



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ



ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ

ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ

ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ Δ. ΔΑΝΙΗΛΙΔΗΣ

ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΧΕΣΕΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΜΕΓΕΘΟΥΣ ΣΕΙΣΜΩΝ ΤΗΣ ΕΥΡΥΤΕΡΗΣ
ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΤΟΥ ΑΙΓΑΙΟΥ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ



ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ Δ. ΔΑΝΙΗΛΙΔΗΣ

ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΧΕΣΕΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΜΕΓΕΘΟΥΣ ΣΕΙΣΜΩΝ
ΤΗΣ
ΕΥΡΥΤΕΡΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΤΟΥ ΑΙΓΑΙΟΥ

Επιβλέποντες

Σκορδύλης Εμμανουήλ, Καθηγητής Σεισμολογίας

Πάνου Αρετή, Εργαστηριακό Διδακτικό Προσωπικό



ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ	5
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	6
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	7
ABSTRACT	8
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο ΕΙΣΑΓΩΓΗ	9
1.1 Μέγεθος Σεισμού.....	9
1.2 Κλίμακες μεγεθών.....	9
1.2.1 Τοπικό μέγεθος (M_L).....	10
1.2.2 Επιφανειακό μέγεθος (M_s).....	11
1.2.3 Χωρικό μέγεθος (m_b).....	12
1.2.4 Μέγεθος διάρκειας (M_D).....	12
1.2.5 Το πρόβλημα του κορεσμού-Μέγεθος σεισμικής ροπής (M_w).....	13
1.2.6 Σχέσεις μεταξύ κλιμάκων μεγεθών.....	14
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΜΕΓΕΘΟΥΣ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ	16
2.1 Ιστορική Αναδρομή.....	16
2.2 Προηγούμενη Έρευνα στον Ελληνικό Χώρο.....	18
2.3 Ενιαίο Εθνικό Δίκτυο Σεισμογράφων.....	20
2.4 Αναθεωρημένη Σχέση Υπολογισμού Τοπικού Μεγέθους στον Ελληνικό χώρο.....	22
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗΣ	26
3.1 Πηγές Δεδομένων.....	26
3.2 Μέγεθος Σεισμικής Ροπής (M_w) Α.Π.Θ.- Ν.Ο.Α. – EMSC.....	26
3.3 Κατάλογος Σεισμών με Μεγάλη Σεισμικής Ροπής.....	26
3.3.1 Συγκρίσεις Μεγεθών Σεισμικής Ροπής.....	28
3.4 Τοπικό Μέγεθος (M_L) Α.Π.Θ.- Ν.Ο.Α.....	30
3.5 Σύγκριση Αποτελεσμάτων.....	31
3.6 Εξάρτηση Διαφορών από το Εστιακό Βάθος και το Μέγεθος.....	35
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο ΣΥΝΟΨΗ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	38
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	39
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	42



Πρόλογος

Ο σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι η σύγκριση και η αξιολόγηση των σχέσεων υπολογισμού του μεγέθους των σεισμών της ευρύτερης περιοχής του Αιγαίου. Για την πραγματοποίηση της παρούσας εργασίας αντλήθηκαν δεδομένα σεισμών της περιοχής, βάσει των οποίων εξετάζεται η σχέση που εφαρμόζεται καλύτερα στη περιοχή.

Στο πρώτο κεφάλαιο δίνονται οι βασικές, εισαγωγικές πληροφορίες για την έννοια του σεισμού, τις κλίμακες μεγεθών και το φαινόμενο του κορεσμού τους. Επιπλέον αναφέρονται σχέσεις που συνδέουν κλίμακες μεγεθών μεταξύ τους.

Το δεύτερο κεφάλαιο, εστιάζει κυρίως στην περιοχή ενδιαφέροντος της εργασίας με αναφορές στην ιστορική της σεισμικότητα καθώς και σε ανάλογες προηγούμενες σχετικές έρευνες. Επίσης γίνεται αναφορά στα όργανα καταγραφής των σεισμών που ανήκουν στο Ενιαίο Εθνικό Δίκτυο Σειсмоγράφων, αλλά και στην αναθεωρημένη σχέση για τον υπολογισμό τοπικού μεγέθους στην Ελλάδα.

Στο τρίτο κεφάλαιο, γίνεται λόγος για τα δεδομένα παρατήρησης, που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία, καθώς και οι πηγές από τις οποίες αντλήθηκαν. Παρουσιάζεται η χωρική κατανομή των epicέντρων των σεισμών των οποίων τα στοιχεία χρησιμοποιήθηκαν. Ειδικότερα, γίνεται αναφορά στο μέγεθος της σεισμικής ροπής M_w και στις βασικές πηγές (Εργαστήριο Γεωφυσικής Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης, Α.Π.Θ, Γεωδυναμικό Ινστιτούτο Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών, Ν.Ο.Α, Ευρω-Μεσογειακό Σεισμολογικό Κέντρο, EMSC) από τις οποίες αντλήθηκαν οι τιμές του. Γίνεται σύγκριση μεταξύ των τιμών του μεγέθους σεισμικής ροπής που δίνονται από τις παραπάνω πηγές και αναδεικνύονται σχέσεις που συνδέουν τα μεγέθη αυτά μεταξύ τους.

Επιπλέον στο τρίτο κεφάλαιο, περιγράφεται η κλίμακα τοπικού μεγέθους M_L στην Ελλάδα καθώς και ο τρόπος υπολογισμού του από Α.Π.Θ. και Ν.Ο.Α. Διερευνώνται και καταγράφονται οι σχέσεις που συνδέουν τιμές M_L που προέρχονται από διαφορετικές πηγές. Γίνεται συσχέτιση των τιμών του τοπικού μεγέθους M_L με τις τιμές του μεγέθους σεισμικής ροπής και προκύπτουν σχέσεις σύνδεσης τους. Τέλος γίνεται έλεγχος πιθανής εξάρτησης του υπολογιζόμενου μεγέθους M_L από το εστιακό βάθος αλλά και από την «ισχύ» (πραγματικό μέγεθος) του σεισμού.

Στο τέταρτο και τελευταίο κεφάλαιο, συνοψίζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν στην πορεία της εργασίας και καταγράφονται τα τελικά της συμπεράσματα.



Ευχαριστίες

Η παρούσα εργασία αποτελεί την διπλωματική εργασία του τμήματος Γεωλογίας του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης.

Με την ολοκλήρωση της, θα ήθελα να ευχαριστήσω συγκεκριμένους ανθρώπους που η βοήθεια τους ήταν κομβική για την πραγματοποίηση αυτής της εργασίας.

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα της διπλωματικής μου εργασίας, Καθηγητή κ. Σκορδύλη Εμμανουήλ για την ανάθεση της εργασίας, την υπομονή και τις καίριες παρεμβάσεις - παρατηρήσεις σε όλα τα στάδια της διπλωματικής εργασίας.

Ακόμη θέλω να απευθύνω ευχαριστίες στην επίσης επιβλέπουσα της διπλωματικής μου εργασίας, Δρ Πάνου Αρετή για την υπομονή της και τις διευκρινήσεις – καθοδηγήσεις της, που ήταν απαραίτητες στην εξέλιξη της διπλωματικής εργασίας.

Τέλος θέλω να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τους γονείς μου Δημήτρη και Βενετία καθώς και την αδελφή μου Όλγα, για την ψυχολογική και οικονομική υποστήριξη, την ενθάρρυνση και την εξασφάλιση ενός άνετου περιβάλλοντος ώστε να μπορέσω να αφοσιωθώ στις σπουδές μου.

Περίληψη

Για να αποδοθεί ποσοτικά η ενεργεία ενός σεισμού χρησιμοποιούνται διάφορες κλίμακες μεγεθών σεισμού. Τα διαφορά σεισμικά μεγέθη υπολογίζονται από τις καταγραφές σεισμικών οργάνων. Μέσω αυτών των κλιμάκων, είναι εφικτή η σύγκριση των σεισμών μεταξύ τους και η ταξινόμηση τους σε καταλόγους.

Τα πλέον αξιόπιστα μεγέθη, το τοπικό μέγεθος M_L και το μέγεθος σεισμικής ροπής M_w , χρησιμοποιούνται ως επί το πλείστον για την απόδοση της σεισμικής ενέργειας παγκοσμίως.

Στην ευρύτερη περιοχή του Αιγαίου και γενικότερα στην Ελλάδα τα μεγέθη σεισμού εκτιμώνται από τις καταγραφές των οργάνων του Ενιαίου Εθνικού Δικτύου Σεισμογράφων (ΕΕΔΣ). Τα τελευταία χρόνια ο υπολογισμός του τοπικού μεγέθους M_L στην Ελλάδα γίνεται μέσω της σχέσης Hutton and Boore (1987) η οποία προέκυψε από δεδομένα σεισμών της Νότιας Καλιφόρνιας και παρέχει συγκεκριμένες τιμές στις παραμέτρους της σχέσης Bacun and Joyner (1984).

Σε πρόσφατη έρευνα χρησιμοποιώντας δεδομένα των σταθμών του ΕΕΔΣ, οι Scordilis et al., (2016) επαναπροσδιόρισαν την τιμή των παραμέτρων αυτών, καθώς και τις τιμές των διορθώσεων ανά σταθμό, c_i . Έτσι προέκυψε μια νέα, αναθεωρημένη σχέση υπολογισμού του τοπικού μεγέθους M_L στην Ελλάδα.

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιούνται τα δεδομένα των 242 σεισμών που εκδηλώθηκαν στην ευρύτερη περιοχή του Αιγαίου από τον Ιανουάριο του 2008 έως τον Μάρτιο του 2021. Οι τιμές του μεγέθους σεισμικής ροπής, M_w , των σεισμών αυτών προέρχονται από καταγραφές σταθμών τριών σεισμολογικών φορέων: (α) του Σεισμολογικού Σταθμού του Εργαστηρίου Γεωφυσικής του ΑΠΘ (AUTH), (β) του Γεωδυναμικού Ινστιτούτου του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών (NOA) και (γ) του Ευρω-Μεσογειακού Σεισμολογικού Κέντρου (EMSC). Οι τιμές του τοπικού μεγέθους M_L των σεισμών αυτών προκύπτουν από σταθμούς των AUTH και NOA.

Οι σχέσεις υπολογισμού τοπικού μεγέθους (M_L) στην Ελλάδα που αναφέρθηκαν προηγούμενα, εξετάζονται στην παρούσα εργασία με σκοπό την ανάδειξη της καταλληλότερης για τον αξιόπιστο υπολογισμό του τοπικού μεγέθους στην Ελλάδα.

Evaluating magnitude estimation relations for earthquakes of the boarder Aegean region

Abstract

Various scales of earthquake magnitudes are used to quantify the energy of earthquakes. Their values are calculated from the recordings of seismic instruments. Through these scales, it is possible to compare earthquakes with each other and classify them into catalogues.

The most reliable quantities, the local magnitude M_L and the seismic moment magnitude M_w , are mostly used for seismic energy performance worldwide.

In the wider Aegean region and in Greece in general, the earthquake magnitudes are estimated from the recordings of the instruments of the Hellenic Unified Seismological Network (HUSN). In recent years, the calculation of the local M_L magnitude in Greece is done through the Hutton and Boore (1987) relation, which was based on a general relation of Bacun and Joyner (1984), with parameters whose values derived from Southern California earthquake data.

In recent research using HUSN station data, Scordilis et al., (2016) re-determined the values of these parameters, as well as the values of the per-station corrections, c_i . Thus, a new, revised calculation relationship of the local M_L magnitude in Greece was obtained.

In this paper, the data of the 242 earthquakes that occurred in the wider Aegean region from January 2008 to March 2021 are used. The values of the of the seismic moment magnitude, M_w , of these earthquakes come from station recordings of three seismological agencies: (a) the Seismological Station of the Geophysical Laboratory of Aristotle University of Thessaloniki (AUTH), (b) the Geodynamic Institute of the National Observatory of Athens (NOA) and (c) the Euro-Mediterranean Seismological Center (EMSC). The values of the local magnitude, M_L , of these earthquakes are coming from AUTH and NOA stations.

The relationships for calculating local magnitude (M_L) in Greece that were previously mentioned, are examined in this paper with the aim of highlighting the most suitable one for the reliable calculation of local magnitude in Greece.

1. Εισαγωγή

1.1 Μέγεθος Σεισμού

Η απότομη απελευθέρωση συσσωρευμένης ενέργειας σε σημείο του εσωτερικού της Γης, προκαλεί διατάραξη στα πετρώματα της περιοχής και συνδέεται με την εκδήλωση του σεισμού. Η ενέργεια, που απελευθερώνεται στην εστία του σεισμού, έχει την ιδιότητα να διοχετεύεται στα στρώματα της Γης υπό μορφή ελαστικών (σεισμικών) κυμάτων.

Οι δυσμενείς επιπτώσεις του σεισμού στο φυσικό (και όχι μόνον) περιβάλλον, προκάλεσαν την ανάγκη να μελετηθεί και να αποδοθεί ποσοτικά η ενέργεια του, ώστε να είναι εφικτή η σύγκριση μεταξύ των σεισμών και η ταξινόμηση τους σε καταλόγους. Τέτοιοι κατάλογοι είναι απαραίτητοι για μελέτες που απώτερο στόχο έχουν τα κατάλληλα μέτρα προστασίας ώστε να μειωθούν οι επιπτώσεις μελλοντικών σεισμών.

Επειδή δεν υπάρχει άμεσος τρόπος για να μετρηθεί η ενέργεια ενός σεισμού, θεσπίστηκε η έννοια του σεισμικού μεγέθους η εκτίμηση του οποίου βασίστηκε σε μετρήσεις παραμέτρων πάνω σε καταγραφές σεισμικών κυμάτων. Τέτοιες παράμετροι είναι το μέγιστο πλάτος ταλάντωσης, η αντίστοιχη περίοδος, η διάρκεια καταγραφής κλπ.

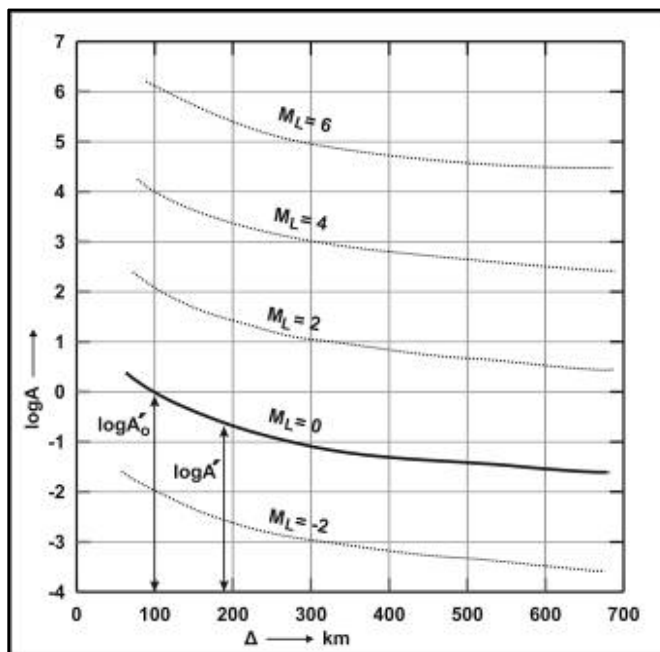
Το ύψος της ενέργειας που απελευθερώνεται στην εστία του σεισμού καθορίζει τα χαρακτηριστικά των σεισμικών κυμάτων. Για παράδειγμα τα σεισμικά κύματα μεγάλης ενέργειας (ισχυρός σεισμός, μεγάλο μέγεθος), διαδίδονται με μεγάλα πλάτη σε μεγάλες αποστάσεις και ενδέχεται να προκαλέσουν σημαντικά μακροσεισμικά αποτελέσματα (υψηλές τιμές μακροσεισμικών εντάσεων). Λόγω όμως εξασθένησης των πλατών τους (γεωμετρική διάσπορά), προκύπτει μείωση των μακροσεισμικών επιπτώσεων με την απόσταση. Μείωση της μακροσεισμικής έντασης παρατηρείται επίσης, λόγω, της ανελαστικής απόσβεσης των σεισμικών κυμάτων, δηλαδή της μετατροπής μέρους της κινητικής ενέργειας των κυμάτων σε θερμική ενέργεια.

1.2 Κλίμακες μεγεθών

Αναφέρθηκε η χρήση των παραμέτρων των σεισμικών κυμάτων για τον υπολογισμό του μεγέθους ενός σεισμού. Τα διαφορετικά χαρακτηριστικά των διαθέσιμων δεδομένων για το σκοπό αυτό (π.χ. διαφορετικές καταγραφές από σεισμόμετρα με διαφορετικά χαρακτηριστικά) καθιστούν δύσκολο τον αξιόπιστο υπολογισμό της ενέργειας, και κατ' επέκταση του μεγέθους, του σεισμού. Δυσκολίες στον υπολογισμό, υπάρχουν και λόγω των διαφορετικών ειδών των σεισμικών κυμάτων, των οποίων οι καταγραφές είναι διαθέσιμες κατά περίπτωση.

Για τον υπολογισμό του σεισμικού μεγέθους χρησιμοποιήθηκαν κατά καιρούς καταγραφές από διάφορα είδη σεισμικών οργάνων καταγραφής με διαφορετικά χαρακτηριστικά (π.χ. ιδιοπερίοδο, μεγέθυνση κλπ.) και επινοήθηκαν διάφορες κλίμακες σεισμικών μεγεθών, οι κυριότερες από τις οποίες περιγράφονται στη συνέχεια.

Για τον υπολογισμό του τοπικού μεγέθους M_L , χρησιμοποιείται η μέση τιμή, A , του μεγίστου πλάτους καταγραφής στις δύο οριζόντιες συνιστώσες ενός τυπικού σειсмоγράφου Wood-Anderson (σεισμόμετρο στρέψης με ιδιοπερίοδο εκκρεμούς $T_0 = 0.8 \text{ sec}$, στατική μεγέθυνση $V_0 = 2080$ και παράγοντα απόσβεσης $\zeta = 0.7$). Οι τιμές του $\log A$ σε σχέση με την επικεντρική απόσταση Δ φαίνονται στο σχήμα 1.1 .



