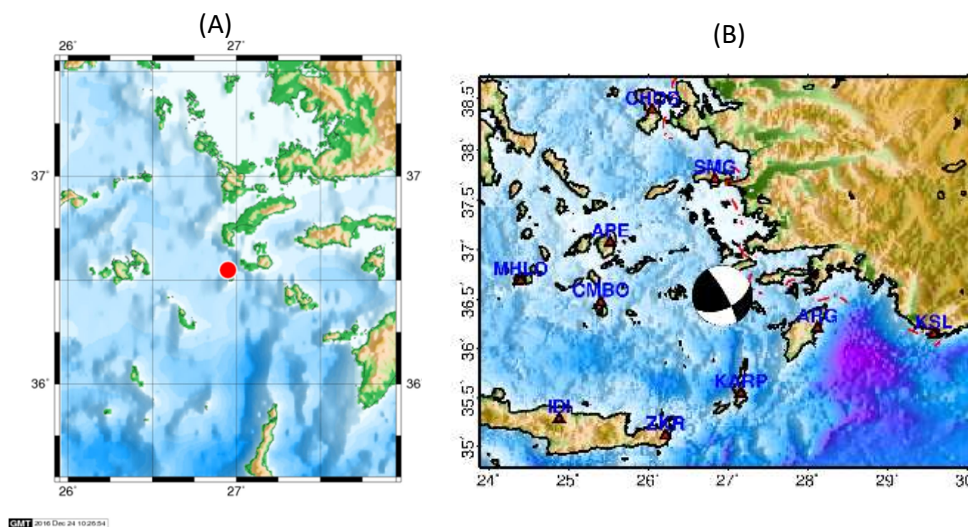


**Παρατηρήσεις επί των καταγραφών του σεισμού της 20^{ης} Δεκεμβρίου 2016, 08:03 στη
θαλάσσια περιοχή της Νισύρου**

Επιμέλεια Δρ. Ι. Καλογεράς & Δρ. Ν.Μελής

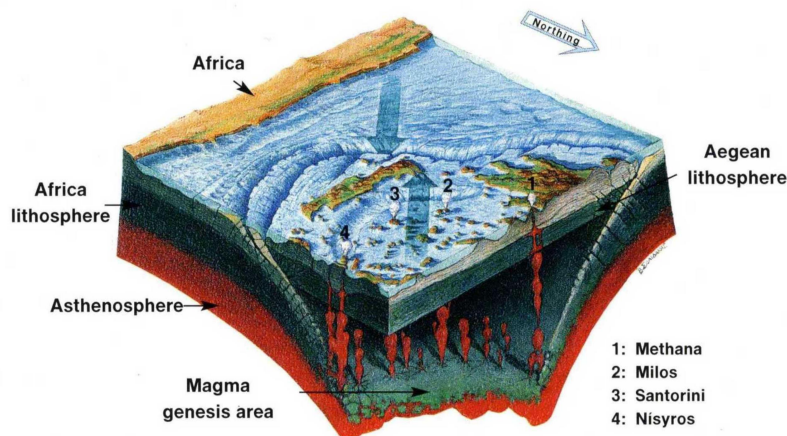
Στις 08:03 τοπική ώρα (06:03 GMT) της 20ης Δεκεμβρίου 2016 σημειώθηκε ισχυρή σεισμική δόνηση μεγέθους $M_L 5.3$ ($M_w 5.2$) και εστιακού βάθους 120 km, με επίκεντρο που εντοπίζεται στην θαλάσσια περιοχή ΔΝΔ της Νισύρου και με γεωγραφικές συντεταγμένες 36.54N 26.93E (Εικόνα 1Α). Ο σεισμός δεν ακολουθήθηκε από σημαντική σεισμική ακολουθία, χαρακτηριστικό γνώρισμα των σεισμών ενδιάμεσου βάθους.



Εικόνα 1. (Α) Το επίκεντρο του σεισμού της 20^{ης} Δεκεμβρίου. (Β) Η επίλυση του μηχανισμού γένεσης δείχνει ένα ρήγμα ανάστροφο με συνιστώσα οριζόντιας μετατόπισης (oblique fault) (πηγή <http://bbnet.gein.noa.gr>, 24/12/2016).

Οι καταγραφές του σεισμού από το εθνικό δίκτυο επιταχυνσιογράφων του Γεωδυναμικού Ινστιτούτου αποτελούν ενδιαφέρον εκπαιδευτικό υλικό σε σχέση με την παρουσία και ανάλυση της κατευθυντικότητας της σεισμικής ενέργειας και τον τρόπο αναγραφής των κυμάτων χώρου για σεισμούς ενδιάμεσου βάθους από τη συγκεκριμένη περιοχή.

Το σεισμοτεκτονικό καθεστώς της ευρύτερης περιοχής της Νισύρου καθορίζεται από την κατάδυση της Αφρικανικής λιθόσφαιρας κάτω από τη μικροπλάκα του Αιγαίου, και ιδιαίτερα το ηφαίστειο της Νισύρου που βρίσκεται στο ανατολικότερο τμήμα του ηφαιστειακού τόξου του νοτίου Αιγαίου (Εικόνα2) (π.χ. Jackson, 1994; Wortel and Spakman, 2000; Fytikas & Vougioukalakis, 2005).



