

ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ



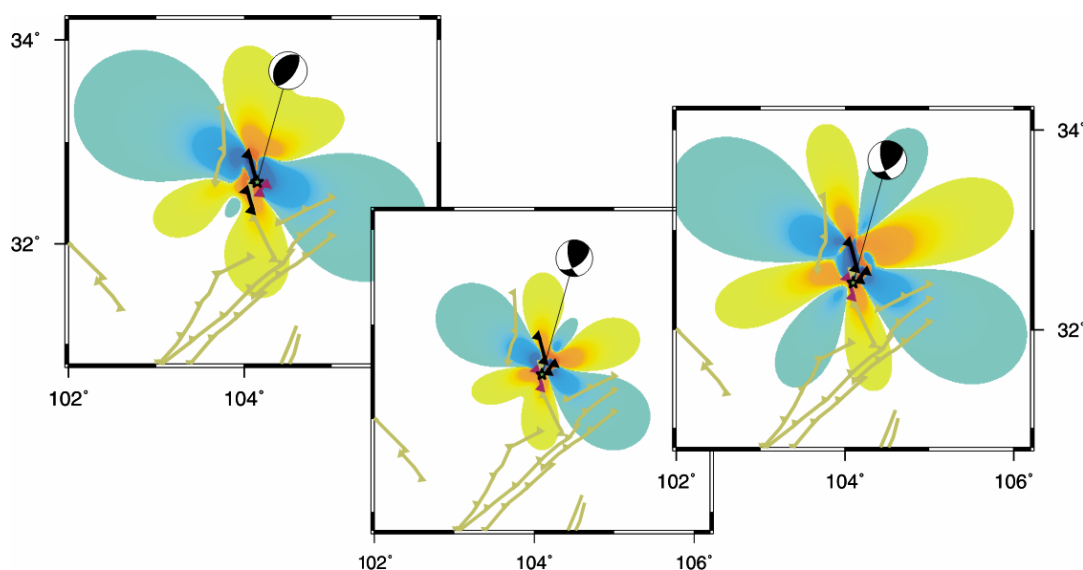
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ

ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ

ΧΑΡΙΚΛΕΙΑ Γ. ΓΚΑΡΛΑΟΥΝΗ
Γεωλόγος

Η Εξέλιξη του Πεδίου των Τάσεων στην Περιοχή Sichuan – Yunnan της Κίνας



ΔΙΑΤΡΙΒΗ ΕΙΔΙΚΕΥΣΗΣ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

ΤΜΗΜΑΤΟΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ

ΕΙΔΙΚΕΥΣΗ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ

Θεσσαλονίκη 2007

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΣΥΜΒΟΥΛΕΥΤΙΚΗ ΚΑΙ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

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

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

Κίλιας Αδαμάντιος, Καθηγητής Α.Π.Θ.
(Μέλος)

Δημοσίευση του Τομέα Γεωφυσικής Α.Π.Θ. με κωδικό αριθμό **697**

Περιεχόμενα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	7
ΣΕΙΣΜΟΤΕΚΤΟΝΙΚΟ ΚΑΘΕΣΤΩΣ ΤΩΝ ΕΠΑΡΧΙΩΝ SICHUAN ΚΑΙ YUNNAN ΤΗΣ ΝΟΤΙΟΑΝΑΤΟΛΙΚΗΣ ΚΙΝΑΣ	7
1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	7
1.2 ΣΕΙΣΜΟΤΕΚΤΟΝΙΚΟ ΚΑΘΕΣΤΩΣ ΤΗΣ ΚΙΝΑΣ	7
1.3 ΣΕΙΣΜΟΤΕΚΤΟΝΙΚΟ ΚΑΘΕΣΤΩΣ ΤΗΣ ΝΟΤΙΟΑΝΑΤΟΛΙΚΗΣ ΚΙΝΑΣ.....	11
1.4 ΕΝΕΡΓΕΣ ΔΟΜΕΣ ΤΩΝ ΕΠΑΡΧΙΩΝ SICHUAN ΚΑΙ YUNNAN	13
1.4.1 Η Ζώνη Διάρρηξης Xianshuihe.....	14
1.4.2 Οι Ζώνες Διάρρηξης Anninghe–Zemuhe.....	16
1.4.3 Η Ζώνη Διάρρηξης Xiaojiang	17
1.4.4 Η Ζώνη Διάρρηξης Longmenshan	19
1.4.5 Η Ζώνη Διάρρηξης Minjiang.....	21
1.4.6 Η Ζώνη Διάρρηξης Red River	23
1.4.7 Η Ζώνη Διάρρηξης Ganzi	25
1.4.8 Η Ζώνη Διάρρηξης Litang	25
1.4.9 Η Ζώνη Διάρρηξης Batang.....	26
1.4.10 Η Ζώνη Διάρρηξης Zhongdian.....	27
1.4.11 Η Ζώνη Διάρρηξης Chenzhi	27
1.4.12 Η Ζώνη Διάρρηξης Jianchuan	28
1.4.13 Οι Ζώνες Διάρρηξης Βόρεια του Ρήγματος Red River	28
1.4.14 Οι Ζώνες Διάρρηξης Νότια του Ρήγματος Red River.....	30
1.5 ΣΕΙΣΜΙΚΟΤΗΤΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ	32
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	39
ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΤΩΝ ΤΑΣΕΩΝ COULOMB	39
2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	39
2.2 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ	40
2.2 ΤΟ ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΘΡΑΥΣΗΣ COULOMB.....	43
2.3 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ	49
2.4 ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗΣ	52
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	57
ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΡΥΘΜΩΝ ΟΛΙΣΘΗΣΗΣ ΣΤΑ ΠΙΟ ΣΗΜΑΝΤΙΚΑ ΡΗΓΜΑΤΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ	57
3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	57
3.2 ΓΕΩΛΑΙΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ.....	58
3.3 ΡΥΘΜΟΙ ΟΛΙΣΘΗΣΗΣ ΤΩΝ ΚΥΡΙΩΝ ΡΗΓΜΑΤΩΝ	60
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	71
ΜΕΤΑΒΟΛΕΣ ΤΗΣ ΤΑΣΗΣ COULOMB ΛΟΓΩ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΟΛΙΣΘΗΣΗΣ	71
4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	71

4.2	ΒΟΡΕΙΑ ΥΠΟΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ.....	72
4.2.1	Daofu, 30 Αυγούστου, 1904 $M_{BJI}=6.8$	73
4.2.2	Luhuo, 24 Μαρτίου, 1923, $M_{BJI}=7.0$	75
4.2.3	Diexi, 25 Αυγούστου, 1933, $M_{BJI}=7.5$	76
4.2.4	Litang, 25 Μαΐου, 1948, $M_{BJI}=7.3$	78
4.2.5	Kangding, 14 Απριλίου, 1955, $M_{BJI}=7.5$	79
4.2.6	Zhangla, 9 Νοεμβρίου, 1960, $M_{BJI}=6.5$	80
4.2.7	Zhuwo, 30 Αυγούστου, 1967, $M_{BJI}=6.8$	81
4.2.8	Luhuo, 6 Φεβρουαρίου, 1973, $M_{BJI}=7.6$	82
4.2.9	Huanlong, 11 Αυγούστου, 1973, $M_{BJI}=6.5$	84
4.2.10	Σεισμική Ακολουθία Songpan, 1976.....	85
4.2.10.α	1 ^{ος} Σεισμός της ακολουθίας Songpan, 16 Αυγούστου, 1976, $M_{BJI}=7.2$	85
4.2.10.β	2 ^{ος} Σεισμός της ακολουθίας Songpan, 21 Αυγούστου, 1976 $M_{BJI}=6.7$	87
4.2.10.γ	3 ^{ος} Σεισμός της ακολουθίας Songpan, 23 Αυγούστου, 1976, $M_{BJI}=7.2$	87
4.2.11	Daofu, 23 Ιανουαρίου, 1981, $M_{BJI}=6.9$	89
4.2.12	Σεισμική Ακολουθία Batang, 1989.....	90
4.2.12.α	1 ^{ος} Σεισμός της ακολουθίας Batang, 16 Απριλίου, 1989, $M_{BJI}=6.0$	90
4.2.12.β	2 ^{ος} Σεισμός της ακολουθίας Batang, 25 Απριλίου, 1989 $M_{BJI}=6.7$	91
4.3	ΚΕΝΤΡΙΚΗ ΥΠΟΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ.....	93
4.3.1	Dali, 16 Μαρτίου, 1925, $M_{BJI}=6.8$	94
4.3.2	Anninghe, 30 Σεπτεμβρίου, 1952, $M_{BJI}=6.8$	94
4.3.3	Luzhijiang, 23 Σεπτεμβρίου, 1955, $M_{BJI}=6.8$	95
4.3.4	Dongchuan, 5 Φεβρουαρίου, 1966, $M_{BJI}=6.5$	96
4.3.5	Yongshan, 11 Μαΐου, 1974, $M_{BJI}=7.0$	97
4.3.6	Qinhe, 7 Νοέμβριου, 1976, $M_{BJI}=6.7$	98
4.3.7	Yimen, 24 Οκτωβρίου, 1995, $M_{BJI}=6.2$	99
4.3.8	Lijiang, 3 Φεβρουαρίου, 1996, $M_{BJI}=7.0$	100
4.4	ΝΟΤΙΑ ΥΠΟΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ.....	102
4.4.1	Qujiong, 12 Δεκεμβρίου, 1913, $M_{BJI}=7.2$	102
4.4.2	Lancang-Gengma, 26 Δεκεμβρίου, 1941, $M_{BJI}=7.0$	103
4.4.3	Lancang-Gengma, 3 Φεβρουαρίου, 1950, $M_{BJI}=7.0$	104
4.4.4	Tonghai, 5 Ιανουαρίου, 1970, $M_{BJI}=7.8$	105
4.4.5	South Yunnan, 28 Απριλίου, 1971, $M_{BJI}=6.7$	106
4.4.6	1976, Σεισμική Ακολουθία Lung-Ling.....	107
4.4.6.α	1 ^{ος} Σεισμός της ακολουθίας Lung-Ling, 1976, 29 Μαΐου, $M_{BJI}=7.4$	108
4.4.6.β	2 ^{ος} Σεισμός της ακολουθίας Lung-Ling, 29 Μαΐου, 1976, $M_{BJI}=7.4$	109
4.4.7	South Yunnan, 15 Μαρτίου, 1979, $M_{BJI}=6.8$	110
4.4.8	Dien Bien Phu, 24 Ιουνίου, 1983, $M_{BJI}=6.3$	111
4.4.9	Σεισμική ακολουθία Lancang-Gengma 1988.....	112
4.4.9.α	1 ^{ος} Σεισμός της ακολουθίας Lancang-Gengma, 6 Νοεμβρίου, 1988, $M_{BJI}=7.0$	113
4.4.9.β	2 ^{ος} Σεισμός της ακολουθίας Lancang-Gengma, 6 Νοεμβρίου, 1988, $M_{BJI}=7.4$	114
4.4.10	Burma, 7 Ιουλίου, 1995, $M_{BJI}=6.8$	115
	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο	123
	ΕΞΕΛΙΚΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΤΑΣΕΩΝ.....	123
5.1	ΓΕΝΙΚΑ	123
5.2	ΒΟΡΕΙΑ ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ (ΒΟΡΕΙΑ ΕΠΑΡΧΙΑ SICHUAN).....	125
5.3	ΚΕΝΤΡΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ (ΝΟΤΙΑ SICHUAN-ΒΟΡΕΙΑ YUNNAN)	133
5.4	ΝΟΤΙΑ ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ (ΝΟΤΙΑ YUNNAN).....	138

5.5	ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ ΤΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΤΩΝ ΤΑΣΕΩΝ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΟΥ Μ'	143
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6		155
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....		155
6.1	ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ	155
6.2	ΕΠΕΚΤΑΣΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΤΩΝ ΤΑΣΕΩΝ ΓΙΑ ΤΟ 2007	156
6.3	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	160
6.4	RESULTS-DISCUSSION	163
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....		167

Πρόλογος

Η παρούσα διατριβή ειδίκευσης εκπονήθηκε στα πλαίσια του Μεταπτυχιακού Προγράμματος Σπουδών του Τομέα Γεωφυσικής, Τμήμα Γεωλογίας, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης και διεξήχθη στα πλαίσια ενός διακρατικού ερευνητικού προγράμματος μεταξύ του τομέα Γεωφυσικής και του Hebei και Sichuan Seismological Bureau (China).

Αντικείμενο της εργασίας αποτελεί η μεταβολή των στατικών τάσεων Coulomb, της κατανομής τους και της εξέλιξής τους, οι οποίες εξαρτώνται από την ισχυρή σεισμικότητα και τις σεισμοτεκτονικές ιδιότητες της περιοχής μελέτης δηλαδή των επαρχιών Sichuan και Yunnan στη Νοτιοανατολική Κίνα. Η μελέτη στοχεύει στην εφαρμογή ενός μοντέλου, του οποίου η αξιοπιστία έχει ήδη δοκιμαστεί από πολλούς ερευνητές, σε μία εκτεταμένη και πολύπλοκη περιοχή και στην εξαγωγή συμπερασμάτων που αφορούν την εκτίμηση της σεισμικής επικινδυνότητας και τον προσδιορισμό των ενεργών τεκτονικών δομών οι οποίες είναι πιθανόν να φιλοξενήσουν ισχυρούς σεισμούς στο μέλλον. Η επιλογή της συγκεκριμένης περιοχής οφείλεται στο γεγονός ότι συνδυάζει τόσο την υψηλή σεισμικότητα όσο και την πολύπλοκη τεκτονική.

Η διατριβή συγκροτείται από έξι κεφάλαια. Στο **πρώτο** κεφάλαιο γίνεται μία αναφορά στο σεισμοτεκτονικό καθεστώς το οποίο διέπει την νοτιοανατολική Κίνα και στις κινητήριες δυνάμεις οι οποίες την ωθούν στην παρούσα τεκτονική κατάσταση. Επίσης περιγράφονται εν συντομία οι πιο αξιόλογες ζώνες διάρρηξης οι οποίες συναντώνται στο εσωτερικό της περιοχής μελέτης και γίνεται λόγος για την υψηλή σεισμικότητα η οποία εκδηλώνεται και η οποία επί το πλείστον κατανέμεται στις προαναφερόμενες σεισμικές δομές.

Στο **δεύτερο** κεφάλαιο, επιχειρείται μια εισαγωγή στο θεωρητικό υπόβαθρο των μεταβολών των τάσεων Coulomb στις φυσικές παραμέτρους και στις μαθηματικές σχέσεις οι οποίες λαμβάνονται υπόψη. Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε και εισάγονται τα σεισμολογικά δεδομένα τα οποία χρησιμοποιήθηκαν.

Στο **τρίτο** κεφάλαιο, γίνεται λόγος για τις κινήσεις τις οποίες πραγματοποιεί η μικροπλάκα Sichuan-Yunnan τους ρυθμούς ολίσθησης των ιδιαίτερων τεμαχών στα οποία διαιρέθηκαν τα μεγαλύτερα ρήγματα και συμπεριλαμβάνονται στο εξελικτικό μοντέλο των τάσεων καθώς και οι συγκεντρωτικοί πίνακες που αφορούν τις τεκτονικές και γεωμετρικές ιδιότητες τους.

Στο **τέταρτο** κεφάλαιο, παρουσιάζονται τα επιμέρους μοντέλα διάρρηξης που κατασκευάστηκαν για τους ισχυρούς σεισμούς με μέγεθος $M_{BH} \geq 6.5$ καθώς και οι μεταβολές των

τάσεων οι οποίες προκαλούνται από τη γένεση του σεισμού και τις ιδιότητες του αντίστοιχου τεμάχους το οποίο τον προκαλεί.

Στο **πέμπτο** κεφάλαιο, αναλύεται το εξελικτικό μοντέλο των τάσεων όπως προέκυψε για κάθε μια από τις τρεις επιμέρους περιοχές μελέτης, την βόρεια την κεντρική και τη νότια περιοχή με το συγκερασμό όλων των προαναφερόμενων στοιχείων για διαφορετικές τιμές του φαινομένου συντελεστή τριβής μ' .

Εν κατακλείδι στο κεφάλαιο **έξι**, συνοψίζονται τα αποτελέσματα καθώς και τα εξαγόμενα συμπεράσματα. Γίνονται μελλοντικές εκτιμήσεις με επέκταση των υπολογισμών για το 2007.

Τέλος ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου σε όλους όσους μου συμπαραστάθηκαν και με βοήθησαν στη διεκπεραίωση της παρούσας εργασίας. Οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στην επιβλέπουσα της διατριβής κ. Παπαδημητρίου Ελευθερία, Καθηγήτρια Σεισμολογίας για την συνεχή επίβλεψη της διατριβής, την επιστημονική καθοδήγησή και την ουσιαστική συμβολή της στο τελικό αποτέλεσμα. Επιπλέον θα ήθελα να την ευχαριστήσω για την ηθική και οικονομική υποστήριξη της καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της διατριβής. Θερμές ευχαριστίες οφείλω και στα άλλα δύο μέλη της Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής στον κ. Καρακώστα Βασίλειο, Αναπληρωτή Καθηγητή Σεισμολογίας για τις χρήσιμες συμβουλές του καθώς και για την οικονομική υποστήριξη που μου παρείχε, αλλά και στον κ. Κίλια Αδαμάντιο, Αναπληρωτή Καθηγητή Τεκτονικής για το συνεχές ενδιαφέρον του και τη συμβολή του στην ολοκλήρωση της διατριβής.

Ιδιαίτερα επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω την κ. Τσουκαλά Ευαγγελία, Καθηγήτρια Παλαιοντολογίας για την ηθική της υποστήριξη και την γεωλογική εμπειρία υπαίθρου που μου έχει παρέχει τα τελευταία χρόνια .

Δε θα μπορούσα φυσικά να μην εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου και ένα πολύ μεγάλο ευχαριστώ στους γονείς μου Γιώργο και Μαρία Γκαρλαούνη χωρίς την παρότρυνση, την ηθική και οικονομική υποστήριξή των οποίων τίποτα δεν θα ήταν εφικτό. Ένα μεγάλο ευχαριστώ στην αδερφή μου Χριστίνα για την υπομονή που μου έχει δείξει.

Θα ήθελα επίσης να εκφράσω τις ευχαριστίες μου σε όλους τους φίλους μου για την κατανόηση τους καθώς και στους συναδέλφους μεταπτυχιακούς φοιτητές για την συνεργασία τους. Ένα ιδιαίτερο ευχαριστώ στον Φραγκόπουλο Διονύση για την συμπαράσταση του και τη και την υποστήριξη σε θέματα ηλεκτρονικών υπολογιστών.

Γκαρλαούνη Χαρούλα

Ιούνιος 2007

Κεφάλαιο 1

Σεισμοτεκτονικό Καθεστώς των Επαρχιών Sichuan και Yunnan της Νοτιοανατολικής Κίνας

1.1 Εισαγωγή

Ο γεωγραφικός όρος «Νοτιοανατολική Κίνα» αναφέρεται στην ευρύτερη περιοχή που καλύπτουν οι δύο πολυπληθείς επαρχίες Sichuan και Yunnan στο νότιο και ανατολικό περιθώριο της Κινεζικής επικράτειας και οι γειτονικές σε αυτή περιοχές (Σχήμα 1). Η επαρχία Sichuan βρίσκεται βόρεια της επαρχίας Yunnan και οριοθετείται ανατολικά από την αυτόνομη περιοχή του Θιβέτ και του Qinghai, ενώ νότια, η επαρχία Yunnan συνορεύει με την Ινδία, το Λάος, τη Βιρμανία και το Βιετνάμ. Στα ανατολικά της περιοχής μελέτης συναντώνται οι ανατολικότερες επαρχίες της Κίνας, Ganzu, Shaanxi, Hubei, Guizhou και η επαρχία Guangxi.

Η γεωμορφολογία της περιοχής μελέτης παρουσιάζει ιδιαίτερα χαρακτηριστικά όπως έντονο ανάγλυφο και ανώμαλη τοπογραφία με το υψόμετρο να κυμαίνεται από 2000 μέχρι 4000m. Δυτικά και βόρεια της επαρχίας Sichuan, υψώνονται τα ορεινά συστήματα των Ιμαλαΐων και των ορέων Qinling ενώ στα ανατολικά εκτείνεται η λεκάνη του Sichuan η οποία αναπτύσσεται σε υψόμετρο μόλις 500m πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας. Η επαρχία Yunnan είναι επίσης ορεινή με το μέγιστο υψόμετρό της να ξεπερνά τα 6000m. Διαρρέεται από σημαντικά ποτάμια συστήματα όπως οι ποταμοί Red River, Yangtze και Mekong η κοίτη των οποίων διευθετείται συστηματικά από τη διεύθυνση που χαράζουν οι σημαντικότερες ρηξιγενείς ζώνες. Η πολυπλοκότητα αυτή στη μορφολογία έχει διαμορφωθεί κυρίως εξαιτίας της έντονης ενεργού τεκτονικής, τα κύρια γνωρίσματα της οποίας αποτελούν το αντικείμενο του πρώτου κεφαλαίου.

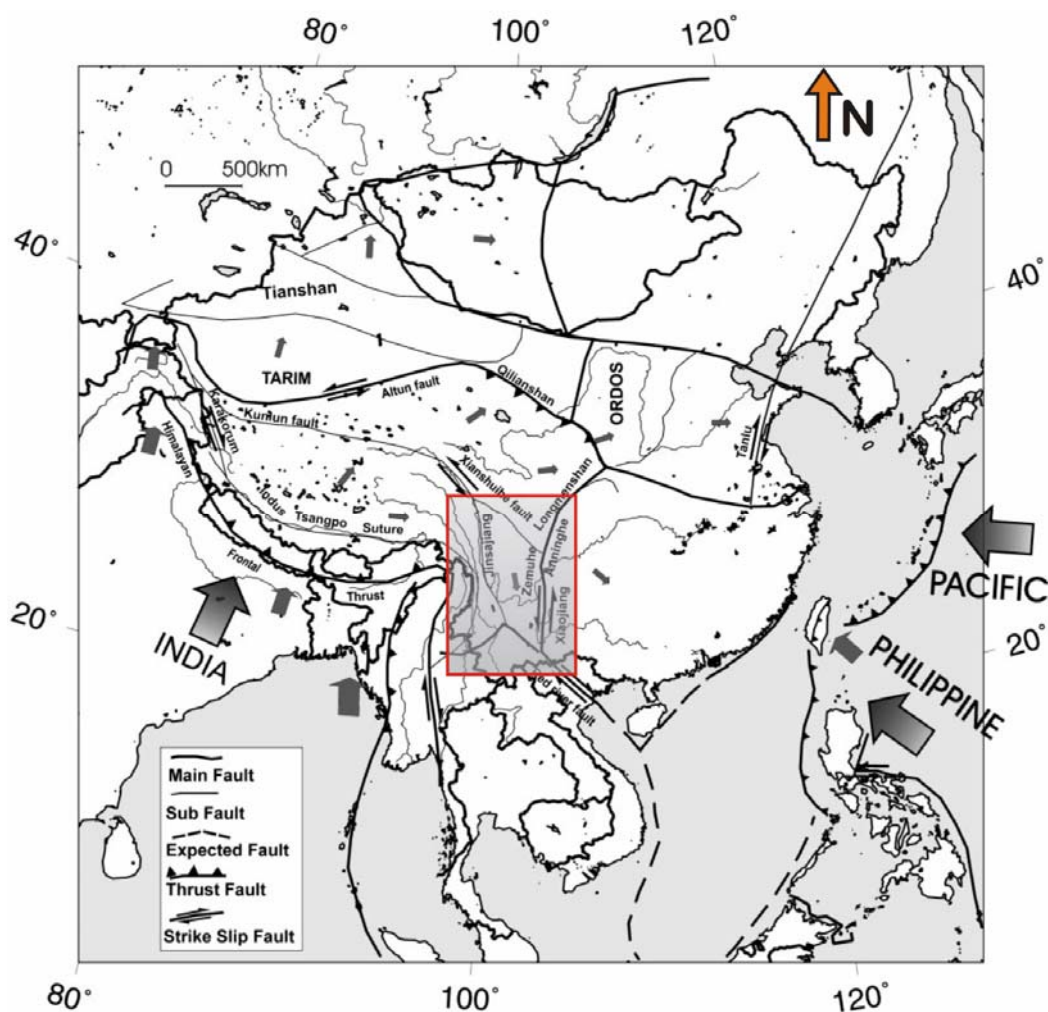
1.2 Σεισμοτεκτονικό Καθεστώς της Κίνας

Η πλειοψηφία των επιστημονικών ερευνών οι οποίες έχουν διεξαχθεί με αντικείμενο την ενεργό τεκτονική και την ενεργό παραμόρφωση η οποία επικρατεί στο εσωτερικό της Κίνας, αποδίδουν την ύπαρξή τους, στην ισχυρή προς τα βορειοανατολικά κίνηση της Ινδικής ηπειρωτικής λιθοσφαιρικής πλάκας σε σχέση με την ήπειρο της Ευρασίας η οποία θεωρείται σταθερή (Armijo & Tappanier, 1989, Molnar

& Tarponier 1975, Tarponier & Molnar, 1977). Ωστόσο, εκτός από αυτή την ηπειρωτική σε εξέλιξη σύγκρουση, στα ανατολικά περιθώρια της Ευρασιατικής ηπείρου η περιγραφή του τεκτονικού υποβάθρου πλαισιώνεται με την κατάδυση της ωκεάνιας λιθόσφαιρας του Ειρηνικού ωκεανού στα βόρειο-ανατολικά και τη συμβολή της ωκεάνιας πλάκας των Φιλιππίνων στα νότια, η επίδραση των οποίων στο εσωτερικό της Κίνας θεωρείται αμελητέα. Δεσπόζουσα γεωλογική δομή στην Κινεζική ενδοχώρα αποτελεί το υψίπεδο του Θιβέτ το οποίο συγκροτεί μια ξεχωριστή μικροπλάκα με την ονομασία «Υψίπεδο Qinghai-Tibet» η οποία και διαμορφώνει το τεκτονικό καθεστώς στη Νοτιοανατολική Κίνα. Η γειτνίαση της περιοχής μελέτης προς τα δυτικά με το υψίπεδο του Θιβέτ καθιστά την περιγραφή του υποχρεωτική προκειμένου να ερμηνευτεί η τεκτονική συμπεριφορά της Νοτιοανατολικής επικράτειας. Στο **Σχήμα 1** απεικονίζονται οι κινήσεις των λιθοσφαιρικών πλακών οι οποίες δραστηριοποιούνται σε ολόκληρη την περιοχή της Κίνας καθώς και μερικές από τις πιο αξιόλογες ενεργές τεκτονικές δομές. Η γεωγραφική θέση της περιοχής μελέτης, οριοθετείται με το ορθογώνιο παραλληλόγραμμο σχήμα. Οι λιθοσφαιρικές κινήσεις συμβολίζονται με τα μεγάλα βέλη ενώ με τα μικρά βέλη απεικονίζονται οι οριζόντιες κινήσεις που πραγματοποιούν οι επιμέρους μικροπλάκες. Από τη φορά τους, διακρίνεται η κίνηση διαφυγής του φλοιού του υψιπέδου του Θιβέτ προς τα βόρεια και ανατολικά μακριά από το μέτωπο σύγκρουσης των Ιμαλαΐων.

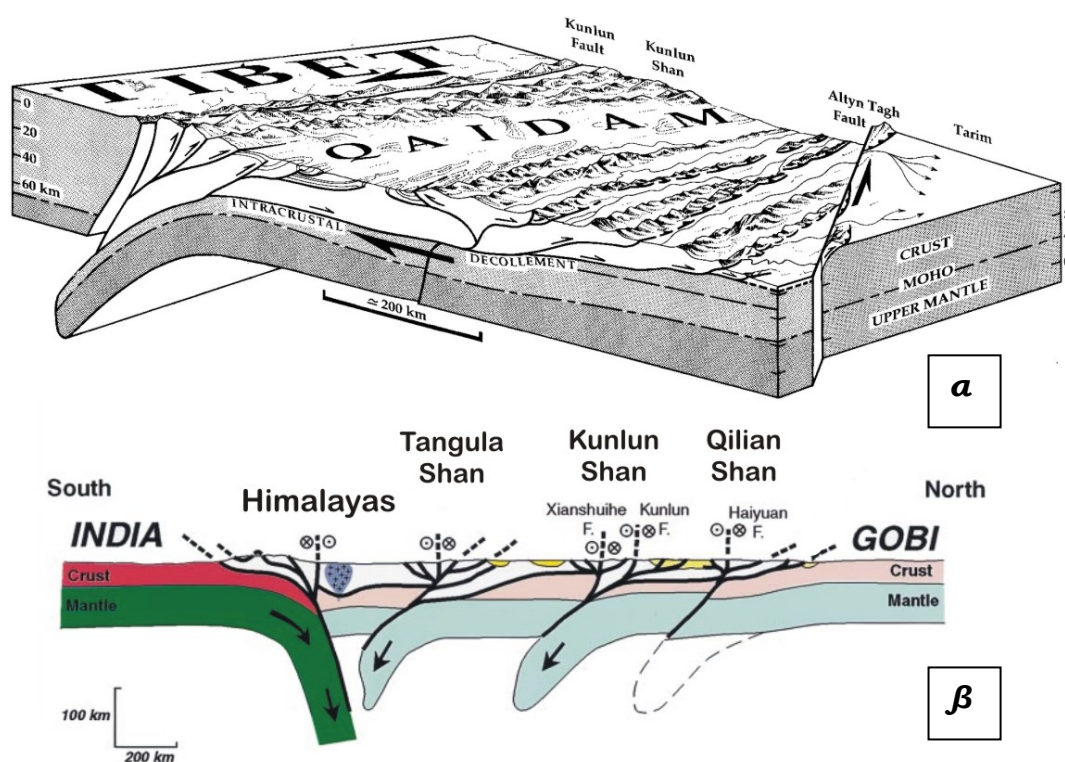
Η επικρατούσα τεκτονική κατάσταση είναι απόρροια έντονων ηπειρωτικών λιθοσφαιρικών διαδικασιών με την έναρξή τους να τοποθετείται πριν από 70 Ma όταν η Ινδική ήπειρος, αφού διασπάστηκε από την ήπειρο της Gondwana, κατευθύνθηκε βορειοανατολικά με διεύθυνση 20°. Η συμπιεστική αυτή τεκτονική ώθησε τον ωκεανό της Νεοτηθύος ο οποίος διαχώριζε την Ευρασία από την Ινδία σε σταδιακό κλείσιμο στην περιοχή Yarlong-Zangbo και τον σχηματισμό της ομώνυμης οφειολιθικής συρραφής. Στη συνέχεια σχηματίστηκε το υψίπεδο του Θιβέτ, εξαιτίας της ισχυρής ηπειρωτικής σύγκρουσης που ακόμη λαμβάνει χώρα μεταξύ της Ινδικής και της Ευρασιατικής ηπείρου που έχει σαν συνέπεια τη σταδιακή προσαύξηση μάζας. Υπολογίζεται ότι από το Τριαδικό μέχρι σήμερα η Ινδία κατά την οριζόντια κίνησή της μετά τη σύγκρουση διέτρεξε οριζόντια 1500 έως 2000m ανυψώνοντας συνολικά το υψίπεδο περισσότερο από 4000m ενώ η ανύψωση του κύριου τμήματος του υψιπέδου που επιτελέστηκε αποκλειστικά στο Μέσο με Άνω Μειόκαινο ανέρχεται στα 1000m. Η κοινά αποδεκτή περίοδος κατά την οποία κορυφώθηκε η τελική σύγκρουση ανάμεσα στις δύο ηπείρους χρονολογείται στα 45 ± 5 Ma, δηλαδή τη χρονική περίοδο του

Ηωκαίνου. Μετά το πέρας της κύριας σύγκρουσης, η Ινδία εξακολούθησε να διατηρεί σταθερή τη διεύθυνση της κίνησής της προς το Βορρά με επιβραδυνόμενο όμως ρυθμό περίπου 40–54mm/yr, σύμφωνα με γεωλογικά δεδομένα και γεωδαιτικές μετρήσεις, προκαλώντας τον σχηματισμό της οροσειράς των Ιμαλαΐων (Liu and Yiang, 2003, Paul et al., 2001, Qin et al., 2002) και την πάχυνση του φλοιού ο οποίος κυμαίνεται στα 70–75km και βρίσκεται σε απόλυτη ισοστατική ισορροπία με το υψηλό τοπογραφικό ανάγλυφο το οποίο μειώνεται απότομα από την περιφέρεια, προς στο εσωτερικό της Κίνας (Wang, 1996).



Σχήμα 1. Τα κυριότερα σεισμοτεκτονικά χαρακτηριστικά στην ευρύτερη περιοχή της Κίνας. Με τα μεγάλα βέλη παριστάνονται οι κινήσεις των λιθοσφαιρικών πλακών οι οποίες ορίζουν την Ινδο–Ευρασιατική σύγκρουση και τα τόξα κατάδυσης της Ειρηνικής πλάκας και της πλάκας των Φιλιππίνων. Με μικρότερα βέλη συμβολίζονται οι οριζόντιες κινήσεις των επιμέρους μικροπλακών. Με το ορθογώνιο πλαίσιο ορίζεται η ρομβικού σχήματος περιοχή μελέτης των επαρχιών Sichuan και Yunnan η οποία περιβάλλεται από μεγάλες ζώνες διάρρηξης (Ma, 1987).

Το υψίπεδο «Qinghai-Tibet» τέμνεται εγκάρσια σε επιμέρους γεωτεκτονικές ζώνες σε διεύθυνση σχεδόν Α-Δ διατεταγμένες από το Βορρά προς το Νότο, από την αρχαιότερη προς τη νεότερη σε ηλικία, οι οποίες διαχωρίζονται μέσω ασθενών ζωνών και αντιστοιχούν σε προγενέστερες οφειολιθικές συρραφές (Wang, 1996). Ωστόσο, τα τελευταία 10Ma λόγω της βαρυτικής κατάρρευσης του ορογενούς, το υψίπεδο του Θιβέτ από το συμπιεστικό καθεστώς έχει διέλθει σε πεδίο εφελκυστικών τάσεων διεύθυνσης ανατολής-δύσης με ρυθμό 10–15mm/yr, το οποίο έχει δραστηριοποιήσει εκ νέου τις προαναφερόμενες ασθενείς ζώνες με το χαρακτήρα ρηγμάτων οριζόντιας μετατόπισης οι οποίες εκδηλώνουν άλματα εκατοντάδων χιλιομέτρων και το βάθος των οποίων ενδεχομένως να εκτείνεται σε όλο το πάχος της λιθόσφαιρας (Armijio et al., 1986, Liu and Yang, 2003, Tapponier et al., 1982) (Σχήμα 2).

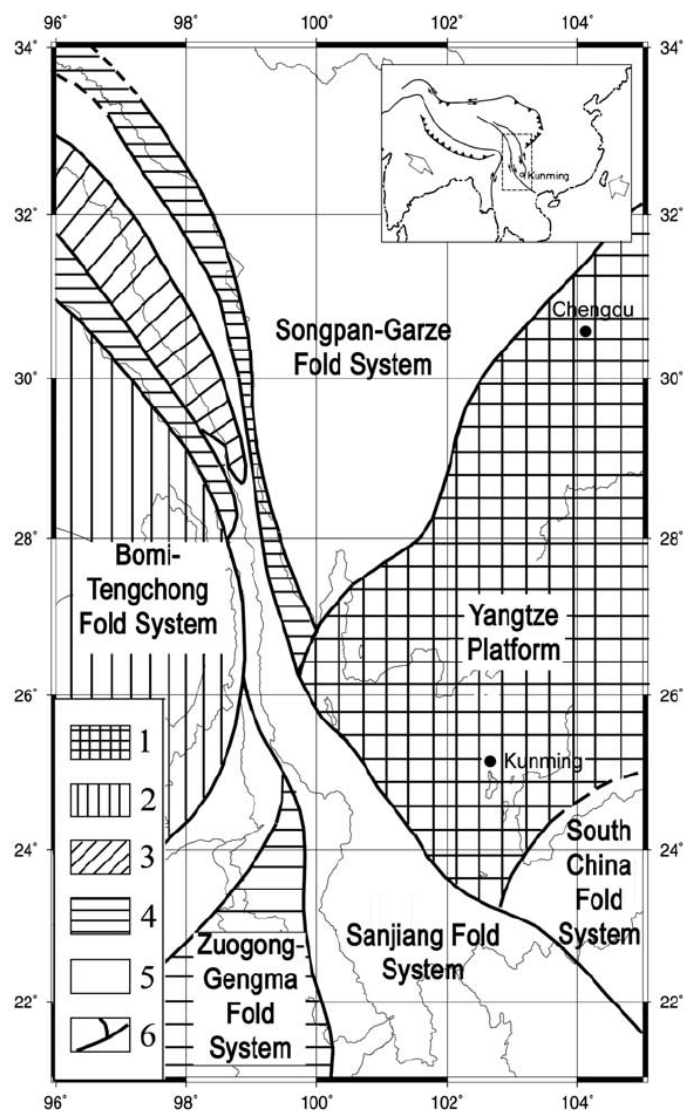


Σχήμα 2. α) Τρισδιάστατη απεικόνιση τομής του υψιπέδου του Θιβέτ με διεύθυνση 30°ΒΑ στην οποία διακρίνονται τα πάχη του φλοιού και τα γεωμορφολογικά γνωρίσματα συγκριτικά με τα τεκτονικά στοιχεία. Παρατηρείται ότι μεγάλου μήκους οροσειρές αναπτύσσονται κατά μήκος τεκτονικών διαρρήξεων (Meyer et al., 1998). β) Τομή σε διεύθυνση Βορρά-Νότου του Θιβετιανού υψιπέδου στην οποία διακρίνεται η σύγκρουση της Ινδίας και της Ευρασίας με τμήμα του μανδύα να παρασύρεται και να καταδύεται κάτω από το υψίπεδο (Meyer et al., 1998).

Οι πιο σημαντικές ζώνες οριζόντιας μετατόπισης είναι τα ρήγματα Altyn, Kansu, Kunlun, Karakorum και Qilianshan. Στο **Σχήμα 2** παρουσιάζεται μια τομή του υψιπέδου σε διεύθυνση Βορρά-Νότου και σε αυτή απεικονίζεται η κατάδυση μέρους του μανδύα κάτω από την Ευρασιατική πλάκα καθώς και οι ζώνες διάρρηξης που το διατρέχουν οι οποίες σύμφωνα με τους ερευνητές αντιστοιχούν σε καταδύσεις του φλοιού. Το υψίπεδο διαχωρίζεται στο Βορρά και στο Νότο από την απόκρημνη μορφολογία και τις δομές τις παράλληλες σε αυτή. Σε αντίθεση τα ανατολικά και δυτικά όρια εμφανίζονται λιγότερο σαφή με χαρακτηριστικά τα ανατολικά όρια όπου συναντάται και η περιοχή μελέτης, το χαμηλό ανάγλυφο και τις εφελκυστικές λεκάνες.

1.3 Σεισμοτεκτονικό Καθεστώς της Νοτιοανατολικής Κίνας

Στα τέλη της δεκαετίας του 1970 οι Kan et al. (1977) και οι Li and Wang (1990) έθεσαν τις πρώτες βάσεις για τη διερεύνηση του τεκτονικού υποβάθρου που αφορά στις δύο υπό μελέτη επαρχίες οι οποίες συνιστούν την ομώνυμη ρομβικού σχήματος μικροπλάκα των Sichuan-Yunnan καθώς και στη γειτονική της προς το Βορρά, τη μικροπλάκα Sichuan-Qinghai, στην οποία επίσης εκδηλώνεται έντονη σεισμική δραστηριότητα. Το σεισμοτεκτονικό τους καθεστώς και η κινηματική τους συμπεριφορά εξαρτώνται όπως προαναφέρθηκε, άμεσα από την κυρίαρχη παρουσία του υψιπέδου του Θιβέτ από το Καινοζωικό μέχρι σήμερα (Tapponier and Molnar, 1977). Η περιοχή συνιστά μια πλευρική ζώνη μετάβασης του υψιπέδου προς την ηπειρωτική πλατφόρμα Yangtze στην ανατολική Κίνα όπως αυτό διαπιστώνεται από την μεταβολή του πάχους του φλοιού το οποίο μειώνεται βαθμιαία από τα δυτικά προς τα ανατολικά. Ο φλοιός στην περιοχή αυτή η οποία εναλλακτικά ονομάζεται τάφος Panxi, κυμαίνεται από τα 36km σε βάθος στα νότια μέχρι τα 70km στα βόρεια. Σύμφωνα με τους Wang et al. (2003) η περιοχή μελέτης αποτελείται από έξι τεκτονικές ενότητες οι οποίες διακρίνονται στο **Σχήμα 3**. Πρόκειται για τα συστήματα πτύχωσης Bomi-Tengchong, Zuogong-Gengma, τις ενότητες Sanjiang, Songpan-Garze, την ενότητα της Νότιας Κίνας και την πλατφόρμα Yangtze. Στα ανατολικά η μικροπλάκα συνορεύει με την Άνω Κρητιδική ζώνη πτύχωσης Yangtze του ορογενούς Yenshanian, όπου οι κυρίαρχες παρατάξεις των γεωλογικών σχηματισμών είναι βορειοανατολικής διεύθυνσης ενώ στα νοτιοδυτικά συνορεύει με τη ζώνη πτύχωσης Mekong του Ινδονησιακού ορογενούς με παράταξη σχεδόν κάθετη στην προηγούμενη (Tapponier and Molnar, 1977).



Σχήμα 3. Γεωλογικός χάρτης των Επαρχιών Sichuan και Yunnan στον οποίο απεικονίζονται οι κύριες γεωτεκτονικές ενότητες που απαντώνται στην υπό μελέτη περιοχή (1) πλατφόρμα Yangtze (2) Κάτω Καληδονική ζώνη πτύχωσης, (3) Άνω Καληδονική ζώνη πτύχωσης, (4) Βαρύσκια ζώνη πτύχωσης, (5) Ζώνη πτύχωσης Ινδοκίνας, (6) Όριο μεταξύ κύριων τεκτονικών ενοτήτων, (Wang et al., 2003).

Επιπλέον χαρακτηριστικό γνώρισμα της περιοχής είναι ότι η επαρχία Yunnan εντοπίζεται νότια του ανατολικού άξονα των Ιμαλαΐων στα πολιτικά σύνορα με τη Βιρμανία, το τριπλό σημείο ένωσης της Ινδικής με την Ευρασιατική λιθόσφαιρα και το βορειότερο άκρο της πλάκας της Ινδοκίνας και της Νότιας Κίνας. Στο σημείο αυτό το μέτωπο ανάστροφων διαρρήξεων των Ιμαλαΐων ενώνεται με το τόξο της Βιρμανίας. Για το λόγο αυτό, τα τεκτονικά χαρακτηριστικά της επαρχίας Yunnan αποδίδονται στη

δεξιόστροφη περιστροφή του υψιπέδου του Θιβέτ και την επέκταση του ρήγματος Sagaing προς το Βορρά το οποίο και καταλήγει στη δυτική Yunnan.

Σύμφωνα με τους Tarponier and Molnar (1977), η εξώθηση της κεντρικής Κίνας κατά το Τριτογενές προς τα ανατολικά, με ιδιαίτερα ραγδαίους ρυθμούς σε σχέση με την νοτιοανατολική Κίνα προκάλεσε συμπίεση στην περιοχή Longmenshan μέσα σε ένα ευρύ αριστερόστροφο συμπιεστικό καθεστώς που επικρατούσε αλλά και δραστηριοποίηση της δεξιόστροφης οριζόντιας κίνησης στην ΒΒΑ-διεύθυνσης ζώνη συμπίεσης. Η εφίπνευση πραγματοποιείται στο ανατολικό μέτωπο της υπο-πλάκας που δημιουργείται μεταξύ των ρηγμάτων Kunlun και Xianshuihe και του Πρωτεροζωικού κρατόνα Yangtze στα ανατολικά, στον οποίο και καταλήγουν οι παραπάνω δομές, ενώ ολόκληρη η εσωτερική Κίνα εφίπνευε την πλάκα των Φιλιππίνων. Γεωμορφολογικά, στη ζώνη αυτή διαμορφώνεται το φυσικό όριο ανάμεσα στο υψίπεδο της δυτικής Sichuan και της λεκάνης του Sichuan προς τα ανατολικά.

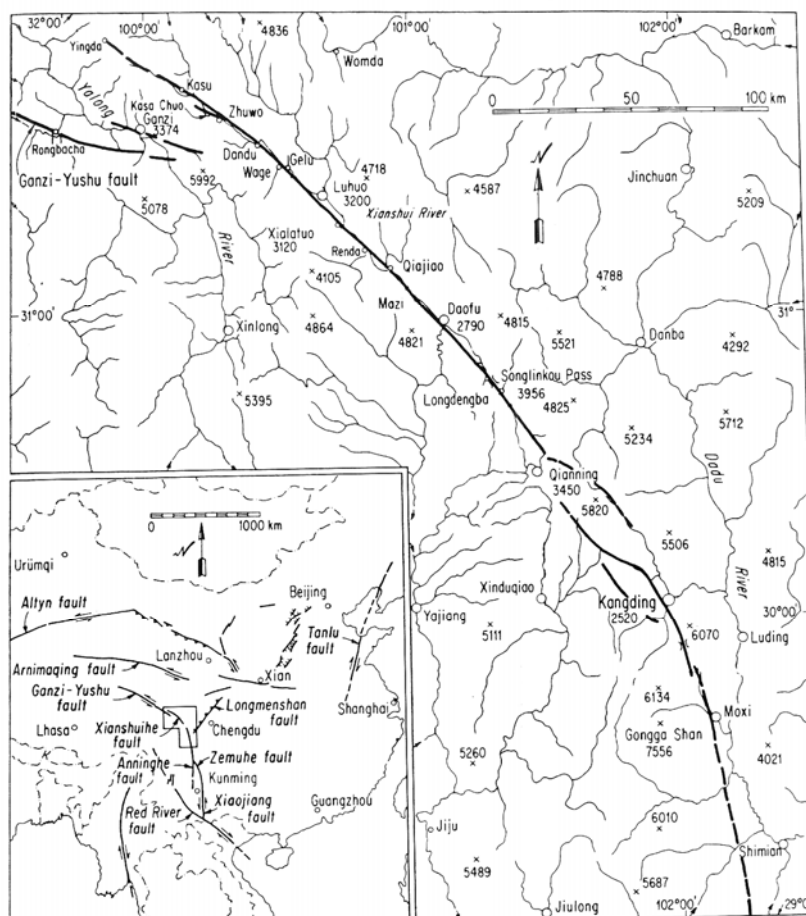
1.4 Ενεργές Δομές των Επαρχιών Sichuan και Yunnan

Τα ενεργά σεισμικά ρήγματα στην Κίνα είναι αυτά τα οποία εκδηλώνουν τεκτονική δραστηριότητα από το Τεταρτογενές μέχρι σήμερα και συνεπώς αναμένεται να δραστηριοποιηθούν στο μέλλον. Κατανέμονται κυρίως κατά μήκος των ορίων μικροπλάκων συνιστώντας τα δυναμικά τους όρια, αποτελούν όρια μεταξύ τεμαχών ρηγμάτων και μικροπλάκων ή συνθέτουν μικρότερα τεμάχη ρηγμάτων (Ding, 1996). Η Νοτιοανατολική Κίνα συγκεκριμένα, περιβάλλεται από τα ανατολικά και από το Βορρά προς το Νότο από τις αριστερόστροφες οριζόντιας μετατόπισης ζώνες Ganzi, Xianshuihe, Anninghe-Zemuhe, Xiaojiang, ενώ στο δυτικό όριο κυριαρχεί η τεκτονική γραμμή του Jinshajiang η οποία επεκτείνεται προς το Νότο για να συνενωθεί με την αξιόλογη τεκτονική ζώνη Red River που μαζί με τη ζώνη Lancang-Gengma οριοθετούν το νότιο τμήμα. Στο Βορρά η μικροπλάκα του Sichuan-Qinghai οριοθετείται από τα βόρεια τμήματα της ζώνης διάρρηξης Xianshuihe, τη συμπιεστική ζώνη Longmenshan και Ming Jiang. Η πλειοψηφία των ρηγμάτων αυτών θεωρείται ότι αποτέλεσαν διόδους ανόδου του μάγματος κατά τη διάρκεια του Άνω Τριαδικού-Κρητιδικού. Μικρότερα ρήγματα, αλλά ενεργά με σημαντική σεισμική δραστηριότητα εμφανίζονται και στο εσωτερικό της μικροπλάκας όπως τα ρήγματα Lijiang, Litang, Qinhe, Qujiang και Batang. Το δόσβατο της περιοχής κατά ένα μεγάλο ποσοστό εμπόδισε την επιφανειακή αναγνώριση πολλών ρηγμάτων τα οποία έγιναν γνωστά στους γεωλόγους μόλις τις

τελευταίες δεκαετίες. Ακολουθεί μια σύντομη περιγραφή των πιο σημαντικών ενεργών ρηξιγενών ζωνών οι οποίες περιλαμβάνονται στην περιοχή μελέτης.

1.4.1 Η Ζώνη Διάρρηξης Xianshuihe

Το υψίπεδο του Θιβέτ ανατολικά οριοθετείται από τη ζώνη διάρρηξης Xianshuihe, στο δυτικό τμήμα της επαρχίας Sichuan. Η ρηξιγενής αυτή δομή είναι μία από τις πιο ενεργές ζώνες στον κόσμο, ανάλογης σημασίας με το ρήγμα του Αγίου Ανδρέα στην Καλιφόρνια και το ρήγμα της βόρειας Ανατολίας στην Τουρκία και εκτείνεται από τις 33°B στην πεδιάδα Kiang μέχρι τις 25°B περίπου στην περιοχή Kung Ming της επαρχίας Yunnan. Αποτελεί τμήμα ενός εκτενούς αριστερόστροφου συστήματος οριζόντιας μετατόπισης με συνολικό μήκος 1400km ξεκινώντας βόρεια από την περιοχή Qinghai, διασχίζει την βορειοδυτική επαρχία Sichuan και καταλήγει στην νότια Yunnan (Σχήμα 4).



Σχήμα 4. Το ρήγμα Xianshuihe και οι πόλεις από τις οποίες αυτό διέρχεται και επονομάζουν τα επιμέρους τμήματα στα οποία αυτό διακρίνεται Στο χάρτη κάτω αριστερά φαίνεται το ρήγμα σε σχέση με την ανατολική Κίνα (Allen et al., 1991).

Σύμφωνα με τους Allen et al. (1991), η ζώνη αυτή δεν είναι συνεχής αλλά διακρίνεται σε πέντε επιμέρους μικρότερα τμήματα τα οποία ενεργοποιούνται ξεχωριστά και εκδηλώνουν εξίσου μεγάλη σεισμικότητα όπως προκύπτει από ισχυρούς σεισμούς στο ιστορικό παρελθόν. Τα τμήματα που συναντώνται από το Βορρά προς το Νότο είναι τα Moxi, Selaha (Kangding), Zheduotang, Yalahe και το ομώνυμο ρήγμα Xianshuihe. Το τελευταίο έχει συνολικό μήκος 150km ανάμεσα στην περιοχή Songlinkou Pass και Kasu όπου το ίχνος του ρήγματος φαίνεται συνεχές και απλό και ελέγχει τη ροή του ποταμού Xianshui και των παραποτάμων του. Το βορειοδυτικό του άκρο υπερκαλύπτει το νοτιοανατολικό άκρο του ρήγματος Ganzi-Yushu με ένα αριστερόστροφο κλιμακωτό ρήγμα (*en echelon stepover*) μήκους 40km. Το νοτιοανατολικό του άκρο συνδέεται με το ρήγμα Anninghe με μια επίσης πολύπλοκη τεκτονικά δομή.

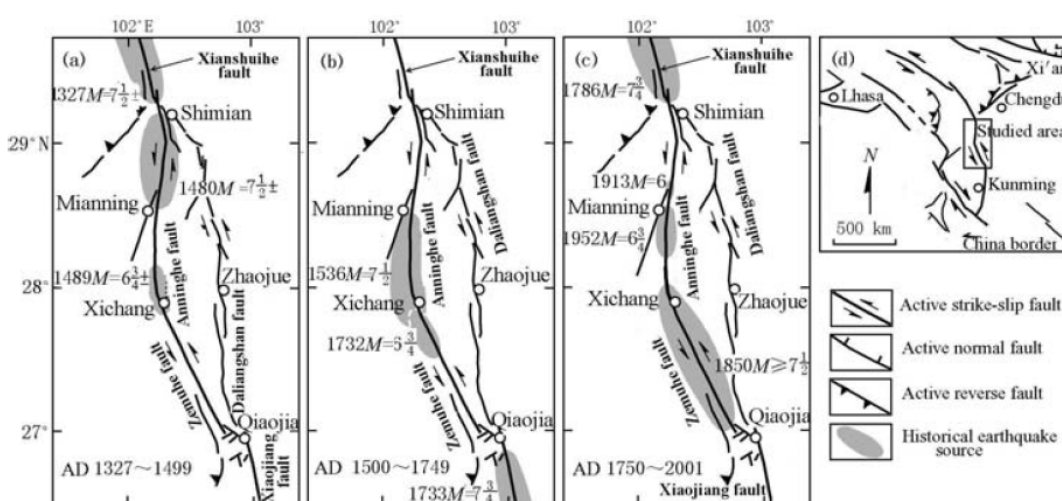
Τα τεκτονικά χαρακτηριστικά του ρήγματος είναι ευδιάκριτα λόγω του σχετικά υψηλού ρυθμού ολίσθησης, της απουσίας βλάστησης και οικιστικής ανάπτυξης και λόγω του κλίματος. Το ρήγμα Xianshuihe διακρίνεται επιπλέον σε μικρότερα τεμάχια με πρώτο το τμήμα Kasu-Xialatuo, το επιφανειακό ίχνος του οποίου είναι ορατό σε πολλά σημεία και συνοδεύεται από τη παρουσία μικρών λιμνών (*sag ponds*). Το δεύτερο τμήμα είναι το τέμαχος Xialatuo-Qiaijiao το οποίο και σχηματίζει χαρακτηριστικές ταφρογενείς λεκάνες. Στη συνέχεια συναντάται το τέμαχος Qiaijiao-Songlinkou το μεγαλύτερο μέρος του οποίου καλύπτεται από πυκνή βλάστηση, φαίνεται όμως να εκτρέπει τις κοίτες του υδρογραφικού δικτύου. Το τέταρτο τέμαχος είναι το Songlinkou Pass-Laoqianning το οποίο στην περιοχή Longdengba εμφανίζεται επιφανειακά με μια κατοπτρική επιφάνεια 15m ύψους στην οποία αποτυπώνεται η υψηλότερη κατακόρυφη συνιστώσα. Το πέμπτο τέμαχος είναι το Laoqianning-Kangding το οποίο παρουσιάζει σημαντική οριζόντια συνιστώσα και το έκτο τμήμα είναι το Kangding-Moxi στο οποίο η παρατήρηση χαρακτηριστικών πρόσφατης μετατόπισης εμποδίζεται από την οικιστική παρέμβαση. Συναντώνται ωστόσο ράχες (*side-hill ridges*), λίμνες (*sag ponds*) και πολλές οριζόντιες μετατοπίσεις. Νοτιότερα του Moxi το ρήγμα διέρχεται από μια ιδιαίτερα ορεινή περιοχή όπου χάνεται η συνέχεια και η γραμμικότητα και η δομή της ζώνης διάρρηξης γίνεται περισσότερο πολύπλοκη.

Εκτός από την υψηλή σεισμικότητα, η ασεισμική ολίσθηση ορισμένων τεμαχίων αποτελεί άλλο ένα χαρακτηριστικό του ρήγματος. Η κλιμακωτή δομή η οποία παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον είναι αυτή η οποία συνδέει το Xianshuihe με το Ganzi, το οποίο συνοδεύεται από την παρουσία κανονικών ρηγμάτων βορειοανατολικής

παράταξης στο οποίο έχουν γίνει σεισμοί αντίστοιχου μηχανισμού γένεσης. Στο ΒΔ τμήμα του ρήγματος υπάρχουν περισσότερα από 20 μεγάλα Τεταρτογενή ρήγματα τα οποία διακρίνονται σε τρεις ομάδες με βάση την παράταξη και τα δυναμικά τους χαρακτηριστικά τα οποία έχουν ΒΔ παράταξη όπως το ρήγμα Χιαλαταο (στη περιοχή Luhuo), το ρήγμα Qiazao (στη περιοχή Daofu), το ρήγμα Taziba (στη περιοχή Qianning), τα ρήγματα στρέψης (*torsional faults*) με παράταξη ΒΒΑ-ΒΑ, όπως στην περιοχή Luorwa και τα εφελκυστικά ρήγματα με παράταξη Α-Δ, όπως το ρήγμα Warixian.

1.4.2 Οι Ζώνες Διάρρηξης Anninghe-Zemuhe

Η ρηξιγενής δομή Xianshuihe νοτιότερα επεκτείνεται στις ζώνες διάρρηξης Anninghe και Zemuhe. Πρόκειται για μια ενιαία αριστερόστροφη ζώνη διάρρηξης η οποία παρουσιάζει σημαντική σεισμικότητα (Σχήμα 5). Η ζώνη διάρρηξης Anninghe εκτείνεται σε μήκος περίπου 170km σε διεύθυνση Βορρά-Νότου ενώ η ζώνη Zemuhe αναπτύσσεται σε ΒΒΔ διεύθυνση σε μήκος περίπου 110km μέχρι που συναντά την αριστερόστροφη ζώνη διάρρηξης Xiaojiang. Τα δύο αυτά συνεχή ρήγματα συνδέονται με ένα πολύπλοκο σύστημα κλιμακωτών μετατοπίσεων (*enéchelon offsets*).



Σχήμα 5. Τα επιμέρους τμήματα της δομής Anninghe και Zemuhe καθώς και οι σημαντικότεροι γνωστοί ισχυροί ιστορικοί σεισμοί. Οι σκιερές περιοχές αντικατοπτρίζουν ζώνες οι οποίες έχουν ολισθήσει από ισχυρούς σεισμούς ο χρόνος γένεσης και το μέγεθος των οποίων αναγράφονται δίπλα (Yi et al., 2004).

Διακρίνονται σε πέντε επιμέρους τεμάχια και συγκεκριμένα τα τμήματα Shimian, Tuowu, Mianning-Xichang, Xichang-Puge και Ningman (Yi et al., 2004). Σημαντικό είναι το κλιμακωτό ρήγμα με το οποίο τα δύο αυτά συνενώνονται με το ρήγμα Xiaojiang

στο Νότο. Τα επιμέρους τμήματα εκδηλώνουν διαφορετικές σεισμικές ιδιότητες και κάθε ένα από αυτά συνδέεται με τη γένεση ισχυρού σεισμού όπως διακρίνεται στο **Σχήμα 5**. Παλαιοσεισμολογικές έρευνες δείχνουν ότι το ρήγμα Zemuhe συγκεκριμένα συνδέεται με έξι ισχυρούς σεισμούς από το Ολόκαινο μέχρι σήμερα (He and Ren, 2003).

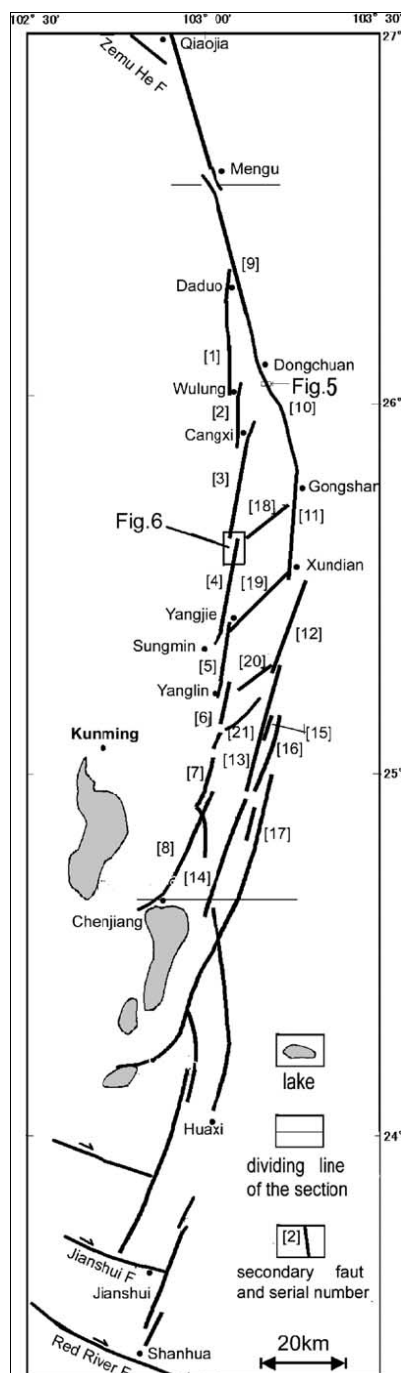
1.4.3 Η Ζώνη Διάρρηξης Xiaojiang

Επέκταση της ζώνης διάρρηξης Xianshuihe προς το Νότο αποτελεί η αριστερόστροφη ζώνη οριζόντιας μετατόπισης Xiaojiang. Αυτή η ζώνη διάρρηξης βρίσκεται εξολοκλήρου στην επαρχία Yunnan και αποτελεί μία από τις πιο ενεργές σεισμικές ζώνες στο νοτιοανατολικό όριο του Θιβέτ. Πρόκειται για μία ιδιαίτερα πολύπλοκη τεκτονικά ζώνη με γενική διεύθυνση Βορρά-Νότου συνολικού μήκους 400km, η οποία με βάση τα ιδιαίτερα τεκτονικά της γνωρίσματα διακρίνεται σε τρεις επιμέρους ενότητες σύμφωνα με τους Shen et al. (2003) τα οποία παρουσιάζονται στο **Σχήμα 6**.

Το βορειότερο της τμήμα εκτείνεται από την πόλη Qiaojia μέχρι την πόλη Mengu με παράταξη 355° και μήκος περίπου 50km. Γεωμορφολογικά, αποτελεί το όριο ανάμεσα στα όρη και τα αλλούβια ιζήματα κατά μήκος της ποτάμιας κοιλάδας του Jinsha Jiang, εκατέρωθεν του οποίου διακρίνονται απότομες πλαγιές και μικρότεροι κλάδοι ρηγματών. Το ενδιαμέσο τμήμα της ρηξιγενούς ζώνης εκτείνεται από την Mengu στην Chenjiang και συνίσταται από δύο ενεργά ρήγματα Βορρά-Νότου αριστερόστροφης οριζόντιας μετατόπισης τα οποία διακρίνονται στο ανατολικό και δυτικό Xiaojiang. Το τμήμα αυτό έχει μήκος 200km και πλάτος 15km και αποτελείται από δευτερεύοντα τεμάχια τα οποία ορίζουν περιμετρικά περιοχές ρομβικού σχήματος. Ο δυτικός κλάδος του ρήγματος αποτελείται από οχτώ αριστερόστροφα ρήγματα οριζόντιας μετατόπισης, τα μήκη των οποίων κυμαίνονται από 10 μέχρι 50km. Ανάμεσά τους διαμορφώνονται επτά ταφρογενείς λεκάνες (*pull apart basins*) και συγκεκριμένα οι λεκάνες Wulong, Cangxi, Quingshuihai, Dianasa και Yangzongai. Τα επιμέρους αυτά ρήγματα αποτελούνται από μερικά υπο-παράλληλα ρήγματα, όπως για παράδειγμα το ρήγμα Cangxi-Quingshuihai που αποτελείται από πέντε κλιμακωτές δομές που σχηματίζουν πλεξοειδές σχήμα. Ο ανατολικός κλάδος του ρήγματος έχει όμοια δομή με το δυτικότερο, αποτελείται δηλαδή από μικρότερα ρήγματα οριζόντιας μετατόπισης. Από το Βορρά προς το Νότο οι παρατάξεις τους κυμαίνονται από ΒΒΔ προς ΝΝΑ. Κάθε ρήγμα διαχωρίζεται σε δύο μέχρι τέσσερα κλιμακωτά (*en echelon*) ρήγματα. Το ρήγμα

Χiaojiang εμφανίζεται επιφανειακά σε αρκετά σημεία όπως στην περιοχή Danaobao, νότια της λεκάνης Dongchuan, όπου και διαπερνά Πλειστοκαινικά ιζήματα.

Σχήμα 6. Η γεωμετρία των ενεργών ρηγμάτων τα οποία συνθέτουν την ζώνη διάρρηξης Χiaojiang όπως προτείνονται από τους Shen et al. (2003).



- (1) Ρήγμα Daduo-Wulong
- (2) Ρήγμα Wulong-Cangxi
- (3) Ρήγμα Cangxi-Qingshuiha
- (4) Ρήγμα Qingshuihai-Diansh
- (5) Ρήγμα Luliangshan
- (6) Ρήγμα Yanglin-Qiansuo
- (7) Ρήγμα Fugang-Haifenyuan
- (8) Ρήγμα Yangzonghai-Chengjian
- (9) Ρήγμα Menggu-Dongchuan
- (10) Ρήγμα Dongchuan-Tianba
- (11) Ρήγμα Gongshan-Xundian
- (12) Ρήγμα Tangzi-Xiaoxinjie
- (13) Ρήγμα Xiaoxinjie-Yiliang
- (14) Ρήγμα Yiliang-Xujiadu
- (15) Ρήγμα Mopanshan-Fenglecun
- (16) Ρήγμα Majie-Nanyangjie
- (17) Ρήγμα East Yiliang
- (18) Ρήγμα Qingshuihai-Moluoh
- (19) Ρήγμα Yangjie-Xundian
- (20) Ρήγμα Kuanglanghe-Yaolingshan
- (21) Ρήγμα Wanshoushan

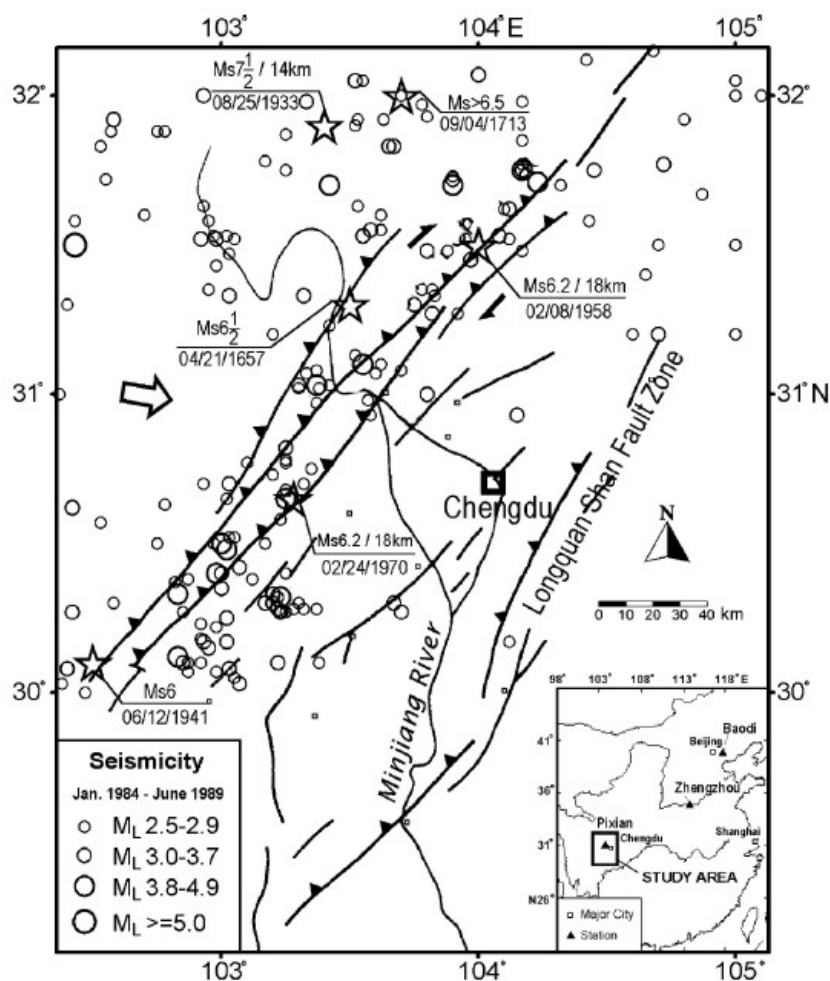
Στο νοτιότερο άκρο του ρήγματος Dongchuan-Tianba, λαμβάνει χώρα μια αρκετά μεγάλη κάμψη του ανατολικού κλάδου. Η λεκάνη Xundian και η λεκάνη Yiliang σχηματίζονται ανάμεσα σε μεγάλες μετατοπίσεις του ρήγματος (*oversteps*). Τα τεκτονικά αυτά χαρακτηριστικά διαχωρίζουν τον ανατολικό κλάδο του Xiaojiang σε τρία τεκτονικά τμήματα, τα οποία έχουν υποστεί διάρρηξη όπως προκύπτει από ιστορικά στοιχεία. Το νοτιότερο τμήμα εκτείνεται από το Chenjiang μέχρι το Shanhua περίπου με μήκος 150km και πλάτος 25km με πλεξοειδή μορφή. Αποτελεί την επέκταση προς το Νότο του ανατολικού κλάδου του ρήγματος Xiaojiang.

Από στρωματογραφικά στοιχεία προκύπτει ότι το Xiaojiang, πριν από το Τεταρτογενές διατηρούσε τον ίδιο αριστερόστροφο χαρακτήρα με το σημερινό. Από την ύπαρξη τριών ειδών πτύχωσης συνεπάγεται ότι το σύστημα διάρρηξης έχει υποστεί την επίδραση τριών τεκτονικών φάσεων. Η πρώτη συνέβη από το Πλειόκαινο μέχρι το Άνω Πλειστόκαινο και κατά την περίοδο αυτή σχηματίστηκαν εμβρυακά στοιχεία του ρήγματος. Από το Μέσο Πλειστόκαινο η κίνηση κατά μήκος του ρήγματος επιταχύνθηκε, ενώ στο τέλος του Άνω Πλειστοκαίνου το σύστημα διάρρηξης ενοποιήθηκε, δηλαδή έγινε συνεχές με μετατοπίσεις της τάξης των 2000m να έχουν μετρηθεί σε λεκάνες και το υδρογραφικό δίκτυο (Shen et al., 2003).

1.4.4 Η Ζώνη Διάρρηξης Longmenshan

Στα βορειοδυτικά της μικροπλάκας Sichuan-Yunnan κυριαρχεί με την παρουσία της η εντυπωσιακή συμπίεστική ζώνη Longmenshan η οποία εμποδίζει την κίνηση της μικροπλάκας του Θιβέτ προς τα ανατολικά. Στις δορυφορικές εικόνες Landsat αποκαλύπτεται μεγάλη ομοιότητα μεταξύ της εμφάνισης των ρηγμάτων Longmenshan και των εφίππευσεων του μετώπου των Ιμαλαΐων με την ισχυρά πτυχωμένη ενότητα να εφίππευει πάνω στα Τεταρτογενή αλλούβια ιζήματα.

Τη ζώνη διάρρηξης διατρέχουν γραμμικά ρήγματα με βορειοανατολική παράταξη στη γενική διεύθυνση των εφίππευσεων 40°ΒΑ (Σχήμα 7). Κοντά στη δομή της εφίππευσης παρατηρούνται δομές με παράταξη 60° οι οποίες και αντιστοιχούν πιθανόν σε προϋπάρχουσες εφίππευσεις οι οποίες πλέον έχουν αποκτήσει χαρακτήρα οριζόντιας μετατόπισης. Στο επίπεδο του Sichuan διαπιστώνονται επιμηκυμένες ράχεις παράλληλες στις ανάστροφες διαρρήξεις της ζώνης Longmenshan (Tapponier and Molnar, 1977, Burchfiel et al., 1995).



Σχήμα 7. Τα επιμέρους τεμάχια από τα οποία αποτελείται το ανάστροφο μέτωπο Longmenshan καθώς και επίκεντρα σεισμών για το χρονικό διάστημα 1984-1989, τα οποία απεικονίζονται με κύκλους. Με αστέρισκους παρουσιάζονται οι ιστορικοί σεισμοί με μέγεθος $M \geq 6.0$ (Lu et al., 2004).

Το ρήγμα Longmenshan αποτελείται κυρίως από τρία κύρια ανάστροφα ρήγματα βορειοανατολικής-νοτιοδυτικής διεύθυνσης και τα συνοδεύοντα δευτερεύοντα ρήγματα. Έχει συνολικό μήκος 60km και εφωπιδεί πάνω στον κρατόνα Yangtze από βορειοδυτικά προς νοτιοανατολικά (Wang, 1996). Τα τρία κυριότερα ρήγματα της ζώνης διάρρηξης είναι από το Βορρά προς το Νότο, το ρήγμα Wenchuan-Maowen, το ρήγμα Beichuan και το ρήγμα Pengguan τα οποία είναι ανάστροφα με δεξιόστροφη συνιστώσα, εμφανίζουν επιφανειακά ίχνη και μετατοπίζουν εμφανώς Καινοζωικούς σχηματισμούς. Στη νοτιότερη ευρύτερη περιοχή υπάρχουν και άλλες μικρότερες δομές μέσα στη λεκάνη Sichuan επίσης ανάστροφες όπως τα ρήγματα Dayi και Xiong Po. Βόρεια του ρήγματος Pengguan υπάρχει η αλλόχθονη μάζα η οποία χαρακτηρίζεται από έντονες πτυχώσεις των

πετρωμάτων της και ανάστροφες δομές με μικρές κλίσεις ($\sim 30^\circ$). Η ύπαρξη της αριστερόστροφης και δεξιόστροφης συνιστώσας δυτικά και ανατολικά, αντίστοιχα σχετίζονται με τη νότια κίνηση της μάζας ως αποτέλεσμα της επίδρασης του αριστερόστροφου ρήγματος οριζόντιας μετατόπισης Kunlun, καθώς η συγκεκριμένη ζώνη διάρρηξης βρίσκεται στο νότιο άκρο της. Έτσι η περιοχή ανυψώνεται, εξωθείται προς τα νότια και διαιρείται σε δύο επιμέρους τμήματα με το νοτιότερο τμήμα να έχει υποστεί τη μεγαλύτερη παραμόρφωση.

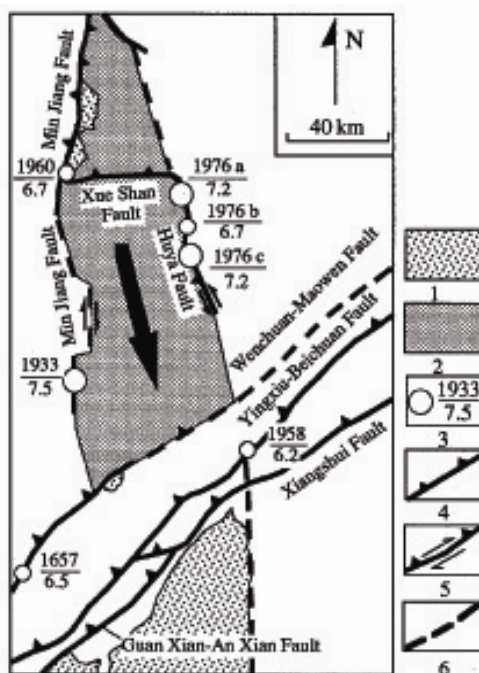
1.4.5 Η Ζώνη Διάρρηξης Minjiang

Μία χαρακτηριστική δομή, η οποία παρουσιάζει σημαντική σεισμικότητα συγκριτικά με τη σχετικά αδρανή ζώνη του Longmenshan, εντοπίζεται στην περιοχή Min Shan βορειότερα του τελευταίου, οριοθετώντας το δυτικό όριο της οροσειράς Min Shan (Σχήμα 8). Αρχικά σχηματίστηκε ως συναποθετική εφελκυστική δομή κατά το Λιθανθρακοφόρο-Μ.Τριαδικό, ενώ στο Άνω Τριαδικό ενεργοποιήθηκε ως ανάστροφο ρήγμα με αριστερόστροφη οριζόντια συνιστώσα κατά την Ινδονησιακή πτυχωσιγενή τεκτονική.

Διαχωρίζεται σε τρεις κλάδους επιμέρους ρηγμάτων με βάση την τεκτονική του δομή και τα γεωμορφολογικά του χαρακτηριστικά. Ο νοτιότερος και ο βορειότερος κλάδος έχουν παράταξη 340° , είναι διατεταγμένοι σε μία δομή (*right stepping en echelon*) και συνδέονται με ένα τέμαχος με διεύθυνση Βορρά-Νότου. Ο νοτιότερος κλάδος έχει μήκος 30km και γωνία κλίσης 50° προς τα νοτιοδυτικά. Το ενδιάμεσο τέμαχος αποτελείται από τέσσερα υποπαράλληλα ανάστροφα ρήγματα με παράταξη 70° - 80° . Ο βόρειος κλάδος, αναπτύσσεται βόρεια του Songpan σε μήκος 85km, έχει παράταξη 10° - 30° , συνοδεύεται από πτυχωσιγενείς δομές και Τεταρτογενείς λεκάνες που αποδεικνύουν τον ενεργό του χαρακτήρα. Έχει γωνία κλίσης 80° και παρουσιάζει αυξημένη σεισμική δραστηριότητα βορειότερα από την τομή με το ρήγμα Xue Shan γεγονός που υποδηλώνει την βορειότερη επέκτασή του (Chen et al., 1994).