Σχήμα 1.1: Γραφική παράσταση της τιμής $\log A$ (από τυπικό σειсмоγράφο Wood - Anderson) σε συνάρτηση με την επικεντρική απόσταση Δ (km) (Παπαζάχος και συνεργάτες, 2005)

Στο σχήμα 1.1, η τιμή του τοπικού μεγέθους M_L αποτυπώνεται με καμπύλες παράλληλες, που κάθε μια αντιπροσωπεύει συγκεκριμένη ενέργεια σεισμού. Η διαφορά των λογαρίθμων των πλάτων από διαφορετικού μεγέθους σεισμούς στην ίδια όμως επικεντρική απόσταση είναι σταθερή (παράλληλες καμπύλες).

Με βάση τα παραπάνω ο Richter (1935), όρισε ως πρότυπο σεισμό μηδενικού μεγέθους ($M_L=0$) το σεισμό που έχει καταγραφεί από τυπικό σειсмоγράφο Wood - Anderson που βρίσκεται σε επικεντρική απόσταση 100km με μέγιστο πλάτος $A_0^* = 1\mu\text{m}$ (10^{-6} m).

Έτσι ως τοπικό μέγεθος M_L χαρακτηρίζεται, η διαφορά του δεκαδικού λογαρίθμου του μέγιστου πλάτους αναγραφής, A από τον αντίστοιχο λογάριθμο του πλάτους του πρότυπου σεισμού, A_0^* , στη συγκεκριμένη επικεντρική απόσταση (πάντα σε τυπικό σειсмоγράφο Wood - Anderson).

Για παντός τύπου σειсмоγράφους οι Bullen και Bolt (1985), εισήγαγαν τη σχέση:

$$M_L = \log a + 2.56 \log \Delta - 1.67 \quad \text{για } 10 \text{ km} < \Delta < 600 \text{ km} \quad (1.1)$$

όπου α: πλάτος της εδαφικής κίνησης (μm) και Δ: επικεντρική απόσταση (km).

1.2.2 Επιφανειακό μέγεθος, M_s

Για τον υπολογισμό του επιφανειακού μεγέθους, M_s , χρησιμοποιούνται τα εδαφικά πλάτη επιφανειακών κυμάτων. Τα κύματα αυτά διαμορφώνονται και διαδίδονται στα επιφανειακά στρώματα της Γης, επομένως το μέγεθος αυτό δίνει πληροφορίες για σεισμούς μικρού σχετικά εστιακού βάθους ($h < 60 \text{ km}$). Με γνώμονα τα παραπάνω, οι Gutenberg και Richter (1942, 1956) εισήγαγαν τη σχέση:

$$M_s = \log a - \log a' + c_1 + d_1 \quad (1.2)$$

όπου α : το πλάτος της εδαφικής κίνησης (μm) επιφανειακών κυμάτων περιόδου 18-22sec
α' : το πλάτος πρότυπου σεισμού (πίνακας 1.1) και
 c_1, d_1 : σταθερές του σταθμού και της εστίας

Πίνακας 1.1: Τιμές του $-\log a'$ της σχέσης 1.2 για διάφορες τιμές της επικεντρικής απόστασης Δ.
(Παπαζάχος και συνεργάτες, 2005)

Δ°	$-\log a'$	Δ°	$-\log a'$	Δ°	$-\log a'$
20	4.0	60	4.8	120	5.3
25	4.1	70	4.9	140	5.3
30	4.3	80	5.0	160	5.35
40	4.5	90	5.05	170	5.3
45	4.6	100	5.1	180	5.0
50	4.6	110	5.2		

Επίσης ο Gutenberg (1945a), πρότεινε μια ακόμα σχέση υπολογισμού του επιφανειακού μεγέθους χρησιμοποιώντας πλάτη επιφανειακών κυμάτων περιόδων $T = 17-23 \text{ s}$.

$$M_s = \log a + 1.66 \log \Delta + 1.82 \quad \text{για } 15^\circ \leq \Delta \leq 130^\circ \quad (1.3)$$

όπου α: πλάτος της εδαφικής κίνησης (μm)
Δ: επικεντρική απόσταση σε μοίρες (°)

Μια άλλη σχέση υπολογισμού του μεγέθους M_s , εισήγαγαν οι Vanek et al., (1962). Η σχέση ισχύει για διάφορες περιόδους T (≥ 3 sec) σεισμών και για επιφανειακούς σεισμούς ($h < 60$ km) από επικεντρικές αποστάσεις 20° - 30° και είναι γνωστή ως "τύπος της Πράγας".

$$M_s = \log \frac{\alpha}{T} + 1.66 \log \Delta + 3.3, \text{ για } 20^\circ < \Delta < 160^\circ \quad (1.4)$$

όπου α : μέγιστο εδαφικό πλάτος (μm)

T : περίοδος ταλάντωσης (s)

Δ : επικεντρική απόσταση ($^\circ$)

Η παραπάνω σχέση υιοθετήθηκε το 1964 από την International Association of Seismology and Physics of the Earth's Interior (IASPEI).

1.2.3 Χωρικό μέγεθος, m_b

Για αυτό το μέγεθος, χρησιμοποιούνται κυρίως κύματα χώρου (εγκάρσια και διαμήκη), όποτε δεν υπάρχουν περιορισμοί ως προς το βάθος της εστίας, αλλά ούτε και προς την επικεντρική απόσταση Δ . Τα πλάτη που χρησιμοποιήθηκαν από τον Gutenberg (1945b,c) για τον καθορισμό αυτής της κλίμακας μεγέθους αφορούν κύματα με περιόδους της τάξης των 5.0 sec για τα επιμήκη κύματα και 10 sec για τα εγκάρσια. Αργότερα οι Gutenberg και Richter (1956) πρότειναν τη σχέση,

$$m_b = \log \frac{U}{T} + Q(\Delta, h) + c_2 + d_2 \quad (1.5)$$

όπου U : η εδαφική μετάθεση σεισμικού κύματος,

$Q(\Delta, h)$: συνάρτηση της επικεντρικής απόστασης και του εστιακού βάθους

c_2, d_2 : σταθερές που αφορούν τη θέση του σταθμού και της εστίας

Η σχέση αυτή εφαρμόζεται μέχρι και σήμερα χρησιμοποιώντας τα πλάτη των πρώτων 5sec των επιμήκων (κυρίως) κυμάτων (περίοδου ~ 1 sec) που προέρχονται από επικεντρικές αποστάσεις 21° - 100° .

1.2.4 Μέγεθος διάρκειας, M_D (ή M_T)

Για τις περιπτώσεις όπου λόγω μεγάλων πλατών των καταγραφών τα προαναφερθέντα μεγέθη αδυνατούν να δώσουν αξιόπιστα αποτελέσματα (περιπτώσεις κορεσμού των πλατών καταγραφής), θεσπίστηκε το μέγεθος διαρκείας M_D . Το μέγεθος αυτό προκύπτει από τη συνολική διάρκεια καταγραφής του σεισμού ή μέχρι το πλάτος της καταγραφής (λόγω απόσβεσης) να φτάσει σε μια ελάχιστη τιμή

Για τον υπολογισμό του μεγέθους αυτού, ο Bisztricsany (1958), πρότεινε την σχέση:

$$M_D = \alpha_1 + \alpha_2 \log(\tau) + \alpha_3 (\log(\tau))^2 + \alpha_4 \Delta \quad (1.6)$$

όπου τ : η διάρκεια καταγραφής (σε sec),
 Δ : η επικεντρική απόσταση (σε km) και
 α_i ($i=1,2,3,\dots$): σταθερές.

1.2.5 Το πρόβλημα του κορεσμού – μέγεθος της σεισμικής ροπής, M_w

Μέχρι τώρα στην περιγραφή της κάθε κλίμακας μεγέθους, αναφέρονταν και οι προϋποθέσεις και περιορισμοί κατά τη χρήση τους. Το βασικό πρόβλημα είναι ότι οι κλίμακες αυτές είναι ευαίσθητες στο είδος των σεισμικών κυμάτων που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό τους και στο φαινόμενο του κορεσμού. Έτσι, άλλη κλίμακα θεωρείται κατάλληλη για τον υπολογισμό μεγέθους τοπικών σεισμών, άλλη για μακρινούς επιφανειακούς σεισμούς κ.ο.κ.

Μια αντικειμενική ποσότητα που περιγράφει τη σεισμική κίνηση και, κατ' επέκταση, την ισχύ του προκαλούμενου σεισμού από αυτήν, είναι η σεισμική ροπή. Σύμφωνα με τον Aki (1966), η σεισμική ροπή M_0 ισούται με:

$$M_0 = \mu L w u \quad (1.7)$$

όπου μ : το μέτρο δυσκαμψίας του υλικού στην εστία (ιδιότητα υλικού)
 L, w : το μήκος και το πλάτος του ρήγματος
 u : μέση μετάθεση στην επιφάνεια ρήγματος

Με διαφοροποίηση της πιο πάνω σχέσης, προσαρμοσμένη στη χρήση εγκάρσιων κυμάτων, προκύπτει η εξίσωση:

$$M_0 = \frac{4\pi\rho\beta^3\Psi R}{0.85} \quad (1.8)$$

Όπου β : η ταχύτητα διάδοσης των εγκάρσιων κυμάτων (m/s^2)
 ρ : πυκνότητα υλικού
 R : υποκεντρική απόσταση (km)
 Ψ : φασματική τιμή εγκάρσιων κυμάτων που αντιστοιχεί στη γωνιακή συχνότητα.

Για τον υπολογισμό του μεγέθους ροπής M_w από φάσματα μεγάλης περιόδου, οι Hanks και Kanamori (1979), πρότειναν τη σχέση:

$$M_w = \frac{\log M_0 - 16.1}{1.5} \quad (1.9)$$

όπου M_0 : η σεισμική ροπή εκφρασμένη σε $\text{dyn}\cdot\text{cm}$.

1.2.6 Σχέσεις μεταξύ κλιμάκων μεγεθών

Για τη δημιουργία αξιόπιστων καταλόγων σεισμών είναι απαραίτητο τα μεγέθη όλων των σεισμών κάθε καταλόγου να εκφράζονται σε μια ενιαία κλίμακα μεγέθους. Για το λόγο αυτό, πολύ χρήσιμες είναι εμπειρικές σχέσεις που συνδέουν κλίμακες μεγεθών μεταξύ τους, επιτρέποντας αξιόπιστες μετατροπές μεγεθών από μία κλίμακα σε μια άλλη.

Μια σχέση που συνδέει το τοπικό μέγεθος M_L με το επιφανειακό μέγεθος M_s , πρότειναν οι Gutenberg και Richter (1956):

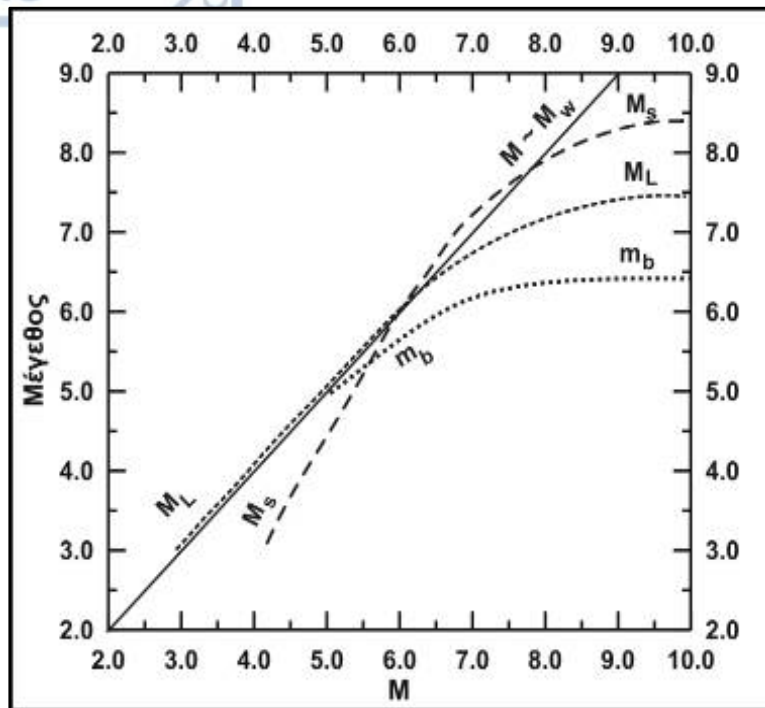
$$M_s = 1.27(M_L - 1) - 0.016M_L^2 \quad (1.10)$$

Ο Karnik (1973) χρησιμοποιώντας δεδομένα από το Διεθνές Σεισμολογικό Κέντρο (ISC) για το χωρικό μέγεθος m_b πρότεινε την σχέση:

$$m_{b,ISC} = 0.46 M_s + 2.74 \quad (1.11)$$

Τα δεδομένα της σχέσης αυτής αφορούσαν σεισμούς μεγέθους $m_b \geq 4.5$ και επιφανειακού μεγέθους $M_s \leq 6.5$.

Στο σχήμα 1.2 περιγράφονται οι σχέσεις των διαφόρων κλιμάκων μεγεθών (M_s , M_L , m_b) με την κλίμακα μεγέθους σεισμικής ροπής, M_w . Παρατηρείται σχεδόν ταύτιση τιμών μεταξύ μεγεθών M_L και M_w για εύρος τιμών M μεταξύ 3.0–6.2 περίπου. Για μεγαλύτερες τιμές παρατηρείται καθαρή υποεκτίμηση μεγέθους από την κλίμακα M_L . Το μέγεθος M_s , παρουσιάζει φαινόμενα κορεσμού για τιμές μεγεθών πάνω από 8, ενώ αντίστοιχο φαινόμενο παρατηρείται και για το m_b για τιμές μεγεθών πάνω από ~6.5.



Σχήμα 1.2: Σχέσεις κλιμάκων μεγεθών με το μέγεθος σεισμικής ροπής (Heaton et al., 1986).

Επίσης ο Karnik (1996) με χρήση της σχέσης 1.4 δημιούργησε καταλόγους σεισμών που εκδηλώθηκαν στην Ευρώπη την χρονική περίοδο 1800-1990. Το επιφανειακό μέγεθος των καταλόγων του Karnik (1996), M_{SK} συνδέεται με το επιφανειακό μέγεθος M_s με τις σχέσεις (Scordilis, 2006):

$$M_s = 1.05 (\pm 0.05) M_{SK} - 0.41 (\pm 0.31) \text{ για } 5.4 \leq M_{SK} \leq 8.1 \quad (1.12)$$

$$M_s = 1.19 (\pm 0.06) M_{SK} - 1.14 (\pm 0.26) \text{ για } 4.0 \leq M_{SK} \leq 5.3 \quad (1.13)$$

Αντίστοιχες σχέσεις μεταξύ του μεγέθους σεισμικής ροπής M_w και του μεγέθους M_{SK} είναι (Scordilis, 2006):

$$M_w = 0.80 M_{SK} + 1.31 \text{ για } 4.0 \leq M_{SK} \leq 5.3 \text{ με σφάλμα } \sigma = 0.41 \quad (1.14)$$

$$M_w = 0.70 M_{SK} + 1.80 \text{ για } 5.4 \leq M_{SK} \leq 6.2 \text{ με σφάλμα } \sigma = 0.29 \quad (1.15)$$

$$M_w = 1.04 M_{SK} - 0.33 \text{ για } 6.3 \leq M_{SK} \leq 8.1 \text{ με σφάλμα } \sigma = 0.31 \quad (1.16)$$

Σχέσεις που συνδέουν τα μεγέθη M_s και m_b , όπως αυτά υπολογίζονται από διεθνή σεισμολογικά κέντρα (ISC, NEIC), με το μέγεθος σεισμικής ροπής σε παγκόσμια κλίμακα προτάθηκαν επίσης από τον Scordilis (2006):

$$M_w = 0.67 M_s + 2.07 \quad \text{για } 3.0 \leq M_s \leq 6.1 \text{ με σφάλμα } \sigma=0.17 \quad (1.17)$$

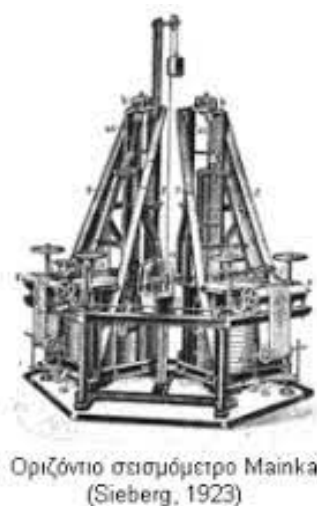
$$M_w = 0.99 M_s + 0.08 \quad \text{για } 6.2 \leq M_s \leq 8.2 \text{ με σφάλμα } \sigma=0.20 \quad (1.18)$$

$$M_w = 0.85 m_b + 1.03 \quad \text{για } 3.5 \leq m_b \leq 6.2 \text{ με σφάλμα } \sigma=0.29 \quad (1.19)$$

2. Υπολογισμός μεγέθους στην Ελλάδα

2.1 Ιστορική Αναδρομή

Την παρατήρηση και μελέτη της σεισμικότητας στη Ελλάδα, βοήθησε η εγκατάσταση και λειτουργία σημαντικού αριθμού σειсмоγράφων. Ο πρώτος σειсмоγράφος (τύπου Agatemnone) εγκαταστάθηκε, στην Αθήνα το 1898 (Παπαζάχος και Παπαζάχου, 2003). Στην συνέχεια εγκαταστάθηκαν στην Αθήνα σειсмоγράφοι Mainka (Σχήμα 2.1) και Wiechert (Σχήμα 2.2) το 1911 και το 1926 αντίστοιχα (Παπαζάχος και συνεργάτες, 2005). Το 1964 εγκαταστάθηκε στην Αθήνα σειсмоγράφος Wood Anderson (W-A) (Σχήμα 2.3). Ακολούθησε η τοποθέτηση και η λειτουργία νέων σταθμών στην επικράτεια ενώ σημαντική τομή αποτέλεσε η λειτουργία του δικτύου σειсмоγράφων του τομέα Γεωφυσικής του ΑΠΘ (έναρξη το 1981). Οι σεισμολογικοί σταθμοί παρέχουν δεδομένα για τους σεισμούς της περιοχής, απαραίτητα για την ανάλυση και περαιτέρω μελέτη τους.



Σχήμα 2.1: Οριζόντιος σειсмоγράφος Mainka (<https://www.gein.noa.gr/HTML/WEB-EDU/instruments.htm>)

Ο σειсмоγράφος Mainka θεωρείται ένας από τους παλιού τύπου σειсмоγράφους μηχανικής

αναγραφής. Έχει την δυνατότητα να καταγράψει τις δύο οριζόντιες συνιστώσες της εδαφικής κίνησης. Η αιωρούμενη κίνηση, των 2 εκκρεμών κεκλιμένου άξονα που εμπεριέχει, ταυτίζεται με την εδαφική κίνηση και καταγράφεται στην ταινία αναγραφής. Η απόσβεση της κίνησης των εκκρεμών γίνεται μέσω αέρα.



