

ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ



**ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ**

ΜΑΡΙΑ ΜΕΣΗΜΕΡΗ

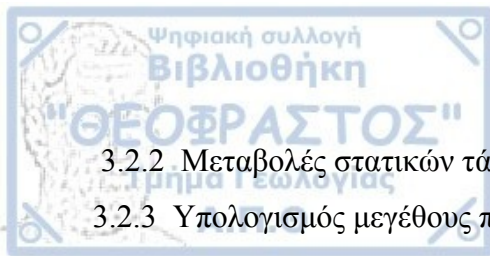
**ΜΕΛΕΤΗ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΟΤΗΤΑΣ
ΠΡΙΝ ΤΗΝ ΓΕΝΕΣΗ ΙΣΧΥΡΟΥ ΣΕΙΣΜΟΥ**

ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ : Ε. ΠΑΠΑΔΗΜΗΤΡΙΟΥ

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ 2011



ΠΡΟΛΟΓΟΣ	5
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο :ΠΡΟΓΝΩΣΗ ΣΕΙΣΜΩΝ	7
1.1 Εισαγωγή	7
1.2 Μακροπρόθεσμη πρόγνωση σεισμών	8
1.2.1 Η μέθοδος των προσωρινών σεισμικών κενών.....	8
1.2.2 Η μέθοδος μεταβολής της στατικής τάσης.....	11
1.3 Μεσοπρόθεσμη πρόγνωση σεισμών	12
1.3.1 Μέθοδος της επιβραδυνόμενης εντός – επιταχυνόμενης εκτός σεισμικής παραμόρφωσης.....	13
1.4 Βραχυπρόθεσμη πρόγνωση σεισμών	15
1.4.1 Πρόδρομα φαινόμενα.....	16
1.4.2 Φυσική ερμηνεία των πρόδρομων φαινομένων.....	18
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο:ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΑΝΑΣΤΡΟΦΗΣ ΠΡΙΝ ΑΠΟ ΙΣΧΥΡΟΥΣ ΣΕΙΣΜΟΥΣ	20
2.1 Εισαγωγή	20
2.2 Lesser Antilles και Νότια California	21
2.2.1 Αναδρομική πρόγνωση στις Lesser Antilles	21
2.2.2 Πρόγνωση σε πραγματικό χρόνο στις Lesser Antilles.....	22
2.2.3 Εφαρμογή στην περιοχή της Νότιας California.....	24
2.3 Taiwan	25
2.3.1 Δεδομένα.....	26
2.3.2 Περιοχή μελέτης.....	26
2.3.3 Μέθοδος	27
2.3.4 Αποτελέσματα.....	28
2.4 Συμπεράσματα	31
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο: ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ZMAP	32
3.1 Εισαγωγή	32
3.2 Παραδείγματα χρήσης του Zmap	33
3.2.1 Η παράμετρος b κάτω από το Mount St. Helens.....	33



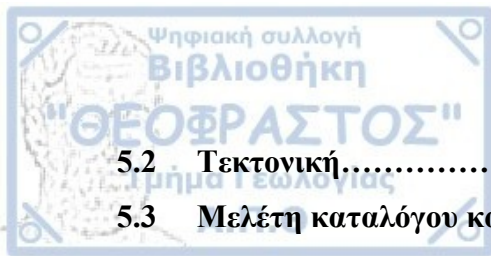
3.2.2 Μεταβολές στατικών τάσεων	36
3.2.3 Υπολογισμός μεγέθους πληρότητας.....	36
3.4 Χαρτογράφηση της μεταβολής της σεισμικότητας	37

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο: ΜΕΛΕΤΗ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΟΤΗΤΑΣ ΠΡΙΝ ΚΑΙ
ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΓΕΝΕΣΗ ΤΟΥ ΣΕΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΛΕΥΚΑΔΑΣ M= 6.2
(14/08/2003).....**

4.1 Εισαγωγή.....	38
4.2 Γεωλογία και τεκτονική.....	38
4.3 Ιστορικοί σεισμοί	39
4.4 Μελέτη και υπολογισμός Z-value 100 km από το επίκεντρο του σεισμού.....	41
4.4.1 1998-2004.....	41
4.4.2 2000-2002.....	46
4.4.3 2003.....	49
4.4.3.1 Περίοδος μέχρι τον σεισμό της 14 ^{ης} Αυγούστου.....	51
4.4.3.2 Περίοδος μετά τον σεισμό της 14 ^{ης} Αυγούστου.....	55
4.4.3.3 2002-2003.....	57
4.4.3.4 2003-2004.....	60
4.5 Μελέτη και υπολογισμός Z-value για την περιοχή Λευκάδα- Κεφαλονιά...63	
4.5.1 1998-2006.....	63
4.5.2 2000-2002.....	66
4.5.3 2003.....	70
4.5.3.1 Περίοδος μέχρι τον σεισμό της 14 ^{ης} Αυγούστου	72
4.5.3.2 Περίοδος μετά τον σεισμό της 14 ^{ης} Αυγούστου.....	75
4.5.3.3 2002-2003.....	77
4.5.3.4 2003-2004.....	80
4.5.4 2004-2006.....	82
4.6 Συμπεράσματα.....	85

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο: ΜΕΛΕΤΗ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΟΤΗΤΑΣ ΠΡΙΝ ΚΑΙ
ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΓΕΝΕΣΗ ΤΟΥ ΣΕΙΣΜΟΥ ΤΟΥ ΑΙΓΙΟΥ M=6.4
(15/06/1995).....**

5.1 Εισαγωγή.....	86
--------------------------	-----------



5.2	Τεκτονική.....	86
5.3	Μελέτη καταλόγου και υπολογισμός Z-value.....	88
5.3.1	1990-1998.....	88
5.3.2	1992-1994.....	92
5.3.3	1995.....	96
5.3.3.1	1 ^ο Εξάμηνο 1995 (01/01/1995 – 15/06/1995).....	98
5.3.3.2	2 ^ο Εξάμηνο 1995 (15/06/1995 – 31/12/1995)	103
5.3.3.3	Σύγκριση 1994 με 1995.....	106
5.3.3.4	Σύγκριση 1995 με 1996	109
5.3.4	1996-1998.....	111
5.4	Συμπεράσματα.....	115
	Βιβλιογραφία.....	120



Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια του Προπτυχιακού Προγράμματος Σπουδών του Τμήματος Γεωλογίας υπό την επίβλεψη της Καθηγήτριας Σεισμολογίας του Τομέα Γεωφυσικής κ. Ε. Παπαδημητρίου. Ο σκοπός της εργασίας είναι η μελέτη της σεισμικότητας σε περιοχές όπου έγιναν ισχυροί σεισμοί. Η μελέτη αυτή θα μας δείξει τις τυχόν μεταβολές της σεισμικότητας και κατά πόσο θα μπορούσε να βασιστεί πάνω σε αυτές κάποιο μοντέλο πρόγνωσης των επικείμενων ισχυρών σεισμών. Για να επιτευχθεί αυτό χρειάστηκε να μελετηθεί αναλυτικά κατάλογος σεισμών για κάθε περιοχή, να γίνει χωρική κατανομή των σεισμών για κάθε περίοδο για να βρεθεί εποπτικά οποιαδήποτε μεταβολή και στην συνέχεια με την χρήση του λογισμικού Zmap να υπολογισθεί και ποσοτικά η εκάστοτε μεταβολή στην σεισμικότητα (Z-value).

Στο πρώτο κεφάλαιο αναφέρονται διάφορες μέθοδοι πρόγνωσης σεισμών. Γίνεται κατηγοριοποίηση των μεθόδων ανάλογα με το χρονικό παράθυρο της μεθόδου πρόγνωσης και παρουσιάζονται παγκόσμια παραδείγματα εφαρμογής των μεθόδων αυτών.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζεται το μοντέλο της σεισμικής αναστροφής. Τα παραδείγματα που παραθέτονται αφορούν τις περιοχές Lesser Antilles, Νότια Καλιφόρνια και Taiwan. Μεγαλύτερη έμφαση δίνεται στο παράδειγμα της Taiwan διότι παρόμοια μέθοδος εφαρμόζεται και στα δεδομένα της εργασίας αυτής.

Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται παρουσίαση του λογισμικού Zmap. Δίνονται παγκόσμια παραδείγματα καθώς παρουσιάζονται και κάποιες από τις εφαρμογές του λογισμικού. Επίσης, δίνεται έμφαση στον υπολογισμό της μεταβολής της σεισμικότητας γιατί αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται για την ανάλυση των δεδομένων.

Στο τέταρτο κεφάλαιο περιγράφεται η μελέτη της σεισμικότητας πριν και μετά τη γένεση του σεισμού της Λευκάδας (14/08/2003). Χρησιμοποιούνται δύο κατάλογοι για την περιοχή. Ο πρώτος αφορά 100 km από το επίκεντρο του σεισμού της 14^{ης} Αυγούστου



ενώ ο δεύτερος αφορά μόνο τα νησιά της Λευκάδας και Κεφαλονιάς. Ο κάθε κατάλογος που μελετάται χωρίζεται σε επιμέρους τμήματα και γίνεται σύγκριση της μεταβολής της σεισμικότητας ανά 4 έτη, ανά 1,5 έτος, ανά έτος, ανά εξάμηνο, ανά τρίμηνο και ανά μήνα. Με κάθε λεπτομέρεια παρουσιάζεται η μέθοδος που χρησιμοποιείται και στο τέλος γίνεται ανάλυση των συμπερασμάτων.

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η μελέτη του καταλόγου πριν και μετά την γένεση του σεισμού του Αιγίου (15/06/1995). Ο κατάλογος που μελετάται χωρίζεται σε επιμέρους τμήματα και γίνεται σύγκριση της μεταβολής της σεισμικότητας ανά 4 έτη, ανά 1,5 έτος, ανά έτος, ανά εξάμηνο, ανά τρίμηνο και ανά μήνα. Η καταγραφή της μεθοδολογίας είναι λεπτομερής όπως και στο προηγούμενο κεφάλαιο. Τέλος, παρουσιάζονται τα συμπεράσματα για την περιοχή.

Κλείνοντας, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την επιβλέπουσα της παρούσας εργασίας κ. Παπαδημητρίου Ελευθερία, Καθηγήτρια Σεισμολογίας, για την καθοδήγηση, την προτροπή για έρευνα καθώς και για την στήριξη καθ' όλη την διάρκεια των προπτυχιακών μου σπουδών.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Αστεϊόπουλο Τάσο ο οποίος ήταν πάντα πρόθυμος να με βοηθήσει και να λύσει κάθε μου απορία σχετικά με το Zmap και το GMT. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω όσους ήταν κοντά μου αυτά τα χρόνια και ειδικότερα τις Στέλλα Κερασίδου, Κέλυ Νικολαΐδου, Χάρις Σερδάρη καθώς και την οικογένεια μου για την οικονομική στήριξη.



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο : ΠΡΟΓΝΩΣΗ ΣΕΙΣΜΩΝ

1.1 Εισαγωγή

Η πρόγνωση συγκεκριμένου σεισμού είναι ένα από τα σημαντικότερα, από κοινωνικής πλευράς, αντικείμενα της Σεισμολογίας λόγω των μεγάλων αρνητικών συνεπειών των βλαβερών σεισμών. Η δυσκολία πρόγνωσης συγκεκριμένου σεισμού οφείλεται στο γεγονός ότι ο φλοιός της Γης όπου γίνονται οι σεισμοί είναι ένα «μη γραμμικό σύστημα», δηλαδή ένα σύστημα το οποίο έχει χαοτική συμπεριφορά. Αυτό σημαίνει ότι οι βασικές παράμετροι ενός μελλοντικού σεισμού (χρόνος, χώρος, μέγεθος) και ιδιαίτερα ο χρόνος γένεσής του είναι εξαιρετικά ευαίσθητες σε μεταβολές της φυσικής εξέλιξης του φλοιού της Γης. Αυτό όμως δεν σημαίνει πως δεν υπάρχει καμιά δυνατότητα πρόγνωσης των σεισμών αφού τα χαοτικά συστήματα, συνεπώς και ο φλοιός της Γης, είναι μεν πολύπλοκα αλλά και προβλέψιμα σε κάποιο βαθμό.

Με τον όρο πρόγνωση συγκεκριμένου σεισμού εννοούμε την γνώση του χώρου γένεσης, του χρόνου γένεσης και του μεγέθους του καθώς και των αντιστοιχών τριών αβεβαιοτήτων πριν από την γένεση του σεισμού. Από τον ορισμό αυτό προκύπτει ότι μια πρόγνωση συγκεκριμένου σεισμού για να θεωρηθεί επιτυχής πρόγνωση πρέπει ο σεισμός να γίνει μέσα στα τρία παράθυρα (χρόνου, χώρου, μεγέθους) που είχαν προκαθοριστεί. Επιστημονικά έγκυρη πρόγνωση θεωρείται μια επιτυχής πρόγνωση η οποία είναι αποτέλεσμα εφαρμογής συγκεκριμένης επιστημονικής μεθοδολογίας.

Ανάλογα με τις τιμές των αβεβαιοτήτων των τριών παραμέτρων και ιδιαίτερα του χρόνου γένεσης, η πρόγνωση συγκεκριμένου σεισμού (ειδική πρόγνωση) διακρίνεται σε διάφορες κατηγορίες από διάφορους επιστήμονες. Έτσι, όταν ο χρόνος γένεσης του αναμενόμενου σεισμού υπολογίζεται με ακρίβεια: α) λίγων δεκαετιών (π.χ. 30 ετών) η πρόγνωση θεωρείται μακροπρόθεσμη (long term), β) αρκετών μηνών ή λίγων ετών (π.χ. 3-5 ετών) η πρόγνωση θεωρείται μεσοπρόθεσμη (intermediate term), γ) λίγων ημερών ή εβδομάδων (π.χ. 10 ημερών) η πρόγνωση θεωρείται βραχυπρόθεσμη (short term).



1.2 Μακροπρόθεσμη πρόγνωση των σεισμών

Οι κύριες επιστημονικές προσπάθειες μακροπρόθεσμης πρόγνωσης των σεισμών βασίζονται ουσιαστικώς στην αρχή ότι σε κάθε μεγάλο ενεργό σεισμικό ρήγμα γίνονται κατ' επανάληψη ισχυροί (κύριοι) σεισμοί σύμφωνα τόσο με την θεωρία του Reid (1910) όσο και με άλλες σχετικές θεωρίες και έννοιες (σεισμικός κύκλος, χαρακτηριστικός σεισμός). Οι περισσότερες και πιο πρόσφατες από τις προσπάθειες αυτές βασίζονται επιπλέον στη αρχή ότι η γένεση του επόμενου κύριου σεισμού σε ένα ενεργό ρήγμα καθορίζεται σε ορισμένο βαθμό (π.χ. χρόνος γένεσής του) και από την πρόσφατη δράση γειτονικών ρηγμάτων. Παρακάτω θα αναφερθούμε στις σημαντικότερες από τις επιστημονικές μεθόδους που έχουν δοκιμαστεί και ελέγχονται ακόμη για την αξιοπιστία τους στη μακροπρόθεσμη πρόγνωση των σεισμών. Αυτές είναι η μέθοδος των «προσωρινών σεισμικών κενών» (seismic gaps) και «της μεταβολής της στατικής τάσης».

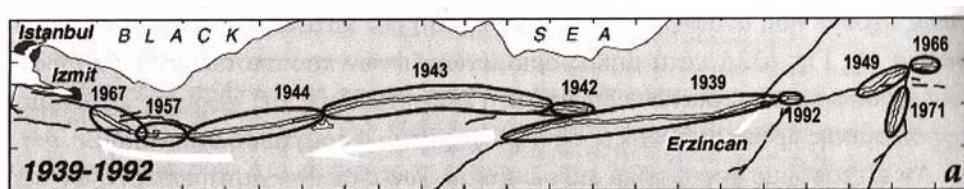
1.2.1 Η μέθοδος των προσωρινών σεισμικών κενών

Η σεισμική δράση δεν κατανέμεται τυχαία στην επιφάνεια της Γης αλλά κατά μήκος ορισμένων ζωνών που αποτελούν τις παρυφές των λιθοσφαιρικών πλακών. Συνεπώς, η ιδιότητα αυτή της χωρικής κατανομής της σεισμικής δράσης καθορίζει τις περιοχές όπου η πρόγνωση έχει νόημα.

Αν εξετάσουμε προσεκτικά τις σεισμικές ζώνες σε ένα χάρη επικέντρων σεισμών θα διαπιστώσουμε ότι σε ορισμένες περιοχές οι ζώνες αυτές παρουσιάζουν ασυνέχειες. Αρχικά η κυρίαρχη αντίληψη ήταν ότι σ' αυτές τις σεισμικές ασυνέχειες δεν έγιναν σεισμοί σε ορισμένο χρονικό διάστημα αλλά έγιναν εκεί σεισμοί στο παρελθόν. Προκύπτει, λοιπόν, το συμπέρασμα ότι η πιθανότητα γένεσης σεισμών στο προσεχές μέλλον σ' αυτές τις προσωρινές σεισμικές ασυνέχειες είναι αυξημένη. Οι ασυνέχειες αυτές των σεισμικών ζωνών λέγονται προσωρινά σεισμικά κενά.

Για να θεωρηθεί μια περιοχή σεισμικής ζώνης ως προσωρινό σεισμικό κενό, εφαρμόζονται ορισμένα κριτήρια. Τα σημαντικότερα από τα κριτήρια αυτά είναι ότι στην περιοχή δεν έγινε σεισμός κατά τα τελευταία 30 χρόνια τουλάχιστον και οι διαρρήξεις στη σεισμική ζώνη όπου βρίσκεται η περιοχή είναι ανάστροφες ή οριζόντιας μετατόπισης. Όταν γίνει αναγνώριση ενός προσωρινού σεισμικού κενού, ο κατά προσέγγιση καθορισμός του χρόνου γένεσης του σεισμού επιδιώκεται με διάφορες μεθόδους.

Μια από αυτές τις μεθόδους βασίζεται στο γεγονός ότι σε ορισμένες ζώνες παρατηρήθηκε μετανάστευση επικέντρων, δηλαδή συστηματική μετάθεση του σημείου διάρρηξης πάνω στη σεισμική ζώνη κατά ορισμένη κατεύθυνση. Αν, συνεπώς, παρατηρηθεί τέτοια μετάθεση πάνω στην σεισμική ζώνη με κατεύθυνση προς το σεισμικό κενό, μπορεί να βγει το συμπέρασμα ότι ο σεισμός θα γίνει σύντομα στο κενό, χωρίς να είναι δυνατός ο ακριβής προσδιορισμός του χρόνου γένεσης αυτού με τη μέθοδο αυτή. Ένα από τα γνωστότερα παραδείγματα μετανάστευσης της σεισμικής δράσης είναι αυτό της σεισμικής δράσης που παρατηρήθηκε κατά μήκος του ρήγματος της βόρειας Ανατολίας, όπου παρατηρείται συχνά μετανάστευση στη γένεση ισχυρών σεισμών, κυρίως προς τα δυτικά. Έτσι μεταξύ του 1939 και του 1967 έγιναν έξι μεγάλοι σεισμοί ($M= 7.3-8.0$) με σαφή μετανάστευση προς τα δυτικά (Σχήμα 1.1). Μια άλλη μέθοδος βασίζεται στον καθορισμό της περιόδου επανάληψης των ισχυρών σεισμών στο προσωρινό σεισμικό κενό.

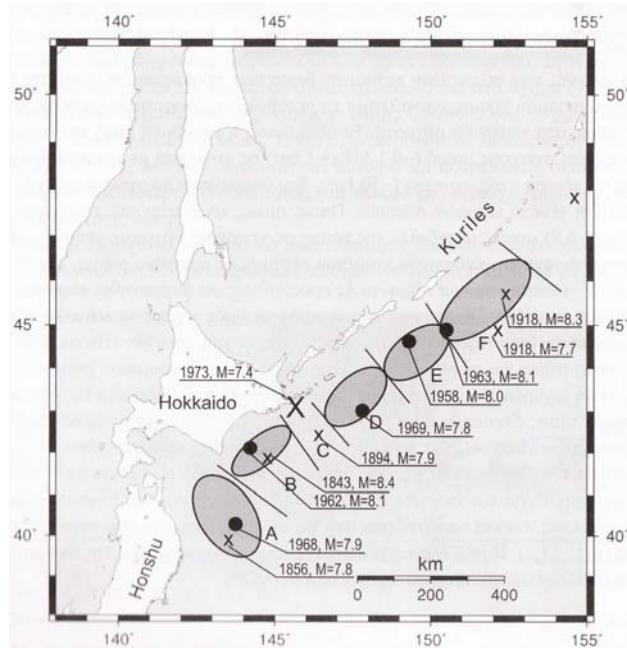


Σχήμα 1.1: Μετανάστευση της σεισμικής δράσης κατά μήκος του ρήγματος της βόρειας Ανατολίας στο διάστημα 1939-1967 (Stein et al., 1997).

Μια τρίτη μέθοδος καθορισμού του χρόνου γένεσης ενός ισχυρού σεισμού σε σεισμικό κενό βασίζεται στις γνώσεις που αφορούν την ταχύτητα της σχετικής κίνησης των λιθοσφαιρικών πλακών και την αντοχή των πετρωμάτων. Γνωρίζουμε σήμερα ότι οι

ταχύτητες των σχετικών κινήσεων στις περιοχές επαφής των λιθοσφαιρικών πλακών κυμαίνονται μεταξύ 0 και 30 εκατοστών ανά έτος και ότι η ανηγμένη παραμόρφωση θραύσης των πετρωμάτων είναι της τάξης του 5×10^{-5} . Συνεπώς, γνωρίζοντας την ταχύτητα σύγκλισης δύο λιθοσφαιρικών πλακών, μπορούμε να υπολογίσουμε το ρυθμό μεταβολής της ανηγμένης παραμόρφωσης των πετρωμάτων και επειδή γνωρίζουμε και την κρίσιμη τιμή την οποία όταν αποκτήσει η παραμόρφωση αυτή το πέτρωμα σπάει, δηλαδή, γίνεται σεισμός, μπορούμε να καθορίσουμε το χρόνο μεταξύ δύο μεγάλων σεισμών.

Το σχήμα 1.2 παριστάνει σειρά σεισμογόνων χώρων ισχυρών σεισμών στην περιοχή των νησιών Hokkaido και νότιες Kuriles (βορειοανατολικά της Ιαπωνίας). Η σεισμική αυτή ζώνη βρίσκεται στο όριο μεταξύ της Ειρηνικής και της Ευρασιατικής λιθοσφαιρικής πλάκας και γι' αυτό αναμένεται έντονη παραμόρφωση των πετρωμάτων του φλοιού. Ενώ, όμως, οι περιοχές A,B,D,E αποτελούσαν εστιακούς χώρους μεγάλων σεισμών οι οποίοι έγιναν μεταξύ 1958 και 1969, στην περιοχή C θεωρήθηκε από Ιάπωνες σεισμολόγους ως προσωρινό σεισμικό κενό (Utsu, 1972). Η πρόβλεψη αποδείχθηκε σωστή γιατί ένας σεισμός μεγέθους 7.4 έγινε στην περιοχή αυτή το 1973.



Σχήμα 1.2 Εφαρμογή της μεθόδου των προσωρινών σεισμικών κενών για την πρόγνωση του σεισμού που έγινε το 1973 κοντά στην βορειοανατολική Ιαπωνία (Utsu, 1972).

1.2.3 Η μέθοδος μεταβολής της στατικής τάσης

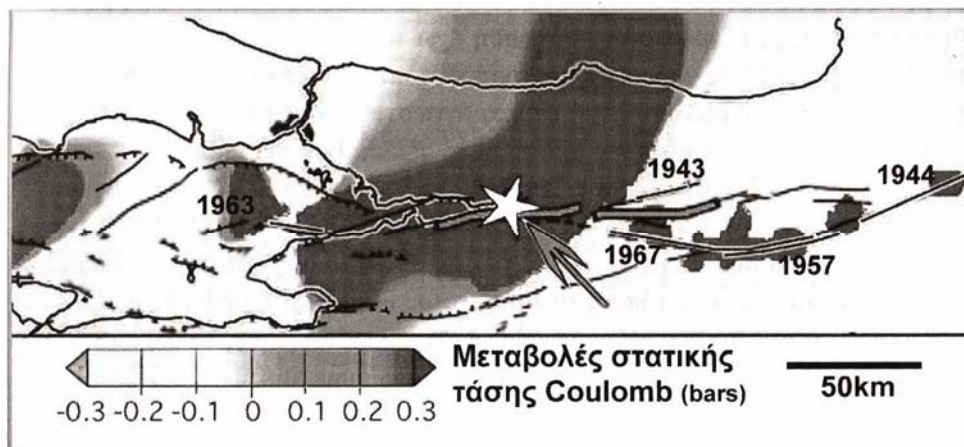
Από έρευνες των τελευταίων τεσσάρων δεκαετιών προκύπτει ότι η γένεση ενός ισχυρού σεισμού έχει ως αποτέλεσμα τη μεταβολή της διατμητικής και της κάθετης τάσης στα γειτονικά ρήγματα. Επειδή, όμως, η μεταβολή αυτή της στατικής τάσης είναι σχετικώς μικρή ($\sim 0.1 \text{ MPa} = 1 \text{ bar}$) σε σύγκριση με την πτώση τάσης κατά την γένεση ενός σεισμού ($\sim 50 \text{ bar}$), δεν θεωρήθηκε αρχικώς ικανή να επηρεάσει τη γένεση ισχυρών σεισμών. Όπως όμως προκύπτει από την θεωρία του χάους μικρές μεταβολές της τάσης σε γειτονικά ρήγματα μπορεί να επηρεάσουν έντονα την γένεση του επόμενου σεισμού σε ορισμένο ρήγμα. Για το λόγο αυτό, γίνονται σήμερα σημαντικές προσπάθειες να διερευνηθεί παραπέρα το θέμα και έχει ήδη δημοσιευτεί σημαντικός αριθμός σχετικών αποτελεσμάτων πειραματικών αλλά και θεωρητικών ερευνών (Harris, 1998).

Ένα κριτήριο για την δυνατότητα διέγερσης ή μη ενός σεισμικού ρήγματος από τη γένεση ισχυρών σεισμών σε γειτονικά ρήγματα είναι η μεταβολή της στατικής τάσης ή τάσης Coulomb. Η μεταβολή αυτή εκτιμάται από την μεταβολή της συνάρτησης Coulomb (ΔCFF), η οποία έχει ορισμένη κατανομή στο χώρο γύρω από την εστία ενός σεισμού. Η χωρική κατανομή της ΔCFF εξαρτάται από την ολίσθηση στην εστία του σεισμού και από τις διαστάσεις και τον προσανατολισμό του ρήγματος και υπολογίζεται από τις σχετικές παραμέτρους της εστίας του σεισμού. Η ΔCFF δίνεται σε συνάρτηση με τη μεταβολή της διατμητικής τάσης, $\Delta\tau$, και της κάθετης τάσης, $\Delta\sigma$, από τη σχέση:

$$\Delta\text{CFF} = \Delta\tau + \mu' \Delta\sigma \quad (1.1)$$

όπου μ' είναι ο φαινόμενος συντελεστής τριβής (Scholz, 2002). Η τιμή της μεταβολής της τάσης Coulomb χρησιμοποιείται για να εκτιμήσουμε εάν η γένεση ενός σεισμού επισπεύδει ή επιβραδύνει τη γένεση ενός άλλου σεισμού. Εάν $\Delta\text{CFF} > 0$, ο πρώτος σεισμός επισπεύδει το χρόνο γένεσης του επομένου σεισμού ενώ εάν $\Delta\text{CFF} < 0$, ο πρώτος σεισμός επιβραδύνει τη γένεση του δεύτερου. Για να αποκτήσουμε μια αντίληψη της χωρικής κατανομής των θετικών και αρνητικών τιμών της τάσης Coulomb, υπολογίζονται οι τιμές της τάσης Coulomb στους κόμβους ενός κανάβου ο οποίος καλύπτει ευρεία γεωγραφική περιοχή γύρω από την εστία ενός ισχυρού σεισμού. Οι τιμές

αυτές υπολογίζονται για τον τυπικό μηχανισμό γένεσης σεισμού σε κάθε κόμβο και στη συνέχεια χαρτογραφούνται στις γεωγραφικές συντεταγμένες του αντίστοιχου κόμβου. Με τον τρόπο αυτό καθορίζονται περιοχές αύξησης της τάσης (φωτεινές περιοχές) και περιοχές μείωσης της τάσης (σκιερές περιοχές). Η ύπαρξη σκιερής περιοχής διαρκεί κατά το χρονικό διάστημα το οποίο απαιτείται ώστε η τεκτονική φόρτιση να αυξήσει τις τιμές της τάσης στο επίπεδο που βρισκόταν πριν από την γένεση του πρώτου σεισμού. Ένα τυπικό παράδειγμα παρουσιάζεται στο σχήμα 1.3 όπου χαρτογραφείται η μεταβολή της στατικής τάσης Coulomb για το χρονικό διάστημα 1912-1996 (Nalbant et al., 1998) στην περιοχή του σεισμού της Νικομήδειας (17.08.1999, $M=7.5$). Φαίνεται ότι αυτός ο καταστρεπτικός σεισμός, που σημειώνεται με αστέρι, έγινε ακριβώς στο κέντρο της περιοχής μέγιστης αύξησης της στατικής τάσης.



Σχήμα 1.3: Χωρική κατανομή της μεταβολής στατικής τάσης Coulomb για το χρονικό διάστημα 1912-1996 στην περιοχή του σεισμού της Νικομήδειας (Izmit, 17.8.1999, $M=7.5$). Βλέπουμε ότι ο καταστρεπτικός σεισμός έγινε στο κέντρο της περιοχής μέγιστης αύξησης της στατικής τάσης (Nalbant et al., 1998).

1.3 Μεσοπρόθεσμη πρόγνωση των σεισμών

Φαίνεται ότι η μεσοπρόθεσμη πρόγνωση έχει υψηλότερη πιθανότητα επιτυχίας στο προσεχές μέλλον από ότι η μακροπρόθεσμη και η βραχυπρόθεσμη πρόγνωση. Αυτό οφείλεται στις προγνωστικές ιδιότητες ορισμένων τύπων σεισμικότητας που προκύπτουν από πλήθος αξιόπιστων σεισμολογικών παρατηρήσεων και από τη φυσική ερμηνεία αυτών των τύπων σεισμικότητας με βάση τη θεωρία του χάους. Η «επιταχυνόμενη

σεισμικότητα» και η «επιβραδυνόμενη σεισμικότητα» είναι δύο από αυτούς τους σημαντικότερους τέτοιους τύπους σεισμικότητας.

1.3.1 Μέθοδος της επιβραδυνόμενης εντός - επιταχυνόμενης εκτός σεισμικής παραμόρφωσης

Από την εξέταση επιταχυνόμενων προτεροσεισμικών ακολουθιών ισχυρών (6.3-8.3) κύριων σειμών οι οποίοι έγιναν σε διάφορα μέρη της Γης (Parazachos et al., 2004 a,b) προκύπτει ότι ισχύουν οι σχέσεις :

$$\log R = M - \log s_r + \sigma = 0.15 \quad (1.2)$$

$$\log t_p = 4.77 - 0.60 \log s_r + \sigma = 0.10 \quad (1.3)$$

όπου R (σε km) είναι η ακτίνα του ισοδύναμου κύκλου ελλειπτικής κρίσιμης περιοχής, s_r (σε $\text{Joule}^{1/2}/\text{yr } 10^4 \text{ km}^2$) είναι ο μακράς διάρκειας ρυθμός της σεισμικής παραμόρφωσης στην κρίσιμη περιοχή ανά έτος και ανά 10000 km^2 , t_p (σε έτη) είναι η συνολική διάρκεια της επιταχυνόμενης προτεροσεισμικής ακολουθίας και M είναι το μέγεθος του κύριου σεισμού.

Έστω ότι μια ακολουθία σειμών που διερευνάται έχει πιθανότητα P να επαληθεύει τις σχέσεις (1.1) και (1.2). Για κάθε γεωγραφικό σημείο του χώρου που διερευνάται ορίζεται μια ποσότητα q_a , που ονομάζεται «δείκτης ποιότητας», από την σχέση:

$$q_a = \frac{P}{m \cdot C} \quad (1.4)$$

όπου C είναι μια παράμετρος που εκφράζει τον βαθμό απόκλισης από τη γραμμικότητα της χρονικής μεταβολής της σεισμικής παραμόρφωσης η οποία πραγματοποιείται στο χώρο λόγω της γένεσης των σειμών της ακολουθίας (Bowman et al., 1998). Από στοιχεία επιταχυνόμενων προτεροσεισμικών ακολουθιών που έγιναν σε διάφορα μέρη της Γης, προκύπτει ότι :

$$C \leq 0.60, P \geq 0.45, m \leq 0.35, q_a \geq 3.0 \quad (1.5)$$

Το σημείο Q, ενός υπό διερεύνηση χώρου για το οποίο ικανοποιούνται οι σχέσεις (1.5) και ο δείκτης ποιότητας έχει την μεγαλύτερη τιμή, θεωρείται ως το κέντρο της κρίσιμης ελλειπτικής περιοχής. Η λύση που αντιστοιχεί σ' αυτό το κέντρο είναι η «βέλτιστη λύση». Το μέγεθος M, που αντιστοιχεί στην βέλτιστη λύση είναι το μέγεθος του αναμενόμενου κύριου σεισμού με σφάλμα ± 0.4 .

Η επιβραδυνόμενη σεισμική παραμόρφωση η οποία απελευθερώνεται με τη γένεση επιβραδυνόμενων προτεροσεισμών στην περιοχή του ρήγματος του αναμενόμενου κύριου σεισμού ακολουθεί το νόμο της δύναμης που εκφράζεται με τις σχέσεις:

$$\log a = 0.23M - 0.14 \log s_d + 1.40, \quad \sigma = 0.15 \quad (1.6)$$

$$\log t_d = 3.00 - 0.32 \log s_d, \quad \sigma = 0.12 \quad (1.7)$$

όπου a (σε km) είναι το μήκος του μέγιστου ημιάξονα της περιοχής του ρήγματος την οποία υποθέτουμε ελλειπτική και την ονομάζουμε σειсмоγόνο περιοχή, M είναι το μέγεθος του κύριου σεισμού, t_d (σε έτη) είναι η διάρκεια της προτεροσεισμικής επιβραδυνόμενης ακολουθίας και s_d (σε $\text{Joule}^{1/2}/\text{yr } 10^4 \text{ km}^2$) είναι ο μακράς διάρκειας ρυθμός σεισμικής παραμόρφωσης στην περιοχή του ρήγματος (Papazachos et al., 2004a). Ένας «δείκτης ποιότητας ορίζεται από την σχέση:

$$q_d = \frac{P \cdot m}{C} \quad (1.8)$$

όπου P είναι η πιθανότητα ώστε οι προτεροσεισμικές παρατηρήσεις σε ένα σειсмоγόνο χώρο να βρίσκονται σε συμφωνία με τις σχέσεις (1.6) και (1.7). Από παρατηρήσεις που αφορούν προτεροσεισμικές επιβραδυνόμενες ακολουθίες στις περιοχές ρηγμάτων κύριων σεισμών που έγιναν σε διάφορα μέρη της Γης προέκυψαν οι σχέσεις :

$$C \leq 0.60, P \geq 0.45, 2.5 \leq m \leq 0.35, q_d \geq 3.0 \quad (1.9)$$

Για τον καθορισμό του επικέντρου του αναμενόμενου κύριου σεισμού, όλη η κρίσιμη περιοχή χωρίζεται σε ένα αριθμό ισαπεχόντων σημείων (δίκτυο σημείων) και για κάθε

σημείο ελέγχεται η ισχύς των σχέσεων (1.9). Ορίζονται, έτσι, όλα τα σημεία του δικτύου για τα οποία ισχύουν οι σχέσεις αυτές και εκείνο από τα σημεία αυτά για το οποίο ο δείκτης ποιότητας, q_d , έχει την μεγαλύτερη τιμή θεωρείται ως το επίκεντρο του επερχόμενου κύριου σεισμού με σφάλμα μικρότερο των 120 km.

Φαίνεται ότι η μέθοδος της επιβραδυνόμενης εντός – επιταχυνόμενης εκτός σεισμικής παραμόρφωσης είναι η περισσότερα υποσχόμενη μέθοδος μεσοπρόθεσμης πρόγνωσης των σεισμών για τους ακόλουθους λόγους: α) έχειδειχθεί ότι οι δύο τύποι σεισμικότητας, δηλαδή, επιταχυνόμενη σεισμική παραμόρφωση στον ευρύτερο χώρο και επιβραδυνόμενη σεισμική παραμόρφωση σε περιορισμένο χώρο, προηγούνται ενός πολύ μεγάλου ποσοστού, αν όχι όλων, των ισχυρών κύριων σεισμών, β) τόσο οι τρεις παράμετροι του επερχόμενου κύριου σεισμού (επίκεντρο, χρόνος γένεσης, μέγεθος) όσο και τα σφάλματά τους υπολογίζονται αριθμητικά και για το λόγο αυτό είναι δυνατός ο έλεγχος της εγκυρότητας της μεθόδου, γ) απαιτεί δεδομένα σχετικής ισχυρών σεισμών ($M > 4.0$) που είναι διαθέσιμα και οι παράμετροί τους (μέγεθος, συντεταγμένες επικέντρων) έχουν καθοριστεί με ικανοποιητική ακρίβεια. Προκύπτει, συνεπώς, ότι σε μια περιοχή που παρακολουθείται συστηματικά είναι πολύ λίγο πιθανό να γίνει ισχυρός κύριος σεισμός χωρίς να γίνει προηγουμένως αναγνώριση αυτών των δύο τύπων σεισμικότητας. Όμως, μέχρι τώρα σχετικές παρατηρήσεις έδειξαν ότι υπάρχει σημαντική πιθανότητα να παρατηρηθούν σε μια περιοχή οι δύο αυτοί τύποι σεισμικότητας χωρίς να ακολουθήσει κύριος σεισμός (false alarm).

1.4 Βραχυπρόθεσμη Πρόγνωση των Σεισμών

Οι μέχρι τώρα προσπάθειες βραχείας διάρκειας πρόγνωσης των σεισμών βασίζονται στην αντίληψη ότι κατά τη διαδικασία γένεσης ενός σεισμού, του σταδίου διάρρηξης των πετρωμάτων προηγείται προπαρασκευαστικό στάδιο στον εστιακό χώρο του σεισμού. Συνέπεια των φυσικών διαδικασιών κατά το προπαρασκευαστικό στάδιο είναι η εμφάνιση πρόδρομων φαινομένων τα οποία όχι μόνον προηγούνται του σεισμού αλλά έχουν και αιτιατή σχέση με αυτόν. Η εμφάνιση των πρόδρομων φαινομένων σχετίζεται με την μεταβολή των φυσικών ιδιοτήτων των πετρωμάτων του σειсмоγόνου χώρου

καθώς και τη μεταβολή διαφόρων φυσικών παραμέτρων, οι οποίες αποκλίνουν από τις κανονικές τιμές για ορισμένο χρονικό διάστημα. Για το λόγο αυτό, η κύρια επιστημονική προσπάθεια επινόησης ασφαλούς και ακριβούς μεθόδου βραχυπρόθεσμης πρόγνωσης των σεισμών βασίζεται στη συνεχή και όσο το δυνατόν ακριβέστερη μέτρηση διαφόρων φυσικών παραμέτρων, ώστε να καθοριστούν οι κανονικές τιμές των παραμέτρων αυτών και οι μεταβολές εκείνες που είναι αποτέλεσμα διαδικασιών που συμβαίνουν στους εστιακούς χώρους μεγάλων σεισμών πριν από την γένεσή τους.

1.4.1 Πρόδρομα φαινόμενα

Τα πρόδρομα φαινόμενα που έχουν συσχετισθεί με τη γένεση ισχυρών μελλοντικών σεισμών μπορούν να διακριθούν σε τρεις γενικές κατηγορίες. Σ' αυτά που σχετίζονται με «παραμορφώσεις του φλοιού της Γης», με «μεταβολές της σεισμικής δράσης» και με «μεταβολές γεωφυσικών παραμέτρων».

Οι παραμορφώσεις του φλοιού της Γης που έχουν παρατηρηθεί πριν από σεισμούς είναι: Α) επιμηκύνσεις (ή επιβραχύνσεις) του εδάφους της τάξης του 10^{-6} που μετριοούνται συνεχώς με επιμηκυνσιόμετρα ή ανά ορισμένα χρονικά διαστήματα με γεωδαιτικές μεθόδους, β) κατακόρυφες μεταβολές του εδάφους (ανυψώσεις, καθιζήσεις) της τάξης μερικών εκατοστών που έχουν προσδιορισθεί στην ξηρά με την ανάγνωση κατακόρυφου κανόνα με τηλεσκόπιο και στις ακτές με μέτρηση των μεταβολών της μέσης στάθμης της θάλασσας, γ) μεταβολές της κλίσης του εδάφους της τάξης του 10^{-5} - 10^{-6} rad/yr που μετριοούνται με κλισιόμετρα.

Η κύρια μεταβολή της σεισμικής δράσης η οποία έχει ενδιαφέρον για τη βραχυπρόθεσμη πρόγνωση των ισχυρών σεισμών είναι η γένεση των προσεισμών. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι εστίες των προσεισμών βρίσκονται κοντά στην εστία του κύριου σεισμού, η συχνότητα τους αρχίζει να αυξάνεται λίγες μέρες πριν από τον κύριο σεισμό και τα μεγέθη τους ακολουθούν το νόμο των Gutenberg- Richter με μικρή τιμή της παραμέτρου b . Όμως, ο αριθμός και τα μεγέθη των προσεισμών είναι συνήθως μικρά



και γι' αυτό είναι δύσκολη η διάκριση των προσεισμών από τη συνηθισμένη σεισμική δράση και η αναγνώρισή τους.

Οι μεταβολές γεωφυσικών παραμέτρων που έχουν παρατηρηθεί πριν από σειμούς είναι : α) ελάττωση του λόγου, α/β , της ταχύτητας των επιμήκων κυμάτων προς την ταχύτητα των εγκαρσίων κυμάτων μέχρι 15% της κανονικής τιμής, β) μεταβολή στο μηχανισμό γένεσης των μικρών σειμών (αλλαγή της διεύθυνσης της συνιστώσας θλίψης), γ) μεταβολή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης των πετρωμάτων του εστιακού χώρου, δ) μεταβολή της περιεκτικότητας του ραδονίου στο μεταλλικό νερό και έκλυσή του από το έδαφος κυρίως σε ρήγματα, ε) πρόδρομα ηλεκτρικά και ηλεκτρομαγνητικά σήματα που διαδίδονται κυρίως στη Γη, και στ) μεταβολές της έντασης των διαφόρων γεωφυσικών πεδίων (μαγνητικού, ηλεκτρικού, βαρύτητας).

