

**Ο σεισμός των Κυθήρων 08/01/2006: Επεξεργασία  
καταγραφών διάφορων ψηφιακών καταγραφών και  
επίδραση των υψηλοπερατών φίλτρων στην  
προσομοίωση των ιδιοτήτων της σεισμικής πηγής.  
The Kythera earthquake 08/01/2006: Processing of records  
from different digital sensors and high-pass filtering effects in  
source simulations**

**Ανδρέας Σκαρλατούδης–<sup>A1</sup> και Βασίλης Μάργαρης–<sup>B2</sup>**

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ :** Στις 8 Ιανουαρίου 2006 συνέβη ένας σεισμός ενδιαμέσου βάθους (67Km), με μέγεθος **M6.7**, στην περιοχή των Κυθήρων. Διαφόρων τύπων ψηφιακοί επιταχυνσιογράφοι κατέγραψαν τον κύριο σεισμό και παρήγαξαν ένα σύνολο δεδομένων υψηλής ποιότητας, που εμφανίζει διαφορετικά φασματικά χαρακτηριστικά σε σύγκριση με δεδομένα επιφανειακών σεισμών που συνέβησαν στην ίδια περιοχή. Για την επεξεργασία των καταγραφών εφαρμόστηκε διαδικασία διόρθωσης και μελετήθηκε η επίδραση της στον υπολογισμό των φασματικών τιμών των καταγραφών ισχυρής κίνησης και το φάσμα του ψηφιακού θορύβου των διαφόρων επιταχυνσιογράφων. Για τις θέσεις των σταθμών καταγραφής παράχθηκαν συνθετικές καταγραφές με τη μέθοδο της στοχαστικής προσομοίωσης. Από τη σύγκριση των θεωρητικά υπολογισμένων φασμάτων Fourier με τα παρατηρημένα, προέκυψαν σημαντικές πληροφορίες για τις ιδιότητες του φάσματος της πηγής του συγκεκριμένου σεισμού. Στην παρούσα εργασία έγινε επίσης μια προσπάθεια για το συνδυασμό της επεξεργασίας των καταγραφών και του υπολογισμού της γωνιακής συχνότητας του φάσματος της πηγής σαν μια ρυθμιστική παράμετρο των υψηλοπερατών φίλτρων. Ο συνδυασμός αυτός μπορεί να οδηγήσει σε ακριβέστερο καθορισμό των χαρακτηριστικών συχνοτήτων των υψηλοπερατών φίλτρων και συνεπώς σε ακριβέστερο υπολογισμό των φασματικών τιμών των συγκεκριμένων καταγραφών.

**ABSTRACT :** The Kythera earthquake (08/01/2006) was an intermediate depth (67 Km) earthquake (**M6.7**) that occurred in the western part of the Hellenic Arc. Different types of digital strong motion sensors recorded the mainshock, produced high quality data that exhibited different frequency and amplitude characteristics comparing to those produced by shallow earthquakes occurred in the same area. For the data processing, a correction procedure was applied and its impact on the corrected records together with the digital noise spectrum of the different sensors was studied. Simulated source spectra were produced with the stochastic simulation approach, which was used for studying the source properties of this intermediate depth earthquake. An attempt has been made also to combine the data processing routines with the corner frequency of the source spectrum as a controlling parameter of the characteristic frequencies of the high-pass filters applied. This combination could lead to a more precise calculation of the characteristic frequencies of high-pass filters and thus more accurate spectral values of the specific records.

<sup>1</sup> Msc Γεωφυσικός, Εργαστήριο Γεωφυσικής, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, email: [askarlat@geo.auth.gr](mailto:askarlat@geo.auth.gr)

<sup>2</sup> Διευθυντής Ερευνών, ΙΤΣΑΚ, Θεσσαλονίκη, email: [marqaris@itsak.gr](mailto:marqaris@itsak.gr)

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε ένα σύνολο επιταχυνσιογραμμάτων που καταγράφηκαν από το σεισμό ενδιαμέσου βάθους στην περιοχή των Κυθήρων (08/01/2006). Ο σεισμός καταγράφηκε από ένα σημαντικό αριθμό επιταχυνσιογράφων διαφορετικού τύπου (ETNA, QDR, CMG-5T, A-800, A-900), του δικτύου ισχυρής σεισμικής κίνησης του Ινστιτούτου Τεχνικής Σεισμολογίας και Αντισεισμικών Κατασκευών (ΙΤΣΑΚ) και του Γεωδυναμικού Ινστιτούτου του Αστεροσκοπείου Αθηνών (ΓΙΕΕΑ). Οι συγκεκριμένες καταγραφές εμφανίζουν μεγαλύτερη διάρκεια και διαφορετικό συχνοτικό περιεχόμενο συγκριτικά με καταγραφές από επιφανειακούς σεισμούς που συνέβησαν στην ίδια περιοχή (Karakostas et al., 2006). Για τη μελέτη των φασματικών ιδιοτήτων της πηγής του σεισμού των Κυθήρων, υπολογίστηκαν τα θεωρητικά φάσματα Fourier με τη μέθοδο της στοχαστικής προσομοίωσης για τις θέσεις των επιταχυνσιογράφων που κατέγραψαν τον κύριο σεισμό. Από τη σύγκριση των θεωρητικών φασμάτων με τα παρατηρημένα, προέκυψαν σημαντικά συμπεράσματα τόσο για το συχνοτικό περιεχόμενο των καταγραφών όσο και για τις ιδιότητες της διάδοσης των σεισμικών κυμάτων από τους σεισμούς ενδιαμέσου βάθους.