Σχήμα 2.2: Σεισμογράφος Wiechert (<https://seismo-edu9.webnode.gr/vocabulary>)

Ο σεισμογράφος Wiechert ανήκει στην κατηγορία των παλιών σεισμογράφων μηχανικής αναγραφής. Υπάρχουν δύο τύποι του σεισμογράφου αυτού, ο οριζόντιος και ο κατακόρυφος. Ο οριζόντιος Wiechert αναγράφει τις 2 οριζόντιες συνιστώσες της κίνησης μέσω ενός ανάστροφου εκκρεμούς κυλινδρικού σχήματος, ενώ ο κατακόρυφος περιέχει ένα βαρύ οπλισμό που κρέμεται από οκτώ κατακόρυφα ελατήρια. Συνήθως η μάζα των εκκρεμών είναι $m=1\text{kg}$ και η στατική μεγέθυνση $V_0=1500$. Η ιδιοπερίοδος διαφέρει στους δύο τύπους του σεισμογράφου, αφού $T_0=1\text{ sec}$ στους κατακόρυφους και $T_0=3-12\text{ sec}$ στους οριζόντιους.



Σχήμα 2.3: Οριζόντιος σεισμογράφος Wood_Anderson (W-A) (<https://www.gein.noa.gr/HTML/WEB-EDU/instruments.html>)

Ένας πιο εξελιγμένος τύπος σειсмоγράφων είναι ο σειсмоγράφος οπτικής αναγραφής Wood-Anderson που κατασκευάστηκε στις Η.Π.Α., το 1925 (Παπαζάχος και συνεργάτες, 2005). Περιέχει ένα εκκρεμές στρέψης, που στη μάζα του βρίσκεται ο καθρέπτης. Η ιδιοπερίοδος του εκκρεμούς του είναι $T_0 = 0.8 \text{ sec}$ και η στατική του μεγέθυνση $V_0 = 2800$.

2.2 Προηγούμενη Έρευνα στον Ελληνικό χώρο

Ένα από τα πρώτα θέματα που αντιμετωπίστηκαν ήταν η θέσπιση μίας αξιόπιστης σχέσης υπολογισμού μεγεθών από τις καταγραφές τους. Έτσι αρχικά για την εύρεση του επιφανειακού μεγέθους M_s σεισμών εστιακού βάθους $h < 60 \text{ km}$, οι Papazachos και Vasilikou (1966) χρησιμοποιώντας τις οριζόντιες καταγραφές των σειсмоγράφων Mainka και Wiechert πρότειναν την σχέση:

$$M_s = \log a + 1.42 \log \Delta + 0.2 \quad \text{για } \Delta < 600 \text{ km} \quad (2.1)$$

όπου a το μέσο εδαφικό πλάτος (μm) και Δ η επικεντρική απόσταση (km)

Για σεισμούς ενδιάμεσου εστιακού βάθους h ($60 \leq h \leq 180 \text{ km}$), χρησιμοποιήθηκε η σχέση (Papazachos and Comninakis, 1971):

$$M_s = \log a + 0.18 \frac{R}{100} + 3.20 \quad (2.2)$$

όπου R η υποκεντρική απόσταση και a το μέσο εδαφικό πλάτος

Για την εύρεση του τοπικού μεγέθους M_L χρησιμοποιήθηκαν καταγραφές του σειсмоγράφου W-A, ενώ για τον υπολογισμό του ίδιου μεγέθους, στη Θεσσαλονίκη χρησιμοποιήθηκαν καταγραφές σε σειсмоγράφους βραχείας περιόδου (S-13 Teledyne Geotech) που βαθμολογήθηκαν ως προς το M_L του σειсмоγράφου W-A της Αθήνας.

Η σχέση που προέκυψε (Κυρατζή 1984, Kiratzi & Papazachos 1986) και με την οποία υπολογίζεται το τοπικό μέγεθος M_{LGR} είναι:

$$M_{LGR}^* = \log a + 2.32 \log R - 1.07 + C_s \quad \text{για } 3.0 \leq M_{LGR} \leq 6.0 \quad (2.3)$$

όπου a το εδαφικό πλάτος (μm), R η υποκεντρική απόσταση (km) και C_s η σταθερή διόρθωση του κάθε σταθμού.

Για τον υπολογισμό ισοδύναμου μεγέθους με τη χρήση της διάρκειας καταγραφής σε έναν σταθμό προέκυψε η ακόλουθη σχέση (Κυρατζή 1984, Kiratzi & Papazachos 1985):

$$M_{LGR} = M_D = C_0 + C_1 \log t + 0.0012 \Delta \quad \text{για } 3.0 \leq M_{LGR} \leq 6.0 \quad (2.4)$$

όπου t η διάρκεια σήματος (s), Δ η επικεντρική απόσταση (km), C_1 ο συντελεστής που εξαρτάται από την επικεντρική απόσταση και C_0 η σταθερή διόρθωση του κάθε σταθμού.

Θεσπίστηκαν επίσης σχέσεις μεταξύ κλιμάκων μεγεθών. Έτσι το χωρικό μέγεθος m_b συνδέεται με το μέγεθος ροπής M_w , μέσω της σχέσης (Parazachos et al., 1997):

$$M_w = 1.28 m_b - 1.12 \quad \text{για } 4.8 \leq m_b \leq 6.0 \quad (2.5)$$

Επίσης από δεδομένα σεισμών της περιοχής του Αιγαίου, προτάθηκαν οι παρακάτω σχέσεις (Parazachos et al., 1997) που συνδέουν τη σεισμική ροπή M_0 με το M_w ,

$$\log M_0 = 1.5 M_w + 15.99 \quad (\text{για επιφανειακούς σεισμούς}) \quad (2.6)$$

$$\log M_0 = 1.5 M_w + 16.11 \quad (\text{για σεισμούς ενδιάμεσου βάθους}) \quad (2.7)$$

Η σχέση που συνδέει το μέγεθος σεισμικής ροπής M_w με το M_{LGR} είναι (Parazachos et al. 1997, Margaris & Parazachos 1999):

$$M_w = 0.97 M_{LGR} + 0.58 \quad \text{για } 3.6 \leq M_{LGR} \leq 6.5 \quad (2.8)$$

Οι Margaris και Parazachos (1999) διατύπωσαν την σχέση του μεγέθους ροπής M_w με το μέγεθος M_{LSM} , που υπολογίζεται από επιταχυνσιογράφοις.

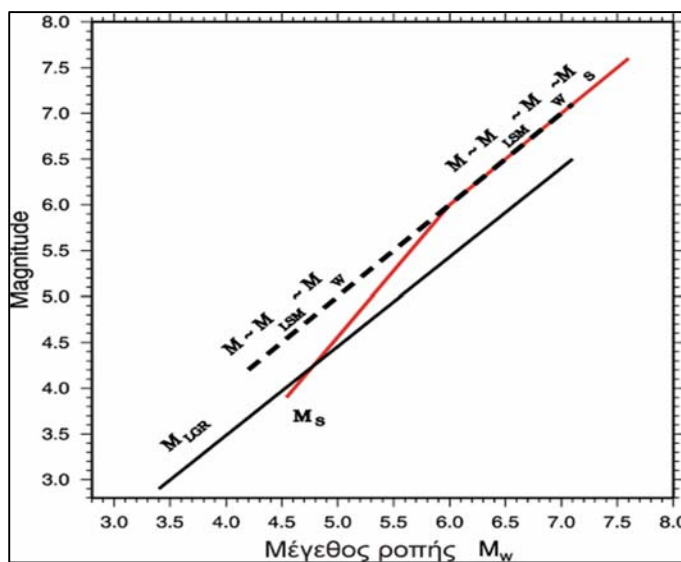
$$M_w = M_{LSM} \quad \text{για } 3.9 \leq M_{LSM} \leq 6.6 \quad (2.9)$$

Για σεισμούς του ελληνικού χώρου, το επιφανειακό μέγεθος M_s , και το μέγεθος σεισμικής ροπής M_w συνδέονται με τις σχέσεις (Parazachos et al. 1997, 2002):

$$M_w = 0.69 M_s + 1.83 \quad \text{για } 4.2 \leq M_s \leq 6.0 \quad (2.10)$$

$$M_w = M_s \quad \text{για } 6.0 \leq M_s \leq 8.0 \quad (2.11)$$

Συσχέτιση μεταξύ των τιμών των μεγεθών διαφόρων κλιμάκων του ελληνικού χώρου παρουσιάζεται στη γραφική παράσταση του σχήματος 2.4. Οι τιμές των μεγεθών M_{LSM} είναι ισοδύναμες με αυτές του M_w (κόκκινη γραμμή) για τιμές $M_w=6.0-7.6$. Το ίδιο ισχύει και για το μέγεθος, M_s , το οποίο για τιμές $M_w \leq 5.9$ διαφοροποιείται ακολουθώντας γραμμική σχέση. Για παράδειγμα, για $M_w=5.0$, το επιφανειακό μέγεθος M_s έχει τιμή περίπου 4.6. Η ευθεία που αντιστοιχεί στο τοπικό μέγεθος M_{LGR} , βρίσκεται γραφικά πιο κάτω, άρα αποδίδει μικρότερο (κατά ~ 0.5) μέγεθος σε σχέση με το M_w .

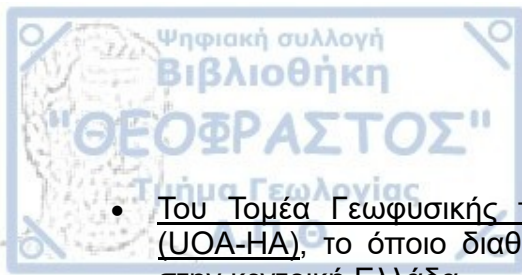


Σχήμα 2.4: Σχέσεις κλιμάκων μεγεθών με το μέγεθος σεισμικής ροπής στην Ελλάδα. (Parazachos et al., 2002)

2.3 Ενιαίο Εθνικό Δίκτυο Σεισμογράφων (ΕΕΔΣ)

Για την εκτίμηση των μεγεθών των σεισμών του Ελληνικού χώρου, λαμβάνονται δεδομένα από σεισμογράφους, που είναι εγκατεστημένοι στην ευρύτερη περιοχή όπως φαίνεται στο σχήμα 2.5 (Evangelidis et al., 2021). Όλοι οι σεισμολογικοί σταθμοί απαρτίζουν το Ενιαίο Εθνικό Δίκτυο Σεισμογράφων το οποίο συστήθηκε το 2004 και λειτουργούν με ευθύνη τεσσάρων ερευνητικών κέντρων (φορέων):

- Του Γεωδυναμικού Ινστιτούτου του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών (NOA - HL), το οποίο διαθέτει 52 μόνιμους σεισμολογικούς σταθμούς καλύπτοντας την ηπειρωτική και νησιωτική Ελλάδα, καθώς και τα ενεργά ηφαίστεια του Ελληνικού τόξου (Σαντορίνη, Μήλος, Νίσυρος)
- Του Τομέα Γεωφυσικής του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης (AUTH - HT), το οποίο διαθέτει 49 σεισμολογικούς σταθμούς που βρίσκονται κυρίως στην κεντρική και βόρεια Ελλάδα και σε νησιά του Αιγαίου και του Ιονίου Πελάγους καθώς και στα νησιά του ενεργού ηφαιστείου της Σαντορίνης.



- Του Τομέα Γεωφυσικής του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών (ΥΟΑ-ΗΑ), το οποίο διαθέτει 45 σεισμολογικούς σταθμούς που είναι τοποθετημένοι στην κεντρική Ελλάδα.
- Του Τομέα Γεωφυσικής του Πανεπιστημίου Πατρών (ΥΟΡ-ΗΡ), που διαθέτει 25 σεισμολογικούς σταθμούς που είναι εγκαταστημένοι στην Δυτική Ελλάδα και σε νησιά του Ιονίου.

Επιπλέον υπάρχουν σεισμολογικά κέντρα που λειτουργούν δίκτυα σειсмоγράφων στην ευρύτερη περιοχή όπως:

- Το Ελληνικό Σεισμολογικό Δίκτυο τη Κρήτης (HSNC-HC), που αποτελείται από 31 σταθμούς που βρίσκονται στην περιοχή αποκλειστικά της Κρήτης.
- Το Ινστιτούτο Τεχνικής Σεισμολογίας και Αντισεισμικών Κατασκευών (ITSAK-HI), που διαθέτει δίκτυο με ~120 επιταχυνσιογράφους ανά την Ελλάδα.
- Το Τμήμα Γεωλογικής Επισκόπησης της Κύπρου (GSD-CQ), που αναδιαμόρφωσε το σεισμολογικό δίκτυο το οποίο απαρτίζεται από 13 σεισμολογικούς σταθμούς.
- Κέντρα του εξωτερικού (GE, MN), που είτε λειτουργούν ανεξάρτητα, είτε συνεργάζονται με το δίκτυο HL και αποτελούνται από 34 σταθμούς.

Οι καταγραφές, από τους σταθμούς των προαναφερθέντων κέντρων, διατίθενται στο Εθνικό Παρατηρητήριο του Κέντρου Δεδομένων της Αθήνας για το Ευρωπαϊκό Ολοκληρωμένο Αρχείο Δεδομένων (EIDA@NOA).



Σχήμα 2.5: Οι σεισμολογικοί σταθμοί που λειτουργούν στην Ελλάδα και τις γειτονικές χώρες. Με τρίγωνα συμβολίζονται οι σταθμοί με σεισμόμετρα ευρέος φάσματος (BB), ενώ με κύκλους συμβολίζονται οι επιταχυνσιογράφοι (SM). Οι σταθμοί έχουν χρωματική κωδικοποίηση ανάλογα στο δίκτυο το οποίο ανήκουν. Στους ένθετους χάρτες εμφανίζονται τα τοπικά δίκτυα.

2.4 Αναθεωρημένη Σχέση Υπολογισμού Τοπικού Μεγέθους στον Ελληνικό χώρο

Για τον προσδιορισμό του τοπικού μεγέθους M_L σε παγκόσμια κλίμακα, οι Bacun and Joyner (1984) πρότειναν τη σχέση:

$$M_L = \log A + n \log \frac{R}{100} + K(R-100) + 3.0 \quad (2.12)$$

Όπου A το μέγιστο πλάτος (mm) καταγραφής σεισμού σε σειсмоγράφο W-A, R η υποκεντρική απόσταση (km), n ο παράγοντας γεωμετρικής διασποράς και K ο συντελεστής ανελαστικής απόσβεσης.

Με δεδομένα από σεισμούς της Νότιας Καλιφόρνιας, οι Hutton and Boore (1987) όρισαν συγκεκριμένη τιμή στον παράγοντα γεωμετρικής διασποράς ($n=1.11$) και στον συντελεστή ανελαστικής απόσβεσης ($K=0.00189$). Επομένως η σχέση 2.12 παίρνει τη μορφή:

$$M_L = \log A + 1.11 \log \frac{R}{100} + 0.00189(R-100) + 3.0 \quad (2.13)$$

Η παραπάνω σχέση χρησιμοποιείται ευρέως τα τελευταία χρόνια, με τα αποτελέσματα της να ανταποκρίνονται σε μεγάλο βαθμό με την πραγματική τιμή του μεγέθους M_L . Όμως στους σεισμούς της Ελλάδας, παρουσιάζουν κάποιες αποκλίσεις ως προς το μέγεθος σεισμικής ροπής M_w . Οι αποκλίσεις αυτές οφείλονται στις διαφορετικές (για την περιοχή) τιμές των παραμέτρων η και K .

Σε πρόσφατη ερεύνα οι Scordilis et al., (2016), για τον εντοπισμό ακριβέστερης (για τους τοπικούς σεισμούς) σχέσης, ανέλυσαν δεδομένα από 98 σεισμολογικούς σταθμούς του ΕΕΔΣ. Τα δεδομένα αυτά αφορούν 782 σεισμούς με μέγεθος ροπής M_w από 2.9 έως 6.4 και υποκεντρική απόσταση, R , από 4 έως 685 km. Το αποτέλεσμα της έρευνας αυτής ήταν να επαναπροσδιοριστούν οι τιμές του παράγοντα γεωμετρικής διασποράς, η και του συντελεστή ανελαστικής απόσβεσης, K στην Ελλάδα. Έτσι η αναθεωρημένη σχέση υπολογισμού του M_L είναι:

$$M_L = \log A + 1.319 (\pm 0.024) \log \frac{R}{100} + 0.00226 (\pm 0.00017) (R-100) + 3.0 + c_i \quad (2.14)$$

Από τη σύγκριση των εξισώσεων 2.13 και 2.14 προκύπτει ότι η τιμή της παραμέτρου K αυξάνεται κατά 0.209 ενώ η τιμή της παραμέτρου η έχει απόκλιση +0.00037. Επίσης υπάρχει η παράμετρος c_i , που ονομάζεται διόρθωση σταθμού και λαμβάνει διαφορετική τιμή για κάθε σταθμό (STA). Στο πίνακα 2.1 παρουσιάζονται οι τιμές c_i των 98 σταθμών που βαθμολογήθηκαν.

Πίνακας 2.1: Οι διορθώσεις c_i της σχέσης 2.14 για τους 98 σταθμούς (Scordilis et al., 2016).