Μακροσκοπικά πρόδρομα φαινόμενα είναι: α) μεταβολές στο θαλάσσιο νερό (απόσυρση ή εφόρμηση της θάλασσας) που παρατηρούνται από μερικές ώρες μέχρι μερικές μέρες πριν από τους σειμούς και οφείλονται σε προσεισμική παραμόρφωση του υποθαλάσσιου σειсмоγόνου χώρου, β) πρόδρομες μεταβολές στο υπόγειο νερό (μεταβολή της στάθμης, της θερμοκρασίας κλπ.) που παρατηρείται συνήθως μερικές ώρες πριν από το σεισμό, γ) πρόδρομα ακουστικά φαινόμενα (υποχθόνιος θόρυβος κλπ.), που οφείλονται σε μικρούς σειμούς (οι οποίοι δεν γίνονται αισθητοί ως εδαφική ταλάντωση) και γίνονται αισθητά μερικές μέρες πριν από το σεισμό. Πολλές φορές, όμως, ακούγονται τέτοιοι θόρυβοι χωρίς να ακολουθεί σεισμός, δ) πρόδρομα οπτικά φαινόμενα που, πιθανώς, οφείλονται σε μεταβολή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου της Γης πριν από ισχυρούς σειμούς, ε) ασυνήθιστη συμπεριφορά ζώων, που παρατηρείται 12 ώρες πριν από σειμούς κατά μέσο όρο, και πιθανώς οφείλεται σε μικρούς σειμούς, σε ερεθισμό των ζώων από τοξικά αέρια που απελευθερώνονται στο σειсмоγόνο χώρο κατά τη διάρκεια της φυσικής διαδικασίας προετοιμασίας γένεσης των σειμών κλπ.

Θεωρητικές έρευνες έχουν δείξει (Dobrovolsky et al., 1979), ότι η ακτίνα, r (σε km), του κύκλου ο οποίος έχει κέντρο το επίκεντρο του σεισμού και περικλείει το χώρο όπου



παρατηρούνται τα πρόδρομα φαινόμενα (χώρος φυσικής προετοιμασίας γένεσης του σεισμού) δίνεται από την σχέση:

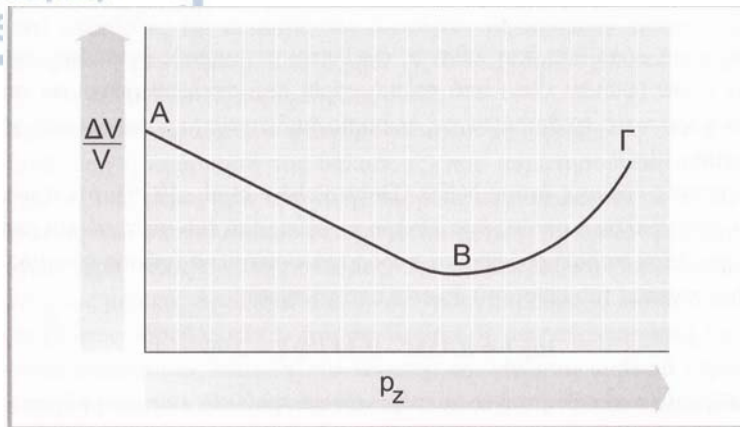
$$\log r = 0.43M - 0.33 \log \varepsilon - 2.73 \quad (1.9)$$

όπου M είναι το μέγεθος του αναμενόμενου σεισμού και ε είναι η μέγιστη κύρια ανηγμένη παραμόρφωση, της οποίας η τιμή μεταβάλλεται μεταξύ 10^{-6} και 10^{-8} από περιοχή σε περιοχή. Η ομοιότητα της σχέσης (1.1), η οποία δίνει την ακτίνα κρίσιμης περιοχής και της σχέσης (1.9), η οποία δίνει τη διάσταση της περιοχής προετοιμασίας είναι εντυπωσιακή, γιατί οι σχέσεις αυτές έχουν προσδιορισθεί με ανεξάρτητες μεθόδους και δεδομένα παρατήρησης. Έτσι, ο κρίσιμος χώρος που προσδιορίζεται σε σεισμολογικά στοιχεία είναι ο χώρος όπου πρέπει να αναζητούνται πρόδρομα γεωδαιτικά, σεισμολογικά και γεωφυσικά φαινόμενα.

1.4.2 Φυσική ερμηνεία των πρόδρομων φαινομένων

Διάφορες προσπάθειες έγιναν για την ερμηνεία των μεταβολών που παρατηρούνται πριν από τους σεισμούς με θεωρητικά πρότυπα (μοντέλα). Από τις προσπάθειες αυτές εκείνες που βασίστηκαν σε εργαστηριακές έρευνες φαίνεται ότι σημειώνουν κάποια επιτυχία. Συνέπεια των εργαστηριακών αυτών ερευνών είναι η διατύπωση της θεωρίας της διασταλτικότητας (dilatancy theory).

Αν σε ορισμένο πέτρωμα εφαρμόσουμε τάσεις συμπίεσης κατά τις διευθύνσεις ενός τρισσορθογώνιου συστήματος αξόνων και χαρτογραφήσουμε την ανηγμένη παραμόρφωση, $\Delta V/V$, δηλαδή το λόγο της μεταβολής του όγκου προς τον αρχικό όγκο του πετρώματος σε συνάρτηση με την τάση, p_z , κατά τη διεύθυνση της μέγιστης συμπίεσης, θα παρατηρήσουμε ότι όταν αυξάνεται η τάση, αρχικά ελαττώνεται ο όγκος, δηλαδή, το πέτρωμα συστέλλεται και η ανηγμένη παραμόρφωση είναι σχεδόν γραμμική συνάρτηση της τάσης (σχήμα 1.4, τμήμα AB). Μετά, η σχέση παύει να είναι γραμμική και το πέτρωμα διαστέλλεται παρά την αύξηση της τάσης, δηλαδή, έχουμε το φαινόμενο διασταλτικότητας (τμήμα ΒΓ) μέχρις ότου το πέτρωμα υποστεί θραύση (σημείο Γ).



Σχήμα 1.4: Μεταβολή της ανηγμένης παραμόρφωσης πετρώματος σε συνάρτηση με την ασκούμενη σ' αυτό μέγιστη τάση συμπίεσης. Η ΑΒ παριστάνει την κανονική συστολή και η ΒΓ τη διασταλτικότητα.

Η διασταλτικότητα οφείλεται στο γεγονός ότι κατά τη διάρκεια αυτής, δημιουργούνται κενά στο πέτρωμα λόγω της δημιουργίας μικρορωγμών μέσα σ' αυτό. Ο μεγάλος άξονας των μικρορωγμών είναι παράλληλος προς τη διεύθυνση της μέγιστης συμπίεσης ενώ αυτές διογκώνονται κατά τη διεύθυνση της ελάχιστης συμπίεσης.

Αν υποθέσουμε ότι η διασταλτικότητα συμβαίνει και στον εστιακό χώρο πριν από τους σεισμούς, τότε οι μικρορωγμές που δημιουργούνται κατά τη διάρκεια αυτής αποτελούν τις εστίες των προσεισμών. Η πλήρωση, από το άλλο μέρος, των μικρορωγμών με νερό μπορεί να ερμηνεύσει τη μεταβολή του λόγου της ταχύτητας των επιμήκων κυμάτων προς την ταχύτητα των εγκαρσίων κυμάτων, α/β , που παρατηρείται πριν από τη γένεση του σεισμού, γιατί η ταχύτητα των επιμήκων κυμάτων είναι περισσότερο ευαίσθητη σε μεταβολές του βαθμού διαβροχής του πετρώματος. Προσπάθειες, επίσης, καταβάλλονται για την ερμηνεία και των άλλων μεταβολών που παρατηρήθηκαν πριν από τους σεισμούς με τη θεωρία της διασταλτικότητας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο: ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΑΝΑΣΤΡΟΦΗΣ ΠΡΙΝ ΑΠΟ ΙΣΧΥΡΟΥΣ ΣΕΙΣΜΟΥΣ

2.1 Εισαγωγή

Το φαινόμενο της σεισμικής αναστροφής μπορεί να περιγραφθεί ως εξής (Keilis–Borok et al., 1994; Shebalin et al., 1996): περιοχές με έντονη σεισμική δραστηριότητα γίνονται ασυνήθιστα ήσυχες ενώ περιοχές με χαμηλή σεισμική δραστηριότητα παρουσιάζουν διέγερση πριν από την γένεση επερχόμενου ισχυρού σεισμού. Αυτό λαμβάνει χώρα μερικούς μήνες πριν τον κύριο σεισμό και περίπου 100 km από το μελλοντικό επίκεντρο.

Μέρος αυτού του φαινομένου –σεισμικές ησυχίες – έχει αναφερθεί σε διάφορες χρονικές κλίμακες, από 10 χρόνια (σεισμικά κενά, Mogi, 1985) σε χρόνια (Wyss, 1986; Wyss and Habbermann, 1988; Wiemmer and Wyss, 1994) και σε μήνες (doughnut pattern, Mogi, 1985). Επίσης έχουν προταθεί μηχανισμοί που περιέγραφαν σεισμικές ησυχίες (Scholz, 1988, 1990). Ο αλγόριθμος μεσο-πρόθεσμης πρόγνωσης ‘ Mendocino Scenario’ βασίζεται σε τοπικές σεισμικές ησυχίες οι οποίες διακόπτουν την σεισμική δραστηριότητα για μερικούς μήνες και αυτό συμβαίνει μερικά χρόνια πριν τον κύριο σεισμό. Τέλος οι Rundkvist and Rotwain (1994) και Schreider (1990) έχουν αναφέρει διάφορες υποθέσεις για τις σεισμικές ησυχίες.

Το φαινόμενο της σεισμικής αναστροφής βρίσκεται στο τελευταίο στάδιο και ουσιαστικά είναι ένας συνδυασμός των φαινομένων της σεισμικής ησυχίας και της διέγερσης σε μια περιοχή. Στο κεφάλαιο αυτό θα παραθέσουμε παραδείγματα εφαρμογής της μεθόδου για τις περιοχές Νότια Καλιφόρνια, Lesser Antilles (Keilis–Borok et al., 1994; Shebalin et al., 1996) και Taiwan (Wu & Chen, 2006).

2.2 Lesser Antilles & Νότια Καλιφόρνια

Οι Shebalin & Keilis-Borok (1999) εξέτασαν τις παρακάτω περιοχές και προσπάθησαν να εφαρμόσουν αλγορίθμους για τον επαναπροσδιορισμό των εστιακών συντεταγμένων και την χωρο-χρονική αύξηση της πιθανότητας για ισχυρούς σεισμούς. Χώρισαν την περιοχή σε ζώνες τις οποίες ονόμασαν 'ενεργές' και 'ανεργές' και έτσι μπορούσαν να κατατάξουν κάθε σεισμό. Η σεισμική αναστροφή θα έδινε μεγάλο αριθμό σεισμών στην 'ανεργή ζώνη ενώ θα είχαμε λίγους σεισμούς στην 'ενεργή'. Επίσης την περιοχή την οποία θεωρούσαν ως πιο πιθανή για τη γένεση κύριου σεισμού την ονόμασαν TSIP (Time Space Increased Probability). Αν το επίκεντρο του κύριου σεισμού βρισκόταν στην περιοχή αυτή τότε η πρόγνωση θα ήταν επιτυχής.

2.2.1 Αναδρομική πρόγνωση στις Lesser Antilles

Για την περιοχή Lesser Antilles εξέτασαν σεισμούς (Shebalin & Keilis-Borok, 1999) κατά την περίοδο από τον Ιανουάριο 1984 έως Ιούνιο 1995 για σεισμούς οι οποίοι είχαν ήδη γίνει. Στον πίνακα 2.1, φαίνονται συνοπτικά τα αποτελέσματα εφαρμογής της μεθόδου όπου παρατηρούμε ότι 5 από τους 7 κύριους σεισμούς οι οποίοι έγιναν κατά την περίοδο που εξετάζουμε μπορούσαν να είχαν προβλεφθεί.

Πίνακας 2.1: Συνοπτική παρουσίαση αποτελεσμάτων για την περιοχή Lesser Antilles 1984-1995 (Shebalin & Keilis-Borok, 1999).

Time period	1984–June 1995
Number of strong earthquakes, $M \geq 5$	7
Number of successful predictions	5
Relative time-space volume of alarms	7.4%
Number of TSIPs	8

Στον πίνακα 2.2 παρουσιάζονται αναλυτικά οι σεισμοί από το 1984-1997 για μέγεθος $M \geq 5$ όπου και διακρίνουμε ποιοι συγκεκριμένοι σεισμοί μπορούσαν να προβλεφθούν βάση του μοντέλου (+) αλλά και ποιους σεισμούς απέτυχε να προβλέψει το μοντέλο πρόγνωσης (-).

Πίνακας 2.2: Αναλυτική παρουσίαση αποτελεσμάτων για $M > 5$. Από αριστερά προς τα δεξιά αναφέρονται η ημερομηνία του σεισμού, το επίκεντρο, το βάθος, το μέγεθος καθώς και το αποτέλεσμα της πρόγνωσης (Shebalin & Keilis-Borok, 1999).

Date	Epicenter	Depth (km)	M		Result of prediction
<i>Retrospective test</i>					
1985.03.16	17.01°N 62.44°W	13	6.3	+	Successful prediction
1985.03.16	16.97°N 62.51°W	33	5.4		Aftershock, not considered
1986.02.12	17.01°N 62.32°W	22	5.4	+	Successful prediction
1987.08.12	14.03°N 59.25°W	52	5.5		Outside the region
1990.02.21	16.90°N 62.32°W	109	5.8	+	Successful prediction
1990.07.12	14.64°N 60.45°W	28	5.7	+	Successful prediction
1990.11.18	17.80°N 63.03°W	92	5.3		Outside the region
1991.04.19	16.86°N 60.59°W	16	5.3	-	Failure to predict
1991.12.30	17.71°N 61.62°W	47	5.3	+	Successful prediction
1992.08.03	15.91°N 60.88°W	43	5.4	-	Failure to predict
1995.03.08	16.67°N 59.40°W	33	6.2		Outside the region
<i>Test in real time</i>					
1996.09.24	15.34°N 61.35°W	138	6.0	+	Successful prediction

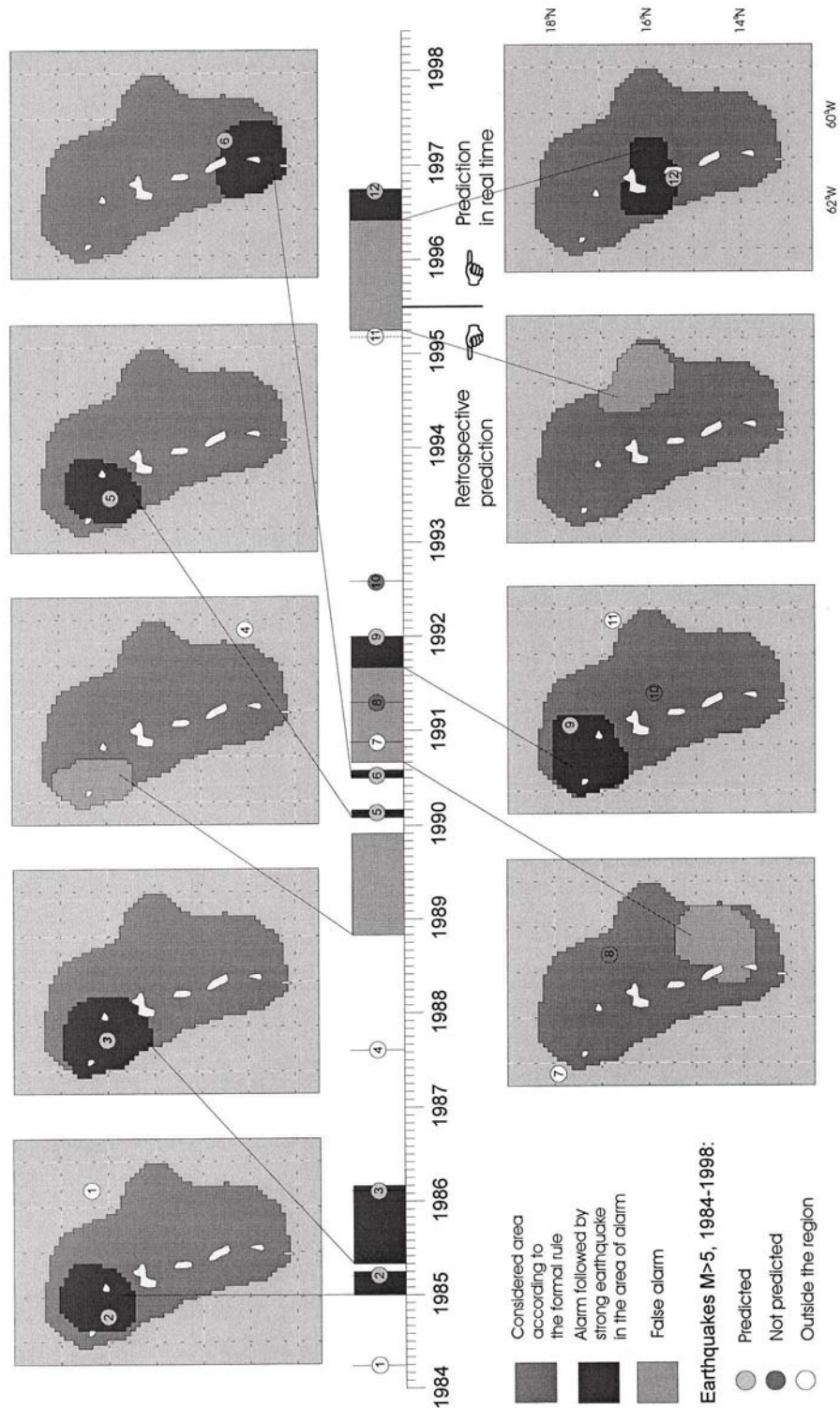
2.2.2 Πρόγνωση σε πραγματικό χρόνο στις Lesser Antilles

Από τον Ιούλιο 1995 έως Ιούνιο 1998 έθεσαν (Shebalin & Keilis-Borok, 1999) σε εφαρμογή τους ίδιους αλγόριθμους για την περιοχή με την διαφορά ότι τα δεδομένα ήταν σε πραγματικό χρόνο. Όπως φαίνεται στον πίνακα 2.3 προέβλεψαν επιτυχώς τον κύριο σεισμό.

Πίνακας 2.3: Συνοπτική παρουσίαση αποτελεσμάτων για την περιοχή Lesser Antilles 1995-1997 (Shebalin & Keilis-Borok, 1999).

Time period	July 1995– September 1997
Number of strong earthquakes, $M \geq 5$	1
Number of successful predictions	1
Relative time–space volume of alarms	7.8%
Number of TSIPs	2

Συνοψίζοντας για την περιοχή Lesser Antilles, όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.1, στην πλειονότητα τους οι κύριοι σεισμοί προβλέφθηκαν σωστά ενώ είχαμε μικρό αριθμό «εσφαλμένων συναγερμών».



Σχήμα 2.1: Αναδρομική πρόγνωση και πρόγνωση σε πραγματικό χρόνο για την περιοχή Lesser Antilles (Shebalin & Keilis-Borok, 1999).

2.2.3 Εφαρμογή στην περιοχή Νότια Καλιφόρνια

Για την περιοχή αυτή εξέτασαν (Shebalin & Keilis-Borok, 1999) δεδομένα 32 ετών (1965-1997) όπως φαίνεται αναλυτικά στον πίνακα 2.4 σε σύγκριση με τα δεδομένα για την περιοχή Lesser Antilles. Λόγω της αυξημένης σεισμικής δραστηριότητας στην περιοχή πήραν ελάχιστο μέγεθος $M \geq 6.3$ και εφάρμοσαν τον ίδιο αλγόριθμο. Τα αποτελέσματα ήταν ενθαρρυντικά καθώς 6 από τους 8 κύριους σεισμούς προβλέφθηκαν με επιτυχία.

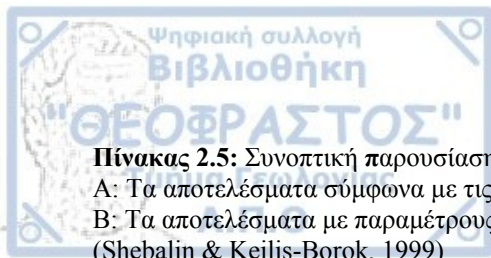
Πίνακας 2.4: Παράμετροι αλγορίθμου για τις περιοχές Lesser Antilles και Νότια Καλιφόρνια (Shebalin & Keilis-Borok, 1999).

Parameter		Lesser Antillean Arc	Southern California, A	Southern California, B
Minimum magnitude of earthquakes at which prediction is aimed	M_0	5	6.3	6.3
<i>Parameters for identification of A and N</i>				
Minimal magnitude of background earthquakes	M_b	0	1.8	1.8
Duration of the background time interval, years	T_b	30	30	30
Radius of circles, km	r	25	25	20
Parameter for smoothing epicenter density	N_0	20	20	20
Parameter for the completeness of the catalogue and for mask determination	N_{min}	100	100	200
<i>Parameters of function f</i>				
Minimum magnitude of current earthquakes	M_c	0	2.3	2.3
Duration of the current time interval, days	T_c	90	90	90
Radius of circles R (km)	R	75	75	75
<i>Parameters for determination of TSIPs</i>				
Step for spatial grid	δ	0.1°	0.1°	0.1°
Step for time, months	τ	1	1	1
Threshold for function	F	5.5	5.5	5.0
Duration of alarm (months)	T	12	12	12
Minimum spatial size of alarm (km ²)	S	5000	5000	15 000
Width of additional belt	b	0.2°	0.2°	0

A: same, except magnitude, parameters as for Antilles.

B: parameters chosen for real-time testing.

Ακολουθώντας άλλαξαν (Shebalin & Keilis-Borok, 1999) κάποιες παραμέτρους σε σχέση με τον αλγόριθμο που εφαρμόστηκε στην περιοχή Lesser Antilles. Τα αποτελέσματα ήταν ικανοποιητικά αλλά όπως φαίνεται και στον πίνακα 2.5 έδωσαν 34 «εσφαλμένους συναγερμούς».



Πίνακας 2.5: Συνοπτική παρουσίαση αποτελεσμάτων για την περιοχή Νότια Καλιφόρνια 1965-1997.
 Α: Τα αποτελέσματα σύμφωνα με τις παραμέτρους που χρησιμοποιήθηκαν στις Lesser Antilles.
 Β: Τα αποτελέσματα με παραμέτρους που εφαρμόστηκαν για μελλοντικά αποτελέσματα.
 (Shebalin & Keilis-Borok, 1999)

Considered time period	1965–September 1997	
Test	A	B
Number of strong earthquakes, $M \geq 6.3$	8	7
Number of successful predictions	8	8
Relative time–space volume of alarms	12.1%	9.2%
Number of TSIPs	42	30

A: transfer of parameters from Antilles.

B: parameters chosen for future real-time testing.

Συνοπτικά στον πίνακα 2.6 παρουσιάζονται για την περιοχή Νότια Καλιφόρνια τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη εφαρμογή και των 2 αλγορίθμων.

Πίνακας 2.6: Αναλυτική παρουσίαση αποτελεσμάτων για την περιοχή Νότια Καλιφόρνια μετά την εφαρμογή των 2 αλγορίθμων. Από αριστερά προς τα δεξιά αναφέρονται η ημερομηνία του σεισμού, το επίκεντρο, το βάθος, το μέγεθος καθώς και το αποτέλεσμα της πρόγνωσης σύμφωνα και με τους 2 αλγορίθμους (Shebalin & Keilis-Borok, 1999).

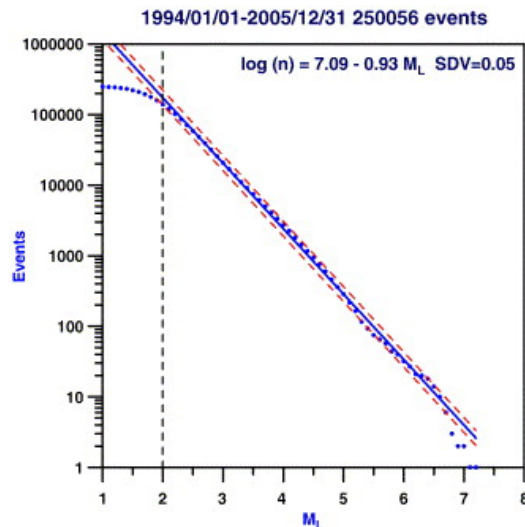
Date	Epicenter	Depth (km)	M	Result of retrospective prediction with parameters from Antilles (A) and with parameters fixed for future real-time testing (B)		
				A	B	
1966.08.07	31.80°N –114.50°W	0	6.3			outside the region
1968.04.09	33.19°N –116.13°W	11	6.5	+	+	successful prediction
1971.02.09	34.41°N –118.40°W	8	6.6	+	–	failure-to-predict in test B
1979.10.15	32.61°N –115.32°W	12	6.6	+	+	successful prediction
1980.05.25	37.61°N –118.82°W	3	6.4			foreshock, not considered
1980.05.25	37.56°N –118.79°W	6	6.5	+	+	successful prediction
1980.05.27	37.46°N –118.82°W	2	6.3			aftershock, not considered
1983.05.02	36.25°N –120.26°W	9	6.3	+	+	successful prediction
1987.11.24	33.01°N –115.84°W	2	6.6	+	+	successful prediction
1992.06.28	34.20°N –116.44°W	1	6.7	+	+	successful prediction
1992.06.28	34.20°N –116.83°W	5	6.4			aftershock, not considered
1994.01.17	34.21°N –118.54°W	18	6.7	+	+	successful prediction
1994.01.17	34.22°N –118.54°W	17	6.6			aftershock, not considered

2.3 Taiwan

Οι Wu & Chen (2006) μελέτησαν τον σεισμό του Chi-Chi (1999) στην Taiwan ($M=7.6$), τον μεγαλύτερο σεισμό που έγινε στην περιοχή και προσπάθησαν να δουν αν είχε προηγηθεί το φαινόμενο της σεισμικής αναστροφής.

2.3.1 Δεδομένα

Τα δεδομένα που χρησιμοποιήσαν είχαν ελάχιστο μέγεθος $M > 2$ και εστιακό βάθος μικρότερο των 35km για την περίοδο 01/01/1994 – 31/12/2005, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.2



Σχήμα 2.2: Υπολογισμός μεγέθους πληρότητας του καταλόγου (Wu & Chen ,2006).

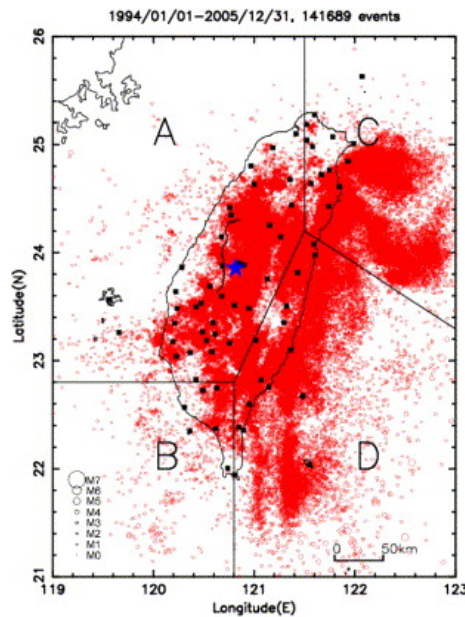
2.3.2 Περιοχή μελέτης

Όπως φαίνεται στο σχήμα 2.3, χώρισαν (Wu & Chen ,2006) την περιοχή σε 4 ζώνες (A, B, C, D) καθεμία από τις οποίες έχει διαφορετικά τόσο τεκτονικά όσο και σεισμολογικά χαρακτηριστικά. Αναλυτικά :

- i) Ζώνη A, τοποθετείται στην Ευρασιατική πλάκα, οι περισσότεροι σεισμοί συνδέονται με ενεργά ρήγματα που βρίσκονται πάνω στον νησί της Taiwan. (σχήμα 2.3).
- ii) Ζώνη B, το μεγαλύτερο μέρος της ζώνης αυτής τοποθετείται στην πλάκα της Κίνας και η περιοχή αυτή είναι η χαμηλότερη σε σεισμικότητα ανάμεσα από τις 4 ζώνες (σχήμα 2.3).

iii) Ζώνη C, η περιοχή αυτή περιλαμβάνει την ζώνη κατάδυσης A. Ryukyu, την τάφρο Okinawa και μερικά ηφαίστεια. Σε αυτήν την Ζώνη παρατηρούνται σεισμοί μεγάλου βάθους και η σεισμικότητα είναι αρκετά υψηλή (σχήμα 2.3).

iv) Ζώνη D, εδώ έχουμε την σύγκρουση της Ευρασιατικής πλάκας με την πλάκα των Φιλιππίνων και λόγω της σύγκρουσης αυτής παρουσιάζει μεγαλύτερη σεισμική δραστηριότητα σε σχέση με τις άλλες ζώνες (σχήμα 2.3).



Σχήμα 2.3: Χωρισμός της Taiwan σε 4 επιμέρους ζώνες με σεισμοτεκτονικά κριτήρια.
A) Ευρασιατική πλάκα. B) Πλάκα Κίνας C) Ζώνη καταβύθισης
D) Σύγκρουση Ευρασιατικής πλάκας με την πλάκα Φιλιππίνων (Wu & Chen ,2006).

2.3.3 Μέθοδος

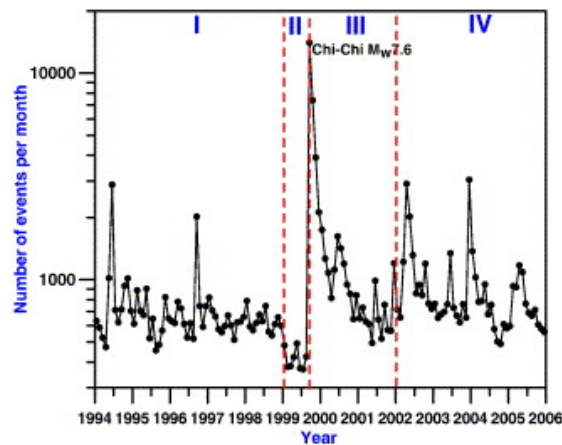
Η μέθοδος που χρησιμοποίησαν (Wu & Chen 2006) ήταν η εφαρμογή του Z-test (σχέση 1) για να μπορέσουν να υπολογίσουν την μεταβολή της σεισμικής δραστηριότητας. Στην σχέση 2.1 έχουμε για R_{tar} και R_{bg} τους μέσους όρους της σεισμικότητας για το χρονικό διάστημα της μελέτης και της σεισμικότητας της περιοχής αντίστοιχα, σ_{tar} και σ_{bg} είναι οι τυπικές αποκλίσεις και n_{tar} , n_{bg} ο αριθμός των σεισμών. Αυτό είναι παρόμοιο με την

παράμετρο Z που υπολογίζεται μέσω του Z_{map} (Wiemer & Wyss, 1994). Επίσης, πρόσθεσαν (Wu & Chen, 2006) μια δοκιμασία έτσι ώστε να απαλείψουν τους μετασεισμούς (3 μέρες μετά τον κύριο σεισμό και 5 km από τον επίκεντρο). Τέλος, ο θετικός παράγοντας Z υποδηλώνει αύξηση της σεισμικότητας ενώ ο αρνητικός παράγοντας μείωση.

$$Z(x, y, t) = \frac{(R_{tar} - R_{bg})}{\sqrt{\frac{\sigma_{bg}^2}{n_{bg}} + \frac{\sigma_{tar}^2}{n_{tar}}}} \quad (2.1)$$

2.3.4 Αποτελέσματα

Τοποθετώντας (Wu & Chen, 2006) τους σεισμούς σε ημιλογαριθμικό διάγραμμα (σχήμα 2.4) χώρισαν (Wu & Chen, 2006) την περίοδο μελέτης σε 4 επιμέρους τμήματα. Η πρώτη (I) αφορά την περίοδο 5 ετών πριν τον κύριο σεισμό (1994-1998), η δεύτερη (II) μερικούς μήνες πριν τον κύριο σεισμό (01/01/1999-19/09/1999), η τρίτη (III) από την γένεση του σεισμού ($M=7.6$) έως και 2 χρόνια μετά (20/09/1999-31/12/2001) και η τέταρτη (IV) τα 4 επόμενα χρόνια (2002-2005).



Σχήμα 2.4: Ετήσιος αριθμός σεισμών σε συνάρτηση με το χρόνο (Wu & Chen, 2006).

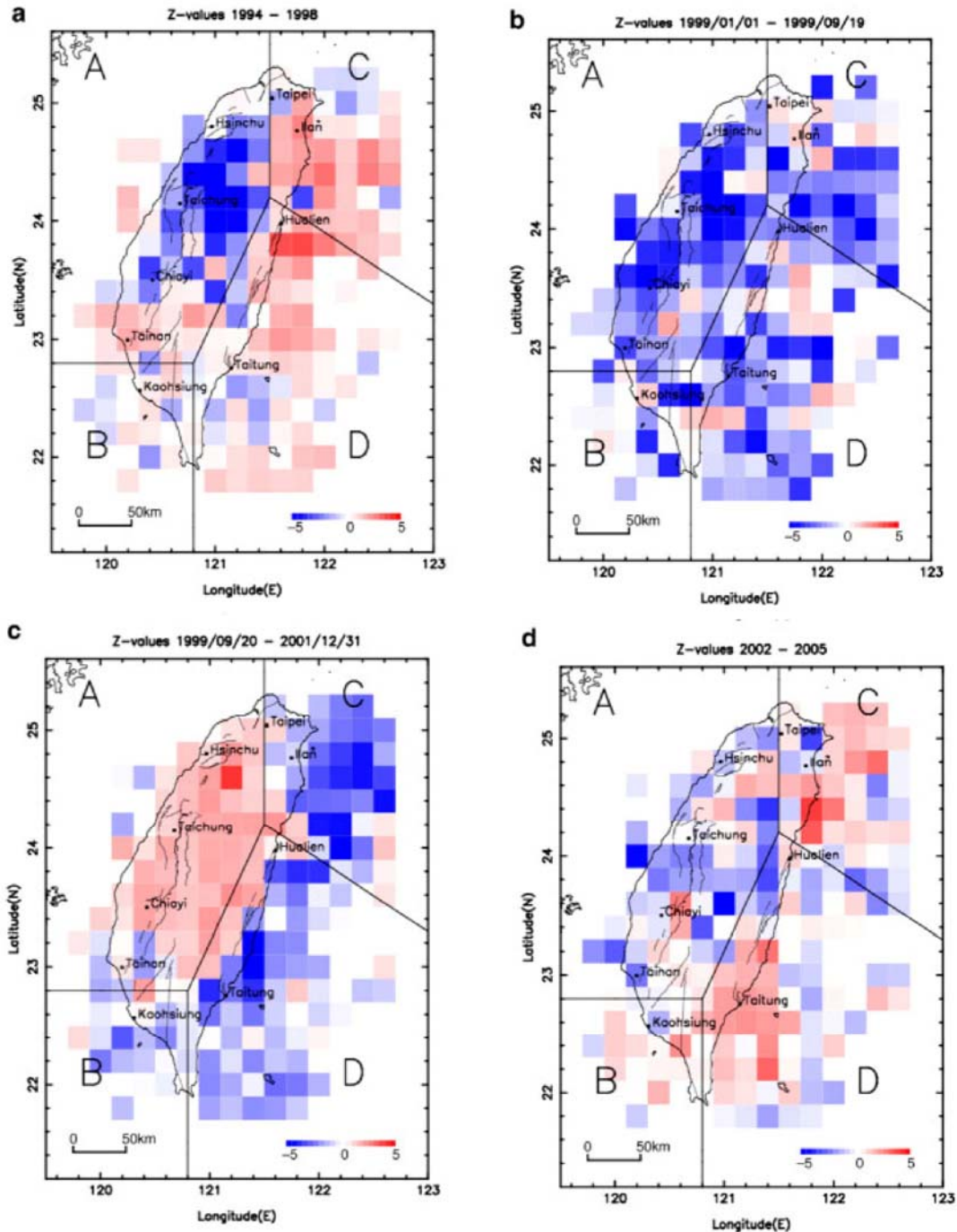
Έπειτα οι 4 αυτές υποπερίοδοι μελετήθηκαν ως προς την μεταβολή του Z, όπως αναφέραμε παραπάνω για να μπορέσουν να εξαχθούν συμπεράσματα για την σεισμικότητα της περιοχής. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν φαίνονται στα σχήματα 2.5.

(I) 1994-1998: Παρατηρούμε, όπως αναμενόταν για την περιοχή, ότι η ζώνες C και D παρουσιάζουν υψηλή σεισμικότητα σε αντίθεση με τις ζώνες A και B όπου η σεισμικότητα είναι χαμηλή (σχήμα 2.5a).

(II) Ιανουάριος 1999 - 19 Σεπτεμβρίου 1999, πριν τον κύριο σεισμό. Παρατηρείται χαμηλή σεισμική δραστηριότητα σε ολόκληρη σχεδόν την περιοχή της Taiwan και περιοχές όπου συνήθως ήταν σεισμικά ενεργές (C & D) φαίνεται να έχουν χαμηλή σεισμικότητα. Επιπλέον υπάρχει δραστηριότητα κοντά στο επίκεντρο του επερχόμενου σεισμού (A) (σχήμα 2.5b).

(III) 20 Σεπτεμβρίου 1999 – 2001. Την περίοδο αυτή έχουμε έξαρση της σεισμικότητας στην ζώνη A, η οποία ζώνη είναι από τις πιο χαμηλές σεισμικά της περιοχής, ενώ οι πιο υψηλές σεισμικά ζώνες (C & D) παραμένουν «ήσυχες» (σχήμα 2.5c).

(IV) 2002 – 2005 Την περίοδο αυτή παρατηρούμε ότι η ζώνη A αρχίζει και ηρεμεί σε σύγκριση με την προηγούμενη περίοδο ενώ οι ζώνες C & D αρχίζουν να γίνονται σεισμικά ενεργές όπως στην περίοδο (I). Έτσι η περιοχή αποκτά ξανά την «φυσιολογική» σεισμική δραστηριότητα (σχήμα 2.5d).



Σχήμα 2.5: a) Μεταβολή σεισμικότητας για την περίοδο 1994-1998
 b) Μεταβολή σεισμικότητας για την περίοδο 01/01/1999- 19/09/1999
 c) Μεταβολή σεισμικότητας για την περίοδο 20/09/1999- 31/12/2001
 d) Μεταβολή σεισμικότητας για την περίοδο 2002-2005
 Το μπλε χρώμα υποδηλώνει μείωση της τιμής Z και μείωση της σεισμικότητας.
 Το κόκκινο υποδηλώνει αύξηση της τιμής Z και αύξηση της σεισμικότητας.
 (Wu & Chen ,2006)



Ανακεφαλαιώνοντας τα αποτελέσματα των μελετών για τις περιοχές Lesser Antilles, Νότια Καλιφόρνια (Shebalin & Keilis-Borok, 1999) και Taiwan (Wu & Chen, 2006) καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η μέθοδος σεισμικής αναστροφής σε σύγκριση με τις μεθόδους μεσοπρόθεσμης πρόγνωσης (Keilis-Borok, 1990; Kossobokov et al., 1999; Rotwain and Novikova, 1999) μας δίνει μικρότερο χωρο-χρονικό περιθώριο. Επίσης, η περίπτωση της Taiwan (Wu & Chen, 2006) είναι ένα χαρακτηριστικό και ολοκληρωμένο παράδειγμα του κύκλου της σεισμικής αναστροφής, όπου η σεισμικότητα μεταβάλλεται αισθητά πριν και μετά την γένεση του κύριου σεισμού (19/09/1999). Το μειονέκτημα όμως της μεθόδου αυτής είναι ότι απαιτείται πλήρης κατάλογος για μικρά μεγέθη σεισμών και για μεγάλο χρονικό διάστημα για να μπορέσουμε να έχουμε ικανοποιητικά αποτελέσματα.



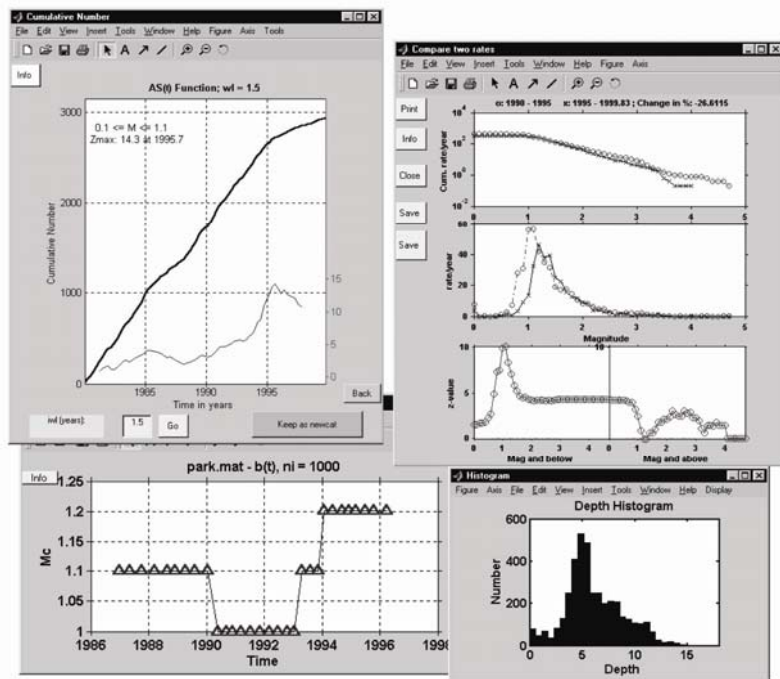
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο : ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΡΟΓΡΑΜΑΤΟΣ ZMAP

3.1 Εισαγωγή

Το Zmap αποτελεί ένα σύνολο εργαλείων το οποίο λειτουργεί γραφικό περιβάλλον και σχεδιάστηκε από τους Wiemer και Zuniga με σκοπό να βοηθήσει τους σεισμολόγους στην ανάλυση των σεισμικών καταλόγων. Το Zmap δημοσιεύτηκε πρώτη φορά το 1994 και μέχρι σήμερα συνεχώς αναπτύσσεται. Η τελευταία έκδοση του λογισμικού είναι το Zmap 6.0. Το πρόγραμμα αυτό είναι γραμμένο με βάση την γλώσσα προγραμματισμού Matlab η οποία χρησιμοποιείται σε μεγάλο βαθμό από τους ερευνητές των φυσικών επιστημών. Παρ' όλα αυτά δεν απαιτείται καμία γνώση της γλώσσας Matlab για την χρήση του λογισμικού Zmap.

Μια τυπική εικόνα του περιβάλλοντος εργασίας του λογισμικού Zmap δίνεται στο σχήμα 3.1. Πάνω αριστερά φαίνεται το άθροισμα των σειμών κάποιου καταλόγου, ενώ η λεπτή καμπύλη δείχνει την μεταβολή της Z-value για τον συγκεκριμένο κατάλογο. Κάτω δεξιά είναι το διάγραμμα του συνόλου των σειμών ως προς το βάθος αυτών. Επιπλέον με το λογισμικό αυτό μπορούν να υπολογιστεί η παράμετρος b , το ελάχιστο μέγεθος πληρότητας ορισμένου καταλόγου, να δημιουργηθούν διάφορα ιστογράμματα που αφορούν τον κατάλογο κ.α. Αυτές είναι κάποιες ενδεικτικές δυνατότητες του συγκεκριμένου λογισμικού.

Παρακάτω θα αναφέρουμε αναλυτικά κάποιες από τις δυνατότητες του συγκεκριμένου λογισμικού σύμφωνα με διεθνή παραδείγματα. Επίσης θα αναφερθούμε και στον τρόπο υπολογισμού της παραμέτρου Z το οποίο θα μας απασχολήσει και στα επόμενα κεφάλαια. Τέλος, το Zmap είναι λογισμικό ανοιχτού κώδικα και οι δημιουργοί του (Wiemer & Zuniga, 1994) είναι ανοιχτοί σε κάθε πρόταση για τροποποίηση των επιμέρους αρχείων εντολών.



