

## Επιρροή των τοπικών εδαφικών συνθηκών και της τοπογραφίας στην εδαφική ταλάντωση - Ενόργανα αποτελέσματα από το Αίγιο

### Site and topography effects on ground motion - Instrumental results from Aegion

Όλγα-Τζόαν ΚΤΕΝΙΔΟΥ<sup>1</sup>, Στέλλα ΑΡΝΑΟΥΤΗ<sup>2</sup>, Francisco-J. CHAVEZ-GARCIA<sup>3</sup>,  
Δημήτριος ΡΑΠΤΑΚΗΣ<sup>4</sup>, Κυριαζής ΠΙΤΙΛΑΚΗΣ<sup>5</sup>, Δημήτριος ΔΙΑΓΟΥΡΤΑΣ<sup>6</sup>,  
Κωνσταντίνος ΜΑΚΡΟΠΟΥΛΟΣ<sup>7</sup>

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ** : Μελετάται η περιοχή του Αιγίου και συγκεκριμένα το κατακόρυφο δίκτυο CORSSA, που βρίσκεται στα κατάντη της πόλης, σε συνδυασμό με επιφανειακό σταθμό στα ανάντη του ρήγματος. Χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των Yamazaki et al. (1992) συσχετίζονται καταγραφές από την επιφάνεια και τα διάφορα βάθη του δικτύου και υπολογίζονται οι προσανατολισμοί όλων των υπόγειων οργάνων. Οι προσανατολισμοί χρησιμοποιούνται για να στραφούν κατάλληλα 19 διαθέσιμες καταγραφές σε σχέση με το πρηνές του ρήγματος του Αιγίου και με το πλευρικό όριο αποθέσεων-βράχου της «λεκάνης» που δημιουργείται. Από τις καταγραφές στο δίκτυο υπολογίζονται οι εμπειρικοί φασματικοί λόγοι HVSR και SSR, ο τελευταίος σε σχέση με το βαθύτερο όργανο που βρίσκεται στο σκληρό υπόβαθρο, σε βάθος 178μ. Από τους λόγους προκύπτει πως η παράλληλη στο όριο συνιστώσα (t) ενισχύεται περισσότερο από την κάθετη σε αυτό (r). Επίσης υπολογίζονται οι λόγοι HVSR για ταυτόχρονες καταγραφές στον επιφανειακό σταθμό ΟΤΕ στα ανάντη, καθώς και ο λόγος της κίνησης στη θέση αυτή ως προς το βαθύτερο όργανο του δικτύου CORSSA.

**ABSTRACT** : The area under study is that of Aegion, Gulf of Corinth, Greece. A vertical array (CORSSA) exists at the lower part of the town and a surface accelerograph (OTE) at the upper part. Using the maximum cross-correlation method according to Yamazaki et al. (1992), all buried instruments are orientated based on the surface instrument of the array. The results are used to orientate 19 recorded events parallel and vertical to the fault plane

<sup>1</sup> Υποψήφια Δρ, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, email: [ktenidou@civil.auth.gr](mailto:ktenidou@civil.auth.gr)

<sup>2</sup> Υποψήφια Δρ, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, email: [sarnaout@civil.auth.gr](mailto:sarnaout@civil.auth.gr)

<sup>3</sup> Καθηγητής, Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, email: [paco@pumas.iingen.unam.mx](mailto:paco@pumas.iingen.unam.mx)

<sup>4</sup> Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, email: [raptakis@civil.auth.gr](mailto:raptakis@civil.auth.gr)

<sup>5</sup> Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, email: [kpitilak@civil.auth.gr](mailto:kpitilak@civil.auth.gr)

<sup>6</sup> Ερευνητής, Τμήμα Γεωλογίας, Εθνικό Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, email: [diagourtas@geol.uoa.gr](mailto:diagourtas@geol.uoa.gr)

<sup>7</sup> Καθηγητής, Τμήμα Γεωλογίας, Εθνικό Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, email: [kmacrop@geol.uoa.gr](mailto:kmacrop@geol.uoa.gr)

and consequently to the rock-deposit discontinuity of the basin formed. HVSR ratios are calculated for these events, as well as SSR ratios with respect to the deepest array instrument which lies in soft rock. The results indicate differences between the two horizontal components, with the transverse one (related to SH wave motion) being larger than the radial one (related to SV motion). HVSR ratios are also calculated for simultaneous events at OTE surface station, along with a kind of SSR ratio between OTE and the deepest CORSSA instrument.

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι τοπικές εδαφικές συνθήκες επηρεάζουν τα χαρακτηριστικά της ισχυρής εδαφικής κίνησης και η επιρροή τους σχετίζεται με το πάχος και την εμπέδηση των εδαφικών στρώσεων με το υπόβαθρο, με την επιφανειακή τοπογραφία και με τις τυχόν πλευρικές ασυνέχειες. Η επιρροή των εδαφικών στρώσεων στη διαφοροποίηση της εδαφικής κίνησης έχει μελετηθεί σχετικά διεξοδικά, ωστόσο η επίδραση της επιφανειακής και υπόγειας τοπογραφίας παρουσιάζει μεγαλύτερη πολυπλοκότητα και διαφέρει περισσότερο από τοποθεσία σε τοποθεσία. Γενικά σχετίζεται με πολύπλοκα φαινόμενα δισδιάστατης φύσης, όπως η εστίαση και αποεστίαση της σεισμικής ενέργειας, η περίθλαση του πρωτογενούς κυματικού πεδίου, η δημιουργία επιφανειακών κυμάτων και η συμβολή αυτών (Bard, 1999).

Ένας από τους τρόπους με τους οποίους μελετάται εμπειρικά η επιρροή των τοπικών εδαφικών συνθηκών είναι η επεξεργασία καταγραφών σεισμικών γεγονότων στο πεδίο των συχνοτήτων για τον υπολογισμό φασματικών λόγων. Οι συνήθεις λόγοι που χρησιμοποιούνται είναι (Lermo and Chávez-García, 1993): (α) ο κλασικός εμπειρικός λόγος SSR (standard spectral ratio) που σχηματίζεται με διαίρεση της κίνησης σε ένα σημείο ως προς την κίνηση σε σημείο «αναφοράς», π.χ. σημείο που βρίσκεται σε κοντινή επιφανειακή εμφάνιση βράχου και (β) ο εμπειρικός λόγος HVSR (horizontal to vertical spectral ratio) που σχηματίζεται διαιρώντας τις οριζόντιες συνιστώσες της κίνησης σε ένα σημείο με την κατακόρυφη κίνηση του ίδιου, η οποία θεωρείται ως ανεξάρτητη των τοπικών συνθηκών. Στο παρόν άρθρο θα μελετηθεί η περιοχή του Αιγίου με αυτές τις μεθόδους με σκοπό τη μελέτη της σεισμικής ενίσχυσης και την επιρροή της τοπογραφίας.

