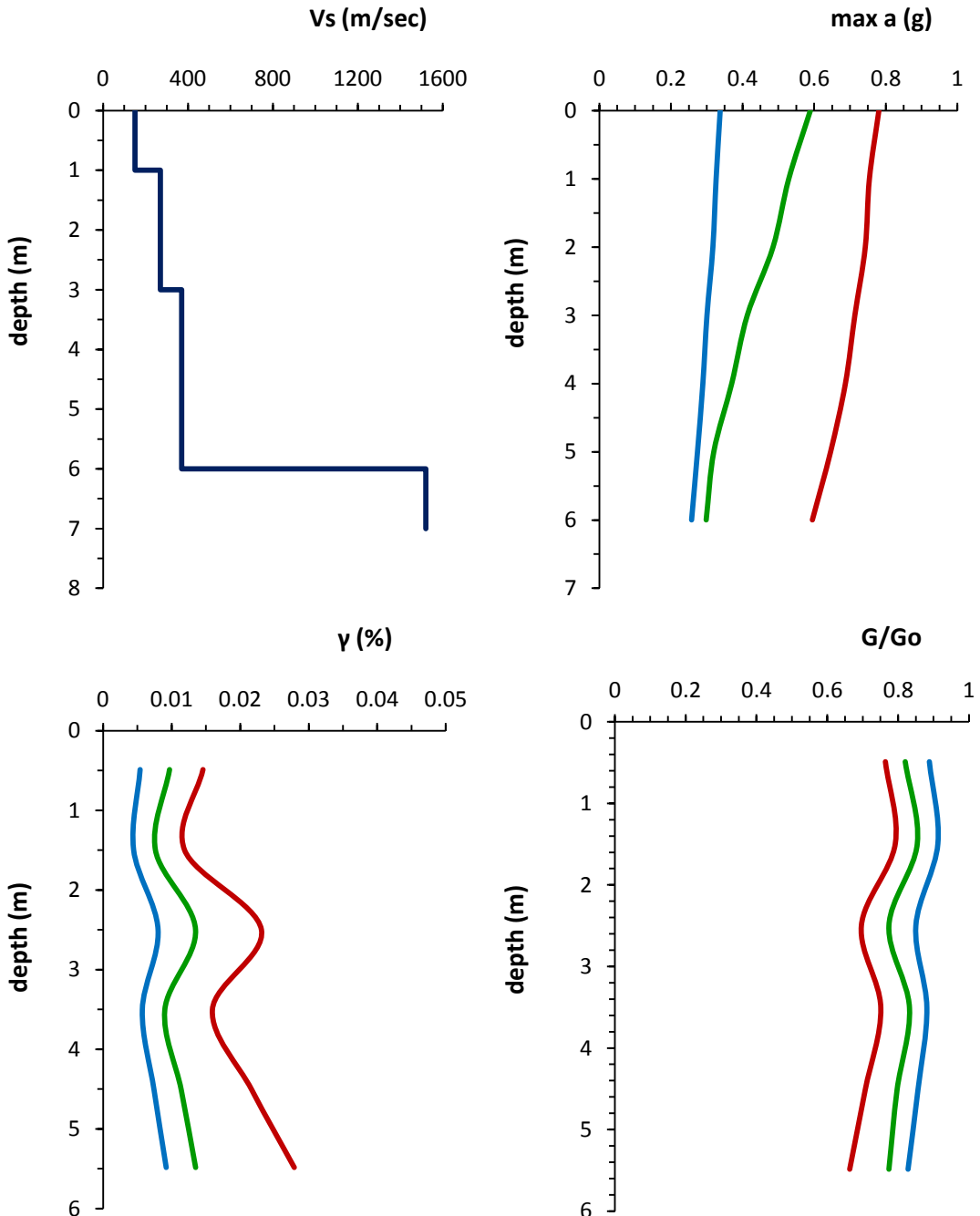
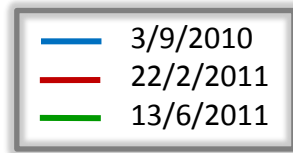
*Σχήματα & εικόνες*





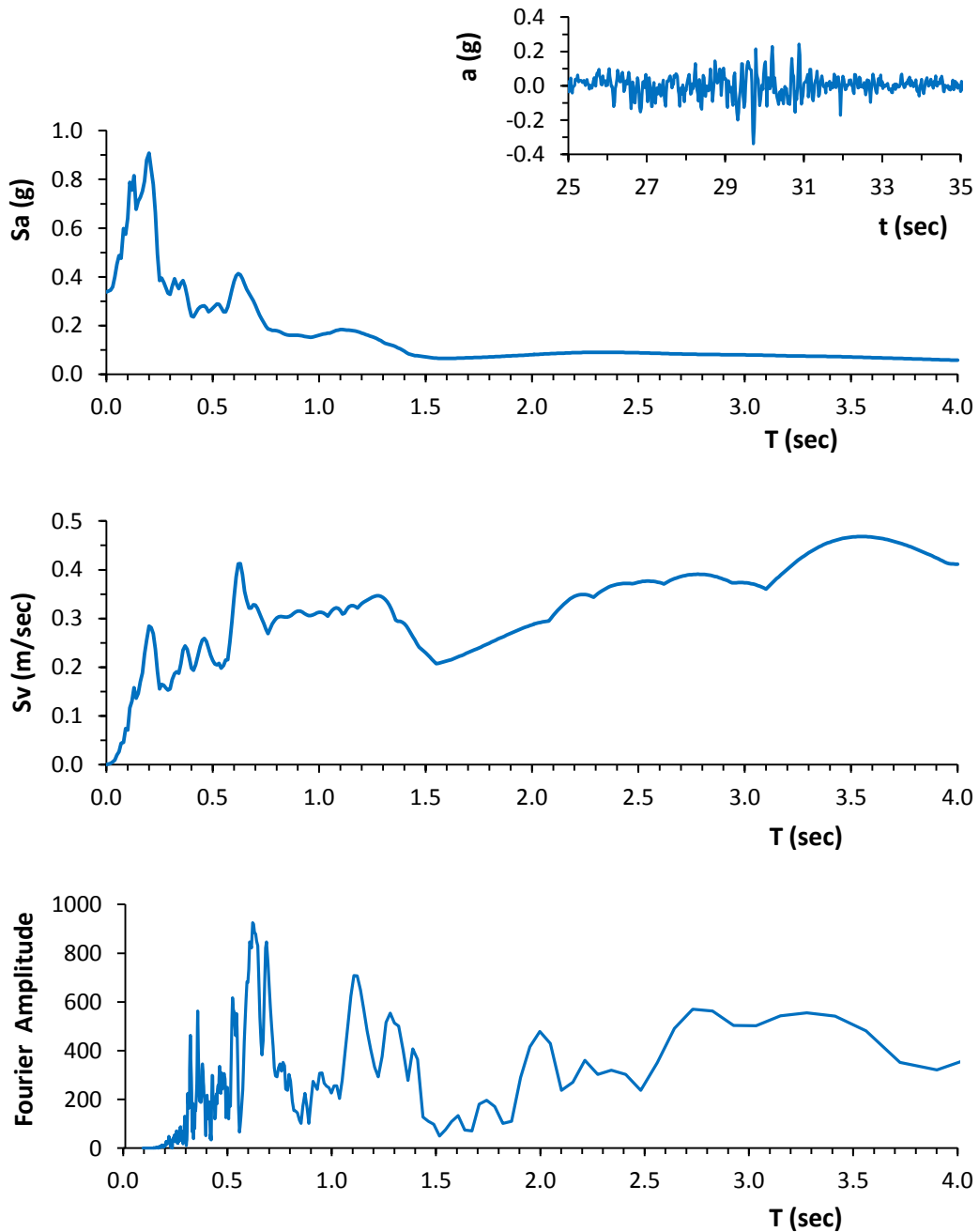
**Εικόνα 5.1:** οριζόντιες απείρου μήκους εδαφικές στρώσεις οι οποίες διεγείρονται με κατακορύφως προσπίπτοντα διατμητικά κύματα S, που προσομοιώνουν τη κίνηση του βραχώδους υποβάθρου (SHAKE2000).

**LPCC – N10W  
Deconvolution**



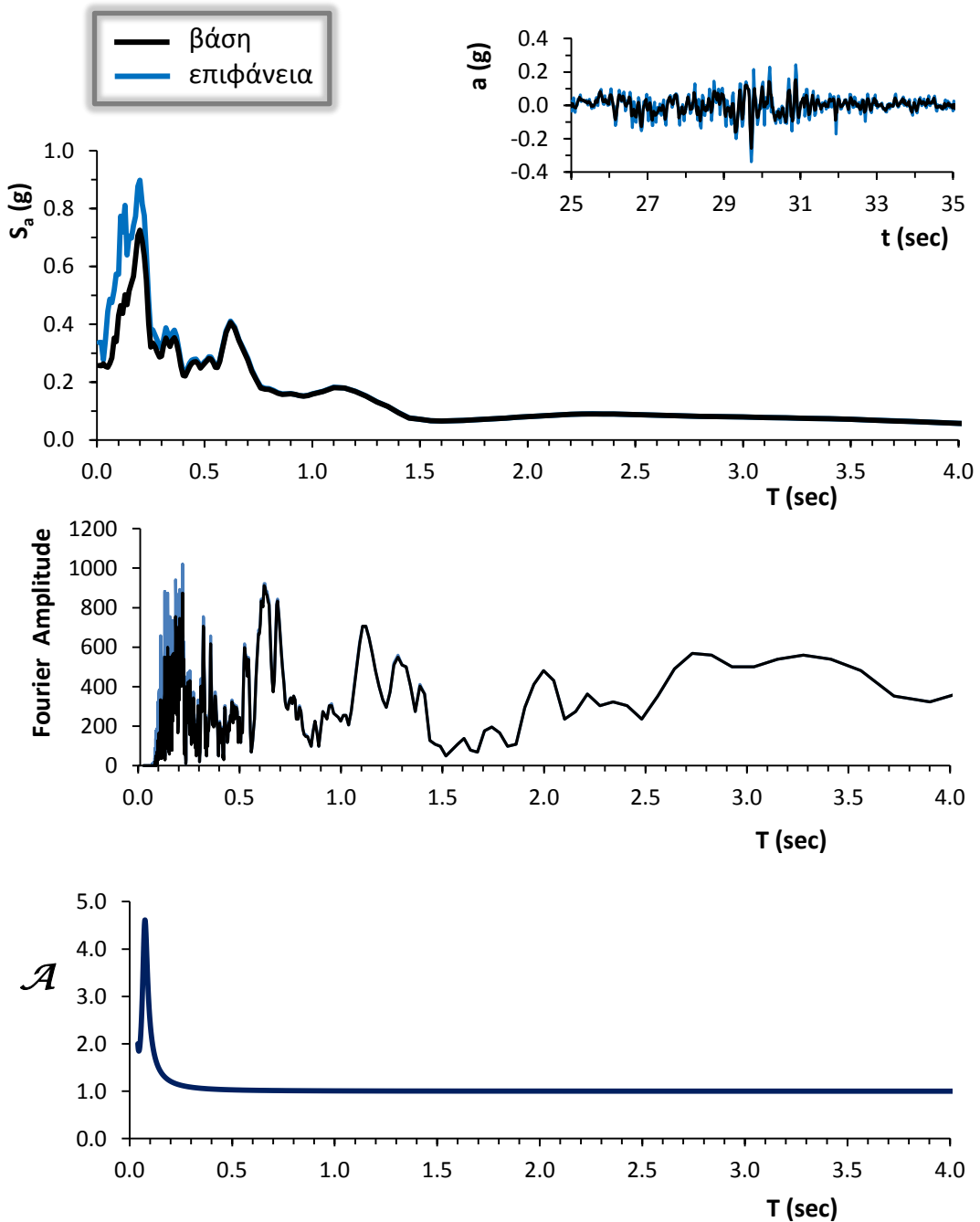
**Σχήμα 5.1:** Το εδαφικό προφίλ σε όρους ταχύτητας διατμητικών κυμάτων ( $V_s$ ), οι μέγιστες εδαφικές επιταχύνσεις ( $\max a$ ), η ποσοστιαία μεταβολή της γωνιακής παραμόρφωσης ( $\gamma$  %) και ο λόγος της απομείωσης του μέτρου διατμήσεως ( $G$ ) σε σχέση με το βάθος της εδαφικής στήλης.

**LPCC – N10W**  
**3 Σεπτεμβρίου 2010**

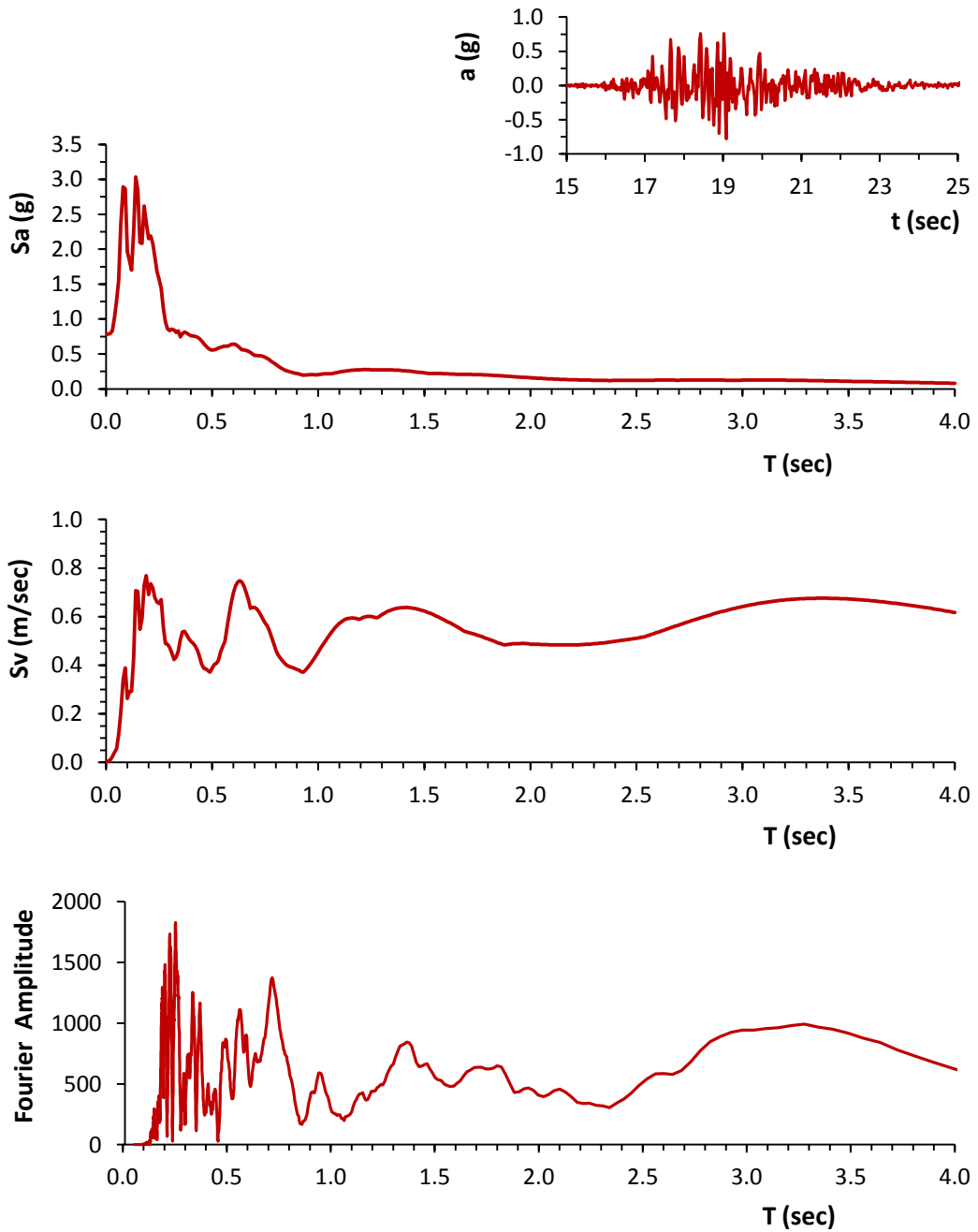


**Σχήμα 5.2:** Η χρονοϊστορία των επιταχύνσεων ( $a$ ), τα ελαστικά φάσματα επιταχύνσεων ( $S_a$ ) και ταχύτητων ( $S_v$ ) και το φάσμα του πλάτους Fourier για τον σεισμό της 3<sup>ης</sup> Σεπτεμβρίου του 2010.

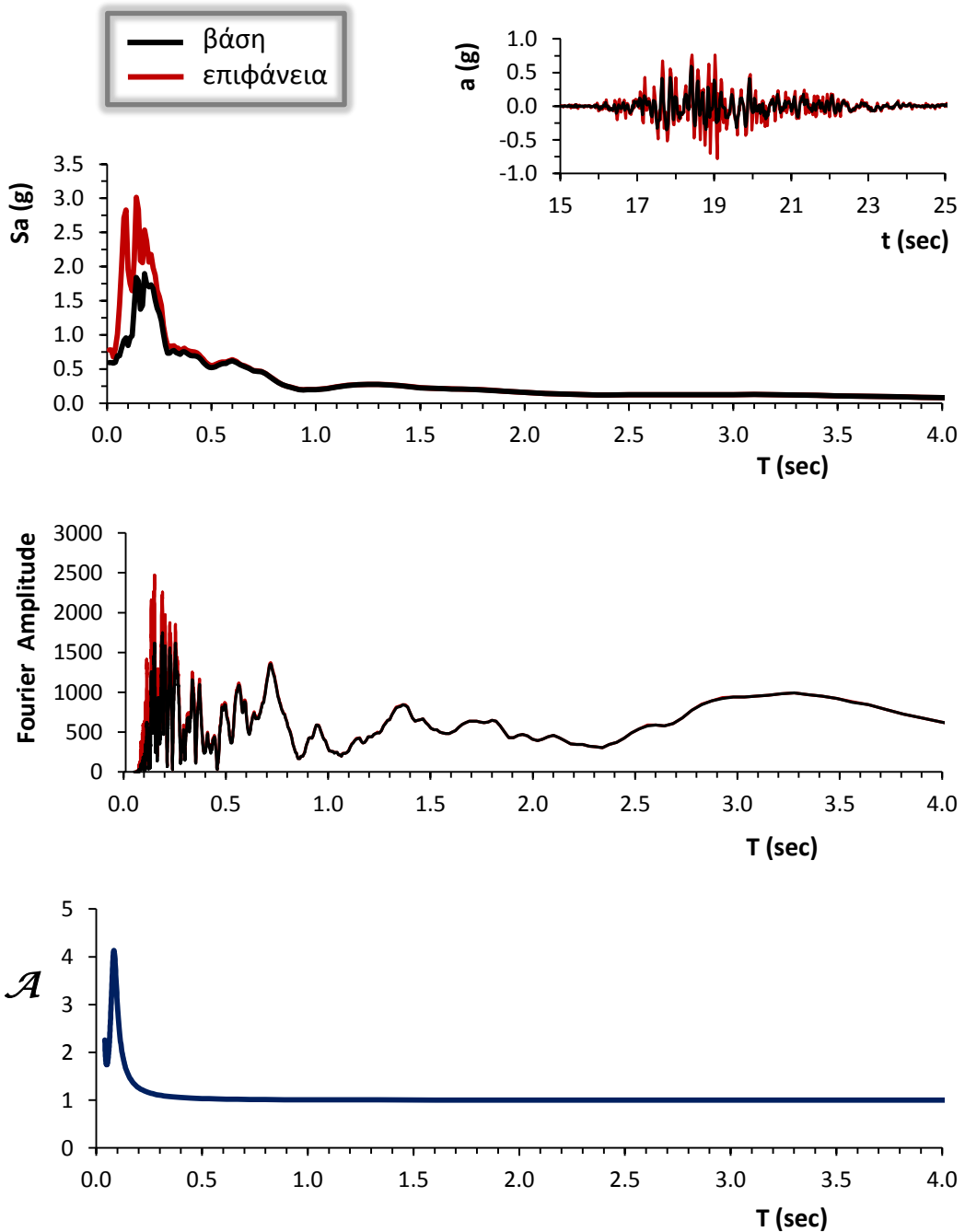




**Σχήμα 5.3:** Η χρονιοιστορία επιταχύνσεων ( $a$ ), το ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων ( $S_a$ ) και το φάσμα του πλάτους Fourier μετά την αντίστροφη ισοδύναμη ελαστική ανάλυση με το SHAKE2000. Επίσης, ο συντελεστής φασματικής μεγέθυνσης  $\mathcal{A}$ . (δεσπόζουσα ιδιοπερίοδος εδάφους:  $T = 0.09$  sec)

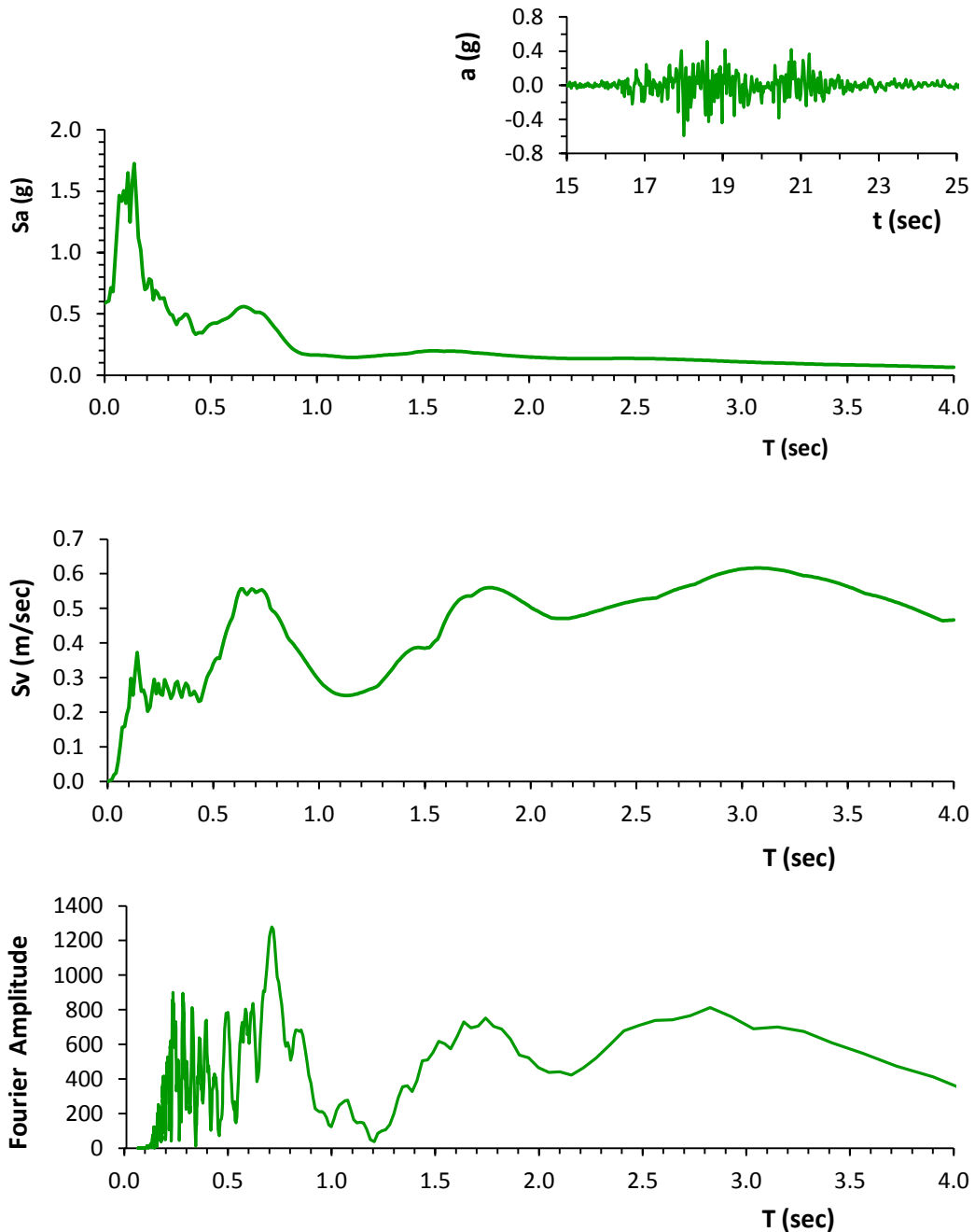


**Σχήμα 5.4:** Η χρονιοιστορία των επιταχύνσεων ( $a$ ), τα ελαστικά φάσματα επιταχύνσεων ( $S_a$ ) και ταχύτητων ( $S_v$ ) και το φάσμα του πλάτους Fourier για τον σεισμό της 22<sup>ης</sup> Φεβρουαρίου του 2011.

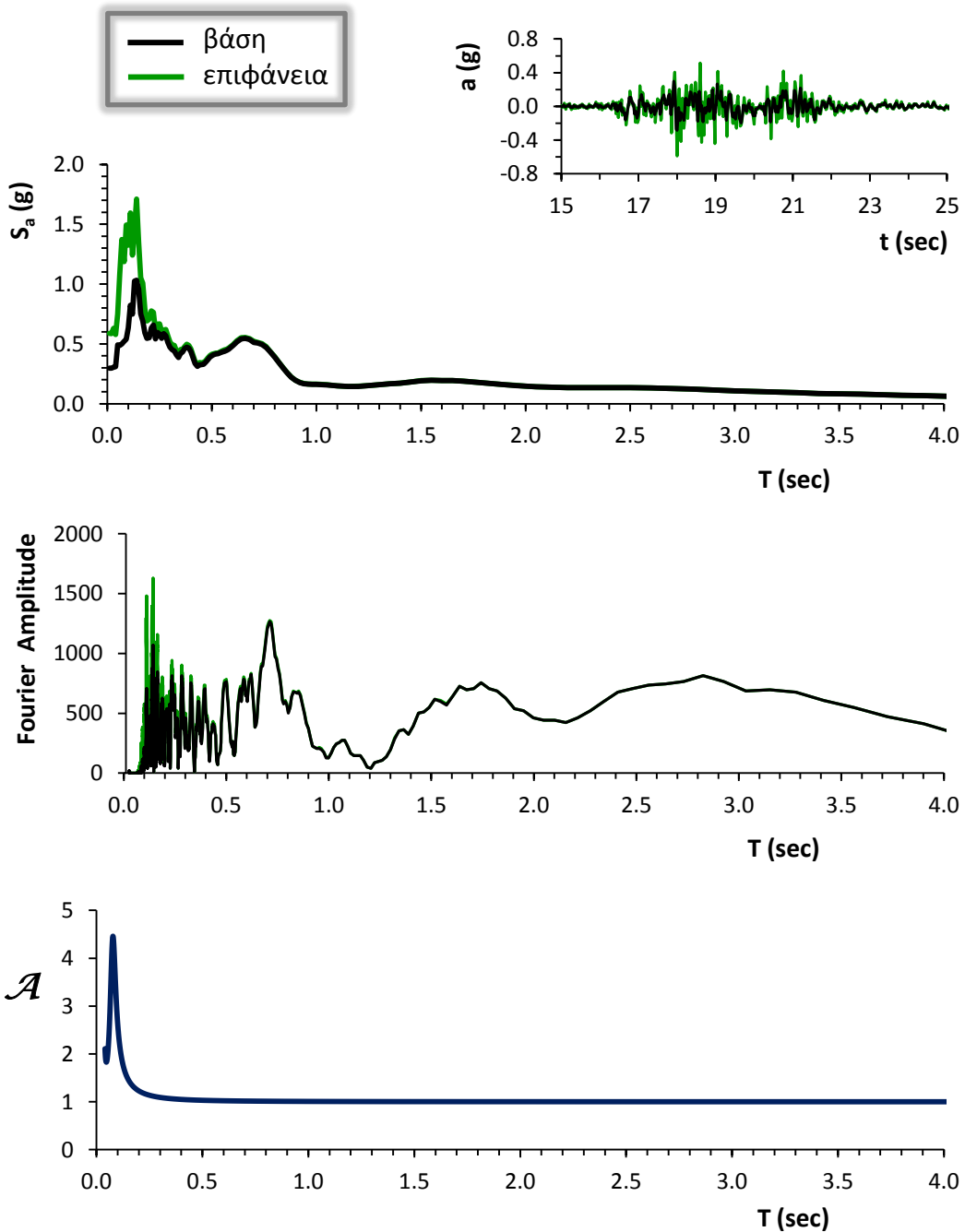


**Σχήμα 5.5:** Η χρονιοιστορία επιταχύνσεων ( $a$ ), το ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων ( $S_a$ ) και το φάσμα του πλάτους Fourier μετά την αντίστροφη ισοδύναμη ελαστική ανάλυση με το SHAKE2000. Επίσης, ο συντελεστής φασματικής μεγέθυνσης  $\mathcal{A}$ . (δεσπόζουσα ιδιοπερίοδος εδάφους:  $T = 0.08$  sec)

**LPCC – N10W**  
**13 Ιουνίου 2011**

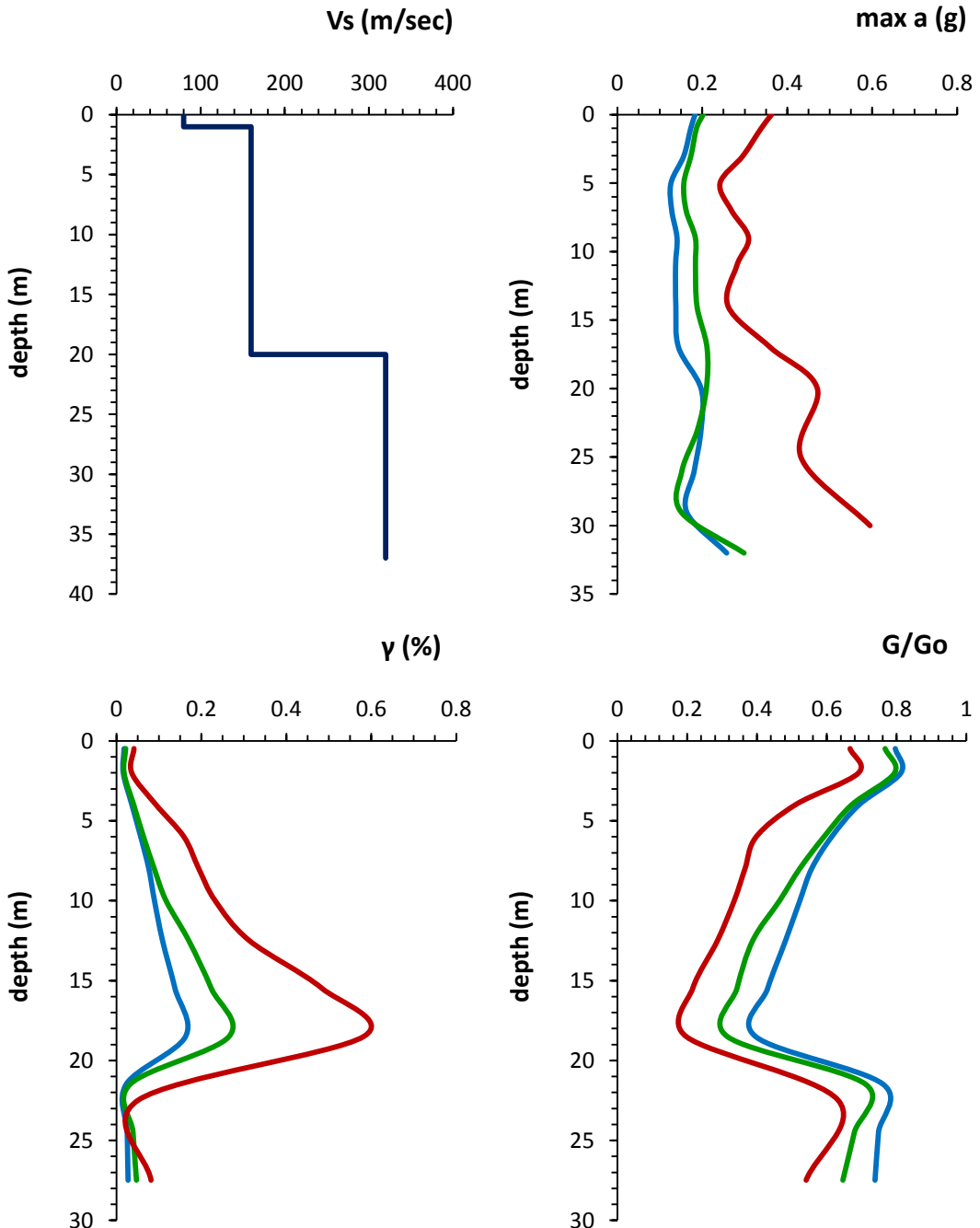
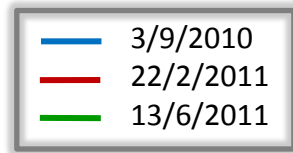


**Σχήμα 5.6:** Η χρονοϊστορία των επιταχύνσεων ( $a$ ), τα ελαστικά φάσματα επιταχύνσεων ( $S_a$ ) και ταχύτητων ( $S_v$ ) και το φάσμα του πλάτους Fourier για τον σεισμό της 13<sup>ης</sup> Ιουνίου του 2011.

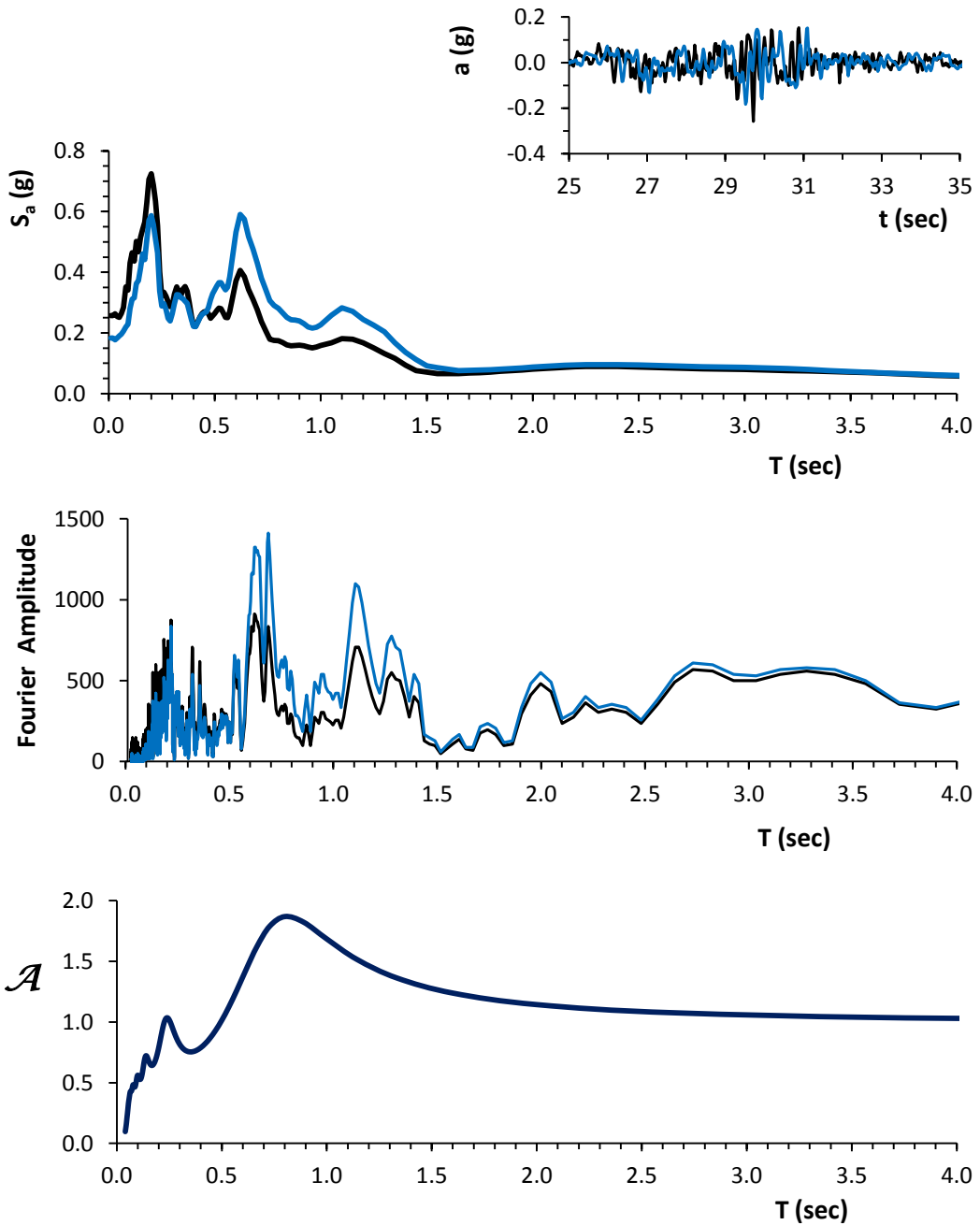
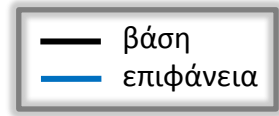


**Σχήμα 5.7:** Η χρονιοιστορία επιταχύνσεων ( $a$ ), το ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων ( $S_a$ ) και το φάσμα του πλάτους Fourier μετά την αντίστροφη ισοδύναμη ελαστική ανάλυση με το SHAKE2000. Επίσης, ο συντελεστής φασματικής μεγέθυνσης  $\mathcal{A}$ . (δεσπόζουσα ιδιοπερίοδος εδάφους:  $T = 0.09$  sec)

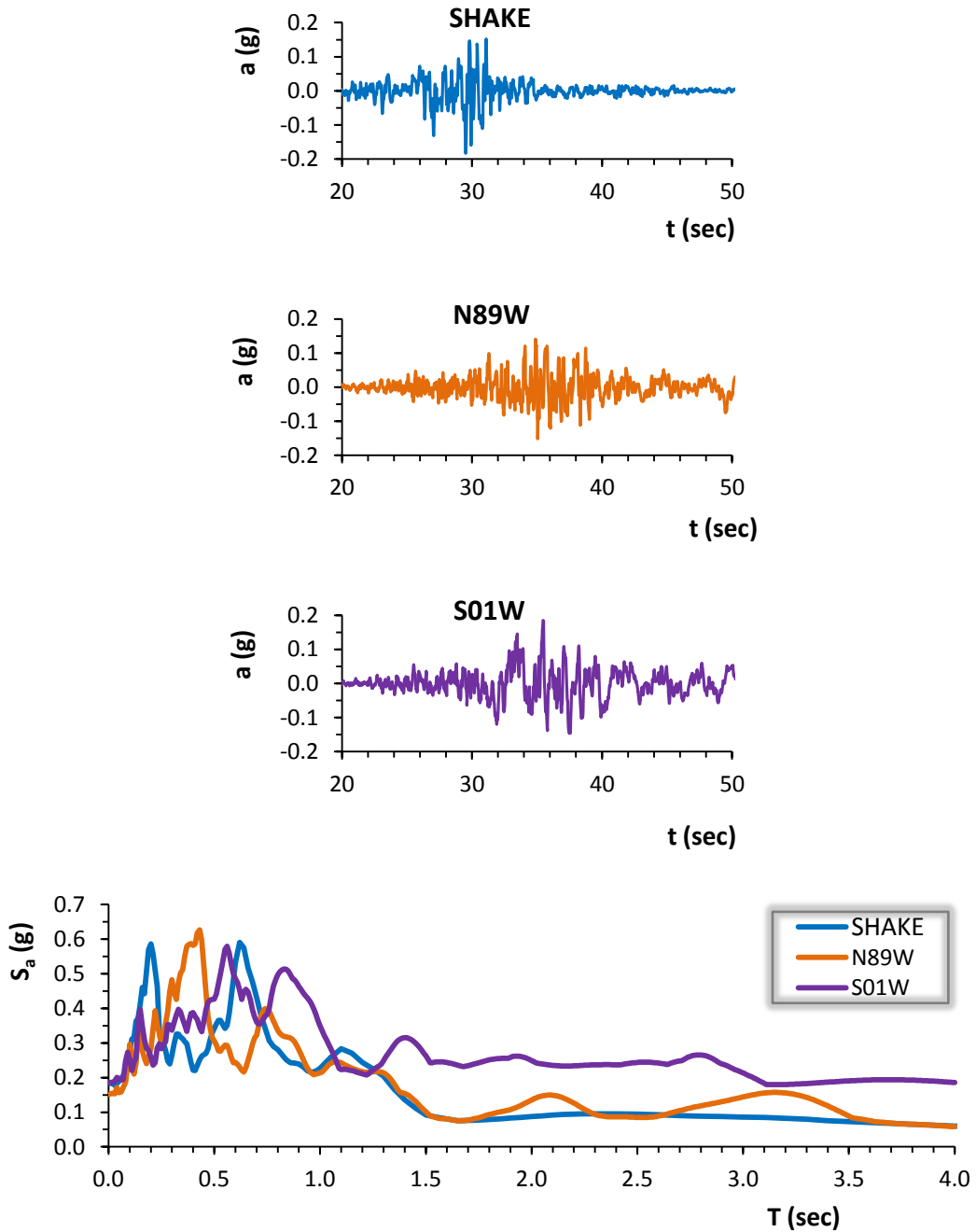
# CBGS



**Σχήμα 5.8:** Το εδαφικό προφίλ σε όρους ταχύτητας διατμητικών κυμάτων ( $V_s$ ), οι μέγιστες εδαφικές επιταχύνσεις ( $\max a$ ), η ποσοστιαία μεταβολή της γωνιακής παραμόρφωσης ( $\gamma$  %) και ο λόγος της απομείωσης του μέτρου διατμήσεως ( $G$ ) σε σχέση με το βάθος της εδαφικής στήλης.

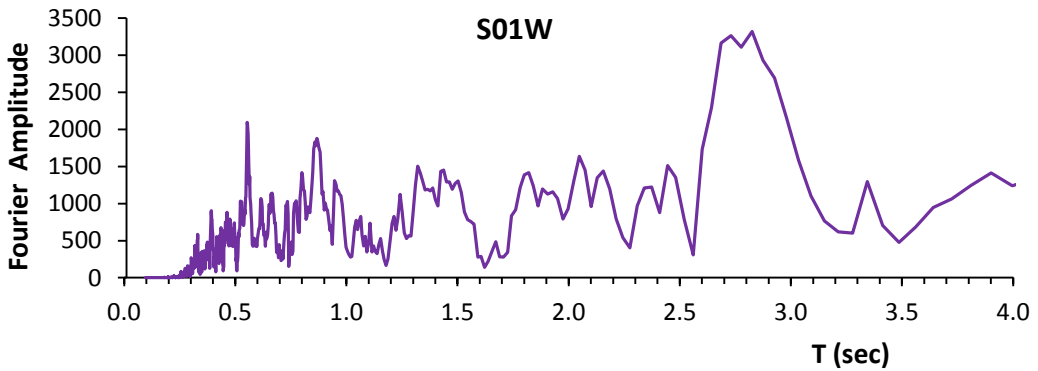
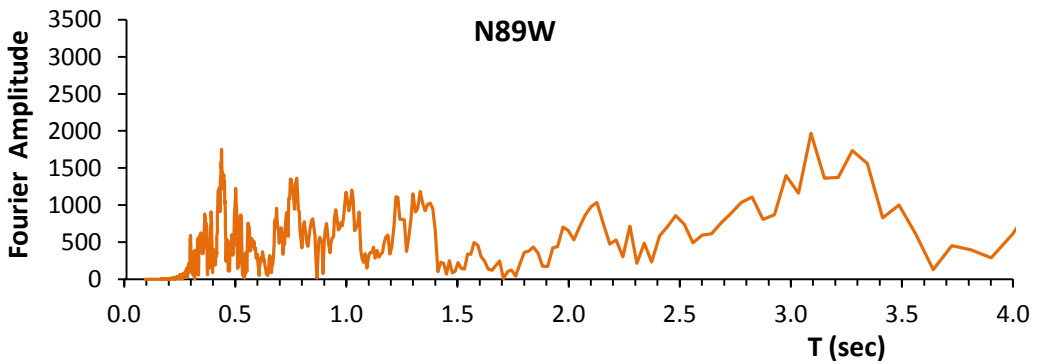
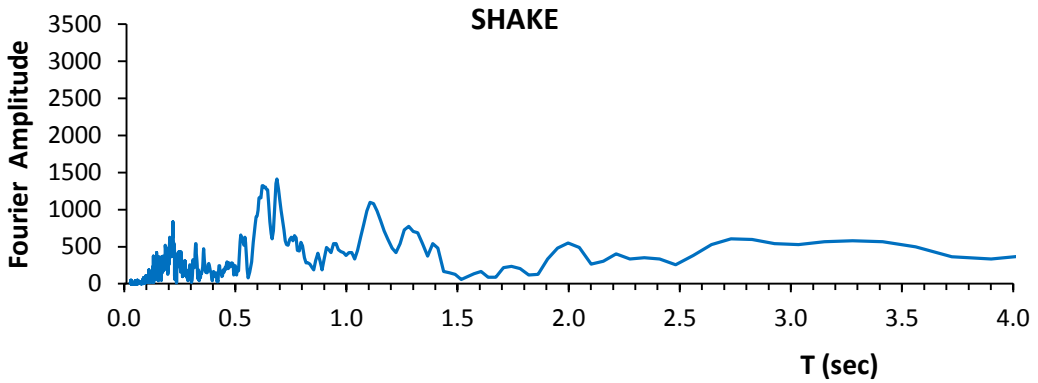


**Σχήμα 5.9:** Η χρονιοιστορία επιταχύνσεων ( $a$ ), το ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων ( $S_a$ ) και το φάσμα του πλάτους Fourier μετά την ανάστροφη ισοδύναμη ελαστική ανάλυση με το SHAKE2000. Επίσης, ο συντελεστής φασματικής μεγέθυνσης  $\mathcal{A}$ . (δεσπόζουσα ιδιοπερίοδος εδάφους:  $T = 0.73 \text{ sec}$ )

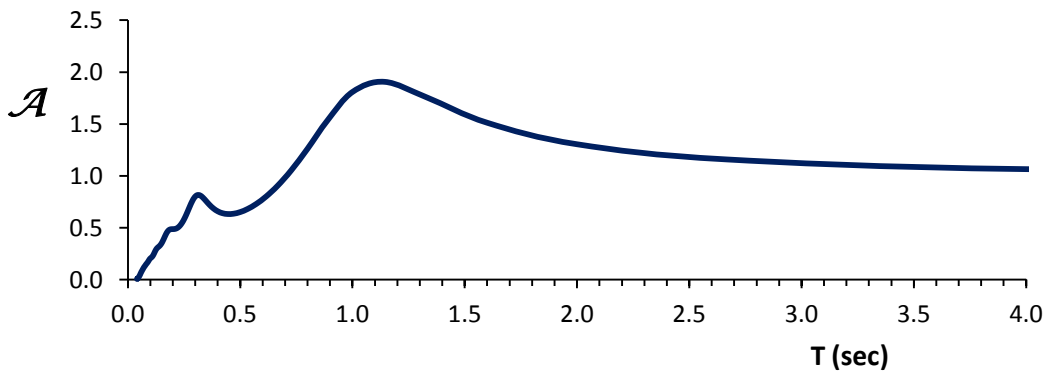
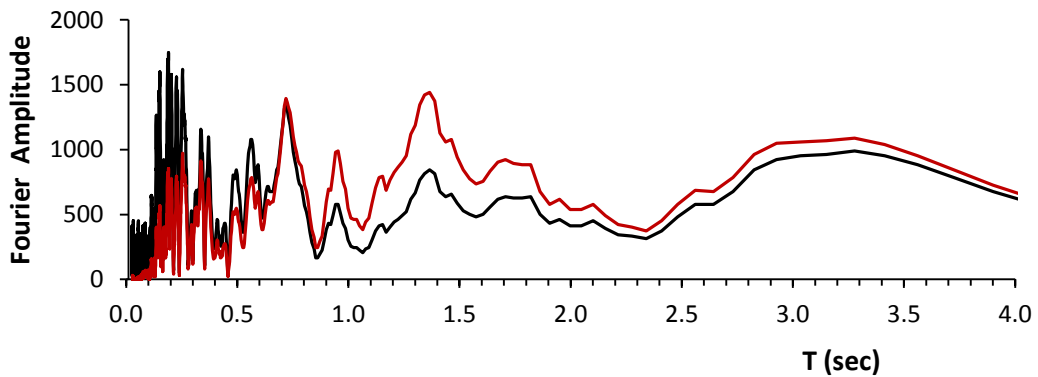
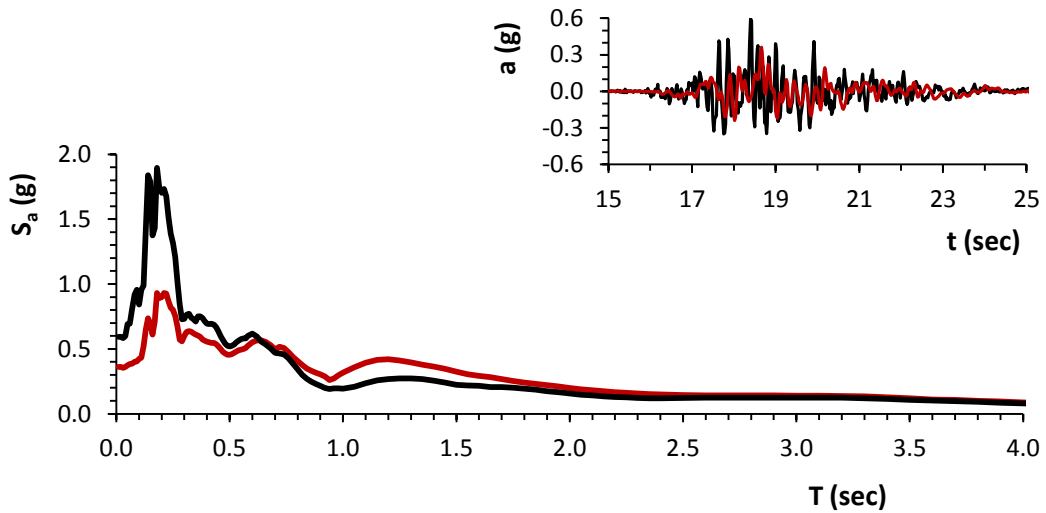
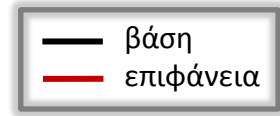


**Σχήμα 5.10:** Η χρονοϊστορία επιταχύνσεων ( $a$ ) και το ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων ( $S_a$ ) από την ισοδύναμη ελαστική ανάλυση με το SHAKE2000, σε σύγκριση με τα αντίστοιχα από τις δύο συνιστώσες της καταγραφής.





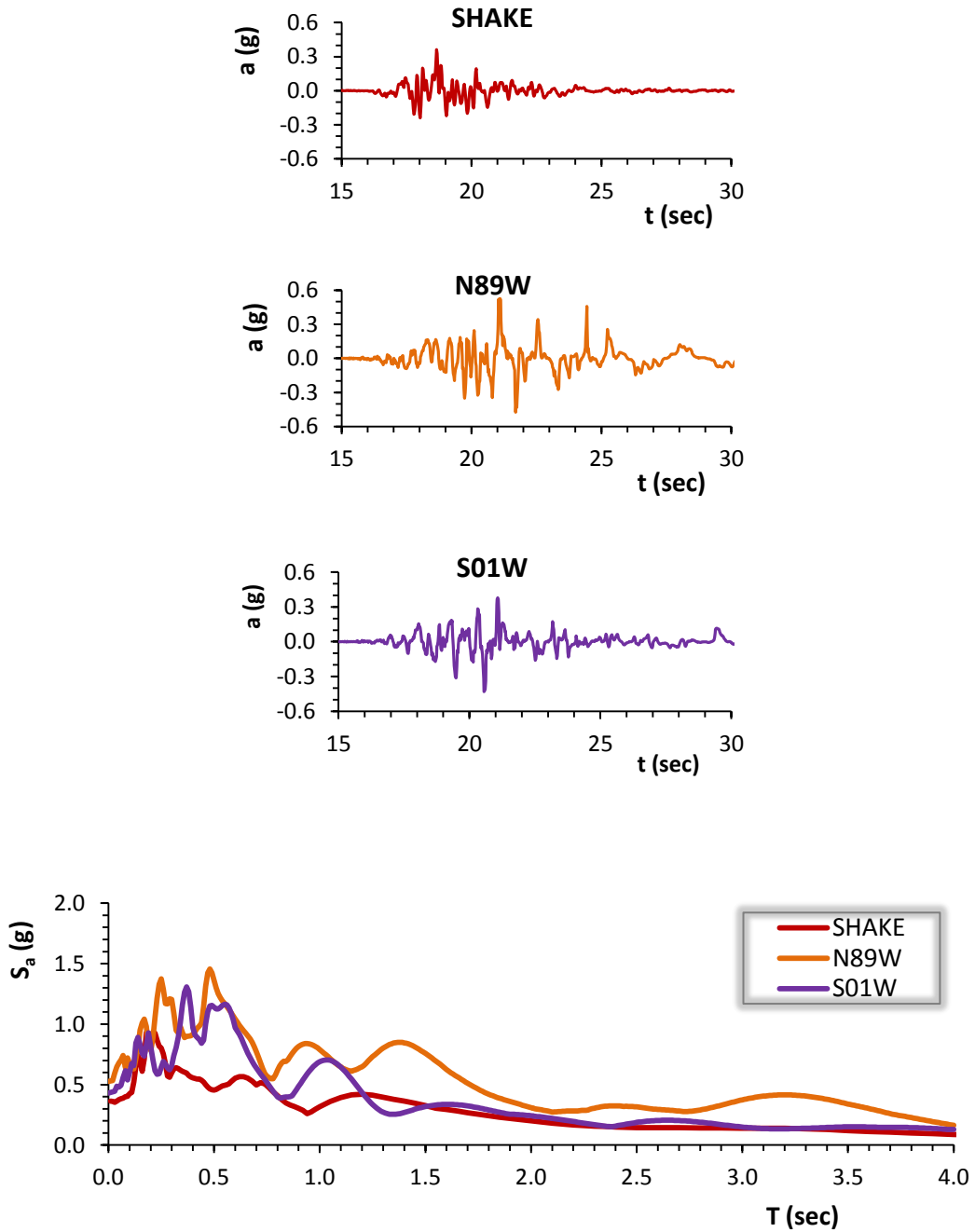
**Σχήμα 5.11:** Το φάσμα πλάτους Fourier από την ισοδύναμη ελαστική ανάλυση με το SHAKE2000 σε σύγκριση με τα αντίστοιχα από τις δύο συνιστώσες της καταγραφής.



**Σχήμα 5.12:** Η χρονιοιστορία επιταχύνσεων ( $a$ ), το ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων ( $S_a$ ) και το φάσμα του πλάτους Fourier μετά την ανάστροφη ισοδύναμη ελαστική ανάλυση με το SHAKE2000. Επίσης, ο συντελεστής φασματικής μεγέθυνσης  $\mathcal{A}$ . (δεσπόζουσα ιδιοπερίοδος εδάφους:  $T = 0.84$  sec)

CBGS

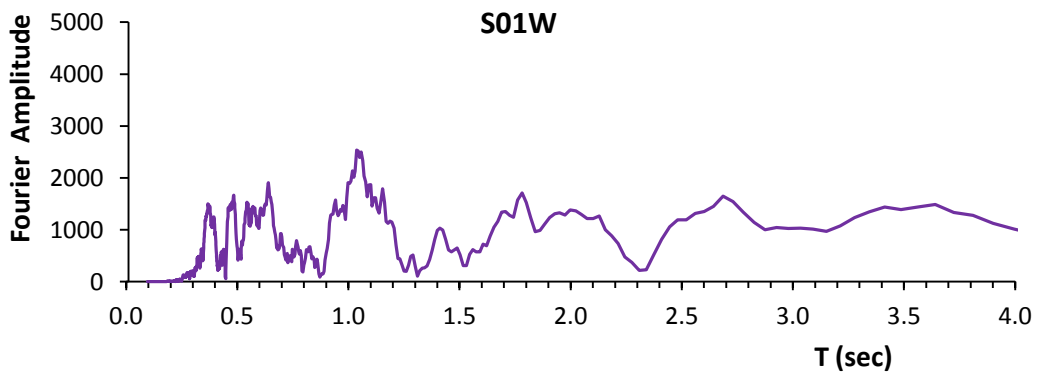
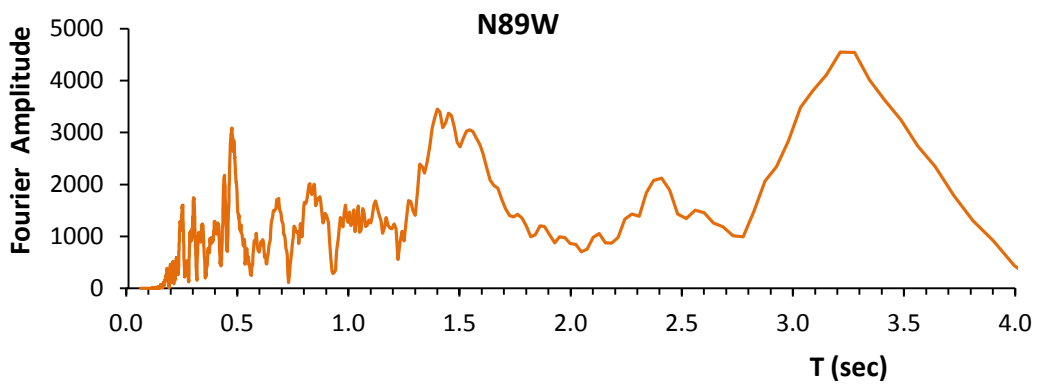
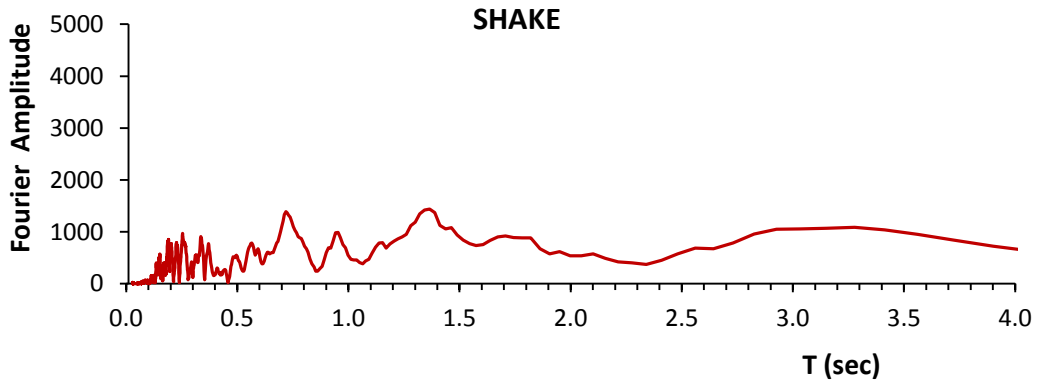
22 Φεβρουαρίου 2011



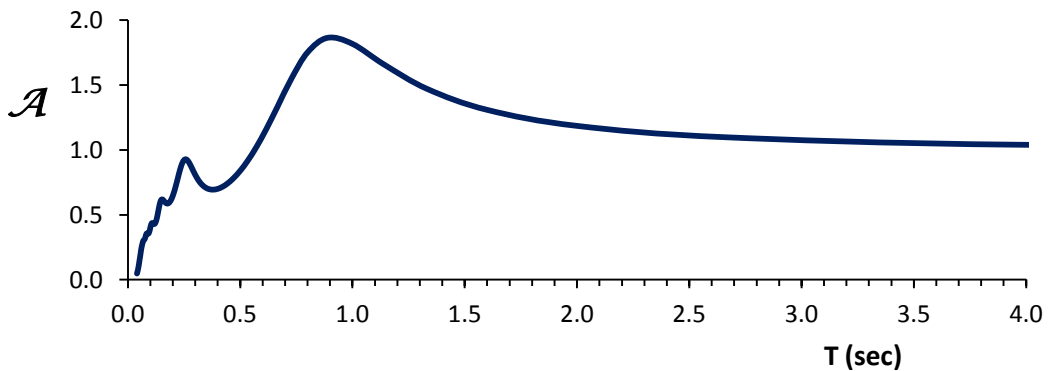
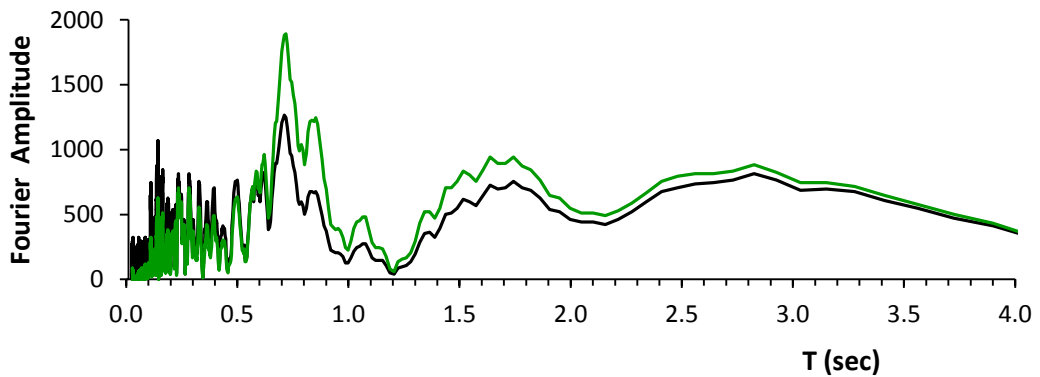
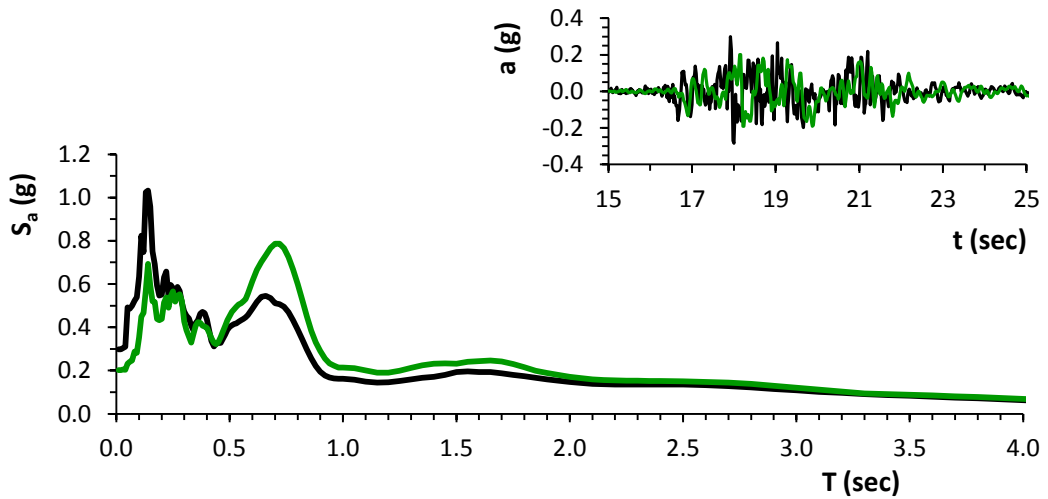
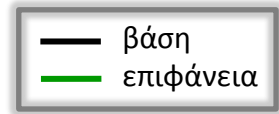
**Σχήμα 5.13:** Η χρονοϊστορία επιταχύνσεων ( $a$ ) και το ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων ( $S_a$ ) από την ισοδύναμη ελαστική ανάλυση με το SHAKE2000, σε σύγκριση με τα αντίστοιχα από τις δύο συνιστώσες της καταγραφής.

**CBGS**

**22 Φεβρουαρίου 2011**

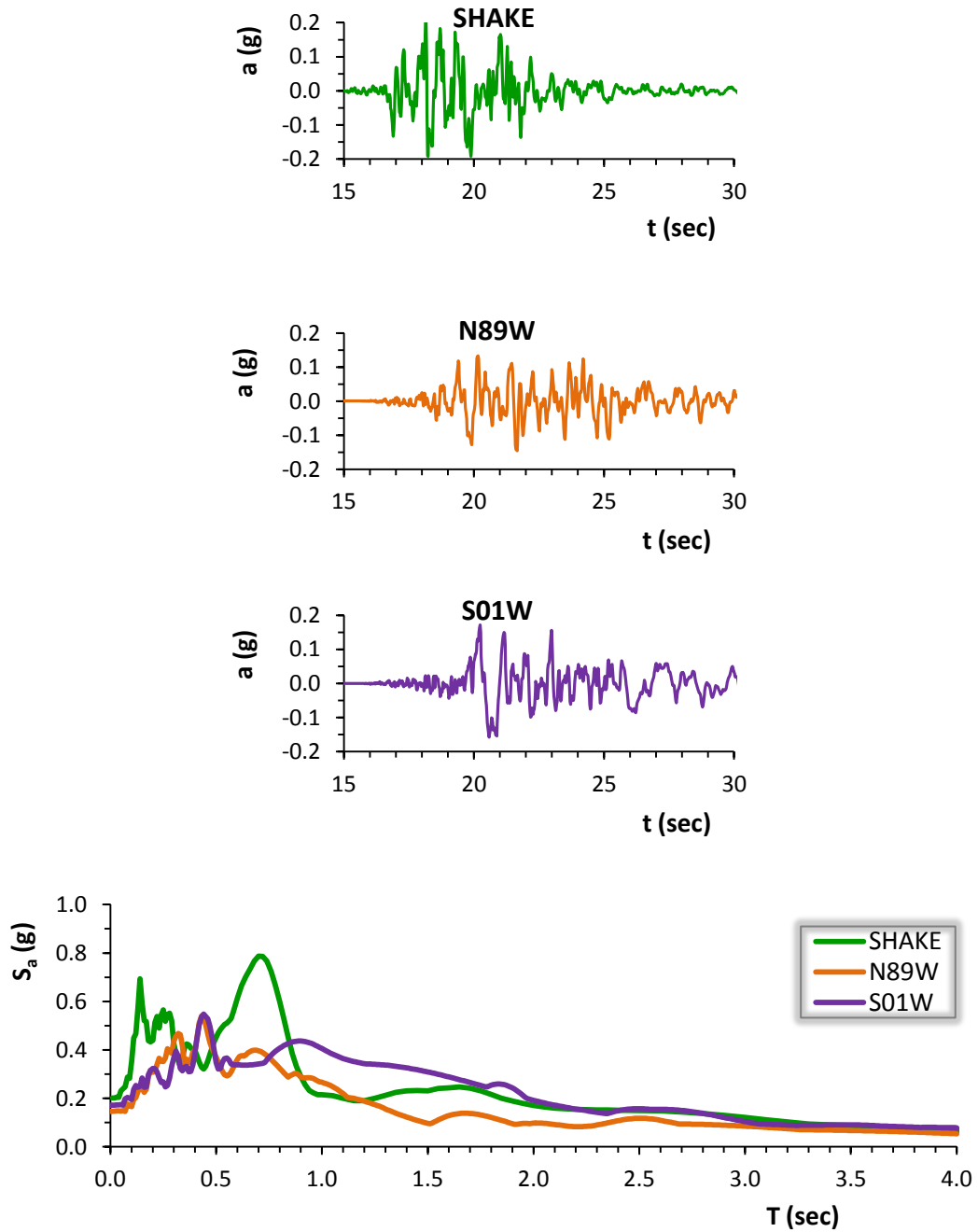


**Σχήμα 5.14:** Το φάσμα πλάτους Fourier από την ισοδύναμη ελαστική ανάλυση με το SHAKE2000 σε σύγκριση με τα αντίστοιχα από τις δύο συνιστώσες της καταγραφής.



**Σχήμα 5.15:** Η χρονιοϊστορία επιταχύνσεων ( $a$ ), το ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων ( $S_a$ ) και το φάσμα του πλάτους Fourier μετά την ανάστροφη ισοδύναμη ελαστική ανάλυση με το SHAKE2000. Επίσης, ο συντελεστής φασματικής μεγέθυνσης  $\mathcal{A}$ . (δεσπάζουσα ιδιοπερίοδος εδάφους:  $T = 0.77$  sec)

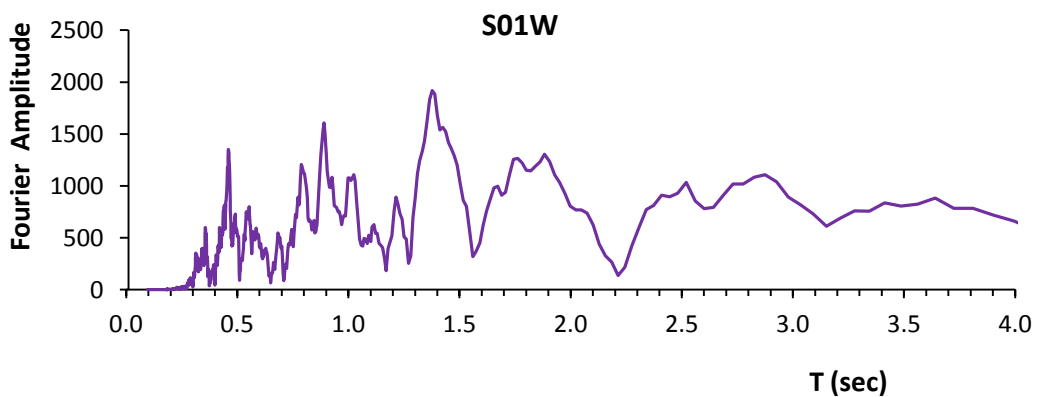
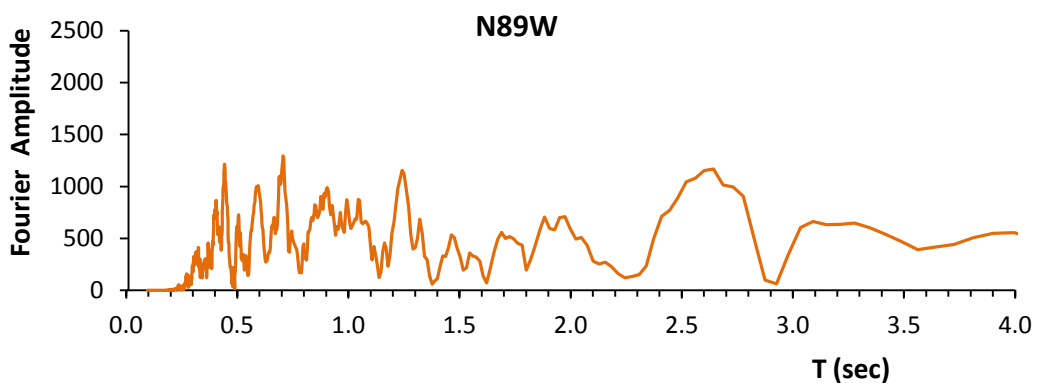
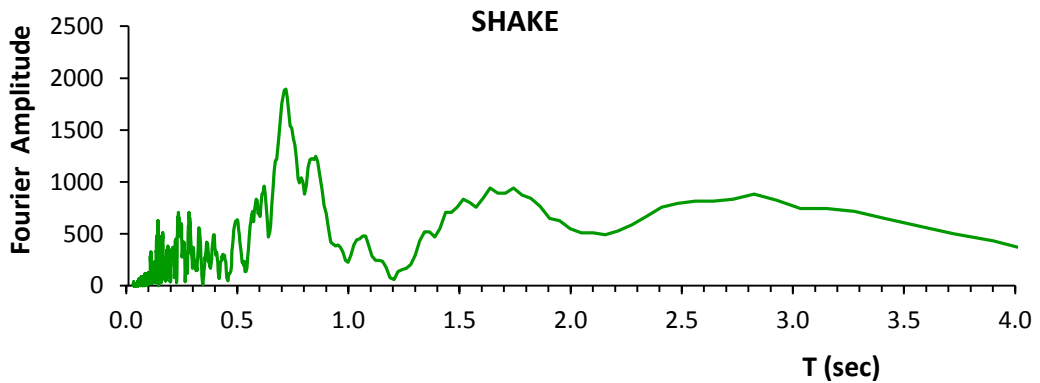
**CBGS**  
**13 Ιουρίου 2011**



**Σχήμα 5.16:** Η χρονιοιστορία επιταχύνσεων ( $a$ ) και το ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων ( $S_a$ ) από την ισοδύναμη ελαστική ανάλυση με το SHAKE2000, σε σύγκριση με τα αντίστοιχα από τις δύο συνιστώσες της καταγραφής.

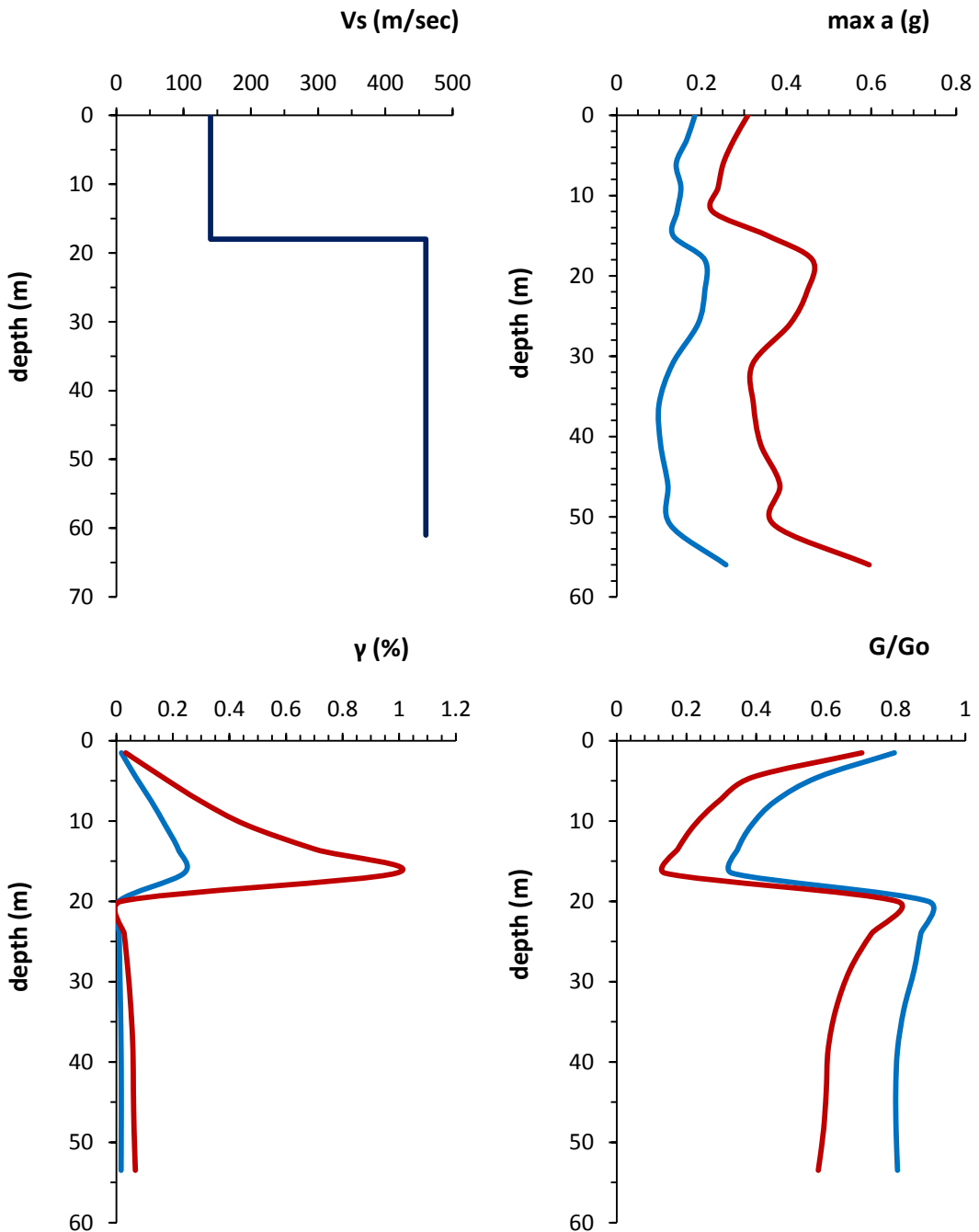
**CBGS**

**13 Ιουνίου 2011**



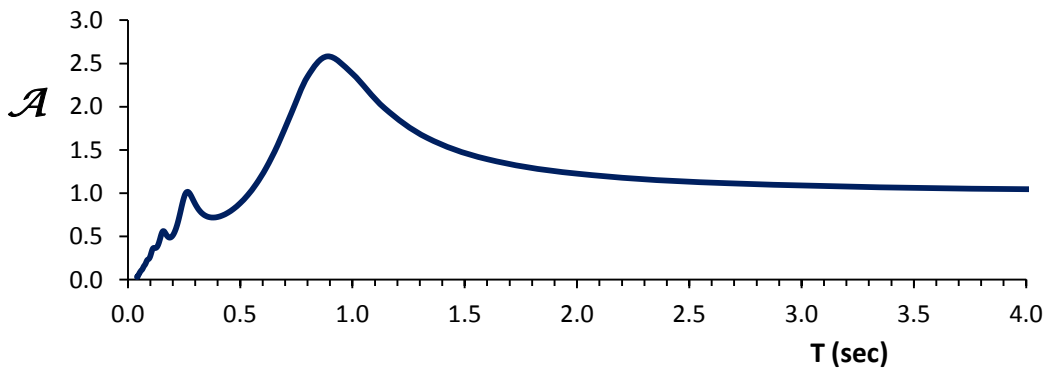
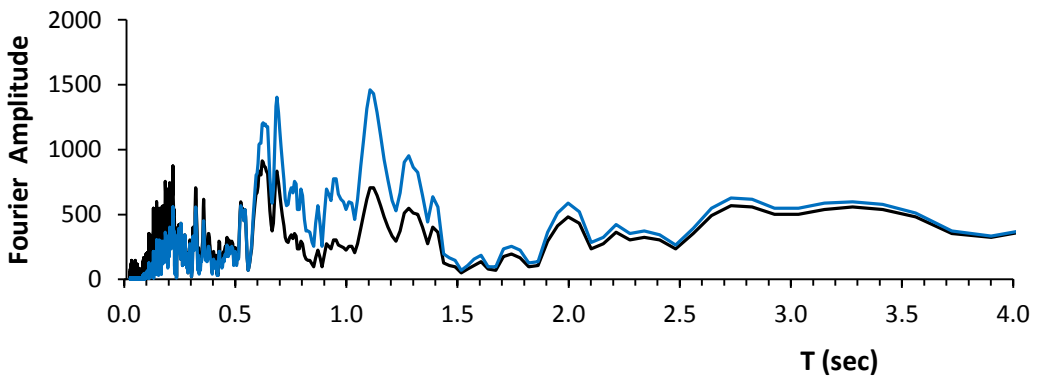
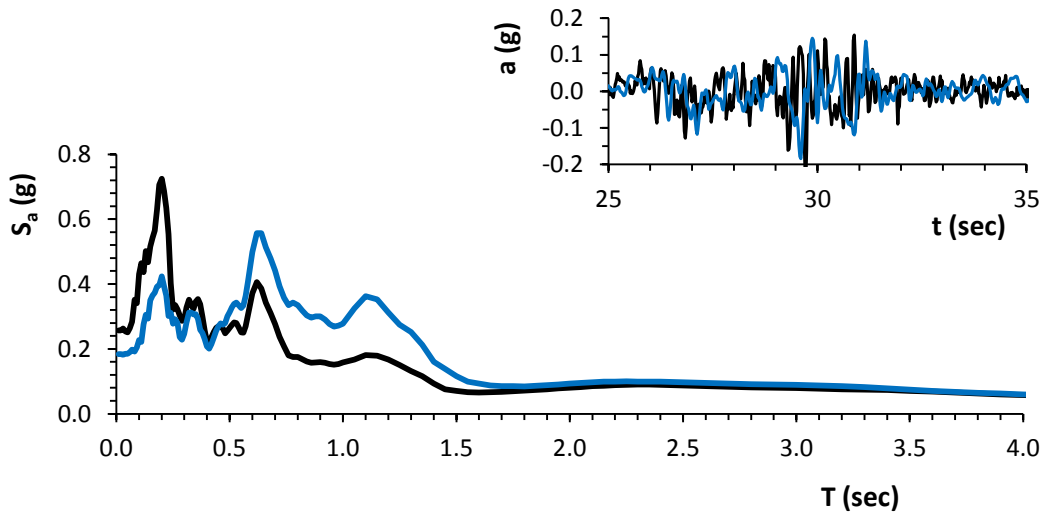
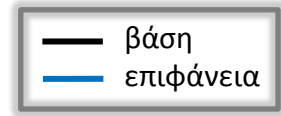
**Σχήμα 5.17:** Το φάσμα πλάτους Fourier από την ισοδύναμη ελαστική ανάλυση με το SHAKE2000 σε σύγκριση με τα αντίστοιχα από τις δύο συνιστώσες της καταγραφής.

CCCC

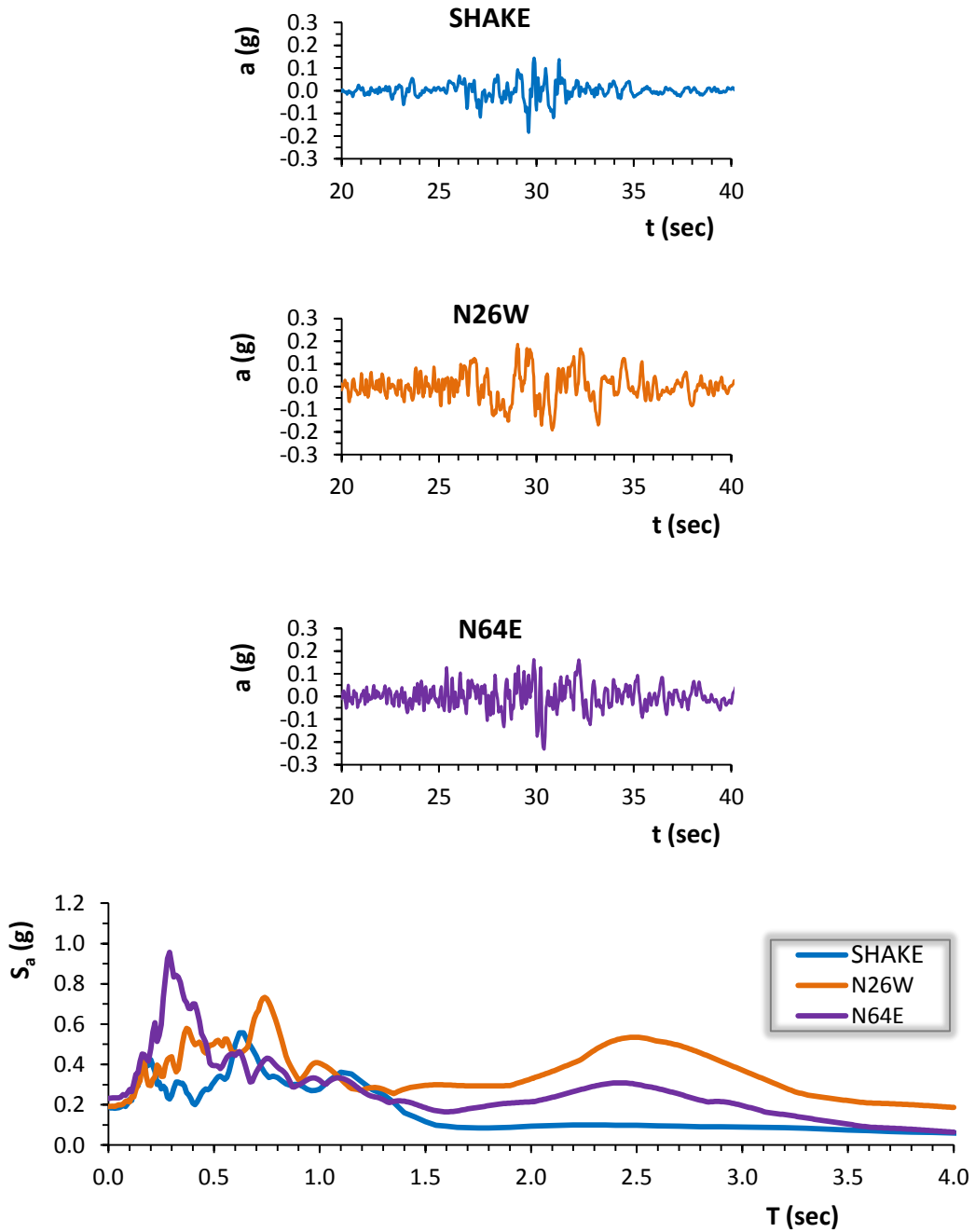


**Σχήμα 5.18:** Το εδαφικό προφίλ σε όρους ταχύτητας διατμητικών κυμάτων ( $V_s$ ), οι μέγιστες εδαφικές επιταχύνσεις ( $\max a$ ), η ποσοστιαία μεταβολή της γωνιακής παραμόρφωσης ( $\gamma$  %) και ο λόγος της απομείωσης του μέτρου διατμήσεως ( $G$ ) σε σχέση με το βάθος της εδαφικής στήλης.

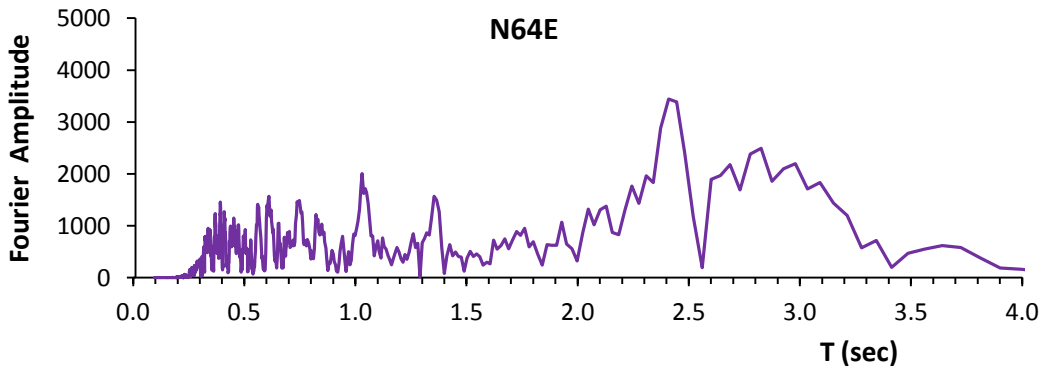
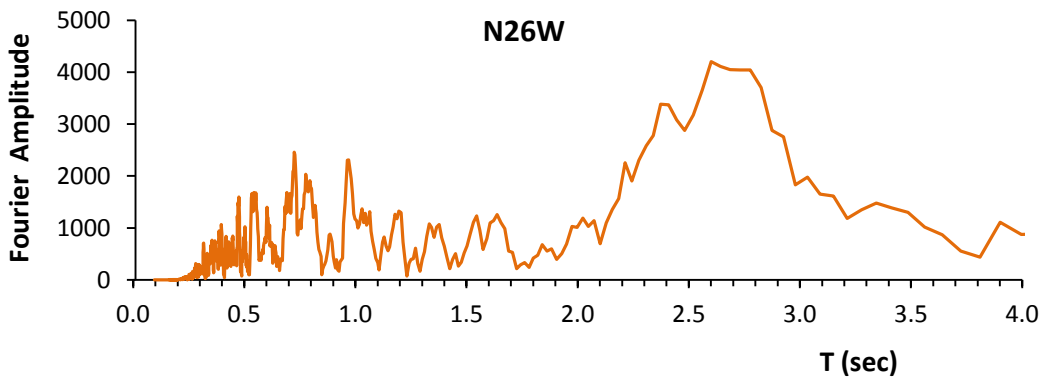
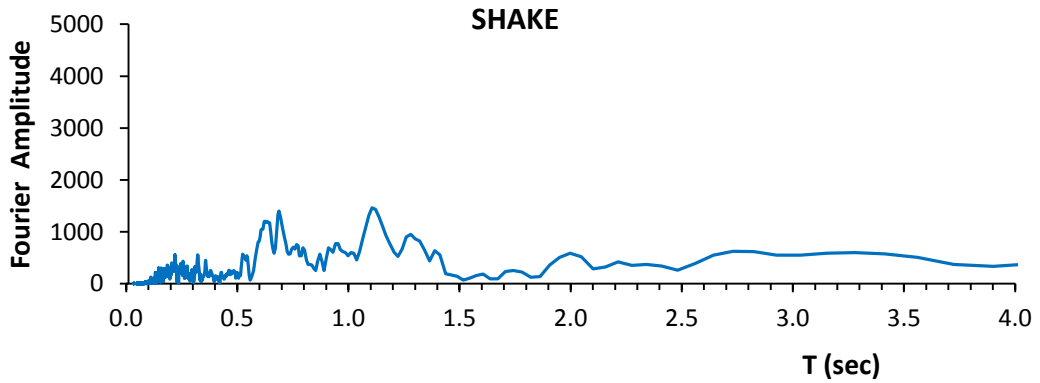




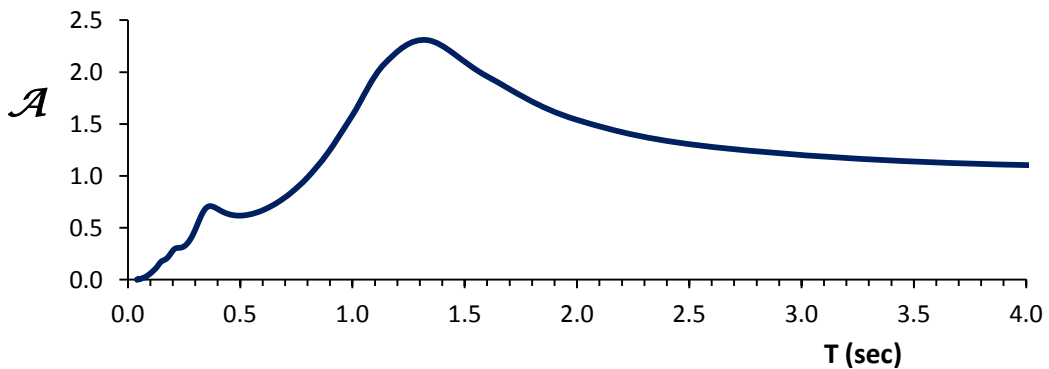
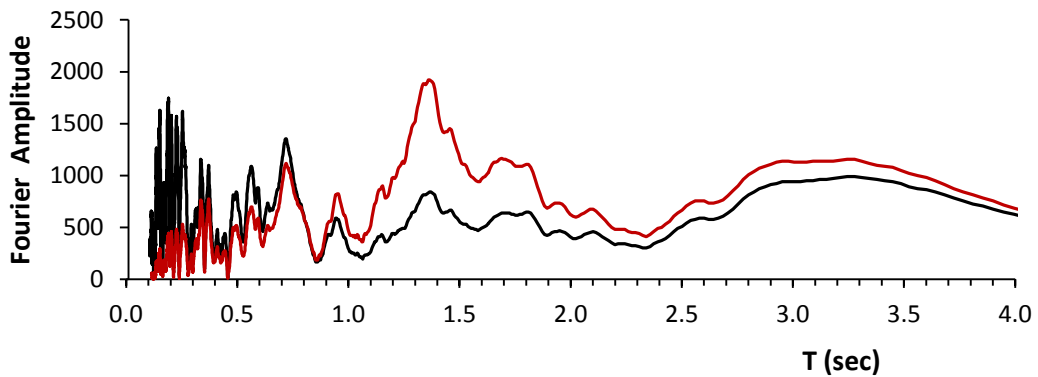
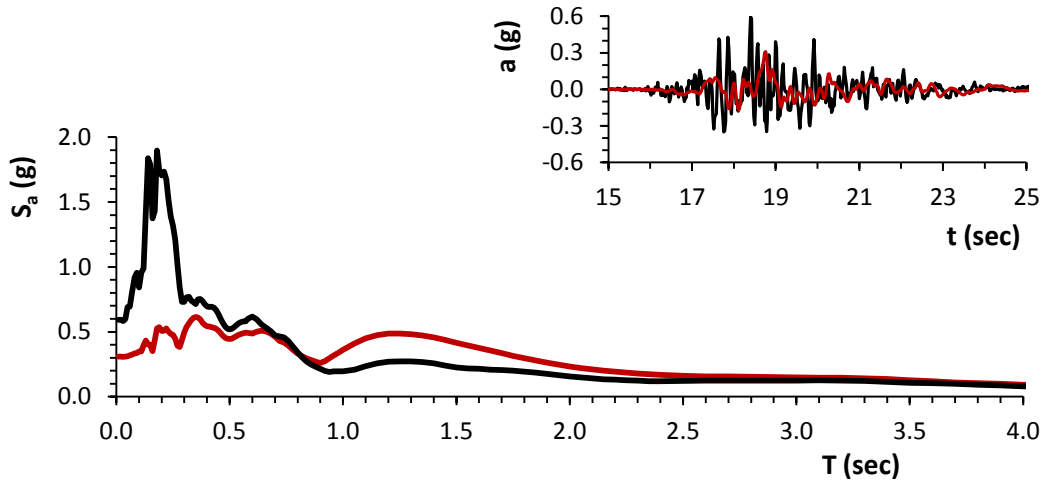
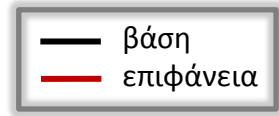
**Σχήμα 5.19:** Η χρονιοιστορία επιταχύνσεων ( $a$ ), το ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων ( $S_a$ ) και το φάσμα του πλάτους Fourier μετά την ανάστροφη ισοδύναμη ελαστική ανάλυση με το SHAKE2000. Επίσης, ο συντελεστής φασματικής μεγέθυνσης  $\mathcal{A}$ . (δεσπόζουσα ιδιοπερίοδος εδάφους:  $T = 0.71$  sec)



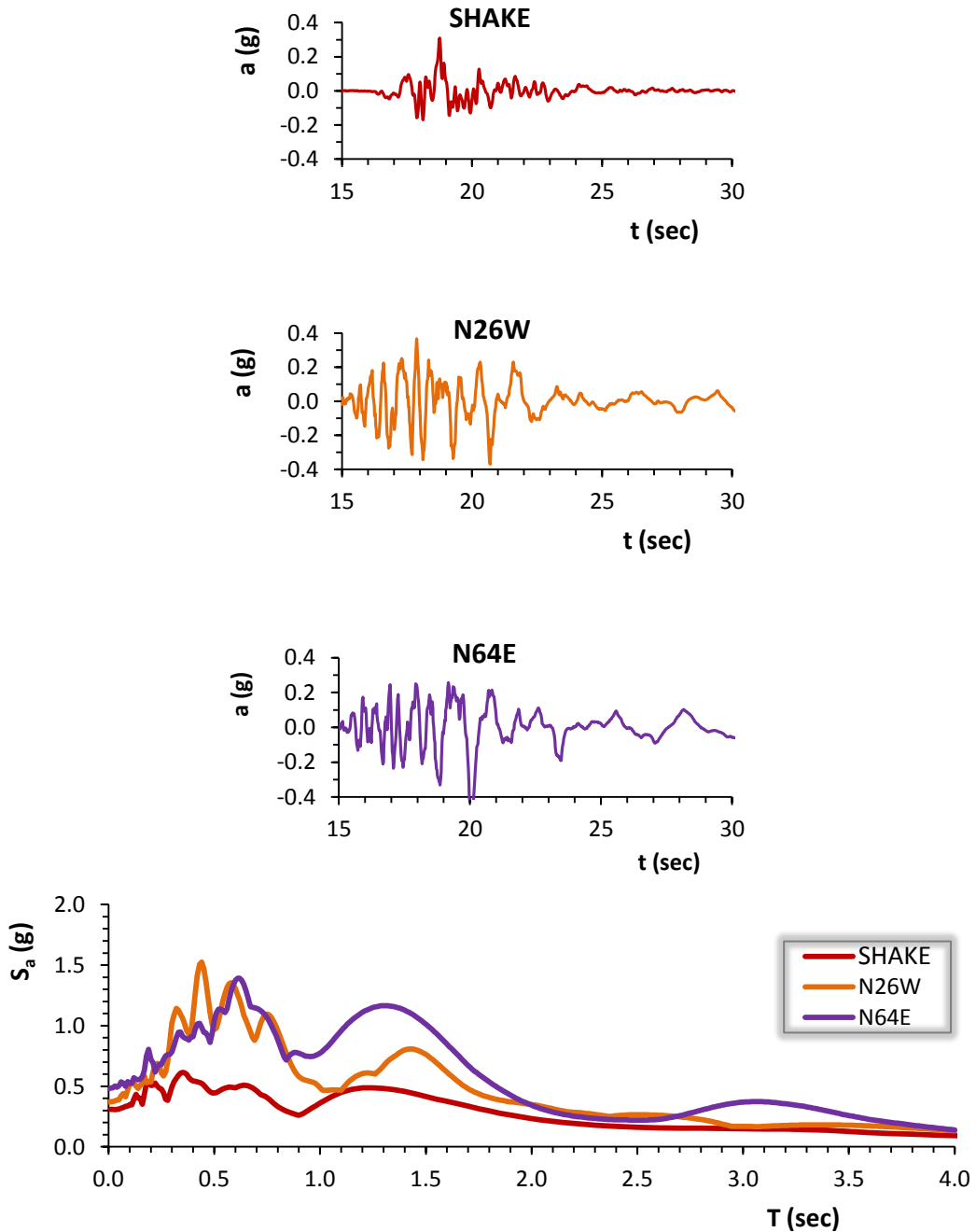
**Σχήμα 5.20:** Η χρονοϊστορία επιταχύνσεων ( $a$ ) και το ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων ( $S_a$ ) από την ισοδύναμη ελαστική ανάλυση με το SHAKE2000, σε σύγκριση με τα αντίστοιχα από τις δύο συνιστώσες της καταγραφής.



**Σχήμα 5.21:** Το φάσμα πλάτους Fourier από την ισοδύναμη ελαστική ανάλυση με το SHAKE2000 σε σύγκριση με τα αντίστοιχα από τις δύο συνιστώσες της καταγραφής.



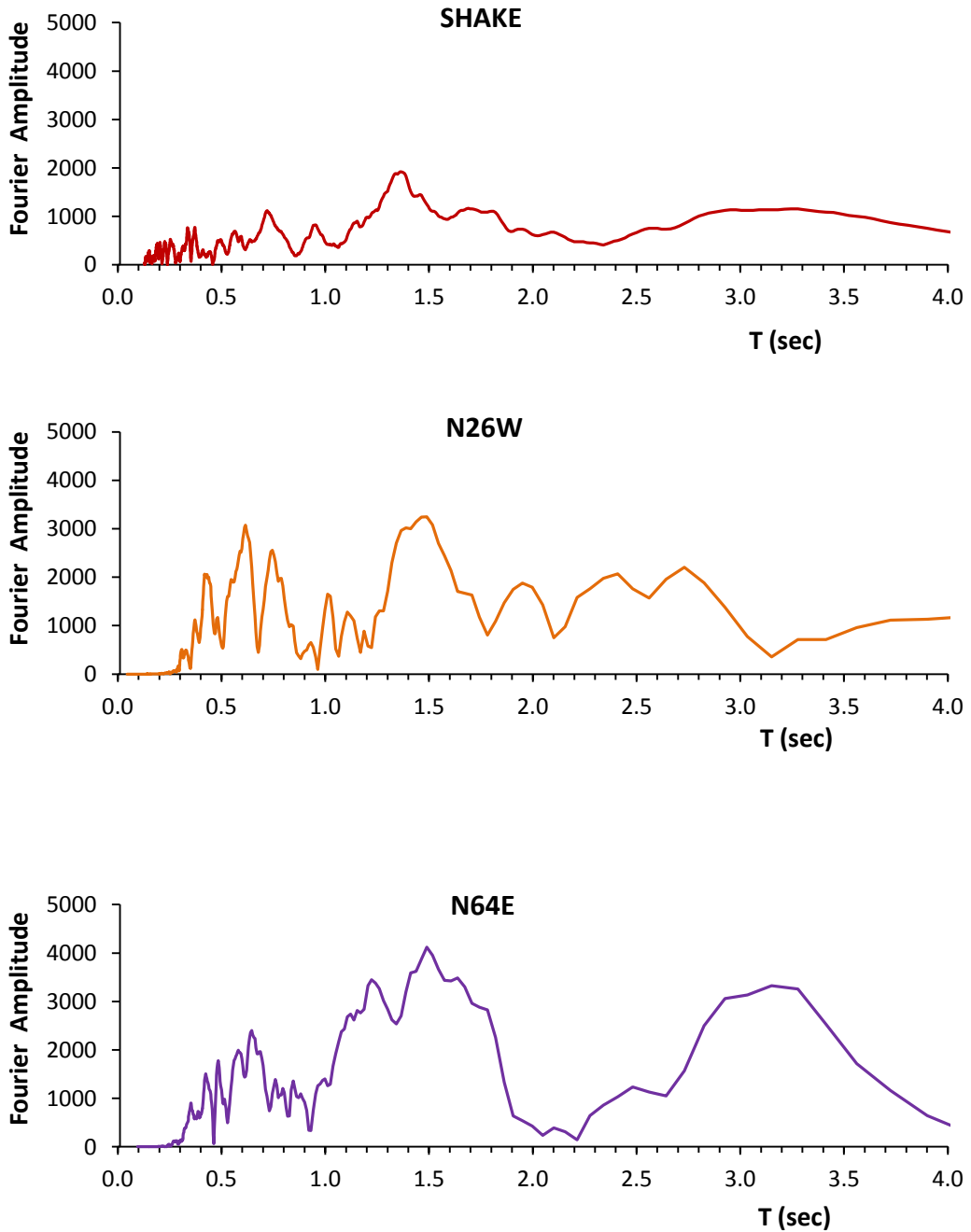
**Σχήμα 5.22:** Η χρονιοϊστορία επιταχύνσεων ( $a$ ), το ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων ( $S_a$ ) και το φάσμα του πλάτους Fourier μετά την ανάστροφη ισοδύναμη ελαστική ανάλυση με το SHAKE2000. Επίσης, ο συντελεστής φασματικής μεγέθυνσης  $\mathcal{A}$ . (δεσπόζουσα ιδιοπερίοδος εδάφους:  $T = 0.81 \text{ sec}$ )



**Σχήμα 5.23:** Η χρονιοστορία επιταχύνσεων ( $a$ ) και το ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων ( $S_a$ ) από την ισοδύναμη ελαστική ανάλυση με το SHAKE2000, σε σύγκριση με τα αντίστοιχα από τις δύο συνιστώσες της καταγραφής.

