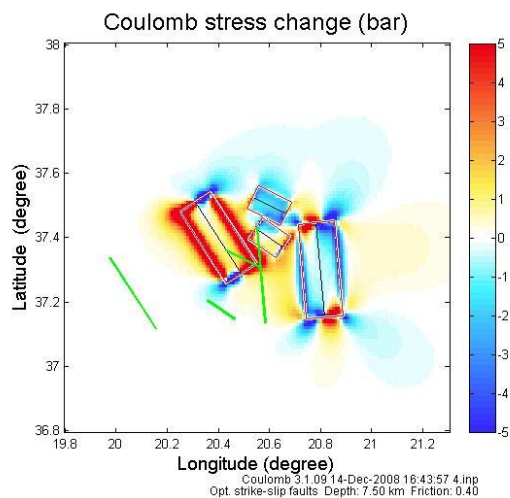




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ



**ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΕΙΣΜΟΤΕΚΤΟΝΙΚΗΣ ΤΩΝ ΙΟΝΙΩΝ ΝΗΣΩΝ ΜΕ ΤΗ
ΜΕΘΟΔΟ «ΤΑΣΕΩΝ COULOMB» ΒΑΣΙΣΜΕΝΗ ΣΕ ΔΕΔΟΜΕΝΑ
ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ GPS ΚΑΙ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΣΤΟ GOOGLE EARTH**

Επιβλέπων καθηγητής : Μιχαήλ Γ. Σακελλαρίου

Νικόλαος Α. Χριστοδούλου

ΑΘΗΝΑ, ΜΑΡΤΙΟΣ 2009

Αφιερωμένη στην οικογένειά μου.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερω τους Καθηγητές του Ε.Μ.Π. κύριο Μ. Σακελλαρίου και κύριο Δ. Παραδείση για την ευχάριστη συνεργασία, την πολύτιμη βοήθεια που μου πρόσφεραν, καθώς και για την άμεση ανταπόκρισή τους σε οποιαδήποτε απορία και πρόβλημα παρουσιάστηκε κατά τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Ευχαριστώ επίσης την Καθηγήτρια του Ε.Μ.Π. κυρία Θεοδώρα Ροντογιάννη για το ενδιαφέρον και τη βοήθειά της, καθώς και την Εύη Μαμούχα, διπλωματούχο Γεωλόγο του Ε.Κ.Π.Α. για την πολύτιμη και συνεχή βοήθεια που μου έδωσε καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας. Επίσης θέλω να ευχαριστήσω τη Μήνα Πατσαλίδου, διπλωματούχο Γεωλόγο του Α.Π.Θ., καθώς και την Υ.Δ. του Ε.Μ.Π. Αγγελική Μαρίνου για τη συνεργασία και τη βοήθεια που μου προσέφεραν. Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω τους γονείς μου για τη στήριξη που μου παρείχαν τόσα χρόνια, αλλά και την ψυχολογική βοήθεια κατά την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	3
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	9
ABSTRACT	13
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	17
2 ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΣΕΙΣΜΙΚΟΤΗΤΑ ΤΗΣ ΕΛΛΑΔΟΣ	21
2.1 ΓΕΝΙΚΑ	22
2.2 ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ ΣΤΟ ΠΑΓΚΟΣΜΙΟ ΓΕΩΤΕΚΤΟΝΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΚΑΙ ΣΤΟ ΗΠΕΙΡΩΤΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΔΙΑΡΡΗΞΗΣ.....	22
2.3 ΤΟ ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΤΟΞΟ.....	24
2.4 ΓΕΩΔΥΝΑΜΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ ΑΝΑΤΟΛΙΚΗΣ ΜΕΣΟΓΕΙΟΥ.....	26
2.5 ΓΕΩΔΥΝΑΜΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ ΕΛΛΗΝΙΚΟΥ ΧΩΡΟΥ	27
2.5.1 Γενικά	27
2.5.2 Ιόνια νησιά.....	28
2.6 ΕΝΕΡΓΟΣ ΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ ΚΑΙ ΤΙΣ ΓΥΡΩ ΠΕΡΙΟΧΕΣ	30
2.6.1 Μηχανισμοί γένεσης των σεισμών στην Ελλάδα	31
2.6.2 Κύρια ρήγματα επιφανειακών σεισμών στην Ελλάδα.....	32
2.7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	32
3 ΡΗΓΜΑΤΑ	35
3.1 ΓΕΝΙΚΑ	36
3.2 ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΡΗΓΜΑΤΩΝ	36
3.3 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΡΗΓΜΑΤΩΝ	39
3.3.1 Ταξινόμηση με βάση την τροχιά ολίσθησης	39
3.3.2 Ταξινόμηση με βάση τις δυνάμεις που δημιουργούν τα ρήγματα και ανάλογα με τα φαινόμενα που τα συνοδεύουν.....	40
3.3.3 Ταξινόμηση με βάση τη σχέση διεύθυνσης ρήγματος – διεύθυνσης στρωμάτων..	41
3.3.4 Ταξινόμηση με βάση την κλίση – Γενετική ταξινόμηση ρηγμάτων	42
3.3.5 Ταξινόμηση με βάση το μήκος ή τη σχέση των ρηγμάτων με άλλα γειτονικά... ..	42
3.3.6 Ταξινόμηση με βάση την αριθμητική τιμή της μετατόπισης	42
3.3.7 Ταξινόμηση με βάση τη σχέση κλίσης ρήγματος – κλίσεις στρωμάτων.....	43
3.4 ΡΗΓΜΑΤΑ ΓΕΝΕΤΙΚΗΣ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗΣ.....	43
3.4.1 Κανονικά ρήγματα	43
3.4.1.1 Γενικά	43
3.4.1.2 Χαρακτηριστικά και μορφές	43
3.4.2 Ανάστροφα ρήγματα	45
3.4.2.1 Γενικά	45

3.4.2.2	Χαρακτηριστικά και μορφές	45
3.4.3	Ρήγματα οριζόντιας μετατόπισης.....	47
3.4.3.1	Γενικά	47
3.4.3.2	Χαρακτηριστικά και μορφές	47
3.5	ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑ ΕΝΕΡΓΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΩΝ ΡΗΓΜΑΤΩΝ	48
3.6	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	49
4	ΟΙ ΣΕΙΣΜΟΙ.....	51
4.1	ΓΕΝΙΚΑ	52
4.2	ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΣΕΙΣΜΩΝ	52
4.2.1	Ταξινόμηση σεισμών με βάση τα αίτια που τους προκαλούν	52
4.2.2	Ταξινόμηση σεισμών με βάση το βάθος της σεισμικής εστίας	53
4.3	ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΣΕΙΣΜΩΝ.....	54
4.3.1	Εστία σεισμού	54
4.3.2	Επίκεντρο σεισμού.....	54
4.3.3	Μέγεθος σεισμού	54
4.3.3.1	Τοπικό μέγεθος	55
4.3.3.2	Επιφανειακό μέγεθος	55
4.3.3.3	Χωρικό μέγεθος	56
4.3.3.4	Μέγεθος σεισμικής ροπής	56
4.3.3.5	Μέγεθος διάρκειας σήματος	57
4.3.4	Ενέργεια σεισμού	57
4.3.5	Ένταση σεισμού	58
4.3.6	Χρόνος γένεσης σεισμού	58
4.4	ΣΕΙΣΜΙΚΑ ΚΥΜΑΤΑ	58
4.4.1	Κύματα χώρου	59
4.4.1.1	Διαμήκη κύματα (P)	60
4.4.1.2	Εγκάρσια κύματα (S)	60
4.4.2	Επιφανειακά κύματα	61
4.5	ΤΡΟΠΟΙ ΚΑΙ ΑΙΤΙΑ ΓΕΝΕΣΗΣ ΤΩΝ ΣΕΙΣΜΩΝ	62
4.5.1	Τρόποι γένεσης των επιφανειακών σεισμών	62
4.5.2	Μηχανισμός γένεσης των τεκτονικών σεισμών	63
4.5.3	Τρόποι γένεσης των πλουτώνιων σεισμών	64
4.5.4	Αίτια γένεσης των σεισμών	65
4.5.5	Η θεωρία των λιθοσφαιρικών πλακών.....	66
4.6	ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΓΕΝΕΣΗΣ ΤΩΝ ΣΕΙΣΜΩΝ	67
4.6.1	Γεωμετρικές παράμετροι του σεισμικού ρήγματος.....	67
4.6.2	Μετάθεση στην εστία σεισμού	69
4.7	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	70
5	ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΤΗΣ ΘΕΩΡΙΑΣ ΤΑΣΕΩΝ ΚΑΙ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ	73
5.1	ΓΕΝΙΚΑ	74
5.2	ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΔΥΝΑΜΗΣ	74

5.2.1	Γενικά	74
5.2.2	Δυνάμεις στα πετρώματα	75
5.3	ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΤΑΣΗΣ	75
5.3.1	Τανυστής τάσης	75
5.3.2	Κύριες τάσεις	78
5.4	ΚΥΚΛΟΣ ΤΑΣΕΩΝ ΜΟΗΡ.....	78
5.5	ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ ΣΩΜΑΤΟΣ	79
5.5.1	Κυβική παραμόρφωση	80
5.5.2	Διατμητική παραμόρφωση.....	80
5.5.3	Περιστροφή	81
5.6	ΕΛΑΣΤΙΚΕΣ ΣΤΑΘΕΡΕΣ.....	82
5.7	ΤΥΠΟΙ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΗΝ ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΗ ΤΟΥΣ ΘΕΩΡΗΣΗ.....	83
5.8	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	84
6	ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ COULOMB 3.1	85
6.1	ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ COULOMB 3.1	86
6.1.1	Η λογική και η φιλοσοφία του προγράμματος	86
6.1.2	Απαιτήσεις του προγράμματος σε hardware και λογισμικό.....	87
6.1.3	Επιπλέον χαρακτηριστικά που προτείνονται	87
6.1.4	Νέες δυνατότητες του Coulomb 3.1.....	87
6.2	ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ COULOMB 3.1	90
6.2.1	Εκκίνηση του Coulomb	90
6.2.2	Περιγραφή των menu	91
6.3	ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΚΑΙ ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ.....	93
6.3.1	Η κρίσιμη έννοια των ρηγμάτων – πηγών και των ρηγμάτων – αποδέκτες	93
6.3.2	Διαδικασία υπολογισμών	94
6.3.3	Αλλαγή παραμέτρων στα αρχεία εισόδου	95
6.3.4	Αποθήκευση, εκτύπωση και επεξεργασία γραφήματος.....	95
6.3.5	Συντεταγμένες, μονάδες και συμβάσεις συμβολισμού	95
6.4	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	97
7	ΤΟ ΓΕΩΔΑΙΤΙΚΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΤΟΥ ΕΠΙΠΕΔΟΥ COULOMB ΚΑΙ ΤΟΥ ΕΛΛΙΨΟΕΙΔΟΥΣ GOOGLE EARTH	99
7.1	ΓΕΝΙΚΑ	100
7.2	ΑΣΥΜΒΑΤΟΤΗΤΑ COULOMB ΚΑΙ GOOGLE EARTH	100
7.3	ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΚΑΜΠΥΛΟΤΗΤΑΣ	100
7.4	ΕΝΔΕΙΚΤΙΚΟ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ.....	103
7.5	ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΗΣ ΚΑΜΠΥΛΟΤΗΤΑΣ ΜΕ ΤΗΝ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ GOOGLE EARTH	103
7.6	ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΕΚΤΑΣΗΣ ΣΤΗΝ ΟΠΟΙΑ ΤΟ ΕΛΛΙΨΟΕΙΔΕΣ ΤΑΥΤΙΖΕΤΑΙ ΜΕ ΤΟ ΕΠΙΠΕΔΟ	104
7.7	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	105

8	ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ – ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΑΣΕΩΝ COULOMB ΚΑΙ ΟΡΙΖΟΝΤΙΩΝ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΕΩΝ..	107
8.1	ΓΕΝΙΚΑ	108
8.2	ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΠΟΥ ΑΚΟΛΟΥΘΗΘΗΚΕ	108
8.2.1	Υπολογισμός τάσεων Coulomb και οριζόντιων μετατοπίσεων και απεικόνισή τους στο Google earth	108
8.2.2	Κριτήριο αστοχίας Coulomb	110
8.3	ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	111
8.3.1	Λευκάδα.....	111
8.3.1.1	Ενεργά ρήγματα	111
8.3.1.2	Το ρήγμα του Αγίου Νικήτα – Αθανίου.....	116
8.3.2	Ζάκυνθος.....	122
8.3.3	Κεφαλονιά.....	127
8.4	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	143
9	ΓΕΝΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΓΙΑ ΤΟ ΠΑΓΚΟΣΜΙΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ (GPS)	145
9.1	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ GPS.....	146
9.2	ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΑ ΓΕΩΔΑΙΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΝΑΦΟΡΑΣ ΚΑΙ ΕΠΙΠΛΕΟΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	147
9.3	ΕΙΔΙΚΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ.....	148
9.4	ΣΦΑΛΜΑΤΑ.....	149
9.5	ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ GPS ΚΑΙ ΤΟ ΔΥΤΙΚΟ ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΤΟΞΟ	150
9.6	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	152
10	ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΙΟΝΙΩΝ ΝΗΣΩΝ ΜΕ ΔΕΔΟΜΕΝΑ GPS ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΠΡΟΗΓΟΥΜΕΝΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	153
10.1	ΓΕΝΙΚΑ	154
10.2	ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ GPS.....	154
10.3	ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΣ ΚΑΙ ΠΙΝΑΚΕΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	155
10.4	ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΕΩΝ, ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	164
10.4.1	Προσδιορισμός της παραμόρφωσης μιας περιοχής με χρήση γεωδαιτικών μετρήσεων GPS – Τανυστής παραμόρφωσης	165
10.4.2	Το λογισμικό υπολογισμού των τανυστών παραμόρφωσης	165
10.4.3	Παρουσίαση των αποτελεσμάτων	166
10.4.3.1	Ιόνια νησιά	168
10.4.3.2	Λευκάδα- Κεφαλονιά - Ζάκυνθος	169
10.4.3.3	Νότια Κεφαλονιά	172
10.4.3.4	Βόρεια Κεφαλονιά.....	173
10.4.3.5	Βόρεια Κεφαλονιά – Ιθάκη – Νότια Λευκάδα.....	174
10.4.3.6	Ζάκυνθος – Νότια Κεφαλονιά	175
10.4.3.7	Ζάκυνθος – Κεφαλονιά	176
10.4.3.8	Ζάκυνθος – Στροφάδες	177
10.4.3.9	Σταθμοί Vasi – Atko – Sara – Exog – Mess	178
10.4.4	Συμπεράσματα.....	180

10.4.5 Σύγκριση αποτελεσμάτων με αντίστοιχα από προηγούμενη εργασία.....	186
10.5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	188
11 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	189
11.1 ΓΕΝΙΚΑ	190
11.2 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	191
11.3 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....	193
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	195
ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	196
Διπλωματικές εργασίες	196
ΞΕΝΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	196
ΠΗΓΕΣ ΣΤΟ ΔΙΑΔΙΚΤΥΟ	197
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	199

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της διπλωματικής εργασίας, όπως φανερώνει και ο τίτλος της είναι η διερεύνηση της σεισμοτεκτονικής των Ιονίων νήσων με τη μέθοδο «τάσεων Coulomb» και η απεικόνιση των αποτελεσμάτων (τάσεων Coulomb και οριζόντιων μετατοπίσεων) στο Google earth. Το δεύτερο μέρος περιλαμβάνει υπολογισμό των παραμορφώσεων (εφελκυσμός και θλίψη) που προκύπτουν από μετρήσεις GPS και σύγκρισή τους με τις αντίστοιχες που προκύπτουν από προηγούμενη μεταπτυχιακή εργασία. Στο τμήμα αυτό θα γίνει μια αναφορά στα έντεκα κεφάλαια που απαρτίζουν την εργασία αυτή για να αναφερθεί το τι ακολουθεί. Μετά το πέρας των κεφαλαίων ακολουθεί η βιβλιογραφία.

Στο πρώτο κεφάλαιο της διπλωματικής εργασίας γίνεται μια προσπάθεια να αναλυθεί ο σκοπός της εργασίας αυτής, η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε, καθώς και τα αποτελέσματα εξάχθηκαν. Ο αναγνώστης επηρεάζεται εν πρώτοις για το τι πρόκειται να αναλυθεί.

Στη συνέχεια και συγκεκριμένα στο δεύτερο κεφάλαιο αναλύονται τα σεισμοτεκτονικά χαρακτηριστικά της Ελλάδας με τη γεωλογική ανάπτυξη της στο γεωτεκτονικό σύστημα αλλά και στο παγκόσμιο ηπειρωτικό σύστημα διάρρηξης. Αναφέρονται η γεωλογική ανάπτυξη της Ανατολικής Μεσογείου, όπως και της Ελλάδας. Η Ελλάδα είναι μια ιδιαίτερα σεισμογενής χώρα και αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι βρίσκεται στο όριο της Ευρασιατικής και της Αφρικανικής πλάκας.