Σχήμα 3.1: Περιβάλλον εργασίας Zmap και υπολογισμός Z-value

3.2 Παραδείγματα χρήσης Zmap

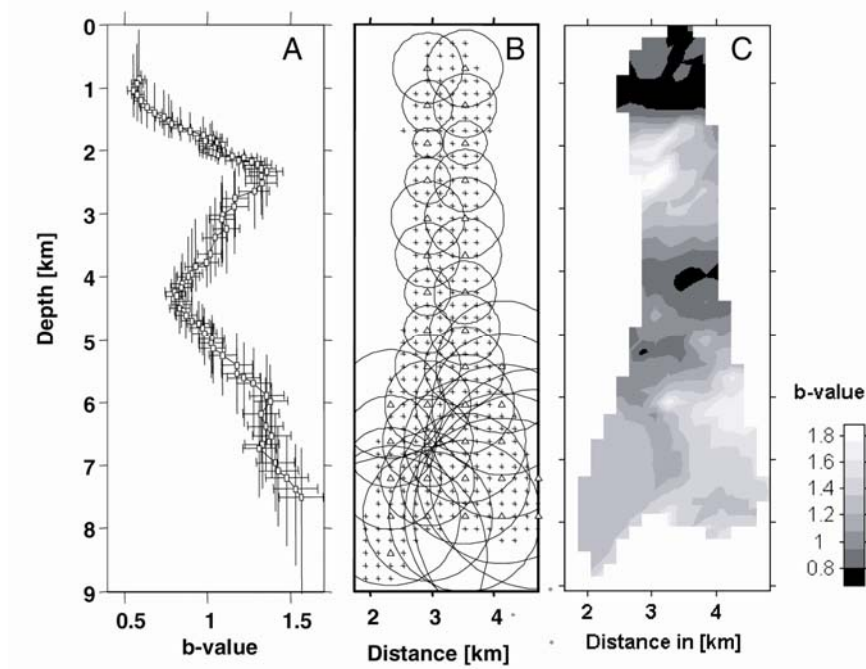
3.2.1 Η παράμετρος b κάτω από το Όρος Αγίας Ελένης

Το Zmap χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της χωρικής κατανομής της παραμέτρου b σε διάφορα τεκτονικά περιβάλλοντα. Η b ορίζεται από την σχέση $\log_{10} N = a - bM$, όπου N ο αθροιστικός αριθμός των σεισμών του καταλόγου και a και b σταθερές που εξαρτώνται από την σεισμικότητα και τις σεισμοτεκτονικές ιδιότητες της περιοχής (Gutenberg and Richter, 1944; Ishimoto and Iida, 1939).

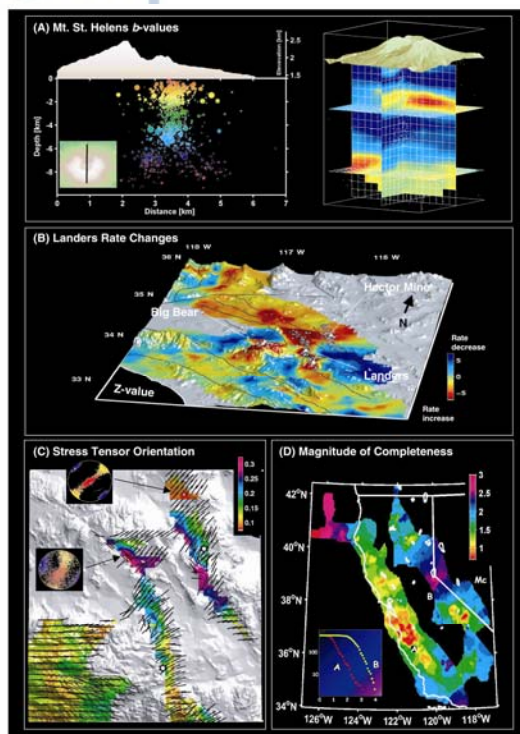
Σε περιοχές όπου έχουμε κάποιο ηφαίστειο, οι υψηλές τιμές της b σχετίζονται με την παρουσία μάγματος στην συγκεκριμένη περιοχή (Jolly and McNutt, 1999; Murru et al., 1999; Power et al., 1995; Wiemer and McNutt, 1997; Wiemer et al., 1998; Wyss et al., 1997b). Συγκεκριμένα θα παρουσιάσουμε ένα παράδειγμα από το Όρος της Αγ. Ελένης (Wiemer and McNutt, 1997) χρησιμοποιώντας σεισμούς με ελάχιστο μέγεθος $M=0.4$ οι

οποίοι καταγράφηκαν από τοπικό δίκτυο σειсмоγράφων κατά την περίοδο 1988-1995 και είναι συνολικά 2.000 γεγονότα.

Χρησιμοποιώντας το Zmap γίνεται διερεύνηση της χωρικής κατανομής της b σε μία, δύο αλλά και τρεις διαστάσεις. Στο σχήμα 3.2a φαίνεται η μεταβολή της τιμής της παραμέτρου b σε συνάρτηση με το βάθος. Παρατηρούμε πως όσο αυξάνεται το βάθος αυξάνεται και η τιμή της b . Στο σχήμα 3.2b όπου και έχουμε δυσδιάστατη προβολή, από Βορά προς Νότο και με εύρος 2 χλμ, παρατηρούμε πως η b παρουσιάζει μεγαλύτερη διαφοροποίηση όσο αυξάνεται το βάθος. Τέλος, στις 3 διαστάσεις, όπως φαίνεται και από το σχήμα 3.3a, φαίνεται η μεταβολή της b με το βάθος καθώς επίσης και η τοπογραφία της περιοχής του Όρους της Αγ. Ελένης.

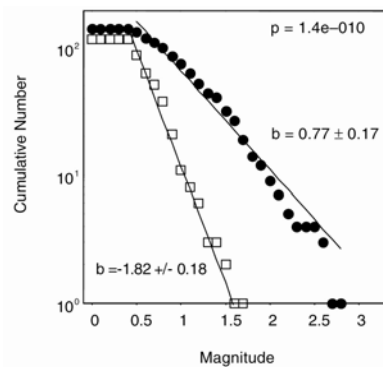


Σχήμα 3.2: A) Η παράμετρος b σε συνάρτηση με το βάθος για το Όρος της Αγ. Ελένης την περίοδο 1987-1995 με ελάχιστο μέγεθος $M=0.4$ B) Από Βορά προς Νότο απεικόνιση της επιλεγόμενης περιοχής. C) Η κατανομή της παραμέτρου b κάτω από το Mount S. Helens. Χρωματική κλίμακα με σκούρα χρώματα όσο ελαττώνεται η τιμή του b (Wiemer and McNutt, 1997).



Σχήμα 3.3: Α) Τρισδιάστατη απεικόνιση της μεταβολής της παραμέτρου b για το Όρος της Αγ. Ελένης Β) Μεταβολή της σεισμικότητας για την περιοχή Landers (Νότια Καλιφόρνια). Χρωματική κλίμακα όπου το μπλε χρώμα συμβολίζει αύξηση της τιμής Z άρα μείωση της σεισμικότητας στην περιοχή ενώ το κόκκινο χρώμα συμβολίζει μείωση της τιμής Z άρα αύξηση της σεισμικότητας στην περιοχή. C) Προσανατολισμός στατικών τάσεων για την περίοδο 1992-2000. Με κίτρινο χρώμα συμβολίζεται η σ_1 , με κόκκινο η σ_2 και με μπλε η σ_3 . D) Χάρτης των Δυτικών Η.Π.Α. όπου και υπολογίζεται το μέγεθος πληρότητας της περιοχής. (Wiemer and McNutt, 1997)

Για να επαληθευτούν τα προηγούμενα γίνεται σύγκριση της κατανομής μεγέθους για τους επιφανειακούς σεισμούς και για αυτούς με βάθος 2-3χλμ (Σχήμα 3.4). Είναι εμφανής η διαφορά που υπάρχει στην τιμή της b , η οποία αποδεικνύεται και με την εφαρμογή στατιστικής δοκιμασίας που έχει προταθεί από τον Utsu (1992).



Σχήμα 3.4: Σύγκριση κατανομής μεγέθους επιφανειακών σεισμών για το Όρος της Αγ. Ελένης (κύκλοι) και για βάθος 2-3χλμ (τετράγωνα) (Wiemer and McNutt, 1997).

Συμπερασματικά, έπειτα από την ανάλυση των τιμών της παραμέτρου b για την περιοχή του Όρους της Αγ. Ελένης αλλά και ακόμη 9 ηφαιστείων, θα λέγαμε ότι γενικά οι τιμές της b κάτω από ηφαιστεια δεν είναι πάντα μεγάλες. Όταν όμως οι τιμές του b είναι μεγάλες τότε υπάρχει μεγάλη πιθανότητα παρουσίας μάγματος στην περιοχή. Από την άλλη η απουσία μεγάλων τιμών για το b είναι ισχυρή ένδειξη για την απουσία μάγματος στην περιοχή (Jolly and McNutt, 1999; Murru et al., 1999; Power et al., 1995; Wiemer and McNutt, 1997; Wiemer et al., 1998; Wyss et al., 1997b; Wyss et al., 2000).

3.2.2 Μεταβολές στατικών τάσεων

Με την βοήθεια του λογισμικού Zmap μπορούν να αναλυθούν οι μηχανισμοί γένεσης και να υπολογισθούν οι μεταβολές των στατικών τάσεων συναρτήσει του χρόνου και του βάθους (Michael, 1984, 1987a, 1987b, 1991; Michael et al., 1990).

Ένα παράδειγμα φαίνεται στο σχήμα 3.2c για την περιοχή της Νότιας Καλιφόρνιας. Οι διευθύνσεις των κύριων αξόνων τάσης συμβολίζονται με γραμμές πάνω στην τοπογραφία της περιοχής. Τα αποτελέσματα της μελέτης των τάσεων αποδεικνύουν πως περιοχές όπου υπήρξε μεγάλη ολίσθηση κατά την διάρκεια του κύριου σεισμού έχουν ένα πιο ανομοιογενές πεδίο τάσεων ενώ οι περιοχές που βρίσκονται μακριά από την ζώνη διάρρηξης παρουσιάζουν πιο ομογενές πεδίο τάσεων (Wiemer et al., 2001).

3.2.3 Υπολογισμός μεγέθους πληρότητας

Η ποιότητα των καταλόγων των σεισμών μειώνεται όσο αυξάνεται η απόσταση από το δίκτυο σειсмоγράφων. Για να ξεπεραστεί το πρόβλημα της ανομοιογένειας του μεγέθους, το Zmap επιτρέπει στον χρήστη να χαρτογραφήσει τα μεγέθη και να προσδιορίσει την χωρική τους κατανομή (Wiemer and Wyss, 2000). Ένα παράδειγμα φαίνεται στο σχήμα 3.2d και αφορά τις Δυτικές Η.Π.Α. για την περίοδο 1995-2000.



3.3 Χαρτογράφηση της μεταβολής της σεισμικότητας

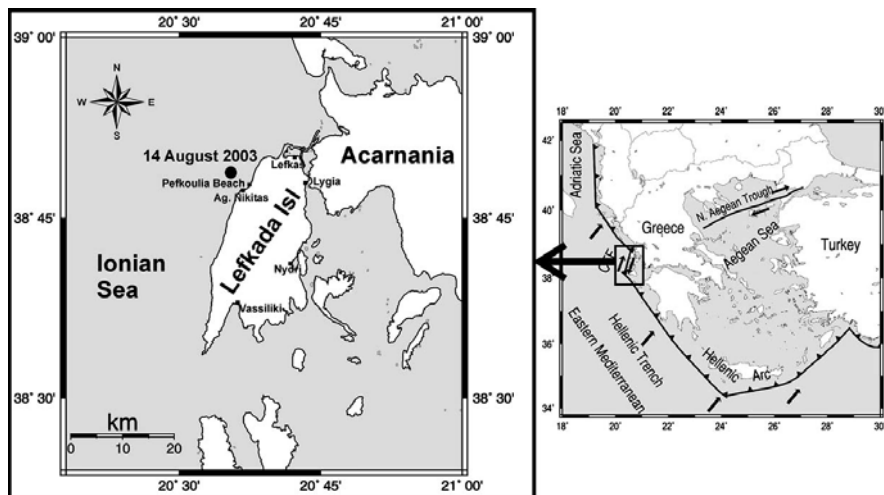
Η μέτρηση της μεταβολής της σεισμικότητας είναι δύσκολη γιατί 1) τεχνητές μεταβολές της σεισμικότητας είναι συνήθεις, 2) οι μετασεισμικές ακολουθίες πρέπει να αφαιρούνται από τον εξεταζόμενο κατάλογο πριν την μελέτη της μεταβολής της σεισμικότητας της περιοχής και 3) ο ορισμός αυτής της μεταβολής δεν είναι απλός.

Το Zmap βοηθά σε μεγάλο βαθμό στο να υπερβληθούν τα συγκεκριμένα εμπόδια. Αναφέρουμε ένα παράδειγμα που αφορά τον σεισμό του 1992 $M=7.3$ στην περιοχή Landers της Νότιας Καλιφόρνιας (Wyss and Wiemer, 2000). Το πρώτο βήμα είναι η δημιουργία ομογενούς καταλόγου και η χωρική κατανομή του μεγέθους πληρότητας για τις διάφορες χρονικές περιόδους. Αφού αφαίρεσαν από τον κατάλογο τους σεισμούς που δεν αφορούσαν σεισμικές δονήσεις προχώρησαν στην σύγκριση των περιόδων 1985-1992.48 και 1992.6-1999.8 για να βρουν την μεταβολή της σεισμικότητας. Στο σχήμα 3.2b απεικονίζεται η μεταβολή αυτή πάνω στην τοπογραφία της περιοχής όπου και γίνεται μέτρηση της τιμής της παραμέτρου Z . Για θετικές τιμές της Z έχουμε μπλε χρώμα στο χάρτη, δηλαδή η σεισμικότητα μειώνεται, ενώ για αρνητικές τιμές της Z έχουμε κόκκινο χρώμα στο χάρτη, δηλαδή η σεισμικότητα αυξάνεται. Για να μπορέσουμε να εντοπίσουμε σημαντική μείωση της σεισμικότητας απαιτείται μελέτη και σύγκριση μιας περιοχής για μεγάλο χρονικό διάστημα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4ο : Μελέτη μεταβολής σεισμικότητας πριν και μετά την γένεση του σεισμού της Λευκάδας M= 6.2 (14/08/2003)

4.1 Εισαγωγή

Το πρωί της 14ης Αυγούστου 2003 σημειώθηκε ισχυρή σεισμική δόνηση στον θαλάσσιο χώρο δυτικά της Λευκάδος μεγέθους $M=6.2$ και εστιακού βάθους $h=10\text{km}$. Οι γεωγραφικές συντεταγμένες του epicέντρου, σύμφωνα με το Εργαστήριο Γεωφυσικής του Α.Π.Θ., είναι $\varphi=38.86^{\circ}\text{N}$ $\lambda=20.73^{\circ}\text{E}$ (σχ.4.1). Ο λόγος για τον οποίο εξετάζουμε την συγκεκριμένη σεισμική δόνηση είναι για να ελέγξουμε αν υπήρξε οποιαδήποτε μεταβολή στην σεισμικότητα πριν τη γένεση του κύριου σεισμού.



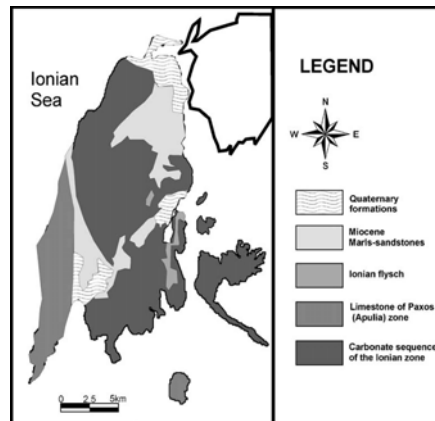
Σχήμα 4.1.: Αριστερά: Χάρτης της Λευκάδας όπου απεικονίζεται το επίκεντρο της σεισμικής δόνησης (μαύρος κύκλος)

Δεξιά: Σεισμοτεκτονικές ιδιότητες Αιγαίου και γύρω περιοχών (Papadimitriou, 2002). Η περιοχή μελέτης σημειώνεται σε τετράγωνο.

4.2 Γεωλογία και τεκτονική

Η Λευκάδα ανήκει γεωλογικά στην ζώνη των Παξών και στην Ιόνιο ζώνη (Σχ.4.2). Διακρίνουμε 1) Πλειστοκαινικές και κυρίως Ολοκαινικές αποθέσεις, 2) Μειοκαινικές μάργες και ψαμμίτες, 3) κατά τόπους εμφανίσεις φλύσχη της Ιονίου, 4) ασβεστόλιθους της Απούλιας ζώνης στο ΝΔ τμήμα του νησιού, 5) και την ασβεστολιθική σειρά της

Ιόνιας ζώνης (Bornovas, 1964). Η ζώνη των Παξών στρωματογραφικά αποτελείται από επιφανειακούς μειοκαινικούς σχηματισμούς οι οποίοι είναι μαργαίκοι, συχνά ψαμμούχοι εναλλασσόμενη με λατυποπαγείς ασβεστόλιθους. Η Ιόνια ζώνη είναι επωθημένη προς τα δυτικά πάνω στην ζώνη των Παξών.



Σχήμα 4.2: Απλοποιημένος γεωλογικός χάρτης Λευκάδας (Rondoyanni-Tsiambaou, 1997).

Η περιοχή γενικά του Νότιου Ιονίου (Λευκάδα, Κεφαλλονιά, Ιθάκη και Ζάκυνθος) χαρακτηρίζεται από υψηλή σεισμικότητα με μεγέθη που φτάνουν μέχρι και το 7.4. Εκεί εντοπίζονται δεξιόστροφα ρήγματα τα οποία οφείλονται στην προς τα νοτιοδυτικά κίνηση της μικροπλάκας του Αιγαίου σε σχέση με την Ευρασιατική και την Απουλία μικροπλάκα. Το σημαντικότερο ρήγμα της περιοχής αυτής είναι το δεξιόστροφο ρήγμα μετασχηματισμού της Κεφαλλονιάς (CTF= Cephalonia Transform Fault) το οποίο εντοπίστηκε για πρώτη φορά και καθορίστηκαν οι ιδιότητες του από τους Scordilis et al. (1985).

4.3 Ιστορικοί σεισμοί

Τα Ιόνια νησιά, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, έχουν υποστεί πλήθος καταστροφικών σεισμών. Στον Πίνακα 4.1 παρουσιάζονται συνοπτικά οι μεγαλύτεροι σεισμοί από το 1400 μέχρι και πριν το σεισμό του 2003 (Papazachos and Papazachou, 2003). Παρατηρούμε πως μεγέθη κοντά στο $M=6.0$ είναι αρκετά συνήθη στην περιοχή της Λευκάδας. Οι σεισμοί δε με μέγεθος $M>7.0$ αφορούν κυρίως την περιοχή της Κεφαλονιάς.

Πίνακας 4.1: Ιστορικοί σεισμοί κοντά στα νησιά του Ιονίου Λευκάδα-Κεφαλονιά. Από αριστερά προς τα δεξιά αναφέρονται ο αύξων αριθμός, το έτος και η ημερομηνία του σεισμού, οι συντεταγμένες του επικέντρου, το μέγεθος του σεισμού και η μακροσεισμική ένταση.

A/A	Έτος	Ημερομηνία	Γεωγραφικό Πλάτος	Γεωγραφικό Μήκος	Ms	I _{max}
1	1469	Ανοιξη	38.3 ⁰ N	20.5 ⁰ E	7.2	IX
2	1577		38.8 ⁰ N	20.6 ⁰ E	6.2	VIII
3	1612	26/05	38.8 ⁰ N	20.8 ⁰ E	6.5	VIII
4	1613	12/10	38.8 ⁰ N	20.8 ⁰ E	6.4	VIII
5	1625	28/06	38.8 ⁰ N	20.7 ⁰ E	6.6	IX
6	1630	02/07	38.8 ⁰ N	20.8 ⁰ E	6.7	IX
7	1636	30/09	38.1 ⁰ N	20.3 ⁰ E	7.2	IX
8	1638	16/07	38.2 ⁰ N	20.4 ⁰ E	6.4	VIII
9	1658	24/08	38.2 ⁰ N	20.4 ⁰ E	7.0	IX
10	1704	22/11	38.8 ⁰ N	20.7 ⁰ E	6.3	IX
11	1714	08/09	38.1 ⁰ N	20.5 ⁰ E	6.4	VIII
12	1722	05/06	38.7 ⁰ N	20.6 ⁰ E	6.4	VIII
13	1723	22/02	38.6 ⁰ N	20.65 ⁰ E	6.7	VIII
14	1741	23/06	38.15 ⁰ N	20.40 ⁰ E	6.4	VIII
15	1766	24/07	38.1 ⁰ N	20.4 ⁰ E	7.0	IX
16	1767	22/07	38.3 ⁰ N	20.4 ⁰ E	7.2	X
17	1769	12/10	38.8 ⁰ N	20.6 ⁰ E	6.7	IX
18	1783	23/03	38.71 ⁰ N	20.61 ⁰ E	6.7	X
19	1815		38.8 ⁰ N	20.7 ⁰ E	6.3	VIII
20	1820	21/02	38.8 ⁰ N	20.6 ⁰ E	6.4	IX
21	1825	19/01	38.7 ⁰ N	20.6 ⁰ E	6.5	X
22	1867	04/02	38.39 ⁰ N	20.52 ⁰ E	7.4	X
23	1869	28/12	38.85 ⁰ N	20.80 ⁰ E	6.4	X
24	1912	24/01	38.11 ⁰ N	20.67 ⁰ E	6.8	X
25	1914	27/11	38.72 ⁰ N	20.62 ⁰ E	6.3	IX
26	1948	22/04	38.71 ⁰ N	20.57 ⁰ E	6.5	IX
27	1953	08/12	38.3 ⁰ N	20.8 ⁰ E	7.2	X+
28	1972	17/09	38.21 ⁰ N	20.31 ⁰ N	6.3	VII
29	1983	17/01	38.1 ⁰ N	20.2 ⁰ E	7.0	VI

4.4 Μελέτη καταλόγου και υπολογισμός z-value σε απόσταση 100km από το επίκεντρο του σεισμού (14/08/2003)

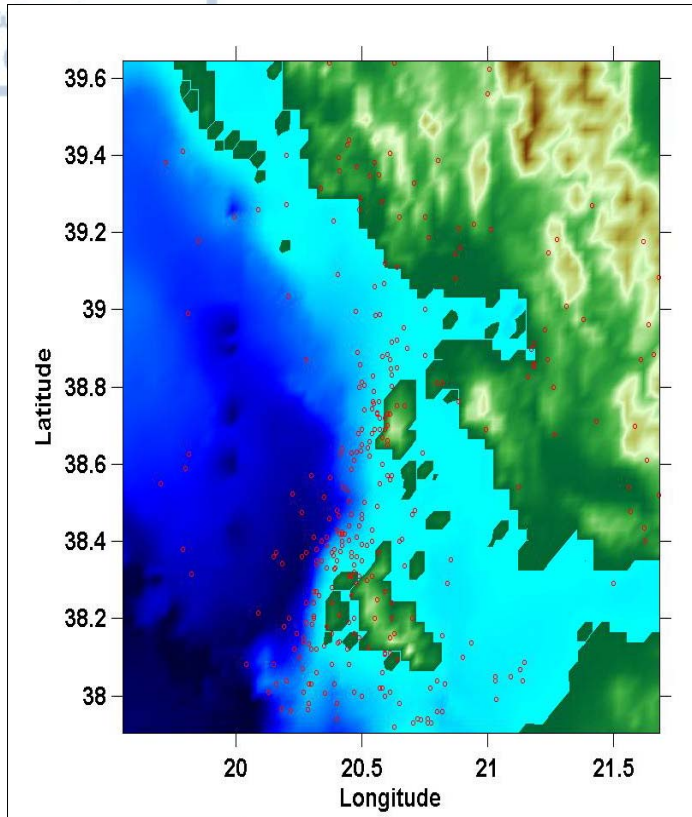
Ο κατάλογος των σεισμών αφορά την περίοδο 1998-2004, την περιοχή με ακτίνα 100Km από το επίκεντρο του σεισμού της 14^{ης} Αυγούστου και μεγέθη $M \geq 4.0$. Ο κατάλογος χωρίστηκε αρχικά σε 3 επιμέρους τμήματα. Το πρώτο αφορά την περίοδο πριν τη γένεση του κύριου σεισμού της 14^{ης} Αυγούστου 2003. Το δεύτερο αφορά όλο το έτος 2003 όπου και χωρίστηκε εκ νέου για να μελετηθεί και να συγκριθεί η σεισμικότητα ανά εξάμηνο αλλά και ανά τρίμηνο και τέλος το τρίτο μέρος αφορά την περίοδο μετά το τέλος του έτους 2003 και εκτείνεται μέχρι το 2004. Η κάθε ενότητα χαρτογραφήθηκε και μελετήθηκε ως προς την μεταβολή της παραμέτρου Z.

4.4.1 1998-2004

Ο κατάλογος που εξετάζουμε εδώ αποτελείται από 322 σεισμούς (σχήμα 4.3) με μέγιστο μέγεθος $M=6.2$ και ελάχιστο $M=4.0$. Το βάθος είναι 0-56 Km και η περιοχή που περικλείει βρίσκεται σε ακτίνα 100 Km από το επίκεντρο του σεισμού ($38.80^{\circ}/20.60^{\circ}$) της 14^{ης} Αυγούστου 2003. Το χρονικό εύρος του καταλόγου είναι από 01/01/1998 έως και 05/02/2005. Στο σχήμα 4.4 φαίνεται η γενική κατανομή των επικέντρων σε ένα απλοποιημένο χάρτη της περιοχής.

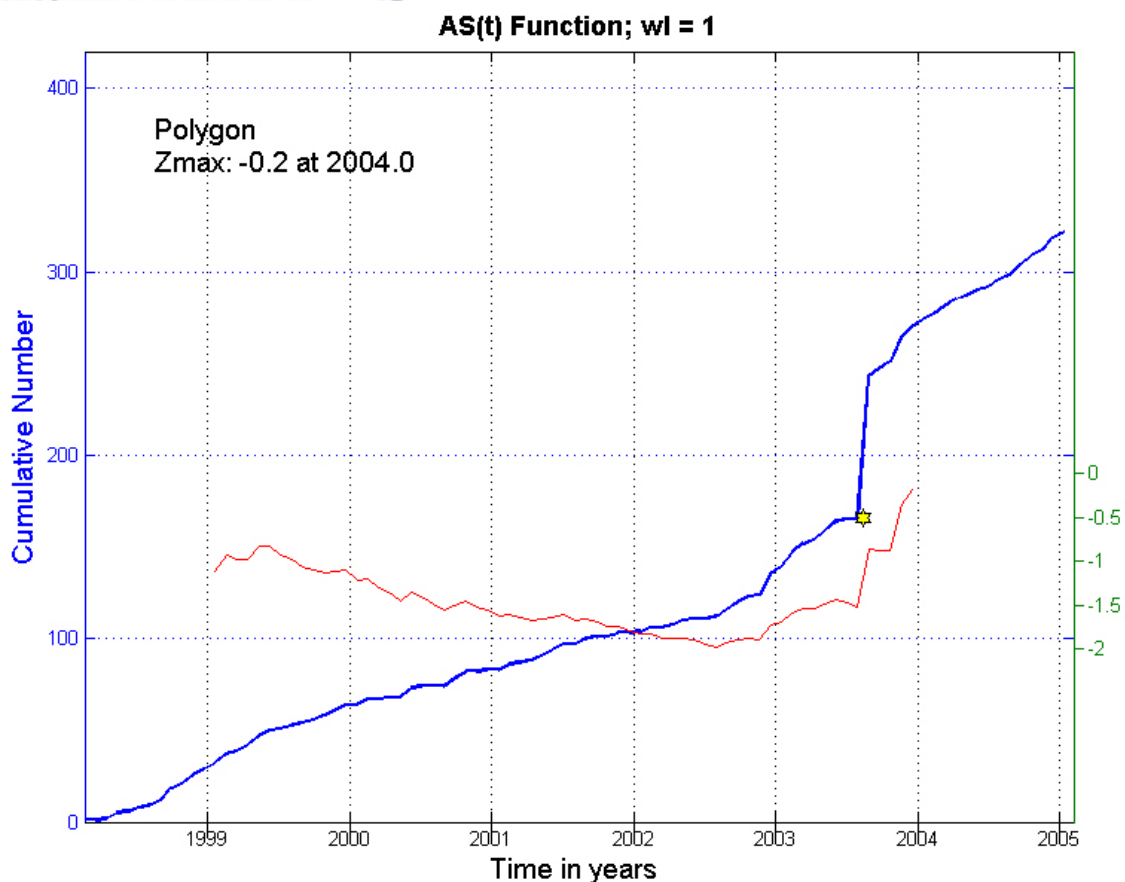


Σχήμα 4.3: Παράμετροι καταλόγου περιόδου 1998-2003 (zmap)



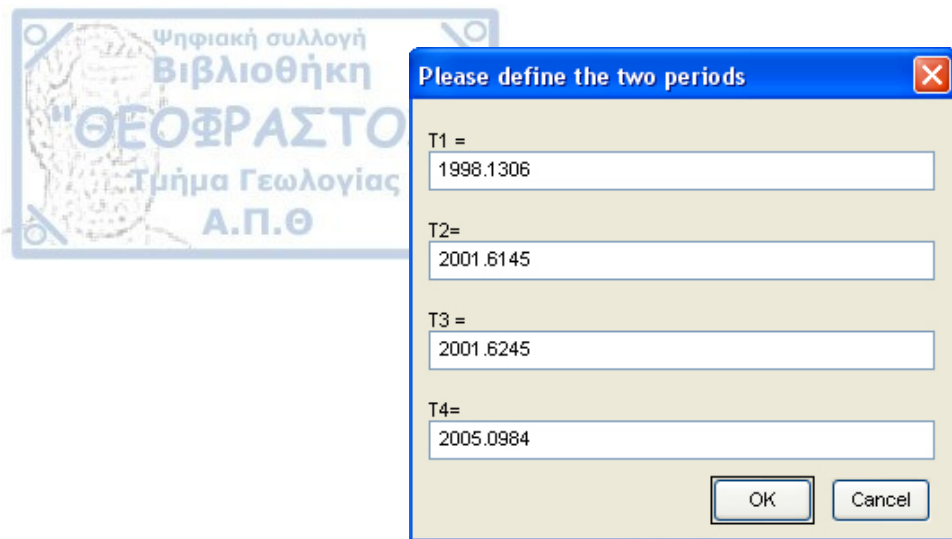
Σχήμα 4.4: Χάρτης κατανομής επικέντρων για την περίοδο 1998-2004.

Με την βοήθεια του προγράμματος z-map δημιουργούμε την καμπύλη αθροιστικής συχνότητας των σεισμών και επίσης υπολογίζουμε την παράμετρο Z (σχήμα 4.5). Η παράμετρος αυτή υπολογίζεται με την συνάρτηση $AS(t)$ και με βήμα 1. Δηλαδή υπολογίζουμε και συγκρίνουμε την σεισμικότητα ανά έτος για την περίοδο 1998-2004. Οι αρνητικές τιμές της Z -value υποδηλώνουν αύξηση της σεισμικότητας της περιοχής για την εκάστοτε περίοδο μελέτης ενώ οι θετικές τιμές φανερώνουν μείωση της σεισμικότητας και κατ' επέκταση «ησυχία».



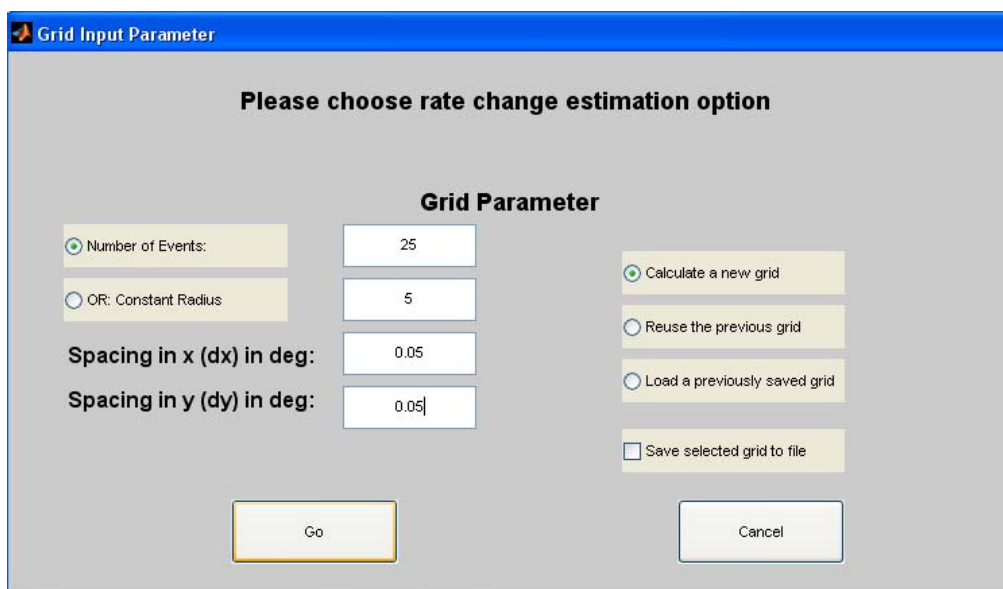
Σχήμα 4.5: Με μπλε χρώμα είναι η αθροιστική καμπύλη των σεισμών για την περίοδο 1998-2004. Με κόκκινο είναι η καμπύλη της μεταβολής της Z-value ανά έτος.

Αυτό που παρατηρούμε είναι ότι η Z δεν παίρνει θετικές τιμές ενώ η μέγιστη τιμή του είναι $Z_{\max} = -0.2$ και σημειώνεται στις αρχές του 2004. Επίσης ενδιαφέρον έχει η μεταβολή της καμπύλης όπου μας δείχνει τις μεταβολές στην σεισμικότητα. Έτσι είναι φανερό πως πριν το 2003 αρχίζει να μειώνεται η τιμή της Z άρα και να αυξάνεται η σεισμικότητα ενώ μετά την γένεση του κύριου σεισμού αρχίζει να ελαττώνεται φτάνοντας στην μέγιστη τιμή της στις αρχές του 2004. Αξίζει να σημειωθεί πως οι τιμές διαφέρουν αρκετά από αυτές που προκύπτουν παρακάτω από την σύγκριση των επιμέρους περιόδων 1998- 2001.6 & 2001.7-2005 (σχήμα 4.6).



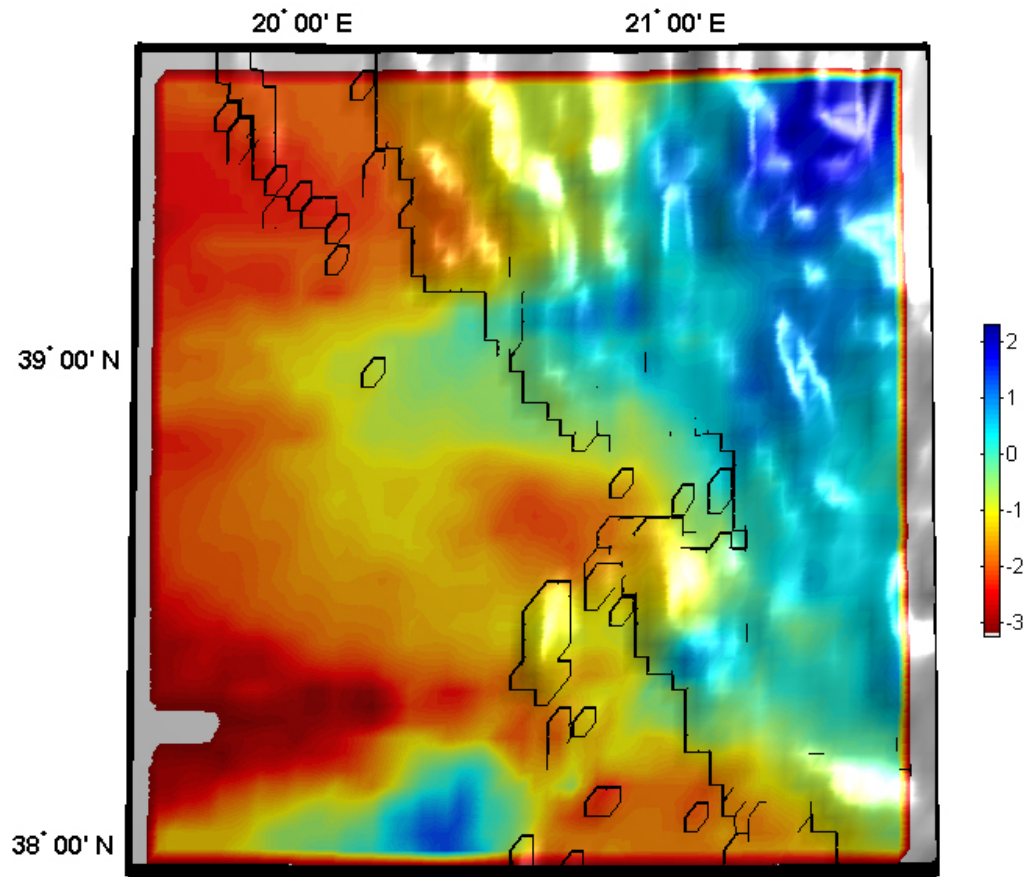
Σχήμα 4.6: Χωρισμός καταλόγου σε 2 επιμέρους περιόδους διάρκειας 3,5 ετών με σκοπό την σύγκριση της μεταβολής της σεισμικότητας.

Στο σχήμα 4.7 φαίνονται οι παράμετροι που ορίσαμε για τον υπολογισμό και την σύγκριση της Z. Στην θέση «number of events» δεν βάζουμε τον αριθμό των συνολικών σεισμών του καταλόγου αλλά το μέγιστο των σεισμών που θέλουμε. Έτσι το πρόγραμμα χαράσσει νοητούς κύκλους με μέγιστο αριθμό σεισμών 25 και με ανάλυση 0.05x0.05 και συγκρίνει τις επιμέρους περιοχές. Η διαδικασία αυτή ακολουθήθηκε για κάθε επιμέρους τμήμα του συγκεκριμένου καταλόγου με ακριβώς ίδιες παραμέτρους. Μοναδική εξαίρεση αποτελούν οι κατάλογοι των εξαμήνων του 2003 όπου λόγω έλλειψης δεδομένων η τιμή του N ορίζεται στο 10.



Σχήμα 4.7: Παράμετροι υπολογισμού της z-value για την περίοδο 1990-1998.

Έπειτα επιλέγουμε πάνω στον χάρτη μας το πολύγωνο που θέλουμε να γίνει η σύγκριση (38.0° - 39.5° και 19.5° - 21.5°) και έπειτα υπολογίζει το Z σε ένα χάρτη με έγχρωμη κλίμακα (Σχήμα 4.8). Η κλίμακα μας δείχνει χρωματικά την μεταβολή της z -value. Υπενθυμίζουμε ότι το μπλε χρώμα συμβολίζει την αύξηση της Z και την μείωση της σεισμικότητας ενώ το κόκκινο χρώμα συμβολίζει την μείωση της Z και την αύξηση της σεισμικότητας.

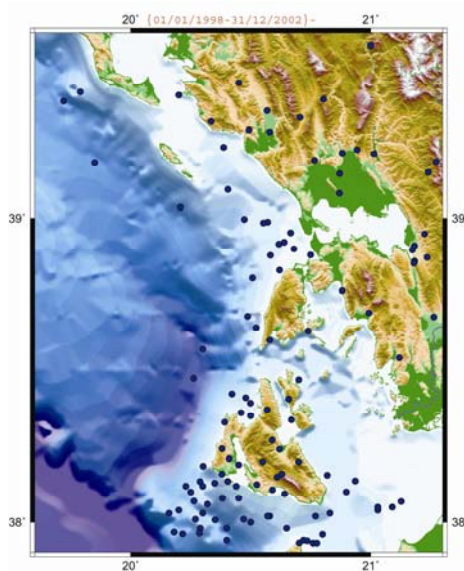


Σχήμα 4.8: Χάρτης σύγκρισης σεισμικότητας των περιόδων 1998-2001,5 και 2001,5-2005. Το μπλε χρώμα συμβολίζει αύξηση της Z άρα μείωση της σεισμικότητας. Το κόκκινο χρώμα συμβολίζει μείωση της Z άρα αύξηση της σεισμικότητας.

Αυτό που παρατηρούμε είναι πως οι τιμές διαφέρουν σημαντικά με την προηγούμενη σύγκριση. Η Z παίρνει τιμές από -3 έως και 2 . Οι περιοχές με έντονο κόκκινο χρώμα είναι αυτές που δραστηριοποιούνται κατά τα έτη 2001,5-2005 ενώ οι μπλε περιοχές ησυχάζουν. Παρακάτω θα αναλυθούν λεπτομερώς οι περίοδοι πριν και μετά τον κύριο σεισμό για να εξετασθεί αν υπήρξε κάποια αισθητή μεταβολή της σεισμικότητας.

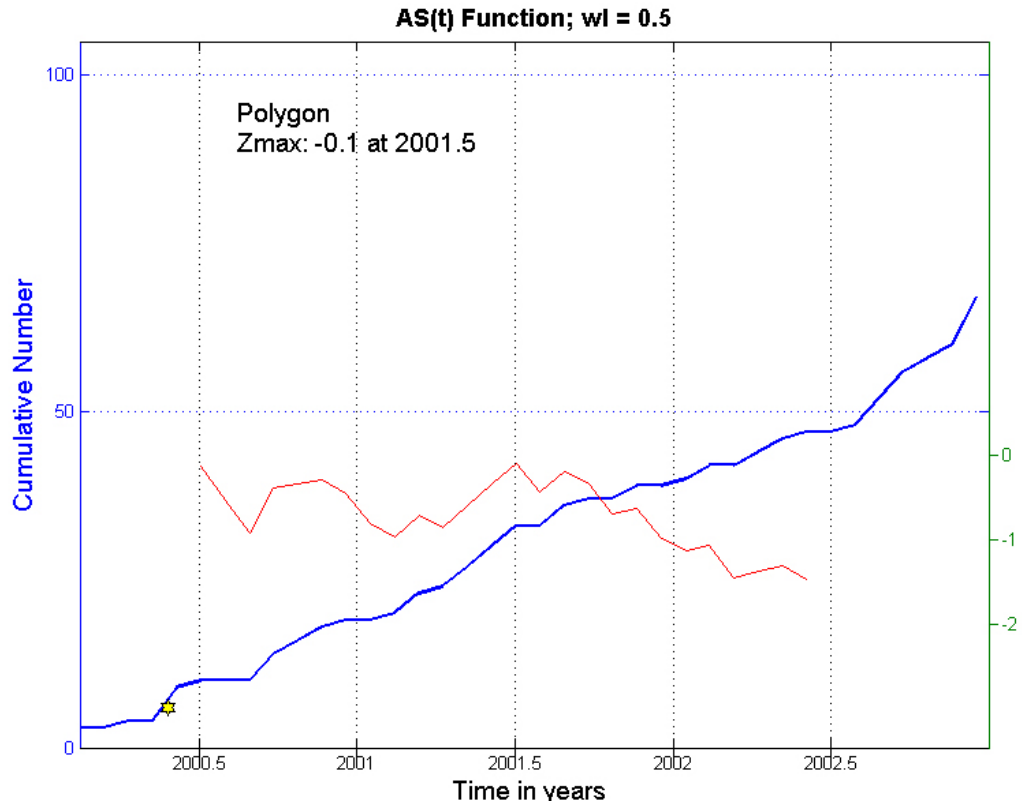
Για να μπορέσουμε να κατανοήσουμε την κατανομή της σεισμικότητας στην περιοχή εξετάζουμε την περίοδο 01/01/1998-31/12/2002 (Σχήμα 4.9) για την οποία έχουμε 67 σεισμούς με ελάχιστο μέγεθος $M_{\min}=4.0$ και $M_{\max}=5.3$. Έπειτα χαρτογραφούμε τα επίκεντρα (Σχήμα 4.10) για να δούμε την χωρική τους κατανομή. Παρατηρούμε διάσπαρτους σεισμούς προς τα ΒΒΑ του Ιονίου και κανένα επίκεντρο δυτικά προς την Αδριατική. Οι δύο συγκεντρώσεις που παρατηρούνται αφορούν τις περιοχές βόρεια του νησιού της Λευκάδας και νότια του νησιού της Κεφαλονιάς. Επίσης παρατηρούνται λίγα επίκεντρα κατά μήκος του ρήγματος CTF.