CCCC

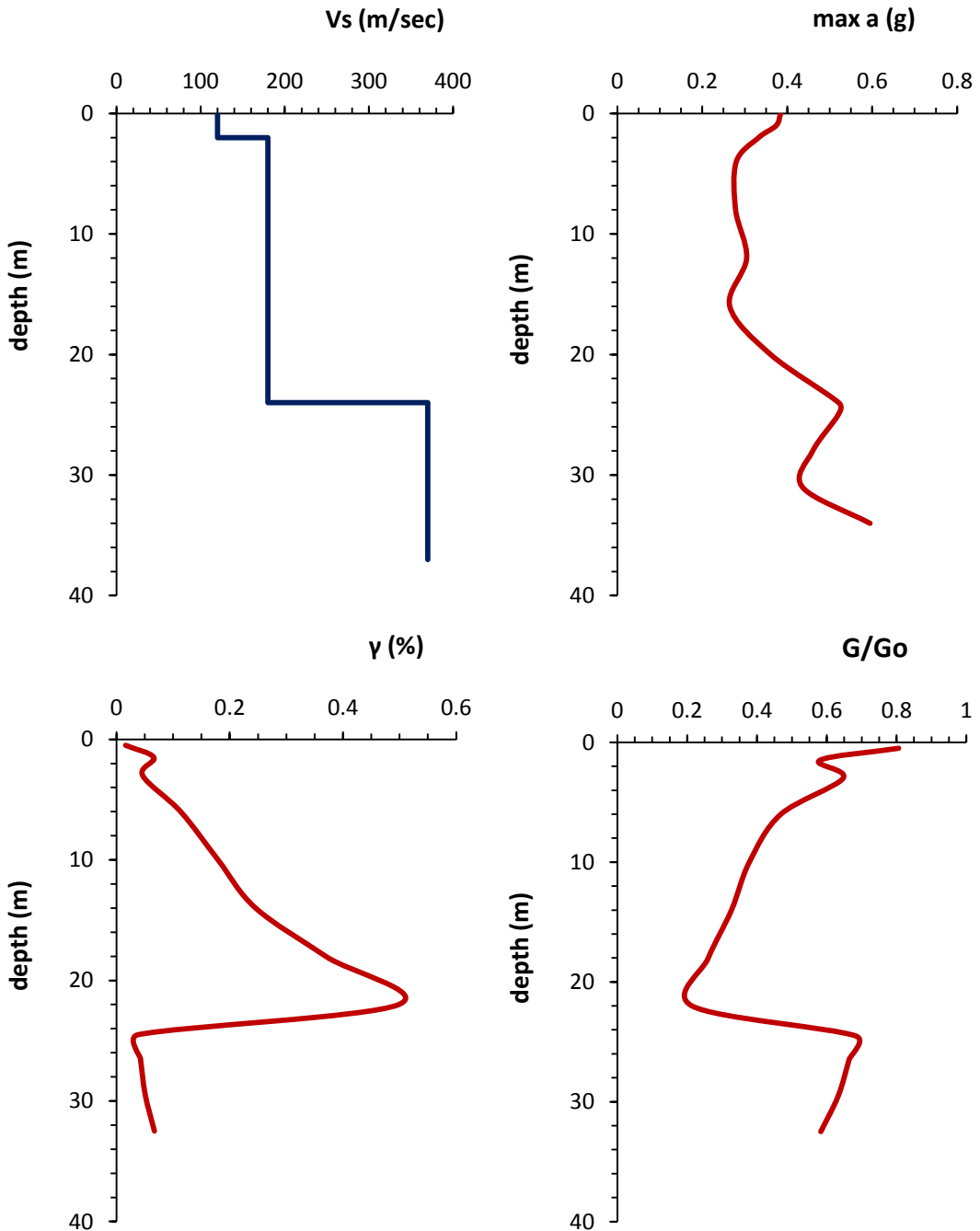
22 Φεβρουαρίου 2011



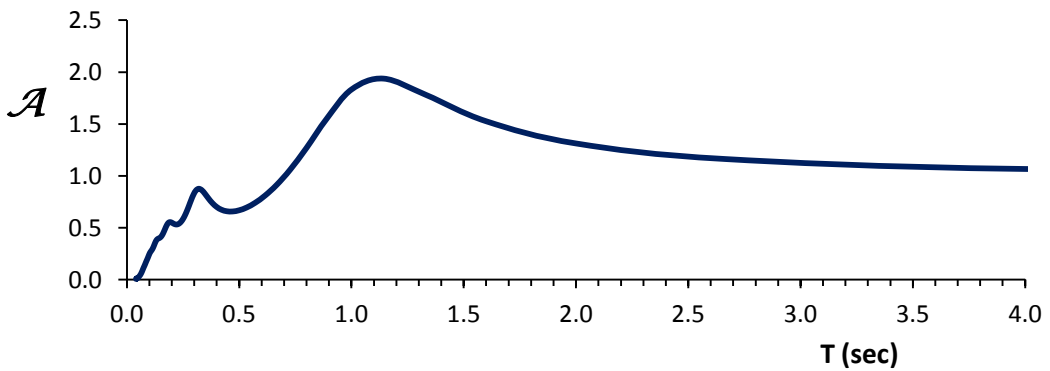
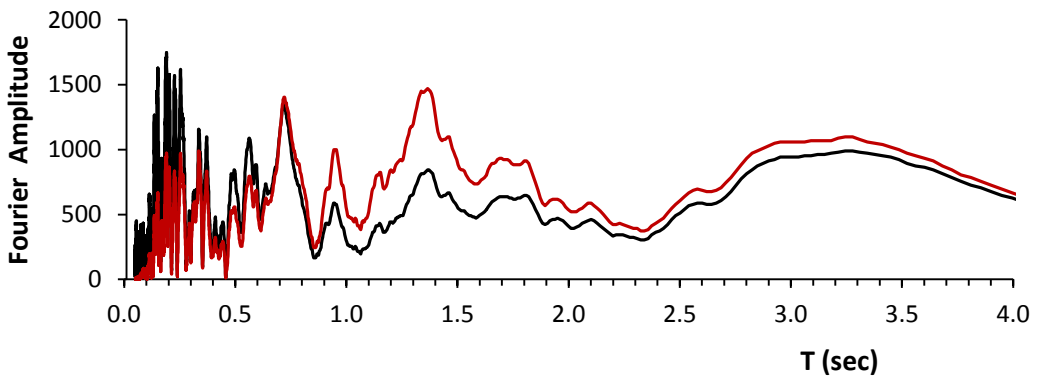
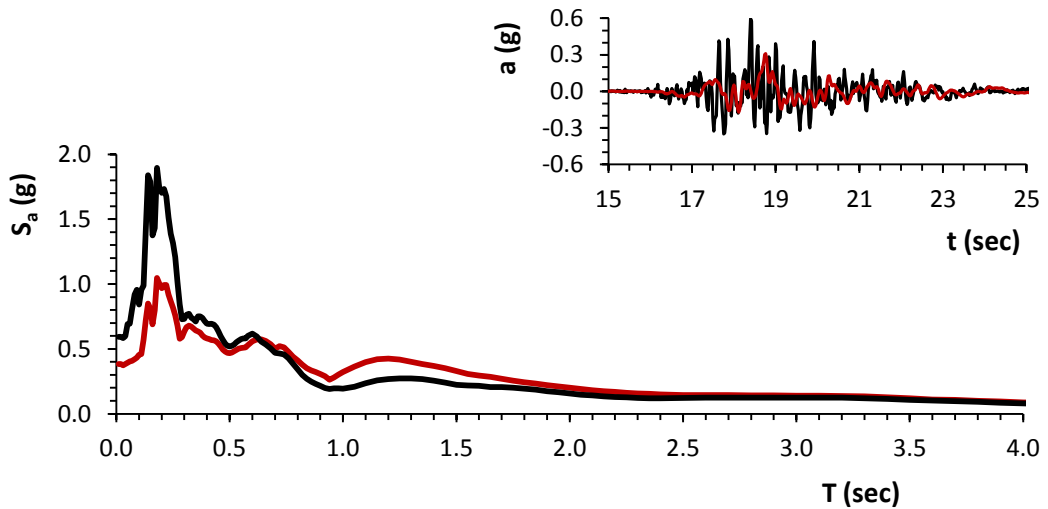
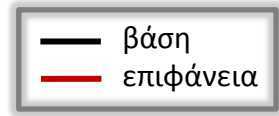
**Σχήμα 5.24:** Το φάσμα πλάτους Fourier από την ισοδύναμη ελαστική ανάλυση με το SHAKE2000 σε σύγκριση με τα αντίστοιχα από τις δύο συνιστώσες της καταγραφής.

# CHHC

22/2/2011



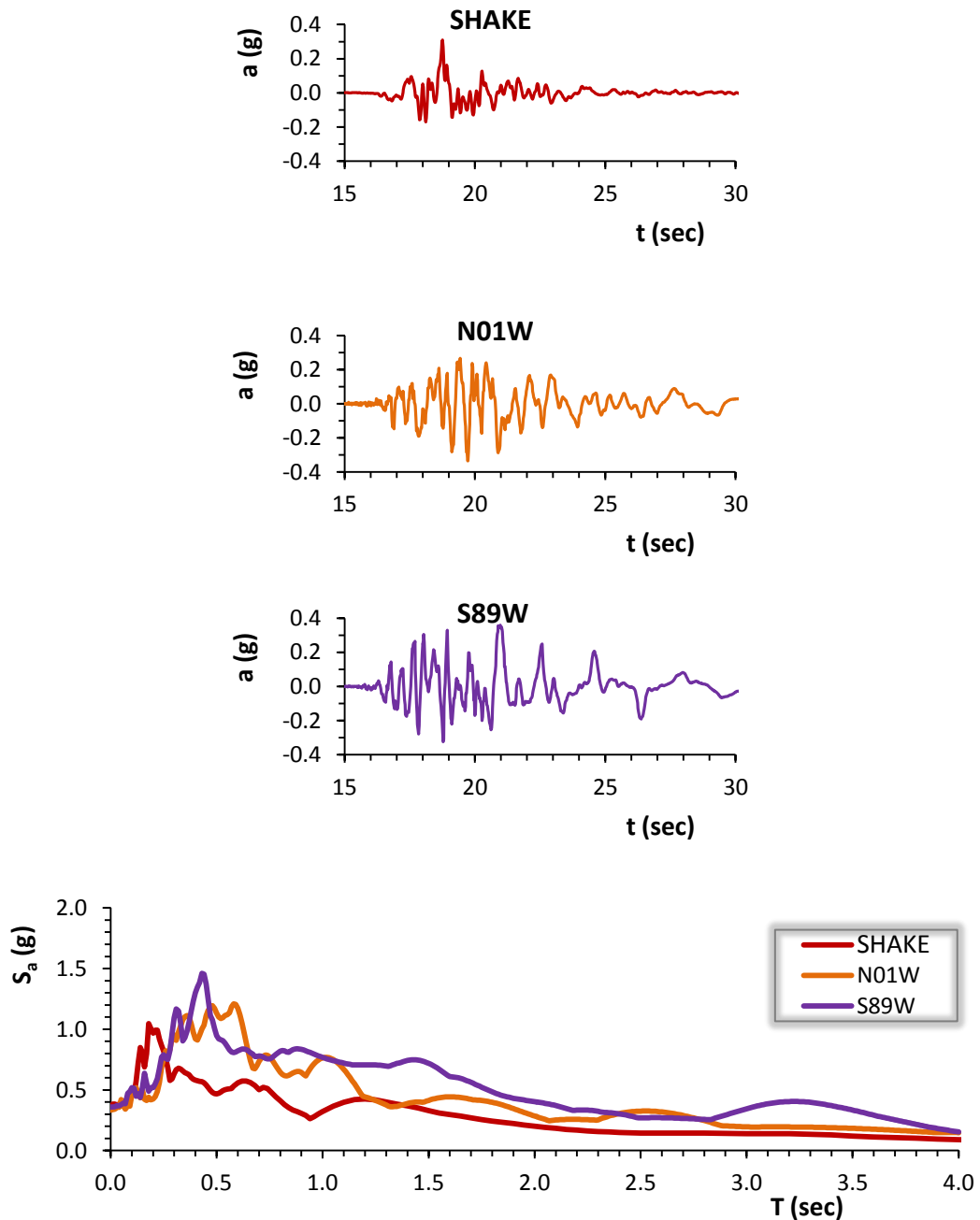
**Σχήμα 5.25:** Το εδαφικό προφίλ σε όρους ταχύτητας διατμητικών κυμάτων ( $V_s$ ), οι μέγιστες εδαφικές επιταχύνσεις ( $\max a$ ), η ποσοστιαία μεταβολή της γωνιακής παραμόρφωσης ( $\gamma$  %) και ο λόγος της απομείωσης του μέτρου διατμήσεως ( $G$ ) σε σχέση με το βάθος της εδαφικής στήλης.



**Σχήμα 5.26:** Η χρονιοιστορία επιταχύνσεων ( $a$ ), το ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων ( $S_a$ ) και το φάσμα του πλάτους Fourier μετά την ανάστροφη ισοδύναμη ελαστική ανάλυση με το SHAKE2000. Επίσης, ο συντελεστής φασματικής μεγέθυνσης  $\mathcal{A}$ . (δεσπάζουσα ιδιοπερίοδος εδάφους:  $T = 0.84 \text{ sec}$ )

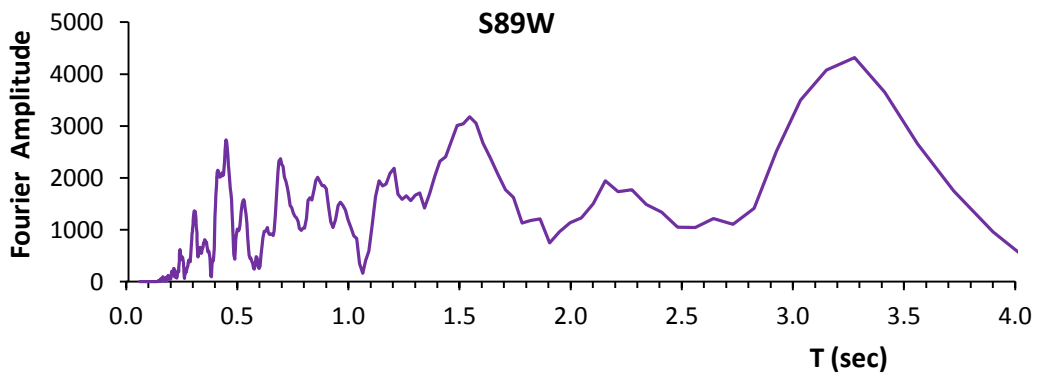
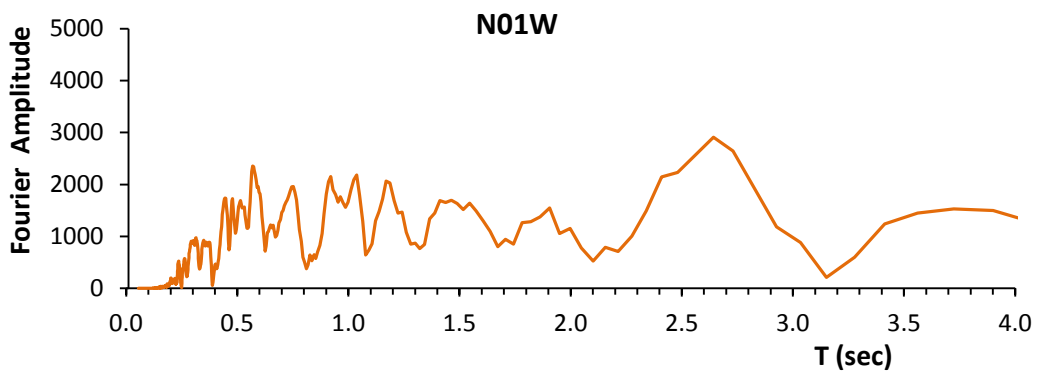
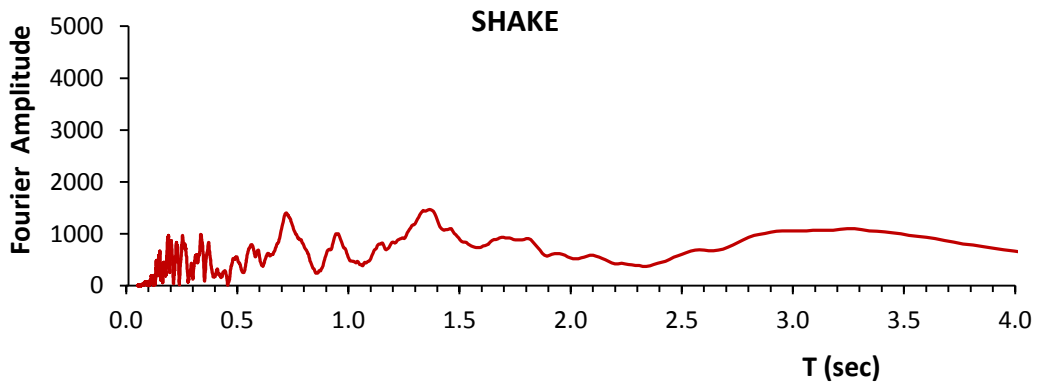


**CHHC**  
**22 Φεβρουαρίου 2011**



**Σχήμα 5.27:** Η χρονοϊστορία επιταχύνσεων ( $a$ ) και το ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων ( $S_a$ ) από την ισοδύναμη ελαστική ανάλυση με το SHAKE2000, σε σύγκριση με τα αντίστοιχα από τις δύο συνιστώσες της καταγραφής.

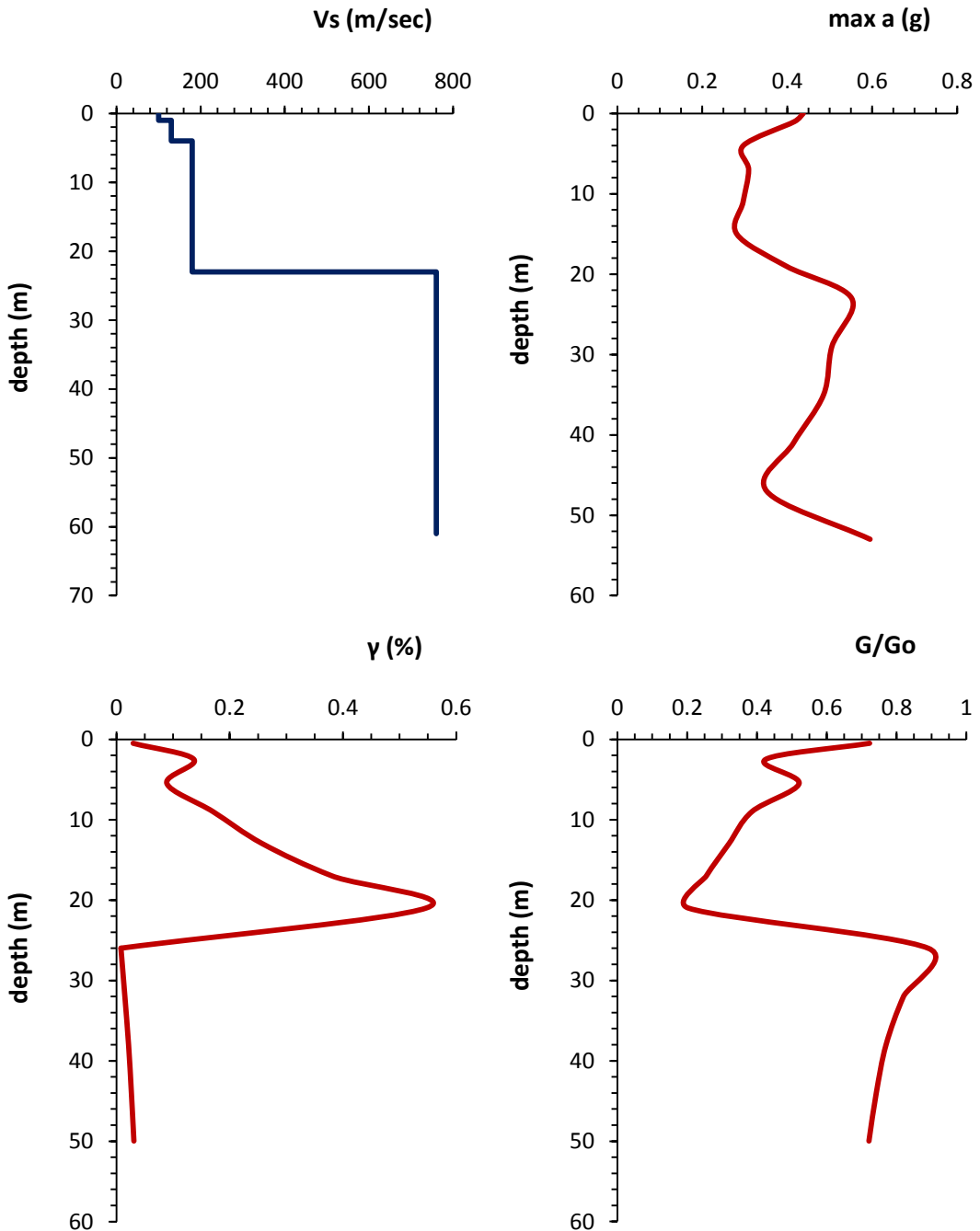
**CHHC**  
**22 Φεβρουαρίου 2011**



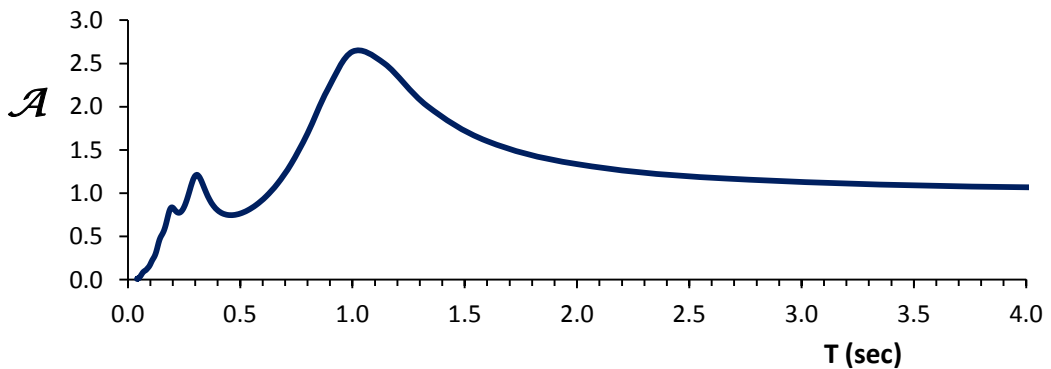
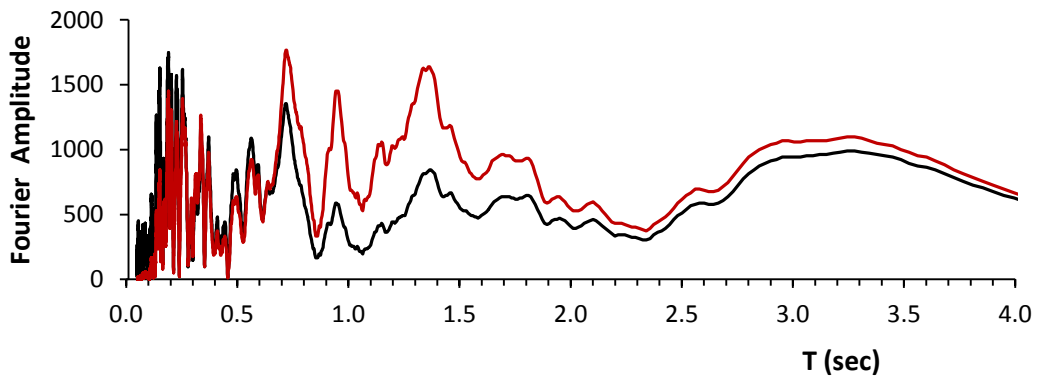
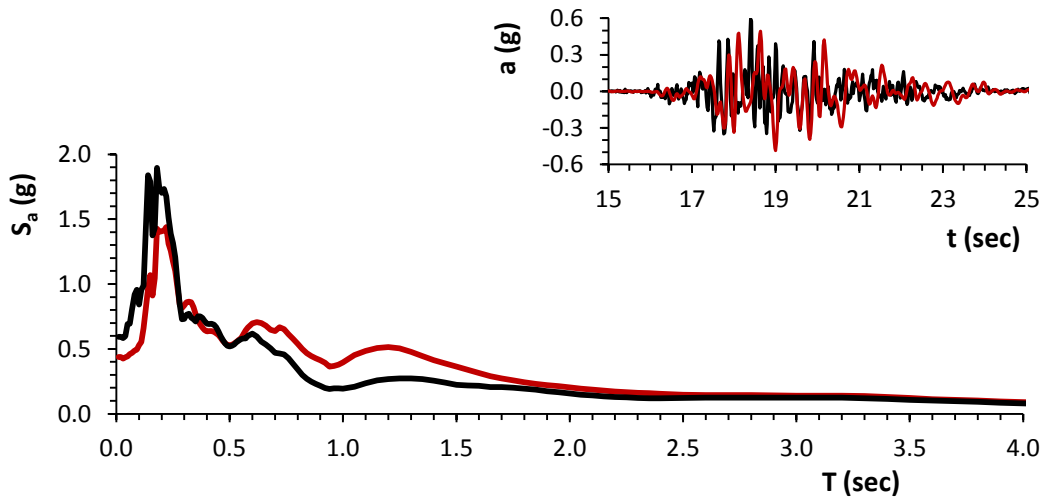
**Σχήμα 5.28:** Το φάσμα πλάτους Fourier από την ισοδύναμη ελαστική ανάλυση με το SHAKE2000 σε σύγκριση με τα αντίστοιχα από τις δύο συνιστώσες της καταγραφής.

# CMHS

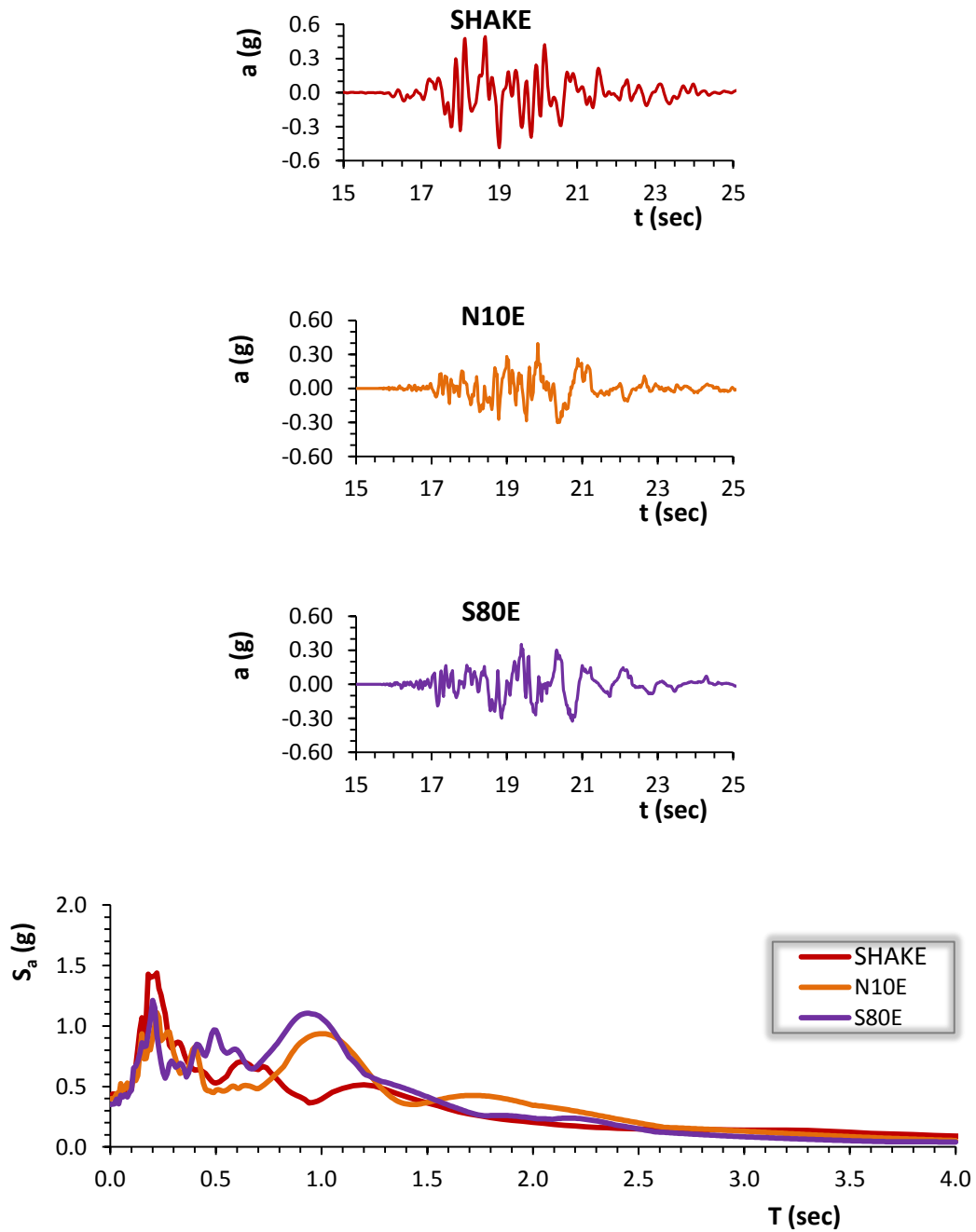
22/2/2011



**Σχήμα 5.29:** Το εδαφικό προφίλ σε όρους ταχύτητας διατμητικών κυμάτων ( $V_s$ ), οι μέγιστες εδαφικές επιταχύνσεις ( $\max a$ ), η ποσοστιαία μεταβολή της γωνιακής παραμόρφωσης ( $\gamma$  %) και ο λόγος της απομείωσης του μέτρου διατμήσεως ( $G$ ) σε σχέση με το βάθος της εδαφικής στήλης.



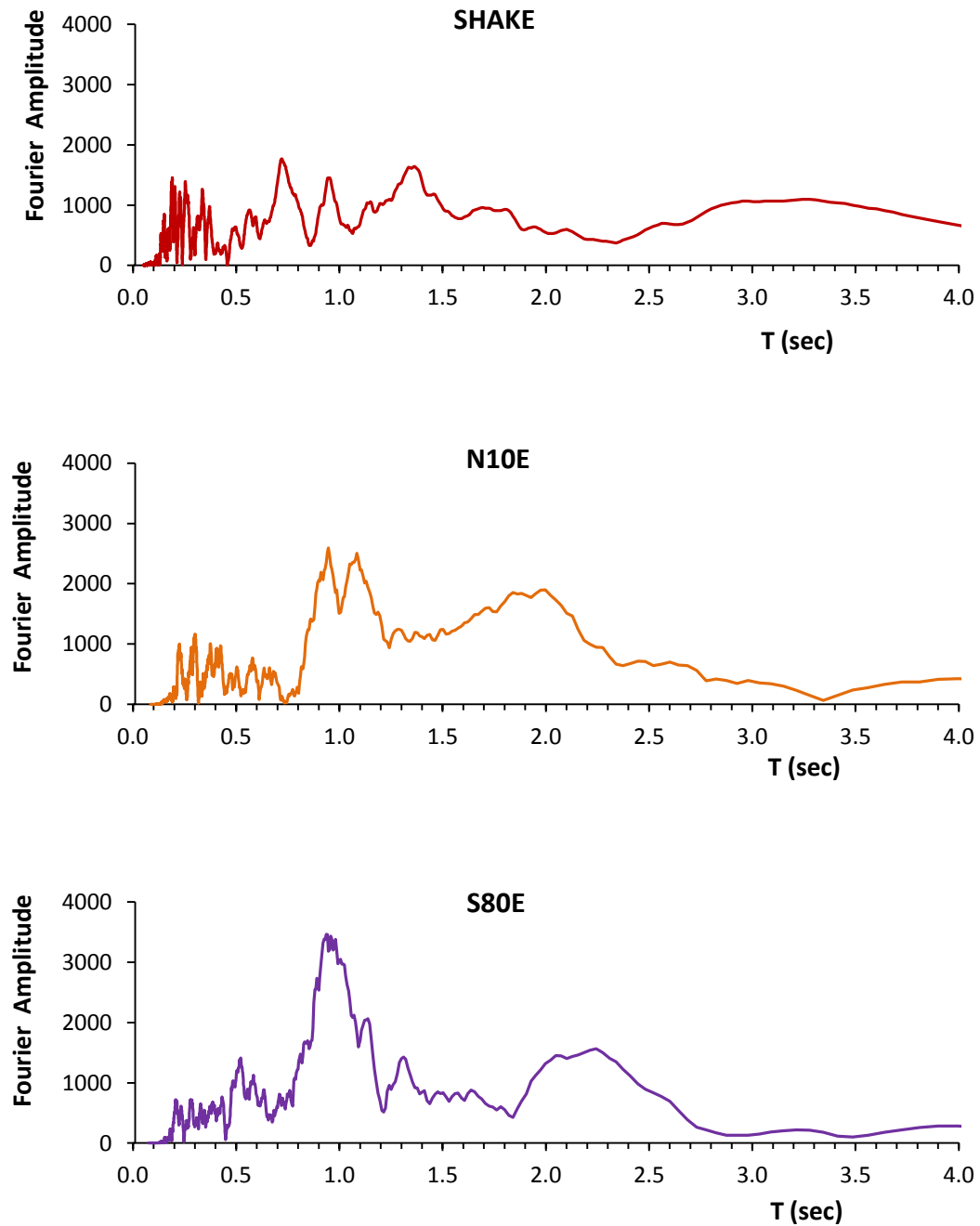
**Σχήμα 5.30:** Η χρονιοιστορία επιταχύνσεων ( $a$ ), το ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων ( $S_a$ ) και το φάσμα του πλάτους Fourier μετά την ανάστροφη ισοδύναμη ελαστική ανάλυση με το SHAKE2000. Επίσης, ο συντελεστής φασματικής μεγέθυνσης  $\mathcal{A}$ . (δεσπόμενη ιδιοπερίοδος εδάφους:  $T = 0.50$  sec)



**Σχήμα 5.31:** Η χρονοϊστορία επιταχύνσεων ( $a$ ) και το ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων ( $S_a$ ) από την ισοδύναμη ελαστική ανάλυση με το SHAKE2000, σε σύγκριση με τα αντίστοιχα από τις δύο συνιστώσες της καταγραφής.

CMHS

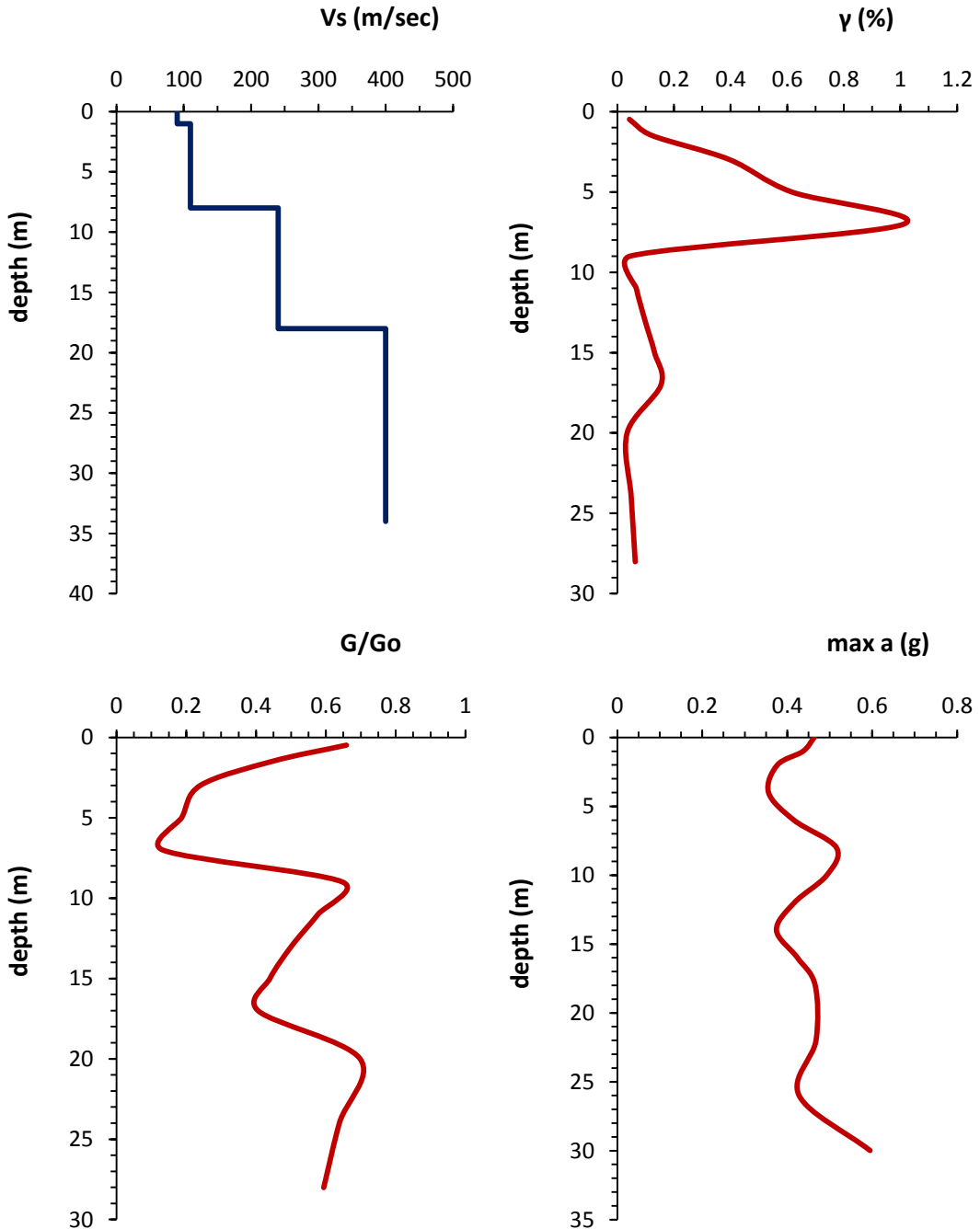
22 Φεβρουαρίου 2011



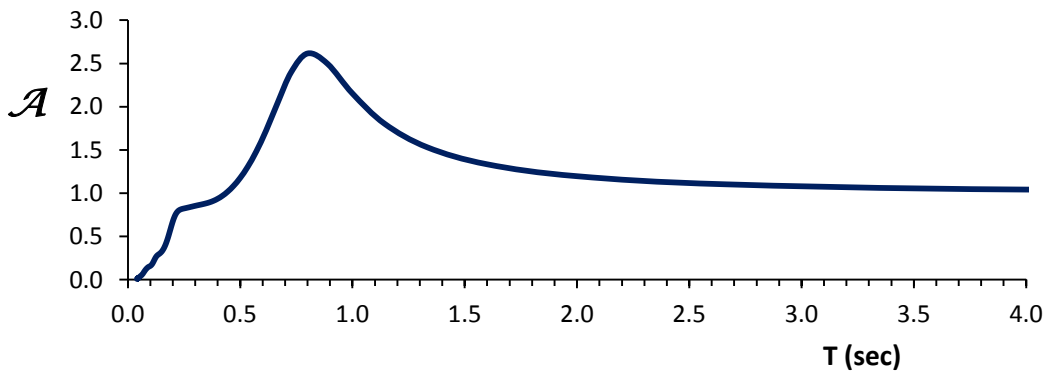
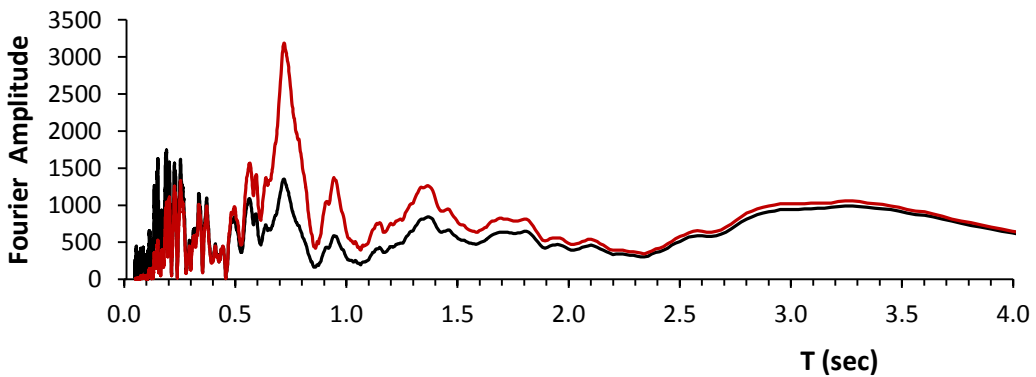
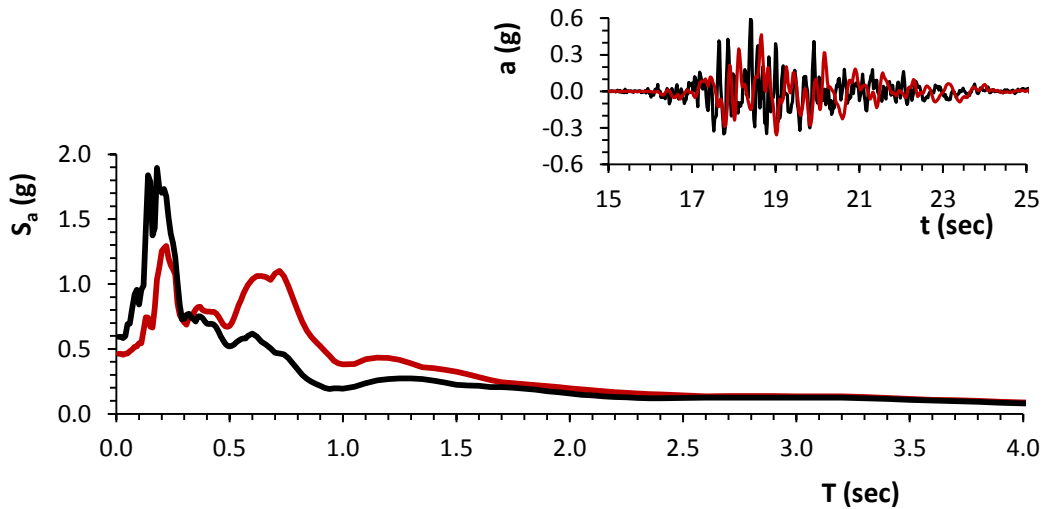
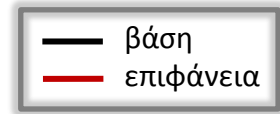
**Σχήμα 5.32:** Το φάσμα πλάτους Fourier από την ισοδύναμη ελαστική ανάλυση με το SHAKE2000 σε σύγκριση με τα αντίστοιχα από τις δύο συνιστώσες της καταγραφής.

# HPSC

22/2/2011



**Σχήμα 5.33:** Το εδαφικό προφίλ σε όρους ταχύτητας διατμητικών κυμάτων ( $V_s$ ), οι μέγιστες εδαφικές επιταχύνσεις ( $\max a$ ), η ποσοστιαία μεταβολή της γωνιακής παραμόρφωσης ( $\gamma$  %) και ο λόγος της απομείωσης του μέτρου διατμήσεως ( $G$ ) σε σχέση με το βάθος της εδαφικής στήλης.

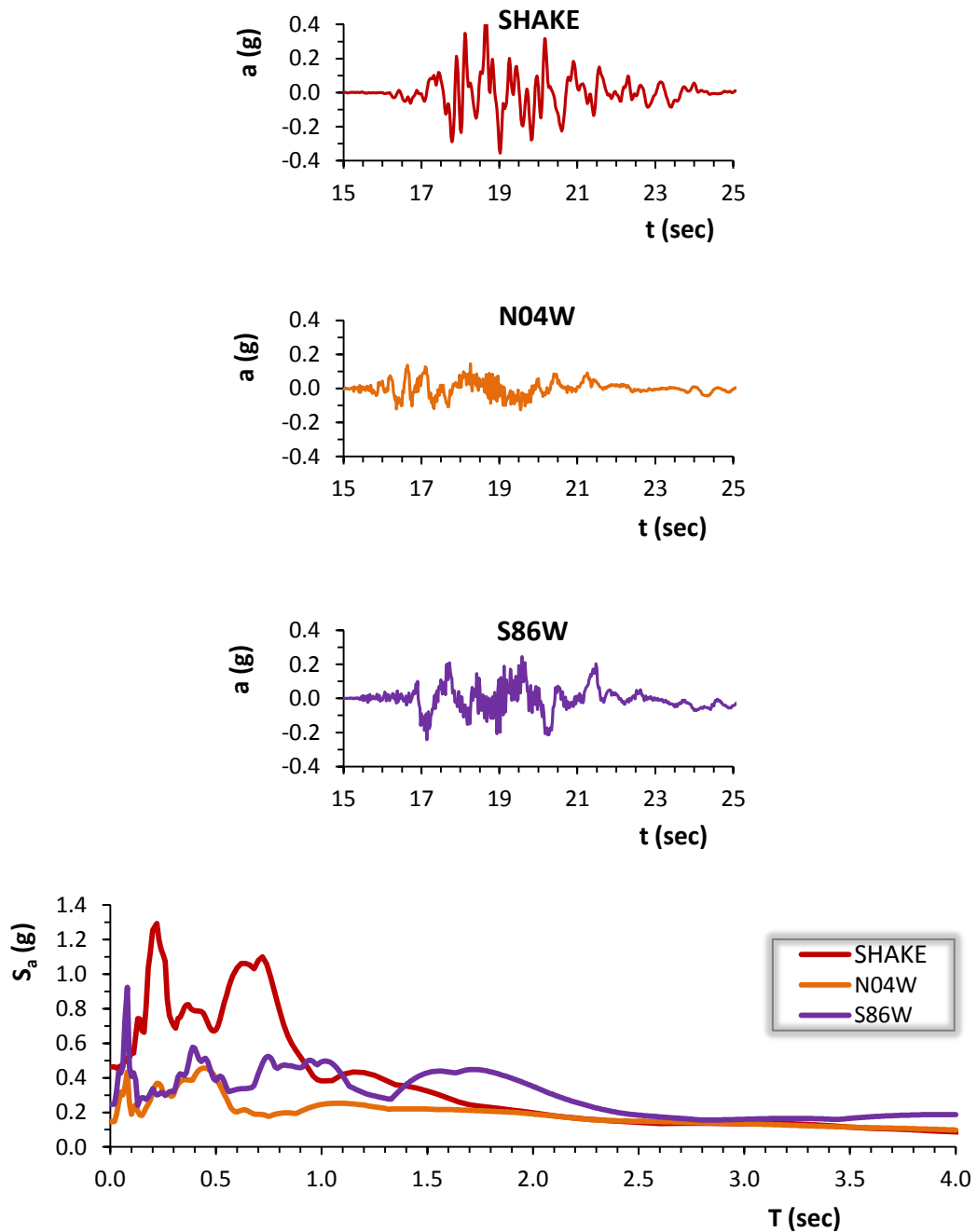


**Σχήμα 5.34:** Η χρονοϊστορία επιταχύνσεων ( $a$ ), το ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων ( $S_a$ ) και το φάσμα του πλάτους Fourier μετά την ανάστροφη ισοδύναμη ελαστική ανάλυση με το SHAKE2000. Επίσης, ο συντελεστής φασματικής μεγέθυνσης  $\mathcal{A}$ . (δεσπόζουσα ιδιοπερίοδος εδάφους:  $T = 0.60$  sec)



HPSC

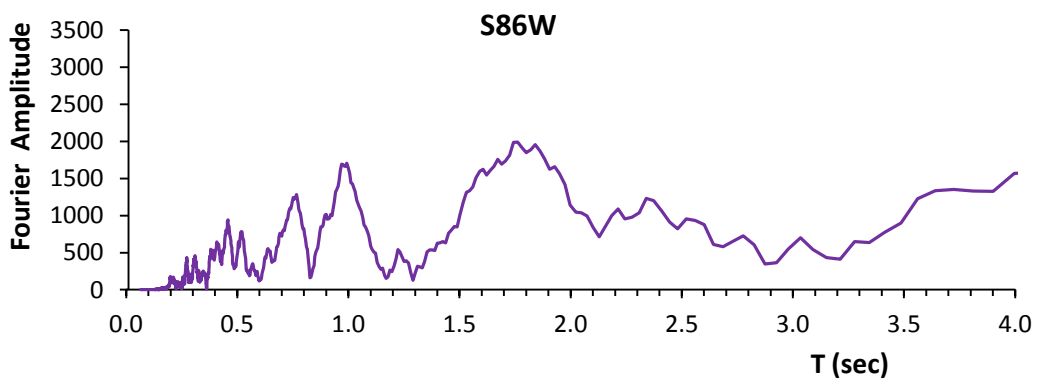
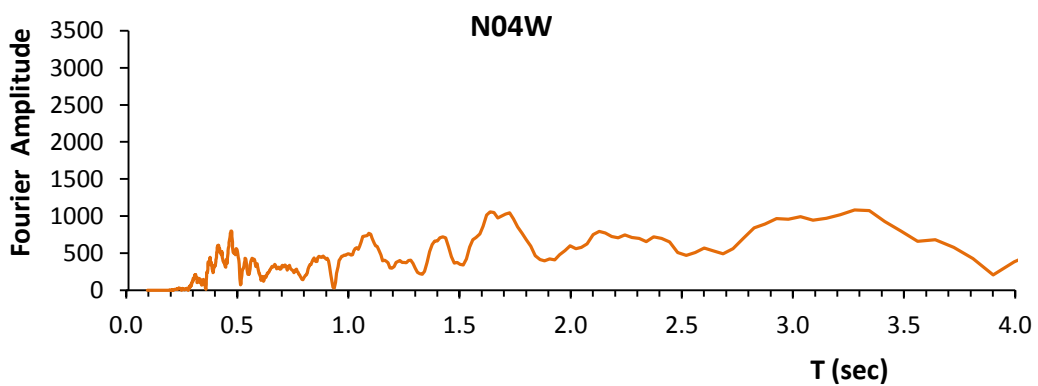
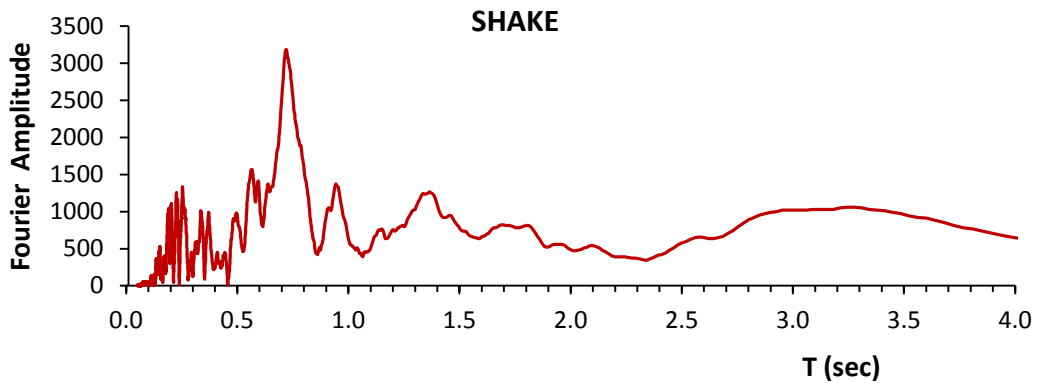
22 Φεβρουαρίου 2011



**Σχήμα 5.35:** Η χρονοϊστορία επιταχύνσεων ( $a$ ) και το ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων ( $S_a$ ) από την ισοδύναμη ελαστική ανάλυση με το SHAKE2000, σε σύγκριση με τα αντίστοιχα από τις δύο συνιστώσες της καταγραφής.

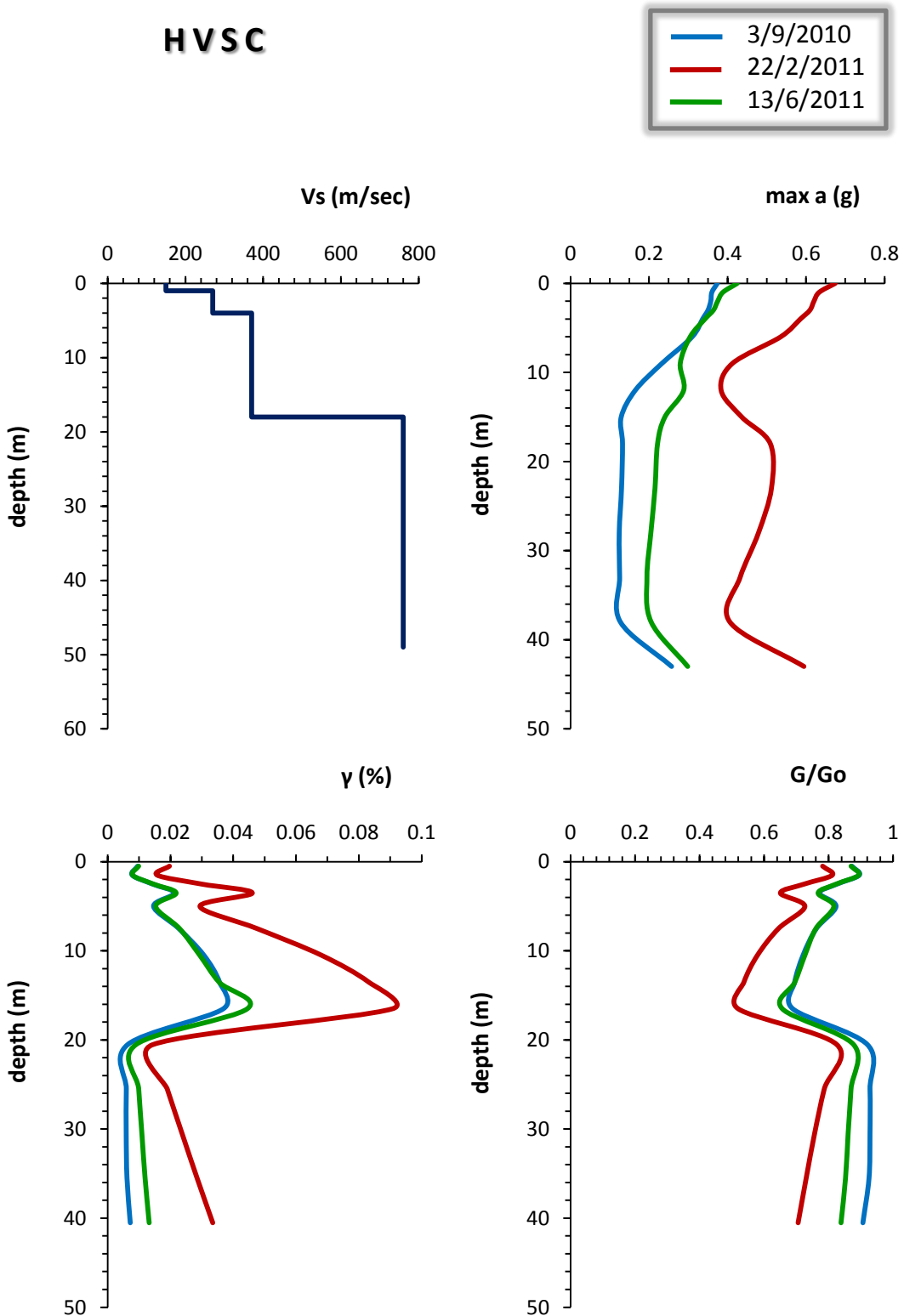
HPSC

22 Φεβρουαρίου 2011

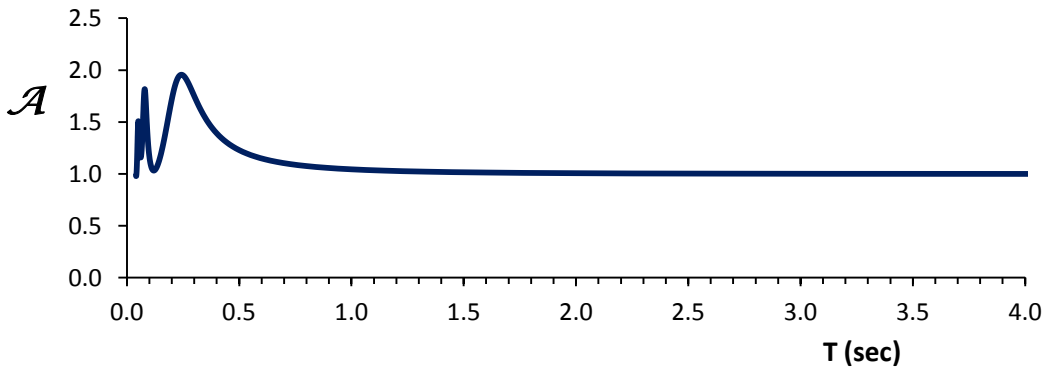
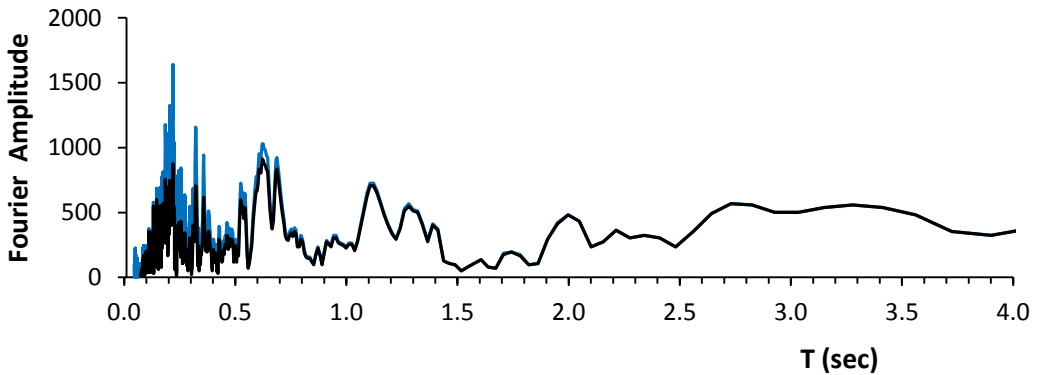
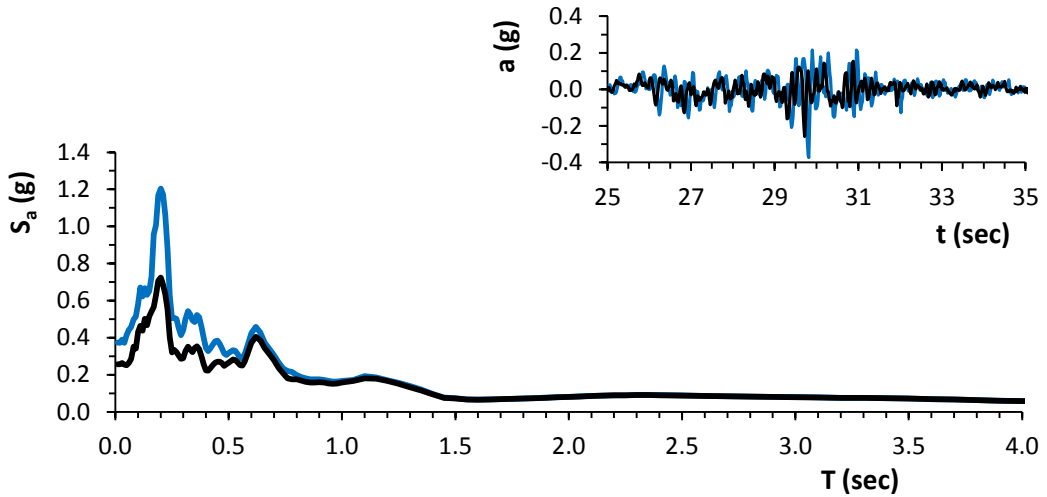
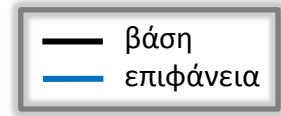


**Σχήμα 5.36:** Το φάσμα πλάτους Fourier από την ισοδύναμη ελαστική ανάλυση με το SHAKE2000 σε σύγκριση με τα αντίστοιχα από τις δύο συνιστώσες της καταγραφής.

# HVSC

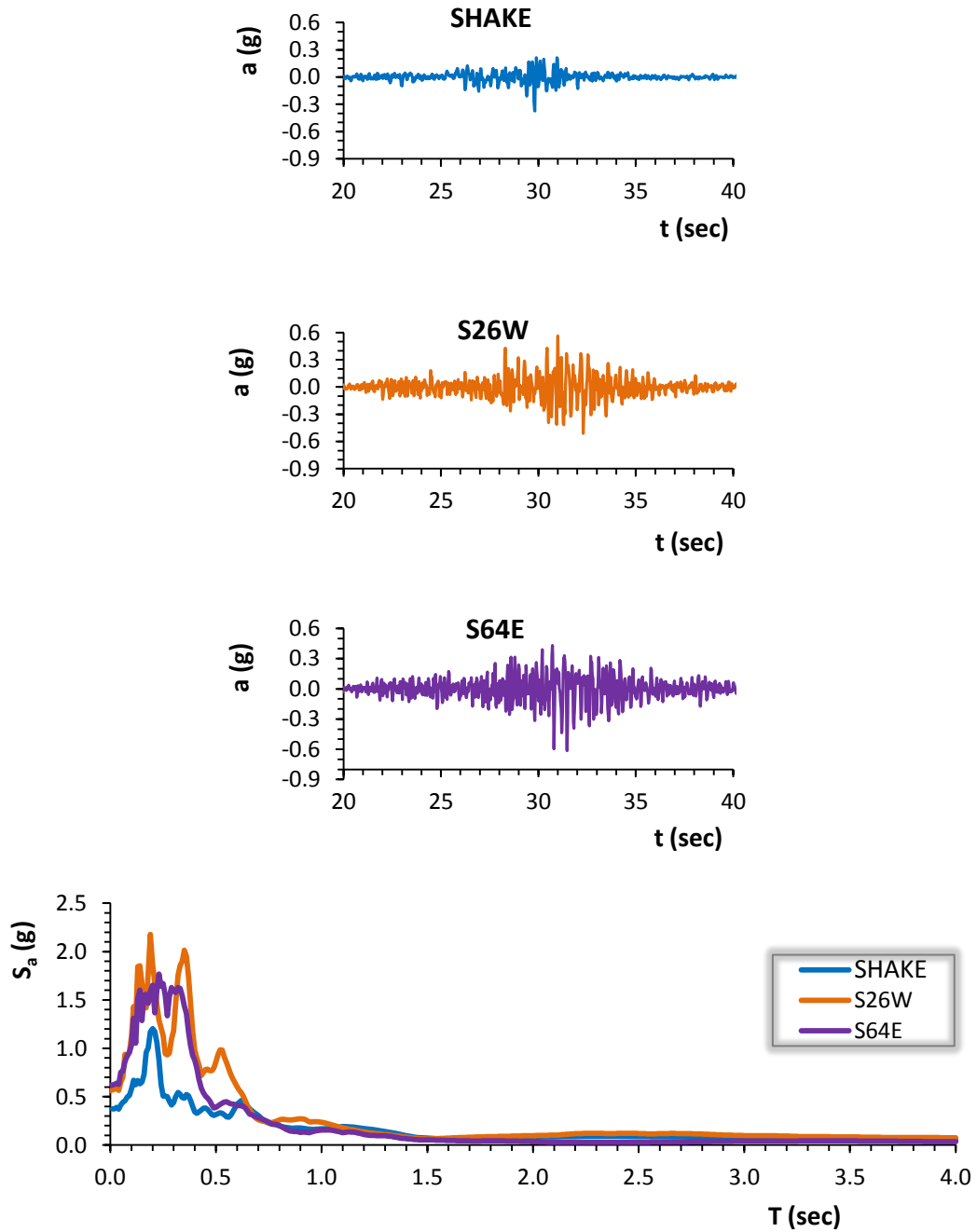


**Σχήμα 5.37:** Το εδαφικό προφίλ σε όρους ταχύτητας διατμητικών κυμάτων ( $V_s$ ), οι μέγιστες εδαφικές επιταχύνσεις ( $\max a$ ), η ποσοστιαία μεταβολή της γωνιακής παραμόρφωσης ( $\gamma$  %) και ο λόγος της απομείωσης του μέτρου διατμήσεως ( $G$ ) σε σχέση με το βάθος της εδαφικής στήλης.



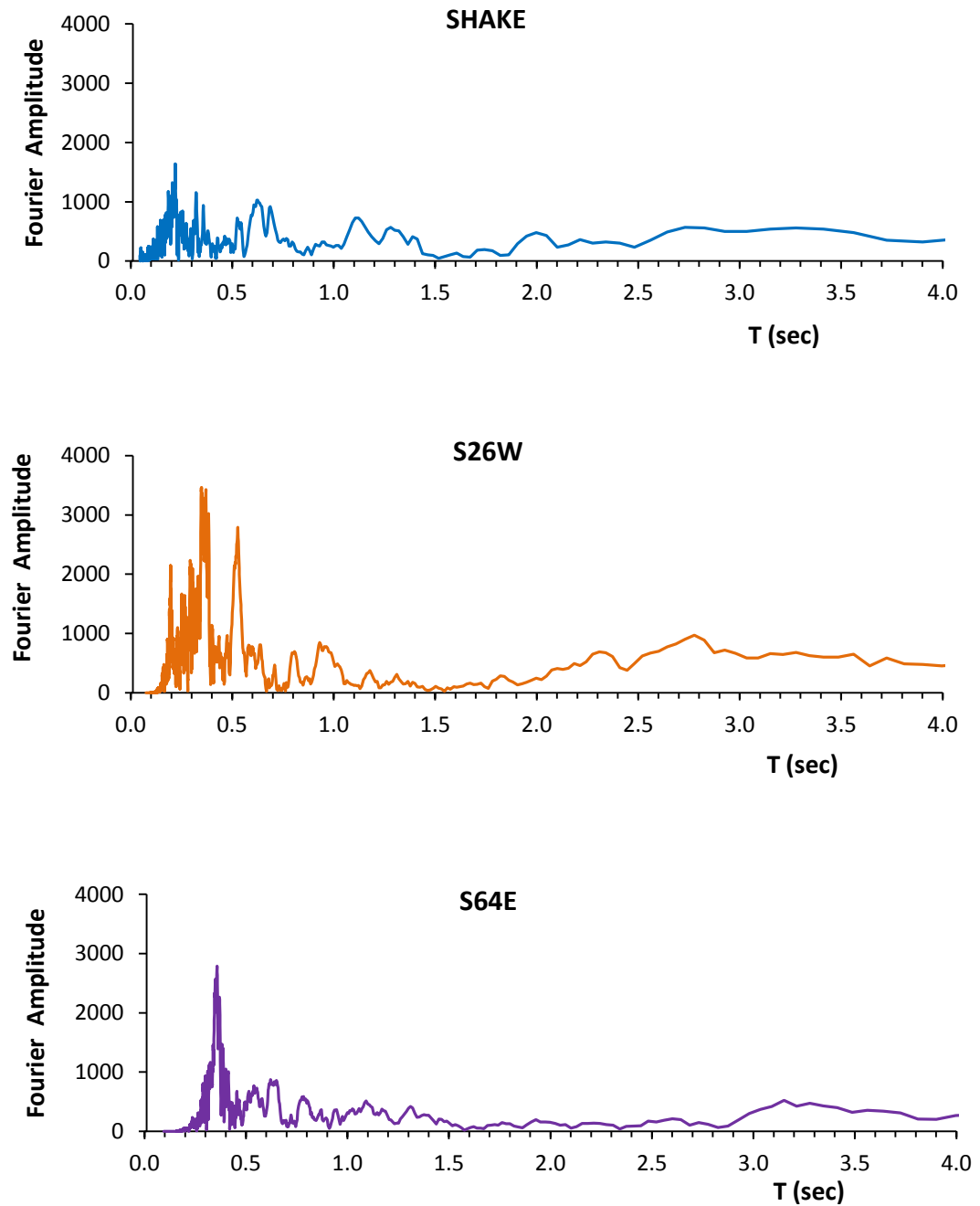
**Σχήμα 5.38:** Η χρονιοιστορία επιταχύνσεων ( $a$ ), το ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων ( $S_a$ ) και το φάσμα του πλάτους Fourier μετά την ανάστροφη ισοδύναμη ελαστική ανάλυση με το SHAKE2000. Επίσης, ο συντελεστής φασματικής μεγέθυνσης  $\mathcal{A}$ . (δεσπόμενη ιδιοπερίοδος εδάφους:  $T = 0.31 \text{ sec}$ )

HVSC  
3 Σεπτεμβρίου 2010

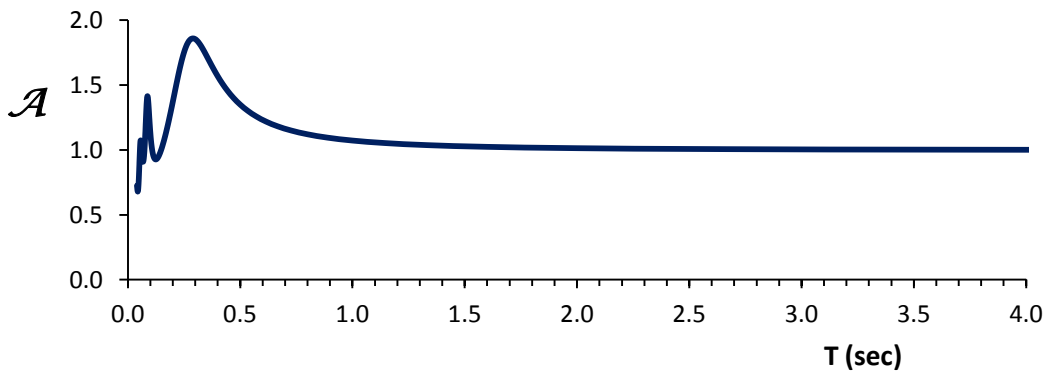
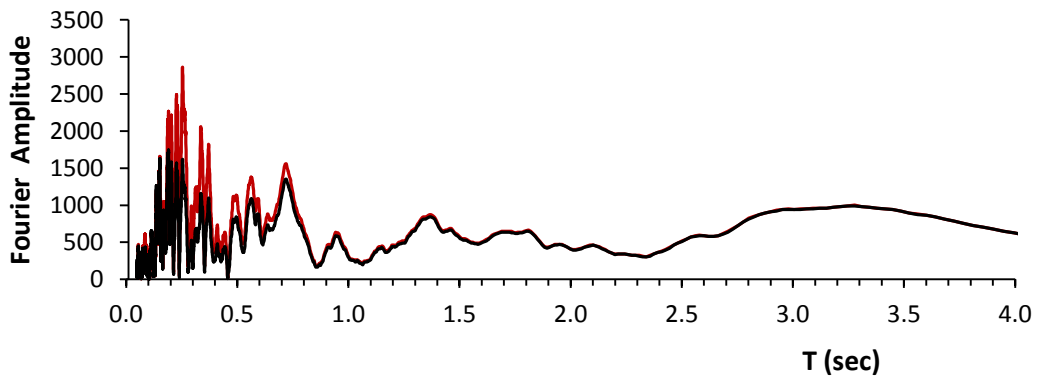
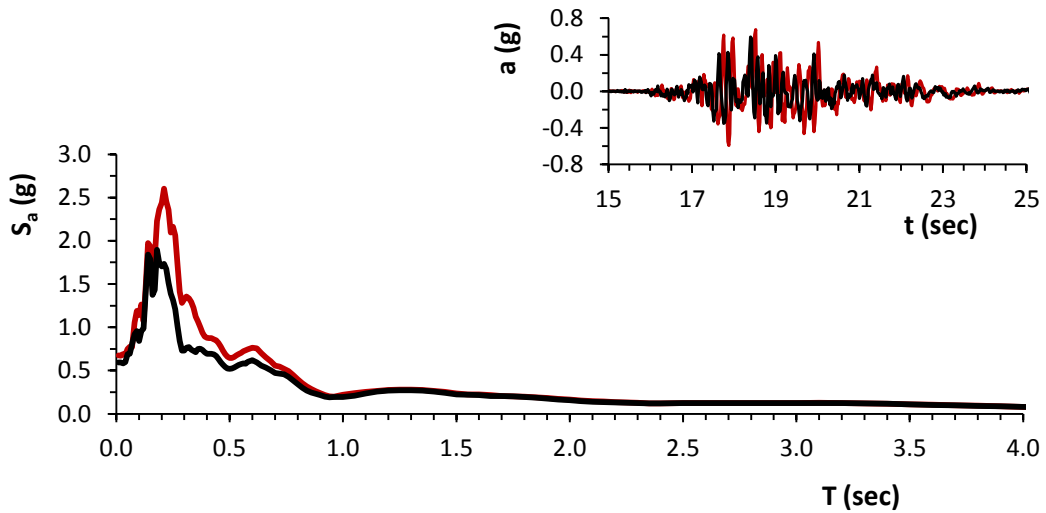
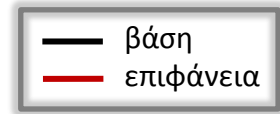


**Σχήμα 5.39:** Η χρονοϊστορία επιταχύνσεων ( $a$ ) και το ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων ( $S_a$ ) από την ισοδύναμη ελαστική ανάλυση με το SHAKE2000, σε σύγκριση με τα αντίστοιχα από τις δύο συνιστώσες της καταγραφής.

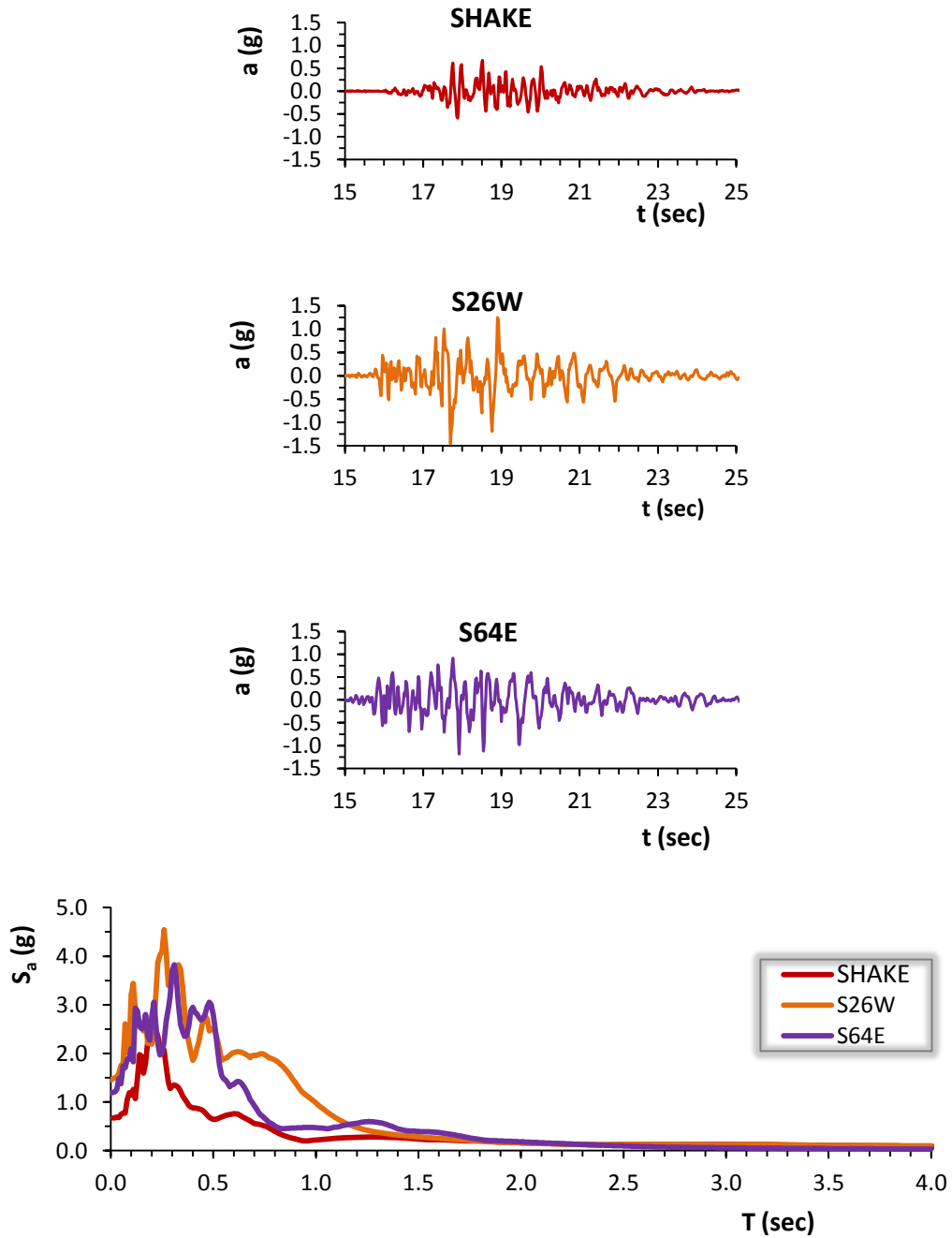
**HVSC**  
**3 Σεπτεμβρίου 2010**



**Σχήμα 5.40:** Το φάσμα πλάτους Fourier από την ισοδύναμη ελαστική ανάλυση με το SHAKE2000 σε σύγκριση με τα αντίστοιχα από τις δύο συνιστώσες της καταγραφής.



**Σχήμα 5.41:** Η χρονοϊστορία επιταχύνσεων (α), το ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων ( $S_a$ ) και το φάσμα του πλάτους Fourier μετά την ανάστροφη ισοδύναμη ελαστική ανάλυση με το SHAKE2000. Επίσης, ο συντελεστής φασματικής μεγέθυνσης  $\mathcal{A}$ . (δεσπίζουσα ιδιοπερίοδος εδάφους:  $T = 0.35 \text{ sec}$ )

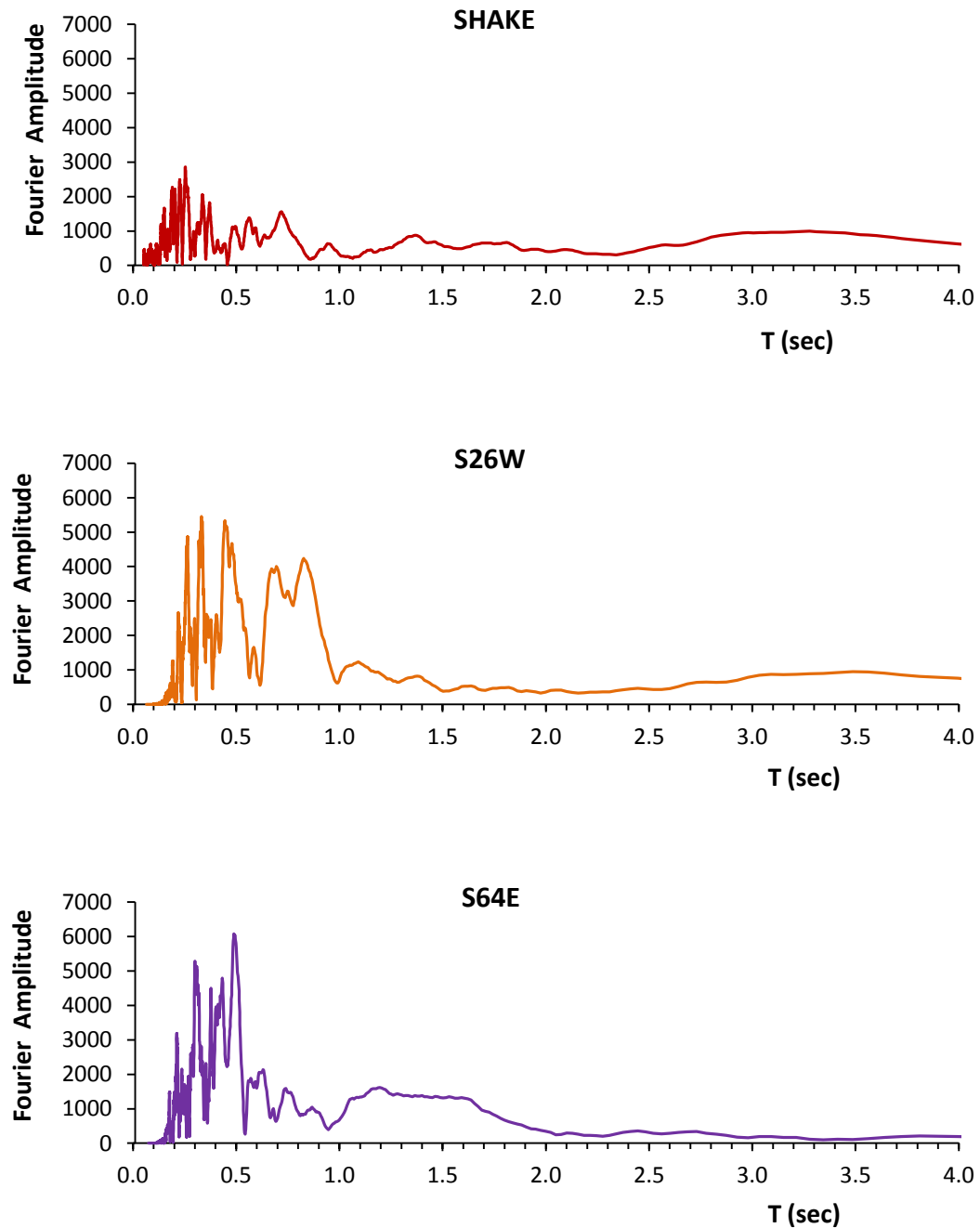


**Σχήμα 5.42:** Η χρονοϊστορία επιταχύνσεων ( $a$ ) και το ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων ( $S_a$ ) από την ισοδύναμη ελαστική ανάλυση με το SHAKE2000, σε σύγκριση με τα αντίστοιχα από τις δύο συνιστώσες της καταγραφής.

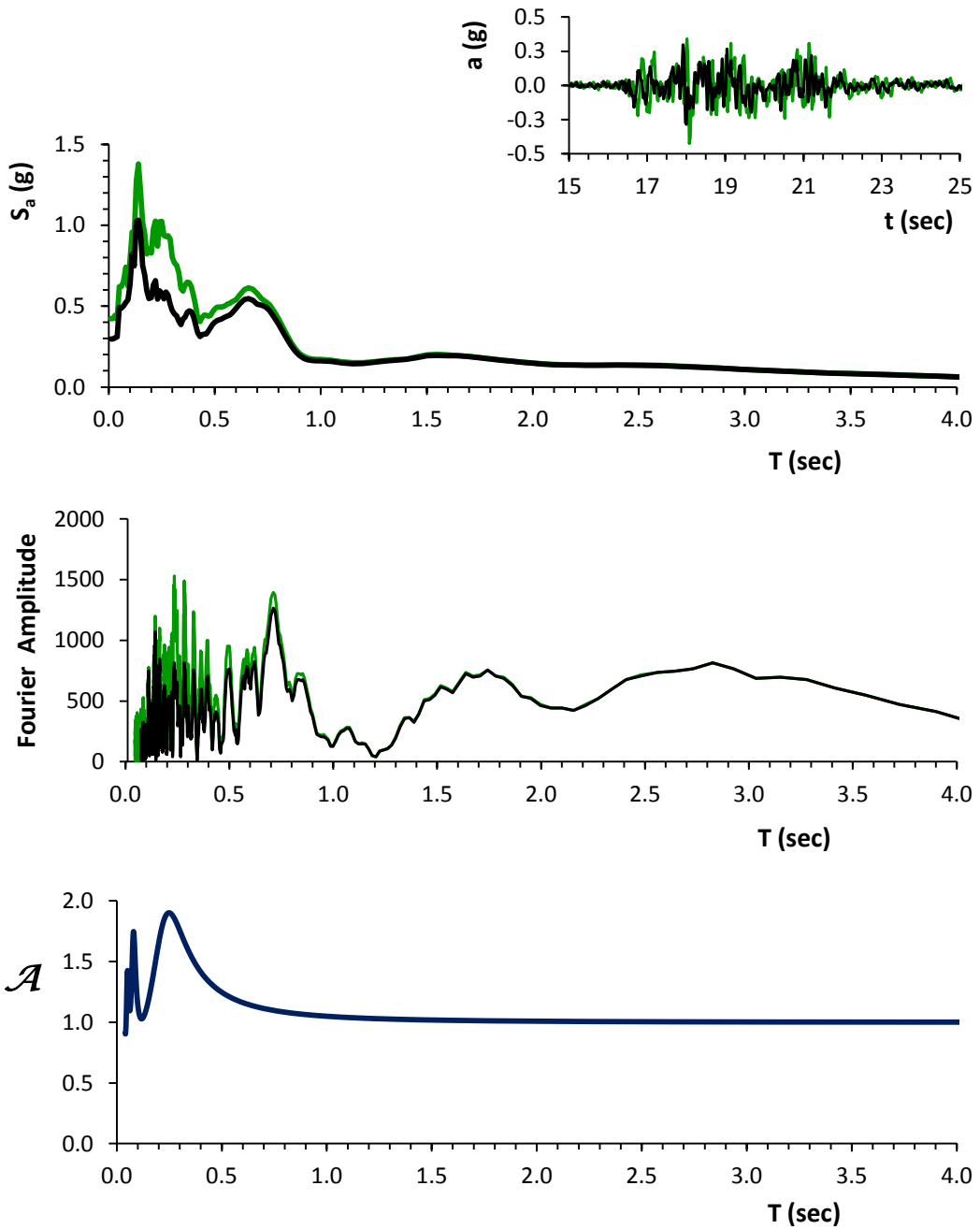
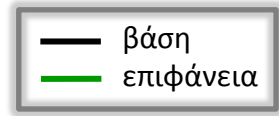


HVSC

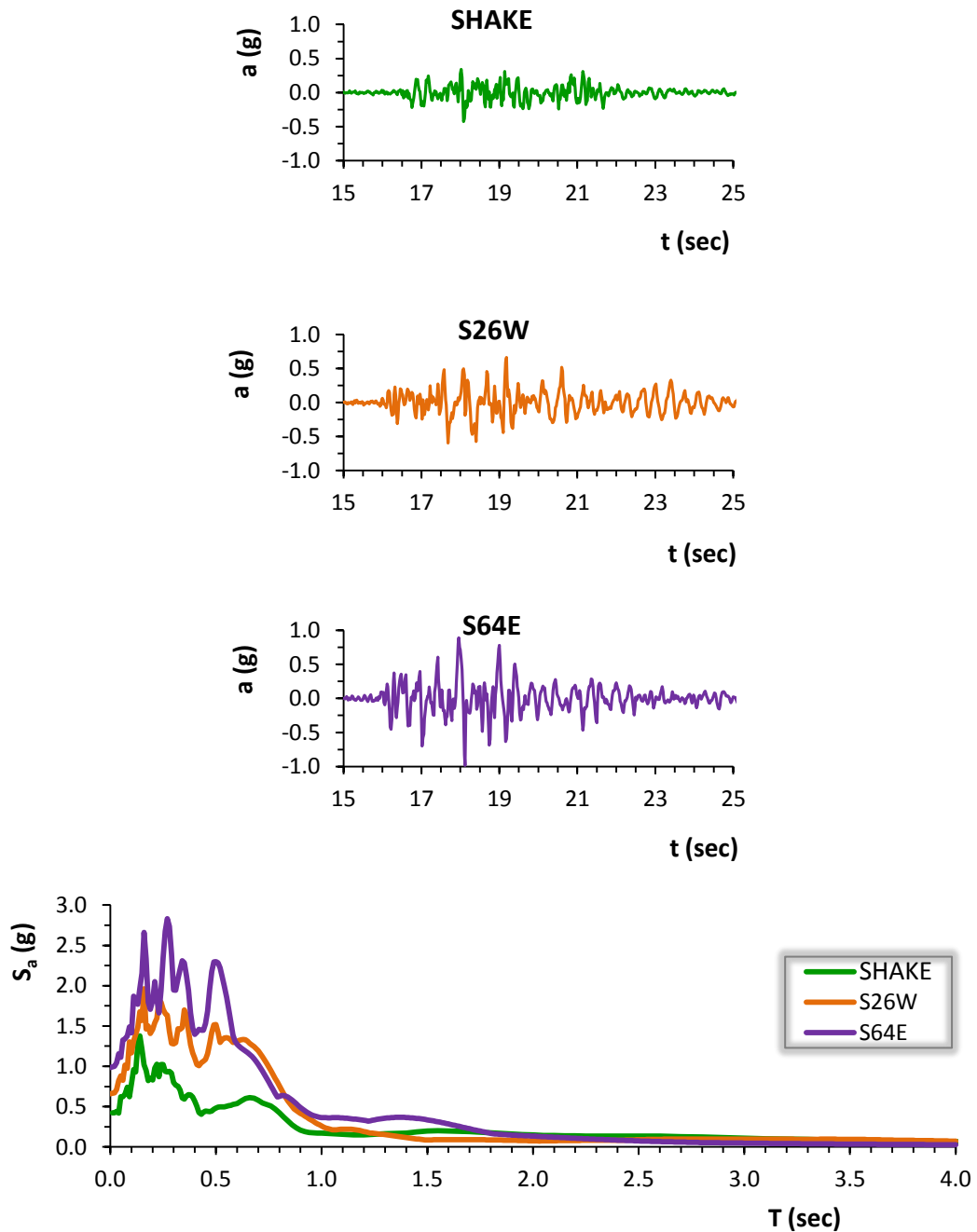
22 Φεβρουαρίου 2011



**Σχήμα 5.43:** Το φάσμα πλάτους Fourier από την ισοδύναμη ελαστική ανάλυση με το SHAKE2000 σε σύγκριση με τα αντίστοιχα από τις δύο συνιστώσες της καταγραφής.

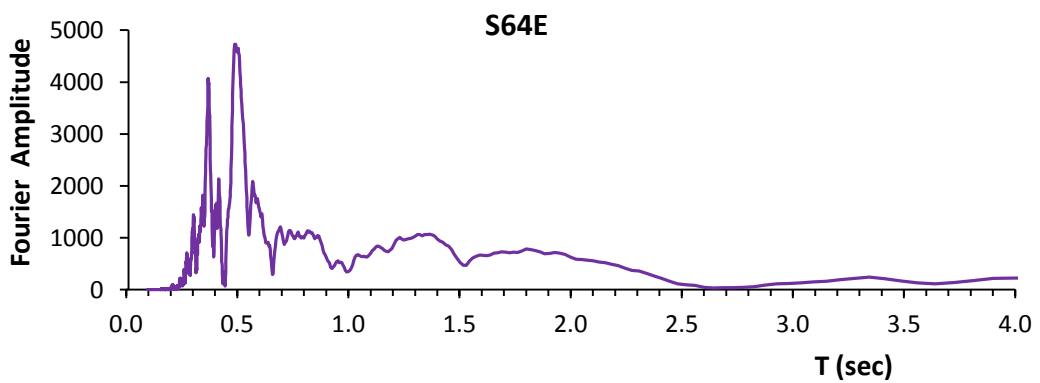
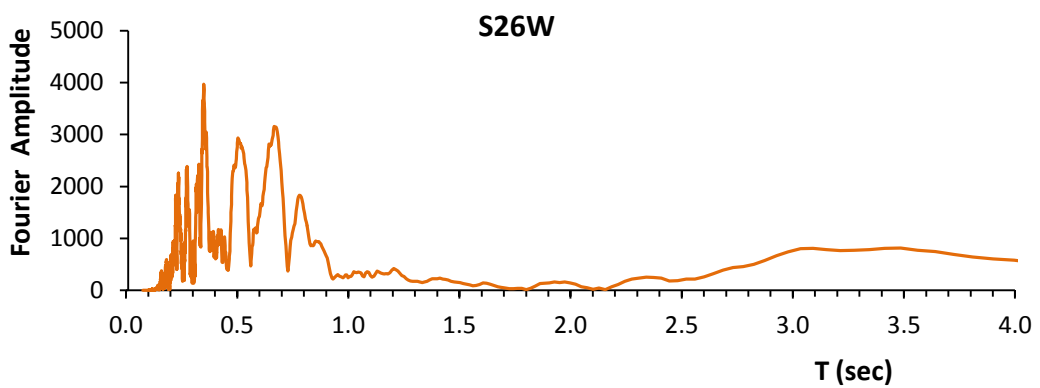
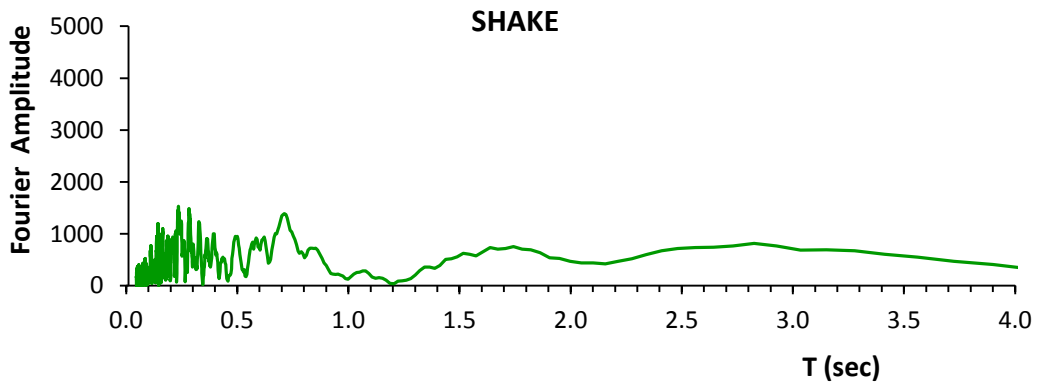


**Σχήμα 5.44:** Η χρονιοϊστορία επιταχύνσεων ( $a$ ), το ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων ( $S_a$ ) και το φάσμα του πλάτους Fourier μετά την ανάστροφη ισοδύναμη ελαστική ανάλυση με το SHAKE2000. Επίσης, ο συντελεστής φασματικής μεγέθυνσης  $\mathcal{A}$ . (δεσπάζουσα ιδιοπερίοδος εδάφους:  $T = 0.32$  sec)



**Σχήμα 5.45:** Η χρονοϊστορία επιταχύνσεων ( $a$ ) και το ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων ( $S_a$ ) από την ισοδύναμη ελαστική ανάλυση με το SHAKE2000, σε σύγκριση με τα αντίστοιχα από τις δύο συνιστώσες της καταγραφής.

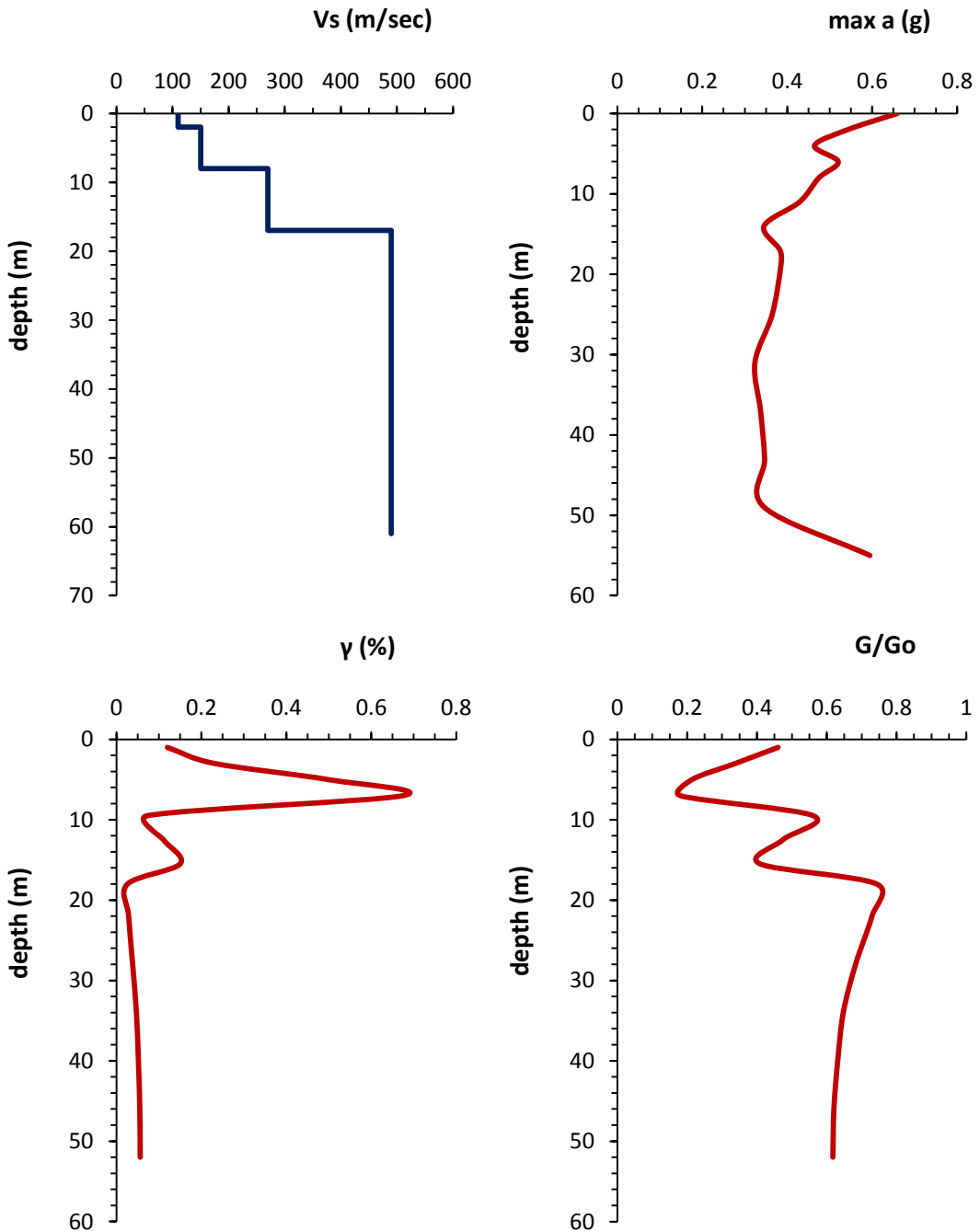
**HVSC**  
**13 Ιουνίου 2011**



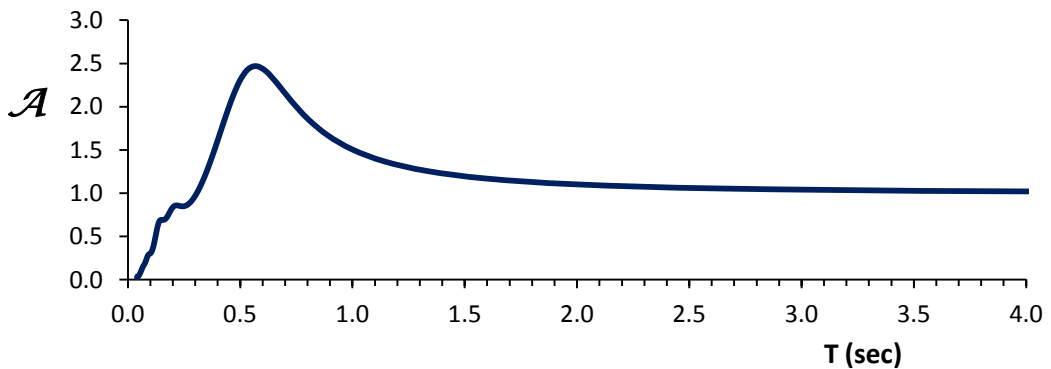
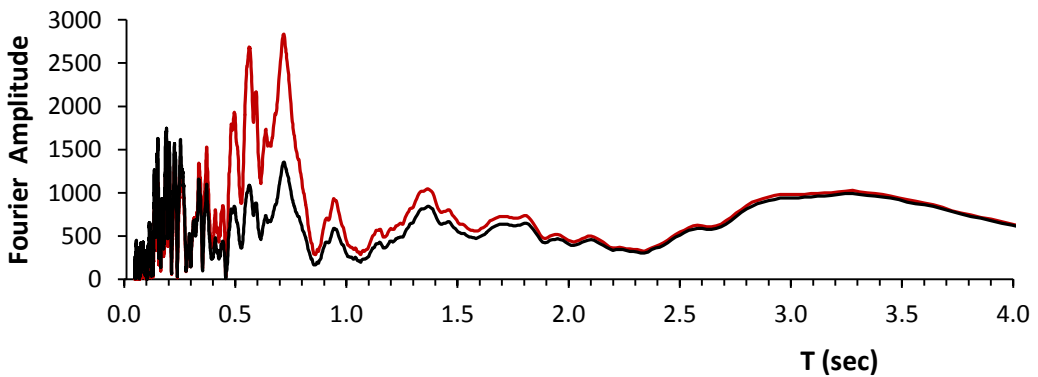
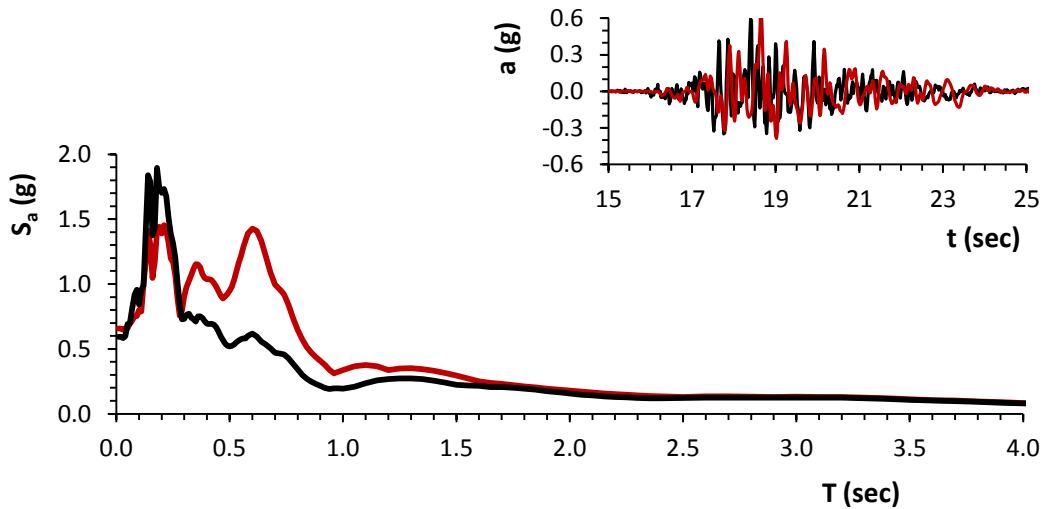
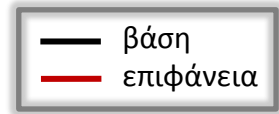
**Σχήμα 5.46:** Το φάσμα πλάτους Fourier από την ισοδύναμη ελαστική ανάλυση με το SHAKE2000 σε σύγκριση με τα αντίστοιχα από τις δύο συνιστώσες της καταγραφής.