Στο επόμενο κεφάλαιο που ακολουθεί αναφέρονται οι βασικές θεωρητικές έννοιες των ρηγμάτων, η ταξινόμησή τους με διάφορα κριτήρια, τα χαρακτηριστικά ορισμένων εξ' αυτών, καθώς και η πιθανότητα ενεργοποίησής τους. Η θεωρία των ρηγμάτων δε θα μπορούσε να απουσιάζει από μια εργασία που έχει ως θέμα τη σεισμοτεκτονική.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι απαραίτητες προς κατανόηση έννοιες για τους σεισμούς, λαμβάνοντας υπόψη ότι είναι χρήσιμες για την περαιτέρω επεξεργασία στο θέμα των σεισμικών διαρρήξεων. Γίνεται μια ταξινόμηση με βάση τα αίτια που τους προκαλούν αλλά και με το βάθος της διάρρηξης και στη συνέχεια παρουσιάζονται τα βασικά στοιχεία και μεγέθη και τέλος αναλύονται τα σεισμικά κύματα, οι τρόποι γένεσης των σεισμών και οι παράμετροί τους.

Στο επόμενο κεφάλαιο αναπτύσσονται οι βασικές έννοιες από τη θεωρία τάσεων και παραμορφώσεων, όπως και μερικά στοιχεία για τους ταυιστές παραμόρφωσης, οι οποίοι χρειάζονται στο δεύτερο μέρος της εργασίας. Γίνεται επίσης αναφορά στις ελαστικές σταθερές, καθώς και στον κύκλο τάσεων Mohr.

Στο έκτο κεφάλαιο αναφέρεται το θεωρητικό υπόβαθρο του προγράμματος Coulomb, το οποίο πρέπει να είναι γνωστό για να γίνει εύκολα και κατανοητά η διαδικασία υπολογισμού των τάσεων και των μετατοπίσεων, μέσω του προγράμματος αυτού. Αρχικά

δίνονται τα κύρια χαρακτηριστικά του, οι απαιτήσεις που χρειάζεται για να λειτουργήσει τόσο σε λογισμικό, όσο και σε hardware, καθώς επίσης και οι νέες δυνατότητές του σε σχέση με τις προηγούμενες εκδόσεις. Στη συνέχεια γίνεται περιγραφή για τη χρήση του, την περιγραφή των menu, καθώς και τις διαστάσεις του και τις μονάδες μέτρησης που έχει το κάθε μέγεθος που εισάγεται στο πρόγραμμα. Γενικά αναλύονται όλα τα απαραίτητα εργαλεία τα οποία χρησιμοποιούνται για τη διαδικασία υπολογισμού τάσεων και οριζόντιων μετατοπίσεων.

Όπως αναφέρεται στις διαστάσεις του Coulomb στο έκτο κεφάλαιο, οι μετρήσεις συντεταγμένων πραγματοποιούνται στο επίπεδο σύστημα συντεταγμένων. Το Google earth αντίστοιχα, στο οποίο απεικονίζονται οι τάσεις και οι μετατοπίσεις είναι ελλειψοειδές και χρησιμοποιεί τις γεωγραφικές συντεταγμένες. Σκοπός του έβδομου κεφαλαίου είναι να αναλύσει το πρόβλημα που δημιουργείται από την απεικόνιση αυτή, αλλά και να αναφέρει τη διαδικασία που ακολουθήθηκε ούτως ώστε να απαλειφθεί το πρόβλημα.

Το όγδοο κεφάλαιο αποσκοπεί στην παρουσίαση τάσεων και μετατοπίσεων, τόσο όπως προέκυψαν στο Coulomb, όσο και την απεικόνισή τους στο Google earth. Τα Ιόνια νησιά χωρίστηκαν σε Λευκάδα, Ζάκυνθο και Κεφαλονιά, ανάλογα με τις γεωγραφικές συντεταγμένες των διαρρήξεων των ρηγμάτων. Για κάθε μία ομάδα ρηγμάτων παρουσιάζονται κατ' αρχήν τα δεδομένα των διαρρήξεων και εν συνεχεία οι τάσεις και οι μετατοπίσεις μετά από κάθε σεισμική διάρρηξη, οι οποίες απεικονίζουν τις περιοχές γύρω από τα ρήγματα, όπου οι τάσεις αυξάνονται και τις περιοχές που εκτονώνονται οι τάσεις αυτές.

Στο ένατο κεφάλαιο δίνονται οι βασικές έννοιες για το παγκόσμιο σύστημα εντοπισμού θέσης GPS, όσον αφορά τα χαρακτηριστικά του, τα δορυφορικά γεωδαιτικά συστήματα αναφοράς, καθώς και για τις ειδικές τεχνικές που έχουν αναπτυχθεί τα τελευταία χρόνια και τα σφάλματα που υπεισέρχονται από τις διαδικασίες μέτρησης με το σύστημα αυτό. Τέλος γίνεται αναφορά στις μετρήσεις που έλαβαν χώρα στο Δυτικό Ελληνικό τόξο (Ιόνια νησιά) με το σύστημα αυτό. Οι μετρήσεις αυτές χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό των μετατοπίσεων (εφελκυσμός και θλίψη) για να γίνει σύγκριση με τις αντίστοιχες από προηγούμενη εργασία και να επιβεβαιωθούν τα αποτελέσματα.

Στο επόμενο κεφάλαιο παρουσιάζεται ολόκληρη η διαδικασία που απαιτείται για τον υπολογισμό των τανυστών παραμόρφωσης. Δίνονται οι πίνακες δεδομένων, οι απαραίτητες μετατροπές συντεταγμένων καθώς και τα τελικά αποτελέσματα. Τέλος γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων αυτών με προηγούμενα και ακολουθούν συμπεράσματα.

Στο τελευταίο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την εκπόνηση της εργασίας αυτής.

ABSTRACT

The purpose of this degree thesis is, according to its title, to explore the structure of the Ionian islands according to the method of “Coulomb stresses” and presents its findings (coulomb tendencies and horizontal displacements) at Google earth. The second part includes calculations of deformations (tensor notation and compression) that occurred in GPS measurements; then compare them with respective calculations that occurred in another post – graduated thesis. In addition, this part briefly refers to the content of each of the eleven chapters. Finally bibliography will follow.

The first chapter presents an effort of analyzing the aspirations of this work, the methodology, as well as which results were exported. The reader gets a first impression of the analysis that will follow in the next chapters.

The second chapter analyzes the seism tectonic characteristics of Greece with its geological growth in the geotectonic system as well as in the global continental rupture system. Reference is made to the geological growth of Eastern Mediterranean, and particularly Greece. Greece is a predominantly seismic country due to the fact that is located between Evrasiatiki and African plate.

In the next chapter, the basic theoretical significances of faults are reported; their classification with various criteria, some of their characteristics, as well as their probability of activation. The theory of faults could not be missing in a work that has seism tectonic as its dominant subject.

The fourth chapter presents essential definitions to comprehend the earthquakes, taking into consideration that they are helpful in analyzing further the subject of seismic ruptures. A classification is attempted, based on the reasons that cause them as well as based on the depth of rupture; following that, basic elements and sizes are presents. Finally, an analysis of the seismic waves, the ways an earthquake is originated and their parameters occurs.

The next chapter raises the basic terminology of the theory of tendencies and deformations, as well as certain elements for deformations tensors that will be useful need in the second part. Reference is also made in the flexible deformation, as well as the Mohr circle of tendencies.

In the sixth chapter, the theoretical background of Coulomb program is presented in order to support comprehension of the process of calculating stresses and displacements, via this program. Initially a presentation is made of its main characteristics and requirements for its function, not only as software, but in hardware as well. Its new possibilities in combination with the previous publications are also explored. Following that, a description for the program use, description menu, its dimensions and units of

measurement for each data that will be imported in the program. Overall, all essential tools that are used for the process of calculating the tendencies and horizontal displacements are analyzed here.

Hence, as explained in Coulomb's dimensions in the sixth chapter, the measurements of coordinates are accomplished in the flat – level system of coordinates. Respectively Google Earth, that portrays the stresses and the displacements, it is ellipsoid and it uses the geographic coordinates. Seventh chapter aims to analyze the problem that is created by this depiction, and moreover report the path that was followed in order to resolve this problem.

The eighth chapter aims in the presentation of Coulomb stresses and horizontal displacements; so much as they resulted in Coulomb program, as their depiction in Google Earth. The Ionian Islands were separated in Lefkada, Zakynthos and Kefalonia, depending on the geographic coordinates of ruptures of faults. For every team of faults they are presented at beginning the data of ruptures and on continue Coulomb stresses and horizontal displacements after each seismic rupture, what they portray the regions round the faults, where the stresses increase also the regions where are defused this stresses.

The basic significances for the Global Positioning System are presented in the ninth chapter, with special regard to its characteristics, the satellite geodetic systems, as well as on the special techniques that have been developed lately and the errors that occur from the procedures of measuring with this system. Finally, a reference of the measurements that took place in the West Hellenic Arc (Ionian Islands), by using GPS. Such measurements were used to calculate the deformations (tensor notation and compression) in order to compare them with respective calculations in another post – graduated thesis.

The following chapter presents the whole procedure that is required in order to calculate deformations tensors. Data tables are given, as well as the essential transformations of coordinates. Hence the final outcomes are provided with those that occurred from a previous thesis. This comparison thus demonstrates useful conclusions.

To conclude, the last chapter demonstrates the conclusions that arise from the development of this thesis degree.

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το πρώτο κεφάλαιο της εργασίας αυτής περιλαμβάνει την εισαγωγή όπου παρουσιάζεται ο γενικότερος προβληματισμός που οδήγησε στην εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, καθώς και οι βασικοί στόχοι που τέθηκαν προς υλοποίηση.

Σκοπός της διπλωματικής εργασίας αυτής είναι η διερεύνηση της τεκτονικής των Ιονίων νήσων με τη μέθοδο «τάσεων Coulomb» και στη συνέχεια ο υπολογισμός των μετατοπίσεων (παραμορφώσεων) της ίδιας περιοχής βασισμένη σε δεδομένα GPS. Τα αποτελέσματα συγκρίνονται με αντίστοιχα από προηγούμενη εργασία.

Στο πρώτο μέρος της εργασίας μέσω του λογισμικού Coulomb υπολογίζονται οι τάσεις Coulomb και οι οριζόντιες μετατοπίσεις έτσι ώστε να διερευνηθεί κατά πόσο η διάρρηξη ενός ρήγματος μπορεί να ενεργοποιήσει ή να εμποδίσει τη διάρρηξη ενός γειτονικού ρήγματος και εν συνεχεία προβάλλονται στο Google Earth. Στο δεύτερο μέρος υπολογίζονται οι παραμορφώσεις (εφελκυσμός και θλίψη) για τα Ιόνια νησιά από δεδομένα GPS, γίνεται σύγκριση με αντίστοιχα από προηγούμενη εργασία και λαμβάνοντας υπόψη όλα όσα υπολογίζονται, εξάγονται συμπεράσματα.

Η περιοχή των Ιονίων νήσων είναι μια ιδιαίτερα σεισμογενής περιοχή και παρουσιάζει έντονο σεισμογενές παρελθόν. Το σεισμικό, τεκτονικό και γεωλογικό υπόβαθρο της περιοχής αυτής είναι γνωστό.

Η μεθοδολογία που αναπτύσσεται στην παρούσα εργασία βασίζεται στην περιγραφή του τρόπου αλληλεπίδρασης των τεκτονικών ρηγμάτων (stress triggering), μέσω της μεταβολής των τάσεων Coulomb, η αύξηση των οποίων ενδεχομένως να αποτελέσει το κίνητρο για την επόμενη σεισμική διάρρηξη ενός ρήγματος.

Για να εξεταστεί πιο διεξοδικά η παραπάνω θεωρία, θα πρέπει κατ' αρχήν να δοθεί ο ορισμός του σεισμού, ο οποίος κάθε φορά που γεννιέται οδηγεί στη διάρρηξη ενός ή περισσότερων ρηγμάτων.

Σεισμός είναι η εδαφική δόνηση που γεννιέται κατά τις μηχανικές διαταράξεις των γήινων πετρωμάτων από φυσικά αίτια τα οποία βρίσκονται στο εσωτερικό της Γης.

Σύμφωνα λοιπόν με τα παραπάνω, όταν γίνει ένας σεισμός, ένα μέρος της τάσης που έχει συγκεντρωθεί λόγω της κίνησης των λιθοσφαιρικών πλακών, απελευθερώνεται. Συνήθως ως αποτέλεσμα του σεισμού είναι η πτώση τάσης του συγκεκριμένου ρήγματος στο οποίο γίνεται η διάρρηξη, ενώ παρατηρείται επίσης και αύξηση τάσης σε περιοχές γειτονικές του ρήγματος. Φυσικό επακόλουθο είναι ότι, στις περιοχές που υπάρχει αύξηση τάσης θα υπάρχει αυξημένη σεισμικότητα ενώ στις περιοχές που υπάρχει μείωση τάσης η σεισμικότητα θα είναι περιορισμένη.

Η μεθοδολογία που πρόκειται να ακολουθηθεί, περιλαμβάνει ως βασικό στοιχείο την συνάρτηση Coulomb, CFF, γνωστή ως κριτήριο αστοχίας Coulomb. Στην παρούσα διπλωματική εργασία προσδιορίζονται οι μεταβολές της συνάρτησης αυτής, ΔCFF με τις παραδοχές ότι τα ρήγματα αποτελούν ασυνέχειες σε έναν ελαστικό και ισότροπο χώρο, αφού δεν είναι δυνατό να προσδιοριστούν οι πραγματικές μεταβολές των τάσεων που πραγματοποιούνται στη Γη.

Για τον προσδιορισμό των μεταβολών των τάσεων Coulomb είναι διαθέσιμο το Coulomb 3.1, κατάλληλο λογισμικό για το σκοπό αυτό. Συγκεκριμένα με το λογισμικό αυτό, προσδιορίζονται οι τιμές της μεταβολής της τάσης Coulomb στους κόμβους ενός τρισδιάστατου κανάβου, ο οποίος θεωρείται ότι περιλαμβάνει μια γεωγραφική περιοχή γύρω από την εστία ενός σεισμού και εν συνεχεία χαρτογραφούνται οι τιμές αυτές στις αντίστοιχες γεωγραφικές συντεταγμένες του αντίστοιχου κόμβου. Η μέθοδος υπολογισμού των τάσεων αναφέρεται αναλυτικά σε επόμενο κεφάλαιο.

Η περιοχή των Ιονίων νήσων θεωρείται μια περιοχή με μεγάλη σεισμοτεκτονική δραστηριότητα και αυτός είναι ένας από τους κυριότερους λόγους που αποφασίστηκε να διερευνηθεί στη διπλωματική εργασία αυτή.

Στη συνέχεια όλες οι προσδιορισμένες μεταβολές τάσης Coulomb, καθώς και οι οριζόντιες μετατοπίσεις, απεικονίζονται στο Google earth. Δημιουργούνται τα αρχεία .kml που απεικονίζουν τις τάσεις Coulomb και τις οριζόντιες μετατοπίσεις στο Google earth. Το δεύτερο μέρος περιλαμβάνει τον υπολογισμό παραμορφώσεων μέσω των δεδομένων GPS και τελικώς γίνεται σύγκριση των μετατοπίσεων αυτών με αντίστοιχους υπολογισμούς από άλλη εργασία. Εξάγονται συμπεράσματα για τη σεισμοτεκτονική της περιοχής και στην περίπτωση που υπάρχουν διαφορές θα πρέπει να ερμηνευθούν. Η μεθοδολογία, καθώς και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται αναλυτικά στα παρακάτω κεφάλαια.

Ο γενικότερος προβληματισμός του τρόπου αλληλεπίδρασης των τεκτονικών ρηγμάτων έχει τη βάση του στο χώρο της σεισμολογίας. Στην εργασία αυτή γίνεται μια προσπάθεια να γίνει σωστή αντιμετώπιση του φαινομένου της διάρρηξης ενός υλικού σώματος. Επιπλέον δίνεται η ευκαιρία για συνεργασία μεταξύ της Γεωλογίας – Σεισμολογίας και Γεωδαισίας για τη μελέτη και σύγκριση παραμορφώσεων και οριζόντιων μετατοπίσεων που συμβαίνουν σε μια περιοχή με έντονη σεισμική δραστηριότητα.

2 ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΣΕΙΣΜΙΚΟΤΗΤΑ ΤΗΣ ΕΛΛΑΔΟΣ

2.1 Γενικά

Η λιθόσφαιρα της Γης αποτελείται από μεγάλες λιθοσφαιρικές πλάκες, οι σχετικές κινήσεις των οποίων ρυθμίζουν τα τεκτονικά φαινόμενα, τόσο σε τοπική, όσο και σε παγκόσμια κλίμακα. Κατά το γεωλογικό παρελθόν οι κινήσεις των πλακών αυτών, ήταν υπεύθυνες για τη δημιουργία των οροσειρών του πλανήτη. Ορισμένες από τις λιθοσφαιρικές πλάκες είναι δομημένες από ηπειρωτικό φλοιό και ονομάζονται **ηπειρωτικές πλάκες** ενώ αντίστοιχα κάποιες άλλες είναι δομημένες από ωκεάνιο φλοιό και ονομάζονται **ωκεάνιες πλάκες**. Η γεωδυναμική συμπεριφορά των δύο, διαφέρει.

