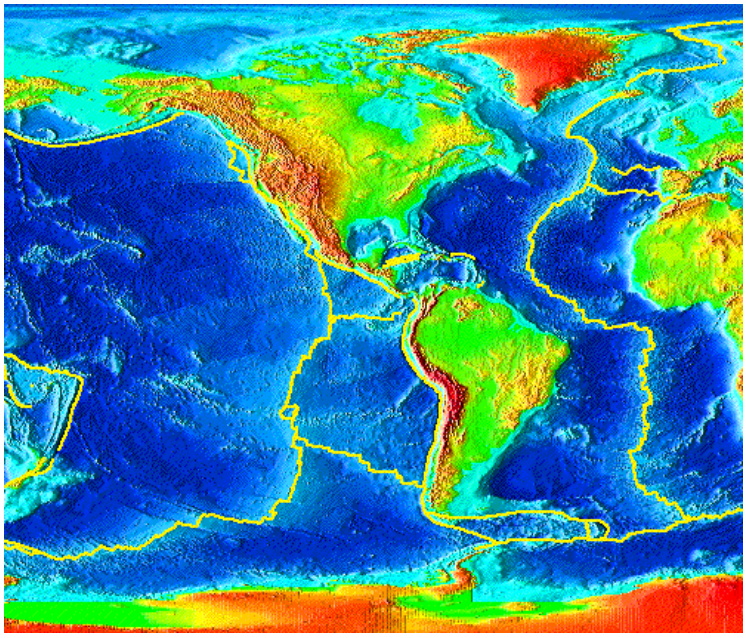
ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΔΕΛΛΙΟΥ ΜΑΡΙΑ
ΝΙΚΟΛΑΟΥ ΡΟΔΟΥΛΑ

«ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΠΡΟΣΦΑΤΩΝ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΑΚΟΛΟΥΘΙΩΝ ΤΩΝ ΠΕΡΙΟΧΩΝ ΚΑΛΙΦΟΡΝΙΑ ΚΑΙ ΑΛΑΣΚΑ»



ΕΠΙΒΛΕΠΟΝΤΕΣ ΚΑΘΗΓΗΤΕΣ: ΓΙΩΡΓΟΣ ΚΑΡΑΚΑΪΣΗΣ
ΜΑΝΩΛΗΣ ΣΚΟΡΔΥΛΗΣ

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ 2006

Βιβλιοθήκη "Θεόφραστος" - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

Η εικόνα του εξωφύλλου προέρχεται από την ιστοσελίδα
http://geology.about.com/library/bl/maps/blplateswtopowhem.htm

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΡΩΤΟ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ 3
1.1 Το Ρήγμα Του Αγίου Ανδρέα 3
1.2 Μελέτη Σεισμικών Ακολουθιών..... 9
1.2.1. Χρονική κατανομή σεισμών..... 9
1.2.2. Χωρική Κατανομή..... 10
1.2.3. Χωροχρονική Κατανομή..... 13
1.2.4. Κατά Μέγεθος Κατανομή..... 13

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΥΤΕΡΟ

LANDERS 15

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΡΙΤΟ

JOSHUA TREE..... 19

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΕΤΑΡΤΟ

DENALI..... 21

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΕΜΠΤΟ

MENDOCINO..... 29

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΚΤΟ

Ανάλυση Σεισμών..... 36
6.1 LANDERS..... 38
6.1.1. Χρονική Κατανομή..... 38
6.1.2. Χωρική Κατανομή..... 39
6.1.3. Χωροχρονική Κατανομή..... 40
6.1.4. Κατά Μέγεθος Κατανομή..... 41
6.1.5. Μεταβολή Μέσου Μεγέθους-Παραμέτρου b..... 42
6.2 JOSHUA TREE..... 43
6.2.1. Χωρική Κατανομή..... 43
6.2.2. Χωροχρονική Κατανομή..... 44
6.2.3. Μεταβολή Μέσου Μεγέθους-Παραμέτρου b..... 45
6.3 DENALI..... 46
6.3.1. Χρονική Κατανομή..... 46
α)Προσεισμοί..... 46
β)Μετασεισμοί 47
6.3.2. Χωρική Κατανομή..... 48
6.3.3. Χωροχρονική Κατανομή..... 49
α)Προσεισμοί..... 49
β)Μετασεισμοί..... 50

6.3.4. Κατά Μέγεθος Κατανομή..... 51
α)Προσεισμοί..... 51
β)Μετασεισμοί..... 52
6.3.5. Μεταβολή Μέσου Μεγέθους-Παραμέτρου b..... 53
6.4 MENDOCINO..... 54
6.4.1. Χρονική Κατανομή..... 54
6.4.2. Χωρική Κατανομή..... 55
6.4.3. Χωροχρονική Κατανομή..... 56
6.4.4. Κατά Μέγεθος Κατανομή..... 57
6.4.5. Μεταβολή Μέσου Μεγέθους-Παραμέτρου b..... 58
ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΒΔΟΜΟ
Συμπεράσματα..... 59
Βιβλιογραφία..... 61
Ιστοσελίδες..... 64

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

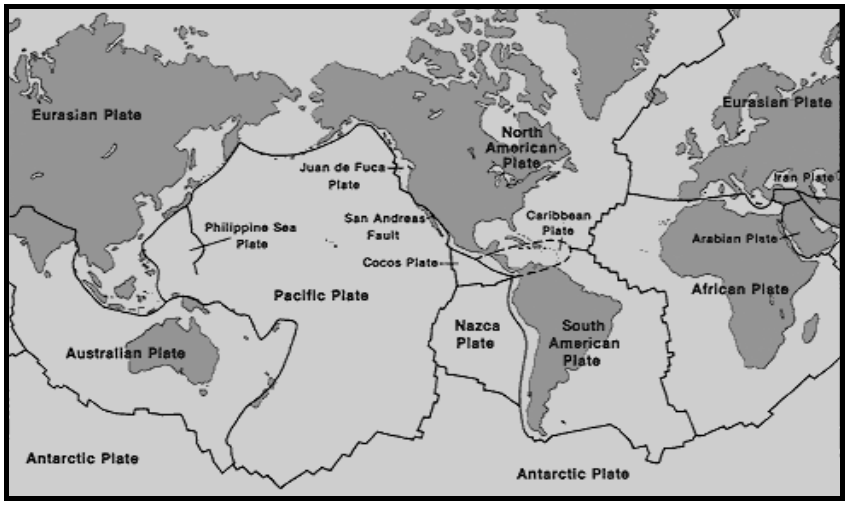
ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σκοπός της εργασίας αυτής είναι η μελέτη των ιδιοτήτων τριών κύριων σεισμών που έγιναν στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής. Η πρώτη ακολουθία που μελετήσαμε αφορά τον μεγάλο σεισμό του 1992, που σημειώθηκε στην περιοχή του Landers και είχε μέγεθος 7.3. Ο επόμενος σεισμός που μελετήσαμε έγινε στην περιοχή του Mendocino το 1994 και είχε μέγεθος 6.9. Τέλος μελετήσαμε τη μετασεισμική ακολουθία του σεισμού μεγέθους 7.9 που έγινε το 2002 στην περιοχή Denali, στην Αλάσκα. Τα ρήγματα που έδωσαν τους δύο πρώτους σεισμούς συνδέονται άμεσα με το μεγάλο ρήγμα της περιοχής, το ρήγμα του Αγίου Ανδρέα.

Ευχαριστούμε θερμά για την πολύτιμη βοήθειά τους τους καθηγητές μας κ. Μανώλη Σκορδύλη και κ. Γιώργο Καρακαϊση.

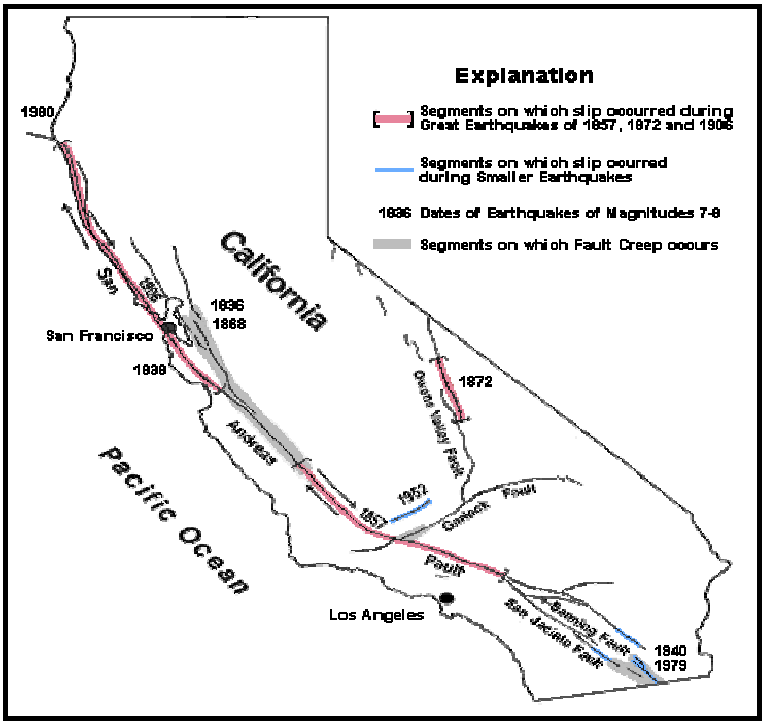
1.1 Το ρήγμα του Αγίου Ανδρέα

Η παρουσία *του ρήγματος του Αγίου Ανδρέα* έγινε γνωστή με ένα δραματικό τρόπο στις 18 Απριλίου 1906, όταν μία ξαφνική μετατόπιση κατά μήκος του ρήγματος έδωσε το μεγάλο σεισμό του San Francisco, συνέπεια του οποίου αποτέλεσε και η μεγάλη πυρκαγιά που προκάλεσε ανυπολόγιστες καταστροφές στην πόλη. Ωστόσο ο σεισμός αυτός ήταν μόνο ένας από τους πολλούς που προκλήθηκαν, σε όλη τη διάρκεια ζωής του ρήγματος για περίπου 15 – 20 εκατομμύρια χρόνια.



Σχήμα 1.1*– Συνοπτικός χάρτης των λιθοσφαιρικών πλακών του γήινου φλοιού. (http://pubs.usgs.gov/gip/earthq3/what.html)*

Οι επιστήμονες ανακάλυψαν ότι ο γήινος φλοιός αποτελείται από μια σειρά λιθοσφαιρικών πλακών (σχ. 1.1) οι οποίες μετακινούνται πολύ αργά για εκατομμύρια χρόνια. Δύο από αυτές τις κινούμενες πλάκες συναντιούνται στη δυτική πλευρά της Βόρειας Αμερικής. Το όριο μεταξύ αυτών των δύο πλακών αποτελεί το ρήγμα του Αγίου Ανδρέα. Η Ειρηνική πλάκα (στα δυτικά) κινείται βορειοδυτικά σε σχέση με τη βόρεια Αμερικανική πλάκα (στα ανατολικά), προκαλώντας σεισμούς κατά μήκος του ρήγματος. Ο Άγιος Ανδρέας είναι το 'κυρίαρχο' ρήγμα ενός περίπλοκου δικτύου ρηγμάτων που κόβει τα πετρώματα κατά μήκος της ακτής της California. Ολόκληρο το σύστημα του ρήγματος του Αγίου Ανδρέα έχει μήκος πάνω από 1250 Km και εκτείνεται σε βάθος τουλάχιστον 15 χιλιομέτρων μέσα στη γη. Συγκεκριμένα, το ρήγμα είναι μια πολύπλοκη ζώνη συνθλιμμένων και σπασμένων πετρωμάτων που καλύπτει μια περιοχή με πλάτος που κυμαίνεται από μερικές εκατοντάδες μέτρα έως 1,5 Km . Πολλά μικρότερα ρήγματα διακλαδίζονται από και προς το ρήγμα του Αγίου Ανδρέα. Σχεδόν κάθε διακλάδωση που βρίσκεται μέσα στη ζώνη, αποκαλύπτει μια μυριάδα από μικρές διαρρήξεις.

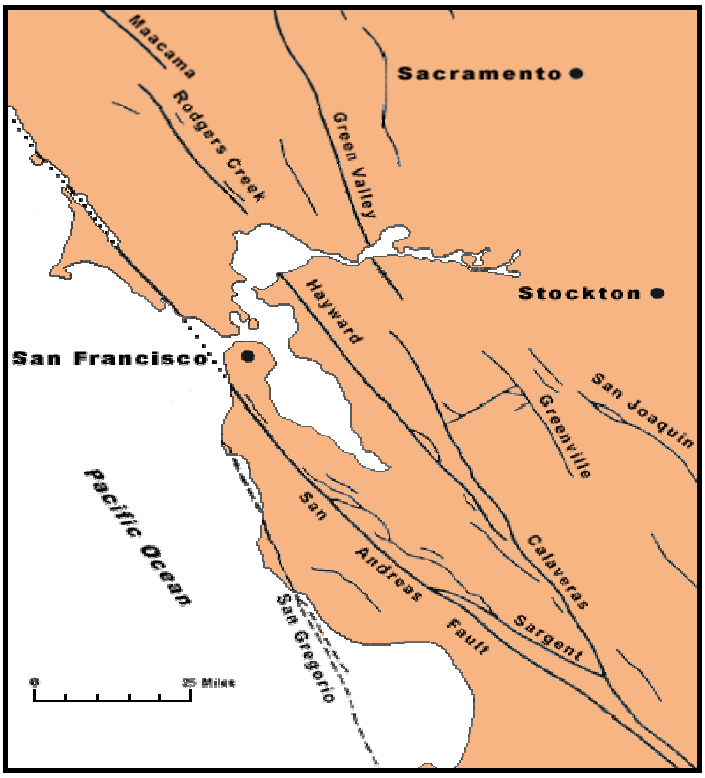


Σχήμα 1.2.- *Το ρήγμα του Αγίου Ανδρέα και άλλα μεγάλα ρήγματα στην California. (http://pubs.usgs.gov/gip/earthq3/where.html).*

Το ρήγμα του Αγίου Ανδρέα (σχ. 1.2) σχηματίζει μία συνεχή στενή ρωγμή στο φλοιό της γης που εκτείνεται από τη βόρεια California

νοτιότερα στο Cajon Pass κοντά στο San Fernando. Νοτιοανατολικά από το Cajon Pass πολλά διακλαδιζόμενα ρήγματα, συμπεριλαμβανομένων των ρηγμάτων του San Jacinto και Banning, προκαλούνται από τις κινήσεις των πλακών του φλοιού. Σε αυτή την έκταση της ζώνης ρηγμάτωσης, το όνομα 'Άγιος Ανδρέας' αναφέρεται γενικά στις διακλαδώσεις που βρίσκονται στα βορειότερα.

Το πολύπλοκο δίκτυο ρηγμάτων που αποτελούν το ρήγμα του Αγίου Ανδρέα στην κεντρική California φαίνεται στο σχήμα 1.3. Από τον αέρα,



Σχήμα 1.3.- *Οι διακλαδώσεις του συστήματος ρήγματος του Αγίου Ανδρέα στην κεντρική California. (από τον χάρτη του Darrell G. Herd, USGS). (http://pubs.usgs.gov/gip/earthq3/where2.html)*

είναι εντυπωσιακή η γραμμική συμφωνία των λιμνών, των όρμων και των κοιλάδων σε αυτό το βύθισμα. Ωστόσο, όταν η παρατήρηση γίνεται από το έδαφος, τα στοιχεία του ρήγματος είναι πιο διακριτικά. Για παράδειγμα, πολλοί άνθρωποι οδηγώντας κοντά στο Crystal Springs Reservoir, κοντά στο San Francisco ή κατά μήκος του Tomales Bay, ή διαμέσου του Cajon ή του Tejon Passes, δεν μπορούν να αντιληφθούν ότι βρίσκονται μέσα στη ζώνη του ρήγματος του Αγίου Ανδρέα. Από το έδαφος το ρήγμα μπορεί να αναγνωριστεί με λεπτομερή έλεγχο του ανάγλυφου. Η ζώνη ρηγμάτωσης φανερώνεται από κάποιους χαρακτηριστικούς επιφανειακούς σχηματισμούς όπως είναι οι πλαγιές,

οι στενές κορυφογραμμές και οι μικρές λίμνες που δημιουργήθηκαν κατά μήκος της ζώνης. Όταν οι κοίτες των ποταμών συναντούν το ρήγμα (Carrizo Plain, κεντρική California), παρουσιάζουν μετατόπιση προς τα δεξιά, ακολουθώντας τη δεξιόστροφη διάρρηξη του ρήγματος (σχ. 1.4).

Σχήμα 1.4. *– Κοίτη ποταμού στο ρήγμα του Αγίου Ανδρέα, Carrizo Plain, κεντρική California. (http://pubs.usgs.gov/gip/earthq3/surface.html)*

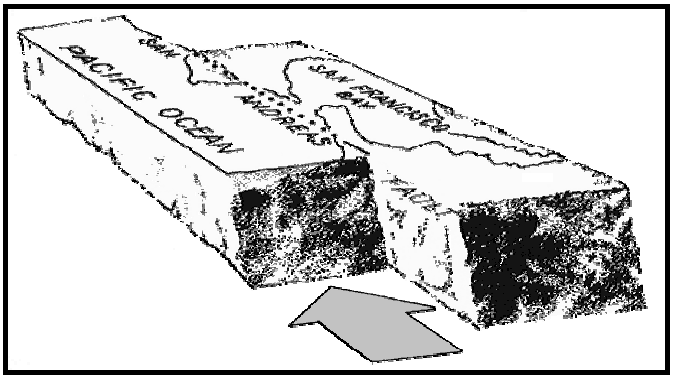
Κατά τη διάρκεια του σεισμού του 1906 στο San Francisco, δρόμοι, φράχτες και σειρές δέντρων και θάμνων κατά μήκος του ρήγματος, μετατοπίστηκαν μερικά μέτρα και ο δρόμος απέναντι από την κοιλάδα Tomales μετατοπίστηκε σχεδόν 6,5 μέτρα (η μεγαλύτερη μετατόπιση που καταγράφηκε). Σε κάθε περίπτωση το έδαφος δυτικά του ρήγματος μετακινήθηκε σχετικά βορειότερα.

Ξαφνική μετατόπιση που συνοδεύει ένα μεγάλο σεισμό πραγματοποιείται σε ένα μόνο τμήμα του ρήγματος κάποια χρονική στιγμή. Η συνολική μετατόπιση κατανέμεται με ένα ακανόνιστο τρόπο σε συνάρτηση με το χρόνο. Αρχικά έχουμε διάρρηξη στο πρώτο τμήμα του ρήγματος και αργότερα σε κάποιο άλλο τμήμα του. Τα τμήματα του ρήγματος που δίνουν τους μεγάλους σεισμούς παραμένουν 'κλειδωμένα' και ανενεργά για εκατοντάδες ή και περισσότερα χρόνια, καθώς πραγματοποιείται η παραμόρφωση. Έπειτα, αφού υπερνικηθούν οι δυνάμεις στατικής τριβής που συγκρατούν τις δύο πλευρές του ρήγματος σε επαφή μεταξύ τους, αρχίζει η διάρρηξη στο σεισμογόνο ρήγμα. Άλλες παραμορφώσεις του ρήγματος, ωστόσο, διευκολύνουν την κίνηση περισσότερο με συνεχή ερπυσμό παρά με ξαφνικές μετατοπίσεις που γεννούν μεγάλους σεισμούς. Κατά τους ιστορικούς χρόνους, αυτά τα μετατοπισμένα από τον ερπυσμό τμήματα δεν έχουν δημιουργήσει σεισμούς που η γένεση τους να οφείλεται στα 'κλειδωμένα' τμήματα του ρήγματος.

Οι γεωλόγοι πιστεύουν ότι ολόκληρη η αναφερθείσα μετατόπιση που οφείλεται σε σεισμούς αλλά και σε ερπυσμό είναι τουλάχιστον της

τάξης μεγέθους των 546 km, κατά μήκος του ρήγματος του Αγίου Ανδρέα, από τότε που δημιουργήθηκε, περίπου 15 – 20 εκατομμύρια χρόνια πριν. Μελέτες ενός τμήματος του ρήγματος μεταξύ του Tejon Pass και της περιοχής Salton Sea αποκάλυψαν γεωλογικά παρόμοια εδάφη στις αντίθετες πλευρές του ρήγματος, που τώρα χωρίζονται από μια απόσταση 234 χιλιομέτρων και μερικά τμήματα του φλοιού ενδέχεται να μετακινήθηκαν σε αρκετά μεγάλες αποστάσεις.

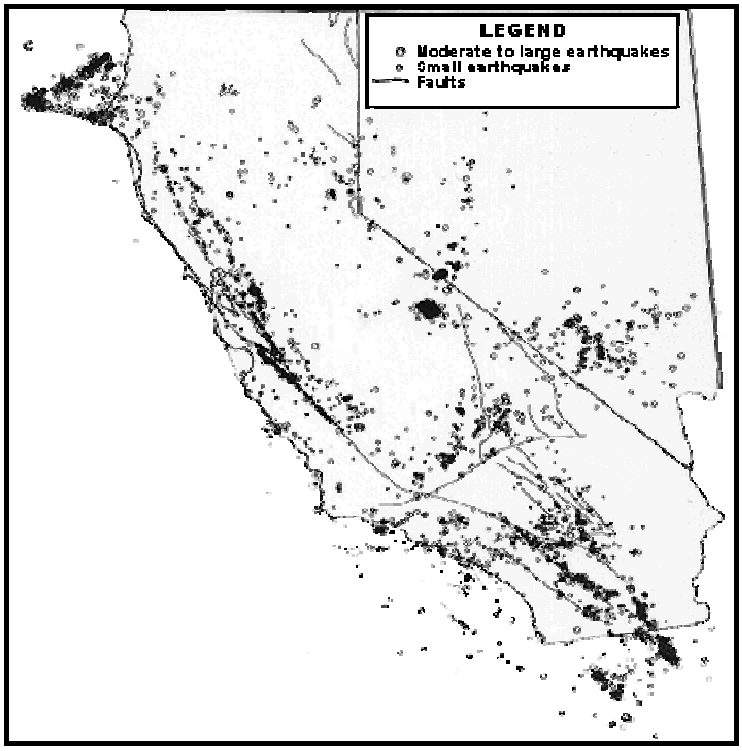
Παρόλο που είναι δύσκολο να φανταστούμε την τεράστια αυτή μετατόπιση του γήινου φλοιού, ωστόσο το ποσοστό μετατόπισης που παρουσιάζεται σ' αυτές τις πολύ παλιές μετρήσεις είναι αντίστοιχο του ποσοστού εκείνου της μετατόπισης που μετρήθηκε κατά τους ιστορικούς χρόνους (σχ. 1.5). Η αξιολόγηση των μετρήσεων δείχνει ρυθμό μετατόπισης της τάξης των 2 ιντσών (~ 5 cm) τον χρόνο.



Σχήμα 1.5. *– Μετατόπιση των τεμαχών κατά μήκος του ρήγματος του Αγίου Ανδρέα. (http://pubs.usgs.gov/gip/earthq3/move.html)*

Ο χάρτης του σχήματος (1.6) δείχνει την θέση όλων των σεισμών μεγέθους $M \geq 1.5$ στην περιοχή της California–Nevada κατά το 1980. Στην πραγματικότητα γεννιούνται χιλιάδες μικροί σεισμοί στην California, κάθε χρόνο. Οι μεγαλύτεροι ιστορικοί σεισμοί που πραγματοποιήθηκαν κατά μήκος του ρήγματος του Αγίου Ανδρέα είναι αυτοί του 1857 και του 1906.

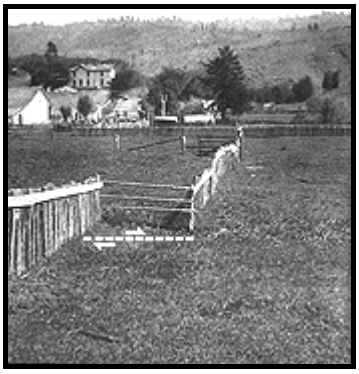
Ο σεισμός της 9ης Ιανουαρίου 1857 στη νότια California είχε περίπου το ίδιο μέγεθος με τον σεισμό του San Francisco το 1906 ($M=8.3$). Σύμφωνα με τα δημοσιεύματα του τύπου της εποχής, η εδαφική κίνηση και στις δύο περιπτώσεις ήταν πολύ έντονη και του ίδιου τύπου (σχ. 1.7). Μία μέτρηση του σεισμού του 1857 περιγράφει ένα μαντρί, το οποίο κόπηκε από το ρήγμα, και από στρόγγυλο που ήταν πήρε σχήμα 'S'. Αυτή η κίνηση είναι καθαρά αντιπροσωπευτική για δεξιόστροφο ρήγμα οριζόντιας μετατόπισης. Μελέτες του διαχωρισμού μίας αύλακας φανερώνουν μία μετατόπιση των 9 μέτρων για τον σεισμό του 1857.



Σχήμα 1.6.- *Σεισμοί μεγέθους M≥1.5 που καταγράφηκαν το 1980 στο ρήγμα του Αγίου Ανδρέα και σε άλλα μεγάλα ρήγματα στη California και Nevada. (http://pubs.usgs.gov/gip/earthq3/along.html)*

Ο σεισμός και η πυρκαγιά της 18ης Απριλίου 1906, στοίχισε την ζωή σε 700 ανθρώπους και προκάλεσε ζημιές εκατομμυρίων δολαρίων στην California ενώ έγινε αισθητός μέχρι το Oregon και την κεντρική Nevada. Το μέγεθος του εκτιμήθηκε σε 8.3 στη κλίμακα Richter ενώ η ένταση του έφτασε τους XI βαθμούς στην κλίμακα Mercalli. Η επιφανειακή διάρρηξη πραγματοποιήθηκε σε ένα μήκος 390Km κατά μήκος του ρήγματος, από τον Άγιο Ιωάννη τον Βαπτιστή, νότια του Point Arena μέχρι τις παράκτιες περιοχές του Cape Mendocino.

Στις 18 Μαΐου, 1940, πραγματοποιήθηκε σεισμός μεγέθους 7.1 σε ρήγμα, άγνωστο μέχρι τότε, στην κοιλάδα Imperial. Η μεγαλύτερη μετατόπιση ήταν μήκους 5 μέτρων από ένα δεξιόστροφο ρήγμα οριζόντιας μετατόπισης στο σεισμό αυτό. Παρόμοια κίνηση στο ρήγμα Imperial παρατηρήθηκε στον σεισμό του Νοεμβρίου του 1979. Το ρήγμα αυτό είναι τμήμα του συστήματος του Αγίου Ανδρέα. Άλλοι σεισμοί με μεγέθη M≥7 παρατηρήθηκαν στο ρήγμα Hayward το 1836 και το 1868 και στο ρήγμα του Αγίου Ανδρέα το 1838.



Σχήμα 1.7.- *Φράχτης, κοντά στο Point Reyes, California, που μετακινήθηκε 2.5 μέτρα από την αρχική του θέση λόγω μετατόπισης στο ρήγμα στο σεισμό του 1906 (http://pubs.usgs.gov/gip/earthq3/fence.gif)*

1.2 ΜΕΛΕΤΗ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΑΚΟΛΟΥΘΙΩΝ

1.2.1 Χρονική κατανομή σεισμών

Η πρώτη στατιστική επεξεργασία μετασεισμών που έγινε, αφορούσε την χρονική τους κατανομή και πραγματοποιήθηκε από τον Omori (1894), ο οποίος πρότεινε τη σχέση:

$$n(t)=k/(t+c) \qquad (1)$$

που περιέγραφε την ελάττωση της συχνότητας γένεσης των μετασεισμών που ακολούθησαν το μεγάλο σεισμό του Nobi στην Ιαπωνία (28 Οκτώβρη 1891, M=8.5).