# ΚΡΟC

22/2/2011



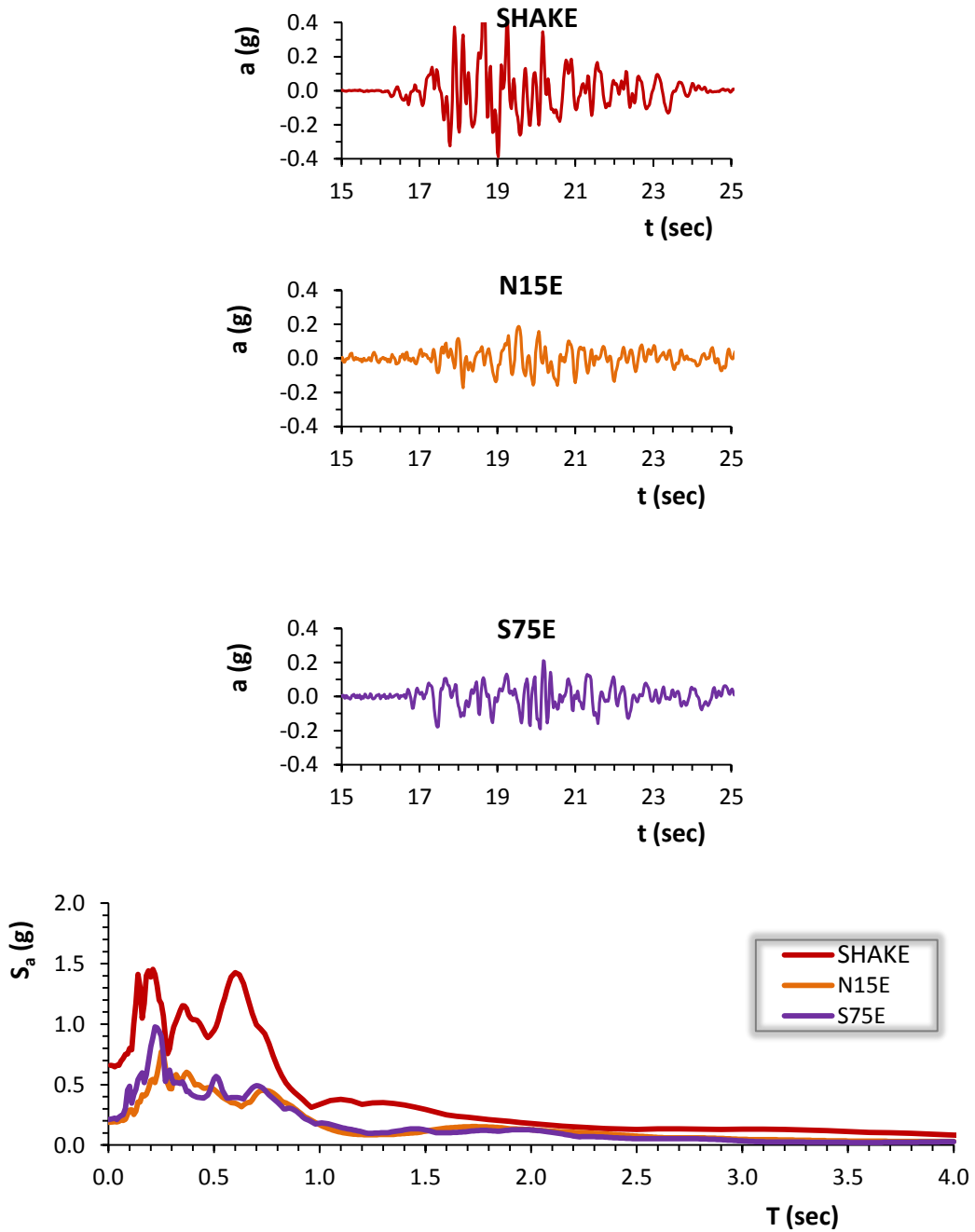
**Σχήμα 5.47:** Το εδαφικό προφίλ σε όρους ταχύτητας διατμητικών κυμάτων ( $V_s$ ), οι μέγιστες εδαφικές επιταχύνσεις ( $\max a$ ), η ποσοστιαία μεταβολή της γωνιακής παραμόρφωσης ( $\gamma$  %) και ο λόγος της απομείωσης του μέτρου διατμήσεως ( $G$ ) σε σχέση με το βάθος της εδαφικής στήλης.



**Σχήμα 5.48:** Η χρονιοιστορία επιταχύνσεων ( $a$ ), το ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων ( $S_a$ ) και το φάσμα του πλάτους Fourier μετά την ανάστροφη ισοδύναμη ελαστική ανάλυση με το SHAKE2000. Επίσης, ο συντελεστής φασματικής μεγέθυνσης  $\mathcal{A}$ . (δεσπόζουσα ιδιοπερίοδος εδάφους:  $T = 0.70$  sec)

ΚΡΟC

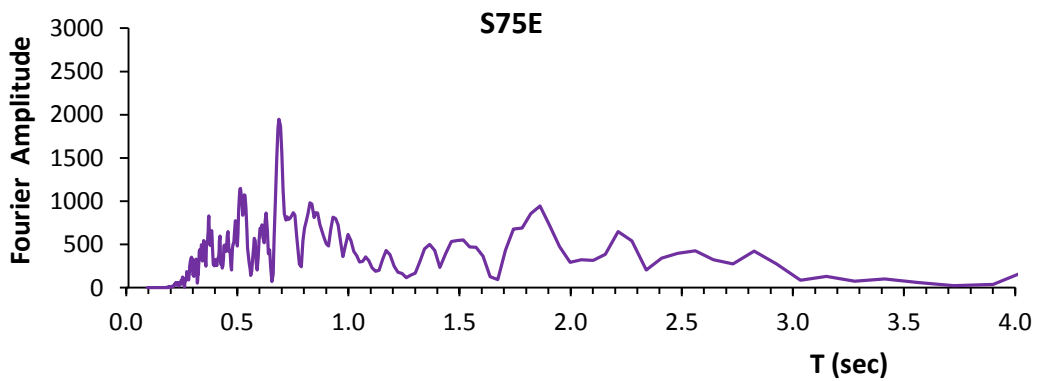
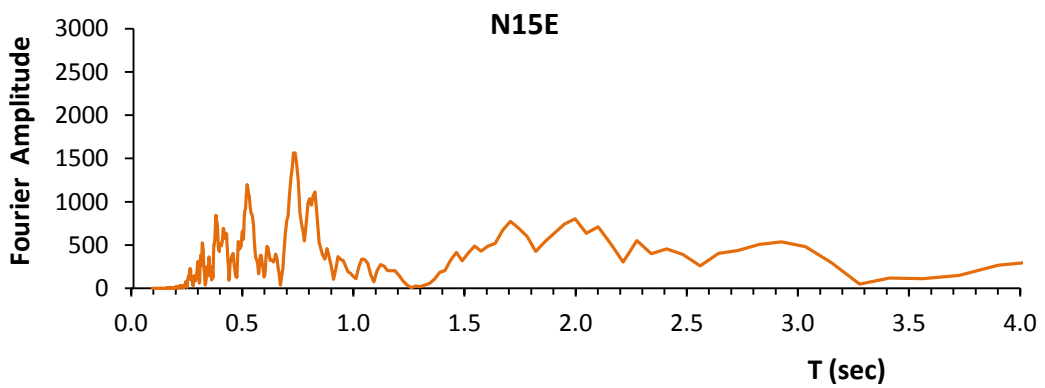
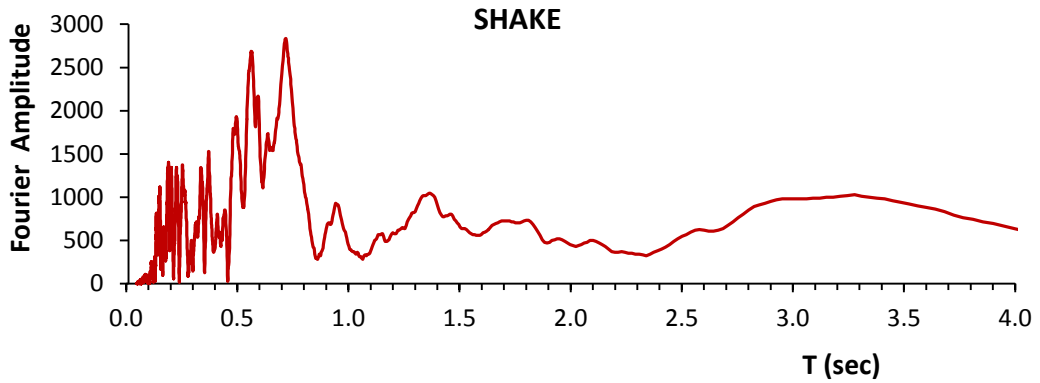
22 Φεβρουαρίου 2011



**Σχήμα 5.49:** Η χρονοϊστορία επιταχύνσεων ( $a$ ) και το ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων ( $S_a$ ) από την ισοδύναμη ελαστική ανάλυση με το SHAKE2000, σε σύγκριση με τα αντίστοιχα από τις δύο συνιστώσες της καταγραφής.

**KROC**

**22 Φεβρουαρίου 2011**

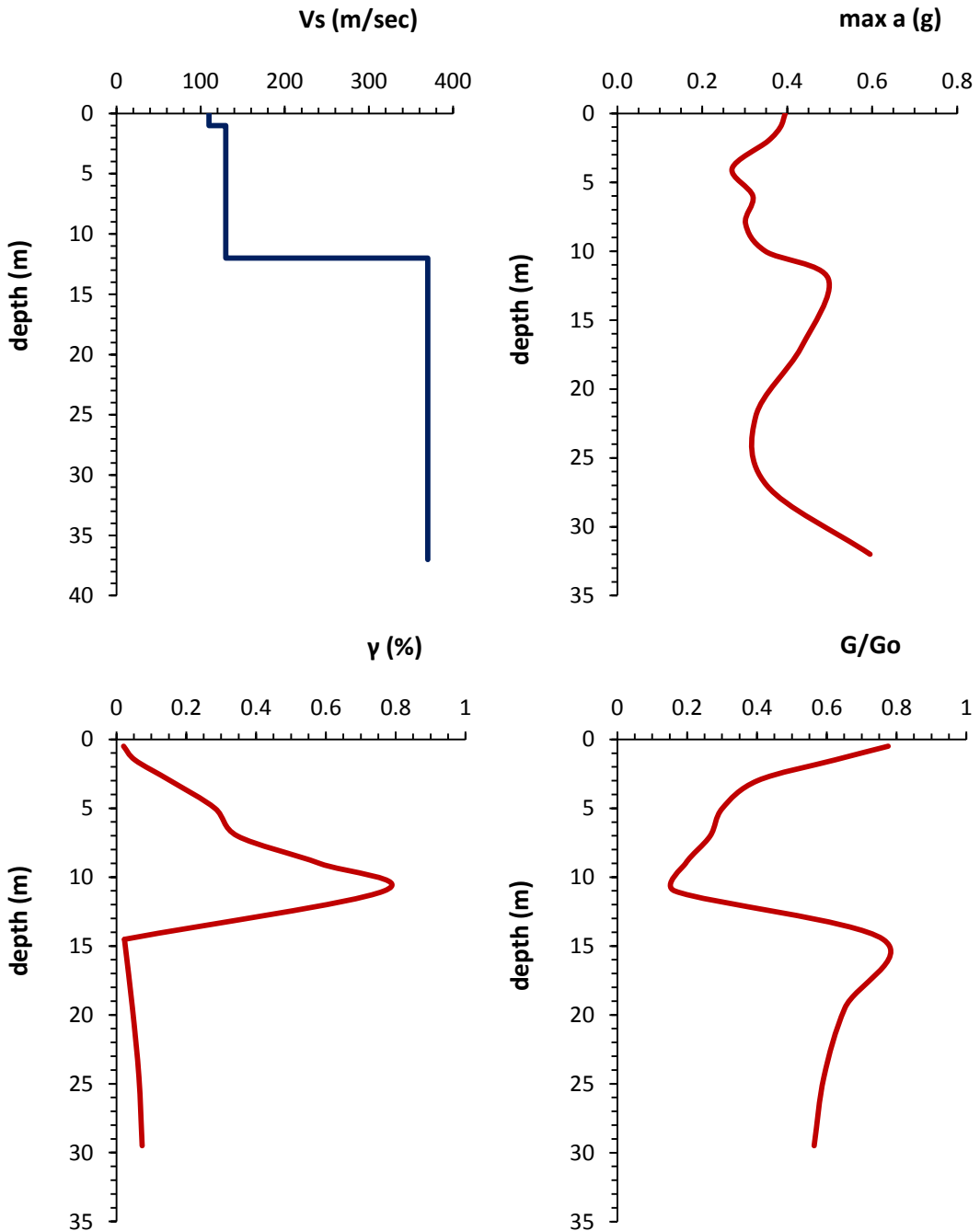


**Σχήμα 5.50:** Το φάσμα πλάτους Fourier από την ισοδύναμη ελαστική ανάλυση με το SHAKE2000 σε σύγκριση με τα αντίστοιχα από τις δύο συνιστώσες της καταγραφής.

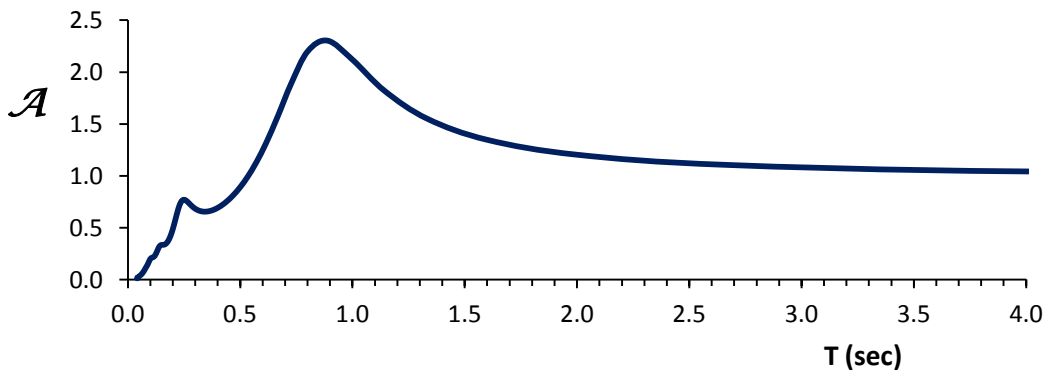
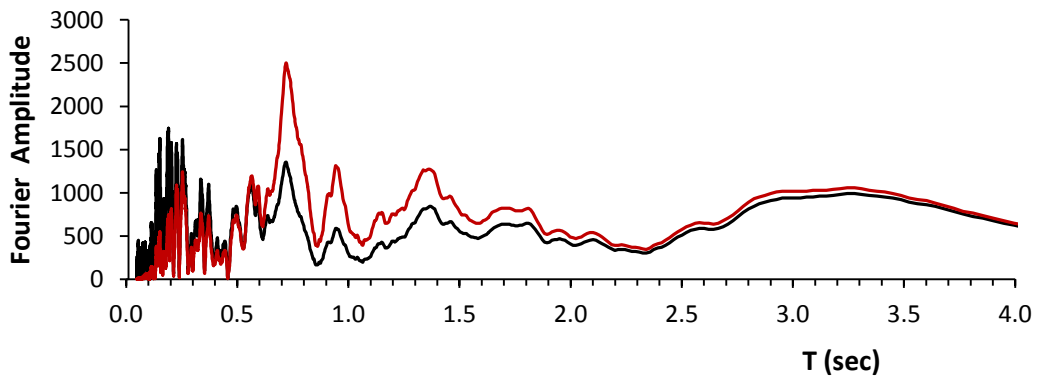
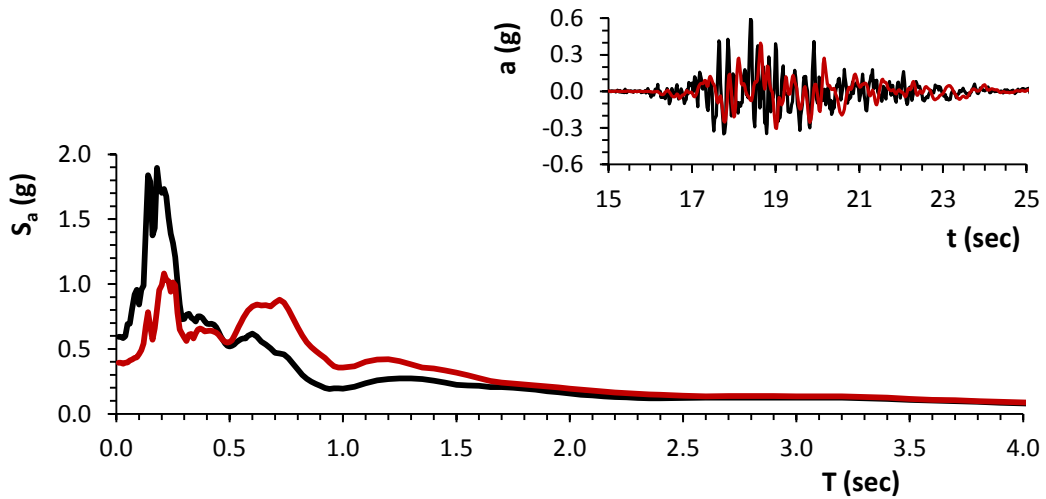
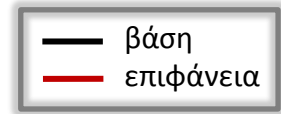


# NNBS

22/2/2011



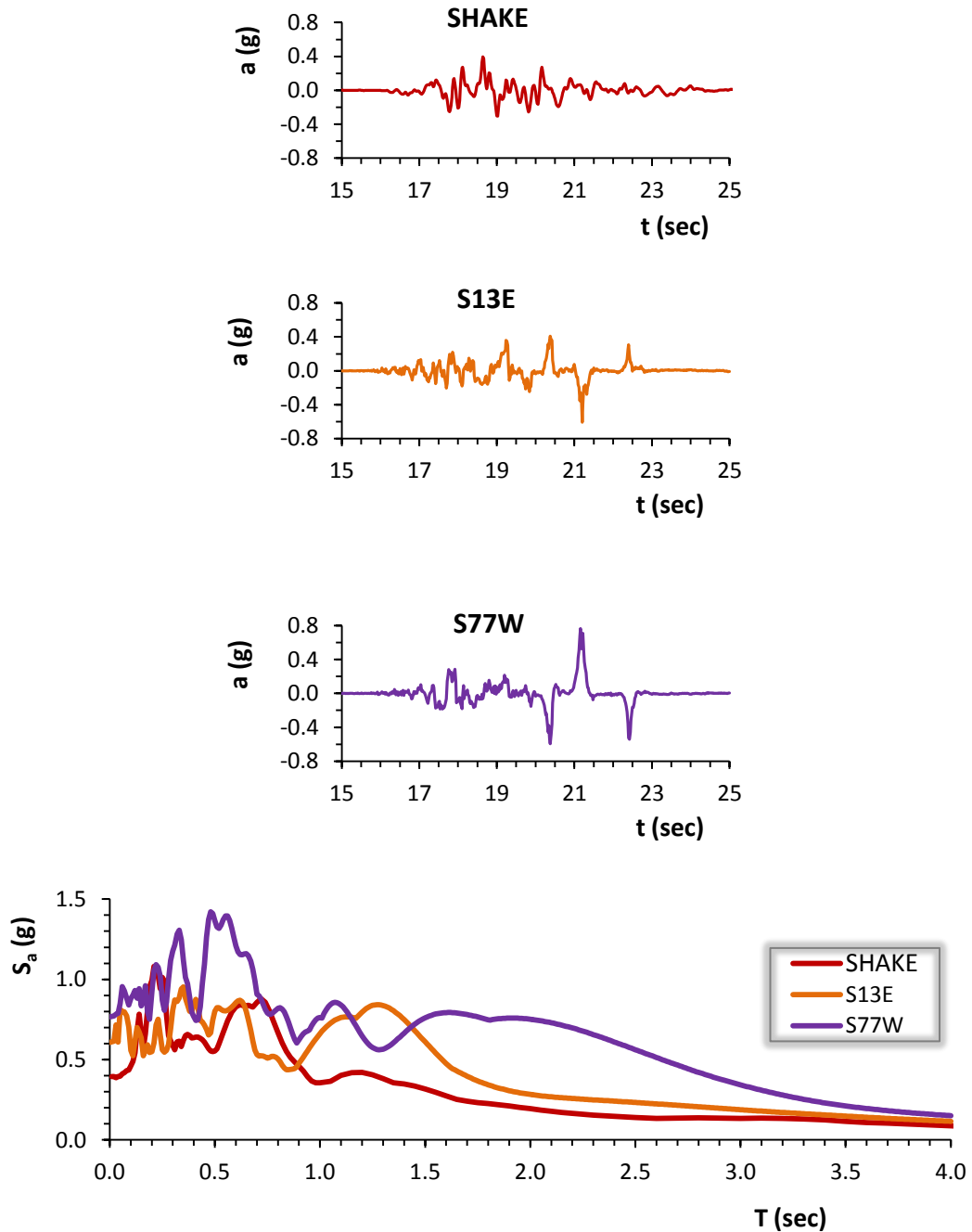
**Σχήμα 5.51:** Το εδαφικό προφίλ σε όρους ταχύτητας διατμητικών κυμάτων ( $V_s$ ), οι μέγιστες εδαφικές επιταχύνσεις ( $\max a$ ), η ποσοστιαία μεταβολή της γωνιακής παραμόρφωσης ( $\gamma$  %) και ο λόγος της απομείωσης του μέτρου διατμήσεως ( $G$ ) σε σχέση με το βάθος της εδαφικής στήλης.



**Σχήμα 5.52:** Η χρονιοϊστορία επιταχύνσεων ( $a$ ), το ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων ( $S_a$ ) και το φάσμα του πλάτους Fourier μετά την ανάστροφη ισοδύναμη ελαστική ανάλυση με το SHAKE2000. Επίσης, ο συντελεστής φασματικής μεγέθυνσης  $\mathcal{A}$ . (δεσπόζουσα ιδιοπερίοδος εδάφους:  $T = 0.60$  sec)

NNBS

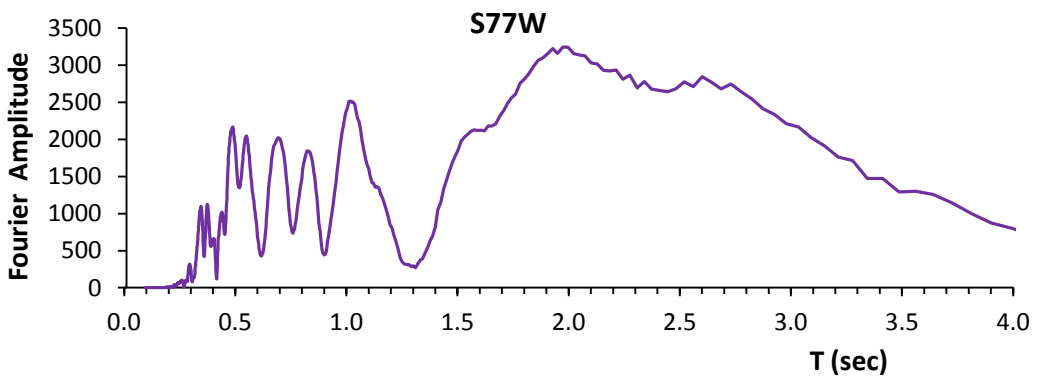
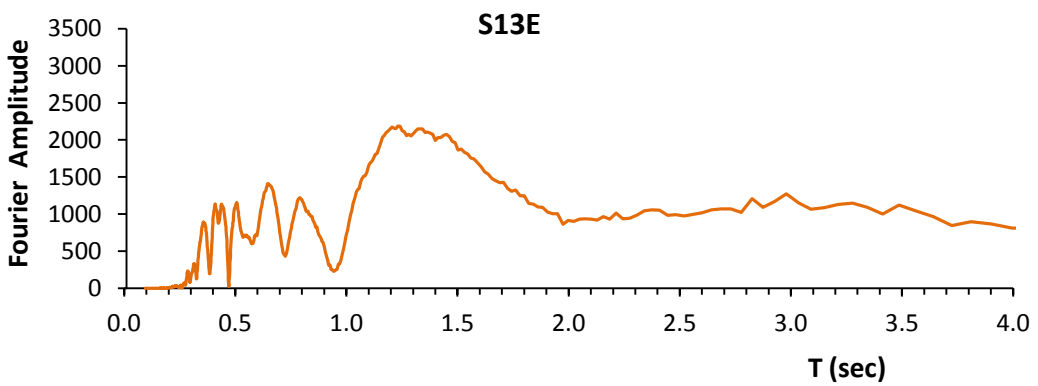
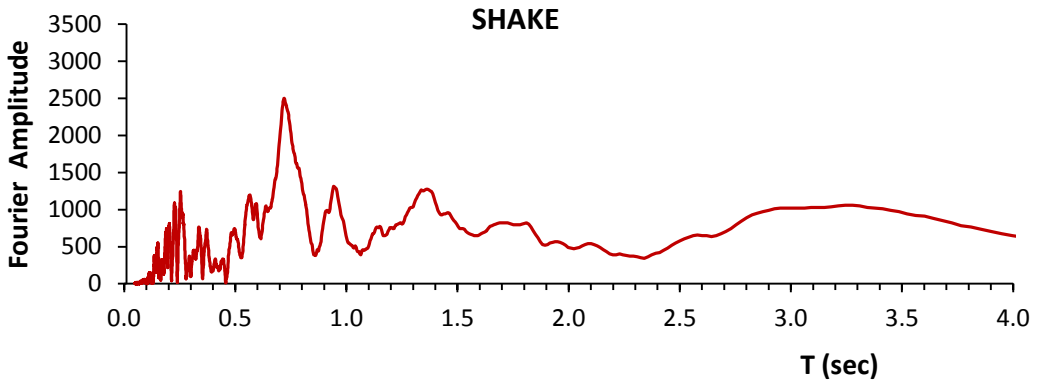
22 Φεβρουαρίου 2011



**Σχήμα 5.53:** Η χρονοϊστορία επιταχύνσεων ( $a$ ) και το ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων ( $S_a$ ) από την ισοδύναμη ελαστική ανάλυση με το SHAKE2000, σε σύγκριση με τα αντίστοιχα από τις δύο συνιστώσες της καταγραφής.

**NNBS**

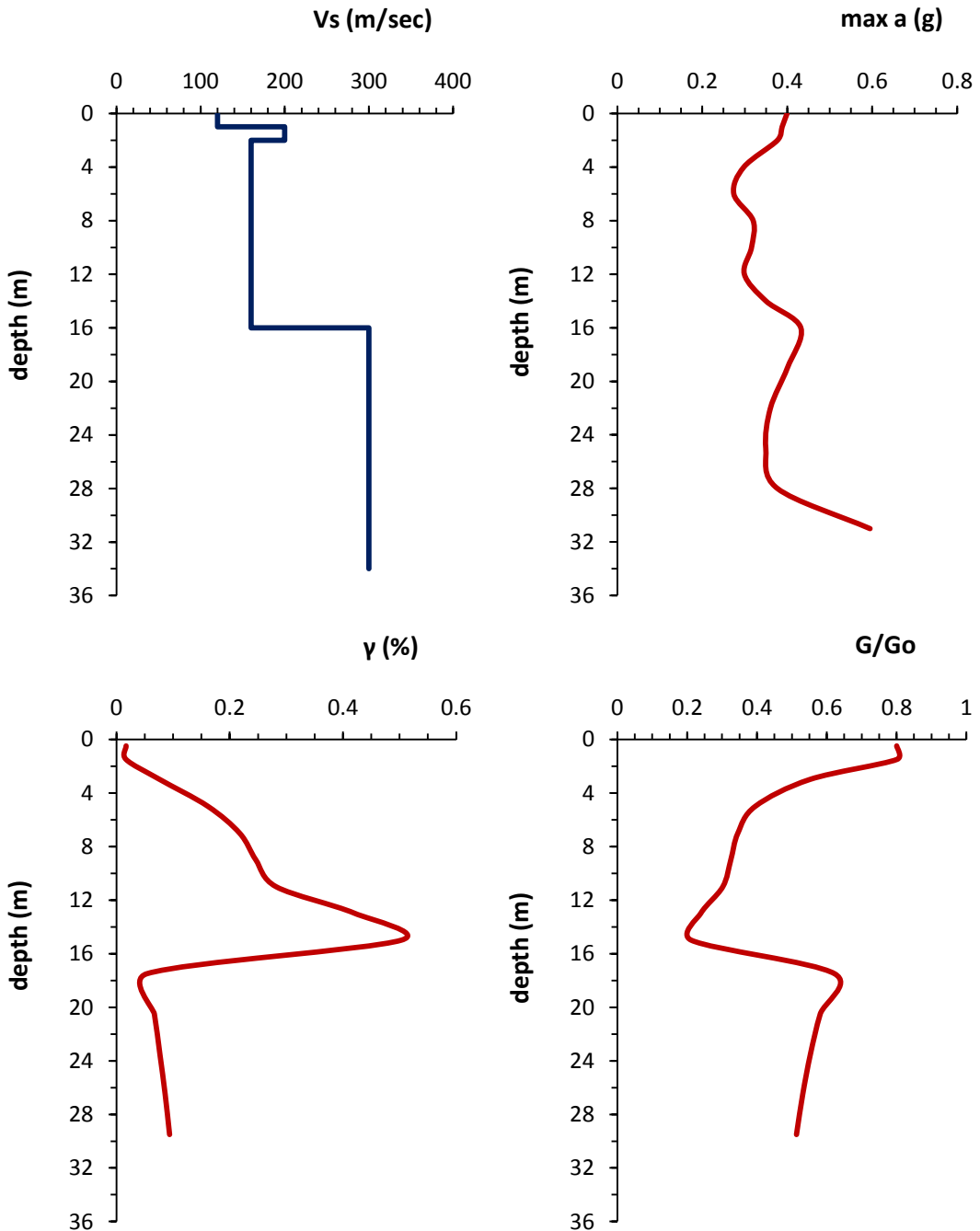
**22 Φεβρουαρίου 2011**



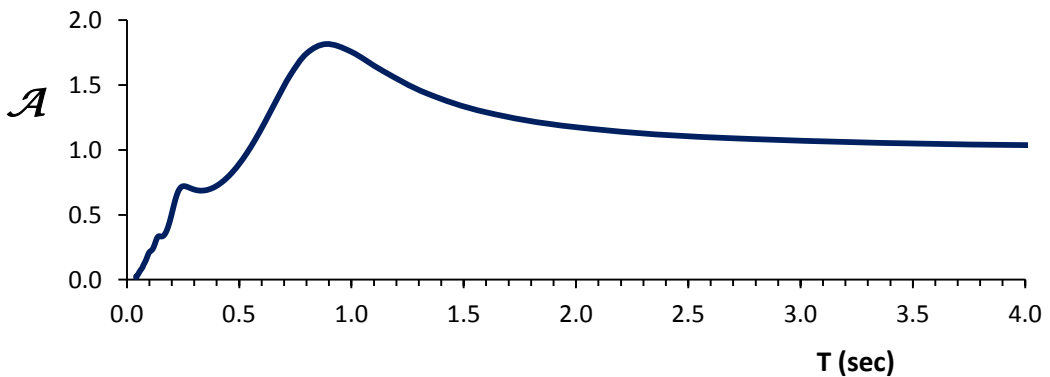
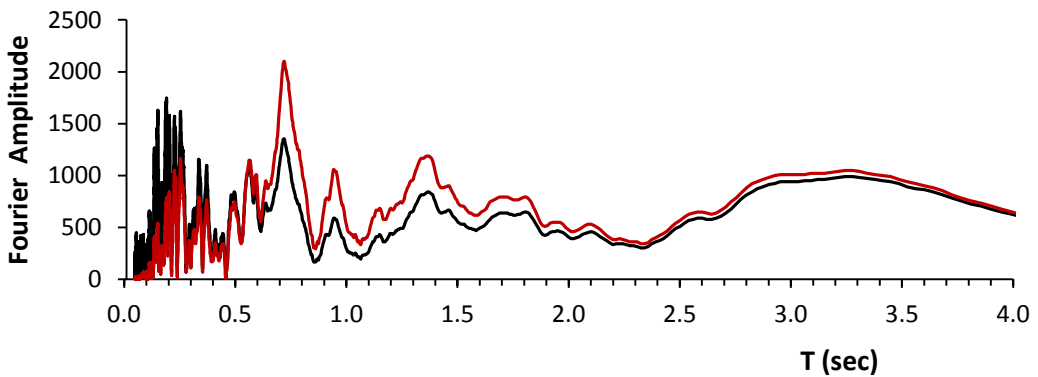
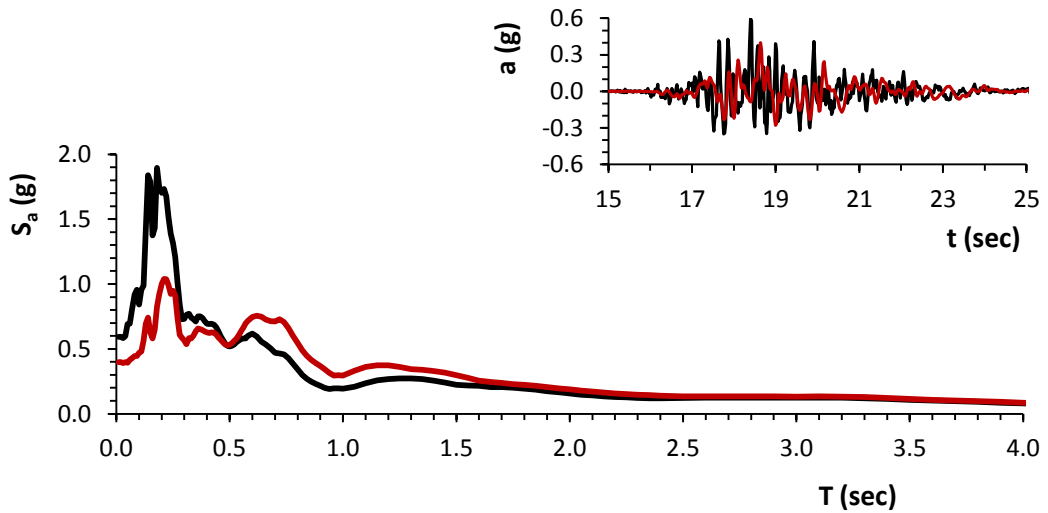
**Σχήμα 5.54:** Το φάσμα πλάτους Fourier από την ισοδύναμη ελαστική ανάλυση με το SHAKE2000 σε σύγκριση με τα αντίστοιχα από τις δύο συνιστώσες της καταγραφής.

# PRPC

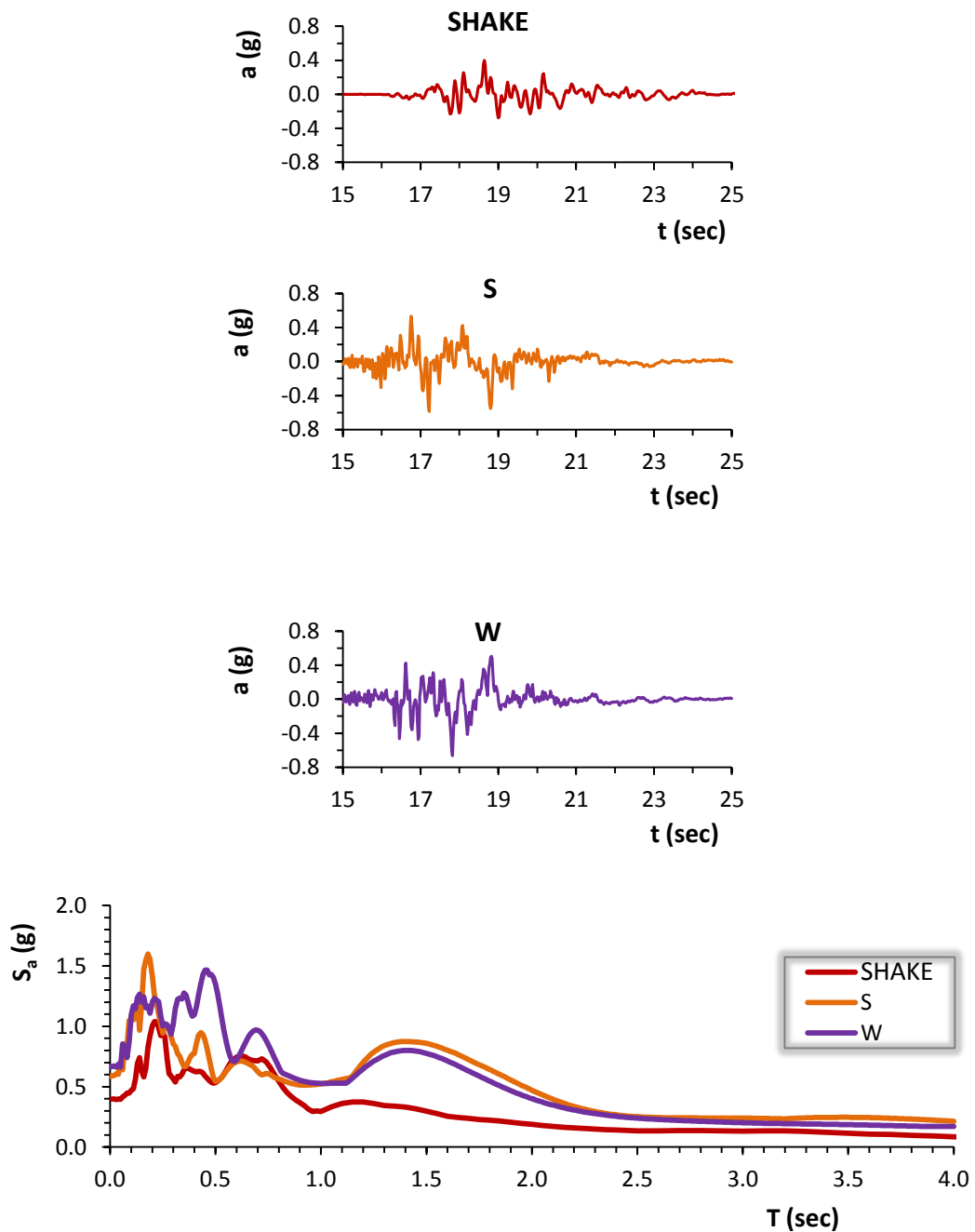
22/2/2011



**Σχήμα 5.55:** Το εδαφικό προφίλ σε όρους ταχύτητας διατμητικών κυμάτων ( $V_s$ ), οι μέγιστες εδαφικές επιταχύνσεις ( $\max a$ ), η ποσοστιαία μεταβολή της γωνιακής παραμόρφωσης ( $\gamma$  %) και ο λόγος της απομείωσης του μέτρου διατμήσεως ( $G$ ) σε σχέση με το βάθος της εδαφικής στήλης.



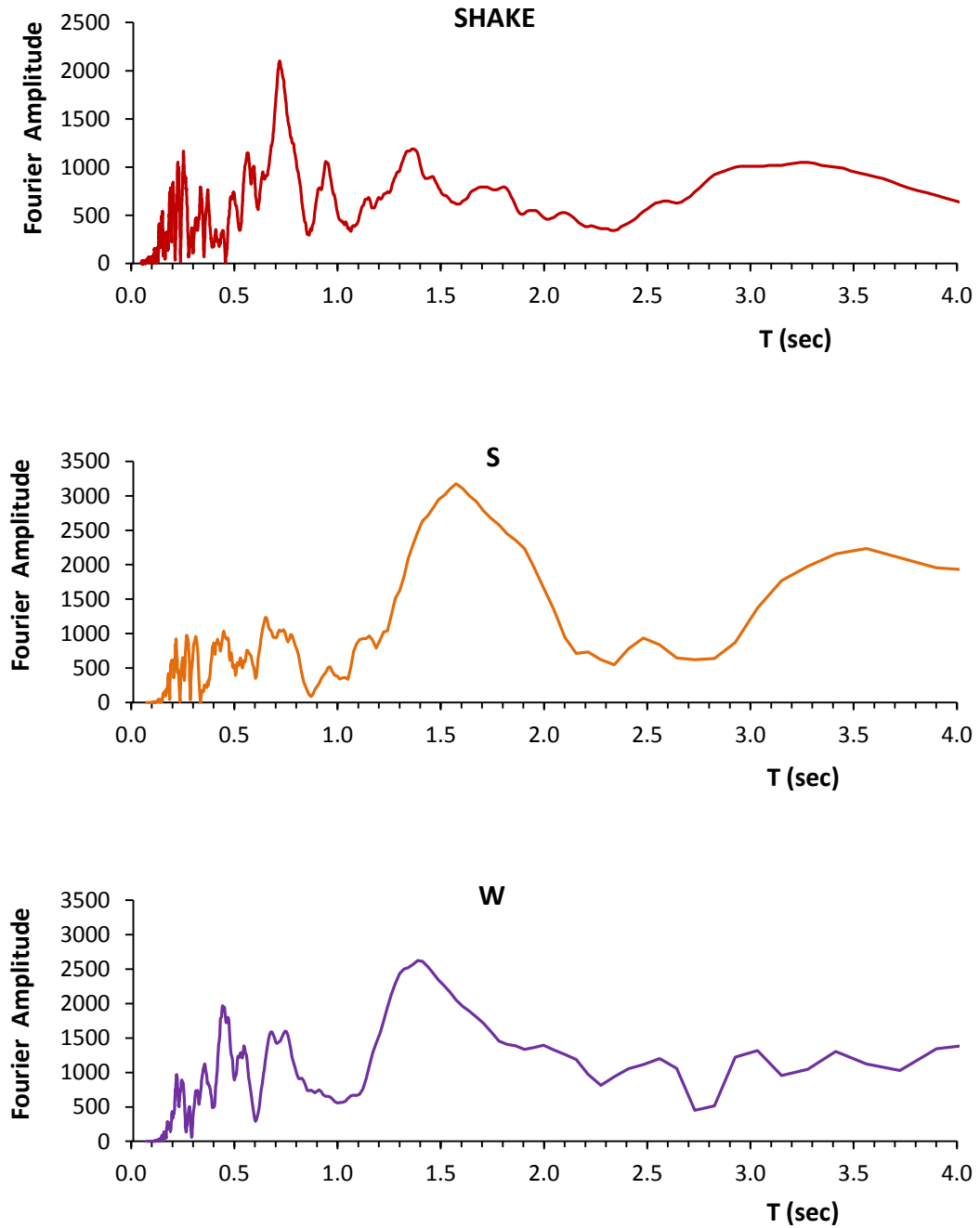
**Σχήμα 5.56:** Η χρονιοϊστορία επιταχύνσεων ( $a$ ), το ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων ( $S_a$ ) και το φάσμα του πλάτους Fourier μετά την ανάστροφη ισοδύναμη ελαστική ανάλυση με το SHAKE2000. Επίσης, ο συντελεστής φασματικής μεγέθυνσης  $\mathcal{A}$ . (δεσπόζουσα ιδιοπερίοδος εδάφους:  $T = 0.78 \text{ sec}$ )



**Σχήμα 5.57:** Η χρονοϊστορία επιταχύνσεων ( $a$ ) και το ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων ( $S_a$ ) από την ισοδύναμη ελαστική ανάλυση με το SHAKE2000, σε σύγκριση με τα αντίστοιχα από τις δύο συνιστώσες της καταγραφής.

**PRPC**

**22 Φεβρουαρίου 2011**

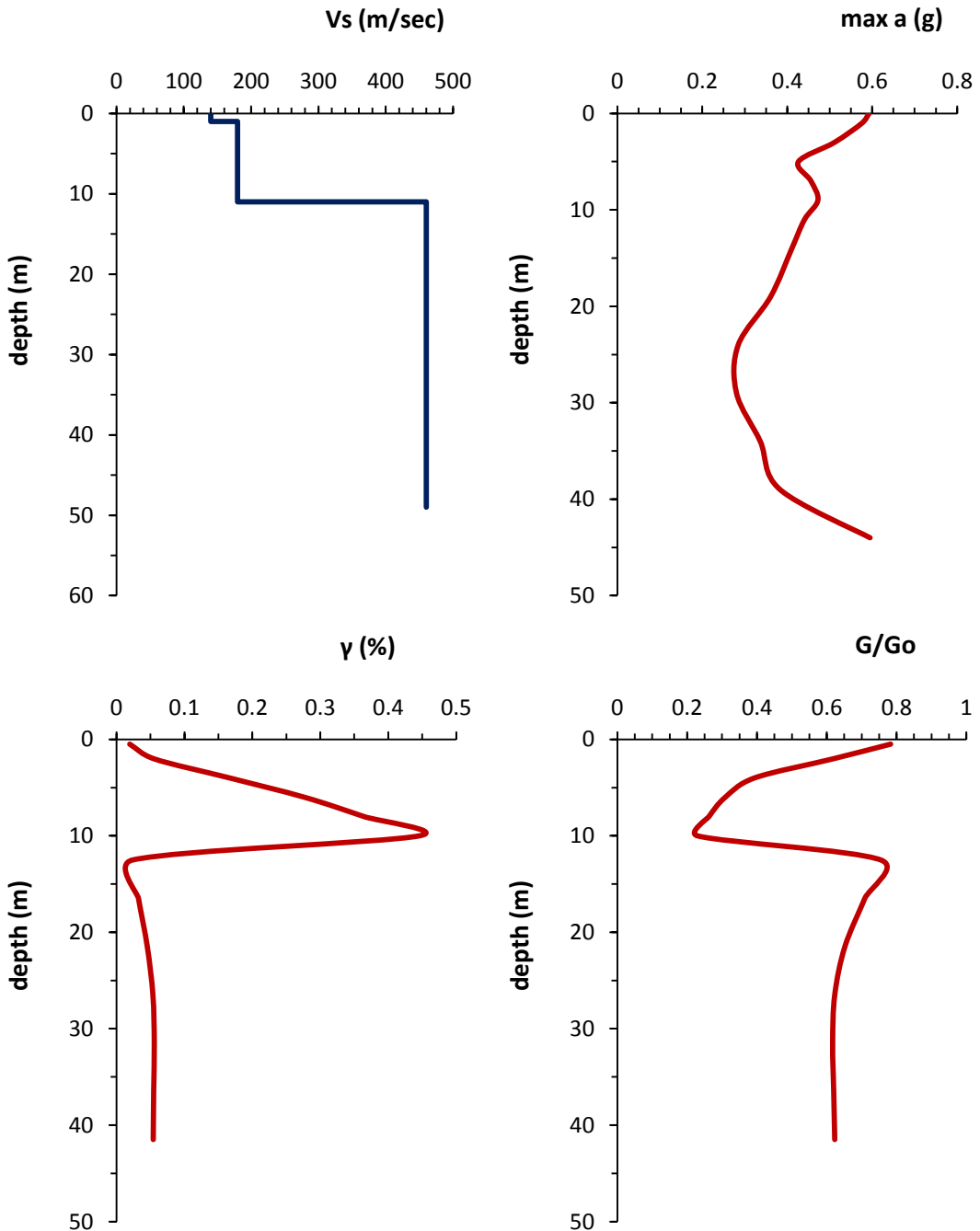


**Σχήμα 5.58:** Το φάσμα πλάτους Fourier από την ισοδύναμη ελαστική ανάλυση με το SHAKE2000 σε σύγκριση με τα αντίστοιχα από τις δύο συνιστώσες της καταγραφής.

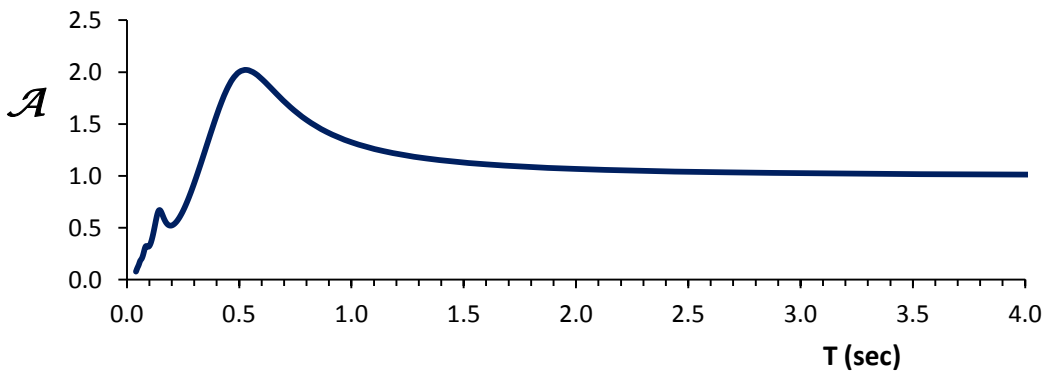
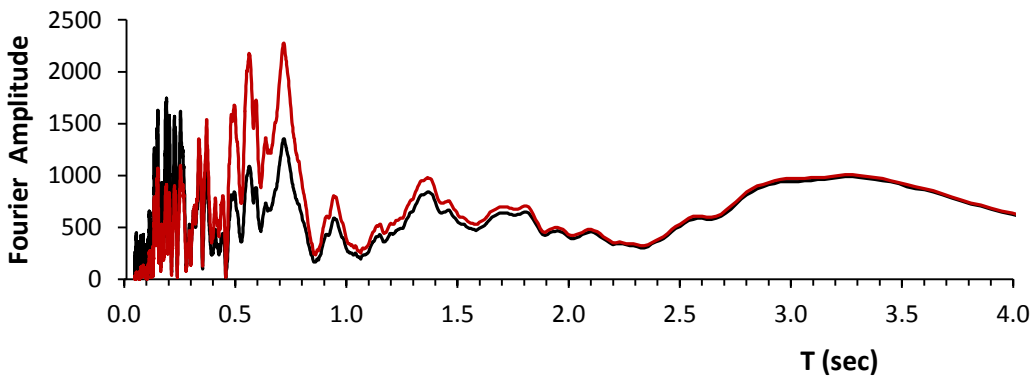
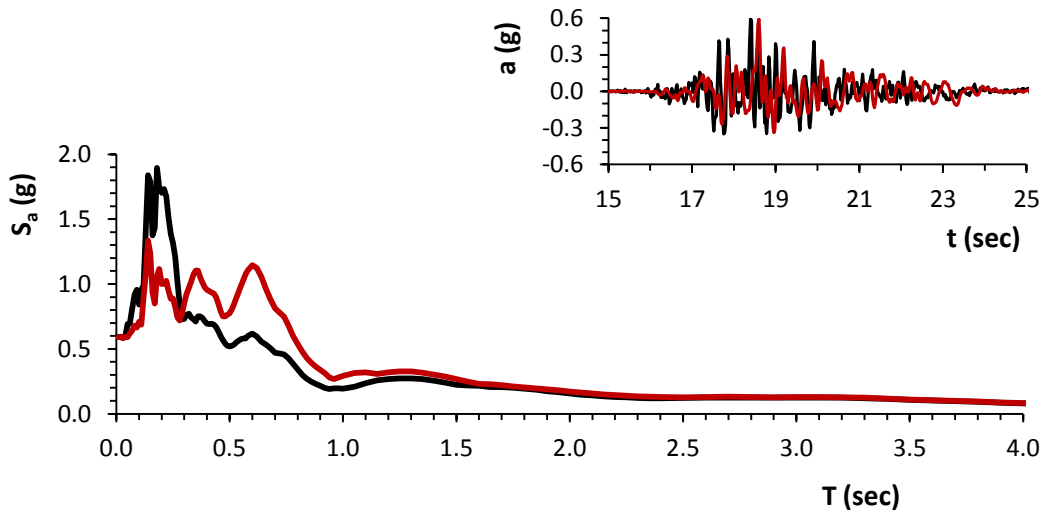
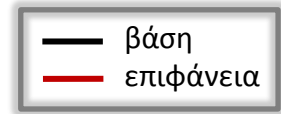


# RHSC

22/2/2011



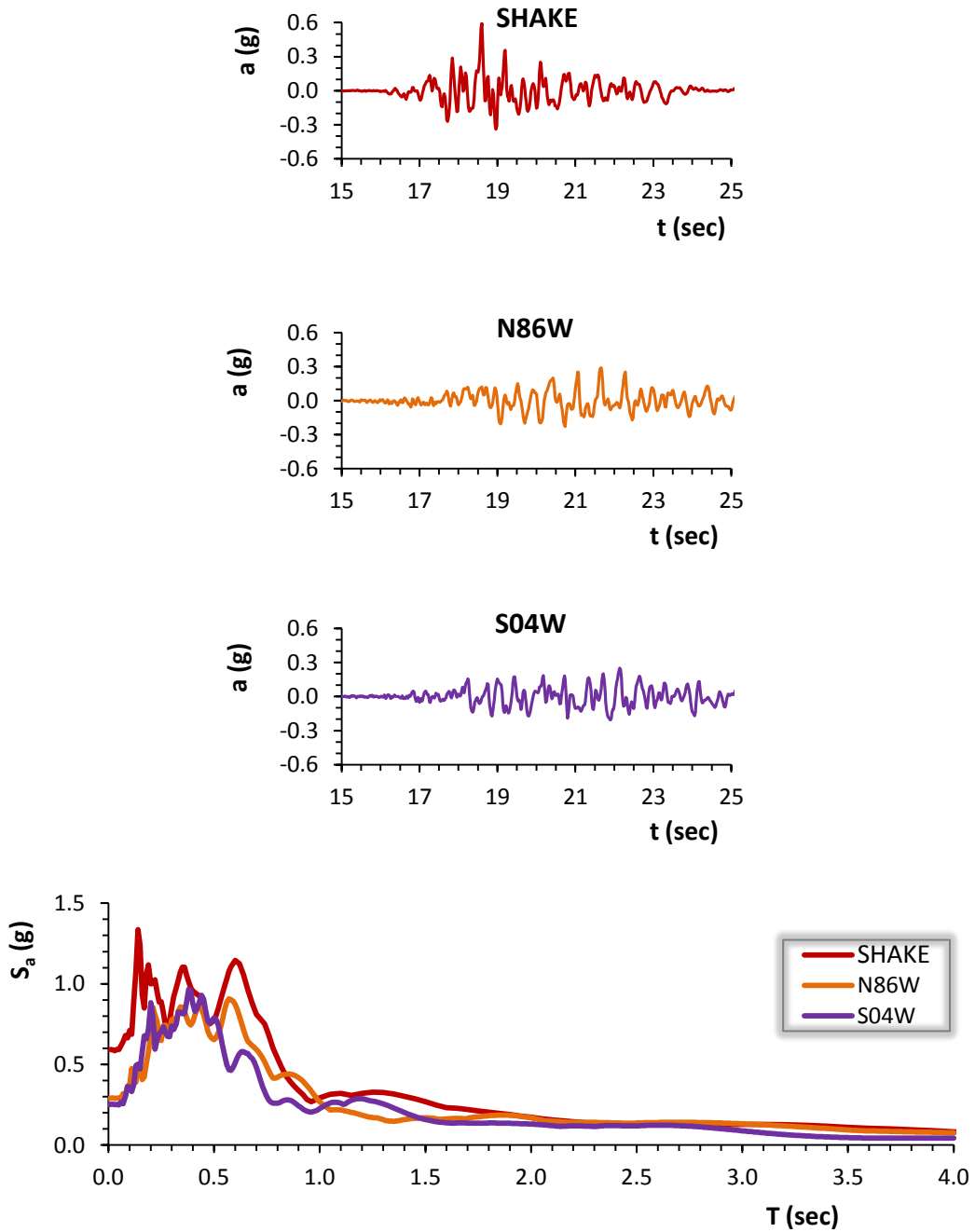
**Σχήμα 5.59:** Το εδαφικό προφίλ σε όρους ταχύτητας διατμητικών κυμάτων ( $V_s$ ), οι μέγιστες εδαφικές επιταχύνσεις ( $\max a$ ), η ποσοστιαία μεταβολή της γωνιακής παραμόρφωσης ( $\gamma$  %) και ο λόγος της απομείωσης του μέτρου διατμήσεως ( $G$ ) σε σχέση με το βάθος της εδαφικής στήλης.



**Σχήμα 5.60:** Η χρονιοιστορία επιταχύνσεων ( $a$ ), το ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων ( $S_a$ ) και το φάσμα του πλάτους Fourier μετά την ανάστροφη ισοδύναμη ελαστική ανάλυση με το SHAKE2000. Επίσης, ο συντελεστής φασματικής μεγέθυνσης  $\mathcal{A}$ . (δεσπόζουσα ιδιοπερίοδος εδάφους:  $T = 0.58 \text{ sec}$ )

RHSC

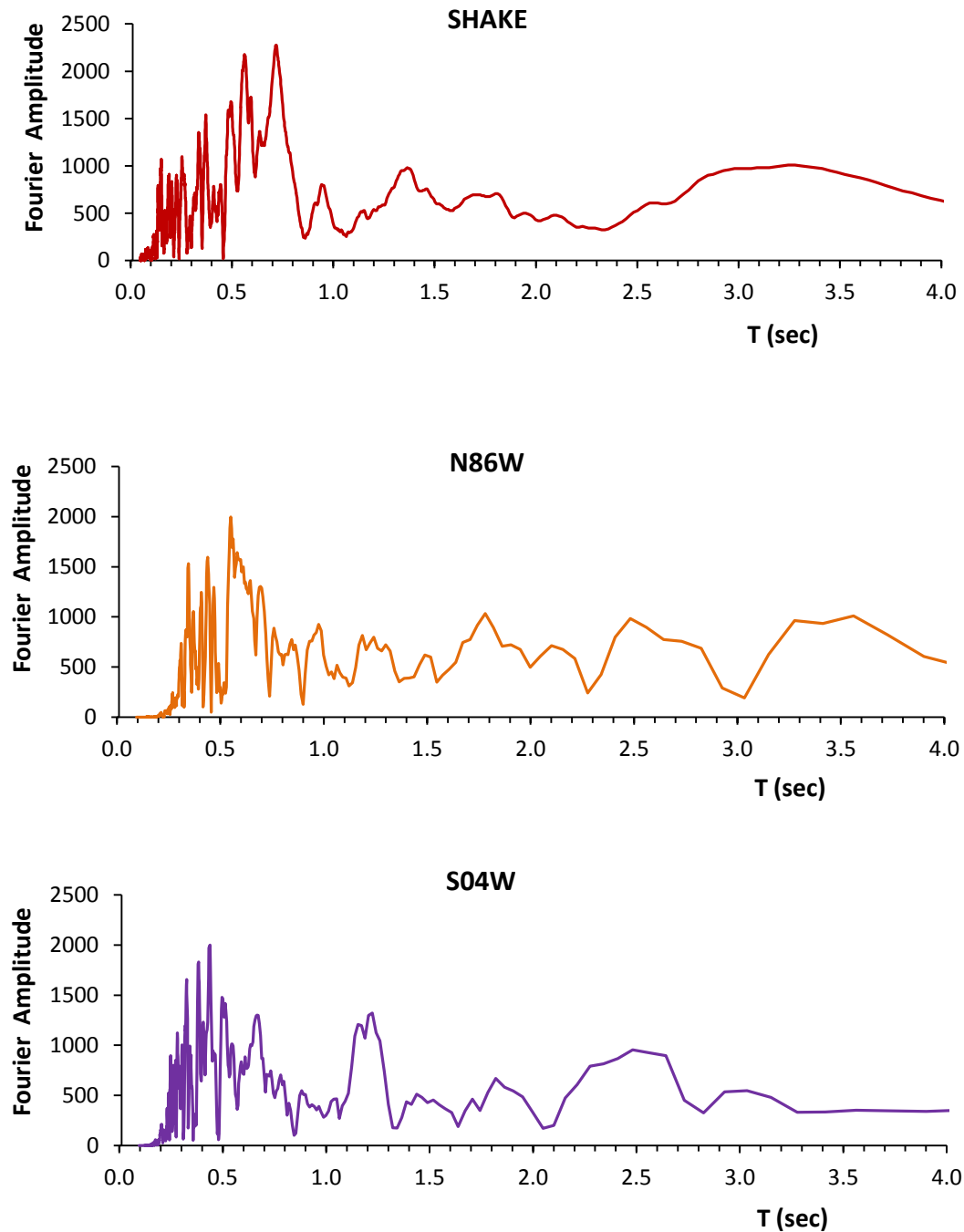
22 Φεβρουαρίου 2011



**Σχήμα 5.61:** Η χρονοϊστορία επιταχύνσεων ( $a$ ) και το ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων ( $S_a$ ) από την ισοδύναμη ελαστική ανάλυση με το SHAKE2000, σε σύγκριση με τα αντίστοιχα από τις δύο συνιστώσες της καταγραφής.

**RHSC**

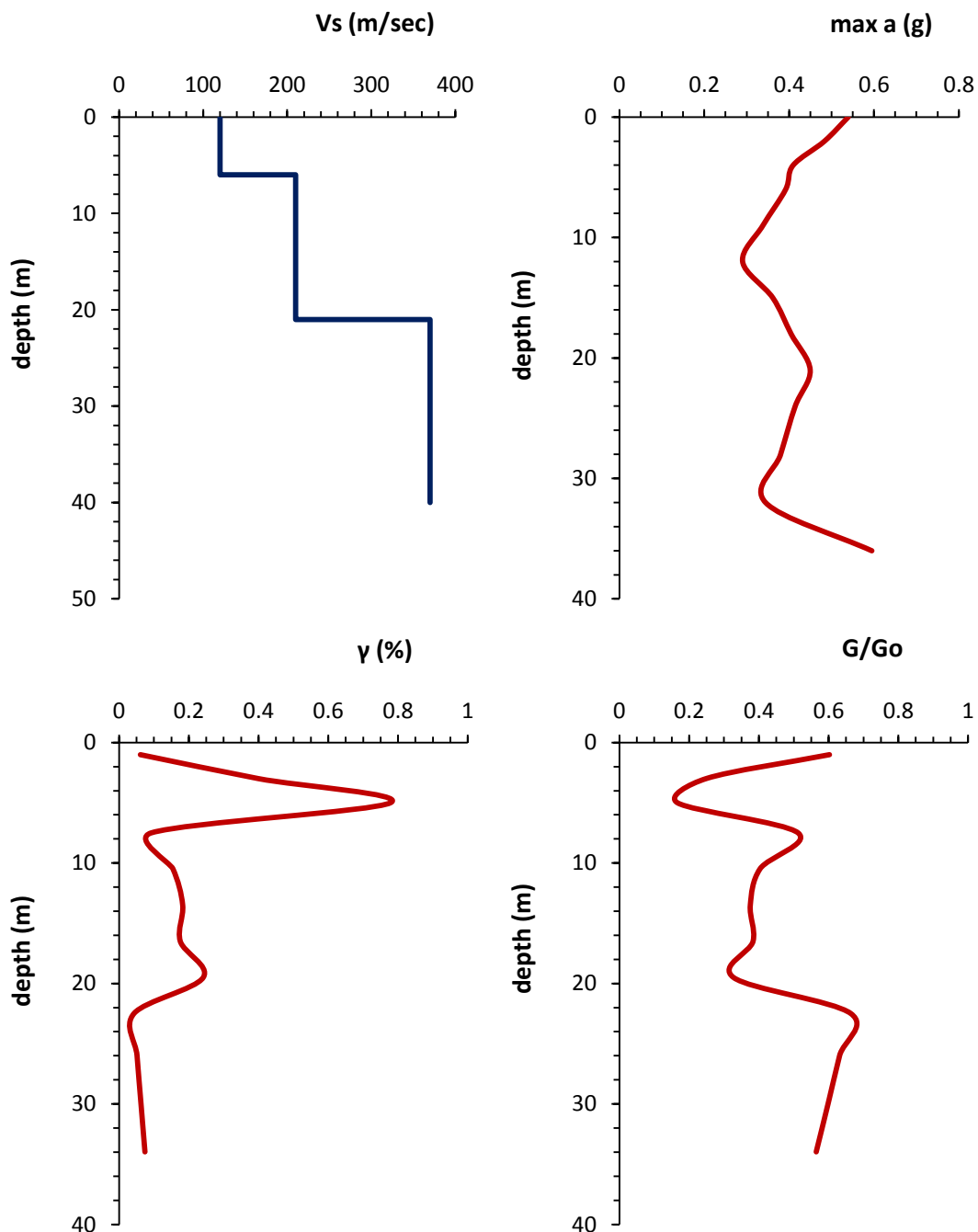
**22 Φεβρουαρίου 2011**



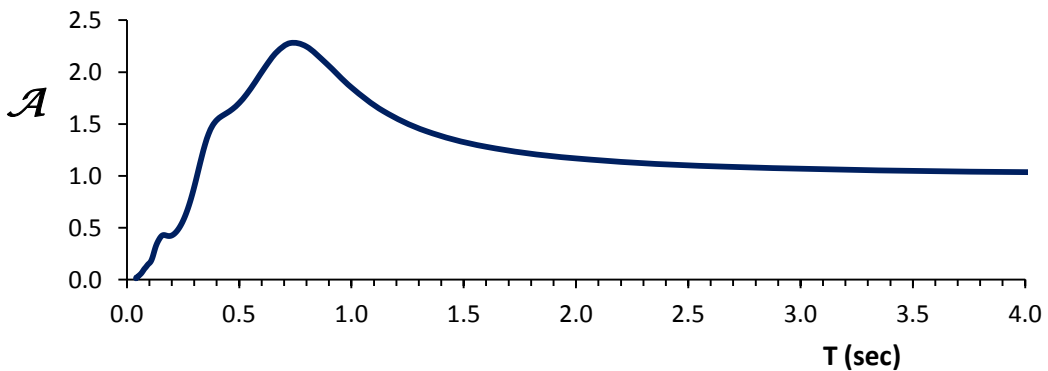
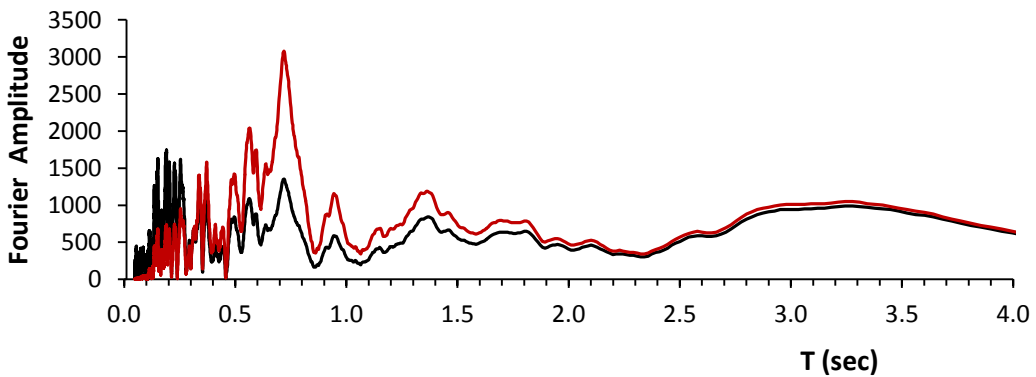
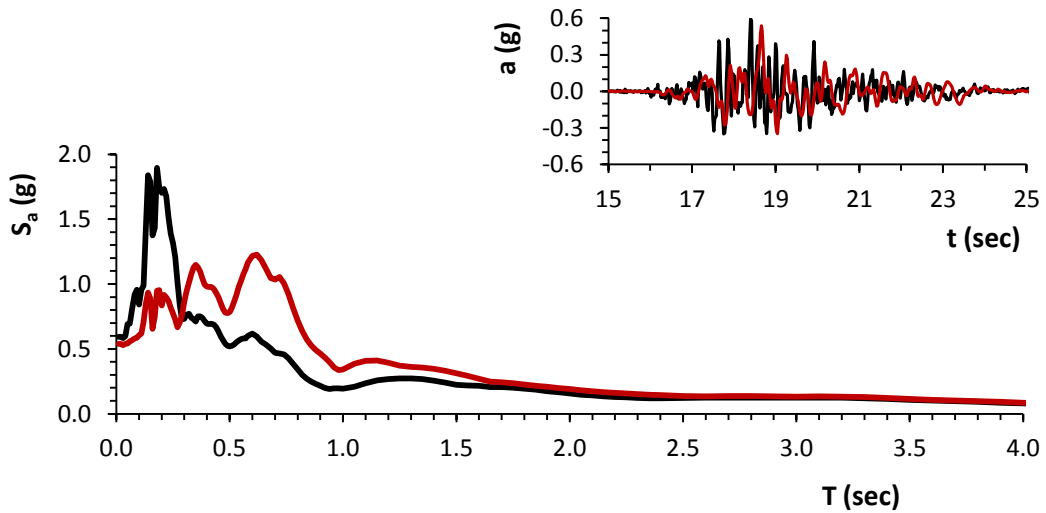
**Σχήμα 5.62:** Το φάσμα πλάτους Fourier από την ισοδύναμη ελαστική ανάλυση με το SHAKE2000 σε σύγκριση με τα αντίστοιχα από τις δύο συνιστώσες της καταγραφής.

# SHLC

22/2/2011



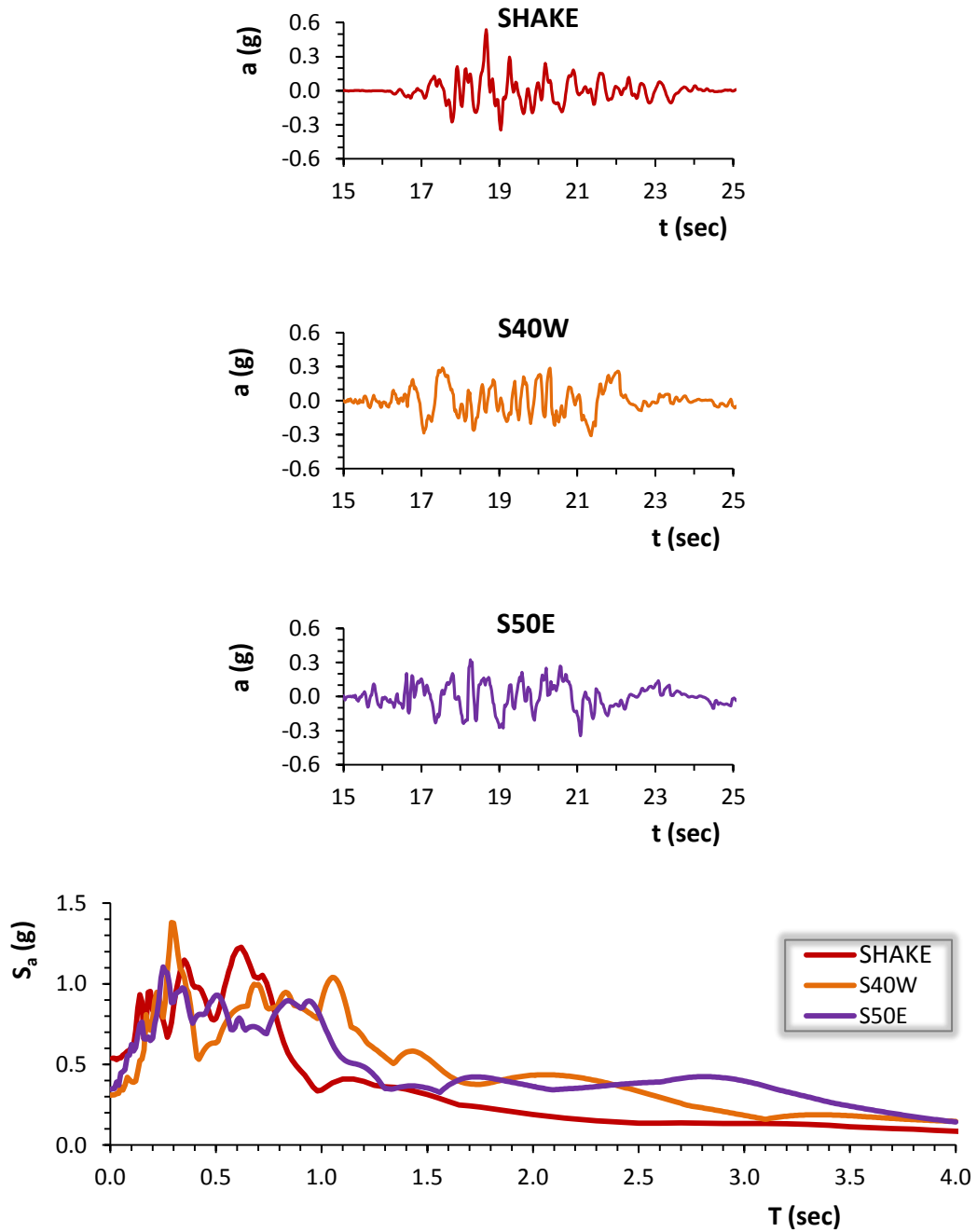
**Σχήμα 5.63:** Το εδαφικό προφίλ σε όρους ταχύτητας διατμητικών κυμάτων ( $V_s$ ), οι μέγιστες εδαφικές επιταχύνσεις ( $\max a$ ), η ποσοστιαία μεταβολή της γωνιακής παραμόρφωσης ( $\gamma$  %) και ο λόγος της απομείωσης του μέτρου διατμήσεως ( $G$ ) σε σχέση με το βάθος της εδαφικής στήλης.



**Σχήμα 5.64:** Η χρονοϊστορία επιταχύνσεων ( $a$ ), το ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων ( $S_a$ ) και το φάσμα του πλάτους Fourier μετά την ανάστροφη ισοδύναμη ελαστική ανάλυση με το SHAKE2000. Επίσης, ο συντελεστής φασματικής μεγέθυνσης  $\mathcal{A}$ . (δεσπόζουσα ιδιοπερίοδος εδάφους:  $T = 0.77$  sec)

SHLC

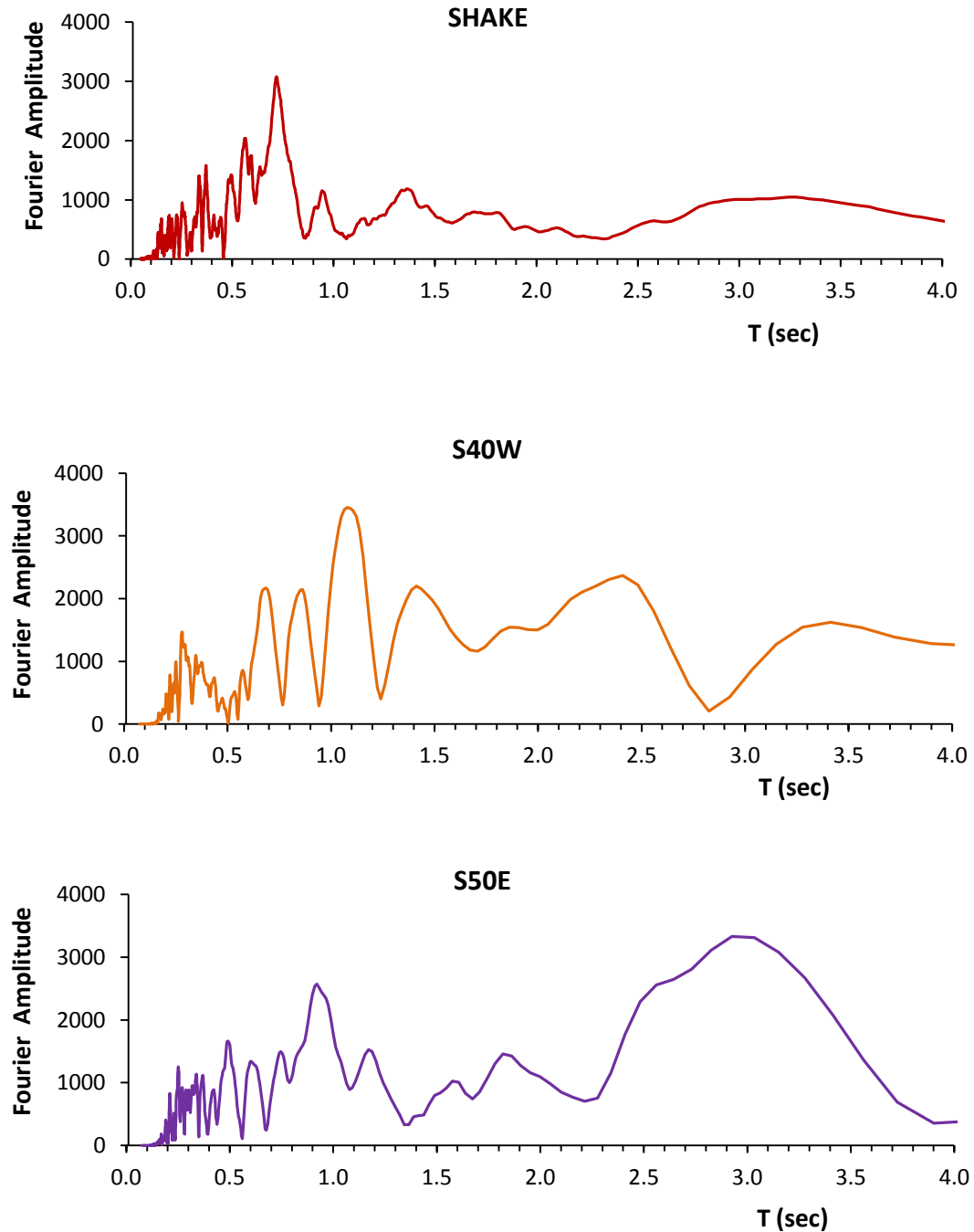
22 Φεβρουαρίου 2011



**Σχήμα 5.65:** Η χρονοϊστορία επιταχύνσεων ( $a$ ) και το ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων ( $S_a$ ) από την ισοδύναμη ελαστική ανάλυση με το SHAKE2000, σε σύγκριση με τα αντίστοιχα από τις δύο συνιστώσες της καταγραφής.

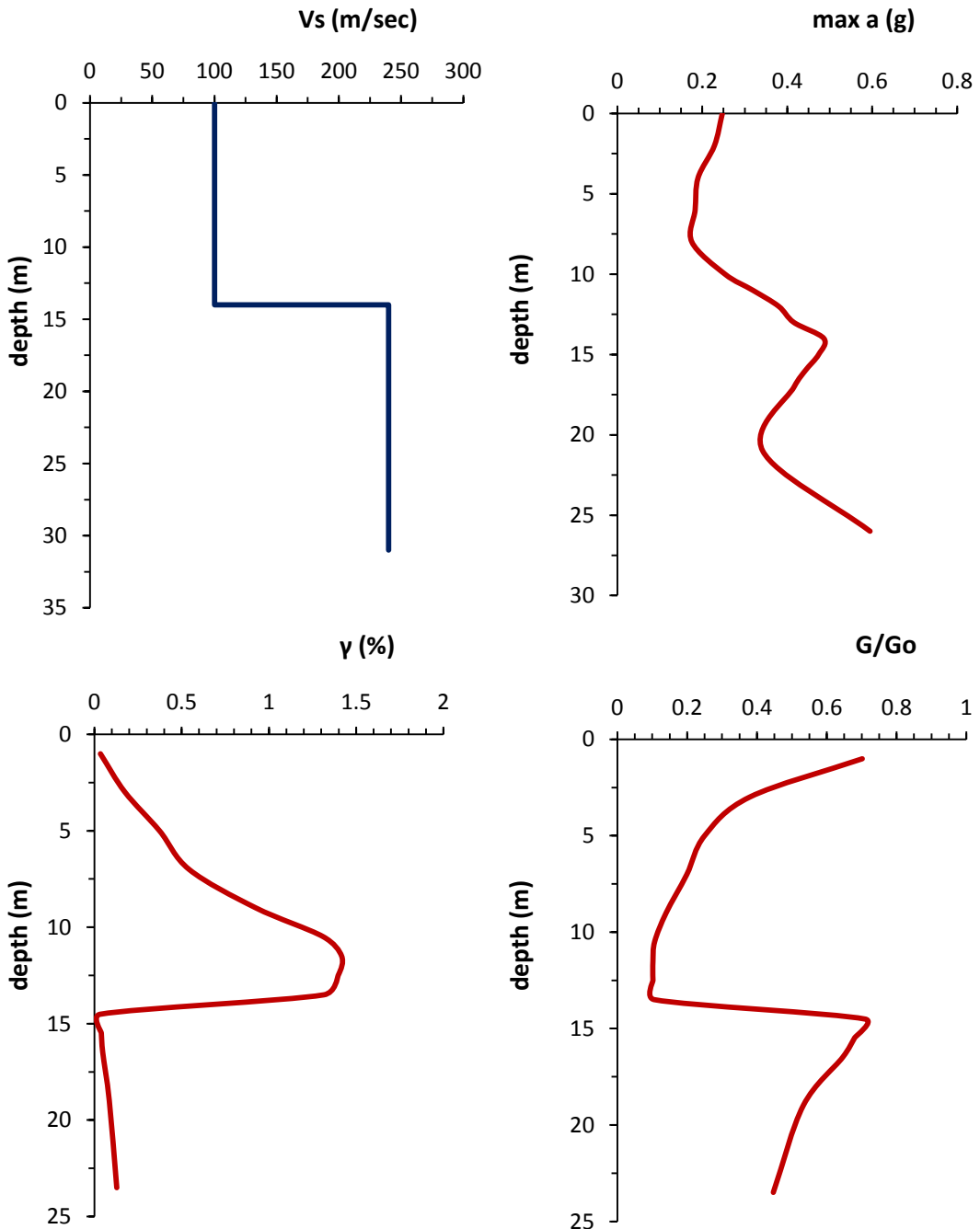
**SHLC**

**22 Φεβρουαρίου 2011**

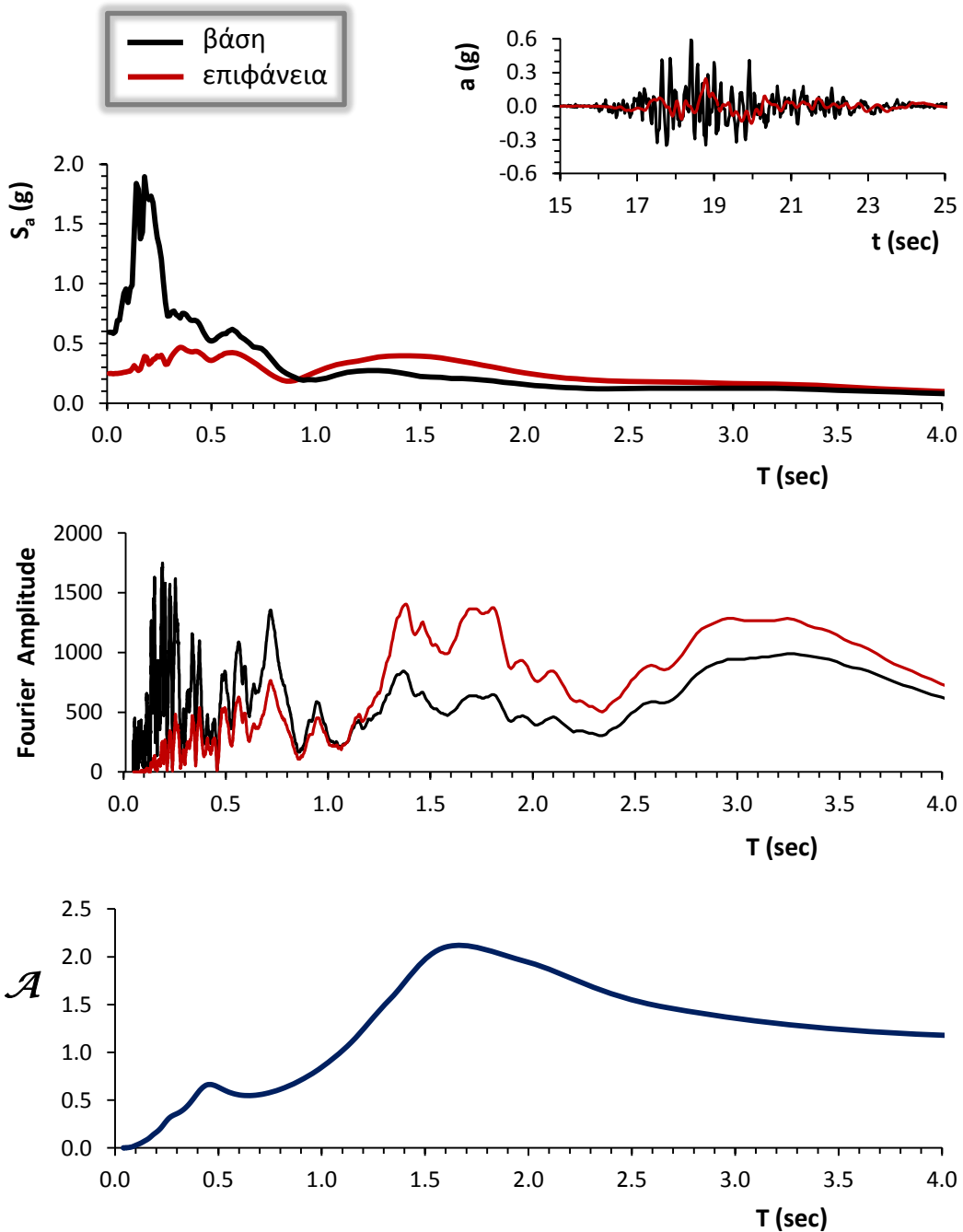


**Σχήμα 5.66:** Το φάσμα πλάτους Fourier από την ισοδύναμη ελαστική ανάλυση με το SHAKE2000 σε σύγκριση με τα αντίστοιχα από τις δύο συνιστώσες της καταγραφής.

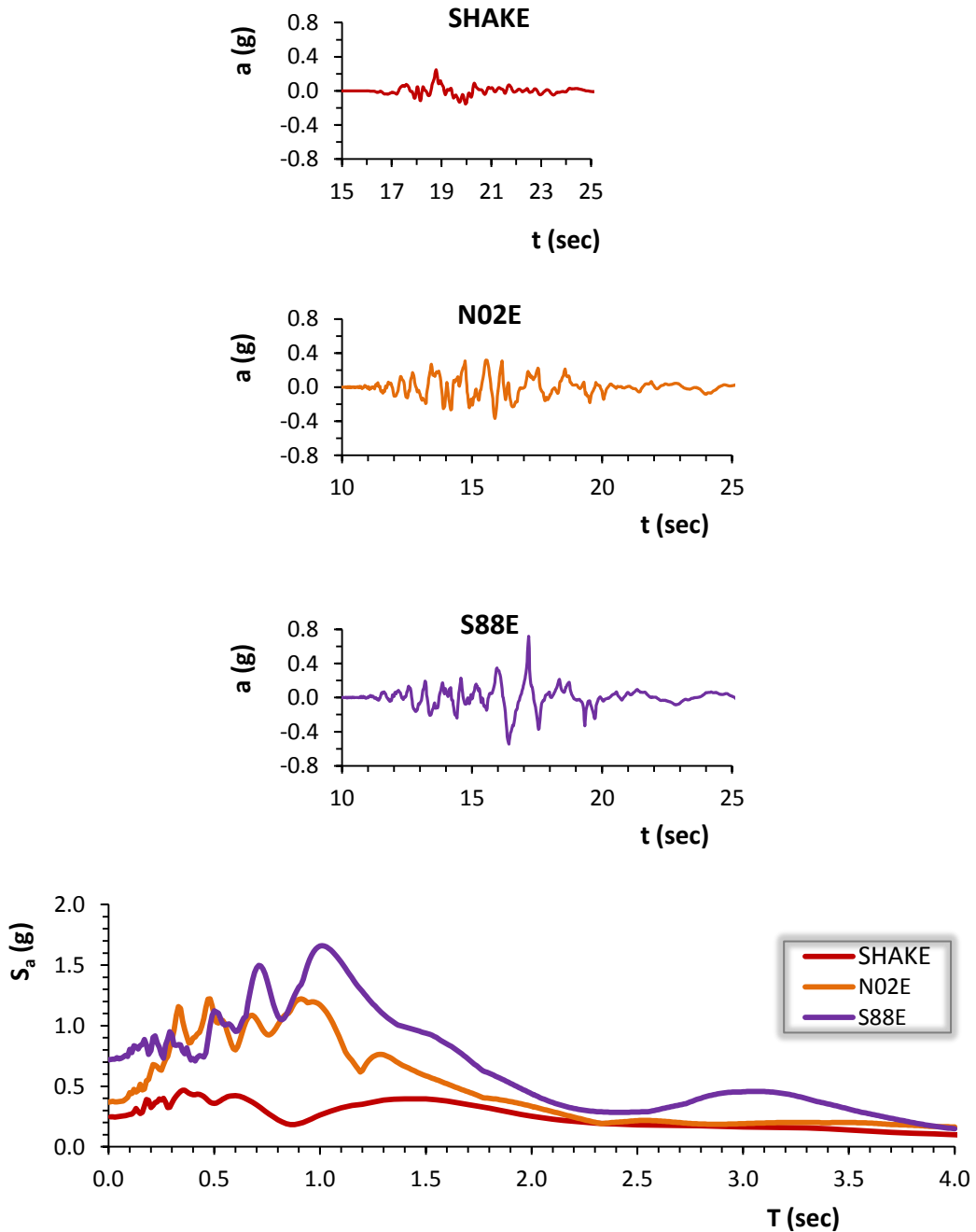




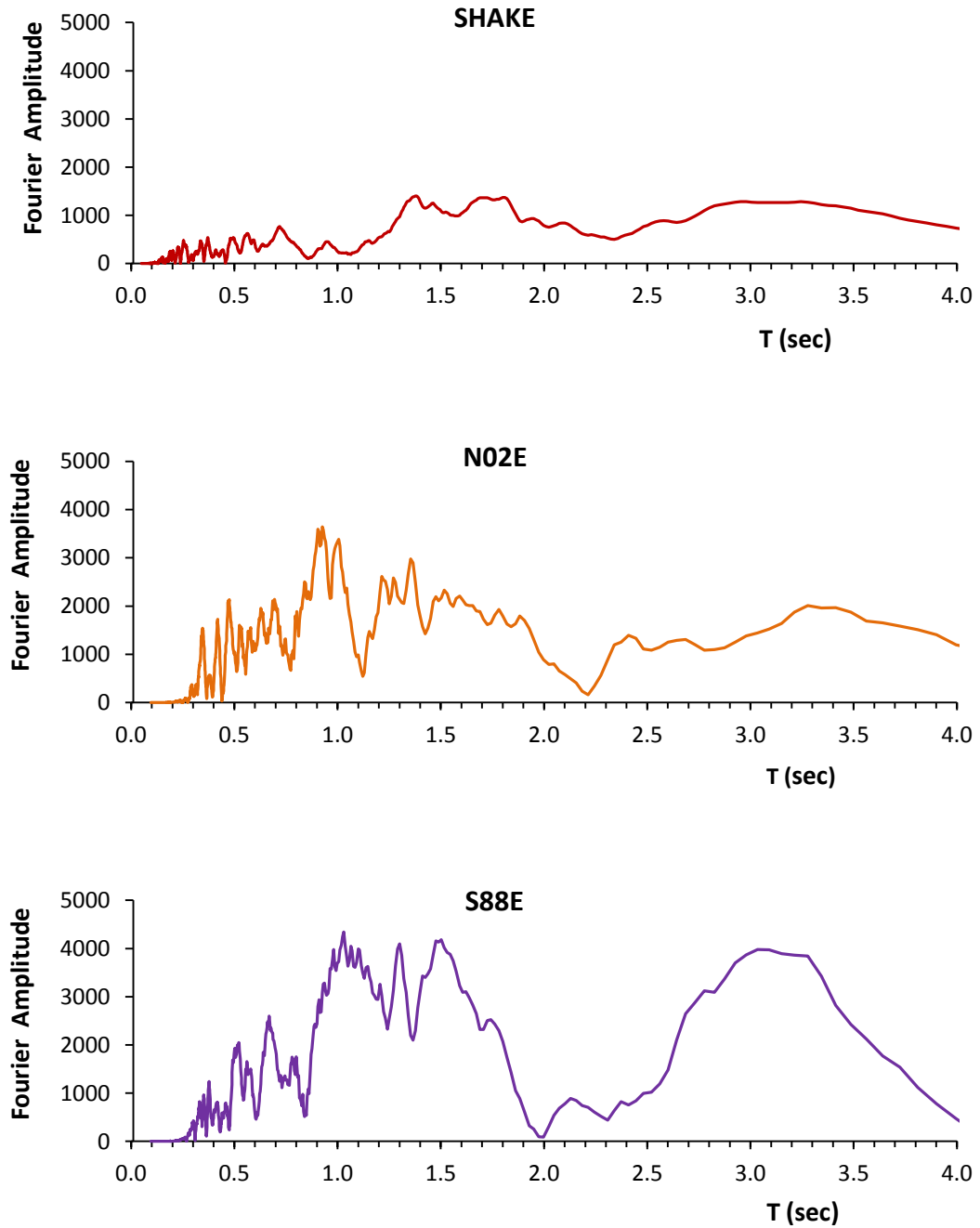
**Σχήμα 5.67:** Το εδαφικό προφίλ σε όρους ταχύτητας διατμητικών κυμάτων ( $V_s$ ), οι μέγιστες εδαφικές επιταχύνσεις (max a), η ποσοστιαία μεταβολή της γωνιακής παραμόρφωσης ( $\gamma$  %) και ο λόγος της απομείωσης του μέτρου διατμήσεως (G) σε σχέση με το βάθος της εδαφικής στήλης.



**Σχήμα 5.68:** Η χρονιοιστορία επιταχύνσεων ( $a$ ), το ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων ( $S_a$ ) και το φάσμα του πλάτους Fourier μετά την ανάστροφη ισοδύναμη ελαστική ανάλυση με το SHAKE2000. Επίσης, ο συντελεστής φασματικής μεγέθυνσης  $\mathcal{A}$ . (δεσπάζουσα ιδιοπερίοδος εδάφους:  $T = 0.97$  sec)



**Σχήμα 5.69:** Η χρονιοιστορία επιταχύνσεων ( $a$ ) και το ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων ( $S_a$ ) από την ισοδύναμη ελαστική ανάλυση με το SHAKE2000, σε σύγκριση με τα αντίστοιχα από τις δύο συνιστώσες της καταγραφής.

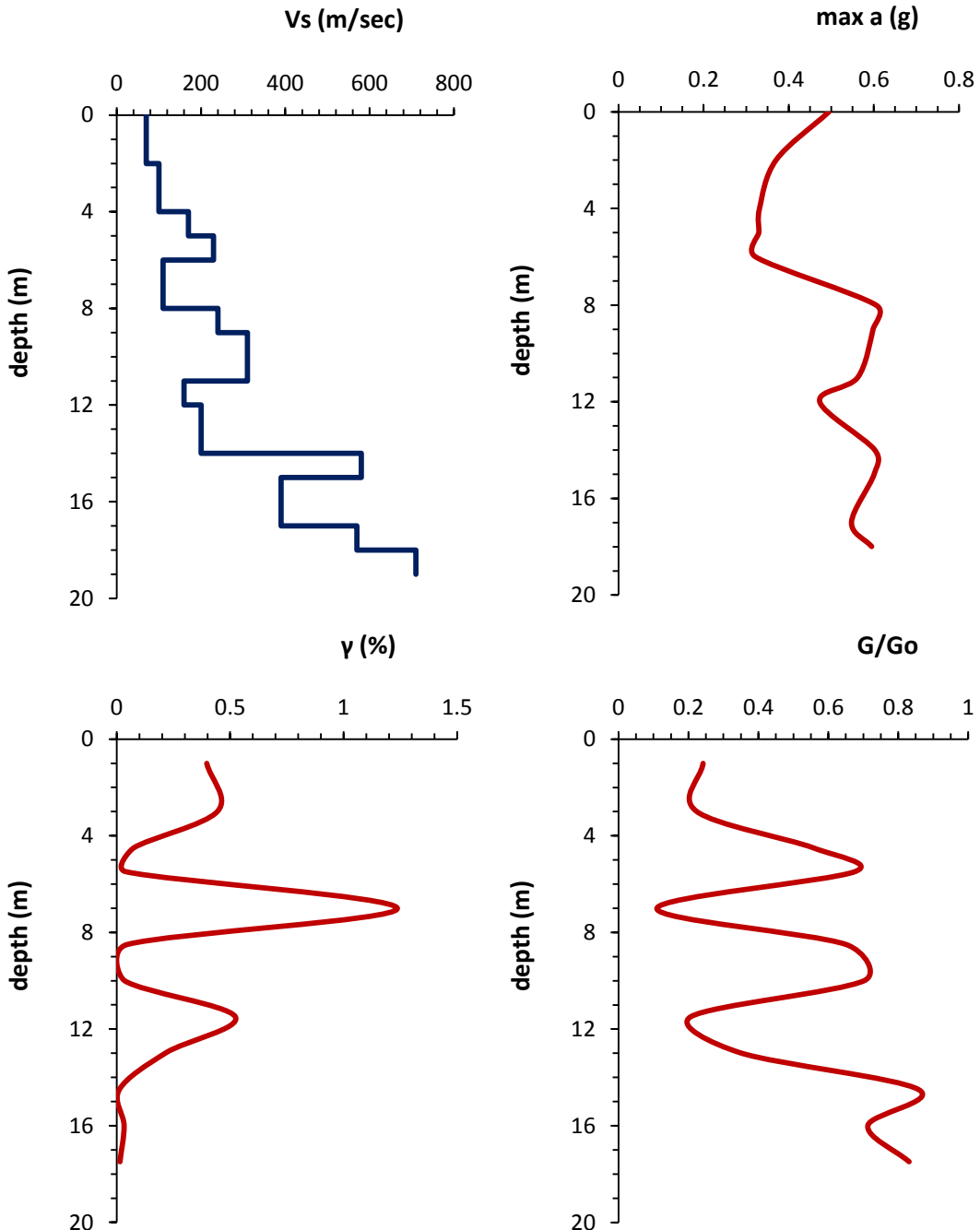


**Σχήμα 5.70:** Το φάσμα πλάτους Fourier από την ισοδύναμη ελαστική ανάλυση με το SHAKE2000 σε σύγκριση με τα αντίστοιχα από τις δύο συνιστώσες της καταγραφής.

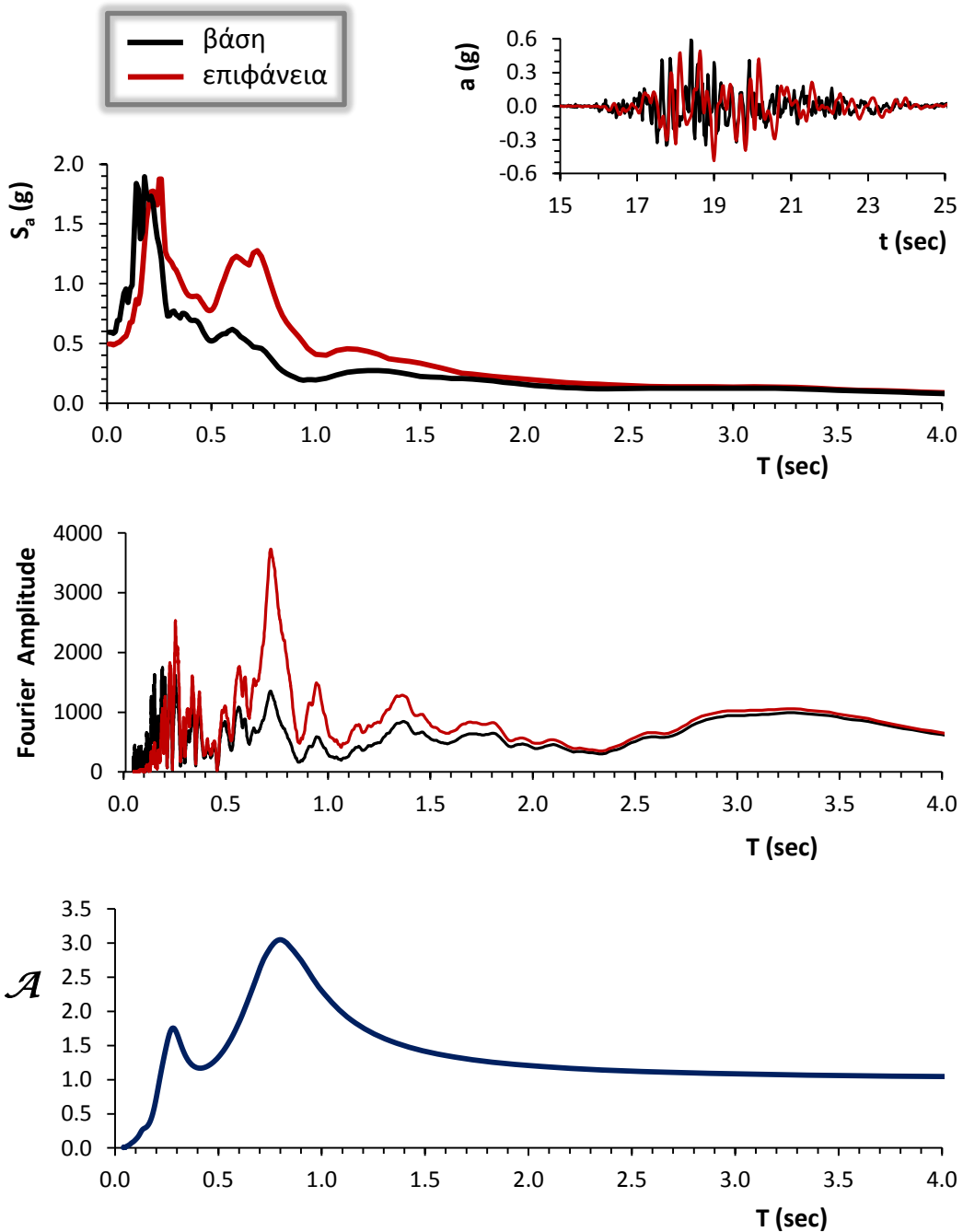


**Εικόνα 5.2 :** απόσταση μεταξύ του σταθμού REHS και του σημείου διεξαγωγής των δοκιμών CPT από τους Cubrinovski et al (2012).

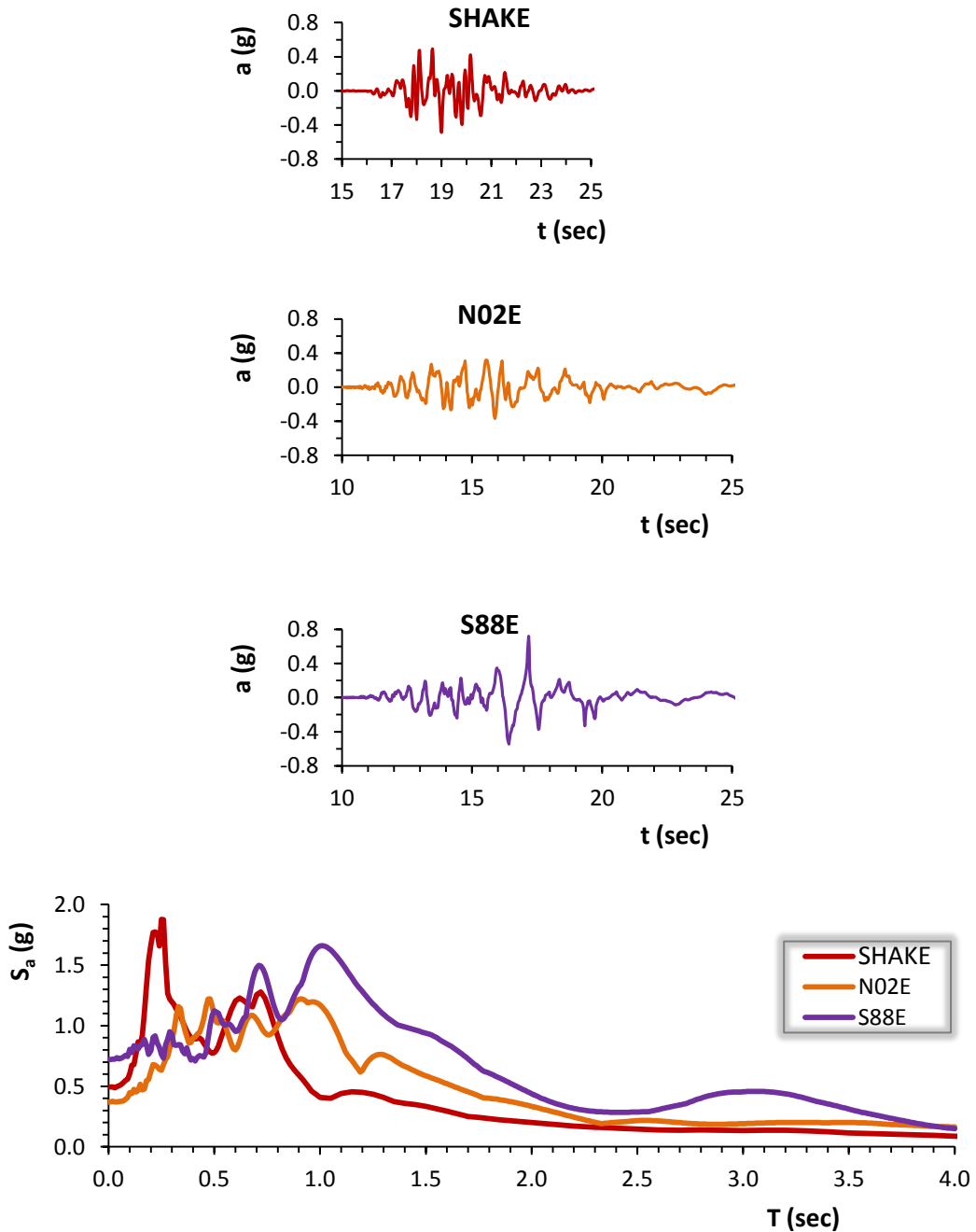
πηγή: Google Maps



**Σχήμα 5.71:** Το εδαφικό προφίλ σε όρους ταχύτητας διατμητικών κυμάτων ( $V_s$ ), οι μέγιστες εδαφικές επιταχύνσεις ( $\max a$ ), η ποσοστιαία μεταβολή της γωνιακής παραμόρφωσης ( $\gamma$  %) και ο λόγος της απομείωσης του μέτρου διατμήσεως ( $G$ ) σε σχέση με το βάθος της εδαφικής στήλης.

