

ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ



ΕΥΑΓΓΕΛΙΑ Θ. ΧΑΡΑΛΑΜΠΙΔΟΥ

Η ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΑΚΟΛΟΥΘΙΑ ΤΗΣ ΘΑΛΑΣΣΑΣ ΤΟΥ ΜΑΡΜΑΡΑ
(26 ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΥ 2019, M=5.7)

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ



ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ

2020





ΕΥΑΓΓΕΛΙΑ Θ. ΧΑΡΑΛΑΜΠΙΔΟΥ
Φοιτήτρια Τμήματος Γεωλογίας, ΑΕΜ: 5333

Η ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΑΚΟΛΟΥΘΙΑ ΤΗΣ ΘΑΛΑΣΣΑΣ ΤΟΥ ΜΑΡΜΑΡΑ (26 ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΥ 2019, M=5.7)

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας, Τομέα Γεωφυσικής

Επιβλέπων καθηγητής

ΣΚΟΡΔΥΛΗΣ ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ



© Ευαγγελία Θ. Χαραλαμπίδου, Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ., Τομέας Γεωφυσικής, 2020
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

Η ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΑΚΟΛΟΥΘΙΑ ΤΗΣ ΘΑΛΑΣΣΑΣ ΤΟΥ ΜΑΡΜΑΡΑ (26
ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΥ 2019, $M=5.7$) – *Διπλωματική Εργασία*

© Evangelia T. Charalampidou, School of Geology, Dept. of Geophysics, 2020
All rights reserved.

THE EARTHQUAKE SEQUENCE OF MARMARA SEA (26 SEPTEMBER 2019,
 $M=5.7$) – *Bachelor Thesis*



ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Πρόλογος.....	7
Ευχαριστίες.....	8
Περίληψη.....	9
Abstract.....	10
1. ΜΕΛΕΤΗ ΤΩΝ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΑΚΟΛΟΥΘΙΩΝ.....	11
1.1 Εισαγωγικές έννοιες και ορισμοί.....	11
1.2 Χωρική κατανομή σεισμών.....	14
1.3 Κατά μέγεθος κατανομή σεισμών.....	15
1.4 Χρονική κατανομή σεισμών.....	17
1.5 Χωρο-χρονική κατανομή σεισμών.....	18
1.6 Χρονική μεταβολή του μέσου μεγέθους.....	19
2. ΜΑΚΡΟΣΕΙΣΜΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	20
2.1 Γενικές πληροφορίες περιοχής.....	20
2.1.1 Το Ρήγμα της Βόρειας Ανατολίας.....	23
2.2 Στοιχεία του σεισμού.....	24
2.3 Επιπτώσεις σεισμού.....	26
2.4 Ιστορικοί σεισμοί.....	28
3. ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΑΚΟΛΟΥΘΙΑΣ ΤΗΣ ΘΑΛΑΣΣΑΣ ΤΟΥ ΜΑΡΜΑΡΑ.....	31
3.1 Δεδομένα παρατήρησης.....	31
3.2 Κατά μέγεθος κατανομή.....	31
3.3 Χωρική κατανομή (Space distribution).....	34
3.3.1 Γεωγραφική (οριζόντια) κατανομή.....	34
3.3.2 Κατακόρυφη κατανομή.....	36
3.4 Χρονική κατανομή (Time distribution).....	39
3.5 Κατανομή μέσου μεγέθους (Mean magnitude).....	42
3.6 Χωρο-χρονική κατανομή (Space-time distribution).....	43
4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	45



ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	46
ΙΣΤΟΣΕΛΙΔΕΣ.....	47
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	49



ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Στο πλαίσιο αυτής της διπλωματικής εργασίας πραγματοποιήθηκε μελέτη της σεισμικής ακολουθίας στη θάλασσα του Μαρμαρά, που συνόδευσε το σεισμό μεγέθους $M=5.7$ και σημειώθηκε στις 26 Σεπτεμβρίου 2019 στην περιοχή. Η μελέτη αυτή στοχεύει στη εξαγωγή συμπερασμάτων που αφορούν την εν λόγω σεισμική ακολουθία, όπως αυτά προκύπτουν από τη μελέτη των χαρακτηριστικών της παραμέτρων.

- Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται γενική περιγραφή των κύριων χαρακτηριστικών των σεισμικών ακολουθιών καθώς και των τρόπων ανάλυσης και μελέτης τους.
- Στο δεύτερο κεφάλαιο δίδονται τα γενικά στοιχεία του κύριου σεισμού και της σεισμικής ακολουθίας, πληροφορίες για το σεισμογόνο χώρο που μελετήθηκε, γίνονται αναφορές σε ιστορικούς σεισμούς της περιοχής, ενώ περιγράφονται οι επιπτώσεις αυτής της σεισμικής δραστηριότητας.
- Στο τρίτο κεφάλαιο επιχειρείται αναλυτική μελέτη των παραμέτρων της σεισμικής ακολουθίας της θάλασσας του Μαρμαρά. Εξετάζεται η κατανομή των σεισμών-μελών της τόσο κατά μέγεθος αλλά και χωρικά, χρονικά και χωρο-χρονικά. Έτσι, προκύπτουν πληροφορίες που αφορούν τις διαστάσεις και τη γεωμετρία του σεισμικού ρήγματος αλλά και τον τρόπο που η ακολουθία εξελίχθηκε χρονικά αλλά και χωρικά πάνω στο σεισμικό ρήγμα. Με τη διαδικασία αυτή προέκυψαν χρήσιμα συμπεράσματα σχετικά με την «ταυτότητα» της ακολουθίας.
- Στο τέταρτο κεφάλαιο συνοψίζονται τα αποτελέσματα της μελέτης της σεισμικής ακολουθίας με την παράθεση των συμπερασμάτων που προέκυψαν από την επεξεργασία που περιεγράφηκε προηγουμένως.



ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ευχαριστώ θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή, κ. Σκορδύλη Εμμανουήλ, του οποίου η συμβολή και η επιστημονική καθοδήγηση ήταν καθοριστικές για την διεκπεραίωση της διπλωματικής εργασίας.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στις 26 Σεπτεμβρίου 2019 και ώρα 10:59 GMT εκδηλώθηκε ισχυρός σεισμός, μεγέθους $M=5.7$, κοντά στην Κωνσταντινούπολη και συγκεκριμένα 70 χιλιόμετρα δυτικά της Πόλης και νότια της Σηλυβρίας, με επίκεντρο στη Θάλασσα του Μαρμαρά. Η εργασία εξετάζει τα σεισμικά χαρακτηριστικά και τις ιδιότητες της (μετα)σεισμικής ακολουθίας.

Ο κύριος σεισμός της ακολουθίας προκλήθηκε από ένα δεξιόστροφο ρήγμα οριζόντιας μετατόπισης (τμήμα του ρήγματος της Βόρειας Ανατολίας), μήκους περίπου 12 km, με διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ, προκαλώντας ζημιές σε κτήρια, προβλήματα στις τηλεπικοινωνίες και τραυματισμούς ανθρώπων.

Ο κύριος σεισμός της ακολουθίας εκδηλώθηκε στο ένα άκρο του σεισμικού ρήγματος, ενώ η μετασεισμική δράση επεκτάθηκε στο άλλο άκρο του, όπου σημειώθηκε και ο μεγαλύτερος μετασεισμός, διαμορφώνοντας έτσι χαρακτηριστικά μονοκατευθυντικής διάρρηξης. Ο ισχυρότερος μετασεισμός (26/10/19, 19:18 GMT, $M=4.2$) εκδηλώθηκε κοντά στο μέσο του σεισμογόνου χώρου.

Για την αναλυτική μελέτη της σεισμικής ακολουθίας εξετάστηκαν διάφοροι παράμετροι. Πιο συγκεκριμένα, η χωρική κατανομή των εστιών των σεισμών, η κατανομή τους με το χρόνο (ρυθμός εκδήλωσης σεισμών στη μονάδα του χρόνου), η κατανομή της τιμής του μέσου μεγέθους των μετασεισμών, καθώς και η απεικόνιση εγκάρσιας και διαμήκους τομής του σεισμογόνου χώρου για μία πιο αξιόπιστη περιγραφή της γεωμετρίας και των διαστάσεων του σεισμικού ρήγματος.

Από την μελέτη της εν λόγω σεισμικής ακολουθίας, προέκυψαν συμπεράσματα περί ομαλής εξέλιξης της ακολουθίας, γεγονός που πιστοποιείται από τις διαστάσεις του σεισμογόνου χώρου, από τη χρονική κατανομή των μετασεισμών αλλά και από τα μεγέθη των ίδιων των μετασεισμών.



ABSTRACT

On September 26, 2019 at 10:59 GMT a strong earthquake of magnitude $M=5.7$, occurred close to Istanbul and specifically, 70 kilometers west of it and south of Silivri, with epicenter at Marmara Sea. This work investigates the characteristics and properties of the (after)shock sequence.

The main shock of the sequence was produced by a right-lateral fault (segment of the North Anatolia Fault zone) of about 12 km length and NW-SE direction, causing damages to buildings, problems with telecommunications and human injuries.

The fault rupture was unilateral, meaning that the focus of the mainshock was located close to the one edge of the fault with the rupture propagating towards the other. The strongest aftershock (26/10/19, 19:18 GMT, $M=4.2$) occurred very close to the middle of the seismogenic volume.

Various parameters were considered for the study of this seismic sequence. Specifically, the foci distribution of its member-shocks in space and with time, the time variation of their mean magnitude as well as longitudinal and cross sections of the seismogenic volume for a more detailed and reliable description of the seismic fault.

The study of this seismic sequence showed evidence of normal evolution, which was verified by the dimensions of the seismogenic volume as well as by the time and the magnitude distribution of its aftershocks.

1. ΜΕΛΕΤΗ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΑΚΟΛΟΥΘΙΩΝ

1.1 Εισαγωγικές Έννοιες και Ορισμοί

➤ **Σεισμός** είναι η δόνηση του εδάφους που δημιουργείται κατά την παροδική διατάραξη της μηχανικής ισορροπίας των πετρωμάτων, η οποία οφείλεται σε φυσικά αίτια που βρίσκονται στο εσωτερικό της Γης. Η διατάραξη αυτή προκαλείται κατά τη σχετική ολίσθηση του ενός τεμάχους του *σεισμικού ρήγματος* ως προς το άλλο, ενώ η εδαφική δόνηση οφείλεται στα ελαστικά (σεισμικά) κύματα που παράγονται κατά τη διάρκεια της ολίσθησης αυτής. Τα σεισμικά κύματα διαδίδονται στο εσωτερικό της Γης και αναδύονται στην επιφάνειά της, προκαλώντας δονήσεις που, πολλές φορές, γίνονται αισθητές. Ένας σεισμός, είτε μεμονωμένος είτε ως μέλος μίας σεισμικής ακολουθίας, δημιουργείται επί το πλείστον σε ενεργά προϋπάρχοντα ρήγματα. Η δημιουργία του οφείλεται στην απότομη υπερνίκηση της στατικής τριβής, κάτω από ένα καθεστώς συνεχώς αυξανόμενων τεκτονικών τάσεων, που αναπτύσσεται μεταξύ των τεμαχών του εκάστοτε ρήγματος και στην ξαφνική ολίσθηση του ενός τεμάχους ως προς το άλλο. Στην περιοχή του ενεργού ρήγματος, πριν από τη γένεση του κύριου σεισμού, τα γύρω πετρώματα βρίσκονται σε κατάσταση ελαστικής παραμόρφωσης. Όταν οι ασκούμενες τάσεις στο υλικό, δηλαδή στα πετρώματα, υπερβούν το όριο αντοχής του, ή την δύναμη στατικής τριβής που συγκρατεί τα δύο τεμάχη προϋπάρχοντος ρήγματος μεταξύ τους, τότε προκαλείται διάρρηξη στο πέτρωμα ή πραγματοποιείται ολίσθηση πάνω σε προϋπάρχον ρήγμα που συνοδεύεται με την εκδήλωση σεισμού.

➤ **Μέγεθος (M)** ενός σεισμού είναι ένα μέτρο που περιγράφει την «ισχύ» του και συνδέεται άμεσα με την ενέργεια που εκλύεται κατά τη γένεσή του. Η τιμή του μεγέθους προσδιορίζεται με μετρήσεις διαφόρων παραμέτρων (πλατών, περιόδων, διάρκειας, κλπ.) των σεισμικών κυμάτων που καταγράφονται σε σεισμολογικούς σταθμούς.



- Ο χώρος που παραμορφώνεται ελαστικά πριν την γένεση του κύριου σεισμού και στον οποίο λαμβάνει χώρα η διάρρηξη (πλαστική παραμόρφωση) και απελευθερώνεται η συσσωρευμένη ενέργεια, χαρακτηρίζεται ως **σεισμογόνος χώρος**.
- Η ολίσθηση των δύο πλευρών του σεισμικού ρήγματος ξεκινάει από ένα σημείο της επιφάνειάς του που ονομάζεται **εστία** του σεισμού.
- Η κατακόρυφη προβολή της εστίας πάνω στην επιφάνεια της Γης αποτελεί το **επίκεντρο** του σεισμού.
- Ο χώρος που ορίζεται από οι εστίες του κύριου σεισμού και των μετασεισμών του ονομάζεται **μετασεισμικός χώρος** και σχεδόν ταυτίζεται με το σεισμογόνο χώρο.
- Η προβολή του μετασεισμικού χώρου στην επιφάνεια της Γης ορίζεται ως **μετασεισμική περιοχή**. Συνήθως, το σχήμα της περιοχής είναι ελλειπτικό και ο μεγάλος άξονας της έλλειψης είναι παράλληλος με το σεισμογόνο ρήγμα.
- Όταν οι σεισμοί εκδηλώνονται σε περιορισμένο χώρο και κατά ορισμένο χρονικό διάστημα, τότε συνιστούν μία **σεισμική ακολουθία**.
- **Κύριος σεισμός** μιας ακολουθίας είναι ο σεισμός που διακρίνεται από τους υπολοίπους σεισμούς της ακολουθίας, διότι το μέγεθος του είναι **αισθητά μεγαλύτερο** από τα μεγέθη των υπόλοιπων σεισμών της.

Οι σεισμικές ακολουθίες διακρίνονται σε τρεις (3) κατηγορίες:

1. **Μετασεισμική ακολουθία:** Ορίζεται ως το σύνολο των μικρότερων σεισμών που ακολουθούν τον κύριο σεισμό και ονομάζονται **μετασεισμοί**.
2. **Προσεισμική ακολουθία:** Είναι το σύνολο των μικρότερων σεισμών (προσεισμοί) που εκδηλώνονται με αυξανόμενη συχνότητα στο σεισμογόνο χώρο πριν την εκδήλωση του κύριου σεισμού.
3. **Σμηνοακολουθία/Σμηνοσειρά:** Είναι το σύνολο των σεισμών που εκδηλώνεται με μεγάλη συχνότητα σε περιορισμένο χώρο και χρόνο, χωρίς όπως κάποιος από αυτούς να έχει αισθητά μεγαλύτερο μέγεθος από τους υπόλοιπους ώστε να χαρακτηριστεί ως κύριος σεισμός.

Σε μία σεισμική ακολουθία, οι προσεισμοί μπορούν να ξεκινήσουν μερικές ώρες ή ακόμη και λίγους μήνες πριν από τον κύριο σεισμό, ενώ οι μετασεισμοί είναι δυνατόν να έχουν διάρκεια μερικών εβδομάδων ή κάποιων μηνών. Η διάρκεια της μετασεισμικής ακολουθίας συνδέεται με το *εστιακό βάθος*, το *μέγεθος του κύριου σεισμού* και την *γενικότερη τεκτονική κατάσταση* της εκάστοτε περιοχής. Η κατάσταση αυτή αφορά το επίπεδο των τάσεων και τη δυνατότητα ελαστικής παραμόρφωσης των πετρωμάτων, επηρεάζοντας έτσι τον τρόπο γένεσης των μετασεισμών, την διάρκεια και την κατά μέγεθος κατανομή τους.