Συνήθως οι μετασεισμοί αντιμετωπίζονται ως τυχαία γεγονότα στο χρόνο, των οποίων η συχνότητα γένεσης υπακούει σε κάποιο νόμο εξασθένισης. Ο Jeffreys (1938), μετά από μελέτη των μετασεισμών που ακολούθησαν το σεισμό του Tango στην Ιαπωνία (7 Μάρτη 1927, M=7.5), δεν ανακάλυψε καμιά αμοιβαία εξάρτηση μεταξύ των μετασεισμών. Αυτό σημαίνει ότι η γένεση ενός μετασεισμού εξαρτιόταν μόνο από το χρόνο που είχε περάσει από τον κύριο σεισμό. Έτσι, η συχνότητα των μετασεισμών ελαττωνόταν με το χρόνο σύμφωνα με τη σχέση του Omori.

Το γεγονός ότι οι μετασεισμικές ακολουθίες αποτελούνται από ανεξάρτητα τυχαία γεγονότα, δε σημαίνει ότι είναι απλές κατανομές Poisson. Στην απλή κατανομή Poisson, η πιθανότητα να συμβεί ένα γεγονός σε ορισμένο χρονικό διάστημα, είναι σταθερή σε όλο το διάστημα αυτό (Ranalli 1969). Αυτό φυσικά δεν μπορεί να συμβαίνει στους μετασεισμούς μιας ακολουθίας, για τους οποίους η πιθανότητα να συμβούν εξαρτάται από το χρόνο που πέρασε από τη στιγμή γένεσης του κύριου σεισμού.

Ο Hirano (1924), για να αναπαραστήσει τη συχνότητα γένεσης των μετασεισμών του μεγάλου σεισμού του Kwanto (1 Σεπτέμβρη 1923, M=7.9), χρησιμοποίησε τη σχέση:

$$n(t)=k/(t+c)^p \qquad (2)$$

όπου n(t) είναι ο αριθμός των μετασεισμών ανά μονάδα χρόνου, t είναι ο χρόνος μετά τον κύριο σεισμό και k, c, p, είναι παράμετροι..

Ο Utsu (1962), μετά από έρευνα σε σεισμικές ακολουθίες που έγιναν στην Αλάσκα, διαπίστωσε ότι η τιμή της c (της σχέσης 1) ήταν περίπου 2 μέρες, ενώ η τιμή της παραμέτρου p, η οποία αποτελεί δείκτη ελάττωσης της συχνότητας γένεσης των μετασεισμών στο χρόνο, κυμαινόταν μεταξύ 0,8 και 1,5.

Έχει δειχτεί από διάφορους ερευνητές (Mogi 1962b, Ranalli 1969, Papazachos 1974b), ότι ο αριθμός n, των μετασεισμών ανά μονάδα χρόνου (π.χ. ανά ημέρα) δίνεται ως συνάρτηση του χρόνου t, ο οποίος μετριέται από το χρόνο γένεσης του κύριου σεισμού, από τη σχέση:

$$n=n_0 t^{-p} \qquad (3)$$

όπου n_o είναι η συχνότητα των μετασεισμών ανά μονάδα χρόνου μετά το χρόνο γένεσης του κύριου σεισμού. Η παράμετρος p, εξαρτάται από τις φυσικές ιδιότητες του υλικού στον εστιακό χώρο και η συνηθέστερη τιμή της είναι η μονάδα. Η προηγούμενη σχέση μπορεί να γραφτεί και σε λογαριθμική μορφή: $\log n=n_1-p\log t$. Έτσι, οι παράμετροι $n_1(=\log n_o)$ και p, μπορούν να υπολογιστούν με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων.

Ο Ouchi (1982), θεωρώντας την περιοχή στην οποία γίνεται μια μετασεισμική ακολουθία σαν πολυσύνθετο ανοικτό σύστημα, το οποίο δέχεται διάφορες εξωτερικές επιδράσεις (θερμοκρασία, κατανομή τάσεων στην ευρύτερη περιοχή, κλπ.), πρότεινε την παρακάτω γενική σχέση του ρυθμού γένεσης των μετασεισμών στην ακολουθία αυτή:

$$dn(t)= F(n, a_1, a_2,....)dt \qquad (4)$$

όπου n(t) δηλώνει τον αριθμό των μετασεισμών ανά μονάδα χρόνου και a_1, a_2, κλπ, είναι χαρακτηριστικές παράμετροι της συνάρτησης F και εκφράζουν τις εξωτερικές επιδράσεις στο σύστημα.

1.2.2 Χωρική κατανομή

Η μελέτη της κατανομής στο χώρο των εστιών των σεισμών σεισμικών ακολουθιών έχει ιδιαίτερη σημασία για μερικούς κλάδους της

Σεισμολογίας. Διάφορες παράμετροι όπως το μήκος του ρήγματος, ο τρόπος με τον οποίο γίνεται η διάρρηξη στην εστία του και οι διαστάσεις του σεισμογόνου χώρου, που μπορούν να προσδιοριστούν από την κατανομή αυτή, είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν τόσο στην μακροπρόθεσμη πρόγνωση των σεισμών, με τον υπολογισμό του αναμενόμενου μεγέθους σεισμού από ορισμένο ρήγμα ή σεισμογόνο χώρο συγκεκριμένων διαστάσεων, όσο και στην εκτίμηση του σεισμικού κινδύνου σε μια περιοχή.

Από έρευνες διαφόρων επιστημόνων έχει δειχτεί ότι οι διαρρήξεις των σεισμικών ρηγμάτων δεν φτάνουν πάντοτε στην επιφάνεια της Γης. Για το λόγο αυτό, από τις σεισμικές ακολουθίες των οποίων οι σεισμοί έχουν τα επίκεντρα στην ξηρά, είναι λίγες εκείνες που με επιφανειακές εκδηλώσεις παρέχουν στους σεισμολόγους τη δυνατότητα άμεσου υπολογισμού των διαστάσεων των χώρων μέσα στους οποίους έγιναν. Για τη μεγάλη πλειοψηφία των σεισμικών ακολουθιών, ιδιαίτερα όταν γίνονται σε θαλάσσιες περιοχές, οι διαστάσεις των χώρων όπου αυτές γίνονται είναι δυνατόν να υπολογιστούν μόνο έμμεσα. Για παράδειγμα ο υπολογισμός του μήκους του ρήγματος που προκαλεί ένα σεισμό είναι ιδιαίτερα δύσκολος καθώς εξαρτάται από πολλούς παράγοντες σύμφωνα με το Slemmons (1977).

Για το λόγο αυτό, διαμορφώθηκαν μέθοδοι έμμεσου υπολογισμού των διαστάσεων του σεισμογόνου χώρου, όπως με την μελέτη της κατανομής των μετασεισμών, με τη φασματική ανάλυση των επιφανειακών κυμάτων μακρινού πεδίου, με τη μελέτη των θαλάσσιων κυμάτων βαρύτητας που προκαλούνται από υποθαλάσσιους σεισμούς (τσουνάμις), κλπ.

Οι διαστάσεις του χώρου όπου γίνεται μια ακολουθία εξαρτώνται από το μήκος, το πλάτος και τον προσανατολισμό του ρήγματος το οποίο προκάλεσε τον κύριο σεισμό και καθορίζονται εύκολα από τη χωρική κατανομή των εστιών των μετασεισμών οι οποίες ορίζουν το μετασεισμικό χώρο.

Γύρω στη δεκαετία του 1930, διατυπώθηκε η άποψη ότι μια περιοχή στην οποία μετά από έναν μεγάλο σεισμό γίνονται μετασεισμοί είναι η ίδια περιοχή που παραμορφωνόταν πριν τον κύριο σεισμό (σεισμογόνος χώρος). Ο Wilson (1936) και ο Ishimoto (1937) έδειξαν ότι μετασεισμοί γίνονται στην περιοχή στην οποία συμβαίνει παραμόρφωση των πετρωμάτων. Το επίκεντρο του κύριου σεισμού βρίσκεται συνήθως κοντά στα όρια της μετασεισμικής περιοχής. Ο Wilson (1936), επίσης, τόνισε ότι η έκταση της μετασεισμικής περιοχής εξαρτάται από το μέγεθος του κύριου σεισμού.

Ο Benioff (1951), μελετώντας τα φαινόμενα ερπυσμού που παρατηρούνται στις μετασεισμικές ακολουθίες, έθεσε τις βάσεις για την έρευνα των χαρακτηριστικών της ελαστικής ανακούφισης, της έκλυσης δηλαδή της ενέργειας που ήταν αποθηκευμένη στο υλικό του σεισμογόνου χώρου υπό μορφή ενέργειας ελαστικής παραμόρφωσης.

Ο Sykes (1971) τόνισε, ότι οι ζώνες διάρρηξης και κατά συνέπεια τα μεγέθη των σεισμών, καθορίζονται από τις τεκτονικές συνθήκες που επικρατούν σ' αυτές. Μεγαλύτερες τάσεις και μικρότερες μετασεισμικές περιοχές μπορεί να είναι τυπικά χαρακτηριστικά περιοχών με μεγάλη τεκτονική ανομοιογένεια. Μετά από μελέτη μεγάλων σεισμών στην περιοχή της Αλάσκας και των Αλεουτίων νησιών, συμπεραίνει ότι οι μετασεισμικές περιοχές μεγάλων σεισμών έχουν την τάση να συνορεύουν μεταξύ τους χωρίς να αλληλεπικαλύπτονται σημαντικά, πιστεύοντας ότι για ένα χρονικό διάστημα μερικών δεκαετιών οι μεγάλοι σεισμοί δεν συμβαίνουν στο ίδιο μέρος. Η σχετική ολίσθηση των επιφανειών των δύο τεμαχών σε τέτοιους μεγάλους σεισμούς είναι της τάξης των μερικών μέτρων, ελευθερώνοντας έτσι ενέργεια η οποία υπήρχε στο υλικό του χώρου υπό μορφή ελαστικής παραμόρφωσης. Η νέα συσσώρευση τέτοιου ποσού ενέργειας απαιτεί μεγάλο χρονικό διάστημα επειδή τα τεμάχη κινούνται με ταχύτητα της τάξης μερικών εκατοστών το χρόνο.

Ο Krinitzsky (1974) υποστήριξε την πιθανότητα ακριβέστερης περιγραφής ενός ρήγματος το οποίο προκάλεσε έναν κύριο σεισμό, με βάση τη μελέτη της κατανομής των μετασεισμών και όχι με τις επιφανειακές εκδηλώσεις αυτού.

Μερικά χρόνια αργότερα, ο Kanamori (1977) τόνισε ότι ο ακριβέστερος προσδιορισμός της επιφάνειας του ρήγματος, πετυχαίνεται από τη μελέτη της κατανομής των μετασεισμών που γίνονται 24 ώρες μετά τον κύριο σεισμό.

Ανακριβείς υπολογισμούς του μήκους του ρήγματος από επιφανειακές εκδηλώσεις σεισμών βρήκε ο Wyss (1978) σε εργασίες των Bonilla and Buchanan (1970). Πιστεύει, ότι καλύτερα είναι να χρησιμοποιείται το εμβαδόν, S, της επιφάνειας του ρήγματος παρά το μήκος του, L, σε συνάρτηση με το μέγεθος, γιατί το S μπορεί να υπολογιστεί περίπου με την ίδια ακρίβεια που υπολογίζεται και το L και γιατί ο λόγος του μήκους προς το πλάτος W του ρήγματος, L/W, μπορεί να διαφέρει ως μια τάξη μεγέθους σε διαφορετικά τεκτονικά περιβάλλοντα. Ακόμη, μια σχέση μεταξύ του μεγέθους, M, του κύριου σεισμού και της S, έχει μεγαλύτερη φυσική σημασία. Η σχετική μετάθεση, u, μεταξύ των δύο τεμαχών μπορεί να βρεθεί εύκολα αν ξέρουμε με σχετική ακρίβεια το εμβαδόν S της επιφάνειας του ρήγματος, από τη σχέση:

$$M_o = \mu S u \quad (5)$$

όπου M_o είναι η σεισμική ροπή του κύριου σεισμού και μ ο συντελεστής ακαμψίας του υλικού (Aki 1966).

Γενικά, η χωρική κατανομή των επικέντρων των σεισμών μιας σεισμικής ακολουθίας δίνει χρήσιμες πληροφορίες για το είδος αυτής της ακολουθίας. Έτσι, η χωρική κατανομή των μετασεισμών ενός κύριου σεισμού καθορίζει τη ρηξιγενή ζώνη των κύριων σεισμών, ενώ οι προσεισμοί συνήθως τοποθετούνται κοντά στην εστία του σεισμού (Papazachos et al., 1983).

1.2.3 Χωροχρονική κατανομή

Η μελέτη της χωροχρονικής κατανομής των σεισμών μιας σεισμικής ακολουθίας είναι σημαντική λόγω του ότι δίνει μία γενικότερη εικόνα για την συμπεριφορά της ακολουθίας αυτής. Ένα από τα σημαντικότερα αποτελέσματα αυτής της έρευνας είναι το ότι αμέσως μετά τη γένεση του κύριου σεισμού σε σημείο κοντά στο κέντρο του σεισμογόνου ρήγματος (δικατευθυντική διάρρηξη), η σεισμική δραστηριότητα μεταναστεύει κυρίως στο ένα άκρο του ρήγματος όπου πραγματοποιούνται αργότερα οι μεγαλύτεροι σε μέγεθος μετασεισμοί. Όταν ο κύριος σεισμός γεννιέται στο ένα άκρο του ρήγματος (μονοκατευθυντική διάρρηξη), η σεισμική δραστηριότητα μεταναστεύει στο άλλο άκρο όπου γεννιούνται αργότερα οι μεγαλύτεροι μετασεισμοί (Karakaisis et al., 1985, Scordilis et al., 1985).

1.2.4 Κατά μέγεθος κατανομή

Μία από τις σημαντικότερες στατιστικές σχέσεις της Σεισμολογίας είναι η σχέση μεταξύ του αριθμού, n, και του μεγέθους, M, των σεισμών που συμβαίνουν σε ορισμένη περιοχή και σε ορισμένο χρονικό διάστημα.

Μέχρι τον ορισμό της έννοιας του μεγέθους από τον Richter το 1930, οι σεισμολόγοι συσχέτιζαν τον αριθμό των σεισμών με άλλες παραμέτρους που τους χαρακτηρίζουν.

Είναι γενικά αποδεκτό ότι η κατά μέγεθος κατανομή των σεισμών περιγράφεται από την σχέση των Gutenberg – Richter (1944), η οποία δίνει τη συσσωρευτική συχνότητα με την οποία συμβαίνουν οι σεισμοί σε συνάρτηση με το μέγεθος τους.

$$\log N = a - bM \quad (6)$$

Βιβλιοθήκη "Θεόφραστος" - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

όπου N είναι ο αριθμός των σεισμών με μέγεθος ίσο και μεγαλύτερο από το M και a, b παράμετροι που προσδιορίστηκαν από παρατηρήσεις. Τη σχέση αυτή εφάρμοσαν οι Gutenberg και Richter για πρώτη φορά σε σεισμούς της νότιας California το 1944. Είχαν, όμως, από το 1941, παρατηρήσει ότι η συχνότητα των σεισμών μειωνόταν εκθετικά, όσο αυξανόταν το μέγεθος.

Η παράμετρος a, εξαρτάται από τη χρονική περίοδο που καλύπτουν τα δεδομένα που επεξεργαζόμαστε, από την έκταση της περιοχής στην οποία έγιναν οι σεισμοί και από τη σεισμικότητα της.

Η παράμετρος b, είναι μία από τις σπουδαιότερες παραμέτρους στη Σεισμολογία. Η σημασία της έγκειται στο γεγονός, ότι μπορεί να περιγράψει το βαθμό της ομογένειας των υλικών και την κατάσταση των τάσεων που επικρατούν στην εστιακή περιοχή (Mogi 1963, Scholz 1968, Gibowicz 1973a), μπορεί να χρησιμοποιηθεί για προβλήματα σεισμικότητας (Allen et al. 1965, Karnik 1969), όπως επίσης και για προβλήματα που σχετίζονται με την πρόγνωση των σεισμών (Suyehiro 1966, Wyss and Lee 1973, Papazachos 1975a). Η τιμή της παραμέτρου b, μπορεί επίσης να χαρακτηρίζει το είδος της σεισμικής ακολουθίας γιατί αυτή η τιμή είναι σχετικά μικρή (~0.7) για προσεισμικές ακολουθίες, σχετικά μεγάλη (~1) για μετασεισμικές ακολουθίες και ακόμα μεγαλύτερη για σμηνοσεισμούς (Papazachos, 1974a).

Η εκτίμηση της εξέλιξης της σεισμικής δραστηριότητας σε μία περιοχή σε περίοδο όπου υπάρχει σεισμική έξαρση είναι ένα πρόβλημα μεγάλης κοινωνικής σημασίας γιατί μπορεί να οδηγήσει σε συμπεράσματα για την προστασία των ανθρώπων. Η διαδικασία για τέτοιες εκτιμήσεις πρέπει να αρχίσει αμέσως μετά την έναρξη της σεισμικής ακολουθίας (σε χρόνο λιγότερο της μίας ώρας) παίρνοντας τις κατάλληλες μετρήσεις από τα σεισμογράμματα, ερμηνεύοντας τα αποτελέσματα και υπολογίζοντας τις τιμές των παραμέτρων που καθορίζουν τον χρόνο, το χώρο και το μέγεθος των σεισμών. Αυτή η διαδικασία πρέπει να επαναλαμβάνεται ανά χρονικά διαστήματα που εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά της σεισμικής ακολουθίας (από μερικές ώρες μέχρι μερικές μέρες).

Πρέπει να τονισθεί ότι για την εφαρμογή αυτής της μεθοδολογίας απαιτούνται παρατηρήσεις από τουλάχιστον σαράντα σεισμούς (μετασεισμούς κλπ.).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΣΕΙΣΜΟΣ LANDERS

Ο σεισμός του Landers με μέγεθος M=7.2, ο οποίος σημειώθηκε στις 28 Ιουνίου 1992, συνδέεται πιθανότατα με το σεισμό Joshua Tree (μεγέθους M=6.1) της 23ης Απριλίου 1992. Ο τελευταίος οφείλεται σ' ένα μικρό ρήγμα οριζόντιας μετατόπισης βόρεια της ζώνης του Landers (βλ. κεφάλαιο 3).

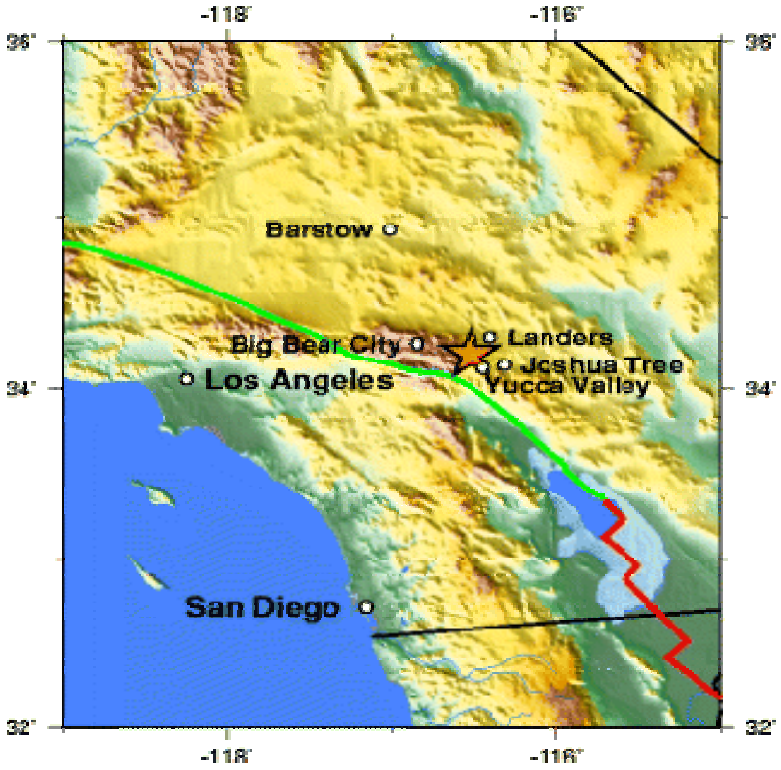
Ο κύριος σεισμός του Landers ενεργοποίησε πολλά τμήματα του ρήγματος στα δυτικά της ερήμου Mojave στις 28 Ιουνίου, τα οποία συνδέονται μ' ένα περίπλοκο σύστημα δεξιόστροφης μετατόπισης πάνω στο ρήγμα του Αγ. Ανδρέα. Το γεγονός ότι ο σεισμός αυτός έγινε σε μια αραιοκατοικημένη περιοχή της California ελαχιστοποίησε τις ανθρώπινες απώλειες αλλά και τις υλικές ζημιές.

Η πιο θεαματική διάρρηξη που έγινε μέχρι τώρα στον 20ό αιώνα από σεισμό στις Ηνωμένες Πολιτείες, προκλήθηκε από το σεισμό του Landers στην California, 10 km περίπου βόρεια της κοιλάδας Yucca (σχ.2.1). Η διάρρηξη προκάλεσε δεξιόστροφη μετατόπιση, η οποία εκτείνεται σε τέσσερις τουλάχιστον διαφορετικές ζώνες διάρρηξης. Το συνολικό μήκος της επιφανειακής διάρρηξης ήταν περίπου 80 km.

Σχήμα 2.1.- *Δορυφορική φωτογραφία του ρήγματος του Landers. (http://activetectonics.la.asu.edu/Landers/pic00010.jpg)*

Ο σεισμός του Landers (σχ. 2.2), ο οποίος έγινε στις 28 Ιουνίου του 1992 είναι ένας από τους μεγαλύτερους, καλά καταγεγραμμένους σεισμούς της California (σχ. 2.2). Η καλή ποιότητα και η μεγάλη ποσότητα των δεδομένων που υπάρχουν για τον σεισμό αυτό, επέτρεψαν στους επιστήμονες να δημιουργήσουν κάποια μοντέλα. Για παράδειγμα οι Wald and Heaton (1994) συνδύασαν γεωδαιτικά και σεισμικά δεδομένα για να αλλάξουν το μοντέλο που ήδη υπήρχε για το ρήγμα αυτό και να προσδιορίσουν την ιστορία των κινήσεων στο ρήγμα. Οι Cohee and Beroza (1994) μοντελοποίησαν τις διάφορες διαρρήξεις του ρήγματος χρησιμοποιώντας εμπειρικά κάποιες μαθηματικές συναρτήσεις τις οποίες χρησιμοποίησε πρώτος ο Green. Οι Cotton and Campillo (1995) χρησιμοποίησαν αντιστροφή συχνοτήτων σε περιοχή ισχυρών κινήσεων με σκοπό να προσδιορίσουν την σχέση χώρου – χρόνου της ολίσθησης στο ρήγμα *(www.geologie.ens.fr/~madariag/Landers.html).*

Ο σεισμός αυτός είχε σαν αποτέλεσμα τον θάνατο τριών ανθρώπων και τον τραυματισμό 400. Προκαταρτικές εκτιμήσεις των καταστροφών που προκάλεσε ο σεισμός αυτός, καθώς και ο σεισμός που ακολούθησε στις 15:05 UTC και είχε μέγεθος M=6.7 ανεβάζουν το κόστος τους στα 92 εκατομμύρια δολάρια. Ο σεισμός έγινε αισθητός στη νότια California, νότια Nevada, δυτική Arizona και νότια Utah. Έγινε επίσης αισθητός σε



Σχήμα 2.2*– Επίκεντρα σημαντικών σεισμών του Ιουνίου του 1992 (http://earthquake.usgs.gov/regional/states/events/1992_06_28.php)*

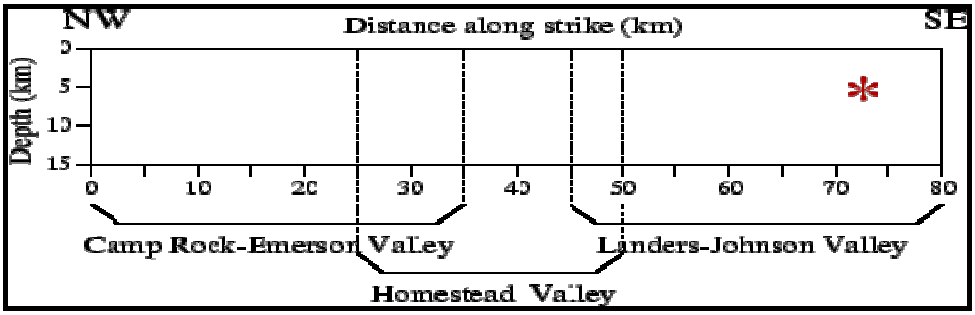
ουρανοξύστες περιοχών που βρίσκονται αρκετά βόρεια όπως το Boise και το Idaho, όπως επίσης και ανατολικά στο Albuquerque, New Mexico και Denver, Colorado. Επιφανειακά το ρήγμα παρατηρείται κατά μήκος ενός τμήματος 70 km από την περιοχή του Joshua Tree μέχρι το Barstow συνοδευόμενη από μία οριζόντια μετατόπιση των 5.5 μέτρων και μία κάθετη μετακίνηση των 1.8 μέτρων (σχ. 2.3). Στάσιμα κύματα έχουν καταγραφεί βόρια στη Lake Union, Washington, και ανατολικά μέχρι την Aurora, Colorado, Corpus Christi και Texas.

Ο σεισμός του Landers αποτελεί εξαιρετικό αντικείμενο για τη δημιουργία ενός δυναμικού μοντέλου, γιατί σήμερα η ιστορία των διαρρήξεων στο ρήγμα είναι πολύ καλά γνωστή με την βοήθεια ενός εκτεταμένου δικτύου επιταχυνσιογράφων. Πρόσφατα οι Olsen (1997) και Madariaga (1997) μελέτησαν τις συνθήκες τριβής κάτω από τις οποίες πραγματοποιήθηκε η διάρρηξη στο σεισμό του Landers. Γι' αυτό το σκοπό προσομοίωσαν τις κινήσεις του ρήγματος του παρελθόντος έτσι όπως καθορίστηκαν από τους Wald and Heaton (1994)με σκοπό τη μελέτη της επίδρασης του αρχικού φορτίου στη διάδοση της διάρρηξης και ταυτόχρονα τη μοντελοποίηση των παρατηρούμενων επιταχυνσιογραμμάτων.

Σχήμα 2.3. *– Επιφανειακή διάρρηξη του σεισμού του Landers η οποία έκοψε στα δύο την εθνική οδό 247 φανερώνοντας την σημαντική οριζόντια μετατόπιση του ρήγματος.*
(http://www.seismowatch.com/EQSERVICES/NotableEQ/Jun/Landers.scec.images/lanrd1.JPG)

Το ρήγμα του Landers το οποίο έχει μήκος 80 km και πλάτος 15 km διαιρείται σε τρεις τομείς. Στον τομέα του Landers Johnson Valley στο

νότο όπου βρίσκεται και το επίκεντρο (αστεράκι), στον τομέα της Homestead Valley στην μεσαία περιοχή του ρήγματος και στον τομέα Camp Rock Emerson στα βόρεια (σχ. 2.4).



