

ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ

Διπλωματική Διατριβή
Χρήστου Ευάγγελος

Φοιτητής Τμήματος Γεωλογίας ΑΠΘ με Κατεύθυνση : Γεωφυσική

Τίτλος

“ Συμβολή στην Εκτίμηση Εστιακών Παραμέτρων Ιστορικών Σεισμών
στη Θάλασσα του Μαρμαρά ”



Επίβλεψη: Dr. Παπαδημητρίου Ελευθερία, Καθηγήτρια Σεισμολογίας,
Τομέας Γεωφυσικής ΑΠΘ

Συνεπίβλεψη: Dr. Παραδεισοπούλου Παρθένα, Διδάκτωρ Σεισμολογίας,
Τομέας Γεωφυσικής ΑΠΘ

Ακαδημαϊκό Έτος : 2013 – 2014

ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ

Σεισμολογία

“ Συμβολή στην Εκτίμηση Εστιακών Παραμέτρων Ιστορικών Σεισμών
στη Θάλασσα του Μαρμαρά ”

Διπλωματική Διατριβή

Άγγελος Χρήστου

Φοιτητής τμήματος Γεωλογίας ΑΠΘ {2010 – 2014}

Ακαδημαϊκό Έτος : 2013 – 2014

Περιεχόμενα

<u>Πρόλογος</u>	... σελ. 3
<u>Κεφάλαιο 1^ο ~ Εισαγωγή</u>	
1.1 Περιοχή Έρευνας – Μελέτης	... σελ. 5
<u>Κεφάλαιο 2^ο ~ Σεισμοτεκτονικές Ιδιότητες της Θάλασσας του Μαρμαρά</u>	
2.1 Το Ρήγμα της Βόρειας Ανατολίας	...σελ. 6
2.2 Λιθοσφαιρικές Πλάκες & οι Κινήσεις τους που Επηρεάζουν την Ενεργό Τεκτονική στη Θάλασσα του Μαρμαρά.	...σελ. 7
2.3 Ενεργός Τεκτονική, Μηχανισμοί Γένεσης Σεισμών, Γεωμετρία Ρηγμάτων & η Επίδρασή τους στη Σεισμικότητα	...σελ. 8
2.4 Η κινηματική προσομοίωση του εφελκυστικού πεδίου της Θάλασσας του Μαρμαρά	...σελ. 14
<u>Κεφάλαιο 3^ο ~ Η Σεισμικότητα στη Θάλασσα του Μαρμαρά</u>	
3.1 Η Ιστορική Σεισμικότητα	...σελ. 18
3.2 Οι Σεισμοί στην Κωνσταντινούπολη	...σελ. 20
3.3 Εστιακές Παράμετροι Ιστορικών Σεισμών στη Θάλασσα του Μαρμαρά	...σελ. 32
3.4 Η Σύγχρονη Σεισμικότητα	...σελ. 43
<u>Κεφάλαιο 4^ο ~ Εκτίμηση Μακροσεισμικών Αποτελεσμάτων στη Θάλασσα του Μαρμαρά</u>	
4.1 Μεθοδολογία	...σελ. 49
4.2 Εκτίμηση της Μακροσεισμικής Έντασης	...σελ. 56
<u>Κεφάλαιο 5^ο ~ Πειραματικά Αποτελέσματα Διπλωματικής Διατριβής</u>	
Συμβολή στη Μελέτη των Μακροσεισμικών Αποτελεσμάτων στη Θάλασσα του Μαρμαρά	...σελ. 60
<u>Βιβλιογραφία</u>	...σελ. 79

Πρόλογος

Η διπλωματική αυτή διατριβή εντάσσεται στα πλαίσια υποχρεωτικής επιλογής που κάνουν οι φοιτητές με σκοπό την εκπόνηση διπλωματικής εργασίας από ένα κατάλογο θεμάτων που προτείνεται από τον εκάστοτε τομέα του τμήματος Γεωλογίας ΑΠΘ, κάθε ακαδημαϊκό έτος. Η παρούσα διατριβή προέκυψε έπειτα από την ακαδημαϊκή μου εκπαίδευση στην επιστήμη της Γεωλογίας & εξειδικευμένη επιμόρφωσή μου σε θέματα και προβληματισμούς της σύγχρονης Γεωφυσικής και Σεισμολογίας από το 1^ο έως το τέλος του 4^{ου} έτους σπουδών μου στο τμήμα Γεωλογίας ΑΠΘ.

Αξίζει να αναφερθεί πως, ο τίτλος της εργασίας προέκυψε όχι από επιλογή ορισμένου θέματος του καταλόγου των προτεινόμενων διπλωματικών εργασιών του τομέα Γεωφυσικής του ΑΠΘ κατά το ακαδημαϊκό έτος 2013 – 2014, αλλά έπειτα από την εκπαιδευτική και ερευνητική μου ενασχόληση, την ανάληψη πρωτοβουλιών και υποχρεώσεων υπό την επίβλεψη και καθοδήγηση της καθηγήτριας Σεισμολογίας κ. Ελευθερίας Παπαδημητρίου, η διδασκαλία και εκπαιδευτική συνεισφορά της οποίας καθίσταται ανεκτίμητη στα πρώτα αλλά και στα μελλοντικά μου βήματα επί των μυστηριωδών μονοπατιών της Γεωφυσικής επιστήμης & Σεισμολογίας. Συνεπώς, αποτέλεσμα της συνεργασίας μας αυτής συνιστά η διπλωματική αυτή διατριβή στην οποία, προσπάθησα να συμβάλλω στην εκτίμηση εστιακών παραμέτρων ιστορικών σεισμών στη Θάλασσα του Μαρμαρά και να εκτιμήσω τα μακροσεισμικά αποτελέσματα ισχυρών σεισμών που εκδηλώθηκαν σε ιστορικούς αλλά και σύγχρονους χρόνους. Αναλυτικότερα, η δομή της εργασίας και οι στόχοι που προσπαθήσαμε να επιτύχουμε περιγράφονται στη συνέχεια.

Στο 1^ο κεφάλαιο το οποίο συνιστά την εισαγωγή, παρουσιάζονται πληροφορίες της περιοχής μελέτης.

Στο 2^ο κεφάλαιο επιτυγχάνεται ο προσδιορισμός των σεισμοτεκτονικών ιδιοτήτων της Θάλασσας του Μαρμαρά. Αρχικά, πραγματοποιείται μια εισαγωγή στη γεωτεκτονική και σεισμοτεκτονική μελέτη του ρήγματος της Βόρειας Ανατολίας, επακόλουθα αναλύεται η γεωδυναμική των λιθοσφαιρικών πλακών, που συντελούν στην ενεργό τεκτονική της Θάλασσας του Μαρμαρά με ιδιαίτερα καταστροφικούς σεισμούς. Έπειτα δίνονται πληροφορίες επί των μηχανισμών γένεσης σεισμών και των εστιακών παραμέτρων σεισμικών ρηγμάτων και τέλος επιτυγχάνεται η κινηματική προσομοίωση του εφελκυστικού πεδίου της Θάλασσας του Μαρμαρά που συμβάλλει στην υψηλή σεισμικότητα.

Στο 3^ο κεφάλαιο εντριβώ στη σεισμικότητα της Θάλασσας του Μαρμαρά από τους ιστορικούς χρόνους, με αποτέλεσμα να αναλύεται η ιστορική σεισμικότητα της περιοχής και να προσδιορίζεται η μεθοδολογία και η επιστημονική διαδικασία στο σύνολό της, που ακολουθεί ο κλάδος της Ιστορικής Σεισμολογίας. Εισάγονται στο τμήμα αυτό ιστορικές πληροφορίες, πηγές και ιστορικά κείμενα, τα οποία οδηγούν στην εκτίμηση των εστιακών παραμέτρων και των μακροσεισμικών αποτελεσμάτων ιστορικών σεισμών στην Κωνσταντινούπολη και στην ευρύτερη περιοχή της Θάλασσας του Μαρμαρά. Επιπλέον, μετά το ταξίδι μας στο βάθος της ιστορίας προκειμένου να διερευνηθεί η ιστορική σεισμικότητα, φθάνουμε στη σύγχρονη εποχή της ενόργανης Σεισμολογίας, όπου μελετάται η σύγχρονη σεισμικότητα της Θάλασσας του Μαρμαρά όπως αυτή καταγράφεται έως σήμερα.

Στο 4^ο κεφάλαιο αρχικά, συνοψίζονται πληροφορίες που αφορούν, τη σεισμικότητα της περιοχής, τα μοντέλα σεισμικότητας και αναλύεται η μεθοδολογία που

ακολουθείται ώστε να εκτιμηθούν τα μακροσεισμικά αποτελέσματα ιστορικών αλλά και σχετικά πιο σύγχρονων σεισμών.

Σημαντικότερα, στο 5^ο και τελευταίο κεφάλαιο πραγματοποιείται και δίνεται η μέγιστη δυνατή έμφαση στα πειραματικά αποτελέσματα της διατριβής μου και παρουσιάζεται η συμβολή μου στη μελέτη των μακροσεισμικών αποτελεσμάτων έξι εκ των ισχυρότερων σεισμών που εκδηλώθηκαν κατά τη χρονική διάρκεια 300 ετών, από την 22^η Μαΐου 1766 έως την 22^η Ιουλίου 1967, στη Θάλασσα του Μαρμαρά.

Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου διατριβής θα ήθελα πρώτα να ευχαριστήσω την καθηγήτριά μου κ. Ελευθερία Παπαδημητρίου, καθηγήτρια Σεισμολογίας του τομέα Γεωφυσικής του ΑΠΘ, χωρίς την εκπαιδευτική συνεισφορά και ερευνητική καθοδήγηση της οποίας δεν θα είχε επιτευχθεί η άρτια προπτυχιακή μου κατάρτιση στην επιστήμη της Σεισμολογίας. Την ευχαριστώ για την επιστημονική της καθοδήγηση, τις ουσιαστικές και ωφέλιμες συμβουλές, την ηθική και πνευματική υποστήριξη και βοήθεια που μου παρείχε από το 2^ο έτος σπουδών μου και που συνεχίζει έως σήμερα, με στόχο την επιστημονική και ανθρωπιστική μου ανέλιξη.

Επιπρόσθετα, ιδιαίτερες ευχαριστίες εκφράζω στον καθηγητή μου κ. Καρακαϊφή Γιώργο, καθηγητή του τομέα Γεωφυσικής ΑΠΘ, ο οποίος μου έδωσε τα αρχικά ερεθίσματα ώστε να εισαχθώ στην επιστήμη της Σεισμολογίας από το 1^ο εξάμηνο σπουδών μου. Επιπλέον, για τη προσπάθειά του, το χρόνο και την ενέργεια που μου αφιέρωσε ώστε να επιτευχθεί η άριστη εισαγωγή μου στις επιστήμες της Σεισμολογίας και της Γεωφυσικής.

Η ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας δεν θα ήταν δυνατή εάν η κ. Παραδεισοπούλου Παρθένα, διδάκτορας Σεισμολογίας του τομέα Γεωφυσικής ΑΠΘ, δε διέθετε το χρόνο της με σκοπό τη κατάρτισή μου σε υπολογιστικά προγράμματα και υπολογιστικές μεθόδους, που καθόρισαν τη συμβολή μου στην εκτίμηση των μακροσεισμικών αποτελεσμάτων ισχυρών σεισμών στη Θάλασσα του Μαρμαρά. Την ευχαριστώ πολύ για τη συνεπίβλεψη και συνεπικουρία της κατά τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής μου διατριβής.

Πολλές ευχαριστίες εκφράζω στην αγαπημένη μου φίλη Σοφία Κολιοπούλου, MSc. Βυζαντινής Αρχαιολογίας & Ιστορίας Τέχνης, που με την αγάπη της, τη φιλική συμπαράσταση και ψυχολογική της ενθάρρυνση, από το 2^ο έτος σπουδών μου, συνέβαλε στην άριστη κατάρτισή μου και αγάπη μου προς τις Γεωεπιστήμες και ιδιαίτερα προς τις επιστήμες της Σεισμολογίας και Γεωφυσικής. Επιπλέον, της εκφράζω την ευγνωμοσύνη μου για την άριστη επιστημονική της συμβολή σε θέματα της Βυζαντινής Αρχαιολογίας, ιστορικών πηγών της Βυζαντινής περιόδου και της Ιστορικής Σεισμολογίας.

Ευχαριστώ πολύ τους αγαπημένους μου φίλους και συμφοιτητές Δημήτρη Μενεξόπουλο, Νικόλα Γρένδα και Χρήστο-Αλέξανδρο Πλαστήρα για τα όμορφα φοιτητικά χρόνια, κατά τη διάρκεια των οποίων μοιραστήκαμε το πάθος μας για τις γεωεπιστήμες, ενδιαφέροντα και δραστηριότητες κοινωνικοπολιτικού, καλλιτεχνικού και πνευματικού ευρύτερα περιεχομένου.

Εντέλει, θα ήθελα να εκφράσω την απέραντη ευγνωμοσύνη μου στην οικογένειά μου, για την παιδεία, την μόρφωση, τον ανθρωπισμό, τη πνευματική καλλιέργεια και επιστημονική κατάρτιση που μου προσέφεραν, στηρίζοντάς με ηθικά, πνευματικά και οικονομικά από την αρχή της ύπαρξής μου.

§ 1. Εισαγωγή

1.1 Περιοχή Έρευνας

Η **Θάλασσα του Μαρμαρά ή Προποντίδα** (Αρχαία Ελληνικά : *Προποντίς*) είναι κλειστή θάλασσα που συνδέει τον Εύξεινο Πόντο (Μαύρη Θάλασσα) με το Αιγαίο Πέλαγος, χωρίζοντας κατ' αυτό τον τρόπο το ασιατικό μέρος της Τουρκίας από το ευρωπαϊκό και κατ' επέκταση την Ευρώπη από την Ασία. Έχει δύο ακραίους πορθμούς, τον Βόσπορο, που τη συνδέει με τη Μαύρη Θάλασσα, και τον Ελλήσποντο, που τη συνδέει με το Αιγαίο. Ο Βόσπορος χωρίζει επίσης και την Κωνσταντινούπολη στην ασιατική και την ευρωπαϊκή της πλευρά. Έχει έκταση 11.350 χλμ² και καλύπτει όλη τη θαλάσσια έκταση από την Καλλίπολη μέχρι τη Νικομήδεια, περίπου 145 μίλια απόσταση. Το συνολικό ανάπτυγμα της ευρωπαϊκής ακτής της είναι περίπου 130 μίλια, ενώ της ασιατικής ακτής περίπου τα 300 μίλια.

Γενικά η Θάλασσα του Μαρμαρά αποτελεί ένα σύστημα ισχυρών θαλασσίων ρευμάτων, όπου ο Βόσπορος μεταφέρει σ' αυτή την υπερπλήρωση υδάτων του Ευξείνου που προέρχονται από τις συνεχείς σ' αυτόν εκβολές ποταμών, και στη συνέχεια η θάλασσα του Μαρμαρά εκβάλλει τη δική της υπερπλήρωση δια του Ελλήσποντου στο Αιγαίο. Συνέπεια αυτού είναι το υφιστάμενο συνεχές θαλάσσιο ρεύμα, το λεγόμενο «ρεύμα του Μαρμαρά», με μόνιμη κατεύθυνση προς το Αιγαίο. Σημειώνεται ότι το ρεύμα του Μαρμαρά έχει προκαλέσει κατά καιρούς πολλά ναυτικά ατυχήματα. Για τον λόγο αυτό η πλοήγηση των διερχομένων πλοίων υπό πλοηγούς είναι υποχρεωτική. Υπάρχουν δύο μείζονες νησιωτικές ομάδες γνωστές ως Πριγκηπονήσια και Νησιά του Μαρμαρά. Η τελευταία ομάδα διαθέτει πλούσιες πηγές μαρμάρου και από εκεί παίρνει το όνομά της και η θάλασσα.



Δορυφορική εικόνα της Θάλασσας του Μαρμαρά μέσω STS 40, Ιούνιος 1991. NASA.

§ 2. Σεισμοτεκτονικές Ιδιότητες της Θάλασσας του Μαρμαρά

2.1 Το Ρήγμα της Βόρειας Ανατολίας

Το ρήγμα της Βόρειας Ανατολίας, που έχει προκαλέσει πολλούς, μεγάλους σε μέγεθος σεισμούς στα ιστορικά αλλά επίσης και πρόσφατα χρόνια, όπως τον Σεισμό του Ιζμίτ το 1999, διέρχεται υπό του πυθμένα της Θάλασσας του Μαρμαρά. Οι καταστροφικές επιπτώσεις της σεισμικής ενεργότητας του ρήγματος της Ανατολίας στην ευρύτερη περιοχή της Τουρκίας, έχουν δώσει & συνεχίζουν να δίνουν το έναυσμα στους γεωφυσικούς επιστήμονες και γεωεπιστήμονες γενικότερα, ενδελεχούς, πολυσχιδούς & υψηλού επιπέδου έρευνας επί των νόμων, των αιτιών και των ιδιοτήτων που διέπουν ένα τόσο υψηλής ενεργότητας γεωδυναμικό σύστημα εξαιρετικού γεωλογικού ενδιαφέροντος. Συμπερασματικά, είναι ωφέλιμο αρχικά, να κατανοήσουμε τα βαθύτερα φυσικά αίτια της κινηματικής των λιθοσφαιρικών πλακών για την περιοχή του Μαρμαρά, ώστε στη συνέχεια να μελετήσουμε, να ερευνήσουμε και να αναλύσουμε τις σεισμοτεκτονικές ιδιότητες, τις εστιακές παραμέτρους ιστορικών σεισμών και τα σεισμικά φαινόμενα γενικότερα που χαρακτηρίζουν τη Θάλασσα του Μαρμαρά. Το ρήγμα της Βόρειας Ανατολίας παρουσιάζει αρκετές ομοιότητες με το ρήγμα του Αγίου Ανδρέα στην Καλιφόρνια, καθώς και τα δύο ρήγματα είναι δεξιόστροφα οριζόντιας μετατόπισης, έχουν παρόμοιους ρυθμούς ολίσθησης και ίδιο περίπου συνολικό μήκος. Το ρήγμα όμως του Αγίου Ανδρέα έχει προκαλέσει μόνο 3 σεισμούς με μέγεθος μεγαλύτερο του $M=6.7$ στον 20^ο αιώνα. Σε αντίθεση, στο ίδιο χρονικό διάστημα το ρήγμα της Βόρειας Ανατολίας έχει προκαλέσει έντεκα (11) σεισμούς με αντίστοιχα μεγέθη (έως $M=7.9$). Στους σεισμούς αυτούς συμπεριλαμβάνεται ο πολύνεκρος σεισμός της 17^{ης} Αυγούστου 1999. Ο πρώτος σεισμός της σειράς αυτής του 20^{ου} αιώνα είναι ο σεισμός του 1939. Το χρονικό διάστημα που μεσολάβησε μεταξύ αυτών των σεισμών, που μετανάστευσαν προς τα δυτικά, ποικίλλει από 3 μήνες έως 32 χρόνια. Οι 7 πιο ισχυροί και πολύνεκροι σεισμοί του 20^{ου} αιώνα είναι:

1939 (26/12) με μέγεθος $M=7.9$ και μήκος διάρρηξης περίπου 360 km

1942 (20/12) με μέγεθος $M=6.9$ και μήκος διάρρηξης περίπου 50 km

1943 (26/11) με μέγεθος $M=7.6$ και μήκος διάρρηξης περίπου 280 km.

1944 (01/02) με μέγεθος $M=7.3$ και μήκος διάρρηξης περίπου 165 km.

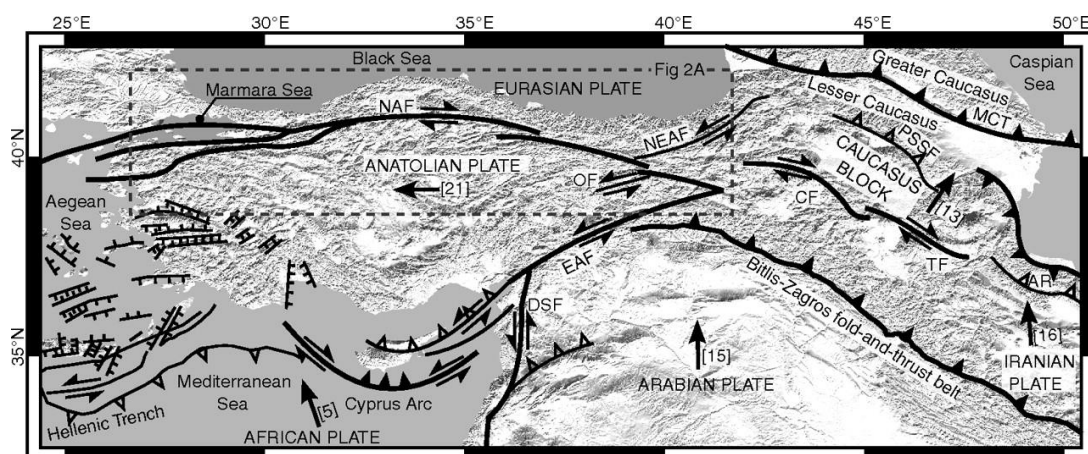
1957 (26/05) με μέγεθος $M=6.8$ και μήκος διάρρηξης περίπου 30 km.

1967 (22/08) με μέγεθος $M=7.1$ και μήκος διάρρηξης περίπου 80 km.

1999 (17/08) με μέγεθος $M=7.4$ και μήκος διάρρηξης περίπου 140 km.

2.2 Λιθοσφαιρικές Πλάκες & οι Κινήσεις τους που Επηρεάζουν την Ενεργό Τεκτονική στη Θάλασσα του Μαρμαρά.

Το ρήγμα της Βόρειας Ανατολίας είναι ένα από τα σημαντικότερα ενεργά ρήγματα οριζόντιας μετατόπισης του κόσμου. Είναι υπεύθυνο για πολυάριθμους και μεγάλους σε μέγεθος σεισμούς. Το μήκος του ξεπερνάει τα 1000 km. Στο μεγαλύτερο μήκος του αποτελείται βασικά από μία σαφή και "γραμμική" ρηξιγενή ζώνη, με τυπικές δομές οριζόντιας μετατόπισης (Σχήμα 2.1). Καθώς όμως πλησιάζει προς το εφελκυστικό πεδίο του Αιγαίου διασπάται σε τουλάχιστον δύο κλάδους και κατά θέσεις αποκτά χαρακτήρα πλαγιοκανονικού ρήγματος.



Σχήμα 2.1 Η ανατομία του ρήγματος της Βόρειας Ανατολίας (Frazer J., 2010).

Η προς τα βόρεια κίνηση της Αραβικής Πλάκας με κατεύθυνση σχετική προς την Ευρασιατική, προκαλεί την προς τα δυτικά κίνηση και διαφυγή της Μικροπλάκας της Ανατολίας, καθώς και την προς τα ανατολικά κίνηση ενός βορειοανατολικού τμήματός της (Ketin 1948, McKenzie 1972, Sengor 1979). Το ρήγμα της Βόρειας Ανατολίας, όπως επίσης και το ρήγμα της Ανατολικής Ανατολίας συνιστούν τα βόρεια και ανατολικά αντίστοιχα όρια της προς τα δυτικά κίνησης της μικροπλάκας. Η κινηματική ωστόσο του βορειοανατολικού τεμάχους είναι αρκετά σύνθετη λόγω της εφελκυστικής παραμορφωτικής τεκτονικής στην οποία υπόκειται εξαιτίας της ενεργότητας κανονικών και πλαγιοκανονικών ρηγμάτων.

Η υψηλή σεισμικότητα της Τουρκίας παρατηρείται στις εξής περιοχές:

- I. στο κυρίως τμήμα του ρήγματος της Ανατολίας που είναι το Βόρειο Ρήγμα Ανατολίας (North Anatolian Fault – NAF)
- II. στο δυτικό τμήμα του NAF, που εντοπίζεται στην Κωνσταντινούπολη και διασχίζει τη θάλασσα του Μαρμαρά με πολύ υψηλή σεισμικότητα από τους ιστορικούς χρόνους έως σήμερα
- III. το ανατολικό τμήμα (East Anatolian Fault – EAF)
- IV. το σύμπλεγμα ρηγμάτων (triple junction) "Κ" που εντοπίζεται στην περιοχή Karlıova της Ανατολικής –Βορειοανατολικής (ABA) Τουρκίας.

Ο βόρειος κλάδος του ρήγματος οριοθετεί τη νότια πλευρά του κόλπου της Νικομήδειας (Izmit), τη λεκάνη του Μαρμαρά, διασχίζει τη χερσόνησο της Καλλίπολης, διατρέχει κατά μήκος τη νότια πλευρά του κόλπου του Σάρου και τερματίζει στο βύθισμα του Βόρειου Αιγαίου. Ο νότιος κλάδος παρακάμπτει τη νότια πλευρά της θάλασσας του Μαρμαρά, κατά μήκος της χερσονήσου Biga (ΒΔ Μικρά Ασία), με μια σειρά μικρών σχετικά διακριτών ρηγμάτων και εισχωρεί στο Αιγαίο, μεταξύ Λέσβου και ακτών Μ. Ασίας (κόλπος Αρδαμυτίου), πιθανά συνεχίζει μέχρι το βύθισμα της Σκύρου.

Κατά τη διάρκεια του 20^{ου} αιώνα μόνο ο σεισμός του Hendek το 1943 συνδέεται με τη ρηξιγενή ζώνη του σεισμού του 1999 (αλληλοεπικάλυψη). Ωστόσο προηγούμενοι σεισμοί το 1719, 1754, 1878, 1894 συνέβησαν επίσης στον κόλπο της Νικομήδειας (Izmit) στο ίδιο τμήμα του ρήγματος του 1999. Οι σεισμοί του 1719 και του 1754 προκάλεσαν το θάνατο 6.000 και 2.000 ανθρώπων αντίστοιχα, στο Izmit, στην Κωνσταντινούπολη και στην περιοχή Adapazari. Υπάρχουν λίγες σχετικά πληροφορίες για το σεισμό του 1878 ο οποίος προκάλεσε σημαντικές ζημιές και θανάτους ανθρώπων στις ίδιες περιοχές, που πλήγηκαν από το σεισμό του 1999 (Sapanca και Adapazari). Ο σεισμός του 1894 προκάλεσε επίσης ανάλογα αποτελέσματα (1400 νεκροί) στις περιοχές από την Κωνσταντινούπολη έως το Adapazari. Οι σεισμοί του 1754 και του 1878 εντοπίζονται πιθανόν στην περιοχή ανάμεσα στο δυτικό μέρος του κόλπου του Izmit και του Adapazari. Τα τμήματα διάρρηξης των σεισμών αυτών, αποτελούν το αντικείμενο συστηματικών σεισμοτεκτονικών, παλαιοσεισμολογικών και νεοτεκτονικών ερευνών από πολλές ερευνητικές ομάδες παγκοσμίως.

2.3 Η Ενεργός Τεκτονική, οι Μηχανισμοί Γένεσης Σεισμών, η Γεωμετρία Ρηγμάτων & η Επίδρασή τους στη Σεισμικότητα.

Στο ρου της ιστορίας, η περιοχή της Θάλασσας του Μαρμαρά, στη Βορειοδυτική Τουρκία, έχει υποστεί πολυάριθμους και καταστροφικούς σεισμούς. Η ενεργός αυτή τεκτονική καθορίζεται από το δεξιόστροφο οριζόντιας μετατόπισης ρήγμα της Βόρειας Ανατολίας, το οποίο ανήκει στην ευρύτερη ζώνη διάρρηξης της Ανατολίας που διατρέχει τη Τουρκία από την περιοχή Karlıova στα ανατολικά (41°E) έως την Κωνσταντινούπολη (29°E) στα δυτικά. Κατά μήκος αυτής της απόστασης η ζώνη διάρρηξης μπορεί να καθοριστεί με μεγάλη ακρίβεια εξαιτίας των μορφολογικών της χαρακτηριστικών, καθιστώντας την κατά κάποιο τρόπο ένα επίμηκες όριο λιθοσφαιρικών πλακών που διαχωρίζει την άκαμπτη Μαύρη θάλασσα από τις υψηλής σεισμικότητας περιοχές της Ανατολίας (McClusky et al. 2000).

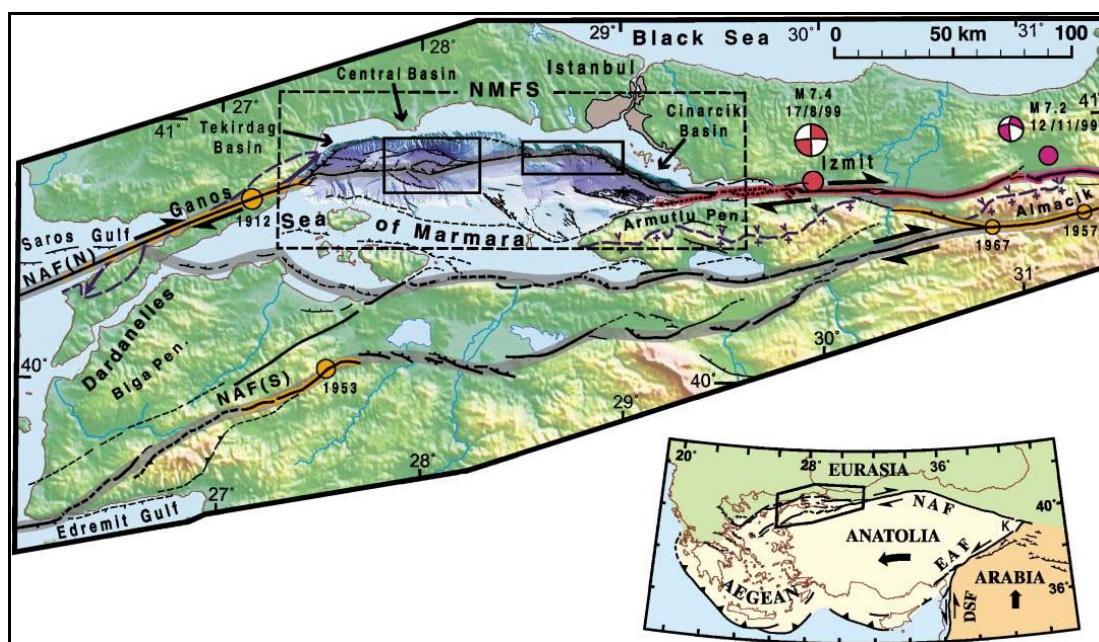
Η σεισμογενής ζώνη της Ανατολίας έχει εκδηλώσει σεισμούς μεγέθους : $M_s > 7$ με επιφανειακές εκδηλώσεις σε όλο το εύρος του μήκους της κατά τη διάρκεια του 20^{ου} αιώνα με χαρακτηριστικές τις καταστροφικές σεισμικές ακολουθίες του 1939 και 1999 (Ambraseys 1970, Barka 1996, Stein et al. 1997). Το δεξιόστροφο οριζόντιας μετατόπισης ρήγμα συνεχίζει δυτικά της πόλης Νικομήδειας (Izmit) και διαχωρίζεται σε επιμήκη τμήματα παράλληλα και υποπαράλληλα μεταξύ τους, στη Θάλασσα του Μαρμαρά, στη Βορειοδυτική Τουρκία όπως επίσης και στο βόρειο Αιγαίο Πέλαγος

όπου εντοπίζονται οι προεκτάσεις του (Barka & Kandinsky-Kade 1988, Taymaz et al. 1991).

Σεισμικές διασκοπήσεις βασισμένες στη μέθοδο της σεισμικής ανάκλασης που έλαβαν χώρα στην περιοχή του Μαρμαρά αποκαλύπτουν την ύπαρξη πολλών ρηγμάτων στον πυθμένα της θάλασσας με γεωμετρικά χαρακτηριστικά κανονικής συνιστώσας ολίσθησης (Smith et al. 1995, Okay et al. 1999, Parke et al. 2000). Επιπλέον, η εκδήλωση σεισμών που συνδέονται με μηχανισμούς γένεσης κανονικών και πλαγιοκανονικών ρηγμάτων έχει επιβεβαιωθεί όχι μόνο για τη Θάλασσα του Μαρμαρά αλλά και για την ευρύτερη περιοχή της Δυτικής Τουρκίας.

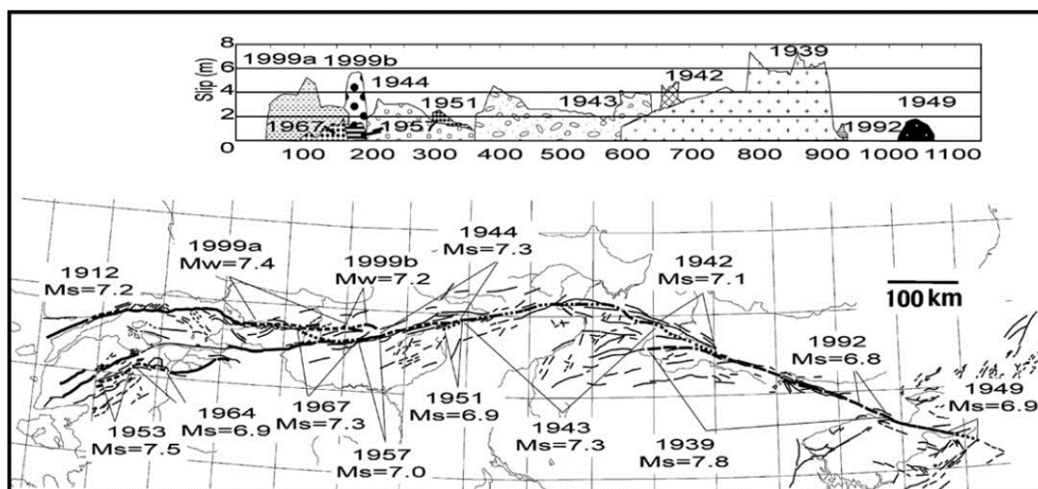
Η θάλασσα του Μαρμαρά, υποθετικά, σχηματίστηκε από το εφελκυστικό τεκτονικό καθεστώς που ενεργούσε στο φλοιό της ευρύτερης περιοχής. Σύγχρονες έρευνες GPS αποδεικνύουν ότι οι διατμητικές τάσεις διεύθυνσης ABA – ΔΝΔ κατά μήκος της θάλασσας του Μαρμαρά προκαλούν έκταση της περιοχής με ρυθμό ολίσθησης 23 ± 3 mm/yr (Straub et al. 1997, McClusky et al. 2000). Στην περιοχή της θάλασσας του Μαρμαρά, το δεξιόστροφο οριζόντιας μετατόπισης ρήγμα της βόρειας Ανατολίας χωρίζεται προς τα δυτικά σε δύο κύριους κλάδους με μεταξύ τους απόσταση περίπου 100 km προτού εισέλθουν στη βόρεια περιοχή του Αιγαίου. Σύμφωνα με γεωδαιτικά δεδομένα από δημοσιευμένες εργασίες επί της περιοχής του Μαρμαρά (Armijo et al., 1999; McClusky et al., 2000) η δεξιόστροφη κίνηση εμφανίζεται μετατοπισμένη με κατεύθυνση προς τα βόρεια, δηλαδή προς το βόρειο κλάδο του ρήγματος κατά μήκος της ρομβοειδούς μορφολογικής λεκάνης που οι δύο κλάδοι του ρήγματος της βόρειας Ανατολίας σχηματίζουν (Σχήμα 2.2). Συνεπώς, η Θάλασσα του Μαρμαρά μπορεί να θεωρηθεί ως ένα τεκτονικό βύθισμα το οποίο έχει δημιουργηθεί από την εφελκυστική τεκτονική που παρατηρείται παράλληλα με την έντονη δεξιόστροφη οριζόντια ολίσθηση, στο δυτικό τμήμα του ρήγματος της βόρειας Ανατολίας καθώς αυτό διαχωρίζεται σε κλάδους. Τα μορφοτεκτονικά δεδομένα από βυθοσκοπήσεις των κλάδων του NAF στο θαλάσσιο πυθμένα και η κινηματική ανάλυση των ρηγμάτων, σε συνδυασμό με τους μηχανισμούς γένεσης σεισμών της θάλασσας του Μαρμαρά, προτείνουν ουσιαστικά ένα τεκτονικό μοντέλο βύθισης της ευρύτερης περιοχής λόγω της επίδρασης των έντονων τοπικά εφελκυστικών τάσεων. Η γεωτεκτονική διεργασία αυτή έχει ως αποτέλεσμα το σχηματισμό της τεκτονικής λεκάνης διατμητικής διάνοιξης της θάλασσας του Μαρμαρά. Σε συμφωνία με τα αποτελέσματα των προαναφερόμενων ερευνών (Armijo et al., 1999), δεχόμαστε ότι η λεκάνη της θάλασσας του Μαρμαρά περιέχει ένα σημαντικό ποσοστό πρόσφατων θαλασσιών ιζημάτων μέσου πάχους 1-2 km, όπου σε βαθύτερες λεκάνες που εντοπίζονται προς τα βόρεια όρια της θάλασσας του Μαρμαρά, το μέσο πάχος αυτό αυξάνει έως και τα 6 km. Οι στρωματογραφικές ακολουθίες αυτές των ιζημάτων και ιζηματογενών πετρωμάτων έχουν υποστεί έντονη ενεργό τεκτονική που σήμερα διακρίνεται με την παρουσία κανονικών ρηγμάτων καθώς αυτά έχουν παρατηρηθεί με μεγάλη ευκρίνεια σε σύγχρονες έρευνες σεισμικών διασκοπήσεων ανάκλασης και απόδοσης του σεισμικού προφίλ της περιοχής (Parke et al. 1999). Εντός της ευρύτερης σε έκταση τεκτονικής λεκάνης διατμητικής διάνοιξης της θάλασσας του Μαρμαρά, εντοπίζονται μικρότερα γεωτεκτονικά συστήματα λεκανών με σημαντικότερη τη λεκάνη που έχει σχηματιστεί από μία υποθαλάσσια ρηξιγενή ζώνη μεγάλου άλματος που χαρακτηρίζεται από πλαγιοκανονικά ρήγματα και που συνδέει τους δύο κύριους κλάδους ρηγμάτων του ρήγματος της βόρειας Ανατολίας όπως αυτό επεκτείνεται στη

θάλασσα του Μαρμαρά. Η ρηξιγενής αυτή ζώνη ορίζεται ως Ρηξιγενές Σύστημα του Βόρειου Μαρμαρά – North Marmara Fault System (NMFS), χαρακτηρίζεται από υψηλή σύγχρονη σεισμικότητα καθώς έχει ενεργοποιηθεί το 1912 και το 1999 με αξιοσημείωτες τις ολισθήσεις των ρηγμάτων Ganos και Νικομήδειας (Izmit) αντίστοιχα. Επιπλέον, ιδιαίτερα σημαντικό είναι το γεγονός ότι, μέσω σεισμολογικών ερευνών για τη Θάλασσα του Μαρμαρά, το ρήγμα της Βόρειας Ανατολίας γενικότερα και το NMFS, προκύπτουν αποτελέσματα μετανάστευσης επικέντρων ισχυρών και πολύ ισχυρών σεισμών από τα Α προς τα Δ με βάση σύγχρονες και ιστορικές καταγραφές.



Σχήμα 2.2

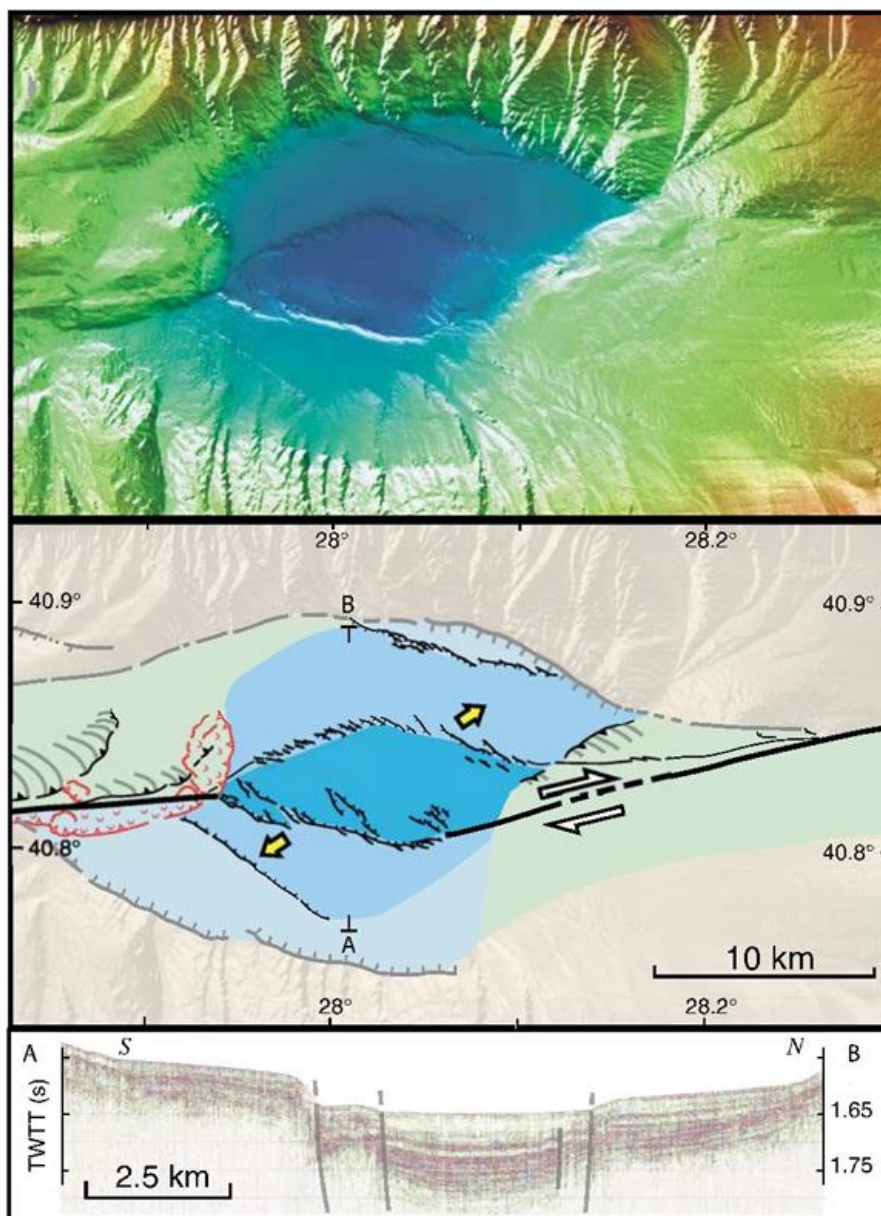
Η ενεργός τεκτονική της θάλασσας του Μαρμαρά, ανανεωμένο μοντέλο από Armijo et al., 1999. Συμπεριλαμβάνονται τα δεδομένα των πρόσφατων βυθοσκοπήσεων τύπου EM 300, όπως επίσης και τα προσφάτως χαρτογραφημένα υποθαλάσσια ρήγματα. Η δεξιόστροφη οριζόντια ολίσθηση, ως υποδεικνύεται και στο μοντέλο, εντοπίζεται με έντονα χαρακτηριστικά στο βόρειο κλάδο του NAF (NMFS), επιπλέον είναι εμφανείς με χρώμα μωβ οι τεκτονικές λεκάνες διατμητικής διάνοιξης (pull apart basins) που δημιουργούνται από το συνδυασμό της εφελκυστικής ενεργού τεκτονικής παράλληλα με την δεξιόστροφη οριζόντια μετατόπιση που χαρακτηρίζει το NAF τους δυτικούς του κλάδους, συνεπώς και τη θάλασσα του Μαρμαρά (Armijo et al., 1999).