Εικόνα 2. Αναπαράσταση της ζώνης κατάδυσης στην περιοχή του νότιου Αιγαίου από ΒΑ (από Fytikas & Vougioukalakis, 2005)

Πιο συγκεκριμένα, στην παρούσα έκθεση σχολιάζονται οι καταγραφές από τους επιταχυνσιογράφους του εθνικού δικτύου του Γ.Ι. που αποστέλλουν σε πραγματικό χρόνο συνεχή καταγραφή (<https://accelnet.gein.noa.gr>). Διαθέσιμες καταγραφές γύρω από την ευρύτερη περιοχή του epicέντρου και μέχρι επικεντρική απόσταση περίπου 250km, υπάρχουν από τους σταθμούς Νισύρου (NSRA), Καλύμνου (KLNA), Αστυπάλαιας (ASTA), Αμοργού (AMGA), Ρόδου (RODB), Καρπάθου (KRPA), Θήρας (THRA), Ζάκρου (ZKRA), Αγ. Νικολάου Κρήτης (AGNA), Τήνου (TNSA), Γαζίου Ηρακλείου (HERG), Μήλου (MILA), Καστελόριζου (KSLB) και Ρεθύμνου (RTHF). Ο Πίνακας Ι περιλαμβάνει τις μέγιστες τιμές της εδαφικής κίνησης που προκύπτουν μετά την επεξεργασία των καταγραφών (λογισμικό SCREAM και ART εταιρείας Guralp Systems Ltd.). Οι τιμές εδαφικής επιτάχυνσης είναι ιδιαίτερα μικρές (κάτω του 1cm/s^2), με εξαίρεση την Κάρπαθο όπου εμφανίζεται η μέγιστη τιμή της τάξης των 11cm/s^2 και το Ζάκρο με μέγιστη τιμή εδαφικής επιτάχυνσης της τάξης των 2cm/s^2 . Στον πλησιέστερο προς το epicέντρο σταθμό της Νισύρου (epικεντρική απόσταση 20km / υποκεντρική απόσταση 120km) η μέγιστη τιμή εδαφικής επιτάχυνσης είναι της τάξης των $0,4\text{cm/s}^2$.

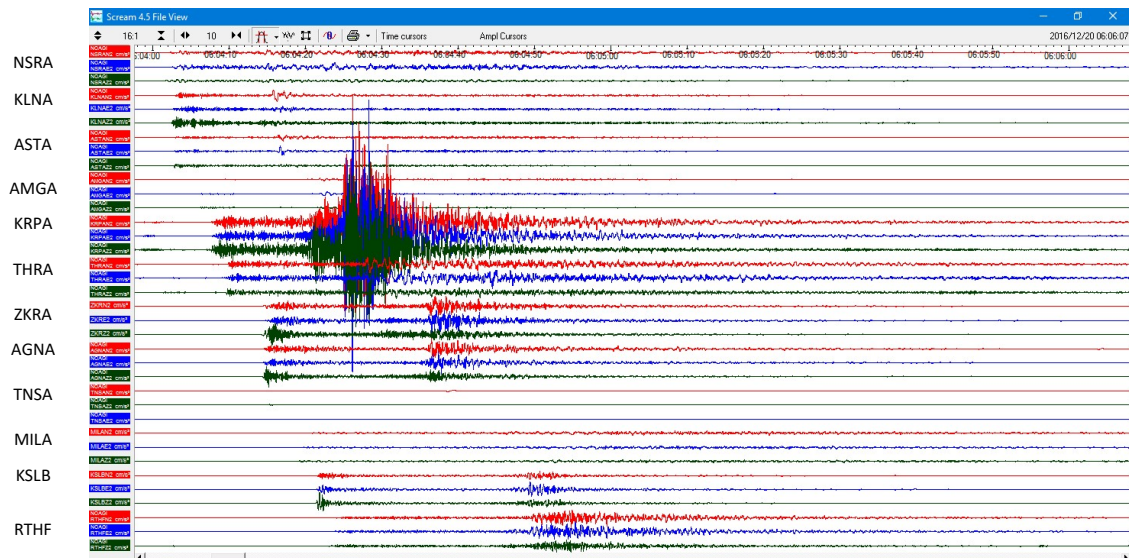
Οι χαμηλές τιμές εδαφικής επιτάχυνσης οφείλονται στο πεδίο μεγάλης απορρόφησης κατά τη διάδοση της σεισμικής ενέργειας στην ευρύτερη περιοχή του νότιου Αιγαίου. Συγκριτικά είναι δυνατόν να αναφερθούν καταγραφές από σεισμούς της ίδιας τάξης μεγέθους με σημαντικά υψηλότερες τιμές εδαφικής επιτάχυνσης ακόμα και σε μεγαλύτερες επικεντρικές αποστάσεις: α) 08/08/2013, 09:06, M5.2, $\text{pga}=56\text{cm/s}^2$ στην Άμφισσα σε απόσταση 30km, β) 09/07/1999, 20:45, M4.9, $\text{pga}=18\text{cm/s}^2$, στα Σεπόλια σε απόσταση 20km, γ) 27/04/2000, 19:03, M5.1, $\text{pga}=80\text{cm/s}^2$ στο Αίγιο, σε απόσταση 13km, δ) 15/02/2016, 18:55, M5.2, $\text{pga}=19\text{cm/s}^2$ στον Πύργο, σε απόσταση 27km.