Ο νότιος κλάδος, εκτείνεται από το Songpan μέχρι το Muxuru και συνίσταται από τρεις ασυνεχείς κλάδους. Είναι λιγότερο διακριτός επιφανειακά και η παρουσία του διαπιστώνεται με βάση τη σεισμικότητα, τις βαρυτικές ανωμαλίες καθώς και άλλα συνοδά τεκτονικά στοιχεία. Έχει παράταξη 340° - 350° και κλίνει προς τα ανατολικά. Τα δύο αυτά ρήγματα συνδέει ένα τρίτο διεύθυνσης Α-Δ, το ρήγμα Xue

Shan, για το οποίο δεν υπάρχουν ενδείξεις ότι είναι ενεργό αλλά πιθανόν να μην έχει διαδραματίσει σημαντικό ρόλο στην εξέλιξη της ζώνης.



Σχήμα 8. Η περιοχή *Ming Jiang* και οι σημαντικότεροι ισχυροί σεισμοί που έχουν γίνει σε αυτή και στα βορειοανατολικά της ζώνης *Longmenshan* (λευκοί κύκλοι). Με το μαύρο βέλος απεικονίζεται η κίνηση που πραγματοποιεί το τμήμα που ορίζεται από τα ρήγματα *Ming Jiang* (Chen et al., 1994).

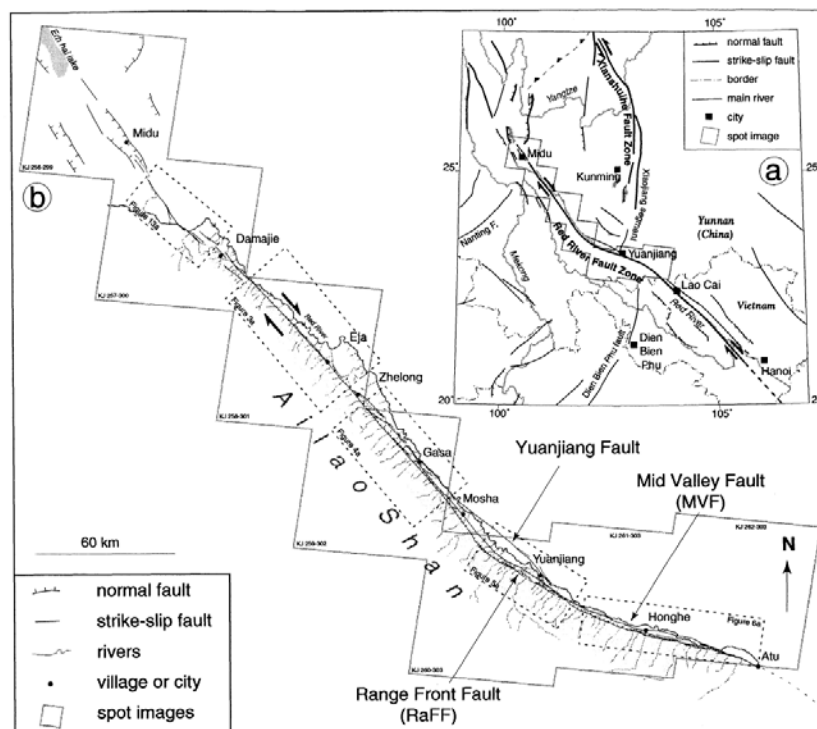
Το ρήγμα *Huya* οριοθετεί στα ανατολικά την οροσειρά *Min Shan*. Στο ρήγμα αυτό εκδηλώθηκε η σεισμική ακολουθία του 1976 της οποίας οι λύσεις των μηχανισμών γένεσης των κύριων σεισμών περιγράφουν με μεγάλη ακρίβεια τη γεωμετρία του ρήγματος. Το ρήγμα *Minjiang* το οποίο έχει μικρότερο μήκος αλλά συγκεντρώνει μεγαλύτερη σεισμικότητα συγκριτικά με το *Longmenshan* που είναι μεγαλύτερης ηλικίας. Οι Jones et al. (1984), μετά τη μελέτη των παραμέτρων της σεισμικής ακολουθίας του 1976, κατά την οποία έγιναν τρεις ισχυροί σεισμοί με μεγέθη $M \geq 6.8$, συμπεραίνουν ότι η δομή του ρήγματος είναι πολύπλοκη και ότι κάθε ένας σεισμός αντιστοιχεί σε διαφορετικό τμήμα ρήγματος. Συνεπώς, ο πρώτος και ο τρίτος σεισμός οι οποίοι έχουν όμοιο μηχανισμό γένεσης συνδέονται με δύο παράλληλους κλάδους του ίδιου ρήγματος οι οποίοι διαχωρίζονται από μία δεξιόστροφη κλιμακωτή δομή υπεύθυνη για το δεύτερο κύριο σεισμό η οποία σχηματίζει γωνία 120° με τη διεύθυνση των υπόλοιπων κλάδων.

1.4.6 Η Ζώνη Διάρρηξης Red River

Ένα εξαιρετικό γεωλογικό χαρακτηριστικό της Νοτιοανατολικής Κίνας αποτελεί η ζώνη διάρρηξης Red River. Σύμφωνα με τους Tapponnier and Molnar (1977) συνιστά μία ρηξιγενή ζώνη μήκους ~1150km η οποία αρχίζει από το ανατολικό Θιβέτ, εκτείνεται προς τα νοτιοανατολικά, διαπερνά την λεκάνη Hanoi στο Βιετνάμ και καταλήγει στη θάλασσα της Νότιας Κίνας (Σχήμα 9). Κατά μήκος της ρέει ο Κόκκινος ποταμός (*Red River*) από τον οποίο δανείζεται την ονομασία της. Το ρήγμα παρουσιάζει αριστερόστροφο χαρακτήρα μέχρι το Μέσο Τριτογενές ενώ στο Άνω Τριτογενές απέκτησε δεξιόστροφη συμπεριφορά, γνώρισμα το οποίο διατηρεί μέχρι σήμερα (Tapponnier et al., 1990). Ο σχηματισμός της ζώνης διάρρηξης Red River, σχετίζεται με την εξώθηση της Ινδοκίνας προς τα ανατολικά που έλαβε χώρα κατά το Ολιγόκαινο-Μειόκαινο λόγω της σταδιακής απομάκρυνσης της κεντρικής Ασίας από το μέτωπο της ηπειρωτικής σύγκρουσης, γεγονός που ερμηνεύεται από τις ευρείες ζώνες διάτμησης μολωνιτωμένου γνευσίου στη ζώνη μεταμόρφωσης Ailao-Shan (Leloup et al., 1995).

Κατά μήκος της ζώνης αυτής στην περίοδο από 35Ma μέχρι 15Ma από σήμερα πραγματοποιήθηκε αριστερόστροφη οριζόντια μετατόπιση 700 ± 200 km που συνδέεται με την ταυτόχρονη διάνοιξη της Νότιας Κίνας, ανατολικά. Ακολούθησε εφελκυσμός σε δύο φάσεις ο οποίος αρχικά έφερε στην επιφάνεια τα μολωνιτωμένα πετρώματα. Η πρώτη φάση ανάδυσης νοτιοανατολικά του Midu, έγινε εξαιτίας διεφελκυσμού κατά τη διάρκεια αριστερόστροφης διάτμησης, ενώ η δεύτερη φάση σηματοδότησε την έναρξη της υπάρχουσας δεξιόστροφης κίνησης αφού η ζώνη δραστηριοποιήθηκε εκ νέου αλλά με αντίστροφη ολίσθηση. Καθώς η Ινδία συνέχιζε τη βορειοανατολική της κίνηση προκλήθηκε μία δεύτερη φάση εξώθησης ωθώντας τη νότια Κίνα και το Θιβέτ προς τα ανατολικά στο Πλειόκαινο-Τεταρτογενές. Η ζώνη διάρρηξης Red River ακολουθεί τη διεύθυνση της ζώνης μεταμόρφωσης Ailao Shan-Red River. Από τη μελέτη δορυφορικών εικόνων Landsat και τοπογραφικών χαρτών μεγάλης κλίμακας, προκύπτει ότι το ίχνος του ρήγματος παρουσιάζεται συνεχές και γραμμικό, από την πόλη Midu μέχρι τα πολιτικά σύνορα Yunnan-Βιετνάμ. Μεταξύ των πόλεων Zhelung και Atu, το ρήγμα αναπτύσσεται σε δύο παράλληλους κλάδους, το ρήγμα Mid Valley (MVF) και το ρήγμα Range Front (RaFF) (Allen et al., 1984, Replumaz et al., 2001). Ο κλάδος RaFF ακολουθεί το βορειοανατολικό πρόποδα της οροσειράς Ailao Shan και διαχωρίζει τους υψηλής μεταμόρφωσης γνευσίους από τα

σχιστώδη ιζηματογενή πετρώματα στα βόρεια. Ο κλάδος MVF τέμνει τα ιζηματογενή πετρώματα μερικά χιλιόμετρα βορειότερα από τον κλάδο RaRF.



Σχήμα 9. Το επιφανειακό ίχνος της δεξιόστροφης ζώνης διάρρηξης Red River η οποία δεσπόζει στην επαρχία Yunnan και όπως φαίνεται ταυτίζεται με την ανάπτυξη της ζώνης μεταμόρφωσης Ailao Shan (Replumaz et al., 2001.)

Βορειοδυτικά της πόλης Midu, η ζώνη διάρρηξης εμφανίζεται περισσότερο πολύπλοκη με πλάγια, κανονικά αριστερόστροφα ρήγματα (*left-stepping*) και πολυάριθμες λεκάνες όπως αυτή της λίμνης Er Hai (*pull apart basins*). Το ρήγμα όμως επεκτείνεται νοτιότερα στο Βιετνάμ, όπου νοτιότερα της πόλης Lao Cai, διακλαδίζεται σε δύο διακριτά τμήματα. Βορειότερα του Xiaguan, το ρήγμα Red River αποκτά πιο ΒΔ κατεύθυνση, αποτελείται από διάφορα τμήματα τα οποία χαρακτηρίζονται από κανονική συνιστώσα παρά από συνιστώσα οριζόντιας μετατόπισης. Η εφελκυστική αυτή δομή στις απολήξεις των μεγάλων ρηγμάτων οριζόντιας μετατόπισης είναι χαρακτηριστική. Επίσης σχηματίζονται ενεργά τεκτονικά βυθίσματα που διαμόρφωσαν διάφορες λίμνες. Οι Tarronier et al. (1990) λαμβάνοντας υπόψιν τον προσανατολισμό των κανονικών ρηγμάτων Kung Ming γειτονικά του Red River ως αντιπροσωπευτικά του προσανατολισμού του πεδίου των τάσεων στην περιοχή, θεωρούν επικρατέστερο τον εφελκυσμό Α-Δ που προκαλεί η

δεξιόστροφη κίνηση οριζόντιας μετατόπισης κατά μήκος αυτών των ΒΔ-ΝΑ ρηγμάτων.

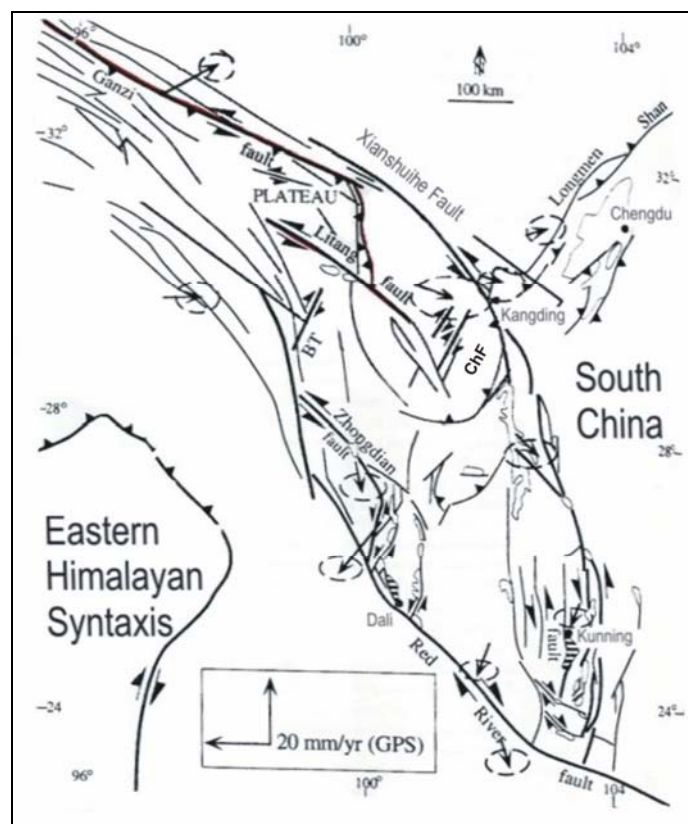
1.4.7 Η Ζώνη Διάρρηξης Ganzi

Σύμφωνα με τους Wang and Burchfiel (2000) η ζώνη διάρρηξης Ganzi έχει βορειοδυτική παράταξη και αποτελείται από ένα βόρειο και ένα νότιο κλάδο, με μερικές μικρές πεπλατυσμένες ρηγματώσεις (*splays*) κοντά στο νοτιοανατολικά άκρα (Σχήμα 10). Ο βόρειος κλάδος διακρίνεται επιφανειακά σε μήκος περισσότερο από 400km, από την περιοχή Sichuan προς το οροπέδιο Qinghai, αλλά ανατολικότερα από τις 95° ο εντοπισμός του γίνεται δυσχερής. Ο νότιος κλάδος εμφανίζεται επιφανειακά για 150km μέσα στην ενότητα Yidun. Η ενεργός δραστηριότητα του ρήγματος αποδεικνύεται από την μετατόπιση κοιτών, από ρηξιγενείς επιφάνειες, μετατοπισμένα αλλουβιακά ρυπίδια, ράχες συμπίεσης (*pressure ridges*), λίμνες (*sag ponds*) και από τη δράση θερμών πηγών κατά μήκος και των δύο κλάδων του ρήγματος. Ο βόρειος κλάδος αποτελείται από δύο παράλληλα ρήγματα τα οποία διακόπτουν και μετατοπίζουν αριστερόστροφα οι κοίτες των ποταμών μέχρι και 10km, ειδικότερα κατά μήκος του νοτίου κλάδου, το οποίο συνοδεύουν σε όλο το μήκος του πολυάριθμες δομές (*shutter ridges* και *fault slivers*). Τα ποτάμια που ρέουν προς την λεκάνη του Ganzi μετατοπίζονται αριστερόστροφα από 2 μέχρι 6km. Από γεωλογικά δεδομένα και οι δύο κλάδοι του ρήγματος φαίνεται να έχουν συνολική αριστερόστροφη μετατόπιση 100km περίπου. Στο σημείο όπου τερματίζεται το ρήγμα Ganzi, υπάρχει μία ζώνη ανάστροφων διαρρήξεων Βορρά-Νότου το οποίο συνδέει τα ρήγματα Ganzi και Litang και είναι Καινοζωικής ηλικίας.

1.4.8 Η Ζώνη Διάρρηξης Litang

Η ζώνη διάρρηξης Litang έχει διεύθυνση βορειοδυτική με μήκος 150km και πλάτος 25 km (Σχήμα 10). Χαρακτηρίζεται από αριστερόστροφη κίνηση οριζόντιας μετατόπισης και μετατοπίζει οριζόντια άλλες τεκτονικές δομές και πλουτωνίτες με Άνω Καινοζωική ηλικία. Μέσα στην ζώνη διάρρηξης υπάρχουν τρεις κλιμακωτές ρομβικού σχήματος λεκάνες μέσα σε Τεταρτογενή ιζήματα. Οι λεκάνες αυτές περικλείονται από ρήγματα βορειοανατολικής και νοτιοδυτικής διεύθυνσης των οποίων ο προσανατολισμός δείχνει ότι σχηματίστηκαν λόγω εφελκυσμού Βορρά-Νότου μέσα στην ήδη υπάρχουσα ζώνη των αριστερόστροφων ρηγμάτων (Wang and Burchfiel, 2000). Σε αντίθεση με το ρήγμα Ganzi ο ρυθμός παραμόρφωσης σε αυτό το

ρήγμα είναι μικρός. Η συνολική μετατόπιση του ρήγματος από το Καινοζωικό μέχρι σήμερα, υπολογίζεται στα 10km.



Σχήμα 10. Τα ρήγματα Ganzi, Litang, Batang (BT) Zhongdian και το ρήγμα Chenzhi (ChF). Τα βέλη συμβολίζουν την οριζόντια κίνησή τους (Burchfiel and Wang, 2002).

1.4.9 Η Ζώνη Διάρρηξης Batang

Στην περιοχή αυτή επίσης συναντώνται ενεργά Άνω Καινοζωικά ρήγματα τα οποία έχουν βορειοανατολική παράταξη. Τα πιο σημαντικά ρήγματα είναι το ρήγμα Batang (**Σχήμα 10**) και το ρήγμα Chenzhi (**Σχήμα 11**). Το ρήγμα Batang έχει βορειοανατολική παράταξη και αποτελείται από ασυνεχή μικρά ρήγματα, καθώς και από αλληλεπικαλυπτόμενα (*overlapping*) τεμάχια τα οποία ανιχνεύονται για 100km στο βορειότερο τμήμα της τεκτονικής ενότητας Zhongza. Το 1989 δύο σεισμοί με μέγεθος ($M=6.7$) έγιναν σε χρονικό διάστημα 17 ημερών, ενώ ακολούθησαν δύο μετασεισμοί με μεγέθη $M=6.2$ και $M=6.3$, αντίστοιχα, που συνδέονται με το συγκεκριμένο ρήγμα. Πλησίον του δυτικού άκρου, το ρήγμα μετατοπίζει δεξιόστροφα τον ποταμό Lanchang περίπου κατά 18km. Το ρήγμα Batang στο ένα

άκρο του συναντά το βορειοδυτικό άκρο του ρήγματος Litang (Wang and Burchfiel, 2000).

1.4.10 Η Ζώνη Διάρρηξης Zhongdian

Στην περιοχή εμφανίζονται και άλλες καινοζωικές ζώνες διάρρηξης της ίδιας γεωμετρίας με τα ρήγματα Ganzi και Litang. Περίπου 30km νοτιοδυτικά από το ρήγμα Ganzi εντοπίζεται το ρήγμα Zhongdian, ένα αριστερόστροφο ρήγμα οριζόντιας μετατόπισης με βορειοδυτική παράταξη (**Σχήμα 10**). Μετατοπίζει αριστερόστροφα τις δομές που διασχίζει αλλά πιθανή είναι και μία παλαιότερη αντίθετη φορά. Εκατέρωθεν του κυρίου ρήγματος αναπτύσσονται παράλληλα μικρότερα ρήγματα με μικρές αριστερόστροφες μετατοπίσεις (<3.0km). Εκτείνεται περίπου 200km νότια του ρήγματος Litang και είναι ορατό για περίπου 120km από τον ποταμό Jinsha, νοτιοανατολικότερα του οποίου υπάρχει το αριστερόστροφο ρήγμα Jianshuan με βόρεια-βορειοανατολική διεύθυνση σχηματίζοντας ένα ανατολικά κυρτό ρήγμα. Μετατοπίζει τις κοίτες των ποταμών περίπου 15km (Wang and Burchfiel, 2000, Burchfiel and Wang, 2002).

1.4.11 Η Ζώνη Διάρρηξης Chenzhi

Η ζώνη διάρρηξης Chenzhi έχει βορειοανατολική διεύθυνση και βρίσκεται ανάμεσα στα ρήγματα Xianshuihe και Litang (**Σχήμα 10**). Συνίσταται από τρεις παράλληλους κλάδους οι οποίοι μετατοπίζουν ισχυρά τον πτυχωμένο Τριαδικό φλύσχη, στον οποίον έχουν διεισδύσει μετατεκτονικοί πλουτωνίτες γρανιτικής σύστασης Α.Τριαδικού-Κ.Ιουρασικού. Το μεσαίο ρήγμα ανιχνεύεται σε μήκος 100km περίπου και είναι σεισμικά ενεργό. Από τη μετατόπιση κοιτών και άλλων γεωλογικών δομών όπως πλουτωνικών επαφών προκύπτει μια δεξιόστροφη κίνηση. Έχουν μετρηθεί μετατοπίσεις πλουτωνικών σωμάτων της τάξης των 3–5km, 14km, 2–3km, οι οποίες όμως δεν θεωρούνται ακριβείς λόγω του ανώμαλου σχήματος των όγκων αυτών. Άλλες μετρήσεις κατά μήκος του ποταμού Yalong ο οποίος τέμνεται από το ρήγμα, δείχνουν μετατοπίσεις της τάξης των 1–5km. Γενικά όμως τα ρήγματα αυτά θεωρούνται ότι αντιπροσωπεύουν μικρές μετατοπίσεις που έχουν παράγει συνολική μετατόπιση 15–20km ή και πιθανότερα λιγότερο κατά το Καινοζωικό (Wang and Burchfiel, 2000).

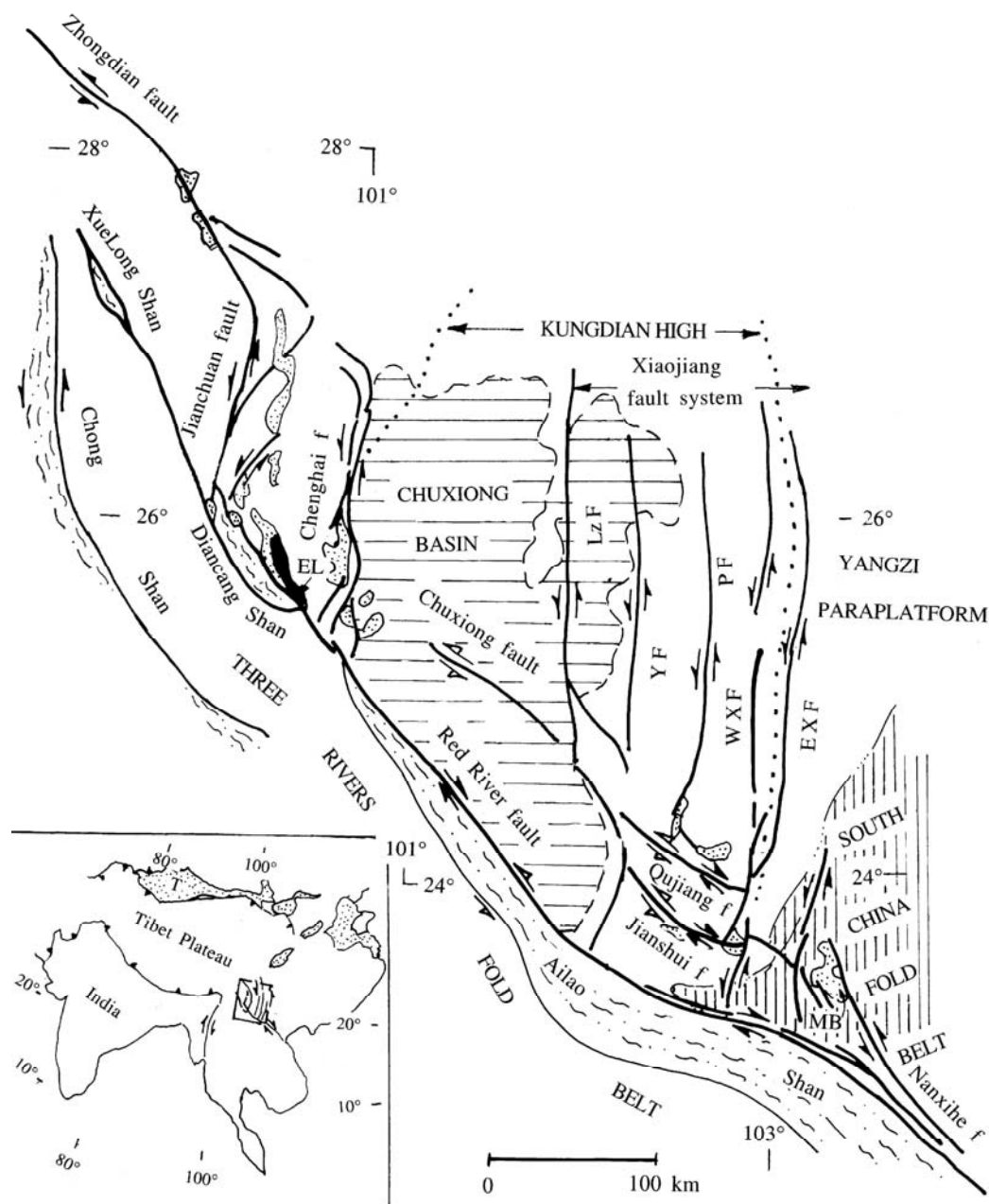
1.4.12 Η Ζώνη Διάρρηξης Jianchuan

Βορειοανατολικά του άκρου του ρήγματος Red River, εντοπίζεται η λεκάνη Jianchuan η οποία οριοθετείται από κανονικά ρήγματα Βορρά-Νότου και ρήγματα οριζόντιας μετατόπισης, άλλα αριστερόστροφα οριζόντιας μετατόπισης με βορειοανατολική παράταξη και άλλα δεξιόστροφα με βορειοδυτική παράταξη τα οποία τέμνουν τη δυτική επαρχία Yunnan σε μικρότερα τεμάχια (**Σχήμα 11**). Γεωμορφολογικά παρουσιάζονται ως επιμήκεις λεκάνες σε διεύθυνση Βορρά-Νότου, που εκτείνονται σε μήκος από 1km μέχρι 70km. Τα όρια των λεκανών σχηματίζονται από νέα ρήγματα με απότομα πρανή και καλά προσδιορισμένες τριγωνικές επιφάνειες (*facets*). Παρά τις πολύ καλές εμφανίσεις των ρηγμάτων απουσιάζουν μηχανισμοί γένεσης σεισμών που να τους αντιστοιχούν. Στα ανατολικά της λεκάνης Jianchuan υπάρχει ένα κανονικό ρήγμα με δεξιόστροφη συνιστώσα και με μεγάλη γωνία κλίσης (65°) προς τα δυτικά το οποίο από την κατανομή σεισμών μεσαίου μεγέθους φαίνεται ότι με το βάθος αποκτά λοιστρωτή γεωμετρία (Wu and Wang, 1988). Κατά μήκος της επιφάνειας ολίσθησης υπάρχει υλικό πλήρωσης (*gouge, breccia*). Στη δυτική πλευρά πιστεύεται ότι υπάρχουν ρήγματα χωρίς ορατό επιφανειακό ίχνος. Στο βόρειο όριο υπάρχει ένα αριστερόστροφο ρήγμα οριζόντιας μετατόπισης με βόρεια-βορειοανατολική διεύθυνση προς τη λεκάνη Lijiang η οποία μετατοπίζεται αριστερόστροφα. Οι κινήσεις που πραγματοποιούνται κατά μήκος αυτού του ρήγματος οριζόντιας μετατόπισης έχουν ως συνέπεια τη διάνοιξη της λεκάνης. Η δομή αυτών των ρηγμάτων δείχνει ότι στη δυτική επαρχία Yunnan κυριαρχεί συμπίεση με διεύθυνση Βορρά-Νότου και εφελκυσμός σε διεύθυνση Ανατολής-Δύσης, σχηματίζοντας κανονικά ρήγματα και ρήγματα οριζόντιας μετατόπισης (Wu and Wang, 1988).

1.4.13 Οι Ζώνες Διάρρηξης Βόρεια του Ρήγματος Red River

Οι Burchfiel and Wang (2002) μελέτησαν την περιοχή βόρεια του ρήγματος Red River στην επαρχία Yunnan και επισημαίνουν ότι από την έναρξη του Καινοζωικού κυρίαρχη κίνηση είναι η αριστερόστροφη διάτμηση. Στην περιοχή συναντώνται τα βορειοδυτικής παράταξης δεξιόστροφα ρήγματα οριζόντιας μετατόπισης Qujiang, Jianshui, Chuxiong, ενώ δυτικά του Xiaojiang εκτείνονται αριστερόστροφα ρήγματα οριζόντιας μετατόπισης διεύθυνσης Βορρά-Νότου. Οι δομές αυτές οι οποίες είναι σεισμικά ενεργές διακρίνονται στον τεκτονικό χάρτη του **Σχήματος 11**. Το ρήγμα Qujiang εκτείνεται περίπου 70km βόρεια της ζώνης Red

River, και το επιφανειακό του ίχνος το οποίο εντοπίζεται σε μήκος 120km στα υψώματα της περιοχής Kangding, είναι κοίλο προς το Βορρά.



Σχήμα 11. Τεκτονικός χάρτης που απεικονίζει τα μεγαλύτερα δομικά χαρακτηριστικά αλλά και παλαιογεωγραφικές ομάδες της επαρχίας Yunnan βόρεια του ρήγματος Red River. Τα λευκά βέλη κατά μήκος των ρηγμάτων Jianshui, Qujiang και Chuxiong δηλώνουν τον παλαιότερο αριστερόστροφο χαρακτήρα τους και τα μαύρα βέλη το σημερινό δεξιόστροφο χαρακτήρα (EL: η λίμνη Erhai, MB: η λεκάνη Menzi, EXF: ανατολικό τμήμα του ρήγματος Xiaojiang, LzF: ρήγμα Luzhijiang, PF: ρήγμα Puduhe, WXF: δυτικό τμήμα του ρήγματος Xiaojiang, YF: ρήγμα Yime) (Burchfiel and Wang, 2002).

Η ενεργή συμπεριφορά του υποδηλώνεται μέσω των ρηξιγενών επιφανειών, των μετατοπίσεων Ολοκαινικής ηλικίας αλλά και της σεισμικής δραστηριότητας (Wang et al., 1998). Ωστόσο πριν από το Πλειόκαινο πιθανότατα να δραστηριοποιήθηκε ως αριστερόστροφο ρήγμα οριζόντιας μετατόπισης όπως και τα γειτονικά του ρήγματα Jianshui και Chuxiong. Από ιστορικούς σεισμούς προκύπτει ότι η περιοχή γύρω από την επαφή των ρηγμάτων Qujiang, την λεκάνη Kun Ming και το ρήγμα Xiaojiang είναι διαρκώς ενεργή με τον άξονα της συμπίεστικής τάσης όπως προκύπτει από τους μηχανισμούς γένεσης να έχει διεύθυνση ΒΒΔ και ο εφελκυσμός σχεδόν Ανατολή-Δύση (Holt et al., 1991). Το ρήγμα Jianshui βρίσκεται σε απόσταση 50km από το Red River και παρουσιάζει έντονη κυρτότητα προς το Νότο η οποία αποδίδεται στην αριστερόστροφη διάτμηση πάνω στο Xiaojiang. Η δεξιόστροφη του δραστηριότητα επισημαίνεται από την ύπαρξη ποικίλων γεωλογικών δομών, όπως μετατοπίσεις πτυχών, εφυπτεύσεων και γεωμορφολογικών στοιχείων, όπως εκτροπές ποταμών. Η μετατόπιση κατά μήκος του ρήγματος κυμαίνεται μεταξύ 2–6km από το Τεταρτογενές μέχρι σήμερα (Wang et al., 1998).

Το ρήγμα Chuxiong το οποίο διακρίνεται στο **Σχήμα 11** εκτείνεται παράλληλα προς το ρήγμα Red River στην προέκταση του Qujiang, με το οποίο όμως δεν φαίνεται να συνδέονται. Σύμφωνα με τους Leloup et al. (1995) το ρήγμα εκδηλώθηκε με μία αριστερόστροφη οριζόντια μετατόπιση πριν το Τεταρτογενές και πιθανόν με μία σύγχρονη κίνηση αντίθετης φοράς η οποία όμως δεν επιβεβαιώνεται από γεωλογικές παρατηρήσεις.

1.4.14 Οι Ζώνες Διάρρηξης Νότια του Ρήγματος Red River

Νότια της μεγάλης τεκτονικής ζώνης του Red River και ανατολικά του άξονα των Ιμαλαΐων, η τεκτονική είναι επίσης πολύπλοκη με την Ινδο-Ευρασιατική σύγκρουση από διεύθυνση ανατολική-δυτική να εκτείνεται τώρα σε διεύθυνση Βορρά-Νότου. Συναντώνται μεγάλα ρήγματα με ΒΑ παράταξη τα οποία ισαπέχουν μεταξύ τους όπως τα ρήγματα Ruili-Longling, Wanding, Nanting, Menglian, Lancang και Daluo-Jinghong τα οποία συνοδεύονται από τις αντίστοιχες ταφρογενείς λεκάνες (**Σχήμα 12**). Στο σύνολό τους δραστηριοποιούνται ως ρήγματα οριζόντιας μετατόπισης με αριστερόστροφο χαρακτήρα (Han et al., 2004). Το ρήγμα Lancang έχει προταθεί ότι διαπερνά την ασυνέχεια Mohorovicic.

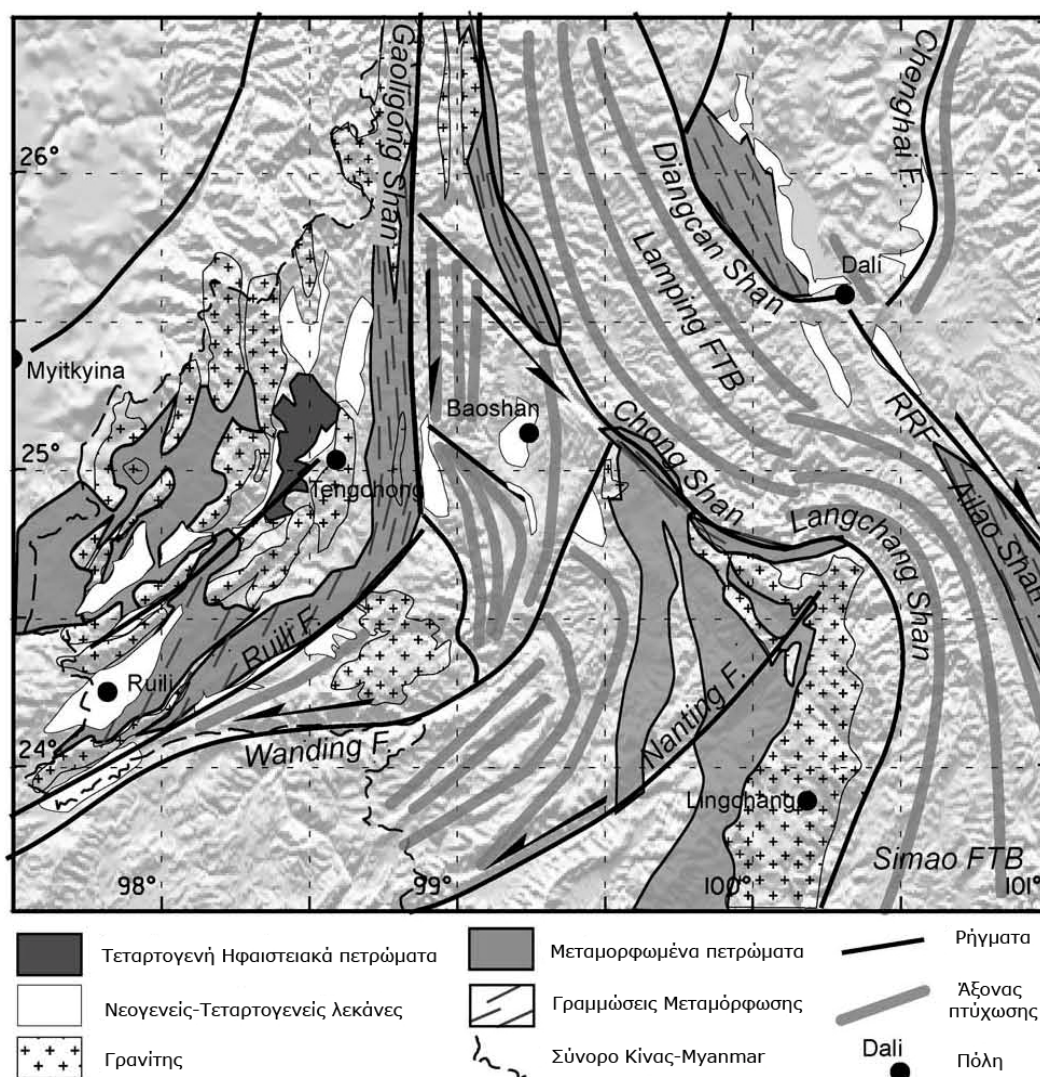
Η ζώνη Ruili-Longling (**Σχήμα 12**) αντιμετωπίζεται ως όλκιμη διατμητική ζώνη με βορειοανατολική ανάπτυξη η οποία κλίνει προς τα βορειοδυτικά και

θεωρείται σεισμικά ενεργή δεδομένου ότι συνδέεται με τη γένεση μιας σεισμικής ακολουθίας που εξετάζεται στην παρούσα μελέτη (Bai and Meju, 2003). Οι Wang and Burchfiel (1997) δηλώνουν μια αριστερόστροφη ενεργή σεισμική δραστηριότητα κατά μήκος των ρηγμάτων αυτών. Ωστόσο η γεωμετρία της ζώνης και των τάφρων προτείνουν εφελκυσμό ΒΔ-ΝΑ διεύθυνσης με το ποσοστό της διάτμησης να αυξάνεται από τα ανατολικά προς τα δυτικά. Στην άμεση γειτνίαση με το ρήγμα Longling, το ρήγμα Ruili καμπυλώνεται προς το Βορρά και φαίνεται να ενώνεται με τη ζώνη διάρρηξης Gaoligong. Νότια του Longling εμφανίζονται γρανιτικές διεισδύσεις οι οποίες συνδέονται επίσης με ΒΔ-ΝΑ εφελκυσμό. Συμπεριφέρεται ως μια όλκιμη ζώνη κατά μήκος της οποίας το υπόβαθρο εφίππευει από τα βορειοδυτικά στα νοτιοανατολικά (Bai and Meju 2003). Σύμφωνα με τους ίδιους η ζώνη αυτή διάρρηξης διατηρεί μία βορειοανατολική παράταξη σε μήκος 96km βόρεια από το Ruili και ενοποιείται με ένα ρήγμα Βορρά-Νότου (ρήγμα Damengliu).

Το ρήγμα Nanting (**Σχήμα 12**) εκτείνεται από την πτύχωση Laming μέχρι την Βιρμανία όπου τέμνεται από το ρήγμα Sagaing. Το ίχνος του διακρίνεται από τη μετατόπιση γεωμορφολογικών δομών όπως ποτάμιας κοίτες και αλλούβια ριπίδια (Wang and Burchfiel, 1997), καθώς και από τη σεισμικότητα που εμφανίζεται με μηχανισμούς γένεσης που δηλώνουν αριστερόστροφη οριζόντια μετατόπιση με ΒΑ παράταξη (Holt et al., 1991). Ωστόσο δεν υπάρχουν σαφείς δείκτες μετατόπισης στο κεντρικό τμήμα του ρήγματος ενώ παρουσιάζεται και μία σημαντική κανονική συνιστώσα η οποία αποδίδεται στη δεξιόστροφη περιστροφή των τεκτονικών τεμαχίων (Socquet and Pubbelier, 2005)

Το ρήγμα Wanding διατρέχει σε διεύθυνση Ανατολή-Δύση τα δυτικά πολιτικά σύνορα της Κίνας με τη Βιρμανία ενώ στη συνέχεια καμπυλώνεται προς τα βορειοανατολικά. Όπως διακρίνεται και στο **Σχήμα 12** το ρήγμα δεν επεκτείνεται πιο βόρεια από την οροσειρά Chong-Lanchang Shan. Κατά μήκος του ίχνους του ρήγματος εντοπίζονται θερμές πηγές αλλά και εφελκυστικές λεκάνες, όπως η λεκάνη Kejie, στην οποία δεσπόζουν διεφελκυστικές αριστερόστροφες διαρρήξεις ΒΑ παράταξης και οι συζυγείς τους δεξιόστροφες ΒΔ παράταξης σε συμφωνία με την αντίληψη ότι το ρήγμα δεν είναι τυπικό οριζόντιας μετατόπισης αλλά συνδέεται με διεφελκυσμό (*transtensive*). Ο αριστερόστροφος χαρακτήρας του ρήγματος φαίνεται ότι ακολουθεί μια δεξιόστροφη συμπεριφορά (Lacassin et al., 1998). Η γένεση ενός ιστορικού σεισμού συνδέεται με τη δομή αυτή ο οποίος συνδέεται με μια αριστερόστροφη οριζόντια μετατόπιση μέχρι και 10 km μήκος (Wang and Burchfiel,

1997). Η ακριβής σχέση μεταξύ της ζώνης αυτής και του ρήγματος Ruili δεν είναι σαφής και είναι αβέβαιο αν αυτά τα δύο συνενώνονται κάτω από τη λεκάνη Ruili ή αν το ρήγμα Longling τέμνει το ρήγμα Ruili καθώς έχει βρεθεί η παρουσία ενός ανάστροφου ρήγματος στο σημείο τομής τους.



Σχήμα 12. Απλουστευμένος γεωλογικός χάρτης της δυτικής επαρχίας Yunnan στον οποίο χαρτογραφούνται οι σημαντικότερες τεκτονικές δομές όπως τα ρήγματα Ruili, Wanting και Nanting (Socquet and Pubellier, 2005).

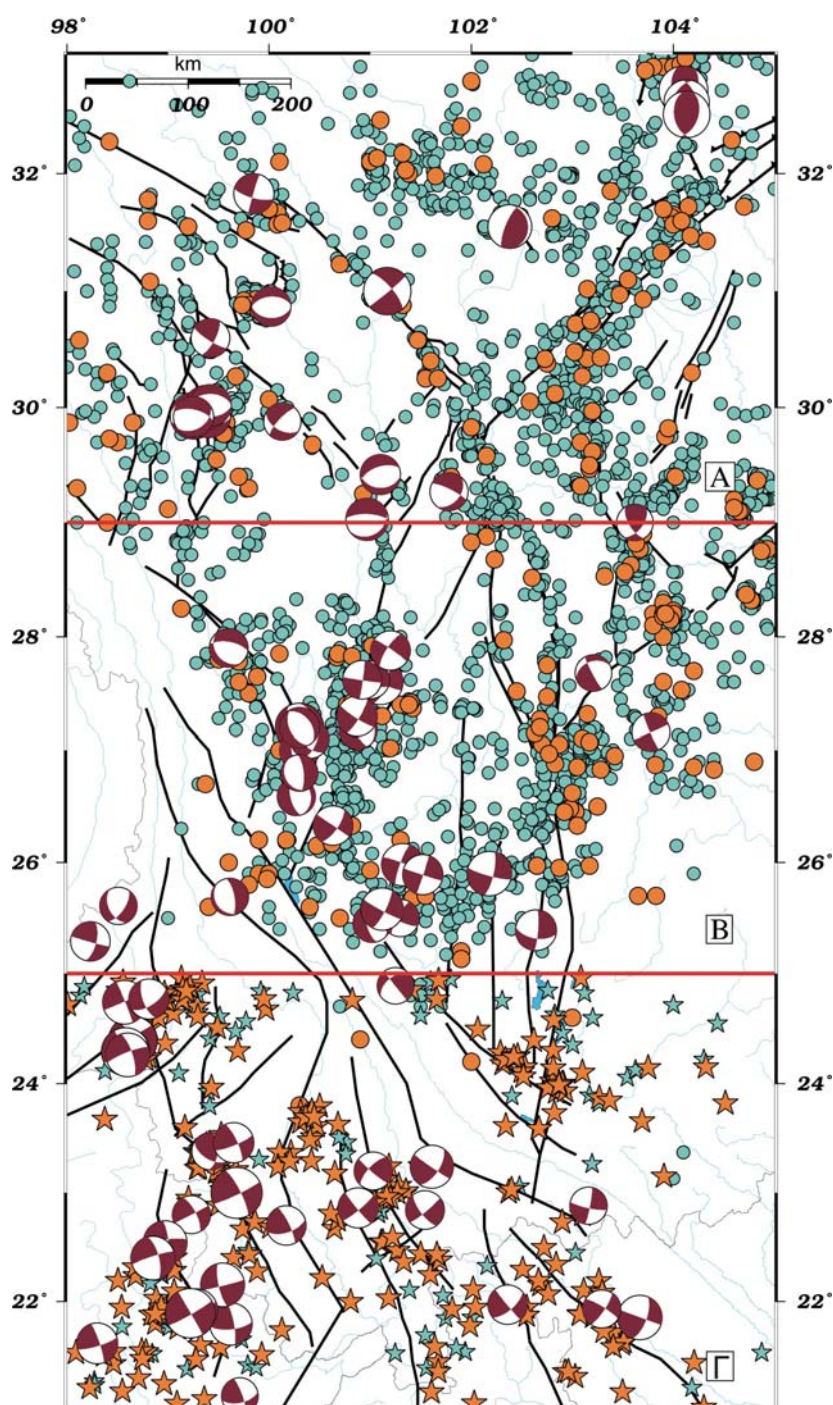
1.5 Σεισμικότητα της Περιοχής Μελέτης

Όπως προαναφέρθηκε, στην περιοχή μελέτης εκδηλώνεται η ισχυρότερη ενδοπλακική σεισμικότητα στην επικράτεια της Κίνας με συχνούς και ισχυρούς σεισμούς. Ισχυροί σεισμοί αναφέρονται τόσο στους ιστορικούς χρόνους όσο και κατά την ενόργανη περίοδο. Σύμφωνα με διαθέσιμα στοιχεία του *Prediction Department of*

China Earthquake Administration για το χρονικό διάστημα 26BC με 2001AD στις παραπάνω επαρχίες έγιναν 639 ισχυροί σεισμοί με μέγεθος $M \geq 5.0$, από τους οποίους οι 124 έχουν μεγέθη τα οποία κυμαίνονται από $M=6.0$ μέχρι $M=6.9$, οι 39 έχουν μεγέθη από $M=7.0$ μέχρι $M=7.9$ και ένας έχει μέγεθος $M=8.0$ (Han and Jiang, 2004). Σύμφωνα με πολλούς ερευνητές η σεισμικότητα στην Κίνα ακολουθεί χρονική και χωρική μεταβολή με τους σεισμούς να γίνονται ομαδοποιημένα κατά χρονικές περιόδους με αποτέλεσμα οι περίοδοι σεισμικής ησυχίας να εναλλάσσονται με περιόδους έντονης σεισμικής δραστηριότητας.

Στο **Σχήμα 13** παρουσιάζεται ένας χάρτης σεισμικότητας με σεισμούς που έχουν μέγεθος $M \geq 3.0$ που έγιναν στην περιοχή μελέτης από το 1970 μέχρι σήμερα. Πληροφορίες για τα επίκεντρα των σεισμών έχουν ληφθεί από το τοπικό δίκτυο του Seismological Bureau of China το οποίο είναι εγκατεστημένο στην επαρχία Sichuan όσον αφορά την βόρεια και τη κεντρική περιοχή μελέτης (περιοχή Α, περιοχή Β) ενώ για τη νότια περιοχή μελέτης (περιοχή Γ) τα επίκεντρα προέρχονται από το International Seismological Centre (ISC). Πληροφορίες για τους μηχανισμούς γένεσης των σεισμών οι οποίοι προέρχονται από τον κατάλογο του Harvard δίνονται στον **Πίνακα 1**. Η κατανομή των επικέντρων αποδεικνύει ότι το μεγαλύτερο πλήθος των σεισμών κατανέμεται κατά μήκος των ενεργών ζωνών διάρρηξης που περιγράφηκαν παραπάνω (Zheng et al., 1987) και κυρίως κατά μήκος αυτών οι οποίες οριοθετούν τη μικροπλάκα περιμετρικά με συχνότερη τη σεισμική δράση να κυριαρχεί στα ανατολικά περιθώρια. Επιπλέον, μικρότερου μεγέθους σεισμοί γίνονται και στο εσωτερικό των επαρχιών όσο και στα δυτικά περιθώρια.

Σε ότι αφορά τη σεισμικότητα στο εσωτερικό της ρομβικής περιοχής τα επίκεντρα κατανέμονται περισσότερο διεσπαρμένα, αλλά ωστόσο σχηματίζονται σημαντικές ενεργές σεισμικές ζώνες. Ισχυρότερη και πιο συχνή σεισμικότητα για παράδειγμα εκδηλώνεται στα ρήγματα Xianshuihe και Xiaojiang ανατολικά, ενώ στα δυτικά οι σεισμοί στη πλειοψηφία τους είναι μεσαίου μεγέθους. Οι περισσότεροι σεισμοί από αυτούς που μελετώνται ταυτίζονται σαφώς με συγκεκριμένα ενεργά ρήγματα, αλλά σε μερικές περιπτώσεις όπως οι σεισμοί του Diexi, το 1933 του Yongshan το 1974 και του Batang το 1989, η σύνδεσή τους με το ρήγμα που τους προκάλεσε είναι προβληματική (Han and Jiang, 2004).



Σχήμα 13. Χωρική κατανομή της σεισμικότητας για σεισμούς με $3.0 \leq M < 4.0$ (γαλάζιο χρώμα) και με μέγεθος $4.0 \leq M < 5.0$ (πορτοκαλί χρώμα) που έγιναν από το 1970 μέχρι σήμερα έως το 2005 στην βόρεια (Α), κεντρική (Β) και νότια (Γ) περιοχή μελέτης. Οι κύκλοι αναφέρονται στα επίκεντρα του τοπικού δικτύου ενώ οι ιαστερίσκοι σε σεισμούς του κατάλογου του ISC (International Seismological Centre). Οι μηχανισμοί γένεσης ισχυρών ($M > 5.0$) σεισμών οι οποίοι έγιναν στην περιοχή μελέτης από το 1970 παρουσιάζονται με τη μέθοδο της ισεμβαδικής προβολής του κάτω ημισφαιρίου.

Τα εστιακά βάθη των σεισμών φαίνεται να είναι μικρότερα από 20km ενώ παρατηρείται μία μείωση του μέσου εστιακού βάθους από τα βορειοδυτικά προς τα νοτιοανατολικά. Ενώ στα δυτικά της τάφρου το πάχος του φλοιού είναι μεγάλο, από τα δυτικά προς τα ανατολικά λεπταίνει σταδιακά όσο μεγαλώνει η απόσταση από τα περιθώρια του Θιβέτ με αποτέλεσμα στο κέντρο και στα δυτικά το πάχος του φλοιού να είναι μικρό. Οι Qin et al. (2001) στην περιοχή αυτή εντόπισαν 13 σειμογενείς ζώνες οι οποίες εμφανίζουν μεγάλη πιθανότητα να δώσουν ισχυρό σεισμό με μέγεθος $M > 6.0$ κατά το χρονικό διάστημα μετά το 1996.

Το μεγαλύτερο πλήθος ιστορικών σεισμών αφορά το ρήγμα Xianshuihe, τα σειμοτεκτονικά χαρακτηριστικά του οποίου παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Οι περισσότεροι από τους σεισμούς αυτούς είναι συγκεντρωμένοι στην περιοχή όπου συναντώνται το ρήγμα Ganzī με το Xianshuihe όπου εκεί φαίνεται ότι συγκεντρώνεται το μεγαλύτερο ποσοστό της παραμόρφωσης. Από το 1725 έχουν γίνει 13 σεισμοί με μεγέθη $M \geq 6.6$ κατά μήκος της ζώνης και με τον ισχυρότερο σεισμό να έχει μέγεθος $M = 7.9$. Ισχυροί σεισμοί κατά μήκος του ρήγματος έγιναν το 1816 με μέγεθος $M = 7.5$, το 1893 με $M = 7.0$, το 1904 με $M = 7.0$, το 1923 με $M = 7.3$, το 1973 με $M = 7.6$ και το 1981 με $M = 7.0$. Νοτιότερα στα ρήγματα Anninghe και Zemuhe, ο πιο πρόσφατος σεισμός ο οποίος και μελετάται έγινε το 1952, ενώ κατά το ιστορικό παρελθόν σύμφωνα με τους Wen et al. (2001) η περιοχή έχει επανειλημμένα πληγεί από ισχυρούς σεισμούς. Το τέμαχος Shimian έχει προκαλέσει σεισμούς με μεγέθη $M = 7.5$ το 1327, and $M = 7.8$ το 1786. Νοτιότερα, το 1480 έγινε σεισμός με $M = 7.5$ ο οποίος αποδίδεται στο τέμαχος Tuowu, ενώ επακολούθησαν σεισμοί με μέγεθος $M = 6.8$, $M = 7.5$ και $M = 6.8$ το 1489, το 1536 και το 1952, αντίστοιχα, στο τμήμα Mianning—Xichang. Το 1850 επίσης έγινε ισχυρός σεισμός με πιθανό μέγεθος $M \geq 7.5$ ο οποίος αποδίδεται στο τέμαχος Xichang—Puge. Σύμφωνα με τους Yi et al. (2004), το τέμαχος Mianning—Xichang το οποίο ανήκει στο ρήγμα Anninghe είναι πιθανό να δώσει κάποιον ισχυρό σεισμό στο μέλλον. Η προτεινόμενη περίοδος επανάληψης για τον επόμενο χαρακτηριστικό σεισμό για το τέμαχος αυτό κυμαίνεται από 55 με 67 χρόνια από τον τελευταίο, με εκτιμώμενο μέγεθος 7.0 με 7.5.

Το ρήγμα Xiaojiang, φαίνεται ότι διέρχεται μία περίοδο σεισμικής ησυχίας με εξαίρεση τον πρόσφατο σεισμό του Dongchuan το 1966 με μέγεθος $M = 6.5$. Ο ιστορικά μεγαλύτερος σεισμός που συνδέεται αποκλειστικά με το ρήγμα αυτό τοποθετείται το 1833 με $M = 8.0$. Σύμφωνα με τους Shen et al. (2003), ο πιο παλιός σεισμός που αναφέρεται στην περιοχή είναι ο σεισμός του Yiliang που έγινε στις 14 Ιανουαρίου,

1500μΧ, με μέγεθος πιθανόν μεγαλύτερο από 7.0, το οποίο έχει εξαχθεί από τον μέγεθος των επιφανειακών διαρρήξεων αφού εκδηλώθηκε επιφανειακή διάρρηξη μήκους 81km. Από τότε αναφέρονται 55 σεισμοί με $M > 4.7$, από τους οποίους οι 11 έχουν μέγεθος $M > 6.0$, οι τρεις μεγαλύτερο από 7.0 και ένας σεισμός ίσο με 8.0. Τέσσερις ιστορικές επιφανειακές διαρρήξεις έχουν εντοπιστεί κατά μήκος του Xiaojiang. Το 1713 έγινε ο σεισμός του Xundian με $M = 7.0$ και επίκεντρο στο ενδιάμεσο τμήμα του ανατολικού κλάδου του ρήγματος Xiaojiang. Λόγω του σεισμού αυτού εκδηλώθηκε επιφανειακή διάρρηξη μήκους 25km η οποία εκτείνεται από τη λεκάνη Xundian νοτιοανατολικά της λεκάνης Gongshan. Ωστόσο υπάρχουν πληροφορίες και για άλλους καταστροφικούς σεισμούς οι οποίοι έγιναν το 1515μΧ στις νότιες απολήξεις της ζώνης. Η οριζόντια σεισμική μετατόπιση είναι 1.2–3.5m και η κατακόρυφη λιγότερο από 0.5m. Το 1733 ακολούθησε ο σεισμός του Dongchuan, με $M = 7.8$. Η επιφανειακή διάρρηξη που προκλήθηκε από το σεισμό του 1733, έλαβε χώρα κατά μήκος του βόρειου τεμάχους του ανατολικού κλάδου του Xiaojiang με μήκος περίπου 82km. Το 1833 έγινε ο σεισμός του Songming με μέγεθος $M = 8.0$. Κατά μήκος του δυτικού κλάδου του Xiaojiang εντοπίζεται μια επιμήκης ζώνη διάρρηξης μήκους 126km που αντιστοιχεί στο σεισμό αυτό. Επίσης έχουν διερευνηθεί περισσότεροι από 15 παλαιοσεισμοί από διάφορες επιστημονικές ομάδες και η περίοδος επανάληψης ισχυρών σεισμών με $M > 7.0$ από τα υπάρχοντα δεδομένα φαίνεται να είναι 2000–3000 χρόνια (Shen et al., 2003).

Ζώνες στις οποίες η σεισμική δραστηριότητα δεν είναι τόσο έκδηλη είναι οι ζώνες διάρρηξης Red River και Longmenshan. Στη ζώνη Red River η εικόνα που παρουσιάζει η σεισμικότητα είναι αρκετά διαφορετική. Από το 886μΧ, όπως προκύπτει από ιστορικά στοιχεία, έχουν γίνει 202 σεισμοί με μεγέθη $M > 4.0$ από τους οποίους οι 20 έχουν μέγεθος από $M = 6.0$ μέχρι $M = 6.9$, και οι τρεις με $M \geq 7.0$. Το μεσοδιάστημα ανάμεσα σε σεισμούς ενδιαμέσου μεγέθους, $5.0 \leq M \leq 6.0$, εκτιμάται ότι ανέρχεται από 10 έτη μέχρι και αρκετές δεκαετίες. Ωστόσο υπάρχει απουσία ιστορικών δεδομένων τα οποία να συσχετίζουν ισχυρούς σεισμούς με το συγκεκριμένο ρήγμα νοτιότερα από τις 23°N όπως εύκολα διακρίνεται σε ένα χάρτη σεισμικότητας και όπως επάγεται από ιστορικά δεδομένα και σεισμικές καταγραφές που δείχνουν λίγους και μικρούς σεισμούς (Tappanier and Molnar 1977). Πιθανόν το ρήγμα στη περιοχή αυτή να αποτελεί σεισμικό κενό, γεγονός που καθιστά αυξημένη την πιθανότητα γένεσης μελλοντικού ισχυρού σεισμού ή το ρήγμα να ολισθαίνει ασεισμικά. Ωστόσο υπάρχουν γεωλογικές παρατηρήσεις όπως ίχνη ρηξιγενών

επιφανειών και μετατοπίσεις στην κοίτη ποταμών που αποδίδονται σε παλαιότερους ισχυρούς σεισμούς οι οποίοι έγιναν αλληπάλληλα στο Πλειστόκαινο. Συνεπώς οι ισχυροί σεισμοί ($M \approx 8$) εμφανίζουν περίοδο επανάληψης της τάξης των 1000–2000 χρόνων (Replumaz et al, 2001). Νότια της πόλης Midu παρατηρείται σεισμική ησυχία τουλάχιστον τα τελευταία 300 έτη, σε αντίθεση με το βορειοδυτικότερο τμήμαχος βόρεια του Xiaguan, που είναι έντονα τμηματοποιημένο, παρουσιάζει αξιοσημείωτη σεισμική δραστηριότητα. Σύμφωνα με τους Zhao et al. (1993), το ενεργό τμήμαχος το οποίο προέκυψε από την έρευνά τους, αφορά ένα δεξιόστροφο ρήγμα οριζόντιας μετατόπισης μήκους 268km αποτέλεσμα το οποίο συμπίπτει με τις παρατηρήσεις υπαίθρου.

Η ζώνη Longmenshan εμφανίζεται σεισμικά αδρανής εκτός από το κεντρικό και νοτιοδυτικό τμήμα όπου έχουν γίνει τρεις σεισμοί με μέγεθος $M > 6.0$ όπως ο σεισμός του Wenchuan το 1657 με μέγεθος $M = 6.5$ και ο σεισμός του Dayi το 1970 με μέγεθος $M = 6.2$ ενώ αρκετοί έχουν μεγέθη $M = 4-5.5$. Συνεπώς το σύνολο σχεδόν των καταγεγραμμένων σεισμών είναι μικρότεροι από $M < 5.0$. Η κατανομή των επικέντρων σε ένα χάρτη σεισμικότητας στο δυτικό όριο της λεκάνης του Sichuan κατά μήκος του ρήγματος Longmenshan φαίνεται να εκτείνεται από τις 30° κοντά στη πόλη Kangding, μέχρι τις 33°, νότια της πόλης Pao Chi.

Σύμφωνα με τους Zhao et al., 1993, το ενεργό τμήμαχος στο ρήγμα Jianchuan-Lijiang βρίσκεται σε μια κοινή ζώνη επαφής του ρήγματος Jianchuan-Lijiang και του ρήγματος Reyuan-Hechin με μήκος 48km, πλάτος 20km, και γωνία κλίσης 90°, που φτάνει σε βάθος 11,6km, με παράταξη 50°ΒΑ και το οποίο χαρακτηρίζεται από δεξιόστροφη οριζόντια μετατόπιση. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι υπάρχουν δραστικές αλλαγές στην περιοχή γύρω από το ρήγμα Jianchuan-Lijiang. Νότια του ρήγματος Red River συναντάται η σεισμική ζώνη Tengchong και Longling όπου έγινε και η ακολουθία του 1976, καθώς και η ζώνη Lancang-Gengma στην οποία αναφέρονται ισχυροί σεισμοί από το 1950, μέχρι την ακολουθία του 1988.

Συμπερασματικά προκύπτει ότι ολόκληρη η περιοχή παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον όσον αφορά τη σεισμολογική έρευνα αλλά και τους στόχους της παρούσας μελέτης και αυτό γιατί πλήττεται από ισχυρή και αξιοσημείωτη σεισμικότητα η οποία πιθανότατα αλληλεπιδρά στον χώρο και τον χρόνο. Η αναλυτική εξέταση των τεκτονικών ιδιοτήτων των παραπάνω ρηγμάτων διατέλεσε το πρωταρχικό αλλά και ουσιώδες κεφάλαιο προκειμένου να εφαρμοστεί οποιοδήποτε μοντέλο τάσεων.

Κεφάλαιο 2

Μεθοδολογία Υπολογισμού της Μεταβολής των Τάσεων Coulomb

2.1 Εισαγωγή

Η μεθοδολογία η οποία υιοθετήθηκε στην παρούσα διατριβή προτάθηκε αρχικά από τους Deng and Sykes (1997) προκειμένου να εκτιμηθεί από τους ερευνητές η μεταβολή του πεδίου των τάσεων που προκάλεσε η εκδήλωση ισχυρών σεισμών με μέγεθος $M \geq 6.0$, στην ευρύτερη περιοχή του ρήγματος του Αγίου Ανδρέα στη Νότια Καλιφόρνια. Με την εφαρμογή της μεθόδου επιδιώκεται η συσχέτιση μεταξύ των μεταβολών των τάσεων Coulomb και της γένεσης ισχυρών σεισμών. Οι μεταβολές αυτές είτε επιταχύνουν την εκδήλωση επερχόμενων σεισμών είτε την αναχαιτίζουν. Εξαρτώνται από τη συνεχή φόρτιση στις σημαντικότερες ζώνες διάρρηξης μιας περιοχής και από τη σεισμική ολίσθηση κατά τη γένεση των ισχυρότερων σεισμών. Ο λόγος για τον οποίο χρησιμοποιούνται οι μεταβολές των τάσεων και όχι οι απόλυτες τιμές τους οφείλεται στο ότι συχνά οι απόλυτες τιμές της τάσης δεν είναι γνωστές αλλά είναι και ιδιαίτερα δύσκολο να υπολογιστούν, ενώ αντίθετα οι μεταβολές τους μπορούν να υπολογιστούν πολύ πιο εύκολα αν είναι γνωστή η γεωμετρία και οι ιδιότητες της ολίσθησης. Τα ρήγματα δεν αποτελούν μεμονωμένα από το περιβάλλον συστήματα, αντίθετα στη φύση εμφανίζονται συνήθως τμηματοποιημένα και όχι συνεχή σε όλο τους το μήκος και σε άμεση γειτνίαση με άλλες ενεργές δομές, με αποτέλεσμα την ισχυρή ή ασθενή, άμεση ή έμμεση αλληλεπίδραση μεταξύ τους. Η μεταβολή των τάσεων σε μία πολύπλοκη τεκτονικά περιοχή καθίσταται σημαντική όσον αφορά τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών της σεισμικότητας της ευρύτερης περιοχής και την εκτίμηση της σεισμικής επικινδυνότητας. Επίσης είναι δυνατή η μελέτη του σεισμικού κύκλου της περιοχής αφού θεωρείται ότι κατά τη γένεση ενός μεγάλου σεισμού η περιοχή αποφορτίζεται ολοκληρωτικά, ενώ μετά το σεισμό συσσωρεύεται παραμόρφωση εκ νέου, εξαρτώμενη από τον απαιτούμενο χρόνο ανάκτησης των τάσεων.

Στην περιοχή μελέτης έχει πραγματοποιηθεί προηγούμενη έρευνα από τους Papadimitriou et al. (2004) η οποία όμως περιορίζεται στην εξέλιξη των τάσεων κατά μήκος του ρήγματος Xianshuihe, ωστόσο τα αποτελέσματα τους έρχονται σε

συμφωνία με αυτά που προέκυψαν από την παρούσα διατριβή. Επίσης υπολογισμοί των μεταβολών των τάσεων έχουν επιχειρηθεί από τους Zhao et al. (1999), οι οποίοι υπολόγισαν το πεδίο των τάσεων πριν από τη γένεση του σεισμού του Lijiang ο οποίος έγινε το 1966 και είχε μέγεθος $M=6.2$ και προτείνουν ότι η φόρτιση των τάσεων από το 1988 μέχρι το 1991 προκάλεσαν αύξηση και επομένως επιτάχυνση του σεισμού. Οι Chen et al. (2004) επιχείρησαν την κατασκευή εξελικτικού μοντέλου τάσεων χρησιμοποιώντας διαφορετική μεθοδολογία για τις δύο επαρχίες Sichuan και Yunnan για το χρονικό διάστημα 1976 με 2003 και καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι υπάρχει ισχυρή αλληλεπίδραση μεταξύ των ισχυρών σεισμών η οποία ευνοεί τη γένεση και την επιτάχυνσή του χρόνου γένεσής τους.

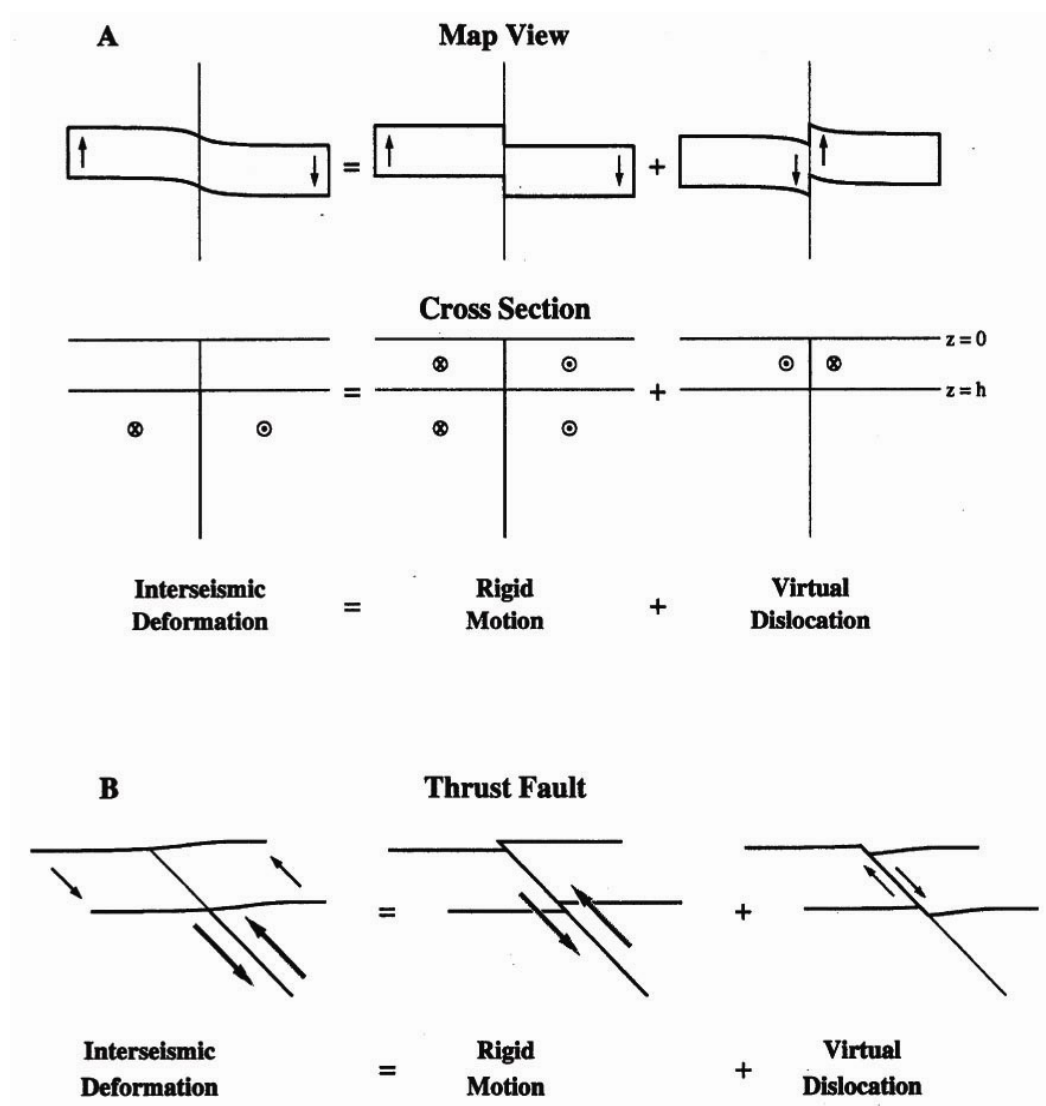
2.2 Μεθοδολογία

Ο υπολογισμός των μεταβολών των τάσεων Coulomb, βασίζεται στη μεταβολή του τανυστή της τάσης στο χώρο και το χρόνο ο οποίος μεταδίδεται με ελαστικό τρόπο στα σεισμογόνα στρώματα του εσωτερικού της Γης. Το θραυσιγενές στρώμα του φλοιού στο οποίο υπολογίζουμε τις μεταβολές της στατικής τάσης, προσομοιάζεται με ομογενή ημιχώρο, ο οποίος περιορίζεται από την υπερκείμενη ατμόσφαιρα και από το υποκείμενο όλκιμο στρώμα της γης. Οι αθροιστικές μεταβολές της τάσης οφείλονται σε δύο σημαντικούς παράγοντες που αφορούν τόσο στην παραγόμενη τεκτονική φόρτιση από τις συνεχείς κινήσεις των λιθοσφαιρικών πλακών όσο και από τις σεισμικές ολισθήσεις οι οποίες πραγματοποιούνται πάνω στην επιφάνεια των ρηγμάτων κατά τη γένεση των σεισμών. Η γένεση των σεισμών προκαλείται λόγω της συσσωρευμένης τάσης πάνω στις ενεργείς ρηξιγενείς επιφάνειες που πραγματοποιείται στο μεσοδιάστημα μεταξύ δύο ισχυρών σεισμών στις σημαντικές τεκτονικές δομές μιας περιοχής και οι τιμές της προσεγγίζονται λαμβάνοντας υπόψη τους μακράς διάρκειας ρυθμούς ολίσθησης των ρηγμάτων αυτών. Συμπεράσματα για τους ρυθμούς ολίσθησης εξάγονται από γεωδαιτικές κυρίως μετρήσεις, παλαιοσεισμικά και γεωλογικά δεδομένα.

Ο υπολογισμός των συσσωρευτικών μεταβολών των στατικών τάσεων κατά το μεσοδιάστημα μεταξύ δύο ισχυρών σεισμών γίνεται με τη χρήση του μοντέλου της «Εικονικής Αρνητικής Ολίσθησης» (*Negative Virtual Displacement*). Προκειμένου να κατανοηθεί ο όρος αυτός, παρατίθεται το παρακάτω σχήμα στο οποίο απεικονίζονται τα δύο μοντέλα φόρτισης, για σεισμούς που αποδίδονται σε ρήγματα οριζόντιας μετατόπισης αλλά και σε σεισμούς οφειλόμενους σε ανάστροφα ρήγματα

(**Σχήμα 14**). Η τάση η οποία υπολογίζεται αφορά την παραμόρφωση που προκαλείται από την μετατόπιση πάνω στις ρηξιγενείς δομές από την ελεύθερη επιφάνεια μέχρι το βάθος των 15km περίπου, το βάθος μέχρι το οποίο πραγματοποιείται θραυσιγενής παραμόρφωση και επομένως το κατώτατο βάθος στο οποίο πραγματοποιείται η έναρξη της σεισμικής ολίσθησης (*nucleation*). Στο **Σχήμα 14** παριστάνεται σε τομή αλλά και σε κάτοψη το μοντέλο συσσώρευσης της ανηγμένης παραμόρφωσης σε ένα ρήγμα οριζόντιας μετατόπισης (Α) και σε ένα ανάστροφο ρήγμα (Β). Παρατηρείται ότι η συσσωρευμένη παραμόρφωση αρχικά σε ένα ρήγμα οριζόντιας μετατόπισης ισοδυναμεί με το αθροιστικό αποτέλεσμα το οποίο προκύπτει από τη διαρκή σχετική κίνηση μεταξύ δύο τεμαχών κατώτερα από το σειсмоγόνο βάθος, h , το κατώτερο βάθος στο οποίο εντοπίζονται εστίες σεισμών, μέσα σε ελαστικό ημιχώρο σε συνδυασμό με την συσσώρευση των τάσεων που λαμβάνει χώρα στα βάθη $0 \leq z \leq h$ που ορίζουν το σειсмоγόνο στρώμα. Η προσθετική αυτή διαδικασία διακρίνεται σε μια άκαμπτη μετάθεση των υλικών του ημιχώρου κατά μήκος του ρήγματος και σε μία αρνητική εικονική μετατόπιση δηλαδή μία κίνηση αντίθετης φοράς από την πραγματική η οποία οριοθετείται μεταξύ της ελεύθερης επιφάνειας ($z = 0km$) και το κατώτερο βάθος του σειсмоγόνου στρώματος.

Στα ανάστροφα ρήγματα η διαδικασία είναι σχετικά η ίδια. Το στρώμα με $0 \leq z \leq h$ «κλειδώνει» ενώ σε μεγαλύτερα βάθη πραγματοποιείται μια διαρκής ολίσθηση με ασεισμικά χαρακτηριστικά. Η παραμόρφωση συσσωρεύεται εξαιτίας μίας ανοδικής άκαμπτης κίνησης του ανώτερου τεμάχους πάνω από το κάτω τέμαχος και μίας εικονικής κανονικής μετατόπισης που περιορίζεται εντός των ορίων του σειсмоγόνου στρώματος. Το τελικό αποτέλεσμα ισοδυναμεί με την κίνηση ενός κανονικού ρήγματος. Οι τάσεις οι οποίες απελευθερώνονται ολικά ή εν μέρει κατά τη διάρκεια ενός σεισμού λαμβάνονται ως θετικές στο συγκεκριμένο μοντέλο.



Σχήμα 14. (A) Παραμόρφωση στο μεσοδιάστημα μεταξύ δύο ισχυρών σεισμών (*Interseismic Deformation*) στην επιφάνεια της Γης, στην άμεση γειτονία ενός δεξιόστροφου ρήγματος οριζόντιας μετατόπισης (Αριστερά). Η παραμόρφωση μπορεί να προσομοιωθεί κλειδώνοντας το άνω στρώμα (σεισμογόνο) και επιτρέποντας την κίνηση μόνο στο κατώτερο στρώμα το οποίο ολισθαίνει συνεχώς ασεισικά. (B) Στο δεύτερο σχήμα αναπαρίσταται η παραμόρφωση σε ένα ανάστροφο ρήγμα. Και σε αυτή την περίπτωση το πάνω τμήμα του στρώματος θεωρείται κλειδωμένο, από την επιφάνεια μέχρι το κατώτερο βάθος του σεισμογόνου στρώματος, επιτρέποντας την ασεισμική ολίσθηση στα κατώτερα στρώματα. Κατά παρόμοιο τρόπο η κίνηση διαιρείται σε δύο επιμέρους κινήσεις, μία άκαμπτη του πάνω τεμάχους να επιπτεεί στο κατώτερο τέμαχος σε συνδυασμό με μία αντίστροφη κίνηση (Deng and Sykes, 1997).

Υποθέτουμε ότι οι μεταβολές στην τάση οφείλονται τόσο στη συσσώρευση ελαστικής τάσης όσο και στην απελευθέρωση των τάσεων κατά τη διάρκεια των σεισμών, διαδοχικά φαινόμενα τα οποία εναλλάσσονται κατά την διάρκεια του σεισμικού κύκλου. Η μεταβολή των τάσεων κατά το σεισμό, ανακτάται πλήρως με τη διαδοχική συσσώρευση τάσεων, με αποτέλεσμα το τελικό αποτέλεσμα της μεταβολής στο τέλος του σεισμικού κύκλου να είναι ίσο με μηδέν. Οι μεταβολές στην τάση που σχετίζονται με μεγάλους σεισμούς, αφορούν τόσο εικονικές αρνητικές μεταθέσεις όσο και πραγματικές μετατοπίσεις και υπολογίζονται εισάγοντας ένα μοντέλο μετάθεσης, σύμφωνα με το οποίο, η επιφάνεια του ρήγματος, Σ , βρίσκεται μέσα σε ομογενή ελαστικό ημχώρο. Σύμφωνα με τον Steketee (1958) το πεδίο της μετάθεσης u_k ($k^{\text{η}}$ συνιστώσα του u) σε ελαστικό ημχώρο για μια αυθαίρετη ομοιόμορφη μετάθεση U , κατά μήκος της επιφάνειας Σ ορίζεται από τη σχέση:

$$u_k = \frac{U_i}{8\pi\mu} \iint_{\Sigma} w_{ij}^k u_j d\Sigma \quad (1)$$

όπου μ είναι ο συντελεστής διάτμησης, u_j , τα κατευθύνοντα συνημίτονα της κάθετης στην επιφάνεια τάσης, U , είναι η i -οστή συνιστώσα της U και w_{ij}^k είναι τα έξι σύνολα της συνάρτησης Green. Οι μεταθέσεις και το πεδίο παραμόρφωσης που οφείλεται σε τετραγωνικές πηγές προκύπτει από την παραγωγή της σχέσης (1) (Okada, 1992, G. Converse, U. S. Geological survey, αδημοσίευτη έκθεση, 1973). Η ελαστική τάση s_{ij} υπολογίζεται από την ελαστική ανηγμένη παραμόρφωση, e_{ij} , εφαρμόζοντας τον νόμο του Hooke για ισότροπο μέσο:

$$s_{ij} = \frac{2\mu\nu}{1-2\nu} \delta_{ij} e_{kk} + 2\mu e_{ij} \quad (2)$$

όπου ν είναι ο λόγος Poisson και δ_{ij} το δέλτα του Kronecker. Οι απόλυτες τιμές όσο και οι μεταβολές της τάσης υπολογίζονται με την βοήθεια των σχέσεων αυτών.

