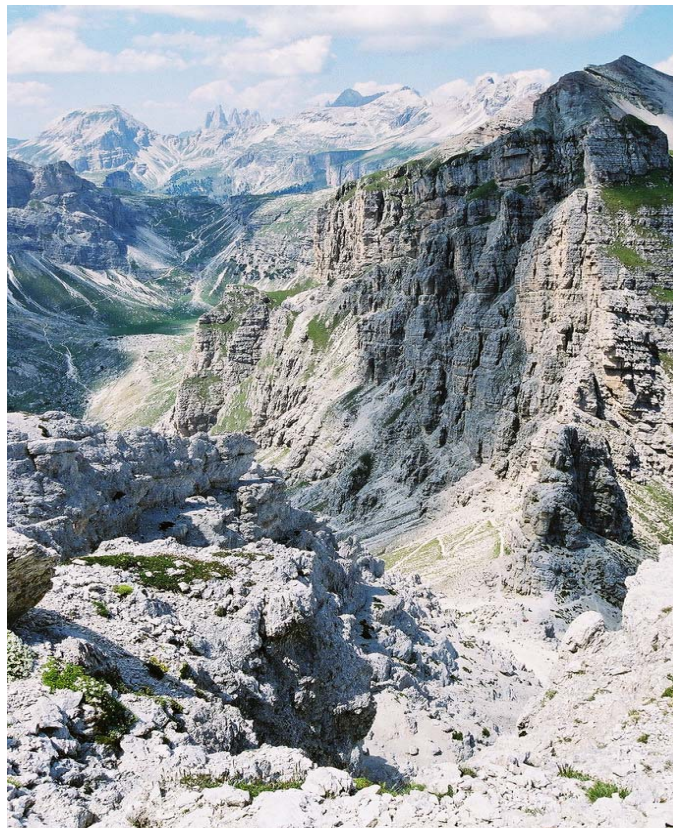


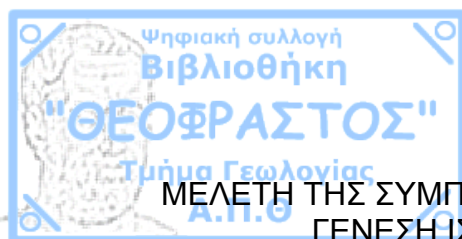
ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΟΤΗΤΑΣ ΠΡΙΝ ΚΑΙ ΜΕΤΑ ΤΗ
ΓΕΝΕΣΗ ΙΣΧΥΡΩΝ ΣΕΙΣΜΩΝ ΣΤΟΝ ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΧΩΡΟ

Χαντζόπουλος Νικόλαος Α.Ε.Μ: 3647



Επιβλέποντες Καθηγητές: Ελευθερία Παπαδημητρίου, Βασίλης Καρακώστας

Θεσσαλονίκη 2008



ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΟΤΗΤΑΣ ΠΡΙΝ ΚΑΙ ΜΕΤΑ ΤΗ ΓΕΝΕΣΗ ΣΧΥΡΩΝ ΣΕΙΣΜΩΝ ΣΤΟΝ ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΧΩΡΟ



Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης
Σχολή Θετικών Επιστημών

Περιεχόμενα.....	3
Πρόλογος.....	5
Πρόλογος.....	6
Κεφάλαιο 1 ^ο	7
Βασικές έννοιες και ορισμοί.....	7
Περίληψη.....	8
1.1 Βασικές έννοιες.....	9
1.2 Προϋποθέσεις μελέτης σεισμικής ησυχίας σε μια περιοχή.....	11
1.3 Χαρακτηριστικά σεισμικής ησυχίας.....	12
1.4 Αρχικές μέθοδοι και μελέτες.....	16
1.5 Άλλα προβλήματα.....	17
1.6 Ο σύνθετος νόμος της τριβής.....	19
1.7 Η ελληνική περιοχή μελέτης και σύντομη γεωτεκτονική περιγραφή αυτής.....	23
Κεφάλαιο 2 ^ο	25
Χρονική και χωρική κατανομή της σεισμικότητας.....	25
2.1 Εισαγωγή.....	26
2.2 Μεταβολές του ρυθμού γένεσης των σεισμών για κυκλικές αποστάσεις των 30,30-60,60,60-90,90km από το επίκεντρο του σεισμού του 1983.....	27
2.3 Παρατηρήσεις σχετικά με τη χωρική κατανομή της σεισμικότητας για κυκλικές αποστάσεις 0-30,30-60,0-60,60-90,0-90km.....	33
2.4 Μεταβολές της συχνότητας της σεισμικότητας για σεισμικές ακτίνες των 40,40-80,80,80-120,120km.....	44
2.5 Παρατηρήσεις σχετικά με τη χωρική κατανομή της σεισμικότητας για αποστάσεις 40,40-80,80,80-120,120km.....	48
2.6 Μεταβολές της συχνότητας της σεισμικότητας για σεισμικές ακτίνες των 50,50-100,100,100-150,150km.....	58
2.7 Παρατηρήσεις σχετικά με τη χωρική κατανομή της σεισμικότητας για κυκλικές αποστάσεις 50,50-100,100,100-150,150km.....	64
Κεφάλαιο 3 ^ο	74
Τάσεις Coulomb.....	74
3.1 Εισαγωγικά στοιχεία για τη μεταβολή στατικής τάσης λόγω γένεσης προηγούμενων σεισμών.....	75
3.2 Το μοντέλο του «αρνητικού» σεισμού και οι μεταβολές στις τάσεις Coulomb.....	76
3.3 Η εφαρμογή της μεθόδου στην περιοχή της Κεφαλονιάς.....	79



Κεφάλαιο4°	81
Συμπεράσματα	81
4.1 Συμπεράσματα.....	82
Βιβλιογραφία.....	85



Πρόλογος

Η εργασία αυτή, μελετά τη συμπεριφορά της σεισμικότητας πριν και μετά τη γένεση ισχυρών σεισμών στον ελληνικό χώρο. Εντάσσεται στο πλαίσιο ενός ευρύτερου προγράμματος του Τομέα Γεωφυσικής του τμήματος Γεωλογίας του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης, το οποίο αφορά τη μελέτη και τη λύση επιστημονικών προβλημάτων που σχετίζονται άμεσα με τη λήψη μέτρων αντισεισμικής προστασίας των κατοίκων του ελλαδικού χώρου.

Στο πρώτο κεφάλαιο της παρούσας εργασίας περιγράφονται βασικές έννοιες και ορισμοί που αφορούν στη μελέτη της συμπεριφοράς της σεισμικότητας, ενώ περιγράφονται συνοπτικά και προγενέστερες έρευνες και μελέτες που έγιναν πάνω στο αντικείμενο αυτό, τόσο σε διεθνές επίπεδο όσο και στον ελληνικό χώρο. Η παράθεση των πληροφοριών αυτών γίνεται, ώστε να γίνει ευκολότερα κατανοητό από τον αναγνώστη το θέμα που διαπραγματεύεται η εργασία αυτή.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα δεδομένα παρατήρησης και περιγράφεται η διαδικασία επιλογής τους από το σεισμικό κατάλογο με βάση τα κριτήρια που απαιτούνται κάθε φορά για την μελέτη της σεισμικότητας. Παράλληλα, περιγράφονται η επεξεργασία αυτών των δεδομένων, η χρονική και χωρική κατανομή αυτών, καθώς επίσης και τα συμπεράσματα που εξάγονται από τη μελέτη αυτών.

Στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφεται συνοπτικά η μεθοδολογία υπολογισμού των τάσεων Coulomb, δίνεται ο ορισμός τους, περιγράφεται θεωρητικά η μέθοδος που ακολουθείται στην πρόγνωση των σεισμών με βάση τις μεταβολές των τάσεων αυτών για την εξαγωγή συμπερασμάτων. Παρατίθενται τα συμπεράσματα από την εφαρμογή της μεθόδου αυτής στην περιοχή της Κεφαλονιάς.

Στο τέταρτο κεφαλαίο παρουσιάζονται όλα τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τις μεθοδολογίες που εφαρμόστηκαν.

Η εργασία αυτή δε θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί χωρίς τη συμβολή υποστήριξη και καθοδήγηση των επιβλεπόντων καθηγητών κ. Παπαδημητρίου Ελευθερίας και κ. Βασίλη Καρακώστα τους οποίους και ευχαριστώ θερμά.



Κεφάλαιο 1°

Βασικές έννοιες και ορισμοί

Από τα πρώτα χρόνια ανάπτυξης της Σεισμολογίας οι επιστήμονες έψαχναν τρόπους προσδιορισμού πρόδρομων φαινομένων των σεισμών. Ένα από αυτά είναι οι σεισμικές ησυχίες. Είναι από τα φαινόμενα που έχουν ερευνηθεί αρκετά τα τελευταία χρόνια και έχουν αποκτηθεί πολύτιμες γνώσεις από τη μελέτη τους, ενώ έχουν εξαχθεί πολύτιμα συμπεράσματα για τη σεισμικότητα και για το μηχανισμό γένεσης των σεισμών, καθώς και την κατανομή τους στο χώρο που μελετάται κάθε φορά. Το αντικείμενο αυτής της εργασίας διαπραγματεύεται το θέμα των σεισμικών ησυχιών. Προσπαθεί να προσεγγίσει το πρόβλημα των πρόδρομων σεισμικών φαινομένων και να δώσει τρόπους ερμηνείας τους, μοντέλα ανάλυσης και περιγραφής τους, καθώς και να προτείνει κατευθύνσεις για μελλοντική έρευνα. Σκοπός της εργασίας αυτής είναι η μελέτη της συμπεριφοράς της σεισμικότητας στην ευρύτερη περιοχή της νήσου Κεφαλονιάς πριν και μετά την εκδήλωση του ισχυρού σεισμού $M=7,0$ που σημειώθηκε το 1983. Το επίκεντρο του βρίσκεται στο θαλάσσιο χώρο του Ιονίου Πελάγους, νοτιοδυτικά της Κεφαλονιάς. Για το σκοπό αυτό χαρτογραφήθηκαν οι αλλαγές του ρυθμού σεισμικότητας των σεισμών με $M \geq 5,0$ σε κυκλικές περιοχές με διάφορες ακτίνες γύρω από το επίκεντρο του σεισμού. Ακολουθώντας, συνεκτιμήθηκαν οι ρυθμοί σεισμικότητας οι οποίοι και χαρτογραφήθηκαν για περαιτέρω μελέτη και εξαγωγή συμπερασμάτων. Ακόμη, χρησιμοποιήθηκαν και οι μεταβολές των τάσεων Coulomb για τη διαμόρφωση της συνολικής εικόνας της πρόδρομης σεισμικότητας.

1.1 Βασικές έννοιες

Ένα από τα βασικά προβλήματα που απασχολεί την επιστημονική κοινότητα, είναι η εύρεση ενός απλού και αξιόπιστου τρόπου πρόγνωσης των σεισμών. Με το πρόβλημα αυτό έχουν ασχοληθεί αρκετοί επιστήμονες στον κόσμο μελετώντας πρόδρομα φαινόμενα πριν από την εκδήλωση μεγάλων σεισμών. Με την πρόοδο των ερευνών αυτών βρέθηκε ότι παρατηρείται μια μείωση των μικρότερων σε μέγεθος σεισμών πριν από την εκδήλωση σεισμών μεγαλύτερων σε μέγεθος. Βρέθηκε επίσης ότι οι μικρότεροι σεισμοί σε μέγεθος είναι περισσότεροι σε πλήθος από τους μεγαλύτερους. Το φαινόμενο αυτό ποικίλλει σε χρονική διάρκεια όσο και σε έκταση (περιοχή γύρω από την εστία του μελετώμενου μεγαλύτερου σε μέγεθος σεισμού). Στη συνέχεια παρατίθενται οι ορισμοί και οι έννοιες που είναι απαραίτητα προκειμένου ο αναγνώστης να κατανοήσει το θέμα της εργασίας αυτής.

Ο ρυθμός σεισμικότητας, είναι ο ανά μονάδα χρόνου και όγκου αριθμός σεισμών με $M > M_{\min}$, κατά τη διάρκεια της σταθερής κατάστασης της σεισμικότητας σε συγκεκριμένο σεισμογόνο όγκο κατά το χρονικό διάστημα ανάμεσα σε δυο ισχυρούς σεισμούς.

Συνεχίζοντας την παράθεση βασικών εννοιών και ορισμών, είναι απαραίτητο να δώσουμε τον ορισμό της **σεισμικής ησυχίας**, ο οποίος προσδιορίζεται ως μια ελάττωση του ρυθμού σεισμικότητας, σε μια περιοχή μετά από σύγκριση του ρυθμού αυτού σε διαφορετικές χρονικές περιόδους. Η σύγκριση αυτή γίνεται με βάση κάποιες αυστηρά ορισμένες προδιαγραφές. Ο βαθμός ελάττωσης λαμβάνει χώρα κατά μέρος ή ολόκληρος στο σεισμογόνο όγκο του διαδοχικού κύριου σεισμού και εκτείνεται μέχρι το χρόνο του κύριου σεισμού. Ή μπορεί να διαχωρίζεται από αυτόν από ένα σχετικά σύντομο αυξημένο ρυθμό σεισμικότητας. Συνήθως, ο ρυθμός ελάττωσης σεισμικότητας είναι μεγαλύτερος από 40% και λαμβάνει χώρα σε όλα τα εύρη μεγεθών.

Ο σεισμικός κύκλος είναι ο κύκλος τεκτονικής φόρτισης ανάμεσα σε δυο διαδοχικές διαρρήξεις σε ένα συγκεκριμένο τμήμα ενεργού ρήγματος ή όριο λιθοσφαιρικών πλακών.

Τα σεισμικά κενά, είναι οι ασυνέχειες (κενά) στη σεισμική δραστηριότητα που παρατηρούνται επί ορισμένο χρονικό διάστημα σε συγκεκριμένα τμήματα σεισμικών ζωνών, όπου έγιναν αργότερα σεισμοί, των οποίων οι σεισμογόνοι

χώροι κάλυψαν τις ασυνέχειες αυτές. Χωρίζονται σε **πρώτου** είδους που είναι κενά στη χωρική κατανομή ισχυρών σεισμών σε ζώνες διάρρηξης και **δευτέρου** είδους που αφορούν κενά στην εκδήλωση σεισμών μικρών μεγεθών πριν από την εκδήλωση σεισμών μεγάλων μεγεθών (Mogi, 1969).

Συνοψίζοντας τα προηγούμενα μπορούμε να πούμε ότι οι σεισμικές συνθήκες που μελετώνται πριν την εκδήλωση κάποιου ισχυρού σεισμού, είναι τα μεγέθη των λιγότερο ισχυρών σεισμών που καταγράφονται, η συχνότητα γένεσης τους, η χωρική κατανομή της σεισμικότητας και όπου μπορεί να προσδιοριστεί, η χρονική κατανομή των παρατηρούμενων σεισμών που προέρχονται από την και κοντά στην αναμενόμενη ζώνη διάρρηξης για αρκετές δεκαετίες πριν από τον κύριο σεισμό.

1.2 Προϋποθέσεις μελέτης σεισμικής ησυχίας σε μια περιοχή

Για να μελετηθεί η σεισμική ησυχία σε κάθε περίπτωση, πρέπει να ισχύουν κάποιες προϋποθέσεις, οι οποίες αφορούν τους σεισμικούς καταλόγους που χρησιμοποιούνται, ώστε να αποφευχθούν σημαντικά σφάλματα στις μετρήσεις. Αυτές περιληπτικά είναι:

- Αποτίμηση των μεταβολών του σεισμικού καταλόγου που χρησιμοποιείται, εξαιτίας διορθώσεων.
- Καθορισμός του ελάχιστου ομογενούς μεγέθους που ανταποκρίνεται στο σκοπό της ερευνάς κάθε φορά.
- Απομάκρυνση εξαρτημένων γεγονότων από ανθρωπογενείς αλλαγές στο σεισμικό κατάλογο.
- Ποσοτική μέτρηση του πλήθους και της σημαντικότητας της ανωμαλίας που προκύπτει από τις αλλαγές αυτές.
- Ποσοτικός προσδιορισμός της αρχής της ανωμαλίας.
- Εκτίμηση της διάστασης της ανωμαλίας.
- Αξιολόγηση της σημαντικότητας της ανωμαλίας ως συνάρτηση της ζώνης συχνότητων.
- Αποτίμηση του βαθμού παρατήρησης των λαθεμένων συναγερμών.
- Σχεδιασμός πειράματος που ανταποκρίνεται στην τεκτονική δομή της μελετώμενης περιοχής και το οποίο είναι κατάλληλο για τον έλεγχο της υπόθεσης της σεισμικής ησυχίας.
- Παράλληλα χρειάζεται να βρεθούν ανεξάρτητες αποδείξεις ότι οι πρόδρομες διαδικασίες έχουν εμφανιστεί πριν από τον κύριο σεισμό.

Όπως γίνεται άμεσα αντιληπτό οι προϋποθέσεις είναι πολλές και αυστηρές, για αυτό και καμιά μελέτη πρόδρομης σεισμικής ησυχίας δεν έχει ικανοποιήσει ακόμα όλα τα κριτήρια που αναφέρθηκαν παραπάνω. αλλά προτείνονται ως ιδανικά. Τα χαρακτηριστικά μιας σεισμικής ησυχίας μπορούν να συνοψισθούν στα παρακάτω

1.3 Χαρακτηριστικά σεισμικής ησυχίας

Ύστερα από αρκετές μελέτες και έρευνες, έχει βρεθεί ότι το ποσοστό του ρυθμού ελάττωσης της σεισμικότητας πρέπει να είναι μεγαλύτερο από 40% και σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να φτάσει το 90%. Γι' αυτό, οι περίοδοι σεισμικής ησυχίας είναι συχνά πολύ προφανείς και ευπροσάρμοστες σε διαφορετικές προσεγγίσεις, ή ακόμη ευάλωτες σε λάθη στην ανάλυση.

Η διακύμανση του μέσου ρυθμού σεισμικότητας κατά τη διάρκεια του χρόνου της ανωμαλίας είναι αξιοσημείωτα χαμηλή στις περισσότερες περιπτώσεις. Ταυτόχρονα, το χωρικό μέγεθος των ανωμαλιών σεισμικής ησυχίας δεν είναι συνήθως καλά προσδιορισμένο. Αυτό συμβαίνει επειδή στα τηλεσεισμικά δεδομένα που λαμβάνονται η σεισμική πυκνότητα ανά όγκο μελετώμενης περιοχής είναι πολύ χαμηλή, ώστε να επιτρέψει ακριβή καθορισμό των ορίων της χωρικής ανωμαλίας. Σε μερικά από τα τοπικά σύνολα δεδομένων δεν υπάρχουν καταγεγραμμένοι πολλοί σεισμοί μετά από το τέλος της κύριας διάρρηξης. Στα περισσότερα σύνολα σεισμικών δεδομένων ο βαθμός ανωμαλίας δείχνει περίπου ίσος με αυτόν του σεισμογόνου όγκου. Σε λίγες περιπτώσεις, φαίνεται ότι ο όγκος της σεισμικής ησυχίας ίσως είναι μεγαλύτερος από τον όγκο της πηγής.

Ο χρόνος εκκίνησης μιας σεισμικής ησυχίας καθορίζεται ακριβώς στις περισσότερες περιπτώσεις, ενώ η διάρκεια της σεισμικής ησυχίας προσδιορίζεται σε ικανοποιητικό βαθμό. Το εύρος των μεγεθών στο οποίο προκύπτει η σεισμική ησυχία δείχνει να περιλαμβάνει όλα τα μεγέθη, μικρά και μεγαλύτερα. Μόνο όταν χρησιμοποιούνται οι ισχυρότεροι σεισμοί ο ρυθμός ελάττωσης σεισμικότητας τείνει να γίνει λιγότερο σημαντικός, σύμφωνα με στατιστικές δοκιμασίες.

Η αποτυχία στην πρόβλεψη καθορίζεται ως εμφανίσεις κύριων σεισμών χωρίς πρόδρομη σεισμική ησυχία. Μερικές τέτοιες περιπτώσεις βρέθηκαν στις ίδιες περιοχές όπου αναφέρθηκαν και επιτυχίες (Habermann, 1981b; Wyss et al., 1984; Wyss and Burford, 1987). Διαιρώντας τον αριθμό των αποτυχιών με αυτόν των επιτυχιών στην ίδια περιοχή φτάνουμε περίπου στο 50% ως μέσο ρυθμό αποτυχίας. Και πάλι αυτή η τιμή μπορεί να αλλάξει καθώς γίνονται διαθέσιμες περισσότερες πληροφορίες και επίσης μπορεί να είναι συνάρτηση του τεκτονικού περιβάλλοντος.

Για την εύρεση και τη μελέτη της σεισμικής ησυχίας, έχουν αναπτυχθεί ορισμένα στατιστικά και μηχανικά εργαστηριακά μοντέλα. Προκειμένου να είναι χρήσιμο ένα σεισμικό μοντέλο στην πρόγνωση συνεχών κύριων σεισμών, πρέπει να είναι προσωρινά σταθερό. Για παράδειγμα, το μοντέλο πρέπει να επαναλαμβάνεται χρονικά στον ίδιο τόπο (Von Seggern et al., 1981). Αυτό το κριτήριο πρέπει να τηρείται πάντα, αλλά μόνο για επαναλαμβανόμενους κύριους σεισμούς με σχετικά υψηλούς χρόνους επανάληψης (περιορισμένοι από τα δεδομένα των υπαρχόντων σεισμικών καταλόγων), για τους οποίους υπάρχει αρκετά μεγάλη ακολουθία προσεισμών. Δυστυχώς υπάρχουν πολύ λίγες περιπτώσεις αυτού του είδους.

Με γνώμονα αυτόν τον περιορισμό, πρέπει το κάθε μοντέλο, πριν εφαρμοστεί σε πολλές περιοχές, να ελέγχεται σ' αυτή την περιοχή για τη σταθερότητα και την εγκυρότητα του. Η δοκιμασία Z, ο αλγόριθμος RTL, ο συντελεστής συσχέτισης D_2 , είναι μερικά μόνο από τα στατιστικά μοντέλα που χρησιμοποιούνται.

Η δοκιμασία Z είναι μια παραμετρική στατιστική δοκιμασία συγκρίνει τους δυο μέσους όρους ανεξαρτήτων δειγμάτων. Στην περίπτωση της σεισμολογίας οι μέσοι όροι είναι οι μέσοι ρυθμοί μεταβολής γένεσης των σεισμών δυο χρονικών περιόδων (Habermann 1983). Η δοκιμασία Z ορίζεται ως εξής:

$$z = \frac{(m_1 - m_2)}{\sqrt{(\sigma_1^2/n_1) + (\sigma_2^2/n_2)}}$$

Όπου m_1 m_2 οι μέσοι όροι των δυο περιόδων που θέλουμε να συγκρίνουμε, σ_1 και σ_2 οι αποκλίσεις αυτών των μέσων όρων και n_1 n_2 ο αριθμός των δειγμάτων κάθε περιόδου αντίστοιχα.

Ο συντελεστής συσχέτισης αποτελεί ακόμα ένα εργαλείο κλασματικής ανάλυσης και προκύπτει από τον τύπο:

$$D_2 = \lim(r \rightarrow 0) \log C(r) / \log r$$

Με το r να αντιπροσωπεύει την απόσταση μεταξύ 2 επικέντρων και $C(r)$ είναι η συνάρτηση συσχέτισης

$$C(r) = 2N_{R < r} / N(N - 1),$$

Όπου $N_{R < r}$ είναι τα ζεύγη των σεισμών που διαχωρίζονται από μια απόσταση R μικρότερη από την r . Ο συντελεστής προσδιορίζεται από την προσαρμογή

ευθείας γραμμής σε λογαριθμικό γράφημα $C(r) - r$. Η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή της r καθορίζονται λαμβάνοντας υπόψη τα σφάλματα στην τοποθεσία του επίκεντρου και στο εύρος της περιοχής μελέτης.

Η μέθοδος RTL, είναι ουσιαστικά μια αριθμητική παράμετρος που είχε προταθεί αρχικά από τους Sobolev και Tyurkin (1996) για να βοηθήσει στην διερεύνηση της ιδιαιτερότητας της επικρατούσας σεισμικότητας πριν από την εκδήλωση ισχυρών σεισμών σε μια περιοχή. Η μέθοδος αυτή έχει δημιουργηθεί ώστε να ερευνήσει πληρέστερα την υπόθεση ότι η σεισμική ησυχία και οι πρόδρομοι σεισμοί διαδέχονται το ένα το άλλο στο επίκεντρο ενός μελλοντικού ισχυρού σεισμού. Σε αυτή τη διαδικασία, η σεισμική ησυχία σχεδόν πάντα προκύπτει κατά τη διάρκεια του σταδίου της προετοιμασίας του κύριου σεισμού και της συσσώρευσης της σεισμικής ενέργειας στην περιοχή του επικέντρου του.

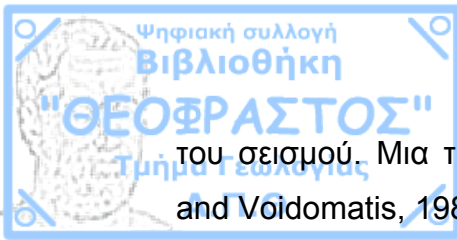
Η RTL παράμετρος έχει συζητηθεί λεπτομερώς (Sobolev Tyurkin 1996, 1996b? Di Gionambattista και Tyurkin, 1999) και για το λόγο αυτό δεν θα αναλυθεί εκτενώς εδώ. Η RTL (x, t) προγνωστική παράμετρος υπολογίζεται στο χώρο-χρονικό σημείο (x, t) που μας ενδιαφέρει κάθε φορά, όπως το επίκεντρο ενός μελλοντικού σεισμού, και προκύπτει από τον πολλαπλασιασμό των παρακάτω εξισώσεων:

$$R(x, t) = \left[\sum_{i=1}^n \exp\left(\frac{r_i}{r_0}\right) \right] - R_s$$

$$T(x, t) = \left[\sum_{i=1}^n \exp\left(-\frac{t - t_i}{t_0}\right) \right] - T_s$$

$$L(x, t) = \left[\sum_{i=1}^n \left(\frac{l_i}{r_i}\right) \right] - L_s$$

Όπου η μεταβλητή r_i αντιπροσωπεύει την απόσταση μεταξύ των σεισμών που συνέβησαν πριν από το χρόνο t εκδήλωσης του κύριου σεισμού και ο υπό δοκιμή σημείο, t_i είναι ο χρόνος των πρόδρομων σεισμών που εκδηλώθηκαν και l_i είναι το μέγεθος του επικέντρου των σεισμών που προηγήθηκαν του κύριου σεισμού που ερευνάται τη δεδομένη χρονική στιγμή. Η τιμή του l_i υπολογίζεται σύμφωνα με την εμπειρική σχέση μεταξύ του μεγέθους του επικέντρου και του μεγέθους



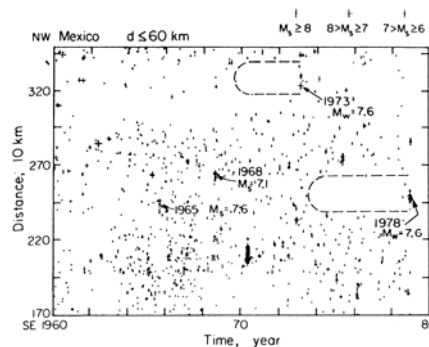
του σεισμού. Μια τέτοια σχέση είναι: $\log.(li) = D \cdot 0.44M - 1,289$ (Papadopoulos and Voidomatis, 1987)

Στην εργασία αυτή δε θα αναφερθούμε αναλυτικά σε στατιστικές μεθόδους και μαθηματικά μοντέλα επειδή εκτεταμένη αναφορά σε αυτά ξεφεύγει από τους σκοπούς μας. Όμως στο σημείο αυτό κρίνεται σκόπιμη μια σύντομη αναφορά των αρχικών μεθόδων και μελετών που αναπτύχθηκαν προκειμένου να μελετηθούν τα πρόδρομα σεισμικά φαινόμενα και κατά επέκταση οι σεισμικές ησυχίες.

1.4 Αρχικές μέθοδοι και μελέτες

Ο καθορισμός σεισμικής ησυχίας μέσα από μελέτες που εκπόνησαν διάφοροι ερευνητές, εξελίχθηκε με την ανάπτυξη τεχνικών για τη μελέτη των φαινομένων. Οι αρχικές μελέτες γενικά, έδειχναν χωροχρονική κατανομή ή χάρτες σεισμικότητας και με βάση αυτές τις μελέτες η σεισμική ησυχία καθορίστηκε ως η κενή περιοχή σ' αυτά τα γραφήματα. Ο καθορισμός της σεισμικής ησυχίας έγινε πιο ποσοτικός από τα πρώτα χρόνια της δεκαετίας του 1980 με την εφαρμογή στατιστικών τεχνικών για αναγνώριση ανωμαλιών. Όμως, ως πρώτες έρευνες είχαν ορισμένες ιδιομορφίες, όπως το ότι δεν καθόριζαν εάν και πότε η ζώνη διάρρηξης εισήλθε σε περίοδο σεισμικής ησυχίας εξαιτίας περιορισμών των σεισμικών καταλόγων.