Σχήμα 2.4.– *Σχηματική αναπαράσταση του ρήγματος του Landers (Peyrat et al, 2000)*

Βιβλιοθήκη "Θεόφραστος" - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΣΕΙΣΜΟΣ JOSHUA TREE

Στις 23 Απριλίου του 1992, στις 9:50:23μ.μ. είχαμε τη γένεση του σεισμού του Joshua Tree. Το επίκεντρο του σεισμού αυτού εντοπίζεται στις 33° 57.6' Β, 116° 19' Δ, 18km (11 μίλια) ανατολικά των Desert Hot Springs και 29km (18 μίλια) βόρεια του Indio. Ο σεισμός του Joshua Tree είχε μέγεθος M=6.1 και εστιακό βάθος 12.4km.

Του κύριου σεισμού προηγήθηκε ένας προσεισμός μεγέθους M=4.6, ο οποίος προκάλεσε μεγάλη ταραχή. Ο σεισμός του Joshua Tree έθεσε σε συναγερμό τους επιστήμονες, λόγω της άμεσης σχέσης της γένεσης του σεισμού αυτού με το ρήγμα του Αγίου Ανδρέα. Μετά τη γένεση του σεισμού του Joshua Tree η περιοχή του ρήγματος του Αγίου Ανδρέα τέθηκε σε επίπεδο κινδύνου Β, κάτι που υποδηλώνει ότι υπήρχαν 5~25% πιθανότητες να γίνει ένας σεισμός μεγαλύτερου μεγέθους, κατά μήκος του ρήγματος του Αγίου Ανδρέα, τις επόμενες τρεις μέρες. Αυτό φυσικά δεν έγινε ποτέ, αλλά περίπου μετά από δύο μήνες και 6000 μετασεισμούς, είχαμε τη γένεση του σεισμού του Landers. Ο σεισμός του Landers ήταν ο μεγαλύτερος σεισμός που χτύπησε τη νότια California μέσα στα τελευταία σαράντα χρόνια, αποδεικνύοντας ότι η ανησυχία που προκάλεσε ο σεισμός του Joshua Tree ήταν δικαιολογημένη, αν και τα γεγονότα δεν έγιναν ακριβώς όπως τα περίμεναν οι επιστήμονες.

Η παραμόρφωση του εδάφους, η οποία έγινε παράλληλα με τη γένεση του σεισμού του Joshua Tree, αναπαρίσταται πολύ καλά από εκτιμήσεις γεωδαιτικών εκτοπισμάτων τα οποία προέρχονται από μετρήσεις με GPS. Το μέσο σφάλμα του σήματος σε σχέση με τη συχνότητα των παραμορφώσεων αυτών είναι ίσο με 1.8, με την παραμόρφωση κοντά στο ρήγμα να υπολογίζεται στα 40mm. Για να καθοριστεί η μεγάλου μήκους κύματος κατανομή της ολίσθησης γύρω από το επίπεδο της διάρρηξης, εφαρμόζεται το σύστημα ομαλοποίησης Tikhonov στις μετρήσεις αυτές. Το σύστημα ομαλοποίησης ελαχιστοποιεί τη διακύμανση της τάσης υπό τον όρο ενός απόλυτα δεξιόστροφου ρήγματος, οριζόντιας μετατόπισης και της απουσίας εμποδίων για την ολίσθηση της επιφάνειας. Η κατανομή της ολίσθησης που προκύπτει, αποδίδει ένα μέσο γεωδαιτικό υπολογισμό $1.7*10^{18}$ Nm με αντίστοιχη μέγιστη ολίσθηση γύρω στα 0.8m και συγκρίνεται με επιτυχία με πληροφορίες σεισμικών αποκλίσεων προερχόμενες από άλλες πηγές, μετρήσεων του χρόνου και των επικέντρων του κύριου σεισμού και των

μετασεισμών του. Από την ανάλυση εμπειρικών συναρτήσεων Green προκύπτει ότι η δημιουργία μίας διάρρηξης διάρκειας πέντε δευτερολέπτων υποδηλώνει διάρρηξη μήκους 6~8Km. Οι περισσότερες από τις τεκμηριωμένες ολισθήσεις έγιναν βόρεια του επικέντρου του σεισμού του Joshua Tree και είναι σύμφωνες με τη διάδοση προς τα βόρεια της ολίσθησης. Η υπολογιζόμενη πτώση τάσης είναι γύρω στα 2~4MPa. Επιπλέον, οι προβλεπόμενες αυξήσεις των τάσεων του Coulomb σχετίζονται πολύ καλά με τα επίκεντρα των μετασεισμών. Οι περισσότεροι από τους μετασεισμούς γίνονται σε περιοχές για τις οποίες, η διάρρηξη που προκαλείται με τη γένεση του κύριου σεισμού προκαλεί αυξήσεις των τάσεων μεγαλύτερες από 0.1 MPa. Αντίθετα, οι προβλεπόμενες μεταβολές των τάσεων είναι μηδενικές στο επίκεντρο του σεισμού του Landers, που έγινε στις 28 Ιουνίου του 1992 και είχε μέγεθος M=7.2. Ο σεισμός αυτός έγινε περίπου 20 Km πέρα από το βορειότερο άκρο της διάρρηξης του Joshua Tree. Βασιζόμενοι στις μεταναστεύσεις των επικέντρων των μετασεισμών και στο προβλεπόμενο στατικό πεδίο των τάσεων, εικάζεται ότι η αναδιανομή των τάσεων λόγω του σεισμού του Joshua Tree, προκάλεσε διατάραξη των τάσεων, παίζοντας σημαντικό ρόλο έτσι στην γένεση του σεισμού του Landers. (*http://adsabs.harvard.edu/cgi_bin/nph_)*

Οι μετασεισμοί του σεισμού του Joshua Tree φανερώνουν ότι το ρήγμα που ευθύνεται για τη γένεση του σεισμού της 23ης Απριλίου είναι δεξιόστροφο, οριζόντιας μετατόπισης, μήκους τουλάχιστον 15km. Από αυτά τα δεδομένα και από τα επίκεντρα των μετασεισμών, συμπεραίνουμε ότι το ρήγμα που έδωσε το σεισμό του Joshua Tree είναι το ρήγμα του Eureka Peak.

Οι ζημιές που προκάλεσε ο σεισμός αυτός ήταν ασήμαντες, ωστόσο ζημιές εντοπίζονται σε διάφορες κοινότητες όπως η κοινότητα του Joshua Tree, της Yucca Valley, Desert Hot Springs, Palm Springs και Twenty-nine Palms. Από τον σεισμό τραυματίστηκαν τριάντα-δύο άνθρωποι.

Αν και ο σεισμός του Joshua Tree είχε ξεχαστεί σε μεγάλο βαθμό μετά τη γένεση του σεισμού του Landers, αποτέλεσε ένα πολύ σημαντικό γεγονός αφού έγινέ αισθητός και σε περιοχές όπως το San Diego, Santa Barbara, Las Vegas, Nevada και στο Phoenix, Arizona.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΣΕΙΣΜΟΣ DENALI

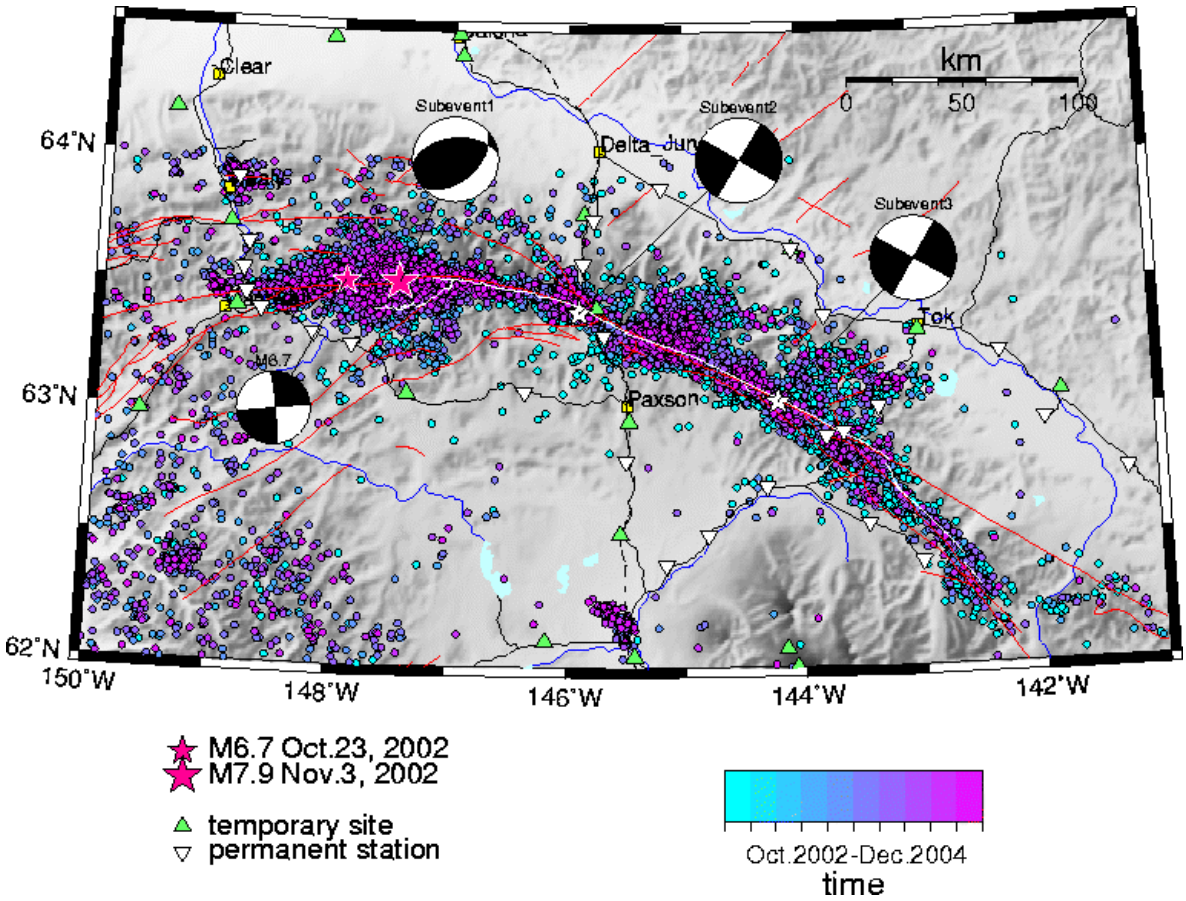
Το Σεισμολογικό Κέντρο Πληροφοριών της Alaska, κατέγραψε την Κυριακή 3 Νοεμβρίου 2002 και ώρα 1:12 π.μ., τον μεγαλύτερο σεισμό των τελευταίων 150 περίπου χρόνων στη Βόρεια Αμερική. Ο σεισμός αυτός είχε μέγεθος M=7.9. Η εστία του εντοπίζεται σε βάθος 5 km, 135 km νότια του Fairbanks και 283 km βόρεια του Anchorage.

Της σεισμικής δόνησης του Denali, είχε προηγηθεί στις 23 Οκτωβρίου 2002 ο σεισμός του Nenana Mountain μεγέθους M=6.7. Το επίκεντρο του σεισμού αυτού βρέθηκε πάνω στο ρήγμα Denali, 22 km ανατολικά του επικέντρου του σεισμού του Νοεμβρίου (σχ. 4.1). Τα μεγάλα μεγέθη των δύο αυτών σεισμών (M=6.7 και M=7.9), οδήγησαν το προσωπικό που εργάζεται στο Alaska Earthquake Information Centre (AEIC) να εγκαταστήσει ένα δίκτυο προσωρινών οργάνων για την παρακολούθηση της εξέλιξης των μετασεισμών. Το προσωρινό αυτό δίκτυο διαλύθηκε τον Ιούνιο του 2003.

Σχήμα 4.1.- *Διάρρηξη του ρήγματος του Denali για το σεισμό του 2002 γύρω στα 1.5 μίλια δυτικά του πετρελαιαγωγού Trans της Alaska (http://pubs.usgs.gov/fs/2003/fs014-03/fs014-03.pdf)*

Τον σεισμό της 3ης Νοεμβρίου, προκάλεσε απότομη ολίσθηση στο ρήγμα του Denali-ένα τοξοειδούς σχήματος ρήγμα οριζόντιας μετατόπισης-το οποίο εκτείνεται 700 km κατά μήκος της πολιτείας της

Alaska και προεκτείνεται νοτιοανατολικά στον Canada. Ο μηχανισμός γένεσης στον εστιακό χώρο (Πανεπιστήμιο της Alaska, Fairbanks) και τα σεισμικά κύματα χώρου που αναλύθηκαν από τους Kickuchi και Yamanaka, φανερώνουν ότι το γεγονός ξεκίνησε με ενεργοποίηση διαφορετικών ρηγμάτων τα οποία καταλήγουν σε μία διάρρηξη με μήκος της τάξης των 330 km περίπου. Αρχικά δηλαδή, είχαμε ένα βορειοανατολικό ανάστροφο ρήγμα, το Susitna Glacier, το οποίο βρίσκεται νότια της ακτής McKinley. Το ρήγμα αυτό εξελίχτηκε σε δεξιόστροφο οριζόντιας μετατόπισης για 220 km περίπου, μέχρι που έφτασε το ρήγμα Totshunda, σε γεωγραφικό μήκος 143° Δυτικά (σχ.4.2).



Σχήμα 4.2.- *Χάρτης με τα επίκεντρα των μετασεισμών μέχρι το τέλος του 2004 (http://www.aeic.alaska.edu/Seis/Denali_Fault_2002/)*

Λευκή γραμμή*- Χαρτογραφημένη διάρρηξη*
Κόκκινη γραμμή*-Ίχνη των ρηγμάτων*
Μαύρες διακεκομμένες γραμμές*-Πετρελαιαγωγός*
Μαύρη γραμμή*-Δρόμοι*
Μπλε γραμμές*- Μεγάλα ποτάμια*

Η χωρική κατανομή των μετασεισμών, καθώς και οι επιφανειακές εκδηλώσεις της διάρρηξης, φανερώνουν πως η διάρρηξη διαδόθηκε προς

Βιβλιοθήκη "Θεόφραστος" - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

το νοτιοανατολικό άκρο του ρήγματος Totshunda και σταμάτησε αφού προχώρησε γύρω στα 70 km μετά απ' αυτό. Μία ομάδα γεωλόγων ακολούθησε τη διάρρηξη με ελικόπτερο μέσα σε κοιλάδες κατά μήκος ρεμάτων και παγετώνων. Κοντά στη λίμνη Mentasta, ένα χωριό το οποίο υπέστη μερικές από τις χειρότερες ζημιές από το συγκεκριμένο σεισμό, ανακάλυψαν ότι η επιφανειακή διάρρηξη εκτείνεται από το ρήγμα του Denali προς το γειτονικό ρήγμα Totshunda, το οποίο τείνει προς τα νοτιοανατολικά, προς τα καναδέζικα σύνορα. Επιπλέον, οι γεωλόγοι ανακάλυψαν ότι σχισμές τις οποίες μελέτησαν, δείχνουν ότι η βόρεια πλευρά του ρήγματος του Denali κινήθηκε προς τα ανατολικά και κατακόρυφα προς τα πάνω σε σχέση με το νότο. Η μεγαλύτερη μετατόπιση στο ρήγμα του Denali ήταν 7 μέτρα στη λεωφόρο του Tok, όπου έκοψε ένα δρόμο ο οποίος από το Tok καταλήγει στο Glenollen και ενώνεται με τη λεωφόρο της Αλάσκας και 20 μέτρα στο ρήγμα του Totshunda. Οι μεγαλύτερες διαρρήξεις εμφανίστηκαν στην περιοχή ανάμεσα στη λεωφόρο Richardson και τη λεωφόρο του Tok (σχ. 4.3).

Σχήμα 4.3.*–Στην φωτογραφία απεικονίζεται ο κορμός δέντρου ο οποίος άνοιξε στα δύο κατά την ενεργοποίηση του ρήγματος του Denali το Νοέμβριο του 2002. Το δέντρο αυτό βρίσκεται δυτικά της λεωφόρου Richardson στο 337ο km.*
(http://wwwdggs.dnr.state.ak.us/Images/quake/TAPSatDenaliFault.jpg).

Βιβλιοθήκη "Θεόφραστος" - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

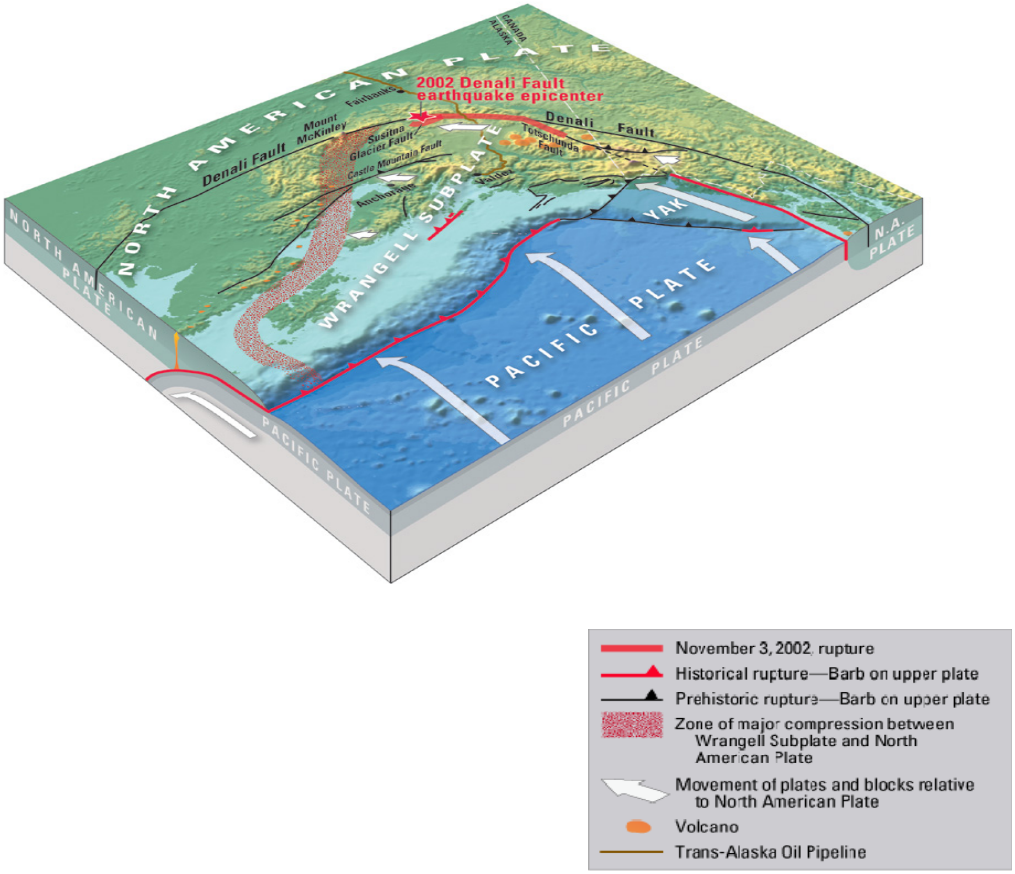
Ο σεισμός της 3ης Νοεμβρίου, έγινε αισθητός έντονα σε ολόκληρη την πολιτεία. Προκάλεσε αμέτρητες κατολισθήσεις και κλείσιμο των δρόμων, αλλά ωστόσο ελάχιστες ζημιές στις κατασκευές, ανέλπιστα λίγους τραυματισμούς και καθόλου θανάτους. Από τις κατοικημένες περιοχές, το μεγαλύτερο χτύπημα το δέχτηκαν τα χωριά Mentasta, Northway και Slana, τα οποία βρίσκονται στην ανατολική άκρη της ρηξιγενούς ζώνης. Μικρές ζημιές παρατηρήθηκαν στις περιοχές Tok, Paxon, Contwell και στο πάρκο του Denali. Μικρές επίσης ζημιές έγιναν και στο Fairbanks, ενώ αρκετές ήταν και οι ζημιές στους δρόμους της λεωφόρου Richardson. Ο πετρελαιαγωγός Trans-Alaska έκλεισε μετά τον σεισμό (αναφέρθηκαν καταστροφές στις εγκαταστάσεις αλλά όχι στον αγωγό και καθόλου διαρροές) (σχ. 4.4). Στην περιοχή Alaska Range συνέβησαν πολλαπλές κατολισθήσεις και χιονοστιβάδες με τη μεγαλύτερη κατολίσθηση στο Black Rapids Glacier.

Σχήμα 4.4.*-Μία αεροφωτογραφία του πετρελαιαγωγού Trans-Alaska (TAPS) κοντά στο ρήγμα του Denali ο οποίος κατευθύνεται δυτικά. Εδώ είναι το σημείο όπου ο αγωγός στηρίζεται πάνω σε ράγες πάνω στις οποίες μπορεί να κινείται ελεύθερα κατά την διάρκεια της σεισμικής δόνησης. Εδώ ο αγωγός έχει μετακινηθεί προς τα δυτικά και έφυγε από τις ράγες. Η εταιρία πετρελαίου Alyeska ανέφερε πως δεν υπήρξαν ρωγμές στον αγωγό, επομένως δεν υπήρξαν ούτε απώλειες πετρελαίου. (http://www.dggs.dnr.state.ak.us/Images/quake/TAPSatDenaliFault.jpg)*

Οι σεισμοί είναι συχνά φαινόμενα στην περιοχή της Alaska. Στατιστικά έχουμε ένα μέγεθος 7 περίπου ή και λίγο μεγαλύτερο κατά μήκος της ακτής ή εκτός αυτής κάθε 1 χρόνο και ένα μέγεθος 8 περίπου κάθε 13 χρόνια. Αυτοί οι σεισμοί πραγματοποιούνται σαν αποτέλεσμα της επέκτασης που προκαλείται από τις κινήσεις των τεκτονικών πλακών στο φλοιό της γης. Σ' αυτή την περιοχή, η Ειρηνική πλάκα κινείται σταθερά προς τα βόρεια με ταχύτητα της τάξης των 5.2 cm το χρόνο και καταδύεται ή «υποβυθίζεται» κάτω από τη βόρεια Αμερικανική

Βιβλιοθήκη "Θεόφραστος" - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

πλάκα. Μια ανωμαλία στην κορυφή της Ειρηνικής πλάκας, γνωστή ως τμήμα YAK, εμποδίζει την ομαλή καταβύθιση της πλάκας αυτής με συνέπεια η υποπλάκα της βόρειας Αμερικανικής πλάκας Wrangell, να ελευθερωθεί και να περιστραφεί δεξιόστροφα (σχ. 4.5).



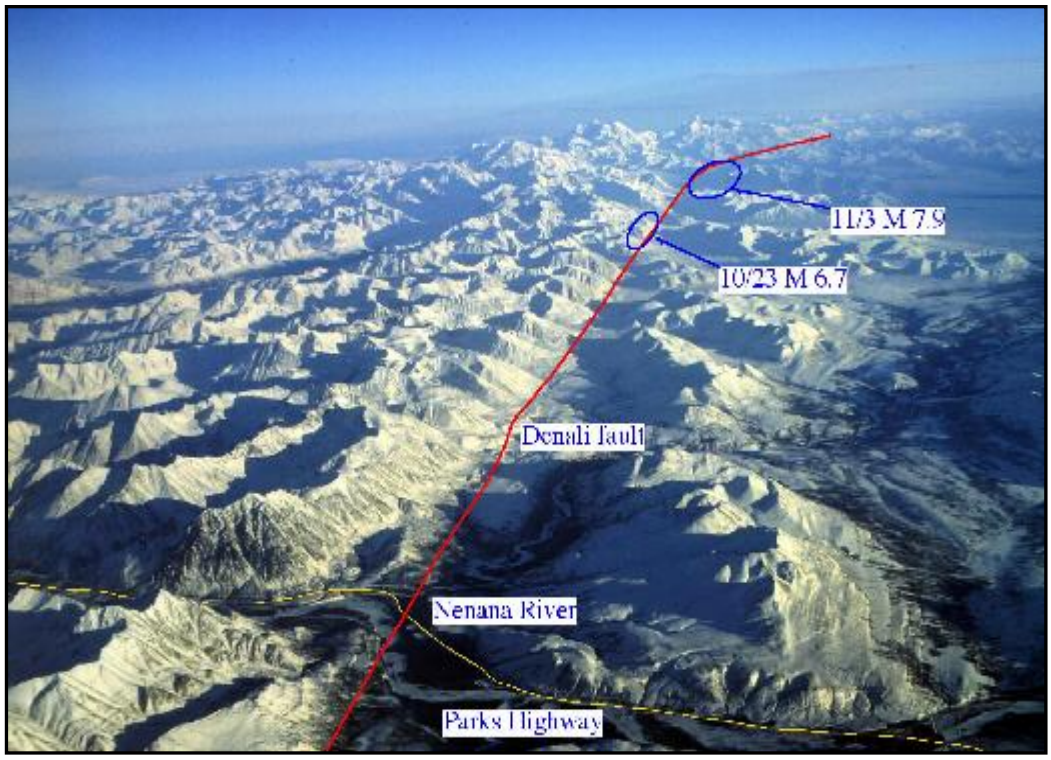
Σχήμα 4.5.– *Ο παραπάνω χάρτης δείχνει τις τεκτονικές πλάκες που επηρεάζουν το νοτιοανατολικό ρήγμα της Alaska. Η Ειρηνική πλάκα βυθίζεται κάτω από τη Βόρεια Αμερικανική πλάκα. Το Yakutat block (YAK) εμποδίζει την Ειρηνική πλάκα από την ομαλή της υποβύθιση, προκαλώντας την Wrangell υποπλάκα να σταματήσει απότομα τη Βόρεια Αμερικανική πλάκα και να περιστραφεί κατά τη φορά των δεικτών του ρολογιού. Τα ρήγματα Denali και Totschunda τοποθετούνται κατά μήκος του βορειοανατολικού τμήματος της υποπλάκας Wrangell.*
(http://earthobservatory.nasa.gov/Study/denali/)

Η δυτικότερη περιοχή της Αλάσκας, η οποία συμπεριλαμβάνει το βουνό Aghest Peak στη βόρεια Αμερική, είναι μια ζώνη συμπίεσης ανάμεσα στη βόρεια Αμερικανική πλάκα και την υποπλάκα Wrangell. Τα

Βιβλιοθήκη "Θεόφραστος" - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

ρήγματα του Denali και του Totshunda βορειοανατολικά βρίσκονται στο χείλος της υποπλάκας Wrangell.