Σχήμα 2.3 Ισχυροί σεισμοί και οι αντίστοιχες μετατοπίσεις ρηγμάτων κατά μήκος του ρήγματος της Βόρειας Ανατολίας από τις 26/27 Δεκεμβρίου 1939. Είναι ευδιάκριτη η μετανάστευση των epicέντρων των ισχυρότερων σεισμών από τα Α προς τα Δ, παρατήρηση η οποία πρωτοπαρουσιάστηκε ερευνητικά από Egeran και Lahn (1944). Το σχήμα προέκυψε από τη συμβολή ερευνητικών εργασιών των Saroglu et al., 1987, 1992; Eyidogan et al., 1991; Barka, 1996; Barka et al., 2000a; Akyuz et al., 2000.

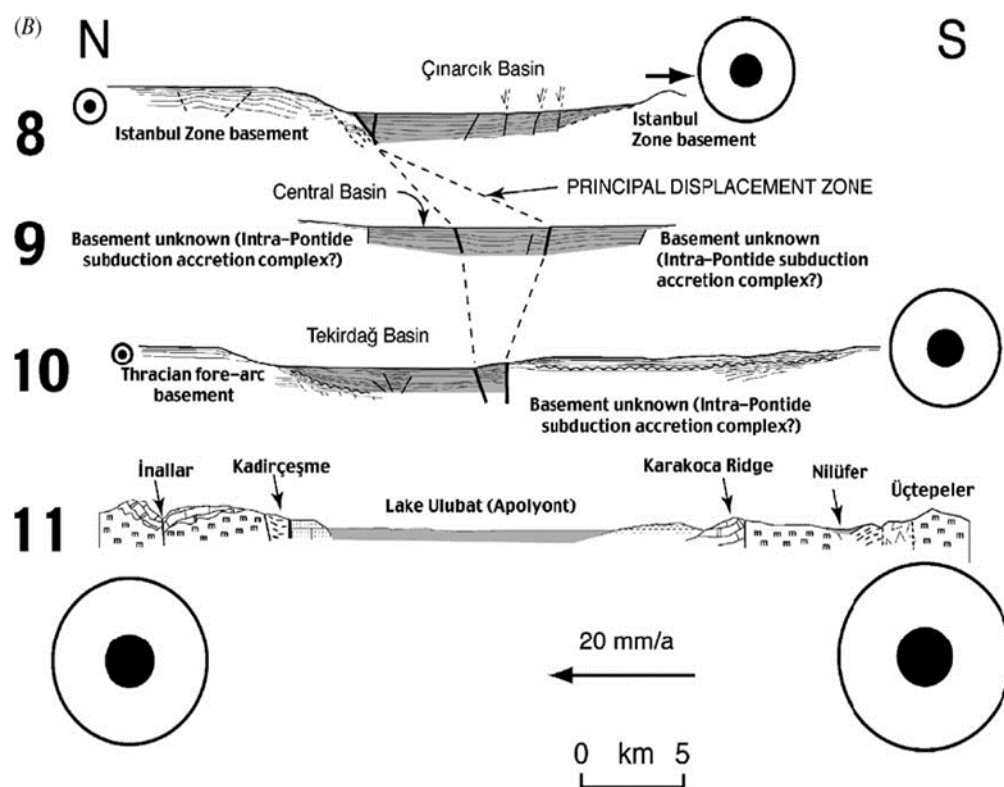
Σε όλη την έκταση του NMFS δύο πιο ρηχές, συγκριτικά με τα βάθη της θαλάσσιας περιοχής, υποθαλάσσιες ράχες εντοπίζονται κατά προσέγγιση στο βάθος των 700 m, οι οποίες διαχωρίζουν τις τρεις βαθύτερες και μεγαλύτερες σε έκταση τεκτονικές λεκάνες της θάλασσας του Μαρμαρά, με βάθη που ξεπερνούν τα 1000m. Οι τρεις τεκτονικές λεκάνες που εντοπίζονται στο ευρύτερο γεωτεκτονικό βύθισμα της λεκάνης της θάλασσας του Μαρμαρά αναφέρονται με προσανατολισμό και κατεύθυνση από τα ανατολικά προς τα δυτικά ως: τεκτονική λεκάνη Cinarcik, κεντρική τεκτονική λεκάνη και λεκάνη Tekirdag. Αρκετές σύγχρονες έρευνες βασισμένες σε σεισμικές διασκοπήσεις προφίλ ανάκλασης προτείνουν αρκετά λεπτομερείς χάρτες της υποθαλάσσιας γεωμορφολογίας και τεκτονικής δομής στη θάλασσα του Μαρμαρά (Okay et al. 1999, 2000; Parke et al. 1999; Imren et al. 2001). Η συμβολή των πρόσφατων ερευνών καθορίζεται σε σημαντικό βαθμό από ένα υψηλής ανάλυσης σύστημα βυθοσκοπήσεων το οποίο συνέλεγε δεδομένα κατά μήκος του NMFS και κατά τη διάρκεια συντονισμένης Γαλλικής-Τουρκικής αποστολής – κρουαζιέρας εξοπλισμένης με το υψηλής τεχνολογίας, ευκρίνειας και ευρέως φάσματος όργανο γεωφυσικής διασκόπησης EM-300. Η έρευνα αυτή πραγματοποιήθηκε κατά το χρονικό διάστημα Σεπτεμβρίου-Οκτωβρίου 2000 με βήμα συλλογής δεδομένων ανάκλασης – gridding 25 m συστήματος sonar αλλά και με χρήση πλευρικών αλλά και όπισθεν γεωφώνων κατά τη κατεύθυνση της δειγματοληψίας. Η διαδικασία αυτή είχε ως αποτέλεσμα οι ψηφιακές καταγραφές των δεδομένων σεισμικής ανάκλασης να συμβάλουν αφενός στην πολύ υψηλής ακρίβειας απόδοση του σεισμικού προφίλ της περιοχής σε 3D και αφετέρου στην ελαχιστοποίηση του σφάλματος. Στη δημοσιευμένη εργασία του Le Pichon et al. (2001) παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των ερευνών αυτών και προτείνονται ένας λεπτομερής σεισμοτεκτονικός χάρτης όπως και η πιο σύγχρονη νεοτεκτονική ερμηνεία της περιοχής της θάλασσας του Μαρμαρά.

Η παρούσα συμβολή των προαναφερόμενων ερευνών αρχικά, προτείνει εκτενείς συζητήσεις επί των αξιοθαύμαστων μορφοτεκτονικών και μορφολογικών χαρακτηριστικών που αποκαλύπτονται στις περιοχές μελέτης, επιπρόσθετα, παρέχει την πιο μοντέρνα ερμηνεία επί του σεισμοτεκτονικού καθεστώτος και της τεκτονικής δομής της θάλασσας του Μαρμαρά, όπως δεν έχει επιτευχθεί τόσο λεπτομερώς σε καμία άλλη περιοχή του ρήγματος της βόρειας Ανατολίας (Σχήμα 2.4, Armijo et al., 1999).



Σχήμα 2.4 (Armijo et al., 1999). Μορφολογικές λεπτομέρειες της τεκτονικής λεκάνης διατμητικής διάνοιξης (pull apart basin) της θάλασσας του Μαρμαρά (επάνω). Τα κίτρινα βέλη υποδεικνύουν τη διεύθυνση του εφελκυσμού (BA-ΝΔ) στον οποίο υπόκειται η περιοχή (κεντρικό σχήμα). Το σεισμικό προφίλ της περιοχής (κάτω) όπου διακρίνονται τα εκτατικά ρήγματα που σχημάτισαν τις τεκτονικές λεκάνες της θάλασσας του Μαρμαρά.

Η γεωμετρία των ενεργών ρηγμάτων όπως και η μορφολογία τους είναι εμφανώς διατηρημένες στον θαλάσσιο πυθμένα του Μαρμαρά. Μετατοπίσεις και άλματα στις ιζηματογενείς ακολουθίες πετρωμάτων που πιθανώς έχουν προέλθει από διαδοχικούς σεισμούς κατά τη γεωλογική εξέλιξη της περιοχής, εντοπίζονται κατά μήκος μεγάλων αποστάσεων που ξεπερνούν δεκάδες χιλιόμετρα και έχουν χαρτογραφηθεί με πολύ μεγάλη ακρίβεια. Ανεξάρτητα, ρήγματα μη ενεργά στους πρόσφατους γεωλογικούς χρόνους όπως και γενικότερα διαρρήξεις που υποδεικνύουν την παρελθούσα ενεργό τεκτονική, τη “νεογέννητη” υποθετικά της θάλασσας του Μαρμαρά και σχετίζονται με ισχυρούς σεισμούς του εγγύς γεωλογικού παρελθόντος είναι επίσης ευδιάκριτα σε υποθαλάσσιες γεωλογικές παρατηρήσεις. Οι ήδη χαρτογραφημένες γεωμορφές αυτές των ρηγμάτων που συμβάλλουν στη θαυμάσια αυτή υποθαλάσσια μορφολογία της τεκτονικής λεκάνης του Μαρμαρά, έχουν προέλθει από την ενεργοποίηση και διαδοχικά ολίσθηση των εκτατικών, πλαγιοκανονικών και ρηγμάτων οριζόντιας μετατόπισης της περιοχής. Οι αρχικές υποθέσεις επί του διαχωρισμού του ρήγματος της βόρειας Ανατολίας σε τμήματα-segments και της σύνδεσης των μεγαλύτερων τεκτονικών λεκανών του θαλάσσιου πυθμένα της θάλασσας του Μαρμαρά, κατά μήκος του Ρηξιγενούς Συστήματος του Βόρειου Μαρμαρά – NMFS (=North Marmara Fault System) (Cinarcik, Κεντρική και λεκάνη Tekirdag), με την ενεργότητα των ρηγμάτων Ganos και Νικομήδειας στη ξηρά εισήχθησαν από ερευνητικές εργασίες των Barka & Kadinsky-Cade, 1988 και Imren et al., 2001.



Σχήμα 2.5 Τροποποιημένο (από Barka και Kadinsky-Cade, 1988) κινηματικό και γεωτεκτονικό μοντέλο των τεκτονικών λεκανών της θάλασσας του Μαρμαρά (Imren et al. 2001).

Στη Κεντρική τεκτονική λεκάνη της θάλασσας του Μαρμαρά είναι ευδιάκριτα τα συζυγή ρήγματα (en echelon faults), παράλληλα και υποπαράλληλα, στα οποία αποδίδεται η ρομβοειδής μορφολογική δομή της ευρύτερης περιοχής της θάλασσας του Μαρμαρά. Επιπλέον, παρατηρούνται ανεξάρτητες ρηξιγενείς δομές διεύθυνσης ΒΔ-ΝΑ με χαρακτηριστική γεωμετρία εκτατικών ρηγμάτων κατά μήκος ιζημάτων νεογενούς και τεταρτογενούς της θάλασσας του Μαρμαρά. Το μέσο μήκος τους φτάνει τα 1-2 km και ο πυθμένας της τεκτονικής λεκάνης, εξαιτίας της δράσης τους και μαζί με αυτά εντοπίζονται στα 20 έως 60 m βαθύτερα από ότι σε παράκτιες περιοχές. Ορισμένα επίσης νέα ρήγματα τεταρτογενούς ηλικίας με παρόμοια διεύθυνση έχουν χαρτογραφηθεί στον πυθμένα αλλά και στα πρηνή της Κεντρικής τεκτονικής λεκάνης.

Το μεγαλύτερο ποσοστό των ενεργών ρηγμάτων εντός και εκτός της λεκάνης έχουν χαρακτηριστικά κανονικών και πλαγκιοκανονικών ρηγμάτων, ωστόσο σε χαρτογραφήσεις και σε χάρτες της περιοχής απεικονίζονται ως ενεργά τμήματα ρηγμάτων – fault segments με δεξιόστροφη οριζόντια συνιστώσα ολίσθησης, διεύθυνσης ΑΒΑ-ΔΝΔ, που εντοπίζονται στα ανατολικά και στα δυτικά του εφελκυστικού πεδίου της Θάλασσας του Μαρμαρά. Μεταξύ των τμημάτων αυτών η μετατόπιση που παρατηρείται λόγω της σεισμικής ολίσθησης έχει συνολικό μήκος 4 km. Το έντονο αυτό τεκτονικό βύθισμα που έχει σχηματίσει τη Κεντρική τεκτονική λεκάνη της θάλασσας του Μαρμαρά έχει απεικονιστεί με πολύ μεγάλη ευκρίνεια και ακρίβεια στο σεισμικό προφίλ που αποδίδει το σχήμα 2.4, όπως και τα χαρακτηριστικά της γεωμετρίας όλων των ρηξιγενών του δομών, κατόπιν λεπτομερούς χαρτογράφησης, χάρις στις γεωφυσικές και σεισμικές έρευνες που έλαβαν χώρα στην περιοχή.

Συμπερασματικά, όλες αυτές οι τεκτονικές δομές και τα μορφολογικά στοιχεία που έχουν παρατηρηθεί και αναλυθεί με ενδελεχείς έρευνες στη Θάλασσα του Μαρμαρά μαρτυρούν μια μακροχρόνια γεωλογική ιστορία και γεωτεκτονική εξέλιξη της Κεντρικής τεκτονικής λεκάνης που καθορίζεται από την επίδραση αρκετά σταθερών στο χρόνο και στο χώρο, μηχανισμών γένεσης σεισμών.

2.4 Η κινηματική προσομοίωση του εφελκυστικού πεδίου της Θάλασσας του Μαρμαρά.

Η υποκείμενη κινηματική που επιδρά στην ενεργότητα ρηγμάτων κατά μήκος του NMFS, εμφανίζεται ως καλά αποκρυπτογραφημένη σε κάμψεις και πτυχώσεις που συναντώνται σε δύο από τις κύριες ρηξιγενείς ζώνες νότια της Κωνσταντινούπολης. Οι ζώνες αυτές ρηγμάτων μοιράζονται διαφορετική γεωμετρία με ξεχωριστά χαρακτηριστικά διεύθυνσης κλίσης και αζιμούθιου (Σχήματα 2.2 και 2.4). Το κύριο ρήγμα που διακρίνεται στα νοτιοδυτικά της Κωνσταντινούπολης είναι ένα γραμμικό δεξιόστροφης οριζόντιας συνιστώσας ολίσθησης, διεύθυνσης Β80°Α που διασχίζει την πιο ρηχή υποθαλάσσια περιοχή του ΑΒΑ Μαρμαρά διαχωρίζοντας τη Κεντρική τεκτονική λεκάνη με το τεκτονικό βύθισμα Cinarcik. Μία ράχη που διασχίζει το προαναφερόμενο ρήγμα, με συνολικό μήκος 3.5 km και δεξιόστροφη συνιστώσα

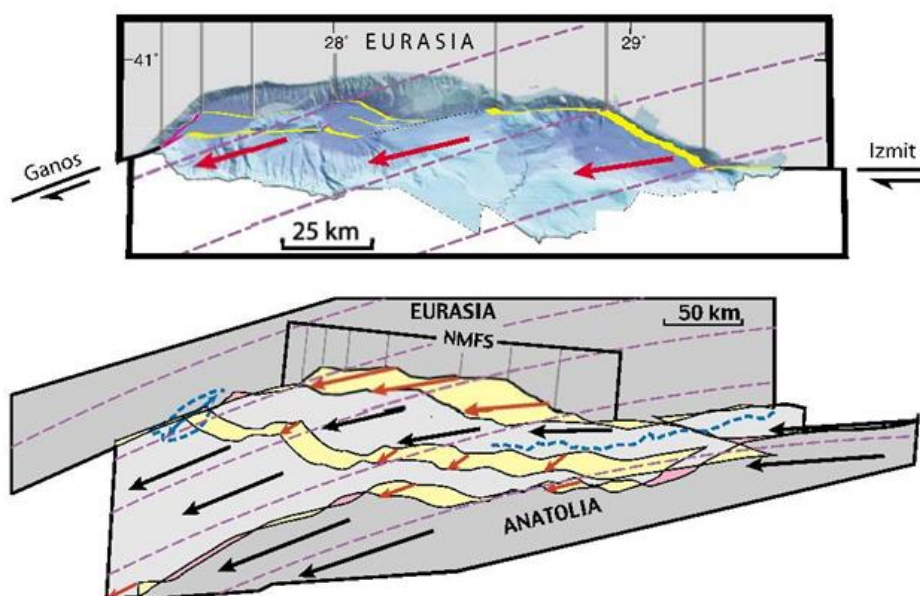
ολίσθησης έχει πρόσφατα χαρτογραφηθεί με τις σύγχρονες σεισμικές μεθόδους γεωφυσικής διασκόπησης.

Η συγκεκριμένη ρηξιγενής δομή με μορφή ράχης, μας παρέχει σημαντικές πληροφορίες επί της εκτίμησης της μετατόπισης και της σεισμικής ολίσθησης του NMFS κατά τα τελευταία 100.000 χρόνια. Σε αντίθεση, το ρήγμα στα ΝΑ της Κωνσταντινούπολης βρίσκεται στη βάση του μεγάλου μήκους αντερείσματος με διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ σχηματίζοντας κατά αυτό τον τρόπο το βορειότερο πρηνές της τεκτονικής λεκάνης Cınarcık. Η διαδοχή αυτή των en echelon (παράλληλων και υποπαράλληλων) ρηγμάτων που συναντάμε κατά μήκος των κύριων ρηγμάτων ΔΝΔ της Κωνσταντινούπολης, σε συνδυασμό με την ενεργότητά τους συνιστούν τη κύρια αιτία δημιουργίας αυτών των εξαρμάτων-ράχων-αντερείσμάτων με ύψη που φθάνουν τα 60 έως 100 m. Ειδικότερα, η ενεργότητα των εκτατικών ρηγμάτων αλλά και ρηγμάτων οριζόντιας συνιστώσας ολίσθησης που έχει εκδηλωθεί με διαδοχικούς ισχυρούς σεισμούς στη διάρκεια του πρόσφατου σχετικά γεωλογικού χρόνου είναι υπεύθυνη για το σχηματισμό του βόρειου αντερείσματος της τεκτονικής λεκάνης Cınarcık με ύψος 1000 m και μήκος 40 km.

Αξιοσημείωτο είναι επίσης το γεγονός ότι, δύο παράλληλες ζώνες ρηγμάτων και ίχνη αυτών που έχουν παρατηρηθεί σε αποστάσεις μεγαλύτερες των 10 km στην ευρύτερη περιοχή κάμψης στα όρια της λεκάνης της Θάλασσας του Μαρμαρά όπου εμφανίζονται πτυχωμένοι οι σχηματισμοί, κατέχουν ξεκάθαρα, γεωμετρικά χαρακτηριστικά δεξιόστροφης συνιστώσας ολίσθησης κατά μήκος της νότιας ρηξιγενούς ζώνης και γεωμετρία κανονικών ρηγμάτων κατά μήκος της ρηξιγενούς ζώνης στη βάση του βόρειου αντερείσματος της λεκάνης Cınarcık. Παρόμοιες τεκτονικές δομές και ανάλογα μορφολογικά χαρακτηριστικά, έχουν περιγραφεί και σε άλλες τεκτονικές λεκάνες οι οποίες υπόκεινται στην ενεργό τεκτονική, που με τη σειρά της καθορίζεται από τη συμμετοχή ολίσθησης οριζόντιας και κανονικής παράλληλα (πλαγιοκανονικής) συνιστώσας (Armijo et al., 1986; Yeats et al., 1997). Εντέλει, ορισμένες δομές ενδεικτικές της δράσης συμπίεστικών δυνάμεων έχουν παρατηρηθεί και έχουν καθοριστεί τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά αυτών, όχι μόνο στον πυθμένα της θάλασσας του Μαρμαρά κατά τη μελέτη της μορφολογίας και τεκτονικής δομής μέσω σεισμικών διασκοπήσεων, αλλά επίσης σε χαράδρες και αντερείσματα του Ρηξιγενούς Συστήματος του Βόρειου Μαρμαρά - (North Marmara Fault System) – NMFS. Ωστόσο, οι γεωμορφές αυτές συνιστούν μικροδομές σε σύγκριση με τη πολύπλοκη, χαοτική και εκπληκτική παράλληλα δομή της τεκτονικής λεκάνης του Μαρμαρά. Παραδείγματα τέτοιων μικροτεκτονικών δομών συναντάμε στο δυτικό ήμισυ της θάλασσας του Μαρμαρά, επάνω ακριβώς από τα πρηνή της κεντρικής τεκτονικής λεκάνης (Σχήμα 2.4). Επιπεύσεις του σύντομου γεωλογικού παρελθόντος, αλλά επίσης νέες, εξελισσόμενες και επικείμενες μελλοντικά, είναι εμφανείς στη κύρια ρηξιγενή ζώνη του ρήγματος Ganos στο δυτικότερο τμήμα του NMFS, όπου έχουν παρατηρηθεί και περιγραφεί πτυχές στις στρωματογραφικές ακολουθίες των ιζηματογενών πετρωμάτων του ηπειρωτικού σήμερα γεωλογικού περιβάλλοντος (Armijo et al., 1999).

Οι σύγχρονες και μελλοντικές παρατηρήσεις επί της μορφολογίας ρηγμάτων και της κινηματικής αυτών χρησιμοποιούνται προκειμένου να επιτευχθεί ένα όσο πιο ακριβές μοντέλο της δυναμικής και κινηματικής συμπεριφοράς του NMFS όπως αναπαρίσταται στο σχήμα 2.6. Η κίνηση έχει υποθεθεί ότι λαμβάνει χώρα έντονα στα υποθαλάσσια

ρήγματα, επιπλέον σε αυτά με δεξιόστροφη οριζόντια συνιστώσα ολίσθησης και σε τμήματα αυτών που συναντάμε στο ηπειρωτικό μέρος της ευρύτερης περιοχής του Μαρμαρά. Σύμφωνα με αυτή την υπόθεση η κινηματική εντοπίζεται γενικότερα σε ρήγματα τα οποία είναι άρρηκτα συνδεδεμένα με τα μεγαλύτερα τις θάλασσας του Μαρμαρά, των οποίων η γεωδυναμική συμπεριφορά έχει μελετηθεί επαρκώς και έχουν προσδιοριστεί με μεγάλη ακρίβεια αρκετές γεωφυσικές και τεκτονικές παράμετροι αυτών. Συνεπώς, η αναπροσομοίωση του κινηματικού μοντέλου στο σχήμα 2.6, προτείνει σύμφωνα και με τη μορφολογία του ρήγματος μήκους 3.5 km με δεξιόστροφη οριζόντια συνιστώσα ολίσθησης, τις περιοχές όπου συναντάται εφελκυστική (κίτρινες περιοχές) και συμπιεστική (ροζ βέλη) παραμόρφωση, καθορίζοντας επακόλουθα την κινηματική κατά μήκος του NMFS τα τελευταία 100.000 χρόνια. Το μοντέλο αυτό κινηματικής που έχει προταθεί για το ρηξιγενές σύστημα του βόρειου Μαρμαρά, έχει το πλεονέκτημα ότι είναι εύκολα συγκρίσιμο και επαληθεύσιμο, τόσο με μακροπρόθεσμες γεωτεκτονικές πληροφορίες όσο και με άλλες που αντλούμε σήμερα με γεωδαιτικές μεθόδους και μετρήσεις GPS, αντίστοιχα μέσω μεγάλης κλίμακας κινηματικής ανάλυσης για την ευρύτερη περιοχή της θάλασσας του Μαρμαρά.



Σχήμα 2.6 Κινηματικό μοντέλο του εφελκυσμού της θάλασσας του Μαρμαρά. (a) Αναπαράσταση του υποθαλάσσιου NMFS στο Άνω Τεταρτογενές – τελευταία 100.000 χρόνια και τα τελευταία 5 Myr (b). Τα κίτρινα και ροζ βέλη αναπαριστούν περιοχές εφελκυστικής και συμπιεστικής τεκτονικής αντίστοιχα που έχουν συμβάλει στη σημερινή γεωδυναμική εξέλιξη της περιοχής και συνεπώς στη γεωμετρία των ενεργών ρηγμάτων. Τα κόκκινα βέλη δείχνουν την κατεύθυνση της κίνησης του νοτιότερου τμήματος σχετικά με την Ευρασία. Η προς τα ΔΝΔ κίνηση της πλάκας της Ανατολίας απεικονίζεται με διακεκομμένα μωβ τόξα όπως κατασκευάστηκε με τη μέθοδο πολικότητας Euler κατά McClusky et al. 2000). Τα μαύρα βέλη δείχνουν τη σχετική κίνηση της Ευρασίας σε σχέση με την μικροπλάκας της Ανατολίας – καφέ βέλη. Το υποθαλάσσιο σύστημα NMFS αναπαρίσταται με τις γκρι επιμήκεις περιοχές. Το κινηματικό μοντέλο (b) συνιστά τροποποίηση του μοντέλου Kahle et al. 2000, από

Armijo et al.1999, όπως βασίστηκε σε μετρήσεις GPS και προτείνει μέσο ρυθμό σεισμικής ολίσθησης στη Θάλασσα του Μαρμαρά τα τελευταία 5 Myr: 22 ± 3 mm/yr (Armijo et al., 1999).

Οι σημερινές οριζόντιες μετατοπίσεις που καταγράφονται με μετρήσεις GPS στην Τουρκία και τις γύρω περιοχές. Αξίζει να προσέξουμε πως μεταξύ 31°A και 36°A υποδεικνύεται συνδυαστικό πεδίο τάσεων οριζόντιας μετατόπισης και συμπίεσης, ενώ δυτικά του 31° μεσημβρινού ενεργεί συνδυαστικό πεδίο τάσεων οριζόντιας μετατόπισης και εφελκυσμού (Flerit et al. 2003).

Ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι οι αρχικές υποθέσεις επί της γεωμετρίας των ρηγμάτων του NMFS και της ευρύτερης περιοχής του Μαρμαρά, της διάδοσης διάρρηξης κατά μήκος του ρήγματος της Βόρειας Ανατολίας και ιδίως όπως αυτή πραγματοποιείται στην περιοχή των Δαρδανελίων – Ελλήσποντος επαληθεύεται με εκπληκτικά αποτελέσματα μέσω του κινηματικού μοντέλου του συστήματος NMFS κατά Armijo et al., 1999. Επαγωγικά, προτείνει ολική μετατόπιση της μικροπλάκας της Ανατολίας σε σχέση με την Ευρασία που εντοπίζεται σε απόσταση 85 km και η οποία χαρακτηρίζεται σε όλο το εύρος της από μηχανισμούς γένεσης σεισμών δεξιόστροφης οριζόντιας συνιστώσας ολίσθησης. Το μεγαλύτερο ποσοστό (= 90%) της συνολικής μετατόπισης και έντονης κινηματικής δράσης της μικροπλάκας της Ανατολίας, πραγματοποιείται κατά μήκος του Βόρειου κλάδου του ρήγματος της Ανατολίας και ιδιαίτερα στη Θάλασσα του Μαρμαρά, στο ρηξιγενές σύστημα του Βόρειου Μαρμαρά - NMFS, με ποσοστό αντίστοιχα υψηλό (= 70-90%).

Επιπρόσθετα, έντονη εφελκυστική ενεργός τεκτονική παρατηρείται στα ΝΔ της Θάλασσας του Μαρμαρά, όπου υφίσταται ισχυρό εφελκυστικό πεδίο καθώς εκεί συναντάμε τους ΔΝΔ κλάδους του ρήγματος της βόρειας Ανατολίας, προτού αυτοί εισέλθουν στην υποθαλάσσια περιοχή του Βόρειου Αιγαίου. Τα συμπεράσματα αυτά έχουν διεξαχθεί από μακροχρόνιες, ενδεδειγμένες σεισμοτεκτονικές και γεωφυσικές έρευνες με αποκορύφωμα τις σεισμικές διασκοπήσεις βασισμένες σε μεθόδους σεισμικής ανάκλασης (Parke et al., 1999, 2000; Okay et al. 1999; Imren et al., 2001; Le Pichon et al., 2001) που επαλήθευσαν ή κατέρριψαν προ υπάρχουσες υποθέσεις για το σεισμοτεκτονικό περιβάλλον της Θάλασσας του Μαρμαρά.

§ 3. Η Σεισμικότητα στη Θάλασσα του Μαρμαρά

3.1 Η Ιστορική Σεισμικότητα

Η περιοχή της Θάλασσας του Μαρμαρά είναι ένα πυκνοκατοικημένο και ταχέως αναπτυσσόμενο τμήμα της Τουρκίας, οριοθετημένο γεωγραφικά μεταξύ 39.5°B έως 41.5°B και 26°A έως 31°A. Ως μία από τις πιο ενεργές τεκτονικά περιοχές που συναντάμε σε παγκόσμια κλίμακα, κατά τη διάρκεια του 20^{ου} αιώνα εκδηλώνει ασυνήθιστη σεισμικότητα τις χρονιές 1912 και 1999 με δύο ισχυρότατους σεισμούς μεγέθους σεισμικής ροπής- Ms 7.3 και 7.4 αντίστοιχα, των οποίων τα επίκεντρα απέχουν μεταξύ τους απόσταση 240 km. Σε οποιαδήποτε ρεαλιστική παραδοχή επί της σεισμικής επικινδυνότητας για την ευρύτερη περιοχή της Θάλασσας του Μαρμαρά, συμπεριλαμβανομένης και της Κωνσταντινούπολης, μιας κοσμοπολίτικης και ανεκτίμητης ιστορικής αξίας πόλης πληθυσμού 11 εκατομμυρίων ανθρώπων, η χρονικώς εξαρτώμενη σεισμικότητα είναι η κύρια ανησυχία που δίνει το έναυσμα ερευνητικής ενασχόλησης και μελέτης της σεισμικότητας.

Συμβολή στην αποκρυπτογράφηση των μυστηρίων της σεισμικότητας για τη Θάλασσα του Μαρμαρά αποτελεί αρχικά η εργασία των Ambraseys & Jackson (2000), οι οποίοι μελέτησαν τη μακροχρόνια σεισμικότητα της περιοχής κατά τα τελευταία 500 ιστορικά χρόνια. Επακόλουθα, ως επέκταση της προαναφερόμενης, μια νέα από το Νίκο Αμβράζη το 2002 (N. Ambraseys, 2002) ο οποίος μελετά με βάση ιστορικές καταγραφές και ενόργανα δεδομένα σεισμικότητας κατά τον τελευταίο αιώνα, τα μεγέθη, τις εντάσεις και τα μακροσεισμικά αποτελέσματα ισχυρών σεισμών που εκδηλώθηκαν στη Θάλασσα του Μαρμαρά τις τελευταίες δύο χιλιετίες. Οι ερευνητικές εργασίες αυτές, επιπλέον, συνεισφέρουν στη δημιουργία ανανεωμένων μοντέλων επί της σύγχρονης σεισμικότητας, καθώς αρκετοί σεισμοί σε γεωφυσικά και στατιστικά μοντέλα που δημιουργήθηκαν έως τα τέλη του 20^{ου} αιώνα, είχαν παραλειφθεί λόγω ανεπαρκούς αναφοράς ή λόγω του ότι δεν ήταν καν γνωστοί, άλλοι είχαν υπερτιμηθεί σε μέγεθος και ένταση, ενώ ορισμένοι είχαν υποτιμηθεί. Συνεπώς, με τις νέες αυτές έρευνες, μοντέλα σεισμικότητας και πρόγνωσης σεισμικών ακολουθιών έχουν βασιστεί σε περισσότερα και πιο ακριβή επιστημονικά δεδομένα για την περιοχή της θάλασσας του Μαρμαρά, άρα εμφανίζονται να είναι πιο αξιόπιστα. Παρότι αναφορές για σεισμούς στη Θάλασσα του Μαρμαρά έχουμε περίπου από τον 3^ο π.Χ. αιώνα, επαρκή δεδομένα ώστε να υποδεικνύονται με σχετική ακρίβεια το επίκεντρο και το μέγεθος του εκάστοτε σεισμού δεν ξεκινά νωρίτερα από τον 1^ο π.Χ. αιώνα.

Η παράκτια περιοχή της Θάλασσας του Μαρμαρά ήταν από τους ιστορικούς χρόνους ένας εκ των σημαντικότερων εμπορικών δρόμων, ίσως και ο πιο σημαντικός, καθώς για 20 αιώνες αποτελούσε σταυροδρόμι της Δύσης με την Ανατολή καθιστώντας την ύψιστης εμπορικής και γεωπολιτικής ευρύτερα σημασίας. Ιστορικό κέντρο της Θάλασσας του Μαρμαρά, το Βυζάντιο. Η Κωνσταντινούπολη ονομαζόταν από την ίδρυσή της το 658/7 π.Χ. έως και το 330 μ.Χ., Βυζάντιο. Το 196 μ.Χ. και για σύντομο χρονικό διάστημα, έλαβε επίσης την ονομασία Augusta Antonina από τον αυτοκράτορα Σεπτίμιο Σεβήρο, προς τιμή του γιού του Αντωνίου. Ο αυτοκράτορας Κωνσταντίνος Α΄, στα εγκαίνιά της το 330 μ.Χ. τη μετονόμασε Nova Roma (Νέα Ρώμη), όνομα που όμως δεν επικράτησε, καθώς η πόλη έγινε γρήγορα γνωστή ως Κωνσταντινούπολη (= πόλη του Κωνσταντίνου), από το όνομα του ιδρυτή της. Όπως παραδίδει ο ιστορικός Σωκράτης, στην εκκλησιαστική Ιστορία, η ονομασία Νέα Ρώμη

κατοχυρώθηκε δια νόμου και φαίνεται πως απηχούσε ένα ρητορικό παραλληλισμό μεταξύ Ρώμης και Κωνσταντινούπολης. Άλλες ονομασίες που της αποδόθηκαν είναι «Βασιλεύουσα», «Βασιλὶς των πόλεων», «Μεγαλόπολις» και «Επτάλοφος», ενώ αναφορά γίνεται και στο όνομα «Ανθούσα» Florentia. Κωνσταντινούπολη ήταν η επίσημη ονομασία μέχρι το 1923. Η διεθνής ονομασία της πόλης σήμερα είναι Istanbul, όπως μετονομάστηκε επίσημα από την Τουρκική Δημοκρατία στις 28 Μαρτίου του 1930. Η ετυμολογία του όρου δεν είναι γνωστή με βεβαιότητα. Περισσότερο αποδεκτή είναι η άποψη πως προέρχεται από τις ελληνικές λέξεις «εις την πόλη». Θεωρείται εξάλλου πιθανό πως με δεδομένα τη σπουδαιότητα και το μέγεθός της, οι κάτοικοί της την αποκαλούσαν απλά «Πόλη», όπως αποκαλείται συχνά μέχρι σήμερα από τους Έλληνες. Η ονομασία Ιστανμπούλ, μαζί με τις παραλλαγές Ιστινμπόλ (Istinbol) ή Ιστανμπόλ (Istanbul) χρησιμοποιήθηκαν κατά την περίοδο του σουλτανάτου των Σελτζούκων, καθώς και κατά την πρώιμη οθωμανική περίοδο, ενώ η προφορά της ονομασίας ως εις την πόλη (Istinboli) πιστοποιείται σύμφωνα με πηγές από τα τέλη του 14ου αιώνα.

Ο Ρωμαϊκός δρόμος με την ονομασία Via Egnatia (Εγνατία Οδός) ήταν ο κύριος εμπορικός δρόμος της Ρώμης με την Ανατολή, ο οποίος κατασκευάστηκε το 130 π.Χ., χρησιμοποιήθηκε από τους Βυζαντινούς και αργότερα από τους Οθωμανούς. Διέσχιζε τα Βαλκάνια έως τη μητρόπολη της Βυζαντινής αυτοκρατορίας, τη Κωνσταντινούπολη, ακολουθώντας πορεία από τα Α προς τα Δ, η οποία ξεκινούσε από την Κωνσταντινούπολη, περνούσε στη βόρεια ακτή του κόλπου της Νικομήδειας (Izmit), συνέχιζε στη Ραιδεστό (Tekirdag), ακολουθούσε τις ακτές της Θράκης (Αίνος, Αλεξανδρούπολη), και περνώντας από Καβάλα, Θεσσαλονίκη σύμφωνα με ιστορικές πηγές, κατέληγε στα ΒΔ σύνορα τη Ελλάδα όπου ξεκινούσαν άλλοι εμπορικοί δρόμοι μέσω του Βόρειου Ιονίου Πελάγους και της Αδριατικής Θάλασσας. Επιπλέον, στη Νίκαια (Iznik), το οδικό δίκτυο των τελευταίων δύο χιλιετιών έκανε μία στροφή προς τη δύση, περνώντας από Bursa, Canakkale και Δαρδανέλλια, καταγράφοντας κατά αυτό τον τρόπο κυκλική πορεία γύρω από τη Θάλασσα του Μαρμαρά. Εν τω μεταξύ, οι θαλάσσιοι δρόμοι των τελευταίων είκοσι αιώνων συνέδεαν μεταξύ τους όλα τα λιμάνια των ακτών της Θάλασσας του Μαρμαρά, επιτρέποντας επακόλουθα τη γρήγορη επικοινωνία των πληροφοριών του εσωτερικού με το εξωτερικό και αντίστροφα. Άρα, σεισμοί και φυσικά φαινόμενα γενικότερα, που παρατηρούνταν και επηρέαζαν τοπικά ή ευρέως τη Θάλασσα του Μαρμαρά, διαδίδονταν άμεσα και καταγράφονταν σε ημερολόγια από κατοίκους ιστορικών πόλεων στην εκάστοτε περιοχή, τροφοδοτώντας μας σήμερα με ανεκτίμητες πληροφορίες επί της επιστήμης της σεισμολογίας.

Ανέκαθεν οι σεισμοί προκαλούσαν στους ανθρώπους φόβο. Από την αρχαιότητα ακόμη, στον παγανιστικό κόσμο, θεωρείτο ότι οι σεισμοί, όπως και κάποια άλλα φυσικά φαινόμενα, έκλειψη Ηλίου ή Σελήνης, εμφάνιση κομητών, πτώσεις μετεωριτών, ανήγγειλαν επικείμενες καταστροφές. Ακολουθώντας τέτοιες αντιλήψεις, οι Χριστιανοί θεωρούσαν ότι οι σεισμοί αποτελούν ένδειξη της οργής του Θεού και αναμφίβολη προειδοποίηση στους ανθρώπους ότι προσπαθούν να κάνουν κάτι αντίθετο προς το θέλημα του. Έτσι, για παράδειγμα, ο αυτοκράτορας Λέων Γ΄ (726-741), ιδρυτής της δυναστείας των Ισαύρων και πρώτος εικονομάχος αυτοκράτορας, ερμήνευσε σύμφωνα με το πνεύμα της εποχής του έναν ισχυρό σεισμό ως ένδειξη θεϊκής δυσαρέσκειας για την λατρεία των εικόνων. Για τον εξευμενισμό του Θεού και

την εξαγορά κατά κάποιον τρόπο των αμαρτιών που θεωρούσαν αιτία της θεϊκής οργής που εκφραζόταν με τους σεισμούς, οι Βυζαντινοί τελούσαν λειτουργίες και λιτανείες και πολύ συχνά ζητούσαν την μεσολάβηση τοπικών αγίων και ιερών προσώπων. Μερικές φορές χρησιμοποιούσαν λείψανα αγίων ως φυλαχτό για προστασία από σεισμούς. Για να μην ξεχαστεί ποτέ η δύναμη της θεϊκής οργής, καθιερώθηκε, ως ένα είδος συνεχούς προειδοποίησης και απειλής, ειδική μνημόσυνη δέηση στις επετείους καταστροφικών σεισμών τόσο στην Κωνσταντινούπολη όσο και στην Αλεξάνδρεια.

Αξίζει να αναφερθεί ότι στο Βυζάντιο, εκτός από ελάχιστους λόγιους, δεν υπήρχε κάποιο μεγαλύτερο ενδιαφέρον για την επιστημονική εξήγηση της σεισμικής δόνησης. Αλλά και οι περισσότεροι Βυζαντινοί λόγιοι που προσπάθησαν να βρουν άλλη εξήγηση για την πρόκληση των σεισμών πέραν της θεϊκής οργής, στρέφονταν στη θεωρία του Αριστοτέλη. Σύμφωνα με τις απόψεις του Αριστοτέλη που είχαν υπερισχύσει για πολλούς αιώνες, οι σεισμοί είναι συνέπεια της κίνησης των ανέμων στις βαθιές υπόγειες σπηλιές. Ωστόσο υπήρξαν και περιπτώσεις λογίων που δεν ήταν υπόδουλοι του κύρους του Αριστοτέλη. Έτσι, για παράδειγμα, ο βυζαντινός ιστορικός του 11ου αιώνα Μιχαήλ Ατταλειάτης θεώρησε σκόπιμο να αμφισβητήσει την θεωρία του. Ο πατριάρχης Κωνσταντινουπόλεως Φώτιος (858-867, 877-886 μ.Χ.) επέμενε στην παραδοσιακή αντίληψη ότι οι σεισμοί είναι τιμωρία για τις ανθρώπινες αμαρτίες, ενώ υπήρχε και η αντίληψη ότι τις δονήσεις του εδάφους τις προκαλούσε η μεγάλη συγκέντρωση νερού.

Παρακάτω παρατίθενται ορισμένα παραδείγματα ιστορικών σεισμών που έπληξαν την Κωνσταντινούπολη κατά τις τελευταίες δύο χιλιετίες, ιστορικά αποσπάσματα και αναφορές σε ισχυρούς καταστροφικούς σεισμούς, πληροφορίες επί των μακροσεισμικών αποτελεσμάτων και έντασης, που σήμερα μας οδηγούν με σχετική ακρίβεια στη διεξαγωγή συμπερασμάτων επί των επικέντρων, των μεγεθών, των εντάσεων, ακόμη και του προσδιορισμού των συσχετιζόμενων ρηγμάτων όπου πραγματοποιήθηκε η σεισμική ολίσθηση.