Εξάλλου, αποκοπές μεγεθών που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτές τις μελέτες ήταν αρκετά υψηλές εμποδίζοντας άμεση σύγκριση με τις σύγχρονες εργασίες. Παράλληλα, η παρατήρηση της ετερογενούς συμπεριφοράς στη ζώνη διάρρηξης αντιτίθεται ισχυρά με τις απόψεις που επικρατούσαν κατά τη διάρκεια της επικράτησης του μοντέλου διαστολής – διάχυσης (αρχές 1970), όταν αρκετά αμετάβλητα πρόδρομα φαινόμενα αναμένονταν 3 φορές μεγαλύτερα σε μέγεθος από την επερχόμενη ζώνη διάρρηξης.



Σχήμα 1. Διάγραμμα χρόνου-απόστασης της σεισμικότητας του Μεξικού το οποίο προέκυψε από τον χωροχρονικό κατάλογο NOAA. Οι σπικτικές καμπύλες κυκλώνουν την περίοδο σεισμικής ησυχίας. Το μέγεθος των συμβόλων είναι ανάλογο των μεγεθών. (Habermann, 1988)

1.5 Άλλα προβλήματα

Στο σημείο αυτό κρίνεται σκόπιμη μια αναφορά των βασικών σημαντικών προβλημάτων που προκύπτουν στην προσπάθεια εύρεσης και ερμηνείας των πρόδρομων σεισμικών δεδομένων και των σεισμικών ησυχιών κατ' επέκταση. Το μεγαλύτερο πρόβλημα που αντιμετωπίζουν οι επιστήμονες που χρησιμοποιούν σεισμολογικά δεδομένα, είναι οι διαβρωτικές και ταυτόχρονα αρνητικές συνέπειες των ανθρωπογενών αλλαγών στους σεισμικούς καταλόγους, οι οποίες αναπόφευκτα επιφέρουν σφάλματα. Είναι ένα πρόβλημα που παρίσταται σθεναρά σε όλες τις μελέτες, το οποίο καταδείχθηκε για πρώτη φορά από τους Habermann (1982a), Perez and Scholz (1984) και άλλους επιστήμονες.

Αν κάποιος κατορθώσει να εξαλείψει τις ανθρωπογενείς αλλαγές ως εξήγηση για παρατηρημένο πρόδρομο, τότε το κυριότερο πρόβλημα που παραμένει είναι ο ρυθμός ψευδών συναγερμών που σχετίζονται με το πρόδρομο. Το τελευταίο πρόβλημα είναι ο καθορισμός του βέλτιστου αποδεκτά στατιστικού πλαισίου εργασίας για μελέτες στις σεισμικές αλλαγές. Αρκετές στατιστικές προσεγγίσεις έχουν προταθεί και όλες δείχνουν να παράγουν σύμφωνα αποτελέσματα. Η φύση των παρατηρούμενων αλλαγών, είναι ισχυρή συνάρτηση των μεγεθών των σεισμών που λαμβάνονται υπόψη.

Συστηματικές αλλαγές στα μεγέθη μπορούν να προκαλέσουν προφανείς αλλαγές στους ρυθμούς σεισμικότητας που μπορούν εύκολα να ερμηνευθούν λανθασμένα ως πρόδρομα φαινόμενα. Η πρώτη μελέτη που θεμελίωσε την άποψη αυτή, ήταν των Perez and Scholz (1984) πάνω στον τηλεσεισμικό κατάλογο του 20^{ου} αιώνα. Με την έρευνα αυτή, οι προαναφερθέντες επιστήμονες κατέδειξαν το αποτέλεσμα της συστηματικής αλλαγής των μεγεθών στην πρόγνωση σεισμών. Δημιούργησαν συγκεντρωτικά διαγράμματα για όλο τον κόσμο και έλαβαν υπόψη μεγέθη μεγαλύτερα από 7.

Σε όλες τις μελέτες των συστηματικών λαθών στα μεγέθη, κάποιος χρειάζεται κριτήρια με τα οποία αποφασίζει για τα μεγέθη. Οι Perez and Scholz καθιέρωσαν κριτήρια υποθέτοντας ότι ο παρών ρυθμός αναφοράς μεγάλων σεισμών είναι πλήρης και ότι οι σεισμοί με μεγέθη $M > 7$ προκύπτουν σε όλο τον κόσμο με σταθερό ρυθμό. Με αυτές τις παραδοχές προσάρμοσαν τους ρυθμούς των παρελθόντων σεισμών με αυτούς των πρόσφατων.

Βρήκαν ότι τα μεγέθη M_s μεγάλων σεισμών πριν το 1908 ήταν συστηματικά υπερτιμημένα το λιγότερο κατά 0,5 μονάδα μεγέθους και το M_s γεγονότων κατά την περίοδο 1908-1948 έχουν σταθερά υπερεκτιμηθεί κατά 0,2 μονάδες, σε σχέση με το M_s που αποδόθηκε σε μεγέθη που προέκυψαν μετά το 1948.

Για να αποφευχθούν τα παραπάνω προβλήματα, είναι αναγκαίο ο σεισμικός κατάλογος που χρησιμοποιείται να είναι απαλλαγμένος από τέτοια σφάλματα. Η διαδικασία που ακολουθείται είναι σύνθετη και εξαρτάται πάντα από την ακρίβεια που θέλουμε να έχουμε στην ερευνητική εργασία που εκτελούμε κάθε φορά. Παράγοντες όπως λάθη στο επίκεντρο του κάθε σεισμού, λάθη στην καταγραφή του βάθους, εκδήλωσής του και σφάλματα στις καταγραφές σεισμικών γεγονότων λόγω ελλείψεων στο σειсмоγραφικό δίκτυο, όπως αραιή κατανομή των σεισμικών σταθμών και η παλαιότητα των χρησιμοποιούμενων οργάνων, λαμβάνονται σοβαρά υπόψη.

1.6 Ο σύνθετος νόμος της τριβής

Επειδή η κυρίαρχη δύναμη που επικρατεί και διαδραματίζει σημαντικό ρόλο τόσο κατά τη διάρκεια εκδήλωσης των σεισμών, όσο και κατά τη διάρκεια των σεισμικών ησυχιών είναι η τριβή, κρίνεται αναγκαία μια σύντομη αναφορά στους νόμους που τη διέπουν από γεωφυσική άποψη.

Σύμφωνα με το Ruina (1983) η τάση τριβής που ακολουθεί νόμο που εξαρτάται από το ρυθμό και την κατάσταση της τριβής δίνεται από:

$$\tau = \mu \cdot \sigma_n^{\text{eff}}, \quad \mu = \mu^* + \alpha \ln\left(\frac{V}{V_0}\right) + b \ln\left(V^* \frac{\theta}{L}\right)$$

όπου μ είναι συντελεστής τριβής μεταξύ των επιφανειών ολίσθησης, ο όρος μ_n^{eff} αντιπροσωπεύει την κάθετη τάση που δρα τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή, όπου V η ταχύτητα ολίσθησης ανάμεσα στις επιφάνειες του ρήγματος, ενώ θ είναι μια σταθερά που περιγράφει την κατάσταση της επαφής των ολισθαινόντων επιφανειών. Οι a, b, L είναι σταθερές υλικών, V^* είναι αυθαίρετα επιλεγμένη ταχύτητα αναφοράς και μ^* είναι μεταβλητή αναφοράς εξαρτώμενη από το V^* .

Η παράγωγος ως προς το χρόνο είναι :

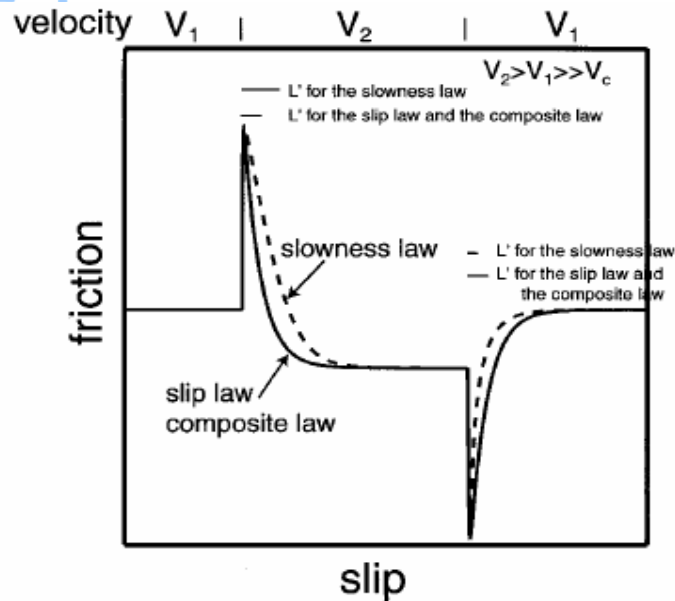
Για το νόμο αργής ολίσθησης: $\frac{d\theta}{dt} = 1 - \frac{\partial V}{L},$

για το νόμο της ολίσθησης: $\frac{d\theta}{dt} = -\left(\frac{\partial V}{dt}\right) \ln\left(\frac{\partial V}{L}\right)$

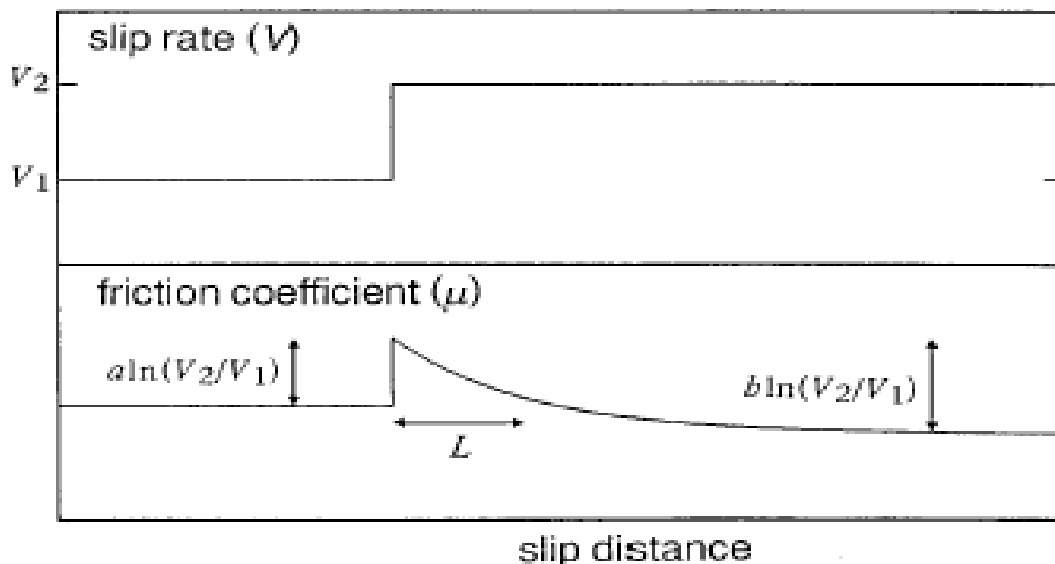
και για το σύνθετο νόμο: $\frac{d\theta}{dt} = \exp\left(-\frac{V}{V_c}\right) - \left(\frac{\theta V}{L}\right)$

Για τους δυο πρώτους νόμους η σταθερά μ_{ss} που είναι η μεταβλητή για σταθερή ταχύτητα ολίσθησης, καθορίζεται για $\frac{d\theta}{dt} = 0$, ως $\mu_{ss} = \mu^* + (\alpha - b) \ln(V/V^*)$.

Τα χαρακτηριστικά της σταθερής τριβής για τα οποία το μ είναι κοντά στο μ_{ss} έχουν εξεταστεί εργαστηριακά. Όταν το μ ακολουθεί νόμο που εξαρτάται από το ρυθμό και την κατάσταση της τριβής, μια βαθμιαία αλλαγή από ταχύτητα V_1 σε V_2 παράγει μια απότομη αλλαγή στο μ , που ακολουθείται από εξασθένιση του, με μια χαρακτηριστική απόσταση L μέχρι τη νέα σταθερή κατάσταση της τριβής όπως απεικονίζεται στο σχήμα.

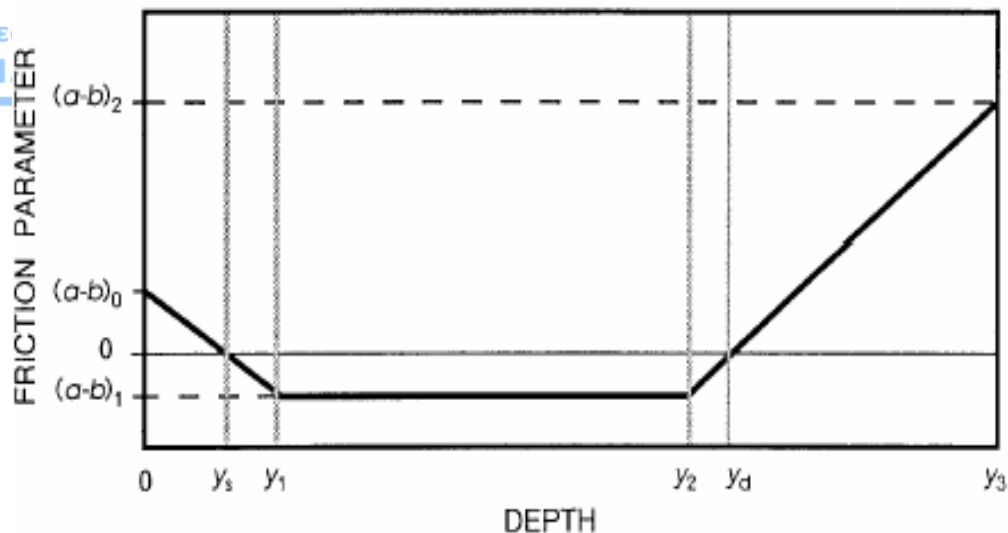


Σχήμα 2. Η διακύμανση του συντελεστή τριβής με την ολίσθηση, όταν η ταχύτητα ολίσθησης αλλάζει τμηματικά ανάμεσα σε V_1 και V_2 για τους νόμους της ολίσθησης, της αργής ολίσθησης και το σύνθετο νόμο, όπου υποθέτουμε ότι $V_2 > V_1 \gg V_c$ (Kato and Tullis, 2003).

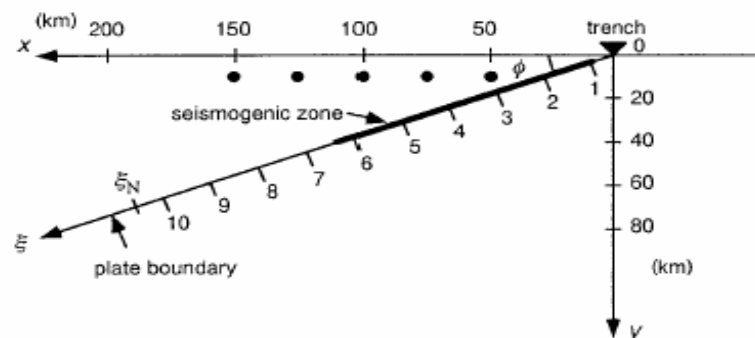


Σχήμα 3. Πάνω: Διαβάθμιση της αύξησης του ρυθμού ολίσθησης από V_1 σε V_2 . Κάτω: Διαβάθμιση του συντελεστή τριβής ως συνάρτηση της απόστασης ολίσθησης. Οι παράμετροι a και b , αντίστοιχα, υποδηλώνουν το άμεσο αποτέλεσμα και το έμμεσο αποτέλεσμα του ρυθμού ολίσθησης στην τριβή. Το L δείχνει την χαρακτηριστική απόσταση ολίσθησης που ορίζεται από την εκθετική αλλαγή στην τριβή κατά Kato et al. (1997).

Ο Ruina (1983) απέδειξε ότι η σχέση $(b-a) > 0$ είναι απαραίτητη συνθήκη για τη γένεση σεισμικής ολίσθησης. Αργότερα ανακάλυψε ότι η ολίσθηση τείνει να γίνει πιο ασταθής όσο το $(b-a)$ μεγαλώνει ή το L ελαττώνεται. Μεγάλο θετικό $(b-a)$ και μικρό L δείχνουν μεγάλη και απότομη ελάττωση στην μεταβλητή τριβής και αύξηση της ταχύτητας ολίσθησης που οδηγούν σε ασταθή ολίσθηση. Γι' αυτό οι τιμές a, b, L ελέγχουν τη συμπεριφορά ολίσθησης ενός ρήγματος.



Σχήμα 4: Η μεταβολή της παραμέτρου τριβής ($a - b$) με το βάθος. Η σεισμογενής ζώνη καθορίζεται από $(a - b) < 0$ στην περιοχή $y_s < y < y_d$ (Kato et al., 1997).



Σχήμα 5: Σχηματική αναπαράσταση 2-D μοντέλου σε ζώνη κατάδυσης. Η αρχή των συντεταγμένων (x, y) τοποθετείται στον επιμήκη άξονα της τάφρου και ο άξονας των y τοποθετείται προς τα κάτω. Η απόσταση κατά μήκος του ορίου της πλάκας από την αρχή των δηλώνεται με το ξ . Kato et al., 1997

Για να γίνει πιο εύκολα κατανοητό το παραπάνω ακολουθούμε πειραματική προσέγγιση. Δημιουργούμε ένα 2-D μοντέλο ρήγματος με γωνία βύθισης ϕ σε ένα αμετάβλητο ελαστικό ημιχώρο, όπου θεωρείται ότι επικρατούν ανάστροφα ρήγματα. Θεωρούμε το ρήγμα με αρχικό πλάτος ως το όριο μεταξύ ηπειρωτικής πλάκας (πάνω αριστερά) και μιας ωκεάνιας πλάκας που βυθίζεται κάτω από την ηπειρωτική (κάτω δεξιά). Θεωρούμε καρτεσιανή συντεταγμένη (x, y) όπως φαίνεται και ξ είναι η απόσταση κατά μήκος του ορίου της πλάκας που μετρείται από την τάφρο.

Η περιοχή που καθορίζεται από $0 \leq \xi \leq \xi_N$ του ορίου της πλάκας, χωρίζεται σε N ισομήκεις κυψελίδες. Η ολίσθηση κατά μήκος κάθε κυψελίδας θεωρείται ενιαία. Η δύναμη της τριβής υπακούει στο νόμο τριβής μιας μεταβλητής και υποθέτουμε ότι ισχύει μόνο στην περιοχή $0 \leq \xi \leq \xi_N$.

Υποθέτουμε επίσης ότι η σταθερή ολίσθηση με ρυθμό ολίσθησης ανάλογο της σχετικής κίνησης των πλακών λαμβάνει χώρα στην περιοχή όπου $\xi \geq \xi_N$ στα

όρια των πλακών. Υπό τον όρο της στατικής ισορροπίας μπορούμε να λάβουμε αναλυτική παρατήρηση των τάσεων που προκαλούνται από την ημιστατική ολίσθηση στα όρια των πλακών, από τη θεωρία της ελαστικότητας (Rani and Singh, 1992). Όταν η ταχύτητα ολίσθησης ξεπεράσει μια συγκεκριμένη τιμή, η κατάσταση της στατικής ισορροπίας διαταράσσεται. Συνεπώς, προσδιορίζουμε περίπου τις δυναμικές τάσεις αποκοπής που επικρατούν στα όρια των πλακών, εισάγοντας την επίδραση της απώλειας της ενέργειας παραμόρφωσης μέσω της εκπομπής ελαστικών κυμάτων (Rice, 1993). Εφαρμόζοντας αυτή τη μέθοδο, μπορούμε να υπολογίσουμε αριθμητικά την εξέλιξη της ολίσθησης στα όρια των λιθοσφαιρικών πλακών και τις τάσεις στο γύρω χώρο.

1.7 Η ελληνική περιοχή μελέτης και σύντομη γεωτεκτονική περιγραφή αυτής

Κρίθηκε σκόπιμη η συνοπτική αναφορά των παραπάνω ορισμών και βασικών θεωριών, προκειμένου ο αναγνώστης να κατανοήσει και να αποσαφηνίσει βασικές αρχές και κανόνες που διέπουν τη μελέτη των σεισμών, ενώ ταυτόχρονα θα βοηθηθεί στην καλύτερη κατανόηση του αντικειμένου που διαπραγματεύεται αυτή η εργασία. Βέβαια δε θα αναπτυχθούν πολύπλοκες έννοιες ή μοντέλα μαθηματικά αλλά απλή προσέγγιση στο όλο θέμα των σεισμικών ησυχιών. Παράλληλα ακολουθεί μια σύντομη περιγραφή της περιοχής στην οποία βρίσκεται η Κεφαλονιά, που παρουσιάζει ιδιαίτερα αυξημένη σεισμικότητα και ιδιαίτερο ενδιαφέρον για τη γεωφυσική έρευνα.

Η περιοχή των κεντρικών Ιόνιων νησιών αποτελεί την πιο ενεργή σεισμική ζώνη στην ευρύτερη περιοχή της μικροπλάκας του Αιγαίου. Η μεγάλη σεισμική δραστηριότητα που παρατηρείται κατά μήκος του ενεργού περιθωρίου, καθώς και το πλήθος των σεισμών που έχουν καταγραφεί τουλάχιστον από το 1850 με πληρότητα μεγεθών από 6 και πάνω, καθιστούν την περιοχή αυτή ιδανική για τη μελέτη της διαδικασίας γένεσης σεισμών. Τα ιστορικά δεδομένα δείχνουν ότι ο ρυθμός σεισμικότητας για ισχυρούς σεισμούς ($M \geq 6,5$), σε αυτή τη ζώνη παρέμεινε σταθερός κατά τη διάρκεια των τελευταίων τεσσάρων αιώνων με μέσο όρο ένα ισχυρό σεισμό ανά δεκαετία (Παπαδημητρίου και Παπαζάχος 1985). Αρκετοί ισχυροί σεισμοί ($M \geq 7$) κατέστρεψαν επανειλημμένα αστικές περιοχές, όπως αναφέρουν ιστορικές πηγές, ενώ μικρότεροι σεισμοί ($6 \leq M \leq 7$) που συνέβησαν κατά τη διάρκεια του εικοστού αιώνα προκάλεσαν επίσης εκτεταμένες καταστροφές και απώλειες ανθρώπινων ζωών στην ευρύτερη περιοχή.

Η περιοχή της Κεφαλονιάς ανήκει γεωτεκτονικά στη ζώνη Παξών ή Προαπουλία καθώς επίσης και στην Ιόνιο ζώνη κατά ένα μικρό τμήμα της. Βρίσκεται σε μια πολύ δραστήρια περιοχή από τεκτονική άποψη, καθώς παρατηρείται σύγκλιση των λιθοσφαιρικών μικρό-πλακών της Αδριατικής και της μικρό-πλάκας του Αιγαίου. Η σύγκλιση αυτή γίνεται σε μια ζώνη ανάστροφων ρηγμάτων κατά μήκος των παράκτιων περιοχών της Πρώην Γιουγκοσλαβίας, Αλβανίας και της νοτιοδυτικής Ελλάδας. Η διεύθυνση του άξονα μέγιστης συμπίεσης είναι περίπου κάθετη με την διεύθυνση της Αδριατικοϊονίου ζώνης. Μεταξύ της ηπειρωτικής σύγκρουσης στα βόρεια και της ωκεάνιας κατάδυσης

στα νότια, παρατηρείται το δεξιόστροφο ρήγμα μετασχηματισμού της Κεφαλονιάς (Scordilis et al., 1985). Το μέγιστο σεισμικό

μέγεθος που είναι γνωστό για αυτό το ρήγμα είναι 7.4 (Παπαζάχος και Παπαζάχου, 1997).

Οι Louvari et al. (1999) μελέτησαν το ρήγμα μετασχηματισμού της Κεφαλονιάς και την επέκτασή του προς τα δυτικά, το ρήγμα της Λευκάδας. Χρησιμοποίησαν λύσεις μηχανισμών γένεσης μεγάλων και μέσων σεισμών, τα δεδομένα των οποίων είτε πάρθηκαν από προγενέστερες μελέτες, είτε προέκυψαν από ανάλυση σειсмоγραμμάτων, κατανομές σεισμικών επικέντρων, ιστορικά δεδομένα, καταγραφές μεγεθών και το βάθος στο οποίο συνέβησαν αυτά.



Σχήμα 6: Χάρτης της Ανατολικής Μεσογείου που δείχνει την ενεργό γεωδυναμική κατάσταση, τις κινήσεις των μικροπλάκων στην περιοχή και τη διαμόρφωση του Ελληνικού - Αιγαίου Τόξου και του Κυπριακού Τόξου (Παπαζάχος, 2001).



Κεφάλαιο 2^ο

Χρονική και χωρική κατανομή της σεισμικότητας

2.1 Εισαγωγή

Ο σκοπός της εργασίας αυτής, είναι η εξέταση της συμπεριφοράς των ενδιαμέσων σεισμών πριν και μετά το σεισμό του 1983 της Κεφαλονιάς ($M=7,0$) στο Ιόνιο πέλαγος. Οι αλλαγές της σεισμικότητας αντανakλούν αλλαγές στο πεδίο των τάσεων που επικρατούν στην περιοχή. Για αυτό το λόγο η εξέλιξη του πεδίου των τάσεων εξετάζεται όσο αυτό είναι δυνατό. Η διαδικασία αυτή επιτυγχάνεται με τον υπολογισμό των μεταβολών των τάσεων Coulomb, η οποία περιγράφεται αναλυτικότερα σε επόμενη ενότητα.

Ο ρυθμός γένεσης των σεισμών σε μια περιοχή, χρησιμοποιείται ως μέτρο του ποσοτικού προσδιορισμού της σεισμικότητας μιας περιοχής. Για αυτό το λόγο, επικεντρώνουμε τις προσπάθειές μας στο να κατανοήσουμε πώς διαμορφώνεται η σεισμικότητα τόσο χρονικά, όσο και χωρικά πριν και μετά τον κύριο σεισμό (Papadimitriou et al., 2005). Για τη μελέτη αυτή χρησιμοποιήθηκε ο κατάλογος των σεισμών του Τομέα Γεωφυσικής του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης, ο οποίος είναι πλήρης για μεγέθη $M \geq 4,5$ από το 1964 και περιλαμβάνει όλους τους σεισμούς του ελληνικού χώρου που έγιναν στη διάρκεια του 20^{ου} αιώνα.

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε σε γενικές γραμμές συνοψίζεται στα ακόλουθα βήματα και ενέργειες. Από τον κατάλογο που αναφέρθηκε παραπάνω λήφθηκαν υπόψη οι σεισμοί που έγιναν σε μια συγκεκριμένη απόσταση από το επίκεντρο του κύριου σεισμού. Με τον τρόπο αυτό δημιουργήθηκαν διάφοροι υποκατάλογοι. Με βάση τους υποκαταλόγους αυτούς, με τη βοήθεια κατάλληλου προγράμματος ηλεκτρονικού υπολογιστή, που μας βοηθά στην χαρτογράφηση του πλήθους των σεισμών σε σχέση με το χρόνο (σε έτη), προκύπτουν γραφήματα του ρυθμού σεισμικότητας της μελετώμενης περιοχής. Στις θέσεις (έτη) όπου αυξάνεται ο ρυθμός σεισμικότητας, επικρατεί αυξημένη σεισμική δραστηριότητα, ενώ στις θέσεις (έτη) όπου ο ρυθμός σεισμικότητας είναι σταθερός η σεισμική δραστηριότητα παρουσιάζεται μειωμένη γεγονός που μπορεί να ερμηνευθεί ως σεισμική ησυχία.

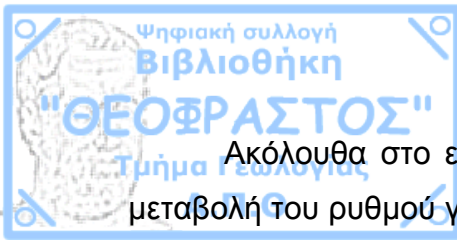
2.2 Μεταβολές του ρυθμού γένεσης των σεισμών για κυκλικές αποστάσεις των 30,30-60,60-90,90km από το επίκεντρο του σεισμού του 1983.

Παρατηρώντας τα σχήματα της χρονικής μεταβολής του ρυθμού γένεσης των σεισμών για την κυκλική απόσταση 0 έως 30km γύρω από τον κύριο σεισμό της Κεφαλονιάς (σχήμα 7α.1), βλέπουμε ότι ξεκινά μια περίοδος δραστηριότητας από το 1900 περίπου μέχρι το 1911 τόσο για τους σεισμούς με $5.0 \leq M \leq 5.4$, όσο και για τους σεισμούς με μεγέθη $5.5 \leq M \leq 5.9$ (σχήμα 7α.2). Η δραστηριότητα αυτή προφανώς σχετίζεται με το σεισμό του 1912 με μέγεθος $M=6.8$ (Παπαζάχος και Παπαζάχου, 2002). Ακολουθεί μια νέα περίοδος σεισμικής ησυχίας που διαρκεί μέχρι το 1930, όπου η συχνότητα των σεισμών αυξάνει συνεχώς, μέχρι το 1953, για όλο το σμήνος των σεισμών από $5.0 \leq M \leq 5.9$, έτος κατά το οποίο εκδηλώνεται ο σεισμός με μέγεθος $M=7.2$. Η δραστηριότητα συνεχίζεται αμείωτη και παρουσιάζει αυξητικές τάσεις σε όλο το εύρος των επιλεγμένων μεγεθών, με πιο χαρακτηριστική και θεαματική την αύξηση του 1983, έτος γένεσης του σεισμού με $M=7.0$.

