

ΣΕΙΣΜΙΚΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΤΕΚΤΟΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΒΑ ΑΙΓΑΙΟΥ ΠΕΛΑΓΟΥΣ ΚΑΙ ΤΩΝ ΓΕΙΤΟΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΟΧΩΝ

Αναστασία Κυρατζή, Χριστόφορος Μπενετάτος, Ζαφειρία Ρουμελιώτη

Τομέας Γεωφυσικής, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 54124 Θεσσαλονίκη kiratzi@geo.auth.gr, benet@geo.auth.gr, zroum@geo.auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η περιοχή της ανατολικής Μακεδονίας και Θράκης θεωρείται μια χαμηλής σεισμικότητας περιοχή, τουλάχιστον όσον αφορά την ενόργανη σεισμικότητα (από το 1911 και μετά). Παρόλα αυτά η περιοχή υφίσταται παραμόρφωση, καθώς μεγάλα σε μήκος ή και μικρότερα ρήγματα φαίνεται ότι επηρεάζουν τις νεογενείς και τεταρτογενείς αποθέσεις. Στις δορυφορικές εικόνες και αεροφωτογραφίες δεσπόζει το ρήγμα Καβάλας – Ξάνθης – Κομοτηνής, συνολικού μήκους ~ 120 km, που καταλήγει προς ανατολάς, στην κοιλιάδα του Έβρου. Οι σημαντικότεροι ιστορικοί σεισμοί είναι ο σεισμός του 1752 (Μ 7.5) στην περιοχή της Αδριανούπολης και ο σεισμός του 1785 (Μ 6.7) στην περιοχή της Κομοτηνής. Οι σεισμοί αυτοί έχουν μεγάλη περίοδο επανάληψης (πιθανότατα είναι της τάξης εκατοντάδων ή και χιλιάδων ετών). Σύμφωνα με τα στοιχεία αυτά, θα πρέπει να εκτιμηθούν οι αναμενόμενες εδαφικές κινήσεις από πιθανές διαρρήξεις τέτοιων ρηγμάτων, ιδιαίτερα αυτών που είναι κοντά στις σύγχρονες οικιστικές περιοχές. Η περιοχή του Βορείου Αιγαίου Πελάγους παρουσιάζει έντονη σεισμικότητα, που σχετίζεται άμεσα με τους κλάδους του ρήγματος της Β. Ανατολίας που εισέρχονται από τα ανατολικά. Στην εργασία αυτή εξετάζουμε τα γενικά χαρακτηριστικά κάποιων σεισμικών ακολουθιών με ιδιαίτερο ενδιαφέρον, όπως οι ακολουθίες του 2004 κοντά στην περιοχή των Λουτρών της Αλεξανδρούπολης και του 2003 στον Κόλπο του Σάρου, υπό το πρίσμα του γενικότερου σεισμοτεκτονικού περιβάλλοντος της περιοχής.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η σεισμικότητα του Β. Αιγαίου Πελάγους και των γειτονικών περιοχών καθορίζεται, κατά κύριο λόγο, από την είσοδο κλάδων του ρήγματος της Βόρειας Ανατολίας σε αυτό, καθώς και από το πεδίο τάσεων εφελκυσμού κατά διεύθυνση ~ Β-Ν της οπισθότοξης περιοχής (Parazachos and Kiratzi, 1996).

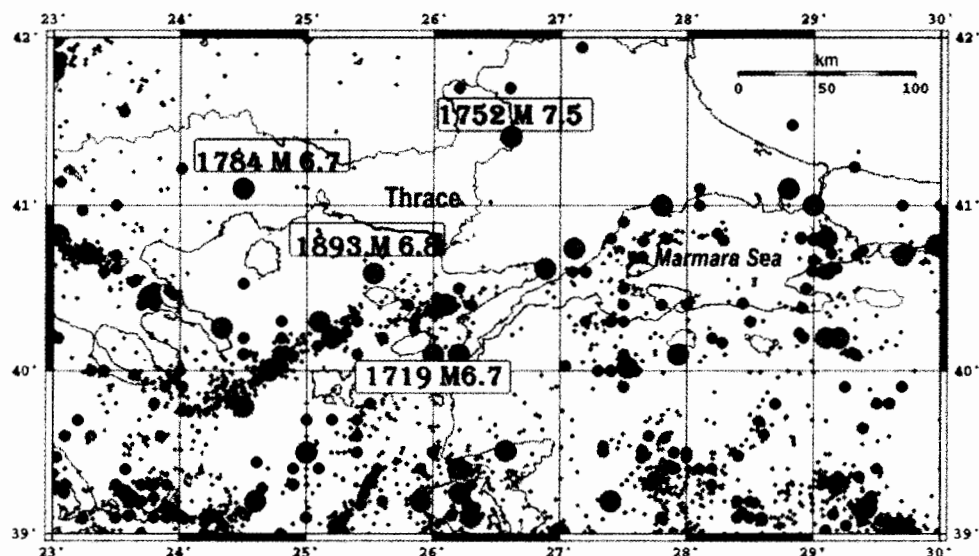
Η κατανομή των επικέντρων των σεισμών (σχ. 1) ακολουθεί και σκιαγραφεί τις ζώνες υψηλής σεισμικότητας, οι οποίες ακολουθούν την τάφρο του Σάρου και την τάφρο του Β. Αιγαίου.

