



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ

ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ

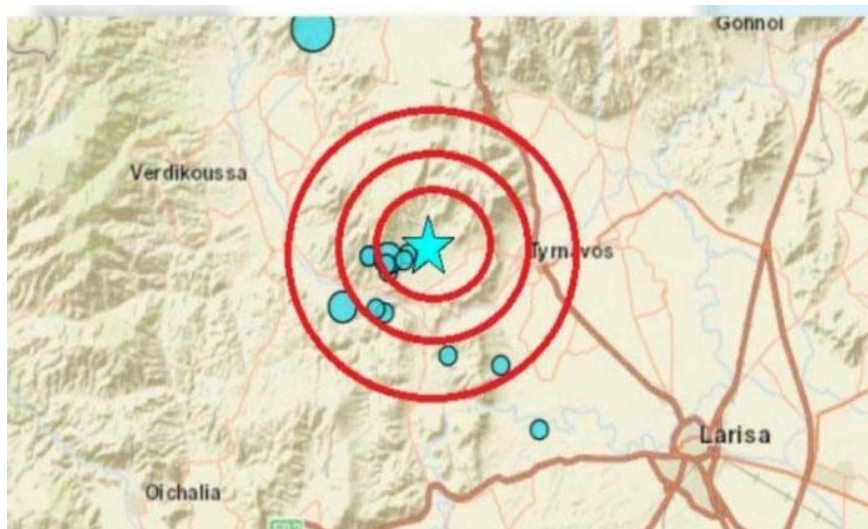


ΓΕΩΡΓΙΟΣ Ν. ΕΚΚΛΗΣΙΑΡΧΟΣ

ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΔΙΕΓΕΡΣΗΣ ΤΗΣ ΕΛΑΣΣΟΝΑΣ

(3 ΜΑΡΤΙΟΥ 2021, $M=6.3$)

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ



ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ

2023





ΓΕΩΡΓΙΟΣ Ν. ΕΚΚΛΗΣΙΑΡΧΟΣ

Φοιτητής Τμήματος Γεωλογίας, ΑΕΜ:5805

ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΔΙΕΓΕΡΣΗΣ ΤΗΣ ΕΛΑΣΣΟΝΑΣ

(3 ΜΑΡΤΙΟΥ 2021, M=6.3)

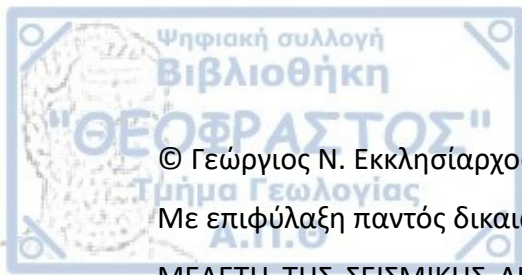
Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας, Τομέα Γεωφυσικής

Επιβλέποντες καθηγητές

ΣΚΟΡΔΥΛΗΣ ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ

ΠΑΝΟΥ ΑΡΕΤΗ

ΤΡΙΑΝΤΑΦΥΛΛΙΔΗΣ ΠΕΤΡΟΣ



© Γεώργιος Ν. Εκκλησιάρχος, Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ., Τομέας Γεωφυσικής, 2023

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΔΙΕΓΕΡΣΗΣ ΤΗΣ ΕΛΑΣΣΟΝΑΣ (3 ΜΑΡΤΙΟΥ 2021, $M=6.3$) –

Διπλωματική Εργασία

© George N. Ekklesiarchos, School of Geology, Dept. of Geophysics, 2023

All rights reserved.

STUDY OF THE SEISMIC EXCITATION OF ELASSONA (MARCH 3, 2021, $M=6.3$) –

Bachelor Thesis

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευτεί ότι εκφράζουν τις επίσημες θέσεις του Α.Π.Θ.



ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ	6
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	7
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	8
ABSTRACT	9
1. ΜΕΛΕΤΗ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΑΚΟΛΟΥΘΙΩΝ	10
1.1 Έννοιες και Ορισμοί	10
1.2 Κατά Μέγεθος Κατανομή	11
1.3 Χωρική Κατανομή	12
1.4 Χρονική Κατανομή	13
1.5 Χώρο–Χρονική Κατανομή	14
1.6 Κατανομή Μέσου Μεγέθους	14
2. ΜΑΚΡΟΣΕΙΣΜΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	15
2.1 Γεωτεκτονική της Λεκάνης της Θεσσαλίας	15
2.2 Στοιχεία Κύριου Σεισμού	18
2.3 Επιπτώσεις Σεισμικής Ακολουθίας στα Κτίρια	18
2.4 Επιπτώσεις Σεισμικής Ακολουθίας στο Έδαφος	22
2.5 Ιστορικοί Σεισμοί	25
3. ΜΕΛΕΤΗ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΑΚΟΛΟΥΘΙΑΣ ΤΗΣ ΕΛΑΣΣΟΝΑΣ	27
3.1 Γενικά Στοιχεία	27
3.2 Κατά Μέγεθος Κατανομή	27
3.3 Χωρική Κατανομή	30
3.3.1 Οριζόντια (γεωγραφική) κατανομή	31
3.3.2 Κατακόρυφη κατανομή	35
3.4 Χρονική Κατανομή	38
3.5 Χώρο–Χρονική Κατανομή	40
3.6 Κατανομή Μέσου Μεγέθους	42
4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	45
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	47
ΔΙΑΔΙΚΤΥΑΚΕΣ ΠΗΓΕΣ	49
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	50

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Σε αυτή την πτυχιακή εργασία μελετάται η σεισμική ακολουθία που συνόδευσε τον ισχυρό σεισμό μεγέθους $M=6.3$ ο οποίος εκδηλώθηκε στην περιοχή της Ελασσόνας (Βόρεια Θεσσαλία), στις 3 Μαρτίου του 2021. Στόχος της συγκεκριμένης μελέτης είναι ο προσδιορισμός των παραμέτρων που χαρακτηρίζουν τη συγκεκριμένη σεισμική ακολουθία και η εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την εξέλιξη της με τον χρόνο.

- ❖ Στο πρώτο κεφάλαιο παρατίθενται ο τρόπος μελέτης, ανάλυσης και διάκρισης των σεισμικών ακολουθιών.
- ❖ Στο δεύτερο κεφάλαιο αναφέρονται σημαντικά στοιχεία που σχετίζονται με την ενεργό τεκτονική και την σεισμικότητα της περιοχής ενδιαφέροντος, περιγράφονται οι επιπτώσεις της σεισμικής δραστηριότητας ενώ δίνονται πληροφορίες σχετικά με την σεισμική ιστορία της περιοχής.
- ❖ Στο τρίτο κεφάλαιο πραγματοποιείται λεπτομερής μελέτη των παραμέτρων της σεισμικής ακολουθίας της Ελασσόνας. Συγκεκριμένα εξετάζονται οι κατανομές των μετασεισμών της κατά μέγεθος, χωρικά, χρονικά αλλά και χώρο-χρονικά. Έτσι, εξάγονται πληροφορίες που σχετίζονται με τις διαστάσεις του σεισμικού ρήγματος και με τον τρόπο εξέλιξης της σεισμικής ακολουθίας τόσο χωρικά όσο και χρονικά.
- ❖ Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την παραπάνω μελέτη.



ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την ολοκλήρωση της πτυχιακής μου εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω συγκεκριμένους ανθρώπους που γνώρισα και συνεργάστηκα με μεγάλη ευκολία, όπου χωρίς την συμβολή τους θα ήταν αδύνατη η διεκπεραίωση της εργασίας.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα της πτυχιακής μου εργασίας, καθηγητή κ. Σκορδύλη Εμμανουήλ για την σημαντική του καθοδήγηση σε όλη τη διάρκεια της πτυχιακής.

Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Τριανταφυλλίδη Πέτρο και την κ. Πάνου Αρετή που με την σειρά τους συνέβαλλαν στον ερευνητικό τομέα της πτυχιακής μου εργασίας.

Τέλος, απευθύνω την ευγνωμοσύνη μου στους γονείς μου Νικόλαο και Αικατερίνη που με στήριξαν από την αρχή των σπουδών τόσο οικονομικά όσο και συμβουλευτικά αλλά και για το άνετο περιβάλλον που μου παρείχαν.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στις 3 Μαρτίου 2021 και ώρα 10:16:08 GMT, εκδηλώθηκε ισχυρός σεισμός μεγέθους $M=6.3$, κοντά στην Ελασσόνα και συγκεκριμένα 10 χιλιόμετρα δυτικά του Τυρνάβου. Όπως προέκυψε από τη μελέτη που ακολουθεί, ο σεισμός προήλθε από ένα κανονικό ρήγμα, παράταξης ΒΔ-ΝΑ, μήκους 20km, ενώ προκάλεσε ζημιές τόσο σε κτίρια και υποδομές όσο και στο έδαφος, ενώ είχε ως αποτέλεσμα μια ανθρώπινη απώλεια και τρεις τραυματισμούς.

Ο κύριος σεισμός εκδηλώθηκε στο μέσο του σεισμικού ρήγματος και στην συνέχεια η σεισμική δραστηριότητα διαδόθηκε σε όλο το μήκος του και προς τα δύο άκρα του, γεγονός που χαρακτηρίζει την σεισμική διάρρηξη ως δικατευθυντική. Ο ισχυρότερος μετασεισμός (04/03/2021, ώρα 18:38 GMT, $M=5.9$) εκδηλώθηκε σε ένα νέο πιθανώς κρυφό ρήγμα στην ΒΔ προέκταση του αρχικού σεισμικού ρήγματος.

Για την πλήρη μελέτη της σεισμικής ακολουθίας της Ελασσόνας εξετάστηκε η κατά μέγεθος κατανομή, η χωρική κατανομή (οριζόντια και κατακόρυφη), η χρονική και η χώρο-χρονική κατανομή των μετασεισμών της καθώς και η χρονική διακύμανση του μέσου μεγέθους τους. Από τη μελέτη των παραπάνω παραμέτρων προέκυψαν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του σεισμικού ρήγματος ενώ πιστοποιήθηκε η ομαλή εξέλιξη της σεισμικής ακολουθίας καθ' όλη τη διάρκεια της.

ABSTRACT

On March 3, 2021 at 10:16:08 GMT, a strong earthquake of magnitude $M=6.3$ occurred close to the city of Elassona and specifically 10 kilometers west of the town of Tyrnavos (central Greece), causing damages to buildings and structures, three human injuries and one death. The performed study revealed that the main shock was produced by an about 20km length normal fault of NW-SE direction.

The main shock was located to the middle of the seismic fault with the rupture propagating towards its two edges (bilateral rupture). The strongest aftershock of the sequence (04/03/2021, 18:38 GMT, $M=5.9$) occurred on a new possibly blind fault at the NW extension of the main fault.

For the detailed study of this seismic sequence and its evolution, various parameters were considered, such as the space distribution of the epicenters, the long and cross section of the foci, the time and the space-time distribution, of its member-shocks as well as the time variation of their mean magnitude.

The study of the above parameters helped to draw conclusions about the geometric characteristics of the seismic fault, while it was shown that the seismic sequence presented all the characteristics of normal evolution throughout its course.

1. ΜΕΛΕΤΗ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΑΚΟΛΟΥΘΙΩΝ

1.1 Έννοιες και Ορισμοί

- **Σεισμική ακολουθία** είναι ένα πλήθος σεισμών που εκδηλώνονται σε ένα συγκεκριμένο χώρο αλλά και χρονικό διάστημα.
- Ο σεισμός μιας ακολουθίας που έχει το μεγαλύτερο μέγεθος σε σχέση με τους υπόλοιπους σεισμούς της, θεωρείται ως ο **κύριος σεισμός**.

Οι σεισμικές ακολουθίες διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες :

- 1) Προσεισμική ακολουθία : Διαμορφώνεται από σεισμούς μικρότερου μεγέθους από αυτό του κύριου σεισμού που εκδηλώνονται με αυξανόμενη συχνότητα πριν από αυτόν στον συγκεκριμένο (σεισμογόνο) χώρο (προσεισμοί).
- 2) Μετασεισμική ακολουθία : Απαρτίζεται από σεισμούς μικρότερου μεγέθους από αυτό του κύριου σεισμού, που εκδηλώνονται στον συγκεκριμένο χώρο μετά από τον κύριο σεισμό (μετασεισμοί).
- 3) Σμηνοσειρά ή σμηνοακολουθία : Είναι ένα πλήθος σεισμών που εκδηλώνονται σε ένα συγκεκριμένο χώρο και χρόνο, χωρίς κάποιος από αυτούς να έχει μέγεθος αισθητά μεγαλύτερο από τους υπόλοιπους ώστε να χαρακτηριστεί ως κύριος σεισμός.

Για την ολοκληρωμένη μελέτη μιας σεισμικής ακολουθίας εξετάζονται τα εξής :

- 1) Η κατά μέγεθος κατανομή
- 2) Η χωρική κατανομή
- 3) Η χρονική κατανομή

- 4) Η χώρο-χρονική κατανομή
- 5) Η κατανομή μέσου μεγέθους

1.2 Κατά Μέγεθος Κατανομή

Η κατά μέγεθος κατανομή των σεισμών περιγράφεται από την σχέση που προτάθηκε από τους Gutenberg and Richter (1944). Η σχέση αυτή περιγράφει την γραμμική συνάρτηση μεταξύ του πλήθους των σεισμών και του μεγέθους τους.

$$\text{Log}N = a' - bM \quad (1.1)$$

Όπου:

N είναι ο αριθμός των σεισμών με μέγεθος μεγαλύτερο ή ίσο του M.

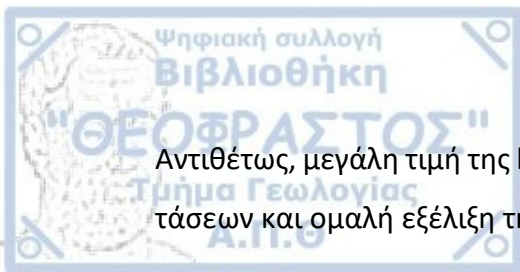
Η παράμετρος a' εξαρτάται από την σεισμικότητα της περιοχής, από την έκταση που καλύπτουν τα επίκεντρα πάνω στην περιοχή και από το συνολικό χρονικό διάστημα t , που καλύπτουν τα δεδομένα μας (ο κατάλογος των σεισμών που χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό των τιμών των παραπάνω παραμέτρων).

Για πρακτικούς λόγους, χρησιμοποιείται η τιμή της παραμέτρου a που αντιστοιχεί σε ένα έτος και δίνεται από την σχέση:

$$a = a' - \log t \quad (1.2)$$

Η τιμή της παραμέτρου b επηρεάζεται από την τεκτονική της υπό μελέτη περιοχής, καθώς και από το επίπεδο των τάσεων που επικρατούν στον χώρο αυτό.

Η παράμετρος b παίζει σημαντικό ρόλο στην εξέλιξη της ακολουθίας διότι χαμηλή τιμή αυτής (μικρή κλίση της ευθείας $\text{Log}N/M$) σημαίνει συσσώρευση τάσεων, με πιθανότητα πρόκλησης νέου ισχυρού σεισμού και μη ομαλή εξέλιξη της ακολουθίας.



Αντιθέτως, μεγάλη τιμή της b (μεγάλη κλίση της ευθείας) συνδέεται με εκτόνωση των τάσεων και ομαλή εξέλιξη της ακολουθίας.

Για την μελέτη των ακολουθιών καθοριστικής σημασίας είναι η εύρεση του μεγέθους πληρότητας M_c , της ελάχιστης τιμής μεγέθους δηλαδή, πάνω από την οποία όλοι οι σεισμοί της ακολουθίας εμπεριέχονται στον τελικό κατάλογο που χρησιμοποιούμε. Περισσότερα για αυτό θα πούμε στο τελευταίο κεφάλαιο.

1.3 Χωρική Κατανομή

Μελετάμε την κατανομή των εστιών και των επικέντρων των σεισμών της ακολουθίας στο χώρο με σκοπό την εύρεση των διαστάσεων του σεισμικού ρήγματος (μήκος και πλάτος), του αζιμούθιου του ως προς το Βορρά καθώς και της διεύθυνση και της γωνίας κλίσης του.

Έτσι η χωρική κατανομή προκύπτει από την μελέτη δύο κατανομών:

- 1) Οριζόντια γεωγραφική κατανομή
- 2) Κατακόρυφη κατανομή

Στην πρώτη περίπτωση παίρνουμε πληροφορίες για την διάσταση της διεγερθείσας περιοχής που προκύπτει από την προβολή των επικέντρων πάνω στον χάρτη. Επίσης εύκολα γίνεται αντιληπτή και η διεύθυνση του ίχνους του ρήγματος χάρη στον τρόπο κατανομής των επικέντρων.

Στην δεύτερη περίπτωση ασχολούμαστε με δύο κατακόρυφες τομές, η μία παράλληλη και η δεύτερη κάθετη στην παράταξη του ρήγματος. Στην περίπτωση αυτή προβάλλονται οι εστίες της σεισμικής ακολουθίας. Η παράλληλη με το ρήγμα τομή θα μας δώσει το μήκος του ρήγματος καθώς και μια γενική εικόνα για το εστιακό βάθος των σεισμών της σεισμικής ακολουθίας. Η κάθετη στο ρήγμα τομή μας δίνει σημαντικές πληροφορίες όπως η διεύθυνση και η γωνία κλίσης του ρήγματος.