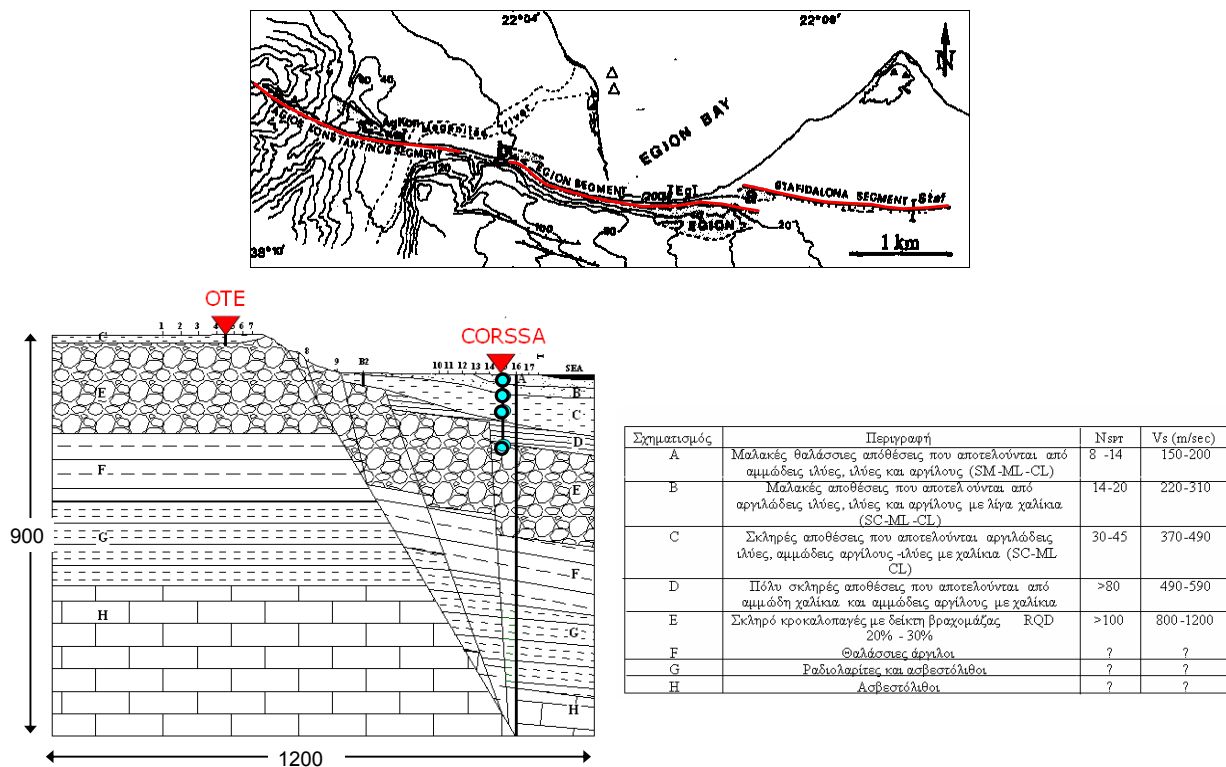
## ΤΟ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΠΕΔΙΟ CORSSA

### Θέση, διάταξη και σκοπός

Το πειραματικό πεδίο CORSSA (Corinth Soft Soil Array, <http://geo.civil.auth.gr/Staff/dep/pitilakis/CORSSA/>) βρίσκεται κοντά στην πόλη του Αιγίου, στον Κορινθιακό Κόλπο, μία περιοχή που έχει υποστεί ισχυρούς σεισμούς, με πιο πρόσφατο και καταστροφικό αυτόν του 1995. Η περιοχή χαρακτηρίζεται από εφελκυστικά ρήγματα, ένα από τα οποία περνά από το Αίγιο και χωρίζει την πόλη σε δύο επίπεδα (Σχήμα 1), καθώς επίσης και από έντονες πλευρικές ασυνέχειες.

Το δίκτυο CORSSA αποτελεί ένα πεδίο δοκιμών που βρίσκεται στο κατάντη τμήμα της πόλης, παρέχει πλήθος ενόργανων δεδομένων και του οποίου η γεωμετρία, η γεωλογία και οι εδαφικές ιδιότητες είναι γνωστές σε ικανοποιητικό βαθμό (Apostolidis et al., 2005). Αποτελείται από 5 επιταχυνσιογράφους σε βάθη 0μ, 14μ, 31μ, 57μ και 178μ, όπως φαίνεται

στο Σχήμα 1. Ο βαθύτερος βρίσκεται μέσα στο σχηματισμό του κροκαλοπαγούς, ενώ οι υπόλοιποι σε εδαφικές αποθέσεις. Μπορεί επομένως να χρησιμοποιηθεί ως «σταθμός αναφοράς». Το κατακόρυφο αυτό δίκτυο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό με επιφανειακό σταθμό εγκατεστημένο στα ανάντη της πόλης (ΟΤΕ), όπως φαίνεται στο Σχήμα 1. Ο σταθμός αυτός βρίσκεται στην επιφάνεια επιφανειακής στρώσης αποθέσεων μικρού πάχους, η οποία υπέρκειται των σκληρών σχηματισμών.



**Σχήμα 1.** Χάρτης της περιοχής όπου φαίνονται τα 3 τμήματα του ρήγματος του Αιγίου (Koukouvelas et al., 1996). Πρόσφατη εδαφική τομή (κατά τη διεύθυνση B-N) στην περιοχή του Αιγίου και εδαφικές ιδιότητες (Apostolidis et al., 2005). Θέσεις του δικτύου επιταχυνσιογράφων ΟΤΕ και CORSSA.

### Γεωτεχνικά-γεωλογικά δεδομένα

Στην περιοχή έχουν πραγματοποιηθεί γεωτρήσεις, χαρτογραφήσεις, επί τόπου και εργαστηριακές δοκιμές εδαφοδυναμικής, καθώς και γεωφυσικές διασκοπήσεις και μετρήσεις μικροθορύβου, προκειμένου να εξακριβωθεί σε ικανοποιητικό βαθμό η γεωλογική δομή και οι γεωτεχνικές και δυναμικές εδαφικές ιδιότητες. Τα παραπάνω αφορούν βάθη έως 180μ στα κατάντη, πέρα από τα οποία η γνώση του υπεδάφους προέρχεται από διαθέσιμη βαθειά γεώτρηση που φθάνει τα 1000μ και διαπερνά τη ζώνη διάτμησης του ρήγματος ([www.corinth-rift-lab.org/](http://www.corinth-rift-lab.org/)). Το πιο πρόσφατο προταθέν γεωτεχνικό προσομοίωμα για την περιοχή (Σχήμα 1) δόθηκε από τους Apostolidis et. al. (2005) και χαρακτηρίζεται από την κλίση που παρουσιάζουν οι κατάντη στρώσεις προς την πλευρά της θάλασσας και από την πολύπλοκη ζώνη διάτμησης του ρήγματος.

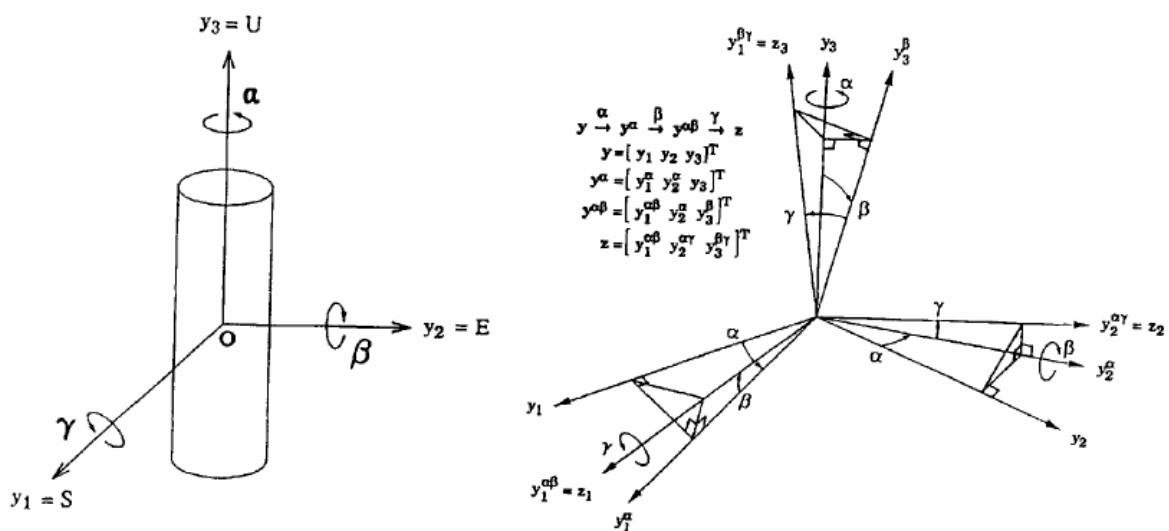
## ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΣ ΟΡΓΑΝΩΝ ΔΙΚΤΥΟΥ CORSSA

## Γενικά

Για την ενόργανη μελέτη της επιρροής της των τοπικών εδαφικών συνθηκών - συμπεριλαμβανομένης της γεωμετρίας των εδαφικών αποθέσεων και της τοπογραφίας- στην σεισμική απόκριση, είναι απαραίτητη η ακριβής γνώση του προσανατολισμού των οργάνων. Ακόμη περισσότερο όταν πρόκειται για καταγραφές σε κατακόρυφα δίκτυα που εκ των πραγμάτων παρουσιάζουν προβλήματα κατά την εγκατάσταση και λειτουργία των οργάνων. Το θέμα γίνεται ακόμη πιο σοβαρό όταν στη μελέτη εμπλέκεται και η παρουσία ρήγματος όπου είναι γνωστό ότι η εγκάρσια και διαμήκης προς αυτό συνιστώσα της κίνησης επηρεάζονται σημαντικά. Στην παρούσα μελέτη ισχύουν όλοι αυτοί οι περιορισμοί και επομένως είναι απαραίτητο, προ πάσης άλλης μελέτης να προσδιορισθούν και να προσανατολισθούν όλες οι καταγραφές που χρησιμοποιήθηκαν ως προς τη διεύθυνση του πρηνούς του Αιγίου, που αποτελεί το βασικό χαρακτηριστικό της περιοχής καθώς συμπίπτει με τον καθρέφτη του ρήγματος και με το όριο μεταξύ ιζημάτων και κροκαλοπαγούς.