Έχει διαπιστωθεί ότι οι κύριοι σεισμοί που εκδηλώνονται στην λιθόσφαιρα (0 – 60 km) συνοδεύονται κατά βάση από μετασεισμούς ή ακόμη και προσεισμούς, εν αντιθέσει στους σεισμούς ενδιάμεσου ή μεγάλου βάθους στους οποίους σπανίως εμφανίζονται (Papazachos et al., 1967).

Η μελέτη μίας σεισμικής διέγερσης περιλαμβάνει τα ακόλουθα:

1. Την χωρική κατανομή (οριζόντια-κατακόρυφη) των εστιών των σεισμών της
2. Την κατά μέγεθος κατανομή τους
3. Την χρονική τους κατανομή
4. Την χωρο-χρονική τους κατανομή
5. Τη χρονική μεταβολή της τιμής των μεγεθών τους

Η εξέταση των παραπάνω κατανομών στοχεύει στην άντληση πληροφοριών σχετικά με τις διαστάσεις του σεισμογόνου χώρου της ακολουθίας (έξαρσης) και με την πορεία εξέλιξής της. Για να έχει πρακτική σημασία η μελέτη μιας σεισμικής έξαρσης, πρέπει αυτή να διεξάγεται σε σχεδόν πραγματικό χρόνο (κατά την εξέλιξη της έξαρσης), ώστε σε σύντομο χρονικό διάστημα, έπειτα από την εκδήλωση ενός ισχυρού σεισμού, να γίνεται δυνατή η αναγνώριση των χαρακτηριστικών της ακολουθίας, με απώτερο σκοπό την εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων επιστημονικής αλλά και πρακτικής σημασίας που αφορούν την εξέλιξη της.

1.2 Χωρική κατανομή σεισμών

Οι σεισμοί κατά κύριο λόγο εκδηλώνονται σε ενεργά ρήγματα που ανήκουν στα δύο παγκόσμια συστήματα ζωνών διάρρηξης, στο *ηπειρωτικό σύστημα διάρρηξης* και στο *σύστημα μεσο-ωκεάνιων ράχων*. Μετά από την εκδήλωση ενός ισχυρού σεισμού είναι δυνατόν να δημιουργηθούν επιφανειακές διαρρήξεις, οι οποίες μπορεί να δώσουν πληροφορίες για τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του σεισμικού ρήγματος. Ωστόσο, αν ο σεισμός δεν είναι τόσο ισχυρός ώστε να προκαλέσει επιφανειακές διαρρήξεις, ή αν είναι υποθαλάσσιος, οι πληροφορίες για τις ιδιότητες του ρήγματος και τις διαστάσεις του σεισμογόνου χώρου (μήκος, πλάτος, αζιμούθιο) θα εξαχθούν μέσω της μελέτης της χωρικής κατανομής των εστιών των μετασεισμών της σεισμικής ακολουθίας. Ο συσχετισμός αυτών των στοιχείων με τις διαστάσεις του σεισμικού ρήγματος και το μέγεθος του κύριου σεισμού της ακολουθίας, προσφέρει χρήσιμα συμπεράσματα για την εξέλιξή της.

Διακρίνονται δύο (2) είδη χωρικής κατανομής:

1. **Οριζόντια** (ή **γεωγραφική**) **κατανομή** της σεισμικής δραστηριότητας που περιγράφεται με χάρτη επικέντρων των σεισμών της ακολουθίας
2. **Κατακόρυφη κατανομή** της σεισμικής δραστηριότητας που περιγράφεται με δύο κατακόρυφες τομές, στις οποίες προβάλλονται οι εστίες των σεισμών της ακολουθίας: μια πάνω σε ένα κατακόρυφο επίπεδο, κάθετο στη παράταξη του σεισμικού ρήγματος και μία άλλη πάνω σε ένα άλλο κατακόρυφο επίπεδο, παράλληλο προς αυτήν.

Από αυτές τις κατανομές, δίδονται στοιχεία για τη διεύθυνση και κλίση του σεισμικού ρήγματος αλλά και για τις διαστάσεις του σεισμογόνου χώρου της σεισμικής ακολουθίας (μήκος-πλάτος), οι οποίες αντιπροσωπεύουν τις αντίστοιχες διαστάσεις του σεισμικού ρήγματος και οι οποίες μπορούν να επαληθευτούν μέσω κατάλληλων εμπειρικών μαθηματικών σχέσεων. Μέσω αυτών των σχέσεων, συνδέονται το μέγεθος M του σεισμού και οι παράμετροι του ρήγματος (μήκος, πλάτος, εμβαδόν, ολίσθηση), που εξαρτώνται από τον τύπο της διάρρηξης (ρήγματα κλίσης, ρήγματα οριζόντιας μετατόπισης) και το γεωτεκτονικό καθεστώς την περιοχής (ενδοπλακικοί ή οριοπλακικοί σεισμοί).

Έχουν προταθεί αξιόπιστες εμπειρικές σχέσεις μεταξύ του μεγέθους M του κύριου σεισμού και των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του σεισμογόνου ρήγματος, όπως είναι το πραγματικό μήκος ρήγματος L (σε km), το πραγματικό πλάτος του W (σε km), το εμβαδόν επιφάνειας μετασεισμικής περιοχής S (σε km^2) καθώς και η μετατόπιση στην εστία (πραγματική μετατόπιση u σε cm). Τέτοιες σχέσεις είναι οι ακόλουθες:

▪ Για ρήγματα οριζόντιας μετατόπισης

$$\text{Log } L = 0.59M - 2.30, \quad \text{για } 5.8 \leq M \leq 8.1 \quad (1)$$

$$\text{Log } u = 0.68M - 2.59, \quad \text{για } 6.0 \leq M \leq 8.0 \quad (2)$$

$$\text{Log } w = 0.23M - 0.49, \quad \text{για } 6.0 \leq M \leq 8.0 \quad (3)$$

$$\text{Log } S = 0.82M - 2.79, \quad \text{για } 6.0 \leq M \leq 8.0 \quad (4)$$

▪ Για ρήγματα κλίσης σε ηπειρωτικές περιοχές

$$\text{Log } L = 0.50M - 1.86, \quad \text{για } 5.8 \leq M \leq 7.8 \quad (5)$$

$$\text{Log } u = 0.72M - 2.82, \quad \text{για } 6.0 \leq M \leq 7.5 \quad (6)$$

$$\text{Log } w = 0.28M - 0.70, \quad \text{για } 6.0 \leq M \leq 7.5 \quad (7)$$

$$\text{Log } S = 0.78M - 2.56, \quad \text{για } 6.0 \leq M \leq 7.5 \quad (8)$$

▪ Για ρήγματα κλίσης σε περιοχές λιθοσφαιρικής κατάδυσης

$$\text{Log } L = 0.55M - 2.19, \quad \text{για } 6.7 \leq M \leq 9.3 \quad (9)$$

$$\text{Log } u = 0.64M - 2.56, \quad \text{για } 6.7 \leq M \leq 9.2 \quad (10)$$

$$\text{Log } w = 0.31M - 0.63, \quad \text{για } 6.7 \leq M \leq 9.2 \quad (11)$$

$$\text{Log } S = 0.86M - 2.82, \quad \text{για } 6.7 \leq M \leq 9.2 \quad (12)$$

(Papazachos et al., 2004, 2006)

1.3 Κατά μέγεθος κατανομή σεισμών

Η κατά μέγεθος κατανομή των σεισμών μίας σεισμικής διέγερσης περιγράφεται από τη γνωστή σχέση των Gutenberg and Richter (1944), σύμφωνα με την οποία το συσσωρευτικό πλήθος των σεισμών που εκδηλώνεται σε μία περιοχή είναι

συνάρτηση του μεγέθους τους. Η εξάρτηση αυτή περιγράφεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\text{Log } N = a' - bM \quad (13)$$

όπου: N = ο αριθμός των σεισμών με μέγεθος μεγαλύτερο ή ίσο του M
 a, b = παράμετροι που υπολογίζονται από τα δεδομένα παρατήρησης

Η σχέση (13) δείχνει ότι η συχνότητα (πλήθος) των σεισμών παρουσιάζει εκθετική μείωση όσο αυξάνεται το μέγεθός τους.

Η παράμετρος a' καθορίζεται από το συνολικό χρονικό διάστημα των δεδομένων παρατήρησης, από την έκταση της διεγερθείσας περιοχής και από το επίπεδο σεισμικότητας της. Συνήθως, χρησιμοποιείται η παράμετρος a_1 , η οποία χαρακτηρίζεται ως *μέτρο σεισμικότητας* και αντιστοιχεί σε ένα έτος. Δίνεται από τη σχέση:

$$a_1 = a' - \log t \quad (14)$$

όπου, t το συνολικό διάστημα (σε έτη) που καλύπτουν τα δεδομένα .

Η παράμετρος b έχει ιδιαίτερη σημασία, καθώς εκφράζει το βαθμό της ομοιογένειας των υλικών στον εστιακό χώρο και το επίπεδο των τάσεων που επικρατούν στο χώρο αυτόν (Mogi 1963, Scholz 1968, Gibowicz 1973). Για τους λόγους αυτούς, χρησιμοποιείται για τον καθορισμό του επιπέδου σεισμικότητας της υπό μελέτη περιοχής (Allen et al. 1965, Karnik 1969), ενώ μπορεί να συμβάλει και στην έρευνα που αφορά την πρόγνωση των σεισμών (Suyehiro 1966, Wyss and Lee 1973, Παπαζάχος 1975).

Έτσι, υψηλή, σχετικά, τιμή της παραμέτρου b υποδεικνύει ομαλή εξέλιξη της ακολουθίας. Αντιθέτως, χαμηλή τιμή της παραμέτρου b υποδεικνύει συσσώρευση τάσεων που είναι πιθανόν να οδηγήσουν σε γένεση νέου ισχυρού σεισμού στην υπό μελέτη περιοχή.

1.4 Χρονική κατανομή σεισμών

Η χρονική κατανομή των σεισμών αφορά τον ρυθμό εκδήλωσης (απομείωσης) των μετασεισμών μίας σεισμικής διέγερσης και οδηγεί σε χρήσιμα συμπεράσματα σχετικά με την εξέλιξη της.

Η συχνότητα, εκδήλωσης των σεισμών μιας σεισμικής διέγερσης δεν παραμένει σταθερή με το χρόνο. Ο ρυθμός απομείωσης των μετασεισμών μίας ομαλά εξελισσόμενης ακολουθίας περιγράφεται από την παρακάτω μαθηματική σχέση (Mogi, 1962):

$$n = n_1 t^{-h} \Rightarrow \log n = \log n_1 - h \log t \quad (15)$$

όπου n , η συχνότητα εκδήλωσης των μετασεισμών σε χρόνο t (σε μέρες) από την αρχή γένεσης του κύριου σεισμού και n_1 η συχνότητα εκδήλωσης των μετασεισμών στη μονάδα του χρόνου. Οι παράμετροι $\log n_1$ και h υπολογίζονται από τα δεδομένα της σεισμικής ακολουθίας. Επιπλέον, προκύπτει και το διάστημα εμπιστοσύνης 95% της παραπάνω σχέσης.

Για την πραγμάτωση αξιόπιστου καθορισμού των τιμών των παραμέτρων $\log n_1$, h καθώς και των διαστημάτων εμπιστοσύνης 95%, χρησιμοποιούνται τα στοιχεία των πρώτων ωρών (συνήθως 24 ή 48 ωρών) μετά την εκδήλωση ενός ισχυρού σεισμού. Ο λόγος είναι ότι μετά τον κύριο σεισμό, αναμένεται πιθανή εκδήλωση σεισμών από γειτονικά ρήγματα της περιοχής ενδιαφέροντος, με άμεση συνέπεια την διεύρυνση του εστιακού χώρου πέραν αυτού που συνδέεται με τον αρχικό σεισμό.

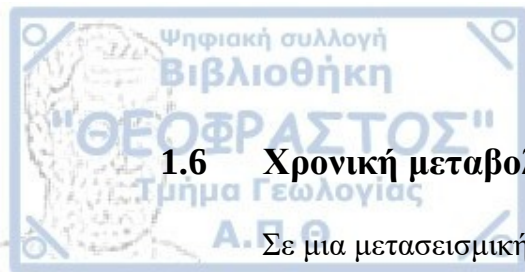
Μία σεισμική ακολουθία είναι δυνατόν να εξελιχθεί είτε ομαλά είτε μη ομαλά. **Ομαλή** χαρακτηρίζεται η εξέλιξη όταν οι μετασεισμοί της ακολουθίας εμπεριέχονται στο διάστημα εμπιστοσύνης 95%. Αντιθέτως, η **μη ομαλή εξέλιξη** παρατηρείται όταν οι μετασεισμοί που εκδηλώνονται, ξεπερνούν τους προβλεπόμενους από την παραπάνω σχέση αλλά και υπερβαίνουν το άνω όριο του διαστήματος εμπιστοσύνης 95%. Η υπέρβαση του ορίου σηματοδοτεί την πιθανή γένεση ενός νέου ισχυρού σεισμού σε σύντομο χρονικό διάστημα.

1.5 Χωρο-χρονική κατανομή σεισμών

Η χωρο-χρονική κατανομή των σεισμών μίας σεισμικής ακολουθίας εξετάζει την χωρική κατανομή που παρουσιάζουν οι εστίες των μετασεισμών πάνω στο σεισμικό ρήγμα σε συνάρτηση με το χρόνο. Εξετάζει, δηλαδή, σε ποιο σημείο του ρήγματος εντοπίζεται η εστία του κύριου σεισμού και πώς στη συνέχεια κατανέμονται οι μετασεισμοί κατά μήκος του ρήγματος.

Όταν ο κύριος σεισμός εκδηλωθεί στο ένα άκρο του σεισμικού ρήγματος και η υπόλοιπη ακολουθία σημειωθεί σε όλο το μήκος του έως το άλλο άκρο του (όπου συνήθως παρατηρείται και ο ισχυρότερος μετασεισμός), η διάρρηξη χαρακτηρίζεται **μονοκατευθυντική** (unilateral).

Αντίθετα, όταν ο κύριος σεισμός εκδηλωθεί στο μέσον του σεισμικού ρήγματος και η υπόλοιπη ακολουθία σημειωθεί εκατέρωθεν προς τα δύο άκρα του, η διάρρηξη χαρακτηρίζεται **δικατευθυντική** (bilateral). Στην περίπτωση αυτή, ο ισχυρότερος μετασεισμός συνήθως εκδηλώνεται σε ένα εκ των δύο άκρων του ρήγματος.



1.6 Χρονική μεταβολή του Μέσου Μεγέθους

Σε μια μετασεισμική ακολουθία που εξελίσσεται ομαλά, το μέσο μέγεθος των μετασεισμών της που ακολουθούν τις συνθήκες πληρότητας θα πρέπει να διατηρεί σταθερή τιμή. Σχετική παρατήρηση έγινε αρχικά από τον Lomnitz (1966) στο πλαίσιο μελέτης της ακολουθίας του σεισμού του Kern County της 21^{ης} Ιουλίου 1952 με μέγεθος $M=7.5$. Στη μελέτη αυτή παρατηρήθηκε ότι αν και ο ρυθμός εκδήλωσης μετασεισμών έπεφτε με την πάροδο του χρόνου, παρ' όλα αυτά το μέσο μέγεθός τους παρέμενε σταθερό.

Για τον υπολογισμό μιας αντιπροσωπευτική τιμής του μέσου μεγέθους μιας μετασεισμικής ακολουθίας χρησιμοποιούνται, συνήθως, οι σεισμοί των πρώτων 48 ωρών από την εκδήλωση του κύριου σεισμού οι οποίοι, όμως, θα πρέπει να έχουν μεγέθη μεγαλύτερα ή ίσα από το ελάχιστο μέγεθος που απαιτείται για τη διασφάλιση της πληρότητας των δεδομένων.

2. ΜΑΚΡΟΣΕΙΣΜΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

2.1 Γενικές Πληροφορίες Περιοχής

Οι παρακάτω πληροφορίες για τα γενικά χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης προέρχονται από την ιστοσελίδα της Wikipedia (<https://el.wikipedia.org>).