2.2 Το Κριτήριο Θραύσης Coulomb

Οι τεκτονικοί σεισμοί εκδηλώνονται στις επιφάνειες των ενεργών σεισμικών ρηγμάτων όταν οι ασκούμενες τάσεις από τα περιβάλλοντα πετρώματα του φλοιού της Γης σε ορισμένο σημείο, υπερβούν την αντοχή του πετρώματος με αποτέλεσμα να επέλθει η διάρρηξη του μέσου και έκλυση σεισμικής ενέργειας λόγω της

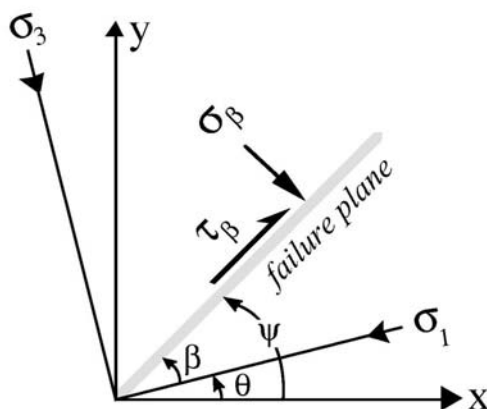
συσσωρευμένης παραμόρφωσης, με τη μορφή σεισμικών κυμάτων. Η αντοχή των υλικών στη διάρρηξη αποτελεί αντικείμενο μελέτης και έχουν προταθεί διάφορα εμπειρικά ή ημιεμπειρικά μοντέλα για να περιγράψουν τη μηχανική αυτή συμπεριφορά τα οποία εξετάζουν τις συνθήκες κάτω από τις οποίες ένα συνεχές μέσο διαρρηγνύεται. Ένα από αυτά τα κριτήρια είναι το κριτήριο θραύσης Coulomb το οποίο περιγράφεται εν συνεχεία. Σύμφωνα με τον Scholtz (2002), σε ένα επίπεδο κάθετο στον άξονα ελάχιστης κύριας τάσης θα πραγματοποιηθεί εφελκυστική διάρρηξη, όταν η ασκούμενη τάση σ_3 είναι εφελκυστική και υπερβαίνει την τιμή T_0 η οποία είναι ίση με την αντοχή του μέσου σε εφελκυσμό, δηλαδή όταν οριακά ικανοποιείται η σχέση:

$$\sigma_3 = -T_0 \quad (3)$$

Όταν η επιδρούσα τάση είναι συμπιεστική η διάρρηξη διάτμησης που θα προκληθεί περιγράφεται με το Κριτήριο Θραύσης Coulomb για μη συνεκτικά υλικά, το οποίο εκφράζεται από τη σχέση:

$$\tau = \mu \sigma_n \quad (4)$$

όπου τ η διατμητική τάση και σ_n η κάθετη τάση. Η παράμετρος μ ονομάζεται συντελεστής εσωτερικής τριβής $\mu = \tan \psi$ όπου ψ είναι η γωνία εσωτερικής τριβής όπως διακρίνεται στο **Σχήμα 15**.



Σχήμα 15. Διαξονικό σύστημα των τάσεων (σ_1 , σ_3) που ασκούνται σε επίπεδο διάρρηξης. Με σ_β και τ_β συμβολίζονται η κάθετη και διατμητική τάση, ψ είναι η γωνία εσωτερικής τριβής (King et al., 1994).

Όταν τα πετρώματα παρουσιάζουν συνοχή τότε στη προηγούμενη σχέση προστίθεται ο παράγοντας συνοχής, τ_0 , και αυτή τροποποιείται λαμβάνοντας τη μορφή:

$$\tau = \tau_0 + \mu \sigma_n \quad (5)$$

Η διάρρηξη θα επέλθει όταν η συνδυασμένη δράση των δύο τάσεων υπερβεί την τιμή της συνοχής. Ως συντελεστής τριβής, μ , ορίζεται ο λόγος της δύναμης τριβής F προς το κάθετο φορτίο, N , ή ως ο λόγος της διατμητικής αντοχής του υλικού s προς το συντελεστή σκληρότητας διεύθυνσης του υλικού, μέτρο αντοχής του υλικού (Scholtz, 2002, Byerlee, 1978). Δίνεται από τη σχέση:

$$\mu = \frac{F}{N} = \frac{s}{p} \quad (6)$$

Η παρουσία των ρευστών, συνήθως του νερού που πληρούν τα διάκενα των διαπερατών πετρωμάτων του φλοιού μεταβάλλουν το θεωρητικό αποτέλεσμα της τριβής με δύο διακριτούς τρόπους. Αρχικά δρουν άμεσα λόγω της επιπρόσθετης πίεσης που εξασκούν τα ρευστά στο πέτρωμα που τα αποθηκεύει και έμμεσα εξαιτίας της χημικής και μηχανικής εξασθένισης που υπόκειται το ορυκτολογικό υλικό του πετρώματος. Οι ζώνες διάρρηξης συνήθως είναι κορεσμένες και σχηματίζουν λεπτά ολισθηρά στρώματα.

Οι επιφάνειες εκατέρωθεν των δύο πλευρών των ρηγμάτων δεν είναι λείες αλλά συνίστανται από εξάρματα και βαθύνσεις με αποτέλεσμα οι τελικές επιφάνειες πρόσφυσης να καταλαμβάνουν μικρότερη επιφάνεια, A_r , από τη θεωρητική, A , αν αυτές ήταν λείες. Αν στις δύο εφαιπόμενες επιφάνειες ασκείται μέση κάθετη τάση σ_n , και η πίεση των ρευστών στα μη εφαιπόμενα διάκενα είναι p , τότε ισχύει ότι:

$$\sigma_n A = p(A - A_r) + \sigma_c A_r \quad (7)$$

όπου σ_c η μέση τάση η οποία ασκείται στις επαφές των εξαρμάτων (*Asperity Junctions*). Διαιρώντας με την ολική επιφάνεια, A , προκύπτει ο νόμος της ενεργού τάσης, $\bar{\sigma}_n$, που αφορά την τριβή και ο οποίος συνδέει την ασκούμενη τάση με την πίεση των ρευστών:

$$\bar{\sigma}_n = \sigma_n - \left(1 - \frac{A_r}{A}\right)p = \sigma_n - p\delta_{ij} \quad (8)$$

όπου δ το δέλτα του Krockener. Με βάση το νόμο της ενεργού τάσης προκύπτει η σχέση που περιγράφει το κριτήριο Coulomb:

$$\tau = \tau_0 + \mu(\sigma_n - p) \quad (9)$$

Παραδειγματικά, ο Byerlee (1967) εφάρμοσε τον νόμο για την περίπτωση του γάββρου υπολογίζοντας την τάση για διαφορετικές τιμές πίεσης καταλήγοντας στη γραμμική σχέση της μορφής: $\tau = 10 + 0.6(\sigma_n - p)$ η οποία απαρτίζεται από δύο μέλη τα οποία αντιστοιχούν στις δύο ιδιότητες με το δεύτερο μέλος να αποδεικνύει την εγγενή μείωση της τριβής εξαιτίας της δράσης του νερού. Στη συνέχεια οι Dieterich and Conrad (1984), μελέτησαν την επίδραση της υγρασίας στην τριβή και τα εξαγόμενα συμπεράσματα δείχνουν ότι το μ αυξάνεται από 0.55 σε 0.65 σε υγρό περιβάλλον και από 0.85 σε 1.0 με απουσία υγρασίας. Επίσης υποστήριξαν ότι τα ρευστά επιδρούν στη ταχύτητα αλλά και το χρόνο δράσης της τριβής.

Το κριτήριο Coulomb έχει τροποποιηθεί από τους Scholz (2002) και Harris (1998) έτσι ώστε να προσεγγίζει ποσοτικά τη θραύση, οπότε προκύπτει η συνάρτηση της κατάρρευσης του Coulomb. Σε περίπτωση που αναφερόμαστε σε πορώδες μέσο η **Σχέση 5** τροποποιείται καθώς η πίεση των ρευστών όπως προαναφέρθηκε διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στη συμπεριφορά του πετρώματος και παίρνει τη μορφή:

$$\Delta CFF = \Delta \tau + \mu(\Delta \sigma + \Delta P) \quad (10)$$

(Όπου CFF, Coulomb Failure Fracture: Συνάρτηση Θραύσης Διάρρηξης). Στη **Σχέση 10** με $\Delta \tau$ και $\Delta \sigma$ συμβολίζονται οι μεταβολές στην διατμητική και στην κάθετη τάση, αντίστοιχα. Οι μεταβολές της διατμητικής τάσης λαμβάνονται θετικές όταν έχουν τη διεύθυνση της ολίσθησης του ρήγματος ενώ οι μεταβολές των κάθετων τάσεων είναι θετικές για αυξανόμενες εφελκυστικές τάσεις κάθετα στο ρήγμα. Η μεταβολή της πίεσης των ρευστών των πόρων του πετρώματος στη ζώνη διάρρηξης που προκύπτει από τη μεταβολή της τάσης συμβολίζεται με ΔP και για ομογενές και ισότροπο ποροελαστικό μέσο δίνεται από τη σχέση (Rice and Cleary, 1976):

$$\Delta P = -B \frac{\Delta \sigma_{kk}}{3} \quad (11)$$

Όπου B είναι ο συντελεστής Skempton, ενώ σ_{kk} είναι το άθροισμα των διαγωνίων στοιχείων του τανυστή της τάσης. Η τιμή του B κυμαίνεται από 0 μέχρι 1 ($0 \leq B < 1$) και ενσωματώνει το αποτέλεσμα των ρευστών των πόρων. Πειραματικά έχει

προσδιορίζεται μία μικρή κύμανση της τιμής του από 0.5 σε 0.9 όσον αφορά πετρώματα όπως γρανίτη, ψαμμίτη και μάρμαρο. Στην περίπτωση παρουσίας ρευστών εισάγεται ο φαινόμενος συντελεστής τριβής μ' , και η **Σχέση 10** τροποποιείται και λαμβάνει την τελική μορφή:

$$\Delta CFF = \Delta \tau + \mu' \Delta \sigma \quad (12)$$

Το μ' αποτελεί μια σταθερά του υλικού της ζώνης διάρρηξης ανεξάρτητη από το τεκτονικό περιβάλλον, τις μεταβολές των τάσεων και του χρόνου και συνδυάζει το αποτέλεσμα των ρευστών των πόρων αλλά και της τριβής σε μία μεταβλητή (Byerlee, 1967; Beeler et al., 2000). Συνδέεται με το συντελεστή τριβής μέσω της σχέσης:

$$\mu' = \mu(1 - B) \quad (13)$$

αντιμετωπίζεται ως ιδιότητα του υλικού και λαμβάνει τιμές από 0 μέχρι 1.0. Η σημασία του μ' στους υπολογισμούς των τάσεων Coulomb, προσεγγίζεται με δύο διαφορετικές μεθόδους, με τη βοήθεια του μοντέλου του ισοτροπικού ποροελαστικού μοντέλου κατά το οποίο το μ' παρουσιάζει διακυμάνσεις εξαρτημένες από τη μέση τάση που εφαρμόζεται και του μοντέλου της σταθερής τιμής φαινόμενου συντελεστή τριβής, με το μ' να συμπεριφέρεται ως μία σταθερά που χαρακτηρίζει το πέτρωμα (Beeler et al., 2000). Έχει αποδειχτεί ότι όταν η αντοχή του πετρώματος μεταβάλλεται γρηγορότερα από την πίεση των ρευστών τότε η πίεση p σχετίζεται με την περιβάλλουσα τάση μέσω του συντελεστή Skemptions, B . Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται ο συντελεστής τριβής μ' ο οποίος δίνεται στη **Σχέση 11**.

Διάφορες τιμές έχουν προταθεί από προηγούμενους ερευνητές για τις τιμές του φαινόμενου συντελεστή τριβής μ' . Χαμηλές τιμές του μ' αποδεικνύουν χαλαρά υλικά ή υψηλή πίεση ρευστών των πόρων. Ωστόσο η μεταβολή της πίεσης των ρευστών φαίνεται ότι μεταβάλλεται χρονικά πριν και μετά τη γένεση ενός σεισμού. Επίσης σύμφωνα με τον Stein (1999) ο φαινόμενος συντελεστής τριβής για τα μεγάλα ρήγματα είναι μικρός ενώ για τα μικρά είναι μεγάλος. Σε ξηρά πετρώματα η τιμή του μ' προσεγγίζει τη τιμή 0.75 ενώ όταν η περιβάλλουσα πίεση είναι αξιόλογη τότε το μ' μεταπίπτει στη τιμή, $\mu'=0$. Οι Parsons et al. (1999) δείχνουν ότι για τα μεγάλα ρήγματα το $\mu' < 0.2$ ενώ για τα μικρά είναι υψηλός $\mu' > 0.8$. Αυτό έρχεται σε συμφωνία με το ότι τα μεγάλα ρήγματα σχηματίζουν μεγάλο πάχος κατακλαστικών οι οποίοι ελαττώνουν την τριβή ολίσθησης και εγκλωβίζουν ρευστά (Stein, 1999)

Συνοψίζοντας τα παραπάνω αποτελέσματα και σύμφωνα με τους King et al. (1994), οι οποίοι προτείνουν ότι ακόμη και όταν οι μεταβολές του μ' είναι ουσιώδεις

δεν διαφοροποιούν την κατανομή των απόλυτων τιμών της τάσης στη γειτονική περιοχή ενός ρήγματος και κατά συνέπεια ούτε τις διαφορές της τάσης της, η τιμή του μ λήφθηκε ίση με 0.4. Οι Nalbant et al. (1998) όπως και οι Toda et al. (1998) επέλεξαν τη τιμή $\mu'=0.4$ ως ενδιάμεση τιμή δεχόμενη ότι σε μία ζώνη κανονικών ρηγμάτων δεν ισχύει καμία απόλυτη κατάσταση. Οι Reasenberg & Simpson (1992) χρησιμοποιούν την τιμή $\mu'=0,2$ για την περιγραφή του σεισμού στη Loma Prieta. Οι Parsons et al. (2005) επίσης έχουν δοκιμάσει για τους υπολογισμούς τους διαφορετικές τιμές του μ και καταλήγουν στο ίδιο συμπέρασμα ότι τα αποτελέσματα είναι ευαίσθητα στις μεταβολές των παραμέτρων αλλά όχι σε μεγάλο βαθμό όπως το πρόσημο των τάσεων ή τη χωρική κατανομή των μεταβολών. Οι Deng & Sykes (1997) χρησιμοποιούν τιμές μεταξύ 0.0 και 0.6 για διαφορετικές χρονικές στιγμές και διαφορετικά τεκτονικά περιβάλλοντα. Οι τιμές αυτές μεταβάλλονται πιθανόν λόγω της χρονικής μετανάστευσης των ρευστών.

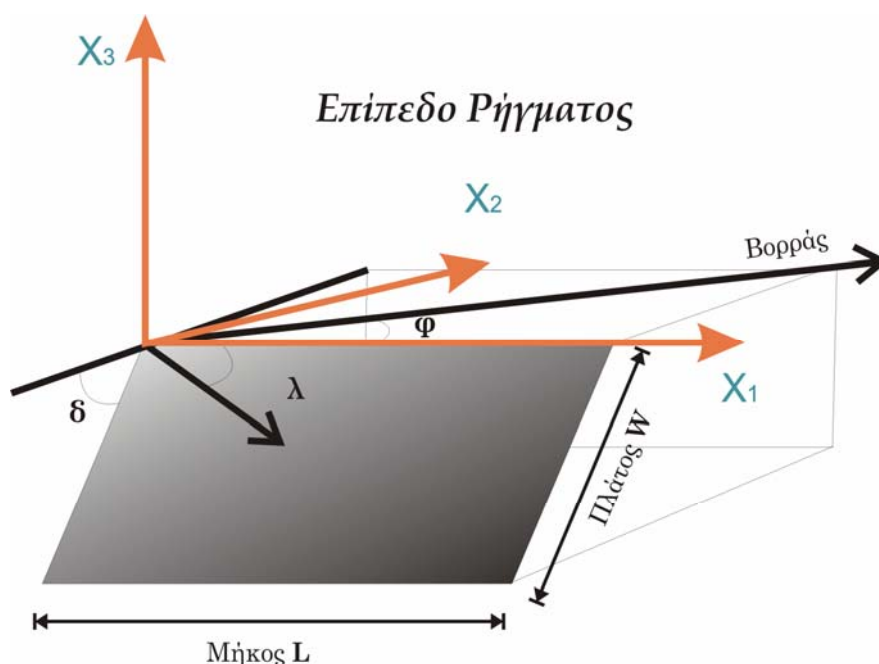
Η τεκτονική της περιοχής μελέτης είναι ιδιαίτερα πολύπλοκη και οι υπολογισμοί επαναλαμβάνονται για διαφορετικές τιμές του φαινομένου συντελεστή τριβής $\mu'=0.2$, $\mu'=0.4$, $\mu'=0.6$ προκειμένου να εξεταστεί τυχούσα μεταβολή του πεδίου των τάσεων σε συνάρτηση με την πίεση των ρευστών των πόρων. Ωστόσο έχει τεκμηριωθεί από προηγούμενες μελέτες ότι η κατανομή των τάσεων μένει αμετάβλητη παρά τη σημαντική διαφοροποίηση του μ' .

Αύξηση στις δύο τιμές της διατμητικής και κάθετης τάσης σημαίνει θετικές τιμές ($\Delta CFF > 0$). Η διατμητική τάση αυξάνεται όταν η Δt παρουσιάζει τη φορά της ολισθήσης ενώ η κάθετη είναι θετική όταν δηλώνει εφελκυσμό. Έχει δειχθεί ότι αύξηση της μεταβολής ακόμη και κατά 0.1bar διεγείρει τη γένεση ενός επερχόμενου σεισμού επιταχύνοντας τη διάρρηξη του ρήγματος. Η κατανομή των μετασεισμών αλλά και μεταγενέστερων ισχυρών σεισμών φαίνεται ότι κατανέμεται στις ζώνες με αυξημένη μεταβολή της τάσης Coulomb. Αντίθετα, αρνητικές τιμές της μεταβολής της τάσης Coulomb ($\Delta CFF < 0$), επιμηκύνουν τον χρόνο μέχρι την εκδήλωση σεισμού καθιστώντας την περιοχή ως σκιερή ζώνη όπου η συγκεντρωμένη παραμόρφωση έχει εκτονωθεί από τη γένεση του ισχυρού σεισμού και η διάρκεια της οποίας εξαρτάται από το χρόνο ανάκτησης της απαιτούμενης τάσης λόγω της συνεχούς τεκτονικής φόρτισης ώστε να φτάσει τις οριακές τιμές και να προκαλέσει σεισμό. Θετικές μεταβολές τόσο της διατμητικής όσο και της κύριας τάσης αυξάνουν τις πιθανότητες γένεσης, ενώ οι αρνητικές όχι. Ωστόσο θετικές τιμές των μεταβολών

δεν ορίζουν θέσεις στις οποίες θα γίνουν σεισμοί αλλά θέσεις στις οποίες το επίπεδο των τάσεων είναι ικανό να προκαλέσει τη γένεση σεισμού μελλοντικά (Harris and Simpson, 1998).

2.3 Υπολογισμός των παραμέτρων του μοντέλου

Οι ανώμαλες επιφάνειες διάρρηξης προσομοιάζονται με επίπεδα πεπερασμένων διαστάσεων και τα ρήγματα με ορθογώνια παραλληλόγραμμα πεπερασμένων διαστάσεων και με τη μεγαλύτερη τους διάσταση να εκτείνεται παράλληλα προς την επιφάνεια της Γης. Τα ρήγματα εμπεριέχονται στο θραυσιγενές στρώμα του φλοιού της Γης και έχουν ελαστικές ιδιότητες. Περιγράφονται από γεωμετρικές παραμέτρους όπως είναι το μήκος, L , και το πλάτος, W , της ζώνης διάρρηξης, η παράταξη, λ , η γωνία κλίσης, δ , η ολίσθηση, u , που πραγματοποιήθηκε κατά τη διάρκεια της σεισμικής κίνησης (Σχήμα 16).



Σχήμα 16. Γεωμετρικές παράμετροι του επιπέδου του σεισμικού ρήγματος το οποίο προσομοιάζεται με παραλληλόγραμμο το οποίο εμπεριέχεται στο σειсмоγόνο στρώμα του φλοιού της γης και περιγράφεται με τη βοήθεια κινηματικών και γεωμετρικών παραμέτρων.

Όπως προαναφέρθηκε η κατανομή του πεδίου των τάσεων στην άμεση γειτνίαση της σεισμικής πηγής εξαρτάται από τις λεπτομέρειες των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του ρήγματος και στο μηχανισμό γένεσης του σεισμού. Ωστόσο, τα στοιχεία αυτά καθίστανται λιγότερο σημαντικά όσο απομακρυνόμαστε από το

ρήγμα με τη σεισμική ροπή να παίζει ουσιαστικό ρόλο (Aki & Richards, 1980). Οι γεωμετρικοί παράγοντες υπολογίζονται με τη χρήση γεωλογικών δεδομένων υπαίθρου, τη μορφολογία, τη χωρική κατανομή της μετασεισμικής ακολουθίας, μακροσεισμικά δεδομένα, αλλά όταν απουσιάζουν τέτοιες πληροφορίες χρησιμοποιούνται εμπειρικές σχέσεις. Στην παρούσα εργασία έχουν υιοθετηθεί οι εμπειρικές σχέσεις των Papazachos et al. (2004) οι οποίοι συνέλλεξαν παγκόσμια δεδομένα σεισμών διαφορετικής σεισμοτεκτονικής προέλευσης. Έτσι με βάση τη χωρική κατανομή των επικέντρων μετασεισμών κατέληξαν σε μαθηματικές σχέσεις που συνδέουν το μέγεθος της σεισμικής ροπής ενός σεισμού με το μήκος του L , το πλάτος, W , καθώς και με τη μετάθεση, u , για ρήγματα οριζόντιας μετατόπισης, και για ρήγματα κλίσης σε ηπειρωτικές ζώνες και σε ζώνες κατάδυσης.

Τα μήκη των τεμαχίων των ρηγμάτων, δηλαδή η παράλληλη διάσταση προς την επιφάνεια της Γης, τα οποία αντιστοιχούν σε κάθε σεισμό, σύμφωνα με τους Papazachos et al. (2004) για τους σεισμούς της Νοτιοανατολικής Κίνας με εξαίρεση τη σεισμική ακολουθία του Songpan, όπου λήφθηκαν υπόψη σεισμολογικά στοιχεία, προσδιορίστηκαν για τα ρήγματα οριζόντιας μετατόπισης με τη χρήση της σχέσης:

$$\log L = 0.59M - 2.3 \quad (14)$$

Ενώ για κανονικά και ανάστροφα ρήγματα με τη σχέση:

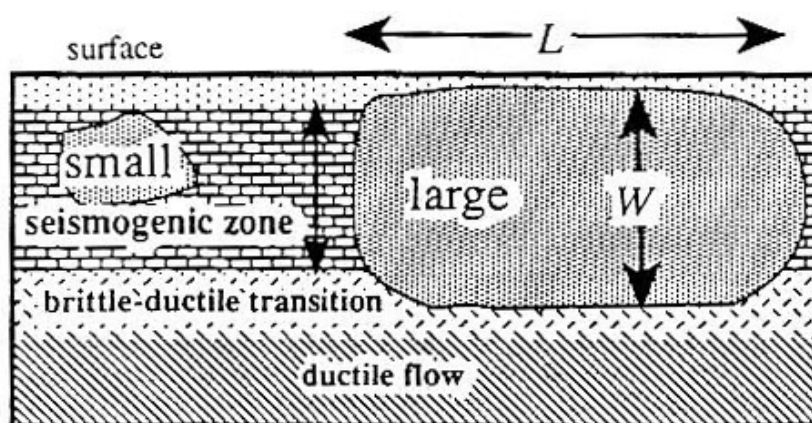
$$\log L = 0.50M - 1.86 \quad (15)$$

Οι υπολογισμοί αυτοί συγκρίθηκαν και βρίσκονται σε πολύ καλή συμφωνία με αυτούς που προκύπτουν από τις σχέσεις των Wells & Coppersmith (1994). Οι σεισμοί ανάλογα με το μέγεθος τους διακρίνονται στους μικρούς και στους μεγάλους δεδομένου ότι κατά τους μεγάλους σεισμούς όλο το πάχος του θραυστικού τμήματος του φλοιού της γης διαρρηγνύεται με τη διάρρηξη να εκδηλώνεται στην επιφάνεια της γης. Στο **Σχήμα 17** διακρίνονται οι σεισμογόνοι όγκοι δύο σεισμών οι οποίοι εξαρτώνται από το μέγεθος του σεισμού. Ο όγκος των μικρών περιορίζεται στο στρώμα της σχιζόσφαιρας όπου υλοποιείται η μετάβαση από το θραυσιγενές υλικό στο όλκιμο, σε αντιδιαστολή με τους μεγάλους, η διάρρηξη των οποίων αγγίζει ή υπερβαίνει τα όρια της. Κατά συνέπεια όσο μεγαλύτερος είναι ένας σεισμός αυτό έχει ως συνέπεια το πάχος του σεισμογόνου στρώματος να παραμένει σταθερό και ο σεισμογόνος όγκος να επεκτείνεται οριζόντια. Το όριο αυτό ικανοποιείται σε ένα ηπειρωτικό περιβάλλον όπως αυτό που εξετάζεται όταν οι σεισμοί έχουν μέγεθος $M=6.0-6.5$ (Scholtz 1982).

Ο υπολογισμός των πλατών, W , δηλαδή της διάστασης παράλληλα προς την κλίση του ρήγματος για τα ρήγματα οριζόντιας μετατόπισης και τα ρήγματα κλίσης αντίστοιχα δίνονται από τις σχέσεις Papazachos et al. (2004):

$$\log w = 0.23M - 0.49 \quad (16)$$

$$\log w = 0.28M - 0.70 \quad (17)$$



Σχήμα 17. Παρουσιάζεται σχηματικά η έννοια του μεγάλου και μικρού σεισμού, οι σεισμικές εστίες, το πάχος της ζώνης διάρρηξης και η κατανομή της σεισμικής ροπής σε τομή μέσα στο φλοιό της γης.

Η σεισμική ολίσθηση δεν κατανέμεται με ομοιογένεια στην επιφάνεια του σεισμογόνου ρήγματος ωστόσο οι υπολογισμοί των μεταβολών των στατικών τάσεων στο μακρινό πεδίο δεν επηρεάζεται το τελικό αποτέλεσμα (King & Cocco, 2001). Για το λόγο αυτό η μέση τιμή της σεισμικής ολίσθησης είναι ικανοποιητική για τους υπολογισμούς μας με τη χρήση εμπειρικών σχέσεων. Αντίστοιχα για τα ρήγματα οριζόντιας μετατόπισης και για τα ρήγματα κλίσης είναι αντίστοιχα (Papazachos et al., 2004):

$$\log u = 0.68M - 2.59 \quad (18)$$

$$\log u = 0.72M - 2.82 \quad (19)$$

Σε περιπτώσεις όπου η τιμή της σεισμικής ροπής, για σεισμούς μεταγενέστερους του 1970 υιοθετήθηκαν οι τιμές αυτές από τον σεισμικό κατάλογο του Harvard και χρησιμοποιήθηκε η Σχέση 20 προκειμένου να εξαχθεί η ολίσθηση κατά τη διάρκεια του σεισμού.

$$M_0 = \mu \cdot S \cdot u \quad (20)$$

Όπου $\mu = 3.3 \cdot 10^{11}$ dyn-cm, S το εμβαδόν του επιπέδου του ρήγματος και u η ολίσθηση σε cm. Εκτός από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά αυτά είναι απαραίτητη η γνώση του μηχανισμού γένεσης των σεισμών δηλαδή το αζιμούθιο, ξ , η κλίση, δ και η γωνία ολίσθησης, λ . Η επιλογή των μηχανισμών γένεσης είναι ουσιαστική γιατί η παραγόμενη μορφή του πεδίου των τάσεων είναι εξαρτώμενη από τα δεδομένα αυτά. Αυτό συμβαίνει γιατί η κατανομή των τάσεων διαφέρει σημαντικά ανάλογα με τον μηχανισμό γένεσης ενός σεισμού.

2.4 Δεδομένα Παρατήρησης

Στη παρούσα εργασία μελετάται η μεταβολή των τάσεων η οποία προκλήθηκε μετά από κάθε ισχυρό σεισμό με μέγεθος $M \geq 6.5$ στις επαρχίες Sichuan και Yunnan. Έχουν γίνει 27 σεισμοί από το 1905 μέχρι σήμερα, με πρώτο το σεισμό του 1904 και τελευταίο καταγεγραμμένο το σεισμό του Lijiang ο 1996, συγκαταλέγοντας έτσι την περιοχή αυτή στις πιο ενεργές σεισμικά περιοχές της Κίνας.

Λόγω της μεγάλης έκτασης που καλύπτουν οι δύο επαρχίες αλλά και προκειμένου να μελετηθεί η περιοχή με τη μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια διαχωρίστηκε σε τρεις επιμέρους υποπεριοχές τη Βόρεια Κεντρική και Νότια περιοχή Μελέτης. Ο διαχωρισμός αυτός δεν επηρεάζει τα τελικά αποτελέσματα της κάθε υποπεριοχής βρίσκονται σε μεγάλη απόσταση από τους σεισμούς της άλλης με συνέπεια οι μεταβολές της τάσης να είναι αμελητέες στις γειτονικές ζώνες.

Οι τάσεις υπολογίζονται για κάθε σημείο του σειсмоγόνου όγκου ο οποίος εκτείνεται από τα 3km μέχρι τα 15km, κάτω από το οποίο η απουσία ελαστικών ιδιοτήτων εμποδίζουν τη συσσώρευση ελαστικής ανηγμένης παραμόρφωσης. Αρχικά παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της σεισμικής μεταβολής των τάσεων αμέσως μετά τη γένεση του κάθε ισχυρού σεισμού. Στη συνέχεια, ο συνδυασμός των σεισμικών μεταβολών με τις σταθερές τεκτονικές κινήσεις και προκύπτουν τα εξελικτικά μοντέλα των τάσεων. Τα αποτελέσματα του εξελικτικού μοντέλου απεικονίζονται χρονολογικά με διαδοχικά σχήματα σε κάθε ένα από τα οποία αποτυπώνεται το πεδίο των τάσεων λίγο πριν τη γένεση ενός σεισμού σε βάθος 8km το οποίο λαμβάνεται ως το μέσο βάθος του σειсмоγόνου όγκου σε συμφωνία εξαιτίας της τεκτονικής φόρτισης αλλά και της κατανομής της ολίσθησης από τη γένεση προηγούμενων σεισμών οι οποίοι έχουν το επίκεντρο τους στην ευρύτερη περιοχή. Σύμφωνα με τους King et al. (1994) οι μεγαλύτερες τιμές της σεισμικής ολίσθησης αναπτύσσονται στο μέσο βάθος του σειсмоγόνου όγκου. Οι τιμές των μεταβολών

απεικονίζονται χρωματικά, με τις γαλάζιες αποχρώσεις να συμβολίζουν μικρές (ανοιχτό γαλάζιο) και μεγάλες μειώσεις (σκούρο μπλε). Αντίθετα, οι κόκκινες αποχρώσεις δείχνουν αυξήσεις των μεταβολών των τάσεων. Μέσω της μεθόδου η μεταβολή του πεδίου των τάσεων που προκαλείται από τη γένεση ενός σεισμού αναλύεται σε ένα επίπεδο το οποίο περιγράφεται με τις ιδιότητες του επιπέδου του ρήγματος του επερχόμενου σεισμού όσον αφορά τη παράταξη. Ενώ το αποτέλεσμα των μεταβολών της κύριας και διατμητικής τάσης οφείλονται στη γένεση του πρώτου σεισμού. Ο συντελεστής διάτμησης και λόγος του Poisson που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της ανηγμένης παραμόρφωσης και της μέσης μετάθεσης λαμβάνονται ίσοι με 33 GPa και 0.25, αντίστοιχα. Το πεδίο κάθε φορά προκύπτει από την ανάλυση των συνιστωσών των τάσεων στο βέλτιστα προσανατολισμένο επίπεδο του σεισμού. Τα επίκεντρα των σεισμών έχουν ληφθεί από τους Yang et al. (2005). Από την ίδια πηγή καθώς και από συγκεκριμένες εργασίες κάθε φορά αλλά και από τον κατάλογο του Harvard λήφθηκαν στοιχεία μηχανισμών γένεσης.

Το λογισμικό το οποίο χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό των τάσεων αποτελεί το πρόγραμμα *Dis3d* του Erikson (1986) το οποίο λαμβάνει υπόψη τις ιδιότητες του χώρου και για κάθε σημείο του χώρου τον οποίο ορίζουμε και υπολογίζει την αντίστοιχη τιμή της μεταβολής ΔCFF στο σημείο αυτό. Τις τιμές αυτές τις προβάλλουμε σε τομή στο βάθος το οποίο επιλέγουμε ανάλογα με τις ανάγκες που μας επιβάλλει η μελέτη, χαρτογραφημένες με τη βοήθεια της προαναφερόμενης χρωματικής κλίμακας.

Παρατίθεται ο πίνακας των σεισμών με μεγέθη μεγαλύτερα από 5.0 οι οποίοι χρησιμοποιήθηκαν και οι οποίοι χαρτογραφήθηκαν στο **Σχήμα 3** του πρώτου κεφαλαίου. Ο πίνακας αφορά πληροφορίες σχετικές με τις συντεταγμένες του epicέντρου, το βάθος της εστίας, του μεγέθους ροπής, τους μηχανισμούς γένεσης οι οποίοι έγιναν στις δύο επαρχίες Sichuan-Yunnan.

Πίνακας 1. Μηχανισμοί Γένεσης των σεισμών με μέγεθος $M \geq 5.0$ στη περιοχή Sichuan-Υννηαν από το 1976 μέχρι το 2004 (Harvard).

	Ημερομηνία	Ωρα	φ°N	λ°E	h	M	Sc. M.	Επίπεδο 1			Επίπεδο 2		
								ξ	δ	λ	ξ	δ	λ
1	19760529	12:23:29.0	24.39	98.65	15	6.7	1.22E+26	323	80	-172	232	82	-10
2	19760529	14:00:33.2	24.29	98.58	15	6.6	1.12 E+26	242	88	0	152	90	178
3	19760531	05:08:35.4	24.26	98.60	15	6.1	1.63E+25	342	72	-169	249	80	-18
4	19760721	15:10:52.2	24.74	98.57	15	6.1	1.98E+25	338	88	-178	248	88	-2
5	19760812	23:26:51.8	26.55	97.12	15	5.9	7.99E+24	148	45	93	323	45	87
6	19760816	14:06:55.0	32.60	104.42	15	6.7	1.29E+26	29	48	122	166	51	60
7	19760821	21:49:57.8	32.37	104.29	15.3	6.3	3.14E+25	198	40	113	349	54	72
8	19760823	03:30:11.5	32.11	104.21	19.6	6.4	4.60E+25	172	45	72	16	48	107
9	19761106	18:04:16.0	27.50	101.4	22.7	6.3	3.64E+25	19	66	-6	111	84	-156
10	19780831	03:26:53.5	27.41	101.04	10	5.3	1.10E+24	5	58	-26	109	68	-145
11	19780909	23:11:14.8	23.20	101.03	10	5.3	1.19E+24	223	69	7	131	84	158
12	19790315	12:52:30.4	23.24	101.61	10	6	1.33E+25	33	62	-3	124	87	-152
13	19790329	07:07:25.3	32.61	97.75	12	5.8	5.68E+24	358	75	-174	266	84	-15
14	19791221	06:32:00.1	26.61	97.78	10	5.3	1.13E+24	119	42	72	323	51	106
15	19800202	12:29:20.2	27.60	101.38	10	5.5	1.98E+24	213	74	-6	304	84	-164
16	19810123	21:13:55.6	30.86	101.35	10	6.5	7.28E+25	319	73	-4	51	86	-163
17	19810814	06:09:39.8	25.61	98.51	10	5.2	9.00E+23	153	46	-141	33	63	-52
18	19810816	18:55:45.7	25.53	97.02	37	5.1	4.95E+23	298	66	-7	30	83	-156
19	19810912	05:25:22.5	21.12	99.71	16	5.1	6.32E+23	77	60	13	341	79	150
20	19810919	06:51:02.3	22.84	101.54	10	5.4	1.33E+24	143	71	-172	50	82	-19
21	19820601	06:12:16.9	21.97	102.36	10	5.5	1.94E+24	49	66	-3	141	87	-156
22	19820615	23:24:38.0	31.90	100.55	10	5.6	3.46E+24	105	72	-3	196	87	-162
23	19820703	08:13:37.6	26.59	100.27	10	5.3	9.61E+23	347	26	-90	166	64	-90
24	19821008	13:34:58.7	25.69	99.61	10	5.2	8.11E+23	146	22	-112	350	69	-81
25	19821027	15:36:35.4	23.97	105.85	10	5.2	7.93E+23	33	74	6	301	85	164
26	19830624	07:18:27.3	21.85	103.67	10	6.2	2.84E+25	20	66	0	110	90	-156
27	19830715	04:48:54.4	21.93	103.29	15	5.3	1.00E+24	34	78	10	301	80	168
28	19840423	22:30:04.3	21.79	99.62	17	5.9	9.01E+24	84	69	13	349	78	159
29	19850418	05:52:55.7	25.39	102.64	10	5.7	4.93E+24	100	57	-170	5	82	-33
30	19850905	18:30:26.2	25.29	98.23	60.7	5.5	2.15E+24	14	65	177	105	87	25
31	19860313	08:41:22.1	25.45	101.02	15	5.3	1.13E+24	330	25	-104	165	66	-84
32	19860806	19:55:20.3	29.15	101.2	15	5.3	1.17E+24	40	41	-162	296	78	-50
33	19870107	18:19:11.4	34.23	103.86	15	5.4	1.44E+24	170	65	28	68	65	152
34	19880903	12:52:56.4	29.95	97.38	15	4.9	2.35E+23	248	35	-106	88	57	-79
35	19881106	13:03:31.2	23.00	99.68	15	7	3.66E+26	333	78	174	64	84	12
36	19881107	02:40:03.1	23.38	99.42	15	5.2	8.40E+23	122	55	40	6	58	137
37	19881115	10:28:13.2	22.80	99.23	15	5.3	1.02E+24	333	70	180	63	90	20

38	19881127	04:17:58.5	22.70	100.17	15	5.5	1.93E+24	71	61	14	334	78	151
39	19881130	08:13:28.9	22.15	99.54	15	6.1	1.49E+25	167	75	-177	76	87	-15
40	19890118	18:22:53.9	29.88	100.13	15	5.2	7.69E+23	120	50	-20	223	75	-138
41	19890301	03:25:10.6	21.61	98.30	58.1	5.7	5.10E+24	73	79	9	341	82	169
42	19890415	20:34:21.2	29.92	99.37	15	6.4	5.33E+25	273	29	-73	74	62	-99
43	19890425	02:13:31.2	29.90	99.41	15	6.1	1.80E+25	245	40	-114	96	54	-71
44	19890503	05:53:12.2	30.00	99.69	15	6.2	2.23E+25	240	44	-117	95	52	-66
45	19890503	15:41:40.5	29.83	99.43	15	5.8	5.60E+25	271	45	-90	91	45	-90
46	19890507	00:38:20.3	23.46	99.65	15	5.6	3.32E+24	335	76	169	68	79	15
47	19890721	03:09:22.5	29.79	99.54	15	5.6	3.27E+24	59	38	-127	283	60	-64
48	19890922	02:25:56.8	30.87	102.83	15	6.1	1.75E+25	352	18	61	202	74	99
49	19920423	14:18:40.9	22.54	98.97	15	6.1	1.58E+25	354	77	-168	262	79	-13
50	19920423	15:32:54.0	22.40	98.85	15	6.1	1.93E+25	345	68	-173	252	84	-22
51	19930126	20:32:08.7	22.86	100.88	24.4	5.6	3.07E+24	50	82	-5	141	85	-172
52	19930717	09:46:39.3	27.42	99.82	15	5.4	1.36E+24	140	33	-55	280	64	-110
53	19930814	14:30:07.9	25.63	101.8	33	5.2	7.54E+23	209	76	15	115	76	165
54	19940111	00:52:04.2	24.80	97.40	15	6.1	1.60E+23	106	25	-85	281	65	-92
55	19940406	07:03:31.4	25.62	97.05	15	5.8	7.15E+24	96	57	26	352	68	144
56	19941229	18:58:34.1	28.8	103.59	33	5.1	5.91E+23	38	55	147	149	63	40
57	19950424	16:13:14.2	22.88	103.16	33	5.2	7.85E+23	102	80	-173	11	83	-10
58	19950709	20:31:38.3	21.92	99.28	15	5.9	7.53E+24	64	66	3	333	88	156
59	19950711	21:46:50.7	21.89	99.22	15	6.8	1.91E+26	60	85	1	330	89	175
60	19951023	22:46:57.5	25.87	102.54	15	6.2	2.18E+25	13	75	-9	105	81	-165
61	19951218	04:57:11.9	34.74	97.63	33	5.7	3.98E+24	46	81	176	137	86	9
62	19960203	11:14:31.8	27.15	100.28	15	6.6	9.94E+25	0	36	-68	153	57	-105
63	19960204	16:58:13.9	26.84	100.38	15	5.5	2.85E+24	358	33	-86	173	57	-93
64	19960206	07:36:21.9	27.52	100.12	15	5.4	1.82E+24	132	57	-141	18	58	-40
65	19960924	19:24:54.5	27.18	100.70	15	5.5	1.96E+24	321	41	-98	151	50	-83
66	19961221	08:39:49.0	30.67	99.90	15	5.4	1.57E+24	28	71	167	294	78	-19
67	19970809	04:48:07.6	30.16	97.46	15	5.4	7.78E+23	73	27	-90	253	63	-90
68	19971023	12:28:38.2	27.14	100.55	15	5.1	5.67E+23	153	20	-110	353	72	-83
69	19981002	12:49:38.4	27.45	101.52	15	5.3	1.22E+24	332	16	-89	151	74	-90
70	19981119	11:38:17.7	27.25	101.47	15	5.6	2.69E+24	31	79	-9	123	81	-169
71	20000114	22:09:06.3	25.34	101.28	33	5.5	1.92E+24	25	77	-2	116	88	-167
72	20000114	23:37:10.8	25.39	101.40	33	5.9	8.33E+24	27	78	-6	118	84	-168
73	20000607	21:47:00.2	26.70	97.15	37	6.3	3.74E+25	290	38	41	166	66	120
74	20000608	12:21:12.4	26.43	97.41	18.8	5.1	5.77E+23	126	33	67	333	60	104
75	20001006	12:05:41.3	24.18	97.13	72.7	5.4	1.64E+24	144	77	166	237	77	14
76	20010223	00:9:28.2	29.44	101.32	33	5.6	3.03E+24	92	34	-73	252	57	-101
77	20010412	10:47:08.9	24.77	98.81	15	5.6	3.21E+24	57	63	-28	161	65	-150
78	20010523	21:10:45.6	27.53	101.11	33	5.4	1.77E+24	8	87	-2	98	88	-177
79	20010709	23:51:34.7	24.89	101.25	33	5.1	6.41E+23	233	50	2	142	89	140
80	20011027	05:35:46.0	26.36	101.01	15	5.5	2.58E+24	35	69	1	305	89	159

81	20020808	11:42:10.6	30.69	99.95	55.1	5.5	9.60E+23	92	41	-86	267	49	-93
82	20030721	15:16:38.3	25.98	101.32	15	5.9	8.58E+24	200	80	-6	291	84	-170
83	20030916	08:00:46.3	29.03	100.97	15	5.9	2.43E+23	61	23	-119	272	70	-79
84	20031016	12:28:11.5	25.89	101.52	33	5.6	2.88E+24	18	88	-1	108	89	-178
85	20031113	02:35:15.4	34.61	104.10	15	5.1	5.47E+23	347	42	53	212	58	118
86	20031114	18:49:46.0	27.68	103.21	15	5.1	2.76E+24	250	36	-170	152	84	-55
87	20040524	22:01:02.5	27.06	97.21	26.5	4.9	2.96E+23	339	45	107	136	48	74
88	20040810	10:26:17.6	27.16	103.78	15.1	5.3	1.20E+24	156	85	1	66	89	175
89	20040826	13:54:29.1	33.76	104.90	18.2	4.6	9.76E+22	334	46	38	216	64	130

Κεφάλαιο 3

Καθορισμός των Ρυθμών Ολίσθησης στα πιο Σημαντικά Ρήγματα της Περιοχής

3.1 Εισαγωγή

Στο εσωτερικό της περιοχής μελέτης συσσωρεύεται έντονη παραμόρφωση εξαιτίας της ισχυρής κίνησης της λιθοσφαιρικής συμπίεσης η οποία δεν κατανέμεται τυχαία στον φλοιό αλλά συγκεντρώνεται αθροιστικά στις ασθενείς ζώνες διάρρηξης που περιγράφηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο και στη συνέχεια εκλύεται είτε με την εκδήλωση ισχυρών σεισμών είτε μέσω ασεισμικής ολίσθησης. Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφονται τόσο οι κινήσεις της μικροπλάκας Sichuan-Yunnan οι οποίες προκαλούνται αποκλειστικά από τη κίνηση του Θιβετιανού υψιπέδου όσο και οι ρυθμοί ολίσθησης των σημαντικότερων ρηγμάτων. Οι τιμές αυτές έχουν προκύψει από διάφορες σεισμολογικές, γεωδαιτικές, γεωλογικές μεθόδους και είναι ιδιαίτερα υψηλές για τις περισσότερες δομές.

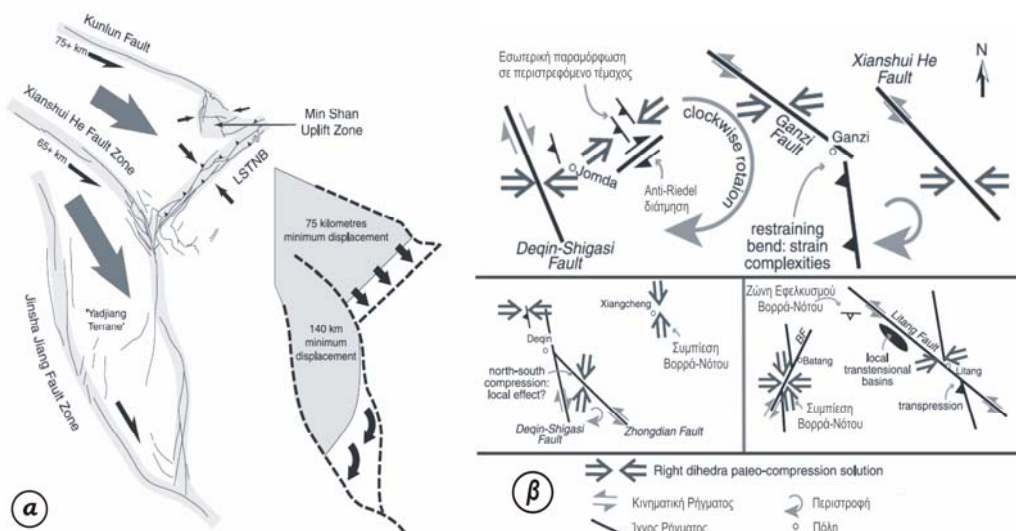
Με τον τρόπο αυτό εξασφαλίζεται η εξώθηση της μάζας της Κίνας προς τα ανατολικά, μακριά από το μέτωπο σύγκρουσης των Ιμαλαΐων με αποτέλεσμα το κύριο σώμα του υψιπέδου του Θιβέτ να εκτελεί από το Άνω Καινοζωικό μία κίνηση διαφυγής προς τα βόρεια και ανατολικά με αθροιστική μετατόπιση ορισμένες χιλιάδες χιλιομέτρων (Tapponier and Molnar 1977). Η κίνηση αυτή διαπιστώνεται ότι απορροφά το μεγαλύτερο τμήμα της παραμόρφωσης ρεολογικού τύπου όπως αποκαλείται, η οποία εκδηλώνεται εκτός από την εξώθηση και την ασεισμική ολίσθηση των μεγάλων ρηγμάτων και με την υψηλή σεισμικότητα. Όπως προαναφέρθηκε το Θιβετιανό τέμαχος πραγματοποιεί την κίνηση αυτή τα τελευταία 4 Ma ενώ ταυτόχρονα περιστρέφεται δεξιόστροφα γύρω από το ανατολικό άκρο του άξονα των Ιμαλαΐων (Shen et al., 2001, Royden et al., 1997). Στην κίνηση του αυτή συμπαρασύρει την μικροπλάκα της Νοτιοανατολικής Κίνας κατά τέτοιο τρόπο ώστε να περιστρέφεται δεξιόστροφα. Το ποσοστό αυτό της παραμόρφωσης απορροφάται μακροπρόθεσμα από τις μεγάλες ζώνες διάτμησης οι οποίες αποδεικνύεται ότι διευκολύνουν την οριζόντια εξώθηση του υλικού του φλοιού μακριά από το μέτωπο της ηπειρωτικής σύγκρουσης (Peltzer and Saucier 1996).

3.2 Γεωδαιτικές Μετρήσεις

Στο χάρτη του Σχήματος 1 διακρίνεται η σταδιακή εκτροπή των μεγάλων δομών του Θιβέτ από την αρχική διεύθυνση τους, κατά τη διάσχιση της Νοτιοανατολικής Κίνας, αποκτώντας διεύθυνση βορρά-νότου. Η διαδοχική αυτή κάμψη διαπιστώνεται εύκολα αν παρατηρήσουμε την δομή του ρήγματος Xianshuihe η οποία περιστρέφεται καμπυλούμενη προς τα νοτιοδυτικά. Η γεωλογία των νεοσχηματισμένων δομών καθώς και μετρήσεις GPS αποδεικνύουν ότι η νότια Κίνα αποτελεί μία ευρεία ζώνη δεξιόστροφης διάτμησης η οποία αρχίζει από το εσωτερικό του Θιβέτ και επιμηκώνεται προς τη Νότια Κίνα και τη Βιρμανία, μεταβιβάζει τη βορειοανατολική κίνηση του Θιβέτ προς τα νότια και μεταφέρεται από το περιβάλλον συμπίεσης στη ζώνη οριζόντιας μετατόπισης. Η παρατήρηση αυτή διαπιστώνεται από το γεγονός ότι μια ιδιαίτερα μεγάλη αριστερόστροφη ζώνη όπως η ζώνη διάρρηξης Xianshuihe-Xiaojiang δραστηριοποιείται μόλις σε απόσταση 200km από την δεξιόστροφη σχεδόν παράλληλη ζώνη διάρρηξης όπως του Red River.

Η ξεχωριστή μικροπλάκα των επαρχιών Sichuan-Yunnan περιστρέφεται δεξιόστροφα όπως αποδεικνύεται από γεωδαιτικές μετρήσεις σύμφωνα με τις οποίες η Νοτιοανατολική Κίνα στρέφεται αριστερόστροφα με ρυθμό $0,2^{\circ}/\text{Myr}$ γύρω από ένα πόλο Euler ο οποίος βρίσκεται νοτιοδυτικά του Βόρνεο σύμφωνα με τους Holt et al. (1991) και Peltzer and Saucier (1996). Συνεπώς η παραμόρφωση περιστρέφεται εξίσου κατά 90° , γεγονός που υποδηλώνει ταυτόχρονη στρέψη του άξονα συμπίεσης κατά 90° , από βορρά-νότο σε ανατολή-δύση (Tarronier and Molnar, 1977). Η ενεργή μετακίνηση οριζόντιας μετατόπισης καθώς και ο εφελκυσμός προς τα ανατολικά τεκμηριώνεται από πολλούς ερευνητές οι οποίοι συμφωνούν στο γεγονός ότι η περιοχή έχει διέλθει από τεκτονικές διακυμάνσεις οι οποίες αφορούν τόσο την παραμόρφωση όσο και την εφαρμοζόμενη τάση (Holt et al., 1991). Η ροή μάζας προς τα νότια διευκολύνεται από μεγάλα κυρτά ρήγματα τα οποία μας ενδιαφέρουν και τα οποία οριοθετούν μικρές πλάκες και προκαλούν το σύνολο της παραμόρφωσης. Πολλά από αυτά τα ρήγματα όπως το Gazni, το Xianshuihe-Xiaojiang, το Litang, το Zhondian και το Dien Bien Phu φαίνεται να έχουν περιστραφεί δεξιόστροφα τα τελευταία 6-8Ma. Η περιοχή αυτή χαρακτηρίζεται από έντονη σεισμικότητα και έντονους ρυθμούς παραμόρφωσης. Οι περισσότερες δομές παρουσιάζουν μεγάλες γωνίες κλίσης σχεδόν κατακόρυφες, με αποτέλεσμα ο άξονας των ελαχίστων τάσεων

να είναι σχεδόν οριζόντιος με προσανατολισμό BBD-NNA (Zheng et al., 1987). Στα νότια της περιοχής το πεδίο τάσεων είναι ακόμα πιο πολύπλοκο λόγω της περιστροφής των αξόνων των τάσεων. Στο εσωτερικό οι άξονες P έχουν διεύθυνση BBD-NNA, διαφέροντας από τον προσανατολισμό που έχουν περιμετρικά και αυτό δηλώνει ότι η ρομβική πλάκα συμπεριφέρεται ως ένα ενιαίο σώμα (Wu et al., 1988). Οι μηχανισμοί γένεσης στην επαρχία Yunnan δείχνουν εφελκυσμό σε διεύθυνση Α-Δ και συμπίεση σε διεύθυνση Βορρά-Νότου. Δημιουργούνται συζυγή ζεύγη ρηγμάτων τα οποία δραστηριοποιούνται ως δεξιόστροφα ΝΑ διεύθυνσης ρήγματα και αριστερόστροφα ΝΔ διεύθυνσης ρήγματα (Holt et al., 1991). Τα ρήγματα στη Νότια Yunnan και την Ινδοκίνα ενεργοποιήθηκαν με την έναρξη της ηπειρωτικής σύγκρουσης, όταν η Ινδοκίνα κινήθηκε νοτιοανατολικά σε σχέση με την Ευρασία (Tarronier et al., 1982, Tarronier et al., 1990). Η παραμόρφωση στην επαρχία Yunnan συντελείται μέσω δεξιόστροφων και κανονικών ρηγμάτων. Στο **Σχήμα 18α**, διακρίνεται η ρομβικού σχήματος περιοχή και με τα βέλη η κίνηση την οποία πραγματοποιεί. Με το **Σχήμα 18β** απεικονίζονται οι συζυγείς δομές οι οποίες δημιουργούνται εξαιτίας της περιστροφής του άξονα συμπίεσης (Wilson et al., 2006).



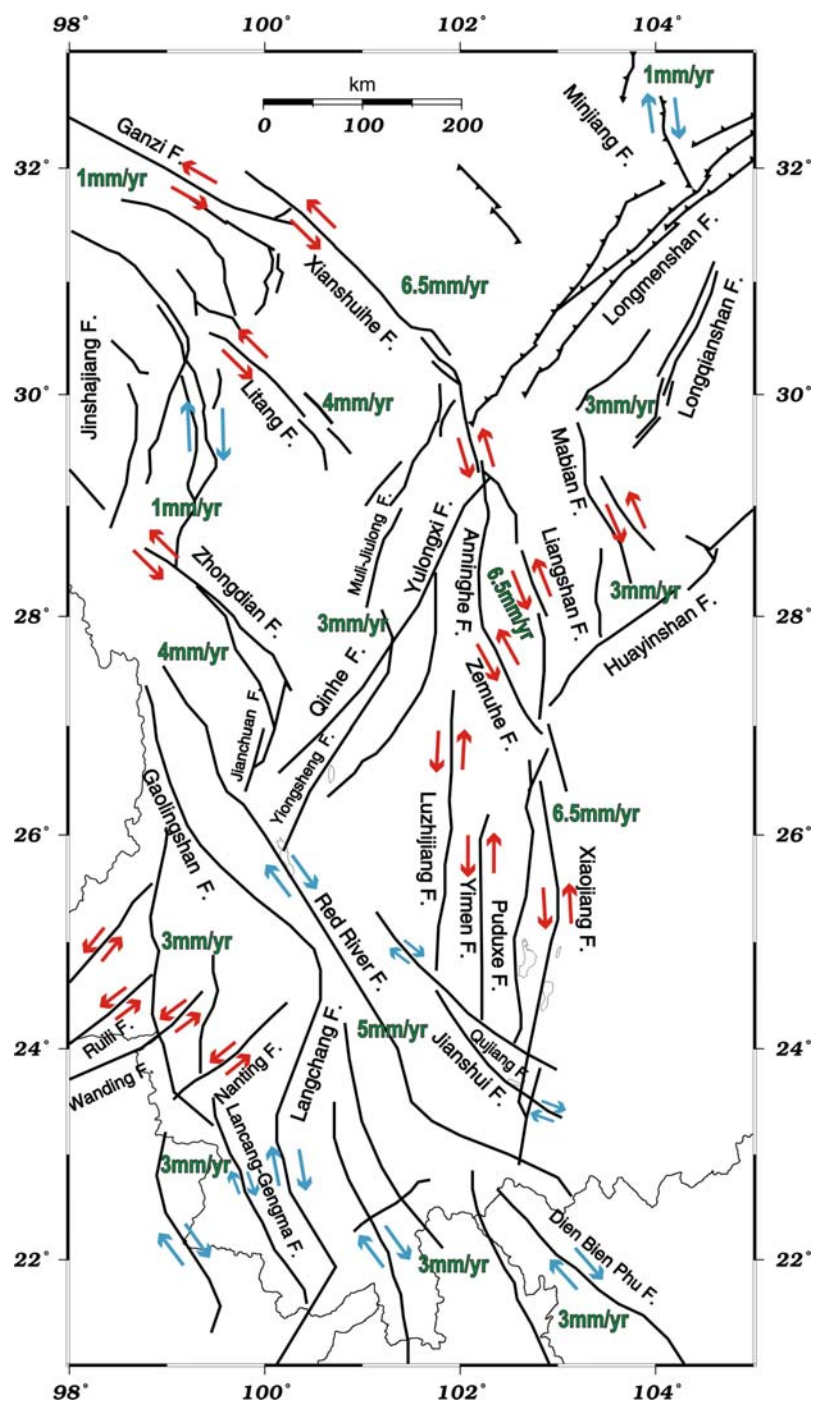
Σχήμα 18. α) Οι επιμέρους κινήσεις που πραγματοποιούν οι μικροπλάκες στη περιοχή. Με τα μεγάλα βέλη απεικονίζονται οι κινήσεις τις οποίες πραγματοποιούν η μικροπλάκα Sichuan-Yunnan και η Qinghai-Sichuan η οποία τερματίζεται στη ζώνη επίπλευσης Longmenshan. **β)** Με τα ανοιχτά βέλη απεικονίζεται η διεύθυνση της μέγιστης συμπίεσης ενώ με τα συμπαγή βέλη κατά μήκος των ρηγμάτων εκφράζεται η κινηματική τους αλλά και η περιστροφή του τεμάχους στο οποίο ανήκουν (Wilson et al., 2006).

3.3 Ρυθμοί Ολίσθησης των Κύριων Ρηγμάτων

Οι μεθοδολογία η οποία χρησιμοποιείται προϋποθέτει την ποσοτικοποίηση των αργών συνεχών κινήσεων των ενεργών ρηγμάτων αφού ο συνυπολογισμός τους είναι απαραίτητος προκειμένου να εφαρμοστεί η μεθοδολογία της εξέλιξης των τάσεων. Καθώς οι μεγάλες δομές ολισθαίνουν διαρκώς ασεισικά για μεγάλα χρονικά διαστήματα του γεωλογικού χρόνου, η μετατόπιση τους αποτυπώνεται στους γεωλογικούς σχηματισμούς και στη μορφολογία η μελέτη των οποίων συμβάλει στον προσδιορισμό του αντίστοιχου ρυθμού ολίσθησης του ρήγματος. Οι παρατηρήσεις συνεπώς που αφορούν τους ρυθμούς ολίσθησης και τις ταχύτητες κινήσεων των επιμέρους μικροπλακών προκύπτουν τόσο από γεωλογικά, τεκτονικά, γεωμορφολογικά δεδομένα όσο και από γεωδαιτικά στοιχεία όπως μετρήσεις GPS (*Global Positioning Systems*). Τα πιο αξιόπιστα από αυτά τα δεδομένα έχουν υιοθετηθεί από τις μελέτες διάφορων ερευνητών στην παρούσα εργασία προκειμένου να υπολογιστεί η τεκτονική φόρτιση στην περιοχή μελέτης. Όπως προαναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, η τεκτονική φόρτιση μιας περιοχής πραγματοποιείται με ρυθμό ανάλογο προς την ασεισική ολίσθηση των ρηξιγενών δομών τα οποία κυριαρχούν σε μια περιοχή. Τα πιο αξιόπιστα διαθέσιμα στοιχεία από αυτά, έχουν χρησιμοποιηθεί στο εξελικτικό μοντέλο των τάσεων.

Στο **Σχήμα 19** χαρτογραφούνται τα κύρια συστήματα ρηγμάτων συνοδευμένα με τις ονομασίες τους καθώς και οι κυριότεροι ρυθμοί ολίσθησης οι οποίοι χρησιμοποιήθηκαν για κάθε τέμαχος. Η παρουσία των οριζόντιας μετατόπισης ρηξιγενών ζωνών είναι έντονη στη περιοχή και ο αριστερόστροφος ή δεξιόστροφος χαρακτήρας είναι άμεσα εξαρτημένος από τον προσανατολισμό των ρηγμάτων σε σχέση με το γενικό πεδίο τάσεων. Ακολουθεί μια αναφορά στις διαθέσιμες πληροφορίες που αφορούν τους ρυθμούς ολίσθησης των επιμέρους ρηγμάτων και σε αυτές οι οποίες επιλέχτηκαν. Τα δεδομένα αυτά παρουσιάζονται κατά περιοχές. Τα ρήγματα της κάθε περιοχής διαιρέθηκαν σε μικρότερα τεμάχη σύμφωνα με τις γεωμετρικές τους ιδιότητες και καταγράφηκαν στοιχεία όπως οι συντεταγμένες του κέντρου τους, η παράταξη, η γωνία κλίσης, το μήκος καθώς και ο ρυθμός ολίσθησης τους. Τα ρήγματα τα οποία συμμετείχαν στους υπολογισμούς του εξελικτικού μοντέλου παρουσιάζονται στους αντίστοιχους χάρτες με την ονομασία που αποδόθηκε σε κάθε τέμαχος. Πιο αναλυτικά, ο ρυθμός ολίσθησης καθώς και οι

γεωμετρικές παράμετροι που αντιστοιχούν σε κάθε τμήχος εμπεριέχονται στους Πίνακες 2, 3 και 4 για κάθε υποπεριοχή αντίστοιχα.

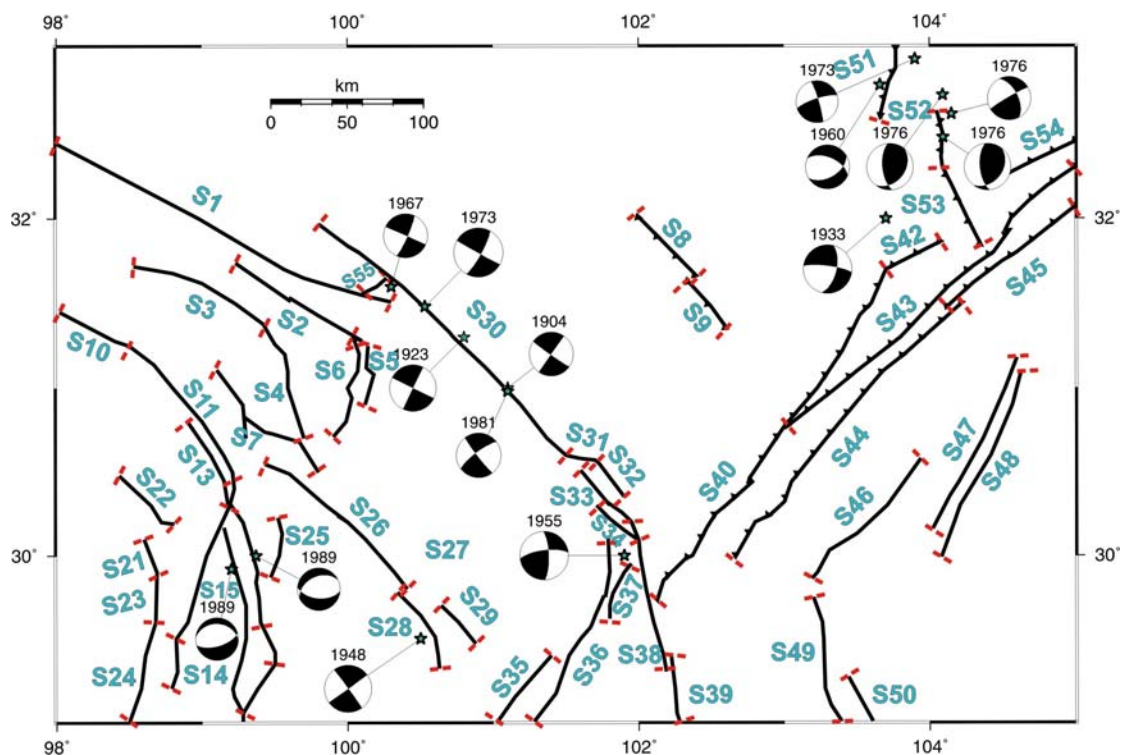


Σχήμα 19. Ρυθμοί ολίσθησης των σημαντικότερων ρηγμάτων στην περιοχή μελέτης. Τα κόκκινα βέλη παριστάνουν την αριστερόστροφη οριζόντια μετατόπιση ενώ τα γαλάζια βέλη αφορούν τη δεξιόστροφη οριζόντια μετατόπιση.

Ξεκινώντας από τη βόρεια περιοχή τα ρήγματα διαιρέθηκαν σε 55 τμήχα τα οποία παρουσιάζονται στο **Σχήμα 20** μαζί με τις ονομασίες τους. Στο ίδιο σχήμα

παρουσιάζονται και οι ισχυροί σεισμοί των οποίων η μεταβολή των τάσεων υπολογίζεται. Σύμφωνα με γεωλογικές παρατηρήσεις των Allen et al. (1991), το ρήγμα Xianshuihe χαρακτηρίζεται από ρυθμό ολίσθησης $15 \pm 5 \text{ mm/yr}$ στο βορειότερο τμήμα του, το οποίο σταδιακά μειώνεται σε 5 mm/yr στο νότιο τέμαχος. Η μέση τιμή η οποία επιλέχτηκε είναι 6.5 mm/yr . Η ζώνη διάρρηξης Longmenshan εκτείνεται παράλληλα με το ανατολικό περιθώριο του Θιβέτ και αποτελεί ένα μέτωπο σύγκρουσης όμοια επιβλητικό με αυτό των Ιμαλαΐων. Στην περιοχή αυτή ο φλοιός σημείωσε βράχυνση μέχρι και 100 km ως το Πλειόκαινο, ωστόσο απουσιάζει μεταγενέστερη συμπίεση. Σύμφωνα με γεωδαιτικές μετρήσεις η σύγχρονη βράχυνση υπολογίζεται στα $0-5 \text{ mm/yr}$, ταχύτητες που είναι μικρές και ασήμαντες συγκριτικά με τις αντίστοιχες στα ρήγματα του ανατολικού περιθωρίου του Θιβέτ (Royden et al., 1997). Εφίπνευσεις κατά μήκος των όρεων Longmen, απορροφούν μέρος της προς τα ανατολικά κίνησης. Οι ταχύτητες αυτές δείχνουν ενεργή βράχυνση $< 3 \text{ mm/yr}$. Στα τεμάχη S40-S45 έχει αποδοθεί ρυθμός ολίσθησης 2 mm/yr . Στο βορειότερο τμήμα του Longmenshan στο Min Shan, υπάρχει εκτός από την συμπίεση και οριζόντια μετατόπιση κατά μήκος του ρήγματος. Η οριζόντια συμπίεση υπολογίζεται ότι είναι της τάξης των 10 mm/yr για τη ζώνη αυτή (Aouac et al., 1993). Σύμφωνα με τους Kirby et al. (2000) η ολίσθηση πάνω στο ρήγμα Minjiang κατά το Τεταρτογενές ήταν μικρότερη από 1 mm/yr (S51-S53). Τα τεμάχη τα οποία αντιστοιχούν στη ζώνη διάρρηξης Min Jiang αντιστοιχούν στα τεμάχη S51-S53 του Σχήματος 20.

Το ρήγμα Litang έχει μελετηθεί από τους Tang et al. (1993), οι οποίοι του αποδίδουν ένα ρυθμό ολίσθησης από το Ολόκαινο μέχρι σήμερα ίση με 5 mm/yr (τεμάχη S26-S29) ενώ η οριζόντια συμπίεση είναι της τάξης των 10 mm/yr για την ζώνη αυτή (Aouac et al., 1993). Όσον αφορά τα ρήγματα Lijiang-Dafu, σύμφωνα με γεωλογικές παρατηρήσεις τις οποίες συγκέντρωσαν οι Han et al. (2004), ο μέσος οριζόντιος και κατακόρυφος ρυθμός ολίσθησης είναι αντίστοιχα 0.84 mm/yr και 0.70 mm/yr από το Τεταρτογενές ($\sim 2.5 \text{ Ma}$) οπότε και ξεκίνησε η δράση του εφελκυστικού περιβάλλοντος σε ευρύ αριστερόστροφο πεδίο τάσεων. Στις ζώνες διάρρηξης Ganzi (S1-S7) ο ρυθμός ολίσθησης για όλο το σύστημα ρηγμάτων είναι 1 mm/yr και το ίδιο ισχύει για τα ρήγματα Jinshajiang (S10-S15, S21-S24) και Batang (S25). Στα ρήγματα Longqianshan (S46-S48) και Mabian (S49-S50) οι ρυθμοί ολίσθησης ανέρχονται σε 3 mm/yr . Στα τεμάχη S8 και S9 τα οποία δεν εκδηλώνουν μεγάλη σεισμικότητα έχουν ρυθμό ολίσθησης 1 mm/yr .



Σχήμα 20. Τα επιμέρους τεμάχη ρηγμάτων τα οποία εισήχθησαν στην εφαρμογή του μοντέλου για την βόρεια περιοχή μελέτης, τα επίκεντρα (αστερίσκοι) και οι μηχανισμοί γένεσης των ισχυρών σεισμών οι οποίοι περιλαμβάνονται στο εξελικτικό μοντέλο.

Στον **Πίνακα 2** παρουσιάζονται οι κωδικοί των 56 ρηγμάτων της βόρειας περιοχής καθώς και οι πληροφορίες που αφορούν (συντεταγμένες κέντρου, μήκος, παράταξη, κλίση) στα οποία διαχωρίστηκαν τα μεγάλα ρήγματα και οι αντίστοιχοι ρυθμοί ολίσθησης.

Πίνακας 2. Ρυθμοί Ολίσθησης και γεωμετρικές παράμετροι για τα ρήγματα της Βόρειας υποπεριοχής Μελέτης

Αριθμός Τεμάχους Ρήματος	Συντεταγμένες Κέντρου Ρήματος		Μήκος (km)	Βάθος (km)	Παράταξη (°)	Κλίση (°)	Ρυθμός Ολίσθησης (mm/yr)
	Γεωγραφικό πλάτος (°)	Γεωγραφικό Μήκος (°)					
S1	31.945	99.107	131.944	3.0- 15.0	298	65	1.0
S2	31.493	99.669	52.778	3.0-15.0	300	65	1.0
S3	31.625	99.000	50.000	3.0-15.0	300	70	1.0
S4	31.034	99.584	41.667	3.0-15.0	343	70	1.0
S5	31.066	100.158	20.833	3.0-15.0	190	75	1.0

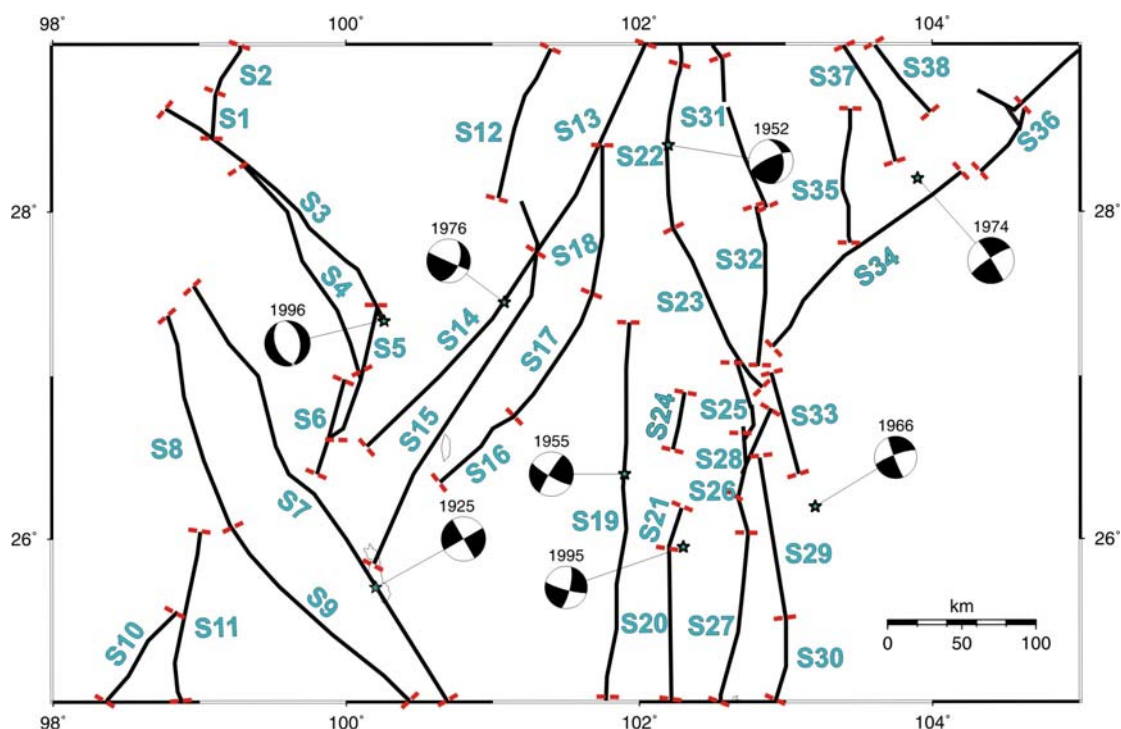
S6	30.974	99.997	34.722	3.0-15.0	190	75	1.0
S7	30.760	99.382	50.000	3.0-15.0	313	75	1.0
S8	31.832	102.198	30.556	3.0-15.0	137	75	1.0
S9	31.486	102.489	22.222	3.0-15.0	137	75	1.0
S10	31.345	98.261	26.389	3.0-15.0	125	75	1.0
S11	30.905	98.890	56.944	3.0-15.0	140	75	1.0
S12	29.864	98.975	79.167	3.0-15.0	200	75	1.0
S13	30.552	99.074	31.944	3.0-15.0	140	75	1.0
S14	29.348	98.820	16.667	3.0-15.0	182	75	1.0
S15	29.915	99.221	29.167	3.0-15.0	175	80	1.0
S16	29.447	99.276	30.556	3.0-15.0	195	80	1.0
S17	29.097	99.258	13.889	3.0-15.0	180	75	1.0
S18	29.964	99.357	41.667	3.0-15.0	170	75	1.0
S19	29.487	99.463	15.278	3.0-15.0	160	75	1.0
S20	29.217	99.382	22.222	3.0-15.0	337	75	1.0
S21	29.987	98.641	12.500	3.0-15.0	165	80	1.0
S22	29.729	98.684	23.611	3.0-15.0	150	75	1.0
S23	30.358	98.573	16.667	3.0-15.0	183	75	1.0
S24	29.311	98.596	34.722	3.0-15.0	190	75	1.0
S25	30.047	99.533	20.833	3.0-15.0	187	84	1.0
S26	30.213	99.974	66.667	3.0-15.0	138	80	4.0
S27	29.880	100.569	25.000	3.0-15.0	135	80	4.0
S28	29.578	100.522	27.778	3.0-15.0	135	80	1.0
S29	29.606	100.757	19.444	3.0-15.0	135	80	1.0
S30	31.295	100.734	118.056	3.0-15.0	315	80	6.5
S31	30.566	101.610	11.111	3.0-15.0	277	87	6,5
S32	30.452	101.793	15.278	3.0-15.0	315	80	6.6
S33	30.305	101.789	30.556	3.0-15.0	315	80	6,5
S34	30.192	101.830	23.611	3.0-15.0	310	85	6.5
S35	29.207	101.187	29.167	3.0-15.0	221	85	2.0
S36	29.509	101.595	69.444	3.0-15.0	221	80	2.0
S37	29.701	102.066	22.222	3.0-15.0	190	80	6.5
S38	29.782	101.824	50.000	3.0-15.0	160	80	6.6
S39	29.201	102.241	22.222	3.0-15.0	170	80	6.7
S40	30.084	102.411	53.472	3.0-15.0	220	50	2.0
S41	31.053	103.279	90.278	3.0-15.0	211	50	2.0
S42	31.770	103.888	22.222	3.0-15.0	240	50	2.0
S43	31.514	104.043	125.000	3.0-15.0	230	50	2.0
S44	30.789	103.393	122.222	3.0-15.0	215	50	2.0
S45	31.754	104.557	47.222	3.0-15.0	230	50	2.0

S46	30.208	103.614	58.333	3.0-15.0	220	80	3.0
S47	30.616	104.319	66.667	3.0-15.0	200	80	1.5
S48	30.518	104.374	70.833	3.0-15.0	200	80	1.5
S49	29.352	103.279	44.444	3.0-15.0	168	80	3.0
S50	29.145	103.529	16.667	3.0-15.0	170	80	1.0
S51	32.791	103.723	25.000	3.0-15.0	190	80	1.0
S52	32.618	103.878	22.222	3.0-15.0	86	80	1.0
S53	32.215	104.142	50.000	3.0-15.0	170	80	1.0
S54	32.335	104.701	36.111	3.0-15.0	240	50	1.0
S55	31.597	100.181	11.111	3.0-15.0	245	45	6.5
S56	32.244	103.620	41.666	3.0-15.0	10	60	1.0

Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των 38 ρηγμάτων της κεντρικής περιοχής μελέτης παρουσιάζονται στον χάρτη του **Σχήματος 21** και περιγράφονται στον **Πίνακα 3**. Τα ρήγματα Anninghe και Zemuhe παρουσιάζουν ρυθμούς ολίσθησης 6-7mm/yr από το Τεταρτογενές μέχρι σήμερα (Wen et al., 2000). Στα τεμάχια αυτά (S22-S23) αποδόθηκαν τιμές ίσες με 6.5mm/yr. Οι Shen et al. (2003) βασισμένοι σε μεθόδους ραδιοχρονολόγησης σε ιζήματα πάνω στις ζώνες μετατόπισης και σε γεωμορφολογικές αναλύσεις υπολόγισαν τους αριστερόστροφους ρυθμούς ολίσθησης πάνω στο ρήγμα Xiaojiang. Μέχρι το Μέσο Πλειστόκαινο ο μέσος ρυθμός ολίσθησης υπολογίζεται για το δυτικό κλάδο του ρήγματος ίσος με 5mm/yr, στο μέσο τμήμα 6.8mm/yr και στο νότιο ανατολικό τμήμα 4-4.5mm/yr. Κατά το Μέσο Πλειστόκαινο ο μέσος ρυθμός ολίσθησης ήταν μικρότερος. Στο δυτικό τμήμα ήταν 5mm/yr και στο ενδιάμεσο τμήμα του νοτιότερου κλάδου του ρήγματος, 4-4.5 mm/yr. Από το Άνω Πλειστόκαινο οι ρυθμοί αυτοί παίρνουν τις τιμές 7mm/yr στο μέσο τμήμα του δυτικού κλάδου, 9mm/yr στο βόρειο τμήμα του ανατολικού κλάδου και 6mm/yr στο νότιο τμήμα του ανατολικού κλάδου. Ο ρυθμός ολίσθησης σήμερα και στους δύο κλάδους φαίνεται να είναι περίπου 6.5mm/yr όπως βορειότερα στο Xianshuihe. Έτσι σε ολόκληρο το μήκος της αριστερόστροφης ζώνης, δηλαδή στα τεμάχια S30-S34, S38, S39 αποδίδεται ο ίδιος μέσος ρυθμός ολίσθησης.