3.2 Οι Σεισμοί στην Κωνσταντινούπολη

Δεδομένου ότι στα εδάφη της Βυζαντινής Αυτοκρατορίας περιλαμβάνονταν περιοχές με έντονη σεισμικότητα, σεισμοί σημειώνονταν ιδιαίτερα συχνά, σχεδόν κάθε χρόνο. Στις πηγές οι περισσότερες μαρτυρίες αφορούν σεισμούς που έπληξαν την Κωνσταντινούπολη. Σύμφωνα με παλαιότερες έρευνες, την περιοχή της Κωνσταντινούπολης, σε μια μακρά περίοδο από το 500 π.Χ. έως το 1890 μ.Χ., έπληξαν πεντακόσιοι σαράντα οκτώ σεισμοί. Σε ότι αφορά την βυζαντινή εποχή, ο πρώτος σεισμός στην Κωνσταντινούπολη για τον οποίο υπάρχει μνεία έλαβε χώρα το 342 μ.Χ., ενώ ισχυροί σεισμοί έπληξαν τη Βασιλεύουσα κατά τα έτη 365, 438, 447, 525, 557, 740, 866, 869, 989, 1064, 1296 και 1346 μ.Χ. Συνολικά στη διάρκεια της βυζαντινής ιστορίας της Κωνσταντινούπολης, η πόλη επλήγη από περισσότερους από εβδομήντα σεισμούς, με τελευταίο τον σεισμό του 1454.

Φυσικά, το επίκεντρο των σεισμών που έχουν εκδηλωθεί στην ευρύτερη περιοχή της Κωνσταντινούπολης και που βασίζονται σε ιστορικές αναφορές, ενέχει πιθανότητα σφάλματος, δεν εντοπίζεται με μεγάλη ακρίβεια και αφορά πολυάριθμα ενεργά ρήγματα στην εγγύς περιοχή της Κωνσταντινούπολης αλλά και σε πιο απομακρυσμένες

περιοχές. Ωστόσο, σεισμοί των οποίων τα επίκεντρα απέχουν σημαντική απόσταση από το μητροπολιτικό κέντρο της Πόλης, έγιναν αισθητοί στη Βασιλεύουσα και προκάλεσαν ζημιές σε κατοικίες, εκκλησίες και στα τείχη της πόλης. Αν πραγματοποιήσουμε μια στατιστική μελέτη για τους ισχυρούς σεισμούς από τους οποίους έχει πληγεί η Κωνσταντινούπολη, παρατηρούμε ότι ανά αιώνα, οι περισσότεροι, 15 ισχυροί σεισμοί, σημειώθηκαν τον 6^ο μ.Χ. αιώνα, 13 σεισμοί τον 5^ο και 11^ο αιώνα, 8 σεισμοί τον 14^ο αιώνα, 5 σεισμοί τον 6^ο αιώνα, 4 σεισμοί τον 8^ο, 9^ο και 15^ο αιώνα, 3 σεισμοί τον 10^ο και 13^ο αιώνα και από 1 σεισμός τον 7^ο και 12^ο αιώνα. Εάν τους μετρούσαμε ανά περιόδους διακυβέρνησης ορισμένων αυτοκρατόρων, οι περισσότεροι σεισμοί σημειώθηκαν επί διακυβέρνησης του Ιουστινιανού Α΄ (527-565 μ.Χ.) – συνολικά δέκα. Ορισμένοι σεισμοί απλώς αναφέρονται, ενώ για άλλους έχουν διασωθεί περισσότερα στοιχεία. Αξίζει να παραθέσουμε τους εξής ισχυρούς ιστορικούς σεισμούς για τους οποίους έχουμε πληθώρα αξιόπιστων πληροφοριών και περιγραφών.

Στις 26 Ιανουαρίου του 450 μ.Χ, ισχυρός σεισμός έπληξε την Κωνσταντινούπολη, με αποτέλεσμα να προκληθούν σημαντικές καταστροφές και να σκοτωθούν πολλοί άνθρωποι. Την εποχή εκείνη στο θρόνο της Βυζαντινής Αυτοκρατορίας βρισκόταν ο Θεοδόσιος Β' ο Μικρός (401-450). Σήμερα έχουμε υπολογίσει ότι ο σεισμός ήταν μεγέθους σεισμικής ροπής $M_s = 7$ και εντάσεως 9 βαθμών στην κλίμακα Mercalli. Σύμφωνα με τον ιστορικό Ιωάννη Μαλάλα (491-578 μ.Χ.), ο σεισμός συνέβη τις πρώτες πρωινές ώρες, εξαιτίας του κατέπεσαν τα τείχη της Κωνσταντινούπολης και καταστράφηκε ένα μεγάλος μέρος των οικοδημάτων της, ιδιαίτερα στο τμήμα μεταξύ των Τρωαδισίων Εμβόλων και του Χαλκού Τετραπύλου. Οι μετασεισμικές δονήσεις ήταν έντονες και συνεχίστηκαν επί τρεις ολόκληρους μήνες, έως και τις 25 Απριλίου, σύμφωνα με τα όσα αναφέρει ο Όσιος Νεόφυτος ο Έγκλειστος. Κατά την περίοδο εκείνη, ο αυτοκράτορας διοργάνωνε πάνδημες λιτανείες και με δάκρυα στα μάτια προσευχόταν στο Θεό λέγοντας: «Κύριε, μετανοούμε· λύτρωσέ μας από τη δίκαιη οργή Σου και από τα παραπτώματά μας. Έσειςες πράγματι τη γη και τη συντάραξες εξαιτίας των αμαρτιών μας, με σκοπό να μας κάμεις να συναισθανθούμε τα παραπτώματά μας και να δοξάζουμε Εσένα τον μόνο αγαθό και φιλόανθρωπο Θεό μας». Στο Χρονικό Πασχάλη αναφέρεται ότι οι κάτοικοι της Κωνσταντινούπολης δεν έμπαιναν στα σπίτια τους για αρκετό χρονικό διάστημα και μερικοί ισχυρίζονταν ότι παρατηρούσαν πύρινες λάμψεις στον ουρανό.



Τα κατεστραμμένα τείχη της Κωνσταντινούπολης από το σεισμό της 26^{ης} Ιανουαρίου 450μ.Χ. Γκραβούρα ανώνυμου ζωγράφου κλασσικής, ρομαντικής περιόδου. Κωνσταντινούπολη, τέλη 19^{ου} αιώνα.

Επιπλέον, είναι γνωστό από πηγές εγγράφων και κειμένων της Βυζαντινής αυτοδιοίκησης, ότι ο σεισμός του 526 ήταν πολύ ισχυρός και ότι προκάλεσε την κατάρρευση πολλών κτιρίων και εκκλησιών. Στον σεισμό αυτό γκρεμίσθηκαν και οι στήλες των αυτοκρατόρων Θεοδοσίου Α' (379-395 μ.Χ.) και Αρκαδίου (395-408 μ.Χ.).

Στις 9 Ιανουαρίου του 869 μ.Χ., ισχυρός σεισμός έπληξε την Κωνσταντινούπολη, με αποτέλεσμα να προκληθούν σημαντικές καταστροφές και ανθρώπινα θύματα, ενώ μικρότεροι σεισμοί συνέχισαν να ταράζουν την πόλη για τις επόμενες σαράντα ημέρες. Προκλήθηκαν σημαντικές ζημιές στην εκκλησία της Αγίας Σοφίας, καθώς και στην εκκλησία της Παναγίας στην πλατεία του Σίγμα, ενώ φθορές υπέστη και ο ναός των Αγίων Αποστόλων. Την εποχή εκείνη στο θρόνο της Βυζαντινής Αυτοκρατορίας βρισκόταν ο Βασίλειος Α' ο Μακεδών (867-886 μ.Χ.), ιδρυτής της Μακεδονικής Δυναστείας, ο οποίος ανακαίνισε αργότερα τους ναούς στους οποίους προκλήθηκαν ζημιές. Σύμφωνα με τις ιστορικές περιγραφές του σεισμικού γεγονότος υπολογίζουμε ότι ο σεισμός ήταν μεγέθους σεισμικής ροπής $M_s = 6,6$ βαθμών και εντάσεως 8 βαθμών στην κλίμακα Mercalli. Ο βυζαντινός συγγραφέας Νικήτας Παφλαγών (περίπου 885 μ.Χ. – μέσα 10ου αι.) χαρακτήρισε τον σεισμό «φρικωδέστατο» και ανέφερε ότι πολλές εκκλησίες, φρούρια και σπίτια γκρεμίστηκαν, ενώ μεγάλος αριθμός ανθρώπων και ζώων σκοτώθηκε. Ο ναός της Αγίας Σοφίας εμφάνισε έντονες ρωγμές σε πολλά μέρη, ενώ κατέπεσε ο μεγάλος τρούλος του ναού της Υπεραγίας Θεοτόκου εν τω Σίγματι. Την ώρα εκείνη, στο ναό ετελείτο θεία λειτουργία. Μεταξύ των παρευρισκομένων ήταν ο τρίχρονος Λέων, ο μετέπειτα αυτοκράτορας Λέων ΣΤ' ο Σοφός, που σώθηκε από «τύχη αγαθή» σύμφωνα με τη περιγραφή των συγγραφέων του ημερολογίου. Έκπληξη

προκαλεί το γεγονός ότι, το σεισμό φαίνεται να είχε προβλέψει ο βυζαντινός λόγιος Λέων ο Μαθηματικός ή Φιλόσοφος (περίπου 790-869 μ.Χ.) ο οποίος προ ημερών παρατήρησε στην ύπαιθρο μακροσκοπικά πρόδρομα φαινόμενα εκδήλωσης του σεισμού. Είναι από τις ελάχιστες και ίσως η μοναδική με τέτοια αξιοπιστία, αναφορά πρόβλεψης σεισμού κατά τους ιστορικούς χρόνους από φυσιοδίφες και φιλοσόφους της εκάστοτε περιόδου. Η πρόβλεψη του Λέοντα του Φιλοσόφου βασίστηκε, σύμφωνα με τις περιγραφές προσωπικών του ιστορικών κειμένων, σε μακροσκοπικές παρατηρήσεις όπως αξιοσημείωτη απόσυρση της θάλασσας που σήμερα γνωρίζουμε ότι ενδέχεται να προοιωνίζει σεισμό λόγω προσεισμικής παραμόρφωσης του υποθαλάσσιου σεισμογόνου χώρου, αύξηση της θερμοκρασίας του υπόγειου νερού που αντλούσαν για χρήση σε λουτρά. Στη συνέχεια αναφέρει το φαινόμενο των υποχθόνιων ήχων που ομολογεί ότι άκουσε ως «ένα ψίθυρο της Γης» και παρατηρήσεις ασυνήθιστης συμπεριφοράς ζώων που συνήθως προηγείται κατά 12 ώρες πριν την εκδήλωση του κύριου σεισμού. Το γεγονός του μεγάλου σεισμού της Κωνσταντινούπολης αναφέρεται και σε κώδικα της Εθνικής Βιβλιοθήκης των Παρισίων αλλά με ημερομηνία 10 Ιανουαρίου.

Επίσης, ιδιαίτερα ισχυρός ήταν και ο σεισμός ο οποίος σημειώθηκε την ημέρα τους Αγίου Δημητρίου, στις 26 Οκτωβρίου του 989 μ.Χ., για τον οποίο υπάρχουν στοιχεία σε πολλές πηγές. Έπληξε την Κωνσταντινούπολη, τη Νικομήδεια, τη Θράκη, τη Βιθυνία και την Λακωνία, έγινε δε αισθητός και στη χερσόνησο των Απεννίνων. Καταστράφηκαν πολλές εκκλησίες της βυζαντινής πρωτεύουσας και έπεσε και ο τρούλος της Αγίας Σοφίας. Η ανακατασκευή αυτού του τελευταίου, την οποία ξεκίνησε ο Βασίλειος Β' (976-1025 μ.Χ.) διήρκεσε έξι χρόνια.

Ενδιαφέρον έχουν τα στοιχεία που αφορούν τον σεισμό στην Κωνσταντινούπολη για τον οποίο γράφουν οι ιστορικοί Ιωάννης Κίνναμος και Νικήτας Χωνιάτης. Συνέβη το 1161, στην διάρκεια της επίσκεψης του σουλτάνου του Ικονίου Κιλίτζ Αρσλάν (1155-1192 μ.Χ.) στη βυζαντινή πρωτεύουσα. Τότε συνέβη ένα ασύνηθες περιστατικό. Ο αυτοκράτορας Μανουήλ Α' Κομνηνός (1143-1180 μ.Χ.) υποδέχθηκε με μεγαλοπρέπεια τον μωαμεθανό φιλοξενούμενο, προσπαθώντας να προκαλέσει σε αυτόν ανεξίτηλη εντύπωση για την λάμψη και την υπεροχή της Βυζαντινής Αυτοκρατορίας. Είχε μάλιστα την πρόθεση να οργανώσει έναν επίσημο περίπατο από την ακρόπολη μέχρι το ναό της Αγίας Σοφίας στον οποίο θα παραβρισκόταν και ο ηγεμόνας του Ρουμ, όμως η ιδέα του αυτή δεν υλοποιήθηκε. Στην πρόθεση αυτή του αυτοκράτορα αντιτάχθηκε ο Πατριάρχης Λουκάς Χρυσοβέργης (1157-1170 μ.Χ) ο οποίος τόνισε ότι ένας αλλόθρησκος δεν έχει θέση μεταξύ ιερών και θείων αντικειμένων. Ο Ιωάννης Κίνναμος, ο οποίος πάντοτε ήταν πρόθυμος να εξυμνήσει τον Μανουήλ Α' Κομνηνό, στο σημείο αυτό δείχνει απόλυτη κατανόηση για την ενέργεια του πατριάρχη Κωνσταντινουπόλεως. Ακόμη ένα γεγονός, συνεχίζει ο Βυζαντινός ιστορικός, απέτρεψε τα σχέδια του αυτοκράτορα: αργά τη νύχτα, συνέβη τρομερός σεισμός ο οποίος διέσεισε το έδαφος, και οι Κωνσταντινουπολίτες από τον σεισμό αυτό κατάλαβαν ότι ο Λουκάς Χρυσοβέργης είχε δίκαιο και ότι πρόκειται για σημάδι ότι η επιθυμία του αυτοκράτορα δεν ευχαριστεί τον Θεό. Ο Νικήτας Χωνιάτης λακωνικά παρατηρεί ότι ο Θεός την ημέρα εκείνη ακύρωσε την γιορτή. Στην συνέχεια προσθέτει ότι συνέβη σεισμός από τον οποίο γκρεμίσθηκαν πολλά κτίρια στην βυζαντινή πρωτεύουσα, και ότι και ο αέρας ήταν ιδιαίτερα αφύσικος και ασυνήθιστος.

Με ιδιαίτερα ενδιαφέροντα τόνο, πάλι με σαφές δίδαγμα, ο Νικήτας Χωνιάτης περιέγραψε και τον σεισμό που συνέβη στις 17 Φεβρουαρίου του 1201. Ο αυτοκράτορας Αλέξιος Γ΄ Άγγελος (1195-1203 μ.Χ.) για ένα διάστημα βρισκόταν στην Ανατολή, και κατά την επιστροφή λίγο έλειψε ο ίδιος και η συνοδεία του να βυθιστούν στα κύματα της θάλασσας. Κατόρθωσαν κατά κάποιον τρόπο να φθάσουν στα Πριγκηπονήσια και στην συνέχεια πέρασαν στη Χαλκηδόνα, απέναντι από την Κωνσταντινούπολη. Γρήγορα ξέχασαν την μεγάλη δοκιμασία που τους συνέβη και παραδόθηκαν στο πάθος των ιππικών αγώνων. Λαμβάνοντας υπόψη τους αστρολόγους οι οποίοι τους συμβούλεψαν να ξεκινήσουν το σύντομο ταξίδι από τη Χαλκηδόνα ως την Κωνσταντινούπολη την έκτη ημέρα, πράγμα για το οποίο ο Χωνιάτης μιλάει με μια δόση χλευασμού, ο Αλέξιος Γ΄ και η συνοδεία του από νωρίς το πρωί άρχισαν τις προετοιμασίες για τη διάβαση. Το πλοίο στο λιμάνι του παλατιού ήταν έτοιμο, και οι συγγενείς του αυτοκράτορα, με αναμμένες τις δάδες – ακόμη δεν είχε εντελώς ξημερώσει – συγκεντρώθηκαν γύρω από τον βασιλέα, έτοιμοι για το ταξίδι. Όμως ο Θεός θέλησε τότε να δείξει ότι είναι ο μόνος κύριος των στιγμών και του χρόνου και ότι μόνο από Αυτόν εξαρτάται η ευτυχία και ο δυστυχία των δρόμων μας. Συνέβη μεγάλο κακό, διότι έγινε σεισμός και κάτω από τα διαμερίσματα του αυτοκράτορα τόσο σείστηκε ώστε άνοιξε ένα τεράστιο χάσμα μέσα στο οποίο έπεσαν μερικοί άνθρωποι. Όλοι τους τραυματίστηκαν κι ένας ευνούχος σκοτώθηκε.

Στο σεισμό της 19ης Μαΐου του 1346 έπεσε και πάλι ο τρούλος της Αγίας Σοφίας, με αποτέλεσμα να πάψουν να τελούνται οι συνηθισμένες λειτουργίες στο ναό. Έτσι, ένα χρόνο αργότερα, τον Μάιο του 1347, ο Ιωάννης ΣΤ΄ Καντακουζηνός, νικητής του εμφυλίου πολέμου (1341-1347 μ.Χ.), δε στέφθηκε στην Αγία Σοφία αλλά στην μικρή εκκλησία της Παναγίας των Βλαχερνών. Τα χρήματα που έστειλε αργότερα για την ανακαίνιση του ξακουστού ναού ο μεγάλος πρίγκιπας της Μόσχας Συμεών Ιβανονιτς Gordi (1341-1353 μ.Χ.) οι Βυζαντινοί τα δαπάνησαν για να πληρώσουν τους ξένους μισθοφόρους στον νέο εμφύλιο πόλεμο.

Τη νύχτα μεταξύ 1ης και 2ας Μαρτίου του 1354 μ.Χ., ισχυρός σεισμός προκάλεσε μεγάλες ζημιές στην Καλλίπολη, την οποία οι Τούρκοι αμέσως κατέλαβαν, και έσπειρε τρομερό φόβο μεταξύ των Βυζαντινών που ήταν εγκατεστημένοι στην περιοχή της Θράκης. Για την ισχύ του μαρτυρεί με τον καλύτερο τρόπο και το γεγονός ότι από προσώπου γης εξαφανίστηκαν μερικά μικρά οχυρά. Για να γίνει το κακό μεγαλύτερο, ο σεισμός συνοδευόταν από ανεμοθύελλα και από βροχή η οποία αμέσως πάγωνε, με αποτέλεσμα πολλοί από αυτούς που επέζησαν το γκρέμισμα των τειχών, μεταξύ των οποίων και πολλά γυναικόπαιδα, πάγωσαν αναζητώντας κάποιο καταφύγιο. Ωστόσο, ένας αριθμός κατοίκων της Καλλίπολης, της σημαντικότερης πόλης στην ευρωπαϊκή πλευρά του Ελληνισπόντου, είχε την τύχη στην ατυχία να τους περισυλλέξει ένα πλοίο που έπλεε για τον Μοριά, όμως άλλαξε πορεία και τους μετέφερε στην Κωνσταντινούπολη. Μολονότι η βυζαντινή πρωτεύουσα ήταν αρκετά μακριά από το επίκεντρο, ο σεισμός έγινε αισθητός και μάλιστα προκλήθηκαν ζημιές στα τείχη της πόλης.



Ο Σεισμός της Θάλασσας του Μαρμαρά.
Πίνακας ανώνυμου καλλιτέχνη, αρχές 16^{ου} αιώνα, Κωνσταντινούπολη.



Πίνακας ζωγραφικής εμπνευσμένος από τον ισχυρό σεισμό ($M_s=7.1$) της 10^{ης} Μαΐου 1556 στην Κωνσταντινούπολη, με τη σχεδόν "ταυτόχρονη" έλευση του Μέγα Κομήτη ή Κομήτη του Καρόλου του 5^{ου} Charles V {C/1556 D1} που θεωρήθηκε αιτία πρόκλησης του σεισμού. Ο κομήτης C/1556 D1 ήταν ορατός στην Κωνσταντινούπολη για 12 ημέρες από μέσα έως τέλος Φεβρουαρίου του 1556 μ.Χ.

Έργο του Herman Gall, Νυρεμβέργη, 1556.

Τέλος, αξίζει να παραθέσουμε μία επίσημη ιστορική επιστολή που συντάχθηκε στις 15 Φεβρουαρίου 1755, από τον πρέσβη της Μεγάλης Βρετανίας στη Κωνσταντινούπολη εκείνη την περίοδο. Αναφέρει τα εξής:

''Απολογισμός των σεισμών που έγιναν έντονα αισθητοί στην Κωνσταντινούπολη. Εισήγηση υπό της Αριστείας του James Porter, Πρέσβη της Μεγαλειότατης στην Κωνσταντινούπολη.

Προς τον αιδεσιμότατο κ. Wetstein.

15 Φεβρουαρίου, 1755.

Κωνσταντινούπολη

Ιστορικοί της κατώτερης αυτής αυτοκρατορίας (εννοούσε την Οθωμανική), μας παρέχουν σημαντικές πληροφορίες για τον αριθμό ισχυρών σεισμών που συνέβησαν στην Κωνσταντινούπολη. Ο Gillius μας πληροφορεί για πολλούς πρόσφατους σεισμούς και για μία αρχαία κολόνα η οποία ονομάζεται ''καμένος στύλος'' και αποκλίνει από την θέση κατασκευής της, ως μια απόδειξη ενός ισχυρού σεισμού που εκδηλώθηκε στην Κωνσταντινούπολη. Ο μόνος ιστορικός σεισμός που με ακριβή ημερομηνία μου έχουν αναφέρει, είναι αυτός του 1719, (σήμερα γνωρίζουμε ότι εννοεί το σεισμό της 25^{ης} Μαΐου 1719 με $M_s=7.4$, που εκδηλώθηκε σε ρήγμα της Νικομήδειας) τον οποίο ακολούθησαν δονήσεις που συνεχίζονταν για 30 ημέρες (μετασεισμοί). Ορισμένες απρόσμενες και τρομακτικές δονήσεις έχω αισθανθεί προσωπικά, σε διάφορες εποχές μέσα στο χρόνο παραμονής μου εδώ. Μία αλησμόνητη δόνηση είναι αυτή ενός πρωινού μεταξύ 15^{ης} με 26^{ης} Μαΐου 1752, στις 5 το πρωί.

Για εκείνη τη χρονιά, είμαστε μάρτυρες ενός βίαιου σεισμού στην Αδριανούπολη στις 29 Ιουλίου, εφόσον ενθυμούμαι καλά, γύρω στις 8 π.μ., ο οποίος όπως περιεγράφηκε, προκάλεσε ασυνήθιστες ρωγμές στο έδαφος, εκρήξεις στα υπόγεια νερά των λουτρών και συνοδευόταν από έκλυση θειούχων αερίων. Υπολογίσιμες ζημιές σημειώθηκαν σε αρκετά σπίτια και ορισμένα κατέρρευσαν. Συντρίμμια αρκετών εξ αυτών παραμένουν έως σήμερα. Λιγότεροι σεισμοί έγιναν αισθητοί τον Αύγουστο του 1752. Δεν ακούσαμε κάτι περισσότερο αφού πέρασε ο σεισμός της 29^{ης} Ιουλίου ούτε από περιοχές προς τα δυτικά.

Στις 29 Αυγούστου ωστόσο και την ίδια ώρα είχαμε μία πολύ ισχυρή δόνηση στην Κωνσταντινούπολη η οποία διήρκεσε λίγα μόνο δευτερόλεπτα. Σημείωσα ότι ο άνεμος εκείνο το πρωί φυσούσε από τα νότια και η υγρή ουσία του θερμομέτρου έδειχνε θερμοκρασία 40 {1}. Το απόγευμα ο άνεμος άλλαξε διεύθυνση, ήταν ΑΝΑ και πολύ

δυνατός και συνέχισε να φυσάει με ορμή όλο το απόγευμα, κατά τη διάρκεια των ακόλουθου σεισμού που νιώσαμε εκείνη την ημέρα. Η πρώτη δόνηση εκείνου του σεισμού μας έγινε αισθητή ως ένα τράνταγμα από κάτω, που σαν να ανασήκωσε το σπίτι και εμάς όπως καθόμασταν και μας πέταξε από τις καρέκλες. Την αρχική αυτή δόνηση διαδέχτηκαν στιγμαία τρεις ή τέσσερις ακόμη οριζόντιες δονήσεις, τέτοιες ώστε οι τοίχοι του σπιτιού απομακρύνονταν και επέστρεφαν, όπως οι κινήσεις που νιώθουμε στο πλοίο... και με δυσκολία μπορούσαμε να σταθούμε ακίνητοι. Οι κινήσεις αυτές κρίναμε ότι είχαν προσανατολισμό από τα ΒΔ προς τα ΝΑ και προέρχονταν από την Αδριανούπολη. Το θερμόμετρο εκείνη τη στιγμή έδειχνε 36. Μια νεκρική σιγή ακολούθησε και εκείνη τη νύχτα σημείωσα ότι τα υγρά του θερμομέτρου έδειχναν 37. Γράμματα από τη Σμύρνη μας είπαν ότι μία μικρή δόνηση αισθανθήκαν εκείνη την ώρα. Επομένως εάν συντονίσουμε όλα τα ρολόγια στην ίδια ώρα και υποθέσουμε ότι η εκρηξιγενής ύλη που προκάλεσε την πρώτη έκρηξη (σεισμό) ήταν περίπου στην Αδριανούπολη, συμπεραίνουμε ότι η επικοινωνία αυτών των τεράστιων μακρινών κινήσεων της Γης ήταν άμεση και σχεδόν ταυτόχρονη, συνεπώς η διαφορά στο χρόνο που αισθανθήκαμε τις κινήσεις αυτές οι κάτοικοι των περιοχών είναι μικρή, ίσως πολύ λίγα λεπτά. Άρα η ταχύτητά τους είναι απίστευτη και μπορούμε να συλλογιστούμε ότι ίσως φθάνουν ή και ξεπερνούν την ταχύτητα του ήχου.

Στις 9 Νοεμβρίου εκείνης της χρονιάς είχαμε μία μικρή δόνηση στις 5.30 π.μ. Το θερμόμετρο έδειχνε 68 προ μεσημβρίας και 66 μετά μεσημβρίας. Μετά τα μεσάνυχτα, τις πρώτες ώρες της 10^{ης} Νοεμβρίου, το θερμόμετρο έδειχνε 56 και μετά μεσημβρίας 54. Ο άνεμος φυσούσε από τα ΝΑ και ήταν καθαρός, κρύος.

Ο πιο ισχυρός σεισμός που ένιωσα ποτέ ήταν αυτός της 2^{ης} Σεπτεμβρίου 1754, στις 10 τη νύχτα. Ο προηγούμενος μήνας δε διέφερε πάνω από 4 ή 5 βαθμούς από τη ζέστη άλλων χρόνων... ο σεισμός ήρθε σαν αυτόν της 29^{ης} Ιουλίου 1752, χωρίς προειδοποιητικά σημάδια, οιωνούς, με τη μόνη διαφορά ότι επικρατούσε διάστημα νεκρικής σιγής από τους σεισμούς. Ο άνεμος εκείνη την ημέρα άλλαξε από ΑΒΑ σε Α και ο ουρανός το βράδυ είχε λίγα ισχνά, αραιά σύννεφα, κάποια περισσότερο μπλε από άλλα και το φεγγάρι ήταν λαμπρό. Η πρώτη δόνηση φάνηκε ολοκληρωτικά κατακόρυφη και το σπίτι με έναν βίαιο ήχο σπασίματος αναπήδησε σαν να έφυγε από τα θεμέλιά του, έτσι το πάτωμα ενός μεγάλου υπνοδωματίου φάνηκε να ανασηκώνεται πάνω από τη μάντρα του σπιτιού και στάθηκε σαν μία πλαγιά, σαν ένα πρανές, πάνω στους

εσωτερικούς τοίχους εκείνου του δωματίου. Την ώρα του σεισμού, φάνηκε σε εμένα τα παράθυρα να είναι πολύ ψηλότερα σε σχέση την αρχική τους θέση και η καρέκλα στη οποία καθόμουν δίπλα σε ένα τοίχο εσωτερικά του σπιτιού, να έχει βυθιστεί· όταν σηκώθηκα αντιλήφθηκα την κλίση που σχημάτιζε το πάτωμα με το οριζόντιο επίπεδο, καθώς στεκόταν ξεκάθαρα με τη κλίση αυτή επί του τοίχου στο υπνοδωμάτιο. Στη συνέχεια ο σεισμός ηρέμησε και τον διαδέχτηκαν αρκετές άλλες οριζόντιες δονήσεις· όλα τα εκκρεμή των ρολογιών σταμάτησαν όπως και οι δείκτες, το δικό μου συγκεκριμένα στις 10.00 μ.μ., ορισμένα λίγα λεπτά πριν ή μετά τις 10 ανάλογα με τη μεγάλη ή μικρή τους ακρίβεια. Οι υπηρέτες μου είπαν ότι τα άλογα είχαν ξυπνήσει και είχαν σηκωθεί από την κοπριά τους με βίαια συναισθήματα και συνέχιζαν να καλπάζουν και να σηκώνονται στα δύο τους πόδια για αρκετή ώρα, όλες οι κόττες φτερούγιζαν, αναπηδούσαν πετώντας και κακάριζαν ασταμάτητα, τα σκυλιά και οι γάτες έτρεχαν πολύ γρήγορα και άτακτα, φοβισμένα. Οι γεωτρήσεις, εκ των οποίων μου ανήκουν τρεις, η μία στέρεψε από νερό και οι άλλες σχεδόν. Η ζημιά που υπέστημεν είναι αξιόλογη, αλλά κυρίως για τα παλαιά λιθόχτιστα οικοδομήματα της Κωνσταντινούπολης, όπως οι επτά πύργοι, τα δημόσια λουτρά και παλαιά τείχη. Όλα τα σπίτια είναι χτισμένα με ξύλο και πηλίνα τούβλα αφυδατωμένα, ώστε να έχουν λιγότερο βάρος οι οικοδομές, καθώς σύμφωνα με τους χωρικούς της περιοχής, κατ' αυτό τον τρόπο, αυξάνεται η ασφάλεια των οικοδομημάτων απέναντι στους σεισμούς. Πράγματι, κανένα, παρά μόνο πολύ παλιά κτίρια υπέστησαν ολοκληρωτικές ζημιές... λίγα από τα νέα, που όλων η αντοχή δοκιμάστηκε απέναντι στο σεισμό, υπέφεραν και όσα είχαν δεχτεί επισκευή στο παρελθόν από σεισμούς επιβίωσαν με λίγες μόνο ρωγμές. Αμέσως ειπώθηκε ότι οι άνθρωποι που σκοτώθηκαν ήταν μερικές εκατοντάδες, αλλά στην πραγματικότητα δεν ήταν πάνω από εξήντα. Όσο πιο ψηλά βρισκόταν ένα διαμέρισμα τόσο πιο ισχυρή η δόνηση του σεισμού... ενώ αυτοί που ήταν στο δρόμο ή στα χωράφια και στην εξοχή δεν τον ένιωσαν τόσο δυνατό. Η διάρκεια του σεισμού από πολλούς επεκτάθηκε σε λεπτά, αλλά κατά όσο μπορώ να κρίνω, δε ξεπέρασε κάποια δευτερόλεπτα το πολύ 30". Το θερμόμετρο προ μεσημβρίας έδειχνε 48 και μετά μεσημβρίας 47. Ο καιρός εκείνη την ημέρα ήταν γενικά αίθριος. Καταλάβαμε ότι η προέλευσή του ήταν από τα ανατολικά, από όπου είχαμε αργότερα μία αδιάψευστη πληροφορία. Σύμφωνα με τη πληροφορία αυτή ο σεισμός είχε πρώτα γίνει αισθητός στην ευρύτερη περιοχή της μεγάλης πόλης Σεβάστειας στη Μικρά Ασία, μετά κινήθηκε προς τη περιοχή Diarbeckir της Μεσοποταμίας όπου

και προκάλεσε κάποιες καταστροφές... έπειτα ήρθε προς τα δυτικά αφήνοντας πολλά ερείπια σε ορισμένες μικρές πόλεις και χωριά... τέλος πέρασε από τη Νικομήδεια στην Κωνσταντινούπολη. Δεν είχαμε απολογισμό για την έκτασή του προς την Αδριανούπολη... λίγο αισθητός έγινε επίσης στη Σμύρνη. Άλλοι σεισμοί μικρότεροι έγιναν αισθητοί εκείνο το βράδυ στις 12 τα μεσάνυχτα.

Και στις 3 Σεπτεμβρίου, στις 10 και 12 π.μ. Ο άνεμος φυσούσε ΑΝΑ. Το θερμόμετρο έδειχνε 46 π.μ. και 44 μ.μ.

Στις 4 Σεπτεμβρίου, δύο ακόμη σεισμοί, ένας στις 02 μ.μ. και ένας στις 11.15 μ.μ. Ο άνεμος φυσούσε ΒΒΑ και ήταν δροσερός. Το θερμόμετρο έδειχνε 42 π.μ. και 44 μ.μ. Ο καιρός ήταν σκοτεινός, με πολλά μαύρα σύννεφα.

Στις 5 Σεπτεμβρίου, ένας τα ξημερώματα και ο άλλος στις 9.40 π.μ., Ο άνεμος φυσούσε ΑΒΑ και στη συνέχεια γύρισε σε Β άνεμο φέρνοντας πολλά νέα σύννεφα. Το θερμόμετρο έδειχνε 44 π.μ. και 45 μ.μ.

Στις 6 Σεπτεμβρίου, δύο δονήσεις στις 4 το πρωί. Λίγος άνεμος, σχεδόν ήρεμος. Τα ο θερμόμετρο έδειχνε 44 π.μ., και 44 μ.μ. Μεταξύ 8 και 9 τη νύχτα είχαμε ένα παράξενο και μεμονωμένο γεγονός... ένα τοπικό επίμηκες σύννεφο σχηματίστηκε πάνω ακριβώς από το σημείο όπου έδυσε ο Ήλιος στον ουρανό και είχε μία πυκνή μαύρη σύσταση... πετούσε φωτιές, κεραυνούς και ορισμένες πολύ τρομακτικές λάμπες που άλλοτε ήταν σαν βέλη, άλλοτε σαν λεπίδες και αναμειγμένες με μπλε στο χρώμα θεικούς ατμούς. Ακριβώς στις 9 μ.μ., κατέβηκε από αυτό ένας εκκωφαντικός ήχος, το σύννεφο ξαφνικά αποχώρησε, με μία ήρεμη, αργή κίνηση διέσχισε όλο το βόρειο ημισφαίριο και παρέμεινε αργότερα εξαιρετικά καθαρό και λαμπερό... ο ήχος συνέχιζε και καθώς μας πλησίαζε το σύννεφο έριχνε έναν αδιάκοπο, ασταμάτητο συρφετός από κεραυνούς που αρχικά συνοδευόταν με ψιχάλα και στη συνέχεια με δυνατή βροχόπτωση. Απομακρύνθηκε έπειτα προς τα ανατολικά όπου συνέχιζε να ρίχνει κεραυνούς, αστραπές και φλόγες και ολοένα και κατέβαινε πιο χαμηλά... μέχρι τις 10 μ.μ. είχε εντελώς ξεθυμάνει.

Εάν αυτό το συνονθύλευμα από εκρηξιγενείς ατμούς και αέρια μας είχε απελευθερώσει από τους σεισμούς, θα μπορούσε να θεωρηθεί ότι είχε άμεση σύνδεση με αυτούς. Ωστόσο, αξίζει να παρατηρηθεί εάν τα κατακρημνίσματα αυτά από το σύννεφο και οι ατμοί είναι ικανά να μειώσουν την ποσότητα αυτής της εύφλεκτης, εκρηξιγενούς ύλης στο εσωτερικό της Γης και κατά συνέπεια τη δύναμη της έκρηξης και των δονήσεων των σεισμών.

Στις 7 Σεπτεμβρίου, ο άνεμος φυσούσε ΔΝΔ και λίγο έβρεχε. Το θερμόμετρο έδειχνε 47 π.μ. και 51 μ.μ.. Εκείνη την ημέρα δεν είχαμε κανένα σεισμό.

Στις 8 Σεπτεμβρίου, ο άνεμος ήταν ΒΒΔ, το βράδυ έβρεχε όπως και λίγο το πρωί. Στις 4.30 π.μ. και στις 10 το πρωί είχαμε δύο δονήσεις. Το θερμόμετρο έδειχνε 52 π.μ., και 55 μ.μ.

Στις 9 Σεπτεμβρίου, είχαμε αίθριο και ήρεμο καιρό, ο άνεμος ήταν ΒΑ και μετά γύρισε σε ΑΒΑ. Το θερμόμετρο έδειχνε 54 π.μ. και 53 μ.μ. Δεν αισθανθήκαμε σεισμό.

10^η Σεπτεμβρίου, ο άνεμος Β και στη συνέχεια ΒΒΑ. Το θερμόμετρο έδειχνε 52 π.μ., και 50 μ.μ. και ο καιρός ήταν σκοτεινός και βαρύς μετά το μεσημέρι, με βόρειο άνεμο. Είχαμε δύο σεισμούς... έναν τα μεσάνυχτα και τον άλλο στις 4 τα ξημερώματα.

Η 11^η Σεπτεμβρίου είχε άνεμο ΑΒΑ. Το θερμόμετρο έδειχνε 50 π.μ. και 52 μ.μ. Ο καιρός περιελάμβανε ψιχάλες και ήρεμη βροχή, γενικά υποφερτός. Ένας σεισμός στις 12.30 μετά τα μεσάνυχτα.

Στις 13 Σεπτεμβρίου, ο άνεμος καθαρά Α. Το θερμόμετρο στους 49 π.μ. και στους 51 μ.μ. Ένας σεισμός στις 3 π.μ, τα ξημερώματα.

Παρότι έχω σημειώσει μόνο αυτούς που περισσότερο ένιωσα, μπορεί να βρούμε δύο ή τρεις ακόμη σε πολύ αξιόπιστες αναφορές. Οι περισσότεροι άνθρωποι υποστηρίζουν ότι όλον αυτό το μήνα, από τη μια ώρα στην άλλη υπήρχαν συνεχόμενοι σεισμοί με μικρές διακοπές. Ο άνεμος για το μεγαλύτερο διάστημα τότε, έπνεε ΒΑ, τα θερμόμετρα έδειχναν ολοένα και μικρότερη θερμοκρασία καθώς το κρύο αυξανόταν.

Στις 6 Οκτωβρίου, αφού είχαμε σχεδόν ξεχάσει τους σεισμούς, τους ξαναθυμηθήκαμε στις 8.45 μ.μ. μετά από ένα χρονικό διάστημα νεκρικής σιγής. Υπήρχαν πολλές οριζόντιες έντονες δονήσεις, η κίνηση δε διήρκεσε πολύ και δεν είχαμε κανένα βίαιο σπάσιμο, θόρυβο ή το παραμικρό προειδοποιητικό σημάδι. Ο άνεμος φυσούσε πριν το σεισμό από τα ΒΑ και μετά από τα ΑΒΑ. Το θερμόμετρο έδειχνε 72 π.μ. και 69 μ.μ.

Στις 7 Οκτωβρίου, ο άνεμος ήταν Α.Β.Α. Το θερμόμετρο έδειχνε 68 π.μ. και 69 μ.μ. Μία μικρή δόνηση έγινε αισθητή στις 12 το μεσημέρι. Από εκείνη την ώρα και ύστερα ο άνεμος φυσούσε από διαφορετικές διευθύνσεις αλλά η κύρια διεύθυνσή του είναι ΒΒΑ. Το θερμόμετρο είχε εύρος θερμοκρασίας από 62 έως 66. Έως τη 4^η Νοεμβρίου δεν αισθανθήκαμε άλλο σεισμό. Είχαμε τότε έναν μικρό και σύντομο στις 10.19 τη νύχτα. Ο άνεμος ήτα καθαρός ΒΑ και είχαμε λίγα αραιά σύννεφα στον ουρανό. Το θερμόμετρο έδειχνε 66 π.μ. και 65 μ.μ. Ένας άλλος σεισμός έγινε αισθητός σε πολλούς στις 19 Νοεμβρίου, στις

9.45 τη νύχτα... αλλά λόγω του ότι ήμουν εν κινήσει δεν τον αντιλήφθηκα. Εκείνη η ημέρα είχε πολλά βροχερά σύννεφα και κρύο.

Από τις 15 Δεκεμβρίου έως το τέλος του μήνα ο καιρός είχε γίνει πολύ κρύος και το χιόνι και ο παγετός ήταν περισσότερα από ότι είχε γνωρίσει η Κωνσταντινούπολη για αρκετά χρόνια. Τα θερμόμετρα είχαν ένα εύρος θερμοκρασιών από το 80 σε πολύ κρύο στο 90. Κατά τη διάρκεια του Ιανουαρίου, από 88 σε 94,95 και 98.

Από τις 15 Ιανουαρίου έως τις 20, ο άνεμος έπνεε από ΝΔ σε ΝΑ, η θερμοκρασία ήταν περίπου στου 88 βαθμούς, έπειτα στους 81 και είχαμε αρκετή ομίχλη και υγρασία.

Στις 20 Ιανουαρίου, ο άνεμος έγινε δυνατός και φυσούσε δυνατά από ΑΒΑ, με παρασυρόμενες ψιχάλες και βροχοσταγόνες. Είχαμε τρεις ισχυρούς σε δόνηση σεισμούς στις 12.34' το μεσημέρι. Η θερμοκρασία στους 83, ο καιρός ανεκτός με κρύο αλλά άλλαζε σταδιακά... και όσο το κρύο αύξανε σημαντικά ένας άλλος σεισμός έγινε αισθητός στις 23 Ιανουαρίου στις 10.30 π.μ. Το χιόνι έπεφτε πυκνό, ο παγετός ήταν πολύ σκληρός, ο άνεμος φυσούσε από τα ΒΑ και το θερμόμετρο στους 91 βαθμούς.

Στο ξεκίνημα του Φεβρουαρίου το χιόνι συνέχισε να πέφτει και το κρύο είχε αυξηθεί...τότε είχαμε τη χαμηλότερη ελάχιστη θερμοκρασία που θυμάμαι να έχω σημειώσει. Τη 4^η Φεβρουαρίου, το θερμόμετρο σκαρφάλωσε στους 100 βαθμούς. Το κανάλι το οποίο χωρίζει την περιοχή Ρεγα από την Κωνσταντινούπολη είχε παγώσει από τα οπλοστάσια κάτω στα στρατόπεδα έως πάνω στο ποτάμι.