Η σύγκρουση των λιθοσφαιρικών πλακών, καθώς και όλα τα τεκτονικά φαινόμενα που συνοδεύουν τη σύγκρουση των πλακών, έχουν σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία ορογενετικών λωρίδων στα όρια των ηπειρωτικών λιθοσφαιρικών πλακών.



Εικόνα 2-1: Απεικόνιση λιθοσφαιρικών πλακών (<http://biologion.blogspot.com>)

2.2 Γεωλογική εξέλιξη της Ελλάδας στο παγκόσμιο γεωτεκτονικό σύστημα και στο Ηπειρωτικό σύστημα διάρρηξης

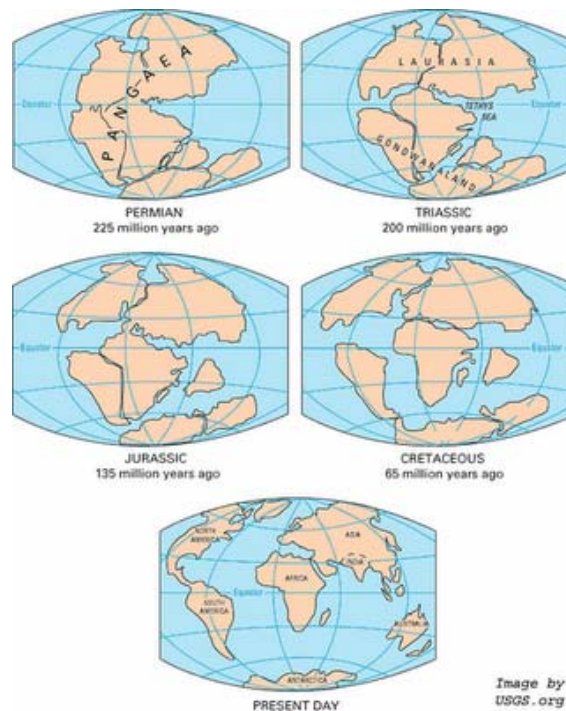
Η σημερινή γεωτεκτονική θέση της Ελλάδας στο χώρο του ορίου σύγκρουσης των λιθοσφαιρικών πλακών της Ευρώπης και της Αφρικής με τη διαμόρφωση του Ελληνικού τόξου, δίνει αδιαμφισβήτητα μια ιδιαίτερη βαρύτητα στη γεωτεκτονική εξέλιξη της Ελλάδας κατά τη διάρκεια της γεωλογικής ιστορίας της. Η διαμόρφωση αυτής της εξέλιξης είναι αποτέλεσμα πολλών τεκτοορογενετικών διεργασιών.

Η σημερινή γεωτεκτονική θέση της Ελλάδας στο χώρο σύγκρουσης των δύο πλακών μπορεί να θεωρηθεί ανάλογη με την αντίστοιχη γεωτεκτονική θέση που κατείχε και στο γεωλογικό παρελθόν. Κατά το γεωλογικό παρελθόν στον ευρύτερο χώρο λάμβαναν χώρα οι τεκτονικές διεργασίες, στα όρια των λιθοσφαιρικών πλακών της Λαυρασίας και της

Γκοντβάνας. Ο χώρος αυτός καλυπτόταν από τη μεγάλη ωκεάνια θάλασσα της Τηθύος. Ο ωκεανός αυτός δημιουργήθηκε από το σχίσμο μιας μεγάλης ηπείρου, της Παγγαίας. Η ωκεάνια αυτή περιοχή, της Τηθύος, έπαιξε το μεγαλύτερο ρόλο στη γεωλογική διαμόρφωση των κυριότερων ορεινών μαζών που ξεχωρίζουν σήμερα σε μεγάλο μέρος της Γης και στις οποίες ανήκει και η Ελλάδα.

Οι σχετικές κινήσεις των πλακών προκαλούν τη συμπίεση του Αιγαίου, καθώς η πλάκα της Τουρκίας, η οποία είναι μέρος της Ευρασιατικής πλάκας, ωθούμενη από την Αραβική πλάκα ασκεί θλίψη στο Αιγαίο. Αυτό το καθεστώς των τάσεων προκαλεί την αύξηση του μήκους του Αιγαίου στη διεύθυνση από ΒΑ προς ΝΔ. Η βύθιση της Αφρικανικής πλάκας είναι η αιτία της δημιουργίας της Ελληνικής τάφρου στα όρια των Ιονίων νήσων, της Πελοποννήσου και της Κρήτης, καθώς επίσης και του ηφαιστειακού τόξου του Αιγαίου. Η Ελληνική τάφρος αποτελεί το μέτωπο συγκρούσεως της Αφρικανικής με την Ευρασιατική πλάκα.

Η σύγκρουση των τεκτονικών πλακών Ευρώπης και Αφρικής προκαλεί και την έντονη πτύχωση της Ελλάδας από δύση προς ανατολή, καθώς και την ορογένεση των Άλπεων στις οποίες ανήκει και η οροσειρά της Πίνδου.



Εικόνα 2-2: Τα στάδια ανάπτυξης της Παγγαίας μέσα στο χρόνο και η σημερινή της μορφή (www.oasp.gr)

Εκτός από τη θέση της Ελλάδας στο παγκόσμιο γεωτεκτονικό σύστημα θα πρέπει να αναφερθεί και η θέση της στο ηπειρωτικό σύστημα διάρρηξης.

Τα σημαντικότερα γεωδυναμικά φαινόμενα που παρατηρούνται σήμερα είναι αποτέλεσμα της ενεργού τεκτονικής δράσης που λαμβάνουν χώρα σε ορισμένες ζώνες της Γης. Οι ζώνες αυτές χωρίζονται σε δύο συστήματα διάρρηξης :

- **Το Ηπειρωτικό σύστημα διάρρηξης** : Αποτελείται από την Ευρασιατική – Μελανησιακή ζώνη διάρρηξης (Γιβραλτάρ, Άλπεις, Βαλκάνια, Ιράν, Ιμαλαία, Βιρμανία, Ινδονησία) και την Περιπειρηνική ζώνη διάρρηξης, η οποία αποτελείται από τις περιπειρηνικές παράκτιες περιοχές της Βόρειας Αμερικής. Στο σύστημα αυτό βρίσκονται όλες οι νέες οροσειρές, τα νησιώτικα τόξα, τα ανδεσίτικα ηφαίστεια, οι εστίες των σεισμών βάθους $h > 300$ km και οι περισσότερες εστίες όλων των επιφανειακών σεισμών. Οι λιθοσφαιρικές πλάκες συγκλίνουν και ο φλοιός της Γης καταστρέφεται.
- **Το σύστημα των μεσοωκεάνιων ράχων** : Οι μεσοωκεάνιες ράχες είναι ανυψώσεις του ωκεάνιου φλοιού οι οποίες διατρέχουν τον Ατλαντικό ωκεανό από Βορρά προς Νότο και διασχίζουν τον Ινδικό και τον Ειρηνικό ωκεανό. Σε μερικές θέσεις τα ύψη των ανυψώσεων αυτών ξεπερνούν τα 3000 m. Το σύστημα αυτό διασχίζει και ηπειρωτικές περιοχές, όπως η ανατολική Αφρική και η Βορειοδυτική Αμερική. Στο σύστημα αυτό συμβαίνουν μόνο επιφανειακοί σεισμοί και πραγματοποιείται απόκλιση των λιθοσφαιρικών πλακών και γένεση νέου φλοιού της Γης.

2.3 Το Ελληνικό τόξο

Το Ελληνικό τόξο είναι ένα σεισμικά, τεκτονικά και ηφαιστειακά ενεργό τόξο. Η τεκτονική δραστηριότητα συνδέεται άμεσα με το σύγχρονο γεωτεκτονικό καθεστώς των λιθοσφαιρικών πλακών του ευρύτερου Ελλαδικού χώρου και συγκεκριμένα της Ευρασιατικής και της Αφρικανικής πλάκας.

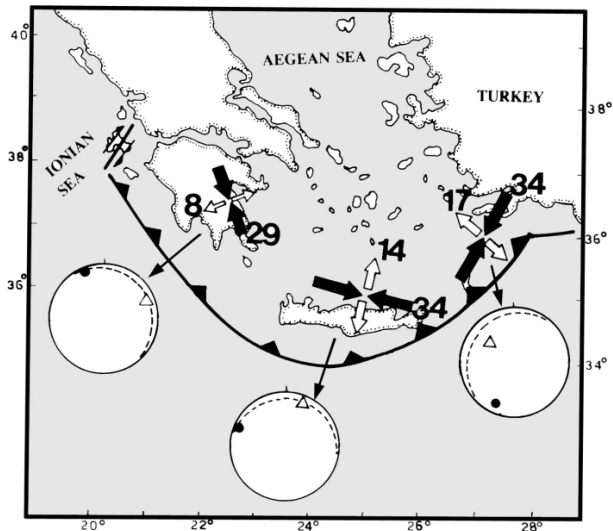
Βασικό γνώρισμα, λοιπόν, του Ελληνικού χώρου είναι το **Ελληνικό τόξο**. Το Ελληνικό τόξο ή το τόξο του Αιγαίου αποτελεί το όριο επαφής της Ευρασιατικής λιθοσφαιρικής πλάκας, τμήμα της οποίας είναι το Αιγαίο, και της Αφρικανικής πλάκας, τμήμα της οποίας είναι η λιθόσφαιρα της Ανατολικής Μεσογείου. Οι δύο αυτές πλάκες συγκλίνουν μεταξύ τους περίπου 2.5 cm/year, με συνέπεια τη βύθιση της ωκεάνιας πλάκας της Ανατολικής Μεσογείου – λόγω μεγαλύτερης πυκνότητας – κάτω από την ηπειρωτική πλάκα του Αιγαίου. Το τόξο που δημιουργείται αποτελείται από :

- ✓ Την **Ελληνική τάφρο**, η οποία δημιουργείται κατά μήκος της επαφής των δύο πλακών. Στην πραγματικότητα πρόκειται για ένα σύστημα τάφρων, μια σειρά από βαθιές λεκάνες, οι οποίες εκτείνονται από τη Ρόδο έως την Κεφαλονιά. Το μέγιστο βάθος εντοπίστηκε νοτιοδυτικά της Πελοποννήσου στο Ιόνιο πέλαγος με βάθος περίπου 4.500 m. Αυτό είναι και το βαθύτερο σημείο της Μεσογείου.

- ✓ Το **νησιώτικο τόξο**, το οποίο αποτελείται από μια σειρά διαδοχικών νησιών, όπως η Ρόδος, η Κρήτη, τα Κύθηρα και από την Πελοπόννησο. Το τόξο αυτό δημιουργείται από την παραμόρφωση και την ανύψωση πετρωμάτων του περιθωρίου της Ευρασιατικής πλάκας.
- ✓ Η **οπισθοτάφρος**, η οποία είναι μια θαλάσσια λεκάνη μικρότερου όμως βάθους από την τάφρο. Το μέγιστο βάθος της φτάνει τα 2000 m. Η λεκάνη αυτή βρίσκεται μπροστά από το νησιωτικό τόξο και πάνω στην Ευρασιατική πλάκα.
- ✓ Το **ηφαιστειακό τόξο**, το οποίο αποτελείται από διαδοχικά ηφαίστεια (Σουσάκι, Μέθανα, Σαντορίνη, Νίσυρος, Μήλος). Η δημιουργία τους οφείλεται σε ανάτηξη του υλικού της βυθιζόμενης Αφρικανικής πλάκας. Κατά την άνοδο του το υλικό αυτό διαπερνά την Ευρασιατική πλάκα και σχηματίζει τα ηφαίστεια.



Εικόνα 2-3: Το Ελληνικό τόξο (www.oasp.gr)

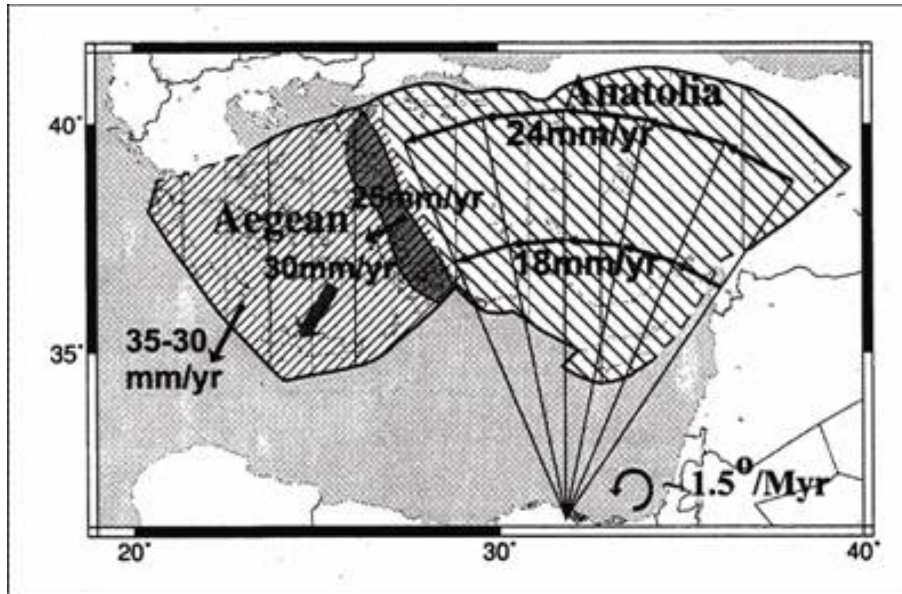


Εικόνα 2-4 :Ρυθμός επέκτασης (άσπρα βέλη) και ρυθμός συμπίεσης(μαύρα βέλη) στο ελληνικό τόξο (Kiratzi and Parazachos, 1995)

2.4 Γεωδυναμική εξέλιξη Ανατολικής Μεσογείου

Η τεκτονική υποδομή της Ανατολικής Μεσογείου, στην οποία ανήκει γεωγραφικά η Ελλάδα κυριαρχείται από τη σύγκρουση της Αραβικής και της Αφρικανικής πλάκας με την Ευρασιατική. Η Αραβική πλάκα κινείται προς τα ΒΔ σχετικά με την Ευρασιατική πλάκα με ρυθμό 18 – 25 mm/year. Η κίνηση αυτή προκαλεί έντονη σεισμική δραστηριότητα καθώς και τοπογραφικές ανωμαλίες στην Ανατολική Τουρκία και στον ορεινό όγκο του Καυκάσου.

Η Αφρικανική πλάκα κινείται βόρεια σε σχέση με την Ευρασιατική πλάκα με ρυθμό 15 mm/year κατά μήκος ενός αριστερόστροφου ρήγματος μετασχηματισμού. Το ρήγμα αυτό περνάει από τη Νεκρά Θάλασσα και προχωρώντας ΒΑ, ενώνεται με το ρήγμα της Ανατολίας. Το βόρειο τμήμα της Αφρικανικής πλάκας βυθίζεται κατά μήκος του Ελληνικού τόξου με μεγαλύτερο ρυθμό από τη σχετική κίνηση της Αφρικανικής πλάκας προς το βορρά κι έτσι το τόξο είναι αναγκασμένο, μαζί με την πλάκα του Αιγαίου, να κινηθούν νότια σε σχέση με την Ευρασιατική πλάκα. Η βύθιση της Αφρικανικής πλάκας γίνεται και κατά μήκος του Κυπριακού τόξου.



Εικόνα 2-5: Κίνηση λιθοσφαιρικών πλακών Αιγαίου και Ανατολίας (Parazachos, 1999)

Οι μετρήσεις GPS που έγιναν στο νότιο Αιγαίο δείχνουν ξεκάθαρα ότι η κίνηση της περιοχής ως προς την Ευρασιατική πλάκα είναι περίπου της τάξης των 30 – 35 mm/year. Επιπλέον η κίνηση μεταξύ Αιγαίου και του ρήγματος της Ανατολίας καθορίζει τη θέση του ορίου των δύο πλακών, ενώ δεν περιορίζεται σε μία μόνο ρηξιγενή ζώνη.