Σχήμα 4.9: Παράμετροι κατάλογου περιόδου 1992-1994.



Σχήμα 4.10 : Χωρική κατανομή επικέντρων για την περίοδο 2000-2002.

Στην συνέχεια υπολογίζουμε το άθροισμα των σεισμών και την παράμετρο Z με την ίδια μέθοδο όπως και προηγουμένως (Σχ. 4.11). Η μοναδική διαφορά είναι πως δεν συγκρίνουμε ανά έτος αλλά η σύγκριση γίνεται ανά εξάμηνο λόγω του μικρότερου χρονικού εύρους (3 έτη).



Σχήμα 4.11: Με μπλε χρώμα είναι η αθροιστική καμπύλη των σεισμών για την περίοδο 2000-2002. Με κόκκινο είναι η καμπύλη της μεταβολής της Z -value ανά εξάμηνο.

Παρατηρούμε πως η Z συνεχώς μειώνεται από τα μέσα του 2001 και μέχρι τα τέλη του 2002. Η μείωση αυτή ξεκινά αμέσως μετά την χρονική περίοδο όπου η Z λαμβάνει την μέγιστη τιμή της $Z_{\max}=-0.1$. Για να μπορέσουμε να διακρίνουμε και χωρικά αυτήν την μεταβολή συγκρίνουμε τις περιόδους 2000-2001,5 και 2001,5- 2002 (Σχήμα 4.12).

Please define the two periods

T1 =
2000.1215

T2 =
2001.5606

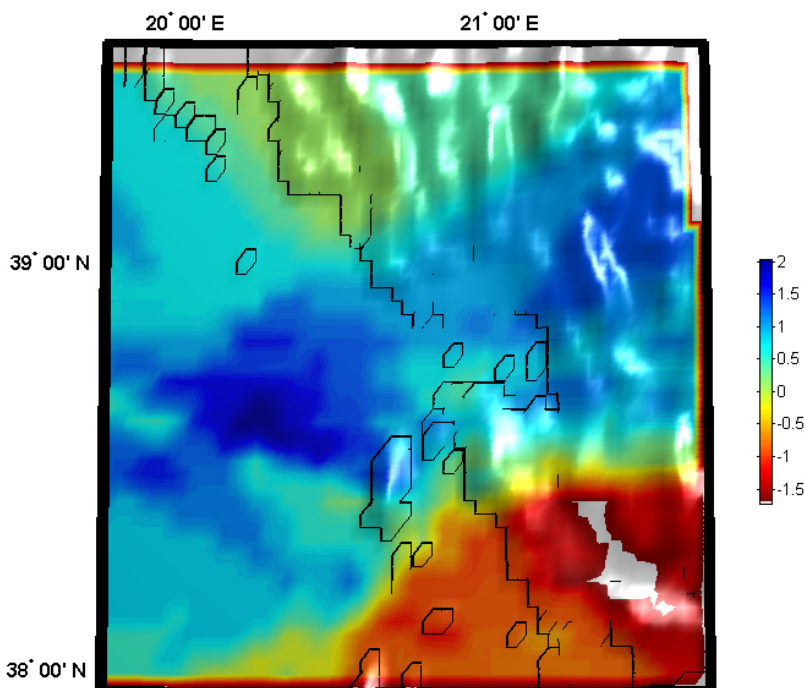
T3 =
2001.5706

T4 =
2002.9996

OK Cancel

Σχήμα 4.12: Χωρισμός καταλόγου σε 2 επιμέρους περιόδους διάρκειας 1,5 ετών με σκοπό την σύγκριση της μεταβολής της σεισμικότητας.

Τα αποτελέσματα που παίρνουμε απεικονίζονται στον χάρτη του σχήματος 4.13. Βλέπουμε πως και πάλι οι τιμές της Z διαφέρουν αισθητά με αυτές που υπολογίστηκαν παραπάνω. Επίσης φαίνεται πως η περιοχή τόσο ΒΔ όσο και ΒΑ του νησιού της Λευκάδας δεν παρουσιάζει έντονη σεισμική δραστηριότητα, εξάλλου εκεί παρατηρούνται και οι μέγιστες τιμές της παραμέτρου Z . Σε αντίθεση, η περιοχή που περιλαμβάνει το νησί της Κεφαλονιάς χαρακτηρίζεται με έντονο κόκκινο χρώμα, γεγονός που σημαίνει ότι έχουμε αύξηση της σεισμικότητας για την περίοδο 2001,5-2002.



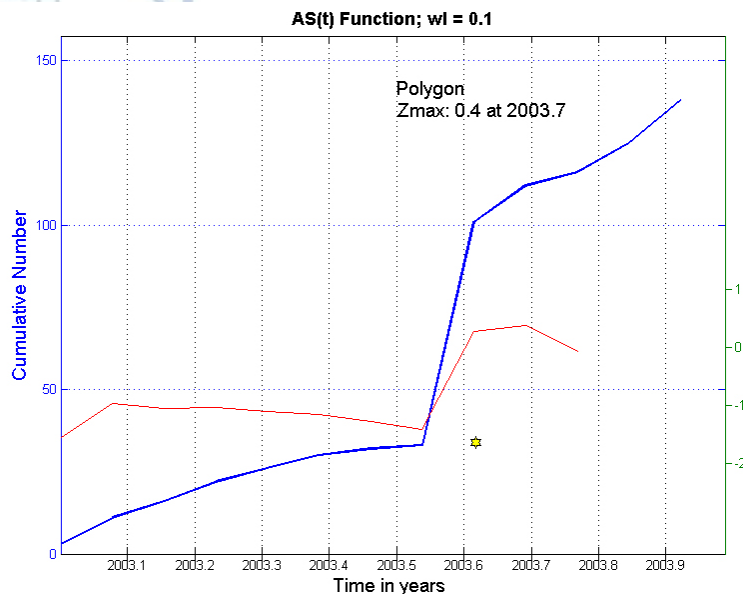
Σχήμα 4.13: Χάρτης σύγκρισης σεισμικότητας των περιόδων 2000-2001,5 και 2001,5-2002. Το μπλε χρώμα συμβολίζει αύξηση της Z άρα μείωση της σεισμικότητας. Το κόκκινο χρώμα συμβολίζει μείωση της Z άρα αύξηση της σεισμικότητας.



Σε αυτό το σημείο θα εξετάσουμε αναλυτικά το έτος 2003 το οποίο παρακάτω θα χωρισθεί σε και θα μελετηθεί ανά εξάμηνο αλλά και ανά τρίμηνο. Την συγκεκριμένη χρονική περίοδο (01/01/2003-31/12/2003) είχαμε 138 σεισμούς (Σχήμα 4.14) με ελάχιστο μέγεθος $M_{\min}=4.0$ και μέγιστο $M_{\max}=6.2$, ο οποίος είναι ο κύριος σεισμός της 14^{ης} Αυγούστου.

Σχήμα 4.14: Παράμετροι κατάλογου περιόδου 01/01/2003-31/12/2003

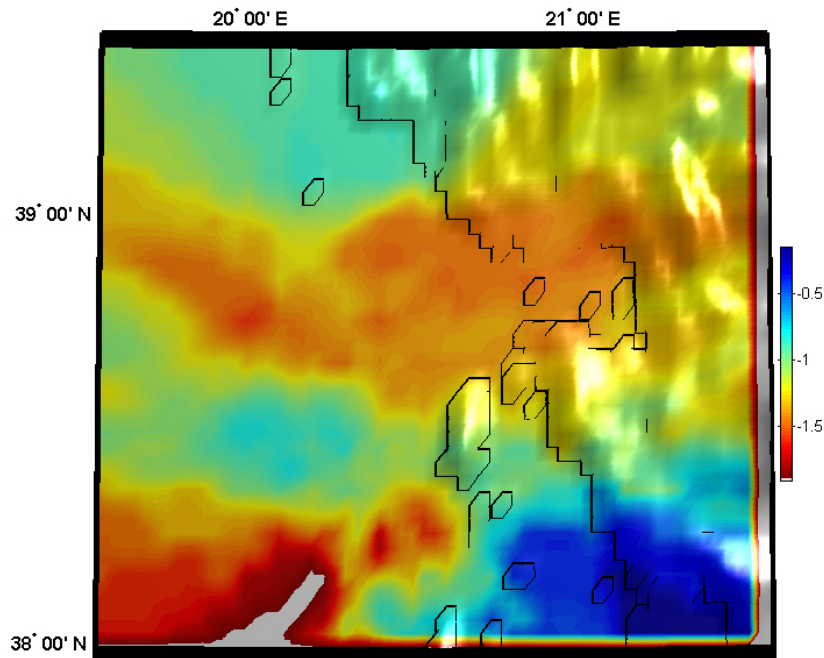
Στη συνέχεια παίρνουμε την αθροιστική καμπύλη και υπολογίζουμε την μεταβολή της Z με βήμα 0,1, δηλαδή ανά μήνα για όλο το έτος 2003 (Σχήμα 4.15). Παρατηρούμε πως η Z παίρνει τιμές περίπου από 0.5 έως και -2, δηλαδή δεν αποκλίνει και πάλι από τις προηγούμενες τιμές που υπολογίσαμε συγκρίνοντας ανά έτος και ανά εξάμηνο. Επίσης παρατηρούμε ότι την περίοδο μετά τον κύριο σεισμό έχουμε απότομη αύξηση της Z μέχρι να πάρει την μέγιστη τιμή της $Z_{\max}=0.4$ και μετά από αυτό υπάρχει μια περίοδος (2003.6 - 2003.7) που η Z δεν παρουσιάζει καμία μεταβολή. Έπειτα αρχίζει πάλι να ελαττώνεται η τιμή της Z .



Σχήμα 4.15: Με μπλε χρώμα είναι η αθροιστική καμπύλη των σεισμών για το έτος 2003. Με κόκκινο είναι η καμπύλη της μεταβολής της Z-value ανά μήνα

Στη συνέχεια χωρίζουμε το 2003 σε δύο επιμέρους περιόδους (Σχήμα 4.16) με σκοπό να συγκρίνουμε την μεταβολή της σεισμικότητας. Η χωρική μεταβολή της σεισμικότητας φαίνεται στον χάρτη του σχήματος 4.17. Το ενδιαφέρον είναι ότι οι τιμές της Z συμπίπτουν με τις τιμές που υπολογίστηκαν στο σχήμα 4.15. Επίσης φαίνονται περιοχές με έντονη σεισμικότητα (έντονο κόκκινο χρώμα) καθώς και περιοχές με ελάττωση της σεισμικότητας (έντονο μπλε χρώμα). Παρακάτω θα αναλυθούν λεπτομερώς τα 2 αυτά εξάμηνα του έτους 2003, τόσο στη χωρική κατανομή των επικέντρων όσο και στην μεταβολή της παραμέτρου Z.

Σχήμα 4.16: Χωρισμός καταλόγου σε 2 επιμέρους περιόδους διάρκειας 6 μηνών με σκοπό την σύγκριση της μεταβολής της σεισμικότητας.



Σχήμα 4.17: Χάρτης σύγκρισης σεισμικότητας 1^{ου} και 2^{ου} εξαμήνου του 2003.
Το μπλε χρώμα συμβολίζει αύξηση της Z άρα μείωση της σεισμικότητας.
Το κόκκινο χρώμα συμβολίζει μείωση της Z άρα αύξηση της σεισμικότητας.

4.4.3.1 Περίοδος μέχρι τον σεισμό της 14^{ης} Αυγούστου

Στο σημείο αυτό χωρίζουμε τον κατάλογο του 2003 σε 2 επιμέρους. Το πρώτο μέρος, που εξετάζεται εδώ, αφορά την περίοδο από την αρχή του έτους έως και τον κύριο σεισμό (σχήμα 4.18). Σημειώνεται πως η τελευταία καταγραφή είναι στις 04/07/2003. Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι ο κατάλογος που επιλέξαμε για την μελέτη μας περιέχει σεισμούς με ελάχιστο μέγεθος $M=4.0$. Ο αριθμός των καταγραφών είναι 33 ενώ στους χάρτες κατανομής των epicέντρων χρησιμοποιούνται 34 καταγραφές γιατί λαμβάνεται υπόψη και ο κύριος σεισμός της 14^{ης} Αυγούστου 2003. Αξίζει να σημειωθεί πως από τις 04/07/2003 έως και τις 14/08/2003 δεν είχαμε κάποιο σεισμό.

General Parameters!

EQs in catalog:

Plot Big Events with:

Bin Length in days:

Beginning year:

Ending year:

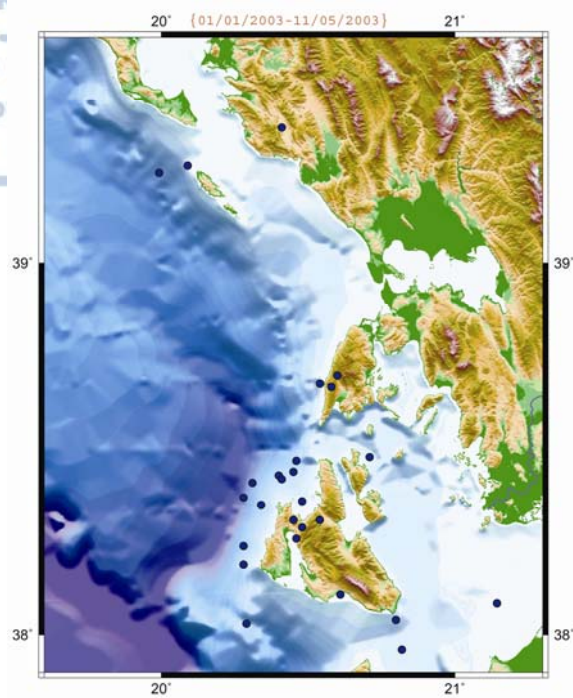
Minimum Magnitud

Maximum Magnitud

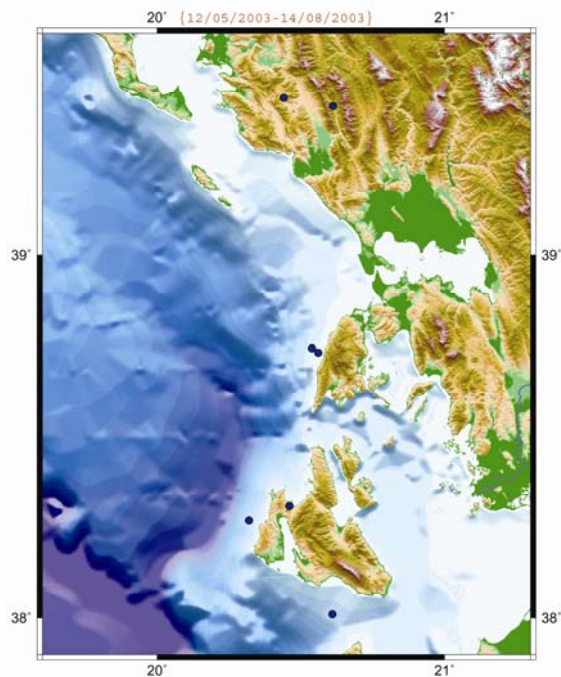
Min Depth **Max Depth**

Σχήμα 4.18: Παράμετροι κατάλογου περιόδου 01/01/2003-04/07/2003

Έπειτα χαρτογραφούμε τα επίκεντρα για να εξετάσουμε την χωρική κατανομή των σεισμών (σχήμα 4.19 & 4.20). Το σχήμα 4.19 αφορά την περίοδο από 01/01/2003 έως και 11/05/2003 ενώ το σχήμα 4.20 από τις 12/05/2003 έως και την μέρα του σεισμού 14/08/2003. Στο σχήμα 4.19 παρατηρούμε πως η σεισμικότητα αρχίζει και μεταφέρεται στο βόρειο τμήμα του νησιού της Κεφαλονιάς ενώ στο νότιο μειώνεται ο αριθμός των επικέντρων. Η περιοχή δε της Λευκάδας θα λέγαμε πως ησυχάζει ενώ υπάρχουν ακόμη τα διάσπαρτα επίκεντρα βόρεια. Παράλληλα η περιοχή της Δυτικής Ηπείρου δεν παρουσιάζει κάποια δραστηριότητα. Το τελευταίο τρίμηνο (σχήμα 4.20) πριν τον κύριο σεισμό παρατηρούμε ελάχιστα επίκεντρα. Οι σεισμοί που εκδηλώθηκαν ήταν πάλι βόρεια της Κεφαλονιάς και δυτικά της Λευκάδας.



Σχήμα 4.19 : Χωρική κατανομή επικέντρων για την περίοδο 01/01/2003-11/05/2003



Σχήμα 4.20 : Χωρική κατανομή επικέντρων για την περίοδο 12/05/2003-14/08/2003

Κατόπιν συγκρίνουμε την μεταβολή της σεισμικότητας της περιοχής χωρίζοντας τον κατάλογο σε δύο επιμέρους τμήματα (σχήμα 4.21).

Please define the two periods

T1 =
2003.001

T2 =
2003.2539

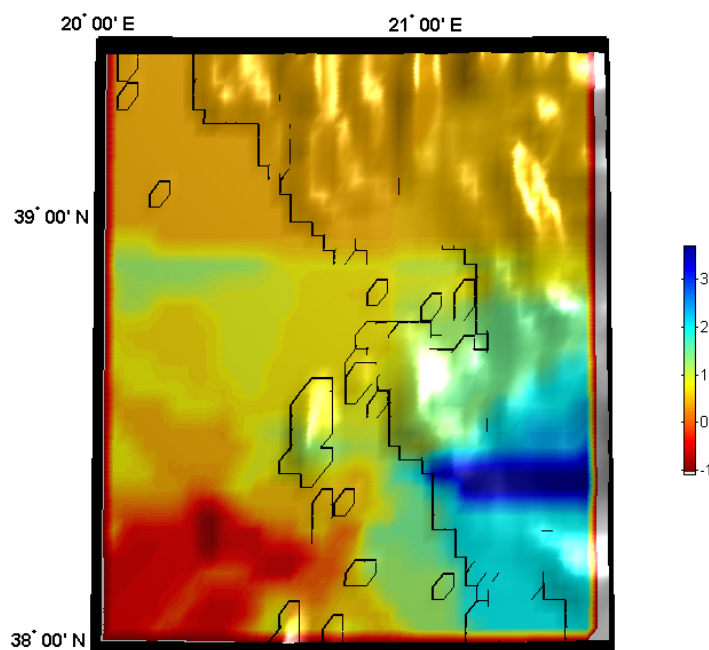
T3 =
2003.2639

T4 =
2003.5067

OK Cancel

Σχήμα 4.21: Χωρισμός καταλόγου σε 2 επιμέρους περιόδους διάρκειας 4 μηνών με σκοπό την σύγκριση της μεταβολής της σεισμικότητας.

Τα αποτελέσματα της σύγκρισης αυτής φαίνονται στο σχήμα 4.22. Παρατηρούμε πως οι τιμές της Z είναι ιδιαίτερα αυξημένες, γεγονός που δείχνει τη μείωση της σεισμικότητας στην περιοχή. Μοναδική εξαίρεση αποτελεί η περιοχή βόρεια της Κεφαλονιάς όπου χαρακτηρίζεται με κόκκινο χρώμα δηλαδή αύξηση της σεισμικότητας. Επίσης φαίνεται με έντονο μπλε χρώμα (μείωση της σεισμικότητας) η περιοχή της Δυτικής Ηπείρου.



Σχήμα 4.22: Χάρτης σύγκρισης σεισμικότητας της περιόδου μέχρι τον σεισμό της 14^{ης} Αυγούστου 2003. Το μπλε χρώμα συμβολίζει αύξηση της Z άρα μείωση της σεισμικότητας. Το κόκκινο χρώμα συμβολίζει μείωση της Z άρα αύξηση της σεισμικότητας.

4.4.3.2 Περίοδος μετά τον σεισμό της 14^{ης} Αυγούστου

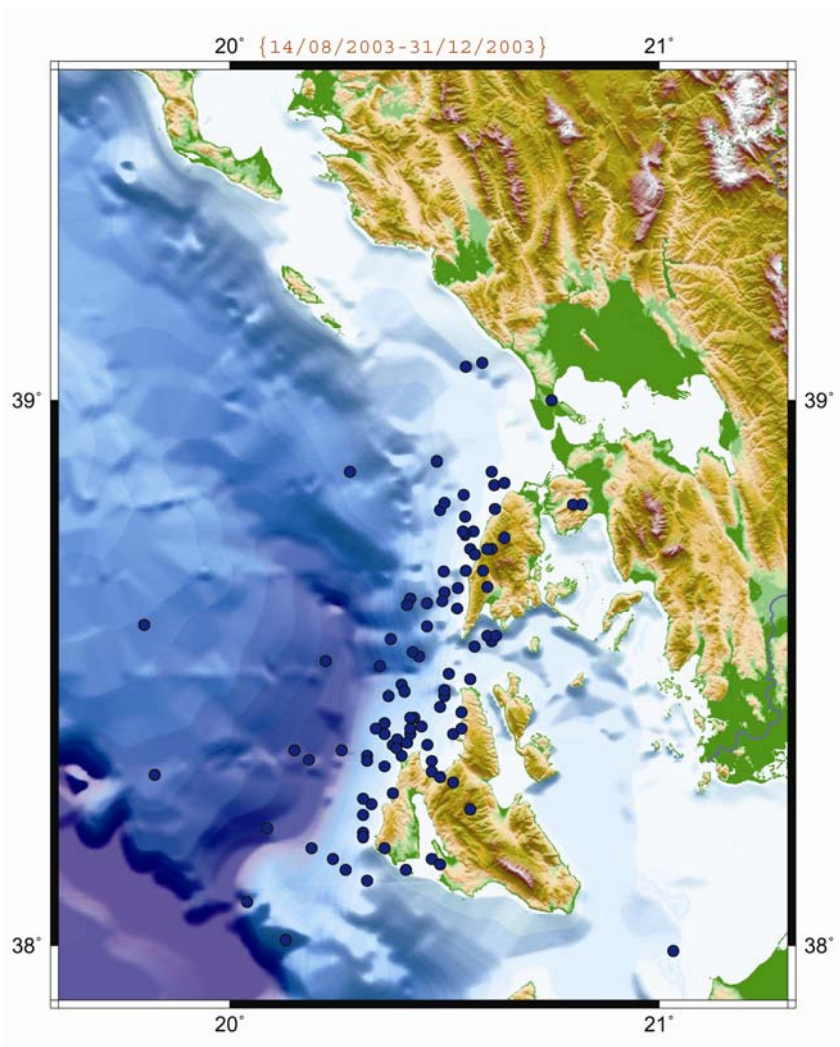
Για τους εναπομείναντες μήνες του 2003 έχουμε 105 σειμούς (σχήμα 4.23). Σημειώνεται πως δεν έχει αφαιρεθεί από τον κατάλογο η μετασεισμική ακολουθία.

Σχήμα 4.23: Παράμετροι κατάλογου περιόδου 14/08/2003-31/12/2003

Στη συνέχεια χαρτογραφούμε τα επίκεντρα των σειμών (σχήμα 4.24). Παρατηρούμε πως υπάρχουν δύο μεγάλες συγκεντρώσεις βόρεια της Κεφαλονιάς και δυτικά της Λευκάδας. Στην πρώτη περίπτωση φαίνεται πως η περιοχή νότια του νησιού που σύμφωνα με το σχήμα 4.10 ήταν ενεργή έχει κατά κάποιο τρόπο ησυχάσει τόσο τους μήνες πριν τον κύριο σεισμό όσο και μετά την εκδήλωση αυτού, δηλαδή κατά την διάρκεια του έτους 2003. Στην δεύτερη περίπτωση έχουμε συγκέντρωση επικέντρων δυτικά της Λευκάδας που πιθανότατα αφορά την ενεργοποίηση του ρήγματος σε διάφορα σημεία.

Για να δούμε την μεταβολή της τιμής Z χωρίζουμε τον κατάλογο σε 2 τμήματα όπου το καθένα περιλαμβάνει 2 μήνες (σχήμα 4.25). Τα αποτελέσματα φαίνονται στον χάρτη του

σχήματος 4.26). Η τιμή της παραμέτρου Z κυμαίνεται από -2 έως και 2 και φανερώνει τόσο περιοχές με χαμηλή σεισμικότητα όσο και περιοχές με αυξημένη σεισμικότητα. Ότι η περιοχή κοντά στο επίκεντρο χαρακτηρίζεται με μπλε χρώμα σημαίνει πως η σεισμικότητα ελαττώθηκε αρκετά το τελευταίο δίμηνο του 2003 και επίσης ότι οι τα επίκεντρα που αποτυπώνονται στο σχήμα 4.24 αφορούν κυρίως μετασεισμούς και ιδιαίτερα την περίοδο αμέσως μετά τον κύριο σεισμό. Ακόμη η περιοχή βόρεια της Κεφαλονιάς χαρακτηρίζεται με έντονο κόκκινο χρώμα, δηλαδή έχουμε αύξηση της σεισμικότητας στην περιοχή.



Σχήμα 4.24 : Χωρική κατανομή επικέντρων για την περίοδο 15/06/1995-31/12/1995.

Please define the two periods

T1 =
2003.617

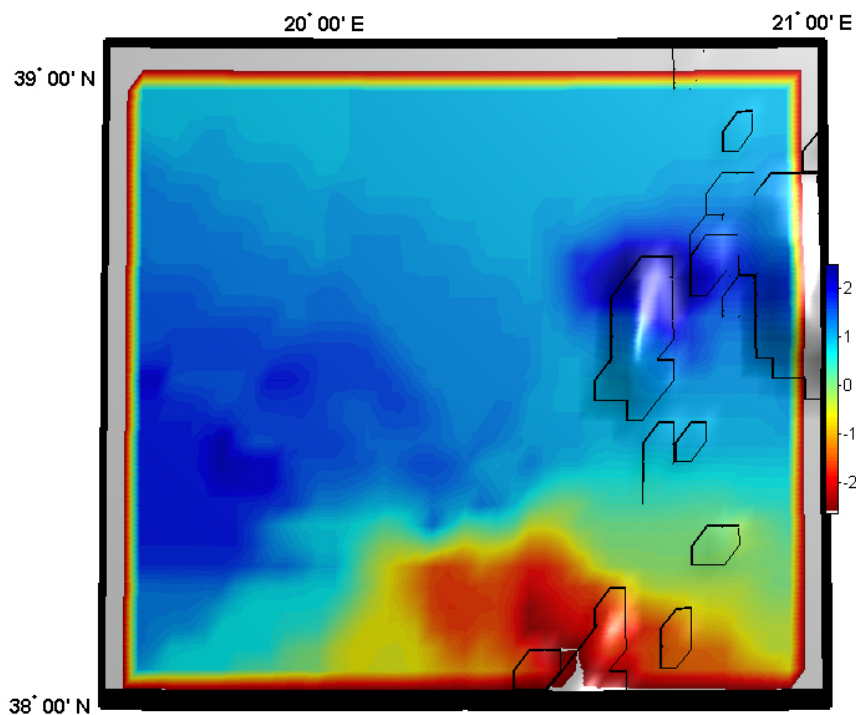
T2 =
2003.8023

T3 =
2003.8123

T4 =
2003.9875

OK Cancel

Σχήμα 4.25: Χωρισμός καταλόγου σε 2 επιμέρους περιόδους διάρκειας 3 μηνών με σκοπό την σύγκριση της μεταβολής της σεισμικότητας.



Σχήμα 4.26:Χάρτης σύγκρισης σεισμικότητας του τελευταίου τετραμήνου του 2003. Το μπλε χρώμα συμβολίζει αύξηση της Z άρα μείωση της σεισμικότητας. Το κόκκινο χρώμα συμβολίζει μείωση της Z άρα αύξηση της σεισμικότητας.

4.4.3.3 2002-2003

Για να ολοκληρώσουμε τη μελέτη για τη μεταβολή της σεισμικότητας στην ευρύτερη περιοχή του Ιονίου, θα συγκρίνουμε το έτος 2003 με το αντίστοιχο 2002 και 2004. Για τα έτη 2002-2003 έχουμε συνολικά 167 σεισμούς με ελάχιστο μέγεθος $M_{\min}=4.0$ (σχήμα 4.27).

General Parameters!

EQs in catalog:

Plot Big Events with:

Bin Length in days:

Beginning year:

Ending year:

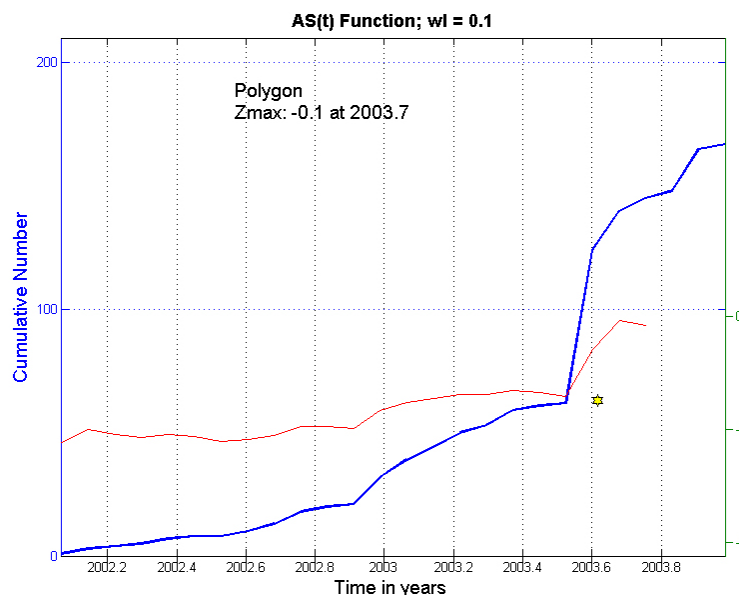
Minimum Magnitude:

Maximum Magnitude:

Min Depth: **Max Depth:**

Σχήμα 4.27: Παράμετροι κατάλογου περιόδου 1994-1995

Στη συνέχεια παίρνουμε την αθροιστική καμπύλη καθώς και την μεταβολή της παραμέτρου Z ανά μήνα (σχήμα 4.28). Παρατηρούμε πως η τιμή Z παίρνει ξανά μόνο αρνητικές τιμές. Απότομη μεταβολή παρουσιάζει κατά το δεύτερο εξάμηνο του 2003 όπου αυξάνεται η τιμή Z , μειώνεται δηλαδή η σεισμικότητα της ευρύτερης περιοχής (όπως δείχθηκε και προηγουμένως). Η αύξηση αυτή σταματά το 2003.7 όπου και η Z παίρνει την μέγιστη τιμή της, $Z_{\max} = -0.1$.

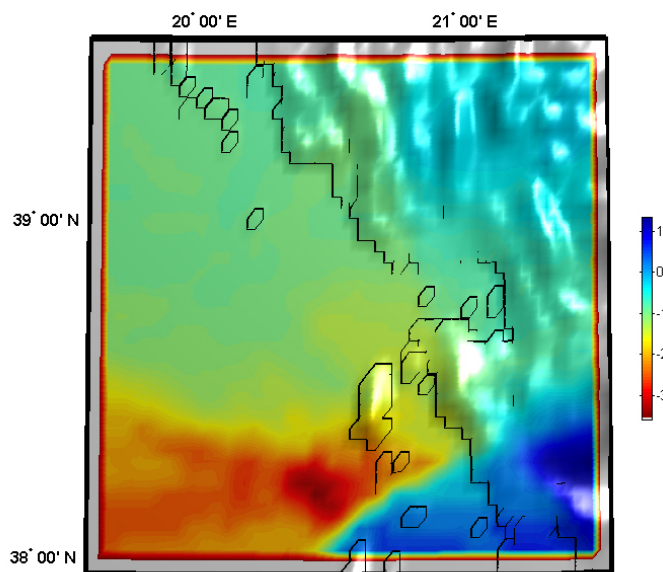


Σχήμα 4.28: Με μπλε χρώμα είναι η αθροιστική καμπύλη των σεισμών για την περίοδο 2002-2003. Με κόκκινο είναι η καμπύλη της μεταβολής της Z -value ανά μήνα

Επιπλέον θα χωρίσουμε τον κατάλογο σε 2 επιμέρους τμήματα για να γίνει σύγκριση της τιμής της Z ανά έτος (σχήμα 4.29). Τα αποτελέσματα φαίνονται στον χάρτη του σχήματος 4.30.

Σχήμα 4.30: Χωρισμός καταλόγου σε 2 επιμέρους περιόδους διάρκειας ενός έτους με σκοπό την σύγκριση της μεταβολής της σεισμικότητας.

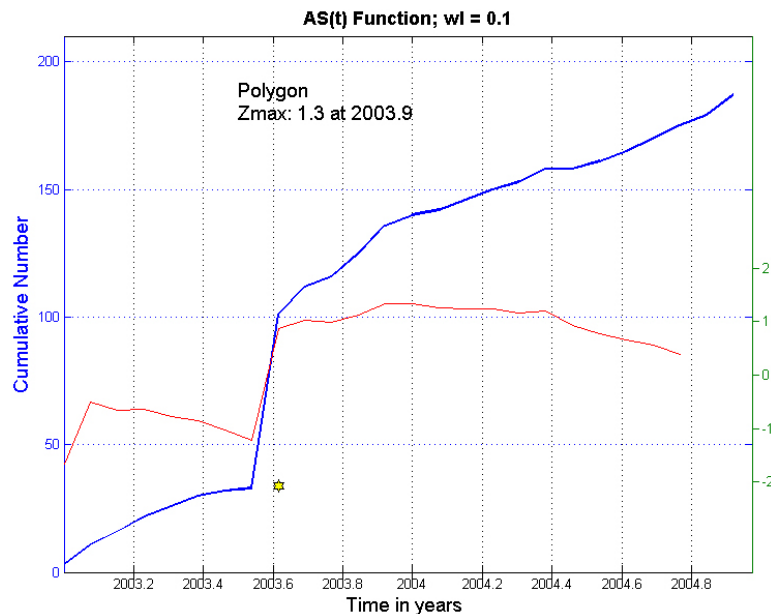
Η πρώτη παρατήρηση αφορά την τιμή της Z όπου παρουσιάζει διαφορά από την προηγούμενη τιμή. Οι τιμές της Z είναι από -3 έως και 1. Με έντονο κόκκινο χρώμα είναι η περιοχή βόρεια της Κεφαλονιάς η οποία παρουσιάζει έντονη σεισμική δραστηριότητα κατά το 2003 και ειδικότερα μετά την γένεση του κύριου σεισμού της 14^{ης} Αυγούστου. Επίσης σημαντική είναι και η μείωση της σεισμικότητας στις περιοχές της Ηπείρου και βόρειου Ιονίου.



Σχήμα 5.32: Χάρτης σύγκρισης σεισμικότητας 2002-2003.
Το μπλε χρώμα συμβολίζει αύξηση της Z άρα μείωση της σεισμικότητας.
Το κόκκινο χρώμα συμβολίζει μείωση της Z άρα αύξηση της σεισμικότητας.

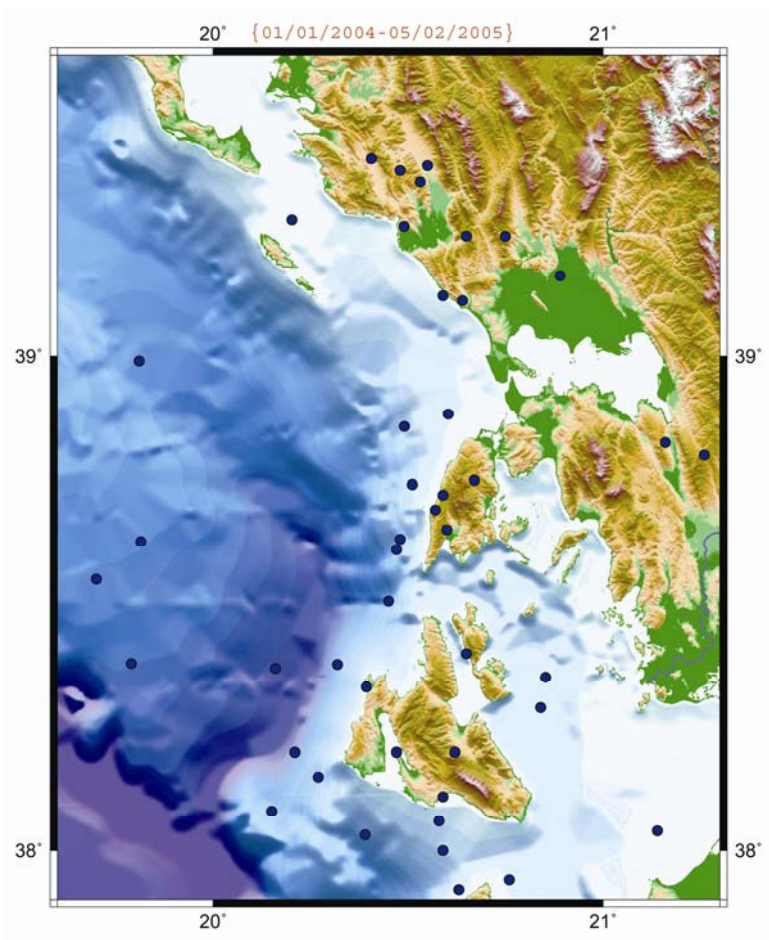
Κλείνοντας θα μελετήσουμε την σεισμικότητα της περιοχής για τα έτη 2003-2004 καθώς και την κατανομή των επικέντρων για το έτος 2004. Έτσι, για την περίοδο αυτή έχουμε 187 σεισμούς με ελάχιστο μέγεθος $M_{\min}=4.0$ (σχήμα 4.31). Υπολογίζουμε την αθροιστική καμπύλη συναρτήσεως του χρόνου καθώς και την μεταβολή της Z ανά μήνα όπως φαίνεται στο σχήμα 4.32.

Σχήμα 4.31: Παράμετροι κατάλογου περιόδου 2003-2004.



Σχήμα 4.32: Με μπλε χρώμα είναι η αθροιστική καμπύλη των σεισμών για την περίοδο 2003-2004 . Με κόκκινο είναι η καμπύλη της μεταβολής της Z -value ανά μήνα

Παρατηρούμε πως η Z αποκτά την μέγιστη ως τώρα τιμή της $Z_{\max} = 1.3$ προς το τέλος του 2003. Έπειτα για σχεδόν το μισό 2004 παραμένει σταθερή και μετά αρχίζει ξανά να ελαττώνεται. Αυτό δείχνει πως η περιοχή δεν είχε έντονες μεταβολές της σεισμικότητας. Το σχήμα 4.33 που δείχνει την κατανομή των επικέντρων των σεισμών του 2004 μας φανερώνει πως η σεισμικότητα στη περιοχή κατά κάποιον τρόπο αποκαταστάθηκε και δεν έχουμε πια μεμονωμένες ανενεργές περιοχές ή περιοχές με εντονότερη του φυσιολογικού δράση.



Σχήμα 4.33 : Χωρική κατανομή επικέντρων για την περίοδο 01/01/2004-05/02/2005.

Τέλος, συγκρίνουμε τα έτη 2003 και 2004 (σχήμα 4.34) και παίρνουμε τον χάρτη του σχήματος 4.35).

Please define the two periods

T1 =
2003.001

T2 =
2003.9868

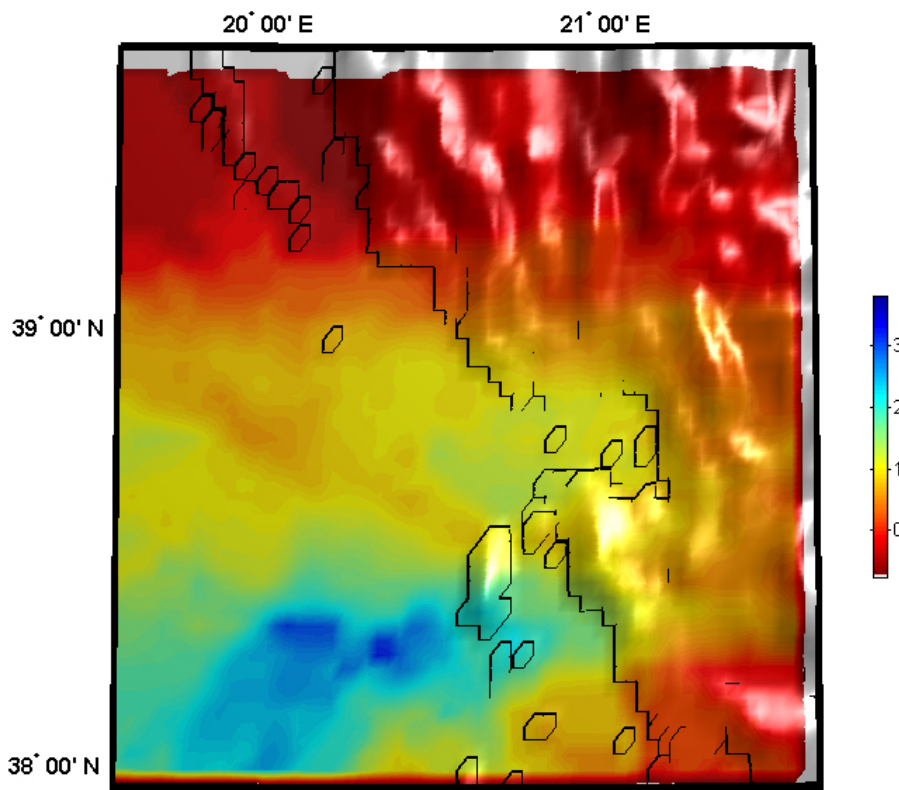
T3 =
2003.9968

T4 =
2004.9725

OK Cancel

Σχήμα 4.34: Χωρισμός καταλόγου σε 2 επιμέρους περιόδους διάρκειας ενός έτους με σκοπό την σύγκριση της μεταβολής της σεισμικότητας.

Η τιμή της Z (σχήμα 4.35) αποκτά θετικές τιμές που ξεπερνούν τις προηγούμενες. Η περιοχή κοντά στο επίκεντρο του κύριου σεισμού της 14^{ης} Αυγούστου 2003 χαρακτηρίζεται από μείωση της σεισμικότητας (έντονο μπλε). Οι άλλες δε περιοχές όπου παριστάνονται χρωματικά με κόκκινο δεν δείχνουν μεγάλη αύξηση της σεισμικότητας καθότι τείνουν στο μηδέν και ίσως το ξεπερνούν ελάχιστα.