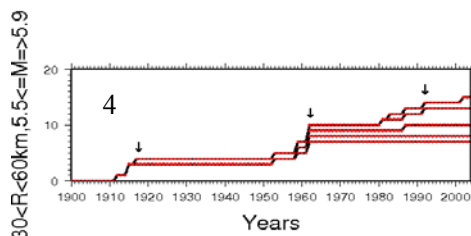
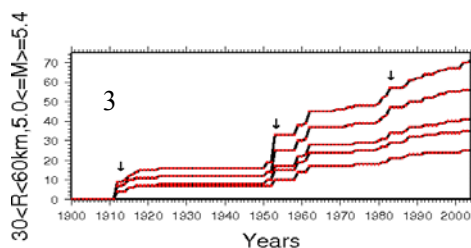
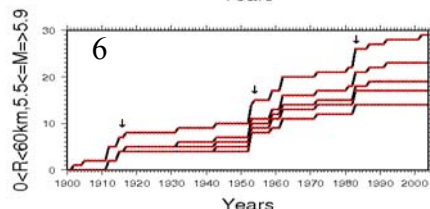
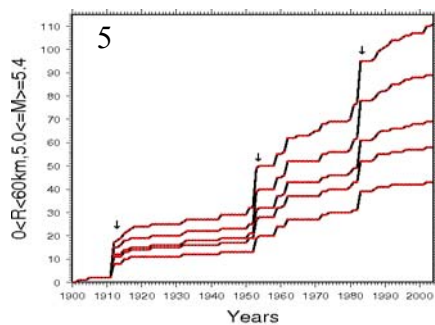
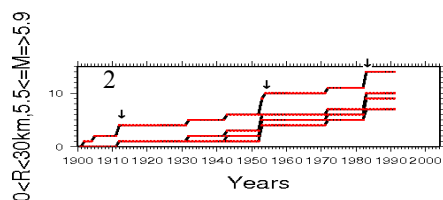
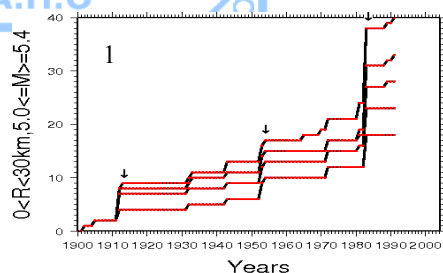
Συνεχίζοντας περαιτέρω τη μελέτη μας και αυξάνοντας σταδιακά την απόσταση από την εστία του κυρίου σεισμού, προχωρούμε στην κατασκευή γραφημάτων, όπου καταγράφεται η χρονική μεταβολή του ρυθμού γένεσης των σεισμών με μέγεθος $5.0 \leq M \leq 5.4$ για κυκλικό δακτύλιο ακτινών 30 έως 60km (σχήμα 7α.3).

Στο αμέσως ακόλουθο γράφημα (σχήμα 7α.4) περιλαμβάνονται οι σεισμοί με μεγέθη $5.5 \leq M \leq 5.9$. Χαρακτηριστικό είναι ότι παρατηρείται μια σεισμική ησυχία για το διάστημα 1961 έως 1980 για τους σεισμούς αυτούς, κάτι το οποίο δεν παρατηρείται στο προηγούμενο σχήμα. Συνοψίζοντας, είναι εμφανής η παρουσία τριών σεισμικών ησυχιών, η πρώτη μεταξύ των ετών 1915 έως 1930 για σεισμούς με μεγέθη από 5.5 έως 5.9 και από το 1922 έως 1953 για σεισμούς με μεγέθη 5.0-5.4.

Σε μεγαλύτερη κυκλική απόσταση από την εστία του κύριου σεισμού και πιο συγκεκριμένα για την απόσταση των 0 έως 60km (σχήμα 7α.5) αυτή τη φορά παρατηρούνται περίπου τα ίδια φαινόμενα και τρεις κύριες περίοδοι έξαρσης του ρυθμού σεισμικότητας για το σύνολο των σεισμών με μέγεθος $5.0 \leq M \leq 5.4$

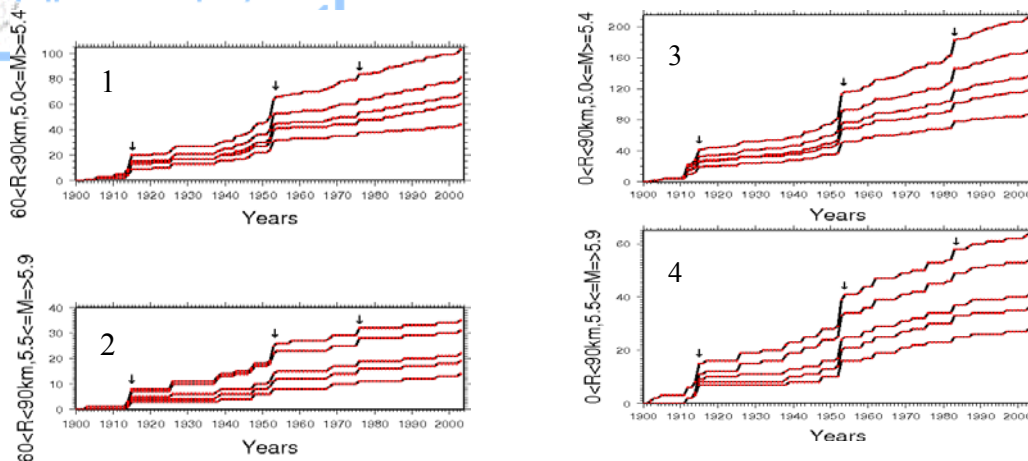


Ακόλουθα στο επόμενο γράφημα (σχήμα 7α.6) αποτυπώνεται η χρονική μεταβολή του ρυθμού γένεσης των σεισμών με $5.5 \leq M \leq 5.9$. Η διαφορά όμως εδώ, αν και όχι εύκολα αντιληπτή, έγκειται στη μικρή σεισμική ησυχία που παρατηρείται στα μεγέθη $5.5 \leq M \leq 5.9$ για τα έτη μεταξύ 1915 έως 1930, κάτι το οποίο δεν παρατηρείται για σεισμούς μικρότερων μεγεθών.



Σχήμα 7α: Χρονική μεταβολή του ρυθμού γένεσης των σεισμών.

(1) Σεισμοί με $5.0 \leq M \leq 5.4$ που έγιναν σε κυκλική περιοχή με ακτίνα $0 \leq R \leq 30 \text{ km}$ γύρω από επίκεντρο του σεισμού του 1983. (2) Το ίδιο με το (1) αλλά για σεισμούς με $5.5 \leq M \leq 5.9$. (3) Σεισμοί με $5.0 \leq M \leq 5.4$ που έγιναν σε κυκλική περιοχή με ακτίνα $30 \leq R \leq 60 \text{ km}$ γύρω από επίκεντρο του σεισμού του 1983. (4) Το ίδιο με το (3) αλλά για σεισμούς με $5.5 \leq M \leq 5.9$. (5) Σεισμοί με $5.0 \leq M \leq 5.4$ που έγιναν σε κυκλική περιοχή με ακτίνα $0 \leq R \leq 60 \text{ km}$ γύρω από επίκεντρο του σεισμού του 1983. (6) Το ίδιο με το (5) αλλά για σεισμούς με $5.5 \leq M \leq 5.9$.



Σχήμα 7β: Χρονική μεταβολή του ρυθμού γένεσης των σεισμών.

(1) Σεισμοί με $5.0 \leq M \leq 5.4$ που έγιναν σε κυκλική περιοχή με ακτίνα $60 \leq R \leq 90 \text{ km}$ γύρω από επίκεντρο του σεισμού του 1983. (2) Το ίδιο με το (1) αλλά για σεισμούς με $5.5 \leq M \leq 5.9$
(3) Σεισμοί με $5.0 \leq M \leq 5.4$ που έγιναν σε κυκλική περιοχή με ακτίνα $0 \leq R \leq 90 \text{ km}$ γύρω από επίκεντρο του σεισμού του 1983. (4) Το ίδιο με το (3) αλλά για σεισμούς με $5.5 \leq M \leq 5.9$.

Το σχήμα 7β αποτελεί συνέχεια του σχήματος 7α, έτσι στα σχήματα 7β.1 και 2 έχουν αποτυπωθεί η χρονική μεταβολή του ρυθμού γένεσης των σεισμών για κυκλική απόσταση από 60 έως 90km από το επίκεντρο του κύριου σεισμού του 1983. Στο 1 για σεισμούς με $5.0 \leq M \leq 5.4$ και στο 2 για σεισμούς με $5.5 \leq M \leq 5.9$. Ο ρυθμός γένεσης παρουσιάζει αυξητικές τάσεις με τρεις κύριες περιόδους έξαρσης το 1911 το 1953 το 1983. Είναι οι ίδιες μεταβολές που παρατηρούνται και στο σχήμα 7^α.

Ανάλογη μεταβολή καταγράφεται και στα σχήματα 7β.3 και 7β.4 όπου η κυκλική περιοχή έχει ακτίνα 0 έως 90km από το επίκεντρο του σεισμού του 1983.

Στο σχήμα 8 αποτυπώνεται η χρονική μεταβολή του ρυθμού σεισμικότητας για τους σεισμούς με μεγέθη 5.0 5.3 5.5 5.7 5.9. Για απόσταση 0-30km (σχήμα 8.1) παρατηρούνται τρεις κύριες μεταβολές του ρυθμού σεισμικότητας, το 1912, 1953 και τη θεαματικότερη όλων το 1983. Στο έτος αυτό η αύξηση είναι μέγιστη για το μέγεθος 5.9. Μικρές σεισμικές ησυχίες ανιχνεύονται ενδιάμεσα των τριών αυτών περιόδων με πιο χαρακτηριστική εκείνη του 1913-1932 που παρατηρείται σε όλο το εύρος μεγεθών.

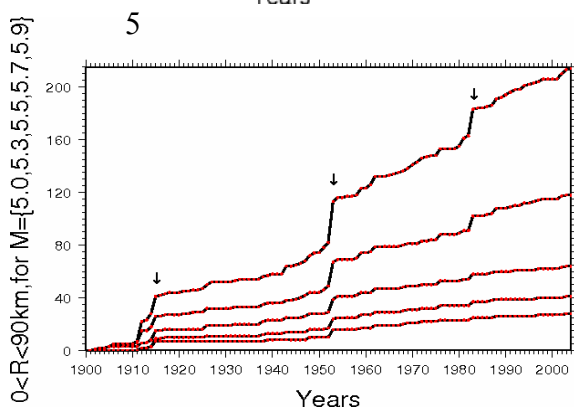
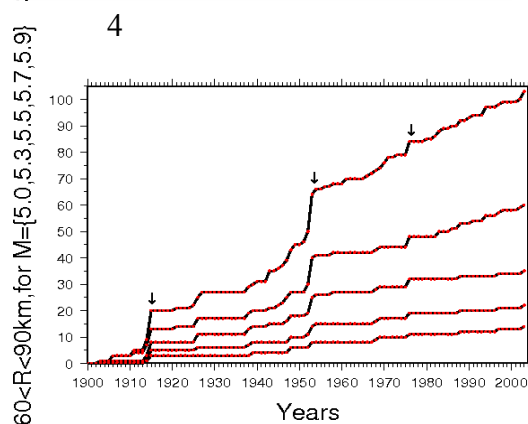
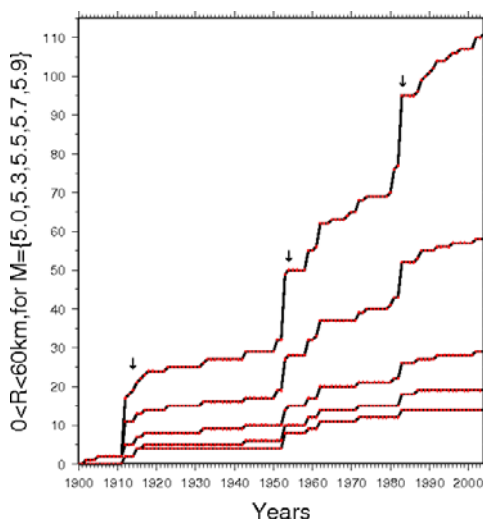
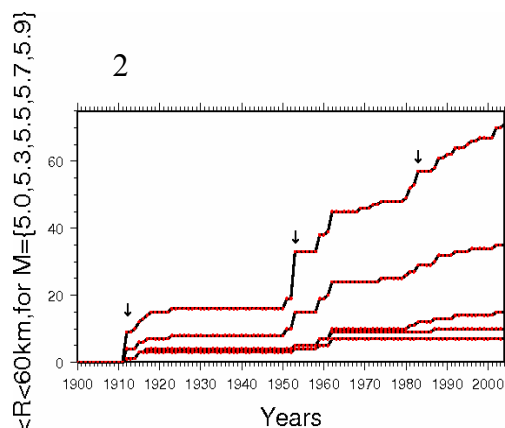
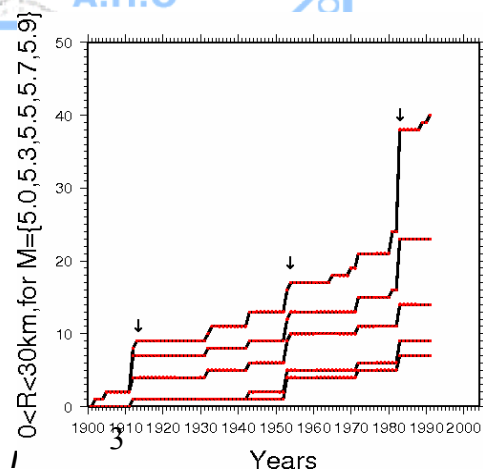
Στα 30 έως 60km (σχήμα 8.2) επικρατούν τρεις κύριες τάσεις αύξησης της χρονικής μεταβολής του ρυθμού γένεσης των σεισμών το 1912, 1953, 1983. Μια αρκετά μεγάλη σε διάρκεια σεισμική ησυχία εκδηλώνεται το 1922 και διαρκεί μέχρι το 1950. Κάτι ανάλογο παρατηρείται και στην αντίστοιχη απόσταση των 30-60km του σχήματος 7.2.

Για το δακτύλιο ακτίνας 0-60km (σχήμα 8.3) παρατηρούνται ομοιότητες με το γράφημα του σχήματος 7.3 χωρίς καμία αξιοσημείωτη σεισμική ησυχία να παρατηρείται σε αυτό το σχήμα. Και εδώ επικρατούν οι τρεις κύριες τάσεις αύξησης του ρυθμού σεισμικότητας στις ίδιες χρονολογίες.

Σε μεγαλύτερη απόσταση από την εστία σε ακτίνα 60-90km (σχήμα 8.4) παρατηρούνται τρεις χαρακτηριστικές μεταβολές, πιο συγκεκριμένα αυξήσεις, στα έτη 1915, 1953, 1983. Δεν παρατηρούνται ιδιαίτερες σεισμικές ησυχίες στην απόσταση αυτή για τα συγκεκριμένα μεγέθη τη χρονική περίοδο 1900-2004.

Για την κυκλική απόσταση των 0-90km (σχήμα 8.5) παρατηρούνται αυξητικές τάσεις της χρονικής μεταβολής του ρυθμού γένεσης των σεισμών χωρίς να παρατηρείται κάποια ιδιαίτερη σεισμική ησυχία ενώ υπάρχουν εμφανείς ομοιότητες με το αντίστοιχο σχήμα 7.5.

Έτσι, ως γενικό συμπέρασμα των σχημάτων 7 και 8 μπορεί να εξαχθεί, ότι υπάρχουν τρεις βασικές περίοδοι που καθορίζουν την αύξηση του ρυθμού γένεσης των σεισμών. Αυτές συμπίπτουν περίπου, αν όχι ακριβώς, με την εκδήλωση μεγάλων σεισμών, ενώ ενδιάμεσα, ανάλογα με την απόσταση και τα επιλεγμένα μεγέθη παρουσιάζονται σεισμικές ησυχίες. Οι τελευταίες είναι πιο εμφανείς σε μεγαλύτερα μεγέθη, δηλαδή 5,5-5,9 και σε δακτυλίους από 0 μέχρι 60km. Όσο απομακρυνόμαστε σε δακτυλικές αποστάσεις οι μεταβολές γίνονται πιο δύσκολα εμφανείς.



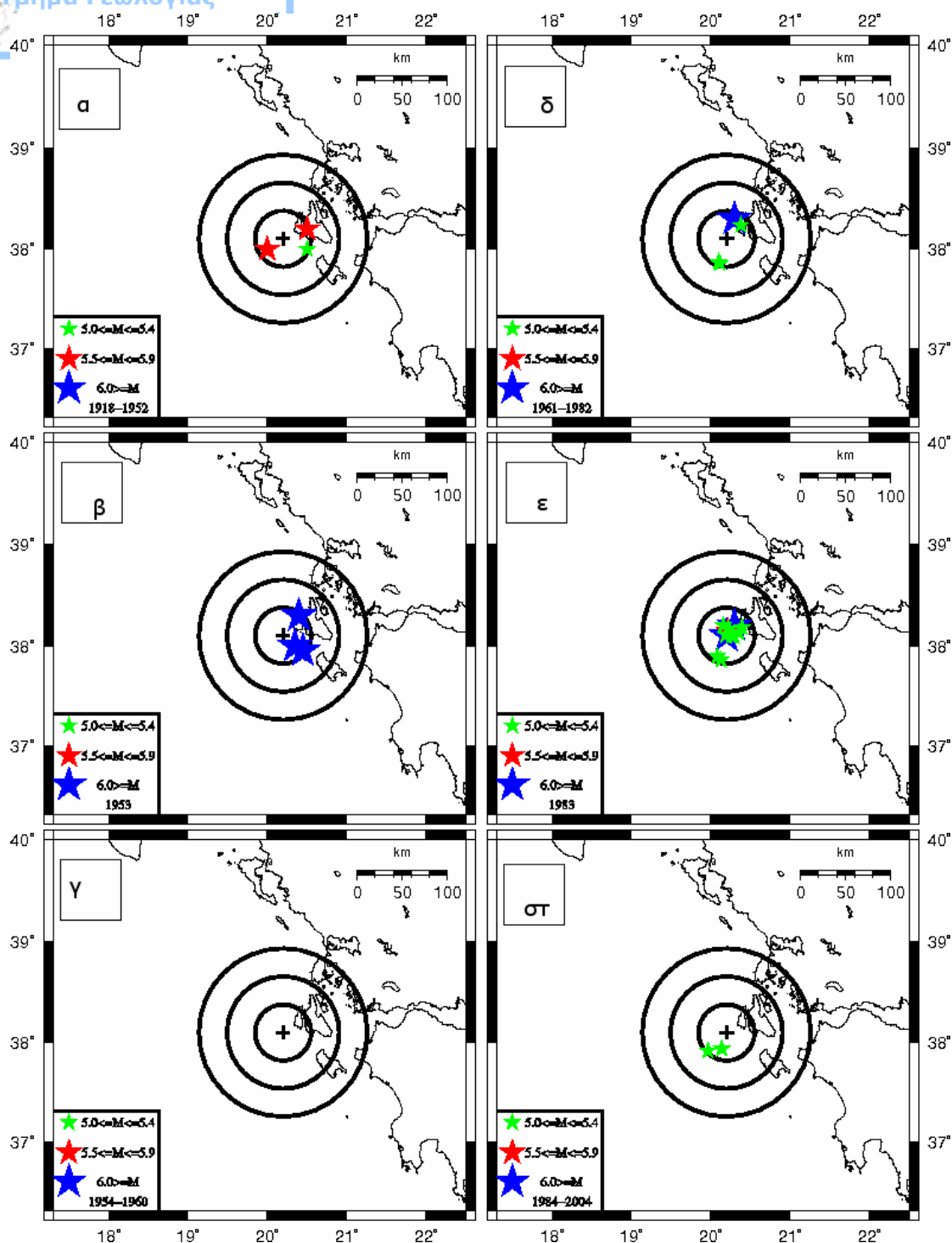
Σχήμα 8:

Χρονική μεταβολή του ρυθμού γένεσης των σεισμών για τα έτη μεταξύ 1900-2004. (1) Σεισμοί με μεγέθη 5,0 5,3 5,5 5,7 5,9 που έγιναν σε κυκλική περιοχή με ακτίνα $0 \leq R \leq 30 \text{ km}$ γύρω από επίκεντρο του σεισμού του 1983. (2) Το ίδιο με το (1) αλλά για περιοχή κυκλικού δακτυλίου με ακτίνα $30 \leq R \leq 60 \text{ km}$. (3) Το ίδιο με το (1) αλλά για περιοχή κυκλικού δακτυλίου $0 \leq R \leq 60 \text{ km}$. (4) Το ίδιο με το (1) αλλά για περιοχή κυκλικού δακτυλίου $60 \leq R \leq 90 \text{ km}$. (5) Το ίδιο με το (1) αλλά για περιοχή κυκλικού δακτυλίου $0 \leq R \leq 90 \text{ km}$.

2.3 Παρατηρήσεις σχετικά με τη χωρική κατανομή της σεισμικότητας για κυκλικές αποστάσεις 0-30,30-60,0-60,60-90,0-90km.

Για να αποκτήσει ο αναγνώστης πληρέστερη εικόνα του φαινομένου της σεισμικής ησυχίας ακολουθεί παρουσίαση των χαρτών χωρικής κατανομής της σεισμικότητας για κυκλικές αποστάσεις των 0 έως 30, 30 έως 60, 0 έως 60, 60 έως 90km από την εστία του κύριου σεισμού του 1983. Λαμβάνοντας υπόψη τις μεταβολές στο ρυθμό γένεσης των σεισμών, χρησιμοποιώντας ως δεδομένα εισόδου τους προσαρμοσμένους στις δικές μας ανάγκες καταλόγους για την εκάστοτε περιοχή μελέτης, δημιουργούμε τους χάρτες αυτούς με κατάλληλο πρόγραμμα ηλεκτρονικού υπολογιστή. Χαρτογραφούνται τα επίκεντρα σεισμών με μεγέθη $M \geq 5,0$ για τις χρονικές περιόδους 1918-1952, 1953, 1954-1960, 1961-1982, 1983, 1984-2004.

Η μελέτη τόσο στους χάρτες όσο και στα γραφήματα γίνεται κάθε φορά σε κυκλικές αποστάσεις ώστε να είναι όσο πιο λεπτομερής γίνεται. Μετά από αρκετές δοκιμές, επιλέχθηκαν να παρουσιαστούν οι χωρικές κατανομές των σεισμών που έγιναν σε αποστάσεις των 30, 40, 50km. Με βάση αυτές τις χιλιομετρικές αποστάσεις χαρτογραφούνται κύκλοι υπό κλίμακα στο χάρτη μέσα στους οποίους περιλαμβάνονται οι σεισμοί στις ανάλογες αποστάσεις. Έτσι για τα 30km χαρτογραφήθηκαν κύκλοι με 30, 60, 90km, ενώ περιλήφθηκαν και οι κυκλικές αποστάσεις των 30 έως 60, 60 έως 90km. Το ίδιο γίνεται για τις υπόλοιπες χιλιομετρικές κυκλικές αποστάσεις, των 40 και 50km. Ακολουθεί η παράθεση των γραφημάτων για τους δακτυλίους 30, 60, 90, 30 έως 60, 60 έως 90km. Τα μεγέθη παριστάνονται με αστέρια πράσινο για σεισμούς με $5.0 \leq M \leq 5.4$, κόκκινο για σεισμούς με $5.5 \leq M \leq 5.9$, μπλε για σεισμούς με $6.0 \geq M$.



Σχήμα 9: Χωρική κατανομή των σεισμών για κυκλικές αποστάσεις από 0 μέχρι 30km (1° ς κύκλος), από το επίκεντρο του σεισμού του 1983. Τα πράσινα αστέρια συμβολίζουν σεισμούς με μεγέθη μεταξύ 5.0-5.4, τα κόκκινα σεισμούς με μεγέθη μεταξύ 5.5-5.9 και τα μπλε σεισμούς με μεγέθη μεγαλύτερα από 6.0.

Στο σχήμα 9α, όπου χαρτογραφήθηκαν τα επίκεντρα των σεισμών για κυκλικές αποστάσεις από 0 έως 30km, για τη χρονική περίοδο 1918-1952 παρατηρείται σεισμική δραστηριότητα περιμετρικά της περιοχής ενδιαφέροντος (του επίκεντρου του σεισμού του 1983) και κατανέμεται σχεδόν σε ακτίνα 30km γύρω από αυτή. Κυριαρχούν μικροί και ενδιάμεσου βάθους σεισμοί, ενώ απουσιάζουν αυτοί με μεγέθη μεγαλύτερα από 6,0. Δηλαδή παρατηρούνται σεισμικά κενά 1^{ου} είδους.

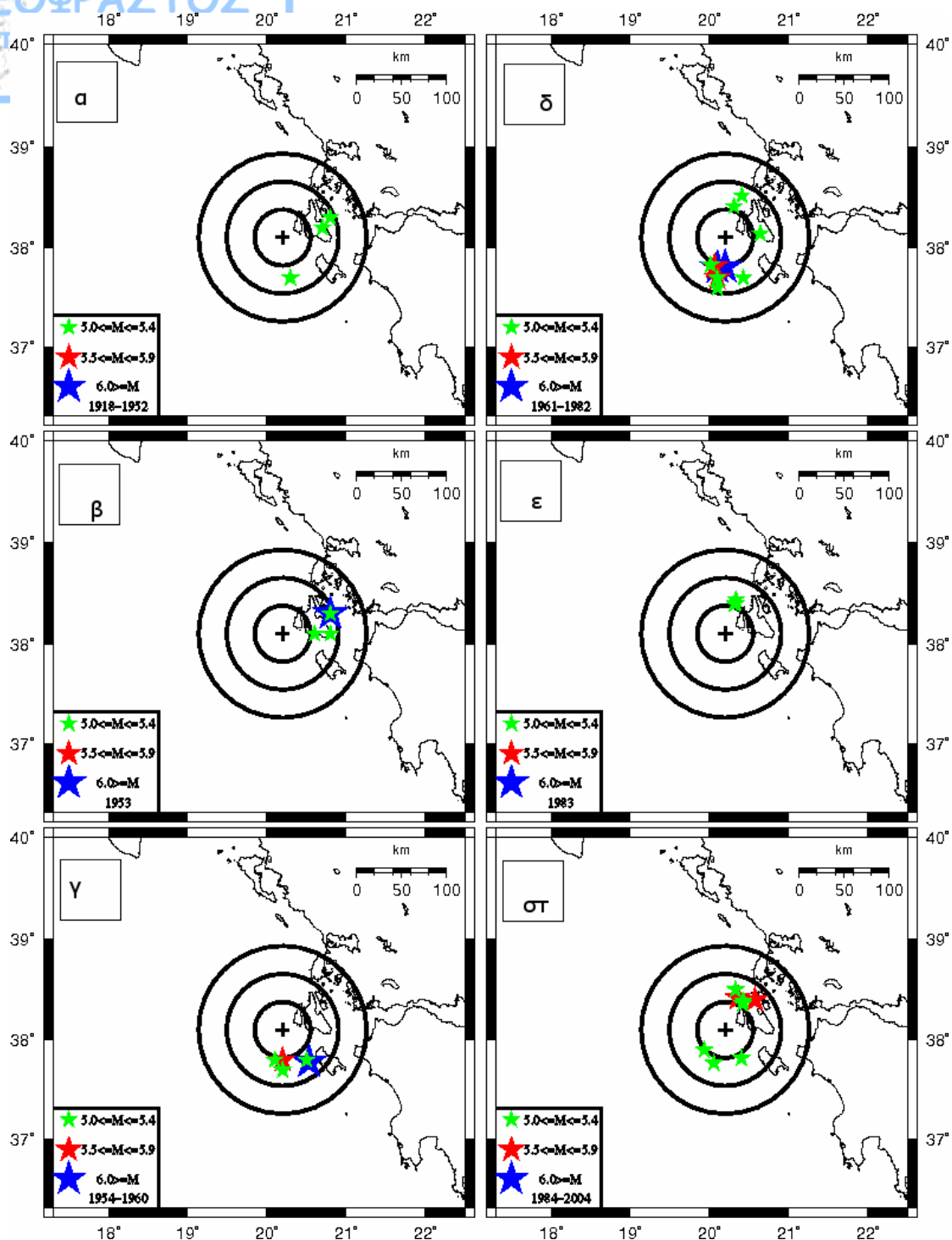
Στην αμέσως επόμενη περίοδο (σχ9.β) κυριαρχούν τρεις μεγάλοι σεισμοί με $M \geq 6.0$ οι οποίοι ανήκουν στη σεισμική έξαρση του 1953.

Αξιοσημείωτη είναι η επόμενη χρονική περίοδος μεταξύ 1954 έως 1960 (σχ9γ) όπου δεν καταγράφεται κανένα μέγεθος, επομένως πρόκειται για σεισμική ησυχία, γεγονός που συμφωνεί απόλυτα με το γράφημα της μεταβολής της σεισμικής συχνότητας για την απόσταση 0-30km στο σχήμα 7.1.

Στη συνέχεια η σεισμικότητα αυξάνει πάλι με την εκδήλωση σεισμών μεγεθών 5,0-5,4 και μεγαλύτερων από 6,0 (απουσιάζουν τα μεγέθη 5,5-5,9) για τα έτη 1961 - 1982, (δ).

Η μέγιστη εκδήλωση σεισμικότητας για το σχήμα 9 που καλύπτει όλο τον κυκλικό δακτύλιο ακτίνας 30Km χαρτογραφείται το 1983 (ε), έτος εκδήλωσης του σεισμού $M=7,0$.

Στη συνέχεια η σεισμικότητα ελαττώνεται πάλι για τα έτη 1984-2004, όπου επικρατούν τα σεισμικά κενά 1^{ου} είδους (στ).