## Μέθοδος

Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε περιγράφεται πλήρως από τους Yamazaki et al. (1992), οι οποίοι μελέτησαν το πρόβλημα της εύρεσης του σφάλματος στον προσανατολισμό επιταχυνσιογράφων που βρίσκονται θαμμένοι κάτω από την επιφάνεια του εδάφους. Θεωρείται ως ορθός ο γνωστός προσανατολισμός του επιφανειακού οργάνου (σύστημα αξόνων  $x_1, x_2, x_3$ ) και βάσει εκείνου υπολογίζεται το σφάλμα στον προσανατολισμό όλων των υπολοίπων, τα οποία ενδέχεται να έχουν στροφή (κατά γωνία  $\alpha, \beta$  ή  $\gamma$ ) σε οποιονδήποτε από τους τρεις άξονες (σύστημα αξόνων  $z_1, z_2, z_3$ , στραμμένο ως προς το ορθό σύστημα αξόνων  $y_1, y_2, y_3$ ), με αποτέλεσμα στροφή των υπολοίπων δύο στο επίπεδό τους (βλ. Σχήμα 2). Υποτίθεται επίσης πως κάθε καταγραφή προερχόμενη από τα υπόγεια όργανα έχει άγνωστη χρονική υστέρηση  $\tau$  ως προς την αντίστοιχη καταγραφή του επιφανειακού.



**Σχήμα 2.** Θεωρούμενες γωνίες σφάλματος στον προσανατολισμό των τριών αξόνων υπόγειου επιταχυνσιογράφου ( $\alpha, \beta, \gamma$ ) κατά Yamazaki et al., 1992. Στην περίπτωση μας θεωρείται  $\beta = \gamma = 0$ .

Τα συστήματα αξόνων σε κάθε υπόγειο όργανο σχετίζονται μεταξύ τους μέσω των γωνιών στροφής όπως φαίνεται στην Εξίσωση 1:

$$z(t) = T(\alpha, \beta, \gamma)y(t)$$

$$= \begin{bmatrix} \cos\alpha \cos\beta & \sin\alpha \cos\beta & \sin\beta \\ -\sin\alpha \cos\gamma - \cos\alpha \sin\beta \sin\gamma & \cos\alpha \cos\gamma - \sin\alpha \sin\beta \sin\gamma & \cos\beta \sin\gamma \\ \sin\alpha \sin\gamma - \cos\alpha \sin\beta \cos\gamma & -\cos\alpha \sin\gamma - \sin\alpha \sin\beta \cos\gamma & \cos\beta \cos\gamma \end{bmatrix} y(t) \quad (1)$$

Η ανάλυση γίνεται στο πεδίο του χρόνου και ακολουθείται η μέθοδος της μέγιστης συσχέτισης (maximum cross-correlation) μεταξύ των καταγραφών. Υπολογίζεται η συνδιακύμανση (cross-covariance) R κάθε συνιστώσας (i) κάθε υπόγειου οργάνου (z), ως προς την αντίστοιχη συνιστώσα του επιφανειακού (x), σε συνάρτηση με τη χρονική υστέρηση τ του υπόγειου. Οι συνιστώσες των στραμμένων υπόγειων οργάνων (z) σχετίζονται με τις αντίστοιχες «ορθές» συνιστώσες (y) μέσω του μητρώου μετασχηματισμού (T). Αυτή η διαδικασία γίνεται επαναληπτικά για πολλές τιμές της χρονικής υστέρησης τ και του σφάλματος στη γωνία προσανατολισμού κάθε συνιστώσας (α, β, γ). Τελικά ως λύση του προβλήματος επιλέγονται οι τιμές αυτές για τις οποίες μεγιστοποιείται το άθροισμα S των συνδιακυμάνσεων για κάθε ζεύγος σταθμών και άρα και η μεταξύ των συνιστωσών συσχέτιση (βλ. Εξισώσεις 2, 3).

$$S(\alpha, \beta, \gamma, \tau) = \sum_{i=1}^3 R_{x_i z_i}(\tau) = \sum_{i=1}^3 E[(x_i(t) - \bar{x}_i)(z_i(t + \tau) - \bar{z}_i)] = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 t_{ij} R_{x_i y_j}(\tau) \quad (2)$$

όπου

$$R_{x_i y_j}(\tau) = E[(x_i(t) - \bar{x}_i)(y_j(t + \tau) - \bar{y}_j)] \quad (3)$$

Βασική προϋπόθεση κατά τους συγγραφείς αποτελεί το να βρίσκονται τα όργανα αρκετά κοντά ώστε να μπορεί να θεωρηθεί απολύτως συσχετισμένη (coherent) η διάδοση των κυμάτων μεταξύ των δύο σημείων. Επιπρόσθετα, αφενός μεν επειδή αυτό είναι ευδιάκριτο στις χαμηλές συχνότητες, και αφετέρου επειδή αναζητείται η μέγιστη *θετική* συσχέτιση, οι χρησιμοποιούμενες καταγραφές πρέπει να υπόκεινται σε φίλτρο που να αντιστοιχεί στην ιδιοσυχνότητα της μεταξύ των δύο σταθμών εδαφικής στήλης. Η διαδικασία αυτή έχει ως αποτέλεσμα να χρησιμοποιούνται οι συχνότητες έως τη συχνότητα του θεμελιώδους συντονισμού του αντίστοιχου φασματικού λόγου.

## Εφαρμογή

Στην προκειμένη περίπτωση θεωρείται πως η απόκλιση στον προσανατολισμό των υπόγειων επιταχυνσιογράφων έγκειται σε στροφή ως προς την κατακόρυφη συνιστώσα και άρα θεωρείται πως υπάρχει μόνο μία άγνωστη γωνία (α), κατά την οποία έχει στραφεί το σύστημα των οριζόντιων αξόνων. Για τον έλεγχο αυτόν χρησιμοποιήθηκαν 33 καταγραφές στο διάστημα από την έναρξη λειτουργίας το 2002 έως τον Ιούνιο 2005 και 18 καταγραφές μεταξύ Αυγούστου 2005 έως και το 2007. Οι Yamazaki et al. (1992) χρησιμοποίησαν 3 καταγραφές στην περίπτωση μελέτης κατακορύφου δικτύου, όπου όμως τα βάθη ήταν μικρότερα (μέγιστο βάθος του Y-array των αυγγραφέων: 89μ, έναντι 178μ στο CORSSA).

Κάθε καταγραφή διορθώθηκε ως προς τη γραμμή αναφοράς και στη συνέχεια εφαρμόστηκε φίλτρο αντίστοιχο με την ιδιοσυχνότητα του μέρους της εδαφικής στήλης που παρεμβάλλεται ανάμεσα στο εκάστοτε όργανο και στο επιφανειακό. Οι διαδικασίες αυτές έγιναν με τον κώδικα SAC2000 (Goldstein et al., 2003) και στη συνέχεια οι διορθωμένες πλέον χρονοϊστορίες χρησιμοποιήθηκαν ως δεδομένα για τον κώδικα MATLAB (2008). Για κάθε σεισμό, οι οριζόντιες συνιστώσες στην επιφάνεια χρησιμοποιήθηκαν ως αναφορά και οι συνιστώσες σε κάθε βάθος ξεχωριστά στράφηκαν ανά 1° από -180° έως +180°, έως ότου βρέθηκε η γωνία στροφής που μεγιστοποιούσε τη συσχέτιση μεταξύ των δύο οργάνων.

