## ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

### ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ



# ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ

# ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ

## ΜΑΤΣΑΡΙΔΟΥ ΧΑΡΙΚΛΕΙΑ Γεωλόγος

# Διατριβή Ειδίκευσης

# Συσχέτιση μεταξύ τάσεων Coulomb από πρόσφατους ισχυρούς σεισμούς του ελληνικού χώρου και διέγερση σεισμικότητας



# ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ ΤΜΗΜΑΤΟΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΕΙΔΙΚΕΥΣΗ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ

### ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ 2016

### ΜΑΤΣΑΡΙΔΟΥ ΧΑΡΙΚΛΕΙΑ

Πτυχιούχος Γεωλόγος

Συσχέτιση μεταξύ τάσεων Coulomb από πρόσφατους ισχυρούς σεισμούς του ελληνικού χώρου και διέγερση σεισμικότητας

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας στα πλαίσια του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών ' Εφαρμοσμένη και Περιβαλλοντική Γεωλογία'

Τομέας Γεωφυσικής

## ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Παπαδημητρίου Ελευθερία, Καθηγήτρια Σεισμολογίας Α.Π.Θ. (Επιβλέπουσα διατριβής)

Καρακώστας Βασίλειος, Καθηγητής Σεισμολογίας Α.Π.Θ. (Μέλος)

Βαλλιανάτος Φίλιππος, Καθηγητής του Τμήματος Φυσικών Πόρων και Περιβάλλοντος ΤΕΙ Κρήτης (Μέλος) © Ματσαρίδου Γ. Χαρίκλεια, 2016

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος, All rights reserved

Συσχέτιση μεταξύ τάσεων Coulomb από πρόσφατους ισχυρούς σεισμούς του ελληνικού χώρου και διέγερση σεισμικότητας

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.

# Περιεχόμενα

| Περιεχόμενα   | 5  |
|---|----|
| Πρόλογος  | 9  |
| 1.Εισαγωγή  | 11 |
| 1.1 Σεισμοτεκτονικά χαρακτηριστικά της Ελλάδας                          | 11 |
| 1.2 Προηγούμενη έρευνα των σεισμικών ακολουθιών                         | 13 |
| 1.3 Συσχέτιση Τάσεων και Ρυθμού Σεισμικότητας                           | 16 |
| 1.4 Προηγούμενη Έρευνα Σεισμικών Ακολουθιών στον Ελληνικό Χώρο.         | 18 |
| 2. Μεθοδολογία & Δεδομένα   | 21 |
| 2.1 Εισαγωγή  | 21 |
| 2.2 Μεταβολή των Τάσεων Coulomb   | 22 |
| 2.3 Το Κριτήριο Θραύσης Coulomb   | 22 |
| 2.4 Συντελεστής τριβής  | 25 |
| 2.5 Υπολογισμός των παραμέτρων του μοντέλου                             | 26 |
| 2.6 Δεδομένα Παρατήρησης  | 29 |
| 2.7 Δεδομένα Μετασεισμών & Πληρότητα                                    | 32 |
| 2.8 Ρυθμός Σεισμικότητας  | 33 |
| 3. Αποτελέσματα   | 34 |
| 3.1 Εισαγωγή  | 34 |
| 3.2 Σεισμική Ακολουθία Σκύρου, 26 Ιουλίου 2001, M <sub>w</sub> =6.4     | 37 |
| 3.2.1 Εισαγωγή  | 37 |
| 3.2.2 Σεισμικότητα πριν και μετά τον κύριο σεισμό                       | 37 |
| 3.2.3 Υπολογισμός Τάσεων Coulomb  | 39 |
| 3.2.4 Χωρική Κατανομή Μετασεισμών                                       | 40 |
| 3.2.5 Πληρότητα   | 41 |
| 3.2.6 Ρυθμός Σεισμικότητας  | 41 |
| 3.3 Σεισμική Ακολουθία Λευκάδας, 14 Αυγούστου 2003, M <sub>w</sub> =6.2 | 45 |
| 3.3.1 Εισαγωγή  | 45 |
| 3.3.2 Σεισμικότητα πριν και μετά τον κύριο σεισμό                       | 45 |
| 3.3.3 Υπολογισμός Τάσεων Coulomb  | 47 |
| 3.3.4 Χωρική Κατανομή Μετασεισμών                                       | 48 |
| 3.3.5 Πληρότητα   | 49 |

| 3.3.6 Ρυθμός Σεισμικότητας  | 50 |
|---|----|
| 3.4 Σεισμική Ακολουθία ΝΔ Πελοποννήσου, Φεβρουάριος 2008                    | 53 |
| 3.4.1 Εισαγωγή  | 53 |
| 3.4.α 1ος Σεισμός της ακολουθίας, 14 Φεβρουαρίου 2008, M <sub>w</sub> =6.8  | 53 |
| 3.4.2.α Σεισμικότητα πριν και μετά τον κύριο σεισμό                         | 53 |
| 3.4.3.α Υπολογισμός Τάσεων Coulomb  | 56 |
| 3.4.4.α Χωρική Κατανομή Μετασεισμών   | 57 |
| 3.4.5.α Πληρότητα   | 58 |
| 3.4.6.α Ρυθμός Σεισμικότητας  | 59 |
| 3.4.β 2ος Σεισμός της ακολουθίας, 14 Φεβρουαρίου 2008, M <sub>w</sub> =6.5  | 62 |
| 3.4.2.β Σεισμικότητα πριν και μετά τον κύριο σεισμό                         | 62 |
| 3.4.3.β Υπολογισμός Τάσεων Coulomb  | 65 |
| 3.4.4.β Χωρική Κατανομή Μετασεισμών   | 66 |
| 3.4.5.β Πληρότητα   | 67 |
| 3.4.6.β Ρυθμός Σεισμικότητας  | 67 |
| 3.4.γ 3ος Σεισμός της ακολουθίας, 20 Φεβρουαρίου 2008, M <sub>w</sub> =6.2  | 70 |
| 3.4.2.γ Σεισμικότητα πριν και μετά τον κύριο σεισμό                         | 70 |
| 3.4.3.γ Υπολογισμός Τάσεων Coulomb  | 72 |
| 3.4.4.γ Χωρική Κατανομή Μετασεισμών   | 73 |
| 3.4.5.γ Πληρότητα   | 73 |
| 3.4.6.γ Ρυθμός Σεισμικότητας  | 74 |
| 3.5 Σεισμική Ακολουθία ΒΔ Πελοποννήσου, 8 Ιουνίου 2008, M <sub>w</sub> =6.4 | 77 |
| 3.5.1 Εισαγωγή  | 77 |
| 3.5.2 Σεισμικότητα πριν και μετά τον κύριο σεισμό                           | 77 |
| 3.5.3 Υπολογισμός Τάσεων Coulomb  | 80 |
| 3.5.4 Χωρική Κατανομή Μετασεισμών   | 81 |
| 3.5.5 Πληρότητα   | 82 |
| 3.5.6 Ρυθμός Σεισμικότητας  | 83 |
| 3.6 Σεισμική Ακολουθία Ν. Κρήτης, 1 Ιουλίου 2009, Μ <sub>w</sub> =6.2       | 86 |
| 3.6.1 Εισαγωγή  | 86 |
| 3.6.2 Σεισμικότητα πριν και μετά τον κύριο σεισμό                           | 86 |
| 3.6.3 Υπολογισμός Τάσεων Coulomb  | 89 |
| 3.6.4 Χωρική Κατανομή Μετασεισμών   | 90 |

| 3.6.5 Πληρότητα  | 90     |
|--|--------|
| 3.6.6 Ρυθμός Σεισμικότητας   | 91     |
| 3.7 Σεισμική Ακολουθία ΝΑ Αιγαίου, 10 Ιουνίου 2012, $M_w$ =6.0           | 94     |
| 3.7.1 Εισαγωγή   | 94     |
| 3.7.2 Σεισμικότητα πριν και μετά τον κύριο σεισμό                        | 94     |
| 3.7.3 Υπολογισμός Τάσεων Coulomb   | 97     |
| 3.7.4 Χωρική Κατανομή Μετασεισμών  | 98     |
| 3.7.5 Πληρότητα  | 99     |
| 3.7.6 Ρυθμός Σεισμικότητας   | 100    |
| 3.8 Σεισμική Ακολουθία Ν. Κρήτης, Ιούνιος 2013                           | 103    |
| 3.8.1 Εισαγωγή   |        |
| 3.8.α 1ος Σεισμός της ακολουθίας, 15 Ιουνίου 2013, Μ <sub>w</sub> =6.3   | 103    |
| 3.8.2.α Σεισμικότητα πριν και μετά τον κύριο σεισμό                      |        |
| 3.8.3.α Υπολογισμός Τάσεων Coulomb                                       |        |
| 3.8.4.α Χωρική Κατανομή Μετασεισμών                                      | 107    |
| 3.8.5.α Πληρότητα  | 107    |
| 3.8.6.α Ρυθμός Σεισμικότητας   |        |
| 3.8.β 2ος Σεισμός της ακολουθίας, 16 Ιουνίου 2013, M <sub>w</sub> =6.1   |        |
| 3.8.2.β Σεισμικότητα πριν και μετά τον κύριο σεισμό                      |        |
| 3.8.3.β Υπολογισμός Τάσεων Coulomb                                       | 114    |
| 3.8.4.β Χωρική Κατανομή Μετασεισμών                                      | 114    |
| 3.8.5.β Πληρότητα  | 115    |
| 3.8.6.β Ρυθμός Σεισμικότητας   |        |
| 3.9 Σεισμική Ακολουθία Δ. Κρήτης, 12 Οκτωβρίου 2013, M <sub>w</sub> =6.8 |        |
| 3.9.1 Εισαγωγή   |        |
| 3.9.2 Σεισμικότητα πριν και μετά τον κύριο σεισμό                        |        |
| 3.9.3 Υπολογισμός Τάσεων Coulomb   |        |
| 3.9.4 Χωρική Κατανομή Μετασεισμών  | 123    |
| 3.9.5. Πληρότητα   | 124    |
| 3.9.6 Ρυθμός Σεισμικότητας   |        |
| 3.10 Σεισμική Ακολουθία Κεφαλονιάς, 2014                                 |        |
| 3.10.1 Εισαγωγή  |        |
| 3.10.α 1ος Σεισμός της ακολουθίας, 26 Ιανουαρίου 2014, M <sub>w</sub> =6 | .1 128 |

| 3.10.2.α Σεισμικότητα πριν και μετά τον κύριο σεισμό                       | 128 |
|--|-----|
| 3.10.3.α Υπολογισμός Τάσεων Coulomb  | 130 |
| 3.10.4.α Χωρική Κατανομή Μετασεισμών                                       | 131 |
| 3.10.5.α Πληρότητα   | 132 |
| 3.10.6.α Ρυθμός Σεισμικότητας  | 132 |
| 3.10.β 2ος Σεισμός της ακολουθίας, 3 Φεβρουαρίου 2014, M <sub>w</sub> =6.0 | 135 |
| 3.10.2.β Σεισμικότητα πριν και μετά τον κύριο σεισμό                       | 135 |
| 3.10.3.β Υπολογισμός Τάσεων Coulomb  | 138 |
| 3.10.4.β Χωρική Κατανομή Μετασεισμών                                       | 139 |
| 3.10.5.β Πληρότητα   | 140 |
| 3.10.6.β Ρυθμός Σεισμικότητας  | 140 |
| 3.11 Σεισμική Ακολουθία ΒΑ Αιγαίου, 24 Μαΐου 2014, Μ <sub>w</sub> =6.8     | 143 |
| 3.11.1 Εισαγωγή  | 143 |
| 3.11.2 Σεισμικότητα πριν και μετά τον κύριο σεισμό                         | 143 |
| 3.11.3 Υπολογισμός Τάσεων Coulomb  | 146 |
| 3.11.4 Χωρική Κατανομή Μετασεισμών   | 147 |
| 3.11.5 Πληρότητα   | 148 |
| 3.11.6 Ρυθμός Σεισμικότητας  | 149 |
| 3.12 Σεισμική Ακολουθία Κάσου, 16 Απριλίου 2015, Μ <sub>w</sub> =6.1       | 152 |
| 3.12.1 Εισαγωγή  | 152 |
| 3.12.2 Σεισμικότητα πριν και μετά τον κύριο σεισμό                         | 152 |
| 3.12.3 Υπολογισμός Τάσεων Coulomb  | 155 |
| 3.12.4 Χωρική Κατανομή Μετασεισμών   | 156 |
| 3.12.5 Πληρότητα   | 157 |
| 3.12.6 Ρυθμός Σεισμικότητας  | 157 |
| 4. Σύνοψη  | 161 |
| 4.1 Σύνοψη Αποτελεσμάτων   | 161 |
| 4.2 Συμπεράσματα   | 166 |
| Βιβλιογραφία   | 167 |

# Πρόλογος

Η παρούσα διατριβή εκπονήθηκε στα πλαίσια του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών του Τομέα Γεωφυσικής, του Τμήματος Γεωλογίας, του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης.

Σκοπός της εργασίας είναι η συσχέτιση της μεταβολής των τάσεων Coulomb, η οποία οφείλεται στη σεισμική ολίσθηση των ισχυρών (Μ≥6.0) σεισμών που έγιναν στον ελληνικό χώρο από το 2001 έως και τον Απρίλιο του 2015, της χωρικής κατανομής τους και της διέγερσης σεισμικότητας στο γύρω τους χώρο.

Η διατριβή αποτελείται από 4 κεφάλαια. Στο πρώτο κεφάλαιο περιγράφονται τα κύρια σεισμοτεκτονικά χαρακτηριστικά του ελληνικού χώρου και αναφέρονται προηγούμενα ερευνητικά αποτελέσματα με τις σεισμικές ακολουθίες στην περιοχή μελέτης. Αναφέρονται συσχετίσεις των μεταβολών των τάσεων Coulomb με το ρυθμό σεισμικότητας από διεθνείς μελέτες και προηγούμενες έρευνες σεισμικών ακολουθιών στον ελλαδικό χώρο.

Στο δεύτερο κεφάλαιο αναλύεται το θεωρητικό υπόβαθρο που υιοθετήθηκε και εφαρμόστηκε για τον υπολογισμό της μεταβολής των τάσεων Coulomb. Αναπτύσσονται οι φυσικές παράμετροι και οι μαθηματικές σχέσεις που λήφθηκαν υπόψη και τα σεισμολογικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν. Στο ίδιο κεφάλαιο αναφέρεται η μεθοδολογία της πληρότητας των μεγεθών που επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί στην παρούσα εργασία, καθώς και του ρυθμού σεισμικότητας.

Στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφονται αναλυτικά τα αποτελέσματα των υπολογισμών των μεταβολών των τάσεων Coulomb μετά από κάθε ισχυρό σεισμό. Παρουσιάζεται η χωρική κατανομή των επικέντρων των μετασεισμών και η μεταβολή των τάσεων τους στις εστίες αυτών των μετασεισμών. Γίνεται συσχέτιση αυτών των μεταβολών των τάσεων των μετασεισμών με τις μεταβολές του ρυθμού σεισμικότητας των περιοχών γύρω από τις οποίες έγιναν οι ισχυροί σεισμοί.

Τέλος, στο τέταρτο κεφάλαιο συνοψίζονται τα συμπεράσματα που εξήχθησαν έπειτα από τις παραπάνω διαδικασίες. Ερμηνεύεται ο ρυθμός σεισμικότητας για κάθε ισχυρό σεισμό σε συνδυασμό με τις μεταβολές των τάσεων Coulomb, όπου είναι δυνατόν.

Με την εργασία αυτή ολοκληρώνεται η φοίτησή μου στο πρόγραμμα μεταπτυχιακών σπουδών του Τομέα Γεωφυσικής, του Τμήματος Γεωλογίας, του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης και θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου σε όλους τους ανθρώπους που με δίδαξαν, μου μετέδωσαν τις γνώσεις τους και μου έδωσαν τη δυνατότητα να τις συνθέσω ώστε να ολοκληρωθεί η παρούσα εργασία. Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω την επιβλέπουσα της διατριβής κα. Παπαδημητρίου Ελευθερία, Καθηγήτρια Σεισμολογίας, για τη συνεχή επιστημονική καθοδήγησή της και για την πολύτιμη βοήθειά της στο τελικό αποτέλεσμα.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Καρακώστα Βασίλειο, Καθηγητή Σεισμολογίας, για τις χρήσιμες επιστημονικές συμβουλές που μου παρείχε και για τα αδημοσίευτα στοιχεία του που μου παραχώρησε, ώστε να ολοκληρωθεί η παρούσα εργασία.

Τις ευχαριστίες μου θα ήθελα να εκφράσω και στον κ. Βαλλιανάτο Φίλιππο, Καθηγητή του τμήματος Φυσικών Πόρων και Περιβάλλοντος, ΤΕΙ Κρήτης, για το ενδιαφέρον που έδειξε για την παρούσα εργασία και τις εποικοδομητικές του παρατηρήσεις.

Δεν θα μπορούσα να μην εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου και ένα πολύ μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένεια μου για την παρότρυνση, την οικονομική και ηθική υποστήριξη που μου παρείχαν σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Θα ήθελα επίσης να εκφράσω τις ευχαριστίες μου σε όλους τους φίλους μου για την κατανόησή τους και στους συναδέλφους μεταπτυχιακούς φοιτητές για τη συνεργασία τους. Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω τη Γκαρλαούνη Χαρά για τη βοήθεια και τις συμβουλές που μου πρόσφερε.



### 1.1 Σεισμοτεκτονικά χαρακτηριστικά της Ελλάδας

Ο ελληνικός χώρος ανήκει στο ηπειρωτικό σύστημα διάρρηξης και χαρακτηρίζεται από υψηλή σεισμικότητα. Τα σημαντικότερα σεισμοτεκτονικά χαρακτηριστικά εμφανίζονται στις περιοχές σύγκλισης των μικρών τεκτονικών πλακών της περιοχής (Απούλιας, Ανατολίας, Αιγαίου) καθώς και στις περιοχές όπου παρατηρείται κίνηση των λιθοσφαιρικών πλακών (Αφρικανική, Ευρασιατική, Αραβική πλάκα). Σύμφωνα με τους Παπαζάχο και Κομνηνάκη (1978), οι οποίοι ήταν οι πρώτοι που διαπίστωσαν ότι η κατάδυση της ωκεάνιας λιθόσφαιρας της Ανατολικής Μεσογείου, που αποτελεί το μπροστινό τμήμα της Αφρικανικής λιθοσφαιρικής πλάκας, συνδέεται με την κίνηση της Αφρικανικής λιθοσφαιρικής πλάκας προς το βορρά, την επιφανειακή σεισμική δράση κατά μήκος του ελληνικού τόξου και τη γένεση σεισμών ενδιαμέσου βάθους στην περιοχή του νοτίου Αιγαίου.

Η κίνηση της Αραβικής λιθοσφαιρικής πλάκας προς το βορρά, σύμφωνα με τον McKenzie (1972,1978), προκαλεί συμπιεστική δύναμη με αποτέλεσμα την κίνηση της λιθοσφαιρικής πλάκας της Ανατολίας προς τα δυτικά. Η κίνηση αυτή έχει δημιουργήσει το δεξιόστροφο ρήγμα της Βόρειας Ανατολίας, που συνεχίζεται στο Βόρειο Αιγαίο κατά μήκος της Τάφρου του Βορείου Αιγαίου, έχει συνολικό μήκος 1500 km και εκτείνεται από την ανατολική Τουρκία μέχρι τη θάλασσα του Μαρμαρά. Για το λόγο αυτό στην περιοχή του Βορείου Αιγαίου επικρατούν κυρίως δεξιόστροφα ρήγματα οριζόντιας μετατόπισης. Σύμφωνα με τους Ritsema (1974) και McKenzie (1972) η αριστερόστροφη περιστροφική κίνηση της Απούλιας πλάκας δημιουργεί συμπιεστικές δυνάμεις στην περιοχή της Αδριατικής και του βορείου Ιουνίου Πελάγους. Οι ίδιοι διαπίστωσαν ότι η περιστροφική αυτή κίνηση προκαλεί σύγκλιση της Απούλιας πλάκας με την ηπειρωτική Ελλάδα. Αποτέλεσμα αυτής της κίνησης είναι η γένεση επιφανειακών σεισμών κατά μήκος των δυτικών ακτών της κεντρικής Ελλάδας και των ακτών της Αλβανίας.



**Σχήμα 1.1:** Απεικόνιση των κινήσεων των λιθοσφαιρικών πλακών που καθορίζουν την ενεργό τεκτονική στην περιοχή του Αιγαίου. (Τροποποιημένο από Papazachos et al. 1998b)

Ο ελληνικός χώρος με βάση τα σεισμοτεκτονικά χαρακτηριστικά χωρίζεται κυρίως σε δύο ζώνες διάρρηξης. Η πρώτη ζώνη ακολουθεί τις δυτικές παράκτιες ελληνικές περιοχές και συνεχίζει προς τα νότια (Αλβανία – Δυτική Ελλάδα – Ιόνια νησιά – Ν. Πελοπόννησος – Κρήτη – Ρόδος) και η δεύτερη ζώνη διευθύνεται βορειοανατολικά – νοτιοδυτικά (Βόρεια Ανατολία – Βόρειο Αιγαίο – κεντρική Ελλάδα – Ιόνια νησιά).

Στον ευρύτερο χώρο του Αιγαίου κυριαρχούν διαφορετικά είδη διαρρήξεων, λόγω της πολυπλοκότητας των γεωδυναμικών φαινομένων που συμβαίνουν εκεί. Στην οπισθοτόξια περιοχή, στο Αιγαίο, υπάρχει εφελκυστικό πεδίο που έχει διεύθυνση Βορρά – Νότου (McKenzie, 1970) και οφείλεται στην ταχύτερη κίνηση του νότιου τμήματος της μικροπλάκας του Αιγαίου σε σχέση με το βόρειο τμήμα της, με αποτέλεσμα να κυριαρχούν σε αυτήν την περιοχή κανονικά ρήγματα διεύθυνσης Α – Δ. Εφελκυστικό πεδίο διεύθυνσης Α – Δ εκτείνεται κατά μήκος της οροσειράς των Ελληνίδων και διακόπτεται στην κεντρική Ελλάδα (Papazachos et al., 1984b; Kiratzi et al., 1987). Στην περιοχή αυτή επικρατούν κανονικά ρήγματα με διεύθυνση Β – Ν.

Ανάστροφα ρήγματα επικρατούν κατά μήκος της σύγκλισης της Απούλιας πλάκας και της πλάκας του Αιγαίου και κατά μήκος του Ελληνικού Τόξου (Ζάκυνθος - Ν. Πελοπόννησος – Ν. Κρήτη – Ν. Κάρπαθος – Α. Ρόδος), λόγω της κατάδυσης της Αφρικανικής πλάκας κάτω από την Ευρασιατική και της εφίππευσης της μικροπλάκας του Αιγαίου πάνω στην Αφρικανική κατά τη νοτιοδυτική κίνησή της (Papazachos and Delibasis, 1969). Τα ρήγματα αυτά διευθύνονται ΒΔ - ΝΑ. Στην ανατολική πλευρά της ζώνης αυτής σχηματίζεται το αριστερόστροφο ρήγμα μετασχηματισμού της Ρόδου (Rhodos Transform Fault, RTF).

Μία τρίτη ζώνη διάρρηξης αναπτύσσεται στο Βόρειο Αιγαίο λόγω του εφελκυστικού πεδίου που επικρατεί, σχηματίζοντας ρήγματα οριζόντιας μετατόπισης με διεύθυνση ΒΑ – ΝΔ και οφείλονται στη νοτιοδυτική κίνηση της μικροπλάκας του Αιγαίου και της δυτικής κίνησης της πλάκας της Ανατολίας. Η ζώνη αυτή διακόπτεται στην κεντρική Ελλάδα και συνεχίζει μέχρι τα Ιόνια νησιά και τη βορειοδυτική Πελοπόννησο. Σε αυτήν τη ζώνη εντοπίστηκε το σημαντικότερο δεξιόστροφο ρήγμα μετασχηματισμού που είναι το ρήγμα της Κεφαλονιάς (Scordilis et al.,1985).

### 1.2 Προηγούμενη έρευνα των σεισμικών ακολουθιών

Στις περισσότερες από τις μελετούμενες περιοχές έχουν πραγματοποιηθεί προηγούμενες έρευνες. Ο σεισμός της Σκύρου (26 Ιουλίου 2001) μελετήθηκε από τους Karakostas et al. (2003), οι οποίοι με βάση τις μεταβολές των τάσεων Coulomb ερμήνευσαν τη χωρική κατανομή των εκτός του ρήγματος μετασεισμών.

Η ακολουθία του σεισμού της Λευκάδας της 14<sup>ης</sup> Αυγούστου 2003, καθώς και η διέγερση σεισμικότητας μελετήθηκε από τους Karakostas et al. (2004). Την ίδια σεισμική ακολουθία μελέτησαν οι Benetatos et al. (2005) με σκοπό να καθορίσουν τα χαρακτηριστικά της πηγής και τους μηχανισμούς γένεσης τόσο του κύριου σεισμού όσο και των μετασεισμών που ακολούθησαν. Οι Roumelioti et al. (2009) καθόρισαν τις βασικές παραμέτρους της σεισμικής ακολουθίας της 14<sup>ης</sup> Φεβρουαρίου 2008, στην περιοχή της Μεθώνης, στη Νότια Πελοπόννησο.

Με το σεισμό που έγινε στη ΒΔ Πελοπόννησο (8 Ιουνίου 2008), ασχολήθηκαν αρκετοί ερευνητές. Οι Konstantinou et al. (2009) μελέτησαν τη διαδικασία της διάρρηξης και τη μετασεισμική ακολουθία. Την παραμόρφωση του φλοιού που

προκλήθηκε από αυτόν το σεισμό μελέτησαν οι Papadopoulos et al. (2010), ενώ οι Margaris et al. (2010) καθόρισαν τις βασικές παραμέτρους του σεισμού, μελέτησαν τις εδαφικές κινήσεις και τις αστοχίες του εδάφους. Την επιφανειακή παραμόρφωση κατά τη διάρκεια του σεισμού καθώς και τις σεισμοτεκτονικές επιπτώσεις στη δυτική Ελλάδα μελέτησαν οι Koukouvelas et al. (2010). Μελετώντας τις σεισμικές ακολουθίες πριν τη γένεση του κύριου σεισμού αλλά και μετά οι Feng et al. (2010) διαπίστωσαν ότι ο σεισμός αυτός αποτελεί έναν δείκτη ανώριμης ζώνης ρήγματος μετασχηματισμού. Οι Konstantinou et al. (2011) ασχολήθηκαν με το ενδεχόμενο ο σεισμός αυτός να αποτελεί μία περίπτωση επανενεργοποίησης ρήγματος στο κατώτερο τμήμα του φλοιού. Οι Segou et al. (2014), συσχέτισαν την κατανομή των τάσεων Coulomb λόγω της σεισμικής ολίσθησης με το σεισμό στο Ευπάλιο το 2010.

Οι Moshou et al. (2010) χρησιμοποιώντας τη μέθοδο της αντιστροφής των σεισμικών κυμάτων καθόρισαν τον τανυστή τάσης για το σεισμό που έγινε νότια της Κρήτης την 1<sup>η</sup> Ιουλίου 2009. Με τη μελέτη της σεισμικής ακολουθίας στα Δωδεκάνησα της 10<sup>ης</sup> Ιουνίου 2012 και με τον καθορισμό των βασικών παραμέτρων του ρήγματος ασχολήθηκαν οι Kiratzi et al. (2013). Με το σεισμό δυτικά της Κρήτης της 12<sup>ης</sup> Οκτωβρίου 2013, καθώς και με τη μετασεισμική του δραστηριότητα ασχολήθηκαν οι Papadimitriou et al. (2015).

Τη σεισμική ακολουθία της Κεφαλονιάς (26 Ιανουαρίου 2014), εξέτασαν οι Karakostas et al. (2015) καθορίζοντας τα βασικά χαρακτηριστικά του ρήγματος, τη μετασεισμική δραστηριότητα και τις σεισμοτεκτονικές ιδιότητες της περιοχής. Με τον καθορισμό των βασικών χαρακτηριστικών της ίδιας σεισμικής ακολουθίας καθώς και με τον προσδιορισμό των μηχανισμών γένεσης ενός μέρους από το μεγάλο πλήθος των μετασεισμών που ακολούθησαν ασχολήθηκαν οι Sokos et al. (2015).

Αρκετές μελέτες έγιναν και για το σεισμό του βορείου Αιγαίου της 24<sup>ης</sup> Μαΐου 2014. Οι Görgün et al. (2015) μελέτησαν αυτήν τη σεισμική ακολουθία κατά μήκος της Τάφρου του Βορείου Αιγαίου προσδιορίζοντας τα βασικά χαρακτηριστικά του ρήγματος. Από την κίνηση των κυματομορφών ο Evangelidis (2014) μελέτησε τη διάρρηξη και πρότεινε τα χαρακτηριστικά του ρήγματος. Η Tsakiroudi (2015) χρησιμοποιώντας τρεις μεθόδους, αυτές της φασματική ανάλυσης, της αντιστροφής του τανυστή ροπής και της αντιστροφής της ολίσθησης των σεισμικών δεδομένων, προσδιόρισε το μέγεθος του σεισμού και τα χαρακτηριστικά του ρήγματος.

Με το σεισμό που έγινε στις 16 Απριλίου 2015, κοντά στο νησί της Κάσου, ασχολήθηκε η Kiratzi (2016). Η Kiratzi (2016) καθόρισε το μηχανισμό γένεσης του ρήγματος και υπολόγισε το εστιακό βάθος και το μοντέλο ολίσθησης.



**Σχήμα 1.2:** Χωρική κατανομή των πρόσφατων ισχυρών σεισμών (Μ ≥6.0) που μελετώνται στην παρούσα εργασία. Στο χάρτη παρουσιάζονται τα επίκεντρα των σεισμών με άστρο και οι μηχανισμοί γένεσής τους ως ισεμβαδικές προβολές του κάτω ημισφαιρίου.

### 1.3 Συσχέτιση Τάσεων και Ρυθμού Σεισμικότητας

Την πιθανότητα ότι η μεταβολή των τάσεων Coulomb ενός σεισμού μπορεί να συσχετιστεί με τη διέγερση σεισμικότητας εξέτασαν οι King et al. (1994). Απέδειξαν μετά από μελέτη του σεισμού στο Landers (1992) ότι οι περισσότεροι μετασεισμοί συγκεντρώνονταν εκεί όπου η μεταβολή των τάσεων είναι μεγαλύτερη από 0.5 bar και ελάχιστοι εκεί όπου η μεταβολή των τάσεων μειώνεται κατά 0.5 bar. Οι ίδιοι διαπίστωσαν ότι οι σεισμοί στο Landers και στο Big Bear αύξησαν την τάση κατά μήκος του τεμάχους του San Bernardino, που βρίσκεται στο νότιο τμήμα του ρήγματος του San Andreas, από 2 στα 6 bars επιταχύνοντας τη γένεση του επόμενου σεισμού. Μετά από μελέτη της μεταβολής των τάσεων για τις σεισμικές ακολουθίες που προηγήθηκαν του Landers (1992), στο Homestead Valley (1979) και στο Joshua Tree (1992) οι King et al. (1994) διαπίστωσαν ότι η αύξηση της μεταβολής των τάσεων λιγότερο από 1 bar διεγείρει σεισμούς, ενώ η μείωση της τάσης κατά 1 bar επιβραδύνει τη γένεση σεισμών.

Σύμφωνα με τους King et al. (1994) που εξέτασαν τις μεταβολές των τάσεων των 4 σεισμών που προηγήθηκαν του Landers (Galway Lake  $M_L$ =5.2 1975, Homestead Valley  $M_L$ =5.2 1979, North Palm Springs  $M_L$ =6.0 1986 και Joshua Tree  $M_L$ =6.1 1992) παρατήρησαν αύξηση των τάσεων κατά 1 bar για τον επερχόμενο σεισμό του Landers. Οι ίδιοι μελετώντας τη μεταβολή των τάσεων Coulomb από το σεισμό του Landers παρατήρησαν ότι στο λοβό των θετικών τάσεων βρίσκεται το επίκεντρο του σεισμού που ακολούθησε στο Big Bear ( $M_L$ =6.5) και ότι στην περιοχή αυτή η τάση αυξήθηκε από 2 έως 3 bars. Κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι ο σεισμό του Landers αποτέλεσε τον κύριο παράγοντα στη διέγερση του σεισμού στο Big Bear.

Μελετώντας τις μεταβολές των τάσεων Coulomb για τους σεισμούς στο Joshua Tree, Landers και Big Bear οι King et al. (1994) παρατήρησαν ότι οι περισσότεροι μετασεισμοί ( $M_l>1$ ) είχαν τα επίκεντρά τους σε θέσεις όπου η τάση ήταν ίση ή μεγαλύτερη από 0.1 bar, ενώ λιγότεροι έγιναν σε περιοχές όπου η τάση μειώθηκε. Αφαιρώντας τους μετασεισμούς που έγιναν σε απόσταση 5 km από τα ρήγματα των παραπάνω σεισμών διαπίστωσαν ότι το 75% των μετασεισμών έγιναν σε περιοχές όπου η τάση αυξήθηκε περισσότερο από 0.3 bar, ενώ το 25% των μετασεισμών έγιναν σε περιοχές όπου η τάση αυξήθηκε περισσότερο από 0.3 bar. Στο ίδιο συμπέρασμα κατέληξαν και οι Hauksson et al. (1993) που μελέτησαν μετασεισμούς μεγέθους  $M_l\geq4$ .

Εξαίρεση στο γεγονός ότι η αύξηση των τάσεων θα συνοδεύεται και από διέγερση σεισμικότητας αποτελεί η περιοχή Indio στο Coechella Valley. Τη διαφοροποίηση αυτή την παραχώρησε ο Ponti (1992) στους King et al. (1994).

Σύμφωνα με τον Ponti (1992) η περιοχή Indio ενώ βρίσκεται εντός του θετικού λοβού των τάσεων του σεισμού του Landers παρουσιάζει λίγους σεισμούς.

Τη διαπίστωση των King et al. (1994), ότι οι μεταβολές των τάσεων σχετίζονται με τη μεταβολή στο ρυθμό σεισμικότητας επιβεβαίωσε ο Stein (1999). Η επιβεβαίωση έγινε μετά από μελέτη του σεισμού του Landers, στην Καλιφόρνια, το 1992 που είχε μέγεθος M<sub>w</sub>=7.3 και σχετίζονταν με το ρόλο που έχει η μεταφορά τάσεων στη γένεση σεισμών.

Μετά από αυτόν τον ισχυρό σεισμό ακολούθησαν και καταγράφηκαν πολλοί μετασεισμοί. Από τον υπολογισμό της μεταβολής των τάσεων ο Stein (1999) διαπίστωσε ότι μετά από αυτόν τον σεισμό σχηματίστηκε λοβός με αυξημένη τάση Coulomb, 40 km δυτικά του κύριου σεισμού, στην περιοχή Big Bear. Στην περιοχή αυτή έγινε σεισμός μεγέθους M<sub>w</sub>=6.5, μετά από 2.5 ώρες από το σεισμό του Landers. Από τη μελέτη των μετασεισμών ο Stein (1999) παρατήρησε ότι το 67% των μετασεισμών (M>1) που ακολούθησαν μετά τους σεισμούς Landers-Big Bear κατανεμήθηκαν σε ζώνες που είχαν μεταβολή τάσης μεγαλύτερη από 0.1 bar κοντά στην περιοχή της διάρρηξης (stress triggering zones). Οι συγκρίσεις της μεταβολής των τάσεων των μετασεισμών βασίζονται στην υπόθεση ότι μικροί σεισμοί έγιναν στα επίπεδα διάρρηξης ως αποτέλεσμα της μεταβολής των τάσεων τους και της μεταβολής της τάσης του κύριου σεισμού.

Άλλος τρόπος για την επιβεβαίωση της συσχέτισης της μεταβολής των τάσεων και του ρυθμού σεισμικότητας, σύμφωνα με τον Stein (1999), είναι ο υπολογισμός τους και η σύγκρισή τους. Για το σεισμό του Northridge, στην Καλιφόρνια, το 1994, που είχε μέγεθος M<sub>w</sub>=6.7 ο Stein (1999) διαπίστωσε ότι το 65% της παρατηρούμενης μεταβολής του ρυθμού σεισμικότητας σχετίζεται με τη μεταβολή της τάσης Coulomb που είχε υπολογιστεί. Στο σεισμό του Kobe, στην Ιαπωνία, το 1995, που είχε μέγεθος M<sub>w</sub>=6.9 παρατηρήθηκε ότι η αύξηση της τάσης κατά 1-bar αντιστοιχεί σε αύξηση του ρυθμού σεισμικότητας κατά 10 φορές περισσότερο και η μεταβολή της τάσης κατά 5-bar αντιστοιχεί σε 100 φορές μεγαλύτερη αύξηση του ρυθμού σεισμικότητας.

Στο σεισμό της περιοχής Loma Prieta, στην Καλιφόρνια, το 1989, που είχε μέγεθος  $M_w$ =6.9 εξετάστηκε η μεταβολή της τάσης και η σεισμικότητα, σε ρήγματα για απόσταση 100 km, από πολλούς ερευνητές (Reasenberg et al.,1992, Simpson et al., 1994, Parsons et al.,1999). Συγκεκριμένα, για τον ίδιο σεισμό αποδείχθηκε ότι η απόκριση της σεισμικότητας στη μεταβολή των τάσεων μειώνεται με την απόσταση από την περιοχή της διάρρηξης και δεν είναι εμφανής για αποστάσεις που ξεπερνούν τα 80 και 100 km, όπου η μεταβολή των τάσεων στις περιοχές αυτές είναι περίπου 0.1 bar (Reasenberg et al.,1992). Για το σεισμό Loma Prieta οι Parsons et al. (1999) διαπίστωσαν ότι η σεισμικότητα σχετίζεται με την υπολογιζόμενη διατμητική τάση στα μεγάλα ρήγματα και για τα μικρότερα ρήγματα, κυρίως τα

ανάστροφα και τα πλάγιας ολίσθησης, η σεισμικότητα συγκεντρώνεται εκεί όπου τα ρήγματα εμφανίζουν ελάττωση της κάθετης τάσης που κρατά τις δύο άκρες του ρήγματος σε επαφή.

Οι Hardebeck et al. (1998) υπολόγισαν τη μεταβολή των τάσεων και στα δύο επίπεδα του ρήγματος τόσο για το σεισμό στο Landers όσο και για το σεισμό στο Northridge και εξέτασαν το ενδεχόμενο να αυξάνονται οι μετασεισμοί που έγιναν κοντά στην περιοχή της διάρρηξης για τους σεισμούς αυτούς. Παρατηρήθηκε αύξηση του πλήθους των μετασεισμών, όταν η τάση αυξήθηκε περισσότερο από 0.1 bar, όπου κι έτσι παρέμεινε και 5 χρόνια μετά τους δύο σεισμούς. Στο ίδιο συμπέρασμα κατέληξαν και οι Seeber and Armbruster (2000), οι οποίοι διαπίστωσαν μία μεγαλύτερη αύξηση του πλήθους των μετασεισμών που μειώνονταν με την πάροδο του χρόνου. Για τη σεισμική ακολουθία του Superstition Hills, στην Καλιφόρνια, το 1987, που είχε μέγεθος M<sub>w</sub>=6.6 οι Anderson et al. (1999) παρατήρησαν μια συσχέτιση της τάσης, όταν αυτή αυξάνεται περισσότερο από 0.1 bar, και του αριθμού των μετασεισμών μετά από 1.4 έως 2.8 χρόνια μετά τον κύριο σεισμό.

Οι Toda et al. (2005) ασχολήθηκαν με την πρόβλεψη της εξέλιξης της σεισμικότητας στη νότια Καλιφόρνια, μετά το σεισμό στο Landers (1992), βασιζόμενοι στη μεταφορά των τάσεων του σεισμού. Διαπίστωσαν ότι μικρές μεταβολές των τάσεων προκαλούν μεγάλες μεταβολές στο ρυθμό σεισμικότητας μιας περιοχής με υψηλή σεισμικότητα και ότι η μείωση του ρυθμού σεισμικότητας στις σκιερές ζώνες γίνεται εμφανής σε περιοχές που αποτελούσαν ζώνες υψηλής σεισμικότητας παλαιότερα. Οι Marsan (2003) και Felzer and Brodsky (2005) παρατήρησαν ότι οι μετασεισμοί δεν κατανέμονται πάντα στους θετικούς λοβούς των τάσεων και ότι η μείωση του ρυθμού σεισμικότητας σκιερές ζώνες. Οι Toda et al. (2005) υποστήριξαν ότι μικρές αυξήσεις στις μεταβολές των τάσεων ενισχύονται από υψηλό ρυθμό σεισμικότητας, δίνοντας ως παραδείγματα τους σεισμούς που έγιναν στις περιοχές Big Bear, Barstow και Hector Mine, μετά το σεισμό του Landers, στις οποίες είχαν παρατηρηθεί μικρές αυξήσεις των τάσεων.

# 1.4 Προηγούμενη Έρευνα Σεισμικών Ακολουθιών στον Ελληνικό Χώρο

Ο Γαλανόπουλος (1955) ήταν ο πρώτος που μελέτησε τις σεισμικές ακολουθίες και συγκεκριμένα τον ελαστικό τρόπο ανακούφισης του μετασεισμικού χώρου του σεισμού της Κεφαλονιάς το 1953. Όμως, οι Papazachos et al. (1967) ήταν αυτοί που μελέτησαν πλήρως τις ιδιότητες των σεισμικών ακολουθιών στον ελληνικό χώρο, εξετάζοντας τη χρονική και κατά μέγεθος κατανομή 40 σεισμικών

ακολουθιών και τα χαρακτηριστικά παραμόρφωσης του σεισμογόνου στρώματος τους για το χρονικό διάστημα από το 1926 έως το 1964.

Ο Δρακόπουλος (1968) μελέτησε τις ιδιότητες των σεισμικών ακολουθιών στον ελληνικό χώρο, των οποίων οι κύριοι σεισμοί είχαν μέγεθος Μ≥4.1 από το 1912 έως το 1967. Εξέτασε την κατανομή των σεισμών αυτών στο χρόνο και κατά μέγεθος και για ορισμένους και στο χώρο, διαπιστώνοντας ότι η συνολική διάρκεια της μετασεισμικής ακολουθίας για μεγέθη σεισμών 4.1≤M<sub>0</sub>≤5.8 είναι 12 ημέρες, ενώ για μεγέθη σεισμού 5.9≤ M<sub>0</sub>≤7.5 η συνολική διάρκεια είναι 89 ημέρες.

Τη σεισμική ακολουθία της 5<sup>ης</sup> Φεβρουαρίου του 1966 που είχε μέγεθος M=6.2 και έγινε στην περιοχή της τεχνητής λίμνης των Κρεμαστών μελέτησαν οι Comninakis et al. (1968) και ο Papazachos (1973, 1974b). Σύμφωνα με αυτούς ο σεισμός οφειλόταν στην φόρτωση του πυθμένα της λίμνης. Σεισμικές ακολουθίες στην περιοχή του Αιγαίου μελέτησαν οι Ranalli (1969) και Prochazkova (1970), χρησιμοποιώντας διαφορετικό τρόπο ομαδοποίησης δεδομένων για στη στατιστική τους ανάλυση. Η σεισμική ακολουθία του σεισμού της Επιδαύρου που έγινε στις 4 Ιουλίου 1968 και είχε μέγεθος M=5.5, μελετήθηκε από τους Drakopoulos and Srivastava (1970). Ο Papazachos (1971) κάνοντας χρήση δεδομένων από σεισμικές ακολουθίες που έγιναν στο χρονικό διάστημα από το 1911 έως το 1969 πρότεινε σχέση μεταξύ του αριθμού των μετασεισμών που είχαν μέγεθος M≥4.0 και του μεγέθους του κύριου σεισμού (logN=-3.7+0.74 M₀).

Οι Drakopoulos and Economides (1972) μελέτησαν τη μετασεισμική ακολουθία που ακολούθησε μετά το σεισμό του βορείου Αιγαίου στις 19 Φεβρουαρίου 1968 που είχε μέγεθος M=7.1 και κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι ο ρυθμός γένεσης των μετασεισμών ελαττώνεται ομοιόμορφα μέχρι μία χρονική στιγμή (t<sub>0</sub>) που αντιστοιχεί σε διάστημα μεγαλύτερο του ενός μήνα. Τη σμηνοακολουθία της Μήλου που έγινε το χρονικό διάστημα 16 – 21 Αυγούστου του 1971 μελέτησαν οι Drakopoulos and Delibasis (1973) που τη συσχέτισαν με τον ηφαιστειακό χαρακτήρα του νησιού. Ο Komninakis (1978) μελέτησε τη χωροχρονική και κατά μέγεθος κατανομή της μετασεισμικής ακολουθίας του σεισμού της Βοιωτίας (M=5.0) που έγινε στις 14 Νοεμβρίου 1974, διαπιστώνοντας ότι ο σεισμός ήταν αποτέλεσμα φόρτωσης των λιμνών της Υλικής και Παραλίμνης.

Πολλοί ήταν οι ερευνητές (Carver and Henrisey, 1978; Kulhanec and Meyer, 1978, 1979; Fintel, 1978; Maley et al., 1980; Carver and Bollinger, 1981; Soufleris and Stewart, 1981; Papazachos et al., 1982; Soufleris et al., 1982) που μελέτησαν τη σεισμική ακολουθία της Θεσσαλονίκης, στις 20 Ιουνίου 1978 που είχε μέγεθος M=6.5. Ο σεισμός της Θεσσαλονίκης ήταν ο πρώτος σεισμός της σύγχρονης ιστορίας της Ελλάδας που έγινε κοντά σε αστικό κέντρο και προκάλεσε μεγάλες ζημιές στα κτίρια της πόλης. Σύμφωνα με τους Papazachos et al. (1982, 1983a) που μελέτησαν τη χωροχρονική και κατά μέγεθος κατανομή της σεισμικής ακολουθίας διαπίστωσαν τη δυνατότητα πρόγνωσης του κύριου σεισμού. Κάποιες από τις ιδιότητες της ακολουθίας της Θεσσαλονίκης (1978) συγκρίθηκαν με αυτές της ακολουθίας του σεισμού στον κόλπο του Σάρου που έγινε στις 27 Μαρτίου 1975 και είχε μέγεθος M=6.6, από τους Comninakis and Papazachos (1979).

Από τη μελέτη της χρονικής μεταβολής της διαφοράς μεγεθών μεταξύ των κύριων σεισμών που έγιναν κατά μήκος του ελληνικού τόξου και των μεγαλύτερων μετασεισμών τους, διαπιστώθηκε από τους Papazachos (1981) και Papazachos and Comninakis (1982) μια περιοδική μεταβολή με μέση περίοδο περίπου 29 χρόνια, ενώ οι ελάχιστες τιμές της είχαν σχέση με τη γένεση ισχυρών σεισμών στην περιοχή. Οι Jackson et al. (1982) μελέτησαν τη μετασεισμική ακολουθία του σεισμού στον κόλπο των Αλκυονίδων που έγινε στις 24 Φεβρουαρίου 1981 και είχε μέγεθος M=6.7. Η ίδια μετασεισμική ακολουθία εξετάστηκε και από τους Papazachos et al. (1984a), οι οποίοι παρατήρησαν ότι η ακολουθία χωρίζεται σε δύο υπό-ακολουθίες. Η πρώτη ήταν αποτέλεσμα του κύριου σεισμού και συγκεντρωνόταν σε όλη την επικεντρική περιοχή, ενώ η δεύτερη οφειλόταν σε έναν ισχυρό μετασεισμό (M<sub>s</sub>=6.3) που ακολούθησε 8 ημέρες μετά τον κύριο, στο ανατολικό τμήμα της περιοχής.

Ο σεισμός που έγινε στο νησί της Κεφαλονιάς στις 17 Ιανουαρίου 1983 εξετάστηκε από τους Scordilis et al. (1985), οι οποίοι μετά από μελέτη της χωρικής κατανομής των εστιών των μετασεισμών διαπίστωσαν την πρώτη οριζόντιας μετατόπισης κίνηση στο Ιόνιο Πέλαγος. Αυτό το ρήγμα οριζόντιας μετατόπισης επιβεβαιώθηκε και από άλλους ερευνητές αργότερα (Anderson and Jackson, 1987; Papazachos et al., 1991; Papadimitriou, 1988; Kiratzi and Langston, 1991; Papadimitriou, 1993; Hatzfeld et al., 1995).

Η χωρική κατανομή των μετασεισμών που ακολούθησαν μετά τον κύριο σεισμό της Δράμας που έγινε στις 9 Νοεμβρίου 1985, μελετήθηκε από τους Karakostas et al. (1989), οι οποίοι κατέληξαν ότι η μετασεισμική ζώνη έχει σχέση με τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά της περιοχής. Από τη μελέτη της κατανομής των προσεισμών και των μετασεισμών του σεισμού που έγινε στις 13 Μαΐου 1995 στην περιοχή Κοζάνης – Γρεβενών και είχε μέγεθος M=6.6, οι Papazachos et al. (1995, 1998a) και Drakatos et al. (1998) μπόρεσαν να προσδιορίσουν με λεπτομέρεια τη δομή της περιοχής. Για την ίδια σεισμική ακολουθία καθορίστηκε το ρήγμα στην περιοχή (Papazachos et al., 1996,1998a; Hatzfeld et al., 1995, 1997, 1998; Papanastasiou et al., 1998) και αποδόθηκε η γένεση του κύριου σεισμού στην τεχνητή λίμνη Πολυφύτου (Papazachos et al., 1996; Drakatos et al., 1998).

Οι Papadimitriou et al. (2001) διερεύνησαν την πιθανότητα ένας κύριος ισχυρός σεισμός που γίνεται στον ελληνικό χώρο να επιταχύνει τη γένεση ισχυρών σεισμών που θα ακολουθήσουν αργότερα. Διαπίστωσαν ότι μετά από έναν ισχυρό σεισμό ακολουθούν σεισμοί στις περιοχές όπου παρατηρήθηκαν θετικές μεταβολές των τάσεων Coulomb.