Στην Εικόνα 3 παρουσιάζονται κατά αύξουσα σειρά επικεντρικής απόστασης οι καταγραφές των 3 συνιστωσών κάθε σταθμού και στην εικόνα 4 ο χάρτης με τις θέσεις των επιταχυνσιογράφων σε σχέση με το epicέντρο. Οι μέγιστες τιμές εδαφικής επιτάχυνσης παρουσιάζονται στο σταθμό της Καρπάθου (προς N), ενώ οι ελάχιστες στους σταθμούς της Αμοργού και της Τήνου (ΒΔ), με μια αναλογία της τάξης του 200:1. Ο πλησιέστερος προς το

ΠΙΝΑΚΑΣ Ι. Μέγιστες τιμές εδαφικής επιτάχυνσης (PGA, cm/s²), εδαφικής ταχύτητας (PGV, cm/s) και εδαφικής μετατόπισης (PGD, cm) για τον σεισμό της 20/12/2016 06:03 (GMT), από την επεξεργασία των διαθέσιμων καταγραφών των επιταχυνσιογράφων και για επικεντρικές αποστάσεις μέχρι περίπου 250km από το επίκεντρο.

STATION CODE	LOCATION	COORDINATES	BLDG	GEOLOGY	EP. DIST	HYP. DIST	N-S	PGA cm/s ²	PGV cm/s	PGD cm	E-W	PGA cm/s ²	PGV cm/s	PGD cm	Z	PGA cm/s ²	PGV cm/s	PGD cm
NSRA	NISYROS	36,61N 27,13E	1-st masonry	andesitic lava	20	123	N0	0,244	0,043	0,009	N90	0,406	0,076	0,025		0,156	0,034	0,009
KLNA	KALYMNOS	36,96N 26,97E	2-st R/C	Limestone/alluvium	43	130	N320	0,535	0,089	0,021	N50	0,334	0,022	0,005		0,504	0,018	0,004
ASTA	ASTYPALAIA	36,54N 26,35E	2-st R/C		52	132	N0	0,295	0,035	0,011	N90	0,418	0,050	0,008		0,194	0,012	0,002
AMGA	AMORGOS	36,83N 25,89E	1-st R/C	schist	98	156	N0	0,127	0,014	0,004	N90	0,161	0,035	0,007		0,093	0,010	0,003
RODB	RODOS	36,45N 28,22E	3-st R/C	Present deposits	116	168	N60	0,623	0,061	0,011	N150	0,817	0,092	0,012		0,849	0,63	0,008
KRPA	KARPATOS	35,51N 27,21E	2-st R/C	alluvium	117	169	N0	10,110	0,363	0,046	N90	11,136	0,386	0,035		7,634	0,251	0,018
THRA	THIRA	36,42N 25,43E	2-st R/C	recent deposits	135	182	N0	0,673	0,115	0,028	N90	0,883	0,114	0,025		0,540	0,046	0,010
ZKRA	ZAKROS	35,12N 26,22E	2-st R/C	limestone	171	210	N0	0,853	0,083	0,020	N90	1,118	0,075	0,012		1,013	0,050	0,010
AGNA	AGIOS NIKOLAOS	35,19N 25,72E	3-st R/C	limestone	186	222	N275	0,840	0,094	0,015	N5	0,950	0,056	0,007		0,919	0,030	0,006
TNSA	TINOS	37,54N 25,16E	2-st R/C	recent deposits	192	228	N100	0,052	0,113	0,004	N190	0,032	0,005	0,001		0,056	0,008	0,002
HERG	GAZI	35,33N 25,06E	3-st R/C	conglomerate	215	247	N0	1,972	0,220	0,035	N90	2,180	0,193	0,031		2,311	0,142	0,017
MILA	MILOS	36,74N 24,43E	2-st R/C	marles	224	255	N320	0,187	0,026	0,009	N50	0,176	0,028	0,007		0,150	0,017	0,003
KSLB	KASTELORIZO	36,15N 29,58E	1-st R/C	limestone	242	271	N0	0,367	0,026	0,003	N90	0,651	0,046	0,004		0,932	0,035	0,004
RTHF	RETHYMNO	35,37N 24,48E	2-st R/C	recent deposits	256	283	N345	0,770	0,047	0,006	N75	0,798	0,047	0,008		0,533	0,031	0,003