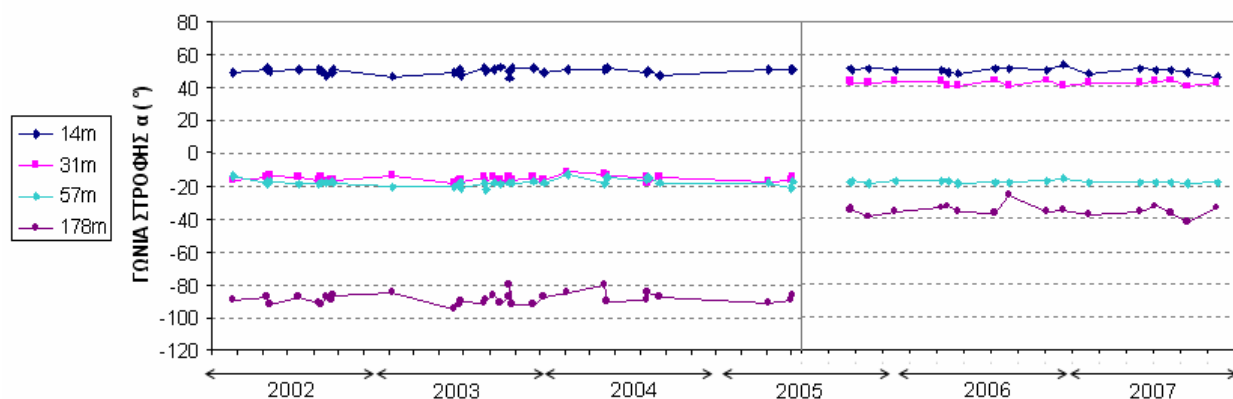
Οι καταγραφές που χρησιμοποιήθηκαν και τα αποτελέσματα της στροφής φαίνονται στους Πίνακες 1α και 1β και στο Σχήμα 3. Τα στοιχεία των σεισμών ελήφθησαν από το σεισμικό κατάλογο του Γεωδυναμικού Ινστιτούτου του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών.

**Πίνακας 1α.** Στοιχεία καταγραφών περιόδου 2002-2005.

Α/Α	ΚΩΔ.	ΕΤΟΣ	ΜΗΝ.	ΗΜ.	Hour	Sec	Msec	N (°)	E (°)	h (km)	ML	Re (km)	ΓΩΝΙΑ ΣΤΡΟΦΗΣ (°)			
													14m	31m	57m	178m
1	Ci007	2002	MAY	21	20	53	30.8	36.57	24.31	97	5.1	313	49	-16	-14	-89
2	Cn003	2002	JUL	28	14	33	44.7	37.62	22.65	74	4.0	100	51	-15	-19	-88
3	Cn004	2002	JUL	28	17	16	30.7	37.95	20.73	19	4.9	141	52	-15	-17	-88
4	Cn009	2002	AUG	3	8	43	57.6	37.84	20.94	38	4.3	126	50	-14	-17	-92
5	Cp004	2002	SEP	30	19	58	12.5	37.79	21.13	16	4.2	112	51	-15	-19	-88
6	Cq011	2002	NOV	6	9	12	46.2	37.95	20.68	14	4.7	146	51	-16	-19	-91
7	Cr003	2002	NOV	13	21	55	44	38.44	22.04	20	3.2	24	50	-15	-18	-92
8	Cr008	2002	NOV	23	1	14	30.4	37.99	22.56	28	4.0	60	48	-17	-18	-88
9	Cr017	2002	DEC	2	4	58	56.4	37.80	21.15	17	5.3	110	49	-16	-17	-89
10	Cr020	2002	DEC	3	0	38	57.2	37.82	21.11	14	4.1	112	51	-16	-18	-87
11	Ct009	2003	APR	3	16	31	26.2	38.38	21.96	16	3.4	20	47	-14	-20	-85
12	Da001	2003	AUG	3	16	54	20.7	38.42	22.39	12	3.8	38	49	-18	-20	-95
13	Da004	2003	AUG	14	5	14	53.9	38.79	20.56	12	5.9	166	51	-17	-18	-93
14	Da007	2003	AUG	14	12	18	15.0	38.76	20.67	8	5.1	155	50	-16	-18	-90
15	Da009	2003	AUG	14	16	18	3.9	38.76	20.67	9	5.2	155	48	-17	-21	-90
16	Db016	2003	SEP	30	16	46	11.6	37.97	21.80	10	4.0	46	52	-15	-18	-91
17	Db017	2003	SEP	30	16	51	6.8	37.96	21.80	2	3.6	47	50	-17	-22	-89
18	Dc003	2003	OCT	17	12	57	8.7	35.96	22.25	37	5.3	294	51	-15	-18	-87
19	Dc023	2003	OCT	31	2	33	10.8	38.33	21.82	16	4.0	27	53	-16	-19	-91
20	Dc033	2003	NOV	16	7	22	49.7	38.27	20.34	8	4.8	174	50	-17	-18	-88
21	Dc039	2003	NOV	18	18	32	16.4	38.41	22.00	13	4.1	21	46	-15	-18	-80
22	Dc041	2003	NOV	23	5	36	44.2	38.00	21.07	12	4.0	106	52	-16	-18	-92
23	Dc052	2004	JAN	2	19	23	57.5	37.75	21.61	14	3.9	80	52	-15	-17	-92
24	Dc069	2004	JAN	23	3	12	22.9	38.28	22.08	21	3.1	3	49	-16	-18	-88
25	Dd016	2004	MAR	13	0	7	9.6	38.03	21.91	5	3.4	33	51	-11	-13	-85
26	Dk001	2004	MAY	24	0	3	1.9	38.35	22.24	24	3.5	20	51	-13	-19	-80
27	Dk003	2004	MAY	30	6	59	8	37.09	21.50	17	4.6	160	52	-14	-15	-90
28	DI024	2004	AUG	15	23	23	51.3	38.43	21.96	17	3.4	25	49	-15	-16	-89
29	DI027	2004	AUG	18	14	38	59.4	38.55	21.91	24	3.9	41	50	-19	-15	-85
30	Dm010	2004	SEP	9	9	57	41.1	38.16	22.10	6	3.1	13	48	-15	-18	-88
31	Dp002	2005	APR	16	18	6	0.5	38.26	21.97	21	3.1		51	-17	-18	-91
32	Dp029	2005	MAY	29	8	55	35.8	38.26	22.73	104	4.4	66	51	-16	-21	-89
33	Dp031	2005	JUN	3	2	56	19.2	38.37	21.98	16	3.3	17	51	-15	-17	-87
<b>ΓΩΝΙΑ ΣΤΡΟΦΗΣ</b>													<b>50.2</b>	<b>-15.6</b>	<b>-17.9</b>	<b>-88.7</b>
<b>ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ</b>													<b>1.6</b>	<b>1.5</b>	<b>1.9</b>	<b>3.2</b>

Πίνακας 1β. Στοιχεία καταγραφών περιόδου 2005-2007.