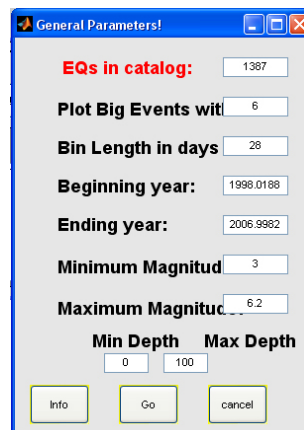
Σχήμα 4.35 : Χάρτης σύγκρισης σεισμικότητας 1994-1995.
Το μπλε χρώμα συμβολίζει αύξηση της Z άρα μείωση της σεισμικότητας.
Το κόκκινο χρώμα συμβολίζει μείωση της Z άρα αύξηση της σεισμικότητας.

4.5 Μελέτη καταλόγου και υπολογισμός z-value για την περιοχή Λευκάδα – Κεφαλονιά

Για να μπορέσουμε να δούμε αν υπήρξε αναστροφή σεισμικότητας πριν την γένεση του σεισμού της 14^{ης} Αυγούστου 2003 παίρνουμε έναν κατάλογο που περιλαμβάνει της περιοχή από $\varphi=37.9^0$ έως $\varphi=39.0^0$ και $\lambda=19.9^0$ έως $\lambda=20.9^0$. Η διαφορά με τον προηγούμενο κατάλογο δεν είναι μόνο στο γεωγραφικό εύρος των δεδομένων αλλά και στο μέγεθος. Οι σεισμοί του καταλόγου αυτού έχουν ελάχιστο μέγεθος $M=3.0$. Ο κατάλογος χωρίστηκε αρχικά σε 3 επιμέρους τμήματα. Το πρώτο αφορά την περίοδο πριν γένεση του κύριου σεισμού της 14^{ης} Αυγούστου 2003. Το δεύτερο αφορά όλο το έτος 2003 όπου και χωρίστηκε εκ νέου για να μελετηθεί και να συγκριθεί η σεισμικότητα ανά εξάμηνο αλλά και ανά τρίμηνο και τέλος το τρίτο μέρος αφορά την περίοδο μετά το τέλος του έτους 2003 και εκτείνεται μέχρι και το τέλος του 2006. Η κάθε ενότητα χαρτογραφήθηκε και μελετήθηκε ως προς την μεταβολή της παραμέτρου Z.

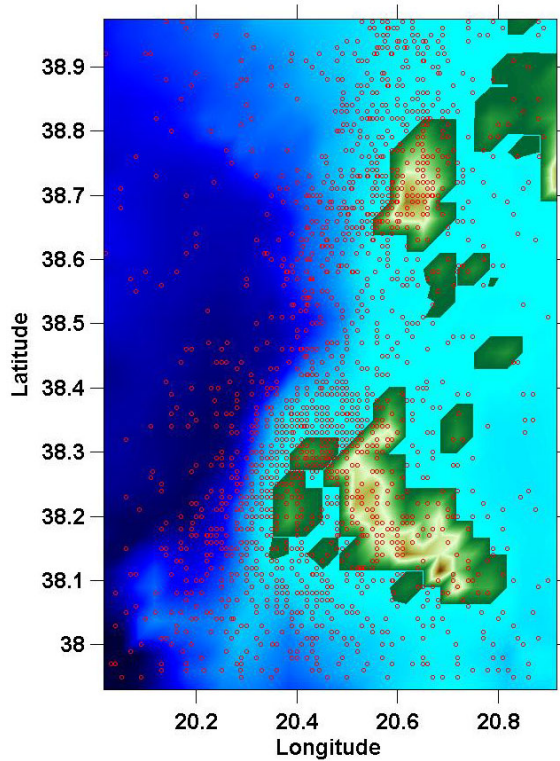
4.5.1 1998-2006

Ο κατάλογος που εξετάζουμε εδώ αφορά την περίοδο 1998- 2006 (σχήμα 4.36) όπου έχουμε συνολικά 1387 σεισμούς και παίρνουμε ως ελάχιστο μέγεθος $M_{\min}=3.0$. Η χωρική κατανομή των επικέντρων φαίνεται στο σχήμα 4.37 όπου και παρατηρούμε πως η εξεταζόμενη περιοχή περιορίστηκε γεωγραφικά σε σύγκριση με τον προηγούμενο κατάλογο.

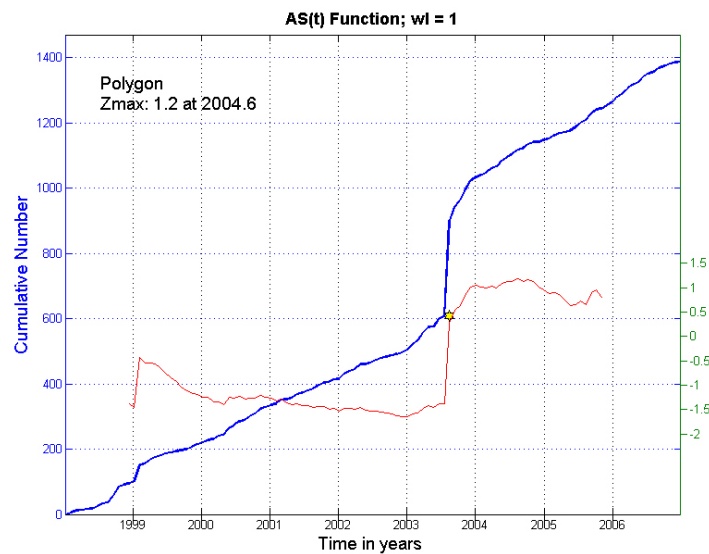


Σχήμα 4.36: Παράμετροι καταλόγου περιόδου 1998-2006 (zmap)

Εν συνεχεία υπολογίζουμε την αθροιστική καμπύλη και την τιμή της παραμέτρου Z ανά έτος (σχήμα 4.38). Παρατηρούμε πως οι τιμές της Z κυμαίνονται από -1.5 έως και 2. Η απότομη μεταβολή παρατηρείται μετά το πρώτο μισό του 2003 και συνεχίζεται η αύξηση μέχρι να φτάσει την μέγιστη τιμή της κατά το 2004.6, $Z_{\max}=1.2$.



Σχήμα 4.38: Χάρτης κατανομής επικέντρων για την περίοδο 1998-2006 (Z_{map})



Σχήμα 4.38: Με μπλε χρώμα είναι η αθροιστική καμπύλη των σεισμών για την περίοδο 1998-2006. Με κόκκινο είναι η καμπύλη της μεταβολής της Z -value ανά έτος.

Το σχήμα 4.39 δείχνει τις επιμέρους περιόδους όπου και χωρίσαμε τον κατάλογο για να συγκρίνουμε χωρικά την μεταβολή της παραμέτρου Z. Στο σχήμα 4.40 φαίνονται οι παράμετροι που ορίσαμε για τον υπολογισμό και την σύγκριση του Z. Στην θέση «number of events» δεν βάζουμε τον αριθμό των συνολικών γεγονότων του καταλόγου αλλά το μέγιστο των γεγονότων που θέλουμε. Έτσι το πρόγραμμα χαράσσει νοητούς κύκλους με μέγιστο αριθμό γεγονότων 25 και με ανάλυση 0.025x0.025 (γιατί ο χώρος μελέτης μας είναι σχετικά περιορισμένος) και συγκρίνει τις επιμέρους περιοχές. Η διαδικασία αυτή ακολουθήθηκε για κάθε επιμέρους τμήμα του συγκεκριμένου καταλόγου με ακριβώς ίδιες παραμέτρους.

A dialog box titled "Please define the two periods" with a close button (X) in the top right corner. It contains four input fields for time periods:

- T1 = 1998.0188
- T2 = 2002.5085
- T3 = 2002.5185
- T4 = 2006.9982

At the bottom, there are "OK" and "Cancel" buttons.

Σχήμα 4.39: Χωρισμός καταλόγου σε 2 επιμέρους περιόδους διάρκειας 4,5 ετών με σκοπό την σύγκριση της μεταβολής της σεισμικότητας.

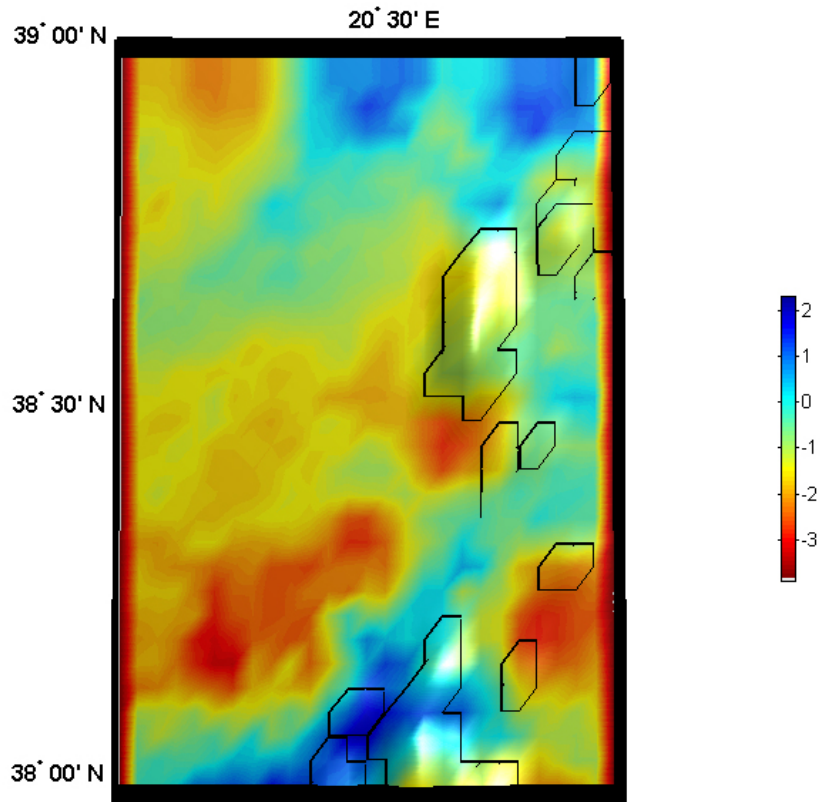
A dialog box titled "Grid Input Parameter" with a close button (X) in the top left corner. The main heading is "Please choose rate change estimation option". Underneath, there is a section titled "Grid Parameter" with several input fields and radio buttons:

- Number of Events: 25
- OR: Constant Radius: 5
- Spacing in x (dx) in deg: 0.025
- Spacing in y (dy) in deg: 0.025
- Calculate a new grid
- Reuse the previous grid
- Load a previously saved grid
- Save selected grid to file

At the bottom, there are "Go" and "Cancel" buttons.

Σχήμα 4.40: Παράμετροι υπολογισμού της z-value για την περίοδο 1998-2006.

Το αποτέλεσμα της σύγκρισης αυτής παρουσιάζεται στον χάρτη του σχήματος 4.41 όπου με έντονο κόκκινο χρώμα είναι οι περιοχές που παρουσιάζουν έντονη σεισμική δραστηριότητα για την περίοδο 2002,5-2006 ενώ στις περιοχές με μπλε χρώμα παρατηρείται ελάττωση τις σεισμικότητας. Αυτό που σημειώνουμε από την σύγκριση αυτή είναι πως οι τιμές της Z δεν διαφοροποιούνται σε σχέση με την σύγκριση ανά έτος.



Σχήμα 4.41: Χάρτης σύγκρισης σεισμικότητας των περιόδων 1998-2002,5 και 2002,5-2006. Το μπλε χρώμα συμβολίζει αύξηση της Z άρα μείωση της σεισμικότητας. Το κόκκινο χρώμα συμβολίζει μείωση της Z άρα αύξηση της σεισμικότητας.

4.5.2 2000-2002

Για να μπορέσουμε να ελέγξουμε αν υπήρχε αισθητή μεταβολή της σεισμικότητας στην περιοχή θα ερευνήσουμε τις τιμές της Z και την χωρική κατανομή των σεισμών για την

περίοδο 2000-2002. Από το σχήμα 4.42 έχουμε πως για την περίοδο αυτή έγιναν 281 σεισμοί με ελάχιστο μέγεθος $M_{\min}=3.0$ και μέγιστο $M_{\max}=5.3$.

General Parameters!

EQs in catalog: 281

Plot Big Events with: 5.1

Bin Length in days: 28

Beginning year: 2000.0425

Ending year: 2002.9784

Minimum Magnitude: 3.1

Maximum Magnitude: 5.3

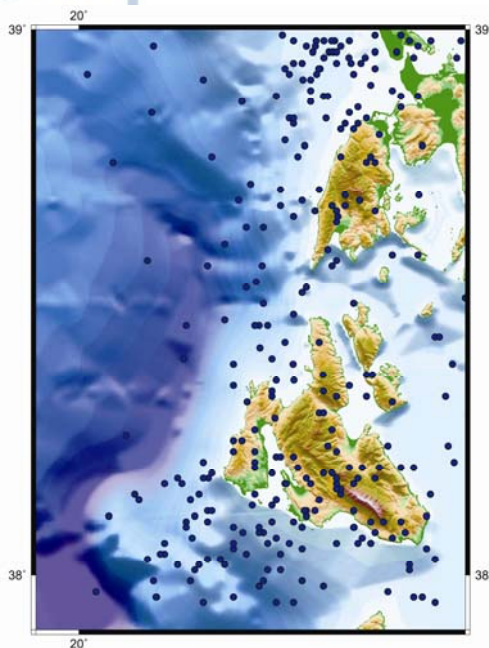
Min Depth **Max Depth**

0 56

Info Go cancel

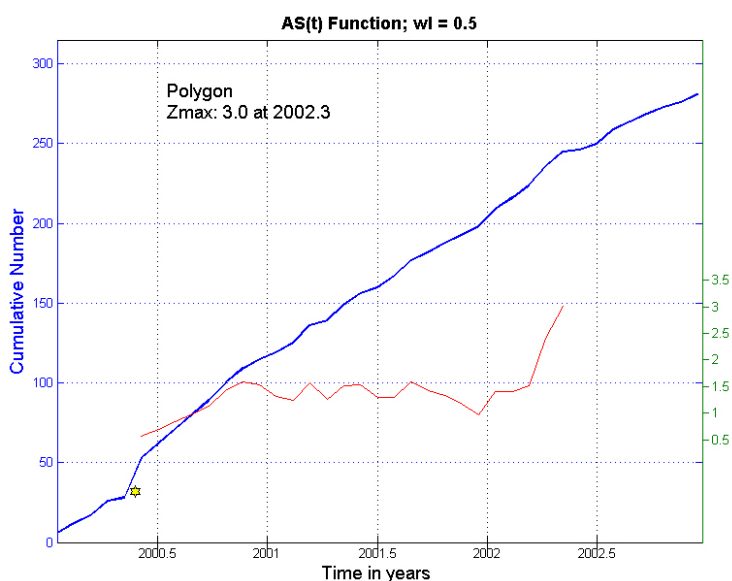
Σχήμα 4.43: Παράμετροι κατάλογου περιόδου 2000-2002.

Στο σχήμα 4.43 παρουσιάζεται η χωρική κατανομή των σεισμών για την περίοδο 2000-2002. Οι ομοιότητες που παρουσιάζονται με το σχήμα 4.10 είναι πως τα επίκεντρα συγκεντρώνονται στο νότιο τμήμα του νησιού της Κεφαλονιάς και δυτικά και βόρεια του νησιού της Λευκάδας. Η διαφορά που παρατηρείται είναι στον αριθμό των σεισμών και αυτό διότι σε αυτόν τον κατάλογο χρησιμοποιούμε σεισμούς με ελάχιστο μέγεθος $M=3$ καθώς και στην μικρή γεωγραφική έκταση που εξετάζουμε.



Σχήμα 4.43 : Χωρική κατανομή επικέντρων για την περίοδο 2000-2002.

Στο διάγραμμα του σχήματος 4.44 έχουμε την αθροιστική καμπύλη των σεισμών σε συνάρτηση με το χρόνο καθώς και την μεταβολή της παραμέτρου Z ανά εξάμηνο για την χρονική περίοδο 200-2002. Σε μεγάλη αντίθεση με το διάγραμμα του σχήματος 4.11 όπου είχαμε μόνο αρνητικές τιμές για την Z , εδώ έχουμε μόνο θετικές τιμές της Z . Ειδικότερα μετά την αρχή του 2002 η Z αυξάνεται συνεχώς μέχρι να πάρει την μέγιστη τιμή της $Z_{\max}=3.0$.



Σχήμα 4.44: Με μπλε χρώμα είναι η αθροιστική καμπύλη των σεισμών για την περίοδο 2000-2002. Με κόκκινο είναι η καμπύλη της μεταβολής της Z -value ανά εξάμηνο.

Στη συνέχεια χωρίζουμε τον κατάλογο σε 2 επιμέρους περιόδους (σχήμα 4.45) και παίρνουμε το χάρτη του σχήματος 4.46.

Please define the two periods

T1 = 2000.0425

T2 = 2001.5104

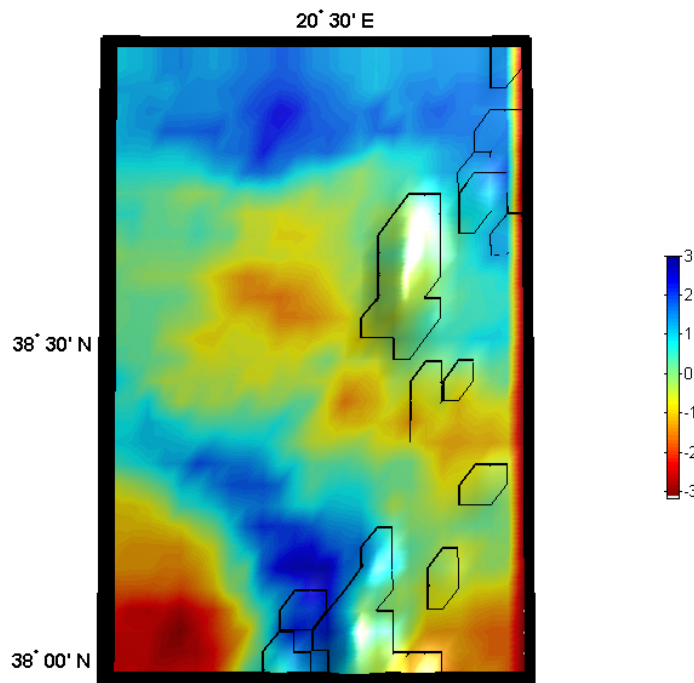
T3 = 2001.5204

T4 = 2002.9784

OK Cancel

Σχήμα 4.45: Χωρισμός καταλόγου σε 2 επιμέρους περιόδους διάρκειας 1,5 ετών με σκοπό την σύγκριση της μεταβολής της σεισμικότητας.

Στο σχήμα 4.46 βλέπουμε πως υπάρχουν αρνητικές τιμές της Z σε αντίθεση με πριν και ειδικότερα η περιοχή δυτικά του νησιού της Κεφαλονιάς όπου και παρουσιάζει έντονη σεισμική δράση.



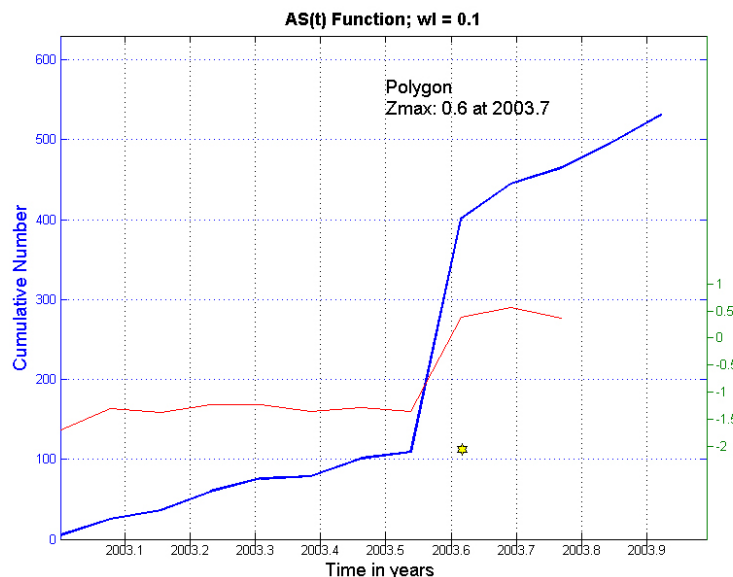
Σχήμα 4.46: Χάρτης σύγκρισης σεισμικότητας των περιόδων 2000- 2001,5 και 2001,5-2002. Το μπλε χρώμα συμβολίζει αύξηση της Z άρα μείωση της σεισμικότητας. Το κόκκινο χρώμα συμβολίζει μείωση της Z άρα αύξηση της σεισμικότητας.

4.5.3 2003

Κατά το έτος 2003 είχαμε συνολικά 531 σεισμούς (σχήμα 4.47) συμπεριλαμβανομένης και της μετασεισμικής ακολουθίας. Το ελάχιστο μέγεθος είναι $M_{\min}= 3.0$ και μέγιστο $M_{\max}= 6.2$ όπου και είναι το μέγεθος του σεισμού της 14^{ης} Αυγούστου 2003.

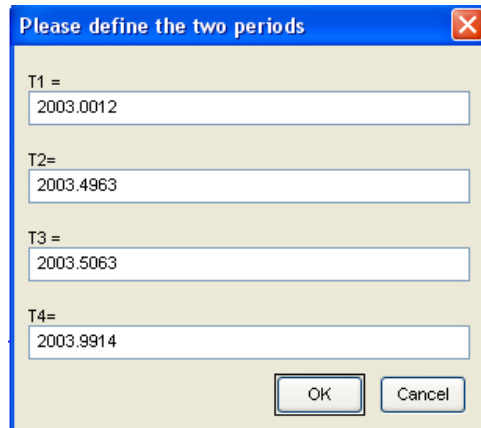
Στο σχήμα 4.48 παρουσιάζεται η αθροιστική καμπύλη καθώς και η μηνιαία μεταβολή της παραμέτρου Z για το έτος 2003. Οι τιμές της Z κυμαίνονται από -2 έως σχεδόν 1. Πάλι βλέπουμε απότομη αύξηση της Z μετά τα μέσα του 2003 και αυτή η αύξηση συνεχίζεται μέχρι το 2003,7 όπου και η Z παίρνει την μέγιστη τιμή του, $Z_{\max}=0.6$.

Σχήμα 4.47: Παράμετροι κατάλογου περιόδου 01/01/2003-31/12/2003

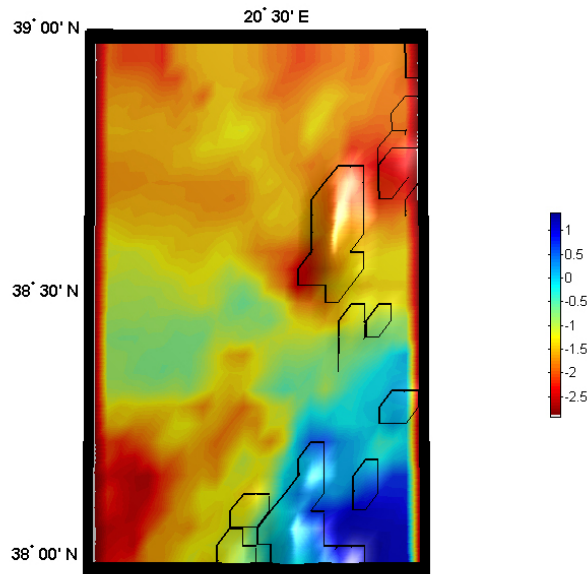


Σχήμα 4.48: Με μπλε χρώμα είναι η αθροιστική καμπύλη των σεισμών για το έτος 1995. Με κόκκινο είναι η καμπύλη της μεταβολής της Z -value ανά μήνα

Επιπλέον χωρίζουμε τον κατάλογο σύμφωνα με το σχήμα 4.49 και παίρνουμε τον χάρτη του σχήματος 4.50 όπου απεικονίζονται χρωματικά οι χωρικές μεταβολές της παραμέτρου Z. Οι τιμές της Z συμπίπτουν με αυτές που υπολογίστηκαν πριν. Οι περιοχές με έντονο κόκκινο χρώμα (αύξηση σεισμικότητας) βρίσκονται κυρίως κοντά στο επίκεντρο του σεισμού της 14^{ης} Αυγούστου αλλά και δυτικά του νησιού της Κεφαλονιάς.



Σχήμα 4.49: Χωρισμός καταλόγου σε 2 επιμέρους περιόδους διάρκειας 6 μηνών με σκοπό την σύγκριση της μεταβολής της σεισμικότητας.



Σχήμα 5.16: Χάρτης σύγκρισης σεισμικότητας 1^{ου} και 2^{ου} εξαμήνου του 1995. Το μπλε χρώμα συμβολίζει αύξηση της Z άρα μείωση της σεισμικότητας. Το κόκκινο χρώμα συμβολίζει μείωση της Z άρα αύξηση της σεισμικότητας.

4.5.3.1 Περίοδος μέχρι τον σεισμό της 14^{ης} Αυγούστου

Για το πρώτο μισό του 2003 έχουμε 109 σειμούς με ελάχιστο μέγεθος $M_{\min}=3.0$ (σχήμα 4.51). Ο κατάλογος που μελετήθηκε με το Zmap (υπολογισμός z-value) δεν περιλαμβάνει 2 σειμούς που έγιναν το πρώτο 10ήμερο του Αυγούστου καθώς και τον σεισμό της 14^{ης} Αυγούστου. Αντιθέτως στο σχήμα 4.52 όπου και δίνεται χωρικά η κατανομή των epicέντρων για την περίοδο μέχρι και τον κύριο σεισμό, συμπεριλαμβάνονται αυτοί οι σειμοί.

Σχήμα 4.51 Παράμετροι κατάλογου περιόδου 01/01/1995-17/07/2003

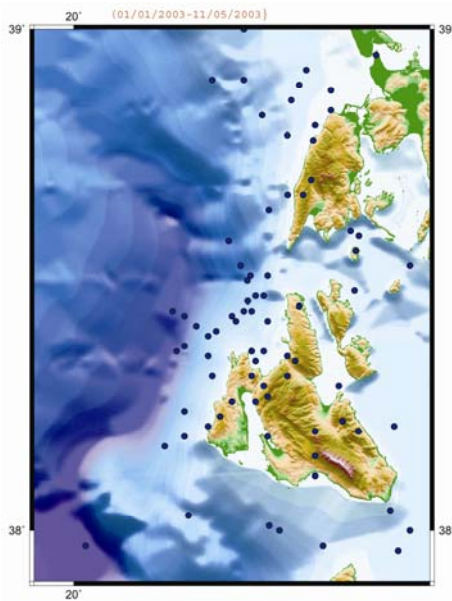
Στη συνέχεια χαρτογραφούμε τα epicέντρα για όλη την περίοδο του 2003 μέχρι και τον σεισμό της 14^{ης} Αυγούστου (σχήμα.4.52) Συγκριτικά με τον προηγούμενο χάρτη (σχ.4.43) παρατηρούμε πως η περιοχή βόρεια του νησιού της Κεφαλονιάς παρουσιάζει μεγαλύτερη συγκέντρωση epicέντρων ενώ θα μπορούσε και να χαρακτηριστεί ως μείωση στα βόρεια και στα δυτικά του νησιού της Λευκάδας.

Αναλυτικότερα, στο σχήμα 4.53 χαρτογραφούμε τα epicέντρα για την περίοδο 01/01/2003-11/05/2003 και στο σχήμα 4.54 την περίοδο 12/05/2003-14/08/2003 μέχρι δηλαδή και τον κύριο σεισμό. Εδώ είναι πιο ξεκάθαρη η μετατόπιση της σεισμικότητας στην περιοχή της Κεφαλονιάς. Επιπλέον συμβαδίζει με το σχήμα 4.19 και το σχήμα 4.20

όπου τα επίκεντρα συγκεντρώνονται βόρεια της Κεφαλονιάς και δυτικά και βόρεια της Λευκάδας μειώνονται αισθητά.



Σχήμα 4.52: Χωρική κατανομή επικέντρων για την περίοδο 01/01/2003- 14/08/2003



Σχήμα 4.53 : Χωρική κατανομή επικέντρων για την περίοδο 01/01/2003-11/05/2003

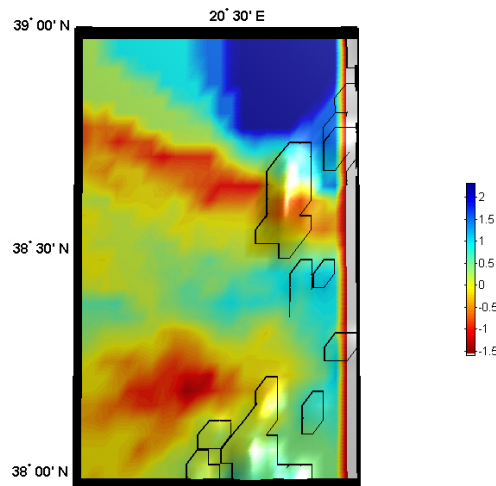


Σχήμα 4.54: Χωρική κατανομή επικέντρων για την περίοδο 12/05/2003- 14/08/2003

Τέλος χωρίζουμε τον κατάλογο ανά 3,5 μήνες (σχήμα 4.55) και χαρτογραφούμε την χωρική μεταβολή της τιμής της Z (σχήμα 4.56).

Σχήμα 4.55: Χωρισμός καταλόγου σε 2 επιμέρους περιόδους διάρκειας 3,5 μηνών με σκοπό την σύγκριση της μεταβολής της σεισμικότητας.

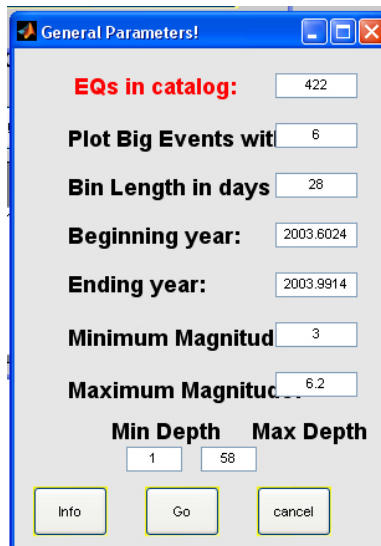
Η τιμή της Z είναι παρόμοια με αυτήν που υπολογίσαμε συγκρίνοντας τα 2 εξάμηνα του 2003. Επίσης με έντονο κόκκινο φαίνεται το βόρειο τμήμα της Κεφαλονιάς όπου παρατηρήσαμε και πριν πως είχαμε αύξηση της σεισμικότητας, καθώς και το τμήμα βορειοδυτικά της Λευκάδας κοντά στο επίκεντρο του επικείμενου σεισμού χαρακτηρίζεται με έντονο μπλε όπου και δείχνει την έλλειψη δραστηριότητας πριν τη γένεση του κύριου σεισμού.



Σχήμα 5.22:Χάρτης σύγκρισης σεισμικότητας 1^{ου} εξαμήνου του 2003.
Το μπλε χρώμα συμβολίζει αύξηση της Z άρα μείωση της σεισμικότητας.
Το κόκκινο χρώμα συμβολίζει μείωση της Z άρα αύξηση της σεισμικότητας.

4.5.3.2 Περίοδος μετά τον σεισμό της 14^{ης} Αυγούστου

Η περίοδος αυτή αφορά το διάστημα από τη γένεση του κύριου σεισμού της 14^{ης} Αυγούστου 2003 μέχρι και το τέλος του έτους. Κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου έγιναν 422 σεισμοί (σχήμα 4.57) χωρίς να έχουμε αφαιρέσει από τον κατάλογο τους μετασεισμούς.

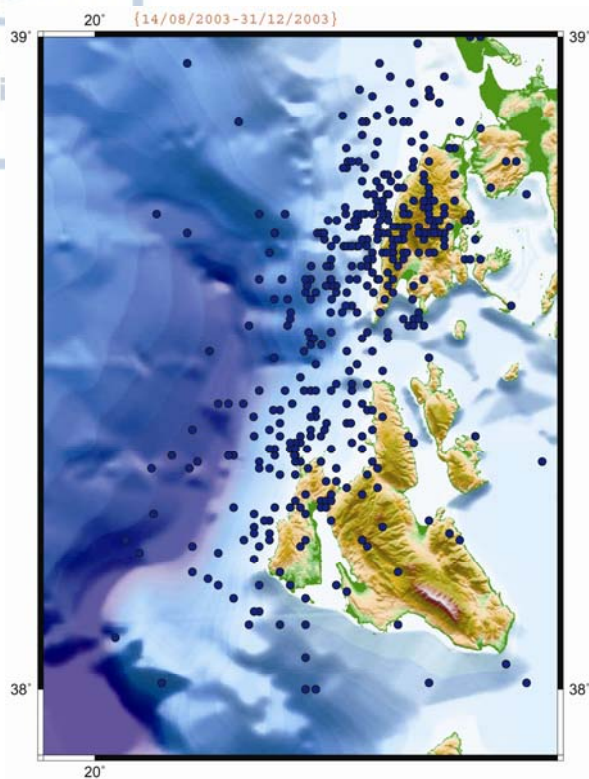


EQs in catalog:	422
Plot Big Events with	6
Bin Length in days	28
Beginning year:	2003.6024
Ending year:	2003.9914
Minimum Magnitud	3
Maximum Magnitud	6.2
Min Depth	1
Max Depth	58

Info Go cancel

Σχήμα 4.57: Παράμετροι κατάλογου περιόδου 14/08/2003- 31/12/2003

Η χωρική κατανομή των σεισμών αυτών φαίνεται στο σχήμα 4.58 όπου και παρατηρούμε αυξημένη συγκέντρωση epicέντρων σε όλο το νησί της Λευκάδας μέχρι και βορειοδυτικά της Κεφαλονιάς. Η συγκέντρωση αυτή πιθανότατα να οφείλεται στους μετασεισμούς αφού ουσιαστικά παρατηρείται κατά μήκος του ρήγματος της Κεφαλονιάς. Ακόμη η περιοχή βόρεια της Κεφαλονιάς συνεχίζει να έχει αυξημένη συγκέντρωση epicέντρων ενώ το νότιο τμήμα δεν δραστηριοποιείται ιδιαίτερα.

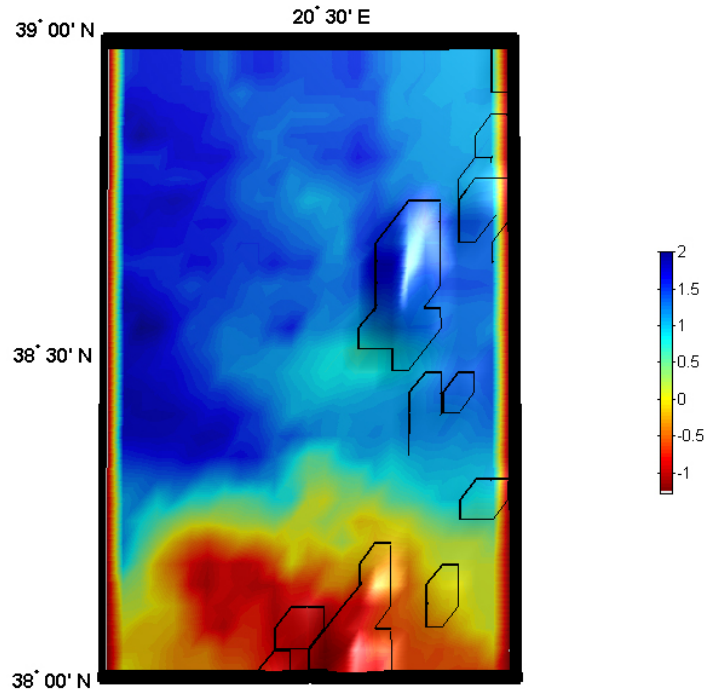


Σχήμα 4.58 : Χωρική κατανομή επικέντρων για την περίοδο 14/08/2003-31/12/2003

Στην συνέχεια χωρίζουμε εκ νέου τον κατάλογο (σχήμα 4.59) για να μελετήσουμε την μεταβολή της παραμέτρου Z (σχήμα 4.60). Είναι φανερό πως οι συγκέντρωση των σεισμών κατά μήκος του ρήγματος οφειλόταν στους μετασεισμούς διότι στον χάρτη του σχήματος 4.60 η συγκρινόμενη περιοχή εμφανίζεται με έντονο μπλε (μείωση σεισμικότητας). Επίσης παρατηρείται αύξηση της σεισμικότητας στο βόρειο τμήμα του νησιού της Κεφαλονιάς ενώ το Νότιο συνεχίζει να μην παρουσιάζει ιδιαίτερη δραστηριότητα.

Σχήμα 4.59: Χωρισμός καταλόγου σε 2 επιμέρους περιόδους διάρκειας 2,5 μηνών με σκοπό την σύγκριση της μεταβολής της σεισμικότητας.

Οι τιμές δε της παραμέτρου Z δεν παρουσιάζουν ιδιαίτερη ποσοτική διαφοροποίηση σε σχέση με τις τιμές του πρώτου εξαμήνου του 2003 αλλά και τις τιμές σύγκρισης των πρώτων τριμήνων του έτους.



Σχήμα 4.61:Χάρτης σύγκρισης σεισμικότητας 2^{ου} εξαμήνου του 2003.
Το μπλε χρώμα συμβολίζει αύξηση της Z άρα μείωση της σεισμικότητας.
Το κόκκινο χρώμα συμβολίζει μείωση της Z άρα αύξηση της σεισμικότητας.

4.5.3.3 2002-2003

Κλείνοντας την μελέτη του έτους 2003 , θα προχωρήσουμε σε σύγκριση αυτού με τα έτη 2002 και 2004 αντίστοιχα για να ελέγξουμε αν τυχόν υπάρχει κάποια διαφοροποίηση στην τιμή της παραμέτρου Z . Για την περίοδο 2002-2003 έχουμε συνολικά 614 δεδομένα (σχήμα 4.61) με ελάχιστο μέγεθος $M_{\min} = 3.0$. Στη συνέχεια παίρνουμε την αθροιστική καμπύλη (σχήμα 4.62) καθώς και την μεταβολή της παραμέτρου Z ανά μήνα. Οι τιμές που λαμβάνει η Z είναι αρνητικές ενώ έχουμε απότομη αύξηση την χρονική περίοδο 2003,4 η οποία και συνεχίζεται μέχρι το 2003,6 όπου και λαμβάνει η Z την μέγιστη τιμή της, $Z_{\max} = - 0.1$

General Parameters!

EQs in catalog:

Plot Big Events with:

Bin Length in days:

Beginning year:

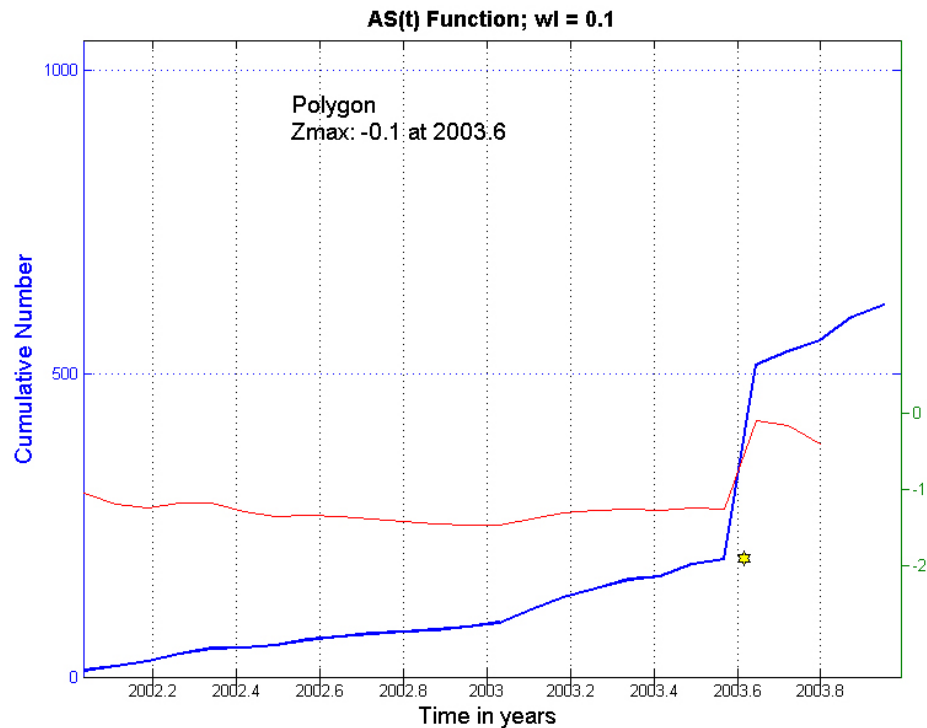
Ending year:

Minimum Magnitude:

Maximum Magnitude:

Min Depth: **Max Depth:**

Σχήμα 4.61: Παράμετροι κατάλογου περιόδου 2002-2003.



Σχήμα 4.62: Με μπλε χρώμα είναι η αθροιστική καμπύλη των σεισμών για την περίοδο 2002-2003. Με κόκκινο είναι η καμπύλη της μεταβολής της Z-value ανά μήνα

Στη συνέχεια συγκρίνουμε τα δύο αυτά έτη (σχήμα 4.63) και παίρνουμε τον χάρτη του σχήματος 4.64.

Please define the two periods

T1 =
2002.0337

T2 =
2003.0126

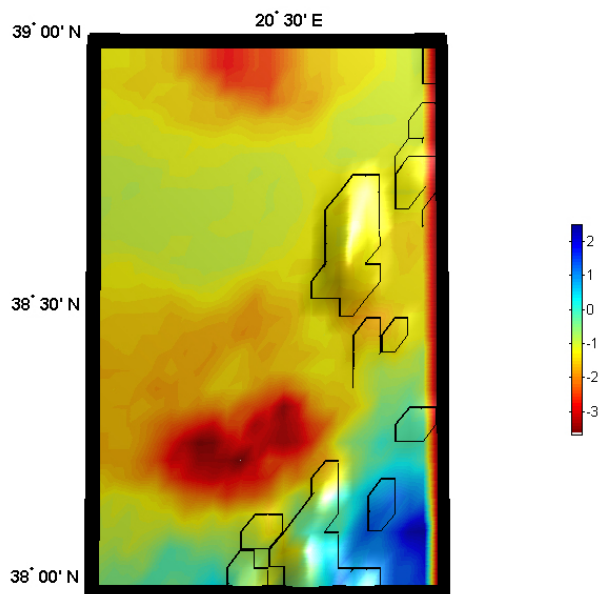
T3 =
2003.0226

T4 =
2003.9914

OK Cancel

Σχήμα 4.63: Χωρισμός καταλόγου σε 2 επιμέρους περιόδους διάρκειας ενός έτους με σκοπό την σύγκριση της μεταβολής της σεισμικότητας.

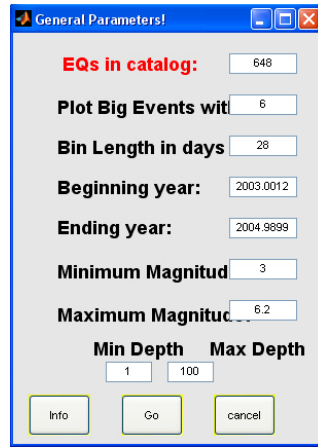
Στον χάρτη φαίνεται πως η Z αποκτά και θετικές τιμές (μείωση της σεισμικότητας) ενώ όπως ήταν αναμενόμενο η περιοχή βόρεια της Κεφαλονιάς παρουσιάζει έντονη δραστηριότητα (κόκκινο χρώμα). Οι υπόλοιπες περιοχές μπορούμε να πούμε πως κυμαίνονται στα ίδια επίπεδα αφού η Z πλησιάζει το 0.



Σχήμα 4.64: Χάρτης σύγκρισης σεισμικότητας 2002-2003. Το μπλε χρώμα συμβολίζει αύξηση της Z άρα μείωση της σεισμικότητας. Το κόκκινο χρώμα συμβολίζει μείωση της Z άρα αύξηση της σεισμικότητας.