Μετά την εύρεση του μήκους του ρήγματος μπορούμε να αξιοποιήσουμε κάποιες σχέσεις που το συνδέουν με το μέγεθος του κύριου σεισμού. Ενδεικτικά αναφέρουμε τη σχέση (Parazachos et al., 2004):

$$\text{Log}L = 0.5M - 1.86 \quad \text{για } 5.8 \leq M \leq 7.8 \quad (1.3)$$

Όπου L το τμήμα του διεγερμένου ρήγματος (σε km) και M το μέγιστο μέγεθος του σεισμού που θα μπορούσε να προκληθεί από το παραπάνω ρήγμα. Η σχέση αυτή αφορά διάρρηξη κλίσης σε ηπειρωτικές περιοχές.

1.4 Χρονική Κατανομή

Είναι γνωστό ότι σε μια ομαλά εξελισσόμενη μετασεισμική ακολουθία το πλήθος των σεισμών-μελών της βαίνει μειούμενο με το χρόνο. Επομένως η χρονική κατανομή των σεισμών μιας σεισμικής ακολουθίας χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της πορείας-εξέλιξής της. Αυτό που ενδιαφέρει είναι το αν η εξέλιξή της στο χρόνο αφήνει «υπόνοιες» για πιθανά επερχόμενο νέο ισχυρό σεισμό.

Για την σωστή μελέτη μιας χρονικής κατανομής υπολογίζεται το μέσο πλήθος των σεισμών που εκδηλώνονται σε χρονικά διαστήματα η διάρκεια των οποίων διαμορφώνεται ανάλογα με την χρονική απόσταση από τον κύριο σεισμό. Κατόπιν προσαρμόζεται γραμμική σχέση καθώς και δύο επιπλέον ευθείες που υλοποιούν διάστημα εμπιστοσύνης 95%. Η σχέση προσδιορίζεται από τα δεδομένα των πρώτων 48 ωρών μετά τον κύριο σεισμό.

Σε μια ομαλά εξελισσόμενη μετασεισμική ακολουθία οι σεισμοί που την αποτελούν δεν θα πρέπει να υπερβαίνουν το άνω όριο του διαστήματος εμπιστοσύνης 95% που έχει οριστεί. Αντίθετα, σε μια μη ομαλά εξελισσόμενη μετασεισμική ακολουθία το πλήθος των σεισμών που εκδηλώνονται υπερβαίνει το ανώτερο όριο 95% που έχει οριστεί, γεγονός που υποδεικνύει πιθανότητα γένεσης κάποιου ισχυρού

μετασεισμού ή και ακόμα κύριου σεισμού στο αμέσως επόμενο χρονικό διάστημα μέσα στο διεγερθέντα χώρο.

1.5 Χώρο–Χρονική Κατανομή

Η χώρο–χρονική κατανομή εφαρμόζεται για την κατανόηση της χωρικής και χρονικής εξέλιξης της εκδήλωσης των σεισμών της ακολουθίας πάνω στην επιφάνεια του ρήγματος. Έτσι, από την κατανομή αυτή προκύπτουν πληροφορίες για τον τρόπο διάδοσης της διάρρηξης πάνω στο ρήγμα κατά τη διάρκεια της ακολουθίας, δηλαδή αν η διάρρηξη διαδόθηκε προς μία ή δύο κατευθύνσεις.

Στην πρώτη περίπτωση όπου ο κύριος σεισμός εκδηλώνεται στο ένα άκρο του ρήγματος και στη συνέχεια η δραστηριότητα επεκτείνεται στο υπόλοιπο ρήγμα μέχρι και στο άλλο άκρο του, η διάρρηξη λέγεται μονοκατευθυντική (unilateral). Αν ο κύριος σεισμός συμβεί στο μέσο του τμήματος του ρήγματος και στην συνέχεια οι μετασεισμοί εξαπλωθούν προς τα δύο άκρα του, τότε η διάρρηξη θα πρέπει να χαρακτηριστεί ως δικατευθυντική (bilateral).

1.6 Κατανομή Μέσου Μεγέθους

Το μέσο μέγεθος σε μια ομαλά εξελισσόμενη μετασεισμική ακολουθία θα πρέπει να παραμένει σχεδόν σταθερό όσο περνάει ο χρόνος με κάποιες πολύ μικρές αυξομειώσεις.

Για την σωστή μελέτη της μεταβολής του μέσου μεγέθους εκτιμούμε την τιμή του (και το διάστημα εμπιστοσύνης 95%) λαμβάνοντας υπόψιν τους σεισμούς των πρώτων 48 ωρών από την στιγμή γένεσης του κύριου σεισμού. Αυτή η τιμή του μέσου μεγέθους θα είναι αντιπροσωπευτική και για όλα τα υπόλοιπα δεδομένα (μετά τις πρώτες 48 ώρες). Συστηματική υπέρβασή του θα σημαίνει μη ομαλή εξέλιξη της ακολουθίας.

2. ΜΑΚΡΟΣΕΙΣΜΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

2.1 Γεωτεκτονική της Λεκάνης της Θεσσαλίας

Οι παρακάτω πληροφορίες για τα ενεργά ρήγματα, το πεδίο των τάσεων, το σεισμικό ρήγμα του Τυρνάβου και το σεισμογόνο ρήγμα προέρχονται από την εργασία Παπαζάχος και συν., (2021).

Πριν αναφερθούμε στις επιπτώσεις της μετασεισμικής ακολουθίας στην περιοχή, καλό θα είναι να επισημανθούν σημαντικά στοιχεία που αφορούν την ενεργό τεκτονική και την σεισμικότητα της ευρύτερης περιοχής της Θεσσαλίας.

Πεδίο των τάσεων

Είναι γνωστό, πως στο Α. Μειόκαινο-Πλειόκαινο στην ευρύτερη περιοχή της Βόρειας Θεσσαλίας κυριαρχούσαν εφελκυστικές τάσεις με διεύθυνση ΒΑ-ΝΔ, με αποτέλεσμα την δημιουργία ρηξιγενών ζωνών με παράταξη ΒΔ-ΝΑ (κάθετα στο υπάρχον πεδίο).

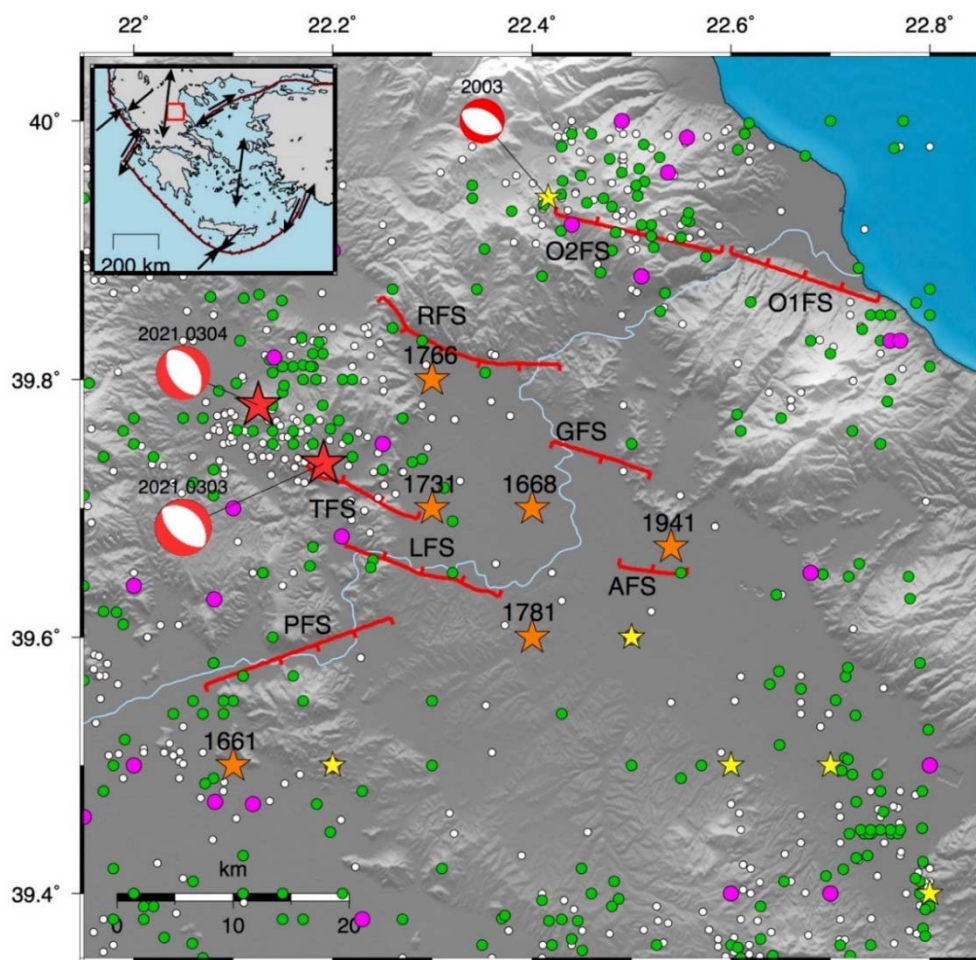
Στη συνέχεια, στο Τεταρτογενές κυριαρχεί πάλι εφελκυστικό πεδίο όμως με παράταξη ΒΒΑ-ΝΝΔ με αποτέλεσμα τα ρήγματα που δημιουργήθηκαν από αυτόν το εφελκυσμό να έχουν παράταξη ΔΒΔ-ΑΝΑ.

Αντιθέτως, οι συμπιεστικές τάσεις που παρατηρήθηκαν, έχουν τοπικό χαρακτήρα και περιορίζονται στο δυτικό κομμάτι της Βόρειας Θεσσαλίας.

Ενεργά Ρήγματα

Σημαντικά ενεργά κανονικά ρήγματα της Βόρειας Θεσσαλίας (σχήμα 2.1) είναι αυτά του Ομολίου 1 (Ο1FS), Ομολίου 2 (Ο2FS), Ροδιάς (RFS), Γυρτόνης (GFS), Ασμακίου (AFS), Λάρισας (LFS), Τυρνάβου (TFS), και Πηνειού (PSF) (Caputo and Pavlides 1993, 3^η έκδοση της βάσης δεδομένων των ρηγμάτων του ελληνικού χώρου του

Γεωδυναμικού Ινστιτούτου του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών (NOA faults version 3 <https://noa-beyondapps.maps.arcgis.com/>). Αυτά φαίνονται στον χάρτη του σχήματος 2.1 (Παπαζάχος και συν., 2021).



Σχήμα 2.1 : Σεισμικός χάρτης της Βόρειας Θεσσαλίας των ενεργών ρηγμάτων (κόκκινες γραμμές). Οι λευκοί κύκλοι αφορούν σεισμούς με μέγεθος $M \geq 2.0$ από το 1984, οι πράσινοι κύκλοι σεισμούς με μέγεθος $M \geq 3.0$ από το 1965, οι μωβ κύκλοι σεισμούς με μέγεθος $M \geq 4.0$ από το 1951. Οι αστερίσκοι με κίτρινο και πορτοκαλί χρώμα σχετίζονται με γνωστούς σεισμούς με μέγεθος $M \geq 5.0$ και με μέγεθος $M \geq 6.0$ αντίστοιχα (στοιχεία από τον κατάλογο σεισμικότητας του Τομέα Γεωφυσικής του ΑΠΘ). Οι αστερίσκοι με κόκκινο χρώμα είναι οι δύο σεισμοί που εκδηλώθηκαν στις 03 και 04 Μαρτίου του 2021 με μεγέθη $M=6.3$ και $M=6.0$ στον Τύρναβο. Για τους συγκεκριμένους σεισμούς σχεδιάστηκαν και οι μηχανισμοί γένεσης τους (Τομέας Γεωφυσικής Α.Π.Θ), ενώ στα Βόρεια της περιοχής υπάρχει και ο μηχανισμός γένεσης του σεισμού που εκδηλώθηκε το 2003 με μέγεθος $M=5.2$ (βάση δεδομένων GCMT).



Πιο συγκεκριμένα, τα σεισμικά ρήγματα της Ροδιάς (RFS) και της Γυρτώνης (GFS) είναι ρήγματα που κλίνουν προς τα ΝΝΔ.

Αντιθέτως, τα ρήγματα του Τυρνάβου (TFS), της Λάρισας (LFS) και του Ασμακίου (AFS) κλίνουν προς τα Β και ΒΒΑ. Θεωρούνται ενεργά, σημαντικού ενδιαφέροντος εξαιτίας της μεγάλης σεισμικής επικινδυνότητας επειδή βρίσκονται κοντά σε αστικά κέντρα της περιοχής της Θεσσαλίας, αλλά εκλαμβάνονται ως δευτερεύουσες δομές.

Παλαιοσεισμολογικές έρευνες που πραγματοποιήθηκαν στα ρήγματα της περιοχής της Βόρειας Θεσσαλίας (Caruto et al., 2004, 2006; Tsodoulos et al., 2016a, 2016b), ανέδειξαν πως αυτά παρουσιάζουν χαμηλό ρυθμό ολίσθησης (μέχρι 0.2 mm/yr) και επιφανειακές μετατοπίσεις περίπου 20-40 cm ανά γεγονός (ισχυρό σεισμό). Οι ισχυροί σεισμοί της περιοχής έχουν μεγάλη περίοδο επανάληψης και μεγέθη της τάξης των 6.5 βαθμών.

Σεισμικό Ρήγμα Του Τυρνάβου

Σύμφωνα με γεωλογικές και σεισμολογικές παρατηρήσεις, το ενεργό ρήγμα του Τυρνάβου είναι κανονικό, με παράταξη ΔΒΔ-ΑΝΑ, διεύθυνση κλίσης προς τα Β-ΒΒΑ, με χαμηλή γωνία κλίσης (35-40°) και χωρίς έντονη επιφανειακή εμφάνιση, δηλαδή «τυφλό» (Pavlides et al., 2021). Το συνολικό μήκος του είναι ~ 20km, ενώ το καλά μελετημένο και χαρτογραφημένο ίχνος του ξεπερνάει τα 12km.

Παρουσιάζει μια αργή δραστηριότητα, με 20-40 cm κατακόρυφες επιφανειακές μετατοπίσεις ανά γεγονός, διάστημα επανάληψης 1000 χρόνων και ρυθμό ολίσθησης 0.05-0.2 mm / έτος. Η παρουσία του ρήγματος αυτού κοντά στην Λάρισα αυξάνει την σεισμική επικινδυνότητα της περιοχής.

Το σεισμικό ρήγμα του πρόσφατου σεισμού (3/3/2021, M=6.3)

Πρόκειται για ένα κανονικό ρήγμα, παράταξης ΒΔ-ΝΑ, με γωνία κλίσης ~50°, το οποίο έδρασε ως τυφλό (blind fault) κατά την εκδήλωση της σεισμικής ακολουθίας. Το σεισμογόνο ρήγμα βρίσκεται μεταξύ των χωριών Ζάρκο και Μ. Ελευθεροχώρι. Μετά

από έρευνες στο ύπαιθρο, εντοπίστηκαν μικρές διανοίξεις πάνω σε προ υπάρχοντα ρήγματα και ζώνες διάτμησης, καθώς και κατακόρυφες μετατοπίσεις και μικρά ανοίγματα πλάτους έως και 2cm. Το συγκεκριμένο σεισμικό ρήγμα δεν έχει σχέση ούτε με το ενεργό ρήγμα του Τυρνάβου, αλλά ούτε με το ρήγμα της Λάρισας.

2.2 Στοιχεία Κύριου Σεισμού

Στις 3 Μαρτίου 2021 και τοπική ώρα 12:16:08 (10:16:08 GMT) εκδηλώθηκε ισχυρός σεισμός μεγέθους $M_w=6.3$ με επίκεντρο 22.191° E και 39.735° N και εστιακό βάθος ~ 10 km. Το επίκεντρο του εντοπίστηκε 10km δυτικά του Τυρνάβου. Το ρήγμα που προκάλεσε το σεισμό ήταν κανονικό (normal fault) και τυφλό με μήκος 20 km, διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ και με κλίση προς τα ΒΑ.