Α/Α	ΚΩΔ.	ΕΤΟΣ	ΜΗΝ.	ΗΜ.	Hour	Sec	Msec	N (°)	E (°)	h (km)	ML	Re (km)	ΓΩΝΙΑ ΣΤΡΟΦΗΣ (°)			
													14m	31m	57m	178m
1	Du010	2005	OCT	18	15	25	59.5	37.58	20.86	22	5.6	150	51	43	-18	-35
2	Du011	2005	OCT	18	15	36	23.5	37.74	20.98	25	4.7	129	50	42	-17	-34
3	Du012	2005	OCT	18	18	43	11.5	37.60	20.93	13	4.4	143	50	42	-17	-35
4	Eg009	2005	NOV	20	17	56	41.7	38.42	21.87	17	3.8	29	51	42	-19	-39
5	Fo003	2006	JAN	8	11	34	54	36.21	23.41	69	6.4	295	50	43	-17	-36
6	Fo069	2006	APR	3	0	49	44.76	37.53	20.93	25	4.8	0	50	43	-17	-34
7	Fo086	2006	APR	15	21	15	11.4	37.64	21.00	15	4.8	134	49	41	-17	-33
8	Fo101	2006	MAY	5	6	16	8.9	38.28	22.63	22	4.3	56	48	41	-19	-36
9	Fu005	2006	JUL	12	13	35	12.4	38.35	22.26	17	3.7	22	51	44	-18	-37
10	Fu025	2006	AUG	11	23	27	23.1	38.31	22.59	21	3.8	52	51	41	-18	-26
11	Fu061	2006	OCT	19	12	35	26.6	37.84	21.91	11	3.6	56	50	44	-17	-36
12	Fu102	2006	NOV	24	9	3	24.5	38.32	22.04	17	3.5	9	53	41	-16	-35
13	Gc021	2007	JAN	10	14	15	21.6	38.38	22.04	21	3.5	16	48	42	-18	-38
14	Gs063	2007	APR	10	7	13	4.0	38.53	21.66	10	4.4	54	51	42	-18	-36
15	Gs101	2007	MAY	7	1	34	42.8	37.62	21.08	16	4.6	129	50	43	-18	-33
16	Gs122	2007	JUN	5	11	50	19.8	38.54	21.62	21	4.7	58	50	44	-18	-37
17	Gt013	2007	JUL	6	19	1	47.2	38.19	22.63	27	4.1	56	49	40	-19	-42
18	Gw004	2007	AUG	28	9	5	33.4	37.73	21.65	59	4.2	80	46	42	-18	-34
<b>ΓΩΝΙΑ ΣΤΡΟΦΗΣ</b>													<b>49.9</b>	<b>42.2</b>	<b>-17.7</b>	<b>-35.3</b>
<b>ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ</b>													<b>1.5</b>	<b>1.2</b>	<b>0.8</b>	<b>3.2</b>



**Σχήμα 3.** Γράφημα της απαιτούμενης γωνίας στροφής των οριζοντίων συνιστωσών για κάθε βάθος και για κάθε σεισμό που μελετήθηκε, για την πρώτη και δεύτερη περίοδο λειτουργίας του δικτύου. Φαίνεται πως ο προσανατολισμός στα βάθη 14μ και 57μ παραμένει ίδιος, ενώ για τα βάθη 31μ και 178μ μεταβάλλεται.

Από τα αποτελέσματα φαίνεται πως ο προσανατολισμός στα βάθη 14μ και 57μ παραμένει ίδιος καθ' όλη τη διάρκεια λειτουργίας του δικτύου, ενώ στα βάθη 31μ και 178μ μεταβάλλεται. Η τυπική απόκλιση των αποτελεσμάτων είναι πολύ μικρή, περίπου από  $\pm 0.8^\circ$  έως  $\pm 3.2^\circ$ , με τη μέγιστη απόκλιση για το βαθύτερο όργανο (178μ).

Από τα αποτελέσματα προκύπτουν οι ορθοί προσανατολισμοί σε σχέση με αυτόν του επιφανειακού οργάνου και τις προσδιορισθείσες γωνίες στροφής. Έτσι, τελικά οι προσανατολισμοί των οργάνων του δικτύου CORSSA είναι οι εξής.

**Πίνακας 2.** Τελικοί προσανατολισμοί των οργάνων του δικτύου CORSSA..

Βάθος	2002 έως Ιούνιος 2005		Αύγουστος 2005 - εξής	
	x	y	x	y
0μ	N090°	N000°	N090°	N000°
14μ	N140°	N050°	N140°	N050°
31μ	N074°	N344°	N132°	N042°
57μ	N072°	N342°	N072°	N342°
178μ	N001°	N271°	N055°	N325°

## ΕΠΙΡΡΟΗ ΤΟΠΙΚΩΝ ΕΔΑΦΙΚΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ - ΕΝΟΡΓΑΝΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

### Γενικά

Επιλέχθηκαν και μελετήθηκαν 19 σεισμικοί με τοπικά μεγέθη από M3.1 έως M5.3 που καταγράφηκαν ταυτόχρονα ανάντη και κατόντη του πρσανού, στις θέσεις ΟΤΕ και CORSSA. Οι καταγραφές στράφηκαν έτσι ώστε να προσανατολισθούν παράλληλα (N010°) και κάθετα (N100°) στη διεύθυνση του πρσανού. Οι σεισμοί που χρησιμοποιήθηκαν φαίνονται στον Πίνακα 3, μαζί με τις παραμέτρους τους όπως προέκυψαν από τον κατάλογο του Γεωδυναμικού Ινστιτούτου.

**Πίνακας 3.** Στοιχεία γεγονότων που καταγράφηκαν ταυτόχρονα σε ΟΤΕ και CORSSA και που χρησιμοποιήθηκαν για τις αναλύσεις με εμπειρικές μεθόδους.

A/A	ΚΩΔ.	ΕΤΟΣ	ΜΗΝ.	ΗΜ.	Hour	Sec	Msec	N (°)	E (°)	h (km)	ML	Re (km)
1	Ci018	2002	JUN	18	22	21	21.3	38.37	22.10	5	3.1	15
2	Ci025	2002	JUL	7	5	30	44.5	38.28	22.16	18	3.3	9
3	Cn004	2002	JUL	28	17	16	30.7	37.95	20.73	19	4.9	141
4	Cn017	2002	AUG	14	22	51	35.7	38.49	22.03	18	3.7	30
5	Cq001	2002	OCT	13	14	51	46.5	37.92	22.06	5	3.7	43
6	Cr008	2002	NOV	23	1	14	30.4	37.99	22.56	28	4.0	60
7	Cr017	2002	DEC	2	4	58	56.4	37.80	21.15	17	5.3	110
8	Ct009	2003	APR	3	16	31	26.2	38.38	21.96	16	3.4	20
9	Dc023	2003	OCT	31	2	33	10.8	38.33	21.82	16	4.0	27
10	Dc037	2003	NOV	17	0	26	30.2	38.29	22.13	17	3.3	7
11	Dc039	2003	NOV	18	18	32	16.4	38.41	22.00	13	4.1	21
12	Dc072	2004	JAN	23	12	47	58.3	38.58	21.28	10	3.3	90
13	Dd016	2004	MAR	13	0	7	9.6	38.03	21.91	5	3.4	33
14	De002	2004	MAR	22	3	9	52.5	38.31	22.15	5	3.1	10
15	Dk001	2004	MAY	24	0	3	1.9	38.35	22.24	24	3.5	20
16	Dk018	2004	JUN	10	2	11	33.1	38.29	22.08	5	3.2	4
17	DI006	2004	JUL	14	18	12	29.2	37.87	21.87	11	3.6	54
18	Dp002	2005	APR	16	18	6	0.5	38.26	21.97	21	3.1	11
19	Dp031	2005	JUN	3	2	56	19.2	38.37	21.98	16	3.3	17