Οι ζώνες διάρρηξης Zhongdian (τεμάχια S3-S5) και Jiangchuan (S6) έχουν ρυθμό ολίσθησης ίσο με 4mm/yr. Στη περιοχή αυτή συμπεριλαμβάνεται και το σεισμικό τμήμα της ρηξιγενούς ζώνης Red River (S7). Τα αριστερόστροφα ρήγματα βορρά νότου παράλληλα του ρήγματος Xiaojiang όπως τα ρήγματα τα Puduhe, Yimen και Luzhijiang έχουν ρυθμό ολίσθησης 3mm/yr. Οι ζώνες διάρρηξης

Huayinshan (S34-S38) και Liangshan (S31-S32) καθώς και τα ρήγματα Yulongxi (S13) Qinhe (S14), Yiongheng (S15) και Muli-Jiulong (S12) έχουν ρυθμό ολίσθησης ίσο με 3mm/yr.



Σχήμα 21. Τα επιμέρους τεμάχια ρηγμάτων τα οποία εισήχθησαν στην εφαρμογή του μοντέλου για την κεντρική περιοχή μελέτης, τα επίκεντρα (αστερίσκοι) και οι μηχανισμοί γένεσης των ισχυρών σεισμών οι οποίοι περιλαμβάνονται στο εξελικτικό μοντέλο.

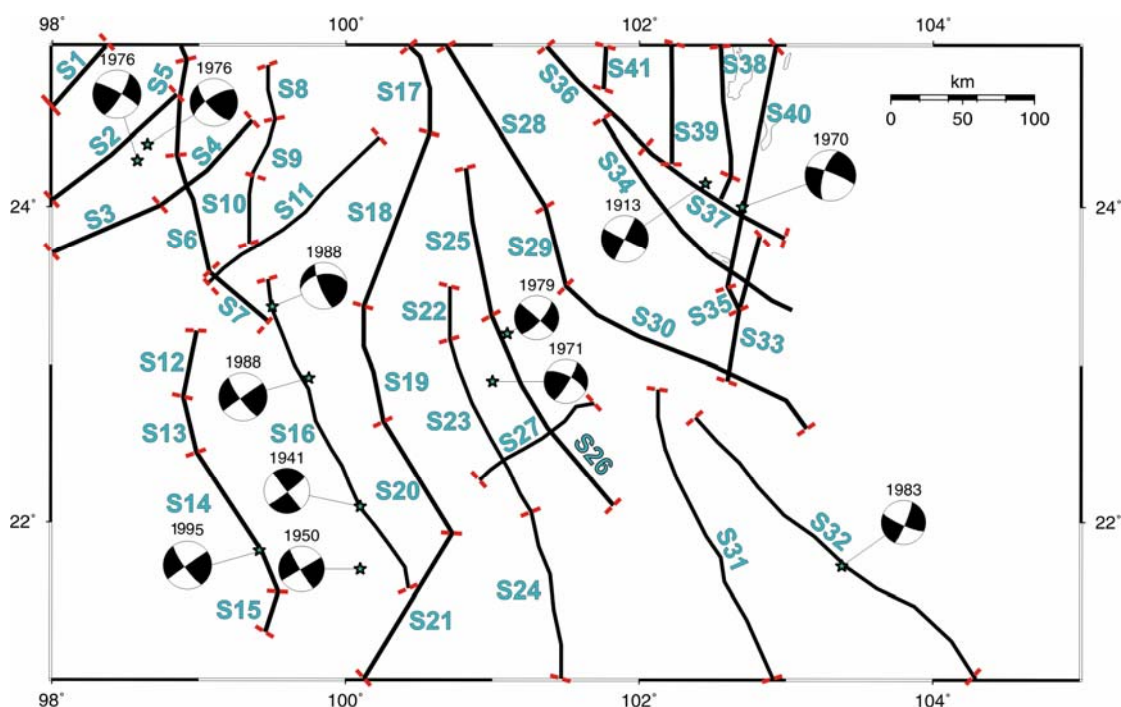
Πίνακας 3. Ρυθμοί Ολίσθησης και γεωμετρικές παράμετροι για τα ρήγματα της Κεντρικής υποπεριοχής Μελέτης

Αριθμός Τεμάχους Ρήγματος	Συντεταγμένες Κέντρου Ρήγματος		Μήκος (km)	Βάθος (km)	Παράταξη (°)	Κλίση (°)	Ρυθμός Ολίσθησης (mm/yr)
	Γεωγραφικό πλάτος (°)	Γεωγραφικό Μήκος (°)					
S1	28.599	99.096	13.88	3.0-15.0	3	60	3.0
S2	28.853	99.189	18.05	3.0-15.0	30	60	3.0
S3	28.084	99.597	104.16	3.0-15.0	130	70	4.2
S4	27.663	99.729	86.11	3.0-15.0	150	70	4.2
S5	27.069	100.125	43.05	3.0-15.0	10	75	4.0
S6	26.681	99.894	33.33	3.0-15.0	10	75	4.0

S7	26.238	99.809	168.05	3.0-15.0	330	80	5.0
S8	26.708	98.954	76.38	3.0-15.0	345	80	5.0
S9	25.501	99.820	90.27	3.0-15.0	315	80	5.0
S10	25.309	98.612	33.33	3.0-15.0	223	75	3.0
S11	25.510	98.898	58.33	3.0-15.0	190	75	3.0
S12	28.586	101.183	55.55	3.0-15.0	195	75	3.0
S13	28.391	101.725	81.94	3.0-15.0	210	75	3.8
S14	27.119	100.764	91.66	3.0-15.0	220	75	3.8
S15	26.825	100.779	125.00	3.0-15.0	205	80	3.0
S16	26.617	100.962	37.50	3.0-15.0	220	80	3.0
S17	27.131	101.476	50.00	3.0-15.0	210	75	3.0
S18	27.974	101.748	50.00	3.0-15.0	190	75	3.0
S19	26.133	101.917	131.94	3.0-15.0	2	75	2.0
S20	25.517	102.224	54.16	3.0-15.0	5	75	2.0
S21	26.062	102.251	13.88	3.0-15.0	13	80	2.0
S22	28.375	102.195	55.55	3.0-15.0	180	75	6.5
S23	27.289	102.566	63.88	3.0-15.0	330	75	65
S24	26.688	102.273	19.44	3.0-15.0	190	75	6.5
S25	26.842	102.743	26.38	3.0-15.0	175	84	6.5
S26	26.215	102.698	19.44	3.0-15.0	180	80	6.5
S27	25.530	102.692	56.94	3.0-15.0	185	80	6.5
S28	26.591	102.812	22.22	3.0-15.0	190	80	6.5
S29	25.974	102.919	58.33	3.0-15.0	175	80	6.5
S30	25.253	103.003	27.77	3.0-15.0	182	80	5.0
S31	28.485	102.680	59.72	3.0-15.0	163	87	3.0
S32	27.510	102.875	54.16	3.0-15.0	182	80	3.0
S33	26.717	103.003	34.72	3.0-15.0	170	80	3.0
S34	27.761	103.477	90.27	3.0-15.0	236	85	3.0
S35	28.231	103.408	45.83	3.0-15.0	182	85	3.0
S36	28.407	104.534	25.00	3.0-15.0	220	89	3.0
S37	28.674	103.620	43.05	3.0-15.0	155	80	3.0
S38	28.798	103.814	27.77	3.0-15.0	140	80	3.0

Στον Πίνακα 4 και στο Σχήμα 22 δίνονται πληροφορίες για τα τεμάχια των ρηγμάτων που αφορούν στη νότια υποπεριοχή. Ο ρυθμός ολίσθησης στο Red River όπως προκύπτει από γεωλογικά στοιχεία κυμαίνεται από 1 μέχρι 10mm/yr. Το μεγάλο αυτό εύρος των τιμών οφείλεται στη δυσκολία υπολογισμού των ηλικιών των μετατοπίσεων των γεωλογικών σχηματισμών. Από τις γεωμορφολογικές διαταραχές του υδρογραφικού δικτύου προκύπτει συνολική δεξιόστροφη μετατόπιση ίση με

25±0.5km.. Επίσης οι Allen et al. (1984), υπολογίζουν συνολική μετατόπιση 5.5km με ρυθμό ολίσθησης να κυμαίνεται μεταξύ 2-7mm/yr και οι Leloup et al. (1995) ίσο με 7±3mm/yr. Η τιμή αυτή είναι αρκετά μεγάλη και χαρακτηρίζει σημαντικές σεισμικές ζώνες διάρρηξης αλλά στην περίπτωση του Red River δεν συμβαδίζει με τη σεισμικότητα όπως προαναφέρθηκε. Αριστερόστροφη μετατόπιση της τάξης των 500km φαίνεται να επιτελέστηκε κατά μήκος του ρήγματος προκαλώντας εφελκυσμό και τη διάνοιξη της θάλασσας της Νότιας Κίνας (Westaway, 1995).



Σχήμα 22. Τα επιμέρους τεμάχια ρηγμάτων τα οποία εισήχθησαν στην εφαρμογή του μοντέλου για τη νότια περιοχή μελέτης, τα επίκεντρα (αστερίσκοι) και οι μηχανισμοί γένεσης των ισχυρών σεισμών οι οποίοι περιλαμβάνονται στο εξελικτικό μοντέλο.

Από τα παραπάνω στοιχεία προκύπτει μία μέση τιμή του ρυθμού ολίσθησης ίση με 5mm/yr λαμβάνοντας υπόψη ότι η αριστερόστροφη μετατόπιση σταμάτησε γύρω στα 15Ma πριν από σήμερα και η ζώνη διάρρηξης ενεργοποιήθηκε δεξιόστροφα πριν από 5Ma (Replumaz et al., 2001). Συνεπώς τα τεμάχια S7 του **Σχήματος 21** και τα τεμάχια S28-S30 του **Σχήματος 22** ολισθαίνουν με ρυθμό 5m/yr. Η ενεργή ολίσθηση κατά μήκος ρηγμάτων με ΒΑ παράταξη ενισχύεται από τη σεισμικότητα από την μετατόπιση γεωλογικών στοιχείων είναι τα ρήγματα Nanting και Wanding τα οποία ολισθαίνουν με ρυθμό 1mm/yr (Socquet and Pubellier 2005) και αφορά στα ρηξιγενή τεμάχια S2-S4 στον χάρτη του **Σχήματος 22**. Τα μικρότερα

ρήγματα Qujiang και Jianshui (S36-S37 και S34,) βόρεια του Red river στο οποίο αποδίδεται ο σεισμός του Tonghai επιφορτίζονται με ρυθμό $3\pm 3\text{mm/yr}$. Οι υπόλοιπες ρηξιγενείς δομές BA-ND νότια του Red River (S1, S11-S15, S17-S26, S31-S32) στις οποίες εμπεριέχεται και η ρηξιγενής ζώνη Lancang-Gengma (S16) στα νότια, επιφορτίζονται με ρυθμό $3\pm 3\text{mm/yr}$. Οι μεγάλες ρηξιγενείς δομές αποτελούνται από μικρότερα τμήματα τα οποία περιγράφονται από διαφορετικές γεωμετρικές παραμέτρους.

Πίνακας 4. Ρυθμοί Ολίσθησης και γεωμετρικές παράμετροι για τα ρήγματα της νότιας υποπεριοχής Μελέτης

Αριθμός Τεμάχους Ρήγματος	Συντεταγμένες Κέντρου Ρήγματος		Μήκος (km)	Βάθος (km)	Παράταξη (°)	Κλίση (°)	Ρυθμός Ολίσθησης (mm/yr)
	Γεωγραφικό πλάτος (°)	Γεωγραφικό Μήκος (°)					
S1	248.373	982.067	27.778	3.0-15.0	223	70	3.0
S2	243.719	984.611	58.333	3.0-15.0	229	69	3.0
S3	238.603	983.722	43.056	3.0-15.0	242	70	3.0
S4	242.587	990.938	44.444	3.0-15.0	229	70	3.0
S5	246.365	988.776	33.333	3.0-15.0	188	75	3.0
S6	239.529	989.981	43.056	3.0-15.0	178	75	3.0
S7	234.186	992.941	27.778	3.0-15.0	130	75	3.0
S8	246.942	994.979	26.389	3.0-15.0	170	75	1.0
S9	243.575	994.562	25.000	3.0-15.0	200	75	1.0
S10	239.673	993.482	23.611	3.0-15.0	180	75	1.0
S11	239.303	996.949	79.167	3.0-15.0	225	75	1.0
S12	229.996	989.407	23.611	3.0-15.0	12	75	3.0
S13	225.991	989.542	20.833	3.0-15.0	345	75	3.0
S14	220.092	993.009	55.556	3.0-15.0	349	75	3.0
S15	214.306	995.136	13.889	3.0-15.0	24	80	3.0
S17	247.086	100.580	27.778	3.0-15.0	350	75	3.0
S18	238.891	100.336	65.278	3.0-15.0	20	75	3.0
S19	229.965	100.174	41.667	3.0-15.0	350	75	3.0
S20	222.820	100.495	45.833	3.0-15.0	337	75	3.0
S21	214.800	100.425	59.722	3.0-15.0	30	80	3.0
S22	233.167	100.711	26.389	3.0-15.0	2	75	3.0
S23	225.641	100.972	69.444	3.0-15.0	150	75	3.0
S24	215.264	101.410	29.167	3.0-15.0	167	75	3.0

S25	237.728	100.896	54.167	3.0-15.0	160	84	3.0
S26	226.393	101.350	79.167	3.0-15.0	140	80	3.0
S27	225.085	101.305	47.222	3.0-15.0	50	80	1.0
S28	244.965	101.019	65.972	3.0-15.0	150	80	5.0
S29	237.182	101.436	29.167	3.0-15.0	165	80	5.0
S30	231.046	102.205	86.111	3.0-15.0	124	80	5.0
S31	219.042	102.466	111.111	3.0-15.0	150	87	3.0
S32	218.198	103.305	134.722	3.0-15.0	135	80	3.0
S33	233.167	102.682	51.389	3.0-15.0	195	80	3.0
S34	241.331	102.043	38.889	3.0-15.0	325	85	3.0
S35	235.432	102.679	43.056	3.0-15.0	310	85	3.0
S36	246.365	101.744	52.778	3.0-15.0	144	89	3.0
S37	240.404	102.517	55.556	3.0-15.0	290	80	3.0
S38	246.098	102.567	52.778	3.0-15.0	5	80	3.0
S39	246.448	102.217	40.278	3.0-15.0	5	80	3.0
S40	242.412	102.761	90.278	3.0-15.0	10	80	3.0
S41	248.486	101.753	15.278	3.0-15.0	5	80	3.0

Κεφάλαιο 4

Μεταβολές της Τάσης Coulomb λόγω Σεισμικής Ολίσθησης

4.1 Εισαγωγή

Σκοπός του παρόντος κεφαλαίου είναι ο υπολογισμός των μεταβολών των στατικών τάσεων Coulomb οι οποίες οφείλονται στη γένεση των ισχυρών ($M_{BJ} \geq 6.5$) σεισμών που έγιναν στην περιοχή μελέτης κατά την ενόργανη περίοδο. Για τους υπολογισμούς αυτούς είναι απαραίτητη η γνώση της γεωμετρίας διάρρηξης και της μέσης ολίσθησης κατά τη γένεση κάθε ισχυρού σεισμού. Ο καθορισμός της γεωμετρίας των ρηγμάτων βασίζεται σε αξιόπιστες λύσεις των μηχανισμών γένεσης των σεισμών αυτών, όπως αυτοί έχουν προσδιοριστεί και δημοσιευτεί από προηγούμενους ερευνητές, σε μελέτες σεισμικών ακολουθιών, σε γεωλογικές μελέτες καθώς και σε εμπειρικές σχέσεις όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο. Σε κάθε περίπτωση δίνονται οι λεπτομέρειες υπολογισμού των εστιακών παραμέτρων του κάθε σεισμού.

Ακολουθεί η αναλυτική περιγραφή ανά περιοχή ξεκινώντας με τη βόρεια περιοχή που καλύπτει το βόρειο τμήμα της επαρχίας Sichuan ($\varphi: 29^\circ-33^\circ$, $\lambda: 98^\circ-105^\circ$), συνεχίζοντας με τη κεντρική περιοχή ($\varphi: 25^\circ-29^\circ$, $\lambda: 98^\circ-105^\circ$) που περιλαμβάνει το νότιο τμήμα της επαρχίας Sichuan και το βόρειο τμήμα της επαρχίας Yunnan και καταλήγοντας στην νότια περιοχή ($\varphi: 21^\circ-25^\circ$, $\lambda: 98^\circ-105^\circ$) που περιλαμβάνει το νότιο τμήμα της επαρχίας Yunnan και τις συνοριακές περιοχές της Κίνας με τη Βιρμανία και το Βιετνάμ.

Ο πρώτος ισχυρός σεισμός στον 20^ο αιώνα στο βόρειο τμήμα της περιοχής μελέτης έγινε το 1904 και στη συνέχεια ακολούθησαν άλλοι 14 ισχυροί σεισμοί στην επικράτεια αυτή. Κυριαρχούν διαρρήξεις κυρίως αριστερόστροφης οριζόντιας μετατόπισης κατά μήκος του ρήγματος Xianshuihe και δεξιόστροφης οριζόντιας μετατόπισης στην ευρύτερη περιοχή του ρήγματος Longmenshan. Χαρακτηριστική όμως είναι η γένεση δύο ισχυρών σεισμικών ακολουθιών στις περιοχές Songpan, και Batang οι οποίοι συνδέονται με κανονικά ρήγματα αλλά και η σταδιακή

μετανάστευση των σεισμικών επικέντρων που χαρακτηρίζει τη ρηξιγενή ζώνη του Xianshuihe.

Στη δεύτερη υποπεριοχή υπεισέρχονται τμήματα του ανατολικού και το δυτικού περιθωρίου της ρομβικής περιοχής καθώς και ρήγματα τα οποία αναπτύσσονται στο εσωτερικό της. Ο πρώτος σεισμός έγινε το 1925 στη βόρεια απόληξη της ζώνη διάρρηξης Red River το οποίο βρίσκεται στη κεντρική περιοχή ενώ η συνέχεια του ίδιου ρήγματος συγκαταλέγεται στη νότια περιοχή. Το γεγονός αυτό δεν επηρεάζει τα αποτελέσματα γιατί όπως προκύπτει και από άλλες εργασίες και προαναφέρθηκε στη περιγραφή της σεισμικότητας, το ρήγμα στο σύνολό του εμφανίζεται ασεισμικό εκτός από το βορειότερο άκρο του το οποίο ενώνεται με την ζώνη διάρρηξης Jiangchuan. Μέχρι το 1996 που έγινε ο πιο πρόσφατος ισχυρός σεισμός, μεσολάβησαν άλλοι έξι κάθε ένας από τους οποίους σε διαφορετική ζώνη διάρρηξης και σε μεγάλη απόσταση μεταξύ τους.

Η τρίτη περιοχή η οποία μελετάται βρίσκεται νοτιότερα της προηγούμενης με 13 σεισμούς κατά τη χρονική περίοδο που καλύπτει η παρούσα μελέτη με έντονη δραστηριότητα των σεισμών μικρότερων μεγεθών. Οι σεισμοί οι οποίοι μελετώνται χαρακτηρίζονται από διαρρήξεις οριζόντιας μετατόπισης κυρίως, ενώ χαρακτηριστική είναι η γένεση διπλών σεισμών όπως στις σεισμικές ακολουθίες του 1976 και του 1988.

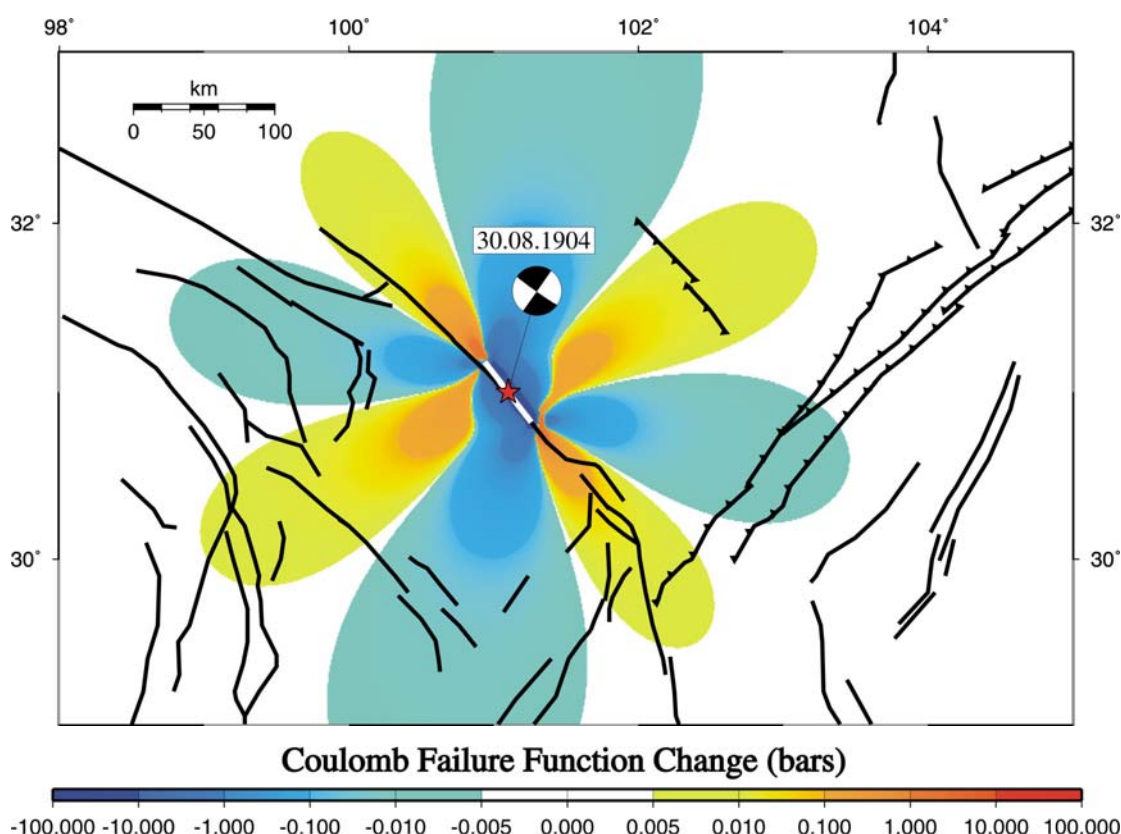
4.2 Βόρεια Υποπεριοχή Μελέτης

Στη βόρεια περιοχή μελέτης δηλαδή τη βόρεια επαρχία Sichuan έγιναν 15 ισχυροί σεισμοί από το 1904 μέχρι σήμερα οι οποίοι συμπεριλαμβάνονται στο έξελικτικό μοντέλο. Προκειμένου να παραχθεί το μοντέλο των τάσεων προέχει ο υπολογισμός των μεταβολών πεδίου των τάσεων κατά τη σεισμική ολίσθηση οι οποίες αναπτύσσονται στην παράγραφο που ακολουθεί με την περιγραφή της μεταβολής του και τον υπολογισμό των τιμών της ΔCCF με τη χρήση των σχέσεων που περιγράφηκαν στο δεύτερο κεφάλαιο. Ο φαινόμενος συντελεστής της τριβής λήφθηκε ίσος με 0.4 για τους υπολογισμούς, το $G=33\text{GPa}$ και το λόγο Poisson ίσο με 0.25. Τα μεγέθη σεισμικής ροπής πριν από το 1976 λήφθηκαν από τον κατάλογο των Pacheco and Sykes (1992) ενώ για μεταγενέστερους σεισμούς από τον κατάλογο μηχανισμών γένεσης του Harvard. Για κάθε σεισμό περιγράφεται το μοντέλο της διάρρηξης το οποίο του αντιστοιχεί (μήκος, πλάτος, ολίσθηση) και αναφέρονται οι διαθέσιμες πληροφορίες οι οποίες συλλέχτηκαν για τους σεισμούς αυτούς. Στη

συνέχεια με τη βοήθεια χρωματικής κλίμακας απεικονίζεται η μεταβολή του πεδίου των τάσεων η οποία υπολογίζεται κάθε φορά για ένα επίπεδο το οποίο αντιστοιχεί στο επίπεδο του ρήγματος το οποίο προκάλεσε τον σεισμό. Με λευκό χρώμα απεικονίζονται οι σχεδόν μηδενικές μεταβολές της τάσης, ενώ με κόκκινα οι θετικές μεταβολές, δηλαδή οι συσσωρευμένες τάσεις έτσι όπως ανακατανεμήθηκαν εξαιτίας της σεισμικής ολίσθησης και με μπλε οι αρνητικές μεταβολές στις οποίες οι τάσεις έχουν εξομαλυνθεί.

4.2.1 Daofu, 30 Αυγούστου, 1904 $M_{\text{BJP}} = 6.8$

Ο σεισμός του Daofu, είναι ο πρώτος σεισμός του 20ου αιώνα σε ολόκληρη την περιοχή και έχει μέγεθος σεισμικής ροπής $M_w = 6.8$ (Harvard). Αποδίδεται στη διάρρηξη του τεμάχους Daofu της ρηξιγενούς ζώνης Xianshuihe η οποία ενεργοποιήθηκε μεταγενέστερα το 1981. Απουσιάζουν λεπτομερείς γεωλογικές παρατηρήσεις υπαίθρου οι οποίες να συνδέονται με τη γένεση του συγκεκριμένου σεισμού. Ωστόσο σύμφωνα με τις επίσημες αναφορές του Department of Earthquake Disaster Prevention (1995) στην Κίνα, πάνω από 400 άτομα έχασαν τη ζωή τους και κτήρια καταστράφηκαν σε ακτίνα 50km, όσο δηλαδή υπολογίζεται το μήκος του ρήγματος, γύρω από την περιοχή Daofu, κατά μήκος της κοιλάδας του Xianshuihe (Allen et al., 1991). Το 1996 ανακαλύφθηκαν από τους ερευνητές Ray Weldon II και Wen Xueze (προσωπική επικοινωνία), προγενέστερες μετατοπίσεις κατά μήκος των επιφανειακών εκδηλώσεων του μεταγενέστερου σεισμού του 1981, ο οποίος διέρρηξε το τεμάχος του Daofu. Από λεπτομερείς μετρήσεις προέκυψαν διάφορες μετατοπίσεις ίσες με 3.2m, 1.35m και 0.6m. Διαπιστώθηκε ότι η μικρότερου μήκους διάρρηξη αντιστοιχεί στο σεισμό του 1981 και επομένως η μετατόπιση των 1.35m είναι αντιπροσωπευτική της ολικής ολίσθησης των δύο σεισμών. Ο μηχανισμός γένεσης υιοθετήθηκε από τους Papadimitriou et al. (2004) (παράταξη: 322° , κλίση: 85° , ολίσθηση: 1°). Το μήκος του τμήματος που διερρήχθη είναι $L = 50\text{km}$ σύμφωνα με γεωλογικές παρατηρήσεις (Department of Earthquake Disaster Prevention 1995), ενώ η ολίσθηση που πραγματοποιήθηκε σεισμικά αγγίζει τα 1.08m σύμφωνα με τη **Σχέση 18**. Στο **Σχήμα 23** φαίνονται οι μεταβολές της στατικής τάσης που έχουν υπολογιστεί σε όλο το βόρειο τμήμα της περιοχής μελέτης. Το αστέρι σε κόκκινο χρώμα αντιστοιχεί στο επίκεντρο του σεισμού ενώ με το λευκό χρώμα απεικονίζεται το τεμάχος του ρήγματος το οποίο διερρήχθη.



Σχήμα 23. Η χωρική κατανομή των μεταβολών των τάσεων Coulomb οι οποίοι προκλήθηκαν από τον σεισμό του 1904 στο ρήγμα Xianshuihe. Ο αστερίσκος αντιστοιχεί στο επίκεντρο του σεισμού (Yang et al., 2005) και ο μηχανισμός γένεσης προβάλλεται ως ισεμβαδική προβολή του κάτω ημισφαιρίου. Οι μεταβολές στην τάση σε bars παρουσιάζονται με τη χρωματική κλίμακα. Το λευκό χρώμα αντιστοιχεί σε σχεδόν μηδενικές μεταβολές της τάσης Coulomb, ενώ αντίθετα τα γαλάζια χρώματα αντιστοιχούν σε αρνητικές τιμές της μεταβολής των τάσεων και οι διαβαθμίσεις από κίτρινο μέχρι κόκκινο απεικονίζουν τις θετικές μεταβολές της ΔCFF . Τα ρήγματα με μαύρο αντιστοιχούν στα γειτονικά ρήγματα τα οποία στη συνέχεια υπεισέρχονται στο εξελικτικό μοντέλο, ενώ το λευκό αναπαριστά το υπεύθυνο ρήγμα το οποίο προκάλεσε το σεισμό και αυτό για το οποίο έχει πραγματοποιηθεί ο υπολογισμός των τάσεων. Παρατηρείται ότι η γένεση του σεισμού έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση των μεταβολών στα άκρα του τεμάχους το οποίο διερρήχθη και κατά μήκος της διεύθυνσης του ρήγματος.

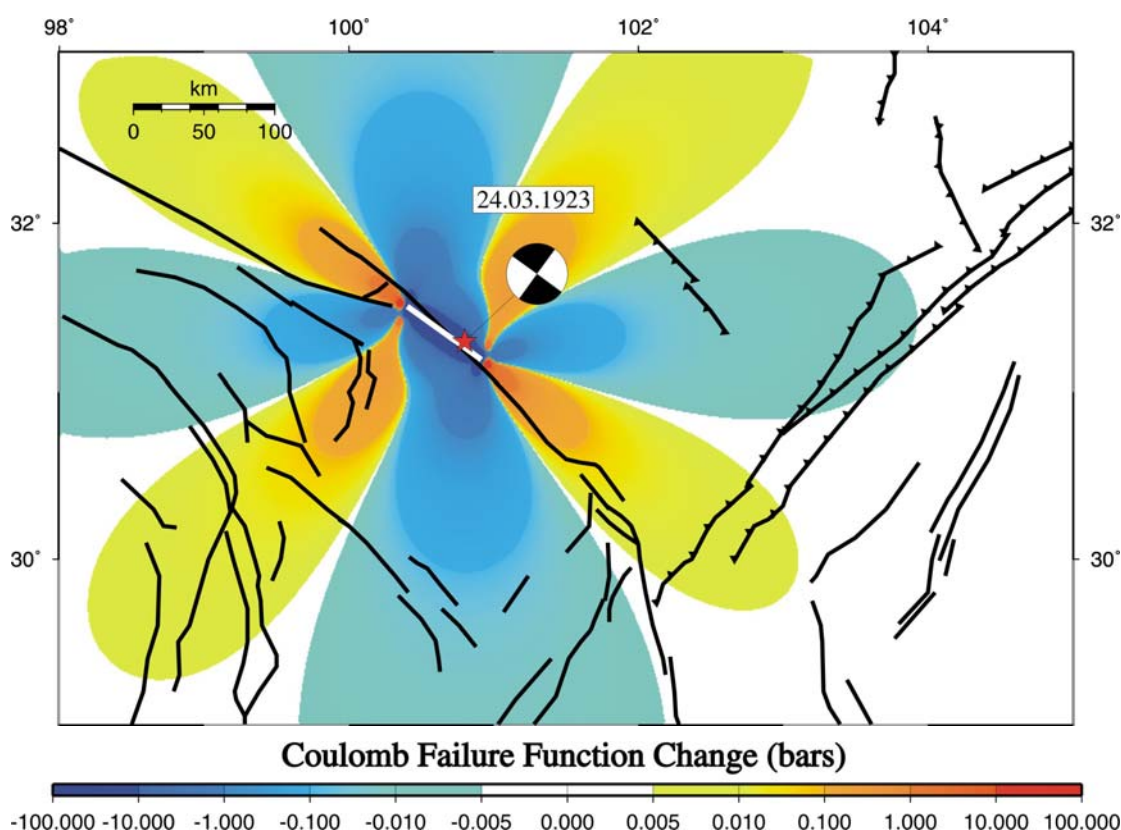
Από την κατανομή αυτή φαίνεται ότι τα γειτονικά τμήματα του ρήγματος επηρεάζονται από τη σεισμική μεταβολή της τάσης καθώς μία φωτεινή ζώνη θετικών τάσεων σχηματίζεται κατά μήκος της παράταξης του ρήγματος Xianshuihe. Σε

διεύθυνση βορρά-νότου δημιουργείται μία μεγάλης έκτασης σκιερή ζώνη. Από το σχήμα φαίνεται ότι είναι πιθανό ο επόμενος ισχυρός σεισμός θα γίνει βόρεια του σεισμού του Daofu σε περιοχή υψηλών μεταβολών των τάσεων Coulomb με εμφανή την επίδραση του πρώτου στη γένεσή του.

4.2.2 Luhuo, 24 Μαρτίου, 1923, $M_{\text{B}}=7.0$

Στις 24 Μαρτίου 1923, 19 χρόνια μετά τον προηγούμενο σεισμό του Daofu, ένας ισχυρότερος σεισμός με μέγεθος $M_w=7.2$ έπληξε ξανά τη ζώνη διάρρηξης Xianshuihe με την ενεργοποίηση του τεμάχους Luhuo, το οποίο είναι γειτονικό του τεμάχους Daofu (**Σχήμα 24**). Υπάρχουν διάφορες γεωλογικές παρατηρήσεις υπαίθρου όπως επιφανειακές διαρρήξεις, οι οποίες συνδέονται με τη γένεση του σεισμού του 1923.

Η ενδιάμεση απόσταση μεταξύ των διαρρήξεων έχει μέσο μήκος 1m, ενώ παρατηρήθηκαν μετατοπίσεις αριστερόστροφου χαρακτήρα με μήκος 2.0m περίπου. Οι διαρρήξεις σχηματίζουν δεξιόστροφες κλιμακωτές δομές (*right stepping en echelon offsets*) με μεσολαβούμενες ράχες συμπίεσης (*pressure ridges*). Οι Allen et al. (1991) κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η μέγιστη συνολική σεισμική μετατόπιση αγγίζει τα 3.0m ενώ το μήκος της διάρρηξης είναι ορατό από την πόλη Xialatao μέχρι την πόλη Mazi, ίσως και ακόμη νότιότερα, πλησιάζοντας τα 60km σε μήκος. Πιθανότατα υπάρχει επικάλυψη κατά 10km περίπου με την διάρρηξη του 1973 που θα ακολουθήσει. Από το συγκερασμό των γεωλογικών και σεισμικών δεδομένων έγινε αποδεκτό ότι η μέση ολίσθηση είναι ίση με $u=2.3\text{m}$ σύμφωνα με τη **Σχέση 16** η οποία έρχεται σε συμφωνία και με τους υπολογισμούς των Molnar and Deng (1984) που εκτιμούν ολίσθηση ίση με 2.0m. Ο μηχανισμός γένεσης υιοθετήθηκε από τους Papadimitriou et al. (2004) (παράταξη: 116° , κλίση: 90° , γωνία ολίσθησης λ : 10°) Στο **Σχήμα 24** παρουσιάζεται το πεδίο της μεταβολής των τάσεων κατά τη διάρκεια του σεισμού το οποίο είναι αντιπροσωπευτικό σεισμού οριζόντιας μετατόπισης. Στα άκρα του τεμάχους που ολίσθησε, αναπτύσσονται θετικές τιμές τάσεων όπου στο μέλλον παρουσιάζεται η σεισμική δραστηριότητα του 1973. Οι λοβοί των θετικών μεταβολών των τάσεων αναπτύσσονται κατά μήκος του ρήγματος σε ΒΔ-ΝΑ διεύθυνση και προκαλούν τη γένεση σεισμών στο μέλλον.



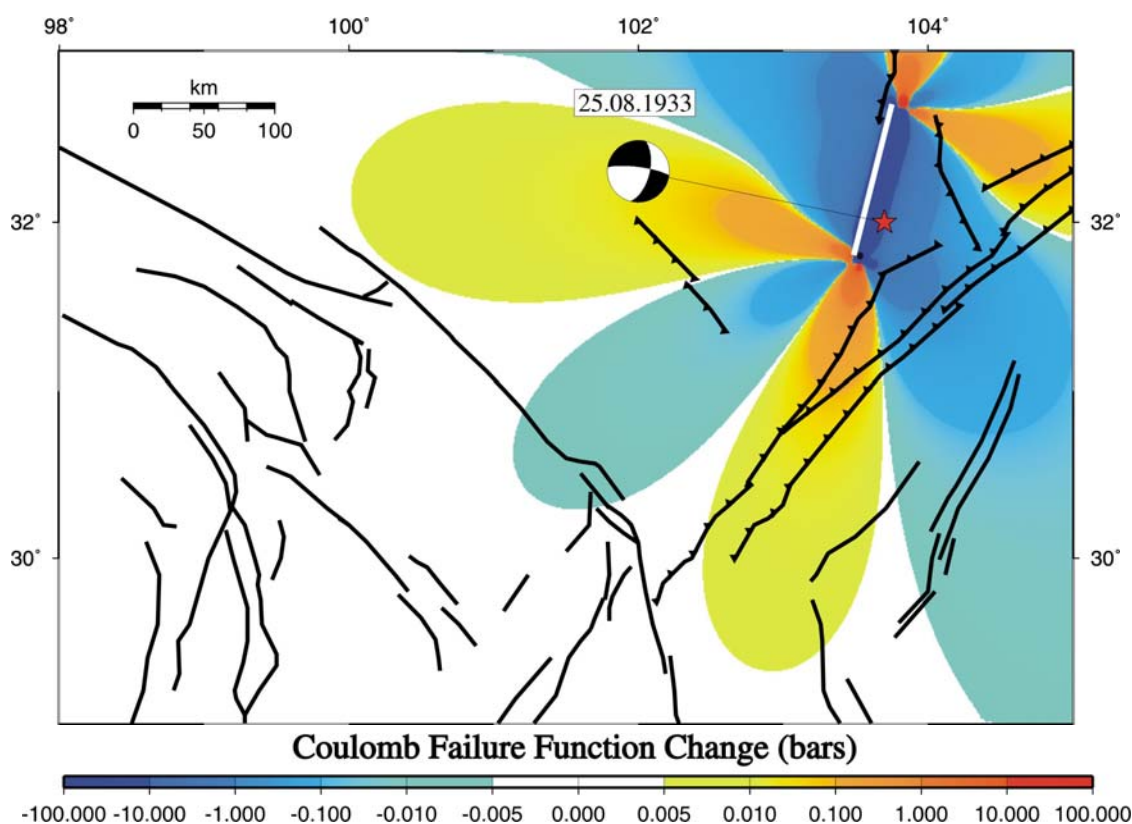
Σχήμα 24. Η μεταβολή των τάσεων που προκλήθηκε από τον σεισμό του 1923 στο ρήγμα Xianshuihe (όπως στο Σχήμα 23). Λοβοί φωτεινών περιοχών αναπτύσσονται σε διευθύνσεις ΒΑ-ΝΔ και ΒΔ-ΝΑ του τεμάχους που ολίσθησε.

4.2.3 Diexi, 25 Αυγούστου, 1933, $M_{\text{BJI}} = 7.5$

Ο καταστροφικός αυτός σεισμός εκδηλώθηκε στην ζώνη διάρρηξης Min Shan, και είναι γνωστός με την ονομασία ως σεισμός του Diexi από την ομώνυμη πόλη πλησίον της οποίας εντοπίζεται το επίκεντρο. Έχει μέγεθος σεισμικής ροπής $M_w = 7.3$ (PASADENA) και προκάλεσε τον θάνατο σε 6800 ανθρώπους. Κατά τη σεισμική κίνηση προκλήθηκαν καταπτώσεις μεγάλων όγκων αλλά και κατολισθήσεις εκατέρωθεν των πρανών του ποταμού Min Jiang, αποκόπτοντας τη κοίτη του ποταμού και σχηματίζοντας μικρές λίμνες. Όταν τα αναχώματα των λιμνών αυτών κατέρρευσαν στις 3 Δεκεμβρίου του ίδιου χρόνου, 2500 επιπλέον άνθρωποι έχασαν τη ζωή τους. Από τους Tang et al. (1993), έχει προταθεί ότι το υπεύθυνο ρήγμα για το σεισμό είναι το ρήγμα Songringou. Ωστόσο, παρά τις εκτεταμένες κατολισθήσεις κατά μήκος του ομώνυμου ποταμού δεν υπάρχουν άλλες σημαντικές παρατηρήσεις, όπως εδαφικές διαρρήξεις, οι οποίες να τεκμηριώνουν την άποψη αυτή. Οι ισόσειστες γραμμές όπως έχουν κατασκευαστεί από διαφορετικούς ερευνητές έχουν

αντιθετικό προσανατολισμό, αλλά γενικότερα διακρίνεται μια διάταξη βορρά-νότου.

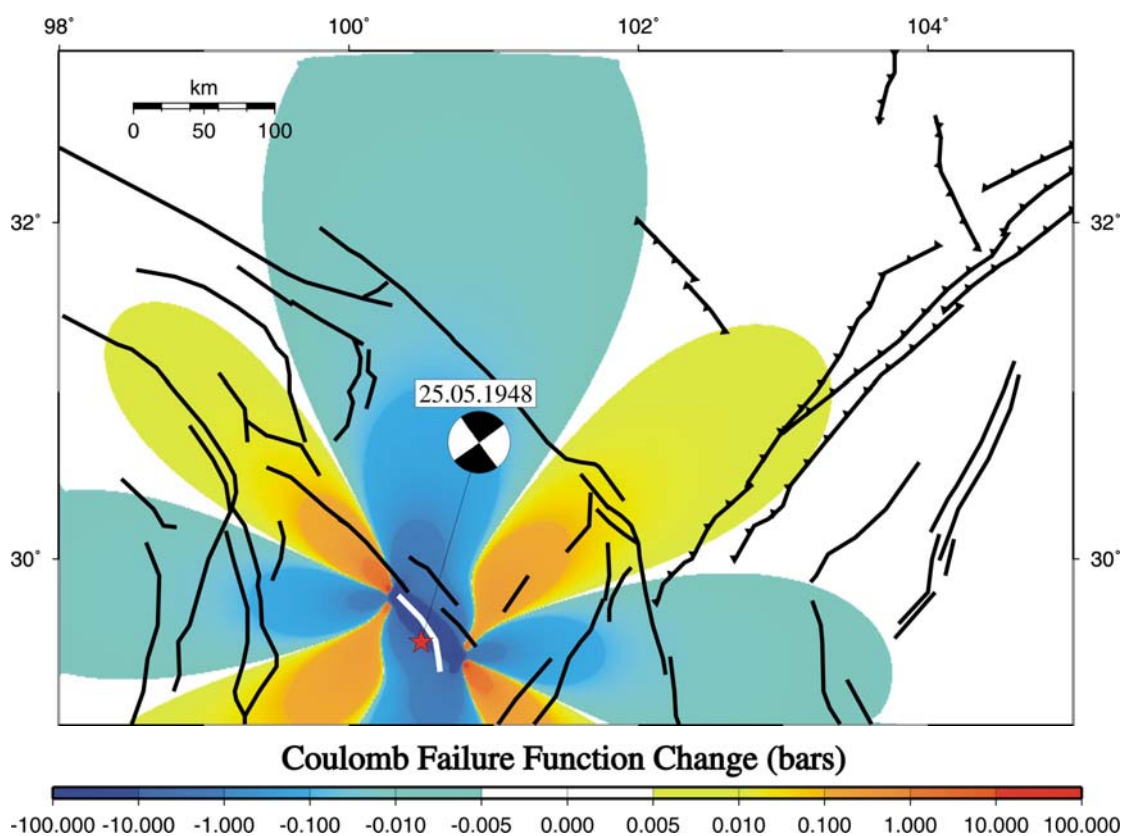
Σύμφωνα με τους παραπάνω ερευνητές, το ρήγμα το οποίο προκάλεσε το σεισμό είναι οριζόντιας μετατόπισης με δεξιόστροφη συνιστώσα και διεύθυνση ΒΑ-ΝΔ. Ο μηχανισμός γένεσης υιοθετήθηκε από τους Tang et al. (1983) (παράταξη: 14° , γωνία κλίσης: 60° , γωνία ολίσθησης: -167°). Το επίκεντρο του σεισμού βρίσκεται στο νότιο άκρο του ρήγματος Min Jiang, οπότε αυτός πιθανότατα οφείλεται σε δραστηριοποίηση του νότιου τμήματος του Min Jiang. Το μήκος του τμήματος το οποίο ενεργοποιήθηκε υπολογίστηκε με βάση τη **Σχέση 14** ίσο με $L=102\text{km}$ ενώ η σεισμική ολίσθηση υπολογίστηκε με τη **Σχέση 18** ίση με $u=2.36\text{m}$. Το πεδίο της μεταβολής των τάσεων στο νοτιότερο τμήμα του Min Jiang αποτυπώνεται στο **Σχήμα 25**. Διακρίνονται οι λοβοί θετικών μεταβολών των στατικών τάσεων, ιδιαίτερα στο βόρειο άκρο στο οποίο συναντάται αυξημένη σεισμικότητα τα επόμενα χρόνια, ενώ κάθετα στην παράταξη του ρήγματος αναπτύσσεται μία μεγάλης έκτασης σκιερή ζώνη. Λόγω του μεγάλου μέγεθους του σεισμού η χωρική κατανομή των τάσεων επιδρά σε ολόκληρη την ανατολική περιοχή.



Σχήμα 25. Η μεταβολή ΔCFF που προκλήθηκε σε μεγάλη έκταση, από τον σεισμό του Diexi το 1933 στο ρήγμα Min Jiang (όπως στο Σχήμα 23).

4.2.4 Litang, 25 Μαΐου, 1948, $M_{BJI}=7.3$

Ο ισχυρός αυτός σεισμός γνωστός ως σεισμός του Litang έχει μέγεθος $M_{(UK)}=7.3$ (PASADENA). Από την τεκτονική της περιοχής προκύπτει ότι το ρήγμα το οποίο προκάλεσε το σεισμό αυτό είναι το ομώνυμο ρήγμα δυτικά και υποπαράλληλα της τεκτονικής ζώνης Xianshuihe. Πληροφορίες που αφορούν τη γένεση του σεισμού προέρχονται από αδημοσίευτη πηγή από τους Wen και συνεργάτες του οι οποίοι προτείνουν ότι η διάρρηξη εκτείνεται στο νοτιοανατολικό τέμαχος του ρήγματος Litang το οποίο έχει νοτιοδυτική παράταξη και όπου είναι ακόμα διακριτά πρηνή και επιφάνειες. Το μήκος της διάρρηξης κυμαίνεται από 45km μέχρι 60km. Το βορειοδυτικό τμήμα του φαίνεται να είναι αριστερόστροφο με σημαντική όμως ανάστροφη συνιστώσα. Η μέση μετατόπιση σύμφωνα με τους ίδιους υπολογίζεται περίπου στα 3.0m. Ο μηχανισμός ο οποίος υιοθετήθηκε από Molnar & Deng (1984), αντιστοιχεί σε αριστερόστροφο ρήγμα οριζόντιας μετατόπισης με ΒΔ-ΝΑ παράταξη, (παράταξη: 315° , κλίση: 90° και γωνία ολίσθησης: 0°) (Σχήμα 26).

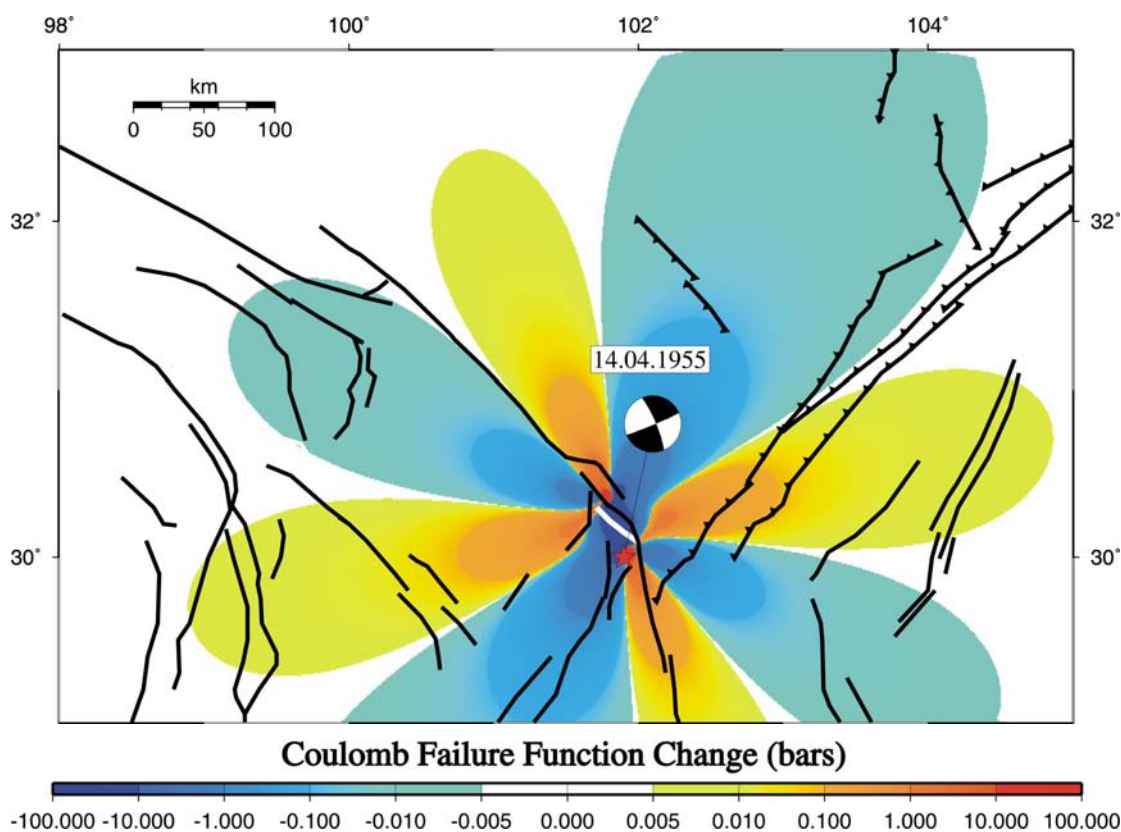


Σχήμα 26. Η μεταβολή των τάσεων Coulomb που προκλήθηκε αμέσως μετά τον ισχυρό σεισμό του Litang (όπως στο Σχήμα 23). Φωτεινές ζώνες αναπτύσσονται κάθετα στο Xianshuihe και προφανώς επιταγχύνουν τη γένεση του σεισμού του 1955.

Το μήκος του ρήγματος το οποίο ενεργοποιήθηκε είναι $L=60\text{km}$ (Paradimitriou et al., 2004) ενώ η ολίσθηση υπολογίστηκε με τη Σχέση 18 ίση με $u=2.36\text{ m}$. Στο Σχήμα 26 παρουσιάζεται η κατανομή των μεταβολών των τάσεων μετά το σεισμό του 1948. Οι θετικές μεταβολές των τάσεων αντιστοιχούν σε τεμάχια του Xiansuihe στα οποία θα γίνει μετά από επτά χρόνια ο ισχυρός σεισμός του 1955. Φαίνεται προφανώς ότι ο σεισμός του Litang επηρέασε θετικά τη γένεση του σεισμού του 1955 και επιτάχυνε τη γένεση του. Οι μεταβολές του πεδίου των τάσεων είναι σημαντικές σε μέγεθος και καλύπτουν μία μεγάλη έκταση στην περιοχή.

4.2.5 Kangding, 14 Απριλίου, 1955, $M_{\text{BJ}}=7.5$

Ο ισχυρός αυτός σεισμός έχει μέγεθος $M_S=7.4$ (Pacheco and Sykes 1983) και αναφέρεται ως σεισμός του Kangding. Ο σεισμός έγινε στο ρήγμα Zhedotang το οποίο έχει μήκος 35km (Σχήμα 23).



Σχήμα 27. Η κατανομή των μεταβολών των τάσεων μετά το σεισμό του Kangding (όπως στο Σχήμα 23). Δημιουργούνται φωτεινές ζώνες σε διεύθυνση Α-Δ και Β-Ν οι οποίοι αναπτύσσονται κατά μήκος της παράταξης του ρήγματος.

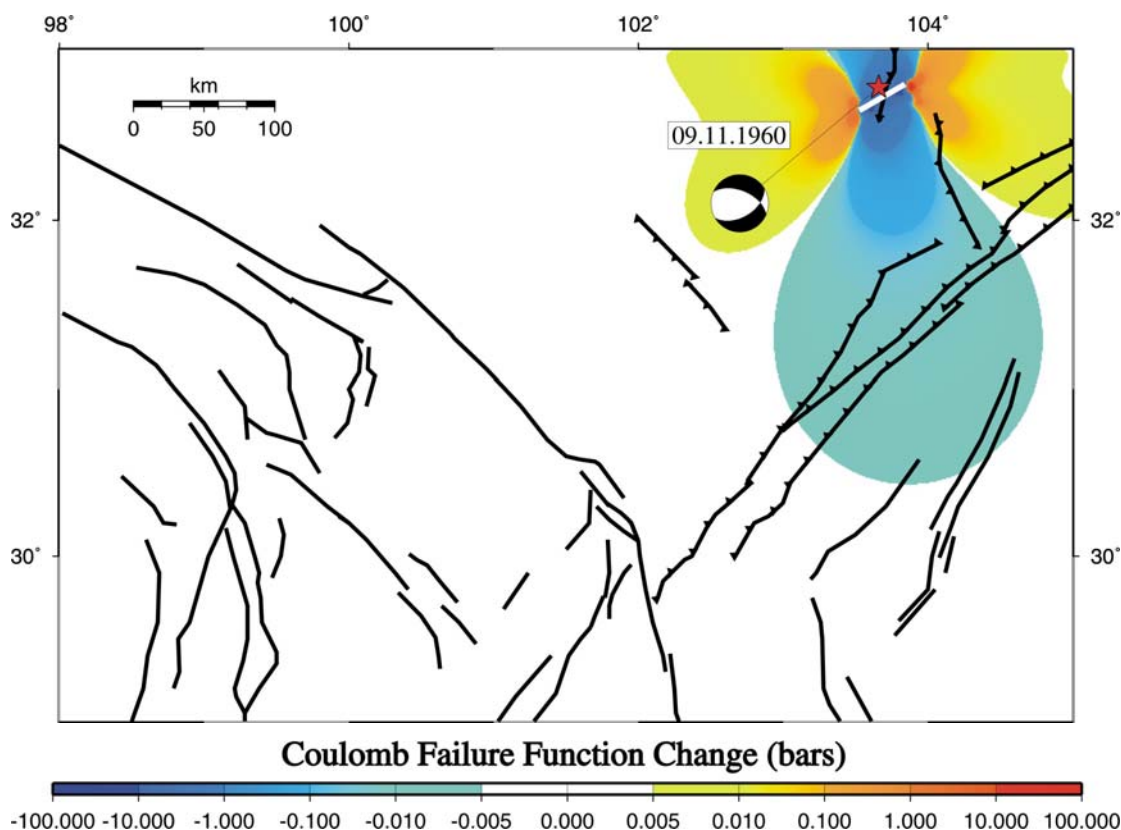
Οι Li et al. (1992) αναφέρουν αριστερόστροφες μετατοπίσεις κατά μήκος του ρήγματος (*goolies*) εξαιτίας του σεισμού αυτού τα οποία είναι της τάξης των 1.9m με 2.1m στο βορειοδυτικό τμήμα και 3.1m με 3.9m στο μέσο, καθώς και 1.7m στο νοτιοανατολικό τμήμα. Προτείνεται ότι η ολίσθηση έχει μία ενδιάμεση τιμή σε σχέση με τις παρατηρούμενες και λήφθηκε ίση με $u=3.24m$ ώστε να συμβαδίζει και με σεισμό αυτού του μεγέθους από τη **Σχέση 18**. Παρατηρήθηκαν κλιμακωτές διαρρήξεις (*en echelon fissures*) μετά το σεισμό μέχρι 14m μήκος και 0.5m πλάτος. Αεροφωτογραφίες φανερώνουν ότι το ρήγμα διερρήχθει για 27km, εξαιρετικά μικρή τιμή για τόσο μεγάλο σεισμό. Ο μηχανισμός γένεσης που προτάθηκε από τους τελευταίους δείχνει αριστερόστροφο ρήγμα οριζόντιας μετατόπισης (παράταξη: 337° , γωνία κλίσης: 81° , γωνία ολίσθησης: -3°). Στο **Σχήμα 27** παρουσιάζονται οι μεταβολές οι οποίες φαίνεται να φορτίζουν θετικά τα βορειότερα και νοτιότερα από το ρήγμα που ολίσθησε τμήματα του Xianshuihe. Επίσης, θετικά επηρεάζονται τα ρήγματα Litang, Jiangchuan και Batang στα δυτικά καθώς επίσης και το ρήγμα Longmenshan στα ανατολικά καθώς περιβάλλονται από αυξημένες μεταβολές τάσεων.

4.2.6 Zhangla, 9 Νοεμβρίου, 1960, $M_{BJI}=6.5$

Ο σεισμός αυτός στον κατάλογο του Seismological Bureau of China έχει μέγεθος $M_w=6.5$ και συνδέεται με τη ζώνη διάρρηξης Min Shan. Σύμφωνα με τους Chen et al. (1994) μια βορειοανατολική εφελκυστική ζώνη με μήκος περίπου 500m έχει σχηματιστεί στο ανατολικό τμήμα του Min Jiang. Η γεωμετρία της δομής αυτής σε σχέση με το ρήγμα φανερώνει μία δεξιόστροφη συνιστώσα κίνησης. Ο μηχανισμός γένεσης για το σεισμό αυτό προέρχεται από τους Yang et al. (2005). Το ρήγμα αυτό είναι κανονικό και έχει δεξιόστροφη συνιστώσα οριζόντιας μετατόπισης (παράταξη: 60° , γωνία κλίσης: 50° , γωνία ολίσθησης λ : -130°). Το μήκος του ρήγματος το οποίο ενεργοποιήθηκε υπολογίστηκε ίσο με $L=34km$ από τη **Σχέση 15**. Η ολίσθηση υπολογίστηκε με την **Σχέση 19** ίση με $u=0.68m$.

Στο **Σχήμα 28** παρουσιάζεται η χωρική κατανομή των μεταβολών της τάσης Coulomb που οφείλονται στη γένεση του σεισμού αυτού. Διακρίνονται οι ιδιαίτερα αυξημένες μεταβολές των τάσεων οι οποίες επισπεύδουν την εκδήλωση ισχυρής σεισμικότητας στην περιοχή ανατολικά του άκρου του τέμαχους το οποίο διερρήχθη. Η κατανομή των μεταβολών των τάσεων παρατηρείται ότι προκαλεί πεδίο το οποίο αντιστοιχεί σε κανονικό ρήγμα με χαρακτηριστική την αύξηση των τάσεων κατά τη

διεύθυνση ανάπτυξης του ρήγματος και τη σκιερή ζώνη κάθετα στο βορειοανατολικό τμήμα του ρήγματος Longmenshan.

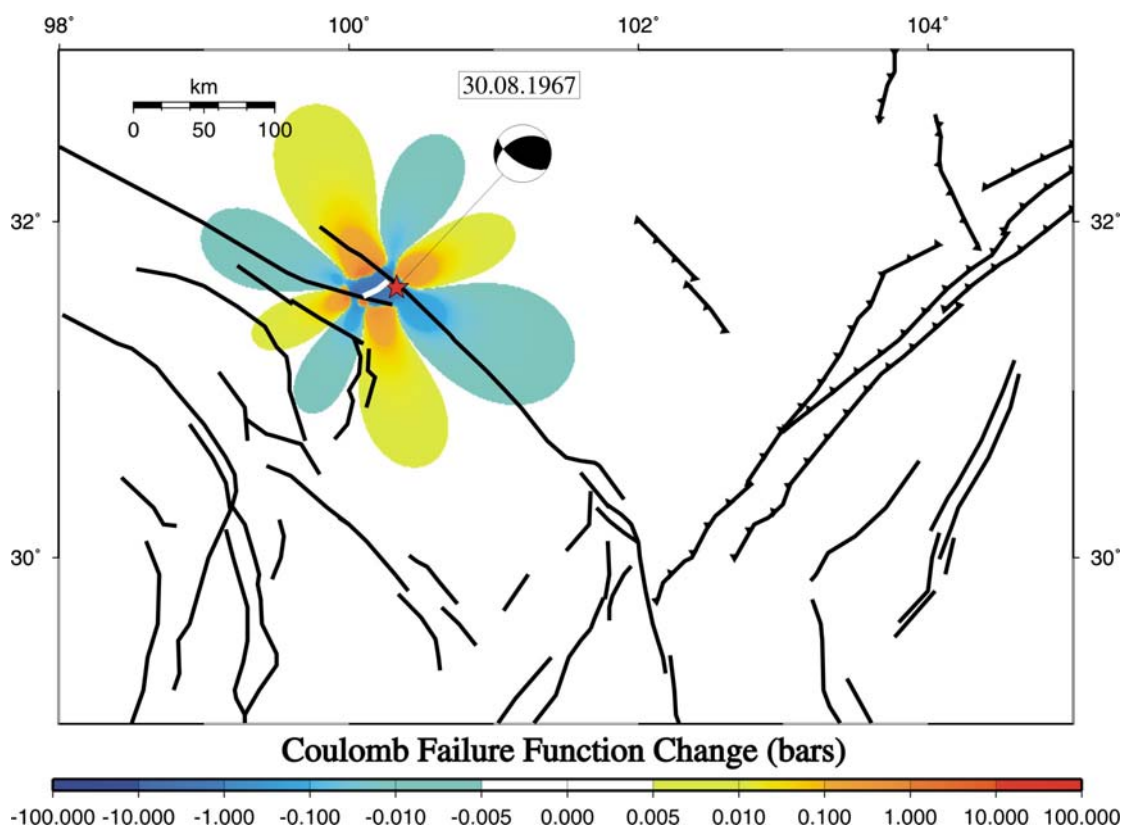


Σχήμα 28. Η μεταβολή των τάσεων που προκλήθηκε από τον σεισμό Zhangla του 1960 (όπως στο Σχήμα 23). Οι φωτεινές ζώνες αναπτύσσονται σε διεύθυνση περίπου ανατολής-δύσης.

4.2.7 Zhuwo, 30 Αυγούστου, 1967, $M_{BJI}=6.8$

Τον Αύγουστο του 1967, άλλος ένας ισχυρός σεισμός με μέγεθος $M_{UK}=7.0$ (BDA) έγινε βορειοδυτικά της πόλης του Luhuo. Το επίκεντρο του απέχει 10km δυτικά από το επιφανειακό ίχνος της ζώνης διάρρηξης Xianshuihe. Σύμφωνα με τους Zhou et al. (1983) ο μηχανισμός γένεσης του σεισμού, αντιστοιχεί σε κανονικό ρήγμα με παράταξη: 245° , γωνία κλίσης: 45° και γωνία ολίσθησης: 42° . Το μήκος του ρήγματος το οποίο ενεργοποιήθηκε υπολογίστηκε ίσο με $L=20\text{km}$. Η ολίσθηση υπολογίστηκε με τη Σχέση 18 ίση με 1.48m. Ο σεισμός αυτός φαίνεται ότι προκλήθηκε από εφελκυστική δομή κάθετη στην διεύθυνση του Xianshuihe οι ιδιαιτερότητες της οποίας περιγράφηκαν και στο πρώτο κεφάλαιο. Η δραστηριότητα αυτή αποτελεί ένα δευτερεύον φαινόμενο που συνοδεύει την επικρατούσα οριζόντια μετατόπιση πάνω στη ζώνη διάρρηξης. Στο Σχήμα 29

παρουσιάζεται το πεδίο των μεταβολών των τάσεων όπως αυτό υπολογίστηκε με βάση τα παραπάνω δεδομένα. Φαίνεται ότι οι μεταβολές κατανέμονται έτσι ώστε οι θετικές τιμές να βρίσκονται στη βόρεια περιοχή του Xianshuihe, η οποία συνδέεται με τη γένεση του επόμενου σεισμού του 1973 ο οποίος πιθανόν να επιταχύνθηκε χρονικά.

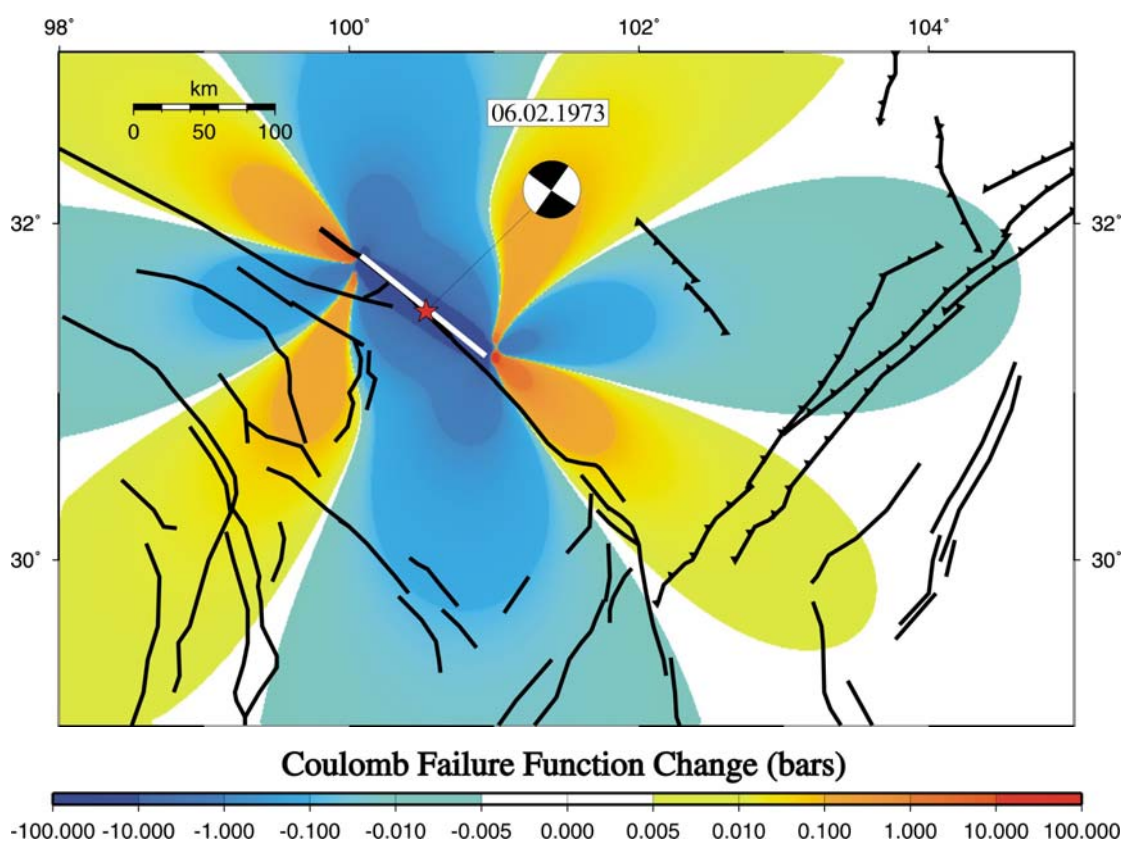


Σχήμα 29. Η μεταβολή των τάσεων που προκλήθηκε αμέσως μετά το σεισμό του 1967 (όπως στο Σχήμα 23). Οι θετικοί λοβοί των μεταβολών των τάσεων πιθανόν να επιτάχυναν τη γένεση του επόμενου ισχυρού σεισμού του 1973.

4.2.8 Luhuo, 6 Φεβρουαρίου, 1973, $M_{BJI}=7.6$

Ο σεισμός του Luhuo έχει μέγεθος σεισμικής ροπής $M_w=7.4$ (Pacheco and Sykes 1983). Η επιφανειακή διάρρηξη του σεισμού ο οποίος συνδέεται με το τμήμας Luhuo του ρήγματος Xianshuihe είχε μήκος 90km, με το ίχνος του να είναι γραμμικό και συνεχές, το επίκεντρο να βρίσκεται στο μέσο της ζώνης και τους μετασεισμούς να εκτείνονται βόρεια και νότια σχηματίζοντας με ακρίβεια το σειсмоγόνο όγκο (Tang et al., 1993, Zhou et al., 1983). Ο μηχανισμός γένεσης ο οποίος επιλέχθηκε είναι ο προτεινόμενος από τους Zhou et al. (1983) και αντιστοιχεί σε αριστερόστροφης μετατόπισης κατακόρυφο ρήγμα (παράταξη: 125° , γωνία κλίσης: 87° , γωνία

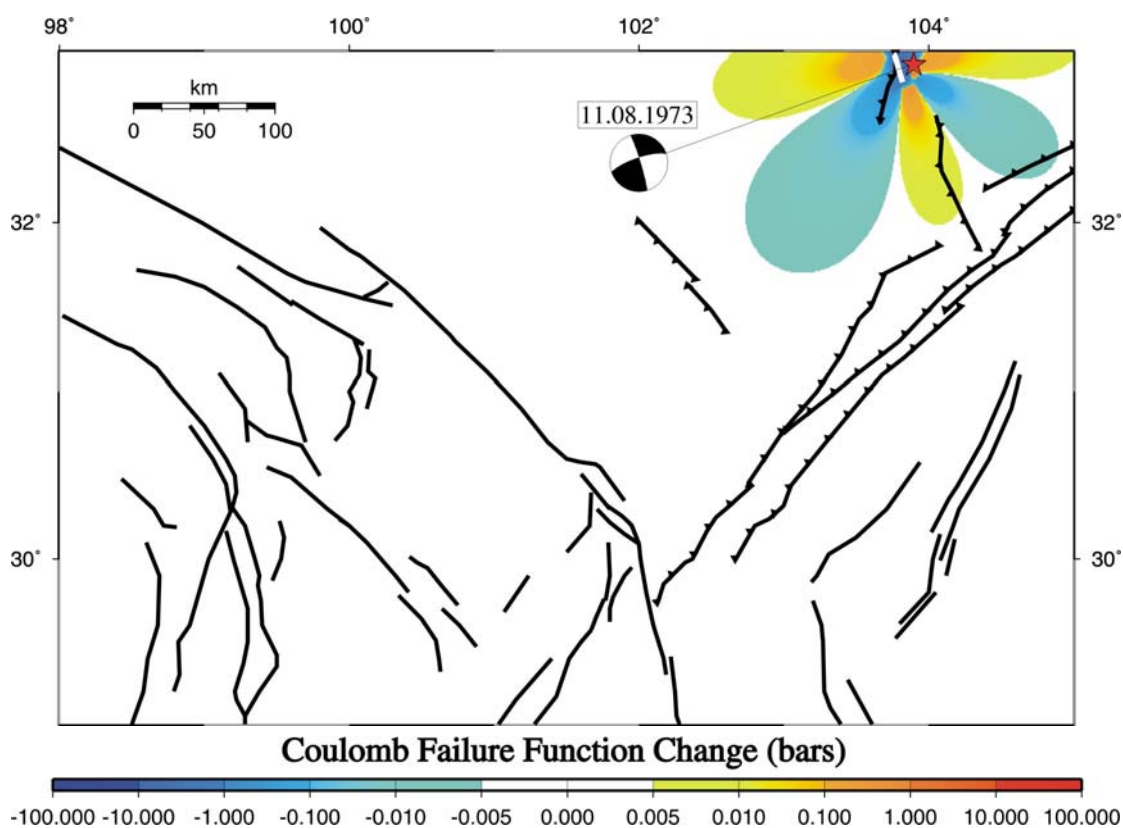
ολίσθησης: 0°). Το μήκος του ρήγματος το οποίο ενεργοποιήθηκε υπολογίστηκε ίσο με $L = 116\text{km}$ από τη **Σχέση 14**, ενώ η ολίσθηση υπολογίστηκε με τη **Σχέση 18** ίση με $u = 2.77\text{m}$. Στο **Σχήμα 30** φαίνεται η ΔCFF των τάσεων η κατανομή της οποίας είναι ιδιαίτερα εκτεταμένη λόγω του μεγάλου μεγέθους του σεισμού. Το ρήγμα Xianshuihe φορτίζεται θετικά εξαιτίας των μεγάλων θετικών μεταβολών με τέτοιο τρόπο ώστε να φορτίζουν θετικά ξανά το νότιο τμήμα στο οποίο στη συνέχεια ακολουθεί ο σεισμός του Daofu το 1981. Ο σεισμός είναι ιδιαίτερα ισχυρός και δημιουργεί μεγάλες μεταβολές στην τάση με αποτέλεσμα ο σεισμός του Daofu να προηγηθεί του κανονικού του χρόνου γένεσης. Επίσης θετικές μεταβολές συσσωρεύονται στη περιοχή όπου το 1989 εκδηλώθηκε η σεισμική ακολουθία του Batang.



Σχήμα 30. Οι μεγάλες μεταβολές των τάσεων που προκλήθηκε από τον σεισμό του 1973 σε βόρειο τμήμα του Xianshuihe (όπως στο Σχήμα 23). Οι θετικές μεταβολές των τάσεων καλύπτουν το ρήγμα εκατέρωθεν του τμήματος που ολίσθησε αλλά και τις ζώνες διάρρηξης Batang που συμβαίνει το 1989 η αντίστοιχη σεισμική ακολουθία.