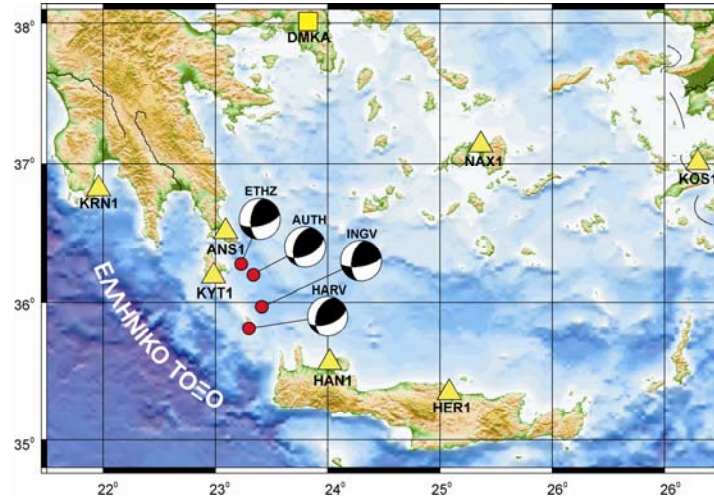
Οι καταγραφές ισχυρής σεισμικής κίνησης συμβάλλουν σημαντικά στη γνώση για την αντισεισμική μηχανική σε σεισμικά ενεργές περιοχές καθώς και στη γενικότερη μελέτη της διάδοσης των σεισμικών κυμάτων. Οι ψηφιακοί καταγραφείς υψηλής ανάλυσης ( $\geq 18\text{bit}$ ) παράγουν καταγραφές σημαντικά βελτιωμένες σε σχέση με αυτές που προέρχονται από αναλογικούς ή χαμηλής ανάλυσης ψηφιακούς καταγραφείς ( $< 18\text{bit}$ ) αλλά δεν είναι πλήρως απαλλαγμένες από ψηφιακό θόρυβο. Όπως έχει δείχθει, σε διάφορες περιπτώσεις (π.χ. Wang et al., 2003) εξαιτίας ατελειών στην κατασκευή των οργάνων καταγραφής ή/και για διάφορους άλλους λόγους, εισάγεται στην καταγραφή ψηφιακός θόρυβος που επηρεάζει την ποιότητα της καταγραφής τόσο στις χαμηλές όσο και στις υψηλές συχνότητες και υπεισέρχεται ως τελικό αποτέλεσμα στον αντισεισμικό σχεδιασμό.

Οι σύγχρονες απαιτήσεις για την παραγωγή δεδομένων ισχυρής σεισμικής κίνησης με ολοένα χαμηλότερο συχνοτικό περιεχόμενο, δημιουργούν την ανάγκη για τη δημιουργία νέων τεχνικών για την επεξεργασία των δεδομένων. Για το λόγο αυτό, στην παρούσα εργασία έγινε προσπάθεια να εφαρμοστεί μια καινούργια τεχνική όπου περιλαμβάνει τον υπολογισμό της θεωρητικής γωνιακής συχνότητας των καταγραφών,  $f_0$ , έπειτα από την προσαρμογή των θεωρητικών με τα παρατηρημένα φάσματα της σεισμικής πηγής και στη συνέχεια τη σύγκρισή της με την χαρακτηριστική συχνότητα αποκοπής του υψηλοπερατού φίλτρου. Από τη σύγκριση αυτή προκύπτει μια ένδειξη για τη γωνιακή συχνότητα αποκοπής του υψηλοπερατού φίλτρου που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να φιλτραριστούν οι καταγραφές.

## ΔΕΔΟΜΕΝΑ

Το 60 τοις εκατό της Ευρωπαϊκής σεισμικότητας εκλύεται στην Ελλάδα με σεισμούς μεγέθους μέχρι και **M8.0**. Ο σεισμός των Κυθήρων ήταν ένας σεισμός ενδιαμέσου βάθους (βάθος=67 Km, **M6.7**) που συνέβη στο δυτικό τμήμα του Ελληνικού τόξου όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 1**. Οι πιθανές λύσεις επικέντρων του ίδιου σεισμού που δημοσιεύτηκαν από το Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης (Α.Π.Θ.), το Ινστιτούτο Γεωφυσικής και Ηφαισειολογίας της Ιταλίας (INGV), το Ελβετικό Ινστιτούτο Τεχνολογίας της Ζυρίχης (ETHZ) και του Εργαστηρίου

Σεισμολογίας του Πανεπιστημίου του Harvard (HARV) φαίνονται στο σχήμα με κόκκινους κύκλους ενώ οι σταθμοί του ΙΤΣΑΚ και του ΓΙΕΕΑ που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία σημειώνονται με κίτρινα τρίγωνα και τετράγωνα αντίστοιχα. Στο **Σχήμα 1** φαίνονται επίσης οι μηχανισμοί γένεσης που προτάθηκαν από τους προηγούμενους φορείς.



**Σχήμα 1.** Χάρτης της περιοχής του Ν. Αιγαίου. Οι σταθμοί του ΙΤΣΑΚ που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία φαίνονται με τα κίτρινα τρίγωνα, του ΓΙΕΕΑ με τα τετράγωνα ενώ τα επίκεντρα που προτάθηκαν από τους διάφορους φορείς με κόκκινους κύκλους. Στο σχήμα φαίνονται επίσης οι μηχανισμοί γένεσης που προτάθηκαν από το Α.Π.Θ., το ETHZ, το INGV και το Πανεπιστήμιο του Harvard.