Δυτικά των 31° το ρήγμα της Β. Ανατολίας διακλαδίζεται σε μια σειρά από σχεδόν παράλληλα ρήγματα, δεξιόστροφης οριζόντιας μετατόπισης, που διατρέχουν τη ΒΔ Τουρκία και το Β. Αιγαίο Πέλαγος με διεύθυνση ΒΑ ή ΑΒΑ. Τα ρήγματα αυτά σχετίζονται με λεκάνες ιζηματογένεσης όπου συγκεντρώνονται μεγάλου πάχους μετα-

Μειοκαινικών αποθέσεων. Τα ρήγματα του Β. Αιγαίου Πελάγους σταματούν στο δυτικό τμήμα του Β. Αιγαίου Πελάγους, όπου συναντούν τα ΒΔ διεύθυνσης ρήγματα που κυριαρχούν στη δομή της κεντρικής Ελλάδας, και σχετίζονται με πλαγιο-κανονική διάρρηξη και με ΝΝΑ – ΝΝΔ διευθύνσεις ολίθησης (Kiratzi, 2002).

Η πλατιά ζώνη των μηχανισμών γένεσης οριζόντιας μετατόπισης, όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 2, δηλώνει το κινηματικό αποτέλεσμα της προς τα δυτικά κίνησης της πλάκας της Ανατολίας, και των κλάδων του ρήγματος της Β. Ανατολίας. Στην περιοχή αυτή, το πεδίο των τάσεων ευνοεί και τη δραστηριοποίηση κανονικών ρηγμάτων αλλά και ρηγμάτων με ανάστροφη συνιστώσα (Kiratzi, 2002; Koukouvelas and Aydin, 2002).

Η αλλαγή στο αζιμούθιο των διευθύνσεων ολίθησης που συνοδεύει την απότομη αλλαγή στη διεύθυνση των ενεργών ρηγμάτων κοντά στην α-



Σχήμα 1. Κατανομή των επικέντρων (κύκλοι) των σεισμών στην περιοχή του ΒΑ Αιγαίου Πελάγους και των γειτονικών περιοχών. Τα δεδομένα είναι πλήρη για το διάστημα 365 π.Χ. – 2004. Με γκρι κύκλους είναι τα επίκεντρα των ιστορικών σεισμών (προ του 1911) ενώ με μαύρους κύκλους σημειώνονται τα επίκεντρα της ενόργανης σεισμικότητας. Οι διαμέτροι των κύκλων είναι ανάλογοι του μεγέθους των σεισμών.

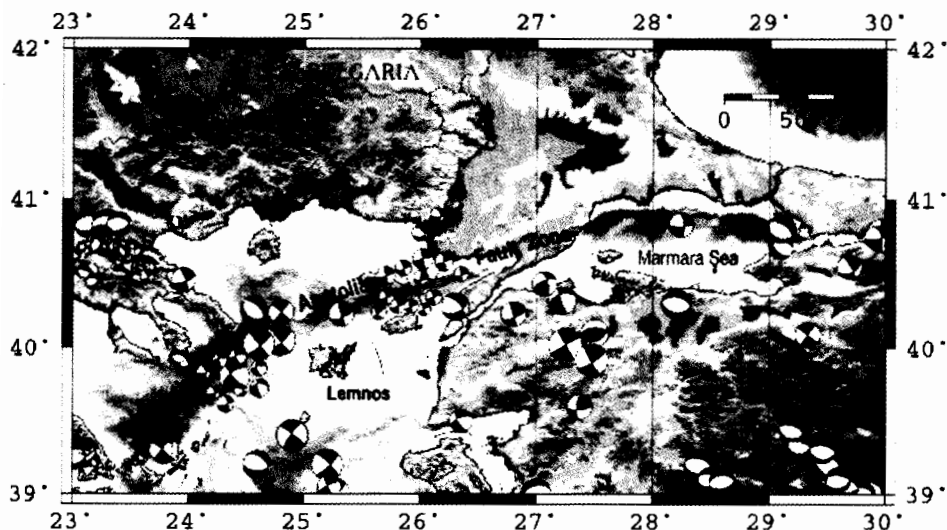
νατολική ακτή της ηπειρωτικής Ελλάδας, οδηγεί στην υπόθεση ότι η δεξιόστροφη οριζόντια κίνηση που διασχίζει το Β. Αιγαίο Πέλαγος εξισορροπείται από δεξιόστροφη περιστροφή τμημάτων στην κεντρική Ελλάδα, που περιβάλλονται από ρήγματα (block rotations), σε σχέση με την Ευρασία (McKenzie and Jackson 1983, 1986; Taymaz et al. 1991) ή σύμφωνα με άλλους ερευνητές (Koukouvelas and Aydin, 2002) η όλη αλλαγή γίνεται και χωρίς περιστροφή.

Οι McKenzie and Jackson (1983) θεωρούν ότι η προϋπάρχουσα τεκτονική μάζα είναι τόσο ανθεκτική ώστε είναι ευκολότερο να κινεί ρήγματα που έχουν ΒΔ έως ΔΒΔ παράταξη. Αυτά τα ρήγματα είναι τα ίδια μικρής αντοχής, αλλά περικλείουν μάζες ανθεκτικές που περιστρέφονται δεξιόστροφα πάνω στο υποκείμενο συνεχές πεδίο ταχυτήτων. Σε αυτή την εικόνα, ο άνω φλοιός ανταποκρίνεται παθητικά στο πεδίο ροής που υπάρχει από κάτω, το οποίο με τη σειρά του ελέγχει την ταχύτητα περιστροφής των ανθεκτικών μαζών που περικλείονται από ρήγματα. Όμως, η τεκτονική

ανισοτροπία του πάνω φλοιού επηρεάζει την παραμόρφωση, με την έννοια ότι καθορίζει τη διεύθυνση των ρηγμάτων που θα δραστηριοποιηθούν ή ποια ρήγματα θα δραστηριοποιηθούν Ξανά (Kiratzi, 2002; Kiratzi and Louvari, 2003).