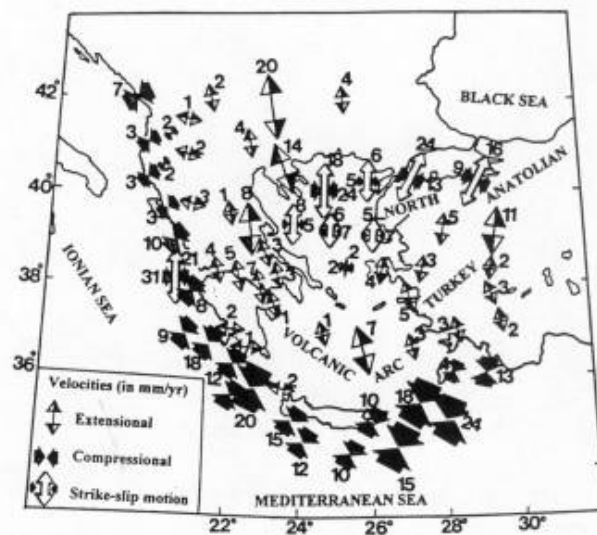
Εικόνα 2-6: Κινήσεις λιθοσφαιρικών πλακών που καθορίζουν τα τεκτονικά φαινόμενα στην Ανατολική Μεσόγειο (Parazachos, 1999)

2.5 Γεωδυναμική εξέλιξη Ελληνικού χώρου

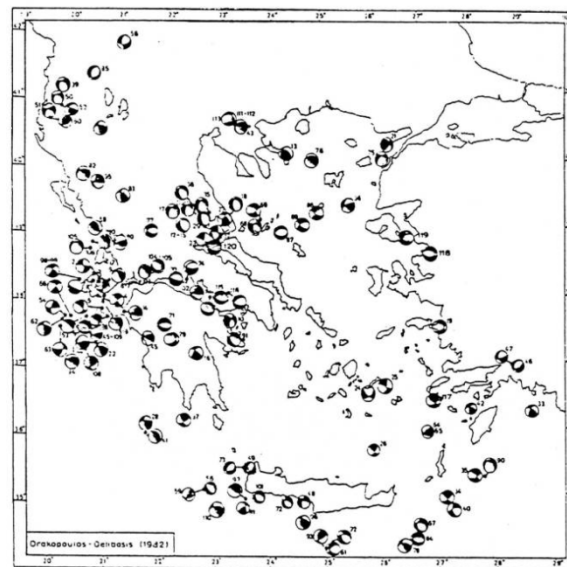
2.5.1 Γενικά

Η σχετική κίνηση μεταξύ των περιοχών του νοτίου Αιγαίου και της Πελοποννήσου με την Ευρασιατική πλάκα συγκεντρώνεται στη θάλασσα του Βορείου Αιγαίου και κατά

μήκος του Κορινθιακού κόλπου. Σημαντικό ρόλο επίσης, στη γεωδυναμική εξέλιξη του Ελλαδικού χώρου, κατέχει και το Ελληνικό τόξο και κυρίως οι περιοχές της τάφρου, στις οποίες πραγματοποιείται βύθιση της Αφρικανικής πλάκας κάτω από την Ευρασιατική. Παρακάτω παρουσιάζονται πιο αναλυτικά, τα γεωδυναμικά χαρακτηριστικά των Ιονίων νήσων, τα οποία και είναι η περιοχή που εξετάζεται στην παρούσα διπλωματική εργασία.



Εικόνα 2-7: Ταχύτητες σεισμικής παραμόρφωσης (mm/yr) στον ελληνικό χώρο και τις γύρω περιοχές (Parazachos, 1996)



Εικόνα 2-8: Μηχανισμοί γένεσης σεισμών μεγέθους $M > 5.3$ και μικρού βάθους στον Ελληνικό χώρο (Drakopoulos and Delibasis, 1982)

2.5.2 Ιόνια νησιά

Εξετάζοντας τα Ιόνια νησιά ως προς την τεκτονική τους, εννοείται ότι η περιοχή αφορά τη Ζάκυνθο, τη Λευκάδα και την Κεφαλονιά, νησιά τα οποία μελετώνται στην εργασία αυτή. Η Βορειοδυτική Ελλάδα κινείται μέσω του δεξιόστροφου ρήγματος της

Κεφαλονιάς σε σχέση με το Αιγαίο και την Πελοπόννησο. Το ρήγμα αυτό, επίσης, διαχωρίζει τα νότια νησιά του Ιονίου πελάγους (Ζάκυνθος, Λευκάδα, Κεφαλονιά) και την Πελοπόννησο από τα βόρεια νησιά του Ιονίου πελάγους, τα οποία παρουσιάζουν ασήμαντη κίνηση.

Η περιοχή των Ιονίων νήσων παρουσιάζει έντονη σεισμικότητα. Αποτελεί το ΒΔ τμήμα του Ελληνικού τόξου και εμφανής είναι η πολυπλοκότητά του αν μελετηθεί η μορφολογία του θαλάσσιου πυθμένα και τους μηχανισμούς γένεσης των σεισμών. Παρακάτω ακολουθεί ένας πίνακας, ο οποίος δείχνει τα γεγονότα από το 1972 μέχρι και τον πρόσφατο σεισμό που έγινε στη Λευκάδα το 2003. Τα δεδομένα αυτά χρησιμοποιήθηκαν και για τους υπολογισμούς τάσεων Coulomb και οριζόντιων μετατοπίσεων.

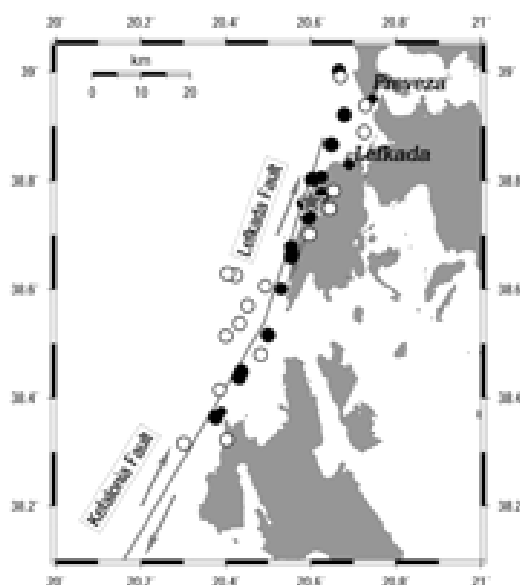
Date	Lat(°N)	Long (°E)	Depth (km)	M	Mechanism			L(km)	u (cm)	Lateral slip (cm)	Dip slip (cm)
					Strike(°)	Dip(°)	Rake(°)				
17/9/1972	38,30	20,30	3 - 15	6,30	45	68	-174	23,07	28,58	-28,419	-2,987
4/11/1973	38,90	20,50	3 - 15	5,9	320	45	80	14,42	13,428	2,332	13,224
11/5/1976	37,40	20,40	3 - 15	6,50	327	12	90	29,17	41,687	0,000	13,428
12/6/1976	37,50	20,60	3 - 15	5,80	297	20	90	12,82	11,117	0,000	41,687
28/6/1981	37,81	20,06	3 - 15	5,7	15	76	180	11,40	9,204	-9,204	0,000
17/1/1983	38,03	20,20	3 - 15	7	39	45	175	52,48	107,152	-106,744	9,339
19/1/1983	38,15	20,22	3 - 15	5,8	41	49	171	12,82	11,117	-10,980	1,739
31/1/1983	38,18	20,39	3 - 15	5,6	41	82	-177	10,14	7,621	-7,610	-0,399
23/3/1983	38,20	20,30	3 - 15	6,3	31	69	174	23,07	28,576	-28,419	2,987
24/3/1983	38,10	20,29	3 - 15	5,5	62	70	172	9,02	6,310	-6,248	0,878
14/5/1983	38,44	20,33	3 - 15	5,6	36	86	167	10,14	7,621	-7,425	1,714
27/2/1987	38,42	20,36	3 - 15	5,8	26	61	168	12,82	11,117	-10,874	2,311
18/5/1988	38,36	20,42	3 - 15	5,80	45	70	163	12,82	11,12	-4,996	1,527
24/8/1989	37,94	20,14	3 - 15	5,7	36	46	142	11,40	9,20	-3,408	2,663
23/1/1992	38,40	20,57	3 - 15	5,60	345	19	68	10,14	7,62	2,855	7,066
25/2/1994	38,76	20,54	3 - 15	5,50	22	58	168	9,02	6,31	-6,172	1,312
16/4/1994	37,40	20,60	3 - 15	5,70	304	14	90	11,40	9,20	0,000	9,204
1/2/1996	37,76	19,86	3 - 15	5,60	173	55	71	10,14	7,62	2,481	7,206
18/11/1997	37,30	20,80	3 - 15	6,60	355	20	159	32,81	50,35	-47,006	18,044
6/11/2002	37,95	20,68	3 - 15	5,01	306	83	-11	5,07	2,50	2,456	-0,477
28/7/2002	37,93	20,69	3 - 15	5,25	119	87	28	6,72	3,94	3,475	1,848
14/8/2003	38,82	20,57	3 - 15	6,20	180	63	90	20,51	23,66	0,000	6,677
16/11/2003	38,27	20,34	3 - 15	5,05	289	85	-13	5,31	2,70	2,629	-0,607

Πίνακας 2-1: Παράμετροι σεισμών Ιονίων νήσων

Στην περιοχή των Ιονίων νήσων παρατηρείται έντονη σεισμική δραστηριότητα σε τρεις περιοχές, στις οποίες παρατηρείται αλλαγή στη διεύθυνση της τάφρου. Οι περιοχές αυτές αναλύονται πιο κάτω :

- Η πρώτη περιοχή βρίσκεται νότια της Ζακύνθου, στην τάφρο της Ζακύνθου με βάθος 4000 m.

- Η δεύτερη περιοχή τοποθετείται βόρεια από την τάφρο του Β. Ματαπά, όπου και παρατηρείται μία συγκέντρωση των σεισμικών epicέντρων με βορειοανατολική προς νοτιοδυτική κατεύθυνση, αντίστοιχη με τη διεύθυνση της σχετικής κίνησης μεταξύ της πλάκας του Αιγαίου και της Αφρικανικής πλάκας στην περιοχή αυτή του ελληνικού τόξου. Στην περιοχή θεωρείται ότι η σύγκλιση της Αφρικανικής πλάκας με την πλάκα του Αιγαίου αλλάζει επειδή η ωκεάνια λιθόσφαιρα στα ΝΑ καταβυθίζεται με σύγκρουση ανάμεσα στα ηπειρωτικά τεμάχια. Επομένως οι σεισμοί εδώ σχετίζονται με την αλλαγή στο μηχανισμό σύγκλισης.
- Η τρίτη περιοχή βρίσκεται νότια της Πελοποννήσου στην περιοχή του όρους Ματαπά, το οποίο είναι ένα ύψωμα ανάμεσα στις τάφρους του Β. και Ν. Ματαπά. Το όρος αυτό θεωρείται συμπιεστική γεωλογική δομή, η οποία δημιουργήθηκε λόγω συγκόλλησης ιζημάτων στην ηπειρωτική κατωφέρεια.



Εικόνα 2-9 : Το ρήγμα της Κεφαλονιάς (<http://bssa.geoscienceworld.org>)

2.6 Ενεργός τεκτονική στην Ελλάδα και τις γύρω περιοχές

Η έρευνα της ενεργού τεκτονικής μιας περιοχής επιτυγχάνεται με:

- με τη **μελέτη της χωρικής κατανομής των σεισμικών εστιών**, η οποία καθορίζει τα όρια των λιθοσφαιρικών πλακών.
- με τη **μελέτη των μηχανισμών γένεσης των σεισμών**, οι οποίοι καθορίζουν το πεδίο τάσεων και τη διεύθυνση κίνησης των πλακών και
- με το **συνδυασμό των μηχανισμών γένεσης των σεισμών και της σεισμικότητας**, που καθορίζουν την ταχύτητα παραμόρφωσης του φλοιού της Γης.

Η ενεργός τεκτονική έχει μελετηθεί με σεισμολογικές, γεωδαιτικές, παλαιομαγνητικές και γεωλογικές μεθόδους. Το μεγαλύτερο ενδιαφέρον επικεντρώνεται στις σεισμολογικές και τις γεωδαιτικές μεθόδους. Η διαφορά είναι ότι με τη **γεωδαιτική μέθοδο** καθορίζεται η **συνολική παραμόρφωση**, ενώ με τη **σεισμολογική μέθοδο** καθορίζεται μόνο **το σεισμικό μέρος της παραμόρφωσης**, δηλαδή η παραμόρφωση που μετατρέπεται σε σεισμική ενέργεια.

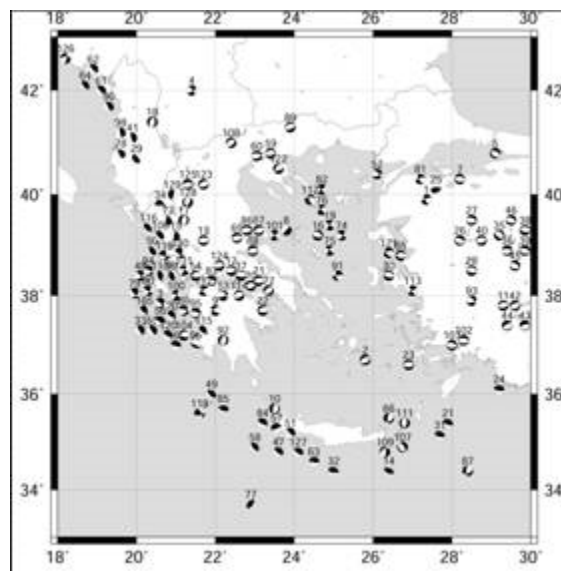
2.6.1 Μηχανισμοί γένεσης των σεισμών στην Ελλάδα

Για να βρεθούν οι μηχανισμοί γένεσης των σεισμών στην Ελλάδα χρησιμοποιήθηκαν :

1. Οι πρώτες αποκλίσεις των διαμηκών κυμάτων αφού έγινε καταγραφή τους σε μεγάλες αποστάσεις.
2. Οι πρώτες αποκλίσεις των διαμηκών κυμάτων των τοπικών σεισμών.
3. Μοντέλα κυμάτων χώρου αφού έγινε καταγραφή τους σε μεγάλες αποστάσεις.

Η μεγαλύτερη συμβολή στην ενεργό τεκτονική στον ελληνικό χώρο είναι η αναγνώριση :

- ↪ των ανάστροφων ρηγμάτων στο κυρτό μέρος του ελληνικού τόξου.
- ↪ του επεκτατικού πεδίου τάσεων στη διεύθυνση βορρά – νότου στο Αιγαίο.
- ↪ του επεκτατικού πεδίου τάσεων στη διεύθυνση ανατολής – δύσης κατά μήκος της οροσειράς των Ελληνίδων.
- ↪ του ρήγματος μετασχηματισμού της Κεφαλονιάς.
- ↪ του ρήγματος μετασχηματισμού της Ρόδου.



Εικόνα 2-10: Μηχανισμοί γένεσης επιφανειακών σεισμών στον ελληνικό χώρο (www.geo.auth.gr)

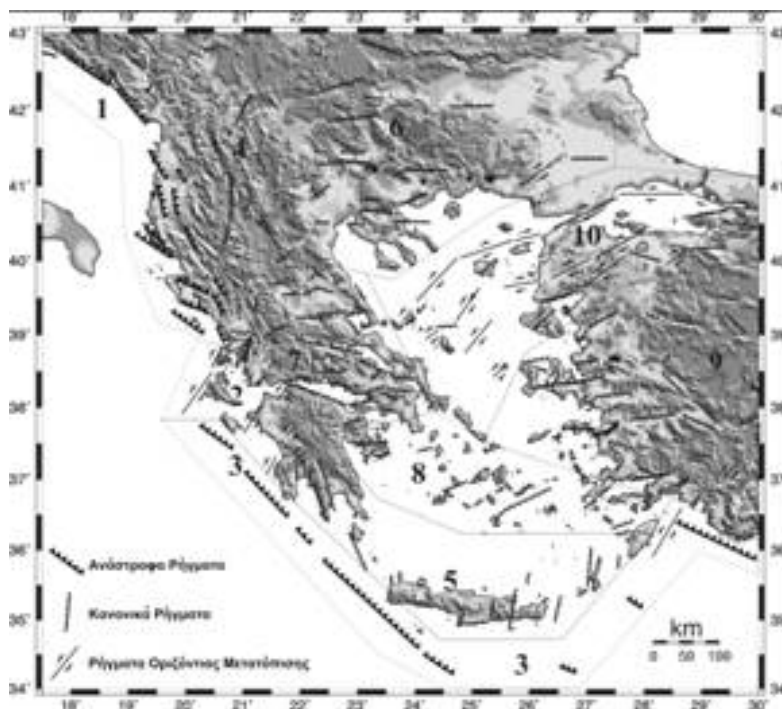
2.6.2 Κύρια ρήγματα επιφανειακών σεισμών στην Ελλάδα

Κύριο ρήγμα εννοείται το ρήγμα μιας περιοχής όπου γεννήθηκαν οι μέγιστοι επιφανειακοί σεισμοί της περιοχής με θραύση ολόκληρου του ρήγματος. Οι μικρότεροι επιφανειακοί σεισμοί γεννιούνται συνήθως με θραύση τμήματος και όχι ολόκληρου του κυρίου ρήγματος ή άλλου μικρότερου ρήγματος το οποίο συνήθως είναι παράλληλο προς το κύριο ρήγμα. Τα μήκη των κυρίων ρηγμάτων υπολογίστηκαν από την παρακάτω σχέση

$$\log L = 0.51 \cdot M_w - 1.85 \quad (2.1)$$

για τιμή μεγέθους ίση με το μέγεθος του μεγαλύτερου σεισμού που γεννήθηκε στο ρήγμα.

Η θέση (ϕ , λ), το αζιμούθιο (ζ) και η διεύθυνση κλίσης κάθε ρήγματος έχουν καθορισθεί με σεισμολογικές, γεωλογικές και γεωμορφολογικές μεθόδους. Η κλίση (δ) και η γωνία ολίσθησης (λ) έχουν καθορισθεί με βάση τις τυπικές λύσεις των μηχανισμών γένεσης.