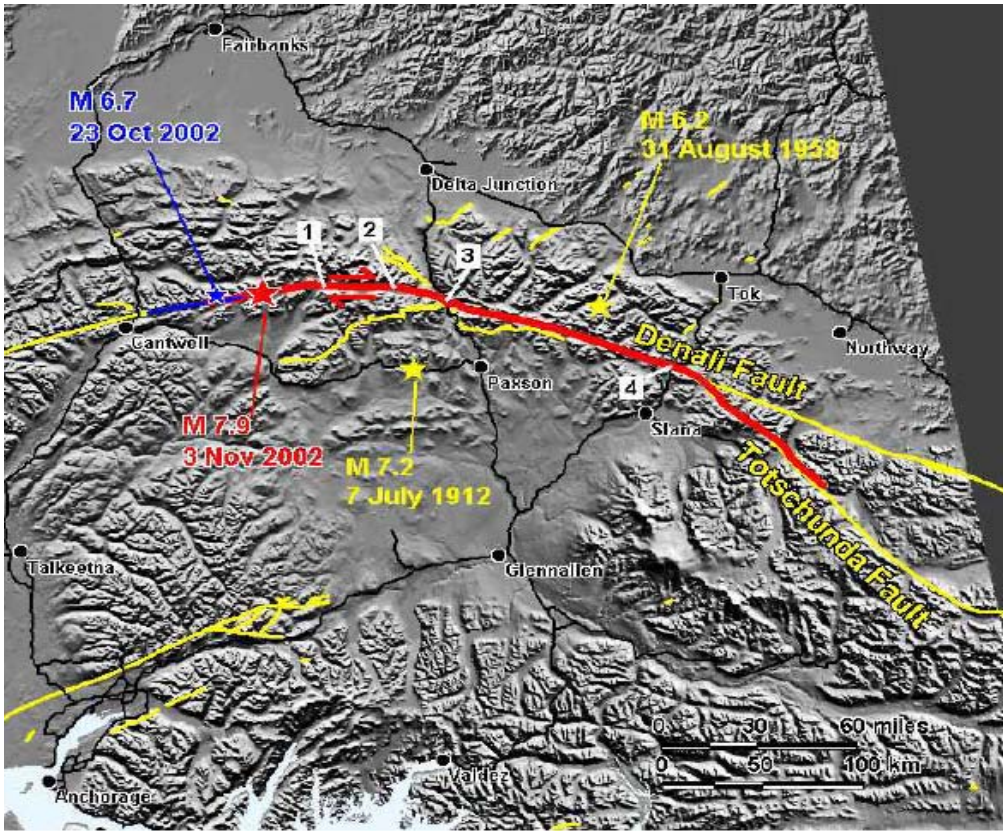
Το σχήμα 4.6 δείχνει τις προσεγγιστικές τοποθεσίες των σεισμικών επικέντρων. Η όψη αυτή παρουσιάζεται προς τα ανατολικά, κατά μήκος του κύριου κλάδου του ρήγματος του Denali, το οποίο σημειώνεται εδώ από μια χαρακτηριστική γραμμική κοιλάδα κατά μήκος της νότιας άκρης του Alaska Range. Ο ποταμός Nenana οριοθετεί από τα ανατολικά το Denali National Park. Το Park Highway, το οποίο συνδέει τα Anchorage και Fairbanks, εκτείνεται ανατολικά του ποταμού, βόρεια του ρήγματος, αλλά αποκλίνει απ' το ποτάμι προς το νότο. Το επίκεντρο του σεισμού της 3ης Νοεμβρίου ήταν κατά προσέγγιση 68 km ανατολικά της εθνικής οδού. Σ' αυτήν την απόσταση, οι ανώμαλες κορυφές των βουνών Deborah και Hess ανέρχονται γύρω στα 3650 m, λίγο βορειότερα των επικέντρων και της καμπής στο ρήγμα Denali.



Σχήμα 4.6.– *Από τον Wesley K. Wallace, Γεωφυσικό Ινστιτούτο, Πανεπιστήμιο του Alaska Fairbanks (http://www.aeic.alaska.edu/Denali_Fault_2002/)*

Οι σεισμοί στο Nenana Mountain και στο ρήγμα Denali προκάλεσαν μια αξιόλογη μετασεισμική ακολουθία. Το AEIC εντόπισε πάνω από 1000 μετασεισμούς του σεισμού M 6.7 πριν από τον κύριο σεισμό M 7.9 και πάνω από 14000 μετασεισμούς μέχρι τα μέσα του Δεκέμβρη του 2002.

Οι μεγαλύτεροι μετασεισμοί του σεισμού του Nenana Mountain ήταν δύο γεγονότα μεγέθους 5.8. Ένας προσεισμός μεγέθους 4.4 προηγήθηκε του κύριου σεισμού του Denali κατά 3.5 ώρες. Ο μεγαλύτερος μετασεισμός (M=5.8) συνέβη 20 λεπτά μετά τον κύριο σεισμό και σημειώθηκε 95 km ανατολικά του επικέντρου του κυρίου σεισμού (10 km ανατολικά της εθνικής οδού Richardson). Παρακολουθώντας τον σεισμό που έλαβε χώρα στο ρήγμα Denali, ο ρυθμός γένεσης των γεγονότων αυξήθηκε από ένα ποσοστό της τάξης των 40 γεγονότων ανά ημέρα το Σεπτέμβριο, σ'ένα ποσοστό της τάξης των 400 περίπου γεγονότων ανά ημέρα κατά το Νοέμβριο. Η γρήγορη αυτή αύξηση των στοιχείων είχε σαν αποτέλεσμα την επιβράδυνση των διαδικασιών ανάλυσης των δεδομένων. Επιπρόσθετες καθυστερήσεις προκλήθηκαν από την ανάγκη



Σχήμα 4.7.- *Εδώ φαίνονται το επίκεντρο του σεισμού της 3ης Νοεμβρίου (κόκκινο) και ο προσεισμός της 23ης Οκτωβρίου με μέγεθος M=6.7 (μπλε), καθώς επίσης και δύο παλαιότεροι σεισμοί (κίτρινο) που καταγράφηκαν γύρω από το ρήγμα. Με κίτρινο δείχνονται άλλα ρήγματα που αποδεικνύουν τη δραστηριότητα κατά τη διάρκεια του Τεταρτογενούς. (http://wwwdggs.dnr.state.ak.us/earthquake3.html)*

για επανεξέταση των ελαστικών παραμέτρων του σεισμού για δεύτερη φορά εφόσον τα στοιχεία που προέρχονταν από το προσωρινό δίκτυο του Denali συγχωνεύτηκαν με τα στοιχεία του AEIC. Το μέγεθος πληρότητας m_c του καταλόγου των μετασεισμών ποικίλλει κατά μήκος της ρηξιγενούς ζώνης. Για το διάστημα Οκτώβριος-Δεκέμβριος το m_c είναι 1.4, ενώ είναι χαμηλότερο (1.1) στο δυτικό άκρο της διάρρηξης και υψηλότερο (2.2) στο ανατολικό άκρο.

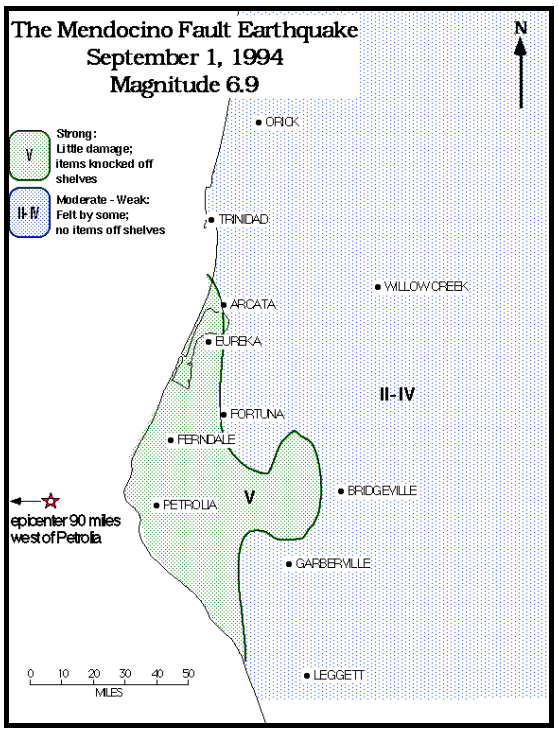
Ο σεισμός μεγέθους 7.9 του Denali της 3ης Νοεμβρίου 2002 προέκυψε από τη δεξιόστροφη μετατόπιση κατά μήκος του συστήματος των ρηγμάτων Denali και Totschunda στην Alaska (σχ. 4.7). Το συνολικό μήκος της διάρρηξης ήταν τουλάχιστον 300 km.

Βιβλιοθήκη "Θεόφραστος" - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΣΕΙΣΜΟΣ MENDOCINO

Ο σεισμός Mendocino εκδηλώθηκε την 1η Σεπτεμβρίου του 1994 στην παράκτια περιοχή, 140 χιλιόμετρα περίπου δυτικά του ακρωτηρίου του Mendocino (σχ. 5.1) και είχε μέγεθος M=6.9. Το γεγονός αυτό συνέβη κατά μήκος του ρήγματος του Mendocino, στο όριο μεταξύ της Ειρηνικής πλάκας προς τα νότια και της πλάκας Gorda προς τα βόρεια. Το συγκεκριμένο ρήγμα είναι πολύ ενεργό και δίνει πολύ συχνά μικρούς σε μέγεθος σεισμούς και σπανιότερα μεγάλους. Επίσης είναι υπεύθυνο για το 30% της σεισμικής ενέργειας που ελευθερώνεται ετησίως στη Βόρεια ακτή της περιοχής. Το ρήγμα του Mendocino είναι κατακόρυφο, με διεύθυνση Ανατολής-Δύσης. Η κίνησή του είναι παράταξης με την πλάκα Gorda να κινείται προς τα ανατολικά σε σχέση με την Ειρηνική πλάκα.



Σχήμα 5.1.- *Χάρτης της περιοχής του ρήγματος του Mendocino. Στο χάρτη φαίνεται το επίκεντρο του σεισμού της 1ης Σεπτεμβρίου 1994 με μέγεθος M=6.9.*
(http://www.humboldt.edu/~geodept/earthquakes/recent_eqks.html)

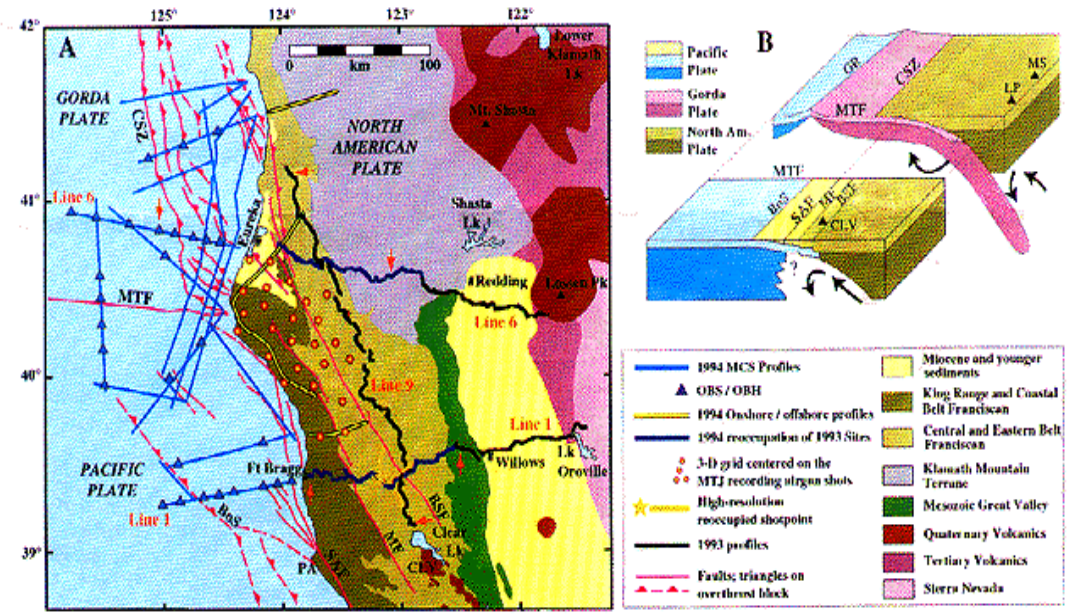
Αν και ο σεισμός της 1ης Σεπτεμβρίου ήταν ο μεγαλύτερος σε μέγεθος σεισμός που συνέβη στις Ηνωμένες Πολιτείες το 1994, ωστόσο δεν προκάλεσε σοβαρές ζημιές σε κτίρια εξαιτίας της μεγάλης απόστασης του επικέντρου του από τις κατοικημένες περιοχές. Ο σεισμός αυτός προκάλεσε μία κατακόρυφη μετατόπιση του γήινου φλοιού της τάξης των 0,5 μέτρων, κάτι που αρχικά επηρέασε την πυκνοκατοικημένη κοιλάδα του San Fernando κοντά στο Los Angeles (USGS & SCEC, 1994). Μετρήσεις της στάθμης της πλημμυρίδας στο σημείο της μετατόπισης, του βαθμού στον οποίο επηρεάζουν τα αποθέματα νερού καθώς και μελέτες των βλαβών των τεχνικών κατασκευών, είχαν σαν αποτέλεσμα τον εντοπισμό σημαντικών καταστροφών που οφείλονταν στην στατική παραμόρφωση και στην εδαφική κίνηση που προκλήθηκε από το σεισμό. Σημαντικές ποσότητες νερού και υδρογραφικά δίκτυα διασχίζουν την κοιλάδα του San Fernando και ο σεισμός προκάλεσε τη μεταβολή της κλίσης τους καθώς και τη παραμόρφωση τους. Εννιά μέρες μετά το σεισμό, εστάλη μέσω του ηλεκτρονικού ταχυδρομείου μία αναφορά με τις αρχικές εκτιμήσεις για τις μεταβολές των κλίσεων στο ύπαιθρο, που έγιναν μέσω μετρήσεων GPS, σε τοπογράφους και μηχανικούς της περιοχής για να τους βοηθήσει να υπολογίσουν την πιθανότητα πρόκλησης περαιτέρω καταστροφών (Hudnut and Murray, 1994). Οι αναφορές με τις εκτιμήσεις που δημιουργήθηκαν για τον συγκεκριμένο σεισμό, εστάλησαν και σε άλλους ομοσπονδιακούς, κρατικούς και τοπικούς κυβερνητικούς οργανισμούς σαν πρότυπο, για να μπορέσουν να επανεξεταστούν τα επιτρεπτά όρια της στάθμης των υδάτων, για να γίνουν αναγνωρίσιμες πιθανές μεταβολές από τα διεθνή δίκτυα ελέγχου (τα οποία αποτελούν τα κέντρα για τον καθορισμό των εδαφικών συνόρων) καθώς και για να μπορέσουν να εντοπιστούν καταστροφές οι οποίες έχουν υποστεί κάποιες τεχνικές κατασκευές. Επίσης, οι πληροφορίες που περιέχονται στις αναφορές αυτές μπορούν να βοηθήσουν άλλους οργανισμούς να οργανώσουν την εποπτεία των διεθνών δικτύων ελέγχου και των βαθυμετρικών αξιολογήσεων των καναλιών νερού και των λιμανιών διευκολύνοντας έτσι την αποτελεσματικότερη εκμετάλλευση των κοινών αποθεμάτων.

Από την άλλη, καταγράφηκε ως ο μεγαλύτερος σεισμός κατά τους ιστορικούς χρόνους, κάτι που σχετίζεται άμεσα με το ρήγμα του Mendocino. Ο συγκεκριμένος σεισμός έγινε αισθητός από τα νότια της περιοχής Bay του Σαν Φρανσίσκο μέχρι το Roseburg του Oregon. Αξιοσημείωτο είναι επίσης το γεγονός ότι 45 λεπτά μετά τον κύριο σεισμό καταγράφηκε ένα κύμα ύψους 15 μέτρων περίπου, το οποίο ερμηνεύτηκε ως τσουνάμι.

Βιβλιοθήκη "Θεόφραστος" - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

Η δυτική ακτή της Βόρειας Αμερικής είναι σεισμικά ενεργή, αποτελώντας μέρος του χαρακτηριστικού «Δαχτυλιδιού της Φωτιάς» που οριοθετεί τον Ειρηνικό ωκεανό.

Στο σημείο της τριπλής σύνδεσης του Mendocino δημιουργείται μία πολύπλοκη ζώνη λόγω της ταχείας Ολοκαινικής ανάδυσης και παραμόρφωσης της επιφάνειας. Στο σημείο αυτό έχουμε τη συμβολή της



Σχήμα 5.2.– *(α) Απλοποιημένος γεωλογικός χάρτης της Νότιας California στον οποίο απεικονίζονται οι θέσεις όπου διεξήχθησαν το 1993 και το 1994 σεισμικά πειράματα στη ξηρά. Τα βέλη με χρώμα πορτοκαλί δείχνουν τμήματα των γραμμών 1,6 και 9 τα οποία φαίνονται σχηματικά στην εικόνα (β).*

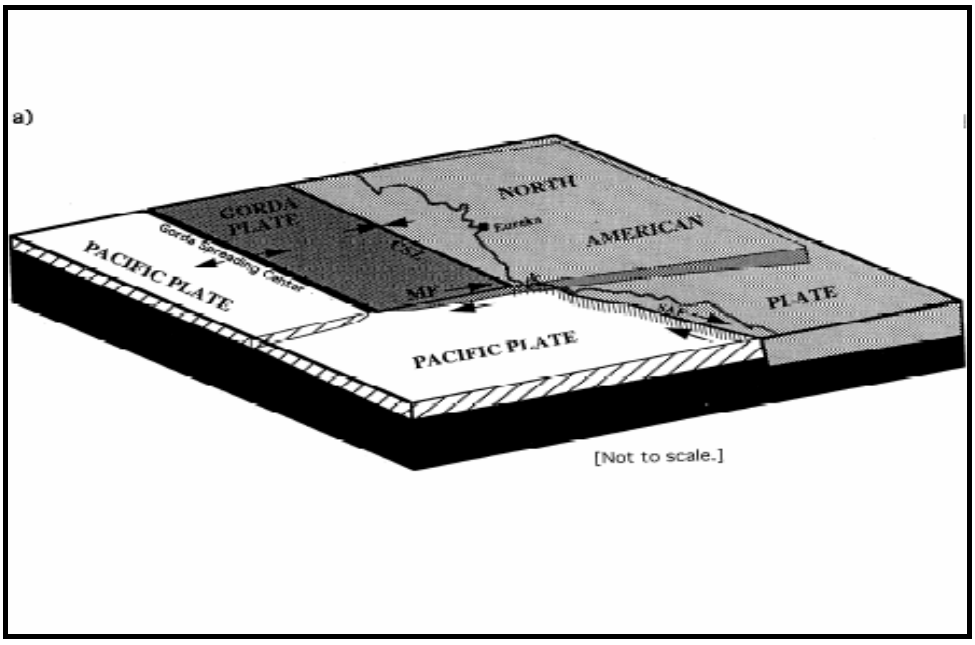
(β)Τρισδιάστατο σχήμα που απεικονίζει την αλληλεπίδραση των τεκτονικών πλακών στην περιοχή της τριπλής συμβολής του Mendocino.Στο σχήμα φαίνεται η ανάπτυξη ενός πλακοειδούς παραθύρου καθώς η πλάκα Gorda μετακινείται προς τα βόρεια (όχι υπό κλίμακα). Οι ανοιχτόχρωμες γραμμές απεικονίζουν εξωτερικό φλοιό, οι πιο σκούρες γραμμές αντιπροσωπεύουν τμήμα του μανδύα από τη λιθόσφαιρα. Το ανοιχτοκίτρινο χρώμα 'Ειρηνική πλάκα' φανερώνει την ύπαρξη υλικού που προέρχεται από τον φλοιό, υλικό που έχει μεταφερθεί από τη Βόρεια Αμερικάνικη πλάκα πάνω στην Ειρηνική. Η χρωματική διαβάθμιση από το κίτρινο στο πράσινο δείχνει την ύπαρξη υλικού από τον φλοιό ανάμεσα στη ζώνη του ρήγματος του Αγίου Ανδρέα η οποία έχει μία ενδιάμεση κίνηση από αυτές της Βόρειας Αμερικάνικης Πλάκας και της Ειρηνικής. Τα βέλη αντιπροσωπεύουν την κατεύθυνση της ασθενοσφαιρικής ροής. (http://www.agu.org/sci_soc/trehu.html).

ζώνης υποβύθισης Cascadia, του ρήγματος του Αγίου Ανδρέα καθώς και του ρήγματος του Mendocino (σχ.5.2). Ανάμεσα σε αυτόν τον ορεινό τεκτονικό κόμβο παρατηρήθηκαν ανυψώσεις των παράκτιων περιοχών, μεγαλύτερες των 1.4 m στο σεισμό του Cape Mendocino που έγινε το 1992 και είχε μέγεθος M_s=7.1. Ραδιομετρικά δεδομένα παλαιών γραμμών των ακτών (<8000 χρόνια), κατά μήκος του δυτικότερου ίχνους της ζώνης υποβύθισης Cascadia, υποδεικνύουν ότι το Ολοκαινικό πρότυπο του δικτύου ανόδου της επιφάνειας έχει πολλές ομοιότητες με το πρότυπο ανάδυσης που προκλήθηκε από το σεισμό του 1992.

Αποτελέσματα αυτής της έρευνας δείχνουν επίσης ότι έγιναν τουλάχιστον τέσσερις φορές σεισμικά επεισόδια μεταξύ 600 και 7000 χρόνων πριν και ότι μερικά από τα γεγονότα του παρελθόντος μπορεί να είχαν σαν αποτέλεσμα πολύ μεγαλύτερα ποσοστά ανυψώσεων (~2.5m) από αυτά των πρόσφατων σεισμικών γεγονότων, πιθανότατα κατά τη διάρκεια μεγάλων σεισμών (M>7.5) κατά μήκος της μέγα-εφίππευσης της ζώνης υποβύθισης Cascadia. Ωστόσο, άλλη μια αληθοφανής ερμηνεία των δεδομένων είναι ότι πολλαπλοί σεισμοί, οι οποίοι έδωσαν πολύ μικρότερες μετατοπίσεις από αυτές που αναμένονταν στατιστικά για κάθε σεισμικό γεγονός, έγιναν μέσα σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα, δίνοντας στις γεωλογικές αποτυπώσεις την εικόνα μικρότερης συχνότητας σεισμών και μεγαλύτερων σε μέγεθος γεγονότων. Ανεξάρτητα από τον αριθμό και την χρονική στιγμή γένεσης των παλαιοσεισμών, ο αριθμός των μετατοπίσεων είναι ο ελάχιστος σε σχέση με τον αριθμό των γεγονότων που πραγματοποιήθηκαν λόγω ξαφνικών, ταχέων ανυψώσεων. Στο παρόν, οι ρυθμοί και τα πρότυπα του δικτύου ανύψωσης της επιφάνειας είναι περισσότερο γνωστά από το χρόνο γένεσης και το μέγεθος των παλαιοσεισμών. Περίοδοι Ολοκαινικών εμφανίσεων αναγνωρίζονται πολύ πιο νότια από το ρήγμα του Mendocino, περίπου 30km, κατά μήκος του αποκαλυπτόμενου ρήγματος του Αγίου Ανδρέα. Οι εμφανίσεις αυτές μπορεί αν σχετίζονται επίσης με την ταυτόχρονη με το σεισμό ανύψωση της επιφάνειας. Βασιζόμενοι σε πρόσφατη χαρτογράφηση των ενεργών ρηγμάτων της περιοχής, υποδεικνύεται εδώ ότι αυτή η ανύψωση είναι το αποτέλεσμα πολλαπλών δακτυλίων ασυνεχών εφιππεύσεων και ρηγμάτων οριζόντιας μετατόπισης τα οποία παραμορφώνουν τα όρια των πλακών στο τελευταίο τμήμα του ρήγματος του Αγίου Ανδρέα. Αυτή η ερμηνεία είναι σύμφωνη με το γεγονός ότι ένα μόνο σημαντικό ρήγμα οριζόντιας μετατόπισης δεν έχει αναγνωριστεί στην περιοχή της τριπλής σύνδεσης του Mendocino, καθώς πολλά μικρά ανάστροφα ρήγματα που διασταυρώνονται με Ολοκαινικές αποθέσεις και γεωμορφολογικές επιφάνειες έχουν χαρτογραφηθεί και χρονολογηθεί.

Βιβλιοθήκη "Θεόφραστος" - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

Μερικοί από τους πιο υψηλούς ρυθμούς παραμόρφωσης του φλοιού, ανύψωσης της επιφάνειας και σεισμικής δραστηριότητας στη Βόρεια Αμερική παρατηρούνται στο βορειότερο τμήμα του ρήγματος του Αγίου Ανδρέα (SAF), στη συμβολή του με την ζώνης υποβύθισης Cascadia (CSZ) και τη σχισμογενή ζώνη του Mendocino (MF) (σχ. 5.3).Αυτή η συμβολή, γνωστή και ως τριπλή σύνδεση του Mendocino (MTJ), ευθύνεται για μεγαλύτερο από το ένα τέταρτο της σεισμικής ενέργειας που απελευθερώνεται από όλους τους σεισμούς της California αλλά και περιοχών κοντά σε αυτήν, κατά τη διάρκεια των τελευταίων 50 χρόνων. Περισσότεροι από 60 σεισμοί με μέγεθος M>5.5 έγιναν στη γειτονία της τριπλής σύνδεσης του Mendocino τον τελευταίο 1.5 αιώνα.

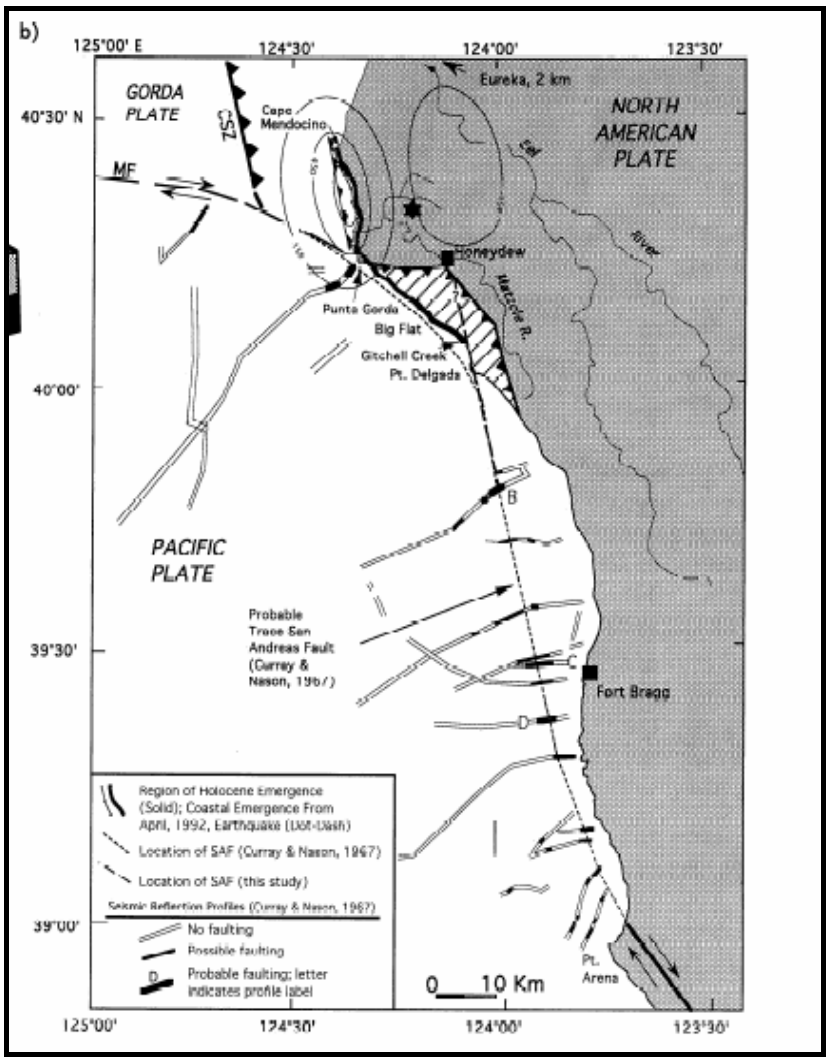


Σχήμα 5.3.- *Τρισδιάστατη απεικόνιση της περιοχής της τριπλής σύνδεσης του Mendocino. Η λιθοσφαιρική πλάκα Gorda μορφοποιείται στο κέντρο διαχωρισμού και υποβυθίζεται κάτω από τη Βόρεια Αμερικανική πλάκα, προς τα ανατολικά, κατά μήκος της ζώνης υποβύθισης Cascadia (CSZ). Η Βόρεια Αμερικανική πλάκα και η Ειρηνική πλάκα ολισθαίνουν, απομακρυνόμενες η μία από την άλλη κατά μήκος του ρήγματος του Αγίου Ανδρέα, μετασχηματίζοντας έτσι τα όρια των πλακών. Οι πλάκες Ειρηνική και Gorda ολισθαίνουν επίσης απομακρυνόμενες η μία από την άλλη στη ρηξιγενή ζώνη του Mendocino, η οποία είναι και αυτή δεξιόστροφη, μεταβάλλοντας τα όρια των πλακών. (Merritts, D.J. 1996)*

Δύο παράμετροι είναι απαραίτητες για την κατανόηση της σεισμοτεκτονικής της Βόρειας California. Η πρώτη είναι η καταγραφή των

Βιβλιοθήκη "Θεόφραστος" - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

ενεργών ιχνών και της γεωμετρίας των βορειότερων 140 km του ρήγματος του Αγίου Ανδρέα και των νοτιότερων μερικών δεκάδων χιλιομέτρων της ζώνης υποβύθισης Cascadia. Παρά τη σεισμικότητα της περιοχής, οι θέσεις των ορίων αυτών των σχηματισμών δεν έχουν καθοριστεί ακόμα με σημαντική ακρίβεια, λόγω της ανωμαλίας του εδάφους και της πολύπλοκης τεκτονικής που εμφανίζει η περιοχή. Η δεύτερη παράμετρος καθορίζει αν και πόσο συχνά, μεγάλοι (M_s>7.5) σεισμοί έχουν γίνει στις κορυφές αυτών των τεκτονικών δομών. Παλαιοσεισμικές μελέτες, 150 km νότια, κοντά στο Point Arena, φανερώνουν ότι έγιναν πάνω από τέσσερις μεγάλοι σεισμοί στο βόρειο τμήμα του ρήγματος του Αγίου Ανδρέα, οι οποίοι προηγήθηκαν του γεγονότος του 1906, τα τελευταία 2000 χρόνια. Στρωματογραφικές



Σχήμα 5.4.– *Χάρτης της περιοχής και της τεκτονικής κατάστασης της τριπλής συμβολής στη περιοχή του Mendocino. (Merritts, D.J. 1996)*

μελέτες της βαλτώδους έκτασης βόρεια της τριπλής σύνδεσης του Mendocino φανερώνει ότι μπορεί να έγιναν τουλάχιστον πέντε επεισόδια καταβύθισης που οφείλονταν στη γένεση μεγάλων σεισμών, κατά μήκος της ζώνης υποβύθισης Cascadia, στην βόρεια California τα τελευταία 1600 χρόνια (σχ. 5.4).