Από αυτές τις παρατηρήσεις, δεν εμφανίζεται να υπάρχει μία λογική ή πιθανή προγνωστική για τους σεισμούς... αφού μας επισκέπτονται χωρίς διαχωρισμούς στη μέση χρονικών περιόδων άλλοτε πολύ δυνατών ανέμων, άλλοτε νηνεμίας, κρύου, ζέστης, βροχής, χιονιού και αίθριου καιρού. Άρα, δεν μπορεί να υπάρξει καμία σύνδεση αυτών με την ατμόσφαιρα, εκτός απλά από το συνονθύλευμα εκείνο των εκρηξιγενών σύννεφων που παρατηρήσαμε τη νύχτα της 6^{ης} Σεπτεμβρίου... εκτός και αν η διεύθυνση του ανέμου που φαινόταν να είναι κοινή με αυτή των σεισμών, μπορεί να θεωρηθεί ότι έχει σχέση.

Δεύτερον, αυτό που κάποιοι γηραιοί μας είπαν ότι η άνοιξη και το φθινόπωρο είναι οι δύο συνήθεις εποχές για σεισμούς, φαίνεται να μην είναι ένας ασφαλής κανόνας καθώς, όχι μόνο από αυτούς που παρατήρησα αλλά γενικά και από παρατηρήσεις άλλων φαίνεται ότι συμβαίνουν εξίσου σε όλες τις εποχές.

Τρίτον, η ταχύτητα της κίνησης και η απόσταση επικοινωνίας εμφανίζονται υπερβολικά εκπληκτικές. Από την Αδριανούπολη στη

Σμύρνη, σε ευθεία γραμμή, η απόσταση δεν είναι μικρότερη από 250 μίλια και ως την Κωνσταντινούπολη 150 μίλια. Πιθανώς ο λόγος για τον οποίο ο σεισμός έγινε αισθητός με μικρότερη δύναμη σε ορισμένα από τα προαναφερόμενα μέρη, είναι η διαφορά της απόστασης και ίσως η μείωση της δύναμης του σεισμού κατά τη διάδοσή του και κατανομή στη Γη. Άρα μπορούμε να σχηματίσουμε την εικασία στη βάση ότι η προέλευση της έκρηξης ήταν στην, ή περίπου στην, Αδριανούπολη.

Η Σεβάστεια σε μια ευθεία γραμμή υπολογίζω ότι απέχει 750 μίλια. Αλλά δεν έχω ακόμη πληροφορηθεί για το χρόνο και την ακριβή ώρα που ο σεισμός έγινε αισθητός σε αυτούς εκεί πέρα... άκουσα ότι ήταν η ίδια ημέρα... αλλά αυτοί οι άνθρωποι δεν παρατηρούν επαρκώς ώστε να θυμούνται μία ώρα.

{I}. Τα θερμόμετρα εκείνης της εποχής ήταν βαθμονομημένα από το 1 έως το 100. Η κλίμακα αυτή συσχέτιζε τη μέση θερμοκρασία με τους 50 βαθμούς, το κρύο με τους 60 έως 65, το πολύ κρύο και τον παγετό με 80, τους 95 έως 100 βαθμούς με υπερβολικό ψύχος. Η θερμότερη ένδειξη για το κλίμα της Κωνσταντινούπολης με τα θερμόμετρα αυτά ήταν 35 έως 30 βαθμούς που σήμαινε αφόρητη ζέστη.

3.3 Οι Εστιακές Παράμετροι Ιστορικών Σεισμών στη Θάλασσα του Μαρμαρά

Η Εκτίμηση της Μακροπρόθεσμης Σεισμικότητας

Η χρήση των πληροφοριών που αφορούν τη μακροπρόθεσμη σεισμικότητα και που προκύπτουν από διεπιστημονικές έρευνες, συντελεί σε μια πιο πλήρη κατανόηση του σεισμικού κινδύνου, εφόσον βασίζεται στην ανθρώπινη εμπειρία επί των σεισμών εδώ και χιλιάδες χρόνια και θεωρητικά προσεγγίζει μια πολύ μικρή αλλά σημαντική περίοδο της γεωλογικής χρονολογικής κλίμακας. Πρόσφατες, νεοσύστατες και σύγχρονες εξελισσόμενες έρευνες στην Ευρώπη επί του επιστημονικού πεδίου της Ιστορικής Σεισμολογίας έχουν δείξει ότι η αποκρυπτογράφηση των μυστηρίων ιστορικών σεισμών και των μακροσεισμικών αποτελεσμάτων τους είναι μια αρκετά δύσκολη και πολυσχιδής διεπιστημονική διαδικασία (Stucchi, 1993; Albinì and Moroni, 1994; Vogt, 1996) που απαιτεί τεράστιο όγκο δεδομένων ώστε να αναλυθεί ένας μόνο σεισμός. Σημαντική συνεισφορά επί της ιστορικής σεισμολογίας έχουν να επιδείξουν αρχεία και επιστημονικές εργασίες των Castanetto & Galadini και ιδιαίτερα των 788 σελίδων βιβλίο τους που εκδόθηκε το 2001 και στο οποίο περιγράφονται όλα τα βήματα που πρέπει να ακολουθηθούν προκειμένου να αναλυθεί ένας σεισμός και τα μακροσεισμικά αποτελέσματα αυτού με τη μέγιστη δυνατή ακρίβεια. Η παρούσα διπλωματική εργασία επεκτείνεται στην έρευνα και συγκεκριμένα στην εκτίμηση εστιακών παραμέτρων ιστορικών σεισμών για τη Θάλασσα του Μαρμαρά.

Μια Πρώτη Προσέγγιση

Τα δεδομένα επί των μακροσεισμικών αποτελεσμάτων που αντλούνται από πηγές ιστορικών περιόδων, έχουν ερμηνευτεί ακολουθώντας μία βελτιστοποιημένη έκδοση της μεθόδου ερμηνείας που αρχικά προτάθηκε από Ambraseys και Melville, 1982. Η μέθοδος αυτή περιλαμβάνει την εκτίμηση των παρατηρημένων εντάσεων, των epicέντρων των σεισμών και τον υπολογισμό του μεγέθους των σεισμών όπως αυτό ορίζεται από τις εντάσεις τους σε διαφορετικές περιοχές και από τα μακροσεισμικά τους αποτελέσματα σε συνάρτηση με την απόστασή τους από την εστία. Μια πλήρης βάση δεδομένων συνήθως περιλαμβάνει το σύνολο των πηγών από όπου αντλούμε τις πληροφορίες για τους ιστορικούς σεισμούς και συσχετίζει τις ιστορικές αναφορές με τα διαθέσιμα σεισμολογικά δεδομένα των ιστορικών αυτών σεισμών. Για σεισμούς που χρονολογούνται πριν από το 1500 μ.Χ. και από το 1500 έως το 1800 μ.Χ., οι πρωτότυπες πηγές μέσω των οποίων αντλούμε πληροφορίες συναντώνται σε πληθώρα ξένων γλωσσών, άλλοτε νεκρών και άλλοτε σύγχρονων, εκ των οποίων όλες σχεδόν έχουν μεταφραστεί στην Αγγλική γλώσσα. Ωστόσο, για σεισμούς που εκδηλώθηκαν μεταξύ του 1500 και 1800 μ.Χ., η πλήρης βάση δεδομένων πλέον περιλαμβάνει μία αναθεωρημένη και ανανεωμένη έκδοση της δημοσιευμένης εργασίας των Ambraseys & Finkel, 1995.

Η πληρέστερη έως σήμερα βάση δεδομένων για την Ιστορική Σεισμολογία είναι προς το παρόν υπό κατασκευή, επιπλέον πολλά υποσχόμενη με δεδομένα ιστορικών σεισμών που ποτέ άλλοτε δεν ήταν διαθέσιμα ή ακόμη και γνωστά και προκύπτει από μακροχρόνιες διεπιστημονικές έρευνες των κλάδων της Σεισμολογίας και της Αρχαιολογίας. Μέσω αυτής θα παρέχονται σημαντικότερες πληροφορίες για τη περιοχή των epicέντρων, τις εντάσεις των σεισμών, τα μεγέθη (Ambraseys, 2001a) και θα επιτυγχάνεται γενικότερα βέλτιστη επανεκτίμηση των εστιακών τους παραμέτρων.

Χρονολόγηση

Με τους ιστορικούς σεισμούς, η χρονολόγηση και ο υπολογισμός της ακριβούς ημερομηνίας και ώρας τους καθίσταται μια αρκετά δύσκολη επιστημονική διαδικασία. Πολλά ημερολόγια έχουν χρησιμοποιηθεί για να χρονολογήσουμε σεισμούς των τελευταίων είκοσι αιώνων και λεπτομέρειες επί των διαφορετικών ημερολογιακών συστημάτων στο πως αυτά έχουν χρησιμοποιηθεί παλιότερα και πως αξιοποιούνται έως σήμερα, συναντώνται, για παράδειγμα, σε σχετική εργασία του Grumel (1958). Χρονολογικά λάθη και ανακρίβειες, ορισμένες φορές σε πρωτογενείς αλλά κυρίως σε δευτερογενείς ιστορικές πηγές αποτελούν συχνό φαινόμενο. Αμφιβολίες δημιουργούνται σε εμάς τους σεισμολόγους αρκετές φορές για το αν καταγεγραμμένα σεισμικά γεγονότα αφορούν έναν ορισμένο κύριο σεισμό μιας σεισμικής ακολουθίας, ή εάν πολλαπλές αναφορές, από διαφορετικές περιοχές και με αξιοσημείωτη χρονική διαφορά ωρών ή και ημερών μεταξύ τους, καταγράφουν ένα σεισμικό γεγονός ή πολλαπλά, όπως ισχυρούς μετασεισμούς. Συνειδητοποιούμε πως η ταυτοποίηση ισχυρών σεισμών που προκύπτει από τις ιστορικές πηγές απαιτεί πολύ προσεχτική και ενδελεχή έρευνα, καθώς σε περίπτωση ανακριβούς και λανθασμένης αναφοράς συντελεί σε σφάλμα επί των epicέντρων, των μεγεθών και των εστιακών παραμέτρων

ευρύτερα ισχυρών σεισμών που διερευνώνται. Επιπλέον, προκειμένου στη σύγχρονη έρευνα να διευκολύνεται η επιστημονική κοινότητα των σεισμολόγων, κατασκευάζονται εξειδικευμένοι κατάλογοι των εστιακών παραμέτρων ακόμη και των μηχανισμών γένεσης ιστορικών σεισμών που έχουν αναζητηθεί και ταυτοποιηθεί διαμέσω των ιστορικών πηγών. Συμπερασματικά, οι κατάλογοι αυτοί είναι απαραίτητο να εκτιμούν με το ελάχιστο δυνατό στατιστικό σφάλμα τις εστιακές παραμέτρους των ιστορικών σεισμών, καθώς η μελέτη της ιστορικής σεισμικότητας απαντά σε αρκετά και πολύπλοκα μυστήρια που διέπουν τα σεισμικά φαινόμενα όπως τα μελετάμε στη σύγχρονη Σεισμολογία.

Το Φαινόμενο του Συγχρονισμού στους Ιστορικούς Σεισμούς

Ένα σημαντικό πρόβλημα που συναντάται στην προσπάθεια εκτίμησης του επικέντρου ιστορικών σεισμών και του μεγέθους τους είναι ο συγχρονισμός στην καταγραφή του εκάστοτε σεισμικού γεγονότος σε διαφορετικές περιοχές. Πολλές μάλιστα φορές, οι συγγραφείς των ημερολογίων από όπου αντλούνται αυτές τις πληροφορίες, δεν αναφέρονται καν στην ακριβή τοποθεσία όπου παρατηρήθηκαν οι περισσότερες ζημιές, στην ώρα, στην ημέρα και σπάνια άλλοτε, ούτε στην εβδομάδα, στο μήνα ή ακόμη και στο έτος ενός ισχυρού ιστορικού σεισμού. Η σύγχυση αυτή προκαλείται εξαιτίας του φαινομένου του συγχρονισμού που εφαρμόζαν οι αρχαιότεροι χρονικογράφοι αφού αναγάζανε όλα τα σεισμικά γεγονότα μιας χρονικής περιόδου σε μία σύντομη χρονική περιγραφή. Κατά αυτό τον τρόπο, πολλές σεισμικές ακολουθίες μέσα σε ένα έτος και ισχυροί σεισμοί άλλοτε κύριοι και άλλοτε μετασεισμοί, καταγράφονταν ως ένα σημαντικό σεισμικό φαινόμενο που λάμβανε χώρα πχ. για "μία συνεχόμενη εβδομάδα ή έναν ολόκληρο μήνα".

Επιπρόσθετα, αξίζει να αναφέρουμε πως η αδυναμία αναγνώρισης του φαινομένου του συγχρονισμού αρχικά στις πρωτογενείς ιστορικές πηγές και επακόλουθα στους ιστορικούς καταλόγους, συντελεί συνήθως στην υπερεκτίμηση των μεγεθών και των μακροσεισμικών αποτελεσμάτων ιστορικών σεισμών (Ambraseys & White, 1997).

Τα Μακροσεισμικά Αποτελέσματα Ιστορικών Σεισμών.

Η εκτίμηση της ισχύος της δόνησης στο έδαφος θεμελίωσης κτιρίων, που προκύπτει από ιστορικές πηγές για ιστορικούς και μοντέρνες πηγές για σύγχρονους αντίστοιχα σεισμούς, χαρακτηρίζεται ως ένα εκ των μακροσεισμικών αποτελεσμάτων και εξαρτάται από τη τρωτότητα των κτιρίων στην εδαφική επιτάχυνση καθώς επίσης και από την αντικειμενικότητα από την οποία διακατέχεται η πληροφορία στα ιστορικά κείμενα.

Μέχρι σχετικά πρόσφατα, τα σπίτια στην Κωνσταντινούπολη και σε πόλεις και σε χωριά γύρω από τη θάλασσα του Μαρμαρά, είχαν ως δομικό υλικό στην πλειοψηφία τους το ξύλο, με συνέπεια, παρότι υπέκυπταν σε σοβαρές και ανεπανόρθωτες ζημιές

κατά την εκδήλωση πολύ ισχυρών σεισμών, σπάνια κατέρρεαν και δεν προκαλούνταν σημαντικές απώλειες ανθρωπίνων ζώων (Refik, 1935).

Μια γενική παρατήρηση στην επικρατούσα οικοδομική είναι ότι η εγγενής αντοχή των οικιών στην εδαφική επιτάχυνση είναι αξιοσημείωτη, με αποτέλεσμα να χαρακτηρίζεται από χαμηλή τρωτότητα. Σε αντίθεση, κατασκευές πέτρινες και από τούβλα που συγκριτικά είναι λίγες στην ευρύτερη περιοχή της θάλασσας του Μαρμαρά, μπορούν εύκολα να καταρρεύσουν με σημαντικές απώλειες ανθρωπίνων ζώων. Επιπλέον, στο ηπειρωτικό τμήμα της Θράκης όπου τα σπίτια είναι χτισμένα από τούβλα ιλύος και αργίλου και οι στέγες τους είναι επίπεδες με μεγάλο βάρος, χαρακτηρίζονται από υψηλή τρωτότητα. Εξαιρετικό ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι στην Κωνσταντινούπολη ζημιές και απώλειες ανθρωπίνων ζώων συντελούνταν σε μεγαλύτερο ποσοστό εξαιτίας πυρκαγιών, από ότι εξαιτίας σεισμών (Cezar, 1963).

Αρκετά συχνά το γεγονός ότι μερικά ιστορικά μνημεία στην Κωνσταντινούπολη και στην ευρύτερη περιοχή της Θάλασσας του Μαρμαρά, χτισμένα από πέτρα ή τούβλα, συναντώνται σήμερα σε μια ανεκτή ακόμη και αξιοπρεπή στατική κατάσταση, ερμηνεύεται ως μια ένδειξη είτε χαμηλής τρωτότητας των κτιρίων αυτών λόγω καλής κατασκευής τους από τους μηχανικούς της τότε εποχής, είτε ως μια ένδειξη μη δοκιμασίας των ιστορικών μνημείων αυτών σε καταστροφικούς σεισμούς. Ωστόσο, οι μέχρι τώρα παρατηρήσεις μας αποδεικνύουν ότι ιστορικά οικοδομήματα που συναντάμε σήμερα στην Κωνσταντινούπολη και στις ιστορικές πόλεις της Θάλασσας του Μαρμαρά έχουν υποστεί ένα σημαντικό αριθμό καταστροφικών σεισμών και έχουν μερικώς ή ολοκληρωτικά επιβιώσει μέσα από μια διαδικασία φυσικής επιλογής. Τα κτίρια αυτά αντιπροσωπεύουν ένα μικρό δείγμα βέλτιστου σχεδιασμού και υψηλού κατασκευαστικού επιπέδου, στοιχεία τα οποία επιτεύχθηκαν στο πέρασμα των αιώνων τόσο με την εκθετικά αυξανόμενη εμπειρία στο σχεδιασμό και στην κατασκευή κτιρίων, όσο και σε συνάρτηση με τα βιώματα και εμπειρίες που αποκτήθηκαν από τα σεισμικά φαινόμενα. Επομένως, το αποτέλεσμα αυτό της διατήρησης και επιβίωσης ιστορικών μνημείων και κτιρίων, δε συνίσταται να λαμβάνεται υπόψη στην προσπάθειά μας να εκτιμήσουμε γενικότερα τη σεισμική επικινδυνότητα στην Κωνσταντινούπολη.

Ένας διαφορετικός τύπος ανθρωπίνων κατασκευών, ο οποίος φαίνεται να έχει μια μικρή πρόσθετη αντοχή στους σεισμούς είναι αυτός των οικιών που κατασκευάστηκαν κατά τις τελευταίες δεκαετίες με μη παραδοσιακά αλλά μοντέρνα δομικά υλικά όπως το ενισχυμένο σκυρόδεμα. Όπως οι πρόσφατοι σεισμοί απέδειξαν, η απουσία εφαρμογής αξιόπιστων κατασκευαστικών κανόνων και η έλλειψη της δομικής ενίσχυσης των οικιών, όταν συνδυάζονται με τη ταυτόχρονη εισαγωγή σύγχρονων δομικών υλικών και μεθόδων κατασκευής, συντελούν στην παραγωγή οικοδομημάτων με πολύ υψηλή τρωτότητα που επακόλουθα σε ότι αφορά την επιστήμη της Σεισμολογίας, τείνει να αυξάνει σε σημαντικό βαθμό την ένταση που παρατηρούμε στους σύγχρονους σεισμούς.

Οι Εντάσεις των Ισχυρών Ιστορικών Σεισμών.

Η διαφορά στην τρωτότητα των πολλών και διαφορετικών οικοδομημάτων στη Θάλασσα του Μαρμαρά και οι διακυμάνσεις της σε συνάρτηση με το χρόνο συνεπάγεται τη δυσκολία εκτίμησης των εντάσεων ιστορικών σεισμών. Σήμερα, βρίσκουμε πως ζημιές και καταρρεύσεις παλαιών οικιών, δημοσίων κτιρίων και των τειχών της Κωνσταντινούπολης, αποτελούν ένδειξη της αδυναμίας γενικά και τρωτότητας ειδικότερα αυτών των κατασκευών που συχνά καταρρέουν χωρίς την επίδραση των σεισμών, της εδαφικής κίνησης ή της σεισμικής επιτάχυνσης. Το γεγονός αυτό καθιστά ακόμη πιο δύσκολη την προσπάθειά μας να εκτιμήσουμε τις εντάσεις ιστορικών σεισμών.

Η φυσική υπερβολή που εμπεριέχεται στις πηγές, ιστορικές και μοντέρνες είναι ένα πρόσθετο πρόβλημα, ωστόσο, δεν είναι τόσο δύσκολο για να λυθεί. Η αυθεντικότητα της πηγής, το είδος της αφήγησης, η ταξινόμηση των γεγονότων και των αποδεικτικών στοιχείων για τους σεισμούς από τον αφηγητή κατά σειρά σημαντικότητας, η εμπειρία του αφηγητή στην αξιολόγηση και καταγραφή της αντικειμενικής ιστορικής πληροφορίας, συμβάλλουν στην εκτίμηση του βαθμού των μακροσεισμικών αποτελεσμάτων και της έκτασης αυτών σε όποιες γεωγραφικές τοποθεσίες κατέγραφαν σοβαρές επιπτώσεις. Για παράδειγμα, αναφορές τέτοιες, που έπονται ενός υποτιθέμενου αρχικά ισχυρού και καταστροφικού σεισμού στην Κωνσταντινούπολη, ομολογούν πως οι κάτοικοι βρήκαν καταφύγιο σε εκκλησίες ή τζαμιά, ή ότι οργάνωσαν μαζικά θρησκευτικά μυστήρια και λατρείες προκειμένου να κατευνάσουν τα φυσικά φαινόμενα των σεισμών. Κατά τη διάρκεια του προαναφερόμενου σεισμού και ανάλογων αυτού, στις ιστορικές πηγές δεν έχουμε αναφορές για απώλειες ανθρώπινων ζωών ή πολλαπλών καταρρεύσεων οικιών, στοιχείο το οποίο αποδεικνύει ότι ο σεισμός δεν ήταν εντέλει ισχυρός και καταστροφικός. Υπάρχουν επίσης ορισμένες περιπτώσεις κατά τις οποίες ένας χρονικογράφος ή ιστορικός άθελά του υπερβάλλει, αναφέροντας ζημιές που έχουν συντελεστεί από την επίδραση πολλών ισχυρών σεισμών, πυρκαγιών ακόμη και ισχυρών καταιγίδων στο ρου των ιστορικών χρόνων. Η εσκεμμένη υπερβολή επί των ζημιών και μακροσεισμικών αποτελεσμάτων των σεισμών, όπως επίσης η απόκρυψη και έλλειψη αναφοράς για ισχυρούς σεισμούς εξαιτίας πολιτικών και θρησκευτικών γεγονότων συνιστούν πρόσθετα τροχοπέδη στη έρευνα της Ιστορικής Σεισμολογίας. Η αναγωγή των κοινωνικοπολιτικών και πολιτιστικών γεγονότων σε σημαντικότερα στις καταγραφές των ιστορικών, επισκιάζει επομένως τη σοβαρότητα και το μέγεθος των μακροσεισμικών αποτελεσμάτων. Τα προβλήματα αυτά έχουν συζητηθεί σε ερευνητικές εργασίες που συνδέουν τις ιστορικές πηγές με την προσπάθεια εκτίμησης των εντάσεων των σεισμών στην Κωνσταντινούπολη και την ευρύτερη περιοχή της Θάλασσας του Μαρμαρά (Vogt, 1996; White, 2000; Ambraseys, 2002).

Ιστορικές αναφορές επί της θνησιμότητας επιφανών πολιτών, της μεγάλης κλίμακας ανακατατάξεων και πολιτικών μεταρρυθμίσεων όπως υποβολής φόρων, κοπής νέου νομίσματος, οικονομικών εμπορικών σχέσεων ή μαζικών μεταναστεύσεων κατόπιν ενός ισχυρού σεισμού, συνηγορούν προς έναν ισχυρό, μεγάλο μεγέθους σεισμό. Ορισμένες από τις προαναφερόμενες επιπτώσεις ισχυρών σεισμών αρκετά συχνά δε καταγράφονται ή δεν αποδίδονται σε σεισμικά φαινόμενα αλλά τις επάγουμε από δευτερεύοντα στοιχεία ιστορικών πηγών. Γράφηματα που προκύπτουν για τις

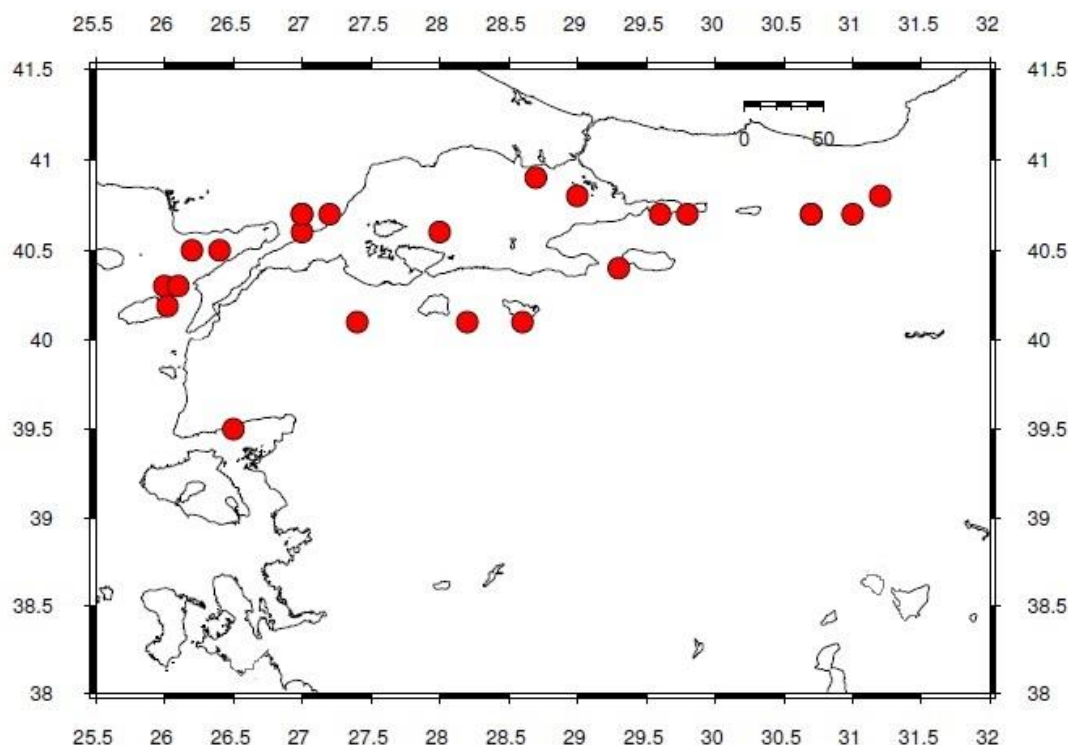
ανθρώπινες απώλειες είναι συχνά ανακλητά καθώς δύσκολα επαληθεύονται, επιπρόσθετα δεν είναι απαραίτητα ενδεικτικά του μεγέθους ή της έντασης ενός σεισμού. Εξαιτίας της έμφασης που δίνεται στις επιπτώσεις των σεισμών σε μεγάλα αστικά κέντρα, γραφήματα όπως τα προαναφερόμενα εξαρτώνται σε ένα μεγάλο βαθμό στην πληθυσμιακή κατανομή και πυκνότητα. Ακόμη και σήμερα που έχουμε επιτύχει την πλήρη κάλυψη και ανάλυση των σεισμικών γεγονότων, το πρόβλημα που αντιμετωπίζουμε στο συσχετισμό των ανθρώπινων απωλειών με τα μακροσεισμικά αποτελέσματα των σεισμών, συνεχίζει να υφίσταται. Αρκετά συχνά, το μεγαλύτερο ποσοστό ανθρώπων που σκοτώνονται εξαιτίας των σεισμών συναντάται σε μικρές πόλεις και χωριά, μακριά από τα αστικά κέντρα.

Η εκτίμηση της έντασης, των μακροσεισμικών αποτελεσμάτων και των εστιακών παραμέτρων που πραγματεύεται η παρούσα διατριβή έχει βασιστεί σε δύο κλίμακες, στην κλίμακα έντασης Mercalli (Mercalli Intensity Scale - MIS) όπως ιδιαίτερα σημαντικά στην κλίμακα Medvedev-Sponheuer-Karnik (MSK Scale) με την οποία MSK έχει συνυπολογιστεί το μακροσεισμικό μέγεθος, η ένταση και τα μακροσεισμικά αποτελέσματα με βάση τις καταγεγραμμένες ζημιές σε μοντέρνες κατασκευές στην Κωνσταντινούπολη και την ευρύτερη περιοχή της Θάλασσας του Μαρμαρά. Αξίζει επίσης να αναφέρουμε ότι στην Θάλασσα του Μαρμαρά οι οικισμοί και οι πόλεις δεν έχουν μεταβάλλει σε αξιοσημείωτο βαθμό την πολεοδομία και χωροταξία τους, ούτε τα δομικά υλικά κατασκευής τους από τις αρχές του 19^{ου} αιώνα. Εκτιμήσεις των μακροσεισμικών εντάσεων, μακροσεισμικών μεγεθών και εστιακών παραμέτρων ιστορικών σεισμών έχουν πραγματοποιηθεί από το συγγραφέα της παρούσας διατριβής όπως και από ορισμένους άλλους ερευνητές κατά τη διάρκεια των τελευταίων δύο δεκαετιών με δημοσιευμένες ερευνητικές εργασίες που παρατίθενται και στη βιβλιογραφία. Οι μέχρι τώρα εκτιμήσεις μας παρουσιάζουν, στην πλειοψηφία τους, σχεδόν μια απόκλιση ± 0.5 βαθμών σε κλίμακα μακροσεισμικών εντάσεων μεταξύ τους. Επιπλέον, για ορισμένους αρχαίους, ιστορικούς σεισμούς τα δεδομένα και οι πληροφορίες που αντλούμε από τις ιστορικές πηγές είναι ελάχιστα έως μηδαμινά και μη αξιόπιστα, με αποτέλεσμα οι εκτιμήσεις μας σε τέτοιες περιπτώσεις να εμπεριέχουν σημαντικά στατιστικά σφάλματα και αποκλίσεις ακόμη και κατά ± 1 βαθμούς στην κλίμακα εντάσεων μεταξύ τους. Συνεπώς, αποδεικνύεται η πολυσχιδής, λεπτομερέστατη και ενδελεχής έρευνα που πραγματεύεται και είναι απαραίτητο να συνεχίσει να ακολουθεί στην επιστημονική της διαδικασία η Ιστορική Σεισμολογία.

Περιοχές Επικέντρων

Δεδομένα τα οποία μας παρέχονται από τις ιστορικές πηγές για τους σεισμούς στο ηπειρωτικό τμήμα της Θάλασσας του Μαρμαρά, επιτρέπουν με σεβαστή αξιοπιστία το γεωγραφικό προσδιορισμό σεισμών μεγάλου μεγέθους και της περιοχής του επικέντρου τους. Σημαντικό είναι το γεγονός ότι πολλοί ισχυροί σεισμοί έχουν καταγραφεί σε πλήρη κοντά σε μητροπολιτικά κέντρα όπως η Κωνσταντινούπολη. Αρχαιότεροι σεισμοί είναι πιο δύσκολο να προσδιοριστούν γεωγραφικά και να αποφανθούμε επί της περιοχής του επικέντρου τους. Σε αντίθεση, οι ισχυροί αρχαίοι σεισμοί για τους οποίους υπάρχουν ελάχιστες αναφορές, συχνά προσδιορίζονται γεωγραφικά χάρις στη γνωστή σε εμάς ενεργό τεκτονική που δρα στην ευρύτερη

περιοχή της Θάλασσας του Μαρμαρά και που συνδυάζεται με τις λίγες αυτές αλλά συγχρόνως πολύ σημαντικές και αποδεικτικές ιστορικές περιγραφές. Στο σχήμα 3.1 χαρτογραφούνται τα επίκεντρα ιστορικών αλλά και σύγχρονων σεισμών που εκδηλώθηκαν στην ευρύτερη περιοχή της Θάλασσας του Μαρμαρά από το 1357 έως σήμερα.



Σχήμα 3.1 Γεωγραφική κατανομή των epicέντρων των 20 πιο ισχυρών, ιστορικών και σύγχρονων σεισμών στην ευρύτερη περιοχή της Θάλασσας του Μαρμαρά. Οι σεισμοί των οποίων τα epicέντρα προσδιορίστηκαν γεωγραφικά με χρήση του προγράμματος GMT (Generic Mapping Tools, Paul & Wessel (1998)), χρονολογούνται από το 1354 μ.Χ. έως και το 1999 με διακύμανση μεγέθους σεισμικής ροπής $6.8 \leq M_w \leq 7.4$. Επιπλέον, έχει χαρτογραφηθεί το epicέντρο του σεισμού της 6/7/2003 μεγέθους σεισμικής ροπής $M_w=5.9$, που συνιστά τον ισχυρότερο σεισμό του διαστήματος σεισμικής ησυχίας στη Θάλασσα του Μαρμαρά από την εκδήλωση των ισχυρών σεισμών του 1999 έως σήμερα.

Βρίσκουμε σήμερα, λαμβάνοντας υπόψη τυχούσες υπερβολές και σύμφωνα με τις παρατηρήσεις μας επί των καταστροφικών σεισμικών γεγονότων, στην ευρύτερη περιοχή ότι κάθε ένας σεισμός συμβάλλει με υψηλή σημασία και βαρύτητα στην εξαγωγή συμπερασμάτων για την ιστορική σεισμικότητα και τα μακροσεισμικά αποτελέσματα ιστορικών σεισμών. Συγκεκριμένα είναι απαραίτητο να συνυπολογίζουμε ακόμη και μικρούς σε μέγεθος σεισμούς, οι οποίοι παρότι εκδηλώθηκαν απουσιάζουν από τις ιστορικές καταγραφές. Ορισμένοι από τους μικρούς αυτούς ιστορικούς σεισμούς υποθέτουμε λογικά πως εντέλει έχουν υποτιμηθεί σε μέγεθος και ένταση, καθώς αρκετά από τα μακροσεισμικά τους αποτελέσματα είναι

σήμερα εμφανή ως ζημιές και αστοχίες σε ιστορικές κατασκευές που έχουν αναλυθεί σε επίπεδο δομοστατικής και τεχνικής σεισμολογίας.

Η μελέτη της σεισμικότητας του 20^{ου} αιώνα στην Κωνσταντινούπολη και στη Θάλασσα του Μαρμαρά είναι επιπρόσθετα υψηλής σημασίας καθώς επιτρέπει συσχετισμούς μεταξύ των μακροσεισμικών αποτελεσμάτων ιστορικών σεισμών και των σεισμών του 20^{ου} αιώνα. Η επιτυχία του συσχετισμού αυτού βασίζεται στις σύντομες αυτές ιστορικές αναφορές που με λακωνικότητα, παρέχουν δεδομένα επί των περιοχών που δέχτηκαν τη μεγαλύτερη μακροσεισμική ένταση, μας σχηματίζουν δευτερογενώς μια εικόνα των ισόσειστων καμπυλών από τις ζημιές και το είδος αυτών που καταγράφονταν σε κάθε χωριό, πόλη και μητροπολιτικό κέντρο, επιπλέον προσεγγίζουν τη χρονική διάρκεια των μετασεισμών και τη σύνδεση του εκάστοτε σεισμικού γεγονότος με τις εδαφικές παραμορφώσεις και ισχυρές μετατοπίσεις, τις επιφανειακές εκδηλώσεις ρηγμάτων, τις κατολισθήσεις και αστοχίες πρανών όπως και με την εγγύτητα γνωστών ενεργών ρηγμάτων. Όλες αυτές οι λεπτομέρειες που συναντώνται σε μία ιδανική μορφή στις ιστορικές πηγές, όταν συγκρίνονται και συσχετίζονται με αποτελέσματα ερευνών σύγχρονων σεισμών και μακροσεισμικών αποτελεσμάτων αυτών, επιτρέπουν έναν πολύ πιο αξιόπιστο προσδιορισμό της έντασης, του μεγέθους και των μακροσεισμικών αποτελεσμάτων ιστορικών σεισμών.

Για σεισμούς που εκδηλώθηκαν πριν τη δεκαετία του 1920, ο γεωγραφικός προσδιορισμός των επικέντρων τους έχει πραγματοποιηθεί σύμφωνα με τις μέγιστες τιμές εντάσεων και τα κέντρα των ισόσειστων καμπυλών. Σεισμούς με επίκεντρα στον πυθμένα της Θάλασσας του Μαρμαρά έχουμε προσπαθήσει να τους συσχετίσουμε με ενεργά τεκτονικά ρήγματα της υποθαλάσσιας περιοχής. Ο προσδιορισμός αυτός επιτυγχάνεται μέσω της γνώσης που κατέχουμε για τη γεωγραφική θέση και το μέγεθος του εκάστοτε σύγχρονα αναλυθέντος σεισμού.

Ταξινόμηση των Σεισμών σύμφωνα με τα Μακροσεισμικά τους Αποτελέσματα στη Θάλασσα του Μαρμαρά.

Όλα τα σεισμικά γεγονότα έχουν ταξινομηθεί με βάση τη γεωγραφική τους θέση και τις επικεντρικές τους περιοχές που εντοπίζονται είτε στο ηπειρωτικό τμήμα της Θάλασσας του Μαρμαρά, είτε παράκτια, είτε υποθαλάσσια, είτε σε άγνωστες προς εμάς περιοχές. Η ταξινόμηση αυτή στηρίζεται στην ποιότητα των δεδομένων, δηλαδή στο πόσο καλά έχουν προσδιοριστεί στο χώρο σεισμοί είτε σύμφωνα με τις ιστορικές πηγές είτε με τη τις σύγχρονες ενόργανες μεθόδους έρευνας της Σεισμολογίας. Επίσης, η ταξινόμηση συχνά στηρίζεται σε περιοχές από τις οποίες ιστορικά προκύπτουν δεδομένα για το μέγεθος του εκάστοτε σεισμού. Βασιζόμενοι στα μέγιστα μακροσεισμικά αποτελέσματα σεισμών που εκδηλώθηκαν είτε στο ηπειρωτικό τμήμα της ευρύτερης περιοχής της Θάλασσας του Μαρμαρά, είτε παράκτια, τους διαχωρίζουμε στις εξής κατηγορίες:

- I. σε σεισμούς που προκάλεσαν υπολογίσιμες, σημαντικές ζημιές
- II. σε όσους επέφεραν μεγαλύτερης ακόμη κλίμακας ζημιές ή ολοκληρωτικές καταστροφές
- III. τέλος, σε όσους συνετέλεσαν σε κοινωνικοπολιτικές και οικονομικές ανακατατάξεις.

Κάθε ένας σεισμός κατατάσσεται σε μια από τις κατηγορίες αυτές ανάλογα με τις απώλειες ανθρώπινων ζωών που καταγράφηκαν και που με τη σειρά τους αντίστοιχα είναι μικρές, σημαντικές και μεγάλες. Περαιτέρω ταξινόμηση των σεισμικών γεγονότων έχει επιτευχθεί σύμφωνα με το χωρικό εύρος των μακροσεισμικών αποτελεσμάτων και το πλήθος των πολεοδομικών συγκροτημάτων ή πόλεων που δέχτηκαν τις επιπτώσεις των σεισμικών κυμάτων. Ιδιαίτερα, έχουμε σήμερα επισημάνει σεισμούς τους οποίους ακολούθησαν εκδήλωση θαλάσσιων σεισμικών κυμάτων, επιφανειακές εκδηλώσεις ρηγμάτων, αστοχίες πρανών και κατολισθήσεις. Ο πίνακας 3.1 δείχνει τη ταξινόμηση ισχυρών σεισμών με επιφανειακό μέγεθος $M_s \geq 6.8$ στη Θάλασσα του Μαρμαρά κατά τη χρονική διάρκεια 20 αιώνων. Η ταξινόμηση των σεισμών έχει πραγματοποιηθεί σε 10 πεδία που εκφράζουν τις εστιακές παραμέτρους και τα μακροσεισμικά αποτελέσματα αυτών με σκοπό :

- I. να επιθεωρηθούν όλα τα σεισμικά γεγονότα ανεξάρτητα από το πότε και πού εκδηλώθηκαν
- II. να συγκριθούν τα επίκεντρα και το μέγεθος των σεισμών
- III. να εξεταστεί η πληρότητα των πληροφοριών.