Εικόνα 2-11:Κύρια ρήγματα επιφανειακών σεισμών του ελληνικού χώρου (www.geo.auth.gr)

2.7 Συμπεράσματα

Η θέση της Ελλάδας δικαιολογεί την έντονη σεισμικότητα που παρουσιάζει η χώρα μέσα στο χρόνο. Πολλοί σεισμοί έχουν γίνει από πολύ παλιά μέχρι σήμερα, μερικοί από τους οποίους αρκετά καταστροφικοί. Η Ελλάδα βρίσκεται στο σημείο που είναι το όριο της Αφρικανικής και της Ευρασιατικής πλάκας και η μεταξύ τους κίνηση προκαλεί τάσεις και γί

αυτό υπάρχει έντονη σεισμικότητα. Ο συνδυασμός λοιπόν των κινήσεων των λιθοσφαιρικών πλακών προκαλεί πολλούς σεισμούς σε διαφορετικά μεγέθη και βάθη.

3 ΡΗΓΜΑΤΑ

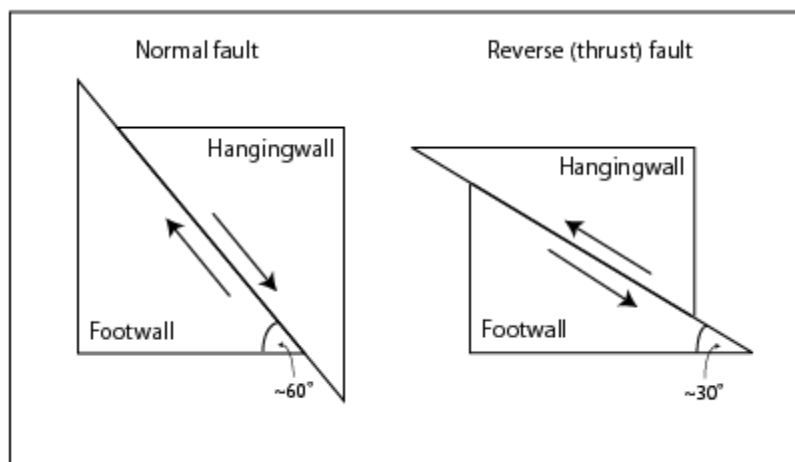
3.1 Γενικά

Στην τεκτονική Γεωλογία με τον όρο **ρήγμα** εννοείται μία διάρρηξη των πετρωμάτων του φλοιού της Γης η οποία μπορεί να εκτείνεται από τοπική έως πλανητική κλίμακα, σε τεμάχη με σχετική μετατόπιση. Εάν το ρήγμα συνδέεται με τη σεισμικότητα μίας περιοχής, τότε καλείται «ενεργό ρήγμα». Η επιφάνεια του ρήγματος λέγεται κατοπτρική επιφάνεια, λόγω της λειάνσεως που δημιουργεί η τριβή των πετρωμάτων κατά τη σχετική κίνηση στα πιο πολλά ρήγματα και κυρίως στα μεγάλα. Τα δύο τμήματα του φλοιού δεξιά και αριστερά του ρήγματος, ονομάζονται τεκτονικά τεμάχη.

Σε ρήγματα που οφείλονται σε πτυχογόνες δυνάμεις το μέγεθος της σχετικής κίνησης είναι δυνατόν να φθάσει σε μερικές δεκάδες χιλιόμετρα (π.χ. επωθήσεις). Συνήθως τα μεγάλα ρήγματα συνοδεύονται από άλλα μικρότερα και παράλληλα προς τα κύρια. Στις περιπτώσεις αυτές πρέπει να γίνεται λόγος για ρηγματογενείς ζώνες και όχι απλά για ρήγματα.

3.2 Γεωμετρικά στοιχεία ρηγμάτων

Όπως αναφέρθηκε και στον παραπάνω ορισμό, ένα ρήγμα χωρίζει το εκάστοτε πέτρωμα σε δύο τεμάχη (fault blocks). Το τεμάχος που βρίσκεται προς τη φορά κλίσης του ρήγματος, δηλαδή υπέρκειται του ρήγματος, ονομάζεται **υπερκείμενο τεμάχος** ή **οροφή** (hanging wall). Το τεμάχος που βρίσκεται αντίθετα από τη φορά κλίσης του ρήγματος, δηλαδή υπόκειται του ρήγματος, ονομάζεται **υποκείμενο τεμάχος** ή **δάπεδο** (foot wall).



Εικόνα 3-1:Οροφή και δάπεδο ρήγματος σε κανονικό και ανάστροφο ρήγμα (www.nationmaster.com)

Ολίσθηση (slip) ονομάζεται η σχετική μετατόπιση δύο σημείων εκατέρωθεν της επιφάνειας διάρρηξης, τα οποία πριν τη μετατόπιση συνέπιπταν. Πρόκειται για διάνυσμα το οποίο βρίσκεται στο δάπεδο και αναλύεται σε δύο συνιστώσες: την ολίσθηση κατά κλίση (dip slip) και την ολίσθηση κατά παράταξη (strike slip). Η ολίσθηση μπορεί να

υπολογιστεί μόνο εάν τα δύο σημεία που αναφέρθηκαν είναι γνωστά, κάτι το οποίο δεν είναι πάντα δεδομένο.

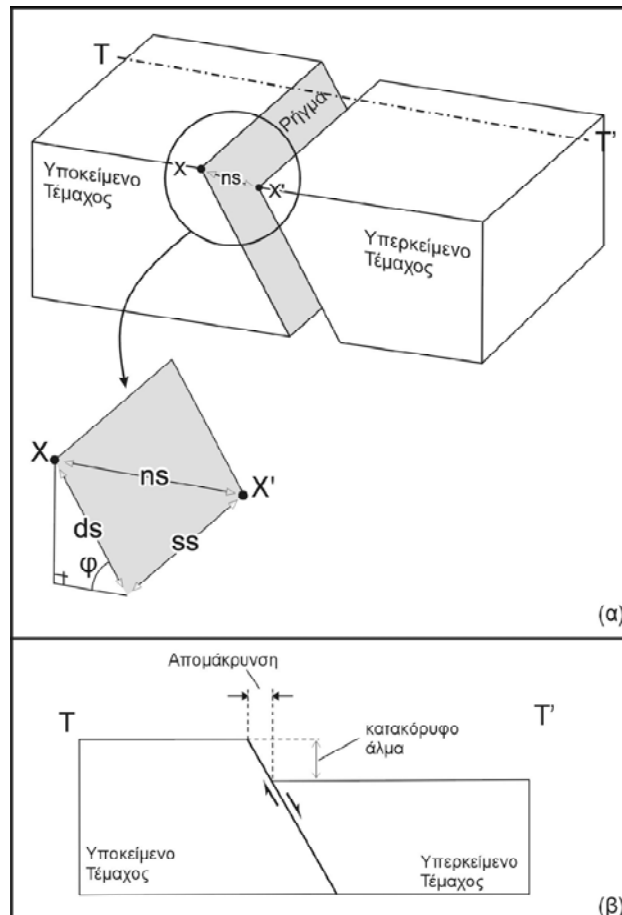
Όταν δεν είναι γνωστά τα σημεία αυτά ώστε να εκτιμηθεί η ολίσθηση του ρήγματος, τότε ο καλύτερος υπολογισμός είναι αυτός του **άλματος** ή της **φαινομενικής μετατόπισης** (separation). Στην ουσία πρόκειται για ένα γεωμετρικό μέγεθος που αντιστοιχεί στη φαινόμενη μετατόπιση ενός επίπεδου δείκτη εκατέρωθεν ενός ρήγματος, μετρημένη σε οποιαδήποτε διεύθυνση.

Τα βασικότερα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των ρηγμάτων τα οποία είναι απαραίτητα για τη συνέχεια, για την αναπαράσταση και τον καθορισμό του είδους της διάρρηξης παρουσιάζονται παρακάτω :

- Το **επίπεδο του ρήγματος** (fault plane) : Καθορίζει τη μετατόπιση ενός καθοδηγητικού ορίζοντα, έτσι ώστε τα δύο αρχικά και γειτονικά σημεία αυτού να ολισθαίνουν και να απομακρύνονται σχετικά μεταξύ τους. Το επίπεδο του ρήγματος καθορίζεται από το κάθετο μοναδιαίο διάνυσμα σε αυτό.
- Η **διεύθυνση του ρήγματος** : Είναι η τομή του ρήγματος με τη φυσική γήινη επιφάνεια.
- Η **κλίση (ρ) του ρήγματος** : Είναι η γωνία που σχηματίζει το επίπεδο του ρήγματος με το οριζόντιο επίπεδο. Κυμαίνεται από 0° έως 90° .
- Η **τροχιά ολίσθησης (s)** : Είναι η ευθεία που ενώνει τα αποχωρισθέντα γειτονικά σημεία ενός καθοδηγητικού ορίζοντα, τα οποία απομακρύνονται μεταξύ τους. Η τροχιά ολίσθησης αντιστοιχεί στο μέσο όρο κίνησης που ακολούθησαν τα δύο σημεία. Η τροχιά ολίσθησης είναι η συνισταμένη των επιμέρους κινήσεων επί της επιφάνειας των ρηγμάτων.
- Η **γωνία τροχιάς ολίσθησης (pitch)** : Είναι η γωνία που σχηματίζει η τροχιά ολίσθησης με τη διεύθυνση του ρήγματος και η οποία μετριέται επί του επιπέδου του ρήγματος. Κυμαίνεται από 0° έως 360° .
- **Συνολική μετατόπιση (total displacement)** : Θεωρείται ο αποχωρισμός ενός καθοδηγητικού ορίζοντα λόγω της σχετικής κίνησης της οροφής και του δαπέδου του ρήγματος. Η συνολική μετατόπιση ενός ρήγματος μπορεί να αναλυθεί σε δύο επίπεδα : το κάθετο προς το επίπεδο του ρήγματος, το οποίο περιέχει την κλίση του ρήγματος και στο κατακόρυφο επίπεδο που περιέχει τη διεύθυνση του ρήγματος.
Η συνολική μετατόπιση εάν αναλυθεί στο επίπεδο που είναι κάθετο προς το επίπεδο του ρήγματος τότε προκύπτει η **μετατόπιση κατά κλίση (S)** και η **μετατόπιση κατά διεύθυνση (T)**.
Η συνολική μετατόπιση επί του κατακόρυφου επιπέδου εάν αναλυθεί προκύπτει η **κατακόρυφη μετατόπιση (V)** και η **οριζόντια μετατόπιση (L)**.
- Το **μήκος του ρήγματος (l)** : Ενοείται η οριζόντια έκταση του ρήγματος, η οποία μετριέται παράλληλα προς τη διεύθυνση του ρήγματος επί της φυσικής

γήινης επιφάνειας. Η μετατόπιση είναι μηδενική στα άκρα του ρήγματος και περίπου στο κέντρο του ρήγματος είναι η μέγιστη τιμή της.

- Το **ύψος του ρήγματος (h)** : Είναι η κατακόρυφη εξάπλωση του ρήγματος. Η μετατόπιση είναι μηδενική στο ανώτερο και το κατώτερο σημείο του ρήγματος, ενώ στο μέσο του ύψους του γίνεται μέγιστη.
- Το **εύρος του ρήγματος (r_1, r_2)** : Είναι η οριζόντια έκταση του ρήγματος μετρημένη κάθετα στη διεύθυνση του ρήγματος. Διακρίνεται σε εύρος οροφής και σε εύρος δαπέδου.



Εικόνα 3-2: (α) Αληθής ολίσθηση (net slip) (β) Κατακόρυφο άλμα ρήγματος (Μαμούχα, 2008)

Στην παραπάνω εικόνα θεωρείται ότι πριν τη διάρρηξη το σημείο X συνέπιπτε με το σημείο X'. Η αληθής ολίσθηση μπορεί να αναλυθεί σε δύο συνιστώσες, την ολίσθηση κατά παράταξη (strike slip) και την ολίσθηση κατά κλίση (dip slip). Η γωνία ϕ αντιστοιχεί στην κλίση του ρήγματος.

Το μήκος, το ύψος και το εύρος του ρήγματος αντιστοιχούν στους τρεις άξονες ενός ελλειψοειδούς παραμόρφωσης.

3.3 Ταξινόμηση ρηγμάτων

Για να γίνει πιο εύκολη και κατανοητή η ανάλυση των ρηξιγενών δομών παρουσιάζεται παρακάτω ταξινόμηση των ρηγμάτων με βάση ορισμένες κατηγορίες.

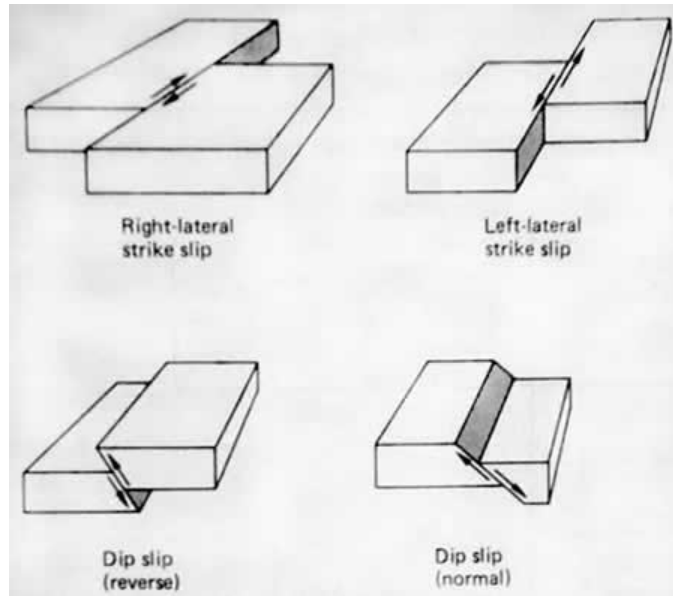
3.3.1 Ταξινόμηση με βάση την τροχιά ολίσθησης

Εάν τα ρήγματα ταξινομηθούν με βάση την τροχιά ολίσθησης τότε διακρίνονται σε :

- ✓ **Ρήγματα ολίσθησης κατά κλίση (dip slip faults)** : Τα ρήγματα αυτά χωρίζονται περαιτέρω σε **κανονικά** ή **ορθά (normal)** και σε **ανάστροφα (reverse)** ανάλογα με την απόκλιση ή τη σύγκλιση της οροφής και του δαπέδου μεταξύ τους κι έχουν ως αποτέλεσμα την αύξηση ή τη μείωση του χώρου ανάμεσα στα δύο τεμάχια αντίστοιχα.
- ✓ **Ρήγματα οριζόντιας μετατόπισης ή ρήγματα κατά τη διεύθυνση (strike slip faults)** : Είναι τα ρήγματα, στα οποία η κίνηση γίνεται παράλληλα προς τη διεύθυνση του ρήγματος.

Η διεύθυνση της κίνησης ορίζεται από την τροχιά ολίσθησης του ρήγματος. Σύμφωνα με αυτό στα ρήγματα οριζόντιας μετατόπισης, ανήκουν όσα ρήγματα έχουν πολύ μικρή γωνία τροχιάς ολίσθησης από 0° έως 5°. Η γωνία αυτή στα κανονικά ρήγματα είναι περίπου 90° ενώ οι γωνίες μεταξύ 90° και 100° ανήκουν σε ρήγματα μεικτού κινηματικού χαρακτήρα, δηλαδή περιέχουν δύο συνιστώσες, μία οριζόντιας κίνησης και μία κατακόρυφης κίνησης.

Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζονται τα ρήγματα αυτά. Τα δύο σχήματα ρηγμάτων κάτω είναι ρήγματα ολίσθησης κατά κλίση, ανάστροφο και κανονικό όπως φαίνονται από αριστερά προς δεξιά, ενώ τα δύο σχήματα ρηγμάτων επάνω είναι ρήγματα οριζόντιας μετατόπισης, δεξιόστροφο και αριστερόστροφο, όπως φαίνονται από αριστερά προς δεξιά.



Εικόνα 3-3: Ρήγματα ολίσθησης κατά κλίση (*dip slip faults*) και ρήγματα οριζόντιας μετατόπισης (*strike – slip faults*) (www.geog.nau.edu)

3.3.2 Ταξινόμηση με βάση τις δυνάμεις που δημιουργούν τα ρήγματα και ανάλογα με τα φαινόμενα που τα συνοδεύουν

Κατά την ταξινόμηση αυτήν τα ρήγματα διακρίνονται σε:

- Ρήγματα διατμήσεως
- Ρήγματα εφελκυσμού

Στα ρήγματα διατμήσεως οι οριζόντιες πλευρικές πιέσεις υπερισχύουν ενώ η αρχική απόσταση αντίστοιχων σημείων δεξιά και αριστερά του ρήγματος μειώνεται. Εδώ δηλαδή ανήκουν όλα τα ρήγματα τα οποία προκαλούν μείωση του αρχικού χώρου παράλληλα προς τη διεύθυνση κίνησης. Τα ρήγματα αυτά διακρίνονται σε τρεις τύπους ανάλογα με τη γωνία κλίσης του επιπέδου του ρήγματος και του μεγέθους της κίνησης :

- **Ανώθηση** : Είναι το ρήγμα το οποίο έχει επίπεδο με κλίση μεγαλύτερη των 45° , ενώ η κίνηση είναι σχετικά μικρή. Η γωνία κλίσης του επιπέδου είναι περίπου 65° έως 90° .
- **Επίπτωση** : Είναι μία κατηγορία ρηγμάτων η οποία δημιουργείται κατά την πτύχωση. Διακρίνεται από την επώθηση με βάση τη γωνία κλίσης και το μέγεθος κίνησης του ρήγματος. Η γωνία κλίσης είναι περίπου από 35° έως 65° .
- **Επώθηση** : Σε αυτήν τη μορφή δημιουργείται πάντοτε ρήγμα μεγάλων διαστάσεων ενώ η κλίση είναι μικρότερη των 45° και συνήθως είναι γύρω στις 25° . Η σχετική κίνηση είναι αρκετά μεγάλη και πολλές φορές υπερβαίνει τα 100 km. Οι επιφάνειες των ρηγμάτων μπορεί να είναι οριζόντιες ή να σχηματίζουν αρνητικές γωνίες κλίσης.