# Κεφάλαιο 2°

# Μεθοδολογία & Δεδομένα

### 2.1 Εισαγωγή

Στην παρούσα εργασία υιοθετήθηκε η μεθοδολογία που προτάθηκε αρχικά από τους Deng and Sykes (1997), οι οποίοι μπόρεσαν να εκτιμήσουν τη μεταβολή του πεδίου των τάσεων που προκάλεσε η γένεση ισχυρών σεισμών (Μ≥6.0), στην ευρύτερη περιοχή του ρήγματος του Αγίου Ανδρέα στη Νότια Καλιφόρνια. Κατά την εφαρμογή αυτής της μεθόδου επιδιώκεται η συσχέτιση μεταξύ των τάσεων Coulomb και της γένεσης ισχυρών σεισμών. Αυτές οι μεταβολές είτε επιταχύνουν τη γένεση επερχόμενων σεισμών, είτε την επιβραδύνουν. Οι παράγοντες από τους οποίους εξαρτάται η μεταβολή του πεδίου των τάσεων είναι η συνεχής φόρτιση στις σημαντικότερες ζώνες διάρρηξης μίας περιοχής και η σεισμική ολίσθηση κατά τη γένεση ισχυρών σεισμών. Χρησιμοποιούνται μόνο οι μεταβολές των τάσεων και όχι οι απόλυτες τιμές τους επειδή οι απόλυτες τιμές της τάσης δεν είναι γνωστές, αλλά είναι και ιδιαίτερα δύσκολο να υπολογιστούν, ενώ αντίθετα οι μεταβολές τους μπορούν να υπολογιστούν πιο εύκολα αν είναι γνωστή η γεωμετρία και η κινηματική των ρηγμάτων.

Τα ρήγματα στη φύση δεν εμφανίζονται συνεχή σ' όλο το μήκος τους, αλλά τμηματοποιημένα συνήθως και σε άμεση γειτνίαση με άλλες ενεργές δομές, με αποτέλεσμα την ισχυρή ή ασθενή, άμεση ή έμμεση αλληλεπίδραση μεταξύ τους. Επομένως, για τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών της σεισμικότητας μίας πολύπλοκης τεκτονικά περιοχής, καθώς και για την εκτίμηση της σεισμικής επικινδυνότητας, η μεταβολή των τάσεων καθίσταται ιδιαίτερα σημαντική. Ακόμη μπορεί να μελετηθεί η επανενεργοποίηση μίας περιοχής, αφού θεωρείται ότι κατά τη γένεση ενός μεγάλου σεισμού η περιοχή αποφορτίζεται ολοκληρωτικά, ενώ μετά το σεισμό συσσωρεύεται εκ νέου ανηγμένη παραμόρφωση, εξαρτώμενη από τον απαιτούμενο χρόνο ανάκτησης των τάσεων.

### 2.2 Μεταβολή των Τάσεων Coulomb

Η μεθοδολογία που εφαρμόζεται για τον υπολογισμό των μεταβολών των τάσεων Coulomb, βασίζεται στη μεταβολή του τανυστή της τάσης στο χώρο και το χρόνο, ο οποίος διαδίδεται με ελαστικό τρόπο στα σεισμογόνα στρώματα του φλοιού. Οι μεταβολές της στατικής τάσης υπολογίζονται στο θραυσιγενές στρώμα του φλοιού, το οποίο προσομοιάζεται με ομογενή ημιχώρο, ο οποίος περιορίζεται από την υπερκείμενη ατμόσφαιρα και από το υποκείμενο όλκιμο στρώμα της Γης. Δύο είναι οι σημαντικοί παράγοντες που σχετίζονται με τις αθροιστικές μεταβολές της τάσης και αφορούν την παραγόμενη τεκτονική φόρτιση από τις συνεχείς κινήσεις των λιθοσφαιρικών πλακών και τις σεισμικές ολισθήσεις που πραγματοποιούνται πάνω στην επιφάνεια των ρηγμάτων κατά τη γένεση ισχυρών σεισμών. Η γένεση των σεισμών προκαλείται λόγω της τάσης που συσσωρεύεται στις ενεργές ρηξιγενείς επιφάνειες. Στο μεσοδιάστημα μεταξύ δύο ισχυρών σεισμών πραγματοποιείται συσσώρευση της τάσης στις σημαντικές τεκτονικές δομές μιας περιοχής.

### 2.3 Το Κριτήριο Θραύσης Coulomb

Οι τεκτονικοί σεισμοί γίνονται στις επιφάνειες των ενεργών σεισμικών ρηγμάτων όταν οι τάσεις που ασκούνται από τα περιβάλλοντα πετρώματα του φλοιού της Γης σε ορισμένο σημείο, υπερβούν την αντοχή του πετρώματος που έχει ως συνέπεια τη διάρρηξη του μέσου και την έκλυση σεισμικής ενέργειας λόγω της συσσωρευμένης παραμόρφωσης, με τη μορφή σεισμικών κυμάτων. Για την περιγραφή της αντοχής των υλικών στη διάρρηξη και τις συνθήκες κάτω από τις οποίες ένα συνεχές μέσο υφίσταται διάρρηξη προτάθηκε το κριτήριο θραύσης Coulomb, που περιγράφεται στη συνέχεια. Σύμφωνα με τον Scholtz (2002), θα πραγματοποιηθεί εφελκυστική διάρρηξη, σε ένα επίπεδο κάθετο στον άξονα ελάχιστης τάσης, όταν αυτή η τάση, σ<sub>3</sub>, είναι εφελκυστική και υπερβαίνει κάποια ελάχιστη τιμή Τ<sub>o</sub>, την αντοχή του μέσου στον εφελκυσμό, δηλαδή ικανοποιεί τη σχέση:

$$\sigma_3 = -T_0$$
 (2.1)

Όταν η τάση που επιδρά στο μέσο είναι συμπιεστική, η διάρρηξη διάτμησης που θα προκληθεί περιγράφεται με το Κριτήριο Θραύσης Coulomb (Scholtz, 2002) για μη συνεκτικά υλικά, το οποίο εκφράζεται από τη σχέση:

$$\tau = \mu \sigma_n$$
 (2.2)

όπου τ είναι η διατμητική τάση και σ<sub>n</sub> η κάθετη τάση. Η παράμετρος μ είναι ο συντελεστής εσωτερικής τριβής και μπορεί να γραφεί ως μ = tanψ, όπου ψ είναι η γωνία εσωτερικής τριβής, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.1.



**Σχήμα 2.1:** Διαξονικό σύστημα των τάσεων ( $\sigma_1$ , $\sigma_3$ ) που ασκούνται σε επίπεδο διάρρηξης. Με τβ συμβολίζεται η διατμητική τάση και με σβ η κάθετη τάση. Η γωνία ψ είναι η γωνία εσωτερικής τριβής, β και θ οι οξείες γωνίες των επιπέδων στα οποία έγινε η διάρρηξη (King et al., 1994).

Όταν τα πετρώματα εμφανίζονται συνεκτικά τότε στην προηγούμενη σχέση προστίθεται ο παράγοντας της συνοχής, τ<sub>0</sub>, οπότε η νέα σχέση που προκύπτει είναι της μορφής:

$$\tau = \tau_0 + \mu \sigma_n \quad (2.3)$$

Οι Scholz (2002) και Harris (1998) τροποποίησαν το κριτήριο Coulomb, έτσι ώστε να προσεγγίζει ποσοτικά τη θραύση, οπότε προκύπτει η συνάρτηση της

κατάρρευσης του Coulomb. Στην περίπτωση ενός πορώδους μέσου η σχέση 2.3 τροποποιείται καθώς η πίεση των ρευστών έχει σημαντικό ρόλο στη συμπεριφορά του πετρώματος και παίρνει τη μορφή:

$$\Delta CFF = \Delta \tau + \mu \left( \Delta \sigma + \Delta P \right) \quad (2.8)$$

Όπου CFF Συνάρτηση Κατάρρευσης Coulomb, (Coulomb Failure Fracture). Στη σχέση 2.8 με Δτ και Δσ συμβολίζονται οι μεταβολές στη διατμητική και στην κάθετη τάση, αντίστοιχα. Οι μεταβολές της διατμητικής τάσης λαμβάνονται θετικές όταν έχουν τη διεύθυνση της ολίσθησης του ρήγματος, ενώ οι μεταβολές των κάθετων τάσεων είναι θετικές για αυξανόμενες εφελκυστικές τάσεις κάθετα στο ρήγμα. Έχει αποδειχτεί ότι όταν η αντοχή του πετρώματος μεταβάλλεται γρηγορότερα από την πίεση των ρευστών τότε η πίεση, p, σχετίζεται με την περιβάλλουσα τάση μέσω του συντελεστή Skempton, B. Η μεταβολή της πίεσης των ρευστών των πόρων του πετρώματος στη ζώνη διάρρηξης που προκύπτει από τη μεταβολή της τάσης, για ομογενές και ισότροπο ποροελαστικό μέσο δίνεται από τη σχέση (Rice and Cleary, 1976):

$$\Delta P = -B \frac{\Delta \sigma_{kk}}{3} \qquad (2.9)$$

Όπου B είναι ο συντελεστής του Skempton, ενώ σ<sub>kk</sub> είναι το άθροισμα των διαγωνίων στοιχείων του τανυστή της τάσης. Η τιμή του B κυμαίνεται από 0 μέχρι 1 (0  $\leq$  B  $\leq$  1) και ενσωματώνει το αποτέλεσμα των ρευστών των πόρων. Από πειράματα έχει προσδιοριστεί μία μικρή κύμανση της τιμής του από 0.5 σε 0.9 όσον αναφορά πετρώματα όπως ο γρανίτης, ο ψαμμίτης και το μάρμαρο. Όταν οι πόροι ενός πορώδους πετρώματος πληρώνονται με αέρα η τιμή του B είναι σχεδόν μηδέν. Στην περίπτωση παρουσίας ρευστών εισάγεται ο φαινόμενος συντελεστής τριβής μ', και η σχέση 2.8 λαμβάνει την παρακάτω μορφή:

$$\Delta CFF = \Delta \tau + \mu' \Delta \sigma \quad (2.10)$$

Αύξηση της κάθετης και διατμητικής τάσης στη σχέση 2.10, σημαίνει θετικές τιμές των μεταβολών της στατικής τάσης (ΔCFF > 0). Έχει αποδειχθεί από μελέτες (King et al. 1994, Stein,1999) ότι αύξηση της μεταβολής ακόμη κατά 0.1 bar, μπορεί να διεγείρει τη γένεση ενός επερχόμενου σεισμού και να επιταχύνει τη διάρρηξη του ρήγματος. Η κατανομή των μετασεισμών, αλλά και μεταγενέστερων ισχυρών σεισμών φαίνεται ότι κατανέμεται στις ζώνες με θετική μεταβολή της τάσης Coulomb. Αντίθετα, οι αρνητικές τιμές μεταβολής της τάσης Coulomb (ΔCFF < 0), παρατείνουν το χρόνο μέχρι τη γένεση του σεισμού, καθιστώντας την περιοχή ως σκιερή ζώνη, όπου η συγκεντρωμένη παραμόρφωση έχει εκτονωθεί από τη γένεση του ισχυρού σεισμού και η διάρκεια της οποίας εξαρτάται από το χρόνο ανάκτησης της απαιτούμενης τάσης λόγω της συνεχούς τεκτονικής φόρτισης ώστε να φτάσει τις οριακές τιμές και να προκαλέσει σεισμό. Μόνο οι θετικές μεταβολές της διατμητικής και της κύριας τάσης αυξάνουν την πιθανότητα γένεσης ενός σεισμού. Όμως, οι θετικές τιμές των μεταβολών των τάσεων ορίζουν τις θέσεις στις οποίες το επίπεδο των τάσεων είναι ικανό να προκαλέσει τη γένεση σεισμού μελλοντικά και όχι τις θέσεις στις οποίες θα γίνουν σεισμοί (Harris and Simpson, 1998).

### 2.4 Συντελεστής τριβής

Σύμφωνα με τους Deng and Sykes (1997) η τιμή του συντελεστή τριβής, μ, μεταβάλλεται χρονικά μετά από έναν ισχυρό σεισμό όταν υπάρχουν υγρά στους πόρους του μέσου. Επίσης, η τιμή του αυξάνεται μετά τη γένεση ενός σεισμού, ενώ με την πάροδο του χρόνου η τιμή του, σταδιακά, μειώνεται, γιατί η χρονική περίοδος κατά την οποία η πίεση των υγρών επηρεάζει την αντοχή ενός ρήγματος μετά από ένα σεισμό εξαρτάται από το ρυθμό εξισορρόπησης των υγρών που διαχέονται από άλλα σημεία του ρήγματος ή από γειτονικές περιοχές.

Ο φαινόμενος συντελεστής τριβής, μ', είναι μια σταθερά του υλικού της ζώνης διάρρηξης που είναι ανεξάρτητη από το τεκτονικό περιβάλλον, τις μεταβολές των τάσεων και του χρόνου και συνδυάζει το αποτέλεσμα των ρευστών των πόρων αλλά και της τριβής σε μία μεταβλητή (Byerlee, 1967; Beeler et al., 2000). Η σχέση του με το συντελεστή τριβής δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$\mu' = \mu(1 - B)$$
 (2.11)

Όπου Β είναι ο συντελεστής του Skempton.

Οι τιμές του μ' κυμαίνονται από 0 έως 1.0 και θεωρείται ιδιότητα του υλικού. Στους υπολογισμούς των τάσεων Coulomb η σημασία του μ' προσεγγίζεται με δύο διαφορετικές μεθόδους. Με τη βοήθεια του ισοτροπικού ποροελαστικού μοντέλου το μ' παρουσιάζει διακυμάνσεις εξαρτώμενες από τη μέση τάση που εφαρμόζεται και με το μοντέλο της σταθερής τιμής φαινόμενου συντελεστή τριβής, όπου το μ' συμπεριφέρεται ως μία σταθερά που χαρακτηρίζει το πέτρωμα (Beeler et al., 2000).

Από μελέτες που έχουν γίνει, προτάθηκαν διάφορες τιμές για το φαινόμενο συντελεστή τριβής, μ'. Ο Stein (1999) πρότεινε ότι ο φαινόμενος συντελεστής είναι μικρός για μεγάλα ρήγματα, ενώ για μικρά ρήγματα είναι μεγάλος. Σε ξηρά πετρώματα η τιμή του μ' προσεγγίζει τη τιμή 0.75, ενώ όταν η περιβάλλουσα πίεση είναι αξιόλογη τότε το μ' τείνει στη τιμή, μ'=0. Σύμφωνα με τους Parsons et al. (1999) για τα μεγάλα ρήγματα το μ' < 0.2, ενώ για τα μικρά είναι υψηλός μ' > 0.8. Αυτό επιβεβαιώνεται με το ότι σχηματίζεται μεγάλο πάχος κατακλασιτών από μεγάλα ρήγματα που ελαττώνουν την τριβή ολίσθησης και εγκλωβίζουν τα ρευστά (Stein, 1999).

Σύμφωνα με τους King et al. (1994) όταν οι μεταβολές του μ' είναι σημαντικές, δεν διαφοροποιείται η κατανομή των απόλυτων τιμών της τάσης στη γειτονική περιοχή ενός ρήγματος και κατά συνέπεια ούτε οι διαφορές της τάσης και επομένως η τιμή του μ' λήφθηκε ίση με 0.4. Οι Reasenberg and Simpson (1992) για την περιγραφή του σεισμού της Loma Prieta χρησιμοποίησαν την τιμή μ' = 0.2. Οι Deng and Sykes (1997) χρησιμοποίησαν διάφορες τιμές που κυμαίνονταν μεταξύ 0 και 0.6 για διαφορετικές χρονικές στιγμές και διαφορετικά τεκτονικά περιβάλλοντα. Μελετώντας τη σεισμική ακολουθία της Σκύρου (26/7/2001, M<sub>w</sub>=6.4), οι Karakostas et al. (2003) υπολόγισαν τις τιμές της ΔCFF για διάφορες τιμές του φαινόμενου συντελεστή τριβής (0.2 ≤ μ' ≤ 0.9) και απέδειξαν ότι το εκτιμώμενο πεδίο τάσεων δεν επηρεάζεται σημαντικά. Οι Parsons et al. (2005) δοκιμάζοντας διάφορες τιμές του μ' στους υπολογισμούς τους κατέληξαν στο ίδιο συμπέρασμα, ότι δηλαδή τα αποτελέσματα επηρεάζονται από τις μεταβολές των παραμέτρων, αλλά όχι σε μεγάλο βαθμό.

#### 2.5 Υπολογισμός των παραμέτρων του μοντέλου

Με σκοπό να υπολογιστούν οι παράμετροι του μοντέλου διάρρηξης, οι επιφάνειες διάρρηξης και τα ρήγματα προσομοιάζονται με ορθογώνια παραλληλόγραμμα πεπερασμένων διαστάσεων, με τη μεγαλύτερη διάστασή τους να εκτείνεται παράλληλα προς την επιφάνεια της Γης. Απαραίτητος είναι ο καθορισμός των γεωμετρικών παραμέτρων του ρήγματος που περιλαμβάνει το μήκος, L, και το πλάτος, W, της ζώνης διάρρηξης, το μηχανισμό γένεσης (παράταξη (ζ), γωνία κλίσης (δ) και γωνία ολίσθησης (λ) και την ολίσθηση (υ) που πραγματοποιήθηκε κατά τη διάρκεια της σεισμικής κίνησης (*σχήμα 2.2*).



**Σχήμα 2.2:** Προσομοίωση του ρήγματος με ορθογώνιο παραλληλόγραμμο και καθορισμός των γεωμετρικών παραμέτρων.

Για τον υπολογισμό των γεωμετρικών παραμέτρων χρησιμοποιούνται γεωλογικά δεδομένα υπαίθρου, η μορφολογία, η χωρική κατανομή της μετασεισμικής ακολουθίας και μακροσεισμικά δεδομένα. Όταν όμως δεν υπάρχουν αυτές οι πληροφορίες χρησιμοποιούνται εμπειρικές σχέσεις. Στην παρούσα εργασία έχουν υιοθετηθεί οι εμπειρικές σχέσεις των Wells and Coppersmith (1994) και αυτές των Papazachos et al. (2004), οι οποίοι συνέλεξαν δεδομένα σεισμών σε παγκόσμια κλίμακα διαφορετικής σεισμοτεκτονικής προέλευσης. Έτσι, με βάση τη χωρική κατανομή των επικέντρων των μετασεισμών κατέληξαν σε εμπειρικές σχέσεις που συνδέουν το μέγεθος της σεισμικής ροπής ενός σεισμού, Μ<sub>w</sub>, με το μήκος του, L, και με τη μετάθεση, u, για ρήγματα οριζόντιας μετατόπισης, κανονικά και ανάστροφα. Οι παράμετροι που επιλέχθηκαν τελικά, προέρχονται από την εξέταση των μετασεισμικών ακολουθιών και επαληθεύονται από δημοσιευμένες μελέτες και από τα αποτελέσματα των εμπειρικών σχέσεων. Όπου δεν υπήρχαν στοιχεία από προηγούμενες μελέτες χρησιμοποιήθηκαν τα αποτελέσματα των σχέσεων των Papazachos et al. (2004).

#### 2.5.1 Μήκος διάρρηξης, L

Τα μήκη των τεμαχών των ρηγμάτων αποτελούν την παράλληλη διάσταση τους προς την επιφάνεια της Γης. Για τον υπολογισμό του μήκους οι Wells and Coppersmith (1994) πρότειναν τις παρακάτω σχέσεις για τις τρεις κατηγορίες ρηγμάτων:

| • | Για ρήγματα οριζόντιας μετατόπισης: | logL = 0.62M - 2.57 | (2.12) |
|---|-------------------------------------|---------------------|--------|
| • | Για κανονικά ρήγματα:               | logL = 0.50M - 1.88 | (2.13) |
| • | Για ανάστροφα ρήγματα:              | logL = 0.58M - 2.42 | (2.14) |

Οι σχέσεις που προτάθηκαν από τους Papazachos et al. (2004) για τις τρεις ρηγμάτων:

| • | Για ρήγματα μετατόπισης: | logL = 0.59M - 2.30 | (2.15) |
|---|--------------------------|---------------------|--------|
| • | Για ρήγματα κλίσης:      | logL = 0.50M - 1.86 | (2.16) |

### 2.5.2 Πλάτος διάρρηξης, W

Το πλάτος του ρήγματος αποτελεί την διάσταση που είναι παράλληλη προς τη διεύθυνση κλίσης του ρήγματος. Όπως είναι γνωστό η γένεση των σεισμών γίνεται στο σεισμογόνο στρώμα του φλοιού της Γης, που παρουσιάζει ελαστικές ιδιότητες. Ανάλογα με το μέγεθός τους οι σεισμοί διακρίνονται σε μεγάλους και μικρούς. Στους μεγάλους σεισμούς η επιφάνεια διάρρηξης εκτείνεται σε όλο το πάχος του θραυστικού τμήματος του φλοιού της Γης, ενώ οι μικροί σεισμοί περιορίζονται στο στρώμα της σχιζόσφαιρας.



**Σχήμα 2.3:** Σχηματική παρουσίαση του μεγάλου και μικρού σεισμού, του μήκους (L) και πάχους (W) διάρρηξης. (Scholtz 2002)

Στην περιοχή του Ελληνικού Τόξου που υπάρχουν ανάστροφα ρήγματα, η γωνία κλίσης τους είναι μικρή με αποτέλεσμα το πλάτος του ρήγματος να προκύπτει μεγαλύτερο από το μήκος του. Για το λόγο αυτό, στα ρήγματα αυτά τέθηκε ο περιορισμός ότι το μήκος του ρήγματος θα πρέπει να είναι μεγαλύτερο ή ίσο με το πλάτος, L≥W.

Στις υπόλοιπες περιοχές το πλάτος του ρήγματος υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο:

$$W = \frac{DL - DU}{\eta \mu (\delta)} \quad (2.17)$$

Όπου DL και DU είναι το κατώτερο και το ανώτερο όριο του σεισμογόνου στρώματος αντίστοιχα και δ η γωνία κλίσης του ρήγματος.

### 2.5.3 Υπολογισμός της σεισμικής ολίσθησης, u

Η κατανομή της σεισμικής ολίσθησης στην επιφάνεια της διάρρηξης δεν είναι ομοιόμορφη, όμως οι υπολογισμοί των μεταβολών των στατικών τάσεων στο μακρινό πεδίο δεν επηρεάζουν το τελικό αποτέλεσμα (King and Cocco, 2001). Έτσι για τον υπολογισμό των μεταβολών της τάσης Coulomb μπορεί να χρησιμοποιηθεί και η μέση τιμή της σεισμικής ολίσθησης. Όταν η τιμή της σεισμικής ροπής είναι γνωστή τότε μπορεί να υπολογιστεί η τιμή της σεισμικής ολίσθησης από τη σχέση:

$$M_0 = \mu \cdot u \cdot L \cdot W \qquad (2.18)$$

Όπου μ είναι ο συντελεστής δυσκαμψίας του υλικού στην εστία του σεισμού και ισούται με μ =  $3.3 \cdot 10^{11}$  dyn/cm<sup>2</sup>, L το μήκος του ρήγματος και W το πλάτος της

διάρρηξης. Στις ζώνες κατάδυσης όμως, η τιμή του συντελεστή δυσκαμψίας αλλάζει και γίνεται είναι ίση με  $\mu$  = 5.5  $\cdot$  10<sup>11</sup> dyn/cm<sup>2</sup>.

# 2.6 Δεδομένα Παρατήρησης

Στην παρούσα εργασία εξετάζεται η μεταβολή των τάσεων η οποία προκλήθηκε μετά από κάθε ισχυρό σεισμό με μέγεθος Μ≥6.0 στην Ελλάδα από το 2001 μέχρι και τον Απρίλιο του 2015 (*Πίνακας 2.1*).

Τα μεγέθη των σεισμών ελήφθησαν από δημοσιευμένες εργασίες και από τον κατάλογο σεισμών του Τομέα Γεωφυσικής του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης (http://geophysics.geo.auth.gr). Οι μηχανισμοί γένεσης των σεισμών έχουν ληφθεί από δημοσιευμένες εργασίες με αντιστροφή των κυμάτων χώρου και από τον κατάλογο του GCMT (http://www.globalcmt.org/CMT).

| Ημερομηνία | Χρόνος<br>Γένεσης | $\varphi^{o}$   | $\lambda^{o}$   | <b>Βάθος</b><br>(Km)                     | $M_w$                    | L<br>(km)      | ζ                        | $\theta^{o}$         | $\lambda^o$         | M <sub>0</sub><br>(dyn∙cm) | Βιβλιογραφία  |
|------------|-------------------|-----------------|-----------------|--|--------------------------|----------------|--------------------------|----------------------|---------------------|----------------------------|---|
| 26/7/2001  | 0:21:38           | 39.07           | 24.24           | 14                                       | 6.4                      | 23             | 148                      | 76                   | -1                  | $5.61 \cdot 10^{25}$       | Karakostas et al. 2003  |
| 14/8/2003  | 5:14:55           | 38.77           | 20.6            | 11<br>13                                 | 6.2                      | 16<br>23       | 18<br>16                 | 60<br>72             | -175<br>178         | $2.9 \cdot 10^{25}$        | Karakostas et al. 2004<br>Benetatos et al. 2005   |
| 14/2/2008  | 10:09:25          | 36.575          | 21.868          | 30                                       | 6.7                      | 30             | 288                      | 10                   | 73                  | $2.27 \cdot 10^{26}$       | Roumetioti et al. 2009  |
| 14/2/2008  | 12:08:56          | 36.438          | 22.026          | 33                                       | 6.1                      | 30             | 312                      | 18                   | 93                  | $8.1 \cdot 10^{25}$        | Roumetioti et al. 2009  |
| 20/2/2008  | 18:27:08          | 36.363          | 21.907          | 10                                       | 6.0                      | 30             | 253                      | 65                   | -2                  | $2.19 \cdot 10^{25}$       | Roumetioti et al. 2009  |
| 8/6/2008   | 12:25:28          | 37.952<br>37.98 | 21.537<br>21.51 | 16<br>18<br>20<br>24<br>25<br>18<br>21.4 | 6.4<br>6.5<br>6.4        | 22<br>20<br>25 | 209                      | 83                   | 164                 | 4.56 · 10 <sup>25</sup>    | Karakostas et al. (submitted)<br>Konstantinou et al. 2009<br>Papadopoulos et al. 2010<br>Margaris et al. 2010<br>Koukouvelas et al. 2010<br>Feng et al. 2010<br>Konstantinou et al. 2011<br>Segou et al. 2014 |
| 1/7/2009   | 9:30:12           | 34.042          | 25.411          | 20                                       | 6.2                      | 22             | 295                      | 32                   | 108                 | $5.85 \cdot 10^{25}$       | Moshou et al. 2010  |
| 10/6/2012  | 12:44:17          | 36.441          | 28.904          | 20<br>24<br>30<br>19.2                   | 6.0<br>6.1<br>6.0<br>5.8 | 24             | 115<br>212<br>262<br>203 | 85<br>78<br>69<br>60 | 171<br>3<br>49<br>0 | $2.02 \cdot 10^{25}$       | Kiratzi et al. 2013<br>Bülent et al. 2015<br>Görgün et al. 2014<br>Yavuz et al. 2015  |
| 15/6/2013  | 16:11:03          | 34.341          | 25.016          | 17.5                                     | 6.3                      | 20             | 100                      | 85                   | 95                  | $3.78 \cdot 10^{25}$       | Karakostas V.   |
| 16/6/2013  | 21.39.05          | 34 181          | 25 1 39         | 11                                       | 61                       | 16             | 112                      | 87                   | 97                  | $1.9 \cdot 10^{25}$        | Karakostas V  |

**Πίνακας 2.1:** Βασικά χαρακτηριστικά, όπως οι γεωγραφικές συντεταγμένες του επικέντρου, το βάθος της εστίας, το μέγεθος του σεισμού, το μέγεθος της σεισμικής ροπής και ο μηχανισμός γένεσης, των ισχυρών σεισμών (M<sub>w</sub> ≥6.0) που έγιναν στον ελληνικό χώρο από το 2001 έως και τον Απρίλιο του 2015.

| Ημερομηνία | Χρόνος<br>Γένεσης | $\varphi^{o}$ | $\lambda^o$ | <b>Βάθος</b><br>(Km) | $M_w$                    | L<br>(km) | ζ              | $\theta^{o}$   | $\lambda^o$         | M₀<br>(dyn•cm)          | Βιβλιογραφία   |
|------------|-------------------|---------------|-------------|----------------------|--------------------------|-----------|----------------|----------------|---------------------|-------------------------|--|
| 12/10/2013 | 13:11:55          | 35.341        | 23.114      | 27.5                 | 6.8                      | 24        | 339            | 3              | 130                 | $1.74 \cdot 10^{25}$    | Papadimitriou et al. 2015  |
| 26/1/2014  | 13:55:41          | 38.2          | 20.44       | 18                   | 6.1                      | 20        | 20<br>20       | 65<br>74       | 176<br>163          | 1.89 · 10 <sup>25</sup> | Karakostas at al. 2015<br>Sokos et al. 2015                                |
| 3/2/2014   | 3:08:44           | 38.27         | 20.42       | 7                    | 6.0                      | 16        | 12<br>199      | 45<br>49       | 154<br>167          | $1.33 \cdot 10^{25}$    | Karakostas at al. 2015<br>Sokos et al. 2015                                |
| 24/5/2014  | 9:25:02           | 40.286        | 25.375      | 15                   | 6.9<br>7.0<br>6.9<br>6.8 | 40        | 73<br>82<br>73 | 85<br>77<br>85 | -177<br>149<br>-177 | 2.47 · 10 <sup>26</sup> | Karakostas V.<br>Görgün et al. 2015<br>Evangelidis 2014<br>Tsakiroudi 2015 |
| 16/4/2015  | 18:07:48          | 35.03         | 26.85       | 23                   | 6.1                      | 14        | 245            | 49             | 132                 | $1.89 \cdot 10^{25}$    | Kiratzi A. 2016  |

### 2.7 Δεδομένα Μετασεισμών & Πληρότητα

Για τη λεπτομερή εξέταση της σεισμικότητας μιας περιοχής χρησιμοποιήθηκε ένας κατάλογος μετασεισμών που είναι πλήρης, ώστε να γίνει σύγκριση της σεισμικότητας. Ο κατάλογος αυτός εμπεριέχει μόνο όσους σεισμούς έγιναν σε χρονικό διάστημα 30 ημερών μετά από κάθε ισχυρό σεισμό (Μ≥6.0), στον ελληνικό χώρο.

Για αυτούς τους καταλόγους μετασεισμών, υπολογίσθηκαν οι τάσεις Coulomb στην εστία του κάθε μετασεισμού και έπειτα χαρτογραφήθηκαν τα επίκεντρά τους σε περιοχές με θετικές και αρνητικές τιμές των τάσεων, ανάλογα με τη θέση των εστιών τους.

Η μέθοδος υπολογισμού της πληρότητας βασίστηκε στον κώδικα που ανέπτυξαν οι Leptokaropoulos et al. (2013). Στον κώδικα επιλέγονται 1000 τυχαίοι συνθετικοί κατάλογοι σεισμών και συγκρίνονται με τα παρατηρούμενα δεδομένα, καθώς επίσης, γίνεται και σύγκριση μεταξύ των παρατηρούμενων δεδομένων και της θεωρητικής κατανομής αυτών. Στη συνέχεια, με την καλύτερη τροποποιημένη προσαρμογή (modified goodness-of-fit test, MGFT), δίνεται το κατώτερο μέγεθος σεισμού για το οποίο υπάρχουν όλα τα διαθέσιμα δεδομένα.

Από τον κώδικα αναπαριστάται σε ένα διάγραμμα ο δεκαδικός λογάριθμος της συχνότητας και της αθροιστικής συχνότητας σε συνάρτηση με το μέγεθος και σε ένα άλλο διάγραμμα παρουσιάζονται οι διαφορές μεταξύ των δεδομένων που παρατηρήθηκαν και των θεωρητικών τους κατανομών, όπως προέκυψαν από τον υπολογισμό της μέγιστης πιθανότητας, (GFT) και οι διαφορές μεταξύ των δεδομένων που παρατηρήθηκαν και των 1000 τυχαίων συνθετικών καταλόγων, (MGFT), σε συνάρτηση με το μέγεθος. Στο τέλος προτείνεται από το πρόγραμμα το κατώτερο μέγεθος μετασεισμών και σχηματίζονται πλήρεις κατάλογοι μεγεθών.

Στο σχήμα 2.4 παρουσιάζεται ένα παράδειγμα με τον υπολογισμό της πληρότητας του μεγέθους για το σεισμό της Κεφαλονιάς (26/1/2014) με μέγεθος M<sub>w</sub>=6.1. Το σχήμα 2.4Α απεικονίζει με κόκκινους κύκλους τον αθροιστικό αριθμό των σεισμών που ακολούθησαν μετά από 30 ημέρες από τον κύριο σεισμό σε συνάρτηση με το μέγεθος και με τα μαύρα τετράγωνα τον αριθμό των σεισμών που έγιναν 30 ημέρες μετά τον κύριο σε συνάρτηση με το μέγεθος. Στο σχήμα 2.4B εμφανίζονται οι δύο καμπύλες που δείχνουν το κατώτερο μέγεθος των σεισμών για τους οποίους έχουμε όλα τα διαθέσιμα δεδομένα.



**Σχήμα 2.4: Α.** Αθροιστική συχνότητα (κύκλοι) και συχνότητα (τετράγωνα) των σεισμών σε συνάρτηση με το μέγεθος. **Β.** Η καμπύλη με το ανοιχτό χρώμα δείχνει τη διαφορά μεταξύ των παρατηρούμενων δεδομένων και της θεωρητικής κατανομής, όπως σχηματίστηκε από τον υπολογισμό της μέγιστης πιθανότητας σαν συνάρτηση μεγέθους (GFT). Η καμπύλη με το σκούρο χρώμα εμφανίζει τη διαφορά μεταξύ των παρατηρούμενων δεδομένων και της θεωρητικής κατανομής, όπως σχηματίστηκε από τον υπολογισμό της μέγιστης πιθανότητας σαν συνάρτηση μεγέθους (GFT). Η καμπύλη με το σκούρο χρώμα εμφανίζει τη διαφορά μεταξύ των παρατηρούμενων δεδομένων και των 1000 τυχαίων συνθετικών καταλόγων που σχηματίστηκαν σύμφωνα με τον ορισμό της καλύτερης τροποποιημένης προσαρμογής (MGFT).

### 2.8 Ρυθμός Σεισμικότητας

Αφού σχηματίστηκαν οι πλήρεις κατάλογοι των μετασεισμών, υπολογίσθηκαν οι μεταβολές των τάσεων τους στις εστίες τους και χαρτογραφήθηκαν τα επίκεντρά τους. Στη συνέχεια υπολογίσθηκε ο ρυθμός σεισμικότητας κάθε περιοχής μετά από τη γένεση ισχυρού σεισμού. Σχεδιάστηκαν δύο είδη αθροιστικών διαγραμμάτων που εμφανίζουν τον αθροιστικό αριθμό των σεισμών που έγιναν 30 ημέρες μετά το σεισμό.

Αρχικά, παρουσιάζονται τα αθροιστικά διαγράμματα που περιλαμβάνουν όλους τους μετασεισμούς που έγιναν σε χρονικό διάστημα 30 ημερών και εμφανίζονται με κόκκινη και μπλε γραμμή ανάλογα αν η μεταβολή της τάσης τους στην εστία του κάθε μετασεισμού είναι θετική ή αρνητική, αντίστοιχα. Στη συνέχεια σχεδιάστηκαν τα ίδια αθροιστικά διαγράμματα, χωρίς να λαμβάνονται υπόψη οι μετασεισμοί που βρίσκονταν πάνω στο ρήγμα και εμφανίζονται με κόκκινη γραμμή όσοι μετασεισμοί είχαν θετικές τάσεις και με μπλε γραμμή όσοι είχαν αρνητικές τάσεις.

Από τα αυτά τα διαγράμματα μπορεί να γίνει αντιληπτή η επίδραση του ισχυρού σεισμού στην περιοχή, ακόμα και μετά από 30 ημέρες. Επίσης, από τη μελέτη αυτών των διαγραμμάτων σε συνδυασμό με τη μεταβολή των τάσεων που προκλήθηκε από τους ισχυρούς σεισμούς, μπορεί να εξηγηθεί ο αυξημένος ρυθμός σεισμικότητας στη γύρω περιοχή.

# Κεφάλαιο 3°

Αποτελέσματα

### 3.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο θα περιγραφούν τα αποτελέσματα των υπολογισμών των μεταβολών των στατικών τάσεων Coulomb που οφείλονται στη γένεση των ισχυρών σεισμών και θα διερευνηθεί η επίδραση του κάθε ισχυρού σεισμού στη διέγερση της σεισμικότητας της γύρω περιοχής. Η περιοχή μελέτης είναι ο ελληνικός χώρος και η επιρροή του κάθε ισχυρού σεισμού στη γειτονική του περιοχή εξετάζεται με το ρυθμό σεισμικότητας, ο οποίος σχετίζεται με το χρόνο.

Για κάθε σεισμό εξετάζεται η σεισμικότητα στη γειτονική του περιοχή πριν και μετά τη γένεσή του. Η σεισμικότητα της περιοχής που μελετάται έχει μέγιστη απόσταση από το επίκεντρο 1° προς όλες τις κατευθύνσεις (Βορρά – Νότο – Ανατολή – Δύση). Η μελέτη της σεισμικότητας γίνεται σε έξι χρονικά διαστήματα. Αρχικά, εξετάζονται οι σεισμοί που έγιναν σε χρονικό διάστημα 30 και 7 ημερών πριν το σεισμό. Στη συνέχεια μελετώνται οι σεισμοί 24 και 48 ώρες μετά το σεισμό, έτσι ώστε να καθοριστεί το ρήγμα στην περιοχή και τα βασικά του χαρακτηριστικά και ακολουθούν οι μετασεισμικές ακολουθίες μετά από 30 και 60 ημέρες για να διερευνηθεί η επίδραση του σεισμού στη σεισμικότητα της γύρω περιοχής.

Λαμβάνοντας υπόψη το μηχανισμό γένεσης του κάθε σεισμού υπολογίστηκε η κατανομή των τάσεων Coulomb. Με βάση τα αποτελέσματα των μεταβολών των τάσεων η κάθε περιοχή γύρω από το επίκεντρο του σεισμού διακρίνεται σε φωτεινή και σκιερή ζώνη, όταν οι μεταβολές των τάσεων είναι μεγάλες και μικρές αντίστοιχα. Με βάση τη μετασεισμική ακολουθία μετά από 30 ημέρες εξετάστηκε η χωρική κατανομή των μεταβολών των τάσεων του κάθε μετασεισμού στην εστία του, ώστε να διαπιστωθεί αν υπήρχε διέγερση σεισμικότητας στη γύρω περιοχή. Αφού, διαπιστώθηκαν μεταβολές των τάσεων μεγαλύτερες από 0.1 bar υπολογίστηκε ο ρυθμός σεισμικότητας για τους μετασεισμούς που έγιναν σε χρονικό διάστημα 30 ημερών.

Στους υπολογισμούς που έγιναν ο συντελεστής διάτμησης ήταν 33GPa, για το φλοιό της Γης και 50 GPa, για τις ζώνες κατάδυσης. Ο λόγος Poisson ήταν ίσος με 0.25 και ο φαινόμενος συντελεστής τριβής 0.4.

Ο Πίνακας 2.2 περιλαμβάνει τις παραμέτρους των διαρρήξεων, όπως το μηχανισμό γένεσης (παράταξη, γωνία κλίσης, γωνία ολίσθησης), το επίκεντρο του σεισμού, το μήκος του ρήγματος, το μέγεθος, το εστιακό βάθος και την ολίσθηση. Για την παρούσα εργασία υιοθετήθηκαν αυτές οι παράμετροι στον υπολογισμό της μεταβολής των τάσεων για κάθε ισχυρό σεισμό.

**Πίνακας 2.2:** Παράμετροι των διαρρήξεων των ισχυρών σεισμών που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό των τάσεων Coulomb. Οι δύο πρώτες στήλες δίνουν πληροφορίες για το χρόνο γένεσης των σεισμών και οι δυο επόμενες δίνουν τις επικεντρικές συντεταγμένες. Η πέμπτη στήλη δίνει το εστιακό βάθος, η έκτη το μέγεθος και η έβδομη το μήκος του ρήγματος. Ο μηχανισμός γένεσης του κάθε σεισμού δίνεται στην όγδοη (παράταξη), ένατη (κλίση) και δέκατη (γωνία ολίσθησης) στήλη. Η σεισμική ροπή βρίσκεται στην ενδέκατη στήλη. Στις δύο τελευταίες στήλες βρίσκονται η συνιστώσα οριζόντιας μετατόπισης (SS), που είναι αρνητική για δεξιόστροφα ρήγματα και η συνιστώσα κλίσης (DS), που είναι θετική για κανονικά ρήγματα.

| Χρόνος Γένεσης |                   | Επίκε         | ντρο          |               |       |           | Μηχαν           | νισμός Γέ              | ένεσης                    |                      |         |         |
|----------------|-------------------|---------------|---------------|---------------|-------|-----------|-----------------|------------------------|---------------------------|----------------------|---------|---------|
| Ημερομηνία     | Χρόνος<br>Γένεσης | $\varphi^{o}$ | $\lambda^{o}$ | Βάθος<br>(Km) | $M_w$ | L<br>(km) | Παράταξη<br>(°) | Γωνία<br>Κλίσης<br>(°) | Γωνία<br>Ολίσθησης<br>(°) | M₀<br>(dyn•cm)       | SS (m)  | DS (m)  |
| 26/7/2001      | 0:21:38           | 39.07         | 24.24         | 14            | 6.4   | 23        | 148             | 76                     | -1                        | $5.61 \cdot 10^{25}$ | 0.4784  | 0.0083  |
| 14/8/2003      | 5:14:55           | 38.77         | 20.6          | 11            | 6.2   | 16        | 18              | 60                     | -175                      | $2.9 \cdot 10^{25}$  | - 0.53  | - 0.05  |
| 14/2/2008      | 10:09:25          | 36.575        | 21.868        | 30            | 6.7   | 30        | 288             | 10                     | 73                        | $2.27 \cdot 10^{26}$ | 0.24    | - 0.79  |
| 14/2/2008      | 12:08:56          | 36.438        | 22.026        | 33            | 6.1   | 30        | 312             | 18                     | 93                        | $8.1 \cdot 10^{25}$  | - 0.015 | - 0.28  |
| 20/2/2008      | 18:27:08          | 36.363        | 21.907        | 10            | 6.0   | 30        | 253             | 65                     | -2                        | $2.19 \cdot 10^{25}$ | 0.097   | 0.003   |
| 8/6/2008       | 12:25:28          | 37.952        | 21.537        | 16            | 6.4   | 22        | 209             | 83                     | 164                       | $4.56 \cdot 10^{25}$ | - 0.48  | - 0.14  |
| 1/7/2009       | 9:30:12           | 34.042        | 25.411        | 20            | 6.2   | 22        | 295             | 32                     | 108                       | $5.85 \cdot 10^{25}$ | - 0.13  | - 0.41  |
| 10/6/2012      | 12:44:17          | 36.441        | 28.904        | 20            | 6.0   | 24        | 115             | 85                     | 171                       | $2.02 \cdot 10^{25}$ | - 0.20  | - 0.032 |
| 15/6/2013      | 16:11:03          | 34.341        | 25.016        | 17.5          | 6.3   | 20        | 100             | 85                     | 95                        | $3.78 \cdot 10^{25}$ | - 0.029 | - 0.334 |
| 16/6/2013      | 21:39:05          | 34.181        | 25.139        | 11            | 6.1   | 16        | 112             | 87                     | 97                        | $1.9 \cdot 10^{25}$  | - 0.026 | - 0.81  |
| 12/10/2013     | 13:11:55          | 35.341        | 23.114        | 27.5          | 6.8   | 24        | 339             | 3                      | 130                       | $1.74 \cdot 10^{25}$ | - 0.4   | - 0.5   |
| 26/1/2014      | 13:55:41          | 38.2          | 20.44         | 18            | 6.1   | 20        | 20              | 65                     | 176                       | $1.89 \cdot 10^{25}$ | - 0.173 | - 0.009 |
| 3/2/2014       | 3:08:44           | 38.27         | 20.42         | 7             | 6.0   | 16        | 12              | 45                     | 154                       | $1.33 \cdot 10^{25}$ | - 0.178 | - 0.087 |
| 24/5/2014      | 9:25:02           | 40.286        | 25.375        | 15            | 6.8   | 40        | 73              | 85                     | -177                      | $2.47 \cdot 10^{26}$ | - 0.85  | 0.04    |
| 16/4/2015      | 18:07:48          | 35.03         | 26.85         | 23            | 6.1   | 14        | 245             | 49                     | 132                       | $1.89 \cdot 10^{25}$ | -0.26   | - 0.28  |
### 3.2 Σεισμική Ακολουθία Σκύρου, 26 Ιουλίου 2001, M<sub>w</sub>=6.4

#### 3.2.1 Εισαγωγή

Στις 26 Ιουλίου 2001 (00:21:38, GMT), ένας σεισμός μεγέθους  $M_w$ =6.4 έγινε στο Βόρειο Αιγαίο, μεταξύ των νησιών της Σκύρου και της Αλοννήσου. Το επίκεντρο του σεισμού εντοπίστηκε 39.07°B 24.24°A, βορειοδυτικά της Σκύρου (Karakostas et al., 2003). Πρόκειται για ένα αριστερόστροφο ρήγμα οριζόντιας μετατόπισης, με διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ, (148°/76°/-1°, λύση GCMT) που έγινε σε μία περιοχή που αποτελεί το νοτιοδυτικό άκρο της ζώνης που συνδέεται με την τάφρο του Βορείου Αιγαίου.

### 3.2.2 Σεισμικότητα πριν και μετά τον κύριο σεισμό

Μελετήθηκε η σεισμικότητα στην περιοχή γύρω από το σεισμό για έξι χρονικές περιόδους και παρουσιάζεται σε χάρτες, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.1. Αρχικά, στο Σχήμα 3.1Α φαίνονται τα επίκεντρα των προσεισμών 30 ημέρες πριν τη γένεση του σεισμού, με μπλε τετράγωνα και παρατηρείται ότι υπάρχει μία ασθενής προσεισμική δραστηριότητα στην περιοχή πολύ κοντά στο επίκεντρο του σεισμού που ακολούθησε αργότερα. Ο ίδιος αριθμός προσεισμών που έγιναν 7 ημέρες πριν το Σχήμα 3.1B, όπου απεικονίζονται τα επίκεντρα των σεισμών που έγιναν 7 ημέρες πριν τον κύριο σεισμό με μοβ τετράγωνα. Στη συνέχεια, αναπαριστάται η κατανομή των μετασεισμών 24 ώρες μετά τον κύριο σεισμό (Σχήμα 3.1Γ) με κόκκινους κύκλους, δείχνοντας το μεγάλο πλήθος μετασεισμών που ακολούθησε γύρω από το επίκεντρο. Η αύξηση του πλήθους των σεισμών συνεχίστηκε και 48 ώρες μετά τον κύριο σεισμό, (Σχήμα 3.1Δ), με τα επίκεντρα να φαίνονται με μοβ κύκλους. Η μετασεισμική ακολουθία συνεχίστηκε με αυξημένο αριθμό σεισμών στη γύρω περιοχή 30 ημέρες μετά το σεισμό (Σχήμα 3.1Ε). Μετά από 60 ημέρες παρατηρείται μία μείωση του πλήθους των μετασεισμών (Σχήμα 3.1ΣΤ).

Με βάση τη χωρική κατανομή των μετασεισμών μετά από 24 και 48 ώρες (Σχήμα 3.1Γ, Σχήμα 3.1Δ) ορίστηκε το ρήγμα στην περιοχή, το οποίο βρίσκεται σε συμφωνία με αυτό των Karakostas et al. (2003), από τους οποίους ελήφθησαν όλα τα στοιχεία του. Από τους χάρτες που δείχνουν τη σεισμική δραστηριότητα στην περιοχή μετά από 30 και 60 ημέρες (Σχήμα 3.1Ε και Σχήμα 3.1ΣΤ) εξετάστηκε η διέγερση σεισμικότητας στην περιοχή γύρω από το σεισμό.



**Σχήμα 3.1:** Χωρική κατανομή της σεισμικής δραστηριότητας πριν και μετά τον κύριο σεισμό της Σκύρου, το επίκεντρο του οποίου παριστάνεται με άστρο. Ο μηχανισμός γένεσης του κύριου σεισμού φαίνεται επίσης ως ισεμβαδική προβολή του κάτω ημισφαιρίου. **Α.** Τα επίκεντρα των προσεισμών 30 ημέρες πριν τον κύριο σεισμό (μπλε τετράγωνα). **Β.** Προσεισμοί 7 ημέρες πριν τον κύριο σεισμό (μοβ τετράγωνα). **Γ.** Επίκεντρα των μετασεισμών 24 ώρες μετά τον κύριο σεισμό (κόκκινοι κύκλοι). **Δ.** Μετασεισμοί 48 ώρες μετά το σεισμό, με τους μοβ κύκλους. **Ε.** Τα επίκεντρα των σεισμών μετά από 30 ημέρες (πράσινοι ρόμβοι).

#### 3.2.3 Υπολογισμός Τάσεων Coulomb

Από τους Karakostas et al. (2003) το βάθος του σεισμού υπολογίσθηκε στα 14 km και το μήκος του ρήγματος στα 23 km. Σύμφωνα με το μηχανισμό γένεσης του σεισμού, το ρήγμα είχε παράταξη 148°, γωνία κλίσης 76° και γωνία ολίσθησης -1°. Το μήκος του ρήγματος είναι σε καλή συμφωνία με αυτό που υπολογίσθηκε από τις σχέσεις των Papazachos et al. (2004) και ήταν 26 km από τις σχέσεις των Wells and Coppersmith (1994) και ήταν 22 km. Οι μετασεισμικοί κατανέμονται σε βάθη μεταξύ των 5 έως 20 km. Από τη σεισμική ροπή,  $M_0$ =5.61·10<sup>25</sup> dyn·cm (GCMT), που εκλύθηκε υπολογίσθηκε η ολίσθηση ίση με 0.48 μέτρα.

Το επίκεντρο του σεισμού, ο μηχανισμός γένεσης και το ρήγμα φαίνονται στο *Σχήμα 3.2A*. Οι μεταβολές των τάσεων Coulomb φαίνονται στο *Σχήμα 3.2B*, με τις θετικές τιμές των τάσεων να διευθύνονται ΒΔ-ΝΑ, ενώ οι αρνητικές τιμές ορίζουν σκιερές ζώνες με διεύθυνση BBA-ΝΝΔ και ΒΔ-ΝΑ.