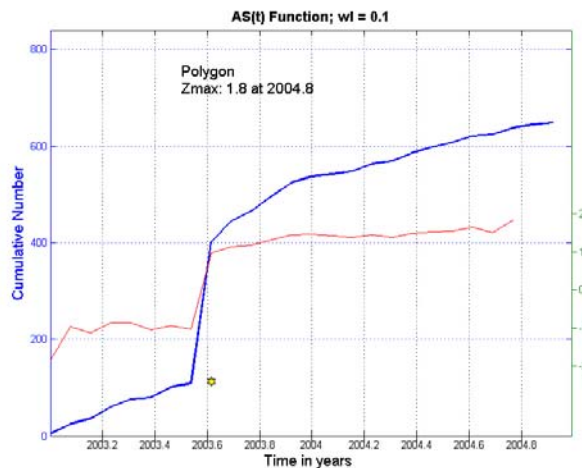


Την περίοδο 2003-2004 έγιναν 648 σεισμοί με μέγεθος $M_{\min}=3.0$ (σχήμα 4.65).



Σχήμα 4.65: Παράμετροι κατάλογου περιόδου 2003-2004.

Στο σχήμα 4.66 έχουμε την αθροιστική καμπύλη (μπλε γραμμή) και την μεταβολή της παραμέτρου Z ανά μήνα (ροζ γραμμή). Παρατηρούμε ότι η τιμή της Z παίρνει τιμές από -2 έως 2 σχεδόν. Οι αρνητικές τιμές είναι συγκεντρωμένες μέχρι το 2003,6 ενώ μετά από αυτή τη χρονική στιγμή η τιμή της Z αυξάνεται απότομα και παραμένει κοντά στο 1 μέχρι το 2004,6 όπου αυξάνεται ξανά απότομα για να πάρει την μέγιστη τιμή της το 2004,8, $Z_{\max}=1.8$. Αυτό μας δείχνει πως κατά το έτος 2004 η περιοχή γενικά ήταν ήρεμη σεισμικά αλλά και δεν υπήρχαν μεμονωμένες εξάρσεις ή ησυχίες.



Σχήμα 4.66: Με μπλε χρώμα είναι η αθροιστική καμπύλη των σεισμών για την περίοδο 2003-2004. Με κόκκινο είναι η καμπύλη της μεταβολής της Z -value ανά μήνα.

Στη συνέχεια συγκρίνουμε τα δύο έτη (σχήμα 4.67) και παίρνουμε τον χάρτη του σχήματος 4.68.

Please define the two periods

T1 = 2003.0012

T2 = 2003.9955

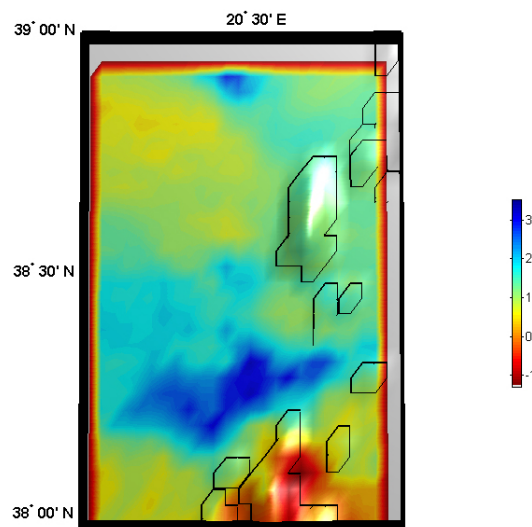
T3 = 2004.0055

T4 = 2004.9899

OK Cancel

Σχήμα 4.68: Χωρισμός καταλόγου σε 2 επιμέρους περιόδους διάρκειας ενός έτους με σκοπό την σύγκριση της μεταβολής της σεισμικότητας.

Χωρικά οι θετικές τιμές της Z (μείωση σεισμικότητας) αφορούν την περιοχή του νησιού της Λευκάδας καθώς και την περιοχή βόρεια της Κεφαλονιάς όπου μέχρι πρότινος παρουσίαζε έντονη σεισμικότητα. Επίσης με έντονο κόκκινο χρώμα παρουσιάζεται η περιοχή νότια του νησιού της Κεφαλονιάς όπου κατά το έτος 2003 δεν παρουσιάζει ιδιαίτερη σεισμική δραστηριότητα. Τέλος οι τιμές της Z είναι παρόμοιες με τις τιμές της σύγκρισης ανά μήνα της περιόδου 2003-2004.



Σχήμα 4.68 : Χάρτης σύγκρισης σεισμικότητας 2003-2004.
Το μπλε χρώμα συμβολίζει αύξηση της Z άρα μείωση της σεισμικότητας.
Το κόκκινο χρώμα συμβολίζει μείωση της Z άρα αύξηση της σεισμικότητας.



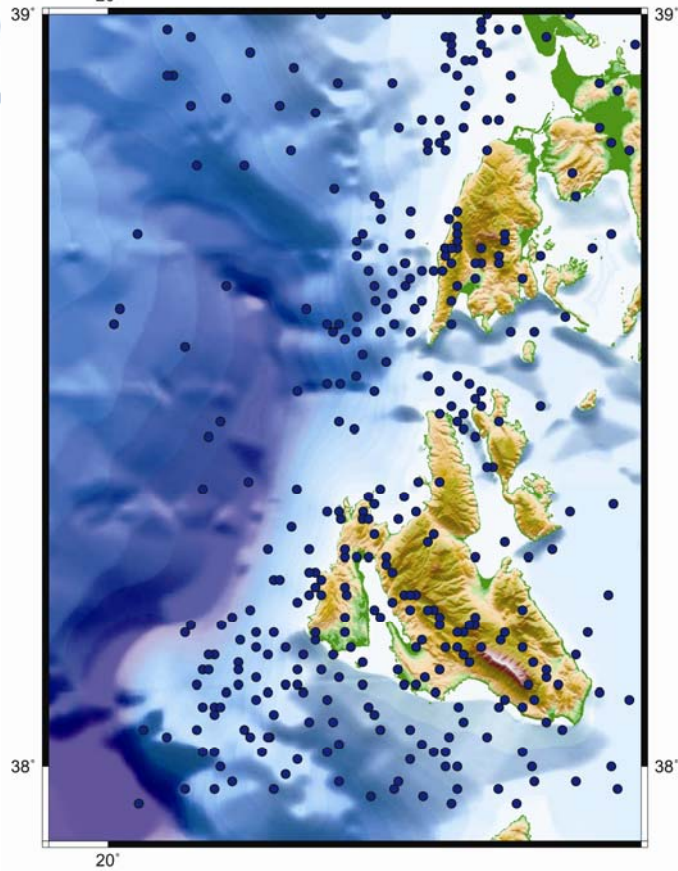
Τέλος, θα παρουσιαστεί η μελέτη της περιόδου 2004-2006 για να διαπιστωθεί αν η περιοχή απέκτησε ξανά την «φυσιολογική» της σεισμικότητα. Κατά την περίοδο αυτή είχαμε 359 σεισμούς με ελάχιστο μέγεθος $M_{\min}=3.0$ και μέγιστο $M_{\max}=5.1$ (σχήμα 4.69).

EQs in catalog:	359
Plot Big Events with	4.9
Bin Length in days	28
Beginning year:	2004.0004
Ending year:	2006.9982
Minimum Magnitud	3
Maximum Magnitud	5.1
Min Depth	1
Max Depth	58

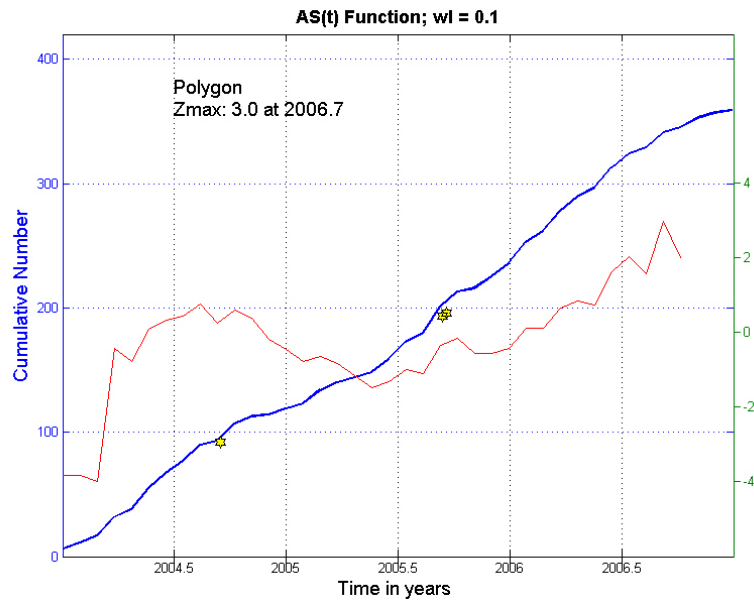
Σχήμα 4.69: Παράμετροι κατάλογου περιόδου 2004-2006.

Η χωρική κατανομή των επικέντρων φαίνεται στο σχήμα 4.70 όπου και παρατηρούμε ότι η περιοχή νότια της Κεφαλονιάς δραστηριοποιείται ξανά, όπως είχε αναφερθεί και παραπάνω. Επίσης έχουμε διάσπαρτα επίκεντρα σε όλη την περιοχή και φαίνεται πως αποκαθίσταται η σεισμικότητα.

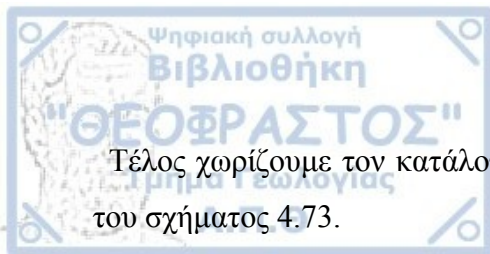
Στη συνέχεια παίρνουμε την αθροιστική καμπύλη (σχήμα 4.71) καθώς και την μεταβολή της τιμής της Z ανά μήνα για την περίοδο 2004-2006. Παρατηρούμε ότι η Z παίρνει τιμές από -4 έως και 4 ενώ παρουσιάζει και αρκετές αυξομειώσεις. Τη μέγιστη δε τιμή της την παίρνει προς το τέλος του 2006, $Z_{\max}=3.0$.



Σχήμα 5.70 : Χωρική κατανομή επικέντρων για την περίοδο 2004-2006.



Σχήμα 4.71: Με μπλε χρώμα είναι η αθροιστική καμπύλη των σεισμών για την περίοδο 2004-2006.
Με κόκκινο είναι η καμπύλη της μεταβολής της Z-value ανά μήνα

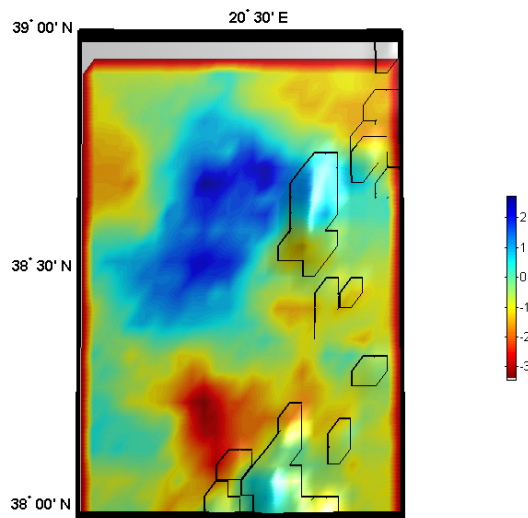


Τέλος χωρίζουμε τον κατάλογο σε 2 περιόδους (σχήμα 4.72) και παίρνουμε τον χάρτη του σχήματος 4.73.

Period	Start Date
T1	2004.0004
T2	2005.4993
T3	2005.5093
T4	2006.9982

Σχήμα 4.72: Χωρισμός καταλόγου σε 2 επιμέρους περιόδους διάρκειας 1,5 ετών με σκοπό την σύγκριση της μεταβολής της σεισμικότητας.

Εδώ παρατηρούμε (σχήμα 4.73) ότι η περιοχή που περιλαμβάνει το νησί της Λευκάδας δεν παρουσιάζει έντονη σεισμική δραστηριότητα 2 χρόνια μετά τον κύριο σεισμό της 14^{ης} Αυγούστου 2003. Επίσης η σεισμικότητα συγκεντρώνεται στην περιοχή της Κεφαλονιάς. Τέλος, οι τιμές της Z είναι παρόμοιες με τις τιμές που υπολογίστηκαν πριν ανά μήνα.



Σχήμα 4.73 : Χάρτης σύγκρισης σεισμικότητας 2004-2006.
Το μπλε χρώμα συμβολίζει αύξηση της Z άρα μείωση της σεισμικότητας.
Το κόκκινο χρώμα συμβολίζει μείωση της Z άρα αύξηση της σεισμικότητας.



Συμπερασματικά θα λέγαμε πως οι τιμές της Z τόσο για τον πρώτο κατάλογο όσο και για τον δεύτερο δεν παρουσίασαν κάποια κανονικότητα. Μάλιστα σε μια συγκεκριμένη περίπτωση (περίοδος 200-2002) η μηνιαία μεταβολή της σεισμικότητας στον ένα κατάλογο (100km από το επίκεντρο) έδινε μόνο αρνητικές τιμές ενώ στον άλλο κατάλογο μόνο θετικές τιμές. Επίσης πολλές φορές δεν συμβαδίζουν οι τιμές της Z για συγκεκριμένες χρονικές περιόδους αλλά διαφορετικά συγκρίσιμα διαστήματα. Παρ' όλα αυτά, χωρικά η μεταβολή της Z επαληθεύεται και από τους χάρτες κατανομής επικέντρων.

Όσον αφορά την σεισμική αναστροφή παρατηρήσαμε πως καθ' όλο το 2003 η περιοχή νότια της Κεφαλονιάς (για τον δεύτερο εξεταζόμενο κατάλογο) δεν παρουσίαζε την ίδια δραστηριότητα με τα προηγούμενα έτη. Από την άλλη όμως η περιοχή βόρεια του νησιού ήταν σεισμικά ενεργή. Κατά το 2004 όμως επανήλθε η σεισμικότητα στην περιοχή δραστηριοποιώντας ξανά το νότιο τμήμα του νησιού και έχοντας λιγότερα επίκεντρα στο βόρειο.

Υπογραμμίζουμε ότι η περιοχή είναι αρκετά μικρή για να μπορέσει να γίνει καλύτερη μελέτη της σεισμικής αναστροφής. Ο πρώτος κατάλογος που αφορά μεγέθη $M \geq 4.0$ είναι αρκετά μικρός αλλά δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα. Ο δε δεύτερος κατάλογος έχει σαφώς περισσότερα δεδομένα αλλά υπάρχει περίπτωση σφάλματος διότι δεν αφαιρέθηκε η μετασεισμική ακολουθία του σεισμού της 14^{ης} Αυγούστου 2003. Τέλος, σε αντίστοιχες εργασίες που έχουν γίνει διεθνώς τα δεδομένα είναι σαφώς περισσότερα καθώς και οι περιοχές μελέτης ευρύτερες.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο : Μελέτη μεταβολής σεισμικότητας πριν και μετά την γένεση του σεισμού του Αιγίου M=6.4 (15/06/1995)

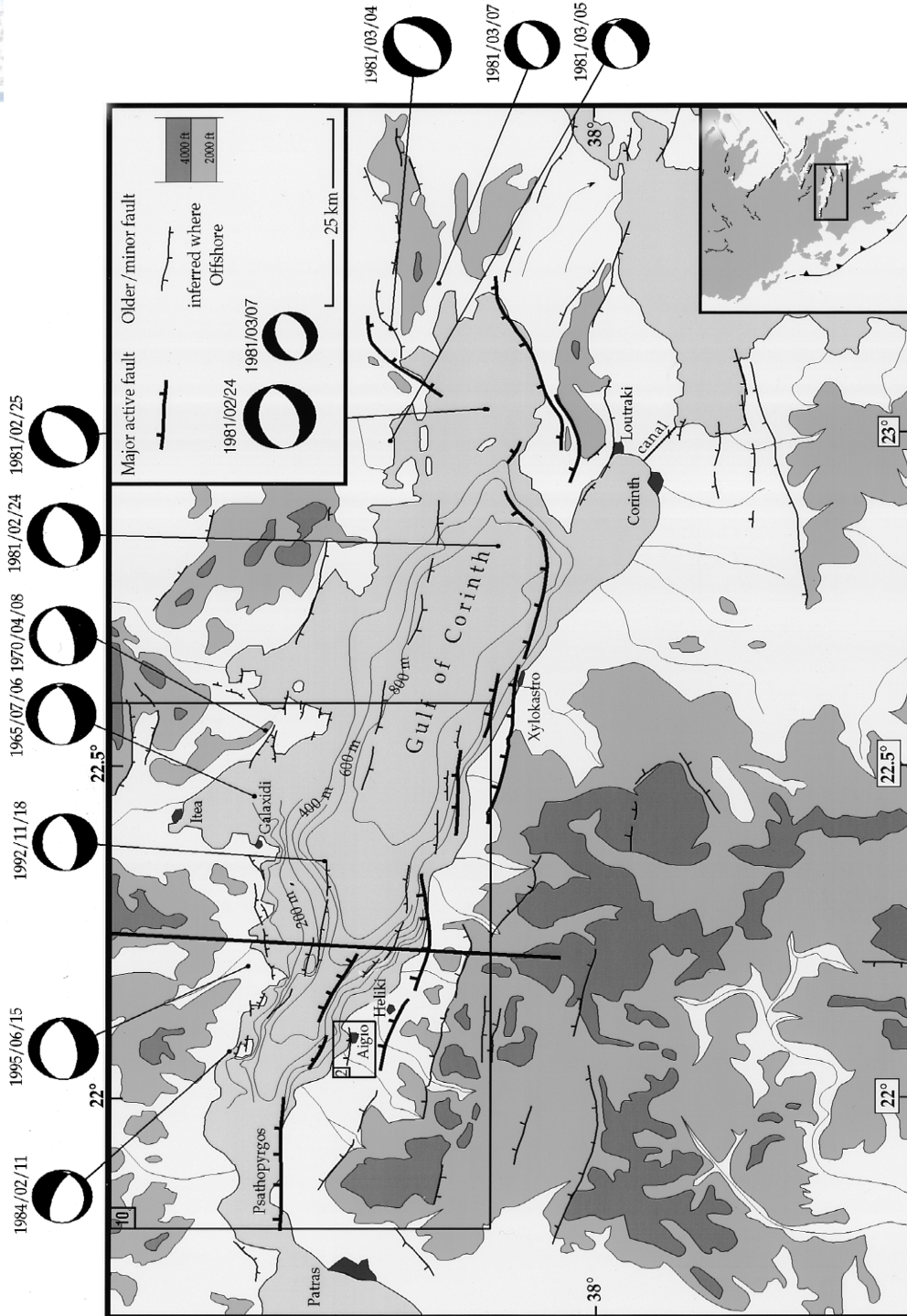
5.1 Εισαγωγή

Στις 15 Ιουνίου 1995 σημειώθηκε ισχυρή δόνηση μεγέθους M=6.2 στην περιοχή του Αιγίου. Το επίκεντρο υπολογίστηκε 12 χλμ BBA της πόλης του Αιγίου (38.37⁰B , 22.15⁰A) στην βόρεια πλευρά του Κορινθιακού κόλπου. Η μελέτη της σεισμικότητας στην περιοχή πριν και μετά τον κύριο σεισμό έγινε με σκοπό να βρεθεί κάποια αναστροφή της σεισμικότητας σε ακτίνα περίπου 100χλμ από το επίκεντρο του σεισμού της 15^{ης} Ιουνίου. Για τον σκοπό αυτό μελετήθηκε ο κατάλογος σεισμών της περιοχής για την περίοδο 1990-1998.

5.2 Τεκτονική

Η επέκταση της λιθόσφαιρας του Αιγαίου και των γύρω ηπειρωτικών περιοχών κατά την διεύθυνση βορρά- νότου που προτάθηκε για πρώτη φορά από τον McKenzie (1970) αφορά τη νότια Βουλγαρία, τη βόρεια και κεντρική Ελλάδα, το ηφαιστειακό τόξο του νότιου Αιγαίου, τη νοτιοδυτική Τουρκία και την κεντρική δυτική Τουρκία.

Συγκεκριμένα η τάση εφελκυσμού που δρα κατά την διεύθυνση βορρά- νότου οδηγεί σε διάρρηξη κανονικών ρηγμάτων (σχ. 5.1) τα οποία έχουν διεύθυνση ανατολής- δύσης και κλίνουν προς τον βορρά ή προς το νότο. Το εφελκυστικό αυτό πεδίο οφείλεται στην ταχύτερη κίνηση προς το νότο του μπροστινού (νοτίου) τμήματος της μικροπλάκας του Αιγαίου σε σχέση με προς το πίσω (βόρειο) τμήμα αυτής της μικροπλάκας.



Σχήμα 5.1: Χάρτης με τα ρήγματα στον Κορινθιακό κόλπο και ισχυρών σεισμών από το 1965 και έπειτα. (Armijo et al. (1996)), Baker et al. (1997), Taymaz(1990), Hatzfield et al. (1996), Bernard et al., (1997))

5.3 Μελέτη καταλόγου και υπολογισμός της z-value

Ο κατάλογος των σεισμών αφορά την περίοδο 1990-1998 και περικλείει τις περιοχές με συντεταγμένες 37.5° - 39.2° και 21° - 23.5° . Ο κατάλογος χωρίστηκε αρχικά σε 3 επιμέρους τμήματα. Το πρώτο αφορά την περίοδο πριν γένεση του κύριου σεισμού της 15^{ης} Ιουνίου 1995. Το δεύτερο αφορά όλο το έτος 1995 όπου και χωρίστηκε εκ νέου για να μελετηθεί και να συγκριθεί η σεισμικότητα ανά εξάμηνο αλλά και ανά τρίμηνο και τέλος το τρίτο μέρος αφορά την περίοδο μετά το τέλος του έτους 1995 και εκτείνεται μέχρι το 1998. Η κάθε αυτή ενότητα χαρτογραφήθηκε και μελετήθηκε ως προς την μεταβολή της παραμέτρου Z.

5.3.1 1990-1998

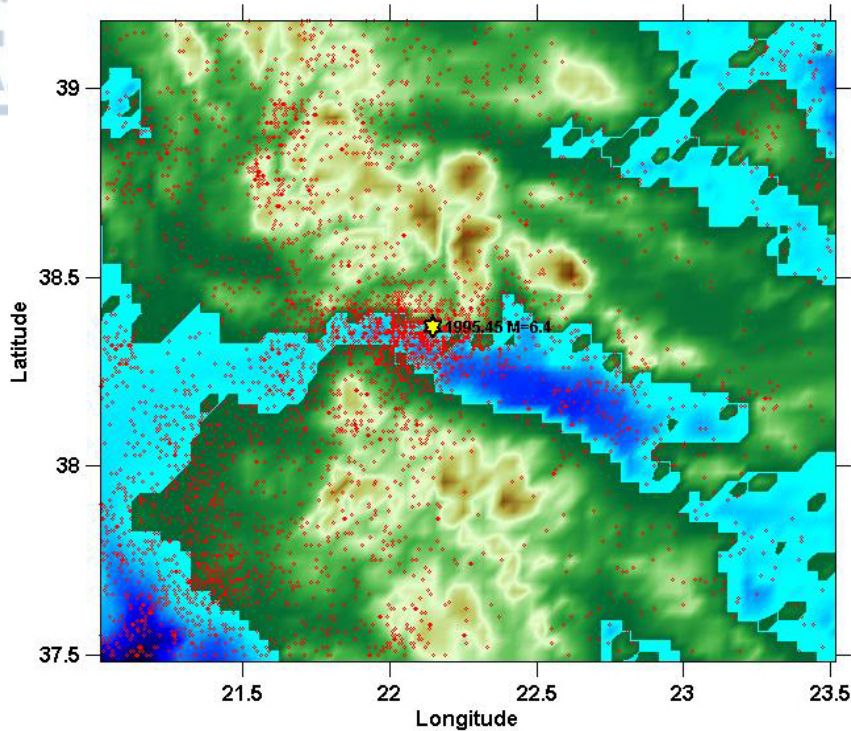
Ο κατάλογος της περιόδου 1990-1998 περιλαμβάνει 3896 σεισμούς (σχήμα 5.2 & 5.3) με ελάχιστο μέγεθος $M_{\min}=3.0$ και μέγιστο $M_{\max}=6.4$.

The screenshot shows a dialog box titled "General Parameters!". It contains the following fields and values:

- EQs in catalog:** 3896
- Plot Big Events with:** 6.2
- Bin Length in days:** 28
- Beginning year:** 1990.0066
- Ending year:** 1998.9966
- Minimum Magnitude:** 3
- Maximum Magnitude:** 6.4
- Min Depth:** 0
- Max Depth:** 172

At the bottom of the dialog, there are three buttons: "Info", "Go", and "cancel".

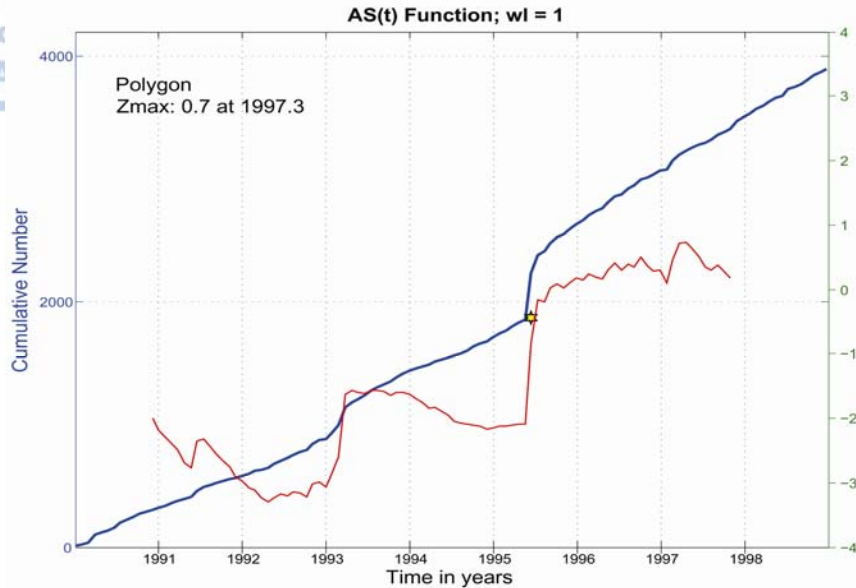
Σχήμα 5.2: Παράμετροι καταλόγου περιόδου 1990-1998 (zmap)



Σχήμα 5.3: Χάρτης κατανομής επικέντρων για την περίοδο 1990-1998 (Zmap)

Με την βοήθεια του προγράμματος z-map δημιουργούμε την καμπύλη αθροιστικής συχνότητας των σεισμών και επίσης υπολογίζουμε την παράμετρο Z (σχήμα 5.4). Η παράμετρος αυτή υπολογίζεται με την συνάρτηση $AS(t)$ και με βήμα 1. Δηλαδή υπολογίζουμε και συγκρίνουμε την σεισμικότητα ανά έτος για την περίοδο 1990-1998. Οι αρνητικές τιμές της Z-value υποδηλώνουν αύξηση της σεισμικότητας της περιοχής για την εκάστοτε περίοδο μελέτης ενώ οι θετικές τιμές φανερώνουν μείωση της σεισμικότητας και κατ' επέκταση «ησυχία».

Παρατηρούμε 2 απότομες μεταβολές στην τιμή της Z τις περιόδους πριν και μετά τον σεισμό του 1995. Έτσι το 1993 με 1994 έχουμε αύξηση της τιμής της Z άρα μείωση της σεισμικότητας πράγμα που επαναλαμβάνεται και μετά το πρώτο μισό του 1995 και συνεχίζει μέχρι το πρώτο τετράμηνο 1997 όπου και λαμβάνει την μέγιστη τιμή της.



Σχήμα 5.4: Με μπλε χρώμα είναι η αθροιστική καμπύλη των σεισμών για την περίοδο 1990-1998. Με κόκκινο είναι η καμπύλη της μεταβολής της Z-value ανά έτος.

Σε πρώτη φάση ενδιαφερόμαστε να ανιχνεύσουμε τα επίπεδα στα οποία κινείται η παράμετρος Z για να μπορέσουμε να την εξετάσουμε ενδελεχώς παρακάτω. Έτσι όπως φαίνεται και από το Σχήμα 5.4 οι τιμές για την περίοδο 1990-1998 είναι ανάμεσα στο -3 και 1 περίπου. Το ίδιο εύρος τιμών βρίσκουμε και αν χωρίσουμε τον κατάλογο στην μέση και συγκρίνουμε τις δύο περιόδους των 4,5 ετών που προκύπτουν (Σχ.5.5)

Σχήμα 5.5: Χωρισμός καταλόγου σε 2 επιμέρους περιόδους διάρκειας 4,5 ετών με σκοπό την σύγκριση της μεταβολής της σεισμικότητας.

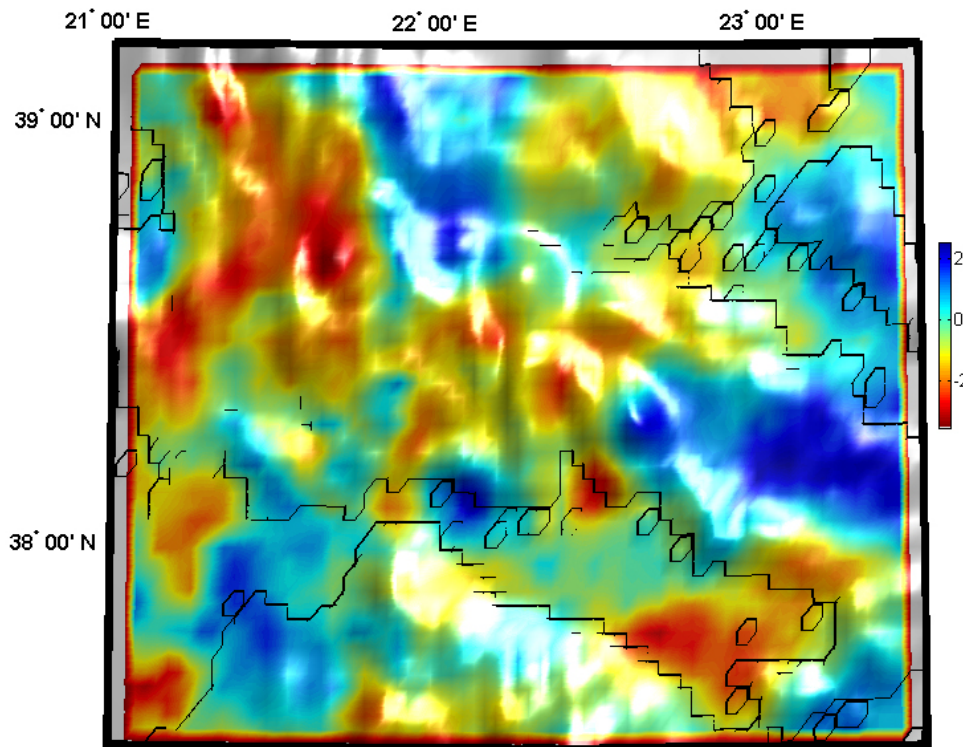
Στο σχήμα 5.6 φαίνονται οι παράμετροι που ορίσαμε για τον υπολογισμό και την σύγκριση της Z . Στην θέση «number of events» δεν βάζουμε τον αριθμό των συνολικών γεγονότων του καταλόγου αλλά το μέγιστο των γεγονότων που θέλουμε. Έτσι το πρόγραμμα χαράσσει νοητούς κύκλους με μέγιστο αριθμό γεγονότων 25 και με ανάλυση 0.05x0.05 και συγκρίνει τις επιμέρους περιοχές. Η διαδικασία αυτή ακολουθήθηκε για κάθε επιμέρους τμήμα του συγκεκριμένου καταλόγου με ακριβώς ίδιες παραμέτρους.

Σχήμα 5.6: Παράμετροι υπολογισμού της z -value για την περίοδο 1990-1998.

Έπειτα επιλέγουμε πάνω στον χάρτη μας το πολύγωνο που θέλουμε να γίνει η σύγκριση (37.5°- 39.2° και 21°- 23.5°) και έπειτα υπολογίζει η Z σε ένα χάρτη με έγχρωμη κλίμακα (Σχ. 5.7). Η κλίμακα μας δείχνει χρωματικά την μεταβολή της z -value. Το μπλε χρώμα συμβολίζει την αύξηση της Z και την μείωση της σεισμικότητας ενώ το κόκκινο χρώμα συμβολίζει την μείωση της Z και την αύξηση της σεισμικότητας.

Μια πρώτη εκτίμηση, κυρίως για τις περιοχές αύξησης της σεισμικότητας (κόκκινες), μας δείχνει πως υπάρχουν κάποιες μικρές εστίες οι οποίες στο δεύτερο μισό της περιόδου 1990-1998 παρουσιάζουν εντονότερη σεισμική δραστηριότητα. Στα επόμενα υποκεφάλαια θα αναλυθούν λεπτομερώς οι συγκεκριμένες περιοχές.

Τέλος οι τιμές που παίρνει η Z συμπίπτουν με τις τιμές του σχήματος 5.4 όπου η σύγκριση έγινε ανά χρόνο.



Σχήμα 5.7: Χάρτης σύγκρισης σεισμικότητας των περιόδων 1990-1994,5 και 1994,5-1998. Το μπλε χρώμα συμβολίζει αύξηση της Z άρα μείωση της σεισμικότητας. Το κόκκινο χρώμα συμβολίζει μείωση της Z άρα αύξηση της σεισμικότητας.

5.3.2 1992-1994

Η πρώτη περίοδος στην οποία χωρίζουμε τον κατάλογο είναι 3 χρόνια πριν τον σεισμό της 15^{ης} Ιουνίου 1995. Έτσι χρησιμοποιούμε δεδομένα από 01/01/1992 έως και 31/12/1994. Τα δεδομένα είναι 1113 (Σχ.5.8) με ελάχιστο μέγεθος $M_{\min}=3.0$ και μέγιστο $M_{\max}=5.7$. Στη συνέχεια χαρτογραφούμε τα επίκεντρα των σεισμών για να ελέγξουμε την χωρική τους κατανομή (Σχ. 5.9).

General Parameters!

EQs in catalog:

Plot Big Events with:

Bin Length in days:

Beginning year:

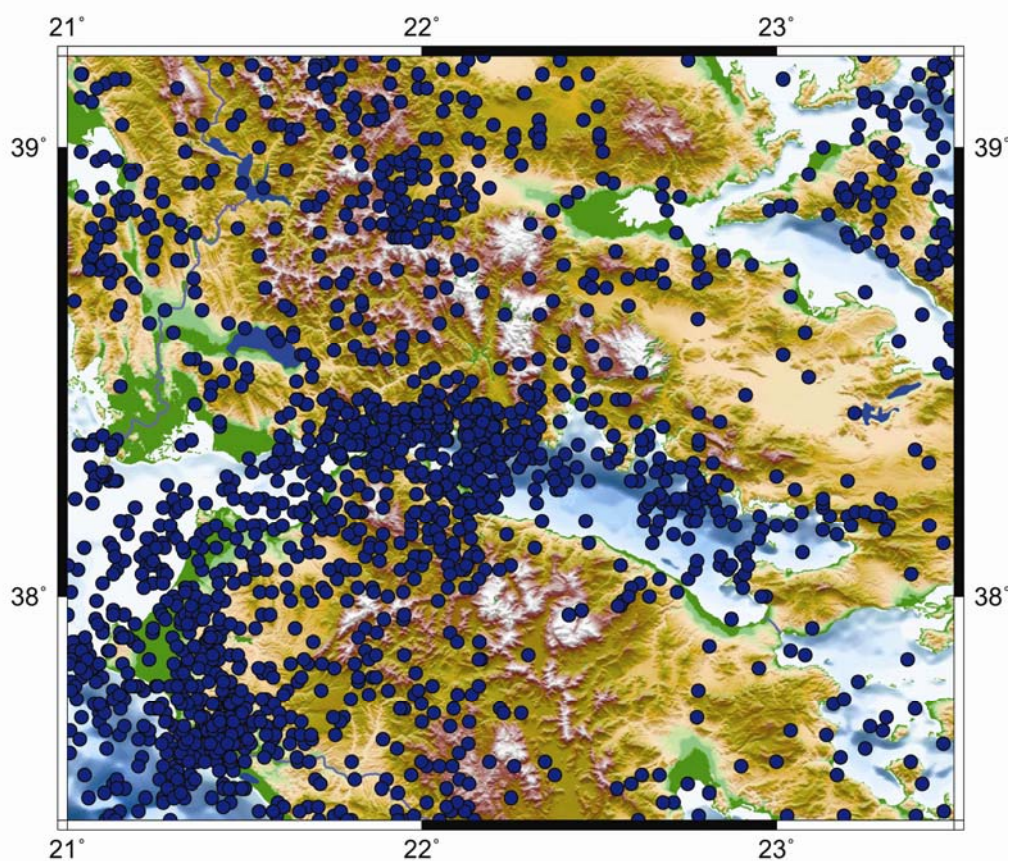
Ending year:

Minimum Magnitude:

Maximum Magnitude:

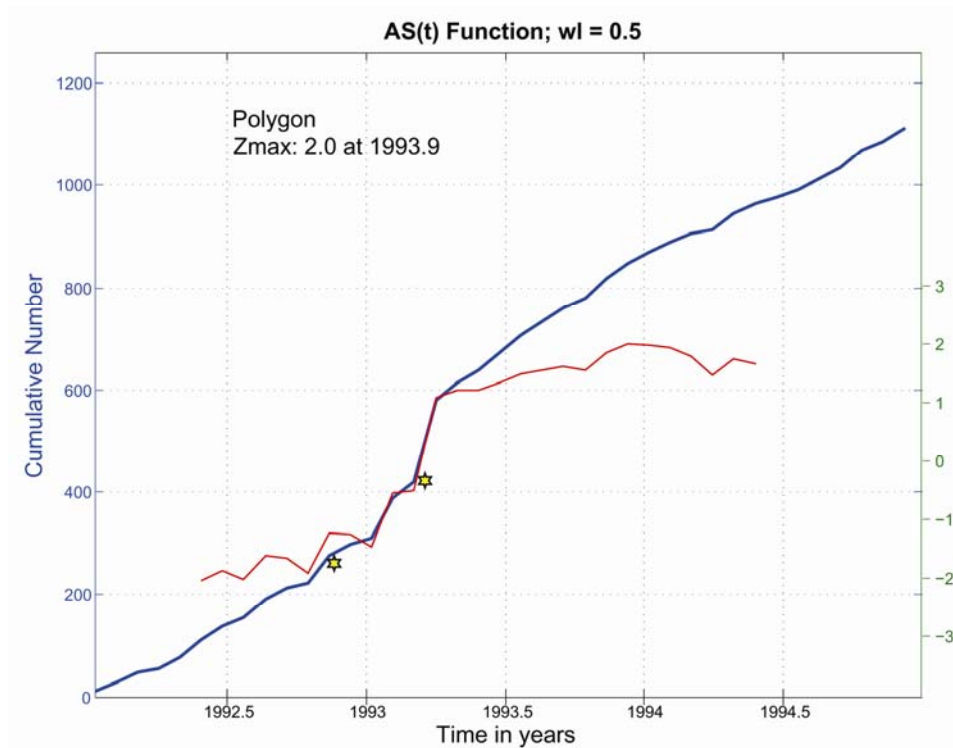
Min Depth **Max Depth**

Σχήμα 5.8: Παράμετροι κατάλογου περιόδου 1992-1994.



Σχήμα 5.9 : Χωρική κατανομή επικέντρων για την περίοδο 1992-1994.

Στην συνέχεια υπολογίζουμε το άθροισμα των σεισμών και την παράμετρο Z με την ίδια μέθοδο όπως και προηγουμένως (Σχ. 5.10). Η μοναδική διαφορά είναι πως δεν συγκρίνουμε ανά έτος αλλά η σύγκριση γίνεται ανά εξάμηνο λόγω του μικρότερου χρονικού εύρους (3 έτη).



Σχήμα 5.10: Με μπλε χρώμα είναι η αθροιστική καμπύλη των σεισμών για την περίοδο 1992-1994. Με κόκκινο είναι η καμπύλη της μεταβολής της Z -value ανά εξάμηνο.

Εδώ φαίνεται καθαρότερα η μείωση που είχε σημειωθεί προηγουμένως και αφορούσε την περίοδο 1993-1994. Στο σχήμα 5.10 φαίνεται μια απότομη αύξηση της τιμής της Z η οποία ξεκινά περίπου στο πρώτο τρίμηνο του 1993 και φτάνει στο μέγιστο της στο τέλος του ίδιου έτους. Η αύξηση αυτή της τιμής της Z συνεπάγεται μείωση της σεισμικότητας στην περιοχή.

Για να μπορέσουμε να διακρίνουμε και χωρικά ποιες περιοχές παρουσιάζουν αυτήν την μείωση, χωρίζουμε τον κατάλογο στην μέση εκ νέου και συγκρίνουμε τις δύο περιόδους που προκύπτουν (Σχ. 5.11).

Please define the two periods

T1 =
1992.021

T2 =
1993.5098

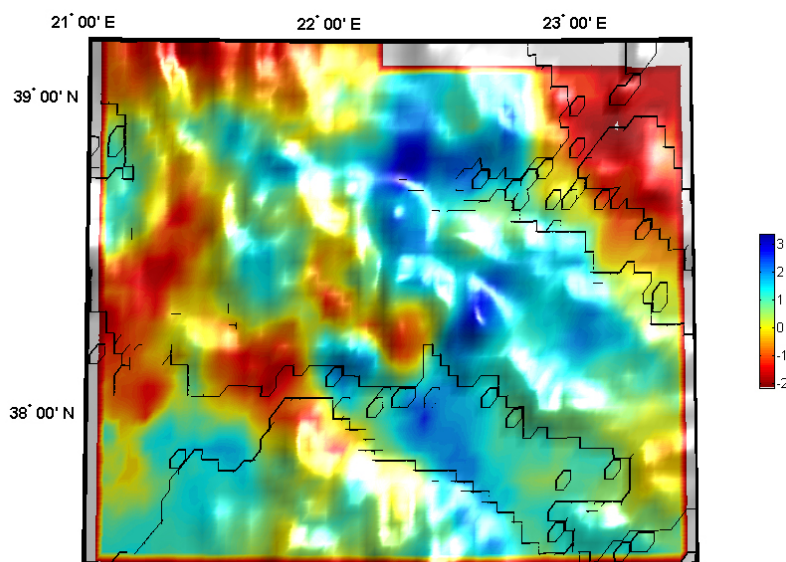
T3 =
1993.5198

T4 =
1994.9986

OK Cancel

Σχήμα 5.11: Χωρισμός καταλόγου σε 2 επιμέρους περιόδους διάρκειας 1,5 ετών με σκοπό την σύγκριση της μεταβολής της σεισμικότητας.

Στο σχήμα 5.12 φαίνεται η σύγκριση των δύο περιόδων. Η χρωματική κλίμακα ερμηνεύεται όπως και προηγουμένως. Βλέπουμε γενικά μια ελάττωση της σεισμικότητας μετά το πρώτο μισό του 1993 για την πλειονότητα των περιοχών του χάρτη. Επιπλέον η περιοχή κοντά στο σημείο 38° Β με την έντονη σεισμικότητα (κόκκινο χρώμα) θα μελετηθεί παρακάτω εκτενώς καθώς παρουσιάζει μια ενδιαφέρουσα μεταβολή καθώς επίσης και η περιοχή με μπλε χρώμα (μείωση σεισμικότητας) 23° Α, 38° Β. Τέλος οι τιμές της παραμέτρου Z δεν διαφέρουν αρκετά από τις τιμές που υπολογίστηκαν στο σχήμα 5.10 (ανά εξάμηνο).