SN	NET	STA	c_i
1	HA	ACOR	-0.2072
2	HT	AGG	-0.0307
3	HT	ALN	0.0763
4	HP	AMT	-0.2085
5	HL	ANKY	0.0931
6	HP	ANX	-0.1096
7	HT	AOS	0.0342
8	HL	APE	0.1951
9	HL	ARG	0.0850

SN	NET	STA	c_i
50	HL	LAST	0.1797
51	HL	LIA	-0.0339
52	HT	LIT	0.0600
53	HT	LKD2	-0.0428
54	HL	LKR	0.0284
55	HA	LOUT	0.0524
56	HP	LTK	0.0145
57	HA	MAKR	-0.3599
58	HL	MHLO	-0.4274

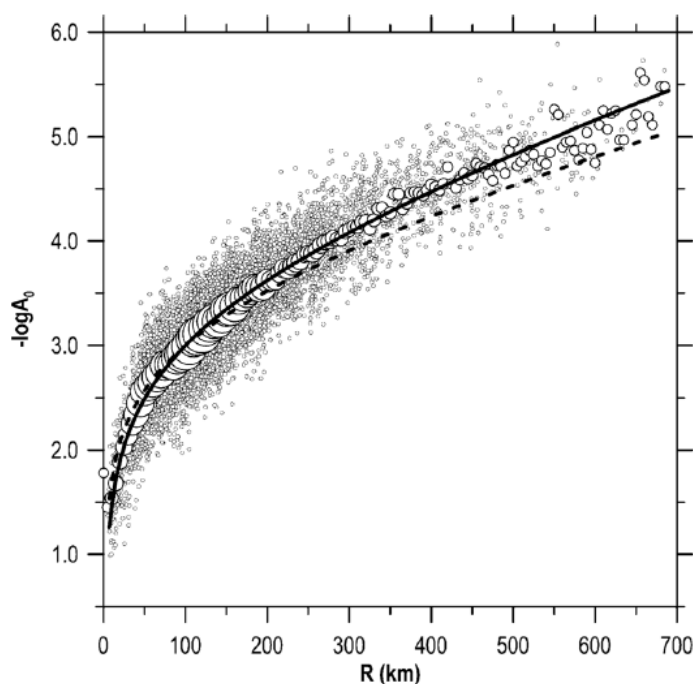
SN	NET	STA	c _i
10	HA	ATAL	0.2702
11	HL	ATH	-0.0952
12	HA	ATHU	0.4029
13	HA	AXAR	-0.3721
14	HT	CHOS	-0.1209
15	HT	CMBO	-0.1673
16	HP	DID	-0.0574
17	HA	DIDY	-0.0355
18	HP	DRO	-0.2178
19	HP	DSF	0.0483
20	HP	DSL	0.0112
21	HP	DYR	0.2332
22	HP	EFP	-0.0868
23	HA	EREA	0.0017
24	HL	EVR	0.0517
25	HT	FNA	-0.0911
26	HA	FYTO	0.2151
27	HT	GRG	0.0135
28	HP	GUR	-0.2109
29	HL	GVD	-0.1261
30	HT	HORT	0.2015
31	HL	IACM	-0.4838
32	HL	IDI	0.2097
33	HT	IGT	0.1508
34	HL	IMMV	-0.0825
35	HL	ITM	0.1331
36	HL	JAN	0.0044
37	HA	KALE	-0.0395
38	HL	KARP	0.0007
39	HA	KARY	0.0703
40	HT	KAVA	-0.0083

SN	NET	STA	c _i
59	HA	MRKA	-0.0783
60	HL	NEO	-0.1099
61	HT	NEST	0.0720
62	HT	NIS1	-0.2430
63	HL	NISR	-0.0143
64	HL	NPS	0.0085
65	HL	NVR	0.1105
66	HT	OUR	-0.1084
67	HT	PAIG	0.1498
68	HP	PDO	-0.3319
69	HL	PLG	0.1968
70	HL	PRK	-0.3462
71	HL	PTL	0.0248
72	HP	PVO	0.0580
73	HP	PYL	0.1168
74	HL	RDO	0.1047
75	HL	RLS	0.1752
76	HL	SANT	-0.0245
77	HP	SERG	-0.0113
78	HP	SFD	-0.3476
79	HT	SIGR	-0.0961
80	HL	SIVA	-0.2492
81	HA	SKIA	-0.0614
82	HL	SMG	-0.2052
83	HA	SMIA	-0.4080
84	HL	SMTH	0.2107
85	HT	SOH	-0.0351
86	HT	SRS	0.2090
87	HA	THAL	-0.3131
88	HT	THE	0.3847
89	HL	THL	0.1659

SN	NET	STA	c _i
41	HL	KEK	0.0714
42	HL	KLK	0.2490
43	HT	KNT	0.0710
44	HT	KPRO	0.0364
45	HT	KRND	-0.0353
46	HL	KSL	0.1152
47	HL	KYTH	0.0014
48	HL	KZN	0.0343
49	HA	LAKA	0.1002

SN	NET	STA	c _i
90	HL	VAM	-0.0320
91	HA	VILL	-0.1419
92	HL	VLI	0.0254
93	HL	VLS	0.0825
94	HP	VLX	0.1983
95	HL	VLY	-0.0629
96	HT	XOR	-0.0438
97	HL	ZKR	0.1533
98	HP	ZKS	-0.3858

Η σύγκριση ανάμεσα στις καμπύλες βαθμολογίας που χρησιμοποιήθηκαν στις σχέσεις 2.13 και 2.14, (σχήμα 2.6) εμφανίζουν διαφοροποίηση η οποία είναι εντονότερη για υποκεντρικές αποστάσεις μεγαλύτερες των 100 km. Πιο συγκεκριμένα, φαίνεται ότι η σχέση Hutton & Boore (1987) υποεκτιμά τα μεγέθη όταν αυτά υπολογίζονται από σεισμολογικούς σταθμούς σε αποστάσεις μεγαλύτερες των 100km.



Σχήμα 2.6: Γραφική παράσταση της νέας προτεινόμενης συνάρτησης βαθμολογίας (Scordilis et al., 2016, συνεχής γραμμή) και της αντίστοιχης που χρησιμοποιείται σήμερα (Hutton & Boore, 1987, στικτή γραμμή).

3. Δεδομένα παρατήρησης

3.1 Πηγές δεδομένων

Για την εκπόνηση αυτής της διπλωματικής εργασίας, συλλέχθηκαν δεδομένα από σεισμούς που εκδηλώθηκαν στον Ελλαδικό χώρο την χρονική περίοδο από τον Ιανουάριο του 2008 έως τον Μάρτιο του 2021. Η περιοχή εκδήλωσης των σεισμών οριοθετείται ως προς το γεωγραφικό μήκος μεταξύ 19.3° - 29.6° Α και το γεωγραφικό πλάτος μεταξύ 33.8° - 42.3° Β.

Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν, αφορούν τις βασικές εστιακές παραμέτρους των σεισμών (χρόνος γένεσης, γεωγραφικές συντεταγμένες επικέντρου, εστιακό βάθος, μέγεθος) και λήφθηκαν από καταλόγους σεισμών τριών σεισμολογικών φορέων: του Τομέα Γεωφυσικής του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης, (AUTH, <http://geophysics.geo.auth.gr/ss>), του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών, (NOA, <https://bbnet.gein.noa.gr>), και του Ευρω-Μεσογειακού Σεισμολογικού Κέντρου (European Mediterranean Seismological Center, EMSC (www.emsc-csem.org)).

3.2 Μέγεθος Σεισμικής Ροπής (M_w) Α.Π.Θ.- Ν.Ο.Α. - EMSC

Στο πρώτο κεφάλαιο, αναφέρθηκε η σημασία του μεγέθους της σεισμικής ροπής M_w , καθώς και ο λόγος που ο υπολογισμός του επιτρέπει την ασφαλή εκτίμηση της "ισχύος" (συνάρτηση της απελευθερούμενης ενέργειας) ενός σεισμού. Όμως στους καταλόγους των διαφορετικών σεισμολογικών φορέων ενδεχομένως να υπάρξουν διαφορές σε ό,τι αφορά την εκτίμηση των τιμών των εστιακών παραμέτρων των σεισμών και επομένως και των μεγεθών τους.

Ειδικότερα, σε ό,τι αφορά τα μεγέθη σεισμικής ροπής στους καταλόγους των προαναφερθέντων σεισμολογικών φορέων, παρατηρήθηκε για τους ίδιους σεισμούς μια απόκλιση τιμών του M_w έως 0.6. Αυτή η απόκλιση μπορεί να οφείλεται σε διαφορετικούς τρόπους εκτίμησης του M_w ή/και στο γεγονός ότι οι σταθμοί (των εκάστοτε δικτύων) χρησιμοποιούν διαφορετικού είδους σειсмоγράφους με διαφορετικά τεχνικά χαρακτηριστικά. Ένας επιπλέον παράγοντας μπορεί να είναι η απόσταση του κάθε σταθμού από το επίκεντρο του σεισμού.

Έτσι, στην πορεία υιοθέτησης μίας τελικής, αντιπροσωπευτικής τιμής μεγέθους για κάθε σεισμό, είναι απαραίτητο να προηγηθεί σύγκριση μεταξύ των τιμών των μεγεθών όλων των δικτύων για τον εντοπισμό πιθανών σχέσεων εξάρτησης μεταξύ τους.

3.3 Κατάλογος Σεισμών με Μεγέθη Σεισμικής Ροπής

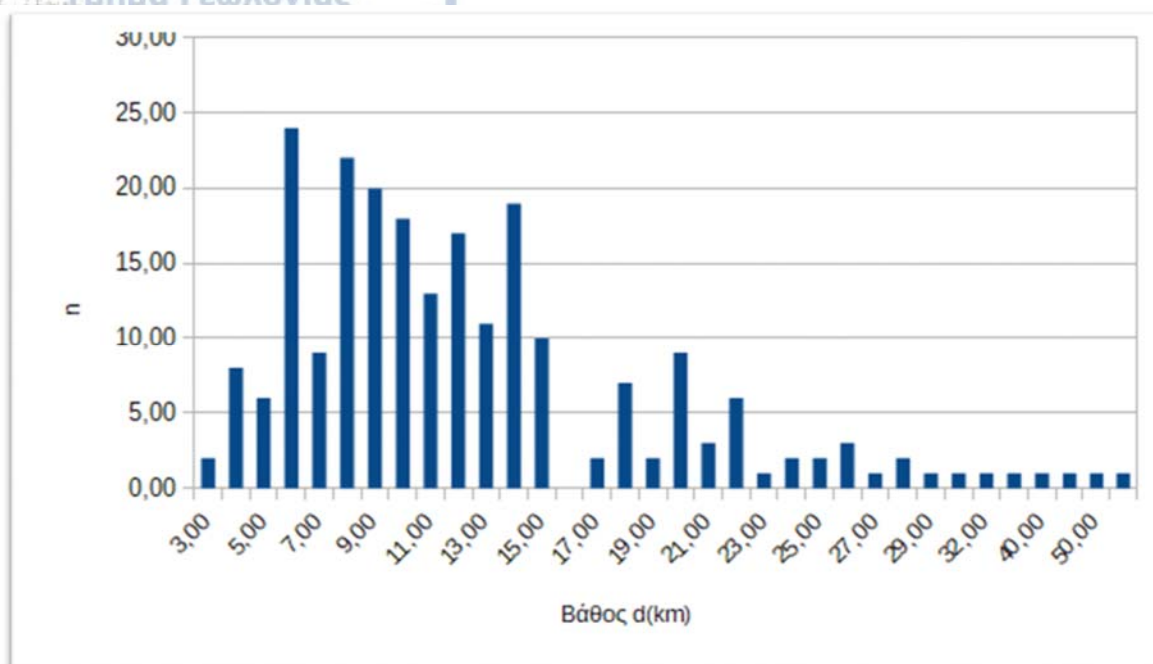
Για την ευκολία στην σύγκριση των δεδομένων των διαφόρων σεισμολογικών φορέων, δημιουργήθηκε ένας ενιαίος κατάλογος, που περιέχει 242 σεισμούς με αναφορές σε μεγέθη ροπής και από τις τρεις εξεταζόμενες πηγές (ΑΠΘ, NOA, EMSC). Στον νέο αυτόν κατάλογο (παράρτημα Ι) δίνονται πληροφορίες για την ημερομηνία εκδήλωσης του σεισμού, τον χρόνο γένεσης του, το γεωγραφικό μήκος και πλάτος του επικέντρου του και το εστιακό του βάθος.

Η κατανομή των σεισμών του καταλόγου στην περιοχή ενδιαφέροντος, απεικονίζεται στο σχήμα 3.1. Όπως φαίνεται και από το χάρτη, υπάρχει έντονη συγκέντρωση επικέντρων στην περιοχή του Ιονίου, γεγονός αναμενόμενο λόγω της πολύ υψηλής σεισμικότητας της περιοχής. Όμως τα επίκεντρα των σεισμών φαίνεται να καλύπτουν επαρκώς τον ελληνικό χώρο, και επομένως τα αποτελέσματα αυτής της μελέτης μπορούν να θεωρηθούν ως αντιπροσωπευτικά για τον ευρύτερο χώρο του Αιγαίου.



Σχήμα 3.1: Χωρική κατανομή των επικέντρων των 242 σεισμών που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία (Ιανουάριος 2008 - Μάρτιος 2021) (<https://www.google.com/maps>)

Η πλειοψηφία των σεισμών του καταλόγου μας είχαν εστιακά βάθη μεταξύ 7 και 15 km, όπως φαίνεται και από το ιστόγραμμα του σχήματος 3.2.



Σχήμα 3.2: Ιστόγραμμα τιμών των εστιακών βαθών, d (km), των 242 σεισμών του καταλόγου.

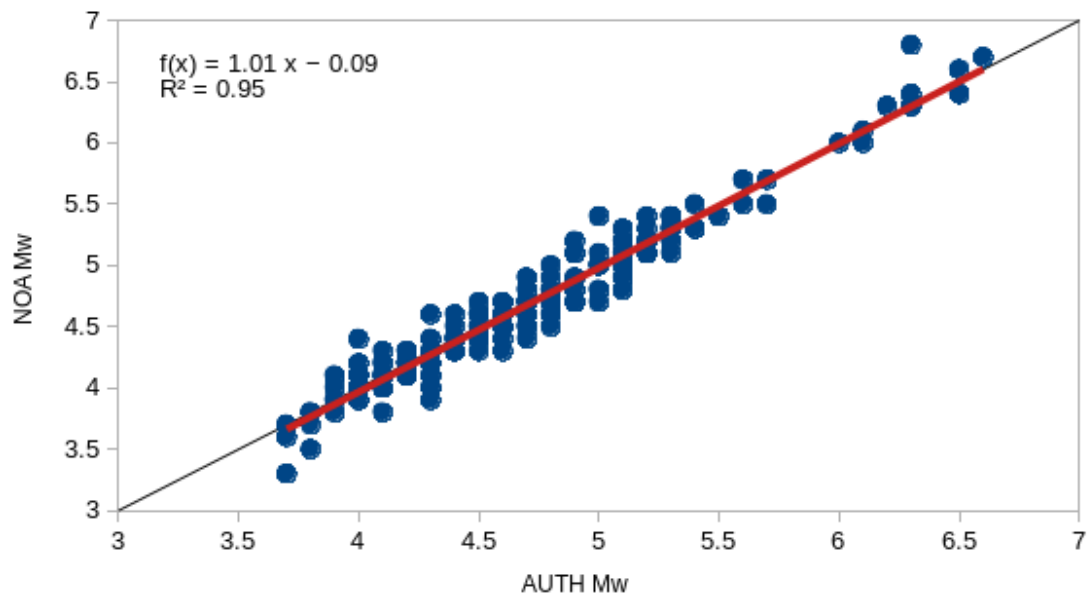
3.3.1 Συγκρίσεις Μεγεθών Σεισμικής Ροπής

Για τη σύγκριση των τιμών του σεισμικού μεγέθους M_w των τριών πηγών (ΑΠΘ, NOA, EMSC) του καταλόγου κατασκευάστηκαν αντίστοιχα διαγράμματα που επιτρέπουν την εξαγωγή μαθηματικών σχέσεων που συνδέουν τα μεγέθη αυτά μεταξύ τους.

Στο πρώτο διάγραμμα (σχήμα 3.3), απεικονίζεται η συσχέτιση των τιμών M_w του NOA και M_w του ΑΥΘ. Από την εικόνα της κατανομής των σημείων προκύπτει γραμμική σχέση μεταξύ των μεγεθών αυτών που εκφράζεται από τη σχέση:

$$M_w \text{NOA} = 1.01M_w \text{AΥΘ} - 0.09 \quad (3.1)$$

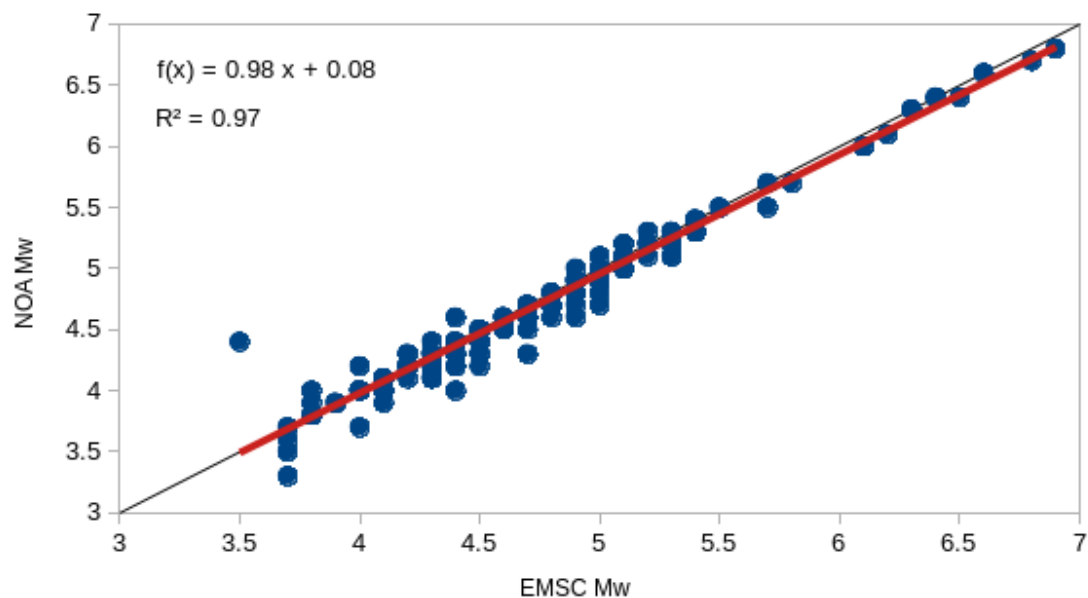
με καλή τιμή του συντελεστή συσχέτισης (correlation coefficient), $R=0.97$ ο οποίος δείχνει το βαθμό συσχέτισης των πειραματικών (πραγματικών) τιμών των μεταβλητών με τη θεωρητική μέση ευθεία και παίρνει τιμές εντός του διαστήματος $[0,1]$ ($R=0$ καμία συσχέτιση, $R=1$ τέλεια συσχέτιση). Επομένως τα δεδομένα αν και δεν συμπίπτουν πλήρως με την ευθεία (κόκκινη) γραμμή, την παρακολουθούν σε πολύ ικανοποιητικό βαθμό. Επίσης παρατηρείται πως η μέση θεωρητική ευθεία βρίσκεται πολύ κοντά (πρακτικά συμπίπτει) στη διχοτόμο, γεγονός που επιτρέπει να θεωρήσουμε τα δύο συγκρινόμενα μεγέθη ισοδύναμα σε ολόκληρο το εύρος των διαθέσιμων τιμών τους.