**Σχήμα 3.2: Α.** Απεικόνιση του ρήγματος του σεισμού της Σκύρου, στις 26/7/2001. Διακρίνονται το επίκεντρο με άστρο και ο μηχανισμός γένεσης του σεισμού. **Β.** Χωρική κατανομή των μεταβολών των τάσεων Coulomb που προκλήθηκαν από τον κύριο σεισμό. Οι μεταβολές των τάσεων εμφανίζονται με τη χρωματική κλίμακα, σε bars, όπου με τις αποχρώσεις του μπλε εμφανίζονται οι αρνητικές τιμές της μεταβολής των τάσεων, με λευκό οι μηδενικές και με αποχρώσεις από κίτρινο έως κόκκινο οι θετικές.

#### 3.2.4 Χωρική Κατανομή Μετασεισμών

Η μετασεισμική δραστηριότητα ήταν έντονη για μεγάλο χρονικό διάστημα μετά τον κύριο σεισμό (Σχήμα 3.3Α). Με σκοπό να διερευνηθεί πιθανή πρόκληση λόγω των μεταβολών των στατικών τάσεων, υπολογίσθηκαν οι τιμές στην εστία του κάθε μετασεισμού. Στο Σχήμα 3.3Α φαίνονται τα επίκεντρα των μετασεισμών κατά το χρονικό διάστημα των 30 ημερών μετά τον κύριο σεισμό. Με κόκκινο χρώμα φαίνονται οι μετασεισμοί στην εστία των οποίων οι μεταβολές της τάσης ήταν θετικές και με μπλε χρώμα οι μετασεισμοί που οι μεταβολές των τάσεων ήταν αρνητικές στην εστία τους. Οι περισσότεροι μετασεισμοί έγιναν κοντά στο ρήγμα, όμως υπάρχουν αρκετοί που κατανέμονται και στη γύρω περιοχή. Με σκοπό να εκτιμηθεί η διέγερση μετασεισμών εκτός του ρήγματος του κύριου σεισμού, αφαιρέθηκαν από το δείγμα δεδομένων οι μετασεισμοί που έγιναν πάνω στο ρήγμα. Ο χάρτης του Σχήματος 3.3Β εμφανίζει την ίδια κατανομή των επικέντρων των μετασεισμών, χωρίς όμως αυτούς που έγιναν πάνω στο ρήγμα. Τα δεδομένα για τους μετασεισμούς Μ≥3.3.



**Σχήμα 3.3: Α.** Κατανομή του πεδίου των τάσεων Coulomb μετά το σεισμό που έγινε στις 26/7/2001, στην περιοχή της Σκύρου. Με κόκκινους κύκλους παριστάνονται τα επίκεντρα των μετασεισμών που οι εστίες τους είχαν θετικές μεταβολές τάσεων, ενώ με μπλε κύκλους φαίνονται τα επίκεντρα των μετασεισμών που οι εστίες τους είχαν συ οι εστίες τους είχαν συ οι εστίες τους είχαν συ οι εστίες τους είχαν του οι εστίες τους είχαν θετικές μεταβολές τάσεων, ενώ με μπλε κύκλους φαίνονται τα επίκεντρα των μετασεισμών που οι εστίες τους είχαν θετικές μεταβολές τάσεων, ενώ με μεταβολές τάσεων **Β.** Αναπαράσταση χάρτη όμοιου με τον πρώτο, χωρίς όμως τους μετασεισμούς που έγιναν στην περιοχή γύρω από το ρήγμα.

#### 3.2.5 Πληρότητα

Με σκοπό να διερευνηθεί ποσοτικά η διέγερση της σεισμικής δραστηριότητας, απαιτείται πλήρες δείγμα δεδομένων.

Λαμβάνοντας υπόψη όλα τα διαθέσιμα δεδομένα για αυτήν τη μετασεισμική ακολουθία διερευνάται η πληρότητα των μεγεθών της για το χρονικό διάστημα των 30 ημερών μετά το σεισμό. Η μέθοδος της πληρότητας που εφαρμόστηκε ήταν των Leptokaropoulos et al. (2013) και διαπιστώθηκε ότι τα δεδομένα ήταν πλήρη για σεισμούς με M≥3.3. Η διαφορά τόσο μεταξύ των παρατηρούμενων δεδομένων και της θεωρητικής κατανομής (GFT), όσο και η διαφορά μεταξύ των παρατηρούμενων και των 1000 συνθετικών καταλόγων (MGFT) δείχνουν μέγεθος M≥3.3.



**Σχήμα 3.4: Α.** Αθροιστική συχνότητα (κύκλοι) και συχνότητα (τετράγωνα) των σεισμών σε συνάρτηση με το μέγεθος για τους σεισμούς 30 ημέρες μετά τον κύριο. **Β.** Διαφορά μεταξύ των παρατηρούμενων δεδομένων και της θεωρητικής κατανομής, όπως σχηματίστηκε από τον υπολογισμό της μέγιστης πιθανότητας σαν συνάρτηση μεγέθους (GFT), με το ανοιχτό χρώμα. Διαφορά μεταξύ των παρατηρούμενων δεδομένων και του τυχαίων συνθετικών καταλόγων που σχηματίστηκαν σύμφωνα με τον ορισμό της καλύτερης τροποποιημένης προσαρμογής (MGFT), με το σκούρο χρώμα.

# 3.2.6 Ρυθμός Σεισμικότητας

Για να εξεταστεί η επίδραση του σεισμού στη σεισμικότητα της περιοχής γύρω από το επίκεντρο του, υπολογίσθηκε ο ρυθμός σεισμικότητας για τους σεισμούς που έγιναν 30 ημέρες μετά τον κύριο και είχαν μέγεθος Μ≥3.3. Έγινε διάγραμμα στο οποίο αναπαριστάται ο αθροιστικός αριθμός των μετασεισμών σε συνάρτηση με το χρόνο. Το αποτέλεσμα φαίνεται στο *Σχήμα 3.5*, όπου με τη μπλε γραμμή παρουσιάζεται ο αθροιστικός αριθμός των μετασεισμών που είχαν τις εστίες τους σε περιοχές αρνητικών μεταβολών των τάσεων Coulomb και με την κόκκινη ο αθροιστικός αριθμός των μετασεισμών, οι εστίες των οποίων βρίσκονταν σε περιοχές θετικών μεταβολών των τάσεων. Από το σχήμα γίνεται αντιληπτή μια αυξημένη σεισμικότητα στην περιοχή γύρω από το επίκεντρο του σεισμού, μετά τη γένεση του. Επίσης, φαίνεται ότι από την 1<sup>η</sup> μέχρι την 5<sup>η</sup> ημέρα ο αριθμός των μετασεισμών που είχαν τις εστίες τους σε περιοχές με αρνητικές τιμές τάσεων ήταν κατά ελάχιστα μεγαλύτερος από τον αριθμό των μετασεισμών, των οποίων οι εστίες τους ήταν σε περιοχές με θετικές τιμές τάσεων. Από την 6<sup>η</sup> έως την 8<sup>η</sup> ημέρα ο αριθμός των μετασεισμών, οι εστίες των οποίων ήταν σε περιοχές με θετικές μεταβολές τάσης γίνεται μεγαλύτερος από τον αριθμό των μετασεισμών, των οποίων οι είχαν τις εστίες τους σε θέσεις με τις αρνητικές τιμές. Ίδιος αριθμός μετασεισμών παρατηρείται από την 9<sup>η</sup> μέχρι τη 16<sup>η</sup> ημέρα, ενώ από τη 17<sup>η</sup> έως την 30<sup>η</sup> ημέρα οι μετασεισμοί που είχαν τις εστίες τους σε περιοχές με θετικές τάσεις εμφανίζονται περιοσότεροι.



**Σχήμα 3.5:** Σχηματική αναπαράσταση του ρυθμού σεισμικότητας στην περιοχή της Σκύρου μετά το σεισμό στις 26/7/2001. Η κόκκινη γραμμή δείχνει το ρυθμό σεισμικότητας της γύρω περιοχής για τους μετασεισμούς που έγιναν 30 ημέρες μετά τον κύριο, των οποίων οι εστίες ήταν σε φωτεινές περιοχές, ενώ η μπλε το ρυθμό σεισμικότητας της γύρω περιοχής για τους ίδιους μετασεισμούς που είχαν τις εστίες τους σε σκιερές ζώνες.

Παρόμοια, σχεδιάστηκε το ίδιο διάγραμμα και για τους ίδιους μετασεισμούς, αφού αφαιρέθηκαν όσοι έγιναν πολύ κοντά στο ρήγμα. Η αφαίρεση των μετασεισμών έγινε αφού λήφθηκε υπόψη η προβολή του ρήγματος στην επιφάνεια, σχηματίζοντας ένα ορθογώνιο παραλληλόγραμμο σχήμα. Με αυτόν τον τρόπο μπορεί να γίνει αντιληπτή η επίδραση του σεισμού στη διέγερση της σεισμικότητας της γύρω περιοχής, χωρίς να λαμβάνονται υπόψη οι κοντινοί μετασεισμοί στο ρήγμα. Το Σχήμα 3.6 δείχνει το ρυθμό σεισμικότητας μετά την αφαίρεση των κοντινών στο ρήγμα μετασεισμών. Από το σχήμα γίνεται φανερή η μείωση του αριθμού των μετασεισμών που είχαν τις εστίες τους σε περιοχές θετικών μεταβολών των τάσεων και ιδιαίτερα των μετασεισμών που είχαν τις εστίες τους σε σκιερές ζώνες, καθώς αφαιρέθηκε μεγάλος αριθμός μετασεισμών και από τις δύο περιοχές, όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Η μεγάλη μείωση των μετασεισμών που είχαν τις εστίες τους σε περιοχές με αρνητικές τιμές τάσεων οφείλεται στο ότι οι περισσότεροι είχαν γίνει κοντά στο ρήγμα με αποτέλεσμα να μην έχουν συμπεριληφθεί στους υπολογισμούς του ρυθμού σεισμικότητας, ενώ οι υπόλοιποι έγιναν σε γειτονικές περιοχές και οι περισσότεροι συγκεντρώθηκαν στον βορειοδυτικό λοβό των αρνητικών τάσεων.



**Σχήμα 3.6:** Απεικόνιση του ρυθμού σεισμικότητας της περιοχής της Σκύρου μετά το σεισμό στις 26/7/2001, χωρίς τους κοντινούς στο ρήγμα μετασεισμούς. Η κόκκινη γραμμή δείχνει το ρυθμό σεισμικότητας της γύρω περιοχής για τους μετασεισμούς που έγιναν 30 ημέρες μετά τον κύριο και είχαν τις εστίες τους σε φωτεινές ζώνες, ενώ η μπλε το ρυθμό σεισμικότητας για τους ίδιους μετασεισμούς των οποίων οι εστίες ήταν σε σκιερές ζώνες.

Στον Πίνακα 3.1 παρουσιάζονται τα ποσοστά των μετασεισμών που είχαν τις εστίες τους σε περιοχές με θετικές και αρνητικές μεταβολές τάσεων. Επίσης, φαίνονται και τα ποσοστά των μετασεισμών, χωρίς τους κοντινούς στο ρήγμα και για τις δύο περιοχές θετικών και αρνητικών μεταβολών των τάσεων. Παρατηρείται ότι το ποσοστό των μετασεισμών, των οποίων οι εστίες τους βρίσκονταν σε περιοχές με

αρνητικές μεταβολές τάσεων είναι μεγαλύτερο, ενώ μετά την αφαίρεση των κοντινών στο ρήγμα μετασεισμών το ποσοστό των μετασεισμών που είχαν τις εστίες τους σε φωτεινές ζώνες γίνεται μεγαλύτερο. Με βάση αυτά τα αποτελέσματα γίνεται φανερός ο αυξημένος ρυθμός σεισμικότητας στην περιοχή της Σκύρου μετά τη γένεση του ισχυρού σεισμού. Το συμπέρασμα αυτό βρίσκεται σε συμφωνία με αυτό των King et al. (1994), που απέδειξαν ότι η μεταβολή των τάσεων Coulomb ενός σεισμού μπορεί να συσχετιστεί με τη διέγερση σεισμικότητας στη γύρω περιοχή, όπως συνέβη μετά το σεισμό στο Landers (1992), όπου οι περισσότεροι μετασεισμοί ήταν συγκεντρωμένοι εκεί όπου η μεταβολή των τάσεων ήταν μεγαλύτερη από 0.5 bar και ελάχιστοι κατανέμονταν εκεί όπου η μεταβολή των τάσεων μειώνονταν κατά 0.5 bar. Επίσης, συμφωνία υπάρχει και με το συμπέρασμα στο οποίο κατέληξε ο Stein (1999) μετά τη μελέτη των μεταβολών των τάσεων του σεισμού στο Landers (1992), ο οποίος παρατήρησε ότι στον έναν από τους θετικούς λοβούς των τάσεων του σεισμού του Landers, έγινε ο σεισμός στο Big Bear που ακολούθησε αργότερα και ότι οι περισσότεροι μετασεισμοί κατανέμονταν σε ζώνες που είχαν μεταβολή τάσης μεγαλύτερη από 0.1 bar κοντά στην περιοχή της διάρρηξης.

| Μετασεισμοί                          | Θετικές<br>Τιμές<br>Τάσεων<br>(%) | Αρνητικές<br>Τιμές<br>Τάσεων<br>(%) |
|--------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|
| Όλοι                                 | 52                                | 48                                  |
| Χωρίς τους<br>κοντινούς<br>στο ρήγμα | 67                                | 33                                  |

**Πίνακας 3.1:** Ποσοστά των μετασεισμών που είχαν τις εστίες τους σε θέσεις με θετικές και αρνητικές μεταβολές των τάσεων για το σεισμό της Σκύρου.

# 3.3 Σεισμική Ακολουθία Λευκάδας, 14 Αυγούστου 2003, M<sub>w</sub>=6.2

## 3.3.1 Εισαγωγή

Ισχυρός σεισμός έπληξε το νησί της Λευκάδας στις 14 Αυγούστου 2003, (05:14:55, GMT). Το μέγεθος του σεισμού ήταν  $M_w$ =6.2 και ο μηχανισμός γένεσης του ρήγματος είχε παράταξη 18°, γωνία κλίσης 59° και γωνία ολίσθησης -174° (λύση GCMT). Το επίκεντρο του σεισμού προσδιορίστηκε 38.77°B 20.6°A, στις δυτικές ακτές της Λευκάδας (Karakostas et al., 2004). Η περιοχή της Λευκάδας μαζί με την περιοχή της Κεφαλονιάς αποτελούν την πιο σεισμογενή ζώνη στο Ιόνιο Πέλαγος και η σεισμικότητα οφείλεται στο δεξιόστροφο ρήγμα, οριζόντιας μετατόπισης, της Κεφαλονιάς (Kefalonia Transform Fault, KFT).

#### 3.3.2 Σεισμικότητα πριν και μετά τον κύριο σεισμό

Η κατανομή των σεισμών που προηγήθηκαν και αυτών που ακολούθησαν του κύριου σεισμού στη γύρω περιοχή διερευνήθηκαν και απεικονίζονται στο Σχήμα 3.7. Οι σεισμοί που έγιναν 30 ημέρες πριν τον κύριο σεισμό (Σχήμα 3.7Α) είναι ελάχιστοι, ενώ υπήρχαν και κάποιοι που έγιναν και μακρύτερα από το επίκεντρο. Ο αριθμός των σεισμών 7 ημέρες πριν τον ισχυρό σεισμό (Σχήμα 3.7Β), είναι και αυτός ελάχιστος. Μετά το σεισμό ακολούθησε μια πυκνή μετασεισμική ακολουθία στη γύρω περιοχή, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.7Γ, όπου οι μετασεισμοί που ακολούθησαν 24 ώρες μετά τον κύριο σεισμό, εμφανίζονται με κόκκινους κύκλους. Αυξημένος εμφανίζεται ο αριθμός των μετασεισμών 48 ώρες αργότερα όπως φαίνεται από το Σχήμα 3.7Δ, με τους μοβ κύκλους. Η έντονη μετασεισμική ακολουθία στην περιοχή συνεχίστηκε 30 ημέρες μετά τη γένεση του ισχυρού σεισμού και παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.6Ε, με πράσινους ρόμβους. Τα επίκεντρα των μετασεισμών 60 ημέρες μετά τον κύριο σεισμό φαίνονται στο Σχήμα 3.6ΣΤ, με κίτρινους ρόμβους και παρατηρείται μεγάλος αριθμός μετασεισμών σε αυτό το χρονικό διάστημα.

Από τη χωρική κατανομή των επικέντρων των μετασεισμών 24 και 48 ώρες μετά το σεισμό (*Σχήμα 3.7Γ, Σχήμα 3.7Δ*) καθορίστηκε το ρήγμα στις δυτικές ακτές της Λευκάδας. Το ρήγμα βρίσκεται σε συμφωνία με αυτό των Karakostas et al. (2004), οι οποίοι ασχολήθηκαν με αυτήν την ακολουθία και τη διέγερση σεισμικότητας στην περιοχή. Μετά την απεικόνιση της μετασεισμικής δραστηριότητας για χρονικό διάστημα 30 και 60 ημερών μετά το σεισμό σε χάρτες (*Σχήμα 3.7E* και *Σχήμα 3.7ΣT*) μελετήθηκε η σεισμικότητα στη κοντινή περιοχή του επικέντρου.



**Σχήμα 3.7:** Χωρική κατανομή της προσεισμικής και μετασεισμικής δραστηριότητας σεισμού που έγινε στο νησί της Λευκάδας. Το επίκεντρο του σεισμού φαίνεται με το άστρο και ο μηχανισμός γένεσής του ως ισεμβαδική προβολή του κάτω ημισφαιρίου. **Α.** Τα επίκεντρα των προσεισμών 30 ημέρες πριν τον κύριο σεισμό (μπλε τετράγωνα). **Β.** Οι σεισμοί 7 ημέρες πριν από το σεισμό (μοβ τετράγωνα). **Γ.** Μετασεισμοί 24 ώρες μετά τον κύριο σεισμό (κόκκινοι κύκλοι). **Δ.** Τα επίκεντρα των μετασεισμών 48 ώρες μετά τον κύριο σεισμό (μοβ κύκλοι). **Ε.** Οι μετασεισμοί 30 ημέρες μετά το σεισμό (πράσινοι ρόμβοι). **ΣΤ.** Οι μετασεισμοί 60 ημέρες μετά το σεισμό (κίτρινοι ρόμβοι).

# 3.3.3 Υπολογισμός Τάσεων Coulomb

Για τον υπολογισμό του μοντέλου μεταβολής των τάσεων του σεισμού της Λευκάδας χρησιμοποιήθηκαν τα στοιχεία της μελέτης των Karakostas et al. (2004).

Ωστόσο, μελετήθηκαν και τα αποτελέσματα των Benetatos et al. (2005). Αυτοί κατέληξαν σε ένα δεξιόστροφο ρήγμα οριζόντιας μετατόπισης με παράταξη 16°, γωνία κλίσης 72° και γωνία ολίσθησης 178°. Υπολόγισαν το μήκος του ρήγματος ίσο με 23 km και το βάθος ίσο με 13 km.

Σύμφωνα με τους Karakostas et al. (2004) το μήκος του ρήγματος ήταν 16 km και βρίσκεται σε καλή συμφωνία σε αυτό που υπολογίσθηκε από τις σχέσεις των Papazachos et al. (2004) και ήταν 22 km καθώς και σε αυτό που προέκυψε από τις σχέσεις των Wells-Coppersmith (1994) και ήταν 18 km. Σύμφωνα με τους Karakostas et al. (2004) ο μηχανισμός γένεσης του ρήγματος ήταν παράταξη  $18^\circ$ , γωνία κλίσης  $60^\circ$  και γωνία ολίσθησης  $-175^\circ$ , δείχνοντας ένα ρήγμα οριζόντιας μετατόπισης, δεξιόστροφο, με διεύθυνση BA-NΔ. Το εστιακό βάθος του σεισμού ήταν στα 8 km και η κατανομή των μετασεισμών είχε βάθος από 3 μέχρι 12 km. Από τη σεισμική ροπή,  $M_o=2.9 \cdot 10^{25}$  dyn·cm (GCMT), που εκλύθηκε κατά μήκος του ρήγματος υπολογίσθηκε ολίσθηση ίση με 0.53 μέτρα.

Η θέση του επικέντρου φαίνεται στο Σχήμα 3.8Α, καθώς επίσης και ο μηχανισμός γένεσης και το ρήγμα. Η χωρική κατανομή των τάσεων Coulomb παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.8B και παρατηρείται ότι οι θετικές τιμές εντοπίζονται σε διεύθυνση B-N και A-Δ του ρήγματος που ολίσθησε, ενώ οι περιοχές BΔ-NA και BA-NΔ βρίσκονται στη σκιερή ζώνη και δεν ευνοούν τη γένεση σεισμών.



**Σχήμα 3.8: Α.** Ο σεισμός της Λευκάδας στις 14/8/2003. Εμφανίζονται το επίκεντρο (άστρο), το ρήγμα οριζόντιας μετατόπισης και ο μηχανισμός γένεσης του σεισμού. **Β.** Οι μεταβολές των τάσεων που προκλήθηκαν από τη σεισμική ολίσθηση.

## 3.3.4 Χωρική Κατανομή Μετασεισμών

Για την περαιτέρω μελέτη της σεισμικότητας στη γύρω περιοχή μετά τη γένεση του ισχυρού σεισμού υπολογίσθηκαν οι μεταβολές των τάσεων στις εστίες των μετασεισμών που έγιναν 30 ημέρες μετά τη γένεση του ισχυρού σεισμού και είχαν μέγεθος πληρότητας Μ≥3.7. Στο *Σχήμα 3.9A* φαίνονται με κόκκινους κύκλους τα επίκεντρα των μετασεισμών στην εστία των οποίων οι μεταβολές της τάσης ήταν θετικές και με μπλε κύκλους οι μετασεισμοί που είχαν τις εστίες τους σε θέσεις όπου οι μεταβολές των τάσεων ήταν αρνητικές. Οι μετασεισμοί κατανέμονται τόσο κοντά στο ρήγμα όσο και μακρύτερα. Για να εκτιμηθεί η διέγερση μετασεισμών εκτός του ρήγματος του κύριου σεισμού, διαγράφηκαν από τα δεδομένα οι μετασεισμοί που έγιναν κοντά στο ρήγμα. Έτσι στο *Σχήμα 3.9B* εμφανίζονται οι μετασεισμοί χωρίς τους κοντινούς στο ρήγμα. Στα σχήματα εμφανίζονται μετασεισμοί που ενώ είχαν τις εστίες τους σε λοβούς θετικών μεταβολών των στατικών τάσεων στον τρισδιάστατο χώρο, η προβολή τους στην επιφάνεια, δηλαδή τα επίκεντρα, βρίσκονται σε περιοχές αρνητικών μεταβολών, γιατί η κλίση του ρήγματος αποκλίνει από την κατακόρυφη.



**Σχήμα 3.9: Α.** Κατανομή του πεδίου των τάσεων μετά το σεισμό που έγινε στις 14/8/2003, στο νησί της Λευκάδας. **Β.** Μεταβολές των τάσεων των μετασεισμών, χωρίς αυτούς που έγιναν γύρω από το ρήγμα. Τα επίκεντρα των μετασεισμών που είχαν τις εστίες τους σε περιοχές με θετικές μεταβολές τάσεων εμφανίζονται με κόκκινους κύκλους, ενώ με μπλε κύκλους τα επίκεντρα όσων είχαν τις εστίες τους σε θέσεις με αρνητικές μεταβολές τάσεων.

### 3.3.5 Πληρότητα

Προκειμένου να γίνει ποσοτική αποτίμηση της διέγερσης της σεισμικής δραστηριότητας, απαραίτητο είναι ένα πλήρες δείγμα δεδομένων.

Έχοντας όλα τα διαθέσιμα δεδομένα για τη μετασεισμική ακολουθία της Λευκάδας εξετάζεται η πληρότητα για το χρονικό διάστημα των 30 ημερών μετά το σεισμό. Από την εφαρμογή της μεθόδου της πληρότητας (Leptokaropoulos et al., 2013) διαπιστώθηκε ότι τα δεδομένα ήταν πλήρη για σεισμούς με μέγεθος Μ≥3.7.



**Σχήμα 3.10: Α.** Αθροιστική συχνότητα (κύκλοι) και συχνότητα (τετράγωνα) των σεισμών σε συνάρτηση με το μέγεθος για τους σεισμούς 30 ημέρες μετά τον κύριο. **Β.** Διαφορά μεταξύ των παρατηρούμενων δεδομένων και της θεωρητικής κατανομής, όπως σχηματίστηκε από τον υπολογισμό της μέγιστης πιθανότητας σαν συνάρτηση μεγέθους (GFT), με το ανοιχτό χρώμα. Διαφορά μεταξύ των παρατηρούμενων και των 1000 τυχαίων συνθετικών καταλόγων που σχηματίστηκαν σύμφωνα με τον ορισμό της καλύτερης τροποποιημένης προσαρμογής (MGFT), με το σκούρο χρώμα.

### 3.3.6 Ρυθμός Σεισμικότητας

Για να εξεταστεί η διέγερση σεισμικότητας, μετά τη γένεση του κύριου σεισμού, στη γύρω περιοχή υπολογίσθηκε ο ρυθμός σεισμικότητας της περιοχής για τους μετασεισμούς του έγιναν σε χρονικό διάστημα 30 ημερών μετά τον κύριο σεισμό και είχαν μέγεθος Μ≥3.7. Στο *Σχήμα 3.11* αναπαριστάται ο αθροιστικός αριθμός των μετασεισμών που έγιναν 30 ημέρες μετά το σεισμό. Τόσο ο αριθμός των μετασεισμών που έγιναν τις εστίες τους σε περιοχές με θετικές μεταβολές των τάσεων, όσο και ο αριθμός των μετασεισμών των οποίων οι εστίες τους βρίσκονταν σε θέσεις με αρνητικές τιμές τάσεων εμφανίζεται αυξημένος. Παρατηρείται μία παράλληλη αύξηση του ρυθμού σεισμικότητας και για τις δύο περιοχές μεταβολών των τάσεων.



**Σχήμα 3.11:** Ρυθμός σεισμικότητας της γύρω περιοχής μετά το σεισμό της Λευκάδας στις 14/8/2003. Με την κόκκινη γραμμή εμφανίζεται ο ρυθμός σεισμικότητας της κοντινής περιοχής για τους μετασεισμούς που έγιναν 30 ημέρες μετά τον κύριο και είχαν τις εστίες τους σε θετικές περιοχές τάσεων, ενώ με τη μπλε ο ρυθμός σεισμικότητας της γύρω περιοχής για τους μετασεισμούς που έγιναν 30 ημέρες μετά τον κύριο και είχαν τις εστίες τους σε θετικές περιοχές τάσεων, ενώ με τη μπλε ο ρυθμός σεισμικότητας της γύρω περιοχής για τους μετασεισμούς που έγιναν 30 ημέρες μετά τον κύριο και είχαν τις εστίες τους σε θετικές περιοχές τάσεων.

Σχεδιάστηκε το ίδιο διάγραμμα και για την περίπτωση στην οποία αφαιρέθηκαν οι πλησιέστεροι στο ρήγμα μετασεισμοί και τα αποτελέσματα φαίνονται στο Σχήμα 3.12. Η αφαίρεση των μετασεισμών έγινε μετά την προβολή του ρήγματος στην επιφάνεια, σχηματίζοντας ένα ορθογώνιο παραλληλόγραμμο σχήμα. Με αυτόν τον τρόπο μπορεί να γίνει αντιληπτή η επίδραση του σεισμού στη διέγερση της σεισμικότητας της γύρω περιοχής, χωρίς να λαμβάνονται υπόψη οι κοντινοί μετασεισμοί στο ρήγμα. Όπως φαίνεται αυτό το διάγραμμα δεν παρουσιάζει μεγάλες διαφορές με το προηγούμενο, παρά μόνο τη μικρή μείωση του αθροιστικού αριθμού των σεισμών, αφού δεν συμπεριλήφθηκαν στους υπολογισμούς οι κοντινοί μετασεισμοί στο ρήγμα. Το μεγαλύτερο μέρος των μετασεισμών κατανέμεται στους δύο ΝΔ θετικούς και αρνητικούς λοβούς των τάσεων.



**Σχήμα 3.12:** Ρυθμός σεισμικότητας της γύρω περιοχής μετά το σεισμό της Λευκάδας, έχοντας διαγράψει τους κοντινούς στο ρήγμα μετασεισμούς. Με την κόκκινη γραμμή εμφανίζεται ο ρυθμός σεισμικότητας της κοντινής περιοχής για τους μετασεισμούς που έγιναν 30 ημέρες μετά τον κύριο και είχαν τις εστίες τους σε περιοχές με θετικές τιμές τάσεων, ενώ με τη μπλε ο ρυθμός σεισμικότητας της ίδιας περιοχής και για τους ίδιους μετασεισμούς που είχαν τις εστίες τους σε περιοχές με αρνητικές τιμές τάσεων.

Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται τα ποσοστά των μετασεισμών που είχαν τις εστίες τους σε περιοχές με θετικές και αρνητικές τιμές τάσεων καθώς και τα ποσοστά αυτών των μετασεισμών μετά την αφαίρεση των πλησιέστερων στο ρήγμα μετασεισμών. Γίνεται φανερό ότι τα ποσοστά των μετασεισμών που είχαν τις εστίες τους σε θετικές περιοχές τάσεων είναι μεγαλύτερα από τα ποσοστά των μετασεισμών που οι εστίες τους βρίσκονταν σε αρνητικές περιοχές τάσεων και στις δύο περιπτώσεις. Αυτά τα αποτελέσματα δείχνουν τον αυξημένο ρυθμό σεισμικότητας στην περιοχή της Λευκάδας μετά τη γένεση του κύριου σεισμού. Το συμπέρασμα αυτό έχει επιβεβαιωθεί τόσο από τους King et al. (1994), μετά τη μελέτη του σεισμού στο Landers (1992), όπου διαπιστώθηκε ότι οι μεταβολές των τάσεων Coulomb σχετίζονται με τη διέγερση σεισμικότητας στη γύρω περιοχή, όσο και από τον Stein (1999) που διαπίστωσε μελετώντας τον ίδιο σεισμό ότι περισσότεροι μετασεισμοί κατανέμονταν σε ζώνες που είχαν μεταβολή τάσης μεγαλύτερη από 0.1 bar κοντά στην περιοχή της διάρρηξης.

| Μετασεισμοί                          | Θετικές<br>Τιμές<br>Τάσεων<br>(%) | Αρνητικές<br>Τιμές<br>Τάσεων<br>(%) |
|--------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|
| Όλοι                                 | 53                                | 47                                  |
| Χωρίς τους<br>κοντινούς<br>στο ρήγμα | 56                                | 44                                  |

**Πίνακας 3.2:** Ποσοστά των μετασεισμών, οι εστίες των οποίων βρίσκονταν σε φωτεινές και σκιερές ζώνες για το σεισμό της Λευκάδας.

# 3.4 Σεισμική Ακολουθία ΝΔ Πελοποννήσου, Φεβρουάριος 2008

# 3.4.1 Εισαγωγή

Ισχυρός σεισμός έγινε στις 14 Φεβρουαρίου 2008, (10:09:25, GMT), στην περιοχή της Μεθώνης και έγινε αισθητός στο μεγαλύτερο μέρος της Νότιας Ελλάδας, στο Κάιρο και στην Καλάβρια της Νότιας Ιταλίας. Το επίκεντρο του κύριου σεισμού εντοπίστηκε στη νοτιοδυτική Πελοπόννησο,  $36.575^{\circ}B$  21.868°A και πρόκειται για ανάστροφο ρήγμα που διευθύνεται BΔ-NA. Το μέγεθος του σεισμού ήταν  $M_w$ =6.8 (GCMT), ενώ ακολούθησαν δύο ισχυροί μετασεισμοί. Ο πρώτος μετασεισμός έγινε την ίδια μέρα, δύο ώρες μετά τον κύριο (14/2/2008, 12:08:56, GMT), είχε επίκεντρο 36.438°B 22.026°A νοτιοδυτικά της Πελοποννήσου, μέγεθος  $M_w$ =6.5 (GCMT) και πρόκειται για ανάστροφο ρήγμα έχινε έξι μέρες μετά τον κύριο RΔ-NA. Ο δεύτερος ισχυρός μετασεισμός έγινε έξι μέρες μετά (20/2/2008, 18:27:08, GMT), είχε επίκεντρο 36.363°B 21.907°A., μέγεθος  $M_w$ =6.2 (GCMT) και το ρήγμα ήταν οριζόντιας μετατόπισης με διεύθυνση Α-Δ.

# 3.4.α 1ος Σεισμός της ακολουθίας, 14 Φεβρουαρίου 2008, $M_w$ =6.8

#### 3.4.2.α Σεισμικότητα πριν και μετά τον κύριο σεισμό

Η σεισμικότητα στη ΝΔ Πελοπόννησο, μετά το σεισμό που έγινε στις 14 Φεβρουαρίου 2008 απεικονίζεται στο Σχήμα 3.13. Ο χάρτης του Σχήματος 3.13Α παρουσιάζει όσους σεισμούς έγιναν 30 ημέρες πριν τον κύριο με μπλε τετράγωνα και κατανέμονται σε μία ευρεία περιοχή γύρω από το επίκεντρο του επερχόμενου σεισμού. Αυξημένος είναι ο αριθμός των σεισμών που έγιναν 7 ημέρες πριν, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.13B. Παρατηρείται σχετικά μεγάλο πλήθος προσεισμών στη γύρω περιοχή που κατανέμεται κοντά και μακρύτερα από το επίκεντρο του ισχυρού σεισμού που ακολούθησε όπως φαίνεται και στα δύο σχήματα. Πυκνή μετασεισμική δραστηριότητα που εκτεινόταν σε μία μεγάλη περιοχή γύρω από το επίκεντρο ακολούθησε 24 ώρες μετά το σεισμό (Σχήμα 3.13Γ). Η ίδια εικόνα παρατηρείται και μετά από 48 ώρες, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.13Δ. Η μετασεισμική δραστηριότητα έγινε εντονότερη μετά από 30 ημέρες (Σχήμα 3.13Ε) και εκτείνονταν σε μια μεγάλη περιοχή μακριά από το επίκεντρο του σεισμού, ενώ δε σταμάτησε και μετά από 60 ημέρες (Σχήμα 3.13ΣΤ), όπου παρατηρείται αύξηση του αριθμού των μετασεισμών. Τα δύο τελευταία σχήματα δείχνουν ένα μεγάλος πλήθος μετασεισμών στην περιοχή, ανάμεσα στους οποίους είναι και οι δύο ισχυρότεροι μετασεισμοί που ακολούθησαν αργότερα.

Μετά την μελέτη της χωρικής κατανομής της μετασεισμικής ακολουθίας μετά από 24 και 48 ώρες (Σχήμα 3.13Γ, Σχήμα 3.13Δ) στην περιοχή της ΝΔ Πελοποννήσου ορίστηκε το ρήγμα στην περιοχή. Στη συνέχεια, για να επιβεβαιωθούν τα παραπάνω αποτελέσματα συγκρίθηκαν με τα στοιχεία των Roumelioti et al. (2009), που μελέτησαν την ίδια σεισμική ακολουθία και παρατηρήθηκε συμφωνία. Η διερεύνηση της διέγερσης σεισμικότητας της γύρω περιοχής, μετά τη γένεση του σεισμού, έγινε από τη μελέτη των μετασεισμών 30 και 60 ημέρες (Σχήμα 3.13Ε, Σχήμα 3.13ΣΤ) μετά τον κύριο.



**Σχήμα 3.13:** Χωρική κατανομή της προσεισμικής και μετασεισμικής δραστηριότητας μετά το σεισμό της ΝΔ Πελοποννήσου. Φαίνεται το επίκεντρο του σεισμού με μεγάλο άστρο και ο μηχανισμός γένεσής του ως ισεμβαδική προβολή του κάτω ημισφαιρίου. Τα δύο μικρότερα άστρα αντιστοιχούν στα επίκεντρα των ισχυρότερων μετασεισμών που ακολούθησαν. **Α.** Οι προσεισμοί 30 ημέρες πριν τον κύριο σεισμό (μπλε τετράγωνα). **Β.** Οι προσεισμοί 7 ημέρες πριν τον κύριο σεισμοί (μοβ τετράγωνα). **Γ.** Μετασεισμοί 24 ώρες μετά τον κύριο σεισμό (κόκκινοι κύκλοι). **Δ.** Μετασεισμοί 48 ώρες μετά τον κύριο σεισμό (μοβ κύκλοι). **Ε.** Οι μετασεισμοί 30 ημέρες μετά το σεισμό (πράσινοι ρόμβοι). **ΣΤ.** Η κατανομή των επικέντρων των μετασεισμών 60 ημέρες μετά τον ισχυρό σεισμό (κίτρινοι ρόμβοι).

# 3.4.3.α Υπολογισμός Τάσεων Coulomb

Μετά τη μελέτη των μετασεισμικών ακολουθιών και τον προσδιορισμό των γεωμετρικών στοιχείων του ρήγματος, εξετάστηκαν και στοιχεία από άλλες έρευνες με σκοπό το σχεδιασμό του μοντέλου μεταβολής των τάσεων.

Σύμφωνα με τον κατάλογο GCMT ο μηχανισμός του ρήγματος του κύριου σεισμού είχε παράταξη 332°, γωνία κλίσης 6°, γωνία ολίσθησης 87° και μέγεθος  $M_w$ =6.8. Oι Roumelioti et al. (2009) βρήκαν ότι ο μηχανισμός γένεσης του ρήγματος ήταν παράταξη 288°, γωνία κλίσης 10°, γωνία ολίσθησης 73° και εκτίμησαν το μέγεθος  $M_w$ =6.7. Επίσης, υπολόγισαν το βάθος του σεισμού στα 30 km και το μήκος του ρήγματος ίσο με 30 km. Το μήκος του ρήγματος είναι σε καλή συμφωνία με αυτό που προκύπτει από τις σχέσεις των Papazachos et al. (2004) και ισούται με 34.6 km καθώς και αυτό από τις σχέσεις των Wells-Coppersmith (1994) που ήταν ίσο με 33.5 km. Χρησιμοποιώντας αυτά τα στοιχεία και τη σεισμική ροπή  $M_o$ =2.37·10<sup>26</sup> dyn·cm (GCMT), υπολογίσθηκε ολίσθηση ίση με 0.83 μέτρα.

Στο Σχήμα 3.14Α παρουσιάζεται το ρήγμα, το επίκεντρο καθώς και ο μηχανισμός γένεσης του κύριου σεισμού. Επίσης, εμφανίζονται και τα επίκεντρα των ισχυρότερων μετασεισμών που ακολούθησαν. Η χωρική κατανομή των μεταβολών της τάσης που οφείλονται στο συγκεκριμένο σεισμό φαίνεται στο Σχήμα 3.14Β. Στο ίδιο σχήμα παρατηρείται ότι οι δύο ισχυροί μετασεισμοί που ακολούθησαν βρίσκονται στη ζώνη των θετικών τιμών των τάσεων και επιβεβαιώνεται ότι η γένεση ισχυρών σεισμών ευνοείται στις φωτεινές ζώνες και όχι στις σκιερές.



**Σχήμα 3.14: Α.** Σχηματική παρουσίαση του σεισμού που εκδηλώθηκε στις 14/2/2008, νότια της Πελοποννήσου. Με το μεγαλύτερο άστρο απεικονίζεται το επίκεντρο του κύριου σεισμού, ενώ με τα μικρότερα άστρα τα επίκεντρα των μετασεισμών που ακολούθησαν. Επίσης, φαίνονται το ανάστροφο ρήγμα και ο μηχανισμός γένεσης του σεισμού. **Β.** Οι μεταβολές των τάσεων Coulomb κατά τη σεισμική ολίσθηση του κύριου σεισμού. Όπως φαίνεται, οι μετασεισμοί που ακολούθησαν βρισκόταν στις περιοχές όπου οι τιμές των τάσεων ήταν θετικές, με αποτέλεσμα την επιταχυμένη γένεσή τους.

#### 3.4.4.α Χωρική Κατανομή Μετασεισμών

Για να διερευνηθεί η σεισμικότητα στην περιοχή μετά από τον ισχυρό σεισμό χαρτογραφήθηκαν τα επίκεντρα των μεταβολών των τάσεων των μετασεισμών που ακολούθησαν μετά από 30 ημέρες στις εστίες των μετασεισμών αυτών. Στο Σχήμα 3.15Α παρουσιάζονται τα επίκεντρα των μετασεισμών με κόκκινους και μπλε κύκλους για τους μετασεισμούς που είχαν τις εστίες τους σε περιοχές με θετικές και αρνητικές τιμές τάσεων, αντίστοιχα. Το μεγαλύτερο μέρος των μετασεισμών συγκεντρώθηκε κοντά στο ρήγμα. Για την εκτίμηση της διέγερσης μετασεισμών στην εκτός του ρήγματος περιοχή, αφαιρέθηκαν από το δείγμα δεδομένων οι μετασεισμοί που έγιναν πάνω στο ρήγμα. Έτσι για τον ίδιο σεισμό χαρτογραφήθηκαν ξανά τα επίκεντρα των μετασεισμών με τις μεταβολές των τάσεων τους, χωρίς όμως τους μετασεισμούς που έγιναν κοντά στο ρήγμα και φαίνονται στο Σχήμα 3.15Β. Τα δεδομένα των μετασεισμών που φαίνονται στα σχήματα ήταν πλήρη για μεγέθη Μ≥3.7. Στα σχήματα παρατηρούνται μετασεισμοί που ενώ είχαν τις εστίες τους σε λοβούς αρνητικών μεταβολών των στατικών τάσεων στον τρισδιάστατο χώρο, η προβολή τους στην επιφάνεια, δηλαδή τα επίκεντρα, βρίσκονται σε περιοχές θετικών μεταβολών, γιατί η κλίση του ρήγματος αποκλίνει από την κατακόρυφη.



**Σχήμα 3.15: Α.** Χωρική κατανομή των τάσεων Coulomb και της μετασεισμικής ακολουθίας του σεισμού που έγινε στις 14/2/2008, ΝΔ της Πελοποννήσου. **Β.** Σχεδίαση ξανά του πρώτου χάρτη, μετά την αφαίρεση των μετασεισμών γύρω από το ρήγμα. Οι κόκκινοι και μπλε κύκλοι απεικονίζουν τους μετασεισμούς στην εστία των οποίων οι μεταβολές της τάσης ήταν θετικές και αρνητικές, αντίστοιχα.

# 3.4.5.α Πληρότητα

Για την μελέτη της ποσοτικής εκτίμησης της διέγερσης της σεισμικής δραστηριότητας, είναι απαραίτητο ένα πλήρες δείγμα δεδομένων.

Η πληρότητα για το χρονικό διάστημα των 30 ημερών μετά το σεισμό της ΝΔ Πελοποννήσου υπολογίσθηκε διαθέτοντας όλα τα διαθέσιμα δεδομένα για αυτή τη μετασεισμική ακολουθία. Από την εφαρμογή της μεθόδου της πληρότητας (Leptokaropoulos et al., 2013) διαπιστώθηκε ότι τα δεδομένα ήταν πλήρη για σεισμούς με Μ≥3.7.



**Σχήμα 3.16: Α.** Αθροιστική συχνότητα (κύκλοι) και συχνότητα (τετράγωνα) των σεισμών σε συνάρτηση με το μέγεθος για τους σεισμούς 30 ημέρες μετά τον κύριο. **Β.** Διαφορά μεταξύ των παρατηρούμενων δεδομένων και της θεωρητικής κατανομής, όπως σχηματίστηκε από τον υπολογισμό της μέγιστης πιθανότητας σαν συνάρτηση μεγέθους (GFT), με το ανοιχτό χρώμα. Διαφορά μεταξύ των παρατηρούμενων δεδομένων και των 1000 τυχαίων συνθετικών καταλόγων που σχηματίστηκαν σύμφωνα με τον ορισμό της καλύτερης τροποποιημένης προσαρμογής (MGFT), με το σκούρο χρώμα.

#### 3.4.6.α Ρυθμός Σεισμικότητας

Προκειμένου να μελετηθεί ο ρυθμός σεισμικότητας στη ΝΔ Πελοπόννησο, μετά τον κύριο σεισμό της  $14^{\eta\varsigma}$  Φεβρουαρίου 2008, σχηματίστηκαν αθροιστικά διαγράμματα για όσους μετασεισμούς έγιναν μετά από 30 ημέρες και είχαν μέγεθος M≥3.7. Το *Σχήμα 3.17* δείχνει το μεγάλο πλήθος των μετασεισμών που ακολούθησαν, στο οποίο συμπεριλαμβάνονται και οι ισχυροί μετασεισμοί που έγιναν λίγες μέρες αργότερα. Όπως φαίνεται ο αθροιστικός αριθμός των μετασεισμών, οι εστίες των οποίων βρίσκονταν σε περιοχές με αρνητικές τιμές είναι μεγαλύτερος από τον αριθμό των μετασεισμών που είχαν τις εστίες τους σε περιοχές με τις θετικές τιμές τάσεων. Επίσης, στο ίδιο σχήμα παρατηρείται ότι και στις δύο περιπτώσεις εμφανίζεται μία παράλληλη αύξηση ο αριθμού των μετασεισμών, με εξαίρεση την 29<sup>η</sup> και την 30<sup>η</sup> ημέρα όπου οι τιμές τους είναι σχεδόν ίδιες.



**Σχήμα 3.17:** Ο ρυθμός σεισμικότητας της κοντινής στο επίκεντρο περιοχής μετά το σεισμό της ΝΔ Πελοποννήσου στις 14/2/2008. Οι μετασεισμοί που εστίες τους βρίσκονταν σε θέσεις με θετικές μεταβολές των τάσεων εμφανίζονται με την κόκκινη γραμμή, ενώ οι μετασεισμοί που εστίες τους βρίσκονταν σε θέσεις αρνητικές μεταβολές των τάσεων με τη μπλε γραμμή.

Το Σχήμα 3.18 αναπαριστά το ρυθμό σεισμικότητας για τους ίδιους μετασεισμούς με τη διαφορά ότι έχουν διαγραφεί ο πλησιέστεροι στο ρήγμα μετασεισμοί. Λαμβάνοντας υπόψη την προβολή του ρήγματος στην επιφάνεια που είχε σχήμα ορθογώνιο παραλληλόγραμμο, έγινε η διαγραφή των κοντινών στο ρήγμα μετασεισμών, κάνοντας αντιληπτή την επίδραση του σεισμού στη σεισμικότητα της περιοχής, χωρίς να συμπεριλαμβάνονται όσοι μετασεισμών και για αυτούς που είχαν τις εστίες τους σε περιοχές θετικών τιμών των τάσεων, αλλά και για εκείνους που είχαν τις εστίες τους σε περιοχές θετικών τιμών των τάσεων. Ιδιαίτερα μειωμένοι εμφανίζονται οι μετασεισμοί που είχαν τις εστίες σου στα στο σρήγμα και αφαιρέθηκαν. Ακόμη, φαίνεται ότι από την 1<sup>η</sup> έως και τη 12<sup>η</sup> ημέρα οι μετασεισμοί, οι εστίες των οποίων βρίσκονταν σε περιοχές με αρνητικές τιμές, είναι περισσότεροι, αντίθετα από τη 13<sup>η</sup> μέχρι την 30<sup>η</sup> ημέρα οι μετασεισμοί που είχαν τις εστίες τώς τάσεις γίνονται περιοχές με αρνητικές τιμές, είναι



**Σχήμα 3.18:** Ρυθμός σεισμικότητας της κοντινής στο επίκεντρο περιοχής μετά το σεισμό της ΝΔ Πελοποννήσου, αφού διαγράφηκαν οι μετασεισμοί γύρω από το ρήγμα. Οι μετασεισμοί, οι εστίες των οποίων ήταν σε περιοχές με θετικές μεταβολές των τάσεων απεικονίζονται με κόκκινη γραμμή, οι μετασεισμοί, οι εστίες των οποίων ήταν σε περιοχές με αρνητικές μεταβολές των τάσεων με μπλε γραμμή.

Ο Πίνακας 3.3 δείχνει την αναλογία των ποσοστών των μετασεισμών που είχαν τις εστίες τους σε φωτεινές και σκιερές ζώνες. Η κατανομή των μετασεισμών τόσο στις φωτεινές όσο και στις σκιερές ζώνες είναι ίδια όταν λαμβάνονται υπόψη όλοι οι μετασεισμοί, ενώ μετά την αφαίρεση των κοντινών στο ρήγμα μετασεισμών υπερτερούν οι μετασεισμοί των οποίων οι εστίες βρίσκονταν σε περιοχές με θετικές τιμές των τάσεων. Λαμβάνοντας υπόψη το συμπέρασμα που διαπιστώθηκε πρώτα από τους King et al. (1994), που μελέτησαν το σεισμό του Landers (1992) και απέδειξαν ότι οι μεταβολές των τάσεων Coulomb ενός σεισμού μπορούν να συσχετιστούν με τη διέγερση σεισμικότητας στη γύρω περιοχή καθώς και ότι οι περισσότεροι μετασεισμοί ήταν συγκεντρωμένοι εκεί όπου η μεταβολή των τάσεων ήταν αυξημένη, γίνεται φανερός ο αυξημένος ρυθμός σεισμικότητας στην περιοχή της ΝΔ Πελοποννήσου, μετά τη γένεση του κύριο σεισμού. Το ίδιο συμπέρασμα διαπιστώνεται και από την έρευνα του Stein (1999), μετά τη μελέτη των μεταβολών των τάσεων του σεισμού στο Landers (1992), ο οποίος παρατήρησε ότι οι περισσότεροι μετασεισμοί κατανέμονταν σε ζώνες που είχαν μεταβολή τάσης μεγαλύτερη από 0.1 bar κοντά στην περιοχή της διάρρηξης και ότι στον έναν από τους θετικούς λοβούς των τάσεων του σεισμού του Landers, έγινε ο σεισμός στο Big Bear που ακολούθησε αργότερα, όπως συνέβη και με τους δύο ισχυρούς μετασεισμούς που έγιναν στη ΝΔ Πελοπόννησο και κατανέμονταν στις θετικές περιοχές των τάσεων.

| Μετασεισμοί                          | Θετικές<br>Τιμές<br>Τάσεων<br>(%) | Αρνητικές<br>Τιμές<br>Τάσεων<br>(%) |
|--------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|
| Όλοι                                 | 50                                | 50                                  |
| Χωρίς τους<br>κοντινούς<br>στο ρήγμα | 58                                | 42                                  |

**Πίνακας 3.3:** Ποσοστά των μετασεισμών, που οι εστίες τους βρίσκονταν σε περιοχές με θετικές και αρνητικές μεταβολές των τάσεων για το σεισμό της ΝΔ Πελοποννήσου.