2.3 Επιπτώσεις Σεισμικής Ακολουθίας στα Κτίρια

Οι πληροφορίες για τις επιπτώσεις της σεισμικής ακολουθίας στα κτίρια προέρχονται από την ιστοσελίδα:

[https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A3%CE%B5%CE%B9%CF%83%CE%BC%CF%8C%CF%82_%CF%84%CE%B7%CF%82_%CE%95%CE%BB%CE%B1%CF%83%CF%83%CF%8C%CE%BD%CE%B1%CF%82_\(2021\)](https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A3%CE%B5%CE%B9%CF%83%CE%BC%CF%8C%CF%82_%CF%84%CE%B7%CF%82_%CE%95%CE%BB%CE%B1%CF%83%CF%83%CF%8C%CE%BD%CE%B1%CF%82_(2021))

Οι επιπτώσεις του σεισμού αυτού ήταν αρκετές τόσο σε κατοικίες όσο και σε έργα υποδομής. Από τα 4.533 σπίτια που υπέστησαν ζημιές τα 1.820 κρίθηκαν μη κατοικήσιμα (σχήμα 2.2) σε περιοχές όπως η Λάρισα, η Ελασσόνα, ο Τύρναβος, η Φαρκαδόνα, το Κιλελέρ. Οι 49 από τους 148 επαγγελματικούς χώρους που υπέστησαν βλάβες κρίθηκαν ακατάλληλοι, ενώ από τους 132 χώρους λατρείας και τα δημόσια κτήρια που υπέστησαν υλικές ζημιές τα 62 χαρακτηρίστηκαν «κίτρινα» (προσωρινά μη κατοικήσιμα αλλά επισκευάσιμα). Επί πλέον, από 247 κτίσματα που «χτυπήθηκαν» από τον σεισμό τα 211 επίσης κρίθηκαν μη κατάλληλα για χρήση.



Σχήμα 2.2 : Κατάρρευση σκεπής σε σπίτι.

Κατά την διάρκεια του σεισμού αποκολλήθηκαν κορυφές καμpanαριών (σχήμα 2.4) και εμφανίστηκαν ρωγμές τόσο σε εσωτερικούς όσο και σε εξωτερικούς τοίχους (σχήμα 2.3) ναών στον Τύρναβο, στο Μεσοχώρι, στην Αμυγδαλέα, στην Ελασσόνα, στην Μαγούλα και στο Αμούρι. Ρωγμές και πτώσεις κεραμιδιών παρουσιάστηκαν και στο Γενί Τζαμί στην Λάρισα, ενώ ο ναός του Αγίου Νικολάου στο Κουτσόχερο καταστράφηκε ολοσχερώς (σχήμα 2.5).



Σχήμα 2.3 : Ρωγμή στον Ιερό Ναό Αγίου Νικολάου στο Δαμάσι.

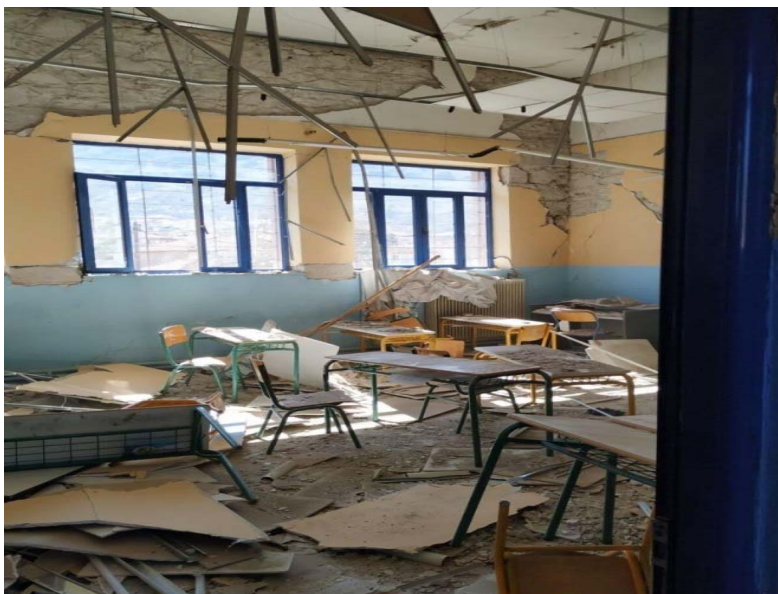


Σχήμα 2.4 : Μερική κατάρρευση καμπαναριού στον Ιερό Ναό Αγίου Δημητρίου στο Μεσοχώρι.



Σχήμα 2.5 : Πλήρης κατάρρευση του Ιερού Ναού Αγίου Δημητρίου (17 ου αιώνα) στο Κουτσόχερο Λάρισας.

Το δημοτικό σχολείο στο Δαμάσι, το οποίο κατασκευάστηκε το 1938, καταπονήθηκε σε μεγάλο βαθμό (σχήμα 2.6), με αποτέλεσμα την ολική κατεδάφιση του μία εβδομάδα μετά τον σεισμό.



Σχήμα 2.6 : Βλάβες στο Δημοτικό Σχολείο του Δαμασίου.

Πέρα από τις υλικές ζημιές, ένας άνθρωπος έχασε την ζωή του αφού νοσηλεύτηκε τέσσερις μέρες στο νοσοκομείο, εξαιτίας των τραυμάτων που υπέστη κατά τον εγκλωβισμό του εξ αιτίας του σεισμού στο σπίτι του στο Μεσοχώρι. Επίσης άλλοι τρεις άνθρωποι τραυματίστηκαν ελαφρά κατά την διάρκεια φυγής τους.

2.4 Επιπτώσεις Σεισμικής Ακολουθίας στο Έδαφος

Οι πληροφορίες για τις επιπτώσεις της σεισμικής ακολουθίας στο έδαφος πάρθηκαν από το <https://www.eaqme.gr/pages/klimakio-ths-eaqme-sto-seismo-ths-elassonas>

Πέρα από τις ζημιές στα κτίρια και την ανθρώπινη απώλεια υπήρχαν και επιπτώσεις στο έδαφος, όπως καταπτώσεις, διαρρήξεις και ρευστοποιήσεις εδαφών. Στην εθνική οδό Λάρισας–Ελασσόνας, στη θέση Μελούνα, παρατηρήθηκε πτώση μαρμάρων (έντονα τεκτονισμένα και κατακερματισμένα), από πρηνή ύψους 5–30 μέτρων. Αυτή η αστοχία δεν προκάλεσε κάποιο πρόβλημα στο οδικό δίκτυο, αφού είχε προηγηθεί σχετική μελέτη και είχαν ληφθεί κατάλληλα μέτρα προστασίας (σχήμα 2.7).



Σχήμα 2.7 : Θέση Μελούνα, εθνική οδός Λάρισας–Ελασσόνας, πτώσεις μαρμάρων.

Στην γέφυρα Τιταρησίου με κατεύθυνση προς Βλαχογιάννι, ο σεισμός προκάλεσε εφελκυστικές ρωγμές μήκους 2 χιλιομέτρων περίπου (σχήμα 2.8). Απαγορεύτηκε η

διέλευση από την διάβαση της γέφυρας αλλά και από την ίδια την γέφυρα του ποταμού Τιταρησίου προς το Δαμάσι.



Σχήμα 2.8 : Γέφυρα Βλαχογιάννι, ρωγμές σε υλικά επιχωμάτων.

Επιπροσθέτως, παρατηρήθηκαν φαινόμενα διαρρήξεων σε καλλιέργειες και στο οδικό δίκτυο στην εκτεταμένη περιοχή Βλαχογιάννι–Πραιτώριο–Βαρκός, με παράταξη ΒΔ-ΝΑ (σχήμα 2.9). Στα 500 μέτρα, βόρεια του χωριού Βαρκό, οι διαρρήξεις παρουσίαζαν μεγαλύτερο πλάτος καθώς και παραλληλία με το ρήγμα.



Σχήμα 2.9 : Ευρύτερη περιοχή Βλαχογιάννι–Πραιτώριο–Βαρκός, διαρρήξεις παράλληλες με το ρήγμα.

Τέλος, πολύ κοντά στην εκκλησία των Αγίων Αναργύρων στο Δομένικο της Ελασσόνας, αποκολλήθηκε ογκόλιθος (μητρικό πέτρωμα ένας γνευσιοσχιστόλιθος) πέντε κυβικών μέτρων (σχήμα 2.10). Εξαιτίας του κινδύνου κύλισης του προς τα κατάντι, ο ογκόλιθος καταστράφηκε με μηχανικά μέσα και απομακρύνθηκε με ασφάλεια.



Σχήμα 2.10 : Χωριό Δομένικο, ογκόλιθος γνευσιοσχιστόλιθου.

2.5 Ιστορικοί Σεισμοί

Οι πληροφορίες για τους ιστορικούς σεισμούς της περιοχής πάρθηκαν από το βιβλίο «Οι Σεισμοί της Ελλάδας» των *Parazachos and Parazachou, (1997)*.

Στη συνέχεια παρατίθενται πληροφορίες και περιγραφές (από την παραπάνω πηγή) των σημαντικότερων σεισμών που εκδηλώθηκαν από το 1661-1941 στην περιοχή της Βόρειας Θεσσαλίας (σχήμα 2.1).

- Σεισμός στις 31 Μαρτίου του 1661 (39.6° N, 22.2° E, επιφανειακός, $M=6.2$, Μετέωρα)
- Σεισμός τον Αύγουστο του 1668 (39.7° N, 22.3° E, επιφανειακός, $M=6.0$, Λάρισα VII)
- Σεισμός του 1731 (39.7° N, 22.3° E, επιφανειακός, $M=6.0$, Λάρισα VII)

Το 1731 εκδηλώθηκε ισχυρός σεισμός στην Λάρισα. Μιναρέδες, 10 σπίτια αλλά και χώροι εργασίας κατέρρευσαν, επίσης υπήρξαν και άλλες ζημιές. Ένας άνθρωπος σκοτώθηκε στο σπίτι του εξαιτίας της κατάρρευσης ενός τοίχου.

- Σεισμός στις 9 Νοεμβρίου του 1766 (39.8° N, 22.2° E, επιφανειακός, $M=6.3$, Ελασσόνα VIII)

Γύρω στις 5 η ώρα το βράδυ, εκδηλώθηκε ισχυρός σεισμός με αποτέλεσμα πολλά σπίτια να υποστούν σοβαρές ζημιές και οι καπνοδόχοι να καταρρεύσουν πλήρως.



- Σεισμός στις 8 Σεπτεμβρίου του 1781 (39.6° N, 21.8° E, επιφανειακός, M=6.0, Μετέωρα VII)

Ο ισχυρός σεισμός προκάλεσε καταστροφές σε σπίτια, εργαστήρια, τζαμιά καθώς και ανθρώπινα θύματα, ενώ ακολουθήθηκε από πυρκαγιά.

- Σεισμός στις 1 Μαρτίου του 1941 (39.67° N, 22.54° E, επιφανειακός, M=6.3, Λάρισα VIII)

Στις 03:52:47 τα μεσάνυχτα έλαβε χώρα ισχυρός σεισμός, προκλήθηκαν σοβαρές ζημιές στην Λάρισα και στα γύρω χωριά όπως στο Γερακάρι, Ελευθέριο, Χάλκη, Γλάυκη, Πλατύκαμπο και άλλα. Στην Λάρισα, οι περισσότερες ζημιές συνέβησαν στην βιομηχανική περιοχή στα Ταμπάκικα, στη περιοχή που βρισκόταν η αγορά της πόλης καθώς και γύρω από το κάστρο. Στην πόλη της Λάρισας, το 10% από τα σπίτια καταστράφηκε ολοσχερώς, το 60% έπαθε σοβαρές ζημιές ενώ το 30% ελαφρότερες. Στην Λάρισα, περίπου 40 άτομα έχασαν την ζωή τους και 100 τραυματίστηκαν. Το ίχνος του ρήγματος, συνολικού μήκους 12km με παράταξη NA-BΔ, ξεκινάει από το Ασημάκι, ανάμεσα από τον Πλατύκαμπο και το Ελευθέριο, και φτάνει μέχρι την Φαλάνα. Ωστόσο παρατηρήθηκαν μικρότερες διαρρήξεις παράλληλες στην κύρια διάρρηξη, στην περιοχή του Γιούλμπερι. Φαινόμενα ρευστοποίησης παρατηρήθηκαν σε μερικά μέρη, όπως στο Αλκαζάρ της Λάρισας. Στην Λάρισα, η αριστερή όχθη του ποταμού Πηνειού, υπέστη καθίζηση και μετακινήθηκε προς την κοίτη του. Μια διάρρηξη επίσης πλάτους 10cm παρατηρήθηκε επίσης στο έδαφος από την γέφυρα του Πηνειού προς το Αλκαζάρ (Maravelakis, 1941, 1943). Η καταστροφή επεκτάθηκε μέχρι και την Ραψάνη όπου 4 σπίτια κατέρρευσαν. Πριν από τον κύριο σεισμό προηγήθηκε προσεισμός στις (2 Ιανουαρίου, 18:01, M=4.1) ενώ ακολουθήθηκε από μετασεισμούς, οι δύο μεγαλύτεροι από τους οποίους εκδηλώθηκαν, ο πρώτος την ίδια μέρα με τον κύριο σεισμό (07:51, M=5.1) και ο δεύτερος στις 14 Μαΐου (08:36, M=5.5).

3. ΜΕΛΕΤΗ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΑΚΟΛΟΥΘΙΑΣ ΤΗΣ ΕΛΑΣΣΟΝΑΣ

3.1 Γενικά Στοιχεία

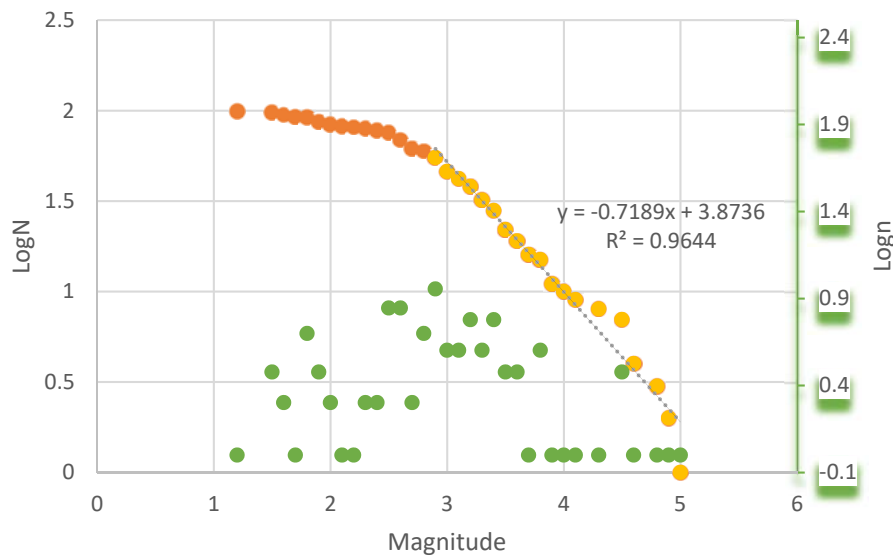
Για την μελέτη της σεισμικής ακολουθίας της Ελασσόνας συλλέχθηκαν δεδομένα από κατάλογο του Σεισμολογικού Σταθμού του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης (<http://geophysics.geo.auth.gr/ss/>) και από το Γεωδυναμικό Ινστιτούτο του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών (<http://bbnet.gein.noa.gr/HL/>). Αναγκαία ήταν η δημιουργία ενός ενιαίου καταλόγου που να εμπεριέχει τις εστιακές παραμέτρους (χρόνος γένεσης, γεωγραφικές συντεταγμένες, εστιακό βάθος και μέγεθος) όλων των κοινών και μη κοινών σεισμών των παραπάνω αρχικών καταλόγων. Έτσι διαμορφώθηκε ο τελικός κατάλογος που καλύπτει το χρονικό διάστημα από 03/03/2021 έως 06/02/2021 και την περιοχή που ορίζεται από το πλαίσιο με συντεταγμένες 39.598°B- 39.871°B και 21.904°A–22.294°A. Ο τελικός κατάλογος περιλαμβάνει συνολικά 362 σεισμούς και είναι πλήρης ως προς το μέγεθος, μετά και από την τελική εκτίμηση του μεγέθους πληρότητας M_c .

3.2 Κατά Μέγεθος Κατανομή

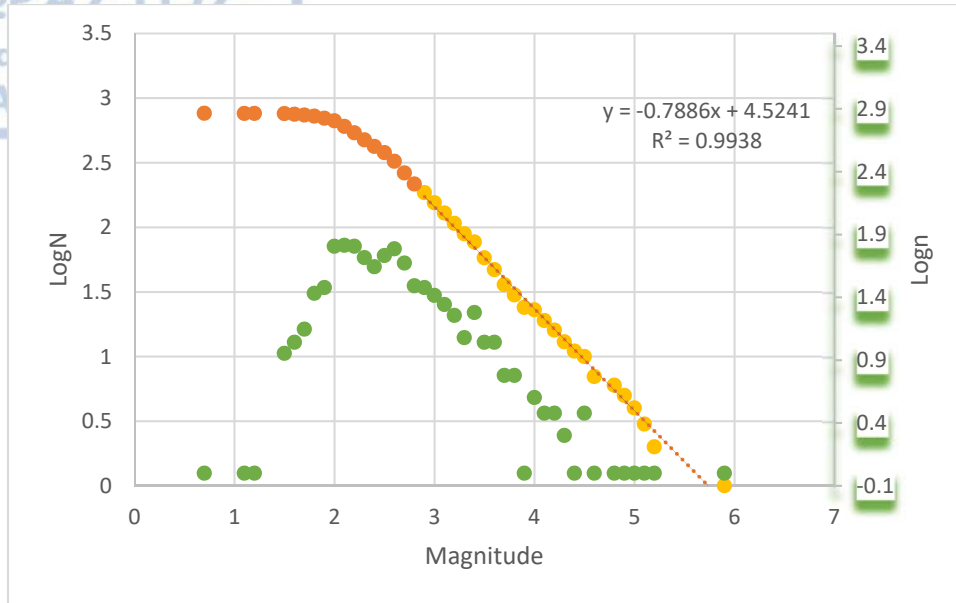
Όπως αναφέρθηκε και στο πρώτο κεφάλαιο, για την μελέτη της κατά μέγεθος κατανομής χρησιμοποιείται η σχέση (1.1) που προτάθηκε από τους Gutenberg and Richter (1944) και θα αναφέρετε στο εξής ως G-R. Σημαντικό στοιχείο για αυτή την κατανομή είναι το μέγεθος πληρότητας M_c , το ελάχιστο, δηλαδή, μέγεθος πάνω από το οποίο όλοι οι σεισμοί που εκδηλώθηκαν στην περιοχή κατά το διάστημα που καλύπτει ο κατάλογος περιέχονται σε αυτόν.