Σχήμα 10: Χωρική κατανομή των σεισμών για κυκλικές αποστάσεις από 30 μέχρι 60km, από το επίκεντρο του σεισμού του 1983. Τα πράσινα αστέρια συμβολίζουν σεισμούς με μεγέθη μεταξύ 5.0-5.4, τα κόκκινα σεισμούς με μεγέθη μεταξύ 5.5-5.9 και τα μπλε σεισμούς με μεγέθη μεγαλύτερα από 6.0.

Στο σχήμα 10, όπου χαρτογραφήθηκαν τα μεγέθη για κυκλικές αποστάσεις από 30 έως 60km, από την περιοχή ενδιαφέροντος, για τη χρονική περίοδο 1918-1952 (α) παρατηρούμε ότι απουσιάζουν τα μεγέθη από 5,5-5,9 και πάνω και κυριαρχούν αυτά μεταξύ 5,0-5,4. Η σεισμική αυτή δραστηριότητα είναι μετατοπισμένη στα ανατολικά.

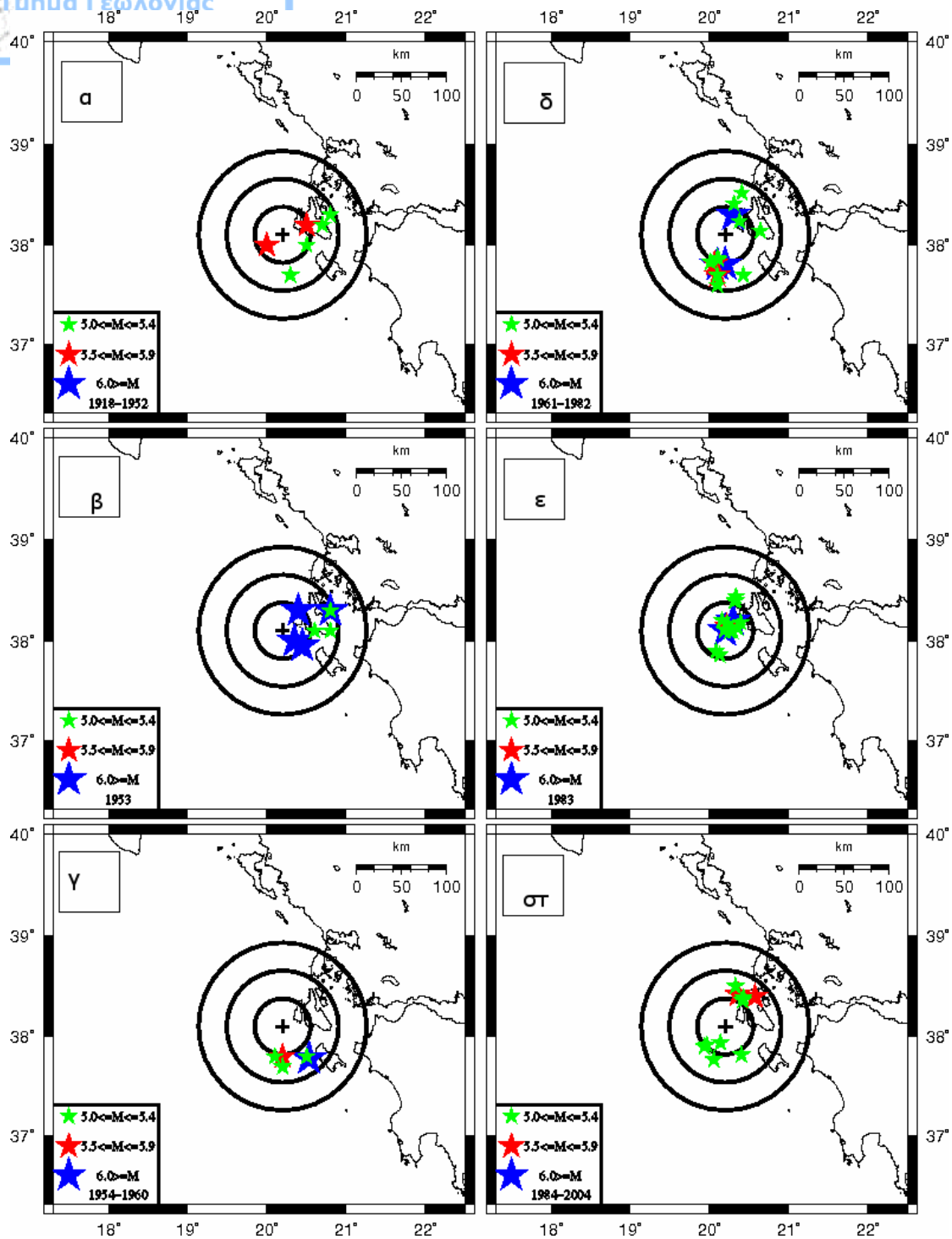
Στο επόμενο χρονικό διάστημα του 1953 (β) παρατηρείται περίπου η ίδια χωρική κατανομή με τη διαφορά ότι συμμετέχει και μεγαλύτερο μέγεθος από 6,0 και πάνω. Προφανώς πρόκειται για τον κύριο σεισμό του 1953.

Κατά το διάστημα 1954-1960 (γ), η δραστηριότητα παρουσιάζεται μετατοπισμένη νότια σε σχέση με το σχήμα (α) και στη χαρτογράφηση περιλαμβάνονται όλα τα μεγέθη από 5,0 και μεγαλύτερα.

Στην επόμενη χρονική περίοδο στο σχήμα (δ) δηλαδή από το 1961-1982 η χωρική κατανομή των σεισμών χαρτογραφείται κατά μήκος του άξονα Βορρά νότου και προς την ανατολική πλευρά του χάρτη, χωρίς να απουσιάζει κάποιο μέγεθος ή να παρατηρείται κάποιο σεισμικό κενό.

Το 1983 (ε) η σεισμικότητα της περιοχής μειώνεται πάλι αισθητά, μόνο ένα μέγεθος καταγράφεται μεταξύ 5,0-5,4, ενώ απουσιάζουν μεγέθη από 5,5 και πάνω. Στην περίπτωση δηλαδή αυτή έχουμε την καταγραφή σεισμικού κενού πρώτου είδους

Για το 1984-2004 (στ) η δραστηριότητα παρουσιάζεται πάλι αυξημένη με το σύνολο των μεγεθών κάτω από 6,0 να καταγράφεται. Η απουσία των μεγεθών με $M \geq 6,0$ μπορεί να ερμηνευθεί ως σεισμικό κενό πρώτου είδους.



Σχήμα 11: Χωρική κατανομή των σεισμών για κυκλικές αποστάσεις από 0 μέχρι 60km, από το επίκεντρο του σεισμού του 1983. Τα πράσινα αστέρια συμβολίζουν σεισμούς με μεγέθη μεταξύ 5.0-5.4, τα κόκκινα σεισμούς με μεγέθη μεταξύ 5.5-5.9 και τα μπλε σεισμούς με μεγέθη μεγαλύτερα από 6.0.

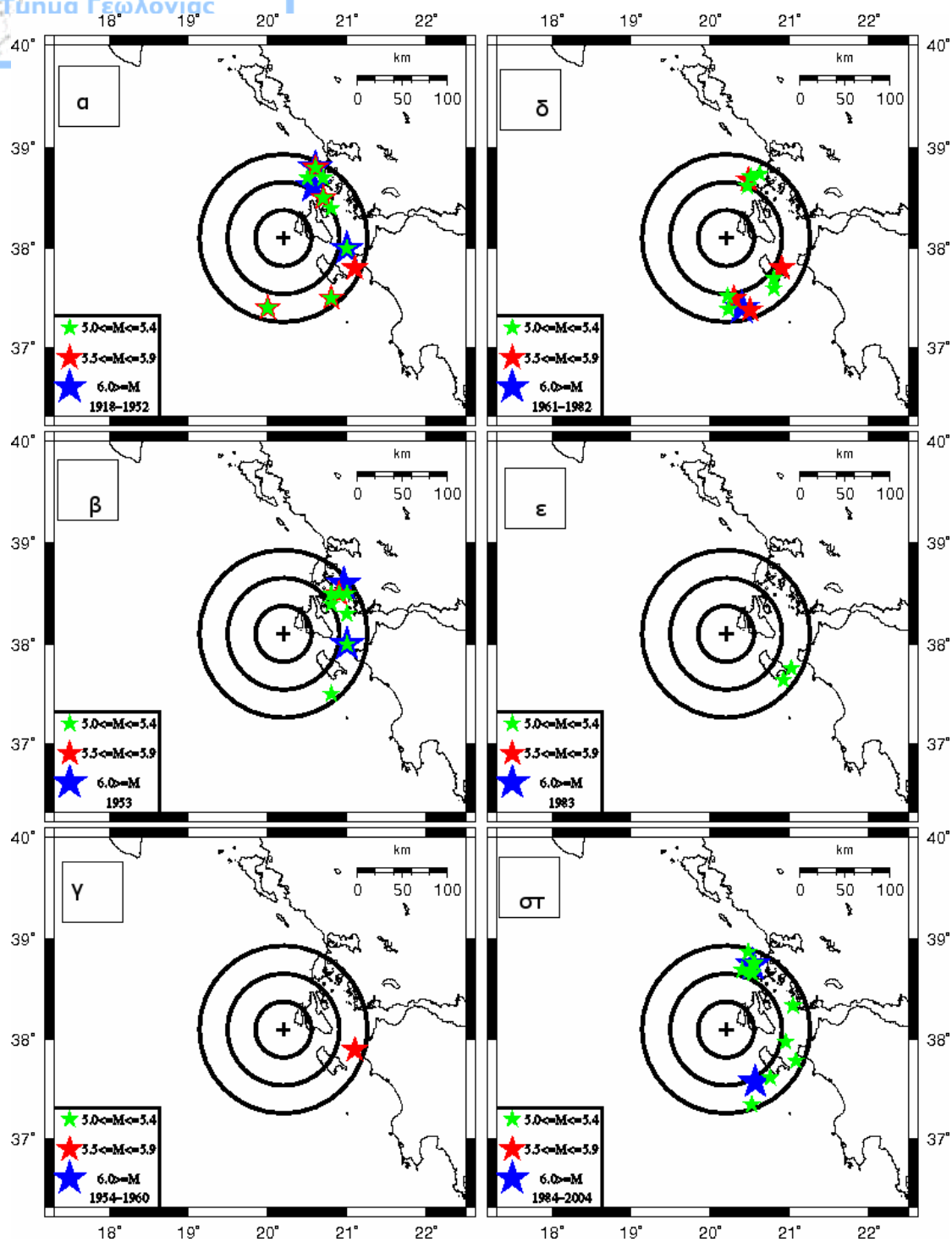
Σε ότι αφορά το σχήμα 11, όπου χαρτογραφήθηκαν τα μεγέθη για αποστάσεις δακτυλίου από 0 έως 60km δεν υπάρχει κάποια έντονη μεταβολή ή ανομοιομορφία στα μεγέθη. Η δραστηριότητα είναι παρούσα σε όλα τα χρονικά διαστήματα χωρίς κάποια σεισμική ησυχία. Στις χρονολογίες 1918-1952 (α) καταγράφονται μεγέθη από 5.0 μέχρι 5.9 ενώ απουσιάζουν αυτά που είναι μεγαλύτερα από 6.0.

Για το μελετούμενο χρονικό διάστημα του έτους 1953 (β) δεν καταγράφονται τα ενδιάμεσα μεγέθη μεταξύ 5,5-5,9, στοιχείο που δεν παρατηρείται το 1954-1960 (γ).

Μεταβαίνοντας στην επόμενη χρονική περίοδο ενδιαφέροντος το 1961-1982 (δ) παρατηρούμε αύξηση του αριθμού των καταγραφόμενων μεγεθών σε σχέση με την προηγούμενη περίοδο χωρίς αποκοπές κάποιων μεγεθών.

Το 1983 (ε) η δραστηριότητα συνεχίζεται αμείωτη περίπου ίδια με την προηγούμενη χρονική περίοδο, με τη διαφορά ότι καταγράφεται πιο κοντά στο επίκεντρο του σεισμού του 1953.

Για το τελευταίο διάστημα 1984-2004 (στ) οι θέσεις των σεισμών παρατηρούνται πιο εξαπλωμένες σε σχέση με αυτές του προηγούμενου διαστήματος ενώ απουσιάζουν τα σεισμικά γεγονότα με μέγεθος μεγαλύτερο από 6.0



Σχήμα 12: Χωρική κατανομή μεγεθών για κυκλικές αποστάσεις από 60-90km από το επίκεντρο του σεισμού του 1983. Τα πράσινα αστέρια συμβολίζουν σεισμούς με μεγέθη μεταξύ 5.0-5.4, τα κόκκινα σεισμούς με μεγέθη μεταξύ 5.5-5.9 και τα μπλε σεισμούς με μεγέθη μεγαλύτερα από 6.0.

Στο σχήμα 12, παρατηρούνται όλα τα μεγέθη να καλύπτουν το χάρτη, σε άξονα κυρίως βορρά νότου και προς τα ανατολικά, για την δακτύλιο ακτίνας μεταξύ 60 έως 90km.

Το χρονικό διάστημα 1918-1952 (α) αποτυπώνονται όλα τα μεγέθη στο χάρτη χωρικής κατανομής, δεν υπάρχουν αποκοπές μεγεθών. Η σεισμικότητα εξελίσσεται κανονικά.

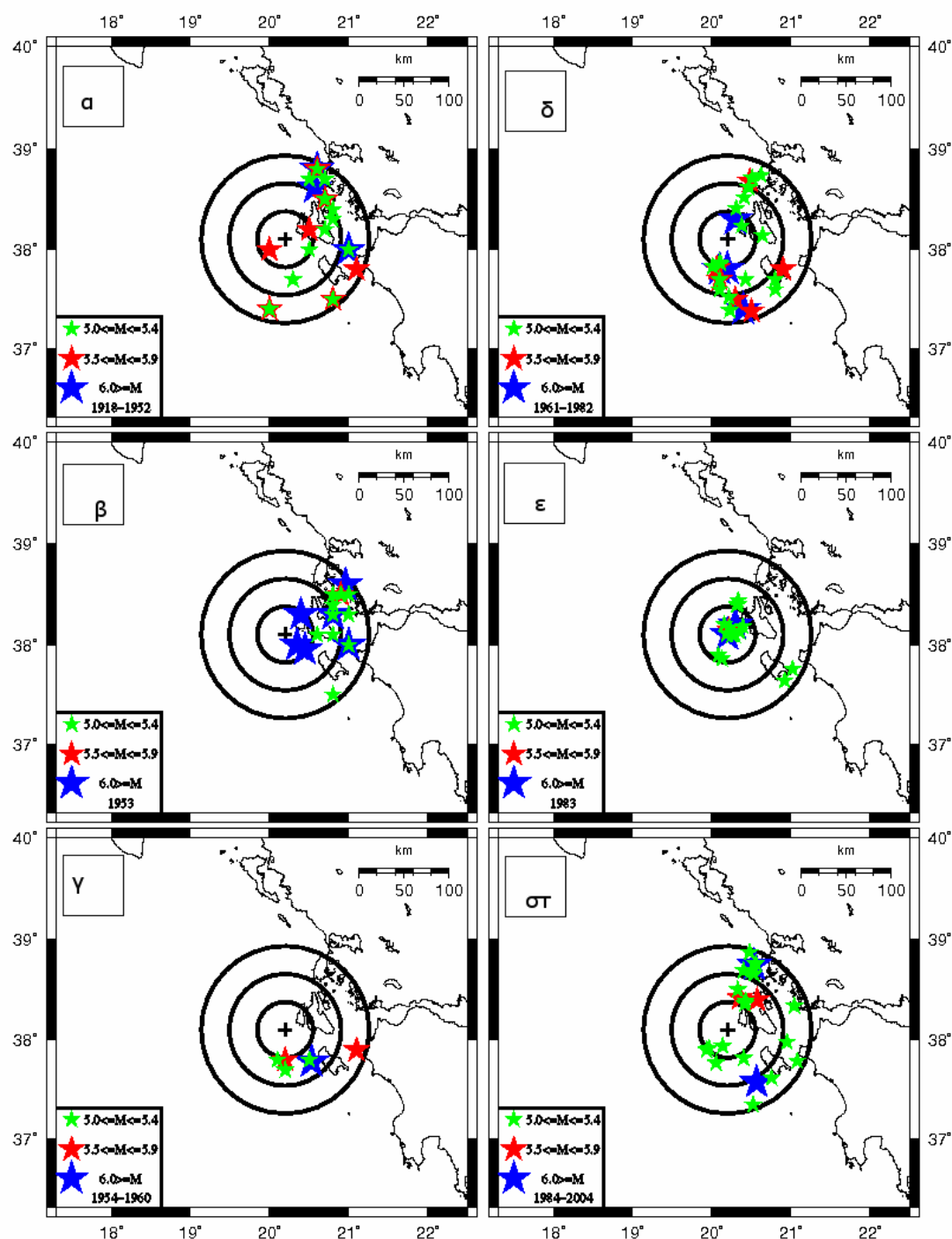
Το ίδιο παρατηρείται και στο αμέσως επόμενο χρονικό διάστημα που έχουμε επιλέξει και είναι το 1953 (β). Σε αυτή την περίπτωση τα καταγραφόμενα μεγέθη παρατηρούνται ελαφρώς μετατοπισμένα στα ανατολικά σε σχέση με το 1918-1952.

Σε ότι αφορά τη σεισμικότητα του 1954-1960 (γ) υπάρχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον επειδή το σμήνος των σεισμών έχει περιοριστεί σε ένα μόνο μέγεθος (απουσιάζουν μεγέθη 5.0-5.4 και μεγαλύτερα από 6.0). Συμπεραίνεται ότι πρόκειται για μικρή σεισμική ησυχία 1^{ου} και 2^{ου} είδους. Κάτι που συμφωνεί με το σχήμα 8 για μεγέθη 5,5-5,9.

Για το επόμενο χρονικό διάστημα του 1961-1982 (δ) η εκδήλωση της σεισμικότητας περιλαμβάνει το σύνολο των μεγεθών, χωρίς αποκοπές ενώ η κατανομή τους παρατηρείται στην ανατολική πλευρά του χάρτη.

Το 1983 (ε) η καταγραφή των σεισμικών γεγονότων έχει περιοριστεί σε δυο σεισμούς μόνο, μεταξύ των μεγεθών 5.0-5.4, καθώς δεν παρατηρείται εκδήλωση κάποιων άλλων μεγαλύτερων σεισμών. Πρόκειται και εδώ για σεισμική ησυχία 1^{ου} είδους, στοιχείο που συμφωνεί με το σχήμα 7.4.

Στην τελευταία περίοδο 1984-2004 (στ) απουσιάζουν μεγέθη από 5.5-5.9, ενώ όλα τα υπόλοιπα καταγράφονται στην περιοχή. Η αντιστοιχία και εδώ με τα δεδομένα του σχημάτων 7.4, 8.4 είναι προφανής.



Σχήμα 13: Χωρική κατανομή σεισμικότητας για κυκλικές αποστάσεις 0-90km από το επίκεντρο του σεισμού του 1983. Τα πράσινα αστέρια συμβολίζουν σεισμούς με μεγέθη μεταξύ 5.0-5.4, τα κόκκινα σεισμούς με μεγέθη μεταξύ 5.5-5.9 και τα μπλε σεισμούς με μεγέθη μεγαλύτερα από 6.0.

Στο πάνω σχήμα 13 έχουν χαρτογραφηθεί τα μεγέθη και η χωρική τους κατανομή για την κυκλική απόσταση 0-90km από το επίκεντρο του κύριου σεισμού του 1983. Τα μεγέθη όπως δείχνουν τα σχετικά υπομνήματα είναι μεγαλύτερα από 5.0.

Στην πρώτη χρονική περίοδο που έχει οριστεί το διάστημα 1918-1952 (α) συμμετέχουν όλα τα μεγέθη στη χαρτογράφηση, ενώ η κατανομή τους περιλαμβάνει το σύνολο σχεδόν της περιοχής σε μια διεύθυνση περίπου Βορά-Νότου.

Προχωρώντας στο αμέσως επόμενο χρονικό διάστημα το οποίο περιλαμβάνει μόνο το έτος του 1953 (β) η σεισμικότητα εξελίσσεται ομαλά χωρίς αποκοπές μεγεθών και παρουσιάζει μια μετατόπιση προς την ανατολική πλευρά του χάρτη.

Το διάστημα 1954-1960 (γ) τα μεγέθη που καταγράφονται είναι σαφώς λιγότερα από το σχήμα 13β παρουσιάζοντας μια μετατόπιση προς το Νοτιανατολικό τμήμα του χάρτη. Σε γενικές γραμμές όμως δεν υπάρχει ουσιαστική μεταβολή του ρυθμού της σεισμικότητας, παρόλο που δεν παρατηρείται καμιά εκδήλωση σεισμού στην απόσταση 0-30km του χάρτη.

Παρακολουθώντας την εξέλιξη του φαινομένου τα επόμενα χρόνια, δηλαδή μεταξύ 1961-1982 (δ) τα μεγέθη αυξάνουν σε αριθμό και παρουσιάζουν μια εξάπλωση στην περιοχή με γενικό προσανατολισμό ανατολικά κατά μήκος της διεύθυνσης Βορά-Νότου.

Τον αμέσως επόμενο χρόνο, το 1983 (ε) η χωρική κατανομή εντοπίζεται συγκεντρωμένη στο κέντρο του χάρτη κυρίως, ενώ όπως και στο προηγούμενο διάστημα δεν παρατηρούνται αποκοπές μεγεθών.

Το ίδιο παρατηρείται και στη χρονική περίοδο 1984-2004 (στ) με όλη τη σεισμικότητα κατανεμημένη στο σύνολο του χάρτη.

Στο σημείο αυτό ολοκληρώθηκε η ανάλυση των σεισμικών μεγεθών για ακτινικές αποστάσεις 0-30, 30-60, 60-90km. Ακολουθούν οι μεταβολές της συχνότητας σεισμικότητας σε σχέση με το χρόνο για ακτίνα 40,40-80,80-120,0-120km και οι χάρτες χωρικής κατανομής

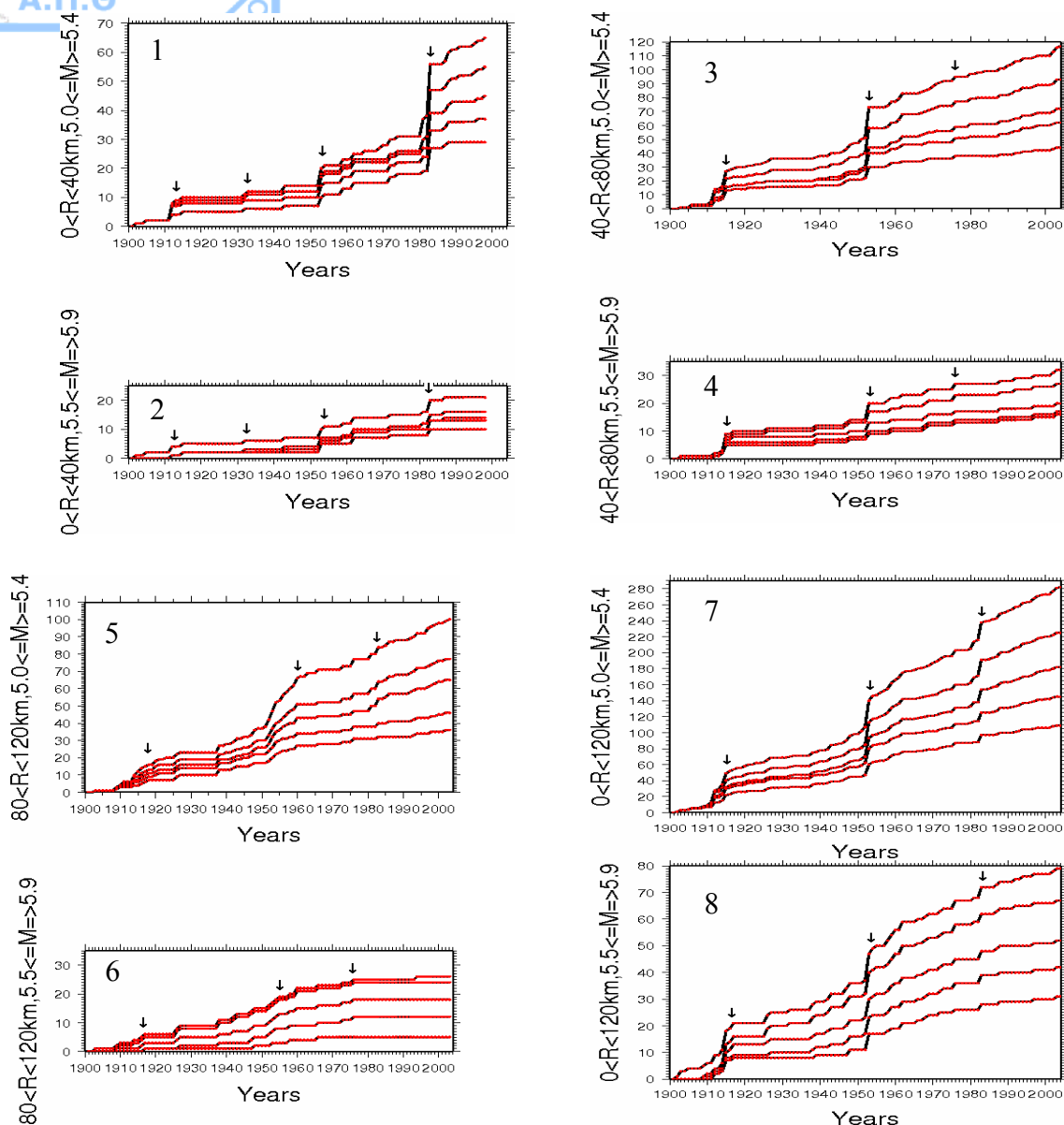
2.4 Μεταβολές της συχνότητας της σεισμικότητας για σεισμικές ακτίνες των 40,40-80,80-120,120km

Στο σχήμα 14.1 έχει χαρτογραφηθεί η χρονική μεταβολή του ρυθμού γένεσης των σεισμών σε σχέση με το χρόνο για σεισμούς με μεγέθη $5.0 \leq M \leq 5.4$, ενώ στο σχήμα 14.2 χαρτογραφείται η μεταβολή του ρυθμού γένεσης των σεισμών με μέγεθος $5.5 \leq M \leq 5.9$, για κυκλικές αποστάσεις από 0 μέχρι 40km από το επίκεντρο του κύριου σεισμού του 1983. Και στις δυο περιπτώσεις παρατηρούνται τέσσερις κύριες περίοδοι έξαρσης της σεισμικότητας κατά τα έτη 1911, 1930, 1954, 1983. Προφανώς σχετίζονται με την εκδήλωση κύριων σεισμών στα έτη αυτά. Δεν καταγράφεται κάποια αξιόλογη μεταβολή του ρυθμού γένεσης των σεισμών τόσο στο γράφημα των μεγεθών 5.0-5.4, όσο και στο γράφημα των μεγεθών 5.5-5.9 κατά το χρονικό διάστημα 1911-1930.

Ακολουθεί το σχήμα 14.3 στο οποίο έχει χαρτογραφηθεί η χρονική μεταβολή του ρυθμού γένεσης των σεισμών για κυκλική απόσταση 40-80km από το επίκεντρο για μεγέθη $5.0 \leq M \leq 5.4$ και ακολουθεί το σχήμα 14.4. Και στις δυο κατηγορίες μεγεθών παρατηρούνται τρεις κύριες περίοδοι έξαρσης της σεισμικότητας κατά τα έτη 1911, 1953, 1975. Δεν παρατηρούνται σεισμικές ησυχίες για τις αποστάσεις αυτές.

Ερευνώντας αναλυτικότερα, χαρτογραφούμε το φαινόμενο σε ακόμα μεγαλύτερη απόσταση στο σχήμα 14.5 και πιο συγκεκριμένα σε κυκλική απόσταση 80-120km από το επίκεντρο. Τα γραφήματα των μεγεθών $5.0 \leq M \leq 5.4$ και $5.5 \leq M \leq 5.9$ σχήμα 14.6, παρουσιάζουν κοινό χαρακτηριστικό τις τρεις περιόδους, όπου η χρονική μεταβολή του ρυθμού σεισμικότητας αυξάνεται ραγδαία κατά τα έτη 1911, 1953, 1975. Αξιοσημείωτη είναι επίσης η σεισμική ησυχία που παρατηρείται στα μεγέθη των μεγαλύτερων σεισμών 5.5-5.9 για το χρονικό διάστημα 1975-2004.

Τα σχήματα 14.7 και 14.8 είναι συγκεντρωτικά, περιλαμβάνουν όλους τους σεισμούς με μεγέθη $5.0 \leq M \leq 5.4$ το πρώτο και μεγέθη $5.5 \leq M \leq 5.9$ το δεύτερο για την κυκλική απόσταση 0-120km από το επίκεντρο του σεισμού του 1983. Παρατηρούνται τρεις εξάρσεις του ρυθμού σεισμικότητας κατά τα έτη 1911, 1953, 1983, ενώ απουσιάζουν εντελώς οι σεισμικές ησυχίες.



Σχήμα 14: Χρονική μεταβολή του ρυθμού γένεσης των σεισμών.