Η **θάλασσα του Μαρμαρά** (ή **Προποντίδα**) είναι μία κλειστή θάλασσα που συνδέει τον Εύξεινο Πόντο (Μαύρη Θάλασσα) με το Αιγαίο Πέλαγος και κατ' επέκταση χωρίζει την ασιατική πλευρά της Τουρκίας από την Ευρώπη. Αποτελείται από δύο ακραίους πορθμούς, στο ΒΑ άκρο της τον *Βόσπορο*, που την συνδέει με την Μαύρη Θάλασσα και στο ΝΔ άκρο της τον *Ελλήσποντο*, που την συνδέει με το Αιγαίο Πέλαγος. Επίσης, υπάρχουν δύο νησιωτικές ομάδες στην έκτασή της, τα Πριγκηπονήσια και τα Νησιά του Μαρμαρά. Η τελευταία ομάδα διαθέτει πλούσιες πηγές σε μάρμαρο, εξ' ου και η ονομασία της θάλασσας.



Σχήμα 2.1.1: Δορυφορική εικόνα της θάλασσας του Μαρμαρά

(πηγή: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:STS040-610-50.jpg>)

Οι πληροφορίες για την προέλευση της θάλασσας του Μαρμαρά και για τα τεκτονικά χαρακτηριστικά της λεκάνης της αντλήθηκαν από ιστοσελίδες του πανεπιστημίου Columbia (<https://www.ldeo.columbia.edu/tamam/tamam-background/izmit-earthquake-and-marmara-sea>), από το διαδικτυακό άρθρο «*Origin of the Sea of Marmara as Deduced from Neogene to Quaternary Paleogeographic Evolution of its Frame*» των Naci Görür, M. Namik Cagatay, Mehmet Sakinc, Muhsin Sümengen, Kamil Sentürk, Cenk Yaltirak & Andrey Tchapalyga (<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00206819709465276?journalCode=tigr20>) και από την εργασία των Yaltirak et. al (2002).

➤ Προέλευση της Θάλασσας του Μαρμαρά:

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η θάλασσα του Μαρμαρά στα άκρα της βρίσκεται σε επικοινωνία τόσο με την Μαύρη Θάλασσα όσο και με τη Μεσόγειο (Αιγαίο Πέλαγος). Η σύνδεση αυτή με δύο θαλάσσια συστήματα, που διαφέρουν σημαντικά ως προς τη χημική σύσταση των υδάτων τους, καθόρισε την ιζηματογένεση στην λεκάνη του Μαρμαρά, η οποία μετέπειτα δέχτηκε την επίδραση της τεκτονικής της περιοχής. Η αποκοπή της επικοινωνίας με ένα εκ των δύο θαλάσσιων περιοχών επιφέρει αλλαγές στις παλαιοωκεανογραφικές συνθήκες της Θάλασσας του Μαρμαρά, καθιστώντας την είτε τμήμα του παγκόσμιου ωκεάνιου συστήματος είτε ένα υφάλμυρο θαλάσσιο περιβάλλον.

Η λεκάνη της θάλασσας του Μαρμαρά (**Sea of Marmara Basin-SBM**) συνιστά ένα από τα τμήματα του βορειοδυτικού συστήματος τάφρων της Ανατολίας μικροπλάκας, το οποίο κατακλύστηκε από νερό, λόγω της αλληλεπίδρασης του ρήγματος της Βόρειας Ανατολίας και του παρόντος εκτατικού τεκτονικού καθεστώτος του Αιγαίου Πελάγους. Η γεωλογική ιστορία της λεκάνης έχει τις απαρχές της στα τέλη του Σερραβάλιου (11.63–13.82 εκατομμύρια χρόνια), όταν δημιουργήθηκε και το ρήγμα της Βόρειας Ανατολίας. Ο πρώτος κατακλυσμός της συνέπεσε με τη δημιουργία του ρήγματος. Η πρώτη θαλάσσια κατάκλιση προήλθε από τη Μεσόγειο Θάλασσα, η οποία παρέμεινε στη λεκάνη για μικρό χρονικό διάστημα και ακολούθως αντικαταστάθηκε από την Παρατηθύ κατά το τέλος του Μειοκαίνου. Η Παρατηθύ επικράτησε στην περιοχή μέχρι το Άνω Πλειόκαινο, όταν ένα δεύτερο πλημμυρικό φαινόμενο, προερχόμενο από τη Μεσόγειο, έλαβε χώρα δια μέσου των Δαρδανελίων.

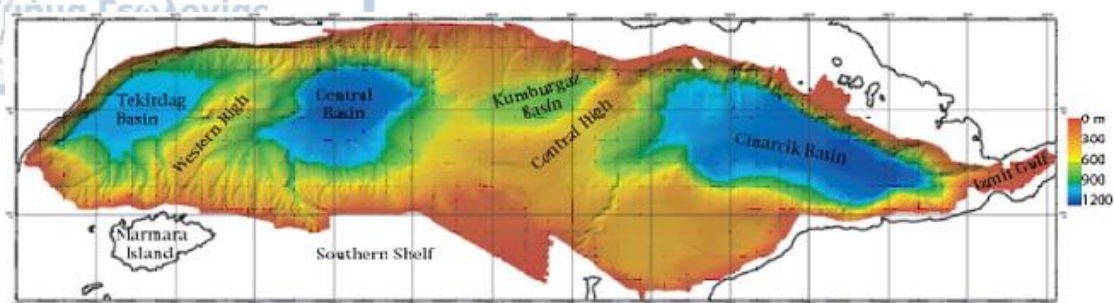
Λόγω των μεταβολών που σημειώθηκαν στη στάθμη της θάλασσας από τους παγετώνες κατά τη διάρκεια του Πλειόκαινου, υπήρχαν εναλλαγές μεταξύ της Παρατηθύος (Μαύρη Θάλασσα) και της Μεσογείου. Στον τελευταίο παγετώνα (Würm), η λεκάνη της Θάλασσα του Μαρμαρά απομονώθηκε ολοκληρωτικά από τις δύο θάλασσες και μετατράπηκε σε ένα περιβάλλον ευξεινικής φάσης, παρόμοιο με αυτό της Μαύρης Θάλασσας εκείνη την περίοδο. Μετά το πέρας του παγετώνα Würm, η Μεσόγειος θάλασσα εισχώρησε ξανά στη λεκάνη, γεμίζοντας την με αλμυρό νερό.

➤ **Τεκτονικά Χαρακτηριστικά της Θάλασσας του Μαρμαρά:**

Οι τεκτονικές λεκάνες της Θάλασσας του Μαρμαρά είναι δομές που διαμορφώθηκαν από δύο διαφορετικά συστήματα ρηγμάτων και σε διαφορετικά χρονικά διαστήματα. Το πρώτο σύστημα που ενήργησε ήταν η ρηξιγενής ζώνη Θράκης-Eskişehir (TEFZ) στο Κ. Μειόκαινο - Κ. Πλειόκαινο, η οποία καθόρισε και την πρώιμη νεοτεκτονική περίοδο της περιοχής. Έπειτα, η ύστερη νεοτεκτονική περίοδος σηματοδοτήθηκε από το ρήγμα της Βόρειας Ανατολίας (NAFZ) στο τέλος Πλειοκαίνου, το οποίο διαίρεσε το TEFZ σε τέσσερα τμήματα. Στα τέλη αυτής της περιόδου, το NAFZ επεκτάθηκε προς τα δυτικά ως ένα σύνολο διασπασμένων τμημάτων, τα οποία ενώθηκαν με τις ζώνες ρηγμάτων Ganos, Bandirma-Behramkale και Manyas-Edremit.

Δεδομένου ότι ο βόρειος κλάδος του ρήγματος της Βόρειας Ανατολίας ήταν συνδεδεμένος με τη ρηξιγενή ζώνη Ganos (GFZ) στα δυτικά, άρχισε η ανάπτυξη ενός υποθαλάσσιου ρήγματος στη Θάλασσα του Μαρμαρά, δημιουργώντας τα τεκτονικά κέρατα και τις λεκάνες της περιοχής με τις δομές αυτές να υπέρκεινται των αρνητικών δομών «λουλουδιών» που είχαν σχηματιστεί από το GFZ κατά την πρώιμη νεοτεκτονική περίοδο.

Η διαμόρφωση της Θάλασσας του Μαρμαρά συνεχίζεται ακόμη κάτω από ένα καθεστώς συμπιεστικών δυνάμεων, που εντοπίζεται στο δυτικό τμήμα της περιοχής (Gelibolu-Χερσόνησος Biga), και οφείλεται σε ένα ΒΔ-ΝΑ δεξιόστροφο διατμητικό μηχανισμό και σε εφελκυστικές τάσεις, διεύθυνσης Β-Ν, μεταξύ των περιοχών Bandirma και Bursa.



Σχήμα 2.1.2: Βαθυμετρικό μοντέλο των τεκτονικών λεκανών στο βόρειο τμήμα της Θάλασσας του Μαρμαρά (πηγή: <https://www.ldeo.columbia.edu/tamam/tamam-background/izmit-earthquake-and-marmara-sea>).

2.1.1 Το Ρήγμα της Βόρειας Ανατολίας

Οι πληροφορίες για το Ρήγμα της Βόρειας Ανατολίας προέρχονται από το βιβλίο «Γεωλογία των Σεισμών», (Παυλίδης, 2016).

Γενικώς, η Θάλασσα του Μαρμαρά χαρακτηρίζεται από ρήγματα-παρακλάδια του ρήματος της Βόρειας Ανατολίας, γεγονός που προσδίδει στην περιοχή υψηλή σεισμικότητα. Το ρήγμα αυτό, με μήκος μεγαλύτερο από 1000 km, συνιστά ένα από τα πιο σημαντικά ενεργά ρήγματα οριζόντιας μετατόπισης σε παγκόσμιο επίπεδο και είναι το όριο μεταξύ της Ευρασιατικής πλάκας και της Ανατολίας μικροπλάκας, η οποία περιλαμβάνει το μεγαλύτερο μέρος της Εγγύς Ανατολής. «Στο μεγαλύτερο μήκος του αποτελείται από μία καθορισμένη και γραμμική ρηξιγενή ζώνη, με τυπικές δομές οριζόντιας μετατόπισης». Ο ρυθμός ολίσθησής του κυμαίνεται στα 25 mm/yr.

«Ο βόρειος κλάδος του ρήματος της Β. Ανατολίας 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 εισέρχεται στο βόρειο Αιγαίο τερματίζοντας στις βόρειες Σποράδες. Ο νότιος κλάδος του ρήματος παρακάμπτει τη νότια πλευρά της Θάλασσας του Μαρμαρά, κατά μήκος της χερσονήσου Biga (ΒΔ Μ. Ασίας) με μία σειρά μικρών διακριτών ρηγμάτων και εισχωρεί στο Αιγαίο, μεταξύ Λέσβου και ακτών Μικράς Ασίας (κόλπος Αρδαμυτίου) και πιθανώς συνεχίζει μέχρι το βύθισμα της Σκύρου».



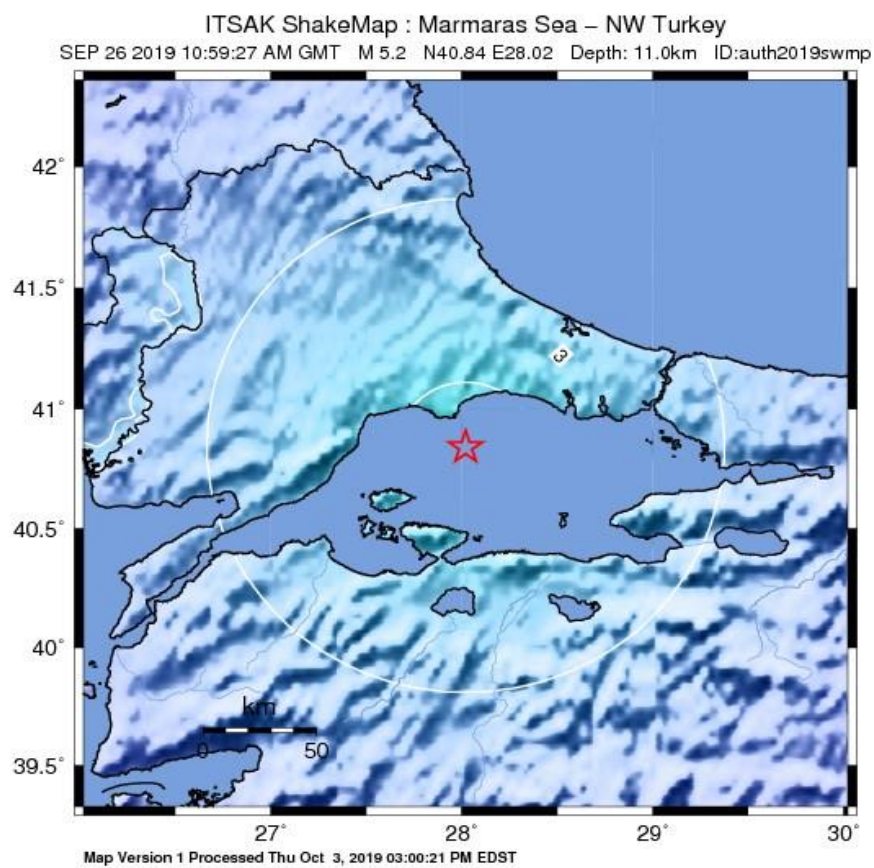
Σχήμα 2.1.1.1: «Γραμμική» ρηξιγενής ζώνη του ρήγματος της Βόρειας Ανατολίας

(πηγή: <https://www.thetoc.gr/koinwnia/article/poio-einai-to-rigma-tis-anatolias/>)

2.2 Στοιχεία του Σεισμού

Στις 26 Σεπτεμβρίου 2019 και ώρα 10:59 GMT εκδηλώθηκε ισχυρός σεισμός μεγέθους $M_L=5.7$ και με μέγεθος σεισμικής ροπής $M_w=5.7$, στην περιοχή της Κωνσταντινούπολης και συγκεκριμένα 70 χιλιόμετρα δυτικά της Πόλης και νότια της Σηλυβρίας, με επίκεντρο στη θάλασσα του Μαρμαρά.

Σύμφωνα με το Ευρωπαϊκό – Μεσογειακό Σεισμολογικό κέντρο (<https://www.emsc-csem.org/Earthquake/earthquake.php?id=794756#summary>), το εστιακό βάθος του σεισμού υπολογίστηκε στα 7 km και το επίκεντρο του είχε συντεταγμένες 40.87°N και 28.19°E. Το εστιακό βάθος υποδεικνύει έναν επιφανειακό σεισμό με μέγιστη εδαφική επιτάχυνση 1.4% g και μέγιστη εδαφική ταχύτητα 0.45 cm/s (<http://shakemaps.itsak.gr/auth2019swmp/intensity.html>). Σχετικά με το σειсмоγόνο ρήγμα, όπως προκύπτει από τους μηχανισμούς γένεσης, είναι ένα δεξιόστροφο ρήγμα οριζόντιας μετατόπισης (right-lateral) και συνιστά τμήμα της ρηξιγενούς ζώνης της Βόρειας Ανατολίας. Το μήκος του κυμαίνεται περίπου στα 12 km, με διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ.



Σχήμα 2.2.1:
Γεωγραφική
κατανομή της
αναμενόμενης
μακροσεισμικής
έντασης του
κύριου σεισμού
στην θάλασσα του
Μαρμαρά

(πηγή: <http://shakemaps.itsak.gr/auth2019swmp/download/intensity.jpg>)

2.3 Επιπτώσεις σεισμού

Ο σεισμός, σύμφωνα με μαρτυρίες, είχε διάρκεια μεγαλύτερη των 15 δευτερολέπτων, προκαλώντας αναστάτωση στους κατοίκους της Κωνσταντινούπολης, οι οποίοι έσπευσαν να βγουν στους δρόμους. Επίσης, τα Μέσα Μαζικής Ενημέρωσης ανακοίνωσαν ότι εκκενώθηκαν σχολεία, νοσοκομεία και εμπορικά κέντρα, ενώ παρατηρήθηκαν και προβλήματα με τα συστήματα τηλεπικοινωνιών. Οι ελαφρά τραυματίες στο σύνολο τους υπολογίστηκαν σε 8 και σημειώθηκαν ζημιές σε κτήρια της Πόλης. Στη συνοικία Ancilar κατέρρευσε μιναρές σε τζαμί.