Στα ρήγματα διατμήσεως τα παλαιότερα πετρώματα είναι τοποθετημένα πάνω από νεότερα. Γίνεται εύκολα κατανοητό ότι κατά την εκτέλεση γεωτρήσεων στην περιοχή μιας εφίπλευσης ή μιας επώθησης είναι δυνατόν να διατρηθούν τα ίδια πετρώματα δύο ή περισσότερες φορές στην ίδια γεώτρηση. Τα πετρώματα είναι σε μεγάλη απόσταση από το επίπεδο του ρήγματος και παρουσιάζουν έντονη καταπόνηση που εκδηλώνεται με ρήγματα μικρότερου μεγέθους και πυκνή κατάκλαση. Οι επωθήσεις και οι εφίπλευσεις είναι νεκρά ρήγματα κι έτσι δεν δραστηριοποιούνται ξανά.

Στα ρήγματα εφελκυσμού υπερισχύουν οι κατακόρυφες δυνάμεις ενώ η αρχική απόσταση αντίστοιχων σημείων δεξιά και αριστερά του ρήγματος αυξάνεται. Εδώ δηλαδή ανήκουν όλα τα ρήγματα τα οποία προκαλούν αύξηση του αρχικού χώρου που κατείχε προηγουμένως το πέτρωμα παράλληλα προς τη διεύθυνση κίνησης. Οι συνηθέστεροι τύποι ρηγμάτων εφελκυσμού είναι :

1. **Μεταπτώσεις ή κανονικά ρήγματα ή ρήγματα βαρύτητας** : Κατά τη δημιουργία τους υπερισχύουν οι κατακόρυφες δυνάμεις. Τα επίπεδα των ρηγμάτων αυτών παρουσιάζουν γωνίες κλίσεων από 50° έως 75° και σε ελάχιστες περιπτώσεις είναι και κατακόρυφα εν αντιθέσει με την αναμενόμενη τιμή που είναι 45°. Αυτή η διαφορά παρατηρείται λόγω της ανομοιογένειας των πετρωμάτων και επίσης επειδή τα επίπεδα με πολύ μεγάλες κλίσεις, διευκολύνουν την ολίσθηση. Οι μεταπτώσεις, ανάλογα με την κίνηση διακρίνονται σε **απλές, κατακόρυφες και διαγώνιες**. Οι μεταπτώσεις μπορεί να είναι μεμονωμένες ή πολλές μαζί σε κλιμακοειδή διάταξη κι έτσι σχηματίζονται οι τεκτονικές τάφροι και τεκτονικές ράχες.
2. **Οριζόντια ή παράλληλη μετάθεση** : Το ρήγμα αυτό χαρακτηρίζεται από οριζόντια σχετική κίνηση μεταξύ των τεμαχών. Συνοδεύει τόσο τα ρήγματα εφελκυσμού, όσο και τα ρήγματα συνθλίψεως. Η σχετική κίνηση είναι συνήθως μικρή.
3. **Ρήγμα στρέψεως** : Το ρήγμα αυτό χαρακτηρίζεται από σχετική στρέψη μεταξύ των δύο τεμαχών.

3.3.3 Ταξινόμηση με βάση τη σχέση διεύθυνσης ρήγματος – διεύθυνσης στρωμάτων

Με βάση την παραπάνω ταξινόμηση τα ρήγματα διακρίνονται σε :

- ↪ **Επιμήκη (longitudinal)** : Συναντώνται όταν η διεύθυνση του ρήγματος είναι παράλληλη προς τη διεύθυνση των στρωμάτων που έχει διαταράξει.
- ↪ **Εγκάρσια (transverse)** : Όταν η διεύθυνση του ρήγματος είναι κάθετη προς τη διεύθυνση των στρωμάτων που έχει διαταράξει.
- ↪ **Διαγώνια (oblique)** : Όταν η διεύθυνση του ρήγματος δημιουργεί τυχαία λοξή γωνία με τη διεύθυνση των στρωμάτων που έχει διαταράξει.

3.3.4 Ταξινόμηση με βάση την κλίση – Γενετική ταξινόμηση ρηγμάτων

Όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω σε κάποια αντίστοιχη ταξινόμηση τα ρήγματα με βάση την κλίση διακρίνονται σε :

- **Κανονικά ή ορθά (normal faults)** : Είναι ρήγματα στα οποία η οροφή φαίνεται ότι έχει κατέλθει σε σχέση με το δάπεδο.
- **Ανάστροφα (reverse faults)** : Είναι ρήγματα στα οποία η οροφή φαίνεται ότι έχει ανέλθει σε σχέση με το δάπεδο.
- **Οριζοντιολισθητικά ρήγματα (strike-slip faults)**: Είναι ρήγματα στα οποία υπάρχει οριζόντια μετατόπιση των τεμαχών τους.

3.3.5 Ταξινόμηση με βάση το μήκος ή τη σχέση των ρηγμάτων με άλλα γειτονικά

Αυτή η ταξινόμηση μπορεί να ακολουθηθεί, αφού στις πλείστες περιπτώσεις τα οριζόντια ρήγματα υπάρχουν σε ένα σύνολο παράλληλων ρηγμάτων.

Έτσι λοιπόν με βάση το μήκος τους, τα ρήγματα διακρίνονται σε **ρήγματα πρώτης τάξης** τα οποία είναι τα μεγαλύτερα ρήγματα που εμφανίζονται σε μια περιοχή. Όσα ρήγματα έχουν σταδιακά μικρότερο μήκος είναι τα **ρήγματα δεύτερης τάξης** και τέλος ακολουθούν τα **ρήγματα τρίτης τάξης**. Η ταξινόμηση αυτή βασίζεται στην αρχή ότι όσα ρήγματα ξεκινούν από ένα ρήγμα πρώτης τάξης, είναι ρήγματα δεύτερης τάξης, ενώ όσα ρήγματα ξεκινούν από ένα ρήγμα δεύτερης τάξης, είναι ρήγματα τρίτης τάξης.

Η τάξη των ρηγμάτων αναφέρεται τόσο στο μέγεθός τους, όσο και στη χρονική σειρά σχηματισμού τους. Δηλαδή τα ρήγματα αναπτύσσονται μέσα στο χρόνο και στο χώρο. Με βάση τη λογική αυτή είναι γνωστό ότι σχηματίζονται πρώτα τα ρήγματα πρώτης τάξης και αργότερα τα δεύτερης και τρίτης τάξης αντίστοιχα. Έτσι όλα τα ρήγματα μικρότερης τάξης μπορούν να συνδεθούν γενετικά με όλα τα ρήγματα πρώτης τάξης.

3.3.6 Ταξινόμηση με βάση την αριθμητική τιμή της μετατόπισης

Όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω τα ρήγματα υπάρχουν σε ένα σύνολο παράλληλων ρηγμάτων. Έτσι τα μικρότερα ρήγματα έχουν το ίδιο τασικό πεδίο με το κύριο ρήγμα και κινούνται παράλληλα με αυτό. Σύμφωνα λοιπόν με την αριθμητική τιμή της μετατόπισης ενός ρηγματος σε σχέση με τη μετατόπιση των γειτονικών του ρηγμάτων, μπορεί να γίνει διαχωρισμός των ρηγμάτων σε :

- ✓ **Κύρια ρήγματα (master faults)** : Είναι ρήγματα τα οποία έχουν μεγάλες μετατοπίσεις και η κίνηση κατά μήκος τους συνήθως συνοδεύεται από μικρότερα ρήγματα.
- ✓ **Συνοδά ρήγματα (second order faults)** : Είναι ρήγματα τα οποία είναι μικρότερα από τα κύρια και όταν έχουν ομόρροπη κλίση με το κύριο ρήγμα ονομάζονται **σύμφωνα** ενώ όταν έχουν αντίρροπη κλίση με το κύριο ρήγμα ονομάζονται **αντίθετα**.

3.3.7 Ταξινόμηση με βάση τη σχέση κλίσης ρήγματος – κλίσεις στρωμάτων

Διακρίνονται δύο κατηγορίες και στην ουσία πρόκειται για μια ταξινόμηση η οποία στηρίζεται στη γεωμετρική διάταξη των στρωμάτων και του ρήγματος, όπως αυτή απεικονίζεται σε μια γεωλογική τομή. Υπάρχουν έτσι οι δύο παρακάτω κατηγορίες :

- **Συνθετικά (synthetic faults)** : Είναι μικρά ρήγματα στα οποία η φορά της κλίσης του ρήγματος είναι ομόρροπη με τη φορά κλίσης των στρωμάτων.
- **Ενάντια (counter faults)** : Η φορά της κλίσης του ρήγματος είναι αντίρροπη με τη φορά κλίσης των στρωμάτων.

3.4 Ρήγματα γενετικής ταξινόμησης

Στην παράγραφο αυτή θα γίνει μια πιο εκτενής αναφορά στα ρήγματα τα οποία αναφέρθηκαν πιο πάνω κατά τη γενετική ταξινόμηση τους. Στην ταξινόμηση αυτή, τα ρήγματα χωρίζονται σε κανονικά, ανάστροφα και ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης. Παρακάτω παρουσιάζονται τα ρήγματα αυτά αναλυτικά.

3.4.1 Κανονικά ρήγματα

3.4.1.1 Γενικά

Τα κανονικά ρήγματα ανήκουν στην κατηγορία των ρηγμάτων με ολίσθηση κατά κλίση στα οποία η οροφή φαίνεται ότι έχει κατέλθει σε σχέση με το δάπεδο. Είναι πρωταρχικοί μηχανισμοί για την έκταση και τη λέπτυνση του φλοιού της Γης πριν το άνοιγμα ενός νέου ωκεανού. Σε πολλά μέρη επίσης σχηματίζουν παγίδες για τη συγκέντρωση υδρογονανθράκων.

Τα κανονικά ρήγματα ονομάζονται και **ρήγματα βαρύτητας (gravity faults)** για να υποδηλωθεί ότι η πρώτη δύναμη που τα δημιούργησε ήταν η βαρύτητα. Ονομάζονται επίσης **ρήγματα έκτασης** γιατί λεπταίνουν το φλοιό ή εφελκύουν τη στρωμάτωση.

Όσον αφορά την Ελλάδα, η ανάλυση των κανονικών ρηγμάτων είναι πολύ σημαντική γιατί τόσο η περιοχή του Αιγαίου, όσο και η ελληνική χερσόνησος συμπεριλαμβάνονται σε ένα γεωτεκτονικό περιβάλλον ηπειρωτικής διαστολής. Η διαστολή αυτή παράγει ρήγματα και ενεργητικά γεωλογικά φαινόμενα.

3.4.1.2 Χαρακτηριστικά και μορφές

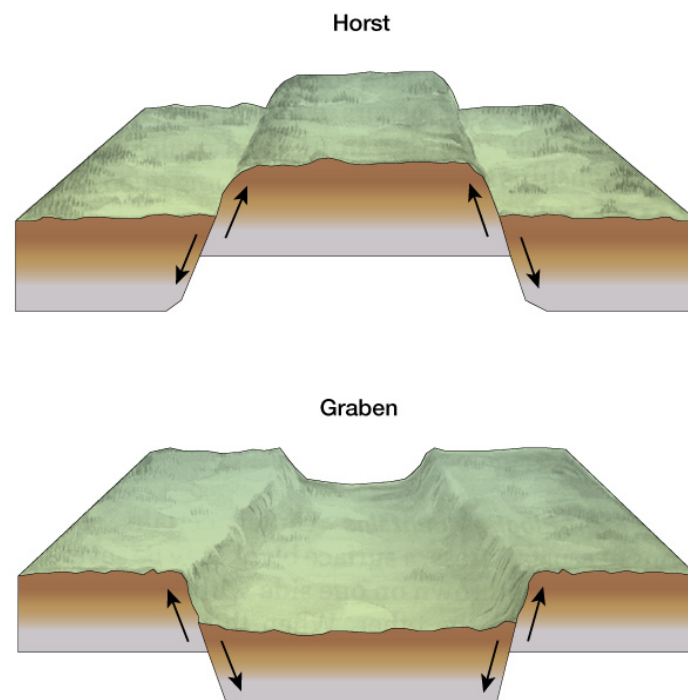
Τα κανονικά ρήγματα χαρακτηρίζονται από μία επίπεδη ή καμπύλη ρηξιγενή επιφάνεια, εκατέρωθεν της οποίας ένας καθοδηγητικός ορίζοντας κινείται με τέτοιο τρόπο ώστε η οροφή να βυθιστεί και το δάπεδο να ανυψωθεί. Συνδέονται επίσης με εφελκυστικό πεδίο το οποίο προκαλεί επέκταση του αρχικού χώρου. Η αναγνώριση του καθοδηγητικού ορίζοντα είναι πρωτίστης σημασίας για να βρεθεί η μετατόπιση που προκαλείται από τα

ρήγματα αυτά. Η βύθιση και η ανύψωση που πραγματοποιούνται δεν είναι σταθερές και κατά συνέπεια μία τιμή της παραμόρφωσης είναι μόνο ενδεικτική.

Η **ανύψωση (u)** στα κανονικά ρήγματα είναι συνήθως μικρότερη της **βύθισης (s)** ενώ το άθροισμα τους ($u+s$) προβαλλόμενο επί της ρηξιγενούς επιφάνειας δίνει τη **μετατόπιση (d_{max})** κατά μήκος του ρήγματος. Η ανύψωση και η βύθιση μειώνονται προς τα άκρα του ρήγματος. Οι περιοχές που επηρεάζονται από τη βύθιση ή την ανύψωση σχετίζονται με καμπύλωση (ανοιχτή πτύχωση) της βάσης και της οροφής και ονομάζονται **μήκος κύματος της βύθισης (r_1)** και **μήκος κύματος της ανύψωσης (r_2)** τα οποία αθροιζόμενα (r_1+r_2) δίνουν το εύρος του ρήγματος.

Τα κανονικά ρήγματα αναπτύσσονται πιθανόν σε ζεύγη, τα οποία αντιτιθέμενα μπορούν να δημιουργούν είτε ένα **κέρας** είτε μία **τάφρο**.

Κέρασ (horst) είναι το ανυψωμένο τέμαχος, το οποίο περιορίζεται από δύο αποκλίνοντα αντιθετικά ρήγματα. **Τάφρος (graben)** είναι ένα βυθισμένο τέμαχος περιορισμένο από δύο συγκλίνοντα αντιθετικά ρήγματα.



Εικόνα 3-4: Τεκτονικό κέρασ(horst) και τάφρος(graben) (<http://geography.sierra.cc.ca.us>)

Οι τάφροι και τα κέρατα μπορούν να σχηματίζονται τόσο από όμοιας μετατόπισης, όσο και από διαφορετικής μετατόπισης ρήγματα, έτσι ώστε να είναι δυνατόν να σχηματίζονται συμμετρικές ή ασύμμετρες τάφροι ή κέρατα.

Τα **λιστρικά κανονικά ρήγματα (normal listric faults)** είναι κανονικά ρήγματα με καμπυλωμένες επιφάνειες προς τα πάνω, οι οποίες γίνονται σχεδόν οριζόντιες και επίπεδες όσο αυξάνεται το βάθος και εμφανίζουν πολύ μεγάλες κλίσεις κοντά στην επιφάνεια.

3.4.2 Ανάστροφα ρήγματα

3.4.2.1 Γενικά

Τα ανάστροφα ρήγματα ανήκουν στην κατηγορία των ρηγμάτων κατά κλίση, όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω. Στην κατηγορία των ρηγμάτων αυτών, ανήκουν οι **επωθήσεις (thrust)** και τα **λέπη**. Τα ρήγματα αυτά είναι ρήγματα τα οποία συνδέονται με θλιπτικό πεδίο κι έτσι μειώνουν τον αρχικό χώρο και το μήκος ενός καθοδηγητικού οριζοντα με ταυτόχρονη αύξηση του πάχους του φλοιού στη συγκεκριμένη περιοχή.