Σχήμα 5.12: Χάρτης σύγκρισης σεισμικότητας των περιόδων 1992-1993,5 και 1993,5-1998. Το μπλε χρώμα συμβολίζει αύξηση της Z άρα μείωση της σεισμικότητας. Το κόκκινο χρώμα συμβολίζει μείωση της Z άρα αύξηση της σεισμικότητας.



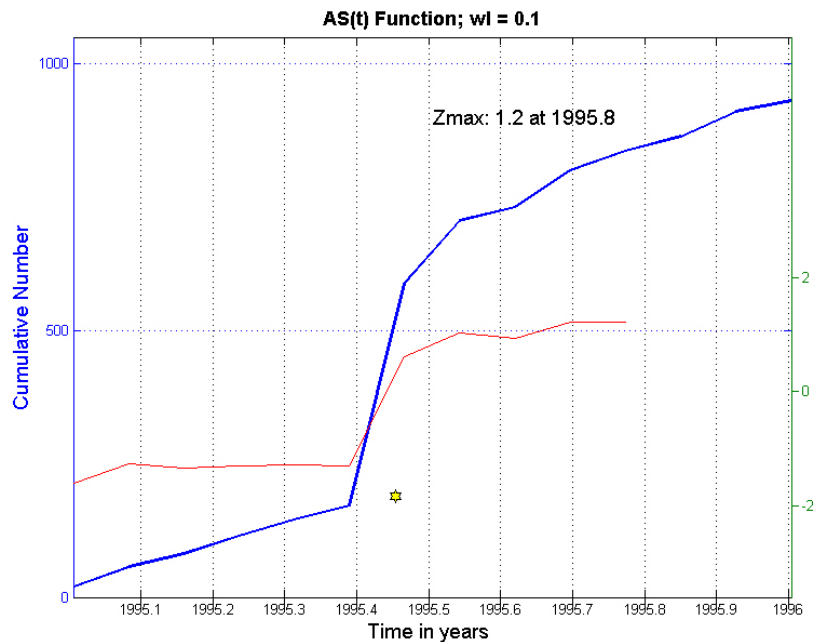
5.3.3 1995

Σε αυτό το σημείο θα εξετάσουμε αναλυτικά το έτος 1995 το οποίο παρακάτω θα χωρισθεί και θα μελετηθεί ανά εξάμηνο αλλά και ανά τρίμηνο. Την συγκεκριμένη χρονική περίοδο (01/01/1995-31/12/1995) είχαμε 931 σεισμούς (Σχ.5.13) με ελάχιστο μέγεθος $M_{\min}=3.0$ και μέγιστο $M_{\max}=6.4$, που είναι ο κύριος σεισμός της 15^{ης} Ιουνίου.

EQs in catalog:	931
Plot Big Events with	6.2
Bin Length in days	28
Beginning year:	1995.0064
Ending year:	1996.0039
Minimum Magnitude	3
Maximum Magnitude	6.4
Min Depth	0
Max Depth	161

Σχήμα 5.13: Παράμετροι κατάλογου περιόδου 01/01/1995-31/12/1995

Στη συνέχεια παίρνουμε την αθροιστική καμπύλη και υπολογίζουμε την μεταβολή της Z με βήμα 0,1 ,δηλαδή ανά μήνα για όλο το έτος 1995 (Σχ.5.14). Παρατηρούμε πως η Z παίρνει τιμές περίπου από 2 έως και -2 , δηλαδή δεν αποκλίνει και πάλι από τις προηγούμενες τιμές που υπολογίσαμε συγκρίνοντας ανά έτος και ανά εξάμηνο. Επίσης παρατηρούμε πως πριν την γένεση του κύριου σεισμού η τιμή της Z αυξάνει απότομα και αυτή η αύξηση συνεχίζεται σε όλο το δεύτερο εξάμηνο του 1995 όπου και το τελευταίο τρίμηνο του έτους λαμβάνει τη μέγιστη τιμή της.



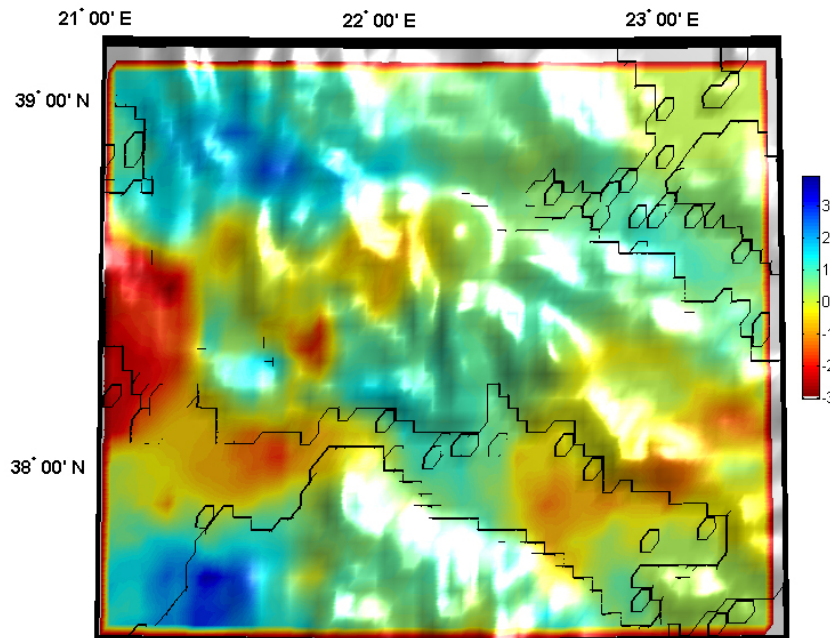
Σχήμα 5.14: Με μπλε χρώμα είναι η αθροιστική καμπύλη των σεισμών για το έτος 1995. Με κόκκινο είναι η καμπύλη της μεταβολής της Z-value ανά μήνα

Το σχήμα 5.15 δείχνει τις επιμέρους περιόδους που χωρίζουμε τον κατάλογο για να ελέγξουμε την μεταβολή της Z για το έτος 1995 ανά εξάμηνο αυτήν την φορά. Η διαδικασία είναι ίδια με παραπάνω και τα αποτελέσματα φαίνονται στο σχήμα 5.16 με χρωματική κλίμακα.

The dialog box 'Please define the two periods' contains four input fields for time periods: T1 = 1995.0064, T2 = 1995.5052, T3 = 1995.5152, and T4 = 1996.0039. At the bottom right, there are 'OK' and 'Cancel' buttons.

Σχήμα 5.15: Χωρισμός καταλόγου σε 2 επιμέρους περιόδους διάρκειας 6 μηνών με σκοπό την σύγκριση της μεταβολής της σεισμικότητας.

Αυτό που σημειώνουμε στο σχήμα 5.16 είναι η έντονη μεταβολή που παρατηρείται στο σημείο 38° Β, όπως είχε αναφερθεί προηγουμένως, και στο οποίο έχουμε μια έντονη αύξηση της σεισμικότητας κατά το δεύτερο εξάμηνο του 1995, δηλαδή μετά την γένεση του σεισμού της 15^{ης} Ιούνη. Μικρομεταβολές υπάρχουν και σε άλλα σημεία αλλά εκτενέστερα θα αναλυθούν παρακάτω όπου και θα αναλυθεί ο κατάλογος ανά εξάμηνο του 1995.



Σχήμα 5.16: Χάρτης σύγκρισης σεισμικότητας 1^{ου} και 2^{ου} εξαμήνου του 1995.
Το μπλε χρώμα συμβολίζει αύξηση της Z άρα μείωση της σεισμικότητας.
Το κόκκινο χρώμα συμβολίζει μείωση της Z άρα αύξηση της σεισμικότητας.

5.3.3.1 1^ο ΕΞΑΜΗΝΟ 1995 (01/01/1995-15/06/1995)

Το πρώτο εξάμηνο του 1995 έχουμε 179 σεισμούς (Σχ.5.17) με ελάχιστο $M_{\min}=3.0$ και μέγιστο $M_{\max}=6.4$. Η τιμή της Z δεν ήταν δυνατό να υπολογιστεί γιατί η χρονική περίοδος ήταν πολύ μικρή, όμως στην συνέχεια ο κατάλογος χωρίζεται ανά τρίμηνο και υπολογίζεται και συγκρίνεται η Z για τις περιόδους αυτές.

General Parameters!

EQs in catalog:

Plot Big Events with:

Bin Length in days:

Beginning year:

Ending year:

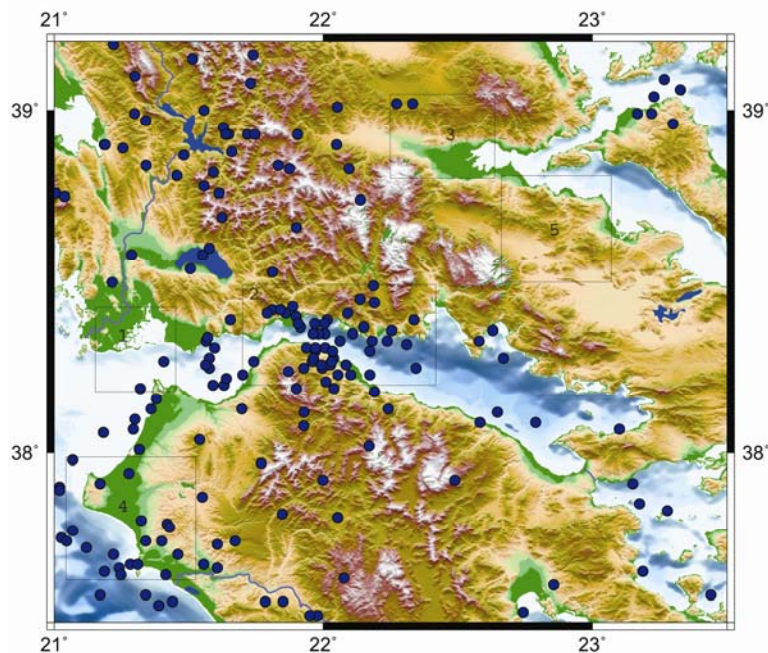
Minimum Magnitude:

Maximum Magnitude:

Min Depth **Max Depth**

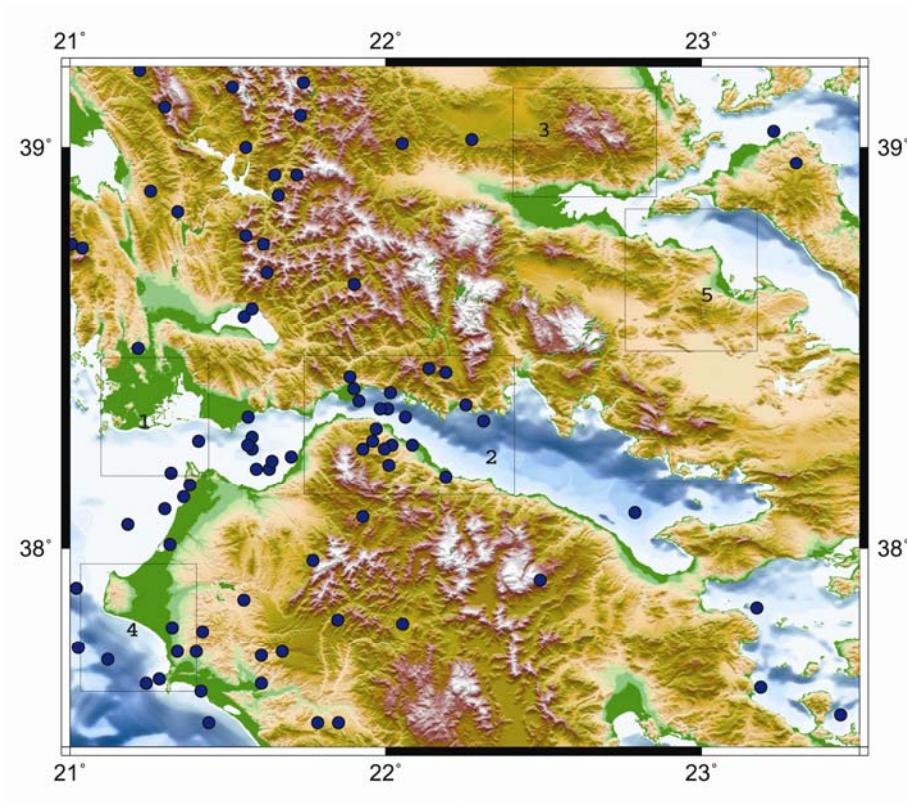
Σχήμα 5.17: Παράμετροι κατάλογου περιόδου 01/01/1995-15/06/1995

Χαρτογραφούμε τα επίκεντρα των σεισμών για όλο το πρώτο εξάμηνο (Σχ.5.18) καθώς και για το πρώτο και δεύτερο τρίμηνο (Σχ.5.19 & 5.20 αντίστοιχα). Σύμφωνα με τις πρώτες ενδείξεις χωρίζουμε την περιοχή σε 5 επιμέρους περιοχές όπου και θα εστιάσουμε για να δούμε τι μεταβολές θα έχουμε πριν και μετά τον κύριο σεισμό.

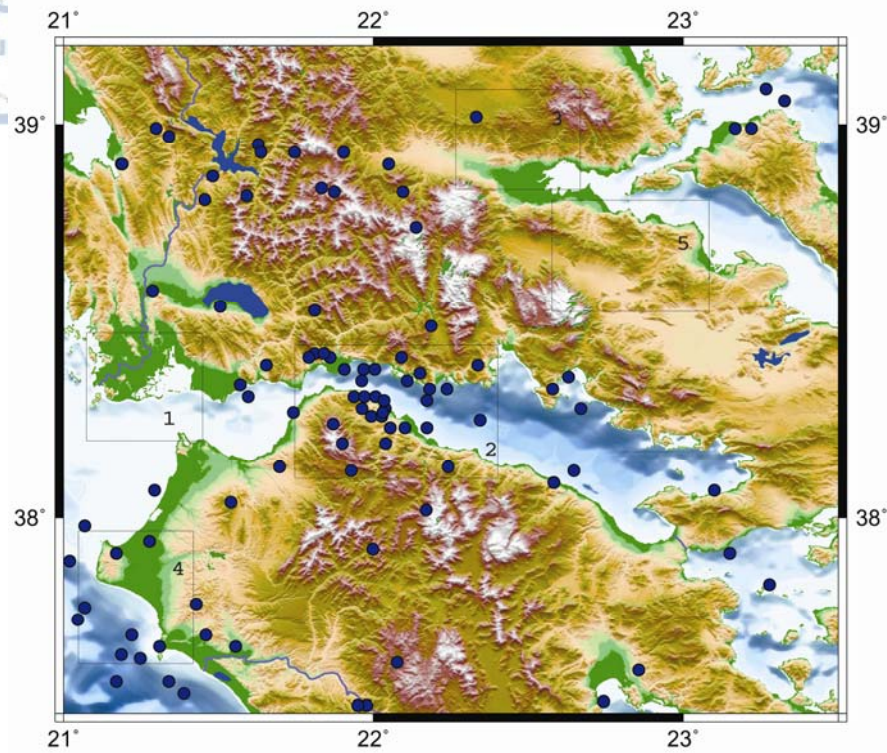


Σχήμα 5.18 : Χωρική κατανομή επικέντρων για την περίοδο 01/01/1995-15/06/1995

Η περιοχή (1) είναι η ίδια που πριν είχαμε σημειώσει πως το δεύτερο εξάμηνο παρουσιάζει έντονη σεισμική δραστηριότητα. Εδώ όμως παρατηρούμε πως και για τα 2 πρώτα τρίμηνα του 1995 (Σχ.5.19 & 5.20), δηλαδή ολόκληρο το πρώτο εξάμηνο) δεν γίνεται κάποιος σεισμός στην περιοχή αυτή. Η (2) αφορά την περιοχή γύρω από το επίκεντρο όπου και αναμένεται έντονη σεισμική δραστηριότητα κυρίως το 2^ο μισό του έτους λόγω και της μετασεισμικής ακολουθίας η οποία δεν αφαιρέθηκε από τον κατάλογο. Στην θέση (3) και (5) δεν βλέπουμε κάποια δραστηριότητα κατά το πρώτο μισό του έτους ούτε και στα επιμέρους τρίμηνα. Τέλος στην θέση (4) υπάρχει μια συγκέντρωση επικέντρων η οποία όμως θα παρατηρηθεί και έπειτα.



Σχήμα 5.19 : Χωρική κατανομή επικέντρων για την περίοδο 01/01/1995- 14/03/1995

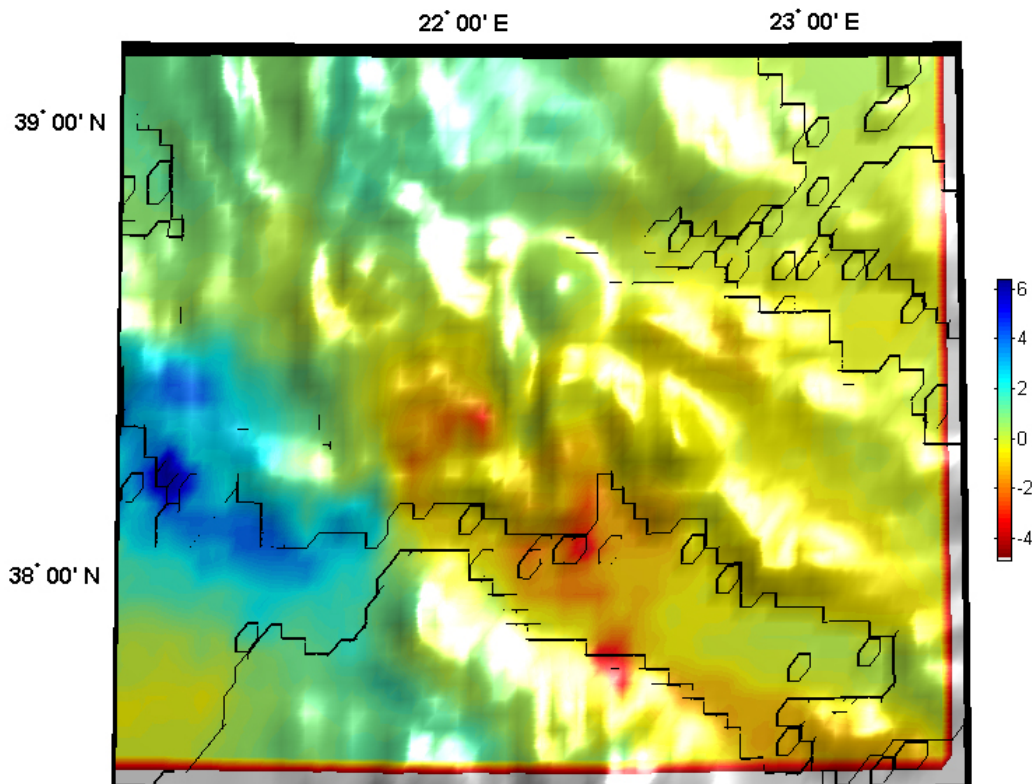


Σχήμα 5.20 : Χωρική κατανομή επικέντρων για την περίοδο 15/03/1995-15/06/1995.

Για να υπολογίσουμε την τιμή της Z χωρίζουμε τον κατάλογο σε δύο επιμέρους τρίμηνα (Σχ.5.21)

Σχήμα 5.21: Χωρισμός καταλόγου σε 2 επιμέρους περιόδους διάρκειας 3 μηνών με σκοπό την σύγκριση της μεταβολής της σεισμικότητας.

Ο χάρτης που προκύπτει (Σχ.5.22) αναπαριστά με χρωματική κλίμακα την μεταβολή της Z . Οι τιμές που παίρνει η Z διαφέρουν αρκετά από τις προηγούμενες. Βλέπουμε ότι κυμαίνονται από -4 έως και 6. Πιθανολογούμε πως από την στιγμή που τα σημεία που ορίσαμε (1),(3) και (5) παρουσιάζουν τις αναμενόμενες ησυχίες, η διαφορά στην τάξη μεγέθους ίσως να οφείλεται στα λιγότερα δεδομένα για την συγκεκριμένη χρονική περίοδο. Επιπλέον έχουμε μια αύξηση της σεισμικότητας στην περιοχή (2) γύρω από το επίκεντρο του σεισμού της 15^{ης} Ιουνίου, ο οποίος περιλαμβάνεται στον συγκεκριμένο κατάλογο.



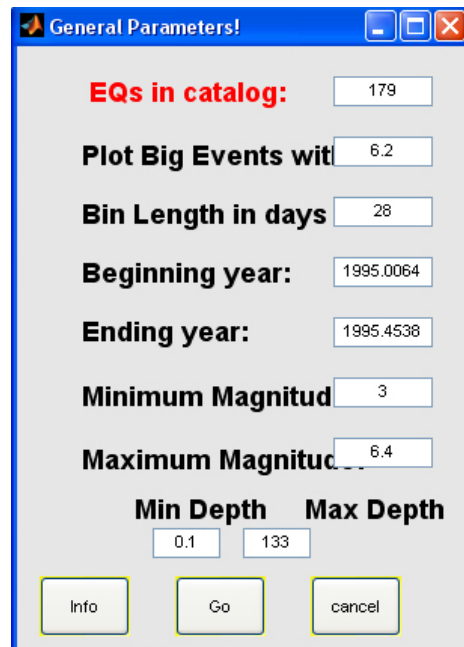
Σχήμα 5.22: Χάρτης σύγκρισης σεισμικότητας 1^{ου} εξαμήνου του 1995.

Το μπλε χρώμα συμβολίζει αύξηση της Z άρα μείωση της σεισμικότητας.

Το κόκκινο χρώμα συμβολίζει μείωση της Z άρα αύξηση της σεισμικότητας.

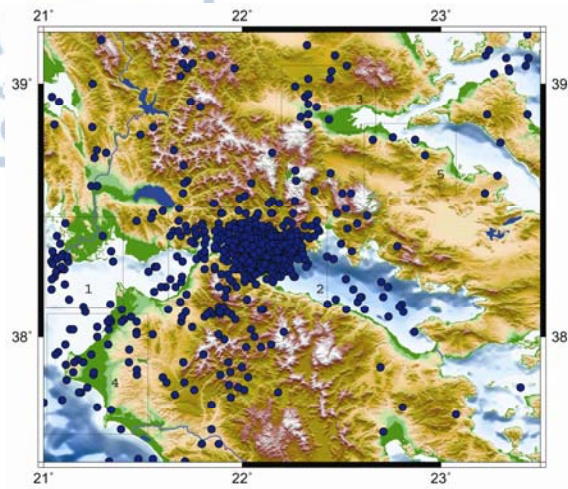
5.3.3.2 2^ο ΕΞΑΜΗΝΟ 1995 (15/06/1995-31/12/1995)

Για το δεύτερο εξάμηνο του 1995 είχαμε 751 σεισμούς, συμπεριλαμβανομένης και της μετασεισμικής ακολουθίας (Σχ.5.23). Ελάχιστο μέγεθος $M_{\min}=3.0$ και μέγιστο $M_{\max}=5.3$.

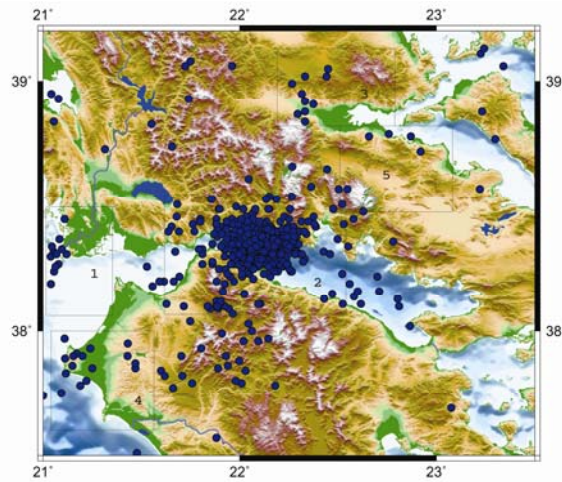


Σχήμα 5.23: Παράμετροι κατάλογου περιόδου 15/06/1995-31/12/1995

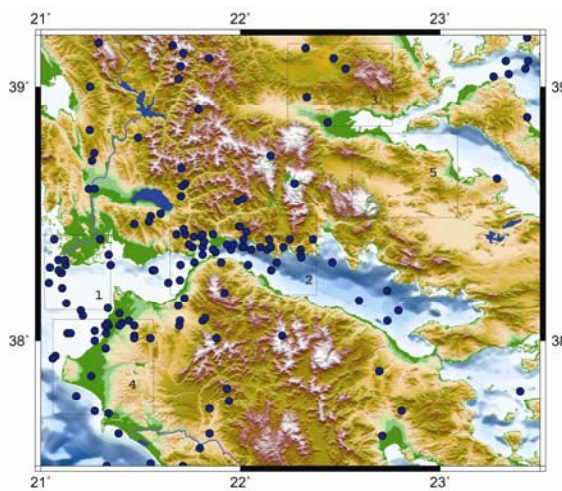
Στη συνέχεια χαρτογραφούμε τα επίκεντρα των σεισμών για όλο το δεύτερο εξάμηνο (Σχ.5.24) καθώς και για 2 επιμέρους τρίμηνα (Σχ.5.25 & 5.26 αντίστοιχα). Όπως είχαμε χωρίσει πριν τον χάρτη σε 5 περιοχές έτσι ακολουθούμε και εδώ τον ίδιο χωρισμό. Η πρώτη παρατήρηση έχει να κάνει με την περιοχή κοντά στο επίκεντρο του κύριου σεισμού της 15^{ης} Ιουνίου (2) όπου και έχουμε έντονη σεισμική δραστηριότητα η οποία ως επί το πλείστον αφορά την μετασεισμική ακολουθία. Στην περιοχή (1) παρατηρείται αύξηση της σεισμικότητας σε αντίθεση με το προηγούμενο εξάμηνο που είχαμε εξετάσει. Οι περιοχές δε (3) και (5) δραστηριοποιούνται ξανά, όμως η περιοχή (5) δραστηριοποιείται μόνο κατά το πρώτο μισό του 2^{ου} εξαμήνου και έπειτα ησυχάζει ξανά.



Σχήμα 5.24 : Χωρική κατανομή επικέντρων για την περίοδο 15/06/1995-31/12/1995.



Σχήμα 5.25 : Χωρική κατανομή επικέντρων για την περίοδο 15/06/1995- 15/09/1995.



Σχήμα 5.26 : Χωρική κατανομή επικέντρων για την περίοδο 16/09/1995-31/12/1995

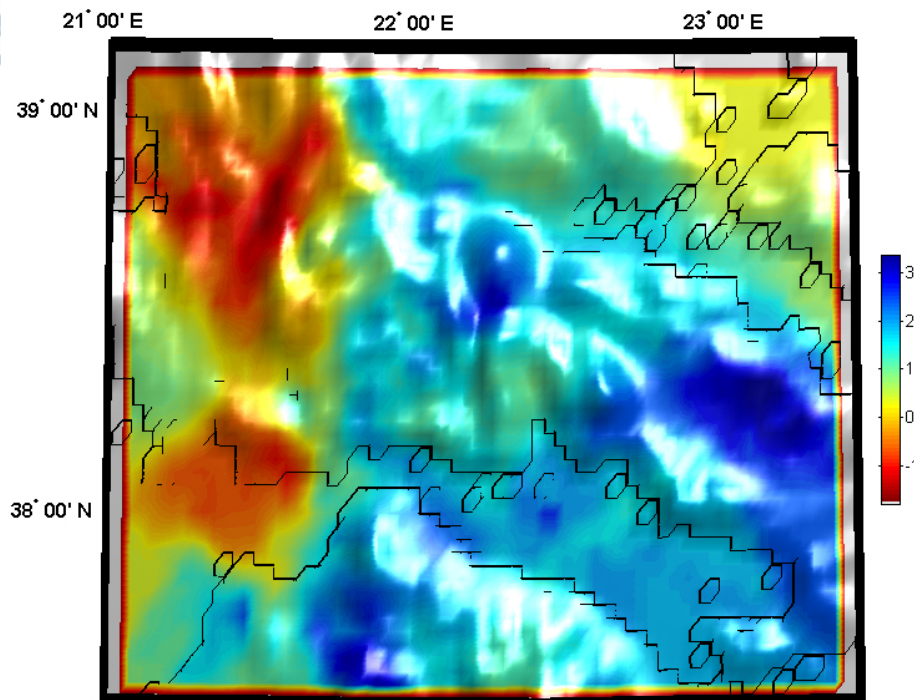
Για να επαληθεύσουμε την μεταβολή αυτή και μαθηματικά πλέον, χωρίζουμε ξανά τον κατάλογο σε δύο τρίμηνα με την βοήθεια του Z-map (Σχ.5.27) και παίρνουμε τον χάρτη του σχήματος 5.28.

The image shows a dialog box with a blue title bar that says "Please define the two periods". Inside the dialog, there are four input fields labeled T1, T2, T3, and T4. The values entered in these fields are 1995.4522, 1995.7281, 1995.7381, and 1996.0039 respectively. At the bottom right of the dialog, there are two buttons: "OK" and "Cancel".

Σχήμα 5.27: Χωρισμός καταλόγου σε 2 επιμέρους περιόδους διάρκειας 3 μηνών με σκοπό την σύγκριση της μεταβολής της σεισμικότητας.

Οι τιμές της Z κυμαίνονται από -2 σχεδόν έως και 3 και τείνουν να πλησιάσουν τις αρχικές τιμές που είχαμε υπολογίσει για την περιοχή. Πρέπει να σημειωθεί πως ο κατάλογος περιέχει και την μετασεισμική ακολουθία του σεισμού της 15^{ης} Ιουνίου και ενδέχεται αυτό να δημιουργήσει σφάλμα στις μετρήσεις της Z. Παρ' όλα αυτά παρατηρούμε πως η χρωματική αναλογία (καθώς και η αριθμητική) είναι σε πολύ μεγάλο βαθμό οι αναμενόμενες.

Αναλυτικά, στην περιοχή (1) έχουμε αύξηση σεισμικής δραστηριότητας. Στην περιοχή (2), που είναι και το επίκεντρο του σεισμού, παρατηρείται μείωση σε σχέση με το πρώτο μισό του 2^{ου} εξαμήνου. Αυτό εξηγείται λόγω της μη αφαίρεσης της σεισμικής ακολουθίας. Την περιοχή (5) την βλέπουμε με μπλε χρώμα, μείωση της σεισμικότητας άρα αύξηση της τιμής της Z, διότι η έξαρση παρατηρήθηκε μόνο το πρώτο μισό του 2^{ου} εξαμήνου και έπειτα η περιοχή ησύχασε. Συνεπώς η Z επαληθεύει την εκτίμηση που είχε γίνει νωρίτερα.



Σχήμα 5.28:Χάρτης σύγκρισης σεισμικότητας 2^{ου} εξαμήνου του 1995.
Το μπλε χρώμα συμβολίζει αύξηση της Z άρα μείωση της σεισμικότητας.
Το κόκκινο χρώμα συμβολίζει μείωση της Z άρα αύξηση της σεισμικότητας.

5.3.3.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ 1994 ΜΕ 1995

Θα προχωρήσουμε στην σύγκριση του έτους 1995 και 1994 για να διαπιστώσουμε αν υπήρξε κάποια μεγάλη μεταβολή στις τιμές της Z. Για την χρονική αυτή περίοδο έχουμε 1189 σεισμούς (Σχ. 5.29). Το ελάχιστο μέγεθος είναι $M_{\min}=3.0$ και το μέγιστο $M_{\max}=6.4$.

Στο σχήμα 5.30 παρατηρούμε την αθροιστική καμπύλη των σεισμών (μπλε χρώμα) καθώς και τη μεταβολή της τιμής της Z με βήμα 0.1, δηλαδή ανά μήνα. Οι τιμές που παίρνει η Z κυμαίνονται μεταξύ του -3 και 2. Αυτό έρχεται σε συμφωνία με τις αρχικές μας παρατηρήσεις καθώς επίσης και από την αύξηση της Z το δεύτερο μισό του 1995, όπως φαίνεται καθαρά στο σχήμα 5.30

General Parameters!

EQs in catalog:

Plot Big Events with:

Bin Length in days:

Beginning year:

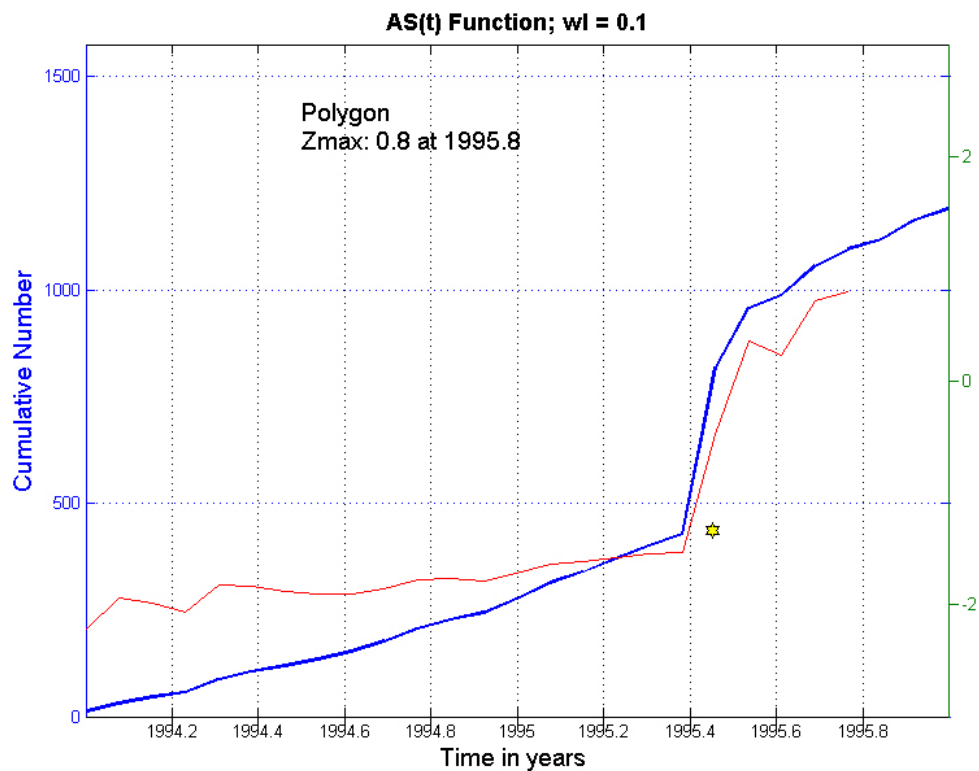
Ending year:

Minimum Magnitude:

Maximum Magnitude:

Min Depth **Max Depth**

Σχήμα 5.29: Παράμετροι κατάλογου περιόδου 1994-1995

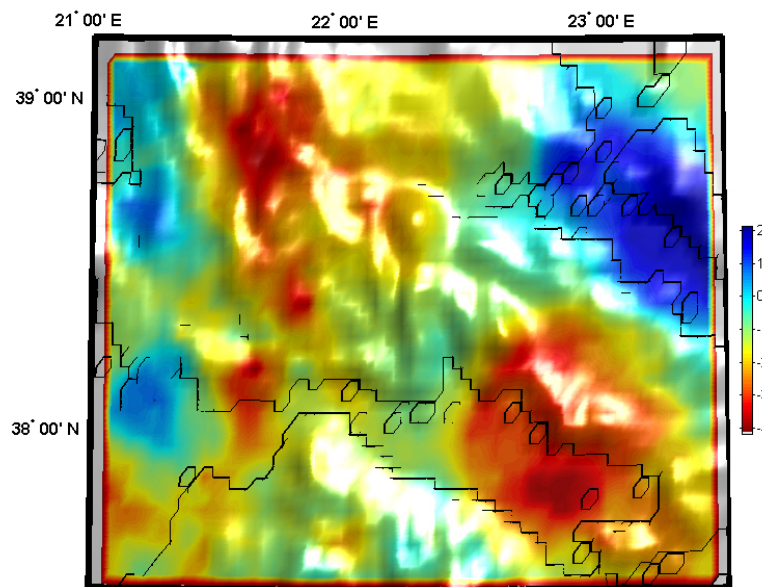


Σχήμα 5.30: Με μπλε χρώμα είναι η αθροιστική καμπύλη των σεισμών για την περίοδο 1994-1995. Με κόκκινο είναι η καμπύλη της μεταβολής της Z-value ανά μήνα

Για να ερμηνεύσουμε και χωρικά την μεταβολή της Z χωρίζουμε τον κατάλογο ανά έτος (Σχ. 5.31) και παίρνουμε ως αποτέλεσμα τον χάρτη του σχήματος 5.32.

Σχήμα 5.31: Χωρισμός καταλόγου σε 2 επιμέρους περιόδους διάρκειας ενός έτους με σκοπό την σύγκριση της μεταβολής της σεισμικότητας.

Στο σχήμα 5.32 βλέπουμε ότι οι τιμές που παίρνει η Z είναι σχεδόν παρόμοιες με τις τιμές που υπολογίσαμε πριν με εξαίρεση την μέγιστη αρνητική τιμή όπου αγγίζει το -4. Σημειώνουμε πως η περιοχή (1) όπου είχαμε αύξηση κατά το δεύτερο μισό του 1995, στην σύγκριση αυτή φαίνεται πως ησυχάζει. Εν αντιθέσει η περιοχή (5) φαίνεται πως έχει έντονη δραστηριότητα ενώ είχαμε παρατηρήσει ησυχία για το πρώτο μισό του 1995.



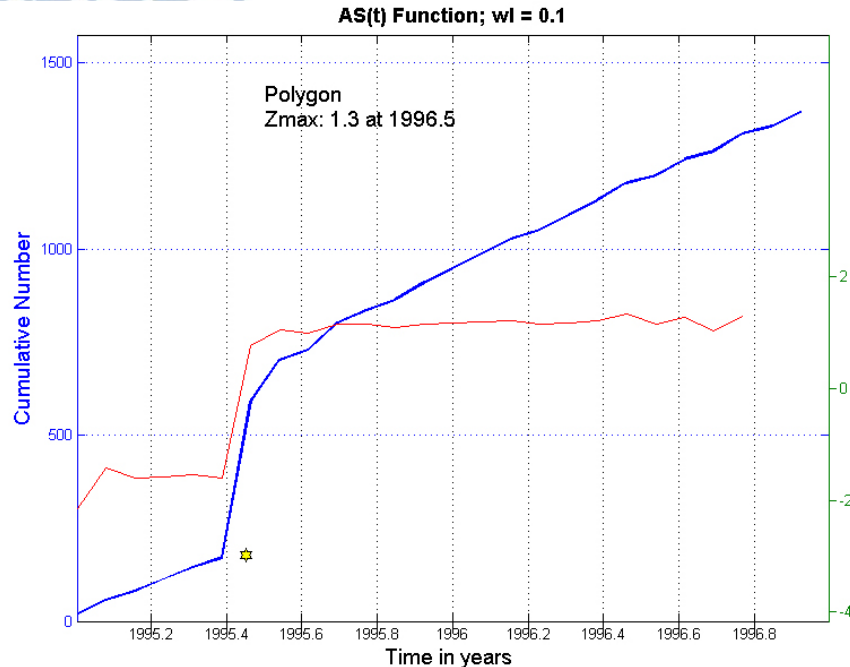
Σχήμα 5.32: Χάρτης σύγκρισης σεισμικότητας 1994-1995.
Το μπλε χρώμα συμβολίζει αύξηση της Z άρα μείωση της σεισμικότητας.
Το κόκκινο χρώμα συμβολίζει μείωση της Z άρα αύξηση της σεισμικότητας.

5.3.3.4 ΣΥΓΚΡΙΣΗ 1995 ΜΕ 1996

Τέλος , θα συγκρίνουμε το έτος 1995 με το 1996 για να δούμε τι τιμές παίρνει η Z καθώς και την χωρική μεταβολή της παραμέτρου. Για την περίοδο αυτή έχουμε 1369 σεισμούς (Σχ. 5.33) με ελάχιστο μέγεθος $M_{\min}=3.0$ και μέγιστο $M_{\max}=6.4$.

Σχήμα 5.33: Παράμετροι κατάλογου περιόδου 1995-1996.

Στην αθροιστική καμπύλη του σχήματος 5.34 παρατηρούμε ότι η Z λαμβάνει τιμές μεταξύ του -3 και 2. Οι τιμές είναι ίδιες με την παραπάνω μέτρηση, όπως επίσης είναι και ίδιο το σημείο μεταβολής της σεισμικότητας (1995.4). Εκεί παρατηρούμε απότομη αύξηση της Z δηλαδή μείωση της σεισμικότητας στην περιοχή. Η σύγκριση της Z έγινε με βήμα 0.1, δηλαδή ανά μήνα για την διάρκεια των 2 ετών μελέτης του συγκεκριμένου καταλόγου.



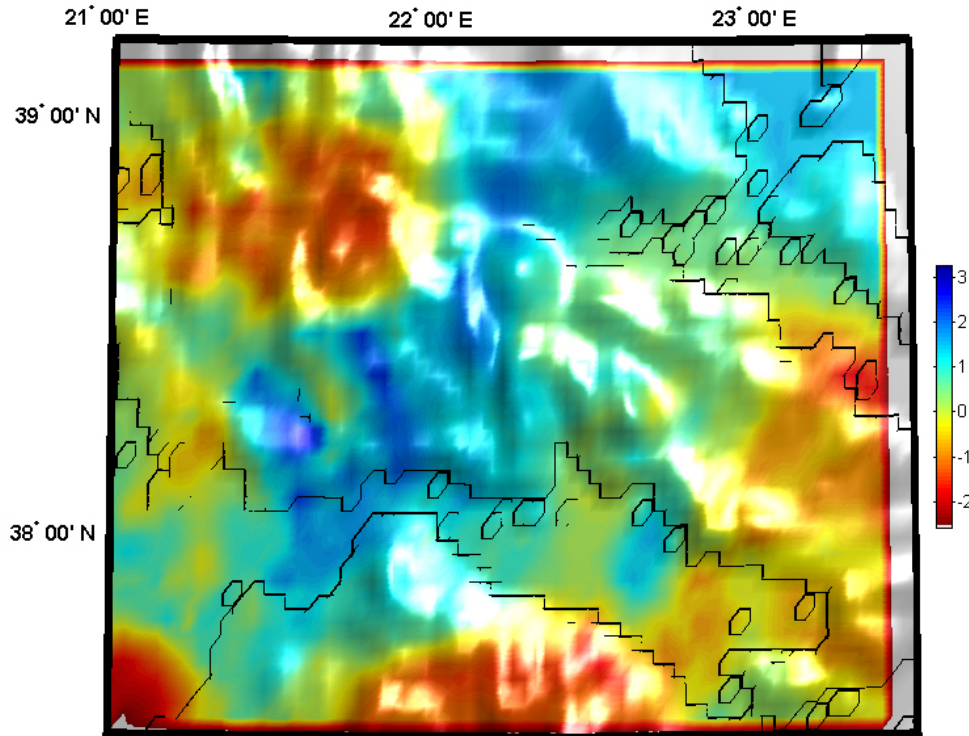
Σχήμα 5.34: Με μπλε χρώμα είναι η αθροιστική καμπύλη των σεισμών για την περίοδο 1995-1996. Με κόκκινο είναι η καμπύλη της μεταβολής της Z-value ανά μήνα

Χωρίζουμε τον κατάλογο ανά έτος (Σχ. 5.35) και παίρνουμε τον χάρτη του σχήματος 5.36.