1. Σεισμοί με $5.0 \leq M \leq 5.4$ που έγιναν σε κυκλική περιοχή με ακτίνα 40km γύρω από επίκεντρο του σεισμού του 1983
2. Το ίδιο με το (1) αλλά για σεισμούς με $5.5 \leq M \leq 5.9$
3. Σεισμοί με $5.0 \leq M \leq 5.4$ που έγιναν σε κυκλική περιοχή με ακτίνα 40-80 km γύρω από επίκεντρο του σεισμού του 1983
4. Το ίδιο με το (3) αλλά για σεισμούς με $5.5 \leq M \leq 5.9$
5. Σεισμοί με $5.0 \leq M \leq 5.4$ που έγιναν σε κυκλική περιοχή με ακτίνα 80-120km γύρω από επίκεντρο του σεισμού του 1983
6. Το ίδιο με το (5) αλλά για σεισμούς με $5.5 \leq M \leq 5.9$
7. Σεισμοί με $5.0 \leq M \leq 5.4$ που έγιναν σε κυκλική περιοχή με ακτίνα 80-120 km γύρω από επίκεντρο του σεισμού του 1983
8. Το ίδιο με το (7) αλλά για σεισμούς με $5.5 \leq M \leq 5.9$

Προκειμένου να αποφευχθούν σφάλματα από αποκοπές μεγεθών στην έρευνα αυτή, κρίθηκε σκόπιμη και σε αυτό το σημείο η χαρτογράφηση της χρονικής μεταβολής του ρυθμού γένεσης των σεισμών για τα μεγέθη 5.0, 5.3, 5.5, 5.7, 5.9. Τα αποτελέσματα της διαδικασίας αυτής καταγράφονται στο σχήμα 15.

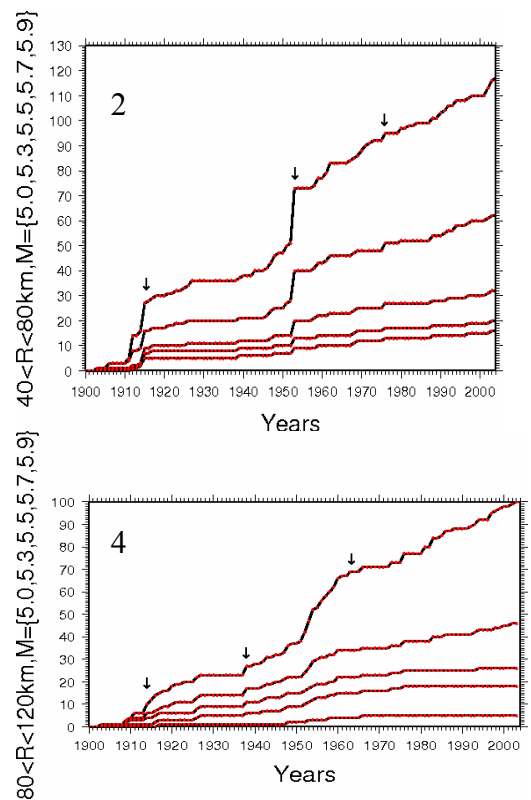
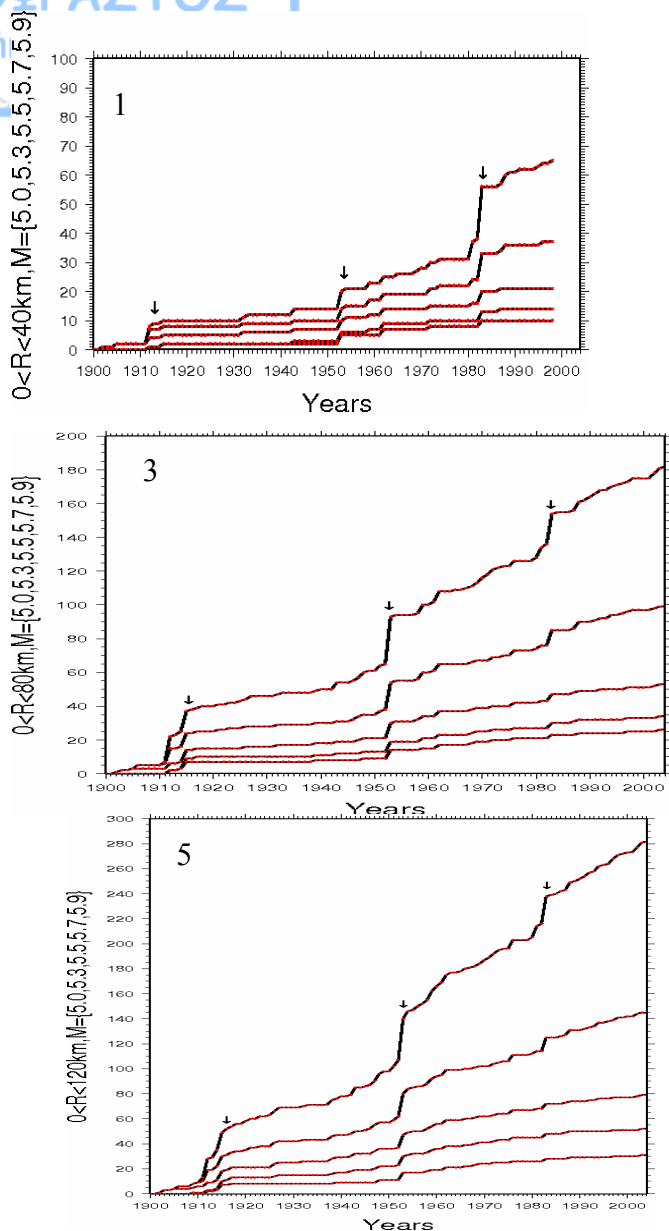
Στο σχήμα 15.1 έχει αποτυπωθεί η χρονική μεταβολή του ρυθμού γένεσης των σεισμών για την κυκλική απόσταση των 0 έως 40km. Είναι εμφανής η σεισμική ησυχία που παρατηρείται για τα έτη 1911-1930, γεγονός που συμφωνεί πλήρως με το σχήμα 14.1. Οι τρεις περίοδοι έξαρσης του ρυθμού σεισμικότητας, το 1911, 1953, 1983 αντίστοιχα κυριαρχούν και σε αυτή την περίπτωση.

Ακολουθεί το σχήμα 15.2, όπου περιλαμβάνει τη μεταβολή του ρυθμού γένεσης των σεισμών σε σχέση με το χρόνο για κυκλικές αποστάσεις 40 έως 80km από το επίκεντρο του σεισμού του 1953. Ιδιαίτερες διαφορές σε σχέση με το προηγούμενο σχήμα δεν παρατηρούνται, εκτός από το ότι δεν παρατηρείται σεισμική ησυχία το 1911-1930.

Σε ακόμα μεγαλύτερη απόσταση 0-80km αυτή τη φορά, δηλαδή μια σύνθεση των σχημάτων 15.2 και 15.1, δίνει το σχήμα 15.3 το οποίο καταγράφει τη μεταβολή της σεισμικότητας σε σχέση με το χρόνο και μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι και εδώ επικρατούν οι αυξήσεις-εξάρσεις κατά τα έτη 1911, 1953, 1983, ενώ συνολικά δεν καταγράφεται κάποια σεισμική ησυχία μεγάλης διάρκειας, ώστε να μπορεί να χαρακτηριστεί ως πρόδρομο φαινόμενο εκδήλωσης κύριου σεισμού.

Το σχήμα 15.4 έγινε για να παρασταθούν οι μεταβολές αυτές σε ακόμα μεγαλύτερη κυκλική απόσταση, αυτή των 80 έως 120km. Δεν παρατηρούνται σεισμικές ησυχίες αλλά οι τρεις ραγδαίες αυξήσεις στις ίδιες χρονολογίες με τα προηγούμενα σχήματα, φαινόμενο που επαναλαμβάνεται και στο σχήμα 15.5 όπου έχουν χαρτογραφηθεί οι μεταβολές για τη συνολική απόσταση των 0 έως 120km από το επίκεντρο του σεισμού του 1953.

Συνοψίζοντας, τα συμπεράσματα που εξάγονται από τη μελέτη των σχημάτων 14 και 15 είναι, ότι υπάρχουν τρεις βασικές περίοδοι που καθορίζουν την αύξηση του ρυθμού γένεσης των σεισμών. Αυτές συμπίπτουν περίπου με την εκδήλωση μεγάλων σεισμών, ενώ ενδιάμεσα, απουσιάζουν σεισμικές ησυχίες.



Σχήμα 15: Χρονική μεταβολή του ρυθμού γένεσης των σεισμών για τα έτη μεταξύ 1900-2004. (1) Σεισμοί με μεγέθη 5,0 5,3 5,5 5,7 5,9 που έγιναν σε κυκλική περιοχή με ακτίνα $0 \leq R \leq 40 \text{ km}$ γύρω από επίκεντρο του σεισμού του 1983. (2) Το ίδιο με το (1) αλλά για περιοχή κυκλικού δακτυλίου με ακτίνα $40 \leq R \leq 80 \text{ km}$. (3) Το ίδιο με το (1) αλλά για περιοχή κυκλικού δακτυλίου $0 \leq R \leq 80 \text{ km}$. (4) Το ίδιο με το (1) αλλά για περιοχή κυκλικού δακτυλίου $80 \leq R \leq 120 \text{ km}$. (5) Το ίδιο με το (1) αλλά για περιοχή κυκλικού δακτυλίου $0 \leq R \leq 120 \text{ km}$.

2.5 Παρατηρήσεις σχετικά με τη χωρική κατανομή της σεισμικότητας για αποστάσεις 40,40-80,80,80-120,120km.

Προκειμένου να βοηθηθούμε περισσότερο και να εξαχθούν ακριβέστερα συμπεράσματα για τα σεισμικά κενά στις αποστάσεις 40,40-80,80,80-120,120km προχωρούμε στην αναλυτική χαρτογράφηση των σεισμικών μεγεθών για τις διάφορες κυκλικές αποστάσεις στις χρονικές περιόδους που έχουμε ορίσει.

Στο σχήμα 16, όπου χαρτογραφήθηκαν τα μεγέθη για κυκλικές αποστάσεις 0-40km δεν υπάρχει κανένα καταγεγραμμένο μέγεθος ίσο ή πάνω από 6,0, το σμήνος των σεισμών είναι ελαττωμένο (μόλις τρεις σεισμοί) και κυριαρχούν τα μεγέθη από 5,0-5,9 για την περίοδο 1918-1952 (α) Παρατηρείται σεισμικό κενό 1^{ου} είδους.

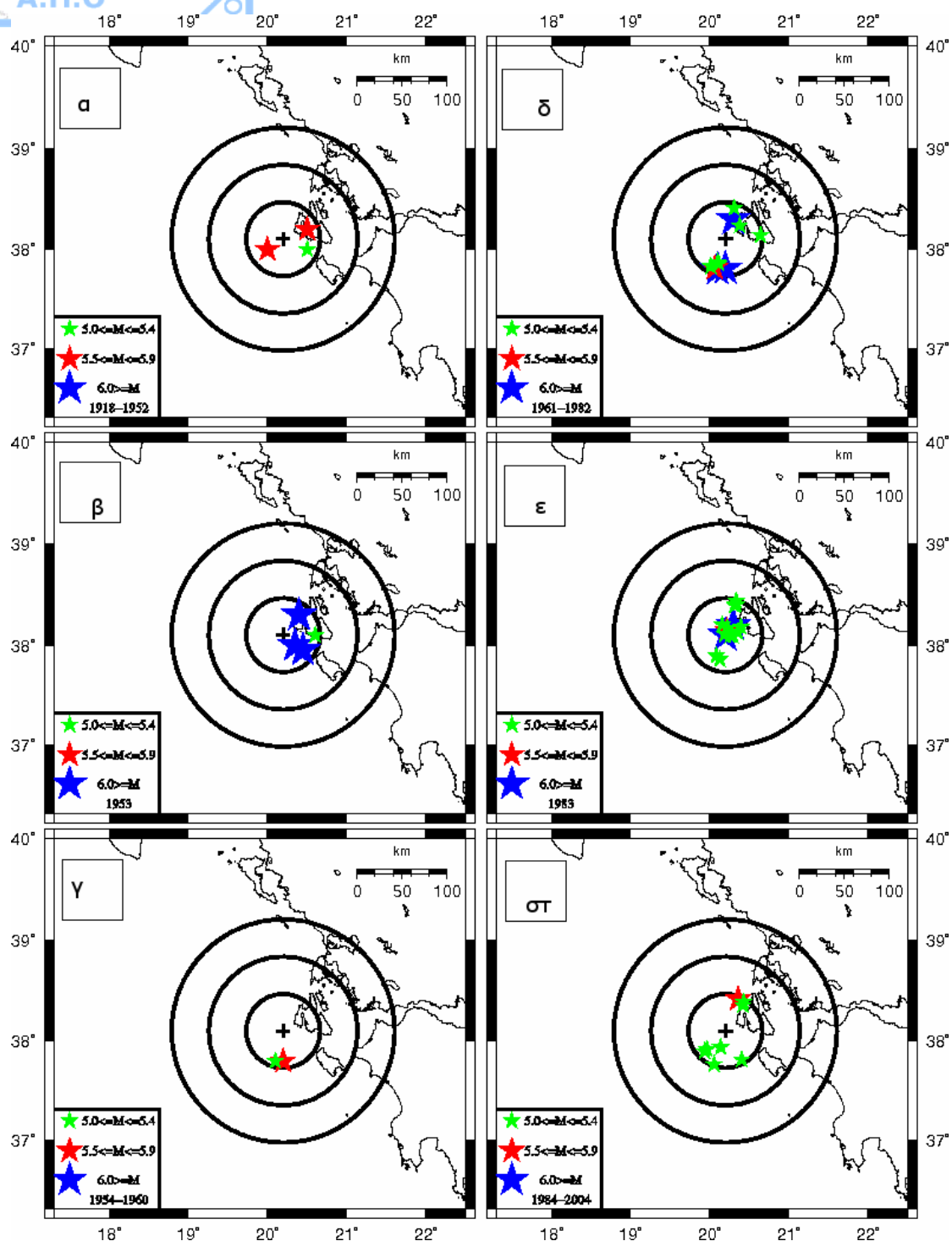
Αντίθετα για την περίοδο 1953 (β), η δραστηριότητα επικεντρώνεται στα μεγέθη πάνω από 6,0, τα ενδιάμεσα μεγέθη μεταξύ 5,5-5,9 απουσιάζουν ενώ αυτά των 5,0-5,4 αντιπροσωπεύονται μόνο από ένα γεγονός καταγεγραμμένο στο χάρτη. Παρατηρείται σεισμικό κενό 2^{ου} είδους.

Στην αμέσως επόμενη περίοδο του 1954-1960 (γ) ελαττώνεται πάλι με πλήρη απουσία μεγάλων μεγεθών πάνω από 6,0 και με την επικράτηση μεγεθών 5,0-5,9 προς τα νότια του χάρτη.

Το 1961-1982 (δ) η δραστηριότητα συνεχίζεται περιλαμβάνοντας όλα τα μεγέθη κατανεμημένα σε μικρή απόσταση από το κέντρο του χάρτη σε προσανατολισμό Βορά-Νότου, ενώ δεν παρατηρούνται αποκοπές μεγεθών.

Το 1983 (ε) χαρτογραφούνται όλα τα μεγέθη, τα περισσότερα πάνω στο επίκεντρο του κύριου σεισμού. Πρόκειται προφανώς για μετασεισμούς.

Το 1984-2004 (στ) δεν παρατηρούνται μεγέθη μεγαλύτερα ή ίσα από 6,0. Στις δυο περιπτώσεις που μελετήθηκαν πιο πάνω παρουσιάζονται σεισμικά κενά 1^{ου} είδους



Σχήμα 16: Χωρική κατανομή σεισμικότητας για κυκλικές αποστάσεις 0-40km από το επίκεντρο του σεισμού του 1983. Τα πράσινα αστέρια συμβολίζουν σεισμούς με μεγέθη μεταξύ 5.0-5.4, τα κόκκινα σεισμούς με μεγέθη μεταξύ 5.5-5.9 και τα μπλε σεισμούς με μεγέθη μεγαλύτερα από 6.0. Οι κύκλοι αντιπροσωπεύουν τις αποστάσεις σε km από το επίκεντρο.

Στο σχήμα 17, έχει αποτυπωθεί η χωρική κατανομή της σεισμικότητας για όλα τα μεγέθη από 5.0 και πάνω σε όλες τις προκαθορισμένες χρονικές περιόδους, για αποστάσεις δακτυλίου με ακτίνα 40-80km από το επίκεντρο του σεισμού που μας ενδιαφέρει.

Για τα έτη 1918-1952 (α), το σμήνος των σεισμών περιλαμβάνει όλα τα μελετώμενα μεγέθη, η δραστηριότητα εξελίσσεται ομαλά και δεν παρατηρούνται αποκοπές μεγεθών.

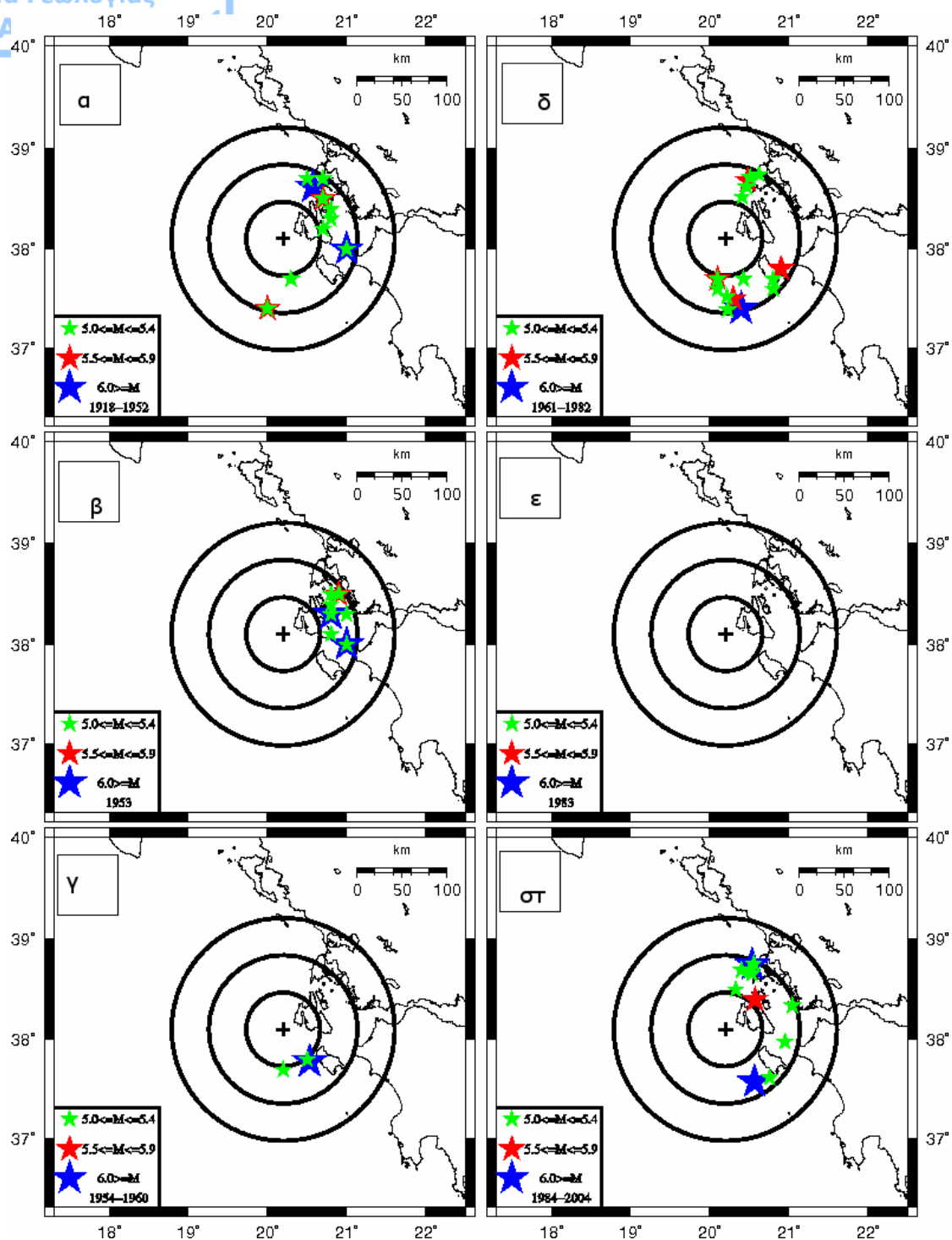
Το 1953 (β) τα σεισμικά μεγέθη παρουσιάζονται μετατοπισμένα ανατολικά σε σχέση με την προηγούμενη χρονική περίοδο, ενώ και σε αυτή την περίοδο δεν υπάρχουν αποκοπές μεγεθών.

Για το 1954-1960 (γ) μπορεί να ειπωθεί ότι η εκδήλωση της σεισμικότητας της περιοχής παρουσιάζει μια προσωρινή ελάττωση, εφόσον συμμετέχουν λιγότερα μεγέθη σε σχέση με την προηγούμενη περίοδο. Ο γενικός προσανατολισμός τους είναι Νοτιοανατολικά του επικέντρου.

Όμως, αυξάνεται το 1961-1982 (δ) και επανέρχεται στα προηγούμενα φυσιολογικά επίπεδα των περιόδων πριν το 1954-1960. Τα μεγέθη χαρτογραφούνται κατά μήκος του άξονα Βορά-Νότου και προς τα Ανατολικά στην περιοχή του χάρτη.

Το 1983 (ε) αποτελεί μια εξαιρετικά ενδιαφέρουσα περίοδο, επειδή δεν υπάρχει κανένα απολύτως μέγεθος που να χαρτογραφείται, γεγονός που οδηγεί στο συμπέρασμα, ότι πρόκειται για πλήρη σεισμική ησυχία. Το ίδιο παρατηρείται ακριβώς και στα γραφήματα μεταβολής της συχνότητας της σεισμικότητας των 40-80km του σχήματος 14 στη σελίδα 40.

Το χρονικό διάστημα 1984-2004 (στ) η εκδήλωση των σεισμών επανέρχεται στα προηγούμενα επίπεδα, των προγενέστερων χρονικών περιόδων.



Σχήμα 17: Χωρική κατανομή σεισμικότητας για κυκλικές αποστάσεις από 40-80km από το επίκεντρο του σεισμού του 1983. Τα πράσινα αστέρια συμβολίζουν σεισμούς με μεγέθη μεταξύ 5.0-5.4, τα κόκκινα σεισμούς με μεγέθη μεταξύ 5.5-5.9 και τα μπλε σεισμούς με μεγέθη μεγαλύτερα από 6.0. Οι κύκλοι αντιπροσωπεύουν τις αποστάσεις σε km από το επίκεντρο.

Στο σχήμα 18, έχει χαρτογραφηθεί η χωρική κατανομή της σεισμικότητας για κυκλικές αποστάσεις από 0-80km.

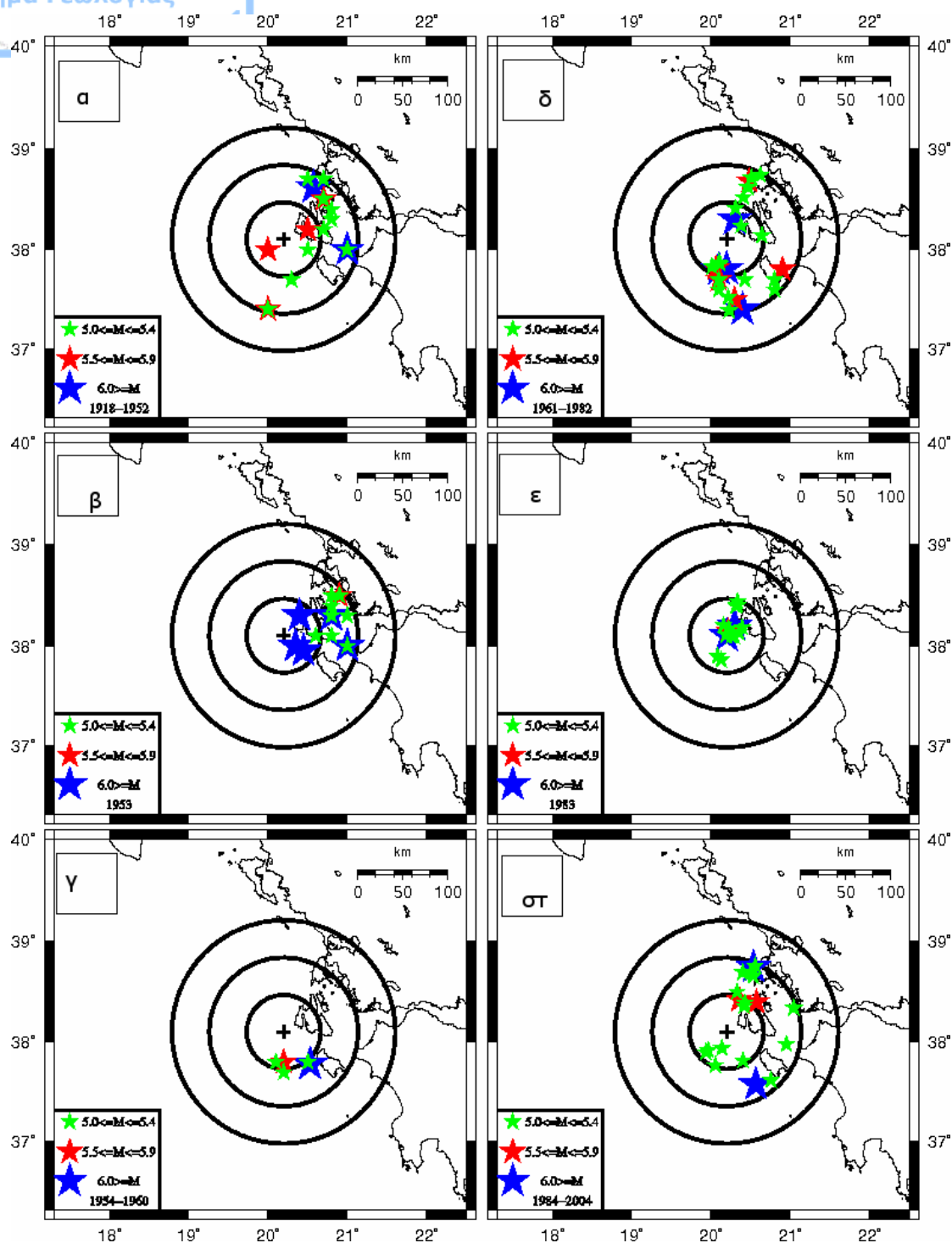
Για την πρώτη χρονική περίοδο του 1918-1952 (α) το σεισμικό σμήνος καταλαμβάνει όλη την ακτινική απόσταση και ταξινομείται σχεδόν σε όλη την επιφάνεια άλλα τα περισσότερα από τα μεγέθη βρίσκονται κατά τα ανατολικά του χάρτη για την περίοδο αυτή.

Το 1953 (β) δεν παρουσιάζει ιδιαίτερες μεταβολές σε σχέση με την προηγούμενη περίοδο, όμως υπάρχει μεγαλύτερη συγκέντρωση του σεισμικού σμήνους στο κέντρο του χάρτη.

Στο 1954-1960 (γ), η σεισμικότητα παρουσιάζεται ελαττωμένη και μετατοπισμένη νότια στο χάρτη. Παρόλο που ο χάρτης αναπαριστά τα μεγέθη για αποστάσεις 0-80km, αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι το σμήνος σε αυτή την περίπτωση είναι συγκεντρωμένο στην απόσταση που συμπίπτει με την ακτίνα των 40km.

Το 1961-1982 (δ) το σμήνος των σεισμών εξαπλώνεται πάλι καλύπτοντας το σύνολο της περιοχής, παρουσιάζοντας ομοιότητα με την εικόνα της σεισμικότητας την ίδια χρονική περίοδο του σχήματος 17.

Αντίθετα το 1983 (ε) μετατοπίζονται στο κέντρο για να απλωθούν πάλι το 1984-2004 (στ).



Σχήμα 18: Χωρική κατανομή σεισμικότητας για κυκλικές αποστάσεις από 0-80km από το επίκεντρο του σεισμού του 1983. Τα πράσινα αστέρια συμβολίζουν σεισμούς με μεγέθη μεταξύ 5.0-5.4, τα κόκκινα σεισμούς με μεγέθη μεταξύ 5.5-5.9 και τα μπλε σεισμούς με μεγέθη μεγαλύτερα από 6.0. Οι κύκλοι αντιπροσωπεύουν τις αποστάσεις σε km από το επίκεντρο.

Στο σχήμα 19, έχει αποτυπωθεί η χωρική κατανομή της σεισμικότητας για αποστάσεις δακτυλίου ακτίνας 80-120km στις γνωστές χρονικές περιόδους.

Έτσι στο πρώτο χρονικό παράθυρο του 1918-1952 (α) σημειώνονται όλα τα μεγέθη μεγαλύτερα από 5.0, με περισσότερα αυτά μεταξύ των 5.0-5.4. Τα σύμβολα των μεγεθών 5.5 έως 5.9 ακολουθούν, ενώ μόνο ένας σεισμός με μέγεθος $M \geq 6.0$ καταγράφεται.