Βιβλιοθήκη "Θεόφραστος" - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΑΚΟΛΟΥΘΙΩΝ

Για τη μελέτη των τριών σεισμικών ακολουθιών –Landers, Denali, Mendocino– χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από το Γεωλογικό Ινστιτούτο των Ηνωμένων Πολιτειών (USGS).

Για την επεξεργασία των δεδομένων χρειάστηκε να μορφοποιηθούν αυτά σ' ένα τύπο αρχείων που θα έκανε ευκολότερη την περαιτέρω ανάλυσή τους. Έτσι δημιουργήθηκαν κατάλογοι οι οποίοι περιείχαν στοιχεία για τον χρόνο γένεσης των σεισμών, το γεωγραφικό μήκος και πλάτος του επικέντρου τους και το μέγεθός τους. Η μελέτη των σεισμικών ακολουθιών επικεντρώθηκε περισσότερο στον τρόπο εξέλιξης των προσεισμών και μετασεισμών της κάθε ακολουθίας σε χρονικό διάστημα μέχρι και τρεις μήνες πριν και μετά τη γένεση του κύριου σεισμού.

Για τη εξαγωγή συμπερασμάτων ήταν απαραίτητο να αναλυθούν χωριστά οι προσεισμοί από τους μετασεισμούς. Η ανάλυση αυτή περιελάμβανε τη μελέτη των χρονικών , χωρικών, χωροχρονικών και κατά μέγεθος κατανομών, καθώς και τη μεταβολή του μέσου μεγέθους, του κάθε σεισμού χωριστά, σε συνάρτηση με την παράμετρο b. Η μελέτη των προσεισμών, δεν οδήγησε σε αξιόπιστα αποτελέσματα λόγω του ότι κατά το συγκεκριμένο χρονικό διάστημα των τριών μηνών πριν από τη γένεση του κύριου σεισμού έγιναν προσεισμοί σημαντικού μεγέθους οι οποίοι αλλοίωναν την εικόνα των αποτελεσμάτων. Ωστόσο, στην πρώτη ακολουθία (σεισμός του Landers, 28 Ιουνίου 1992, M=7.2) μελετήθηκαν και οι προσεισμοί, χρησιμοποιώντας το μεγαλύτερο απ' αυτούς (σεισμός Joshua Tree, M=6.1) ως κύριο, αναλύοντας έτσι και την δική του ακολουθία. Ουσιαστικά έγινε επεξεργασία της ακολουθίας του Joshua Tree αυτόνομα, χωρίς να εμπλέκεται σ' αυτήν ο σεισμός του Landers. Στην επόμενη ακολουθία που αναλύθηκε (σεισμός του Denali, 3 Νοεμβρίου 2002, M=7.9) μελετήθηκαν τόσο οι προσεισμοί –αν και αυτοί δεν έδωσαν σημαντικά αποτελέσματα– όσο και οι μετασεισμοί της. Τέλος, στην ακολουθία του Mendocino (1 Σεπτεμβρίου 1994, M=6.9) έγινε προσπάθεια να μελετηθεί η προσεισμική ακολουθία, αλλά τα αποτελέσματά δεν ήταν αρκετά αξιόπιστα ώστε να οδηγήσουν σε ικανοποιητικά συμπεράσματα. Έτσι η μελέτη εστιάστηκε στην επεξεργασία μόνο της μετασεισμικής ακολουθίας του σεισμού αυτού.

Βιβλιοθήκη "Θεόφραστος" - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

Μελετώντας τις κατανομές (χρονική, χωρική, χωροχρονική, κατά μέγεθος και μεταβολή του μέσου μεγέθους–παραμέτρου b) προέκυψαν ορισμένα αξιοπρόσεκτα συμπεράσματα τα οποία και καταγράφονται στο τέλος της εργασίας.

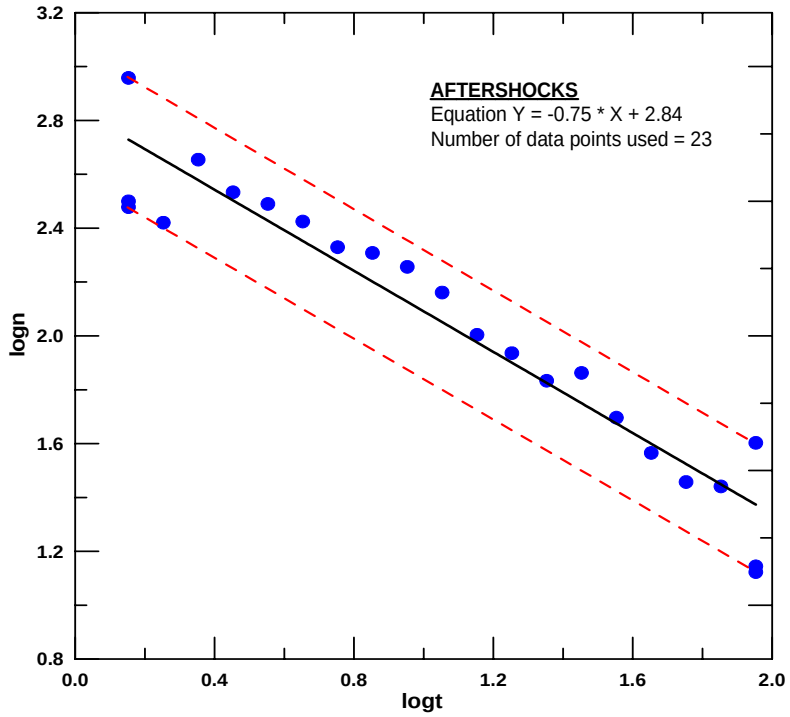
Βιβλιοθήκη "Θεόφραστος" - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

6.1 LANDERS

Στη προσπάθεια μελέτης της σεισμικής ακολουθίας του σεισμού του Landers (28 Ιουνίου 1992) διαπιστώθηκε πως δύο μήνες πριν την γένεση του κύριου σεισμού, έγινε ένας μεγάλος προσεισμός μεγέθους M=6.1. Η γένεση του προσεισμού αυτού (σεισμός Joshua Tree της 23ης Απριλίου 1992) και η μετέπειτα εξέλιξή του είχε ως αποτέλεσμα η μελέτη των προσεισμών του σεισμού του Landers να μην δίνει αξιόπιστα αποτελέσματα. Για το λόγο αυτό, ο σεισμός Joshua Tree μελετήθηκε ως ξεχωριστή σεισμική ακολουθία, ενώ η μελέτη του σεισμού του Landers, στηρίχτηκε στην επεξεργασία δεδομένων που αφορούσαν μόνο τους μετασεισμούς του σεισμού αυτού.

6.1.1 Χρονική κατανομή

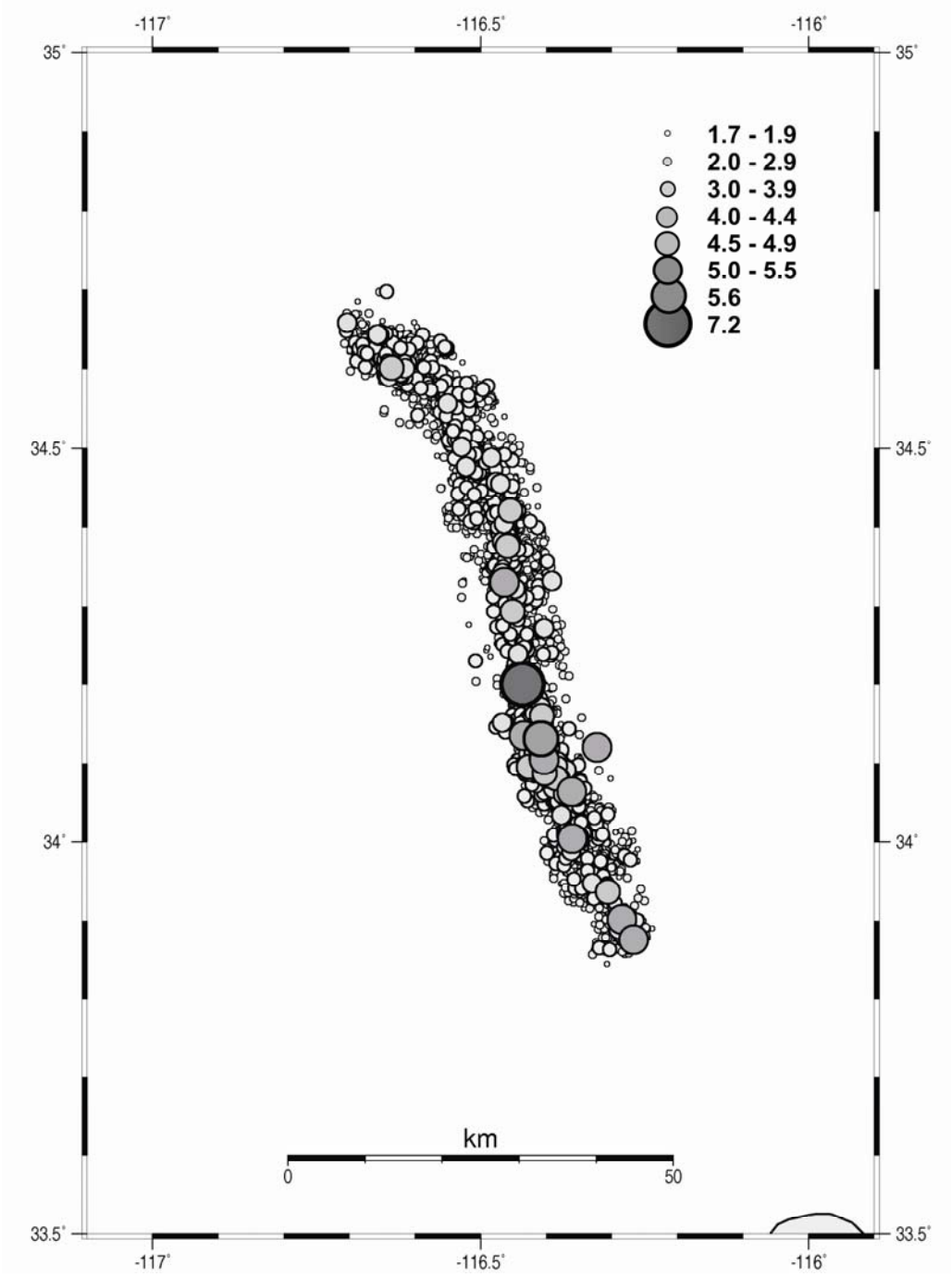
Στη χρονική κατανομή μελετήσαμε τον τρόπο με τον οποίο κατανέμεται η συχνότητα **n** των μετασεισμών σε συνάρτηση με τον χρόνο **t**. Χρησιμοποιώντας τις τιμές των λογαρίθμων της συχνότητας των μετασεισμών (**logn**) και του χρόνου (**logt**) δημιουργήσαμε το γράφημα που ακολουθεί (σχήμα 6.1). Όπως βλέπουμε από το γράφημα οι μετασεισμοί κατανέμονται χρονικά μέσα στο διάστημα εμπιστοσύνης (95%) φανερώνοντας έτσι την ομαλή εξέλιξη της ακολουθίας.



***Σχήμα 6.1.**–Χρονική κατανομή των μετασεισμών του σεισμού του Landers (28/6/92, M=7.2)*

6.1.2 Χωρική κατανομή

Η χωρική κατανομή της ακολουθίας του Landers παρουσιάζει (σχήμα 6.2), μια ΒΔ–ΝΑ διεύθυνση. Η διάρρηξη φαίνεται να είναι δικατευθυντική, αφού ο κύριος σεισμός (M=7.2) έγινε στο μέσο περίπου του ρήγματος αυτού. Από τη χωρική κατανομή προκύπτει ότι το μήκος του ρήγματος (σεισμογόνου χώρου) είναι της τάξης των 90km.

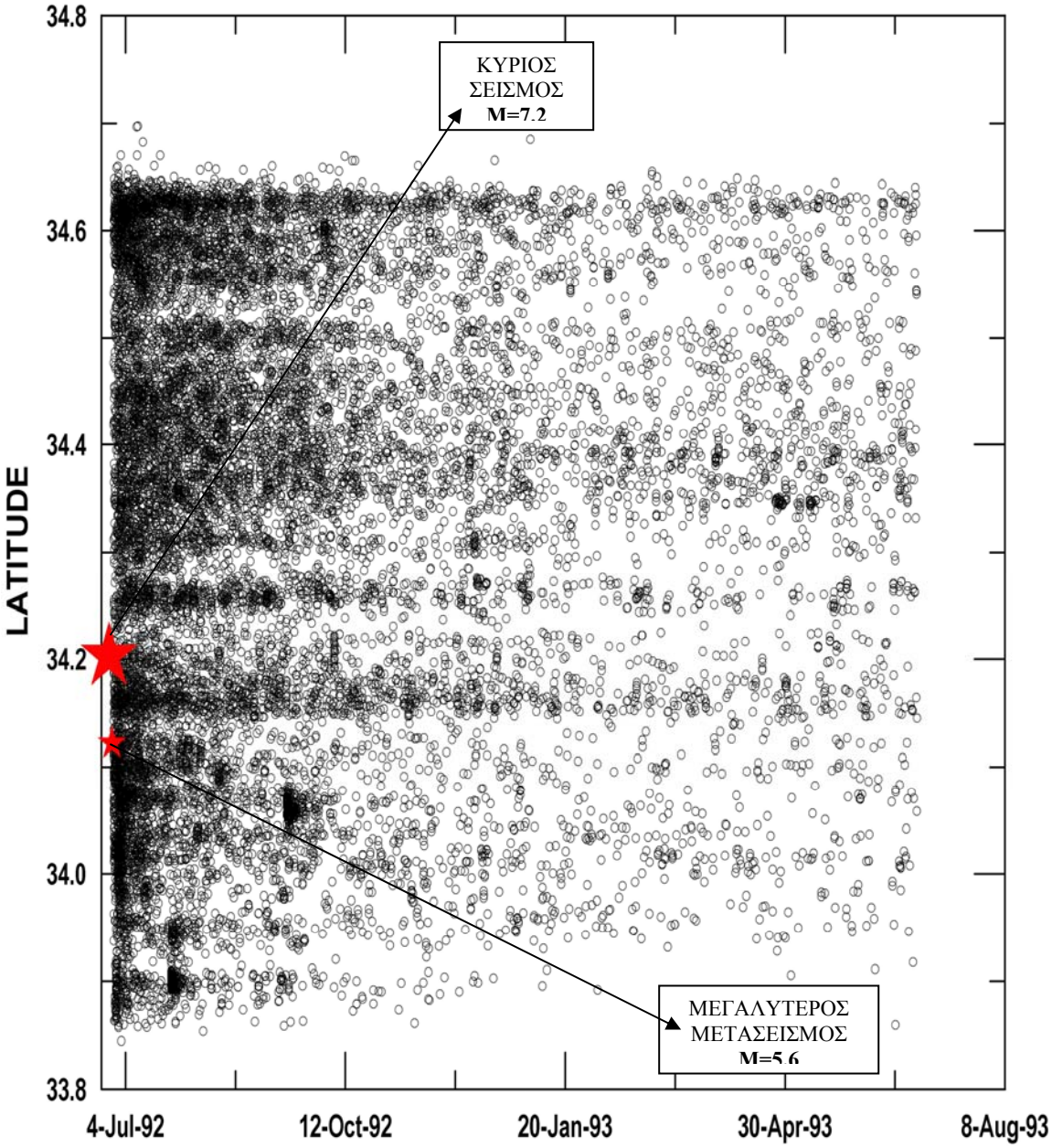


Σχήμα 6.2.– Χωρική κατανομή της σεισμικής ακολουθίας του Landers.

Βιβλιοθήκη "Θεόφραστος" - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

6.1.3 Χωροχρονική κατανομή

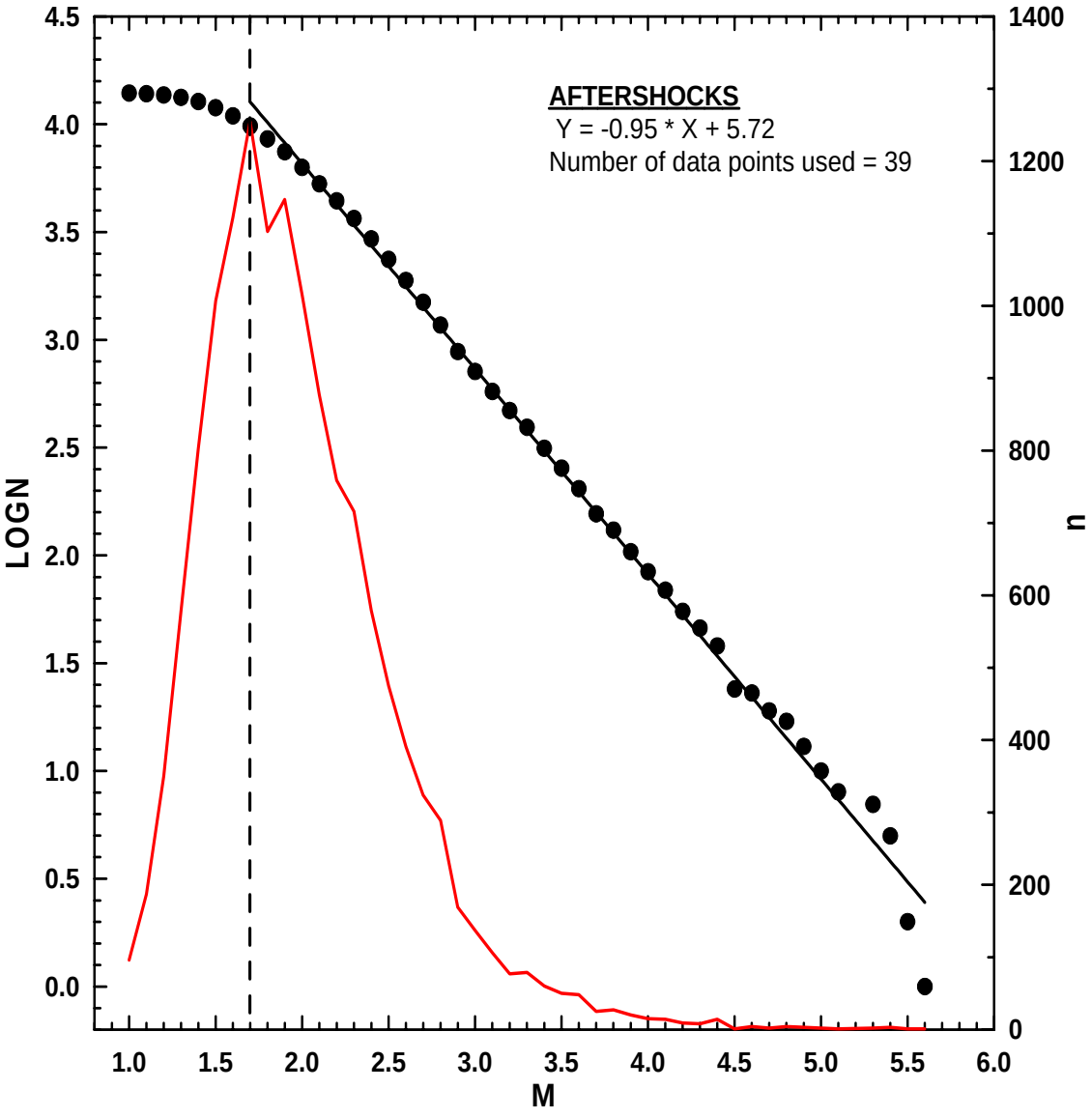
Ο κύριος σεισμός του Landers μεγέθους M=7.2 έγινε περίπου στο μέσον του ρήγματος (34.20, -116.43), όπως φαίνεται και στο ακόλουθο σχήμα (σχήμα 6.3). Η μετασεισμική του ακολουθία καλύπτει όλη την περιοχή του ρήγματος και προς τις δύο κατευθύνσεις, οπότε πρόκειται για δικατευθυντική διάρρηξη. Ο μεγαλύτερος μετασεισμός με μέγεθος M=5.6 σημειώθηκε νότια του κύριου σεισμού.



Σχήμα 6.3.- *Χωροχρονική κατανομή των μετασεισμών του σεισμού του Landers*

6.1.4 Κατά μέγεθος κατανομή

Η κατά μέγεθος κατανομή στηρίζεται στη μελέτη μεγεθών των μετασεισμών σε συνάρτηση με τη μεταβολή του λογαρίθμου των αθροιστικών συχνοτήτων τους. Στο γράφημα που προκύπτει (σχήμα 6.4) παρατηρούμε κλίση ίση με b=0.95, ενώ τα δεδομένα των μετασεισμών είναι πλήρη για μέγεθος M=1.7. Η τιμή του b είναι αρκετά μεγάλη ώστε να μπορεί να θεωρηθεί αναμενόμενη για τη μετασεισμική ακολουθία.



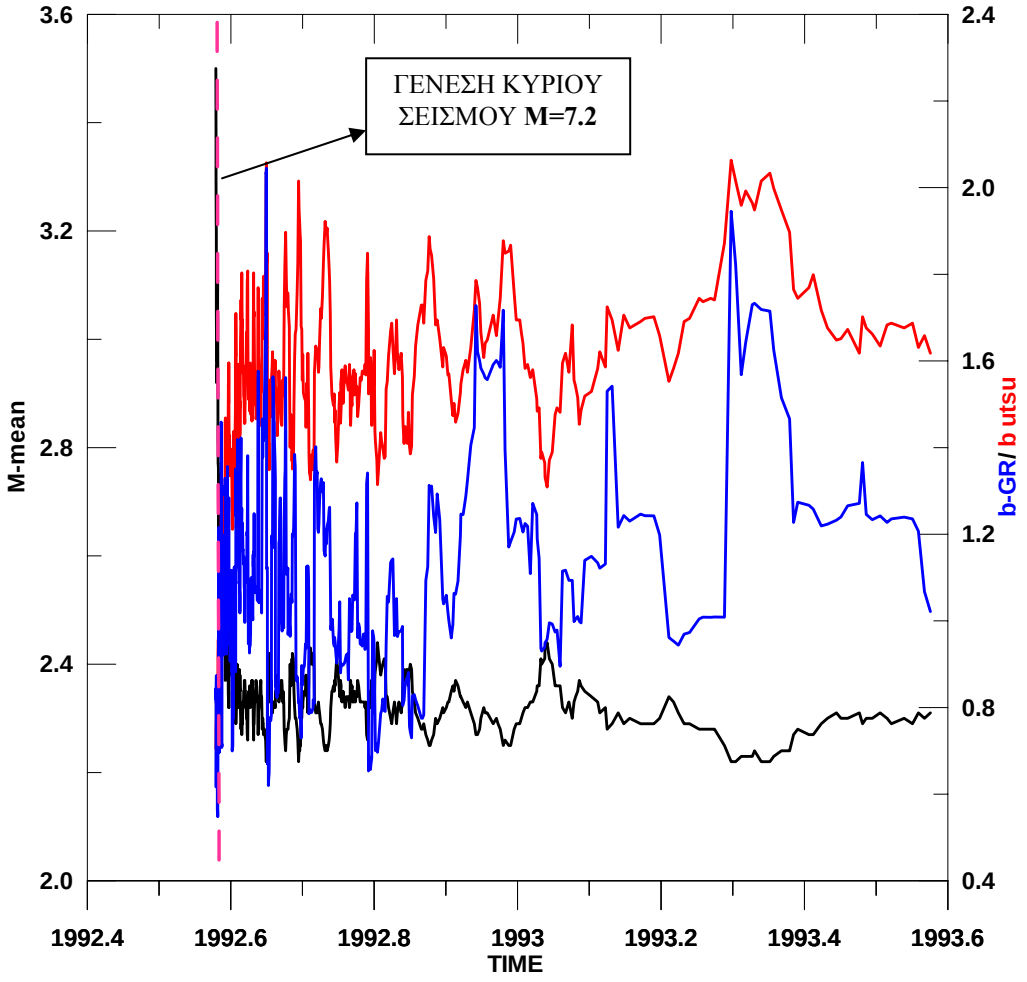
Σχήμα 6.4.– Κατά μέγεθος κατανομή των μετασεισμών του Landers

6.1.5 Μεταβολή Μέσου Μεγέθους-Παραμέτρου b

Για τη μελέτη της κατανομής αυτής χρησιμοποιήθηκε το μέσο μέγεθος των μετασεισμών παίρνοντας διαδοχικά πακέτα των σαράντα σεισμών, την κλίση b κατά Gutenberg – Richter που δίνεται από την σχέση logN=a-bM και την κλίση b κατά Utsu που δίνεται από την σχέση $M_{mean}=M_{min}+\log e/b$. Με καθένα από τα παραπάνω δεδομένα δημιουργούμε τα αντίστοιχα γραφήματα σε συνάρτηση με το χρόνο.

Στο γράφημα που ακολουθεί (σχήμα 6.5), το οποίο απεικονίζει τη μεταβολή του μέσου μεγέθους με το χρόνο, παρατηρούμε ότι μετά τη γένεση του κύριου σεισμού (διακεκομμένη γραμμή), το μέσο μέγεθος των μετασεισμών παραμένει σταθερό, όπως και αναμενόταν.

Όσον αφορά την παράμετρο b, παρουσιάζει μία σταθερά μικρή ανοδική πορεία, κάτι που είναι απολύτως φυσιολογικό για μετασεισμική ακολουθία.