Σχήμα 2.3.1: Κάτοικοι στους δρόμους λόγω της σεισμικής δραστηριότητας

(πηγή: <https://www.emsc-csem.org/Earthquake/earthquake.php?id=794756#pics>)



Σχήμα 2.3.2: Κατάρρευση μιναρέ σε τζαμί της συνοικίας Avcali
(πηγή: <https://www.emsc-csem.org/Earthquake/earthquake.php?id=794756#pics>)



Σχήμα 2.3.3: Εσωτερικές ρωγμές και ζημιές σε κτήρια της Κωνσταντινούπολης
(πηγή: <https://www.emsc-csem.org/Earthquake/earthquake.php?id=794756#testimonies>)

2.4 Ιστορικοί σεισμοί

Οι πληροφορίες για τους ιστορικούς σεισμούς προέρχονται από τα βιβλία: «Γεωλογία των Σεισμών», (Παυλίδης, 2016), «Οι Σεισμοί της Ελλάδας» (Παπαζάχος και Παπαζάχου, 2003) και από την ιστοσελίδα της Wikipedia (<https://en.wikipedia.org/>).

❖ Σεισμός 10^{ης} Σεπτεμβρίου 1509 ($M_s=7.2 \pm 0.3$, 40.54°N, 28.42E°)

Στις 10 Σεπτεμβρίου, ώρα 22:00 GMT, σημειώθηκε ισχυρός σεισμός μεγέθους $M=7.2 (\pm 0.3)$ με επίκεντρο ΒΔ της Τουρκίας και Νότια της Κωνσταντινούπολης. Λόγω της περιοχής εκδήλωσης και της έντασης της σεισμικής δράσης, εκτιμάται ότι ο σεισμός προήλθε από μία διάρρηξη μήκους 70 km. Οι μετασεισμοί της ακολουθίας είχαν συνολική διάρκεια 45 ημερών, ενώ υπήρξαν και έντονα θαλάσσια κύματα (tsunami), γεγονός που επιβεβαιώνεται από την ύπαρξη τουρβιδιτικού στρώματος στην τεκτονική λεκάνη Çınarcık. Ο αριθμός των θυμάτων του, από ελάχιστα γνωστά στοιχεία, κυμαίνεται στα 1.000 με 13.000 άτομα. Οι σημαντικότερες ζημιές του σεισμού επεκτάθηκαν από την πόλη Çorlu στα δυτικά προς την πόλη İzmit στα ανατολικά. Στην περιοχή της Κωνσταντινούπολης κατέρρευσαν πολλά σπίτια, καμινάδες και έσπασαν τοίχοι. Επίσης, λόγω της διάρκειας των μετασεισμών, πολλοί άνθρωποι αδυνατούσαν να γυρίσουν στα σπίτια τους για περίπου 2 μήνες.

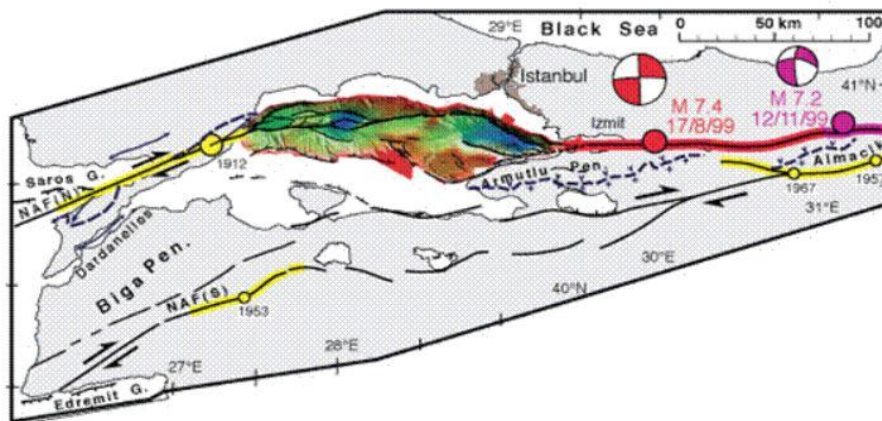
❖ Σεισμός 22^{ης} Μαΐου 1766 ($M_s=7.1$, 40.48°N, 29.0°E)

Στις 22 Μαΐου 1766, ώρα 05:10 GMT, σημειώθηκε ισχυρός σεισμός μεγέθους $M=7.1$ με επίκεντρο στο ανατολικό άκρο της Θάλασσας του Μαρμαρά, στην τεκτονική λεκάνη Çınarcık (κοντά στα Πριγκηπονήσια), προκαλώντας ζημιές μεταξύ των περιοχών İzmit και Tekirdağ. Η σεισμική δόνηση είχε ως αποτέλεσμα την δημιουργία έντονων θαλάσσιων κυμάτων (tsunami), λόγω υποθαλάσσιων κατολισθήσεων, που προκάλεσαν μεγάλες καταστροφές. Το πρώτο σεισμικό κύμα συνοδεύονταν από δυνατό «θόρυβο» και είχε διάρκεια 2 λεπτών. Το επόμενο κύμα είχε διάρκεια 4 λεπτών και οι μετασεισμοί διήρκεσαν περίπου στα 8 λεπτά. Στις εβδομάδες που ακολούθησαν, εκδηλώθηκαν αρκετοί μετασεισμοί, ενώ ολόκληρη η σεισμική ακολουθία υπολογίζεται ότι είχε διάρκεια 1 έτους. Η ρηξιγενής διάρρηξη είχε μήκος που κυμαινόταν από 70

έως 120 km. Ο σεισμός έγινε αισθητός στο Aydin, στη Θεσσαλονίκη, στο Βουνό Άθως, στην ανατολική Βουλγαρία και κατά μήκος της δυτικής ακτής της Μαύρης Θάλασσας.

❖ **Σεισμός 17^{ης} Αυγούστου 1999 ($M_s=7.4$, 40.76°N, 29.97°E)**

Στις 17 Αυγούστου 1999, ώρα 00:01 GMT, εκδηλώθηκε ισχυρός σεισμός με επίκεντρο στο ανατολικό άκρο της Θάλασσας του Μαρμαρά, κοντά στην πόλη της Νικομήδειας (Izmit) με εστιακό βάθος στα 10 km. Οι καταγραφές της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης κυμαίνονταν από 0.3 g μέχρι 0.4 g. Ο σεισμός είχε διάρκεια 45 δευτερολέπτων και απαρτιζόταν από δύο σεισμούς, όπου η εκδήλωση του ενός προκάλεσε τον άλλον, λόγω της διάρρηξης δύο τμημάτων του ρήγματος, γεγονός που δημιούργησε έντονο θαλάσσιο κύμα (tsunami). Η επιφανειακή διάρρηξη που σημειώθηκε αποτελούνταν από τέσσερα τμήματα (segments). Η μέγιστη μετατόπιση κατά μήκος αυτής της διάρρηξης μετρήθηκε στα ανατολικά της λίμνης Saranza, όπου το σεισμικό ρήγμα μετατόπισε ένα μικρό επαρχιακό δρόμο κατά 5 m. Η διάρρηξη ήταν οριζόντιας μετατόπισης με δεξιόστροφη συνιστώσα και το συνολικό μήκος της εκτιμάται σε 140 km. Στα 100 km αυτής της έκτασης εμφανίζονται σχεδόν συνεχείς διαρρήξεις στην ξηρά, ενώ από την πόλη Gölcük και προς τα δυτικά, το ίχνος του ρήγματος εισέρχεται στο θαλάσσιο χώρο και δεν είναι ορατό. Από το σεισμό αυτό, έχασαν την ζωή τους 17.127 άνθρωποι και τραυματίστηκαν περίπου 50.000. Σε 214.000 κατοικίες προκλήθηκαν βαριές ή ελαφριές ζημιές και 250.000 άνθρωποι έμειναν άστεγοι.



Σχήμα 2.4.1: Τα τμήματα του ρήγματος της Βόρειας Ανατολίας, που η διάρρηξη τους προκάλεσε τους σεισμούς της 17^{ης} Αυγούστου 1999 και 12^{ης} Νοεμβρίου 1999

(πηγή: <https://www.ldeo.columbia.edu/tamam/tamam-background/izmit-earthquake-and-marmara-sea>)



❖ **Σεισμός 12^{ης} Νοεμβρίου 1999 ($M_s=7.1$, 40.76°N, 31.16°E)**

Το επίκεντρο του σεισμού εντοπίστηκε στο ανατολικό άκρο του ρήγματος του πρώτου σεισμού με εστιακό βάθος 14 km. Οι περισσότερες καταστροφές σημειώθηκαν στην πόλη Düzce, σε χωριά της επαρχίας Bolu και σε μεγάλα τεχνικά έργα, όπως η μεγάλη κοιλαδογέφυρα και η σήραγγα του αυτοκινητόδρομου Κωνσταντινούπολης-Άγκυρας. Η διεύθυνση του σεισμογόνου ρήγματος ήταν Α-Δ, το μήκος του άγγιζε τα 70 km και αποτελούνταν από 3 μικρότερα ρήγματα (segments). Ο σεισμός στοίχησε τη ζωή σε 834 ανθρώπους και τραυμάτισε 4.566.

3. ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΑΚΟΛΟΥΘΙΑΣ ΤΗΣ

ΘΑΛΑΣΣΑΣ ΤΟΥ ΜΑΡΜΑΡΑ

3.1 Δεδομένα παρατήρησης

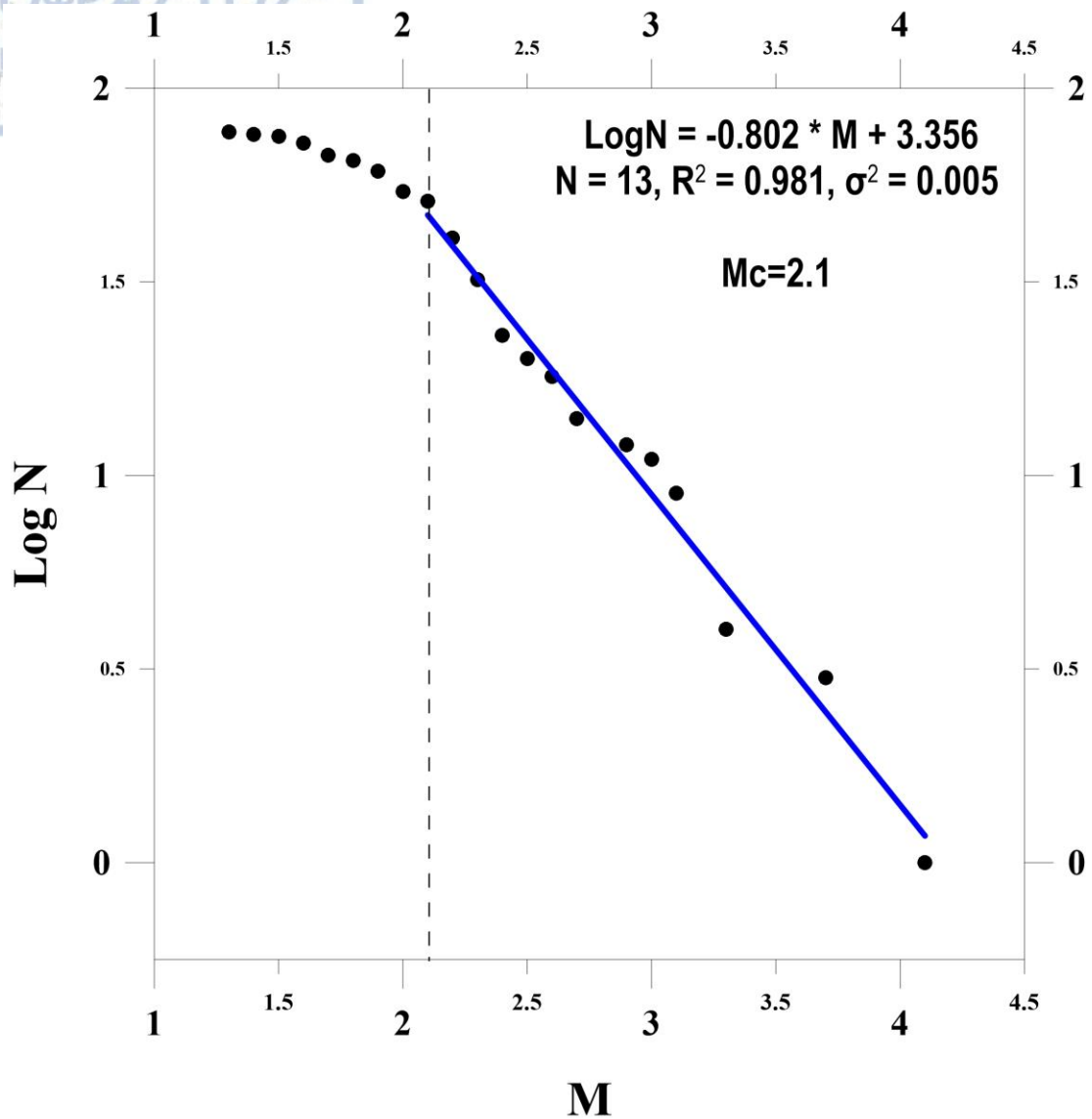
Για τη μελέτη της σεισμικής ακολουθίας της θάλασσας του Μαρμαρά κρίθηκε αναγκαία η δημιουργία καταλόγου, που περιέχει τις εστιακές παραμέτρους (χρόνος γένεσης, γεωγραφικές συντεταγμένες επικέντρων, εστιακό βάθος, μέγεθος) για όλους του σεισμούς που απαρτίζουν την ακολουθία. Τα στοιχεία του καταλόγου καλύπτουν το χρονικό διάστημα από 22/09/2019 έως 02/10/2019 και η περιοχή ενδιαφέροντος έχει γεωγραφικές συντεταγμένες από 40.7°- 41.0°B γεωγραφικό πλάτος και από 28.1°- 28.4°A γεωγραφικό μήκος. Τα εστιακά βάθη έχουν τιμές μικρότερες των 40 km, καθώς η σεισμική ακολουθία της μελέτης είναι επιφανειακή. Ο τελικός κατάλογος περιλαμβάνει 329 σεισμούς που παρατίθενται στο παράρτημα στο τέλος της εργασίας. Ως πηγή πληροφοριών χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από το **Ευρωπαϊκό Μεσογειακό Σεισμολογικό Κέντρο – EMSC** (<https://www.emsc-csem.org>) και από τα Τουρκικά Ινστιτούτα καταγραφών σεισμικής δραστηριότητας, **AFAD** (<https://depzem.afad.gov.tr>) και **KOERI** (<http://www.koeri.boun.edu.tr>).