2. ΙΣΤΟΡΙΚΟΙ ΣΕΙΣΜΟΙ

Οι σημαντικότεροι από άποψη μεγέθους και μακροσεισμικών παρατηρήσεων, ιστορικοί σεισμοί της περιοχής (σχ. 1), όπως αναφέρονται στους Παπαζάχος και Παπαζάχου (2002), παρουσιάζονται στον Πίνακα 1. Ο μεγαλύτερος σε μέγεθος είναι ο σεισμός της 29^{ης} Ιουλίου 1752 M 7.5, που προκάλεσε βλάβες στην Αδριανούπολη (Edirne) όπως αναφέρεται από τους Ambraseys and Finkel (1987). Ένα μεγάλο τμήμα από τα τείχη του κάστρου καθώς και σημαντικός αριθμός πυλών γκρεμίσθηκαν. Ερειπώθηκαν οι πόλεις Havsa και Haskoy όπου αναφέρθηκαν και πολλοί θάνατοι. Τα χωριά της ανατολικής Θράκης Zerna, Kozkoy και Feretik σαρώθηκαν. Ο σεισμός επηρέασε και την Κωνσταντινούπολη, όπου κατέρρευσαν λίγα



Σχήμα 2. Μηχανισμοί γένεσης (beach – balls; μαύρο χρώμα δηλώνει συμπίεση, άσπρο χρώμα δηλώνει εφελκυσμό) των σεισμών στην περιοχή του ΒΑ Αιγαίου Πελάγους και των γειτονικών περιοχών, από την κατανομή των οποίων φαίνεται ότι η παραμόρφωση της περιοχής εκδηλώνεται ως κίνηση ρηγμάτων οριζόντιας μετατόπισης. Οι διάμετροι των κύκλων είναι ανάλογοι του μεγέθους των σεισμών.

παλιά σπίτια αλλά αναφέρεται ότι ακολούθησε πυρκαγιά από την οποία κήκαν 57 μαγαζιά. Του σεισμού προηγήθηκαν προσεισμοί και οι μετασεισμοί συνεχίστηκαν για περισσότερο από ένα έτος στην ευρύτερη περιοχή που ενεργοποιήθηκε.

Ο σεισμός της Κομοτηνής της 6^{ης} Νοεμβρίου 1784 (M 6.7) (ένταση ΙΧ στην Κομοτηνή) προκάλεσε την κατάρρευση μέχρι τα θεμέλια 500 σπιτιών, και η κατάσταση επιδεινώθηκε από σφοδρή βροχή που είχε ως αποτέλεσμα να πνιγούν πολλοί άνθρωποι και ζώα.

Οι σεισμοί της ακολουθίας του 1829 (M 7.3) προκάλεσαν καταστροφές στην Καβάλα, Ξάνθη, Ελευθερούπολη και Αδριανούπολη και προκάλεσαν ολική καταστροφή της μικρής τότε πόλης της Δράμας. Μαζί με το σεισμό του 1752 της Αδριανούπολης αποτελούν τους μεγαλύτερους σεισμούς (με M > 7.0) της περιοχής. Ο σεισμός του 1867 (M 6.0) είχε επίκεντρο επίσης κοντά στην περιοχή της Δράμας.

Ο σημαντικότερος ιστορικός σεισμός κοντά

στη Σαμοθράκη είναι του 1893 (M 6.8), που προκάλεσε τις μεγαλύτερες βλάβες στο βόρειο τμήμα του νησιού. Παρατηρήθηκαν μεταβολές στον υδροφόρο ορίζοντα και καταπτώσεις βράχων. Εμφανίστηκαν ρηγματώσεις στην επιφάνεια του εδάφους μεταξύ των χωριών Θερωμών και Κήπων στους πρόποδες βουνού, και στην ίδια τοποθεσία παρατηρήθηκε καθίζηση της παραλίας, η οποία κατακλύστηκε από θαλάσσιο κύμα ύψους 5 μέτρων. Είναι ενδιαφέρον ότι και στην παραλία Άγκιστρο καταγράφηκε θαλάσσιο κύμα (tsunami) ύψους 1 μέτρου, καθώς και στην παραλία της Αλεξανδρούπολης το κύμα ήταν ύψους 1 μέτρου, και πλημμύρισε την περιοχή σε απόσταση έως και 40 μέτρα από την ακτή.

Ο δεύτερος σημαντικός σεισμός από άποψη μεγέθους του 1860 (M 6.2) προκάλεσε μικρότερες βλάβες στο νησί της Σαμοθράκης, αλλά παρουσιάστηκε παρόμοια κατανομή δευτερογενών επιπτώσεων όπως καταπτώσεις βράχων και μεταβολές στον υδροφόρο ορίζοντα, όπως και στο σεισμό του 1893.

Πίνακας 1. Οι σημαντικότεροι ιστορικοί σεισμοί της ανατολικής Μακεδονίας και Θράκης (Παπαζάχος και Παπαζάχου, 2002).

Έτος	Μήνας/Ημέρα	Χρόνος γένεσης	Γεωγ. Πλάτος	Γεωγ. Μήκος	Μέγεθος	Θέση	Μέγιστη ένταση
52	?	μεσάνυχτα	40.9	24.2	(6.0)	Φίλιπποι	(VII)
597	?	νύχτα	40.9	24.3	(6.8)	Φίλιπποι	(VIII)
1752	07/29		41.3	26.5	7.5	Havsa	IX
1784	11/06		41.1	25.5	6.7	Κομοτηνή	IX
1829	05/05	09:	41.1	24.5	7.3	Δράμα	X
1860	08/06		40.5	25.8	(6.2)	Σαμοθράκη	VII
1867	03/29		41.2	24.2	(6.0)	Δράμα	VIII
1893	02/09	18:	40.6	25.5	6.8	Σαμοθράκη	IX

Πίνακας 2. Παράμετροι της σημοσειράς στην περιοχή των Λουτρών Αλεξανδρούπολης που σημειώθηκε τους μήνες Ιούνιο και Ιούλιο του 2004.