Αρχικά έγινε μια απόπειρα να εφαρμοστεί η σχέση G-R για τους προσεισμούς. Δυστυχώς, ο σχετικά μικρός αριθμός τους δεν επέτρεψε την εφαρμογή της και την εξαγωγή αξιόπιστων και πειστικά ερμηνεύσιμων συμπερασμάτων. Συνεπώς η μελέτη της προσεισμικής ακολουθίας δεν ήταν εφικτή και για το λόγο αυτό οι προσεισμοί εξαιρέθηκαν από τον τελικό κατάλογο.

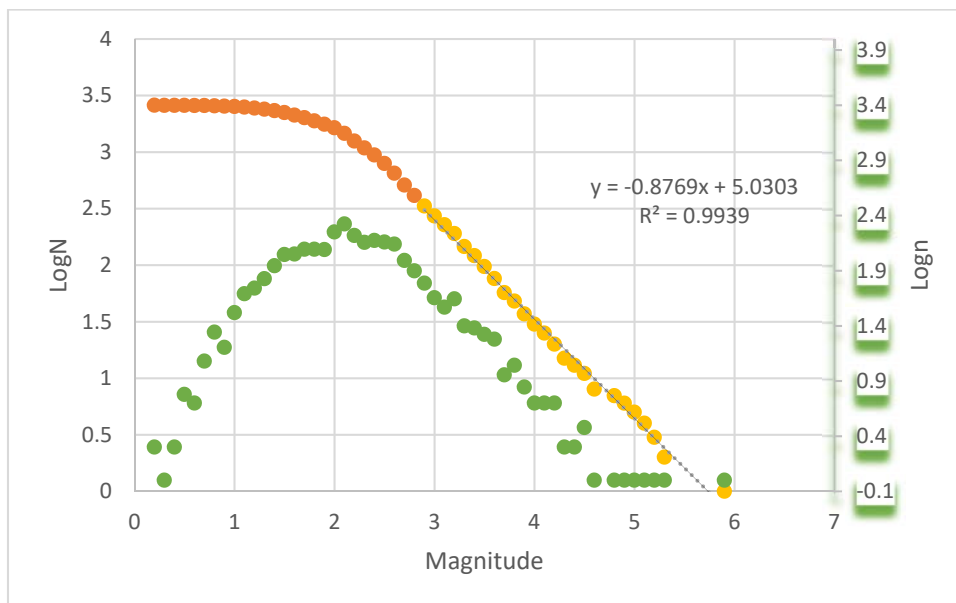
Ακολούθησε εφαρμογή της σχέσης για διάφορα χρονικά διαστήματα μετά την εκδήλωση του κύριου σεισμού με σκοπό να εντοπιστεί η μεγαλύτερη τιμή μεγέθους πληρότητας, η οποία αναμενόταν να προκύψει από τα δεδομένα των πρώτων ωρών μετά τον κύριο σεισμό. Αυτό συμβαίνει γιατί σημαντικός αριθμός μικρών σεισμών «κρύβεται» μέσα στις κυματομορφές μεγαλύτερων σεισμών οι οποίοι είναι πολύ συχνοί τις πρώτες ώρες μετά τον κύριο σεισμό. Έτσι, από τις πρώτες 6 ώρες μετά τον κύριο σεισμό προέκυψε μέγεθος πληρότητας $M_c=2.6$, ενώ από τις 3 πρώτες ώρες το μέγεθος πληρότητας ανέβηκε στο $M_c=2.9$ (σχήμα 3.1). Αυτή ήταν και η τελική τιμή ($M_c=2.9$) που υιοθετήθηκε για το μέγεθος πληρότητας του καταλόγου. Έπειτα, σχεδιάστηκαν οι κατανομές μεγεθών για τις πρώτες 48 ώρες (σχήμα 3.2), για τον πρώτο μήνα (σχήμα 3.3) καθώς και για ολόκληρη τη μετασεισμική ακολουθία (σχήμα 3.4) χρησιμοποιώντας το παραπάνω μέγεθος πληρότητας ($M \geq 2.9$).



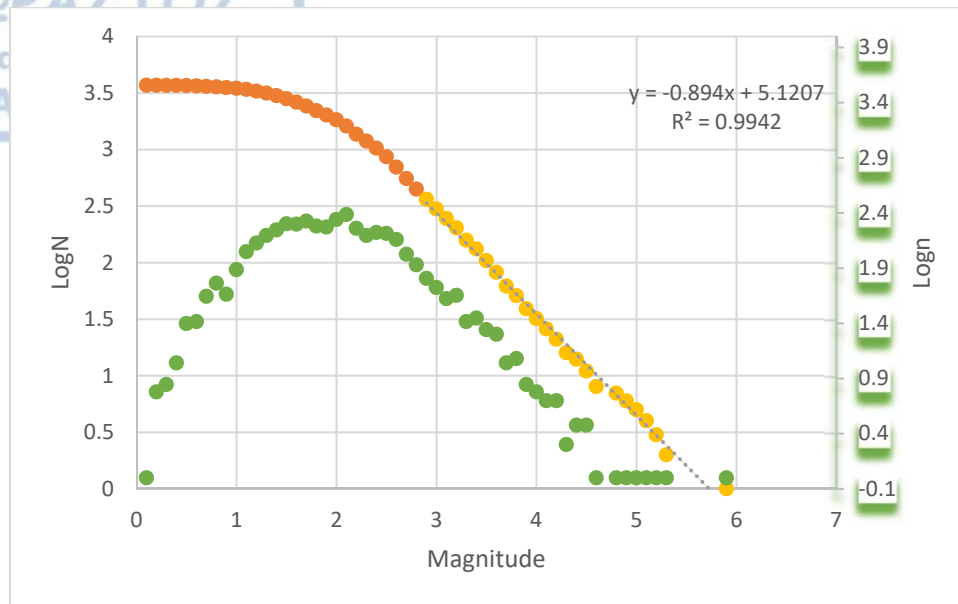
Σχήμα 3.1 : Κατά μέγεθος κατανομή των μετασεισμών της ακολουθίας της Ελασσόνας, χρησιμοποιώντας τα δεδομένα των πρώτων 3 ωρών μετά τον κύριο σεισμό και μέγεθος πληρότητας $M_c=2.9$.



Σχήμα 3.2 : Κατά μέγεθος κατανομή των μετασεισμών της ακολουθίας της Ελασσόνας, χρησιμοποιώντας τα δεδομένα των πρώτων 48 ωρών μετά τον κύριο σεισμό και μέγεθος πληρότητας $M_c=2.9$.



Σχήμα 3.3 : Κατά μέγεθος κατανομή των μετασεισμών της ακολουθίας της Ελασσόνας, χρησιμοποιώντας τα δεδομένα του πρώτου μήνα μετά τον κύριο σεισμό και μέγεθος πληρότητας $M_c=2.9$.



Σχήμα 3.4 : Κατά μέγεθος κατανομή των μετασεισμών της ακολουθίας της Ελασσόνας, χρησιμοποιώντας το σύνολο των δεδομένων με μέγεθος πληρότητας $M_c=2.9$.

Οι μαθηματικές σχέσεις που αντιστοιχούν στις μέσες ευθείες κάθε μιας από τις παραπάνω κατανομές δίνονται μέσα στα αντίστοιχα διαγράμματα. Το συμπέρασμα που προκύπτει είναι πως κατά την εξέλιξη της ακολουθίας η τιμή της (απόλυτης τιμής) παραμέτρου b αυξάνεται έστω και πολύ ελαφρά, σκιαγραφώντας ομαλή εξέλιξη της μετασεισμικής ακολουθίας.

3.3 Χωρική Κατανομή

Στη περίπτωση της χωρικής κατανομής, αυτή διακρίνεται στην οριζόντια (γεωγραφική) και στην κατακόρυφη κατανομή των σεισμών. Είναι αναγκαία η δημιουργία χαρτών και διαγραμμάτων που προβάλλονται τα επίκεντρα και οι εστίες αντίστοιχα των μετασεισμών, με σκοπό την άντληση πληροφοριών που σχετίζονται με τις διαστάσεις και τον προσανατολισμό του σεισμογόνου χώρου της μετασεισμικής ακολουθίας και του σεισμικού ρήγματος της Ελασσόνας.

3.3.1 Οριζόντια (γεωγραφική) κατανομή

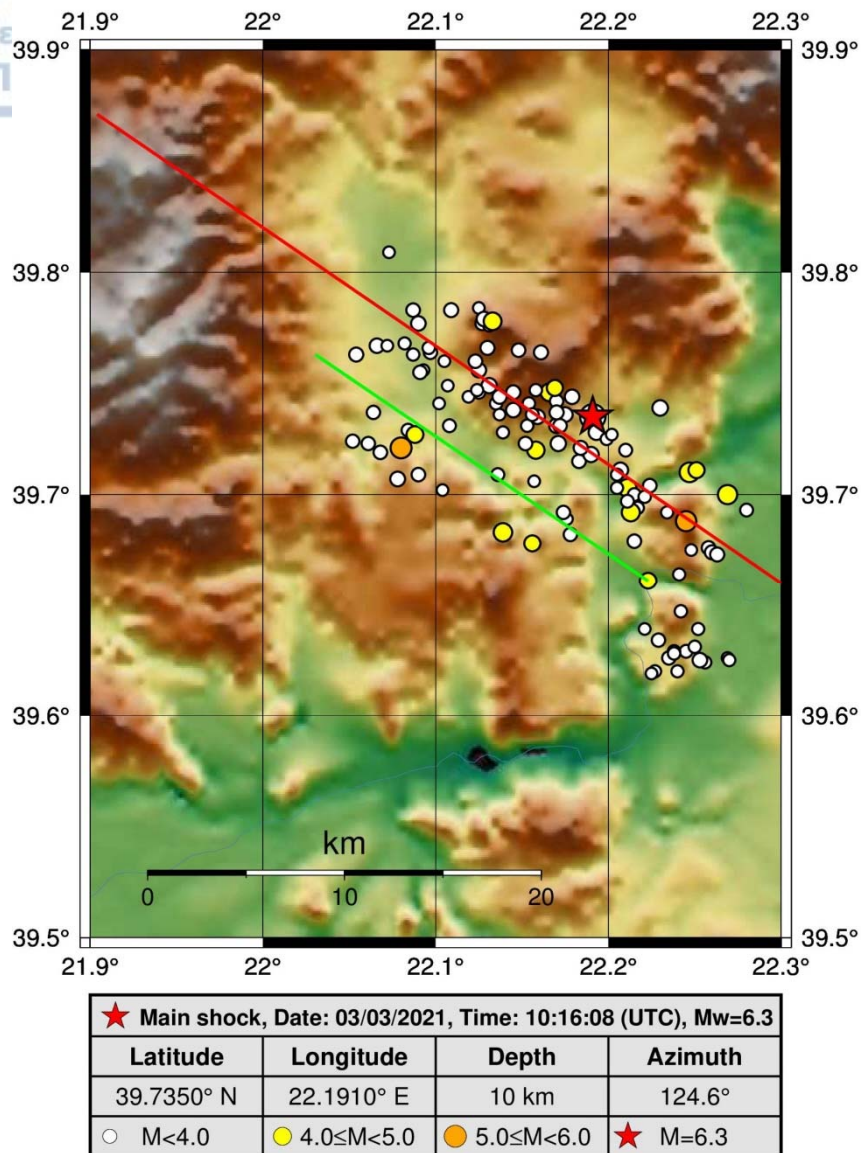
Με τη βοήθεια του προγράμματος GMT (Wessel et al., 2013), κατασκευάζονται χάρτες που απεικονίζουν τα επίκεντρα των σεισμών της ακολουθίας. Χρησιμοποιούνται μόνο οι μετασεισμοί με μέγεθος $M \geq 2.9$.

Από το δεύτερο κεφάλαιο είναι γνωστό πως ο σεισμός της Ελασσόνας προέρχεται από ένα κανονικό ρήγμα, ηπειρωτικής διάρρηξης. Επομένως, εφαρμόζοντας την σχέση (Papazachos et al., 2004):

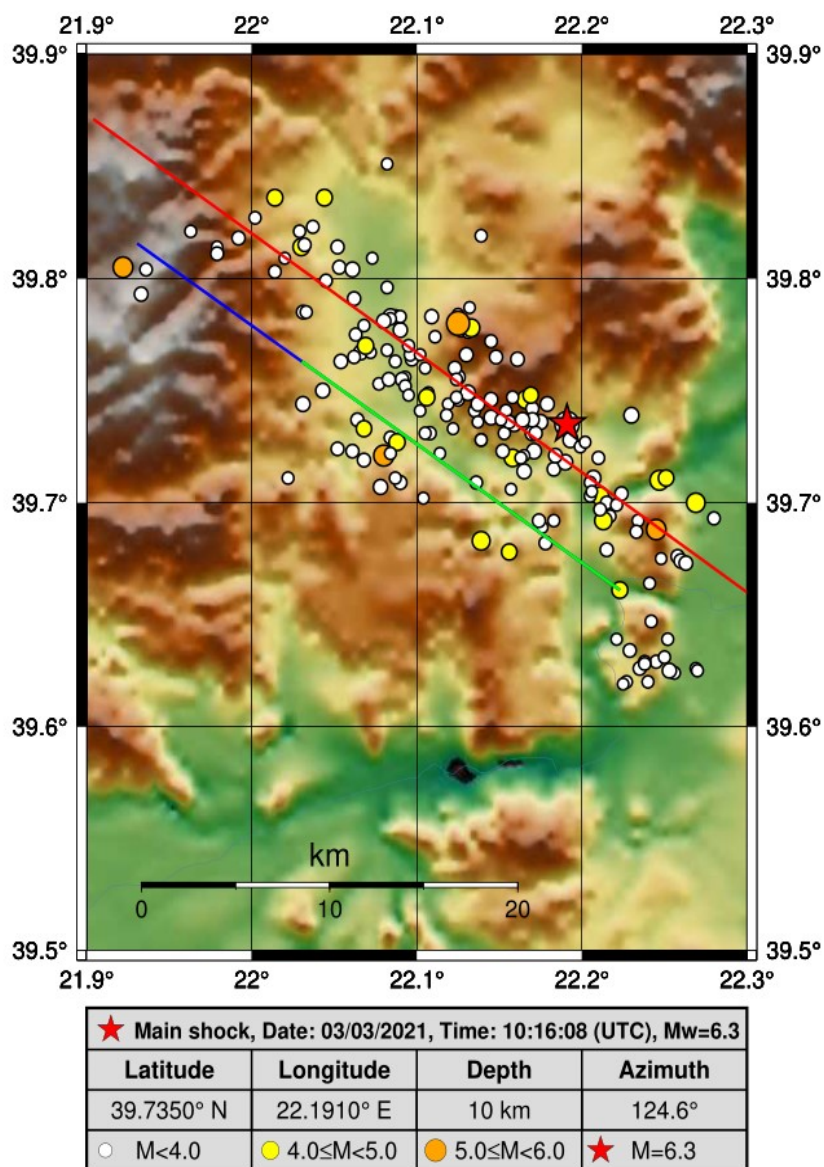
$$\text{Log}L(\text{km}) = 0.50M - 1.86, \quad \sigma = 0.13, \quad 5.8 \leq M \leq 7.8 \quad (3.1)$$

και θεωρώντας το μέγεθος του κύριου σεισμού $M=6.3$, προκύπτει θεωρητική τιμή για το μήκος του σεισμικού ρήγματος $L=19.49\text{km}$. Άρα και στον χάρτη χωρικής κατανομής των μετασεισμών της ακολουθίας αναμένεται ανάλογο μήκος του σεισμογόνου χώρου που διαμορφώνεται.