4.2.9 Huanlong, 11 Αύγούστου, 1973, $M_{BJI}=6.5$

Ο σεισμός αυτός ο οποίος έγινε στα βορειοδυτικά της τεκτονικής γραμμής του Minjiang, έχει μέγεθος $M_S=6.1$ (NEIS). Είναι λιγότερο ισχυρός σε σχέση με τους υπόλοιπους ωστόσο μελετάται γιατί η περιοχή παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Ο μηχανισμός γένεσης επιλέχτηκε από τους Yang et al. (2005) (παράταξη: 343° , γωνία κλίσης: 85° , γωνία ολίσθησης: 15°). Η δομή που προκάλεσε το σεισμό και περιγράφεται από τον μηχανισμό γένεσης, ταυτίζεται με αυτή του Min Jiang. Το μήκος του ρήγματος το οποίο ενεργοποιήθηκε υπολογίστηκε ίσο με $L=20\text{km}$ από τη Σχέση 14 ενώ η ολίσθηση υπολογίστηκε με τη Σχέση 18 ίση με $u=0.36\text{m}$. Στο Σχήμα 31 παρατηρείται ότι λόγω του μικρού σχετικά μεγέθους του σεισμού, οι μεταβολές του πεδίου των τάσεων δεν καλύπτουν ευρεία περιοχή. Ωστόσο δείχνει να συμβάλει όπως και οι προηγούμενοι σεισμοί του 1966 και 1960 με τη γένεση του σε κάποια θετική επιφόρτιση στη περιοχή νότια του τεμάχους στο οποίο σε λίγα χρόνια ακολουθεί η σεισμική ακολουθία του Songpan (Σχήμα 19).



Σχήμα 31. Η μεταβολή των τάσεων που προκλήθηκε από τον σεισμό του 1973 και ο οποίος με τη σειρά του ενισχύει περισσότερο τις στατικές τάσεις στην περιοχή Songpan (όπως στο Σχήμα 23).

4.2.10 Σεισμική Ακολουθία Songpan, 1976

Το 1976 στην ζώνη διάρρηξης Min Shan και πιο συγκεκριμένα στο ρήγμα Huaya, παρατηρήθηκε μια σεισμική ακολουθία τριών ισχυρών σεισμών οι οποίοι χαρακτηρίστηκαν ως «τριπλέτα σεισμών» όπως χαρακτηρίζεται το σύνθετο φαινόμενο όχι ιδιαίτερα συχνό που εκδηλώνεται με την αλληλουχία ισχυρών σεισμών στην ίδια δομή. Οι τρεις ισχυροί σεισμοί έγιναν με χρονική διαφορά μερικών ημερών ο ένας από τον άλλο. Στο χώρο εκδήλωσης της σεισμικής δραστηριότητας παρατηρήθηκαν κατακρημνίσεις βράχων, κατολισθήσεις, ροές και ρευστοποιήσεις εδαφών κυρίως κατά μήκος του βόρειου και μεσαίου τεμάχους του ρήγματος. Οι τρεις κύριοι σεισμοί χαρακτηρίζονται από σχετικά μικρού μήκους και σχεδόν κατακόρυφες μετασεισμικές ζώνες με βάθη κυμαινόμενα από 15km μέχρι 20km πάνω στο ρήγμα Huaya σχηματίζοντας μια ζώνη διάρρηξης με συνολικό μήκος 80km. Κάθε σεισμός συνδέεται με τμήμα ρήγματος βορειότερα από τον επακόλουθο σεισμό, χωρίς να επικαλύπτονται οι σειсмоγόννοι όγκοι αλλά να βρίσκονται σε συνέχεια. Οι ισόσειστες καμπύλες που κατασκευάστηκαν για τους τρεις σεισμούς έχουν μέγιστους άξονες σε συμφωνία με το ρήγμα Huaya. Η ακολουθία μελετήθηκε διεξοδικά από τους Jones et al. (1984). Από την μελέτη των μετασεισμικών ακολουθιών προκύπτουν δύο κλιμακωτά en echelon ρήγματα τα οποία συνδέονται με ένα επιπρόσθετο κλάδο όπως περιγράφηκε και στη γεωμετρία του ρήγματος (*right stepping offset*).

4.2.10.α 1^{ος} Σεισμός της ακολουθίας Songpan, 16 Αυγούστου, 1976, $M_{BJI}=7.2$

Ο πρώτος ισχυρός σεισμός έγινε στις 16 Αυγούστου με το επίκεντρο του στο βορειότερο τμήμα του χαρτογραφημένου τμήματος του ρήγματος Huaya και με μέγεθος σεισμικής ροπής $M_w=6.7$ (Harvard). Η μετασεισμική του ακολουθία ορίζει μια ζώνη μήκους 30km παράλληλη στην παράταξη ($10^\circ-15^\circ$) προς τα δυτικά του ρήγματος με τη μετασεισμική δραστηριότητα συγκεντρωμένη στα άκρα. Τα εστιακά βάθη των μετασεισμών του κυμαίνονται από 1km μέχρι τα 14km οπότε το βάθος των 8km ως μέσου του σεισμογόνου όγκου στο οποίο υπολογίζονται οι μεταβολές των τάσεων βρίσκεται σε απόλυτη συμφωνία ακόμη και στη πολύπλοκη αυτή περιοχή της έντονης συμπίεσης. Σύμφωνα με τους Jones et al. (1984) ο υπολογισμός του μηχανισμού γένεσης του σεισμού είναι αρκετά ακριβής και δείχνει μια τεκτονική δομή με παράταξη $165^\circ \pm 10^\circ$, υποπαράλληλη στη διεύθυνση που ακολουθεί η χωρική

κατανομή των μετασεισμών. Η γωνία κλίσης είναι $63^{\circ} \pm 2^{\circ}$ προς τα δυτικά. Η γωνία ολίσθησης είναι 40° , δηλαδή αντιστοιχεί σε ανάστροφη κίνηση με αριστερόστροφη συνιστώσα οριζόντιας μετατόπισης. Το εστιακό βάθος του σεισμού υπολογίστηκε με δύο μεθόδους ίσο με 12km (αντιστροφή κυματομορφών) και 8,5km (με το πρόγραμμα HypoInverse), αντίστοιχα. Η συνολική σεισμική ροπή που εκλύθηκε κατά τη διάρκεια του σεισμού υπολογίστηκε ίση με $13 \cdot 10^{26} \text{ dyn}\cdot\text{cm}$. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στην εμφάνιση κατευθυντικότητας της διάρρηξης στο σεισμικό ρήγμα. Ο μηχανισμός γένεσης ο οποίος επιλέχτηκε αντιστοιχεί σε δομή με παράταξη 165° και γωνία ολίσθησης 40° . Από τη σεισμική ροπή υπολογίστηκε ολίσθηση ίση με $u=1.1\text{m}$. Στο **Σχήμα 32** φαίνεται η χωρική κατανομή των μεταβολών των τάσεων για διαφορετικούς υπολογισμούς για τη σεισμική ακολουθία.

Στα **Σχήματα 32α, β και γ** υπολογίζονται οι μεταβολές της τάσης κατά τη διάρκεια της ολίσθησης για κάθε ένα από τους τρεις ισχυρούς σεισμούς υπολογισμένες για τύπο διάρρηξης αντίστοιχο αυτού που τον προκάλεσε. Με μωβ χρώμα φαίνεται το ρήγμα που διερρήχθη και αυτό ως προς τη γεωμετρία του οποίου γίνονται οι υπολογισμοί ενώ με μαύρο τα υπόλοιπα τεμάχια του ρήγματος. Συνεπώς στα **Σχήματα 32α και 32γ** είναι υπολογισμένα για δεξιόστροφο ρήγμα ενώ στο **Σχήμα 32β** είναι υπολογισμένο για ανάστροφο τύπο διάρρηξης. Στο **Σχήμα 32δ** απεικονίζεται η μεταβολή των τάσεων που προκάλεσε ο πρώτος οι οποίες έχουν αναλυθεί σε τύπο διάρρηξης όμοιο του δεύτερου σεισμού. Αντίστοιχα στο **Σχήμα 32ε** παρουσιάζεται η μεταβολή του δεύτερου σεισμού της ακολουθίας υπολογισμένο σε τύπο διάρρηξης όμοιο με το μηχανισμό γένεσης του τρίτου σεισμού και τέλος το αθροιστικό αποτέλεσμα και των δύο σεισμών ως προς τον τρίτο απεικονίζεται στο **Σχήμα 32ζ**. Ο λόγος για τον οποίο πραγματοποιήθηκαν οι υπολογισμοί αυτοί είναι για να διαπιστωθεί η άμεση επίδραση του ενός σεισμού στον άλλο. Πράγματι διακρίνεται ότι όλοι οι σεισμοί ανεξαρτήτως του τύπου διάρρηξης για τον οποίο έγιναν οι υπολογισμοί, έγιναν σε περιοχές οι οποίες καλύπτονταν από φωτεινούς λοβούς τάσεων προκαλούμενους από την θετική αύξηση των προγενέστερων σεισμών. Η γένεση των σεισμών σε μικρό χρονικό διάστημα και σε μικρή απόσταση δείχνει ότι η γένεση του κάθε σεισμού επιταχύνει τη γένεση του άλλου. Το μοντέλο ερμηνεύει με επιτυχία τη γένεση των σεισμών στην σεισμική ακολουθία.

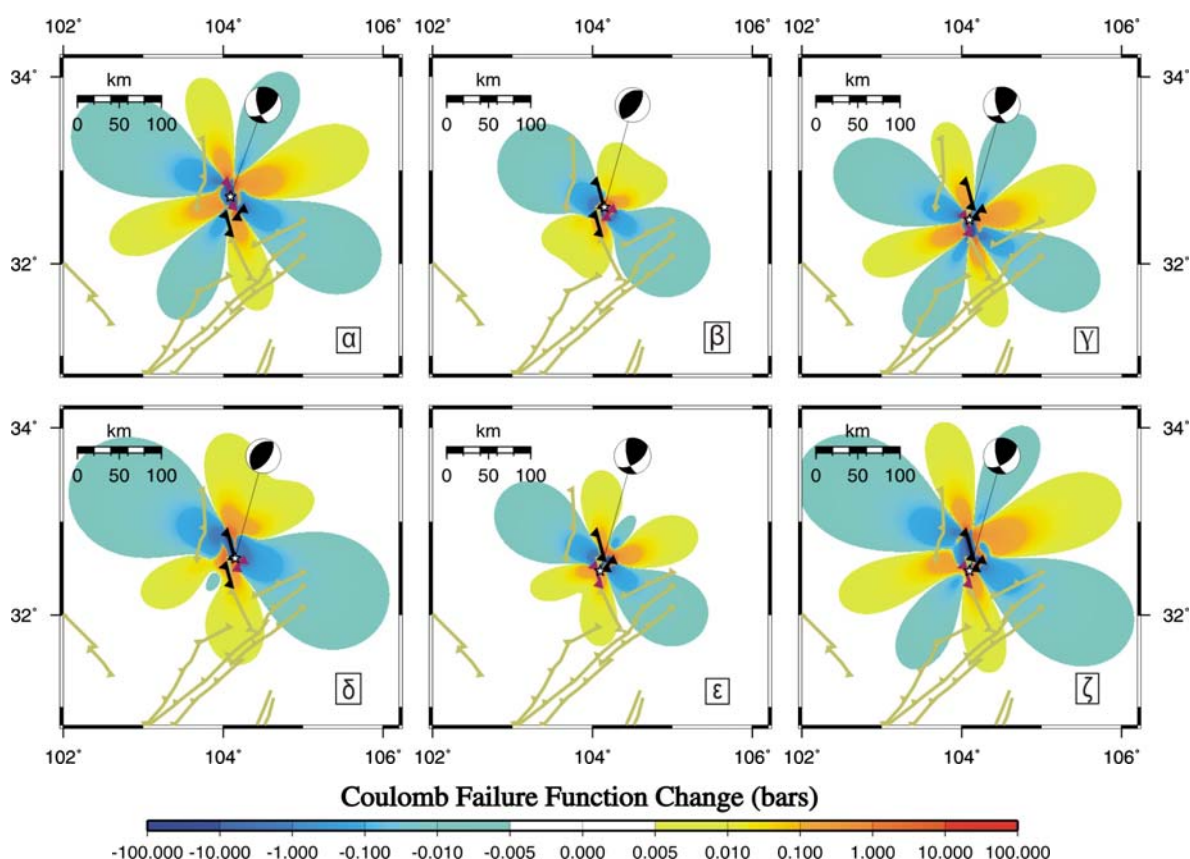
4.2.10.β 2^{ος} Σεισμός της ακολουθίας Songpan, 21 Αυγούστου, 1976 $M_{BJI}=6.7$

Ο δεύτερος ισχυρός σεισμός έγινε 5 ημέρες μετά, με το επίκεντρο του στο νοτιότερο σημείο του μετασεισμικού χώρου του πρώτου ισχυρού σεισμού. Έχει μέγεθος σεισμικής ροπής ίσο με $M_w=6.3$ (Harvard). Οι μετασεισμοί του κατανέμονται σε μια διεύθυνση 125° προς τα δυτικά σε μήκος 12km (Jones et al., 1984). Η διεύθυνση της μετασεισμικής ακολουθίας συμπίπτει με την μεταβολή των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του ρήγματος σε αυτό το σημείο. Τα εστιακά βάθη των μετασεισμών κυμαίνονται από τα 2km μέχρι τα 13km. Η λύση του μηχανισμού γένεσης δείχνει μία δομή με παράταξη $35^\circ-40^\circ$ και γωνία κλίσης 60° προς τα βορειοδυτικά (παράταξη: 125° , γωνία κλίσης: 60° , γωνία ολίσθησης: 90°). Στο **Σχήμα 31β** διακρίνεται το πεδίο των μεταβολών των τάσεων αμέσως μετά το σεισμό αυτό υπολογισμένο για ανάστροφο ρήγμα. Διακρίνεται ότι ο λοβός των θετικών τάσεων αναπτύσσεται κατά μήκος της παράταξης του ρήγματος ενθαρρύνοντας τη γένεση του τρίτου σεισμού ανατολικά.

4.2.10.γ 3^{ος} Σεισμός της ακολουθίας Songpan, 23 Αυγούστου, 1976, $M_{BJI}=7.2$

Ο τρίτος κύριος σεισμός με μέγεθος σεισμικής ροπής $M_w=6.4$ (Harvard) έγινε 30 ώρες από μετά το δεύτερο και συνδέεται με το τέμαχος νοτιότερα από το προηγούμενο με το επίκεντρό του να βρίσκεται 15km νοτιότερα από το νότιο άκρο της προηγούμενης ακολουθίας. Η χωρική του κατανομή παρουσιάζει αρκετές ομοιότητες σε σχέση με την πρώτη, ακολουθώντας την ίδια παράταξη αλλά με μικρότερο μήκος (20-25km). Τα εστιακά βάθη των μετασεισμών κυμαίνονται από το 1km μέχρι τα 14km. Ο μηχανισμός γένεσης παρουσιάζει αρκετή ομοιότητα σε σχέση με αυτόν του πρώτου σεισμού. Η παράταξη και η ολίσθηση είναι ίδιες (165° και 40° , αντίστοιχα) με τον πρώτο σεισμό ενώ διαφοροποιούνται η γωνία κλίσης που είναι λίγο μεγαλύτερη (65°) από αυτή του πρώτου σεισμού και το εστιακό βάθος που είναι μικρότερο. Ενώ τα υπολογιζόμενα μεγέθη για τους δυο μεγαλύτερους σεισμούς είναι τα ίδια ωστόσο η εκλυόμενη σεισμική ροπή διαφέρει έχοντας μικρότερη τιμή ($M_0 = 8.4 \cdot 10^{25}$ dyn·cm (Jones et al. 1984).

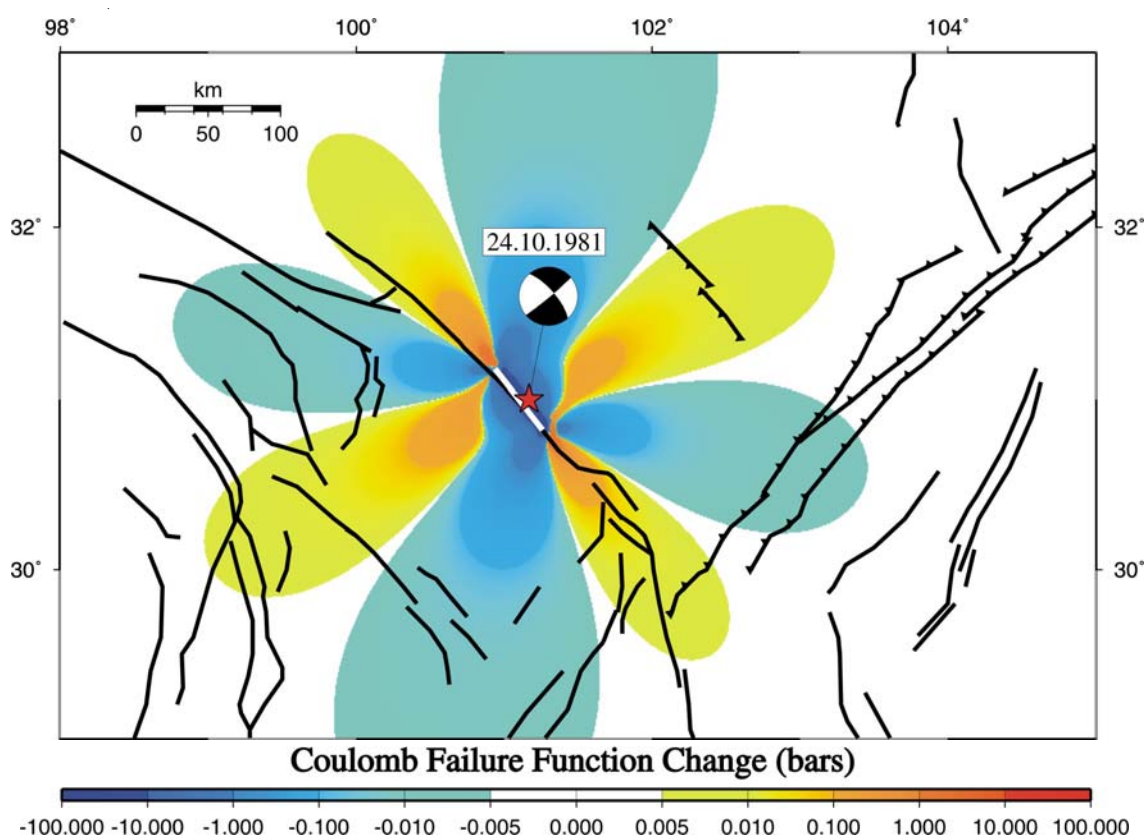
Στο **Σχήμα 31γ** απεικονίζεται η μεταβολή των τάσεων κατά το σεισμό ως προς το επίπεδο του ρήγματος που τον προκάλεσε και φαίνεται ότι έχει την τυπική μορφή ρήγματος οριζόντιας μετατόπισης.



Σχήμα 32. Παρουσιάζονται οι μεταβολές των τάσεων οι οποίες προκαλούνται κατά την ολίσθηση των τριών ισχυρών σεισμών της ακολουθίας. Το πεδίο των τάσεων είναι υπολογισμένο για επίπεδο ρήγματος το οποίο αντιστοιχεί στο τέμαχος με το μωβ χρώμα. **α)** Η μεταβολή των τάσεων κατά τη διάρκεια του πρώτου ισχυρού σεισμού στις 16/08/1976 υπολογισμένη για τύπο διάρρηξης όμοιο του μηχανισμού γένεσης του ίδιου. **β)** Η ΔCFF κατά τον δεύτερο σεισμό της ακολουθίας 21/08/1976 υπολογισμένη για τύπο διάρρηξης όμοιο του μηχανισμού γένεσης του ίδιου. **γ)** Η μεταβολή των τάσεων του τρίτου σεισμού στις 23/08/1976 υπολογισμένη για τύπο διάρρηξης όμοιο του μηχανισμού γένεσης του ίδιου. **δ)** Η μεταβολή των τάσεων που προκάλεσε ο πρώτος σεισμός και η οποία έχει αναλυθεί σε τύπο διάρρηξης όμοιο του δεύτερου σεισμού. **ε)** Η μεταβολή των τάσεων του δεύτερου σεισμού ως προς το τρίτο ρήγμα. **ζ)** Η αθροιστική μεταβολή του πρώτου και του δεύτερου σεισμού ως προς το ρήγμα που προκάλεσε τον τρίτο σεισμό. Οι υπολογισμοί αυτοί δείχνουν την άμεση επίδραση του ενός ως προς τον άλλο. Παρατηρείται ότι όλα τα επίκεντρα εντοπίζονται σε περιοχές θετικών ΔCFF με εμφανή διέγερση του ενός σεισμού από τον προηγούμενό του ανεξάρτητα από τον τύπο διάρρηξης για τον οποίο κάθε φορά υπολογίζονται.

4.2.11 Daofu, 23 Ιανουαρίου, 1981, $M_{BJI}=6.9$

Ο ισχυρός σεισμός στις 23 Ιανουαρίου 1981, αποτελεί και τον πιο πρόσφατο και που οφείλεται στη δραστηριοποίηση του Xianshuihe με το επίκεντρο του στην περιοχή Daofu, με μέγεθος $M_w=6.5$ (Harvard). Σύμφωνα με τους Zhou et al. (1983), εκδηλώθηκε επιφανειακή διάρρηξη μήκους $L=44\text{km}$ με κλιμακωτή μορφή με μέγιστη αριστερόστροφη μετατόπιση ίση με 23-45cm.



Σχήμα 33. Η μεταβολή των τάσεων που προκλήθηκε από τον σεισμό του 1981 (όπως στο Σχήμα 23). Οι μεταβολές που προκλήθηκαν από το σεισμό αυτό συνέβαλαν στην ενεργοποίηση του ρήγματος της σεισμικής ακολουθίας Batang το 1989 με τον φωτεινό λοβό στα νοτιοδυτικά να καλύπτει τη περιοχή.

Οι Liu et al. (1992) εντόπισαν μετατόπιση της τάξης των 0,38m ενώ μεταγενέστερες μετρήσεις δείχνουν μήκη 0.3-0.6m. Επομένως επιλέχτηκε μια μέση τιμή της ολίσθησης $u=0.56\text{m}$ η οποία προκύπτει από την εκλυόμενη σεισμική ροπή, $M_o=7.28 \cdot 10^{25} \text{ dyn-cm}$. Επιλέχτηκε ο μηχανισμός γένεσης του Harvard ο οποίος αντιστοιχεί σε αριστερόστροφο ρήγμα οριζόντιας μετατόπισης με ΒΔ-ΝΑ παράταξη, (παράταξη: 319° , γωνία κλίσης: 73° , γωνία ολίσθησης: -4°).

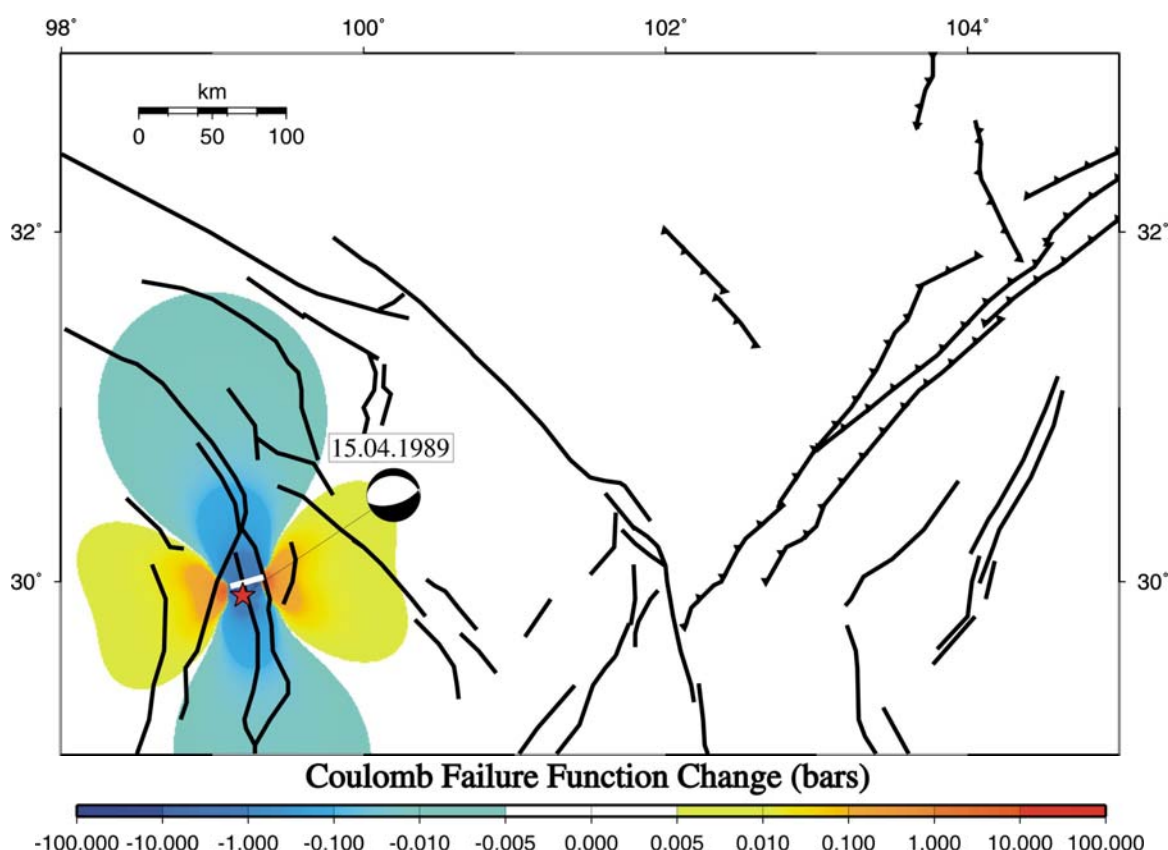
Στο **Σχήμα 33** παρουσιάζονται οι μεταβολές της τάσης οι οποίες οφείλονται στη γένεση του σεισμού αυτού και έχουν υπολογιστεί σύμφωνα με το μηχανισμό γένεσης του. Ο σεισμός έχει το ίδιο επίκεντρο με αυτό του 1923, και επιδρά κατά τον ίδιο τρόπο στα γειτονικά ρήγματα, ενώ φαίνεται ότι έχει συμβάλει στην ενεργοποίηση του ρήγματος που προκάλεσε την ακολουθία του Batang οχτώ χρόνια αργότερα αφού οι φωτεινοί λοβοί κατευθύνονται σε διεύθυνση ΒΑ-ΝΔ και ΒΔ-ΝΑ πάνω από το σύστημα διάρρηξης Jiangchuan και Batang.

4.2.12 Σεισμική Ακολουθία Batang, 1989

Τον Απρίλιο του 1989 έλαβε χώρα η σεισμική ακολουθία του Batang με δυο ισχυρούς σεισμούς με $M \geq 6.0$ με χρονική διαφορά λίγων ημερών. Η κατανομή της μετασεισμικής ακολουθίας συνδέεται με τη ζώνη διάρρηξης Jingshajiang η οποία αποτελείται από αριστερόστροφα ρήγματα διεύθυνσης Βορρά-Νότου (**Σχήμα 20**). Ωστόσο οι μηχανισμοί γένεσης της ακολουθίας αντιστοιχούν σε ρήγματα κλίσης με διεύθυνση Α-Δ, η οποία δεν συμφωνεί με την τεκτονική της περιοχής. Σχετικές ερμηνείες σύμφωνα με τις οποίες η ακολουθία να συνέβη σε τυφλά ρήγματα Ανατολής-Δύσης ενώ έχει διατυπωθεί και η άποψη πως συνέβησαν διαδοχικά, σε ρήγματα Βορρά-Νότου με ιδιαίτερα μικρές γωνίες κλίσης και οι μετασεισμοί πραγματοποιήθηκαν σε μία ενοποιημένη ζώνη διάρρηξης Ανατολής-Δύσης (Han et al., 2004).

4.2.12.α 1^{ος} Σεισμός της ακολουθίας Batang, 16 Απριλίου, 1989, $M_{BJI}=6.0$

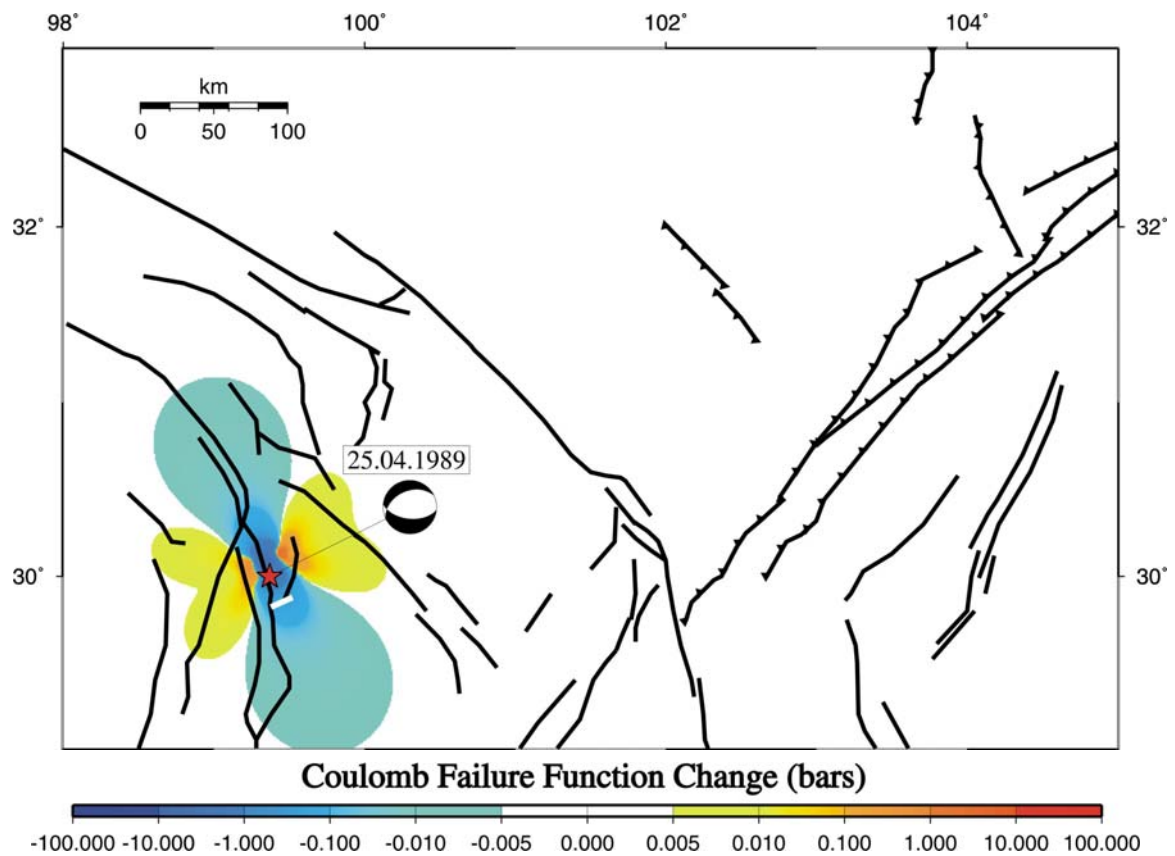
Ο πρώτος ισχυρός σεισμός έγινε στις 16 Απριλίου, με μέγεθος σεισμικής ροπής $M_w=6.4$ (HRV). Επιλέχτηκε ο μηχανισμός γένεσης, απουσία τεκτονικών στοιχείων. Οι Gao et al. (2000) προτείνουν ότι η διεύθυνση της διάρρηξης συμπίπτει με την βορειοανατολική διεύθυνση της μετασεισμικής ακολουθίας και είναι μονοκατευθυντική (παράταξη: 74° , γωνία ολίσθησης $\lambda:-99^\circ$). Από τη σεισμική ροπή που εκλύθηκε $M_0=5.33 \cdot 10^{25}$ dyn-cm υπολογίστηκε η ολίσθηση κατά μήκος του ρήγματος το οποίο έχει μήκος $L=22\text{km}$ (**Σχέση 15**) ίση με $u=0.54\text{m}$ (**Σχέση 19**). Στο **Σχήμα 34** παρουσιάζεται η μεταβολή των τάσεων κατά το σεισμό. Διακρίνεται η δημιουργία δύο λοβών θετικών μεταβολών σε διεύθυνση Ανατολής-Δύσης και μία σκιερή ζώνη σε Βορρά-Νότου κατεύθυνση.



Σχήμα 34. Η μεταβολή των τάσεων που προκλήθηκε από τον πρώτο ισχυρό σεισμό της σεισμικής ακολουθίας του Batang το 1989, τυπική κανονικού ρήγματος (όπως στο Σχήμα 23).

4.2.12.β 2^{ος} Σεισμός της ακολουθίας Batang, 25 Απριλίου, 1989 $M_{BJI}=6.7$

Ο δεύτερος σεισμός έγινε στις 25 Απριλίου με μέγεθος ροπής $M_w=6.1$ (Harvard). Η διάρρηξη η οποία πραγματοποιήθηκε έχει μήκος $L=15.5\text{km}$ και πλάτος $W=14.8\text{km}$ υπολογιζόμενα από τις Σχέσεις 15 και 17 αντίστοιχα. Από την εκλυόμενη σεισμική ροπή, $M_0=1.80 \cdot 10^{25} \text{ dyn-cm}$ (Harvard) υπολογίστηκε μέση ολίσθηση ίση με $u=0.32\text{m}$. Ο μηχανισμός γένεσης επιλέχτηκε από το Harvard η οποία έρχεται σε συμφωνία με τους Gao et al. (1989) και αποδίδεται σε κανονικό ρήγμα (παράταξη: 245° , γωνία κλίσης: 40° , γωνία ολίσθησης: -114°). Η διαφορά με τον πρώτο σεισμό είναι ότι αποδίδεται σε αντιθετικό του ρήγμα και όχι στο ίδιο. Στο Σχήμα 35 παρουσιάζεται η μεταβολή των τάσεων η οποία είναι τυπική κανονικού ρήγματος και η οποία ακολουθεί την ίδια κατανομή με τον πρώτο σεισμό.



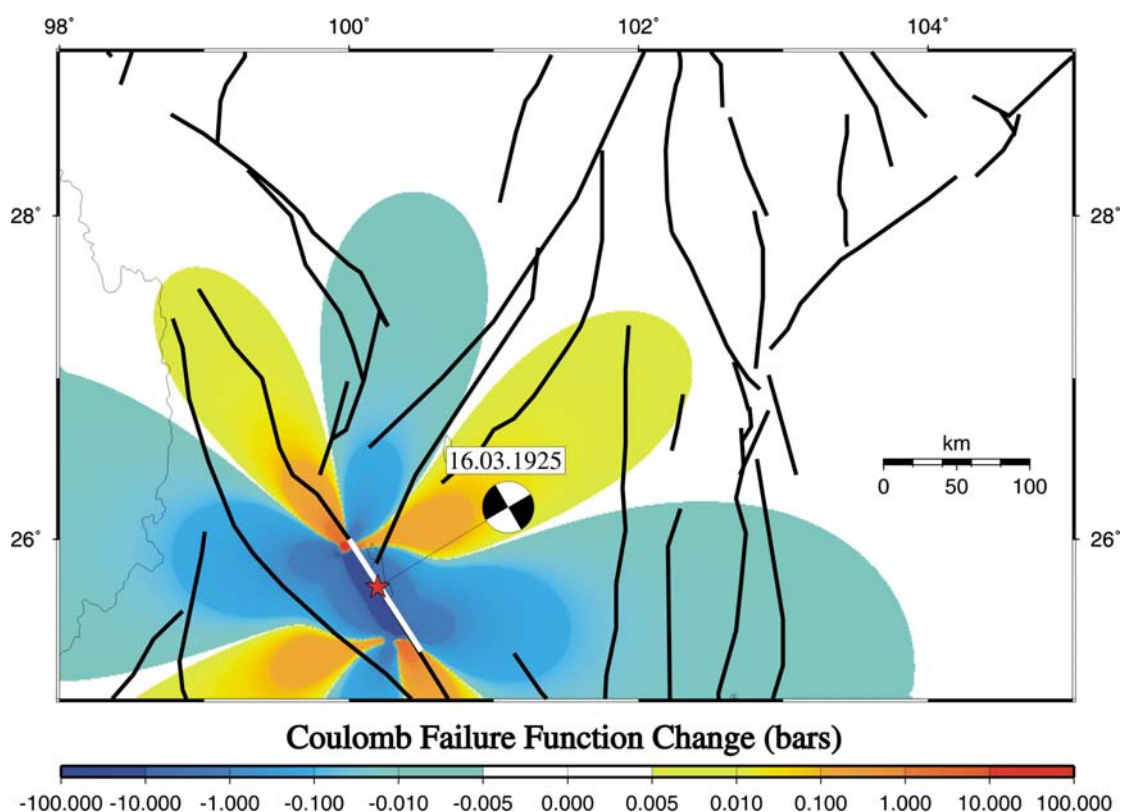
Σχήμα 35. Η μεταβολή των τάσεων που προκλήθηκε από τον 2^ο σεισμό της σεισμικής ακολουθίας Batang (όπως στο Σχήμα 23).

4.3 Κεντρική Υποπεριοχή Μελέτης

Στη κεντρική περιοχή μελέτης δηλαδή τη νότια επαρχία Sichuan και βόρεια Yunnan, έγιναν 8 ισχυροί σεισμοί από το 1925 μέχρι το 1996 οι οποίοι συμπεριλαμβάνονται στο εξελικτικό μοντέλο των τάσεων. Ο φαινόμενος συντελεστής της τριβής για τον υπολογισμό των τάσεων λήφθηκε ίσος με 0.4 για τους υπολογισμούς, το $G=33\text{GPa}$ και ο λόγος Poisson ίσος με 0.25. Τα μεγέθη σεισμικής ροπής πριν από το 1976 λήφθηκαν από τον κατάλογο των Pacheco and Sykes (1992) ενώ τα μεταγενέστερα από τον κατάλογο μηχανισμών γένεσης του Harvard. Για κάθε σεισμό περιγράφεται το μοντέλο της διάρρηξης το οποίο του αντιστοιχεί (μήκος, πλάτος, ολίσθηση) και αναφέρονται οι διαθέσιμες πληροφορίες οι οποίες συλλέχθηκαν για τους σεισμούς αυτούς. Με τη βοήθεια χρωματικής κλίμακας απεικονίζεται η μεταβολή του πεδίου των τάσεων η οποία υπολογίζεται κάθε φορά για ένα επίπεδο το οποίο αντιστοιχεί στο επίπεδο του ρήγματος το οποίο προκάλεσε τον σεισμό. Με λευκό χρώμα απεικονίζονται οι σχεδόν μηδενικές μεταβολές της τάσης, ενώ με κόκκινα οι θετικές μεταβολές, δηλαδή οι συσσωρευμένες τάσεις έτσι όπως ανακατανεμήθηκαν εξαιτίας της σεισμικής ολίσθησης και με μπλε οι αρνητικές στις οποίες οι τάσεις έχουν ανακουφιστεί.

4.3.1 Dali, 16 Μαρτίου, 1925, $M_{\text{Bj}}=6.8$

Ο σεισμός αυτός είναι γνωστός ως σεισμός του Dali και είναι ένας από τους πιο σημαντικούς και ισχυρούς σεισμούς, έχει μέγεθος $M_W=7.0$ και έγινε στη βόρεια απόληξη της ζώνης διάρρηξης Red River. Το μήκος του ρήγματος από τις αντίστοιχες σχέσεις έχει υπολογιστεί ίσο με 68km (**Σχέση 14**) και ολίσθηση ίση με 1.48m (**Σχέση 18**). Ο μηχανισμός γένεσης δεν υπάρχει για το σεισμό αυτό οπότε του αποδόθηκε υποθετικά ένας μηχανισμός ο οποίος να έρχεται σε συμφωνία με την τεκτονική της περιοχής. (παράταξη: 150° , γωνία κλίσης: 90° , γωνία ολίσθησης: 180°) Στο **Σχήμα 35** παρουσιάζεται η μεταβολή των τάσεων η κατανομή των οποίων καλύπτει μία εκτεταμένη περιοχή και δημιουργεί θετικές μεταβολές στο βορειοδυτικό τμήμα του ρήγματος το οποίο θεωρείται και περισσότερο ενεργό. Αντίθετα σχηματίζεται μία ευρεία σκιερή ζώνη σε ανατολή-δύση περίπου κατεύθυνση.

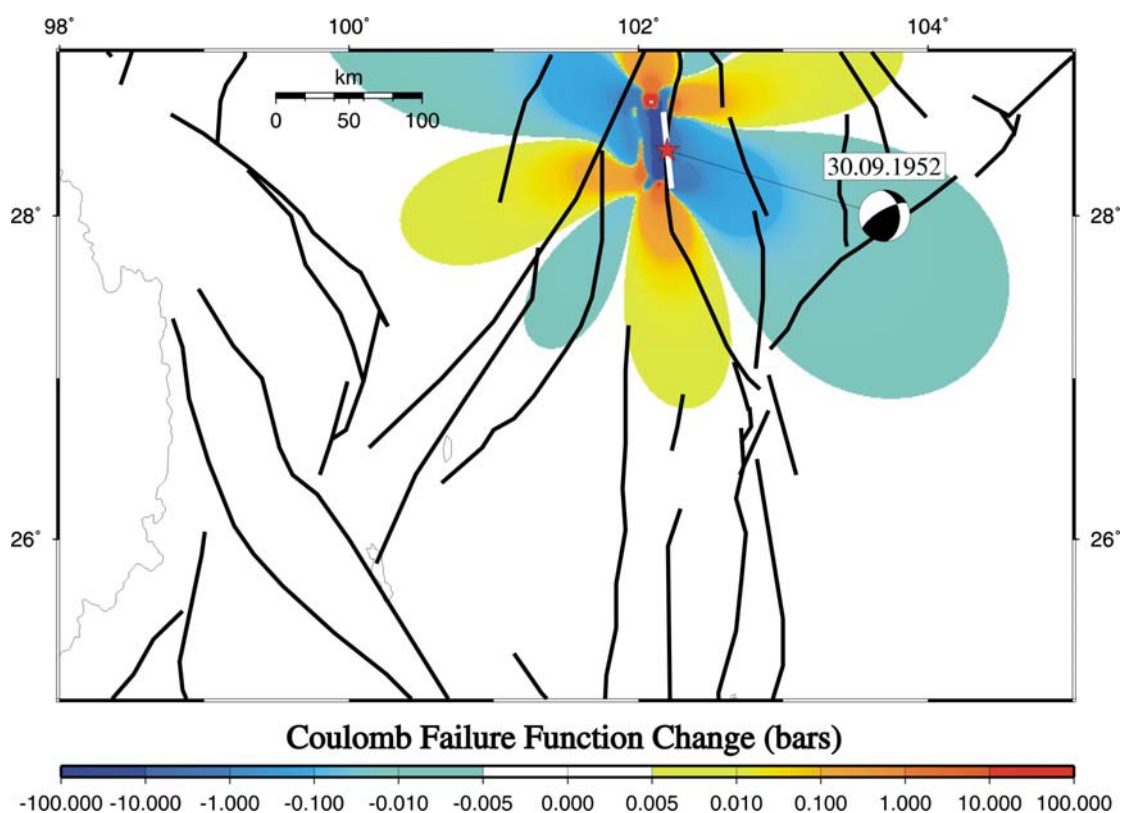


Σχήμα 36. Η μεταβολή των τάσεων που προκλήθηκε από τον σεισμό του 1925. Είναι ιδιαίτερα εκτεταμένη λόγω της μεγάλης τιμής της ολίσθησης και φαίνεται να φορτίζει θετικά την βορειοδυτική απόληξη του ρήγματος και τη βορειοανατολική στην οποία δεν εκδηλώνεται μεγάλη σεισμικότητα. (όπως στο Σχήμα 23)

4.3.2 Anninghe, 30 Σεπτεμβρίου, 1952, $M_{BJI}=6.8$

Ο σεισμός αυτός έχει μέγεθος $M_{BJI}=6.8$. Εκδηλώθηκε στη ζώνη διάρρηξης Anninghe. Εκδηλώνεται σε μία περιοχή ιδιαίτερα απομακρυσμένη από αυτή του σεισμού του Dali και επομένως σε καμία περίπτωση δεν διεγείρεται από αυτόν. Το ρήγμα Anninghe είναι αριστερόστροφο ρήγμα οριζόντιας μετατόπισης με ΒΔ-ΝΑ παράταξη και ο μηχανισμός γένεσης που επιλέχτηκε από τους Yang et al. (2005) συμφωνεί με τα χαρακτηριστικά αυτά (παράταξη: 354° , γωνία κλίσης: 40° , γωνία ολίσθησης $\lambda: 30^\circ$). Το μήκος του ρήγματος το οποίο ενεργοποιήθηκε υπολογίστηκε ίσο με $L=52\text{km}$ (Σχέση 14) και η ολίσθηση υπολογίστηκε ίση με 1.08m (Σχέση 18). Στο Σχήμα 37 απεικονίζονται οι μεταβολές των τάσεων οι οποίες όμως είναι απομακρυσμένες από τα περισσότερα επίκεντρα των ισχυρών σεισμών σε αυτή τη περιοχή παραμόνο από το επίκεντρο του 1974 νοτιοανατολικά το οποίο όμως βρίσκεται στη σκιερή ζώνη του σεισμού αυτού. Ωστόσο φαίνεται να αυξάνει της

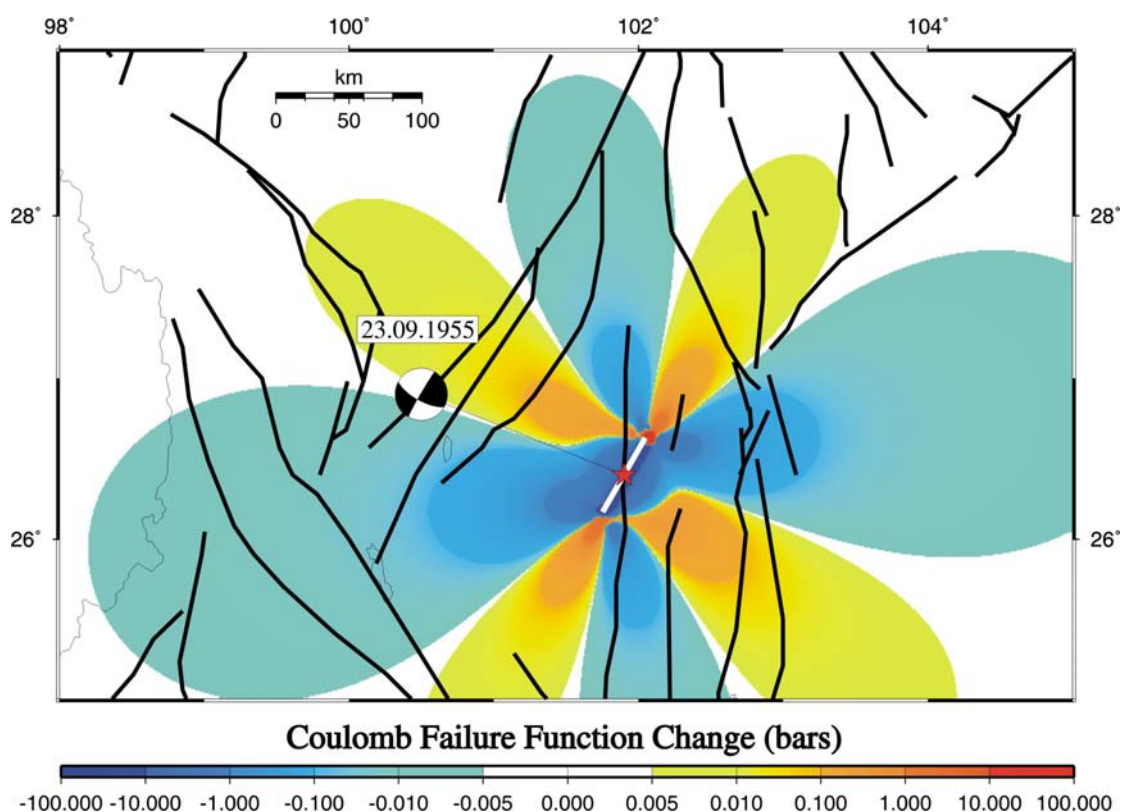
στατικές τάσεις κατά μήκος του ρήγματος Anninghe και Zemuhe τα οποία εκδηλώνουν συχνή σεισμική δραστηριότητα η οποία όμως δεν έχει παρατηρηθεί τα χρόνια που επακολουθούν.



Σχήμα 37. Η μεταβολή των τάσεων κατά τον σεισμό του 1952 ο οποίος είναι απομακρυσμένος από τις υπόλοιπες θέσεις επικέντρων στην κεντρική υποπεριοχή (όπως στο Σχήμα 23).

4.3.3 Luzhijiang, 23 Σεπτεμβρίου, 1955, $M_{BJI}=6.8$

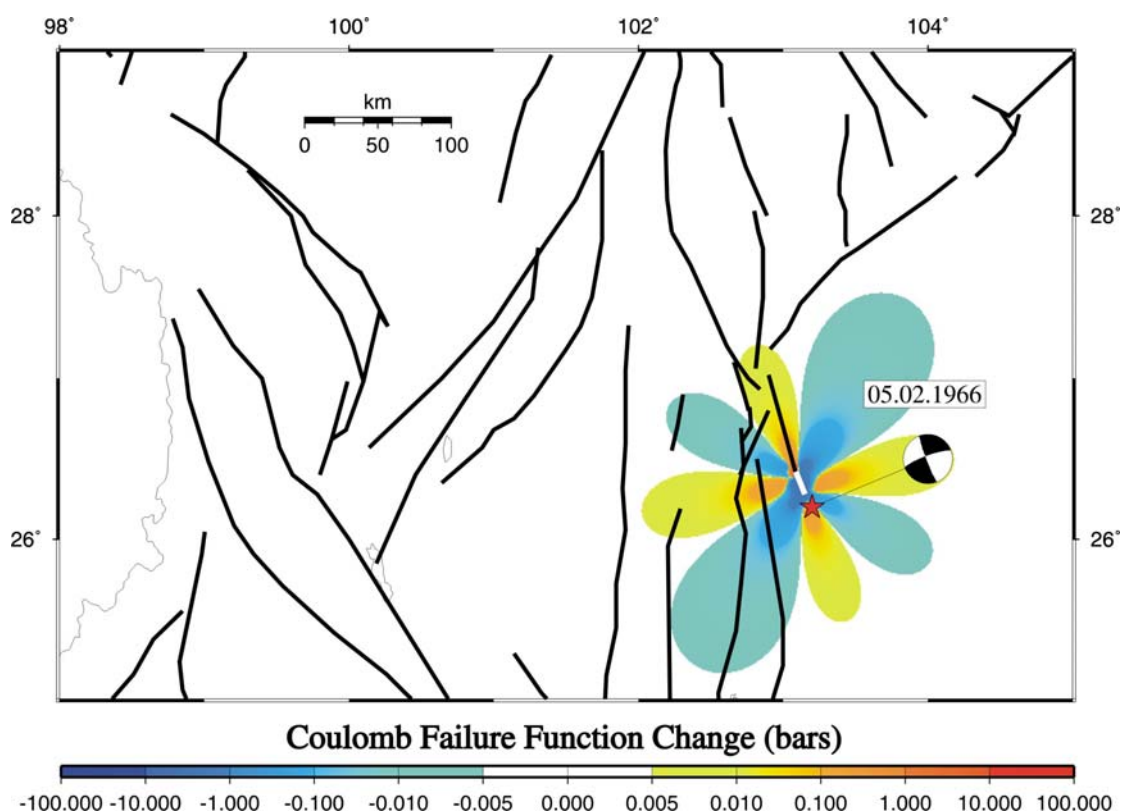
Ο σεισμός αυτός έχει μέγεθος σεισμικής ροπής $M_{(UK)}= 6.9$ (PAS). Από την τεκτονική της περιοχής προκύπτει ότι ρήγμα το οποίο προκάλεσε το σεισμό είναι ρήγμα Βορρά-Νότου. Ο μηχανισμός γένεσης υιοθετήθηκε από τους Yang et al. (2005) και αντιστοιχεί σε αριστερόστροφο ρήγμα οριζόντιας μετατόπισης (παράταξη: 210° , γωνία κλίσης: 87° , γωνία ολίσθησης: 20°). Το μήκος του ρήγματος το οποίο ενεργοποιήθηκε υπολογίστηκε ίσο με $L=59\text{km}$ από τη Σχέση 14 και η ολίσθηση υπολογίστηκε ίση με $u=1.26\text{m}$ (Σχέση 18). Στο Σχήμα 38 απεικονίζεται η χωρική κατανομή των μεταβολών η οποία δε φαίνεται να επηρεάζει το μεταγενέστερο σεισμό που έγινε στη περιοχή.



Σχήμα 38. Η μεταβολή των τάσεων που προκλήθηκε από τον σεισμό του 1955 στο ρήγμα Yiden (όπως στο Σχήμα 23).

4.3.4 Dongchuan, 5 Φεβρουάριου, 1966, $M_{BJI}=6.5$

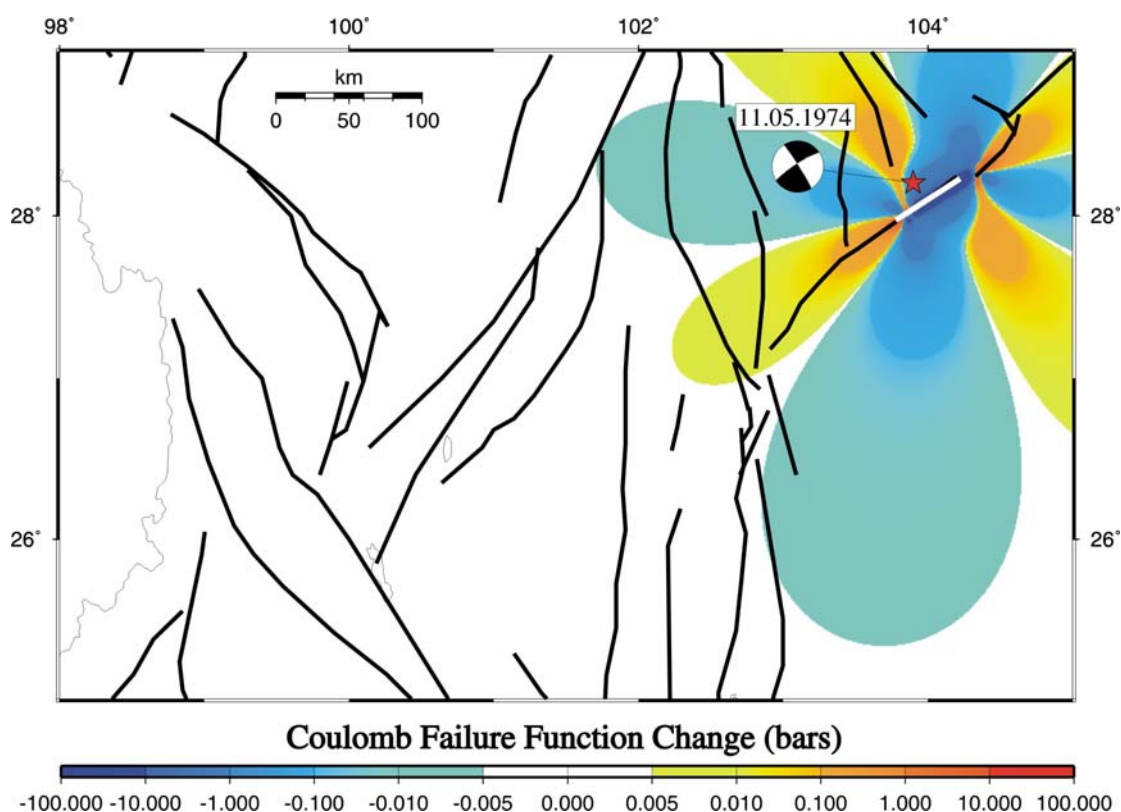
Ο σεισμός αυτός, σεισμός του Dongchuan έχει μέγεθος $M_s=6.0$ (USGS). Ο σεισμός αυτός εκδηλώθηκε σε ένα από τα αριστερόστροφα ρήγματα του Xiaojiang. Ο μηχανισμός γένεσης επιλέχτηκε από τους Yang et al. (2005), (παράταξη: 159° , γωνία κλίσης: 85° , γωνία ολίσθησης: -11°). Δίνεται η σεισμική ροπή που εκλύθηκε $M_o=1.48 \cdot 10^{25}$ dyn·cm (Holt et al., 1991). Το μήκος του ρήγματος το οποίο ενεργοποιήθηκε υπολογίστηκε ίσο με $L=17$ km από τη **Σχέση 14** για ρήγματα οριζόντιας μετατόπισης ενώ η ολίσθηση υπολογίστηκε με τη **Σχέση 18** ίση με 0.31m. Είναι μικρότερου μεγέθους σε σχέση με αυτούς που μελετώνται ωστόσο υπήρξε ιδιαίτερα καταστροφικός για την περιοχή της Yunnan. Στο **Σχήμα 39** απεικονίζεται η κατανομή των μεταβολών των τάσεων κατά τη διάρκεια του σεισμού αυτού, φωτεινές ζώνες του οποίου κατανέμονται στα βόρεια και δυτικά τεμάχη των Xiaojiang ρηγμάτων.



Σχήμα 39. Η μικρή σχετικά μεταβολή των τάσεων που προκλήθηκε από τον σεισμό του 1966 (όπως στο Σχήμα 23)

4.3.5 Yongshan 11 Μαΐου, 1974, $M_{BJI}=7.0$

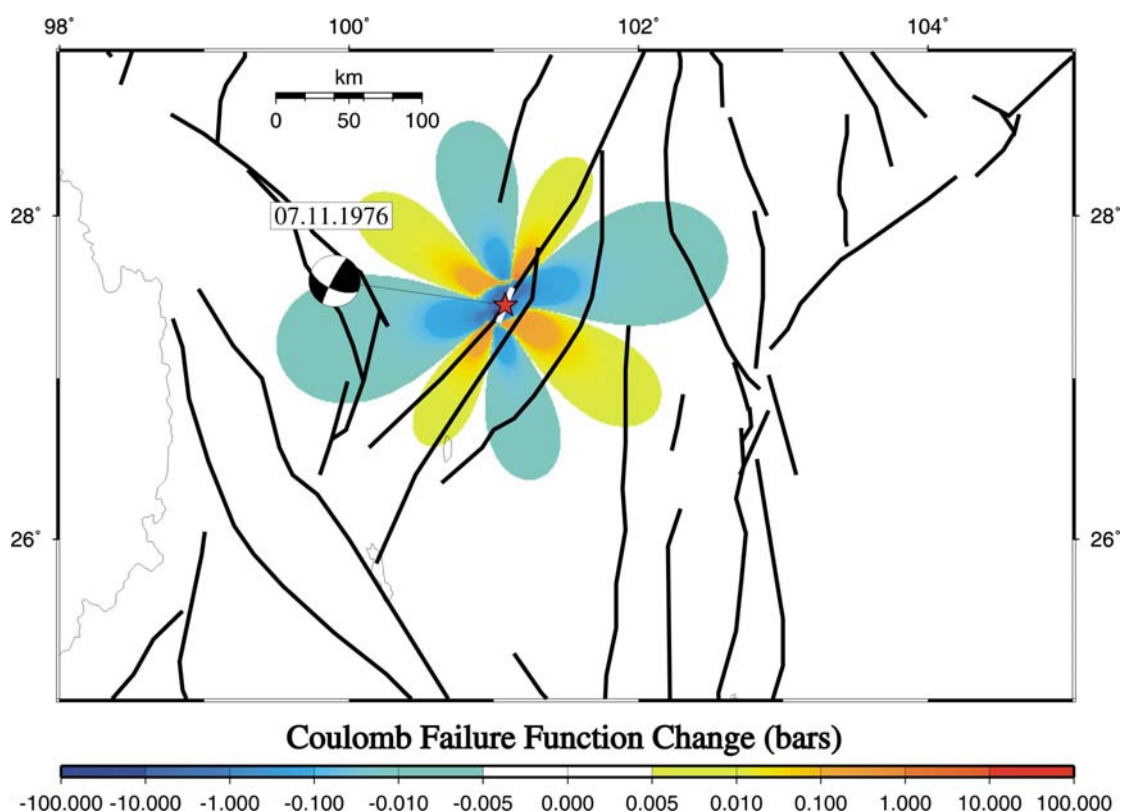
Ο ισχυρός αυτός σεισμός συνέβη στην ανατολική Yunnan και είναι γνωστός ως σεισμός του Yongshan, έχει μέγεθος $M_s=6.8$ (NEIS). Για το σεισμό αυτό δεν υπάρχει απόλυτη συσχέτιση με το υπαίτιο ρήγμα το οποίο προκάλεσε τον σεισμό αφού οι μελέτες που έχουν διεξαχθεί δίνουν συγκρουόμενα αποτελέσματα. Από την τεκτονική της περιοχής προκύπτει ότι ρήγμα το οποίο προκάλεσε το σεισμό είναι πιθανότερα ΒΔ-ΝΑ παράταξης. Το ρήγμα αυτό είναι αριστερόστροφο οριζόντιας μετατόπισης και ο μηχανισμός γένεσης επιλέχτηκε από τους Yang et al. (2005), (παράταξη: 237° , γωνία κλίσης: 81° , γωνία ολίσθησης: 176°). Το μήκος του ρήγματος το οποίο ενεργοποιήθηκε υπολογίστηκε ίσο με $L=52\text{km}$ από τη **Σχέση 14** και η ολίσθηση ίση με 1.08m (**Σχέση 18**). Στο **Σχήμα 40** διακρίνεται η μεταβολή της τάσης ΔCFF αμέσως μετά το σεισμό αυτό.



Σχήμα 40. Η μεταβολή των τάσεων που προκλήθηκε από τον σεισμό του 1974 (όπως στο Σχήμα 22)

4.3.6 Qinhe, 7 Νοέμβριου, 1976, $M_{BJI}=6.7$

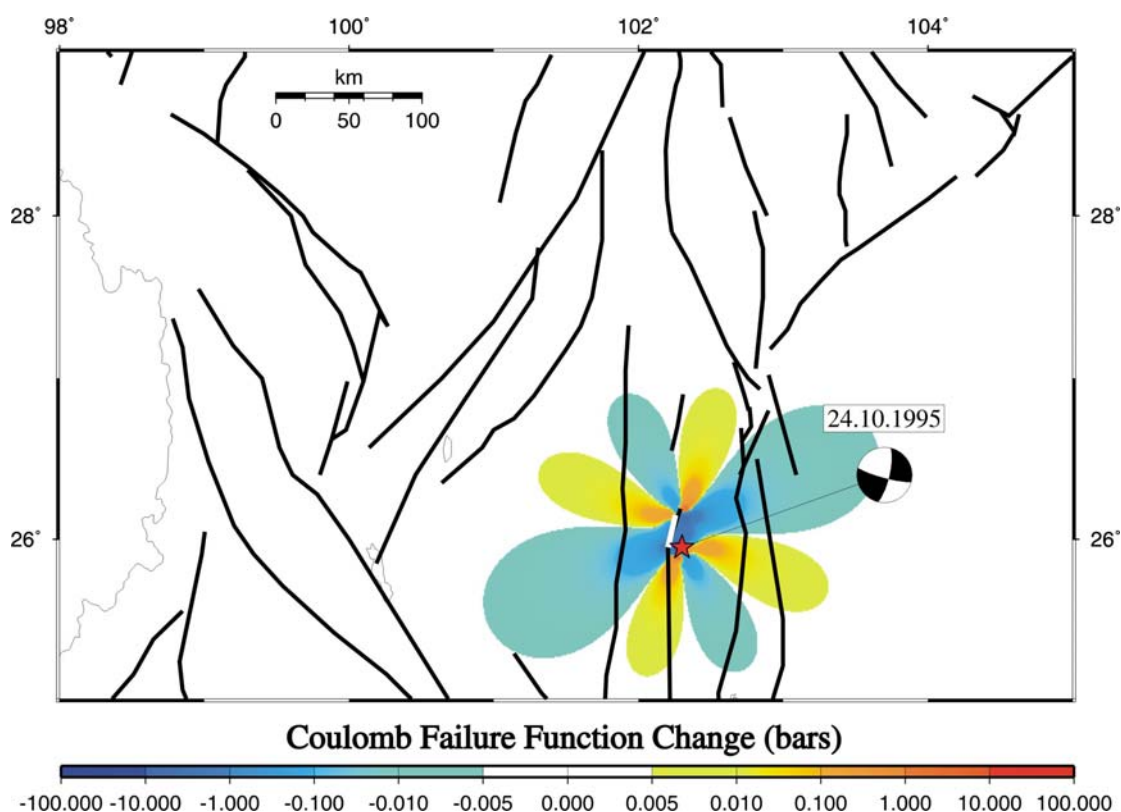
Ο ισχυρός αυτός σεισμός στον Κινέζικο κατάλογο έχει μέγεθος ροπής $M_w=6.3$ (Harvard).. Από την τεκτονική της περιοχής προκύπτει ότι ρήγμα το οποίο προκάλεσε το σεισμό είναι πιθανότερα ΒΔ-ΝΑ παράταξης και είναι αριστερόστροφο οριζόντιας μετατόπισης.(παράταξη: 19° , γωνία κλίσης: 66° και γωνία ολίσθησης: -6° , Harvard). Δίνεται η σεισμική ροπή που εκλύθηκε $M_o=1.29 \cdot 10^{25}$ dyn-cm και το εστιακό βάθος $h=6$ km (Holt et al., 1991). Το μήκος του ρήγματος το οποίο ενεργοποιήθηκε υπολογίστηκε ίσο με $L=26$ km από τη Σχέση 14 ενώ η ολίσθηση υπολογίστηκε από την εκλυόμενη σεισμική ροπή ίση με $u=0.47$ m. Στο Σχήμα 41 διακρίνεται η μεταβολή της τάσης Coulomb για το σεισμό αυτό, η επίδραση του οποίου είναι μικρή και περιορίζεται στο ρήγμα Qinhe.



Σχήμα 41. Η μεταβολή των τάσεων που προκλήθηκε από τον σεισμό του 1976 (όπως στο Σχήμα 23)

4.3.7 Υίμεν, 24 Οκτωβρίου, 1995, $M_{BJI}=6.2$

Ο σεισμός αυτός έχει μέγεθος σεισμικής ροπής $M_w=6.2$ (Harvard). Ο σεισμός εκδηλώθηκε στο ρληγμα Ruidue το οποίο είναι αριστερόστροφο οριζόντιας μετατόπισης. Με το κριτήριο αυτό επιλέχθηκε ο μηχανισμός γένεσης του σεισμού από Yang et al. (2005), (παράταξη: 13° , γωνία κλίσης: 75° , γωνία ολίσθησης: -9°). Δίνεται η σεισμική ροπή που εκλύθηκε $M_0=2.8 \cdot 10^{25}$ dyn·cm από την οποία υπολογίστηκε η ολίσθηση $u=0.23$ m. Το μήκος του ρήγματος το οποίο ενεργοποιήθηκε υπολογίστηκε ίσο με $L=23$ km από τη Σχέση 14. Στο Σχήμα 42 παρουσιάζεται το πεδίο των τάσεων όπως αυτό υπολογίστηκε με βάση τα παραπάνω δεδομένα. Η κατανομή του είναι μικρής έκτασης και απομακρυσμένη από τον ακόλουθο σεισμό του 1996 στη περιοχή.

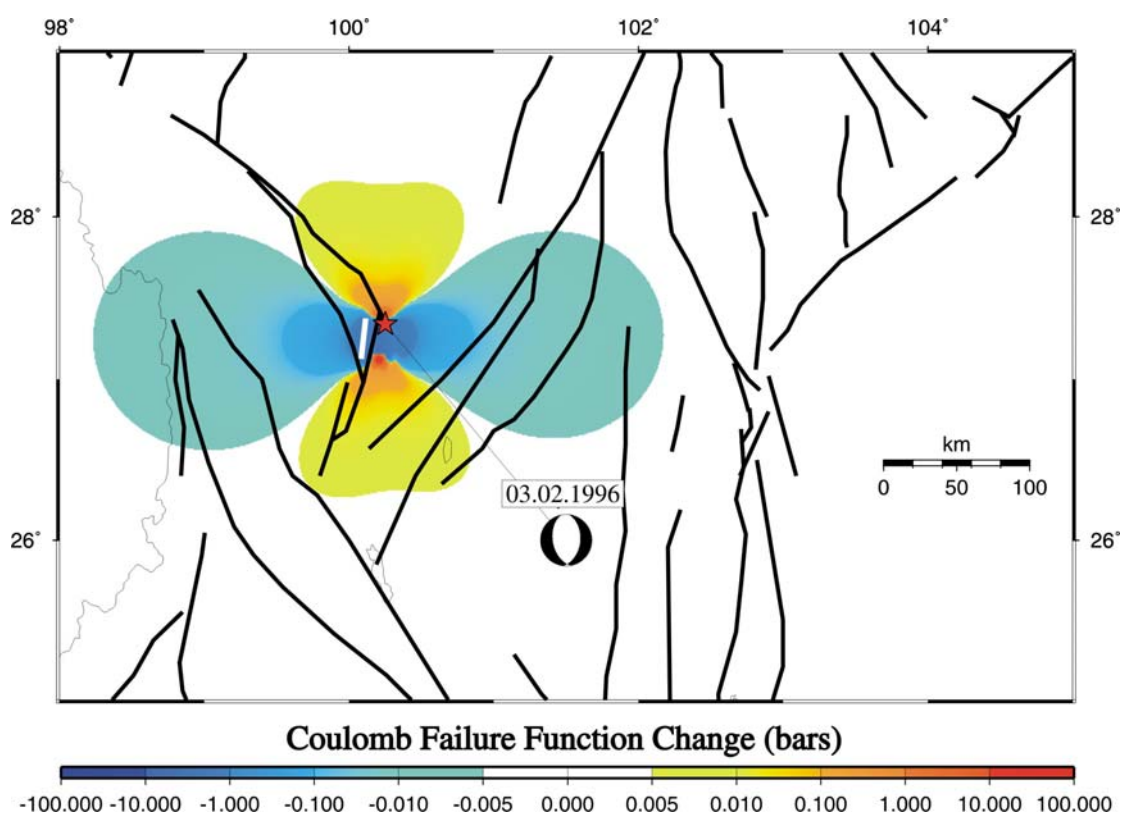


Σχήμα 42. Η μεταβολή των τάσεων που προκλήθηκε από τον σεισμό του 1995 (όπως στο Σχήμα 23)

4.3.8 Lijiang 1996, 3 Φεβρουαρίου, $M_{BJI}=7.0$

Στις 3 Φεβρουαρίου 1996, συνέβη ισχυρός σεισμός στην επαρχία της Yunnan με σεισμικής ροπής $M_W=6.2$ (Harvard) ο οποίος και συνοδεύτηκε από σημαντικές απώλειες με 309 θύματα και πολλές καταστροφές με περισσότερους από 320.000 κατοίκους να μένουν άστεγοι. Οι επιφανειακές διαρρήξεις που προκλήθηκαν από τον σεισμό αλλά και η κατανομή των μετασεισμών ακολουθούν μια κατεύθυνση B-N πάνω στην ρηξιγενή δομή Lijiang-Dafu (Han et al., 2004). Γεωλογικές παρατηρήσεις υπαίθρου έδειξαν ότι οι επιφανειακές διαρρήξεις που σχηματίστηκαν δεν είχαν μεγάλες διαστάσεις αλλά η γεωμετρία τους συμπίπτει πλήρως με το υπεύθυνο ρήγμα και εκτείνονται σε διεύθυνση 20° - 25° και έχουν κλιμακωτή μορφή. Οι μετατοπίσεις οι οποίες εκδηλώθηκαν είναι επίσης μικρού μήκους με τη μέγιστη οριζόντια να ισούται με 0.55m μήκος και την μέγιστη κατακόρυφη 0.45m. Σύμφωνα με τους Zhao et al. (1998) η χρονική διάρκεια της πηγής είναι 14sec και η διαδικασία της διάρρηξης αποτελείται από δύο γεγονότα, το πρώτο το οποίο είχε διάρκεια 6sec και αντιστοιχεί σε κανονική διάρρηξη μεγάλης γωνίας κλίσης και ένα δεύτερο γεγονός με διάρκεια 8sec πλάγιας ολίσθησης ενώ ανάμεσα στα δύο γεγονότα παρεμβάλλεται χρόνος 6sec.

Οι παράμετροι της εστίας δείχνουν μεγάλη συνιστώσα διάρρηξης κλίσης σε αντίθεση με τους περισσότερους σεισμούς στην περιοχή Yunnan στους οποίους υπερισχύει η συνιστώσα οριζόντιας μετατόπισης. Το επίπεδο που επιλέχτηκε στην παρούσα εργασία δίνεται από τους Zhao et al. (1998) και αφορά δομή με παράταξη 6° ΒΑ, και γωνία κλίσης 44° προς τα νοτιοανατολικά. Η γωνία ολίσθησης είναι -78° , δηλαδή αφορά ρήγμα κλίσης με κανονική συνιστώσα διάρρηξης. Το εστιακό βάθος είναι 10km και η σεισμική ροπή η οποία εκλύθηκε είναι ίση με $M_0 = 5.5 \cdot 10^{25}$ dyn-cm. Ο κύριος σεισμός συνοδεύτηκε από μετασεισμική ακολουθία με τον ισχυρότερο να έχει μέγεθος $M6.0$. Μέχρι τις 10 Φεβρουαρίου σημειώθηκαν 210 σεισμοί με μέγεθος $M > 3.0$. Οι τρεις μεγαλύτεροι από τους σεισμούς που ακολούθησαν παρουσιάζουν επίσης χαρακτηριστικά κανονικής διάρρηξης με στοιχεία από το Harvard. Στο **Σχήμα 43** παρουσιάζεται η μεταβολή των τάσεων η οποία έχει προκύψει για το σεισμό του Lijiang.



Σχήμα 43. Η μεταβολή των τάσεων κατά το σεισμό του 1996, η κατανομή των οποίων αντιστοιχεί σε αυτή κανονικού ρήγματος που έρχεται σε αντιδιαστολή με όλους τους προγενέστερους σεισμούς οριζόντιας μετατόπισης στη περιοχή (όπως στο Σχήμα 23).

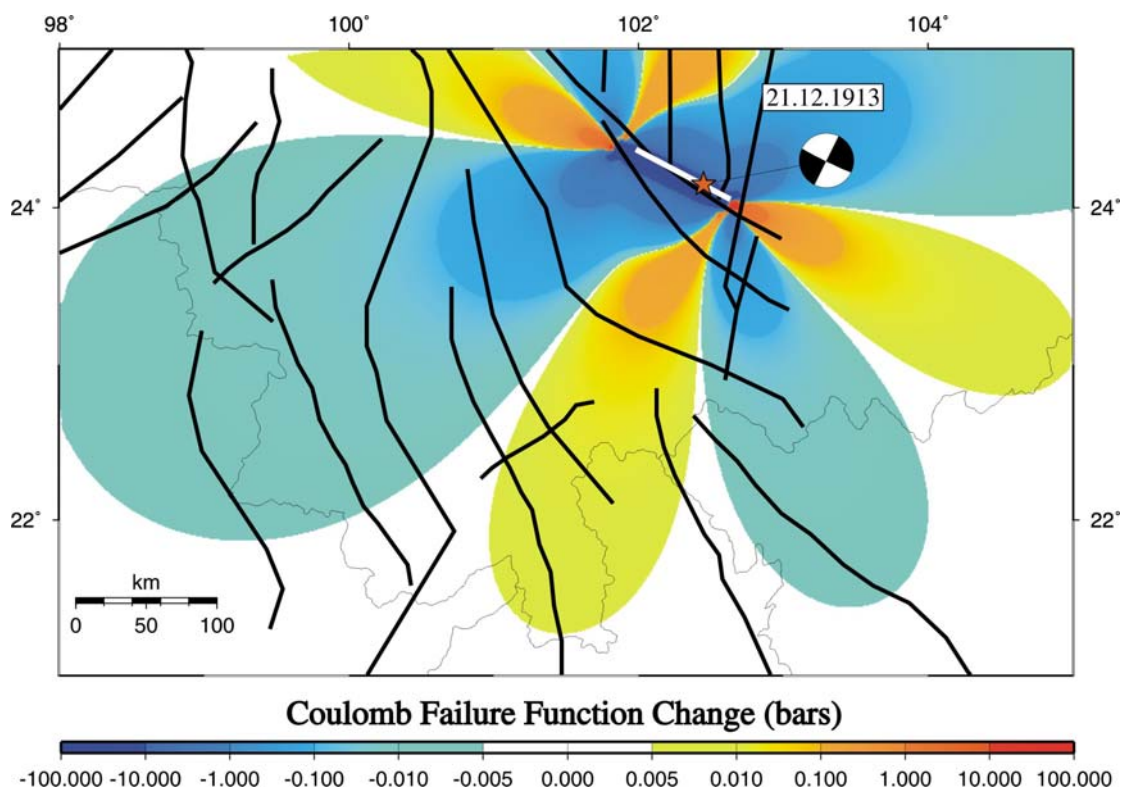
4.4 Νότια Υποπεριοχή Μελέτης

Στη νότια περιοχή μελέτης δηλαδή τη βόρεια επαρχία Yunnan έγιναν 12 ισχυροί σεισμοί από το 1913 μέχρι σήμερα οι οποίοι συμπεριλαμβάνονται στο έξελικτικό μοντέλο. Προκειμένου να παραχθεί το μοντέλο των τάσεων προέχει ο υπολογισμός των μεταβολών πεδίου των τάσεων κατά τη σεισμική ολίσθηση οι οποίες αναπτύσσονται στην παράγραφο που ακολουθεί με την περιγραφή της μεταβολής του και τον υπολογισμό των τιμών της ΔCCF με τη χρήση των σχέσεων που περιγράφηκαν στο δεύτερο κεφάλαιο. Ο φαινόμενος συντελεστής της τριβής λήφθηκε ίσος με 0.4 για τους υπολογισμούς, το $G=33\text{Gp}$ και ο λόγος Poisson, 0.25 αντίστοιχα. Τα Μεγέθη σεισμικής ροπής πριν από το 1976 λήφθηκαν από τον κατάλογο των Pacheco and Sykes (1992) ενώ τα μεταγενέστερα από τον κατάλογο μηχανισμών γένεσης του Harvard. Για κάθε σεισμό περιγράφεται το μοντέλο της διάρρηξης το οποίο του αντιστοιχεί (μήκος, πλάτος, ολίσθηση) και αναφέρονται οι διαθέσιμες πληροφορίες οι οποίες συλλέχτηκαν για τους σεισμούς αυτούς. Στη συνέχεια με τη βοήθεια χρωματικής κλίμακας απεικονίζεται η μεταβολή του πεδίου των τάσεων η οποία υπολογίζεται κάθε φορά για ένα επίπεδο το οποίο αντιστοιχεί στο επίπεδο του ρήγματος το οποίο προκάλεσε τον σεισμό. Με λευκό χρώμα απεικονίζονται οι σχεδόν μηδενικές μεταβολές της τάσης, ενώ με κόκκινα οι θετικές μεταβολές, δηλαδή οι συσσωρευμένες τάσεις έτσι όπως ανακαταναμεμήθηκαν εξαιτίας της σεισμικής ολίσθησης και με μπλε οι αρνητικές στις οποίες οι τάσεις έχουν εξομαλυνθεί.