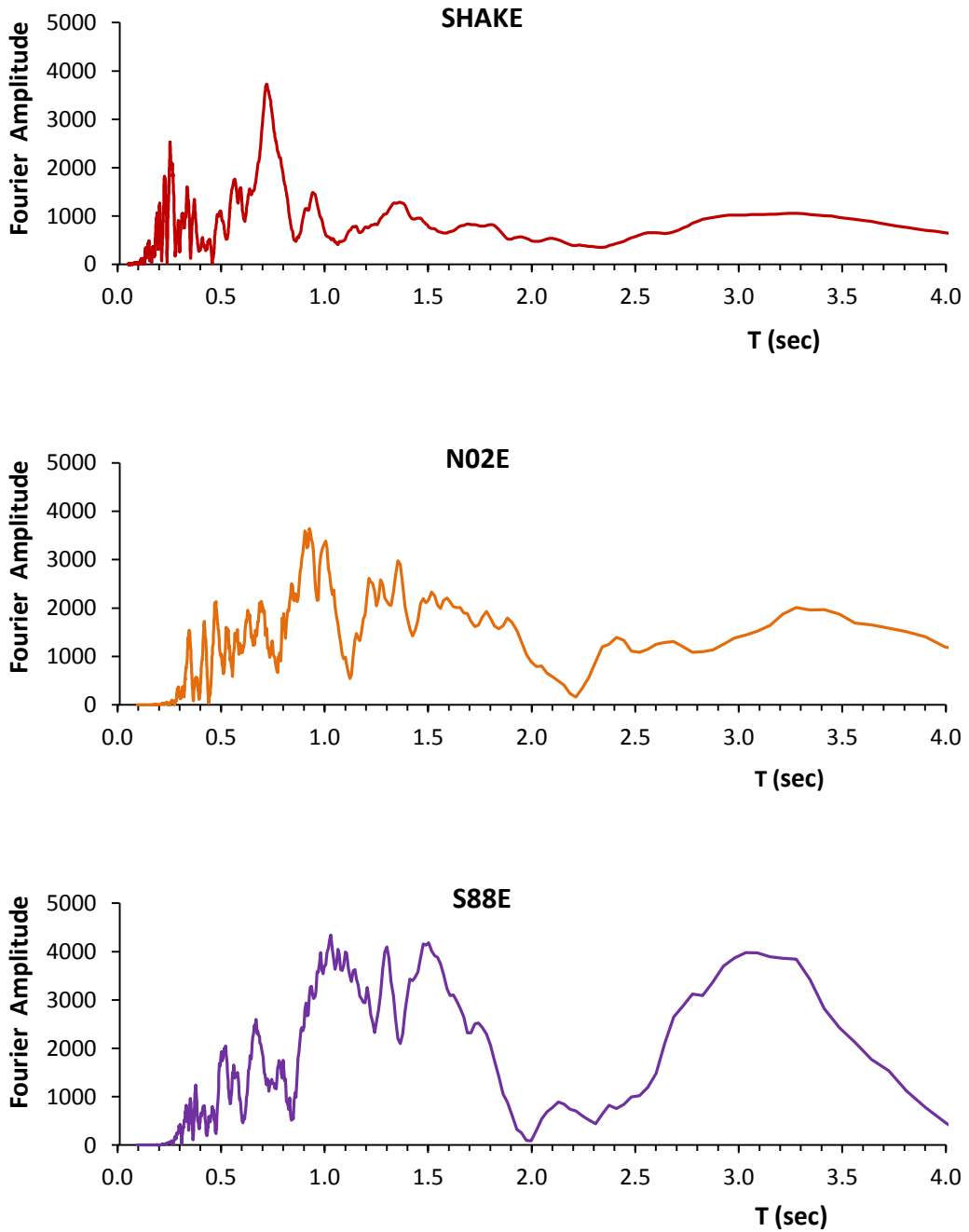


**Σχήμα 5.72:** Η χρονιοιστορία επιταχύνσεων ( $a$ ), το ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων ( $S_a$ ) και το φάσμα του πλάτους Fourier μετά την ανάστροφη ισοδύναμη ελαστική ανάλυση με το SHAKE2000. Επίσης, ο συντελεστής φασματικής μεγέθυνσης  $\mathcal{A}$ . (δεσπόζουσα ιδιοπερίοδος εδάφους:  $T = 0.39$  sec)



**Σχήμα 5.73:** Η χρονοϊστορία επιταχύνσεων ( $a$ ) και το ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων ( $S_a$ ) από την ισοδύναμη ελαστική ανάλυση με το SHAKE2000, σε σύγκριση με τα αντίστοιχα από τις δύο συνιστώσες της καταγραφής.





**Σχήμα 5.74:** Το φάσμα πλάτους Fourier από την ισοδύναμη ελαστική ανάλυση με το SHAKE2000 σε σύγκριση με τα αντίστοιχα από τις δύο συνιστώσες της καταγραφής.



SCALE 1:400 AT A3

REHS Site Location Plan

Figure 2

**Εικόνα 5.3 :** ο σταθμός REHS και το σημείο της γεώτρησης BH/CPT 103  
 πηγή: “Investigation into the collapse of the Pyne Gould Corporation Building and the Forsyth Barr Building stairs on 22 February 2011”

**MACHINE AUGER LOG**

SHEET 1 of 2

PROJECT:		DBH Christchurch Earthquake Building Investigation		JOB NUMBER:		5273927							
SITE LOCATION:		Christchurch		CLIENT:		Dept of Building and Housing							
CIRCUIT:		NZMG		BOREHOLE LOCATION:		REHS							
COORDINATES:		N 5,742,669 m E 2,481,312 m		R.L. DATUM:		Mean Sea Level							
DEPTH (m)	CORRECTION	METHOD	REMARKS	N-SPT TESTS			SAMPLER	DEPTH (m)	CORRECTION	SAMPLER	SOL / ROCK DESCRIPTION	REMARKS (INT)	DEPTH (m)
				XV	Y	SPT							
0.00		73 %	CB										0.00
0.25		22 %	SPT										0.25
0.50		43 %	CB										0.50
0.75		67 %	SPT										0.75
1.00		76 %	TT										1.00
1.25		100 %	SPT										1.25
1.50		67 %	TT										1.50
1.75		46 %	SPT										1.75
2.00		90 %	TT										2.00
2.25		100 %	SPT										2.25
2.50		80 %	TT										2.50
2.75		100 %	SPT										2.75
3.00		59 %	SPT										3.00

DATE STARTED:	13/6/11	DRILLED BY:	Pro DM (Auck) Ltd
DATE FINISHED:	13/6/11	EQUIPMENT:	Edson Tractor Rig
LOGGED BY:	G.J.G.	DRILL METHOD:	CB and TT
SHEAR VANE No:		DRILL FLUID:	Water and mud
		DIAMETER/INCLINATION:	- / 90°

COMMENTS: 0m = top of borehole not top of concrete pad. Co-ordinates from hand held GPS. SN = Solid N case SPT. Most core losses not shown for clarity of log. Core losses assumed to be a result of matrix being washed away during drilling.
--

FOR EXPLANATION OF SYMBOLS AND ABBREVIATIONS SEE KEY SHEET	Revision A
--	------------

**Εικόνα 5.4 :** γεώτρηση BH/CPT 103, (1 από 2)  
 πηγή: "Investigation into the collapse of the Pyne Gould Corporation Building and the Forsyth Barr Building stairs on 22 February 2011"

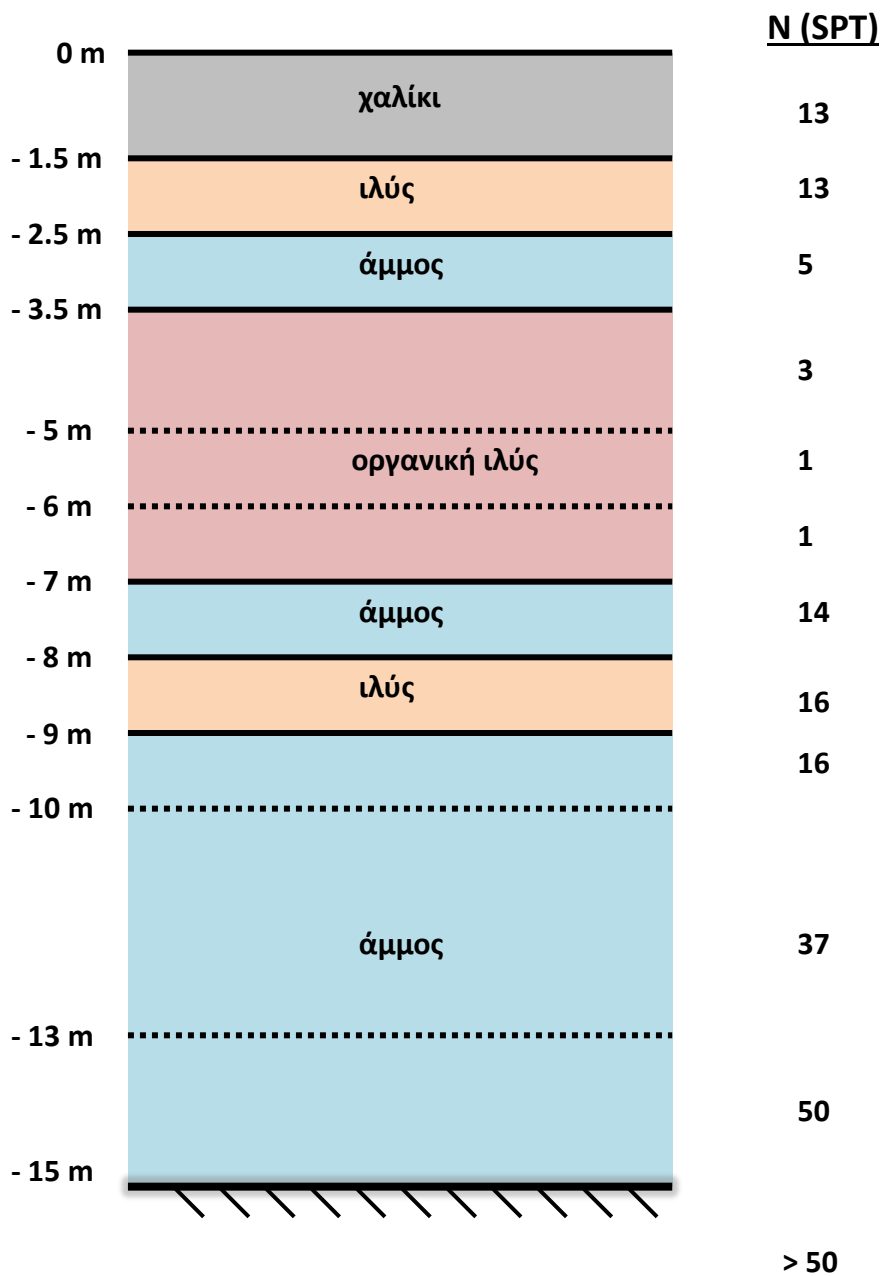
**MACHINE AUGER LOG**

SHEET 2 of 2

PROJECT: DBH Christchurch Earthquake Building Investigation				JOB NUMBER: 5273927										
SITE LOCATION: Christchurch				CLIENT: Dept of Building and Housing										
CIRCUIT: NZMG				BOREHOLE LOCATION: REHS										
COORDINATES: N 5742.669 m E 2481.312 m				R.L.: DATUM: Mean Sea Level										
DEPTH (m)	DRILLING			IN-SITU TESTS			SAMPLER	DEPTH (m)	CORRECTION LOG	UNIT	MOISTURE	SOIL / ROCK DESCRIPTION	REMARKS UNIT	DEPTH (m)
	FLUID LOSS	WATER LEVEL	COMPLETION	IV	V	SPT								
11.0		80 %	TT			13 12 N=3.7						Medium dense, fine to medium SAND, with pebbles (20mm) of silt, trace silt grey, moist.		11
12.0		35 %	TT									Medium dense, fine to coarse GRAVEL, grey, moist. fines washed away.		12
12.5												No core: 1.5-1.8m (0.3m)		12
13.0		90 %	TT									Medium dense, fine to coarse SAND, minor fine to coarse gravel, grey brown, moist. Gravel rounded to sub rounded, SW, grey/white.		13
14.0		100 %	SPT			20 31 13 N=50+ 4r (25mm)								14
15.0												END OF LOG @ 14.45 m		15
16.0														16
17.0														17
18.0														18
19.0														19
DATE STARTED: 12/8/11				DRILLED BY: Pro Drill (Auck) Ltd				COMMENTS:						
DATE FINISHED: 13/8/11				EQUIPMENT: Edson Tractor/Rig				0m = top of borehole not top of concrete pad. Co-ordinates from hand held GPS.						
LOGGED BY: GJG				DRILL METHOD: OS and TT				SN = Solid N case SPT. Most core losses not shown for clarity of log. Core losses assumed to be a result of matrix being washed away during drilling.						
SHEAR VANE No:				DRILL FLUID: Water and mud										
				DIAMETER/INCLINATION: - / 90°										
FOR EXPLANATION OF SYMBOLS AND ABBREVIATIONS SEE KEY SHEET												Revised A		

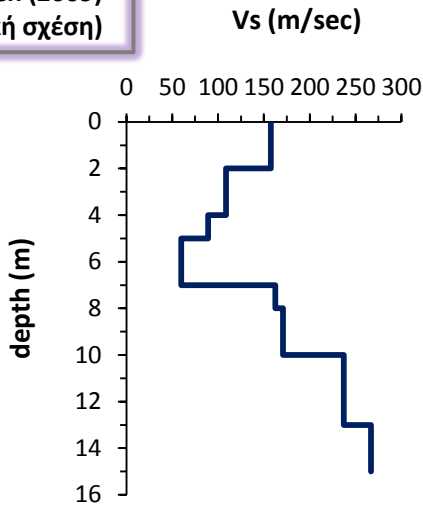
**Εικόνα 5.5 :** γεώτρηση BH/CPT 103, (2 από 2)

πηγή: "Investigation into the collapse of the Pyne Gould Corporation Building and the Forsyth Barr Building stairs on 22 February 2011"

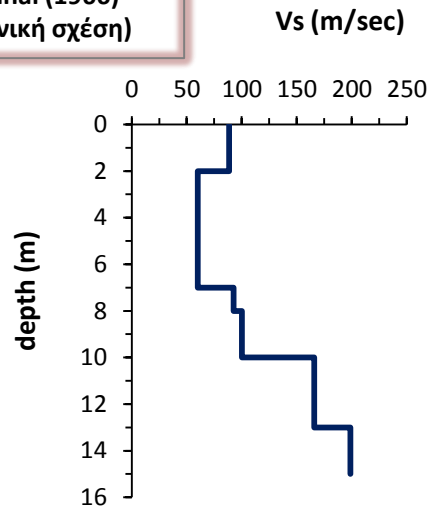


Εικόνα 5.6 : εδαφικό προφίλ στο σταθμό REHS με βάση τη γεώτρηση ΒΗ/CPT 103.

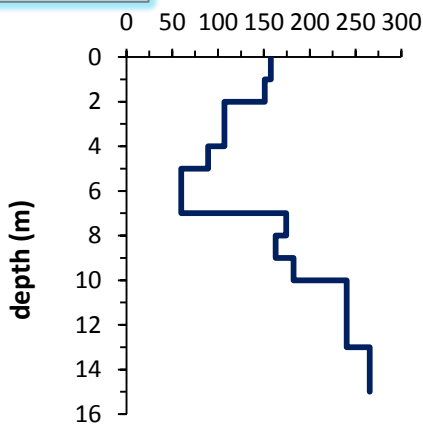
Dikmen (2009)  
(γενική σχέση)



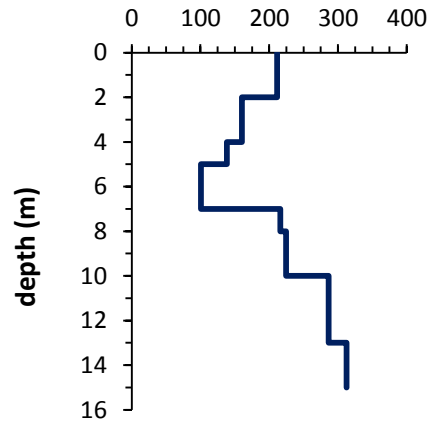
Kanai (1966)  
(γενική σχέση)



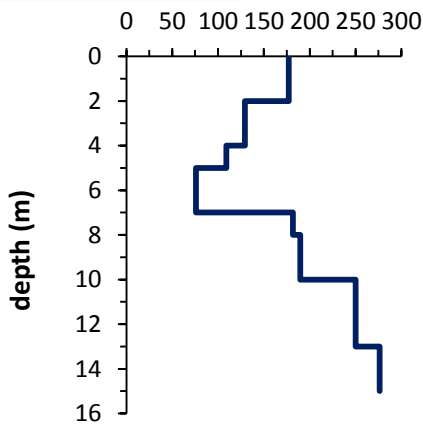
Dikmen (2009)  
(ειδικές σχέσεις)



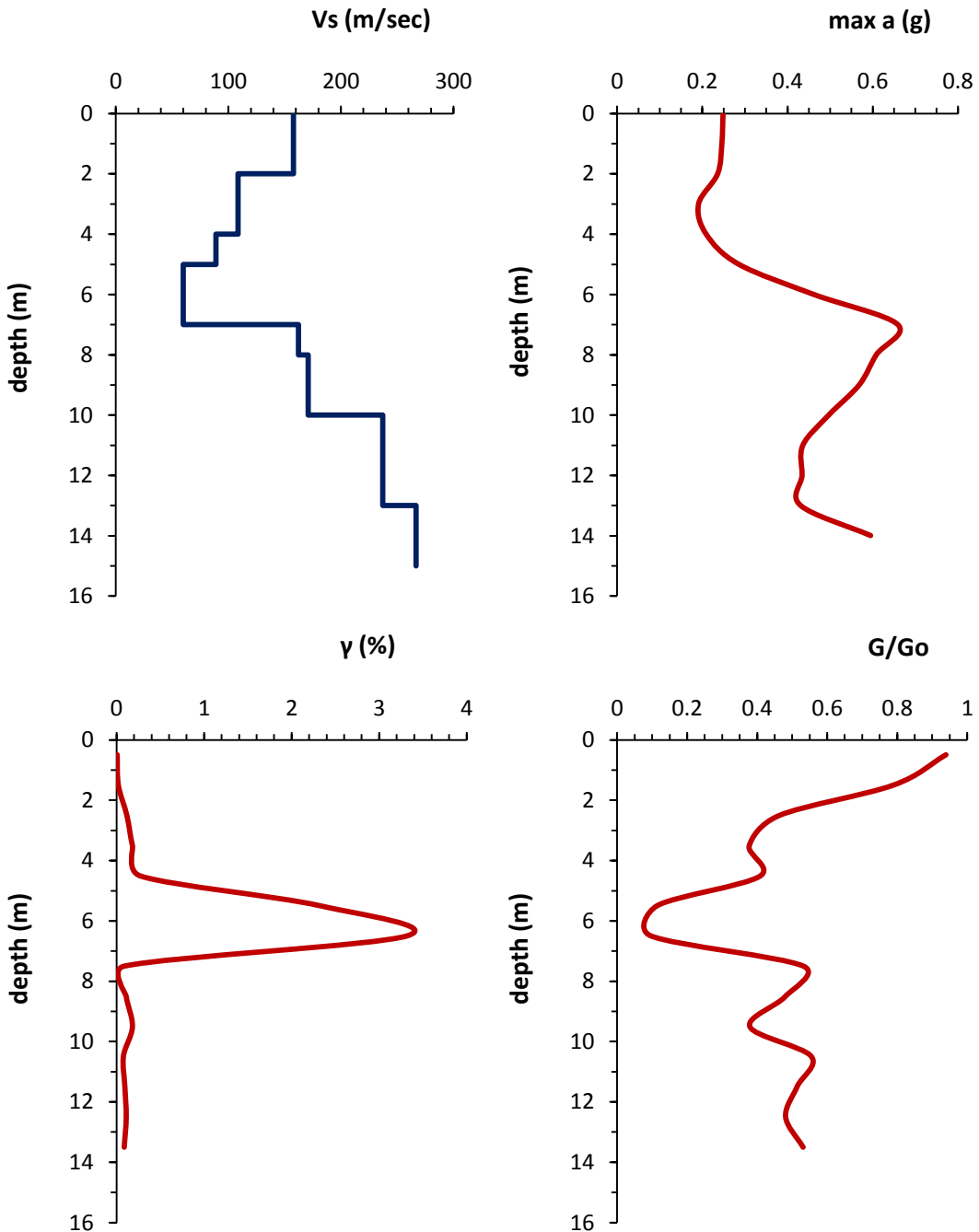
Sykora & Stokoe (1983)  
(σχέση για άμμους)



Imai & Yoshimura (1975)  
(γενική σχέση)



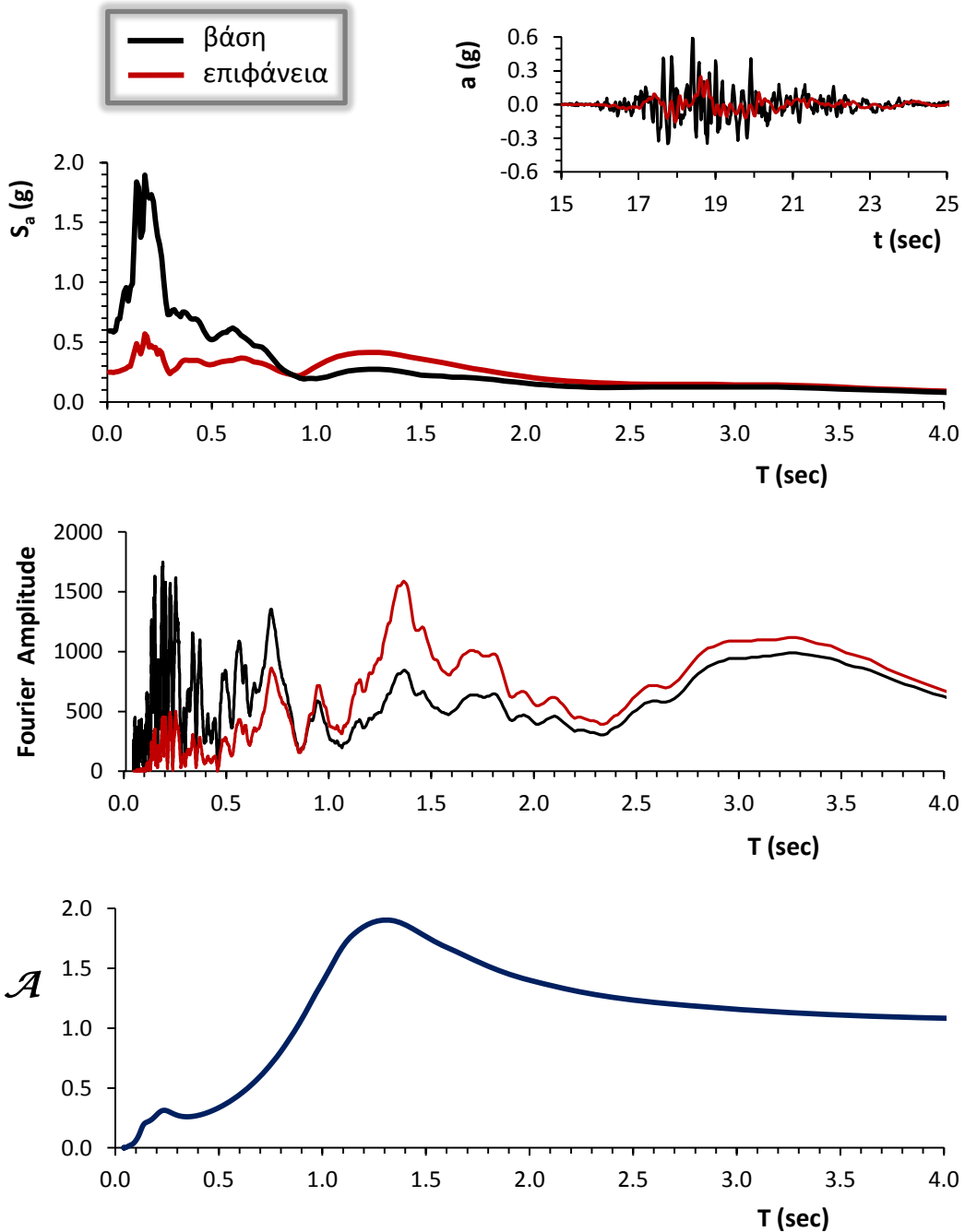
**Σχήμα 5.75:** τα εδαφικά προφίλ σε όρους ταχύτητας διατμητικών κυμάτων ( $V_s$ ) για τον σταθμό REHS όπως προκύπτουν από τη χρήση της εκάστοτε εμπειρικής σχέσης.

Ανάλυση 1<sup>η</sup>

**Σχήμα 5.76:** Το εδαφικό προφίλ σε όρους ταχύτητας διατμητικών κυμάτων ( $V_s$ ), οι μέγιστες εδαφικές επιταχύνσεις ( $\max a$ ), η ποσοστιαία μεταβολή της γωνιακής παραμόρφωσης ( $\gamma$  %) και ο λόγος της απομείωσης του μέτρου διατμήσεως ( $G$ ) σε σχέση με το βάθος της εδαφικής στήλης.



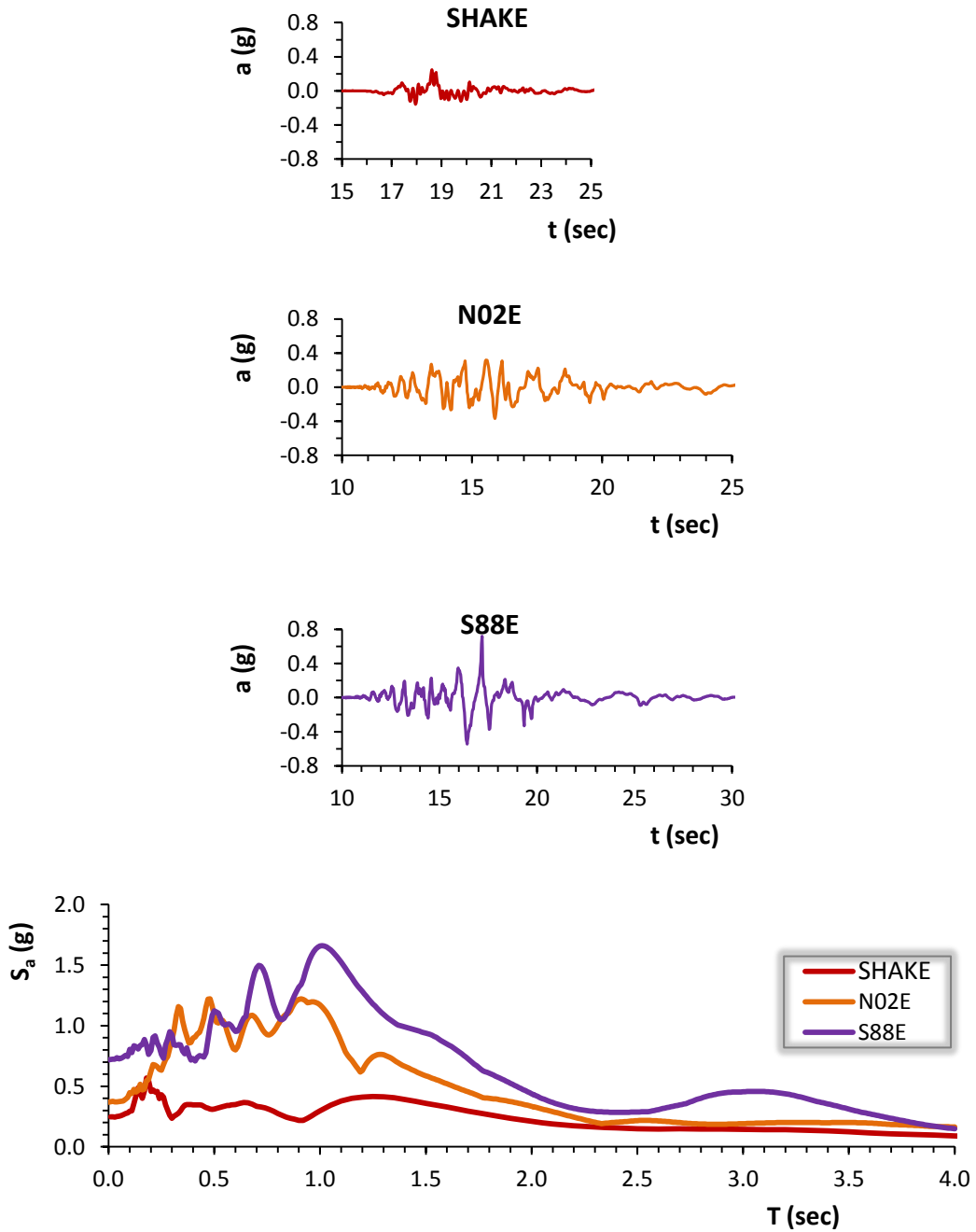
Ανάλυση 1<sup>η</sup>



**Σχήμα 5.77:** Η χρονιοιστορία επιταχύνσεων ( $a$ ), το ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων ( $S_a$ ) και το φάσμα του πλάτους Fourier μετά την ανάστροφη ισοδύναμη ελαστική ανάλυση με το SHAKE2000. Επίσης, ο συντελεστής φασματικής μεγέθυνσης  $\mathcal{A}$ . (δεσπάζουσα ιδιοπερίοδος εδάφους:  $T = 0.50$  sec)



Ανάλυση 1<sup>η</sup>



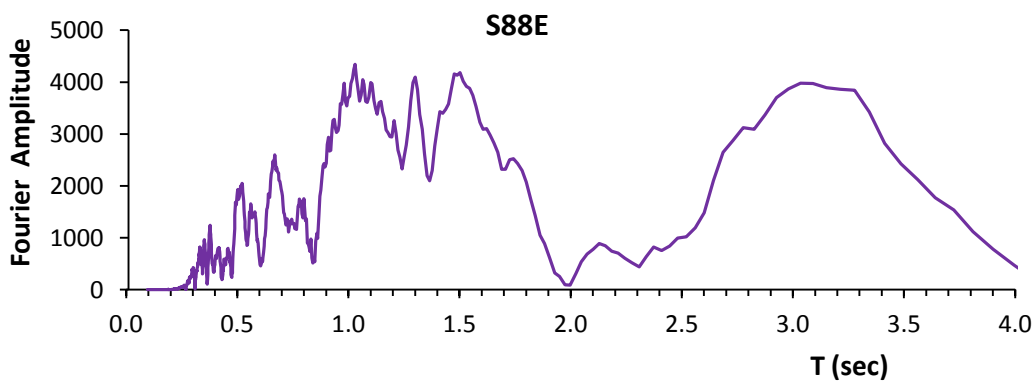
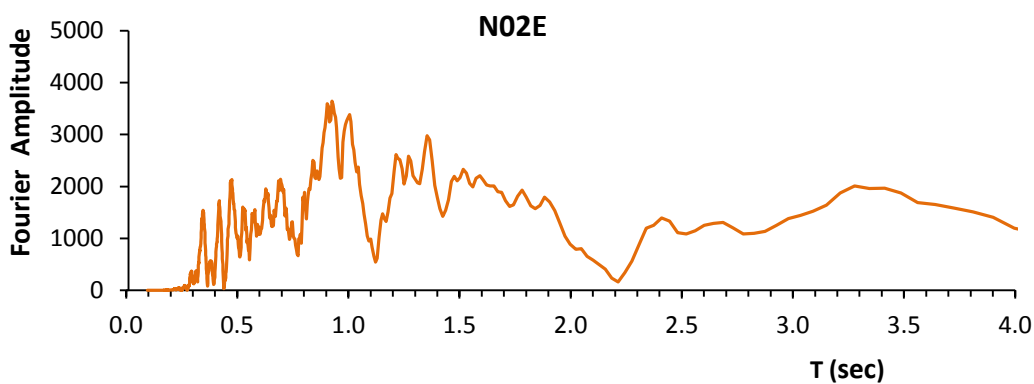
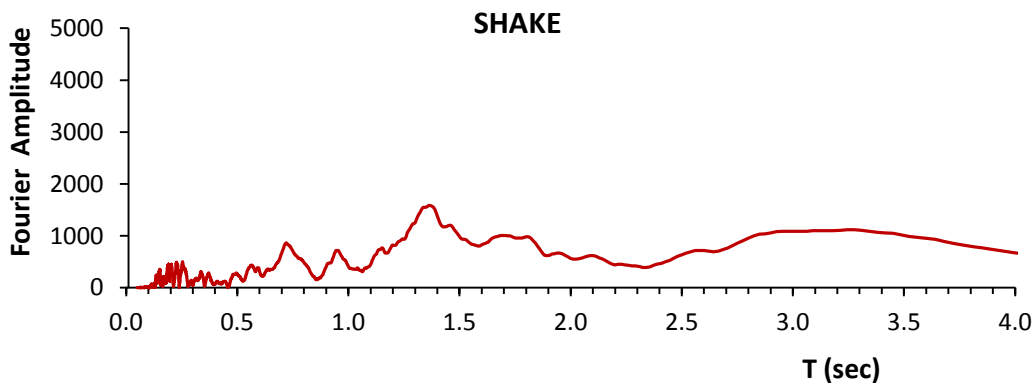
**Σχήμα 5.78:** Η χρονοϊστορία επιταχύνσεων ( $a$ ) και το ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων ( $S_a$ ) από την ισοδύναμη ελαστική ανάλυση με το SHAKE2000, σε σύγκριση με τα αντίστοιχα από τις δύο συνιστώσες της καταγραφής.

REHS

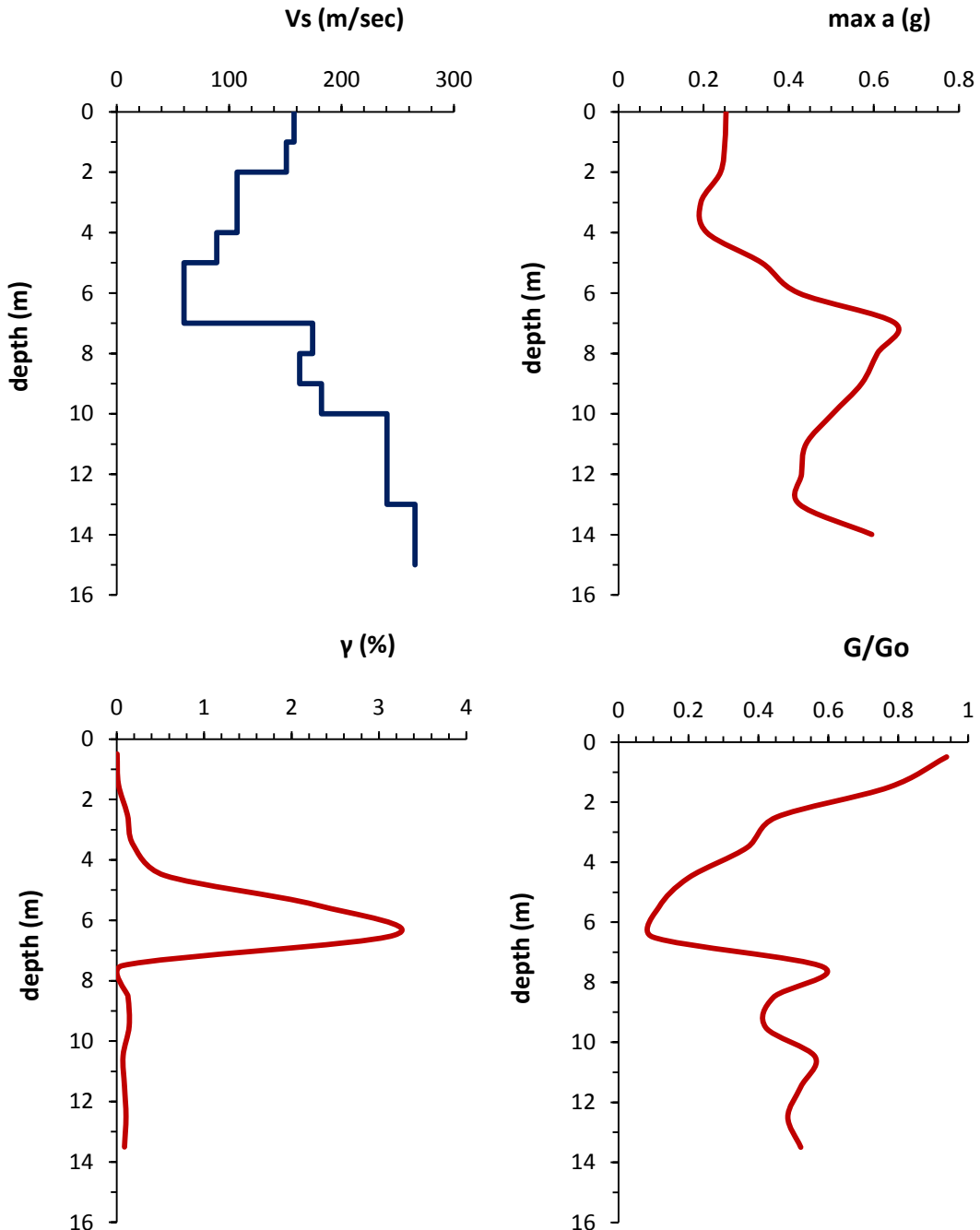
22 Φεβρουαρίου 2011

Dikmen (2009)  
(γενική σχέση)

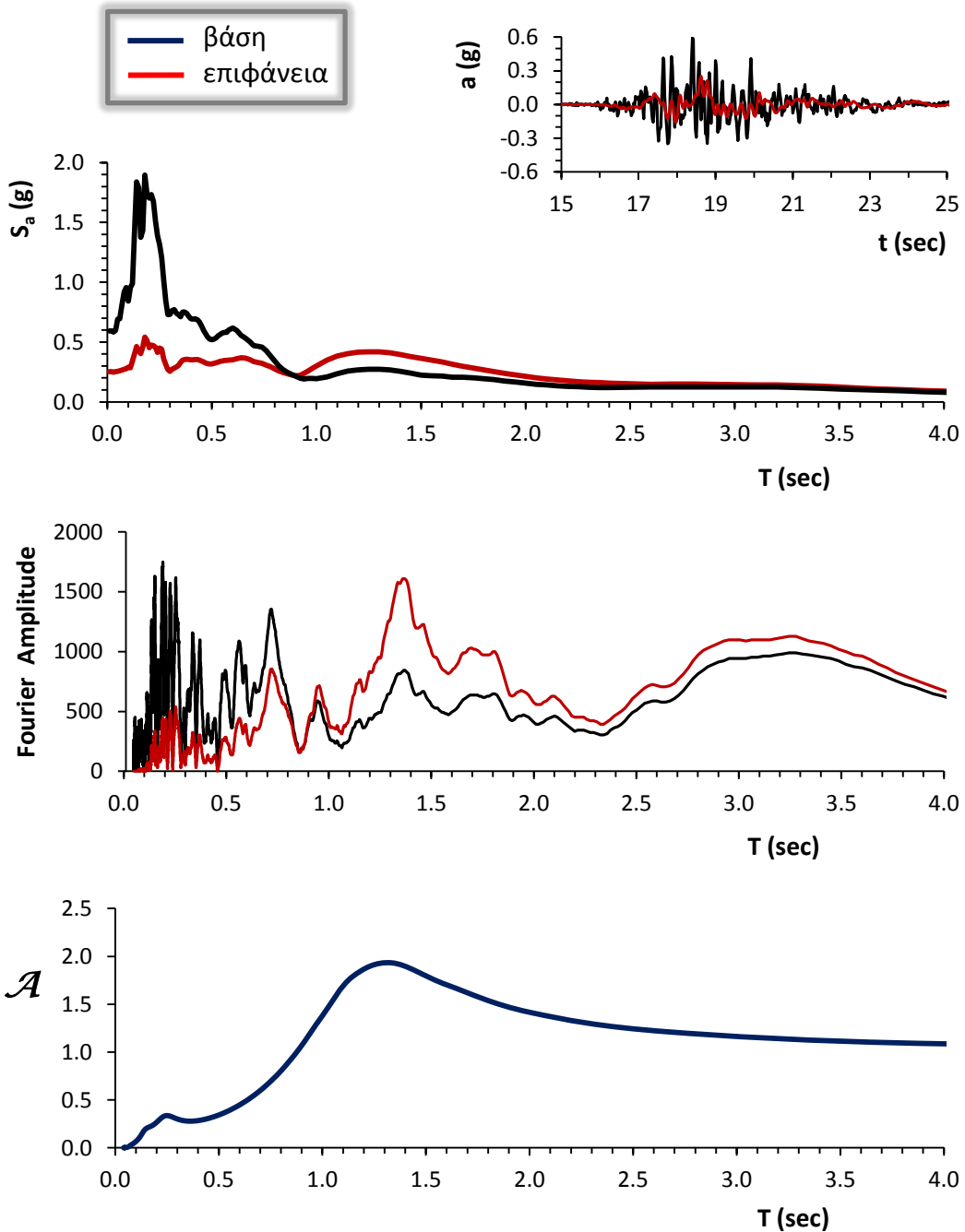
Ανάλυση 1<sup>η</sup>



Σχήμα 5.79: Το φάσμα πλάτους Fourier από την ισοδύναμη ελαστική ανάλυση με το SHAKE2000 σε σύγκριση με τα αντίστοιχα από τις δύο συνιστώσες της καταγραφής.

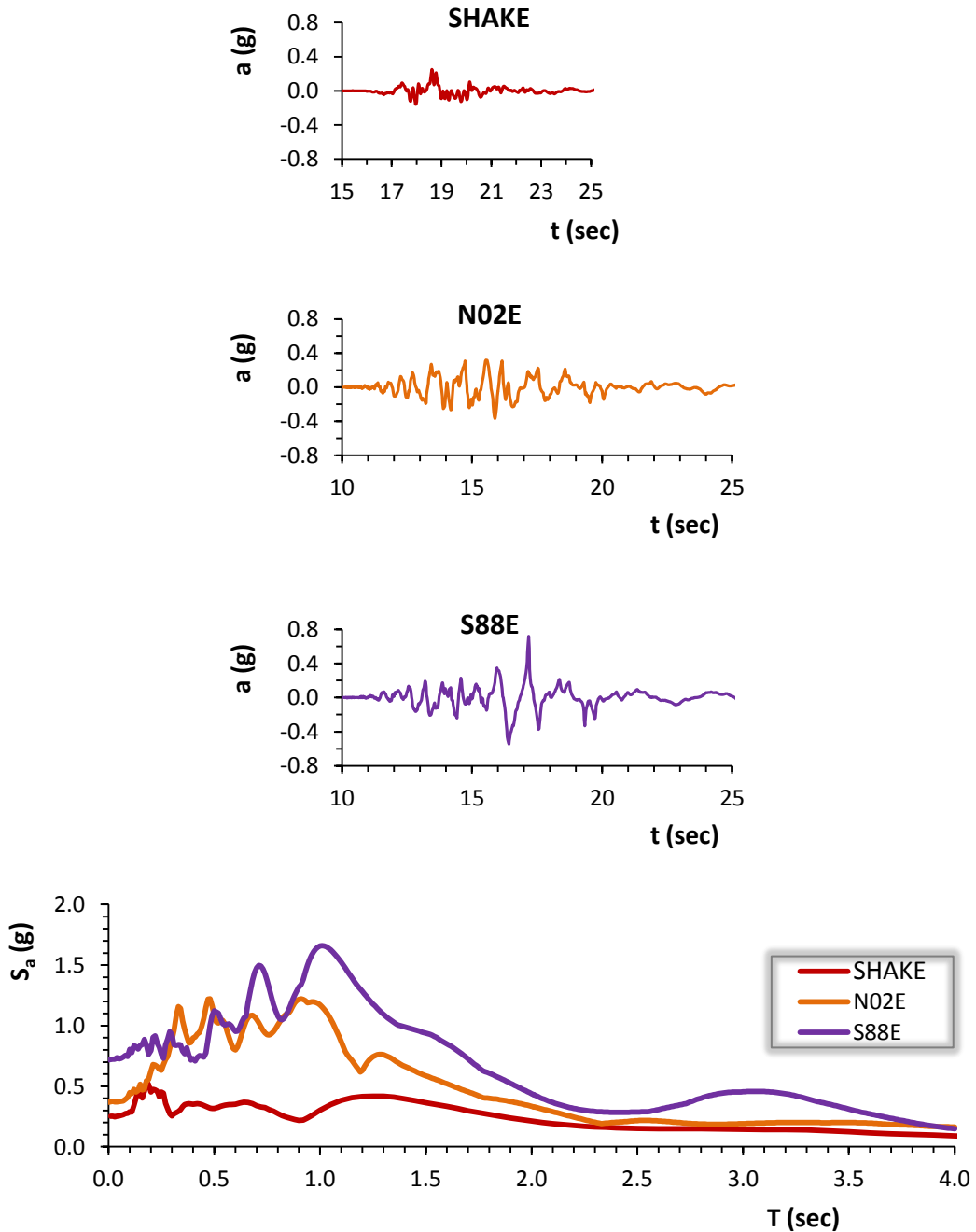
Ανάλυση 1<sup>η</sup>

**Σχήμα 5.80:** Το εδαφικό προφίλ σε όρους ταχύτητας διατμητικών κυμάτων ( $V_s$ ), οι μέγιστες εδαφικές επιταχύνσεις ( $\max a$ ), η ποσοστιαία μεταβολή της γωνιακής παραμόρφωσης ( $\gamma$  %) και ο λόγος της απομείωσης του μέτρου διατμήσεως ( $G$ ) σε σχέση με το βάθος της εδαφικής στήλης.

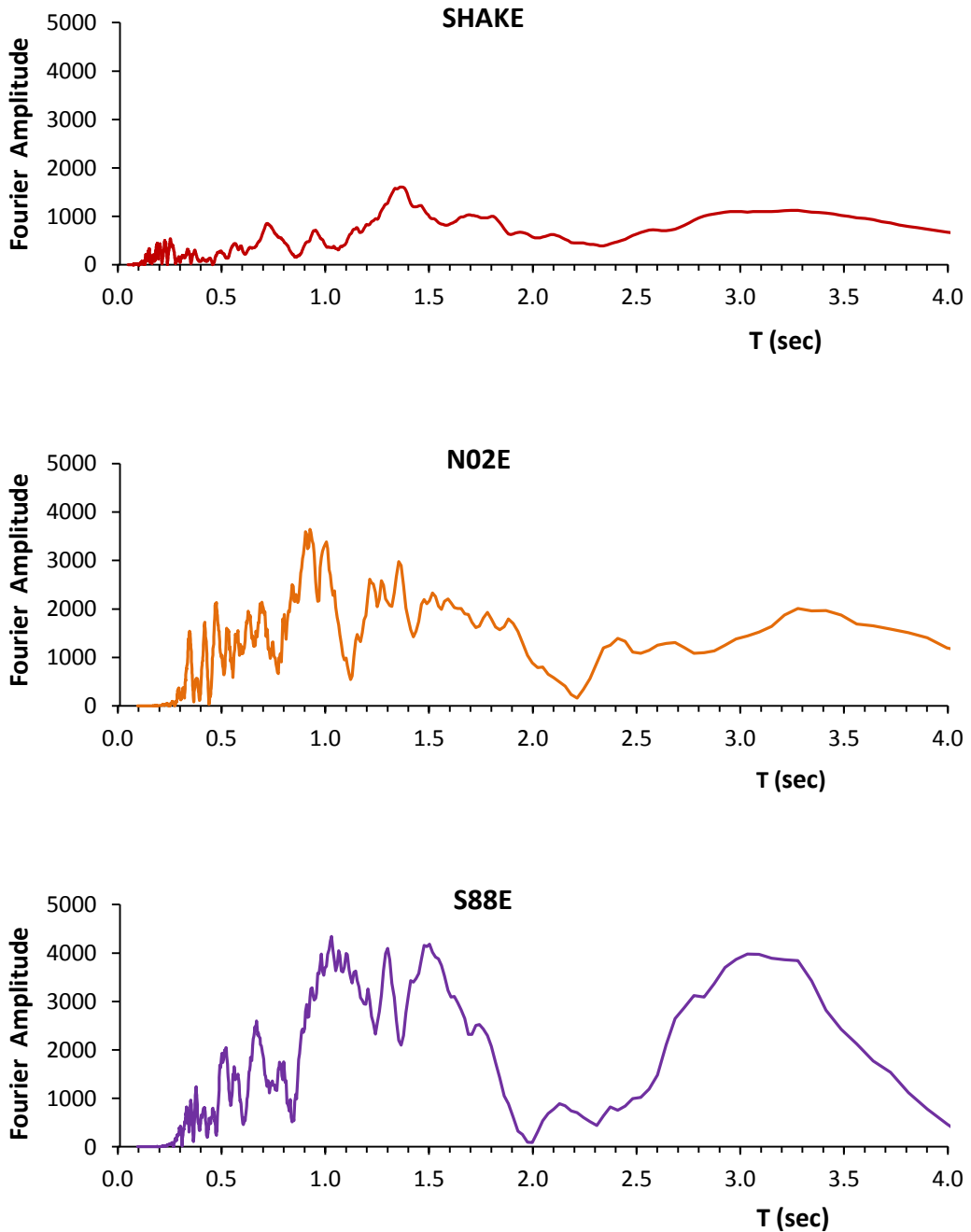
Ανάλυση 1<sup>η</sup>

**Σχήμα 5.81:** Η χρονοϊστορία επιταχύνσεων ( $a$ ), το ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων ( $S_a$ ) και το φάσμα του πλάτους Fourier μετά την ανάστροφη ισοδύναμη ελαστική ανάλυση με το SHAKE2000. Επίσης, ο συντελεστής φασματικής μεγέθυνσης  $\mathcal{A}$ . (δεσπάζουσα ιδιοπερίοδος εδάφους:  $T = 0.50$  sec)

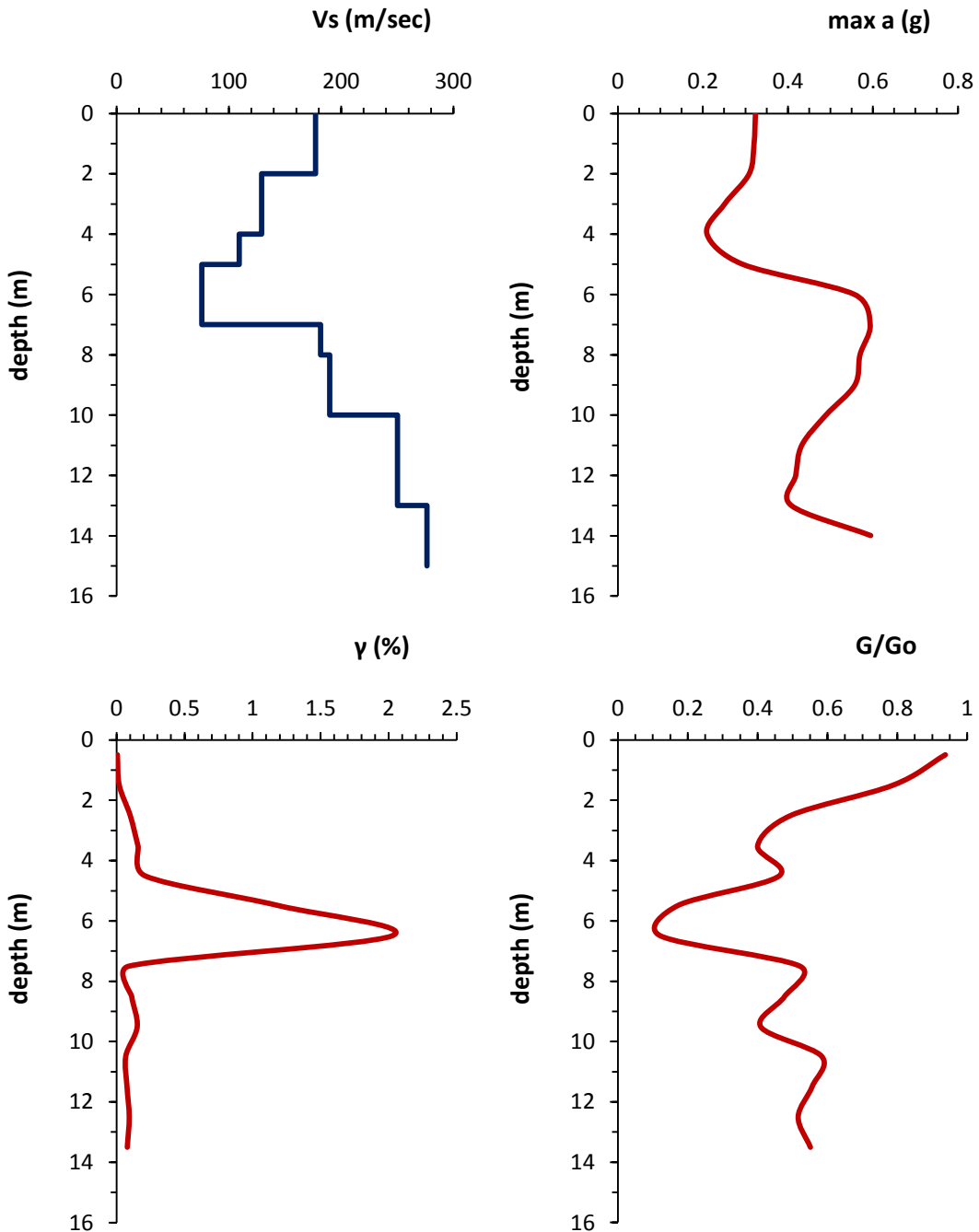
Ανάλυση 1<sup>η</sup>



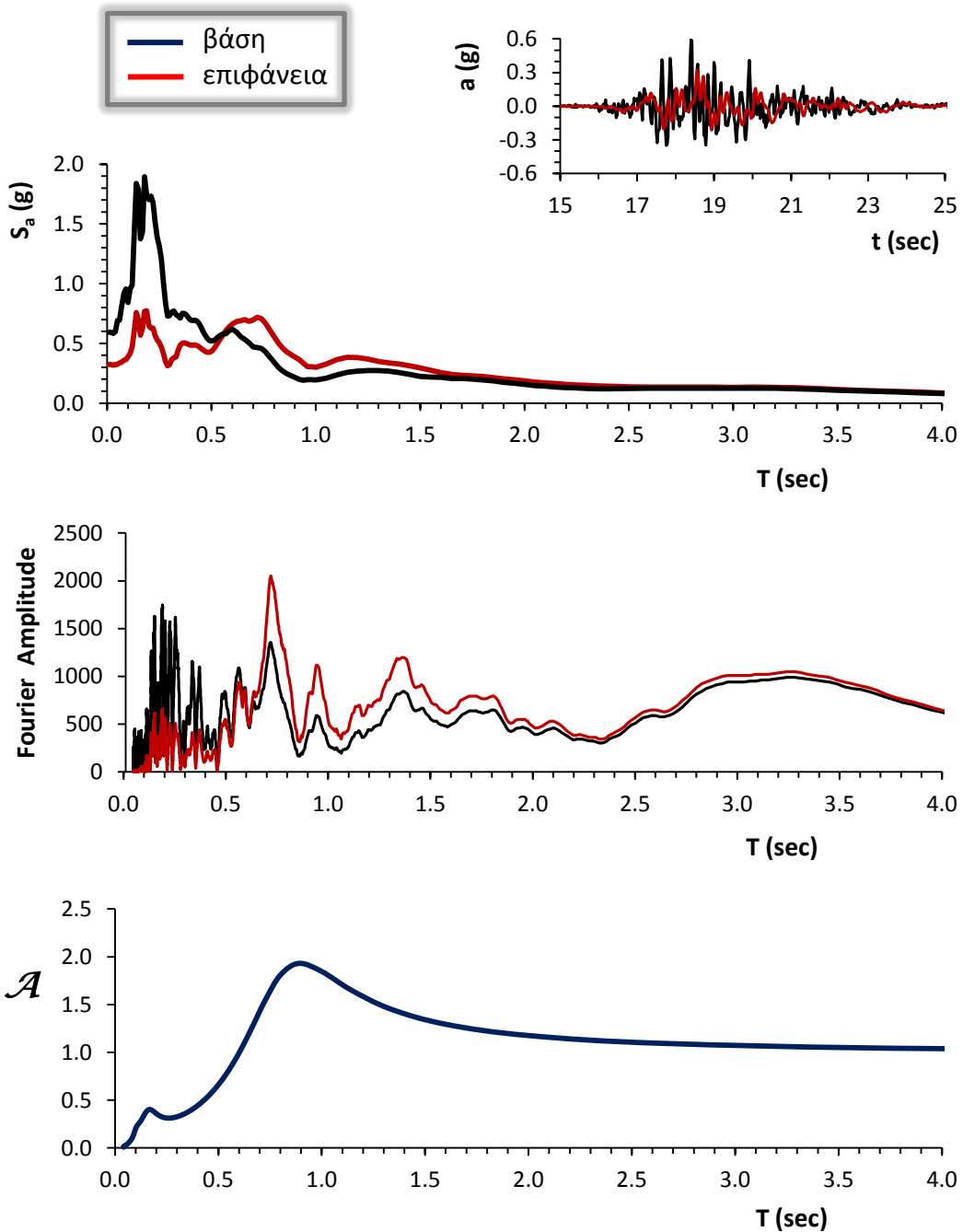
**Σχήμα 5.82:** Η χρονοϊστορία επιταχύνσεων ( $a$ ) και το ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων ( $S_a$ ) από την ισοδύναμη ελαστική ανάλυση με το SHAKE2000, σε σύγκριση με τα αντίστοιχα από τις δύο συνιστώσες της καταγραφής.



**Σχήμα 5.83:** Το φάσμα πλάτους Fourier από την ισοδύναμη ελαστική ανάλυση με το SHAKE2000 σε σύγκριση με τα αντίστοιχα από τις δύο συνιστώσες της καταγραφής.

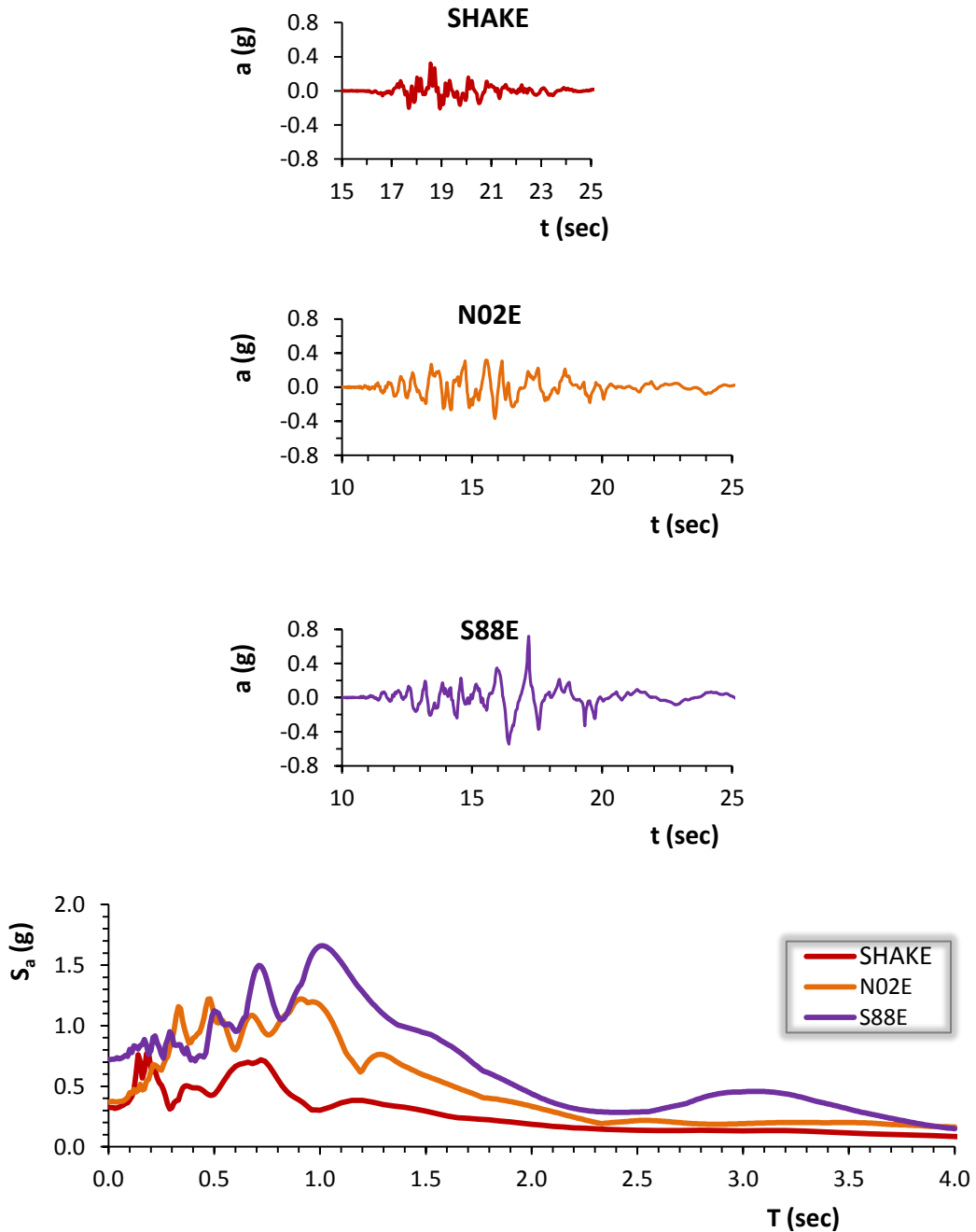
Ανάλυση 1<sup>η</sup>

**Σχήμα 5.84:** Το εδαφικό προφίλ σε όρους ταχύτητας διατμητικών κυμάτων ( $V_s$ ), οι μέγιστες εδαφικές επιταχύνσεις ( $\max a$ ), η ποσοστιαία μεταβολή της γωνιακής παραμόρφωσης ( $\gamma$  %) και ο λόγος της απομείωσης του μέτρου διατμήσεως ( $G$ ) σε σχέση με το βάθος της εδαφικής στήλης.

Ανάλυση 1<sup>η</sup>

**Σχήμα 5.85:** Η χρονιοιστορία επιταχύνσεων ( $a$ ), το ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων ( $S_a$ ) και το φάσμα του πλάτους Fourier μετά την ανάστροφη ισοδύναμη ελαστική ανάλυση με το SHAKE2000. Επίσης, ο συντελεστής φασματικής μεγέθυνσης  $\mathcal{A}$ . (δεσπόζουσα ιδιοπερίοδος εδάφους:  $T = 0.44$  sec)



Ανάλυση 1<sup>η</sup>

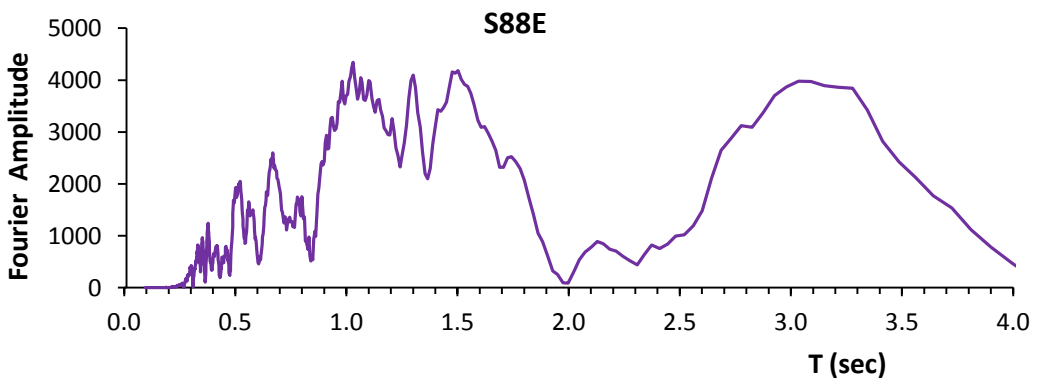
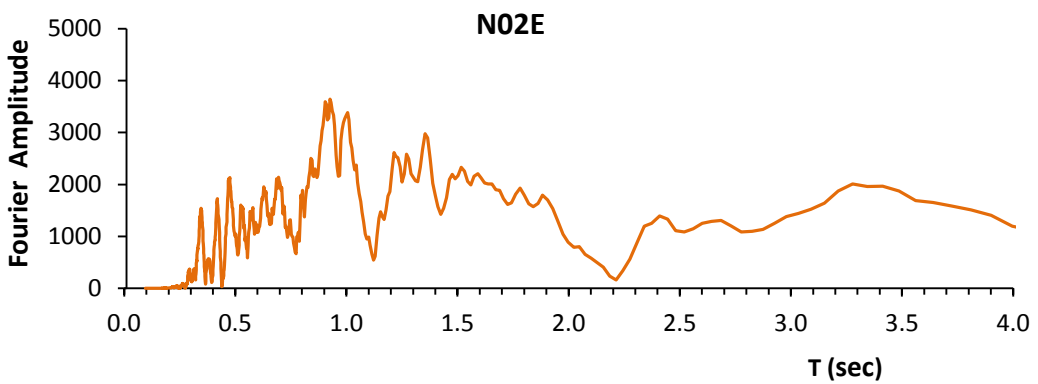
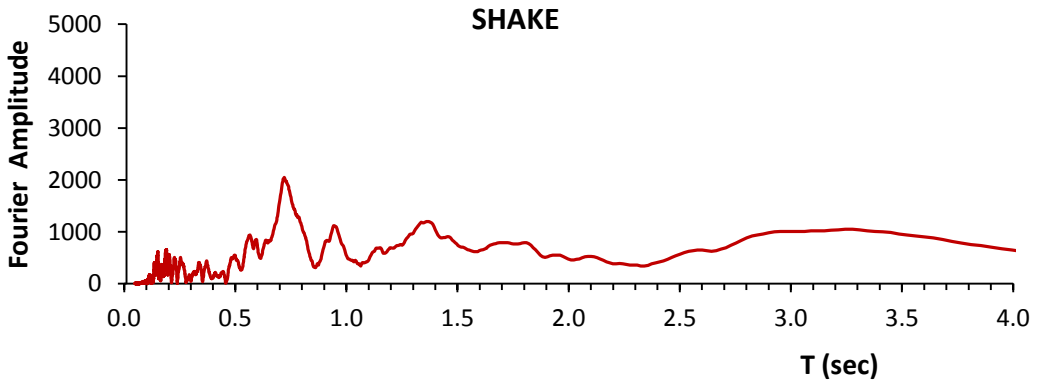
**Σχήμα 5.86:** Η χρονοϊστορία επιταχύνσεων ( $a$ ) και το ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων ( $S_a$ ) από την ισοδύναμη ελαστική ανάλυση με το SHAKE2000, σε σύγκριση με τα αντίστοιχα από τις δύο συνιστώσες της καταγραφής.

REHS

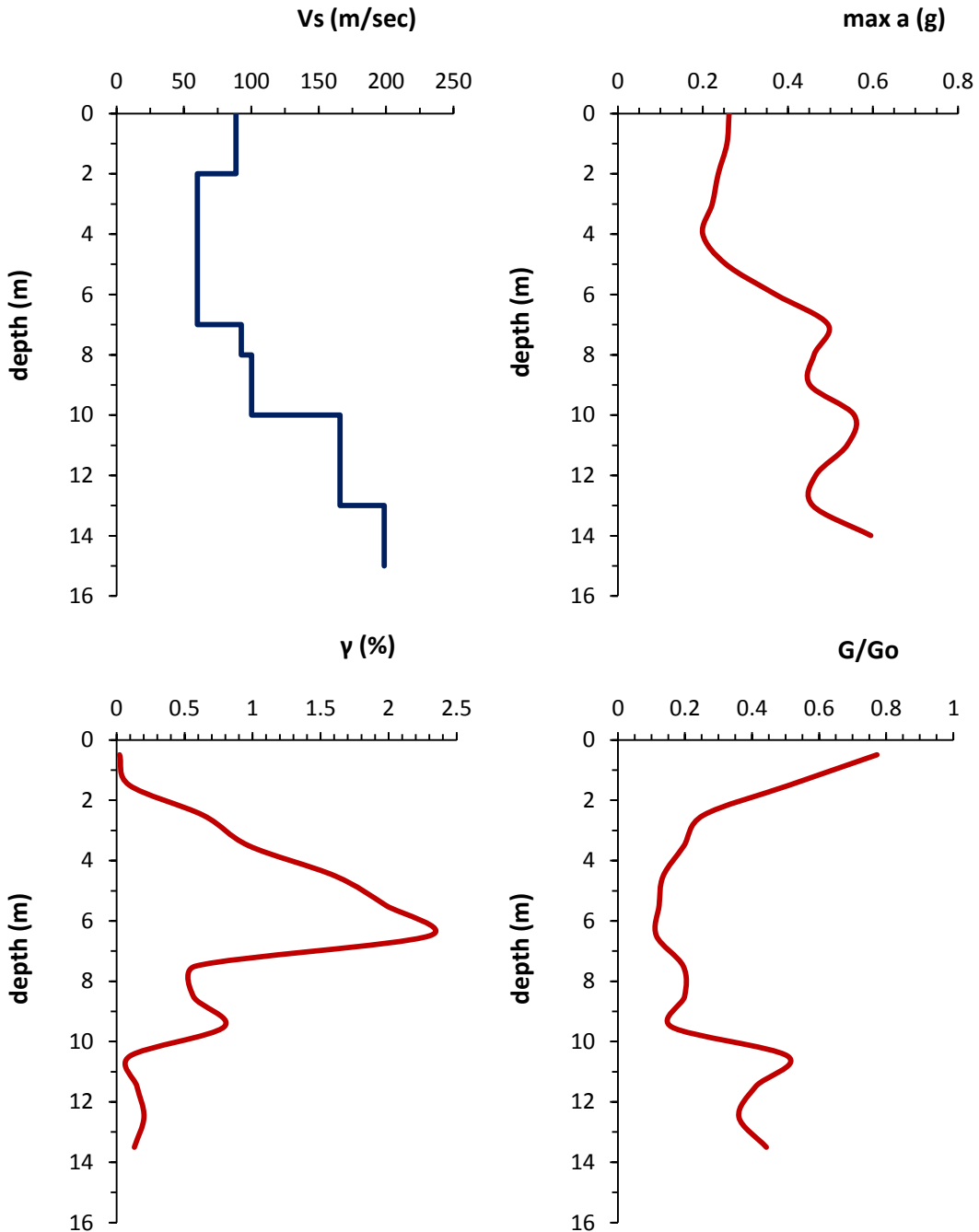
22 Φεβρουαρίου 2011

Imai & Yoshimura (1975)  
(γενική σχέση)

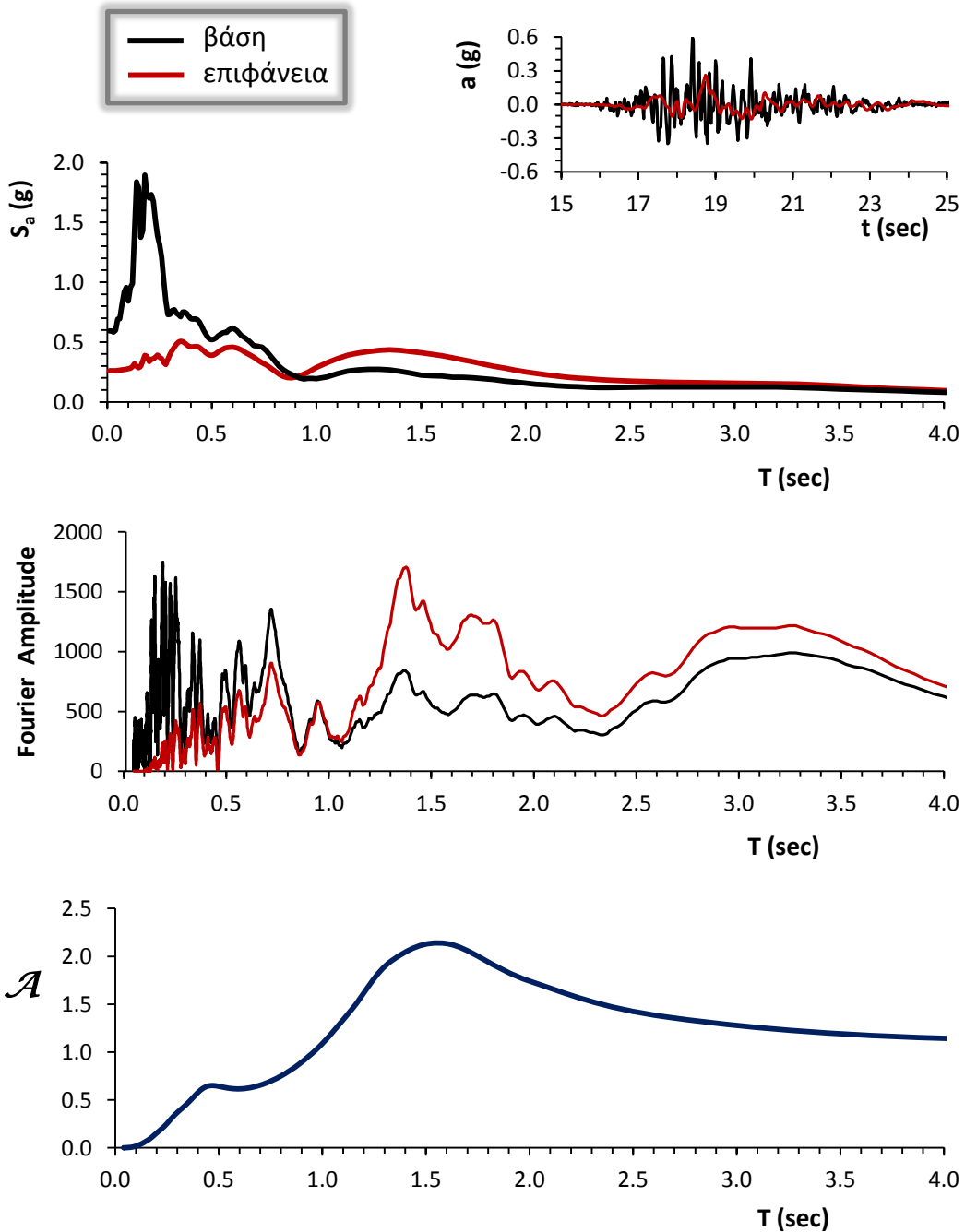
Ανάλυση 1<sup>η</sup>



**Σχήμα 5.87:** Το φάσμα πλάτους Fourier από την ισοδύναμη ελαστική ανάλυση με το SHAKE2000 σε σύγκριση με τα αντίστοιχα από τις δύο συνιστώσες της καταγραφής.

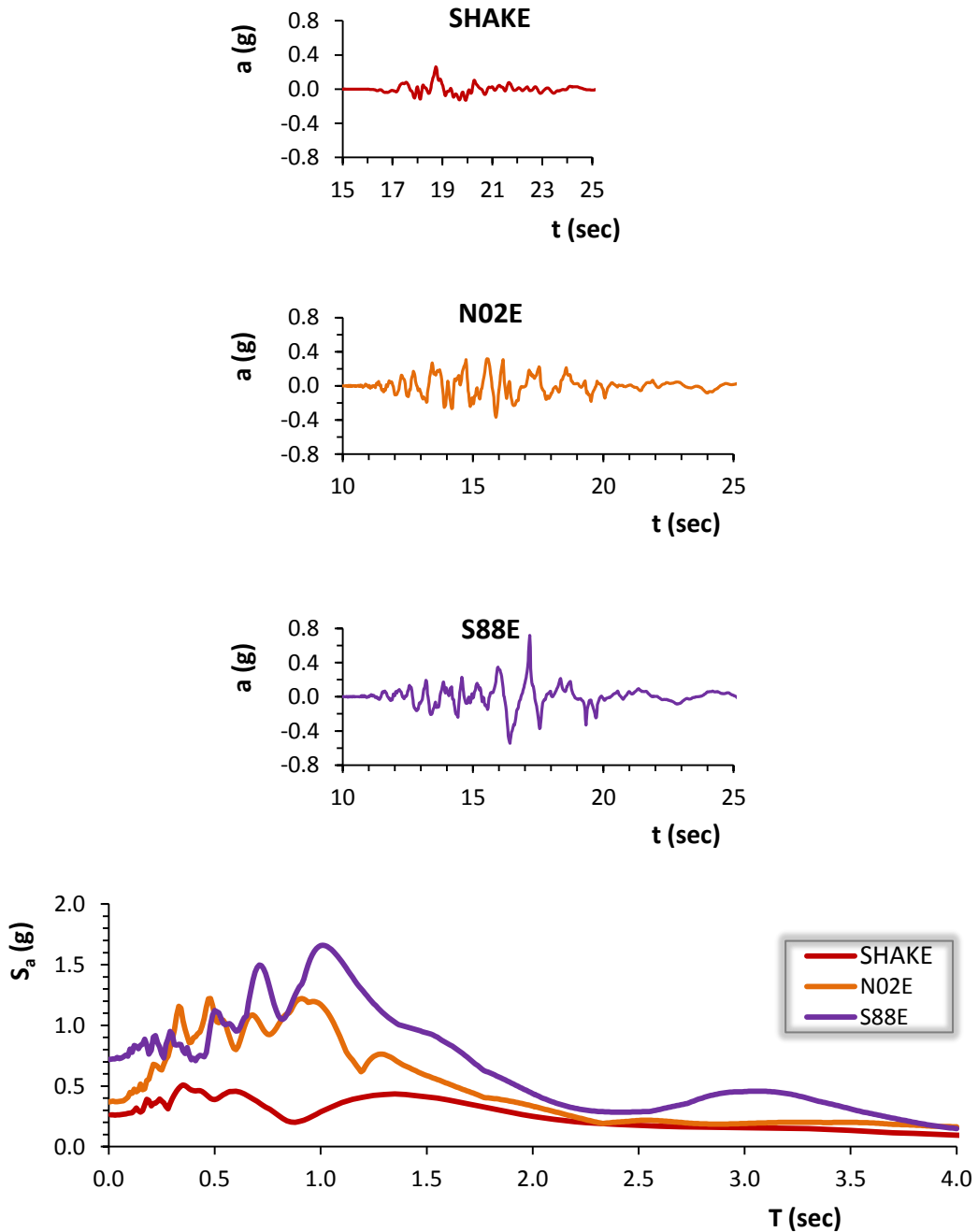
Ανάλυση 1<sup>η</sup>

**Σχήμα 5.88:** Το εδαφικό προφίλ σε όρους ταχύτητας διατμητικών κυμάτων ( $V_s$ ), οι μέγιστες εδαφικές επιταχύνσεις ( $\max a$ ), η ποσοστιαία μεταβολή της γωνιακής παραμόρφωσης ( $\gamma$  %) και ο λόγος της απομείωσης του μέτρου διατμήσεως ( $G$ ) σε σχέση με το βάθος της εδαφικής στήλης.

Ανάλυση 1<sup>η</sup>

**Σχήμα 5.89:** Η χρονιοιστορία επιταχύνσεων ( $a$ ), το ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων ( $S_a$ ) και το φάσμα του πλάτους Fourier μετά την ανάστροφη ισοδύναμη ελαστική ανάλυση με το SHAKE2000. Επίσης, ο συντελεστής φασματικής μεγέθυνσης  $\mathcal{A}$ . (δεσπάζουσα ιδιοπερίοδος εδάφους:  $T = 0.93$  sec)

Ανάλυση 1<sup>η</sup>



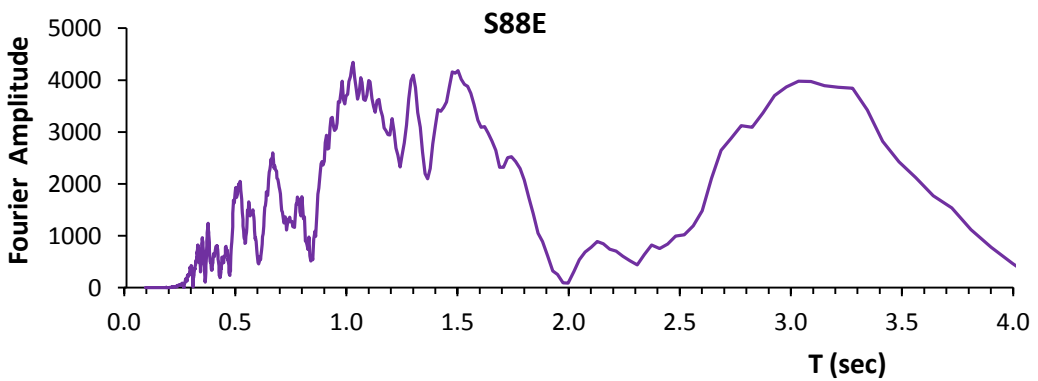
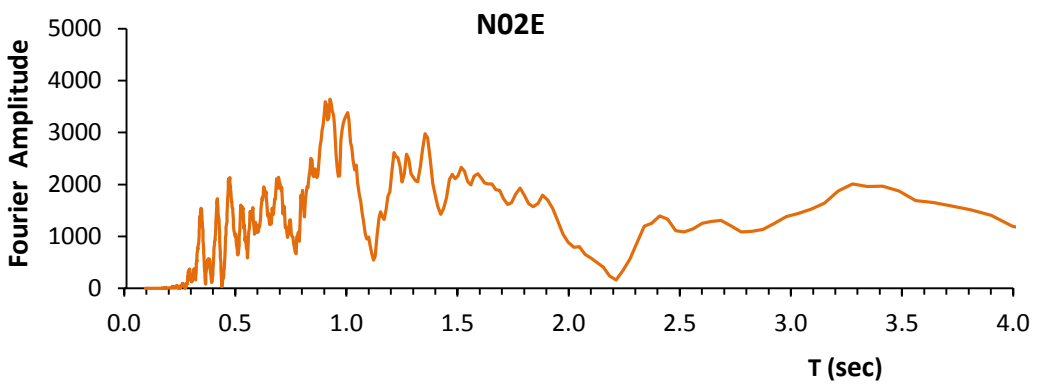
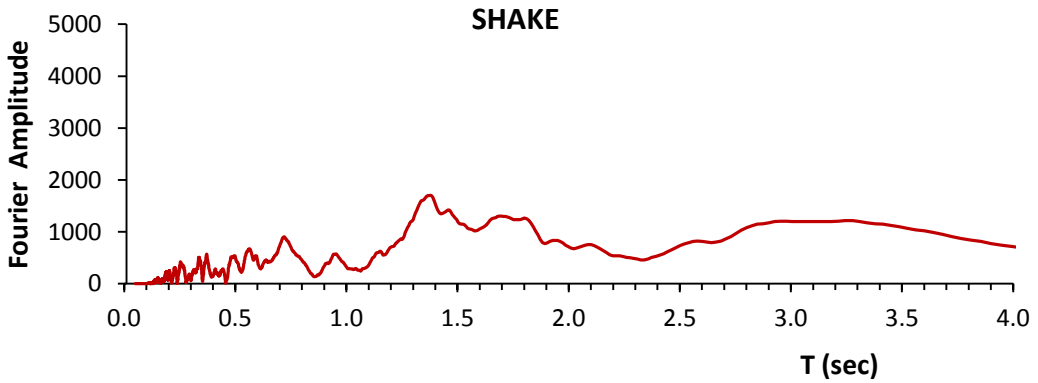
**Σχήμα 5.90:** Η χρονοϊστορία επιταχύνσεων ( $a$ ) και το ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων ( $S_a$ ) από την ισοδύναμη ελαστική ανάλυση με το SHAKE2000, σε σύγκριση με τα αντίστοιχα από τις δύο συνιστώσες της καταγραφής.

REHS

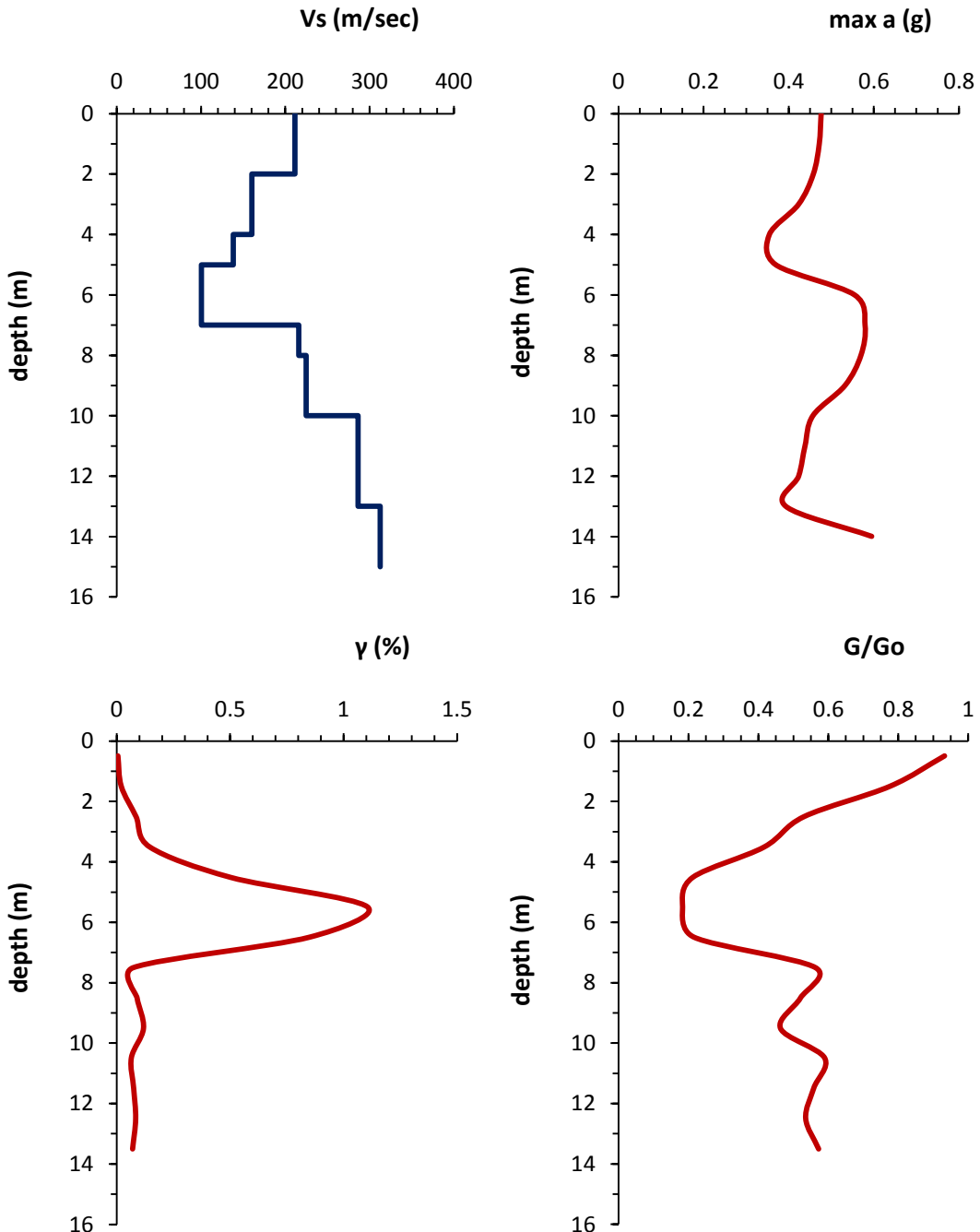
22 Φεβρουαρίου 2011

Kanai (1966)  
(γενική σχέση)

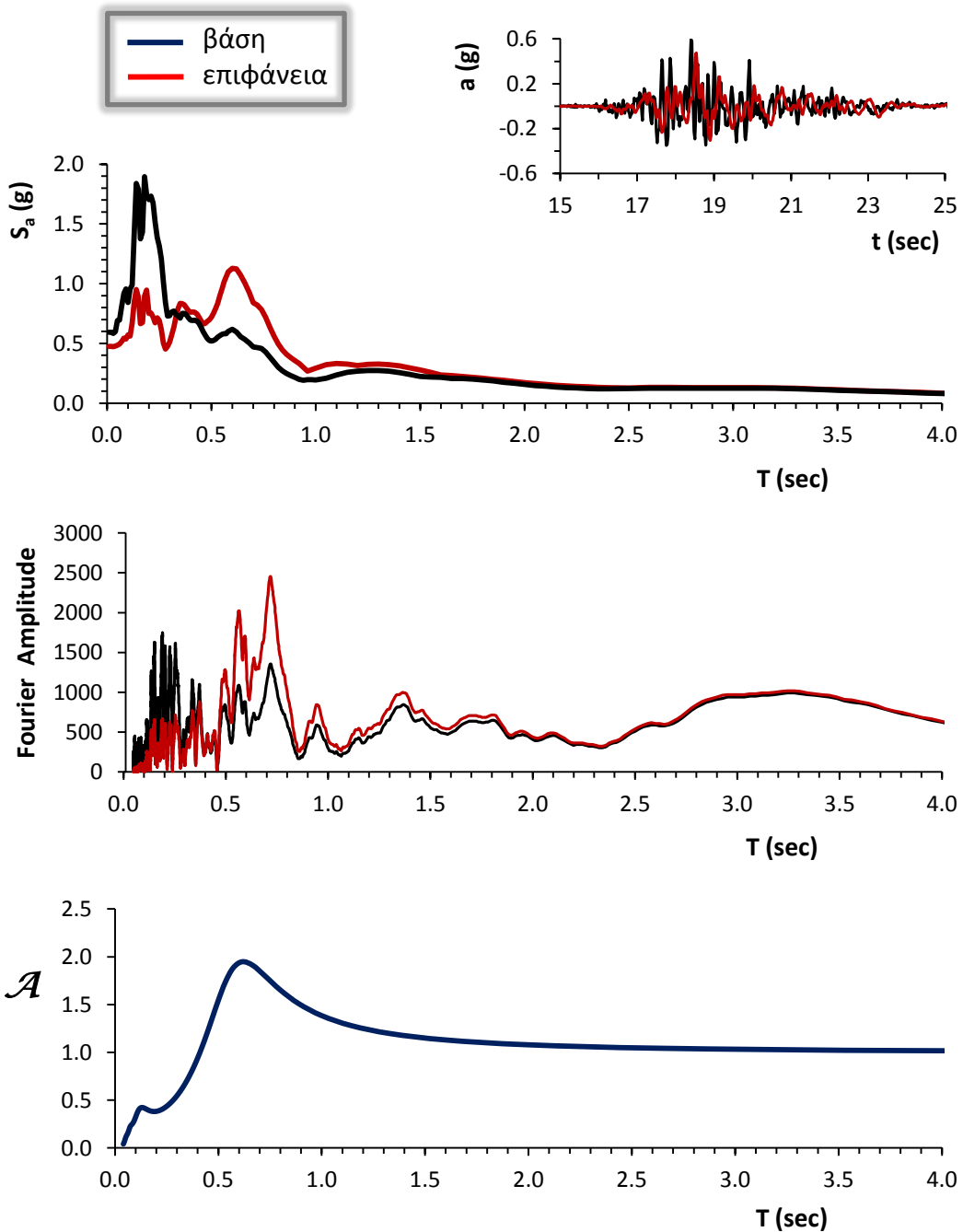
Ανάλυση 1<sup>η</sup>



**Σχήμα 5.91:** Το φάσμα πλάτους Fourier από την ισοδύναμη ελαστική ανάλυση με το SHAKE2000 σε σύγκριση με τα αντίστοιχα από τις δύο συνιστώσες της καταγραφής.

Ανάλυση 1<sup>η</sup>

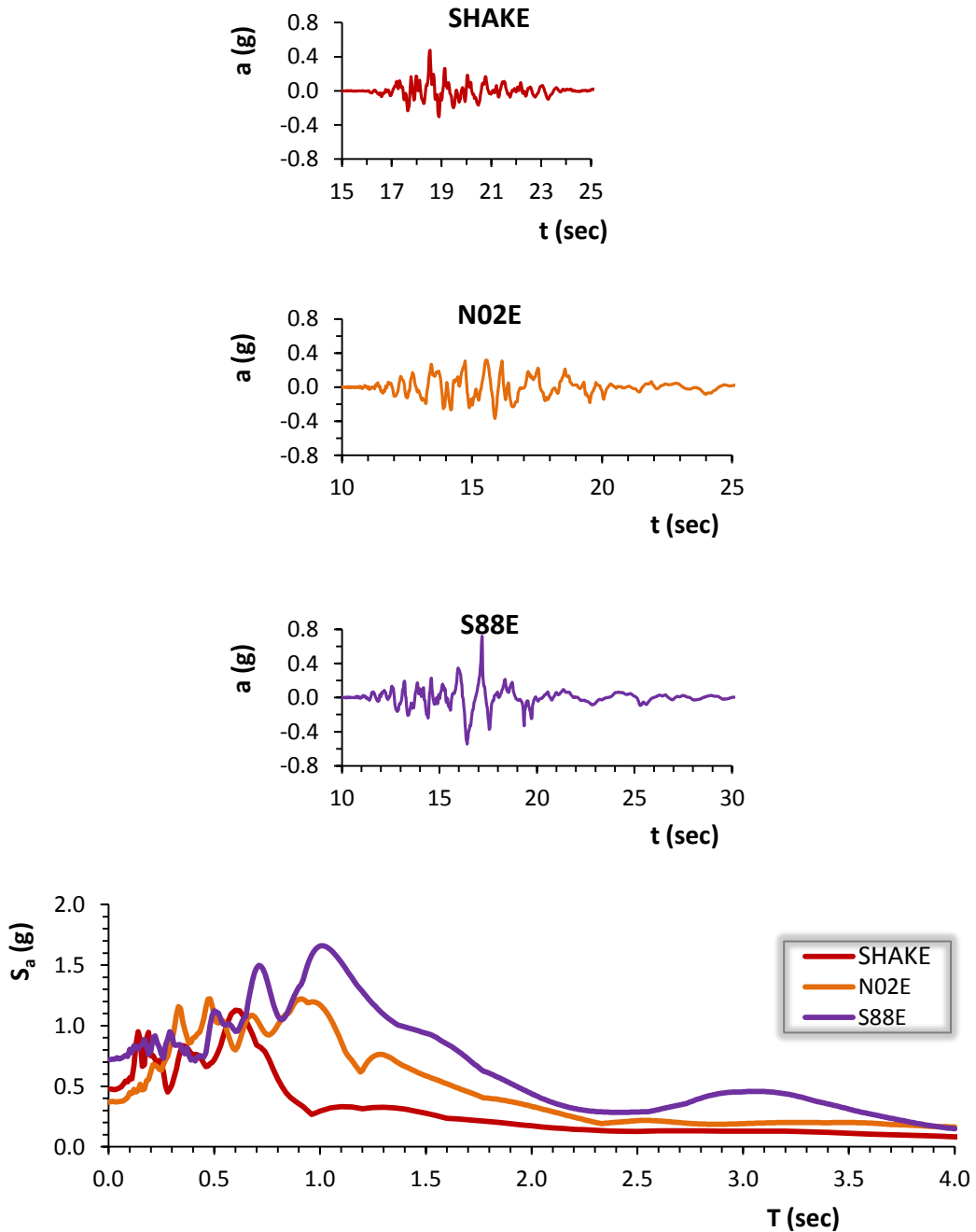
**Σχήμα 5.92:** Το εδαφικό προφίλ σε όρους ταχύτητας διατμητικών κυμάτων ( $V_s$ ), οι μέγιστες εδαφικές επιταχύνσεις ( $\max a$ ), η ποσοστιαία μεταβολή της γωνιακής παραμόρφωσης ( $\gamma$  %) και ο λόγος της απομείωσης του μέτρου διατμήσεως ( $G$ ) σε σχέση με το βάθος της εδαφικής στήλης.

Ανάλυση 1<sup>η</sup>

**Σχήμα 5.93:** Η χρονιοιστορία επιταχύνσεων ( $a$ ), το ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων ( $S_a$ ) και το φάσμα του πλάτους Fourier μετά την ανάστροφη ισοδύναμη ελαστική ανάλυση με το SHAKE2000. Επίσης, ο συντελεστής φασματικής μεγέθυνσης  $\mathcal{A}$ . (δεσπόζουσα ιδιοπερίοδος εδάφους:  $T = 0.37$  sec)



Ανάλυση 1<sup>η</sup>



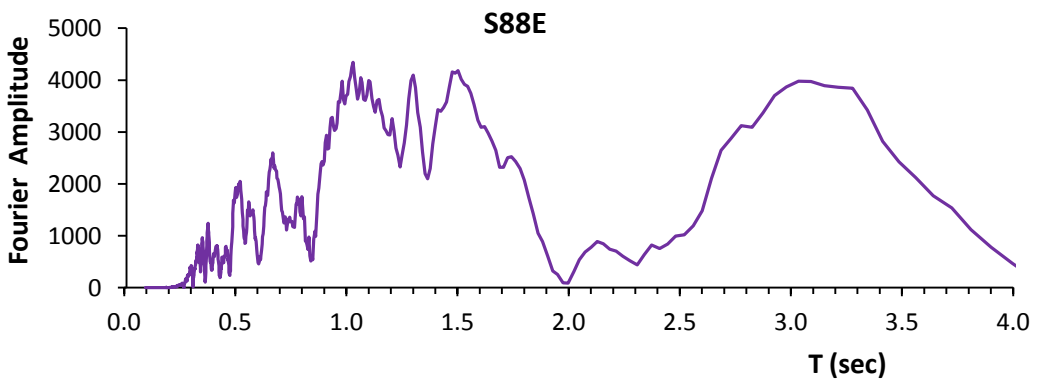
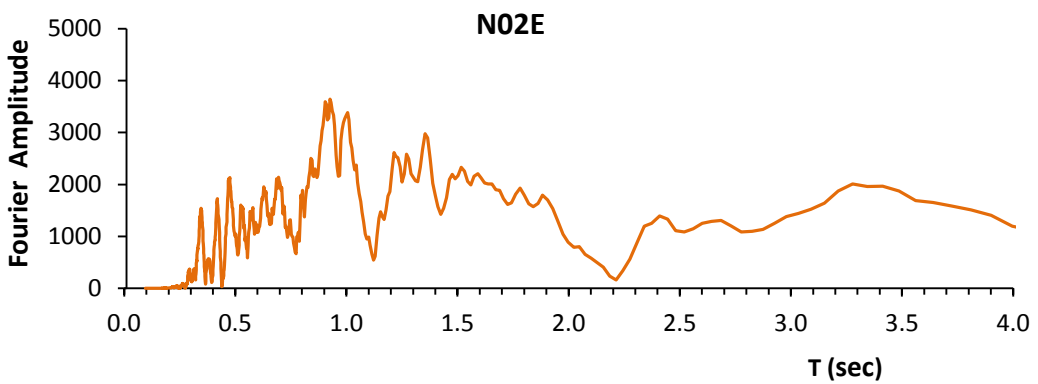
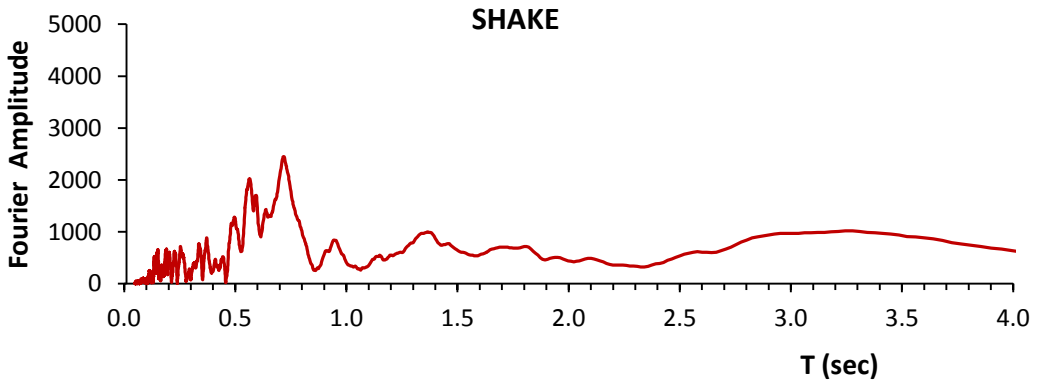
**Σχήμα 5.94:** Η χρονοϊστορία επιταχύνσεων ( $a$ ) και το ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων ( $S_a$ ) από την ισοδύναμη ελαστική ανάλυση με το SHAKE2000, σε σύγκριση με τα αντίστοιχα από τις δύο συνιστώσες της καταγραφής.