									Μακροσεισμικά Αποτελέσματα : 1~10												
	Έτος	Μήνας	Ημέρα	Ωρα	N°	E°	Ms	Mo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Περιοχή		
1	32	0	0	0	40.5	30.5	7.0	04.37	1	4	2	2	2	0	2	2	0	0	Νίκαια		
2	68	0	0	0	40.7	30.0	7.2	08.71	1	4	2	2	2	0	2	2	0	0	Νίκαια		
3	121	0	0	0	40.5	30.1	7.4	17.38	1	3	4	3	3	2	2	0	0	0	Νικομήδεια		
4	123	11	10		40.3	27.7	7.0	04.37	1	3	1	2	2	0	0	0	0	0	Κύζικος		
5	160	0	0	0	40.0	27.5	7.1	06.17	1	3	6	3	2	0	2	2	2	0	Ελλησπόντος		
6	180	5	3	0	40.6	30.6	7.3	12.30	1	4	2	2	3	0	2	0	0	0	Νικομήδεια		
7	268	0	0	0	40.7	29.9	7.3	12.30	1	3	3	3	3	0	2	0	0	0	Νικομήδεια		
8	358	8	24	6:00	40.7	30.2	7.4	17.38	1	3	6	3	3	3	2	2	2	2	Νικομήδεια		
9	362	12	2	0	40.7	30.2	6.8	02.19	1	4	3	2	2	0	1	1	0	0	Νικομήδεια		
10	368	10	11	0	40.5	30.5	6.8	02.19	1	4	2	2	2	0	2	1	0	0	Persis		
11	368	11	0	0	40.1	27.8	6.8	02.19	1	4	1	2	2	0	0	0	0	0	Germe		
12	407	4	1	1900	40.9	28.7	6.8	02.19	2	4	2	2	1	0	1	1	0	0	Hebdomon		
13	437	9	25	0	40.8	28.5	6.8	02.19	3	4	1	2	1	1	1	1	0	0	Κωνσταντινούπολη		
14	447	11	6	20:00	40.7	30.3	7.2	08.71	1	3	5	3	3	3	2	2	2	2	Νικομήδεια		
15	460	0	0	0	40.1	27.6	6.9	03.09	1	4	3	4	2	2	2	2	2	0	Κύζικος		
16	478	9	25	0	40.7	29.8	7.3	12.30	2	3	5	3	3	3	2	2	0	1	Ελληνοπούλη		
17	484	0	0	0	40.5	26.6	7.2	08.71	1	3	8	3	3	2	2	2	2	0	Καλλίπολη		
18	554	8	16	6:00	40.7	29.8	6.9	03.09	2	4	4	2	2	2	2	1	2	0	Νικομήδεια		
19	557	12	14		40.9	28.3	6.9	03.09	2	4	3	2	2	2	1	1	0	0	Σηλυβρία		
20	740	10	26	14:00	40.7	28.7	7.1	06.17	3	4	5	2	3	2	2	2	0	2	Θάλασσα Μαρμαρά		
0	823	10	0	0	00.0	00.0	0.0	00.00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Panium		
21	860	5	23	0	40.8	28.5	6.8	02.19	3	4	2	2	1	1	2	1	0	0	Θάλασσα Μαρμαρά		
22	869	1	9	0	40.8	29.0	7.0	04.37	2	4	1	2	2	1	2	2	0	0	Κωνσταντινούπολη		
23	967	9	2	5:00	40.7	31.5	7.2	08.71	1	3	4	3	3	3	2	2	0	0	Κλαυδιούπολη		
24	989	10	25	19:00	40.8	28.7	7.2	08.71	3	4	3	2	2	2	2	0	0	1	Θάλασσα Μαρμαρά		
25	1063	9	23	22:00	40.8	27.4	7.4	17.38	1	3	5	3	3	3	2	2	0	0	Πάνιο		
26	1065	9	0	0	40.4	30.0	6.8	02.19	1	4	2	2	1	0	1	1	0	0	Νίκαια		
27	1296	6	1	0:01	40.5	30.5	7.0	04.37	1	4	2	2	2	1	2	2	0	0	Βιθυνία		
28	1343	10	18	12:00	40.7	27.1	6.9	03.09	1	3	6	3	2	2	1	1	0	0	Γάνος		
29	1343	10	18	21:00	40.9	28.0	7.0	04.37	2	4	3	2	2	1	2	0	0	1	Ηράκλεια		
30	1354	3	1	20:00	40.7	27.0	7.4	17.38	1	2	7	3	3	3	2	2	1	0	Hexamili		
31	1419	3	15	0:01	40.4	29.3	7.2	08.71	1	4	3	2	3	2	2	0	2	0	Προύσα		
0	1489	1	16	6:00	00.0	00.0	0.0	00.00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Σάρος		
32	1509	9	10	22:00	40.9	28.7	7.2	12.30	2	2	15	2	2	3	1	2	2	2	Κωνσταντινούπολη		
33	1556	5	10		40.6	28.0	7.1	06.17	1	3	3	3	3	2	0	2	0	0	Άρτεμις Θερμαία		
34	1625	5	18		40.3	26.0	7.1	06.17	3	4	5	3	0	0	0	2	0	0	Σάρος		
35	1659	2	17	19:00	40.5	26.4	7.2	08.71	2	4	5	2	0	0	0	2	0	0	Σάρος		
36	1672	2	14	0	39.5	26.0	7.0	04.37	2	4	3	2	2	0	0	2	0	0	Πηγές		
37	1719	5	25	12:00	40.7	29.8	7.4	17.38	1	2	17	3	3	3	2	2	2	0	Νικομήδεια		
38	1737	3	6	7:30	40.0	27.0	7.0	04.37	1	3	19	3	3	0	1	2	2	0	Πηγές		
39	1752	7	29	18:00	41.5	26.7	6.8	02.19	1	3	17	3	2	2	2	2	2	0	Αδριανούπολη		
40	1754	9	2	21:30	40.8	29.2	6.8	02.19	2	3	9	3	2	2	2	2	0	2	Νικομήδεια		
41	1766	5	22	5:00	40.8	29.0	7.1	06.17	2	3	16	2	3	2	2	2	0	1	Θάλασσα Μαρμαρά		
42	1766	8	5	5:30	40.6	27.0	7.4	17.38	1	2	20	3	3	3	2	2	2	0	Gonas		
43	1855	2	28	2:30	40.1	28.6	7.1	06.17	1	2	24	3	3	1	1	2	2	0	Προύσα		
44	1859	8	21	11:30	40.3	26.1	6.8	02.19	2	3	25	3	1	2	1	2	2	2	Σάρος		
45	1893	2	9	17:16	40.5	26.2	6.9	03.09	2	3	31	3	2	1	1	2	0	1	Σάρος		
46	1894	7	10	12:24	40.7	29.6	7.3	12.30	2	2	81	1	3	3	2	2	2	2	Νικομήδεια		
47	1912	8	9	1:28	40.7	27.2	7.3	12.30	1	2	99	1	2	2	2	2	1	2	Γάνος		
48	1912	9	13	23:31	40.7	27.0	6.8	02.19	1	3	32	1	2	1	1	2	2	0	Γάνος		
49	1944	10	6	2:34	39.5	26.5	6.8	02.19	2	2	67	1	1	1	1	1	2	0	Edremit		
50	1953	3	18	19:06	40.1	27.4	7.1	06.17	1	2	45	1	2	2	2	2	1	0	Gonen		
51	1957	5	26	6:33	40.7	31.0	7.1	06.17	1	2	81	1	2	2	2	2	1	0	Abant		
52	1964	10	6	14:31	40.1	28.2	6.8	02.19	1	2	70	1	1	1	1	1	1	0	Manyas		
53	1967	7	22	16:57	40.7	30.7	7.2	08.71	1	2	99	1	3	2	2	2	1	0	Μοδρονές		
54	1999	8	17	0:01	40.7	30.0	7.4	17.38	1	1	0	1	3	3	2	2	1	1	Νικομήδεια		
55	1999	11	12	0:00	40.8	31.2	7.1	06.17	1	1	0	1	2	2	2	1	1	0	Προυσιάδα		

Πίνακας 3.1 Ταξινόμηση ισχυρών σεισμών με επιφανειακό μέγεθος $M_s \geq 6.8$ στη Θάλασσα του Μαρμαρά κατά τη χρονική διάρκεια 20 αιώνων και καταγραφή των εστιακών τους παραμέτρων και μακροσεισμικών αποτελεσμάτων. Στα μακροσεισμικά αποτελέσματα αναγράφονται τα εξής:

1.Τοποθεσία : 1, στη στεριά; 2, παράκτια; 3, στη θάλασσα;

- 2.Επικεντρική περιοχή : 1, ενόργανη εκτίμηση; 2, καλά καθορισμένη μακροσεισμικά; 3, λιγότερο καλά καθορισμένη; 4, ανεπαρκή δεδομένα και πιστή εφαρμογή της αναφοράς από την ιστορική πηγή
3. Πλήθος περιοχών που ερευνήθηκαν
4. Μέγεθος Σεισμών : 1, ενόργανη εκτίμηση; 2, μακροσεισμικό μέγεθος $M_s \pm 0.5$ και $M_s \pm 0.35$
5. Μέγιστα Μακροσεισμικά Αποτελέσματα : 1, υπολογίσιμες ζημιές; 2, σοβαρές ζημιές; 3, καταστροφές και εκτεταμένες ανακατασκευές, έντονες κοινωνικές και οικονομικές συνέπειες;
6. Απώλειες ανθρώπινων ζωών : 1, μικρές; 2, σημαντικές; 3, μεγάλες
7. Έκταση ζημιών : 1, Τοπική; 2, Ευρεία;
8. Αισθητή Περιοχή : 1, Μικρή; 2, Μεγάλη;
9. Επιπτώσεις στο Έδαφος : 1, επιφανειακές εκδηλώσεις ρηγμάτων; 2, αστοχίες εδαφών και κατολισθήσεις;
10. Θαλάσσια Σεισμικά Κύματα : 1, Καταστροφικά; 2, Ήπια και απλώς παρατηρηθέντα Μεσαίου Επιφανειακού Μεγέθους Σεισμοί : $6.8 \leq M_s < 7.0$; Ισχυροί Σεισμοί : $7.0 \leq M_s < 7.4$ Πολύ Ισχυροί Σεισμοί : $M_s \geq 7.4$

Τα Μεγέθη Σεισμικής Ροπής - M_o , έχουν υπολογιστεί σε 10^{26} dyne·cm σύμφωνα με τη διεθνή σχέση συσχετισμού Επιφανειακού Μεγέθους Σεισμών - Σεισμικής Ροπής $\{M_s - M_o\}$ των Ekström & Dziewonski (1988). Με αυτόν τον τρόπο και μόνο, έως σήμερα, μπορούμε να επιτύχουμε μια γενική ποιοτική εκτίμηση των ιστορικών δεδομένων προτού αυτά χρησιμοποιηθούν σε μία τελική ποιοτική ανάλυση στην Ιστορική Σεισμολογία.

Συμπεράσματα επί της Ιστορικής Σεισμικότητας

Ιστορικές έρευνες σεισμικότητας πρέπει να επικεντρώνονται στο να είναι ενδεικτικές και όχι στο να αποκαλύπτουν αποσπασματικά, περιγραφικά στοιχεία που χρήζουν πρόσθετης αξιολόγησης, καθώς οι περιγραφές βασίζονται σε υποκειμενικές γνώμες χρονικογράφων και ιστορικών, επιπρόσθετα η ερμηνεία τους διακατέχεται από έλλειψη αντικειμενικότητας ανάλογα με τον ερευνητή. Συνεπώς, δεν είναι επαρκές το να βασιζόμαστε σε στοιχεία λίγων καταστροφικών σεισμών που καταγράφηκαν προκειμένου να ερμηνεύσουμε τη σεισμικότητα (Finkel, 2000). Είναι απαραίτητο επακόλουθα να αναπτύξουμε σύγχρονες και διεπιστημονικές μεθόδους έρευνας, ώστε να εξελίσσουμε την Ιστορική Σεισμολογία που συνιστά αδιαμφισβήτητα με τη σειρά της ισχυρό λύτη πολλών μυστηρίων της Σύγχρονης Σεισμολογίας.

Οι κύριοι παράγοντες που φαίνεται να επηρεάζουν την επιβίωση των ιστορικών δεδομένων είναι η ποιότητα των διαθέσιμων ιστορικών αλλά και σύγχρονων λογοτεχνικών και φιλοσοφικών αρχείων, οι επικρατούσες ιστορικές συνθήκες, ο γεωγραφικός τόπος εκδήλωσης των σεισμών και το μέγεθος αυτών. Ο συνολικός αριθμός σεισμών που έχουν αναγνωριστεί στη Θάλασσα του Μαρμαρά κατά τη διάρκεια των τελευταίων 20 αιώνων είναι 581, εκ των οποίων οι 408 εκδηλώθηκαν στην προ-ενόργανη περίοδο έρευνας της Σεισμολογίας πριν το 1900 και 173 στον 20^ο αιώνα. Επίσης, 301 σεισμοί αποτελούν μικρά σεισμικά γεγονότα που δε προκάλεσαν μεγάλες ζημιές, ανησυχία και το μέγεθος των οποίων έως σήμερα δεν έχει εκτιμηθεί. Οι υπόλοιποι 107 ισχυροί σεισμοί έχουν μελετηθεί επαρκώς με αποτέλεσμα να έχουν

εκτιμηθεί τα μεγέθη τους σύμφωνα με την εξίσωση (1) και να προκύπτει εύρος τιμών μεταξύ 5.0 και 7.4. Το μέγεθος όλων των 173 σεισμών που εκδηλώθηκαν στη σύγχρονη ενόργανη περίοδο μετά το 1899 υπολογίστηκε μέσω της φόρμουλας της Πράγας με εύρος τιμών μεταξύ 4.0 και 7.4. Ο πίνακας 3.1, απαριθμεί 55 σεισμικά γεγονότα από τη βάση δεδομένων σεισμών επιφανειακού μεγέθους $M_s \geq 6.8$, των οποίων έχουν υπολογιστεί ακόμη και οι τιμές σεισμικής ροπής και σεισμικής ενέργειας. Για σεισμούς πριν το 1977 οι υπολογισμοί αυτοί πραγματοποιήθηκαν μέσω της ομάδας εξισώσεων (3).

Για ιστορικούς σεισμούς στη θάλασσα, ο γεωγραφικός προσδιορισμών των επικέντρων τους είναι προσεγγιστικός και δεν εγγυάται μια εξεζητημένη επιστημονική διαδικασία προσδιορισμού του. Έχοντας στο μυαλό μας ότι σεισμοί με επιφανειακό μέγεθος M_s μεταξύ 6.8 και 7.4 προϋποθέτουν μήκος διάρρηξης από 30 έως και περισσότερα από 100 km σε μήκος, οι γεωγραφικοί προσδιορισμοί επικέντρων τους στη θάλασσα συμπεραίνουμε πως είναι προσεγγιστικοί και ανακλητοί, καθώς δεν προσδιορίζουν τίποτε περισσότερο πέρα από την ευρύτερη περιοχή εκδήλωσης του σεισμού. Πράγματι, μία αρκετά πολύπλοκη διαδικασία γεωγραφικού προσδιορισμού επικέντρων που ενίοτε προτείνεται, ενέχει τον κίνδυνο μεγάλης αβεβαιότητας και μεγάλου στατιστικού σφάλματος στις εκτιμήσεις. Αντίθετα, μία απλοποιημένη μέθοδος μπορεί να φέρει αξιόπιστα αποτελέσματα και εκτιμήσεις, λόγω του ότι αποκαλύπτει ουσιαστικές υποκρυπτόμενες υποθέσεις μέσα από τις ιστορικές πηγές, αξιολογώντας και βαθμονομώντας, απλώς την αντικειμενικότητα και σημαντικότητα των γεγονότων.

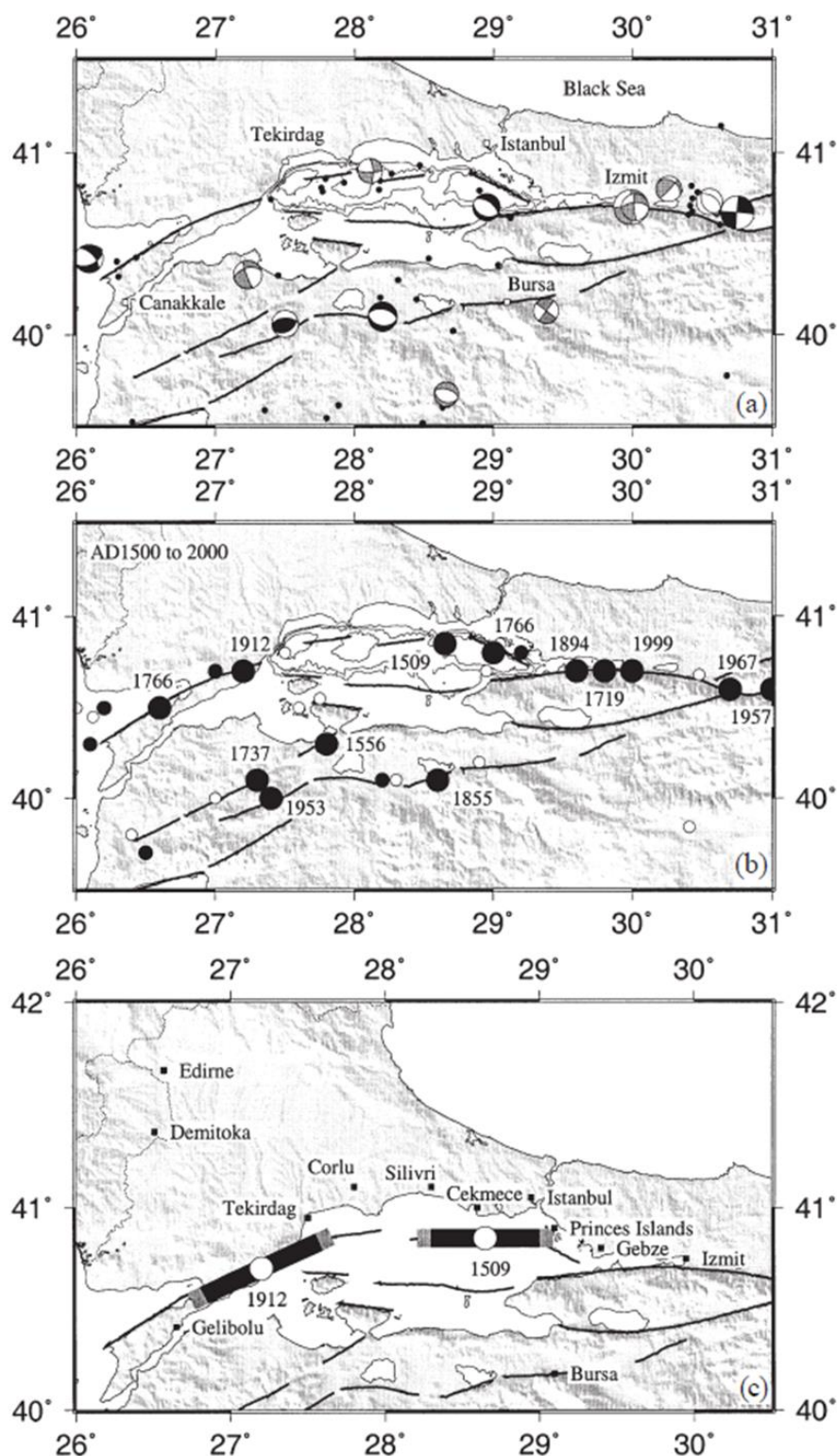
3.4 Η Σύγχρονη Σεισμικότητα

Τα ιστορικά αρχεία σεισμών δύο χιλιετιών υποδεικνύουν ότι κατά μέσο όρο ένας μέσης έντασης ($I_o = VIII - IX$) σεισμός επηρεάζει την Κωνσταντινούπολη κάθε 50 χρόνια. Η μέση περίοδος επανάληψης μεγάλης έντασης σεισμών είναι 300 χρόνια. Οι ζημιές από τους σεισμούς που έχουν υποστεί διάφορες πόλεις και περιοχές στη Θάλασσα του Μαρμαρά, όπως επίσης και τα ιστορικά οικοδομήματα στην Κωνσταντινούπολη έχουν επαρκώς καταγραφεί. Είναι σήμερα γνωστό ότι, ο 1480 χρόνων χριστιανικός ναός της Αγίας Σοφίας που πλέον λειτουργεί ως ένα αξιοθαύμαστο ιστορικό μνημείο και μουσείο έχει επανειλημμένα και ισχυρά επηρεαστεί από ιστορικούς σεισμούς που εκδηλώθηκαν στη Θάλασσα του Μαρμαρά και την Κωνσταντινούπολη, με αποτέλεσμα να επισκευάζεται και να ανακαινίζεται κατόπιν πολύ ισχυρών και καταστροφικών σεισμών (Durukal E., 2003). Σύντομες πληροφορίες ισχυρών ιστορικών σεισμών με εκτιμώμενο επιφανειακό μέγεθος $M_s \geq 7.0$ που εκδηλώθηκαν κατά τις τελευταίες δύο χιλιετίες, συσχέτισης αυτών με ενεργά ρήγματα και υπολογισμό των μακροσεισμικών τους αποτελεσμάτων παρέχουν εργασίες του Ambraseys et al. (1991, 2000, 2002) που μελετούν την ιστορική σεισμικότητα όπως περιεγράφηκε στην παράγραφο § 3.1.

Πρόσφατες έρευνες που διεξήχθησαν μετά τους καταστροφικούς σεισμούς του 1999, Kocaeli ($M_w = 7.4$) και Duzce ($M_w = 7.2$), δείχνουν (υποθέτοντας τη σταθερότητα του πεδίου των τάσεων στη Θάλασσα του Μαρμαρά) 65% πιθανότητα

εκδήλωσης ενός ισχυρού σεισμού με μέγεθος σεισμικής ροπής $M_w \geq 7.0$, ο οποίος θα σημειώσει σημαντικά μακροσεισμικά αποτελέσματα στην Κωνσταντινούπολη (Parsons, 2000) και στην ευρύτερη περιοχή της Θάλασσας του Μαρμαρά. Ο συσχετισμός σεισμών που εκδηλώθηκαν από το 1500 μ.Χ. έως σήμερα με ενεργά τμήματα του ρήγματος της Βόρειας Ανατολίας στη Θάλασσα του Μαρμαρά φαίνεται στον πίνακα 3.2.

Στην περιοχή της Θάλασσας του Μαρμαρά, εντοπίζονται αρκετά πιθανά σεισμικά κενά. Για παράδειγμα, κατά μήκος της Κοιλάδας Mudurnu, από τα Πριγκηπωνήσια έως το Αιγαίο Πέλαγος δεν έχει εκδηλωθεί κάποιος ισχυρός σεισμός κατά τα τελευταία 400 χρόνια με εξαίρεση το σεισμό του 1737 στη Χερσόνησο Biga (Ambraseys, 1991). Το δυτικότερο τμήμα των νότιων κλάδων της προέκτασης του ρήγματος Ανατολίας στη Θάλασσα του Μαρμαρά δεν έχει διαρρηχθεί από το 1855 έως σήμερα, συμπερασματικά η πιθανότητα εκδήλωσης ισχυρών σεισμών κατά τον 21^ο αιώνα είναι πολύ αυξημένη, σύμφωνα και με παρατηρήσεις του πεδίου των τάσεων. Οι βόρειοι κλάδοι ωστόσο στη Θάλασσα του Μαρμαρά χαρακτηρίζονται από υψηλή ενεργότητα με εκδήλωση πολλών και ισχυρών σεισμών. Σύγχρονες έρευνες και χάρτες σεισμικότητας υποδεικνύουν αυξημένη σεισμική ησυχία στο κεντρικό, και υποθαλάσσιο επομένως, τμήμα της Θάλασσας του Μαρμαρά (Ambraseys N., 2000).



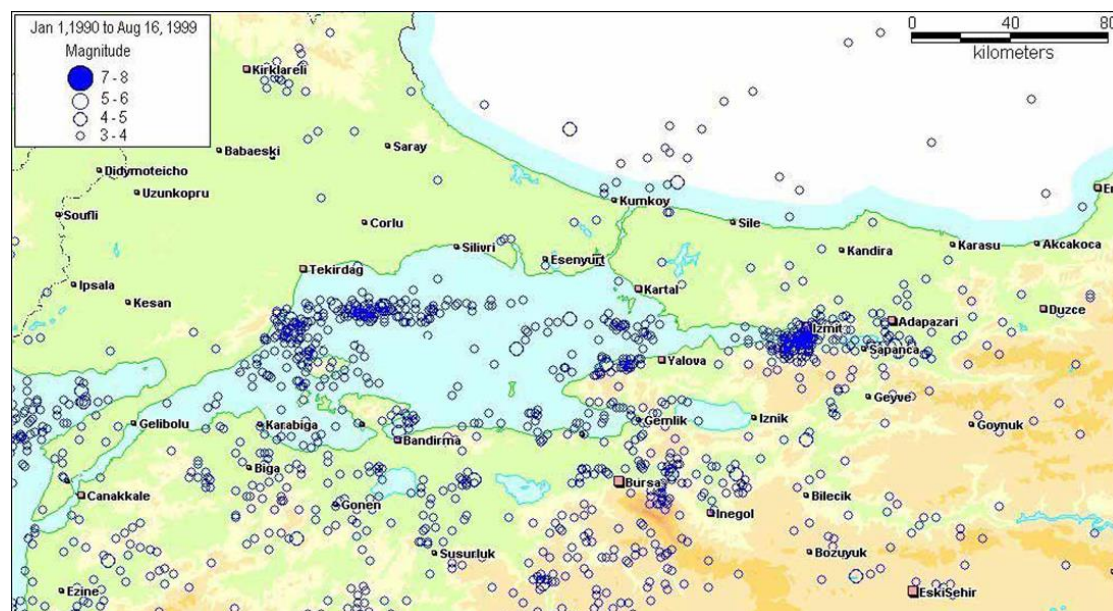
Σχήματα 3.2(α), 3.2 (β), 3.2 (γ).

3.2(α): Μηχανισμοί γένεσης σύγχρονων σεισμών στη Θάλασσα Μαρμαρά.

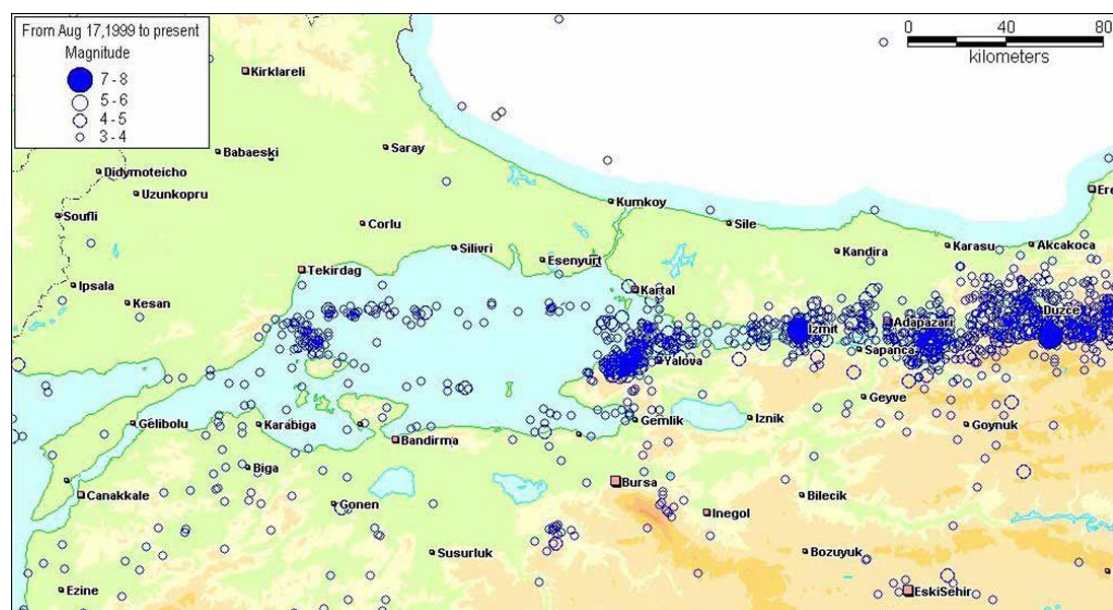
3.2(β): Ισχυροί Σεισμοί στη Θάλασσα του Μαρμαρά κατά Ambraseys (2000). Σεισμοί με $M_s \geq 7.0$ αναπαρίστανται από τους μεγάλους μαύρους κύκλους, με $7.0 \geq M_s \geq 6.6$ από τους μικρότερους και σεισμοί με $6.6 \geq M_s \geq 6.0$ από τους λευκούς κύκλους.

3.2(γ): Χαρτογράφηση επικέντρων (λευκοί κύκλοι) και εκτιμώμενων μηκών διάρρηξης (μαύρα γραμμικά τμήματα) των ισχυρών σεισμών 10^{ης} Σεπτεμβρίου 1509 και 9^{ης} Αυγούστου 1912 (Ambraseys N., 2000).

Η ευθυγράμμιση των ρηγμάτων στη Θάλασσα του Μαρμαρά είναι εμφανώς διακριτή και από τα σχήματα 3.3 και 3.4 όπου χαρτογραφούνται τα επίκεντρα σεισμών μεγέθους $M \geq 3.0$, από 1.1.1990 έως 16.8.1999 (δηλαδή πριν από το σεισμό του Kocaeli [$M_w = 7.4$]) και από 17.8.1999 έως σήμερα αντίστοιχα.



Σχήμα 3.3 Η σεισμική δραστηριότητα στη Θάλασσα του Μαρμαρά για σεισμούς μεγέθους $M \geq 3.0$ από 1^η Ιανουαρίου 1990 έως 16^η Αυγούστου 1999 (Ambraseys N., 2000).



Σχήμα 3.4 Η Σεισμική Δραστηριότητα στη Θάλασσα του Μαρμαρά για σεισμούς μεγέθους $M \geq 3.0$ από 17 Αυγούστου 1999 έως σήμερα (Ambraseys N., 2000).

Οι Ισχυροί Σεισμοί του 1999 (Kocaeli-Izmit-Duzce)

Οι τελευταίοι ισχυρότατοι σεισμοί του 20^{ου} αιώνα στο ρήγμα της βόρειας Ανατολίας συνέβησαν τη 17^η Αυγούστου 1999 με μέγεθος $M=7.4$ και τη 12^η Νοεμβρίου 1999 με μέγεθος $M=7.1$. Ο σεισμός της 12^{ης} Νοεμβρίου προκλήθηκε από το σεισμό της 17^{ης} Αυγούστου μέσω μηχανισμών στατικής ενεργοποίησης ρηγμάτων. Το επίκεντρο του σεισμού της 17^{ης} Αυγούστου προσδιορίστηκε στο ανατολικό άκρο της θάλασσας του Μαρμαρά κοντά στην πόλη της Νικομήδειας (Izmit), ενώ το εστιακό βάθος σε 10 km. Οι καταγραφές της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης κυμαίνονταν μεταξύ 0.3 και 0.4 g. Ο σεισμός διήρκεσε 45 δευτερόλεπτα και αποτελείται ουσιαστικά από δύο σεισμούς (διάρρηξη δύο τμημάτων του ρήγματος), που ο ένας προκάλεσε τον άλλο μέσω της μεταφοράς των στατικών τάσεων.

Η πόλη που βρισκόταν στην επικεντρική περιοχή και στη γειτονιά του σεισμικού ρήγματος ήταν η Νικομήδεια (Izmit, επαρχία Kocaeli), αλλά και πολλές άλλες πόλεις στα νότια παράλια του ομώνυμου κόλπου (Yalova, Golcuk), της λίμνης Sapanza (Adapazari) και του Σαγγάριου ποταμού. Η πόλη του Adapazari, αν και βρισκόταν σχετικά μακριά από το επίκεντρο και το ρήγμα υπέστη σημαντικές καταστροφές εξαιτίας της εκτεταμένης ρευστοποίησης του εδάφους.

Η επιφανειακή διάρρηξη που προκλήθηκε από το σεισμό αποτελείται από τέσσερα τεμάχια. Η μέγιστη μετατόπιση κατά μήκος της επιφανειακής διάρρηξης μετρήθηκε ανατολικά της λίμνης Sapanza, όπου το ρήγμα μετέθεσε ένα μικρό επαρχιακό δρόμο κατά 5 μέτρα. Η διάρρηξη ήταν τυπική οριζόντιας μετατόπισης με δεξιόστροφη συνιστώσα. Το συνολικό μήκος της διάρρηξης εκτιμάται σε 140 km. 100 περίπου χιλιόμετρα ορατές σχεδόν συνεχείς διαρρήξεις στην ξηρά, ενώ από το Golcuk και προς τα δυτικά το συν-σεισμικό ίχνος του ρήγματος εισέρχεται στη θάλασσα και χάνεται. Μικροδομές τυπικές των ρηγμάτων οριζόντιας μετατόπισης παρατηρήθηκαν και μελετήθηκαν σε όλο του το μήκος. Το επίκεντρο του σεισμού της 12^{ης} Νοεμβρίου 1999 εντοπίστηκε ανατολικότερα και το βάθος της εστίας ήταν 14 km. Η πόλη Duzce ήταν αυτή τη φορά που δέχτηκε το μεγαλύτερο πλήγμα από το σεισμό, καθώς και πολλά χωριά της επαρχίας Bolu και μεγάλα τεχνικά έργα, όπως η μεγάλη κοιλαδογέφυρα και η σήραγγα του αυτοκινητοδρόμου Κωνσταντινούπολης – Άγκυρας. Το ρήγμα το οποίο προκάλεσε το σεισμό της 12^{ης} Νοεμβρίου 1999 έχει μήκος 70 km. Έχει διεύθυνση σχεδόν Α-Δ, με ένα τοξοειδές σχήμα και αποτελείται από τρία τμήματα – segments.

Ισχυρός σεισμός μεγέθους σεισμικής ροπής $M_w = 7.4$ (όπως περιεγράφηκε) εκδηλώθηκε στο δυτικό τμήμα του ρήγματος της Βόρειας Ανατολίας με μακροσεισμικό επίκεντρο κοντά στην πόλη Golcuk (40.702° N, 29.987° E) στη ΒΔ Τουρκία. Το συνολικό παρατηρούμενο μήκος διάρρηξης ήταν περίπου 100 km. Η οριζόντια μετατόπιση που καταγράφηκε κυμαίνεται μεταξύ 1.5 και 5 m κατά μήκος της διάρρηξης. Η μέγιστη μετασεισμική δραστηριότητα οριοθετείται μεταξύ 40.5° - 40.8° N και 29.8° - 30.0° E καλύπτοντας την περιοχή μεταξύ των πόλεων Νικομήδειας, Adapazari και των ανατολικών περιοχών προς το επίκεντρο του σεισμού.

Το σεισμικό προφίλ της διάρρηξης που εκδήλωσε το σεισμό του Kocaeli δείχνει ξεκάθαρα πλαγιοκανονική διάρρηξη, η οποία καταγράφει προς τα δυτικά ταχύτητα σεισμικών κυμάτων 3km/s και προς τα ανατολικά πολύ υψηλές ταχύτητες που προσεγγίζουν τα 4.7 km/s για απόσταση περίπου 40 km, προτού μειωθούν στα 3.1 km/s στο ανατολικότερο τμήμα της ζώνης διάρρηξης. Η μεγαλύτερη ολίσθηση που καταγράφηκε ως 7 m παρατηρήθηκε μεταξύ 25 και 45 km ανατολικά του epicέντρου.

Στα δυτικά του επικέντρου η ολίσθηση καταγράφεται επίσης μεγάλη σε αποστάσεις μεταξύ 10 και 30 km. Ο χρόνος έκλυσης σεισμικής ενέργειας υπολογίζεται στα 2 έως 4 δευτερόλεπτα. Οι ζημιές που προκλήθηκαν από το σεισμό εντοπίζονται σε μία πολύ μεγάλη περιοχή που εκτείνεται από την πόλη Tekirdag έως την πόλη Eskisehir, επιπρόσθετα πλειόσειστες πόλεις εκτιμήθηκαν πως ήταν η Κωνσταντινούπολη, η Sakarya, η Yalova, οι πόλεις Kocaeli και Bolu. Οι πλειόσειστες περιοχές εντοπίζονται σε μία ζώνη 20 km σε πλάτος, 10 km προς τα βόρεια και 10 km προς τα νότια, εκατέρωθεν της ζώνης διάρρηξης. Ο αριθμός των κατεστραμμένων κτιρίων μετά τη σεισμική ακολουθία της 17^{ης} Αυγούστου 1999 σημειώνεται 23.400. Οι θάνατοι ανήλθαν τους 18.373, οι τραυματίες τους 48.901 και περισσότερες από 120.000 οικογένειες βρέθηκαν άστεγες.

§ 4. Εκτίμηση Μακροσεισμικών Αποτελεσμάτων στη Θάλασσα του Μαρμαρά

4.1 Μεθοδολογία

Αρκετή επιστημονική δουλειά και ερευνητική προσπάθεια έχει αφιερωθεί στη Θάλασσα του Μαρμαρά λόγω των πολλών ιστορικών αρχείων και πηγών γενικότερα, που αναφέρονται σε ζημιές και καταστροφές σε ιστορικές μεγάλες πόλεις όπως η Κωνσταντινούπολη με πληθυσμό 14.16 εκατομμύρια έως το 2013, επιπρόσθετα εξαιτίας του ρήγματος της Βόρειας Ανατολίας του οποίου τα ΒΔ, υψηλής ενεργότητας τμήματα βυθίζονται κάτω από τη Θάλασσα του Μαρμαρά προσδίδοντας υψηλή σεισμικότητα με καταστροφικούς σεισμούς. Στόχος της παρούσας διπλωματικής διατριβής είναι το να αξιολογηθούν όλες οι σύγχρονες και πιο πρόσφατες έρευνες επί της ιστορικής και σύγχρονης μακροσεισμικότητας στη Θάλασσα του Μαρμαρά, σημαντικότερα να επανεκτιμηθούν, όπως και να εκτιμηθούν για πρώτη φορά, τα μακροσεισμικά αποτελέσματα ισχυρών ιστορικών σεισμών.

Δημοσιευμένες εργασίες για ζημιές που προκλήθηκαν από σεισμούς στη Θάλασσα του Μαρμαρά (Ambraseys & Finkel, 1990, 1991, 1995; Parsons et al., 2000) έχουν χρησιμοποιήσει στις εκτιμήσεις των μακροσεισμικών αποτελεσμάτων τη τροποποιημένη κλίμακα έντασης Mercalli - MMI (Modified Mercalli Intensity Scale) για πολύ ισχυρούς σεισμούς από το 1500 μ.Χ. έως το 2000 (Πίνακας 4.1 – Parsons et al., 2000).

Επιπλέον, στις προαναφερόμενες εργασίες συμπεριλήφθηκαν και οι σεισμοί του 1912 και 1999 για λόγους βέλτιστης αξιολόγησης των μακροσεισμικών αποτελεσμάτων ιστορικών σεισμών, εφόσον τα επίκεντρα και τα μεγέθη σύγχρονων σεισμών είναι διαθέσιμα και με αξιοπιστία καθορισμένα από τις εξελιγμένες μεθόδους έρευνας της σύγχρονης Σεισμολογίας. Οι τιμές των MMI έχουν επιτύχει έως τώρα εκτιμήσεις επί της έντασης 200, ίσως και περισσότερων, καταστροφικών σεισμικών γεγονότων στη Θάλασσα του Μαρμαρά και η αλγοριθμική μέθοδος των Bakun & Wentworth (1997) έχει χρησιμοποιηθεί, όπως και στη συγκεκριμένη διατριβή, προκειμένου με βάση τα αποτελέσματα MMI να υπολογιστεί το μέγεθος M και το επίκεντρο των σεισμών. Η αυθεντική εμπειρική σχέση των Bakun & Wentworth (1997) είναι η εξής:

$$M_i = (MMI_i + 3.29 + 0.0206d_i) / 1.68 \quad (4.1),$$

όπου d_i είναι η απόσταση σε km μεταξύ των παρατηρήσεων MMI και του επικέντρου. Η σχέση αυτή αναπτύχθηκε αρχικά κατά τη μελέτη της έντασης και των μακροσεισμικών αποτελεσμάτων 30 σεισμών στην Καλιφόρνια μέσω ενόργανων παρατηρήσεων. Στην παρούσα ερευνητική μελέτη η σχέση 4.1 αντικαταστάθηκε ως εξής:

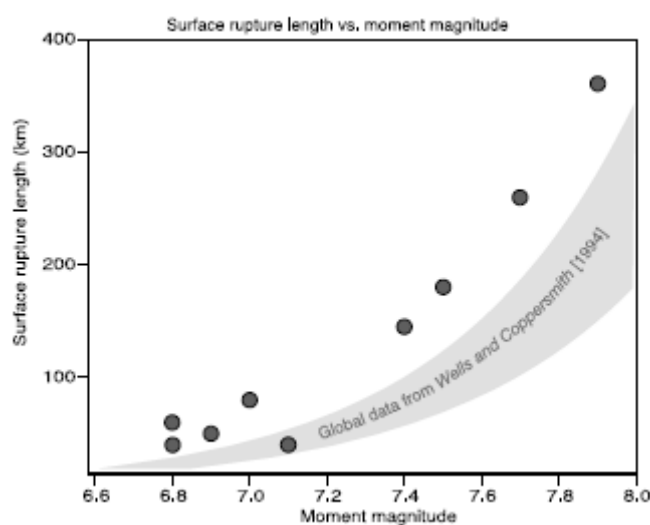
$$M_{s_i} = -1.54 + 0.65 (MMI_i) + 0.0029d_i + 2.14 \log(d_i) - (\text{Papazachos and Papaioannou, 1997}), \quad (4.2)$$

όπου το μέγεθος M καθορίζεται σύμφωνα με το επιφανειακό μέγεθος σεισμικών κυμάτων M_s χρησιμοποιώντας τη σχέση :

$$\log (M_i) = 16.07 + 1.5M_{s_i}, \quad (\text{Ambraseys, 2002}) \quad (4.3).$$

Προσδιορισμός των Επικέντρων

Η μέθοδος καθορισμού των επικέντρων ιστορικών σεισμών έχει υψηλή εξάρτηση από τα δεδομένα των ιστορικών πηγών. Οι Parsons et al. (2000) κατάφεραν να προσδιορίσουν γεωγραφικά ιστορικούς σεισμούς στη Θάλασσα του Μαρμαρά, σύμφωνα με χάρτη των Parke et al. (1999) ο οποίος αποδίδει εικόνες προφίλ σεισμικής ανάκλασης. Επιπλέον στην παρούσα ερευνητική εργασία εκτιμήσαμε τα μήκη διάρρηξης και τη μέση σεισμική ολίσθηση από εμπειρικές σχέσεις υπολογισμού του μεγέθους M (Wells & Coppersmith, 1994) για ρήγματα οριζόντιας συνιστώσας ολίσθησης στο ηπειρωτικό και θαλάσσιο τμήμα της περιοχής της Θάλασσας του Μαρμαρά, χρησιμοποιώντας την εξίσωση (4.1) των Bakun & Wentworth (1997). Τα μήκη διάρρηξης επιφανειακών ρηγμάτων φαίνεται να έχουν υποτιμηθεί από αρχικές εργασίες καθώς εκτιμώνται σημαντικά μεγαλύτερα (Barka, 1996 - Σχήμα 4.1).



Σχήμα 4.1 Συσχετισμός των επιφανειακών μηκών διάρρηξης (Surface Rupture Length) με το μέγεθος σεισμικής ροπής (Moment Magnitude) κατά μήκος του ΒΔ τμήματος του ρήγματος της Βόρειας Ανατολίας (Barka et al. 1996).

Ακριβής καθορισμός των επικέντρων με ενόργανα στοιχεία (χρόνοι άφιξης, μοντελοποίηση κυματομορφών) είναι δυνατός μόνο για πολύ πρόσφατους σεισμούς μετά το 1980. Για το υπόλοιπο διάστημα της ενόργανης περιόδου της Σεισμολογίας (1911-1980), στο οποίο ανήκουν και οι μελετημένοι στην παρούσα εργασία σεισμοί χρησιμοποιήθηκαν ενόργανα αλλά και μακροσεισμικά δεδομένα για τον καθορισμό των επικέντρων των ισχυρών αυτών σεισμών. Τα γεωγραφικά πλάτη και μήκη των επικέντρων των πέντε σεισμών που μελετήθηκαν αρχικά δόθηκαν με προσέγγιση ενός δεκάτου που σημαίνει ότι το σφάλμα στο επίκεντρο είναι περίπου 10 km αλλά σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να φτάσει τα 20 km. Για το λόγο αυτό, λήφθηκαν υπόψη, συγκρίθηκαν και συνδυάστηκαν πληροφορίες από σχετικές εργασίες των Ambraseys (2002), Bakun (1997), Papazachos (1997) όπου πραγματοποιείται προσπάθεια προσδιορισμού των επικέντρων των ιστορικών αυτών σεισμών, με σκοπό την ελαχιστοποίηση του σφάλματος στον προσδιορισμό των επικέντρων των σεισμών. Ορισμένες φορές, είναι δυνατό οι γεωγραφικές συντεταγμένες του επικέντρου να δίνονται με προσέγγιση ενός εκατοστού με αποτέλεσμα το σφάλμα στο επίκεντρο να είναι της τάξης λίγων χιλιομέτρων. Για τους ιστορικούς σεισμούς στη Θάλασσα του

Μαρμαρά το 1766, τα γεωγραφικά πλάτη και μήκη των επικέντρων τους δίνονται στην παρούσα εργασία με ακρίβεια ενός δεκάτου. Το επίκεντρο είναι το κέντρο της ζώνης διάρρηξης η οποία καθορίζεται με τη χρήση όλων των μακροσεισμικών δεδομένων και την εφαρμογή μεθόδου που πρότεινε ο C. Papazachos (1992). Η μέθοδος αυτή βασίζεται σε μοντέλο το οποίο περιλαμβάνει ανισότροπη ακτινοβολία της σεισμικής ενέργειας στην πηγή καθώς επίσης γεωμετρική διασπορά και ανελαστική απόσβεση της σεισμικής ενέργειας. Για τον προσδιορισμό των επικέντρων αυτών χρησιμοποιήθηκαν και γεωλογικά στοιχεία από εργασίες των Ambraseys & Finkel (1990, 1991, 1995), Barka (1996), Barka A. και K. Kadinsky-Cade (1988), Parsons (2000). Στη συγκεκριμένη διατριβή τα σφάλματα στον καθορισμό των επικέντρων των ιστορικών σεισμών του 1766 είναι της τάξης των 20 km.