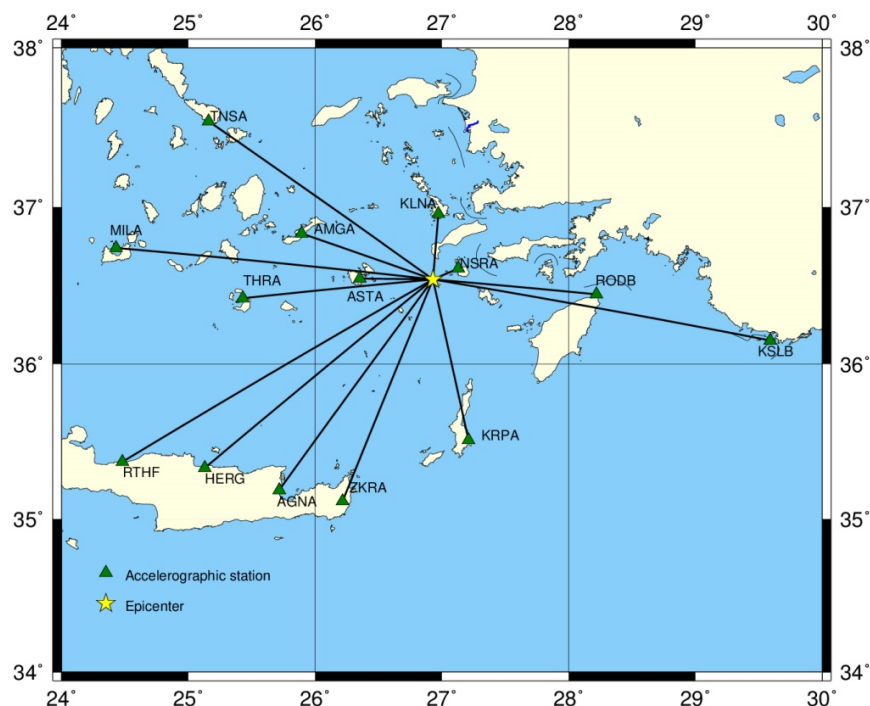
επίκεντρο σταθμός της Νισύρου (προς ΒΑ) χαρακτηρίζεται από χαμηλές τιμές εδαφικής επιτάχυνσης, με μια αναλογία με αυτές της Καρπάθου της τάξης του 30:1.



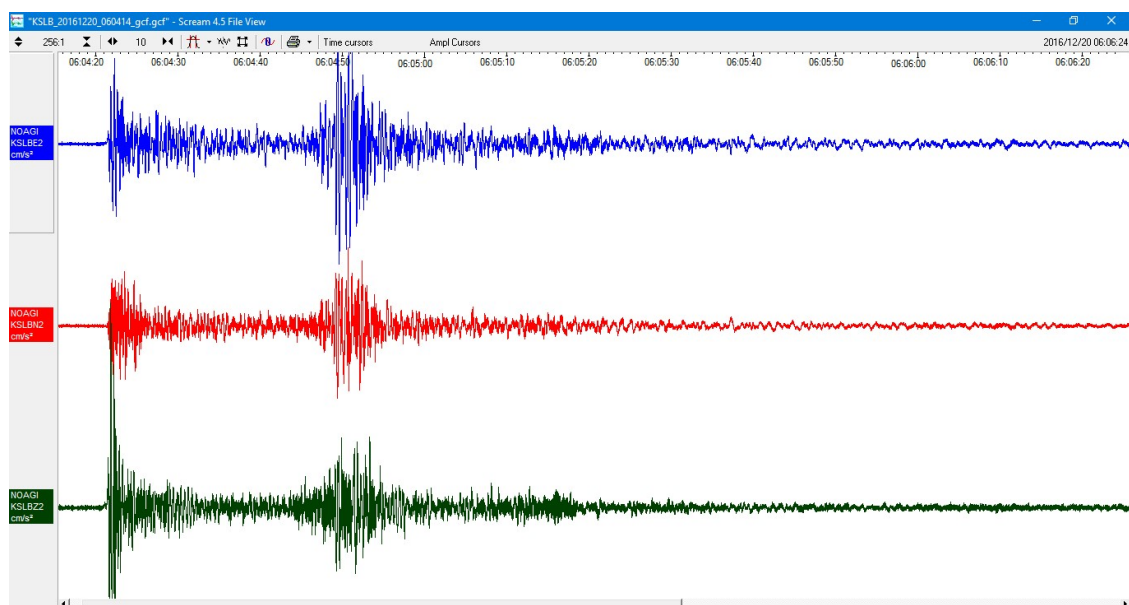
Εικόνα 3. Καταγραφή των 3 συνιστωσών των επιταχυνσιογράφων της ευρύτερης περιοχής του επικέντρου κατά αύξουσα σειρά επικεντρικής απόστασης (NSRA, KLNA, ASTA, AMGA, KRPA, THRA, ZKRA, AGNA, TNSA, MILA, KSLB, RTHF). Για κάθε σταθμό παρουσιάζονται κατά σειρά η N-S (κόκκινο), E-W (μπλε) και Z συνιστώσα (πράσινο).