REHS

22 Φεβρουαρίου 2011

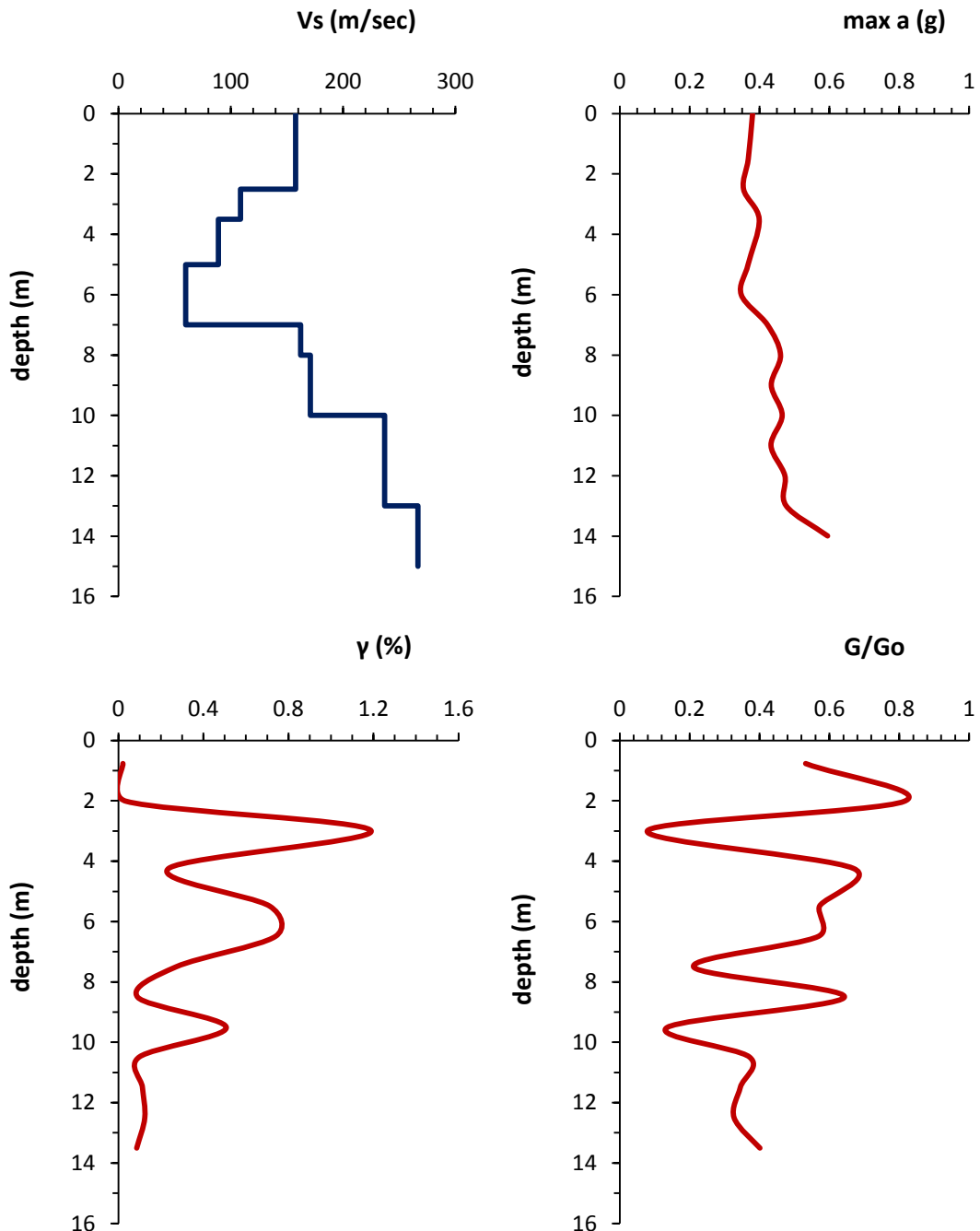
Syhora & Stokoe (1983)  
(σχέση για άμμους)

Ανάλυση 1<sup>η</sup>



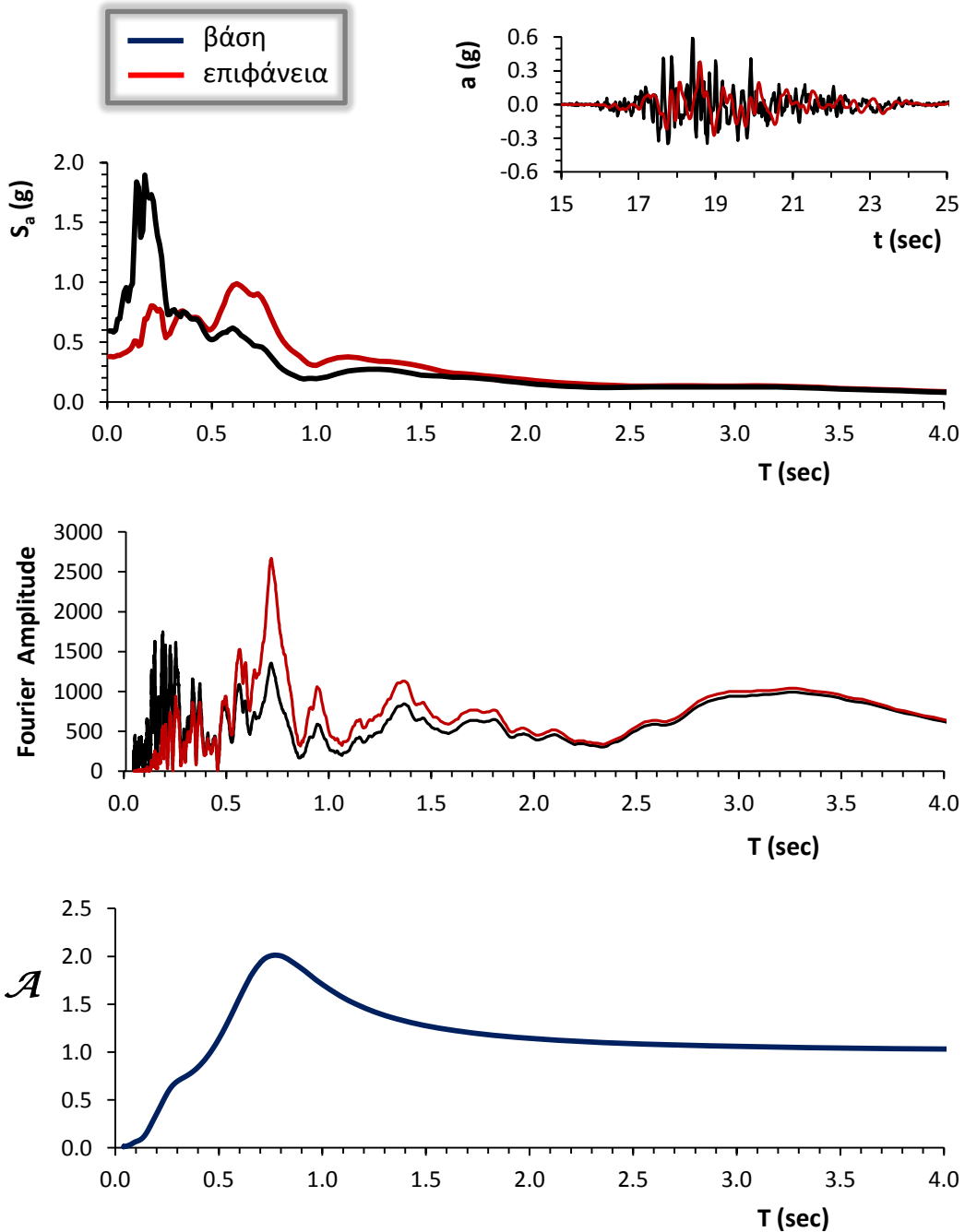
**Σχήμα 5.95:** Το φάσμα πλάτους Fourier από την ισοδύναμη ελαστική ανάλυση με το SHAKE2000 σε σύγκριση με τα αντίστοιχα από τις δύο συνιστώσες της καταγραφής.

Ανάλυση 2<sup>η</sup>



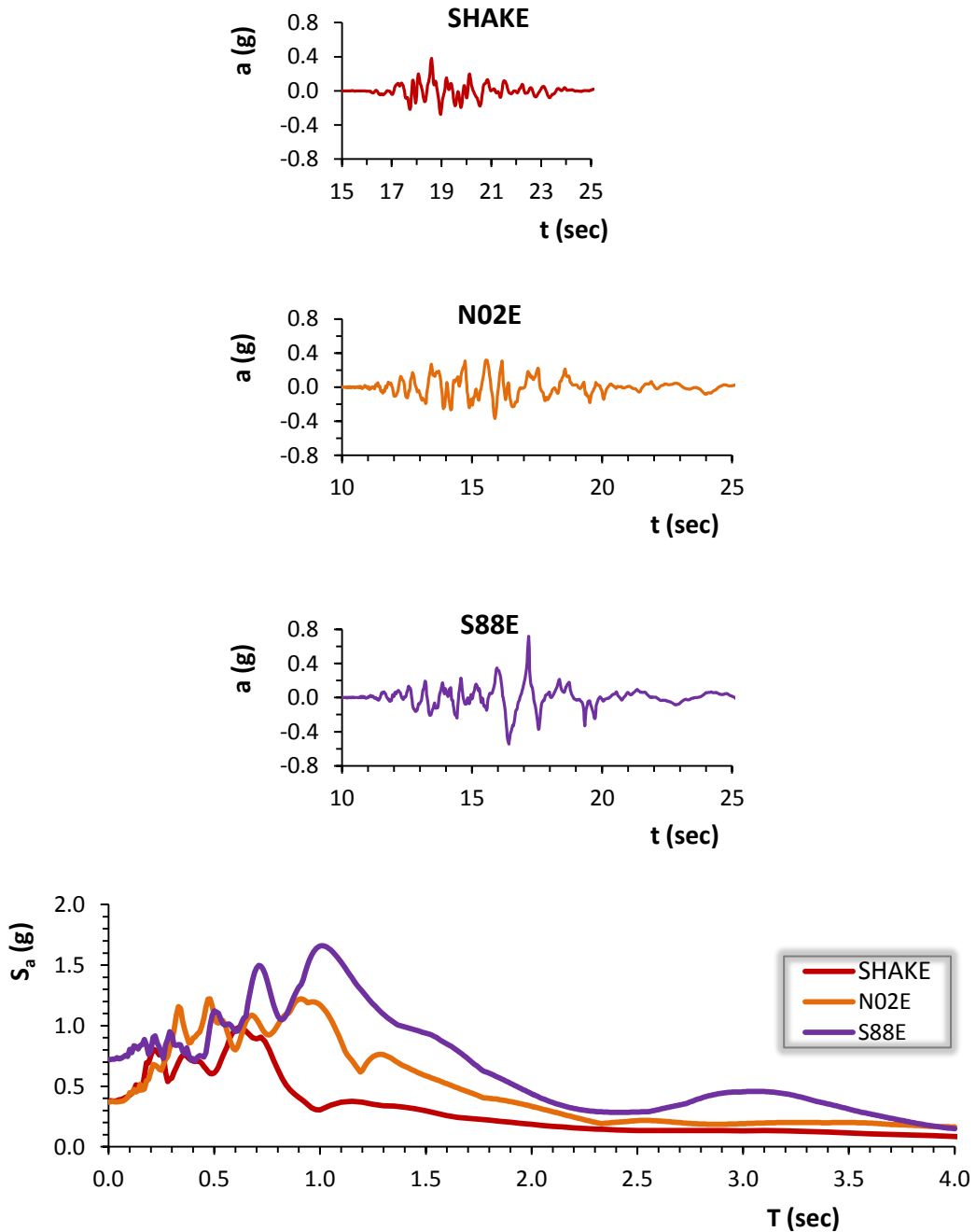
**Σχήμα 5.96:** Το εδαφικό προφίλ σε όρους ταχύτητας διατμητικών κυμάτων ( $V_s$ ), οι μέγιστες εδαφικές επιταχύνσεις ( $\max a$ ), η ποσοστιαία μεταβολή της γωνιακής παραμόρφωσης ( $\gamma$  %) και ο λόγος της απομείωσης του μέτρου διατμήσεως ( $G$ ) σε σχέση με το βάθος της εδαφικής στήλης.

Ανάλυση 2<sup>η</sup>



**Σχήμα 5.97:** Η χρονοϊστορία επιταχύνσεων ( $a$ ), το ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων ( $S_a$ ) και το φάσμα του πλάτους Fourier μετά την ανάστροφη ισοδύναμη ελαστική ανάλυση με το SHAKE2000. Επίσης, ο συντελεστής φασματικής μεγέθυνσης  $\mathcal{A}$ . (δεσπόζουσα ιδιοπερίοδος εδάφους:  $T = 0.56$  sec)

Ανάλυση 2<sup>η</sup>



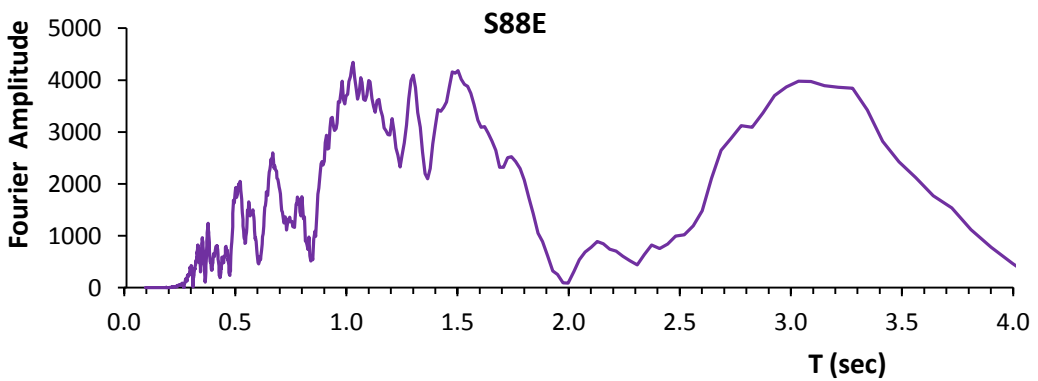
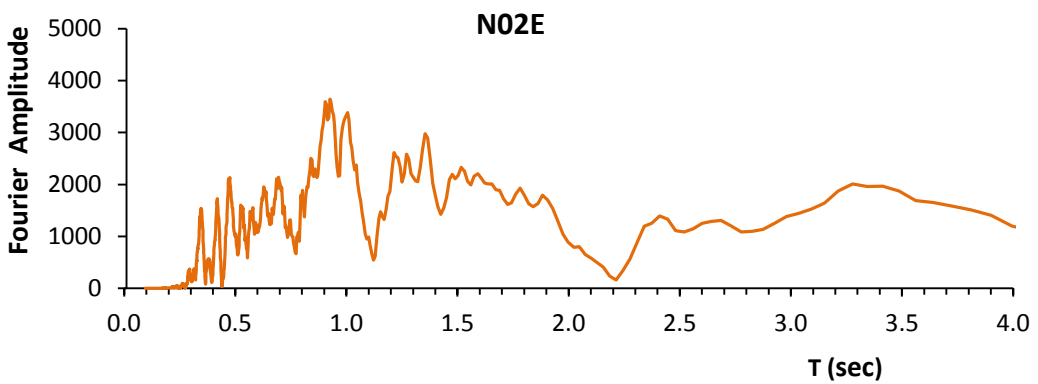
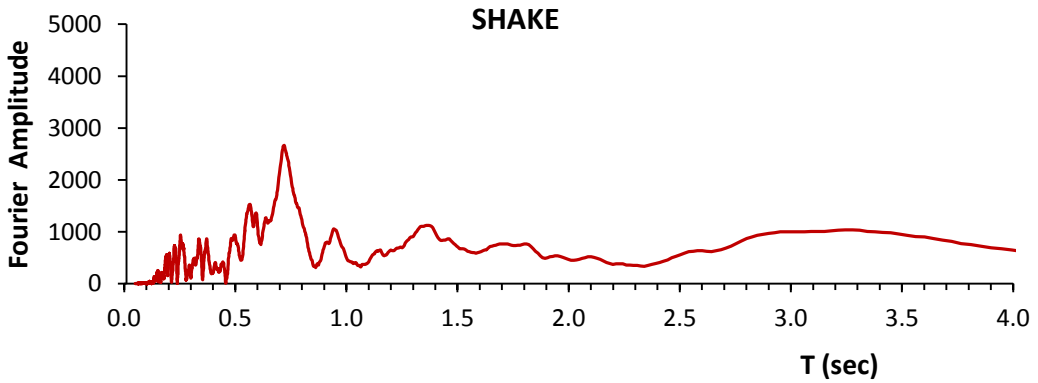
**Σχήμα 5.98:** Η χρονοϊστορία επιταχύνσεων ( $a$ ) και το ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων ( $S_a$ ) από την ισοδύναμη ελαστική ανάλυση με το SHAKE2000, σε σύγκριση με τα αντίστοιχα από τις δύο συνιστώσες της καταγραφής.

REHS

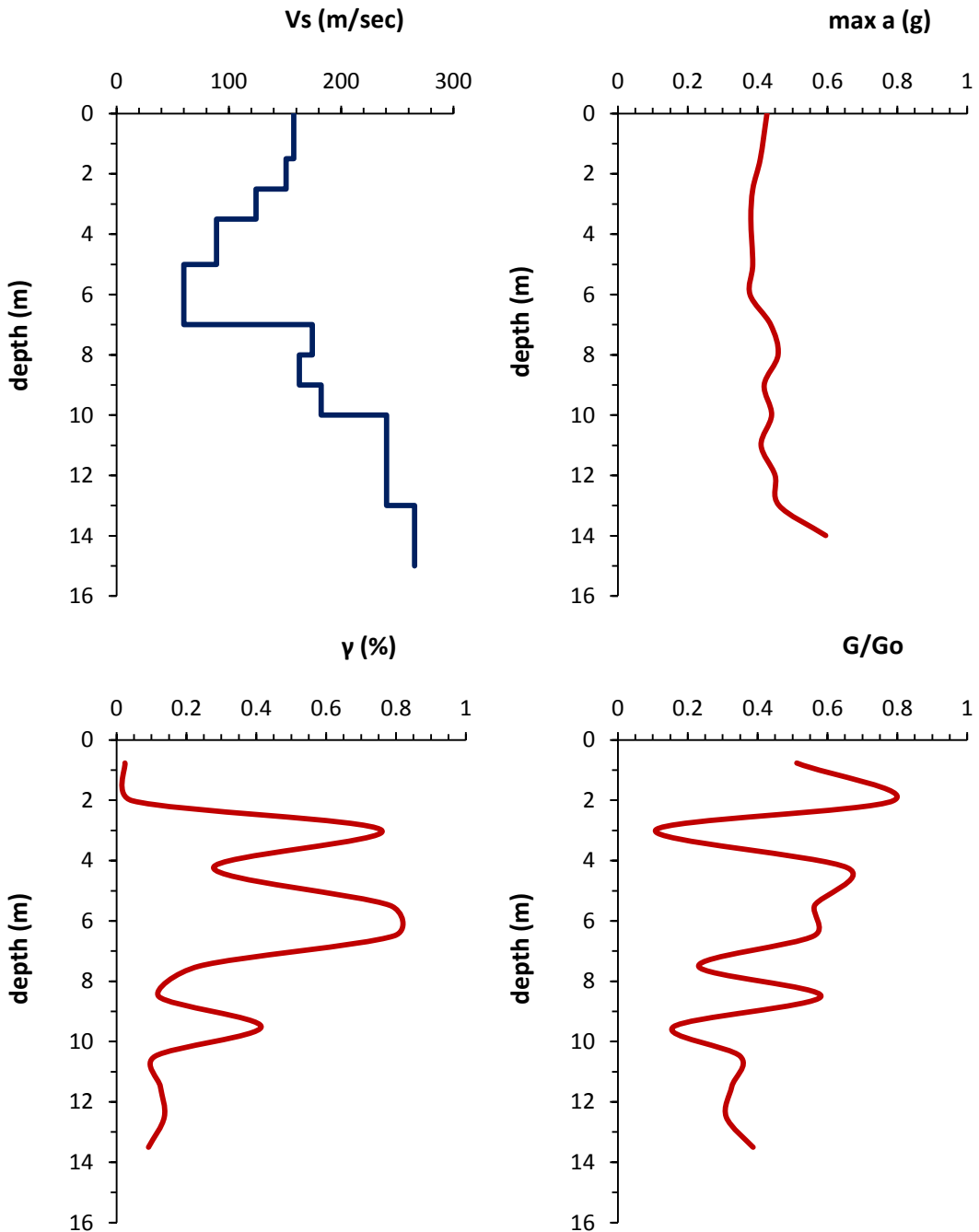
22 Φεβρουαρίου 2011

Dikmen (2009)  
(γενική σχέση)

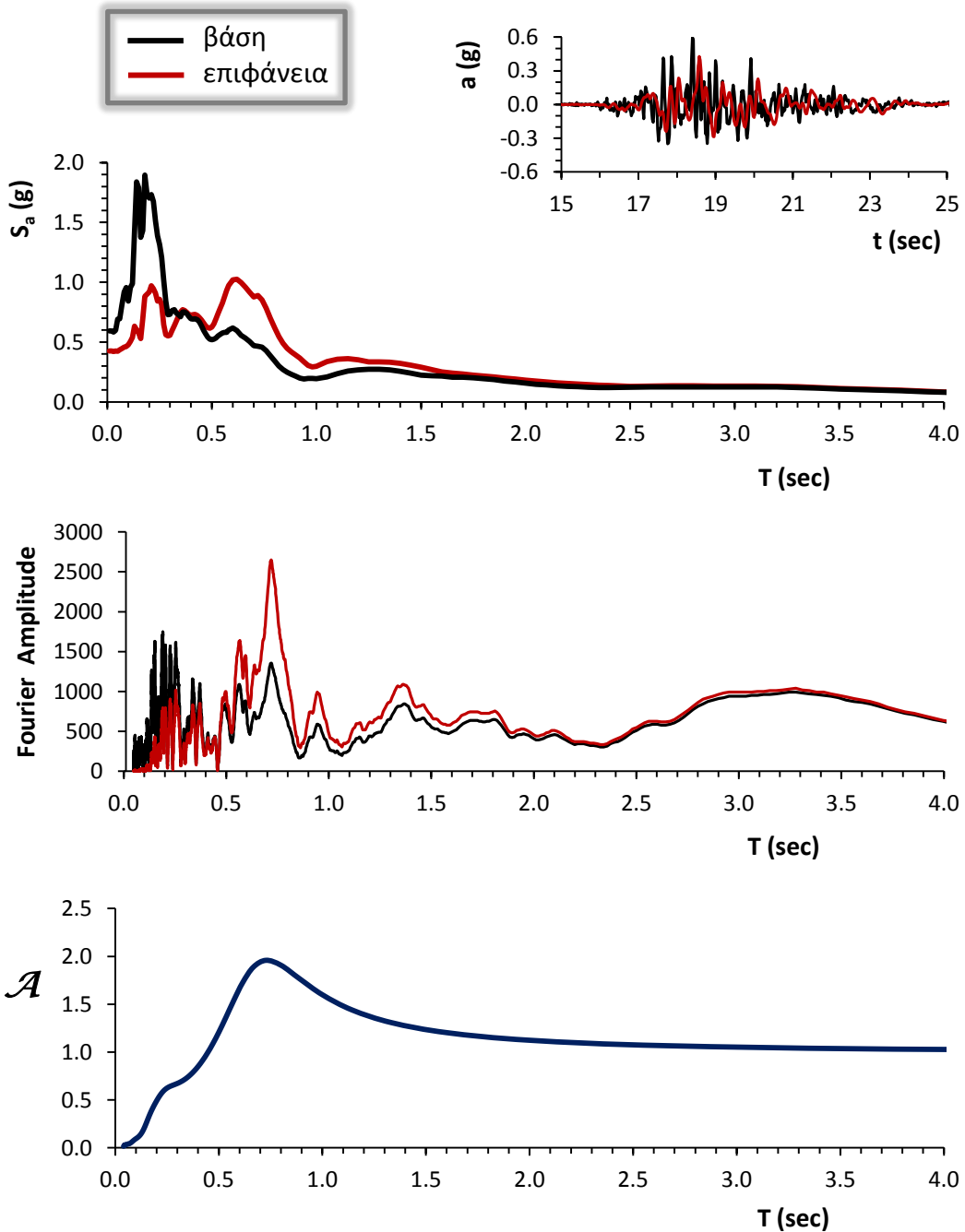
Ανάλυση 2<sup>η</sup>



Σχήμα 5.99: Το φάσμα πλάτους Fourier από την ισοδύναμη ελαστική ανάλυση με το SHAKE2000 σε σύγκριση με τα αντίστοιχα από τις δύο συνιστώσες της καταγραφής.

Ανάλυση 2<sup>η</sup>

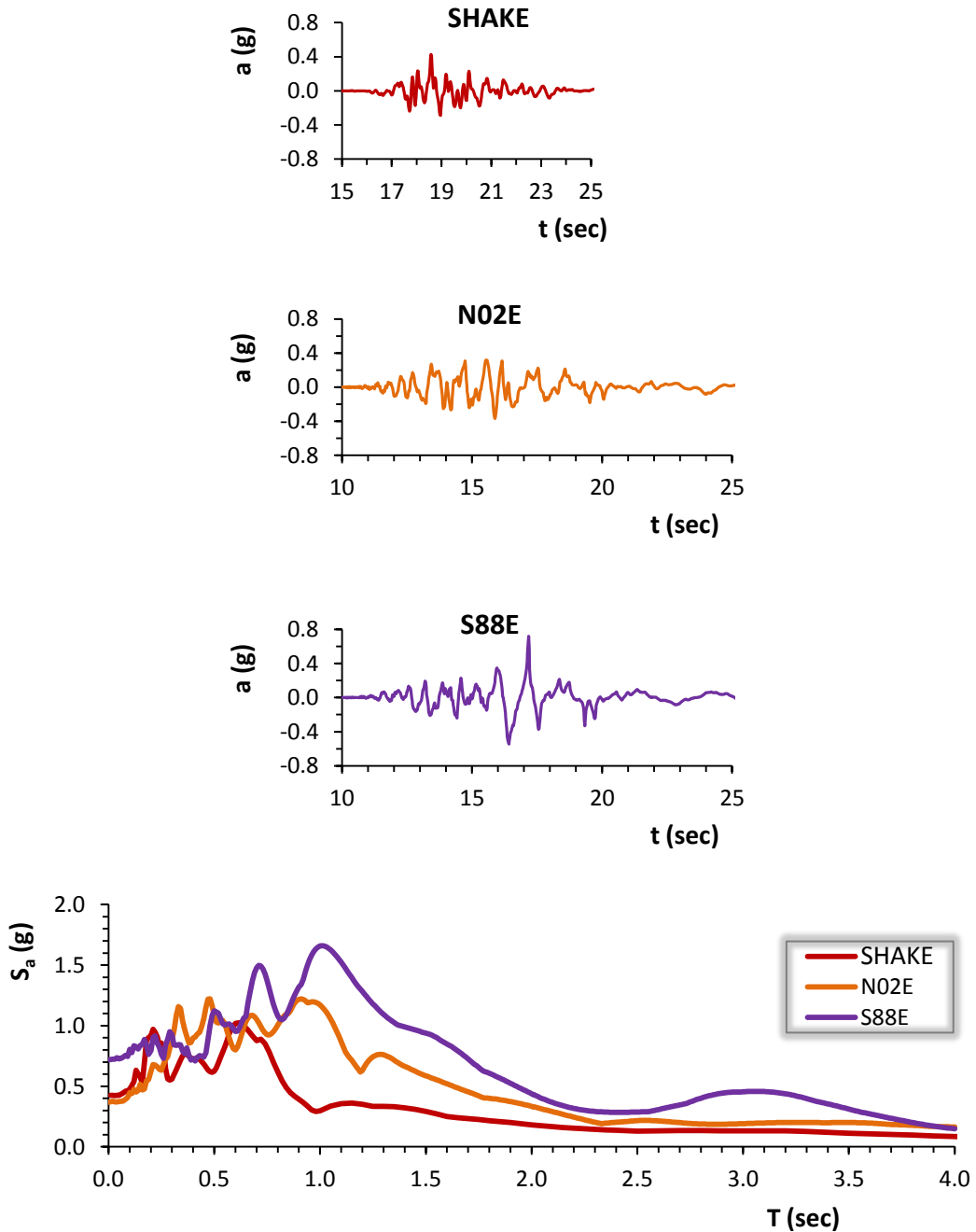
**Σχήμα 5.100:** Το εδαφικό προφίλ σε όρους ταχύτητας διατμητικών κυμάτων ( $V_s$ ), οι μέγιστες εδαφικές επιταχύνσεις ( $\max a$ ), η ποσοστιαία μεταβολή της γωνιακής παραμόρφωσης ( $\gamma$  %) και ο λόγος της απομείωσης του μέτρου διατμήσεως ( $G$ ) σε σχέση με το βάθος της εδαφικής στήλης.

Ανάλυση 2<sup>η</sup>

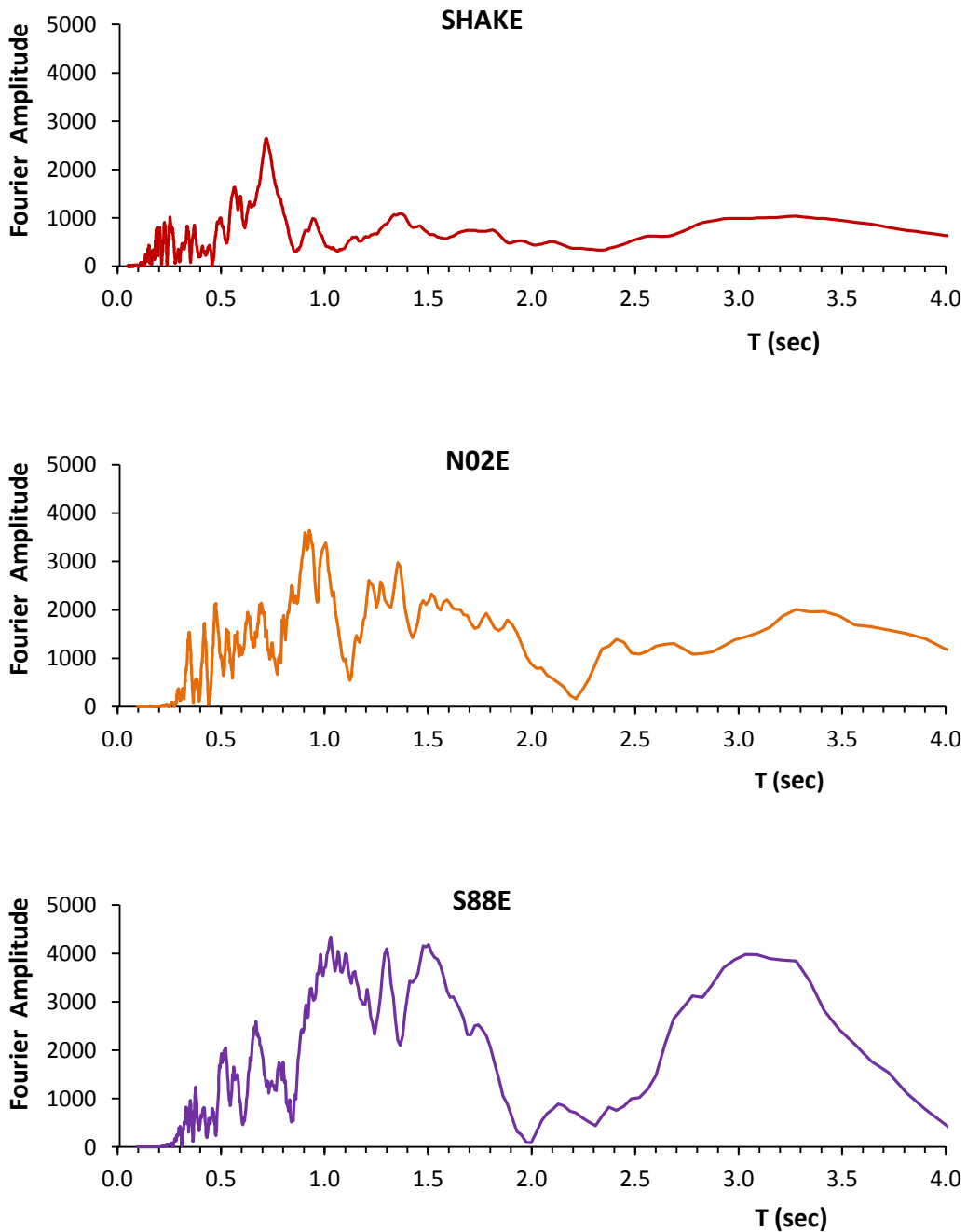
**Σχήμα 5.101:** Η χρονοϊστορία επιταχύνσεων ( $a$ ), το ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων ( $S_a$ ) και το φάσμα του πλάτους Fourier μετά την ανάστροφη ισοδύναμη ελαστική ανάλυση με το SHAKE2000. Επίσης, ο συντελεστής φασματικής μεγέθυνσης  $\mathcal{A}$ . (δεσπόζουσα ιδιοπερίοδος εδάφους:  $T = 0.56$  sec)



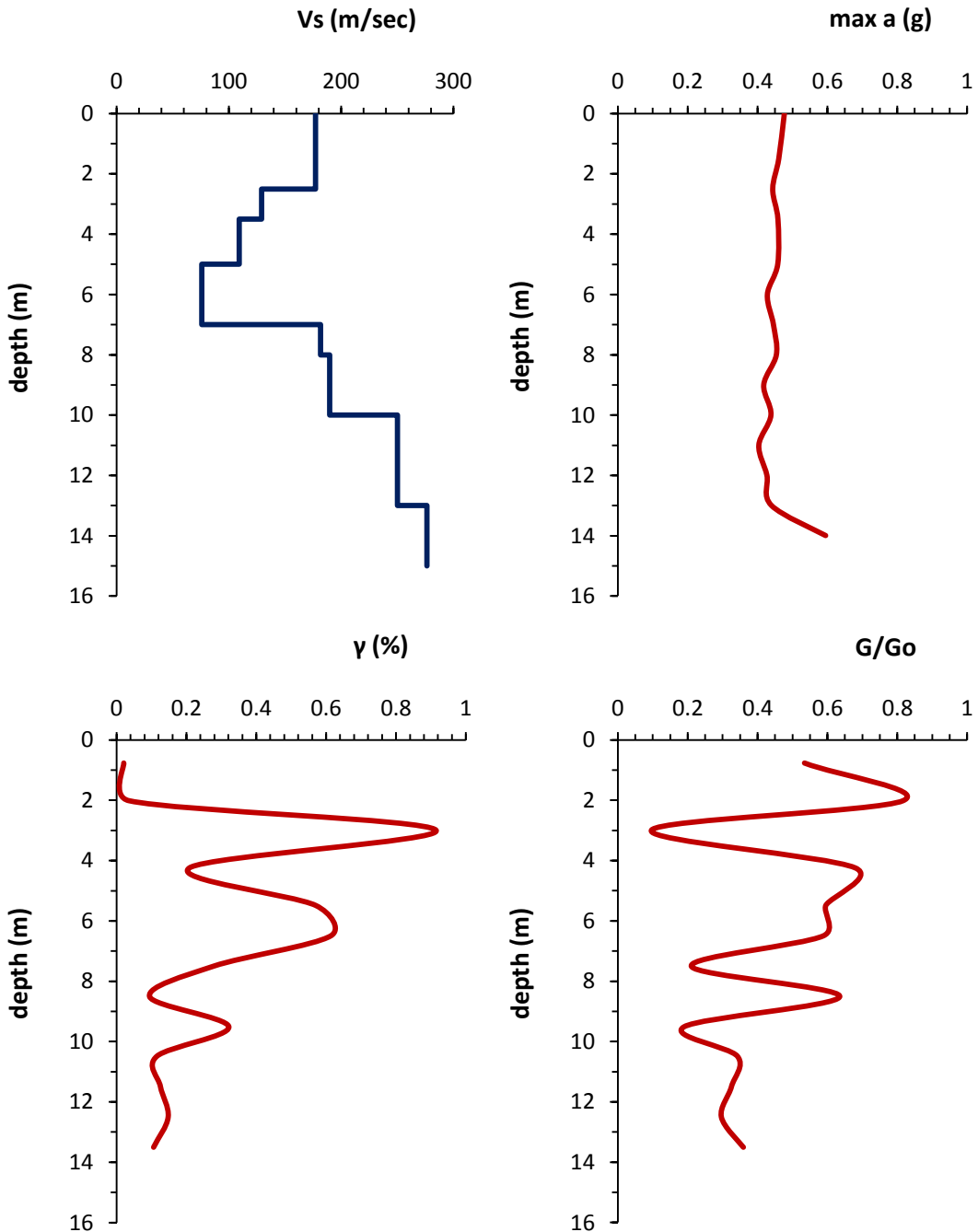
Ανάλυση 2<sup>η</sup>



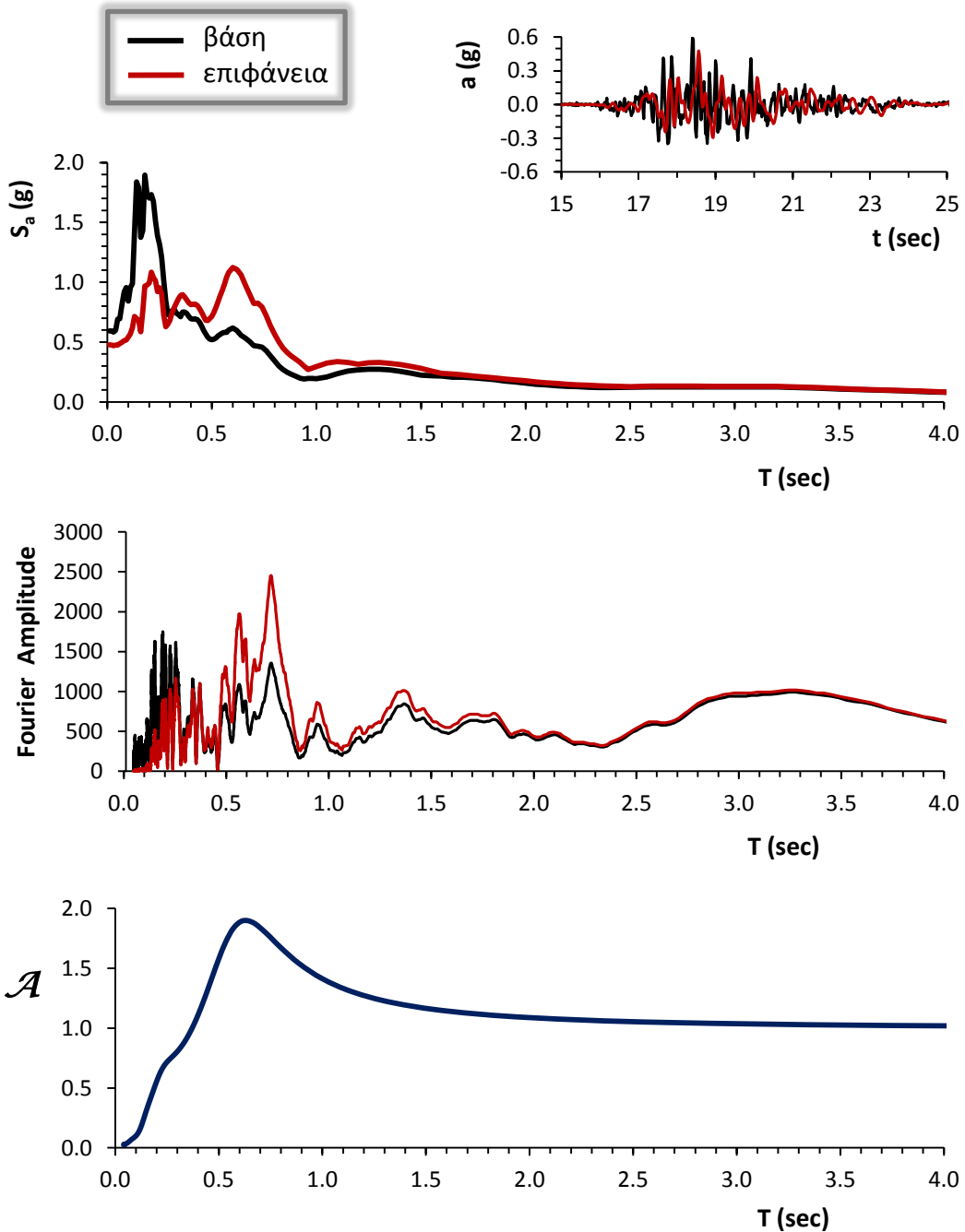
**Σχήμα 5.102:** Η ιστορία επιταχύνσεων ( $a$ ) και το ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων ( $S_a$ ) από την ισοδύναμη ελαστική ανάλυση με το SHAKE2000, σε σύγκριση με τα αντίστοιχα από τις δύο συνιστώσες της καταγραφής.



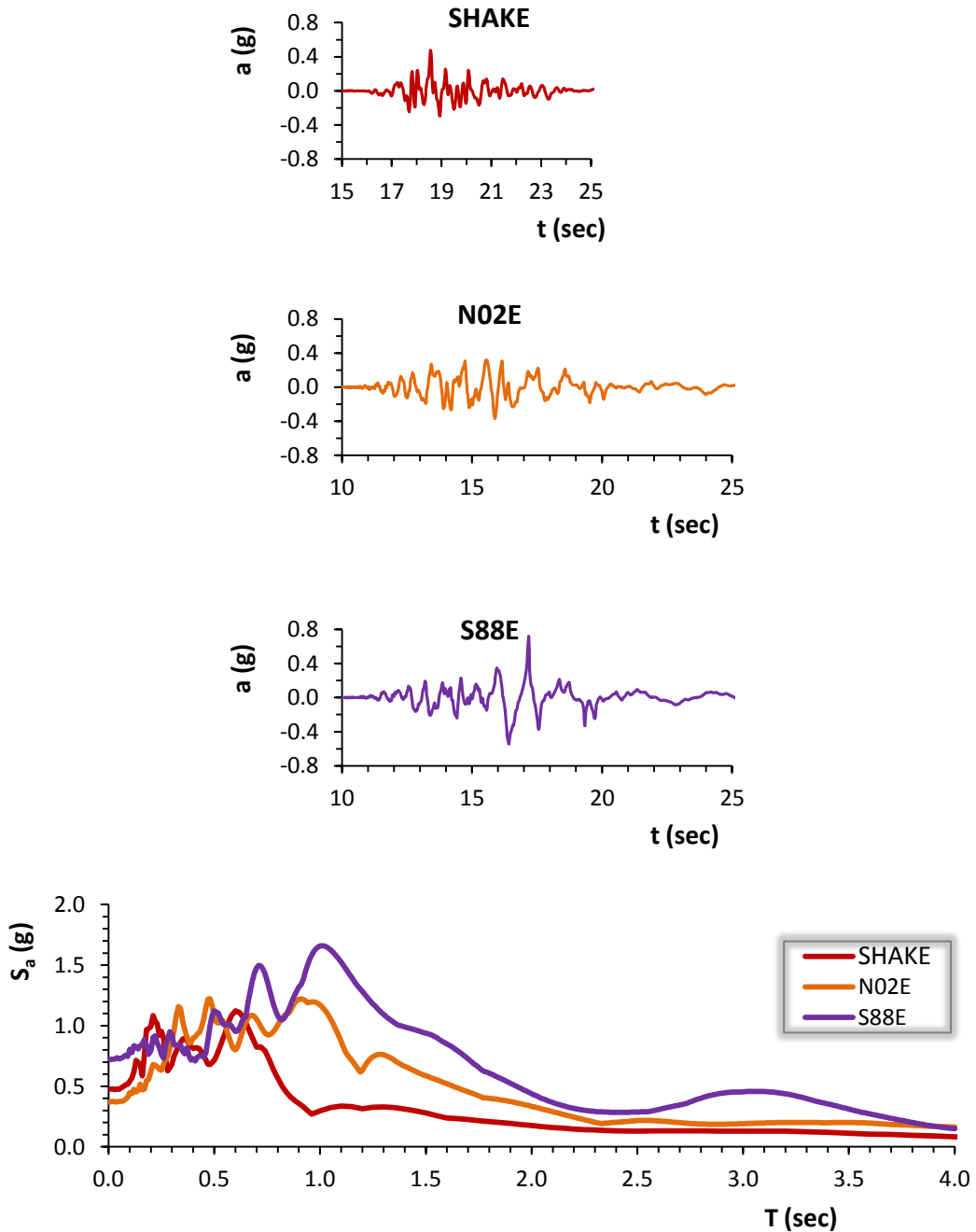
**Σχήμα 5.103:** Το φάσμα πλάτους Fourier από την ισοδύναμη ελαστική ανάλυση με το SHAKE2000 σε σύγκριση με τα αντίστοιχα από τις δύο συνιστώσες της καταγραφής.

Ανάλυση 2<sup>η</sup>

**Σχήμα 5.104:** Το εδαφικό προφίλ σε όρους ταχύτητας διατμητικών κυμάτων ( $V_s$ ), οι μέγιστες εδαφικές επιταχύνσεις ( $\max a$ ), η ποσοστιαία μεταβολή της γωνιακής παραμόρφωσης ( $\gamma$  %) και ο λόγος της απομείωσης του μέτρου διατμήσεως ( $G$ ) σε σχέση με το βάθος της εδαφικής στήλης.

Ανάλυση 2<sup>η</sup>

**Σχήμα 5.105:** Η χρονοϊστορία επιταχύνσεων ( $a$ ), το ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων ( $S_a$ ) και το φάσμα του πλάτους Fourier μετά την ανάστροφη ισοδύναμη ελαστική ανάλυση με το SHAKE2000. Επίσης, ο συντελεστής φασματικής μεγέθυνσης  $\mathcal{A}$ . (δεσπόζουσα ιδιοπερίοδος εδάφους:  $T = 0.50$  sec)

Ανάλυση 2<sup>η</sup>

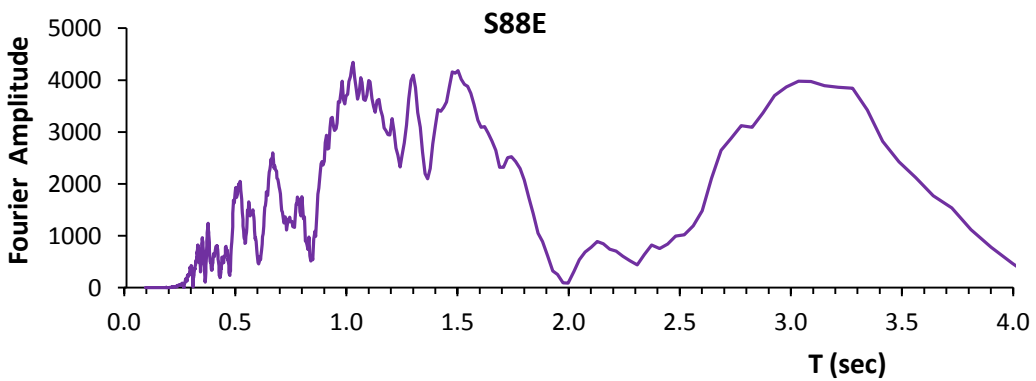
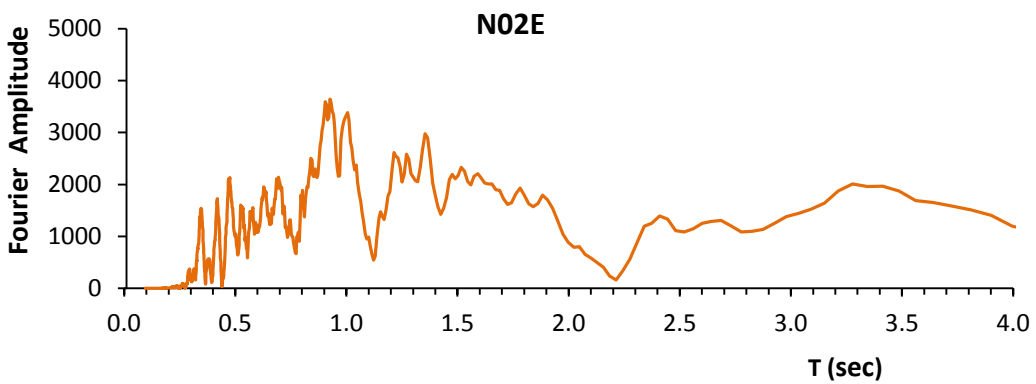
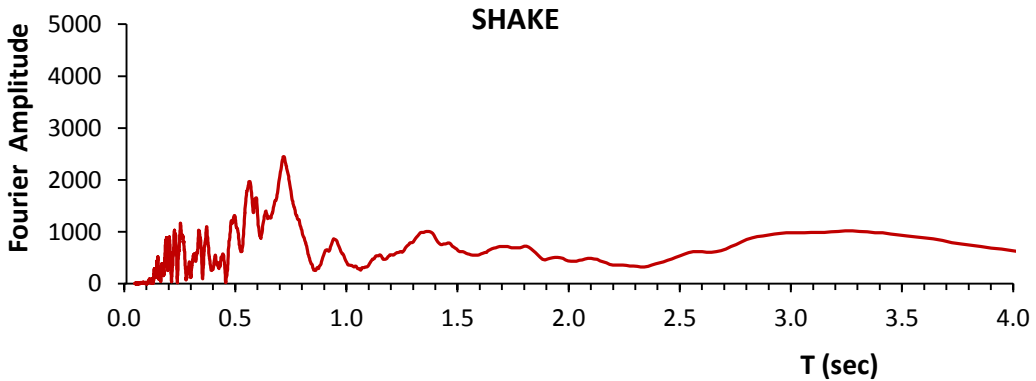
**Σχήμα 5.106:** Η χρονιοιστορία επιταχύνσεων ( $a$ ) και το ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων ( $S_a$ ) από την ισοδύναμη ελαστική ανάλυση με το SHAKE2000, σε σύγκριση με τα αντίστοιχα από τις δύο συνιστώσες της καταγραφής.

REHS

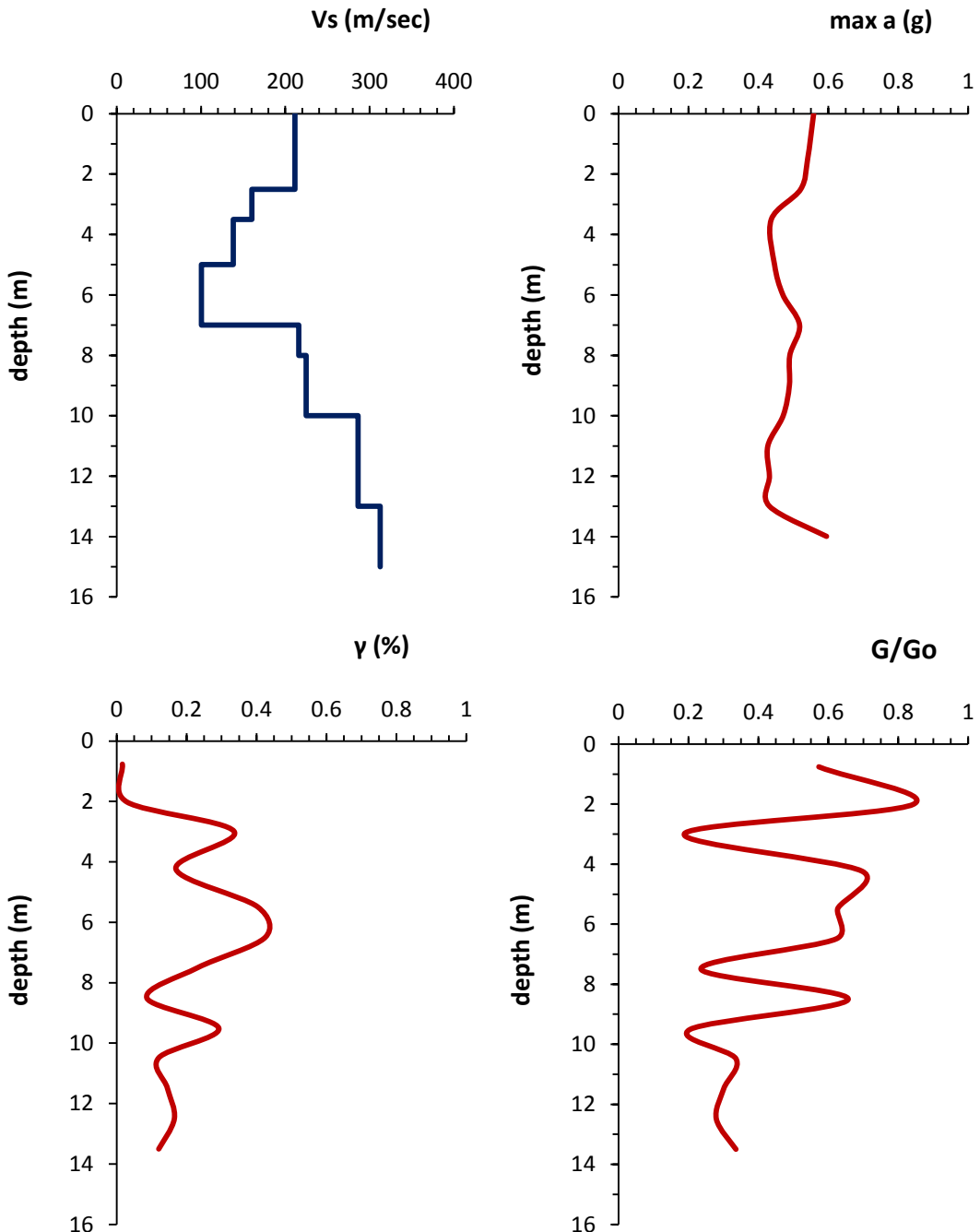
22 Φεβρουαρίου 2011

Imai & Yoshimura (1975)  
(γενική σχέση)

Ανάλυση 2<sup>η</sup>

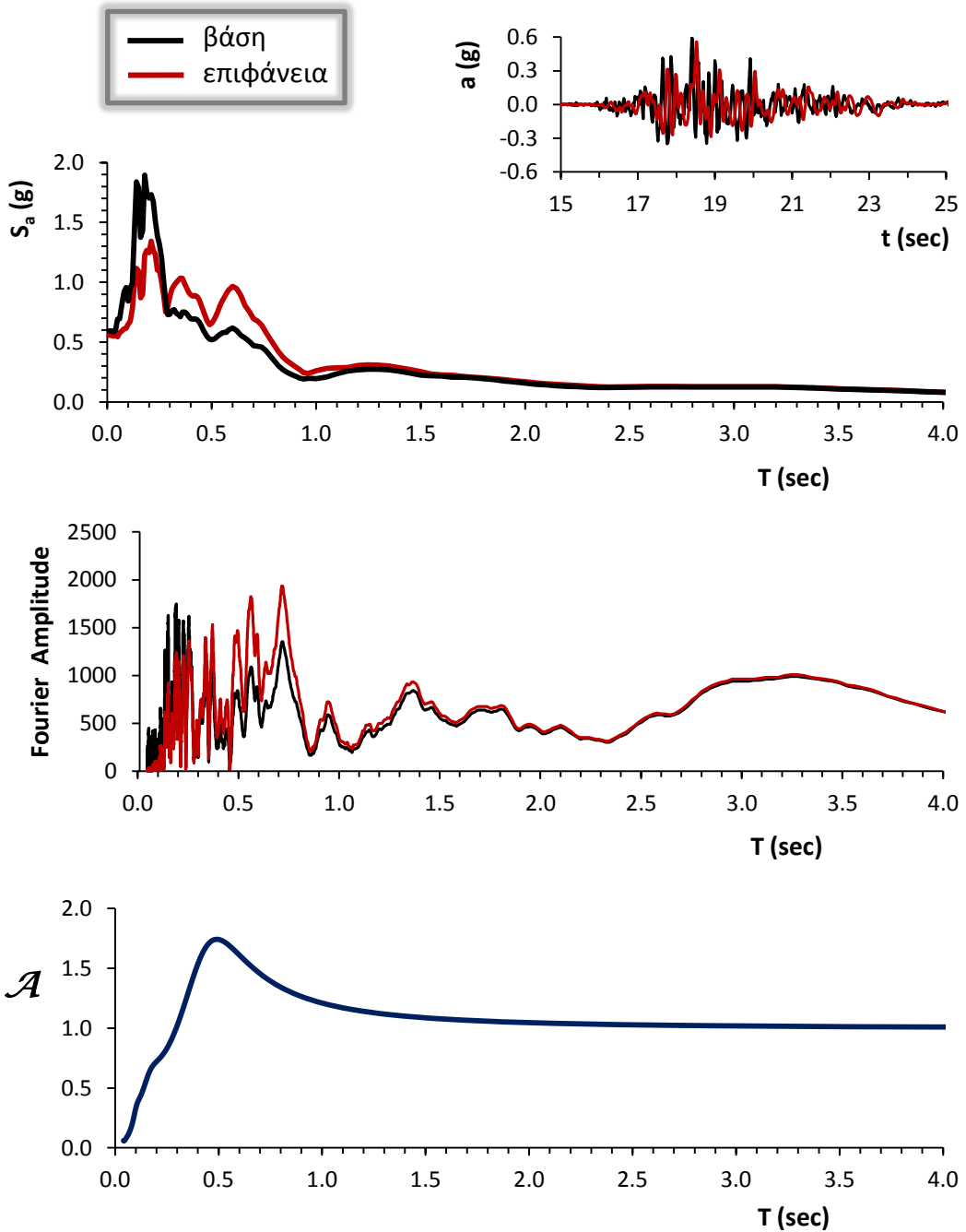


**Σχήμα 5.107:** Το φάσμα πλάτους Fourier από την ισοδύναμη ελαστική ανάλυση με το SHAKE2000 σε σύγκριση με τα αντίστοιχα από τις δύο συνιστώσες της καταγραφής.

Ανάλυση 2<sup>η</sup>

**Σχήμα 5.108:** Το εδαφικό προφίλ σε όρους ταχύτητας διατμητικών κυμάτων ( $V_s$ ), οι μέγιστες εδαφικές επιταχύνσεις ( $\max a$ ), η ποσοστιαία μεταβολή της γωνιακής παραμόρφωσης ( $\gamma$  %) και ο λόγος της απομείωσης του μέτρου διατμήσεως ( $G$ ) σε σχέση με το βάθος της εδαφικής στήλης.

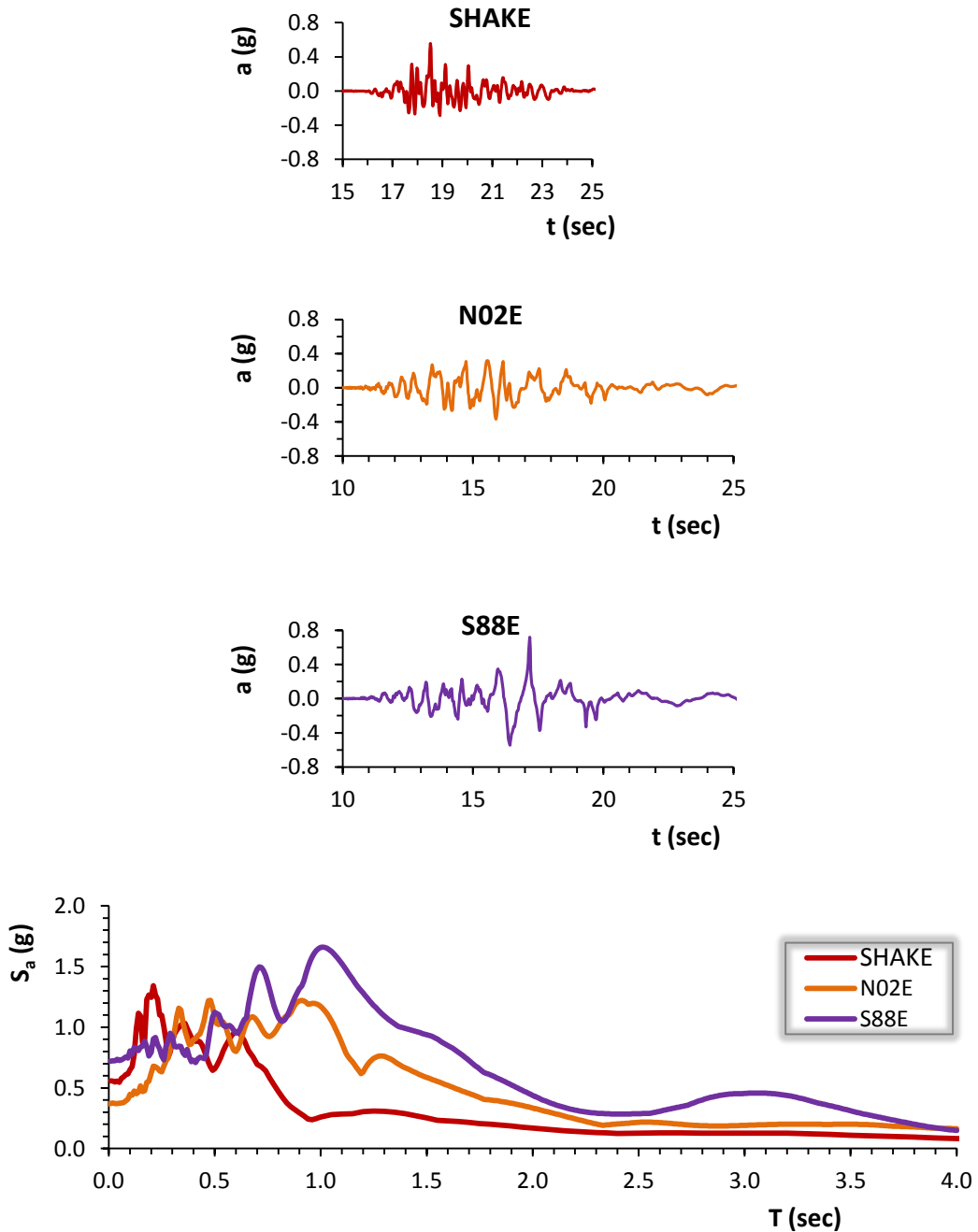
Ανάλυση 2<sup>η</sup>



**Σχήμα 5.109:** Η χρονοϊστορία επιταχύνσεων ( $a$ ), το ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων ( $S_a$ ) και το φάσμα του πλάτους Fourier μετά την ανάστροφη ισοδύναμη ελαστική ανάλυση με το SHAKE2000. Επίσης, ο συντελεστής φασματικής μεγέθυνσης  $\mathcal{A}$ . (δεσπόζουσα ιδιοπερίοδος εδάφους:  $T = 0.42$  sec)



Ανάλυση 2<sup>η</sup>



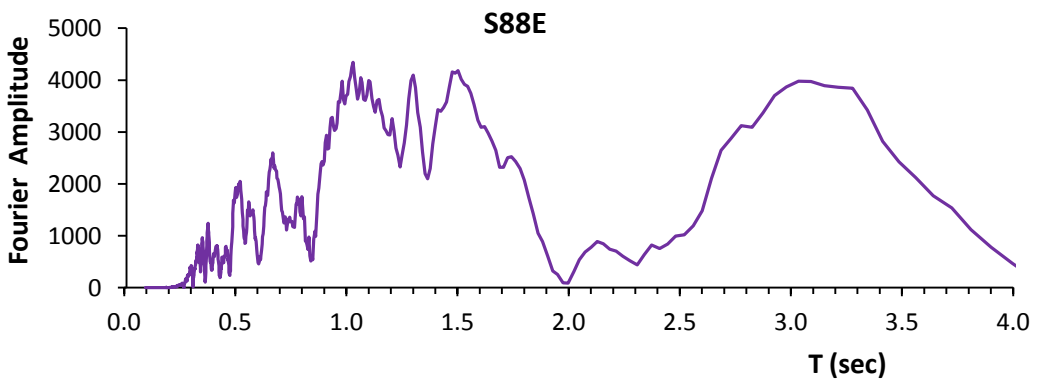
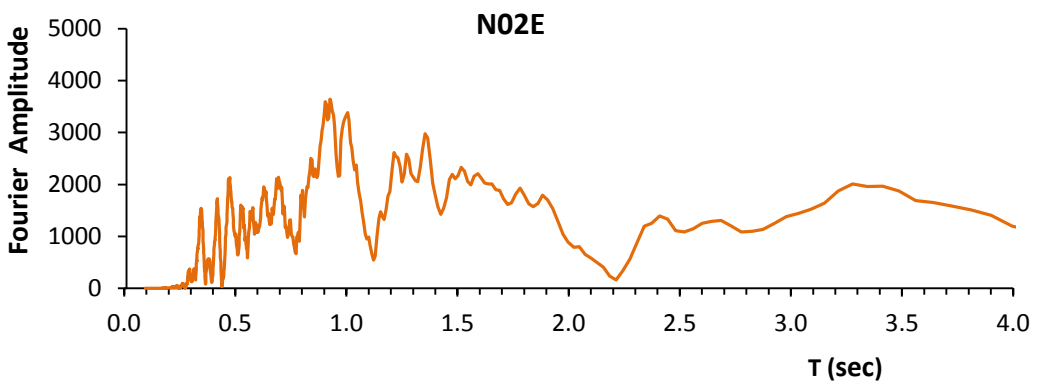
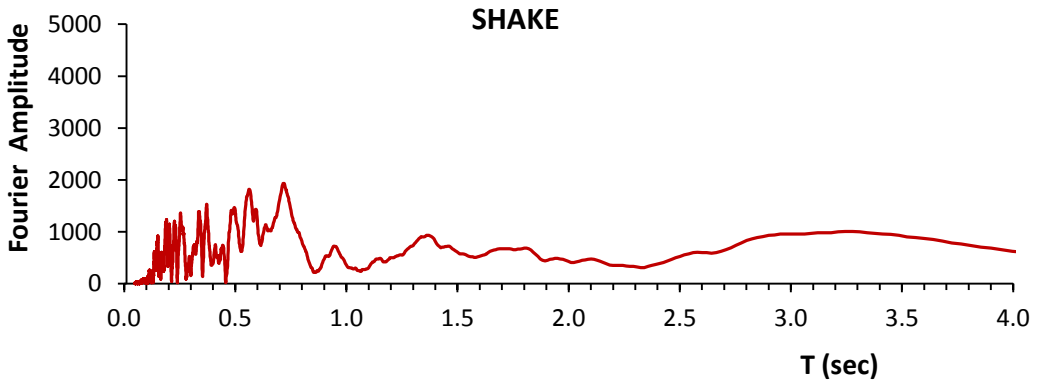
**Σχήμα 5.110:** Η ιστορία επιταχύνσεων ( $a$ ) και το ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων ( $S_a$ ) από την ισοδύναμη ελαστική ανάλυση με το SHAKE2000, σε σύγκριση με τα αντίστοιχα από τις δύο συνιστώσες της καταγραφής.

REHS

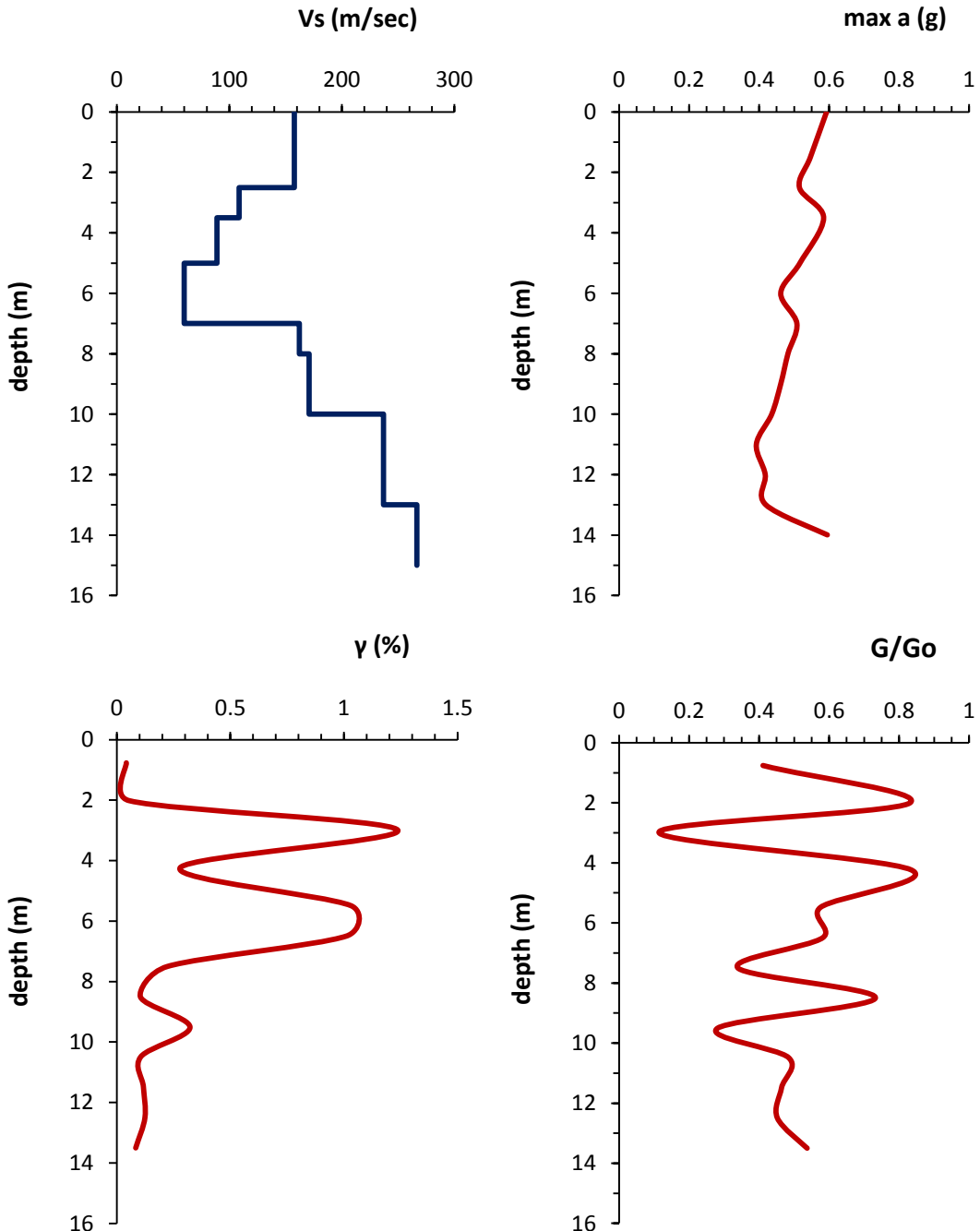
22 Φεβρουαρίου 2011

Syhora & Stokoe (1983)  
(σχέση για άμμους)

Ανάλυση 2<sup>η</sup>

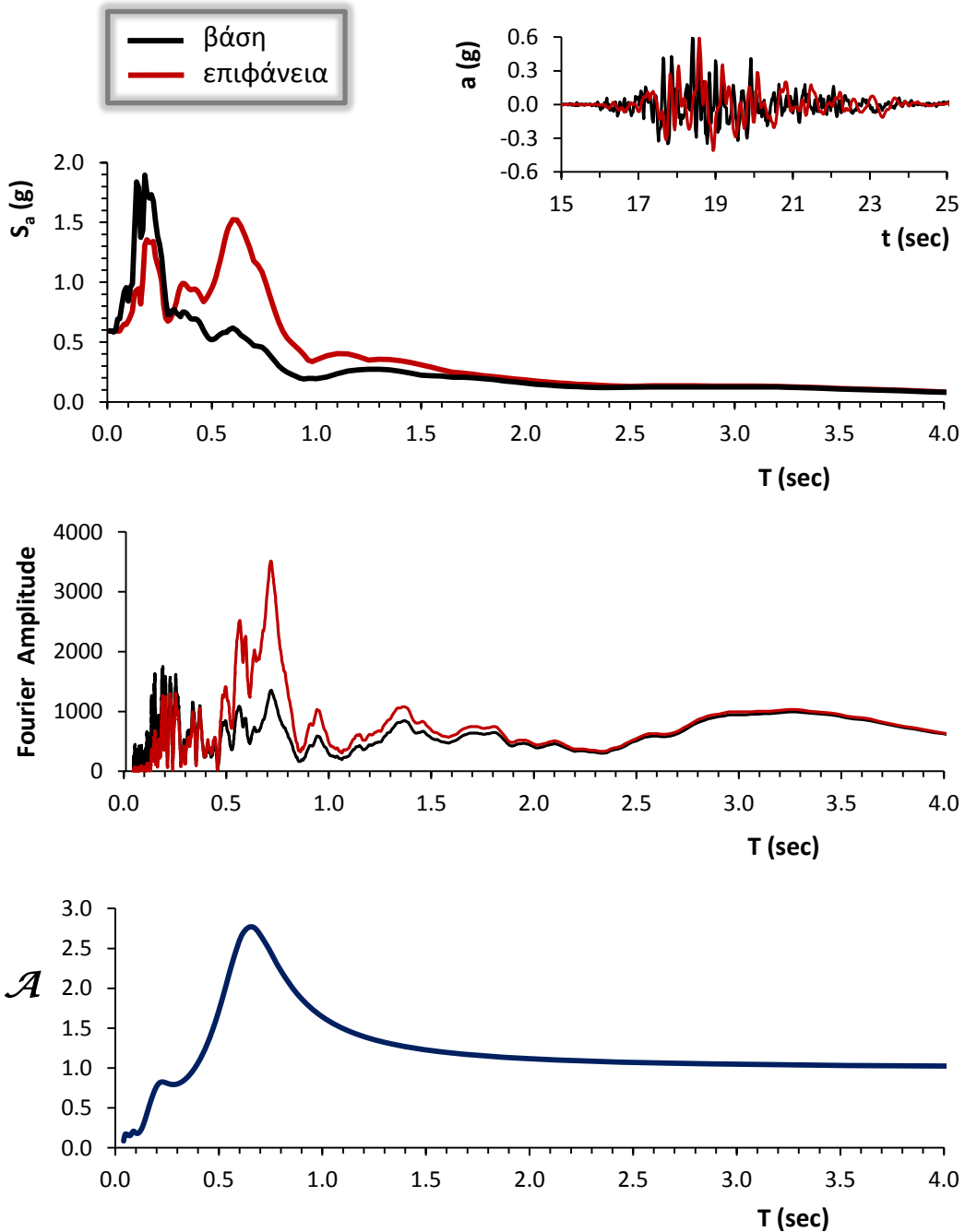


**Σχήμα 5.111:** Το φάσμα πλάτους Fourier από την ισοδύναμη ελαστική ανάλυση με το SHAKE2000 σε σύγκριση με τα αντίστοιχα από τις δύο συνιστώσες της καταγραφής.



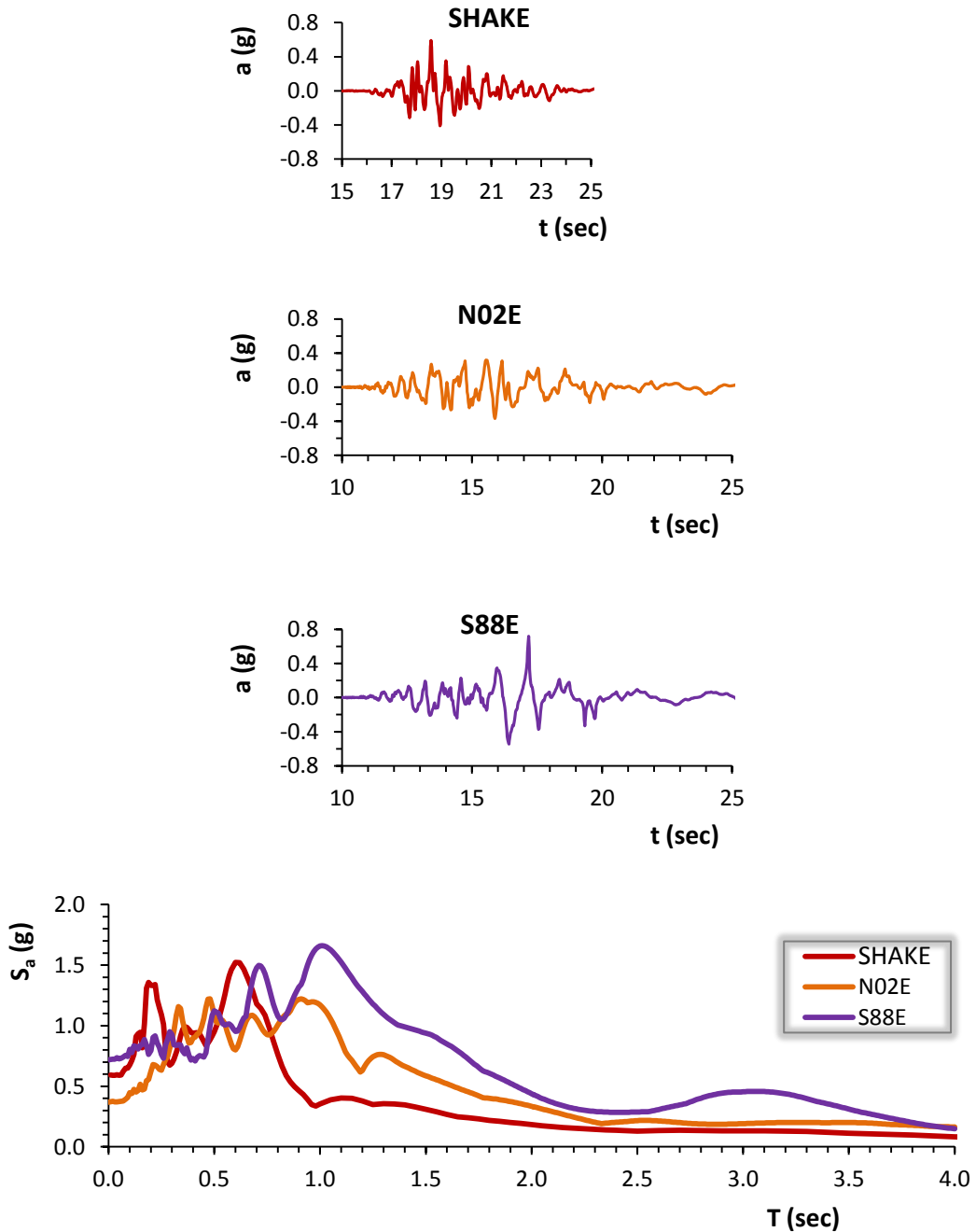
**Σχήμα 5.112:** Το εδαφικό προφίλ σε όρους ταχύτητας διατμητικών κυμάτων ( $V_s$ ), οι μέγιστες εδαφικές επιταχύνσεις ( $\max a$ ), η ποσοστιαία μεταβολή της γωνιακής παραμόρφωσης ( $\gamma$  %) και ο λόγος της απομείωσης του μέτρου διατμήσεως ( $G$ ) σε σχέση με το βάθος της εδαφικής στήλης.

Ανάλυση 3<sup>η</sup>



**Σχήμα 5.113:** Η χρονοϊστορία επιταχύνσεων ( $a$ ), το ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων ( $S_a$ ) και το φάσμα του πλάτους Fourier μετά την ανάστροφη ισοδύναμη ελαστική ανάλυση με το SHAKE2000. Επίσης, ο συντελεστής φασματικής μεγέθυνσης  $\mathcal{A}$ . (δεσπάζουσα ιδιοπερίοδος εδάφους:  $T = 0.50$  sec)

Ανάλυση 3<sup>η</sup>



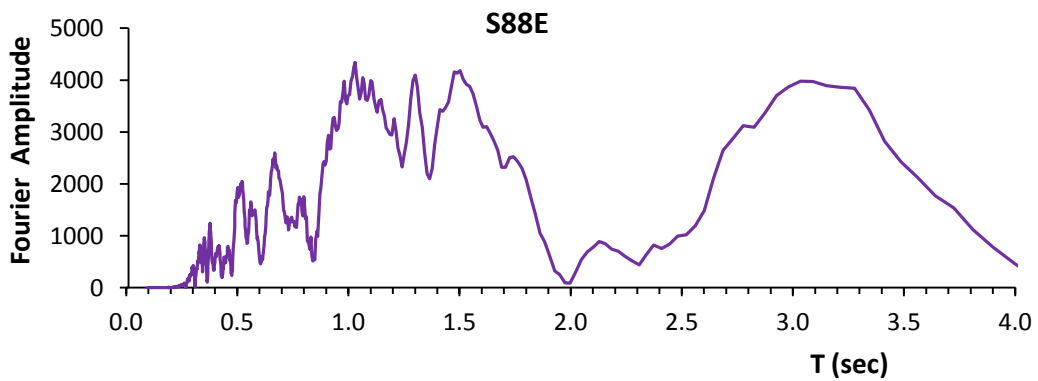
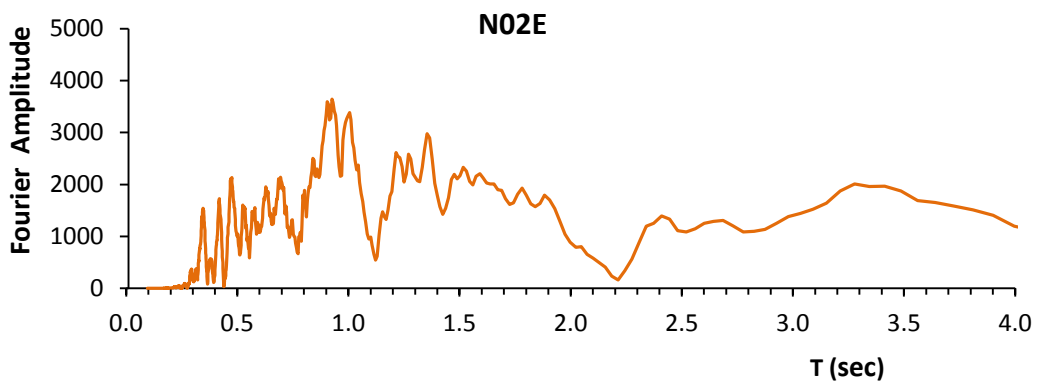
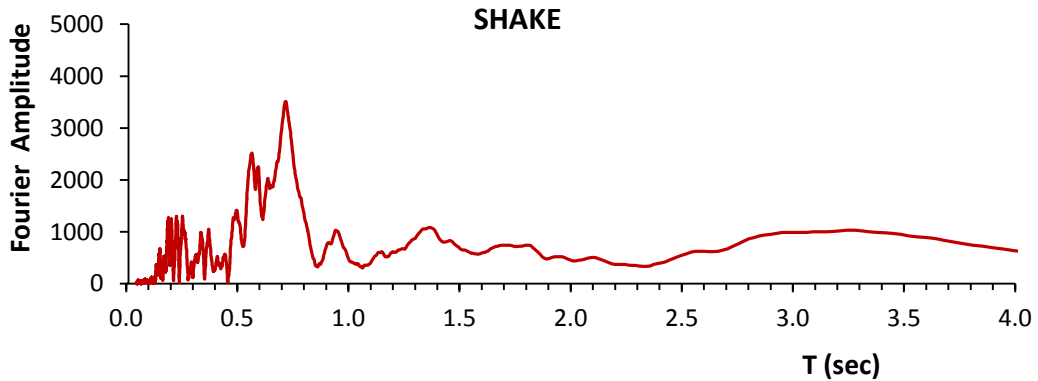
**Σχήμα 5.114:** Η ιστορία επιταχύνσεων ( $a$ ) και το ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων ( $S_a$ ) από την ισοδύναμη ελαστική ανάλυση με το SHAKE2000, σε σύγκριση με τα αντίστοιχα από τις δύο συνιστώσες της καταγραφής.

REHS

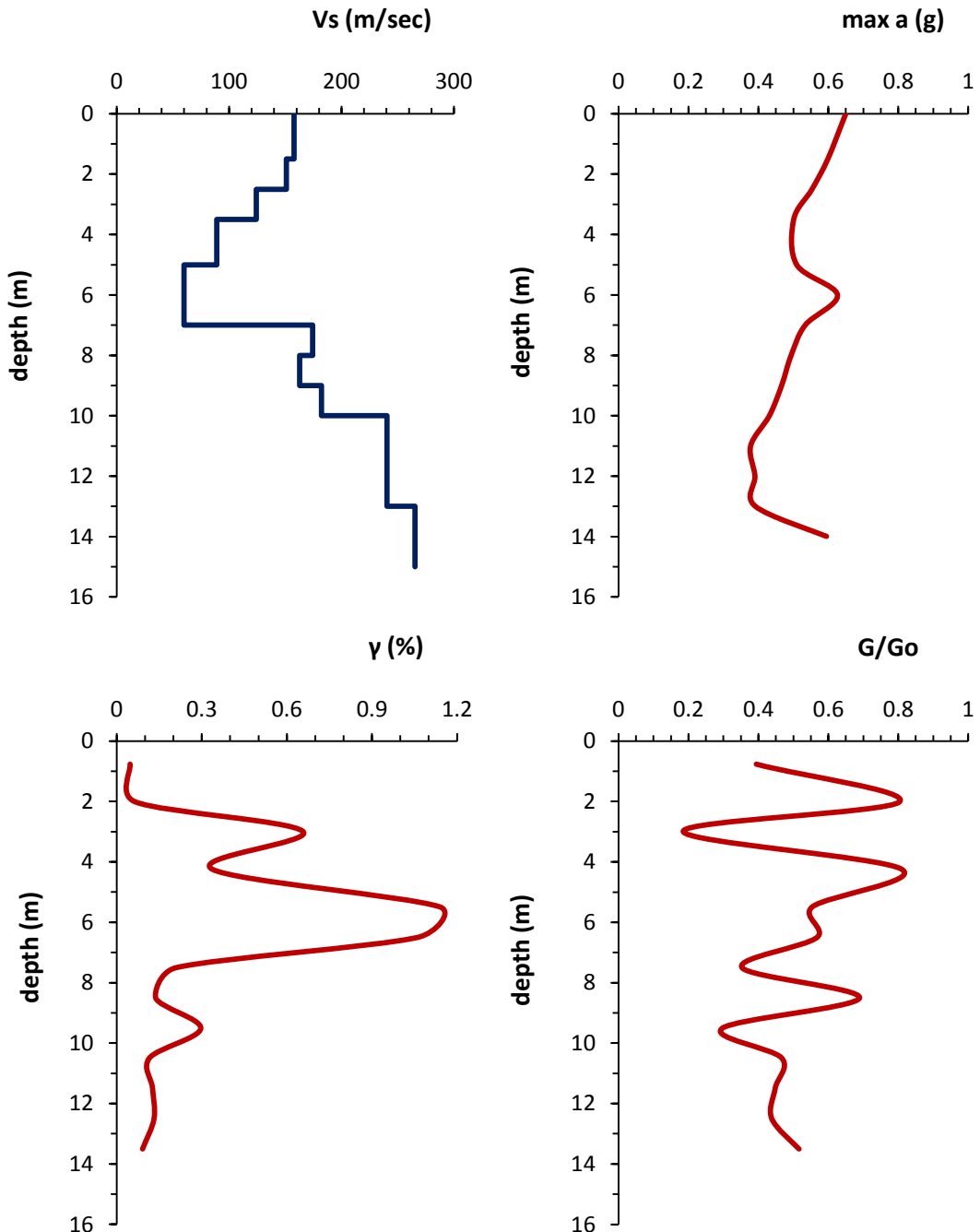
22 Φεβρουαρίου 2011

Dikmen (2009)  
(γενική σχέση)

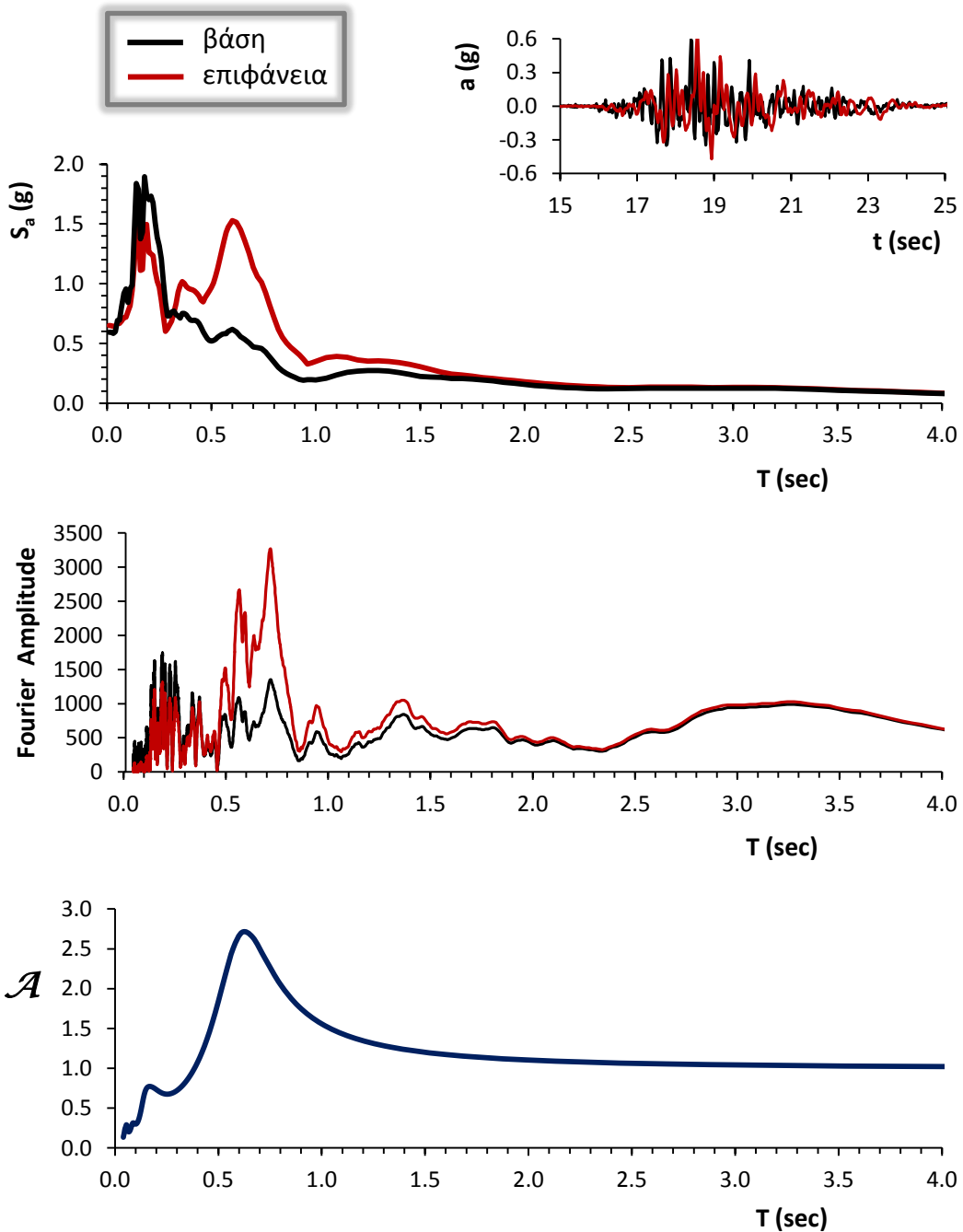
Ανάλυση 3<sup>η</sup>



**Σχήμα 5.115:** Το φάσμα πλάτους Fourier από την ισοδύναμη ελαστική ανάλυση με το SHAKE2000 σε σύγκριση με τα αντίστοιχα από τις δύο συνιστώσες της καταγραφής.



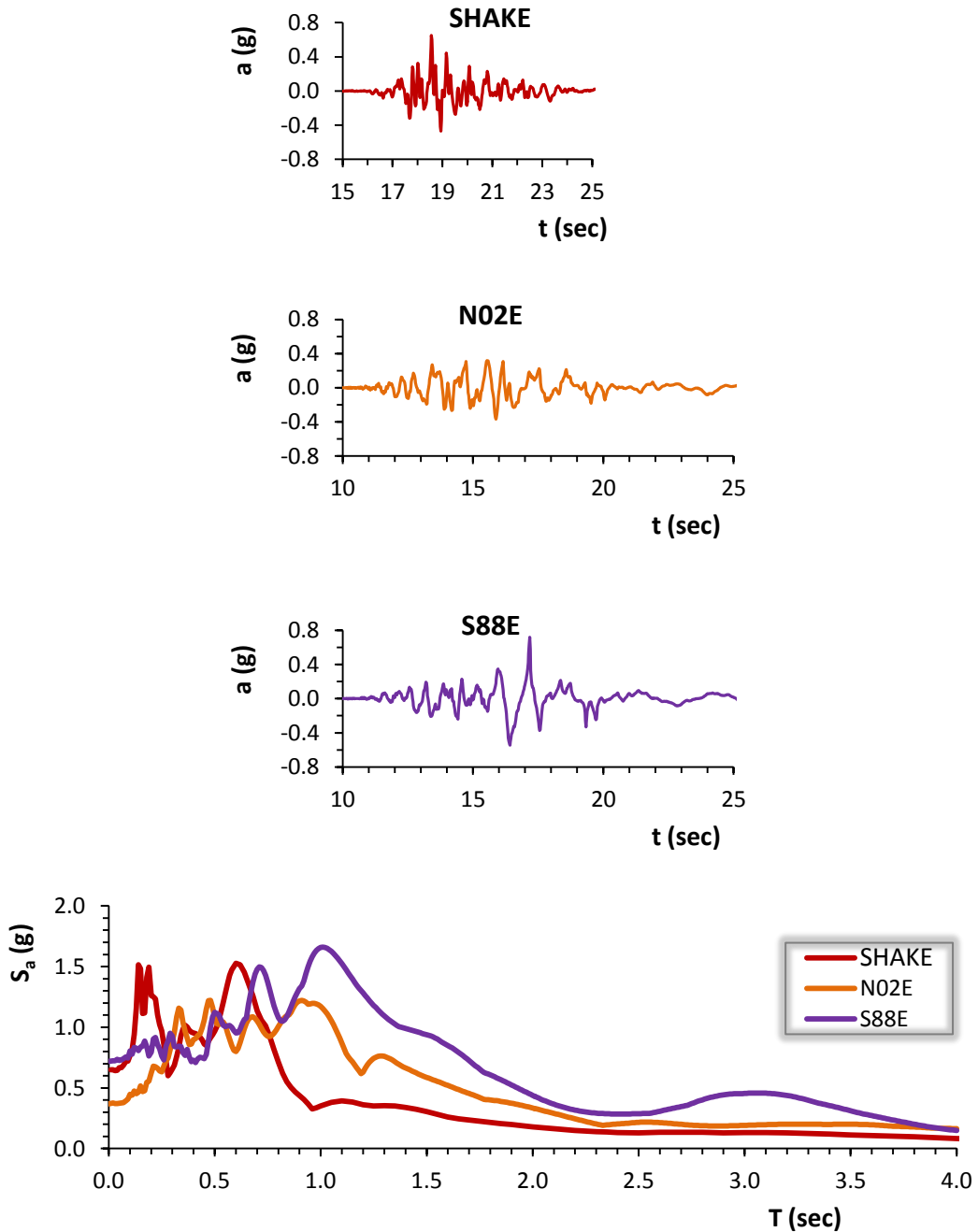
**Σχήμα 5.116:** Το εδαφικό προφίλ σε όρους ταχύτητας διατμητικών κυμάτων ( $V_s$ ), οι μέγιστες εδαφικές επιταχύνσεις ( $\max a$ ), η ποσοστιαία μεταβολή της γωνιακής παραμόρφωσης ( $\gamma$  %) και ο λόγος της απομείωσης του μέτρου διατμήσεως ( $G$ ) σε σχέση με το βάθος της εδαφικής στήλης.

Ανάλυση 3<sup>η</sup>

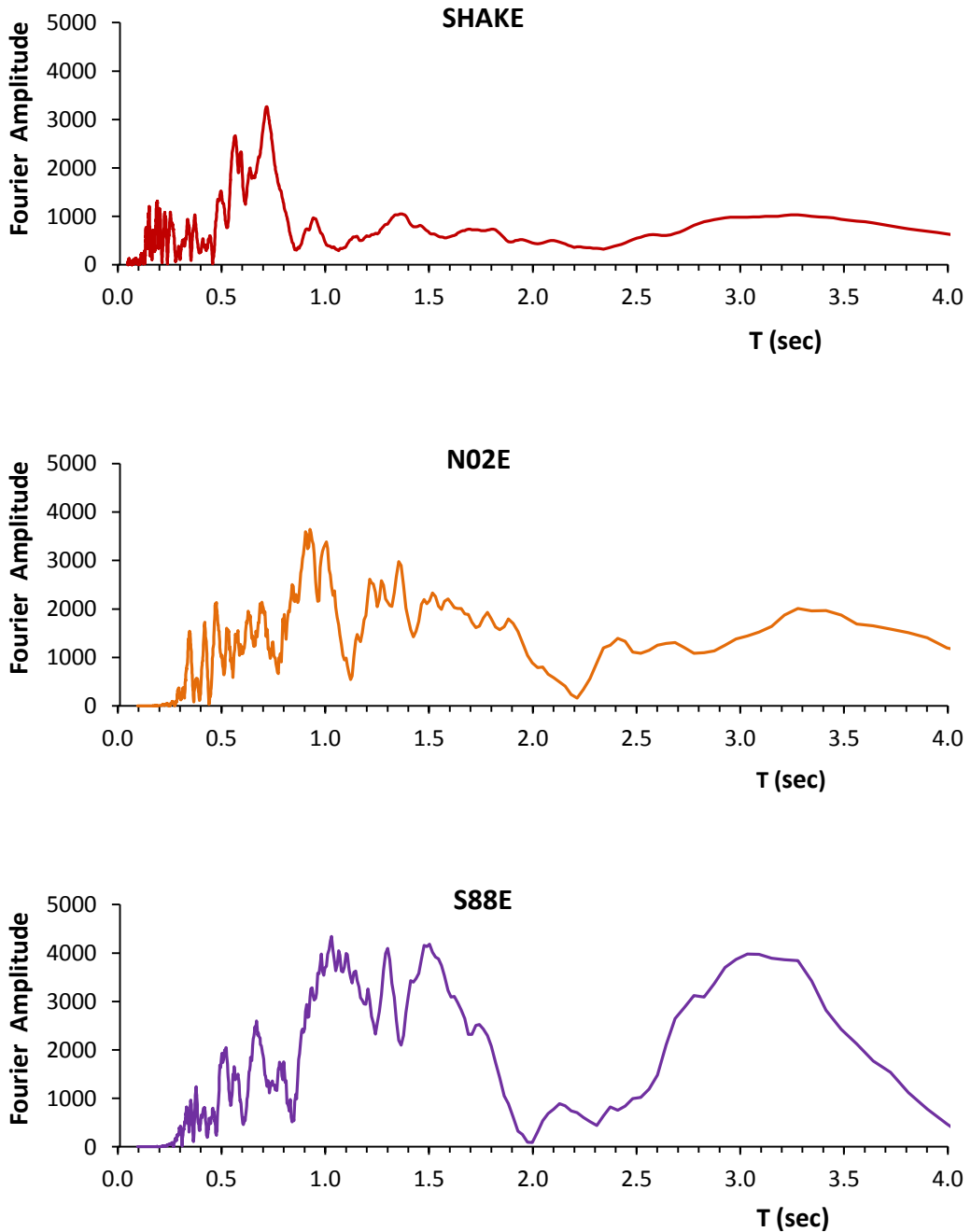
**Σχήμα 5.117:** Η χρονοϊστορία επιταχύνσεων ( $a$ ), το ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων ( $S_a$ ) και το φάσμα του πλάτους Fourier μετά την ανάστροφη ισοδύναμη ελαστική ανάλυση με το SHAKE2000. Επίσης, ο συντελεστής φασματικής μεγέθυνσης  $\mathcal{A}$ . (δεσπόμενη ιδιοπερίοδος εδάφους:  $T = 0.50$  sec)



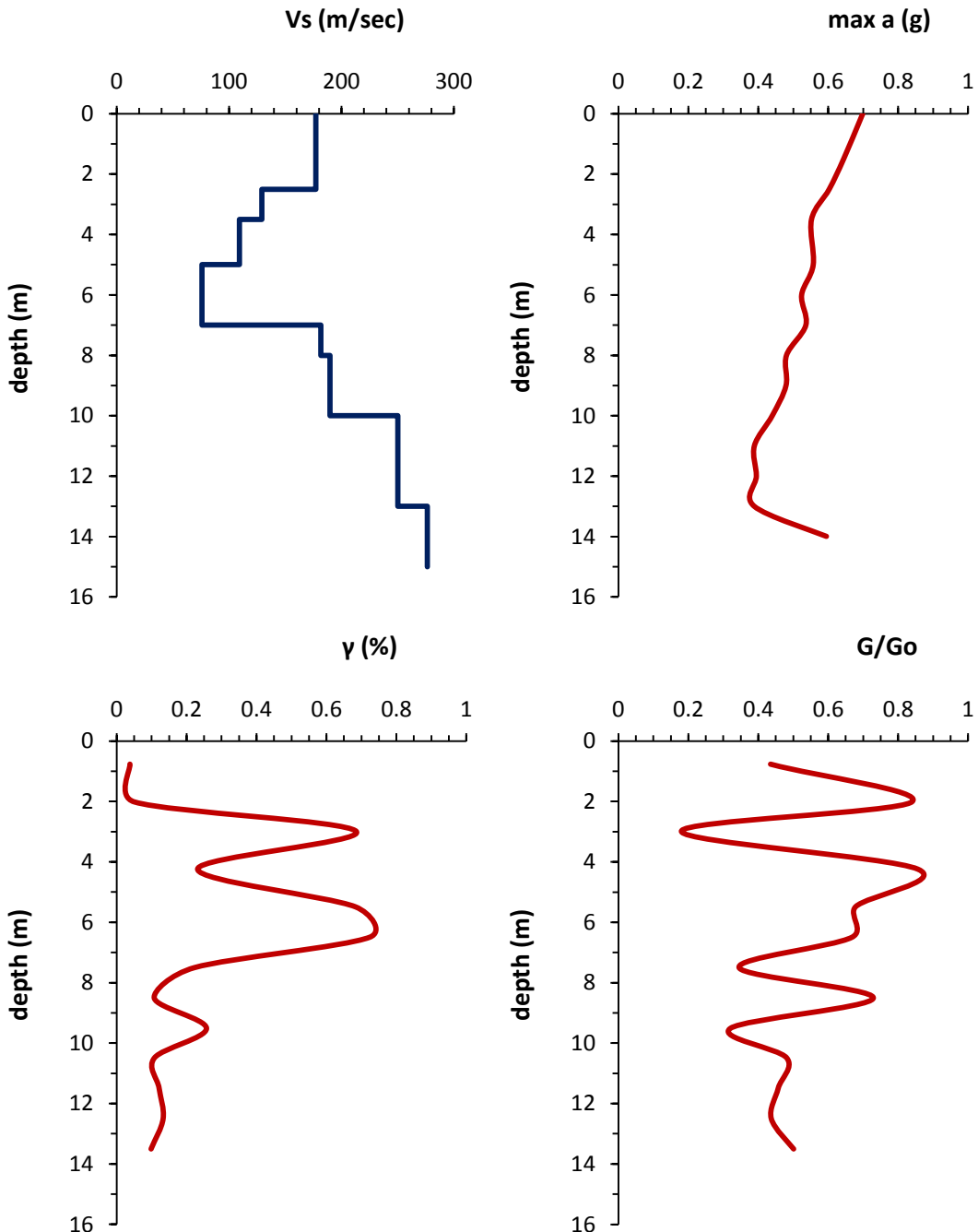
Ανάλυση 3<sup>η</sup>



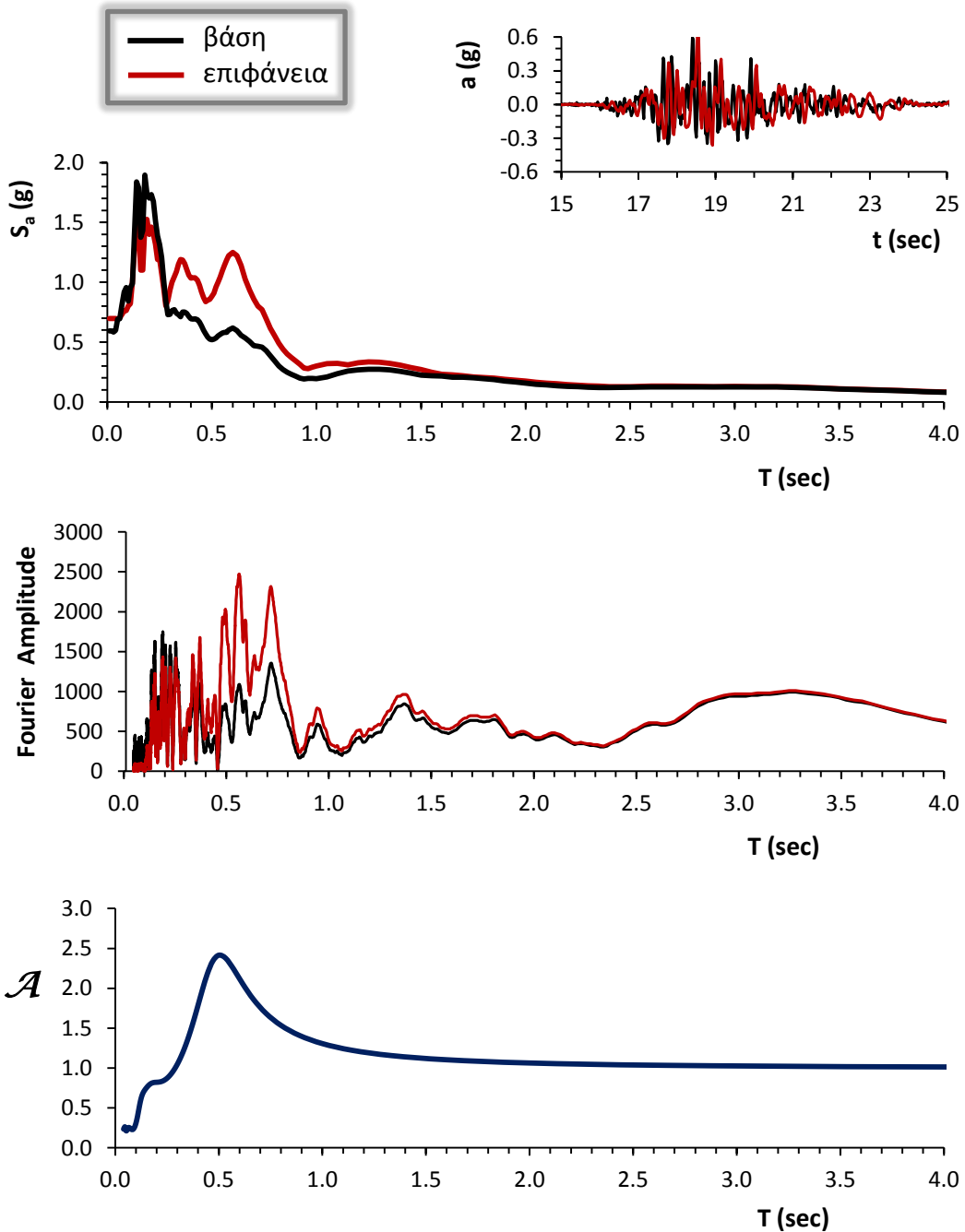
**Σχήμα 5.118:** Η ιστορία επιταχύνσεων ( $a$ ) και το ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων ( $S_a$ ) από την ισοδύναμη ελαστική ανάλυση με το SHAKE2000, σε σύγκριση με τα αντίστοιχα από τις δύο συνιστώσες της καταγραφής.