Εκτίμηση του Μακροσεισμικού Μεγέθους

Διάφορα μοντέλα έχουν προταθεί για τον υπολογισμό του μεγέθους σεισμών στην ευρύτερη περιοχή του Μαρμαρά. Το πιο αξιόπιστο μοντέλο έως σήμερα όπως περιεγράφηκε και στην αρχή του κεφαλαίου δίνεται κατά Parsons et al (2000) από τη σχέση $M_i = 1.96 + 0.60(I) + 0.012(d)$, που αποτελεί μετασχηματισμό αλγοριθμικής συσχέτισης μεγεθών σεισμών που εκδηλώθηκαν σε ρήγματα οριζόντιας μετατόπισης σύμφωνα με Bakun & Wentworth (1997). Προκειμένου να διασφαλισθεί το μικρό σφάλμα στην προσπάθεια εκτίμησης του μακροσεισμικού μεγέθους των ιστορικών σεισμών του 1766 αλλά και των σχετικά πιο σύγχρονων, λαμβάνουμε υπόψη το μακροσεισμικό πεδίο των επιφανειακών σεισμών στο Βαλκανικό χώρο μέσω του μοντέλου (Papazachos C., 1992), όπου η μακροσεισμική ένταση σε μια θέση θεωρείται ως αποτέλεσμα : της ανισότροπης ακτινοβολίας στη σεισμική εστία, της γεωμετρικής διασποράς και της ανελαστικής απόσβεσης κατά μήκος του δρόμου διάδοσης των σεισμικών κυμάτων. Συγκεκριμένα, για το Βαλκανικό χώρο, συμπεριλαμβανομένης και της ευρύτερης περιοχής του Μαρμαρά χρησιμοποιείται η προαναφερθείσα σχέση (4.1a), κατά (Parsons et al. 2000): $M_i = 1.96 + 0.60(I) + 0.012(d)$. Κατ' αυτό τον τρόπο πραγματοποιούμε τη συσχέτιση του μεγέθους M_i με τη μέγιστη μακροσεισμική ένταση I_o σεισμών, όταν η ένταση I είναι γνωστή σε επικεντρική απόσταση Δ (σε km). Στο τελευταίο στάδιο ολοκλήρωσης του υπολογισμού του μακροσεισμικού μεγέθους M εφαρμόζεται η σχέση (4.5): $M = 0.62 I + 2.035 \log R + 0.002R - 0.96$, όπου M είναι το μακροσεισμικό μέγεθος (ισοδύναμο με το μέγεθος της σεισμικής ροπής M_w) και R η επικεντρική απόσταση εφόσον έχει προηγηθεί μετασχηματισμός του αλγορίθμου Bakun (1997 – Estimating Earthquake Location and Magnitude from Seismic Intensity Data). Το μέγεθος των επιφανειακών κυμάτων M_s για σεισμούς πριν το 1899 υπολογίστηκε από την ένταση και τις επικεντρικές αποστάσεις χρησιμοποιώντας την παρακάτω εξίσωση όπου έχουν εισαχθεί οι τοπικές παράμετροι της Θάλασσας του Μαρμαρά: $M_{si} = -1.54 + 0.65(I_i) + 0.0029(r_i) + 2.14\log(r_i) + 0.32p$, (4.1b) όπου M_{si} είναι το προσαρμοσμένο επανεκτιμημένο μέγεθος επιφανειακών κυμάτων που προκύπτει από τη φόρμουλα της Πράγας. Η ποσότητα I_i που εκφράζει ένταση στην κλίμακα Medvedev-Sponheuer-Karnik (MSK Scale) εφαρμόζεται στο μοντέλο μας για τιμές έντασης $MSK \leq 8$ και απόσταση r_i σε km από τη σεισμική πηγή. Η ποσότητα p έχει τιμή 0 σύμφωνα τη μέση τιμή της στη Θάλασσα του Μαρμαρά, ενίοτε αποκτά τιμή 1 όταν υπερβεί κατά 84% τη μέση τιμή. Η εξίσωση (4.1b) έχει προκύψει έπειτα από τη

μελέτη σεισμών στην Ελλάδα και τη Δυτική Τουρκία και ισχύει για μετρήσεις μεγάλης κλίμακας πεδίου (Ambraseys, 1992).

Στις έρευνες που επικεντρώνονται σε περιορισμένων εκτάσεων περιοχές, η απόσταση από την πηγή καθορίζεται ως η ελάχιστη απόσταση από την επιφανειακή εκδήλωση ρηγμάτων, ενώ σε έρευνες μεγάλης κλίμακας πεδίου καθορίζεται από την επικεντρική απόσταση. Κάθε μία των τιμών M_{si} που υπολογίζουμε μέσω της εξίσωσης (4.1b), έχει μια μέση τιμή που δεν αποκλίνει σημαντικά από το επιφανειακό μέγεθος M_s . Οι υπολογισμοί όλων των τιμών μεγεθών M_s και M_{si} φαίνονται στον πίνακα 3.1. Εκτιμήσεις επί των εντάσεων ιστορικών σεισμών στην παρούσα διατριβή είναι ακριβείς με μέση απόκλιση ± 0.5 μονάδες στη κλίμακα MSK και ελάχιστη απόκλιση ± 0.5 στην κλίμακα εντάσεων Mercalli. Οι εκτιμήσεις μας επί του επιφανειακού μεγέθους M_s ιστορικών σεισμών στη Θάλασσα του Μαρμαρά παρουσιάζουν μέγιστη απόκλιση ± 0.35 μονάδες στην κλίμακα μεγεθών, γεγονός που επιβεβαιώνει μία βέλτιστη προσέγγιση και μοντελοποίηση των χαρακτηριστικών, των ιδιοτήτων και αποτελεσμάτων των επιφανειακών κυμάτων. Ωστόσο, ιστορικοί σεισμοί για τους οποίους οι αναφορές είναι ελάχιστες από διαφορετικές περιοχές στη Θάλασσα του Μαρμαρά και εκ των οποίων δεν προκύπτουν επαρκή δεδομένα, η αβεβαιότητα γενικότερα στους υπολογισμούς μας επί του επιφανειακού μεγέθους M_s σεισμικών κυμάτων και των εντάσεων αυτών μεγαλώνει. Σχέσεις μεταξύ του μεγέθους των επιφανειακών κυμάτων M_s και της σεισμικής ροπής M_o , και αντίστροφα, παρέχουν σημαντικές πληροφορίες και συνιστούν εργαλεία επί της συσχέτισης εστιακών παραμέτρων πολλών ιστορικών σεισμών. Η σύγχρονη κλίμακα που χρησιμοποιείται και εκφράζεται λογαριθμικά ως $\log(M_o) - M_s$, ισχύει για επιφανειακούς σεισμούς και έχει προκύψει από παγκόσμιες βάσεις δεδομένων μέσω των οποίων ερευνώνται ενεργές τεκτονικά και κρατονικές περιοχές. Οι Ekström & Dziewonski (1988) εισήγαγαν την παγκόσμια κλίμακα $\log(M_o) - M_s$ η οποία συσχετίζει το επιφανειακό μέγεθος M_s με το μέγεθος σεισμικής ροπής μέσω των εξής μετασχηματισμών:

$$M_s = -19.24 + \log M_o \quad \text{για} \quad \log M_o < 24.5 \quad (4.4a)$$

$$M_s = -19.24 + \log M_o - 0.088 (\log M_o - a^2) \quad \text{για} \quad 24.5 \leq \log M_o \leq 26.4 \quad (4.4b)$$

$$M_s = -10.76 + (2/3) \log M_o \quad \text{για} \quad \log M_o > 26.4 \quad (4.4c)$$

Οι σχέσεις (4.4a), (4.4b), (4.4c) ξαναγράφονται με τις εξής μορφές:

$$\log M_o = 19.24 + M_s \quad \text{για} \quad M_s < 5.3 \quad (4.5a)$$

$$\log M_o = 30.20 - [92.45 - 11.40 M_s]^{1/2} \quad \text{για} \quad 5.3 \leq M_s \leq 6.8 \quad (4.5b)$$

$$\log M_o = 16.14 + 1.5 M_s \quad \text{για} \quad M_s > 6.8 \quad (4.5c)$$

Ωστόσο, οι ομάδες σχέσεων (4.4) & (4.5) όπως έχουν μετασχηματιστεί, δεν είναι απόλυτα ιδανικές για τον υπολογισμό και συσχετισμό των ποσοτήτων $\log(M_o) - M_s$. Τοπικά για τη Θάλασσα του Μαρμαρά ο υπολογισμός του μεγέθους σεισμικής ροπής προσεγγίζει με επιτυχία ρεαλιστικές τιμές. Παγκόσμια μοντέλα κλιμάκων μεγεθών και εντάσεων ωστόσο που έχουν προταθεί, φαίνονται ακατάλληλα όπως και οι συσχετισμοί $\log(M_o) - M_s$ της ομάδας εξισώσεων 4.5. Προκειμένου να ξεπεραστεί το πρόβλημα με την ομάδα εξισώσεων 3 όπου έχουν προσαρμοστεί με ομοιογένεια τα δεδομένα στον $\log(M_o)$ εκφράζοντας μια ανεξάρτητη φυσική ποσότητα και ταυτόχρονα συνυπολογίζοντας τις τοπικές συνθήκες απόσβεσης των επιφανειακών κυμάτων, εισάγουμε τις ακόλουθες διγραμμικές σχέσεις:

$$\log M_0 = 19.08 + M_s \quad \text{για } M_s < 6.0 \quad (4.6a)$$

&

$$\log M_0 = 19.08 + M_s \quad \text{για } M_s < 6.0 \quad (4.6b)$$

Οι εξισώσεις (4.6a) και (4.6b) εφαρμόζονται για τις περιοχές της Ανατολικής Μεσογείου και της Μέσης Ανατολής έως τις 70° Α, χρησιμοποιώντας το Global Centroid Moment Tensor (GCMT) Project του Πανεπιστημίου του Harvard. Επιπλέον, χρησιμοποιείται εναλλακτικό μοντέλο επανεκτίμησης των επιφανειακών μεγεθών M_s με βάση τη φόρμουλα της Πράγας για 577 επιφανειακούς σεισμούς (βάθους < 40 km), με ενδεικτικό εύρος τιμών $\log (M_0) = \{22.4 \text{ έως } 27.3\}$. Στο μοντέλο της Πράγας η ποσότητα του επιφανειακού μεγέθους θεωρείται ανεξάρτητη (Ambraseys and Douglas, 2000). Η σεισμική ροπή που υπολογίζεται από την ομάδα εξισώσεων (4.4) είναι κατά παράγοντα 0.7 και 0.85 μικρότερη από τις παγκόσμιες σχέσεις (4.5) για μεγέθη σεισμών $M < 6.0$ και $M > 6.0$ αντίστοιχα.

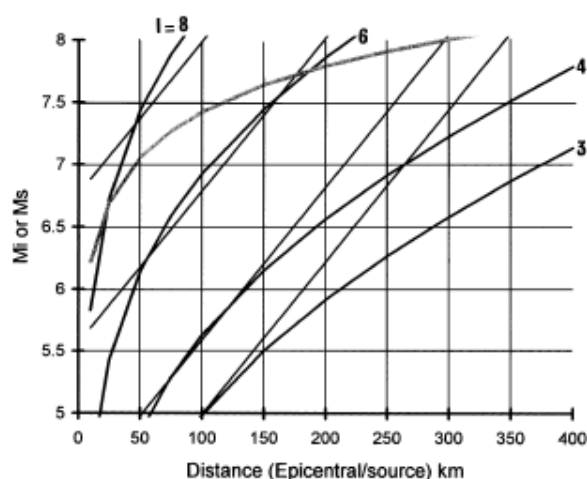
Το μέγεθος σεισμικής ενέργειας M_w , το μέγεθος σεισμού M και το επιφανειακό μέγεθος M_s ορίζονται ως ένας γραμμικός μετασχηματισμός του λογαρίθμου του μεγέθους σεισμικής ροπής M_0 ως εξής:

$$M = M_s = M_w = 2/3 \log (M_0) - 10.73 \quad (4.7)$$

όπου το μέγεθος σεισμικής ροπής M_0 υπολογίζεται σε $\text{dyne} \cdot \text{cm} \cdot 10^{-7} \text{ N} \cdot \text{m}$ (Kanamori, 1977) και το μέγεθος M δεν είναι τίποτε περισσότερο από το μετασχηματισμένο μέγεθος σεισμικής ροπής M_0 όπως προκύπτει από την εξίσωση 4.7. Συχνά, παραλείπεται το γεγονός ότι η εξίσωση (4.7) ισχύει για σεισμούς οι οποίοι εκδηλώνονται με ενεργοποίηση ολόκληρου του μήκους ενός ενεργού ρήγματος και όχι μόνο τμημάτων αυτού, επιπρόσθετα ότι η ισχύς της αφορά επιφανειακό μέγεθος σεισμών μεγαλύτερο από 6.5 $\{M_s \geq 6.5\}$ (Ekström & Dziewonski, 1988). Για μικρότερα μεγέθη ισχύει ότι: $M \neq M_s$. Οι τιμές σεισμικής ροπής στον πίνακα 3.1 προκύπτουν είτε από καταλόγους του GCMT Project του πανεπιστημίου Harvard για σεισμούς μετά το 1977, είτε από υπολογισμούς μέσω των εξισώσεων (4.4), (4.5c) και της παγκόσμιας κλίμακας $\log (M_0) - M_s$ των Ekström & Dziewonski (1988) για σεισμούς πριν το 1977. Για επιφανειακούς σεισμούς με επιφανειακό μέγεθος $M_s < 6.4$, των οποίων οι διαστάσεις της πηγής στο τρισδιάστατο χώρο είναι επαρκώς μικρές, εμφανίζεται ως μικρή η διαφορά μεταξύ της απόστασης από την πηγή και της επικεντρικής απόστασης σε μία περιοχή, σίγουρα όχι μεγαλύτερη από την αβεβαιότητα που συναντάμε στον προσδιορισμό επικέντρων κατά τον 20^ο αιώνα. Καθώς το μέγεθος ενός σεισμού αυξάνεται, η επικεντρική απόσταση σε τοπική κλίμακα πεδίου αυτοαναιρείται ως μία μέτρηση της εγγύτητας του πεδίου αυτού στην πηγή. Επομένως, η απόσταση r στην εξίσωση (4.1b), η οποία έχει θεωρηθεί σύμφωνα με τη γνώση μας επί των γεωλογικών συνθηκών του πεδίου, πρέπει να υπολογίζεται από το ίχνος του ενεργού ρήγματος. Οι σχέσεις καθορισμού και βαθμονόμησης του μεγέθους ιστορικών σεισμών έχουν προκύψει από μοντέλα διάφορων περιοχών και χρησιμοποιώντας την επικεντρική απόσταση μπορούμε να εκτιμήσουμε τη σεισμική επικινδυνότητα στην Θάλασσα του Μαρμαρά. Για παράδειγμα τα μεγέθη ορισμένων ιστορικών σεισμών στη Θάλασσα του Μαρμαρά έχουν εκτιμηθεί από Parsons et al. (2000) σύμφωνα με τη σχέση:

$$M_i = 1.96 + 0.60 (l) + 0.012(d), \quad (4.8)$$

Η σχέση (4.8) αποτελεί μια φόρμουλα καθορισμού και βαθμονόμησης μεγεθών σεισμών και προτάθηκε από Bakun & Wentworth (1997) κατά την προσπάθεια εκτίμησης του μεγέθους 22 σεισμών στην περιοχή της Καλιφόρνια. Το εύρος του μεγέθους των σεισμών αυτών κυμαίνεται ως εξής: $4.4 \leq M \leq 6.9$, όπου d είναι η επικεντρική απόσταση σε km. Για $M \geq 6.0$, κατά Parsons et al. (2000) έχει υπολογιστεί ότι $M_1 = M$, επιπλέον ότι για $M_H < 6.0$, το M_H μπορεί να θεωρηθεί ως το τοπικό μέγεθος M_1 κατά Hubert-Ferrari et al. (2000) και όπου d θεωρείται η μέση εκτιμώμενη επικεντρική απόσταση για ορισμένη ένταση (l). Η εξίσωση (4.8) δεν μπορεί να συγκριθεί άμεσα με την εξίσωση (4.1b), εφόσον οι δύο αυτές σχέσεις διαφέρουν στο πως ορίζουν τις έννοιες της απόστασης, του μεγέθους και των τοπικών γεωλογικών συνθηκών. Η μόνη παρατήρηση που μπορεί να γίνει είναι ότι στο σχήμα 3.3, όπου αναπαρίσταται ένα σύστημα των εξισώσεων (4.1b) και (4.8), η εξίσωση (4.8) δίνει μεγαλύτερα μακροσεισμικά μεγέθη σεισμών.



Σχήμα 4.2 Χαρτογράφηση των επιφανειακών μεγεθών M_s από την εξίσωση (1) με έντονες γραμμές και των M_i από την εξίσωση (6) με λεπτές γραμμές για εντάσεις III, IV, VI & VIII σε συνάρτηση με την απόσταση σε km του πεδίου από το επίκεντρο ή την πηγή. Για την εξίσωση (1) ισχύει ότι πάνω από τη γκρι καμπύλη οι αποστάσεις του πεδίου χαρακτηρίζονται ως αποστάσεις από την πηγή, ενώ κάτω από αυτή είναι επικεντρικές. Για την εξίσωση (6) οι αποστάσεις είναι επικεντρικές (Ambraseys N., 2002).

Ο πίνακας 4.2 κατανέμει σε λίστα τα μεγέθη M_1 13 ιστορικών σεισμών στη Θάλασσα του Μαρμαρά όπως υπολογίστηκαν από Parsons et al. (2000), σύμφωνα με την εξίσωση (4.8). Επιπλέον, περιλαμβάνει τις εκτιμήσεις των M_H όπως υπολογίστηκαν από Hubert-Ferrari et al. (2000) με βάση τα μήκη των ρηγμάτων στη φύση και τη σχέση κλίμακων μεγεθών των Kanamori & Anderson (1975). Κατά την απουσία σχετικών πληροφοριών, το μήκος ενός ενεργού ρήγματος συνιστά την καλύτερη ένδειξη του μέγιστου αναμενόμενου μεγέθους σεισμού που δύναται να εκδηλωθεί σε περίπτωση ενεργοποίησης του ρήγματος σε όλο το μήκος του. Ωστόσο, η εκτίμησή μας αυτή πραγματοποιείται προσεγγιστικά και όχι με απόλυτες μεθόδους, ιδίως στην περίπτωση που μελετάμε παραθαλάσσια και υποθαλάσσια ρήγματα, για τα οποία οποιαδήποτε παραδοχή επί της χωρικής τοποθέτησης και μήκους διάρρηξης αυτών, έγκειται στην

υποκειμενική άποψη του ερευνητή. Για καλύτερη σύγκριση ο πίνακας 4.2 δείχνει επίσης τις τιμές των επιφανειακών μεγεθών M_s , όπως επαληθεύτηκαν και στην παρούσα διατριβή από την εξίσωση (4.8). Αυτές οι τρεις βάσεις δεδομένων χαρτογραφήθηκαν στο σχήμα 4.3 όπου συνυπολογίστηκαν οι αβέβαιες εκτιμήσεις των επιφανειακών μεγεθών M_s λόγω ανεπαρκούς αριθμού παρατηρήσεων, έλλειψης ιστορικών πηγών και δεδομένων, διαφορών στην εκτίμηση του επιφανειακού μεγέθους σεισμών με $M_s \geq 7.0$.

Πίνακας 4.2 Σύγκριση των εκτιμήσεων επιφανειακών μεγεθών ιστορικών σεισμών στη Θάλασσα του Μαρμαρά.

Ημερομηνία			M_I *	M_H	M_s
9	Σεπτεμβρίου	1509	7.6	–	7.2
10	Μαΐου	1556	6.5 – 7.0	–	7.1
25	Μαΐου	1719	7.6	7.6	7.4
6	Μαρτίου	1737	–	7.2	7.0
2	Σεπτεμβρίου	1754	7.0	7.1	6.8
22	Μαΐου	1766	7.2	7.4	7.1
5	Αυγούστου	1766	7.6	7.4	7.4
29	Μαΐου	1776	–	6.3	*
8	Φεβρουαρίου	1826	–	6.9	6.2
19	Απριλίου	1850	6.0 – 7.0	6.8	6.1
28	Φεβρουαρίου	1855	7.0 – 7.5	7.4	7.1
11	Απριλίου	1855	–	6.6	6.2
17	Σεπτεμβρίου	1857	6.5 – 7.0	6.9	5.4
6	Νοεμβρίου	1863	6.4 – 7.0	6.9	5.3
13	Οκτωβρίου	1877	6.0 – 7.0	6.3	5.5
19	Απριλίου	1878	–	6.3	5.9
26	Οκτωβρίου	1889	–	7.0	**
10	Ιουλίου	1894	7.0	7.0	7.3
9	Αυγούστου	1912	7.4	–	7.3
18	Μαρτίου	1953	7.2	–	7.1
6	Οκτωβρίου	1964	6.9	–	6.9
17	Αυγούστου	1999	7.4	–	7.4

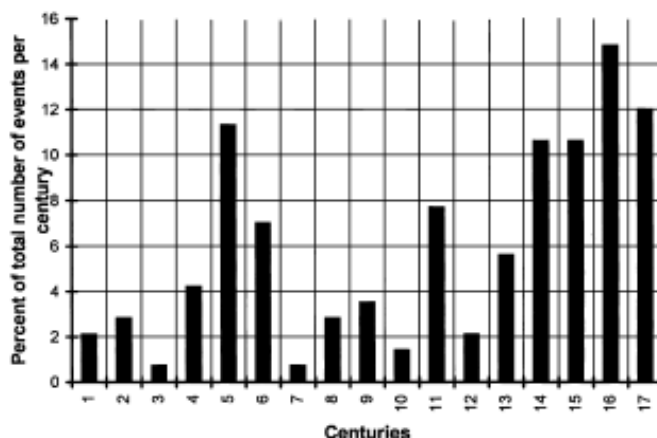
M_I : Μέγεθος σεισμών εκτιμώμενο κατά Parsons et al. (2000)

M_H : Μέγεθος σεισμών εκτιμώμενο κατά Hubert-Ferrari et al. (2000)

M_s : Επιφανειακό μέγεθος σεισμών κατά Ambraseys et al. (2002)

* : πολύ μικρός σε μέγεθος σεισμός

** : ανακριβή στοιχεία σεισμού



Σχήμα 4.3 Γράφημα όπου χαρτογραφούνται το ποσοστό του συνολικού αριθμού σεισμών στη Θάλασσα του Μαρμαρά ανά αιώνα (Ambraseys N., 2002).

4.2 Εκτίμηση της Μακροσεισμικής Έντασης

Η γνώση των τιμών της μακροσεισμικής έντασης, I , στις θέσεις όπου ο σεισμός προκάλεσε βλάβες ή έγινε αισθητός είναι εξαιρετικής σημασίας καθώς οι τιμές αυτές χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό των επικέντρων και των μεγεθών των σεισμών που εκδηλώθηκαν κατά τη διάρκεια της ιστορικής περιόδου της Σεισμολογίας (550 π.Χ. – 1910), καθώς και για τον καθορισμό των επικέντρων των σεισμών που εκδηλώθηκαν κατά την ενόργανη περίοδο της Σεισμολογίας. Ειδικής σημασίας για τέτοια χρήση είναι η μέγιστη μακροσεισμική ένταση, I_0 , δηλαδή η ένταση στο μέσο της πλειόσειστης περιοχής η οποία συμπίπτει, συνήθως, στους επιφανειακούς σεισμούς με τη ζώνη διάρρηξης (ρήγμα) του σεισμού.

Οι μακροσεισμικές εντάσεις όπως υπολογίστηκαν για τους προαναφερόμενους πέντε ιστορικούς και σύγχρονους σεισμούς είναι στην κλίμακα MM (Modified Mercalli Scale) και έχουν καθοριστεί με βάση την επίδραση του σεισμού στους ανθρώπους και τις τεχνικές κατασκευές. Οι επιδράσεις τους στο υπόγειο ή το θαλασσινό νερό λήφθηκαν επίσης υπόψη εφόσον υπήρχαν σχετικές και αξιόπιστες πληροφορίες.

Οι μικρής τιμής μακροσεισμικές εντάσεις ($I \leq VI$) για τους σεισμούς των ιστορικών χρόνων (22^{ης} Μαΐου 1766 – Κωνσταντινούπολη και 5^{ης} Αυγούστου 1766 – Ganos) δύναται να εκτιμηθούν με απευθείας εφαρμογή της κλίμακας MM, καθώς η εκτίμηση αυτή βασίζεται στην επίδραση των σεισμών στους ανθρώπους που δεν μεταβάλλεται πολύ με την πάροδο του χρόνου. Ωστόσο, η απευθείας εφαρμογή της κλίμακας MM δε συνίσταται για μεγάλες τιμές μακροσεισμικών εντάσεων ($I \geq VII$) καθώς η εκτίμηση των τιμών αυτών βασίζεται στην επίδραση των σεισμών στα κτίρια των οποίων ο σχεδιασμός και η κατασκευή έχει μεταβληθεί με το χρόνο. Κατά συνέπεια τα σύγχρονα κτίρια κατασκευάζονται με νέα υλικά και τεχνικές (ενισχυμένο σκυρόδεμα, νέοι αντισεισμικοί κανονισμοί, κλπ.) και οι μεγάλες τιμές των χρησιμοποιούμενων σήμερα κλιμάκων έχουν καθοριστεί με βάση την επίδραση των σεισμών σε τέτοια κτίρια. Είναι επομένως αναγκαίο να καθορίζονται κανόνες αντιστοιχίας μεταξύ των μακροσεισμικών εντάσεων μεγάλων τιμών και την επίδραση των σεισμών σε παλαιά

κτίρια ώστε να έχουμε έναν ομογενή κατάλογο. Αντίστοιχοι κατάλογοι μακροσεισμικών εντάσεων και μεγεθών σεισμών έχουν κατασκευαστεί για ιστορικούς σεισμούς που εκδηλώθηκαν στην Κωνσταντινούπολη και την ευρύτερη περιοχή της Θάλασσας του Μαρμαρά από Ambraseys, N. και C. Finkel (1991), Papazachos et al., (1997).

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα ιστορικών και σύγχρονων σεισμών για τους οποίους υπάρχουν μακροσεισμικές εντάσεις σε μεγάλες αποστάσεις (χαμηλές τιμές) και μακροσεισμικά αποτελέσματα σε μικρές αποστάσεις. Οι διαθέσιμες σε εμάς χαμηλές εντάσεις για κάθε έναν εκ των πέντε σεισμών χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό του μεγέθους και στη συνέχεια με χρήση της σχέσης (4.9):

$$I - I_0 = -3.59 \log (\Delta + 6) + 3.19 \quad (4.9)$$

εκτιμήθηκαν οι μακροσεισμικές εντάσεις σε μικρές αποστάσεις. Επειδή πολλά από τα μακροσεισμικά αποτελέσματα των μελετημένων σεισμών κοντά στα επίκεντρό τους ήταν γνωστά επιτεύχθηκε η αντιστοίχιση μεταξύ των σεισμικών επιδράσεων σε παλαιά κτίρια και των τιμών των εντάσεων του σεισμού σε σύγχρονη μακροσεισμική κλίμακα. Τα σημαντικότερα εκ των μακροσεισμικών αποτελεσμάτων ιστορικών και σύγχρονων σεισμών στη Θάλασσα του Μαρμαρά από το 1766 έως το 1967 αντιστοιχούν σε κάθε μία από τις πέντε υψηλές εντάσεις της κλίμακας MMI. Όλες οι διαθέσιμες τιμές των μακροσεισμικών εντάσεων, για κάθε ισχυρό σεισμό ($M \geq 6.0$) που μελετήθηκε στη Θάλασσα του Μαρμαρά χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό της μέγιστης μακροσεισμικής έντασης, I_0 , στο κέντρο της ζώνης διάρρηξης του σεισμού με την υπολογιστική μέθοδο που προτάθηκε από τον C. Papazachos (1992). Οι εντάσεις αυτές έχουν τιμές $I_0 \geq VIII$. Συμπερασματικά, στην παρούσα ερευνητική εργασία χρησιμοποιώντας τα προαναφερόμενα μοντέλα των:

I. Bakun & Wentworth (1997) : $M_i = (MMI_i + 3.29 + 0.0206d_i) / 1.68$ (4.2)

II. Ambraseys (2002) : $\log (M_i) = 16.07 + 1.5M_{si}$ (4.3)

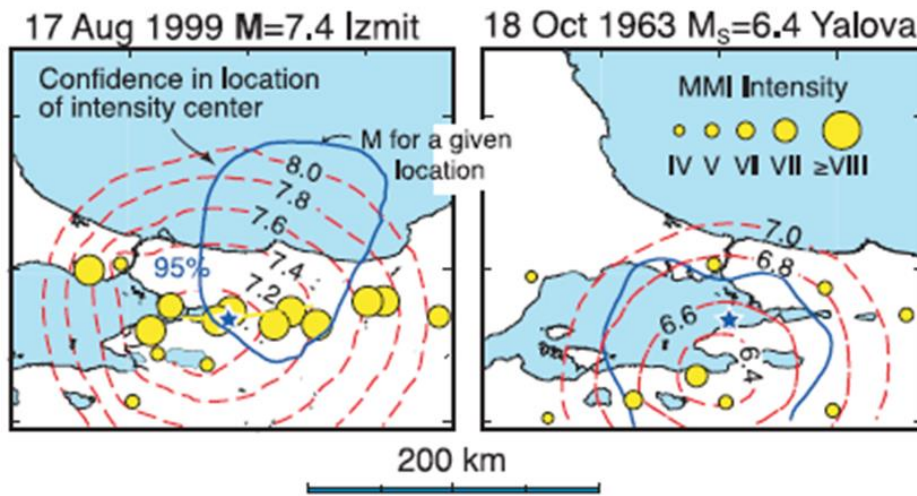
III. Barka et al. 1996

IV. Parsons et al. 2000

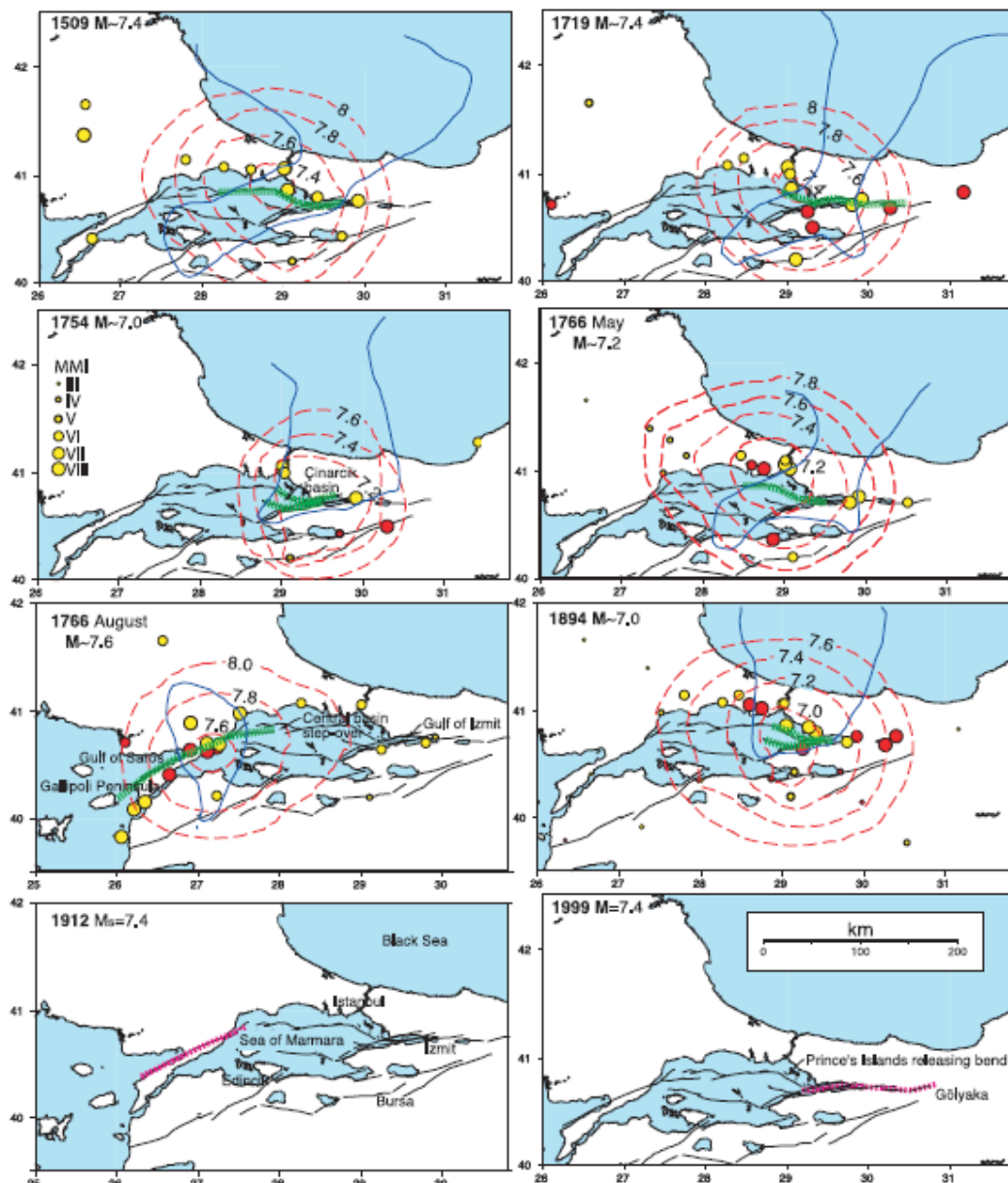
εκτιμούμε τις εστιακές παραμέτρους και τα μακροσεισμικά αποτελέσματα ιστορικών σεισμών στη Θάλασσα του Μαρμαρά.

Αρχικά, αξίζει να παραθέσουμε αντίστοιχα αποτελέσματα τιμών MMI της εργασίας των Parsons et al. 2000, που με ανάλογη επιστημονική διαδικασία περιγράφονται από τα σχήματα 4.4 και 4.5 ως εξής :

Σχήμα 4.4 - (Parsons et al. 2000).



Σχήμα 4.5 - (Parsons et al. 2000).



Σχήματα 4.4 & 4.5: Ισχυροί Σεισμοί της περιόδου 1500 – 2000 μ.Χ. στη Θάλασσα του Μαρμαρά. Για τα σεισμικά γεγονότα μεταξύ 1509 και 1894 προσδιορίζονται τα επίκεντρά τους σύμφωνα με τις τιμές MMI όπως αυτές προκύπτουν από τις ιστορικές και σύγχρονες περιγραφές επί των ζημιών και καταστροφών. Οι κατάλογοι των μακροσεισμικών αποτελεσμάτων και επικέντρων έχουν δημιουργηθεί από Ambraseys & Finkel (1990, 1991, 1995). Τα εκτιμώμενα μήκη διάρρηξης αναπαρίστανται από τις πράσινες και μωβ διακεκομμένες γραμμές. Οι τιμές MMI χαρτογραφούνται με κίτρινους κύκλους ενώ με κόκκινους κύκλους εκτιμώνται πλειόσειστες περιοχές λόγω της σεισμικής επιτάχυνσης από χαλαρά ιζήματα. Με κόκκινους διακεκομμένους κύκλους χαρτογραφούνται τα όρια εμπιστοσύνης των τιμών MMI (Parsons et al. 2000).

§ 5

Συμβολή στη Μελέτη των Μακροσεισμικών Αποτελεσμάτων

στη Θάλασσα του Μαρμαρά

Πειραματικά Αποτελέσματα Διπλωματικής Διατριβής

Η μελέτη επικεντρώθηκε στην ευρύτερη περιοχή της Θάλασσας του Μαρμαρά, όπου διεξήχθη η έρευνα των μακροσεισμικών αποτελεσμάτων ισχυρών σεισμών οι οποίοι εκδηλώθηκαν από το 1766 έως το 1967. Μεγέθη σεισμών της ευρύτερης περιοχής του Μαρμαρά δίνονται κατά Parsons et al (2000) από τη σχέση $M_i = 1.96 + 0.60(I) + 0.012(d)$, που αποτελεί μετασχηματισμό αλγοριθμικής συσχέτισης μεγεθών σεισμών που εκδηλώθηκαν σε ρήγματα οριζόντιας μετατόπισης σύμφωνα με Bakun & Wentworth (1997). Επιπρόσθετα, προκειμένου να διασφαλισθεί το μικρό σφάλμα στον υπολογισμό των μακροσεισμικών αποτελεσμάτων, λήφθηκε υπόψη η εργασία των Papazachos C. & Papaioannou (1997). Σύμφωνα με τη σχετική εργασία αναλύθηκε το μακροσεισμικό πεδίο των επιφανειακών σεισμών στο Βαλκανικό χώρο με τη χρήση προτεινόμενου μοντέλου (Papazachos C., 1992), όπου η μακροσεισμική ένταση σε μια θέση θεωρείται ως αποτέλεσμα : της ανισότροπης ακτινοβολίας στη σεισμική εστία, της γεωμετρικής διασποράς και της ανελαστικής απόσβεσης κατά μήκος του δρόμου διάδοσης των σεισμικών κυμάτων. Συγκεκριμένα, για το Βαλκανικό χώρο, συμπεριλαμβανομένης και της ευρύτερης περιοχής του Μαρμαρά αναπτύχθηκε ο κώδικας υπολογισμού:

$$M_i = 1.96 + 0.60(I) + 0.012(d), \quad (\text{Parsons et al. 2000}) \quad (5.1),$$

Επιτεύχθηκε επακόλουθα η συσχέτιση αυτού με τη μέγιστη μακροσεισμική ένταση I_0 σεισμών, όταν η ένταση I είναι γνωστή σε επικεντρική απόσταση Δ (σε km), επακόλουθα προτείνεται και εφαρμόζεται η ακόλουθη σχέση:

$$M = 0.62 I + 2.035 \log R + 0.002R - 0.96 \quad (5.2),$$

όπου M είναι το μακροσεισμικό μέγεθος (ισοδύναμο με το μέγεθος της σεισμικής ροπής M_w) και R η επικεντρική απόσταση, μετασχηματίζοντας τον αλγόριθμο Bakun (1997 – Estimating Earthquake Location and Magnitude from Seismic Intensity Data). Από διαθέσιμους καταλόγους σεισμών, Papazachos et al. 1997, Parsons et al. 2000, εφαρμόστηκε ο μετασχηματισμένος κώδικας κατά Papazachos and Papaioannou (1997) στους παρακάτω σεισμούς, με σκοπό να εκτιμηθούν τα μακροσεισμικά μεγέθη αυτών, τα επίκεντρά τους και επακόλουθα να χαραχθούν οι ισόσειστες καμπύλες και η απόκλιση του μεγέθους σεισμικής ροπής.

- I. 22^{ης} Μαΐου 1766 – Κωνσταντινούπολη
- II. 5^{ης} Αυγούστου 1766 – Ganos
- III. 18^{ης} Μαρτίου 1953 – Genise
- IV. 6^{ης} Οκτωβρίου 1964 – Manyas
- V. 22^{ης} Ιουλίου 1967 – Mudurnu

Αρχικά, κατόπιν ανάκτησης δεδομένων μακροσεισμικών μεγεθών από διαθέσιμους καταλόγους των Papazachos et al. 1997 (Atlas of Iseismal Maps for Strong Shallow Earthquakes in Greece and Surrounding Area, 426 BC – 1995) και εισαγωγής αυτών στο αλγοριθμικό μοντέλο των Bakun & Wentworth (1997), υπολογίστηκαν οι τιμές του μακροσεισμικού μεγέθους, της μακροσεισμικής έντασης (MMI = Modified Mercalli Intensity) και της απόκλισης του μακροσεισμικού μεγέθους (RMS) των προς μελέτη ισχυρών ιστορικών και σύγχρονων σεισμών.

Επακόλουθα, με τη χρήση του λογισμικού ArcGIS, χαρτογραφήθηκαν το μακροσεισμικό μέγεθος, οι τιμές MMI, εισήχθησαν οι ισόσειστες καμπύλες και το διάστημα εμπιστοσύνης που προαναφέρθηκε και εναλλακτικά ως απόκλιση μακροσεισμικού μεγέθους στην ευρύτερη περιοχή της Θάλασσας του Μαρμαρά. Αναλυτικότερα, η πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε για κάθε ένα σεισμό και τα αποτελέσματα που σημειώθηκαν περιγράφονται παρακάτω.

Ο Σεισμός της 22^{ης} Μαΐου 1766 στην Κωνσταντινούπολη

Το επίκεντρο του ισχυρού αυτού σεισμού βρισκόταν κοντά στη ΒΑ ακτή της θάλασσας του Μαρμαρά και ακολουθήθηκε από μία άλλη ισχυρή δόνηση περίπου ίδιου μεγέθους στις 5 Αυγούστου 1766 η οποία εκδηλώθηκε με επίκεντρο στη ΒΔ ακτή της Θάλασσας του Μαρμαρά εξαιτίας του φαινομένου μεταφοράς των τάσεων σε ενεργά ρήγματα της περιοχής. Στην Κωνσταντινούπολη, ο σεισμός της 22^{ης} Μαΐου 1766 με μέγεθος σεισμικής ροπής $M_w = 7.2$, προκάλεσε καταστροφές και πολυάριθμες καταρρεύσεις οικιών και δημοσίων κτιρίων κάθε κατασκευαστικής μορφής. Οι θάνατοι ανήλθαν στους 4500 και τη σεισμική δόνηση ακολούθησε ένα ισχυρό θαλάσσιο σεισμικό κύμα που προκάλεσε πρόσθετες καταστροφές κατά μήκος του Βοσπόρου και του κόλπου των Μουδανιών. Ο Γαλατάς και το Περάν δεν έπαθαν σοβαρές βλάβες. Στον κόλπο της Νικομήδειας (Izmit) αρκετές πόλεις και χωριά υπέστησαν καταστροφές. Σοβαρά χτυπήθηκε και η ίδια η πόλη της Νικομήδειας καθώς το θαλάσσιο σεισμικό κύμα προκάλεσε πολλές καταστροφές στα ναυπηγεία της. Επιπλέον, καταστράφηκε το Deli και σε μικρότερη έκταση η Προύσα. Στις πόλεις Catalca, Cekmece, Corlu, και Karisdiran ούτε ένα σπίτι δεν έμεινε άθικτο. Κάποιες βλάβες σημειώθηκαν στην Αρκαδιούπολη (Burgaz) και στην Αδριανούπολη (Edirne). Οι βλάβες του σεισμού αυτού από ότι φαίνεται δεν εκτείνονται μακρύτερα από τη Ραιδεστό και η δόνηση αξίζει να σημειωθεί πως έγινε αισθητή μέχρι τη Θεσσαλονίκη και τη Σμύρνη. Σύμφωνα με σχετικές έρευνες, οι μετασεισμικές δονήσεις συνεχίστηκαν μέχρι το τέλος Ιουνίου (Perrey 1848, Mallet 1854, Αντωνιάδης 1907, Κωνσταντινίδης 1939, Ambraseys και Finkel 1995).