3.2 Κατά Μέγεθος Κατανομή

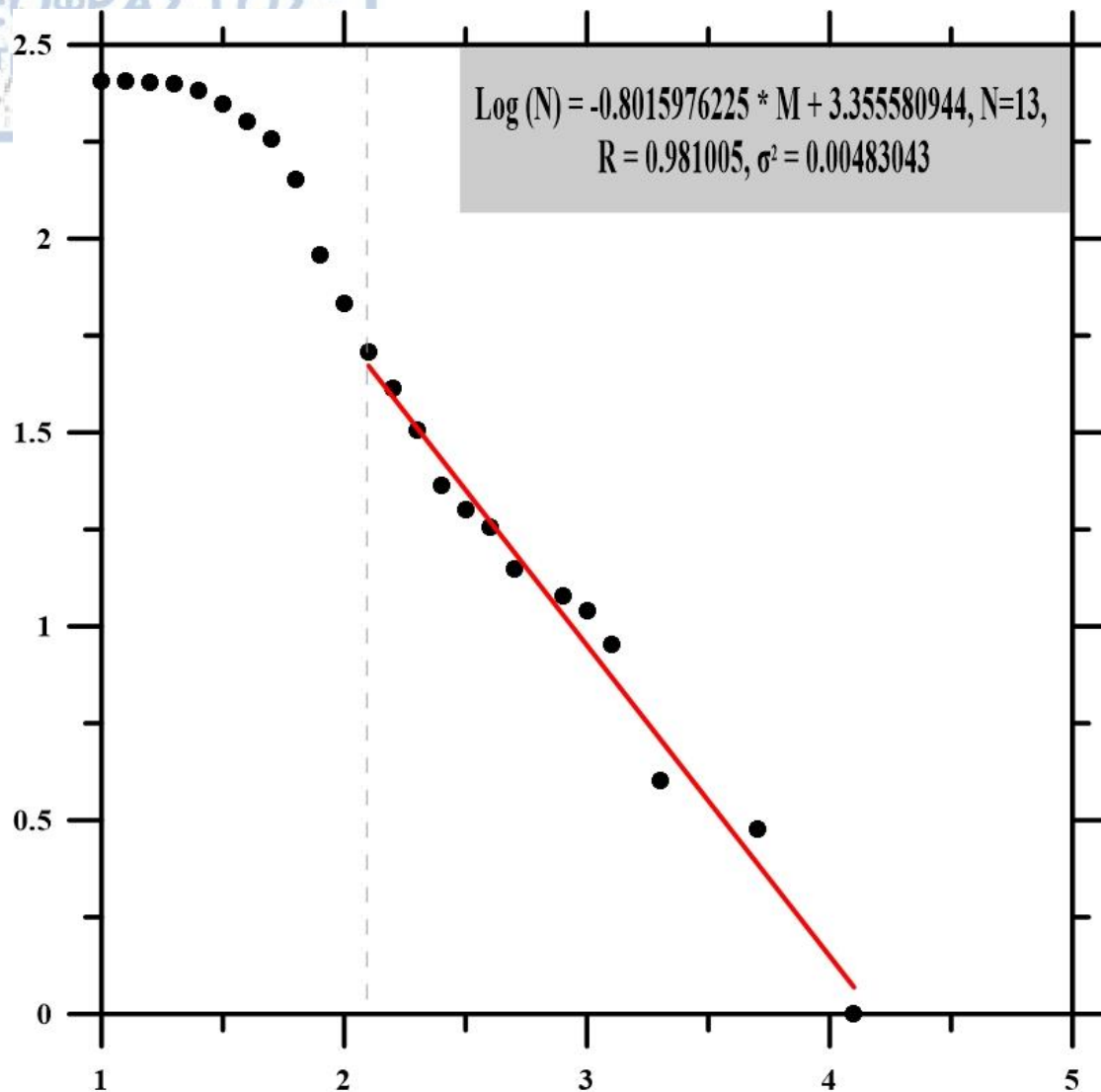
Η κατά μέγεθος κατανομή των μετασεισμών μίας σεισμικής ακολουθίας περιγράφεται από τη σχέση 13 των Gutenberg and Richter (1944).

Με την εφαρμογή της σχέσης αυτής για τους μετασεισμούς της ακολουθίας, των πρώτων 6 ωρών προέκυψε μέγεθος πληρότητας μετασεισμών $M_c \geq 2.1$ (σχήμα 3.2.1), ενώ διατηρώντας το M_c σταθερό για το σύνολο των δεδομένων προέκυψε το γράφημα του σχήματος 3.2.2.

Υπενθυμίζεται ότι ως μέγεθος πληρότητας M_c ορίζεται η χαμηλότερη τιμή μεγέθους, πάνω από την οποία ανιχνεύεται το σύνολο των σεισμών σε συγκεκριμένο χώρο και χρόνο.



Σχήμα 3.2.1: Κατά μέγεθος κατανομή των μετασεισμών της σεισμικής ακολουθίας της θάλασσας του Μαρμαρά (26/09/2019, $M=5.7$), χρησιμοποιώντας τα δεδομένα των πρώτων 6 ωρών μετά την εκδήλωση του κύριου σεισμού.



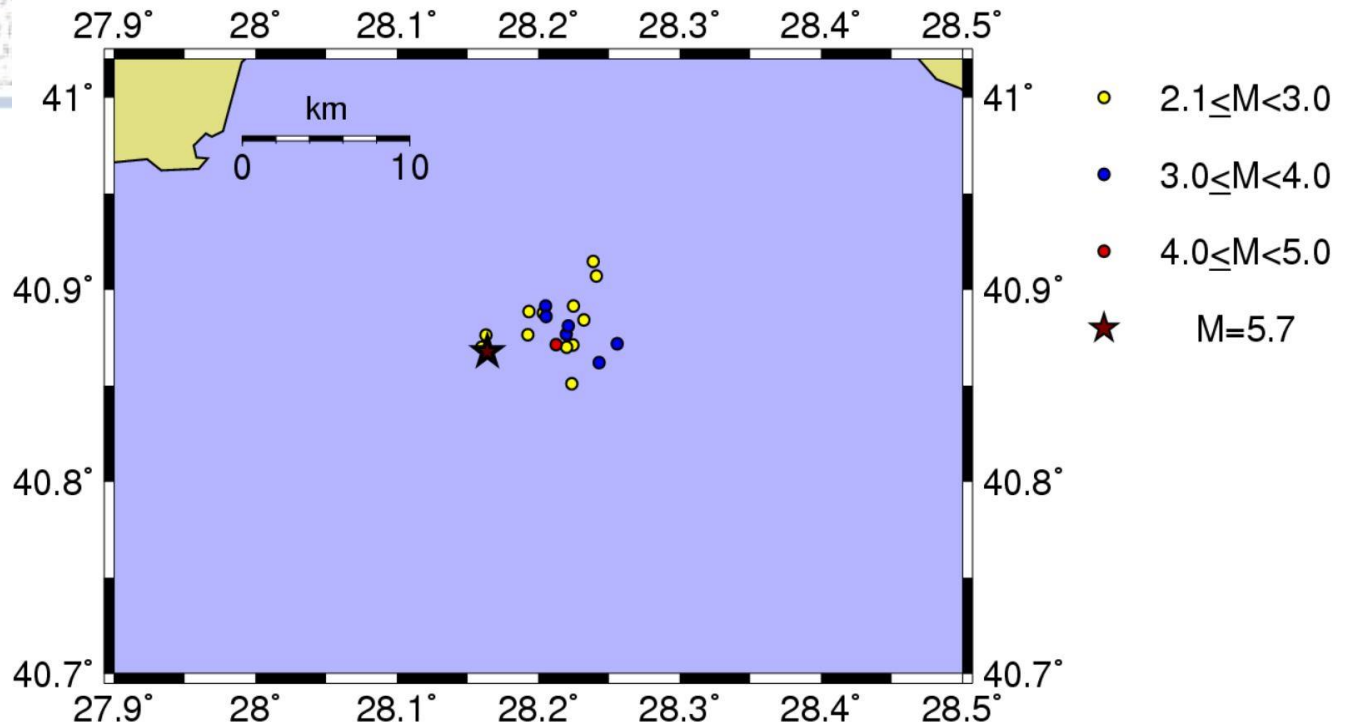
Σχήμα 3.2.2: Κατά μέγεθος κατανομή των μετασεισμών της σεισμικής ακολουθίας της θάλασσας του Μαρμαρά (26/09/2019, $M=5.7$), χρησιμοποιώντας το σύνολο των δεδομένων αλλά υιοθετώντας το μέγεθος πληρότητας $M_c=2.1$ όπως αυτό προέκυψε από τα δεδομένα των πρώτων 6 ωρών της μετασεισμικής ακολουθίας.

Η χωρική κατανομή της σεισμικής ακολουθίας της θάλασσας του Μαρμαρά διακρίνεται στην οριζόντια/γεωγραφική και στην κατακόρυφη κατανομή των σεισμών της. Η γεωγραφική (οριζόντια) κατανομή αφορά στη δημιουργία ενός χάρτη αποτελούμενο από τα επίκεντρα των σεισμών της υπό μελέτη σεισμικής διεγέρσης. Η κατακόρυφη κατανομή περιλαμβάνει τις εστίες των σεισμών – μελών της ακολουθίας, προβαλλόμενες πάνω σε δύο κατακόρυφα επίπεδα, εκ των οποίων το ένα βρίσκεται σε παραλληλία με το επίπεδο του σεισμικού ρήγματος και το άλλο βρίσκεται κάθετα στο επίπεδο αυτό. Οι δύο κατανομές δίδουν χρήσιμες πληροφορίες για τις διαστάσεις, την γεωμετρία και τον προσανατολισμό του σεισμογόνου χώρου της ακολουθίας της θάλασσας του Μαρμαρά.

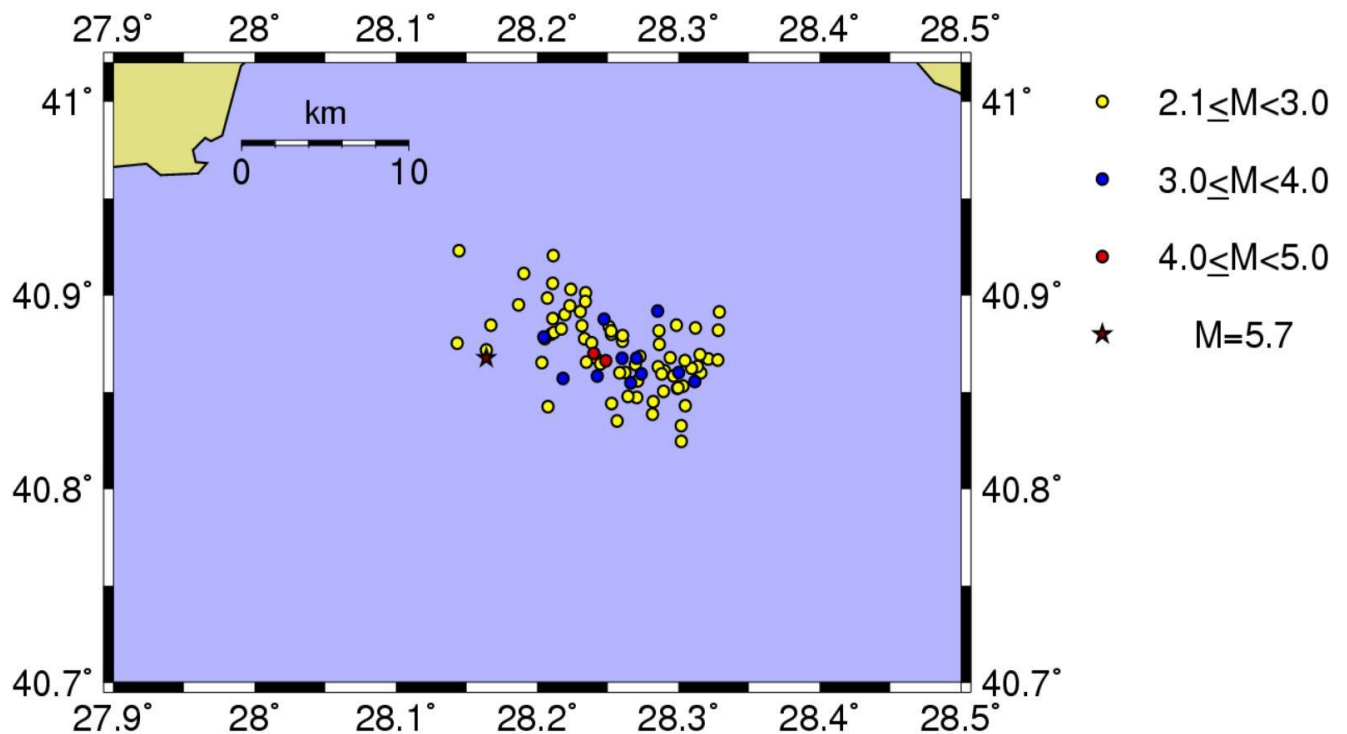
3.3.1 Γεωγραφική (οριζόντια) κατανομή

Ο χάρτες με τις χωρικές κατανομές των προσεισμών και των μετασεισμών της σεισμικής ακολουθίας της θάλασσας του Μαρμαρά κατασκευάστηκαν μέσω του προγράμματος GMT (Wessel & Smith, 1995). Στο σχήμα (3.3.1.1) απεικονίζεται σε χάρτη η γεωγραφική κατανομή των προσεισμών για χρονικό διάστημα από 22/09/19 έως 26/09/19 και στο χάρτη του σχήματος (3.3.1.2) δίνεται η γεωγραφική κατανομή των μετασεισμών για χρονικό διάστημα από 26/09/19 έως 02/10/19. Και στους δύο χάρτες διακρίνεται ο κύριος σεισμός με κόκκινο αστερίσκο ($M=5.7$) ενώ χρησιμοποιήθηκαν μόνο πλήρη δεδομένα ($M \geq 2.1$).

Όπως προκύπτει από διάφορα σεισμολογικά ινστιτούτα (AFAD, KOERI, EMSC), το σεισμογόνο ρήγμα που προκάλεσε τον σεισμό στη θάλασσα του Μαρμαρά ($M=5.7$) είναι ένα δεξιόστροφο ρήγμα οριζόντιας μετατόπισης. Επομένως, η μαθηματική σχέση που συνδέει το μήκος ρήγματος (L) με το μέγεθος του σεισμού (M) είναι η σχέση (1) (Papazachos, et. al 2004). Θέτοντας στη σχέση το μέγεθος του κύριου σεισμού, δηλαδή $M=5.7$, θα προκύψει ότι $L=11.56$ km. Άρα, το μήκος του σεισμικού ρήγματος αναμένεται να είναι, θεωρητικά, περίπου 12 km.



Σχήμα 3.3.1.1: Γεωγραφική κατανομή των προσεισμών για το χρονικό διάστημα 22/09/19 έως 26/09/19 της σεισμικής ακολουθίας της θάλασσας του Μαρμαρά (26/09/2019, $M=5.7$)



Σχήμα 3.3.1.2: Γεωγραφική κατανομή των μετασεισμών για το χρονικό διάστημα 26/09/19 έως 02/10/19 της σεισμικής ακολουθίας της θάλασσας του Μαρμαρά (26/09/19, $M=5.7$)

Παρατηρώντας την χωρική κατανομή των εστιών στο χάρτη των μετασεισμών της ακολουθίας (σχήμα 3.3.1.2), προκύπτει ότι το μήκος του ρήγματος κυμαίνεται περίπου στα 12.6 km, αποτέλεσμα που βρίσκεται σε συμφωνία με την θεωρητική προσέγγιση του μήκους στα 12 km, δικαιολογώντας συγχρόνως και το μέγεθος του κύριου σεισμού ($M=5.7$). Επιπλέον, κατά τη διαμόρφωση του σεισμογόνου χώρου παρατηρείται ότι η διεύθυνση του ρήγματος είναι ΔΒΔ-ΑΝΑ με αζιμούθιο περί στις 280° . Η διάρρηξη έχει χαρακτήρα μονοκατευθυντικό, καθώς ο κύριος σεισμός εκδηλώθηκε κοντά στο ΒΔ άκρο του σεισμικού ρήγματος ενώ η υπόλοιπη ακολουθία εξελίσσεται σε όλο το μήκος του έως το άλλο άκρο του.