Ο σεισμός έγινε αισθητός στις περισσότερες περιοχές της Ελλάδας και την ευρύτερη περιοχή της ανατολικής Μεσογείου, από τη νότια Ιταλία έως την Αίγυπτο και την Ιορδανία. Οι μεγαλύτερες καταστροφές παρατηρήθηκαν στο χωριό Μιτάτα στο νησί των Κυθήρων (Karakostas et al., 2006). Η αντιστροφή τηλεσεισμικών καταγραφών ευρέως φάσματος έδειξε ένα μηχανισμό οριζόντιας μετατόπισης με ανάστροφη συνιστώσα (φ:50, λ:55, ξ:115) (Benetatos and Kiratzi, 2006). Στον Πίνακα 1 δίνονται πληροφορίες για τις θέσεις των σταθμών καταγραφής, τις αποστάσεις από το υπόκεντρο του σεισμού, τους τύπους των οργάνων που ήταν εγκατεστημένα στις θέσεις αυτές και τις εδαφικές συνθήκες σύμφωνα με την κατηγοριοποίηση κατά NEHRP (1994) και UBC (1997).

**Πίνακας 1.** Θέσεις και εδαφικές συνθήκες των σταθμών καταγραφής, αποστάσεις από το υπόκεντρο του σεισμού και τύποι οργάνων.

Όνομα σταθμού	Γεωγ. Μήκος	Γεωγ. Πλάτος	Εδαφικές Συνθήκες	Υπ. Απόστ. (Km)	Τύπος οργάνου
KYT1	36.150	22.983	B/A	75	ETNA
ANS1	36.472	23.101	B/A	79	QDR
HAN1	35.518	24.019	D	118	QDR
KRN1	36.802	21.961	C	156	QDR
HER1	35.318	25.102	C	198	QDR
DMKA	37.990	23.820	B/A	213	A-800
NAX1	37.100	25.367	C	216	CMG-5T
KOS1	36.983	27.290	C	368	ETNA

Τα όργανα QDR και A-800 χρησιμοποιούν χαμηλής ανάλυσης ψηφιακούς καταγραφείς ( $\leq 11$ -bit), τα ETNA χρησιμοποιούν ψηφιακούς καταγραφείς ανάλυσης (18-19 bit) ενώ τα όργανα CMG-5T ψηφιακούς καταγραφείς υψηλής ανάλυσης (24-bit).

## ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ

Για τον υπολογισμό της συχνότητας αποκοπής του υψηλοπερατού φίλτρου υπολογίστηκε για τις οριζόντιες συνιστώσες κάθε καταγραφής το φάσμα Fourier (FAS) και σχεδιάστηκε μαζί με τη φασματική καμπύλη ψηφιακού θορύβου που αντιστοιχεί σε κάθε τύπου οργάνου. Οι φασματικές καμπύλες του ψηφιακού θορύβου των οργάνων υπολογίστηκαν από το ψηφιοποιημένο ίχνος του χρόνου (time mark) όπου αυτό ήταν διαθέσιμο (όργανα QDR) ή από τις μέσες καμπύλες θορύβου του ψηφιακού καταγραφέα (όργανα ETNA and CMG-5T) (Skarlatoudis et al., 2004). Για την καταγραφή του σταθμού DMKA (A-800) δεν υπήρχαν διαθέσιμες πληροφορίες για το επίπεδο του θορύβου και για το λόγο αυτό η καταγραφή φιλτραρίστηκε για διάφορες γωνιακές συχνότητες αποκοπής υψηλοπερατού φίλτρου και επιλέχθηκε αυτή που απομάκρυνε το θόρυβο μεγάλης περιόδου έπειτα από την ολοκλήρωση για τον υπολογισμό της μετάθεσης.

Η συχνότητα αποκοπής του υψηλοπερατού φίλτρου που επιλέχθηκε ορίστηκε ως η συχνότητα όπου το πλάτος του φάσματος Fourier της καταγραφής είναι μεγαλύτερο για πρώτη φορά από το πλάτος της φάσματος Fourier της καμπύλης του ψηφιακού θορύβου. Η αναλογία σήματος προς θόρυβο που προτάθηκε από τους Skarlatoudis et al., (2003) για τον υπολογισμό της συχνότητας αποκοπής του υψηλοπερατού φίλτρου δεν εφαρμόστηκε στην παρούσα εργασία με στόχο τη διατήρηση του χαμηλόσυχνου περιεχομένου των φασμάτων των καταγραφών λόγω των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών του σεισμών ενδιαμέσου βάθους. Στο **Σχήμα 2** με τις κατακόρυφες διακεκομμένες γραμμές φαίνονται οι συχνότητες αποκοπής που υπολογίστηκαν για την κάθε καταγραφή και δίνονται στο Πίνακα 3.

Για την επεξεργασία των δεδομένων στην παρούσα εργασία επιλέχτηκε η μέθοδος που προτάθηκε από τον Boore (2001, 2003). Η μεθοδολογία περιλαμβάνει την προσθήκη συγκεκριμένου αριθμού μηδενικών σημείων, ο οποίος εξαρτάται κατά κύριο λόγο από την τάξη του εφαρμοζόμενου φίλτρου, στην αρχή και στο τέλος της καταγραφής και την εφαρμογή αιτιοκρατικών φίλτρων για την επεξεργασία των καταγραφών (Boore, 2005). Το υψηλοπερατό φίλτρο που εφαρμόστηκε για την απομάκρυνση του ψηφιακού θορύβου στην παρούσα εργασία ήταν ένα αιτιοκρατικό φίλτρο τύπου Butterworth, όγδοης τάξης.

## ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΘΕΩΡΗΤΙΚΩΝ ΦΑΣΜΑΤΩΝ

Οι θεωρητικές τιμές των φασμάτων Fourier υπολογίστηκαν με βάση τη στοχαστική προσομοίωση (Boore, 1983; Margaris and Boore, 1998) για κάθε καταγραφή της ισχυρής κίνησης του κυρίου σεισμού από τους σταθμούς που φαίνονται στο **Σχήμα 1**. Αναλυτική περιγραφή της μεθοδολογίας υπάρχει σε διάφορες δημοσιευμένες εργασίες (π.χ. Boore, 1983; Atkinson and Boore, 1995, 1997, 1998) ενώ λεπτομέρειες για την εφαρμογή της στην ευρύτερη περιοχή του Αιγαίου μπορούν να βρεθούν στις εργασίες των Margaris and Boore (1998) και Margaris and Hatzidimitriou (2002). Μερικές από τις βασικές αρχές της μεθόδου

θα παρουσιαστούν και στην παρούσα εργασία. Το θεωρητικό φάσμα σε μία θέση μπορεί να περιγραφεί από τη σχέση

$$R(f) = CS(f)A(f)D(f)I(f) \quad (1)$$

όπου  $C$  είναι σταθερά,  $S(f)$  είναι το φάσμα της πηγής,  $A(f)$  είναι ο παράγοντας ενίσχυσης των τοπικών εδαφικών συνθηκών,  $D(f)$  είναι ο παράγοντας απόσβεσης, και  $I(f)$  είναι ο παράγοντας που περιγράφει την απόκριση του οργάνου καταγραφής. Για το φάσμα της πηγής,  $S(f)$ , θεωρήθηκε το  $\omega$ -τετράγωνο προσομοίωμα που περιγράφει την ισχυρή κίνηση στην πηγή και δίνεται από τη σχέση,

$$S(f) = CM_0 / [1 + (f / f_0)^2] \quad (2)$$

όπου  $M_0$  είναι η σεισμική ροπή και  $f_0$  είναι η γωνιακή συχνότητα του φάσματος. Στη **Σχέση 2** η γωνιακή συχνότητα,  $f_0$ , καθορίζει το πλάτος της επιτάχυνσης και ελέγχει το συχνοτικό περιεχόμενο της πηγής. Στην παρούσα εργασία η γωνιακή συχνότητα  $f_0$  υπολογίστηκε με τις μεθόδους που προτάθηκαν από τον Brune (1970, 1971) και από τον Andrews (1986) ενώ η μέση τιμή της  $f_0$  από τις δύο μεθόδους χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό του θεωρητικού φάσματος και της παραμέτρου τάσης,  $\Delta\sigma$ .