# 3.4.β 2ος Σεισμός της ακολουθίας, 14 Φεβρουαρίου 2008, $M_w$ =6.5

# 3.4.2.β Σεισμικότητα πριν και μετά τον κύριο σεισμό

Στο Σχήμα 3.19 παρουσιάζεται η σεισμικότητα στη ΝΔ Πελοπόννησο τόσο πριν όσο και μετά τον πρώτο ισχυρό μετασεισμό που ακολούθησε στην περιοχή. Ο μεγάλος αριθμός σεισμών που προηγήθηκε 30 ημέρες του ισχυρού μετασεισμού φαίνεται στο Σχήμα 3.19Α και κατανέμονταν σε μία ευρεία περιοχή γύρω από το επίκεντρο του επερχόμενου ισχυρού μετασεισμού. Όσοι σεισμοί έγιναν 7 ημέρες πριν εμφανίζονται στο Σχήμα 3.19Β (μοβ τετράγωνα), όπου και παρατηρείται μεγάλο πλήθος σεισμών ακόμα και σε περιοχές μακριά από το επίκεντρο του ισχυρού μετασεισμού που ακολούθησε αργότερα. Το μεγάλο πλήθος των προσεισμών οφείλεται και στον κύριο σεισμό που προηγήθηκε με αποτέλεσμα μέρος των προσεισμών να αποτελούν τους μετασεισμούς του πρώτου ισχυρού σεισμού. Το Σχήμα 3.19Γ, απεικονίζει με κόκκινους κύκλους τους σεισμούς που ακολούθησαν μετά από 24 ώρες και κατανέμονταν τόσο κοντά στο επίκεντρο του ισχυρού μετασεισμού, όσο και μακρύτερα. Στο Σχήμα 3.19Δ (μοβ κύκλοι) φαίνεται ο αυξημένος αριθμός σεισμών που ακολούθησε μετά από 48 ώρες και συγκεντρώνονταν κοντά στο επίκεντρο, αλλά και σε μακρύτερες αποστάσεις. Εντονότατη μετασεισμική ακολουθία παρατηρείται μετά από 30 ημέρες που κατανέμεται σε μία μεγάλη έκταση τόσο κοντά όσο και μακρύτερα από το επίκεντρο, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.19Ε (πράσινοι ρόμβοι). Πυκνή μετασεισμική δραστηριότητα συνεχίζει να εμφανίζεται στη γύρω περιοχή και μετά από 60 ημέρες όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.19ΣΤ, με κίτρινους ρόμβους.

Με βάση τη χωρική κατανομή των μετασεισμών που έγιναν μετά από 24 και 48 ώρες από τον ισχυρό μετασεισμό (*Σχήμα 3.19Γ, Σχήμα 3.19Δ*) ορίστηκε το ρήγμα στην περιοχή, προσδιορίστηκαν τα χαρακτηριστικά του και στη συνέχεια επιβεβαιώθηκαν από τη μελέτη των Roumelioti et al. (2009). Η διέγερση

σεισμικότητας της περιοχής, μετά τον ισχυρό μετασεισμό, διερευνάται με τη βοήθεια των χαρτών που παρουσιάζουν τη σεισμικότητα 30 και 60 ημέρες μετά το σεισμό (Σχήμα 3.19Ε, Σχήμα 3.19ΣΤ).



**Σχήμα 3.19:** Χωρική κατανομή της σεισμικής δραστηριότητας πριν και μετά τον πρώτο ισχυρό μετασεισμό. Το επίκεντρο του ισχυρού μετασεισμού αναπαριστάται με το μεγάλο άστρο και ο μηχανισμός γένεσής του ως ισεμβαδική προβολή του κάτω ημισφαιρίου. Τα δύο μικρότερα άστρα αντιστοιχούν στα επίκεντρα των σεισμών που προηγήθηκαν και ακολούθησαν. **Α.** Οι προσεισμοί 30 ημέρες πριν τον ισχυρό μετασεισμό (μπλε τετράγωνα). **Β.** Οι προσεισμοί 7 ημέρες πριν το σεισμό (μοβ τετράγωνα). **Γ.** Μετασεισμοί 24 ώρες μετά τον σεισμό (κόκκινοι κύκλοι). **Δ.** Μετασεισμοί 48 ώρες μετά τον ισχυρό μετασεισμό (πράσινοι ρόμβοι). **ΣΤ.** Οι μετασεισμοί 60 ημέρες μετά το σεισμό (κίτρινοι ρόμβοι).

#### 3.4.3.β Υπολογισμός Τάσεων Coulomb

Όσο αναφορά τον πρώτο μετασεισμό από τον κατάλογο GCMT δίνεται ο παρακάτω μηχανισμός γένεσης με παράταξη 337°, γωνία κλίσης 5°, γωνία ολίσθησης 127° και μέγεθος  $M_w$ =6.5. Οι Roumelioti et al. (2009) πρότειναν μηχανισμό με παράταξη 312°, γωνία κλίσης 18°, γωνία ολίσθησης 93°, μέγεθος  $M_w$ =6.1 και εστιακό βάθος στα 33 km. Από τα παραπάνω στοιχεία και με τη χρήση της σεισμικής ροπής,  $M_o$ =8.1·10<sup>25</sup> dyn·cm (GCMT), βρέθηκε η ολίσθηση ίση με 0.28 μέτρα.

Το ανάστροφο ρήγμα του πρώτου μετασεισμού εμφανίζεται στο Σχήμα 3.20Α μαζί με το μηχανισμό γένεσής του και το επίκεντρο. Επιπλέον, διακρίνονται το επίκεντρο του κύριου σεισμού που προηγήθηκε και του δεύτερου ισχυρού μετασεισμού που ακολούθησε. Οι τάσεις Coulomb φαίνονται στο Σχήμα 3.20Β, με τις θετικές τιμές να εμφανίζουν προσανατολισμό ΒΔ-ΝΑ, ενώ οι αρνητικές ΒΑ-ΝΔ.



**Σχήμα 3.20: Α.** Ο ισχυρός μετασεισμός που ακολούθησε στις 14/2/2008. Το επίκεντρο του πρώτου ισχυρού μετασεισμού απεικονίζεται με το μεγαλύτερο άστρο. Φαίνονται το ανάστροφο ρήγμα, ο μηχανισμός γένεσης του μετασεισμού και με τα μικρότερα άστρα τα επίκεντρα του κύριου σεισμού καθώς και του μετασεισμού που έγινε αργότερα. **Β.** Απεικόνιση των μεταβολών των τάσεων κατά τη σεισμική ολίσθηση που σχετίζονται με τον πρώτο μετασεισμό.

#### 3.4.4.β Χωρική Κατανομή Μετασεισμών

Χαρτογραφήθηκαν τα επίκεντρα των μετασεισμών, ώστε να εξεταστεί η σεισμικότητα στην περιοχή μετά την γένεση αυτού του σεισμού. Αυτοί οι χάρτες απεικονίζουν τα επίκεντρα των μετασεισμών που έγιναν μετά από 30 ημέρες και είχαν μέγεθος πληρότητας M≥3.7, αφού πρώτα υπολογίσθηκαν οι μεταβολές των τάσεων τους στις εστίες των μετασεισμών αυτών και φαίνονται στο *Σχήμα 3.21A*. Από το ίδιο σχήμα φαίνεται ότι η κατανομή του μεγαλύτερου μέρους των μετασεισμών ήταν κοντά στο ρήγμα και ένα μικρότερο μέρος τους ήταν μακρύτερα από αυτό. Για να διερευνηθεί η διέγερση μετασεισμών εκτός του ρήγματος, διαγράφηκαν από το δείγμα δεδομένων οι μετασεισμοί που έγιναν κοντά στο ρήγμα. Στο *Σχήμα 3.21B* παρουσιάζονται οι ίδιοι μετασεισμοί, με τη διαφορά ότι δε συμπεριλήφθηκαν όσοι είχαν γίνει γύρω από το ρήγμα. Οι κόκκινοι κύκλοι αντιστοιχούν στα επίκεντρα των μετασεισμών οι εστίες των οποίων βρίσκονταν σε περιοχές με θετικές μεταβολές τάσεων, ενώ οι μπλε κύκλοι στα επίκεντρα όσων είχαν τις εστίες τους σε περιοχές με αρνητικές μεταβολές τάσεων.



**Σχήμα 3.21: Α.** Κατανομή των τάσεων Coulomb και της μετασεισμικής ακολουθίας έπειτα από τον ισχυρό μετασεισμό στις 14/2/2008, ΝΔ της Πελοποννήσου. **Β.** Αναπαράσταση του πρώτου χάρτη, μετά την αφαίρεση των πλησιέστερων στο ρήγμα μετασεισμών. Στα δύο σχήματα οι κόκκινοι και μπλε κύκλοι δείχνουν τα επίκεντρα των μετασεισμών που οι εστίες τους βρίσκονταν σε περιοχές με θετικές και αρνητικές τιμές τάσεων, αντίστοιχα.

#### 3.4.5.β Πληρότητα

Απαραίτητο είναι ένα πλήρες δείγμα δεδομένων, ώστε να διερευνηθεί ποσοτικά η διέγερση της μετασεισμικής δραστηριότητας.

Με βάση όλα τα διαθέσιμα δεδομένα για αυτήν τη μετασεισμική ακολουθία υπολογίσθηκε η πληρότητα των μεγεθών της για το χρονικό διάστημα των 30 ημερών μετά το σεισμό. Μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου της πληρότητας (Leptokaropoulos et al., 2013) διαπιστώθηκε ότι τα δεδομένα ήταν πλήρη για σεισμούς με μέγεθος M≥3.7.



**Σχήμα 3.22: Α.** Αθροιστική συχνότητα (κύκλοι) και συχνότητα (τετράγωνα) των σεισμών σε συνάρτηση με το μέγεθος για τους σεισμούς 30 ημέρες μετά τον κύριο. **Β.** Διαφορά μεταξύ των παρατηρούμενων δεδομένων και της θεωρητικής κατανομής, όπως σχηματίστηκε από τον υπολογισμό της μέγιστης πιθανότητας σαν συνάρτηση μεγέθους (GFT), με το ανοιχτό χρώμα. Διαφορά μεταξύ των παρατηρούμενων δεδομένων και των 1000 τυχαίων συνθετικών καταλόγων που σχηματίστηκαν σύμφωνα με τον ορισμό της καλύτερης τροποποιημένης προσαρμογής (MGFT), με το σκούρο χρώμα.

## 3.4.6.β Ρυθμός Σεισμικότητας

Με σκοπό να μελετηθεί ο ρυθμός σεισμικότητας μετά τον πρώτο ισχυρό σεισμό που έγινε στις 14 Φεβρουαρίου 2008, στη ΝΔ Πελοπόννησο, κατασκευάστηκαν αθροιστικά διαγράμματα. Στο Σχήμα 3.22 παρουσιάζεται ο αθροιστικός αριθμός των μετασεισμών που είχαν μέγεθος Μ≥3.7 και έγιναν σε χρονικό διάστημα 30 ημερών μετά από αυτόν τον ισχυρό μετασεισμό. Ο αριθμός των μετασεισμών των οποίων οι εστίες τους βρίσκονταν σε περιοχές με θετικές τάσεις εμφανίζεται ιδιαίτερα μεγάλος, σε αντίθεση με τον αριθμό των μετασεισμών των οποίων οι εστίες τους βρίσκονται σε περιοχές με αρνητικές τιμές που είναι μικρότερος. Την 6<sup>η</sup> ημέρα μετά τον ισχυρό μετασεισμό εμφανίζεται μια μεγαλύτερη αύξηση του αριθμού των μετασεισμών που οι εστίες τους βρίσκονται στις φωτεινές ζώνες, λόγω της γένεσης του δεύτερου ισχυρότερου μετασεισμού.



**Σχήμα 3.22:** Απεικόνιση του ρυθμού σεισμικότητας στην περιοχή της ΝΔ Πελοποννήσου μετά τον πρώτο ισχυρό μετασεισμό. Η κόκκινη γραμμή δείχνει το ρυθμό σεισμικότητας της γύρω περιοχής για τους μετασεισμούς που έγιναν 30 ημέρες μετά τον κύριο, των οποίων οι εστίες ήταν σε φωτεινές περιοχές, ενώ η μπλε το ρυθμό σεισμικότητας της γύρω περιοχής για τους ίδιους μετασεισμούς που είχαν τις εστίες τους σε σκιερές ζώνες.

Το Σχήμα 3.23 αναπαριστά το ρυθμό σεισμικότητας για τους ίδιους μετασεισμούς, χωρίς να λαμβάνονται υπόψη αυτοί που έγιναν γύρω από το ρήγμα. Λαμβάνοντας υπόψη την προβολή του ρήγματος στην επιφάνεια που είχε σχήμα ορθογώνιο παραλληλόγραμμο, έγινε η αφαίρεση των κοντινών στο ρήγμα μετασεισμών, κάνοντας αντιληπτή την επίδραση του σεισμού στη σεισμικότητα της γύρω περιοχής. Φαίνεται μια μείωση του αριθμού των μετασεισμών που είχαν τις εστίες τους σε περιοχές με θετικές τάσεις, γιατί μέρος τους αφαιρέθηκε αφού είχαν γίνει κοντά στο ρήγμα. Επίσης, ο αριθμός των μετασεισμών των οποίων οι εστίες τους ήταν σε περιοχές με αρνητικές τάσεις έχει μειωθεί σχεδόν στο μισό του αρχικού αριθμού επειδή το μεγαλύτερο μέρος τους έγινε πάνω και πλησίον του ρήγματος και αφαιρέθηκαν από το υπολογισμό του ρυθμού σεισμικότητας.



**Σχήμα 3.23:** Ρυθμός σεισμικότητας στην περιοχή της ΝΔ Πελοποννήσου μετά τον πρώτο ισχυρό μετασεισμό, αφού διαγράφηκαν οι μετασεισμοί γύρω από το ρήγμα. Η κόκκινη γραμμή δείχνει το ρυθμό σεισμικότητας της περιοχής για τους μετασεισμούς που έγιναν 30 ημέρες μετά τον κύριο, των οποίων οι εστίες ήταν σε φωτεινές περιοχές, ενώ η μπλε το ρυθμό σεισμικότητας της περιοχής για τους μετασεισμούς που είχαν τις εστίες τους σε σκιερές ζώνες.

Ο Πίνακας 3.4 εμφανίζει τα ποσοστά των μετασεισμών που είχαν τις εστίες τους σε θέσεις με θετικές και αρνητικές τιμές τάσεων. Το ποσοστό των μετασεισμών που είχαν τις εστίες τους σε περιοχές με θετικές τάσεις είναι αρκετά μεγαλύτερο από το ποσοστό των μετασεισμών των οποίων οι εστίες βρίσκονταν σε περιοχές αρνητικών τάσεων. Ακόμα και μετά την αφαίρεση των μετασεισμών γύρω από το ρήγμα το ποσοστό των μετασεισμών που είχαν τις εστίες τους σε περιοχές με θετικές τάσεις συνεχίζει να είναι μεγαλύτερο από το ποσοστό των αρνητικών τάσεων. Με βάση αυτά τα αποτελέσματα διαπιστώνεται αυξημένος ρυθμός σεισμικότητας στην περιοχή μετά τη γένεση του πρώτου ισχυρού μετασεισμού. Αυτό το αποτέλεσμα βρίσκεται σε συμφωνία με το συμπέρασμα των King et al. (1994), και του Stein (1999), που παρατήρησαν ότι περισσότεροι μετασεισμοί κατανέμονταν σε ζώνες που είχαν αυξημένη μεταβολή τάσης. **Πίνακας 3.4:** Ποσοστά των μετασεισμών, οι εστίες των οποίων βρίσκονται σε περιοχές θετικών και αρνητικών τιμών των τάσεων μετά τον πρώτο ισχυρό μετασεισμό στη ΝΔ Πελοπόννησο.

| Μετασεισμοί                          | Θετικές<br>Τιμές<br>Τάσεων<br>(%) | Αρνητικές<br>Τιμές<br>Τάσεων<br>(%) |
|--------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|
| Όλοι                                 | 75                                | 25                                  |
| Χωρίς τους<br>κοντινούς<br>στο ρήγμα | 77                                | 23                                  |

# 3.4.γ 3ος Σεισμός της ακολουθίας, 20 Φεβρουαρίου 2008, $M_w$ =6.2

## 3.4.2. γ Σεισμικότητα πριν και μετά τον κύριο σεισμό

Η σεισμικότητα στη γύρω περιοχή μετά από το δεύτερο ισχυρό μετασεισμό μελετήθηκε τόσο πριν τη γένεση του όσο και μετά και αναπαραστάθηκαν οι χάρτες που φαίνονται στο Σχήμα 3.24. Ο μεγάλος αριθμός σεισμών που έγινε 30 ημέρες πριν τον ισχυρό μετασεισμό φαίνεται στο Σχήμα 3.24Α, και κατανέμονταν σε μία μεγάλη έκταση κοντά στο επίκεντρο, αλλά και μακρύτερα. Ο αριθμός των σεισμών που έγινε 7 ημέρες πριν φαίνεται στο Σχήμα 3.24B, και η χωρική κατανομή τους δεν αλλάζει από την προηγούμενη. Παρατηρείται έντονη προσεισμική δραστηριότητα και στα δύο σχήματα που μπορεί να εξηγηθεί από ότι συμπεριλαμβάνονται και οι μετασεισμοί που ακολούθησαν μετά από τους ισχυρούς σεισμούς που προηγήθηκαν. Ακολούθησε μεγάλο πλήθος μετασεισμών στη γύρω περιοχή μετά από 24 ώρες που απεικονίζεται στο Σχήμα 3.24Γ με κόκκινους κύκλους, καθώς και μεγάλο πλήθος μετασεισμών μετά από 48 ώρες όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.24Δ, με τους μοβ κύκλους. Στο Σχήμα 3.24Ε, εμφανίζεται η εντονότατη μετασεισμική δραστηριότητα στην περιοχή που ακολούθησε 30 ημέρες μετά και στο Σχήμα 3.24ΣΤ, με τους κίτρινους ρόμβους συνεχίζει να εμφανίζεται το μεγάλο πλήθος των μετασεισμών για χρονικό διάστημα 60 ημερών μετά το σεισμό που συγκεντρώνονταν σε μία μεγάλη έκταση στη γύρω περιοχή.

Από τη χωρική κατανομή των μετασεισμών μετά από 24 και 48 ώρες (Σχήμα 3.24Γ, Σχήμα 3.24Δ) καθορίστηκε το ρήγμα, οριζόντιας μετατόπισης, για το δεύτερο ισχυρό μετασεισμό, τα χαρακτηριστικά του οποίου επαληθεύτηκαν και από τους Roumelioti et al. (2009). Η σεισμικότητα στην περιοχή εξετάζεται από τους χάρτες που εμφανίζουν τους μετασεισμούς μετά από 30 και 60 ημέρες από το δεύτερο ισχυρό μετασεισμό (Σχήμα 3.24Ε, Σχήμα 3.24ΣΤ).



**Σχήμα 3.24:** Χωρική κατανομή της σεισμικής δραστηριότητας πριν και μετά το δεύτερο ισχυρό μετασεισμό στη ΝΔ Πελοπόννησο, το επίκεντρο του οποίου φαίνεται με άστρο και ο μηχανισμός γένεσής του ως ισεμβαδική προβολή του κάτω ημισφαιρίου. Τα μικρότερα άστρα δείχνουν τα επίκεντρα των σεισμών που προηγήθηκαν. **Α.** Οι προσεισμοί 30 ημέρες πριν τη γένεση του ισχυρού μετασεισμού (μπλε τετράγωνα). **Β.** Οι σεισμοί 7 ημέρες πριν το δεύτερο ισχυρό μετασεισμό (μοβ τετράγωνα). **Γ.** Τα επίκεντρα των μετασεισμών μετά από 24 ώρες (κόκκινοι κύκλοι). **Δ.** Οι μετασεισμοί μετά από 48 ώρες (μοβ κύκλοι). **Ε.** Οι μετασεισμοί 30 ημέρες μετά το σεισμό (πράσινοι ρόμβοι). **ΣΤ.** Τα επίκεντρα των μετασεισμών 60 ημέρες μετά τον ισχυρό μετασεισμό (κίτρινοι ρόμβοι).

#### 3.4.3.γ Υπολογισμός Τάσεων Coulomb

Σε αντίθεση με το ανάστροφο ρήγμα του κύριου σεισμού και του πρώτου μετασεισμού, το ρήγμα του δεύτερου ισχυρού μετασεισμού είναι οριζόντιας μετατόπισης με διεύθυνση Α-Δ. Για το δεύτερο μετασεισμό τα στοιχεία που δίνει το GCMT είναι μηχανισμός γένεσης του ρήγματος με παράταξη 250°, γωνία κλίσης 71°, γωνία ολίσθησης -8° και μέγεθος  $M_w$ =6.2. Από την πλευρά τους, οι Roumelioti et al. (2009) δίνουν μηχανισμό που είχε παράταξη 253°, γωνία κλίσης 65°, γωνία ολίσθησης -2° και μέγεθος  $M_w$ =6.0. Επίσης, οι ίδιοι βρήκαν ότι το εστιακό βάθος είναι μικρότερο από τα προηγούμενα και ίσο με 10 km. Η σεισμική ροπή που εκλύθηκε από αυτόν το μετασεισμό είναι  $M_o$ =2.19·10<sup>25</sup> dyn·cm (GCMT) και η ολίσθηση 0.09 μέτρα.

Ο μορφολογικός χάρτης παρουσιάζει το επίκεντρο του δεύτερου μετασεισμού και το μηχανισμό γένεσής του, αλλά και τα επίκεντρα των σεισμών που προηγήθηκαν, στο Σχήμα 3.25Α. Στο Σχήμα 3.25Β φαίνεται η χωρική κατανομή των μεταβολών των τάσεων, που οφείλονται στη σεισμική ολίσθηση του συγκεκριμένου μετασεισμού. Οι θετικοί λοβοί έχουν διεύθυνση ΒΑ-ΝΔ και Β-Ν, ενώ οι αρνητικοί έχουν διεύθυνση ΒΑ-ΝΔ και σχεδόν Α-Δ.



**Σχήμα 3.25: Α.** Το ρήγμα οριζόντιας μετατόπισης του δεύτερου ισχυρού μετασεισμού (20/2/2008). Με το μεγαλύτερο άστρο απεικονίζεται το επίκεντρο του δεύτερου μετασεισμού και ο μηχανισμός γένεσής του, ενώ με τα μικρότερα άστρα τα επίκεντρα των σεισμών που προηγήθηκαν. **Β.** Η μεταβολή των τάσεων που προκλήθηκε από το αυτόν το μετασεισμό. Παρατηρείται ότι οι θετικοί λοβοί διευθύνονται ΒΑ-ΝΔ και Β-Ν.
### 3.4.4.γ Χωρική Κατανομή Μετασεισμών

Όπως έγινε και στους προηγούμενους σεισμούς χαρτογραφήθηκαν σε χάρτες τα επίκεντρα των μετασεισμών, ώστε να εξεταστεί η σεισμικότητα στην περιοχή μετά τη γένεση αυτού του σεισμού. Έτσι, στο *Σχήμα 3.26A* αναπαριστώνται τα επίκεντρα των μετασεισμών που έγιναν μετά από 30 ημέρες, έχοντας πρώτα υπολογίσει τις μεταβολές των τάσεων στις εστίες των μετασεισμών αυτών και παρουσιάζονται με κόκκινους και μπλε κύκλους όταν οι εστίες τους βρίσκονται σε θέσεις με θετικές και αρνητικές μεταβολές των τάσεων, αντίστοιχα. Για τη μελέτη της διέγερσης μετασεισμών εκτός του ρήγματος, αφαιρέθηκαν από το δείγμα δεδομένων οι μετασεισμών που έγιναν πάνω στο ρήγμα. Στο *Σχήμα 3.26B* φαίνεται η ίδια μετασεισμική ακολουθία, χωρίς τους κοντινούς στο ρήγμα μετασεισμούς. Τα δεδομένα των μετασεισμών που χρησιμοποιήθηκαν και φαίνονται στα σχήματα ήταν πλήρη για μεγέθη Μ≥3.8.



**Σχήμα 3.26: Α.** Κατανομή του πεδίου των τάσεων Coulomb έπειτα από το δεύτερο ισχυρό μετασεισμό που έπληξε την περιοχή στις 20/2/2008. **Β.** Χωρική κατανομή του πεδίου των τάσεων αφού διαγράφηκαν όσοι μετασεισμοί έγιναν γύρω από το ρήγμα. Και στα δύο σχήματα οι κόκκινοι κύκλοι απεικονίζουν τα επίκεντρα των μετασεισμών οι εστίες των οποίων βρίσκονται σε περιοχές με θετικές τιμές τάσεων, ενώ οι μπλε κύκλοι τα επίκεντρα όσων είχαν τις εστίες τους σε περιοχές με αρνητικές τιμές τάσεων.

## 3.4.5.γ Πληρότητα

Με σκοπό να διερευνηθεί ποσοτικά η διέγερση της σεισμικής δραστηριότητας, απαιτείται πλήρες δείγμα δεδομένων.

Χρησιμοποιώντας όλα τα διαθέσιμα δεδομένα για τη μετασεισμική ακολουθία της ΝΔ Πελοποννήσου εξετάζεται η πληρότητα για το χρονικό διάστημα των 30 ημερών μετά το σεισμό. Μετά τον υπολογισμό της πληρότητας (Leptokaropoulos et al., 2013) διαπιστώθηκε ότι τα δεδομένα ήταν πλήρη για σεισμούς με μέγεθος M≥3.8.



**Σχήμα 3.27: Α.** Αθροιστική συχνότητα (κύκλοι) και συχνότητα (τετράγωνα) των σεισμών σε συνάρτηση με το μέγεθος για τους σεισμούς 30 ημέρες μετά τον κύριο. **Β.** Διαφορά μεταξύ των παρατηρούμενων δεδομένων και της θεωρητικής κατανομής, όπως σχηματίστηκε από τον υπολογισμό της μέγιστης πιθανότητας σαν συνάρτηση μεγέθους (GFT), με το ανοιχτό χρώμα. Διαφορά μεταξύ των παρατηρούμενων και των 1000 τυχαίων συνθετικών καταλόγων που σχηματίστηκαν σύμφωνα με τον ορισμό της καλύτερης τροποποιημένης προσαρμογής (MGFT), με το σκούρο χρώμα.

### 3.4.6.γ Ρυθμός Σεισμικότητας

Έχοντας στόχο τον υπολογισμό του ρυθμού σεισμικότητας της περιοχής μετά τη γένεση του δεύτερου ισχυρού μετασεισμού σχεδιάστηκαν αθροιστικά διαγράμματα. Το Σχήμα 3.28 απεικονίζει τον αθροιστικό αριθμό των μετασεισμών, με μέγεθος Μ≥3.8, που έγιναν 30 ημέρες μετά σε συνάρτηση με το χρόνο. Όπως φαίνεται στο διάγραμμα ο αριθμός των μετασεισμών, οι εστίες των οποίων βρίσκονταν σε περιοχές με αρνητικές τιμές τάσεων είναι μεγαλύτερος από τον αριθμό των μετασεισμών που είχαν τις εστίες τους σε περιοχές με θετικές τιμές τάσεων. Επίσης, παρατηρείται ότι από την 15<sup>η</sup> μέχρι την 20<sup>η</sup> ημέρα ο αθροιστικός αριθμός των μετασεισμών είναι ίδιος για τους μετασεισμούς που είχαν τις εστίες τους σε θέσεις με θετικές τιμές τάσεων και γι' αυτούς που τις είχαν σε θέσεις με αρνητικές τιμές τάσεων.



**Σχήμα 3.28:** Σχηματική αναπαράσταση του ρυθμού σεισμικότητας της περιοχής μετά το δεύτερο ισχυρό μετασεισμό στη ΝΔ Πελοπόννησο, στις 20/2/2008. Η κόκκινη γραμμή δείχνει το ρυθμό σεισμικότητας της γύρω περιοχής για τους μετασεισμούς που έγιναν 30 ημέρες μετά, των οποίων οι εστίες ήταν σε φωτεινές περιοχές, ενώ η μπλε το ρυθμό σεισμικότητας της γύρω περιοχής μετασεισμούς που είχαν τις εστίες τους σε σκιερές ζώνες.

Με τον ίδιο τρόπο έγινε και το διάγραμμα του Σχήματος 3.29, με τη διαφορά ότι δεν συμπεριλήφθηκαν οι μετασεισμοί που έγιναν κοντά στο ρήγμα. Λαμβάνοντας υπόψη την προβολή του ρήγματος στην επιφάνεια που είχε σχήμα ορθογώνιο παραλληλόγραμμο, έγινε η διαγραφή των κοντινών στο ρήγμα μετασεισμών, κάνοντας αντιληπτή την επίδραση του σεισμού στη σεισμικότητα της περιοχής, χωρίς να συμπεριλαμβάνονται όσοι μετασεισμοί έγιναν πλησίον του ρήγματος. Αυτό που παρατηρείται είναι μια μεγάλη μείωση του αθροιστικού αριθμού των μετασεισμών. Από την 1<sup>η</sup> έως και την 15<sup>η</sup> ημέρα ο αριθμός των μετασεισμών που είχαν τις εστίες τους σε αρνητικές περιοχές τάσεων είναι μεγαλύτερος από τον αριθμό των μετασεισμών που είχαν τις εστίες τους σε θετικές περιοχές τάσεων. Από τη 16<sup>η</sup> μέχρι την 21<sup>η</sup> ημέρα εμφανίζεται ο ίδιος αριθμός μετασεισμών. Αντίθετα από την 22<sup>η</sup> έως και την 30<sup>η</sup> ημέρα οι μετασεισμοί των οποίων οι εστίες τους βρίσκονταν σε περιοχές με αρνητικές τιμές τάσεων ήταν περισσότεροι.



**Σχήμα 3.29:** Απεικόνιση του ρυθμού σεισμικότητας της περιοχής μετά το δεύτερο ισχυρό μετασεισμό της ΝΔ Πελοποννήσου, έχοντας διαγράψει τους κοντινούς στο ρήγμα μετασεισμούς. Η κόκκινη γραμμή δείχνει το ρυθμό σεισμικότητας της γύρω περιοχής για τους μετασεισμούς που έγιναν 30 ημέρες μετά, των οποίων οι εστίες ήταν σε φωτεινές περιοχές, ενώ η μπλε το ρυθμό σεισμικότητας της γύρω περιοχής για τους ίδιους μετασεισμούς που είχαν τις εστίες τους σε σκιερές ζώνες.

Στον παρακάτω πίνακα εμφανίζεται η κατανομή, σε ποσοστά, των μετασεισμών που είχαν τις εστίες τους σε θέσεις θετικών και αρνητικών μεταβολών των τάσεων. Το ποσοστό των μετασεισμών, οι εστίες των οποίων ήταν σε αρνητικές περιοχές τάσεων είναι μεγαλύτερο σε σχέση με αυτό των μετασεισμών που είχαν τις εστίες τους σε περιοχές θετικών τιμών των τάσεων, ακόμα και όταν δεν λαμβάνονται υπόψη οι κοντινοί στο ρήγμα μετασεισμοί.

**Πίνακας 3.5:** Ποσοστά των μετασεισμών που είχαν τις εστίες τους σε περιοχές με θετικές και αρνητικές τιμές των τάσεων και έγιναν 30 ημέρες μετά το δεύτερο ισχυρό μετασεισμό στη ΝΔ Πελοπόννησο.

| Μετασεισμοί                          | Θετικές<br>Τιμές<br>Τάσεων<br>(%) | Αρνητικές<br>Τιμές<br>Τάσεων<br>(%) |
|--------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|
| Όλοι                                 | 42                                | 58                                  |
| Χωρίς τους<br>κοντινούς<br>στο ρήγμα | 41                                | 59                                  |

### 3.5 Σεισμική Ακολουθία ΒΔ Πελοποννήσου, 8 Ιουνίου 2008, M<sub>w</sub>=6.4

### 3.5.1 Εισαγωγή

Ως σεισμός του Μόβρη ή ως σεισμός Αχαΐας-Ηλίας είναι γνωστός ο σεισμός που έγινε στη ΒΔ Πελοπόννησο στις 8 Ιουνίου 2008, στις 12:25:28 (GMT). Στην περιοχή αυτή δεν είχε γίνει κάποιος άλλος ισχυρός σεισμός στο παρελθόν. Το επίκεντρο ήταν 37.952°B 21.537°A, το μέγεθός του M<sub>w</sub>=6.4 και ο μηχανισμός γένεσης του ρήγματος είχε παράταξη 209°, γωνία κλίσης 83° και γωνία ολίσθησης 164° (GCMT), δείχνοντας ένα ρήγμα οριζόντιας μετατόπισης με προσανατολισμό BA-NΔ.

#### 3.5.2 Σεισμικότητα πριν και μετά τον κύριο σεισμό

Οι σεισμοί που προηγήθηκαν και ακολούθησαν μετά τη γένεση του ισχυρού σεισμού στη ΒΔ Πελοπόννησο μελετήθηκαν προκειμένου να διερευνηθεί η επίδραση του σεισμού στη σεισμικότητα της περιοχής γύρω από το επίκεντρο. Τα επίκεντρα των προσεισμών και των μετασεισμών χαρτογραφήθηκαν σε χάρτες και απεικονίζονται στο Σχήμα 3.30. Στο Σχήμα 3.30Α παρουσιάζονται οι σεισμοί που προηγήθηκαν 30 ημέρες του κύριου, με μπλε τετράγωνα. Γίνεται φανερό το μεγάλο πλήθος προσεισμών για αυτό το χρονικό διάστημα καθώς και η κατανομή τους μακριά από το επίκεντρο του επερχόμενου σεισμού, κοντά στον Κορινθιακό κόλπο. Οι προσεισμοί που έγιναν 7 ημέρες πριν τη γένεση του κύριου σεισμού και φαίνονται με μοβ τετράγωνα στο Σχήμα 3.30Β κατανέμονται και αυτοί μακριά από την περιοχή του επικέντρου. Ακολούθησε μία εκτεταμένη μετασεισμική δραστηριότητα στη γύρω περιοχή τόσο μετά από 24 ώρες, όπου οι μετασεισμοί εμφανίζονται με κόκκινους κύκλους (Σχήμα 3.30Γ) και οι περισσότεροι συγκεντρώνονταν κοντά στο επίκεντρο του σεισμού, όσο και μετά από 48 ώρες, όπου οι μετασεισμοί φαίνονται με μοβ κύκλους (Σχήμα 3.30Δ) και μέρος τους κατανέμονταν και σε μακρύτερες αποστάσεις. Η μετασεισμική δραστηριότητα δε σταμάτησε μετά από 30 ημέρες όπως φαίνεται από τους πράσινους ρόμβους (Σχήμα 3.30E) και μεγάλο μέρος της συγκεντρώνονταν μακριά από το επίκεντρο του σεισμού, κοντά στον Κορινθιακό κόλπο. Συνεχίστηκε η μετασεισμική δραστηριότητα στην περιοχή κοντά στο επίκεντρο, αλλά και μακρύτερα, κοντά στον Κορινθιακό κόλπο, ακόμα και μετά από 60 ημέρες από τον κύριο σεισμό (Σχήμα 3.30ΣΤ).

Για τον καθορισμό του ρήγματος στην περιοχή και των χαρακτηριστικών του χρησιμοποιήθηκαν οι χάρτες με τη χωρική κατανομή των μετασεισμών μετά από 24 και 48 ώρες (Σχήμα 3.30Γ, Σχήμα 3.30Δ) και επαληθεύτηκαν από αδημοσίευτα στοιχεία του κ. Καρακώστα Β. Έγινε σύγκριση αυτών των στοιχείων με αποτελέσματα που προέκυψαν και από άλλες έρευνες που αφορούσαν το συγκεκριμένο σεισμό και παρατηρήθηκαν αρκετές ομοιότητες. Η διέγερση της σεισμικότητας στην περιοχή γύρω από το σεισμό εξετάζεται από τους χάρτες που δείχνουν τη σεισμική δραστηριότητα μετά από 30 και 60 ημέρες (*Σχήμα 3.30Ε, Σχήμα 3.30ΣΤ*).



**Σχήμα 3.30:** Χωρική κατανομή της σεισμικής δραστηριότητας πριν και μετά τον κύριο σεισμό της ΒΔ Πελοποννήσου, το επίκεντρο του οποίου παριστάνεται με άστρο και ο μηχανισμός γένεσής του ως ισεμβαδική προβολή του κάτω ημισφαιρίου **Α.** Σεισμοί 30 ημέρες πριν τη γένεση του κύριου σεισμού (μπλε τετράγωνα). **Β.** Οι σεισμοί 7 ημέρες πριν από τον κύριο σεισμό (μοβ τετράγωνα). **Γ.** Μετασεισμοί 24 ώρες μετά τον κύριο σεισμό (κόκκινοι κύκλοι). **Δ.** Μετασεισμοί 48 ώρες μετά τον κύριο σεισμό (μοβ κύκλοι). **Ε.** Κατανομή των μετασεισμών 30 ημέρες μετά τον κύριο σεισμό (πράσινοι ρόμβοι). **ΣΤ.** Μετασεισμοί 60 ημέρες μετά το σεισμό (κίτρινοι ρόμβοι).

### 3.5.3 Υπολογισμός Τάσεων Coulomb

Ο σεισμός της ΒΔ Πελοποννήσου, την 8<sup>η</sup> Ιουνίου 2008, απασχόλησε πολλούς μελετητές, μιας και δεν υπήρχε κάποιο γνωστό ρήγμα στην περιοχή και δεν είχε γίνει κάποιος άλλος ισχυρός σεισμός παλαιότερα. Έτσι έχουν δημοσιευθεί αρκετές έρευνες, μερικές από τις οποίες αναφέρονται παρακάτω.

Οι Konstantinou et al. (2009) όρισαν ένα ρήγμα με κατεύθυνση ΒΑ-ΝΔ και μέγεθος M<sub>w</sub>=6.4. Επίσης, βρήκαν ότι τα υποκεντρικά βάθη του σεισμού κυμαίνονται από 15 έως 25 km και το βάθος του σεισμού στα 18 km μετά από επαναπροσδιορισμό.

Σύμφωνα με τους Papadopoulos et al. (2010) το ρήγμα είναι δεξιόστροφο, οριζόντιας μετατόπισης που βυθίζεται με γωνία κλίσης 85° προς τα ΒΔ και διευθύνεται BA-NΔ. Ακόμη, υπολόγισαν το βάθος του σεισμού στα 20 km, το μήκος του ρήγματος ίσο με 20 km και για σεισμική ροπή,  $M_o=4.56\cdot10^{25}$  dyn·cm, προέκυψε μέση ολίσθηση ίση με 0.76 μέτρα.

Με τη μελέτη τους οι Margaris et al. (2010) χαρακτήρισαν το ρήγμα ως οριζόντιας μετατόπισης, δεξιόστροφο με μέγεθος M<sub>w</sub>=6.5 και παράταξη 210°. Όρισαν το βάθος του σεισμού στα 24 km, που συμφωνεί με το βάθος που προτείνει το GCMT (24.7 km) καθώς επίσης και τα εστιακά βάθη των μετασεισμών μεταξύ των 10 έως 25 km, καταλήγοντας ότι αυτά τα εστιακά βάθη των μετασεισμών είναι πιθανόν ο λόγος που το ρήγμα δεν είχε επιφανειακή διάρρηξη.

Από την πλευρά τους οι Koukouvelas et al. (2010) όρισαν ένα ρήγμα οριζόντιας μετατόπισης, δεξιόστροφο, με κατεύθυνση B35° Α. Οι ίδιοι εκτίμησαν το μέγεθος του σεισμού ίσο με M<sub>w</sub>=6.4 και υπολόγισαν τα εστιακά βάθη από 5 έως 30 km.

Οι Feng et al. (2010) μετά την έρευνα τους κατέληξαν σε ένα ρήγμα οριζόντιας μετατόπισης, δεξιόστροφο με διεύθυνση ΒΑ-ΝΔ, σχεδόν κατακόρυφο που το εστιακό βάθος κυμαίνεται μεταξύ 18 έως 22 km. Επίσης, υπολόγισαν το μήκος του ρήγματος ίσο με 25 km.

Από τη μελέτη τους οι Konstantinou et al. (2011) διαπίστωσαν ένα ρήγμα με μηχανισμό γένεσης οριζόντιας μετατόπισης με παράταξη B210° Α. Η παράταξη στην οποία κατέληξαν επιβεβαιώθηκε και από την κατανομή των μετασεισμών που μελέτησαν. Επίσης, προσδιόρισαν το εστιακό βάθος στα 18 km, το σεισμογόνο στρώμα μεταξύ 15 και 25 km και εκτίμησαν το μέγεθος του σεισμού ίσο με M<sub>w</sub>=6.4.

Οι Segou et al. (2014) χαρακτήρισαν το ρήγμα δεξιόστροφο, οριζόντιας μετατόπισης, με μέγεθος M<sub>w</sub>=6.4 και με παράταξη B30° A, που πυρηνοποιήθηκε σε βάθος 21.4 km.

Τα στοιχεία, τελικά, που επιλέχθηκαν για την παρούσα εργασία ελήφθησαν όπως προαναφέρθηκε από την αδημοσίευτη μελέτη του κ. Καρακώστα Β. και σύμφωνα με αυτόν το βάθος του σεισμού ήταν στα 16 km, τα εστιακά βάθη των μετασεισμών κυμαίνονταν μεταξύ 3 μέχρι 20 km και ο μηχανισμός γένεσης του ρήγματος είχε παράταξη 209°, γωνία κλίσης 83° και γωνία ολίσθησης 164° (GCMT). Ο ίδιος υπολόγισε το μήκος του ρήγματος ίσο με 22 km, που βρίσκεται σε καλή συμφωνία με το μήκος που προέκυψε από τις σχέσεις των Papazachos et al. (2004) (≈30 km) και των Wells-Coppersmith (1994) (≈25 km). Από τις εμπειρικές σχέσεις και με τη χρήση της τιμής της σεισμικής ροπής, M₀=4.56·10<sup>25</sup> dyn·cm (GCMT), υπολογίσθηκε η ολίσθηση που ήταν ίση με 0.50 μέτρα.

Στο Σχήμα 3.31Α παρουσιάζεται το ρήγμα του σεισμού, το επίκεντρο και ο μηχανισμός γένεσης. Η χωρική κατανομή των τάσεων φαίνεται στο Σχήμα 3.31B. Οι λοβοί των θετικών μεταβολών των τάσεων, όπως παρατηρείται αναπτύσσονται στα BBA-NNΔ και σχεδόν Α-Δ του τμήματος που ολίσθησε, ενώ οι λοβοί των αρνητικών μεταβολών των τάσεων σχεδόν BBΔ-NNA και Α-Δ.



**Σχήμα 3.31: Α.** Το ρήγμα στη ΒΔ Πελοπόννησο μετά το σεισμό στις 8/6/2008. Εμφανίζονται το επίκεντρο (άστρο) και ο μηχανισμός γένεσης του σεισμού. **Β.** Οι μεταβολές των τάσεων Coulomb κατά τη σεισμική ολίσθηση. Παρατηρείται ότι οι αρνητικοί λοβοί έχουν διεύθυνση σχεδόν Β-Ν και Α-Δ, ενώ οι θετικοί λοβοί διευθύνονται ΒΑ-ΝΔ και Α-Δ.

## 3.5.4 Χωρική Κατανομή Μετασεισμών

Για τη μελέτη της επίδρασης του σεισμού στη σεισμικότητα της γύρω περιοχής χρησιμοποιήθηκε το μεγάλο πλήθος των μετασεισμών που έγιναν 30 ημέρες μετά τον κύριο σεισμό. Τα επίκεντρα των μετασεισμών, όπως προέκυψαν μετά από τον υπολογισμό της μεταβολής των τιμών των τάσεων τους στις εστίες τους, φαίνονται στο Σχήμα 3.32Α με κόκκινους και μπλε κύκλους ανάλογα αν η εστία τους ήταν σε περιοχές θετικών και αρνητικών μεταβολών τάσεων, αντίστοιχα. Για να διερευνηθεί η διέγερση μετασεισμών εκτός του ρήγματος του κύριου σεισμού, αφαιρέθηκαν όσοι μετασεισμοί έγιναν πάνω στο ρήγμα και παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.32B. Και στους δύο χάρτες τα δεδομένα των μετασεισμών που χρησιμοποιήθηκαν ήταν πλήρη για σεισμούς Μ≥3.4 και με τους κόκκινους κύκλους φαίνονται τα επίκεντρα των μετασεισμών στην εστία των οποίων οι μεταβολές των τάσεων ήταν θετικές, ενώ με μπλε κύκλους τα επίκεντρα όσων οι μεταβολές των τάσεων στις εστίες τους ήταν αρνητικές.



**Σχήμα 3.33: Α.** Χωρική κατανομή του πεδίου των τάσεων Coulomb 30 ημέρες μετά το σεισμό που έγινε στις 8/6/2008, ΒΔ της Πελοποννήσου. Οι κόκκινοι κύκλοι δείχνουν τα επίκεντρα των μετασεισμών που οι εστίες τους βρίσκονταν σε θέσεις με θετικές μεταβολές τάσεων, ενώ με μπλε κύκλους εμφανίζονται τα επίκεντρα των μετασεισμών οι εστίες των οποίων βρίσκονταν σε περιοχές αρνητικές τιμές τάσεων. **Β.** Κατανομή του πεδίου των τάσεων των μετασεισμών, έχοντας αφαιρέσει όσους εκδηλώθηκαν κοντά στο ρήγμα.

#### 3.5.5 Πληρότητα

Για να γίνει ποσοτική αποτίμηση της διέγερσης της σεισμικής δραστηριότητας, είναι απαραίτητο ένα πλήρες δείγμα δεδομένων.

Με βάση όλα τα διαθέσιμα δεδομένα για αυτήν τη μετασεισμική ακολουθία διερευνάται η πληρότητα των μεγεθών της για το χρονικό διάστημα των 30 ημερών μετά το σεισμό. Από τη μέθοδο της πληρότητας (Leptokaropoulos et al., 2013) που εφαρμόστηκε διαπιστώθηκε ότι τα δεδομένα ήταν πλήρη για σεισμούς με M≥3.4.



**Σχήμα 3.34: Α.** Αθροιστική συχνότητα (κύκλοι) και συχνότητα (τετράγωνα) των σεισμών σε συνάρτηση με το μέγεθος για τους σεισμούς 30 ημέρες μετά τον κύριο. **Β.** Διαφορά μεταξύ των παρατηρούμενων δεδομένων και της θεωρητικής κατανομής, όπως σχηματίστηκε από τον υπολογισμό της μέγιστης πιθανότητας σαν συνάρτηση μεγέθους (GFT), με το ανοιχτό χρώμα. Διαφορά μεταξύ των παρατηρούμενων δεδομένων και των 1000 τυχαίων συνθετικών καταλόγων που σχηματίστηκαν σύμφωνα με τον ορισμό της καλύτερης τροποποιημένης προσαρμογής (MGFT), με το σκούρο χρώμα.

### 3.5.6 Ρυθμός Σεισμικότητας

Για να διερευνηθεί η διέγερση της σεισμικότητας στη ΒΔ Πελοπόννησο μετά τη γένεση του κύριου σεισμού είναι απαραίτητος ο υπολογισμός του ρυθμού σεισμικότητας με τη χρήση αθροιστικών διαγραμμάτων. Στο Σχήμα 3.35 παρουσιάζεται ο αθροιστικός αριθμός των μετασεισμών μετά από 30 ημέρες από τη γένεση του κύριου σεισμού. Ο αθροιστικός αριθμός των μετασεισμών οι εστίες των οποίων ήταν σε θέσεις με αρνητικές τιμές τάσεων είναι μεγαλύτερος από αυτόν των μετασεισμών που είχαν τις εστίες τους σε περιοχές με θετικές τιμές τάσεων.



**Σχήμα 3.35:** Σχεδίαση του ρυθμού σεισμικότητας στη ΒΔ Πελοπόννησο για χρονικό διάστημα 30 ημερών μετά το σεισμό που έγινε στις 8/6/2008. Ο ρυθμός σεισμικότητας για τους μετασεισμούς που είχαν τις εστίες τους σε περιοχές θετικές μεταβολές των τάσεων εμφανίζεται με την κόκκινη γραμμή, ενώ ο ρυθμός σεισμικότητας της ίδιας περιοχής για τους μετασεισμούς που είχαν τις εστίες τους σε περιοχές αρνητικών μεταβολών των τάσεων με τη μπλε γραμμή.

Όπως αναφέρθηκε και στους προηγούμενους σεισμούς έγινε αφαίρεση των μετασεισμών που έγιναν πάνω στο ρήγμα. Η αφαίρεση των μετασεισμών έγινε αφού λήφθηκε υπόψη η προβολή του ρήγματος στην επιφάνεια, σχηματίζοντας ένα ορθογώνιο παραλληλόγραμμο σχήμα. Με αυτόν τον τρόπο μπορεί να γίνει αντιληπτή η επίδραση του σεισμού στη διέγερση της σεισμικότητας της γύρω περιοχής, χωρίς να λαμβάνονται υπόψη οι κοντινοί μετασεισμοί στο ρήγμα. Στο *Σχήμα 3.36* απεικονίζεται ο ρυθμός σεισμικότητας μετά την αφαίρεση των κοντινών στο ρήγμα μετασεισμών. Γίνεται αντιληπτή η μεγάλη μείωση του αθροιστικού αριθμού των μετασεισμών που είχαν τις εστίες τους σε θέσεις με αρνητικές τιμές τάσεων, καθώς οι περισσότεροι από αυτούς έγιναν κοντά στο ρήγμα και με τη διαγραφή τους δε συμπεριλήφθηκαν στους υπολογισμούς του ρυθμού σεισμικότητας. Μέρος των μετασεισμών που είχαν τις εστίες τους σε στίες τους σε περιοχές θετικών τιμών τάσεων βρίσκονταν κοντά στο ρήγμα και αφαιρέθηκαν με συνέπεια ο αθροιστικός αριθμός τους να εμφανίζεται κι αυτός αρκετά μειωμένος.