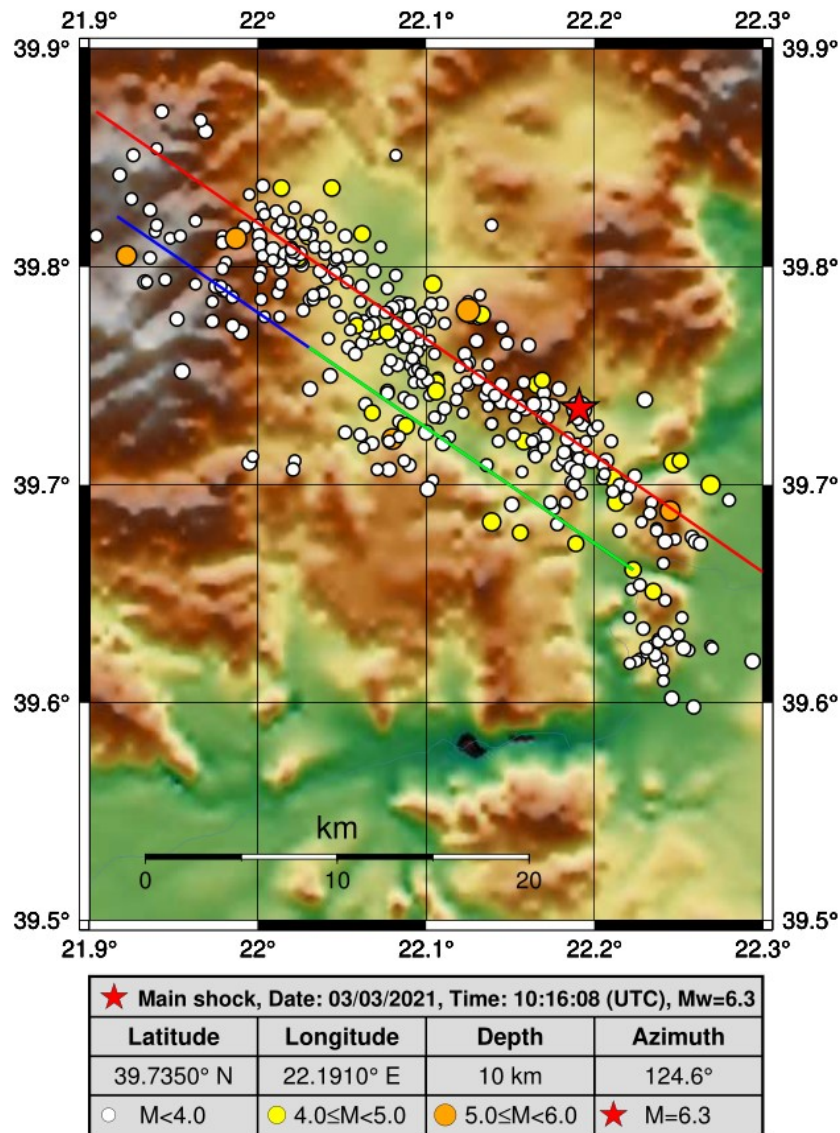
Παρακάτω παρατίθενται 3 χάρτες οριζόντιας κατανομής epicέντρων της μετασεισμικής ακολουθίας για τις πρώτες 24 ώρες (σχήμα 3.5), 48 ώρες (σχήμα 3.6) και για όλους τους σεισμούς του καταλόγου (σχήμα 3.7). Η κόκκινη γραμμή δείχνει το μέσο αζιμούθιο που διαμορφώνεται από την κατανομή των μετασεισμών ενώ η πράσινη (σχήμα 3.5) δείχνει το μέσο μήκος του σεισμογόνου χώρου όπως αυτό διαμορφώνεται από τα επίκεντρα των ισχυρότερων ($M \geq 4.0$) μετασεισμών της ακολουθίας. Στα γραφήματα των σχημάτων (3.6) και (3.7), με μπλε γραμμή συμβολίζεται η προέκταση του αρχικού τμήματος του ρήγματος προς τα ΒΔ μετά την εκδήλωση του δεύτερου ισχυρότερου σεισμού της ακολουθίας (4/3/2021, $M=5.9$).



Σχήμα 3.5 : Οριζόντια κατανομή των επικέντρων των μετασεισμών της ακολουθίας της Ελασσόνας για τις πρώτες 24 ώρες (03/03/2021-04/03/2021) μετά τον κύριο σεισμό.



Σχήμα 3.6 : Οριζόντια κατανομή των επικέντρων των μετασεισμών της ακολουθίας της Ελασσόνας για τις πρώτες 48 ώρες (03/03/2021-05/03/2021) μετά τον κύριο σεισμό.



Σχήμα 3.7 : Οριζόντια κατανομή των επικέντρων για το σύνολο των μετασεισμών της ακολουθίας της Ελασσόνας (03/03/2021-02/06/2021).

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τα παραπάνω γραφήματα, είναι πως το μήκος του ρήγματος, όπως αυτό προκύπτει από τη χωρική κατανομή των μετασεισμών, κυμαίνεται περί τα 20km (σχήμα 3.5), κάτι που ταυτίζεται με την αρχική προσέγγιση των 19.59km, μήκος που αντιστοιχεί σε ρήγμα ικανού να εκδηλώσει σεισμό μεγέθους μέχρι και $M=6.3$. Επιπροσθέτως, το αζιμούθιο του ρήγματος ως προς τον Βορρά, είναι $\sim 125^\circ$, υποδηλώνοντας ΒΔ-ΝΑ παράταξη. Τέλος, η διάρρηξη χαρακτηρίζεται δικατευθυντική (bilateral), επειδή ο κύριος σεισμός εκδηλώθηκε στο

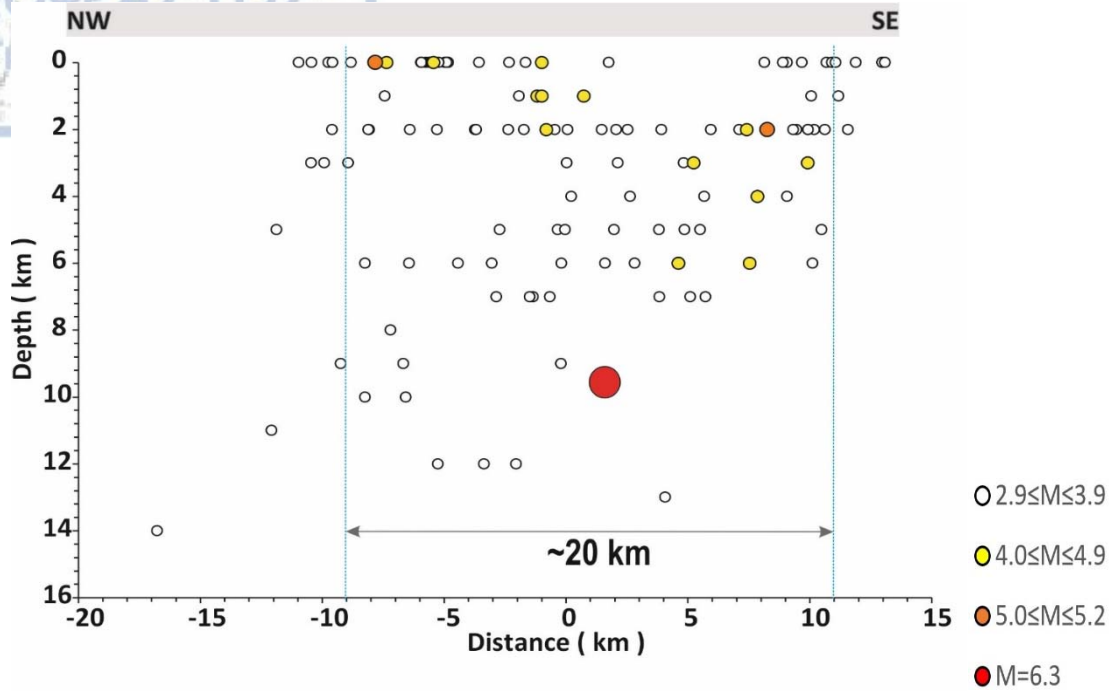
μέσο του σεισμικού ρήγματος και έπειτα η δραστηριότητα επεκτάθηκε και προς τα δύο άκρα του ρήγματος.

3.3.2 Κατακόρυφη κατανομή

Για την μελέτη της γεωμετρίας του σεισμικού ρήγματος, κατασκευάζονται διαγράμματα που απεικονίζουν τομές του σεισμογόνου χώρου (προβολές των εστιών σε κατακόρυφα επίπεδα) με σκοπό την άντληση πληροφοριών που σχετίζονται με τη διεύθυνση και τη γωνία κλίσης του σεισμικού ρήγματος. Οι τομές πραγματοποιούνται παράλληλα και κάθετα στην παράταξη του σεισμογόνου χώρου.

➤ Διαμήκης τομή (Long Section)

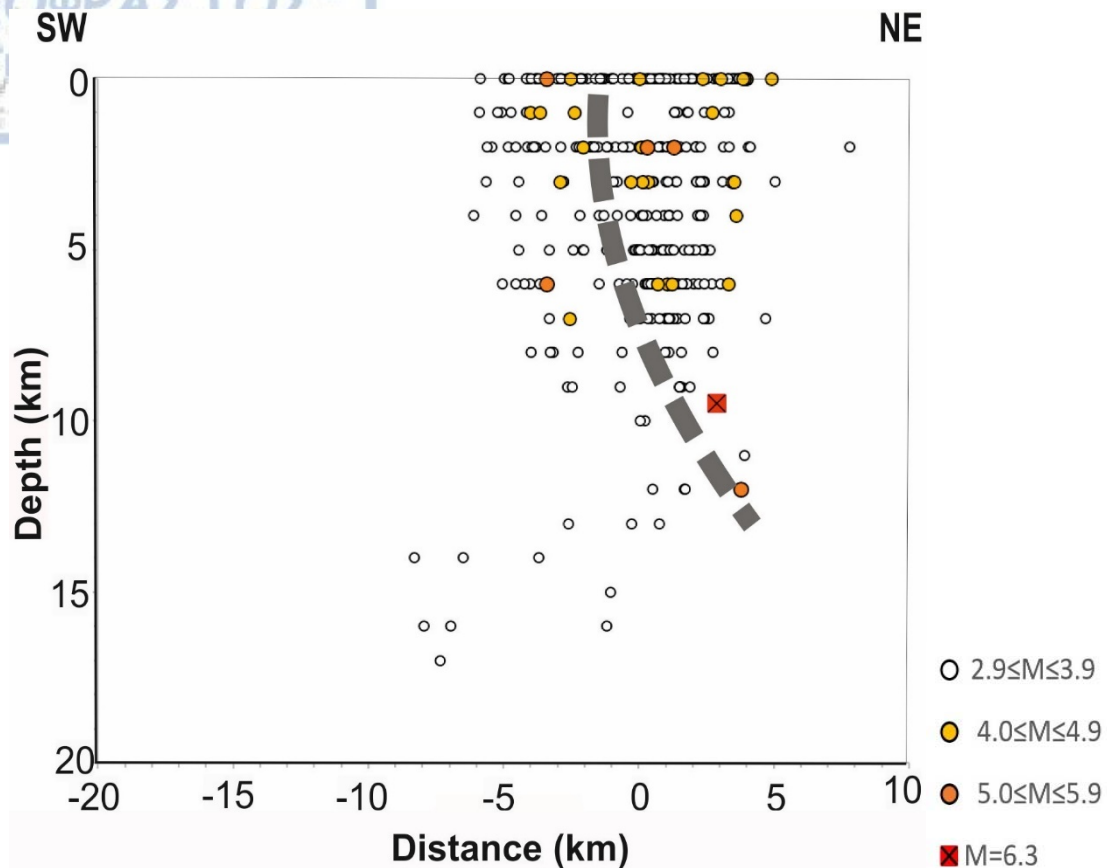
Από τη διαμήκη τομή (παράλληλη στη διεύθυνση του ρήγματος) βγαίνουν συμπεράσματα για το μήκος του ρήγματος και για τη διακύμανση του βάθους της σεισμικής διάρρηξης (σχήμα 3.8). Προκύπτει ότι το μήκος του ρήγματος κυμαίνεται περίπου στα 20 km, όπως έχει αποδειχθεί και από την προηγούμενη κατανομή, και το βάθος της διάρρηξης φτάνει τα ~10 km. Η συγκέντρωση σεισμών με εστιακά βάθη ~0 km οφείλεται σε μη αξιόπιστη εκτίμηση του εστιακού βάθους λόγω του γενικευμένου (και όχι ακριβέστερου τοπικού) μοντέλου δομής φλοιού που χρησιμοποιήθηκε κατά τη διαδικασία υπολογισμού των εστιακών παραμέτρων των σεισμών της ακολουθίας.



Σχήμα 3.8 : Χωρική κατανομή των εστιών της μετασεισμικής ακολουθίας της Ελασσόνας, σε κατακόρυφο επίπεδο, παράλληλο στο αζιμούθιο του σεισμογόνου χώρου, που προέκυψε από τις πρώτες 24 ώρες μετά τον κύριο σεισμό (03/03/2021-04/03/2021, $M=6.3$ με κόκκινο κύκλο) .

➤ Εγκάρσια τομή (Cross Section)

Στην εγκάρσια τομή (κάθετη στο αζιμούθιο του ρήγματος) προβάλλονται οι εστίες των μετασεισμών της ακολουθίας σε κατακόρυφο επίπεδο κάθετο στο αζιμούθιο του ρήγματος (σχήμα 3.9). Από την μορφή της τομής προκύπτουν συμπεράσματα για την διεύθυνση κλίσης και την γωνία κλίσης του σεισμικού ρήγματος .



Σχήμα 3.9 : Χωρική κατανομή των εστιών της μετασεισμικής ακολουθίας της Ελασσόνας, σε κατακόρυφο επίπεδο, κάθετο στο αζιμούθιο του σεισμογόνου χώρου, που προέκυψε από το σύνολο του καταλόγου. Η διακεκομμένη γραμμή αναπαριστά το σεισμικό ρήγμα.

Αν ληφθούν υπόψιν από το παραπάνω γράφημα οι σεισμοί με μέγεθος $M \geq 4.0$ προκύπτει πως το ρήγμα βυθίζεται προς τα ΒΑ .

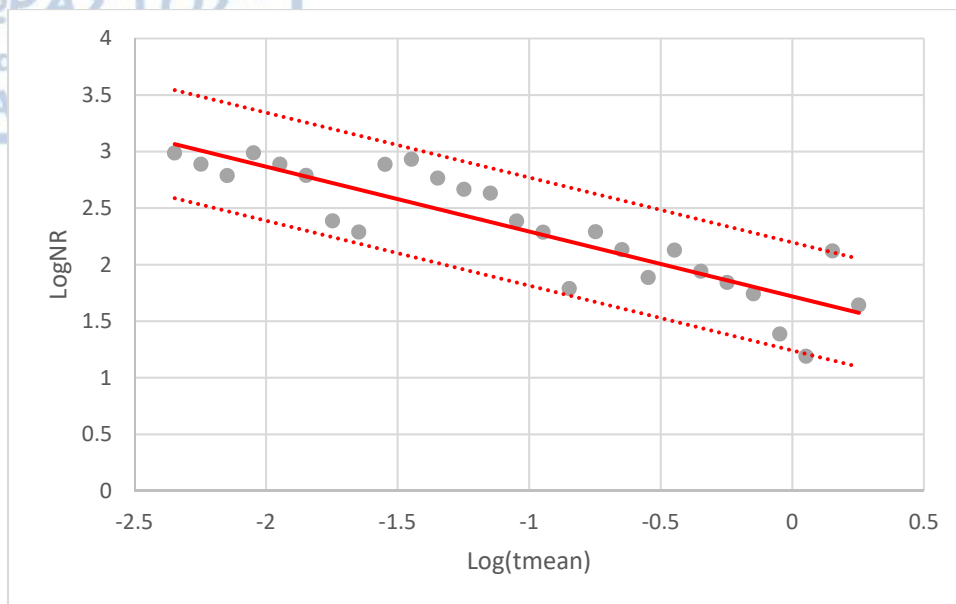
3.4 Χρονική Κατανομή

Όπως έχει αναφερθεί και στο πρώτο κεφάλαιο, η χρονική κατανομή των σεισμών μιας σεισμικής διέγερσης μελετάται με σκοπό την εκτίμηση της πορείας-εξέλιξης της διέγερσης. Σε μια ομαλά εξελισσόμενη μετασεισμική ακολουθία αναμένεται ο αριθμός των μετασεισμών να μειώνεται με το χρόνο, ακολουθώντας συγκεκριμένο ρυθμό που εκτιμάται από τα δεδομένα των πρώτων 48 ωρών της ακολουθίας. Τυχόν συστηματική υπέρβαση πάνω από το μέσο ρυθμό (συν διάστημα εμπιστοσύνης 95%) θα σημαίνει μη ομαλή εξέλιξη με αυξημένη πιθανότητα εκδήλωσης ισχυρού μετασεισμού ή και νέου κύριου σεισμού.

Για την μελέτη της χρονικής κατανομής της μετασεισμικής ακολουθίας της Ελασσόνας, λήφθηκαν υπόψιν οι μετασεισμοί με μέγεθος $M \geq 2.9$ (μέγεθος πληρότητας). Έτσι κατασκευάστηκαν γραφήματα που απεικονίζουν τις κατανομές για χρονικά διαστήματα των 48 ωρών, 1 μήνα και για όλο το πλήθος των μετασεισμών του καταλόγου.