Date Year/Month/Day	Time hh/mm/ss	Latitude	Longitude	Magnitude Mw
20040627	153147	40.859	26.030	4.5
20040627	162626	40.877	25.997	3.8
20040627	185044	40.814	26.120	3.6
20040627	201522	40.831	26.055	3.5
20040627	223715	40.877	26.211	3.7
20040628	004640	40.846	25.978	3.3
20040628	040918	40.897	26.215	3.1
20040628	060716	40.826	26.131	3.9
20040628	064032	41.035	26.232	3.3
20040628	095853	40.797	26.193	3.0
20040628	095939	40.822	26.200	3.3
20040628	102412	40.832	26.143	3.8
20040628	102840	40.844	26.138	4.0
20040628	104248	40.880	26.140	3.7
20040629	021153	40.892	26.141	3.9
20040629	025538	40.827	26.173	3.3
20040629	035224	40.867	26.064	2.5
20040629	043232	40.828	26.116	3.2
20040629	082925	40.842	26.162	3.1
20040629	101513	40.835	26.017	3.9
20040629	130748	40.830	25.986	3.4
20040630	042217	40.859	26.024	2.7
20040630	200831	40.792	26.111	3.7
20040630	201201	40.815	26.108	3.5
20040630	220132	40.834	26.045	3.6
20040630	232030	40.831	26.056	3.6
20040701	102348	40.851	26.205	3.6
20040701	105000	40.794	26.061	3.7
20040701	150914	40.825	26.092	4.0
20040701	150313	40.843	26.136	3.7
20040701	150618	40.865	26.092	3.9
20040701	154657	40.851	26.191	3.7
20040701	231253	40.826	26.122	3.1

3. ΜΙΚΡΟΣΕΙΣΜΙΚΗ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΩΝ ΛΟΥΤΡΩΝ ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΥΠΟΛΗΣ

Στην περιοχή της Αλεξανδρούπολης, η σεισμικότητα είναι γενικά μικρή τόσο σε αριθμό σεισμών όσο και σε μεγέθη. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι σεισμοί που παρατηρήθηκαν το καλοκαίρι του 2004 στην περιοχή των Λουτρών της Αλεξανδρούπολης (Πίνακας 2, και Σχ. 3). Τα μεγέθη των σεισμών της σημνοσειράς κυμαίνονται από 2.5 έως 4.5 με το μεγαλύτερο αριθμό σεισμών να έχει μεγέθη της τάξης του 4.0.

Όσον αφορά τους μηχανισμούς γένεσης, των μεγαλύτερων από αυτούς τους σεισμούς, που υπολογίσαμε με αντιστροφή των κυματομορφών των επιμήκων κυμάτων (Dreger, 2002), με βάση τις αναγραφές σε σειсмоγράφους ευρέως φάσματος, φαίνεται ότι οι σεισμοί αυτοί συνδέονται με κανονικά ρήγματα με πλαγιοκανονική συνιστώσα κίνησης (σχήμα 3). Στη μέθοδο αντιστροφής που χρησιμοποιήθηκε, η σεισμική πηγή θεωρείται σημειακή στο χώρο και στο χρόνο και η μετάθεση του υλικού σημείου σε απόσταση x και χρόνο t από την πηγή,

μπορεί να παρασταθεί σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση

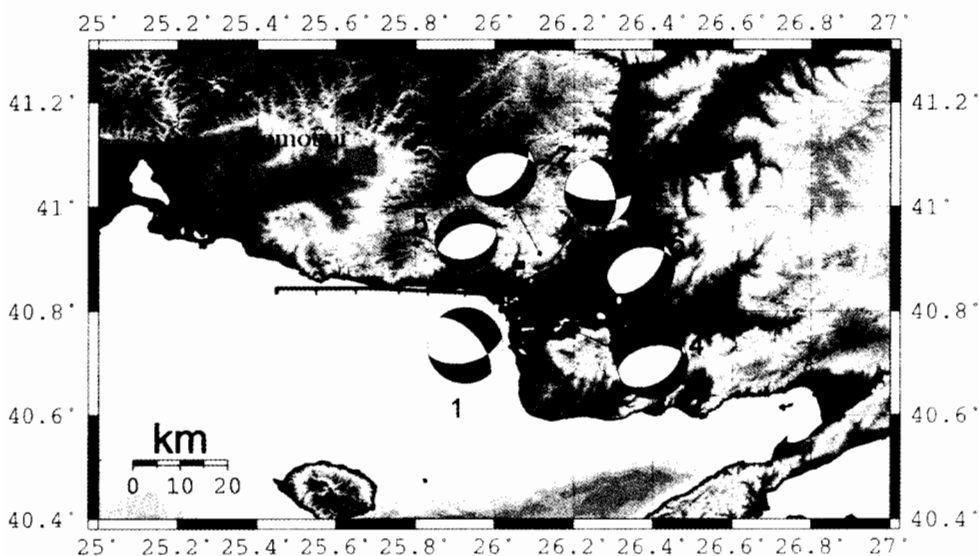
$$U_n = (x, t) = M_{ij} \cdot G_{ni,j}(x, z, t)$$

όπου U είναι η συνιστώσα της μετάθεσης, M ο ταυστής σεισμικής ροπής και G ο πίνακας των θεωρητικών συναρτήσεων Green. Η μέθοδος αντιστρέφει ολόκληρη την κυματομορφή (full waveform inversion method) και επιστρέφει τον ταυστή σεισμικής ροπής M ο οποίος εκφράζει το μηχανισμό γένεσης του σεισμού. Η ποιότητα της λύσης καθορίζεται και ελέγχεται μέσω των ακόλουθων συναρτήσεων:

$$f = \frac{RMS(data - synth)}{Pdc}$$

$$VR = 1.0 - \frac{\int [data - synth]^2 dt}{\int [data]^2 dt}$$

Από τη σύγκριση πραγματικών και συνθετικών δεδομένων υπολογίζονται οι παράμετροι f και VR οι