Σχήμα 5.35: Χωρισμός καταλόγου σε 2 επιμέρους περιόδους διάρκειας ενός έτους με σκοπό την σύγκριση της μεταβολής της σεισμικότητας.

Στο σχήμα 5.36 παρατηρούμε πως η περιοχή που είχαμε χαρακτηρίσει (2) , κοντά στο επίκεντρο του σεισμού της 15^{ης} Ιουνίου ησυχάζει κατά το έτος 1996. Από την άλλη η σεισμική δραστηριότητα επεκτείνεται σε σημεία εκατέρωθεν του επικέντρου με

χαρακτηριστικά παραδείγματα τις περιοχές που είχαν χαρακτηριστεί (5) και (1) . Τέλος οι τιμές της Z είναι ίδιες με αυτές που υπολογίστηκαν προηγουμένως ανά μήνα.



Σχήμα 5.36 : Χάρτης σύγκρισης σεισμικότητας 1994-1995.

Το μπλε χρώμα συμβολίζει αύξηση της Z άρα μείωση της σεισμικότητας.

Το κόκκινο χρώμα συμβολίζει μείωση της Z άρα αύξηση της σεισμικότητας.

5.3.4 1996-1998

Κλείνοντας την μελέτη του αρχικού μας καταλόγου, θα παραθέσουμε τα αποτελέσματα για την τελευταία περίοδο όπου και χωρίσαμε τον κατάλογο. Η περίοδος αυτή αφορά τα έτη 1996-1998 όπου και θέλουμε να δούμε αν υπήρξαν σημαντικές μεταβολές στην τιμή της Z σε σχέση με τις προηγούμενες μετρήσεις. Ο κατάλογος για την περίοδο αυτή έχει 1279 δεδομένα με ελάχιστο μέγεθος $M_{\min}=3.0$ και μέγιστο $M_{\max}=5.4$ (Σχ.5.37).

General Parameters!

EQs in catalog:

Plot Big Events with:

Bin Length in days:

Beginning year:

Ending year:

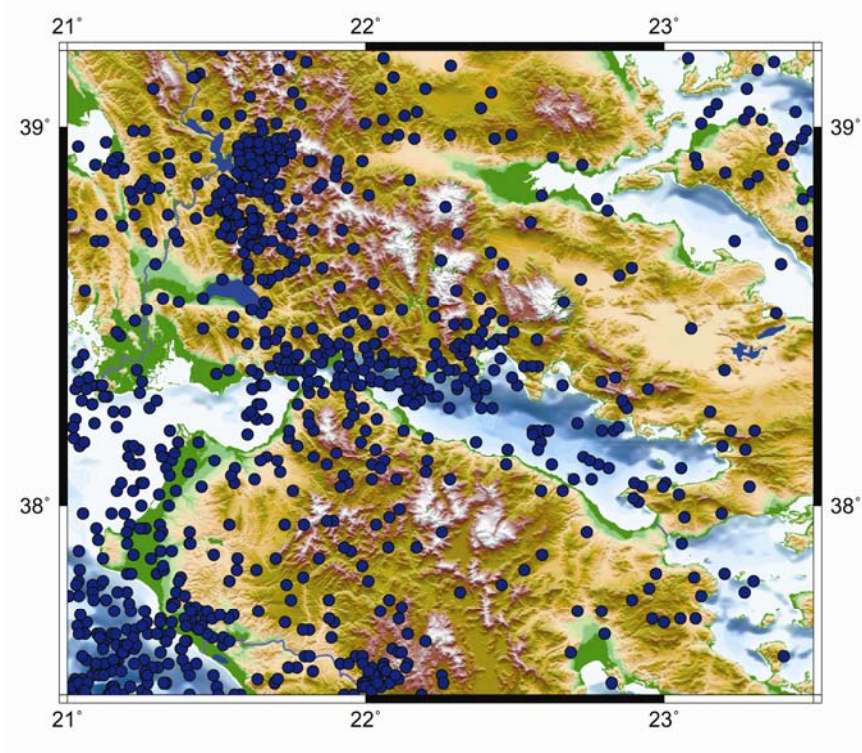
Minimum Magnitude:

Maximum Magnitude:

Min Depth: **Max Depth:**

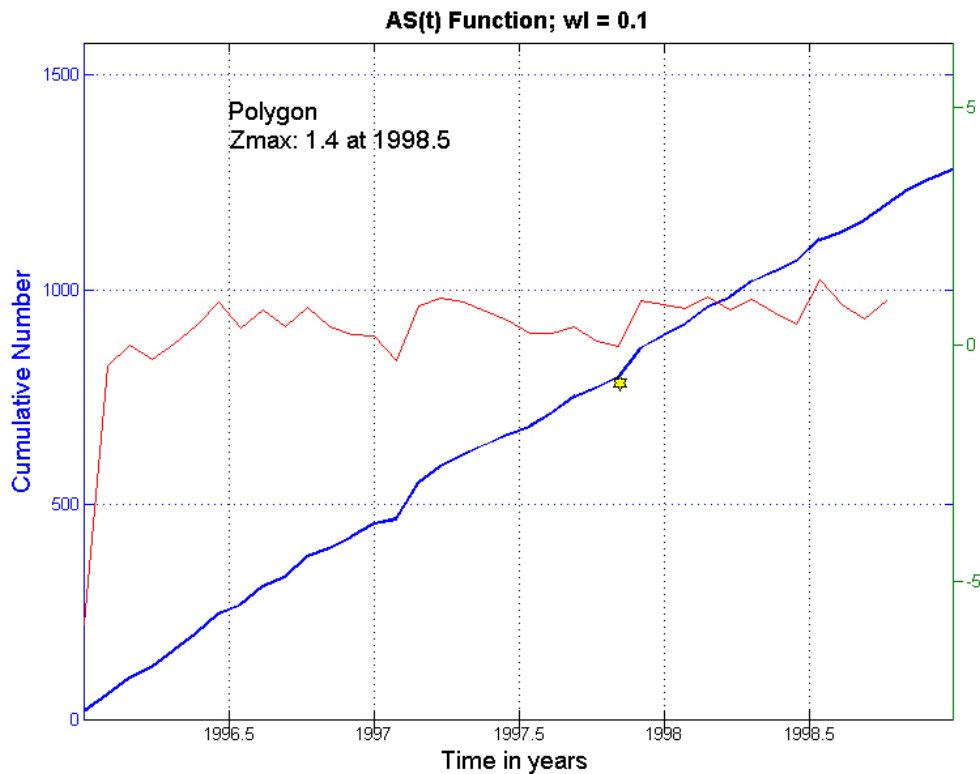
Σχήμα 5.37: Παράμετροι κατάλογου περιόδου 1996-1998.

Στο σχήμα 5.38 απεικονίζονται τα επίκεντρα των σεισμών του εξεταζόμενου καταλόγου.



Σχήμα 5.38 : Χωρική κατανομή επίκεντρων για την περίοδο 1996-1998.

Στο σχήμα 5.39, όπου έχουμε την αθροιστική καμπύλη των σεισμών, υπολογίζεται και η μεταβολή της τιμής Z . Το βήμα με το οποίο εξετάζουμε την μεταβολή αυτή είναι και πάλι 0,1 δηλαδή ανά μήνα. Η Z παίρνει τιμές από -4 έως 2 σχεδόν. Μόνο στις αρχές του 1996 παρατηρείται μεγάλη αύξηση της Z , μείωση δηλαδή της σεισμικότητας. Έπειτα από αυτό η Z κυμαίνεται στα ίδια σχεδόν επίπεδα με πολύ μικρές αυξομειώσεις. Τέλος στα τέλη του 1998 λαμβάνει και την μέγιστη θετική τιμή της ($Z_{\max}=1.4$ για το 1998.5).



Σχήμα 5.39: Με μπλε χρώμα είναι η αθροιστική καμπύλη των σεισμών για την περίοδο 1996-1998. Με κόκκινο είναι η καμπύλη της μεταβολής της Z -value ανά μήνα

Τέλος χωρίζουμε τον κατάλογο ανά 1,5 έτος (Σχ. 5.40) και παίρνουμε τα αποτελέσματα του σχήματος 5.41

Please define the two periods

T1 =
1996.0011

T2 =
1997.4988

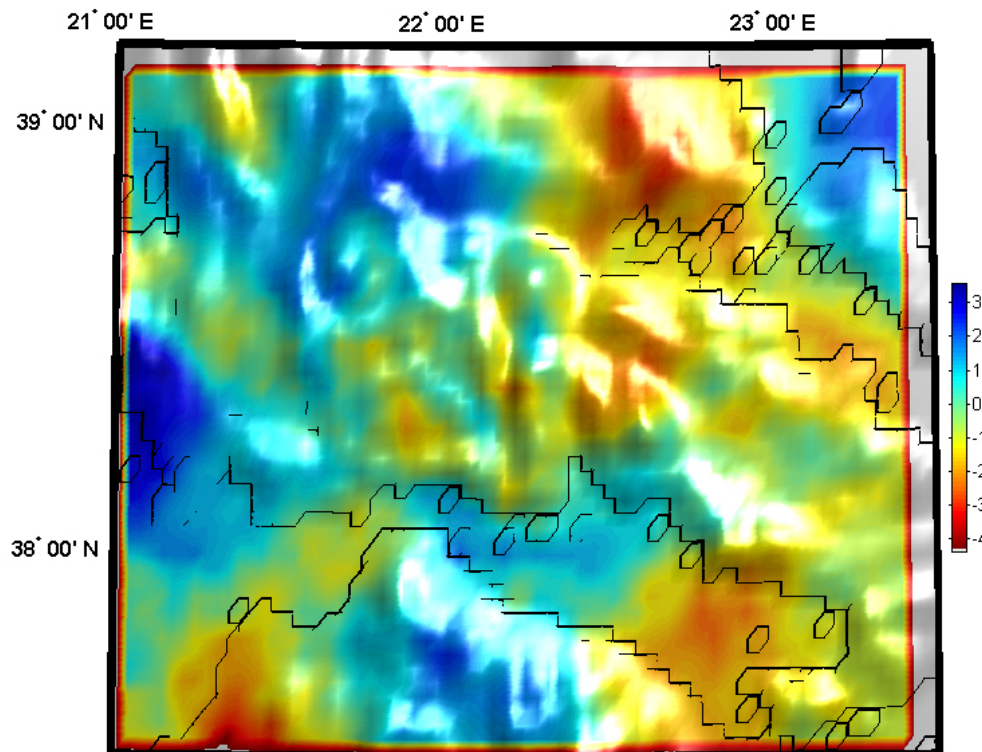
T3 =
1997.5088

T4 =
1998.9966

OK Cancel

Σχήμα 5.40: Χωρισμός καταλόγου σε 2 επιμέρους περιόδους διάρκειας 1,5 ετών με σκοπό την σύγκριση της μεταβολής της σεισμικότητας.

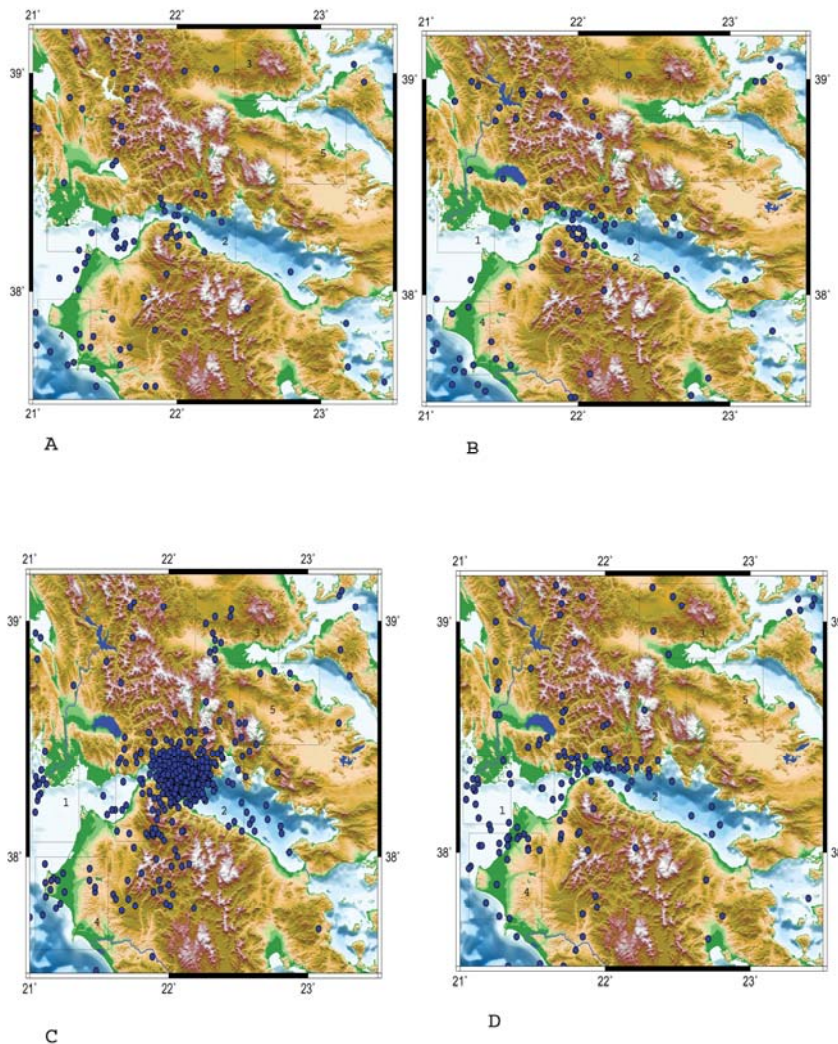
Αυτό που παρατηρούμε στο σχήμα 5.41 είναι πως οι τιμές της Z είναι ίδιες και επίσης οι περιοχές Ανατολικά τείνουν να γίνουν σεισμικά ενεργές ενώ στην υπόλοιπη περιοχή επικρατεί κατά κάποιο τρόπο ησυχία.



Σχήμα 5.41 : Χάρτης σύγκρισης σεισμικότητας 1996-1998.
Το μπλε χρώμα συμβολίζει αύξηση της Z άρα μείωση της σεισμικότητας.
Το κόκκινο χρώμα συμβολίζει μείωση της Z άρα αύξηση της σεισμικότητας.

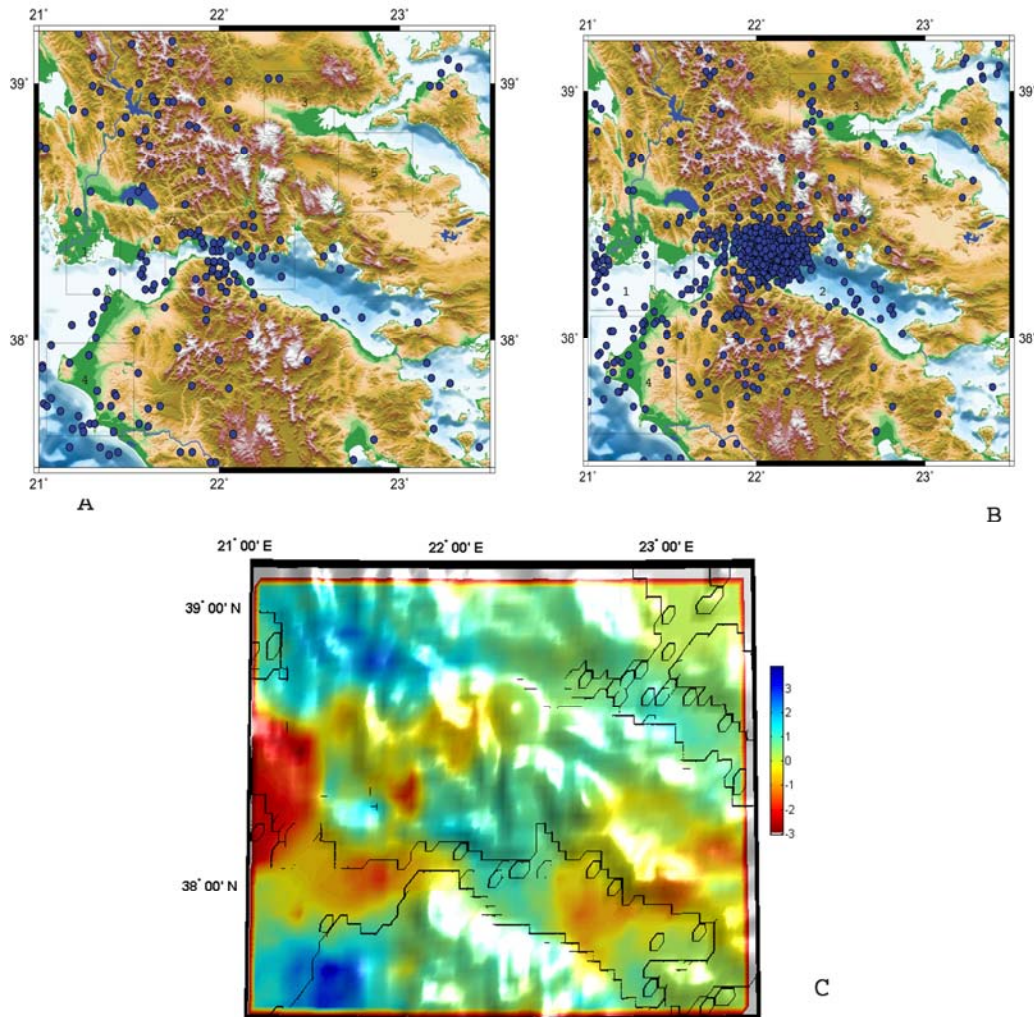
5.4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Κλείνοντας αυτό το κεφάλαιο θα παραθέσουμε συγκριτικά τα σχήματα των προηγούμενων υποκεφαλαίων. Στο σχήμα 5.42 έχουμε από αριστερά προς δεξιά (A→D) τα τρίμηνα του 1995 όπου είχε χωριστεί ο κατάλογος. Έτσι φαίνεται η έντονη σεισμική δραστηριότητα στην περιοχή του επικέντρου η οποία όμως μειώνεται κατά το τελευταίο τρίμηνο. Επίσης παρατηρούμε την αύξηση στην περιοχή (1) καθώς και την ησυχία πριν τον κύριο σεισμό στις περιοχές (3) και (5).



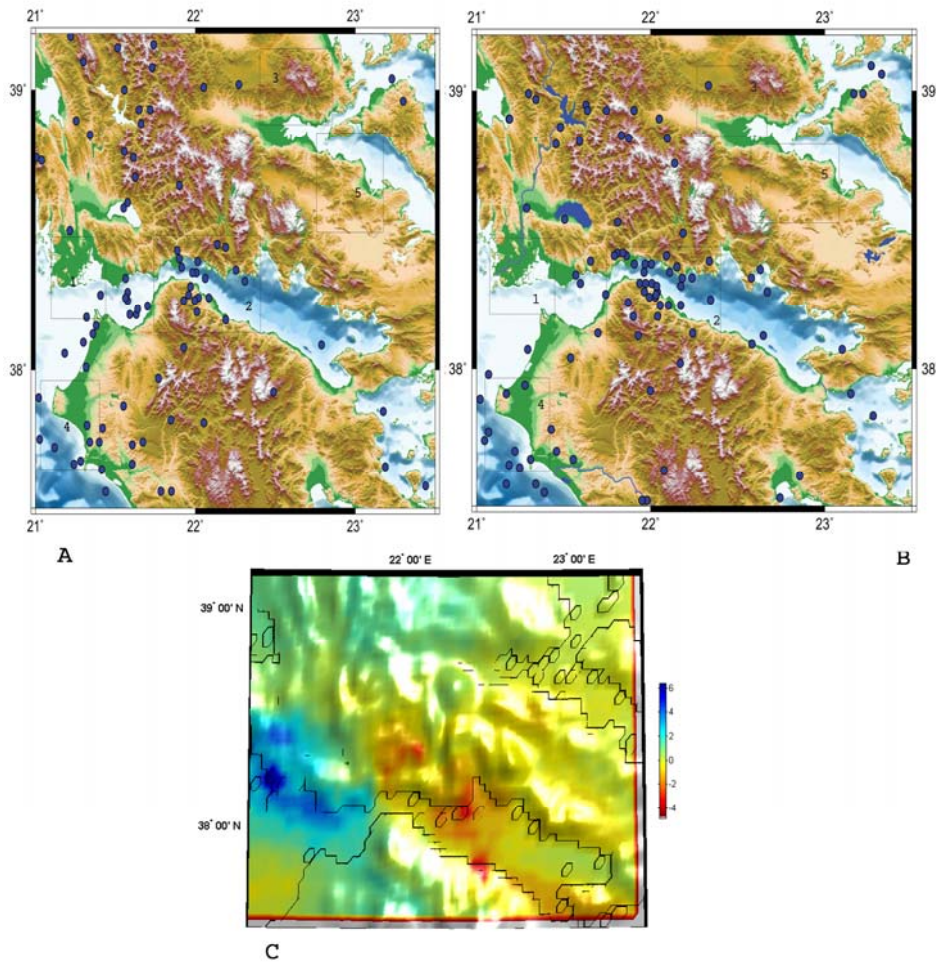
Σχήμα 5.42 : A) Χωρική κατανομή επικέντρων για την περίοδο 01/01/1995- 14/03/1995
B) Χωρική κατανομή επικέντρων για την περίοδο 15/03/1995- 15/06/1995
C) Χωρική κατανομή επικέντρων για την περίοδο 15/06/1995- 15/09/1995
D) Χωρική κατανομή επικέντρων για την περίοδο 16/09/1995- 31/12/1995

Στο σχήμα 5.43 παρατηρούμε στα (A,B) την χωρική κατανομή των epicέντρων για τα 2 εξάμηνα του 1995 και στο C την μεταβολή της σεισμικότητας. Έτσι φαίνεται η αύξηση στην περιοχή (1) καθώς και μικρές εστίες εκατέρωθεν του epicέντρου του σεισμού της 15^{ης} Ιουνίου.



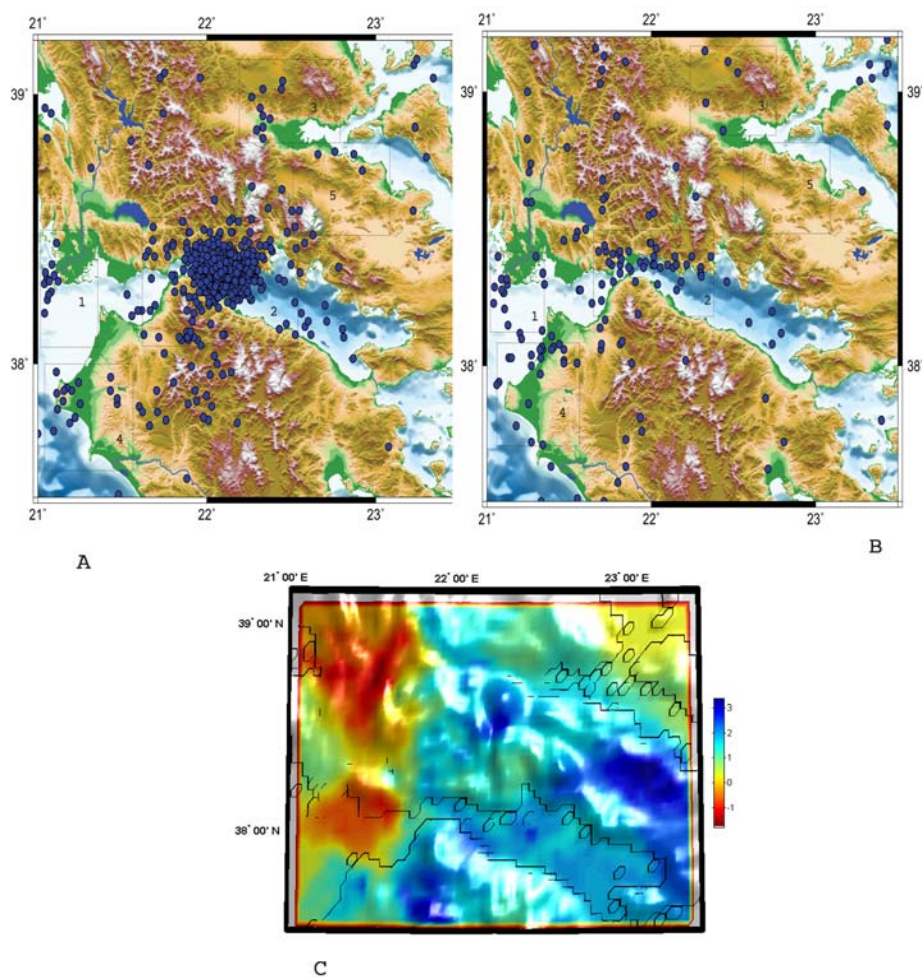
Σχήμα 5.43 : A) Χωρική κατανομή epicέντρων για την περίοδο 01/01/1995- 15/06/1995
 B) Χωρική κατανομή epicέντρων για την περίοδο 15/06/1995- 31/12/1995
 C) Χάρτης σύγκρισης σεισμικότητας 1^{ου} και 2^{ου} εξαμήνου του 1995.
 Το μπλε χρώμα συμβολίζει αύξηση της Z άρα μείωση της σεισμικότητας.
 Το κόκκινο χρώμα συμβολίζει μείωση της Z άρα αύξηση της σεισμικότητας.

Στο σχήμα 5.44 παρατηρούμε την μεταβολή της σεισμικότητας κατά 2 πρώτα τρίμηνα του 1995. Έτσι βλέπουμε τις περιοχές (1), (3) και (5) να ησυχάζουν πριν τη γένεση του κύριου σεισμού.



Σχήμα 5.44: A) Χωρική κατανομή επικέντρων για την περίοδο 01/01/1995- 14/03/1995
 B) Χωρική κατανομή επικέντρων για την περίοδο 15/03/1995- 15/06/1995
 C) Χάρτης σύγκρισης σεισμικότητας 1^{ου} εξαμήνου του 1995.
 Το μπλε χρώμα συμβολίζει αύξηση της Z άρα μείωση της σεισμικότητας.
 Το κόκκινο χρώμα συμβολίζει μείωση της Z άρα αύξηση της σεισμικότητας.

Στο σχήμα 5.46 έχουμε τις μεταβολές της σεισμικότητας για το 2 τελευταία τρίμηνα του 1995. Εδώ έχουμε έντονη δραστηριότητα στην περιοχή (1) και ελάττωση της δραστηριότητας στην περιοχή (5).

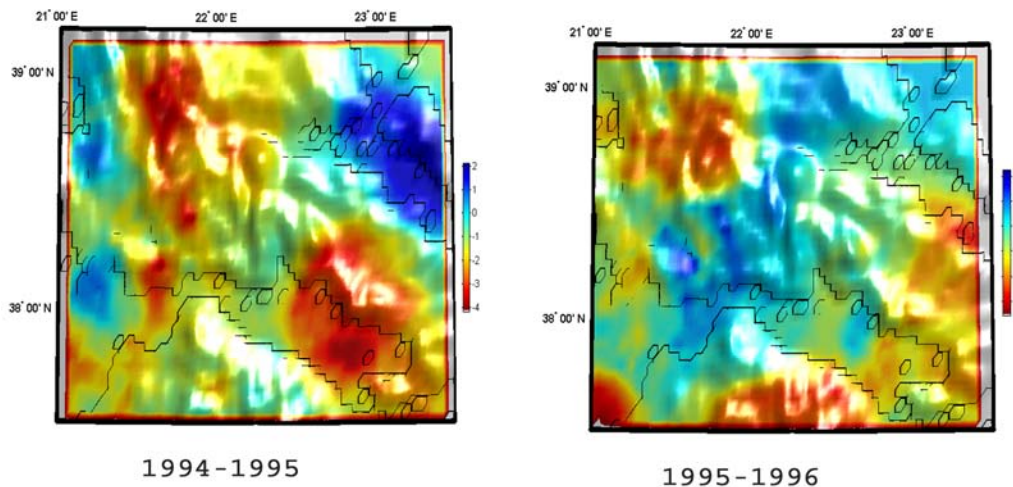


Σχήμα 5.45: A) Χωρική κατανομή επικέντρων για την περίοδο 15/06/1995- 15/09/1995
B) Χωρική κατανομή επικέντρων για την περίοδο 16/09/1995- 31/12/1995
C) Χάρτης σύγκρισης σεισμικότητας 2^{ου} εξαμήνου του 1995.
Το μπλε χρώμα συμβολίζει αύξηση της Z άρα μείωση της σεισμικότητας.
Το κόκκινο χρώμα συμβολίζει μείωση της Z άρα αύξηση της σεισμικότητας.

Έτσι για το 1995 η μεταβολή που έχουμε είναι σε σημεία εκατέρωθεν του epicέντρου του σεισμού της 15^{ης} Ιουνίου ενώ η τιμή της Z παίρνει σε μεγάλο ποσοστό τις ίδιες τιμές για κάθε εξεταζόμενη περίοδο. Μοναδική εξαίρεση αποτελεί η περίπτωση του 1^{ου}

εξαμήνου όπου πιθανολογούμε ότι λόγω μικρού αριθμού δεδομένων δεν είναι απόλυτα σύμφωνη με τις υπόλοιπες τιμές της Z .

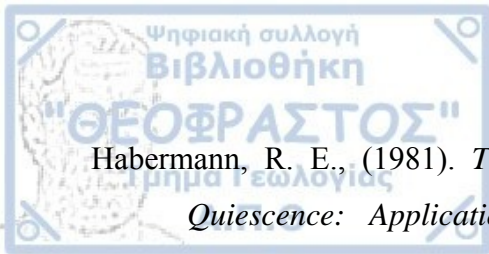
Τέλος, παραθέτουμε συγκριτικά τους χάρτες μεταβολής της Z για τα έτη 1994-1995 και 1995-1996 (Σχ.5.46). Εδώ παρατηρούμε πως υπάρχει μια αναστροφή της σεισμικότητας όσον αφορά αυτές τις περιόδους. Αυτό οφείλεται στο ότι το 1995 είχαμε την γένεση του σεισμού μεγέθους $M=6.4$ και όλη την μετασεισμική ακολουθία η οποία δεν αφαιρέθηκε από τον κατάλογο. Επίσης μετά το 1995 η περιοχή κοντά στο επίκεντρο ηρεμεί και η σεισμική δραστηριότητα επεκτείνεται στις περιοχές όπου πριν δεν υπήρχε σεισμική δράση.



Σχήμα 5.46: Αριστερά) Χάρτης σύγκρισης σεισμικότητας 1994-1995.
Δεξιά) Χάρτης σύγκρισης σεισμικότητας 1995-1996.
Το μπλε χρώμα συμβολίζει αύξηση της Z άρα μείωση της σεισμικότητας.
Το κόκκινο χρώμα συμβολίζει μείωση της Z άρα αύξηση της σεισμικότητας.



- Bornovas, J., (1964). Geologie de l'île de Lefkade. Geol. Geophys. Res. (Special Publication by Greek Geological Survey) V.10 (1) (Athens).
- Bowman, D.D., Quillon, G., Sammis, C.G., Sornette, A. and Sornette, D., (1998). An observational test of the critical earthquake concept. *J. Geophys. Res.*,103, 24359 – 24372.
- Davis, S.D., Frohlich, C., (1991). Single-link cluster analysis of earthquake aftershocks: decay laws and regional variations. *J. Geophys. Res.*96, 6336-6350
- Dobrovolsky, J.P., Zubkov, S.I. and Miachkin, B.J., (1979). Estimation of the size of earthquake preparation zones. *Pure Applied Geophysics*, 117, 1025-1044.
- Gephart, J. W. and D. W. Forsyth, (1984). An improved method for determining the regional stress tensor using earthquake focal mechanism data: Application to the San Fernando earthquake sequence, *J. Geophys. Res.* **89**, 9,305–9,320.
- Gephart, J. W., (1990a). FMSI: A FORTRAN program for inverting fault/slickenside and earthquake focal mechanism data to obtain the original stress tensor, *Comput. Geosci.* **16**, 953–989.
- Gephart, J. W., (1990b) Stress and the direction of slip on fault planes, *Tectonics* **9**, 845–858.
- Gutenberg, R. and C. F. Richter, (1944). Frequency of earthquakes in California, *Bull. Seism. Soc. Am.* **34**, 185–188.



Habermann, R. E., (1981). *The Quantitative Recognition and Evaluation of Seismic Quiescence: Applications to Earthquake Prediction and Subduction Zone Tectonics*, University of Colorado, Boulder.

Habermann, R. E., (1988). Precursory seismic quiescence: Past, present and future, *Pure Appl. Geoph.* **126**, 279–318.

Habermann, R. E., (1991). Seismicity rate variations and systematic changes in magnitudes in teleseismic catalogs, *Tectonophysics* **193**, 277–289.

Harris, R., (1998). Introduction to special section: stress triggers, stress shadows, and implications of seismic hazard. *J. Geophys. Res.*, 103, 24347-24358.

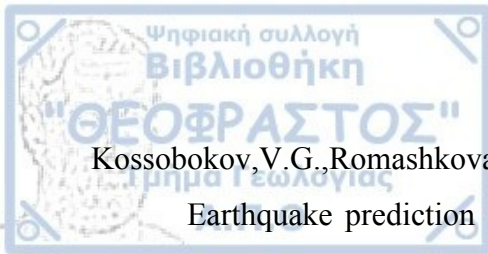
Hsu, M.T.,(2003).Seismological observation and service in Taiwan (up to 1970). In: Lee,W.H.K., Kanamori,H., Jennings,P.C.(Eds.),Handbook of Earthquake and Engineering seismology.Academic Press

Ishimoto, M. and K. Iida, (1939). Observations of earthquakes registered with the microseismograph constructed recently, *Bull. Earthq. Res. Inst.* **17**, 443–478.

Jolly, A. D. and S. R. McNutt, (1999). Seismicity at the volcanoes of Katmai National Park, Alaska, July 1995–December 1997, *J. Volcanology and Geothermal Res.* **93**, 173–190.

Karakostas, V.G., Papadimitriou, E.E., Papazachos, C.B., 2004. Properties of the 2003 Lefkada, Ionian Islands, Greece, earthquake seismic sequence and seismicity triggering. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 94 (5), 1976– 1981.

Kossobokov,V.G., Keilis-Borok,V.I, Smith, S.W., 1990.Localization of intermediate-term earthquake prediction. *J. Geophys. Res.*95 (B12), 19763-19772



Kossobokov, V.G., Romashkova, L.L., Keilis-Borok, V.I., Healy, J.H., 1999. Testing Earthquake prediction algorithms: Statistically significant advance prediction of the largest earthquakes in the circum-pacific, 1992-1997. *Phys. Earth. Planet. Inter.* **111**, 187-196

Lu, Z. and M. Wyss, (1996). Segmentation of the Aleutian plate boundary derived from stress direction estimates based on fault plane solutions, *J. Geophys. Res.* **101**, 803–816.

Lu, Z., M. Wyss, and H. Pulpan, (1997). Details of stress directions in the Alaska subduction zone from fault plane solutions, *J. Geophys. Res.* **102**, 5,385–5,402.

Michael, A. J., (1984). Determination of stress from slip data: Faults and folds, *J. Geophys. Res.* **89**, 11,517–11,526.

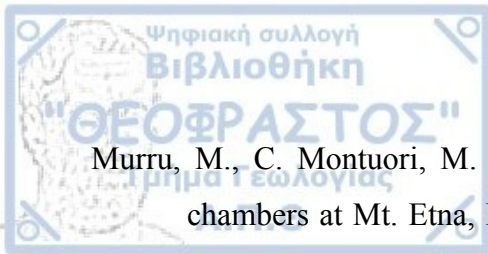
Michael, A. J., (1987a). Use of focal mechanisms to determine stress: A control study, *J. Geophys. Res.* **92**, 357–368.

Michael, A. J., (1987b). Stress rotation during the Coalinga aftershock sequence, *J. Geophys. Res.* **92**, 7,963–7,979.

Michael, A. J., (1991). Spatial variations of stress within the 1987 Whittier Narrows, California, aftershock sequence: New techniques and results, *J. Geophys. Res.* **96**, 6,303–6,319.

Michael, A. J., W. L. Ellsworth, and D. Oppenheimer, (1990). Co-seismic stress changes induced by the 1989 Loma Prieta, California earthquake, *Geophys. Res. Lett.* **17**, 1,441–1,444.

Mogi, K., 1985. Earthquake prediction. Academic Press, Tokyo.



Murru, M., C. Montuori, M. Wyss, and E. Privitera, (1999). The location of magma chambers at Mt. Etna, Italy, mapped by b-values, *Geophys. Res. Lett.* **26**, 2,553–2,556.

Nalbant, S.S., Hubert, A. and Kinig, G.C.P., (1998). Stress coupling between earthquake northwest Turkey and the north Aegean Sea. *J. Geophys. Res.*, 103, 24469-24486.

Papazachos, B. C. and C. B. Papazachou, (2003), *The Earthquakes of Greece*. Ziti Publications, Thessaloniki.

Papazachos, C.B., Karakaisis, G.F., Scordilis, E.M. and Papazachos, B.C., (2004b). Global observational properties of the critical earthquake model. *Bull. Seism. Soc. Am.*

Papazachos, C.B., Scordilis, E.M., Karakaisis, G.F. and Papazachos, B.C., (2004a). Decelerating preshock seismic deformation in fault regions during critical periods. *Bull. Geol. Soc. Greece*, 36, 1-9.

Παπαζάχος, Β. , Καρακαΐσης, Γ. και Χατζηδημητρίου, Π., (2005), *Εισαγωγή στην σεισμολογία*. Εκδόσεις Ζήτη.

Papadimitriou, E., 2002. Mode of strong earthquake recurrence in the Central Ionian Islands (Greece): possible triggering due to Coulomb Stress changes generated by the occurrence of previous strong shocks. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 92 (8), 3293–3308

Pavlidis, S., Papathanassiou, G., Ganas, A., Papadopoulos, G.A., Ioannides, K., Stamoulis, K., Papachristodoulou, C., Keramydas, D., 2003. The 14th August 2003 Lefkada (Ionian Sea) Earthquake (Mw=6.3), Preliminary Field Observations, Intern. Conf. *The South Aegean Active Volcanic Arc: Present Knowledge and Future Perspectives* 17–20 Sept, 2003 Milos, Abs.



Power, J. A., A. D. Jolly, R. A. Page, and S. R. McNutt, (1995). *Seismicity and Forecasting of the 1992 Eruptions of Crater Peak Vent, Mt. Spurr, Alaska: An Overview*, U.S. Geological Survey Bulletin.

Reasenber, P. A., (1985). Second-order moment of central California seismicity, *J. Geophys. Res.* **90**, 5,479–5,495

Reid, H.F., (1910). The mechanism of the earthquake. In: The California earthquake of April 18,1906, report of the State Earthquake Investigation Commission, Washington, DC, Carnegie Institution, 2, 1-192.

Rondoyanni-Tsiambaou, Th., 1997. Les seismes et l'environnement geologique de l' ile de Lefkade, Greece: Passe et Futur.. In: Marinos, et al., (Eds.), Engineering Geology and the Environment. Balkema, pp. 1469– 1474

Rundkvist, D.V., Rotwain, I.M., 1994. Present-day geodynamics and seismicity of Asia minor. Theoretical problems of Geodynamics and Seismology. *Computational Seismology* 27, 201-244

Scholz, C.H., 1988. Mechanism of seismic quiescence. *Pageoph* 126, 701-718

Scholz, C.H., 1990. The mechanics of earthquakes and faulting. Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK.

Scholz, R., Barka, A. and Dietrich, J.H. (1997). Progressive failure on the North Anatolian fault since 1939 by earthquake stress triggering. *Geophys. J. Int.*, 128, 594-604.

Scordilis, E.M., Karakaisis, G.F., Karakostas, B.G., Panagiotopoulos, D.G., Comninakis, P.E., Papazachos, B.C., 1985. Evidence for Transform Faulting in the Ionian Sea:



the Cephalonia Island Earthquake Sequence of 1983. *Pure Appl. Geophys.* 123, 388–397.

Shebalin, P.N., Keilis-Borok, V.I., 1999. Phenomenon of local ‘seismic reversal’ before strong earthquakes. *Phys. Earth Planet. Inter.* 111, 215–237

Utsu, T., (1972). Large earthquakes near Hokkaido and the expectancy of the occurrence of a large earthquake off Nemuro. *Rep. Comm. Earthq. Pred.*, 7, 7–13.

Utsu, T., (1992). On seismicity, in *Report of the Joint Research Institute for Statistical Mathematics*, 139–157, Institute for Statistical Mathematics, Tokyo.

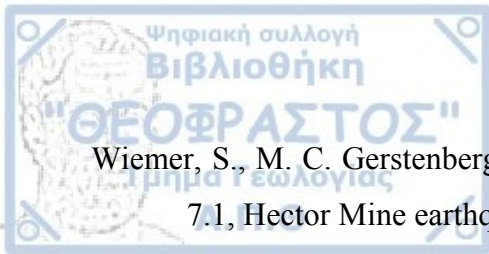
Wang, J.H., Chen, K.C., Lee, T.Q., 1994. Depth distribution of shallow earthquakes in Taiwan. *J. Geol. Soc. China* 37, 125–142

Wiemer, S. and S. McNutt, (1997). Variations in frequency-magnitude distribution with depth in two volcanic areas: Mount St. Helens, Washington, and Mt. Spurr, Alaska, *Geophys. Res. Lett.* 24, 189–192.

Wiemer, S., S. R. McNutt, and M. Wyss, (1998). Temporal and threedimensional spatial analysis of the frequency-magnitude distribution near Long Valley caldera, California, *Geophys. J. Int.* 134, 409–421.

Wiemer, S. and M. Wyss, (2000). Minimum magnitude of completeness in earthquake catalogs: Examples from Alaska, the western United States, and Japan, *Bull. Seism. Soc. Am.* 90, 859–869.

Wiemer, S. and M. Baer, (2000). Mapping and removing quarry blast events from seismicity catalogs, *Bull. Seism. Soc. Am.* 90, 525–530.



Wiemer, S., M. C. Gerstenberger, and E. Hauksson, (2001). Properties of the 1999, Mw 7.1, Hector Mine earthquake: Implications for aftershock hazard, *Bull. Seism. Soc. Am.* (submitted).

Wiemer, S. and Malone, S., 2001. A software package to analyse seismicity: ZMAP. *Seismol. Res. Lett.*, 72, 3, 373-382.

Wu, Y.M., Chiao, L.Y., 2006. Seismic quiescence before the 1999 Chi-chi, Taiwan Mw 7.6 earthquake. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 96, 321-327

Wu, Y.M., Chen, C.C., 2006. Seismic reversal pattern for the 1999 Chi-Chi, Taiwan, Mw 7.6 earthquake. *Tectonophysics* 429 (2007) , 125-132.

Wyss, M., Habermann, R.E., 1988. Precursory seismic quiescence. *Pageoph* 126, 319-332.

Wyss, M. and Z. Lu, (1995). Plate boundary segmentation by stress directions: Southern San Andreas Fault, California, *Geophys. Res. Lett.* **22**, 547–550.

Wyss, M., K. Shimazaki, and S. Wiemer, (1997b). Mapping active magma chambers by b-value beneath the off-Ito volcano, Japan, *J. Geophys. Res.* **102**, 20,413–20,422.

Wyss, M., K. Nagamine, F. W. Klein, and S. Wiemer, (2000). Evidence for magma at intermediate crustal depth below Kilauea's East Rift, Hawaii, based on anomalously high b-values, *J. Volc. Geoth. Res.* (in press).

Wyss, M. and S. Wiemer, (2000). Change in the probabilities for earthquakes in Southern California due to the Landers M 7.3 earthquake, *Science* **290**, 1,334–1,338.