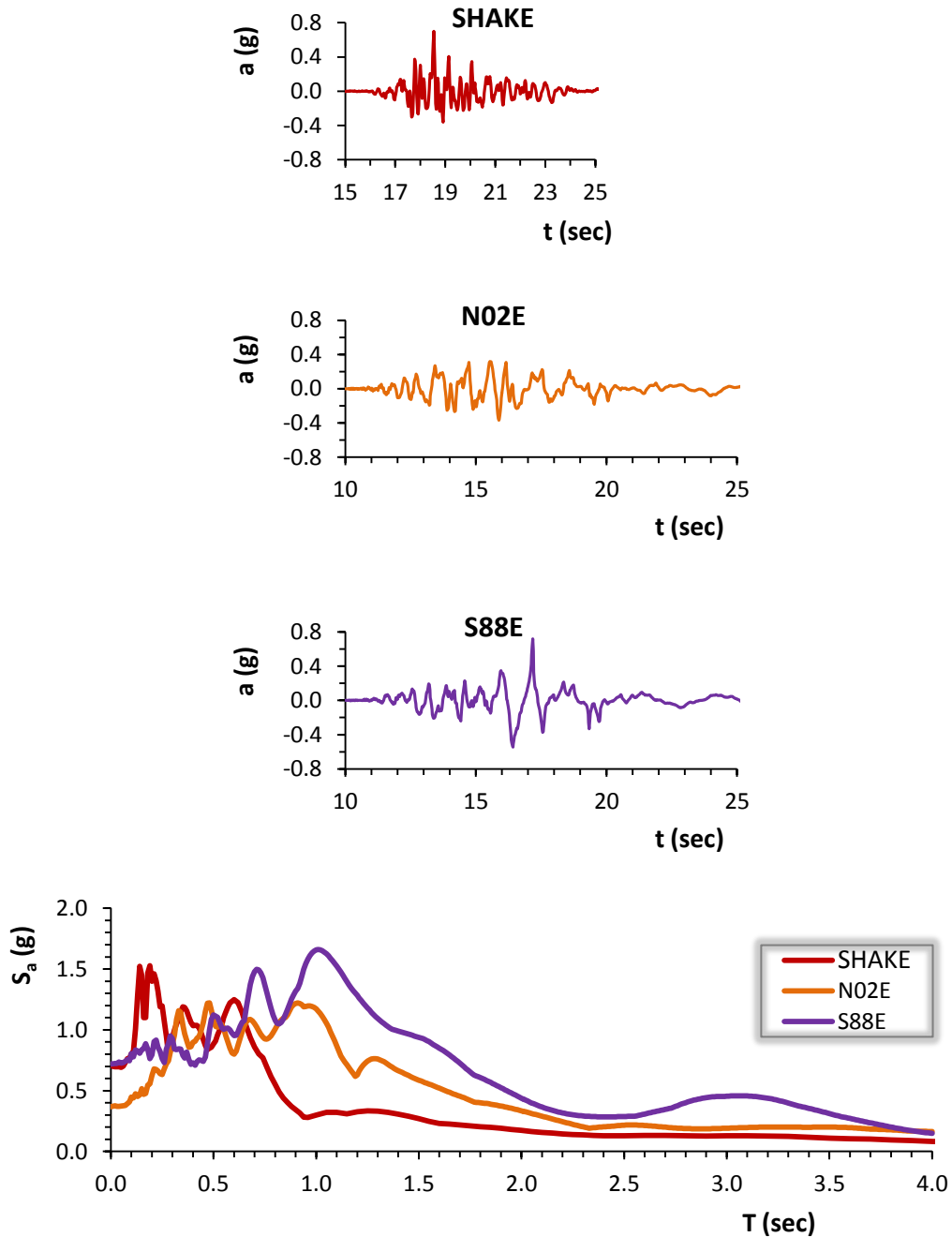
**Σχήμα 5.119:** Το φάσμα πλάτους Fourier από την ισοδύναμη ελαστική ανάλυση με το SHAKE2000 σε σύγκριση με τα αντίστοιχα από τις δύο συνιστώσες της καταγραφής.

Ανάλυση 3<sup>η</sup>

**Σχήμα 5.120:** Το εδαφικό προφίλ σε όρους ταχύτητας διατμητικών κυμάτων ( $V_s$ ), οι μέγιστες εδαφικές επιταχύνσεις ( $\max a$ ), η ποσοστιαία μεταβολή της γωνιακής παραμόρφωσης ( $\gamma$  %) και ο λόγος της απομείωσης του μέτρου διατμήσεως ( $G$ ) σε σχέση με το βάθος της εδαφικής στήλης.

Ανάλυση 3<sup>η</sup>

**Σχήμα 5.121:** Η χρονοϊστορία επιταχύνσεων ( $a$ ), το ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων ( $S_a$ ) και το φάσμα του πλάτους Fourier μετά την ανάστροφη ισοδύναμη ελαστική ανάλυση με το SHAKE2000. Επίσης, ο συντελεστής φασματικής μεγέθυνσης  $\mathcal{A}$ . (δεσπόζουσα ιδιοπερίοδος εδάφους:  $T = 0.45$  sec)

Ανάλυση 3<sup>η</sup>

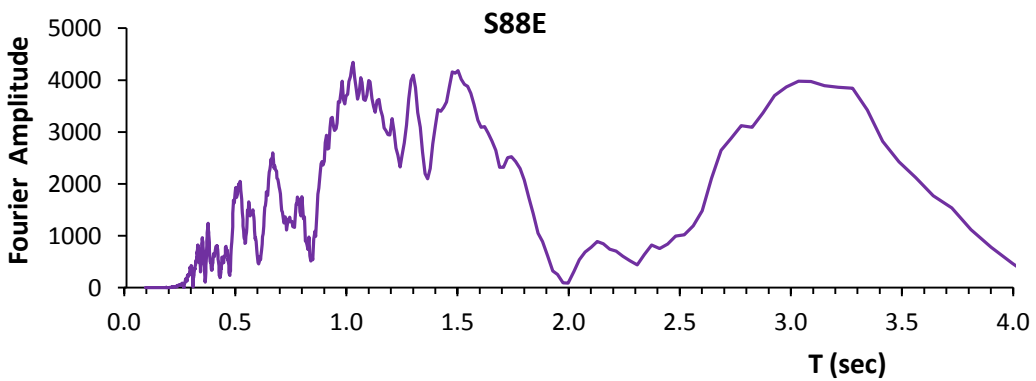
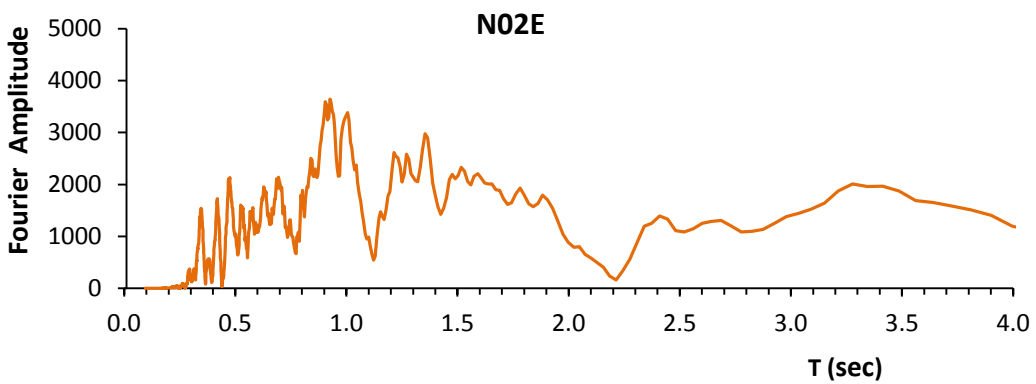
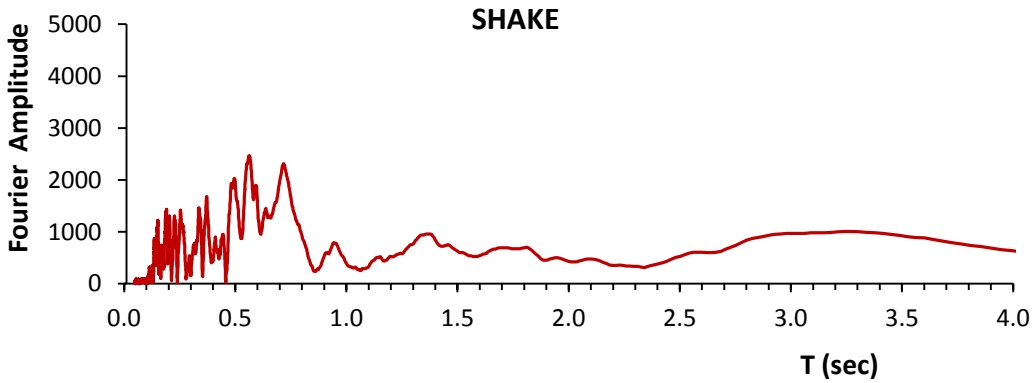
**Σχήμα 5.122:** Η χρονιοϊστορία επιταχύνσεων ( $a$ ) και το ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων ( $S_a$ ) από την ισοδύναμη ελαστική ανάλυση με το SHAKE2000, σε σύγκριση με τα αντίστοιχα από τις δύο συνιστώσες της καταγραφής.

REHS

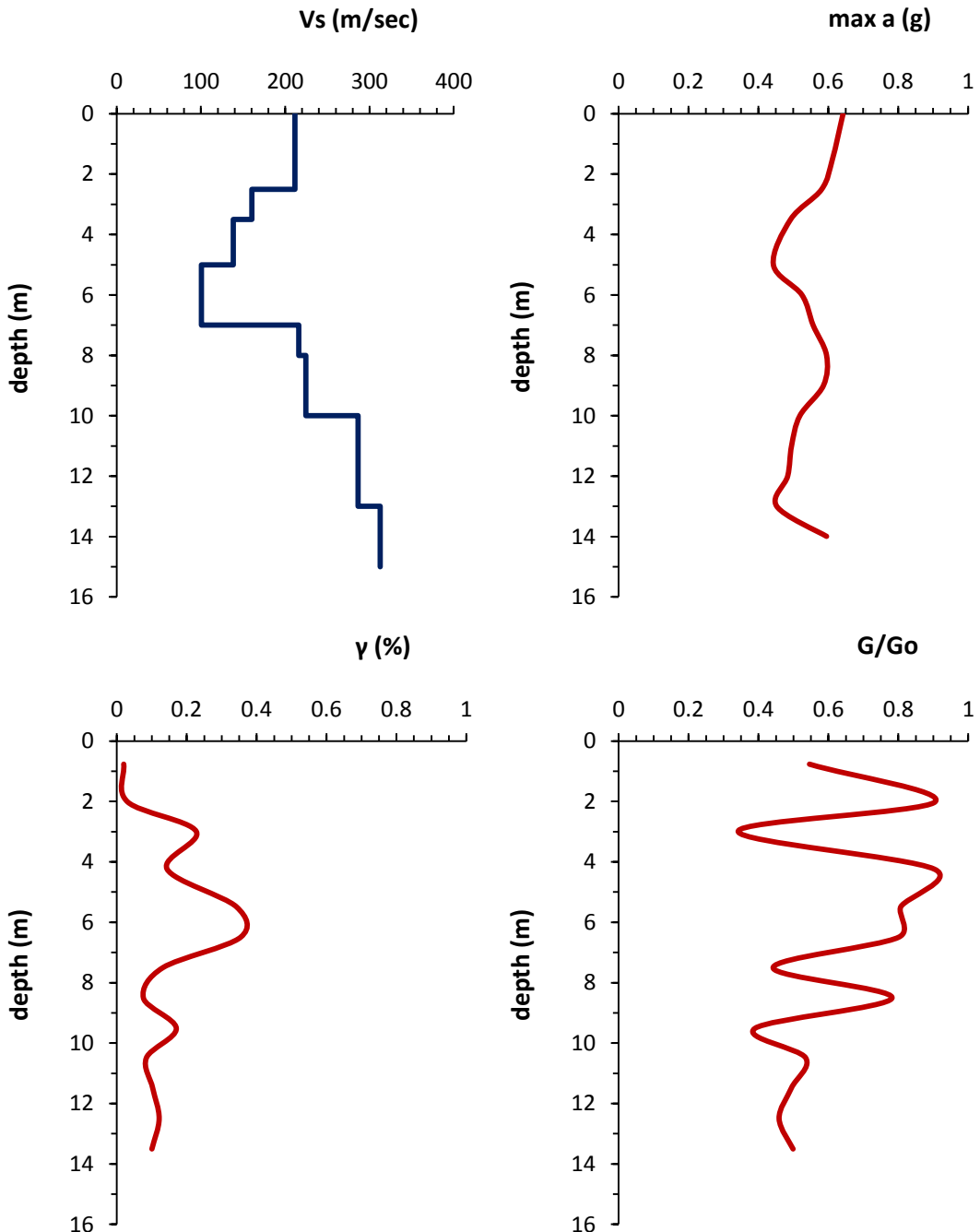
22 Φεβρουαρίου 2011

Imai & Yoshimura (1975)  
(γενική σχέση)

Ανάλυση 3<sup>η</sup>

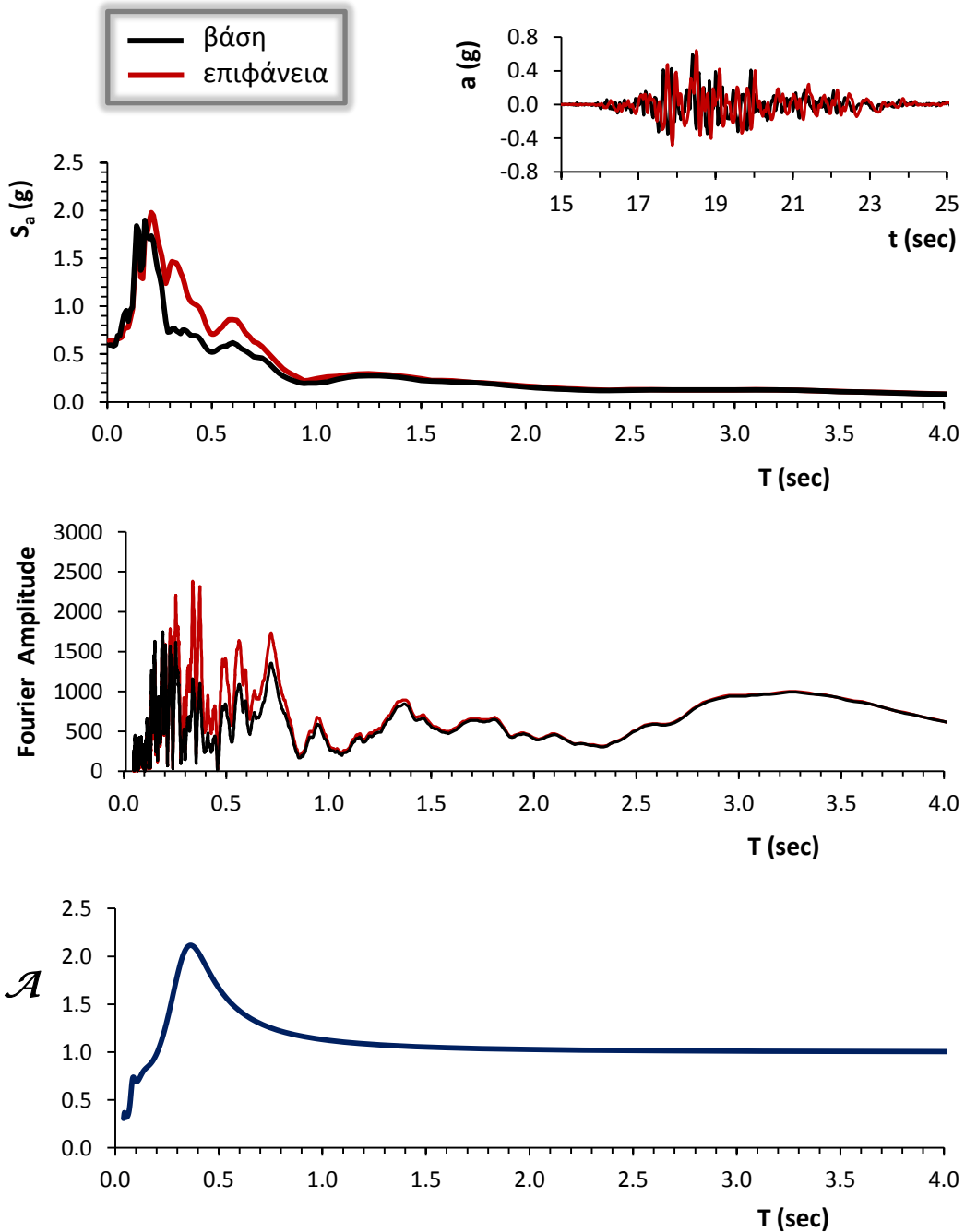


**Σχήμα 5.123:** Το φάσμα πλάτους Fourier από την ισοδύναμη ελαστική ανάλυση με το SHAKE2000 σε σύγκριση με τα αντίστοιχα από τις δύο συνιστώσες της καταγραφής.

Ανάλυση 3<sup>η</sup>

**Σχήμα 5.124:** Το εδαφικό προφίλ σε όρους ταχύτητας διατμητικών κυμάτων ( $V_s$ ), οι μέγιστες εδαφικές επιταχύνσεις ( $\max a$ ), η ποσοστιαία μεταβολή της γωνιακής παραμόρφωσης ( $\gamma$  %) και ο λόγος της απομείωσης του μέτρου διατμήσεως ( $G$ ) σε σχέση με το βάθος της εδαφικής στήλης.

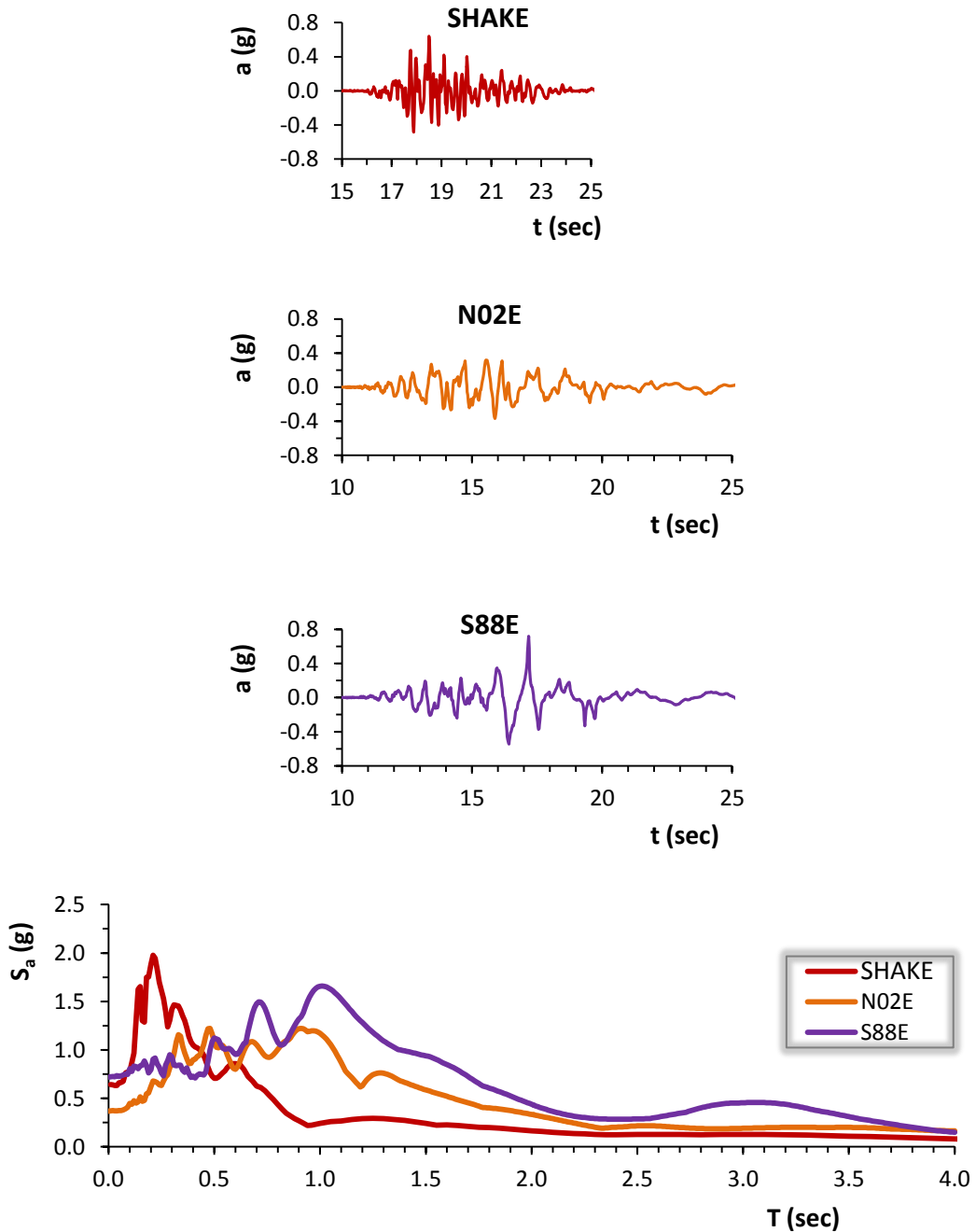
Ανάλυση 3<sup>η</sup>



**Σχήμα 5.125:** Η χρονοϊστορία επιταχύνσεων ( $a$ ), το ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων ( $S_a$ ) και το φάσμα του πλάτους Fourier μετά την ανάστροφη ισοδύναμη ελαστική ανάλυση με το SHAKE2000. Επίσης, ο συντελεστής φασματικής μεγέθυνσης  $\mathcal{A}$ . (δεσπίζουσα ιδιοπερίοδος εδάφους:  $T = 0.35$  sec)



Ανάλυση 3<sup>η</sup>



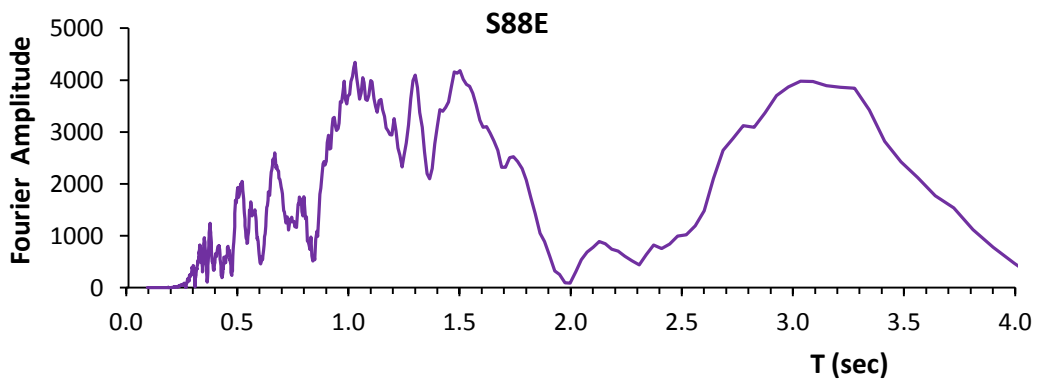
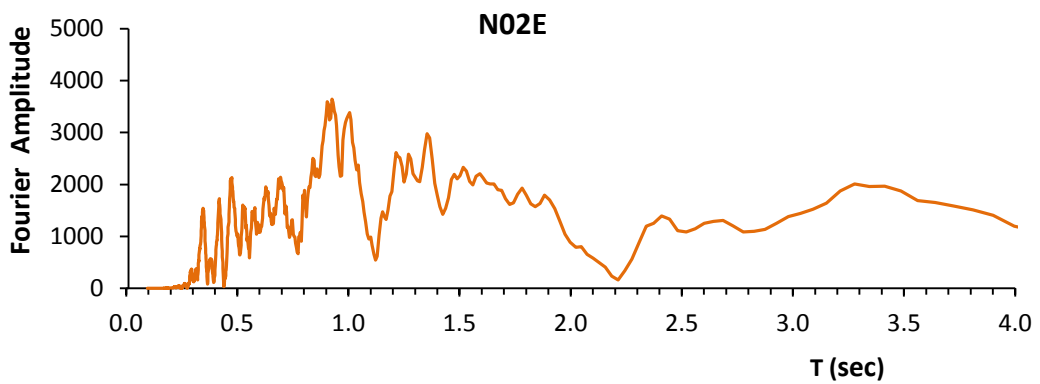
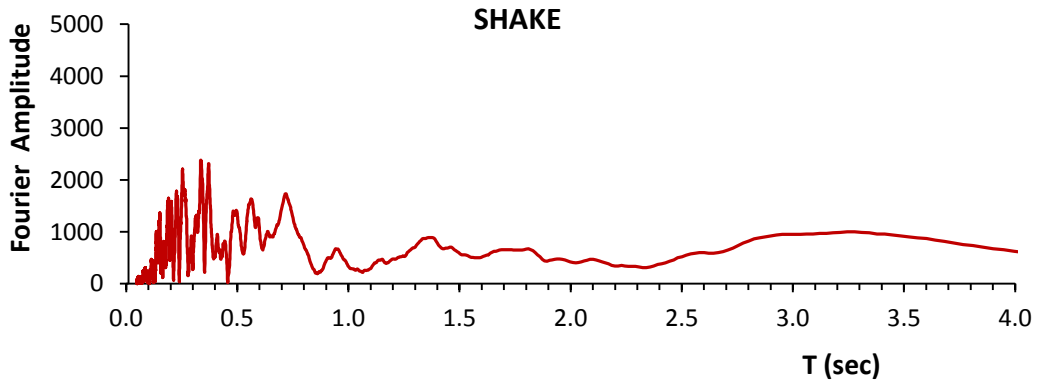
**Σχήμα 5.126:** Η χρονιοιστορία επιταχύνσεων ( $a$ ) και το ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων ( $S_a$ ) από την ισοδύναμη ελαστική ανάλυση με το SHAKE2000, σε σύγκριση με τα αντίστοιχα από τις δύο συνιστώσες της καταγραφής.

REHS

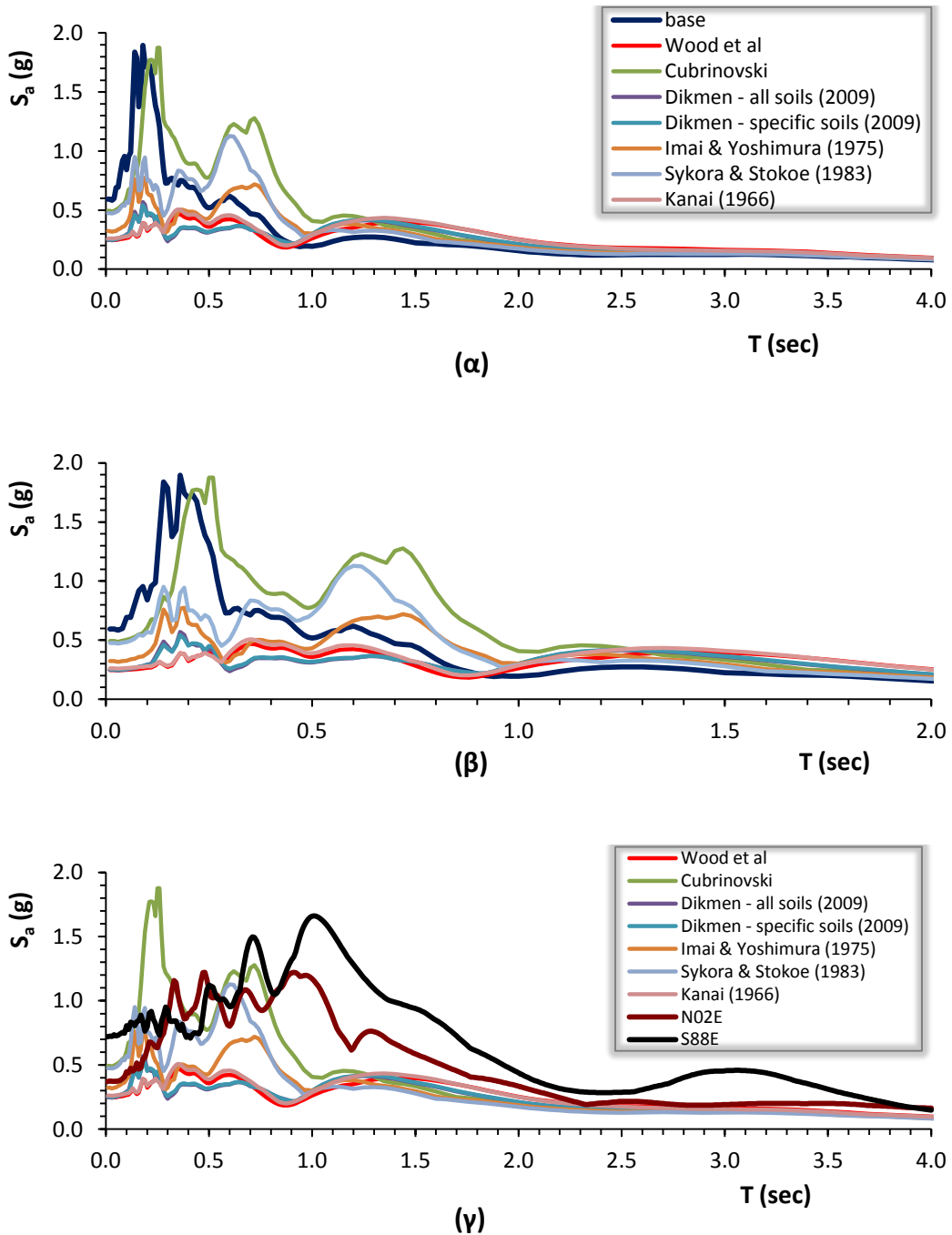
22 Φεβρουαρίου 2011

Syhora & Stokoe (1983)  
(σχέση για άμμους)

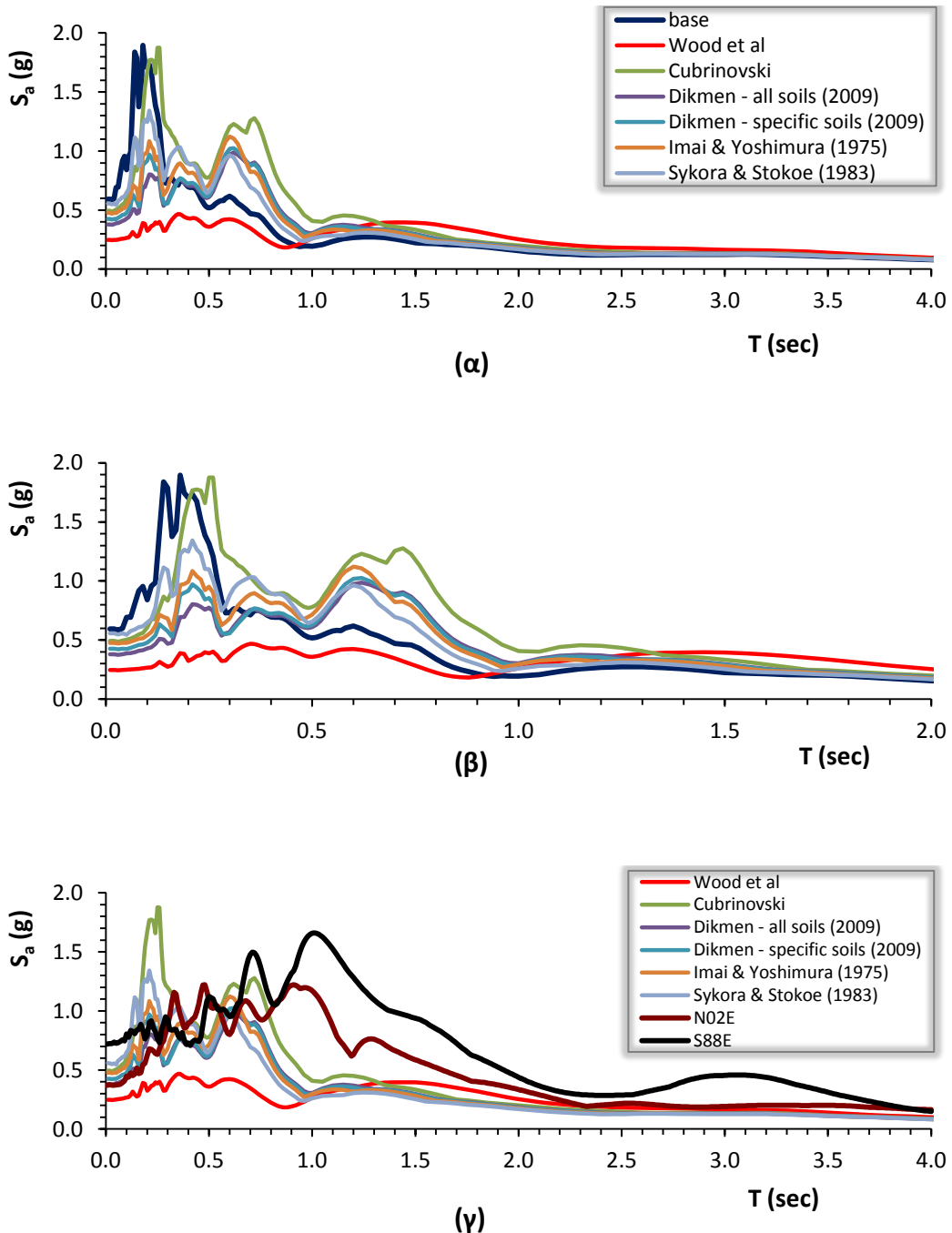
Ανάλυση 3<sup>η</sup>



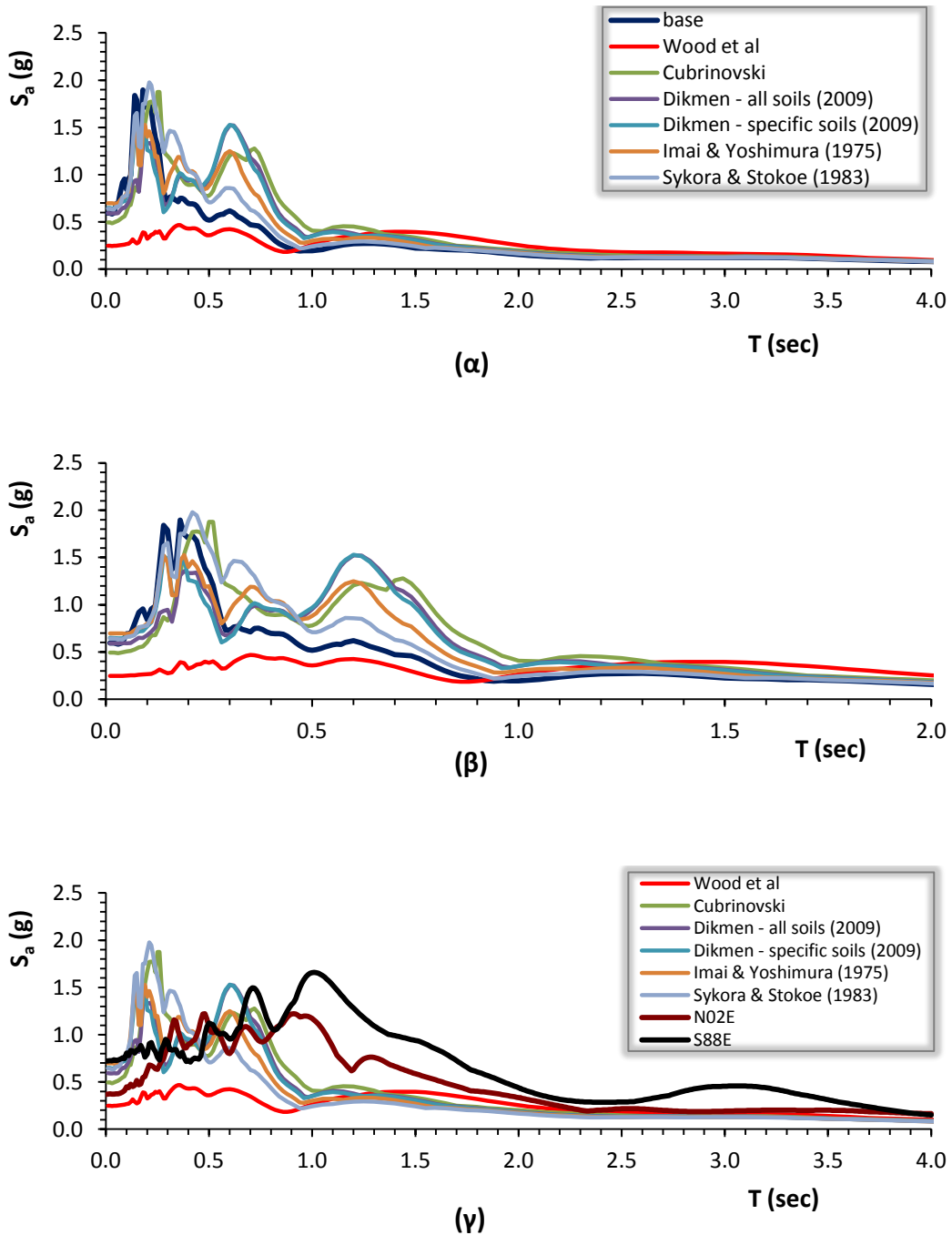
**Σχήμα 5.127:** Το φάσμα πλάτους Fourier από την ισοδύναμη ελαστική ανάλυση με το SHAKE2000 σε σύγκριση με τα αντίστοιχα από τις δύο συνιστώσες της καταγραφής.



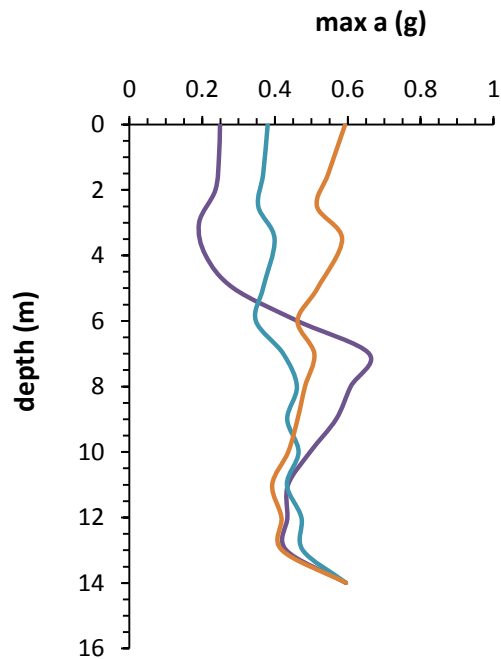
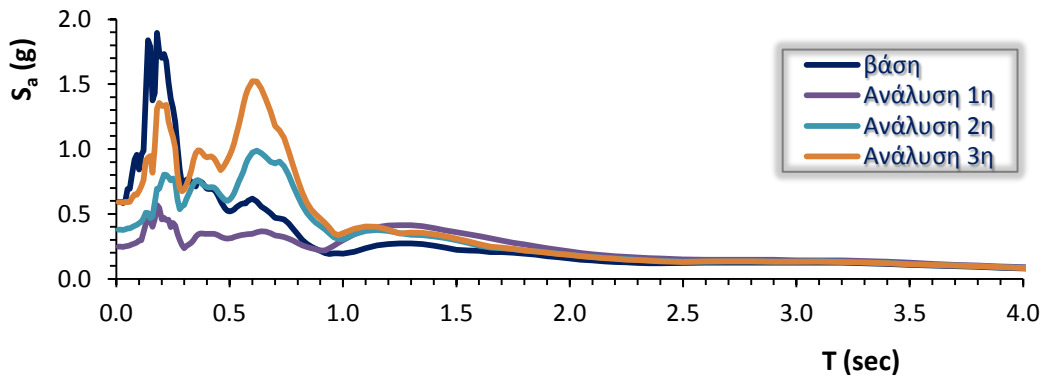
**Σχήμα 5.128:** ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων από το πρώτο σετ ισοδύναμων ελαστικών αναλύσεων με το λογισμικό SHAKE2000 για κάθε εδαφικό προφίλ του σταθμού REHS: (α) από 0 έως 4 sec, και (β) από 0 έως 2 sec αντίστοιχα. Στο σχήμα (γ) απεικονίζονται με μαύρο και βαθύ κόκκινο χρώμα τα φάσματα των συνιστωσών, N02E και S88E, της καταγραφής.



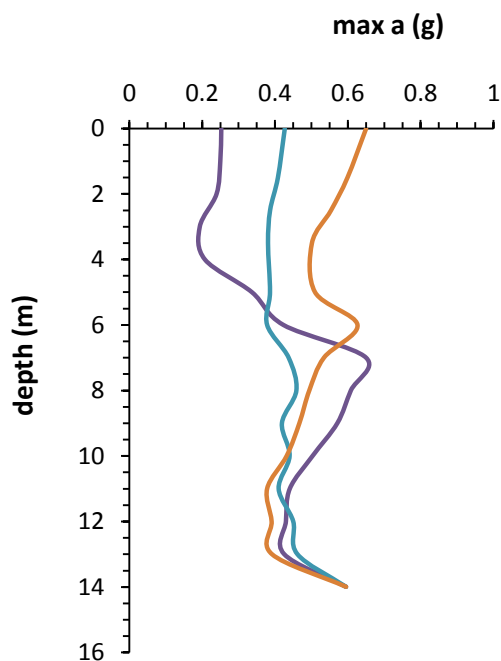
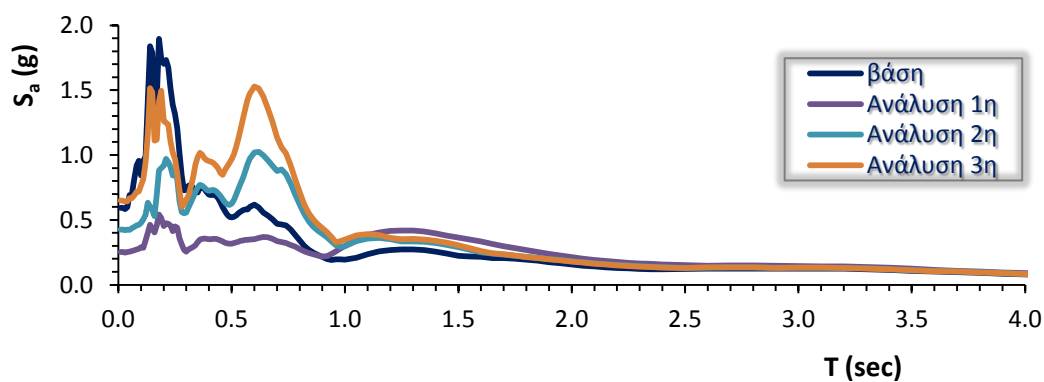
**Σχήμα 5.129:** ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων από το δεύτερο σετ ισοδύναμων ελαστικών αναλύσεων με το λογισμικό SHAKE2000 για κάθε εδαφικό προφίλ του σταθμού REHS: (α) από 0 έως 4 sec, και (β) από 0 έως 2 sec αντίστοιχα. Στο σχήμα (γ) απεικονίζονται με μαύρο και βαθύ κόκκινο χρώμα τα φάσματα των συνιστωσών, N02E και S88E, της καταγραφής.



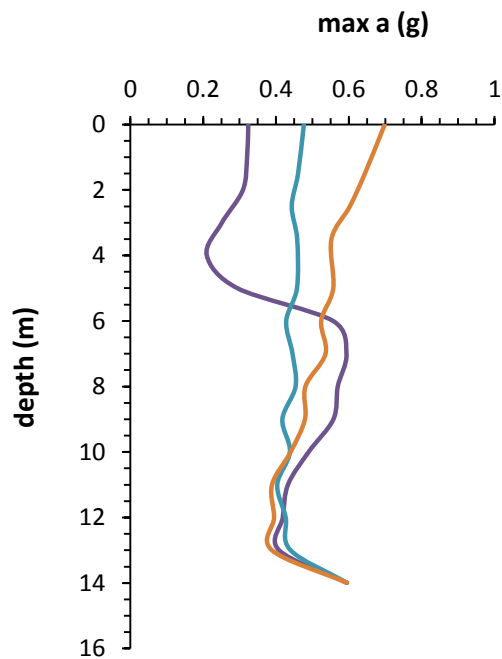
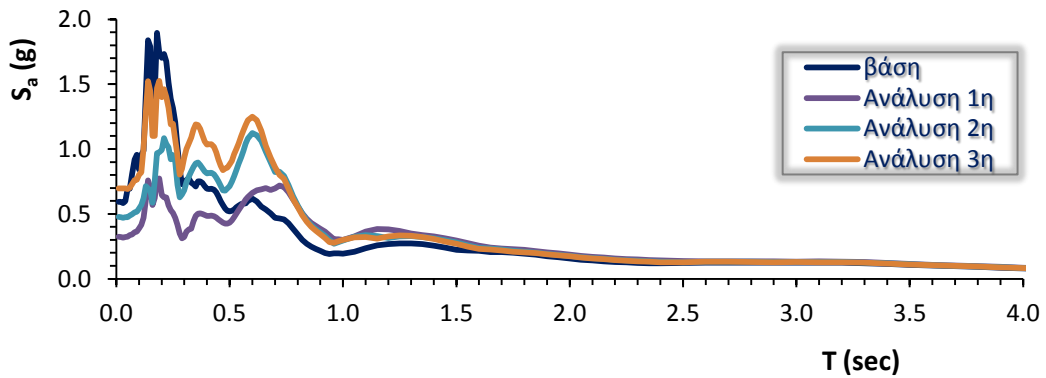
**Σχήμα 5.130:** ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων από το τρίτο σετ ισοδύναμων ελαστικών αναλύσεων με το λογισμικό SHAKE2000 για κάθε εδαφικό προφίλ του σταθμού REHS: (α) από 0 έως 4 sec, και (β) από 0 έως 2 sec αντίστοιχα. Στο σχήμα (γ) απεικονίζονται με μαύρο και βαθύ κόκκινο χρώμα τα φάσματα των συνιστωσών, N02E και S88E, της καταγραφής.



**Σχήμα 5.131:** ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων ( $S_a$ ) και η κατανομή της μέγιστης επιτάχυνσης ( $\max a$ ) με το βάθος, από τα 3 σετ αναλύσεων με το εδαφικό προφίλ από την γενική σχέση του Dikmen (2009) για τον σταθμό REHS.

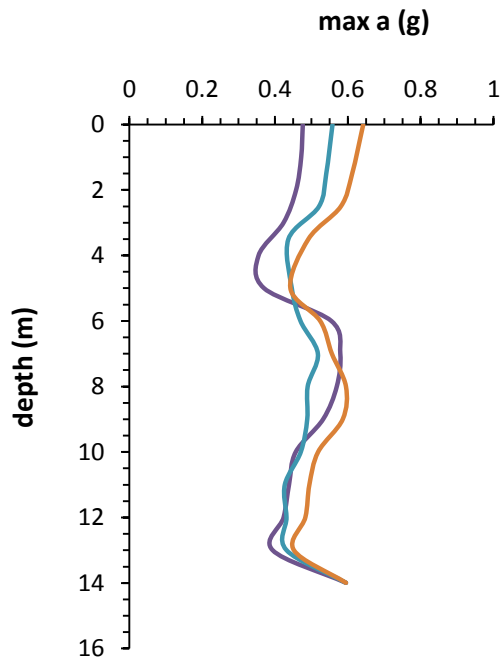
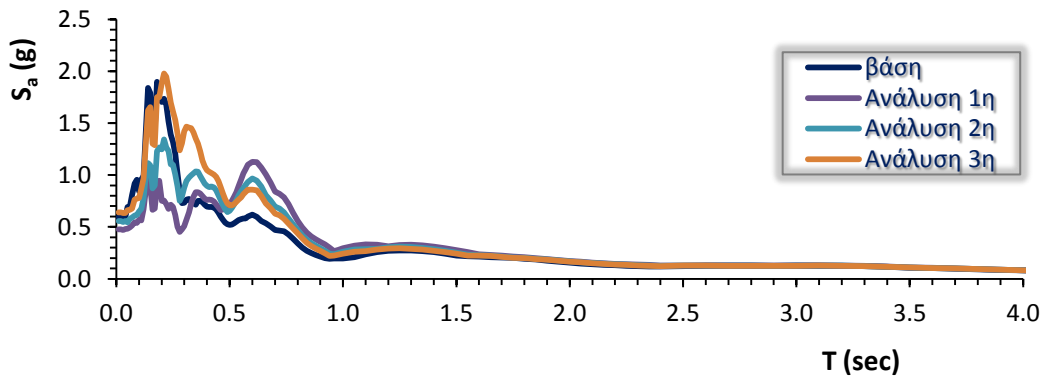


**Σχήμα 5.132:** ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων ( $S_a$ ) και η κατανομή της μέγιστης επιτάχυνσης ( $\max a$ ) με το βάθος, από τα 3 σετ αναλύσεων με το εδαφικό προφίλ από τις ειδικές σχέσεις του Dikmen (2009) για τον σταθμό REHS.



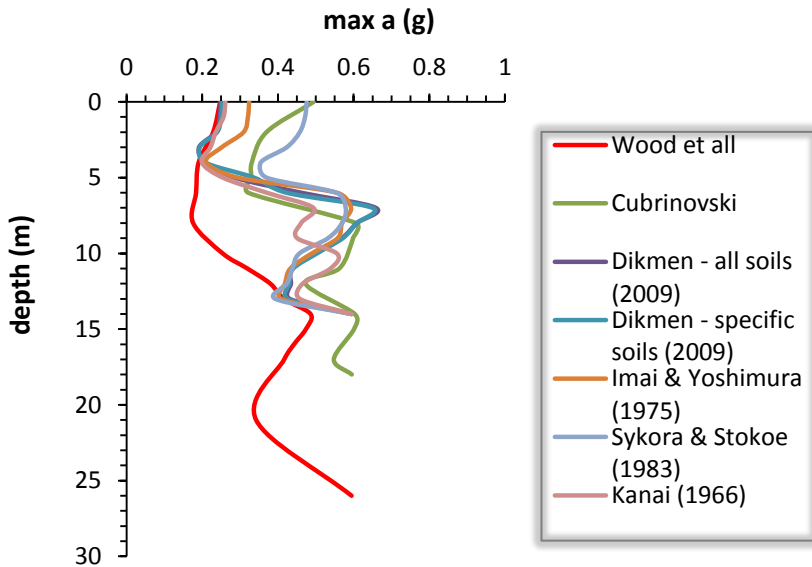
**Σχήμα 5.133:** ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων ( $S_a$ ) και η κατανομή της μέγιστης επιτάχυνσης ( $\max a$ ) με το βάθος, από τα 3 σετ αναλύσεων με το εδαφικό προφίλ από την γενική σχέση των Imai & Yoshimura (1975) για τον σταθμό REHS.



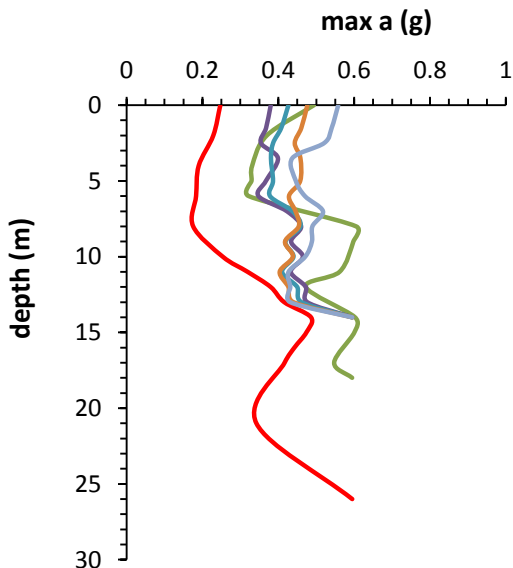


**Σχήμα 5.134:** ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων ( $S_a$ ) και η κατανομή της μέγιστης επιτάχυνσης ( $\max a$ ) με το βάθος, από τα 3 σετ αναλύσεων με το εδαφικό προφίλ από την σχέση για άμμους των Sykora & Stokoe (1983) για τον σταθμό REHS.

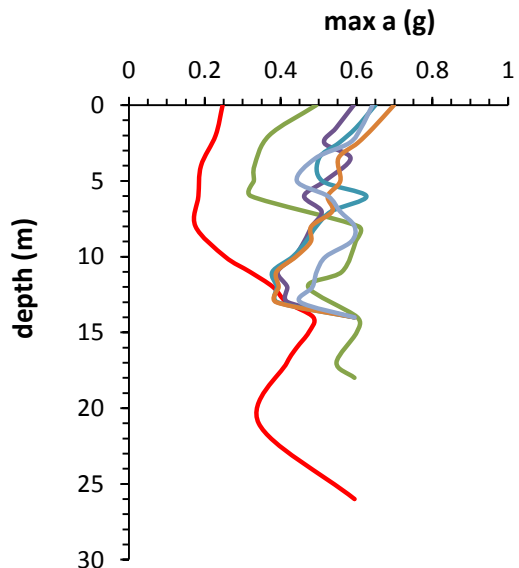
## Ανάλυση 1η



## Ανάλυση 2η



## Ανάλυση 3η



**Σχήμα 5.135:** κατανομή των μέγιστων επιταχύνσεων ( $\max a$ ) με το βάθος για τα τρία σετ αναλύσεων, για κάθε ένα εδαφικό προφίλ, για τον σταθμό REHS.



# Κεφάλαιο 6

---

*Διερεύνηση δεδομένων*



### 6.1 Διερεύνηση του βάθους ύπαρξης του βραχώδους υποβάθρου

Όλα τα εδαφικά προφίλ που χρησιμοποιήσαμε στο κεφάλαιο 5 για τις ισοδύναμες ελαστικές αναλύσεις με το λογισμικό SHAKE2000 (Wood et al, 2011), έχουν ένα σχετικά μικρό βάθος εδάφους έως το υποκείμενο βραχώδες υπόβαθρο. Ειδικότερα, το μέγιστο βάθος των προφίλ αυτών φτάνει τα 60 m, στους σταθμούς CCCC, CMHS και KROC, και περίπου τα 40 m σε όλους τους υπόλοιπους. Ως εκ τούτου, στις αναλύσεις που προηγήθηκαν επιβάλαμε τον διεγείρων κραδασμό στο αντίστοιχο κατώτατο βάθος που φτάνει το εδαφικό προφίλ κάθε σταθμού.

Στη παρούσα ενότητα βασιζόμενοι στις έρευνες των Brown & Weeber σχετικά με το γεωλογικό υπόβαθρο στην ευρύτερη περιοχή του Canterbury (Brown & Weeber, 1992), αλλά και σε όσα έχουμε αναφέρει εκτενώς για το γεωλογικό υπόβαθρο της περιοχής στο κεφάλαιο 3, θεωρούμε πως κάτω από το εδαφικό προφίλ κάθε σταθμού υπάρχουν στρώσεις χαλικιών σε βάθος περίπου 400 μέτρων. Με βάση αυτό το δεδομένο έγιναν περαιτέρω αναλύσεις για δύο σταθμούς οι οποίοι εδράζονται στο κέντρο (CBD) της πόλης του Christchurch, τον CBGS και τον CCCC. Για τη περιγραφή της μεταβολής του μέτρου διατμήσεως ( $G/G_0 : \gamma$ ) και του συντελεστή απόσβεσης ( $\xi : \gamma$ ), χρησιμοποιήθηκαν οι καμπύλες των Vucetic & Dobry (1991) για εδάφη με δείκτη πλασιμότητας (PI) 15 % για τα πρώτα επιφανειακά μέτρα του εδαφικού προφίλ (Wood et al, 2011) και οι αντίστοιχες καμπύλες των ίδιων ερευνητών για εδάφη με δείκτη πλασιμότητας (PI) 50 % για τις στρώσεις των χαλικιών.

#### 6.1.1 Επιταχυνσιογραφικός σταθμός CBGS

Τα **σχήματα 6.1 έως και 6.10** παρουσιάζουν τα αποτελέσματα για τον σταθμό CBGS, για τα τρία σεισμικά γεγονότα, της 3<sup>ης</sup> Σεπτεμβρίου του 2010 ( $M_w$  7.1), της 22<sup>ης</sup> Φεβρουαρίου του 2011 ( $M_l$  6.3) και της 13<sup>ης</sup> Ιουνίου του ίδιου έτους ( $M_w$  6.0).

Συγκεκριμένα τα **σχήματα 6.2 έως και 6.4** αναφέρονται στον σεισμό στις 3 Σεπτεμβρίου του 2010. Ενδιαφέρον παρουσιάζει το ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων στο **σχήμα 6.3**. Το φάσμα που προκύπτει από την ανάλυση με το SHAKE, λόγω της παρουσίας του στρώματος των χαλικιών σε μεγάλο βάθος, παρουσιάζει ενίσχυση των επιταχύνσεων για περιόδους από 1 έως 1.5 sec περίπου. Επίσης συγκριτικά με την ανάλυση που προηγήθηκε χωρίς την παρουσία των χαλικιών (σχήμα 5.10), οι φασματικές επιταχύνσεις για  $T \approx 0.2$  sec έχουν μειωθεί περίπου στο μισό ενώ οι αντίστοιχες κοντά στο 1 sec έχουν αυξηθεί αισθητά. Είναι εμφανές πως το αποτέλεσμα της παρούσας ανάλυσης είναι πολύ πιο ικανοποιητικό σε σχέση με την αντίστοιχη του κεφαλαίου 5. Το ελαστικό φάσμα που προκύπτει από το SHAKE,

προσεγγίζει για μικρές περιόδους την συνιστώσα S01W της καταγραφής, ενώ για μεγαλύτερες την συνιστώσα N89W.

Στα **σχήματα 6.5 έως και 6.7** παρουσιάζονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα για τον σεισμό στις 22 Φεβρουαρίου του 2011. Κι εδώ η ενίσχυση των φασματικών επιταχύνσεων από 1 έως 1.5 sec περίπου είναι εμφανής. Όμως όπως φαίνεται τόσο από τις χρονοϊστορίες των επιταχύνσεων όσο και από τα ελαστικά φάσματα επιταχύνσεων στο **σχήμα 6.6**, τα αποτελέσματα της γραμμικής ανάλυσης δεν προσεγγίζουν ορθώς καμία από τις συνιστώσες της καταγραφής. Θα λέγαμε πως μόνο ποιοτικά το φάσμα επιταχύνσεων από το SHAKE βρίσκεται σε συμφωνία με τα άλλα δύο, λόγω των δύο “φουσκωμάτων” που παρουσιάζει για  $T \approx 0.5$  και 1.5 sec.

Τα **σχήματα 6.8 έως και 6.10** εμπεριέχουν τα αποτελέσματα για το σεισμικό γεγονός στις 13 Ιουνίου του 2011. Ίσως η ανάλυση για τον σεισμό αυτό προσεγγίζει καλύτερα τη πραγματική καταγραφή σε σχέση με τις αντίστοιχες για τα δύο προηγούμενα σεισμικά γεγονότα. Ειδικότερα στο **σχήμα 6.9** όπου υπάρχει το ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων, πέρα από την ιδιαίτερα υψηλή κορυφή που παρουσιάζει το φάσμα από την ανάλυση για  $T \approx 0.7$  sec, πριν τα 0.5 sec και μετά το 1.5 sec αντίστοιχα καταφέρνει να αποδώσει επαρκώς τα γενικά χαρακτηριστικά των φασμάτων των δύο συνιστωσών της καταγραφής.

### **6.1.2 Επιταχυνσιογραφικός σταθμός CCCC**

Τα **σχήματα 6.11 έως και 6.17** παρουσιάζουν τα αντίστοιχα αποτελέσματα για τον σταθμό CBGS για τα δύο σεισμικά γεγονότα, του Σεπτεμβρίου και του Φεβρουαρίου. Σε γενικές γραμμές και οι δύο αναλύσεις δεν δίνουν καλή προσέγγιση των πραγματικών καταγραφών. Στο **σχήμα 6.13**, όπου υπάρχει το ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων για τον σεισμό του Σεπτεμβρίου, το φάσμα από το SHAKE παρουσιάζει κορυφές σε διαφορετικές περιόδους σε σχέση με τα αντίστοιχα των συνιστωσών N26W και N64E της καταγραφής. Επίσης δεν παρουσιάζει το “φούσκωμα” που υπάρχει και στις δύο συνιστώσες για  $T \approx 2.5$  sec. Όσον αφορά τον σεισμό του Φεβρουαρίου, στο **σχήμα 6.16** υπάρχει το αντίστοιχο συγκεντρωτικό ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης κι εδώ δεν είναι ικανοποιητικά εφόσον οι φασματικές επιταχύνσεις είναι πολύ μικρότερες από τις καταγεγραμμένες. Υπάρχει ενίσχυση από 1 έως και 1.5 sec περίπου αλλά δεν είναι αρκετή ώστε να πλησιάσει τις τιμές που δίνουν τα φάσματα της καταγραφής.

### **6.1.3 Συμπεράσματα**

Οι αναλύσεις με τη παρουσία στρώσεων χαλκιού, σε βάθος έως και 400 m περίπου, για τους δύο επιταχυνσιογραφικούς σταθμούς CBGS και CCCC στο κέντρο της πόλης του Christchurch, προσέφεραν αποτελέσματα που προσέγγισαν σε ικανοποιητικό βαθμό της πραγματικές καταγραφές στις περιόδους από 1 έως 1.5 sec χονδρικώς.

Το βαθύ εδαφικό προφίλ συνετέλεσε στην φασματική ενίσχυση των επιταχύνσεων στις περιόδους αυτές. Ταυτόχρονα όμως απομείωσε τις αντίστοιχες για περιόδους μικρότερες των 0.5 sec περίπου με αποτέλεσμα σε αυτό το φάσμα συχνοτήτων να υπάρχει περιορισμένη σύγκλιση με τα αντίστοιχα φάσματα των πραγματικών καταγραφών. Επίσης, ακόμα και η υιοθέτηση ενός τόσο βαθέως εδαφικού προφίλ δεν επιδρά στις μεγάλες περιόδους άνω των 2 sec, κάτι που φαίνεται εντόνως στο φάσμα επιταχύνσεων για τον σταθμό CCCC, στον σεισμό της 3<sup>ης</sup> Σεπτεμβρίου.

Θα συμπεραίναμε πως το προφίλ με τα 400 m χαλικώδους εδάφους ουσιαστικά βελτιώνει τα αποτελέσματα μας μόνο ως προς τις περιόδους του 1 με 1.5 sec. Η αβεβαιότητα ως προς τις εδαφικές ιδιότητες και τις δυναμικές παραμέτρους των υλικών που αποτελούνται είναι ένας καθοριστικός παράγοντας για την αδυναμία προσέγγισης της πραγματικότητας.

## *6.2 Διερεύνηση διεγείροντα κραδασμού και εδαφικών προφίλ*

Όπως σχολιάσαμε στην ενότητα 5.5, όπου παρουσιάσαμε τα συμπεράσματα του κεφαλαίου 5, δύο πιθανοί παράγοντες που συνεισφέρουν στην αδυναμία σύγκλισης των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από τις αναλύσεις με το λογισμικό SHAKE, είναι ο διεγείρον κραδασμός που χρησιμοποιήσαμε για τις αναλύσεις μας και η αξιοπιστία των εδαφικών προφίλ.

Ως διεγείρων κραδασμός για όλες αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν έως τώρα χρησιμοποιήθηκε η χρονοϊστορία επιταχύνσεων στο βραχώδες υπόβαθρο του σταθμού LPCC, όπως προέκυψε από την αντίστροφη γραμμική ελαστική ανάλυση για κάθε ένα σεισμικό γεγονός ξεχωριστά. Ο σταθμός LPCC είναι ο μόνος εκ των σταθμών της περιοχής του Christchurch ο οποίος εδράζεται σε σημείο όπου ο βράχος απέχει τόσο λίγο από την επιφάνεια του εδάφους (περίπου 6 m). Για τον λόγο αυτό οι καταγραφές του LPCC ήταν το μοναδικό διαθέσιμο στοιχείο για την προσομοίωση της σεισμικής κίνησης του βραχώδους υποβάθρου της περιοχής.

Προκειμένου να διερευνήσουμε την ορθότητα της επιλογής αυτής αλλά και των εδαφικών προφίλ που χρησιμοποιήσαμε (Wood et al, 2011), πραγματοποιήσαμε διερευνητικές αναλύσεις μεταξύ δύο επιταχυνσιογραφικών σταθμών που εδράζονται σε μικρή απόσταση μεταξύ τους. Όπως φαίνεται και στην **εικόνα 6.1**, οι επιταχυνσιογραφικοί σταθμοί CBGS και CCCC βρίσκονται και οι δύο στο κέντρο της πόλης και απέχουν μεταξύ τους περίπου 2400 m. Ουσιαστικώς, εξαιτίας της μικρής απόστασης που χωρίζει τους εν λόγω σταθμούς, αναμένουμε πως ο διεγείρον κραδασμός στο βραχώδες υπόβαθρο και των δύο θα διαφέρει ελάχιστα. Επίσης ο σταθμός CBGS εδράζεται στο ελεύθερο πεδίο (free field) οπότε οι καταγραφές του δεν εμπεριέχουν επιρροές από την παρουσία κάποιου γειτονικού δομήματος.

Συνεπώς, προχωρήσαμε σε αντίστροφες ισοδύναμες ελαστικές αναλύσεις στις καταγραφές και των δύο σταθμών, για τα σεισμικά γεγονότα του Σεπτεμβρίου και του Φεβρουαρίου. Με τις αναλύσεις αυτές λάβαμε τη διέγερση στο βραχώδες υπόβαθρο κάθε σταθμού και τη χρησιμοποιήσαμε ως διεγείρον κραδασμό στο



εδαφικό προφίλ του άλλου σταθμού εναλλάξ. Θα μπορούσαμε για ευκολία κατανόησης να ονομάσουμε τις αναλύσεις αυτές, “χιαστί” αναλύσεις. Η **εικόνα 6.2** παρουσιάζει σχηματικά την διαδικασία που ακολουθήσαμε στις αναλύσεις μας. Λόγω της μικρής απόστασης που χωρίζει τους σταθμούς κρίθηκε αναγκαία η αλλαγή του προσανατολισμού σε όλες τις καταγραφές που θα συγκρίνουμε μεταξύ τους, σε EW και NS.

Τα **σχήματα 6.18 έως και 6.29** απεικονίζουν τα αποτελέσματα των ισοδύναμων γραμμικών αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν με τον κώδικα SHAKE2000. Ειδικότερα τα σχήματα 6.18 έως και 6.23 αναφέρονται στην αντίστροφη ισοδύναμη ανάλυση στις καταγραφές του σταθμού CBGS για τα δύο σεισμικά γεγονότα, ενώ τα υπόλοιπα στην αντίστοιχη διαδικασία για τον σταθμό CCCC.

### ***6.2.1 Αναλύσεις με βάση του επιταχυνσιογραφικό σταθμό CBGS***

Τα **σχήματα 6.18 έως και 6.20** παρουσιάζουν τα αποτελέσματα της αντίστροφης ισοδύναμης ελαστικής ανάλυσης στην καταγραφή του σταθμού CBGS για το σεισμικό γεγονός της 3<sup>ης</sup> Σεπτεμβρίου του 2010. Αντίστοιχα, στα **σχήματα 6.21 έως και 6.23** απεικονίζονται τα αποτελέσματα για τον σεισμό της 22<sup>ης</sup> Φεβρουαρίου του 2011. Στο σχήμα 6.18 όπως και στο σχήμα 6.21 είναι εμφανείς οι διαφορές μεταξύ των ελαστικών φασμάτων επιταχύνσεως των σταθμών CBGS και LPCC και στις δύο συνιστώσες, EW και NS. Οι διαφορές είναι περισσότερο αισθητές στον σεισμό του Φεβρουαρίου. Αναφορικά με τον σεισμό του Σεπτεμβρίου, στο σχήμα 6.19 η σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ του φάσματος που προκύπτει από το SHAKE και εκείνου που προκύπτει από την πραγματική καταγραφή στην επιφάνεια του σταθμού CCCC, για την συνιστώσα EW, είναι πάρα πολύ ικανοποιητική. Αντίθετα στο σχήμα 6.20, το οποίο αφορά την συνιστώσα NS, η σύγκριση είναι απογοητευτική, ιδίως στην περιοχή των περιόδων μεγαλύτερων του 1.5 sec, όπου το φάσμα που προκύπτει από την ανάλυση αδυνατεί να προσεγγίσει τις μεγάλες φασματικές επιταχύνσεις που παρουσίασε η πραγματική καταγραφή. Όσον αφορά τον σεισμό του Φεβρουαρίου, είναι εμφανές στα σχήματα 6.22 και 6.23 πως σύγκλιση μεταξύ των φασμάτων υπάρχει μόνο στις μικρές περιόδους, κάτω από 0.6 sec περίπου, με τη σύγκλιση στη συνιστώσα NS να είναι σαφώς πιο ικανοποιητική.

### ***6.2.2 Αναλύσεις με βάση του επιταχυνσιογραφικό σταθμό CCCC***

Τα **σχήματα 6.24 έως και 6.29** συγκεντρώνουν τα αποτελέσματα της αντίστροφης ισοδύναμης ελαστικής ανάλυσης στην καταγραφή του σταθμού CCCC για το σεισμικό γεγονός της 3<sup>ης</sup> Σεπτεμβρίου του 2010 και της 22<sup>ης</sup> Φεβρουαρίου του 2011 αντίστοιχα. Στο σχήμα 6.24 όπως και στο σχήμα 6.27 είναι εμφανείς οι διαφορές μεταξύ των ελαστικών φασμάτων επιταχύνσεως των σταθμών CCCC και LPCC για τις δύο συνιστώσες, EW και NS. Οι διαφορές είναι και εδώ περισσότερο αισθητές στον σεισμό του Φεβρουαρίου. Για τον σεισμό του Σεπτεμβρίου, στο σχήμα 6.25 η σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ του φάσματος που προκύπτει από το SHAKE

και εκείνου που προκύπτει από την πραγματική καταγραφή στην επιφάνεια του σταθμού CBGS, για την συνιστώσα EW, είναι πάρα πολύ ικανοποιητική. Το αντίθετο και πάλι συμβαίνει στο σχήμα 6.26, το οποίο αφορά την συνιστώσα NS. Ιδίως στην περιοχή των περιόδων μεγαλύτερων του 1.5 sec, όπου το φάσμα που προκύπτει από την ανάλυση παρουσιάζει πολύ μεγαλύτερες φασματικές επιταχύνσεις από την πραγματική καταγραφή. Όσον αφορά τον σεισμό του Φεβρουαρίου, στα σχήματα 6.28 και 6.29 γίνεται σαφές πως σύγκλιση μεταξύ των φασμάτων υπάρχει μόνο στις μικρές περιόδους, κάτω από 0.6 sec περίπου για την συνιστώσα EW, ενώ για τη συνιστώσα NS τα δύο φάσματα συγκλίνουν πάρα πολύ ικανοποιητικά.

### 6.2.3 Συμπεράσματα

Οι “χιαστί” αναλύσεις που προηγήθηκαν μας οδηγούν στα εξής συμπεράσματα:

- Η επιλογή της χρονοϊστορίας επιταχύνσεων στο βραχώδες υπόβαθρο του σταθμού LPCC ως διεγείρον κραδασμός στη βάση όλων των υπόλοιπων σταθμών που μελετήσαμε, πιθανότατα δεν ήταν ορθή. Αυτό είναι περισσότερο εμφανές για τον σεισμό του Φεβρουαρίου. Βέβαια, για το συγκεκριμένο σεισμικό γεγονός είναι κάτι που περιμέναμε, διότι το ρήγμα που προκάλεσε τον εν λόγω σεισμό ουσιαστικά εκτείνεται μεταξύ του Lyttelton όπου εδράζεται ο σταθμός LPCC και του Christchurch.
- Τόσο οι αναλύσεις με βάση τον σταθμό CBGS όσο και με βάση τον σταθμό CCCC, για τον σεισμό του Σεπτεμβρίου παρουσίασαν ικανοποιητική σύγκλιση ως προς την συνιστώσα EW, ενώ για τον σεισμό του Φεβρουαρίου παρουσίασαν ενθαρρυντικά αποτελέσματα στην συνιστώσα NS. Το γεγονός αυτό μας οδηγεί στο συμπέρασμα πως είτε ο μηχανισμός της διάρρηξης είτε φαινόμενα που σχετίζονται με την ιδιαίτερη γεωμορφολογία της περιοχής επηρέασαν καθοριστικά τις καταγραφές των σταθμών. Ως εκ τούτου η μελέτη της επιρροής των τοπικών εδαφικών συνθηκών δεν μπορεί να είναι ολοκληρωμένη χωρίς τη διερεύνηση και αυτών των παραγόντων.



# Κεφάλαιο 6

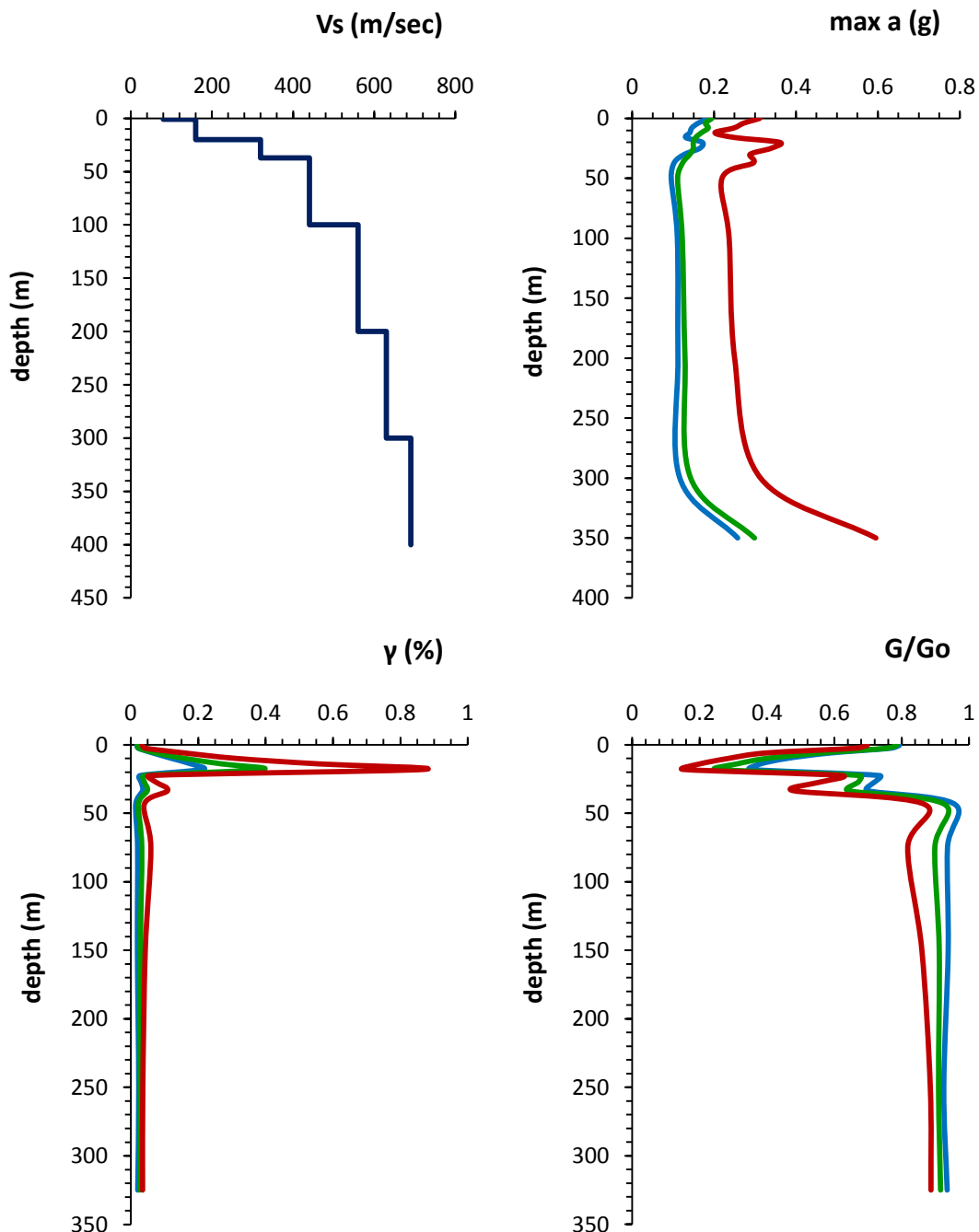
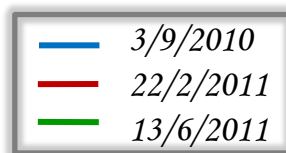
---

*Σχήματα & εικόνες*

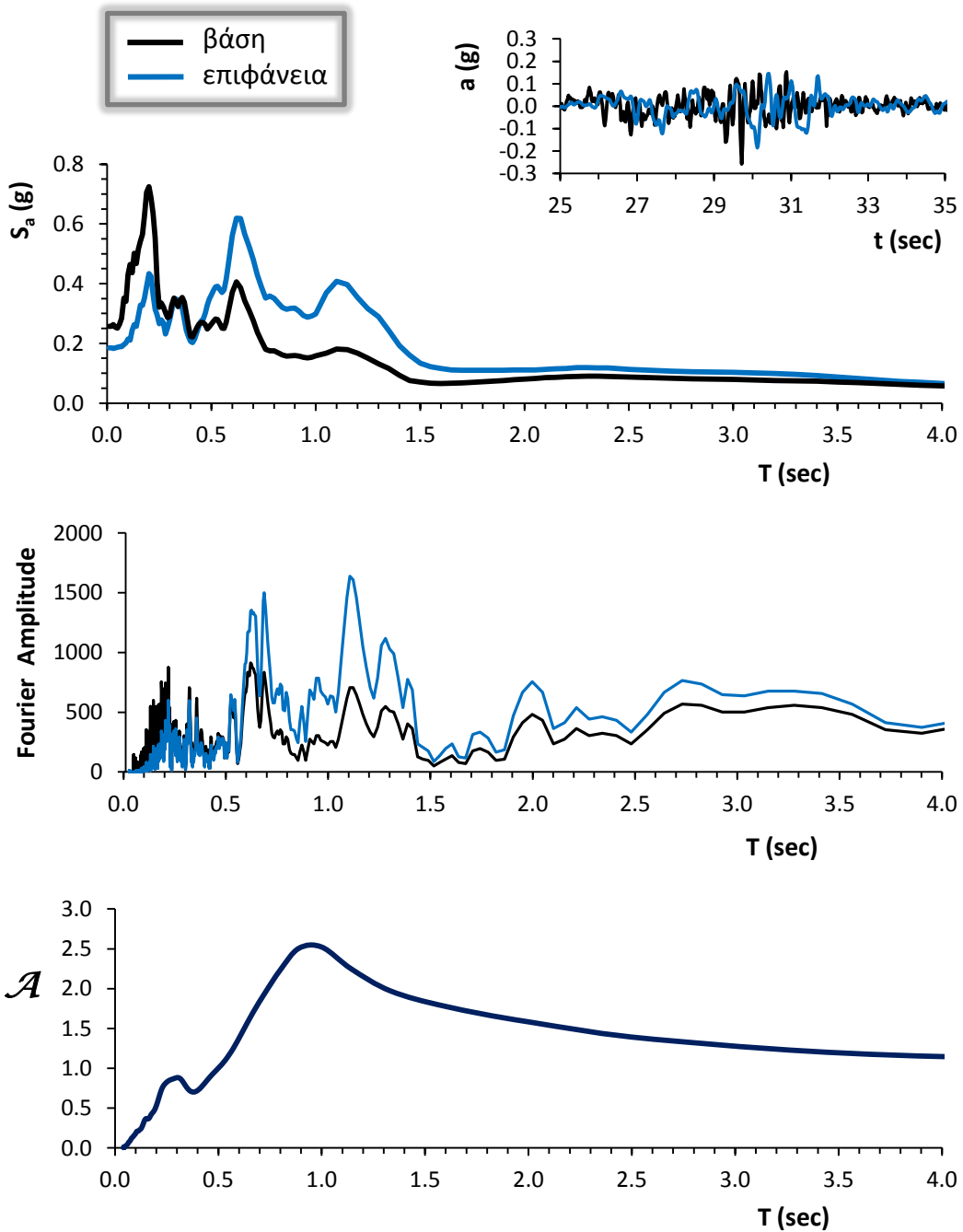


# CBGS

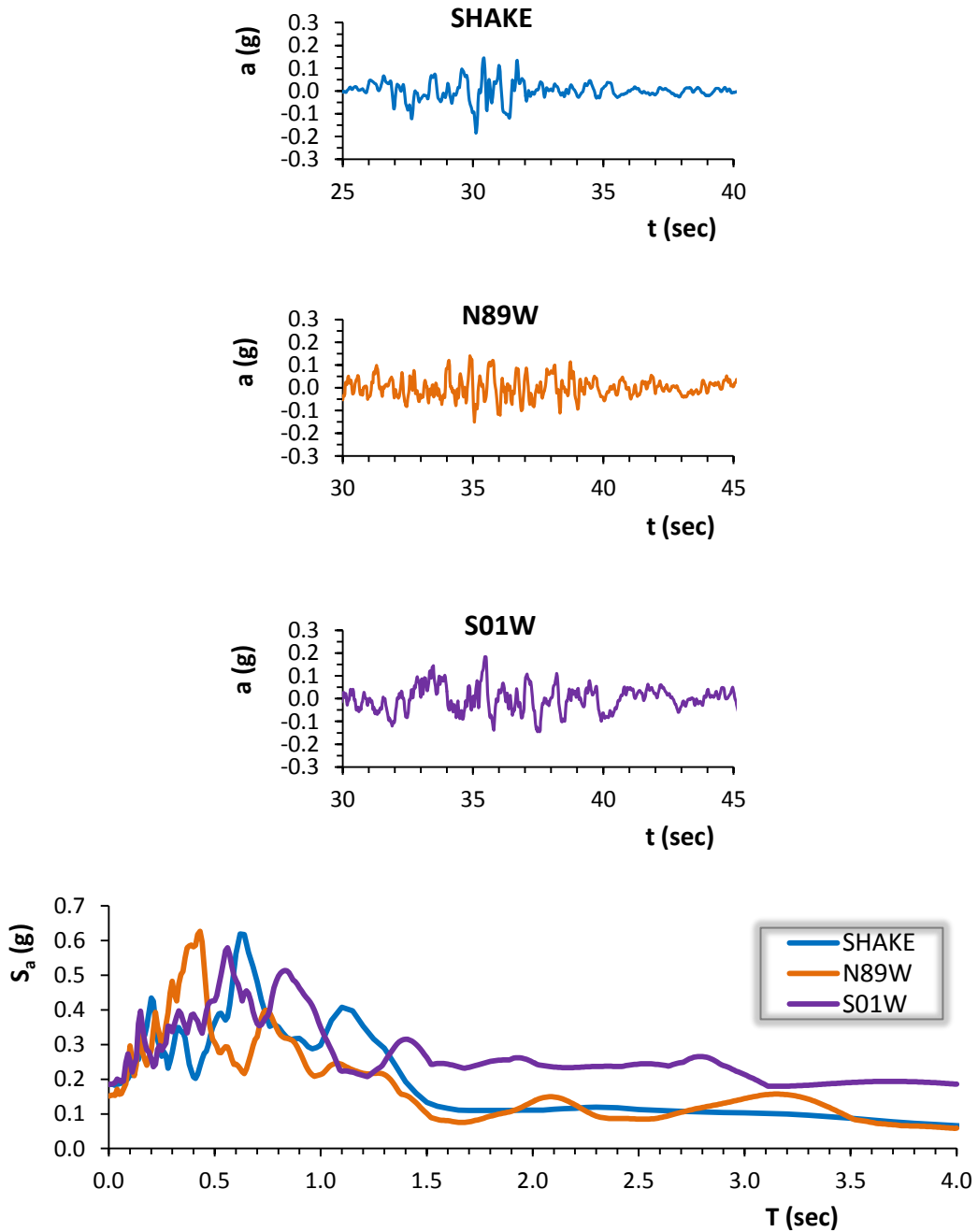
εδαιφικό προφίλ με  
στρώσεις χαλικιών



**Σχήμα 6.1:** Το εδαφικό προφίλ σε όρους ταχύτητας διατμητικών κυμάτων ( $V_s$ ), οι μέγιστες εδαφικές επιταχύνσεις (max a), η ποσοστιαία μεταβολή της γωνιακής παραμόρφωσης ( $\gamma$  %) και ο λόγος της απομείωσης του μέτρου διατμήσεως (G) σε σχέση με το βάθος της εδαφικής στήλης.

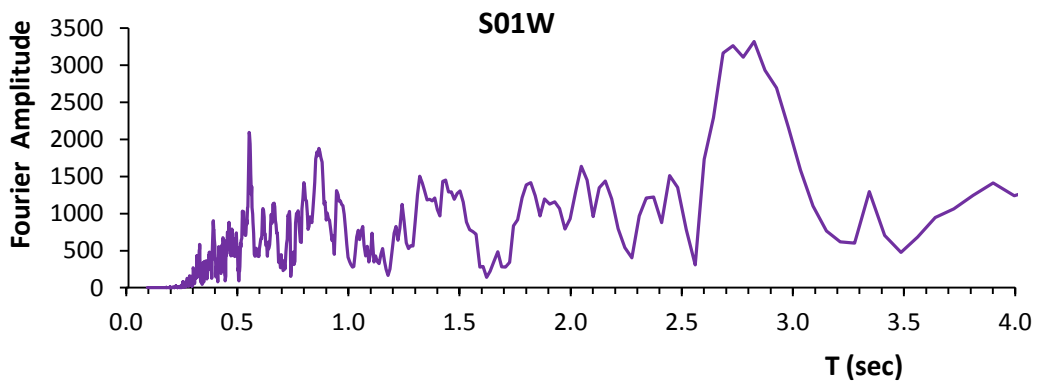
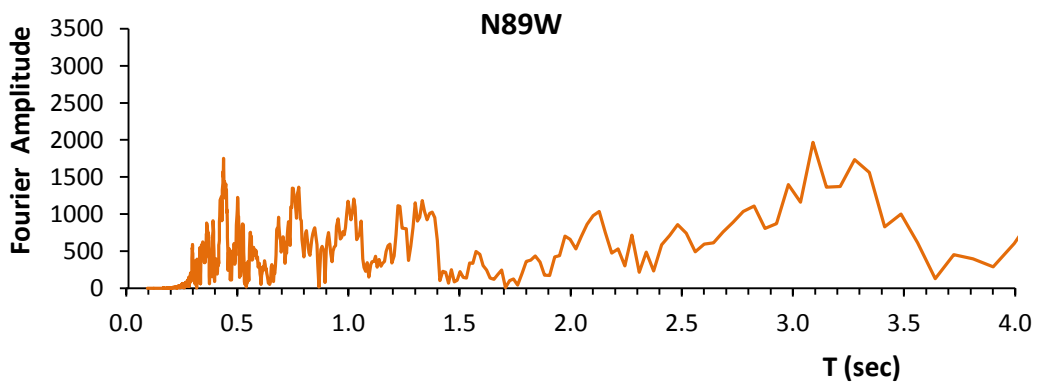
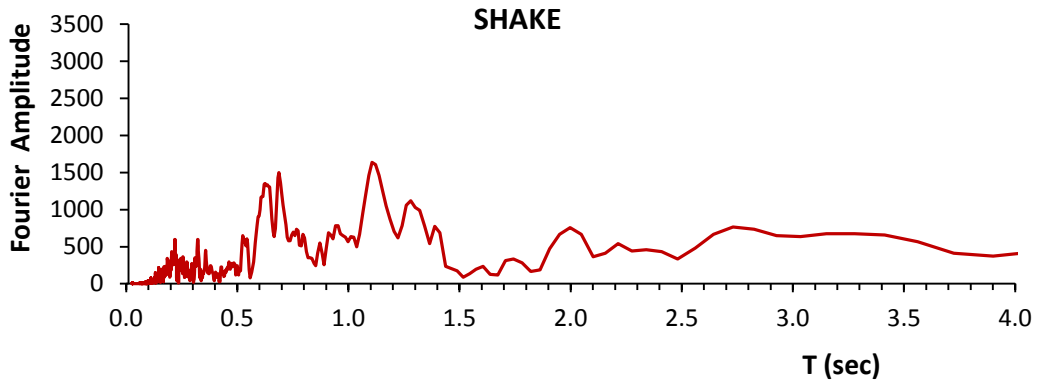


**Σχήμα 6.2:** Η χρονιοιστορία επιταχύνσεων ( $a$ ), το ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων ( $S_a$ ) και το φάσμα του πλάτους Fourier μετά την ανάστροφη ισοδύναμη ελαστική ανάλυση με το SHAKE2000. Επίσης, ο συντελεστής φασματικής μεγέθυνσης  $\mathcal{A}$ . (δεσπόζουσα ιδιοπερίοδος εδάφους:  $T = 2.69$  sec)

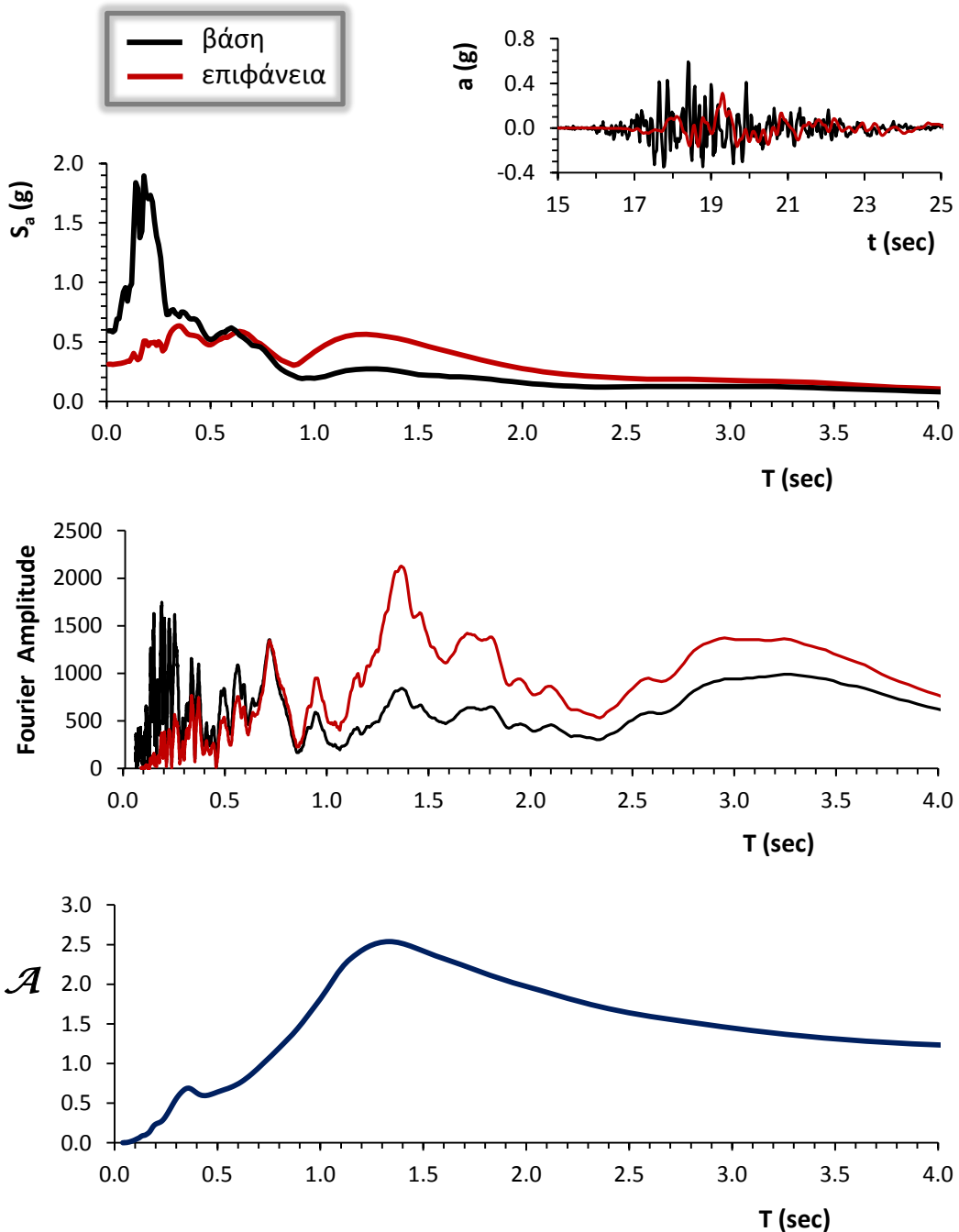


**Σχήμα 6.3:** Η χρονιοιστορία επιταχύνσεων ( $a$ ) και το ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων ( $S_a$ ) από την ισοδύναμη ελαστική ανάλυση με το SHAKE2000, σε σύγκριση με τα αντίστοιχα από τις δύο συνιστώσες της καταγραφής.

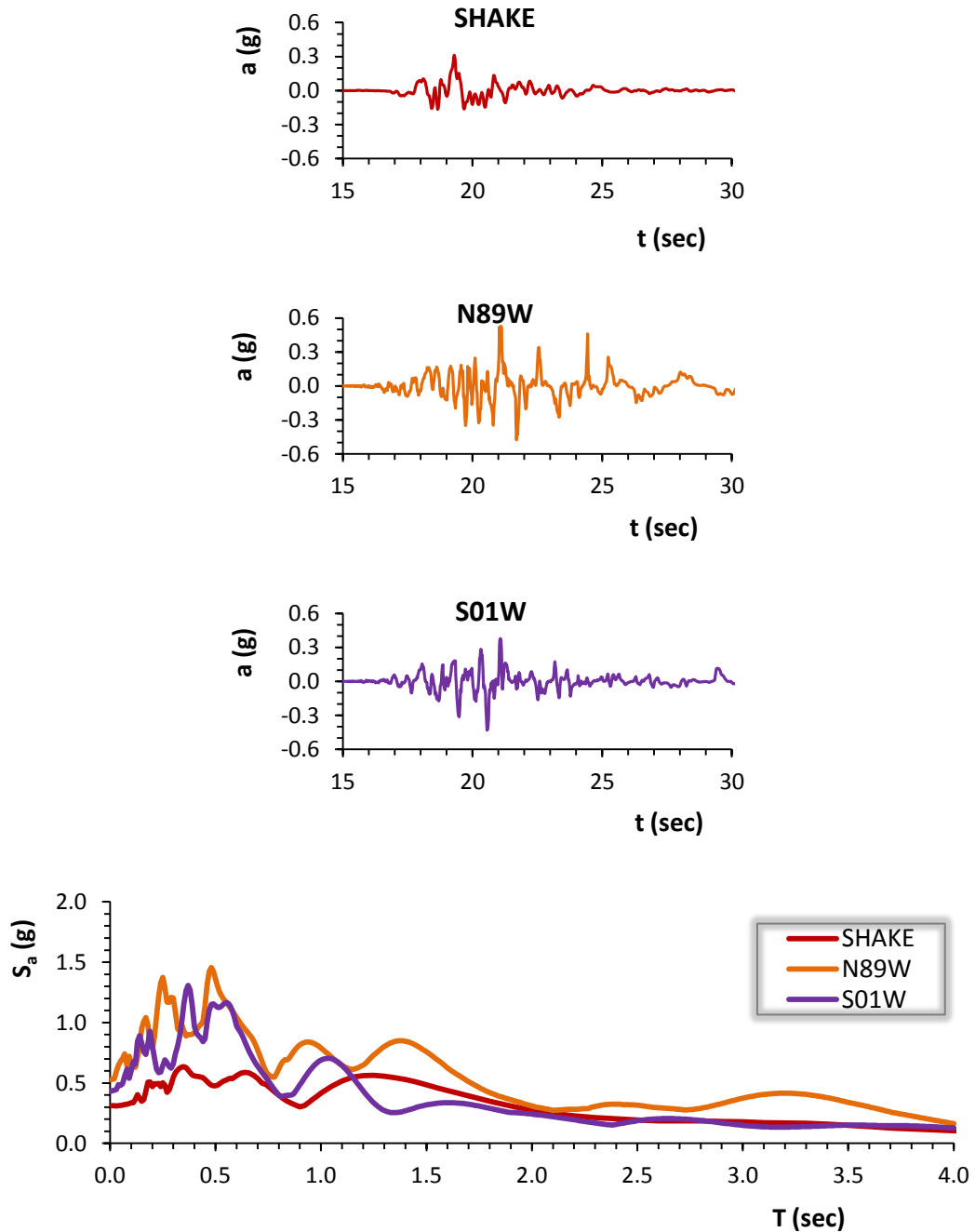




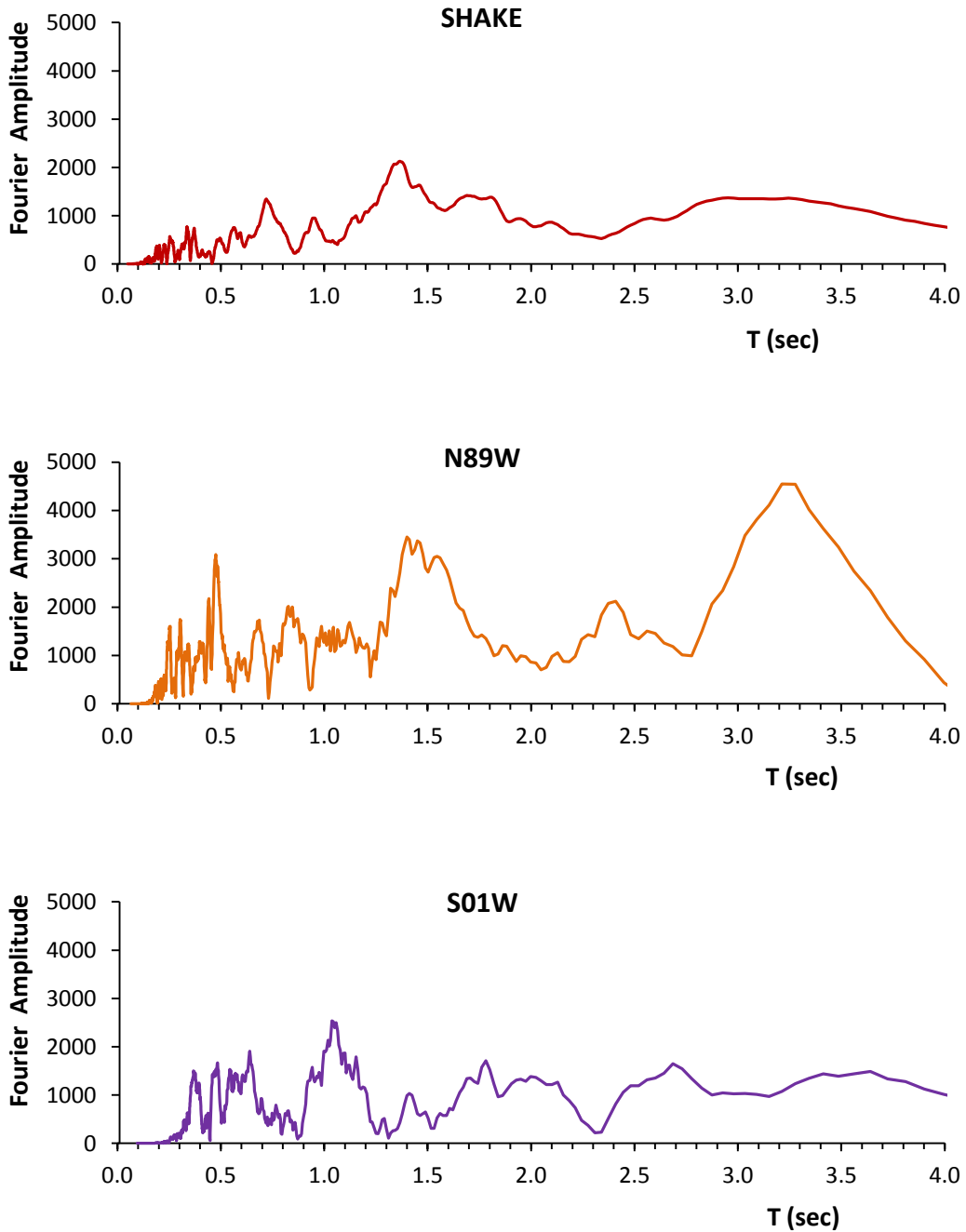
**Σχήμα 6.4:** Το φάσμα πλάτους Fourier από την ισοδύναμη ελαστική ανάλυση με το SHAKE2000 σε σύγκριση με τα αντίστοιχα από τις δύο συνιστώσες της καταγραφής.