Σχήμα 3. Μηχανισμοί γένεσης των μεγαλύτερων σεισμών της ακολουθίας του Ιουνίου - Ιουλίου 2004 (τα νούμερα παραπέμπουν στον πίνακα 3) στην περιοχή των Λουτρών Αλεξανδρούπολης, από τους οποίους φαίνεται ότι οι σεισμοί συνδέονται με ενεργοποίηση κανονικών ρηγμάτων, παράταξης $\text{ABA} - \Delta\text{N}\Delta$ με ταυτόχρονη συνιστώσα οριζόντιας κίνησης. Στο ίδιο σχήμα απεικονίζεται γραφικά και το ρήγμα Μαρώνειας - Μάρκρης(Σ. Παυλίδης, προσωπική επικοινωνία). Σημειώνονται οι θέσεις του Λουτρού και της Αλεξανδρούπολης (ΑΛ).

οποίες και χρησιμοποιούνται για την επιλογή της τελικής λύσης. Σκοπός είναι να επιτύχουμε μια όσο το δυνατόν χαμηλή τιμή για την παράμετρο f και υψηλή τιμή για την VR . Οι παράμετροι των μηχανισμών γένεσης παρατίθενται στον Πίνακα 3.

Η σεισμική δραστηριότητα στην περιοχή Λουτρών είναι πιθανόν να σχετίζεται μερήγματα της περιοχής, με παράταξη Α-Δ (Κουκουvelas and Aydin, 2002). Με οδηγό τους μηχανισμούς γένεσης οι οποίοι παραπέμπουν σε ρήγματα που γενικά έχουν παρατάξεις ΑΒΑ – ΔΝΔ θα μπορούσαμε να θεωρήσουμε ότι αυτοί συνδέονται με τη συνέχεια, προς ανατολάς του ρήγματος της Μαρώνειας-Μάκρης (Σ. Παυλιδής, προσωπική επικοινωνία). Σε αυτήν την περίπτωση ως επίπεδο του ρήγματος θα πρέπει να δεχθούμε αυτό με την κλίση προς νότο. Δεν μπορεί όμως να αποκλεισθεί η περίπτωση οι σεισμοί αυτοί να συνδέονται με μικρότερες δομές της περιοχής όπως είναι τα ρήγματα Συκοράχης, Μαΐστρου και Έβρου (Karfakis and Doutsos, 1995; Rondoyanni et al., 2004), τα οποία δεν απεικονίζονται στο σχήμα 3 για λόγους απλούστευσης. Τα ρήγματα αυτά είναι παράλληλα μεταξύ τους, μήκους 21 km, 9 km και 11 km, αντίστοιχα που έχουν ΒΑ – ΝΔ κυρίως διεύθυνση αλλά σαφή πλαγιοκανονική συνιστώσα. Οι μηχανισμοί γένεσης των μεγαλύτερων σεισμών της ακολουθίας (με νούμερο 1, 2 και 6 στο σχ. 3) είναι και αυτοί με τη σημαντικότερη συνιστώσα οριζόντιας μετατόπισης, πράγμα που αφήνει ανοικτό το ενδεχόμενο οι σεισμοί αυτοί να συνδέονται και με τα προηγούμενα αναφερθέντα ρήγματα. Σε κάθε περίπτωση η σηματοσειρά σημειώθηκε σε περιοχή λουτροπηγών και είναι προφανής η γενετική σχέση των σεισμών με την ύπαρξη ενεργών ρηγμάτων στην περιοχή.

Πίνακας 3. Παράμετροι των μηχανισμών γένεσης των μεγαλύτερων σεισμών της σηματοσειράς στην περιοχή των Λουτρών Αλεξανδρούπολης που σημειώθηκε τους μήνες Ιούνιο και Ιούλιο του 2004.

N	Date	Time	Latit.	Long.	Mw	H k m	Nodal Plane 1			Nodal plane 2			P axes		T axes	
							Strike	Dip	Rake	Strike	Dip	Rake	Az	Pl	Az	Pl
1	20040627	15:31:47	40.775	25.994	4.5	4	76	52	-139	318	59	-46	293	53	18	4
2	20040628	10:28:40	40.891	26.140	4.0	4	93	69	-137	345	50	27	317	45	215	12
3	20040629	2:11:53	40.892	26.141	3.9	6	50	45	-112	260	49	-69	298	74	335	2
4	20040630	20:08:31	40.792	26.111	3.7	6	55	43	-108	259	50	-74	232	77	338	4
5	20040630	23:20:30	40.831	26.056	3.6	7	75	40	-86	249	50	94	128	84	342	5
6	20040701	15:09:14	40.825	26.092	4.0	7	255	40	-65	44	54	109	262	73	148	7

4. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΟΙ ΣΕΙΣΜΟΙ ΣΤΟΝ ΚΟΛΠΟ ΤΟΥ ΣΑΡΟΥ