Για τη μελέτη των μακροσεισμικών αποτελεσμάτων, εισήχθη στο μετασχηματισμένο υπολογιστικό κώδικα των Bakun & Wentworth (1997), ο οποίος διατέθηκε στο εργαστήριο Γεωφυσικής ΑΠΘ εν έτει 2005, εκ του εισηγητή του αλγοριθμικού μοντέλου W.H. Bakun, ο κατάλογος των μακροσεισμικών μεγεθών που είναι διαθέσιμος από Papazachos et al. 1997. Ειδικότερα, τα δεδομένα των μακροσεισμικών μεγεθών που έχουν προκύψει από μελέτες ιστορικών εγγράφων και πηγών καθώς και σύμφωνα με σύγχρονες σεισμοτεκτονικές μελέτες στην περιοχή της Θάλασσας του Μαρμαρά, όπου ορίζεται το σεισμικό δυναμικό και οι αναμενόμενες τιμές μακροσεισμικών μεγεθών, εντάσεων και μακροσεισμικών αποτελεσμάτων, δίνονται

στον πίνακα 5.1. Στη συνέχεια οι τιμές Mi, εισήχθησαν στον κώδικα Bakun (1997) και προέκυψαν τα αποτελέσματα υπολογισμού του Μακροσεισμικού Μεγέθους (Mi) και της Απόκλισης του Μακροσεισμικού Μεγέθους (Ri) λόγω στατιστικού σφάλματος (RMS) το οποίο βεβαίως εισήχθη στον κώδικα Bakun ως παράμετρος. Η ποσότητα R(km) εκφράζει τη μέγιστη ακτινική απόσταση κατά μήκος της οποίας πραγματοποιείται η πειραματική έρευνα και η ποσότητα s(km) εκφράζει το βήμα (step) λήψης των δεδομένων στον πίνακα 5.1 και έρευνας στον πίνακα 5.2, ως απόσταση εκφρασμένη σε km. Επακόλουθα, τα αποτελέσματα του πειράματος χαρτογραφούνται στο σχήμα 5.1 με τη μορφή ισόσειστων καμπυλών που βάση αυτών αναλύθηκαν επαγωγικά τα μακροσεισμικά αποτελέσματα του σεισμού της 22ης Μαΐου 1766 στην Κωνσταντινούπολη.

<u>Σεισμός 22ης Μαΐου 1766</u>			
N°	E°	R(km)	s(km)
29.10	40.80	250	5
N°	E°	Mi	
28.964	41.013	9.0	
29.470	40.730	8.0	
29.938	40.774	8.0	
28.530	41.200	7.0	
28.520	41.170	7.0	
29.071	40.197	7.0	
27.400	41.520	6.0	
27.820	41.350	6.0	
27.530	41.070	6.0	
27.630	41.380	6.0	
26.563	41.686	5.0	
27.145	38.434	3.0	
22.930	40.630	3.0	

Πίνακας 5.1

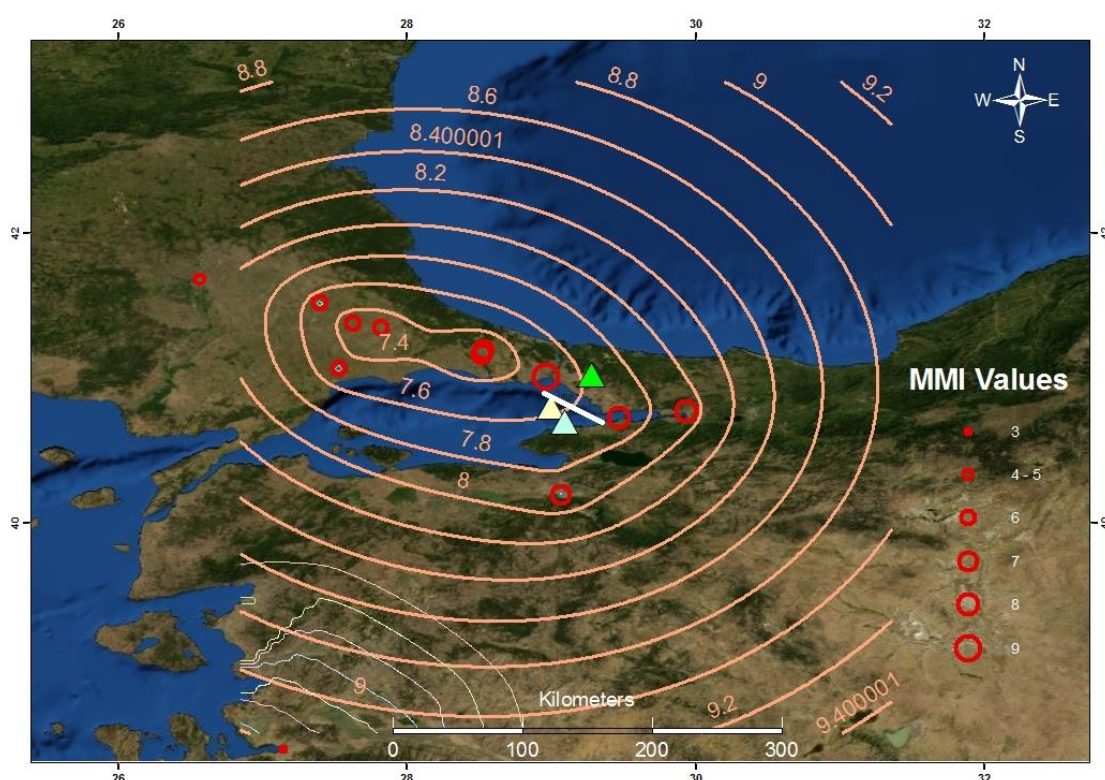
<u>Σεισμός 22ης Μαΐου 1766</u>			
N°	E°	R(km)	s(km)
29.10	40.80	250	5
N°	E°	Mi	Ri
26.847	38.547	9.209	6.367
26.892	38.547	9.201	6.480
26.937	38.547	9.194	6.602
26.982	38.547	9.188	6.733
27.027	38.547	9.181	6.865
n=10200	n=10200	n=10200	n=10200
31.172	43.052	9.244	0.9914
31.217	43.052	9.256	0.9918
31.262	43.052	9.268	0.9924
31.307	43.052	9.281	0.9929
31.352	43.052	9.293	0.9935

Πίνακας 5.2

Πίνακας 5.1: Κατάλογος περιληπτικός των κατά εκτίμηση μακροσεισμικών μεγεθών από ιστορικές πηγές. Οι τιμές Mi εισήχθησαν στον κώδικα υπολογισμού μακροσεισμικού μεγέθους των Bakun & Wentworth (1997).

Πίνακας 5.2: Κατάλογος των πειραματικών αποτελεσμάτων για το μακροσεισμικό μέγεθος (Mi) και την απόκλιση μακροσεισμικού μεγέθους (Ri) του σεισμού της 22^{ης} Μαΐου 1766. Η μέγιστη ακτινική απόσταση κατά μήκος της οποίας πραγματοποιήθηκε η μελέτη των μακροσεισμικών αποτελεσμάτων εκφράζεται από την ποσότητα R και ισούται με R = 250 km. Το βήμα με το οποίο αναλύονται τα μακροσεισμικά μεγέθη είναι 5 km. Η ποσότητα n εκφράζει το πλήθος των στοιχείων – πειραματικών αποτελεσμάτων που προέκυψαν στο τέλος της υπολογιστικής διαδικασίας και που στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκαν ώστε να αποδοθούν οι ισόσειστες καμπύλες σύμφωνα με τις τιμές Mi και τα όρια εμπιστοσύνης σύμφωνα με τις τιμές Ri.

Στο σχήμα 5.1 παρατηρούμε το επίκεντρο του σεισμού κατά Ambraseys (2002) με μπεζ τρίγωνο και συντεταγμένες επικέντρου: $40.80^{\circ}\text{B} - 29.00^{\circ}\text{A}$, κατά Bakun με πράσινο τρίγωνο (1997) και συντεταγμένες επικέντρου: $41.03^{\circ}\text{B} - 29.28^{\circ}\text{A}$ και κατά Papazachos & Papazachou (1997) με γαλάζιο τρίγωνο και συντεταγμένες: $40.80^{\circ}\text{B} - 29.10^{\circ}\text{A}$. Το μέγεθος σεισμικής ροπής υπολογίστηκε σε $M_w = 7.1$ και η κατανομή του μακροσεισμικού μεγέθους και των τιμών MMI (Modified Mercalli Intensity) χαρτογραφούνται επί του σχήματος με κόκκινους κύκλους. Οι Ισόσειστες Καμπύλες αναπαρίστανται με ροζ ελλειπτικούς κύκλους και το Διάστημα Εμπιστοσύνης, που ορίζεται εναλλακτικά ως Απόκλιση Μακροσεισμικού Μεγέθους με λευκές καμπύλες. Με έντονη λευκή γραμμή χαρτογραφείται το ρήγμα όπου εκδηλώθηκε η διάρρηξη. Ο σεισμός εκδηλώθηκε στο ρήγμα της Κωνσταντινούπολης, την 22η Μαΐου 1766.



Σχήμα 5.1 Κατανομή του Μακροσεισμικού Μεγέθους και των τιμών MMI (Modified Mercalli Intensity) με κόκκινους κύκλους, των Ισόσειστων Καμπυλών με ροζ ελλειπτικούς κύκλους και του Διαστήματος Εμπιστοσύνης, που ορίζεται εναλλακτικά ως Απόκλιση Μακροσεισμικού Μεγέθους με λευκές καμπύλες, για το σεισμό της 22^{ης} Μαΐου 1766.

Ο Σεισμός της 5^{ης} Αυγούστου 1766

Ο σεισμός εκδηλώθηκε στο ρήγμα Ganos τη 5η Αυγούστου 1766 και είχε μέγεθος σεισμικής ροπής $M_w = 7.6$. Κατέστρεψε πόλεις και χωριά ανάμεσα στη Ραιδεστό και Μυριόφυτο (Murefte), επιπλέον καταστράφηκε σχεδόν ολόκληρη η πόλη Γάνος από το σεισμό και τη φωτιά που ακολούθησε. Σχεδόν όλα εκ των 800 σπιτιών της χώρας κατέρρευσαν και το μεγαλύτερο ποσοστό των κατοίκων θάφτηκε κάτω από τα ερείπια. Το μεγαλύτερο μέρος της Περίστασης γκρεμίστηκε ενώ οι πόλεις Σηλύβρια, Ραιδεστός, Καλλίπολη καθώς επίσης και ενδιάμεσες τοποθεσίες αυτών, έγιναν θέατρο καταστροφών. Το μισό της Καλλίπολης καταστράφηκε και δεν απέμεινε κανένα κατοικήσιμο σπίτι. Το έδαφος ρηγματώθηκε και ξεπήδησε νερό. Τα κάστρα στο στενό των Δαρδανελίων (Seddulbahir, Kilitunbahir, Sultanhisar) καθώς και η περιοχή της Βίγας (Bigas) υπέφεραν λιγότερο. Από το σεισμό προκλήθηκαν αρκετές βλάβες στη Τένεδο καθώς επίσης και στο κάστρο της Μυτιλήνης, επιπλέον καταστροφές προκλήθηκαν στην Κωνσταντινούπολη όπου περίπου 30 περίπου άνθρωποι έχασαν τη ζωή τους και περισσότεροι από 100 τραυματίστηκαν. Στην Αδριανούπολη 7 μιναρέδες γκρεμίστηκαν, ενώ αρκετά τζαμιά, λουτρά και μέρος από τα τείχη της πόλης βλάφτηκαν. Αναφέρεται ότι η δόνηση προκάλεσε κάποιες βλάβες στις πόλεις Προύσα, Νικομήδεια, Γιάλοβα και Karamursel όπου κατέρρευσε το δικαστικό κτίριο και 4 άνθρωποι σκοτώθηκαν. Ο ισχυρός σεισμός της 5^{ης} Αυγούστου 1766 έγινε αισθητός στη Λήμνο, στο Άγιο Όρος, στη Θεσσαλονίκη, στη Τένεδο, στη Σμύρνη και στο Αϊδινίο. Αντιληπτός έγινε επίσης σε ολόκληρα τα Βαλκάνια μέχρι τα Καρπάθια και σε όλη την έκταση της λεκάνης του Δούναβη μέχρι το Sorbon της Ουγγαρίας και τη Βιέννη. Οι καταστρεπτικοί μετασεισμοί κράτησαν περίπου 1 χρόνο (Perrey 1848, Mallet 1854, Μαραβελάκης 1937, Ambraseys και Finkel 1995).

Ο σεισμός της 5^{ης} Αυγούστου 1766 συνιστά τον ισχυρότερο έως σήμερα ιστορικό σεισμό που εκδηλώθηκε στην περιοχή Γάνος και η μελέτη των μακροσεισμικών του μεγεθών και αποτελεσμάτων στηρίχθηκε επίσης σε πληθώρα ιστορικών καταγραφών και πηγών. Ακόμη βρισκόμαστε έναν αιώνα περίπου πριν την εποχή της ενόργανης σύγχρονης σεισμολογίας, όπου παρόλα αυτά, ο 18^{ος} αιώνας μας παρέχει σημαντικές πληροφορίες, περιγραφές και εμπεριστατωμένα αρχεία για ισχυρούς και καταστροφικούς σεισμούς. Τα δεδομένα των μακροσεισμικών μεγεθών που χρησιμοποιήθηκαν για την εξαγωγή των ισόσειστων καμπυλών του σεισμού του Αυγούστου του 1766, προκύπτουν από παραστατικές καταγραφές σοβαρών ζημιών σε πολλές σημαντικές μητροπόλεις της Θάλασσας του Μαρμαρά, συμπεριλαμβανομένης προφανώς και της σημαντικότερης αυτών, της Κωνσταντινούπολης. Σύμφωνα με τη μεθοδολογία που περιεγράφηκε προηγουμένως η μελέτη των μακροσεισμικών αποτελεσμάτων στηρίχθηκε στον κατάλογο μακροσεισμικών μεγεθών που είναι διαθέσιμος από Papazachos et al. 1997. Προκειμένου να χαραχθούν οι ισόσειστες καμπύλες του σεισμού της 5.8.1766 εισήχθησαν στον υπολογιστικό κώδικα τα μακροσεισμικά μεγέθη του πίνακα 5.3 και στη συνέχεια προέκυψαν τα αποτελέσματα των τιμών Μακροσεισμικού Μεγέθους (M_i) και της Απόκλισης του Μακροσεισμικού Μεγέθους (R_i) λόγω στατιστικού σφάλματος (RMS) το οποίο βεβαίως εισήχθη στον κώδικα Bakun ως παράμετρος. Η ποσότητα $R(km)$ εκφράζει τη μέγιστη ακτινική απόσταση κατά μήκος της οποίας πραγματοποιείται η πειραματική έρευνα και η ποσότητα $s(km)$ εκφράζει το βήμα (step) λήψης των δεδομένων στον πίνακα 5.3 και έρευνας στον πίνακα 5.4, ως απόσταση εκφρασμένη σε km. Τέλος, τα αποτελέσματα

του πειράματος χαρτογραφήθηκαν στο σχήμα 5.2 με τη μορφή ισόσειστων καμπυλών που βάση αυτών αναλύθηκαν επαγωγικά τα μακροσεισμικά αποτελέσματα του σεισμού της 5ης Αυγούστου 1766 στην ευρύτερη περιοχή της Θάλασσας του Μαρμαρά και σε ακτίνα 250 km από το επίκεντρο του σεισμού.

<u>Σεισμός 5ης Αυγούστου 1766</u>			
N°	E°	R(km)	S(km)
27.11	40.74	250	5
N°	E°	Mi	
27.350	40.800	10.0	
27.330	40.770	9.0	
27.080	40.680	9.0	
26.676	40.416	9.0	
26.380	40.220	8.0	
26.480	40.150	8.0	
28.528	41.081	7.0	
26.230	40.080	7.0	
26.059	39.829	7.0	
29.938	40.774	6.0	
29.281	40.662	6.0	
29.616	40.692	6.0	
28.964	41.013	6.0	
29.071	40.197	6.0	
26.563	41.686	6.0	
26.567	39.100	6.0	
27.840	37.855	5.0	
24.300	40.200	5.0	
27.145	38.434	5.0	
22.930	40.630	5.0	

Πίνακας 5.3

Πίνακας 5.3: Κατάλογος των κατά εκτίμηση μακροσεισμικών μεγεθών από ιστορικές πηγές για το σεισμό της 5.8.1766 στην ευρύτερη περιοχή της Θάλασσας του Μαρμαρά. Οι τιμές Mi που ανακτήθηκαν, εισήχθησαν στον μετασχηματισμένο κώδικα υπολογισμού μακροσεισμικού μεγέθους των Bakun & Wentworth (1997), ο οποίος λαμβάνει υπόψη τις σχέσεις σεισμικής απόσβεσης των επιφανειακών κυμάτων για την περιοχή της Θάλασσας του Μαρμαρά σύμφωνα με το μοντέλο των Papazachos & Papaioannou (1997). Τα αποτελέσματα του κώδικα στην πρώτη φάση του πειράματος μας παρέχουν στη συνέχεια τα στοιχεία Mi και Ri του πίνακα 5.4.

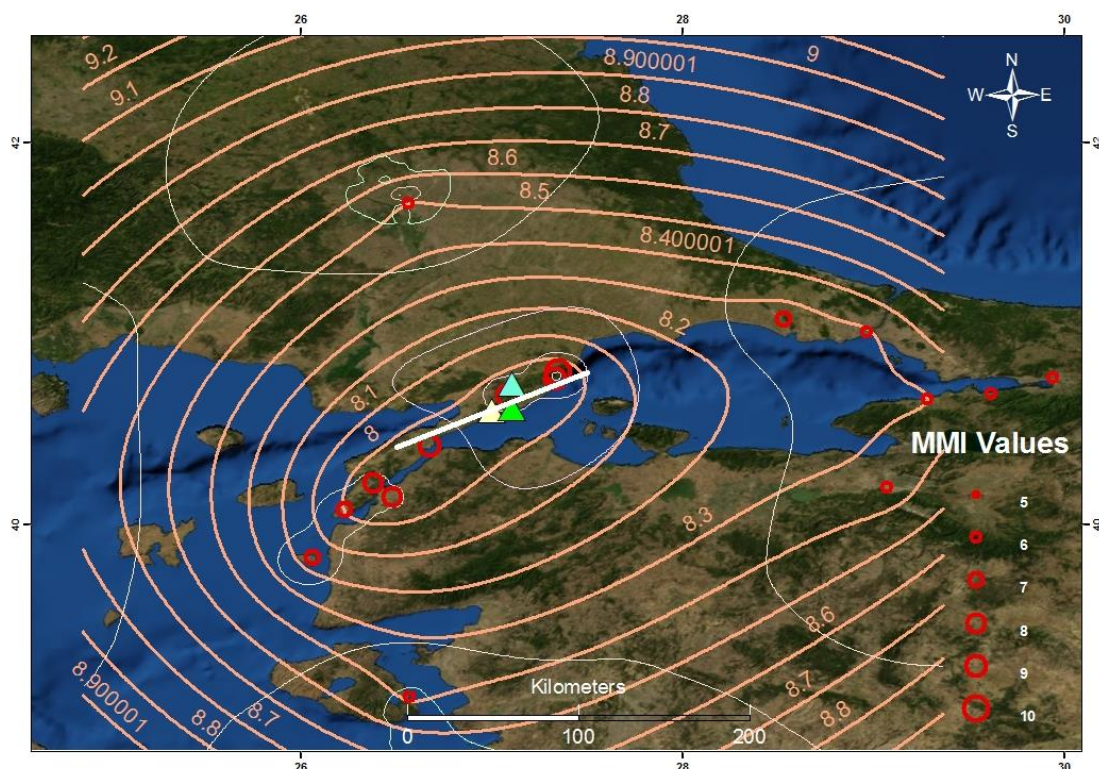
Πίνακας 5.4: Κατάλογος των πειραματικών αποτελεσμάτων για το μακροσεισμικό μέγεθος (Mi) και την απόκλιση μακροσεισμικού μεγέθους (Ri) του σεισμού της 5.8.1766. Η μέγιστη ακτινική απόσταση κατά μήκος της οποίας πραγματοποιήθηκε η μελέτη των μακροσεισμικών αποτελεσμάτων εκφράζεται από την ποσότητα R και

<u>Σεισμός 5ης Αυγούστου 1766</u>			
N°	E°	R(km)	S(km)
27.11	40.74	250	5
N°	E°	Mi	Ri
24.857	38.487	9.116	0.707
24.902	38.487	9.104	0.707
24.947	38.487	9.093	0.707
24.992	38.487	9.081	0.707
25.037	38.487	9.069	0.710
25.083	38.487	9.057	0.729
25.128	38.487	9.046	0.752
25.173	38.487	9.034	0.778
I	I	I	I
n=10200	n=10200	n=10200	n=10200
I	I	I	I
29.001	42.992	9.333	0.523
29.046	42.992	9.339	0.526
29.092	42.992	9.345	0.529
29.137	42.992	9.352	0.532
29.182	42.992	9.358	0.535
29.227	42.992	9.365	0.538
29.272	42.992	9.372	0.541
29.317	42.992	9.378	0.544
29.362	42.992	9.385	0.547

Πίνακας 5.4

ισούνται με ακτίνα $R = 250$ km από το επίκεντρο του σεισμού. Το βήμα με το οποίο αναλύονται τα μακροσεισμικά μεγέθη είναι 5 km. Η ποσότητα n εκφράζει το πλήθος των στοιχείων – πειραματικών αποτελεσμάτων που προέκυψαν στο τέλος της υπολογιστικής διαδικασίας και που ανέρχεται συνολικά σε 10.200. Έπειτα οι τιμές αυτές χρησιμοποιήθηκαν ώστε να αποδοθούν οι ισόσειστες καμπύλες σύμφωνα με τις τιμές M_i και τα όρια εμπιστοσύνης σύμφωνα με τις τιμές R_i .

Σύμφωνα με τα μακροσεισμικά αποτελέσματα που προέκυψαν, στο σχήμα 5.2 έχουν χαρτογραφηθεί τα επίκεντρα κατά Ambraseys (2002) με μπεζ τρίγωνο και συντεταγμένες επικέντρου: $40.60^\circ\text{B} - 27.00^\circ\text{A}$, κατά Bakun με πράσινο τρίγωνο (1997) και συντεταγμένες επικέντρου: $40.61^\circ\text{B} - 27.30^\circ\text{A}$ και κατά Papazachos & Papazachou (1997) με γαλάζιο τρίγωνο και συντεταγμένες : $40.74^\circ\text{B} - 27.11^\circ\text{A}$. Επιπλέον χαρτογραφήθηκαν τα μακροσεισμικά μεγέθη και οι τιμές MMI (Modified Mercalli Intensity) επί του σχήματος με κόκκινους κύκλους, οι Ισόσειστες Καμπύλες οι οποίες αναπαρίστανται με ροζ ελλειπτικούς κύκλους και το Διάστημα Εμπιστοσύνης – Απόκλιση Μακροσεισμικού Μεγέθους με λευκές καμπύλες. Με έντονη λευκή γραμμή χαρτογραφείται το ρήγμα όπου εκδηλώθηκε η διάρρηξη.



Σχήμα 5.2 Μακροσεισμικά Αποτελέσματα για τον ιστορικό σεισμό της 5^{ης} Αυγούστου 1766 στη Θάλασσα του Μαρμαρά. Κατανομή του Μακροσεισμικού Μεγέθους και των τιμών MMI (Modified Mercalli Intensity) με κόκκινους κύκλους, των Ισόσειστων Καμπυλών με ροζ ελλειπτικούς κύκλους και του Διαστήματος Εμπιστοσύνης, που ορίζεται εναλλακτικά ως Απόκλιση Μακροσεισμικού Μεγέθους με λευκές καμπύλες, για το σεισμό της 5^{ης} Αυγούστου 1766.

Ο Σεισμός της 18^{ης} Μαρτίου 1953

Ο σεισμός που εκδηλώθηκε στις 18 Μαρτίου 1953 με μέγεθος σεισμικής ροπής $M_w = 7.1$ και ώρα 19:06:16 στη ΒΔ Τουρκία, κατέστρεψε την περιοχή της Γενισέ και προκάλεσε σοβαρές βλάβες σε όλη τη χερσόνησο της Τροίας, όπου σκοτώθηκαν 268 άτομα και καταστράφηκαν ολοκληρωτικά 5000 σπίτια. Παρατηρήθηκε επιφανειακή διάρρηξη μήκους 58 km μεταξύ Γενισέ και Gonen με δεξιόστροφη οριζόντια κίνηση και μικρή βύθιση του βόρειου τμήματος. Η μέση μετάθεση που παρατηρήθηκε ήταν 2.8 cm. Παρατηρήθηκαν επίσης φαινόμενα ρευστοποίησης εδάφους έως και σε απόσταση 60 km από την περιοχή του ρήγματος. Ζημιές προκλήθηκαν επίσης στη Λέσβο, όπου 204 σπίτια υπέστησαν ολοκληρωτική καταστροφή και άλλα 354 σημαντικές βλάβες. Οι μεγαλύτερες βλάβες προκλήθηκαν στην Καλλονή και στην Κεραμιά, υποδεικνύοντας μακροσεισμική ένταση VIII (BGINOA 1953, Γαλανόπουλος 1955, Richter 1958, Ambraseys 1988b). Πολλοί μετασεισμοί ακολούθησαν το κύριο σεισμό της σεισμικής ακολουθίας της 18^{ης} Μαρτίου 1953 στη ΒΔ Τουρκία, ο μεγαλύτερος εκ των οποίων σε μέγεθος ($M=5.7$), εκδηλώθηκε την ίδια ημέρα με τον κύριο σεισμό στις 21:18. Πλέον βρισκόμαστε στην ενόργανη σύγχρονη εποχή της Σεισμολογίας, όπου τα δεδομένα των σεισμικών καταγραφών είναι απολύτως αξιόπιστα, τα στατιστικά σφάλματα εξαιρετικά μειωμένα στις σύγχρονες σεισμολογικές μελέτες σε σχέση με της μελέτες ιστορικής σεισμικότητας και επομένως τα αποτελέσματά μας προσεγγίζουν όλο και πιο ακτουαλιστικά τα μακροσεισμικά μεγέθη, τα μακροσεισμικά αποτελέσματα και τις εστιακές παραμέτρους ισχυρών σεισμών που εκδηλώθηκαν όχι μόνο στη Θάλασσα του Μαρμαρά, αλλά σε παγκόσμια κλίμακα, από το 1892 και τις αρχές του 20^{ου} αιώνα όπου δημιουργούνται τα πρώτα δίκτυα σειсмоγράφων έως σήμερα. Τα μακροσεισμικά αποτελέσματα ιστορικών σεισμών που εκδηλώθηκαν στην περίοδο της ενόργανης Σεισμολογίας και που μελετώνται στη συνέχεια για τη Θάλασσα του Μαρμαρά, βασίζονται σε δίκτυα σειсмоγράφων του εθνικού αστεροσκοπείου Αθηνών και των ερευνητικών ινστιτούτων της Κωνσταντινούπολης.

Για τη μελέτη των μακροσεισμικών αποτελεσμάτων του σεισμού της 18.3.1953 εισήχθη στο μετασχηματισμένο υπολογιστικό κώδικα μακροσεισμικών μεγεθών των Bakun & Wentworth (1997), ο κατάλογος των τιμών M_i που είναι διαθέσιμος από Papazachos et al. 1997. Ειδικότερα, τα δεδομένα των μακροσεισμικών μεγεθών που έχουν προκύψει από τις αναλύσεις των εστιακών παραμέτρων του σεισμού, λαμβάνοντας υπόψη και τις σχέσεις απόσβεσης των επιφανειακών κυμάτων για την ευρύτερη περιοχή της Θάλασσας του Μαρμαρά. Στη συνέχεια οι τιμές M_i , εισήχθησαν στον κώδικα Bakun (1997) και προέκυψαν τα αποτελέσματα υπολογισμού του Μακροσεισμικού Μεγέθους (M_i) και της Απόκλισης του Μακροσεισμικού Μεγέθους (R_i) λόγω στατιστικού σφάλματος (RMS) το οποίο βεβαίως εισήχθη στον κώδικα Bakun ως παράμετρος. Η ποσότητα $R(km)$ εκφράζει τη μέγιστη ακτινική απόσταση κατά μήκος της οποίας πραγματοποιείται η πειραματική έρευνα και η ποσότητα $s(km)$ εκφράζει το βήμα (step) λήψης των δεδομένων στον πίνακα 5.5 και έρευνας στον πίνακα 5.6, ως απόσταση εκφρασμένη σε km. Επακόλουθα, τα αποτελέσματα του πειράματος χαρτογραφούνται στο σχήμα 5.3 με τη μορφή ισόσειστων καμπυλών που βάση αυτών αναλύθηκαν επαγωγικά τα μακροσεισμικά αποτελέσματα του σεισμού της 18.3.1953 στη Θάλασσα του Μαρμαρά, από τη χερσόνησο της Τροίας έως και τα στενά του Βοσπόρου, όπου αναγράφονται ιδιαίτερα ικανοποιητικά.

<u>Σεισμός 18ης Μαρτίου 1953</u>			
N°	E°	R(km)	S(km)
27.53	40.02	250	5
N°	E°	Mi	
27.720	40.080	9.5	
27.220	39.920	9.0	
27.520	40.030	9.0	
27.520	39.970	9.0	
27.520	40.170	8.0	
27.920	40.200	8.0	
27.620	39.870	8.0	
27.070	39.820	8.0	
26.417	39.133	7.5	
26.217	39.233	7.5	
26.020	39.270	7.0	
26.370	39.020	7.0	
26.220	39.200	7.0	
25.920	39.170	7.0	
n=80	n=80	n=80	
23.350	40.820	3.5	
23.150	38.950	3.5	
22.183	39.883	3.0	
26.170	37.620	3.0	
23.470	38.720	3.0	
22.417	39.633	3.0	
23.217	39.217	3.0	
25.150	37.083	3.0	
24.050	38.617	3.0	
25.270	36.670	3.0	
23.320	38.770	3.0	
22.670	39.080	3.0	
23.017	40.633	3.0	
24.130	41.150	3.0	
23.749	37.983	3.0	
22.733	39.383	3.0	
23.470	38.780	3.0	
22.756	39.182	3.0	
25.370	37.080	3.0	
24.933	37.833	3.0	
24.370	36.700	3.0	
23.000	40.770	3.0	

Πίνακας 5.5

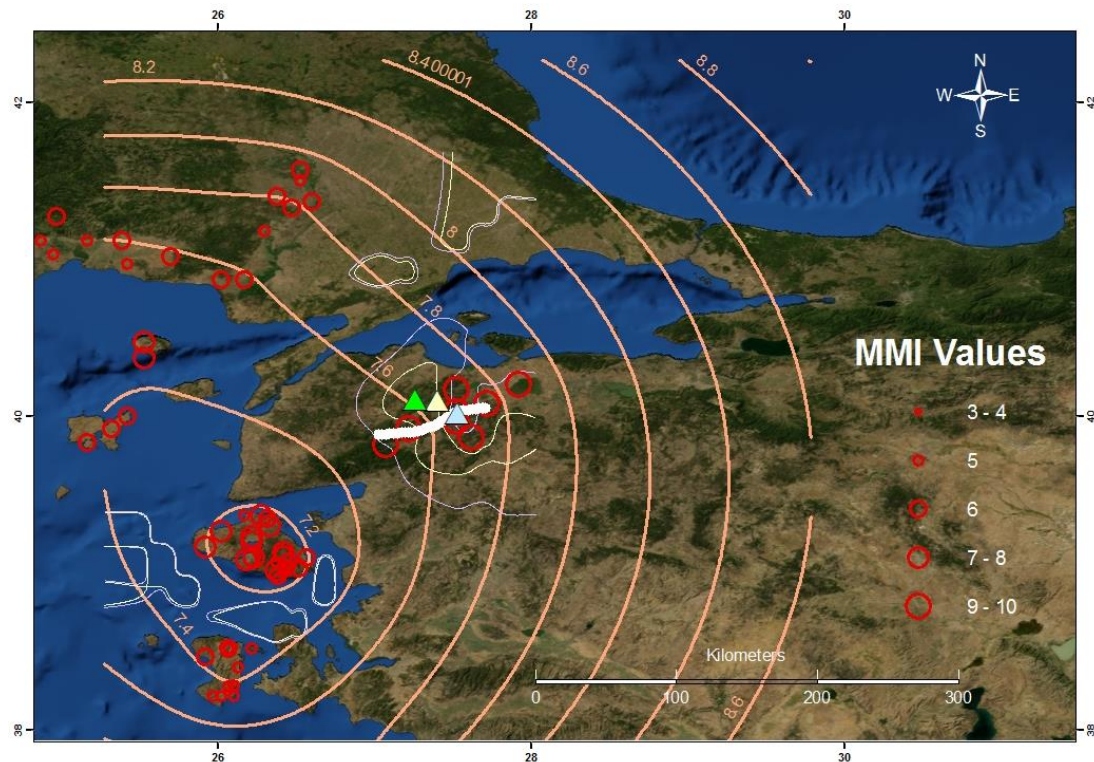
<u>Σεισμός 18ης Μαρτίου 1953</u>			
N°	E°	R(km)	S(km)
27.53	40.02	250	5
N°	E°	Mi	Ri
25.277	37.767	7.886	2.590
25.322	37.767	7.877	2.512
25.367	37.767	7.869	2.440
25.412	37.767	7.861	2.375
25.457	37.767	7.853	2.318
25.503	37.767	7.845	2.267
25.548	37.767	7.837	2.222
25.593	37.767	7.829	2.182
25.638	37.767	7.822	2.148
25.683	37.767	7.814	2.119
25.728	37.767	7.807	2.096
25.773	37.767	7.801	2.078
25.818	37.767	7.794	2.066
25.863	37.767	7.788	2.059
n=10170	n=10170	n=10170	n=10170
28.836	42.272	8.774	0.795
28.881	42.272	8.784	0.794
28.926	42.272	8.795	0.794
28.971	42.272	8.806	0.793
29.016	42.272	8.817	0.792
29.061	42.272	8.827	0.792
29.106	42.272	8.838	0.791
29.151	42.272	8.849	0.791
29.196	42.272	8.860	0.790
29.241	42.272	8.871	0.790
29.286	42.272	8.882	0.789
29.331	42.272	8.893	0.789
29.376	42.272	8.903	0.788
29.421	42.272	8.914	0.788
29.466	42.272	8.925	0.788
29.512	42.272	8.936	0.788
29.557	42.272	8.948	0.787
29.602	42.272	8.959	0.787
29.647	42.272	8.970	0.787
29.692	42.272	8.981	0.787
29.737	42.272	8.992	0.787
29.782	42.272	9.003	0.787

Πίνακας 5.6

Πίνακας 5.5: Κατάλογος των μακροσεισμικών μεγεθών που προκύπτουν από δεδομένα σειсмоγράφων της τότε εποχής και τα οποία είναι βεβαίως βασισμένα σε σεισμολογικές αναλύσεις για το σεισμό της 18.3.1953 στη χερσόνησο της Τροίας. Οι τιμές M_i που ανακτήθηκαν, εισήχθησαν στον μετασχηματισμένο κώδικα υπολογισμού μακροσεισμικού μεγέθους των Bakun & Wentworth (1997), ο οποίος λαμβάνει υπόψη τις σχέσεις σεισμικής απόσβεσης των επιφανειακών κυμάτων για την περιοχή της Θάλασσας του Μαρμαρά σύμφωνα με το μοντέλο των Papazachos & Papaioannou (1997). Τα αποτελέσματα του κώδικα στην πρώτη φάση του πειράματος μας παρέχουν στη συνέχεια τα στοιχεία M_i και R_i του πίνακα 5.6. Αξίζει να αναφέρουμε πως το πλήθος των εκτιμήσεων για τα μακροσεισμικά μεγέθη στον πίνακα 5.5 ανέρχεται στις 80. Εφόσον συγκρίνουμε τα πλήθη n των μακροσεισμικών μεγεθών ιστορικών σεισμών που προκύπτουν από ιστορικές πηγές και που δεν ξεπερνούν γενικώς τα 25 – 30 με τα πλήθη σεισμών της ενόργανης περιόδου της Σεισμολογίας όπου ξεπερνούν σε αριθμό τα 80, συνειδητοποιούμε την υψηλής ακρίβειας μελέτη μας των μακροσεισμικών αποτελεσμάτων σε πιο σύγχρονους σεισμούς συγκριτικά με τους ιστορικούς. Ωστόσο, δεν είναι λίγες οι φορές που οι ιστορικές πηγές σε σημαντικές μητροπόλεις των ιστορικών χρόνων μας παρέχουν μια πολύ πιο σαφή εικόνα των μακροσεισμικών μεγεθών και αποτελεσμάτων, όπως και των εστιακών παραμέτρων ορισμένων εξ αυτών των ιστορικών σεισμών, από ότι σειсмоγράφοι του πρώτου μισού του 20^{ου} αιώνα.

Πίνακας 5.6: Κατάλογος των πειραματικών αποτελεσμάτων για το μακροσεισμικό μέγεθος (M_i) και την απόκλιση μακροσεισμικού μεγέθους (R_i) του σεισμού της 18.3.1953. Η μέγιστη ακτινική απόσταση κατά μήκος της οποίας πραγματοποιήθηκε η μελέτη των μακροσεισμικών αποτελεσμάτων εκφράζεται από την ποσότητα R και ισούται με ακτίνα $R = 250$ km από το επίκεντρο του σεισμού. Το βήμα με το οποίο αναλύονται τα μακροσεισμικά μεγέθη είναι 5 km. Η ποσότητα n εκφράζει το πλήθος των πειραματικών αποτελεσμάτων που προέκυψαν στο τέλος της υπολογιστικής διαδικασίας και που ανέρχεται συνολικά σε 10170. Έπειτα οι τιμές αυτές χρησιμοποιήθηκαν ώστε να αποδοθούν οι ισόσειστες καμπύλες σύμφωνα με τις τιμές M_i και τα όρια εμπιστοσύνης σύμφωνα με τις τιμές R_i .

Στο σχήμα 5.3 παρατηρούμε το επίκεντρο του σεισμού κατά Ambraseys (2002) με μπλε τρίγωνο και συντεταγμένες επικέντρου: $40.10^\circ\text{B} - 27.40^\circ\text{A}$, κατά Bakun με πράσινο τρίγωνο (1997) και συντεταγμένες επικέντρου: $40.11^\circ\text{B} - 27.26^\circ\text{A}$ και κατά Papazachos & Papazachou (1997) με γαλάζιο τρίγωνο και συντεταγμένες : $40.02^\circ\text{B} - 27.53^\circ\text{A}$. Το μέγεθος σεισμικής ροπής υπολογίστηκε σε $M_w = 7.1$ και η κατανομή του μακροσεισμικού μεγέθους και των τιμών MMI (Modified Mercalli Intensity) χαρτογραφούνται επί του σχήματος με κόκκινους κύκλους. Οι Ισόσειστες Καμπύλες αναπαρίστανται με ροζ ελλειπτικούς κύκλους και το Διάστημα Εμπιστοσύνης, που ορίζεται εναλλακτικά ως Απόκλιση Μεγέθους Σεισμικής Ροπής με λευκές καμπύλες. Με έντονη λευκή γραμμή χαρτογραφείται το ρήγμα Genise όπου και εκδηλώθηκε η διάρρηξη.



Σχήμα 5.3 Μακροσεισμικά Αποτελέσματα για τον ισχυρό σεισμό της 18^{ης} Μαρτίου 1953 στη Θάλασσα του Μαρμαρά. Κατανομή του Μακροσεισμικού Μεγέθους και των τιμών MMI (Modified Mercalli Intensity) με κόκκινους κύκλους, των Ισόσειστων Καμπυλών με ροζ ελλειπτικούς κύκλους και του Διαστήματος Εμπιστοσύνης, που ορίζεται εναλλακτικά ως Απόκλιση Μακροσεισμικού Μεγέθους με λευκές καμπύλες, για το σεισμό της 18.3.1953.

Ο Σεισμός της 6^{ης} Οκτωβρίου 1964

Ο σεισμός εκδηλώθηκε στο ρήγμα Manyas την 6η Οκτωβρίου 1964 και είχε μέγεθος σεισμικής ροπής $M_w = 6.8$. Πρόκειται για έναν ιδιαίτερα καταστρεπτικό σεισμό ο οποίος προκάλεσε εκτεταμένες βλάβες στην πεδιάδα νότια της λίμνης Manyas, όπου καταστράφηκαν οι πόλεις Manyas, Salour, Bolesegak και Elida. Σκοτώθηκαν 30 άνθρωποι και τραυματίστηκαν 52 ενώ καταστράφηκαν 4000 σπίτια. Ρωγμές που παρατηρήθηκαν στο έδαφος σε μεγάλη έκταση και φαινόμενα ρευστοποίησης συνέβαλαν στην αύξηση των βλαβών. Μία συνεχής ζώνη διάρρηξης συνολικού μήκους 40 km, η οποία άρχιζε βόρεια του Gonen στα δυτικά μέχρι κοντά στο Kemalpaşa στα ανατολικά, είχε τα χαρακτηριστικά δεξιόστροφης διάρρηξης παράταξης. Έγινε αισθητός μέχρι το Βουκουρέστι, τη Βόρεια Ελλάδα, σχεδόν σε όλη τη Βουλγαρία και στα νησιά του Αιγαίου (BGİNOA 1963, Ambraseys 1988b). Την ίδια ημέρα προηγήθηκε προσεισμός του κύριου σεισμού στις 14:29 με μέγεθος $M=5.4$. Ο κύριος σεισμός εκδηλώθηκε στις 14:31:23 στη ΒΔ Τουρκία και τον διαδέχτηκαν αρκετοί μετασεισμοί, ο μεγαλύτερος των οποίων σε μέγεθος ($M = 4.8$) εκδηλώθηκε στις 15 Δεκεμβρίου και ώρα 21:03.

Ο σεισμός της 6ης Οκτωβρίου 1964 συνιστά έναν αρκετά καταστρεπτικό σεισμό για τη Θάλασσα του Μαρμαρά, ωστόσο το μέγεθος σεισμικής του ροπής δεν τον συγκαταλέγει στους ισχυρότερους. Παρά το ότι στην ευρύτερη περιοχή έχουν εκδηλωθεί πολλοί ισχυρότεροι σεισμοί σε μέγεθος σεισμικής ροπής, ο σεισμός που εκδηλώθηκε από την ολίσθηση του ρήγματος Manyas στις 6.10.1964 εξαιτίας της σεισμικής απόσβεσης που επικρατεί στην πεδιάδα της λίμνης Manyas λόγω του σημαντικού πάχους ιζημάτων και γενικότερα της γεωλογικής δομής στην επικεντρική περιοχή συνέβαλε στην πολύ υψηλή σεισμική επιτάχυνση που δέχτηκαν τα κτίρια και οι κατασκευές των πόλεων Manyas, Salour, Bolesegak και Elida και οι οποίες καταστράφηκαν ολοσχερώς.