4.4.1 Qujiang, 12 Δεκεμβρίου, 1913, $M_{\text{BJ}}=7.2$

Ο πρώτος ισχυρός σεισμός ο οποίος έγινε στην νότια περιοχή μελέτης ήταν το 1913 και είχε $M_W=7.2$. Το επίκεντρο του εντοπίζεται στο ανατολικό άκρο του Qujiang ρήγματος. Ο μηχανισμός γένεσης επιλέχτηκε από τους Yang et al. (2005) και αντιστοιχεί σε δεξιόστροφο ρήγμα οριζόντιας μετατόπισης. (παράταξη: 116° , γωνία κλίσης: 87° , γωνία ολίσθησης: 180°). Το μήκος του υπολογίζεται ότι έφθανε τα 89km και η διάρρηξη πραγματοποιήθηκε κατά 2.0m σύμφωνα με τις αντίστοιχες σχέσεις για τα ρήγματα οριζόντιας μετατόπισης. Στο **Σχήμα 44** παρουσιάζεται η μεταβολή των τάσεων Coulomb και διακρίνεται η ανάπτυξη των λοβών παράλληλα με τη διεύθυνση του ρήγματος Qujiang, ενώ μία εκτεταμένη σκιερή ζώνη αναπτύσσεται

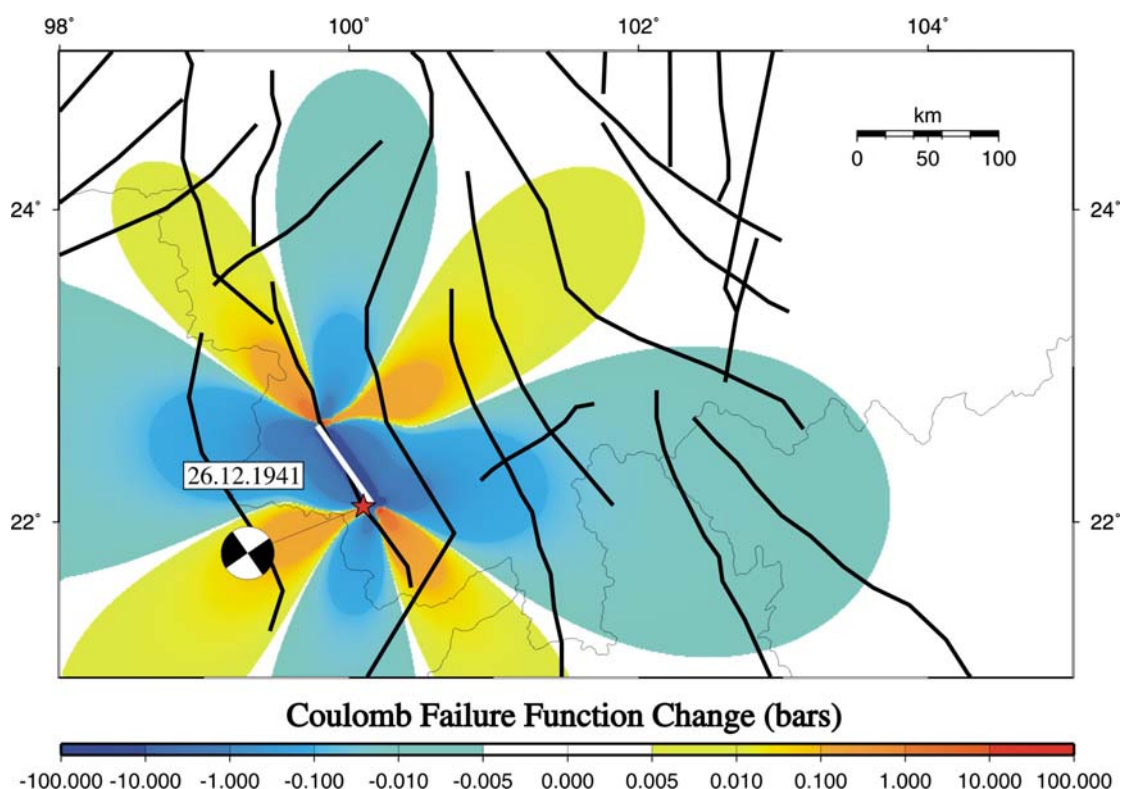
κάθετα. Στον ανατολικό λοβό θετικών μεταβολών μερικά χρόνια αργότερα γίνεται ο ισχυρός σεισμός του 1970.



Σχήμα 44. Η μεταβολή των τάσεων μετά τον ισχυρό σεισμό του 1913 (όπως στο Σχήμα 23)

4.4.2 Lancang-Gengma, 26 Δεκεμβρίου, 1941, $M_{\text{BHI}}=7.0$

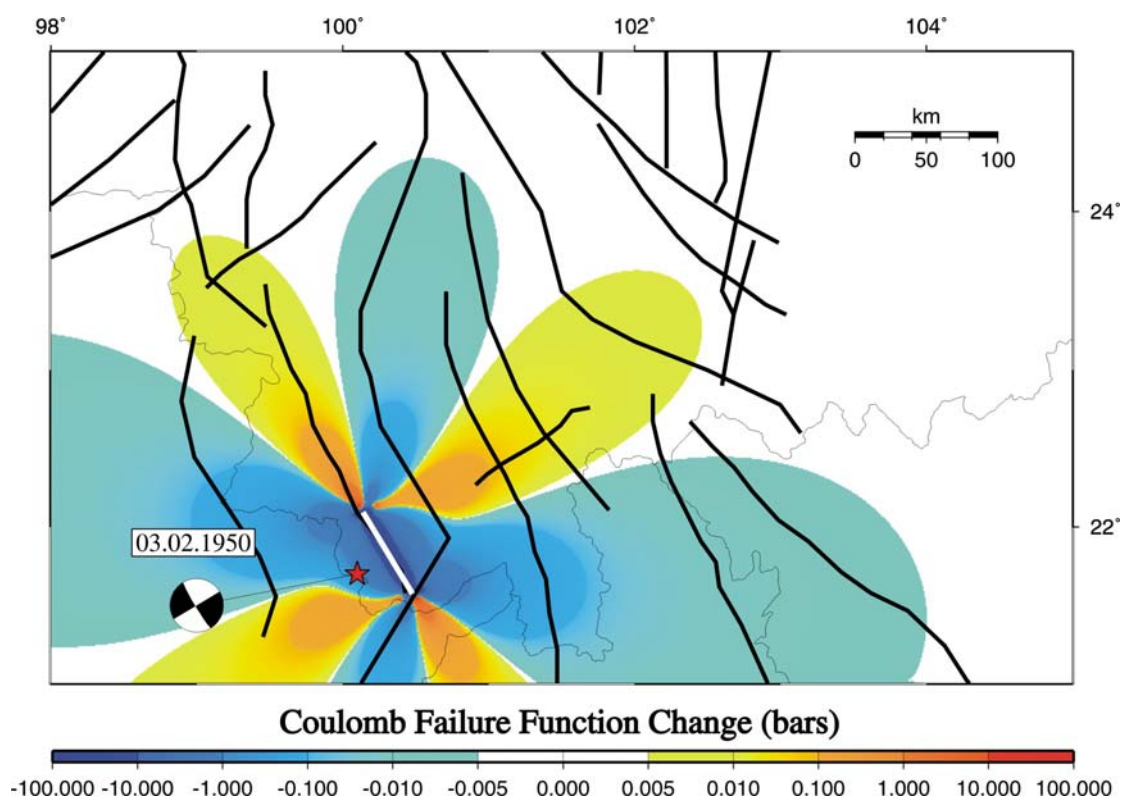
Ο ισχυρός αυτός σεισμός έχει μέγεθος $M_{\text{UK}}=7.0$ (PAS). Από την τεκτονική της περιοχής προκύπτει ότι ρήγμα το οποίο προκάλεσε το σεισμό είναι ΒΔ-ΝΑ διεύθυνσης το οποίο πιο συγκεκριμένα εντάσσεται στη ζώνη διάρρηξης Lancang-Gengma νοτιότερα του ποταμού Red River κοντά στο ανατολικό άκρο του άξονα των Ιμαλαΐων. Το πιθανό ρήγμα το οποίο ενεργοποιήθηκε κατά τη γένεση του σεισμού είναι αριστερόστροφο ρήγμα οριζόντιας μετατόπισης (παράταξη: 145° , γωνία κλίσης: 90° , γωνία ολίσθησης 180°) και είναι το συζυγές ρήγμα που υπολόγισε ο Holt et al. (1991). Το μήκος του ρήγματος το οποίο ενεργοποιήθηκε υπολογίστηκε ίσο με $L=68\text{km}$ από τη Σχέση 14 και η ολίσθηση ίση με $u=1.48\text{m}$ από τη Σχέση 18. Στο Σχήμα 45 που παρουσιάζεται η μεταβολή των τάσεων Coulomb διακρίνεται η ανάπτυξη των θετικών τάσεων κατά μήκος του ρήγματος και στα δύο άκρα των οποίων εκδηλώνονται οι σεισμοί του 1950 και 1988.



Σχήμα 45. Η μεταβολή των τάσεων μετά το σεισμό του 1941 στη ζώνη διάρρηξης Lancang-Gengma. (όπως στο Σχήμα 23)

4.4.3 Lancang-Gengma, 3 Φεβρουαρίου, 1950, $M_{\text{BI}}=7.0$

Ο σεισμός αυτός στον Κινέζικο κατάλογο έχει μέγεθος $M_{\text{(UK)}}=7.0$ (PAS). Το επίκεντρο του σεισμού εντοπίζεται στην ίδια ζώνη διάρρηξης με τον σεισμό του 1941, Lancang-Gengma. Ο μηχανισμός γένεσης που αντιστοιχεί στο επίπεδο του ρήγματος αφορά δεξιόστροφο ρήγμα οριζόντιας μετατόπισης με ΒΔ-ΝΑ διεύθυνση και υιθετήθηκε από Yang et al (2005) (παράταξη: 149° , γωνία κλίσης: 85° , γωνία ολίσθησης $\lambda=180^\circ$). Το μήκος του ρήγματος το οποίο ενεργοποιήθηκε υπολογίστηκε ίσο με $L=68\text{km}$ από τη **Σχέση 14** και η ολίσθηση ίση με 1.48m από τη **Σχέση 18**. Στο **Σχήμα 46** εικονίζεται η μεταβολή των τάσεων η οποία έχει υπολογιστεί και διακρίνεται ότι σε όλες τις περιοχές που αναπτύσσονται θετικοί λοβοί τα επερχόμενα χρόνια εκδηλώνονται ισχυροί σεισμοί όπως βόρεια του ρήγματος το οποίο διερρήχθη, καθώς και ανατολικά. Φαίνεται συνεπώς ότι στη ζώνη αυτή η αλληλεπίδραση των τάσεων παίζει σημαντικό ρόλο.

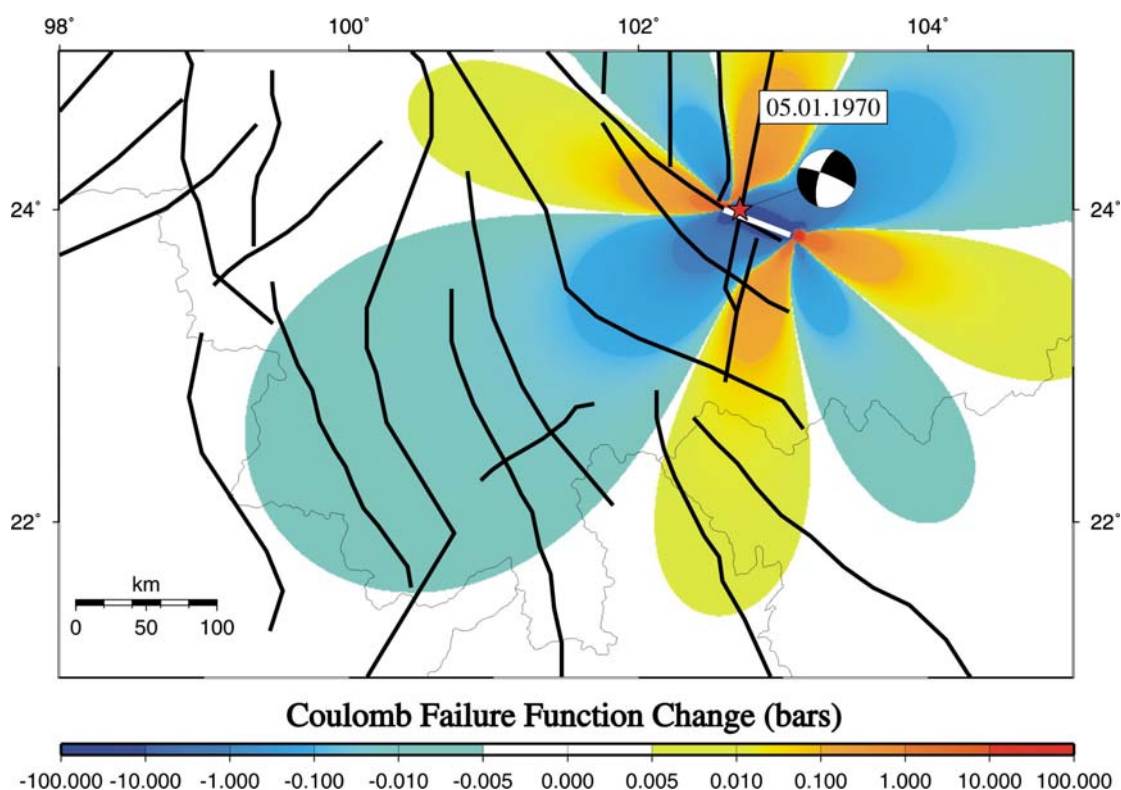


Σχήμα 46. Η μεταβολή των τάσεων μετά το σεισμό του 1950 ο θετικός λοβός του οποίου κατανέμεται κατά μήκος της ζώνης Lancang-Gengma στην οποία παρουσιάζεται ισχυρή σεισμικότητα στο μέλλον (όπως στο Σχήμα 23)

4.4.4 Tonghai, 5 Ιανουαρίου, 1970, $M_{BJI}=7.8$

Ο ισχυρός αυτός σεισμός είναι γνωστός ως σεισμός του Tonghai. Έχει μέγεθος ροπής $M_w = 7.3$ (HRV). Η επιφανειακή διάρρηξη που προκάλεσε είχε μήκος 50km κατά μήκος του ρήγματος με μέγιστη οριζόντια μετατόπιση 2.5m να σημειώνεται κοντά στο βορειοδυτικότερο άκρο του ορατού ρήγματος και κατακόρυφη μετατόπιση 0.5 m ενώ σε μερικά σημεία έφτανε μονάχα το 1.0m (Zhou et al., 1983). Αποδίδεται στο ρήγμα Qujiang το οποίο βρίσκεται στο βορειοδυτικό άκρο του Xiaojiang ρήγματος βόρεια του Red River και παράλληλα σε αυτό. Ο μηχανισμός γένεσης δείχνει πλάγια δεξιόστροφη ολίσθηση και επιφανειακή διάρρηξη μήκους 50km κατά μήκος του ρήγματος, σύμφωνα με τους Tarronier et al. (1990). Ο μηχανισμός γένεσης αντιστοιχεί σε δεξιόστροφο ρήγμα οριζόντιας μετατόπισης (παράταξη 291° , γωνία κλίσης: 80° , γωνία ολίσθησης -157°), όπως υπολογίστηκε από τους Zhou et al., 1983, με τη χρήση τηλεσεισμικών δεδομένων. Το μήκος του ρήγματος το οποίο ενεργοποιήθηκε υπολογίστηκε ίσο με $L = 102$ km από τη **Σχέση 14** και η ολίσθηση ίση με 2.37m (**Σχέση 18**) η οποία έρχεται σε συμφωνία με τα

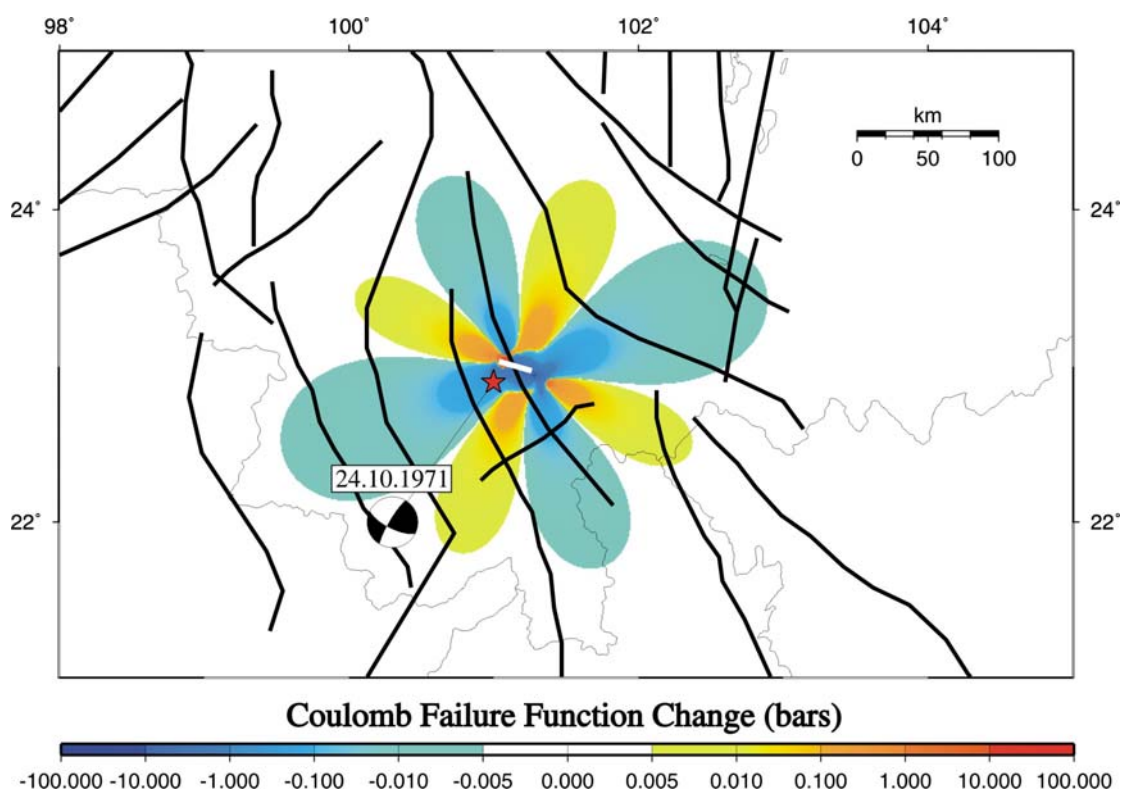
τεκτονικά στοιχεία. Στο **Σχήμα 47** παρουσιάζεται η μεταβολή ΔCFF κατά τη διάρκεια του σεισμού η οποία παρουσιάζει μεγάλη έκταση. Μια ιδιαίτερα μεγάλη σκιερή ζώνη αναπτύσσεται σε διεύθυνση ΒΑ-ΝΔ.



Σχήμα 47. Η μεταβολή ΔCFF μετά τον καταστροφικό σεισμό του 1970 (όπως στο Σχήμα 23)

4.4.5 South Yunnan, 28 Απριλίου, 1971, $M_{BJ}=6.7$

Ο σεισμός αυτός στον Κινέζικο κατάλογο έχει μέγεθος $M_S=6.3$ (NEIS). Από την τεκτονική της περιοχής προκύπτει ότι ρήγμα το οποίο προκάλεσε το σεισμό είναι ΒΔ-ΝΑ παράταξης. Το ρήγμα το αυτό είναι δεξιόστροφο οριζόντιας μετατόπισης και ο μηχανισμός γένεσης υιοθετήθηκε από τους Yang et al (2005) (παράταξη: 117° και γωνία ολίσθησης $\lambda=170^\circ$). Δίνεται η σεισμική ροπή που εκλύθηκε $M_0=1.46 \cdot 10^{25}$ dyn-cm. Το μήκος του ρήγματος το οποίο ενεργοποιήθηκε υπολογίστηκε ίσο με $L=26$ km από τη **Σχέση 12**. Η ολίσθηση υπολογίστηκε με τη **Σχέση 16** ίση με $u=0.49$ m. Στο **Σχήμα 48** παρουσιάζεται η μεταβολή των τάσεων η κατανομή των οποίων δεν είναι μεγάλη και επηρεάζει μόνο τα γειτονικά ρήγματα.



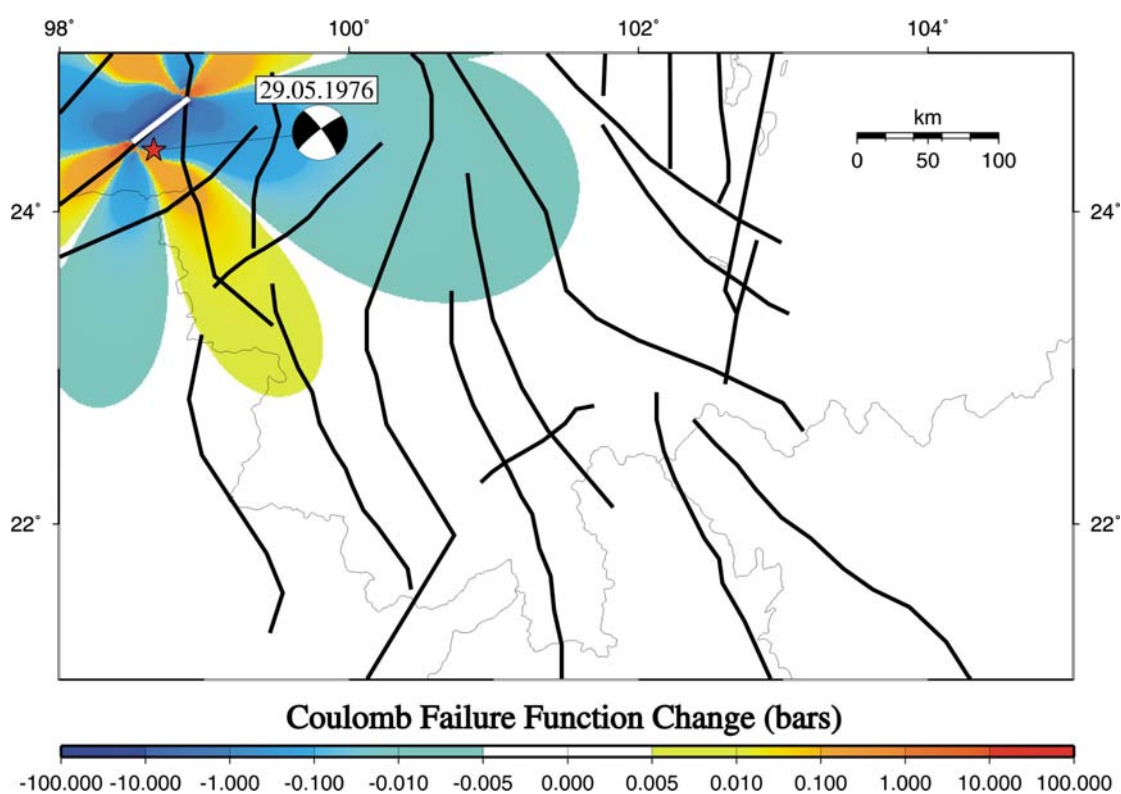
Σχήμα 48. Η μεταβολή των τάσεων μετά τον ισχυρό σεισμό του 1971 στη νότια Υννηαν (όπως στο Σχήμα 23.)

4.4.6 Σεισμική Ακολουθία Lung-Ling, 1976

Τον Μάιο του 1976 η Νότια Υννηαν επλήγη από την ακολουθία του Lung-Ling κατά την οποία συνέβησαν δύο ισχυροί σεισμοί με μεγέθη με διαφορά λίγων ωρών. Οι Kan et al. (1979) δηλώνουν ότι η σεισμική ακολουθία συνέβη βορειοδυτικότερα του ρήγματος NanTing και πιθανόν να οφείλεται σε ένα ΒΑ παράταξης αριστερόστροφο ρήγμα όπως προκύπτει από την κατανομή των μετασεισμών, ενώ ένας μόνο σεισμός της ακολουθίας φαίνεται να οφείλεται σε δεξιόστροφο ρήγμα οριζόντιας μετατόπισης Β-Ν. Κανένας από τους δύο σεισμούς δεν προκάλεσε ορατή επιφανειακή διάρρηξη και υπάρχει το μικρό ενδεχόμενο οι σεισμοί να αναφέρονται σε συζυγή ρήγματα. Από τους Bai & Meju (2003) το ρήγμα στο οποίο αποδίδεται ο σεισμός είναι το ρήγμα Ruili το οποίο είναι ένα αριστερόστροφο ρήγμα όπως περιγράφηκε πριν. Τα εστιακά βάθη των σεισμών συγκεντρώνονται στο βάθος των 10km.

4.4.6.α 1^{ος} Σεισμός της ακολουθίας Lung-Ling, 1976, 29 Μαΐου, $M_{BJI}=7.4$

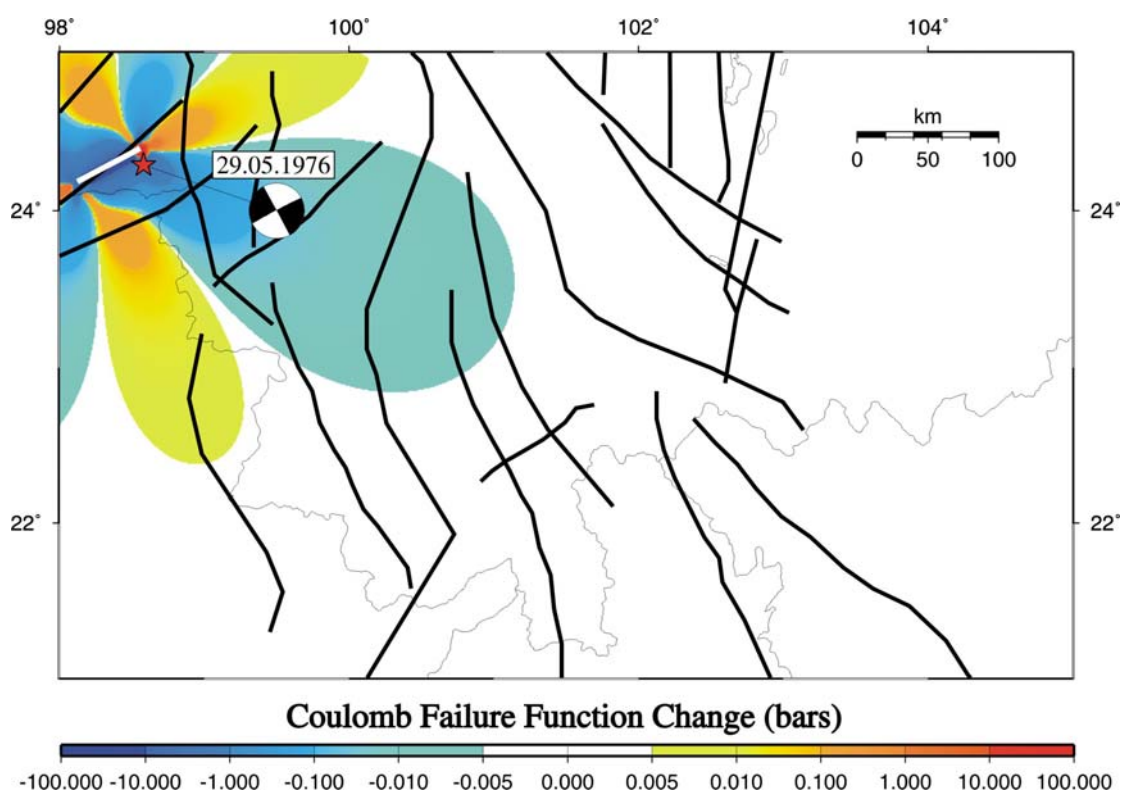
Ο πρώτος σεισμός της σεισμικής ακολουθίας του Lung Ling έγινε στις 29 Μαΐου στις 12:23 και έχει μέγεθος ροπής $M_w=6.7$ (Harvard). Διέρρηξε το βόρειο τμήμα του ρήγματος Ruili σε μήκος $L=50\text{km}$ (Σχέση 14). Το πεδίο των τάσεων έχει υπολογιστεί για μηχανισμό γένεσης που αντιστοιχεί σε αριστερόστροφο ρήγμα οριζόντιας μετατόπισης. Ο μηχανισμός γένεσης επιλέχτηκε από τον κατάλογο του Harvard (παράταξη: 232° , γωνία κλίσης: 82° , γωνία ολίσθησης -10°). Η ολίσθηση υπολογίστηκε με τη Σχέση 18 ίση με 0.92m . Στο Σχήμα 49 απεικονίζεται η μεταβολή των τάσεων του πρώτου σεισμού της ακολουθίας. Είναι προφανές ότι η μεταβολές ΔCFF κατανέμονται έτσι ώστε το ρήγμα Ruili να βρίσκεται μέσα σε αυξημένες θετικές τάσεις οι οποίες ερμηνεύουν τη γένεση του δεύτερου σεισμού στο σημείο αυτό, με διέγερση του διπλανού τμήματος του ρήγματος.



Σχήμα 49 . Η μεταβολή των τάσεων μετά τον πρώτο σεισμό της σεισμικής ακολουθίας του 1976 (όπως στο Σχήμα 23). Διακρίνεται ότι ο λοβός θετικών τάσεων ο οποίος αναπτύσσεται προς τα νοτιοδυτικά προκάλεσε τη γένεση του δεύτερου σεισμού της ακολουθίας.

4.4.6.β 2^{ος} Σεισμός της ακολουθίας Lung-Ling , 29 Μαΐου, 1976, $M_{BJ}=7.4$

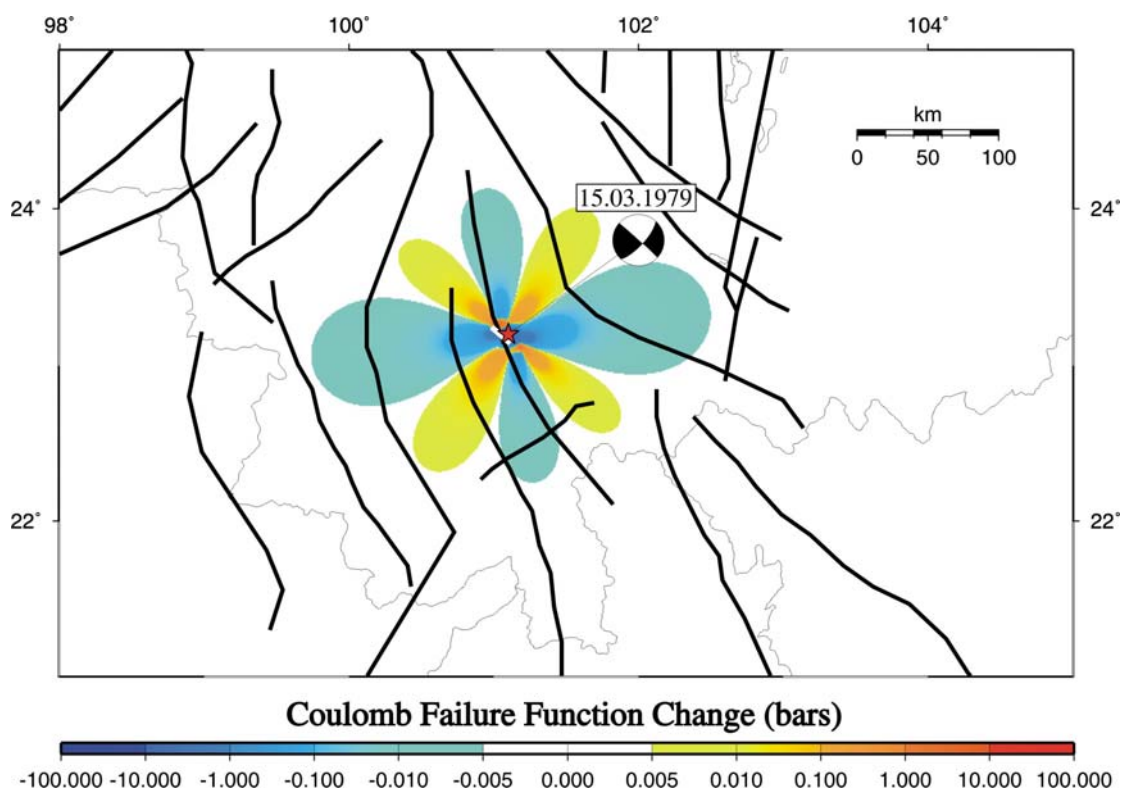
Ο δεύτερος σεισμός της σεισμικής ακολουθίας Lung Ling έχει μέγεθος σεισμικής ροπής ίσο με $M_w=6.7$. Αφορά μία διάρρηξη μήκους 50km εξίσου με 0.92m ολίσθηση από τις αντίστοιχες σχέσεις μιας και που το μέγεθος σεισμικής ροπής είναι το ίδιο με τον προηγούμενο. Το πεδίο των τάσεων έχει υπολογιστεί για το μηχανισμό γένεσης του σεισμού (παράταξη: 242° , γωνία κλίσης: 88° , γωνία ολίσθησης 0°) ο οποίος επιλέχτηκε από τον κατάλογο μηχανισμών γένεσης του Harvard. Το μήκος του ρήγματος το οποίο ολίσθησε λήφθηκε ίσο με 50km (Σχέση 14). Η ολίσθηση υπολογίστηκε με τη Σχέση 18 ίση με 0,92m. Στο Σχήμα 50 απεικονίζεται η μεταβολή των τάσεων και του δεύτερου σεισμού της οποίας η κατανομή είναι όμοια με του πρώτου. Ο χρόνος γένεσης του σεισμού αυτού πιθανότατα έχει επιταχυνθεί από τον προηγούμενό του αφού οι θετικοί λοβοί του προηγούμενου αναπτύσσονται κατά μήκος της διεύθυνσης του ρήγματος.



Σχήμα 50. Η μεταβολή των τάσεων μετά τον δεύτερο σεισμό της ισχυρής σεισμικής ακολουθίας Lung Ling το 1976 (όπως στο Σχήμα 23).

4.4.7 South Yunnan, 15 Μαρτίου, 1979, $M_{\text{BJI}}=6.8$

Ο σεισμός που έγινε τον Μάρτιο του 1979 έχει μέγεθος σεισμικής ροπής $M_w=6.0$ (Harvard). Το υπεύθυνο ρήγμα ανήκει στα βορειοδυτικής διεύθυνσης δεξιόστροφα ρήγματα τα οποία εντοπίζονται νότια του ρήγματος Red River στα νότια σύνορα της επαρχίας Yunnan. Ο μηχανισμός γένεσης επιλέχτηκε από τους Yang et al. (2005) (παράταξη: 312° , γωνία κλίσης: 89° , γωνία ολίσθησης: 163°). Το μήκος του ρήγματος το οποίο ενεργοποιήθηκε υπολογίστηκε ίσο με $L=17.4\text{km}$ από τη Σχέση 14 και η ολίσθηση υπολογίστηκε ίση με $u=0.3\text{m}$ με τη Σχέση 18. Στο Σχήμα 51 παρουσιάζεται η κατανομή των μεταβολών της τάσης Coulomb κατά το σεισμό αυτό ο οποίος έγινε βορειότερα του σεισμού του 1941. Οι μεταβολές των τάσεων δεν εκτείνονται σε μεγάλη έκταση λόγω του μικρού μεγέθους του σεισμού. Αναπτύσσονται τέσσερις λοβοί αυξημένων μεταβολών σε διεύθυνση ΒΑ-ΝΔ και ΒΔ-ΝΑ, καθώς επίσης και μία σκιερή ζώνη σε διεύθυνση ανατολής-δύσης.

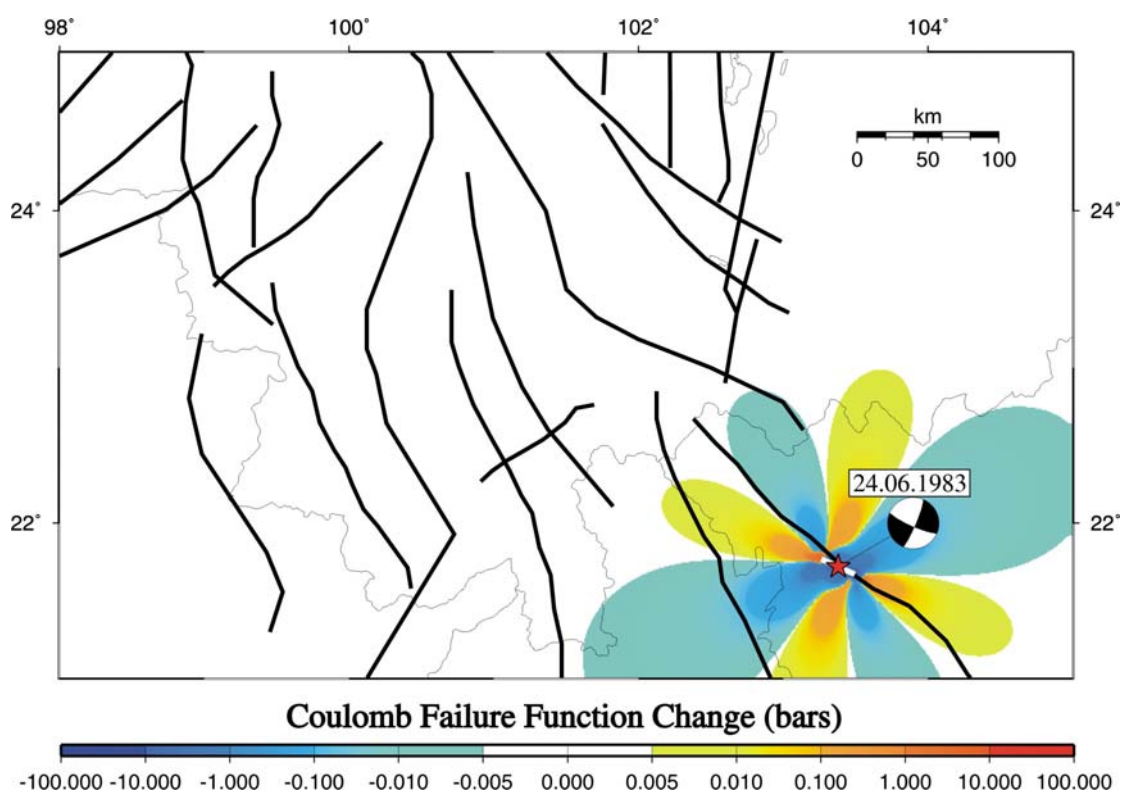


Σχήμα 51. Οι μεταβολές των τάσεων Coulomb οι οποίες προκλήθηκαν από τον σεισμό του 1979 (όπως στο Σχήμα 23)

4.4.8 Dien Bien Phu, 24 Ιουνίου, 1983, $M_{\text{BJI}}=6.3$

Ο σεισμός έχει μέγεθος ροπής $M_w=6.2$ (HRV). Αποδίδεται στο ρήγμα Dien Bien Phu το οποίο βρίσκεται στο έδαφος του Βόρειου Βιετνάμ ωστόσο

συγκαταλέγεται στην ευρύτερη τεκτονική της περιοχής στην οποία επικρατούν τα δεξιόστροφα ρήγματα. Ο επιλεγόμενος μηχανισμός γένεση αντιστοιχεί σε ρήγμα το οποίο είναι οριζόντιας μετατόπισης με δεξιόστροφη συνιστώσα (παράταξη: 114° , γωνία κλίσης: 80° , γωνία ολίσθησης: -172°) και επιλέχτηκε από τους Yang et al. (2005). Δίνεται η σεισμική ροπή που εκλύθηκε $M_0 = 2.84 \cdot 10^{25}$ dyn-cm και το εστιακό βάθος του, $h = 18$ km. Το μήκος του ρήγματος το οποίο ενεργοποιήθηκε υπολογίστηκε ίσο με $L = 26$ km από τη Σχέση 14 και η ολίσθηση ίση με $u = 0,5$ m από τη Σχέση 18. Στο Σχήμα 52 παρουσιάζονται οι μεταβολές των τάσεων οι οποίες έχουν προκληθεί από το σεισμό. Φαίνεται ότι είναι αρκετά απομακρυσμένος και οι μεταβολές του δεν επηρεάζουν ιδιαίτερα τις ρηξιγενείς ζώνες στην επαρχία της Yunnan εκτός από το ίδιο το ρήγμα με αποτέλεσμα να μην επιδρού σημαντικά στην μετέπειτα σεισμικότητα.



Σχήμα 52. Οι μεταβολές της ΔCFF μετά από τον σεισμό του 1983 στο Dien Bien Phu ρήγμα. (όπως στο Σχήμα 23).

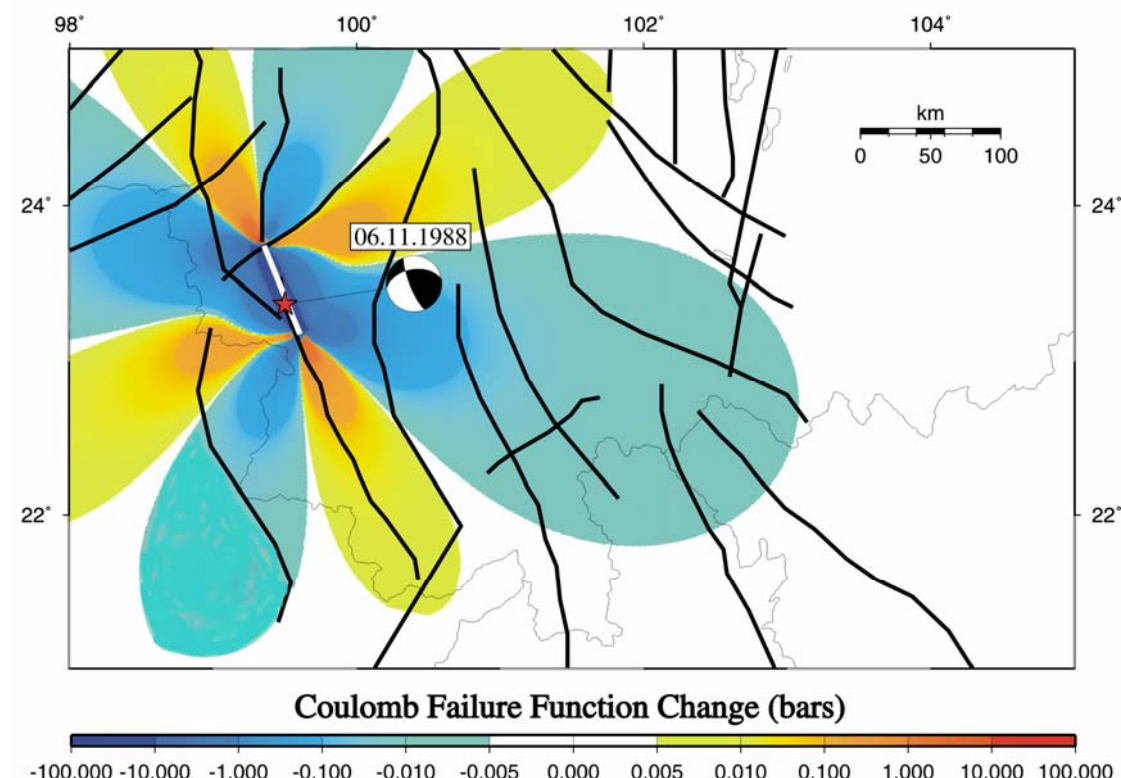
4.4.9 Σεισμική ακολουθία Lancang-Gengma, 1988

Το Νοέμβρη του 1988 στην ζώνη διάρρηξης Lancang-Gengma (Σχήμα 21), συνέβη μια ισχυρή σεισμική ακολουθία, κατά την οποία οι δύο ισχυροί σεισμοί με μεγέθη $M_s = 7.4$ και $M_s = 7.2$ αντίστοιχα, συνέβησαν με χρονική διαφορά μόλις 12

λεπτών. Τα εστιακά βάθη της σεισμικής ακολουθίας φτάνουν μέχρι τα 30km με τις εστίες να συγκεντρώνονται στην ζώνη μετάβασης μεταξύ του βόρειου και του νότιου κλάδου του ρήγματος. Στα Σχήματα 53 και 54 περιγράφονται οι μεταβολές κατά τη διάρκεια της σεισμικής ολίσθησης των δύο σεισμών καθώς και η επίδραση του πρώτου σεισμού στον δεύτερο.

4.4.9.α 1^{ος} Σεισμός της ακολουθίας Lancang-Gengma, 6 Νοεμβρίου, 1988, $M_{BJI}=7.0$

Ο πρώτος σεισμός, γνωστός ως σεισμός του Lancang συνέβη στις 6 Νοεμβρίου στις 12:23:29, έχει μέγεθος $M_W=7.0$ και σύμφωνα με τους Yang et al. (2005) διέρρηξε το βόρειο τμήμα της ζώνης. Επιλέχτηκε ο μηχανισμός γένεσης των Chen and Wu, (1989) και Mozaffari et al. (1998), που αντιστοιχεί σε δεξιόστροφο ρήγμα οριζόντιας μετατόπισης (παράταξη: 144° , γωνία κλίσης: 79° , γωνία ολίσθησης: 179°). Η σεισμική ροπή που εκλύθηκε υπολογίστηκε από το Harvard ίση με $M_0=3.66 \cdot 10^{26}$ dyn-cm, και το εστιακό βάθος του ίσο με $h=13$ km. Το μήκος του ρήγματος το οποίο ενεργοποιήθηκε, υπολογίστηκε ίσο με $L=68$ km από τη Σχέση 12, ενώ η ολίσθηση κατά μήκος του ρήγματος για ένα σεισμό αυτού του μεγέθους ισούται με $u=1.48$ m σύμφωνα με τη Σχέση 16. Στο Σχήμα 53 παρουσιάζεται η μεταβολή των τάσεων που προκλήθηκε από τη γένεση του σεισμού. Φαίνεται ότι κατά μήκος της ζώνης διάρρηξης, νότια του τεμάχους το οποίο διερρήχθει αναπτύσσονται λοβοί θετικών μεταβολών και ειδικότερα οι μεγαλύτερες μεταβολές καλύπτουν το τμήμα το οποίο διερρήχθει αμέσως μετά από 12min και πιθανόν οι μεταβολές αυτές συνέβαλαν στην επιτάχυνση του χρόνου γένεσης του σεισμού.

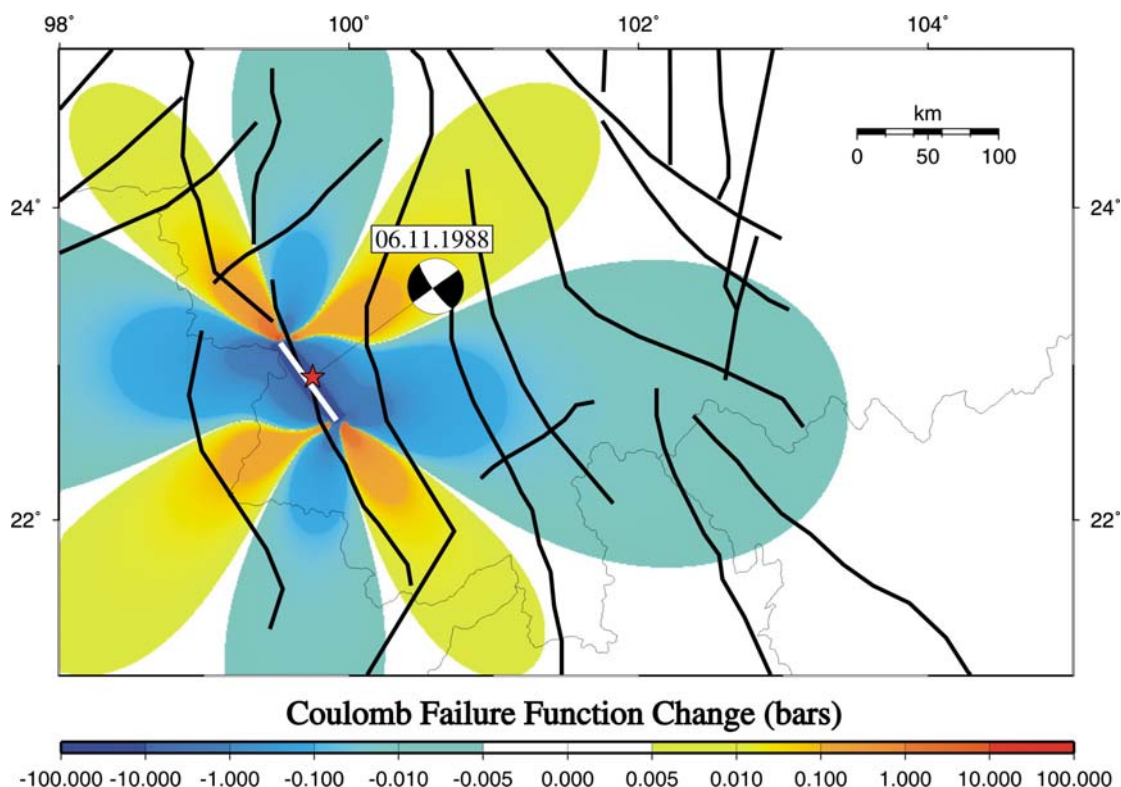


Σχήμα 53. Οι μεταβολές των τάσεων *Coulomb* οι οποίες προκλήθηκαν από τον σεισμό *Lancang*, τον πρώτο σεισμό της σεισμικής ακολουθίας *Lancang-Gengma*. (όπως στο Σχήμα 23)

4.4.9.β 2^{ος} Σεισμός της ακολουθίας *Lancang-Gengma*, 6 Νοεμβρίου, 1988, $M_{WJ}=7.4$

Ο δεύτερος σεισμός, σεισμός του *Gengma*, έγινε βορειότερα και εκτιμάται ότι δραστηριοποίησε το νότιο τμήμα της ζώνης διάρρηξης. Έχει μέγεθος σεισμικής ροπής $M_W=7.0$. Σύμφωνα με τον επιλεγμένο μηχανισμό από *Jiang* (1993), το υπεύθυνο ρήγμα το οποίο τον προκάλεσε είναι και αυτό δεξιόστροφο, οριζόντιας μετατόπισης (παράταξη: 158° , κλίση: 77° , γωνία ολίσθησης: 136°) με εστιακό του βάθος στα 16km. Οι *Yang et al.* (2005), επιχείρησαν επαναπροσδιορισμό των εστιακών παραμέτρων των σεισμών της ακολουθίας, οι οποίοι οριοθετούν ένα σειсмоγόνο όγκο μήκους 150km και πλάτους 40km ο οποίος ταυτίζεται με την επιφανειακή εκδήλωση του ρήγματος. Το μήκος του ρήγματος λήφθηκε ίσο με 68km το οποίο ολίσθησε για 1.08m (Σχέση 18). Συμφωνούν με τους *Holt et al.* (1991) οι οποίοι αναφέρονται επίσης σε ένα κύριο ρήγμα ΒΔ παράταξης. Στο Σχήμα 54 παρουσιάζεται το πεδίο των τάσεων όπως αυτό υπολογίστηκε με βάση τα παραπάνω δεδομένα. αίνεται ότι οι θετικές μεταβολές αναπτύσσονται κατά μήκος των βορειοδυτικών νοτιονατολικών δομών

και είναι σημαντικό το ότι φορτίζεται θετικά η δομή προς τα δυτικά στον οποίο λίγα χρόνια αργότερα σημειώνεται άλλος ένας ισχυρός σεισμός.

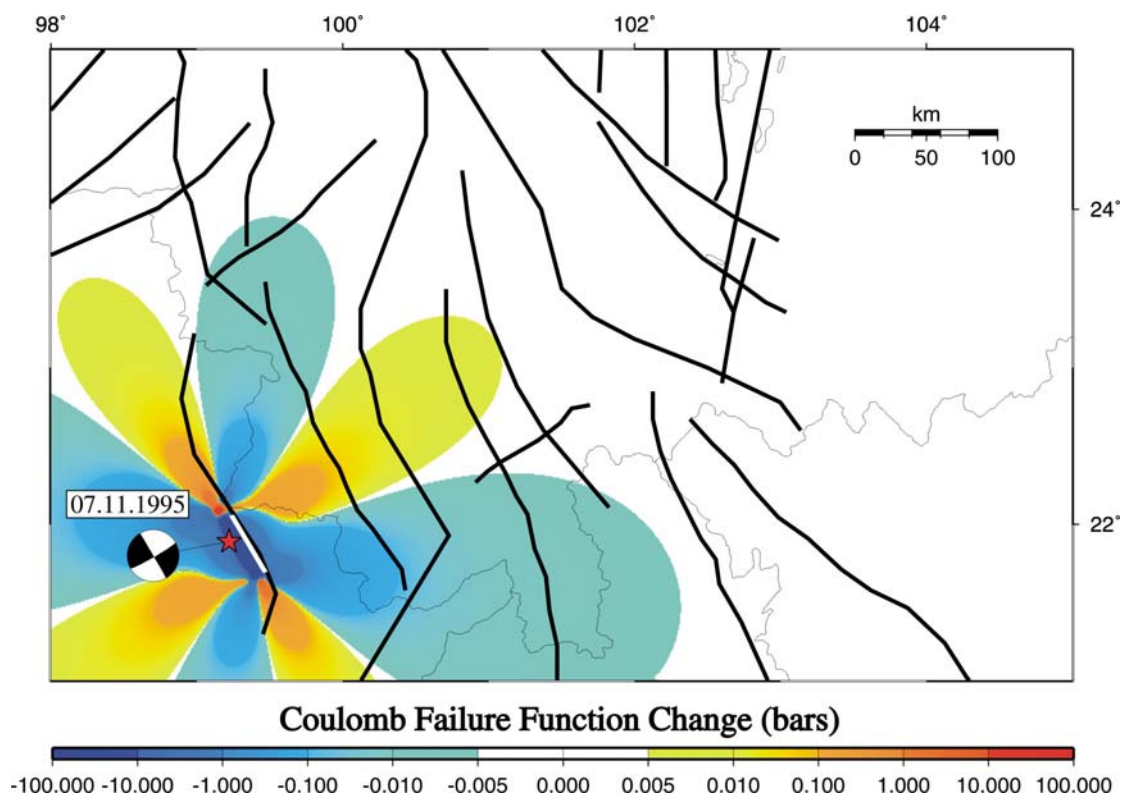


Σχήμα 54. Οι μεταβολές των τάσεων *Coulomb* οι οποίες προκλήθηκαν από τον σεισμό *Lancang*, τον δεύτερο σεισμό της σεισμικής ακολουθίας *Lancang-Gengma*. (όπως στο Σχήμα 23)

4.4.10 Burma, 7 Ιουλίου, 1995, $M_{BH}=6.8$

Ο σεισμός του 1995 ο οποίος συνέβη στ πολιτικά σύνορα της Βιρμανίας με την Κίνα είχε μέγεθος ροπής $M_w=6.5$ (Harvard). Το επίκεντρο του εντοπίζεται στη περιοχή της Βιρμανίας, ωστόσο αποδίδεται σε μία δομή συνέχεια της τεκτονικής της περιοχής που κυριαρχεί και στην επαρχία Yunnan. Ο μηχανισμός γένεσης που επιλέχτηκε για το σεισμό αυτό αντιστοιχεί σε ρήγμα το οποίο είναι οριζόντιας μετατόπισης με δεξιόστροφη συνιστώσα (παράταξη: 330° , γωνία κλίσης: 89° , γωνία ολίσθησης: 175°) όπως προτάθηκε από τους Yang et al. (2005). Το μήκος του ρήγματος το οποίο ενεργοποιήθηκε υπολογίστηκε ίσο με $L=52\text{km}$ με τη βοήθεια της Σχέσης 14 και η ολίσθηση ίση με $u=1.08\text{m}$ από τη Σχέση 18. Στο Σχήμα 54 αυτό παρουσιάζονται οι μεταβολές των τάσεων οι οποίες έχουν προκληθεί από τον σεισμό του 1995. Ο σεισμός αυτός συνέβη σε μία περιοχή στην οποία οι τάσεις έχουν αυξηθεί από τους

θετικούς λοβούς των μεταβολών των τάσεων κατά τη σεισμική ολίσθηση οφειλούμενες στους διαδοχικούς σεισμούς της ζώνης Lancang-Gengma.



Σχήμα 55. Οι μεταβολές των τάσεων *Coulomb* οι οποίες προκλήθηκαν κατά τη διάρκεια του σεισμού του 1995 στην επικράτεια της Βιρμανίας (όπως στο Σχήμα 23).

Ακολουθεί ο **Πίνακας 5** στον οποίο εμπεριέχονται όλοι οι διαθέσιμοι μηχανισμοί γένεσης (παράταξη, γωνία κλίσης, γωνία ολίσθησης), οι οποίοι υπάρχουν για κάθε ισχυρό σεισμό. Οι μηχανισμοί με σκίαση είναι αυτοί οι οποίοι τελικά επιλέχτηκαν για την κατασκευή των μοντέλων διάρρηξης των σεισμών οι οποίοι χρησιμοποιήθηκαν στο εξελικτικό μοντέλο των τάσεων.

Πίνακας 5: Πληροφορίες για τους διαθέσιμους μηχανισμούς γένεσης για κάθε ισχυρό σεισμό. Δίνεται η παράταξη, η γωνία κλίσης, η γωνία ολισθησης και η σεισμική ροπή για κάθε σεισμό. Οι μηχανισμοί με σκίαση είναι αυτοί οι οποίοι τελικά επιλέχτηκαν για τους υπολογισμούς των τάσεων *Coulomb*.

ΒΟΡΕΙΑ ΥΠΟΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ					
30.08.1904	Παράταξη (°)	Γωνία κλίσης (°)	Γωνία ολισθησης (°)	Mo (dyn-cm)	Αναφορά
	322	85	13	-	Papadimitriou et al. (2004)
25.03.1923	Παράταξη (°)	Γωνία κλίσης (°)	Γωνία ολισθησης (°)	Mo (dyn-cm)	Αναφορά
	116	90	0	-	Papadimitriou et al. (2004)
25.08.1933	Παράταξη (°)	Γωνία κλίσης (°)	Γωνία ολισθησης (°)	Mo (dyn-cm)	Αναφορά
	277	79	-30	-	Yang et al. (2005)
	14	60	-167	-	
25.05.1948	Παράταξη (°)	Γωνία κλίσης (°)	Γωνία ολισθησης (°)	Mo (dyn-cm)	Αναφορά
	54	89	-179	-	Yang et al. (2005)
	144	89	1		
	315	85	5	1.5·10 ²⁷	Holt et al. (1991)
	315	90	0	-	Molnar & Deng (1984)
14.04.1955	Παράταξη (°)	Γωνία κλίσης (°)	Γωνία ολισθησης (°)	Mo (dyn-cm)	Αναφορά
	263	72	164	-	Yang et al. (2005)
	358	75	20		
	175	90	0	5·10 ²⁶	Holt et al. (1991)
	160	90	0	1.3·10 ²⁶	Molnar & Deng (1984)
	337	81	-3	-	Papadimitriou et al. (2004)
09.11.1960	Παράταξη (°)	Γωνία κλίσης (°)	Γωνία ολισθησης (°)	Mo (dyn-cm)	Αναφορά
	60	50	-130	-	Yang et al. (2005)
	293	55	-52		

30.08.1967	Παράταξη (°)	Γωνία κλίσης (°)	Γωνία ολισθησης (°)	Mo (dyn-cm)	Αναφορά
	24	82	-179	-	Yang et al. (2005)
	294	88	10		
	245	43	-88	9.1·10 ²⁵	Holt et al. (1991)
	245	45	42	-	Papadimitriou et al. (2004)
06.02.1973	Παράταξη (°)	Γωνία κλίσης (°)	Γωνία ολισθησης (°)	Mo (dyn-cm)	Αναφορά
	29	80	179	-	Yang et al. (2005)
	119	89	-10		
	125	87	0	1.9·10 ²⁷	Zhou et al. (1983)
	306	84	354	-	Molnar & Deng (1984)
24.06.1983	Παράταξη (°)	Γωνία κλίσης (°)	Γωνία ολισθησης (°)	Mo (dyn-cm)	Αναφορά
	252	77	173	-	Yang et al. (2005)
	343	85	15		
16.08.1976	Παράταξη (°)	Γωνία κλίσης (°)	Γωνία ολισθησης (°)	Mo (dyn-cm)	Αναφορά
	38	35	128	-	Yang et al. (2005)
	173	65	67		
	29	48	122	3.66·10 ²⁶	HARVARD
	166	51	60		
	165	63	40	-	Molnar & Deng (1984) Jones et al. (1984)
21.08.1976	Παράταξη (°)	Γωνία κλίσης (°)	Γωνία ολισθησης (°)	Mo (dyn-cm)	Αναφορά
	240	85	147	-	Yang et al. (2005)
	333	58	6		
	198	40	113	-	HARVARD
	349	54	72		
	125	60	90	-	Molnar & Deng (1984) Jones et al. (1984)

23.08.1976	Παράταξη (°)	Γωνία κλίσης (°)	Γωνία ολίσθησης (°)	Mo (dyn-cm)	Αναφορά
	60	85	240	-	Yang et al. (2005)
	333	58	6		
	172	45	72	-	HARVARD
	16	48	107		
	155	65	40	-	Molnar & Deng (1984) Jones et al. (1984)
01.01.1981	Παράταξη (°)	Γωνία κλίσης (°)	Γωνία ολίσθησης (°)	Mo (dyn-cm)	Αναφορά
	142	85	-13	-	Yang et al. (2005)
	233	77	-175		
	319	73	-4	7.28·10 ²⁵	HARVARD
	41	86	-163		
	-39	90	0	1.3·10 ²⁵	Holt et al. (1991)
16.04.1989	Παράταξη (°)	Γωνία κλίσης (°)	Γωνία ολίσθησης (°)	Mo (dyn-cm)	Αναφορά
	273	29	-73	5.33·10 ²⁵	Yang et al. (2005) HARVARD Holt et al. (1991)
	74	62	-99		
25.04.1989	Παράταξη (°)	Γωνία κλίσης (°)	Γωνία ολίσθησης (°)	Mo (dyn-cm)	Αναφορά
	245	40	-114	1.80·10 ²⁵	Yang et al. (2005) HARVARD
	96	54	-71		
ΚΕΝΤΡΙΚΗ ΥΠΟΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ					
16.03.1925	Παράταξη (°)	Γωνία κλίσης (°)	Γωνία ολίσθησης (°)	Mo (dyn-cm)	Αναφορά
	150	90	180	-	Yang et al. (2005)
30.09.1952	Παράταξη (°)	Γωνία κλίσης (°)	Γωνία ολίσθησης (°)	-	Αναφορά
	245	75	130		Yang et al. (2005)
	354	40	30		

23.09.1955	Παράταξη (°)	Γωνία κλίσης (°)	Γωνία ολισθησης (°)	Mo (dyn-cm)	Αναφορά
	120	80	173	-	Yang et al. (2005)
	210	87	20		
05.02.1966	Παράταξη (°)	Γωνία κλίσης (°)	Γωνία ολισθησης (°)	Mo (dyn-cm)	Αναφορά
	159	85	-11	-	Yang et al. (2005)
	249	80	-175		
	172	64	-9	1.48·10 ²⁵	Holt et al. (1991)
11.05.1974	Παράταξη (°)	Γωνία κλίσης (°)	Γωνία ολισθησης (°)	Mo (dyn-cm)	Αναφορά
	237	81	176	-	Yang et al. (2005)
	328	86	10		
	320	80	355	-	Molnar & Deng (1984)
07.11.1976	Παράταξη (°)	Γωνία κλίσης (°)	Γωνία ολισθησης (°)	Mo (dyn-cm)	Αναφορά
	22	50	-3	-	Yang et al. (2005)
	115	88	-175		
	19	66	-6	3.64·10 ²⁵	HARVARD
	11	84	-156		
	208	83	27	2.19·10 ²⁵	Holt et al. (1991)
24.10.1995	Παράταξη (°)	Γωνία κλίσης (°)	Γωνία ολισθησης (°)	Mo (dyn-cm)	Αναφορά
	13	75	-9	2.18·10 ²⁵	Yang et al. (2005)
	105	81	-165		HARVARD
03.02.1996	Παράταξη (°)	Γωνία κλίσης (°)	Γωνία ολισθησης (°)	Mo (dyn-cm)	Αναφορά
	353	44	-78	-	Yang et al. (2005)
	157	48	-102		
	0	36	-68	2.84·10 ²⁵	HARVARD
	153	57	-105		
	6	44	-78	5.5·10 ²⁵	Zhao et al. (1998)

ΝΟΤΙΑ ΥΠΟΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ					
21.12.1913	Παράταξη (°)	Γωνία κλίσης (°)	Γωνία ολισθησης (°)	Mo (dyn-cm)	Αναφορά
	116	87	180	-	Yang et al. (2005)
26.12.1941	Παράταξη (°)	Γωνία κλίσης (°)	Γωνία ολισθησης (°)	Mo (dyn-cm)	Αναφορά
	52	85	179	-	Yang et al. (2005)
	141	89	5		
	145	90	180	5.5·10 ²⁶	Holt et al. (1991)
	55	90	0		
03.02.1950	Παράταξη (°)	Γωνία κλίσης (°)	Γωνία ολισθησης (°)	Mo (dyn-cm)	Αναφορά
	149	85	180	-	Yang et al. (2005)
	59	90	-5		
	60	90	0	5.5·10 ²⁶	Holt et al. (1991)
05.01.1970	Παράταξη (°)	Γωνία κλίσης (°)	Γωνία ολισθησης (°)	Mo (dyn-cm)	Αναφορά
	197	67	-10	-	Yang et al. (2005)
	291	80	-157		
	116	86	0	87·10 ²⁶	Zhou et al. (1983) Holt et al. (1991)
	121	85	150	-	Molnar & Deng (1984)
28.04.1971	Παράταξη (°)	Γωνία κλίσης (°)	Γωνία ολισθησης (°)	Mo (dyn-cm)	Αναφορά
	31	81	23	-	Yang et al. (2005)
	117	70	170		
	243	79	-9	1.46·10 ²⁶	Holt et al. (1991)

29.05.1976	Παράταξη (°)	Γωνία κλίσης (°)	Γωνία ολίσθησης (°)	Mo (dyn-cm)	Αναφορά
	139	69	159	-	Yang et al. (2005)
	229	69	20		
	323	20	172	1.22·10 ²⁶	HARVARD
	232	82	-10		
	49	77	-31	0.1·10 ²⁵	Holt et al. (1991)
	223	84	0	4·10 ²⁵	Molnar & Deng (1984)
29.05.1976	Παράταξη (°)	Γωνία κλίσης (°)	Γωνία ολίσθησης (°)	Mo (dyn-cm)	Αναφορά
	31	77	90	-	Yang et al., 2005
	119	83	166		
	242	88	0	-	HARVARD
	152	90	178	0.1·10 ²⁵	Holt et al., 1991
	235	72	-2		
15.03.1979	Παράταξη (°)	Γωνία κλίσης (°)	Γωνία ολίσθησης (°)	Mo (dyn-cm)	Αναφορά
	42	73	1	-	Yang et al. (2005)
	312	89	163		
	33	62	-3	1.33·10 ²⁵	HARVARD
	124	87	-152		
	30	88	3	2.24·10 ²⁵	Holt et al. (1991)
24.06.1983	Παράταξη (°)	Γωνία κλίσης (°)	Γωνία ολίσθησης (°)	Mo (dyn-cm)	Αναφορά
	114	80	-172	-	Yang et al. (2005)
	23	82	-10		
	20	66	0	2.84·10 ²⁵	HARVARD
	110	90	-156		
	20	80	11	2.40·10 ²⁵	Holt et al. (1991)
06.11.1988	Παράταξη (°)	Γωνία κλίσης (°)	Γωνία ολίσθησης (°)	Mo (dyn-cm)	Αναφορά
	144	79	179	-	Yang et al. (2005)
	54	89	-11		
	333	78	174	3.66·10 ²⁶	HARVARD
	64	84	12		

	154	88	-144	$50 \cdot 10^{25}$	Holt et al. (1991)
06.11.1988	Παράταξη (°)	Γωνία κλίσης (°)	Γωνία ολίσθησης (°)	Mo (dyn-cm)	Αναφορά
	158	77	136	-	Yang et al. (2005)
	259	49	15		
11.07.1995	Παράταξη (°)	Γωνία κλίσης (°)	Γωνία ολίσθησης (°)	Mo (dyn-cm)	Αναφορά
	60	85	1	-	HARVARD
	330	89	175		

Κεφάλαιο 5ο

Εξελικτικό Μοντέλο Τάσεων

5.1 Γενικά

Οι μεταβολές των στατικών τάσεων που οφείλονται στη σεισμική ολίσθηση κατά τη γένεση ενός ισχυρού σεισμού επηρεάζουν τη μελλοντική σεισμικότητα για σημαντικό χρονικό διάστημα (δεκαετίες ή και αιώνες) σε μία ευρεία περιοχή όπου οι μεταβολές αυτές είναι ακόμη και της τάξης των 0.1bar. Σύμφωνα με τους Harris et al. (1995) και Harris and Simpson (1996) η επίδραση των μεταβολών των τάσεων Coulomb σε γειτονικές περιοχές όπου προηγήθηκαν ισχυροί σεισμοί δεν είναι διακριτές για χρονικό διάστημα μικρότερο από 5 χρόνια, αντίθετα, με το πέρασμα του χρόνου, ταυτόχρονα ισχυροποιείται το αποτέλεσμα τους και διαρκούν περισσότερο από 50 χρόνια στην ίδια περιοχή επιταχύνοντας τον επόμενο ισχυρό σεισμό (Toda et al., 2005). Για το λόγο αυτό και με σκοπό την εκτίμηση της μελλοντικής σεισμικής επικινδυνότητας σε μία περιοχή, εφαρμόζεται το εξελικτικό μοντέλο για τον υπολογισμό των τάσεων Coulomb. Το μοντέλο αυτό περιγράφηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο (Κεφ. 2.2) και εν συντομία αναφέρουμε εδώ την εφαρμογή του. Το μοντέλο αυτό συνυπολογίζει το αθροιστικό αποτέλεσμα που προκαλεί τόσο η μεταβολή στις στατικές τάσεις η οποία διαδραματίζεται με τη γένεση των ισχυρών σεισμών στο θραυσιγενές τμήμα του φλοιού αλλά και το διαρκές αποτέλεσμα των λιθοσφαιρικών κινήσεων το οποίο διοχετεύεται κυρίως στο όλκιμο υποκείμενο τμήμα. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η ενσωμάτωση κάθε διαθέσιμης πληροφορίας από τη γένεση παρελθόντων ισχυρών σεισμών και τη συνεχή τεκτονική φόρτιση για όσο το δυνατό μεγαλύτερο χρονικό διάστημα επιτρέπει το εύρος των δεδομένων για μία περιοχή.

Στη παράγραφο που ακολουθεί συνοψίζονται τα αποτελέσματα τα οποία προέκυψαν από την εφαρμογή του παραπάνω μοντέλου σε κάθε μία από τις τρεις υποπεριοχές και τα οποία απεικονίζονται στα **Σχήματα 56, 57 και 58** τα οποία αντιστοιχούν στη βορειότερη την κεντρική και τη νοτιότερη περιοχή. Τα διαδοχικά εικονίδια των σχημάτων τα οποία βρίσκονται σε χρονική αλληλουχία δείχνουν το πεδίο μεταβολής των τάσεων πριν από τη γένεση του σεισμού του οποίου σε κάθε περίπτωση χαρτογραφείται ο μηχανισμός γένεσης και διακρίνεται το τεκτονικό

τέμαχος που τον προκάλεσε. Με τον τρόπο αυτό δίνεται η δυνατότητα αξιολόγησης της επίδραση των μεταβολών των τάσεων οι οποίες οφείλονται στον πρώτο σεισμό συνδυασμένη με το αντίκτυπο της τεκτονικής φόρτισης σε όλη την περιοχή, πάνω στον δεύτερο σεισμό. Αξίζει να αναφερθεί ότι το πεδίο των τάσεων κάθε φορά αναλύεται σε ένα συγκεκριμένο τύπο διάρρηξης το οποίο ορίζεται ως ρήγμα-δέκτης και περιγράφεται από το μηχανισμό γένεσης του επόμενου σεισμού. Το πλεονέκτημα των υπολογισμών αυτών μας επιτρέπει να διαπιστώνουμε τις μεταβολές του πεδίου στο πολύπλοκο τεκτονικό καθεστώς το οποίο διαφοροποιείται ανάλογα με τις διαφορετικές ιδιότητες του ρήγματος που μας ενδιαφέρει. Αυτό συμβαίνει γιατί οι μεταβολές της τάσης υπολογίζονται, με βάση τη γεωμετρία του ρήγματος δέκτη, δηλαδή του ρήγματος που ολίσθησε στον επόμενο ισχυρό σεισμό του δείγματος. Μια συγκεκριμένη περιοχή πιθανόν να αποτελεί φωτεινή περιοχή όταν υπολογίζεται για τα αριστερόστροφα ρήγματα οριζόντιας μετατόπισης διεύθυνσης ΒΔ-ΝΑ ενώ στη περίπτωση των συζυγών του ή άλλου τύπου ρήγματος να αποτελεί σκιερή ζώνη. Πιο συγκεκριμένα, επειδή η τάση είναι ένας μαθηματικός τανυστής και όχι βαθμωτό μέγεθος για το λόγο αυτό οι φωτεινές και σκιερές ζώνες οι οποίες δημιουργούνται διαμορφώνονται με βάση τον χαρακτήρα του ρήγματος (παράταξη, γωνία κλίσης, γωνία ολίσθησης) για το οποίο υπολογίζονται. Κάθε στάδιο αντιστοιχεί στο πεδίο των τάσεων το οποίο επικρατεί πριν από τη γένεση του σεισμού και με τη μέθοδο αυτή μπορούμε να διακρίνουμε τη συσχέτιση των σεισμών με βάση τις μεταβολές ΔCFF οι οποίες διαπιστώνεται ότι επιδρούν χωρικά και χρονικά στον επόμενο σεισμό.

Το πεδίο των τάσεων πριν τον πρώτο σεισμό για κάθε περιοχή λαμβάνεται μηδενικό σε οποιοδήποτε σημείο και η φόρτιση αρχίζει μετά τη γένεση του πρώτου σεισμού και διαμορφώνεται με την αθροιστική συσσώρευση της παραμόρφωσης και τις επιμέρους μεταβολές που προκαλούν οι μετέπειτα σειμοί. Τα αποτελέσματα του εξελικτικού μοντέλου παρουσιάζονται στα σχήματα με τη βοήθεια της χρωματικής κλίμακας οι διαβαθμίσεις της οποίας αντιστοιχούν σε διαφορετικές τιμές τάσης (σε bars). Το πράσινο χρώμα αντιστοιχεί σε σχεδόν μηδενικές μεταβολές της τάσης ενώ όπως και στο προηγούμενο κεφάλαιο οι χρωματισμοί από κίτρινο μέχρι κόκκινο (φωτεινές περιοχές) αντιστοιχούν σε θετικές μεταβολές οι οποίες φέρουν αυξημένη πιθανότητα σεισμικής διέγερσης, ενώ το γαλάζιο μέχρι σκούρο μπλε ορίζουν σκιερές περιοχές και αντιστοιχούν σε μειωμένες μεταβολές. Το ρήγμα αυτό ορίζεται ως ρήγμα-δέκτης και συμβολίζεται με μαύρο χρώμα. Το σύνολο των ρηγμάτων τα οποία

φορτίζονται και συμμετέχουν στην εξέλιξη των τάσεων χρωματίζονται λευκά ενώ αυτά τα οποία έχουν διαρρηχθεί προηγούμενα και συνυπολογίζεται η συνσεισμική τους επίδραση έχουν μωβ χρώμα. Για λόγους απεικόνισης χρησιμοποιείται χρωματική κλίμακα η οποία χαρτογραφείται πάντα στο κάτω μέρος των σχημάτων.