Σχήμα 3.3: Συσχέτιση των τιμών M_w NOA και M_w AUTH. Η μαύρη γραμμή είναι η διχοτόμος ενώ η κόκκινη υλοποιεί τη μέση ευθεία.

Στο διάγραμμα μεταξύ των M_w NOA και M_w EMSC (Σχήμα 3.4), τα δεδομένα εμφανίζουν ακόμη καλύτερη συγκέντρωση γύρω από τη μέση ευθεία σε σχέση με το προηγούμενο διάγραμμα, με τιμή του συντελεστή συσχέτισης $R=0.98$. Η μέση ευθεία δίδεται από τη σχέση:

$$M_w\text{NOA} = 0.98M_w\text{EMSC} + 0.08 \quad (3.2)$$



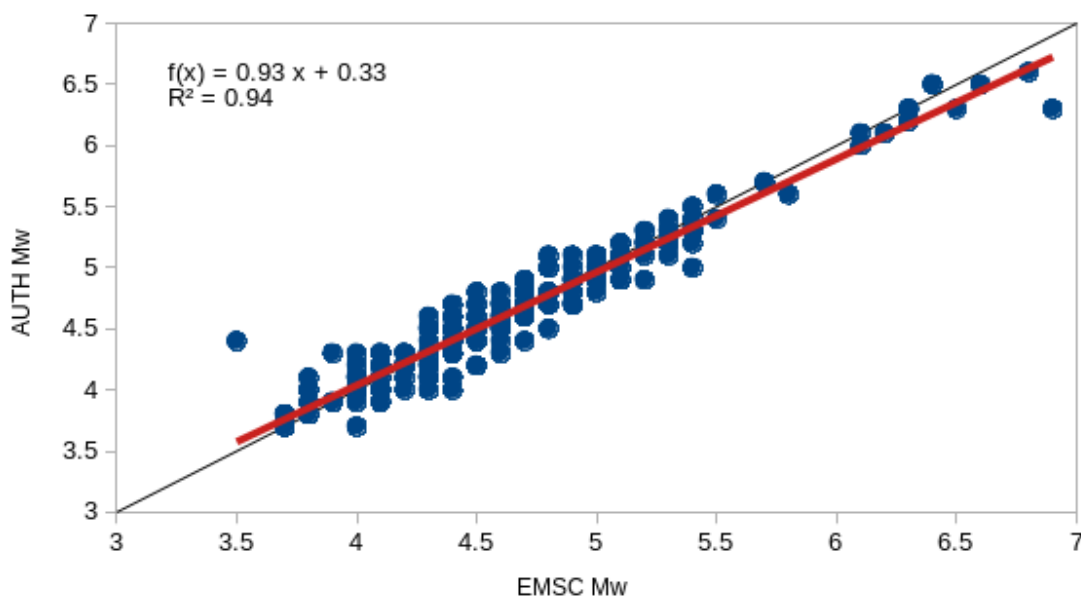
Σχήμα 3.4: Συσχέτιση των τιμών M_w NOA και M_w EMSC. Η μαύρη γραμμή είναι η διχοτόμος ενώ η κόκκινη υλοποιεί τη μέση ευθεία.

Και εδώ η μέση ευθεία αποκλίνει ελάχιστα από τη διχοτόμο, επιτρέποντας να θεωρηθούν τα δύο αυτά μεγέθη ως ισοδύναμα.

Στο διάγραμμα μεταξύ των τιμών M_w AUTH και M_w EMSC (σχήμα 3.5), τα δεδομένα παρουσιάζουν καλή συσχέτιση, με διασπορά αντίστοιχη με αυτή του σχήματος 3.4 όπως φαίνεται και από την τιμή του αντίστοιχου συντελεστή ($R=0.97$). Η μέση θεωρητική ευθεία όμως φαίνεται ότι διαφοροποιείται ελαφρά από την διχοτόμο και εκφράζεται από τη σχέση:

$$M_w AUTH = 0.93 M_w EMSC + 0.33 \quad (3.3)$$

Επομένως τα δύο αυτά μεγέθη, M_w AUTH και M_w EMSC, δε μπορούν να θεωρηθούν ως απολύτως ισοδύναμα, όπως αυτό προκύπτει τουλάχιστον από τα διαθέσιμα δεδομένα.



Σχήμα 3.5: Συσχέτιση των τιμών M_w AUTH και M_w EMSC. Η μαύρη γραμμή είναι η διχοτόμος ενώ η κόκκινη υλοποιεί τη μέση ευθεία.

3.4 Τοπικό μέγεθος (M_L) ΑΠΘ-NOA

Τα μεγέθη M_L υπολογίζονται από δεδομένα που προέρχονται από τις καταγραφές σειсмоγράφων ΕΕΔΣ. Η σχέση που χρησιμοποιείται από ΑΠΘ και το NOA για την εκτίμηση τοπικού μεγέθους, M_L , είναι η σχέση 2.13 (Hutton and Boore, 1987). Στη σχέση αυτή η τιμή του παράγοντα γεωμετρικής διασποράς (η) είναι 1.11 ενώ ο συντελεστής ανελαστικής απόσβεσης (K) έχει τιμή 0.00189, τιμές που προέκυψαν από δεδομένα της περιοχής της νότιας Καλιφόρνιας.

Σε διαγράμματα που θα δούμε παρακάτω, τα δεδομένα θα συμβολίζονται ως M_L_T1 (πηγή AUTH) και M_L_NOA (πηγή NOA). Τα διαφορετικά χαρακτηριστικά (ιδιοπερίοδος T_0 , απόσβεση ζ , κ.α.) των οργάνων που χρησιμοποιούνται στους σταθμούς, καθώς και οι διαφορετικές επικεντρικές αποστάσεις Δ αλλά και οι τοπικές εδαφικές συνθήκες συντελούν σε πιθανές αποκλίσεις στις εκτιμήσεις του μεγέθους ενός σεισμού.

Καθώς η περιοχή ενδιαφέροντος της εργασίας είναι η ευρύτερη περιοχή του Αιγαίου, θα πρέπει στο κομμάτι της σύγκρισης δεδομένων να ενταχθούν και δεδομένα M_L υπολογισμένα από τη σχέση 2.14 (Scordilis et al., 2016), η οποία χρησιμοποιεί τιμές του παράγοντα γεωμετρικής διασποράς (n) και του συντελεστή ανελαστικής απόσβεσης (K) που προέκυψαν με χρήση δεδομένων αποκλειστικά του ευρύτερου χώρου του Αιγαίου και, κατά συνέπεια, είναι προσαρμοσμένη στα σεισμικά χαρακτηριστικά της Ελλάδας.

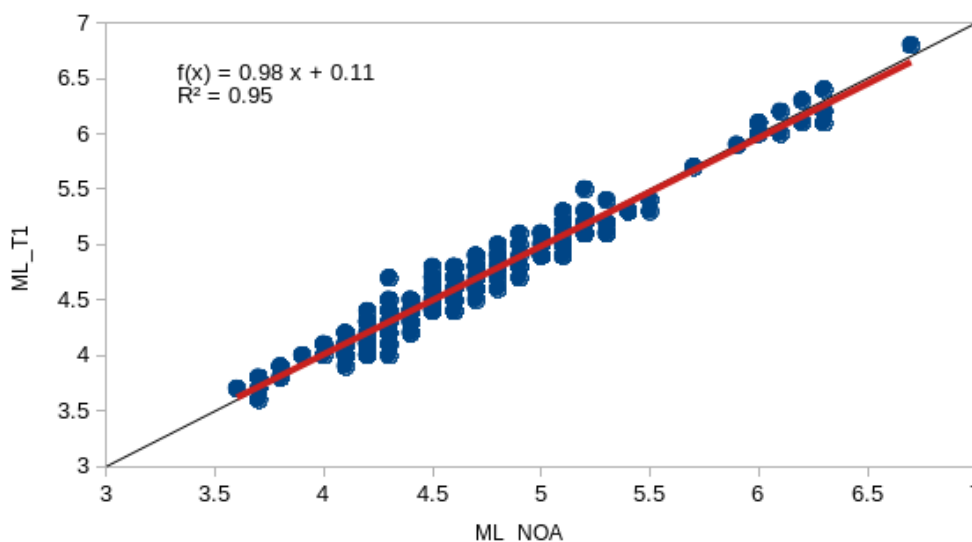
Τα μεγέθη που προήλθαν από τη αυτή τη σχέση, συμβολίζονται ως M_L_T2 .

3.5 Σύγκριση αποτελεσμάτων

Στο διάγραμμα μεταξύ των τιμών M_L_T1 (το τοπικό μέγεθος M_L από τους καταλόγους του ΑΠΘ) και M_L_NOA (σχήμα 3.6), παρατηρούμε ότι η μέση ευθεία (κόκκινη γραμμή) παρακολουθεί με συνέπεια τα δεδομένα, γεγονός που προκύπτει και από την υψηλή τιμή του συντελεστή συσχέτισης, $R=0.97$, ενώ συμπίπτει σχεδόν με την διχοτόμο:

$$M_L_T1 = 0.98M_L_NOA + 0.11 \quad (3.4)$$

Επαληθεύεται λοιπόν ότι οι τιμές των M_L_T1 και M_L_NOA είναι απολύτως συνεπείς, όπως άλλωστε αναμενόταν δεδομένου ότι προκύπτουν μετά από χρήση της ίδιας σχέσης υπολογισμού M_L , αυτής των Hutton & Boore (1987).

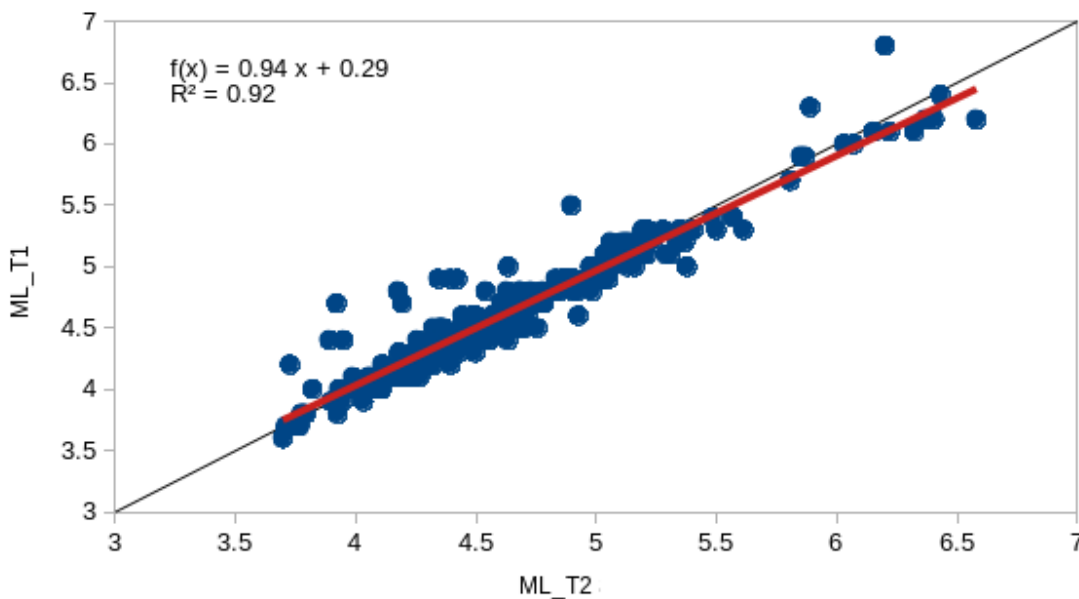


Σχήμα 3.6: Σύγκριση μεταξύ των τιμών M_L_T1 (AUTH) και M_L_NOA . Η κόκκινη γραμμή είναι η μέση ευθεία ενώ η μαύρη εκφράζει τη διχοτόμο.

Στο σχήμα 3.7 γίνεται συσχέτιση μεταξύ των τιμών M_L_T1 και M_L_T2 . Παρατηρούμε και πάλι ότι η μέση ευθεία (κόκκινη γραμμή) παρακολουθεί ικανοποιητικά τα δεδομένα με καλή τιμή του συντελεστή συσχέτισης, $R=0,96$:

$$M_L_T1 = 0.94M_L_T2 + 0.29 \quad (3.5)$$

ενώ παρακολουθεί ικανοποιητικά και τη διχοτόμο.

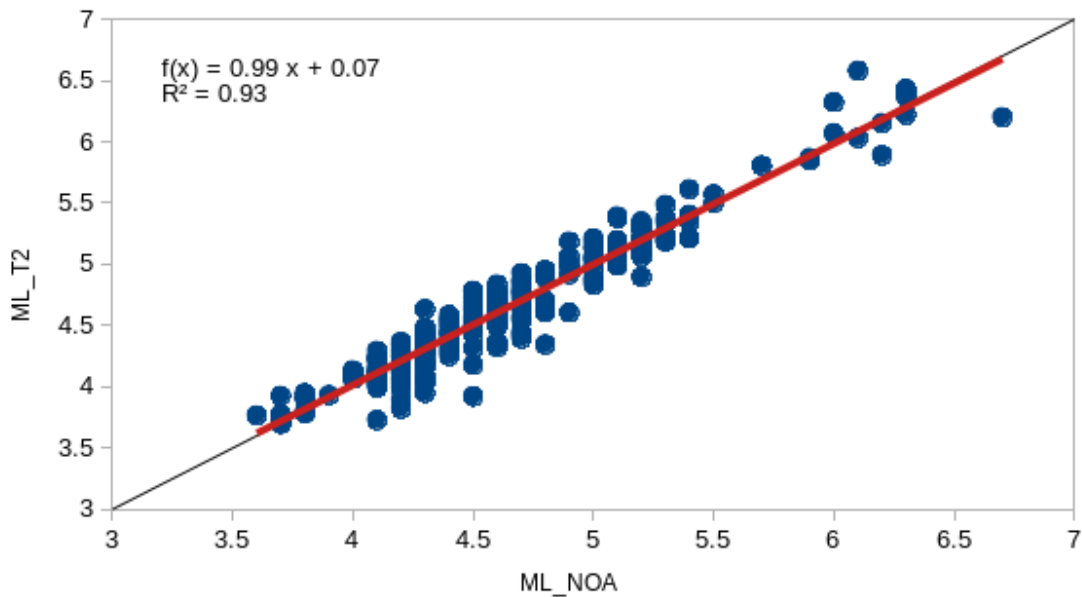


Σχήμα 3.7: Σύγκριση μεταξύ των τιμών M_L_T1 και M_L_T2 . Η κόκκινη γραμμή είναι η μέση ευθεία ενώ η μαύρη εκφράζει τη διχοτόμο.

Στο σχήμα 3.8 παρουσιάζεται η συσχέτιση μεταξύ M_L_T2 και M_L_NOA . Παρατηρείται και πάλι γραμμική σχέση με υψηλή τιμή του συντελεστή συσχέτισης ($R=0.96$):

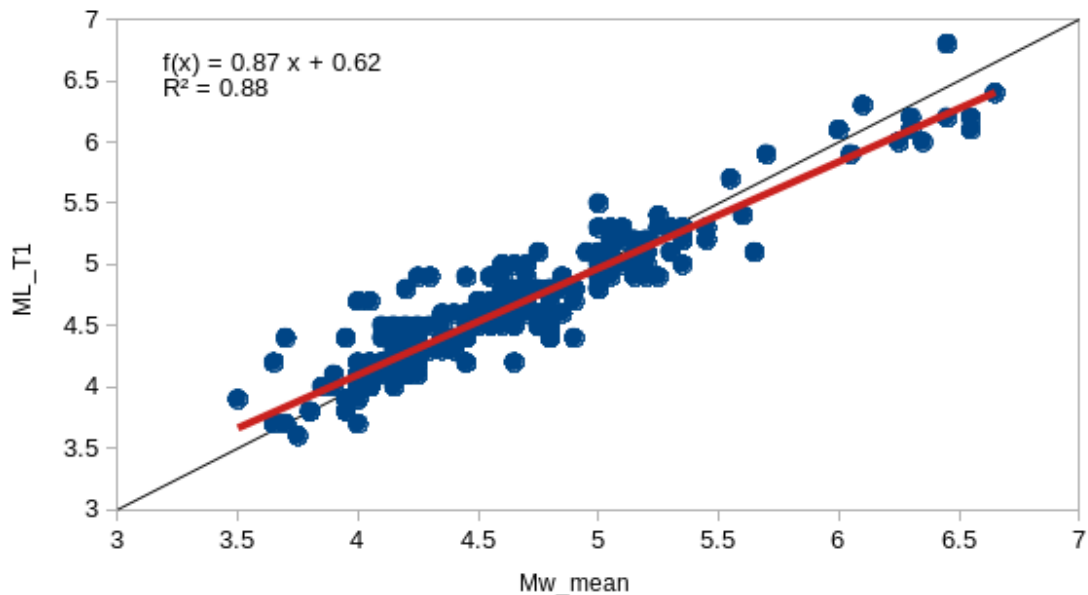
$$M_L_T2 = 0.99M_L_NOA + 0.07 \quad (3.6)$$

Η μέση ευθεία σχεδόν συμπίπτει με την διχοτόμο του διαγράμματος αναδεικνύοντας την, κατά προσέγγιση, ισοδυναμία των δύο αυτών τύπων μεγεθών.



Σχήμα 3.8: Σύγκριση μεταξύ των τιμών ML_T2 και ML_NOA . Η κόκκινη γραμμή είναι η μέση ευθεία ενώ η μαύρη εκφράζει τη διχοτόμο.

Για τη σύγκριση του τοπικού μεγέθους M_L με το μέγεθος σεισμικής ροπής, M_w , χρησιμοποιήθηκε το μέγεθος M_w_mean , που είναι ο μέσος όρος των μεγεθών M_w AUTH και M_w NOA ανά σεισμό.



Σχήμα 3.9: Σύγκριση μεταξύ των τιμών ML_T1 και Mw_mean . Η κόκκινη γραμμή είναι η μέση ευθεία ενώ η μαύρη εκφράζει τη διχοτόμο.