Σχήμα 6.5.- *Μεταβολή μέσου μεγέθους-παραμέτρου b της μετασεισμικής ακολουθίας του Landers*

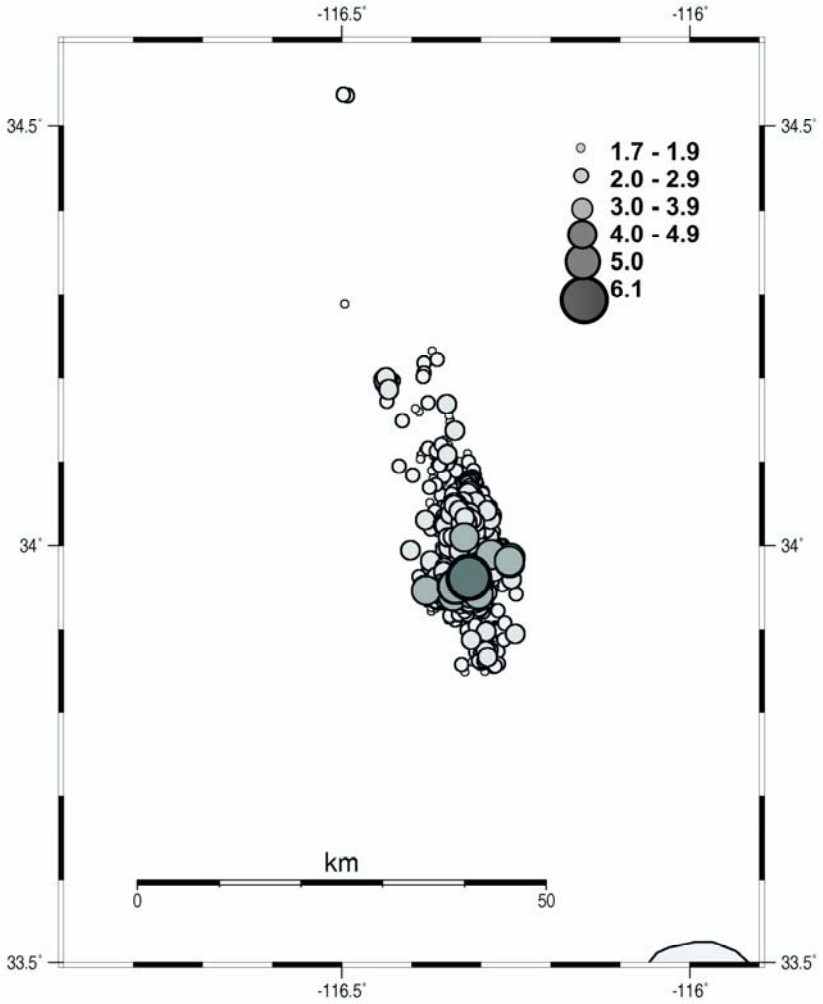
6.2 JOSHUA TREE

Ο σεισμός του Joshua Tree έγινε στις 23 Απριλίου του 1992 και είχε μέγεθος ίσο με M=6.1. Η γένεση του σεισμού αυτού πραγματοποιήθηκε δύο μήνες πριν από τη γένεση του κύριου σεισμού του Landers.

Για μελέτη του μεγάλου αυτού σεισμού που μπορεί να χαρακτηρισθεί ως προσεισμός του σεισμού του Landers, εξετάσαμε τη χωρική και χωροχρονική κατανομή, καθώς και τη μεταβολή του μέσου μεγέθους και της παραμέτρου b με το χρόνο.

6.2.1 Χωρική κατανομή

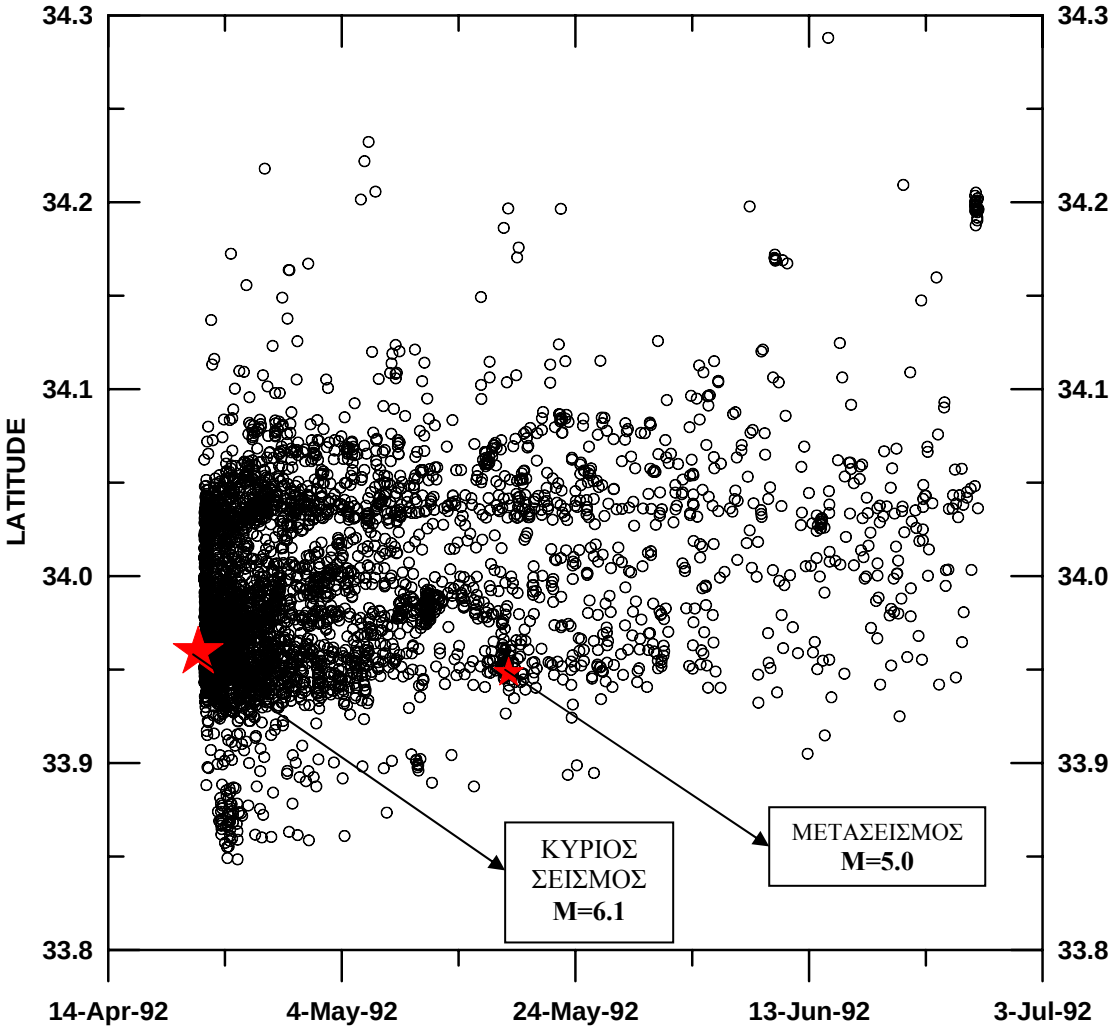
Η χωρική κατανομή των σεισμών της ακολουθίας του Joshua Tree (σχήμα 6.6) συγκεντρώνεται κατά μήκος μιας διεύθυνσης ΒΒΔ-ΝΝΑ. Το μήκος του σεισμογόνου χώρου είναι της τάξης των 35km, ενώ ο κύριος σεισμός εκδηλώθηκε περίπου στο μέσο του.



Σχήμα 6.6. *– Χωρική κατανομή της σεισμικής ακολουθίας του Joshua Tree.*

6.2.2 Χωροχρονική κατανομή

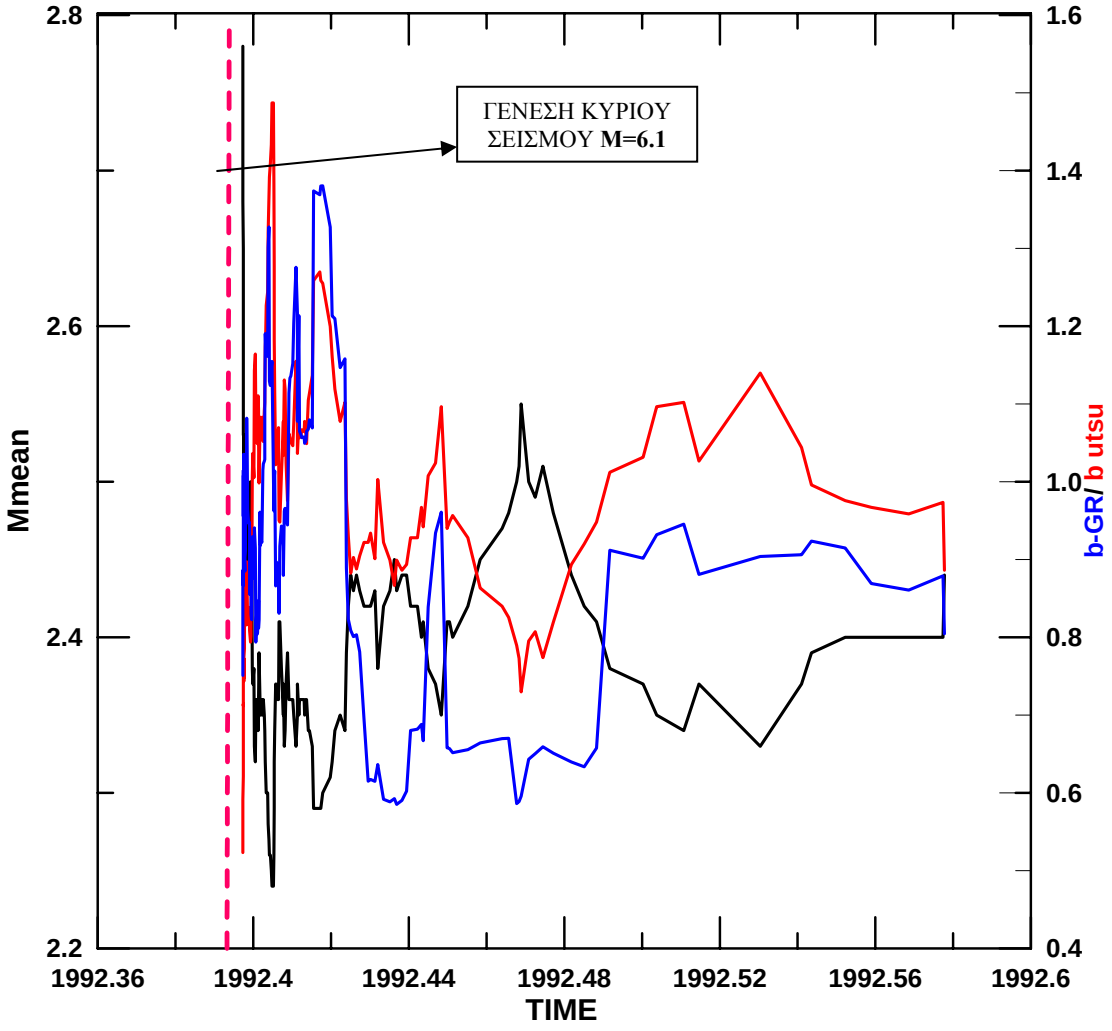
Όπως φαίνεται στο ακόλουθο γράφημα (σχήμα 6.7) ο κύριος σεισμός του Joshua Tree μεγέθους M=6.1 φαίνεται ότι εκδηλώθηκε και αυτός στο μέσο του σεισμογόνου ρήγματος, οπότε και σ' αυτή την περίπτωση η διάρρηξη χαρακτηρίζεται ως δικατευθυντική. Ο μεγαλύτερος μετασεισμός μεγέθους M=5.0 έγινε στο ίδιο γεωγραφικό πλάτος σε χρονικό διάστημα λιγότερο του ενός μήνα (18 Μαΐου 1992) μετά τη γένεση του κύριου σεισμού (23 Απριλίου 1992).



Σχήμα 6.7.- *Χωροχρονική κατανομή των μετασεισμών του Joshua Tree (23/4/1992, M=6.1)*

6.2.3 Μεταβολή Μέσου Μεγέθους-Παραμέτρου b

Στο γράφημα που ακολουθεί (σχήμα 6.8) παρατηρούμε ότι τόσο το μέσο μέγεθος όσο και η τιμή της παραμέτρου b παρουσιάζουν μια ακανόνιστη συμπεριφορά, κάτι που μάλλον οφείλεται στο ότι η μετασεισμική ακολουθία του Joshua Tree εμπλέκεται με την πιθανή προσεισμική ακολουθία του σεισμού του Landers. Αυτό έχει σαν συνέπεια να μην έχουμε μία ξεκάθαρη εικόνα των αποτελεσμάτων.



Σχήμα 6.8.- *Μεταβολή μέσου μεγέθους-παραμέτρου b των μετασεισμών του Joshua Tree.*

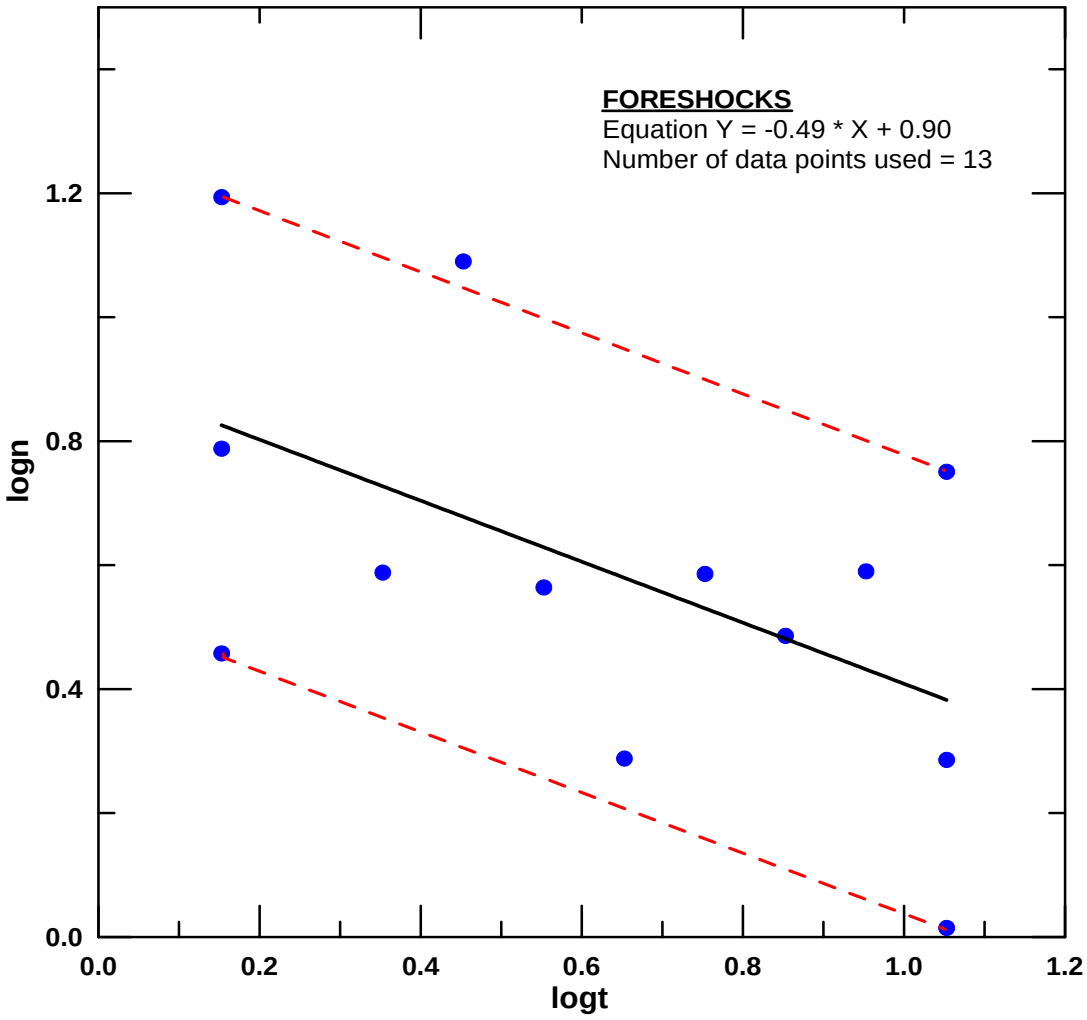
6.3 DENALI

Ο σεισμός που έγινε στο ρήγμα του Denali στις 3 Νοεμβρίου 2002 με μέγεθος M=7.9, έδωσε επαρκή δεδομένα ώστε να μπορεί να γίνει αξιόπιστη μελέτη τόσο της προσεισμικής όσο και της μετασεισμικής του ακολουθίας.

6.3.1 Χρονική κατανομή

(α) Προσεισμοί

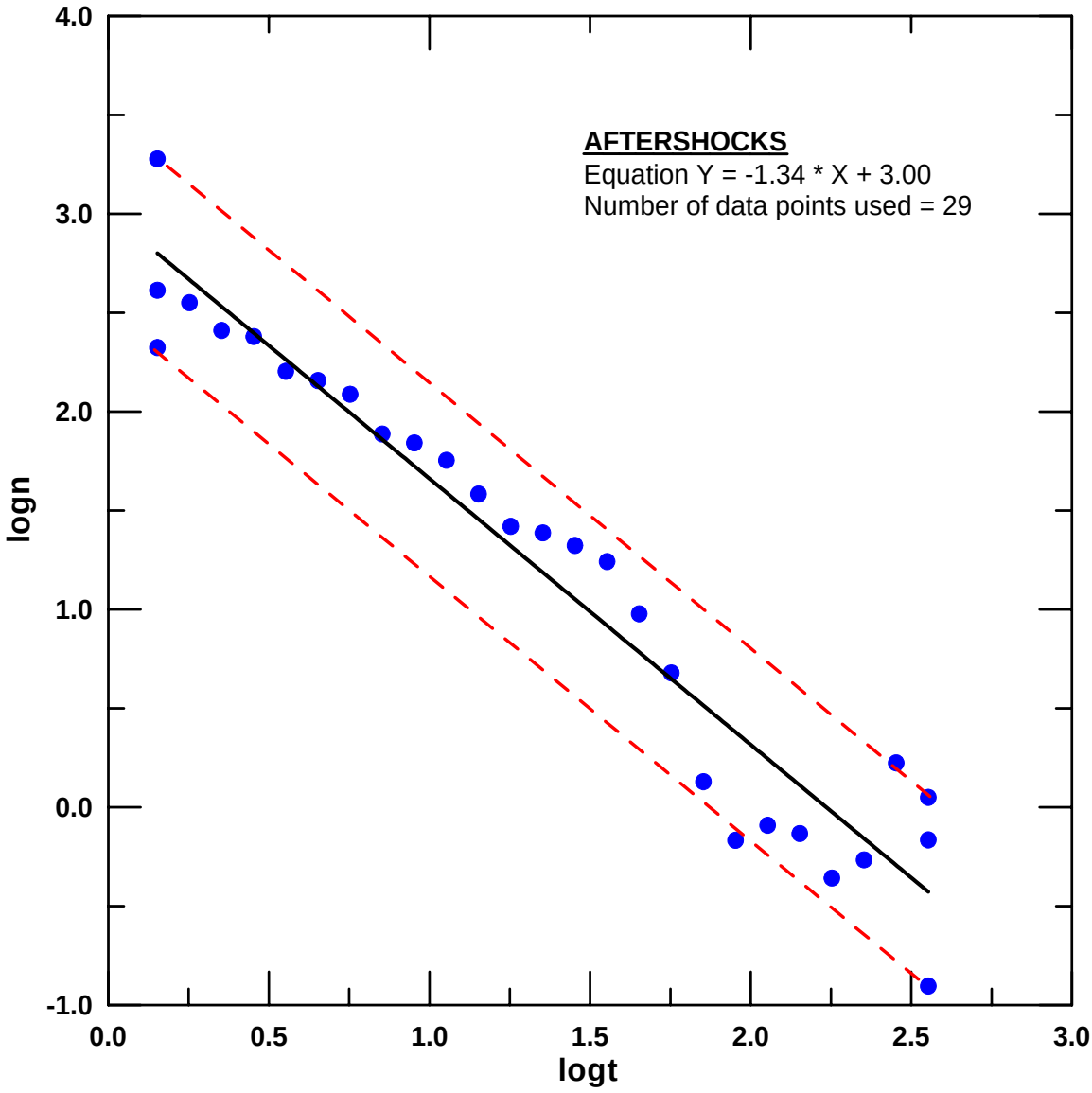
Από τη μελέτη της χρονικής κατανομής (σχήμα 6.9) προκύπτει ότι οι προσεισμοί κατανέμονται μέσα στο διάστημα εμπιστοσύνης (95%). Αν και το χρονικό διάστημα της κατανομής φτάνει μέχρι το χρόνο γένεσης του κύριου σεισμού, δεν παρατηρείται κάποια αξιοσημείωτη μεταβολή της χρονικής κατανομής των προσεισμών πριν από αυτόν.



Σχήμα 6.9.- Χρονική κατανομή των προσεισμών του σεισμού του Denali (3/11/02)

(β)Μετασεισμοί

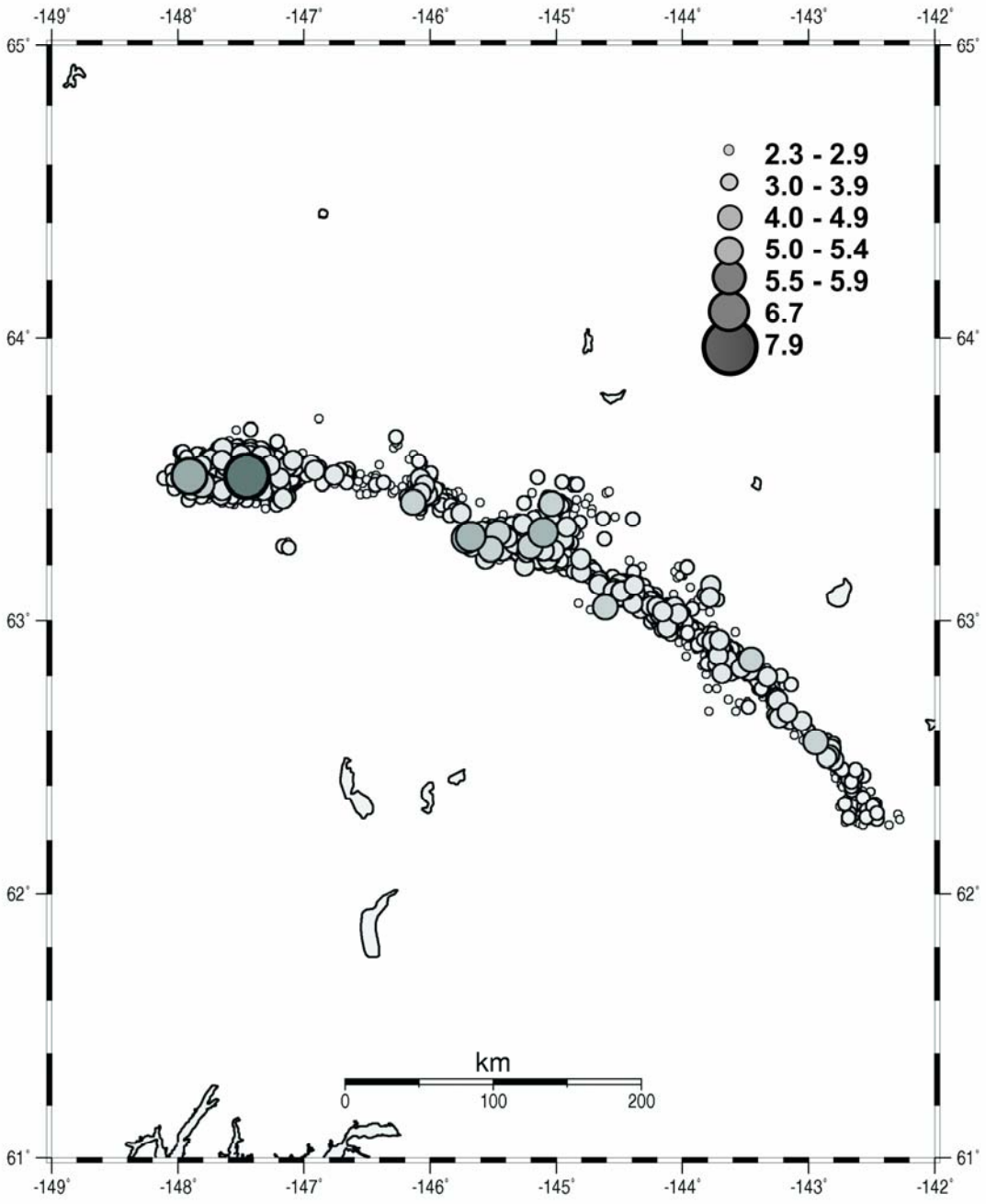
Στη χρονική κατανομή των μετασεισμών, παρατηρούμε ότι οι τελευταίοι βρίσκονται μέσα στο διάστημα εμπιστοσύνης (95%) και κατά συνέπεια η μετασεισμική ακολουθία εξελίσσεται ομαλά (σχήμα 6.10). Ακόμα παρατηρούμε ότι η τιμή της παραμέτρου p (p=1.34) για τους μετασεισμούς είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη τιμή των προσεισμών (p=0.49).



Σχήμα 6.10.- Χρονική κατανομή των μετασεισμών του σεισμού του Denali

6.3.2 Χωρική κατανομή

Όπως φαίνεται στο χάρτη που ακολουθεί (σχήμα 6.11), ο σεισμογόνος χώρος της ακολουθίας του Denali κατανέμεται σε μια ΒΔ–ΝΑ διεύθυνση. Διακρίνεται επίσης ο κύριος σεισμός (M=7.9) ο οποίος εκδηλώθηκε στο δυτικό άκρο του ρήγματος, ενώ τόσο η προσεισμική όσο και η μετασεισμική του ακολουθία εκτείνεται σε όλο το μήκος του ρήγματος.