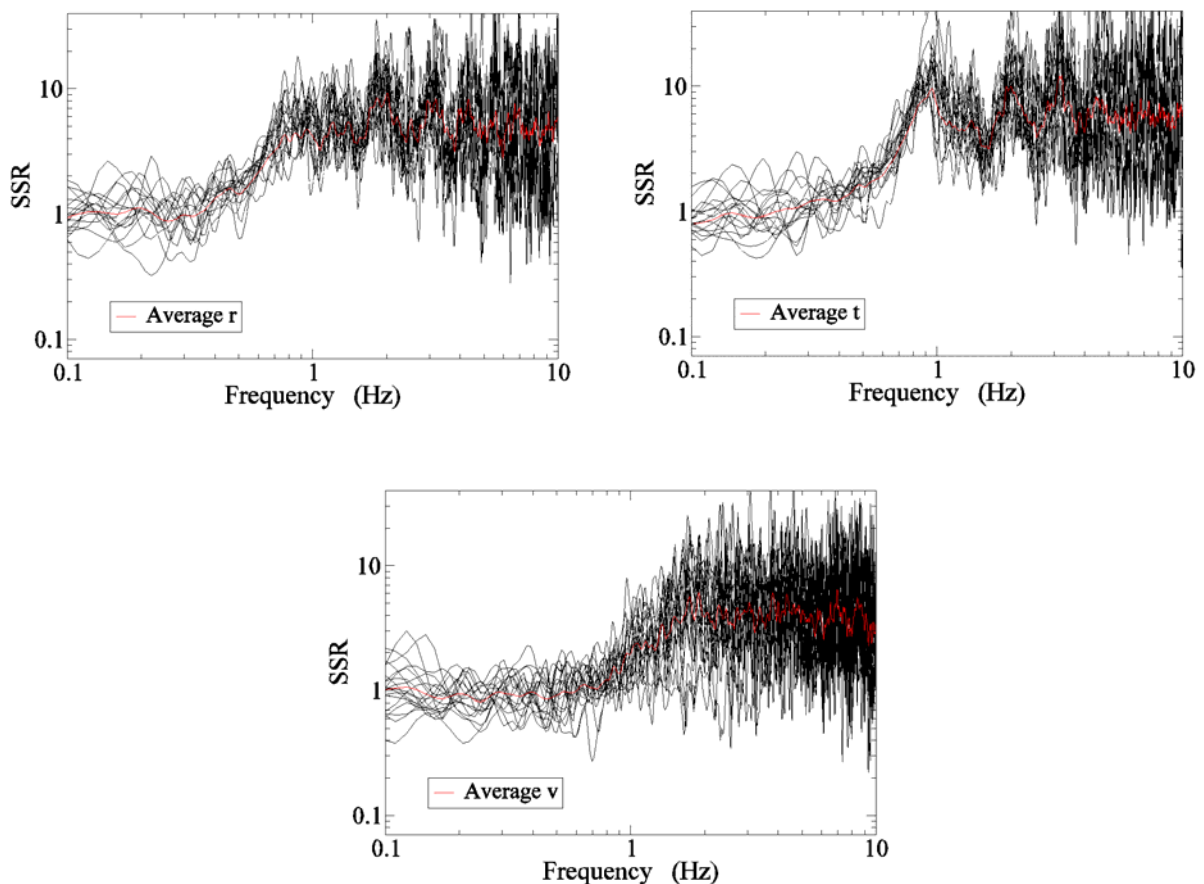
### Εμπειρικοί λόγοι SSR και HVSR στη θέση CORSSA

Ο κλασικός φασματικός λόγος υπολογίστηκε για το κατακόρυφο δίκτυο CORSSA διαιρώντας την εδαφική κίνηση (φάσμα Fourier) σε κάθε βάθος με την κίνηση στο βάθος των 178μ (στο κροκαλοπαγές), θεωρώντας την ως αναφορά. Η κίνηση αναλύεται σε παράλληλη (t) και



κάθετη ( $r$ ) ως προς το πρηνές ( $t$ -transverse και  $r$ -radial αντίστοιχα) και επομένως και ως προς το πλευρικό όριο της λεκάνης του Κορινθιακού Κόλπου που περιλαμβάνει τα ιζήματα.

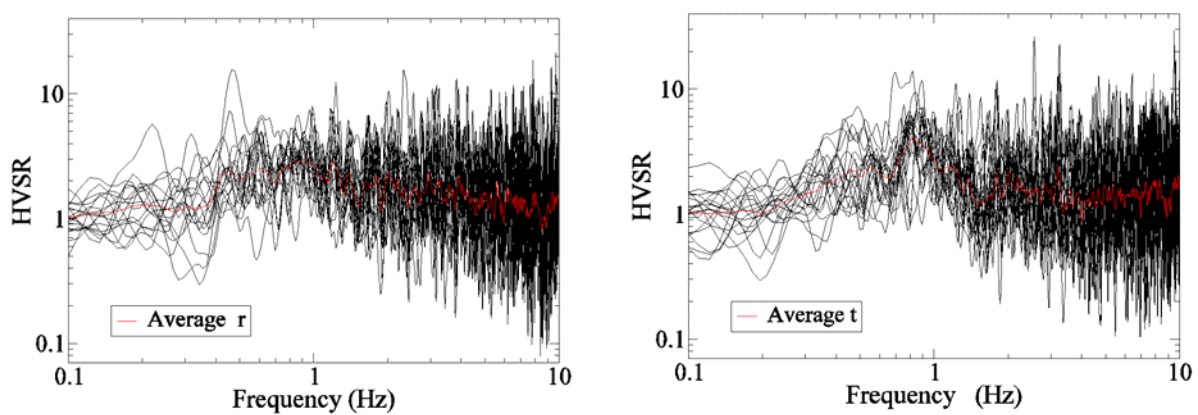
Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4, τα αποτελέσματα του λόγου SSR για όλες τις καταγραφές μαζί με το μέσο όρο τους στις δύο οριζόντιες συνιστώσες παρουσιάζουν διαφορές. Η παράλληλη συνιστώσα ( $t$ ) παρουσιάζει σαφή αιχμή ενίσχυσης της τάξης του 8.0 στη συχνότητα 0.9-1.0Hz, που είναι και η ιδιοσυχνότητα ολόκληρης της εδαφικής στήλης της υπερκείμενης του κροκαλοπαγούς (Apostolidis et al., 2005). Αντίθετα, η κάθετη στο ρήγμα συνιστώσα ( $r$ ) δεν επιτρέπει την εξαγωγή σαφούς συμπεράσματος ως προς την ιδιοσυχνότητα. Η δεύτερη αιχμή που παρουσιάζουν και οι δύο συνιστώσες στα 2.0Hz αντιστοιχεί σε μέρος της εδαφικής στήλης όπου η αντίθεση ταχυτήτων των εδαφικών στρώσεων είναι σημαντική. Η κατακόρυφη συνιστώσα μέχρι το 1.0Hz δεν παρουσιάζει καμία ενίσχυση, ενώ, μετά τα 2Hz η ενίσχυσή της παραμένει σταθερή και ίση περίπου με 2.5.



**Σχήμα 4.** Εμπειρικοί λόγοι SSR (0m) στη θέση CORSSA για τους 19 σεισμούς και μέσος όρος τους για τις 3 συνιστώσες.

Το Σχήμα 5 παρουσιάζει παρομοίως τα αποτελέσματα του λόγου HVSR για τις δύο οριζόντιες συνιστώσες. Όπως είναι αναμενόμενο, οι τιμές του λόγου (πλάτη) είναι μικρότερες από αυτές του λόγου SSR. Παρατηρείται εκ νέου –σε μικρότερο όμως βαθμό– πως η παράλληλη συνιστώσα ( $t$ ) παρουσιάζει σαφέστερη αιχμή στη συχνότητα 0.9-1.0Hz (με πλάτος ενίσχυσης περί το 4.5) σε σχέση με την κάθετη ( $r$ ).

Κατά την έννοια της εδαφικής τομής B-N του Σχήματος 1, η παράλληλη συνιστώσα (t) αντιστοιχεί σε κύματα τύπου SH, ενώ αντίστοιχα η κάθετη (r) αντιστοιχεί σε κύματα μορφής SV, που δημιουργούν επίσης κύματα P φθάνοντας στα όρια των αποθέσεων. Οι Jongmans and Campillo (1993) μελέτησαν λεκάνη με αποθέσεις μήκους 500μ και βάθους 70μ και οι εμπειρικοί λόγοι που εξήγαγαν έδειξαν διαφορές ανάμεσα στις δύο οριζόντιες συνιστώσες. Η φασματική ενίσχυση στην αντίστοιχη SH κίνηση υπερβαίνει αυτήν της αντίστοιχης κίνησης SV. Η διαφορά αυτή θα μπορούσε να αποδοθεί στο ότι η κίνηση SH είναι παράλληλη προς τα γεωλογικά όρια της «λεκάνης» και γίνεται ανεμπόδιστα μέσα στο ίδιο υλικό, ενώ η κίνηση SV περιορίζεται από τα πλευρικά όρια της λεκάνης. Ταυτόχρονα, η πρόσπτωση στα όρια των κυμάτων SH δε δημιουργεί κίνηση κατά τη διαμήκη έννοια ώστε να απωλέσει έτσι ενέργεια, όπως συμβαίνει με τα κύματα SV.