**Σχήμα 3.36:** Παρουσίαση για το σεισμό της ΒΔ Πελοποννήσου του ρυθμού σεισμικότητας της περιοχής, έχοντας διαγράψει τους μετασεισμούς πλησίον του ρήγματος. Με την κόκκινη γραμμή εμφανίζεται ο ρυθμός σεισμικότητας για τους μετασεισμούς οι εστίες των οποίων ήταν σε θέσεις με θετικές μεταβολές των τάσεων, ενώ με τη μπλε ο ρυθμός σεισμικότητας για τους μετασεισμούς οι εστίες των οποίων ήταν σε θέσεις αρνητικών μεταβολών των τάσεων.

Ο Πίνακας 3.6 παρουσιάζει τα ποσοστά των μετασεισμών που είχαν τις εστίες τους σε περιοχές θετικών και αρνητικών μεταβολών των τάσεων για τους μετασεισμούς που ακολούθησαν μετά τον ισχυρό σεισμό στη ΒΔ Πελοπόννησο. Παρατηρείται ότι το ποσοστό των μετασεισμών που είχαν τις εστίες τους σε θέσεις με αρνητικές τιμές είναι μεγαλύτερο από αυτό των μετασεισμών που οι εστίες τους ήταν σε θέσεις θετικών τιμών των τάσεων. Μετά την αφαίρεση των μετασεισμών που έγιναν γύρω από το ρήγμα εμφανίζεται ένα διαφορετικό αποτέλεσμα. Το ποσοστό των μετασεισμών, οι εστίες των οποίων ήταν σε περιοχές θετικών τάσεων γίνεται αρκετά μεγαλύτερο από το ποσοστό των μετασεισμών που είχαν τις εστίες τους σε θέσεις αρνητικών τάσεων. Με βάση αυτά τα αποτελέσματα γίνεται φανερός ο αυξημένος ρυθμός σεισμικότητας στην περιοχή της ΒΔ Πελοποννήσου μετά τη γένεση του κύριου σεισμού. Το συμπέρασμα αυτό βρίσκεται σε συμφωνία με αυτό των King et al. (1994), που απέδειξαν ότι οι μεταβολές των τάσεων Coulomb ενός σεισμού μπορεί να συσχετιστεί με τη διέγερση σεισμικότητας στη γύρω περιοχή, όπως συνέβη μετά το σεισμό στο Landers (1992), όπου οι περισσότεροι μετασεισμοί ήταν συγκεντρωμένοι σε περιοχές με αυξημένη μεταβολή των τάσεων. Επίσης, συμφωνία υπάρχει και με το συμπέρασμα στο οποίο κατέληξε ο Stein (1999) μετά τη μελέτη των μεταβολών των τάσεων του σεισμού στο Landers (1992), ο οποίος παρατήρησε ότι οι περισσότεροι μετασεισμοί κατανέμονταν σε ζώνες που είχαν μεταβολή τάσης μεγαλύτερη από 0.1 bar κοντά στην περιοχή της διάρρηξης.

| Μετασεισμοί                          | Θετικές<br>Τιμές<br>Τάσεων<br>(%) | Αρνητικές<br>Τιμές<br>Τάσεων<br>(%) |
|--------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|
| Όλοι                                 | 44                                | 56                                  |
| Χωρίς τους<br>κοντινούς<br>στο ρήγμα | 60                                | 40                                  |

**Πίνακας 3.6:** Ποσοστά των μετασεισμών που είχαν τις εστίες τους σε περιοχές με θετικές και αρνητικές τιμές των τάσεων και έγιναν μετά το σεισμό της ΒΔ Πελοποννήσου.

# 3.6 Σεισμική Ακολουθία Ν. Κρήτης, 1 Ιουλίου 2009, M<sub>w</sub>=6.2

# 3.6.1 Εισαγωγή

Ο σεισμός που έγινε νότια της Κρήτης, στο Λιβυκό Πέλαγος, στις 09:30:12 (GMT), την 1<sup>η</sup> Ιουλίου 2009, είχε επίκεντρο 34.042°B 25.411°A. Πρόκειται για ένα ανάστροφο ρήγμα, νότια της Κρήτης, στην περιοχή του ελληνικού τόξου. Έχουν γίνει αρκετοί σεισμοί σε όλη την έκταση του ελληνικού τόξου, καθώς αποτελεί το όριο επαφής και κατάδυσης της Αφρικανικής λιθοσφαιρικής πλάκας κάτω από την Ευρασιατική. Ο μηχανισμός γένεσης του ρήγματος είχε παράταξη 295°, γωνία κλίσης 32° και γωνία ολίσθησης 108° (GCMT).

## 3.6.2 Σεισμικότητα πριν και μετά τον κύριο σεισμό

Για τη μελέτη της σεισμικότητας στην περιοχή που έγινε ο κύριος σεισμός, ερευνήθηκαν οι προσεισμοί και οι μετασεισμοί και παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.37. Όσοι σεισμοί έγιναν 30 ημέρες πριν τον κύριο φαίνονται με μπλε τετράγωνα στο Σχήμα 3.37A και κατανέμονταν μακρύτερα από το επίκεντρο του επερχόμενου σεισμού. Οι σεισμοί που έγιναν 7 ημέρες πριν εμφανίζονται με μοβ τετράγωνα στο Σχήμα 3.37B, ο αριθμός των οποίων είναι μικρός και έγιναν τόσο κοντά στο επίκεντρο του σεισμού όσο και μακρύτερα. Στο Σχήμα 3.37Γ απεικονίζεται η έντονη μετασεισμική ακολουθία για χρονικό διάστημα 24 ωρών μετά τον κύριο σεισμό, με κόκκινους κύκλους και στο Σχήμα 3.37Δ παρουσιάζεται με μοβ κύκλους ο αυξημένος

αριθμός μετασεισμών που έγιναν σε χρονικό διάστημα 48 ωρών μετά τον κύριο σεισμό και κατανέμονταν κοντά στο επίκεντρο, αλλά και μακρύτερα κοντά στο νησί της Κρήτης. Η μετασεισμική δραστηριότητα παρατηρείται έντονη και εκτείνεται σε μία ευρεία περιοχή γύρω από το επίκεντρο του σεισμού ακόμα και μετά από 30 ημέρες μετά το σεισμό όπως φαίνεται στο *Σχήμα 3.37E*, με τους πράσινους ρόμβους. Η γένεση μετασεισμών συνεχίστηκε και 60 ημέρες μετά τον κύριο σεισμό, όπου η κατανομή των μετασεισμών απεικονίζεται στο *Σχήμα 3.37ΣT*, με κίτρινους ρόμβους, με μεγάλο πλήθος μετασεισμών να έχουν γίνει κοντά στο νησί της Κρήτης, σε μία περιοχή απομακρυσμένη από το επίκεντρο.

Λαμβάνοντας υπόψη τη χωρική κατανομή των μετασεισμών που έγιναν μετά από 24 και 48 ώρες (Σχήμα 3.37Γ, Σχήμα 3.37Δ) καθορίστηκε το ρήγμα στην περιοχή και τα βασικά του χαρακτηριστικά. Για την ορθότητα αυτών των χαρακτηριστικών του ρήγματος έγινε σύγκριση με τα στοιχεία που δίνουν οι Moshou et al. (2010), στην έρευνά τους για τον ίδιο σεισμό και επαληθεύτηκαν. Η διέγερση σεισμικότητας στην περιοχή μετά το σεισμό εξετάζεται από τους χάρτες που απεικονίζουν τους μετασεισμούς 30 και 60 ημέρες (Σχήμα 3.37Ε, Σχήμα 3.37ΣΤ) μετά τον κύριο σεισμό.



**Σχήμα 3.37:** Χωρική κατανομή της σεισμικής δραστηριότητας πριν και μετά τον κύριο σεισμό στη Ν. Κρήτη. Το επίκεντρο παριστάνεται με άστρο και ο μηχανισμός γένεσης του σεισμού ως ισεμβαδική προβολή του κάτω ημισφαιρίου. **Α.** Προσεισμοί 30 ημέρες πριν τη γένεση του κύριου σεισμού (μπλε τετράγωνα). **Β.** Οι σεισμοί 7 ημέρες πριν από τον κύριο σεισμό (μοβ τετράγωνα). **Γ.** Οι μετασεισμοί 24 ώρες μετά τον κύριο σεισμοί (κόκκινοι κύκλοι). **Δ.** Μετασεισμοί για χρονικό διάστημα 48 ωρών (μοβ κύκλοι). **Ε.** Οι σεισμοί 30 ημέρες μετά τον κύριο σεισμοί (πράσινοι ρόμβοι). **ΣΤ.** Οι μετασεισμοί για χρονικό διάστημα 60 ημερών μετά τον κύριο σεισμό (κίτρινοι ρόμβοι).

### 3.6.3 Υπολογισμός Τάσεων Coulomb

Προκειμένου να υπολογιστεί η μεταβολή των τάσεων είναι απαραίτητη εκτός από τη διερεύνηση των μετασεισμικών ακολουθιών και η εξέταση δημοσιευμένων μελετών που έχουν γίνει για το σεισμό αυτό. Με το σεισμό νότια της Κρήτης ασχολήθηκαν οι Moshou et al. (2010). Πρότειναν μηχανισμό γένεσης του ρήγματος που είχε παράταξη 92°, γωνία κλίσης 67° και γωνία ολίσθησης 80°, μέγεθος M<sub>w</sub>=6.2, εστιακά βάθη των μετασεισμών μεταξύ 15 έως 25 km και βάθος σεισμού στα 20 km.

Από τις σχέσεις των Papazachos et al. (2004) το μήκος του ρήγματος υπολογίσθηκε ίσο με 22 km και από τις σχέσεις των Wells-Coppersmith (1994) ίσο με 20 km. Για τον υπολογισμό του μοντέλου των μεταβολών των τάσεων επιλέχθηκε το μήκος του ρήγματος να ισούται με 22 km, ο μηχανισμός γένεσης του ρήγματος να έχει παράταξη 295°, γωνία κλίσης 32° και γωνία ολίσθησης 108° και το εστιακό βάθος να είναι 20 km. Από τη σεισμική ροπή που εκλύθηκε,  $M_o$ =5.85·10<sup>25</sup> dyn·cm (GCMT), βρέθηκε η ολίσθηση ίση με 0.43 μέτρα.

Το ρήγμα μαζί με το μηχανισμό γένεσης και το επίκεντρο εμφανίζονται σε μορφολογικό χάρτη στο Σχήμα 3.38Α. Η μεταβολή των τάσεων εμφανίζεται στο Σχήμα 3.38Β, όπου παρατηρούνται θετικές μεταβολές στο δυτικό και ανατολικό τμήμα του ρήγματος. Οι περιοχές αυτές είναι πιθανές για να τη γένεση ενός μελλοντικού σεισμού. Μία σκιερή ζώνη σχηματίζεται σε κατεύθυνση σχεδόν βορράνότου.



**Σχήμα 3.38: Α.** Ο σεισμός νότια της Κρήτης που έγινε 1/7/2009. Φαίνονται το επίκεντρο του σεισμού (άστρο), το ανάστροφο ρήγμα και ο μηχανισμός γένεσής του. **Β.** Μεταβολή της CFF που προκλήθηκε από το σεισμό στην περιοχή γύρω από το ρήγμα.

### 3.6.4 Χωρική Κατανομή Μετασεισμών

Προκειμένου να διερευνηθεί η σεισμικότητα στη γύρω περιοχή μετά τη γένεση του κύριου σεισμού στη νότια Κρήτη μελετήθηκαν οι σεισμοί που έγιναν 30 ημέρες μετά τον κύριο. Για τη συγκεκριμένη μετασεισμική ακολουθία υπολογίσθηκαν οι τιμές της μεταβολής των τάσεων για κάθε μετασεισμό στην εστία του καθενός και εμφανίζονται στο Σχήμα 3.39Α. Για να εκτιμηθεί η διέγερση μετασεισμών εκτός του ρήγματος του κύριου σεισμού, αφαιρέθηκαν από τα δεδομένα οι μετασεισμοί που έγιναν πάνω στο ρήγμα και προέκυψε το Σχήμα 3.39Β. Τα επίκεντρα των μετασεισμών των δύο σχημάτων είναι πλήρη για σεισμούς με μέγεθος Μ≥3.3. Όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενους σεισμούς, υπάρχουν και σε αυτόν μετασεισμοί που ενώ οι εστίες τους βρίσκονται σε θετικές περιοχές μεταβολής των τάσεων στον τρισδιάστατο χώρο, τα επίκεντρά τους εμφανίζονται σε περιοχές αρνητικών μεταβολών των τάσεων και το αντίθετο. Αυτό οφείλεται στο ότι η κλίση του ρήγματος αποκλίνει από την κατακόρυφο.



**Σχήμα 3.39: Α.** Χωρική κατανομή του πεδίου των τάσεων που προκλήθηκαν από την ολίσθηση του σεισμού στη νότια Κρήτη στις 1/7/2009. Με κόκκινους κύκλους φαίνονται τα επίκεντρα των μετασεισμών που έχουν τις εστίες τους σε περιοχές με θετικές τιμές τάσεων, ενώ με μπλε κύκλους τα επίκεντρα όσων έχουν τις εστίες τους σε θέσεις με αρνητικές τιμές τάσεων. **Β.** Απεικόνιση της ίδιας μετασεισμικής ακολουθίας, αφού αφαιρέθηκαν οι πλησιέστεροι στο ρήγμα μετασεισμοί.

### 3.6.5 Πληρότητα

Για να διερευνηθεί ποσοτικά η αποτίμηση της διέγερσης της σεισμικής δραστηριότητας, απαιτείται πλήρες δείγμα δεδομένων.

Λαμβάνοντας υπόψη όλα τα διαθέσιμα δεδομένα για αυτήν τη μετασεισμική ακολουθία διερευνάται η πληρότητα των μεγεθών της για το χρονικό διάστημα των

30 ημερών μετά το σεισμό. Από τη μέθοδο της πληρότητας (Leptokaropoulos et al.,
2013) που εφαρμόστηκε διαπιστώθηκε ότι τα δεδομένα ήταν πλήρη για σεισμούς με M≥3.3.



**Σχήμα 3.40: Α.** Αθροιστική συχνότητα (κύκλοι) και συχνότητα (τετράγωνα) των σεισμών σε συνάρτηση με το μέγεθος για τους σεισμούς 30 ημέρες μετά τον κύριο. **Β.** Διαφορά μεταξύ των παρατηρούμενων δεδομένων και της θεωρητικής κατανομής, όπως σχηματίστηκε από τον υπολογισμό της μέγιστης πιθανότητας σαν συνάρτηση μεγέθους (GFT), με το ανοιχτό χρώμα. Διαφορά μεταξύ των παρατηρούμενων και των 1000 τυχαίων συνθετικών καταλόγων που σχηματίστηκαν σύμφωνα με τον ορισμό της καλύτερης τροποποιημένης προσαρμογής (MGFT), με το σκούρο χρώμα.

### 3.6.6 Ρυθμός Σεισμικότητας

Με σκοπό να εξεταστεί η επίδραση του σεισμού στη σεισμικότητα της περιοχής γύρω από το επίκεντρο του, υπολογίσθηκε ο ρυθμός σεισμικότητας για τους σεισμούς που έγιναν 30 ημέρες μετά τον κύριο και είχαν μέγεθος Μ≥3.3. Κατασκευάστηκαν διαγράμματα στα οποία αναπαριστάται ο αθροιστικός αριθμός των μετασεισμών σε συνάρτηση με το χρόνο. Από το διάγραμμα του Σχήματος 3.41 γίνεται εμφανές ένας σχετικά αυξημένος αθροιστικός αριθμός μετασεισμών. Ακόμη, μπορεί να σημειωθεί ότι μόνο από την 3<sup>η</sup> έως την 8<sup>η</sup> ημέρα ο αριθμός των μετασεισμών, οι εστίες των οποίων ήταν σε περιοχές με αρνητικές τιμές τάσεων γίνεται μεγαλύτερος από αυτόν των μετασεισμών που είχαν τις εστίες τους σε θετικές περιοχές τάσεων.



**Σχήμα 3.41:** Ρυθμός σεισμικότητας της περιοχής μετά το σεισμό στη Ν. Κρήτη που έγινε στις 1/7/2009. Η κόκκινη γραμμή δείχνει το ρυθμό σεισμικότητας της γύρω περιοχής για τους μετασεισμούς που έγιναν 30 ημέρες μετά τον κύριο και είχαν εστίες τους σε περιοχές θετικών μεταβολών των τάσεων, ενώ η μπλε γραμμή δείχνει το ρυθμό σεισμικότητας της γύρω περιοχής για τους ίδιους μετασεισμούς που είχαν τις εστίες τους σε περιοχές με αρνητικές μεταβολές των τάσεων.

Το Σχήμα 3.42 παρουσιάζει το ρυθμό σεισμικότητας της ίδιας περιοχής και για τους ίδιους μετασεισμούς, αλλά χωρίς αυτούς που έγιναν κοντά στο ρήγμα. Η αφαίρεση των μετασεισμών έγινε αφού λήφθηκε υπόψη η προβολή του ρήγματος στην επιφάνεια, σχηματίζοντας ένα ορθογώνιο παραλληλόγραμμο σχήμα. Με αυτόν τον τρόπο μπορεί να γίνει αντιληπτή η επίδραση του σεισμού στη διέγερση της σεισμικότητας της γύρω περιοχής, χωρίς να λαμβάνονται υπόψη οι κοντινοί μετασεισμοί στο ρήγμα. Από το διάγραμμα φαίνεται η μείωση του αριθμού των μετασεισμών τόσο αυτών που είχαν τις εστίες τους σε περιοχές θετικών μεταβολών των τάσεων όσο και αυτών οι εστίες των οποίων ήταν σε θέσεις με αρνητικές μεταβολές τάσεων. Μόνο από την 4<sup>η</sup> μέχρι την 7<sup>η</sup> ημέρα ο αθροιστικός αριθμός των σεισμών είναι ίδιος, τόσο για τους μετασεισμούς με τις εστίες τους σε αρνητικές περιοχές τάσεων όσο και για αυτούς με τις εστίες τους σε αρνητικές περιοχές τάσεων.



**Σχήμα 3.42:** Απεικόνιση του ρυθμού σεισμικότητας της περιοχής μετά το σεισμό της Ν. Κρήτης, έχοντας διαγράψει τους κοντινούς στο ρήγμα μετασεισμούς. Με την κόκκινη γραμμή ο ρυθμός σεισμικότητας της γύρω περιοχής για τους μετασεισμούς που έγιναν 30 ημέρες μετά τον κύριο και είχαν εστίες τους σε περιοχές θετικών μεταβολών των τάσεων, ενώ με τη μπλε γραμμή ο ρυθμός σεισμικότητας της ίδιας περιοχής και για τους ίδιους μετασεισμούς που είχαν τις εστίες τους σε περιοχές με αρνητικές μεταβολές των τάσεων.

Στον Πίνακα 3.7 εμφανίζεται η αναλογία, σε ποσοστά, των μετασεισμών που είχαν τις εστίες τους σε περιοχές με θετικές και αρνητικές τιμές των τάσεων. Το ποσοστό των μετασεισμών των οποίων οι εστίες ήταν σε θετικές περιοχές τάσεων είναι μεγαλύτερο από αυτό των μετασεισμών με τις εστίες τους σε θέσεις αρνητικών τάσεων τόσο όταν λαμβάνονται υπόψη όλοι οι μετασεισμοί που έγιναν στην περιοχή, όσο και μετά την αφαίρεση των μετασεισμών γύρω από το ρήγμα. Η μεγάλη μείωση των μετασεισμών που είχαν τις εστίες τους σε θέσεις με αρνητικές τιμές τάσεων οφείλεται στο ότι οι περισσότεροι έγιναν κοντά στο ρήγμα και δε συμπεριλήφθηκαν στους υπολογισμούς του ρυθμού σεισμικότητας, ενώ λιγότεροι μετασεισμοί είχαν τις εστίες τους σε περιοχές θετικών μεταβολών τάσεων και έγιναν κοντά στο ρήγμα. Λαμβάνοντας υπόψη αυτά τα αποτελέσματα γίνεται φανερός ο αυξημένος ρυθμός σεισμικότητας στην περιοχή της νότιας Κρήτης μετά τη γένεση του ισχυρού σεισμού. Το συμπέρασμα αυτό βρίσκεται σε συμφωνία με τους King et al. (1994) και τον Stein (1999) οι οποίοι παρατήρησαν ότι οι περισσότεροι μετασεισμοί κατανέμονταν σε ζώνες που είχαν μεταβολή τάσης μεγαλύτερη από 0.1 bar κοντά στην περιοχή της διάρρηξης.

| Μετασεισμοί                          | Θετικές<br>Τιμές<br>Τάσεων<br>(%) | Αρνητικές<br>Τιμές<br>Τάσεων<br>(%) |
|--------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|
| Όλοι                                 | 53                                | 47                                  |
| Χωρίς τους<br>κοντινούς<br>στο ρήγμα | 55                                | 45                                  |

**Πίνακας 3.7:** Ποσοστά των μετασεισμών οι εστίες των οποίων ήταν σε περιοχές με θετικές και αρνητικές μεταβολές των τάσεων για το σεισμό στη Ν. Κρήτη.

# 3.7 Σεισμική Ακολουθία ΝΑ Αιγαίου, 10 Ιουνίου 2012, $M_w$ =6.0

## 3.7.1 Εισαγωγή

Σεισμός έγινε στις 10 Ιουνίου 2012, στις 12:44:17 (GMT), στην περιοχή του NA Αιγαίου και πιο συγκεκριμένα στη δυτική συνέχεια της αριστερόστροφης ζώνης Fethiye-Burdur προς την πλευρά του Αιγαίου Πελάγους και της λεκάνης της Ρόδου. Το επίκεντρο ήταν 36.441°B 28.904°A (Kiratzi et al., 2013). Ο σεισμός αυτός απασχόλησε αρκετούς μελετητές, οι οποίοι αναφέρονται παρακάτω και είχαν σκοπό να ορίσουν τα βασικά του χαρακτηριστικά. Τα μεγέθη του σεισμού που εκτιμήθηκαν από τον κάθε μελετητή ποικίλλουν από  $M_w$ =5.8 (Evrim Yavuz et al., 2015),  $M_w$ =6.0 (Kiratzi et al., 2013),  $M_w$ =6.0 (Ethem Görgün et al., 2014),  $M_w$ =6.1 (Bülent Dogan et al., 2015) και  $M_w$ =6.1 (GCMT).

# 3.7.2 Σεισμικότητα πριν και μετά τον κύριο σεισμό

Για τη μελέτη της σεισμικότητας της περιοχής γύρω από το σεισμό χαρτογραφήθηκαν τα επίκεντρα των προσεισμικών και μετασεισμικών ακολουθιών και παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.43. Πιο συγκεκριμένα στο Σχήμα 3.43A απεικονίζονται με μπλε τετράγωνα τα επίκεντρα των σεισμών που προηγήθηκαν 30 ημέρες του κύριου και κατανέμονταν σε μεγάλη απόσταση από το επίκεντρο του σεισμού που ακολούθησε. Με μοβ τετράγωνα εμφανίζονται οι σεισμοί που έγιναν 7 ημέρες πριν τον κύριο (Σχήμα 3.43B) και ήταν ελάχιστοι σε αριθμό. Το σχετικά μικρό πλήθος σεισμών που ακολούθησε 24 ώρες μετά το σεισμό και κατανέμονταν τόσο κοντά στο επίκεντρο όσο και μακρύτερα απεικονίζεται στο Σχήμα 3.43Γ με τους κόκκινους κύκλους. Λίγοι σε αριθμό ήταν και οι σεισμοί που έγιναν μετά από 48 ώρες και φαίνονται με μοβ κύκλους στο Σχήμα 3.43Δ. Ασθενής εμφανίζεται η μετασεισμική δραστηριότητα μετά από 30 ημέρες με τα επίκεντρα των μετασεισμών αυτών να φαίνονται με πράσινους ρόμβους (*Σχήμα 3.43E*) και συγκεντρώνονταν κυρίως κοντά στο επίκεντρο. Την ίδια εικόνα εμφανίζει και η μετασεισμική δραστηριότητα μετά από 60 ημέρες, με τους ελάχιστους μετασεισμούς να κατανέμονταν γύρω από το επίκεντρο του κύριου σεισμού με κίτρινους ρόμβους (*Σχήμα 3.43ΣT*).

Με βάση τη χωρική κατανομή της μετασεισμικής ακολουθίας μετά από 24 και 48 ώρες (Σχήμα 3.43Γ, Σχήμα 3.43Δ) ορίστηκε το ρήγμα για το σεισμό του ΝΑ Αιγαίου, το οποίο βρίσκεται σε συμφωνία με αυτό των Kiratzi et al. (2013). Η μελέτη της σεισμικής διέγερσης εξετάστηκε από τους χάρτες που δείχνουν τους μετασεισμούς μετά από 30 και 60 ημέρες από το σεισμό (Σχήμα 3.43Ε, Σχήμα 3.43ΣΤ).



25.5° 26° 26.5° 27° 27.5° 28° 28.5° 29° 29.5° 25.5° 26° 26.5° 27° 27.5° 28° 28.5° 29° 29.5

**Σχήμα 3.43:** Χωρική κατανομή της προσεισμικής και μετασεισμικής δραστηριότητας για το σεισμό του ΝΑ Αιγαίου. Το επίκεντρο του σεισμού φαίνεται με άστρο και ο μηχανισμός γένεσης του ως ισεμβαδική προβολή του κάτω ημισφαιρίου. **Α.** Οι σεισμοί 30 ημέρες πριν τη γένεση του κύριου (μπλε τετράγωνα). **Β.** Οι σεισμοί 7 ημέρες πριν από τον κύριο σεισμό (μοβ τετράγωνα). **Γ.** Οι μετασεισμοί 24 ώρες μετά τον κύριο σεισμό (κόκκινοι κύκλοι). **Δ.** Οι μετασεισμοί μετά από 48 ώρες (μοβ κύκλοι). **Ε.** Τα επίκεντρα των μετασεισμών μετά από 30 ημέρες (πράσινοι ρόμβοι). **ΣΤ.** Τα επίκεντρα των μετασεισμών μετά από 60 ημέρες (κίτρινοι ρόμβοι).

## 3.7.3 Υπολογισμός Τάσεων Coulomb

Για το σεισμό που έγινε την 10<sup>η</sup> Ιουνίου 2012 έχουν δημοσιευτεί διάφορες μελέτες, οι οποίες αναφέρονται στη συνέχεια. Με βάση αυτές τις μελέτες και τα αποτελέσματα που εξήχθησαν από τις μετασεισμικές ακολουθίες υπολογίσθηκε το μοντέλο μεταβολής τάσεων για την περιοχή.

Οι Bülent et al. (2015) παρατήρησαν ένα ρήγμα οριζόντιας μετατόπισης, BΔ-NA διεύθυνσης, με παράταξη 212°, γωνία κλίσης 78° και γωνία ολίσθησης 3°. Οι Görgün et al. (2014) επέλεξαν να χρησιμοποιήσουν, για το ίδιο ρήγμα, ένα μηχανισμό που είχε παράταξη 262°, γωνία κλίσης 69° και γωνία ολίσθησης 49°. Χρησιμοποιώντας τον τανυστή ροπής οι Yavuz et al. (2015), κατέληξαν ότι το ρήγμα έχει παράταξη 203°, γωνία κλίσης 60° και γωνία ολίσθησης 0°.

Οι Kiratzi et al. (2013) μελέτησαν αυτή τη σεισμική ακολουθία ορίζοντας ένα ρήγμα ΔΒΔ-ΑΒΑ δεξιόστροφης οριζόντιας συνιστώσας. Χρησιμοποίησαν τον εξής μηχανισμό γένεσης του ρήγματος με παράταξη 115°, γωνία κλίσης 85° και γωνία ολίσθησης 171°. Επίσης, προσδιόρισαν τα εστιακά βάθη των μετασεισμών μεταξύ 10 έως 25 km, την εστία του σεισμού σε βάθος 24 km και το μήκος του ρήγματος στα 20 km. Το μήκος βρίσκεται σε καλή συμφωνία με το αποτέλεσμα των εμπειρικών σχέσεων των Papazachos et al. (2004) και αρκετά κοντά σε αυτό που προκύπτει από τις σχέσεις των Wells-Coppersmith (1994).

Στην παρούσα εργασία το μήκος του ρήγματος ήταν ίσο με 20 km και ο μηχανισμός γένεσης του ρήγματος που επιλέχτηκε ήταν παράταξη  $115^{\circ}$ , γωνία κλίσης  $85^{\circ}$  και γωνία ολίσθησης (Kiratzi et al., 2013). Από τις εμπειρικές σχέσεις και τη σεισμική ροπή που εκλύθηκε,  $M_{\circ}$ =2.02·10<sup>25</sup> dyn·cm (GCMT), υπολογίσθηκε η ολίσθηση κατά μήκος του ρήγματος ίση με 0.20 μέτρα.

Στο Σχήμα 3.44Α απεικονίζεται το ρήγμα του σεισμού σε μορφολογικό χάρτη με βάση τα παραπάνω στοιχεία. Στο Σχήμα 3.44Β παρουσιάζεται η μεταβολή των τάσεων και παρατηρείται ότι οι θετικοί λοβοί έχουν διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ και ΒΑ-ΝΔ, ενώ οι αρνητικοί έχουν διεύθυνση σχεδόν Α-Δ και Β-Ν. Όπως φαίνεται στο ίδιο σχήμα, το μεγαλύτερο τμήμα της Ρόδου φορτίζεται αρνητικά.



**Σχήμα 3.44: Α.** Ο σεισμός στο ΝΑ Αιγαίο στις 10/6/2012. Φαίνονται το επίκεντρο, με άστρο και ο μηχανισμός γένεσης. **Β.** Η μεταβολή των τάσεων που προκλήθηκε από το σεισμό.

## 3.7.4 Χωρική Κατανομή Μετασεισμών

Για τους μετασεισμούς που έγιναν 30 ημέρες μετά τον ισχυρό σεισμό, υπολογίσθηκαν οι τιμές μεταβολής των τάσεων τους στις εστίες αυτών των μετασεισμών, προκειμένου να μελετηθεί η επίδραση του σεισμού στη σεισμικότητα της γύρω περιοχής. Το αποτέλεσμα φαίνεται στο Σχήμα 3.45Α που εμφανίζεται το σχετικά μικρό πλήθος μετασεισμών που ακολούθησε και είχε μέγεθος πληρότητας Μ≥2.1. Οι μετασεισμοί κατανέμονταν και στην περιοχή γύρω από το σεισμό, αλλά και μακρύτερα. Έχοντας ως σκοπό να εκτιμηθεί η διέγερση μετασεισμών εκτός του ρήγματος του κύριου σεισμού, αφαιρέθηκαν από τα δεδομένα οι μετασεισμοί που έγιναν πάνω στο ρήγμα και παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.45B. Επειδή η κλίση του ρήγματος αποκλίνει από την κατακόρυφο εμφανίζονται μετασεισμοί που ενώ οι εστίες τους βρίσκονται σε περιοχές με θετικές τιμές μεταβολής της τάσης στον τρισδιάστατο χώρο, τα επίκεντρά τους, δηλαδή η προβολή τους στην επιφάνεια, βρίσκονται σε περιοχές αρνητικών μεταβολών.



**Σχήμα 3.45: A.** Κατανομή του πεδίου των τάσεων Coulomb 30 ημέρες μετά το σεισμό που έγινε στις 10/6/2012 στο ΝΑ Αιγαίο. **B.** Εμφάνιση ξανά του πρώτου σχήματος με τη διαφορά ότι όσοι μετασεισμοί είχαν το επίκεντρο τους κοντά στο ρήγμα δεν λήφθηκαν υπόψη. Στα δύο σχήματα τα επίκεντρα των μετασεισμών, οι εστίες των οποίων ήταν σε περιοχές με θετικές μεταβολές τάσεων απεικονίζονται με κόκκινους κύκλους, ενώ τα επίκεντρα αυτών που είχαν τις εστίες τους σε θέσεις με αρνητικές τιμές τάσεων με μπλε κύκλους.

## 3.7.5 Πληρότητα

Για να γίνει ποσοτική αποτίμηση της διέγερσης της σεισμικής δραστηριότητας, χρειάζεται ένα πλήρες δείγμα δεδομένων.

Από όλα τα διαθέσιμα δεδομένα για αυτήν τη μετασεισμική ακολουθία διερευνάται η πληρότητα των μεγεθών της για το χρονικό διάστημα των 30 ημερών μετά το σεισμό. Από τη μέθοδος της πληρότητας (Leptokaropoulos et al., 2013) που εφαρμόστηκε διαπιστώθηκε ότι τα δεδομένα ήταν πλήρη για σεισμούς με μέγεθος Μ≥2.1.



**Σχήμα 3.46: Α.** Αθροιστική συχνότητα (κύκλοι) και συχνότητα (τετράγωνα) των σεισμών σε συνάρτηση με το μέγεθος για τους σεισμούς 30 ημέρες μετά τον κύριο. **Β.** Διαφορά μεταξύ των παρατηρούμενων δεδομένων και της θεωρητικής κατανομής, όπως σχηματίστηκε από τον υπολογισμό της μέγιστης πιθανότητας σαν συνάρτηση μεγέθους (GFT), με το ανοιχτό χρώμα. Διαφορά μεταξύ των παρατηρούμενων δεδομένων και των 1000 τυχαίων συνθετικών καταλόγων που σχηματίστηκαν σύμφωνα με τον ορισμό της καλύτερης τροποποιημένης προσαρμογής (MGFT), με το σκούρο χρώμα.

#### 3.7.6 Ρυθμός Σεισμικότητας

Προκειμένου να διερευνηθεί η επίδραση του σεισμού στη σεισμικότητα της γύρω περιοχής υπολογίσθηκε ο ρυθμός σεισμικότητας στην περιοχή 30 ημέρες μετά τον κύριο σεισμό για τους μετασεισμούς που είχαν μέγεθος Μ≥2.1. Στο Σχήμα 3.47 εμφανίζεται το διάγραμμα που περιλαμβάνει τον αθροιστικό αριθμό των μετασεισμών που έγιναν 30 ημέρες μετά τον κύριο σε συνάρτηση με το χρόνο. Από το διάγραμμα φαίνεται ότι ο αριθμός των μετασεισμών που είχαν τις εστίες τους σε περιοχές με αρνητικές τιμές τάσεων είναι μεγαλύτερος από τον αριθμό των μετασεισμών που είχαν τις εστίες τους σε θετικές περιοχές τάσεων. Επίσης, από την 4<sup>η</sup> έως την 5<sup>η</sup> ημέρα ο αθροιστικός αριθμός των μετασεισμών που είχαν τις εστίες τους σε θετικές περιοχές τάσεων είναι περίπου ίδιος. Παρατηρείται ότι από την 7<sup>η</sup> μέχρι τη 10<sup>η</sup> ημέρα δεν έγινε κάποιος μετασεισμός που η εστία του να ήταν σε θετική περιοχή τάσεων. Το ίδιο συνέβη και από την 11<sup>η</sup> έως την 28<sup>η</sup> ημέρα, ενώ από την 28<sup>η</sup> μέχρι την 30<sup>η</sup> ημέρα ο αριθμός των μετασεισμών των μετασεισμών οι εστίες τους σε θετικές περιοχές των μετασεισμός που το είχαν τις εστίες τους σε αριθμός των μετασεισμών που είχαν τις εστίες τους σε συ τόσο σε θετικές όσο και σε αρνητικές περιοχές τάσεων είναι περίπου ίδιος.



**Σχήμα 3.47:** Ρυθμός σεισμικότητας στην περιοχή του ΝΑ Αιγαίου μετά το σεισμό στο στις 10/6/2012. Με την κόκκινη γραμμή εμφανίζεται ο ρυθμός σεισμικότητας της γύρω περιοχής για τους μετασεισμούς που έγιναν 30 ημέρες μετά τον κύριο, των οποίων οι εστίες βρίσκονταν σε περιοχές θετικών μεταβολών των τάσεων, ενώ με τη μπλε γραμμή ο ρυθμός σεισμικότητας της ίδιας περιοχής και για τους ίδιους μετασεισμούς οι εστίες των οποίων βρίσκονταν σε περιοχές αρνητικών μεταβολών των τάσεων.

Με παρόμοιο τρόπο σχεδιάστηκε και το διάγραμμα του Σχήματος 3.48, με τη διαφορά ότι αφαιρέθηκαν οι μετασεισμοί που έγιναν πλησίον του ρήγματος. Η διαγραφή των μετασεισμών έγινε μετά την προβολή του ρήγματος στην επιφάνεια, σχηματίζοντας ένα ορθογώνιο παραλληλόγραμμο σχήμα. Φαίνεται με αυτόν τον τρόπο η επίδραση του σεισμού στη διέγερση της σεισμικότητας της γύρω περιοχής, χωρίς να λαμβάνονται υπόψη οι κοντινοί στο ρήγμα μετασεισμοί. Στο Σχήμα 3.48 εμφανίζονται οι αριθμοί των μετασεισμών που είχαν τις εστίες τους σε θέσεις θετικών και αρνητικών τιμές τάσεων αρκετά μειωμένοι από τους αρχικούς. Αυτή η μεγάλη μείωση δείχνει ότι ο μεγαλύτερος αριθμός των μετασεισμών είχε γίνει κοντά στο ρήγμα και δε λήφθηκε υπόψη στους υπολογισμούς του ρυθμού σεισμικότητας. Ωστόσο, ο αριθμός των μετασεισμών οι εστίες των οποίων ήταν σε περιοχές με αρνητικές τιμές τάσεων συνεχίζει να είναι μεγαλύτερος από τον αριθμό των μετασεισμών που είχαν τις εστίες τους σε περιοχές με θετικές τιμές τάσεων. Μόνο από την 1<sup>η</sup> μέχρι την 4<sup>η</sup> ημέρα οι μετασεισμοί που είχαν τις εστίες τους σε θετικές περιοχές τάσεων είναι περισσότεροι.



**Σχήμα 3.48:** Ρυθμός σεισμικότητας στην περιοχή του ΝΑ Αιγαίου μετά το σεισμό στις 10/6/2012, έχοντας διαγράψει τους κοντινούς στο ρήγμα μετασεισμούς. Με την κόκκινη γραμμή εμφανίζεται ο ρυθμός σεισμικότητας της γύρω περιοχής για τους μετασεισμούς που έγιναν 30 ημέρες μετά τον κύριο, των οποίων οι εστίες βρίσκονταν σε περιοχές θετικών μεταβολών των τάσεων, ενώ με τη μπλε γραμμή ο ρυθμός σεισμικότητας της ίδιους μετασεισμούς οι εστίες των οποίων βρίσκονταν σε περιοχές αρνητικών μεταβολών των τάσεων.

Στον Πίνακα 3.8 εμφανίζονται τα ποσοστά των μετασεισμών που είχαν τις εστίες τους τόσο σε περιοχές θετικών τάσεων όσο και αρνητικών. Το ποσοστό των μετασεισμών οι εστίες των οποίων ήταν σε περιοχές αρνητικών τιμών των τάσεων είναι μεγαλύτερο από το ποσοστό των μετασεισμών που είχαν τις εστίες τους σε περιοχές θετικών τιμών των τάσεων. Το ίδιο αποτέλεσμα εμφανίζεται και όταν δε λαμβάνονται υπόψη οι μετασεισμοί που έγιναν γύρω από το ρήγμα, με το ποσοστό των μετασεισμών που είχαν τις εστίες τους σε περιοχές θέτικών τις εστίες τους σε θέσεις αρνητικών τιμών τάσεων να είναι αρκετά μεγαλύτερο από αυτό των μετασεισμών οι εστίες των οποίων ήταν σε περιοχές θετικών τιμών του είχαν τις εστίες τους σε θέσεις αρνητικών τιμών τάσεων να

Το μεγαλύτερο ποσοστό των μετασεισμών που είχαν τις εστίες τους σε περιοχές με αρνητικές τιμές τάσεων οφείλεται στο μεγάλο εστιακό βάθος του σεισμού και στην πολυπλοκότητα της περιοχής στην οποία έγινε αυτός ο σεισμός.

| Μετασεισμοί                          | Θετικές<br>Τιμές<br>Τάσεων<br>(%) | Αρνητικές<br>Τιμές<br>Τάσεων<br>(%) |
|--------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|
| Όλοι                                 | 46                                | 54                                  |
| Χωρίς τους<br>κοντινούς<br>στο ρήγμα | 38                                | 62                                  |

**Πίνακας 3.8:** Ποσοστά μετασεισμών, οι εστίες των οποίων ήταν σε περιοχές με θετικές και αρνητικές τιμές τάσεων μετά το σεισμό του ΝΑ Αιγαίου.

# 3.8 Σεισμική Ακολουθία Ν. Κρήτης, Ιούνιος 2013

## 3.8.1 Εισαγωγή

Στην περιοχή του Ελληνικού Τόξου και πιο συγκεκριμένα νότια της Κρήτης, έγινε ισχυρός σεισμός την 15<sup>η</sup> Ιουνίου 2013, στις 16:11:03 (GMT), με μέγεθος M<sub>w</sub>=6.3 (GCMT). Μία μέρα αργότερα, στις 16 Οκτωβρίου 2013, ακολούθησε ισχυρός μετασεισμός στις 21:39:05 (GMT), μεγέθους M<sub>w</sub> =6.1 (GCMT). Τα επίκεντρα των σεισμών ελήφθησαν από τα αδημοσίευτα στοιχεία του κ. Καρακώστα Β. και ήταν 34.341°B 25.016°A για τον κύριο σεισμό και 34.181°B 25.139°A για τον ισχυρό μετασεισμό που ακολούθησε. Τα δύο ρήγματα των σεισμών ήταν ανάστροφα και οι μηχανισμοί γένεσής τους δείχνουν προσανατολισμό Α-Δ για τον πρώτο και ΒΑ-ΝΔ για το δεύτερο. Οι σεισμοί στην περιοχή αυτή είναι συνηθισμένοι καθώς οφείλονται στη σύγκρουση της Αφρικανικής λιθοσφαιρικής πλάκας με την Ευρασιατική.

# 3.8.α 1ος Σεισμός της ακολουθίας, 15 Ιουνίου 2013, $M_w$ =6.3

## 3.8.2.α Σεισμικότητα πριν και μετά τον κύριο σεισμό

Για να μελετηθεί η σεισμικότητα στην περιοχή γύρω από το σεισμό χαρτογραφήθηκαν τα επίκεντρα των σεισμών που προηγήθηκαν και ακολούθησαν του κύριου σεισμού και απεικονίζονται στο Σχήμα 3.49. Στο Σχήμα 3.49Α φαίνονται οι προσεισμοί 30 ημέρες πριν με μπλε τετράγωνα που κατανέμονταν τόσο γύρω από το επίκεντρο του επερχόμενου σεισμού, όσο και μακρύτερα. Το μεγάλο πλήθος προσεισμών που έγινε 7 ημέρες πριν τον κύριο σεισμό απεικονίζεται με μοβ τετράγωνα (Σχήμα 3.49B) και κατανέμονταν κοντά στο επίκεντρο του σεισμού, αλλά και μακρύτερα κοντά στην Κρήτη. Αρκετοί σεισμοί ακολούθησαν 24 ώρες μετά τη γένεση του κύριου σεισμού που συγκεντρώνονταν μόνο γύρω από το επίκεντρο και παρουσιάζονται με κόκκινους κύκλους (*Σχήμα 3.49Γ*). Την ίδια εικόνα εμφανίζουν και τα επίκεντρα των μετασεισμών μετά από 48 ώρες όπως φαίνεται στο *Σχήμα 3.49Δ*, με τους μοβ κύκλους. Να σημειωθεί ότι μετά από 48 ώρες έγινε και ο ισχυρότερος μετασεισμός μεγέθους M<sub>w</sub>=6.1 (GCMT), που περιγράφεται στη συνέχεια. Η μετασεισμική δραστηριότητα συνεχίστηκε και μετά από 30 ημέρες και φαίνεται στο *Σχήμα 3.49Ε*, με πράσινους ρόμβους, με το μεγαλύτερο μέρος των μετασεισμών να έχει γίνει μακριά από το επίκεντρο και κοντά στο νησί της Κρήτης. Οι μετασεισμοί δε σταμάτησαν ακόμα και μετά από 60 ημέρες και εμφανίζονται με κίτρινους ρόμβους (*Σχήμα 3.49ΣΤ*), με τους περισσότερους να έχουν γίνει πολύ κοντά στην Κρήτη.

Με βάση τη χωρική κατανομή της μετασεισμικής δραστηριότητας των 24 και 48 ωρών (Σχήμα 3.49Γ, Σχήμα 3.49Δ) καθορίστηκε το ρήγμα και τα χαρακτηριστικά του και συγκρίθηκαν με αυτά από μελέτες. Η σύγκριση έδειξε ότι τα αποτελέσματα που εξήχθησαν από τη μελέτη της μετασεισμικής δραστηριότητας συμφωνούν με αυτά των μελετών. Από τους χάρτες που δείχνουν τη σεισμική δραστηριότητα μετά από 30 και 60 ημέρες (Σχήμα 3.49Ε, Σχήμα 3.49ΣΤ) εξετάστηκε η διέγερση σεισμικότητας στην περιοχή γύρω από το σεισμό.



**Σχήμα 3.49:** Χωρική κατανομή της προσεισμικής και μετασεισμικής δραστηριότητας μετά τον κύριο σεισμό στη Ν. Κρήτη. Το επίκεντρο του σεισμού φαίνεται με άστρο και ο μηχανισμός γένεσής του ως ισεμβαδική προβολή του κάτω ημισφαιρίου. Με το μικρό άστρο απεικονίζεται το επίκεντρο του ισχυρού μετασεισμού που ακολούθησε μία μέρα μετά. **Α.** Οι προσεισμοί 30 ημέρες πριν τη γένεση του κύριου σεισμού (μπλε τετράγωνα). **Β.** Οι σεισμοί 7 ημέρες πριν από τον κύριο σεισμό (μοβ τετράγωνα). **Γ.** Οι μετασεισμοί 24 ώρες μετά τον κύριο σεισμό (κόκκινοι κύκλοι). **Δ.** Τα επίκεντρα των μετασεισμών μετά από 48 ώρες (μοβ κύκλοι). **Ε.** Οι μετασεισμοί μετά από 30 ημέρες (πράσινοι ρόμβοι). **ΣΤ.** Οι μετασεισμοί 60 ημέρες μετά τον κύριο σεισμό (κίτρινοι ρόμβοι).

#### 3.8.3.α Υπολογισμός Τάσεων Coulomb

Για το σεισμό που έγινε στις 15 Ιουνίου 2013, νότια της Κρήτης, προτάθηκε από το GCMT μηχανισμός γένεσης του ρήγματος που είχε παράταξη 100°, γωνία κλίσης 85° και γωνία ολίσθησης 95°. Από τη μελέτη του ο κ. Καρακώστας Β. βρήκε ότι το μήκος του ρήγματος ήταν 20 km και το βάθος 17.5 km. Επίσης, ο ίδιος εκτίμησε ότι τα εστιακά βάθη των μετασεισμών του κύριου σεισμού βρίσκονταν μεταξύ των 3 έως 20 km. Αυτά τα στοιχεία χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα μελέτη για τον υπολογισμό του μοντέλου μεταβολών των τάσεων και κάνοντας χρήση των εμπειρικών σχέσεων, υπολογίσθηκε ολίσθηση ίση με 0.34 μέτρα, για σεισμική ροπή,  $M_0=3.78\cdot10^{25}$  dyn·cm (GCMT).

Στο Σχήμα 3.50Α φαίνεται το ρήγμα μαζί με τα επίκεντρα των δύο σεισμών και το μηχανισμό γένεσης του κύριου. Από τον υπολογισμό των τάσεων προέκυψε το Σχήμα 3.50B, στο οποίο φαίνονται οι θετικές και αρνητικές τάσεις Coulomb. Παρατηρείται ότι ο μετασεισμός που ακολούθησε βρίσκεται στις θετικές περιοχές και όπως είναι γνωστό, σε αυτές τις ζώνες ευνοείται η γένεση σεισμών.



**Σχήμα 3.42: Α.** Ο κύριος σεισμός που έγινε στις 15/6/2013, νότια της Κρήτης. Διακρίνεται το επίκεντρο του κύριου σεισμού με το μεγαλύτερο άστρο και ο μηχανισμός γένεσης του, ενώ με το μικρότερο άστρο φαίνεται το επίκεντρο του ισχυρότερου μετασεισμού. **Β.** Οι μεταβολές των τάσεων που προκλήθηκαν από το σεισμό. Όπως φαίνεται, ο μετασεισμός που ακολούθησε βρισκόταν σε φωτεινή ζώνη, έτσι ώστε η γένεσή του επιταχύνθηκε.

### 3.8.4.α Χωρική Κατανομή Μετασεισμών

Για τη διερεύνηση της επίδρασης του σεισμού στη σεισμικότητα της γύρω περιοχής χαρτογραφήθηκαν τα επίκεντρα των μετασεισμών που έγιναν 30 ημέρες μετά τον κύριο σεισμό, αφού πρώτα είχαν υπολογισθεί οι μεταβολές των τάσεων για κάθε μετασεισμό στην εστία του και παρουσιάζονται στο *Σχήμα 3.43Α*. Τα επίκεντρα των μετασεισμών είναι πλήρη για μεγέθη σεισμών Μ≥2.8. Προκειμένου να εξεταστεί η διέγερση μετασεισμών στην περιοχή εκτός του ρήγματος του κύριου σεισμού, αφαιρέθηκαν από τα δεδομένα οι μετασεισμοί που έγιναν πάνω στο ρήγμα. Ο ίδιος χάρτης εμφανίζεται και στο *Σχήμα 3.43B* με τη διαφορά ότι έχουν διαγραφεί όσοι μετασεισμοί έγιναν κοντά στο ρήγμα. Όπως φαίνεται στα σχήματα και έχει αναφερθεί και σε προηγούμενους σεισμούς υπάρχουν μετασεισμοί, οι εστίες των οποίων βρίσκονταν σε θέσεις με αρνητικές τιμές τάσεων στον τρισδιάστατο χώρο



**Σχήμα 3.43: Α.** Χωρική κατανομή του πεδίου των τάσεων Coulomb μετά το σεισμό νότια της Κρήτης, στις 15/6/2013. **Β.** Κατανομή των μεταβολών των τάσεων Coulomb, μετά από αφαίρεση των μετασεισμών που έγιναν πλησίον του ρήγματος. Στα σχήματα τα επίκεντρα των μετασεισμών που οι εστίες τους βρίσκονταν σε θέσεις με θετικές τιμές τάσεων φαίνονται με κόκκινους κύκλους, ενώ τα επίκεντρα όσων είχαν τις εστίες τους σε περιοχές με τις αρνητικές τιμές τάσεων με μπλε κύκλους.