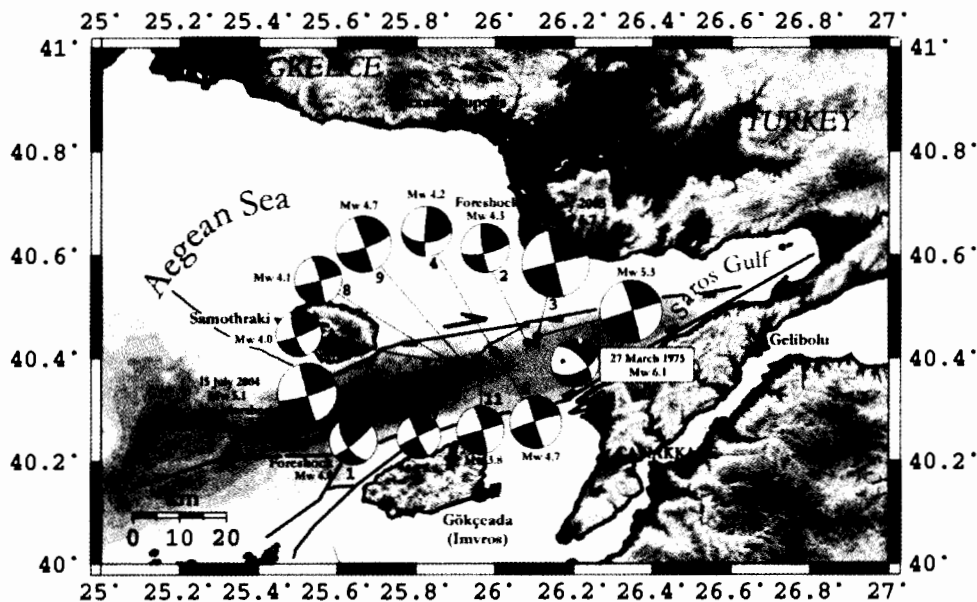
Ο ΣΕΙΣΜΟΣ ΤΗΣ 27^{ης} ΜΑΡΤΙΟΥ 1975 Mw 6.1

Ο σεισμός είχε επίκεντρο στη θάλασσα, στον κόλπο του Σάρου, μια λεκάνη που συνδέεται με το βόρειο κλάδο του ρήγματος της Β. Ανατολίας. Ο μηχανισμός γένεσης που συμπεριλαμβάνεται στο σχήμα 4 δείχνει ρήγμα οριζόντιας μετατόπισης με ισχυρή κανονική συνιστώσα (Taymaz et al., 1991). Το επίπεδο που είναι συμβατό με τη διεύθυνση του ρήγματος της Β. Ανατολίας είναι αυτό με την ΑΒΑ-ΔΝΔ παράταξη και η κλίση του είναι 60° προς τα ΝΑ.

Η ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΑΚΟΛΟΥΘΙΑ ΤΗΣ 6^{ης} ΙΟΥΛΙΟΥ 2003

Ο σεισμός του Ιουλίου 2003 M 5.7 (σχ. 4) σημειώθηκε κοντά στα επίκεντρα των ιστορικών σεισμών του 1860 και 1730 στην ανατολική ακτή της Σαμοθράκης και παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον, γιατί δίνει επιπρόσθετες ενδείξεις για τη δυτική συνέχεια του ρήγματος του Γάνου (Ganos fault) μέσα στο κόλπο του Σάρου.

Το ρήγμα αυτό συνδέεται με πολύ καταστρεπτικούς σεισμούς στην περιοχή της Δυτικής Τουρκίας και η δυτική προέκτασή του αποτελεί σημαντική απειλή για τις περιοχές της Ανατολικής Μακεδονίας και της Θράκης. Με βάση τις μέχρι σήμερα επιστημονικές δημοσιεύσεις, δεν έχει αποσαφηνιστεί πλήρως αν η δυτική συνέχεια του ρήγματος του Γάνου ταυτίζεται με τη νότια ή τη βόρεια ρηξιγενή ζώνη του κόλπου του Σάρου. Ωστόσο, έχει διαπιστωθεί ότι η νότια ρηξιγενής ζώνη συνδέεται με σεισμούς, οι οποίοι χαρακτηρίζονται από σημαντική κανονική συνιστώσα κατά τη



Σχήμα 4. Μηχανισμοί γένεσης της ακολουθίας του 2003 στον Κόλπο του Σάρου. Παρατηρούμε ότι σχεδόν όλοι οι μηχανισμοί δηλώνουν κίνηση οριζόντιας μετατόπισης χωρίς κανονική συνιστώσα. Σε αντίθεση νοτιότερα ο σεισμός του 1975 έχει σαφέστατη κανονική συνιστώσα, δηλαδή διάρρηξη σε πλαγιοκανονικό ρήγμα (Karabulut et al., 2005). Ρήγματα από (Koukouvelas and Aydin, 2002).

διάρρηξή τους. Αυτό ενισχύεται και από το μηχανισμό γένεσης του σεισμού του 1975 (σχ. 4) όπου σαφέστατα έχουμε κανονική συνιστώσα.

Η κατανομή των επικέντρων της ακολουθίας του 2003 δείχνει την ενεργοποίηση μιας ζώνης 25 km που εκτείνεται σε βάθος μεταξύ 9 και 20 km. Από τη μελέτη της κατανομής της ολίσθησης του κυρίου σεισμού (6 Ιουλίου 2003) στην επιφάνεια του ρήγματος βρέθηκε ότι η μεγαλύτερη έκλυση σεισμικής ροπής έγινε σε μια μικρή περιοχή (45 km²) η οποία καλύπτει τα βαθύτερα τμήματα 12 – 20 km της ζώνης που ενεργοποιήθηκε (Karabulut et al., 2005).