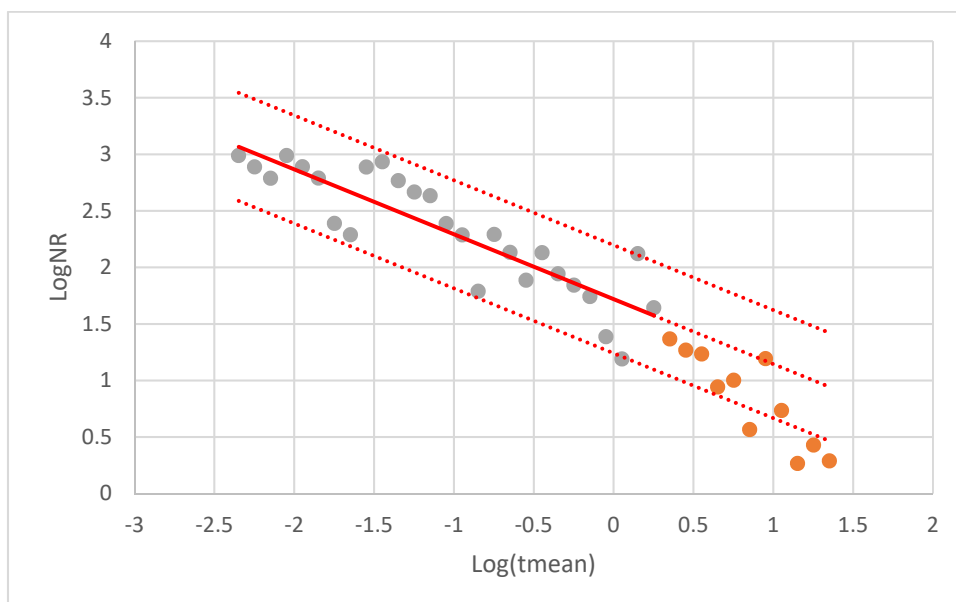
Η γραμμική σχέση (κόκκινη ευθεία) καθώς και οι δύο ευθείες που υλοποιούν διαστήματα εμπιστοσύνης 95% (διακεκομμένες γραμμές) που προσδιορίζονται από τα δεδομένα των 48 ωρών μετά τον κύριο σεισμό, παρουσιάζονται στο σχήμα 3.10. Η σχέση που υλοποιείται από την μέση ευθεία είναι:

$$\text{LogNR} = -0.5737 \log t + 1.719 \quad R^2 = 0.7706 \quad (3.2)$$

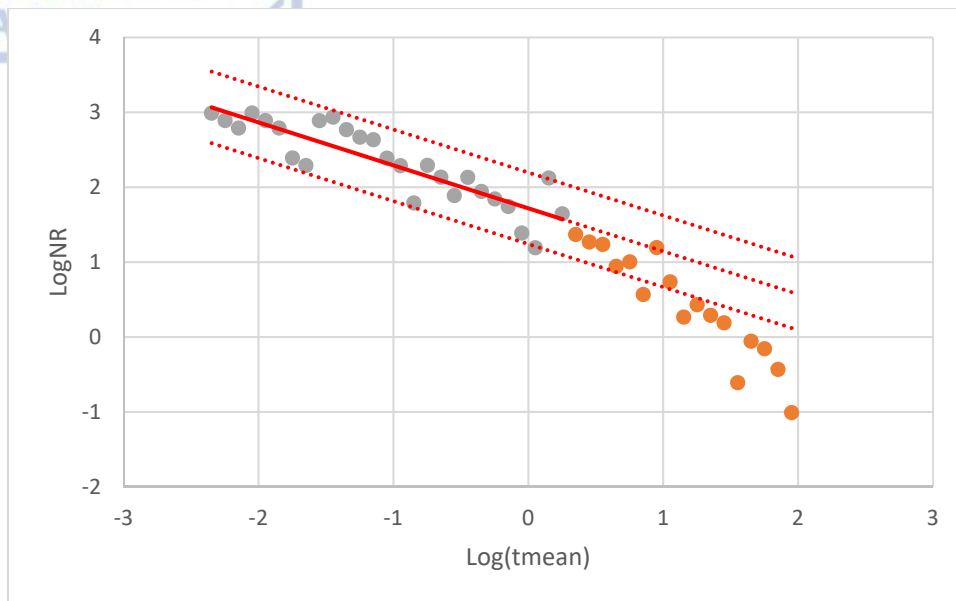


Σχήμα 3.10 : Χρονική κατανομή των μετασεισμών της ακολουθίας της Ελασσόνας των πρώτων 48 ωρών μετά τον κύριο σεισμό (03/03/2021-05/03/2021).

Στη συνέχεια δημιουργήθηκαν αντίστοιχα γραφήματα που δείχνουν τη χρονική κατανομή των μετασεισμών της ακολουθίας για διάστημα ενός μηνός από τον κύριο σεισμό (σχήμα 3.11) καθώς και για το σύνολο των μετασεισμών της (σχήμα 3.12).



Σχήμα 3.11 : Χρονική κατανομή των μετασεισμών της ακολουθίας της Ελασσόνας του πρώτου μήνα μετά τον κύριο σεισμό (03/03/2021-04/03/2021) .

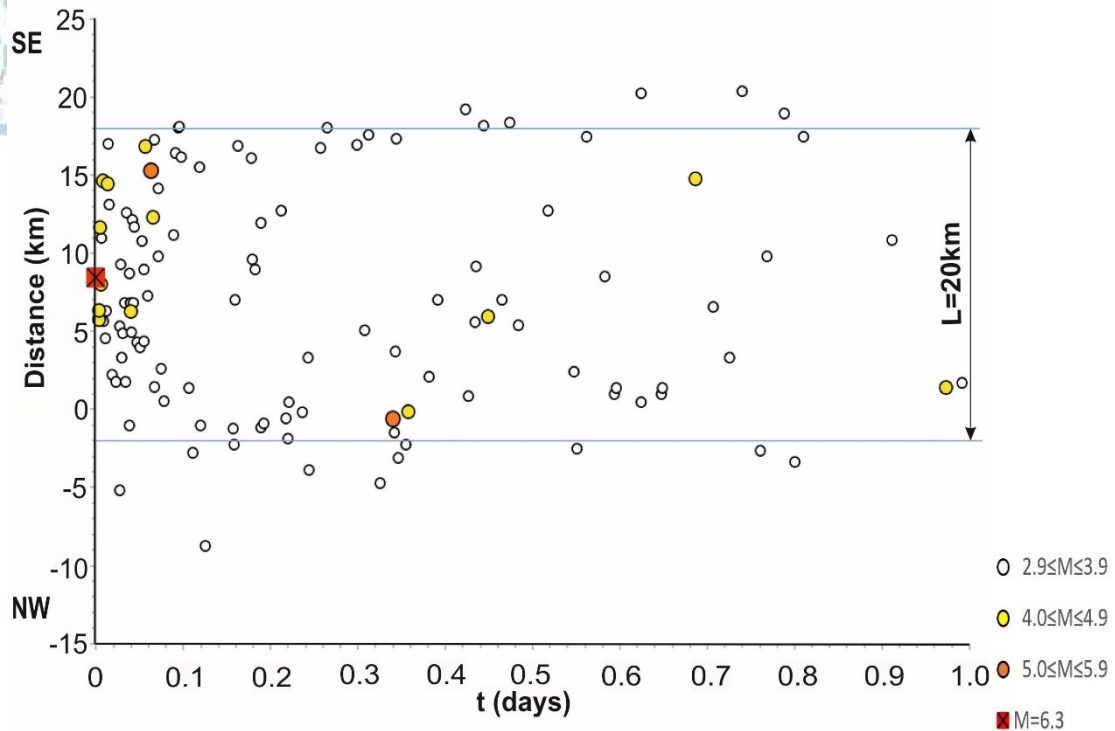


Σχήμα 3.12 : Χρονική κατανομή των μετασεισμών της ακολουθίας της Ελασσόνας για το σύνολο των δεδομένων του καταλόγου .

Τα παραπάνω γραφήματα δείχνουν μια ομαλά εξελισσόμενη μετασεισμική ακολουθία, αφού σε κανένα από αυτά το πλήθος των μετασεισμών δεν ξεπερνάει το ανώτατο όριο εμπιστοσύνης 95% που ορίστηκε.

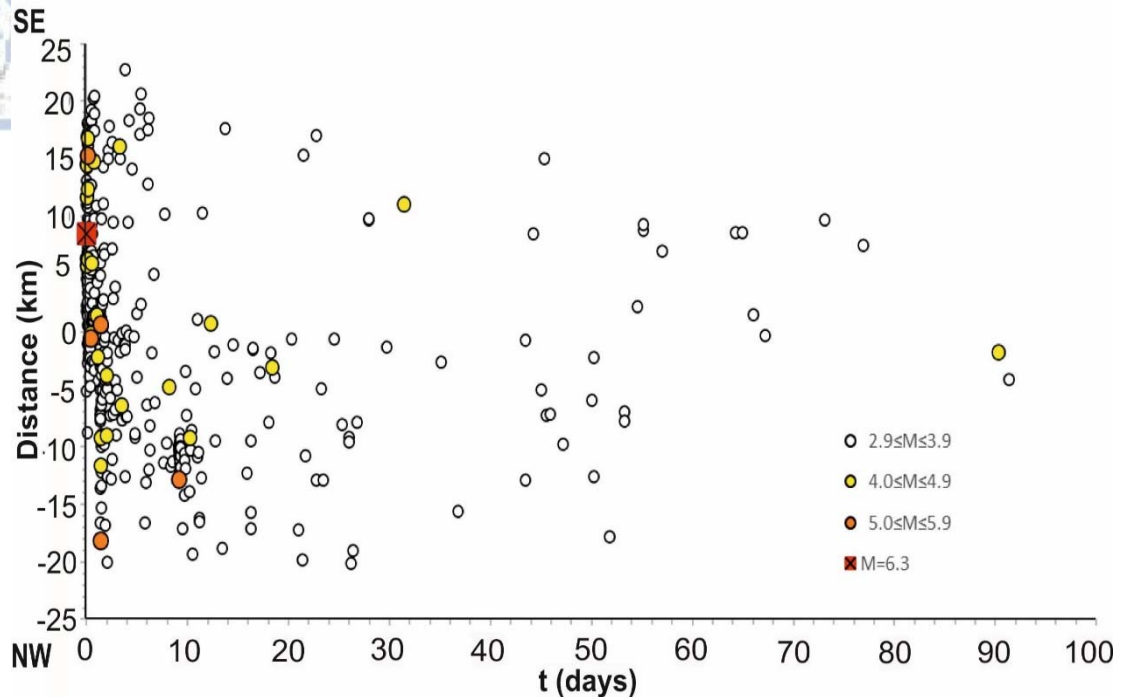
3.5 Χώρο–Χρονική Κατανομή

Η χώρο-χρονική κατανομή μελετάται με σκοπό τον καθορισμό του τρόπου διάδοσης της διάρρηξης πάνω στο σεισμικό ρήγμα. Σημειώνεται ότι και εδώ χρησιμοποιούνται μόνον οι μετασεισμοί που ικανοποιούν τη συνθήκη πληρότητας που καθορίστηκε από την κατά μέγεθος κατανομή ($M \geq 2.9$).



Σχήμα 3.13 : Χώρο-χρονική κατανομή των μετασεισμών της ακολουθίας της Ελασσόνας για τις πρώτες 24 ώρες μετά τον κύριο σεισμό.

Από τη χώρο-χρονική κατανομή των μετασεισμών του πρώτου 24ώρου (σχήμα 3.13) φαίνεται πως ο κύριος σεισμός εκδηλώθηκε στο μέσο του σεισμικού ρήγματος και έπειτα η σεισμική δραστηριότητα διαδόθηκε σε όλο το μήκος του και προς τις δύο κατευθύνσεις. Έτσι η διάρρηξη χαρακτηρίζεται δικατευθυντική (bilateral).



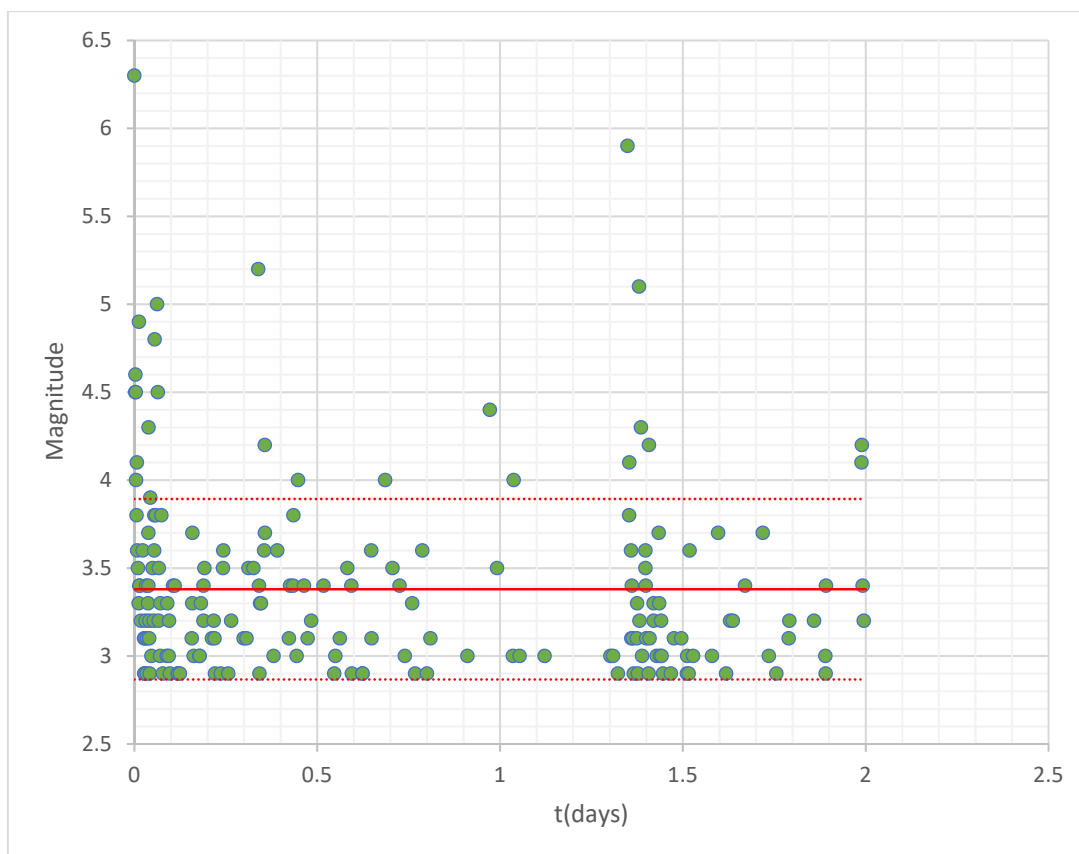
Σχήμα 3.14 : Χώρο-χρονική κατανομή των μετασεισμών της ακολουθίας της Ελασσόνας για το σύνολο των δεδομένων του καταλόγου μετά τον κύριο σεισμό.

Κατά την διάρκεια του πρώτου 24ωρου, ο σεισμογόνος χώρος έχει ένα μήκος $L \sim 20\text{km}$, διάσταση που δικαιολογεί την εκδήλωση σεισμού μεγέθους 6.3. Μετά το τέλος του πρώτου 24ωρου, εκδηλώνεται ο μεγαλύτερος μετασεισμός (04/03/2021 $M=5.9$) σε ένα νέο πιθανώς κρυφό ρήγμα ή προέκταση προς τα ΒΔ του αρχικού ρήγματος καθώς και αρκετοί μετασεισμοί (σχήμα 3.14).