Στην Εικόνα 5 παρουσιάζεται η καταγραφή του Καστελόριζου ως πλέον χαρακτηριστική των σεισμών ενδιαμέσου βάθους. Η πρώτη άφιξη των P-κυμάτων καταγράφεται με μεγάλο πλάτος στην Z-συνιστώσα, ενώ τα S-κύματα έχουν εμφανή καταγραφή στις οριζόντιες συνιστώσες. Η μέγιστη εδαφική επιτάχυνση αντιστοιχεί στην καταγραφή της Z-συνιστώσας στα $0,9 \text{ cm/s}^2$, έναντι των $0,6 \text{ cm/s}^2$ στην E-W συνιστώσα. Η περίπτωση αυτή οφείλεται στο συνδυασμό του εστιακού βάθους, του μηχανισμού γένεσης και της απόστασης.

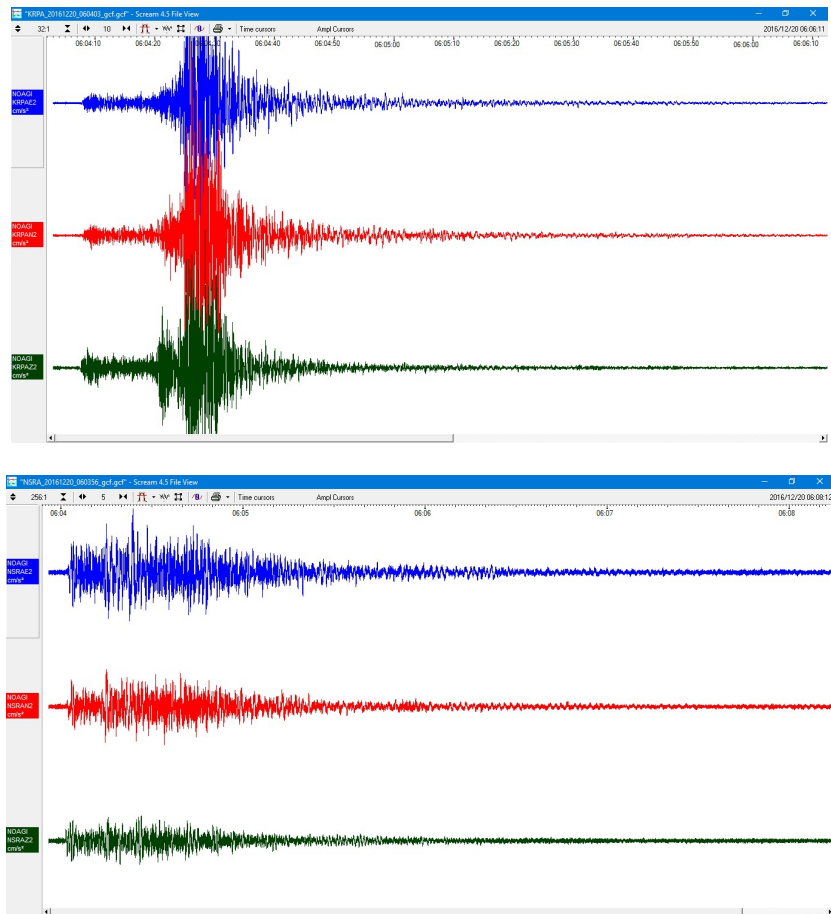
Η εικόνα της έντονης καταγραφής της πρώτης εισόδου των P-κυμάτων παρουσιάζεται και σε άλλους σταθμούς όπως στη Ρόδο, το Ζάκρο, τον Άγιο Νικόλαο, το Γάζι Ηρακλείου, την Κάλυμνο και την Αμοργό. Αντίθετα δεν εμφανίζεται στην καταγραφή της Καρπάθου (εικόνα 6, πάνω), αλλά και σε άλλους σταθμούς όπως στο Ρέθυμνο, τη Νίσυρο και τη Θήρα. Ιδιαίτερα στη Νίσυρο, χαρακτηριστικό της καταγραφής είναι η μη ευδιάκριτη και χωρίς σημαντικά πλάτη αναγραφή των S-κυμάτων (εικόνα 6, κάτω).



Εικόνα 4. Χάρτης με τις θέσεις των επιταχυνσιογράφων του Πίνακα Ι (πράσινα τρίγωνα) σε σχέση με το επίκεντρο του σεισμού (κίτρινο άστρο).