Τα επίκεντρα των μετασεισμών της ακολουθίας του 2003 κατανέμονται κατά μήκος του βορείου ορίου της τάφρου του Σάρου, και όλοι οι μηχανισμοί γένεσης είναι σαφέστατα οριζόντιας μετατόπισης (strike – slip) χωρίς κανονική συνιστώσα κίνησης. Αυτά τα δυο στοιχεία αποτελούν επιπλέον ενδείξεις υπέρ της άποψης ότι η συνέχεια του ρήγματος Γάνου στην τάφρο του Σάρου, ακολου-

θεί το βόρειο όριο της τάφρου του Σάρου και δεν ακολουθεί το ρήγμα κατά μήκος της χερσονήσου Gelibolu, όπως υποστηρίζεται από άλλες εργασίες (Koukouvelas and Aydin, 2002). Το νότιο όριο της τάφρου της Σάρου σε σεισμικές τομές που υπάρχουν έχει σαφέστατη κανονική συνιστώσα διάρρηξης. Σε κάθε περίπτωση απαιτούνται επιπρόσθετα σεισμολογικά στοιχεία. Ιδιαίτερης σημασίας είναι επίσης το γεγονός ότι η ακολουθία του 2003 σηματοδοτεί το δυτικό όριο (στο 26.3° A) του σεισμικού κενού (σεισμικής ηουχίας) που παρατηρείται μετά το σεισμό του 1912 στο ρήγμα του Γάνου.

Σύμφωνα με τις πιο πρόσφατες εκτιμήσεις (Armijo et al., 2005) ο σεισμός του 1912 συνδέεται με τη διάρρηξη ενός ρήγματος 160 km συνολικά, εκ των οποίων τα 40 km είναι υποθαλάσσια στην τάφρο του Σάρου, 50 km στην ξηρά στο ρήγμα που εμφανίσθηκε και χαρτογραφήθηκε (Ambraseys and Jackson, 2000) και 60 km στη θάλασσα του Μαρμαρά (Armijo et al., 2005).

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η περιοχή της ανατολικής Μακεδονίας και Θράκης στον παρόντα αιώνα χαρακτηρίζεται ως περιοχή χαμηλής σεισμικότητας. Όμως ισχυροί σεισμοί, της τάξης του 7.0, έπληξαν πολλές πόλεις ιδιαίτερα τον 18^ο αιώνα, όπως για παράδειγμα την Ξάνθη, την Κομοτηνή και την Αδριανούπολη (Pavlidis et al., 1990; Παπαζάχος και Παπαζάχου, 2002). Δεν υπάρχουν σαφή σεισμολογικά ή γεωλογικά στοιχεία προς το παρόν για να εκτιμηθεί η μέση περίοδος επανάλιψης σεισμών αυτού του μεγέθους. Παρόλα αυτά με βάση την ανάπτυξη των πόλεων στην περιοχή, με πολυώροφα κτήρια και πολεοδομική επέκταση, είναι εξαιρετικά σημαντικό να εκτιμηθούν οι αναμενόμενες εδαφικές κινήσεις από πιθανούς σεισμούς τέτοιου μεγέθους. Αυτός ο στόχος θα αποτελέσει αντικείμενο μελλοντικής μας εργασίας.

Στην εργασία αυτή μελετήσαμε τη σημοσειρά των Λουτρών Αλεξανδρούπολης του 2004 και από τους μηχανισμούς γένεσης που προσδιορίσαμε φαίνεται ότι οι σεισμοί αυτοί οφείλονται σε ενεργοποίηση κανονικών ρηγμάτων με σημαντική συνιστώσα οριζόντιας κίνησης. Τα μεγέθη της σημοσειράς κατανέμονται γύρω από το M 4.0 με τον μεγαλύτερο σεισμό να έχει μέγεθος 4.5. Το γεγονός ότι η σημοσειρά εμφανίστηκε σε περιοχή λουτροπηγών καθιστά πιθανή τη συσχέτιση ενεργών ρηγμάτων με την εμφάνιση των θερμών νερών.

Στο Β. Αιγαίο Πέλαγος η γένεση συχνών και ισχυρών σεισμών συνδέεται με την προς δυσμάς συνέχεια του ρήγματος της Β. Ανατολίας. Είναι σαφές ότι τόσο ο το ρήγμα του βορείου περιθωρίου του κόλπου του Σάρου όσο και το ρήγμα του νοτίου περιθωρίου παίρνει τμήμα της οριζόντιας κίνησης από τα ανατολικά. Από τη μελέτη της ακολουθίας του 2003 στην περιοχή του κόλπου του Σάρου προέκυψαν στοιχεία ότι η δυτική συνέχεια του ρήγματος του Γάνου ακολουθεί τη βόρεια ρηξιγενή ζώνη του κόλπου του Σάρου. Αυτό κυρίως προκύπτει από τους μηχανισμούς γένεσης των ισχυρότερων σεισμών της ακολουθίας, οι οποίοι είναι οριζόντιας μετατόπισης σε σχεδόν κατακόρυφα ρήγματα. Σε αντίθεση, αν ανήκαν στη νότια

ρηξιγενή ζώνη θα χαρακτηρίζονταν από σημαντική κανονική συνιστώσα κατά τη διάρρηξή τους. Αυτό ενισχύεται και από το μηχανισμό γένεσης του σεισμού του 1975 (σχ. 4) όπου σαφέστατα έχουμε κανονική συνιστώσα.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η εργασία αυτή χρηματοδοτήθηκε από το Υπουργείο Εθνικής Παιδείας και Θρησκευμάτων στο πλαίσιο των προγραμμάτων ΠΥΘΑΓΟΡΑΣ II. Ευχαριστούμε τους συνεργάτες μας Mustafa Aktar και Hayrullah Karabulut από το Kandilli Observatory της Κωνσταντινούπολης για την παραχώρηση σεισμολογικών δεδομένων και τη συνεργασία τους. Ευχαριστούμε ιδιαίτερα τον Ι. Κουκουβέλα, για τις παρατηρήσεις του και τις εύστοχες επισημάνσεις του.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Ambraseys, N. N. & Finkel, C. F., 1987. The Saros-Marmara earthquake of 9 August 1912, Earthquake Eng. Struct. Dyn. 15, 189-211.
- Ambraseys, N.N. & Jackson, J., 2000. Seismicity of the Sea of Marmara (Turkey) since 1500, Geophys. J. Int., 141, F1 – F6.
- Armijo, R., Pondard, N., Meyer, B., Uşarkus, G., Mercier de Lipinay, B., Malavieille, J., Dominguez, S., Gustercher, M.-A., Schmidt, S., Beck, C., Hagatay, N., Hakir, Z., Imren, C., Eris, K., Natalin, B., Φzalaybey, S., Tolun, L., Lefèvre, I., Seeber, L., Gasperini, L., Rangin, C., Emre, O. & Sarikavak, K., 2005. Submarine fault scarps in the Sea of Marmara pull-apart (North Anatolian Fault): Implications for seismic hazard in Istanbul, Geochem. Geophys. Geosyst. 6, Q06009, doi:10.1029/2004GC000896.
- Dreger, D., 2002. Manual of the Time-Domain Moment Tensor Inverse Code (TDMT_INVNC), Release 1.1, Berkeley Seismological Laboratory, 18p.
- Karabulut, H., Roumelioti, Z., Benetatos, C., Κώμεc Mutlu, A., Φzalaybey, S., Aktar, M. and A. Kiratzi, 2005. A source study of the 6 July 2003 (Mw 5.7) earthquake sequence in the Gulf of Saros (Northern Aegean Sea): seismological evidence for the western continuation of the