Όλοι οι υπολογισμοί έχουν πραγματοποιηθεί στο μέσο του σεισμογόνου στρώματος περίπου 8km, μερικά χιλιόμετρα πάνω από το κατώτερο όριο του σεισμογόνου στρώματος όπου προτείνεται ότι η ολίσθηση αποκτά τη μέγιστη τιμή της συγκριτικά με τον υπόλοιπο σεισμογόνο όγκο. Όσον αφορά τις ιδιότητες τριβής των ζωνών διάρρηξης ο συντελεστής φαινόμενης τριβής λήφθηκε ίσος με 0.4.

5.2 Βόρεια Περιοχή Μελέτης (Βόρεια επαρχία Sichuan)

Όσον αφορά τη βορειότερη περιοχή μελέτης ο πρώτος ισχυρός σεισμός μέσα στον 20^ο αιώνα συνέβη το 1904. Στο **Σχήμα 56.α** παρουσιάζεται το πεδίο μεταβολής των τάσεων αμέσως μετά από το σεισμό του 1904 ο οποίος εκδηλώθηκε στο ρήγμα Xianshuihe σε ένα ουδέτερο από τάσεις περιβάλλον το οποίο απεικονίζεται με το πράσινο χρώμα. Η μορφή της κατανομής των μεταβολών αντιστοιχεί σε ρήγμα οριζόντιας μετατόπισης το οποίο οφείλεται στον μηχανισμό γένεσης του συγκεκριμένου σεισμού. Στα δύο άκρα του τεμάχους το οποίο διερρήχθη πάνω στο ρήγμα Xianshuihe, διακρίνεται ότι σχηματίζονται φωτεινές περιοχές με αυξημένες μεταβολές τάσεων οι οποίες προφανώς έχουν διεγείρει τη γένεση του επόμενου σεισμού λίγα χρόνια αργότερα. Συνεπώς το 1923 κατά τον σεισμό του Luhuo, πραγματοποιήθηκε διάρρηξη του γειτονικού βορειοδυτικού τεμάχους του ρήγματος.

Στο **Σχήμα 56.β** παρουσιάζεται το πεδίο των τάσεων ακριβώς πριν από το σεισμό του 1923, εξαιτίας της μεταβολής των τάσεων κατά τη διάρκεια της ολίσθησης η οποία πραγματοποιήθηκε κατά το σεισμό του 1904 συμπεριλαμβανομένης και της τεκτονικής φόρτισης των ρηγμάτων τα οποία εντάσσονται στην περιοχή του βόρειου Sichuan για 19 συνεχόμενα χρόνια. Παρατηρούμε ότι προβλέπεται έτσι η γένεση αυτού του σεισμού καθώς τόσο το επίκεντρο του σεισμού όσο και το υπεύθυνο ρήγμα εμπεριέχονται σε περιοχή αυξημένων θετικών μεταβολών της ΔCFF οι οποίες και διέγειραν το τέμαχος του Luhuo προς ολίσθηση.

Στο **Σχήμα 56.γ** ο υπολογισμός των μεταβολών στρέφεται για επίπεδο το οποίο περιγράφεται από τον μηχανισμό διάρρηξης του σεισμού του 1933 δηλαδή για δεξιόστροφο ρήγμα οριζόντιας μετατόπισης. Ο σεισμός του Diexi έχει το επίκεντρο του σε αρκετά απομακρυσμένη περιοχή σε σχέση με τους προηγούμενους.

Παρατηρούμε ότι η συσσώρευση των τάσεων κυρίως προερχόμενες από τη τεκτονική καταπόνηση οι οποίες περιβάλλουν το υπεύθυνο για το σεισμό τέμαχος καθώς και το επίκεντρο του σεισμού του Diexi είναι θετικές και ώριμες ώστε να διεγείρουν τη γένεση του. Παρατηρούμε ότι αν και το πεδίο εδώ είναι στραμμένο για άλλου τύπου ρήγμα, στο βόρειο άκρο του δημιουργούνται ιδιαίτερα αυξημένες τιμές τάσεων, η συσσώρευση των οποίων προκαλεί την έντονη σεισμικότητα στα ρήγματα Ming Jiang τις επόμενες δεκαετίες.

Στο **Σχήμα 56.δ** εξετάζεται ο σεισμός του Litang ο οποίος συνέβη το 1948 και το πεδίο τάσεων αντιστοιχεί στην εικόνα που παρουσιάζει η κατανομή των τάσεων λίγο πριν τη γένεση του. Διακρίνεται και σε αυτή τη περίπτωση ότι το επίκεντρο εντοπίζεται σε περιοχή αυξημένων τιμών των τάσεων οι οποίες προφανώς έχουν προκληθεί από τη γειτονική έντονη σεισμικότητα του 1923 και 1904 ενώ βορειότερα κατά μήκος του ρήγματος Xianshuihe αναπτύσσεται η σκιερή ζώνη λόγω του σεισμού του 1904.

Στο **Σχήμα 56.ε** οι τάσεις εξακολουθούν να είναι υπολογισμένες για περίπου του ίδιου τύπου ρήγμα καθώς ο μηχανισμός γένεσης του είναι παραπλήσιος με τον προηγούμενο. Είναι φανερό ότι οι τάσεις είναι ιδιαίτερα αυξημένες στο τέμαχος αυτό το οποίο δεν έχει υποστεί διάρρηξη στο πρόσφατο παρελθόν και αποτελεί σημείο συνένωσης διαφορετικών τεμαχών τα οποία είναι φορτισμένα με θετικές τάσεις κυρίως λόγω των θετικών λοβών της συνσεισμικής μεταβολής του 1948. Συνεπώς η γένεση του σεισμού του 1955 ερμηνεύεται με τη βοήθεια του μοντέλου των τάσεων.

Ο σεισμός του 1960 (**Σχήμα 56.ζ**) φαίνεται ότι έχει εκδηλωθεί στη γειτονία των αρνητικών μεταβολών με τις θετικές. Το πεδίο φαίνεται ότι δεν είναι ευνοϊκό και η αιτία οφείλεται στο γεγονός ότι ο σεισμός αυτός αποδίδεται σε κανονικό ρήγμα το οποίο πιθανόν να αφορά κάποιο αντιθετικό ρήγμα του Min Jiang ωστόσο δεν αναφέρεται στις σειμοτεκτονικές ιδιότητες που διατίθενται από τους ερευνητές, πιθανόν επειδή αφορά κάποιο «τυφλό» ρήγμα για το οποίο δεν έχει υπολογιστεί η αντιστοιχη φόρτιση. Η ακριβής θέση άλλωστε του σεισμού του 1933 ο οποίος εξακολουθεί να φέρει μεγάλη επιρροή στη περιοχή είναι αμφισβητήσιμη λόγω της απουσίας σεισμικών καταγραφών.

Στο **Σχήμα 56.η** το πεδίο των τάσεων το οποίο απεικονίζεται είναι το αποτέλεσμα των σεισμικών ολισθήσεων όλων των προηγούμενων σεισμών και της τεκτονικής φόρτισης από το 1904 μέχρι και το 1967. Διακρίνεται πως αν και το επίκεντρο δεν βρίσκεται σε κόκκινες περιοχές ωστόσο το ρήγμα που προκάλεσε τον

σεισμό νότια του Xianshuihe έχει φτάσει σε ικανοποιητικό επίπεδο ικανό ώστε να εκδηλώσει σεισμό άρα επιπλέον φόρτιση από την προηγούμενη σεισμικότητα έχουν ενθαρρύνει τη γένεση του.

Στο **Σχήμα 56.θ** παρουσιάζεται η κατανομή των τάσεων αμέσως πριν από τον σεισμό του 1973. Είναι σαφές ότι η μεταβολή της τάσης εξαιτίας όλων των προηγούμενων γειτονικών σεισμών διέγειρε τη γένεση του σεισμού αυτού καθώς εντοπίζεται στην φωτεινή περιοχή του λοβού του σεισμού του 1904, αλλά και του 1967. Χαρακτηριστικά, διακρίνεται η μετανάστευση της σεισμικότητας πάνω στο ρήγμα το οποίο φαίνεται ότι με αυτό το σεισμικό γεγονός ανακουφίζει από τάσεις και το βόρειο τμήμα του. Στη συνέχεια το ενδιαφέρον όσον αφορά την εκδήλωση της σεισμικότητας μεταβαίνει βόρεια στα ρήγματα της ζώνης Min Jiang. Στους εξελικτικούς υπολογισμούς πριν από τον σεισμό του 1973 που διαγράφεται στο **Σχήμα 56.ι** φαίνεται ότι ο σεισμός πραγματοποιήθηκε σε μία περιοχή εκτεταμένης αύξησης των τάσεων ο οποίος όμως είναι σχετικά μικρός για να μεταβάλλει σε μεγάλο βαθμό το πεδίο των τάσεων στην περιοχή.

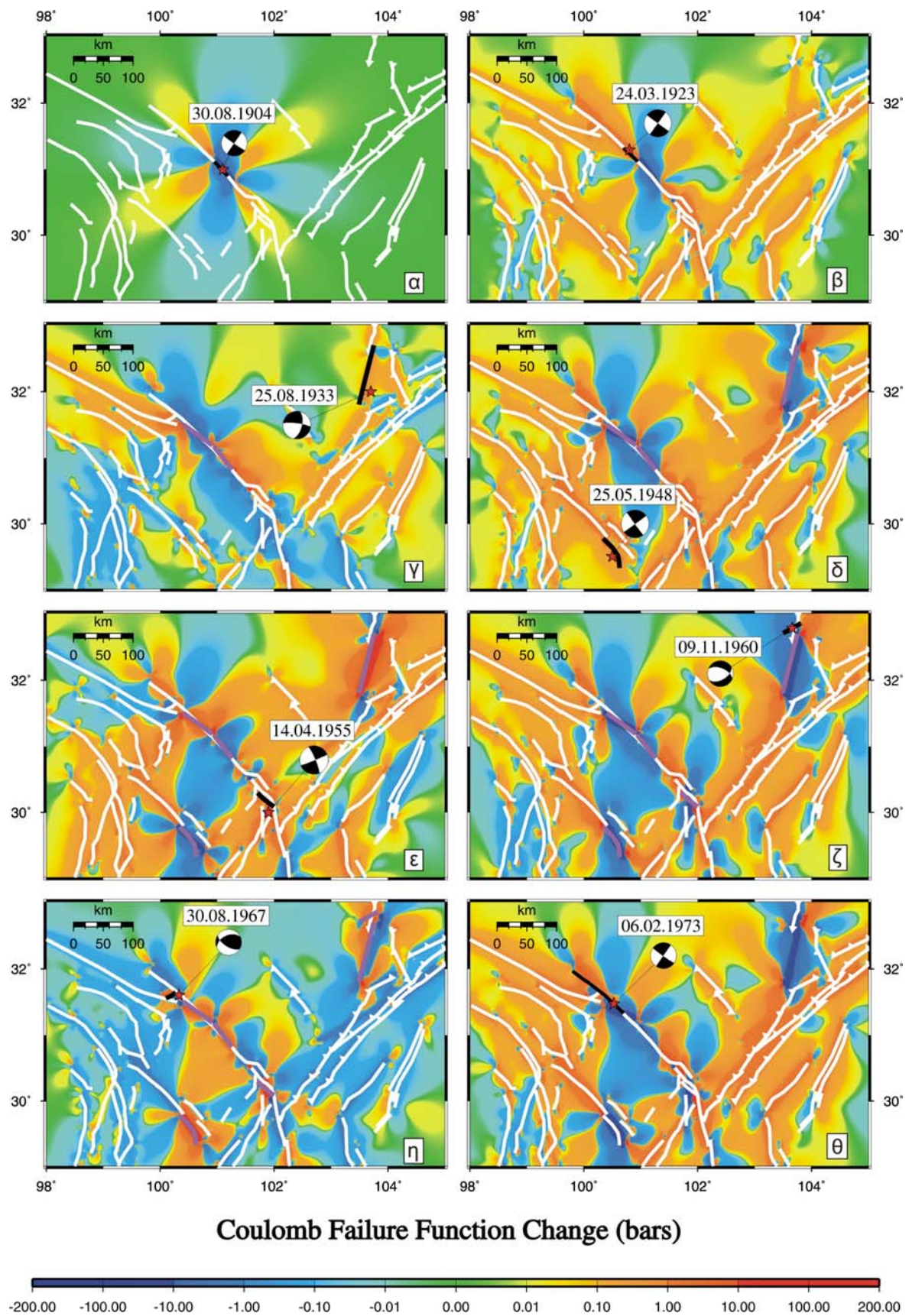
Στα **Σχήματα 56.κ, 56.κ και 56.λ**, διακρίνονται οι διαδοχικές μεταβολές οι οποίες προκαλούνται από την σεισμική ακολουθία του Songpan η οποία ήδη παρουσιάστηκε με λεπτομέρεια, καθώς και η επίδραση του ενός σεισμού στον αμέσως επόμενο του. Η γενική εικόνα η οποία παρουσιάστηκε στα μοντέλα διάρρηξης κατά τη σεισμική ολίσθηση εδώ ενισχύεται με τον επιπρόσθετο παράγοντα της τεκτονικής φόρτισης. Παρατηρείται ότι ο πρώτος σεισμός της ακολουθίας, έγινε σε μία έντονα επιφορτισμένη περιοχή λόγω των αυξημένων τάσεων ΔCFF από το σεισμό του Diexi. Ο δεύτερος σεισμός της ακολουθίας προβλέπεται από το εξελικτικό πεδίο καθώς φαίνεται ότι συμβαίνει στο άκρο του διερρηγμένου ρήγματος. Το ίδιο συμβαίνει και με τον τρίτο σεισμό της ακολουθίας ο οποίος διεγείρεται από την αύξηση τάσεων του πρώτου και του δεύτερου σεισμού. Μετά τη γένεση της ακολουθίας η περιοχή μετατρέπεται σε μία σκιερή ζώνη αφού το σύνολο των τάσεων έχει ανακουφιστεί.

Η κατάσταση των τάσεων πριν από το σεισμό του Daofu αναπαρίσταται στο **Σχήμα 56.μ**. Διαπιστώνεται ότι ο σεισμός αυτός διαρρηγνύει το ίδιο τέμαχος με τον σεισμό του 1904, συμπληρώνοντας έτσι ένα πλήρη σεισμικό κύκλο. Ωστόσο φαίνεται ότι οι τάσεις δεν έχουν πλήρως ανακτηθεί στο τέμαχος αυτό μέχρι το 1981 και η γένεσή του ίσως να οφείλεται στους γειτονικούς του. Στα **Σχήματα 56.ν και 56.ξ** υπολογίζεται το εξελικτικό αποτέλεσμα πριν από τη σεισμική ακολουθία του Batang. Το πεδίο των τάσεων πριν από το σεισμό αδυνατεί να ερμηνεύσει τη γένεση του

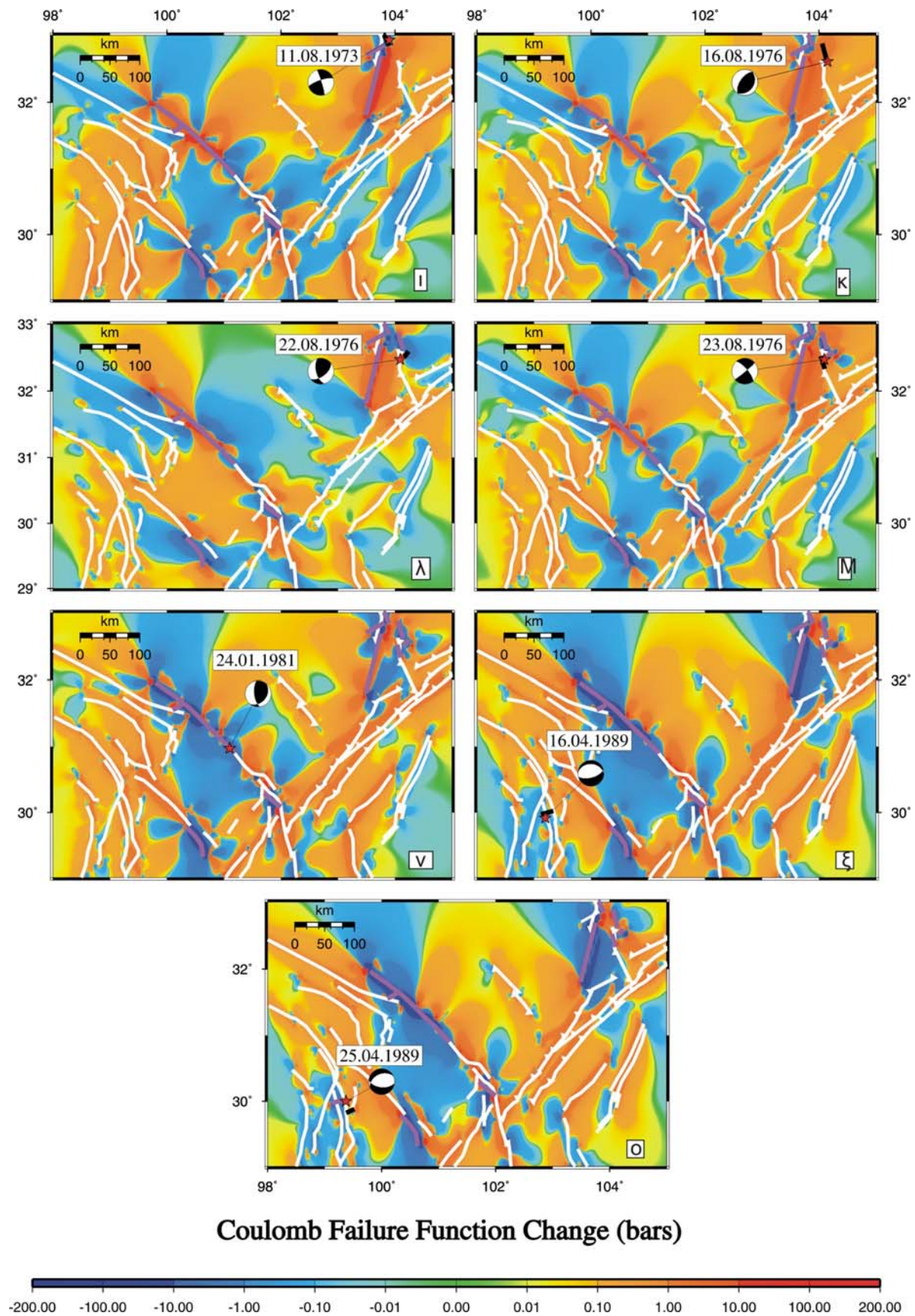
σεισμού στο προκαλούμενο ρήγμα και αυτό γιατί συνέβη σε ένα ρήγμα το οποίο είναι «τυφλό» και έγινε γνωστό με τη δραστηριοποίηση της σεισμικής ακολουθίας του Batang. Για το λόγο αυτό απουσιάζουν τα γεωλογικά δεδομένα ώστε να συμπεριληφθούν στα εισαγόμενα δεδομένα τα οποία χρησιμοποιεί το μοντέλο. Αντίθετα για το δεύτερο σεισμό παρατηρούμε ότι επιτυχώς εντοπίζεται το επίκεντρό του σε μία ζώνη θετικών μεταβολών προκαλούμενων από τον πρώτο σεισμό (**Σχήμα 56.ο**). Το εξελικτικό πεδίο των τάσεων σε αυτή τη περίπτωση υπολογίζεται για εφελκυστικό μηχανισμό γένεσης και φαίνεται ότι από το μοντέλο προβλέπεται η γένεση του σεισμού μέσα στην φωτεινή περιοχή τάσεων απόρροια του πρώτου σεισμού της ακολουθίας. Διαπιστώνεται συνεπώς ότι το μοντέλο είναι ευαίσθητο στην ακριβή γνώση της τεκτονικής μιας περιοχής. Οι εστιακές παράμετροι για κάθε σεισμό οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν για το εξελικτικό μοντέλο της βόρειας περιοχής μελέτης εμπεριέχονται στον **Πίνακα 6**.

Πίνακας 6. Εστιακές Παράμετροι των 15 σεισμών οι οποίοι συμμετέχουν στη κατασκευή του εξελικτικού μοντέλου της βόρειας περιοχής μελέτης.

Χρόνος Γένεσης		Περιοχή	Επίκεντρο		Μέγεθος		Μηχανισμός Γένεσης			L (km)	U (m)	SS (m)	DS (m)
Έτος	Ημερομηνία		Γεωγραφικό Πλάτος	Γεωγραφικό Μήκος	M _{BL}	M _w	Παράταξη (°)	Κλίση (°)	Γωνία Ολίσθησης (°)				
1904	Αύγουστος 30	Xianshuihe	31.00	101.10	6.8	6.8	322	85	13	50	1.08	+1.05	-0.23
1923	Μάρτιος 23	Xianshuihe	31.30	100.80	7.2	7.2	116	90	10	60	2.36	+2.30	0
1933	Αύγουστος 25	Minjiang	32.00	103.70	7.3	7.3	14	60	-167	102	2.36	-2.29	+0.53
1948	Μάϊος 25	Litang	29.50	100.50	7.3	7.3	315	90	0	60	2.36	+2.35	-0.04
1955	Απρίλιος 14	Xianshuihe	30.00	101.90	7.5	7.5	337	81	-3	35	3.23	+3.23	-0.10
1960	Νοέμβριος 9	Minjiang	32.78	103.66	6.5	6.5	60	50	-130	34	0.68	-0.44	+0.52
1967	Αύγουστος 30	Xianshuihe	31.61	100.33	6.8	6.1	245	45	42	20	1.48	+0.59	-0.53
1973	Φεβρουάριος 6	Xianshuihe	31.48	100.53	7.6	7.4	125	87	0	116	2.77	+2.77	0
1973	Αύγουστος 11	Minjiang	32.93	103.90	6.5	6.1	343	85	15	20	0.36	+0.34	-0.09
1976	Αύγουστος 11	Songpan	32.61	104.13	7.2	6.7	165	63	40	30	1.1	+0.84	-0.7
1976	Αύγουστος 21	Songpan	32.60	104.40	6.7	6.3	215	30	90	12	1.2	0	-1.2
1976	Αύγουστος 23	Songpan	32.50	104.30	7.2	6.4	165	65	40	22	1.1	+0.84	-0.7
1981	Ιανουάριος 23	Xianshuihe	30.98	101.10	6.9	6.5	319	73	-4	47	0.56	+0.56	+0.03
1989	Απρίλιος 16	Batang	29.92	99.20	6.4	6.5	74	62	-99	22	0.54	-0.08	+0.53
1989	Απρίλιος 25	Batang	30.00	99.370	6.7	6.1	245	40	-114	15.5	0.32	-0.13	+0.3



Coulomb Failure Function Change (bars)



Σχήμα 56. Εξελικτικό πεδίο τάσεων στην βόρεια περιοχή μελέτης από το 1904 μέχρι το 1989 που έγινε ο τελευταίος σεισμός στην περιοχή. Η τάση (Coulomb) υπολογίζεται για διαρρήξεις οριζόντιας μετατόπισης σε βάθος 8km. Το πεδίο των τάσεων υπολογίζεται σύμφωνα με το μηχανισμό γένεσης του επόμενου ισχυρού σεισμού του δείγματος. Η τιμή της ΔCFF είναι μηδενική πριν το 1904. Χαρτογραφούνται οι μηχανισμοί γένεσης των σεισμών και τα ρήγματα. Οι κόκκινοι αστερίσκοι είναι επίκεντρα σεισμών και ενώνονται με τον μηχανισμό γένεσης που τους αντιστοιχεί. Με το μωβ αναπαρίστανται τα ρήγματα τα οποία έχουν ολισθήσει ενώ με το μαύρο τα ρήγματα-δέκτες για τα οποία κάθε φορά υπολογίζεται το πεδίο των τάσεων. (α) Μεταβολές της τάσης κατά τη σεισμική ολίσθηση που σχετίζονται με το σεισμό του 1904. (β) Εξέλιξη του πεδίου τάσεων μέχρι τη στιγμή πριν τη γένεση του σεισμού του 1923. (γ) Η ΔCFF πριν τη γένεση του σεισμού του 1933. (δ) Εξέλιξη του πεδίου τάσεων μέχρι το σεισμό του 1948. (ε) Το πεδίο τάσεων πριν το σεισμό του 1955. (ς) Η ΔCFF πριν το σεισμό του 1960. (η) Εξέλιξη του πεδίου των τάσεων πριν το 1967. (θ) το πεδίο των τάσεων λίγο πριν το 1973. (ι) Το πεδίο όπως μεταβλήθηκε μετά τον πρώτο σεισμό του 1973. (κ) Το πεδίο των τάσεων λίγο πριν τον πρώτο σεισμό της ακολουθίας Songran. (λ) Το πεδίο των τάσεων αμέσως μετά τον πρώτο σεισμό της ακολουθίας Songran. (μ) Το πεδίο των τάσεων λίγο πριν τον τρίτο σεισμό της ακολουθίας Songran. (ν) Η εξέλιξη του πεδίου πριν το σεισμό του 1981. (ξ) Η ΔCFF πριν από την ακολουθία Batang (ο) Το εξελικτικό αποτέλεσμα αμέσως μετά και τον τελευταίο σεισμό της ακολουθίας Batang.

5.3 Κεντρική Περιοχή Μελέτης (Νότια Sichuan–Βόρεια Yunnan)

Η έναρξη της σεισμικότητας για τον προηγούμενο αιώνα στην κεντρική περιοχή μελέτης σηματοδοτείται με τον σεισμό του Dali το 1925 στο βόρειο τμήμα του ρήγματος Red River. Στο **Σχήμα 57.α** εικονίζεται η χωρική μεταβολή του πεδίου των τάσεων όπως αυτό διαμορφώθηκε αμέσως μετά τη γένεση του σεισμού του Dali. Οι μεταβολές των τάσεων είναι υπολογισμένες για τύπο διάρρηξης όμοιο με αυτό που προκάλεσε το σεισμό του Dali, δηλαδή για δεξιόστροφο ρήγμα οριζόντιας μετατόπισης. Είναι φανερό ότι σχηματίζεται μία μεγάλη περιοχή στην οποία οι τάσεις είναι αρνητικές και οφείλεται στην μεγάλη τιμή της μέσης ολίσθησης κατά τη διάρκεια του σεισμού και την αποφόρτιση των τάσεων κατά μήκος του. Διακρίνονται θετικές τιμές των μεταβολών τάσεων στο βόρειο άκρο του ρήγματος αλλά και βορειοανατολικά του ίχνους του. Η σεισμικότητα στο τμήμα αυτό της Νοτιοανατολικής Κίνας είναι περισσότερο διάσπαρτη σε αντιδιαστολή με τις άλλες δύο περιοχές μελέτης. Παραδειγματικά ο σεισμός ο οποίος επακολουθεί έγινε αρκετά απομακρυσμένα από το σεισμό του Dali έτσι ώστε κάθε αλληλεπίδραση να είναι ανέφικτη. Στα επιμέρους εικονίδια του **Σχήματος 57** παρουσιάζεται η κατανομή του πεδίου των τάσεων λίγο πριν από τη γένεση του εκάστοτε σεισμού ο οποίος κάθε φορά και χαρτογραφείται με εξαίρεση τον εναρκτήριο σεισμό του 1925.

Στη συνέχεια στο **Σχήμα 57.β** το πεδίο των τάσεων είναι στραμμένο για αριστερόστροφο ρήγμα Βορρά-Νότου λίγο πριν τη γένεση του σεισμού στο ρήγμα Anninghe. Παρουσιάζεται το συσσωρευτικό αποτέλεσμα που έχει προκύψει από την αθροιστική επίδραση του σεισμού του Dali όσο και της φόρτισης των ρηγμάτων για τα 17 ακόλουθα χρόνια μέχρι το 1952. Ο σεισμός στο Anninghe ρήγμα συνέβη σε μία αυξημένων τιμών περιοχή, δηλαδή σε μία περιοχή τα ρήγματα της οποίας ικανοποιούν το κριτήριο θραύσης Coulomb, αφού οι θετικές τιμές ενθαρρύνουν τα ρήγματα προς θραύση.

Στο **Σχήμα 57.γ** απεικονίζονται το πεδίο των τάσεων πριν από τον σεισμό του 1955 νοτιότερα ο οποίος γίνεται σε μία περιοχή στην οποία η τεκτονική κυρίως φόρτιση είναι υπεύθυνη για τη γένεση του και λιγότερο οι σεισμικές μεταβολές της τάσης, αφού βρίσκεται σε μεγάλη απόσταση από την τελευταία.

Στο **Σχήμα 57.δ** διακρίνονται οι μεταβολές των τάσεων πριν από το σεισμό του Dongchuan ανατολικά του ρήγματος Xiaojiang, όπως αυτές έχουν προκύψει από την επίδραση των σεισμών και τη φόρτιση μέχρι το 1966.

Στο **Σχήμα 57.ε** χαρτογραφείται το πεδίο των τάσεων, όπως έχει αυτό εξελιχτεί ακριβώς πριν από το σεισμό του Huayinshan το 1974, ένα σεισμικό γεγονός που ακόμη αμφισβητείται από γεωλόγους για το ρήγμα που τον έχει προκαλέσει αν και το επίκεντρο του εντοπίζεται σε μία εκτεταμένη περιοχή αυξημένων ΔCFF .

Δύο χρόνια αργότερα, το 1976 ένας απομακρυσμένος σεισμός σε σχέση με τον προγενέστερο του έγινε στο ρήγμα Qinhe (**Σχήμα 57.ζ**). Η κατάσταση των τάσεων αφού έχει αθροιστεί και το αποτέλεσμα το σεισμού του 1976, λίγο πριν το σεισμό του 1995 παρουσιάζεται στο **Σχήμα 57.η**. Το επίκεντρο αυτό εντοπίζεται επίσης σε περιοχές θετικών μεταβολών οι οποίες οφείλονται επί το πλείστον στη τεκτονική φόρτιση των ρηγμάτων.

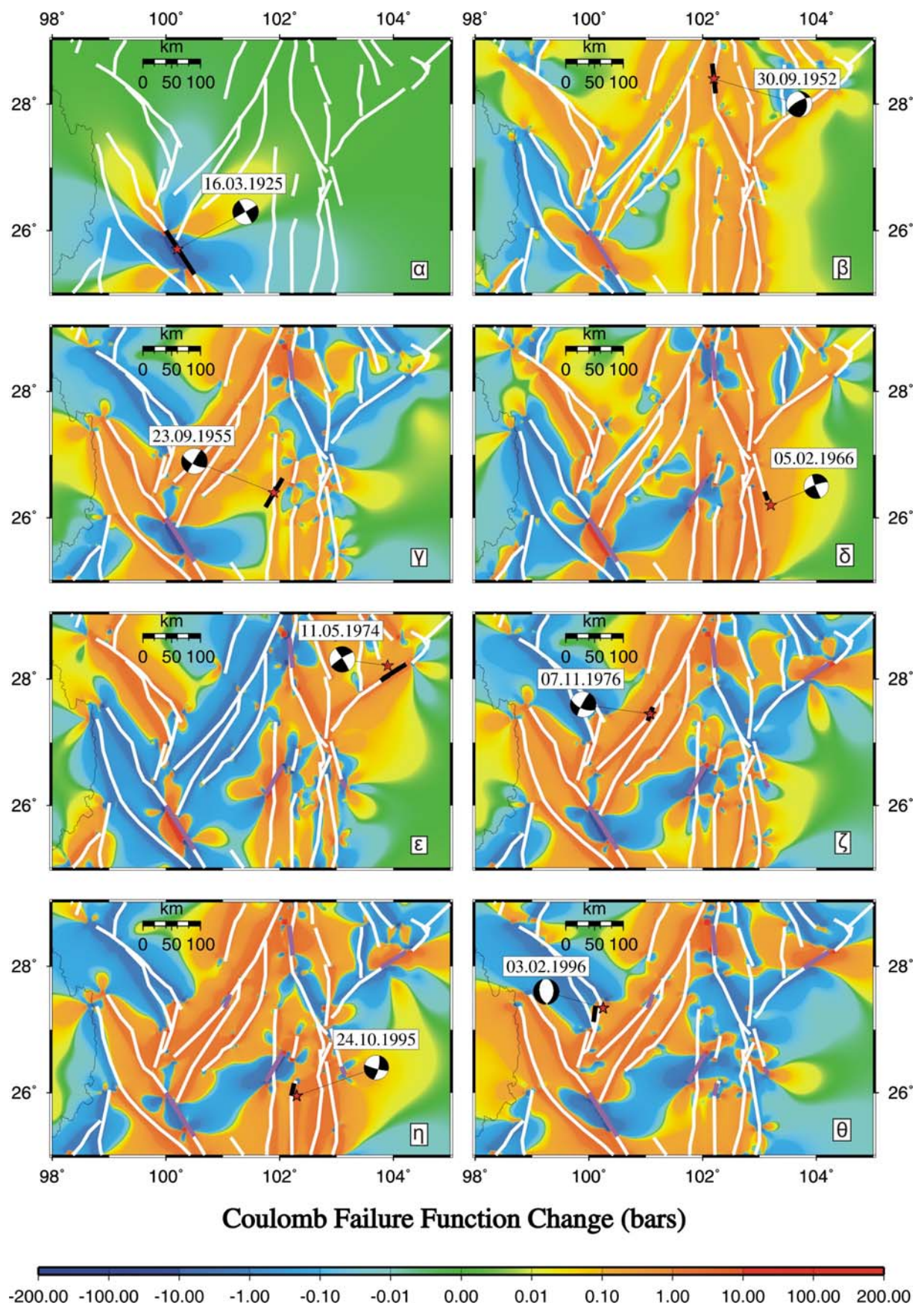
Στο τελευταίο εικονίδιο του **Σχήματος 57.η** φαίνεται το πεδίο των τάσεων λίγο πριν εκδηλωθεί ο τελευταίος σεισμός για τον 21^ο αιώνα στη περιοχή, ο σεισμός του Lijiang στη ζώνη διάρρηξης Zhongdian στην οποία το μόνο γεγονός που έχει επιδράσει είναι το 1925 από το σεισμό του Dali του οποίου θετικός λοβός μεταβολών κάλυπτε την ευρύτερη περιοχή του μεταγενέστερου επικέντρου και ίσως να επιταχύνθηκε από το σεισμό του 1976 ανατολικότερα λίγα χρόνια πριν. Στο σχήμα αυτό αξίζει να αναφερθεί ότι οι τάσεις έχουν υπολογιστεί για κανονικό ρήγμα Borra-Νότου, το μοναδικό στην υποπεριοχή ωστόσο προβλέπει τη θέση του επικέντρου του σεισμού για τύπο διάρρηξης όμοιο με ρήγμα κλίσης.

Χαρακτηριστικό για την περιοχή αυτή είναι ότι γενικά επειδή η σεισμικότητα παρουσιάζει χαμηλότερες τιμές σε σχέση με τη βορειότερη και νοτιότερη περιοχή, τα μεγέθη των σεισμών και κατά συνέπεια οι ολισθήσεις των σεισμών έχουν μικρότερες τιμές, με το παραγόμενο πεδίο των μεταβολών να καταλαμβάνει μικρότερη έκταση και η ακτίνα επίδρασης να είναι μικρή κυρίως καθώς μεγαλώνει η απόσταση από το κέντρο του ρήγματος το οποίο ολίσθησε. Αναμφισβήτητα ο σταθερός συσσωρευτικός μηχανισμός της τάσης κατά μήκος των ρηγμάτων είναι υπεύθυνος αποκλειστικά για τη γένεση των σεισμών στη κεντρική περιοχή.

Οι εστιακές παράμετροι για κάθε σεισμό τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για το εξελικτικό μοντέλο της βόρειας περιοχής μελέτης εμπεριέχονται συγκεντρωτικά στον **Πίνακα 7**.

Πίνακας 7. Εστιακές Παράμετροι των 8 ισχυρών σεισμών ($M_{BJI} \geq 6.5$) οι οποίοι συμμετέχουν στη κατασκευή του εξελικτικού μοντέλου της κεντρικής περιοχής μελέτης

Χρόνος Γένεσης		Περιοχή	Επίκεντρο		Μέγεθος		Μηχανισμός Γένεσης			L (km)	U (m)	SS (m)	DS (m)
Έτος	Ημερομηνία		Γεωγραφικό Πλάτος	Γεωγραφικό Μήκος	M_{BJI}	M_W	Παράταξη (°)	Κλίση (°)	Γωνία Ολίσθησης (°)				
1925	Μάρτιος 16	Red River	25.70	100.20	6.8	7.0	150	90	180	68	1.48	-1.48	0
1952	Σεπτέμβριος 30	Anninghe	28.40	102.20	6.8	-	354	40	30	52	1.08	+0.93	-0.54
1955	Απρίλιος 14	Xiaojiang Faults	30.00	101.90	6.8	7.5	210	87	20	59	1.26	+1.18	-0.43
1966	Φεβρουάριος 05	Xiaojiang Faults	26.20	103.20	6.5	6.9	159	85	-11	17	0.31	+0.3	+0.06
1974	Μάϊος 11	Huayinshan	28.20	103.90	7.1	6.8	237	81	176	52	1.08	+1.06	-1.19
1976	Νοέμβριος 07	Qinhe	27.45	101.08	6.7	6.3	19	66	-6	26	0.47	+0.42	-0.21
1995	Οκτώβριος 24	Xiaojiang Faults	25.95	102.30	6.5	6.2	13	75	-9	23	0.23	+0.23	+0.04
1996	Φεβρουάριος 03	Lijiang	27.34	100.25	7.0	6.6	6	44	-78	28	0.35	0.07	0.34



Σχήμα 57. Εξελικτικό πεδίο τάσεων στη κεντρική υποπεριοχή μελέτης από το 1925 χρησιμοποιώντας φαινόμενο συντελεστή τριβής $\mu'=0.4$. Η τάση Coulomb υπολογίζονται στο βάθος των 8km. Το πεδίο τάσεων υπολογίζεται σε κάθε εικονίδιο σύμφωνα με το μηχανισμό γένεσης του επόμενου ισχυρού σεισμού του δείγματος. Η τιμή της ΔCFF είναι μηδενική πριν το 1925. Χαρτογραφούνται οι μηχανισμοί γένεσης των σεισμών και τα υπεόθυνα ρήγματα. Οι κόκκινοι αστερίσκοι είναι επίκεντρα σεισμών και ενώνονται με τον μηχανισμό γένεσης που τους αντιστοιχεί. Με το μωβ αναπαρίστανται τα ρήγματα τα οποία έχουν ολισθήσει ενώ με το μαύρο τα ρήγματα-δέκτες για τα οποία κάθε φορά υπολογίζεται το πεδίο των τάσεων. **(α)** Μεταβολές της τάσης κατά τη σεισμική ολίσθηση που σχετίζονται με το σεισμό του 1925. **(β)** Εξέλιξη του πεδίου των τάσεων πριν τη γένεση του σεισμού του 1952. **(γ)** Η ΔCFF πριν τη γένεση του σεισμού του 1955 **(δ)** Εξέλιξη του πεδίου τάσεων μέχρι το σεισμό του 1966 στο Xiaojiang. **(ε)** Το πεδίο τάσεων πριν το σεισμό του 1974 **(ς)** Η ΔCFF πριν το σεισμό του 1976 στο ρήγμα Qinhe. **(η)** Το πεδίο τάσεων πριν από το σεισμό του 1995 και **(θ)** οι μεταβολές του πεδίου πριν τον καταστροφικό σεισμό του 1996 του Lijiang που είναι και ο τελευταίος ισχυρός σεισμός για τον 20^ο αιώνα.

5.4 Νότια Περιοχή Μελέτης (Νότια Yunnan)

Στην Νότια περιοχή η σεισμικότητα είναι περισσότερο αυξημένη και εκδηλώνεται σε ομάδες (*clusters*) με τα μικρότερα τεμάχια στα οποία διαιρούνται τα μεγάλου μήκους ρήγματα να υφίστανται διάρρηξη διαδοχικά, επιδρώντας άμεσα το ένα στο άλλο και συνεπώς επιταχύνοντας τον χρόνο γένεσης των μετέπειτα σεισμών. Χαρακτηριστική είναι η εκδήλωση διέγερσης των τεμαχίων κατά μήκος των ρηγμάτων αφού η μορφή του πεδίου των τάσεων το οποίο δημιουργείται κατά τη γένεση των σεισμών οριζόντιας μετατόπισης συμβάλλουν στην αύξηση των τιμών των τάσεων κατά μήκος του ίδιου ρήγματος, χαρακτηριστικό το οποίο συνοδεύει την σεισμικότητα στο ρήγμα Xianshuihe αλλά και στα μεγάλου μήκους ρήγματα της νότιας υποπεριοχής.

Το **Σχήμα 58.α.** αντιστοιχεί στη μεταβολή του πεδίου των τάσεων κατά τη διάρκεια του σεισμού, η οποία προκλήθηκε από το σεισμικό γεγονός του 1913 στο ρήμα Qujiang. Φαίνεται ότι η σκιερή ζώνη λόγω του σεισμού εκτείνεται σε μία μεγάλης έκτασης περιοχή, ενώ λοβοί φωτεινών ζωνών δημιουργούνται στα άκρα του ρήγματος τα οποία στη συνέχεια παρουσιάζουν ισχυρή σεισμικότητα, ιδιαίτερα στο νοτιοανατολικό άκρο. Μεγάλης έκτασης σκιερή ζώνη αναπτύσσεται ωστόσο λόγω της ολίσθησης κατά μήκος του ρήγματος αλλά και σε διεύθυνση Ανατολής-Δύσης. Η μορφή των λοβών ανταποκρίνεται πλήρως σε σεισμό οριζόντιας μετατόπισης.

Στο **Σχήμα 58.β** παρουσιάζεται η εξέλιξη του πεδίου πριν τον σεισμό του 1941 το επίκεντρο του οποίου βρίσκεται μακριά από τον προηγούμενο σεισμό. Ωστόσο οι τάσεις οι οποίες είναι υπολογισμένες για τύπο ρήγματος οριζόντιας μετατόπισης δείχνει ότι οι τάσεις είναι αυξημένες σε μικρό βέβαια ποσοστό μιας και που ο ρυθμός ολίσθησης ο οποίος επιλέχτηκε για τα ρήγματα αυτά είναι σχετικά μικρός.

Στο **Σχήμα 58.γ**, υπολογίστηκαν οι τιμές του πεδίου για τον σεισμό του 1950 ο οποίος διέρρηξε γειτονικό τέμαχος της ίδιας ζώνης διάρρηξης και φανερά επιταχύνθηκε από τον προηγούμενο. Στο σχήμα φαίνεται η έντονη αύξηση τόσο από τη φόρτιση αλλά περισσότερο από την εκδήλωση του προηγούμενου σεισμού και τον λοβό θετικών μεταβολών που δημιούργησε στα νότια ο σεισμός του 1941. Ο σεισμικός κύκλος της περιοχής συνεχίζει με το σεισμό του Tonghai το 1970 ο οποίος προβλέπεται από το μοντέλο και προκλήθηκε από την γένεση του προηγούμενου ισχυρού σεισμού. Το εξελικτικό πεδίο πριν από το σεισμό αυτό διακρίνεται στο **Σχήμα 58.δ**. Αν και το χρονικό μεσο διάστημα από το σεισμό του 1913 είναι μεγάλο

ωστόσο φαίνεται ότι ο σεισμός αυτός έχει διεγερθεί από τον γειτονικό του. Η περίπτωση αυτή συνιστά άλλο ένα παράδειγμα μετανάστευσης επικέντρων ισχυρών σεισμών κατά μήκος της παράταξης ενός ρήγματος.

Στο **Σχήμα 58.ε** αποτυπώνεται το πεδίο των τάσεων πριν από το σεισμό του 1971 στη νότια Yunnan. Διαπιστώνεται ότι η περιοχή στην οποία εντοπίζεται διαχέεται από θετικές μεταβολές ΔCFF εξαιτίας των ισχυρών σεισμών στη ζώνη Lancang-Gengma. Στα **Σχήματα 58.ζ** και **58.η** εμφανίζονται οι μεταβολές στο πεδίο των τάσεων από τη σεισμική ακολουθία Lung-Ling. Το επίκεντρο του πρώτου σεισμού εντοπίζεται σε μία περιοχή ιδιαίτερα αυξημένων τιμών των στατικών τάσεων. Ενώ ο δεύτερος προβλέπεται από το μοντέλο καθώς διεγείρεται από τον προηγούμενο σεισμό της ακολουθίας. Το εξελικτικό πεδίο πριν από το σεισμό του 1979 στο ρήγμα Dien Bien Phu, στο έδαφος του Βιετνάμ το οποίο περιγράφεται στο **Σχήμα 58.θ** προκαλεί μικρή επίδραση στις τάσεις στη γύρω περιοχή και φαίνεται απομακρυσμένος.

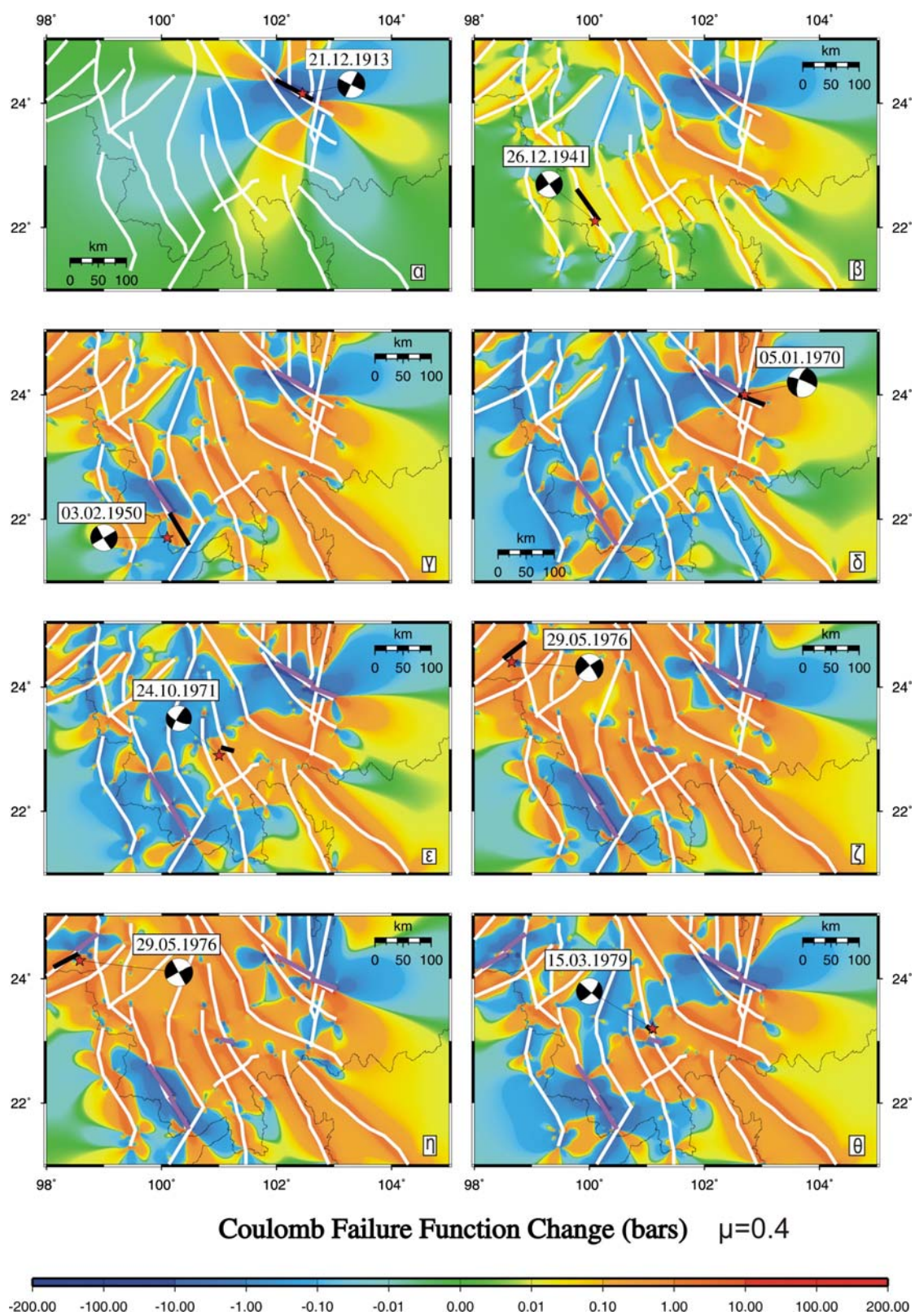
Στο **Σχήμα 58.ι** περιγράφεται το πεδίο των τάσεων λίγο πριν το σεισμό του 1979 ο οποίος διέρρηξε το γειτονικό τέμαχος από αυτό του 1971, σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα, το οποίο οφείλεται στην επιφόρτιση των τάσεων λόγω του προηγούμενου σεισμού.

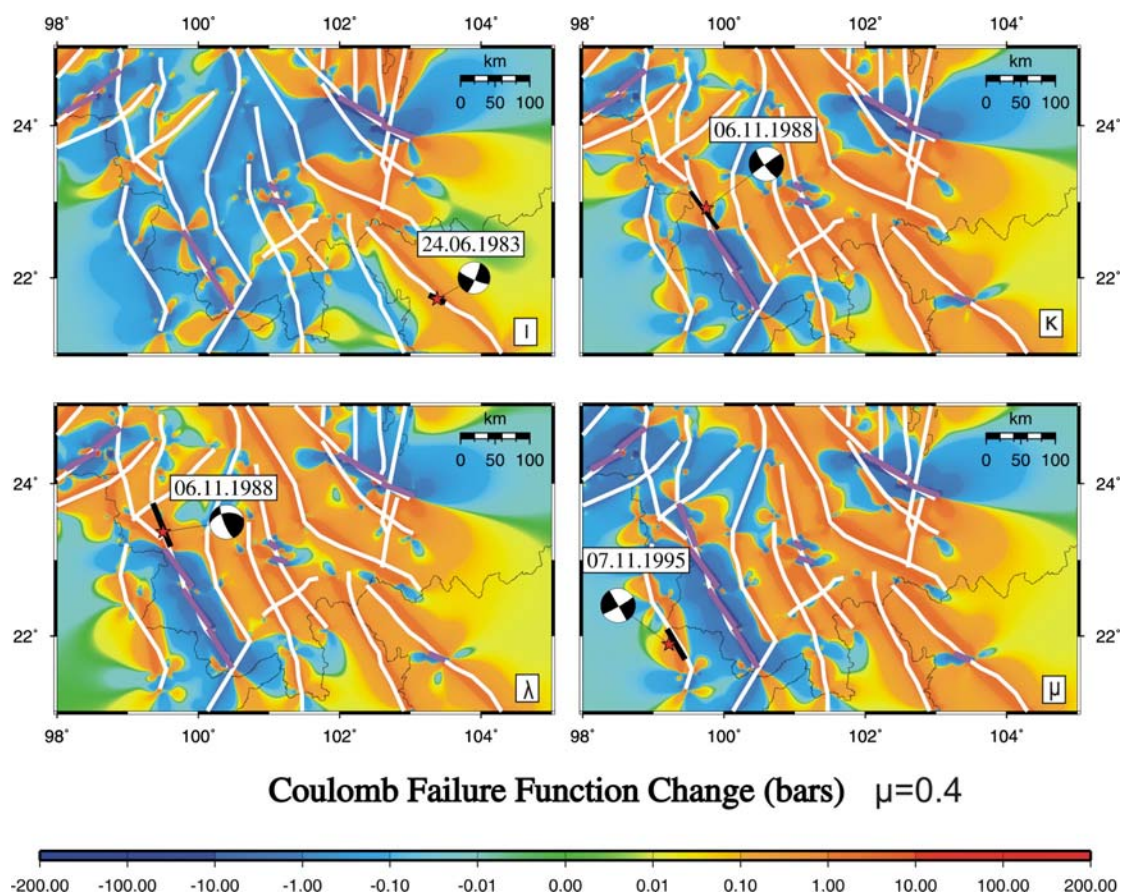
Ιδιαίτερα σημαντική για τη νότια περιοχή αποτελεί η ακολουθία Lancang Gengma χαρακτηριστικό της οποίας είναι η γένεση διπλού ισχυρού σεισμού. Στα **Σχήματα 58.κ** και **58.λ** διακρίνεται πόσο σημαντική είναι η επίδραση των θετικών μεταβολών των τάσεων στην γένεση σεισμών. Τα επίκεντρα και των δύο σεισμών όπως παρατηρείται έχουν προβλεφτεί από το μοντέλο των τάσεων στη περιοχή. Τέλος αφού το συγκεκριμένο έχει ανακουφιστεί από τις τάσεις αφού κάθε τμήμα του έχει υποστεί διάρρηξη, το μοντέλο προβλέπει τη γένεση του σεισμού του 1995 ο οποίος φαίνεται να συμβαίνει σε μία περιοχή που επιταχύνεται από τη γένεση του προηγούμενου. Το πεδίο πριν από τον τελευταίο σεισμό του 1995 διακρίνεται στο **Σχήμα 58.μ** στο οποίο διαπιστώνεται η μεγάλη πιθανότητα για το ρήγμα να ολισθήσει, ικανοποιώντας το κριτήριο θραύσης. Είναι αξιοσημείωτη η μετανάστευση της σεισμικής δραστηριότητας στη διπλανή ζώνη διάρρηξης από τη ζώνη Lancang-Gengma η οποία με τις διαδοχικές της διαρρήξεις σε όλο το μήκος της ζώνης φόρτισαν θετικά τη διπλανή ζώνη η οποία έχει το μήκος της προηγούμενης.

Οι εστιακές παράμετροι για κάθε σεισμό τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για το εξελικτικό μοντέλο της νότιας περιοχής μελέτης παρουσιάζονται στον **Πίνακα 8**.

Πίνακας 8. Εστιακές Παράμετροι των 12 σεισμών οι οποίοι συμμετέχουν στη κατασκευή του εξελικτικού μοντέλου της νότιας περιοχής μελέτης

Χρόνος Γένεσης		Περιοχή	Επίκεντρο		Μέγεθος		Μηχανισμός Γένεσης			L (km)	U (m)	SS (m)	DS (m)
Έτος	Ημερομηνία		Γεωγραφικό Πλάτος	Γεωγραφικό Μήκος	M _{BJI}	M _w	Παράταξη	Κλίση	Γωνία Ολίσθησης				
1913	Δεκέμβριος 21	Qujiang	24.15	102.45	7.0	7.2	116	87	180	89	2.02	-2.02	0
1941	Δεκέμβριος 26	Lancang	22.10	100.10	7.0	7.0	145	90	180	68	1.48	-1.48	-0.13
1950	Φεβρουάριος 3	Lancang	21.70	100.10	7.0	7.0	149	85	180	68	1.48	-1.48	0
1970	Ιανουάριος 5	Qujiang	24.00	102.70	7.8	-	291	80	-157	102	2.37	-2.18	+0.93
1971	Απρίλιος 28	Lancang	22.90	101.00	6.7	6.3	117	70	170	26	0.49	+0.48	-0.08
1976	Μάιος 29	Ruili	24.50	99.00	7.3	6.7	232	82	-10	50	0.92	+0.90	+0.16
1976	Μάιος 29	Ruili	24.45	98.86	7.4	6.7	242	88	0	50	0.92	+0.92	0
1979	Μάρτιος 15	Lancang	23.20	101.10	6.8	6.0	312	86	163	17.5	0.31	-0.29	-0.09
1983	Ιούνιος 24	Dien Bien Phu	21.72	103.38	6.8	6.3	114	80	-172	26	0.5	-0.49	+0.44
1988	Νοέμβριος 6	Lancang	22.92	99.75	7.4	7.0	144	79	179	68	1.48	-1.48	-0.03
1988	Νοέμβριος 6	Lancang	23.37	99.50	7.2	7.0	158	77	136	68	1.48	-1.06	-1.03
1995	Ιούλιος 11	Burma	21.89	99.22	-	6.8	330	89	175	52	1.08	-1.07	+0.09





Σχήμα 58. Εξελικτικό πεδίο τάσεων στην βόρεια περιοχή μελέτης από το 1913. Η τάση (Coulomb) υπολογίζεται για διαρρήξεις σε βάθος 8km χρησιμοποιώντας ως φαινόμενο συντελεστή τριβής $\mu=0.4$. Το πεδίο τάσεων υπολογίζεται σύμφωνα με το μηχανισμό γένεσης του επόμενου ισχυρού σεισμού του δείγματος. Η τιμή της ΔCFF είναι μηδενική πριν το 1913. (α) Μεταβολές της Τάσης κατά τη σεισμική ολίσθηση που σχετίζονται με το σεισμό του 1913 (β) Εξέλιξη του πεδίου τάσεων μέχρι τη στιγμή πριν τη γένεση του σεισμού του 1941. (γ) Η ΔCFF πριν τη γένεση του σεισμού του 1950. (δ) Εξέλιξη του πεδίου τάσεων μέχρι το μεγάλο σεισμό του 1970. (ε) Το πεδίο τάσεων πριν το σεισμό του 1971. (ζ) Η ΔCFF πριν τον πρώτο σεισμό της ακολουθίας Lung Ling το 1976. (η) Εξέλιξη του πεδίου των τάσεων πριν τον δεύτερο σεισμό της ακολουθίας. (θ) Το πεδίο των τάσεων λίγο πριν το 1979 (ι) Η ΔCFF όπως μεταβλήθηκε μετά τον απομακρυσμένο σεισμό του 1983.(κ) Το πεδίο των τάσεων λίγο πριν τον πρώτο σεισμό της ακολουθίας Lacang (λ) Οι μεταβολές της τάσης αμέσως μετά τον πρώτο σεισμό της ακολουθίας και πριν τον δεύτερο (μ) Το πεδίο των τάσεων λίγο πριν τον τελευταίο σεισμό στην περιοχή της Βιρμανίας το 1995.

5.5 Υπολογισμοί του Πεδίου των τάσεων για διαφορετικές τιμές του μ'

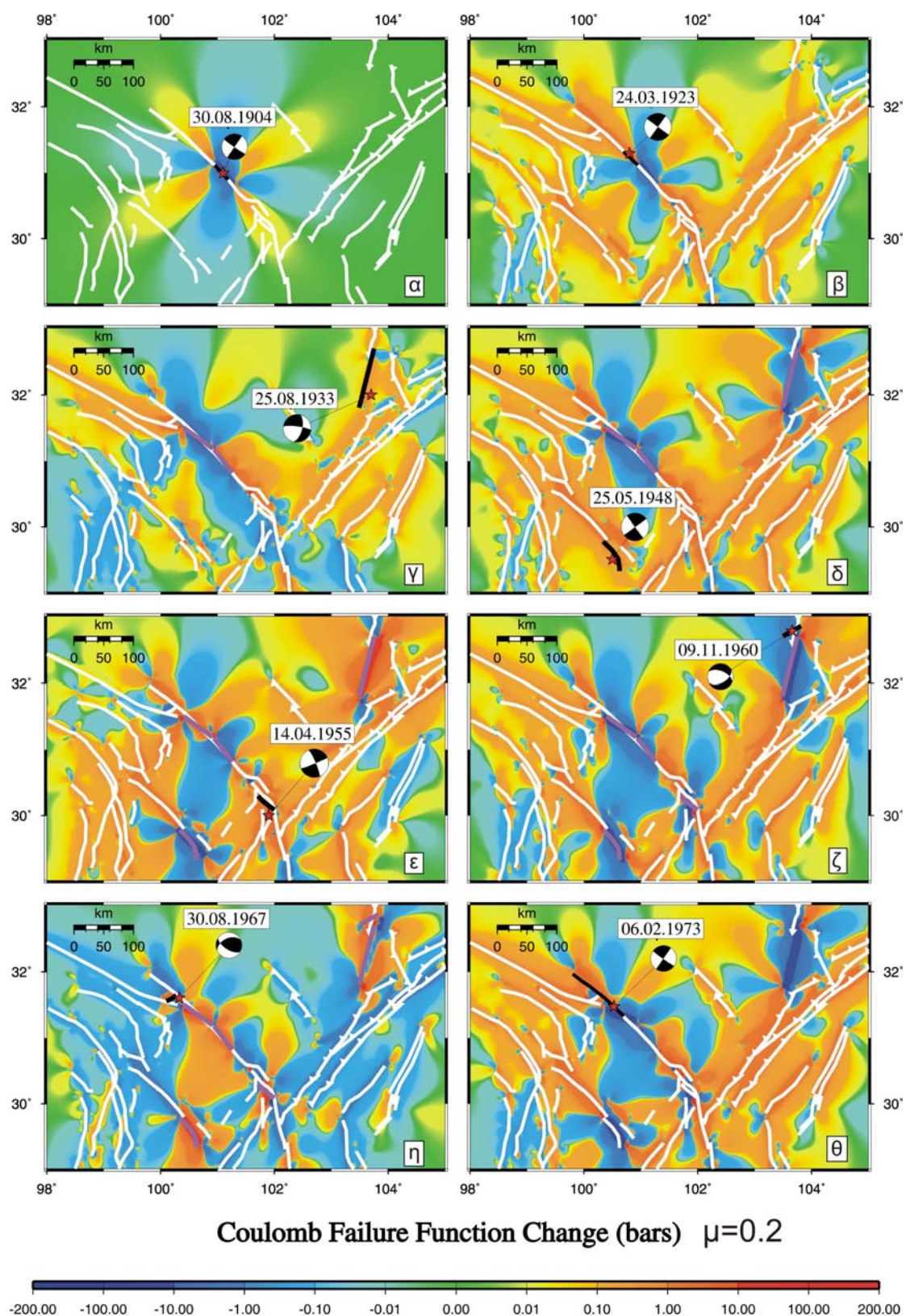
Οι σεισμοί είναι φαινόμενα τα οποία εκδηλώνονται όχι εξαιτίας της θραύσης των πετρωμάτων, τα οποία ήδη εντάσσονται σε ένα κατακερματισμένο φλοιό αλλά αποτελούν το αποτέλεσμα της τριβής των επιφανειών των ρηγμάτων τα οποία καταπονούνται λόγω της άσκησης της περιβάλλουσας τάσης. Συνεπώς αντιμετωπίζοντας τον σεισμό ως φαινόμενο τριβής και ολίσθησης θεωρήθηκε σημαντική η μελέτη της διαδικασίας της τριβής η οποία πραγματοποιήθηκε με τη δοκιμή διαφορετικών τιμών του φαινομένου συντελεστή τριβής ο οποίος περιγράφηκε στο 2ο κεφάλαιο. Στόχος είναι ο εντοπισμός μεταβολών στις τάσεις αν διαφοροποιηθεί ο φαινόμενος συντελεστής τριβής για εναλλακτικές τιμές του φαινομένου συντελεστή τριβής.

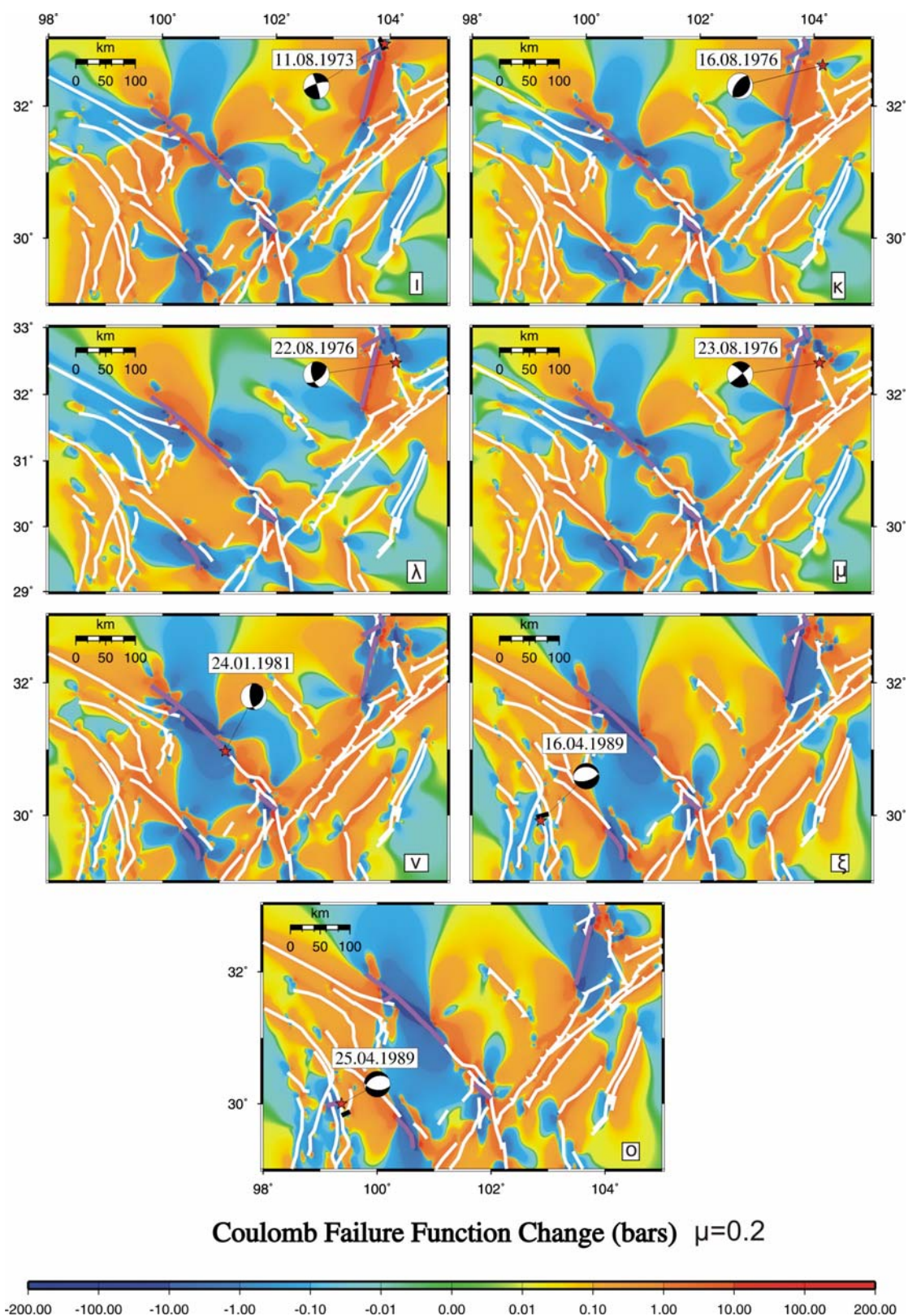
Ο ρόλος καθώς και η φυσική σημασία του φαινομένου συντελεστή τριβής μ , αναλύθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο. Προκειμένου να εξεταστούν πιθανές μεταβολές στους υπολογισμούς του πεδίου των τάσεων με διαφορετική τιμή του φαινομένου συντελεστή πραγματοποιήθηκαν επαναληπτικές δομικές για όλους τους σεισμούς και των τριών περιοχών για μία μεγαλύτερη και μία μικρότερη τιμή του μ' , .

Στα **Σχήματα 57 και 58** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα τα οποία αφορούν την βόρεια υποπεριοχή για εναλλακτικές τιμές $\mu'=0.2$ και $\mu'=0.6$. Διακρίνεται μία αμελητέα μεταβολή, η οποία αφορά περισσότερο τιμές της μεταβολής της τάσης K_1 όχι τη μορφή του πεδίου.

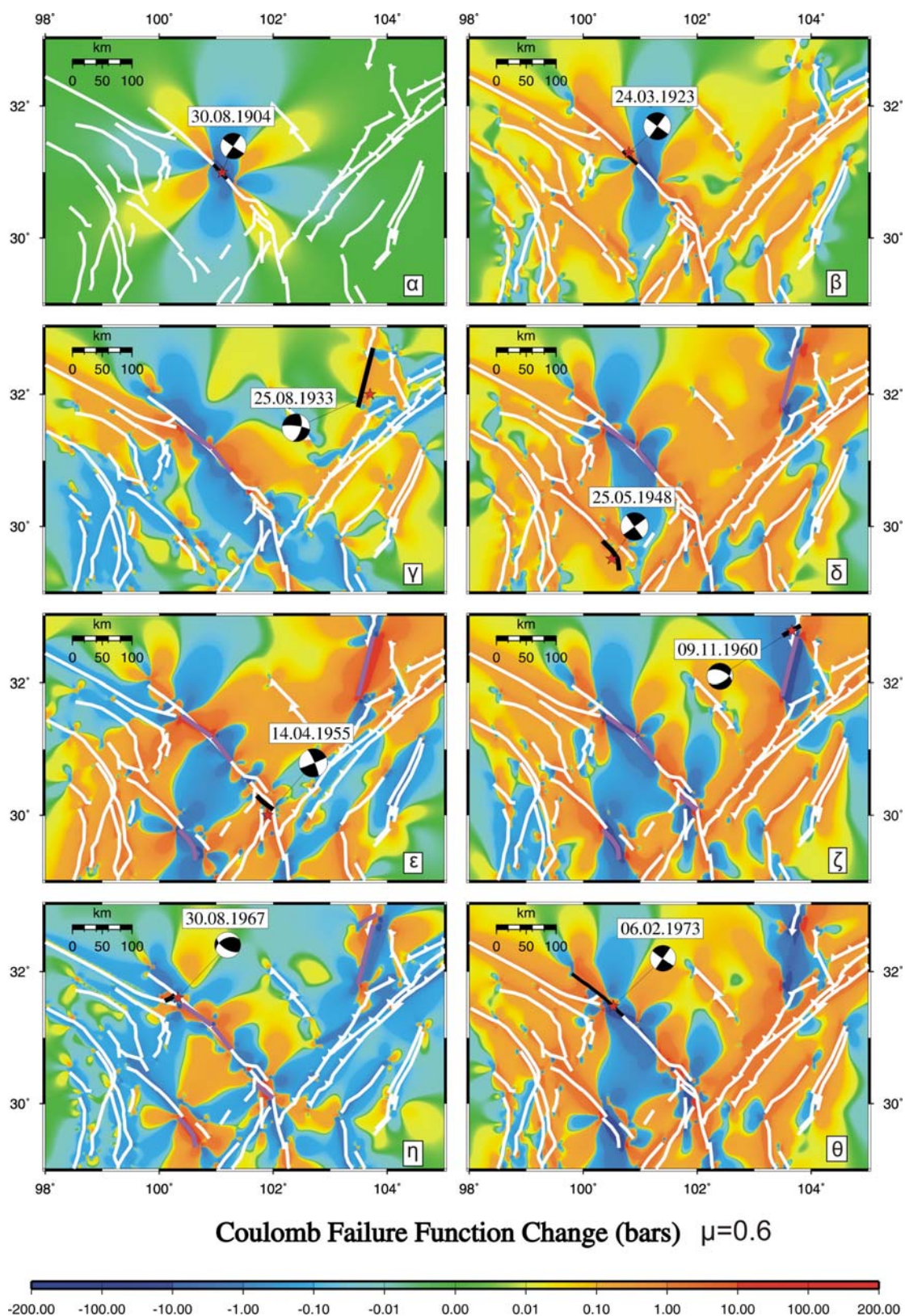
Για την κεντρική περιοχή τα αποτελέσματα του εξελικτικού μοντέλου για χαμηλότερη τιμή 0.2 και υψηλότερη τιμή 0.6 παρουσιάζονται στα **Σχήματα 59 και 60** στην οποία εκδηλώνονται υποτυπώδεις μεταβολές.

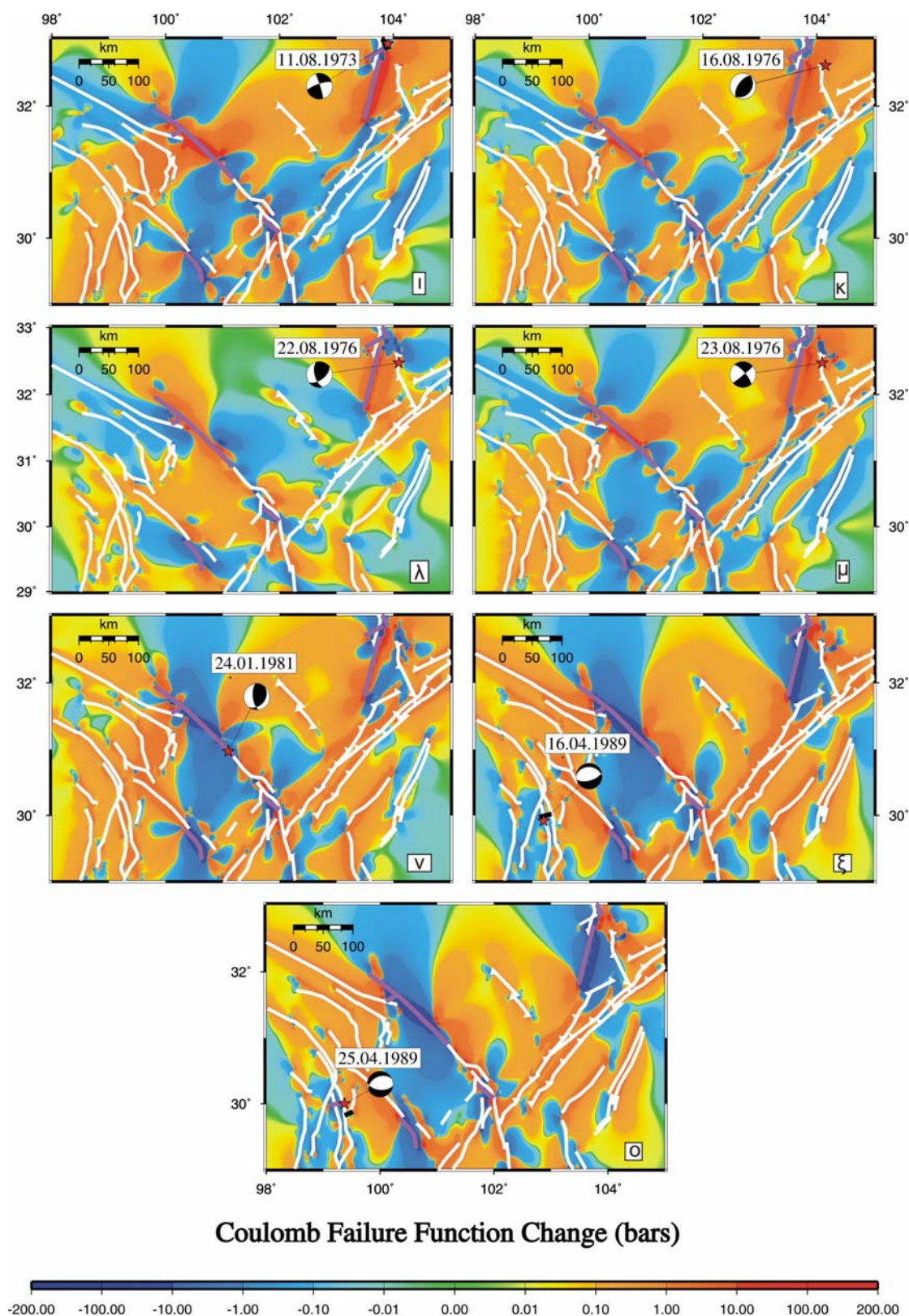
Ομοίως για τη νότια περιοχή τα αποτελέσματα φαίνονται στα **Σχήματα 61 και 62**. Οι υπολογισμοί πραγματοποιήθηκαν με τον ίδιο τρόπο ο οποίος περιγράφηκε στο κεφάλαιο 5.1 και ο τρόπος με τον οποίο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα είναι επίσης ο ίδιος.