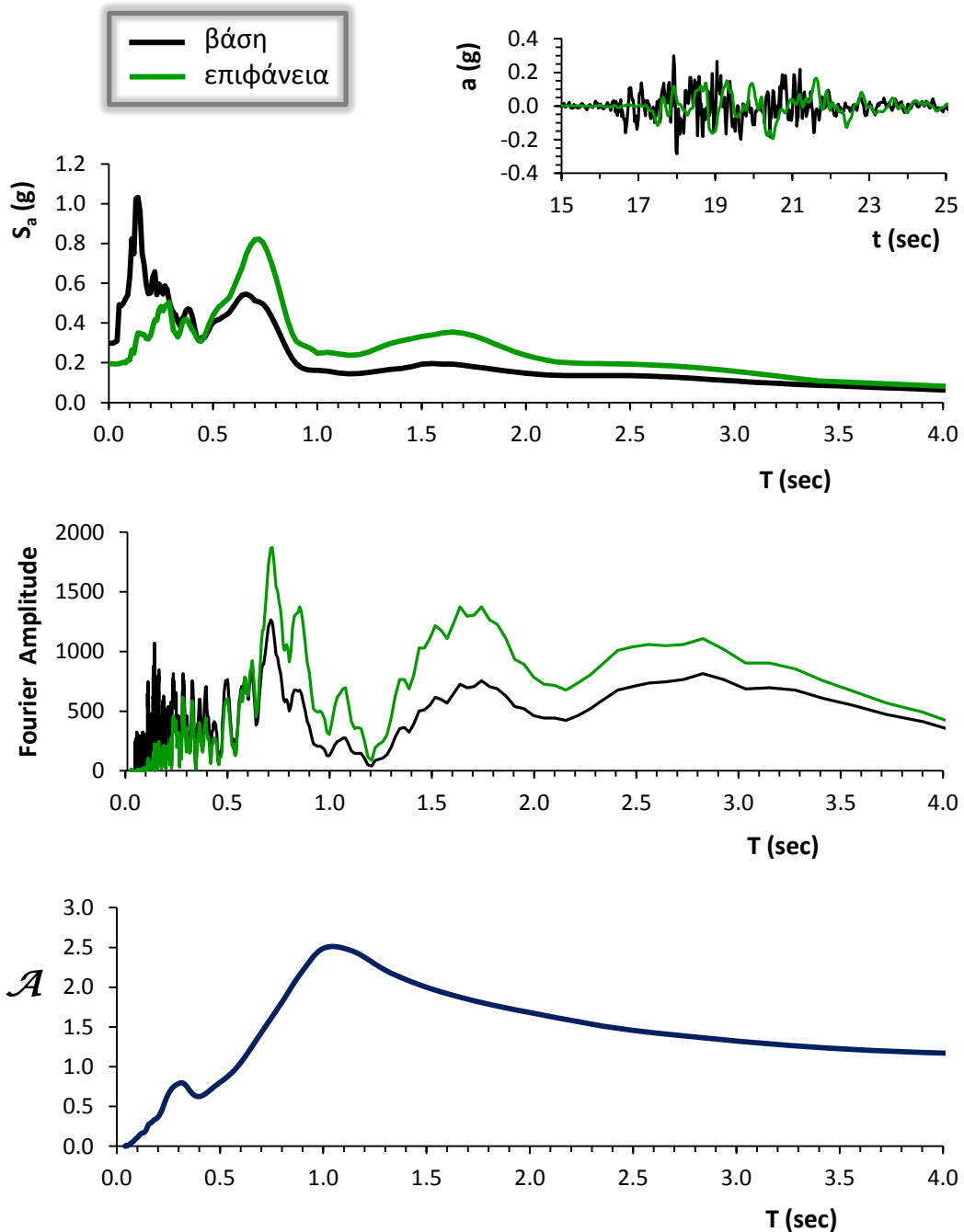
**Σχήμα 6.5:** Η χρονιοιστορία επιταχύνσεων ( $a$ ), το ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων ( $S_a$ ) και το φάσμα του πλάτους Fourier μετά την ανάστροφη ισοδύναμη ελαστική ανάλυση με το SHAKE2000. Επίσης, ο συντελεστής φασματικής μεγέθυνσης  $\mathcal{A}$ . (δεσπόζουσα ιδιοπερίοδος εδάφους:  $T = 2.81$  sec)



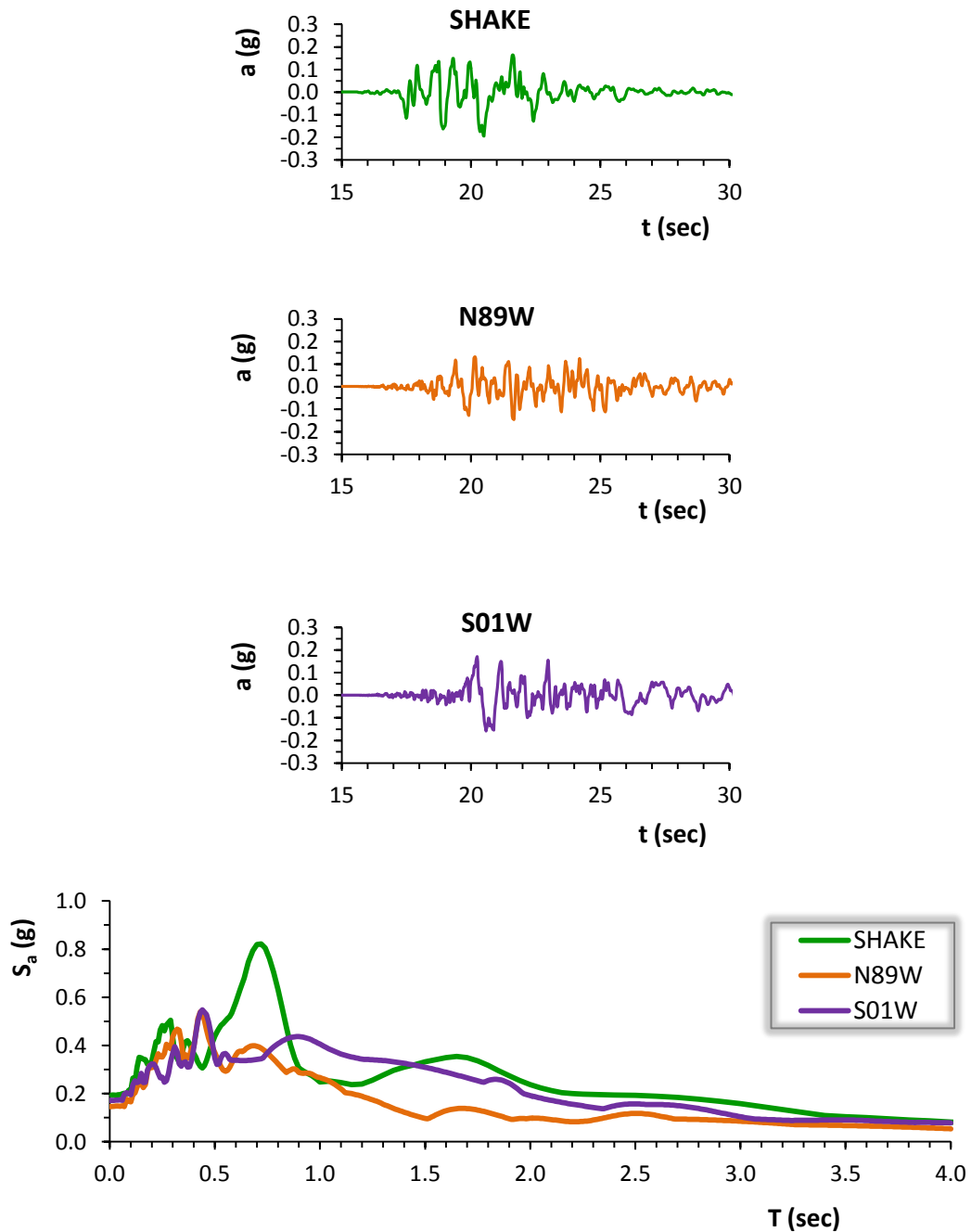
**Σχήμα 6.6:** Η χρονιοϊστορία επιταχύνσεων ( $a$ ) και το ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων ( $S_a$ ) από την ισοδύναμη ελαστική ανάλυση με το SHAKE2000, σε σύγκριση με τα αντίστοιχα από τις δύο συνιστώσες της καταγραφής.



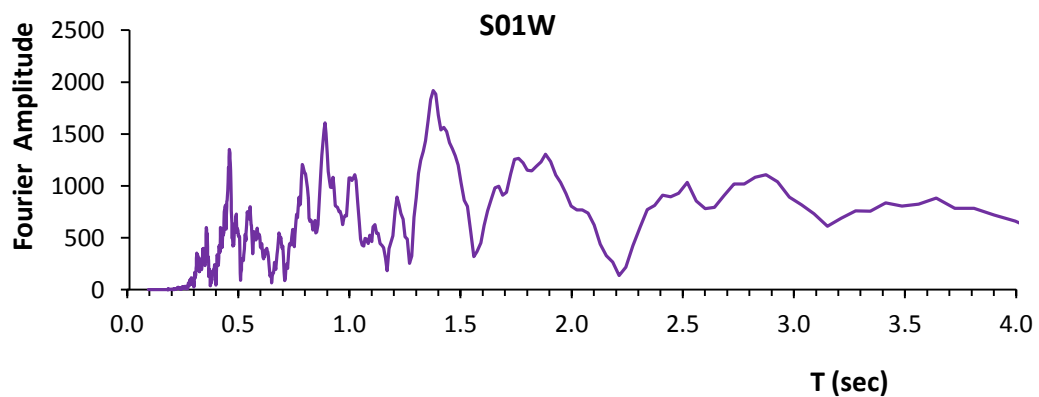
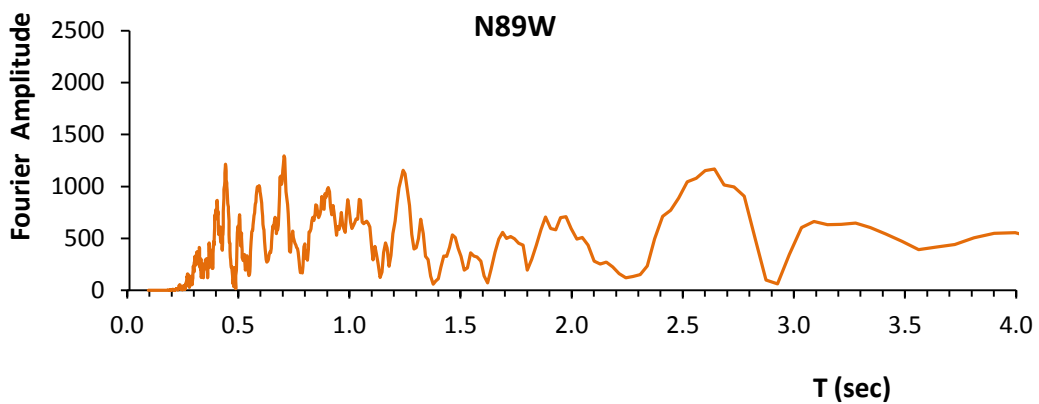
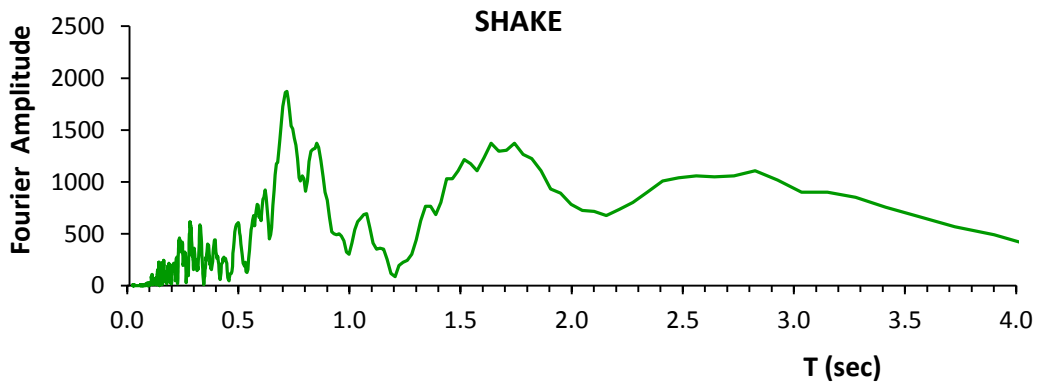
**Σχήμα 6.7:** Το φάσμα πλάτους Fourier από την ισοδύναμη ελαστική ανάλυση με το SHAKE2000 σε σύγκριση με τα αντίστοιχα από τις δύο συνιστώσες της καταγραφής.



**Σχήμα 6.8:** Η χρονιοιστορία επιταχύνσεων ( $a$ ), το ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων ( $S_a$ ) και το φάσμα του πλάτους Fourier μετά την ανάστροφη ισοδύναμη ελαστική ανάλυση με το SHAKE2000. Επίσης, ο συντελεστής φασματικής μεγέθυνσης  $\mathcal{A}$ . (δεσπόζουσα ιδιοπερίοδος εδάφους:  $T = 2.73$  sec)



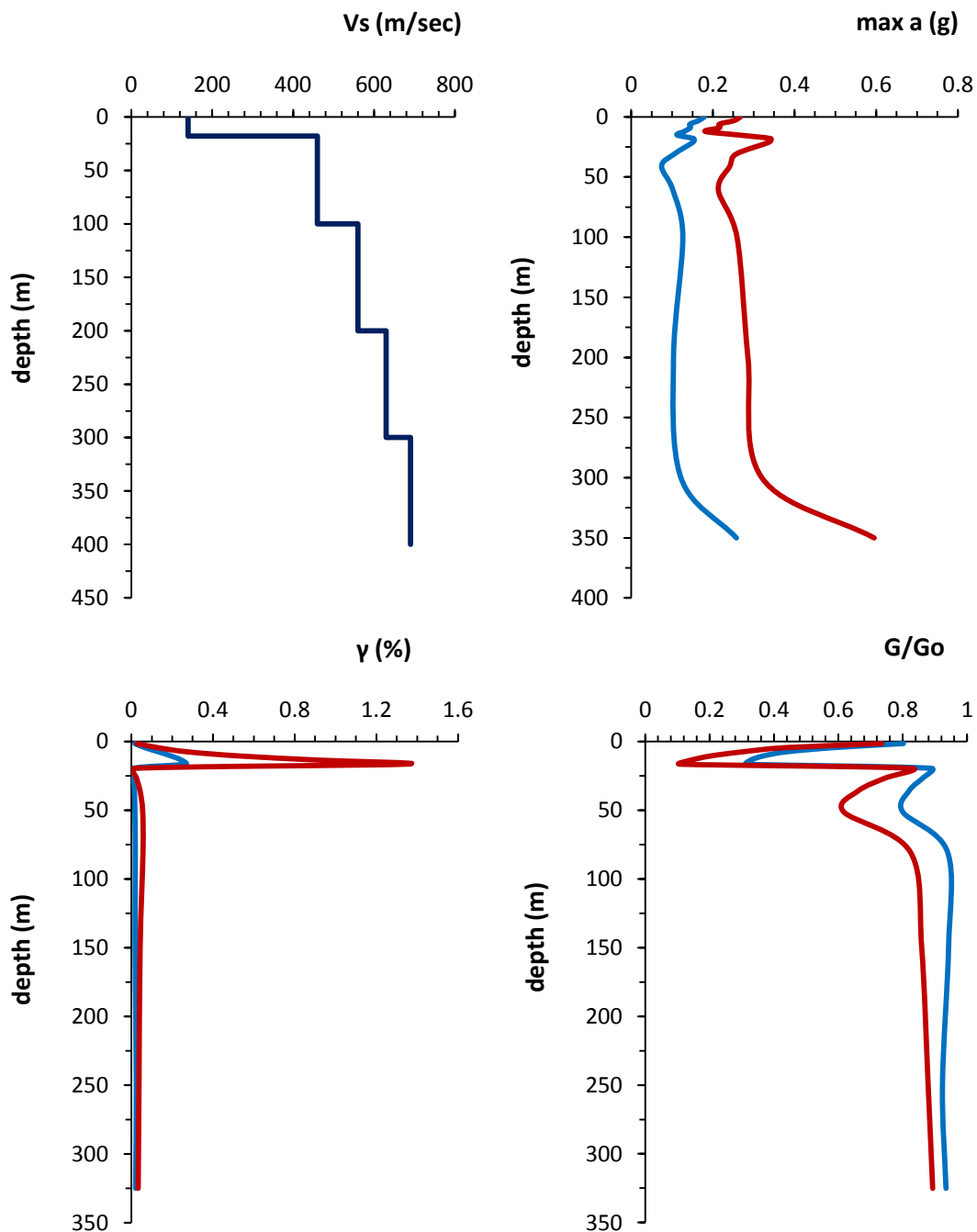
**Σχήμα 6.9:** Η χρονιοϊστορία επιταχύνσεων ( $a$ ) και το ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων ( $S_a$ ) από την ισοδύναμη ελαστική ανάλυση με το SHAKE2000, σε σύγκριση με τα αντίστοιχα από τις δύο συνιστώσες της καταγραφής.



**Σχήμα 6.10:** Το φάσμα πλάτους Fourier από την ισοδύναμη ελαστική ανάλυση με το SHAKE2000 σε σύγκριση με τα αντίστοιχα από τις δύο συνιστώσες της καταγραφής.

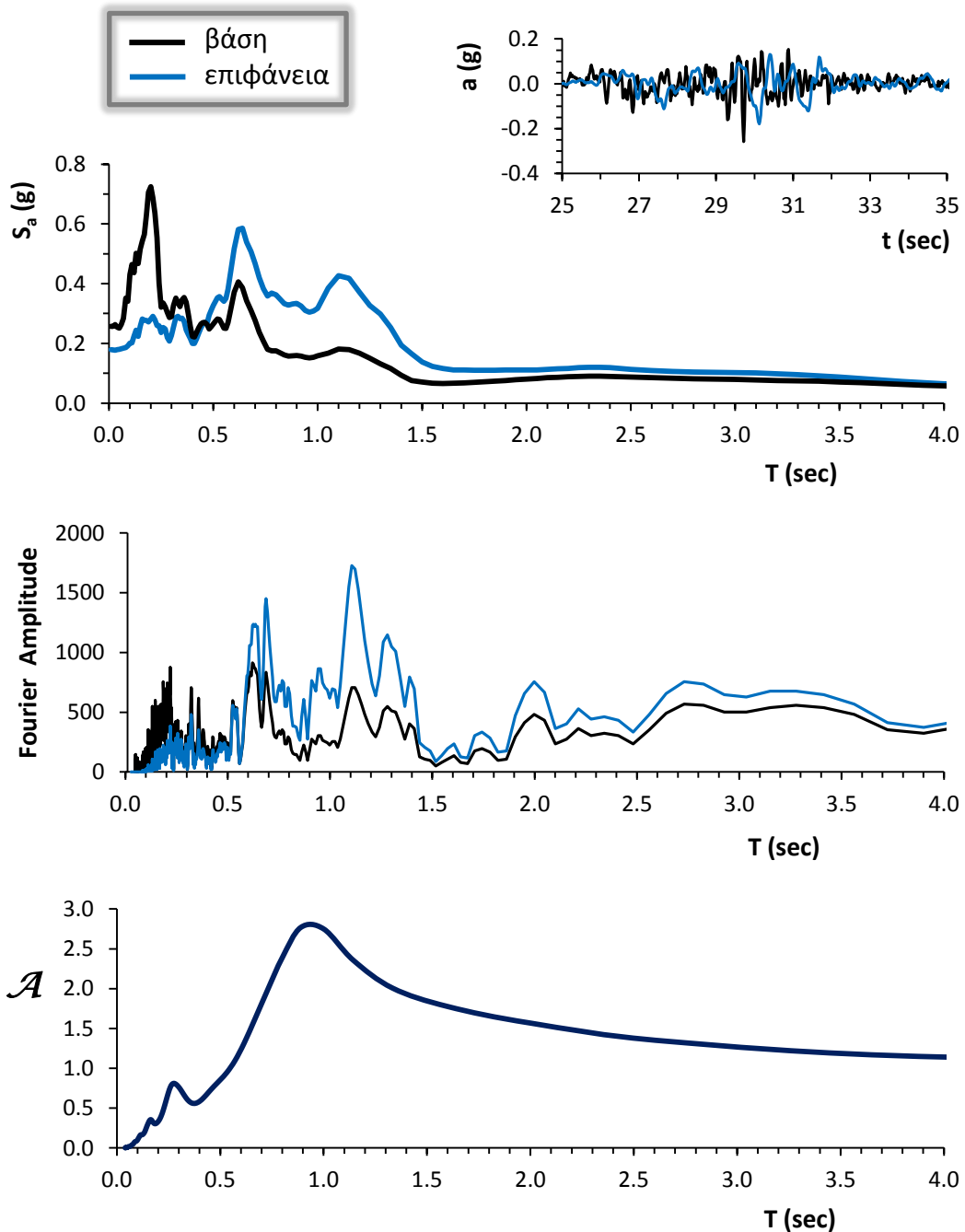
# CCCC

εδαιφικό προφίλ με  
στρώσεις χαλικιών

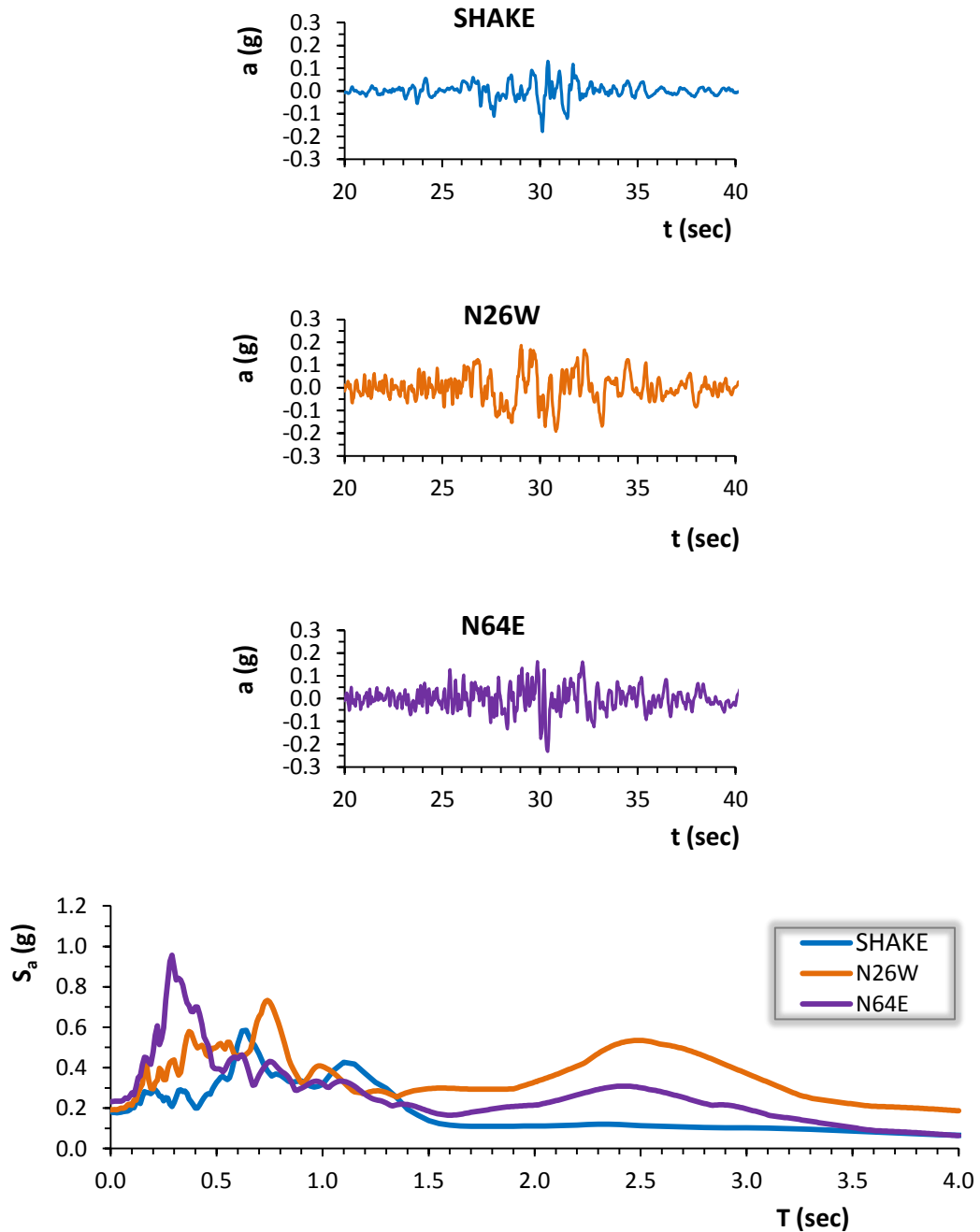


**Σχήμα 6.11:** Το εδαφικό προφίλ σε όρους ταχύτητας διατμητικών κυμάτων ( $V_s$ ), οι μέγιστες εδαφικές επιταχύνσεις ( $\max a$ ), η ποσοστιαία μεταβολή της γωνιακής παραμόρφωσης ( $\gamma$  %) και ο λόγος της απομείωσης του μέτρου διατμήσεως ( $G$ ) σε σχέση με το βάθος της εδαφικής στήλης.

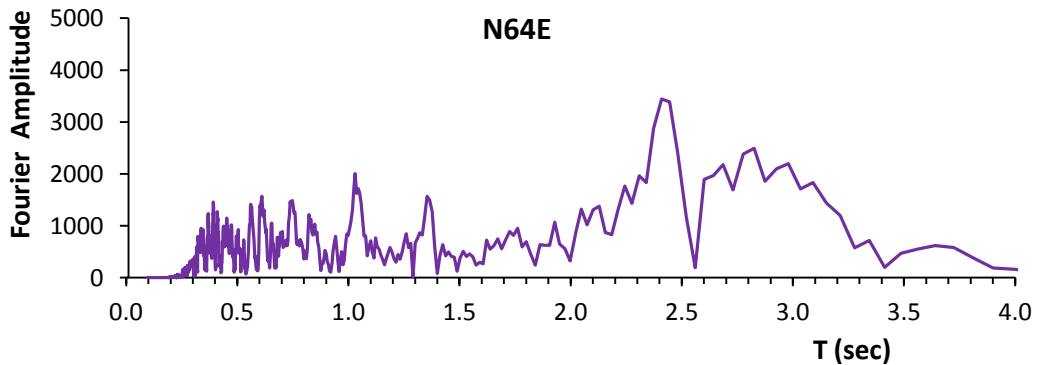
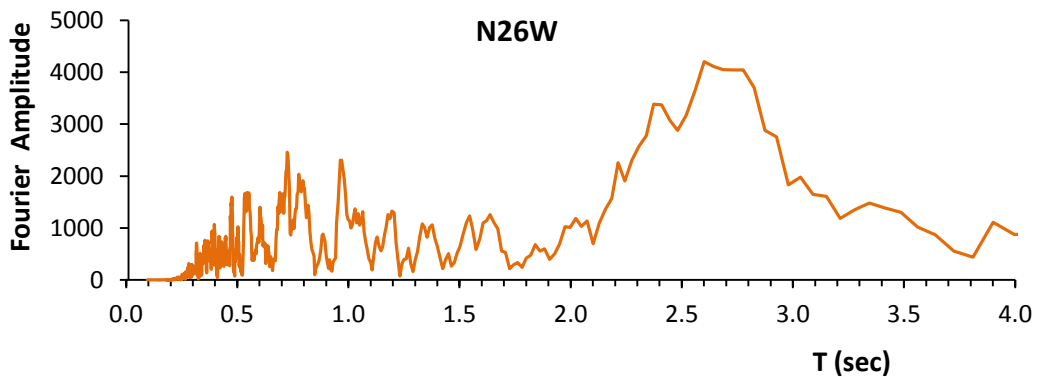
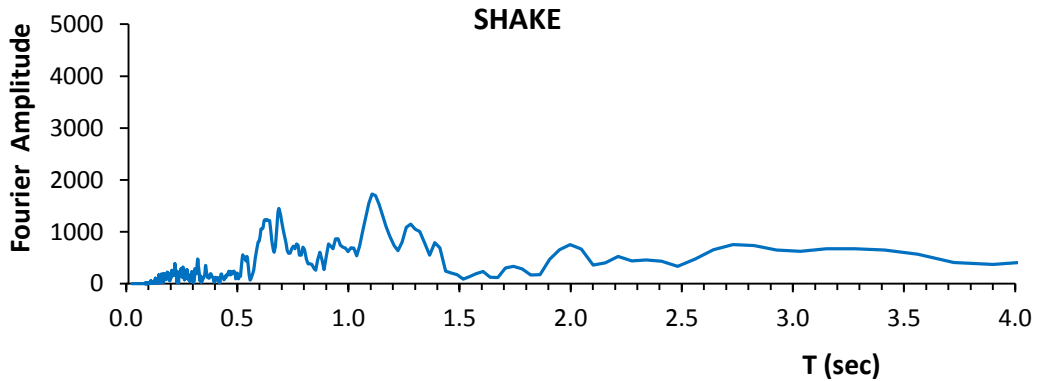




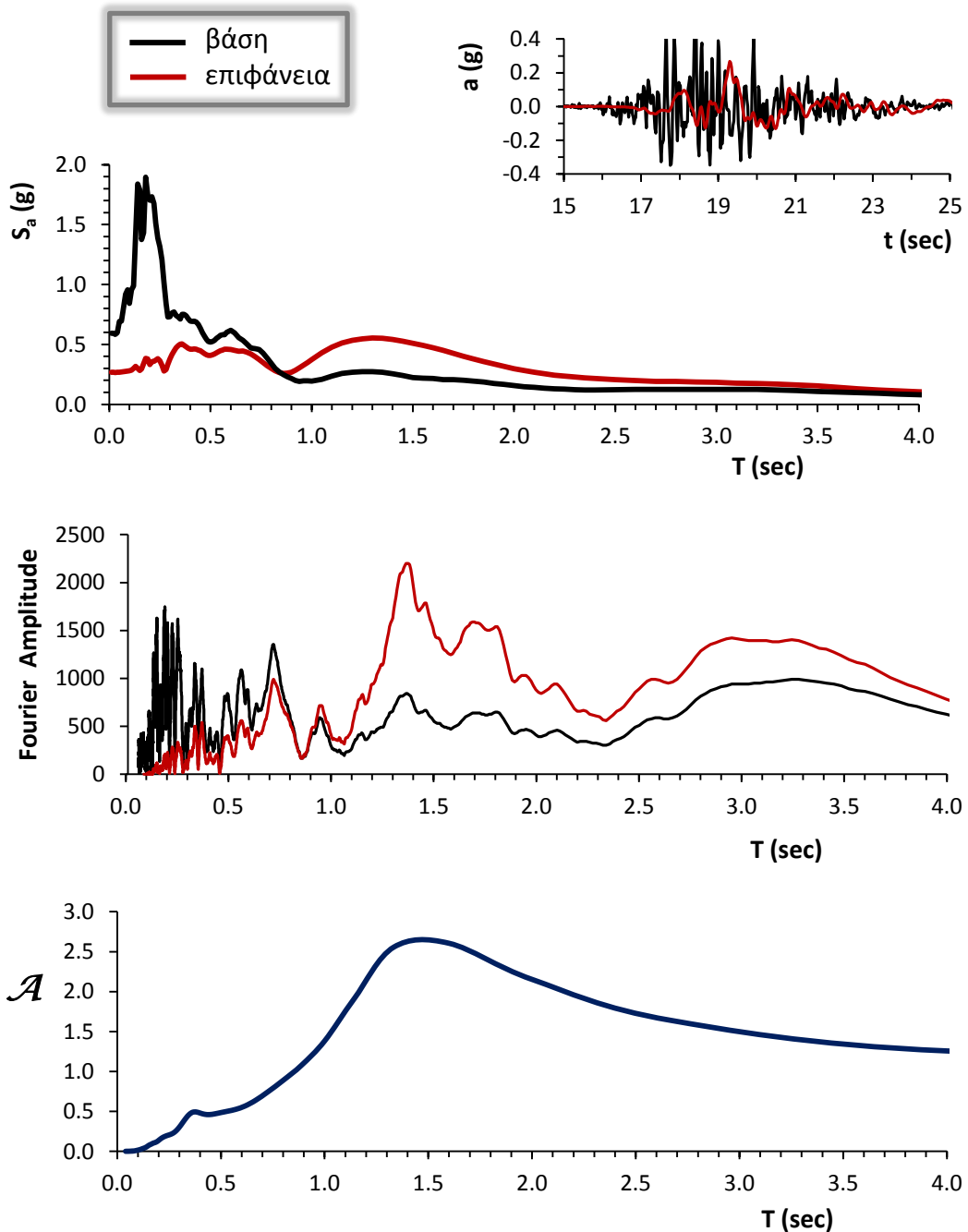
**Σχήμα 6.12:** Η χρονιοιστορία επιταχύνσεων ( $a$ ), το ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων ( $S_a$ ) και το φάσμα του πλάτους Fourier μετά την ανάστροφη ισοδύναμη ελαστική ανάλυση με το SHAKE2000. Επίσης, ο συντελεστής φασματικής μεγέθυνσης  $\mathcal{A}$ . (δεσπόζουσα ιδιοπερίοδος εδάφους:  $T = 2.64$  sec)



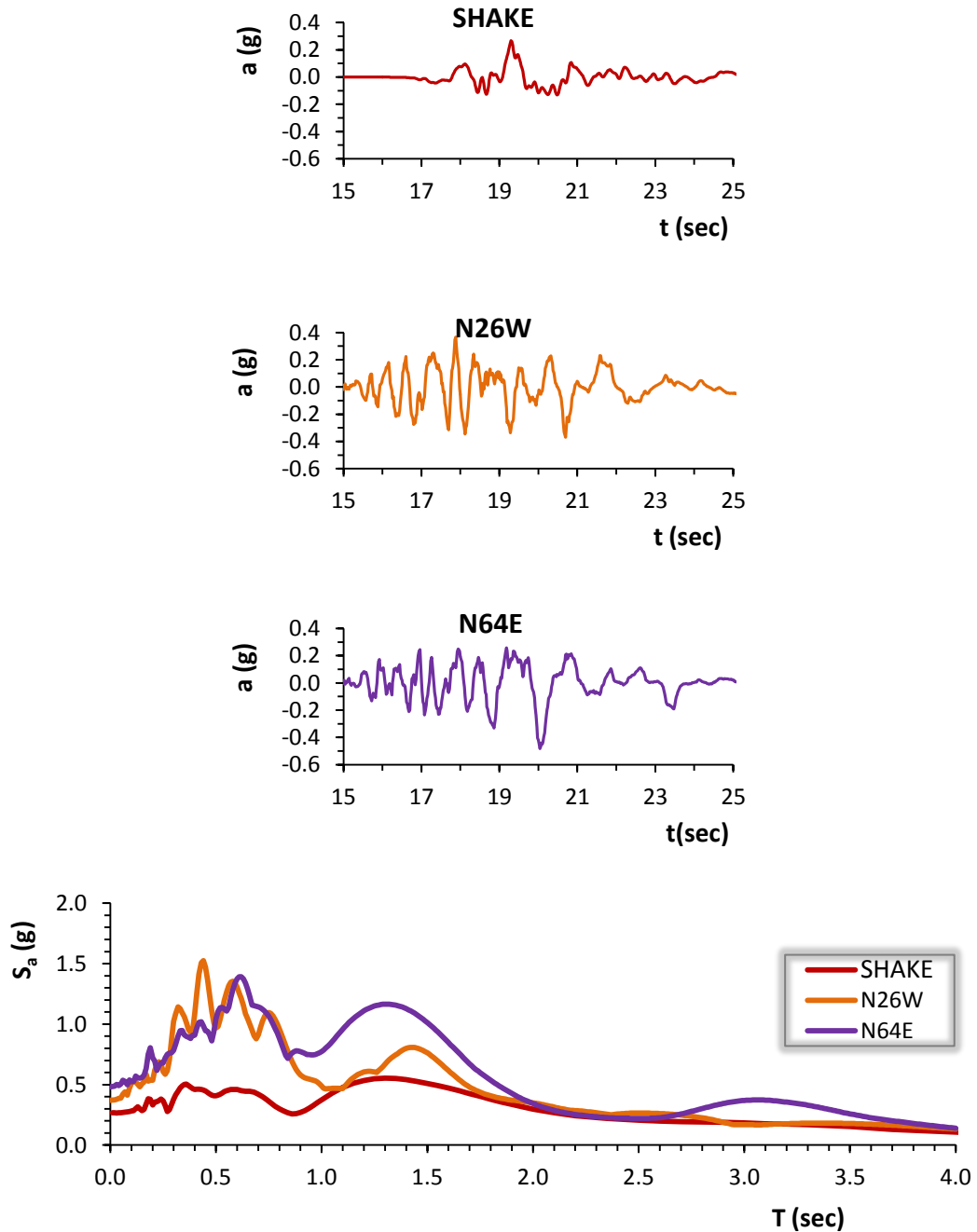
**Σχήμα 6.13:** Η χρονοϊστορία επιταχύνσεων ( $a$ ) και το ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων ( $S_a$ ) από την ισοδύναμη ελαστική ανάλυση με το SHAKE2000, σε σύγκριση με τα αντίστοιχα από τις δύο συνιστώσες της καταγραφής.



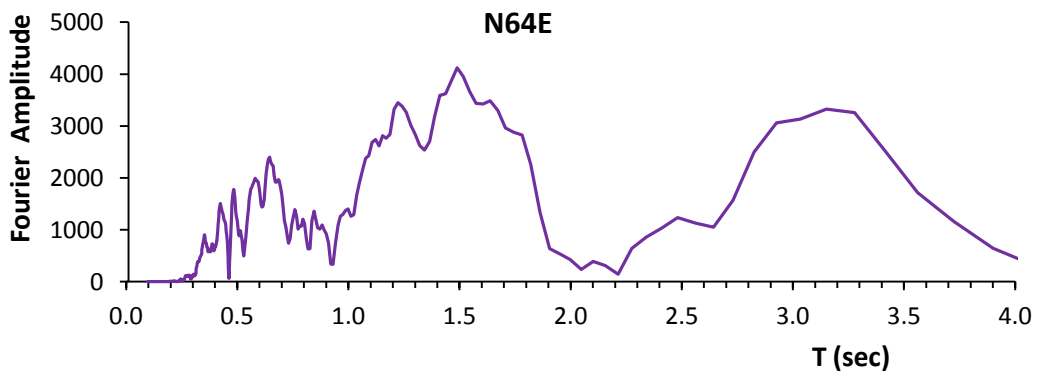
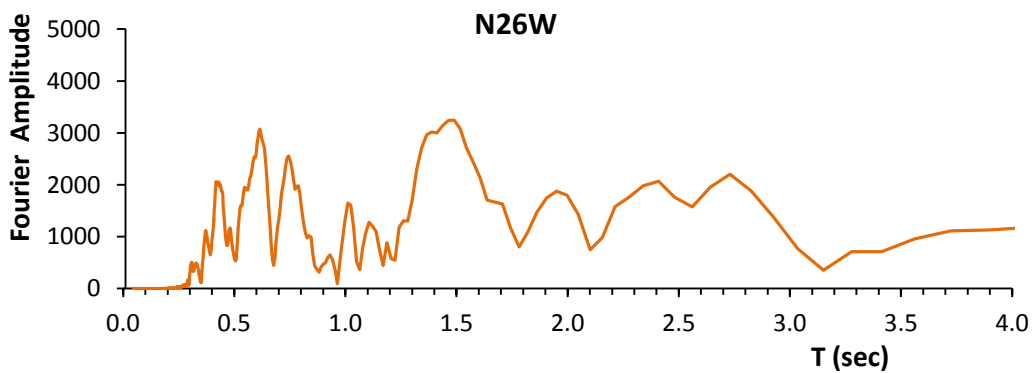
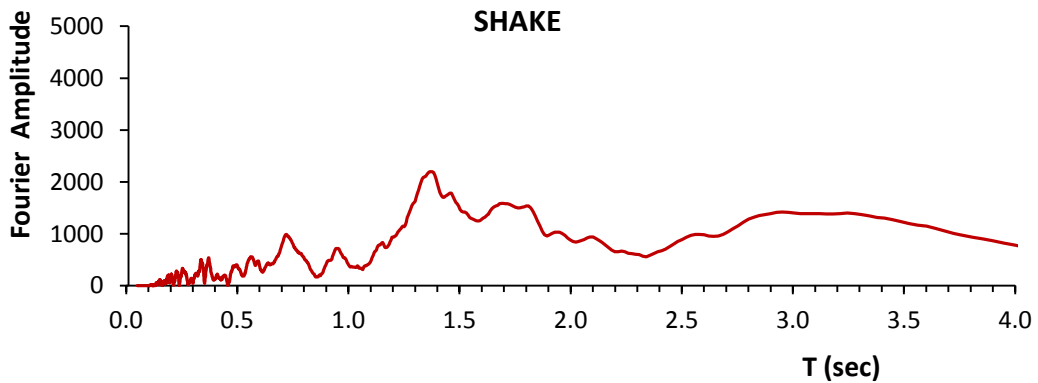
**Σχήμα 6.14:** Το φάσμα πλάτους Fourier από την ισοδύναμη ελαστική ανάλυση με το SHAKE2000 σε σύγκριση με τα αντίστοιχα από τις δύο συνιστώσες της καταγραφής.



**Σχήμα 6.15:** Η χρονιοϊστορία επιταχύνσεων ( $a$ ), το ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων ( $S_a$ ) και το φάσμα του πλάτους Fourier μετά την ανάστροφη ισοδύναμη ελαστική ανάλυση με το SHAKE2000. Επίσης, ο συντελεστής φασματικής μεγέθυνσης  $\mathcal{A}$ . (δεσπόμενη ιδιοπερίοδος εδάφους:  $T = 2.76$  sec)



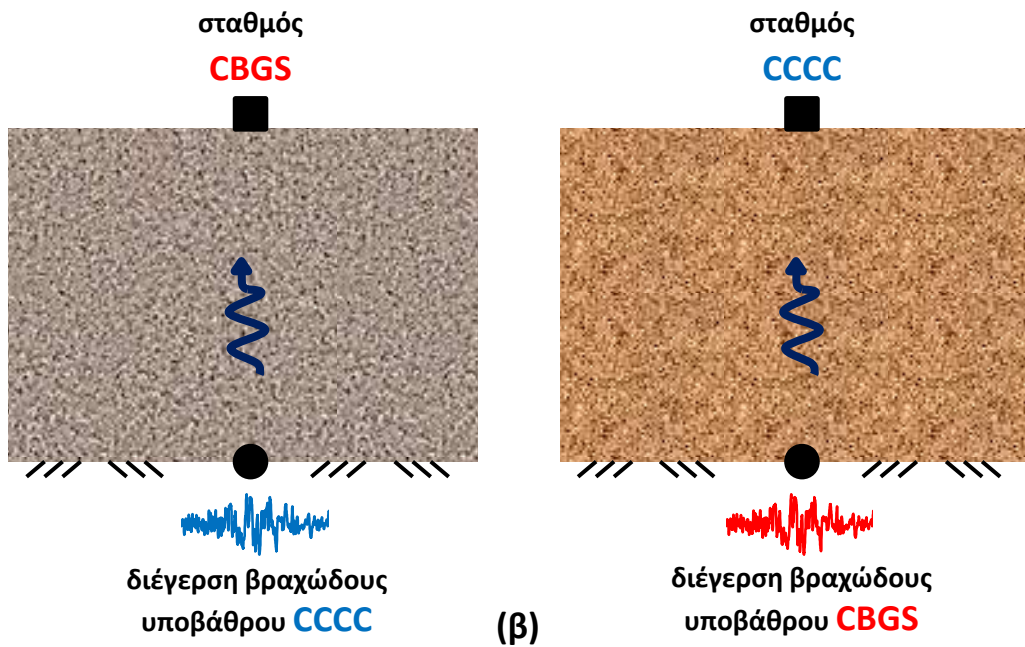
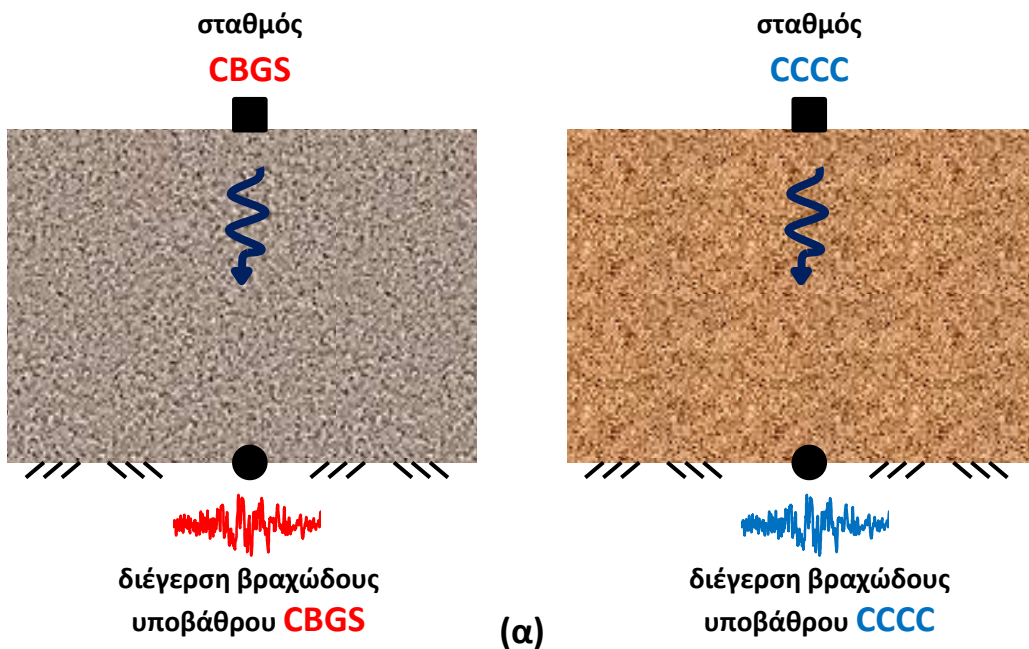
**Σχήμα 6.16:** Η χρονοϊστορία επιταχύνσεων ( $a$ ) και το ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων ( $S_a$ ) από την ισοδύναμη ελαστική ανάλυση με το SHAKE2000, σε σύγκριση με τα αντίστοιχα από τις δύο συνιστώσες της καταγραφής.



**Σχήμα 6.17:** Το φάσμα πλάτους Fourier από την ισοδύναμη ελαστική ανάλυση με το SHAKE2000 σε σύγκριση με τα αντίστοιχα από τις δύο συνιστώσες της καταγραφής.



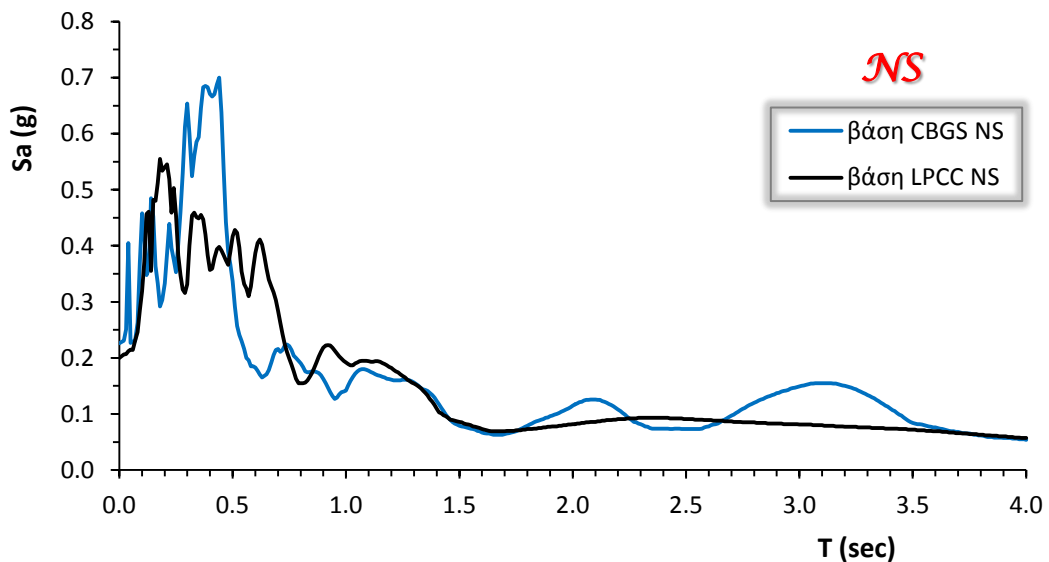
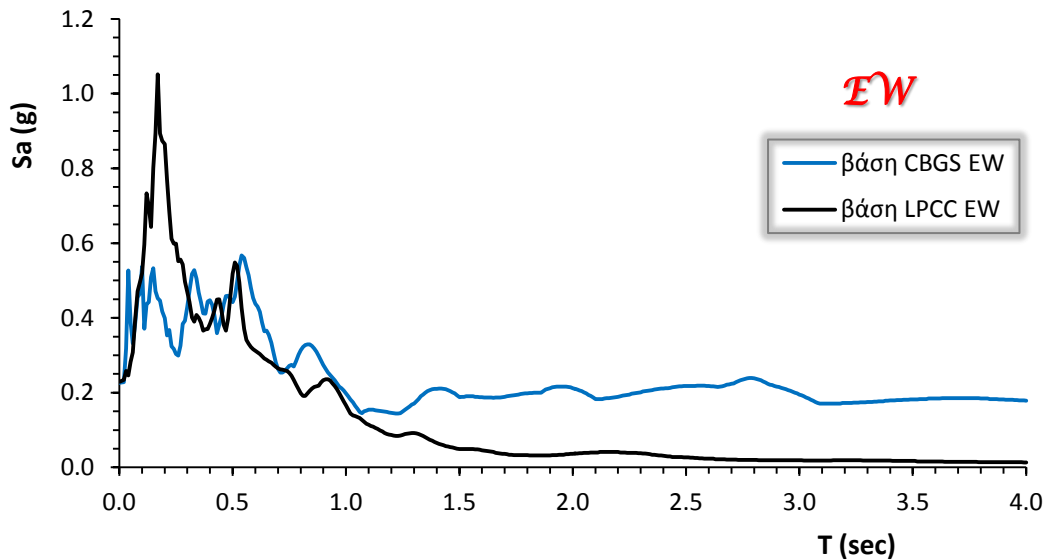
**Εικόνα 6.1:** το σημείο έδρασης των σταθμών CBGS και CCCC στο CBD (central business district) της πόλης του Christchurch και μεταξύ τους απόσταση κατά προσέγγιση. (πηγή: Google Maps)



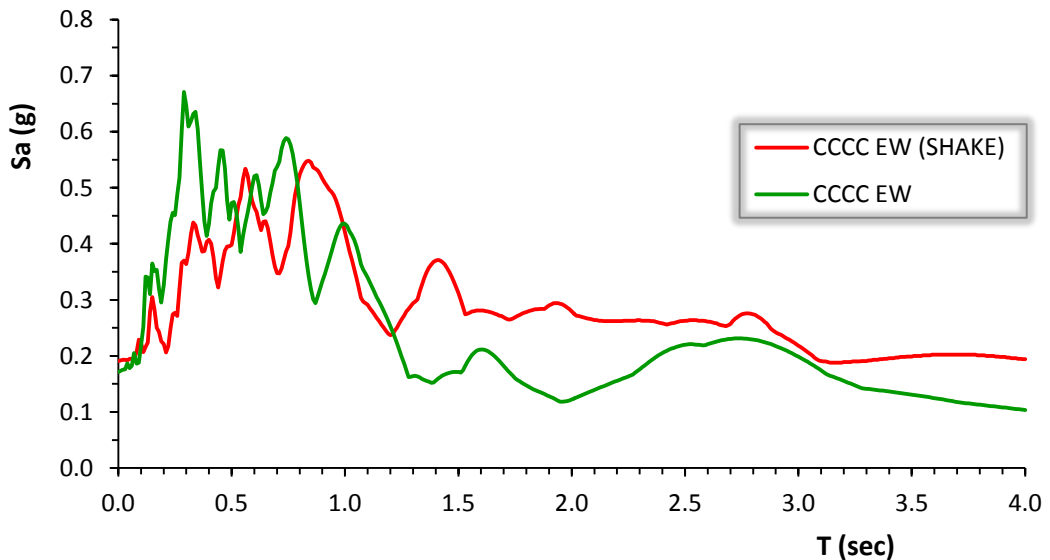
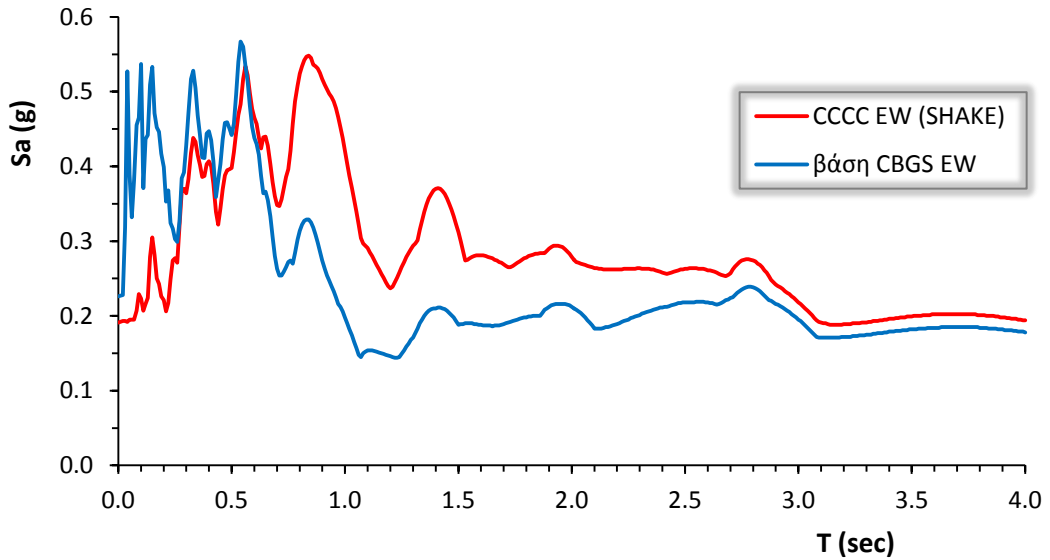
**Εικόνα 6.2:** (α) με βάση τη καταγεγραμμένη διέγερση στην επιφάνεια των σταθμών CBGS και CCCC παράγεται ο διεγείρων κραδασμός στο βραχώδες υπόβαθρο έκαστου, μέσω αντίστροφης ισοδύναμης ελαστικής ανάλυσης, (β) χρήση του προκύπτοντος κραδασμού στη βάση ενός σταθμού ως διέγερση στο εδαφικό προφίλ του άλλου.



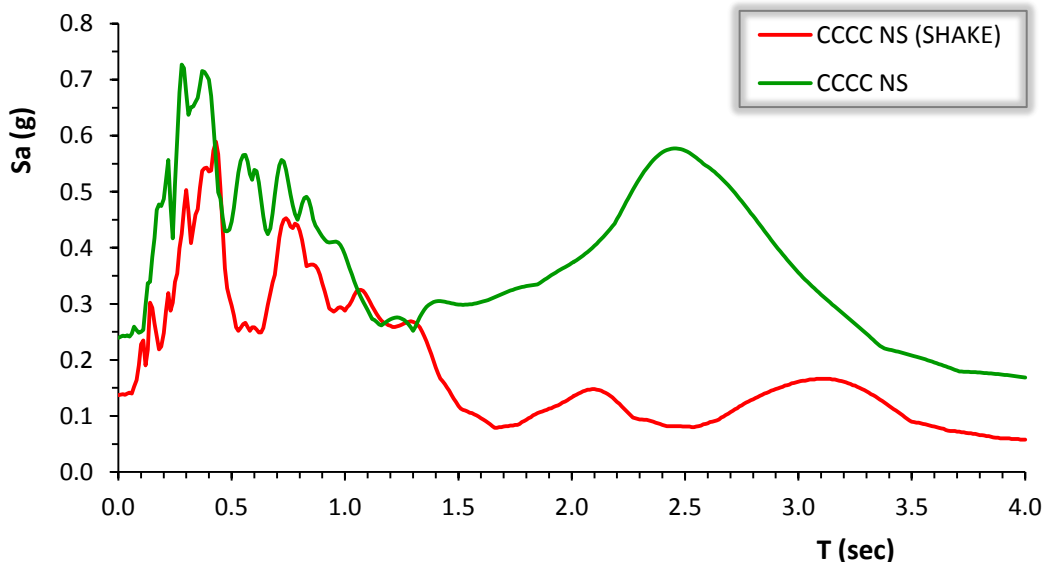
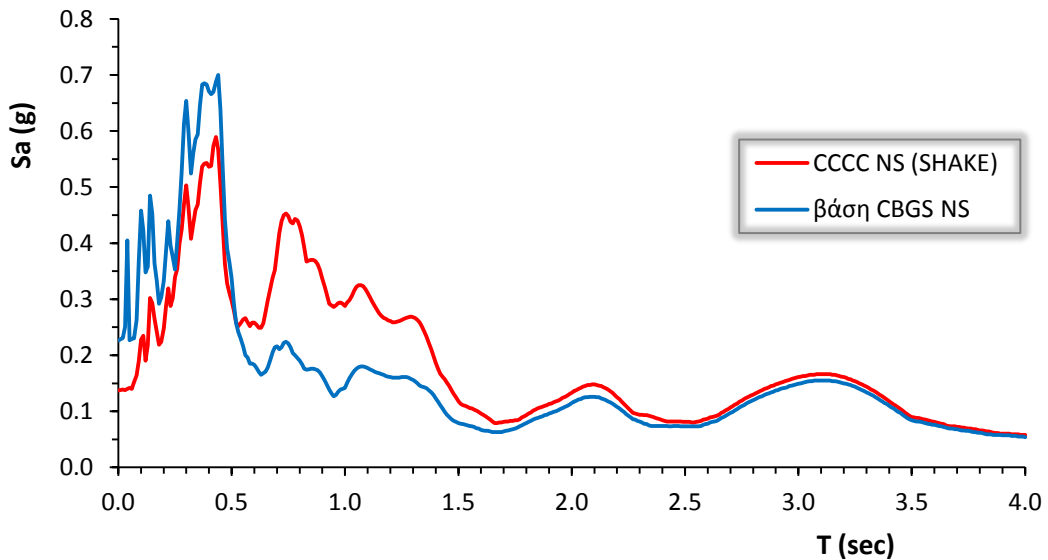
3 Σεπτεμβρίου 2010



**Σχήμα 6.18:** το ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων στη βάση του σταθμού CBGS μέσω αντίστροφης ισοδύναμης ελαστικής ανάλυσης με το λογισμικό SHAKE2000 και σύγκριση με το αντίστοιχο φάσμα στη βάση του σταθμού LPCC, κατά τη διεύθυνση EW (Ανατολής – Δύσης) και NS (Βορρά – Νότου).

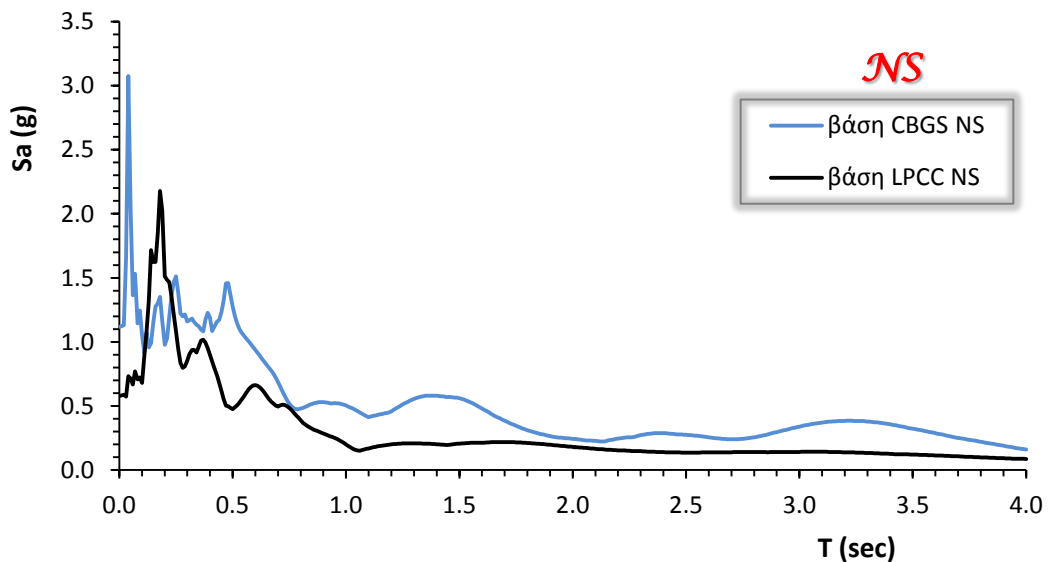
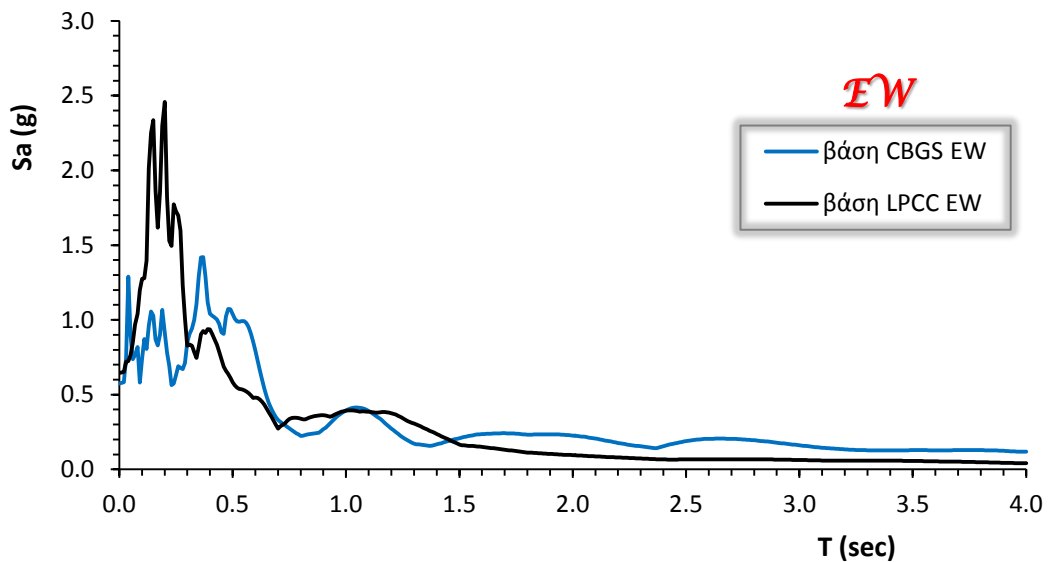


**Σχήμα 6.19:** το ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων στην επιφάνεια του σταθμού CCCC με διεγείρον κραδασμό τον προκύπτοντα στη βάση του σταθμού CBGS, μέσω αντίστροφης ισοδύναμης ελαστικής ανάλυσης με το λογισμικό SHAKE2000 και σύγκριση με το καταγεγραμμένο φάσμα στην επιφάνεια του πρώτου, κατά τη διεύθυνση EW (Ανατολής – Δύσης).



**Σχήμα 6.20:** το ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων στην επιφάνεια του σταθμού CCCC με διεγείρον κραδασμό τον προκύπτοντα στη βάση του σταθμού CBGS, μέσω αντίστροφης ισοδύναμης ελαστικής ανάλυσης με το λογισμικό SHAKE2000 και σύγκριση με το καταγεγραμμένο φάσμα στην επιφάνεια του πρώτου, κατά τη διεύθυνση NS (Βορρά – Νότου).

22 Φεβρουαρίου 2011

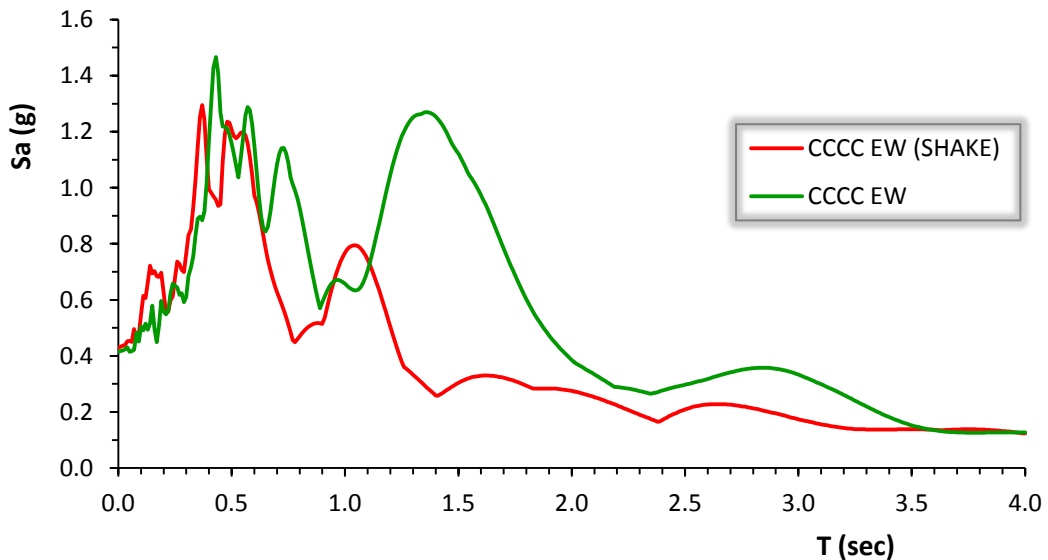
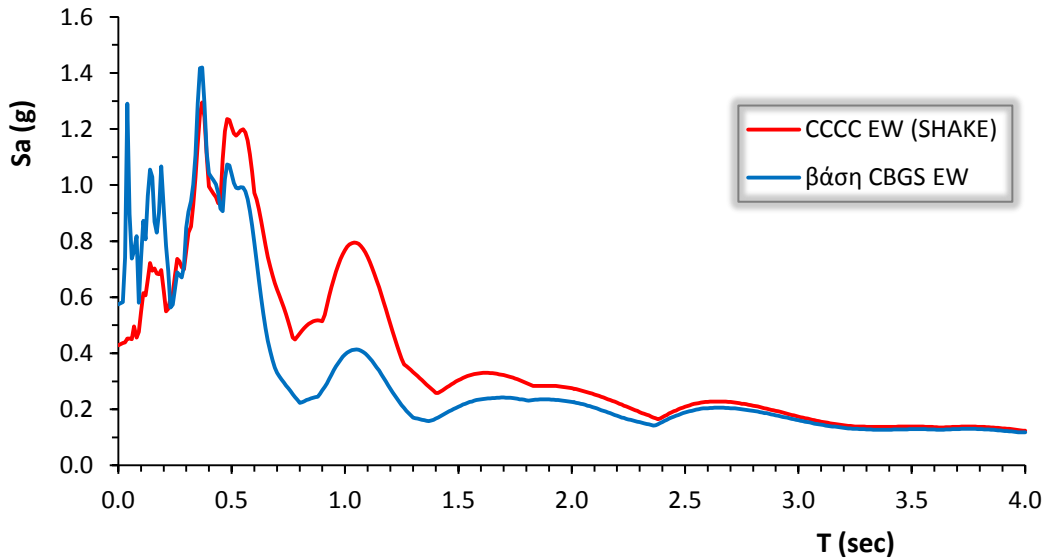


**Σχήμα 6.21:** το ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων στη βάση του σταθμού CBGS μέσω αντίστροφης ισοδύναμης ελαστικής ανάλυσης με το λογισμικό SHAKE2000 και η σύγκριση με το αντίστοιχο φάσμα στη βάση του σταθμού LPCC, κατά τη διεύθυνση EW (Ανατολής – Δύσης) και NS (Βορρά – Νότου).

CBGS → CCCC

συνιστώσα EW

22 Φεβρουαρίου 2011

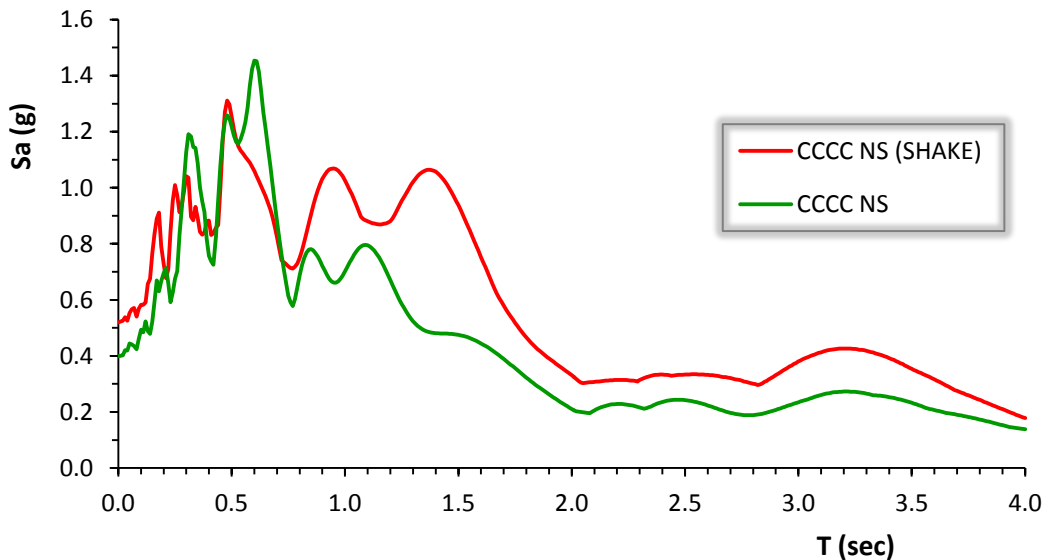
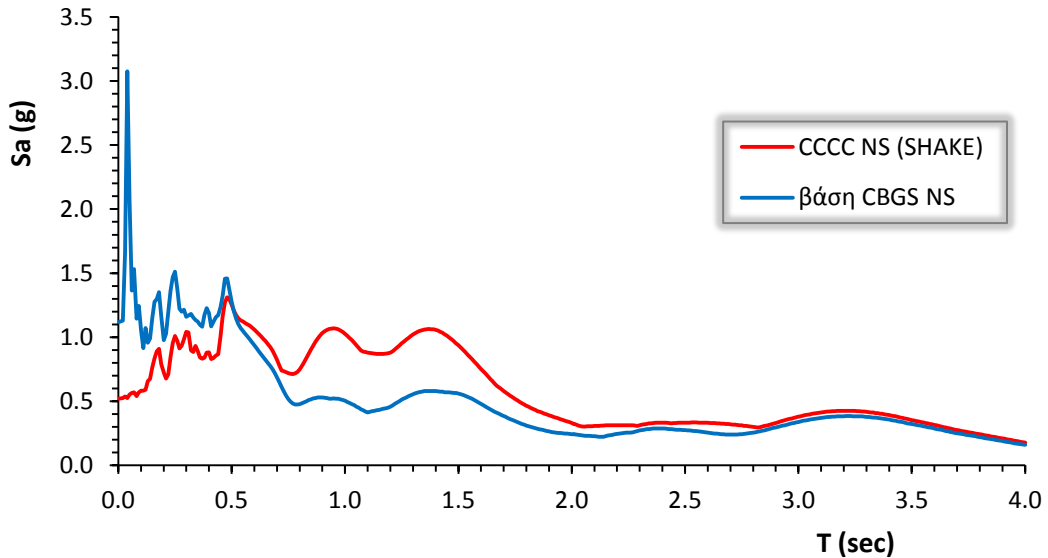


**Σχήμα 6.22:** το ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων στην επιφάνεια του σταθμού CCCC με διεγείρον κραδασμό τον προκύπτοντα στη βάση του σταθμού CBGS, μέσω αντίστροφης ισοδύναμης ελαστικής ανάλυσης με το λογισμικό SHAKE2000 και σύγκριση με το καταγεγραμμένο φάσμα στην επιφάνεια του πρώτου, κατά τη διεύθυνση EW (Ανατολής – Δύσης).

CBGS → CCCC

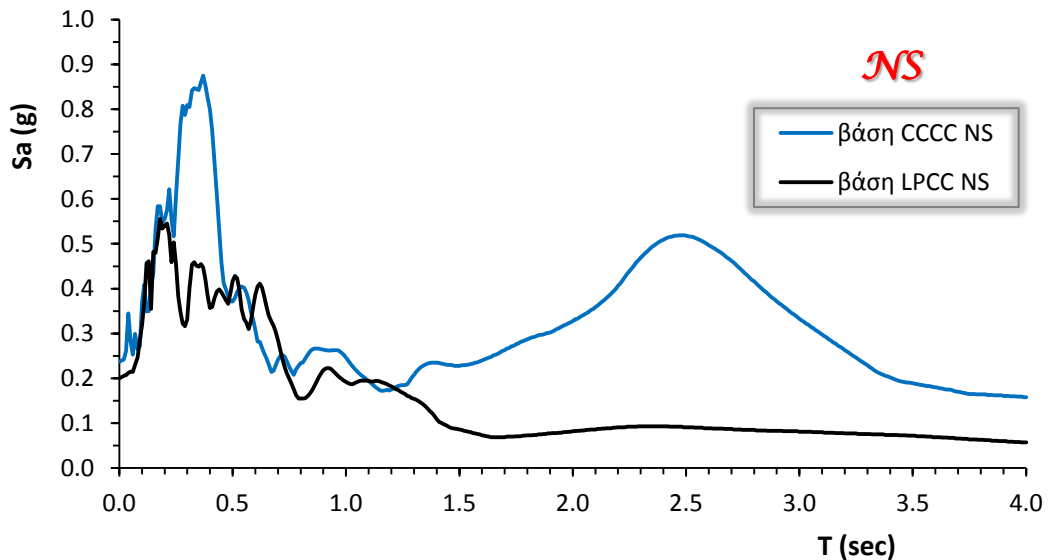
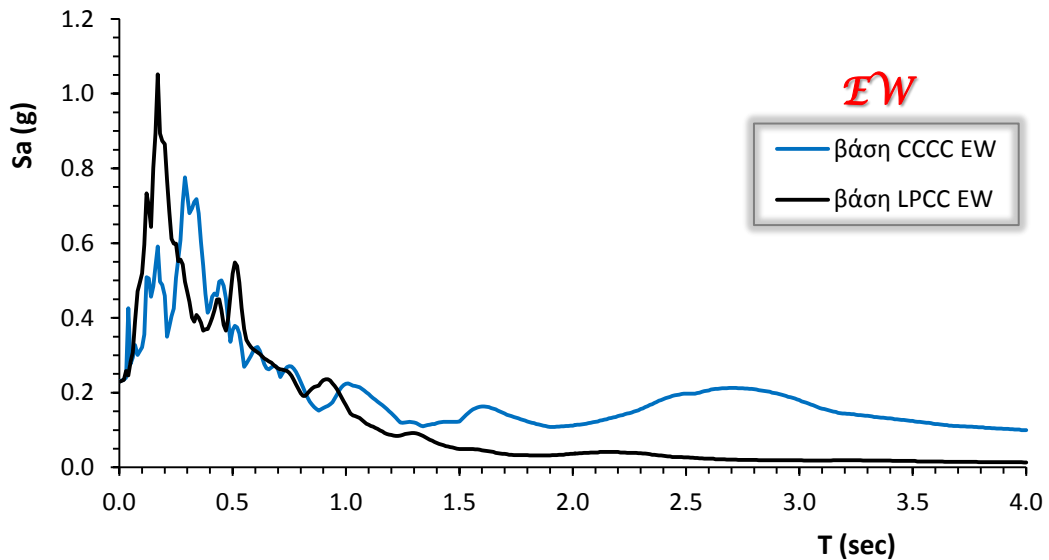
συνιστώσα NS

22 Φεβρουαρίου 2011



**Σχήμα 6.23:** το ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων στην επιφάνεια του σταθμού CCCC με διεγείρον κραδασμό τον προκύπτοντα στη βάση του σταθμού CBGS, μέσω αντίστροφης ισοδύναμης ελαστικής ανάλυσης με το λογισμικό SHAKE2000 και σύγκριση με το καταγεγραμμένο φάσμα στην επιφάνεια του πρώτου, κατά τη διεύθυνση NS (Βορρά – Νότου).

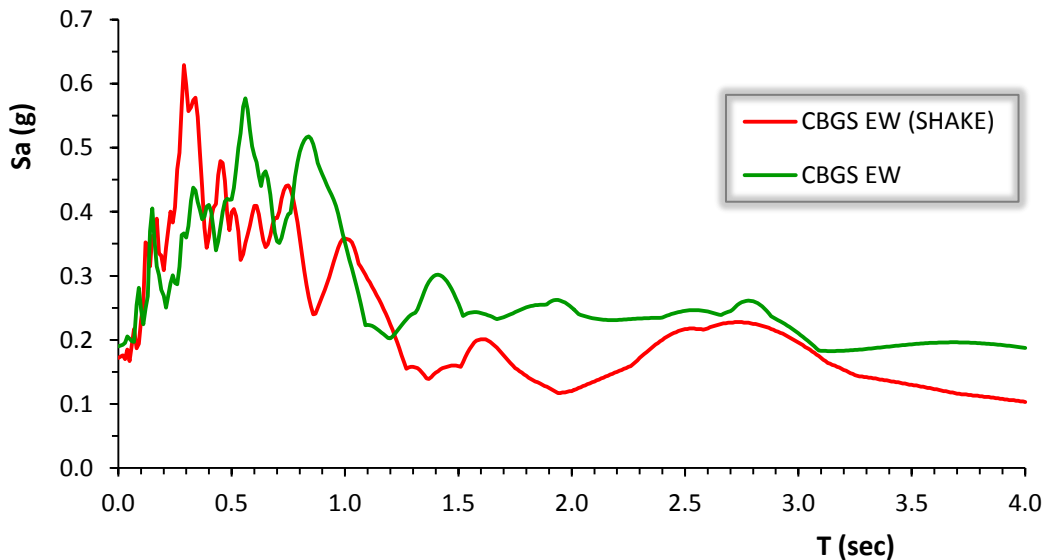
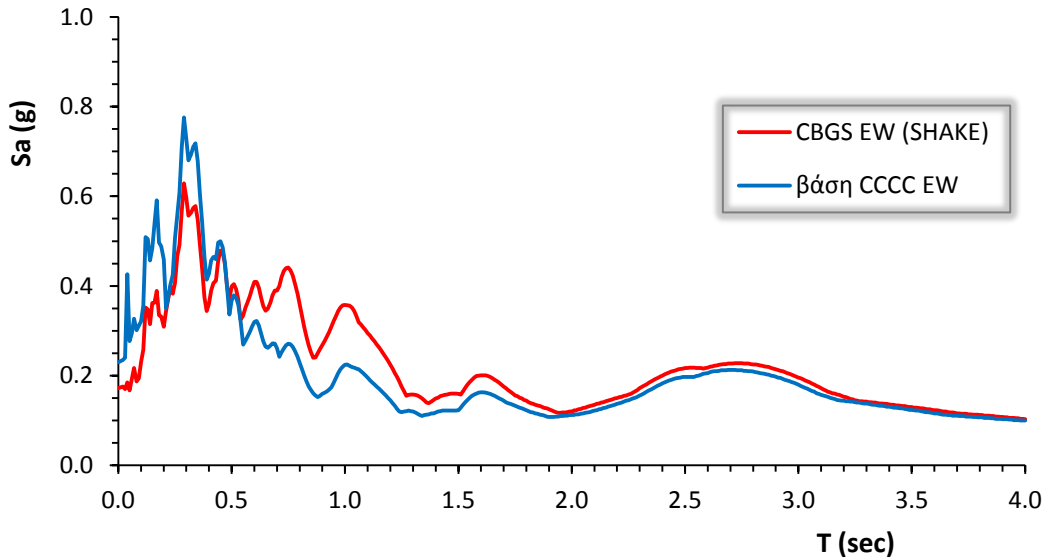
3 Σεπτεμβρίου 2010



**Σχήμα 6.24:** το ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων στη βάση του σταθμού CCCC μέσω αντίστροφης ισοδύναμης ελαστικής ανάλυσης με το λογισμικό SHAKE2000 και σύγκριση με το αντίστοιχο φάσμα στη βάση του σταθμού LPCC, κατά τη διεύθυνση EW (Ανατολής – Δύσης) και NS (Βορρά – Νότου).

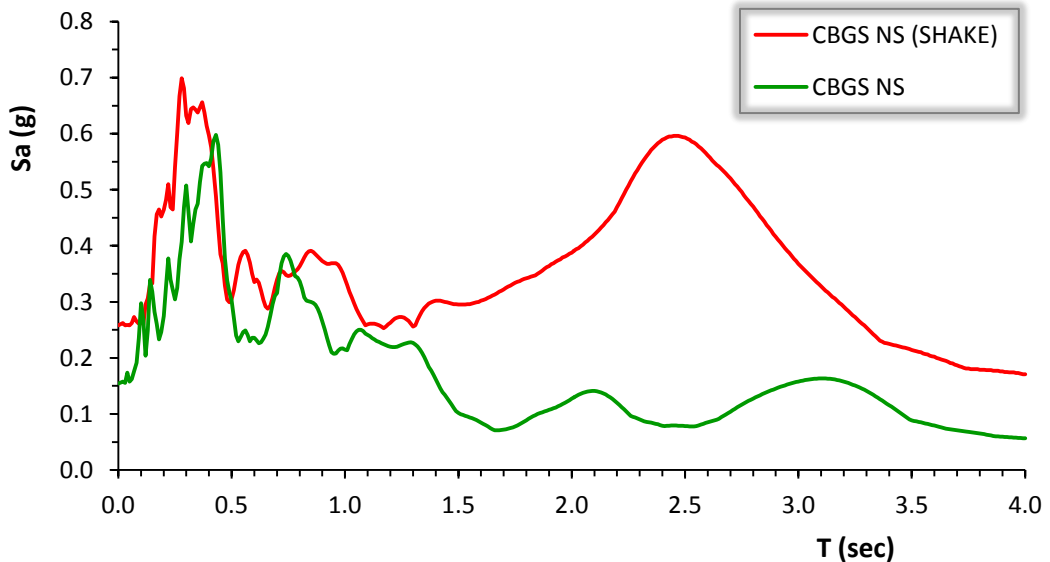
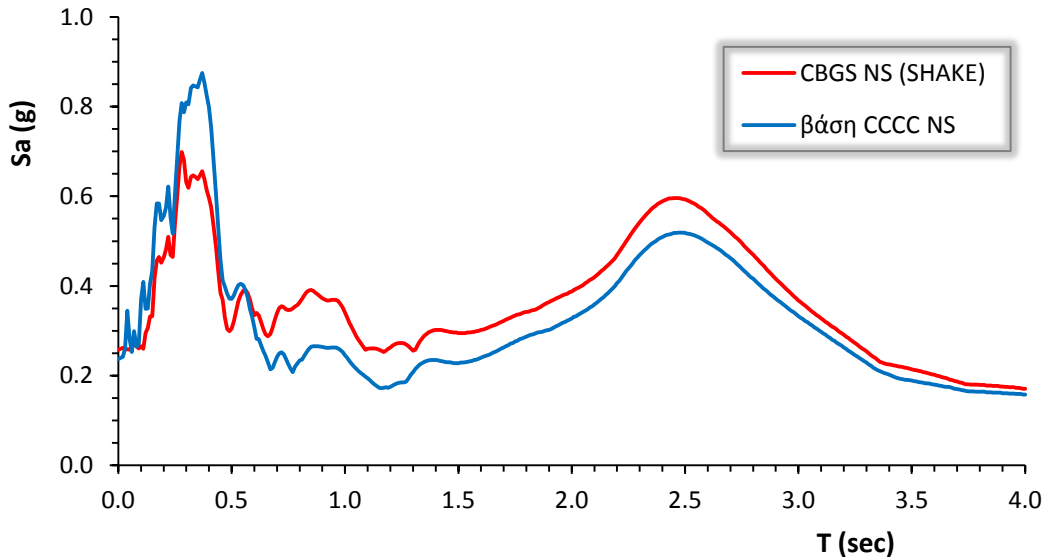
CCCC → CBGS  
3 Σεπτεμβρίου 2010

συνιστώσα EW



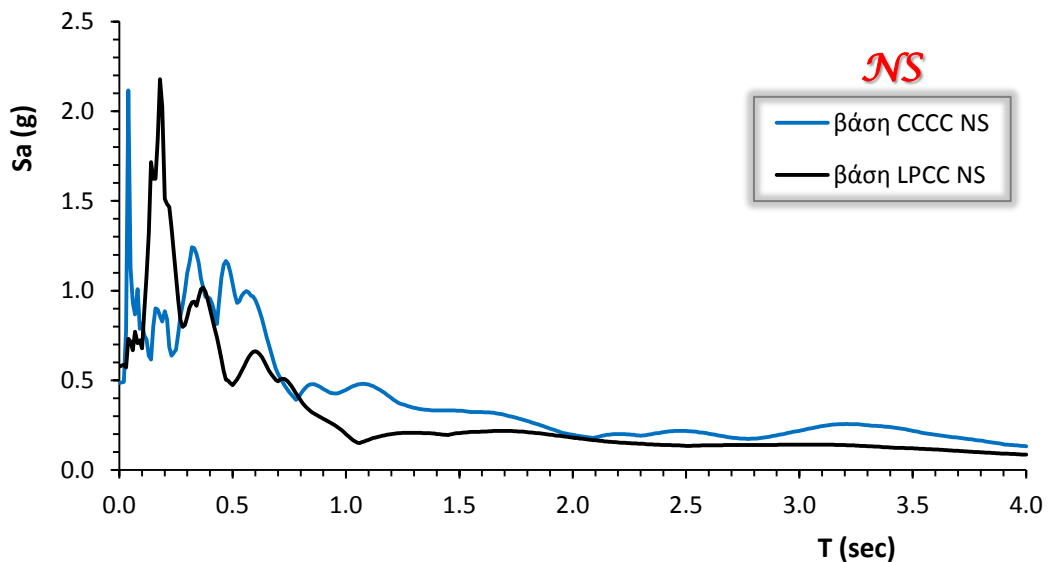
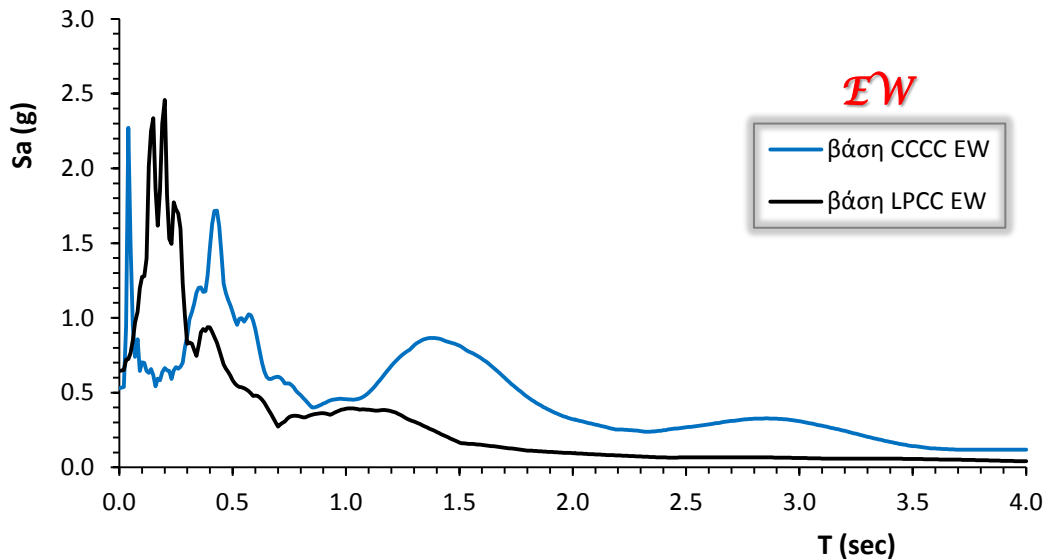
**Σχήμα 6.25:** το ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων στην επιφάνεια του σταθμού CBGS με διεγείρον κραδασμό τον προκύπτοντα στη βάση του σταθμού CCCC, μέσω αντίστροφης ισοδύναμης ελαστικής ανάλυσης με το λογισμικό SHAKE2000 και σύγκριση με το καταγεγραμμένο φάσμα στην επιφάνεια του πρώτου, κατά τη διεύθυνση EW (Ανατολής – Δύσης).





**Σχήμα 6.26:** το ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων στην επιφάνεια του σταθμού CBGS με διεγείρον κραδασμό τον προκύπτοντα στη βάση του σταθμού CCCC, μέσω αντίστροφης ισοδύναμης ελαστικής ανάλυσης με το λογισμικό SHAKE2000 και σύγκριση με το καταγεγραμμένο φάσμα στην επιφάνεια του πρώτου, κατά τη διεύθυνση NS (Βορρά – Νότου).

22 Φεβρουαρίου 2011

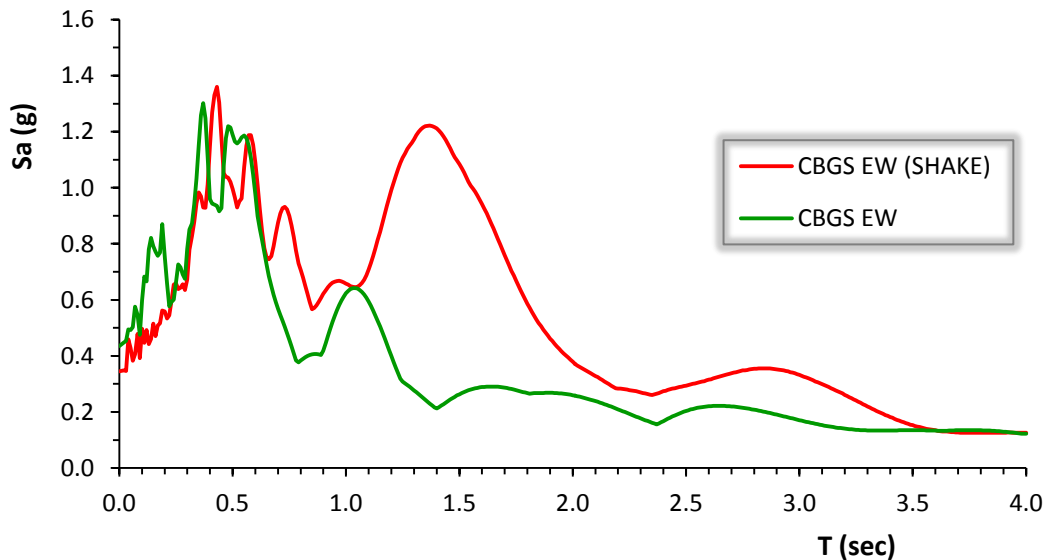
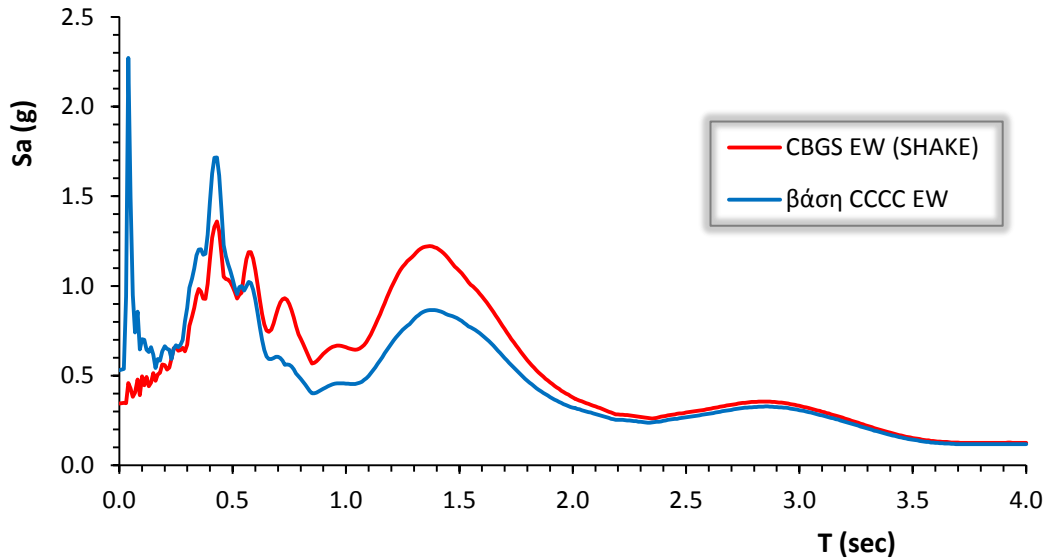


**Σχήμα 6.27:** το ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων στη βάση του σταθμού CCCC μέσω αντίστροφης ισοδύναμης ελαστικής ανάλυσης με το λογισμικό SHAKE2000 και η σύγκριση με το αντίστοιχο φάσμα στη βάση του σταθμού LPCC, κατά τη διεύθυνση EW (Ανατολής – Δύσης) και NS (Βορρά – Νότου).

CCCC → CBGS

συνιστώσα ΕW

22 Φεβρουαρίου 2011

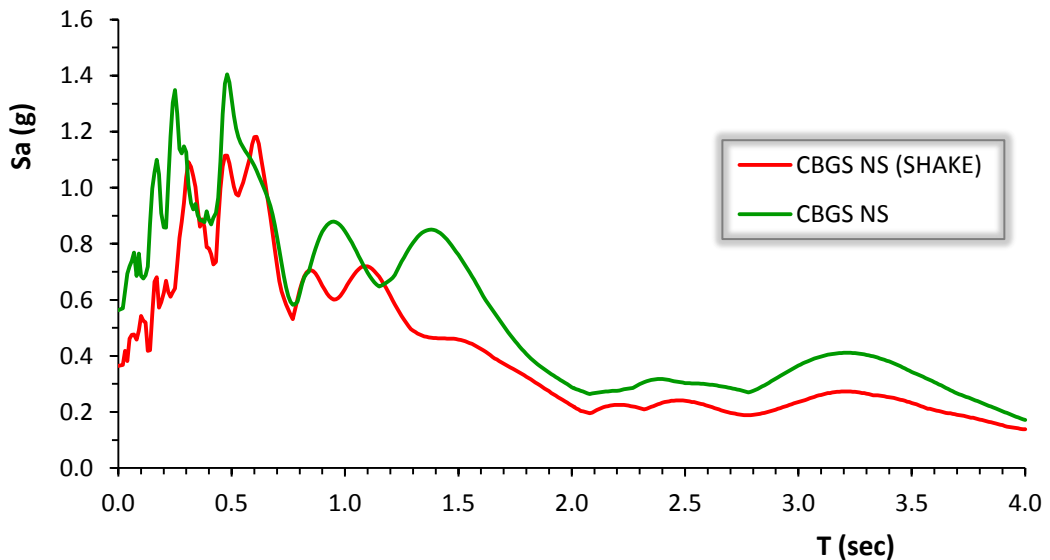
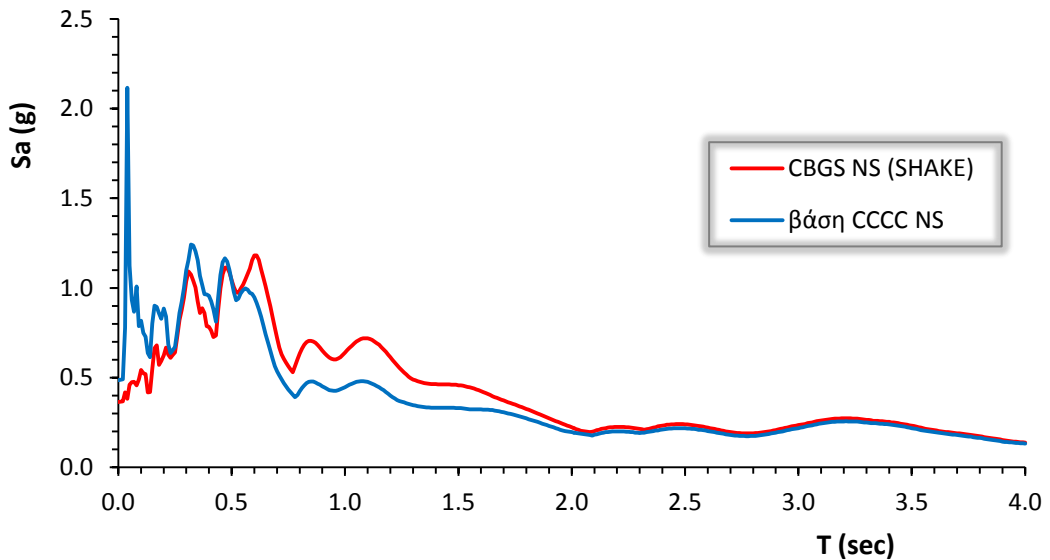


**Σχήμα 6.28:** το ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων στην επιφάνεια του σταθμού CBGS με διεγείρον κραδασμό τον προκύπτοντα στη βάση του σταθμού CCCC, μέσω αντίστροφης ισοδύναμης ελαστικής ανάλυσης με το λογισμικό SHAKE2000 και σύγκριση με το καταγεγραμμένο φάσμα στην επιφάνεια του πρώτου, κατά τη διεύθυνση EW (Ανατολής – Δύσης).

CCCC → CBGS

συνιστώσα NS

22 Φεβρουαρίου 2011



**Σχήμα 6.29:** το ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων στην επιφάνεια του σταθμού CBGS με διεγείρον κραδασμό τον προκύπτοντα στη βάση του σταθμού CCCC, μέσω αντίστροφης ισοδύναμης ελαστικής ανάλυσης με το λογισμικό SHAKE2000 και σύγκριση με το καταγεγραμμένο φάσμα στην επιφάνεια του πρώτου, κατά τη διεύθυνση NS (Βορρά – Νότου).



# Κεφάλαιο 7

---

*Δ1 – κανονικοποίηση του φάσματος αποκρίσεως*



### *7.1 Εισαγωγή*

Με αφορμή την διπλωματική εργασία της Αικατερίνης Ζιωτοπούλου (Αικατερίνη Ζιωτοπούλου, 2007) στην οποία προτάθηκε η υιοθέτηση ενός φάσματος σχεδιασμού των κατασκευών διαφορετικού σε σχέση με τα ισχύοντα στους διεθνείς κανονισμούς, επιχειρήσαμε να διερευνήσουμε κατά πόσο ένα τέτοιο εγχείρημα θα ήταν εφαρμόσιμο στη περιοχή του Christchurch της Νέας Ζηλανδίας. Χρησιμοποιώντας τα δεδομένα των καταγραφών από 5 σεισμικά γεγονότα στην ευρύτερη περιοχή του Canterbury στόχος μας είναι να παρουσιάσουμε μία πρόταση για ένα δικανονικοποιημένο φάσμα σχεδιασμού με άμεση εφαρμογή κυρίως στη περιοχή μελέτης μας.

### *7.2 Τα βήματα προς τη δικανονικοποίηση του φάσματος αποκρίσεως*

Παγκοσμίως οι αντισεισμικοί κανονισμοί προτείνουν φάσματα σχεδιασμού αποτελούμενα από τμήματα – κλάδους τα οποία ορίζουν την αντίστοιχη επιτάχυνση σχεδιασμού ανάλογα με την εκάστοτε ιδιοπερίοδο ταλάντωσης του εν λόγω συστήματος. Τα φάσματα αυτά είναι κανονικοποιημένα μονάχα ως προς τον κατακόρυφο άξονα, δηλαδή τον άξονα των φασματικών επιταχύνσεων.

Η μέγιστη φασματική επιτάχυνση  $S_a$  που μπορεί να αναπτύξει ένας μονοβάθμιος ταλαντωτής στον οποίο επιβάλλεται ανακυκλική διέγερση γωνιακής συχνότητας  $\omega$  είναι (Xie και Yu, 1982):

$$S_a(T) = \dot{\omega} \left| \int_0^t \ddot{x}(\tau) e^{-\xi\omega(t-\tau)} \left[ \left(1 - \frac{\xi^2}{1-\xi^2}\right) \sin[\dot{\omega}(t-\tau)] + \frac{2\xi}{\sqrt{1-\xi^2}} \cos[\dot{\omega}(t-\tau)] \right] d\tau \right|_{max}$$

όπου το  $\xi$  είναι ο λόγος απόσβεσης (damping ratio) με  $\xi = \frac{c}{2m\omega} < 1$ ,

$$\dot{\omega} = \omega \sqrt{1 - \xi^2} \text{ και } T = \frac{2\pi}{\omega}.$$

Οι κανονικοποίηση των φασμάτων σχεδιασμού ως προς την φασματική επιτάχυνση γίνεται με βάση την μέγιστη εδαφική επιτάχυνση  $p_{ga}$  (peak ground acceleration). Συνεπώς προκύπτει η κανονικοποιημένη φασματική επιτάχυνση για το σύστημα ως:

$$S_N(T) = \frac{S_a(T)}{p_{ga}}.$$

Στο **σχήμα 7.1** απεικονίζεται η καταγεγραμμένη ιστορία επιταχύνσεων της συνιστώσας N89W του σταθμού CBGS για το σεισμικό γεγονός της 3<sup>ης</sup> Σεπτεμβρίου



του 2010 με επίκεντρο τη πόλη του Christchurch. Ο λόγος απόσβεσης που χρησιμοποιήσαμε για τη παραγωγή των ελαστικών φασμάτων είναι  $\xi = 5\%$ . Παρατηρούμε πως το ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων έχει αρκετές κορυφές σε διάφορες ιδιοπεριόδους. Τόσο το εδαφικό προφίλ στη περιοχή καταγραφής όσο και το ίδιο το σεισμικό γεγονός (απόσταση της προβολή του ρήγματος στην επιφάνεια από την εν λόγω περιοχή, μηχανισμός διάρρηξης κ.ά.) επηρεάζουν το συχνοτικό περιεχόμενο της καταγραφής στην επιφάνεια. Το κανονικοποιημένο φάσμα ως προς τη μέγιστη εδαφική επιτάχυνση, στο ίδιο σχήμα, δεν δίνει σαφέστερη εικόνα όσον αφορά το θέμα των περιόδων/συχνοτήτων, αλλά προβάλλει ξεκάθαρα την ενίσχυση που παρουσιάζεται για τις διάφορες ιδιοπεριόδους με βάση τον συγκεκριμένο διεγείροντα κραδασμό.

Είναι εμφανές πως στη συγκεκριμένη καταγραφή (αλλά και στην πλειοψηφία των καταγραφών που μελετήσαμε) δεν είναι προφανής η επιλογή μιας και μόνο ιδιοπεριόδου στην οποία να αντιστοιχεί η δυσμενέστερη – μέγιστη φασματική επιτάχυνση. Όπως αναλυτικά περιγράψαμε και στο κεφάλαιο 4 θεωρήσαμε απαραίτητο για την βαθύτερη κατανόηση και διερεύνηση του φαινομένου να επιλέξουμε τρεις δεσπόζουσες ιδιοπεριόδους χαρακτηριστικές του εκάστοτε κραδασμού. Η πρώτη αναφέρεται ως  $T_{p_{short}}$  (βραχεία δεσπόζουσα ιδιοπερίοδος) και προσεγγίζει τα μέγιστα του φάσματος για ιδιοπεριόδους μικρότερες του 1 sec. Η δεύτερη και η τρίτη αναφέρονται ως  $T_{p_{medium}}$  (μεσαία δεσπόζουσα ιδιοπερίοδος) και  $T_{p_{long}}$  (μακρά δεσπόζουσα ιδιοπερίοδος) και προσεγγίζουν τις μέγιστες φασματικές επιταχύνσεις για μεγαλύτερες τιμές ιδιοπεριόδων, πάνω από 0.5 και 1 sec αντίστοιχα.

Προκειμένου να περιορίσουμε την επιρροή των διάφορων ιδιοπεριόδων που φαίνεται να είναι οι δεσπόζουσες του κραδασμού, προχωρώντας ένα βήμα παρακάτω από τα ισχύοντα δεδομένα των κανονισμών, κανονικοποιούμε το φάσμα επιταχύνσεων και ως προς αυτές. Έτσι προκύπτουν τα τρία δικανονικοποιημένα φάσματα επιταχύνσεων που παρουσιάζονται στο **σχήμα 7.2**, ένα για κάθε μία φαινομενικά δεσπόζουσα ιδιοπερίοδο, όπως περιγράψαμε προηγουμένως.