Η σύγκριση του $M_L T1$ με το M_w_mean (σχήμα 3.9) αναδεικνύει γραμμική εξάρτηση με καλή συσχέτιση (τιμή του συντελεστή συσχέτισης $R=0.94$) που εκφράζεται από τη σχέση:

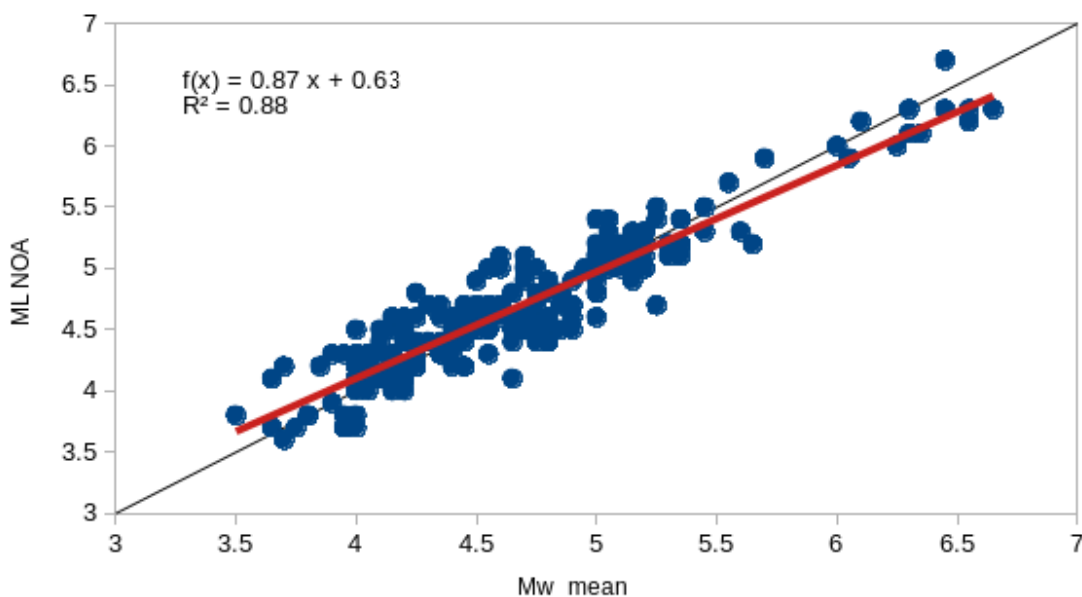
$$M_L T1 = 0.87M_w_mean + 0.62 \quad (3.7)$$

Η μέση ευθεία παρουσιάζει μικρή αλλά σαφή απόκλιση από τη διχοτόμο.

Στο διάγραμμα μεταξύ των μεγεθών M_L_NOA και M_w_mean (σχήμα 3.10), η διασπορά των δεδομένων ($R=0.94$) είναι παρόμοια με αυτήν των δεδομένων του προηγούμενου διαγράμματος (σχήμα 3.9) γεγονός αναμενόμενο αφού τα μεγέθη $M_L T1$ και M_L_NOA είναι πρακτικά ισοδύναμα (σχήμα 3.6). Παρατηρείται και εδώ μια απόκλιση μεταξύ της διχοτόμου και της μέσης ευθείας. Η εξίσωση που περιγράφει τη μέση ευθεία είναι η:

$$M_L_NOA = 0.87M_w_mean + 0.63 \quad (3.8)$$

η οποία είναι ίδια με την σχέση 3.7, όπως άλλωστε αναμενόταν.

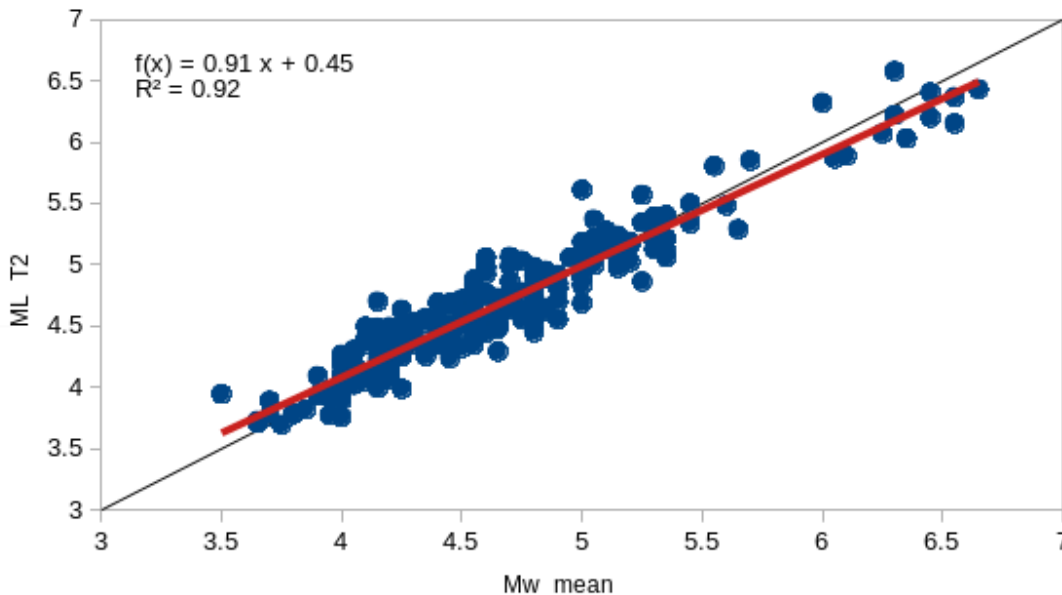


Σχήμα 3.10: Σύγκριση μεταξύ των τιμών M_L_NOA και M_w_mean . Η κόκκινη γραμμή είναι η μέση ευθεία ενώ η μαύρη εκφράζει τη διχοτόμο.

Στο διάγραμμα του σχήματος 3.11 παρουσιάζεται η συσχέτιση μεταξύ των μεγεθών $M_L T2$ και M_w_mean . Παρατηρείται καλύτερη συγκέντρωση των πειραματικών σημείων γύρω από τη

μέση ευθεία (συντελεστής συσχέτισης $R=0.96$) σε σχέση με τα αντίστοιχα διαγράμματα των M_L_T1 και M_L_NOA . Η σχέση που αντιστοιχεί στη μέση ευθεία είναι:

$$M_L_T2 = 0.91M_w\text{mean} + 0.45 \quad (3.9)$$

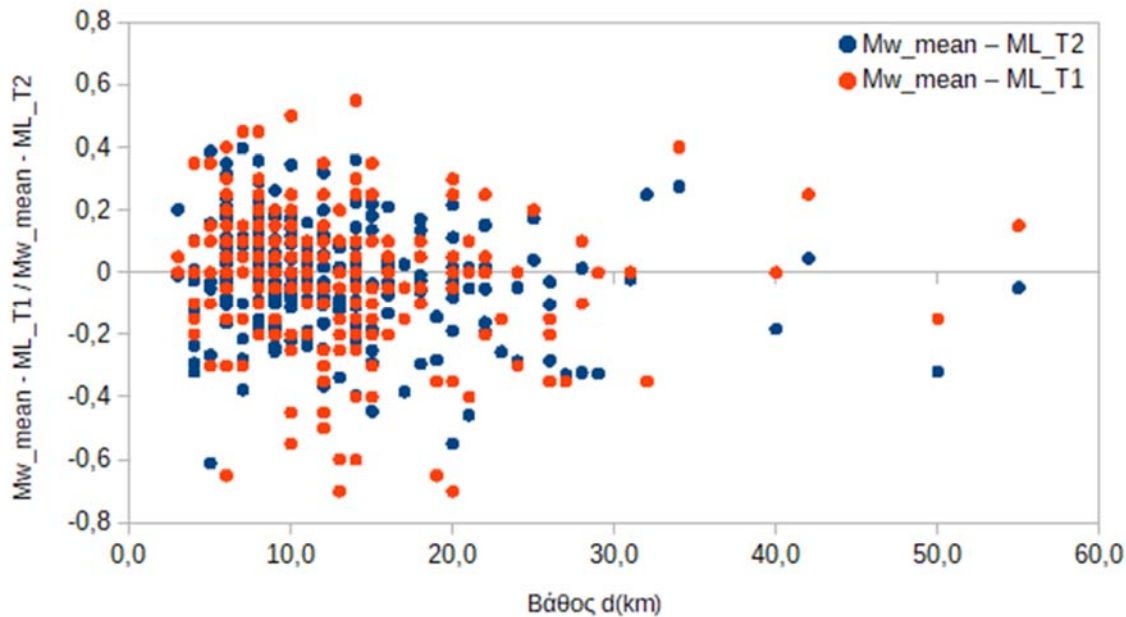


Σχήμα 3.11: Σύγκριση μεταξύ των τιμών M_L_T2 και $M_w\text{mean}$. Η κόκκινη γραμμή είναι η μέση ευθεία ενώ η μαύρη εκφράζει τη διχοτόμο.

Σε σύγκριση με τα αντίστοιχα διαγράμματα, $M_L_T1/M_w\text{mean}$ και $M_L_NOA/M_w\text{mean}$, η μέση ευθεία του διαγράμματος $M_L_T2/M_w\text{mean}$ βρίσκεται πολύ πιο κοντά στη διχοτόμο ενώ παρουσιάζει καλύτερη τιμή του συντελεστή συσχέτισης. Το γεγονός αυτό αποτελεί ισχυρή ένδειξη ότι το M_L_T2 είναι περισσότερο συνεπές με το M_w σε σχέση με τα M_L_T1 και M_L_NOA .

3.6 Εξάρτηση Διαφορών από το Εστιακό Βάθος και το Μέγεθος

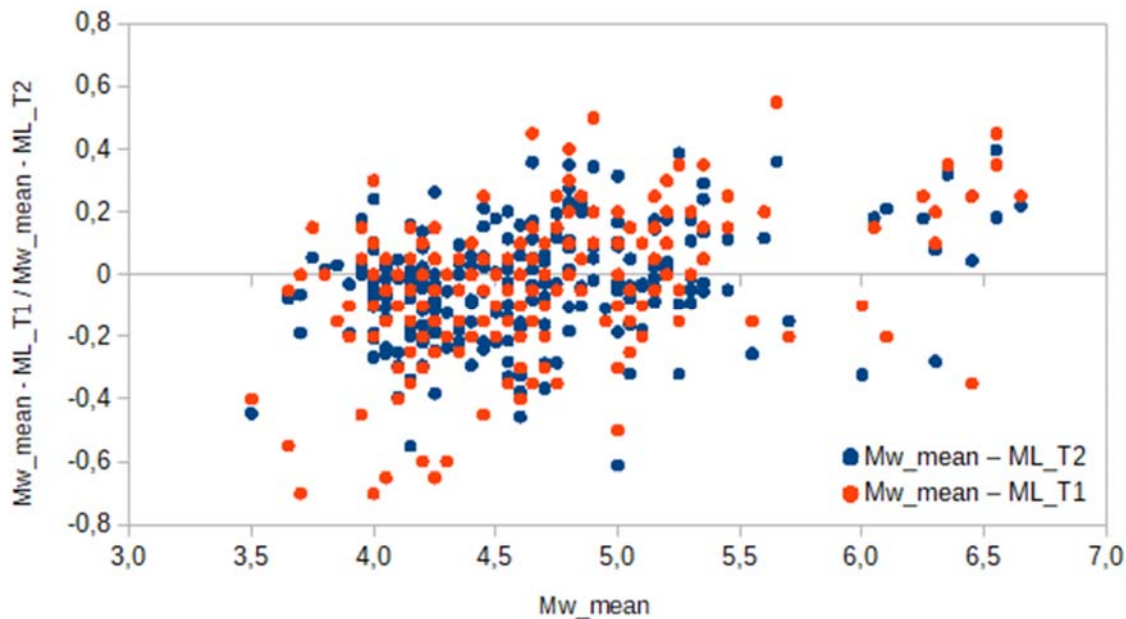
Για την περαιτέρω αξιολόγηση των μεγεθών που εξετάζονται στην εργασία αυτή, είναι χρήσιμο να ελεγχθούν πιθανές εξαρτήσεις των τιμών τους από το εστιακό βάθος αλλά και από το μέγεθος των σεισμών. Ως κριτήριο θεωρήσαμε την απόκλιση του κάθε μεγέθους, M_L_T1 και M_L_T2 , από το μέσο μέγεθος σεισμικής ροπής ($M_w\text{mean}$).



Σχήμα 3.12: Γραφική παράσταση και εξάρτηση των διαφορών $M_w_mean - M_L_T1$ και $M_w_mean - M_L_T2$ με το βάθος d (km).

Στο διάγραμμα του σχήματος 3.12 παρουσιάζεται η εξάρτηση των διαφορών $M_w_mean - M_L_T1$ (πορτοκαλί σημεία) και $M_w_mean - M_L_T2$ (μπλε σημεία) από το εστιακό βάθος d (km). Δεν παρατηρείται κάποια συστηματική εξάρτηση των διαφορών από το εστιακό βάθος. Είναι όμως εμφανές ότι τα πορτοκαλί σημεία παρουσιάζουν μεγαλύτερη διασπορά γύρω από την γραμμή βάσης (γραμμή μηδενικής διαφοράς) σε σχέση με τα μπλε σημεία. Αυτό σημαίνει ότι τα μεγέθη που υπολογίζονται με τη νέα σχέση (Scordilis et al., 2016) είναι περισσότερο συνεπή προς τα μεγέθη σεισμικής ροπής σε σχέση με τα μεγέθη που υπολογίζονται με τη χρήση των παραμέτρων των Hutton and Boore (1987), ανεξαρτήτως εστιακού βάθους.

Επόμενο βήμα ήταν να ελεγχθεί η συνέπεια του υπολογιζόμενου μεγέθους ως προς την πραγματική του τιμή. Δηλαδή, να εξεταστεί αν και πόσο επηρεάζεται η επίδοση της κάθε σχέσης υπολογισμού μεγέθους (M_L_T1 και M_L_T2) από το πόσο ισχυρός είναι ο σεισμός του οποίου το μέγεθος υπολογίζουμε. Για το σκοπό αυτό κατασκευάστηκε το διάγραμμα του σχήματος 3.13 στο οποίο παρουσιάζεται η εξάρτηση των τιμών των διαφορών $M_w_mean - M_L_T1$ (πορτοκαλί σημεία) και $M_w_mean - M_L_T2$ (μπλε σημεία) από την τιμή του μεγέθους σεισμικής ροπής (M_w_mean).



Σχήμα 3.13: Γραφική απεικόνιση και εξάρτηση των τιμών $M_w_mean - M_L_T1$ και $M_w_mean - M_L_T2$ με το μέγεθος M_w_mean .

Τα συμπεράσματα και εδώ είναι παρόμοια με αυτά της προηγούμενης σύγκρισης. Παρατηρείται δηλαδή, πως η διασπορά των σημείων που αντιστοιχούν στα μεγέθη M_L_T1 (πορτοκαλί σημεία) είναι μεγαλύτερη από αυτήν των σημείων που αντιστοιχούν στα μεγέθη M_L_T2 (μπλε σημεία). Δεν παρατηρείται κάποια συστηματική εξάρτηση των διαφορών από την τιμή του μεγέθους σεισμικής ροπής.

Συμπερασματικά, οι παραπάνω συγκρίσεις έδειξαν ότι τα μεγέθη M_L_T2 παρουσιάζουν καλύτερη συνέπεια με τα μεγέθη σεισμικής ροπής, ανεξαρτήτως του εστιακού βάθους ή του πόσο ισχυρός μπορεί να είναι ο σεισμός.

4. Σύνοψη - Συμπεράσματα

Στόχος της παρούσας εργασίας ήταν να ελεγχθεί η αξιοπιστία των σχέσεων που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό μεγέθους σεισμών του ελληνικού χώρου και των γύρω περιοχών.

Για το σκοπό αυτόν χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα της περιοχής που οριοθετείται από τις γεωγραφικές συντεταγμένες 33.8° - 42.3° B, 19.3° - 29.6° A και καλύπτουν το χρονικό διάστημα 2008-2021. Τα δεδομένα προήλθαν από τα δελτία του Σεισμολογικού Σταθμού του ΑΠΘ (AUTH), του Γεωδυναμικού Ινστιτούτου του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών (NOA) και του Ευρω-Μεσογειακού Σεισμολογικού Κέντρου (EMSC-CSEM).

Τα μεγέθη που ελέγχθηκαν είναι το τοπικό μέγεθος που υπολογίζεται από το Σεισμολογικό Σταθμό του ΑΠΘ (M_L_T1), το τοπικό μέγεθος που υπολογίζεται από το Γεωδυναμικό Ινστιτούτο (M_L_NOA) καθώς και το μέγεθος M_L_T2 που υπολογίζεται από πρόσφατα προταθείσα σχέση (Scordilis et al., 2016). Ως μέγεθος αναφοράς χρησιμοποιήθηκε το μέγεθος σεισμικής ροπής που ήταν διαθέσιμο από το ΑΠΘ και το NOA.

Από τις συγκρίσεις που πραγματοποιήθηκαν διαπιστώθηκε ότι:

- 1) Τα μεγέθη σεισμικής ροπής από NOA και ΑΠΘ είναι ισοδύναμα μεταξύ τους και επομένως μπορεί να χρησιμοποιηθεί η μέση τιμή τους ως αντιπροσωπευτικό μέγεθος ροπής κάθε σεισμού.
- 2) Τα μεγέθη (M_L) που υπολογίζονται σήμερα από NOA (M_L_NOA) και AUTH (M_L_T1) με τη χρήση της σχέσης των Hutton & Boore (1987) είναι επίσης ισοδύναμα μεταξύ τους.
- 3) Η σύγκριση των M_L_T1 , M_L_NOA και M_L_T2 με τα μεγέθη σεισμικής ροπής, M_w ανέδειξε ότι τα μεγέθη M_L_T2 που προκύπτουν από τη σχέση που προτάθηκε από τους Scordilis et al. (2016) είναι συνεπέστερα ως προς τα μεγέθη σεισμικής ροπής.
- 4) Ο έλεγχος πιθανής εξάρτησης των M_L_T1 και M_L_T2 από το πραγματικό μέγεθος του σεισμού (M_w) αλλά και από το εστιακό βάθος έδειξε ότι τα μεγέθη M_L_T2 έχουν σαφώς καλύτερη συμπεριφορά, επιδεικνύοντας μικρότερη διασπορά τιμών.