3.6 Κατανομή Μέσου Μεγέθους

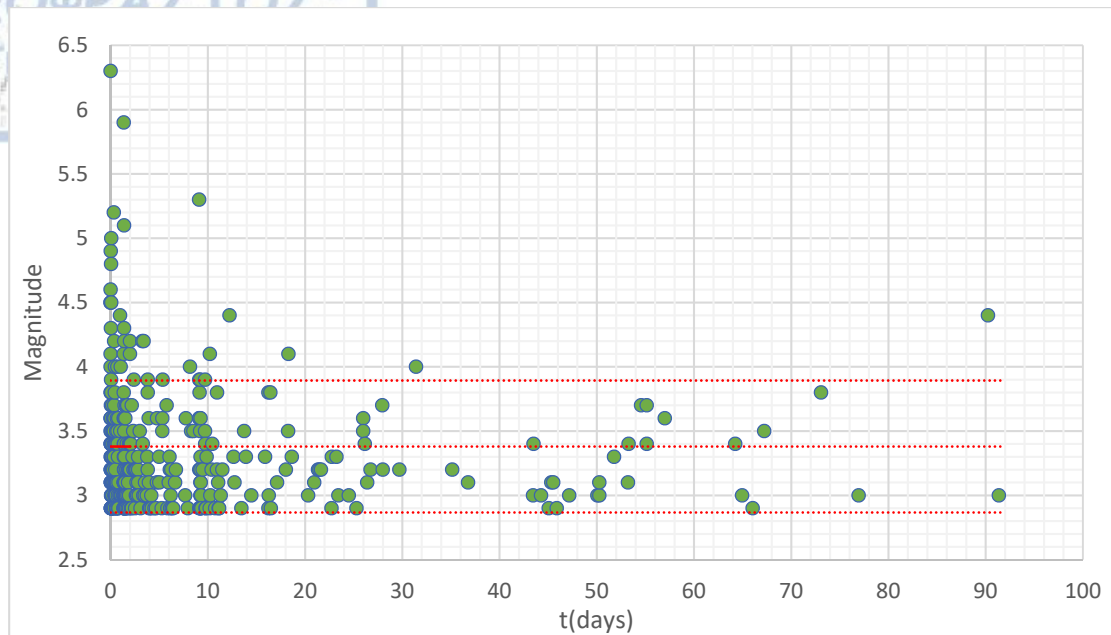
Όπως στις προηγούμενες κατανομές έτσι και για τη μελέτη της κατανομής της τιμής του μέσου μεγέθους M_{mean} χρησιμοποιήθηκαν μόνο οι μετασεισμοί με μέγεθος $M \geq 2.9$. Η αντιπροσωπευτικές τιμές του μέσου μεγέθους και της αντίστοιχης τυπικής απόκλισης (standard deviation, sd) υπολογίστηκαν και πάλι από τα δεδομένα των πρώτων 48 ωρών (σχήμα 3.15). Προέκυψε η τιμή $M_{mean} = 3.38$, με $sd=0.513$ που σημειώνονται στο αντίστοιχο γράφημα με τρεις ευθείες, μια κόκκινη οριζόντια που αντιπροσωπεύει το μέσο μέγεθος και δύο κόκκινες διακεκομμένες οριζόντιες

εκατέρωθεν που αντιπροσωπεύουν το διάστημα εμπιστοσύνης 70% ($\pm 1SD$, δηλαδή $3.38+0.513=3.893$ και $3.38-0.513=2.867$). Δεν παρατηρείται κάποια συστηματική υπέρβαση του άνω ορίου (~ 3.9) που καθορίστηκε προηγουμένως. Η «στιγμαία» υπέρβαση που φαίνεται στο γράφημα δεν προκαλεί κάποια ανησυχία, καθώς δεν είναι συστηματική αλλά αφορά μόνο μεμονωμένα γεγονότα (σχετικά έντονους μετασεισμούς).



Σχήμα 3.15 : Κατανομή μέσου μεγέθους των μετασεισμών της ακολουθίας της Ελασσόνας για τις πρώτες 48 ώρες μετά τον κύριο σεισμό (03/03/2021-05/03/2021).

Παρόμοια είναι και η εικόνα που προκύπτει από τη χρονική κατανομή του μεγέθους του συνόλου των μετασεισμών της ακολουθίας (σχήμα 3.16), υποδηλώνοντας την ομαλή εξέλιξή της.



Σχήμα 3.16 : Κατανομή μέσου μεγέθους των μετασεισμών της ακολουθίας της Ελασσόνας όπως προκύπτει από το σύνολο των δεδομένων μετά τον κύριο σεισμό .

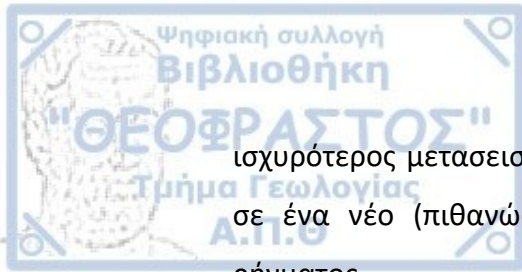
4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στις 3 Μαρτίου 2021 και ώρα 10:16:08 GMT, εκδηλώθηκε ισχυρός σεισμός μεγέθους $M=6.3$, με επίκεντρο κοντά στην Ελασσόνα, 10 km δυτικά του Τυρνάβου και με εστιακό βάθος ~ 10 km. Από τον σεισμό ένας άνθρωπος έχασε την ζωή του, προκλήθηκαν υλικές ζημιές σε κτίρια και έργα υποδομής, ενώ υπήρχαν επιπτώσεις και στο έδαφος.

Από την μελέτη της μετασεισμικής ακολουθίας της Ελασσόνας στην συγκεκριμένη εργασία, εξήχθησαν σημαντικά συμπεράσματα που αφορούν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του σεισμογόνου χώρου, καθώς και τον τρόπο που εξελίχθηκε η μετασεισμική δραστηριότητα.

Τα πιο βασικά συμπεράσματα είναι τα παρακάτω:

- Η κατά μέγεθος κατανομή των μετασεισμών της ακολουθίας ανέδειξε μέγεθος πληρότητας $M_c=2.9$ και τιμή της παραμέτρου b της σχέσης G-R, $b=0.8-0.9$.
- Από την χωρική κατανομή των μετασεισμών της ακολουθίας προέκυψε πως ο σεισμός προκλήθηκε από κανονικό ρήγμα παράταξης ΒΔ-ΝΑ (αζιμούθιο $\sim 120^\circ$), με γωνία κλίσης $\sim 50^\circ$ (βύθιση προς τα ΒΑ). Το μήκος του σεισμικού ρήγματος είναι ~ 20 km και το βάθος διάρρηξης προσεγγίζει τα ~ 15 km. Η εκδήλωση του ισχυρού μετασεισμού ($M=5.9$) στο ΒΔ άκρο του ρήγματος επέκτεινε το σεισμογόνο χώρο κατά $\sim 10-15$ km προς τα ΒΔ.
- Τόσο η χρονική κατανομή όσο και η κατανομή μέσου μεγέθους των μετασεισμών ανέδειξαν πως η ακολουθία εξελίχθηκε ομαλά σε ολόκληρη την πορεία της, χωρίς καμία ένδειξη για πιθανά επερχόμενο ισχυρό μετασεισμό ή και νέο κύριο σεισμό.
- Τέλος, από των χώρο-χρονική κατανομή των μετασεισμών της ακολουθίας, φαίνεται πως ο κύριος σεισμός εκδηλώθηκε στο μέσο του σεισμικού ρήγματος και στην συνέχεια η σεισμική δραστηριότητα διαδόθηκε σε όλο το μήκος του και προς τα δύο άκρα του (δικατευθυντική-bilateral-διάρρηξη). Κατόπιν, ο



ισχυρότερος μετασεισμός (03/04/2021, ώρα 18:38 GMT, M=5.9) εκδηλώθηκε σε ένα νέο (πιθανώς) ρήγμα στη ΒΔ προέκταση του αρχικού σεισμικού ρήγματος.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Caputo R. and Pavlides S. (1993). Late Cainozoic geodynamic evolution of Thessaly and surroundings (central-northern Greece). *Tectonophysics* 223:339–362.
[https://doi.org/10.1016/0040-1951\(93\)90144-9](https://doi.org/10.1016/0040-1951(93)90144-9)
- Caputo R., Helly B., Pavlides S., Papadopoulos G. (2004). Palaeoseismological investigation of the Tyrnavos Fault (Thessaly, Central Greece). *Tectonophysics* 394:1–20,
<https://doi.org/10.1016/j.tecto.2004.07.047>.
- Caputo R., Helly B., Pavlides S., Papadopoulos G. (2006). Archaeo- and palaeoseismological investigations in Northern Thessaly (Greece): Insights for the seismic potential of the region. *Natural Hazards* 39:195–212. <https://doi.org/10.1007/s11069-006-0023-9>.
- Gutenberg R. and C.F. Richter (1944). Frequency of earthquakes in California. "Bull. Seism. Soc. Am.", 34, 185-188.
- Papazachos B.C. and C. Papazachou (1997). The Earthquakes of Greece, Ziti Publications Thessaloniki, Greece, 304p.
- Παπαζάχος Κ., Καρακώστας Β., Παπαδημητρίου Ε., Φουμέλης Μ., Κυρατζή Α., Πικριδάς Χ., Κώστογλου Α., Κκαλλάς Χ., Χατζής Ν., Μπίθαρης Σ., Χατζηπέτρος Α., Φωτίου Α., Βεντούζη Χ., Καραγιάννη Ε., Μπονάτης Π., Κουρούκλας Χ., Παραδεισοπούλου Π., Σκορδύλης Ε., Βαμβακάρης Δ., Γρένδας Ι., Κεμεντζετζίδου Δ., Πάνου Α., Καρακαϊσής Γ., Καραγιάννη Ι., Χατζηδημητρίου Π. (2021). Σεισμοτεκτονικά χαρακτηριστικά της σεισμικής ακολουθίας του Τυρνάβου (Μάρτιος – Απρίλιος 2021), Σεισμική ακολουθία Θεσσαλίας, Μάρτιος 2021, Τεχνική Έκθεση ETAM, Μάργαρης Β., Κλήμης Ν. και Σέξτος, Α. (επιμέλεια).
- Papazachos B.C., Scordilis E.M., Panagiotopoulos D.G., Papazachos C.B., Karakaisis G.F. (2004). Global relations between seismic fault parameters and moment magnitude of earthquakes, "Bulletin of the Geological Society of Greece", XXXVI, 3, 1482-1489.
- Pavlides S., Chatzipetros A., Sboras S., Kremastas E., Chatziioannou A. (2021). The northern Thessaly strong earthquakes of March 3 and 4 and their neotectonic setting, <https://doi.org/10.5281/ZENODO.4618188>

Tsodoulos I., Chatzipetros A., Koukouvelas I., Caputo R., Pavlides S., Stamoulis K., Gallousi C., Papachristodoulou C., Ioannides K., Belesis A., Kremastas E., Kalyvas D. (2016a). Palaeoseismological investigation of the Gyrtoni Fault (Thessaly, Central Greece). *Bull Geol Soc Greece* 50:552–562, <https://doi.org/10.12681/bgsg.11755>.

Tsodoulos I., Stamoulis K., Caputo R., Koukouvelas I., Chatzipetros A., Pavlides S., Gallousi C., Papachristodoulou C., Ioannides K. (2016b). Middle–Late Holocene earthquake history of the Gyrtoni Fault, Central Greece: Insight from optically stimulated luminescence (OSL) dating and paleoseismology. *Tectonophysics* 687, <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2016.08.015>.

Wessel P., Smith W. H. F., Scharroo R., Luis J., Wobbe F., (2013). Generic Mapping Tools: Improved Version Released, *EOS Trans. AGU*, 94(45), p. 409–410, doi:10.1002/2013EO450001.



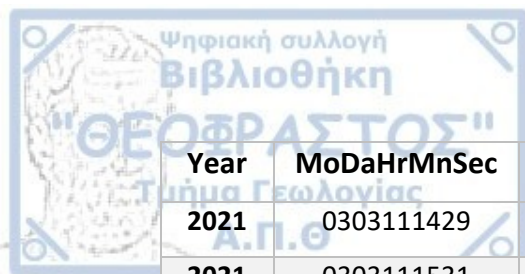
ΔΙΑΔΙΚΤΥΑΚΕΣ ΠΗΓΕΣ

- ❖ Γεωδυναμικό Ινστιτούτο του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών
<http://www.gein.noa.gr/el/>
- ❖ Global Centroid Moment Tensor Project
<http://www.globalcmt.org/>
- ❖ Σεισμολογικός Σταθμός του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης
<http://geophysics.geo.auth.gr/ss/>
- ❖ Μακροσεισμικά αποτελέσματα
<https://www.tanea.gr/2021/03/03/greece/zimies-ston-iero-nao-agiou-dimitriou-sto-mesoxori-elassonas/>
<https://www.in.gr/2021/03/11/greece/seismos-teleytaio-koudouni-sto-dimotiko-sxoleio-sto-damasi-ligo-prin-tin-katedafisi/>
<https://www.efsyn.gr/node/285450>
<https://www.naftemporiki.gr/story/1700460/yppoa-autopsia-sta-mnimeia-tis-larisas-meta-tous-seismous>
- ❖ Φωτογραφία εξωφύλλου
<https://anastoxasmoi.gr/%CE%B9%CF%83%CF%87%CF%85%CF%81%CF%8C%CF%82-%CF%83%CE%B5%CE%B9%CF%83%CE%BC%CF%8C%CF%82-6-%CF%81%CE%AF%CF%87%CF%84%CE%B5%CF%81-%CF%83%CF%85%CE%B3%CE%BA%CE%BB%CF%8C%CE%BD%CE%B9%CF%83%CE%B5-%CF%84%CE%B7/>

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Ακολουθεί ο τελικός κατάλογος των μετασεισμών με $M \geq 2.9$ που αφορούν την σεισμική ακολουθία της Ελασσόνας, κατά το χρονικό διάστημα 03/03/2021-02/06/2021.

Year	MoDaHrMnSec	Latitude (°N)	Longitude (°E)	Depth (km)	M
2021	0303101608	39.735	22.191	9.5	6.3
2021	0303101954	39.746	22.166	1	4.5
2021	0303102047	39.683	22.139	1	4.6
2021	0303102137	39.703	22.211	6	4.5
2021	0303102308	39.678	22.156	1	4.0
2021	0303102442	39.711	22.207	2	3.8
2021	0303102619	39.661	22.223	2	4.1
2021	0303102738	39.735	22.159	7	3.6
2021	0303103031	39.764	22.161	2	3.5
2021	0303103326	39.742	22.170	7	3.3
2021	0303103408	39.710	22.247	6	4.9
2021	0303103614	39.676	22.258	2	3.4
2021	0303103708	39.679	22.215	2	3.4
2021	0303104145	39.746	22.125	0	3.2
2021	0303104857	39.756	22.125	12	3.6
2021	0303105414	39.731	22.153	2	3.1
2021	0303105521	39.809	22.073	11	2.9
2021	0303105713	39.689	22.176	2	2.9
2021	0303105850	39.741	22.135	2	3.1
2021	0303110031	39.709	22.136	0	3.2
2021	0303110230	39.735	22.172	6	3.4
2021	0303110443	39.744	22.119	2	2.9
2021	0303110641	39.694	22.217	5	3.1
2021	0303111022	39.764	22.097	2	3.3
2021	0303111119	39.715	22.183	6	3.4
2021	0303111145	39.731	22.170	9	3.7
2021	0303111223	39.720	22.158	2	4.3



Year	MoDaHrMnSec	Latitude (°N)	Longitude (°E)	Depth (km)	M
2021	0303111429	39.741	22.154	12	3.1
2021	0303111531	39.700	22.215	7	3.2
2021	0303111651	39.706	22.157	5	2.9
2021	0303111902	39.739	22.230	3	3.9
2021	0303112323	39.728	22.139	7	3.0
2021	0303112749	39.746	22.145	6	3.5
2021	0303113212	39.720	22.210	5	3.2
2021	0303113411	39.738	22.145	5	3.6
2021	0303113509	39.728	22.193	5	3.8
2021	0303113557	39.700	22.269	3	4.8
2021	0303114043	39.723	22.171	4	3.8
2021	0303114546	39.688	22.245	2	5.0
2021	0303114904	39.692	22.213	3	4.5
2021	0303115201	39.731	22.108	0	3.2
2021	0303115236	39.674	22.260	2	3.5
2021	0303115749	39.692	22.234	2	3.0
2021	0303115907	39.682	22.178	2	3.3
2021	0303120236	39.749	22.131	6	3.8
2021	0303120809	39.749	22.107	10	2.9
2021	0303122410	39.703	22.205	13	3.0
2021	0303122610	39.634	22.229	0	3.3
2021	0303123128	39.620	22.240	2	3.0
2021	0303123257	39.693	22.280	1	3.2
2021	0303123618	39.675	22.248	4	2.9
2021	0303124821	39.760	22.123	0	3.4
2021	0303125444	39.783	22.087	0	3.4
2021	0303130712	39.639	22.221	0	2.9
2021	0303130847	39.756	22.093	2	2.9
2021	0303140216	39.766	22.096	6	3.1
2021	0303140415	39.723	22.061	2	3.3
2021	0303140514	39.736	22.175	3	3.7
2021	0303140945	39.620	22.227	2	3.0



Year	MoDaHrMnSec	Latitude (°N)	Longitude (°E)	Depth (km)	M
2021	0303143227	39.664	22.241	0	3.0
2021	0303143327	39.725	22.199	4	3.0
2021	0303143828	39.692	22.174	0	3.3
2021	0303144805	39.697	22.211	5	3.2
2021	0303144812	39.755	22.091	10	3.4
2021	0303145209	39.783	22.109	0	3.5
2021	0303152145	39.699	22.221	4	3.1
2021	0303152847	39.729	22.084	0	3.2
2021	0303153204	39.763	22.087	3	3.1
2021	0303153339	39.784	22.125	2	2.9
2021	0303155617	39.760	22.105	8	2.9
2021	0303160536	39.744	22.137	2	3.5
2021	0303160641	39.767	22.066	0	3.6
2021	0303162610	39.619	22.225	2	2.9
2021	0303163733	39.629	22.245	0	3.2
2021	0303172624	39.647	22.242	0	3.1
2021	0303173805	39.747	22.158	1	3.1
2021	0303174545	39.673	22.263	5	3.5
2021	0303180447	39.763	22.054	5	3.5
2021	0303182408	39.721	22.080	0	5.2
2021	0303182723	39.719	22.068	0	3.4
2021	0303182842	39.736	22.137	12	2.9
2021	0303183119	39.626	22.235	2	3.3
2021	0303183441	39.724	22.052	3	3.3
2021	0303184739	39.777	22.090	9	3.6
2021	0303184948	39.727	22.088	0	4.2
2021	0303185046	39.707	22.078	1	3.7
2021	0303192433	39.747	22.124	0	3.0
2021	0303193903	39.744	22.179	2	3.6
2021	0303202445	39.624	22.256	0	3.1
2021	0303202947	39.709	22.090	6	3.4
2021	0303204135	39.723	22.152	7	3.4