Τόσο οι επωθήσεις, όσο και τα λέπη συναντώνται σε :

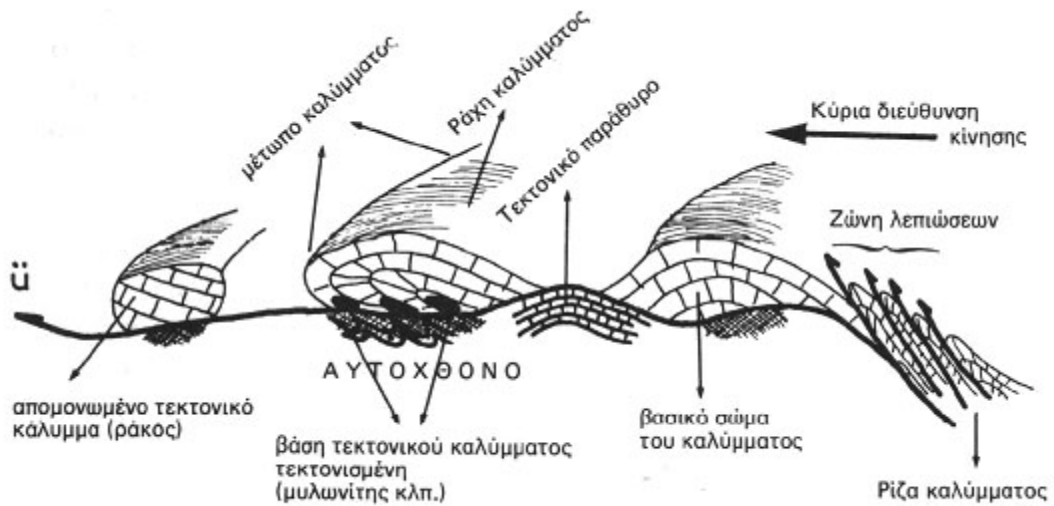
- Οροσειρές.
- Περιοχές που βρίσκονται μεταξύ του μη παραμορφωμένου ηπειρωτικού φλοιού και του πυρήνα των μεταμορφωμένων πετρωμάτων.
- Πυρήνες των μεταμορφωμένων πετρωμάτων στις οροσειρές.
- Ζώνες υποβύθισης σαν αποτέλεσμα της μετακίνησης της μιας πλάκας πάνω στην άλλη που αποξαιίνει τα ιζήματα που έχουν αποθεθεί στον πυθμένα του ωκεανού κατά τη βύθιση, δημιουργώντας έτσι ένα πρίσμα προσαύξησης.

3.4.2.2 Χαρακτηριστικά και μορφές

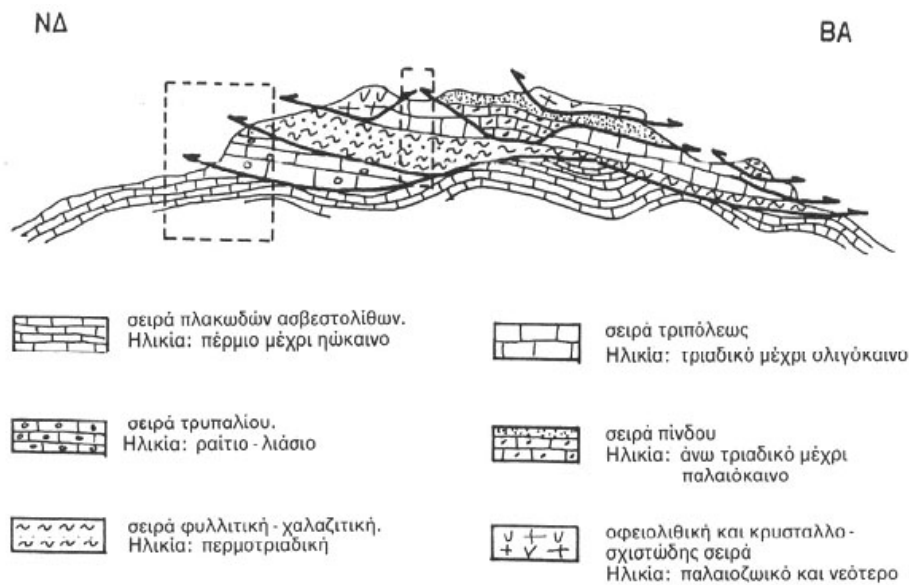
Οι **επωθήσεις** είναι συμπιεστικά ρήγματα τα οποία σχηματίζονται σε όλα τα πετρώματα και σε όλες τις συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας. Έχουν μεγάλες επιφάνειες κλίσης (>45°) επί της οποίας έγινε ή γίνεται μία ώθηση μιας μάζας πετρωμάτων επί της υποκείμενης της.

Στα ανάστροφα ρήγματα διαφέρει η μορφή, η γεωμετρία και η εξέλιξη τους ανάλογα με το περιβάλλον μέσα στο οποίο σχηματίστηκαν. Παράμετρος που δεν μπορεί να παραληφθεί είναι το νερό μέσα στη μάζα του πετρώματος που πρόκειται να διαρρηχθεί. Οι επωθήσεις δημιουργούν και αποκόπτουν κατά την ανάπτυξη τους τμήματα σχηματισμών πετρωμάτων και δημιουργούν τις επωθημένες μάζες και τα **καλύμματα**.

Καλύμματα (nappes) ονομάζονται οι μεγάλοι μήκους και μικρού πάχους τεκτονικά οριζόμενες ενότητες που κινούνται σε μεγάλες αποστάσεις επί ηπίως κεκλιμένων ρηξιγενών επιφανειών με αποτέλεσμα στην τελική τους θέση να μη σχετίζονται με τα αρχικά γειτονικά πετρώματα ώστε να θεωρούνται **αλλόχθονα**. Είναι συμβατικά αποδεκτό ότι στα καλύμματα η οριζόντια κίνηση ξεπερνά τα 5 Km.



Εικόνα 3-5: Μέρη τεκτονικού καλύμματος (www.geo.auth.gr)



Εικόνα 3-6: Τεκτονική των καλυμμάτων στον ελληνικό χώρο (www.geo.auth.gr)

Τα **ανάστροφα λιστρικά ρήγματα (reverse listric faults)** είναι κυρτά προς τα πάνω και χαρακτηρίζονται από μεταβολή της αριθμητικής τιμής της κλίσης τους. Με βάση την κύρτωση, λοιπόν, η κλίση των ρηγμάτων αυτών δεν είναι σταθερή κι έτσι χωρίζονται σε τρία τμήματα : το τμήμα της μεγάλης κλίσης που αντιστοιχεί σε **επώθηση (low angle thrust)**, το τμήμα της μεσαίας κλίσης που αντιστοιχεί σε **εφίπλευση** και το τμήμα της σχεδόν οριζόντιας κλίσης το οποίο είναι συνήθως παράλληλο προς το στρώμα του σχηματισμού στον οποίο αναπτύσσεται.

3.4.3 Ρήγματα οριζόντιας μετατόπισης

3.4.3.1 Γενικά

Τα ρήγματα οριζόντιας μετατόπισης στη γεωλογική καταγραφή είναι γνωστά γιατί η επιφανειακή εμφάνισή τους είναι ευθύγραμμη, σε αντίθεση με τις δύο προηγούμενες κατηγορίες που αναλύθηκαν, οι οποίες παρουσιάζουν πολυσχιδή επιφανειακή εμφάνιση. Η κίνηση στα ρήγματα αυτά γίνεται παράλληλα της διεύθυνσης του ρήγματος. Είναι επίσης γνωστά γιατί έχουν προκαλέσει τους πιο καταστρεπτικούς σεισμούς στην ιστορία της ανθρωπότητας.

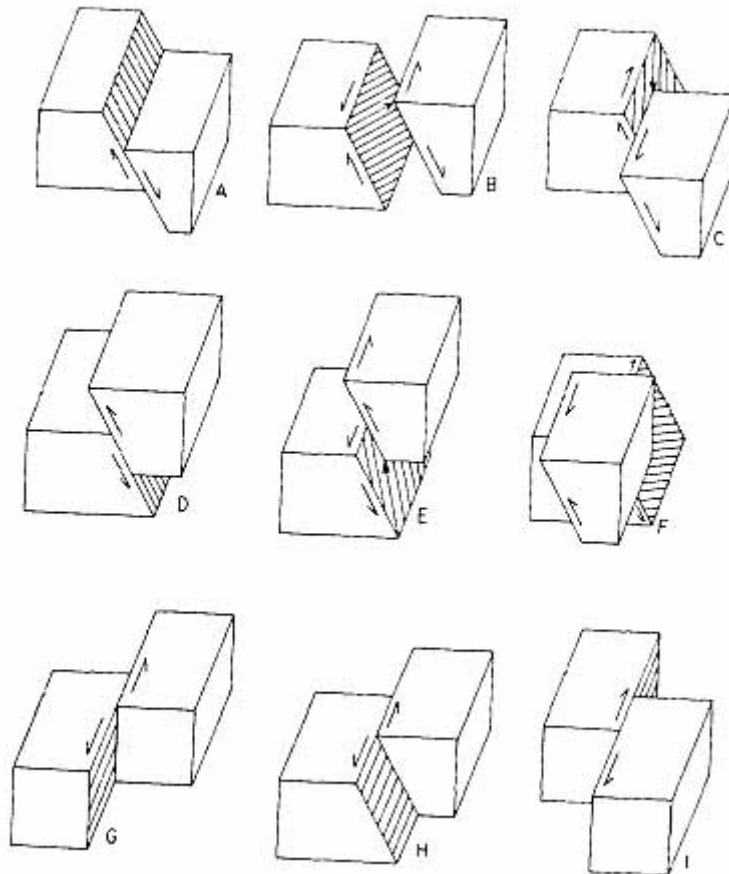
Τα ρήγματα οριζόντιας μετατόπισης χωρίζονται με τη σειρά τους σε δεξιόστροφα και σε αριστερόστροφα. **Δεξιόστροφο οριζόντιας μετατόπισης (dextral strike slip fault)** είναι ένα ρήγμα στο οποίο το ρηξιγενές τέμαχος βρίσκεται απέναντι από τον παρατηρητή και κινείται προς τα δεξιά. **Αριστερόστροφο οριζόντιας μετατόπισης (sinistral strike slip fault)** είναι ένα ρήγμα στο οποίο το ρηξιγενές τέμαχος βρίσκεται απέναντι από τον παρατηρητή και κινείται προς τα αριστερά.

Τα ρήγματα αυτά σχηματίζονται τόσο σε χαμηλές θερμοκρασίες και πιέσεις, όσο και σε συνθήκες υψηλών θερμοκρασιών και πιέσεων. Τα ρήγματα που σχηματίζονται σε συνθήκες χαμηλών θερμοκρασιών παραμορφώνουν πετρώματα με εύθραυστο τρόπο, ενώ τα ρήγματα που σχηματίζονται σε συνθήκες υψηλών θερμοκρασιών παραμορφώνουν πετρώματα υπό συνθήκες πλαστικής ροής (πετρώματα ρηξιγενών ζωνών, μυλονίτες).

3.4.3.2 Χαρακτηριστικά και μορφές

Τα ρήγματα οριζόντιας μετατόπισης χαρακτηρίζονται από πολύ μεγάλες κλίσεις (>60°) και την επικράτηση της οριζόντιας συνιστώσας της μετατόπισης. Συχνά αποτελούν τεκτονικές δομές των πτυχών σχηματίζοντας συζυγείς διατμητικές ρηξιγενείς δομές, ενώ συνοδεύονται συχνά από μικρότερα ρήγματα και διακλάσεις. Συνδέονται με την κίνηση των λιθοσφαιρικών πλακών κι έτσι τα μεγαλύτερα σε μήκος απ' αυτά σχηματίζονται στο περιθώριο μεταξύ δύο λιθοσφαιρικών πλακών σαν αποτέλεσμα σύγκλισης και σχηματίζουν μια ζώνη έντονης παραμόρφωσης μεγάλου μήκους και μικρού πλάτους.

Υπάρχουν δύο μεγάλες κατηγορίες ρηγμάτων οριζόντιας μετατόπισης, τα **ρήγματα μετασχηματισμού** και τα **διηπειρωτικά ρήγματα**. Τα ρήγματα μετασχηματισμού διατέμνουν τη λιθόσφαιρα σε όλο της το πάχος και εμφανίζονται κυρίως στις περιοχές των μεσοωκεάνιων ράχων ενώ τα διηπειρωτικά ρήγματα διατέμνουν τόσο τον ηπειρωτικό φλοιό, όσο και το ιζηματογενές επικάλυμμά του.



Εικόνα 3-7: Κυριότεροι τύποι ρηγμάτων : Α. Κανονικό ρήγμα, Β. Πλάγιο αριστερόστροφο κανονικό ρήγμα, C. Πλάγιο δεξιόστροφο κανονικό ρήγμα, D. Ανάστροφο ρήγμα, E. Πλάγιο αριστερόστροφο ανάστροφο ρήγμα, F. Πλάγιο δεξιόστροφο ανάστροφο ρήγμα, G. Αριστερόστροφο ρήγμα οριζόντιας μετατόπισης με κατακόρυφη ρηξιγενή επιφάνεια, Η. Αριστερόστροφο ρήγμα οριζόντιας μετατόπισης με κεκλιμένη ρηξιγενή επιφάνεια, Ι. Δεξιόστροφο ρήγμα οριζόντιας μετατόπισης με κατακόρυφη ρηξιγενή επιφάνεια (www.geo.auth.gr)

3.5 Πιθανότητα ενεργοποίησης των ρηγμάτων

Ο κίνδυνος ενεργοποίησης ενός νεκρού ρηγματος δεν υφίσταται για όλες τις κατηγορίες ρηγμάτων. Όσο πιο νέο είναι ένα ρήγμα, τόσο μεγαλύτερες υπολειμματικές τάσεις είναι συγκεντρωμένες στη ζώνη του, και τόσες περισσότερες πιθανότητες υπάρχουν να μην έχει αποκατασταθεί η ισορροπία κι έτσι να ενεργοποιηθεί κατά διαστήματα. Τα παλαιότερα ρήγματα δέχτηκαν την επίδραση των νεότερων τεκτονικών γεγονότων με αποτέλεσμα να υπάρξουν συνθήκες αποκατάστασης της ισορροπίας στην περιοχή τους. Γενικότερα ένα ρήγμα είναι δυνατόν να ενεργοποιηθεί :

1. χωρίς οποιαδήποτε άλλη επίδραση όταν εξαιτίας της νεότητας του δραστηριοποιείται κατά διαστήματα.
2. όταν έχει λάβει χώρα σεισμική δόνηση.
3. κατά την κατασκευή μεγάλων τεχνητών λιμνών εξαιτίας της υδροστατικής πίεσης σε μεγάλη έκταση.

3.6 Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό έγινε μια περιληπτική αναφορά στα ρήγματα και στους τρόπους ταξινόμησης αυτών. Αναφέρθηκαν πολλοί τρόποι ταξινόμησης των ρηγμάτων και αυτό γιατί η κάθε μία ταξινόμηση στηρίζεται σε διαφορετικά κριτήρια. Στη συνέχεια περιγράφηκαν οι κατηγορίες ρηγμάτων που χωρίζονται με την πιο συχνή ταξινόμηση. Αναφέρθηκαν επίσης οι λόγοι από τους οποίους επηρεάζεται η ενεργοποίηση ενός ρήγματος.

4 ΟΙ ΣΕΙΣΜΟΙ

4.1 Γενικά

Οι **σεισμοί** είναι μια δόνηση του εδάφους που προκαλείται από τη διάδοση των σεισμικών κυμάτων. Αυτά διαδίδονται μέσω των πετρωμάτων και η πηγή τους είναι η εστία του σεισμού. Ο σεισμός δηλαδή, είναι μια έκκληση ενέργειας που έχει συσσωρευτεί στα πετρώματα με τη μορφή της «**ελαστικής ενέργειας**».

Οι δονήσεις που προκαλούνται από το σεισμό συνοδεύονται πολλές φορές από υπόγειο υπόκωφο θόρυβο. Οι σεισμοί δημιουργούνται στη λιθόσφαιρα με την επίδραση ενδογενών δυνάμεων.

Με την κίνηση των λιθοσφαιρικών πλακών αναπτύσσονται τάσεις στη λιθόσφαιρα, κι όχι μόνο στην επαφή των δύο λιθοσφαιρικών πλακών, αλλά και σε αρκετά χιλιόμετρα μακριά από την επαφή. Σε όλη την έκταση και το βάθος αναπτύσσονται τάσεις μικρές ή μεγάλες. Οι μεγαλύτερες τάσεις αναπτύσσονται στα όρια των πλακών και στις γειτονικές περιοχές σε μία ζώνη πλάτους αρκετών χιλιομέτρων. Σε ορισμένες ζώνες ή σε ορισμένες θέσεις οι ελαστικές τάσεις συγκεντρώνονται σταδιακά όλο και περισσότερο κι έτσι είναι πιθανό να συγκεντρωθεί μεγάλη ποσότητα δυναμικής ενέργειας. Όταν οι τάσεις αυτές υπερβούν το όριο αντοχής των πετρωμάτων του φλοιού επέρχεται **διάρρηξη**, μετατρέποντας τη δυναμική σε κινητική ενέργεια σύμφωνα με την αρχή διατήρησης της μηχανικής ενέργειας. Η κινητική ενέργεια μεταδίδεται προς όλες τις διευθύνσεις με τη μορφή των ελαστικών κυμάτων.