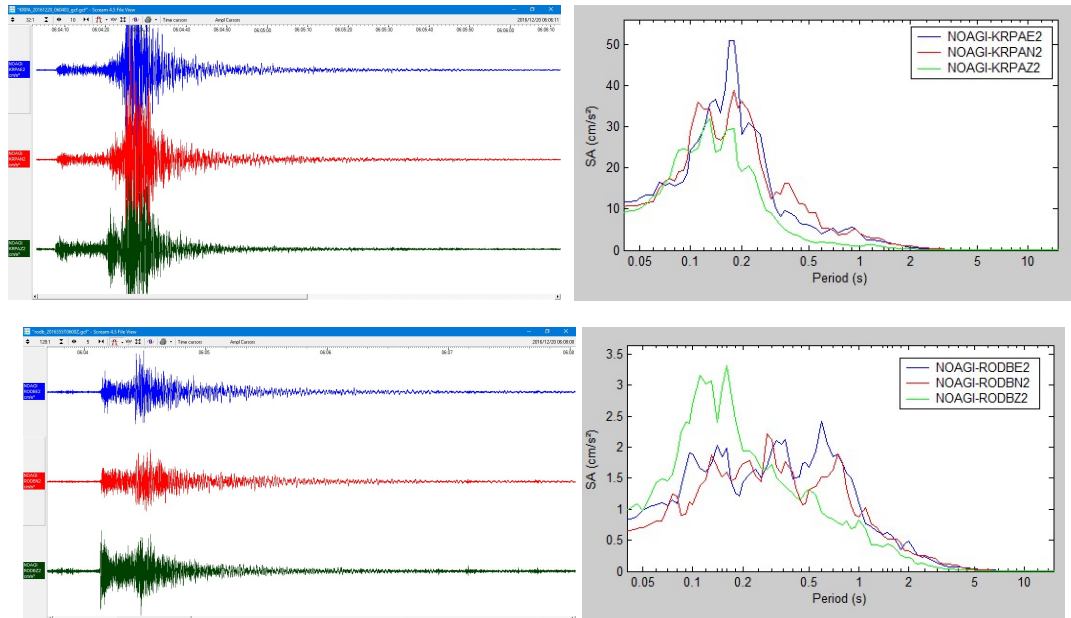
Εικόνα 5. Η καταγραφή του Καστελόριζου (προς τα ΝΑ του επικέντρου) είναι χαρακτηριστική των σεισμών ενδιαμέσου βάθους όπου η πρώτη είσοδος των Ρ-κυμάτων καταγράφεται ιδιαίτερα έντονη στη Ζ-συνιστώσα. Στο συγκεκριμένο σταθμό η μέγιστη εδαφική επιτάχυνση αντιστοιχεί στην καταγραφή της Ζ-συνιστώσας.



Εικόνα 6. Συγκριτική παρουσίαση των καταγραφών στην Κάρπαθο (πάνω) και στη Νίσυρο (κάτω). Η μεγέθυνση κατά τον άξονα του πλάτους στην περίπτωση της Νισύρου είναι πολλαπλάσια για να είναι εμφανής η καταγραφή (256:1 έναντι 32:1).

Η διαφορά στην καταγραφή των Ρ-κυμάτων γίνεται ευδιάκριτη στην εικόνα των φασμάτων απόκρισης, όπου εκτός από την τιμή της εδαφικής επιτάχυνσης παρουσιάζεται και το συχνοτικό περιεχόμενο της καταγραφής. Ως παράδειγμα παρουσιάζονται οι καταγραφές τις Καρπάθου και της Ρόδου (εικόνα 7). Στην καταγραφή της Καρπάθου (πάνω αριστερά) οι μέγιστες επιταχύνσεις εμφανίζονται στις οριζόντιες συνιστώσες και στα S-κύματα. Στο φάσμα απόκρισης (πάνω δεξιά) η μέγιστη φασματική τιμή επιτάχυνσης αντιστοιχεί στην E-W συνιστώσα και η δεσπόζουσα περίοδος είναι στα 0,2sec (5Hz). Σε αντίθεση στην καταγραφή της Ρόδου (κάτω αριστερά) η μέγιστη τιμή εδαφικής επιτάχυνσης παρουσιάζεται στη Z συνιστώσα και στα Ρ-κύματα. Στο αντίστοιχο φάσμα απόκρισης (κάτω δεξιά), η μέγιστη φασματική τιμή επιτάχυνσης αντιστοιχεί στη Z-συνιστώσα και η δεσπόζουσα περίοδος στο 0,1-0,16sec (10-6Hz), έναντι του 0,7sec (1,5Hz) της δεσπόζουσας περιόδου των S-κυμάτων για τις οριζόντιες συνιστώσες. Δεδομένου ότι οι επικεντρικές αποστάσεις μεταξύ των δύο σταθμών είναι περίπου ίσες, οι διαφορές στις μέγιστες τιμές και στο συχνοτικό περιεχόμενο της ισχυρής εδαφικής δόνησης μπορούν να αποδοθούν σε φαινόμενα κατευθυντικότητας της σεισμικής ενέργειας, με

επιπτώσεις στον τύπο των κατασκευών που είναι δυνατόν να επηρεαστούν από αυτήν (ανάλογα με την ιδιοπερίοδό τους).



Εικόνα 7. Συγκριτική παρουσίαση των καταγραφών στην Κάρπαθο (πάνω αριστερά) και στη Ρόδο (κάτω αριστερά), με τα αντίστοιχα φάσματα απόκρισης (δεξιά).