Year	MoDaHrMnSec	Latitude (°N)	Longitude (°E)	Depth (km)	M
2021	0303204302	39.718	22.190	3	3.8
2021	0303205522	39.639	22.252	0	3.0
2021	0303210055	39.748	22.169	0	4.0
2021	0303212432	39.731	22.172	5	3.4
2021	0303213845	39.631	22.250	0	3.1
2021	0303215254	39.736	22.156	0	3.2
2021	0303224122	39.704	22.224	7	3.4
2021	0303232321	39.702	22.104	0	2.9
2021	0303232808	39.768	22.082	0	3.0
2021	0303234526	39.629	22.238	1	3.1
2021	0304001453	39.721	22.184	2	3.5
2021	0304003054	39.777	22.127	0	3.4
2021	0304003304	39.776	22.131	0	2.9
2021	0304011444	39.626	22.269	0	2.9
2021	0304011516	39.741	22.102	9	2.9
2021	0304014852	39.779	22.128	0	3.6
2021	0304015004	39.778	22.132	0	3.1
2021	0304024338	39.711	22.251	4	4.0
2021	0304031258	39.737	22.170	2	3.5
2021	0304034043	39.765	22.148	0	3.4
2021	0304040136	39.625	22.270	0	3.0
2021	0304043034	39.737	22.064	3	3.3
2021	0304044154	39.727	22.202	6	2.9
2021	0304051020	39.625	22.253	2	3.6
2021	0304052841	39.767	22.072	0	2.9
2021	0304054223	39.628	22.238	6	3.1
2021	0304080740	39.709	22.205	7	3.0
2021	0304093616	39.778	22.133	0	4.4
2021	0304100416	39.766	22.130	0	3.5
2021	0304110704	39.728	22.139	5	3.0
2021	0304111008	39.733	22.068	3	4.0
2021	0304113310	39.711	22.087	8	3.0



Year	MoDaHrMnSec	Latitude (°N)	Longitude (°E)	Depth (km)	M
2021	0304131136	39.722	22.084	8	3.0
2021	0304173113	39.774	22.111	7	3.0
2021	0304174121	39.755	22.124	0	3.0
2021	0304180045	39.737	22.151	5	2.9
2021	0304183817	39.780	22.125	12	5.9
2021	0304184424	39.783	22.084	2	3.8
2021	0304184527	39.836	22.014	3	4.1
2021	0304185203	39.737	22.164	0	3.6
2021	0304185341	39.770	22.095	9	3.1
2021	0304185517	39.805	22.053	5	3.4
2021	0304185853	39.819	22.139	2	3.1
2021	0304190242	39.766	22.102	9	2.9
2021	0304191442	39.739	22.118	0	3.1
2021	0304191621	39.785	22.031	0	3.3
2021	0304191930	39.814	21.979	2	2.9
2021	0304192351	39.805	21.922	6	5.1
2021	0304192557	39.799	22.045	2	3.2
2021	0304193132	39.814	22.030	0	4.3
2021	0304193541	39.783	22.090	7	3.0
2021	0304194859	39.793	21.933	2	3.5
2021	0304194912	39.750	22.043	13	3.6
2021	0304195003	39.814	22.052	2	3.4
2021	0304195203	39.785	22.033	2	3.1
2021	0304200136	39.733	22.122	2	2.9
2021	0304200308	39.747	22.106	0	4.2
2021	0304200522	39.796	22.082	1	3.1
2021	0304202111	39.803	22.014	6	3.2
2021	0304202111	39.815	22.032	0	3.3
2021	0304203251	39.692	22.183	16	3.0
2021	0304204118	39.804	22.061	0	3.7
2021	0304204324	39.811	21.979	13	3.3
2021	0304204707	39.731	22.105	0	3.0



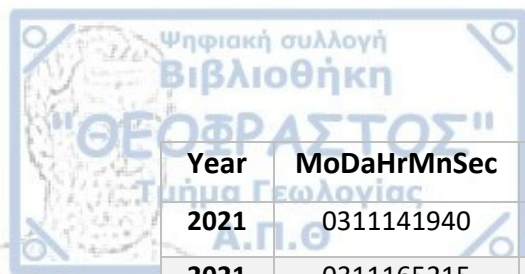
Year	MoDaHrMnSec	Latitude (°N)	Longitude (°E)	Depth (km)	M
2021	0304205024	39.823	22.037	0	3.2
2021	0304205226	39.821	21.963	0	3.0
2021	0304205822	39.851	22.082	26	2.9
2021	0304212901	39.787	22.132	7	2.9
2021	0304214057	39.821	22.029	0	3.1
2021	0304221004	39.827	22.002	4	3.1
2021	0304223200	39.722	22.114	2	2.9
2021	0304223334	39.782	22.084	0	3.0
2021	0304223925	39.721	22.165	7	2.9
2021	0304224255	39.781	22.080	1	3.6
2021	0304225649	39.753	22.077	4	3.0
2021	0305001117	39.711	22.022	16	3.0
2021	0305003455	39.744	22.031	14	3.7
2021	0305010636	39.705	22.206	8	2.9
2021	0305012233	39.687	22.233	6	3.2
2021	0305013312	39.772	22.145	0	3.2
2021	0305022101	39.755	22.083	2	3.4
2021	0305033100	39.714	22.165	7	3.7
2021	0305035503	39.720	22.163	8	3.0
2021	0305042433	39.809	22.020	0	2.9
2021	0305051248	39.752	22.093	0	3.1
2021	0305051526	39.775	22.063	6	3.2
2021	0305065236	39.804	21.936	0	3.2
2021	0305073725	39.779	22.068	7	3.0
2021	0305073839	39.748	22.095	1	2.9
2021	0305074021	39.791	22.062	1	3.4
2021	0305095959	39.836	22.044	0	4.1
2021	0305100115	39.770	22.069	3	4.2
2021	0305100410	39.818	21.992	5	3.4
2021	0305100855	39.765	22.062	0	3.2
2021	0305101727	39.776	22.058	0	3.2
2021	0305102045	39.770	22.064	0	3.2



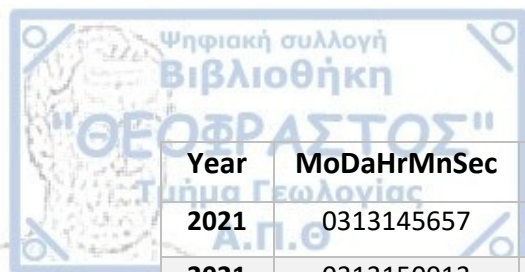
Year	MoDaHrMnSec	Latitude (°N)	Longitude (°E)	Depth (km)	M
2021	0305103650	39.814	21.904	2	3.2
2021	0305121303	39.766	22.080	8	3.4
2021	0305121854	39.768	22.090	4	2.9
2021	0305142828	39.674	22.242	5	3.7
2021	0305144113	39.680	22.237	6	2.9
2021	0305162052	39.619	22.237	1	3.3
2021	0305180327	39.788	22.038	6	3.5
2021	0305185844	39.777	22.049	5	3.2
2021	0305194323	39.752	21.955	14	3.9
2021	0305223131	39.805	22.003	2	3.2
2021	0305224251	39.618	22.221	1	2.9
2021	0305233204	39.713	22.165	5	3.2
2021	0306004347	39.788	22.039	3	3.0
2021	0306015602	39.712	22.191	5	3.2
2021	0306022443	39.755	22.137	3	3.1
2021	0306035057	39.747	22.093	2	3.0
2021	0306060840	39.741	22.141	4	3.2
2021	0306060900	39.760	22.058	15	3.3
2021	0306061955	39.799	22.049	0	3.1
2021	0306080007	39.814	22.032	3	3.0
2021	0306101343	39.798	22.069	8	3.5
2021	0306120602	39.753	22.095	3	2.9
2021	0306163618	39.651	22.235	1	4.2
2021	0306174829	39.743	22.077	2	3.4
2021	0306185231	39.652	22.222	0	3.0
2021	0306194740	39.815	22.062	0	4.2
2021	0306223119	39.747	22.098	3	3.0
2021	0306232254	39.787	22.033	3	3.1
2021	0307034620	39.761	22.095	2	3.0
2021	0307044330	39.837	22.003	0	3.3
2021	0307054955	39.775	22.102	4	3.2
2021	0307060828	39.778	22.099	5	3.9



Year	MoDaHrMnSec	Latitude (°N)	Longitude (°E)	Depth (km)	M
2021	0307060844	39.619	22.294	5	3.8
2021	0307082809	39.710	21.995	14	3.6
2021	0307084827	39.748	22.101	5	3.1
2021	0307094143	39.713	21.997	16	2.9
2021	0307115303	39.720	22.195	6	2.9
2021	0307144806	39.615	22.241	1	3.0
2021	0307160114	39.752	22.098	5	2.9
2021	0307224417	39.683	22.228	4	2.9
2021	0308021908	39.751	22.097	5	2.9
2021	0308042803	39.805	22.025	1	3.1
2021	0308050351	39.801	22.026	2	3.6
2021	0308095411	39.735	22.111	3	3.3
2021	0308101606	39.790	22.077	7	3.1
2021	0308162110	39.623	22.231	0	2.9
2021	0308180045	39.602	22.246	4	3.6
2021	0308180703	39.598	22.259	0	3.5
2021	0308183421	39.698	22.101	5	3.9
2021	0309043033	39.862	21.969	0	3.7
2021	0309064615	39.833	21.995	0	2.9
2021	0309094601	39.784	22.046	5	3.1
2021	0309114547	39.622	22.236	0	3.3
2021	0309123156	39.694	22.219	6	3.2
2021	0309131520	39.610	22.241	3	2.9
2021	0309141816	39.819	22.000	3	3.0
2021	0309155844	39.819	22.019	4	3.2
2021	0309170825	39.818	22.043	6	2.9
2021	0309205229	39.717	22.063	6	2.9
2021	0310014352	39.720	22.143	8	3.1
2021	0310032207	39.793	22.053	8	3.2
2021	0311023201	39.811	22.002	0	3.0
2021	0311040051	39.711	22.198	7	3.6
2021	0311084041	39.777	22.004	0	2.9



Year	MoDaHrMnSec	Latitude (°N)	Longitude (°E)	Depth (km)	M
2021	0311141940	39.773	22.059	3	4.0
2021	0311165215	39.814	22.001	3	3.5
2021	0311223019	39.825	22.011	3	3.5
2021	0312125750	39.813	21.987	2	5.3
2021	0312130314	39.799	22.014	6	3.6
2021	0312130546	39.805	22.017	0	3.6
2021	0312130750	39.803	22.012	6	3.9
2021	0312131349	39.798	22.002	7	2.9
2021	0312131910	39.806	22.011	6	3.2
2021	0312141136	39.803	22.025	0	3.8
2021	0312142619	39.777	22.013	1	2.9
2021	0312150020	39.806	22.006	0	3.9
2021	0312151903	39.810	22.001	0	3.5
2021	0312153138	39.789	21.979	0	2.9
2021	0312155334	39.789	21.981	5	3.2
2021	0312155535	39.788	22.012	6	3.1
2021	0312155544	39.805	22.003	0	3.0
2021	0312161343	39.808	22.009	0	3.6
2021	0312162107	39.815	22.028	3	3.3
2021	0312162107	39.806	22.016	0	3.2
2021	0312163545	39.786	21.985	0	3.1
2021	0312163606	39.820	22.019	5	3.0
2021	0312164246	39.803	22.009	0	2.9
2021	0312173657	39.795	22.001	0	3.0
2021	0312181437	39.815	22.020	0	2.9
2021	0312212439	39.867	21.966	0	3.2
2021	0313032521	39.776	21.952	4	3.5
2021	0313032548	39.770	21.990	7	3.9
2021	0313034951	39.773	21.985	8	3.4
2021	0313042923	39.824	22.004	5	2.9
2021	0313055004	39.779	22.077	6	2.9
2021	0313073522	39.795	22.041	2	3.3



Year	MoDaHrMnSec	Latitude (°N)	Longitude (°E)	Depth (km)	M
2021	0313145657	39.792	21.963	9	2.9
2021	0313150913	39.804	22.024	6	4.1
2021	0313163648	39.785	22.002	4	3.0
2021	0313194152	39.809	22.034	5	3.2
2021	0313211109	39.871	21.943	0	3.4
2021	0314041401	39.771	22.055	6	2.9
2021	0314083829	39.818	22.012	5	3.2
2021	0314090042	39.724	22.100	8	3.8
2021	0314120014	39.827	22.022	3	3.1
2021	0314130428	39.813	21.948	2	2.9
2021	0314140252	39.793	21.934	2	2.9
2021	0314180657	39.784	21.973	2	3.0
2021	0314220641	39.696	22.192	6	3.2
2021	0315154337	39.743	22.106	3	4.4
2021	0316015045	39.742	22.077	2	3.3
2021	0316040110	39.792	22.014	4	3.1
2021	0316205937	39.854	21.940	0	2.9
2021	0317035132	39.632	22.242	0	3.5
2021	0317082213	39.780	22.070	5	3.3
2021	0317214531	39.758	22.092	6	3.0
2021	0319073306	39.775	21.973	6	3.3
2021	0319155017	39.804	22.021	3	3.8
2021	0319155835	39.816	21.939	2	2.9
2021	0319164047	39.814	21.954	2	3.0
2021	0319203919	39.778	22.099	7	3.8
2021	0319214031	39.776	22.099	6	2.9
2021	0320130528	39.779	22.076	4	3.1
2021	0321111054	39.806	22.040	2	3.2
2021	0321163241	39.768	22.090	7	3.5
2021	0321171554	39.770	22.077	6	4.1
2021	0322013532	39.774	22.069	4	3.3
2021	0323174610	39.707	22.071	6	3.0



Year	MoDaHrMnSec	Latitude (°N)	Longitude (°E)	Depth (km)	M
2021	0324085915	39.819	21.940	0	3.1
2021	0324181951	39.851	21.926	0	3.2
2021	0324213403	39.654	22.227	9	3.2
2021	0325013831	39.821	22.015	2	3.2
2021	0326033751	39.802	21.981	3	2.9
2021	0326041914	39.625	22.231	0	3.3
2021	0326160125	39.707	22.021	17	3.3
2021	0326204428	39.799	21.979	4	3.0
2021	0327222403	39.720	22.078	4	3.0
2021	0328171038	39.809	22.040	3	2.9
2021	0329094205	39.806	22.025	1	3.6
2021	0329094237	39.807	22.021	1	3.5
2021	0329135726	39.842	21.918	0	3.4
2021	0329193151	39.831	21.925	0	3.1
2021	0330035247	39.780	22.027	5	3.2
2021	0331090047	39.701	22.187	7	3.7
2021	0331095553	39.700	22.188	7	3.2
2021	0402031750	39.783	22.103	6	3.2
2021	0403200556	39.673	22.189	7	4.0
2021	0407134351	39.774	22.083	2	3.2
2021	0409044756	39.794	21.945	5	3.1
2021	0415211515	39.740	22.087	6	3.0
2021	0415221101	39.791	21.975	4	3.4
2021	0416165047	39.709	22.178	5	3.0
2021	0417114639	39.784	22.061	5	2.9
2021	0417180702	39.679	22.237	4	3.1
2021	0417230423	39.803	22.046	3	3.1
2021	0418073903	39.804	22.047	3	2.9
2021	0419142116	39.808	22.020	2	3.0
2021	0422115955	39.767	22.042	2	3.0
2021	0422164023	39.791	21.978	5	3.0
2021	0422164151	39.757	22.079	3	3.1



Year	MoDaHrMnSec	Latitude (°N)	Longitude (°E)	Depth (km)	M
2021	0424051017	39.826	21.936	0	3.3
2021	0425153410	39.797	22.046	6	3.1
2021	0425170513	39.798	22.037	6	3.4
2021	0426235112	39.719	22.110	2	3.7
2021	0427133920	39.712	22.182	8	3.7
2021	0427134007	39.708	22.186	7	3.4
2021	0429102019	39.691	22.151	3	3.6
2021	0506162050	39.715	22.182	7	3.4
2021	0507090152	39.730	22.190	6	3.0
2021	0508111254	39.754	22.120	5	2.9
2021	0509155117	39.738	22.091	0	3.5
2021	0515115722	39.706	22.190	8	3.8
2021	0519085737	39.717	22.170	5	3.0
2021	0601155614	39.792	22.104	0	4.4
2021	0602190247	39.773	22.066	6	3.0