- Ganos fault. *Tectonophysics*, in press.
- Karfakis, I. and Doutsos, T. T., 1995. Late orogenic evolution of the Circum-Rhodope Belt, Greece. - *Neues Jahrbuch fuer Geologie und Palaeontologie. Monatshefte*. 1995; 5, Pages 305-319. 1995. <http://www.paleoweb.net/cgi-bin/jura/>
- Kiratzí, A. 2002. Stress tensor inversions along the westernmost North Anatolian Fault Zone and its continuation into the North Aegean Sea. *Geophysical Journal International*, 151, 360-376.
- Kiratzí, A. and E. Louvari, 2003. Focal mechanisms of shallow earthquakes in the Aegean Sea and the surrounding lands determined by waveform modeling: a new database. *Journal of Geodynamics*, 36, 251 - 274. <ftp://lemnos.geo.auth.gr/pub/users/sissy/RegFPS-louvari.pdf>
- Koukouvelas I. K. and A. Aydin, 2002. Fault structure and related basins of the North Aegean Sea and its surroundings, *Tectonics*, 21(5), 1046, doi:10.1029/2001TC901037, 2002.
- McKenzie, D and Jackson, J., 1983. The relationship between strain rates, crustal thickening, paleomagnetism, finite strain and fault movements within a deforming zone. *Earth and Planetary Science Letters*, 65, 182-202, and correction: *ibid*, 70, 444 (1984).
- McKenzie, D. and Jackson, J., 1986. A block model of distributed deformation by faulting, *J. Geol. Soc. Lond.*, 143, 249-253.
- Παπαζάχος Β. και Παπαζάχου Κ., 2002. Οι σεισμοί της Ελλάδας, Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη, Ελλάδα, σελ. 320.
- Papazachos, C. and A. Kiratzí, 1996. A detailed study of the active crustal deformation in the Aegean and surrounding area. *"Tectonophysics"*, 253, 129-154.
- Pavlidis S., Mountrakis D., Kiliás A., and Tranos M., 1990. The role of strike-slip movements in the extensional area of Northern Aegean (Greece). A case of transtensional tectonics. *Annales Tectonicae. Special Issue Vol. IV, n.2*, 196-211.
- Rondoyanni, Th., Georgiou, Ch., Galanakis, D. and M. Kourouzidis, 2004. Evidence of active faulting in Thrace region (northeastern Greece). *Bull. of the Geol. Soc. of Greece*, XXXVI, 1671 - 1678.
- Taymaz, T., Jackson, J. and McKenzie, D., 1991. Active tectonics of the north and central Aegean Sea. *Geophys. J. Int.*, 106, 433-490.

ABSTRACT

SEISMICITY AND SEISMOTECTONIC CHARACTERISTICS OF NE AEGEAN SEA AND ITS SURROUNDING LANDS

Anastasia Kiratzí, Christoforos Benetatos, Zafeiria Roumelioti

*Department of Geophysics, Aristotle University of Thessaloniki, 54124 Thessaloniki
kiratzí@geo.auth.gr, benet@geo.auth.gr, zroum@geo.auth.gr*

The area of western Macedonia and Thrace is considered to be of low seismicity, at least according to the instrumental seismicity information available in Greece for the years after 1911. Nevertheless, geological and neotectonic studies suggest that recent, neogene and quaternary, deposits have been affected by the activation of small and larger in length faults, thus implying that the entire area is undergoing considerable deformation. The most predominant seismotectonic feature in satellite images is the Kavala-Xanthi-Komotini fault, which appears to have a total length of approximately 120 km and terminates to the east within the Evros valley. Except from the on-land faults, one should also consider the seismic hazard imposed by the branches of the North Anatolia fault, which enter the North

Aegean Sea from the east. The most important, in terms of macroseismic consequences, historical earthquakes in the area is the one of 1752 (M 7.5) in Andrianoupolis and the one of 1785 (M 6.7) in Komotini. These earthquakes are assigned large return periods, perhaps of the order of hundreds or even thousands of years. Taking into account the results of recent studies, as well as the alerting historical record of the area, seismologists are challenged to predict the expected ground motion from possible activation or re-activation of the large faults of the area and especially those mapped in the proximity of modern towns. However, in order to define realistic earthquake scenarios, more information is needed on the possible seismic sources. In the present work, we study the general characteristics of recent seismic sequences in the area, i.e. the 2003 sequence in the gulf of Saros and the 2004 sequence in the small town of Loutra close to Aelxandroupolis, toward the re-assessment of the seismotectonic setting of the area.