Τα δεδομένα των μακροσεισμικών μεγεθών που χρησιμοποιήθηκαν για την εξαγωγή των ισόσειστων καμπυλών του σεισμού του Οκτωβρίου του 1964, προκύπτουν από δεδομένα σεισμολογικών καταγραφών στο δίκτυο της εγγύς περιοχής. Σύμφωνα με τη μεθοδολογία που περιεγράφηκε προηγουμένως η μελέτη των μακροσεισμικών αποτελεσμάτων στηρίχθηκε στον κατάλογο μακροσεισμικών μεγεθών που είναι διαθέσιμος από Papazachos et al. 1997. Προκειμένου να χαραχθούν οι ισόσειστες καμπύλες του σεισμού της 6.10.1964 εισήχθησαν στον υπολογιστικό κώδικα τα μακροσεισμικά μεγέθη του πίνακα 5.7 και στη συνέχεια προέκυψαν τα αποτελέσματα των τιμών Μακροσεισμικού Μεγέθους (M_i) και της Απόκλισης του Μακροσεισμικού Μεγέθους (R_i) λόγω στατιστικού σφάλματος (RMS). Η ποσότητα $R(km)$ εκφράζει τη μέγιστη ακτινική απόσταση κατά μήκος της οποίας πραγματοποιείται η πειραματική έρευνα και η ποσότητα $s(km)$ εκφράζει το βήμα (step) λήψης των δεδομένων στον πίνακα 5.6 και έρευνας στον πίνακα 5.7, ως απόσταση εκφρασμένη σε km. Τέλος, τα αποτελέσματα του πειράματος χαρτογραφήθηκαν στο σχήμα 5.4 με τη μορφή ισόσειστων καμπυλών που βάση αυτών αναλύθηκαν επαγωγικά τα μακροσεισμικά αποτελέσματα του σεισμού της 6ης Οκτωβρίου 1964 στην ευρύτερη περιοχή της Θάλασσας του Μαρμαρά και σε ακτίνα 250 km από το επίκεντρο του σεισμού.

<u>Σεισμός 6ης Οκτωβρίου 1964</u>			
N°	E°	R _(km)	S _(km)
27.53	40.02	250	5
N°	E°	Mi	
27.93	40.10	250	5
27.930	40.120	9.3	
27.970	40.080	9.3	
28.070	40.070	8.8	
27.930	40.170	8.8	
27.654	40.115	8.0	
27.570	40.200	8.0	
28.280	40.200	8.0	
27.620	40.100	8.0	
27.780	40.370	7.7	
28.000	39.830	7.5	
27.700	39.880	7.5	
27.270	39.920	7.0	
27.520	39.750	7.0	
n=80	n=80	n=80	
29.720	38.730	3.9	
28.120	38.400	3.8	
29.520	38.300	3.8	
25.570	41.030	3.8	
24.870	40.750	3.8	
30.400	38.770	3.8	
31.700	40.230	3.7	
27.680	42.170	3.6	
28.550	38.480	3.5	
31.750	39.820	3.5	
26.820	41.320	3.3	
30.550	38.980	3.3	
24.150	41.420	3.3	
26.420	39.480	3.3	
25.900	42.070	3.1	
24.970	42.400	3.1	
23.830	40.520	3.0	
24.070	42.180	3.0	
23.880	40.950	3.0	
26.580	42.300	3.0	
26.700	43.180	3.0	
27.430	43.000	3.0	

Πίνακας 5.7

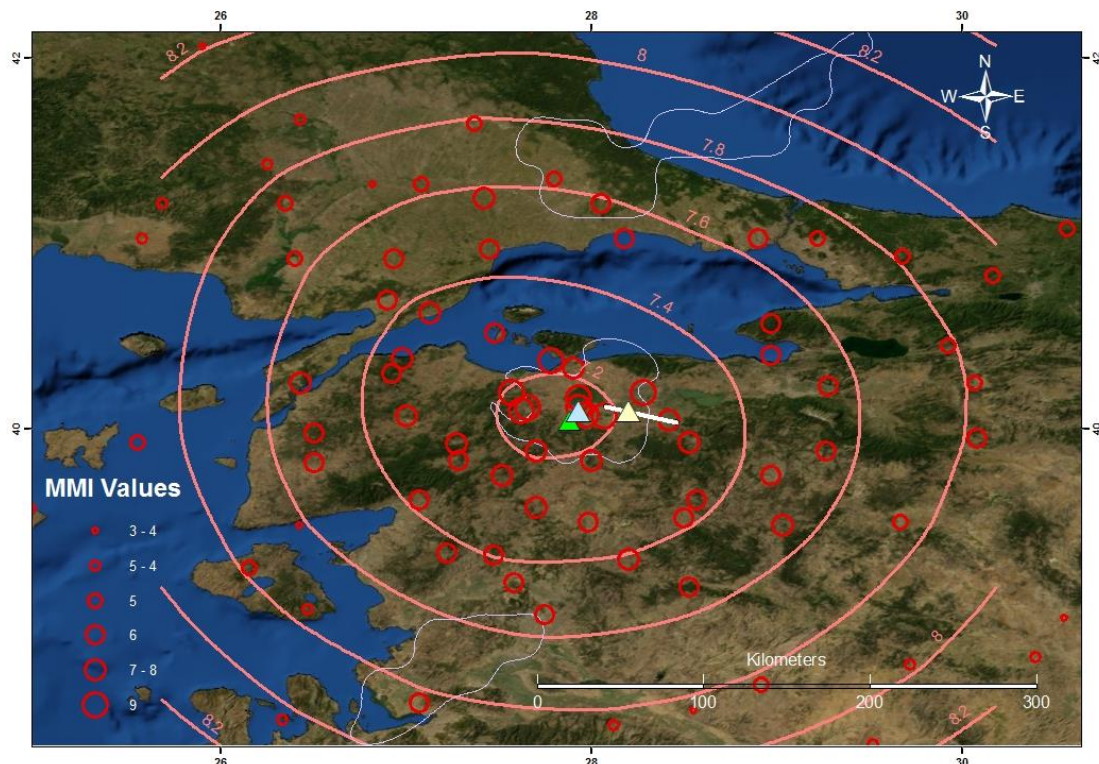
<u>Σεισμός 6ης Οκτωβρίου 1964</u>			
N°	E°	R _(km)	S _(km)
27.53	40.02	250	5
N°	E°	Mi	Ri
25.677	37.847	8.469	1.577
25.722	37.847	8.458	1.611
25.767	37.847	8.447	1.642
25.812	37.847	8.436	1.672
25.857	37.847	8.426	1.700
25.903	37.847	8.415	1.727
25.948	37.847	8.405	1.753
25.993	37.847	8.394	1.778
26.038	37.847	8.384	1.801
26.083	37.847	8.374	1.824
26.128	37.847	8.363	1.845
26.173	37.847	8.353	1.864
26.218	37.847	8.344	1.882
26.263	37.847	8.334	1.900
n=10170	n=10170	n=10170	n=10170
29.236	42.352	8.331	1.042
29.281	42.352	8.338	1.011
29.326	42.352	8.346	0.982
29.371	42.352	8.353	0.958
29.416	42.352	8.361	0.938
29.461	42.352	8.368	0.922
29.506	42.352	8.376	0.915
29.551	42.352	8.384	0.913
29.596	42.352	8.392	0.912
29.641	42.352	8.400	0.911
29.686	42.352	8.409	0.910
29.731	42.352	8.417	0.909
29.776	42.352	8.426	0.908
29.821	42.352	8.434	0.907
29.866	42.352	8.443	0.907
29.912	42.352	8.452	0.906
29.957	42.352	8.461	0.905
30.002	42.352	8.470	0.906
30.047	42.352	8.479	0.908
30.092	42.352	8.488	0.910
30.137	42.352	8.497	0.912
30.182	42.352	8.507	0.913

Πίνακας 5.8

Πίνακας 5.7: Κατάλογος των μακροσεισμικών μεγεθών που προκύπτουν από δεδομένα σειсмоγράφων του δικτύου σειсмоγράφων των μέσων του 20^{ου} αιώνα στην περιοχή της Θάλασσας του Μαρμαρά. Τα δεδομένα του πίνακα 5.7 είναι βεβαίως βασισμένα σε σεισμολογικές αναλύσεις για το σεισμό της 6.10.1964 στην πεδιάδα νότια της λίμνης Manya. Οι τιμές M_i που ανακτήθηκαν από τον κατάλογο των Papazachos et al. (1997), εισήχθησαν στον μετασχηματισμένο κώδικα υπολογισμού μακροσεισμικού μεγέθους των Bakun & Wentworth (1997), ο οποίος λαμβάνει υπόψη τις σχέσεις σεισμικής απόσβεσης των επιφανειακών κυμάτων για την περιοχή της Θάλασσας του Μαρμαρά σύμφωνα με το μοντέλο των Papazachos & Papaioannou (1997). Τα αποτελέσματα του κώδικα στην πρώτη φάση του πειράματος μας παρέχουν στη συνέχεια τα στοιχεία M_i και R_i του πίνακα 5.8. Το πλήθος των εκτιμήσεων για τα μακροσεισμικά μεγέθη στον πίνακα 5.7 ανέρχεται στις 115.

Πίνακας 5.8: Κατάλογος των πειραματικών αποτελεσμάτων για το μακροσεισμικό μέγεθος (M_i) και την απόκλιση μακροσεισμικού μεγέθους (R_i) του σεισμού της 6.10.1964. Η μέγιστη ακτινική απόσταση κατά μήκος της οποίας πραγματοποιήθηκε η μελέτη των μακροσεισμικών αποτελεσμάτων εκφράζεται από την ποσότητα R και ισούται με ακτίνα $R = 250$ km από το επίκεντρο του σεισμού. Το βήμα με το οποίο αναλύονται τα μακροσεισμικά μεγέθη είναι 5 km. Η ποσότητα n εκφράζει το πλήθος των πειραματικών αποτελεσμάτων που προέκυψαν στο τέλος της υπολογιστικής διαδικασίας και που ανέρχεται συνολικά σε 10170. Έπειτα οι τιμές αυτές χρησιμοποιήθηκαν ώστε να αποδοθούν οι ισόσειστες καμπύλες σύμφωνα με τις τιμές M_i και τα όρια εμπιστοσύνης σύμφωνα με τις τιμές R_i σε προγραμματιστικό περιβάλλον ArcGIS με αποτέλεσμα το σχήμα 5.4.

Η Κατανομή του Μακροσεισμικού Μεγέθους και των τιμών MMI (Modified Mercalli Intensity) χαρτογραφούνται επί του σχήματος 5.4 με κόκκινους κύκλους. Οι Ισόσειστες Καμπύλες με ροζ ελλειπτικούς κύκλους και η Απόκλισης του Μεγέθους Σεισμικής Ροπής με λευκές καμπύλες. Με έντονη λευκή γραμμή χαρτογραφείται το ρήγμα όπου εκδηλώθηκε η διάρρηξη. Με μπλε τρίγωνο το επίκεντρο κατά Ambraseys, με γαλάζιο κατά Papazachos και με πράσινο κατά Bakun. Ο σεισμός που εκδηλώθηκε στο ρήγμα Manyas την 6η Οκτωβρίου 1964 είχε επίκεντρο: $40.10^\circ\text{B} - 28.20^\circ\text{A}$ κατά Ambraseys (2002), $40.05^\circ\text{B} - 27.88^\circ\text{A}$ κατά Bakun (1997) και $40.10^\circ\text{B} - 27.93^\circ\text{A}$ κατά Papazachos & Papazachou (1997).



Σχήμα 5.4 Μακροσεισμικά Αποτελέσματα για το σεισμό της 6^{ης} Οκτωβρίου 1964 στη Θάλασσα του Μαρμαρά. Κατανομή του Μακροσεισμικού Μεγέθους και των τιμών MMI (Modified Mercalli Intensity) με κόκκινους κύκλους, των Ισόσειστων Καμπυλών με ροζ ελλειπτικούς κύκλους και του Διαστήματος Εμπιστοσύνης, που ορίζεται εναλλακτικά ως Απόκλιση Μακροσεισμικού Μεγέθους με λευκές καμπύλες, για το σεισμό της 6^{ης} Οκτωβρίου 1964.

Ο Σεισμός της 22^{ης} Ιουλίου 1967

Παρά το γεγονός ότι ο σεισμός της κοιλάδας Mudurnu ήταν ιδιαίτερα ισχυρός, δεν έχουμε επαρκείς αναφορές και καταγραφές της φυσικής αυτής καταστροφής, αρχικά ίσως λόγω κοινωνικοπολιτικών αναταραχών της τότε εποχής, επιπρόσθετα εξαιτίας του ότι τα μακροσεισμικά του αποτελέσματα καταγράφονται συγκριτικά πιο ήπια σε σχέση με προαναφερόμενους μικρότερους σε μέγεθος σεισμούς. Ωστόσο, σημειώθηκαν 86 θάνατοι, 332 τραυματισμοί και καταγράφηκαν 5200 ολοκληρωτικές καταστροφές κατοικιών, εκ των οποίων οι 900 βρίσκονταν στην πόλη Adapazari, στο δυτικότερο τμήμα (segment) της κύριας ζώνης διάρρηξης. Το σημαντικότερο ποσοστό κατοικιών της πλειόσειστης περιοχής κατέρρευσαν εξαιτίας της ισχυρής μετασεισμικής δραστηριότητας.

Ο σεισμός της 22^{ης} Ιουλίου 1967 αποτελεί έναν ιδιαίτερα καταστρεπτικό σεισμό με μέγεθος σεισμικής ροπής $M_w = 7.2$ και με σημαντικά υψηλή σεισμική επιτάχυνση των ελαστικών κυμάτων στην κοιλάδα Mudurnu και την ευρύτερη περιοχή της Θάλασσας του Μαρμαρά. Η ευρύτερη επικεντρική περιοχή που καλύπτεται από σημαντικό πάχος

χαλαρών ιζημάτων συνέβαλε ως ο σημαντικότερος παράγοντας στο βαθμό των μακροσεισμικών αποτελεσμάτων στην ευρύτερη περιοχή. Οι ανθρώπινες απώλειες που σημειώθηκαν, όπως προαναφέρθηκε είναι ιδιαίτερα σημαντικές, όπως και οι ανθρώπινοι τραυματισμοί καθώς και οι οικονομικές συνέπειες για τη ΒΔ Τουρκία.

Για τη μελέτη των μακροσεισμικών αποτελεσμάτων του σεισμού της 22.7.1967 εισήχθη στο μετασχηματισμένο υπολογιστικό κώδικα μακροσεισμικών μεγεθών των Bakun & Wentworth (1997), ο κατάλογος των τιμών M_i που είναι διαθέσιμος από Papazachos et al. 1997. Ειδικότερα, τα δεδομένα των μακροσεισμικών μεγεθών που έχουν προκύψει από τις αναλύσεις των εστιακών παραμέτρων του σεισμού, λαμβάνοντας υπόψη και τις σχέσεις απόσβεσης των επιφανειακών κυμάτων για την ευρύτερη περιοχή της Θάλασσας του Μαρμαρά. Στη συνέχεια οι τιμές M_i , εισήχθησαν στον κώδικα Bakun (1997) και προέκυψαν τα αποτελέσματα υπολογισμού του Μακροσεισμικού Μεγέθους (M_i) και της Απόκλισης του Μακροσεισμικού Μεγέθους (R_i) λόγω στατιστικού σφάλματος (RMS) το οποίο βεβαίως εισήχθη στον κώδικα Bakun ως παράμετρος. Η ποσότητα $R(km)$ εκφράζει τη μέγιστη ακτινική απόσταση κατά μήκος της οποίας πραγματοποιείται η πειραματική έρευνα και η ποσότητα $s(km)$ εκφράζει το βήμα (step) λήψης των δεδομένων στον πίνακα 5.5 και έρευνας στον πίνακα 5.6, ως απόσταση εκφρασμένη σε km. Επακόλουθα, τα αποτελέσματα του πειράματος χαρτογραφούνται στο σχήμα 5.5 με τη μορφή ισόσειστων καμπυλών που βάση αυτών αναλύθηκαν επαγωγικά τα μακροσεισμικά αποτελέσματα του σεισμού της 22.7.1967 στη Θάλασσα του Μαρμαρά.

<u>Σεισμός 22ης Ιουλίου 1967</u>			
N°	E°	R _(km)	S _(km)
30.81	40.63	250	5
N°	E°	Mi	
30.800	40.650	9.5	
30.880	40.620	9.5	
30.800	40.680	8.8	
31.070	40.620	8.8	
30.750	40.550	7.7	
30.730	40.550	7.7	
30.880	40.570	7.7	
30.720	40.570	7.7	
30.780	40.530	7.7	
30.770	40.530	7.7	
31.080	40.720	7.7	
30.950	40.530	7.7	
30.670	40.720	7.7	
31.030	40.530	7.7	
n=80	n=80	n=80	
32.520	40.270	4.7	
32.370	40.050	4.7	
32.180	39.870	4.7	
29.500	39.180	4.7	
29.020	39.220	4.7	
32.620	40.730	4.7	
32.500	40.950	4.7	
31.830	41.380	4.7	
26.930	39.770	4.7	
31.250	39.320	4.7	
27.250	41.280	4.7	
26.670	40.820	4.7	
26.370	40.230	4.7	
31.780	39.530	4.7	
30.320	39.200	4.7	
32.570	40.480	4.7	
32.020	39.680	4.7	
28.100	39.620	4.7	
28.330	39.270	4.7	
30.650	39.250	4.7	
31.570	41.450	4.7	
31.530	39.420	4.7	

Πίνακας 5.9

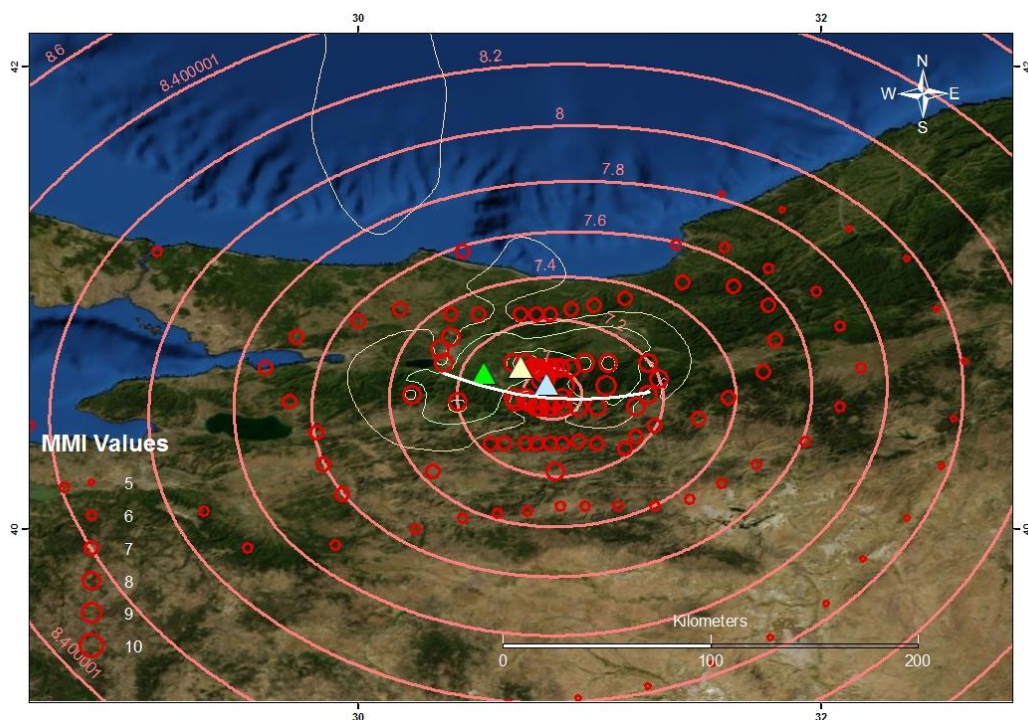
<u>Σεισμός 22ης Ιουλίου 1967</u>			
N°	E°	R _(km)	S _(km)
30.81	40.63	250	5
N°	E°	Mi	Ri
28.557	38.377	8.890	1.222
28.602	38.377	8.879	1.231
28.647	38.377	8.869	1.239
28.692	38.377	8.858	1.247
28.737	38.377	8.848	1.254
28.783	38.377	8.838	1.261
28.828	38.377	8.828	1.268
28.873	38.377	8.818	1.275
28.918	38.377	8.808	1.280
28.963	38.377	8.798	1.286
29.008	38.377	8.789	1.291
29.053	38.377	8.779	1.296
29.098	38.377	8.770	1.300
29.143	38.377	8.761	1.305
n=10170	n=10170	n=10170	n=10170
32.116	42.882	8.844	0.242
32.161	42.882	8.851	0.244
32.206	42.882	8.858	0.246
32.251	42.882	8.865	0.247
32.296	42.882	8.873	0.249
32.341	42.882	8.880	0.251
32.386	42.882	8.888	0.253
32.431	42.882	8.896	0.254
32.476	42.882	8.904	0.256
32.521	42.882	8.912	0.258
32.566	42.882	8.921	0.259
32.611	42.882	8.929	0.261
32.656	42.882	8.938	0.262
32.701	42.882	8.947	0.264
32.746	42.882	8.955	0.265
32.792	42.882	8.965	0.267
32.837	42.882	8.974	0.268
32.882	42.882	8.983	0.269
32.927	42.882	8.993	0.271
32.972	42.882	9.002	0.272
33.017	42.882	9.012	0.273
33.062	42.882	9.022	0.274

Πίνακας 5.10

Πίνακας 5.9: Κατάλογος των μακροσεισμικών μεγεθών που προκύπτουν από δεδομένα σειсмоγράφων του δικτύου σειсмоγράφων των μέσων του 20ου αιώνα στην περιοχή της Θάλασσας του Μαρμαρά. Τα δεδομένα του πίνακα 5.9 είναι βεβαίως βασισμένα σε σεισμολογικές αναλύσεις για το σεισμό της 22.7.1967 στην πεδιάδα νότια της λίμνης Manya. Οι τιμές M_i που ανακτήθηκαν από τον κατάλογο των Papazachos et al. (1997), εισήχθησαν στον μετασχηματισμένο κώδικα υπολογισμού μακροσεισμικού μεγέθους των Bakun & Wentworth (1997), ο οποίος λαμβάνει υπόψη τις σχέσεις σεισμικής απόσβεσης των επιφανειακών κυμάτων για την περιοχή της Θάλασσας του Μαρμαρά σύμφωνα με το μοντέλο των Papazachos & Papaioannou (1997). Τα αποτελέσματα του κώδικα στην πρώτη φάση του πειράματος μας παρέχουν στη συνέχεια τα στοιχεία M_i και R_i του πίνακα 5.9. Το πλήθος των εκτιμήσεων για τα μακροσεισμικά μεγέθη στον πίνακα 5.9 ανέρχεται στις 116.

Πίνακας 5.10: Κατάλογος των πειραματικών αποτελεσμάτων για το μακροσεισμικό μέγεθος (M_i) και την απόκλιση μακροσεισμικού μεγέθους (R_i) του σεισμού της 22.7.1967. Η μέγιστη ακτινική απόσταση κατά μήκος της οποίας πραγματοποιήθηκε η μελέτη των μακροσεισμικών αποτελεσμάτων εκφράζεται από την ποσότητα R και ισούται με ακτίνα $R = 250$ km από το επίκεντρο του σεισμού. Το βήμα με το οποίο αναλύονται τα μακροσεισμικά μεγέθη είναι 5 km. Η ποσότητα n εκφράζει το πλήθος των πειραματικών αποτελεσμάτων που προέκυψαν στο τέλος της υπολογιστικής διαδικασίας και που ανέρχεται συνολικά σε 10170. Έπειτα οι τιμές αυτές χρησιμοποιήθηκαν ώστε να αποδοθούν οι ισόσειστες καμπύλες σύμφωνα με τις τιμές M_i και τα όρια εμπιστοσύνης σύμφωνα με τις τιμές R_i .

Στο σχήμα 5.5 κατανέμονται το μακροσεισμικό μέγεθος και οι τιμές MMI (Modified Mercalli Intensity) με κόκκινους κύκλους, οι Ισόσειστες Καμπύλες με ροζ ελλειπτικούς κύκλους και το Διάστημα Εμπιστοσύνης, που ορίζεται εναλλακτικά ως Απόκλιση Μεγέθους Σεισμικής Ροπής με λευκές καμπύλες, για το σεισμό της 22ης Ιουλίου 1967. Με έντονη λευκή γραμμή χαρτογραφείται το ρήγμα όπου εκδηλώθηκε η διάρρηξη. Με μπλε τρίγωνο το επίκεντρο κατά Ambraseys, με γαλάζιο κατά Papazachos και με πράσινο κατά Bakun. Ο σεισμός του ρήγματος της Mudurnu που εκδηλώθηκε την 22η Ιουλίου 1967 είχε μέγεθος σεισμικής ροπής $M_w = 7.2$ και συντεταγμένες επικέντρου $40.70^\circ\text{B} - 30.70^\circ\text{A}$ κατά Ambraseys (2002), $40.67^\circ\text{B} - 30.54^\circ\text{A}$ κατά Bakun (1997) και $40.63^\circ\text{B} - 30.81^\circ\text{A}$ κατά Papazachos & Papazachou (1997).



Σχήμα 5.5 Μακροσεισμικά Αποτελέσματα (Τιμές Μακροσεισμικού Μεγέθους - MMI, Ισόσειστες Καμπύλες και Απόκλιση Μεγέθους Σεισμικής Ροπής) για τον ισχυρό σεισμό της 22^{ης} Ιουλίου του 1967 στη Θάλασσα του Μαρμαρά.

Βιβλιογραφία

1. Aki, K., 1965. Maximum likelihood estimate of b in the formula $\log N=a-bM$ and its confidence limits. Bull. Earthquake Res. Ins. 43, 237-239.
2. Albin, P., and A. Moroni (1994). Historical Investigation of European Earthquakes, Vol. 2, Pub. Istituto di Ricerca sul Rischio Sismico, Milan, 254 pp.
3. Ambraseys, N. N. (1971). Value of historical records of earthquakes, Nature 232, 375–379.
4. Ambraseys, N. (1992). Soil mechanics and engineering seismology, Proc. 2nd Natl. Conf. on Geotech. Eng., 21–23 October 1992, Thessaloniki, Greece.
5. Ambraseys, N. (2001a). Material for the investigation of the seismicity of the Marmara Sea region, NW Turkey, 1–2000, Eng. Seism. and Earth. Eng. Report no. 01.5, Dept. Civil Eng., Imperial College of Science, London.
6. Ambraseys, N. (2001b). Seismic sea-waves in the Marmara Sea region during the last 20 centuries, in Proc. NATO Advanced Research Workshop on Underwater Ground Failures on Tsunami Generation, Modeling, Risk and Mitigation, Istanbul, May 2001.
7. Ambraseys, N. (2002). The earthquake of 1509 in the Sea of Marmara, Turkey, revisited, Bull. Seism. Soc. Am. 91, no. 6, 1397–1416.
8. Ambraseys, N., and J. Douglas (2000). Reappraisal of surface wave magnitudes in the Eastern Mediterranean region and the Middle East, Geophys. J. Int. 141, 357–373.
9. Ambraseys, N., and C. Finkel (1991). Long-term seismicity of Istanbul and of the Marmara Sea region, Terra 3, 527–539.
10. Ambraseys, N., and C. Finkel (1995). The Seismicity of Turkey and Adjacent Areas: A Historical Review, 1500–1800, Eren, Istanbul, 240 pp.
11. Ambraseys, N., and J. Jackson (2000). Seismicity of the Sea of Marmara (Turkey) since 1500, Geophys. J. Int. 141, F1–F6.
12. Ambraseys, N., C. Melville (1982). A history of Persian earthquakes, Cambridge Univ. Press, New York.
13. Ambraseys, N., S. Sarma (1999). The assessment of total seismic moment, J. Earthquake Eng. 3, 439-461.
14. Ambraseys, N., and D. White (1997). The seismicity of the eastern Mediterranean region 550 to 1 BC: a re-appraisal, J. Earthquake Eng. 1, 603–632.
15. Armijo, R., Tapponnier, P., Mercier, J.L. and Han Tonglin, 1986. Quaternary extension in southern Tibet: field observations and tectonic implications. J. Geophys. Res., 91, 13,803–13,872.
16. Armijo, R., Meyer, B., King, G.C.P., Rigo, A. and Papanastassiou, D., 1996. Quaternary evolution of the Corinth Rift and its implication for the late Cenozoic evolution of the Aegean. Geophys. J. Int., 126, 11–53.

17. Armijo, R., Meyer, B., Hubert, A. and Barka, A., 1999. Westwards Propagation of the North Anatolian Fault into the Northern Aegean: Timing and kinematics. *Geology*, 27, 267–270.
18. Armijo, R., Meyer, B., Navarro, S., King, G., and Barka, A., Asymmetric slip partitioning in the Sea of Marmara pull-apart: a clue to propagation processes of the North Anatolian Fault? *Terra Nova*, 14, 80–86, 2002.
19. Bakun, W., and C. Wentworth (1997). Estimating earthquake location and magnitude from seismic intensity data, *Bull. Seism. Soc. Am.* 87, 1502–1521.
20. Barka, A. (1996). Slip distribution along the North Anatolian Fault associated with the large earthquakes of the period 1939 to 1967, *Bull. Seism. Soc. Am.* 86, 1238–1254.
21. Barka A., and K. Kadinsky-Cade (1988). Strike-slip fault geometry in Turkey and its influence on earthquake activity, *Tectonics* 7, 663–684.
22. Bintliff, J. L. (1984). Structuralism and myth in Minoan studies, *Antiquity* 58, 33–38.
23. Buck, V. (2006). Archaeoseismology in the Atalanti Region, Central Mainland Greece: Theories, Methods and Practice, BAR International Series 1552, Archaeopress, Oxford, 110 pp.
24. Castenetto, S., and F. Galadini (2001). 13 Gennaio 1915 il terremoto nella Marsica, *Publ. Servizio Sismico Nazionale*, Rome, 788 pp.
25. Cezar, M. (1963). Osmanlı devrinde İstanbul yapılarında tahribat yapan yangınlar ve tabii afetler, *Türk Sanati Tarihi Arastirma ve Incelemeleri*, İstanbul 1, 380–392.
26. Dieterich, J. H., 1994. A constitutive law for rate of earthquake production and its application to earthquake clustering. *J. Geophys. Res.* 99, 2601–2618.
27. Dieterich, J. H., Kilgore, B., 1996. Implications of fault constitutive properties for earthquake prediction. *Proc. Nat. Acad. of Sci. USA* 93, 3787–3794.
28. Ekström G. & A. Dziewonski (1988). Evidence of bias in estimation of earthquake size, *Nature* 332, 319–323.
29. Finkel, C. F., Ambraseys, N. N., 1996. The Marmara Sea earthquake of 10 July 1894 and its effect on historic buildings, *Anatolia Moderna Yeni Anadolu VII* (Bibliothèque de l'Institut Français d'Etudes Anatoliennes-Georges Dumézil, Paris), 43.
30. Finkel, C. (2000). Earthquakes of the Marmara Sea Basin: a historian's perspective, in *Proc. NATO Adv. Res. Seminar*, İstanbul, May 2000.
31. Grumel, V. (1958). *Traite d'études byzantines. I: La chronologie*, Paris.
32. Hubert-Ferrari, A., A. Barka, E. Jacques, S. Nalbant, B. Meyer, R. Armijo, P. Tapponnier, and G. King (2000). Seismic hazard in the Marmara Sea region following the 17 August 1999 Izmit earthquake, *Nature* 404, 269–273.
33. Jusseret Simon and Manuel Sintubin (2013). The Origins of an Old Myth: Sir Arthur Evans, Claude Schaeffer and the Seismic Destruction of Late Bronze Age Eastern

Mediterranean Civilizations. Seismological Research Letters Volume 84, Number 1, January/February, 2013.

34. Kanamori, H. (1977). The energy release in great earthquakes, *J. Geophys. Res.* 82, 2981–2987.

35. Kanamori, H., and D. Anderson (1975). Theoretical basis of some empirical relations in seismology, *Bull. Seism. Soc. Am.* 65, 1073–1095.

36. Ketin, I., 1969. Über die nordanatolische Horizontalverschiebung. *Bull. Min. Res. Explor. Inst. Turkey* 72, 1-28.

37. King, G. C. P., R. S. Stein, J. Lin, 1994. Static stress changes and the triggering of earthquakes, *Bull. Seismol. Soc. Amer.* 84, 935-953.

38. Le Pichon, X., T. Taymaz, and C. Sengor (2000). Important problems to be solved in the Sea of Marmara, in *Abstracts NATO Adv. Res. Seminar on Integration of Earth Sciences Research*, Istanbul, 14–17 May 2000, 66–67.

39. Lomnitz, C. (1994). *Fundamentals of Earthquake Prediction*, Wiley, New York.

40. Nalbant, S. S., A. Hubert, G. C. P. King, J. 1998. Stress coupling between earthquakes in northwest Turkey and the north Aegean Sea. *J. Geophys. Res.* 103, 24469-24486.

41. Ogata, Y., 1999. Estimating the hazard of rupture using uncertain occurrence times of paleoearthquakes, *J. Geophys. Res.* 104, 17995-18014.

42. Okada, Y., 1992. Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space, *Bull. Seismol. Soc. Am.* 82, 1018-1040.

43. Okay, A. I., A. Kaslilar-Ozcan, C. Imran, A. Boztepe-Guney, E. Demirbag, and I. Kuscu (2000). Active faults and evolving strike-slip basins in the Marmara Sea, north-west Turkey: a multichannel seismic reflection study, *Tectonophysics* 321, 189–218.

44. Papadimitriou, Eleftheria E., Papazachos, Constantinos B., 1997. Evaluation of the global applicability of the regional time – magnitude predictable seismicity model. *Bulletin of the Seismological Society of America*, August 1997, vol. 87, no.4, 799-808.

45. Papadimitriou, E.E., Karakostas, V.G, & Papazachos, B.C. Rupture zones in the area of the 17.08.99 Izmit (NW Turkey) large earthquake (Mw 7.4) and stress changes caused by its generation. *Journal of Seismology* 5: 269–276, 2001.

46. Papadimitriou E., Karakostas V., Tranos M., Rangelov B., Gospodinov D., 2006. Static stress changes associated with normal faulting earthquakes in South Balkan area. *Int. J. Earth Sci. (Geol Rundsch)*, 20th October 2006.

47. Papadopoulos, J. K. (2005). Inventing the Minoans: Archaeology, modernity and the quest for European identity, *J. Mediterr. Archaeol.* 18, 87–149.

48. Papadopoulos, G. A. (2011). *A Seismic History of Crete: The Hellenic Arc and Trench*, Ocelotos, Athens, 415 pp.

49. Papazachos, B. C., and P. E. Comninakis (1969). Geophysical features of the Greek Island Arc and Eastern Mediterranean Ridge, *Com. Ren. Séances Conf. Reunie Madrid* 16, 74–75.
50. Papazachos, B. C., V. G. Karakostas, A. A. Kiratzi, B. N. Margaris, C. B. Papazachos, and E. M. Scordilis (2002). Uncertainties in the estimation of earthquake magnitudes in Greece, *J. Seismol.* 6, 557–570.
51. Papazachos, B. C., A. A. Kiratzi, and B. G. Karakostas (1997). Toward a homogeneous moment-magnitude determination for earthquakes in Greece and surrounding area, *Bull. Seismol. Soc. Am.* 87, 474–483.
52. Papazachos C., Papaioannou Ch, (1997). The Macroseismic Field of the Balkan Area. *Journal of Seismology*, October 1997, Volume 1, Issue 2, pp 181-201.
53. Parke, J. R., Minshull, T. A., Anderson, G., White, R. S., McKenzie, D., Kuscü, I., Bull, J. M., Gorur, N., Sengör, C., 1999. Active faults in the Sea of Marmara, western Turkey, imaged by seismic reflection profiles. *Terra Nova*, 11, 223-227.
54. Parsons, T., Stein, R. S., Simpson, R. W., Reasenber, P. A., 1999. Stress sensitivity of fault seismicity: A comparison between limited-offset oblique and major strike-slip faults. *J. Geophys. Res.* 104, 20183-20202.
55. Parsons, T., S. Toda, R. Stein, A. Barka, and J. Dieterich (2000). Heightened odds of large earthquakes near Istanbul: an interaction-based probability calculation, *Science* 288, 661–665.
56. Reasenber, P. A., R. W. Simpson, 1992. Response of regional seismicity to the static stress change produced by the Loma Prieta earthquake. *Science* 255, 1687-1690.
57. Refik, A. (1935). On altinci asirda Istanbul hayati, Devlet Basimevi, Istanbul.
58. Reilinger, R., S. McClusky, and M. Oral, et al. (1997). Global Positioning System measurements of present-day crustal movements in the Arabia-Africa-Eurasia plate collision zone, *J. Geophys. Res.* 102, 9983–9999.
59. Sintubin, M. (2011). Archaeoseismology: Past, present and future, *Quaternary Int.* 242, 4–10.
60. Smith, A., F. Oktay, T. Taymaz, J. Jackson, H. Basaran, B. Alpar, M. Simsek, and S. Kara (1995). High resolution seismic profiling in the Sea of Marmara–NW Turkey: Late Quaternary sedimentation and sea level changes, *Geol. Soc. Am. Bull.* 197, 923–936.
61. Savage, J. C., 1991. Criticism of some forecasts of the National Earthquake Prediction Evaluation Council. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 81, 862-881.
62. Stein, R. S., 1999. The role of stress transfer in earthquake occurrence, *Nature* 402, 605-609.
63. Stein, R. S., Barka, A. A., Dieterich, J. H., 1997. Progressive failure on the North Anatolian fault since 1939 by earthquake stress triggering. *Geophys. J. Int.* 128,594-604.

64. Straub, C. (1996). Recent crustal deformation and strain accumulation in the Marmara Sea region, NW Anatolia, inferred from GPS measurements, *Mitteil. Inst. Geod. and Photogramm. ETH*, no. 58, Zurich.
65. Straub, C., Kahle, H.-G., Schindler, C., 1997. GPS and geological estimates of the tectonic activity in the Marmara Sea region, NW Anatolia, *J. Geophys. Res.* 102, 27587-27601.
66. Stucchi, M. (1993). Historical investigation of European Earthquakes, Vol. 1, Pub. Istituto di Ricerca sul Rischio Sismico, Milan, 258 pp.
67. Taymaz, T., J. Jackson, and D. McKenzie (1991). Active tectonics of the north and central Aegean Sea, *Geophys. J. Int.* 106, 433–490.
68. Toksoz, M. N., Shakal, A. F., Michael, A. J., 1979. Space-time migration of earthquakes along the North Anatolian fault zone and seismic gaps. *Pageoph* 117, 1258-1270.
69. Vere-Jones, D. (1987). Statistical aspects of the analysis of historical earthquake catalogues, in *Historical Seismicity of the Central-Eastern Mediterranean Region*, C. Margottini and L. Serva (Editors), Rome, pp. 271–295.
70. Vogt, J. (1996). The weight of pseudo-objectivity, *Ann. Geofisica* 39, 1005–1011.
71. Walcott, R. I. (1984). The kinematics of plate boundaries through New Zealand: a comparison of the short and long term deformation, *Geophys. Journ.* 79, 613–663.
72. Wald, D. J., V. Quitoriano, T. H. Heaton, H. Kanamori, 1999. Relationships between peak ground acceleration, peak ground velocity, and modified Mercalli intensity in California. *Earthquake Spectra* 15, 557-564.
73. Wason, H. R., R. Das, and M. L. Sharma (2012). Magnitude conversion problem using general orthogonal regression, *Geophys. J. Int.* 190, 1091–1096.
74. Wells, D. L., Coppersmith, K. J., 1994. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. *Bull. Seismol. Soc. Amer.* 84, 974-1002.
75. Wesnousky, S., C. Scholtz, K. Shimazaki, and T. Matsuda (1983). Earthquake frequency distribution and mechanics of faulting, *J. Geophys. Res.* 88, 9331–9340.
76. Wesnousky, S. G., 1999. Crustal deformation processes and the stability of the Gutenberg-Richter relationship. *Bull. Seismol. Soc. Amer.* 89, 1131-1137.
77. Wessel, P., and W. H. F. Smith (1998). New, improved version of the Generic Mapping Tools released, *Eos Trans. AGU* 79, 579.
78. Wessel P., W.H.F. Smith, R. Scharroo, J. Luis and F.Wobbe (2013), GMT 5, v 5.1.1 (2014). Generic Mapping Tools: Improved Version Released. doi: 10.1002/2013EO450001
79. White, D. P. (2000). Quality evaluation of sources for historical earthquakes in the East Mediterranean, Ph.D. Thesis, University of London.

80. Wiemer, S., and M. Wyss (2000). Minimum magnitude of completeness in earthquake catalogs: Examples from Alaska, the Western United States, and Japan, *Bull. Seismol. Soc. Am.* 90, no. 4, 859–869.
81. Woessner, J., and S. Wiemer (2005). Assessing the quality of earthquake catalogs: Estimating the magnitude of completeness and its uncertainty, *Bull. Seismol. Soc. Am.* 95, 684–698.
82. Wong, H., E. Ludmann, T. Ulug, and E.Ozel (1995). The Sea of Marmara: a boundary sea in an escape tectonic regime, *Tectonophysics* 244, 231–250.
83. Yadav, R. B. S., P. Bormann, B. K. Rastogi, M.C. Das, and S. Chopra (2009). A homogeneous and complete earthquake catalog for northeast India and the adjoining region, *Seismol. Res. Lett.* 80.
84. Zechar, J. D. (2010). Evaluating earthquake predictions and earthquake forecasts: A guide for students and new researchers, *Community Online Resource for Statistical Seismicity Analysis*, 10.5078/77337879.
85. Παπαζάχος Βασίλης και Παπαζάχου Κατερίνα (2003) ‘‘Οι Σεισμοί της Ελλάδας’’. Εκδόσεις Ζήτη 2003. ISBN: 9604318470

Προγραμματιστικά Περιβάλλοντα

1. ArcGIS v.10.2.2, ESRI (2014).
2. GMT 5, v 5.1.1 (2014). Generic Mapping Tools: Improved Version Released. Paul Wessel1, W.H.F. Smith, R. Scharroo, J. Luis and F.Wobbe (2013) doi: 10.1002/2013EO450001



Η Αγία Σοφία & τα στενά του Βοσπόρου. Έργο ανώνυμου καλλιτέχνη.

Κωνσταντινούπολη, αρχές 19^{ου} αιώνα.