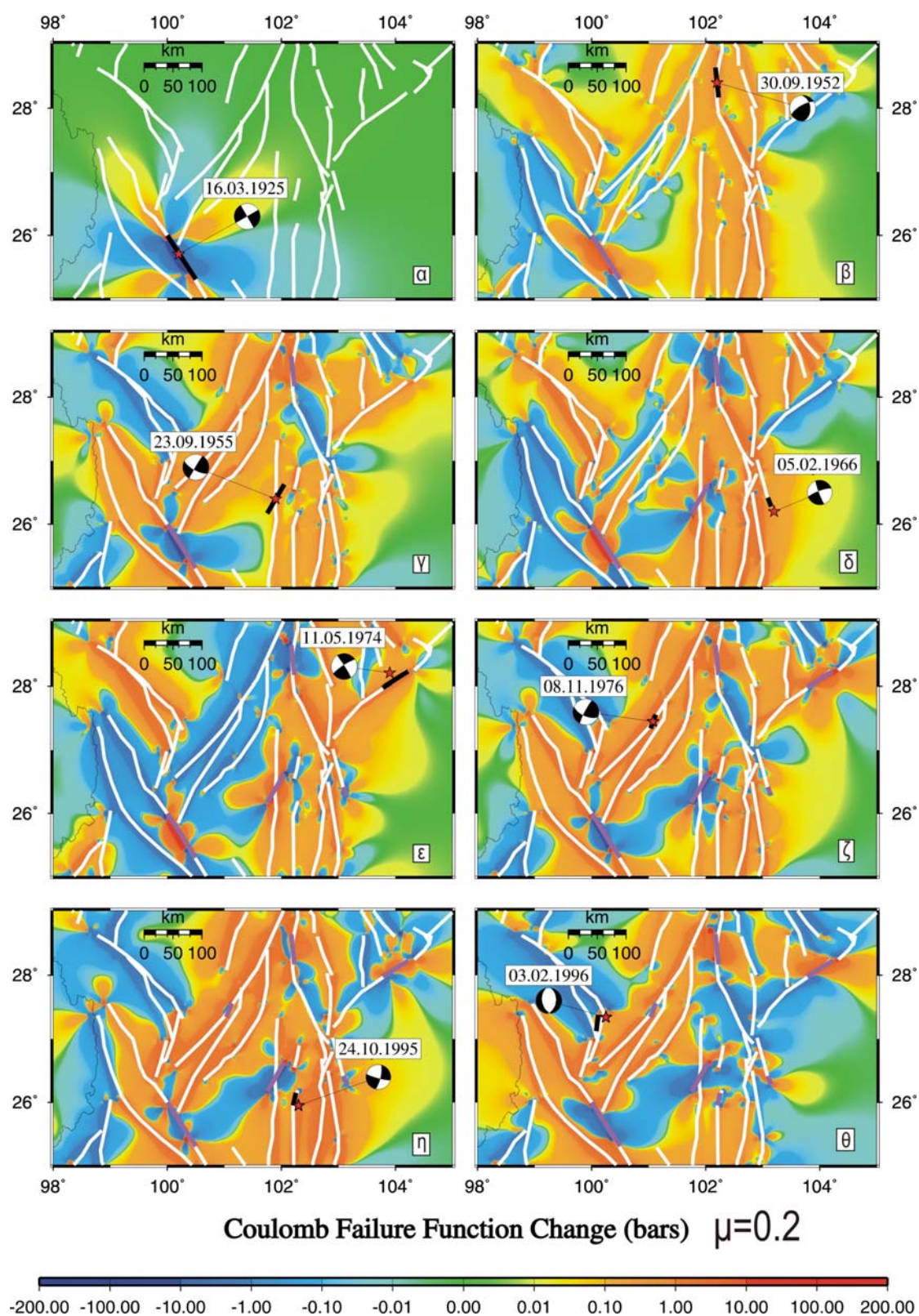


Σχήμα 59. Εξελικτικό πεδίο τάσεων στην βόρεια περιοχή μελέτης από το 1904 για $\mu'=0.2$ (όπως το Σχήμα 56).

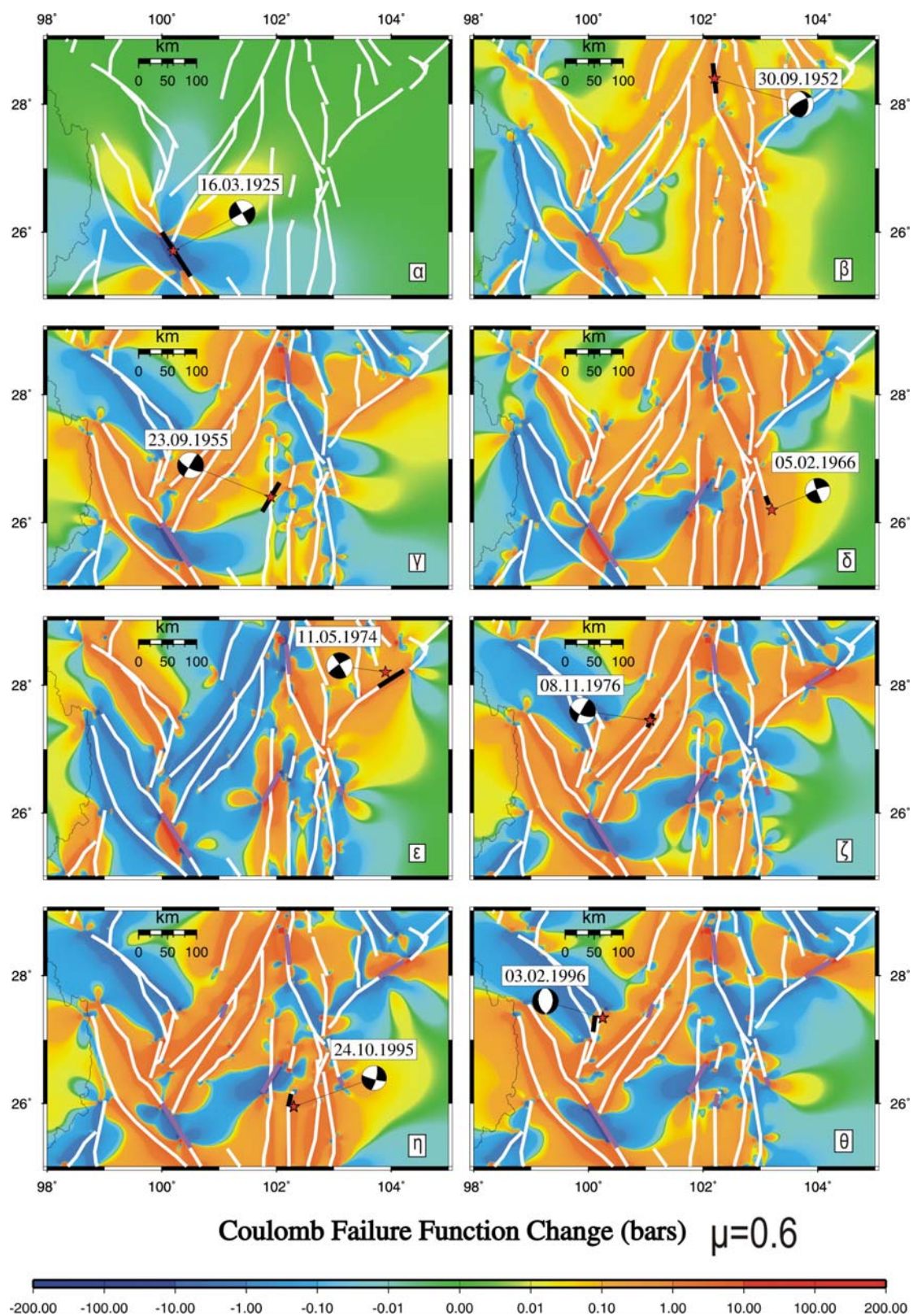




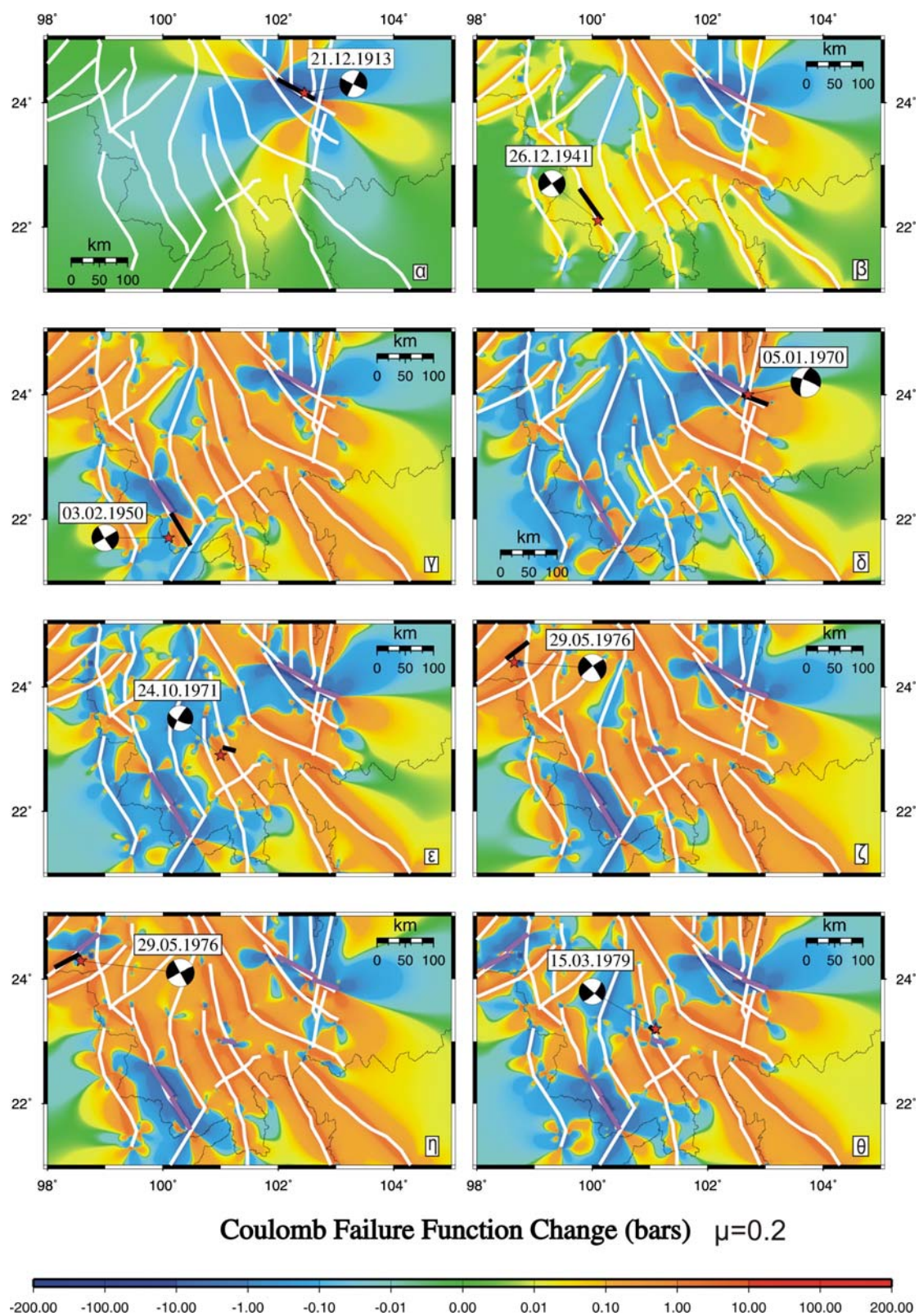
Σχήμα 60. Εξελικτικό πεδίο τάσεων στην βόρεια περιοχή μελέτης από το 1904 για $\mu'=0.6$ (όπως το Σχήμα 56).

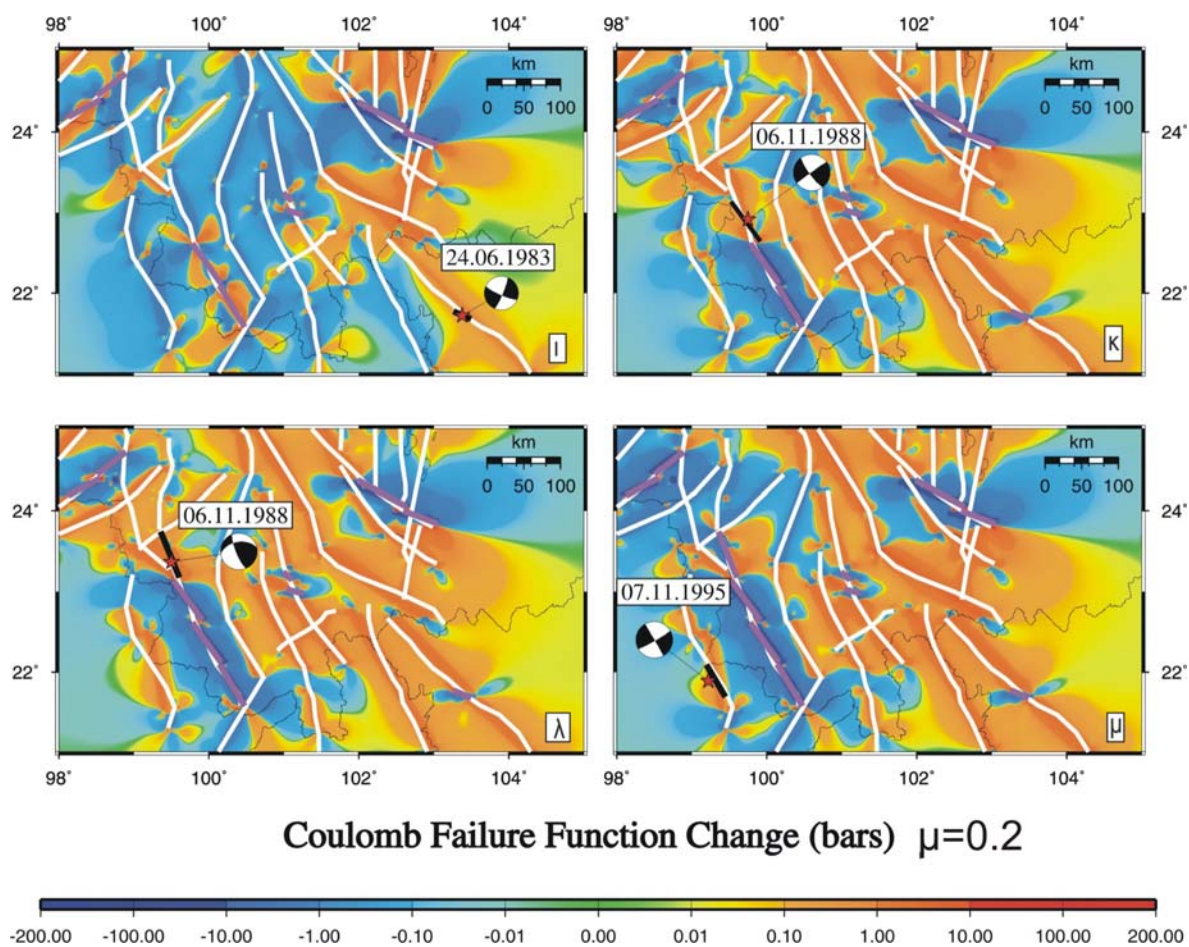


Σχήμα 61. Εξελικτικό πεδίο τάσεων στην κεντρική υποπεριοχή μελέτης από το 1925 χρησιμοποιώντας φαινόμενο συντελεστή τριβής $\mu'=0.2$ (όπως το Σχήμα 57).

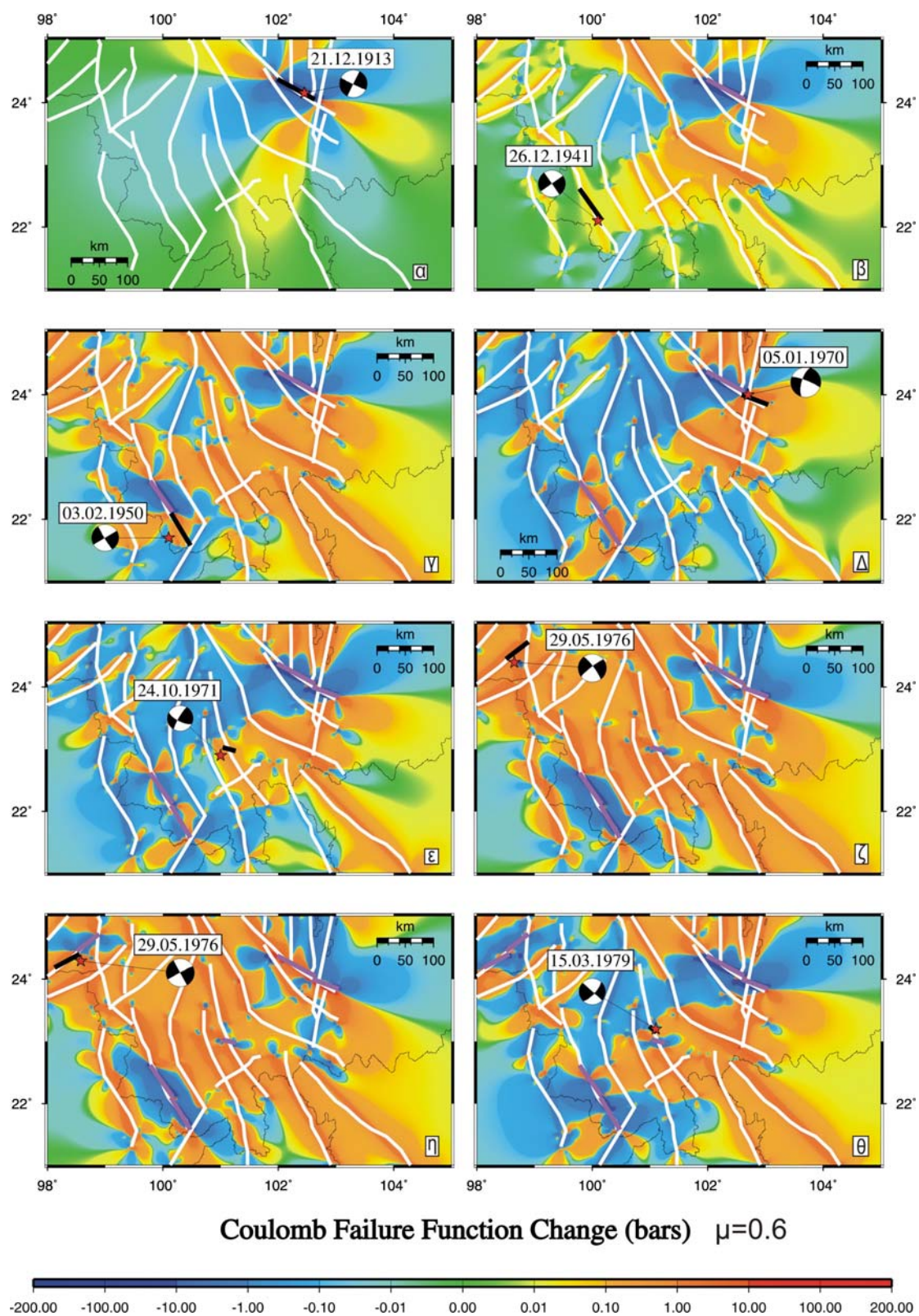


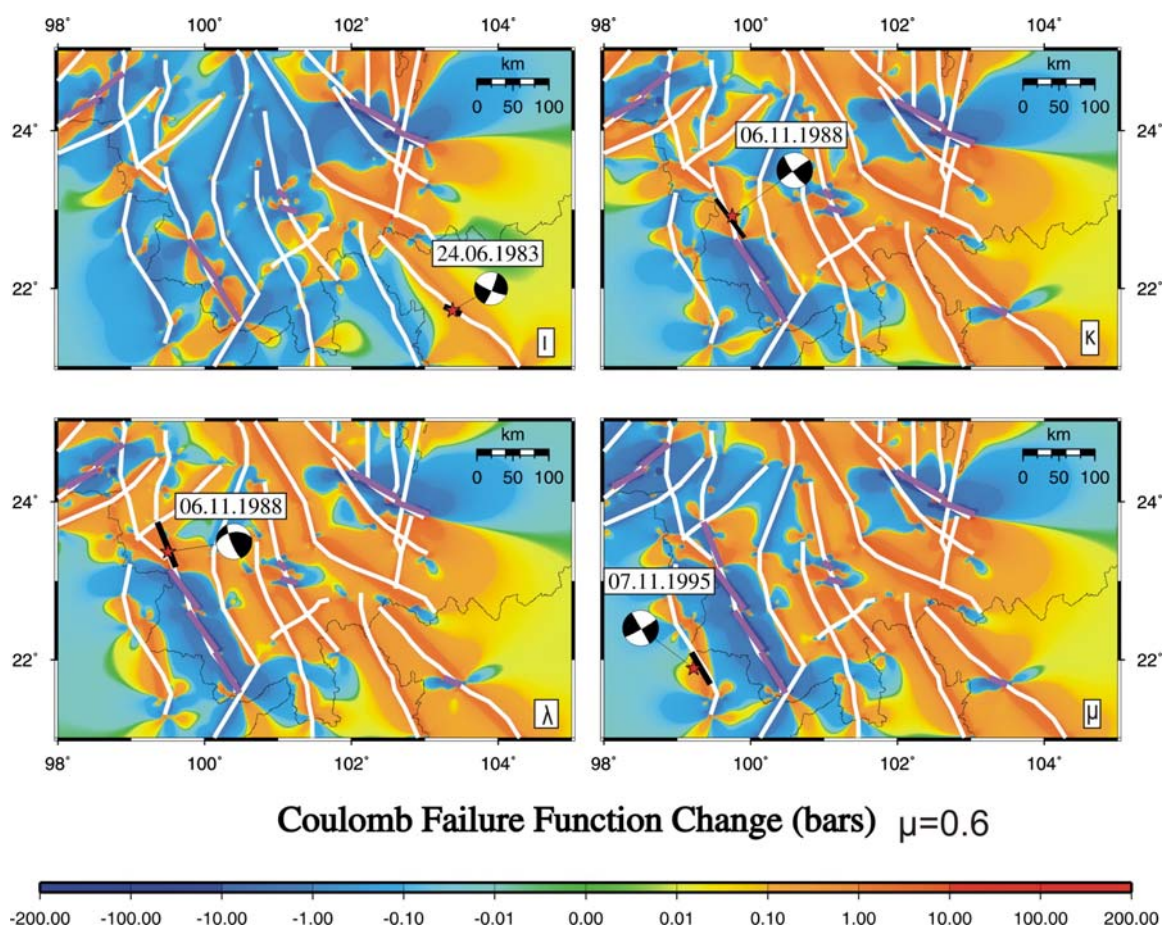
Σχήμα 62. Εξελικτικό πεδίο τάσεων στην κεντρική υποπεριοχή μελέτης από το 1925 χρησιμοποιώντας φαινόμενο συντελεστή τριβής $\mu'=0.6$ (όπως το Σχήμα 57).





Σχήμα 63. Εξελικτικό πεδίο τάσεων στην βόρεια περιοχή μελέτης από το 1913 χρησιμοποιώντας ως φαινόμενο συντελεστή τριβής $\mu'=0.2$ (όπως το Σχήμα 58).





Σχήμα 64. Εξελικτικό πεδίο τάσεων στην βόρεια περιοχή μελέτης από το 1913 χρησιμοποιώντας ως φαινόμενο συντελεστή τριβής $\mu'=0.6$ (όπως το Σχήμα 58).

Κεφάλαιο 6

Αποτελέσματα-Συμπεράσματα

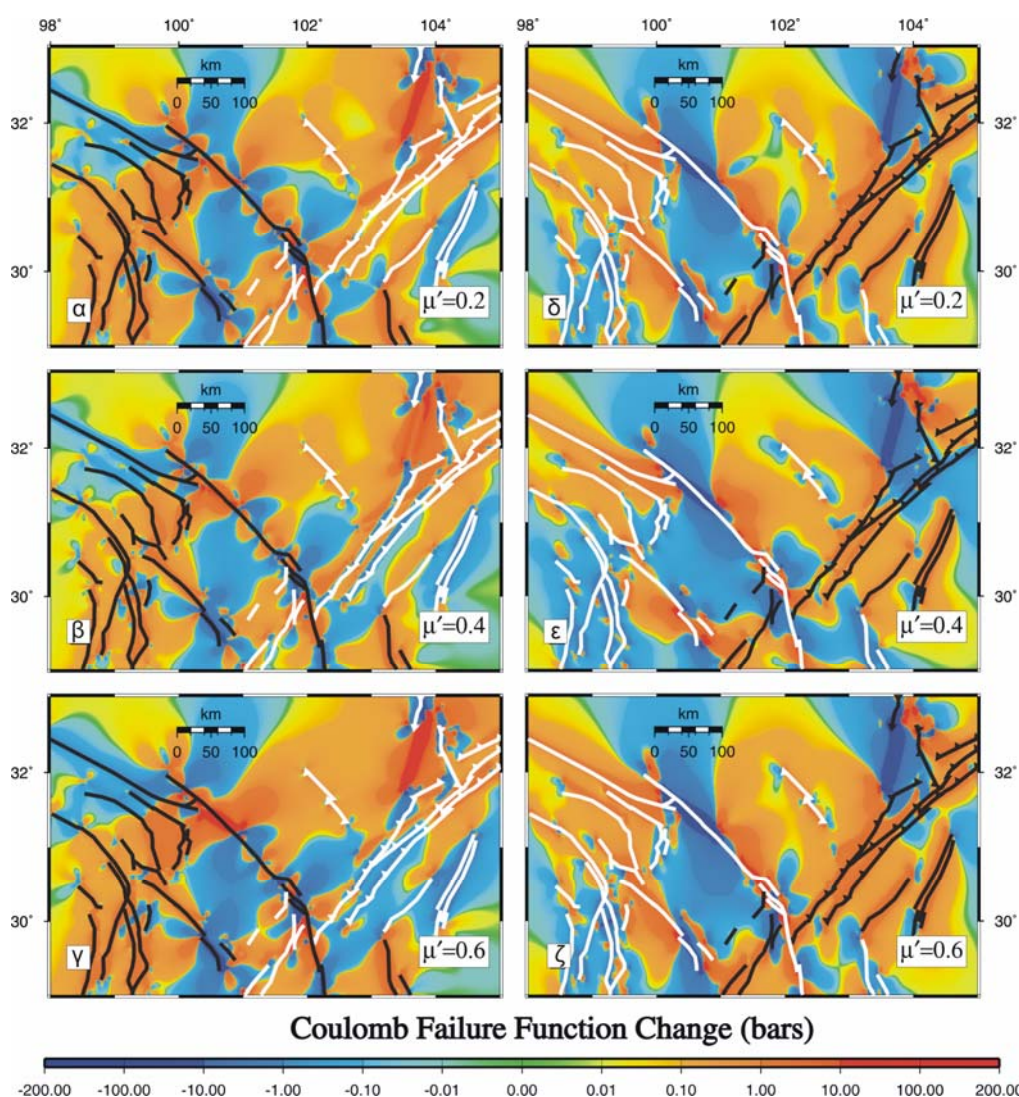
6.1 Ανασκόπηση

Η κατασκευή ενός εξελικτικού μοντέλου του πεδίου των τάσεων στην επικράτεια της Νοτιοανατολικής Κίνας από την αρχή του 20^{ου} αιώνα μέχρι το 2007 αποτέλεσε το κίνητρο και τον αντικειμενικό στόχο της παρούσας Διατριβής Ειδίκευσης. Η σύνθεση των χρονικά σταθερών ρυθμών ολίσθησης των σημαντικότερων ενεργών δομών στα οποία εκδηλώνεται η σεισμικότητα σε συνδυασμό με την σεισμική ολίσθηση των ρηγμάτων κατά τη διάρκεια ισχυρών σεισμών ήταν απαραίτητη προκειμένου να υπολογιστεί το συσσωρευτικό αποτέλεσμα της μεταβολής των στατικών τάσεων πάνω στις δομές αυτές. Τα προαναφερόμενα δεδομένα εισήχθησαν στο απαραίτητο λογισμικό και εφαρμόστηκε η κατάλληλη μέθοδος. Η συλλογή αξιόπιστων δεδομένων τα οποία αφορούν τη γένεση των σεισμών, το μηχανισμό γένεσης και τις ιδιότητες του υπεύθυνου ρήγματος το οποίο κάθε φορά ενεργοποιείται, διατέλεσε τον πρωταρχικό στόχο και η προσπάθεια επικεντρώθηκε στην εύρεση γεωλογικών και σεισμολογικών τοπικών κυρίως μελετών και η πλειοψηφία των στοιχείων που υιοθετήθηκαν αφορούν σεισμολογικά δεδομένα και γεωλογικές παρατηρήσεις υπαίθρου. Με βάση τα στοιχεία αυτά επιλέχθηκαν οι κατάλληλοι και οι πιο αξιόπιστοι μηχανισμοί γένεσης με αποτέλεσμα τα μοντέλα διάρρηξης να προσδιοριστούν με τη μέγιστη δυνατή ακρίβεια. Υπολογίστηκαν εν συνεχεία οι σεισμικές μεταβολές των Τάσεων Coulomb ύστερα από τη γένεση κάποιου ισχυρού σεισμού με μέγεθος $M_{BJL} \geq 6.5$ σύμφωνα με τον τύπο διάρρηξης του ρήγματος που ενεργοποιήθηκε. Ο καθορισμός των ρυθμών ολίσθησης στα σημαντικότερα ρήγματα της περιοχής βασίστηκε σε γεωδαιτικές κυρίως μετρήσεις οι οποίες συχνά συμφωνούσαν με γεωλογικές παρατηρήσεις υπαίθρου διάφορων ερευνητών. Η περιοχή λόγω της μεγάλης της έκτασης διαιρέθηκε σε τρεις επιμέρους περιοχές, τη βόρεια υποπεριοχή (βόρεια επαρχία Sichuan), τη κεντρική περιοχή (νότια επαρχία Sichuan και βόρεια επαρχία Yunnan) και τη νότια υποπεριοχή (νότια επαρχία Yunnan και σύνορα αυτής με τη Βιρμανία και το Λάος). Το εξελικτικό μοντέλο των τάσεων υπολογίστηκε για διαφορετικά χρονικά διαστήματα ανά περιοχή ανάλογα με τη χρονολογία γένεσης του πρώτου σεισμού μέσα στον 20^ο

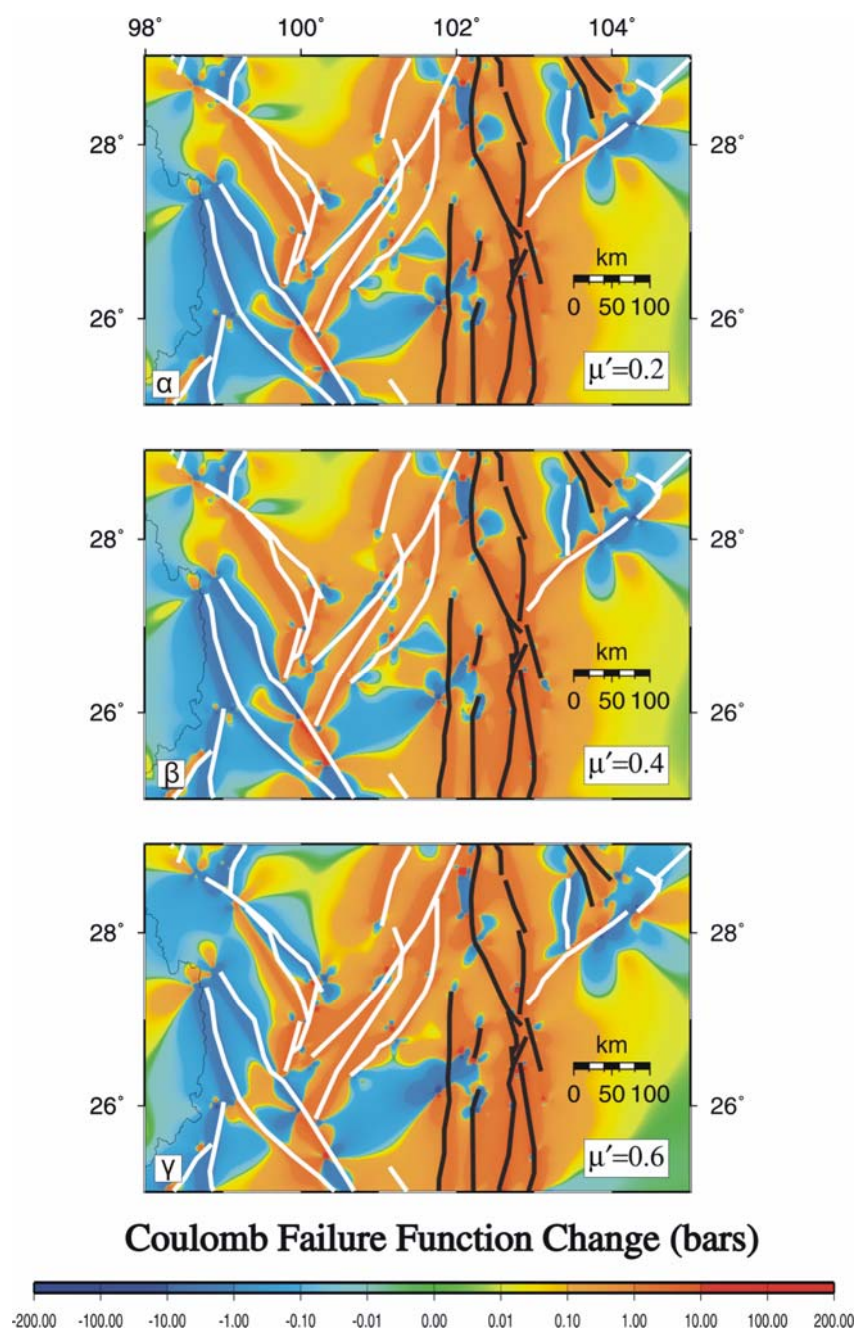
αιώνα στην εκάστοτε περιοχή. Ο διαχωρισμός της συνολικής έκτασης κρίθηκε απαραίτητος και δεν φαίνεται να επηρεάζει το τελικό αποτέλεσμα καθώς οι σεισμοί απέχουν σημαντικά από τα όρια των περιοχών και επιπλέον όσο μεγαλύτερες γίνονται οι αποστάσεις τόσο πιο αμελητέα είναι η επίδραση της σεισμικής ολίσθησης στους υπολογισμούς του πεδίου των τάσεων. Για την βόρεια περιοχή το διάστημα αυτό ορίστηκε το 1904-2007, ενώ στην κεντρική και νότια ορίστηκε το διάστημα 1925-2007 και 1913-2007 αντίστοιχα. Όπως προαναφέρθηκε το πεδίο των τάσεων λαμβάνεται μηδενικό σε κάθε σημείο στο χώρο, πριν από τη γένεση του πρώτου σεισμού. Αθροιστικά συνυπολογίζονται η μεγάλης κλίμακας τεκτονική φόρτιση σε συνδυασμό με τις μεταβολές στις τάσεις λόγω των σεισμών. Όταν εξετάζεται η εξέλιξη του πεδίου τάσεων στην περιοχή φαίνεται ότι το εξελικτικό μοντέλο τάσεων Coulomb μπορεί να ερμηνεύσει την χωροχρονική κατανομή της παρατηρούμενης σεισμικότητας.

6.2 Επέκταση του Μοντέλου των Τάσεων για το 2007

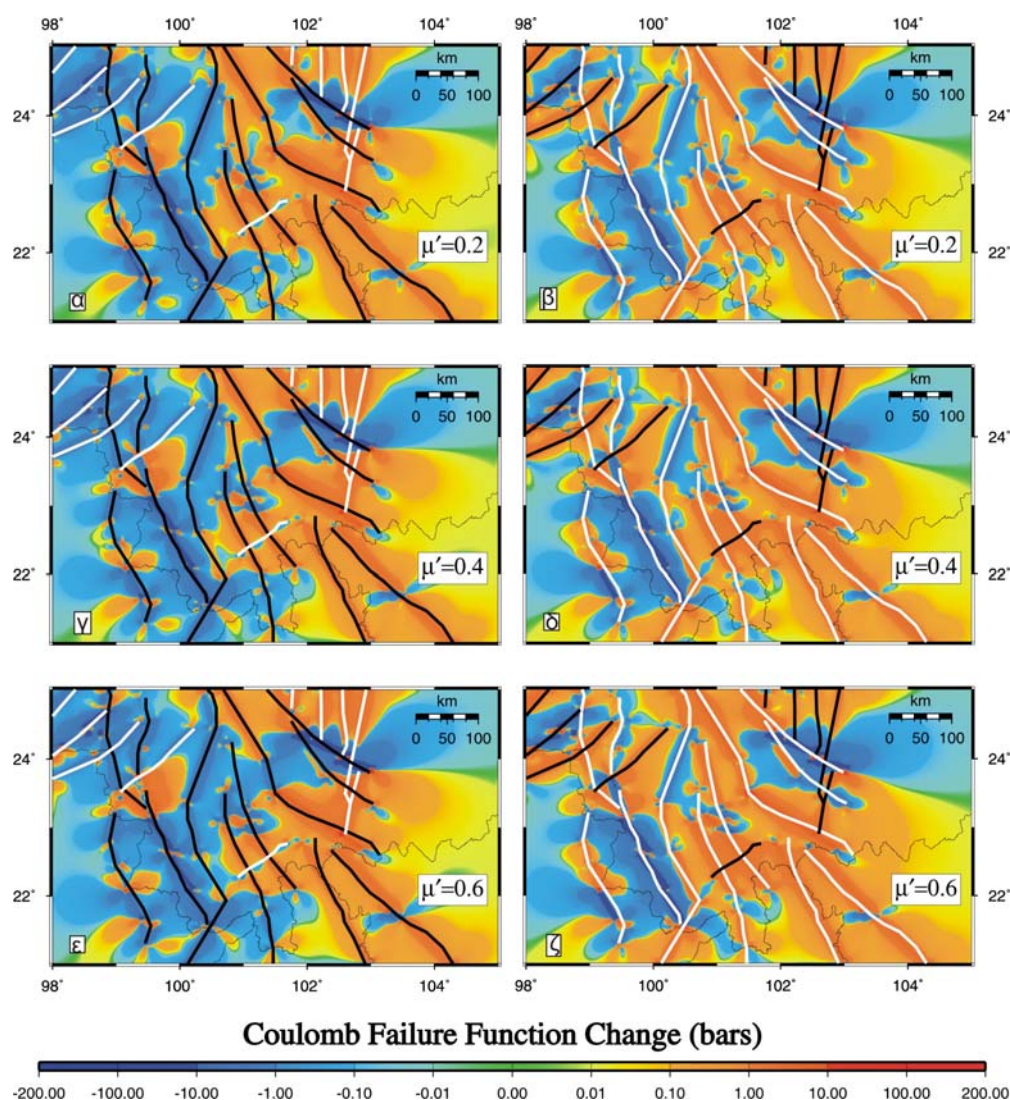
Ο υπολογισμός των μεταβολών των τάσεων επεκτάθηκε μέχρι το 2007 με σκοπό να προσδιοριστούν οι δομές οι οποίες σήμερα βρίσκονται σε περιοχές θετικών μεταβολών των τάσεων. Πραγματοποιήθηκαν δοκιμές των υπολογισμών αυτών για εναλλακτικές τιμές του φαινομένου συντελεστή τριβής $\mu'=0.2$, $\mu'=0.4$ και $\mu'=0.6$ προκειμένου να εντοπιστούν διαφορές στη χωρική κατανομή του πεδίου μεταβολών των τάσεων. Παρατηρείται ότι δεν προέκυψαν σημαντικές μεταβολές στο πεδίο και ιδιαίτερα μεταβολές οι οποίες να περικλείουν αντιστροφή του πρόσημου στις μεταβολές παρά μόνο ποσοτικές μεταβολές των τιμών. Η παρατήρηση αυτή έρχεται σε συμφωνία με άλλους ερευνητές όπως οι Parsons et al. (2005) οι οποίοι διεξήγαγαν παρόμοιες δοκιμές στην γειτονική περιοχή των Ιμαλαΐων και κατέληξαν στο ίδιο συμπέρασμα. Στα Σχήματα 65, 66 και 67 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα τα οποία έχουν προκύψει από την επέκταση των υπολογισμών για κάθε μία από τις τρεις υποπεριοχές μελέτης. Οι μεταβολές του εξελικτικού πεδίου των τάσεων έχουν κάθε φορά υπολογιστεί για τύπους διάρρηξης οι οποίοι είναι αντιπροσωπευτικοί για την εκάστοτε υποπεριοχή και αντιστοιχούν στα ρήγματα τα οποία είναι χρωματισμένα με μαύρο χρώμα.



Σχήμα 65. Οι υπολογισμοί του εξελικτικού πεδίου των τάσεων *Coulomb* όπως έχουν προκύψει για το 2007 στην περιοχή της βόρειας υποπεριοχής μελέτης. Με μαύρο χρώμα παριστάνονται τα ρήγματα τα σύμφωνα με τα οποία έχει υπολογιστεί κάθε φορά το πεδίο των τάσεων. Οι υπολογισμοί έχουν πραγματοποιηθεί για τρεις τιμές του φαινόμενου συντελεστή τριβής ($\mu'=0.2$, $\mu'=0.4$, $\mu'=0.6$). **(α)** Οι υπολογισμοί έχουν πραγματοποιηθεί για ένα αντιπροσωπευτικό μηχανισμό γένεσης ($160^\circ/80^\circ/-10^\circ$) και για $\mu'=0.2$. **(β)** Οι υπολογισμοί ισχύουν για ένα αντιπροσωπευτικό μηχανισμό γένεσης ($160^\circ/80^\circ/-10^\circ$) για $\mu'=0.4$. **(γ)** Οι υπολογισμοί έχουν γίνει για ένα αντιπροσωπευτικό μηχανισμό γένεσης ($160^\circ/80^\circ/-10^\circ$) για $\mu'=0.6$. **(δ)** Οι υπολογισμοί έχουν γίνει για ένα αντιπροσωπευτικό μηχανισμό γένεσης ($240^\circ/50^\circ/-170^\circ$) για $\mu'=0.2$. **(ε)** Οι υπολογισμοί ισχύουν για ένα αντιπροσωπευτικό μηχανισμό γένεσης ($240^\circ/50^\circ/-170^\circ$) για $\mu'=0.4$. **(ζ)** Οι υπολογισμοί έχουν γίνει για ένα αντιπροσωπευτικό μηχανισμό γένεσης ($240^\circ/50^\circ/-170^\circ$) για $\mu'=0.6$.



Σχήμα 66. Οι υπολογισμοί του εξελικτικού πεδίου των τάσεων *Coulomb* όπως έχουν προκύψει για το 2007 στην περιοχή της κεντρικής υποπεριοχής μελέτης. Με μαύρο χρώμα παριστάνονται τα ρήγματα τα για τα οποία έχει στραφεί το πεδίο των τάσεων κάθε φορά. Οι υπολογισμοί έχουν πραγματοποιηθεί για τρεις τιμές του φαινόμενου συντελεστή τριβής ($\mu' = 0.2$, $\mu' = 0.4$, $\mu' = 0.6$). (α) Οι υπολογισμοί έχουν πραγματοποιηθεί για ένα αντιπροσωπευτικό μηχανισμό γένεσης ($350^\circ/80^\circ/30^\circ$) για $\mu' = 0.2$. (β) Οι υπολογισμοί έχουν γίνει για ένα αντιπροσωπευτικό μηχανισμό γένεσης ($350^\circ/80^\circ/30^\circ$) για $\mu' = 0.4$. (γ) Οι υπολογισμοί ισχύουν για ένα αντιπροσωπευτικό μηχανισμό γένεσης ($350^\circ/80^\circ/30^\circ$) για $\mu' = 0.6$.



Σχήμα 67. Οι υπολογισμοί του εξελικτικού πεδίου των τάσεων *Coulomb* όπως έχουν προκύψει για το 2007 στην περιοχή της νότιας υποπεριοχής μελέτης. Με μαύρο χρώμα παριστάνονται τα ρήγματα τα για τα οποία έχει στραφεί το πεδίο των τάσεων κάθε φορά. Οι υπολογισμοί έχουν πραγματοποιηθεί για τρεις τιμές του φαινομένου συντελεστή τριβής ($\mu'=0.2$, $\mu'=0.4$, $\mu'=0.6$). (α) Οι υπολογισμοί έχουν γίνει για ένα αντιπροσωπευτικό μηχανισμό γένεσης ($130^\circ/85^\circ/170^\circ$) για $\mu'=0.2$. (β) Οι υπολογισμοί ισχύουν για ένα αντιπροσωπευτικό μηχανισμό γένεσης ($130^\circ/85^\circ/170^\circ$) για $\mu'=0.4$ (γ) Οι υπολογισμοί έχουν γίνει για ένα αντιπροσωπευτικό μηχανισμό γένεσης ($130^\circ/85^\circ/170^\circ$) για $\mu'=0.6$. (δ) Οι υπολογισμοί ισχύουν για ένα αντιπροσωπευτικό μηχανισμό γένεσης ($230^\circ/85^\circ/-5^\circ$) για $\mu'=0.2$. (ε) Οι υπολογισμοί έχουν γίνει για ένα αντιπροσωπευτικό μηχανισμό γένεσης ($230^\circ/85^\circ/-5^\circ$) για $\mu'=0.4$. (ζ) Οι υπολογισμοί έχουν γίνει για ένα αντιπροσωπευτικό μηχανισμό γένεσης ($230^\circ/85^\circ/-5^\circ$) για $\mu'=0.6$.

Στο **Σχήμα 65** παρουσιάζονται οι υπολογισμοί για τη βόρεια περιοχή της επαρχίας Sichuan. Οι μεταβολές των τάσεων υπολογίστηκαν για δύο αντιπροσωπευτικούς τύπους διάρρηξης και συγκεκριμένα για αριστερόστροφες οριζόντιας μετατόπισης ($160^\circ/80^\circ/-10^\circ$) (**Σχήμα 65α, β και γ**) και ανάστροφες διαρρήξεις ($240^\circ/50^\circ/-170^\circ$) (**Σχήμα 65δ, ε και ζ**). Παρατηρείται ότι τα περισσότερα τεμάχια τα οποία έχουν ήδη ολισθησει κατά το χρονικό διάστημα που καλύπτει η παρούσα μελέτη, βρίσκονται σε περιοχές αρνητικών μεταβολών των τάσεων και επομένως δεν αναμένεται να φιλοξενήσουν ένα ισχυρό σεισμό στο άμεσο μέλλον. Όπως για παράδειγμα το νοτιότερο τέμαχος του Xianshuihe καθώς και νοτιότερα τα ρήγματα Anninghe και Zemuhe τα οποία δεν έχουν δράσει στον τελευταίο αιώνα. Στα Σχήματα **65δ, ε και ζ** το πεδίο είναι υπολογισμένο για ανάστροφο τύπο ρήγματος αντιπροσωπευτικό του ανάστροφου συστήματος Longmenshan το οποίο κυριαρχεί στα βορειοανατολικά. Διαπιστώνεται ότι η περιοχή αυτή βρίσκεται σε περιοχές θετικών μεταβολών κατά μήκος των τμημάτων του ρήγματος Longmenshan της οποίας όμως το μεγαλύτερο ποσό της τάσης εκλύεται ασεισμικά όπως φανερώνει η χαμηλή σεισμικότητα. Εξαίρεση παρουσιάζει η περιοχή του Ming Jiang στην οποία οι τάσεις έχουν ανακουφιστεί και ο χρόνος μελέτης που καλύπτει η εργασία δεν ήταν αρκετός ώστε αυτές να ανακάμψουν.

Στο **Σχήμα 66** φαίνονται οι υπολογισμοί του εξελικτικού μοντέλου για ένα μηχανισμό γένεσης ($350^\circ/80^\circ/30^\circ$) αντιπροσωπευτικό των περισσότερων ενεργών αριστερόστροφων ρηγμάτων τα οποία ενεργοποιούνται στην κεντρική περιοχή. Διακρίνεται ότι η πλειοψηφία των αριστερόστροφων ρηγμάτων με διεύθυνση Βορρά-Νότου βρίσκεται σε περιοχές θετικών μεταβολών του πεδίου των τάσεων και επομένως μπορούν να θεωρηθούν πιθανές θέσεις για τη γένεση ενός ισχυρού σεισμού στο μέλλον.

Οι υπολογισμοί για τη νότια περιοχή (**Σχήμα 67**) έγιναν για ένα αντιπροσωπευτικό συζυγές ζεύγος ρηγμάτων το οποίο κυριαρχεί στη νότια περιοχή. Με τον τρόπο αυτό αναδεικνύεται η παρούσα κατανομή των τάσεων τόσο στα ΒΑ-ΝΔ διεύθυνσης αριστερόστροφα ρήγματα οριζόντιας μετατόπισης με αντιπροσωπευτικό τύπο διάρρηξης: $230^\circ/85^\circ/-5^\circ$ όσο και στα ΒΔ-ΝΑ διεύθυνσης δεξιόστροφα ρήγματα οριζόντιας μετατόπισης με αντιπροσωπευτικό τύπο διάρρηξης: $130^\circ/85^\circ/170^\circ$. Τα αποτελέσματα φανερώνουν ότι τα ρήγματα τα οποία ενεργοποιήθηκαν από τις αρχές του 20^{ου} αιώνα έως σήμερα δεν αναμένεται να ενεργοποιηθούν στο άμεσο μέλλον γιατί δεν έχει διέλθει ο απαιτούμενος χρόνος

ανάκτησης. Παρατηρείται επίσης ότι και στους δύο υπολογισμούς το τέμαχος βορειότερα του σεισμού του 1995 φαίνεται πιθανό να φιλοξενήσει τον επόμενο ισχυρό σεισμό στη περιοχή της βόρειας Βιρμανίας.

Τα αποτελέσματα στο σύνολό τους φανερώνουν η πλειοψηφία των ισχυρών σεισμών οι οποίοι μελετήθηκαν έγιναν σε περιοχές όπου η μεταβολές των τάσεων ήταν θετικές ή όπου ήταν οι μέγιστες ικανές ώστε να προκαλέσουν σεισμό. Εξαιρέση παρουσιάζουν ορισμένες περιπτώσεις ασαφούς αντιστοίχισης σεισμού με ρήγμα λόγω απουσίας γεωλογικών δεδομένων, όπως στην περίπτωση της ακολουθίας Batang, το 1989. Διαπιστώνεται επίσης ότι τα περισσότερα ρήγματα έχουν μεγαλύτερη περίοδο επανάληψης από την χρονική περίοδο των 100 χρόνων την οποία καλύπτει η παρούσα μελέτη, με αποτέλεσμα τα τεμάχη των ρηγμάτων που έχουν υποστεί διάρρηξη να μην έχουν την ικανότητα να προκαλέσουν στο διάστημα αυτό επόμενο σεισμό. Η αδυναμία του μοντέλου να ερμηνεύσει τη θέση κάποιων από τους σεισμούς μπορεί να αποδοθεί στην πολυπλοκότητα της περιοχής και σε διάφορους άλλους παράγοντες όπως σφάλματα στον προσδιορισμό τόσο του επικέντρου όσο και του εστιακού βάρους σε κάθε σεισμό.

6.3 Συμπεράσματα

Από την παρούσα μελέτη προκύπτει ότι η μεταφορά των τάσεων μεταξύ των ρηγμάτων είναι ο επικρατών μηχανισμός στη γένεση των σεισμών στη περιοχή Sichuan-Yunnan δεδομένου ότι η μεγάλη πλειοψηφία των σεισμών έγινε σε περιοχές με υψηλές θετικές μεταβολές της στατικής τάσης. Η μεταφορά των τάσεων εκδηλώνεται μεταξύ γειτονικών ρηγμάτων ίδιου ή διαφορετικού τύπου διάρρηξης, σε διαδοχικά τεμάχη που εντάσσονται στην ίδια ζώνη διάρρηξης, ακόμη και σε συζυγείς δομές. Τεκτονικό χαρακτηριστικό των μεγάλων ζωνών διάρρηξης αποτελεί το γεγονός ότι στη φύση απαντούν τμηματοποιημένα με ιδιαίτερες σεισμικές ιδιότητες. Η αλληλεπίδραση μεταξύ τους αποτελεί έναν αστάθμητο και αναπόφευκτο παράγοντα ο οποίος διαταράσσει την ακεραιότητα του σεισμικού κύκλου για κάθε ένα από τα ανεξάρτητα τεμάχη. Στην παρούσα διατριβή αποδεικνύεται αναμφισβήτητα η ενθάρρυνση μετέπειτα σεισμών κατά μήκος της παράταξης του ίδιου ρήγματος. Χαρακτηριστικά παραδείγματα εκδηλώνονται κατά μήκος των ζωνών διάρρηξης Xianshuihe στο βόρειο τμήμα της επαρχίας Sichuan και Lancang-Gengma στη νότια επαρχία Yunnan. Για την περίπτωση της ζώνης διάρρηξης Lancang-Gengma παρατηρείται ότι η έναρξη της σεισμικής δραστηριότητας

σηματοδοτείται με το σεισμό του 1950, με την ολίσθηση του νότιου μέρους της ζώνης. Ύστερα από 38 χρόνια δύο ισχυροί σεισμοί γίνονται βορειότερα σε γειτονικά ρήγματα. Στη συνέχεια η σεισμικότητα μεταναστεύει δυτικά σε γειτονική δομή με ίδια διεύθυνση, με τη γένεση του ισχυρού σεισμού του 1995 ο οποίος προβλέπεται από το εξελικτικό μοντέλο του πεδίου των τάσεων. Το ρήγμα Qujiang φαίνεται να επηρεάζεται από την αλληλεπίδραση των τάσεων καθώς ο σεισμός του 1913 πιθανόν να προκάλεσε τη γένεση του σεισμού του Tonghai το 1970. Αν και το μεσοδιάστημα μεταξύ των δύο ισχυρών σεισμών είναι αρκετά μεγάλο ωστόσο σύμφωνα με τους Harris et al. (1999) η επίδραση της μεταβολής των τάσεων είναι ικανή να διατηρηθεί και να διεγείρει τον επόμενο σεισμό ακόμη και για χρονικό διάστημα περισσότερο από 50 έτη. Η γένεση των σεισμών επίσης κατά ομάδες φαίνεται ότι ενισχύεται από την σεισμική μεταβολή των τάσεων όπως διακρίνεται και στο σχήμα της ακολουθίας Songpan στη ζώνη Minjiang όπως και στη περίπτωση της ακολουθίας Batang στην οποία η μη πρόβλεψη του πρώτου σεισμού οφείλεται στο γεγονός ότι συνέβη σε “τυφλό” ρήγμα το οποίο δεν ήταν δυνατό να συμπεριληφθεί στο μοντέλο. Επίσης χαρακτηριστικοί είναι οι διπλοί σεισμοί των Lancang-Gengma και Lung-Ling καθώς και η τριπλέτα του Songpan, η γένεση των οποίων περιγράφεται πλήρως από το εξελικτικό μοντέλο.

Τα αποτελέσματα της παρούσας έρευνας έρχονται σε συμφωνία με τα αποτελέσματα άλλων ερευνών όπως των Yi et al. (2000) σύμφωνα με τους οποίους το αριστερόστροφο σύστημα διάρρηξης Xianshuihe-Anninghe-Zemuhe έχει την ικανότητα της μηχανικής αλληλεπίδρασης ανάμεσα στα επιμέρους γειτονικά τεμάχια του, γεγονός το οποίο επιβεβαιώνεται και από την παρούσα έρευνα. Στους υπολογισμούς του **Σχήματος 65** διαπιστώνεται ότι το νοτιότερο τμήμα του Xianshuihe παραμένει αδιάρρηκτο, ενώ γύρω του συσσωρεύονται αυξημένες τιμές τάσεων. Για τον λόγο αυτό αναμένεται μια μελλοντική ολίσθηση στο εναπομείναν τμήμα. Τα αποτελέσματα αυτά έρχονται σε συμφωνία με τους υπολογισμούς των Wen et al. (2002) οι οποίοι προσδίδουν μια μεγάλη πιθανότητα διάρρηξης στο τμήμα Minniang. Σύμφωνα με τους Tang et al. (1993) η σεισμική δραστηριότητα στη περιοχή του Sichuan χαρακτηρίζει χρονικά δύο ενεργές περιόδους και μία περίοδο ησυχίας. Το 1893 ξεκίνησε η δεύτερη ενεργή περίοδος η οποία διακρίνεται σε τρεις επιμέρους ενεργές περιόδους με την μεσολάβηση δύο αντίστοιχων περιόδων ησυχίας με μεσοδιάστημα 12-17 ετών, 9-14 ετών. Χαρακτηριστικά αυτής της περιόδου είναι η αυξημένη σεισμική δραστηριότητα σε ισχυρούς και ενδιαμέσου μεγέθους

σεισμούς με χαρακτηριστική την μετανάστευση των epicέντρων προς μία ορισμένη κατεύθυνση. Χωρικά, παρατηρείται ότι τα epicέντρα των σεισμών με μεγέθη $M \geq 6.0$ συγκεντρώνονται σε περιοχές τομής του ρήγματος Xianshuihe με άλλες δομές στην ένωση του Xianshuihe με ένα σύστημα BBΔ ρηγμάτων με μέσο ρυθμό ολίσθησης 0.9cm/yr όπως το τέμαχος Luhuo-Daofu. Το φαινόμενο της μετανάστευσης των epicέντρων είναι εμφανές κατά μήκος της ζώνης και οι ισχυροί σεισμοί μεταναστεύουν προς ορισμένη κατεύθυνση και τόσο στα βόρεια όσο και στα νότια τεμάχη.

6.4 Results-Discussion

The application of the stress evolutionary model for the Sichuan and Yunnan provinces in Southeast China since the beginning of the 20th century is achieved within this study. In order to quantify the static stress changes, the kinematics of the major faults along with coseismic dislocations due to strong main shocks were taken into consideration. Information on the faults associated with the occurrence of the earthquakes, was adopted from local studies on field investigations and seismological data. All available data regarding the geometry and slip of the causative fault plane were thoroughly examined and therefore rupture models are defined with a considerable accuracy. The information on accumulating tectonic loading on these faults, derived from geodetic measurements, was also used as input data in the stress model. Although fault surfaces are irregular and ruptures are more complicated, slip is not uniform but varies along its segments, it is believed that the approximation models are sufficient in order for identifying areas of stress changes, when they are computed for distances far from the causative fault.

The evolution of the stress field was calculated for the time intervals 1904-2007, 1925-2007, 1913-2007 for the northern (North Sichuan province) central (South Sichuan and North Yunnan province) and southern region (South Yunnan province in the boundaries of Burma and Laos), respectively, in which the whole study area was divided. Initial values just before 1904, 1925 and 1913 events are assigned to be zero everywhere. The fact that the region has been divided into three different sub regions has no effect in the calculation of stress changes since the events are located in large distances from the borders and it has been shown that there is no important impact among the sub regions. The time advance of the shocks is less important in

distant places such as the Central area. The study area is expanded and includes complexities and minor active sub structures that could not all be included in the study. However, for a more detailed survey the results are presented separately for each one of the three sub areas. Stress transfer is confirmed to dominate in this area among adjacent faults or fault segments, or conjugate faults since in most of the cases triggering is apparent and many events are located in bright areas where static stress changes had attained relatively high positive values. It has been suggested that a subsequent event can be triggered in faults with proper orientation that are close to failure even if the stress change is only a few bars. Stress increment do not declare subsequent rupture location but correspond to segments sufficient to fail because they have reached high values of stress and bring the segment close to failure, in accordance with Coulomb Failure Criterion. However, there are cases where fault segments that slipped are found in stress shadows before reloading. This fact can be attributed to fault interaction that inhibits faults to complete an integral seismic cycle and they rupture before obtaining the maximum stress value required or to different seismic cycles existing in a small area. Misfits at the computation of the stress field are attributed to the complexity and the existence of minor faults in this multi segmented crust. The results were extrapolated for 2007 so as to determine the areas with current enhanced stress changes where it is likely for an earthquake to occur, assuming that no other strong earthquake has occurred until now. The final stress evolution patterns are illustrated and the stress changes are calculated for the strike, dip and the rake of the representative faulting type of each sub area. The model results indicate that some faults are encouraged to rupture whereas in many areas there is a fault relaxation and a quiescence seismic period follows.

Alternative values of the coefficient of the apparent friction are testified in our calculations. In particular, values of $\mu'=0.2$, $\mu'=0.4$ and $\mu'=0.6$ are used. The resulted computation of the stress evolution shows unimportant differences in the pattern of the stress field. Small sensitivity has been noticed but not to such a degree so as to alter the sign of the calculated stress change. Parsons et al. (2005) who conducted a similar test in the adjacent region of Himalaya reached the same results.

A feature that characterises long fault zones is that they are found segmented and distinct parts of faults rupture each time until they complete a seismic cycle. It is evidenced in the present study that strong earthquakes in a long fault zone

undoubtedly encourages a second event along strike. Characteristic examples are demonstrated in the case of Xianshuihe fault zone in northern Sichuan and Lancang-Gengma fault zone in southern Yunnan, where almost all the segments of the fault have ruptured in the last century. The fact that most of the earthquakes are concentrated at places where fault tips are met or where fault orientation is rotated is being confirmed since there is a high increase in stress. Coulomb stress Changes certainly influence the location and the timing of the following earthquakes and can be a fundamental tool in seismic hazard assessment since there is a correspondence between positive changes and earthquake occurrences.

Βιβλιογραφία

Allen, C., Gillespie, A., Han, Y., Sieh, K., Zhang, B. and Zhu, C., 1984. Red River and associated faults, Yunnan Province, China: Quaternary geology, slip rates and seismic hazard. *Geol., Soc. Am. Bull.* **95**, 686-700.

Allen, C., Luo, Z., Qian, H., Wen, X., Zhou, H. and Huang, W., 1991. Field Study of a Highly Active Fault Zone: The Xianshuihe Fault of Southwestern China. *Geol., Soc. Am. Bull.* **103**, 1178-1199.

Armijo, R. and Tapponier, P., 1989. Late Cainozoic right-lateral strike-slip faulting in Southern Tibet. *J. Geophys. Res.* **94**, 2787-2838.

Armijo, R., P. Tapponnier, J. L. Mercier, and T. L. Han, Quaternary extension in southern Tibet: Field observations and tectonic implications. *J. Geophys. Res.* **91**, 13,803-13,872, 1986.

Bai, D. and Meju, M., 2003. Deep structure of the Longling-Ruili fault underneath Ruili basin near the eastern Himalayan syntaxis: insights from magnetotelluric imaging. *Tectonophysics* **364**, 135-146.

Beeler, N., Simpson R., Hickman, S. and Lockner, D., 2000. Pore fluid pressure, apparent friction, and Coulomb failure. *J. Geophys. Res.* **105**, 25,533-25,542.

Burchfiel, C. and Wang, E., 2002. Northwest-trending middle Cenozoic, left-lateral faults in southern Yunnan, China, and their tectonic significance. *Journal of structural Geology* **22**, 322-456

Burchfiel, B, Zhiliang, C., Yuping, L. and Royden, L., 1995. Tectonics of the Longmenshan and adjacent Regions, central China. *Int. Geol. Rev.* **8**, 661-735.

Byerlee, J. D., 1967. Frictional characteristics of granite under high confining pressure. *J Geophys. Res.* **72**, 3639-3648.

Chen, S., Wilson, C., Deng, Q., Zhao, X. and Luo, Z., 1994. Active faulting and block movement associated with large earthquakes in the Min Shan and Longmen Mountains, northeastern Tibetan Plateau. *J. Geophys. Res.* **99**, 24 25-24038.

Chen, Z., Burchfiel, C., Liu, Y., King, R., Royden, L ., Tang, W., Wang, E., Zhao, J. and Zhang, X., 2000. Global positioning system measurements from eastern Tibet and their implications for India/Eurasia intercontinental deformation. *J. Geophys. Res.* **105**, 16.215-16.227.

Clarence R. A., Luo Z., Qian H., Wen X., Zhou H. And Huang W., 1991. *Geol., Soc. Am. Bull.* **103**, 1178-1199.

DeMets, C., Gordon, R.G., Argus, D.F. and Stein, S., 1994. Effect of recent revision to the geomagnetic reversal time scale on estimates of current plate motions, *Geophys. Res. Lett.* **21**, 2191-2194.

Deng, J. and Sykes, L., 1997. Evolution of the stress field in southern California and triggering of moderate-size earthquakes: A 200-year perspective. *J. Geophys. Res.* **102**, 9859-9886.

Department of earthquake disaster prevention, SSB (ed.), (1995), The Catalogue of Chinese Historical Strong Earthquakes (in Chinese), Beijing: Seismological Press, 1-514.

Ding, G., 1996. The research on active faults in China, *Journal of Earthquake Prediction Research* **5**, 317-325.

Engdhal, E. R., R. D. Van Der Hilst, and R. P Buland, 1998. Global Teleseismic Earthquake Relocation with Improved Travel Times and Procedures for Depth Determination, *Bull. Seismol. Soc. Am.* **88**, 722-743.

Erikson, L., 1986. User's manual for DIS3D: A three-dimensional dislocation program with applications to faulting in the Earth, Masters Thesis, Stanford Univ., Stanford, Calif., 167.

Gao W., Chen Z. and Xie X., 1995. The fundamental characteristics of active faults in China. *Quaternary International* **25**, 13-17.

Gao Y., Wu Z.-L., Liu Z., Zhou H.-L., 2000. Seismic source characteristics of nine strong earthquakes from 1988 to 1990 and earthquake activity since 1970 in the Sichuan- Qinghai-Xizang (Tibet) Zone in China. *Pure and Applied Geophysics* **157**, 1423-1443.

Han, W. and Jiang, G., 2004. Study on distribution characteristics of strong earthquakes in Sichuan-Yunnan area and their geological tectonic background. *Acta Seismologica Sinica* **17**, 230-243.

Han, Z., Guo, S., Xiang, H., Zhang, J. and Ran, Y., 2004. Seismotectonic environment of occurring the February 3, 1996 Lijiang M=7.0 earthquake, Yunnan Province. *Acta Seismologica Sinica* **17**, 453-463.

Haris, R., 1998. Introduction to special section: Stress triggers, stress shadows, and implications for seismic hazard. *J. Geophys. Res.* **103**, 24.347-24.358.

Harris, R. A. and Simpson, R. W., 1998. Suppression of large earthquakes by stress shadows: A comparison of Coulomb and rate-and-state failure, *J. Geophys. Res.* **103**, 24.439-24.451.

Harris, R. and Simpson, R., 1993. In the shadow of 1857: An evaluation of the static stress changes generated by the M8 Ft. Tejon, California, earthquake, EOS, Trans. Am. Geophys. Un. 74 (43), 427.

He, H. and Ren, J., 2003. Holocene earthquakes on the Zemuhe Fault in Southwestern China, *Annals of Geophysics* **46**, 1035-1051.

He, H.: 1992, The discussion on the seismogenic structures in the wedge area of east Yunnan, *Seismology and Geology* **14**, 55-66 (in Chinese).

Holt, W., Wallace, J., Haines, A., 1991. The active tectonics of the Eastern Himalayan Syntaxis and surrounding regions. *J. Geophys. Res.* **96**, 14595-14632.

Jones, L., Han, W., Hauksson, E., Jin, A., Zhang, Y. and Luo, Z., 1984. Focal Mechanisms and aftershock locations of the Songpan earthquakes of August 1976 in Sichuan, China. *J. Geophys. Res.* **89**, 7697-7707.

Kan, R. J., H. X. Hu, R. S. Zeng, W. D. Mooney, and T. V. McEvilly, 1986. Crustal structure of Yunnan Province, People's Republic of China, from seismic refraction profiles. *Science*, **234**, 433- 437.

Kan, R. J., S. C. Zhang, and F. T. Yan, Modern tectonic stress field in southwestern China (in Chinese), *Acta Geophys. Sinica* 20 (2), 96 - 110, 1977.

King, G., Stein, R. and Lin, J., 1994. Static stress changes and the triggering of earthquakes, *Bull. Seismol. Soc. Am.* **84**, 935-953.

Kirby, E., Whipple, K., Burchfiel, B.C., Tang, W., Berger, G., Sun, Z. and Chen, Z., 2000. Neotectonics of the Min Shan, China: implications for mechanisms driving Quaternary deformation along the eastern margin of the Tibetan Plateau, *Geol. Soc. Am. Bull.* **112**, 375-393.

Leloup, P., Lacassin, R., Tapponier P., Scharer, U., Dalai, Z., Xiaohan L., Liangshang Z., Shaocheng J. and Trinh, P., 1995. The Ailao Shan-Red River shear zone (Yunnan, China), Tertiary transform boundary of Indochina. *Tectonophysics* **251**, 3-84.

Liu, M. and Yang, Y., 2003. Extensional collapse of the Tibetan Plateau: Results of three-dimensional finite element modeling. *J. Geophys. Res.* **108**, 2631.

Liu, Y., Peng, X, Huang, Z., 1988. A deformational study after the Tonghai earthquake. *J. Geophys. Res.* **4**, 369-376.

Lu, J., Xue, S., Qian, F., Zhaoc, Y Guan, H., Mao, X., Ruan A., Yu, S., Xiao, W., Unexpected changes in resistivity monitoring for earthquakes of the Longmen Shan in Sichuan, China, with a fixed Schlumberger sounding array. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* **145**, 87–97.

Ma, X., 1987. An introduction to the lithospheric dynamics in China, introduction of dynamic map of China, *Geological Press, Beijing* (in Chinese).

Meyer, B., Tapponnier, P., Bourjot, L., Metivier, F., Gaudemer, Y., Peltzer, G., Guo, S. and Chen Z., 1998. Crustal thickening in Gansu-Qinghai, lithospheric mantle subduction and oblique, strike slip controlled growth of the Tibet plateau, *Geophys. J. Int*, **135**, 1-47.

Mian Y. and Youqing Y., 2003. Extensional collapse of the Tibetan Plateau: Results of three-dimensional finite element modeling. *J. Geophys. Res.* **108**, no B2361.

Molnar P. and Deng Q., 1984. Faulting associated with large earthquakes and the average rate of deformation in central and eastern Asia, *J. Geophys. Res.* **89** 6203-6227.

Molnar, P., and P. Tapponnier, Relation of the Tectonics of eastern China to the India-Eurasia collision: Application of slip-line field theory to largescale continental tectonics, *Geology* **5**, 212– 216, 1977.

Molnar, P., and Tapponnier, P., 1975. Cainozoic tectonics of Asia: Effects of a continental collision, *Science* **189**, 419– 426.

Nalbant, S., McCloskey, J., Steacy, S., and Barka, A., 2002. Stress accumulation and increased seismic risk in eastern Turkey. *Earth Planet. Sci. Lett.* **195**, 291-298.

Okada, Y., 1992. Internal deformation due to shear and tensile faults in a half space. *Bull. Seism. Soc. Am.* **82**, 1018-1040.

Papadimitriou, E., Wen, X., Karakostas, V. and Xueshen, J., 2004. Earthquake triggering along the Xianshuihe fault zone of western Sichuan, China. *Pure Appl. Geophys.* **161**, 1683–1707.

Papazachos, B., Scordilis, E., Panagiotopoulos, D., Papazachos, C. and Karakaisis, G., 2004. Global Relations between seismic fault parameters and moment magnitude of Earthquakes. *Bull. Geol. Soc. Greece* **XXXVI**, 1482–1489.

Parsons, T., Stein, R., Reasenber, A. 1999. Stress sensitivity of fault seismicity: A comparison between limited-offset oblique and major strike-slip faults. *J. Geophys. Res.* **104**, 20183–20202.

Parsons, T., Yeats., R. Yagi, Y., Hussain A., 2006. Static stress change from the 8 October, 2005 M=7.6 Kashmir earthquake. *Geophys. Res. Lett.* **33**, L06304, doi: 10.1029/2005GL025429.

Peltzer, G. and Saucier, F., 1996. Present-day kinematics of Asia derived from geologic fault rates. *J. Geophys. Res.* **101**, 27943–27956.

Peltzer, G. and Tapponnier, P., 1988. Formation and evolution of strike slip faults, rifts, and basins during the India-Asia collision: an experimental approach. *J. Geophys. Res.*, **93**, 15085–15117.

Qin, C., Papadimitriou, E., Papazachos, B. and Karakaisis, G., 2001. Time-dependent seismicity in China, *Journal of Asian Earth Sciences* **19**, 97–128.

Qin, C., Papazachos, C. and Papadimitriou, E., 2002. Velocity field for crustal deformation in China derived from seismic moment tensor summation of earthquakes, *Tectonophysics* **359**, 29–46.

Reasenber, A. and Simpson, R., 1992. Response of regional seismicity to the static stress change produced by the Loma Prieta earthquake, *Science* **255**, 1687–1690.

- Replumaz, A., Lacassin R., Tapponier, P., Leloup P. H., 2001. Large River offsets and Plio-Quaternary dextral slip rate on the Red River Fault (Yunnan, China). *J. Geophys. Res.* **106**, 819-836.
- Rice, J. and Cleary, M., 1976. Some basic stress diffusion solutions for fluid saturated elastic porous media with compressible constituents, *Rev Geophys.* **14**, 227-241.
- Royden, L., Burchfiel, C., King, R., Wang, E., Chen, Z., Shen, F. and Liu, Y., 1997. Surface Deformation and lower crustal flow in eastern Tibet. *Science* **276**, 788-790.
- Scholz, C. H., 2002. The mechanics of earthquakes and faulting, Cambridge University press, Cambridge, pp. 439.
- Shen, F., Royden, L. and Burchfiel, C., 2001. Large-scale crustal deformation of the Tibetan Plateau. *J. Geophys. Res.* **106**, 6793-6816.
- Shen, J., Wang, Y. and Song, F., 2003. Characteristics of the active Xiaojiang fault zone in Yunnan, China: a slip boundary for the south eastward escaping Sichuan-Yunnan Block of the Tibetan Plateau. *Journal of Asian Earth Sciences* **21**, 1085-1096.
- Socquet, A. and Pubbelier, M., 2005. Cenozoic deformation in western Yunnan (China-Myanmar border). *Journal of Asian Sciences* **24**, 495-515.
- Stein R., 1999. The role of stress transfer in earthquake occurrence. *Nature* **402**, 605-609.
- Steketee, J., 1958. On Volterra's dislocations in a semi-infinite elastic medium. *Can. J. Phys.* **36**, 192-205.
- Tang R., Huang Z., Qian H., Deng T., Jiang L., Ge P., Liu S., Cao Y. and Zhang C, 1984. On the Recent tectonic activity and earthquake of Xianshuihe fault zone. *Seismological Bureau of Sichuan Province*.

Tang, R., Wen, D., Deng, T. And Huang S, 1976. A preliminary study on the characteristics of the ground fractures during the Luhuo earthquake M=7.9, 1973 and the origin of the earthquake. *Acta Geophys. Sinica* **19**, 17-27 (in Chinese)

Tapponier, P. and Molnar, P., 1977. Active Faulting and Cenozoic tectonics of China, *J. Geophys. Res.* **82**, 2905-2930.

Tapponier, P., Peltzer, G., Le Dain, A. Y., Armijo, R. and Cobbold, P., 1982. Propagating extrusion tectonics in Asia: New insights from simple experiments with plasticine, *Geology* **10**, 611-616.

Toda, S., Stein, R., Reasenber, A., Dieterich H. and Yoshida, A., 1998. Stress transferred by the 1995 Mw=6.9 Kobe, Japan, shock: Effect on aftershocks and future earthquake probabilities. *J. Geophys. Res.*, **103**, 24.543-24.565.

Wang Y., 1996. Principal features of the active tectonics in Qinghai – Xizard plateau. *J. Earthquake Prediction Res.* **5**, 348-362.

Wang, C., Chan, W., Mooney, W., 2003. Three dimensional velocity structure of crust and upper mantle in southwestern China and its tectonic implications. *J. Geophys. Res.* **108**, 2442.

Wang, E. and Burchfiel, C., 2000. Late Cenozoic to Holocene deformation in southwestern Sichuan and adjacent Yunnan, China and its role in formation of the southeastern part of the Tibetan Plateau. *Geol. Soc.Am.* **112**, 413-423.

Wang, E., Burchfiel, C., Royden, L., Chen, L., Chen, J. and Li, W., 1998. The late Cenozoic Xianshuihe-Xiaojiang-Red River and Dali fault systems of southwestern Sichuan and central Yunnan, China. *Geol. Soc.Am. Special paper*, **327**, 108.

WEN Xue-ze. 2000. Character of rupture segmentation of the Xianshuihe-Anninghe-Zemuhe fault zone, western Sichuan. *Seismology and Geology* **22**, 239-249 (in Chinese)

Wessel, P. and Smith, W. H. F.: 1998. New, improved version of the Generic Mapping Tools Released, EOS Trans. AGU **79**, 579.

Westaway, R., 1995. Crustal volume balance during the India-Eurasia collision and altitude of the Tibetan Plateau: A working hypothesis, *J. J. Geophys. Res.* **100**, 15.173-15.192.

Wu., F. and Wang, 1988. Tectonics of western Yunnan Province, China, *Geology*, **16**, 153-157.

Xu, X., Wen, X., Zheng, R., Ma, W., Song, F. and Yu, G. (2003), Pattern of latest tectonic motion and its dynamics for active blocks in Sichuan-Yunnan region, China, *Science in China*, **33**.

Yang, Z., Waldhauser, Chen, Y., Richards P., 2005. Double difference relocation of earthquakes in central-western China, *Journal of Seismology* **9**, 241-264.

Yi, G. and Wen, X., 2000. Earthquake Recurrence on Whole Active Fault Zones and its Relation to that on Individual Fault Segments, *Acta Seismologica Sinica* **13**, 563-574.

Yi, G., Wen, X., Fan, J. and Wang, S., 2004. Assessing current faulting behaviors and seismic risk of the Anninghe-Zemuhe fault zone from seismicity parameters, *Acta Seismologica Sinica* **17**, 322-333.

Zhao, S., Chao, D., Junsheng X., 1993. Determination of current active segments at the Red River fault zone by inversion of gps baseline changes. *J. Geodynamics* **17**, 145-154.

Zheng, J., Xu, W., Liu, J. and Zou, Y., 1987. Some characteristics of the seismicity and the stress field in the Panxi rift zone, *Tectonophysics* **133**, 235-241.

Zhou H., Allen C., Kanamori, H., 1983. Rupture complexity of the 1970 Tonghai and 1973 Luhuo earthquakes, China, from P wave inversion, and relationship to surface faulting. *Bull Seism Soc Am* **73**, 1585-1597

Zhou H., Liu H. and Kanamori H., 1983. Source processes of large earthquakes along the Xianshuihe fault in Southwestern China. *Bull Seism Soc Am.* **73**, 537-551.