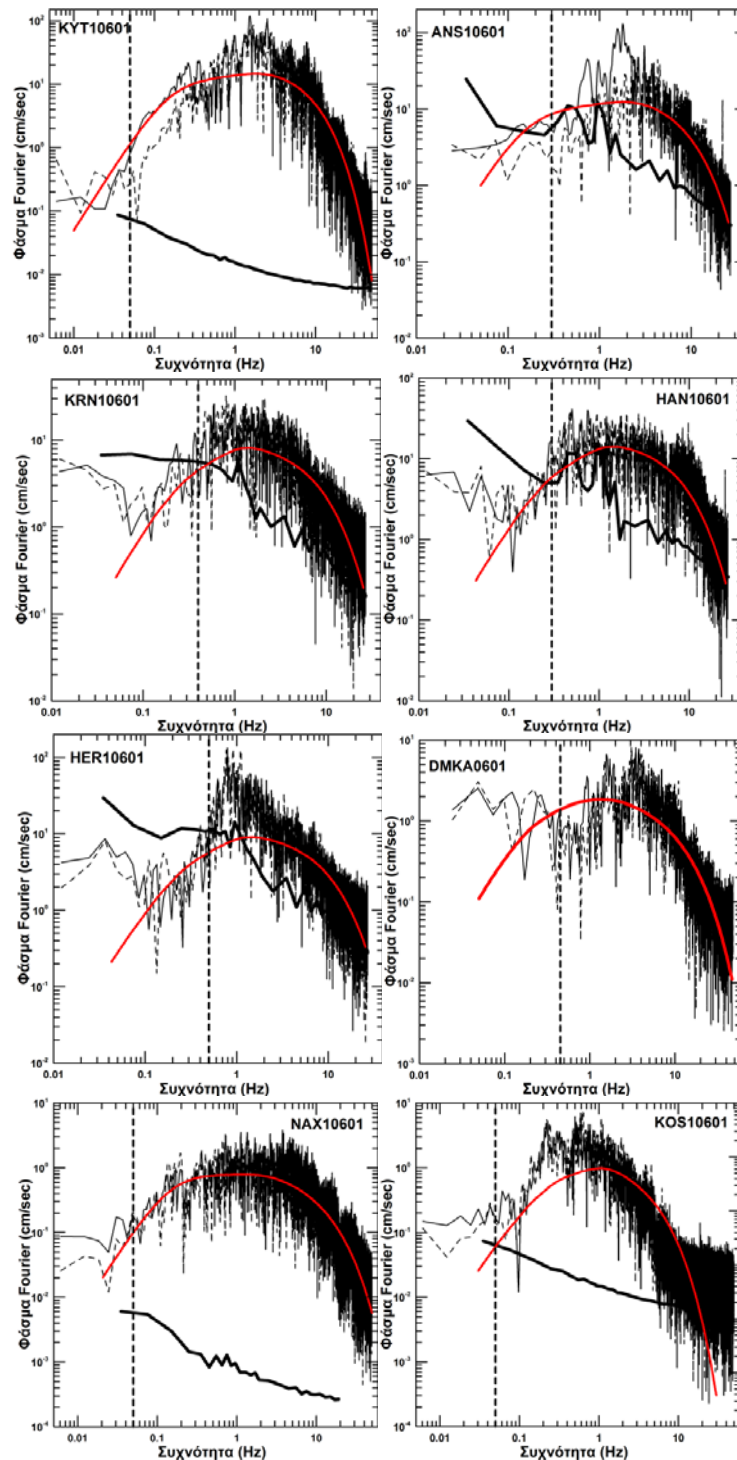
Οι παράμετροι και η μέθοδος της στοχαστικής προσομοίωσης που χρησιμοποιήθηκαν είναι σχεδόν οι ίδιες με αυτές που περιγράφονται στις εργασίες των Margaritis and Boore (1998) και Margaritis and Hatzidimitriou (2002) για επιφανειακούς σεισμούς στην ευρύτερη περιοχή του Αιγαίου. Διαφοροποίηση παρουσιάζεται στο καθορισμό του παράγοντα απόσβεσης  $Q$ . Στην προκειμένη περίπτωση και δεδομένου ότι έπρεπε να προσομοιωθεί η ισχυρή σεισμική κίνηση για το σεισμό ενδιαμέσου βάθους των Κυθήρων κρίθηκε σκόπιμο να μην υιοθετηθούν παράγοντες απόσβεσης  $Q$ , που χρησιμοποιούνται για επιφανειακούς σεισμούς του Ελληνικού χώρου. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε ο παράγοντας απόσβεσης που προτάθηκε από τους Benetatos and Kiratzi (2004) για σεισμούς ενδιαμέσου βάθους της Ρουμανίας και του Ελληνικού τόξου ( $Q=150f^{0.8}$ ). Με βάση την αντιστροφή του προσομοιώματος (Margaritis and Hatzidimitriou, 2002) οι παράμετροι τάσης που υπολογίστηκαν για κάθε σταθμό καταγραφής ισχυρής κίνησης δίνονται στον Πίνακα 2.

**Πίνακας 2.** Παράμετροι τάσης  $\Delta\sigma$  που υπολογίστηκαν για κάθε σταθμό για τις οριζόντιες συνιστώσες.

<b>Όνομα σταθμού</b>	<b>Παράμετρος τάσης <math>\Delta\sigma</math> (bars)</b>
KYT1	67
ANS1	67
HAN1	135
KRN1	135
HER1	135
DMKA	135
NAX1	67
KOS1	135

Οι παράμετροι τάσης υπολογίστηκαν από το μέσο όρο των τιμών για τα δύο μοντέλα υπολογισμού της γωνιακής συχνότητας (Brune, 1970;1971, Andrews, 1986). Στο **Σχήμα 2**,

τα θεωρητικά φάσματα που υπολογίστηκαν από το μέσο όρο των δύο παραμέτρων τάσης από τα δύο διαφορετικά μοντέλα, φαίνονται με την κόκκινη συνεχόμενη γραμμή.



**Σχήμα 2.** Παρατηρημένα (μαύρες συνεχόμενες και διακεκομμένες γραμμές) και θεωρητικά φάσματα (κόκκινη γραμμή) Fourier (FAS) των οριζοντίων συνιστωσών των καταγραφών που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία. Η παχιά συνεχόμενη μαύρη καμπύλη αντιστοιχεί στο φάσμα Fourier της καμπύλης του ψηφιακού θορύβου. Η συχνότητα αποκοπής του υψηλοπερατού φίλτρου φαίνεται στο σχήμα με την κατακόρυφη διακεκομμένη γραμμή.

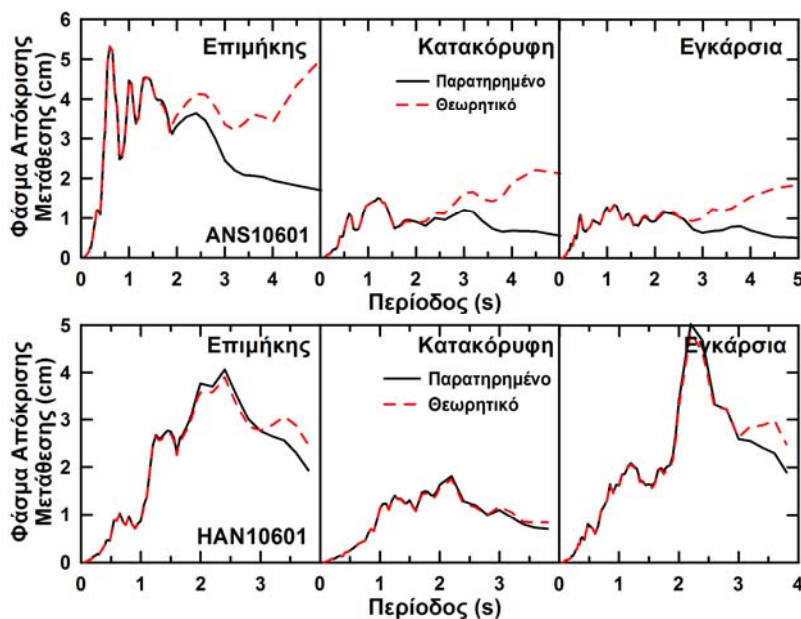
## ΦΑΣΜΑΤΑ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΜΕΤΑΘΕΣΗΣ

Οι καταγραφές διορθώθηκαν χρησιμοποιώντας ως συχνότητα αποκοπής αυτήν που υπολογίστηκε από τη σύγκριση των παρατηρημένων φασμάτων και του ψηφιακού θορύβου (παρατηρημένη συχνότητα) και στη συνέχεια υπολογίστηκαν τα φάσματα απόκρισης μετάθεσης. Επίσης υπολογίστηκαν τα φάσματα απόκρισης μετάθεσης από τις διορθωμένες καταγραφές με συχνότητα αποκοπής υπολογισμένη από τη σύγκριση των θεωρητικών φασμάτων με τα φάσματα του ψηφιακού θορύβου (θεωρητική συχνότητα). Στον Πίνακα 3 δίνονται οι τιμές της “παρατηρημένης” και της “θεωρητικής” συχνότητας αποκοπής.

**Πίνακας 3.** Παρατηρημένες και θεωρητικές συχνότητες αποκοπής των υψηλοπερατών φίλτρων που εφαρμόστηκαν κατά την επεξεργασία των καταγραφών.

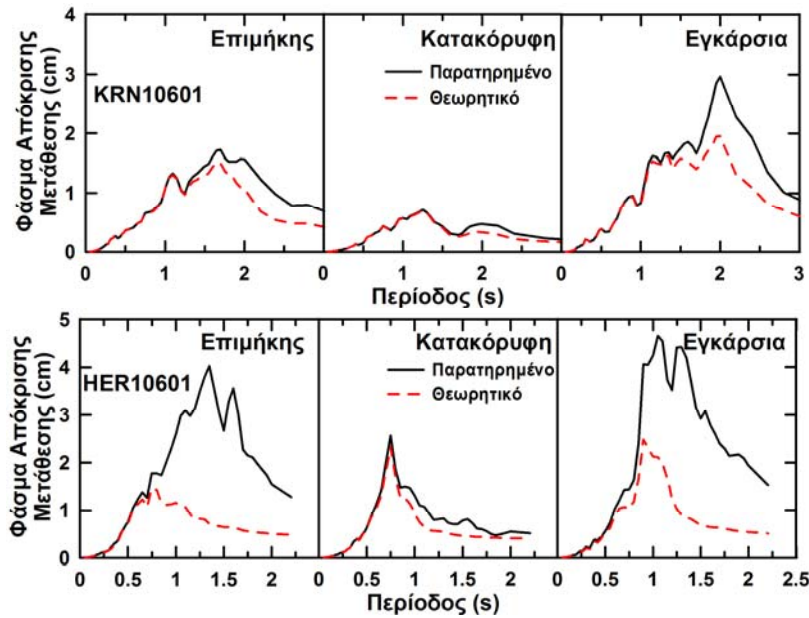
Όνομα σταθμού	Τύπος οργάνου	$f_c$ Παρατ.(Hz)	$f_c$ Θεωρ.(Hz)
KYT1	ETNA	0.05	0.05
ANS1	QDR	0.30	0.14
HAN1	QDR	0.30	0.25
KRN1	QDR	0.40	0.50
HER1	QDR	0.50	1.00
DMKA	A-800	0.45	-
NAX1	CMG-5T	0.05	0.05
KOS1	ETNA	0.05	0.05

Για το σταθμό DMKA δεν υπολογίστηκε θεωρητική συχνότητα επειδή δεν υπήρχε διαθέσιμο το επίπεδο του ψηφιακού θορύβου του συγκεκριμένου οργάνου. Στο **Σχήμα 3** φαίνονται μόνο τα φάσματα απόκρισης μετάθεσης για τους σταθμούς με διαφορετικές παρατηρημένες και θεωρητικές συχνότητες. Τα υπόλοιπα φάσματα μετάθεσης πρακτικά δεν παρουσιάζουν διαφορές. Με τη μαύρη συνεχόμενη γραμμή παριστάνονται τα “παρατηρημένα” φάσματα απόκρισης ενώ με την κόκκινη διακεκομμένη γραμμή τα “θεωρητικά” φάσματα απόκρισης.



**Σχήμα 3.** Η λεζάντα ακολουθεί στην επόμενη σελίδα.





**Σχήμα 3.** Φάσματα απόκρισης μετάθεσης των καταγραφών που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία. Οι συνεχείς μαύρες καμπύλες αντιστοιχούν στα φάσματα απόκρισης με τη συχνότητα αποκοπής του υψηλοπερατού φίλτρου υπολογισμένη από το λόγο σήματος προς θόρυβο ενώ οι κόκκινες διακεκομμένες καμπύλες στα φάσματα όπου η συχνότητα αποκοπής του υψηλοπερατού φίλτρου υπολογίστηκε με βάση το θεωρητικό φάσμα που παράχθηκε για την κάθε καταγραφή.