#### 3.8.5.α Πληρότητα

Για να γίνει ποσοτική εκτίμηση της διέγερσης της σεισμικής δραστηριότητας, είναι απαραίτητο ένα πλήρες δείγμα δεδομένων.

Η πληρότητα για το χρονικό διάστημα των 30 ημερών μετά το σεισμό υπολογίζεται διαθέτοντας όλα τα διαθέσιμα δεδομένα για αυτή τη μετασεισμική

ακολουθία. Από την εφαρμογή της μεθόδου της πληρότητας (Leptokaropoulos et al., 2013) διαπιστώθηκε ότι τα δεδομένα ήταν πλήρη για σεισμούς με μέγεθος Μ≥2.8.



**Σχήμα 3.44: Α.** Αθροιστική συχνότητα (κύκλοι) και συχνότητα (τετράγωνα) των σεισμών σε συνάρτηση με το μέγεθος για τους σεισμούς 30 ημέρες μετά τον κύριο. **Β.** Διαφορά μεταξύ των παρατηρούμενων δεδομένων και της θεωρητικής κατανομής, όπως σχηματίστηκε από τον υπολογισμό της μέγιστης πιθανότητας σαν συνάρτηση μεγέθους (GFT), με το ανοιχτό χρώμα. Διαφορά μεταξύ των παρατηρούμενων και των 1000 τυχαίων συνθετικών καταλόγων που σχηματίστηκαν σύμφωνα με τον ορισμό της καλύτερης τροποποιημένης προσαρμογής (MGFT), με το σκούρο χρώμα.

### 3.8.6.α Ρυθμός Σεισμικότητας

Για τη διερεύνηση της επίδρασης του σεισμού στη σεισμικότητα της περιοχής γύρω από το επίκεντρο απαραίτητος είναι ο υπολογισμός του ρυθμού σεισμικότητας της περιοχής αυτής. Σχηματίστηκε διάγραμμα με τον αθροιστικό αριθμό των μετασεισμών που έγιναν 30 ημέρες μετά τον κύριο σεισμό και είχαν μέγεθος Μ≥2.8 σε συνάρτηση με το χρόνο και παρουσιάζεται στο *Σχήμα 3.45*. Παρατηρείται ένας σχετικά μεγάλος αριθμός μετασεισμών που είχαν τις εστίες τους σε περιοχές με θετικές τιμές τάσεων και ένας μικρότερος αριθμός μετασεισμών των οποίων οι εστίες ήταν σε περιοχές με αρνητικές τιμές τάσεων.


**Σχήμα 3.45:** Ρυθμός σεισμικότητας της γύρω περιοχής μετά το σεισμό της Ν. Κρήτης στις 15/6/2013. Ο ρυθμός σεισμικότητας της περιοχής που έγιναν οι μετασεισμοί σε χρονικό διάστημα 30 ημερών μετά τον κύριο και είχαν τις εστίες τους σε θετικές και αρνητικές περιοχές τάσεων εμφανίζεται με κόκκινη και μπλε γραμμή, αντίστοιχα.

Το ίδιο διάγραμμα σχεδιάστηκε ξανά, χωρίς όμως να λαμβάνονται υπόψη οι μετασεισμοί που έγιναν γύρω από το ρήγμα. Με την προβολή του ρήγματος στην επιφάνεια, σε σχήμα ορθογωνίου παραλληλογράμμου, έγινε η αφαίρεση των μετασεισμών. Με τον τρόπο αυτό φαίνεται η επίδραση του σεισμού στη διέγερση της σεισμικότητας της γύρω περιοχής, χωρίς να συμπεριλαμβάνονται οι κοντινοί στο ρήγμα μετασεισμοί. Το αποτέλεσμα φαίνεται στο *Σχήμα 3.46*, με τους αθροιστικούς αριθμούς των μετασεισμών που είχαν τις εστίες τους σε θετικές και αρνητικές περιοχές τάσεων να εμφανίζονται λίγο μειωμένοι. Οι μετασεισμοί οι εστίες των οποίων ήταν σε περιοχές με αρνητικές τιμές τάσεων ήταν λιγότεροι από τον αριθμό των μετασεισμών που είχαν τις εστίες τους σε θετικών τιμών τάσεων, γιατί οι περισσότεροι από αυτούς είχαν γίνει κοντά στο ρήγμα και δεν συμπεριλήφθηκαν στον υπολογισμό του ρυθμού σεισμικότητας.



**Σχήμα 3.45:** Ρυθμός σεισμικότητας της γύρω περιοχής μετά το σεισμό της Ν. Κρήτης στις 15/6/2013, χωρίς τους κοντινούς μετασεισμούς στο ρήγμα. Ο ρυθμός σεισμικότητας της περιοχής που έγιναν οι μετασεισμοί σε χρονικό διάστημα 30 ημερών μετά τον κύριο και είχαν τις εστίες τους σε θετικές και αρνητικές περιοχές τάσεων εμφανίζεται με κόκκινη και μπλε γραμμή αντίστοιχα.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζεται η κατανομή σε ποσοστά των μετασεισμών που είχαν τις εστίες τους σε θετικές και αρνητικές περιοχές τάσεων. Τόσο στην περίπτωση που λαμβάνονται υπόψη όλοι οι μετασεισμοί που έγιναν στην περιοχή, όσο και μετά την αφαίρεση των κοντινών στο ρήγμα μετασεισμών το ποσοστό των μετασεισμών που είχαν τις εστίες τους σε περιοχές με θετικές τιμές τάσεων είναι πολύ μεγαλύτερο από αυτό των μετασεισμών οι εστίες των οποίων ήταν σε περιοχές με αρνητικές τιμές τάσεων. Από τα παραπάνω αποτελέσματα γίνεται φανερός ο αυξημένος ρυθμός σεισμικότητας στην περιοχή της Ν. Κρήτης μετά τη γένεση του ισχυρού σεισμού. Το συμπέρασμα αυτό βρίσκεται σε συμφωνία με αυτό των King et al. (1994), που παρατήρησαν ότι οι περισσότεροι μετασεισμοί ήταν συγκεντρωμένοι εκεί όπου η μεταβολή των τάσεων ήταν μεγαλύτερη από 0.5 bar και ελάχιστοι κατανέμονταν εκεί όπου η μεταβολή των τάσεων μειώνονταν κατά 0.5 bar. Επίσης, συμφωνία υπάρχει και με το συμπέρασμα στο οποίο κατέληξε ο Stein (1999), ο οποίος διαπίστωσε ότι οι περισσότεροι μετασεισμοί κατανέμονταν σε ζώνες που είχαν μεταβολή τάσης μεγαλύτερη από 0.1 bar κοντά στην περιοχή της διάρρηξης.

**Πίνακας 3.9:** Αναλογία σε ποσοστά των μετασεισμών οι εστίες των οποίων ήταν σε περιοχές θετικών και αρνητικών τιμών των τάσεων που έγιναν μετά το σεισμό στη Ν. Κρήτη.

| Μετασεισμοί                          | Θετικές<br>Τιμές<br>Τάσεων<br>(%) | Αρνητικές<br>Τιμές<br>Τάσεων<br>(%) |
|--------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|
| Όλοι                                 | 77                                | 23                                  |
| Χωρίς τους<br>κοντινούς<br>στο ρήγμα | 85                                | 15                                  |

## 3.8.β 2ος Σεισμός της ακολουθίας, 16 Ιουνίου 2013, $M_w$ =6.1

### 3.8.2.β Σεισμικότητα πριν και μετά τον κύριο σεισμό

Η σεισμική δραστηριότητα που προηγήθηκε και ακολούθησε του ισχυρού μετασεισμού στις 16 Ιουνίου 2013, νότια της Κρήτης, απεικονίζεται στο Σχήμα 3.46. Το σχήμα 3.46Α, δείχνει με μπλε τετράγωνα όσους σεισμούς έγιναν 30 ημέρες πριν τον ισχυρό μετασεισμό και συγκεντρώνονταν γύρω από το επίκεντρο του επερχόμενου ισχυρού μετασεισμού, αλλά και μακρύτερα, κοντά στην Κρήτη. Το μεγάλο πλήθος σεισμών που έγινε 7 ημέρες πριν απεικονίζει το Σχήμα 3.46B, με μοβ τετράγωνα, όπου το μεγαλύτερο μέρος τους έγινε κοντά στο επίκεντρο. Μεταξύ του αυξημένου αριθμού των προσεισμών συμπεριλαμβάνεται και ο σεισμός που έγινε μία ημέρα πριν καθώς και οι μετασεισμοί που οφείλονται σε αυτόν και έτσι μπορεί να δικαιολογηθεί αυτός ο μεγάλος αριθμός προσεισμών. Τους μετασεισμούς που ακολούθησαν 24 ώρες μετά τον ισχυρό μετασεισμό απεικονίζει το Σχήμα 3.46Γ, με κόκκινους κύκλους, που συγκεντρώνονταν γύρω από το επίκεντρο. Την ίδια εικόνα δίνουν και οι μετασεισμοί που ακολούθησαν μετά από 48 ώρες με τους μοβ κύκλους (Σχήμα 3.46Δ). Στο Σχήμα 3.46Ε, παρουσιάζονται με πράσινους ρόμβους τα επίκεντρα των μετασεισμών μετά από 30 ημέρες, όπου ένα μικρό μέρος τους κατανέμονταν κοντά στο επίκεντρο και οι περισσότεροι έγιναν κοντά στην Κρήτη. Η μετασεισμική ακολουθία συνεχίστηκε μετά από 60 ημέρες, όπως εμφανίζεται στο Σχήμα 3.46ΣΤ με κίτρινους ρόμβους, και μεγάλο μέρος της κατανεμήθηκε κοντά στην Κρήτη.

Μετά τη χωρική κατανομή των μετασεισμών που έγιναν μετά από 24 και 48 ώρες (Σχήμα 3.46Γ, Σχήμα 3.46Δ) καθορίστηκε το ρήγμα του ισχυρού μετασεισμού στη νότια Κρήτη και τα βασικά χαρακτηριστικά του και έπειτα συγκρίθηκε με μελέτες που έχουν γίνει για αυτόν το σεισμό καθώς και με εμπειρικές σχέσεις όπου

παρατηρήθηκε συμφωνία στα αποτελέσματα. Η διερεύνηση της διέγερσης της σεισμικότητας στην περιοχή γύρω από το σεισμό μελετήθηκε από τους χάρτες με τη μετασεισμική ακολουθία των 30 και 60 ημερών (Σχήμα 3.46Ε, Σχήμα 3.46ΣΤ).



**Σχήμα 3.46:** Χωρική κατανομή της σεισμικής δραστηριότητας πριν και μετά τον ισχυρό μετασεισμό στη Ν. Κρήτη. Το επίκεντρο του ισχυρότερου μετασεισμού φαίνεται με άστρο και ο μηχανισμός γένεσης του ως ισεμβαδική προβολή του κάτω ημισφαιρίου. Με το μικρότερο άστρο απεικονίζεται ο κύριος σεισμός που προηγήθηκε. **Α.** Τα επίκεντρα των προσεισμών 30 ημέρες πριν τον ισχυρό μετασεισμό (μπλε τετράγωνα). **Β.** Οι σεισμοί 7 ημέρες πριν από τον ισχυρό μετασεισμό (μοβ τετράγωνα). **Γ.** Μετασεισμοί 24 ώρες μετά τον ισχυρό μετασεισμό (κόκκινοι κύκλοι). **Δ.** Οι μετασεισμοί 48 ώρες μετά τον ισχυρό μετασεισμό (μοβ κύκλοι). **Ε.** Οι μετασεισμοί 30 ημέρες μετά το σεισμό (πράσινοι ρόμβοι).

#### 3.8.3.β Υπολογισμός Τάσεων Coulomb

Για το σχεδιασμό του μοντέλου τάσεων του ισχυρότερου μετασεισμού που ακολούθησε στις 16 Ιουνίου 2013, ο μηχανισμός γένεσης του ρήγματος που προτάθηκε από το GCMT είχε παράταξη  $112^\circ$ , γωνία κλίσης  $87^\circ$  και γωνία ολίσθησης  $97^\circ$ . Τα στοιχεία για τον υπολογισμό των μεταβολών των τάσεων ελήφθησαν από τα αδημοσίευτα στοιχεία του κ. Καρακώστα Β. για το σεισμό αυτό. Υπολόγισε το βάθος του σεισμού στα 10.8 km, τα εστιακά βάθη των μετασεισμών μεταξύ 3 μέχρι 20 km και το μήκος του ρήγματος ίσο με 16 km. Από τη σεισμική ροπή, M<sub>o</sub>=1.9·10<sup>25</sup> dyn·cm (GCMT), υπολογίσθηκε η ολίσθηση ίση με 0.21 μέτρα.

Στο μορφολογικό χάρτη, στο Σχήμα 3.47Α, παρουσιάζεται το ρήγμα με το επίκεντρο του μετασεισμού, το μηχανισμό γένεσής του και το επίκεντρο του κύριου σεισμού που προηγήθηκε. Στο Σχήμα 3.47Β απεικονίζεται η χωρική κατανομή της μεταβολής των τάσεων με τις θετικές τιμές να εμφανίζονται κυρίως στα άκρα του ρήγματος.



**Σχήμα 3.47: Α.** Ο ισχυρότερος μετασεισμός που ακολούθησε στις 16/6/2013. Απεικονίζεται με το μεγαλύτερο άστρο το επίκεντρο του μετασεισμού, το ανάστροφο ρήγμα και ο μηχανισμός γένεσης του, ενώ με το μικρότερο άστρο το επίκεντρο του κύριου σεισμού που προηγήθηκε. **Β.** Η μεταβολή των τάσεων που προκλήθηκε από το μετασεισμό.

# 3.8.4.β Χωρική Κατανομή Μετασεισμών

Μετά το σεισμό τις 15<sup>ης</sup> Ιουνίου 2013, έγινε ένας ισχυρός μετασεισμός στις 16 Ιουνίου 2013 και ακολούθησαν αρκετοί μετασεισμοί, όπως προαναφέρθηκε. Για να μελετηθεί η σεισμικότητα της γύρω περιοχής μετά από αυτόν το μετασεισμό χαρτογραφήθηκαν τα επίκεντρα των μετασεισμών που έγιναν μετά από 30 ημέρες, αφού πρώτα υπολογίσθηκαν οι τιμές των μεταβολών των τάσεων του κάθε μετασεισμού στην εστία του και φαίνονται στο Σχήμα 3.48Α. Τα επίκεντρα των μετασεισμών εμφανίζονται με κόκκινους και μπλε κύκλους όταν στις εστίες των μετασεισμών αυτών οι μεταβολές των τάσεων είναι θετικές και αρνητικές, αντίστοιχα. Τα δεδομένα των μετασεισμών του σχήματος ήταν πλήρη για μεγέθη Μ≥2.3. Με σκοπό να ερευνηθεί η διέγερση μετασεισμών εκτός του ρήγματος του ισχυρότερου μετασεισμού, αφαιρέθηκαν από τα δεδομένα όσοι μετασεισμοί έγιναν πάνω στο ρήγμα. Χαρτογραφήθηκαν ξανά τα επίκεντρα των μετασεισμών, έχοντας διαγράψει τους κοντινούς στο ρήγμα μετασεισμούς και παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.48Β.



**Σχήμα 3.48: Α.** Κατανομή του πεδίου των τάσεων Coulomb μετά από το σεισμό νότια της Κρήτης, στις 16/6/2013. **Β.** Πεδίο των τάσεων Coulomb για τον ίδιο σεισμό, χωρίς να συμπεριλαμβάνονται οι μετασεισμοί που έγιναν γύρω από το ρήγμα. Στα δύο σχήματα με τους κόκκινους κύκλους φαίνονται τα επίκεντρα των μετασεισμών που οι εστίες τους ήταν σε περιοχές με θετικές μεταβολές τάσης, ενώ με μπλε κύκλους εμφανίζονται τα επίκεντρα των μετασεισμών οι εστίες των οποίων βρίσκονταν σε περιοχές με αρνητικές τιμές τάσεων.

## 3.8.5.β Πληρότητα

Προκειμένου να γίνει ποσοτική αποτίμηση της διέγερσης της σεισμικής δραστηριότητας, απαραίτητο είναι ένα πλήρες δείγμα δεδομένων.

Έχοντας όλα τα διαθέσιμα δεδομένα για τη μετασεισμική ακολουθία στη Ν. Κρήτη εξετάζεται η πληρότητα για το χρονικό διάστημα των 30 ημερών μετά το σεισμό. Από την εφαρμογή της μεθόδου της πληρότητας (Leptokaropoulos et al., 2013) διαπιστώθηκε ότι τα δεδομένα ήταν πλήρη για σεισμούς με μέγεθος M≥2.3.



**Σχήμα 3.49: Α.** Αθροιστική συχνότητα (κύκλοι) και συχνότητα (τετράγωνα) των σεισμών σε συνάρτηση με το μέγεθος για τους σεισμούς 30 ημέρες μετά τον κύριο. **Β.** Διαφορά μεταξύ των παρατηρούμενων δεδομένων και της θεωρητικής κατανομής, όπως σχηματίστηκε από τον υπολογισμό της μέγιστης πιθανότητας σαν συνάρτηση μεγέθους (GFT), με το ανοιχτό χρώμα. Διαφορά μεταξύ των παρατηρούμενων και των 1000 τυχαίων συνθετικών καταλόγων που σχηματίστηκαν σύμφωνα με τον ορισμό της καλύτερης τροποποιημένης προσαρμογής (MGFT), με το σκούρο χρώμα.

### 3.8.6.β Ρυθμός Σεισμικότητας

Για να μελετηθεί ο ρυθμός σεισμικότητας της περιοχής και μετά τον ισχυρό μετασεισμό στη Ν. Κρήτη, στις 16/6/2013, κατασκευάστηκαν αθροιστικά διαγράμματα. Στο διάγραμμα αναπαριστάται ο αθροιστικός αριθμός των μετασεισμών που έγιναν 30 ημέρες μετά τον ισχυρό μετασεισμό και είχαν μέγεθος Μ≥2.3 σε συνάρτηση με το χρόνο. Στο *Σχήμα 3.50* εμφανίζεται ο αριθμός των μετασεισμών οι εστίες των οποίων ήταν σε περιοχές με θετικές τιμές τάσεων να είναι μεγαλύτερος από τον αριθμό των μετασεισμών που είχαν τις εστίες τους σε περιοχές με αρνητικές τιμές τάσεων.



**Σχήμα 3.50:** Διάγραμμα με το ρυθμό σεισμικότητας της περιοχής γύρω από το επίκεντρο του ισχυρού μετασεισμού της Ν. Κρήτης, μετά τη γένεσή του, στις 16/6/2013. Με την κόκκινη γραμμή εμφανίζεται ο ρυθμός σεισμικότητας αυτής της περιοχής για τους μετασεισμούς που έγιναν 30 ημέρες μετά τον ισχυρό μετασεισμό και είχαν τις εστίες τους σε περιοχές με θετικές μεταβολές των τάσεων, ενώ με τη μπλε γραμμή ο ρυθμός σεισμικότητας της ίδιας περιοχής και για τους ίδιους μετασεισμούς που είχαν τις εστίες τους σε περιοχές με αρνητικές μεταβολές των τάσεων.

Στο Σχήμα 3.51 απεικονίζεται το ίδιο διάγραμμα, χωρίς όμως να λαμβάνονται υπόψη στους υπολογισμούς οι πλησιέστεροι στο ρήγμα μετασεισμοί. Η αφαίρεση των μετασεισμών έγινε αφού λήφθηκε υπόψη η προβολή του ρήγματος στην επιφάνεια, σχηματίζοντας ένα ορθογώνιο παραλληλόγραμμο σχήμα. Έτσι μπορεί να γίνει αντιληπτή η επίδραση του σεισμού στη διέγερση σεισμικότητας της γύρω περιοχής, αφού δεν συμπεριλαμβάνονται στους υπολογισμούς του ρυθμού σεισμικότητας οι μετασεισμοί που έγιναν κοντά στο ρήγμα. Από το Σχήμα 3.51 φαίνεται ότι η μείωση του αριθμού των μετασεισμών οι εστίες των οποίων ήταν σε περιοχές με αρνητικές τάσεις είναι μικρή, ενώ η μείωση του αριθμού των μετασεισμών που εστίες τους ήταν σε περιοχές με θετικές τάσεις είναι μεγάλη. Αυτό οφείλεται στο ότι οι μετασεισμοί που έγιναν κοντά στο ρήγμα και αφαιρέθηκαν είχαν κατά κύριο λόγο τις εστίες τους σε περιοχές θετικών τιμών των τάσεων. Ο αριθμός των μετασεισμών που είχαν τις εστίες τους σε θετικές περιοχές τάσεων συνεχίζει να είναι μεγαλύτερος από τον αριθμό των μετασεισμών των μετασεισμών των οποίων ότο ε στίες τους βρίσκονταν σε περιοχές με αρνητικές τάσεων.



**Σχήμα 3.51:** Αθροιστικό διάγραμμα για το ρυθμό σεισμικότητας της περιοχής γύρω από τον ισχυρό μετασεισμό της Ν. Κρήτη στις 16/6/2013, χωρίς τους μετασεισμούς γύρω από το ρήγμα. Ο ρυθμός σεισμικότητας αυτής της περιοχής για τους μετασεισμούς που έγιναν 30 ημέρες μετά τον ισχυρό μετασεισμό και είχαν τις εστίες τους σε περιοχές με θετικές μεταβολές των τάσεων απεικονίζεται με κόκκινη γραμμή, ενώ ο ρυθμός σεισμικότητας τους ίδιους μετασεισμούς που είχαν τις εστίες του είχαν τις εστίες τους σε περιοχής και για τους ίδιους μετασεισμούς που είχαν τις εστίες τους σε περιοχής και για τους μετασεισμούς που είχαν τις εστίες τους σε περιοχής και για τους μετασεισμούς που είχαν του είχαν τους σε περιοχής και για τους ίδιους μετασεισμούς που είχαν τις εστίες τους σε περιοχές των τάσεων φαίνεται με μπλε γραμμή.

Στον Πίνακα 3.10 το ποσοστό των μετασεισμών που είχαν τις εστίες τους σε περιοχές με θετικές τιμές τάσεων είναι αρκετά μεγαλύτερο από το ποσοστό όσων είχαν τις εστίες τους σε θέσεις με αρνητικές τιμές τάσεων. Η ίδια εικόνα εμφανίζεται και στην περίπτωση που δε λήφθηκαν υπόψη οι μετασεισμοί γύρω από το ρήγμα. Με βάση τη διαπίστωση στην οποία κατέληξαν οι King et al. (1994), ότι οι περισσότεροι μετασεισμοί ήταν συγκεντρωμένοι εκεί όπου η μεταβολή των τάσεων ήταν μεγαλύτερη από 0.5 bar και ελάχιστοι κατανέμονταν εκεί όπου η μεταβολή των τάσεων μειώνονταν κατά 0.5 bar, εξάγεται το συμπέρασμα του αυξημένου ρυθμού σεισμικότητας της περιοχής μετά τη γένεση του ισχυρού μετασεισμού στη Ν. Κρήτη.

Το συμπέρασμα αυτό βρίσκεται σε συμφωνία και με τον Stein (1999), ο οποίος μετά τη μελέτη των μεταβολών των τάσεων του σεισμού στο Landers (1992), παρατήρησε ότι στον έναν από τους θετικούς λοβούς των τάσεων έγινε ισχυρός σεισμός, στην περιοχή Big Bear, λίγες ώρες αργότερα, όπως έγινε και με τον ισχυρό μετασεισμό στη Ν. Κρήτη που η εστία του βρίσκονταν σε περιοχή θετικών τιμών των τάσεων του κύριου σεισμού που έγινε μία ημέρα πριν.

| Μετασεισμοί                          | Θετικές<br>Τιμές<br>Τάσεων<br>(%) | Αρνητικές<br>Τιμές<br>Τάσεων<br>(%) |
|--------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|
| Όλοι                                 | 65                                | 35                                  |
| Χωρίς τους<br>κοντινούς<br>στο ρήγμα | 62                                | 38                                  |

**Πίνακας 3.10:** Ποσοστά των μετασεισμών, οι εστίες των οποίων βρίσκονταν σε περιοχές θετικών και αρνητικών τιμών των τάσεων και έγιναν μετά το μετασεισμό στη Ν. Κρήτη.

# 3.9 Σεισμική Ακολουθία Δ. Κρήτης, 12 Οκτωβρίου 2013, M<sub>w</sub>=6.8

# 3.9.1 Εισαγωγή

Στις 12 Οκτωβρίου 2013, στις 13:11:55 (GMT), έγινε σεισμός δυτικά της Κρήτης με επίκεντρο 35.341°B 23.114°A (Papadimitriou et al., 2015) και μέγεθος M<sub>w</sub>=6.8 (GCMT). Στη ελληνική ζώνη κατάδυσης έχουν γίνει αρκετοί ισχυροί σεισμοί ακόμα και στο παρελθόν. Πρόκειται για το μεγαλύτερο σεισμό που έγινε τα τελευταία σαράντα χρόνια κατά μήκος του δυτικού τμήματος της ζώνης κατάδυσης και προκάλεσε αρκετές βλάβες στη δυτική Κρήτη.

# 3.9.2 Σεισμικότητα πριν και μετά τον κύριο σεισμό

Ο ισχυρός σεισμός δυτικά της Κρήτης είχε μεγάλο πλήθος προσεισμών και μετασεισμών, τα επίκεντρα των οποίων χαρτογραφήθηκαν και παρουσιάζονται στο *Σχήμα 3.52*. Για το χρονικό διάστημα των 30 ημερών πριν τη γένεση του σεισμού, οι προσεισμοί φαίνονται στο *Σχήμα 3.52A*, με μπλε τετράγωνα και κατανέμονταν σε μία μεγάλη έκταση γύρω από το επίκεντρο του επερχόμενου σεισμού. Στο *Σχήμα 3.52B*, με μοβ τετράγωνα, απεικονίζονται όσοι σεισμοί έγιναν 7 ημέρες πριν τον κύριο, το μεγαλύτερο μέρος των οποίων έγινε μακριά από το επίκεντρο. Μετά από 24 ώρες από τη γένεση του σεισμού ακολούθησαν πολλοί μετασεισμοί που συγκεντρώνονταν δυτικά της Κρήτης, κοντά στο επίκεντρο του σεισμού και εμφανίζονται στο *Σχήμα 3.52Γ*, με κόκκινους κύκλους. Η ίδια εικόνα παρουσιάζεται και μετά από 48 ώρες όπως φαίνεται στο *Σχήμα 3.52Δ*, όπου οι μετασεισμοί για αυτό το χρονικό διάστημα εμφανίζονται με μοβ κύκλους. Η έντονη μετασεισμική δραστηριότητα συνεχίστηκε 30 μέρες μετά και απεικονίζεται με πράσινους ρόμβους στο *Σχήμα 3.52E*,όπου φαίνεται ότι μετασεισμοί έγιναν ακόμα και σε περιοχές

αρκετά μακριά από το επίκεντρο του σεισμού. Μια ακόμη εντονότερη μετασεισμική ακολουθία εμφανίζεται 60 ημέρες μετά τον κύριο σεισμό (Σχήμα 3.52ΣΤ), με κίτρινους ρόμβους όπου και παρατηρείται ότι η κατανομή της ήταν και σε περιοχές μακρύτερες του επικέντρου.

Από τους χάρτες που παρουσιάζουν τη χωρική κατανομή της μετασεισμικής ακολουθίας μετά από 24 και 48 ώρες (*Σχήμα 3.52Γ, Σχήμα 3.52Δ*) από το σεισμό καθορίστηκε το ρήγμα για το σεισμό στη δυτική Κρήτη, το οποίο βρίσκεται σε συμφωνία με αυτό των Papadimitriou et al., (2015). Από τους χάρτες που απεικονίζουν τους μετασεισμούς που έγιναν μετά από 30 και 60 ημέρες (*Σχήμα 3.52Ε, Σχήμα 3.52ΣT*) εξετάστηκε η διέγερση σεισμικότητας στη γύρω περιοχή.





#### 3.9.3 Υπολογισμός Τάσεων Coulomb

Ο μηχανισμός γένεσης του ρήγματος που προκάλεσε το σεισμό δυτικά της Κρήτης είχε παράταξη 339°, γωνία κλίσης 3° και γωνία ολίσθησης 130° (GCMT) και δείχνει ένα ανάστροφο ρήγμα με διεύθυνση BΔ-NA. Από τις εμπειρικές σχέσεις των Papazachos et al. (2004) το μήκος του ρήγματος υπολογίσθηκε ίσο με 35 km περίπου, ενώ από τις σχέσεις των Wells-Coppersmith (1994) ισούται με 33 km. Σύμφωνα με τους Papadimitriou et al., (2015) το μέγεθος του σεισμού ήταν ίσο με  $M_w$ =6.7, το μήκος του ρήγματος ήταν 24 km και το βάθος 27.5 km. Ο μηχανισμός γένεσης του ρήγματος που χρησιμοποιήθηκε για το μοντέλο μεταβολής των τάσεων είχε παράταξη 339°, γωνία κλίσης 3° και γωνία ολίσθησης 130° (GCMT). Όμως, επειδή η γωνία κλίσης είναι μικρή, το πλάτος του ρήγματος που προκύπτει είναι μεγαλύτερο από το μήκος και δημιουργείται πρόβλημα καθώς θα πρέπει το μήκος του ρήγματος να είναι μεγαλύτερο ή ίσο με το πλάτος (L≥W). Οπότε η γωνία κλίσης γίνεται 20°. Αυτά τα στοιχεία χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό της ολίσθησης που προέκυψε ίση με 0.62 μέτρα, για σεισμική ροπή,  $M_o$ =1.74·10<sup>26</sup> dyn·cm (GCMT).

Στο Σχήμα 3.53Α παρουσιάζεται το επίκεντρο του σεισμού, ο μηχανισμός γένεσής του και το ανάστροφο ρήγμα. Στο Σχήμα 3.53Β εμφανίζεται η μεταβολή των τάσεων Coulomb, όπου οι θετικές τιμές εμφανίζονται με φωτεινό χρώμα και διευθύνονται ΒΔ-ΝΑ, ενώ οι αρνητικές τιμές είναι με το σκούρο χρώμα και διευθύνονται ΒΑ-ΝΔ.



**Σχήμα 3.53: Α.** Το ανάστροφο ρήγμα που συνδέεται με το σεισμό στις 12/10/2013, δυτικά της Κρήτης. Διακρίνεται το επίκεντρο του σεισμού (άστρο) και ο μηχανισμός γένεσής του. **Β.** Παρουσίαση των μεταβολών των τάσεων Coulomb κατά τη σεισμική ολίσθηση.

### 3.9.4 Χωρική Κατανομή Μετασεισμών

Για να διερευνηθεί η επίδραση του σεισμού στη σεισμικότητα της γύρω περιοχής χαρτογραφήθηκαν τα επίκεντρα των μετασεισμών για χρονικό διάστημα 30 ημερών μετά το σεισμό και παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.54Α. Πιο συγκεκριμένα το Σχήμα 3.54Α εμφανίζει τις μεταβολές των τάσεων του κάθε μετασεισμού στην εστία του, με κόκκινους κύκλους όταν οι εστίες αυτών των μετασεισμών είναι σε θέσεις όπου οι τάσεις είναι θετικές και με μπλε κύκλους όταν οι εστίες των μετασεισμών βρίσκονται σε περιοχές όπου οι μεταβολές της τάσης είναι αρνητικές. Όπως φαίνεται το μεγαλύτερο μέρος των μετασεισμών συγκεντρώνονταν κοντά στο ρήγμα και αρκετοί σε μακρύτερες αποστάσεις. Για να διερευνηθεί η διέγερση μετασεισμών εκτός του ρήγματος του κύριου σεισμού, αφαιρέθηκαν από τα δεδομένα όσοι μετασεισμοί έγιναν πάνω στο ρήγμα. Έχοντας αφαιρέσει όλους τους μετασεισμούς που είχαν τα επίκεντρα τους κοντά στο ρήγμα, δημιουργήθηκε το Σχήμα 3.54Β. Οι μετασεισμοί που φαίνονται και στα δύο σχήματα είχαν μέγεθος πληρότητας Μ≥1.9. Στα σχήματα εντοπίζονται μετασεισμοί που ενώ έχουν τις εστίες τους σε λοβούς με αρνητικές τιμές τάσεων στον τρισδιάστατο χώρο, τα επίκεντρά τους να εμφανίζονται σε θετικές περιοχές τάσεων και μετασεισμοί που έχουν τις εστίες τους σε λοβούς με θετικές τιμές τάσεων στον τρισδιάστατο χώρο, να έχουν τα επίκεντρά τους σε περιοχές αρνητικών τάσεων. Αυτό οφείλεται στο ότι η κλίση του ρήγματος αποκλίνει από την κατακόρυφη.



**Σχήμα 3.54: Α.** Χωρική κατανομή των μεταβολών των τάσεων για το σεισμό που έγινε στις 12/10/2013, δυτικά της Κρήτης. Οι κόκκινοι κύκλοι δείχνουν τα επίκεντρα των μετασεισμών που έχουν τις εστίες τους σε περιοχές με θετικές τιμές τάσεων, ενώ οι μπλε τα επίκεντρα αυτών που οι εστίες τους ήταν σε περιοχές με αρνητικές τιμές τάσεων. **Β.** Χωρική κατανομή των μεταβολών των τάσεων για τους ίδιους μετασεισμούς, έπειτα από διαγραφή όσων έγιναν γύρω από το ρήγμα.

## 3.9.5. Πληρότητα

Με στόχο να διερευνηθεί ποσοτικά η διέγερση της σεισμικής δραστηριότητας, είναι απαραίτητο ένα πλήρες δείγμα δεδομένων.

Με βάση όλα τα διαθέσιμα δεδομένα για τη μετασεισμική ακολουθία της Δ. Κρήτης εξετάζεται η πληρότητα για το χρονικό διάστημα των 30 ημερών μετά το σεισμό. Από την εφαρμογή της μεθόδου της πληρότητας (Leptokaropoulos et al., 2013) διαπιστώθηκε ότι τα δεδομένα ήταν πλήρη για σεισμούς με μέγεθος Μ≥1.9.



**Σχήμα 3.55: Α.** Αθροιστική συχνότητα (κύκλοι) και συχνότητα (τετράγωνα) των σεισμών σε συνάρτηση με το μέγεθος για τους σεισμούς 30 ημέρες μετά τον κύριο. **Β.** Διαφορά μεταξύ των παρατηρούμενων δεδομένων και της θεωρητικής κατανομής, όπως σχηματίστηκε από τον υπολογισμό της μέγιστης πιθανότητας σαν συνάρτηση μεγέθους (GFT), με το ανοιχτό χρώμα. Διαφορά μεταξύ των παρατηρούμενων και των 1000 τυχαίων συνθετικών καταλόγων που σχηματίστηκαν σύμφωνα με τον ορισμό της καλύτερης τροποποιημένης προσαρμογής (MGFT), με το σκούρο χρώμα.

### 3.9.6 Ρυθμός Σεισμικότητας

Για το σεισμό που έγινε δυτικά της Κρήτης κατασκευάστηκαν διαγράμματα, ώστε να μελετηθεί η επίδραση αυτού του σεισμού στη σεισμικότητα της γύρω περιοχής. Τα διαγράμματα σχεδιάστηκαν λαμβάνοντας υπόψη τον αθροιστικό αριθμό των σεισμών που ακολούθησαν 30 ημέρες μετά τον κύριο και είχαν μέγεθος Μ≥1.9. Στο Σχήμα 3.56 φαίνεται ότι από την 1<sup>η</sup> μέχρι τη 14<sup>η</sup> ημέρα ο αριθμός των μετασεισμών οι εστίες των οποίων ήταν σε περιοχές με αρνητικές τιμές τάσεων είναι μεγαλύτερος από τον αριθμό των μετασεισμών που είχαν τις εστίες τους σε περιοχές με θετικές τάσεις. Το αντίθετο συμβαίνει από τη 15<sup>η</sup> μέχρι την 30<sup>η</sup> ημέρα μετά το σεισμό.



**Σχήμα 3.56:** Αναπαράσταση του ρυθμού σεισμικότητας της περιοχής κοντά στο επίκεντρο του σεισμού που έγινε στη Δ. Κρήτη στις 12/10/2013, μετά τη γένεσή του. Ο ρυθμός σεισμικότητας αυτής της περιοχής για τους μετασεισμούς που έγιναν 30 ημέρες μετά τον κύριο σεισμό και είχαν τις εστίες τους σε περιοχές με θετικές και αρνητικές μεταβολές των τάσεων φαίνεται με την κόκκινη γραμμή και τη μπλε γραμμή, αντίστοιχα.

Έχοντας διαγράψει τους μετασεισμούς γύρω από το ρήγμα σχεδιάστηκε το ίδιο αθροιστικό διάγραμμα και εμφανίζεται στο *Σχήμα 3.57*. Η αφαίρεση των μετασεισμών έγινε αφού λήφθηκε υπόψη η προβολή του ρήγματος στην επιφάνεια, σχηματίζοντας ένα ορθογώνιο παραλληλόγραμμο σχήμα. Μπορεί να γίνει αντιληπτή έτσι η επίδραση του σεισμού στη διέγερση της σεισμικότητας της γύρω περιοχής, χωρίς να συμπεριλαμβάνονται οι μετασεισμοί που έγιναν κοντά στο ρήγμα. Από τη σύγκριση των δύο διαγραμμάτων γίνεται φανερή η μείωση του αριθμού των μετασεισμών. Επίσης, ο αριθμός των μετασεισμών που είχαν τις εστίες τους σε περιοχές με θετικές τιμές τάσεων γίνεται μεγαλύτερος από τον αριθμό των μετασεισμών οι εστίες των ήταν σε περιοχές αρνητικών τιμών των τάσεων τη 17<sup>η</sup> ημέρα, σε αντίθεση με το πρώτο διάγραμμα που εμφανίζόταν μεγαλύτερος από τη 15<sup>η</sup> ημέρα μετά το σεισμό. Ιδιαίτερα εμφανής είναι η μεγάλη μείωση του αριθμού των μετασεισμών που είχαν τις εστίες τους σε περιοχές θετικών τιμών τάσεων, γιατί αφαιρέθηκαν και δεν συμπεριλήφθηκαν στους υπολογισμούς του ρυθμού σεισμικότητας.



**Σχήμα 3.57:** Ρυθμός σεισμικότητας της περιοχής κοντά στο επίκεντρο του σεισμού που έγινε στη Δ. Κρήτη στις 12/10/2013, μετά τη γένεσή του, χωρίς τους κοντινούς στο ρήγμα μετασεισμούς. Η κόκκινη γραμμή δείχνει το ρυθμό σεισμικότητας της περιοχής για τους μετασεισμούς που έγιναν 30 ημέρες μετά τον κύριο σεισμό και είχαν τις εστίες τους σε περιοχές με θετικές μεταβολές των τάσεων και η μπλε το ρυθμό σεισμικότητας της ίδιους μετασεισμούς που είχαν τις εστίες τους σε περιοχής και για τους ίδιους μετασεισμούς που είχαν τις εστίες τους σε περιοχής με

Στον Πίνακα 3.11 παρουσιάζεται η αναλογία σε ποσοστά των μετασεισμών που είχαν τις εστίες τους σε περιοχές θετικών και αρνητικών τιμών των τάσεων και ακολούθησαν μετά τον ισχυρό σεισμό στη Δ. Κρήτη. Παρατηρείται ότι το ποσοστό των μετασεισμών που είχαν τις εστίες τους σε θετικές περιοχές τάσεων είναι μεγαλύτερο από το ποσοστό των μετασεισμών που είχαν τις εστίες τους σε αρνητικές περιοχές τάσεων ακόμα και μετά την αφαίρεση των κοντινών στο ρήγμα μετασεισμών. Αυτά τα αποτελέσματα δείχνουν τον αυξημένο ρυθμό σεισμικότητας στην περιοχή της Δ. Κρήτης μετά τη γένεση του κύριου σεισμού. Το συμπέρασμα αυτό έχει επιβεβαιωθεί τόσο από τους King et al. (1994), μετά τη μελέτη του σεισμού στο Landers (1992), όπου αποδείχθηκε ότι η μεταβολή των τάσεων Coulomb μπορεί να συσχετιστεί με τη διέγερση σεισμικότητας στη γύρω περιοχή, όσο και από τον Stein (1999) που διαπίστωσε μελετώντας τον ίδιο σεισμό ότι οι περισσότεροι μετασεισμοί κατανέμονταν σε ζώνες που είχαν μεταβολή τάσης μεγαλύτερη από 0.1 bar κοντά στην περιοχή της διάρρηξης.

| Μετασεισμοί                          | Θετικές<br>Τιμές<br>Τάσεων<br>(%) | Αρνητικές<br>Τιμές<br>Τάσεων<br>(%) |
|--------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|
| Όλοι                                 | 59                                | 41                                  |
| Χωρίς τους<br>κοντινούς<br>στο ρήγμα | 57                                | 43                                  |

**Πίνακας 3.11:** Ποσοστά των μετασεισμών που είχαν τις εστίες τους σε περιοχές με θετικές και αρνητικές μεταβολές των τάσεων για το σεισμό της Δ. Κρήτης.

# 3.10 Σεισμική Ακολουθία Κεφαλονιάς, 2014

## 3.10.1 Εισαγωγή

Το πιο σεισμογενές τμήμα του Ιονίου Πελάγους επλήγη από δύο ισχυρούς σεισμούς σε διάστημα 8 ημερών. Η περιοχή που ενεργοποιήθηκε είναι μέρος του ρήγματος της Κεφαλονιάς (Kefalonia Transform Fault Zone (KTFZ)) και βρίσκεται δυτικά του νησιού. Ακολούθησαν αρκετοί μετασεισμοί στην περιοχή που έδειχναν μία σεισμική ζώνη να εκτείνεται BBA-NNΔ. Πρόκειται για δεξιόστροφα ρήγματα οριζόντιας μετατόπισης, που είναι χαρακτηριστικά αυτής της περιοχής. Υψηλή σεισμικότητα ακολούθησε μετά τους δύο σεισμούς, ιδίως στο νοτιότερο τμήμα του νησιού, που εξηγείται από την ύπαρξη μικρότερων ρηγμάτων στην περιοχή.

Ο πρώτος σεισμός έγινε στις  $26^{n\varsigma}$  Ιανουαρίου 2014 (13:55:41,GMT), και είχε μέγεθος M<sub>w</sub>=6.1 (GCMT). Το επίκεντρο ήταν 38.2°B 20.44°A (Karakostas et al., 2015) και ο μηχανισμός γένεσης του ρήγματος είχε παράταξη 19°, γωνία κλίσης 76°, γωνία ολίσθησης 176° (GCMT) που δείχνει ένα δεξιόστροφο ρήγμα οριζόντιας μετατόπισης με διεύθυνση BA-NΔ. Ο δεύτερος σεισμός έγινε στις 03:08:44 (GMT), στις 3 Φεβρουαρίου 2014 και σύμφωνα με τον κατάλογο GCMT είχε μέγεθος M<sub>w</sub>=6.0 και τον εξής μηχανισμό γένεσης παράταξη 12°, γωνία κλίσης 57° και γωνία ολίσθησης 157°. Το επίκεντρο του σεισμού εντοπίστηκε 38.27°B 20.42°A (Karakostas et al., 2015), στο δυτικό τμήμα του νησιού.

# 3.10.α 1ος Σεισμός της ακολουθίας, 26 Ιανουαρίου 2014, $M_w$ =6.1

# 3.10.2.α Σεισμικότητα πριν και μετά τον κύριο σεισμό

Το Σχήμα 3.58 εμφανίζει την κατανομή των σεισμών, τόσο πριν όσο και μετά το σεισμό που έγινε στις 26 Ιανουαρίου 2014, στην Κεφαλονιά. Οι προσεισμοί που έγιναν 30 ημέρες πριν τον κύριο φαίνονται στο Σχήμα 3.58Α, με μπλε τετράγωνα και παρατηρείται ότι κατανέμονταν σε μία μεγάλη περιοχή, τόσο γύρω από το επίκεντρο όσο και μακρύτερα. Όσοι σεισμοί έγιναν 7 ημέρες πριν το σεισμό απεικονίζονται με μοβ τετράγωνα στο Σχήμα 3.58Β και το μεγαλύτερο μέρος τους συγκεντρώνονταν γύρω από το επίκεντρο του επερχόμενου σεισμού. Μετά από 24 ώρες ακολούθησε μεγάλο πλήθος μετασεισμών γύρω από το επίκεντρο, στο δυτικό τμήμα του νησιού, που φαίνεται στο Σχήμα 3.58Γ, με κόκκινους κύκλους. Αυξημένος είναι και ο αριθμός τω σεισμών που ακολούθησαν 48 ώρες μετά τον κύριο σεισμό, τα επίκεντρα των οποίων φαίνονται με μοβ κύκλους (Σχήμα 3.58Δ) και συγκεντρώνονταν γύρω από το επίκεντρο. Το Σχήμα 3.58Ε, εμφανίζει με πράσινους ρόμβους την πυκνή μετασεισμική ακολουθία που έγινε μετά από 30 ημέρες και κατανέμονταν τόσο κοντά στο επίκεντρο όσο και μακρύτερα από αυτό. Οι μετασεισμοί συνεχίστηκαν στην περιοχή μετά 60 ημέρες από τη γένεση του κύριου σεισμού και παρουσιάζονται με κίτρινους ρόμβους στο Σχήμα 3.58ΣΤ, όπου κατανέμονται κατά μήκος του ρήγματος της Κεφαλονιάς, (KTFZ).

Με βάση τη χωρική κατανομή των μετασεισμών που έγιναν 24 και 48 ώρες (Σχήμα 3.58Γ, Σχήμα 3.58Δ) μετά το σεισμό, καθορίστηκε το ρήγματος στην περιοχή και βρίσκεται σε συμφωνία με αυτό των Karakostas et al. (2015), οι οποίοι μελέτησαν αυτή τη σεισμική ακολουθία. Η διέγερση σεισμικότητας στην περιοχή γύρω από το σεισμό εξετάζεται από του χάρτες που δείχνουν τους μετασεισμούς μετά από 30 και 60 ημέρες (Σχήμα 3.58Ε, Σχήμα 3.58ΣΤ) μετά τον κύριο σεισμό.



**Σχήμα 3.58:** Χωρική κατανομή της προσεισμικής και μετασεισμικής δραστηριότητας για τον κύριο σεισμό της Κεφαλονιάς, το επικέντρου του οποίου παριστάνεται με άστρο και ο μηχανισμός γένεσής του ως ισεμβαδική προβολή του κάτω ημισφαιρίου. Με το μικρότερο άστρο απεικονίζεται ο σεισμός που ακολούθησε οκτώ ημέρες μετά. **Α.** Τα επίκεντρα των σεισμών 30 ημέρες πριν τη γένεση του κύριου σεισμού (μπλε τετράγωνα). **Β.** Οι σεισμοί 7 ημέρες πριν από τον κύριο σεισμό (μοβ τετράγωνα). **Γ.** Τα επίκεντρα των μετασεισμών μετά από 24 ώρες (κόκκινοι κύκλοι). **Δ.** Οι μετασεισμοί 48 ώρες μετά τον κύριο σεισμό (μοβ κύκλοι). **Ε.** Οι μετασεισμοί που 30 ημέρες μετά το σεισμό (πράσινοι ρόμβοι). **ΣΤ.** Τα επίκεντρα των μετασεισμών 60 ημέρες μετά τον ισχυρό σεισμό (κίτρινοι ρόμβοι).

## 3.10.3.α Υπολογισμός Τάσεων Coulomb

Ο υπολογισμός του μοντέλου τάσεων στηρίχθηκε στην έρευνα των Karakostas et al. (2015). Την ίδια σεισμική ακολουθία μελέτησαν και οι Sokos et al. (2015), οι οποίοι διαπίστωσαν ένα ρήγμα δεξιόστροφο, οριζόντιας μετατόπισης με παράταξη 20°, γωνία κλίσης 74°, γωνία ολίσθησης 163°. Οι ίδιοι εκτίμησαν το μέγεθος ίσο με M<sub>w</sub>= 6.1 και το εστιακό βάθος στα 10.5 km.

Σύμφωνα με τους Karakostas et al. (2015), το ρήγμα είχε μήκος 20 km και βρίσκεται σε καλή συμφωνία με το μήκος που προκύπτει τόσο από τις σχέσεις των Papazachos et al. (2004) όσο και από τις σχέσεις των Wells-Coppersmith (1994). Ο μηχανισμός γένεσης που πρότειναν ήταν παράταξη 20°, γωνία κλίσης 65°, γωνία ολίσθησης 177° και εστιακό βάθος 18 km. Από τη σεισμική ροπή,  $M_o=1.89 \cdot 10^{25}$ dyn·cm (GCMT), που εκλύθηκε υπολογίσθηκε η ολίσθηση ίση με 0.17 μέτρα.

Στο μορφολογικό χάρτη, στο Σχήμα 3.59Α, παρουσιάζονται το επίκεντρο, το ρήγμα καθώς και ο μηχανισμός του σεισμού. Στο ίδιο σχήμα διακρίνεται και το επίκεντρο του ισχυρού σεισμού που ακολούθησε λίγες μέρες αργότερα. Οι μεταβολές των τάσεων φαίνονται στο Σχήμα 3.59Β, όπου μπορεί να παρατηρηθεί ότι οι θετικές τιμές κατανέμονται σε διεύθυνση ΒΒΑ-ΝΝΔ και σχεδόν Α-Δ, ενώ οι αρνητικές ΒΔ-ΝΑ και ΒΑ-ΝΔ.



**Σχήμα 3.59: Α.** Ο σεισμός της Κεφαλονιάς που έγινε στις 26/1/2014. Φαίνεται το επίκεντρο του σεισμού με το μεγάλο άστρο και ο μηχανισμός γένεσης του. Με το μικρό άστρο εμφανίζεται το επίκεντρο του σεισμού που ακολούθησε. **Β.** Οι μεταβολές των τάσεων Coulomb που προκλήθηκαν από αυτόν το σεισμό.