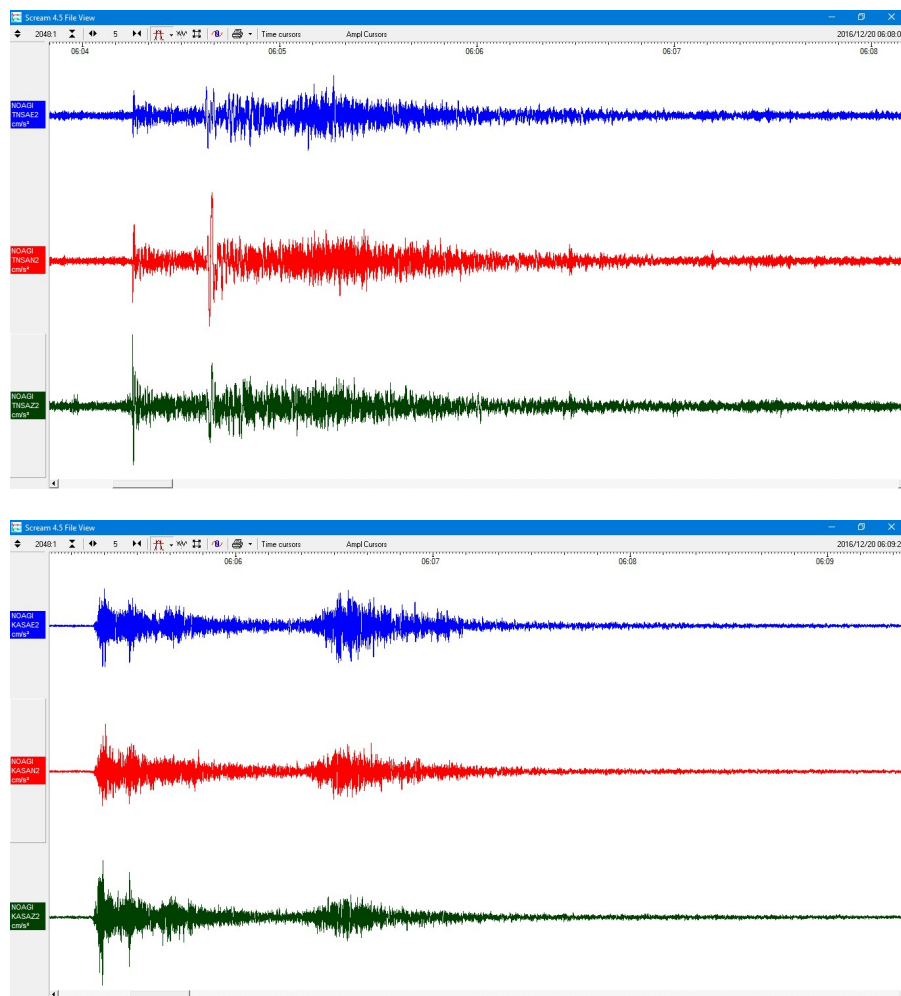
Η πολυπλοκότητα στη διάδοση της σεισμικής ενέργειας (βλ. Konstantinou & Melis, 2008) για την περιοχή του ΝΑ Αιγαίου και επομένως και για το συγκεκριμένο σεισμικό γεγονός, φαίνεται και από το ότι οι ιδιαίτερα χαμηλές τιμές εδαφικής επιτάχυνσης, που παρουσιάζονται στην Ζ-συνιστώσα στην Τήνο, σε επικεντρική απόσταση 190 km είναι της ίδιας τάξης με τις τιμές που καταγράφηκαν στην αντίστοιχη συνιστώσα στην Κασσιόπη Κέρκυρας και σε επικεντρική απόσταση 710 km (Εικόνα 8).

Στις εικόνες 9-11 παρουσιάζονται αποτελέσματα από την εφαρμογή ShakeMap του USGS που έχει υλοποιηθεί στο Γεωδυναμικό με όλα τα δεδομένα των δικτύων επιταχυνσιογράφων και σειсмоγράφων του Γ.Ι. που καταγράφονται σε πραγματικό χρόνο και αναλύονται με αυτόματο τρόπο (βλέπε <https://accelnet.gein.noa.gr/shakemaps/>). Σε δεύτερο στάδιο προστίθενται ανάλογα – αντίστοιχα παραμετρικά δεδομένα από το δίκτυο επιταχυνσιογράφων του Γ.Ι. που λειτουργούν με αλγόριθμο διέγερσης (triggering mode) και από το δίκτυο επιταχυνσιογράφων του ΟΑΣΠ-ΙΤΣΑΚ (<http://shakemaps.itsak.gr>) και γίνεται αναθεώρηση των αποτελεσμάτων. Στην παρούσα έκθεση παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της εφαρμογής με όλα τα διαθέσιμα δεδομένα.