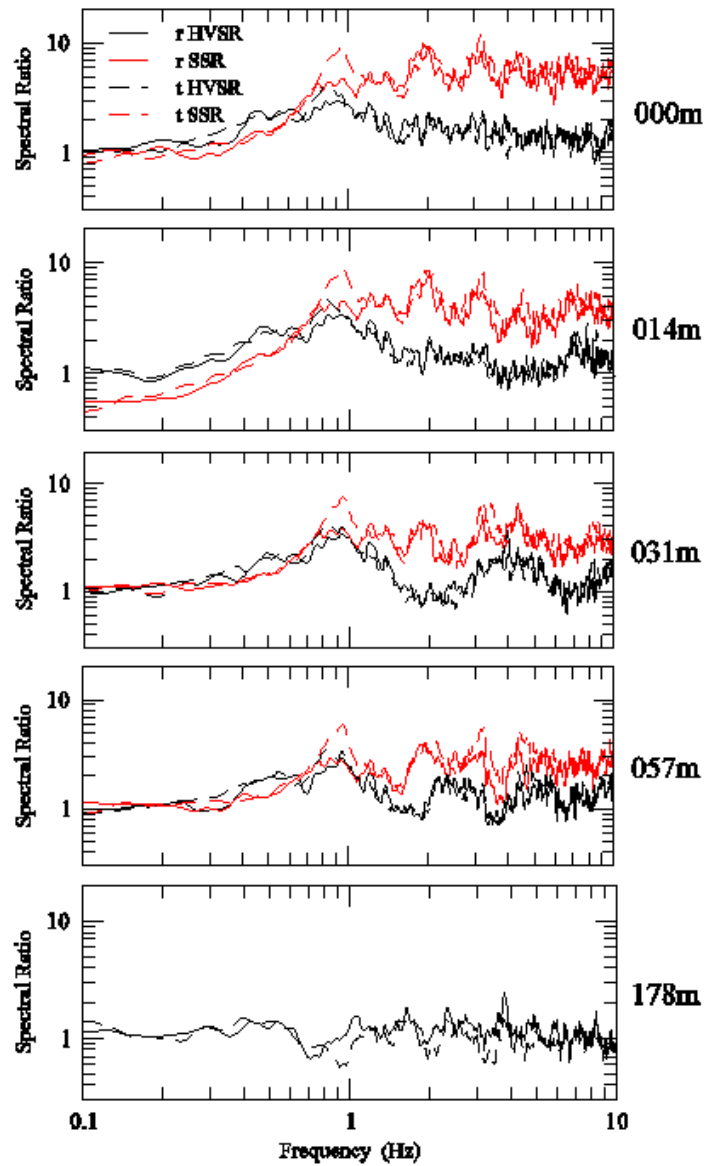


**Σχήμα 5.** Εμπειρικοί λόγοι HVSr (0m) στη θέση CORSSA για τους 19 σεισμούς και μέσος όρος τους για τις 2 συνιστώσες

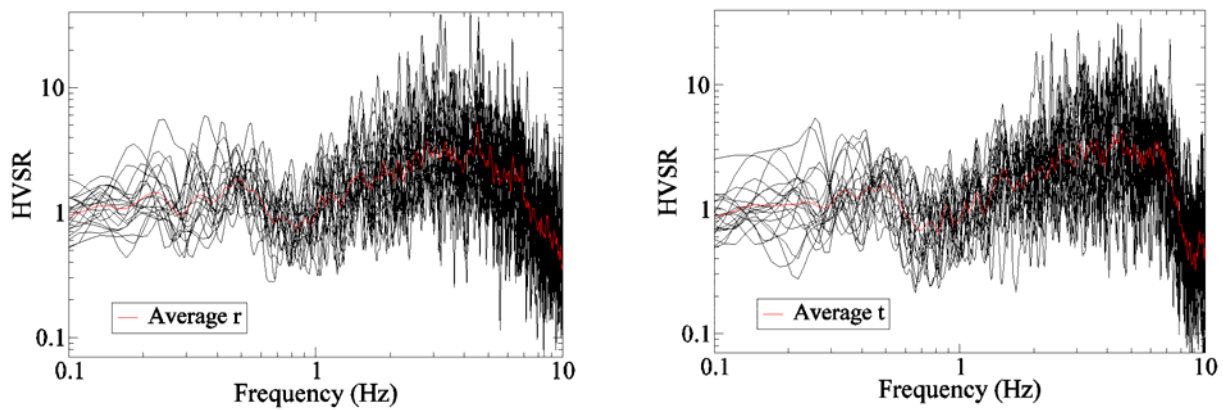
Στο Σχήμα 6 φαίνονται οι μέσοι φασματικοί λόγοι SSR και HVSr συγκριτικά για όλα τα βάθη όπου υπάρχουν εγκατεστημένα όργανα. Οι παρατηρήσεις που έγιναν για το επιφανειακό όργανο και για τις συνιστώσες r και t ισχύουν επίσης για όλα τα υπόλοιπα βάθη έως τα 57μ. Η συχνότητα του θεμελιώδους συντονισμού μετακινείται εδαφώς μέχρι το 1.0Hz έως τα 57μ, ενώ το πλάτος ενίσχυσης δε μειώνεται βαθμιαία, διότι η κύρια εμπέδηση βρίσκεται μεταξύ αυτού του βάθους και του κροκαλοπαγούς (υλικά D και E στο Σχήμα 1). Στο βάθος των 178μ παρατηρείται μείωση του πλάτους μεταξύ 0.7-0.9Hz που ενδεχομένως οφείλεται σε συμβολή ανερχομένων και κατερχομένων κυμάτων που εγκλωβίζονται μεταξύ ελεύθερης επιφάνειας και επιφάνειας αποθέσεων/υποβάθρου.

### Εμπειρικός λόγος HVSr στη θέση ΟΤΕ

Υπολογίσθηκε επίσης ο φασματικός λόγος για τη θέση ΟΤΕ διαιρώντας την οριζόντια κίνηση στην επιφάνεια ως προς την κατακόρυφη. Δεν παρατηρείται κάποια σαφής και χωρίς αμφισβήτηση αιχμή μεταξύ των συχνοτήτων 3.0-7.0Hz, παρ' ότι είναι δεδομένο πως η συχνότητα συντονισμού της εδαφικής στρώσης που υπέρκειται του κροκαλοπαγούς αντιστοιχεί στα 5.5Hz (ο υπολογισμός έγινε κατά Kennet, 1983).



**Σχήμα 6.** Εμπειρικοί λόγοι SSR, HVSR για τις δύο συνιστώσες (μέσος όρος) σε όλα τα βάθη του δικτύου CORSSA.



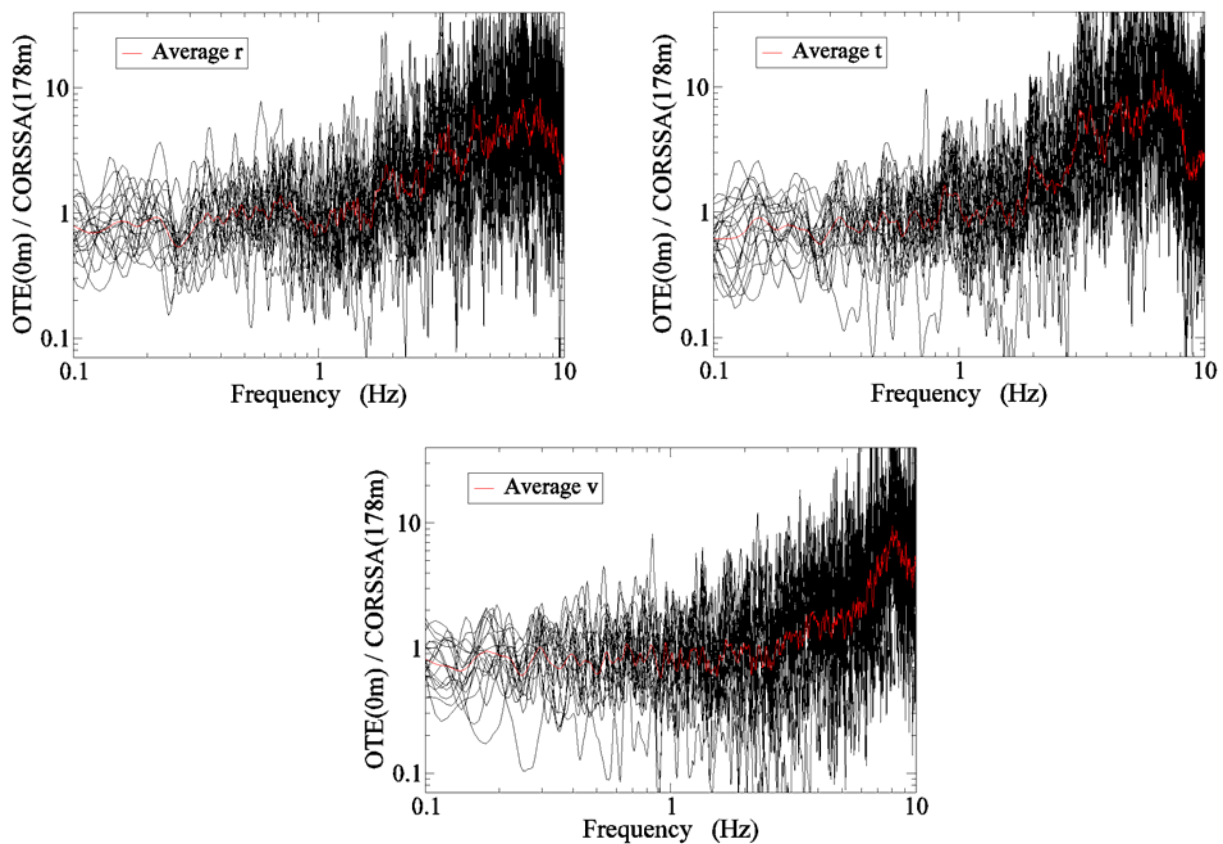
**Σχήμα 7.** Εμπειρικοί λόγοι HVSR στη θέση ΟΤΕ (0μ) για τους 19 σεισμούς και μέσος όρος τους για τις