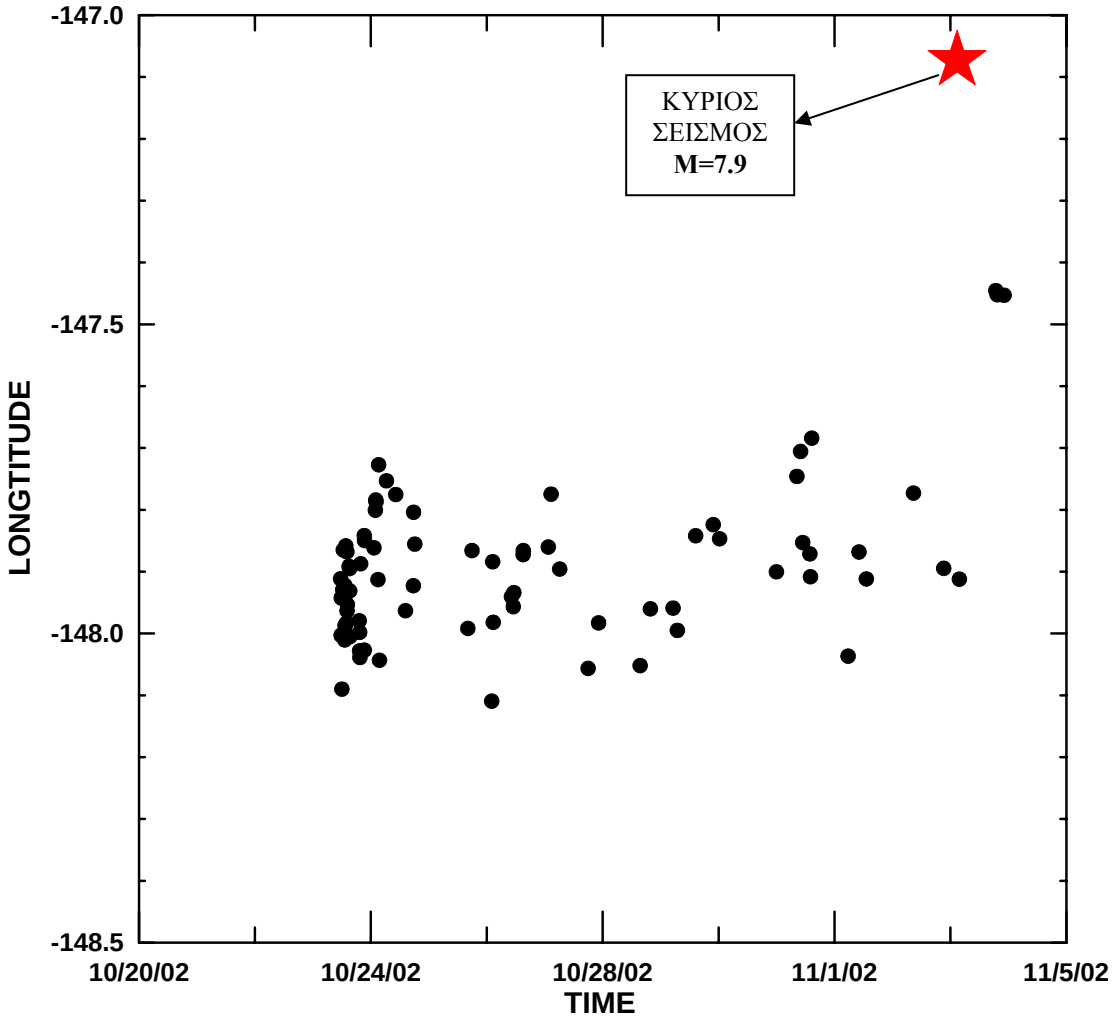
Σχήμα 6.11.– Χωρική κατανομή της σεισμικής ακολουθίας του Denali

Βιβλιοθήκη "Θεόφραστος" - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

6.3.3 Χωροχρονική κατανομή

(α) Προσεισμοί

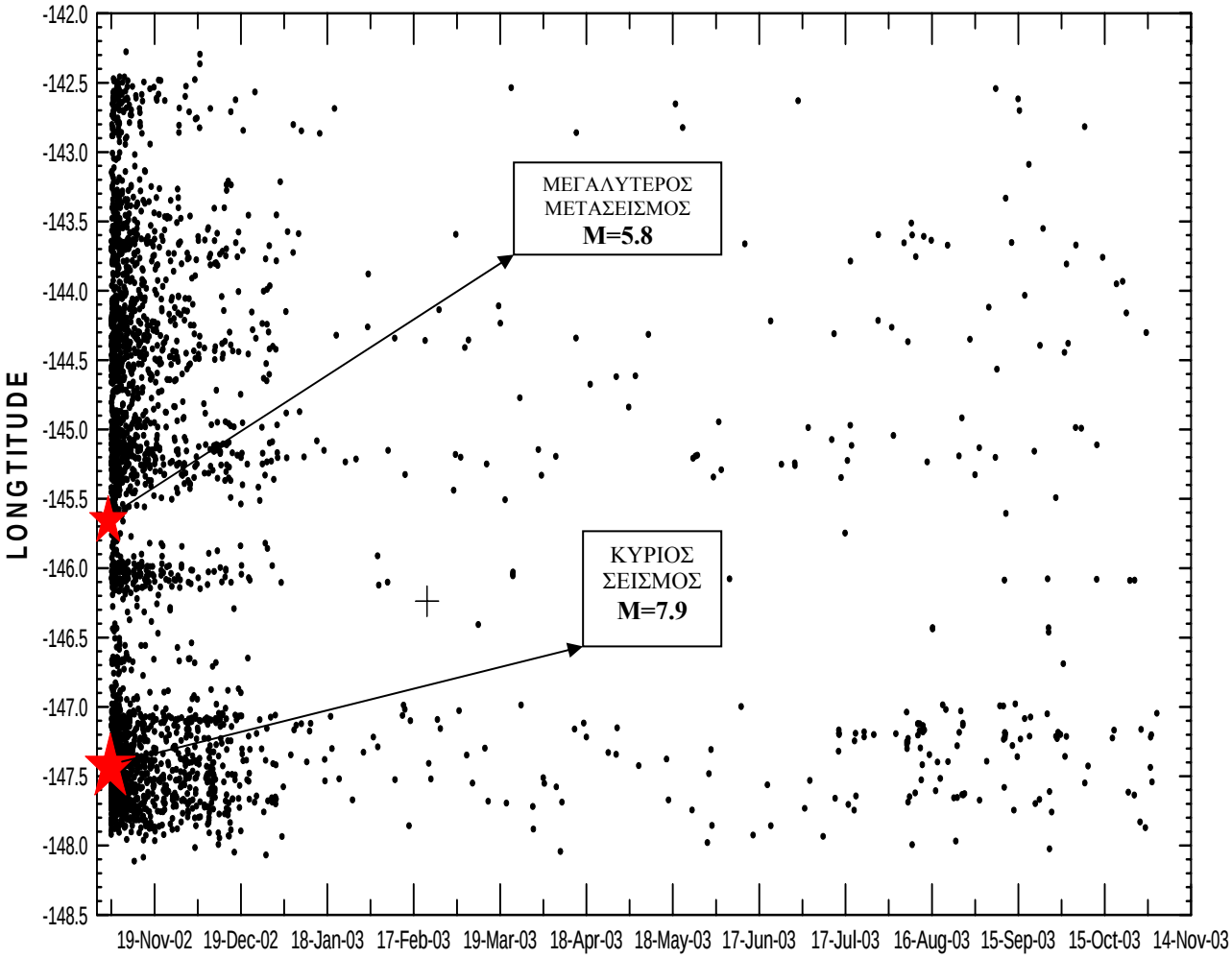
Σύμφωνα με το παρακάτω γράφημα (σχήμα 6.12), η προσεισμική ακολουθία παρατηρείται να συγκεντρώνεται στο δυτικό άκρο του ρήγματος, ενώ το επίκεντρο του κύριου σεισμού βρίσκεται ανατολικά, σε κάποια απόσταση από αυτούς.



Σχήμα 6.12.– Χωροχρονική κατανομή των προσεισμών του Denali

(β)Μετασεισμοί

Στη συγκεκριμένη μετασεισμική ακολουθία υπάρχει αφθονία δεδομένων. Ο τρόπος κατανομής των μετασεισμών δείχνει ότι η διάρρηξη είναι μονοκατευθυντική (σχήμα 6.13). Η γένεση του κύριου σεισμού (M=7.9) παρατηρείται στο δυτικό άκρο του ρήγματος, ενώ το επίκεντρο του μεγαλύτερου μετασεισμού (M=5.8), ο οποίος εκδηλώθηκε είκοσι λεπτά σχεδόν μετά τον κύριο σεισμό, βρίσκεται περίπου στη μέση του ρήγματος του Denali.

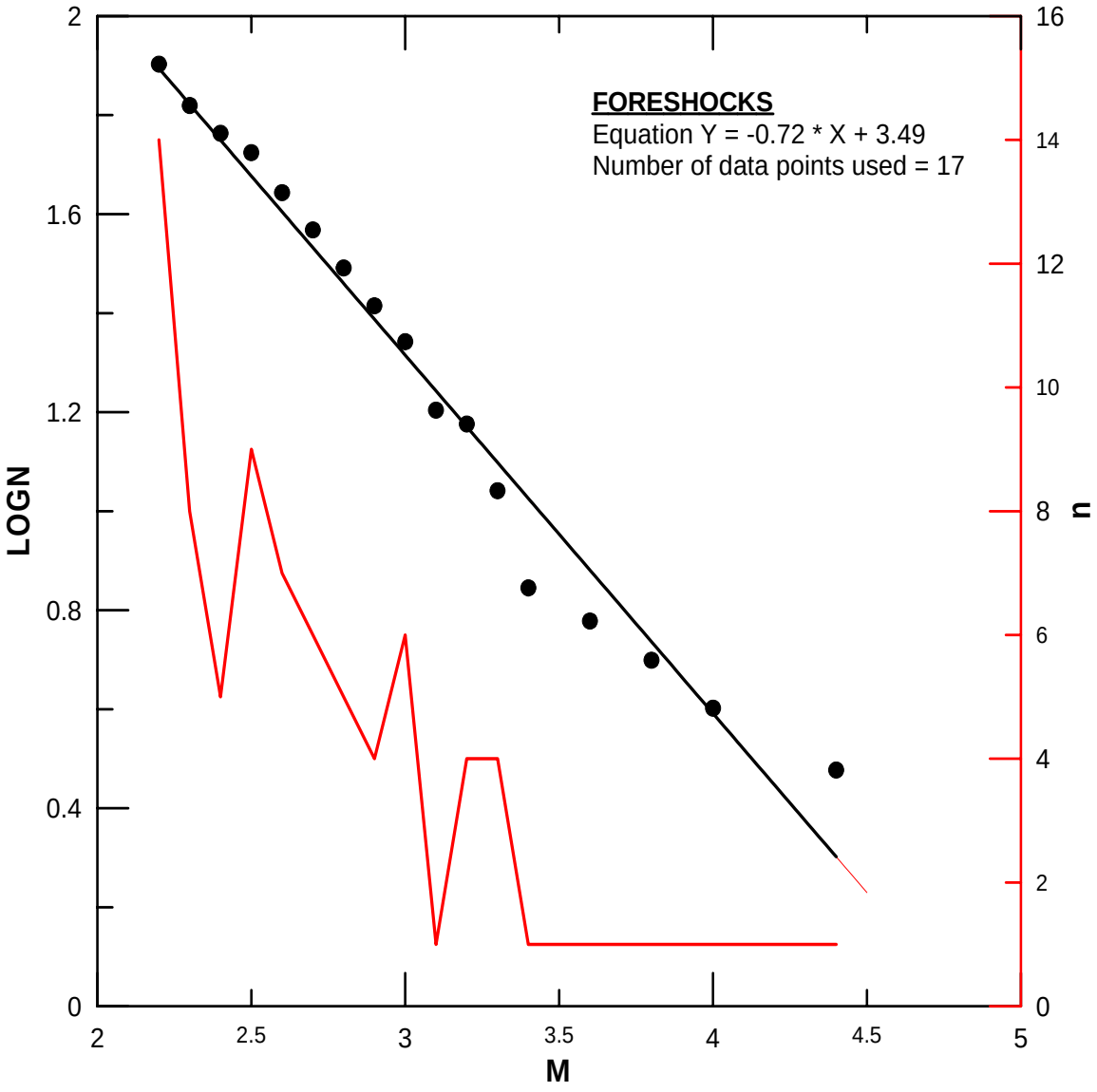


Σχήμα 6.13– Χωροχρονική κατανομή των μετασεισμών του Denali

6.3.4 Κατά μέγεθος κατανομή

(α)Προσεισμοί

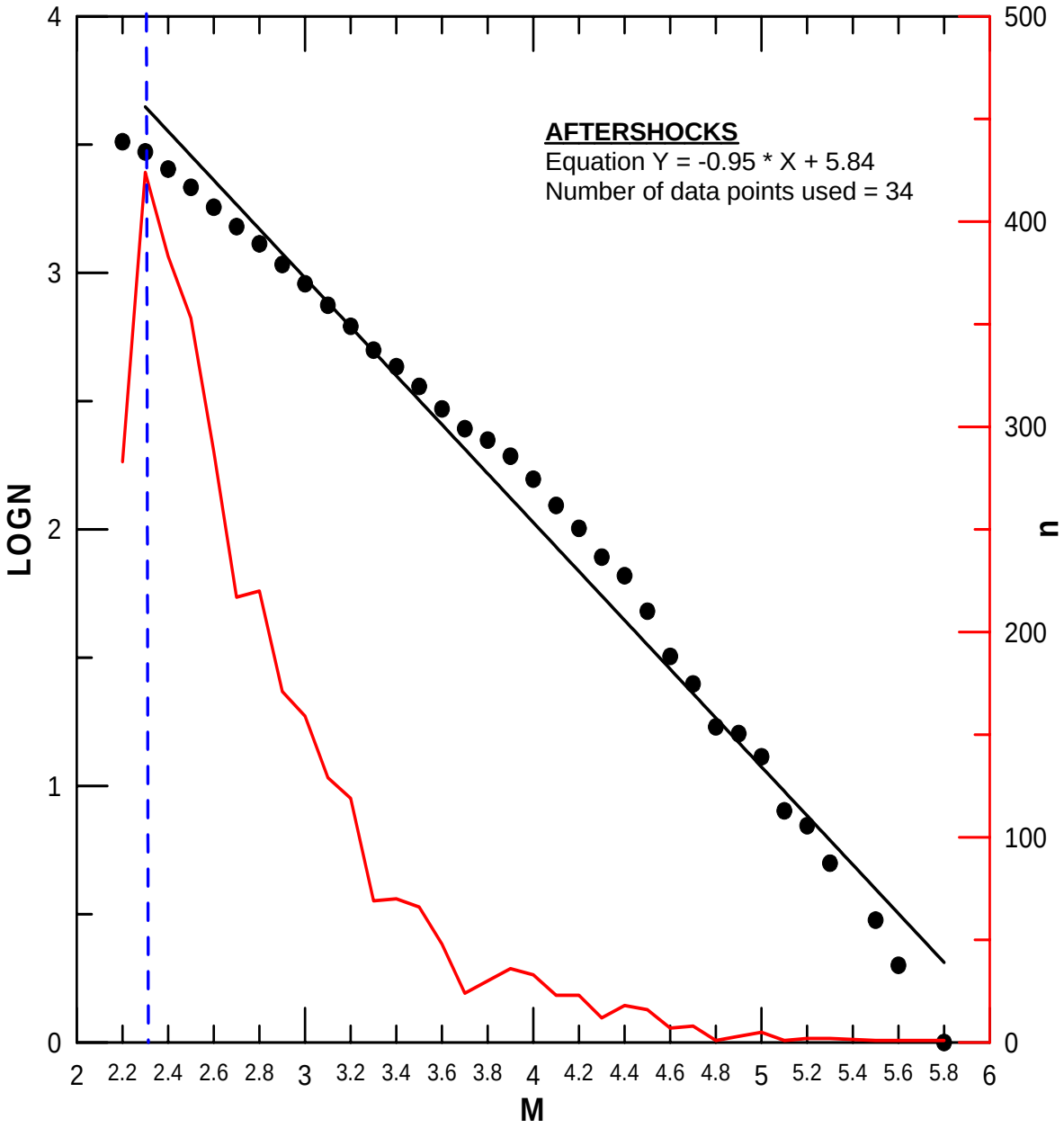
Όπως φαίνεται στο επόμενο γράφημα (σχήμα 6.14), η κατά μέγεθος κατανομή των προσεισμών του Denali δείχνει χαμηλή τιμή της παραμέτρου b, η οποία είναι ίση με 0.72, όπως θα ήταν αναμενόμενο για προσεισμική ακολουθία.



Σχήμα 6.14.– *Κατά μέγεθος κατανομή των προσεισμών του σεισμού του Denali*

(β)Μετασεισμοί

Στη μετασεισμική ακολουθία του Denali, τα δεδομένα είναι πλήρη για M≥2.3 και η παράμετρος b έχει τιμή 0.95, κάτι που είναι φυσιολογικό και αναμενόμενο για την ομαλή εξέλιξη της ακολουθίας (σχήμα 6.15).

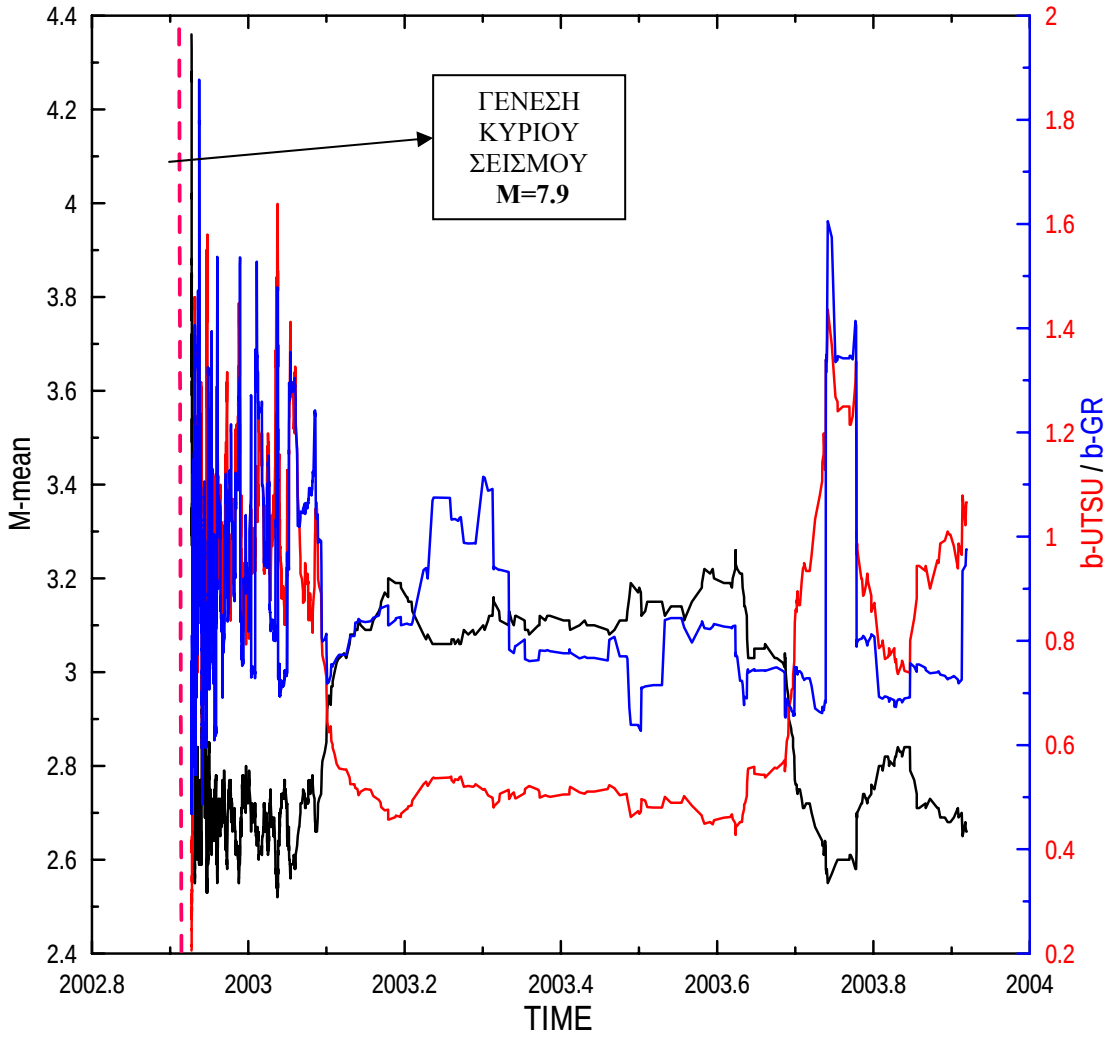


Σχήμα 6.15.– Κατά μέγεθος κατανομή των μετασεισμών του Denali

6.3.5 Μεταβολή Μέσου Μεγέθους-Παραμέτρου b

Στο σχήμα που ακολουθεί (σχήμα 6.16) φαίνεται ότι το μέσο μέγεθος των μετασεισμών του κύριου σεισμού (M=7.9) μειώνεται απότομα, ενώ στη συνέχεια αποκτά μια σταθερή τιμή η οποία στη συνέχεια παρουσιάζει νέα πτώση.

Η τιμή της παραμέτρου b παρά τις διάφορες αυξομειώσεις που παρουσιάζει μπορούμε να πούμε ότι διατηρεί εν τέλει μια μάλλον σταθερή τιμή.



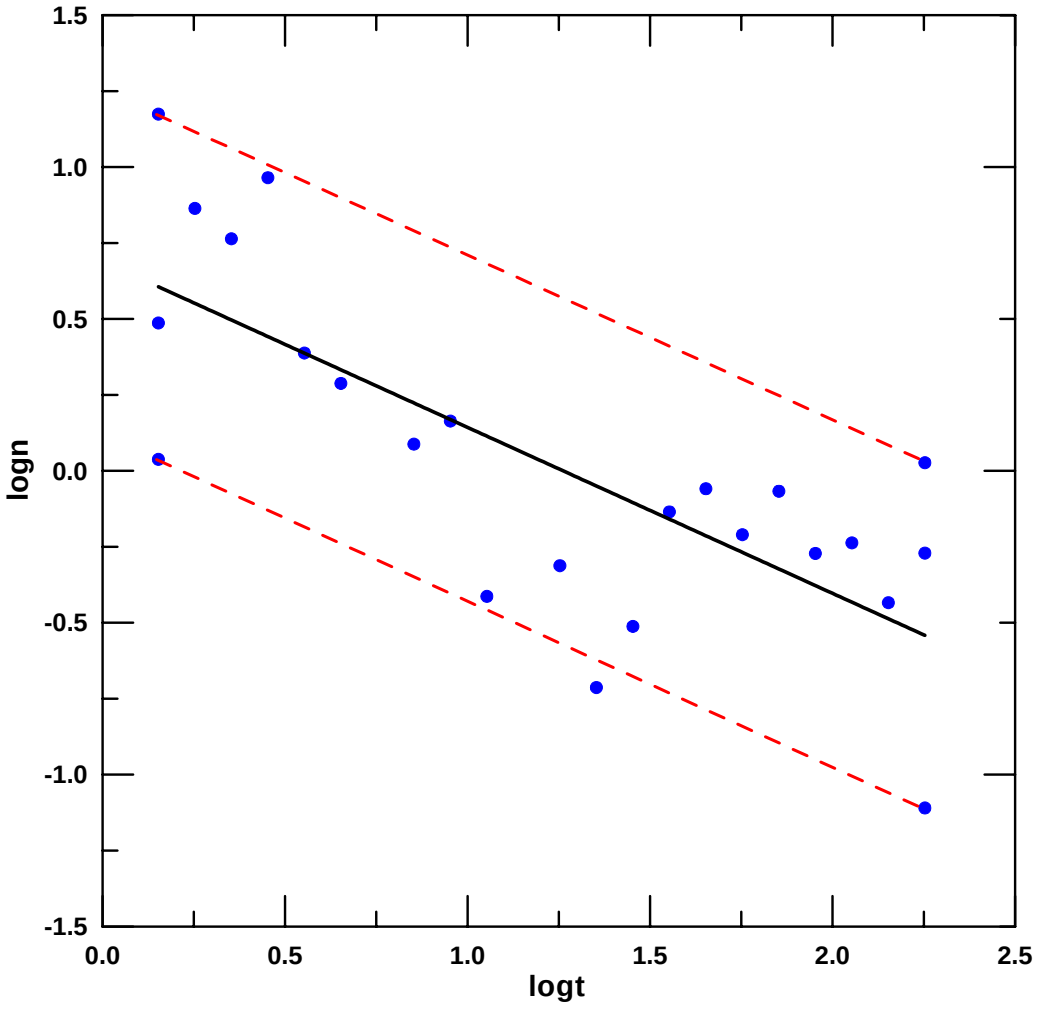
Σχήμα 6.16. *– Μεταβολή μέσου μεγέθους- παραμέτρου b του σεισμού του Denali.*

6.4 MENDOCINO

Στην συγκεκριμένη σεισμική ακολουθία του κύριου σεισμού της 1ης Σεπτεμβρίου 1994, M=6.9, χρησιμοποιήσαμε μόνο τους μετασεισμούς λόγω του ότι δεν ήταν επαρκή τα δεδομένα για την μελέτη των προσεισμών.

6.4.1 Χρονική κατανομή

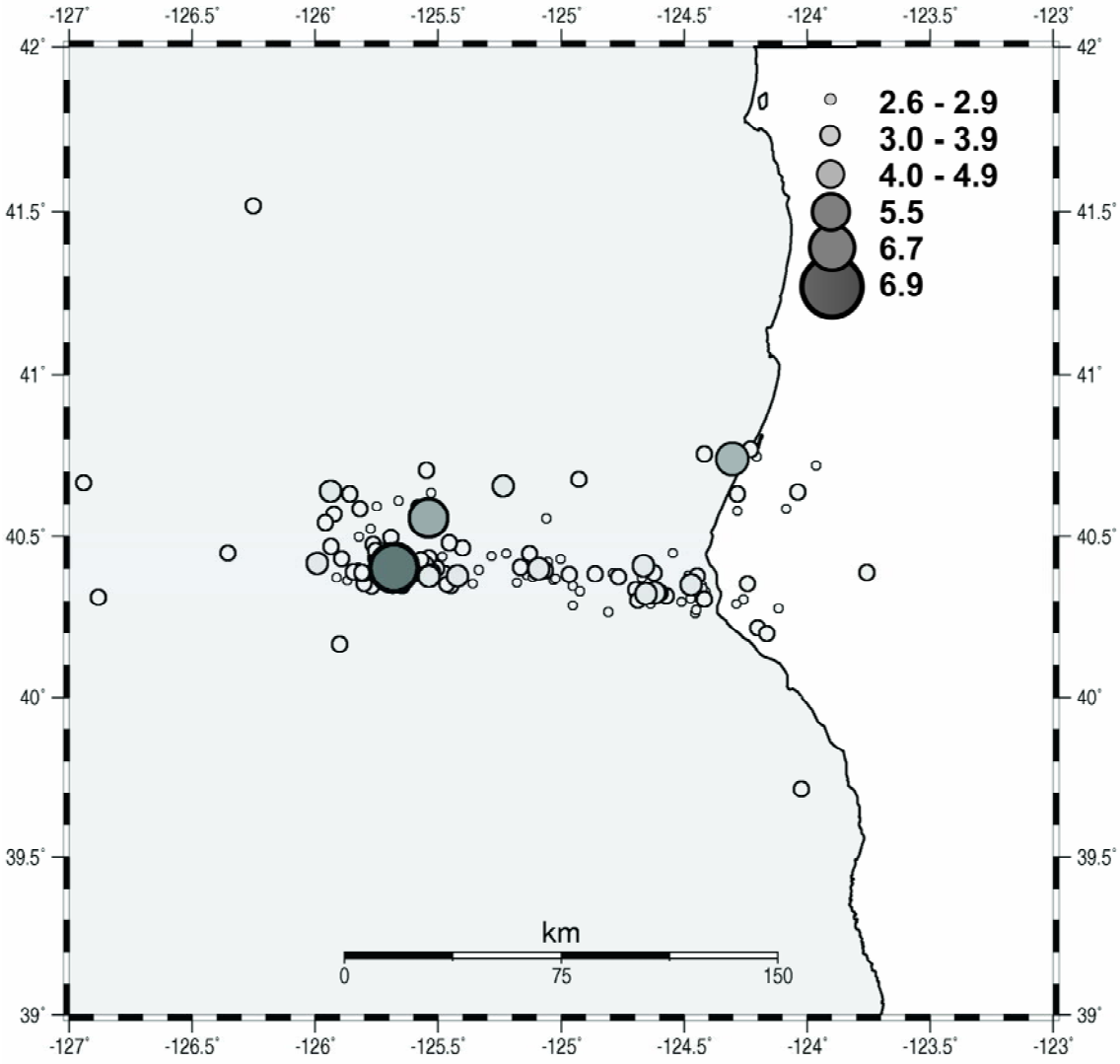
Χρησιμοποιώντας τους λογαρίθμους της συχνότητας και του χρόνου, δημιουργήθηκε το ακόλουθο γράφημα, που απεικονίζει την χρονική κατανομή (σχήμα 6.17) των μετασεισμών της σεισμικής ακολουθίας του σεισμού του Mendocino. Όλοι οι μετασεισμοί κατανέμονται χρονικά μέσα στο διάστημα εμπιστοσύνης (95%), κάτι που δείχνει ότι πρόκειται για ομαλή εξέλιξη της ακολουθίας.