Συμπερασματικά, για τον υπολογισμό αξιόπιστων μεγεθών στον ελληνικό χώρο και τις γύρω περιοχές ενδείκνυται η σχέση των Scordilis et al. (2016) αφού τα μεγέθη που προκύπτουν από αυτήν παρουσιάζουν καλύτερη συνέπεια με τα μεγέθη σεισμικής ροπής αλλά και μικρότερη εξάρτηση τόσο από το εστιακό βάθος όσο και από το πραγματικό μέγεθος του σεισμού, σε σχέση με αυτά που προκύπτουν από τη σχέση των Hutton & Boore (1987).

- Aki, K (1966). Generation and propagation of G Waves from the Niigata earthquake of June 16. 1964. 2: Estimation of earthquake movement. Released energy and stress-strain drop from G wave spectrum. Bull. Earthq. Res. Inst., 44.73-88
- Bakun WH, Joyner WB (1984) The M_L scale in central California. Bull Seism Soc Am 74:1827-1843
- Bisztricsany, E. (1958). A new method for the determination of the magnitude of earthquakes., Geof. Kozl., 1,69-96.
- Bullen, K.E., and Bolt, B.A. (1985). An Introduction to the Theory of Seismology. Cambridge Univ. Press, Cambridge UK, pp.844
- Evangelidis, C. P. Triantafyllis, N. Samios, M. Boukouras, K.Fountoulakis, I., et al. (2021). Seismic Waveform Data from Greece and Cyprus: Integration, Archival, and Open Access Seismol. Res. Lett. XX, 1–13, doi: 10.1785/0220200408.
- Gutenberg, B. and C.F. Richter (1942). Earthquake magnitude, intensity, energy, and acceleration, Bull. Seism. Soc. Am. 32, 163-191
- Gutenberg, B., (1945a). Amplitudes of surface waves and magnitudes of shallow earthquakes, Bull. Seism. Soc. Am. 35, 3-12.
- Gutenberg, B., (1945b). Amplitude of P, PP, and S and magnitudes of shallow earthquakes, Bull. Seism. Soc. Am. 35, 57-69.
- Gutenberg, B., (1945c). Magnitude determination for deep-focus earthquakes, Bull. Seism. Soc. Am. 35, 117-130.
- Gutenberg, B. and Richter, C.F. (1956). Magnitude and energy of earthquakes. Annali di Geofisica, 9, 1-15
- Hanks, T.C. and Kanamori, H. (1979). A moment magnitude scale. J. Geophys. Res., 84, 2348-2350.
- Heaton, T., F. Tajima and A. Mori. (1986). Estimating ground motions using recorder accelerograms. Surveys in Geophysics, 8, 25-83.
- Hutton, L.K. and Boore, M.D. (1987). The M_L Scale in Southern California. Bull.Seism.Soc.Am.,77,2074-2094
- Karnik, V., (1973), Magnitude differences, Pure Appl. Geophys. 103(II) 362-369.

Karnik, V., (1996), Seismicity of Europe and the Mediterranean. In: Klima, K. (ed.), Academy of Sciences of the Czech Republic, Geophysical Institute, 28 pp. plus earthquake catalogue.

Κυρατζή, Α.Α (1984). Κλίμακες μεγεθών των σεισμών στον ευρύτερο χώρο του Αιγαίου. Διδ. Διατριβή, Αριστοτέλειο Πανεπ. Θεσσαλονίκης, σελ. 189.

Kiratz, A.A. and Papazachos, B.C. (1986). Magnitude determination from ground amplitudes recorded by short-period seismographs in Greece. *Annales Geophysicae*, 4, 71-78

Margaris, B.B. and Papazachos, C.B. (1999). Moment-magnitude relation based on strong-motion records in Greece. *Bull. Seim. Soc. Am.*, 89, 442-455

Papazachos, B.C. and Vasilicou, A. (1966). Studies on the magnitude of earthquakes. Progress Report in Seismology and Physics of the Earth's Interior, 1964-1965, 17-18

Papazachos, B.C. and Comninakis, P.E. (1971). Geophysical and tectonic features of the Aegean area. *J. Geophys. Res.*, 76, 8517-8533.

Papazachos, B.C., Kiratzi, A.A. and Karakostas, B.G. (1997) Toward a homogeneous moment magnitude determination in Greece and surrounding area. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 87, 474-483

Papazachos, B.C., Karakostas, V.G., Kiratzi, A.A., Margaris, B.N., Papazachos, C.B. and Scordilis E.M. (2002) Uncertainties in the estimation of earthquakes magnitudes in Greece. *J. Seismology*, 6, 557-570

Παπαζάχος, Κ.Β. και Παπαζάχου, Α.Κ. (2003 Γ Έκδοση). Οι Σεισμοί της Ελλάδας. Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη.

Παπαζάχος, Β.Κ. Καρακαϊσης, Γ.Φ. Χατζηδημητρίου, Π.Μ. (2005). Εισαγωγή στη Σεισμολογία. Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη.

Richter, C.F. (1935). An instrumental earthquake magnitude scale. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 25, 1-32

Scordilis E.M. (2006). Empirical global relations converting M_s and m_b to moment magnitude. *J Seismology* 10:225-236

Scordilis, E.M. Kementzetzidou, D. Papazachos, B.C. (2016) Local magnitude calibration of the Hellenic Unified Seismic Network. *J Seismology*, 20, 319-332

Vanek, J., Zatopek, A., Karnik, V., Kondorskaya, N.V., Riznichenko, Y.V., Savarensky, E.F., Soloviev, S.L. and Shebalin, N.V., (1962), Standardization of magnitude scales, *Bull. Acad. Sci. USSR Geophys. Ser.* 108-111.



Γεωδυναμικό Ινστιτούτο του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών

<https://bbnet.gein.noa.gr/HL/>

<https://www.gein.noa.gr/HTML/WEB-EDU/instruments.htm>

European Mediterranean Seismological Center (EMSC)

<https://www.emsc-csem.org>

<https://www.seismicportal.eu/>

Ιστοσελίδα Σεισμολογία και Εκπαιδευτική Κοινότητα

<https://seismo-edu9.webnode.gr/vocabulary/>

Σεισμολογικός Σταθμός του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης

<http://geophysics.geo.auth.gr/ss/>

Τμήμα Γεωλογίας Ε.Κ.Π.Α., Εργαστήριο Σεισμολογίας

<http://dggsl.geol.uoa.gr/>



Οι 242 σεισμοί, που εκδηλώθηκαν στο χρονικό διάστημα από 29/01/2008 έως 03/03/2021 και που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτή την διπλωματική εργασία, καταγράφονται στον παρακάτω κατάλογο.

Ο κατάλογος περιέχει τις εστιακές παραμέτρους των σεισμών, δηλαδή την ημερομηνία (year, month - mo, day - da) και τον χρόνο εκδήλωσης (UTC) του κάθε σεισμού, τις γεωγραφικές συντεταγμένες (γεωγραφικό πλάτος ϕ° και γεωγραφικό μήκος λ°) του επίκεντρου του, καθώς και το εστιακό του βάθος d (km). Οι παράμετροι προέρχονται από τα δελτία του Σεισμολογικού Σταθμού του Τομέα Γεωφυσικής του Α.Π.Θ.

Επιπλέον ο κατάλογος έχει δεδομένα του μεγέθους σεισμικής ροπής M_w από τις ιστοσελίδες: του Σεισμολογικού Σταθμού του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης (AUTH, <http://geophysics.geo.auth.gr/ss>), του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών (NOA, <https://bbnet.gein.noa.gr/HL>) και του Ευρω-Μεσογειακού Σεισμολογικού Κέντρου (European-Mediterranean Seismological Center, EMSC, <https://www.emsc-csem.org>). Το μέγεθος M_w_mean είναι ο μέσος όρος των τιμών M_w - AUTH και M_w - NOA σε κάθε σεισμό.

Επίσης ο κατάλογος περιέχει τα δεδομένα του τοπικού μεγέθους M_L των 242 σεισμών. Τα δεδομένα έχουν παρθεί από καταλόγους του Α.Π.Θ (M_{L_T1} , M_{L_T2}) και του NOA (M_{L_N}), όπου τα μεγέθη M_{L_T1} και M_{L_N} προήλθαν από τη σχέση 2.13 (Hutton and Boore, 1987), ενώ το μέγεθος M_{L_T2} είναι υπολογισμένο από την σχέση 2.14 (Scordilis et al., 2016).

Year	MoDaHrMnSec	Lat(φ°)	Lon(λ°)	Dep (km)	AUTH - Mw	NOA - Mw	EMSC - Mw	Mw - mean	AUTH - ML_T1	AUTH - ML_T2	NOA - ML_N
2008	0129151653	37,620	23,439	6	4.3	4.2	4.4	4.3	4.9	4.3	4.8
2008	0220182706	36,363	21,907	16	6.1	6.1	6.2	6.1	6.3	5.9	6.2
2008	0228045437	36,132	21,880	12	4.7	4.6	4.8	4.7	5.0	4.6	4.8
2008	0229100137	40,126	21,869	10	3.7	3.6	3.7	3.7	4.2	3.7	4.1
2008	0302054138	36,185	21,890	12	4.5	4.4	4.3	4.5	4.9	4.4	4.7
2008	0411080141	37,760	26,972	13	4.3	4.4	4.4	4.4	4.5	4.4	4.3
2008	0605021028	38,339	20,535	10	4.0	3.9	4.1	4.0	4.4	3.9	4.3
2008	0605181241	38,343	20,442	13	4.3	4.3	4.4	4.3	4.9	4.4	4.7
2008	0608122530	37,945	21,544	32	6.5	6.4	6.4	6.5	6.8	6.2	6.7
2008	0612031536	37,974	21,650	20	3.7	3.7	4.0	3.7	4.4	3.9	4.2
2008	0618015845	37,723	22,784	80	5.1	4.9	5.0	5.0	6.0	5.6	5.8
2008	0627051857	38,007	21,521	19	4.0	4.1	4.3	4.1	4.7	4.2	4.3
2008	0730050258	38,108	20,271	12	5.0	5.0	5.0	5.0	5.5	4.9	5.2
2008	0731025452	38,869	26,076	14	4.2	4.2	4.0	4.2	4.8	4.2	4.5
2008	0731030417	38,865	26,073	13	4.0	4.0	3.8	4.0	4.7	3.9	4.5
2008	0803003916	39,581	23,869	14	5.2	5.1	5.3	5.2	4.9	5.0	4.9
2008	0803005254	39,583	23,895	11	4.3	4.3	4.2	4.3	4.5	4.5	4.4
2008	0803015624	39,584	23,918	15	4.1	4.2	4.4	4.2	4.3	4.3	4.3
2008	0929030535	38,417	20,524	12	4.0	4.1	4.1	4.1	4.1	4.2	4.1
2008	1013041006	39,327	21,446	14	4.0	4.0	4.0	4.0	3.7	3.8	3.7
2008	1014020635	38,819	23,584	8	5.1	5.0	5.1	5.1	5.1	5.2	5.0
2008	1014023547	38,827	23,569	9	4.0	3.9	3.8	4.0	3.8	3.9	3.7
2008	1015192924	38,840	23,581	12	4.2	4.2	4.2	4.2	4.1	4.2	4.1
2008	1227082702	40,117	24,051	13	4.2	4.1	4.2	4.2	4.4	4.5	4.5
2008	1227200920	40,111	24,027	14	4.5	4.4	4.4	4.5	4.5	4.7	4.6
2008	1228225859	40,317	25,985	11	5.1	5.2	5.1	5.2	5.1	5.2	5.1
2009	0216231639	37,077	20,749	23	5.6	5.5	5.5	5.6	5.7	5.8	5.7
2009	0220211012	39,360	20,254	3	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.1
2009	0227205247	34,330	25,147	29	4.5	4.7	4.8	4.6	4.6	4.9	4.7
2009	0301004602	38,858	26,095	12	3.9	3.9	3.9	3.9	4.0	3.9	3.9
2009	0302220208	36,710	26,644	11	4.4	4.3	4.7	4.4	4.4	4.3	4.3
2009	0310193916	38,319	21,878	4	4.0	4.0	4.0	4.0	3.9	3.9	3.8
2009	0317080723	36,977	22,165	4	4.1	4.0	4.1	4.1	4.2	4.3	4.2
2009	0320175945	40,394	25,740	15	3.7	3.3	3.7	3.5	3.9	3.9	3.8

Year	MoDaHrMnSec	Lat(φ°)	Lon(λ°)	Dep (km)	AUTH - Mw	NOA - Mw	EMSC - Mw	Mw - mean	AUTH - ML_T1	AUTH - ML_T2	NOA - ML_N
2009	0330222237	38,873	26,144	18	3.8	3.5	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7
2009	0421080646	36,142	21,536	20	4.3	4.0	4.4	4.2	4.5	4.7	4.6
2009	0428220238	39,383	24,068	11	4.0	4.0	4.1	4.0	4.1	4.2	4.1
2009	05171115904	38,127	22,690	7	4.6	4.5	4.7	4.6	4.5	4.4	4.3
2009	0517223927	38,123	22,680	6	4.2	4.2	4.5	4.2	4.2	4.1	4.1
2009	0521152829	38,593	20,504	15	4.1	4.1	4.3	4.1	4.4	4.4	4.4
2009	0524161704	41,299	22,723	25	5.0	5.4	5.4	5.2	5.0	5.2	5.1
2009	0607085944	38,312	22,050	6	4.4	4.3	4.3	4.4	4.4	4.3	4.3
2009	0626203720	36,531	25,434	7	4.6	4.6	4.4	4.6	4.9	5.0	5.0
2009	0701092936	34,042	25,411	7	6.3	6.3	6.3	6.3	6.2	6.6	6.1
2009	0701105456	39,942	24,063	5	4.0	4.0	4.0	4.0	4.1	4.3	4.2
2009	0906214952	41,524	20,466	6	5.3	5.3	5.3	5.3	5.1	5.3	5.2
2009	0917225352	39,988	19,967	12	4.3	4.2	4.2	4.3	4.3	4.5	4.4
2009	1111095056	37,371	20,182	4	5.3	5.2	5.2	5.3	5.4	5.6	5.5
2009	1204093352	38,871	21,949	4	4.2	4.2	4.2	4.2	4.4	4.5	4.4
2009	1222102712	39,179	20,477	4	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
2010	1017175512	39,386	20,596	15	4.4	4.4	4.4	4.4	4.6	4.7	4.6
2010	1103025040	40,396	26,214	25	5.3	5.3	5.3	5.3	5.1	5.1	5.2
2011	0401132832	35,646	26,569	69	6.1	6.0	6.0	6.1	6.2	6.2	6.1
2011	0508064936	36,696	27,237	9	5.1	5.1	5.0	5.1	5.3	5.3	5.2
2011	0525232800	37,949	21,116	14	5.1	4.8	4.8	5.0	5.1	5.1	5.0
2011	1013144520	40,262	25,294	9	4.2	4.1	4.1	4.2	4.2	4.3	4.3
2011	1110172520	38,418	21,818	7	4.6	4.5	4.5	4.6	4.7	4.8	4.7
2011	1123121808	34,474	25,097	6	5.4	5.3	5.3	5.4	5.2	5.1	5.2
2011	1205081704	38,847	26,294	20	4.6	4.7	4.7	4.7	4.7	4.7	4.6
2011	1205123056	38,060	20,423	18	4.1	4.1	4.1	4.1	4.2	4.4	4.3
2011	1227055824	37,961	27,185	28	4.0	4.4	4.4	4.2	4.1	4.2	4.2
2011	1227075128	37,959	27,164	20	3.9	4.1	4.1	4.0	4.0	4.0	4.1
2012	0126042432	36,067	25,070	21	5.1	5.3	5.3	5.2	5.2	5.2	5.2
2012	0127013352	36,044	25,064	18	5.3	5.4	5.4	5.4	5.3	5.2	5.2
2012	0128105040	36,054	25,035	16	4.7	4.7	4.7	4.7	4.7	4.7	4.6
2012	0129095512	36,072	25,009	22	4.6	4.7	4.7	4.7	4.6	4.5	4.6
2012	0214013352	40,129	24,089	5	5.1	5.1	5.1	5.1	5.0	5.1	5.0
2012	0217080416	37,862	23,019	9	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.1

Year	MoDaHrMnSec	Lat(φ°)	Lon(λ°)	Dep (km)	AUTH - Mw	NOA - Mw	EMSC - Mw	Mw - mean	AUTH - ML_T1	AUTH - ML_T2	NOA - ML_N
2012	0304033112	40,134	24,058	6	5.1	5.2	5.2	5.2	5.0	5.0	5.0
2012	0315054120	38,695	21,305	26	4.3	4.0	4.1	4.2	4.3	4.2	4.2
2012	0321054952	38,627	21,705	8	4.1	3.8	3.8	4.0	3.8	3.8	3.7
2012	0501144728	38,652	26,669	10	4.7	4.8	4.8	4.8	4.5	4.6	4.6
2012	0502064104	38,663	26,657	9	4.1	4.0	-	4.1	4.1	4.1	4.2
2012	0512224728	40,564	22,841	16	4.0	4.0	4.0	4.0	3.9	4.0	4.1
2012	0607205424	41,019	28,242	5	4.9	5.1	5.1	5.0	5.3	5.6	5.4
2012	0617192032	40,555	21,623	22	4.3	4.6	4.6	4.5	4.2	4.3	4.2
2012	0625130504	36,435	28,893	40	4.7	4.9	4.9	4.8	4.8	5.0	4.9
2012	0628131128	39,004	23,135	13	4.2	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3	4.2
2012	0725212832	40,444	26,132	15	4.2	4.3	4.2	4.3	4.3	4.4	4.3
2012	0802103128	39,256	23,712	10	4.2	4.2	4.2	4.2	4.1	4.1	4.2
2012	0909193112	40,002	24,705	8	4.7	4.6	4.6	4.7	4.2	4.3	4.1
2012	0912050048	36,920	24,207	8	4.1	4.3	4.3	4.2	4.3	4.2	4.2
2012	0921084656	35,274	22,550	21	4.9	5.1	5.1	5.0	4.9	5.1	5.0
2012	0922035232	38,079	22,753	7	5.1	4.9	5.0	5.0	4.9	4.9	4.8
2012	0922061528	40,146	20,829	8	4.6	4.6	4.7	4.6	4.5	4.8	4.7
2012	1023152136	38,973	20,621	12	4.8	4.7	4.8	4.8	4.6	4.6	4.5
2012	1110213040	37,920	20,938	12	4.1	4.0	4.0	4.1	4.0	4.1	4.1
2012	1124210504	36,628	27,961	7	4.3	4.1	4.1	4.2	4.1	4.1	4.0
2012	1129112904	37,189	26,830	20	4.1	4.2	4.2	4.2	4.1	4.1	4.0
2012	1203213912	39,540	23,503	5	4.2	4.1	4.1	4.2	4.0	4.0	4.1
2012	1204185912	36,932	23,067	6	4.5	4.3	4.3	4.4	4.3	4.3	4.2
2012	1206174848	36,925	23,020	6	4.5	4.4	4.5	4.5	4.2	4.2	4.2
2012	1209012312	37,929	22,609	9	4.3	4.0	4.0	4.2	4.1	4.1	4.1
2012	1216070224	35,447	27,693	9	4.2	4.2	4.2	4.2	4.1	4.2	4.1
2013	0108141528	39,670	25,550	8	5.7	5.7	5.7	5.7	5.9	5.9	5.9
2013	0109154048	39,710	25,632	8	4.4	4.4	3.5	4.4	4.4	4.6	4.5
2013	0111002952	39,655	25,522	9	4.3	4.2	4.3	4.3	4.4	4.4	4.4
2013	0113085528	39,670	25,569	9	4.5	4.4	4.4	4.5	4.6	4.7	4.6
2013	0215144312	40,329	23,929	10	4.5	4.5	4.6	4.5	4.7	4.7	4.7
2013	0217031200	37,329	20,740	18	5.1	4.9	4.9	5.0	4.9	5.0	5.1
2013	0217164904	40,777	21,360	6	4.1	4.0	4.0	4.1	4.0	4.1	4.0
2013	0221101840	37,394	26,902	8	4.5	4.4	4.5	4.5	4.4	4.4	4.5