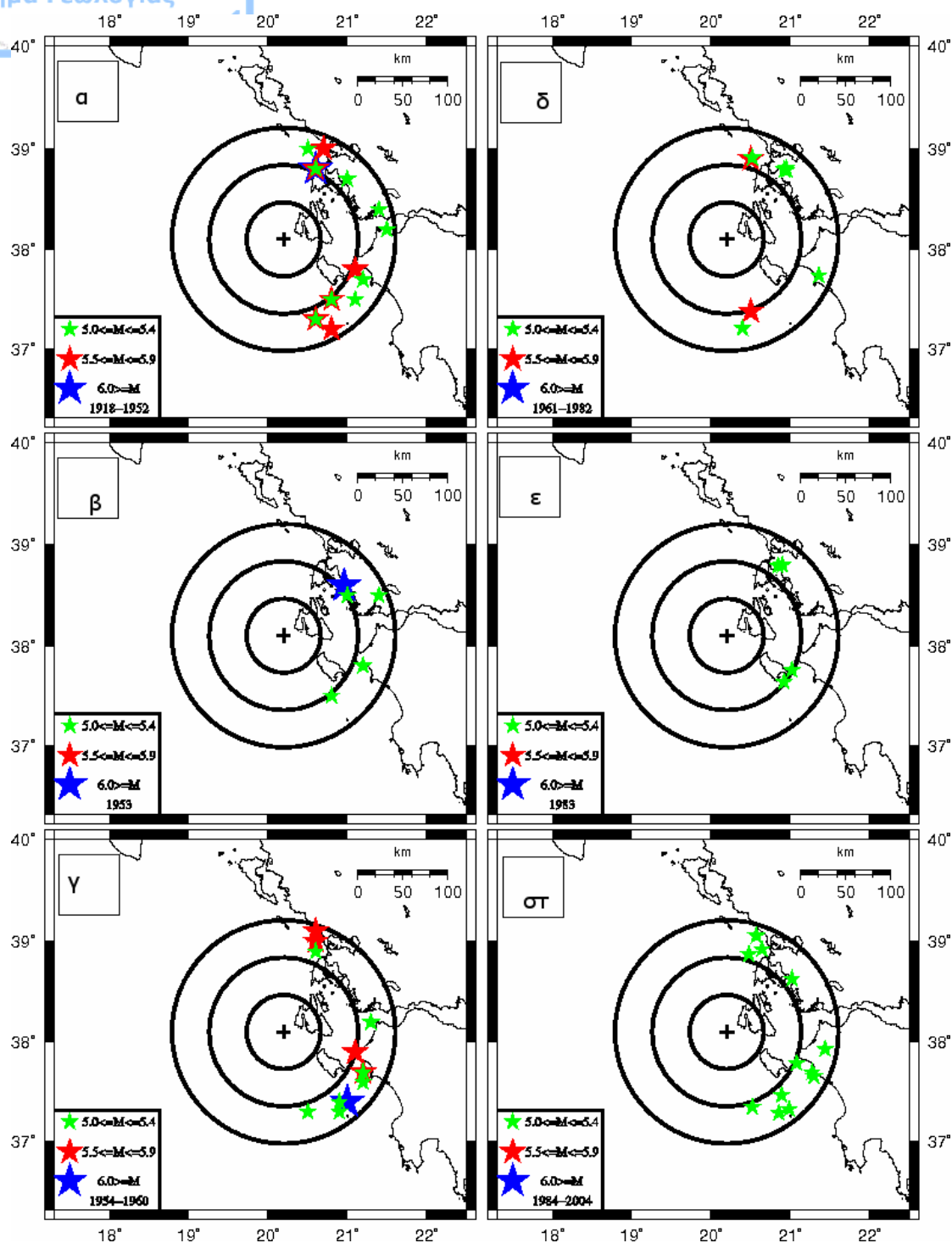
Η ίδια εικόνα περίπου επικρατεί και το 1953 (β), αν και τα μεγέθη που καταγράφονται είναι λιγότερα σε σχέση με την προηγούμενη περίοδο, με τη διαφορά ότι απουσιάζουν τα μεγέθη 5.5-5.9.

Αντίθετα, αποκοπή μεγεθών δεν παρατηρείται το 1954-1960 (γ). Οι σεισμοί που καταγράφονται παρουσιάζονται πιο απλωμένοι στο χώρο του χάρτη

Από το 1961-1982 (δ) η δραστηριότητα φαίνεται μειωμένη με ταυτόχρονη αποκοπή των μεγεθών πάνω από 6.0, (σεισμικό κενό πρώτου είδους)

Το φαινόμενο της αποκοπής μεγεθών συνεχίζεται και το 1983 (ε) με τη απουσία των μεγεθών μεταξύ 5.5-5.9 και μεγαλύτερων από 6.0. Δεν παρατηρείται συγκεκριμένος προσανατολισμός στο χάρτη των καταγεγραμμένων μεγεθών.

Το 1984-2004 (στ) το σμήνος των σεισμών αυξάνει, μόνο όμως με παρουσία των μικρών μεγεθών από 5.0 έως 5.4. Μεγέθη μεταξύ 5.5 έως 5.9 και μεγαλύτερα από 6.0 αποκόπτονται.



Σχήμα 19: Χωρική κατανομή σεισμικότητας για κυκλικές αποστάσεις από 80-120km από το επίκεντρο του σεισμού του 1983. Τα πράσινα αστέρια συμβολίζουν σεισμούς με μεγέθη μεταξύ 5.0-5.4, τα κόκκινα σεισμούς με μεγέθη μεταξύ 5.5-5.9 και τα μπλε σεισμούς με μεγέθη μεγαλύτερα από 6.0. Οι κύκλοι αντιπροσωπεύουν τις αποστάσεις σε km από το επίκεντρο.

Στο σχήμα 20 χαρτογραφήθηκε η χωρική κατανομή της σεισμικότητας για κυκλικές αποστάσεις 0-120km, από το επίκεντρο του κύριου σεισμού.

Η σεισμική δραστηριότητα το διάστημα 1918-1952 (α) περιλαμβάνει το σύνολο των μεγεθών μεγαλύτερων από 5.0. Τα περισσότερα μεγέθη κατανέμονται σε αποστάσεις πάνω από 40km, τα μεγέθη των σεισμών με $M \geq 6.0$ βρίσκονται κοντά στην απόσταση των 80km.

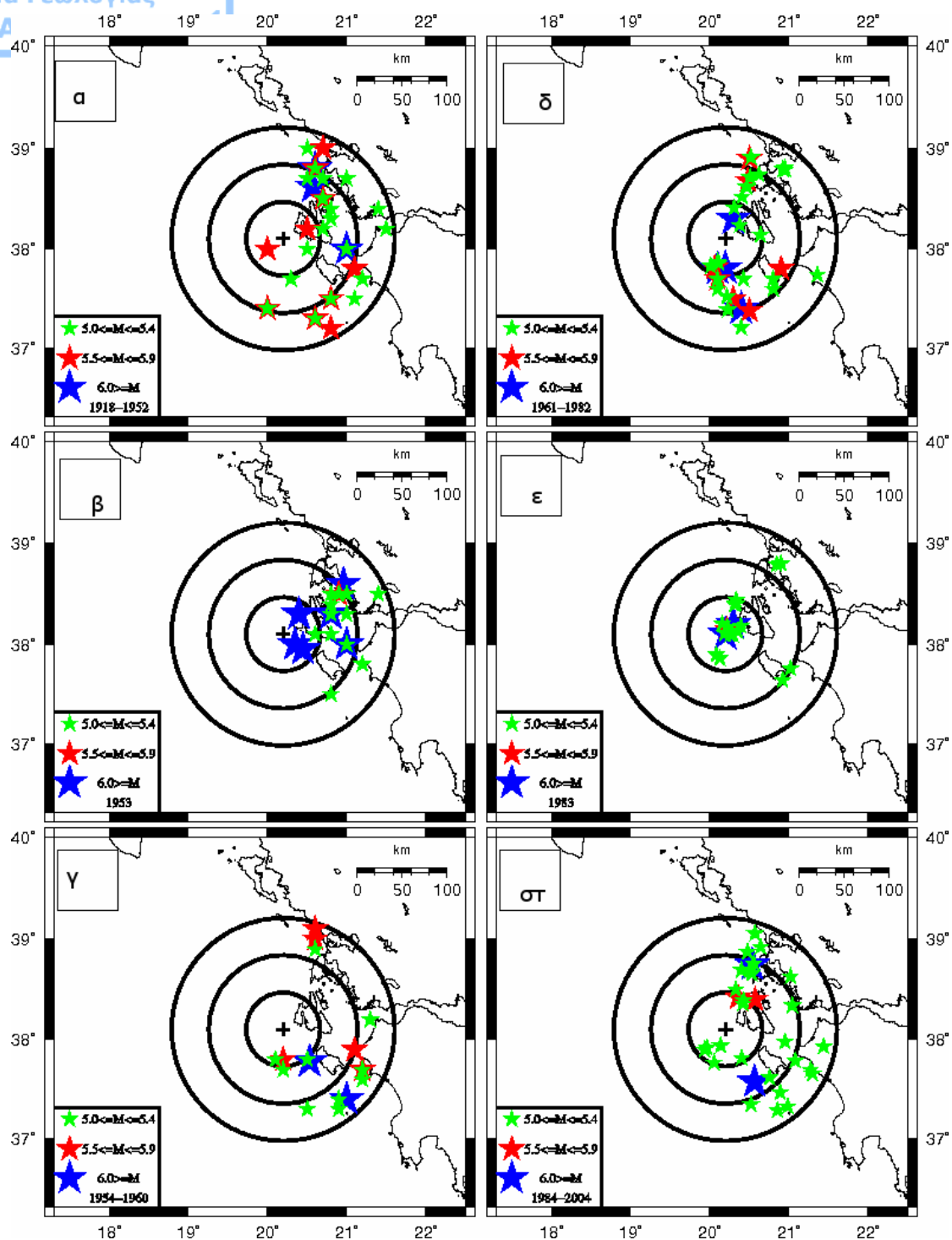
Το 1953 (β) το σμήνος των σεισμών χαρτογραφείται με μεγαλύτερη πυκνότητα προς το κέντρο με πιο πολλά μεγέθη μεγαλύτερα από 6.0 αυτή τη φορά σε σχέση με το 1918-1952. Προφανώς πρόκειται για τον κύριο σεισμό και τους μετασεισμούς του. Τα πολλά μεγέθη και η πυκνή τους κατανομή ενισχύουν την άποψη αυτή.

Το 1954-1960 (γ) οι σεισμοί με μέγεθος πάνω από 6.0 είναι λιγότεροι σε σχέση με πριν. Ταυτόχρονα αυξάνουν τα μεγέθη μεταξύ 5.5-5.9.

Στην αμέσως επόμενη χρονική περίοδο 1961-1982 (δ), η σεισμικότητα στην περιοχή αυξάνει με περισσότερα μεγέθη μεταξύ 5.0-5.4 να συμμετέχουν.

Ενώ το 1983 (ε) το σμήνος των σεισμών μεταναστεύει στο κέντρο του χάρτη. Είναι σαφές ότι πρόκειται για τον κύριο σεισμό και τους μετασεισμούς του.

Συνεχίζοντας στο επόμενο χρονικό παράθυρο, δηλαδή για το 1984-2004 (στ), παρατηρείται αύξηση των καταγραφόμενων μεγεθών σε όλη την περιοχή ενδιαφέροντος



Σχήμα 20: Χωρική κατανομή σεισμικότητας για κυκλικές αποστάσεις από 0-120km από το επίκεντρο του σεισμού του 1983. Τα πράσινα αστέρια συμβολίζουν σεισμούς με μεγέθη μεταξύ 5.0-5.4, τα κόκκινα σεισμούς με μεγέθη μεταξύ 5.5-5.9 και τα μπλε σεισμούς με μεγέθη μεγαλύτερα από 6.0. Οι κύκλοι αντιπροσωπεύουν τις αποστάσεις σε km από το επίκεντρο.

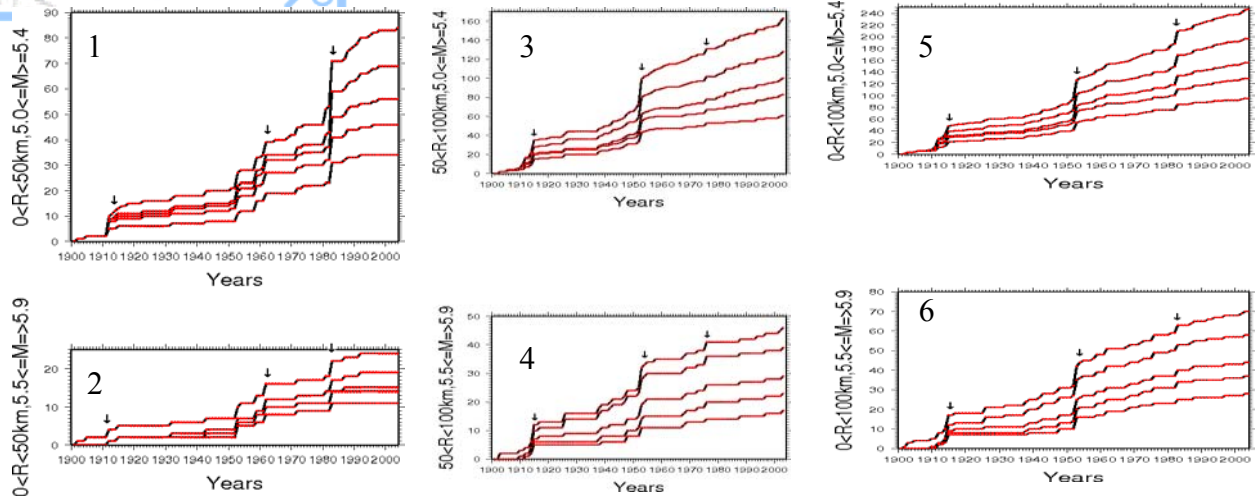
2.6 Μεταβολές της συχνότητας της σεισμικότητας για σεισμικές ακτίνες των 50,50-100,100,100-150,150km.

Στο σχήμα 21α, για τις κυκλικές αποστάσεις 0 έως 50km για όλα τα μεγέθη παρατηρούνται τρεις περίοδοι ενεργοποίησης, γύρω από τη μελετούμενη περιοχή, το 1915,1953 έως 1960, 1983 για τους σεισμούς όλων των μεγεθών, ενώ παρατηρούνται μικρές σεισμικές ησυχίες για τους σεισμούς $5.5 \leq M \leq 5.9$ που δε συναντώνται στα μικρότερα, από το 1915-1930 και από το 1990-2004 (σχήματα 1 και 2).

Στο σχήμα 21α.3 έχει αποτυπωθεί η χρονική μεταβολή του ρυθμού γένεσης των σεισμών για κυκλικές αποστάσεις από 50 έως 100km, για τους σεισμούς με μεγέθη $5.0 \leq M \leq 5.4$ η αύξηση του ρυθμού είναι συνεχής με τρεις μέγιστες εξάρσεις στα έτη 1915,1953,1983. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται σε όλους τους σεισμούς και σεισμικές ησυχίες απουσιάζουν στο σχήμα.

Επίσης στο αμέσως επόμενο σχήμα 21α.4 για τις ίδιες κυκλικές αποστάσεις αλλά για σεισμούς με μέγεθος $5.5 \leq M \leq 5.9$ υπάρχουν επίσης τρεις μέγιστες εξάρσεις στις ίδιες πάλι χρονολογίες χωρίς να παρατηρούνται σημαντικές διαφοροποιήσεις στους σεισμούς που εκδηλώνονται

Προχωρώντας περισσότερο την ανάλυση στο σχήμα 21α 5 χαρτογραφήθηκε η μεταβολή του ρυθμού γένεσης των σεισμών για μεγέθη $5.0 \leq M \leq 5.4$ σε κυκλική απόσταση 0 έως 100km από το επίκεντρο του 1983. Ο ρυθμός έχει αυξητικές τάσεις σε όλη τη χρονική διάρκεια από το 1904 έως το 2004, χωρίς να παρατηρείται κάποια αξιοσημείωτη σεισμική ησυχία. Αντίθετα και σε αυτή την περίπτωση κυριαρχούν οι τρεις περίοδοι έξαρσης στις ίδιες χρονολογίες, φαινόμενο που παρατηρείται επίσης στο επόμενο σχήμα 21α.6

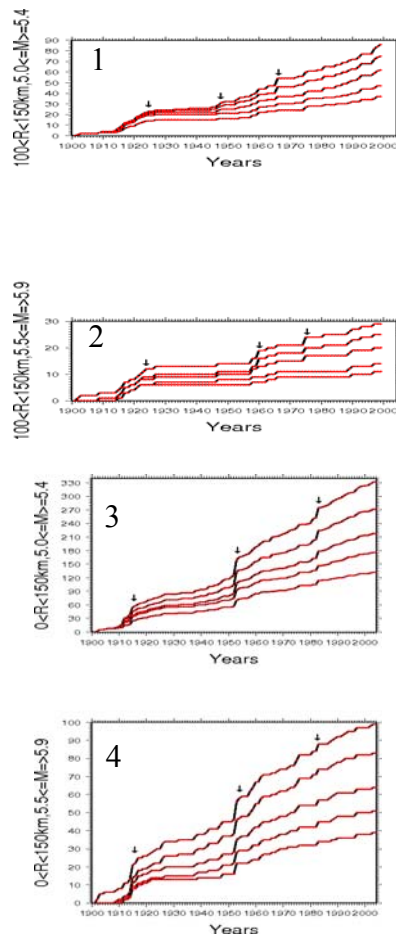


Σχήμα 21α: Χρονική μεταβολή του ρυθμού γένεσης των σεισμών.

(1) Σεισμοί με $5.0 \leq M \leq 5.4$ που έγιναν σε κυκλική περιοχή με ακτίνα $0 \leq R \leq 50 \text{ km}$ γύρω από επίκεντρο του σεισμού του 1983. (2) Το ίδιο με το (1) αλλά για σεισμούς με $5.5 \leq M \leq 5.9$. (3) Σεισμοί με $5.0 \leq M \leq 5.4$ που έγιναν σε κυκλική περιοχή με ακτίνα $50 \leq R \leq 100 \text{ km}$ γύρω από επίκεντρο του σεισμού του 1983. (4) Το ίδιο με το (3) αλλά για σεισμούς με $5.5 \leq M \leq 5.9$. (5) Σεισμοί με $5.0 \leq M \leq 5.4$ που έγιναν σε κυκλική περιοχή με ακτίνα $0 \leq R \leq 100 \text{ km}$ γύρω από επίκεντρο του σεισμού του 1983. (6) Το ίδιο με το (5) αλλά για σεισμούς με $5.5 \leq M \leq 5.9$.

Στο σχήμα 21β.1 συνεχίζεται η καταγραφή της χρονικής μεταβολής του ρυθμού γένεσης των σεισμών με $4.0 \leq M \leq 4.5$ για αποστάσεις 100 έως 150km, ενώ η καταγραφή των σεισμών με μέγεθος $5.5 \leq M \leq 5.9$ γίνεται στο σχήμα 21β.2. Αξιοσημείωτη είναι σε αυτό το σχήμα μια σεισμική ησυχία που παρατηρείται τα έτη 1936-1946. Όπως είναι άμεσα αντιληπτό η δραστηριότητα και σε αυτές τις αποστάσεις είναι ιδιαίτερα έντονη, χωρίς μεγάλες περιόδους αδράνειας ή παύσης.

Τα επόμενα σχήματα 21β.3 και 21β.4 αναφέρονται σε κυκλικές αποστάσεις 0 έως 150km για σεισμούς με μεγέθη $5.0 \leq M \leq 5.4$ το πρώτο και $5.5 \leq M \leq 5.9$ το δεύτερο. Οι τρεις περίοδοι εμφάνισης της έντονης μεταβολής του ρυθμού γένεσης των σεισμών είναι εμφανείς και σε αυτή την περίπτωση.



Σχήμα 21β : Χρονική μεταβολή του ρυθμού γένεσης των σεισμών.

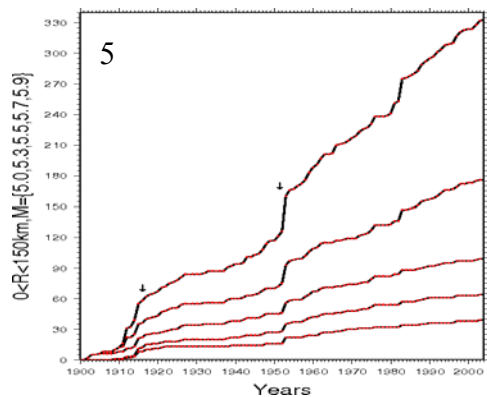
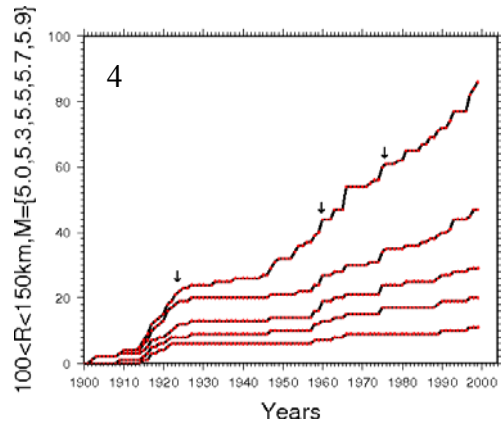
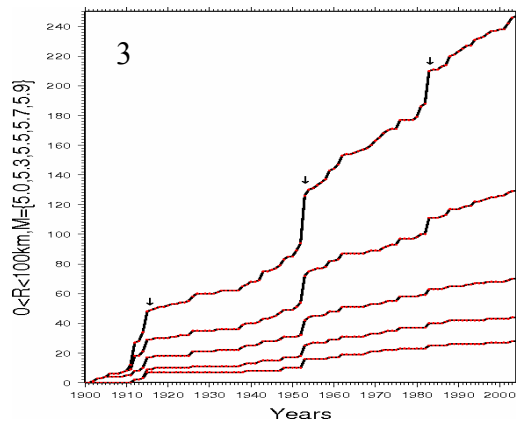
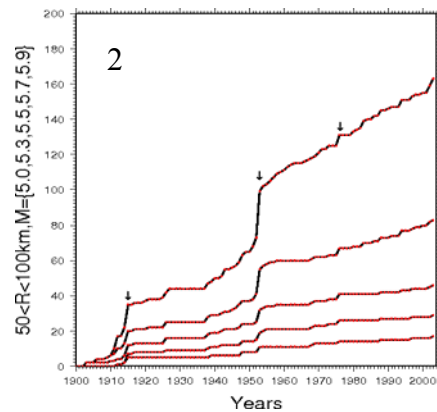
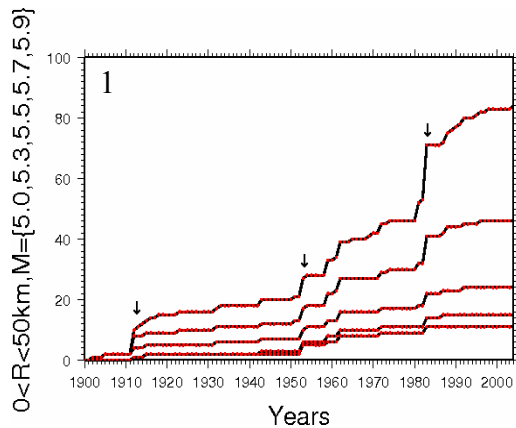
(1) Σεισμοί με $5.0 \leq M \leq 5.4$ που έγιναν σε κυκλική περιοχή με ακτίνα $100 \leq R \leq 150 \text{ km}$ γύρω από επίκεντρο του σεισμού του 1983. (2) Το ίδιο με το (1) αλλά για σεισμούς με $5.5 \leq M \leq 5.9$. (3) Σεισμοί με $5.0 \leq M \leq 5.4$ που έγιναν σε κυκλική περιοχή με ακτίνα $0 \leq R \leq 150 \text{ km}$ γύρω από επίκεντρο του σεισμού του 1983. (4) Το ίδιο με το (3) αλλά για σεισμούς με $5.5 \leq M \leq 5.9$

Στο σχήμα 22 όπου χαρτογραφείται η χρονική μεταβολή του ρυθμού γένεσης των σεισμών για τα μεγέθη 5.0 5.3 5.5 5.7 5.9 σε σχέση με το χρόνο για όλες τις κυκλικές αποστάσεις μεταξύ των 0 έως 150km.

Στο σχήμα 22.1 όπου έχουν χαρτογραφηθεί οι μεταβολές για κυκλικές αποστάσεις 0 έως 50km από το επίκεντρο του κύριου σεισμού του 1983, επικρατούν τρεις μέγιστες εξάρσεις του ρυθμού γένεσης των σεισμών στα έτη 1915,1953,1983.

Το ίδιο φαινόμενο παρατηρείται επίσης για κυκλικές αποστάσεις 50 έως 100km (σχήμα 22.2) 0 έως 100km (σχήμα 22.3) 100-150km (σχήμα 22.4). 0 έως 150km (σχήμα 22.5) Το μόνο που διαφοροποιεί τα γραφήματα στις αποστάσεις των 50 έως 100km και 100 έως 150km είναι ότι η έξαρση του ρυθμού σεισμικότητας μετατοπίζεται από το 1983 στο 1973.

Συμπερασματικά λοιπόν, και στα γραφήματα του ρυθμού γένεσης των σεισμών για κυκλικές αποστάσεις 50km υπάρχουν τρεις βασικές περίοδοι που καθορίζουν την αύξηση του ρυθμού, που συμπίπτουν περίπου, αν όχι ακριβώς, με την εκδήλωση μεγάλων σεισμών. Σεισμικές ησυχίες δεν παρατηρούνται σε αυτές τις αποστάσεις, εκτός από την προαναφερθείσα του σχήματος 21. Ακολουθούν οι χάρτες της χωρικής κατανομής της σεισμικότητας για κυκλικές αποστάσεις 50,100,150km και παρατηρήσεις πάνω σε αυτούς για κάθε χρονική περίοδο.



Σχήμα 22: Χρονική μεταβολή του ρυθμού γένεσης των σεισμών για τα έτη μεταξύ 1900-2004. (1) Σεισμοί με μεγέθη 5,0 5,3 5,5 5,7 5,9 που έγιναν σε κυκλική περιοχή με ακτίνα $0 \leq R \leq 50 \text{ km}$ γύρω από επίκεντρο του σεισμού του 1983. (2) Το ίδιο με το (1) αλλά για περιοχή κυκλικού δακτυλίου με ακτίνα $50 \leq R \leq 100 \text{ km}$. (3) Το ίδιο με το (1) αλλά για περιοχή κυκλικού δακτυλίου $0 \leq R \leq 100 \text{ km}$. (4) Το ίδιο με το (1) αλλά για περιοχή κυκλικού δακτυλίου $100 \leq R \leq 150 \text{ km}$. (5) Το ίδιο με το (1) αλλά για περιοχή κυκλικού δακτυλίου $0 \leq R \leq 150 \text{ km}$.

2.7 Παρατηρήσεις σχετικά με τη χωρική κατανομή της σεισμικότητας για κυκλικές αποστάσεις 50,50-100,100,100-150,150km

Στο σχήμα 23 για τη χωρική κατανομή της σεισμικότητας σε δακτυλική απόσταση ακτίνας 0-50km από το επίκεντρο παρατηρούμε ότι για την περίοδο από το 1918-1952 (α) απουσιάζουν εντελώς τα μεγέθη πάνω από 6.0 (σεισμικό κενό 1^{ου} είδους), ενώ κυριαρχούν των 5,0-5,4,5,5-5,9.

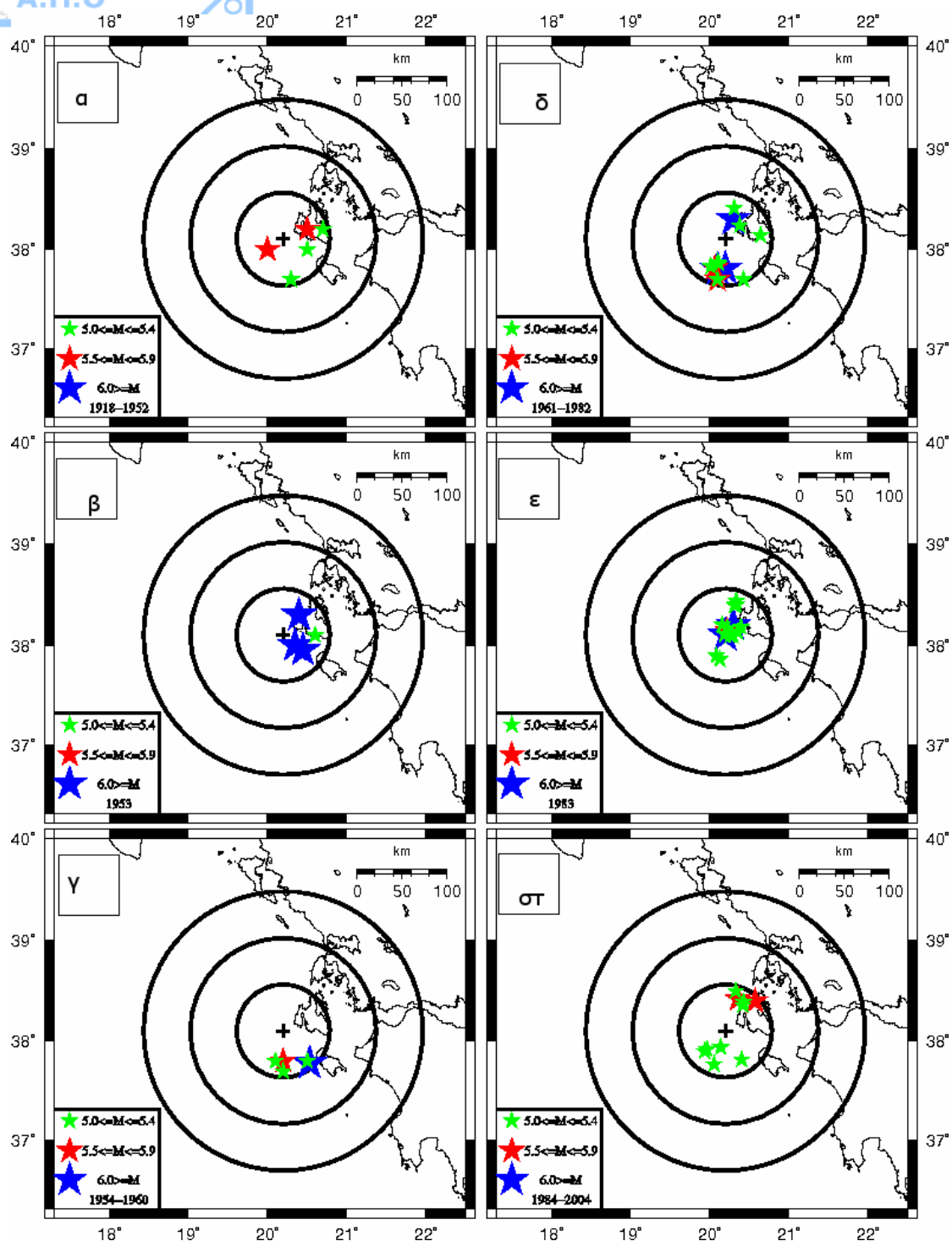
Το 1953 (β) τα μεγέθη που κυριαρχούν είναι μεγαλύτερα από 6.0 και είναι πιο κοντά στο επίκεντρο (σεισμικό κενό 2^{ου} είδους). Δεν παρατηρούνται μεγέθη από 5,5-5,9, ενώ καταγράφεται μόνο ένας σεισμός με μέγεθος μεταξύ 5.0 έως 5.4.