## 3.10.4.α Χωρική Κατανομή Μετασεισμών

Μετά τη γένεση του ισχυρού σεισμού στην Κεφαλονιά διερευνάται η επίδρασή του στη σεισμικότητα της γύρω περιοχής. Για το λόγο αυτό χαρτογραφήθηκαν τα επίκεντρα των μετασεισμών που έγιναν 30 ημέρες μετά το σεισμό και είχαν μέγεθος πληρότητας Μ≥3.0 σε χάρτες και απεικονίζουν τις μεταβολές των τάσεων των μετασεισμών στις εστίες τους. Έτσι, το *Σχήμα 3.60A* εμφανίζει τα επίκεντρα των μετασεισμών με κόκκινους κύκλους όταν έχουν τις εστίες τους σε περιοχές όπου οι μεταβολές των τάσεων είναι θετικές και τα επίκεντρα των μετασεισμών με μπλε κύκλους όταν έχουν τις εστίες τους σε περιοχές όπου οι μεταβολές των τάσεων είναι αρνητικές. Το μεγαλύτερο μέρος των μετασεισμών συγκεντρώνονταν στην περιοχή του ρήγματος. Προκειμένου να διερευνηθεί η διέγερση μετασεισμών εκτός του ρήγματος του κύριου σεισμού, αφαιρέθηκαν από το δείγμα δεδομένων οι μετασεισμοί που έγιναν πάνω στο ρήγμα. Χωρίς να λαμβάνονται υπόψη όσοι μετασεισμοί έγιναν κοντά στο ρήγμα προέκυψε το *Σχήμα 3.60B*, για τον ίδιο σεισμό.



**Σχήμα 3.60: Α.** Χωρική κατανομή του πεδίου των τάσεων Coulomb για το σεισμό που έγινε στην Κεφαλονιά στις 26/1/2014. Οι κόκκινοι και οι μπλε κύκλοι δείχνουν τα επίκεντρα των μετασεισμών 30 ημέρες μετά τον κύριο σεισμό που έχουν τις εστίες τους σε περιοχές με θετικές και αρνητικές τιμές τάσης, αντίστοιχα. **Β.** Κατανομή του πεδίου των τάσεων, έχοντας διαγράψει τους μετασεισμούς που έγιναν κοντά στο ρήγμα.

### 3.10.5.α Πληρότητα

Με σκοπό να διερευνηθεί ποσοτικά η διέγερση της σεισμικής δραστηριότητας, απαιτείται πλήρες δείγμα δεδομένων.

Λαμβάνοντας υπόψη όλα τα διαθέσιμα δεδομένα για αυτήν τη μετασεισμική ακολουθία διερευνάται η πληρότητα των μεγεθών της για το χρονικό διάστημα των 30 ημερών μετά το σεισμό. Από τη μέθοδο της πληρότητας (Leptokaropoulos et al., 2013) που εφαρμόστηκε διαπιστώθηκε ότι τα δεδομένα ήταν πλήρη για σεισμούς με μέγεθος M≥3.0.



**Σχήμα 3.61: Α.** Αθροιστική συχνότητα (κύκλοι) και συχνότητα (τετράγωνα) των σεισμών σε συνάρτηση με το μέγεθος για τους σεισμούς 30 ημέρες μετά τον κύριο. **Β.** Διαφορά μεταξύ των παρατηρούμενων δεδομένων και της θεωρητικής κατανομής, όπως σχηματίστηκε από τον υπολογισμό της μέγιστης πιθανότητας σαν συνάρτηση μεγέθους (GFT), με το ανοιχτό χρώμα. Διαφορά μεταξύ των παρατηρούμενων και των 1000 τυχαίων συνθετικών καταλόγων που σχηματίστηκαν σύμφωνα με τον ορισμό της καλύτερης τροποποιημένης προσαρμογής (MGFT), με το σκούρο χρώμα.

#### 3.10.6.α Ρυθμός Σεισμικότητας

Το σεισμό της Κεφαλονιάς στις 26 Ιανουαρίου 2014 ακολούθησε ένα μεγάλο πλήθος μετασεισμών. Χρησιμοποιώντας μόνο τους μετασεισμούς που έγιναν μετά από 30 ημέρες και είχαν μέγεθος Μ≥3.0 σχεδιάστηκαν διαγράμματα για τη διερεύνηση της επίδρασης του σεισμού στη σεισμικότητα της γύρω περιοχής μετά το σεισμό. Από το Σχήμα 3.62 φαίνεται ότι από την 1<sup>η</sup> μέχρι την 8<sup>η</sup> ημέρα μετά το σεισμό ο αριθμός των μετασεισμών που είχαν τις εστίες τους σε περιοχές θετικών και αρνητικών τάσεων είναι ο ίδιος. Από την 9<sup>η</sup> έως και την 30<sup>η</sup> ημέρα οι μετασεισμοί οι εστίες των οποίων ήταν σε θέσεις με αρνητικές τάσεις έγιναν περισσότεροι από τους μετασεισμούς που είχαν τις εστίες τους σε περιοχές με θετικές τάσεις.



**Σχήμα 3.62:** Ρυθμός σεισμικότητας της περιοχής της Κεφαλονιάς, μετά τη γένεση του σεισμού στις 26/1/2014. Ο ρυθμός σεισμικότητας της γύρω περιοχής για τους μετασεισμούς που έγιναν 30 ημέρες μετά τον κύριο και είχαν τις εστίες τους σε περιοχές θετικών και αρνητικών τιμών των τάσεων φαίνεται με την κόκκινη γραμμή και τη μπλε γραμμή, αντίστοιχα.

Χωρίς τους μετασεισμούς που έγιναν κοντά στο ρήγμα, υπολογίσθηκε ο ρυθμός σεισμικότητας για την ίδια περιοχή και απεικονίζεται στο *Σχήμα 3.63*. Με βάση την προβολή του ρήγματος στην επιφάνεια, σε σχήμα ορθογωνίου παραλληλογράμμου, έγινε η αφαίρεση των κοντινών στο ρήγμα μετασεισμών, ώστε να φανεί η επίδραση του σεισμού στη διέγερση της σεισμικότητας της γύρω περιοχής χωρίς να λαμβάνονται υπόψη αυτοί οι μετασεισμοί. Παρατηρείται μια μείωση του αριθμού των μετασεισμών που είχαν τις εστίες τους σε περιοχές με θετικές τάσεις και μια μεγαλύτερη μείωση των μετασεισμών οι εστίες των οποίων ήταν σε περιοχές με αρνητικές τιμές τάσεων. Αυτό δείχνει ότι οι μετασεισμοί που έγιναν γύρω από το ρήγμα και αφαιρέθηκαν, είχαν κατά κύριο λόγο τις εστίες τους σε θέσεις με αρνητικές τιμές τάσεων.



**Σχήμα 3.63:** Παρουσίαση του ρυθμού σεισμικότητας της περιοχής της Κεφαλονιάς, μετά τη γένεση του σεισμού στις 26/1/2014, χωρίς τους μετασεισμούς γύρω από το ρήγμα. Με την κόκκινη και μπλε γραμμή ο ρυθμός σεισμικότητας της γύρω περιοχής για τους μετασεισμούς που έγιναν 30 ημέρες μετά τον κύριο και είχαν τις εστίες τους σε περιοχές θετικών και αρνητικών τιμών των τάσεων, αντίστοιχα.

Ο Πίνακας 3.12 παρουσιάζει τα ποσοστά των μετασεισμών που είχαν τις εστίες τους σε περιοχές θετικών και αρνητικών τιμών των τάσεων. Το ποσοστό των μετασεισμών των οποίων οι εστίες τους βρίσκονταν σε θέσεις αρνητικών τάσεων είναι αρκετά μεγαλύτερο από αυτό των μετασεισμών που είχαν τις εστίες τους σε θετικές περιοχές τάσεων. Όμως, μετά την αφαίρεση των πλησιέστερων στο ρήγμα μετασεισμών το ποσοστό των μετασεισμών που είχαν τις εστίες τους σε θετικές περιοχές των τάσεων έγινε πολύ μεγαλύτερο από το ποσοστό των μετασεισμών των οποίων οι εστίες βρίσκονταν σε περιοχές αρνητικών τάσεων. Σύμφωνα με το συμπέρασμα των King et al. (1994), που μελέτησαν το σεισμό στο Landers (1992), διαπίστωσαν ότι η μεταβολή των τάσεων Coulomb σχετίζεται με τη διέγερση σεισμικότητας στην περιοχή γύρω από την οποία έγινε ο σεισμός, αφού οι περισσότεροι μετασεισμοί ήταν συγκεντρωμένοι εκεί όπου η μεταβολή των τάσεων ήταν μεγαλύτερη από 0.5 bar και ελάχιστοι κατανέμονταν εκεί όπου η μεταβολή των τάσεων μειώνονταν κατά 0.5 bar. Επομένως, με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα και τη διαπίστωση των King et al. (1994) εξάγεται το συμπέρασμα του αυξημένου ρυθμού σεισμικότητας στην περιοχή της Κεφαλονιάς μετά τη γένεση ισχυρού σεισμού.

Το αποτέλεσμα του αυξημένου ρυθμού σεισμικότητας στην περιοχή της Κεφαλονιάς συμφωνεί και με το συμπέρασμα του Stein (1999), που παρατήρησε μελετώντας το σεισμό στο Landers (1992) ότι περισσότεροι μετασεισμοί κατανέμονταν σε ζώνες που είχαν μεταβολή τάσης μεγαλύτερη από 0.1 bar κοντά στην περιοχή της διάρρηξης.

| Μετασεισμοί                          | Θετικές<br>Τιμές<br>Τάσεων<br>(%) | Αρνητικές<br>Τιμές<br>Τάσεων<br>(%) |
|--------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|
| Όλοι                                 | 39                                | 61                                  |
| Χωρίς τους<br>κοντινούς<br>στο ρήγμα | 84                                | 16                                  |

**Πίνακας 3.12:** Κατανομή των ποσοστών των μετασεισμών των οποίων οι εστίες ήταν σε περιοχές με θετικές και αρνητικές τιμές των τάσεων για τον πρώτο σεισμό της Κεφαλονιάς.

# 3.10.β 2ος Σεισμός της ακολουθίας, 3 Φεβρουαρίου 2014, $M_w$ =6.0

# 3.10.2.β Σεισμικότητα πριν και μετά τον κύριο σεισμό

Η σεισμικότητα στο νησί της Κεφαλονιάς μελετήθηκε και πριν τη γένεση του δεύτερου σεισμού και μετά και παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.64. Το μεγάλο πλήθος των σεισμών που έγιναν 30 ημέρες πριν τον ισχυρό σεισμό φαίνεται με μπλε τετράγωνα στο Σχήμα 3.64Α και ανάμεσα σε αυτούς είναι και ο ισχυρός σεισμός της 26<sup>ης</sup> Ιανουαρίου 2014, καθώς και πολλοί μετασεισμοί που οφείλονται σε αυτόν. Ο μεγάλος αριθμός των προσεισμών που έγιναν 7 ημέρες πριν, εμφανίζεται με μοβ τετράγωνα στο Σχήμα 3.64Β και συγκεντρώνονταν στην περιοχή γύρω από το επίκεντρο του επερχόμενου σεισμού, στο δυτικό τμήμα του νησιού. Ακολούθησε έντονη μετασεισμική δραστηριότητα 24 ώρες μετά τον κύριο σεισμό που συγκεντρώθηκε γύρω από το επίκεντρο και εμφανίζεται με κόκκινους κύκλους στο Σχήμα 3.64Γ. Αυξημένος είναι και ο αριθμός των μετασεισμών 48 ώρες μετά τον κύριο σεισμό, με τα επίκεντρα των οποίων να φαίνονται στο Σχήμα 3.64Δ, με μοβ κύκλους. Ισχυρή μετασεισμική ακολουθία εμφανίζεται μετά από 30 ημέρες, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.64Ε, με τους πράσινους ρόμβους να αντιστοιχούν στα επίκεντρα αυτών των μετασεισμών που κατανέμονταν κατά μήκος του ρήγματος της Κεφαλονιάς (KTFZ). Η πυκνή μετασεισμική δραστηριότητα δε σταμάτησε ακόμα και μετά από 60 ημέρες, όπως εμφανίζεται στο Σχήμα 3.64ΣΤ με τους κίτρινους ρόμβους και κατανέμονταν κατά μήκος του ρήγματος της Κεφαλονιάς (KTFZ).

Από τη χωρική κατανομή των μετασεισμών μετά από 24 και 48 ώρες (*Σχήμα* 3.64Γ, Σχήμα 3.64Δ) καθορίστηκε το ρήγμα στην περιοχή της Κεφαλονιάς, το οποίο

βρίσκεται σε συμφωνία με αυτό των Karakostas et al. (2015). Από τους χάρτες που αναπαριστούν τη σεισμική δραστηριότητα μετά από 30 και 60 ημέρες (Σχήμα 3.64Ε, Σχήμα 3.64ΣΤ) εξετάστηκε η διέγερση σεισμικότητας στην περιοχή γύρω από το σεισμό.



**Σχήμα 3.64:** Χωρική κατανομή της προσεισμικής και μετασεισμικής ακολουθίας μετά το σεισμό της Κεφαλονιάς, το επίκεντρο του οποίου φαίνεται με άστρο και ο μηχανισμός γένεσής του ως ισεμβαδική προβολή του κάτω ημισφαιρίου. Το μικρό αστέρι εμφανίζει τη θέση του επικέντρου του σεισμού που προηγήθηκε. **Α.** Οι σεισμοί 30 ημέρες πριν τη γένεση του κύριου σεισμού (μπλε τετράγωνα). **Β.** Οι σεισμοί 7 ημέρες πριν από τον κύριο σεισμό (μοβ τετράγωνα). **Γ.** Τα επίκεντρα των μετασεισμών 24 ώρες μετά τον κύριο σεισμό (κόκκινοι κύκλοι). **Δ.** Οι μετασεισμοί 48 ώρες μετά τον κύριο σεισμό (μοβ κύκλοι). **Ε.** Τα επίκεντρα των μετασεισμών μετά από 30 ημέρες (πράσινοι ρόμβοι). **ΣΤ.** Η κατανομή των επικέντρων των μετασεισμών μετά από 60 ημέρες (κίτρινοι ρόμβοι).

#### 3.10.3.β Υπολογισμός Τάσεων Coulomb

Για τον υπολογισμό των τάσεων Coulomb χρησιμοποιήθηκαν εκτός από δημοσιευμένες μελέτες και εμπειρικές σχέσεις. Οι Sokos et al. (2015) εξετάζοντας τη σεισμική ακολουθία κατέληξαν σε ένα ρήγμα με παράταξη 199°, γωνία κλίσης 49°, γωνία ολίσθησης 167° και εστιακό βάθος 2.5 km. Οι Karakostas et al. (2015) που προσδιόρισαν ένα ρήγμα μήκους 16 km με μηχανισμό γένεσης που είχε παράταξη 12°, γωνία κλίσης 65° και γωνία ολίσθησης 177°. Το εστιακό βάθος του σεισμού ήταν στα 7 km. Από τις σχέσεις των Papazachos et al. (2004) το μήκος υπολογίσθηκε ίσο με 17 km και από τις σχέσεις των Wells-Coppersmith (1994) ίσο με 14 km και είναι σε καλή συμφωνία με αυτό που τελικά χρησιμοποιήθηκε. Η ολίσθηση που υπολογίσθηκε με τη χρήση της σεισμικής ροπής M<sub>0</sub>=1.33·10<sup>25</sup> dyn·cm (GCMT), από τις εμπειρικές σχέσεις ήταν ίση με 0.2 μέτρα.

Στο Σχήμα 3.65Α εμφανίζεται ο μορφολογικός χάρτης της περιοχής μαζί με το επίκεντρο του σεισμού καθώς και το επίκεντρο του σεισμού που προηγήθηκε, το ρήγμα και το μηχανισμό γένεσης. Η χωρική κατανομή των τάσεων που οφείλονται στο δεύτερο σεισμό φαίνεται στο Σχήμα 3.65Β. Οι θετικοί και οι αρνητικοί λοβοί διευθύνονται σχεδόν Β-Ν και Α-Δ.



**Σχήμα 3.65: Α.** Ο σεισμός που έγινε στην Κεφαλονιά στις 3/2/2014. Στο χάρτη φαίνονται το επίκεντρο του σεισμού με το μεγάλο άστρο, το ρήγμα και ο μηχανισμός γένεσης, ενώ με το μικρό άστρο εμφανίζεται το επίκεντρο του σεισμού που προηγήθηκε. **Β.** Οι μεταβολές των τάσεων που προκλήθηκαν από αυτόν το σεισμό.

## 3.10.4.β Χωρική Κατανομή Μετασεισμών

Για τη μελέτη της επίδρασης του ισχυρού σεισμού στη σεισμικότητα της γύρω περιοχής υπολογίσθηκαν οι μεταβολές των τάσεων για κάθε μετασεισμό που έγινε μετά από 30 ημέρες στην εστία του καθενός. Στο *Σχήμα 3.66A* απεικονίζονται τα επίκεντρα των μετασεισμών που είχαν μέγεθος πληρότητας M≥2.3 και εμφανίζονται με κόκκινους και μπλε κύκλους ανάλογα αν οι εστίες τους ήταν σε περιοχές όπου οι τιμές των τάσεων ήταν θετικές ή αρνητικές. Το μεγαλύτερο μέρος των μετασεισμών συγκεντρώνονταν κοντά στο ρήγμα, ενώ λιγότεροι έγιναν μακρύτερα από αυτό. Προκειμένου να διερευνηθεί η διέγερση μετασεισμών εκτός του ρήγματος του κύριου σεισμού, αφαιρέθηκαν από τα δεδομένα οι μετασεισμών που είχαν το επίκεντρο τους κοντά στο ρήγμα *δ*ημιουργήθηκε το *Σχήμα 3.66B*.



**Σχήμα 3.66: Α.** Χωρική κατανομή των τάσεων Coulomb μετά το σεισμό που έγινε στις 3/2/2014. **Β.** Κατανομή των τάσεων που προκλήθηκε από τον ισχυρό σεισμό, χωρίς τους πλησιέστερους στο ρήγμα μετασεισμούς. Τα δύο σχήματα εμφανίζουν τα επίκεντρα των μετασεισμών που είχαν τις εστίες τους σε περιοχές με θετικές τιμές τάσεων με κόκκινους κύκλους και τα επίκεντρα όσων είχαν τις εστίες τους σε θέσεις με αρνητικές τιμές τάσεων με μπλε κύκλους.

### 3.10.5.β Πληρότητα

Προκειμένου να γίνει ποσοτική αποτίμηση της διέγερσης της σεισμικής δραστηριότητας, είναι απαραίτητο ένα πλήρες δείγμα δεδομένων.

Έχοντας όλα τα διαθέσιμα δεδομένα για τη μετασεισμική ακολουθία της Κεφαλονιάς εξετάζεται η πληρότητα για το χρονικό διάστημα των 30 ημερών μετά το σεισμό. Από την εφαρμογή της μεθόδου της πληρότητας (Leptokaropoulos et al., 2013) διαπιστώθηκε ότι τα δεδομένα ήταν πλήρη για σεισμούς με μέγεθος M≥2.3.



**Σχήμα 3.67: Α.** Αθροιστική συχνότητα (κύκλοι) και συχνότητα (τετράγωνα) των σεισμών σε συνάρτηση με το μέγεθος για τους σεισμούς 30 ημέρες μετά τον κύριο. **Β.** Διαφορά μεταξύ των παρατηρούμενων δεδομένων και της θεωρητικής κατανομής, όπως σχηματίστηκε από τον υπολογισμό της μέγιστης πιθανότητας σαν συνάρτηση μεγέθους (GFT), με το ανοιχτό χρώμα. Διαφορά μεταξύ των παρατηρούμενων και των 1000 τυχαίων συνθετικών καταλόγων που σχηματίστηκαν σύμφωνα με τον ορισμό της καλύτερης τροποποιημένης προσαρμογής (MGFT), με το σκούρο χρώμα.

### 3.10.6.β Ρυθμός Σεισμικότητας

Για να διερευνηθεί η επίδραση του σεισμού στη σεισμικότητα της περιοχής κοντά στην οποία έγινε ο δεύτερος σεισμός στην Κεφαλονιά, υπολογίσθηκε ο ρυθμός σεισμικότητας της περιοχής αυτής και σχεδιάστηκαν αθροιστικά διαγράμματα. Τα διαγράμματα αυτά δείχνουν τον αθροιστικό αριθμό των σεισμών που έγιναν σε χρονικό διάστημα 30 ημερών μετά το σεισμό και είχαν μέγεθος Μ≥2.3. Στο Σχήμα 3.68 παρατηρείται ότι ο αριθμός των μετασεισμών των οποίων οι εστίες ήταν σε περιοχές με θετικές τιμές τάσεων είναι περισσότεροι από τον αριθμό των μετασεισμών των τον μετασεισμών των τον αριθμό



**Σχήμα 3.68:** Παρουσίαση του ρυθμού σεισμικότητας στην περιοχή της Κεφαλονιάς μετά το δεύτερο σεισμό στις 3/2/2014. Με την κόκκινη και μπλε γραμμή εμφανίζεται ο ρυθμός σεισμικότητας της περιοχής για τους μετασεισμούς που έγιναν 30 ημέρες μετά τον κύριο και είχαν τις εστίες τους σε περιοχές με θετικές και αρνητικές μεταβολές των τάσεων, αντίστοιχα.

Στο Σχήμα 3.69 απεικονίζεται ο ρυθμός σεισμικότητας της ίδιας περιοχής και για τους ίδιους μετασεισμούς, έχοντας διαγράψει όσους είχαν γίνει γύρω από το ρήγμα. Η αφαίρεση των μετασεισμών έγινε αφού λήφθηκε υπόψη η προβολή του ρήγματος στην επιφάνεια, σχηματίζοντας ένα ορθογώνιο παραλληλόγραμμο σχήμα. Έτσι, φαίνεται η επίδραση του σεισμού στη διέγερση της σεισμικότητας της γύρω περιοχής, χωρίς να λαμβάνονται υπόψη οι μετασεισμοί που έγιναν κοντά στο ρήγμα. Γίνεται αντιληπτή η μείωση του αριθμού των μετασεισμών που είχαν τις εστίες τους σε περιοχές με θετικές τάσεις και ιδιαίτερα η μεγάλη μείωση των μετασεισμών οι εστίες των οποίων ήταν σε θέσεις αρνητικών τάσεων. Η μεγάλη αυτή μείωση των μετασεισμών που είχαν τις εστίες τους σε περιοχές με αρνητικές τάσεις οφείλεται στο ότι οι περισσότεροι από αυτούς έγιναν κοντά στο ρήγμα και δεν συμπεριλήφθηκαν στον υπολογισμό του ρυθμού σεισμικότητας.



**Σχήμα 3.69:** Διάγραμμα του ρυθμού σεισμικότητας στην περιοχή της Κεφαλονιάς μετά το δεύτερο σεισμό στις 3/2/2014, έχοντας αφαιρέσει τους κοντινούς στο ρήγμα μετασεισμούς. Με την κόκκινη και μπλε γραμμή εμφανίζεται ο ρυθμός σεισμικότητας της περιοχής για τους μετασεισμού που έγιναν 30 ημέρες μετά τον κύριο και είχαν τις εστίες τους σε περιοχές με θετικές και αρνητικές μεταβολές των τάσεων, αντίστοιχα.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζεται η κατανομή σε ποσοστά των μετασεισμών που είχαν τις εστίες τους σε περιοχές θετικών και αρνητικών τιμών των τάσεων. Το ποσοστό των μετασεισμών των οποίων οι εστίες βρίσκονταν σε θετικές περιοχές τάσεων είναι μεγαλύτερο από το ποσοστό όσων είχαν τις εστίες τους σε αρνητικές περιοχές τάσεων. Πολύ μεγαλύτερο γίνεται το ποσοστό των μετασεισμών που είχαν τις εστίες τους σε περιοχές με θετικές τιμές τάσεων μετά τη διαγραφή των πλησιέστερων στο ρήγμα μετασεισμών. Από τα παραπάνω αποτελέσματα γίνεται φανερός ο αυξημένος ρυθμός σεισμικότητας στην περιοχή της Κεφαλονιάς μετά τη γένεση του δεύτερου ισχυρού σεισμού. Το συμπέρασμα αυτό βρίσκεται σε συμφωνία με αυτό των King et al. (1994), που απέδειξαν ότι οι περισσότεροι μετασεισμοί ήταν συγκεντρωμένοι εκεί όπου η μεταβολή των τάσεων ήταν αυξημένη.

Ο αυξημένος ρυθμός σεισμικότητας της περιοχής της Κεφαλονιάς βρίσκεται σε συμφωνία και με το συμπέρασμα στο οποίο κατέληξε ο Stein (1999) μετά τη μελέτη των μεταβολών των τάσεων του σεισμού στο Landers (1992), ο οποίος παρατήρησε ότι στον έναν από τους θετικούς λοβούς των τάσεων του σεισμού του Landers, έγινε ο σεισμός στο Big Bear που ακολούθησε αργότερα και ότι οι περισσότεροι μετασεισμοί κατανέμονταν σε ζώνες που είχαν μεταβολή τάσης μεγαλύτερη από 0.1 bar κοντά στην περιοχή της διάρρηξης.

| Μετασεισμοί                          | Θετικές<br>Τιμές<br>Τάσεων<br>(%) | Αρνητικές<br>Τιμές<br>Τάσεων<br>(%) |
|--------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|
| Όλοι                                 | 58                                | 42                                  |
| Χωρίς τους<br>κοντινούς<br>στο ρήγμα | 75                                | 25                                  |

**Πίνακας 3.13:** Ποσοστά των μετασεισμών των οποίων οι εστίες ήταν σε περιοχές με θετικές και αρνητικές τιμές των τάσεων για το δεύτερο σεισμό στην Κεφαλονιά.

# 3.11 Σεισμική Ακολουθία ΒΑ Αιγαίου, 24 Μαΐου 2014, M<sub>w</sub>=6.8

## 3.11.1 Εισαγωγή

Σεισμός έγινε μεταξύ των νησιών της Σαμοθράκης, της Λήμνου και της Ίμβρου με επίκεντρο 40.286°B 25.375°A, την 24<sup>η</sup> Μαΐου 2014, στις 09:25:02 (GMT), στο BA Αιγαίο. Πρόκειται για ένα ρήγμα δεξιόστροφο, οριζόντιας μετατόπισης που διευθύνεται BA-ΝΔ που έχει μηχανισμό γένεσης του ρήγματος παράταξη 73°, γωνία κλίσης 85° και γωνία ολίσθησης -177° (GCMT) και είναι από τα πιο χαρακτηριστικά ρήγματα της περιοχής του Βορείου Αιγαίου. Η περιοχή αυτή, αποτελεί μια ζώνη ενεργών ρηγμάτων της Τάφρου του Βορείου Αιγαίου και είναι προέκταση του ρήγματος της Βόρειας Ανατολίας.

### 3.11.2 Σεισμικότητα πριν και μετά τον κύριο σεισμό

Η σεισμικότητα στην περιοχή γύρω από το σεισμό πριν και μετά τη γένεσή του παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.70. Πριν 30 ημέρες από τη γένεση του σεισμού έγιναν σεισμοί που φαίνονται στο Σχήμα 3.70Α, με μπλε τετράγωνα και κατανέμονταν κοντά στο επίκεντρο, αλλά και μακρύτερα. Στο Σχήμα 3.70Β φαίνεται με μοβ τετράγωνα ο σχετικά μικρός αριθμός προσεισμών που έγινε 7 ημέρες πριν τον κύριο σεισμό. Αυτό που γίνεται εμφανές είναι ότι το μεγαλύτερο μέρος των προσεισμών συγκεντρώνονταν κατά μήκος της Τάφρου του Βορείου Αιγαίου. Ακολούθησε μεγάλο πλήθος σεισμών 24 ώρες μετά το σεισμό, τα επίκεντρα των οποίων απεικονίζονται στο Σχήμα 3.70Γ, με κόκκινους κύκλους. Η ίδια εικόνα παρατηρείται και 48 ώρες μετά τον ισχυρό σεισμό με τα επίκεντρα αυτών των μετασεισμών να

παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.70Δ, με μοβ κύκλους. Παρατηρείται ότι οι μετασεισμοί τόσο μετά από 24 ώρες όσο και μετά από 48 ώρες συγκεντρώνονταν κατά μήκος της Τάφρου του Βορείου Αιγαίου. Στο Σχήμα 3.70Ε, παρουσιάζεται η πυκνή μετασεισμική ακολουθία 30 ημέρες μετά το σεισμό, με πράσινους ρόμβους και στο Σχήμα 3.70ΣΤ, με κίτρινους ρόμβους, φαίνεται το πλήθος των μετασεισμών που συνέχιζε να αυξάνεται ακόμα και μετά 60 ημέρες. Το μεγαλύτερο μέρος των μετασεισμών, όπως φαίνεται και στα δύο τελευταία σχήματα, συγκεντρώνονταν κατά μήκος Τάφρου του Βορείου Αιγαίου, που εκτείνεται στο Αιγαίο Πέλαγος.

Με βάση τη χωρική κατανομή της μετασεισμικής ακολουθίας των 24 και 48 ωρών (*Σχήμα 3.70Γ, Σχήμα 3.70Δ*) ορίστηκε το ρήγμα στην περιοχή, το οποίο βρίσκεται σε συμφωνία με τα ρήγματα από άλλες μελέτες που αφορούσαν τον ίδιο σεισμό. Για να διερευνηθεί η διέγερση σεισμικότητας στη περιοχή γύρω από το επίκεντρο του σεισμού μελετήθηκαν οι χάρτες της σεισμικής δραστηριότητας των 30 και 60 ημερών (*Σχήμα 3.70Ε, Σχήμα 3.70ΣΤ*) μετά τον κύριο σεισμό.


**Σχήμα 3.70:** Χωρική κατανομή της προσεισμικής και μετασεισμικής δραστηριότητας για το σεισμό στο Β. Αιγαίο. Το επίκεντρο του σεισμού φαίνεται με άστρο και ο μηχανισμός γένεσής του ως ισεμβαδική προβολή του κάτω ημισφαιρίου. **Α.** Σεισμοί 30 ημέρες πριν τη γένεση του κύριου σεισμού (μπλε τετράγωνα). **Β.** Οι σεισμοί 7 ημέρες πριν από τον κύριο σεισμό (μοβ τετράγωνα). **Γ.** Μετασεισμοί 24 ώρες μετά τον κύριο σεισμό (κόκκινοι κύκλοι). **Δ.** Οι μετασεισμοί μετά από 48 ώρες (μοβ κύκλοι). **Ε.** Κατανομή των επικέντρων των μετασεισμών μετά από 30 ημέρες (πράσινοι ρόμβοι). **ΣΤ.** Τα επίκεντρα των μετασεισμών μετά από τον κύριο σεισμό (κίτρινοι ρόμβοι).

### 3.11.3 Υπολογισμός Τάσεων Coulomb

Για να σχεδιαστεί το μοντέλο τάσεων για το σεισμό του ΒΑ Αιγαίου διερευνήθηκαν αρκετές δημοσιευμένες μελέτες που αναφέρονταν στα γεωμετρικά και κινηματικά χαρακτηριστικά του ρήγματος.

Σύμφωνα με τους Görgün et al. (2015), ο σεισμός είχε μέγεθος  $M_w$ =7.0, τα εστιακά βάθη των μετασεισμών κυμαίνονταν μεταξύ 6 έως 30 km, η εστία βρισκόταν σε βάθος 15 km και ο μηχανισμός γένεσης του ρήγματος ήταν παράταξη 82°, γωνία κλίσης 77° και γωνία ολίσθησης 149°. Ο Evangelidis, (2014), επέλεξε τον παρακάτω μηχανισμό γένεσης του ρήγματος με παράταξη 73°, γωνία κλίσης 85° και γωνία ολίσθησης -177°, ενώ το μέγεθος του σεισμού, κατά την εκτίμησή του, ήταν  $M_w$ =6.9. Τα εστιακά βάθη των μετασεισμών που υπολογίσθηκαν από τον ίδιο κυμαίνονταν από 5 έως 30 km και η εστία στα 15 km. Η Tsakiroudi (2015) με βάση τις παραμέτρους της πηγής του ισχυρού αυτού σεισμού και τους μηχανισμούς γένεσης από διαφορετικούς σεισμολογικούς σταθμούς, χρησιμοποιώντας τις μεθόδους της φασματική ανάλυσης, της αντιστροφής του τανυστή ροπής και της αντιστροφής της ολίσθησης των σεισμικών δεδομένων, υπολόγισε το μέγεθος ίσο με  $M_w$ =6.8 και τα χαρακτηριστικά του ρήγματος.

Από τις σχέσεις των Papazachos et al. (2004) το μήκος του ρήγματος που υπολογίσθηκε ισούται με 59 km, ενώ από τις σχέσεις των Wells-Coppersmith (1994) το μήκος ισούται με 51 km. Για τον υπολογισμό του μοντέλου των μεταβολών των τάσεων χρησιμοποιήθηκε ο μηχανισμός γένεσης του ρήγματος που είχε παράταξη 73°, γωνία κλίσης 85° και γωνία ολίσθησης -177° και το μήκος του ρήγματος που υπολογίσθηκε από τον κ. Καρακώστα Β., από την αδημοσίευτη μελέτη του, και ήταν ίσο με 40 km. Με τη βοήθεια των εμπειρικών σχέσεων και τη σεισμική ροπή,  $M_o=2.47 \cdot 10^{26}$  dyn·cm (GCMT), βρέθηκε ότι η ολίσθηση ήταν ίση με 0.85 μέτρα.

Το ρήγμα του σεισμού, το επίκεντρο καθώς και ο μηχανισμός γένεσης παρουσιάζονται σε μορφολογικό χάρτη στο Σχήμα 3.71Α. Οι μεταβολές της κατανομής των τάσεων του σεισμού παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.71B, όπου φαίνεται ότι οι θετικές τιμές των τάσεων βρίσκονται στα άκρα του ρήγματος και διευθύνονται Α-Δ και BBΔ-NNA, ενώ οι αρνητικές τιμές των τάσεων διευθύνονται BBA-NNΔ και σχεδόν Α-Δ.



**Σχήμα 3.71: Α.** Ο σεισμός που έγινε στο ΒΑ Αιγαίο στις 24/5/2014. Διακρίνονται το επίκεντρο του σεισμού, με το άστρο, το ρήγμα και ο μηχανισμός γένεσής του **Β.** Η κατανομή των μεταβολών των τάσεων Coulomb κατά τη σεισμική ολίσθηση.

### 3.11.4 Χωρική Κατανομή Μετασεισμών

Για να μελετηθεί η σεισμικότητα στην περιοχή γύρω από το επίκεντρο του σεισμού μετά τη γένεση του, χαρτογραφήθηκαν τα επίκεντρα των μετασεισμών που έγιναν 30 ημέρες μετά και ήταν πλήρη για μεγέθη Μ≥2.4. Υπολογίσθηκαν οι μεταβολές των τάσεων για κάθε μετασεισμό στην εστία του καθενός και φαίνονται στο *Σχήμα 3.72A* με κόκκινους και μπλε κύκλους όταν οι εστίες τους βρίσκονται σε θέσεις με θετικές ή αρνητικές μεταβολές της τάσης, αντίστοιχα. Οι περισσότεροι μετασεισμοί έγιναν κοντά στο ρήγμα και στον ανατολικό θετικό λοβό των τάσεων. Με σκοπό να γίνει η διερεύνηση της διέγερσης μετασεισμών εκτός του ρήγματος του κύριου σεισμού, αφαιρέθηκαν από τα δεδομένα οι μετασεισμοί που έγιναν πάνω στο ρήγμα. Στο *Σχήμα 3.72B* φαίνεται η ίδια μετασεισμική ακολουθία, χωρίς τους μετασεισμούς που έγιναν κοντά στο ρήγμα.



**Σχήμα 3.72: Α.** Κατανομή του πεδίου των τάσεων Coulomb που προκλήθηκε από το σεισμό του ΒΑ Αιγαίου στις 24/5/2014. Τα επίκεντρα των μετασεισμών που είχαν τις εστίες τους σε περιοχές με θετικές τάσεις παρουσιάζονται με κόκκινους κύκλους, ενώ τα επίκεντρα όσων οι εστίες τους βρίσκονταν σε θέσεις με αρνητικές μεταβολές τάσης με μπλε κύκλους. **Β.** Μεταβολές της τάσης των μετασεισμών, εκτός από αυτούς που έγιναν γύρω από το ρήγμα.

### 3.11.5 Πληρότητα

Με σκοπό να εξεταστεί ποσοτικά η διέγερση της σεισμικής δραστηριότητας, είναι απαραίτητο ένα πλήρες δείγμα δεδομένων.

Με βάση όλα τα διαθέσιμα δεδομένα για τη μετασεισμική ακολουθία του ΒΑ Αιγαίου εξετάζεται η πληρότητα για το χρονικό διάστημα των 30 ημερών μετά το σεισμό. Από την εφαρμογή της μεθόδου της πληρότητας (Leptokaropoulos et al., 2013) διαπιστώθηκε ότι τα δεδομένα ήταν πλήρη για σεισμούς με μέγεθος Μ≥2.4.



**Σχήμα 3.73: Α.** Αθροιστική συχνότητα (κύκλοι) και συχνότητα (τετράγωνα) των σεισμών σε συνάρτηση με το μέγεθος για τους σεισμούς 30 ημέρες μετά τον κύριο. **Β.** Διαφορά μεταξύ των παρατηρούμενων δεδομένων και της θεωρητικής κατανομής, όπως σχηματίστηκε από τον υπολογισμό της μέγιστης πιθανότητας σαν συνάρτηση μεγέθους (GFT), με το ανοιχτό χρώμα. Διαφορά μεταξύ των παρατηρούμενων και των 1000 τυχαίων συνθετικών καταλόγων που σχηματίστηκαν σύμφωνα με τον ορισμό της καλύτερης τροποποιημένης προσαρμογής (MGFT), με το σκούρο χρώμα.

### 3.11.6 Ρυθμός Σεισμικότητας

Για να εξεταστεί η επίδραση του σεισμού στη σεισμικότητας της περιοχής γύρω από το σεισμό, υπολογίσθηκε ο ρυθμός σεισμικότητας αυτής της περιοχής. Το *Σχήμα 3.74* εμφανίζει το ρυθμό σεισμικότητας της περιοχής για τους μετασεισμούς που έγιναν σε χρονικό διάστημα 30 ημερών από τη γένεση του κύριου σεισμού και είχαν μέγεθος Μ≥2.4. Γίνεται αντιληπτό από το σχήμα ότι υπάρχει μια αυξημένη σεισμικότητα σε αυτό το χρονικό διάστημα στην περιοχή, καθώς ο αριθμός των μετασεισμών των οποίων οι εστίες βρίσκονταν σε περιοχές με θετικές μεταβολές τάσεων είναι αρκετά μεγαλύτερος από τον αριθμό των μετασεισμών οι εστίες των οποίων ήταν σε περιοχές με αρνητικές τιμές τάσεων.



**Σχήμα 3.74:** Σχηματική απεικόνιση του ρυθμού σεισμικότητας στην περιοχή του BA Αιγαίου, μετά το σεισμό που έγινε στις 24/5/2014. Η κόκκινη γραμμή δείχνει το ρυθμό σεισμικότητας της περιοχής για τους μετασεισμούς που έγιναν 30 ημέρες μετά τον κύριο και είχαν τις εστίες τους σε περιοχές με θετικές μεταβολές των τάσεων, ενώ η μπλε γραμμή δείχνει το ρυθμό σεισμικότητας της περιοχής για τους ίδιους μετασεισμούς που είχαν τις εστίες τους σε περιοχές με αρνητικές μεταβολές των τάσεων.

Έχοντας αφαιρέσει όσους μετασεισμούς έγιναν πλησίον του ρήγματος, σχεδιάστηκε ο ρυθμός σεισμικότητας που φαίνεται στο *Σχήμα 3.75* για την ίδια περιοχή. Λαμβάνοντας υπόψη την προβολή του ρήγματος στην επιφάνεια, σε σχήμα ορθογωνίου παραλληλογράμμου, έγινε η αφαίρεση των μετασεισμών. Έτσι φαίνεται η επίδραση του σεισμού στη διέγερση της σεισμικότητας της γύρω περιοχής, χωρίς να υπολογίζονται και οι κοντινοί στο ρήγμα μετασεισμού. Η μείωση του αριθμού των μετασεισμών των οποίων οι εστίες ήταν σε περιοχές με θετικές τάσεις είναι μικρή, όμως η μείωση του αριθμού των μετασεισμών που είχαν τις εστίες τους σε περιοχές με αρνητικές τάσεις είναι πολύ μεγάλη. Ο λόγος αυτής της μεγάλης μείωσης του αριθμού των μετασεισμών σι εστίες των οποίων ότο ρήγμα και δεν συμπεριλήφθηκαν στον υπολογισμό του ρυθμού σεισμικότητας.



**Σχήμα 3.75:** Διάγραμμα με το ρυθμό σεισμικότητας στην περιοχή του ΒΑ Αιγαίου, μετά το σεισμό που έγινε στις 24/5/2014, έχοντας αφαιρέσει τους κοντινούς στο ρήγμα μετασεισμούς. Η κόκκινη γραμμή δείχνει το ρυθμό σεισμικότητας της περιοχής για τους μετασεισμούς που έγιναν 30 ημέρες μετά τον κύριο και είχαν τις εστίες τους σε περιοχές με θετικές μεταβολές των τάσεων, ενώ η μπλε γραμμή δείχνει το ρυθμό σεισμικότητας της περιοχή του Κοντινούς του μετασεισμούς.

Ο Πίνακας 3.14 παρουσιάζει την αναλογία, σε ποσοστά, των μετασεισμών που οι εστίες τους βρίσκονταν σε περιοχές θετικών και αρνητικών τιμών των τάσεων για τους μετασεισμούς που ακολούθησαν 30 ημέρες μετά το σεισμό στο ΒΑ Αιγαίο. Παρατηρείται ότι τόσο όταν λαμβάνονται υπόψη όλοι οι μετασεισμοί που έγιναν στην περιοχή, όσο και μετά τη διαγραφή των πλησιέστερων στο ρήγμα μετασεισμών το ποσοστό των μετασεισμών που είχαν τις εστίες τους σε περιοχές θετικών τάσεων είναι πολύ μεγαλύτερο από το ποσοστό των μετασεισμών οι εστίες των οποίων ήταν σε θέσεις αρνητικών τάσεων. Από τα παραπάνω αποτελέσματα γίνεται φανερός ο αυξημένος ρυθμός σεισμικότητας στην περιοχή του ΒΑ Αιγαίου μετά τη γένεση του κύριου σεισμού. Το συμπέρασμα αυτό βρίσκεται σε συμφωνία τόσο με τους King et al. (1994), που απέδειξαν ότι οι μεταβολές των τάσεων Coulomb ενός σεισμού μπορούν να συσχετιστούν με τη διέγερση σεισμικότητας στη γύρω περιοχή, όπως συνέβη μετά το σεισμό στο Landers (1992), όπου οι περισσότεροι μετασεισμοί ήταν συγκεντρωμένοι εκεί όπου η μεταβολή των τάσεων ήταν μεγαλύτερη από 0.5 bar και ελάχιστοι κατανέμονταν εκεί όπου η μεταβολή των τάσεων μειώνονταν κατά 0.5 bar, όσο και με τον Stein (1999) που κατέληξε, μετά τη μελέτη των μεταβολών των τάσεων του σεισμού στο Landers (1992), ότι οι περισσότεροι μετασεισμοί κατανέμονταν σε ζώνες που είχαν μεταβολή τάσης μεγαλύτερη από 0.1 bar κοντά στην περιοχή της διάρρηξης.

**Πίνακας 3.14:** Ποσοστά των μετασεισμών των οποίων οι εστίες βρίσκονταν σε περιοχές θετικών και αρνητικών μεταβολών των τάσεων για τους μετασεισμούς που έγιναν μετά τον ισχυρό σεισμό στο BA Αιγαίο.

| Μετασεισμοί                          | Θετικές<br>Τιμές<br>Τάσεων<br>(%) | Αρνητικές<br>Τιμές<br>Τάσεων<br>(%) |
|--------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|
| Όλοι                                 | 69                                | 31                                  |
| Χωρίς τους<br>κοντινούς<br>στο ρήγμα | 93                                | 7                                   |

## 3.12 Σεισμική Ακολουθία Κάσου, 16 Απριλίου 2015, M<sub>w</sub>=6.1

# 3.12.1 Εισαγωγή

Ο σεισμός που έγινε στις 16 Απριλίου 2015 και ώρα 18:07:48 (GMT) είχε επίκεντρο 35.03° B 26.85° A, δυτικά της Κρήτης, κοντά στο νησί της Κάσου και μέγεθος  $M_w$ =6.1 (GCMT). Ο μηχανισμός γένεσης του ρήγματος είχε παράταξη 245°, γωνία κλίσης 49° και γωνία ολίσθησης 132° (Kiratzi A., 2016). Πρόκειται για ένα ανάστροφο ρήγμα, στο ανατολικό τμήμα του Ελληνικού Τόξου.

# 3.12.2 Σεισμικότητα πριν και μετά τον κύριο σεισμό

Για να μελετηθεί η σεισμικότητα στην περιοχή του ΝΑ Αιγαίου, εκεί που έγινε ο σεισμός, χαρτογραφήθηκαν τα επίκεντρα των προσεισμών και των μετασεισμών και απεικονίζονται στο Σχήμα 3.76. Τους σεισμούς που προηγήθηκαν 30 ημέρες του κύριου, παρουσιάζει το Σχήμα 3.76Α, με μπλε τετράγωνα, και κατανέμονταν μακριά από το επίκεντρο του επερχόμενου σεισμού. Ελάχιστοι σεισμοί προηγήθηκαν 7 ημέρες πριν τον κύριο σεισμό, τα επίκεντρα των οποίων εμφανίζονται με μοβ τετράγωνα (Σχήμα 3.76Β). Στο Σχήμα 3.76Γ, με κόκκινους κύκλους φαίνονται τα επίκεντρα του μεγάλου αριθμού των μετασεισμών 24 ώρες μετά τη γένεση του κύριου σεισμού που κατανέμονταν τόσο κοντά στο επίκεντρο όσο και μακρύτερα. Στο Σχήμα 3.76Δ, με μοβ κύκλους εμφανίζεται ο αυξημένος αριθμός μετασεισμών που ακολούθησαν μετά από 48 ώρες. Η έντονη μετασεισμική δραστηριότητα δε σταμάτησε και μετά από 30 ημέρες, με τους μετασεισμούς να απεικονίζονται στο *Σχήμα 3.76E* με πράσινους ρόμβους. Ιδιαίτερα μεγάλος ήταν ο αριθμός των μετασεισμών ακόμα και μετά από 60 ημέρες από τον ισχυρό σεισμό όπως φαίνεται στο *Σχήμα 3.76ΣT*, με τους κίτρινους ρόμβους να αντιστοιχούν στους μετασεισμούς που έγιναν σε αυτό το χρονικό διάστημα. Από τα δύο τελευταία σχήματα γίνεται εμφανής μία ευρεία κατανομή των μετασεισμών σε θέσεις μακριά από το επίκεντρο του σεισμού.

Από τους χάρτες με τη χωρική κατανομή της μετασεισμικής ακολουθίας των 24 και 48 ωρών (Σχήμα 3.76Γ, Σχήμα 3.76Δ) προσδιορίστηκε το ρήγμα στην περιοχή. Στη συνέχεια για επιβεβαίωση των στοιχείων του ρήγματος χρησιμοποιήθηκε η μελέτη της Kiratzi A., (2016), που έδειχνε την πλήρη συμφωνία των αποτελεσμάτων. Με βάση τους χάρτες που δείχνουν τη μετασεισμική δραστηριότητα των 30 και 60 ημερών (Σχήμα 3.76Ε, Σχήμα 3.76ΣΤ) μελετήθηκε η διέγερση σεισμικότητας στην περιοχή γύρω από το σεισμό.



**Σχήμα 3.76:** Χωρική κατανομή της σεισμικής δραστηριότητας πριν και μετά τον κύριο σεισμό στο ΝΑ Αιγαίο, το επίκεντρο του οποίου παριστάνεται με άστρο. Ο μηχανισμός γένεσης του κύριου σεισμού φαίνεται ως ισεμβαδική προβολή του κάτω ημισφαιρίου. **Α.** Τα επίκεντρα των σεισμών 30 ημέρες πριν την γένεση του κύριου σεισμού (μπλε τετράγωνα). **Β.** Οι σεισμοί 7 ημέρες πριν τον κύριο σεισμό (μοβ τετράγωνα). **Γ.** Μετασεισμοί 24 ώρες μετά τον κύριο σεισμό (κόκκινοι κύκλοι). **Δ.** Μετασεισμοί 48 ώρες μετά τον κύριο σεισμό (μοβ κύκλοι). **ΣΤ.** Κατανομή των επικέντρων των σεισμών 60 ημέρες μετά τον κύριο σεισμό (κίτρινοι ρόμβοι).

### 3.12.3 Υπολογισμός Τάσεων Coulomb

Για το μοντέλο τάσεων χρησιμοποιήθηκαν τα στοιχεία της μελέτης της Kiratzi A., (2016), σύμφωνα με την οποία το ρήγμα είχε παράταξη 245°, γωνία κλίσης 49°, γωνία ολίσθησης 132°, η εστία βρισκόταν σε βάθος 23 km και το μήκος του ρήγματος ήταν ίσο με 14 km. Το μήκος του ρήγματος βρίσκεται σε συμφωνία και με τα αποτελέσματα των εμπειρικών σχέσεων των Papazachos et al, (2004) (L= 15.5 km) καθώς και των Wells & Coppersmith (1994) (L=13.1km). Χρησιμοποιώντας την τιμή της σεισμικής ροπής, Mo=1.89·1025 dyn·cm (GCMT), υπολογίσθηκε ότι η ολίσθηση ήταν ίση με 0.382 μέτρα.

Στο Σχήμα 3.77Α απεικονίζεται το ρήγμα με το επίκεντρο και το μηχανισμό γένεσης του σεισμού. Στο Σχήμα 3.77Β φαίνονται οι μεταβολές της τάσης Coulomb, όπου με θετικές τιμές εμφανίζονται οι φωτεινές ζώνες, με προσανατολισμό ΒΑ-ΝΔ και με αρνητικές τιμές εμφανίζονται οι σκιερές ζώνες που έχουν διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ.



**Σχήμα 3.77: Α.** Ο σεισμός στο ΝΑ Αιγαίο στις 16/4/2015. Με τη μαύρη γραμμή φαίνεται το ανάστροφο ρήγμα και με το άστρο το επίκεντρο. Ο μηχανισμός γένεσης προβάλλεται ως ισεμβαδική προβολή του κάτω ημισφαιρίου. **Β.** Χωρική κατανομή των μεταβολών των τάσεων που προκλήθηκαν από τη σεισμική ολίσθηση.