3.3.2 Κατακόρυφη κατανομή

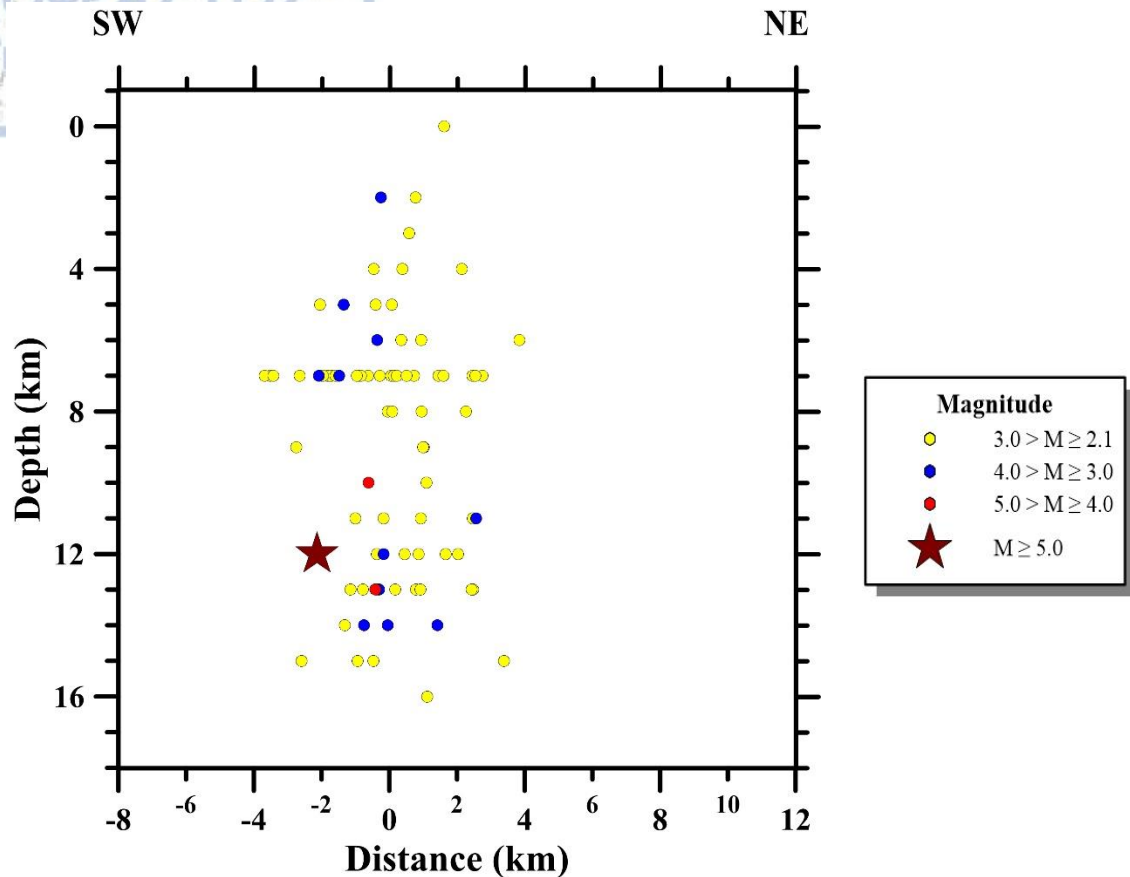
Με σκοπό τη μελέτη των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του σεισμικού ρήγματος, κατασκευάστηκαν η εγκάρσια και η διαμήκης τομή του σεισμογόνου χώρου.

➤ *Εγκάρσια τομή σεισμογόνου χώρου (Cross section)*

Η εγκάρσια τομή (κάθετη στη διεύθυνση του σεισμικού ρήγματος) πραγματοποιείται με σκοπό την ανάδειξη της διεύθυνσης κλίσης και της γωνίας κλίσης του.

Σύμφωνα με την γεωγραφική κατανομή των μετασεισμών, η παράταξη του ρήγματος έχει διεύθυνση ΔΒΔ-ΑΝΑ και τιμή περίπου στις 280° , η οποία είναι πολύ κοντά με την παράταξη από τους μηχανισμούς γένεσης του GCMT (<https://www.globalcmt.org/>) με τιμή στις 273° και γωνία κλίσης 50° . Επομένως, η τομή πρέπει να γίνει στις $\sim 190^\circ$ (ΝΝΔ-ΒΒΑ) για να είναι κάθετη ως προς την παράταξη.

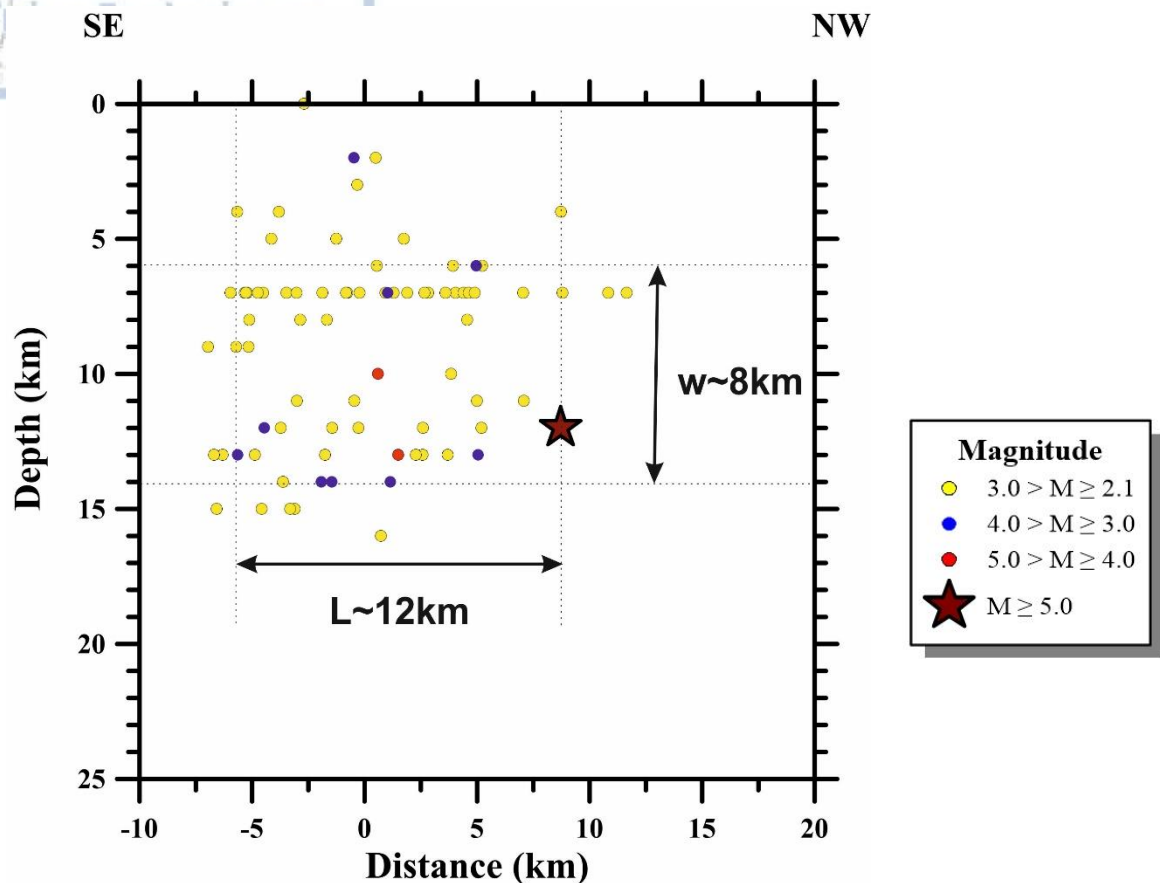
Όπως φαίνεται στο σχήμα 3.3.2.1, το ρήγμα βυθίζεται προς τα ΝΔ με μεγάλη γωνία κλίσης. Οι εστίες των σεισμών μεγέθους $M \geq 3.0$ (μπλε και κόκκινα σύμβολα) απεικονίζουν με μεγαλύτερη αξιοπιστία τον σεισμογόνο χώρο και τη διεύθυνση βύθισης. Οι συμβολισμοί των εστιών αντιστοιχούν με αυτούς των σχημάτων 3.3.1.1 και 3.3.1.2.



Σχήμα 3.3.2.1: Χωρική κατανομή των εστιών των μετασεισμών της ακολουθίας της θάλασσας του Μαρμαρά (26/09/2019, $M=5.7$), που αντιστοιχεί σε κατακόρυφο επίπεδο διεύθυνσης $N190^\circ E$ κάθετης στο επίπεδο του ρήγματος

➤ Διαμήκης τομή σεισμογόνου χώρου (Long section)

Η διαμήκης τομή στο επίπεδο του σεισμικού ρήγματος χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του μήκους και του πλάτους του. Όπως έχει προκύψει από τη γεωγραφική (οριζόντια) κατανομή των μετασεισμών της ακολουθίας και από τις θεωρητικές-μαθηματικές σχέσεις που συνδέουν το μήκος L του ρήγματος και το μέγεθος M του κύριου σεισμού, έχει υπολογιστεί ένα μήκος περίπου στα 12 km. Σχετικά με το πλάτος w του ρήγματος, από το διάγραμμα υπολογίζεται περίπου στα 8 km.



Σχήμα 3.3.2.2: Χωρική κατανομή των εστιών των μετασεισμών της ακολουθίας της θάλασσας του Μαρμαρά (26/09/2019, $M=5.7$), που αντιστοιχεί σε κατακόρυφο επίπεδο διεύθυνσης BA $280^\circ NA$, παράλληλης στην παράταξη του ρήγματος

Όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.3.2.2, ο σεισμογόνος χώρος περιορίζεται μέσα στις διακεκομμένες γραμμές και το μήκος του ρήγματος υπολογίζεται γύρω στα 12 km (χρησιμοποιώντας τις εστίες των σεισμών με $M \geq 3.0$).

Οι συμβολισμοί των εστιών αντιστοιχούν με αυτούς των σχημάτων 3.3.1.1 και 3.3.1.2.

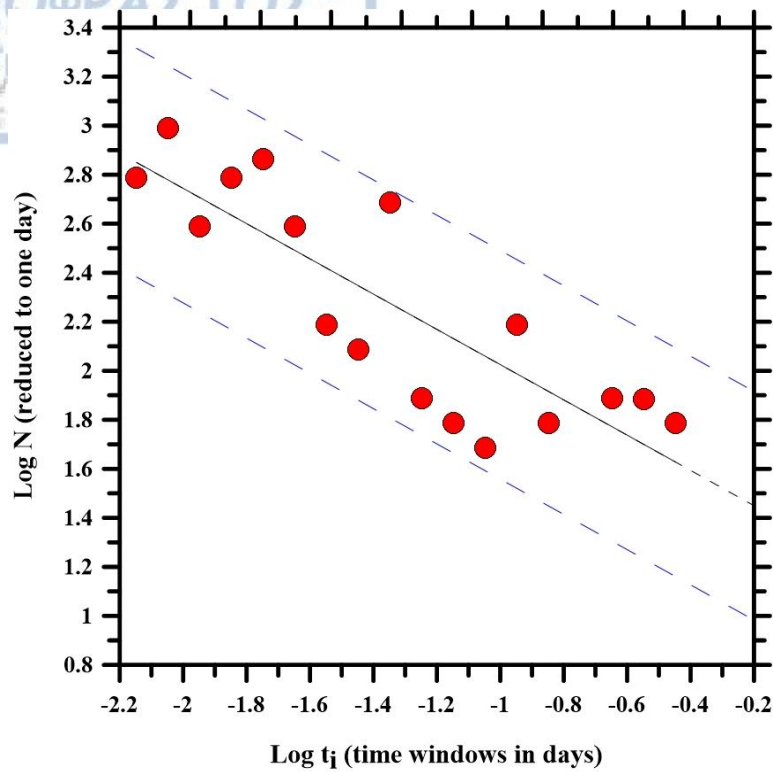
3.4 Χρονική κατανομή (Time distribution)

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, η χρονική κατανομή αφορά τον ρυθμό απομείωσης του πλήθους των μετασεισμών μίας σεισμικής ακολουθίας και οδηγεί σε συμπεράσματα για τον τρόπο εξέλιξής της. Για μία ομαλά εξελισσόμενη ακολουθία, ο ρυθμός απομείωσης των μετασεισμών περιγράφεται από τη σχέση (15) (Mogi, 1962).

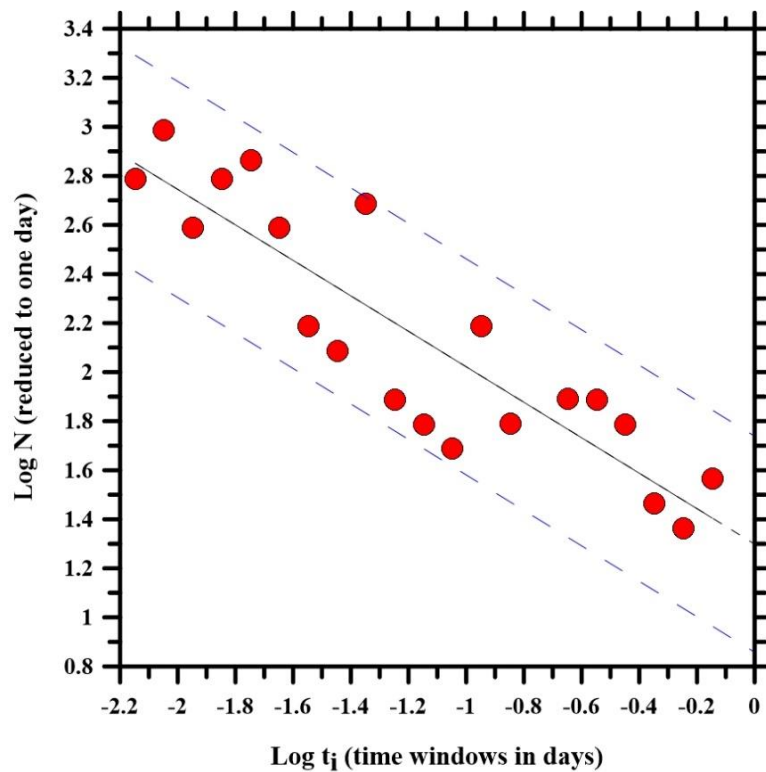
Επομένως, θα πρέπει να προσδιοριστούν οι τιμές των παραμέτρων της σχέσης αυτής που αντιστοιχούν στα χαρακτηριστικά της υπό μελέτη ακολουθίας ώστε να γίνει δυνατό στη συνέχεια να χαρακτηριστεί ως ομαλά ή μη ομαλά εξελισσόμενη.

Για τη μελέτη της χρονικής κατανομής της ακολουθίας της θάλασσας του Μαρμαρά, χρησιμοποιήθηκαν οι μετασεισμοί με μέγεθος $M \geq 2.1$ για την διασφάλιση της πληρότητας των δεδομένων. Η χρονική κατανομή των μετασεισμών προσδιορίστηκε για τα διαστήματα των 12h, 24h, 48h και 4 ημερών από τη γένεση του κύριου σεισμού. Με την εφαρμογή της σχέσης (15) στα στοιχεία των μετασεισμών, προέκυψαν τα παρακάτω διαγράμματα που υποδεικνύουν μία ομαλή εξέλιξη της σεισμικής ακολουθίας, χωρίς κάποια ένδειξη πιθανά επερχόμενου νέου ισχυρού σεισμού. Το συμπέρασμα αυτό προκύπτει από το γεγονός το πλήθος των μετασεισμών βρίσκεται εντός των διαστημάτων εμπιστοσύνης 95%. Εάν ένα ή περισσότερα σημεία ξεπερνούσαν το άνω όριο του διαστήματος εμπιστοσύνης, θα ήταν ένδειξη μη ομαλής εξέλιξης της διέγερσης, με πιθανή την εκδήλωση ενός ισχυρού μετασεισμού ή και νέου κύριου σεισμού, σε σύντομο χρονικό διάστημα.

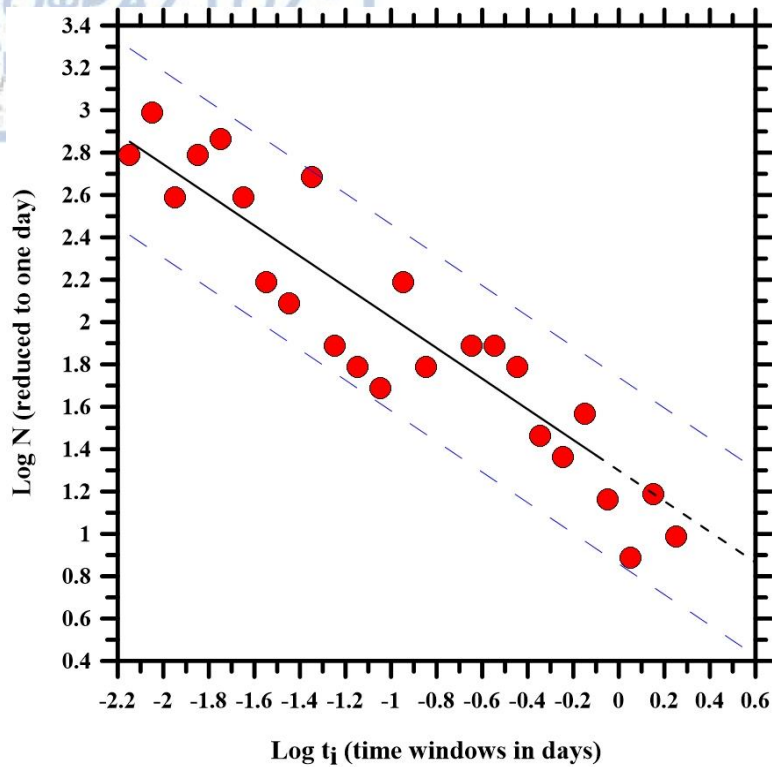
Από τα δεδομένα των μετασεισμών στις 24 h καθορίζεται ο ρυθμός απομείωσης τους και από τα δεδομένα των 48 h καθορίζεται ο ρυθμός που διατηρείται στη σεισμική ακολουθία.