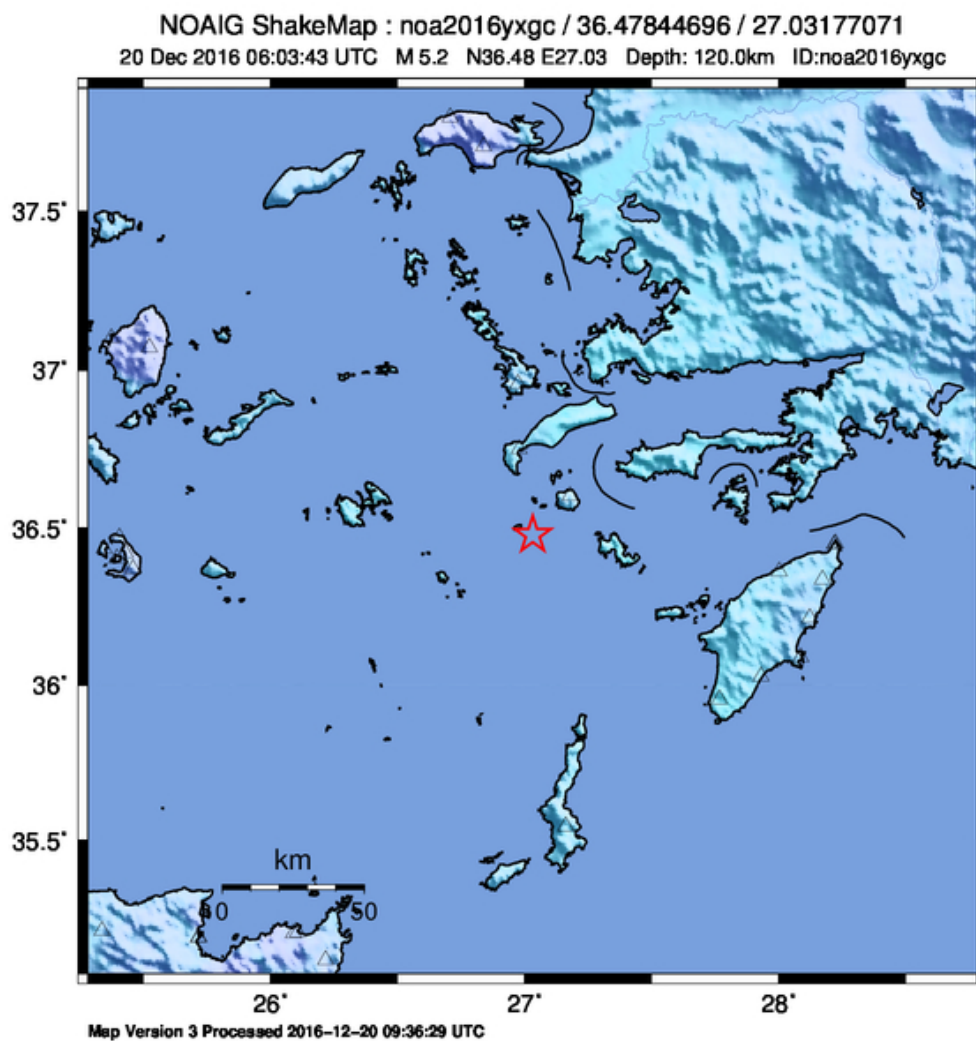
BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Fytikas, M and Vougioukalakis, G.E. (2005). The South Aegean active volcanic arc: Present knowledge and future perspectives. *Developments in Volcanology*, vol 7, p. 381, Elsevier.

- Jackson, J. (1994). Active tectonics of the Aegean Region. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences, Volume 22*, pp. 239-271.
- Konstantinou, K.I. and Melis, N.S. (2008). High-frequency shear-wave propagation across the Hellenic Subduction Zone. *BSSA*, 98, 2, 797-803.
- Wald, D. J., Quitoriano, V., Heaton, T.H., Kanamori, H., Scrivner, C.W. and Worden, C.B. (1999). TriNet ``ShakeMaps'': Rapid Generation of Instrumental Ground Motion and Intensity Maps for Earthquakes in Southern California *Earthquake Spectra*, **15**, 537-556
- Wortel, M.J.R. and Spakman, W. (2000). Subduction and slab detachment in the Mediterranean – Carpathian region. *Science*, 290, 5498, 1910-1917.



Εικόνα 8. Συγκριτική παρουσίαση των καταγραφών στην Τήνο (πάνω) και στη Κασσιόπη (κάτω). Οι κλίμακες κατά τους άξονες του χρόνου (οριζόντιος) και του πλάτους (κατακόρυφος) είναι ίσες.



PERCEIVED SHAKING	Not felt	Weak	Light	Moderate	Strong	Very strong	Severe	Violent	Extreme
POTENTIAL DAMAGE	none	none	none	Very light	Light	Moderate	Mod./Heavy	Heavy	Very Heavy
PEAK ACC.(%g)	<0.05	0.3	2.8	6.2	12	22	40	75	>139
PEAK VEL.(cm/s)	<0.02	0.1	1.4	4.7	9.6	20	41	86	>178
INSTRUMENTAL INTENSITY	I	II-III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X+

Scale based upon Worden et al. (2012)

Εικόνα 9. Χάρτης εκτιμώμενης σεισμικής έντασης αποτέλεσμα της εφαρμογής ShakeMap του USGS στο Γεωδυναμικό. Περιλαμβάνονται όλα τα διαθέσιμα δεδομένα (Γ.Ι. και ΟΑΣΠ-ΙΤΣΑΚ).