### 3.12.4 Χωρική Κατανομή Μετασεισμών

Η εξέταση της επίδρασης του σεισμού στη σεισμικότητα της περιοχής γύρω από το επίκεντρο προϋποθέτει τη χαρτογράφηση των επικέντρων των μετασεισμών που έγιναν σε χρονικό διάστημα 30 ημερών και είχαν μέγεθος πληρότητας Μ≥2.5. Έτσι στο Σχήμα 3.78Α φαίνονται τα επίκεντρα των αυτών των μετασεισμών, έχοντας υπολογίσει τις μεταβολές της τάσης για αυτούς μετασεισμούς στην εστία τους και παρουσιάζονται με κόκκινους κύκλους τα επίκεντρα των μετασεισμών των οποίων οι εστίες τους βρίσκονταν σε θέσεις με θετικές μεταβολές της τάσης, ενώ με μπλε κύκλους τα επίκεντρα αυτών που είχαν τις εστίες τους σε θέσεις με αρνητικές μεταβολές της τάσης. Το μεγαλύτερο μέρος των μετασεισμών ήταν συγκεντρωμένο στο βόρειο αρνητικό λοβό των τάσεων. Για να διερευνηθεί η διέγερση μετασεισμών εκτός του ρήγματος του κύριου σεισμού, αφαιρέθηκαν από το δείγμα δεδομένων οι μετασεισμοί που έγιναν πάνω στο ρήγμα. Στο Σχήμα 3.78Β φαίνεται η ίδια μετασεισμική ακολουθία, χωρίς τους μετασεισμούς που έγιναν κοντά στο ρήγμα. Όπως έχει παρατηρηθεί και σε προηγούμενους σεισμούς, έτσι και σε αυτόν, υπάρχουν μετασεισμοί που ενώ οι εστίες τους βρίσκονταν σε λοβούς με θετικές τιμές τάσεων, τα επίκεντρά τους εμφανίζονται σε περιοχές με αρνητικές τιμές τάσεων και το αντίθετο.



**Σχήμα 3.78: Α.** Κατανομή του πεδίου τάσεων Coulomb, για το σεισμό που έγινε στις 16/4/2015, μαζί με τα επίκεντρα των μετασεισμών (κύκλοι), που έχουν κόκκινο ή μπλε χρώμα ανάλογα αν έχουν τις εστίες τους σε περιοχές με θετικές ή αρνητικές μεταβολές των τιμών της τάσης, αντίστοιχα. **Β.** Μεταβολές της τάσης, έχοντας αφαιρέσει τους μετασεισμούς που έγιναν κοντά στο ρήγμα.

### **3.12.5 Πληρότητα**

Για να γίνει ποσοτική αποτίμηση της διέγερσης της σεισμικής δραστηριότητας, είναι απαραίτητο ένα πλήρες δείγμα δεδομένων.

Από όλα τα διαθέσιμα δεδομένα για αυτήν τη μετασεισμική ακολουθία διερευνάται η πληρότητα των μεγεθών της για το χρονικό διάστημα των 30 ημερών μετά το σεισμό. Από τη μέθοδο της πληρότητας (Leptokaropoulos et al., 2013) που εφαρμόστηκε διαπιστώθηκε ότι τα δεδομένα ήταν πλήρη για σεισμούς με Μ≥2.5.



**Σχήμα 3.79: Α.** Αθροιστική συχνότητα (κύκλοι) και συχνότητα (τετράγωνα) των σεισμών σε συνάρτηση με το μέγεθος για τους σεισμούς 30 ημέρες μετά τον κύριο. **Β.** Διαφορά μεταξύ των παρατηρούμενων δεδομένων και της θεωρητικής κατανομής, όπως σχηματίστηκε από τον υπολογισμό της μέγιστης πιθανότητας σαν συνάρτηση μεγέθους (GFT), με το ανοιχτό χρώμα. Διαφορά μεταξύ των παρατηρούμενων δεδομένων αυνθετικών και των 1000 τυχαίων συνθετικών καταλόγων που σχηματίστηκαν σύμφωνα με τον ορισμό της καλύτερης τροποποιημένης προσαρμογής (MGFT), με το σκούρο χρώμα.

### 3.12.6 Ρυθμός Σεισμικότητας

Προκειμένου να εξεταστεί η επίδραση του σεισμού στη σεισμικότητα της περιοχής γύρω από το επίκεντρο του, υπολογίσθηκε ο ρυθμός σεισμικότητας για τους μετασεισμούς που έγιναν 30 ημέρες μετά τον κύριο, με μέγεθος M≥2.5 και παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.80. Το διάγραμμα αναπαριστά τον αθροιστικό αριθμό των μετασεισμών που έγιναν σε χρονικό διάστημα 30 ημερών μετά τον κύριο σεισμό. Όπως φαίνεται ακολούθησε μια αυξημένη μετασεισμική δραστηριότητα, με τους μετασεισμούς που είχαν τις εστίες τους σε περιοχές με θετικές τάσεις να εμφανίζονται περισσότεροι από αυτούς που είχαν τις εστίες τους σε αρνητικές περιοχές τάσεων.



**Σχήμα 3.80:** Ρυθμός σεισμικότητας της περιοχής μετά το σεισμό που έγινε στο ΝΑ Αιγαίο στις 16/4/2015. Η κόκκινη γραμμή δείχνει το ρυθμό σεισμικότητας της γύρω περιοχής για τους μετασεισμούς που έγιναν 30 ημέρες μετά, των οποίων οι εστίες ήταν σε θετικές περιοχές τάσεων, ενώ η μπλε το ρυθμό σεισμικότητας της γύρω περιοχής για τους ίδιους μετασεισμούς που είχαν τις εστίες τους σε σκιερές ζώνες.

Αφού αφαιρέθηκαν οι μετασεισμοί που είχαν γίνει κοντά στο ρήγμα σχεδιάστηκε το διάγραμμα του *Σχήματος 3.81,* για τον ίδιο σεισμό. Λαμβάνοντας υπόψη την προβολή του ρήγματος στην επιφάνεια που είχε σχήμα ορθογώνιο παραλληλόγραμμο, έγινε η διαγραφή των κοντινών στο ρήγμα μετασεισμών, κάνοντας αντιληπτή την επίδραση του σεισμού στη σεισμικότητα της περιοχής, χωρίς να συμπεριλαμβάνονται αυτοί οι μετασεισμοί. Παρατηρείται μια μεγάλη μείωση του αριθμού των μετασεισμών που είχαν τις εστίες τους σε περιοχές με θετικές τάσεις, επειδή μεγάλος αριθμός των μετασεισμών αυτών έγιναν κοντά στο ρήγμα και δεν συμπεριλήφθηκαν στους υπολογισμούς του ρυθμού σεισμικότητας. Μικρότερη μείωση εμφανίζουν οι μετασεισμοί που είχαν τις εστίες τους σε αρνητικές περιοχές τάσεων, γιατί οι περισσότεροι έγιναν μακρύτερα από το ρήγμα.



**Σχήμα 3.81:** Σχηματική απεικόνιση του ρυθμού σεισμικότητας της περιοχής μετά το σεισμό του ΝΑ Αιγαίου στις 16/4/2015, χωρίς τους μετασεισμούς που έγιναν γύρω από το ρήγμα. Η κόκκινη γραμμή δείχνει το ρυθμό σεισμικότητας της γύρω περιοχής για τους μετασεισμούς που έγιναν 30 ημέρες μετά, των οποίων οι εστίες ήταν σε περιοχές θετικών τάσεων, ενώ η μπλε το ρυθμό σεισμικότητας της ίδιας περιοχής και για τους ίδιους μετασεισμούς που είχαν τις εστίες τους σε περιοχές αρνητικών τιμών τάσεων.

Στον παρακάτω πίνακα εμφανίζεται η κατανομή, σε ποσοστά, των μετασεισμών των οποίων οι εστίες ήταν σε περιοχές θετικών και αρνητικών τιμών τάσεων. Παρατηρείται ένα αρκετά μεγαλύτερο ποσοστό των μετασεισμών οι εστίες των οποίων ήταν σε περιοχές θετικών τάσεων ακόμα και μετά την αφαίρεση των μετασεισμών γύρω από το ρήγμα σε σχέση με το ποσοστό των μετασεισμών που είχαν τις εστίες τους σε αρνητικές περιοχές τάσεων. Σύμφωνα με τους King et al. (1994), που μελέτησαν το σεισμό στο Landers (1992), διαπίστωσαν διέγερση της σεισμικότητας στη γύρω περιοχή, μετά το σεισμό εκεί όπου η μεταβολή των τάσεων ήταν μεγαλύτερη από 0.5 bar. Επίσης, ο Stein (1999), μελετώντας τον ίδιο σεισμό, παρατήρησε ότι περισσότεροι μετασεισμοί κατανέμονταν σε ζώνες που είχαν μεταβολή τάσης μεγαλύτερη από 0.1 bar κοντά στην περιοχή της διάρρηξης. Από τα παραπάνω εξάγεται το συμπέρασμα ότι στην περιοχή της Κάσου που έγινε ο σεισμός, ο ρυθμός σεισμικότητας είναι αυξημένος.

| Μετασεισμοί                          | Θετικές<br>Τιμές<br>Τάσεων<br>(%) | Αρνητικές<br>Τιμές<br>Τάσεων<br>(%) |
|--------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|
| Όλοι                                 | 90                                | 10                                  |
| Χωρίς τους<br>κοντινούς<br>στο ρήγμα | 93                                | 7                                   |

**Πίνακας 3.15:** Ποσοστά των μετασεισμών των οποίων οι εστίες ήταν σε περιοχές με θετικές και αρνητικές τιμές των τάσεων για το σεισμό στην Κάσο.

# Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup> Σύνοψη

# 4.1 Σύνοψη Αποτελεσμάτων

Η συσχέτιση των τάσεων Coulomb και η διέγερση σεισμικότητας μετά από ισχυρούς σεισμούς (M≥6.0) που έγιναν στον ελληνικό χώρο και σε χρονικό διάστημα από το 2001 μέχρι και τον Απρίλιο του 2015 ήταν ο στόχος της παρούσας εργασίας. Όλοι οι πρόσφατοι ισχυροί σεισμοί που μελετήθηκαν και περιλαμβάνονται στην παρούσα μελέτη έχουν πραγματοποιηθεί στο θαλάσσιο χώρο της Ελλάδας. Αντίθετα, παλαιότερα οι ισχυροί σεισμοί γίνονταν τόσο στο θαλάσσιο χώρο της Ελλάδας, όσο και στον ηπειρωτικό. Με σκοπό την εξέταση της διέγερσης της σεισμικότητας υπολογίσθηκε ο ρυθμός σεισμικότητας στην περιοχή μετά τη γένεση του ισχυρού σεισμού.

Βασική προϋπόθεση για την εξαγωγή ορθών αποτελεσμάτων αποτέλεσε η χρήση αξιόπιστων δεδομένων που αφορούσαν τις γεωμετρικές και κινηματικές ιδιότητες του εκάστοτε ρήγματος.

Έτσι μελετήθηκαν οι μετασεισμικές ακολουθίες για κάθε ισχυρό σεισμό για χρονικά διαστήματα αυτά των 24 και 48 ωρών μετά τον ισχυρό σεισμό, ώστε να καθοριστούν τα βασικά χαρακτηριστικά των ρηγμάτων. Στη συνέχεια, αυτά τα χαρακτηριστικά συγκρίθηκαν με τα αποτελέσματα από δημοσιευμένες μελέτες καθώς και με τα αποτελέσματα από εμπειρικές σχέσεις έτσι ώστε να βρίσκονται σε συμφωνία. Ακολούθως υπολογίσθηκαν οι μεταβολές των τάσεων Coulomb μετά από τη γένεση του ισχυρού σεισμού (Μ≥6.0), σύμφωνα πάντα με τον τύπο της διάρρηξης του ρήγματος που δραστηριοποιήθηκε.

Ο υπολογισμός των μεταβολών των τάσεων Coulomb γύρω από ένα ρήγμα ενός ισχυρού σεισμού, μπορεί να βοηθήσει στην εκτίμηση της γένεσης ισχυρών μετασεισμών. Ιδιαίτερα εμφανής έγινε με το μοντέλο τάσεων η έντονη μετασεισμική δραστηριότητα που ακολούθησε μετά τον κύριο σεισμό. Ο αυξημένος αυτός ρυθμός σεισμικότητας μπορεί να εξηγηθεί από τη χωρική κατανομή των τάσεων Coulomb, όταν συμφωνεί με διεθνή δημοσιευμένα αποτελέσματα. Ακόμη, η μεταβολή του ρυθμού σεισμικότητας φαίνεται ακόμα και όταν δε λαμβάνονται υπόψη οι μετασεισμοί που είχαν τα επίκεντρά τους γύρω από το ρήγμα.

Ο σεισμός της Σκύρου το 2001 παρουσιάζει αυξημένο ρυθμό σεισμικότητας της περιοχής. Παρατηρείται ότι από την 1<sup>η</sup> έως και τη 16<sup>η</sup> ημέρα μετά το σεισμό, ο αριθμός των μετασεισμών και για τους μετασεισμούς των οποίων οι εστίες ήταν σε περιοχές θετικών και αρνητικών τιμών τάσεων είναι σχεδόν ίδιος. Από τη 17<sup>η</sup> μέχρι την 30<sup>η</sup> ημέρα οι μετασεισμοί οι εστίες των οποίων ήταν σε περιοχές με θετικές μεταβολές τάσεων φαίνονται περισσότεροι από αυτούς που ήταν σε περιοχές με αρνητικές τιμές τάσεων. Μετά την αφαίρεση των πλησιέστερων στο ρήγμα μετασεισμών, ο αριθμός των μετασεισμών που είχες τις εστίες του σε θέσεις με θετικές τάσεις εμφανίζεται ξεκάθαρα μεγαλύτερος από αυτόν των μετασεισμών που οι εστίες του ήταν σε περιοχές με αρνητικές τάσεις.

Για το σεισμό της Λευκάδας το 2003, ο ρυθμός σεισμικότητας της περιοχής εμφανίζεται αυξημένος. Ο αριθμός των μετασεισμών που είχαν τις εστίες τους σε φωτεινές ζώνες φαίνεται μεγαλύτερος από τον αριθμό των μετασεισμών που είχαν τις εστίες τους σε σκιερές ζώνες. Ακόμα και μετά την αφαίρεση των κοντινότερων στο ρήγμα μετασεισμών οι μετασεισμοί με τις εστίες τους σε θετικές περιοχές τάσεων συνεχίζουν να είναι περισσότεροι.

Ο κύριος σεισμός της σεισμικής ακολουθίας στη ΝΔ Πελοπόννησο το 2008 εμφανίζει αυξημένο ρυθμό σεισμικότητας στη γύρω περιοχή. Παρατηρείται μία παράλληλη αύξηση του αριθμού των μετασεισμών των οποίων οι εστίες ήταν σε θετικές και αρνητικές περιοχές τάσεων, με τους μετασεισμούς που είχαν τις εστίες τους σε σκιερές ζώνες να είναι κατά ελάχιστα περισσότεροι από αυτούς που είχαν τις εστίες τους σε φωτεινές ζώνες. Μετά τη διαγραφή των κοντινότερων στο ρήγμα μετασεισμών οι μετασεισμοί με τις εστίες τους σε αρνητικές περιοχές τάσεων εμφανίζονται περισσότεροι από την 1<sup>η</sup> έως και τη 12<sup>η</sup> ημέρα, ενώ από τη 13<sup>η</sup> μέχρι και την 30<sup>η</sup> ημέρα οι μετασεισμοί οι εστίες των οποίων ήταν σε περιοχές με θετικές τιμές φαίνονται περισσότεροι. Για τον πρώτο μετασεισμό που ακολούθησε, ο αριθμός των μετασεισμών που είχε τις εστίες του σε φωτεινές ζώνες εμφανίζεται μεγαλύτερος από τον αριθμό των μετασεισμών που είχε τις εστίες του σε σκιερές ζώνες, ακόμα και μετά την αφαίρεση των πλησιέστερων στο ρήγμα μετασεισμών. Μία διαφορετική εικόνα παρουσιάζει ο δεύτερος μετασεισμός, στον οποίο οι μετασεισμοί οι εστίες των οποίων ήταν σε θέσεις με αρνητικές τάσεις φαίνονται περισσότεροι από αυτούς που είχαν τις εστίες τους σε περιοχές με θετικές τιμές τάσεων. Ίδιος αριθμός μετασεισμών παρατηρείται από τη 15<sup>η</sup> έως την 20<sup>η</sup> ημέρα μετά το σεισμό. Επειδή η ίδια εικόνα παρουσιάζεται και μετά τη διαγραφή των κοντινότερων στο ρήγμα μετασεισμών, δεν μπορεί να εξηγηθεί σε ικανοποιητικό βαθμό ο αυξημένος ρυθμός σεισμικότητας από τις μεταβολές των τάσεων Coulomb.

Αυξημένο ρυθμό σεισμικότητας παρουσιάζει και η περιοχή της ΒΔ Πελοπόννησο μετά τον σεισμό που έγινε το 2008. Ο αριθμός των μετασεισμών που είχαν τις εστίες τους σε περιοχές με αρνητικές τιμές τάσεων εμφανίζεται μεγαλύτερος από τον αριθμό των μετασεισμών οι εστίες των οποίων ήταν σε περιοχές με θετικές τιμές τάσεων. Όμως, στην περίπτωση που δε λήφθηκαν υπόψη όσοι μετασεισμοί έγιναν γύρω από το ρήγμα οι μετασεισμοί με τις εστίες τους σε περιοχές με θετικές τιμές τάσεων εμφανίζονται περισσότεροι από αυτούς που είχαν τις εστίες τους σε θέσεις με αρνητικές τιμές τάσεων.

Ο σεισμός στη Ν. Κρήτη το 2009 φαίνεται να έχει αυξημένο ρυθμό σεισμικότητας στη γύρω περιοχή. Οι μετασεισμοί των οποίων οι εστίες ήταν σε περιοχές με θετικές τιμές τάσεων εμφανίζονται περισσότεροι από αυτούς που είχαν τις εστίες τους σε περιοχές με αρνητικές τιμές τάσεων. Εξαίρεση αποτελεί το χρονικό διάστημα από την 3<sup>n</sup> έως την 8<sup>n</sup> ημέρα, όπου οι μετασεισμοί των οποίων οι εστίες ήταν σε θέσεις με αρνητικές τιμές τάσεων εμφανίζονται κατά ελάχιστα περισσότεροι από αυτούς που είχαν τις εστίες τους σε περιοχές τιμές τάσεων εμφανίζονται κατά ελάχιστα περισσότεροι από αυτούς που είχαν τις εστίες τους σε περιοχές με θετικές τάσεις. Το ίδιο αποτέλεσμα φαίνεται και στην περίπτωση που δε λαμβάνονται υπόψη οι πλησιέστεροι στο ρήγμα μετασεισμοί, με τη διαφορά ότι εμφανίζεται ίδιος αριθμός μετασεισμών που είχαν τις εστίες τους σε θετικές και αρνητικές περιοχές τάσεων από την 4<sup>n</sup> έως και την 7<sup>n</sup> ημέρα.

Για το σεισμό του ΝΑ Αιγαίου το 2012 εμφανίζεται ο αριθμός των μετασεισμών που είχαν τις εστίες τους σε σκιερές ζώνες να είναι μεγαλύτερος από τον αριθμό των μετασεισμών που είχαν τις εστίες τους σε φωτεινές ζώνες. Η ίδια εικόνα φαίνεται και μετά την αφαίρεση των πλησιέστερων στο ρήγμα μετασεισμών. Επομένως, ο αυξημένος ρυθμός σεισμικότητας της γύρω περιοχής δεν μπορεί να εξηγηθεί σε ικανοποιητικό βαθμό από τη μεταβολή των τάσεων Coulomb.

Στον πρώτο σεισμό της σεισμικής ακολουθίας στη Ν. Κρήτη το 2013 ο αριθμός των μετασεισμών που είχε τις εστίες του σε θετικές περιοχές τάσεων εμφανίζεται αρκετά μεγαλύτερος από τον αριθμό των μετασεισμών που είχε τις εστίες του σε περιοχές με αρνητικές τιμές τάσεων. Η ίδια εικόνα παρουσιάζεται και μετά την αφαίρεση των κοντινότερων στο ρήγμα μετασεισμών. Σε αυτήν την περίπτωση η αύξηση του ρυθμού σεισμικότητας της περιοχής της Ν. Κρήτης φαίνεται να μπορεί να εξηγηθεί από το μοντέλο μεταβολής των τάσεων Coulomb. Το ίδιο αποτέλεσμα εμφανίζει και ο ισχυρός μετασεισμός που ακολούθησε μία ημέρα αργότερα. Συγκεκριμένα, οι περισσότεροι μετασεισμοί που έγιναν είχαν τις εστίες τους σε φωτεινές ζώνες. Στην περίπτωση που δε λαμβάνονται υπόψη όσοι μετασεισμοί είχαν γίνει γύρω από το ρήγμα οι μετασεισμοί που είχαν τις εστίες τους σε σκιερές ζώνες δεν εμφανίζουν ιδιαίτερη μεταβολή, σε αντίθεση με τους μετασεισμούς που είχαν τις εστίες τους σε φωτεινές ζώνες τους σε φωτεινές ζώνες που εμφανίζονται μειωμένοι. Έτσι, από τη μεταβολή των τάσεων Coulomb μπορεί να εξηγηθεί ο αυξημένος ρυθμός σεισμικότητας αυτής της περιοχής μετά τη γένεση του ισχυρού μετασεισμού.

Ο σεισμός δυτικά της Κρήτης το 2013 παρουσιάζει διακυμάνσεις στον αριθμό των μετασεισμών που είχαν τις εστίες τους σε περιοχές με θετικές και αρνητικές τάσεις. Αρχικά, τις πρώτες 14 ημέρες μετά το σεισμό οι μετασεισμοί που είχαν τις εστίες τους σε θέσεις με αρνητικές τιμές τάσεων εμφανίζονται περισσότεροι, ενώ από τη 15<sup>η</sup> μέχρι την 30<sup>η</sup> ημέρα περισσότεροι φαίνονται οι μετασεισμοί των οποίων οι εστίες ήταν σε περιοχές με θετικές τάσεις. Παρόμοιο αποτέλεσμα παρουσιάζεται και στην περίπτωση που δε λαμβάνονται υπόψη οι κοντινότεροι στο ρήγμα μετασεισμοί. Ο αυξημένος ρυθμός σεισμικότητας δυτικά της Κρήτης, μετά τη γένεση του κύριου σεισμού, μπορεί να ερμηνευτεί ικανοποιητικά από το μοντέλο των τάσεων.

Όσο αναφορά τον πρώτο σεισμό της σεισμικής ακολουθίας της Κεφαλονιάς το 2014 φαίνεται ότι τις πρώτες 8 ημέρες μετά τη γένεση του σεισμού ακολούθησε ίδιος αριθμός μετασεισμών των οποίων οι εστίες ήταν σε περιοχές με θετικές και αρνητικές τάσεις. Όμως, από την 9<sup>η</sup> μέχρι την 30<sup>η</sup> ημέρα οι μετασεισμοί που είχαν τις εστίες τους σε θέσεις με αρνητικές τιμές τάσεων έγιναν περισσότεροι. Μετά την αφαίρεση των μετασεισμών που έγιναν κοντά στο ρήγμα, οι μετασεισμοί των οποίων οι εστίες ήταν σε περιοχές με θετικές τιμές τάσεων εμφανίζονται περισσότεροι από αυτούς που είχαν τις εστίες τους σε θέσεις με αρνητικές τάσεις με αποτέλεσμα ο ρυθμός σεισμικότητας στην περιοχή να εμφανίζεται αυξημένος. Μία παρόμοια εικόνα παρουσιάζει και ο δεύτερος σεισμός της Κεφαλονιάς (3/2/2014), με τους μετασεισμούς που είχαν τις εστίες τους σε περιοχές με θετικές μεταβολές τάσεων να εμφανίζονται αυξημένοι, τόσο όταν συμπεριλαμβάνονται όλοι στους υπολογισμούς, όσο και όταν διαγράφονται αυτοί που έγιναν γύρω από το ρήγμα.

Αυξημένο ρυθμό σεισμικότητας εμφανίζει η περιοχή γύρω από την οποία έγινε ο σεισμός του ΒΑ Αιγαίου το 2014. Οι μετασεισμοί που είχαν τις εστίες τους σε περιοχές με θετικές μεταβολές τάσεων ήταν περισσότεροι σε αριθμό σε σχέση με αυτούς που είχαν τις εστίες τους σε αρνητικές περιοχές τάσεων. Το ίδιο αποτέλεσμα φάνηκε και όταν δε συμπεριλήφθηκαν οι πλησιέστεροι στο ρήγμα μετασεισμοί. Τέλος, για το σεισμό που έγινε κοντά στην Κάσο το 2015, παρατηρήθηκε ότι το μεγαλύτερο μέρος των μετασεισμών είχε τις εστίες του σε θετικές περιοχές τάσεων, τόσο όταν λαμβάνονται υπόψη όλοι οι μετασεισμοί όσο και μετά την αφαίρεση των πλησιέστερων στο ρήγμα. Έτσι εξηγείται ο αυξημένος ρυθμός σεισμικότητας κοντά στο νησί της Κάσου.

# 4.2 Συμπεράσματα

Μετά από όλες τις διαδικασίες που περιγράφηκαν παραπάνω μπορούν τα εξαχθούν τα παρακάτω συμπεράσματα:

- Από τη μελέτη της χωρικής κατανομής των προσεισμικών ακολουθιών μπορεί να παρατηρηθεί ότι η προσεισμική δραστηριότητα είναι συνήθως περιορισμένη χωρικά γύρω από το επίκεντρο του επερχόμενου σεισμού, ενώ σε λίγες περιπτώσεις οι προσεισμοί κατανέμονται σε μία ευρύτερη περιοχή μακρύτερα του επικέντρου. Το συμπέρασμα αυτό βρίσκεται σε συμφωνία και με προηγούμενους ερευνητές.
- Από τη μελέτη των μετασεισμικών ακολουθιών παρατηρείται αυξημένη μετασεισμική δραστηριότητα σε όλες τις σεισμικές ακολουθίες τόσο κοντά στο ρήγμα που συνδέεται με τον κύριο σεισμό, όσο και σε γειτονικά ρήγματα.
- Το μοντέλο μεταβολής των τάσεων Coulomb εκτιμά με επιτυχία την πρόκληση σεισμικής δραστηριότητας σε περιοχές με υψηλές τιμές μεταβολής των τάσεων.
- Στις περιοχές με αυξημένες μεταβολές των τάσεων για τα χρονικά διαστήματα των 30 και 60 ημερών μετά τον ισχυρό σεισμό, διαπιστώθηκε αυξημένη σεισμικότητα των περιοχών αυτών.
- Τα ποσοστά των μετασεισμών που είχαν τις εστίες τους σε περιοχές με θετικές μεταβολές των τάσεων είναι μεγαλύτερα από τα ποσοστά των μετασεισμών που είχαν τις εστίες τους σε περιοχές με αρνητικές μεταβολές τάσεων.

# Βιβλιογραφία

Anderson, G. & Johnson, H. (1999). A new statistical test for static stress triggering: Application to the 1987 Superstition Hills earthquake sequence, Journal of Geophysical Research, 104, 20153-20168.

Anderson, H. and J. Jackson (1987). Active tectonics of the Adriatic Region, Geophysical Journal Research, 91, 937-983.

Bülent D., T. Serkan I., Karakas A., Kalafat D. (2015). Seismotectonic content by the source parameters of the 10 June 2012 Ölüdeniz – Fethiye (Dodecanese Islands)  $M_w$  6.1 earthquake and aftershocks (southwestern Turkey), Geodynamica Acta, doi: 10.1007/s40328-015-0106-8.

Byerlee, J. D. (1967). Frictional characteristics of granite under high confining pressure, Journal of Geophysical Research, 72, 3639-3648.

Beeler, N. M, Simpson, R. W., Hickman, S. H. and Lockner, D. A. (2000). Pore fluid pressure, apparent friction and Coulomb failure, Journal of Geophysical Research, 105, 25, 533-25, 542.

Benetatos C., Kiratzi A., Roumelioti Z., Stavrakakis G., Drakatos G., Latoussakis I. (2005). The 14 August 2003 Lefkada Island (Greece) earthquake: Focal mechanisms of the mainshock and of the aftershock sequence, Journal of Seismology, 9, 171-190.

Γαλανόπουλος, Α. Γ. (1955). Η σεισμική δράσις εν Ελλάδι από του 1950 μέχρι του 1953, Ακαδημία Αθηνών, 30, 38-49.

Γκαρλαούνη Χ. (2007). Η Εξέλιξη του Πεδίου των Τάσεων στην Περιοχή Sichuan – Yunnan της Κίνας. Διατριβή Ειδίκευσης. Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών τμήματος Γεωλογίας, Ειδίκευση Γεωφυσική, Α.Π.Θ. Carver, D. and G. A. Bollinger (1981). Aftershocks of the June 20, 1978, Greece earthquake: a multimode faulting sequence, Tectonophysics, 73, 343-363.

Carver, D. and R. Henrisey (1978). Preliminary report on the aftershocks of the June 20, 1978 Thessaloniki, Greece, earthquake, U. S. Geological Survey Open – file Rep., 78-1099, 1-11.

Comninakis, P. E. and B. C. Papazachos (1979). Properties of the main seismic zone in Northern Greece and surrounding area, Intern. Res. Conf. Intra – Continental Earthquakes, September 17-21, Yugoslavia, 173-188.

Comninakis, P. E. (1978), Properties of the 1974 – 1975 aftershock sequence in the Boeotia region, Monthly Bulletin Institute National Observatory of Athens, 1-15.

Comninakis, P., J. Drakopoulos, G. Moumoulidis and Papazachos, B. (1968). Foreshock and aftershock sequences of the Cremasta earthquake and their relation to the water – loading of the Cremasta artificial lake, Annali Di Geofisica., 21, 39-71.

Deng, J. and Sykes, L. R. (1997). Evolution of the stress field in southern California and triggering of moderate—size earthquakes: A 200—year perspective, Journal of Geophysical Research, 102, 9859–9886.

Drakatos, G., D. Papanastassiou, N. Voulgaris and G. Stavrakakis (1998). Observations on the 3 – D crustal velocity structure in the Kozani – Grevena (NW Greece) area, Journal Geodynamics, 26, 341-351.

Δρακόπουλος, Ι. Κ. (1968). Χαρακτηριστικαί παράμετροι των προ- και μετασεισμικών σειρών εις τον Ελληνικόν χώρον, Διδακτορική Διατριβή, Πανεπιστήμιο Αθηνών, 128.

Drakopoulos, j. C. and N. D. Delibasis (1973). Volcanic – type micro – earthquake activity in Melos, Greece, Annali Di Geofisica, 26, 131-153.

Drakopoulos, J. C. and A. C. Ekonomides (1972). Aftershocks of February 19, 1968 earthquake in Northern Aegean sea and related problems, Pure and Applied Geophysics, 95, 100-115.

Drakopoulos, J.C. and Srivastava, H.N. (1970). Investigations of the aftershocks of July 4, 1968 earthquake in Epidavros. Annali Di Geofisica, 23, 1-20.

Erikson, L., 1986. User's manual for DIS3D: A three–dimensional dislocation program with applications to faulting in the Earth, Master Thesis, Stanford University, Stanford, California, 167.

Evangelidis C. (2014). Imaging supershear rupture for the 2014  $M_w$  6.9 Northern Aegean earthquake by backprojection of strong motion waveforms, Geophysical Research Letters, 2015, doi: 10.1002/2014GL062513.

Fintel, M. (1978). Report of the earthquakes of May 24 and June 20 1978, Salonika, Greece, Journal of American Concrete Institute.

Felzer, K. R. and E. Brodsky (2005). Testing the stress shadow hypothesis, Journal of Geophysical Research, 110, B05S09, doi: 10.1029/2004JB003277.

Feng L., Newman A., Farmer G., Psimoulis P. and Stiros S. (2010). Energetic rupture, coseismic and post-seismic response of the 2008  $M_w$  6.4 Achaia – Elia Earthquake in northwestern Peloponnese, Greece: an indicator of an immature transform fault zone, Geophysical Journal International, 183, 103-110, doi: 10.1111/j.1365-246X.2010.04747.x

Görgün E., Zang A., Kalafat D., Kekovali K. (2014). The 10 June 2012 Fethiye  $M_w 6.0$  aftershock sequence and its relation to the 24 – 25 April 1957  $M_s 6.9 - 7.1$  earthquake in SW Anatolia, Turkey, Journal of Asian Earth Science 93, 102-112.

Görgün E., Görgün B. (2015). Seismicity of the 24 May 2014  $M_w$  7.0 Aegean Sea earthquake sequence along the North Aegean Trough, Journal of Asian Earth Science 111, 459-469.

Hauksson E., Jones L. M., Hutton K., and Eberhart-Philips D. (1993). The 1992 Landers earthquake sequence: seismological observations, Journal of Geophysical Research, 98, 19835-19858.

Hardebeck, J. L., Nazareth, J. J. & Hauksson, E. (1998). The static stress change triggering model: Constraints from two southern California aftershocks sequences, Journal Geophysical Research 103, 24427-24437.

Harris, R. and Simpson, R. (1998). Suppression of Large Earthquakes by Stress Shadows: A Comparison of Coulomb and Rate – and – State Failure, Journal of Geophysical Research, 103, 24439–24451.

Harris, R.A. (1998). Introduction to special section: Stress triggers, stress shadows and implications for seismic hazard, Journal of Geophysical Research, 103, 24, 347-24, 358.

Hatzfeld, D., J. Nord, A. Paul, R. Guiguet, P. Briole, J. C. Ruegg, R. Cattin, R. Armijo, B. Meyer, A. Hubert, P. Bernard, K. Makropoulos, V. Karakostas, Ch. Papaioannou, D. Papanastasiou and G. Veis (1995). The Kozani – Grevena (Greece) earthquake of May 13, 1995, Ms=6.6. Preliminary results of a field multidisciplinary survey, Seismological Research Letter, 66, 61-70.

Hatzfeld, D., V. Karakostas, M. Ziazia, G. Selvaggi, S. Levorgne, C. Berge, R. Guiguet, A. Paul, P. Voidomatis, D. Diagourtas, I. Kassaras, I. Koutsikos, K. Makropoulos, R. Azzara, M. Di Bonna, S. Bacceschi, P. Bernard and C. Papaioannou (1997). The Kozani – Grevena (Greece) earthquake of 13 May 1995 revisited from a detailed seismological study, Bulletin of the Seismological Society of America, 87, 463-473.

Hatzfeld, D., V. Karakostas, M. Ziazia, G. Selvaggi, S. Leborgne, C. Berge and K. Makropoulos (1998), The Kozani – Grevena earthquake of May 13, 1995, a seismological study, Journal Geodynamics, 26, 245-254.

Karakostas V. G., Papadimitriou E. E., Karakaisis G. F., Papazachos C. B., Scordilis E. M., Vargemezis G. and Aidona E. (2003). The Skyros, Northern Aegean, Greece, earthquake sequence: off – fault aftershocks, tectonic implications and seismicity triggering, Geophysical Research Letters, 2003, doi: 10.1029/2002GL015814.

Karakostas V. G., Papadimitriou E. E. and Papazachos C. B. (2004). Properties of the 2003 Lefkada, Ionian Islands, Greece, Earthquake Seismic Sequence and Seismicity Triggering, Bulletin of the Seismological Society of America, 1976-1981.

Karakostas V., Papadimitriou E., Mesimeri M., Gkarlaouni C. and Paradisopoulou P. (2015). The 2014 Kefalonia Doublet ( $M_w6.1$  and  $M_w6.0$ ), Central Ionian Islands, Greece: Seismotectonic Implications along the Kefalonia Transform Fault Zone, Geophysica Acta, 1-16, doi: 10.2478/s11600-014-0227-4.

Karakostas, V. G., G. F. Karakaisis and E. E. Papadimitriou (1989). Properties of the November 1985 Drama (northern Greece) seismic sequence, Sci. Ann. Fac. Phys. Math., 7.

McKenzie, D. P. (1970). The plate tectonics of the Mediterranean region, Nature, 226, 271–299.

King, G., Stein, R. and Lin, J. (1994). Static stress changes and the triggering of earthquakes, Bulletin of Seismological Society of America, 84, 935-953.

King, G. C. P. and Cocco, M. (2001). Fault interaction by elastic stress changes: New clues from earthquake sequences, Advances in Geophysics, 44, 1-38.

King G.C.P., and Bowman, D.D., (2003), "The evolution of regional seismicity between large earthquakes", Journal of Geophysical Research 108:B2, doi:10.1029/2001JB000783.

Kiratzi A. (2016). The 16 April 2015 Mw 6.1 earthquake sequence near Kasos island at the Eastern Hellenic subduction zone, Bulletin of the Geological Society of Greece, XLVIII, Proceedings of the 14th International Conference, Thessaloniki, May 2016

Kiratzi A., Aktar M. and Svigkas N. (2013). The 10 June 2012  $M_w$  6.0 earthquake sequence in the easternmost end of the Hellenic Arc, Bulletin of the Geological Society of Greece, XLVII, Proceedings of the 13<sup>th</sup> International Congress, Chania, September, 2013.

Kiratzi, A. A. and Ch. A. Langston (1991). Moment tensor inversion of the January 17, 1983 Kefalinia event, Ionian islands (Greece), Geophysical Journal International, 105, 529-535.

Kirtatzi, A., Papadimitriou, E. E. and Papazachos, B. C. (1987). A microearthquake survey in the Steno dam site in northwestern Greece, Pure and Appl. Geophys., 123, 27-41.

Konstantinou K. I, Melis N. S., Lee S. –J., Evangelidis C. P. and Boukouras K. (2009). Rupture Process and Aftershocks Relocation of the 8 June 2008  $M_w$  6.4 Earthquake in Northwest Peloponnese, Western Greece, Bulletin of Seismological Society of America, 3374-3389, doi: 10.1785/0120080301.

Konstantinou K. I, Evangelidis C. P. and Melis N. S. (2011). The 8 June 2008  $M_w$  6.4 Earthquake in Northwest Peloponnese, Western Greece: A Case of Fault Reactivation in an Overpressured Lower Crust, Bulletin of the Seismological Society of America, 101, 438-445, doi: 10.1758/0120100074.

Koukouvelas I. K., Kokkalas S. and Xypolias P. (2010). Surface deformation during the  $M_w$  6.4 (8 June 2008) Movri Mountain earthquake in the Peloponnese, and its

implications for the seismotectonics of western Greece, International Geology Review, 52:2-3, 249-268, doi: 10.1080/00206810802674329.

Kulhanek, O. and K. Meyer (1979). Source parameters of the Volvi – Langadhas earthquake of June 20, 1978 deduced from body – wave spectra at stations Uppsala and Kiruna, Bulletin of Seismological Society of America, 69, 1289-1294.

Kulhanek, O. and K. Meyer (1978). Contribution to the study of Thessaloniki earthquake of 20 June 1978, Seismological Institute Uppsala, Field Rep., 1-27.

Lasocki S., Karakostas V. G., Papadimitriou E. E. (2009). Assessing the role of stress transfer on aftershock locations, Journal of Geophysical Research, 114, doi: 10.1029/2008JB006022.

Leptokaropoulos K. M., Karakostas V. G., Papadimitriou E. E., Adamaki A. K., Tan O. and Inan S. (2013). A Homogeneous Earthquake for Western Turkey and Magnitude of Completeness Determination, Bulletin of the Seismological Society of America, 103, 2739-2751, doi: 10.1758/0120120174.

Lin, J. and Stein, R. S. (2004). Stress triggering in thrust and subduction earthquakes and stress interaction between the southern San Andreas and nearby thrust and strike slip faults, Journal of Geophysical Research, 109, B02303, doi:10.1029/2003JB002607.

Maley, R. P., C. G. Bufe, R. F. Yerkes, D. L. Carver and R. Henriset (1980). The May – July 1978 earthquake sequence near Thessaloniki, Greece, J. S. Geological Survey, Open – file Rep., 80-937, 1-36.

Margaris B., Athanasopoulos G., Mylonakis G., Papaioannou C., Klimis N., Theodulidis N., Savvaidis A., Efthymiadou V. and Stewart J. P. (2010). The 8 June 2008  $M_w$  6.5 Achaia-Elia, Greece Earthquake: Source Characteristics, Ground Motions and Ground Failure, Earthquake Spectra, 2010, 399-424.

Marsan, D. (2003). Triggering of seismicity at short timescales following Californian earthquakes, Journal of Geophysical Research, 108(B5), 2266, doi: 10.1029/2002JB001946.

Moshou A., Papadimitriou P. and Makropoulos K. (2010). Moment tensor determination using a new waveform inversion technique, Bulletin of the Geological Society of Greece, Proceedings of the 12th International Congress, Patra, May, 2010.

McKenzie, D.P. (1972). Active tectonics of the Mediterranean region, Journal of Geophysical Research, 30, 109-185.

McKenzie, D.P. (1972). Active tectonics of the Alpine-Himalayan belt: The Aegean sea and surrounding regions, Journal of Geophysical Research, 55, 217-254.

Papadopoulos G. A., Karastathis V., Kontoes C., Charalampakis M., Fokaefs A., Papoutsis I. (2010). Crustal deformation with east Mediterranean strike-slip earthquakes: The 8 June 2008 Movri (NW Peloponnese), Greece, earthquake (M<sub>w</sub> 6.4), Tectonophysics 492, 201 212.

Papadimitriou E., Karakostas V., Mesimeri M., Vallianatos F. (2015). The  $M_w6.7$  12 October 2013 western Hellenic Arc main shock and its aftershock sequence: implications for the slab properties, International Journal of Earth Science, doi: 10.1007/s00531-016-1294-3.

Papadimitriou, E.E. and Sykes, L.R. (2001). Evolution of the stress field in the northern Aegean Sea (Greece), Geophysics Journal International, 146, 747–759.

Papadimitriou, E. E. (1993). Focal mechanism along the convex side of the Hellenic Arc and its tectonic significance, Bullettino Di Geofisica Teorrica Ed Applicata, 35, 401-426.

Papanastassiou, D., G. Drakatos, N. Voulgaris and G. Stavrakakis (1998). The May 13, 1995, Kozani – Grvena (NW Greece) earthquake: source study and its tectonic implications, Journal Geodynamics, 26, 233-244.

Papazachos B. C., Scordilis E. M., Panagiotopoulos D. G., Papazachos C. B. and Karakaisis G. F. (2004). Global relations between seismic fault parameters and moment magnitude of earthquakes, Bulletin of the Geological Society of Greece, XXXVI, Proceedings of the 10<sup>th</sup> International Congress, Thessaloniki, April, 2004.

Παπαζάχος, Β. και Παπαζάχου, Κ. (2002). Οι σεισμοί της Ελλάδας, Εκδόσεις Ζήτη.

Παπαζάχος, Β. Κ. και Δρακόπουλος Ι. Κ. (1992). Σεισμοί και μέτρα προστασίας, Εκδόσεις Ζήτη.

Papazachos, B. C., V. G. Karakostas, A. A. Kiratzi, E. E. Papadimitriou, C. B. Papazachos (1998a). Basic properties of the faulting which caused the 1995 Kozani – Grevena seismic sequence, Journal Geodynamics, 26, 217-231.

Papazachos, B. C., D. G. Panagiotopoulos, E. M. Scordilis, G. F. Karakaisis, Ch. A. Papaioannou, B. G. Karakostas, E. E. Papadimitriou, A. A. Kiratzi, P. M. Hatzidimitriou, G. N. Leventakis, Ph. S. Voidomatis, K. J. Peftitselis, A. Savvaidis and Th. M. Tsapanos (1996). Focal properties of the 13 May 1995 large (Ms=6.6) earthquake in the Kozani area (north Greece), XV Carpatho – Balkan Congress, Athens, 17-20 September, 1995, 96-106.

Papazachos, B. C., D. G. Panagiotopoulos, E. M. Scordilis, G. F. Karakaisis, Ch. A. Papaioannou, B. G. Karakostas, E. E. Papadimitriou, A. A. Kiratzi, P. M. Hatzidimitriou, G. N. Leventakis, Ph. S. Voidomatis, K. J. Peftitselis and Th. M. Tsapanos (1995). The physical process of the occurrence of the Kozani - Grevena mainshock in 13th May 1995 (Ms=6.6) and its seismic sequence, Geotechniki Enimerosi, 73, 54-64, 1995 (in Greek).

Papazachos, B. C., A. A. Kiratzi, Ph. S. Voidomatis and Ch. A. Papaioannou (1984a). A study of the December 1981 – January 1982 seismic activity in northern Aegean Sea, Bullettino Di Geofisica Teorrica Ed Applicata, 26, 101-113.

Papazachos, B. C. and P. E. Comninakis (1982). Long – term earthquake prediction in the Hellenic trench – arc system, Tectonophysics, 86, 3-16.

Papazachos, B.C. (1981). The time variation of the difference in magnitude between the main shock and its largest aftershock as long-term premonitory pattern of strong earthquakes. Quat. Geod.,2,111-117.

Papazachos, B. C. (1974b), On the relation between certain artificial lakes and the associated seismic sequences, Engineering Geology, 8, 39-48.

Papazachos B. C. (1973). The time distribution of the reservoir associated foreshocks and its importance to the prediction of the principal shock, Bulletin of Seismological Society of America, 63, 1973-1978.

Papazachos, B. C. (1971). Aftershock activity and aftershock risk in the area of Greece, Annali Di Geofisica, 24, 439-456.

Papazachos, B. C. and Delibasis, N. D. (1969). Tectonic stress field and seismic faulting in the area of Greece, Tectonophysics, 7, 231-255.

Παραδεισοπούλου Π. (2009). Συμβολή στη μελέτη της σεισμικότητας του Ελληνικού χώρου σε σύνδεση με τις μεταβολές του πεδίου των τάσεων, Διδακτορική Διατριβή, Τομέα Γεωφυσικής, Τμήμα Γεωλογίας, Α.Π.Θ.

Parsons, T., Stein, R. S., Simpson, R. W. & Reasenberg, P. A. Stress sensitivity of fault seismicity: A comparison between limited-offset oblique and major strike-slip faults (1999). Journal Geophysical Research, 104, 20183-120202.

Parsons, T. (2005). Significance of stress transfer in time-dependent earthquake probability calculations, Journal Geophysical Research, 110, doi: 10.1029/2004JB003190.

Prochazkova, D. (1970). Analysis of methods of calculation the magnitude – frequency relation, Travaux de l'Institut Geophysique de l'Academie Tchecoslovaque des Sciences, 325, 229-256.

Ranalli, G. (1969). A statistical study of aftershock sequences, Annali Di Geofisica, 22, 359-397.

Reasenberg, P.A & Simpson, R. W. (1992). Response of the regional seismicity to the static stress change produced by the Loma Prieta earthquake, Science, 255, 1687-1690.

Rhoades, D. A, Papadimitriou, E.E., Karakostas, V.G., Console, R., and Murru, M. (2010). Correlation of Static Stress Changes and Earthquake Occurrence in the North Aegean Region, Pure and Applied. Geophysics, doi: 10.1007/s00024-010-0092-2.

Roumelioti, Z., Benetatos, C., and Kiratzi, A. (2009). The 14 February 2008 earthquake (M6.7) sequence offshore south Peloponnese (Greece): Source models of the three strongest events, Tectonophysics, 272-284.

Rice, J. and Cleary, M. (1976). Some basic stress diffusion solutions for fluid saturated elastic porous media with compressible constituents, Reviews of Geophysics and Space physics, 14, 227-241.

Ritsema, A. (1974). The earthquake mechanics of the Balkan region. Koninklijk Nederlands Meteorologish Instituut, De Bilt, 74-4.

Scholz, C. (2002). The mechanics of earthquakes and faulting, Cambridge University Press, Cambridge, 439.

Scordilis, E. M., G. F. Karakaisis, B. G. Karakostas, D. G. Panagiotopoulos, P. E. Comninakis and B. C. Papazachos (1985). Evidence for transform faulting in the Ionian Sea. The Cephalonia island earthquake sequence of 1983, Pure and Applied Geophysics, 123, 388-397.

Segou M., Ellsworth W. L. and Parsons T. (2014). Stress Transfer by the 2008  $M_w$  6.4 Achaia Earthquake to the Western Corinth Gulf and Its Relation with the 2010 Efpalio Sequence, Central Greece, Bulletin of Seismological Society of America, 1723-1734, doi: 10.1785/0120130142.

Seeber, L. & Armbruster, J. G. (2000). Earthquakes as beacons of stress change, Nature 407, 69-72, doi: 10.1038/35024055.

Simpson, R. W. & Reasenberg, P.A. (1994). The Loma Prieta, California, Earthquake of October 17, 1989 – Tectonic Processes and Models, Geological Survey, F55-F89.

Sokos E., Kiratzi A., Gallovic F., Zahradnik J., Serpetsidaki A., Plicka V., Jansky J., Kostelecky J., Tselentis G.-A. (2015). Rupture process of the 2014 Cephalonia, Greece, earthquake doublet (Mw6) as inferred from regional and local seismic data, Tectonophysics, 656, 131-141.

Soufleris, C., J. A. Jackson, G. C. P. King, C. P. Spencer and C. H. Scholz (1982). The 1978 earthquake sequence near Thessaloniki (northern Greece), Geophysical Journal International, 68, 429-458.

Soufleris, C. and G. S. Stewart (1981). A source study of the Thessaloniki (northern Greece) 1978 earthquake sequence, Geophysical Journal International, 67, 343-358.

Stein R.S. (1999). The role of stress transfer in earthquake occurrence, Nature 402, 605-609, doi: 10.1038/45144.

Toda, S., R. S. Stein, K.Richards-Dinger and S.B. Bozkurt (2005) Forecasting the evolution of seismicity in southern California: Animations built on earthquake stress transfer, Journal of Geophysical Research, 110, B05S16, doi: 10.1029/2004JB003415.

Tsakiroudi E. (2015). Source Parameters of the 24 May 2014 North Aegean Earthquake. Submitted to the School of Geology within the framework of the Postgraduate Program "Applied and Environmental Geology", Specialization: Geophysics, AUTH.

Wells D. L. and Coopersmith K. J. (1994). New Empirical Relationships among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area and Surface Displacement, Bulletin of Seismological Society of America, pp. 974-1002.

Yavuz E., Budakoglu E. (2015). 10 June 2012 offshore of Fethiye Dead sea earthquake and aftershock activity, 5<sup>th</sup> International earthquake symposium, Kocaeli-Turkey, 10-12 June 2015.