Το 1954-1960 (γ) το σμήνος μεταναστεύει νότια στο χάρτη και όλα τα μεγέθη που συμμετέχουν εντοπίζονται στην ευρύτερη περιοχή από 19.9^ο/20,9^ο/37,6^ο/37,8^ο και χαρτογραφούνται κοντά στην ακτίνα των 50km.

Το 1961-1982 (δ) τα καταγεγραμμένα γεγονότα απλώνονται στο χάρτη σε σχέση με την προηγούμενη χρονική περίοδο και καλύπτουν το σύνολο σχεδόν του κυκλικού δίσκου με ακτίνα 50km.

Στο επόμενο χρονικό παράθυρο του 1983 (ε) το πλήθος των σεισμών συγκεντρώνεται γύρω από το επίκεντρο. Άλλωστε, το 1983, είναι χρονολογία εκδήλωσης του σεισμού της Κεφαλονιάς, ο οποίος καταγράφεται στο χάρτη, μαζί με τους μετασεισμούς του (μεγέθη μεγαλύτερα από 6.0)

Με την πάροδο του χρόνου, στο επόμενο χρονικό διάστημα από το 1984 μέχρι το 2004 (στ) δεν παρατηρούνται μεγέθη από 6.0 και πάνω (σεισμικό κενό 1^{ου} είδους). Αντίθετα, τα υπόλοιπα συμμετέχουν κανονικά στην εκδήλωση της σεισμικότητας και παρουσιάζονται εξαπλωμένα σε όλη την περιοχή ενδιαφέροντος.



Σχήμα 23 : Χωρική κατανομή σεισμικότητας για το δακτύλιο ακτίνας από 0-50km. Τα πράσινα αστέρια συμβολίζουν σεισμούς με μεγέθη μεταξύ 5.0-5.4, τα κόκκινα σεισμούς με μεγέθη μεταξύ 5.5-5.9 και τα μπλε σεισμούς με μεγέθη μεγαλύτερα από 6.0. Οι κύκλοι αντιπροσωπεύουν τις αποστάσεις σε km από το επίκεντρο.

Το σχήμα 24 αφορά τη χωρική κατανομή της σεισμικότητας σε δακτυλίους από 50 έως 100km απόσταση από το επίκεντρο του κύριου σεισμού.

Η σεισμικότητα στα έτη 1918-1952 (α) εξελίσσεται στην περιοχή γύρω από το επίκεντρο με τη συμμετοχή όλων των μεγεθών κατανεμημένη στα ανατολικά κυρίως, με μικρό αριθμό μεγεθών μετατοπισμένο προς τα Νότια.

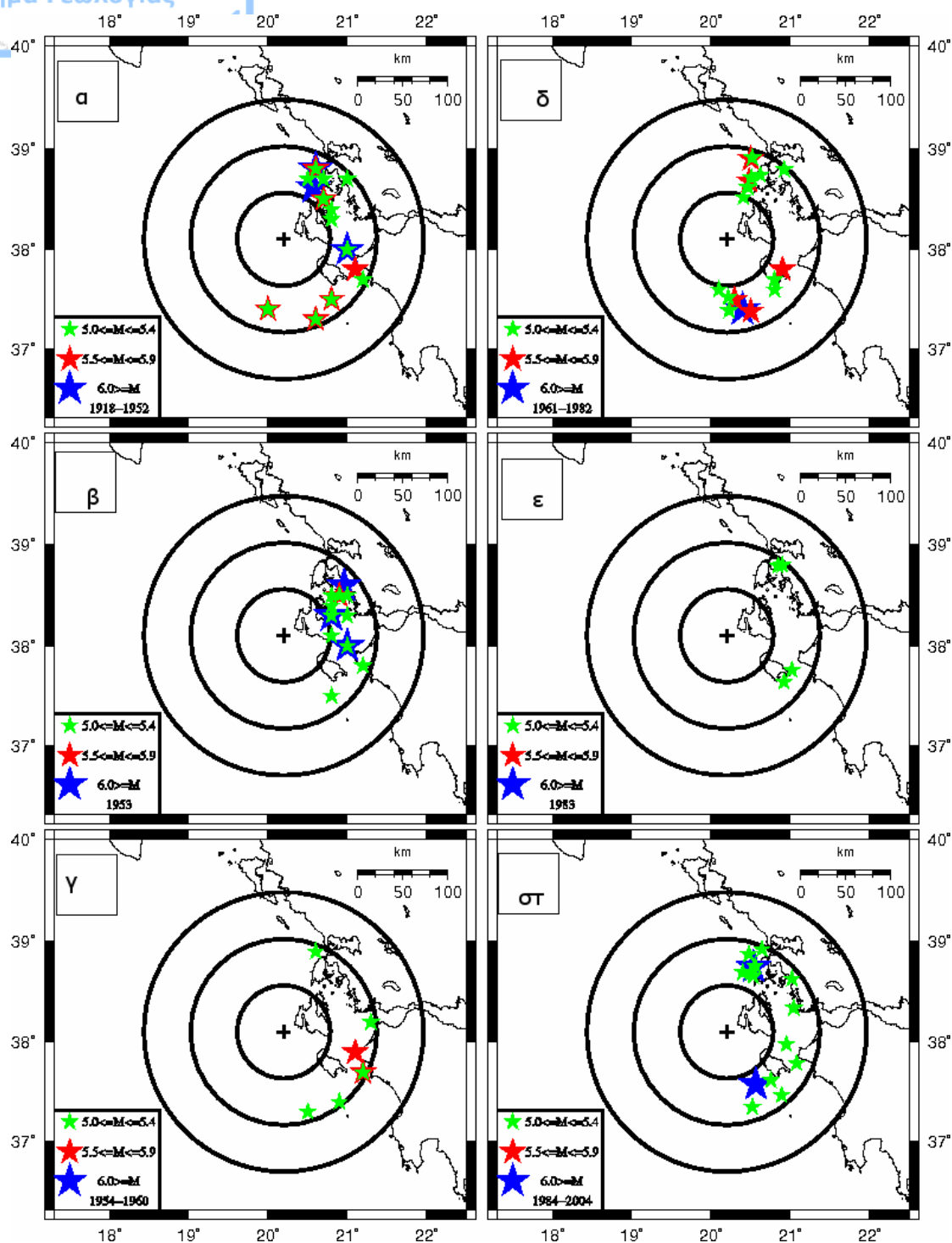
Για τον επόμενο χρόνο, το 1953 (β), το σμήνος των σεισμών αποτελείται από λιγότερα μεγέθη, όμως είναι πιο συσπειρωμένα και εντοπίζονται στα Ανατολικά του χάρτη.

Το 1954-1960 (γ) το σμήνος εξαπλώνεται πάλι, αλλά δεν παρατηρούνται μεγέθη μεγαλύτερα από 6,0 (σεισμικό κενό 1^{ου} είδους).

Αντίθετα, η πυκνότητα των γεγονότων αυξάνει το 1961-1982, (δ) το σμήνος των σεισμών εξαπλώνεται σε έκταση σε σχέση με την προηγούμενη κατανομή με την ταυτόχρονη συμμετοχή όλων των μεγεθών.

Το 1983 (ε) η σεισμικότητα στην περιοχή μειώνεται ακόμα περισσότερο με τα μεγέθη 5.0-5.4 να επικρατούν. Δεν καταγράφονται, όμως μεγαλύτερα από 5.5.

Στο 1984-2004 (στ) η σεισμικότητα παρουσιάζεται εντονότερη με κυρίαρχα τα μεγέθη από 5.0 έως 5.4, αλλά ταυτόχρονα απουσιάζουν τα μεγέθη 5.5 έως 5.9 και μόλις 2 μεγέθη έχουν χαρτογραφηθεί με μέγεθος πάνω από 6,0.



Σχήμα 24 : Χωρική κατανομή σεισμικότητας για το δακτύλιο ακτίνας από 50-100km. Τα πράσινα αστέρια συμβολίζουν σεισμούς με μεγέθη μεταξύ 5.0-5.4, τα κόκκινα σεισμούς με μεγέθη μεταξύ 5.5-5.9 και τα μπλε σεισμούς με μεγέθη μεγαλύτερα από 6.0. Οι κύκλοι αντιπροσωπεύουν τις αποστάσεις σε km από το επίκεντρο.

Το σχήμα 25, περιγράφει τη χωρική κατανομή της σεισμικότητας για κυκλικές αποστάσεις 0-100km από το μελετώμενο επίκεντρο.

Για την περίοδο από το 1918-1952 (α) η χωρική κατανομή των σεισμικών γεγονότων είναι εξαπλωμένη από το επίκεντρο προς τα ανατολικά και σε αυτή την περίπτωση, με συμμετοχή του εύρους όλων των μεγεθών στο χάρτη.

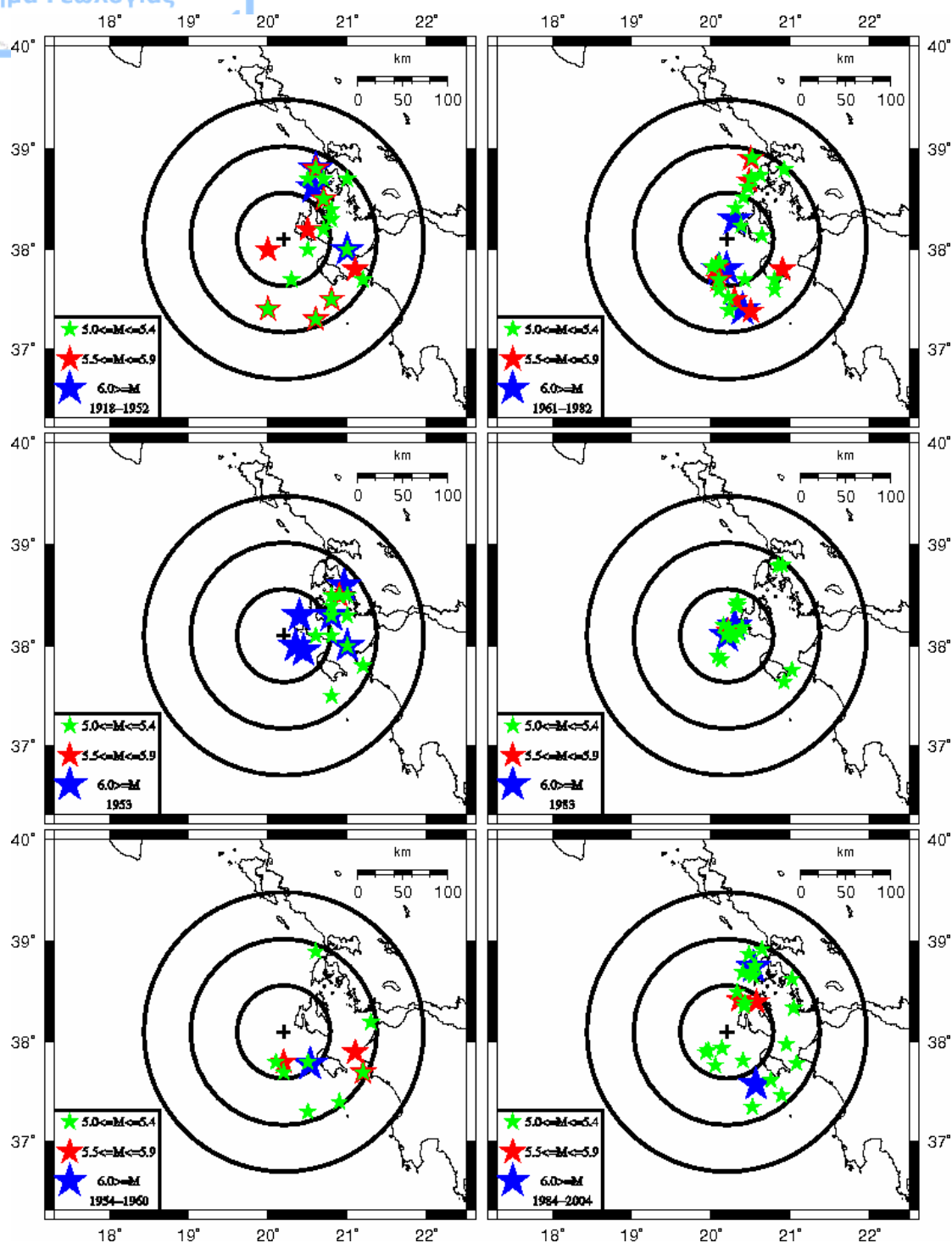
Για το 1953 (β) η σεισμικότητα συμπυκνώνεται προς τα κεντρικά, αλλά χαρακτηριστικό γνώρισμα της είναι ότι κυριαρχούν τα μεγέθη πάνω από 6.0 και 5.0-5.4. Ενδιάμεσα μεγέθη 5.0-5.9 απουσιάζουν.

Η δραστηριότητα συνεχίζεται το 1954-1960 (γ) σε μεγαλύτερη διασπορά και έκταση, με τα μεγέθη 5,0-5,4 να επικρατούν συγκριτικά.

Το 1961-1982 (δ) η κατανομή, το πλήθος και ο αριθμός των γεγονότων ομοιάζουν με αυτά του 1918-1952 σε μεγάλο βαθμό, για να περάσει πάλι η περιοχή

Το 1983 (ε) σε σεισμικότητα συγκεντρωμένη γύρω από το επίκεντρο του σεισμού της Κεφαλονιάς με τα μεγέθη από 5,5-5,9 και μεγαλύτερα από 6,0 να βρίσκονται ακριβώς πάνω στο επίκεντρο. Είναι ο κύριος σεισμός και οι μετασεισμοί του.

Το 1984-2004 (στ) παρατηρείται έξαρση σεισμικής δραστηριότητας και εξάπλωση αυτής στο ανατολικό μέρος της μελετώμενης περιοχής.



Σχήμα 25 : Χωρική κατανομή σεισμικότητας για το δακτύλιο ακτίνας από 0-100km. Τα πράσινα αστέρια συμβολίζουν σεισμούς με μεγέθη μεταξύ 5.0-5.4, τα κόκκινα σεισμούς με μεγέθη μεταξύ 5.5-5.9 και τα μπλε σεισμούς με μεγέθη μεγαλύτερα από 6.0. Οι κύκλοι αντιπροσωπεύουν τις αποστάσεις σε km από το επίκεντρο.

Στο σχήμα 26, έχει χαρτογραφηθεί η χωρική κατανομή της σεισμικότητας για το δακτύλιο 100-150km.

Το 1918-1952 (α) μετέχουν όλα τα μεγέθη με την καταγραφή όμως μόνο ενός μεγέθους από 6.0 και πάνω. Η σεισμικότητα δείχνει ομοιότητα με αυτή της αντίστοιχης περιόδου για ακτινικές αποστάσεις 0-150km του σχήματος 25 (α).

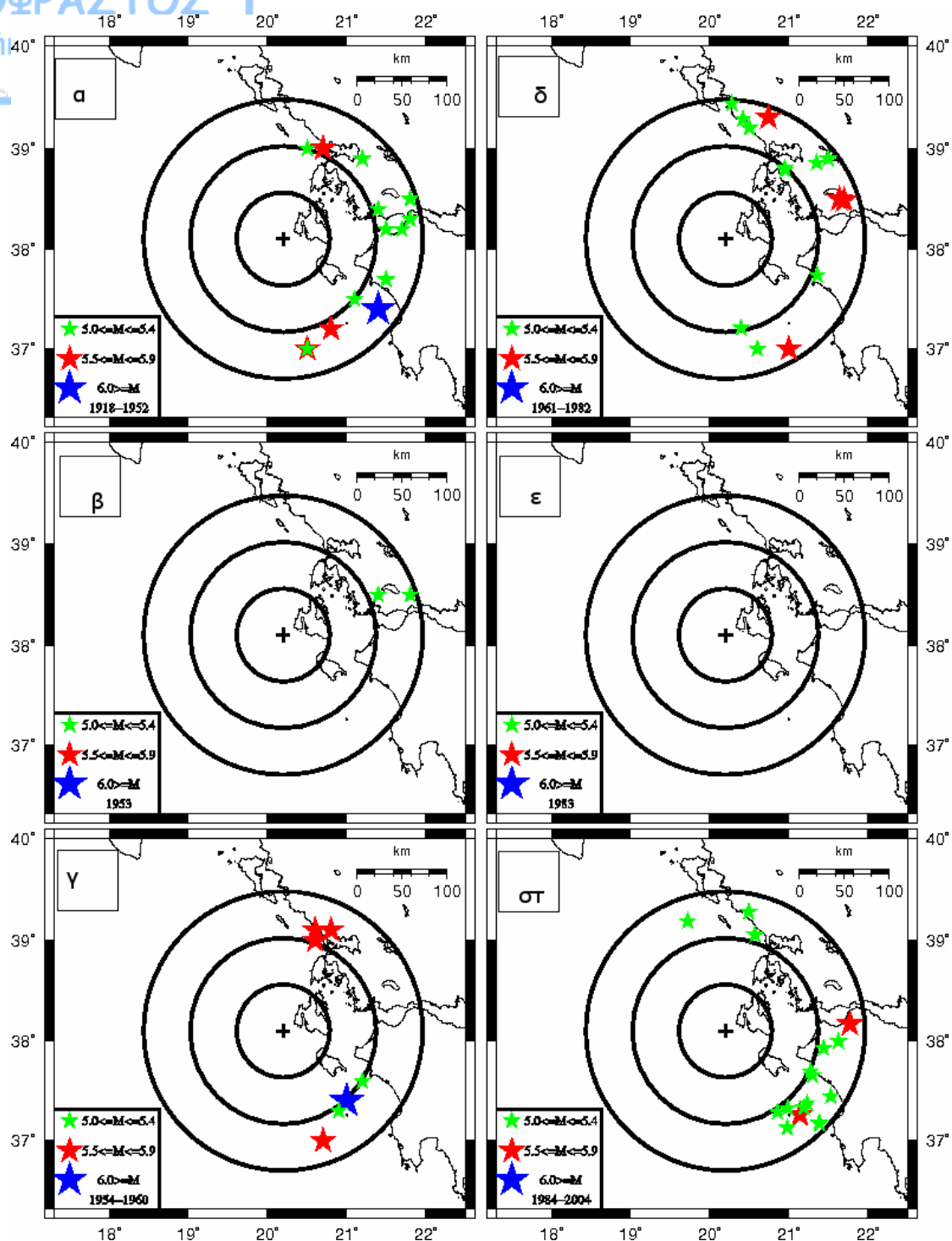
Το 1953 (β) η σεισμικότητα ελαττώνεται αισθητά περιορίζεται μόνο στα μεγέθη 5.0-5.4 ενώ ελάχιστα μεγέθη καταγράφονται. Εύκολα μπορεί να θεωρηθεί ως σεισμική ησυχία των μεγεθών μεγαλύτερων από 5.5, δηλαδή ως σεισμικό κενό 1^{ου} είδους.

Το 1954-1960 (γ) διακρίνονται όλα τα μεγέθη των σεισμών, με τους μισούς από αυτούς να βρίσκονται πάνω στην ακτινική απόσταση των 100km. Στην περίπτωση αυτή κυριαρχούν οι μέσου μεγέθους σεισμοί μεταξύ 5.5 έως 5.9.

Το 1961-1982 (δ) η σεισμικότητα εξελίσσεται φυσιολογικά, περίπου στον ίδιο ρυθμό με το 1954-1960, με περισσότερα καταγραφόμενα μεγέθη μεταξύ 5.0-5.4. Δεν υπάρχουν όμως για αυτή την περίοδο μεγέθη μεγαλύτερα από 6.0, έτσι παρατηρείται σεισμικό κενό 1^{ου} είδους.

Το 1983 (ε), είναι πολύ ενδιαφέρουσα χρονική περίοδος, επειδή παρατηρείται πλήρης σεισμική ησυχία 1^{ου} και 2^{ου} είδους για την απόσταση αυτή και κανένα μέγεθος δεν καταγράφεται.

Το 1984-2004 (στ) δυο σμήνη σεισμών επικρατούν το πρώτο με μεγέθη 5,0-5,4 που είναι και πολυπληθέστερο και το δεύτερο με μεγέθη 5.0-5.9 αποτελούμενο μόνο από δυο σεισμούς. Δεν καταγράφονται μεγέθη μεγαλύτερα από 6.0.



Σχήμα 26 : Χωρική κατανομή σεισμικότητας για το δακτύλιο ακτίνας από 100-150km. Τα πράσινα αστέρια συμβολίζουν σεισμούς με μεγέθη μεταξύ 5.0-5.4, τα κόκκινα σεισμούς με μεγέθη μεταξύ 5.5-5.9 και τα μπλε σεισμούς με μεγέθη μεγαλύτερα από 6.0. Οι κύκλοι αντιπροσωπεύουν τις αποστάσεις σε km από το επίκεντρο.

Για το σχήμα 27 που αφορά τις δακτυλικές αποστάσεις με ακτίνα από 0 έως 150km το 1918-1952 (α) η σεισμικότητα είναι διασπαρμένη σε μεγάλη έκταση ενώ δεν υπάρχει κάποια αποκοπή μεγεθών. Σε σχέση με τον αντίστοιχο χάρτη της ίδιας χρονικής περιόδου του προηγούμενου σχήματος τα καταγραφόμενα μεγέθη είναι περισσότερα σε αριθμό και η σεισμικότητα εντονότερη.

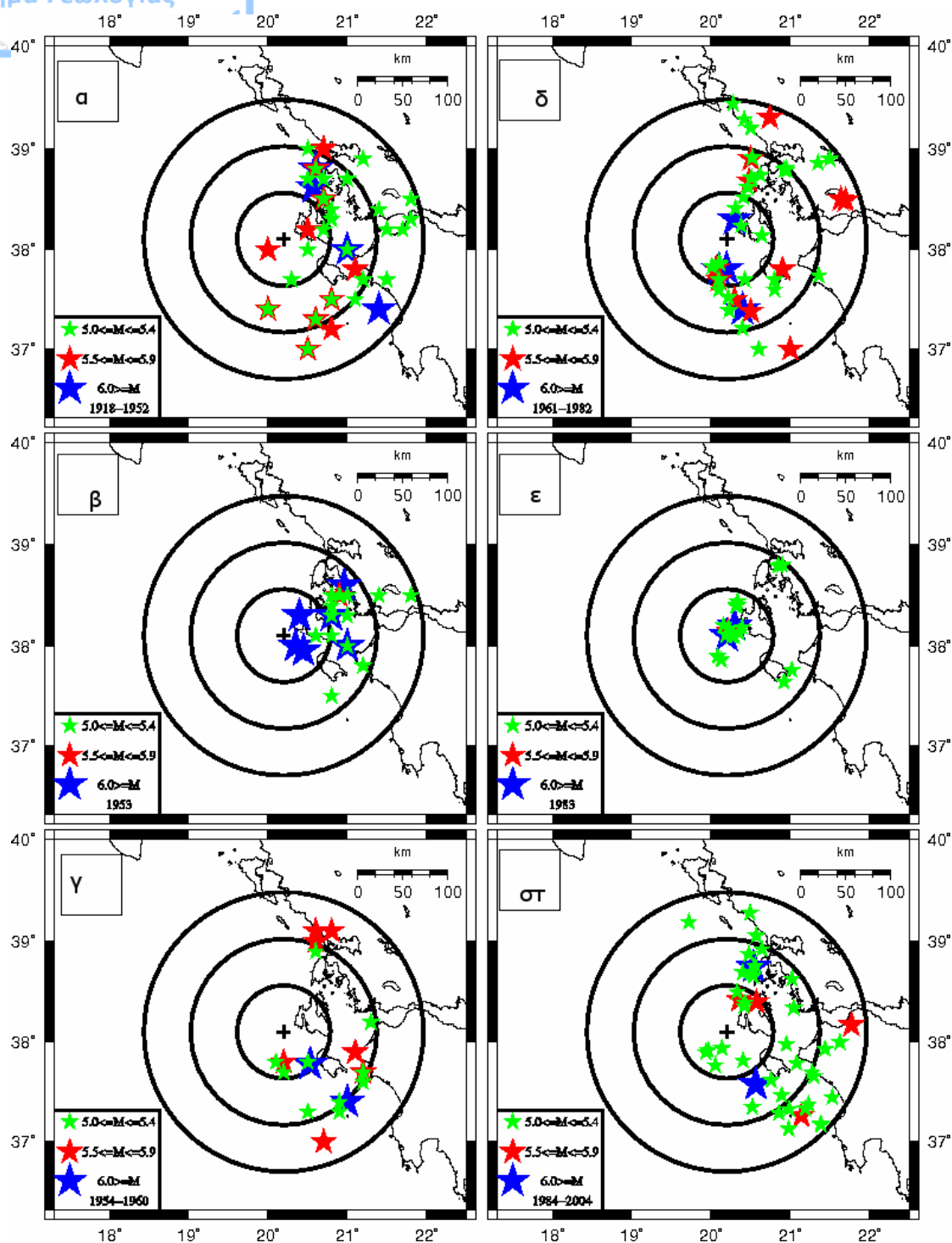
Το 1953 (β) η χωρική κατανομή φαίνεται πιο πυκνή προς το κέντρο του χάρτη με τα μεγάλα μεγέθη πάνω από 6.0 να επικρατούν εκεί. Τα μικρότερα παρατηρούνται σε μεγαλύτερη απόσταση και κυρίως μεταξύ των 50 έως 100km.

Για το 1954-1960 (γ) τα μεγέθη κατανέμονται σε όλους τους δακτυλίους και γενικότερα υπάρχει μια εξάπλωση της σεισμικότητας. Δεν υπάρχει κάποια αποκοπή μεγέθους.

Η ίδια εικόνα συνεχίζεται την επόμενη χρονική περίοδο 1961-1982 (δ) με πιο πολλά μεγέθη να συμμετέχουν αυτή τη φορά, με αποτέλεσμα να καλύπτεται ο μισός χάρτης.

Όμως, το 1983 (ε) το σμήνος των σεισμών μετατοπίζεται προς το κέντρο δίνοντας την εντύπωση ότι συρρικνώνεται σχετικά με το προηγούμενο διάστημα. Συμμετέχουν όλα τα μεγέθη, αν και είναι λιγότερα σε αριθμό.

Στο 1984-2004 (στ) όμως η κατάσταση διαφοροποιείται ξανά, η σεισμικότητα εξαπλώνεται δίνοντας περίπου την ίδια εικόνα των προηγούμενων περιόδων του 1918-1952, 1954-1960.



Σχήμα 27 : Χωρική κατανομή σεισμικότητας για το δακτύλιο ακτίνας από 0-150km. Τα πράσινα αστέρια συμβολίζουν σεισμούς με μεγέθη μεταξύ 5.0-5.4, τα κόκκινα σεισμούς με μεγέθη μεταξύ 5.5-5.9 και τα μπλε σεισμούς με μεγέθη μεγαλύτερα από 6.0. Οι κύκλοι αντιπροσωπεύουν τις αποστάσεις σε km από το επίκεντρο.



Κεφάλαιο 3^ο

Τάσεις Coulomb

3.1 Εισαγωγικά στοιχεία για τη μεταβολή στατικής τάσης λόγω γένεσης προηγούμενων σεισμών.