### ΣΥΖΗΤΗΣΗ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η στοχαστική μέθοδος παραγωγής συνθετικών καταγραφών και φασμάτων Fourier που περιγράφηκε προηγουμένως εφαρμόστηκε για το σεισμό ενδιαμέσου βάθους των Κυθήρων στην ευρύτερη περιοχή του Αιγαίου. Η συμφωνία μεταξύ των θεωρητικών και των πραγματικών φασμάτων είναι πολύ καλή, σε όλο το φάσμα των συχνοτήτων (ειδικά στις υψηλότερες συχνότητες) παρά τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των σεισμών αυτών (καταγραφές πλούσιες σε χαμηλόσυχο περιεχόμενο).

Στα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των σεισμών ενδιαμέσου βάθους θα πρέπει επίσης να προστεθεί το γεγονός ότι η διάδοση των σεισμικών κυμάτων που παράγονται από τους σεισμούς αυτούς επηρεάζεται σημαντικά από το στρώμα χαμηλών ταχυτήτων-χαμηλού παράγοντα απόσβεσης στη σφήνα του μανδύα κάτω από το ηφαιστειακό τόξο του Ν. Αιγαίου. Οι φασματικές τιμές της εδαφικής κίνησης από το σεισμό αυτό, αλλά και γενικότερα για όλους τους σεισμούς ενδιαμέσου βάθους που συμβαίνουν στην περιοχή του Ν. Αιγαίου, κυριαρχούνται από ένα σύνθετο μοντέλο απόσβεσης παράγοντας υψηλότερες φασματικές τιμές σε περιοχές που βρίσκονται κατά μήκος του Ελληνικού τόξου σε αντίθεση με την οπισθότοξη περιοχή. Λόγω του σύνθετου μοντέλου απόσβεσης υιοθετήθηκε η σχέση υπολογισμού του παράγοντα απόσβεσης  $Q=150f^{0.8}$  που χρησιμοποιήθηκε από τους Benetatos and Kiratzi (2002) για την περιοχή του Ν. Αιγαίου και με την οποία παράχθηκαν θεωρητικά φάσματα με πολύ καλή συμφωνία με τις παρατηρημένες φασματικές τιμές για το σεισμό ενδιαμέσου βάθους των Κυθήρων.



Από το **Σχήμα 2** φαίνεται επίσης ότι ένας σημαντικός παράγοντας στη σύγκριση των πραγματικών με τα συνθετικά φάσματα είναι και διακριτική ικανότητα του οργάνου καταγραφής. Είναι εμφανές ότι τα όργανα με υψηλή διακριτική ικανότητα δίνουν καταγραφές πολύ πιο αξιόπιστες, ιδιαίτερα στο χαμηλόσυχο κομμάτι της καταγραφής με αποτέλεσμα την καλύτερη προσαρμογή των θεωρητικών φασμάτων. Από τις προηγούμενες παρατηρήσεις γίνεται κατανοητή η ανάγκη για όργανα υψηλής διακριτικής ικανότητας μιας και οι σύγχρονες ανάγκες απαιτούν δεδομένα με ολοένα και χαμηλότερο συχνοτικό περιεχόμενο και οι πλέον πρόσφατες απαιτήσεις στον αντισεισμικό σχεδιασμό κυρίως βασίζονται στη μετάθεση της ισχυρής κίνησης.

Ο συνδυασμός της επεξεργασίας των καταγραφών και του υπολογισμού της γωνιακής συχνότητας του φάσματος της πηγής φαίνεται από το **Σχήμα 3** ότι μπορεί να δώσει μια σχετικά αξιόπιστη ένδειξη για τη γωνιακή συχνότητα αποκοπής του υψηλοπερατού φίλτρου όταν δεν υπάρχει καμία άλλη πληροφορία για τα επίπεδα του θορύβου της καταγραφής. Στην καλή συμφωνία που παρατηρείται ανάμεσα στη θεωρητική και την παρατηρημένη συχνότητα αποκοπής (Πίνακας 3) εξαίρεση αποτελεί η καταγραφή HER10601 που λόγω ιδιαίτερων επιδράσεων της τοπικής γεωλογίας και των εδαφικών συνθηκών του σταθμού καταγραφής δεν ήταν ικανοποιητική η περιγραφή όλων των φασματικών χαρακτηριστικών της από το θεωρητικό φάσμα.

Συμπερασματικά ο σεισμός ενδιαμέσου βάθους της 8<sup>ης</sup> Ιανουαρίου 2006 στα Κύθηρα παρήγαγε ένα υψηλής ποιότητας σύνολο δεδομένων ισχυρής σεισμικής κίνησης. Οι διαφορετικού τύπου επιταχυνσιογράφοι που κατέγραψαν το σεισμό αυτό, σε συνάρτηση με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του, έδωσαν τη δυνατότητα διαφόρων τύπων μελετών. Στην παρούσα εργασία έγινε μια προσπάθεια για τη μελέτη των φασματικών χαρακτηριστικών της πηγής με τη μέθοδο του στοχαστικού μοντέλου πηγής. Υπολογίστηκε μία μέση παράμετρος τάσης  $\Delta\sigma=110$  bars η οποία είναι διπλάσια από αυτήν την οποία υπολόγισαν για τον Ελληνικό χώρο με βάση καταγραφές ισχυρής κίνησης επιφανειακών σεισμών οι Margaris and Hatzidimitriou (2002) καθώς και οι αντίστοιχες γωνιακές συχνότητες των φασμάτων των διαφόρων σταθμών καταγραφής της συγκεκριμένης σεισμικής πηγής. Επίσης έγινε σύγκριση των παρατηρημένων με τα θεωρητικά φάσματα Fourier. Με τον τρόπο αυτό μελετήθηκαν διάφορα φασματικά χαρακτηριστικά του σεισμού των Κυθέρων ενώ η γωνιακή συχνότητα της πηγής που υπολογίστηκε, χρησιμοποιήθηκε ως μια ένδειξη για την εκτίμηση της συχνότητας αποκοπής του υψηλοπερατού φίλτρου στην επεξεργασία των καταγραφών ισχυρής σεισμικής κίνησης.