Σχήμα 6.17. *– Χρονική κατανομή της μετασεισμικής ακολουθίας του Mendocino (1/9/94)*

6.4.2 Χωρική κατανομή

Η σεισμική ακολουθία του Mendocino, όπως φαίνεται και στο σχήμα (6.18), κατανέμεται σε μια διεύθυνση σχεδόν Α-Δ. Στο δυτικό άκρο του σεισμογόνου χώρου είχαμε τη γένεση του κύριου σεισμού (M=6.9), ενώ πολύ κοντά σ' αυτόν εκδηλώθηκε και ο μεγάλος μετασεισμός (M=6.7).

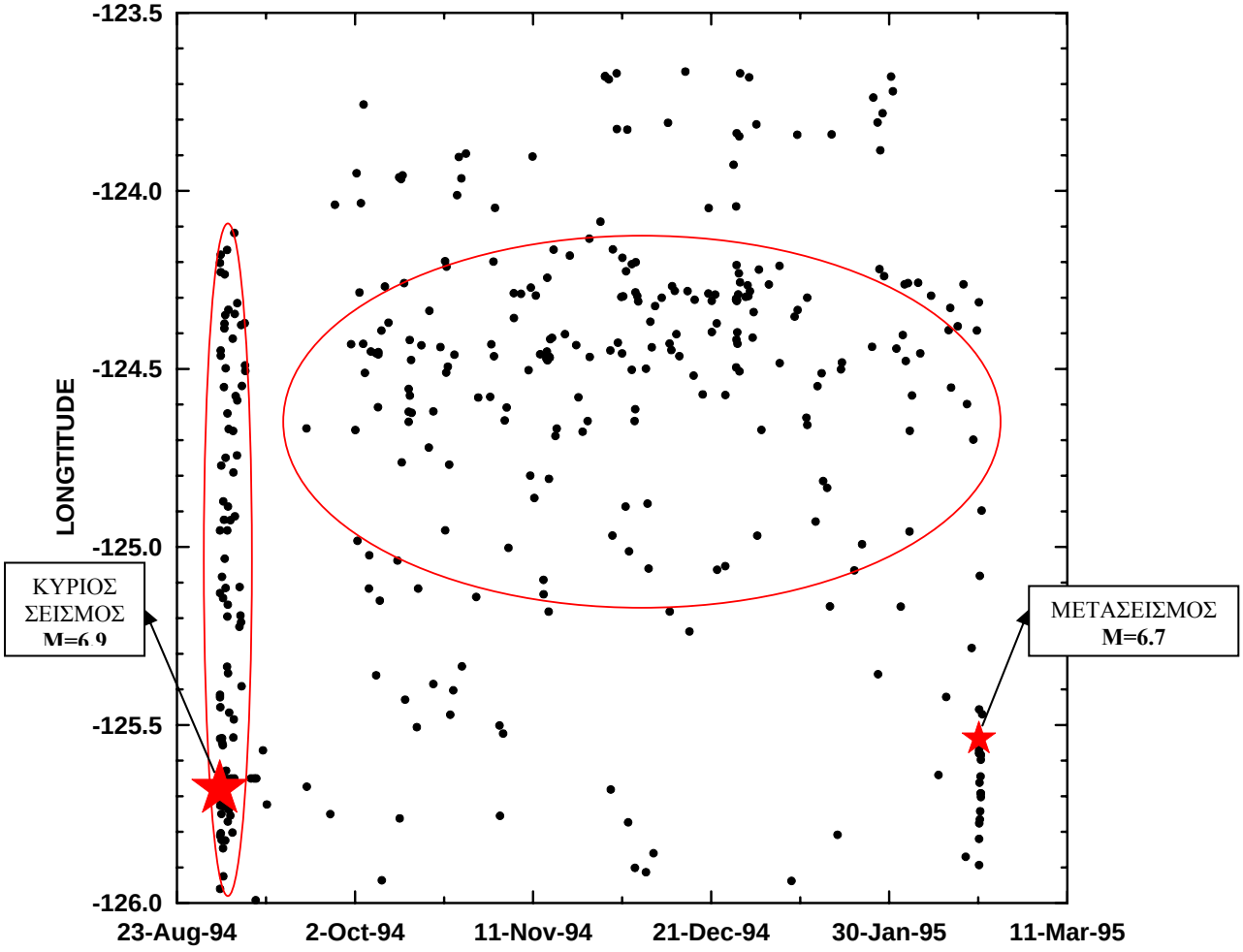


Σχήμα 6.18.- *Χωρική κατανομή της σεισμικής ακολουθίας του Mendocino*

Βιβλιοθήκη "Θεόφραστος" - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

6.4.3 Χωροχρονική κατανομή

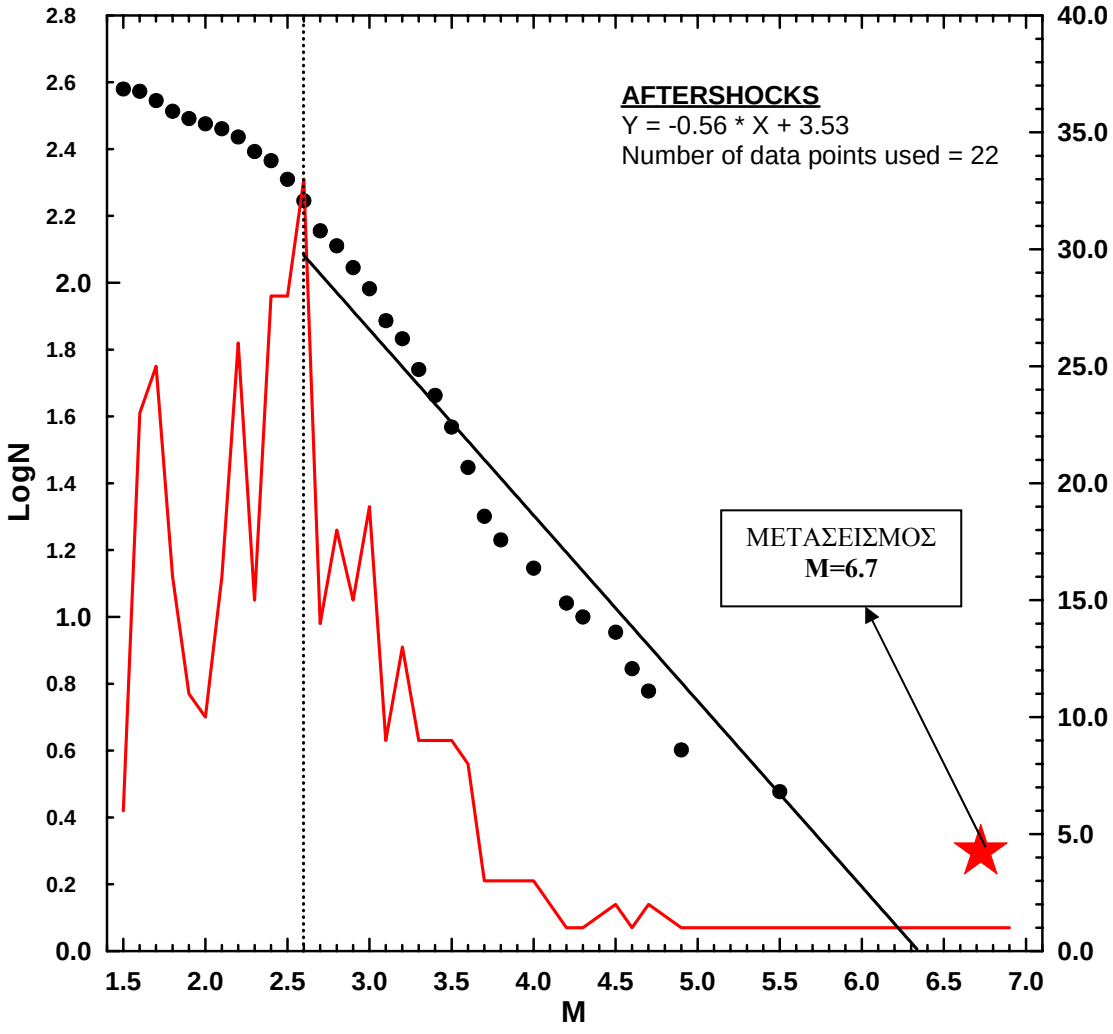
Όπως φαίνεται στο ακόλουθο γράφημα (σχήμα 6.19), ο κύριος σεισμός μεγέθους M=6.9 εκδηλώθηκε στο κάτω (δυτικό) άκρο του ρήγματος, ενώ πολύ κοντά του βρίσκεται και το επίκεντρο του μεγάλου μετασεισμού μεγέθους M=6.7. Έντονη δραστηριότητα παρατηρήθηκε στο κεντρικό τμήμα του ρήγματος (βλ. τμήμα του γραφήματος που είναι μέσα σε κόκκινο κύκλο) η οποία στη συνέχεια κινήθηκε προς τα δυτικά όπου εκδηλώθηκε και ο ισχυρότερος μετασεισμός (M=6.7) της ακολουθίας.



Σχήμα 6.19. *– Χωροχρονική κατανομή των μετασεισμών του σεισμού του Mendocino.*

6.4.4 Κατά μέγεθος κατανομή

Στο γράφημα που προέκυψε από την επεξεργασία των δεδομένων (σχήμα 6.20) παρατηρείται ότι αυτά είναι πλήρη για μέγεθος M≥2.6 και επίσης ότι η κλίση στην καμπύλη είναι μικρή (b~0.6). Η μικρή αυτή τιμή του b δεν θεωρείται φυσιολογική για μετασεισμική ακολουθία. Πιθανότατα σχετίζεται με το μεγάλο μετασεισμό μεγέθους M=6.7 ο οποίος σημειώθηκε στις 19 Φεβρουαρίου 1995, περίπου πεντέμισι μήνες μετά τον κύριο σεισμό.

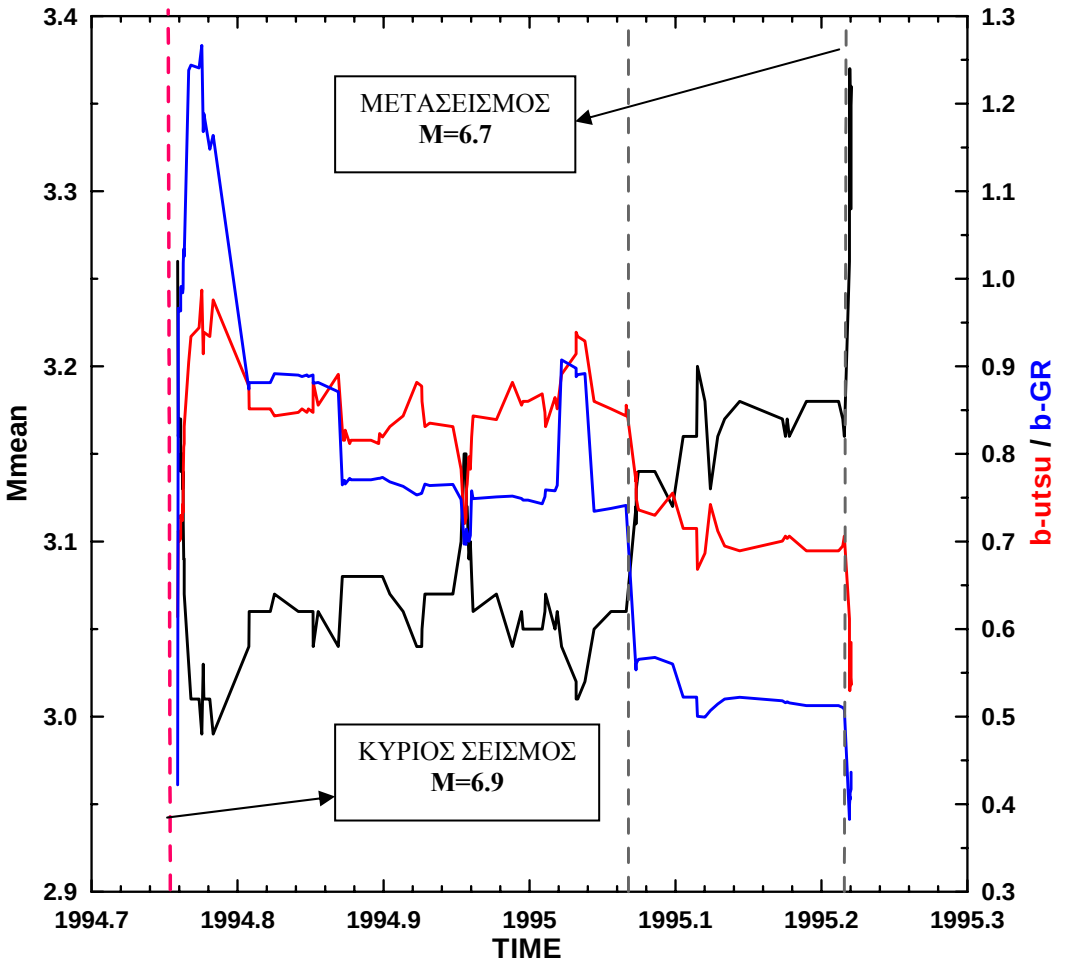


Σχήμα 6.20.– *Κατά μέγεθος κατανομή των μετασεισμών του Mendocino*

6.4.5 Μεταβολή Μέσου Μεγέθους-Παραμέτρου b

Στο γράφημα μέσου μεγέθους με το χρόνο (σχήμα 6.21) παρατηρούμε ότι μετά τη γένεση του κύριου σεισμού (διακεκομμένη γραμμή αριστερά), το μέσο μέγεθος των μετασεισμών παραμένει σταθερό. Από τον Ιανουάριο του 1995 και μετά (διάστημα που οριοθετείται στο σχήμα 6.21 από δύο διακεκομμένες γραμμές) φαίνεται ότι το μέσο μέγεθος έχει μία σταθερά ανοδική πορεία, κάτι που δηλώνει τη μη κανονική εξέλιξη της μετασεισμικής ακολουθίας. Μετά την πάροδο ενάμιση περίπου μήνα από την έναρξη της ανοδικής πορείας έχουμε τη γένεση του μεγάλου μετασεισμού της 19ης Φεβρουαρίου 1995 μεγέθους M=6.7.

Αντίστοιχη συμπεριφορά παρατηρούμε και στη παράμετρο b σε συνάρτηση με το χρόνο. Αρχικά το b παραμένει σταθερό, ενώ στο αντίστοιχο χρονικό διάστημα του ενάμιση περίπου μήνα αποκτά μία σταθερά πτωτική πορεία μέχρι τη γένεση του μεγάλου μετασεισμού της 19/2/1995 μεγέθους M=6.7.



Σχήμα 6.21.- Μεταβολή μέσου μεγέθους- παραμέτρου b του σεισμού του Mendocino.

Βιβλιοθήκη "Θεόφραστος" - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σκοπός της εργασίας αυτής ήταν η μελέτη σεισμικών ακολουθιών πρόσφατων μεγάλων σεισμών των δυτικών Ηνωμένων Πολιτειών της Αμερικής, με στόχο τον εντοπισμό στοιχείων που θα μπορούσαν να έχουν προγνωστικό χαρακτήρα όσον αφορά την εξέλιξη τους.

Για το σκοπό αυτό μελετήθηκαν για κάθε ακολουθία η χωρική, χρονική, χωροχρονική και κατά μέγεθος κατανομή καθώς επίσης και η χρονική μεταβολή τόσο της παραμέτρου b όσο και του μέσου μεγέθους των σεισμών της.

Η μελέτη της ακολουθίας του σεισμού του Landers (M=7,2), έδειξε ότι οφείλεται σε δικατευθυντική διάρρηξη, ενώ η εξέλιξή της τόσο στο χώρο όσο και στο χρόνο ήταν ομαλή.

Από τη μελέτη της ακολουθίας του σεισμού του Joshua Tree (M=6,1) παρατηρήθηκε μάλλον συνύπαρξη σεισμών που ανήκουν τόσο στη μετασεισμική ακολουθία του Joshua Tree όσο και στην προσεισμική ακολουθία του Landers. Το γεγονός αυτό δεν επέτρεψε την μελέτη της αμιγούς μετασεισμικής ακολουθίας του Joshua Tree ούτε και της αντίστοιχης προσεισμικής του Landers. Προέκυψε ακόμη το συμπέρασμα ότι ο κύριος σεισμός του Joshua Tree οφείλεται επίσης σε δικατευθυντική διάρρηξη.

Η μελέτη της σεισμικής ακολουθίας του Denali (M=7,9), έδειξε ότι οφείλεται σε μονοκατευθυντική διάρρηξη. Η κατά μέγεθος κατανομή των προσεισμών έδειξε χαμηλή τιμή της παραμέτρου b (b~0.7), κάτι που αποτέλεσε ένδειξη για τον επερχόμενο ισχυρό κύριο σεισμό. Αντίστοιχη ένδειξη (χαμηλή τιμή της παραμέτρου p, p~0.5) προέκυψε και από τη χρονική κατανομή των προσεισμών. Όσον αφορά τη μετασεισμική ακολουθία, αυτή εξελίχθηκε ομαλά χωρίς να παρουσιάζει ενδείξεις για επερχόμενο ισχυρό μετασεισμό.

Τέλος, στην ακολουθία του σεισμού του Mendocino (M=6,9), και πριν τη γένεση του ισχυρού μετασεισμού (M=6.7) παρατηρήθηκε αύξηση της τιμής του μέσου μεγέθους των μετασεισμών ενώ αντίθετα η τιμή της παραμέτρου b της ακολουθίας παρουσίασε μείωση. Αυτές οι μεταβολές αποτέλεσαν ισχυρές ενδείξεις, με προγνωστικό χαρακτήρα, για τον ισχυρό μετασεισμό που ακολούθησε.

Συμπερασματικά, η μελέτη των τεσσάρων σεισμικών ακολουθιών της περιοχής των δυτικών Η.Π.Α. έδειξε ότι η εξέλιξή τους θα μπορούσε

Βιβλιοθήκη "Θεόφραστος" - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

να εκτιμηθεί στις δύο τουλάχιστον από αυτές (Mendocino, Denali). Η επί μέρους χρονική και χωρική επικάλυψη των ακολουθιών του Joshua Tree και Landers δεν επέτρεψε την εξαγωγή ανάλογων συμπερασμάτων και για αυτές τις ακολουθίες.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Παπαζάχος, Β, *Εισαγωγή στη Γεωφυσική,* Εκδόσεις ΖΗΤΗ, 322 σελ., 1996.

Παπαζάχος, Β, *Εισαγωγή στη Σεισμολογία,* Εκδόσεις ΖΗΤΗ, 382 σελ., 1997.

Aki, K., *Generation and propagation of G Waves from the Niigata earthquake of June 16, 1964, 2. Estimation of earthquake moment, released energy and stress-strain drop from the G Wave spectrum,* Bull. Earth. Res. Inst., 44, 73-88, 1966.

Allen, C.R., Amand, P.S., Richter, C.F. and Nordquist, J.M., *Relation between seismicity and geological structure in the southern California region,* Bull. Seism. Soc. Am., 55, 752-797, 1965.

Benioff, H. *Earthquakes and rock creep, Part 1,* Bull. Seism. Soc. Am., 41, 31-62, 1951.

Bonilla, M.G. and Buchanan, J.M, *Interim report on world wide historic surface faulting,* U.S. Geol. Surv. Open Report, 1970.

Cohee, B. and Beroza, G., *Slip distribution of the 1992 Landers earthquake and its implications for earthquake source mechanics*, Bull. Seis. Soc. Am. 84, 692-712, 1994.

Cotton, F., and Campillo, M., *Frequency domain inversion of strong motions: application to the 1992 Landers earthquake*, J. Geophys. Res. 100, 3961-3975, 1995.

Gibowicz, S.J., *Stress drop and aftershocks,* Bull. Seism. Soc. Am., 63, 1433-1446, 1973a.

Gutenberg, B. and Richter, C.,F., *Frequency of earthquakes in California.* Bull. Seism. Soc. Am., 34, 185-188, 1944.

Hirano, R., *An investigation in aftershocks felt at Kumagai accompanying the great Kwanto earthquake of September 1st,1923,* J. Met. Soc. Jap., ii,2, 77-83, 1924

Ishimoto, M. *On the occurrence of aftershocks and crustal deformation,* J. Seism. Soc. Japan. (Zisin), I, 9, 108-117, 1937.

Jeffreys, H. *Aftershocks and periodicity in earthquakes,* Gerl. Beitr. Geophys., 53, 111-139, 1938

Johnson, A.M., Fleming, R.W. and K. Cruikshank, *Shear zones formed along long, straight traces of fault zones during the 28 June 1992 Landers, California, Earthquake*, Bull. Seism. Soc. Am., 84, 3, 499-510, 1994.

Kanamori, H., *the energy release in great earthquakes,* J. Geophys. Res., 82, 2981-2987, 1977.

Karakaisis, G.F., Karakostas, B.G., Papadimitriou, E.E., Scordilis, E.M. and Papazachos, B.C., *Seismic sequences in Greece interpreted in terms of the barrier model.* Nature, 315, 212-214, 1985.

Karnik, V., *Seismicity of the European Area, Part 1,* D. Reidel, Dordrecht, Netherlands, 364 pp., 1969.

Krinitzsky, E.L., *Fault assessment in earthquake engineering, "State of Art for assessing earthquake hazards in the United States",* Rep. 2, Miscellaneous Paper S-73-1, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Miss., 1974.

Merritts, D.J., *The Mendocino triple junction: Active faults, episodic coastal amergence, and rapid uplift,* Journal of Geophysical Research, Vol. 101, No B3, 6051-6070, 1996

Mogi, K., *On the time distribution of aftershocks accompanying the the recent major earthquakes in and near Japan,* Bull. Earth. Res. Inst., 40, 107,-124, 1962b.

Mogi, K., *The fracture of a semi-infinite body caused by an inner stress origin and its relation to earthquake phenomena (second paper),* Bull. Earth. Res. Inst., 41, 595-614, 1963.

Olsen, **K., Madariaga, R., and Archuleta, R.,** *Three dimensional dynamic simulation of the 1992 Landers earthquake,* Science 278, 834-838, 1997.

Omori, F. *On the aftershocks of earthquake,* J. Coll. science Imp. Univ. Tokyo, Japan, 7, 111-200, 1984

Ouchi, T., *A stochastic modelling of earthquake frequencies,* Geophys. J.R. astr. Soc., 70, 173-189, 1982.

Papazachos, B., Karakaisis, G., Hatzidimitriou, P., Karakostas, B., Kiratzi, A., Leventakis, G., Margaris, B., Panagiotopoulos, D., Papadimitriou, E., Papaioannou, Ch., Papazachos, C., Scordilis, E., Theodulidis, N., Tsapanos, T., Dimitriou, P., *A procedure to assess the evolution of a seismic sequence,* Annales Geologiques des Pays Helleniques, XXXVIII, B, 119-128, 2000.

Papazachos, B.C. Panagiotopoulos, D.G., Tsapanos, T.M., Mountrakis, D.M. and Dimopoulos, G.Ch., *A study of the summer seismic sequence in the Magnesia region of central Greece.* Geophys. J. R. Astr. Soc., 75, 155-168, 1983.

Papazachos, B.C., *On certain aftershock and foreshock parameters in the area of Greece.* Annali di Geofisica, 27, 497-515, 1974a.

Papazachos, B.C., *On the time distribution of aftershocks in the area of Greece,* Pure Appl. Geoph., 112, 627-631, 1974b.

Papazachos, B.C., *Foreshocks and earthquake prediction,* Tectonophysics, 28, 213-226, 1975a.

Peyrat S., Olsen K. and Madariaga R., *Dynamic Modeling of the 1992 Landers Earthquake,* 2000.

Ranalli , G.*, A statistical study of aftershock sequences,* Annal di Geofis., 22, 359-397, 1969.

Scholz, C.H., *The frequency-magnitude relation of microfracturing in rock and its relation to earthquakes,* Bull. Seism. Soc. Am., 58, 399-415, 1968.

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

Slemmons, D.B. *Faults and earthquake magnitude "State of the Art for assessing earthquake hazards in the United States",* Rep. 6, Miscellaneous Paper S-73-1, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Miss., 129 pp., 1977.

Suyehiro, S., *Difference between aftershocks and foreshocks in the relationship of magnitude to frequency of occurrence for the great Chilean earthquake of 1960,* Bull. Seism. Soc. Am., 56, 185-200, 1966.

Sykes, L.R., *Aftershock zones of great earthquakes, seismicity gaps, and earthquake prediction for Alaska and the Aleutians,* J. Geophys. Res., 76, 8021-8041, 1971.

Utsu, T. *On the nature of three Alaskan aftershock sequences of 1957 and 1958,* Bull. Seism. Soc. Am., 52, 279-297, 1962

Wald, D. and Heaton, T., *Spatial and temporal distribution of slip for the 1992 Landers, California earthquake,* Bull. Seis. Soc. Am. 84, 668-691, 1994.

Wilson, J.T., *Foreshocks and aftershocks of the Montana earthquake of December 20, 1932 and the Parkfield earthquake of June 7, 1934,* Bull. Seism. Soc. Am., 26, 189-194, 1936.

Wyss, M., *Estimating expectable maximum magnitude of earthquakes from fault length (Abstract),* EOS, Transactions, Am. Geophys. Union, 59, pp. 1125, 1978.

Wyss, M. and Lee, W.H.K., *The variation of the average earthquake magnitude in central California, in Proceedings of the Conference on Tectonic problems of the San-Andreas fault system. In: R. Kovach and A. Nur (editors),* Geological Sciences, Vol. XIII, School of earth Sciences, Stanford University, 24-42, 1973.

ΙΣΤΟΣΕΛΙΔΕΣ:

www.geologie.ens.fr/~madariag/Landers.html
http://earthquake.usgs.gov/regional/states/events/1992_06_28.php
http://pubs.usgs.gov/fs/2003/fs014-03/fs014-03.pdf
http://www.giseis.alaska.edu
http://www.aeic.alaska.edu/Seis/Denali_Fault_2002/
http://www.aeic.alaska.edu/Denali_Fault_2002/
http://adsabs.harvard.edu/cgi_bin/nph_
http://www.humboldt.edu/~geodept/earthquakes/recent_eqks.html
http://pubs.usgs.gov/gip/earthq3/what.html
http://pubs.usgs.gov/gip/earthq3/where.html
http://pubs.usgs.gov/gip/earthq3/where2.html
http://pubs.usgs.gov/gip/earthq3/surface.html
http://pubs.usgs.gov/gip/earthq3/move.html
http://pubs.usgs.gov/gip/earthq3/along.html
http://pubs.usgs.gov/gip/earthq3/fence.gif
http://activetectonics.la.asu.edu/Landers/pic00010.jpg
http://www.seismo-
watch.com/EQSERVICES/NotableEQ/Jun/Landers.scec.images/lanrd1.JPG
http://wwwdggs.dnr.state.ak.us/Images/quake/TAPSatDenaliFault.jpg
http://earthobservatory.nasa.gov/Study/denali/
http://www.agu.org/sci_soc/trehu.html
http://wwwdggs.dnr.state.ak.us/earthquake.html