2 συνιστώσες.

### SSR μεταξύ των δύο θέσεων (OTE και CORSSA -178μ)

Ο φασματικός λόγος SSR υπολογίσθηκε διαιρώντας την κίνηση στην επιφάνεια της θέσης OTE με την κίνηση σε βάθος 178μ (στάθμη του ημίβραχου) της θέσης CORSSA. Η έρευνα αυτή αποσκοπεί στην διερεύνηση του κατά πόσο ο σταθμός OTE διαθέτει ορισμένα βασικά χαρακτηριστικά ενός σταθμού αναφοράς, όπως είναι ο σταθμός CORSSA (178m). Υπενθυμίζεται ότι ο μεν πρώτος βρίσκεται στην επιφάνεια μικρού πάχους επιφανειακής στρώσης σχετικά υψηλής δυσστησίας, ενώ ο δεύτερος βρίσκεται σε ικανό βάθος μέσα στο κροκαλοπαγές (Σχήμα 1).

Οι φασματικοί λόγοι δείχνουν πως μέχρι τα 3.0Hz τουλάχιστον η ενίσχυση της κίνησης είναι αμελητέα. Στην συνέχεια οι διαφορές είναι μεν υπαρκτές (κυρίως στα πλάτη και στις αντίστοιχες συχνότητες), η γενική μορφή όμως είναι παραπλήσια. Παρατηρείται επίσης πως ο λόγος OTE(0m) / CORSSA (178μ) ομοιάζει στη μορφή με το λόγο HVSR στη θέση OTE, αλλά έχει μεγαλύτερα πλάτη ενίσχυσης, κάτι που ήταν αναμενόμενο. Γενικά φαίνεται ότι η σεισμική κίνηση από το κροκαλοπαγές σε βάθος -178m μέχρι την επιφάνεια, στα ανάντη του ρήγματος -όπου η στρώση του κροκαλοπαγούς συναντάται πολύ κοντά στην επιφάνεια (βλ. Σχήμα 1)-, δεν μεταβάλλεται θεαματικά.



**Σχήμα 8.** Εμπειρικοί λόγοι (μέσος όρος) μεταξύ της επιφάνειας στη θέση OTE (0m) και του σταθμού στο κροκαλοπαγές στη θέση CORSSA (178m) για τις 3 συνιστώσες.

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Χρησιμοποιώντας τη μεθοδολογία των Yamazaki et al. (1992) με τον υπολογισμό της μέγιστης συσχέτισης, προσδιορίστηκαν οι προσανατολισμοί όλων των υπόγειων οργάνων του κατακόρυφου δικτύου CORSSA σε σχέση με το επιφανειακό, για τις δύο περιόδους λειτουργίας του. Οι προσανατολισμοί χρησιμοποιήθηκαν για να στραφούν κατάλληλα οι διαθέσιμες καταγραφές σε σχέση με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του πλευρικού ορίου αποθέσεων-κροκαλοπαγούς (N100°). Οι καταγραφές από το δίκτυο χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό εμπειρικών φασματικών λόγων SSR και HVSR, από τους οποίους προέκυψε πως η παράλληλη στο όριο συνιστώσα (t) ενισχύεται περισσότερο από την κάθετη σε αυτό (r), κάτι που αντιστοιχεί σε ενισχυμένη κίνηση SH σε σχέση με την κίνηση SV. Παρόμοιο αποτέλεσμα έχει βρεθεί από τους Jongmans and Campillo (1993). Τα αποτελέσματα αναδεικνύουν μια σειρά θεμάτων, με προεξάρχουσα την αναγκαιότητα αριθμητικής προσομοίωσης τόσο με προσπίπτοντα κύματα SH όσο και με κύματα P-SV, προκειμένου να ελεγχθεί εάν μπορούν να επαναληφθούν και θεωρητικά, να διερευνηθούν θέματα επιρροής της τοπογραφίας και της γεωμετρίας στα όρια ιζηματογενών λεκανών και να προταθούν συντελεστές ενίσχυσης.

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η εγκατάσταση του πεδίου CORSSA και οι έρευνες και αναλύσεις που παρουσιάζονται έχουν συγχρηματοδοτηθεί μερικώς από τα ευρωπαϊκά ερευνητικά προγράμματα CORSEIS (EVG1-1999-00002), NEMISREF (G1RD-CT-2002-00702) και LESSLOSS (GOCE-CT-2003-505448), καθώς και από το πρόγραμμα XSOILS της Γενικής Γραμματείας Έρευνας και Τεχνολογίας (DP 23). Η Ο. Κτενίδου επιθυμεί να αναγνωρίσει τη στήριξη από μέρους του προγράμματος υποτροφιών εσωτερικού του Ιδρύματος Προποντίς. Η Σ. Αρναούτη επιθυμεί να αναγνωρίσει τη στήριξη από μέρους του προγράμματος υποτροφιών εσωτερικού του ΙΚΥ.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Apostolidis P., Raptakis D, Pandi K., Manakou M., and Pitilakis K., (2005), "Definition of subsoil structure and preliminary ground response in Aigion city (Greece) using microtremor and earthquakes", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 26, pp. 922 - 940.
- Bard P.-Y. (1999), "Local effects on strong ground motion: Physical basis and estimation methods in view of microzoning studies". Proc. of Advanced Study Course in 'Seismotectonic and Microzonation techniques in Earthquake engineering, Kefalonia, Greece.
- Kennet, B.L.N. (1983), "Seismic wave propagation in stratified media", Cambridge University Press.
- Lermo J., and Chávez-García F.-J., "Site effect evaluation using spectral ratios with only one station", *Bull. Seismol. Soc. Amer.*, (1993), 83(5), pp. 1574-1594.
- Goldstein, P., D. Dodge, M. Firpo, Lee Minner (2003) "SAC2000: Signal processing and analysis tools for seismologists and engineers, Invited contribution to "The IASPEI International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology", Edited by WHK Lee, H. Kanamori, P.C. Jennings, and C. Kisslinger, Academic Press, London.
- Jongmans D., and Campillo M., (1993), "The response of the Ubye Valley (France) for incident SH and SV waves: Comparison between measurements and modelling", *Bull. Seismol. Soc. Amer.*, 83(3), pp. 907 - 924.

Koukouvelas I., and Doutsos T., (1996), "Implications of structural segmentation during earthquakes: the 1995 Aigion earthquake, Gulf of Corinth, Greece", *J. Struct. Geol.*, 18, pp. 1831-1838.

Mathworks, (2008), Matlab R2008A.

Yamazaki F., Lu L., and Katayama T., (1992), "Orientation error estimation of buried seismographs in array observation", *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, 21, pp. 679-694.

Γεωδυναμικό Ινστιτούτο Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών,  
[http://www.gein.noa.gr/services/Noa\\_cat/CAT2003.TXT](http://www.gein.noa.gr/services/Noa_cat/CAT2003.TXT) (20/03/2008).