Παρατηρώντας τα τρία δικανονικοποιημένα φάσματα επιταχύνσεων που προκύπτουν από τη παραπάνω διαδικασία (σχήμα 7.2), για την εν λόγω καταγραφή στο σταθμό CBGS, μόνο το πρώτο, που έχει κανονικοποιηθεί ως προς τη βραχεία δεσπόζουσα ιδιοπερίοδο  $T_{p_{short}}$ , φαίνεται να δίνει ουσιαστικό αποτέλεσμα. Η δεσπόζουσα κορυφή του φάσματος παρουσιάζεται για  $T/T_{p_{short}} = 1$  με τιμή  $S_a \approx 4g$ . Για τα επόμενα δύο δικανονικοποιημένα φάσματα είναι εμφανές πως οι περίοδοι που επιλέχθηκαν ως πιθανές δεσπόζουσες δεν πληρούν εν τέλει τα ανάλογα κριτήρια.

### 7.3 Εφαρμογή στους σεισμούς του Canterbury

Για την διερεύνηση της δικανονικοποίησης του φάσματος αποκρίσεως ως προς την αξία της εφαρμογής του στο σχεδιασμό των κατασκευών, η σεισμική ακολουθία στη περιοχή του Christchurch την περίοδο 2010 – 11 αποτελεί θαυμάσια πηγή δεδομένων. Πέραν των πολλών σε αριθμό σημαντικών σεισμικών γεγονότων, μείζονος σημασίας είναι η ύπαρξη ενός πλούσιου και καλά ενημερωμένου δικτύου επιταχυνσιογράφων που εκτείνεται σε όλη τη Νέα Ζηλανδία. Ειδικότερα, οι καταγραφικοί σταθμοί στη πόλη του Christchurch και γύρω από αυτή, όπως παρουσιάζονται και στο κεφάλαιο 4, αποτέλεσαν ιδανικό σενάριο μελέτης για τη παρούσα εργασία.

Συγκεκριμένα, για να διερευνήσουμε το κατά πόσο η εφαρμογή ενός δικανονικοποιημένου φάσματος απόκρισης είναι ουσιαστική ή όχι, μελετήσαμε συνολικά 6 σεισμικά γεγονότα της περιόδου 2010 – 11. Για κάθε ένα από αυτά εκμεταλλευτήκαμε δεδομένα από διάφορους καταγραφικούς σταθμούς διάσπαρτους στη περιοχή. Φυσικά ο κάθε σταθμός αποδίδει δύο χρονοϊστορίες σε διευθύνσεις κάθετες μεταξύ τους ανάλογα με τον προσανατολισμό που έχει τοποθετηθεί ο καταγραφικός μηχανισμός του. Έτσι έχουμε τα παρακάτω δεδομένα μελέτης:

- σεισμικό συμβάν **3<sup>ης</sup> Σεπτεμβρίου του 2010,  $M_w = 7.1$** . Σταθμοί προς μελέτη: *CBGS, CCCC, CHHC, CMHS, DFHS, HORC, HPSC, HVSC, KPOC, LPCC, NNBS, PRPC, REHS, RHSC, SHLC, SMTC, SWNC*.
- σεισμικό συμβάν **22<sup>ης</sup> Φεβρουαρίου 2011,  $M_l = 6.3$** . Σταθμοί προς μελέτη: *CBGS, CCCC, CHHC, CMHS, HPSC, HVSC, KPOC, LPCC, NNBS, PRPC, REHS, RHSC, SHLC, SMTC, SWNC*.
- σεισμικό συμβάν **13<sup>ης</sup> Ιουνίου 2011,  $M_w = 6$** . Σταθμοί προς μελέτη: *CBGS, CHHC, CMHS, HPSC, HVSC, KPOC, LPCC, NNBS, PRPC, REHS, RHSC, SHLC, SMTC, SWNC*.
- σεισμικό συμβάν **13<sup>ης</sup> Ιουνίου 2011,  $M_w = 5.63$** . Σταθμοί προς μελέτη: *CBGS, HVSC, LPCC, REHS*.
- σεισμικό συμβάν **23<sup>ης</sup> Δεκεμβρίου 2011,  $M_w = 5.8$** . Σταθμοί προς μελέτη: *CBGS, CCCC, CHHC, CRLZ, HPSC, HVSC, REHS*.
- σεισμικό συμβάν **23<sup>ης</sup> Δεκεμβρίου 2011,  $M_w = 6$** . Σταθμοί προς μελέτη: *CBGS, HVSC, LPCC, REHS*.

Οι συνολικές καταγραφές που μελετήθηκαν με βάση τα παραπάνω στοιχεία είναι συνολικά **122**. Για κάθε μία από όλες αυτές επιλέχθηκαν τρία  $T_p$ , ένα βραχύ (short), ένα μεσαίο (medium) και ένα μακρύ (long). Ο πίνακας που συνοψίζει τα εν λόγω δεδομένα έχει παρουσιαστεί στο κεφάλαιο 4 της παρούσας εργασίας (πίνακας 4.2 και 4.3).

Στο **σχήμα 7.3** απεικονίζονται τα τρία δικανονικοποιημένα φάσματα επιταχύνσεων που προκύπτουν με βάση τις τρεις φαινομενικά δεσπόζουσες ιδιοπεριόδους για όλες τις παραπάνω καταγραφές. Επίσης υπάρχει και το φάσμα επιταχύνσεων το οποίο είναι κανονικοποιημένο μόνο ως προς τη μέγιστη εδαφική επιτάχυνση ( $rga$ ). Με έντονη παχιά κίτρινη γραμμή επισημαίνεται το μέσο φάσμα που προκύπτει για κάθε μία περίπτωση χωριστά.

Εύκολα παρατηρούμε πως μόνο το φάσμα που προκύπτει από τη κανονικοποίηση των περιόδων με το  $Tp_{short}$  ουσιαστικά εμφανίζει την χαρακτηριστική απαιτούμενη κορυφή για  $T/Tp_{short} = 1$  η οποία αποτελεί σαφή προϋπόθεση για μία ορθή κανονικοποίηση. Αντίθετα, οι δικανονικοποιήσεις με τη μεσαία και ιδιαίτερα με τη μακρά δεσπόζουσα ιδιοπερίοδο δεν φαίνεται να αποδίδουν θετικά αποτελέσματα.

Δεδομένης της μεγάλης διαφοροποίησης και ιδιομορφίας που παρουσιάζουν οι εδαφικοί σχηματισμοί στο Christchurch και γύρω από αυτό, θεωρήσαμε απαραίτητο να επικεντρώσουμε τη προσοχή μας σε εδάφη μιας συγκεκριμένης κατηγορίας. Επιλέξαμε τη **κατηγορία εδαφών D** με βάση τον ισχύοντα αντισεισμικό κανονισμό της Νέας Ζηλανδίας (NZS1170.5). Τα εδάφη αυτά χαρακτηρίζονται από βαθείς ή μαλακούς σχηματισμούς. Από τους σταθμούς που επιλέξαμε να μελετήσουμε εκείνοι που εδράζονται σε εδάφη της κατηγορίας αυτής είναι οι εξής 8 (Wood et al, 2011): *CBGS, CCCC, CHHC, CMHS, REHS, RHSC, SHLC, SMTC*.

Λαμβάνοντας υπόψη μας τις καταγραφές των συγκεκριμένων σταθμών για τα 6 σεισμικά γεγονότα που προαναφέραμε, προχωρήσαμε στη δικανονικοποίηση των φασμάτων επιταχύνσεων αποκλειστικά για τα εδάφη κατηγορίας D. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο **σχήμα 7.4**. Συγκρίνοντας τα σχήματα 7.3 και 7.4 είναι προφανές πως τα φάσματα που προκύπτουν για κάθε πιθανή δεσπόζουσα ιδιοπερίοδο αντίστοιχα παρουσιάζουν πολύ μικρές διαφορές μεταξύ τους. Και στα εδάφη κατηγορίας D μόνο το φάσμα που κανονικοποιείται με τη βραχεία δεσπόζουσα ιδιοπερίοδο είναι ικανοποιητικό. Συμπεραίνουμε πως και πάλι οι άλλες δύο εν δυνάμει δεσπόζουσες ιδιοπερίοδοι δεν λειτουργούν ικανοποιητικά. Επίσης αξιοσημείωτο είναι ότι τα αποτελέσματα για όλα τα εδάφη συνολικά είναι πρακτικώς ίδια με τα αντίστοιχα για τα εδάφη κατηγορίας D. Τα δικανονικοποιημένα φάσματα φαίνεται να είναι ανεξάρτητα της κατηγορίας των διάφορων εδαφών.

Στη συνέχεια θεωρήσαμε άξιο μελέτης να επικεντρωθούμε σε κάθε ένα ξεχωριστό σεισμικό γεγονός που μελετήσαμε ξεχωριστά. Λάβαμε λοιπόν υπόψη μας μόνο τα εδάφη κατηγορίας D για τον σεισμό της 3<sup>ης</sup> Σεπτεμβρίου του 2010 και της 22<sup>ης</sup> Φεβρουαρίου του 2011. Μελετήσαμε μαζί τους δύο σεισμούς της 13<sup>ης</sup> Ιουνίου του 2011 και της 23<sup>ης</sup> Δεκεμβρίου του 2011 αντίστοιχα για να έχουμε έναν ικανοποιητικό όγκο δεδομένων. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στα **σχήματα 7.5 έως και 7.8**.

Βλέποντας μεμονωμένα τα σεισμικά γεγονότα αντιλαμβανόμαστε πως ακόμα και η κανονικοποίηση με τη βραχεία δεσπόζουσα ιδιοπερίοδο δεν είναι ικανοποιητική. Ναι μεν παρουσιάζεται η απαιτούμενη κορυφή για  $T/Tp_{short} = 1$  στο μέσο φάσμα και στις 4 ομάδες σεισμικών γεγονότων αλλά η αιχμή που σχηματίζει δεν είναι

ξεκάθαρη. Παρατηρούμε πως το μέσο φάσμα επιταχύνσεων που εμφανίζεται παρουσιάζει κι άλλες μικρότερες κορυφές γύρω από τη τιμή  $T/T_{p_{short}} = 1$  κάτι που μαρτυρά αδυναμία ικανοποιητικής κανονικοποίησης ως προς τη βραχεία δεσπόζουσα ιδιοπερίοδο. Το φαινόμενο είναι εμφανές στο σύνολο της σεισμικής ακολουθίας που μελετάται.

Ως μία ύστατη προσπάθεια για τη δημιουργία ενός δικανονικοποιημένου φάσματος αποκρίσεως αντιπροσωπευτικού για τη περιοχή του Christchurch, για κάθε ένα σεισμικό γεγονός ξεχωριστά και για κάθε μία συνιστώσα των καταγραφικών σταθμών που μελετάμε επιλέξαμε μία και μοναδική δεσπόζουσα ιδιοπερίοδο. Έχοντας ως δεδομένο τις τρεις φαινόμενες δεσπόζουσες ιδιοπεριόδους  $T_{p_{short}}$ ,  $T_{p_{medium}}$ ,  $T_{p_{long}}$ , για κάθε μία καταγραφή επιλέξαμε μία μοναδική ως επικρατέστερη. Η επιλογή αυτή έγινε λαμβάνοντας υπόψη μας τους εξής παράγοντες:

- την ιδιοπερίοδο  $T$  για την οποία παρατηρείται η μέγιστη φασματική επιτάχυνση στο ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων της καταγραφής.
- το εύρος των περιόδων που καλύπτει η τιμή αυτή στο ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων. Δηλαδή πόσο πλατιά είναι η συγκεκριμένη αιχμή του φάσματος.
- την τιμή της φασματικής ταχύτητας για τη συγκεκριμένη ιδιοπερίοδο  $T$ .
- την τιμή του πλάτους Fourier για τη συγκεκριμένη ιδιοπερίοδο  $T$ .
- τη χρονοϊστορία επιταχύνσεων της καταγραφής.
- τη συσχέτιση μεταξύ των δύο συνιστωσών κάθε καταγραφής ενός επιταχυνσιογράφου. Οι δύο συνιστώσες λόγω του ότι αποδίδουν έναν και μοναδικό κραδασμό σε δύο κάθετες μεταξύ τους χρονοϊστορίες θα παρουσιάζουν παραπλήσιες τιμές δεσποζουσών ιδιοπεριόδων  $T$ .

Στο **σχήμα 7.9** παρουσιάζεται έναν χαρακτηριστικό παράδειγμα επιλογής δεσπόζουσας περιόδου για τη καταγραφή N02E του σταθμού REHS για τον σεισμό της 22<sup>ης</sup> Φεβρουαρίου. Με βάση τους ανωτέρω παράγοντες επιλέξαμε  $T_p \approx 0.9$  sec.

Αντίστοιχα στο **σχήμα 7.10** παρουσιάζεται ένα ιστόγραμμα που συγκεντρώνει τα επιλεγμένα  $T_p$  ανά σεισμικό γεγονός και ανά κατηγορία short, medium, long στην οποία αυτά ανήκαν. Τα συμπεράσματα μας από το διάγραμμα αυτό είναι:

- οι μακρές (long) ιδιοπερίοδοι που επιλέχθηκαν ως δεσπόζουσες σε κάθε σεισμικό γεγονός είναι ελάχιστες (κάτω από 10 %).
- για τον σεισμό του Σεπτεμβρίου οι δεσπόζουσες ιδιοπερίοδοι επελέγησαν κατά κύριο λόγο από την ομάδα των βραχέων (short) με ποσοστό 76 %. Αντίθετα στα άλλα 3 σεισμικά γεγονότα οι βραχείες και μεσαίες ιδιοπερίοδοι μοιράζονται ίδιο ποσοστό, περίπου 50 %.

Ο πίνακες 7.1 και 7.2 που ακολουθούν παρουσιάζουν αναλυτικά τις επιλεγμένες τιμές δεσπόζουσας περιόδου (επισημαίνονται με κόκκινο χρώμα).

**Πίνακας 7.1:** επιλεγμένες τιμές δεσπόζουσας περιόδου ( $T_p$ ) για κάθε μία συνιστώσα των επιταχυνσιογραφικών σταθμών που επιλέχθηκαν προς μελέτη, για τους σεισμούς 3/Σεπτ/2010, 22/Φεβ/2011, 13/Ιουν/2011 ( $M_w=6.0$ ). Επισημαίνονται με κόκκινο χρώμα.

Recording Station Code		3/Σεπτεμβρίου/2010 $M_w = 7.1$			22/Φεβρουαρίου/2011 $M_I = 6.3 (M_w=6.2)$			13/Ιουνίου/2011 $M_w = 6$		
		$T_{p_s}$ (sec)	$T_{p_M}$ (sec)	$T_{p_L}$ (sec)	$T_{p_s}$ (sec)	$T_{p_M}$ (sec)	$T_{p_L}$ (sec)	$T_{p_s}$ (sec)	$T_{p_M}$ (sec)	$T_{p_L}$ (sec)
CBGS	N89W	0.45	0.75	3.20	0.48	1.40	3.20	0.45	0.70	2.60
	S01W	0.55	0.75	2.80	0.60	1.05	2.70	0.45	0.85	1.40
CCCC	N26W	0.75	1.00	2.60	0.75	1.45	2.60	-	-	-
	N64E	0.30	0.75	2.40	0.65	1.40	3.10	-	-	-
CHHC	N01W	0.55	0.85	2.65	0.60	1.00	2.60	0.80	1.40	2.30
	S89W	0.40	1.30	3.10	0.45	1.50	3.30	0.50	1.65	2.50
CMHS	N10E	0.70	1.00	2.50	0.40	1.10	1.85	0.35	0.70	1.25
	S80E	0.53	0.95	2.50	0.50	1.00	2.20	0.25	0.70	1.30
DFHS	S17E	0.15	1.10	1.55	-	-	-	-	-	-
	S73W	0.50	1.00	2.80	-	-	-	-	-	-
HORC	N18E	0.27	0.83	2.25	-	-	-	-	-	-
	S72E	0.40	1.10	3.40	-	-	-	-	-	-
HPSC	N04W	0.40	0.90	3.40	0.45	1.10	1.65	0.55	1.05	1.70
	S86W	0.40	0.65	3.00	0.45	1.00	1.75	0.45	0.75	1.45

<b>HVSC</b>	<i>S26W</i>	0.35	0.52	0.95	0.33	0.45	0.80	0.35	0.50	0.70
	<i>S64E</i>	0.35	0.55	1.00	0.30	0.48	1.20	0.35	0.50	0.75
<b>KPOC</b>	<i>N15E</i>	0.50	0.73	2.90	0.50	0.75	1.70	0.50	0.85	1.80
	<i>S75E</i>	0.48	0.73	2.80	0.50	0.70	1.90	0.50	0.90	-
<b>LPCC</b>	<i>N10W</i>	0.20	0.60	2.80	0.20	0.70	3.30	0.15	0.70	1.80
	<i>S80W</i>	0.20	0.50	0.90	0.20	1.05	2.80	0.15	0.60	1.35
<b>NNBS</b>	<i>S13E</i>	0.30	0.73	2.70	0.40	0.65	1.25	0.40	0.80	1.80
	<i>S77W</i>	0.35	0.70	1.80	0.50	1.05	2.00	0.35	0.85	1.40
<b>PRPC</b>	<i>S</i>	0.45	1.40	2.80	0.20	0.45	1.60	0.45	1.00	2.30
	<i>W</i>	0.60	1.40	2.60	0.20	0.45	1.40	0.35	0.80	2.00
<b>REHS</b>	<i>N02E</i>	0.55	1.45	2.80	0.48	0.90	1.35	0.50	1.00	1.40
	<i>S88E</i>	0.60	1.45	2.45	0.70	1.00	1.50	0.60	0.80	2.75
<b>RHSC</b>	<i>N86W</i>	0.33	1.30	3.10	0.55	0.85	2.50	0.29	0.62	1.40
	<i>S04W</i>	0.30	1.50	2.40	0.45	0.65	2.50	0.30	1.30	2.20
<b>SHLC</b>	<i>S40W</i>	0.38	0.62	1.90	0.30	1.05	2.35	0.45	0.95	2.00
	<i>S50E</i>	0.55	0.90	2.50	0.50	0.90	2.90	0.42	1.50	2.60
<b>SMTC</b>	<i>N88W</i>	0.30	0.60	2.70	0.50	0.80	3.00	0.40	0.90	2.00
	<i>S02W</i>	0.72	1.55	2.55	0.60	1.00	2.55	0.54	0.95	2.45
<b>SWNC</b>	<i>N24E</i>	0.20	0.80	1.50	0.32	1.20	2.90	0.28	1.40	3.10
	<i>N66W</i>	0.25	1.35	2.55	0.36	1.05	2.50	0.21	0.80	2.50

**Πίνακας 7.2:** επιλεγμένες τιμές δεσπόζουσας περιόδου ( $T_p$ ) για κάθε μία συνιστώσα των επιταχυνσιογραφικών σταθμών που επιλέχθηκαν προς μελέτη για τους σεισμούς 13/Ιουν/2011 ( $M_w=5.6$ ), 23/Δεκ/2011 ( $M_w=5.8$ ), 23/Δεκ/2011 ( $M_w=6.0$ )

<b>Recording Station Code</b>		<b>13/Ιουνίου/2011</b>			<b>23/Δεκεμβρίου/2011</b>			<b>23/Δεκεμβρίου/2011</b>		
		<b><math>M_w = 5.6</math></b>			<b><math>M_w = 5.8</math></b>			<b><math>M_w = 6.0</math></b>		
		<b><math>T_{p_s}</math></b>	<b><math>T_{p_M}</math></b>	<b><math>T_{p_L}</math></b>	<b><math>T_{p_s}</math></b>	<b><math>T_{p_M}</math></b>	<b><math>T_{p_L}</math></b>	<b><math>T_{p_s}</math></b>	<b><math>T_{p_M}</math></b>	<b><math>T_{p_L}</math></b>
		<b>(sec)</b>	<b>(sec)</b>	<b>(sec)</b>	<b>(sec)</b>	<b>(sec)</b>	<b>(sec)</b>	<b>(sec)</b>	<b>(sec)</b>	<b>(sec)</b>
<b>CBGS</b>	<i>N89W</i>	0.33	-	1.20	0.40	0.85	3.00	0.33	0.85	3.00
	<i>S01W</i>	0.45	0.55	1.25	0.41	0.75	2.90	0.45	0.85	3.40
<b>CCCC</b>	<i>N26W</i>	-	-	-	0.50	1.20	2.50	-	-	-
	<i>N64E</i>	-	-	-	0.42	1.10	2.60	-	-	-
<b>CHHC</b>	<i>N01W</i>	-	-	-	0.33	0.60	2.70	-	-	-
	<i>S89W</i>	-	-	-	0.43	1.20	3.00	-	-	-
<b>CRLZ</b>	<i>E</i>	-	-	-	0.25	0.83	3.15	-	-	-
	<i>N</i>	-	-	-	0.33	0.60	1.20	-	-	-
<b>HPSC</b>	<i>N04W</i>	-	-	-	0.40	1.40	2.00	-	-	-
	<i>S86W</i>	-	-	-	0.40	0.65	2.50	-	-	-
<b>HVSC</b>	<i>S26W</i>	0.20	0.40	0.60	0.37	0.33	0.65	0.30	0.70	1.00
	<i>S64E</i>	0.20	0.35	0.70	0.13	0.27	0.45	0.16	0.36	0.5
<b>LPCC</b>	<i>N10W</i>	0.25	0.70	3.00	-	-	-	0.13	0.53	1.00
	<i>S80W</i>	0.25	0.49	0.70	-	-	-	0.15	0.50	1.10
<b>REHS</b>	<i>N02E</i>	0.33	0.93	1.40	0.53	0.75	1.50	0.42	0.71	1.20
	<i>S88E</i>	0.37	0.55	1.20	0.55	0.75	2.90	0.50	0.95	1.50

Στα **σχήματα 7.11 και 7.12** παρουσιάζονται τα δύο δικανονικοποιημένα φάσματα με βάση τις επιλεγμένες κατά τα ανωτέρω δεσπόμενες ιδιοπεριόδους, για όλα τα εδάφη και για εκείνα που είναι κατηγορίας D αντίστοιχα. Μπορούμε να κάνουμε τις εξής δύο παρατηρήσεις:

- η διαφορά των δύο φασμάτων είναι μηδαμινή τόσο σχηματικά όσο και ως προς το μέγιστο του λόγου  $S_a/r_{ga}$  για  $T/T_p = 1$ , που είναι 3 και 3.15 αντίστοιχα. Επαληθεύεται λοιπόν το συμπέρασμα που είχαμε βγάλει πρωτύτερα, πως το δικανονικοποιημένο φάσμα είναι ανεξάρτητο της κατηγορίας των εδαφών στα οποία εφαρμόζεται.
- ο φθίνοντας κλάδος και των δύο δικανονικοποιημένων φασμάτων (δεξής κλάδος) είναι ιδιαίτερα ικανοποιητικός παρουσιάζοντας απότομη πτώση μετά τη τιμή  $T/T_p = 1$ . Αντίθετα ο ανερχόμενος κλάδος των φασμάτων (αριστερός κλάδος) παρουσιάζει έντονη καμπύλωση. Αυτό ουσιαστικά μαρτυρά την αδυναμία ύπαρξης μίας μοναδικής δεσπόμενης ιδιοπεριόδου στις καταγραφές.

#### **7.4 Συμπεράσματα**

Με βάση τα ανωτέρω μπορούμε να υπογραμμίσουμε τα παρακάτω συμπεράσματα:

- ✓ η δικανονικοποίηση του φάσματος αποκρίσεως χρησιμοποιώντας τις μεσαίες (medium) και τις μακρές (long) δεσπόμενες ιδιοπεριόδους δεν αποδίδει ικανοποιητικά αποτελέσματα τόσο για όλες τις καταγραφές συγκεντρωτικά όσο και για κάθε σεισμικό γεγονός χωριστά.
- ✓ το σχήμα του μέσου δικανονικοποιημένου φάσματος ελάχιστα διαφέρει αλλάζοντας τα εδαφικά προφίλ και τις εδαφικές παραμέτρους. Φυσικά διαφέρει αλλάζοντας τον διεγείροντα κραδασμό.
- ✓ το δικανονικοποιημένο φάσμα παρουσιάζει μέση φασματική ενίσχυση της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης με τιμή περίπου 3.
- ✓ το δικανονικοποιημένο φάσμα φαίνεται να μην έχει ικανοποιητική εφαρμογή τουλάχιστον για τη περιοχή του Christchurch. Η σεισμική ακολουθία της περιόδου 2010 – 11 που μελετήσαμε παρουσιάζει έντονες ιδιαιτερότητες με χρονοϊστορίες επιταχύνσεων που δίνουν ελαστικά φάσματα χωρίς προφανείς δεσπόμενες ιδιοπεριόδους. Το συχνотικό περιεχόμενο των καταγραφών ποικίλλει από σεισμό σε σεισμό και από σημείο σε σημείο καθιστώντας αδύνατη την υιοθέτηση ενός μέσου δικανονικοποιημένου φάσματος αποκρίσεως.



## 7.5 Σύγκριση με ένα “ιδανικό” δικανονικοποιημένο φάσμα αποκρίσεως

Όπως αναφέραμε και στην εισαγωγή του παρόντος κεφαλαίου έναυσμα για τη διερεύνηση της ύπαρξης ενός δικανονικοποιημένου φάσματος αποκρίσεως για τη περιοχή του Christchurch της Νέας Ζηλανδίας αποτέλεσαν τα ενθαρρυντικά αποτελέσματα μίας παλαιότερης ερευνητικής εργασίας (Αικατερίνη Ζιωτοπούλου, 2007).

Στο σημείο αυτό είναι χρήσιμο να παραθέσουμε επιγραμματικά τις παραμέτρους που χρησιμοποιήθηκαν στην εν λόγω εργασία καθώς και τα βασικότερα συμπεράσματα στα οποία κατέληξε. Η έρευνα χρησιμοποίησε παραμέτρους που αφορούσαν όχι μόνο τα εδαφικά προφίλ και τις ιδιότητές τους αλλά και τον διεγείροντα κραδασμό στο βραχώδες υπόβαθρο κάθε ενός εξ αυτών.

Αρχικώς κατασκευάστηκαν εξιδανικευμένα εδαφικά προφίλ για κάθε μία κατηγορία εδαφών του EC8 (Ευρωκώδικας 8). Για παράδειγμα σχετικά με τη κατηγορία C κατά τον Ευρωκώδικα 8 χρησιμοποιήθηκαν οι εξής παράμετροι:

- η μέση ταχύτητας διατμητικών κυμάτων για βάθος έως και 30 μέτρων ( $V_{s,30}$ ) με τιμές 180, 260 και 360 m/sec.
- η μορφή της κατανομής της μέσης ταχύτητας  $V_s$  συναρτήσει με το βάθος:  $V_s = V_s(z)$ . Χρησιμοποιήθηκε ομοιόμορφη, τραπεζοειδής και ανάστροφη(με επιφανειακή σκληρή εδαφική στρώση) κατανομή.
- το βάθος του εδαφικού σχηματισμού έως το βραχώδες υπόβαθρο (θέσει-βράχος). Οι τιμές που επιλέχθηκαν ήταν 30 και 60 m.
- ο λόγος δυστημσίας του βράχου προς το υπερκείμενο έδαφος εκφραζόμενος σε όρους διατμητικών ταχυτήτων κύματος:  $V_{s,rock}/V_{s,30} = 1.5$  και 5.

Στη συνέχεια επιλέχθηκε ένας αριθμός επιταχυνσιογραφημάτων από διάφορες ανά τον κόσμο καταγραφές, τα οποία αποτέλεσαν τον διεγείροντα κραδασμό των παραπάνω εδαφικών προφίλ. Οι χρονοϊστορίες αυτές αρχικά υποβλήθηκαν σε επικλιμάκια ή υποκλιμάκια αναγωγή ώστε να έχουν κορυφαία επιτάχυνση  $A = 0.2$  g,  $0.4$  g,  $0.6$  g. Αναλυτικότερα αυτές είναι οι εξής 7:

- Stone Canyon Reservoir, Northridge, 1994
- Aegion – Rock, Aegion, 1995
- Sakarya, Izmit, 1999
- Dayhook, Tabas, 1978
- Gilroy – 1, Loma Prieta, 1989
- Lucerne, Landers, 1992
- Superstition Mountain, Imperial Valley, 1979.

Ο συνδυασμός όλων των ανωτέρω παραμέτρων αποφέρει 1008 διαφορετικά σενάρια σεισμικών γεγονότων τα οποία αναλύθηκαν ισοδύναμα ελαστικά (SHAKE) και γνησίως ανελαστικά (NL – DYAS). Τα φάσματα αποκρίσεως που προέκυψαν από

αυτές τις συνολικά 2008 αναλύσεις δικανονικοποιήθηκαν ως προς τη μέγιστη εδαφική επιτάχυνση ( $pga$ ) και ως προς τη δεσπόζουσα ιδιοπερίοδο τους ( $T_p$ ).

Αποτέλεσμα των παραπάνω διαδικασιών ήταν ένα και μοναδικό δικανονικοποιημένο φάσμα σχεδιασμού. Το φάσμα αυτό προσεγγίστηκε από τις εξής αλγεβρικές σχέσεις:

$$\frac{S_a}{pga} = e^{1.35 \frac{T}{T_p}} \quad , \text{ για } T < T_p$$

$$\frac{S_a}{pga} = 3.75 \left( \frac{T}{T_p} \right)^{-1.2} \quad , \text{ για } T \geq T_p$$

Στο **σχήμα 7.13 (α)** απεικονίζεται η μορφή του δικανονικοποιημένου φάσματος με βάση τις παραπάνω σχέσεις. Στα **σχήματα 7.13 και 7.14** συγκρίνονται το δικανονικοποιημένο φάσμα που προέκυψε από τη παραπάνω έρευνα, με τις μέσες τιμές των δικανονικοποιημένων φασμάτων που προήλθαν από τη σεισμική ακολουθία στο Christchurch. Φυσικά η σύγκριση εμπεριέχει μόνο τα μέσα φάσματα που προέκυψαν από τη δικανονικοποίηση με τη χρήση των βραχέων δεσποζουσών ιδιοπεριόδων ( $T_{p_{short}}$ ) και των επιλεγμένων ως επικρατέστερων αντίστοιχα. Είναι προφανές πως δεν τίθεται θέμα σύγκρισης με τα μέσα φάσματα όπως προέκυψαν από τις μεσαίες (medium) και τις μακρές (long) ιδιοπεριόδους.

Τα αποτελέσματα από όλες τις συγκρίσεις επιβεβαιώνουν την αδυναμία ύπαρξης ενός και μοναδικού δικανονικοποιημένου φάσματος, τουλάχιστον για τη συγκεκριμένη περιοχή μελέτης. Οι αιχμές των μέσων φασμάτων που προέκυψαν από τις σεισμικές καταγραφές στο Christchurch δεν είναι τόσο σαφείς, για  $T/T_p = 1$ . Επιπλέον τα “φουσκώματα” που παρατηρούνται κυρίως για  $T < T_p$  αλλά και για  $T > T_p$  αποδεικνύουν ότι η υιοθέτηση ενός και μοναδικού  $T_p$  δεν θα αποτελούσε ορθό σενάριο περιγραφής της πραγματικότητας.



# Κεφάλαιο 7

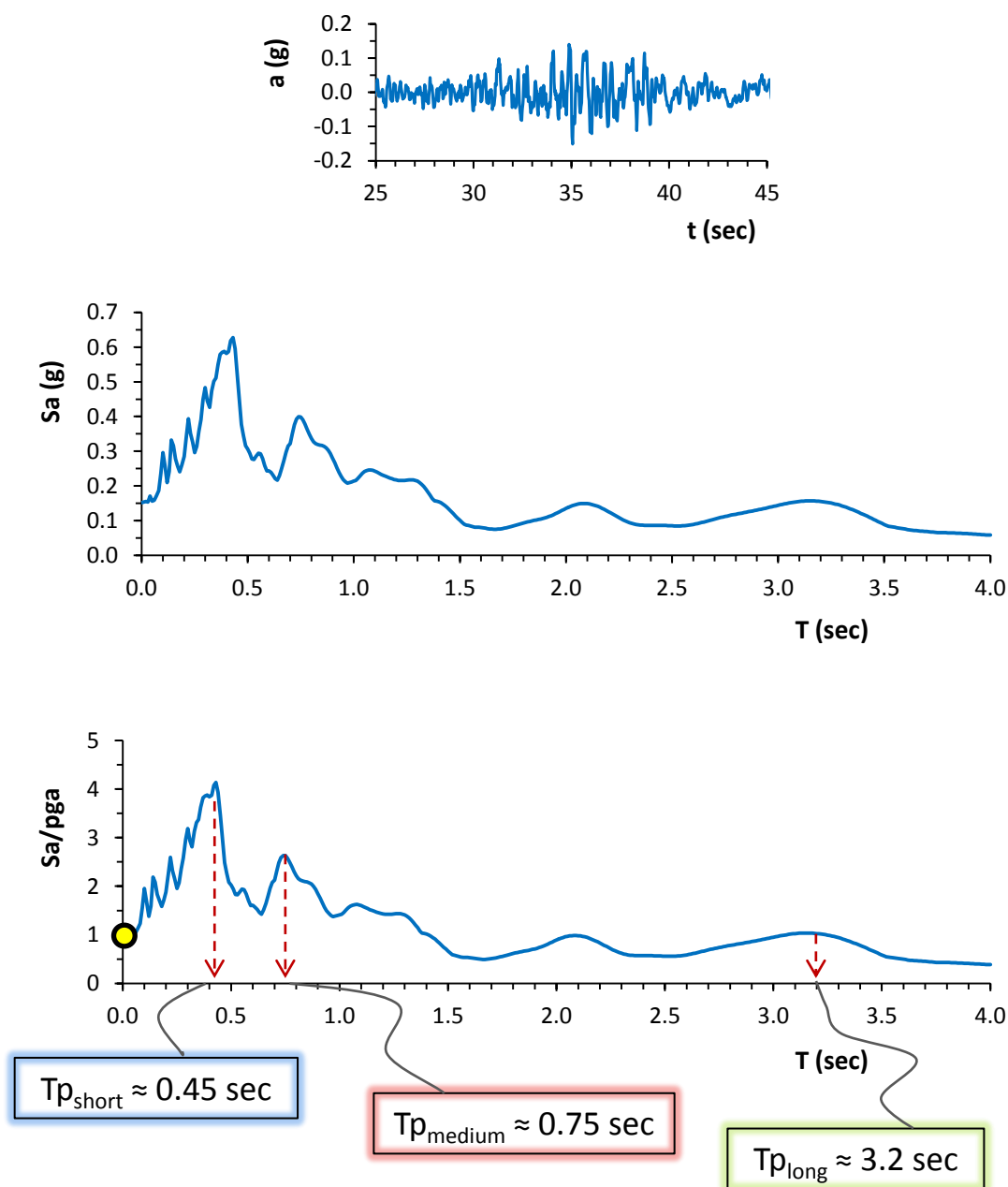
---

*Σχήματα & εικόνες*



3 Σεπτεμβρίου 2010

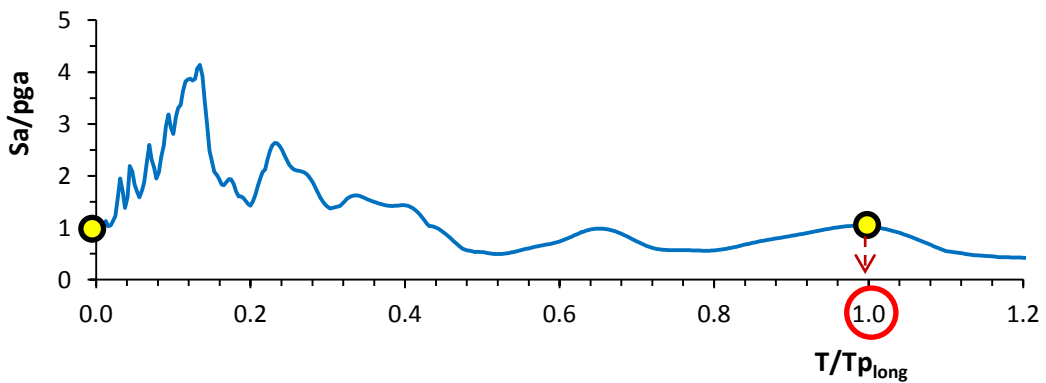
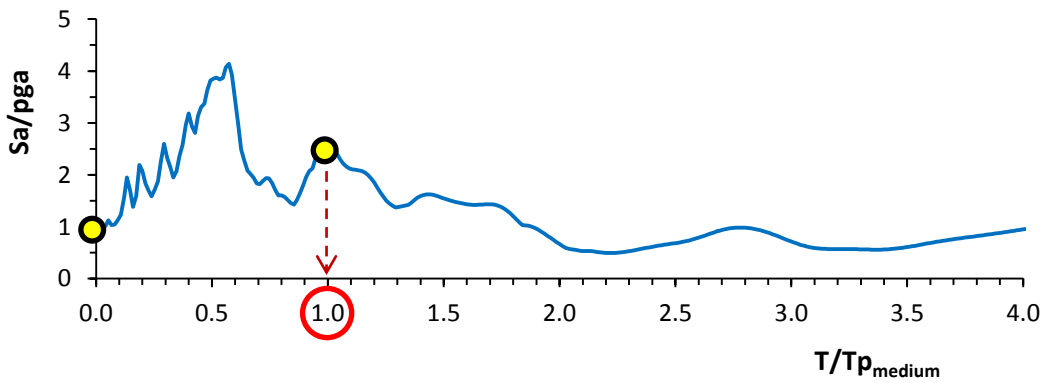
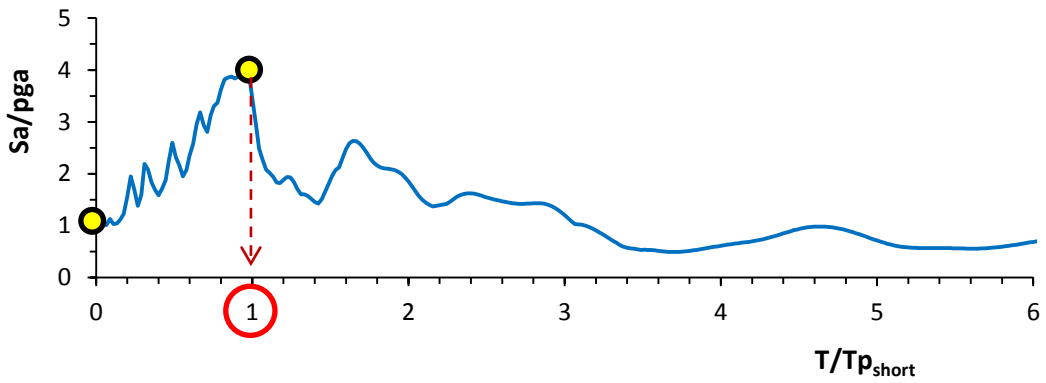
σταθμός CBGS  
συνιστώσα N89W



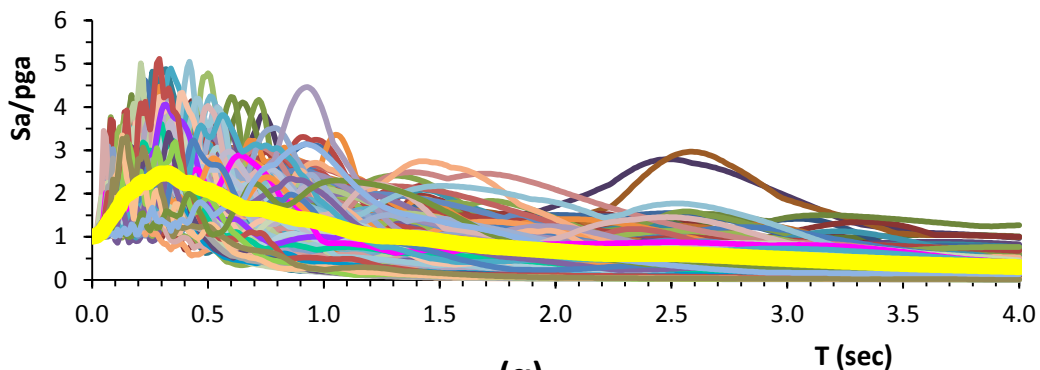
**Σχήμα 7.1 :** η χρονοϊστορία επιταχύνσεων, το ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων και το κανονικοποιημένο ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων ως προς τη μέγιστη εδαφική επιτάχυνση (pga), για τη καταγραφή της συνιστώσας N89W του σταθμού CBGS στον σεισμό της 3<sup>ης</sup> Σεπτεμβρίου του 2010. Επίσης απεικονίζονται οι τρεις χαρακτηριστικές "δεσπόζουσες" ιδιοπερίοδοι του φάσματος.

3 Σεπτεμβρίου 2010

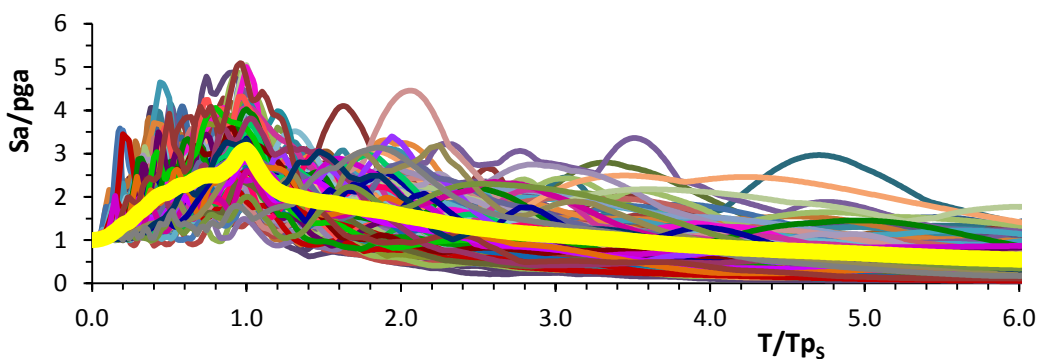
σταθμός CBGS  
συνιστώσα Ν89W



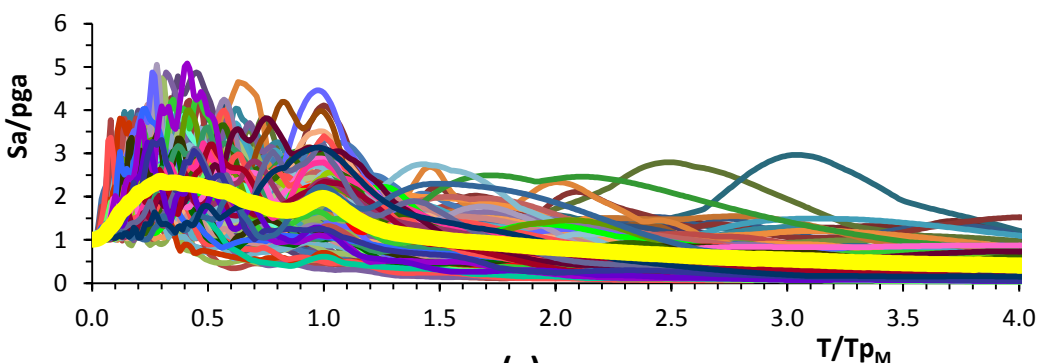
**Σχήμα 7.2 :** τα δικανονικοποιημένα ελαστικά φάσματα επιταχύνσεων ως προς τη μέγιστη εδαφική επιτάχυνση (pga) και ως προς τη βραχεία (short), τη μεσαία (medium) και τη μακρά (long) δεσπόζουσα ιδιοπερίοδο.



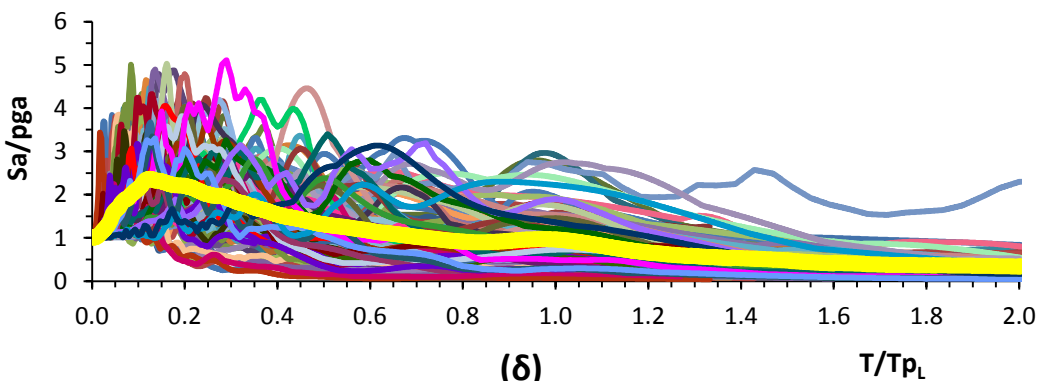
(α)



(β)



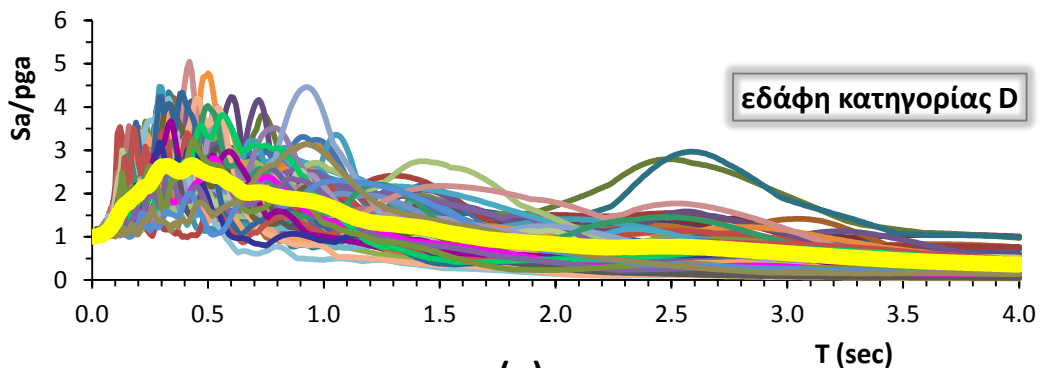
(γ)



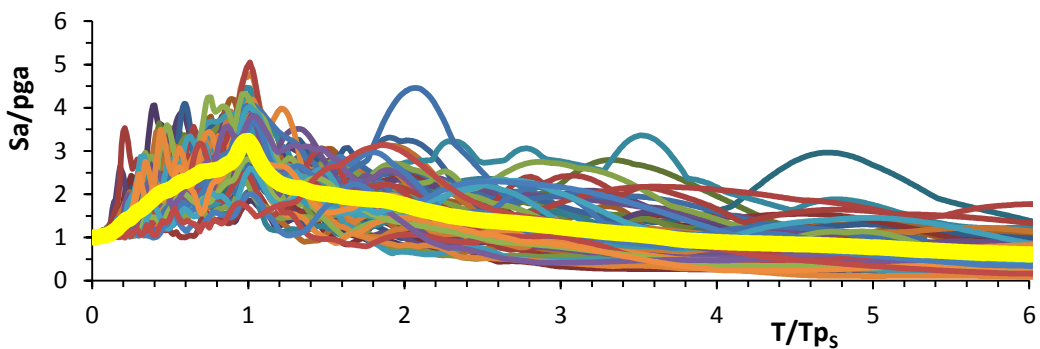
(δ)

**Σχήμα 7.3 :** (α) κανονικοποιημένο ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων ως προς τη μέγιστη εδαφική επιτάχυνση ( $pg_a$ ). (β, γ, δ) δικανονικοποιημένα ελαστικά φάσματα επιταχύνσεων ως προς τη μέγιστη εδαφική επιτάχυνση ( $pg_a$ ) και ως προς τη βραχεία (short), τη μεσαία (medium) και τη μακρά (long) δεσπόζουσα ιδιοπερίοδο. Το μέσο φάσμα επιταχύνσεων απεικονίζεται με έντονη κίτρινη γραμμή.

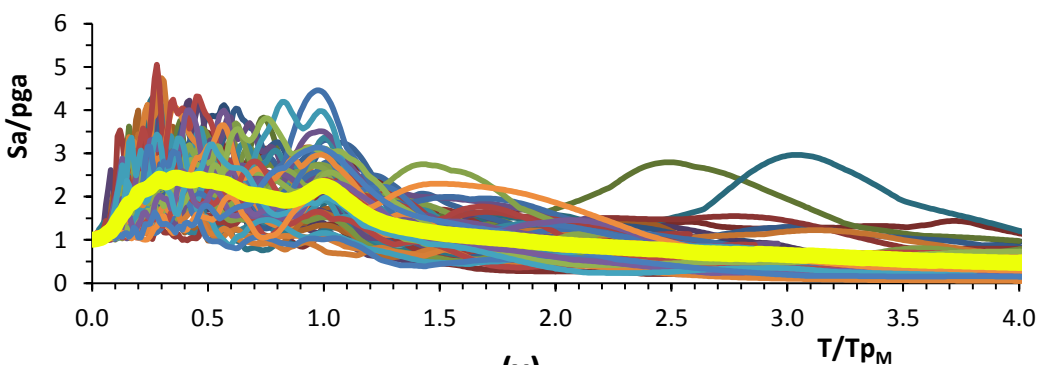




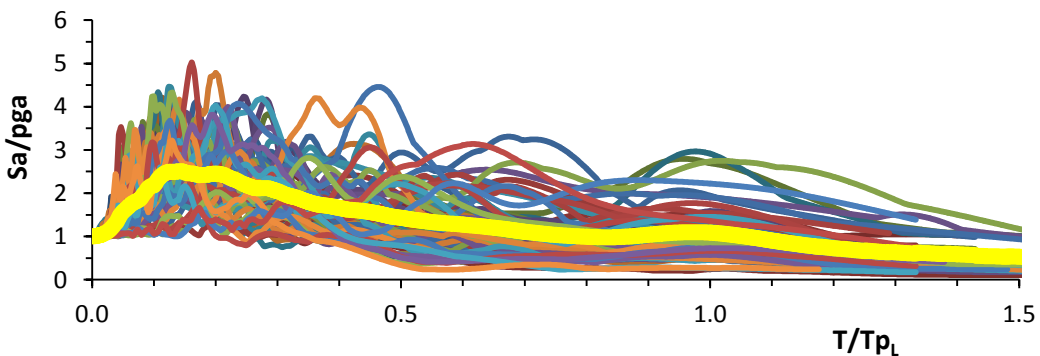
(α)



(β)

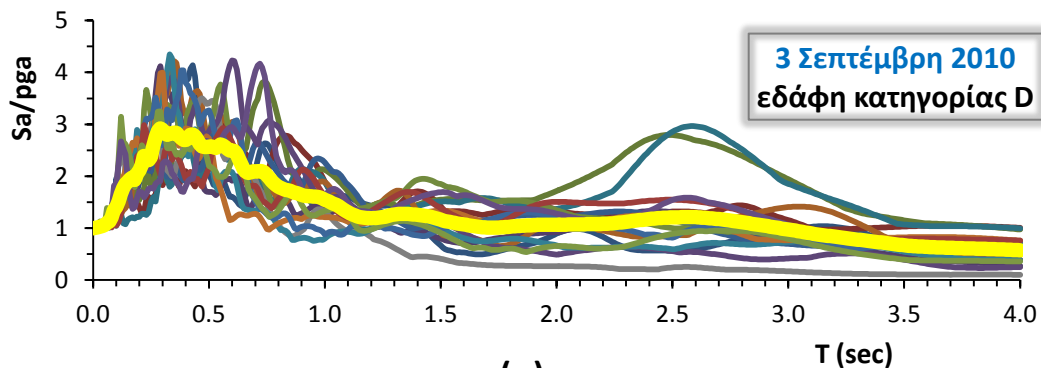


(γ)

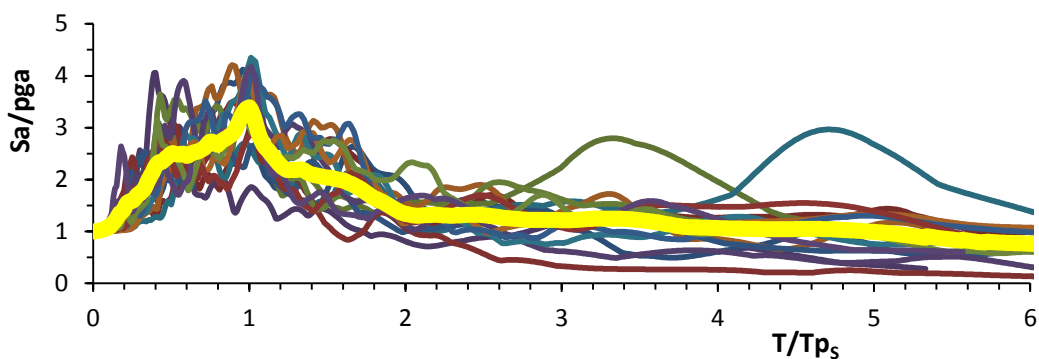


(δ)

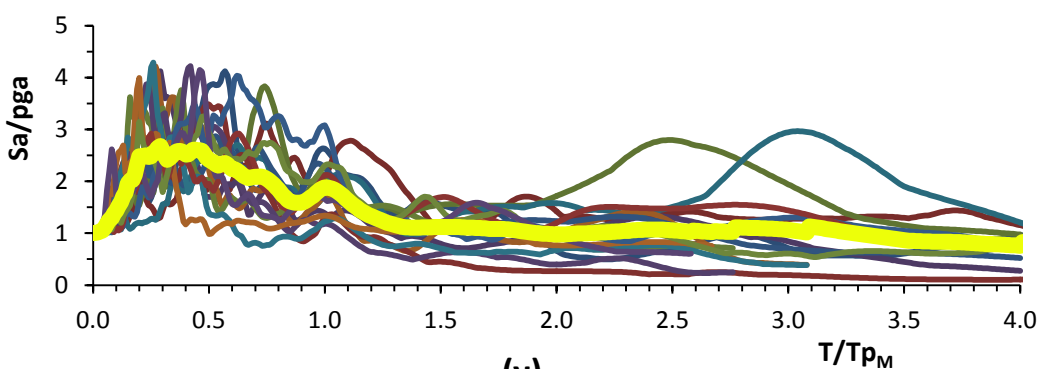
**Σχήμα 7.4 :** εδάφη κατηγορίας D. (α) κανονικοποιημένο ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων ως προς τη μέγιστη εδαφική επιτάχυνση ( $pg_a$ ). (β, γ, δ) δικανονικοποιημένα ελαστικά φάσματα επιταχύνσεων ως προς τη μέγιστη εδαφική επιτάχυνση ( $pg_a$ ) και ως προς τη βραχεία (short), τη μεσαία (medium) και τη μακρά (long) δεσπίζουσα ιδιοπερίοδο. Το μέσο φάσμα επιταχύνσεων απεικονίζεται με έντονη κίτρινη γραμμή.



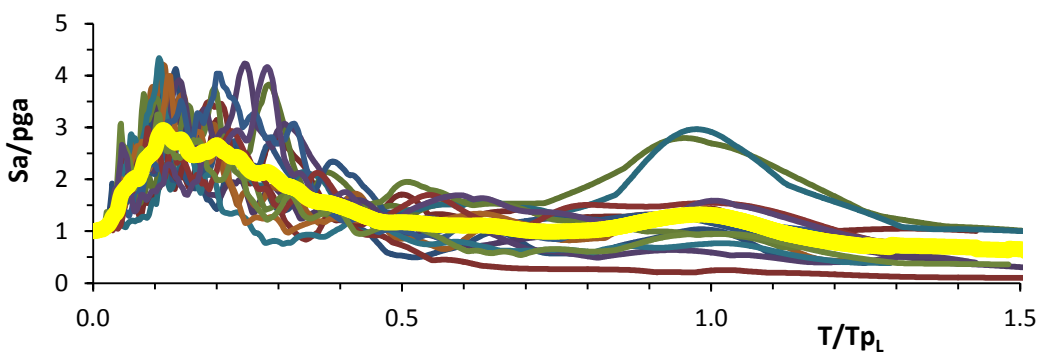
(α)



(β)

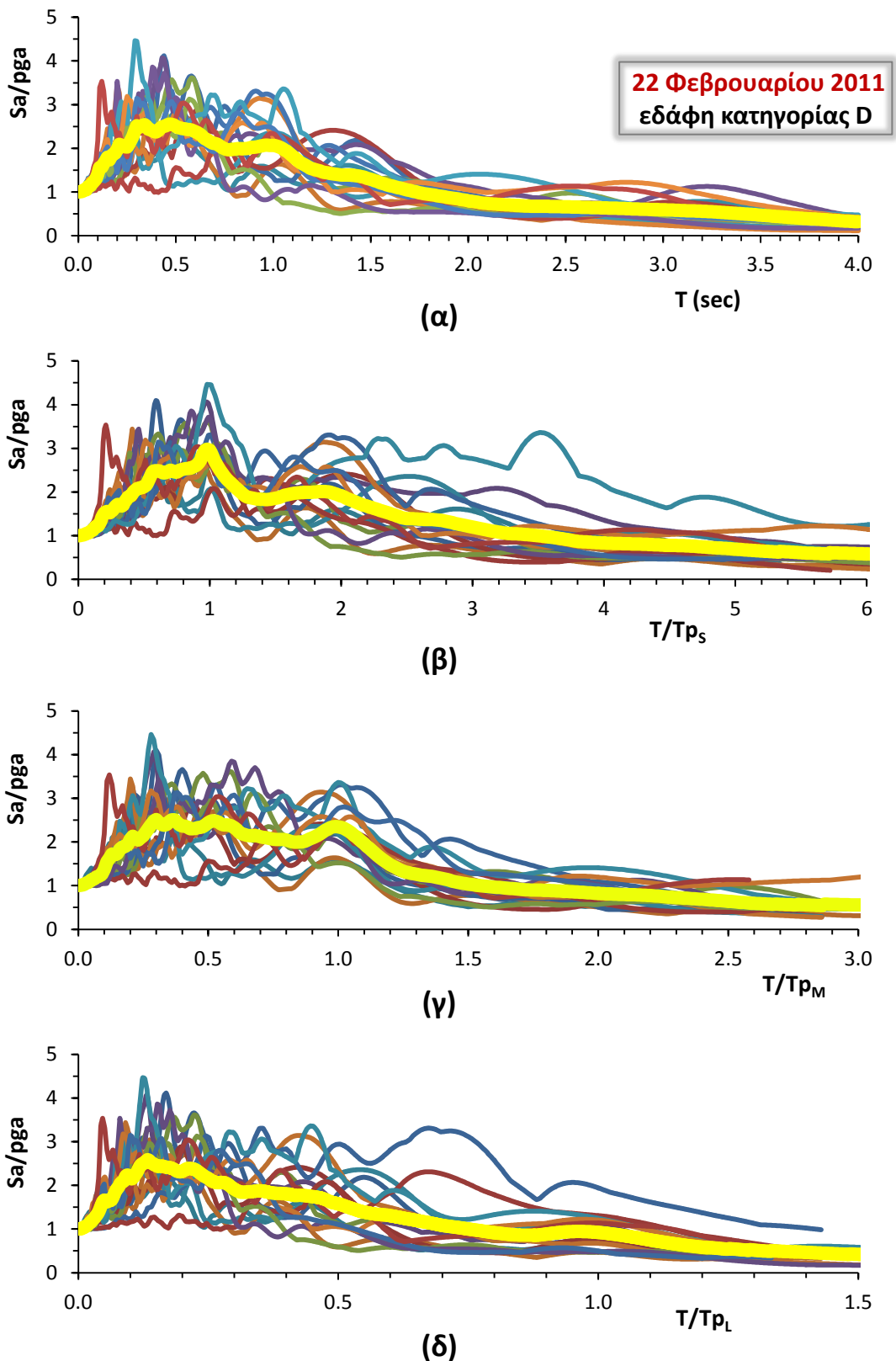


(γ)

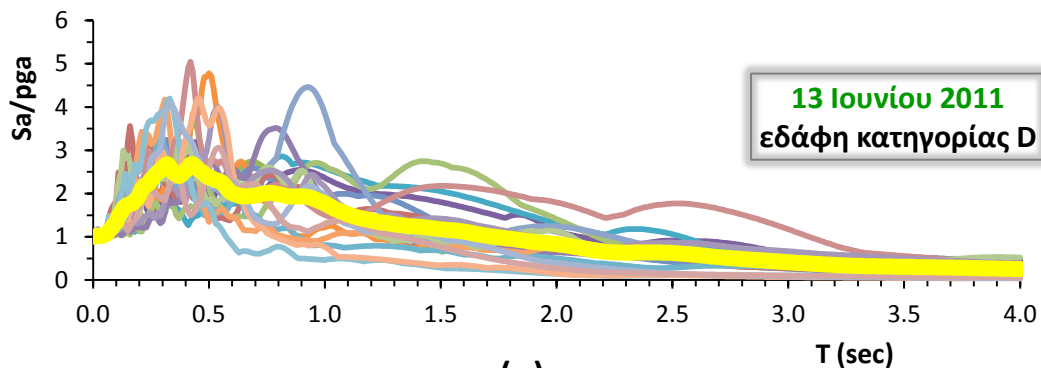


(δ)

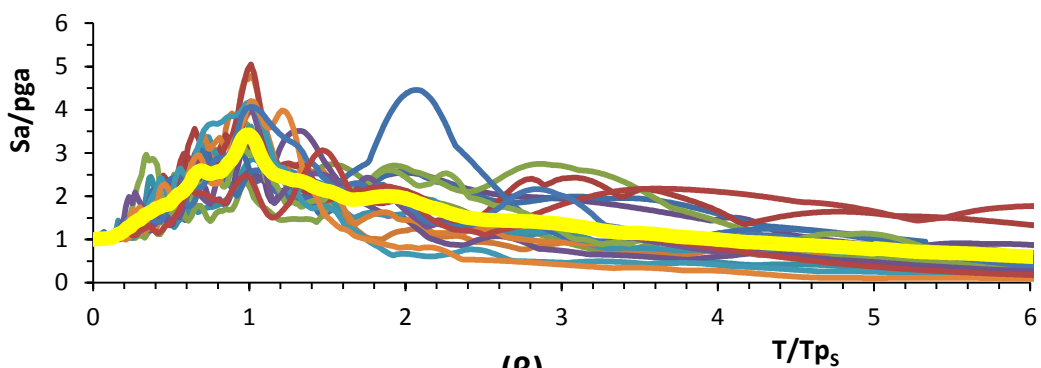
**Σχήμα 7.5 :** εδάφη κατηγορίας D. Σεισμικό γεγονός 3ης Σεπτεμβρίου 2010,  $M_w = 7.1$ . (α) κανονικοποιημένο ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων ως προς τη μέγιστη εδαφική επιτάχυνση (pga). (β, γ, δ) δικανονικοποιημένα ελαστικά φάσματα επιταχύνσεων ως προς τη μέγιστη εδαφική επιτάχυνση (pga) και ως προς τη βραχεία (short), τη μεσαία (medium) και τη μακρά (long) δεσπόζουσα ιδιοπερίοδο. Το μέσο φάσμα επιταχύνσεων απεικονίζεται με έντονη κίτρινη γραμμή.



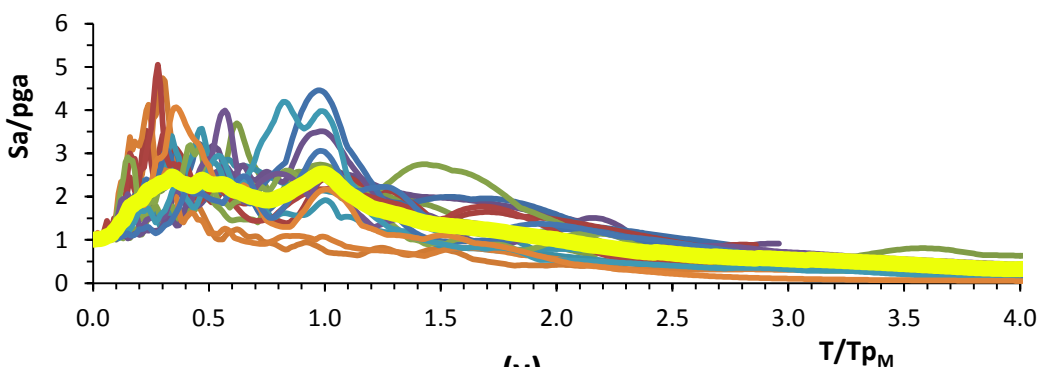
**Σχήμα 7.6 :** εδάφη κατηγορίας D. Σεισμικό γεγονός 22<sup>ης</sup> Φεβρουαρίου 2011,  $M_L = 6.3$ . (α) κανονικοποιημένο ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων ως προς τη μέγιστη εδαφική επιτάχυνση (pga). (β, γ, δ) δικανονικοποιημένα ελαστικά φάσματα επιταχύνσεων ως προς τη μέγιστη εδαφική επιτάχυνση (pga) και ως προς τη βραχεία (short), τη μεσαία (medium) και τη μακρά (long) δεσπόζουσα ιδιοπερίοδο. Το μέσο φάσμα επιταχύνσεων απεικονίζεται με έντονη κίτρινη γραμμή.



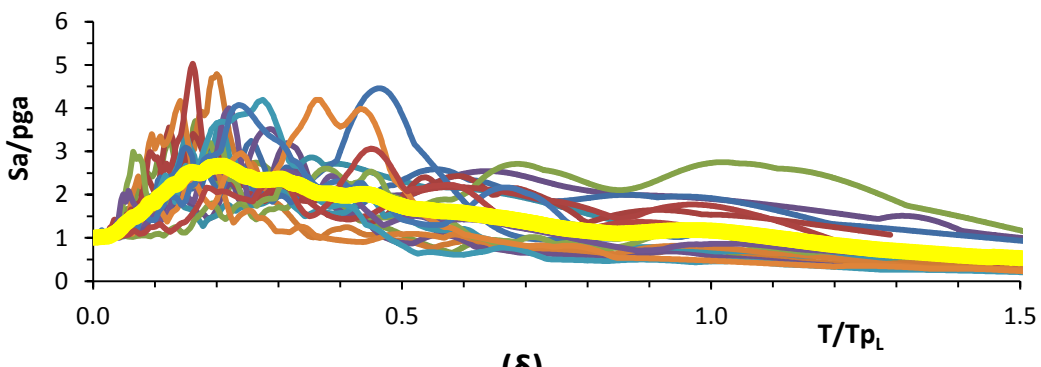
(α)



(β)

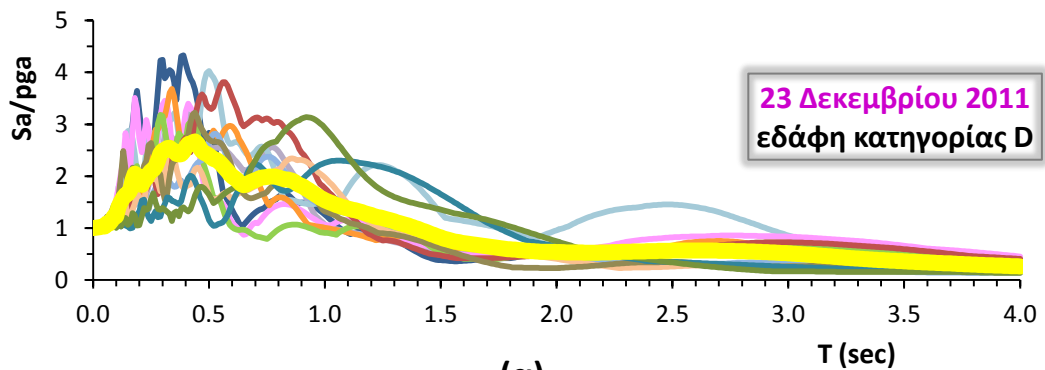


(γ)

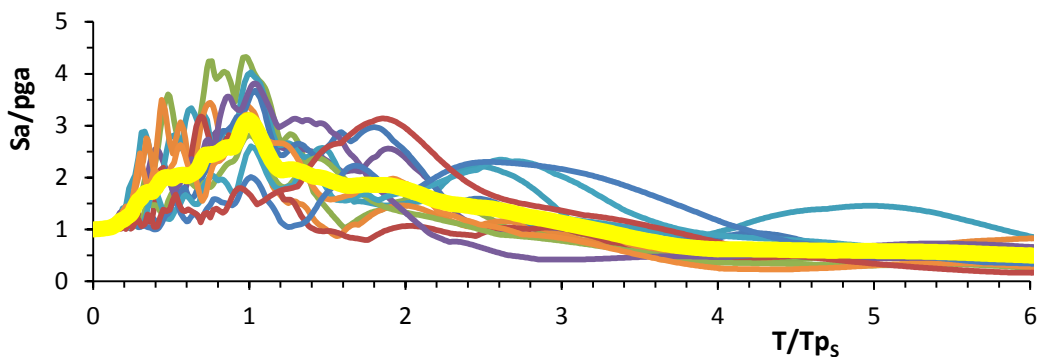


(δ)

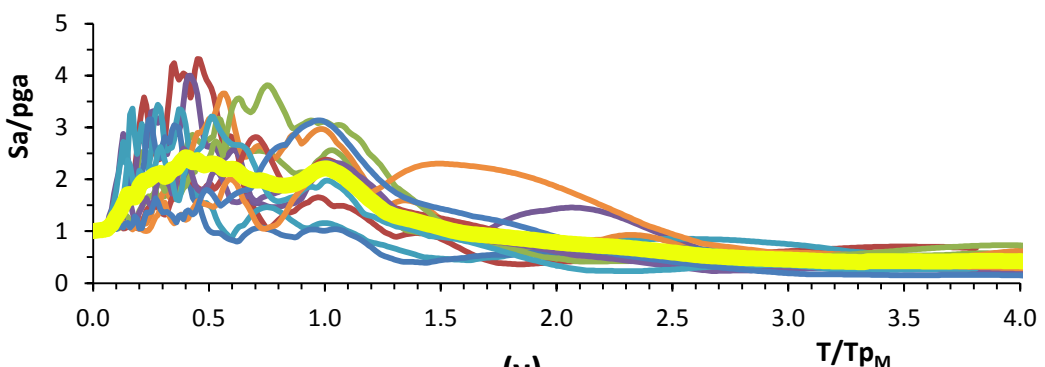
**Σχήμα 7.7 :** εδάφη κατηγορίας D. Σεισμικά γεγονότα 13<sup>ης</sup> Ιουνίου 2011,  $M_w = 6.0$  και  $M_w = 5.63$ . (α) κανονικοποιημένο ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων ως προς τη μέγιστη εδαφική επιτάχυνση (pga). (β, γ, δ) δικανονικοποιημένα ελαστικά φάσματα επιταχύνσεων ως προς τη μέγιστη εδαφική επιτάχυνση (pga) και ως προς τη βραχεία (short), τη μεσαία (medium) και τη μακρά (long) δεσπόζουσα ιδιοπερίοδο. Το μέσο φάσμα επιταχύνσεων απεικονίζεται με έντονη κίτρινη γραμμή.



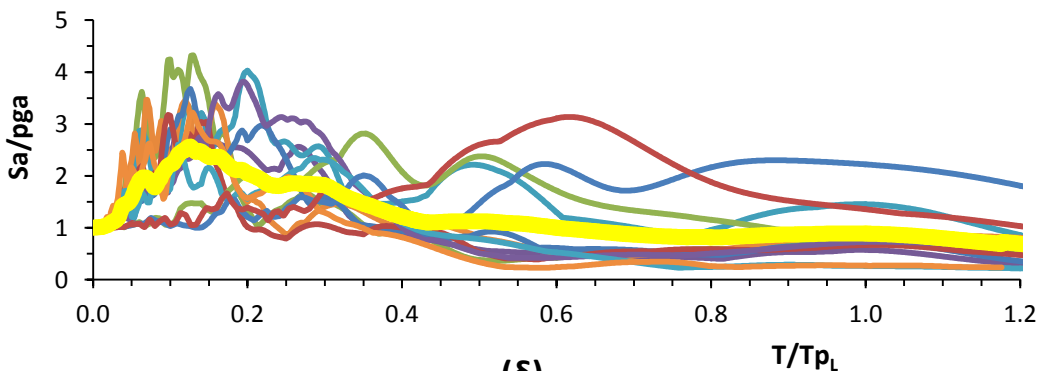
(α)



(β)



(γ)

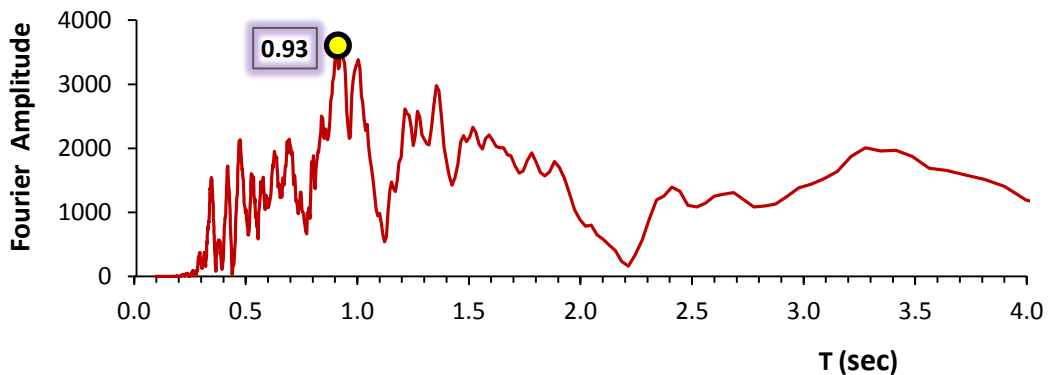
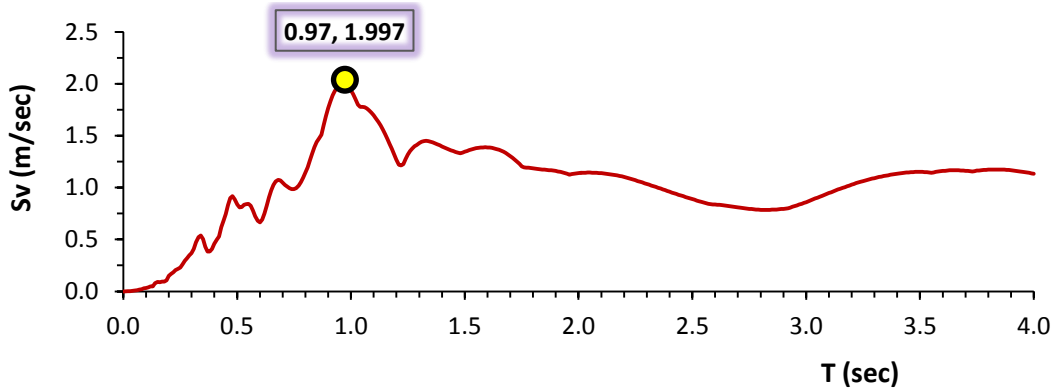
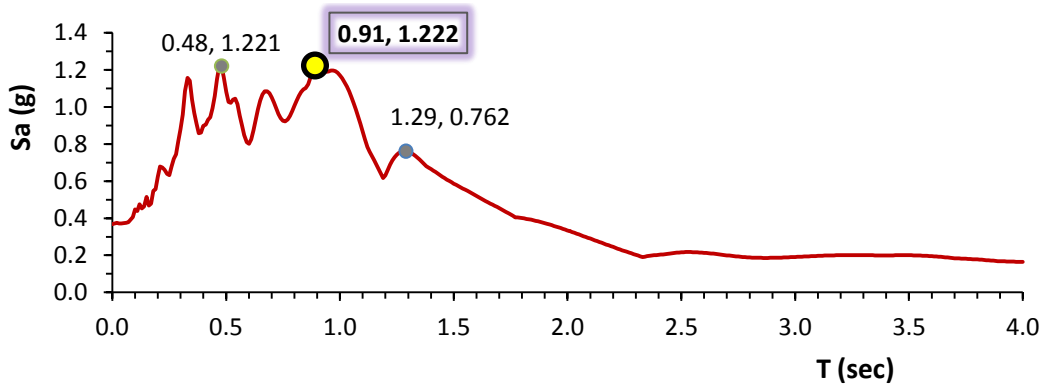
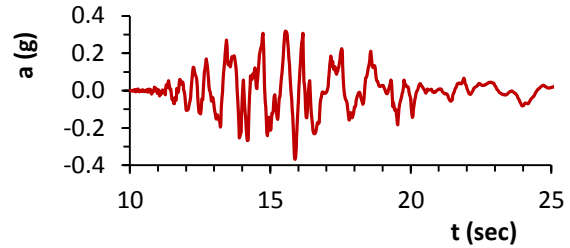


(δ)

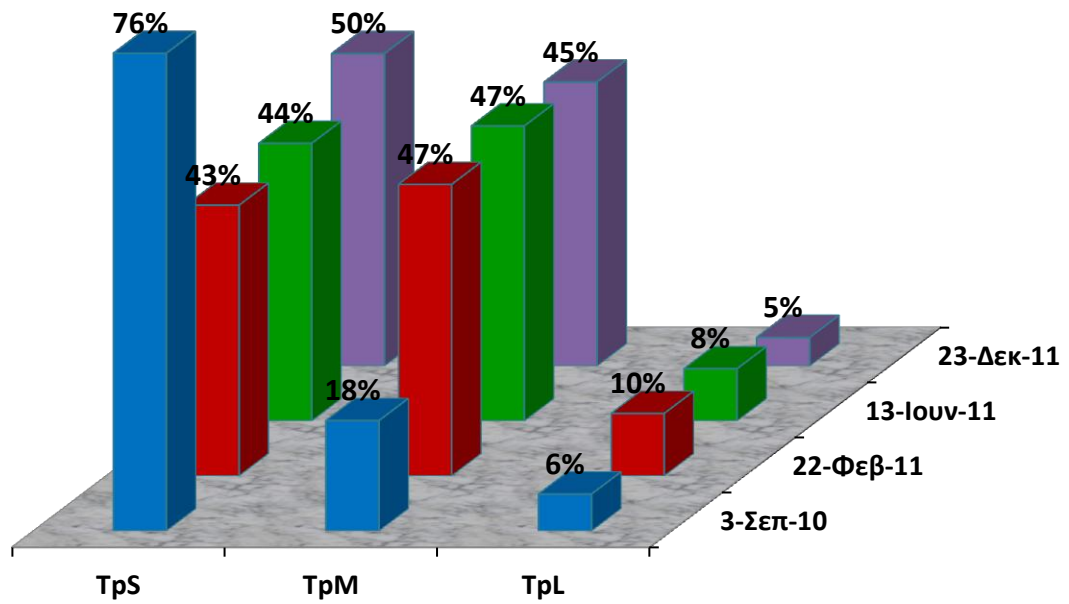
**Σχήμα 7.8 :** εδάφη κατηγορίας D. Σεισμικά γεγονότα 23<sup>ης</sup> Δεκεμβρίου 2011,  $M_W = 5.8$  και  $M_W = 6.0$ . (α) κανονικοποιημένο ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων ως προς τη μέγιστη εδαφική επιτάχυνση (pga). (β, γ, δ) δικανονικοποιημένα ελαστικά φάσματα επιταχύνσεων ως προς τη μέγιστη εδαφική επιτάχυνση (pga) και ως προς τη βραχεία (short), τη μεσαία (medium) και τη μακρά (long) δεσπόζουσα ιδιοπερίοδο. Το μέσο φάσμα επιταχύνσεων απεικονίζεται με έντονη κίτρινη γραμμή.

22 Φεβρουαρίου 2011

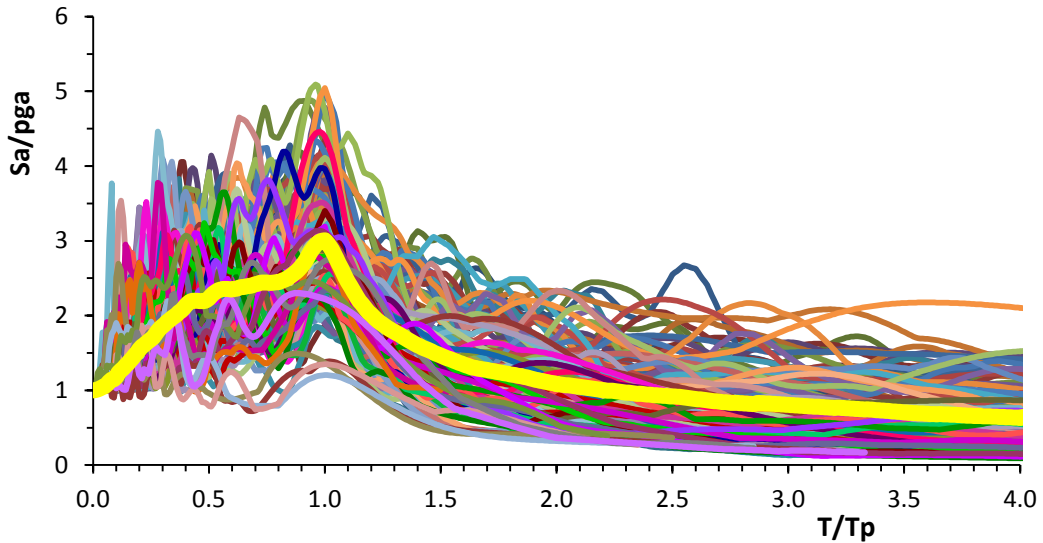
σταθμός REHS  
συνιστώσα Ν02Ε



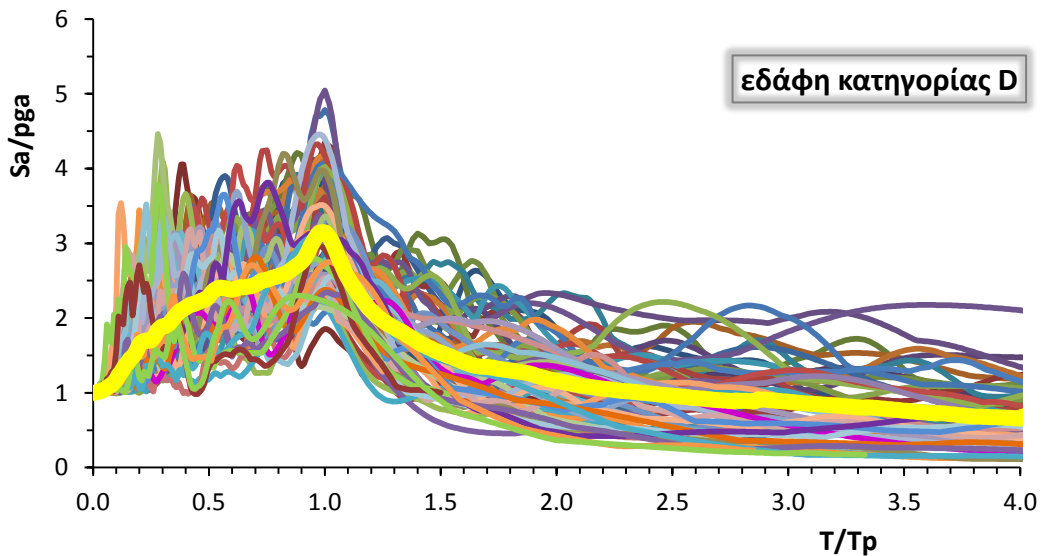
Σχήμα 7.9 : επιλογή της ιδιοπεριόδου  $T_p \approx 0.9$  sec ως δεσπόζουσας της καταγραφής Ν02Ε στον σταθμό REHS για το σεισμικό γεγονός της 22<sup>ης</sup> Φεβρουαρίου του 2011.



**Σχήμα 7.10** : ποσοστό των  $T_{pS}$ ,  $T_{pM}$ ,  $T_{pL}$  που επιλέχθηκαν ως οι επικρατέστερες δεσπόζουσες ιδιοπερίοδοι σε κάθε ένα σεισμικό γεγονός ξεχωριστά.

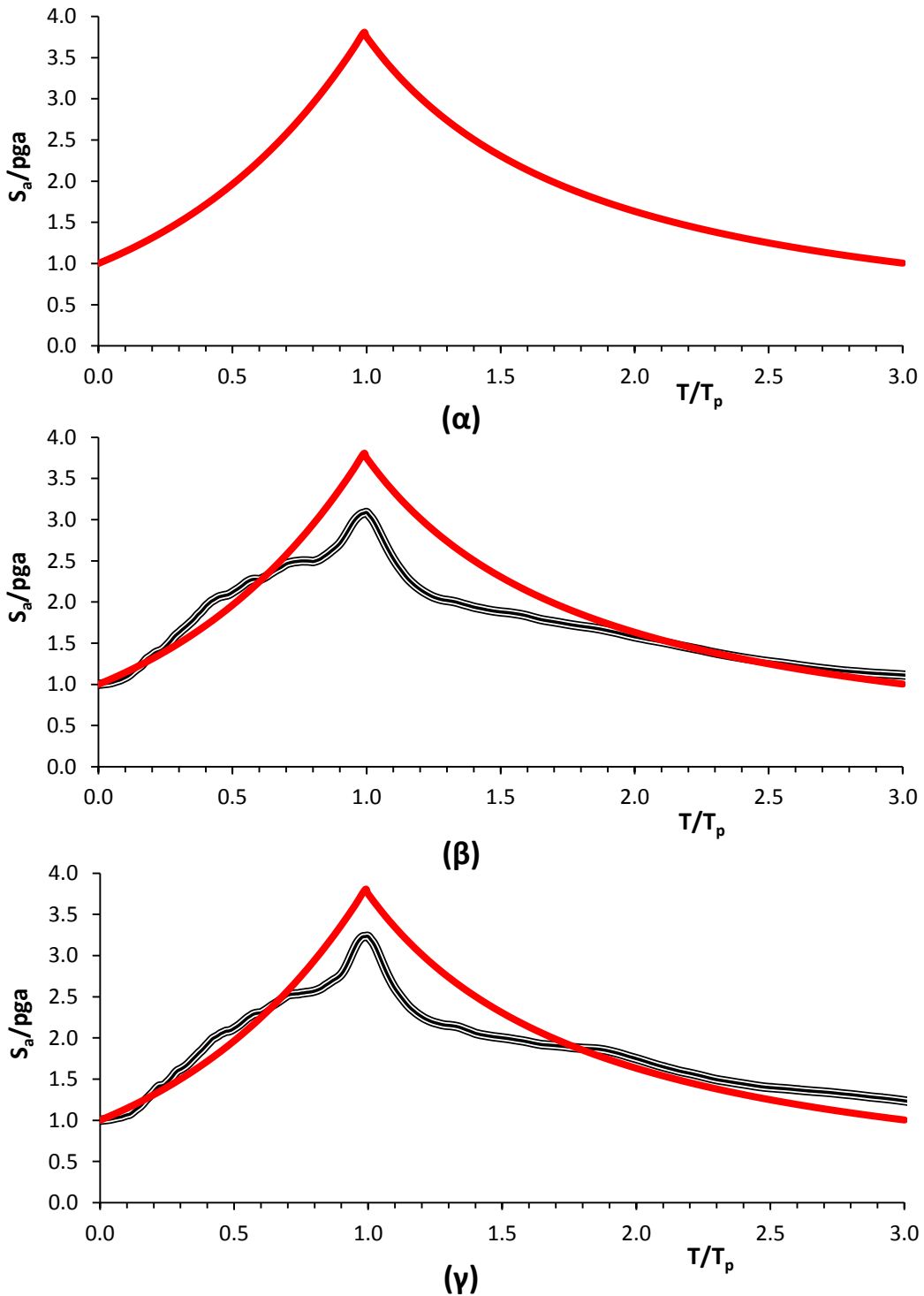


**Σχήμα 7.11** : δικανονικοποιημένο ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων ως προς τη μέγιστη εδαφική επιτάχυνση ( $g_a$ ) και ως προς την επικρατέστερη δεσπόζουσα ιδιοπερίοδο. Για  $T/T_r = 1$  έχουμε τη μέγιστη φασματική επιτάχυνση  $S_a = 3 \text{ rga}$ . Το μέσο φάσμα επιταχύνσεων απεικονίζεται με έντονη κίτρινη γραμμή.

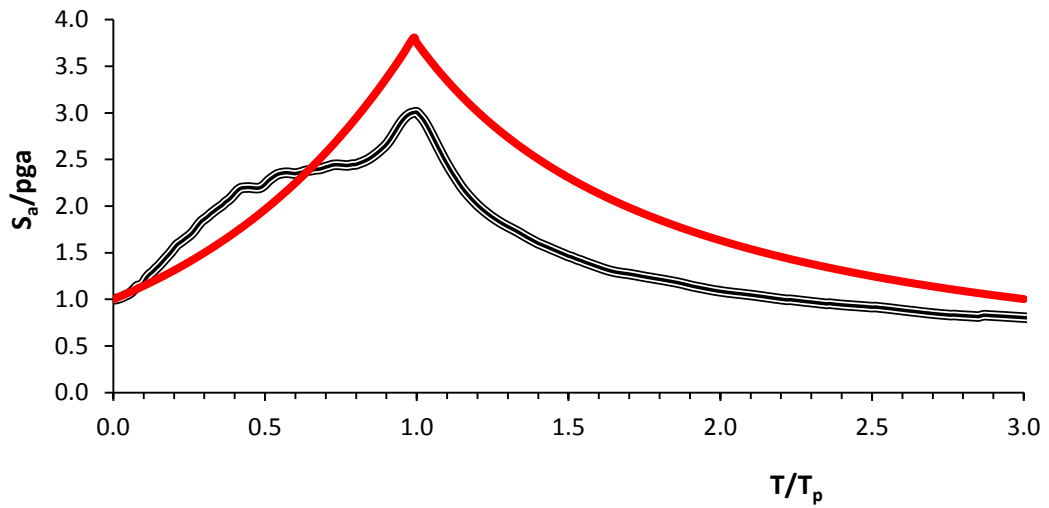


**Σχήμα 7.12** : δικανονικοποιημένο ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων ως προς τη μέγιστη εδαφική επιτάχυνση ( $g_a$ ) και ως προς την επικρατέστερη δεσπόζουσα ιδιοπερίοδο, για εδάφη κατηγορίας D. Για  $T/T_r = 1$  έχουμε τη μέγιστη φασματική επιτάχυνση  $S_a = 3.15 \text{ rga}$ . Το μέσο φάσμα επιταχύνσεων απεικονίζεται με έντονη κίτρινη γραμμή.

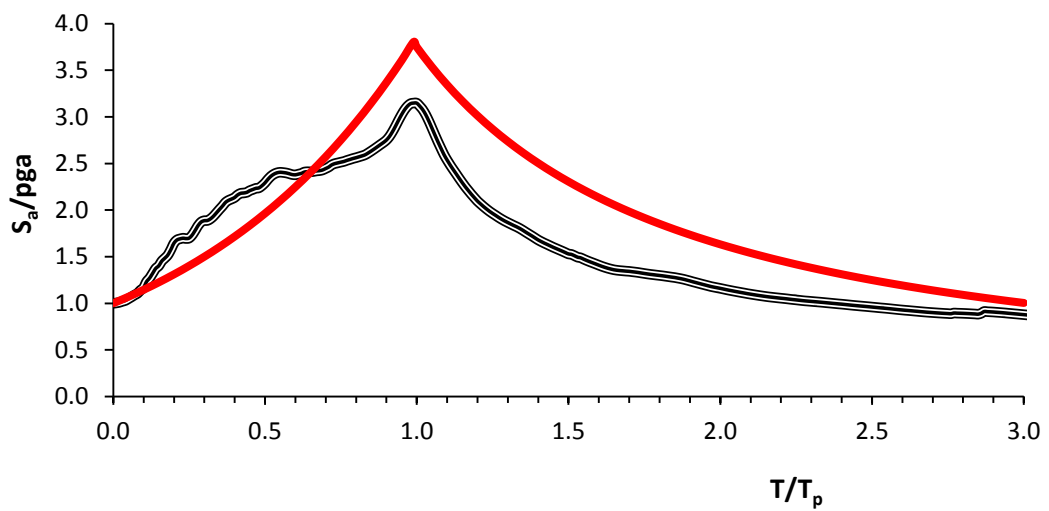




**Σχήμα 7.13 :** (α) δικανονικοποιημένο ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων ως προς τη μέγιστη εδαφική επιτάχυνση ( $pg_a$ ) και ως προς την δεσπόζουσα ιδιοπερίοδο  $T_p$  (Α. Ζιωτοπούλου, 2007), (β) σύγκριση με το μέσο δικανονικοποιημένο φάσμα ως προς τη βραχεία ιδιοπερίοδο ( $T_{p_{short}}$ ) για όλες τις καταγραφές (122) που μελετήθηκαν στο Christchurch, (γ) σύγκριση με το μέσο δικανονικοποιημένο φάσμα ως προς τη βραχεία ιδιοπερίοδο ( $T_{p_{short}}$ ) για όλες τις καταγραφές των εδαφών κατηγορίας D.



(α)



(β)

**Σχήμα 7.14 :** (α) σύγκριση με το μέσο δικανονικοποιημένο φάσμα ως προς την επικρατέστερη δεσπόζουσα ιδιοπερίοδο για όλες τις καταγραφές (122) που μελετήθηκαν στο Christchurch, (β) σύγκριση με το μέσο δικανονικοποιημένο φάσμα ως προς την επικρατέστερη δεσπόζουσα ιδιοπερίοδο για όλες τις καταγραφές των εδαφών κατηγορίας D.



# *Βιβλιογραφία*

---



- **Aikaterini Ziotopoulou (2007).** *Non-Linear Seismic Response Analysis of Soil Deposits and Piles and Proposed Unique Bi-Normalized Design Spectrum.* Athens, Greece: National Technical University of Athens.
- **Beca Carter Hollings & Ferner Ltd (Beca). (2011).** *Investigation into the collapse of the Pyne Gould Corporation Building and the Forsyth Barr Building stairs on 22 February 2011.* Available: <http://www.dbh.govt.nz/UserFiles/File/Reports/quake-forsyth-barr-stairs-report.pdf>. Last accessed 18th Nov 2012.
- **Bolton Seed et al. (2011).** *SHAKE2000.* Available: <http://www.shake2000.com/>. Last accessed 18th Nov 2012.
- **Brendon A. Bradley and Misko Cubrinovski. (2011).** Near-source Strong Ground Motions Observed in the 22 February 2011 Christchurch Earthquake. *Seismological Research Letters.* 82 (6).
- **Canterbury Earthquakes Royal Commission. (2012).** *SUMMARY AND RECOMMENDATIONS IN VOLUMES 1-3 SEISMICITY, SOILS AND THE SEISMIC DESIGN OF BUILDINGS.* Available: <http://canterbury.royalcommission.govt.nz/Commission-Reports>. Last accessed 18th Nov 2012.
- **Cubrinovski and McCahon. (August 2011).** Foundations on Deep Alluvial Soils. *Canterbury Earthquakes Royal Commission.*
- **Cubrinovski et al. (2012).** Application of new ‘Gel-push’ sampling procedure to obtain high quality laboratory test data for advanced geotechnical analyses. *2012 NZSEE Conference* (123).
- **Cubrinovski M. et al. (2011).** *Geotechnical Reconnaissance of the 2011 Christchurch, New Zealand Earthquake.* Available: [http://www.geerassociation.org/GEER\\_Post%20EQ%20Reports/Christchurch\\_2011/Index\\_Christchurch\\_2011.html](http://www.geerassociation.org/GEER_Post%20EQ%20Reports/Christchurch_2011/Index_Christchurch_2011.html). Last accessed 18th Nov 2012.
- **Dikmen, U. (2009).** “Statistical correlations of shear wave velocity and penetration resistance for soils,” *Journal of Geophysics and Engineering,* (6).
- **Dr. Weng Yuen Kam and Associate Prof. Stefano Pampanin (2011).** *General Building Performance in the Christchurch CBD: a contextual report.* New Zealand: Department of Building and Housing (DBH).
- **Fry B. et al. (2011).** The Character of Accelerations in the Mw 6.2 Christchurch Earthquake. *Seismological Research Letters.* 82 (6).
- **Gavin Hayes. (2011).** *The 09/03/2010 Darfield Earthquake and its Aftershocks, Including the 02/21/2011 Christchurch Event.* Available: [http://earthquake.usgs.gov/learn/topics/NewZealand2011\\_slides.pdf](http://earthquake.usgs.gov/learn/topics/NewZealand2011_slides.pdf). Last accessed 18th Nov 2012.
- **Gazetas et al. (2011).** Sliding and Overturning Potential of Christchurch 2011 Earthquake Records. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics.*
- **Gazetas G. (2010).** Ο Σεισμός της Νέας Ζηλανδίας 3 Σεπτεμβρίου 2010 – Μέγεθος 7.0.
- **Gazetas G. (2011).** Νέα Ζηλανδία 22 Φεβρουαρίου 2011 ο Σεισμός 6.3 στο Christchurch (ChCh).

- **Graham H. et al. (2011).** *Report on Landslide Reconnaissance Flight on 24 February 2011 following the Mw 6.3 Christchurch Earthquake of 22 February 2011 OF THE 2010 DARFIELD (NEW ZEALAND) EARTHQUAKE.* Available: [http://info.geonet.org.nz/download/attachments/2196288/Christchurch\\_response.pdf](http://info.geonet.org.nz/download/attachments/2196288/Christchurch_response.pdf). Last accessed 18th Nov 2012.
- **H. J. Bowen et al. (2012).** Full Scale Testing of Ground Remediation Options for Residential Property Repair following the Canterbury Earthquakes. *2012 NZSEE Conference.*
- **Hiroaki Iizuka et al. (2011).** Strong Ground Motions and Damage Conditionals Associated with Seismic Stations in the February 2011 Christchurch, New Zealand, Earthquake. *Seismological Research Letters.* 82 (6).
- **Imai T, Yoshimura Y. (1975).** The relation of mechanical properties of soils to P and S-wave velocities for ground in Japan. Technical note OYO Corporation
- **Institute of Geological & Nuclear Sciences. (2008).** *Geology of the Christchurch Area.* Available: <http://www.gns.cri.nz/Home/Our-Science/Earth-Science/Regional-Geology/Geological-Maps/1-250-000-QMAP/QMAP-text-maps>. Last accessed 18th Nov 2012.
- **Kanai, K. (1966).** “Conf. on Cone Penetrometer The Ministry of Public Works and Settlement (Ankara, Turkey)” (presented by Y Sakai 1968).
- **Mark Stirling et al. (2008).** SEISMIC HAZARD OF THE CANTERBURY REGION, NEW ZEALAND: NEW EARTHQUAKE SOURCE MODEL AND METHODOLOGY. *BULLETIN OF THE NEW ZEALAND SOCIETY FOR EARTHQUAKE ENGINEERING.* 41 (2).
- **Misko Cubrinovski et al. (2011).** Geotechnical Aspects of the 22 February 2011 Christchurch Earthquake. *BULLETIN OF THE NEW ZEALAND SOCIETY FOR EARTHQUAKE ENGINEERING.* 44 (4).
- **Misko Cubrinovski, Russell A. Green et al. (2010).** GEOTECHNICAL RECONNAISSANCE OF THE 2010 DARFIELD (CANTERBURY) EARTHQUAKE. *BULLETIN OF THE NEW ZEALAND SOCIETY FOR EARTHQUAKE ENGINEERING.* 43 (4).
- **NZS 1170.5 Supplement 1:2004. (2004).** *Structural design actions Part 5: Earthquake actions – New Zealand – Commentary (Supplement to NZS 1170.5:2004).*
- **NZS 1170.5:2004. (2004).** *New Zealand Standard™ Structural design actions Part 5: Earthquake actions – New Zealand.*
- **P.N. Davenport. (2001).** Seismic intensities derived from strong motion instruments in New Zealand. *NZSEE 2001 Conference.* 4.03.01.
- **R. P. Orence et al. (2011).** Comparison of Liquefaction Features Observed during the 2010 and 2011 Canterbury Earthquakes. *Seismological Research Letters.* 82 (6).
- **RP Orence et al. (2012).** Analysis of Soil Liquefaction during the Recent Canterbury (New Zealand) Earthquakes. *Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA.* 43 (2).
- **Russell A. Green and Misko Cubrinovski. (2010).** *GEOTECHNICAL RECONNAISSANCE OF THE 2010 DARFIELD (NEW ZEALAND) EARTHQUAKE.* Available: [http://www.geerassociation.org/GEER\\_Post%20EQ%20Reports/](http://www.geerassociation.org/GEER_Post%20EQ%20Reports/)

Darfield%20New%20Zealand\_2010/GEER\_Darfield\_2010\_11-14-2010.pdf. Last accessed 18th Nov 2012.

- **Russell A. Green. (2011).** *An Overview of the Seismological, Geological, and Geotechnical Aspects of the Mw 6.1 Christchurch, New Zealand Earthquake.* Available:[http://mceer.buffalo.edu/quakesummit2011/program/presentations/00-Thursday%20Plenary\\_b-Green.pdf](http://mceer.buffalo.edu/quakesummit2011/program/presentations/00-Thursday%20Plenary_b-Green.pdf). Last accessed 18th Nov 2012.
- **Sean David Rees (2010).** *EFFECTS OF FINES ON THE UNDRAINED BEHAVIOUR OF CHRISTCHURCH SANDY SOILS.* Christchurch, New Zealand: University of Canterbury.
- **SeismoSoft. (2012).** *SeismoSignal Version 5.0.0.* Available: <http://www.seismosoft.com/en/SeismoSignal.aspx>. Last accessed 18th Nov 2012.
- **Smyrou et al. (2011).** Ground Motions versus Geotechnical and Structural Damage in the February 2011 Christchurch Earthquake. *Seismological Research Letters.* 82 (6).
- **Sykora, D. E. and Stokoe, K. H. (1983).** "Correlations of in-situ measurements in sands of shear wave velocity," *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, 20, 125–36.
- **Tonkin & Taylor Ltd. (2011).** *Tonkin & Taylor Christchurch Central City Geological Interpretative Report.* Available: <http://www.ccc.govt.nz/homeliving/civildefence/chcheearthquake/centralcityplan.aspx>. Last accessed 18th Nov 2012.
- **Vucetic, M. and Dobry, R. (1991).** "Effect of Soil Plasticity on Cyclic Response," *ASCE Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 117, No. 1, 89-107.
- **Wood et al. (2011).** DYNAMIC SITE CHARACTERIZATION OF CHRISTCHURCH STRONG MOTION STATIONS. *BULLETIN OF THE NEW ZEALAND SOCIETY FOR EARTHQUAKE ENGINEERING.* 44 (4).
- **Xie Lili and Yu Shuagjiu. (1982).** "The theory of Strong Earthquake Motion Measurement and Analysis", Beijing: Earthquake Press.
- **Γκαζέτας Γ. (1996).** *Εδαφοδυναμική και Σεισμική Μηχανική (Ιστορικά Περιστατικά).* Athens, Greece: Εκδόσεις Συμεών.
- **Γκαζέτας Γ. (2007).** *Σημειώσεις Εδαφοδυναμικής.* Athens, Greece: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- **Μαρίνος Π. κ.ά. (2010).** *Ο ΣΕΙΣΜΟΣ 7,1 της 4/9/2010 ΤΟΥ CANTERBURY ΝΕΑΣ ΖΗΛΑΝΔΙΑΣ ΣΥΝΤΟΜΗ ΑΝΑΦΟΡΑ ΚΑΙ ΕΠΙ ΤΟΠΟΥ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ.* Available: [http://www.geosociety.gr/N\\_Zealand\\_quake.pdf](http://www.geosociety.gr/N_Zealand_quake.pdf). Last accessed 18th Nov 2012.
- **ΠΙΤΙΛΑΚΗΣ Δ. ΚΥΡΙΑΖΗΣ (2010).** *ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗ ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ.* Athens, Greece: Εκδόσεις ΖΗΤΗ.