Year	MoDaHrMnSec	Lat(φ°)	Lon(λ°)	Dep (km)	AUTH - Mw	NOA - Mw	EMSC - Mw	Mw - mean	AUTH - ML_T1	AUTH - ML_T2	NOA - ML_N
2013	0313230848	39,200	23,489	7	3.8	3.7	3.7	3.8	3.6	3.7	3.7
2013	0409033528	36,511	22,998	21	4.6	4.6	4.6	4.6	5.0	5.1	5.1
2013	0423004656	38,360	20,608	11	4.2	4.2	4.2	4.2	4.1	4.2	4.1
2013	0424201144	36,755	22,952	12	4.0	4.0	4.0	4.0	4.1	4.1	4.0
2013	0428163200	37,445	22,687	60	4.6	4.3	4.3	4.5	4.4	4.4	4.4
2013	0516030120	36,967	28,350	6	4.8	4.8	4.8	4.8	4.5	4.7	4.6
2013	0523140904	38,659	20,563	4	4.7	4.7	4.7	4.7	4.7	4.7	4.6
2013	0601230432	40,178	21,683	16	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8
2013	0606115440	36,786	21,849	26	4.8	4.7	4.7	4.8	5.1	5.0	5.0
2013	0619130256	35,784	27,331	5	3.9	4.1	4.1	4.0	4.0	4.1	4.2
2013	0702104624	40,118	21,853	11	4.7	4.7	4.7	4.7	4.6	4.6	4.6
2013	0703132832	40,115	21,847	13	4.8	4.8	4.8	4.8	4.6	4.7	4.6
2013	0730053248	40,311	25,790	10	4.9	4.9	4.9	4.9	4.4	4.6	4.5
2013	0807090608	38,706	22,670	8	5.3	5.4	5.4	5.4	5.2	5.1	5.2
2013	0908045840	34,792	25,107	9	4.7	4.6	4.9	4.7	4.8	4.7	4.6
2013	0916144312	38,699	22,716	6	4.6	4.5	4.6	4.6	4.5	4.6	4.5
2013	0916150016	38,706	22,729	5	5.3	5.2	5.3	5.3	4.9	4.9	4.7
2013	0917073840	38,715	22,734	7	4.0	4.0	4.1	4.0	4.0	4.1	4.2
2013	1011051544	40,689	23,410	10	4.2	4.2	4.2	4.2	4.4	4.4	4.4
2013	1012131128	35,471	23,281	42	6.5	6.4	6.4	6.5	6.2	6.4	6.3
2013	1112181008	38,921	23,099	14	4.9	4.9	4.9	4.9	4.8	4.8	4.7
2013	1119081704	39,566	21,95	22	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8
2013	1122151304	39,025	22,400	18	4.1	4.1	4.1	4.1	4.2	4.1	4.1
2014	0111041352	37,834	20,971	9	5.0	4.8	4.8	4.9	4.7	4.7	4.6
2014	0126135616	38,154	20,287	10	6.1	6.0	6.1	6.1	5.9	5.9	5.9
2014	0126184416	38,231	20,337	9	5.3	5.3	5.4	5.3	5.3	5.2	5.2
2014	0201081456	38,707	22,756	6	4.6	4.7	4.7	4.7	4.6	4.6	4.6
2014	0206192032	38,168	20,334	11	4.7	4.4	4.4	4.6	4.5	4.5	4.5
2014	0214033736	38,160	20,275	8	4.8	4.7	4.7	4.8	4.5	4.6	4.4
2014	0425025704	35,485	21,560	34	4.9	4.7	4.7	4.8	4.4	4.5	4.5
2014	0430040312	38,229	25,128	10	4.8	4.8	4.8	4.8	4.8	4.9	4.8
2014	0506015928	39,345	23,878	9	4.3	4.2	4.2	4.3	4.3	4.3	4.3
2014	0513012312	38,248	25,093	10	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7	3.8	3.6
2014	0524092520	40,286	25,375	15	6.3	6.8	6.9	6.6	6.2	6.4	6.3

Year	MoDaHrMnSec	Lat(φ°)	Lon(λ°)	Dep (km)	AUTH - Mw	NOA - Mw	EMSC - Mw	Mw - mean	AUTH - ML_T1	AUTH - ML_T2	NOA - ML_N
2014	0606171024	39,758	24,103	14	4.2	4.2	4.2	4.2	4.4	4.4	4.4
2014	0625092104	38,342	21,735	8	4.3	3.9	3.9	4.1	4.2	4.1	4.1
2014	0627161456	38,240	25,124	4	4.4	4.6	4.6	4.5	4.6	4.6	4.5
2014	0711094640	38,438	23,700	13	4.3	4.1	4.1	4.2	4.4	4.3	4.5
2014	1024234256	38,919	21,125	10	5.2	5.1	5.1	5.2	5.2	5.2	5.3
2014	1105142152	38,097	20,441	15	4.3	4.1	4.1	4.2	4.1	4.1	4.2
2014	1107074048	38,089	20,448	18	4.7	4.8	4.8	4.8	4.8	4.8	4.7
2014	1107171232	38,289	22,128	6	5.0	5.0	5.0	5.0	4.8	4.7	4.8
2014	1108231512	38,088	20,358	14	5.1	5.0	5.0	5.1	5.1	5.1	5.2
2014	1117230640	38,654	23,433	13	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.3
2014	1117230848	38,646	23,431	12	5.0	5.1	5.1	5.1	5.3	5.2	5.4
2014	1202201600	40,245	25,173	11	4.0	4.2	4.2	4.1	4.1	4.1	4.3
2014	1206014432	38,905	26,261	6	5.1	5.0	5.1	5.1	4.9	5.0	5.1
2014	1211222400	38,393	20,413	27	4.5	4.6	4.6	4.6	4.6	4.6	4.6
2015	0326120104	39,279	24,747	6	4.2	4.1	4.1	4.2	4.1	4.2	4.3
2015	0327233424	35,662	26,616	65	5.2	5.1	5.2	5.2	5.3	5.4	5.4
2015	0416180800	35,146	26,888	28	6.0	6.0	6.1	6.0	6.1	6.3	6.0
2015	0417020552	35,158	26,733	20	5.3	5.4	5.4	5.4	5.3	5.4	5.4
2015	0418164656	36,479	23,195	22	4.7	4.7	4.7	4.7	4.9	4.9	5.0
2015	0609010816	38,640	23,405	14	5.2	5.2	5.3	5.2	5.1	5.2	5.0
2015	0609214952	35,050	26,716	24	5.2	5.4	5.4	5.3	5.3	5.3	5.2
2015	0910081248	38,820	26,283	15	4.6	4.7	4.7	4.7	4.7	4.7	4.8
2015	1012021632	34,648	26,335	20	4.7	4.9	4.9	4.8	4.5	4.6	4.4
2015	1027012520	38,928	24,342	14	4.4	4.4	4.4	4.4	4.3	4.4	4.4
2015	1117071007	38,673	20,530	12	6.3	6.4	6.5	6.4	6.0	6.0	6.1
2015	1117083340	38,647	20,572	9	5.1	5.0	5.0	5.1	5.1	5.1	5.0
2015	1117115725	38,708	20,598	8	4.6	4.5	4.5	4.6	4.5	4.5	4.6
2015	1117123756	38,718	20,577	8	4.9	4.7	4.7	4.8	4.5	4.6	4.6
2015	1117193934	38,705	20,604	6	4.2	4.2	4.3	4.2	4.5	4.4	4.6
2015	1118051814	38,497	20,520	9	4.6	4.4	4.4	4.5	4.5	4.3	4.6
2015	1118121538	38,863	20,592	10	5.0	5.0	5.0	5.0	4.8	4.8	4.6
2015	1118130315	38,741	20,596	14	5.0	4.7	4.8	4.9	4.8	4.6	4.7
2015	1120051224	38,470	20,444	9	4.9	4.8	4.9	4.9	4.9	5.0	4.8
2015	1120093314	38,644	20,539	9	4.7	4.5	4.6	4.6	4.8	4.5	4.7

Year	MoDaHrMnSec	Lat(φ°)	Lon(λ°)	Dep (km)	AUTH - Mw	NOA - Mw	EMSC - Mw	Mw - mean	AUTH - ML_T1	AUTH - ML_T2	NOA - ML_N
2015	1120233704	38,732	20,600	3	4.5	4.6	4.6	4.6	4.5	4.3	4.6
2015	1121004156	38,722	20,604	8	4.7	4.5	4.5	4.6	4.6	4.4	4.7
2015	1212083445	37,802	21,127	20	4.4	4.5	4.5	4.5	4.4	4.5	4.5
2015	1213015014	37,808	21,151	22	3.9	3.9	3.9	3.9	4.1	4.1	4.3
2015	1214211324	39,015	20,629	9	4.3	4.2	4.2	4.3	4.1	4.0	4.2
2015	1226110049	35,517	27,358	50	4.9	5.2	5.2	5.1	5.2	5.4	5.3
2016	0104180055	38,584	20,596	10	4.3	4.2	4.2	4.3	4.5	4.4	4.6
2016	0215185500	37,578	21,697	17	5.2	5.1	5.1	5.2	5.2	5.1	5.1
2016	0218024024	35,257	26,198	26	4.5	4.5	4.5	4.5	4.7	4.6	4.9
2016	0312124039	35,367	23,572	19	4.6	4.5	4.6	4.6	4.9	4.8	5.0
2016	0403004615	34,120	25,817	18	4.7	4.6	4.6	4.7	4.6	4.5	4.5
2016	0416001040	34,956	25,705	6	4.9	4.7	5.0	4.8	4.4	4.5	4.4
2016	0417135449	37,815	23,475	6	3.9	3.8	3.8	3.9	4.0	3.8	4.2
2016	0520084533	39,260	22,929	16	4.0	4.1	4.1	4.1	4.0	4.0	4.3
2016	0916065513	38,878	23,349	11	4.0	4.0	4.0	4.0	4.2	4.2	4.3
2016	0927205705	36,377	27,611	98	5.2	5.1	5.2	5.2	5.3	5.4	5.4
2016	0928071734	36,673	21,805	24	4.7	4.7	4.7	4.7	5.0	5.0	5.1
2016	1011114830	38,398	21,811	8	4.3	4.2	4.2	4.3	4.2	4.2	4.4
2016	1015201449	39,786	20,723	14	5.3	5.3	5.4	5.3	5.3	5.4	5.1
2016	1016000959	39,774	20,681	12	4.7	4.6	4.6	4.7	4.5	4.6	4.6
2016	1016004817	39,724	20,764	16	4.5	4.6	4.6	4.6	4.6	4.7	4.5
2016	1016013205	39,762	20,675	12	4.8	4.5	4.5	4.7	4.5	4.5	4.4
2016	1016022102	39,746	20,692	14	5.0	4.8	4.9	4.9	4.8	4.9	4.9
2016	1016034021	39,765	20,700	14	4.8	4.6	4.6	4.7	4.8	4.7	4.6
2016	1017013030	37,929	26,974	14	4.4	4.3	4.4	4.4	4.6	4.6	4.7
2016	1019212357	39,728	20,682	10	4.4	4.3	4.5	4.4	4.3	4.3	4.4
2016	1110121242	40,969	22,761	8	4.4	4.4	4.4	4.4	4.4	4.5	4.6
2016	1116091514	40,977	22,759	11	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.1	4.1
2016	1118232248	40,967	22,758	13	4.8	4.8	4.9	4.8	4.7	4.8	4.5
2017	0109095316	38,356	21,735	11	4.7	4.6	4.7	4.7	4.6	4.5	4.5
2017	0114223901	39,562	26,075	6	4.4	4.4	4.5	4.4	4.4	4.5	4.3
2017	0115040321	39,565	26,058	6	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.1	4.1
2017	0206035141	39,542	26,114	6	5.2	5.2	5.2	5.2	4.9	5.0	5.0
2017	0206105802	39,520	26,087	8	5.0	5.0	5.0	5.0	5.1	5.2	4.9

Year	MoDaHrMnSec	Lat(φ°)	Lon(λ°)	Dep (km)	AUTH - Mw	NOA - Mw	EMSC - Mw	Mw - mean	AUTH - ML_T1	AUTH - ML_T2	NOA - ML_N
2017	0612122838	38,849	26,305	8	6.3	6.3	6.3	6.3	6.1	6.2	6.3
2017	0612141947	38,863	26,315	12	4.2	4.2	4.3	4.2	4.3	4.4	4.2
2017	0617195005	38,830	26,343	9	5.2	5.3	5.2	5.3	5.3	5.3	5.4
2017	0622024853	38,818	26,433	8	4.8	5.0	4.9	4.9	4.8	4.8	4.7
2017	0703111821	41,181	20,917	6	4.9	4.8	5.0	4.9	4.9	4.9	4.8
2017	0720223111	36,959	27,453	7	6.5	6.6	6.6	6.6	6.1	6.2	6.2
2017	1011224944	39,103	24,230	11	5.0	5.0	5.1	5.0	5.0	5.0	5.1
2018	0102042418	41,182	22,892	16	4.7	4.7	4.7	4.7	4.7	4.8	4.6
2018	0115202414	38,169	23,852	14	4.1	4.1	4.3	4.1	4.5	4.5	4.5
2018	0128144834	37,191	23,805	10	4.2	4.1	4.1	4.2	4.2	4.2	4.1
2018	0221234159	41,953	24,942	17	4.3	4.2	4.3	4.3	4.4	4.6	4.3
2018	0225152114	38,605	25,632	8	4.2	4.3	4.5	4.3	4.2	4.3	4.4
2018	0402094634	35,496	26,622	22	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3	4.4	4.4
2018	0410155620	36,678	26,169	14	4.7	4.5	4.5	4.6	4.7	4.8	4.6
2018	0421002006	39,947	23,717	10	4.8	4.7	4.8	4.8	4.6	4.6	4.8
2018	0501205048	38,207	23,856	6	3.9	4.0	4.0	4.0	3.9	3.9	3.8
2018	0516223004	36,519	22,921	12	4.8	4.9	5.0	4.9	4.6	4.7	4.5
2018	0605085240	36,615	22,627	13	4.5	4.6	4.6	4.6	4.6	4.6	4.7
2018	0625051447	36,651	21,350	20	5.4	5.5	5.5	5.5	5.2	5.3	5.3
2018	0726081751	37,735	26,717	14	4.3	4.4	4.4	4.4	4.4	4.5	4.6
2018	0831071224	39,279	21,619	15	5.1	5.1	5.1	5.1	5.2	5.1	5.1
2018	0927102150	36,659	21,370	13	5.3	5.1	5.2	5.2	5.1	5.2	5.3
2018	1015090246	40,519	23,477	16	4.0	4.1	4.1	4.1	4.0	4.0	4.2
2018	1017220316	37,337	20,545	9	4.0	4.1	4.1	4.1	4.2	4.3	4.3
2018	1025225449	37,367	20,585	15	6.6	6.7	6.8	6.7	6.4	6.4	6.3
2018	1104031244	37,431	20,517	12	4.7	4.7	4.9	4.7	5.0	5.1	4.9
2018	1119130554	37,179	20,58	10	5.1	5.2	5.1	5.2	5.1	5.2	5.2
2019	0205022609	38,967	20,569	8	5.4	5.3	5.4	5.4	5.3	5.2	5.4
2019	0330104618	38,334	22,310	10	5.2	5.1	5.3	5.2	5.2	5.2	5.2
2019	0713150843	38,817	21,245	31	4.8	4.6	4.7	4.7	4.7	4.7	4.5
2019	0719111315	38,138	23,528	11	5.2	5.2	5.3	5.2	5.1	5.2	5.3
2019	1127072343	35,615	23,167	80	6.1	6.1	6.0	6.1	5.8	6.0	5.9
2019	1210215830	35,379	26,497	55	5.5	5.4	5.4	5.5	5.3	5.5	5.5
2020	0128153834	35,158	28,014	4	5.3	5.4	5.4	5.4	5.0	5.4	5.1

Year	MoDaHrMnSec	Lat(φ°)	Lon(λ°)	Dep (km)	AUTH - Mw	NOA - Mw	EMSC - Mw	Mw - mean	AUTH - ML_T1	AUTH - ML_T2	NOA - ML_N
2020	0206092415	39,216	21,492	16	4.7	4.7	4.7	4.7	4.7	4.8	4.5
2020	0321004950	39,304	20,621	8	5.7	5.5	5.7	5.6	5.4	5.5	5.3
2020	0518232237	34,220	25,550	14	5.6	5.7	5.8	5.7	5.1	5.3	5.2
2021	0303101608	39,732	22,218	6	6.2	6.3	6.3	6.3	6.0	6.1	6.0