Σε πλήθος εργασιών έχει προταθεί ότι η σεισμικότητα μιας ευρείας περιοχής εμφανίζεται τροποποιημένη πριν από την εκδήλωση ενός κύριου σεισμού (Bowman et al., 1998; Jaume and Sykes, 1999; Papazachos and Papazachos, 2000). Τα τελευταία χρόνια υπάρχει αυξημένο ενδιαφέρον στις παρατηρήσεις σχετικές με την αύξηση της σεισμικότητας πριν από την εκδήλωση μεγάλων σεισμών. Οι Bowman και King (2001) συνέδεσαν τα μέχρι πρότινος άσχετα μεταξύ τους θέματα: Τις αλληλεπιδράσεις των τάσεων Coulomb και την αυξανόμενη σεισμικότητα πριν την εκδήλωση μεγάλων σεισμών. Ανέπτυξαν το μοντέλο τους χρησιμοποιώντας τη σεισμικότητα στην Καλιφόρνια, ωστόσο όπως επισήμαναν οι ίδιοι η τεχνική αυτή μπορεί να εφαρμοστεί σε οποιαδήποτε ενεργή τεκτονικά περιοχή. Πολλές μελέτες έχουν δείξει ότι το ιστορικό της σεισμικότητας μιας περιοχής επηρεάζει σημαντικά το επίκεντρο των επερχόμενων ισχυρών σεισμών. Τέτοιες μελέτες περιλαμβάνουν την καταγραφή των διακυμάνσεων Coulomb και των τάσεων που προηγούνται των μεγάλων σεισμών. Σύμφωνα με αυτές, η συσσώρευση τάσης δεν περιορίζεται μόνο στο ρήγμα αλλά και σε μια ευρύτερη περιοχή γύρω από αυτό πριν από την εκδήλωση ενός μεγάλου σεισμού.

3.2 Το μοντέλο του «αρνητικού» σεισμού και οι μεταβολές στις τάσεις Coulomb

Ενώ η ανθρωπογενής επίδραση στα αίτια έκλυσης των σεισμών έχει αναγνωριστεί πριν από δεκαετίες (π.χ. φόρτιση τάσεων λόγω τεχνητών λιμνών σε μια περιοχή), εντούτοις δεν είχε γίνει η ίδια μελέτη και για την αλληλεπίδραση μεταξύ των σεισμών, παρόλο που ήταν γνωστό ότι η γένεση ενός σεισμού έχει ως αποτέλεσμα τη μεταβολή της διατμητικής και κάθετης τάσης στα γειτονικά ρήγματα (Chinnery, 1963).

Μια αιτία για τα παραπάνω αποτελεί το γεγονός ότι οι μεταβολές της στατικής τάσης που υπολογίστηκαν, της τάξης των 0,1MPa (1bar), αρχικά θεωρήθηκαν πολύ μικρές σε σύγκριση με την πτώση τάσης που προκαλείται κατά την εκδήλωση ενός σεισμού. Επίσης, τα πρώτα αποτελέσματα ήταν κυρίως ποιοτικά και η ποσοτική εκτίμηση ήταν δύσκολη. Πρόσφατες έρευνες όμως διαφοροποίησαν την αντίληψη αυτή και ισχυροποίησαν την υπόθεση ότι τέτοιες μικρές, απότομες αλλαγές της τάσης προκαλούν μεγάλες αλλαγές στο ρυθμό γένεσης των σεισμών (Stein 1999).

Όμως κατά την τελευταία δεκαετία το σχετικό ενδιαφέρον για την παραπάνω μέθοδο αυξήθηκε σημαντικά, με συνέπεια τη δημοσίευση ενός σημαντικού αριθμού ερευνητικών εργασιών για τα αποτελέσματα σχετικά με τις μεταβολές της στατικής τάσης, οι οποίες επηρεάζουν το χρόνο και το χώρο γένεσης των επόμενων σεισμών (Harris 1998). Η μεθοδολογία αποδείχθηκε ιδιαίτερα αποτελεσματική για την εξήγηση της θέσης όπου γίνονται οι μετασεισμοί καθώς και για τον καθορισμό της έκτασης της διάρρηξης.

Ο ρυθμός σεισμικότητας αυξάνεται όπου η στατική τάση αυξάνεται και μειώνεται εκεί που η στατική τάση μειώνεται. Τόσο η αύξηση όσο και η μείωση του ρυθμού σεισμικότητας ακολουθούνται από μια χρονικώς ακολουθούμενη ανάκαμψη. Η αλληλεπίδραση επομένως στη γένεση των σεισμών είναι ένα θεμελιώδες γνώρισμα τη σεισμικότητας που οδηγεί σε σεισμικές ακολουθίες, γένεση σεισμών κατά ομάδες και μετασεισμούς. Ένα κριτήριο της αλληλεπίδρασης το οποίο παρέχει πληρέστερη αντίληψη για τη γένεση των σεισμών είναι η μεταβολή της τάσης Coulomb.

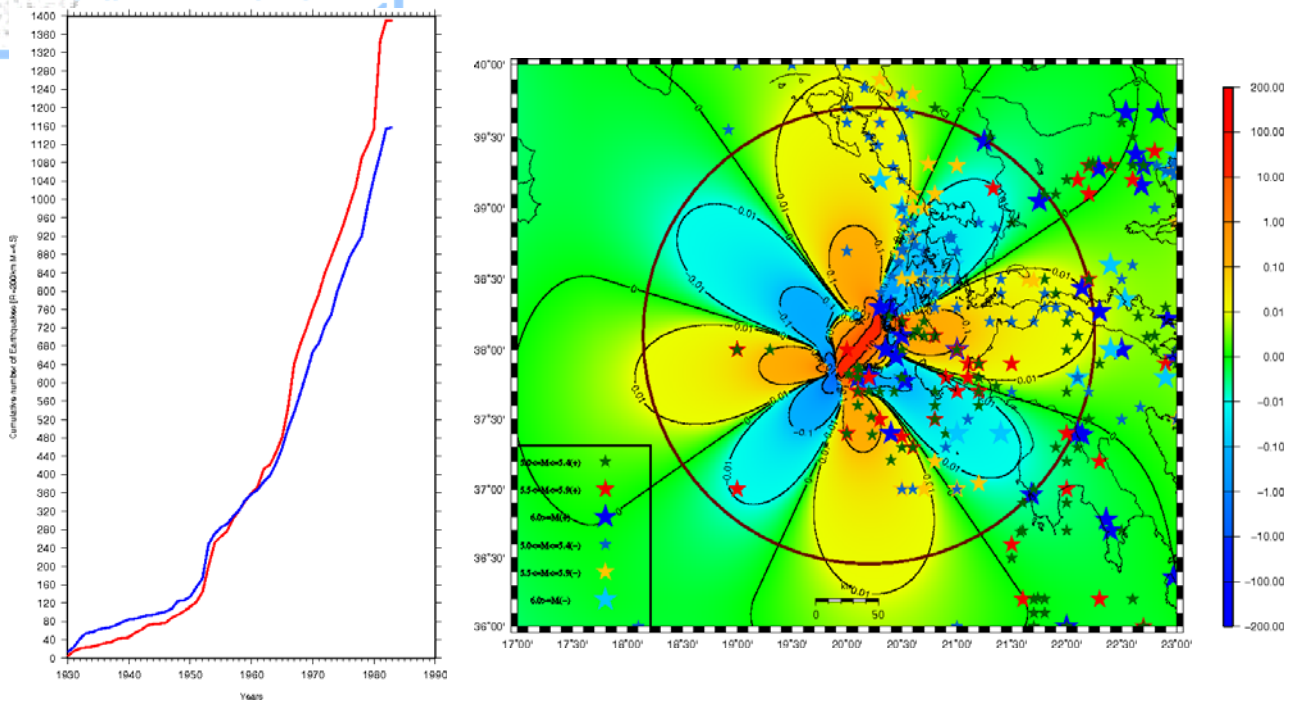
Η μέθοδος που προτάθηκε από τους Deng και Sykes (1997a) και εφαρμόστηκε για πρώτη φορά από αυτούς στη Νότια Καλιφόρνια χρησιμοποιήθηκε και στην παρούσα μελέτη. Οι συγκεκριμένοι επιστήμονες θεώρησαν την τάση ως τανυστή, ο οποίος μεταβάλλεται χρονικά και χωρικά, ενώ μεταδίδεται ελαστικά, με τη Γη να θεωρείται ως ομογενής ελαστικός ημιχώρος. Σύμφωνα με τη μέθοδό τους μεγάλες αλλαγές στην τάση θεωρείται ότι προκύπτουν από τις ακόλουθες αιτίες. Τεκτονική φόρτιση που προκύπτει από την κίνηση των λιθοσφαιρικών πλακών και ταυτόχρονες με την εκδήλωση μεγάλων σεισμών μετατοπίσεις ρηγμάτων. Για τον υπολογισμό της τάσης που συσσωρεύεται μεταξύ της εκδήλωσης μεγάλων σεισμών χρησιμοποιείται ένα θεωρητικό μοντέλο το οποίο θεωρεί εικονικές αρνητικές μετατοπίσεις κατά μήκος μεγάλων ρηγμάτων στη μελετώμενη περιοχή. Οι μετατοπίσεις αυτές βασίζονται σε μακροχρόνιες καταγραφές των ρυθμών σεισμικότητας της μελετώμενης περιοχής. Αυτή η εικονική μετατόπιση έχει το ίδιο μέγεθος και μετατόπιση με το ρήγμα που μελετάται, αλλά με την αντίθετη φορά ολίσθησης.

Σε πολλά ρήγματα όμως, για τα οποία έχει υπολογιστεί θετική μεταβολή της τάσης Coulomb δεν έχουν γίνει αναμενόμενοι σεισμοί, ώστε να εξαχθεί ασφαλές συμπέρασμα για τη χρήση της μεθόδου ως ένα αποτελεσματικό εργαλείο για την πρόγνωση των σεισμών. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ενώ τα αποτελέσματα για μικρούς σεισμούς και η μεταβολή του ρυθμού σεισμικότητας μπορούν να ελεγχθούν με τα υπάρχοντα δεδομένα, τα αποτελέσματα που αφορούν τους ισχυρούς σεισμούς είναι δυσκολότερο να επιβεβαιωθούν επειδή γίνονται πολύ λιγότεροι τέτοιοι σεισμοί.

Παρόλα αυτά πρακτικά από τις μελέτες αυτές έχει αποδειχθεί ότι οι σεισμοί γίνονται όταν η τάση υπερβαίνει την αντοχή του ρήγματος. Η προσέγγιση στη γένεση ενός σεισμού δίνεται ποσοτικά με τη χρήση της μεταβολής της συνάρτησης Coulomb (ΔCFF), η οποία εξαρτάται από αλλαγές τόσο της διατμητικής τάσης $\Delta\tau$, όσο και από αλλαγές της κάθετης τάσης, $\Delta\sigma$ και δίνεται σύμφωνα με την τροποποιημένη σχέση του Scholz (1990) από τη σχέση : $\Delta CFF = \Delta\tau + \mu\Delta\sigma$, όπου μ είναι ο φαινόμενος συντελεστής τριβής.

Η τιμή της μεταβολής της τάσης Coulomb χρησιμοποιείται για να εκτιμήσουμε εάν η γένεση ενός σεισμού επιταχύνει ή επιβραδύνει τη γένεση ενός άλλου σεισμού. Εάν $\Delta CFF > 0$, ο πρώτος σεισμός επιταχύνει τη γένεση του επόμενου, ενώ αν $\Delta CFF < 0$, ο πρώτος σεισμός επιβραδύνει τη γένεση του

δεύτερου. Για να αποκτήσουμε μια αντίληψη της χωρικής κατανομής των θετικών και αρνητικών τιμών των τάσεων Coulomb, υπολογίζονται οι τιμές της τάσης Coulomb στους κόμβους ενός κανάβου, ο οποίος θεωρείται ότι επικαλύπτει μια ευρύτερη γεωγραφική περιοχή γύρω από την εστία ενός ισχυρού σεισμού και στη συνέχεια χαρτογραφούνται οι τιμές αυτές στις γεωγραφικές συντεταγμένες του αντίστοιχου κόμβου. Με τον τρόπο αυτό καθορίζονται οι περιοχές αύξησης της τάσης (πράσινες ως κόκκινες περιοχές) και περιοχές μείωσης της τάσης (πράσινες ως μπλε περιοχές). Η ύπαρξη σκιερής περιοχής διαρκεί κατά το χρονικό διάστημα το οποίο απαιτείται ώστε η τεκτονική φόρτιση να αυξάνει τις τιμές της τάσης στο επίπεδο που βρισκόταν πριν από τη γένεση του πρώτου σεισμού.



Σχήμα 28: Χρονική μεταβολή του ρυθμού γένεσης των σεισμών σε σχέση με το χρόνο για θετικές (κόκκινες) και αρνητικές (μπλε) τιμές Coulomb (γράφημα) και χωρική κατανομή των σεισμών σε κυκλική απόσταση 200km από το επίκεντρο του σεισμού του 1983, ταυτόχρονα χαρτογραφημένες με τις μεταβολές των τάσεων Coulomb για τα έτη από το 1900 μέχρι το 1982

Με βάση τα παραπάνω εισαγωγικά στοιχεία και παρατηρώντας προσεκτικά το γράφημα αλλά και το χάρτη του σχήματος 28, βλέπουμε ότι το μοντέλο του «αρνητικού» σεισμού έχει επιτυχή εφαρμογή και στην περίπτωση του σεισμού της Κεφαλονιάς του 1983.

Όπως φαίνεται από το γράφημα, η χρονική μεταβολή του ρυθμού γένεσης των σεισμών είναι περίπου ίδια και στις θετικές και στις αρνητικές περιοχές των τάσεων Coulomb μέχρι το έτος του 1940. Από εκεί και έπειτα αρχίζει να αυξάνει η διαφορά ανάμεσα τους, με τους σεισμούς στις θετικές περιοχές να αυξάνουν διαρκώς και να παίρνουν τη μέγιστη τιμή τους το 1983, χρονιά του κύριου σεισμού που μελετούμε.

Επιπλέον στο διπλανό χάρτη που αποτυπώνεται η χωρική κατανομή των σεισμών σε μέγιστη κυκλική απόσταση 200km από το επίκεντρο καταγράφονται σεισμοί με αρνητικές όσο και θετικές τιμές Coulomb. Όμως οι περισσότεροι σεισμοί εκδηλώνονται στις θετικές περιοχές των τάσεων με την περιοχή του επικέντρου του κύριου σεισμού του 1983 να έχει την μέγιστη τιμή.



Κεφάλαιο4^ο

Συμπεράσματα

4.1 Συμπεράσματα

Συνοψίζοντας από τη μελέτη των παραπάνω γραφημάτων και χαρτών μπορούν να εξαχθούν τα ακόλουθα συμπεράσματα.

α) Για όλα τα γραφήματα της χρονικής μεταβολής του ρυθμού γένεσης των σεισμών και για κάθε σεισμό, για όλες τις μελετώμενες αποστάσεις, παρατηρούνται τρεις κύριες αυξήσεις του ρυθμού αυτού μεταξύ των ετών 1911-1915, 1953, 1983. Ενδιάμεσες αυξήσεις παρατηρούνται στους μικρότερους σεισμούς με μέγεθος $4.0 \leq M \leq 4.5$, αλλά δεν είναι τόσο χαρακτηριστικές. Στις χρονικές περιόδους που αναφέρονται οι μεταβολές του ρυθμού γένεσης των σεισμών εκδηλώνονται σεισμοί μεγάλων μεγεθών. Σε ότι αφορά σεισμούς με $M \geq 5.5$, παρουσιάζονται διάσπαρτες μικρές σεισμικές ησυχίες μεταξύ των χρονικών περιόδων μεγάλης αύξησης που αναφέρθηκαν παραπάνω, οι οποίες ποικίλλουν ανάλογα με την κυκλική απόσταση από το επίκεντρο του κύριου σεισμού του 1983.

Εκτός από σεισμούς με μεγέθη $5.0 \leq M \leq 5.4$ και $5.5 \leq M \leq 5.9$, χαρτογραφήθηκαν παράλληλα και σεισμοί των 5.0 5.3 5.5 5.7 5.9 για να αποφευχθούν τυχόν λάθη από παραλείψεις σεισμικών γεγονότων από λάθη στο σεισμικό κατάλογο. Όμως, ακόμα και στις περιπτώσεις αυτές δεν παρατηρούνται σημαντικές διαφοροποιήσεις ή διακυμάνσεις στη μεταβολή του ρυθμού γένεσης των σεισμών. Διακρίνονται 3 κύριες μεταβολές στα ίδια χρονικά περιθώρια με τα προηγούμενα.

β) Σχετικά με τους χάρτες χωρικής κατανομής, παρατηρούνται διαδοχικές εναλλαγές σεισμικών κενών 1^{ου} και 2^{ου} είδους. Οι αλλαγές δεν παρουσιάζονται με κάποιο αυστηρό κανόνα σε όλες τις περιοχές διαφορετικών διαστάσεων που έχουν επιλεγεί. Πιο χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν οι χάρτες χωρικής κατανομής των σεισμών για το δακτύλιο ακτίνας από 0 έως 30km για τα έτη μεταξύ 1954 έως 1960 και 1984 έως 2004. Ακολουθούν οι χάρτες χωρικής κατανομής των σεισμών για το δακτύλιο ακτίνας 60 έως 90km για τα έτη 1954 έως 1960, οι χάρτες για το δακτύλιο ακτίνας 0 έως 40km για τα έτη 1954 έως 1960, οι χάρτες χωρικής κατανομής για το δακτύλιο ακτίνας 40 έως 80km για το έτος 1983, οι χάρτες για το δακτύλιο ακτίνας 80 έως 120km για το έτος 1983, οι χάρτες για το δακτύλιο ακτίνας 50 έως 100km για το έτος 1983 και οι χάρτες χωρικής κατανομής των σεισμών για το δακτύλιο ακτίνας 100 έως 150km για τα

έτη από το 1953 μέχρι το 1983.

γ) Από τα παραπάνω λοιπόν, μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι γύρω από το 1983 - χρόνος εκδήλωσης του σεισμού - και πριν από αυτό κατά τη διάρκεια των ετών 1954-1960 παρατηρείται το μεγαλύτερο ποσοστό σεισμικών κενών είτε 1^{ου} είτε 2^{ου} είδους. Υπάρχουν περιπτώσεις όμως όπου δεν καταγράφεται κανένας σεισμός, όπως στο χάρτη χωρικής κατανομής των σεισμών για το δακτύλιο ακτίνας των 100 έως 150km του 1983 στο σχήμα 26.

Μπορεί να ειπωθεί με βεβαιότητα από τη συσχέτιση των προηγούμενων υπάρχει σεισμική ησυχία για τα έτη 1954 έως 1960 κυρίως πριν από την εκδήλωση του σεισμού το 1983. Αποτελεί η χρονική περίοδος αυτή προπαρασκευαστικό στάδιο για το κύριο γεγονός (σεισμό) του 1983. Εξάλλου και τα δεδομένα της μεταβολής των τάσεων Coulomb στο σχήμα 28 συμφωνούν με την εκδοχή αυτή, όπου η πλειονότητα των επικέντρων για τα έτη 1900-1982 βρίσκεται σε θετικές περιοχές (μοντέλο «αρνητικού» σεισμού).

δ) Το ίδιο φαίνεται και από το γράφημα του ρυθμού σεισμικότητας των μεγεθών που ανήκουν στις θετικές και αρνητικές περιοχές των τάσεων Coulomb σε σχέση με το χρόνο, όπου παρατηρείται μια απόκλιση του αριθμού των σεισμών που βρίσκονται στις θετικές από τις αρνητικές περιοχές τάσεων από το 1956 και μετά, σχήμα 28. Η εικόνα αυτή αντιπροσωπεύεται καλύτερα στο χάρτη του σχήματος 28 και σε απόσταση 200km, 4 φορές δηλαδή μεγαλύτερη από το μήκος του ρήγματος που για τον σεισμό αυτόν υπολογίζεται στα 50km.

ε) Ανακεφαλαιώνοντας και λαβαίνοντας υπόψη όλα τα παραπάνω, πρέπει να σημειωθεί ότι η σεισμική ησυχία όντως αποτελεί πρόδρομο φαινόμενο εκδήλωσης μεγάλων σεισμών. Ενώ τα μοντέλα που υπάρχουν βοηθούν σημαντικά στη μελέτη των σεισμικών ησυχιών, χρήζουν βελτίωσης, ώστε να παρέχουν καλύτερα και αρτιότερα αποτελέσματα. Προς την κατεύθυνση αυτή πρέπει να στραφεί η επιστημονική κοινότητα, ώστε να βελτιστοποιηθεί ακόμα περισσότερο αυτό το εργαλείο πρόγνωσης σεισμών. Οι κατευθύνσεις που πρέπει να εστιαστούν οι προσπάθειες αφορούν την ανάλυση των ήδη υπαρχόντων δεδομένων, τυποποίηση της ανάλυσης και μεγαλύτερη εμβάθυνση των τεκτονικών διαδικασιών και των ιδιοτήτων των ρηγμάτων στις μελετώμενες περιοχές. Μερικοί ενδεικτικοί τομείς – κατευθύνσεις στους οποίους πρέπει να δοθεί περαιτέρω προσοχή στο πλαίσιο της εκτεταμένης έρευνας είναι:

- Στην ανάλυση της ανίχνευσης και εξέταση του ιστορικού των αναφορών των σεισμικών δικτύων για να αναγνωριστούν και να διορθωθούν οι ανθρωπογενείς αλλαγές.
- Εξέταση των ρυθμών σεισμικότητας πριν από όλους τους κύριους σεισμούς στους καταλόγους, ώστε να καθοριστεί αν προηγήθηκαν των σεισμικών ησυχιών και να αναπτυχθεί μια σειρά προσδιορισμού των ανωμαλιών.
- Συστηματική μελέτη των γύρω από την ανίχνευση των ψευδών ρυθμών συναγερμών.
- Ανάπτυξη ή βελτιστοποίηση κατάλληλου λογισμικού για τέτοιου είδους έρευνες.
- Η πρόγνωση πρέπει να αποδεικνύει ότι το παρατηρούμενο πρόδρομο δεν είναι ανθρωπογενές.
- Η κατανομή της αλλαγής υπολογισμού των μεγεθών πρέπει να καθοριστεί επαρκώς.
- Σημαντικά στοιχεία υποστήριξης στην διαδικασία της έρευνας από την τεκτονική γεωλογία.

Βιβλιογραφία

- BOWMAN, D. D., OUIILLON, G., SAMMIS, C. G., SORNETTE, A. and SORNETTE, D., (1998), *An Observational Test of the Critical Earthquake Concept*. *J. Geophys. Res.*, 103, 24,359–24,372,.
- CHINNERY, M. A. (1963), *The Stress Changes that Accompany Strike Slip Faulting*. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 53, 921-932,
- CONSOLE, R.; MONTUORI, C.; MURRU, M. (2000), *Statistical Assessment of Seismicity Patterns in Italy: Are they Precursors of Subsequent Events?* *J. Seism 4*, 435-449
- DENG J., and L. R. SYKES (1997a), *Evolution of the Stress Field in Southern California and Triggering of Moderate-Size Earthquakes: a 200-year perspective*, *J. Geophys. Res.* 102, 9859–9886.
- DI GIOVAMBATTISTA, R.; TYUPKIN, YU S. (2000), *Spatial and Temporal Distribution of Seismicity Before the Umbria–Marche September 26,1997 Earthquake*. *J. Seism 4*, no.4 589-598
- ENESCU BOGDAN, KIYOSHI ITO. (2001), *Some Premonitory Phenomena of the 1995 Hyogo-Ken Nanbu (Kobe) Earthquake: Seismicity, b-value and Fractal Dimension*. *Tectonoph.*, 338, 297-314
- HABERMANN R. E. (1988), *Precursory Seismic Quiescence: Past Present, and Future*. *Pure and Appl. Geophys.*, 279-319
- HARRIS, R. A. (1998), *Introduction to Special Session: Stress Triggers, Stress Shadows, and Implications for Seismic Hazard*, *J. Geophys. Res.* 103, 24,347–24,358.
- HUANG,Q., ÖNCEL, A. SOBOLEV, G.A. (2002), *Precursory Seismicity Changes Associated with the $M_w = 7.1$ 1999 August 17 Izmit (Turkey) Earthquake*. *Geophys. J. Int.* 151 235-242
- HUANG (2002), *Seismic Quiescence Before the 2000 $M=7.3$ Tottori Earthquake*. *Geophys. Res. Let.* 1578
- ISHIBASHI. (1988), *Two Categories of Earthquake Precursors Physical and Tectonic, and their Roles in Intermediate-term Earthquake Prediction*.

Pure and Appl. Geophys., 126, 687-701

- A. JAUME, S. C., and L. R. SYKES (1999), *Evolving Towards a Critical Point: A Review of Accelerating Moment/Energy Release Prior to Large and Great Earthquakes*, *Pure Appl. Geophys.*, 155, 279-306
- JOSWIG M. (2001) *Mapping Seismic Quiescence in California Bull. Seism. Soc. Am.*, 91, 64–81
- KAGAN, Y. and KNOPOFF, L. (1987), *Statistical Short Term Earthquake Prediction. Science* 236, 1563-1567.
- KATO, HIRASAWA (1999), *The Variation of Stresses due to Aseismic Sliding and its Affect on Seismic Activity. Pure and Appl. Geophys.*, 425-442
- KATO, OTHAKE, HIRASAWA. (1997), *Possible Mechanism of Precursory Seismic Quiescence: Regional Stress Relaxation Due to Preseismic Sliding. Pure and Appl. Geophys.*, 249-267
- KATO, TULLIS. (2003), *Numerical Simulation of Seismic Cycles with a Composite Rate–and State Dependent Friction Law*
- KARAKOSTAS V.(2005), *Seismicity Patterns Before the Occurrence of the 13 May 1955, M6.6 Kozani-Grevena earthquake. Bull. Geol. Soc. Gr.* 245-253
- LOUVARI, E., A. A. KIRATZI, and B. C. PAPAACHOS (1999), *The Cephalonia Transform Fault and its Extension to Western Lefkada Island (Greece), Tectonophysics* 308, 223–236.
- MATHEWS and REASENBERG. (1988), *Statistical Methods for Investigating Quiescence and Other Temporal Seismicity Patterns. Pure and Appl. Geophys.* 357-373
- MOGI, K (1969), *Some Features of Recent Seismic Activity in and Near Japan (2). Activity Before and After Great Earthquakes. Bull. Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo* 47, 395-417.
- 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. Seism. Soc. Am.*, 92, 3293–3308
- PAPADIMITRIOU E. E., and PAPAACHOS, B. C. (1985), *Evidence for*

- PAPADIMITRIOU E., SOURLAS G., KARAKOSTAS V., (2005), *Seismicity Variations in the Southern Aegean, Greece, Before and After the Large (M7.7) 1956 Amorgos Earthquake Due to Evolving Stress. Pure and Appl. Geophys.*
- PAPADOPOULOS, G.A. and VOIDOMATIS, P., (1987), *Evidence for periodic seismicity in the inner Aegean seismic zone, Pure Appl. Geophys., 125, 613–628.*
- PAPAACHOS, B. and PAPAACHOS, C., (2000), *Accelerated Preshock Deformation of Broad Regions in the Aegean Area. Pure Appl. Geophys., 157, 1663–1681*
- PAPAACHOS, B. C. and PAPAACHOU, C. (2002), *The Earthquakes of Greece. Ziti Publ., Thessaloniki, Greece.*
- PAPAACHOS, B. C., MOUNTRAKIS, D. M., PAPAACHOS, C. B., TRANOS, M. D., KARAKAISIS, G. F., and SAVVAIDIS, A. S. (2001), *The Faults that Caused the Known Strong Earthquakes in Greece and Surrounding Areas during 5th century B. C. up to Present, 2nd Conf. Earthq. Eng. and Eng. Seismol., Thessaloniki, 17–26.*
- PEREZ, O. J and SCHOLZ, C. H. (1984), *Heterogeneities of the Instrumental Seismicity Catalog (1904-1980) for Strong Shallow Earthquakes. Bull. Seism. Soc. Amer. 65, 809-827*
- RANI, S. and SINGH, S J (1992), *Static Deformation of a Uniform Half-space to a Long Dip-slip Fault, Geoph. J. Int. 109, 469 – 476.*
- RICE, J. R. (1993), *Spatio –temporal Complexity of Slip on a Fault, J. Geophys., 9885-9907.*
- RUINA, A. L. (1983), *Slip Instability and State Variable Friction Laws, J. Geophys. 10359-10370.*
- SALTYSKOV, CHEBROV, KUGAENKO. (1999), *Variations of Seismicity in the Avachinsky Gulf (Kamchaka, Russia). Natural Hazards 19 87-96*
- SAVAGE, J. C., (1983) *A Dislocation Model of Strain Accumulation and Release at Subduction Zone, J. Geophys., 4948-4996.*

- SCHOLZ, C. (1990), *The Mechanics of Earthquakes and Faulting*. Cambridge
- SCHOLZ. (1988), *Mechanisms of Seismic Quiescence*. *Pure and Appl. Geophys.* 126, 701-716
- SCORDILIS, E. M., KARAKAISIS, G.F., KARAKOSTAS, B.G., PANAGIOTOPOULOS, D.G., COMNINAKIS, P.E and 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.
- STEIN, R., A. BARKA, and J. DIETERICH (1997), *Progressive Failure on the North Anatolian Fault since 1939 by Earthquake Stress Triggering*, *Geophys. J. Int.* 128, 593–604
- STUART. (1988), *Forecast Model for Great Earthquakes at the Nankai Trough Subduction Zone*. *Pure Appl. Geophys.* 126, 619-643
- VON SEGGERN, D., S. S. ALEXANDER, and C. BAAG (1981), *Seismicity Parameters Preceding Moderate to Major Earthquake*, *J. Geophys.* 86, 9325–9351.
- WYSS M. and HABERMANN R. E. (1988), *Precursory Seismic Quiescence*. *Pure and Appl. Geophys.*, 319-333.
- WYSS, M., and R. O. BURFORD (1987), *A Predicted Earthquake on the San Andreas Fault, California*, *Nature* 329, 323–325.