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ευχαριστούμε τον Dr. David Boore από τη USGS για τις κρίσιμες παρατηρήσεις και τα εποικοδομητικά του σχόλια. Το Γεωδυναμικό Ινστιτούτο του ΕΑΑ μας παραχώρησε καταγραφές του δικτύου ισχυρής κίνησης από το συγκεκριμένο σεισμό και για το λόγο αυτό το ευχαριστούμε θερμά. Η παρούσα εργασία υποστηρίχθηκε από το ερευνητικό πρόγραμμα της Ε.Ε. ITSAK.GR, **MTKD-CT-2005-029627**.

## BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Andrews D. J., (1986), "Objective determination of source parameters and similarity of earthquakes of different size, in earthquake Source Mechanics", S. Das, J. Boatwright, and C. H. Scholz (Editors), American Geophysical Monograph 37, pp. 259–267.
- Atkinson G.M., and Boore D.M., (1995), "Ground motion relations for Eastern North America", Bull. Seism. Soc. Am., 85, pp.17–30.
- Atkinson G.M., and Boore D.M., (1997), "Stochastic point-source modeling of ground motions in the Cascadia region", Seism. Res. Lett., 68, pp. 74–85.
- Atkinson G.M., and Boore D.M., (1998), "Evaluation of the models for earthquake source spectra in eastern North America", Bull. Seism. Soc. Am., 88, pp. 917–934.
- Benetatos Ch. A. and Kiratzi A.A. (2004), "Stochastic strong ground motion simulation of intermediate depth earthquakes: the cases of the 30 May 1990 Vrancea (Romania) and of the 22 January 2003 Karpathos island (Greece) earthquakes", J of Soil Dyn. Earthquake Eng., 24, 1-9.
- Benetatos C. and Kiratzi, A. (2006), "Source characteristics of the 8 January 2006 (Mw 6.7) intermediate depth Kythera earthquake". 1st ECEES, 3-9 September 2006, Geneva, Switzerland.
- Boore, D.M., (1983), "Stochastic simulation of high-frequency ground motions based on seismological models of the radiated spectra", Bull. Seism. Soc. Am. 73, pp. 1865–1894.
- Boore, D.M., (1996), "SMSIM—Fortran programs for simulating ground motions from earthquakes: version 1.0", U.S. Geol. Surv. Open-File Rept. 96–80-A, pp. 73.
- Boore D.M., (2001), "Effect of Baseline Corrections on Displacements and Response Spectra for Several Recordings of the 1999 Chi-Chi, Taiwan, Earthquake", Bull. Seism. Soc. Am., 91, pp. 1199–1211.
- Boore D.M., (2003), "Analog-to-digital conversion as a source of drifts in displacements derived from digital recordings of ground acceleration", Bull. Seism. Soc. Am. 93, pp. 2017-2024.
- Boore, D.M., (2005), "On pads and filters: processing strong-motion data, Bull. Seism. Soc. Am., 95, pp. 745–750.
- Brune, J. N., (1970), "Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves", J. Geophys. Res. 75, pp. 4997–5009.
- Brune, J. N., (1971), "Correction", J. Geophys. Res. 76, pp. 5002.
- Karakostas, Ch., Makarios, T., Lekidis, V., Salonikios, T., Makra, K., Anastasiadis, K., Klimis, N., Dimitriou, P., Margaris, B., Papaioannou, Ch., Theodulidis, N. and Savvaidis, A. (2006), "The Kythira (Greece) earthquake of January 8, 2006: Preliminary report on strong motion data, Geotechnical and structural damage", ITSAK, EERI newsletter, 40(3), 1-21.
- Margaris B.N. and Boore D.M., (1998), "Determination of  $\Delta\sigma$  and  $\kappa_0$  from response spectra of large earthquakes in Greece, Bull. Seism. Soc. Am. 88, pp. 170–182.
- Margaris, B.N. and Hatzidimitriou, P.M., (2002), "Source spectral scaling and stress release estimates using strong motion records in Greece", Bull. Seism. Soc. Am. 92, pp.1040–1059.
- NEHRP (1994). Recommended provisions for seismic regulations for new buildings and other structures, Part 1: Provisions, FEMA 222A Building Seismic Safety Council, Washington D.C., 290 pp.

- Skarlatoudis A.A., Papazachos, C.B., Margaris, B.N. (2003), "Determination of noise spectra from strong motion data recorded in Greece", *J. Seismology*, 7, 533-540.
- Skarlatoudis A.A., Margaris B.N., Papazachos C.B., (2004), "Recent advances in Greece on strong-motion networking and data processing", The Consortium of Organizations for Strong-Motion Observation Systems (COSMOS) invited Workshop, California, United States.
- Uniform Building Code (UBC), (1997). Intern. Conf. Building Officials, USA, Vol. II, 489 pp.
- Wang, G.-Q., Boore D.M., Igel H. and Zhou X.-Y., (2003), "Some observation on collocated and closely-spaced strong ground motion records of the 1999, Chi-Chi, Taiwan earthquake", *Bull. Seism. Soc. Am.* 93, pp. 674--693.