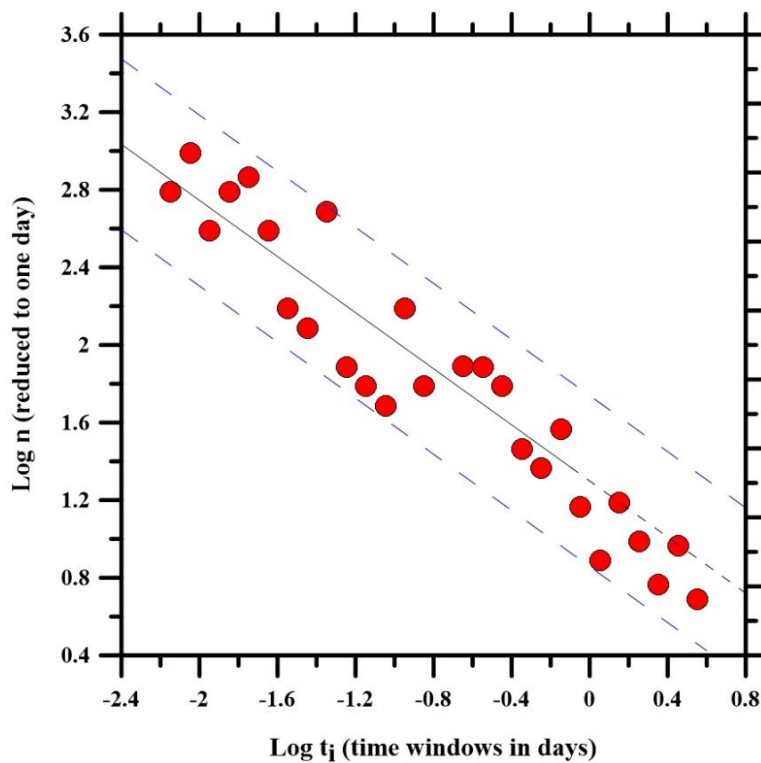
Σχήμα 3.4.1: Χρονική κατανομή των μετασεισμών των πρώτων 12 ωρών της σεισμικής ακολουθίας της θάλασσας του Μαρμαρά (26/09/19, $M=5.7$)



Σχήμα 3.4.2: Χρονική κατανομή των μετασεισμών των πρώτων 24 ωρών της σεισμικής ακολουθίας της θάλασσας του Μαρμαρά (26/09/19, $M=5.7$)



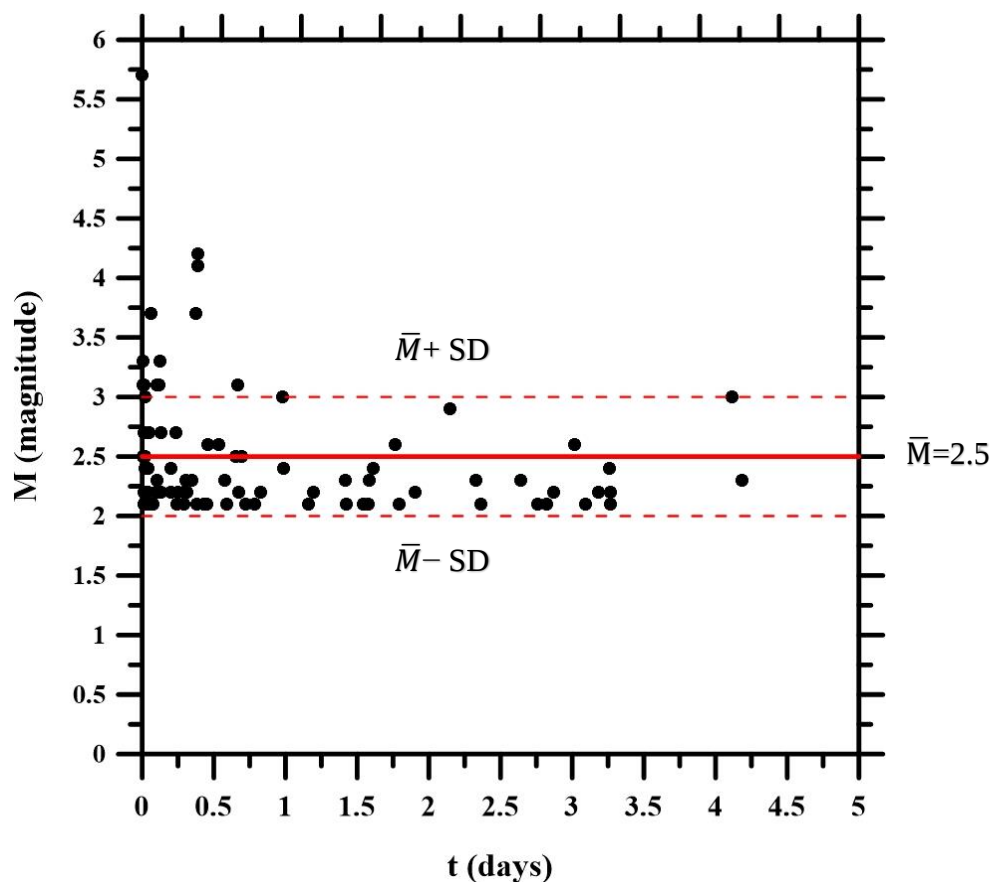
Σχήμα 3.4.3: Χρονική κατανομή των μετασεισμών των πρώτων 48 ωρών της σεισμικής ακολουθίας της θάλασσας του Μαμαρά (26/09/19, $M=5.7$)



Σχήμα 3.4.4: Χρονική κατανομή των μετασεισμών των πρώτων 4 ημερών της σεισμικής ακολουθίας της θάλασσας του Μαμαρά (26/09/19, $M=5.7$)

3.5 Κατανομή μέσου μεγέθους (Mean magnitude)

Στο παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 3.5.1) υπολογίζεται το μέσο μέγεθος και η τυπική απόκλιση (Standard Deviation) που προκύπτει από τους σεισμούς του πρώτου 48ωρου, οι οποίοι ικανοποιούν τη συνθήκη πληρότητας ($M_c = 2.1$). Οι τρεις οριζόντιες γραμμές του διαγράμματος απεικονίζουν τα εξής: Η μεσαία γραμμή (κόκκινη συνεχόμενη) αντιστοιχεί στη τιμή του μέσου μεγέθους M_{mean} , που η τιμή του υπολογίστηκε σε 2.5. Η τυπική απόκλιση (Standard Deviation) υπολογίστηκε σε 0.5. Επομένως, η άνω οριζόντια γραμμή (κόκκινη διακεκομμένη) και η κάτω οριζόντια γραμμή (κόκκινη διακεκομμένη) αντιπροσωπεύουν τα διαστήματα εμπιστοσύνης $\sim 70\%$ με τις σχέσεις $+SD$ και $-SD$ αντίστοιχα, δηλαδή $+SD = 2.5 + 0.5 = 3.0$ και $-SD = 2.5 - 0.5 = 2.0$. Οι πρώτες τιμές που φαίνεται να υπερβαίνουν το άνω διάστημα εμπιστοσύνης, αφορούν το πρώτο 12ώρο από την εκδήλωση του κύριου σεισμού και δεν επηρεάζουν το συνολικό αποτέλεσμα.



Σχήμα 3.5.1: Κατανομή μέσου μεγέθους των μετασεισμών της σεισμικής ακολουθίας της θάλασσας του Μαρμαρά (26/09/2019, $M=5.7$)

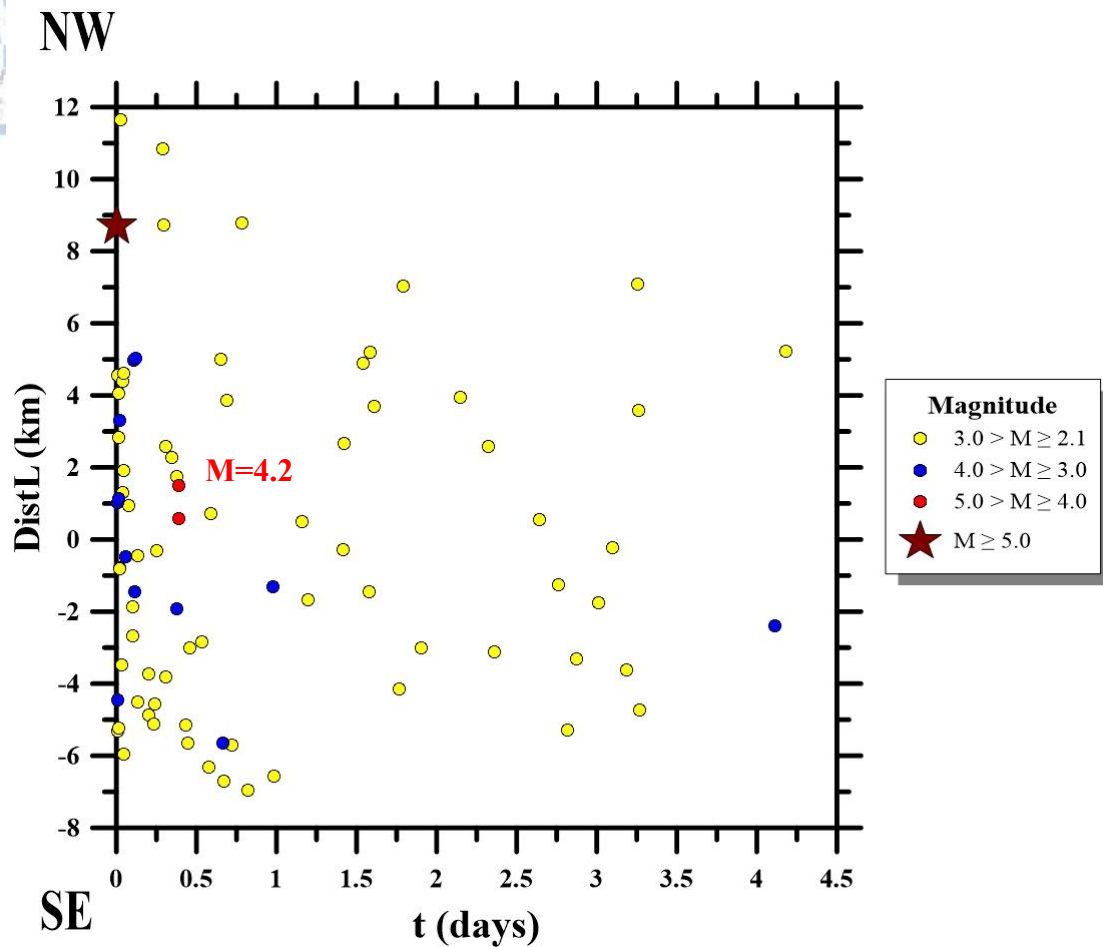
Επομένως, από την κατανομή συμπεραίνεται ότι τα μεγέθη των μετασεισμών της ακολουθίας, όπως φαίνεται και στο διάγραμμα, δεν παρουσιάζουν σημαντική απόκλιση από το μέση τιμή δίδοντας έτσι την εικόνα μίας ομαλά εξελισσόμενης μετασεισμικής ακολουθίας. Η όποια μεγάλη απόκλιση από το μέσο μέγεθος και η υπέρβαση των διαστημάτων εμπιστοσύνης 70% μπορεί να σήμανε την εκδήλωση κάποιου ισχυρού μετασεισμού ή ακόμη και ενός νέου ισχυρού κύριου σεισμού.

3.6 Χωρο-χρονική κατανομή (Space-time distribution)

Η μελέτη της χωρο-χρονικής κατανομής πραγματοποιείται με σκοπό να καθοριστεί ο τρόπος διάδοσης της διάρρηξης πάνω στο σεισμικό ρήγμα. Στο διάγραμμα που παρουσιάζεται παρακάτω (Σχήμα 3.6.1) αποτυπώνεται η πορεία αυτής της διάρρηξης και έχουν χρησιμοποιηθεί μόνο οι μετασεισμοί με μέγεθος πάνω από το μέγεθος πληρότητας ($M \geq 2.1$). Ο κατακόρυφος άξονας αφορά την απόσταση των επικέντρων των μετασεισμών από την διαμήκη τομή στο σεισμικό ρήγμα και ο οριζόντιος άξονας αντιπροσωπεύει τον χρόνο (σε μέρες) από το χρόνο γένεσης του κύριου σεισμού. Οι συμβολισμοί των εστιών αντιστοιχούν με αυτούς των σχημάτων 3.3.1.1 και 3.3.1.2.

Όπως προκύπτει από την χωρο-χρονική κατανομή των μετασεισμών της ακολουθίας, παρατηρείται ότι ο κύριος σεισμός (κόκκινος αστερίσκος) εκδηλώθηκε στο ΒΔ άκρο του ρήγματος και έπειτα η σεισμική δραστηριότητα επεκτάθηκε σε όλο το μήκος του έως το άλλο άκρο του. Ο ισχυρότερος μετασεισμός (26/10/19, 19:18 GMT, $M=4.2$) εκδηλώθηκε στο μέσον (περίπου) του σεισμογόνου χώρου. Επομένως, συνιστά μία μονοκατευθυντική διάρρηξη (unilateral).

Κατά το πρώτο 24ωρο, παρατηρείται διασπορά των επικέντρων των μετασεισμών σε ένα χώρο μήκους περίπου 16 km, γεγονός που δικαιολογεί ένα σεισμό μεγέθους 5.7. Μετά το πέρας της 1^{ης} ημέρας, σημειώνεται περιορισμός του διεγερθέντος χώρου σε ένα μήκος 11 km, με τον ρυθμό εκδήλωσης των μετασεισμών να παρουσιάζει σημαντική μείωση.



Σχήμα 3.6.1: Χωρο-χρονική κατανομή της ακολουθίας της θάλασσας του Μαρμαρά (26/09/2019, $M=5.7$) για μεγέθη μετασεισμών $M \geq 2.1$.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στις 26 Σεπτεμβρίου 2019, ώρα 10:59 GMT εκδηλώθηκε ισχυρός σεισμός, μεγέθους $M=5.7$, στην Κωνσταντινούπολη και συγκεκριμένα 70 χιλιόμετρα δυτικά της Πόλης και νότια της Σηλυβρίας, με επίκεντρο στη θάλασσα του Μαρμαρά. Ο σεισμός προκάλεσε ελαφρούς τραυματισμούς, χωρίς απώλειες ανθρώπινων ζώων και δημιούργησε ζημιές και εσωτερικές φθορές σε κτήρια της Κωνσταντινούπολης, ενώ σημειώθηκαν και προβλήματα με τα συστήματα τηλεπικοινωνιών.

Η μελέτη της σεισμικής ακολουθίας της θάλασσας του Μαρμαρά που πραγματοποιήθηκε στην παρούσα εργασία, εξήγαγε χρήσιμα συμπεράσματα για τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του σεισμογόνου χώρου, καθώς και για τον τρόπο εξέλιξης της σεισμικής δραστηριότητας.

Ακολουθούν τα βασικά συμπεράσματα της εργασίας:

- Από την κατά μέγεθος κατανομή των μετασεισμών της ακολουθίας, προέκυψε μέγεθος πληρότητας $M_c=2.1$ και τιμή για την παράμετρο $b=0.8$.
- Η χωρική κατανομή των μετασεισμών της ακολουθίας συνδέεται με τα τεκτονικά και γεωμετρικά χαρακτηριστικά του σεισμικού ρήγματος. Επομένως, προκύπτει ότι το ρήγμα έχει παράταξη 273° (διεύθυνση ΔΒΔ-ΑΝΑ), διεύθυνση βύθισης προς τα ΝΔ με γωνία κλίσης 49° και γωνία ολίσθησης 144° . Συνιστά, οπότε, μία δεξιόστροφη διάρρηξη διεύθυνσης με ανάστροφη συνιστώσα κλίσης. Το μήκος του σεισμικού ρήγματος, έπειτα από μετρήσεις στον χάρτη χωρικής κατανομής και επαλήθευσης μέσω μαθηματικών σχέσεων, υπολογίζεται στα 12 km.
- Η μελέτη της χρονικής κατανομής των μετασεισμών ανέδειξε μία ομαλά εξελισσόμενη μετασεισμική ακολουθία, χωρίς κάποια ένδειξη για ισχυρότερο μετασεισμό ή ακόμη και την εκδήλωση ενός νέου κύριου σεισμού.
- Τέλος, από τη χωρο-χρονική κατανομή των μετασεισμών της ακολουθίας, συμπεραίνεται ότι ο κύριος σεισμός εκδηλώθηκε στο ΒΔ άκρο του σεισμικού ρήγματος και στη συνέχεια η σεισμική δραστηριότητα επεκτάθηκε σε όλο το μήκος του φτάνοντας έως το άλλο άκρο του, ενώ ο ισχυρότερος μετασεισμός της ακολουθίας (26/09/2019/, ώρα 20:19 GMT, $M=4.2$) εκδηλώθηκε στο μέσον, σχεδόν, του σεισμικού ρήγματος. Συνεπώς, η διάρρηξη χαρακτηρίζεται ως μονοκατευθυντική (unilateral).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Gutenberg, B. and C.F. Richter. Frequency of earthquakes in California, "*Bull. Seism. Soc. Am.*", 34, 185-188, 1944.
- Lomnitz C. Magnitude stability in earthquake sequences, "*Bull. Seism. Soc. Am.*", 56, 247-249, 1966.
- Mogi, K. Magnitude-Frequency Relationship for Elastic Shocks Accompanying Fractures of Various Materials and Some Related Problems in Earthquakes. "*Bulletin of the Earthquake Research Institute*", University of Tokyo', 47, 395-317, 1962.
- Papazachos, B.C., Delibasis, N., Laipis, N., Moumoulidis, G. and G. Purcaru. Aftershock sequences of some large earthquakes in the region of Greece. "*Annal. Di Geofys.*", 20, 1-93, 1967
- Papazachos, B.C., Scordilis, E.M., Panagiotopoulos, D.G., Papazachos, C.B. and G.F. Karakaisis. Global relations between seismic fault parameters and moment magnitude of earthquakes, "*Bulletin of the Geological Society of Greece*", XXXVI, 3, 1482-1489, 2004
- Papazachos, B.C., Karakaisis, G.F., Papazachos, C.B. and E.M. Scordilis. Perspectives for earthquake prediction in the Mediterranean and contribution of geological observations, "*Robertson, A.H.F. & Mountrakis, D. (eds): Tectonic development of the Eastern Mediterranean Region, Geological Society, London, Special Publications*", 260, 689-707, 2006.
- Παπαζάχος, Β.Κ., Γ.Φ. Καρακαϊσης, Π.Μ. Χατζηδημητρίου, «*Εισαγωγή στη ΣΕΙΣΜΟΛΟΓΙΑ*», Εκδόσεις Ζήτη, 177-193, 217, 225, 2005
- Παπαζάχος, Β. και Κ. Παπαζάχου, «*ΟΙ ΣΕΙΣΜΟΙ ΤΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ*», 83, 277, 2003
- Παυλίδης, Σ.Β. «*Γεωλογία των Σεισμών*», 354-360, 2016.
- Wessel, P. and Smith, W., New version of the Generic Mapping Tools. "*EOS*", 76-329., 1995.
- Yaltirak, C. Tectonic evolution of the Marmara Sea and its surroundings, "*Marine Geology*", 190, 493-529, 2002.



ΙΣΤΟΣΕΛΙΔΕΣ

- Για αναζήτηση σεισμών:

<https://deprem.afad.gov.tr/ddakatalogu?lang=en>

<http://www.koeri.boun.edu.tr/scripts/lasteq.asp>

<http://www.koeri.boun.edu.tr/sismo/2/latest-earthquakes/automaticsolutions/>

https://www.emsc-csem.org/Earthquake/?filter=yes&start_date=2019-08-20&end_date=2019-10-02&min_lat=40&max_lat=42&min_long=27&max_long=30&min_depth=0&max_depth=100&min_mag=1.0&max_mag=8.0&min_intens=0&max_intens=8&view=2

- Αποτελέσματα σεισμικής δραστηριότητας:

<https://www.protothema.gr/world/article/929193/seismos-59-rihter-stin-tourkia/>

<https://www.in.gr/2019/09/26/world/seismos-59-rihter-sti-konstantinoupoli/>

<https://www.tovima.gr/2019/09/26/vimatv/konstantinoupoli-ksypnisan-mnimes-apo-ton-foniko-seismo-tou-99/>

<https://www.cnn.gr/news/kosmos/story/81301/thema-xronoy-enas-neos-megalos-seismos-stin-konstantinoupoli>

<https://www.kathimerini.gr/1044402/gallery/epikairothta/kosmos/seismos-57-rihter-sthn-kwnstantinoupolh---8-traymaties>

- Γενικές πληροφορίες περιοχής μελέτης:

<https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%98%CE%AC%CE%BB%CE%B1%CF%83%CF%83%CE%B1%CF%84%CE%BF%CF%85%CE%9C%CE%B1%CF%81%CE%BC%CE%B1%CF%81%CE%AC>

https://www.researchgate.net/publication/234179464_Tectonic_evolution_of_the_Marmara_Sea_and_its_surroundings

<https://www.ldeo.columbia.edu/tamam/tamam-background/izmit-earthquake-and-marmara-sea>

<https://www.gfz-potsdam.de/en/section/seismic-hazard-and-risk-dynamics/projects/memo-mamara-sea-earthquake-model/>

<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00206819709465276?journalCode=tigr20>

<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/09853111.2013.859346>

https://en.wikipedia.org/wiki/1766_Istanbul_earthquake

<https://www.emsc-csem.org/Earthquake/earthquake.php?id=794756#testimonies>



<http://geofon.gfz-potsdam.de/eqinfo/event.php?id=gfz2019swmo>

[https://www.globalcmt.org/cgi-bin/globalcmt-cgi-](https://www.globalcmt.org/cgi-bin/globalcmt-cgi-bin/CMT5/form?itype=ynd&yr=2019&mo=9&day=26&otype=ynd&oyr=2019&omo=9&oday=26&jyr=1976&jday=1&ojyr=1976&ojday=1&nday=1&lmw=5&umw=6&lms=0&ums=10&lmb=0&umb=10&llat=40&ulat=41&llon=27&ulon=29&lhd=0&uhd=200<)

[bin/CMT5/form?itype=ynd&yr=2019&mo=9&day=26&otype=ynd&oyr=2019&omo=9&oday=26&jyr=1976&jday=1&ojyr=1976&ojday=1&nday=1&lmw=5&umw=6&lms=0&ums=10&lmb=0&umb=10&llat=40&ulat=41&llon=27&ulon=29&lhd=0&uhd=200<](https://www.globalcmt.org/cgi-bin/globalcmt-cgi-bin/CMT5/form?itype=ynd&yr=2019&mo=9&day=26&otype=ynd&oyr=2019&omo=9&oday=26&jyr=1976&jday=1&ojyr=1976&ojday=1&nday=1&lmw=5&umw=6&lms=0&ums=10&lmb=0&umb=10&llat=40&ulat=41&llon=27&ulon=29&lhd=0&uhd=200<)

[https://www.researchgate.net/publication/234179464 Tectonic evolution of the Marmara Sea and its surroundings](https://www.researchgate.net/publication/234179464_Tectonic_evolution_of_the_Marmara_Sea_and_its_surroundings)

- Άλλες πηγές:

<http://shakemaps.itsak.gr>

<http://www.geo.auth.gr>

- Φωτογραφία εξωφύλλου:

<https://www.newsbeast.gr/world/arthro/5425923/ischyros-seismos-tora-stin-toyrkia-2>

Παράρτημα

Κατάλογος σεισμών με $M \geq 2.1$ που συνθέτουν τη σεισμική διέγερση της θάλασσας του Μαρμαρά, η οποία εκδηλώθηκε κατά το διάστημα 22/09/2019 - 02/10/2019

Έτος	Μήνας-Μέρα	Ώρα:Λεπτά:Δευτερόλεπτα	Γ. Πλάτος °B	Γ. Μήκος °A	Εστ. Βάθος (km)	M_L
2019	09-22	12:07:09.20	40.8700	28.1600	7	2.1
2019	09-22	03:09:37.00	40.9071	28.2410	15	2.3
2019	09-24	15:47:02.00	40.8763	28.1630	7	2.1
2019	09-24	11:32:34.00	40.8765	28.1926	7	2.1
2019	09-24	13:53:17.00	40.8878	28.2035	10	2.4
2019	09-24	07:30:49.00	40.8915	28.2051	5	3.0
2019	09-24	08:00:21.00	40.8714	28.2126	12	4.6
2019	09-24	08:57:21.00	40.8768	28.2198	11	3.3
2019	09-24	15:05:10.00	40.8510	28.2237	12	2.1
2019	09-24	10:11:07.00	40.8712	28.2245	11	2.7
2019	09-24	08:27:06.00	40.9147	28.2388	4	2.2
2019	09-24	11:19:14.00	40.8620	28.2430	12	3.3
2019	09-25	15:36:09.00	40.8886	28.1934	5	2.9
2019	09-25	13:07:58.00	40.8860	28.2055	12	3.3
2019	09-25	15:35:10.40	40.8700	28.2200	9	2.9
2019	09-25	16:00:03.00	40.8915	28.2249	2	2.7
2019	09-26	07:32:06.00	40.8811	28.2212	11	3.7
2019	09-26	07:52:46.00	40.8842	28.2322	9	2.2
2019	09-26	09:00:16.00	40.8718	28.2558	14	3.0
2019	09-26	10:59:25.00	40.8678	28.1640	12	5.7
2019	09-26	11:08:59.00	40.8601	28.3001	12	3.1
2019	09-26	11:11:34.00	40.8583	28.2425	7	3.3
2019	09-26	11:13:24.00	40.8246	28.3020	7	2.5
2019	09-26	11:14:24.50	40.8800	28.2100	8	2.7
2019	09-26	11:18:59.00	40.8430	28.3048	7	2.1
2019	09-26	11:19:54.00	40.8877	28.2473	14	3.1
2019	09-26	11:22:54.00	40.8916	28.2305	7	2.2
2019	09-26	11:23:52.00	40.8425	28.2076	7	2.1
2019	09-26	11:26:02.00	40.8351	28.2565	7	2.4
2019	09-26	11:28:46.00	40.8601	28.2621	7	2.5
2019	09-26	11:29:13.00	40.8571	28.2183	7	3.0
2019	09-26	11:35:46.00	40.9230	28.1446	7	2.1
2019	09-26	11:51:26.00	40.8610	28.2901	7	2.1

2019	09-26	11:58:44.00	40.8808	28.2118	7	2.1
2019	09-26	12:00:25.00	40.8675	28.2416	7	2.2
2019	09-26	12:03:45.00	40.8600	28.3158	7	2.4
2019	09-26	12:04:19.00	40.8880	28.2110	7	2.7
2019	09-26	12:09:16.00	40.8655	28.2348	7	2.1
2019	09-26	12:26:10.00	40.8675	28.2601	2	3.7
2019	09-26	12:52:10.00	40.8646	28.2448	7	2.1
2019	09-26	13:22:44.00	40.8473	28.2705	7	2.2
2019	09-26	13:25:43.00	40.8817	28.2862	0	2.3
2019	09-26	13:33:43.00	40.8777	28.2053	6	3.1
2019	09-26	13:44:37.00	40.8676	28.2703	14	3.1
2019	09-26	13:57:01.00	40.8785	28.2046	13	3.3
2019	09-26	14:07:51.00	40.8600	28.2584	11	2.7
2019	09-26	14:10:38.00	40.8520	28.2991	7	2.2
2019	09-26	15:50:38.00	40.8531	28.3032	13	2.4
2019	09-26	15:52:19.00	40.8678	28.2941	12	2.2
2019	09-26	16:35:25.00	40.8832	28.3120	8	2.7
2019	09-26	16:49:19.00	40.8522	28.2997	15	2.1
2019	09-26	17:03:31.00	40.8763	28.2603	3	2.2
2019	09-26	17:58:48.00	40.8753	28.1433	7	2.1
2019	09-26	18:02:51.00	40.8846	28.1672	4	2.2
2019	09-26	18:20:52.00	40.8843	28.2316	13	2.3
2019	09-26	18:26:43.00	40.8846	28.2985	4	2.2
2019	09-26	19:19:56.00	40.8776	28.2334	13	2.3
2019	09-26	20:02:40.00	40.8595	28.2736	14	3.7
2019	09-26	20:06:21.00	40.8755	28.2385	5	2.1
2019	09-26	20:19:18.90	40.8700	28.2400	13	4.2
2019	09-26	20:20:19.00	40.8662	28.2486	10	4.1
2019	09-26	21:23:45.00	40.8327	28.3019	9	2.1
2019	09-26	21:45:54.00	40.8632	28.3134	4	2.1
2019	09-26	22:02:17.00	40.8631	28.2856	11	2.6
2019	09-26	23:48:05.00	40.8747	28.2864	8	2.6
2019	09-27	00:50:22.00	40.8671	28.3211	13	2.3
2019	09-27	01:05:59.00	40.8838	28.2509	16	2.1
2019	09-27	02:35:37.00	40.9062	28.2109	11	2.5
2019	09-27	02:55:42.00	40.8555	28.3116	13	3.1
2019	09-27	03:05:25.00	40.8820	28.3282	13	2.2
2019	09-27	03:37:41.00	40.8901	28.2195	10	2.5
2019	09-27	04:16:49.00	40.8694	28.3152	9	2.1
2019	09-27	05:51:05.00	40.8718	28.1640	7	2.1
2019	09-27	06:45:55.00	40.8666	28.3278	9	2.2
2019	09-27	10:32:30.00	40.8548	28.2662	5	3.0
2019	09-27	10:39:27.00	40.8914	28.3289	15	2.4

2019	09-27	14:46:43.00	40.8799	28.2525	2	2.1
2019	09-27	15:39:13.00	40.8685	28.2728	8	2.2
2019	09-27	20:56:40.00	40.8792	28.2604	12	2.3
2019	09-27	21:10:47.00	40.9013	28.2343	7	2.1
2019	09-27	23:58:06.00	40.8653	28.2033	7	2.1
2019	09-28	00:53:22.00	40.8643	28.2695	12	2.1
2019	09-28	00:59:25.00	40.8986	28.2072	12	2.3
2019	09-28	01:38:38.00	40.9031	28.2238	13	2.4
2019	09-28	05:25:49.00	40.8584	28.2965	5	2.6
2019	09-28	05:57:14.00	40.9113	28.1905	7	2.1
2019	09-28	08:41:29.00	40.8451	28.2821	7	2.2
2019	09-28	14:28:38.00	40.8827	28.2171	6	2.9
2019	09-28	18:49:06.00	40.8968	28.2341	12	2.3
2019	09-28	19:43:49.00	40.8386	28.2816	15	2.1
2019	09-29	02:21:57.00	40.8816	28.2523	6	2.3
2019	09-29	05:11:40.00	40.8478	28.2642	5	2.1
2019	09-29	06:40:10.00	40.8623	28.3093	7	2.1
2019	09-29	07:58:22.00	40.8594	28.2881	15	2.2
2019	09-29	11:19:01.00	40.8558	28.2711	13	2.6
2019	09-29	13:18:29.00	40.8441	28.2526	7	2.1
2019	09-29	15:24:25.00	40.8504	28.2894	14	2.2
2019	09-29	17:10:47.00	40.8951	28.1868	11	2.4
2019	09-29	17:19:47.00	40.8946	28.2231	7	2.2
2019	09-29	17:27:24.00	40.8663	28.3045	7	2.1
2019	09-30	13:43:55.00	40.8919	28.2852	11	3.0
2019	09-30	15:24:51.00	40.9205	28.2113	6	2.3