Οι σεισμοί μπορούν να προκληθούν επίσης και από αίτια τα οποία δεν βρίσκονται στα πετρώματα και στο εσωτερικό της Γης αλλά μπορεί να προκληθούν από :

- ↳ Πτώση μετεωριτών
- ↳ Μετεωρολογικά αίτια
- ↳ Θαλάσσια κύματα
- ↳ Παλίρροιες
- ↳ Μηχανές εργοστασίων
- ↳ Μέσα συγκοινωνίας
- ↳ Εκρήξεις σε λατομία

4.2 Ταξινόμηση σεισμών

4.2.1 Ταξινόμηση σεισμών με βάση τα αίτια που τους προκαλούν

Οι σεισμοί μπορούν να διακριθούν με βάση τα αίτια που τους προκαλούν σε :

- **Τεκτονικοί σεισμοί** : Προκαλούνται κατά τη διάρρηξη των πετρωμάτων σε κάποιο βάθος της λιθόσφαιρας, ή από την τριβή που αναπτύσσεται στις επιφάνειες των ρηγμάτων κατά την κίνηση. Η διάρρηξη και η κίνηση γίνονται όταν οι ελαστικές τάσεις, συγκεντρωμένες σε κάποιο βάθος σε μια περιοχή της λιθόσφαιρας, ξεπεράσουν τα όρια της διατμητικής αντοχής των

πετρωμάτων. Οι σεισμοί αυτοί είναι συνήθως καταστρεπτικοί και επιδρούν μέχρι και σε μεγάλη απόσταση από το επίκεντρό τους. Αποτελούν το 85.5% του συνόλου των σεισμών μικρού βάθους.

- **Ηφαιστειογενείς σεισμοί** : Προκαλούνται από τις πιέσεις που ασκεί το μάγμα κατά την άνοδο του και από τις χημικές αντιδράσεις που δραστηριοποιούνται σ' αυτό κατά την άνοδό του προς την επιφάνεια. Έχουν μικρή ακτίνα δράσης στην περιοχή ενεργού ηφαιστείου και αποτελούν το 6.65% του συνόλου των σεισμών.
- **Εγκατακρημνισιογενείς σεισμοί** : Δημιουργούνται μετά από πτώση οροφής υπογείων σπηλαίων ή κρατήρων ηφαιστείων. Η δράση τους περιορίζεται σε πολύ μικρή ακτίνα και αποτελούν το 2.85% του συνόλου των σεισμών.
- **Διάφοροι άλλοι σεισμοί** : Υπάρχουν με «λανθάνουσες» εστίες, στις οποίες δηλαδή έχουν συγκεντρωθεί τάσεις, αλλά όχι σε μεγάλα επίπεδα ούτως ώστε από μόνες τους να προκαλέσουν διάρρηξη και να δημιουργήσουν σεισμό. Αυτοί μπορούν να δημιουργηθούν με άλλα αίτια, τα οποία μπορούν να επισπεύσουν τη γένεση σεισμού, αφού οι συγκεντρωμένες τάσεις δεν προκαλούν διάρρηξη. Τέτοια αίτια είναι η υδροστατική πίεση, διάφορες ανατινάξεις, πυρηνικές εκρήξεις, η κατάπτωση στοών μεταλλείων, παλίρροιες κλπ.

4.2.2 Ταξινόμηση σεισμών με βάση το βάθος της σεισμικής εστίας

Εάν οι σεισμοί ταξινομηθούν με βάση την παραπάνω διάκριση τότε υπάρχουν τα παρακάτω είδη :

- ✓ **Σεισμοί επιφανείας ή σεισμοί μικρού βάθους** : Οι εστίες των σεισμών αυτών βρίσκονται σε βάθος λίγων χιλιομέτρων μέχρι 60 km και αποτελούν το 95% του συνόλου των σεισμών. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι τεκτονικοί σεισμοί που οι σεισμικές εστίες τους δεν ξεπερνούν το συγκεκριμένο βάθος. Επίσης εδώ ανήκουν οι ηφαιστειογενείς, οι εγκατακρημνισιογενείς, καθώς και διάφοροι άλλοι σεισμοί.
- ✓ **Σεισμοί μέσου βάθους ή ενδιάμεσοι σεισμοί**: Οι εστίες των σεισμών αυτών βρίσκονται σε βάθος μεταξύ 60 και 300 km.
- ✓ **Σεισμοί βάθους ή μεγάλου βάθους** : Οι εστίες των σεισμών αυτών βρίσκονται σε βάθος μεταξύ 300 και 700 km. Οι πιο βαθιές εστίες που έχουν διαπιστωθεί φτάνουν το βάθος των 720 km.

Οι σεισμοί των οποίων οι εστίες βρίσκονται σε βάθος μεγαλύτερο των 60 km ονομάζονται **πλουτώνιοι** και προκαλούνται από τεκτονικές δυνάμεις. Μπορούν λοιπόν να ονομαστούν ως «**τεκτονικοί μέσου ή μεγάλου βάθους**». Οι σεισμοί αυτοί αποτελούν το 5% του συνόλου των σεισμών.

4.3 Παράμετροι σεισμών

4.3.1 Εστία σεισμού

Η **εστία σεισμού** είναι η θέση σε κάποιο βάθος στο εσωτερικό της Γης, στην οποία απελευθερώνεται μέρος της συγκεντρωμένης δυναμικής ενέργειας και θεωρείται το αρχικό σημείο από το οποίο αρχίζει η διάρρηξη. Τα σεισμικά κύματα μεταδίδονται από τη σεισμική εστία προς όλες τις κατευθύνσεις ανεξαιρέτως.

Η σεισμική εστία καλύπτει μία σχετικά εκτεταμένη περιοχή. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται η έννοια του **υπόκεντρου** για απλοποίηση. Το υπόκεντρο θεωρείται το κέντρο βάρους της εστιακής περιοχής.

Υποκεντρική ή εστιακή απόσταση λέγεται η απόσταση του υποκέντρου ή της εστίας από ένα σειсмоγραφικό σεισμό.

4.3.2 Επίκεντρο σεισμού

Το **επίκεντρο σεισμού** είναι η θέση πάνω στην επιφάνεια της Γης, ακριβώς κατακόρυφα πάνω από το υπόκεντρο. Το περίγραμμα της επικεντρικής περιοχής δίνει περίπου τη μορφή της εστιακής περιοχής.

Επικεντρική απόσταση ονομάζεται η απόσταση του σειсмоγραφικού κέντρου ή τόπου παρατήρησης από το επίκεντρο.

Η απόσταση μεταξύ της εστίας ενός σεισμού και του επικέντρου λέγεται **βάθος σεισμού**.

4.3.3 Μέγεθος σεισμού

Μέγεθος M, ενός σεισμού, με τη γενική σημασία του όρου, είναι ένα μέτρο της ολικής ενέργειας του σεισμού, το οποίο προσδιορίζεται με μετρήσεις παραμέτρων (πλατών, περιόδων, διάρκειας) των σεισμικών κυμάτων που παράγονται κατά τη γένεση του σεισμού.

Χρησιμοποιήθηκαν οι παράμετροι διαφόρων σεισμικών κυμάτων (κυμάτων διαφόρων περιόδων και ειδών) για τον προσδιορισμό των μεγεθών των σεισμών και για το λόγο αυτό αναπτύχθηκαν διάφορες **κλίμακες μεγεθών**.

Η πρώτη από τις κλίμακες αυτές είναι η κλίμακα που επινόησε ο Charles Richter το 1935 και αργότερα ονομάστηκε κλίμακα **τοπικού μεγέθους M_L** . Η βασική ιδέα του Richter ήταν ότι γνωρίζοντας την απόσταση μεταξύ σειсмоγράφου και επικέντρου και καταγράφοντας το μέγιστο εύρος ταλάντωσης, ήταν δυνατή η εμπειρική βαθμολόγηση του μεγέθους του σεισμού.

Όπως θα αναφερθεί και αργότερα, τα σεισμικά κύματα διακρίνονται σε κύματα χώρου και επιφανειακά κύματα. Για το λόγο αυτό γίνεται διάκριση σε άλλες δύο κλίμακες, την κλίμακα **χωρικού μεγέθους m_b** και την κλίμακα **επιφανειακού μεγέθους M_s** .

Πρόσφατα αναπτύχθηκαν και άλλες κλίμακες μεγεθών οι οποίες μαζί με τις κλίμακες χωρικού και επιφανειακού μεγέθους παρουσιάζονται αναλυτικά παρακάτω.

4.3.3.1 Τοπικό μέγεθος

Τοπικό μέγεθος M_L , σεισμού λέγεται ο δεκαδικός λογάριθμος του μεγίστου πλάτους αναγραφής αυτού, σε μικρά, από πρότυπο βραχείας περιόδου σεισμόμετρο στρέψης που βρίσκεται σε επικεντρική απόσταση 100 Km από το σεισμό. Για τον υπολογισμό του τοπικού μεγέθους χρησιμοποιείται η σχέση :

$$M_L = \log A - \log A' \quad (4.1)$$

όπου **A** : ο μέσος όρος των μεγίστων πλατών αναγραφής του σεισμού από τα δύο οριζόντια σεισμόμετρα

A' : το αντίστοιχο πλάτος αναγραφής του πρότυπου σεισμού στην ίδια απόσταση.

4.3.3.2 Επιφανειακό μέγεθος

Η κλίμακα **επιφανειακού μεγέθους M_s** , χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του μεγέθους των επιφανειακών σεισμών οποιασδήποτε επικεντρικής απόστασης. Η κλίμακα αυτή, χρησιμοποιεί επιφανειακά κύματα Rayleigh με περιόδους 18 – 22 s. Για τον υπολογισμό του επιφανειακού μεγέθους χρησιμοποιείται η σχέση

$$M_s = \log \frac{\alpha}{T} + 1.66 \cdot \log \Delta + 3.3 \quad (4.2)$$

όπου **α** : το εδαφικό πλάτος των επιφανειακών κυμάτων, σε μικρά, περιόδου 20 ± 3 s

T : η περίοδος

Δ : η επικεντρική απόσταση σε Km

Η παραπάνω σχέση ισχύει για επιφανειακούς σεισμούς (**$h < 60$ km**) και για επικεντρικές αποστάσεις μεταξύ 20° και 160° .

Μέχρι τώρα αναφέρθηκαν οι κλίμακες τοπικού και επιφανειακού μεγέθους. Επειδή και τα δύο μεγέθη M_L και M_s αποτελούν μέτρα σεισμικών κυμάτων διαφόρων περιόδων δεν αναμένεται να υπάρχει ακριβής σχέση, μεταξύ τους. Έχουν όμως προταθεί διάφορες στατιστικές σχέσεις, όπως,

$$M_s = 0.95 \cdot M_L + 0.72 \quad (4.3)$$

Η προηγούμενη σχέση συνδέει το τοπικό και το επιφανειακό μέγεθος σεισμού, ισχύει για τον ελληνικό χώρο και πάρθηκε από το Β. Παπαζάχο.

4.3.3.3 Χωρικό μέγεθος

Για τον υπολογισμό του μεγέθους των σεισμών οποιασδήποτε επικεντρικής απόστασης και οποιουδήποτε βάθους, προτάθηκε από τον Gutenberg (1944) η κλίμακα του χωρικού μεγέθους, m_b . Το **χωρικό μέγεθος** ορίζεται από τη σχέση

$$m_b = \log \frac{u}{T} + Q(\Delta, h) + c_2 + d_2 \quad (4.4)$$

όπου, u : το μέγιστο πλάτος σε μικρά

T : η περίοδος σε sec των διαμηκών (P) ή των εγκάρσιων (S) κυμάτων

$Q(\Delta, h)$: η συνάρτηση της επικεντρικής απόστασης και του εστιακού βάθους

c_2, d_2 : σταθερές του σταθμού και της περιοχής της εστίας

Ο υπολογισμός του χωρικού μεγέθους από τον Gutenberg (1944) έγινε με μετρήσεις των πλατών διαμηκών κυμάτων περιόδου 5 sec και των εγκάρσιων κυμάτων περιόδου 10 sec. Σήμερα ο υπολογισμός του χωρικού μεγέθους είναι ίδιος αλλά βασίζεται σε μετρήσεις πλατών κυμάτων χώρου, τα οποία έχουν περίοδο 1 sec και γράφονται σε επικεντρικές αποστάσεις μεταξύ 21° και 100°.

Το χωρικό μέγεθος παριστάνεται με m_b και συνδέεται με το επιφανειακό μέγεθος με τη σχέση

$$m_b = 0.56 \cdot M_s + 2.9 \quad (4.5)$$

4.3.3.4 Μέγεθος σεισμικής ροπής

Σεισμική ροπή, ονομάζεται η ποσότητα η οποία υπολογίζει την ποσότητα που απελευθερώνεται στην εστία ενός σεισμού, χωρίς απαραίτητα να βασίζεται σε κύματα περιορισμένου φάσματος συχνοτήτων. Η σεισμική ροπή M_0 μετριέται σε dyn * cm και ορίζεται από τη σχέση

$$M_0 = \mu \cdot s \cdot d \quad (4.6)$$

όπου, μ : το μέτρο διατμήσεως ή ολισθήσεως

s : το εμβαδόν επιφάνειας του ρήγματος

d : η μέση ολίσθηση του ρήγματος

Το **μέγεθος της σεισμικής ροπής** M_w δίνεται από την παρακάτω σχέση

$$M_w = \frac{2}{3} \cdot \log M_0 - 10.7 \quad (4.7)$$

Η κλίμακα του μεγέθους σεισμικής ροπής θεωρείται η πιο ακριβής αλλά ο υπολογισμός της είναι πολύπλοκος γιατί απαιτείται ανάλυση ολόκληρου του σειсмоγραφήματος σε ψηφιακή μορφή.

4.3.3.5 Μέγεθος διάρκειας σήματος

Για τη μέτρηση της συνολικής αναγραφής του σεισμού ή της διάρκειας μέχρις ότου το πλάτος ελαττωθεί μέχρι ορισμένη τιμή (π.χ. 2 mm), ο Bosztricsany εισήγαγε την κλίμακα **μεγέθους διάρκειας σήματος M_τ** .

Η κλίμακα αυτή εφαρμόζεται κυρίως για τον υπολογισμό του μεγέθους με τοπικά σεισμολογικά δίκτυα. Η κλίμακα μεγέθους διάρκειας σήματος δίνεται με τη σχέση

$$M_\tau = \alpha_1 + \alpha_2 \cdot \log \tau + \alpha_3 \cdot (\log \tau)^2 + \alpha_4 \cdot \Delta \quad (4.8)$$

όπου, τ : η διάρκεια του σήματος σε sec

Δ : η επικεντρική απόσταση σε Km

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$: σταθερές

4.3.4 Ενέργεια σεισμού

Η **ενέργεια σεισμού** είναι ένα μέτρο του μεγέθους των καταστροφών που μπορεί να προκαλέσει ένας σεισμός. Με ολοκλήρωση σειсмоγραφημάτων από σεισμούς αναφοράς προέκυψε η παρακάτω σχέση που συνδέει την ενέργεια σεισμού με το επιφανειακό μέγεθος.

$$\log E = 11.8 + 1.5 \cdot M_S \quad (4.9)$$

όπου, E : η ενέργεια σε ergs

Από τη σχέση αυτή προκύπτει ότι για αύξηση του μεγέθους κατά μία μονάδα, αντιστοιχεί ενέργεια 32 φορές μεγαλύτερη.

Η ενέργεια που απελευθερώνεται κατά τη γένεση ενός σεισμού υπολογίζεται με γεωδαιτικές μετρήσεις στην επικεντρική περιοχή πριν και μετά τη γένεση του σεισμού ή από τις σεισμικές αναγραφές με τη χρησιμοποίηση ολόκληρου του τμήματος του σειсмоγραφήματος και αφορά ορισμένο είδος κύματος. Η ενέργεια που απελευθερώνεται στην εστία ενός σεισμού με τη μορφή κυμάτων χώρου δίνεται (Gutenberg and Richter, 1956) από τη σχέση

$$E = 3 \cdot \pi \cdot \rho \cdot h^2 \cdot v \cdot t \cdot \left(\frac{u}{T}\right)^2 \quad (4.10)$$

όπου, ρ : η πυκνότητα του υλικού

h : το βάθος της εστίας του σεισμού
u : η ταχύτητα διάδοσης των κυμάτων
t : η διάρκεια αναγραφής του κύματος
u : το μέγιστο πλάτος του κύματος
T : η περίοδος

4.3.5 Ένταση σεισμού

Η **σεισμική ένταση** αποτελεί τον έμμεσο τρόπο εκτίμησης της σφοδρότητας ενός σεισμού. Για την εκτίμησή της, χρησιμοποιούνται παρατηρήσεις των επιπτώσεων των σεισμών στο έδαφος και στις κατασκευές. Αποτελεί πολύ χρήσιμη πληροφορία γιατί υποθέτοντας ότι οι αναμενόμενες σεισμικές δονήσεις σε μια περιοχή θα είναι παρόμοιες με αυτές που παρατηρήθηκαν στο παρελθόν, μπορούν να σχεδιαστούν ασφαλέστερες κατασκευές.

Η σεισμική ένταση εξαρτάται από το μέγεθος του σεισμού, τα χαρακτηριστικά της εστίας (μηχανισμός και βάθος), τις τοπικές εδαφικές συνθήκες στον τόπο παρατήρησης και την ιδιοπερίοδο ταλάντωσης των κατασκευών.

4.3.6 Χρόνος γένεσης σεισμού

Τα επιμήκη και τα εγκάρσια σεισμικά κύματα που φθάνουν πρώτα στους σεισμολογικούς σταθμούς γεννιούνται στην εστία του σεισμού. Ο χρόνος γένεσης των κυμάτων αυτών ονομάζεται **χρόνος γένεσης σεισμού**.

4.4 Σεισμικά κύματα

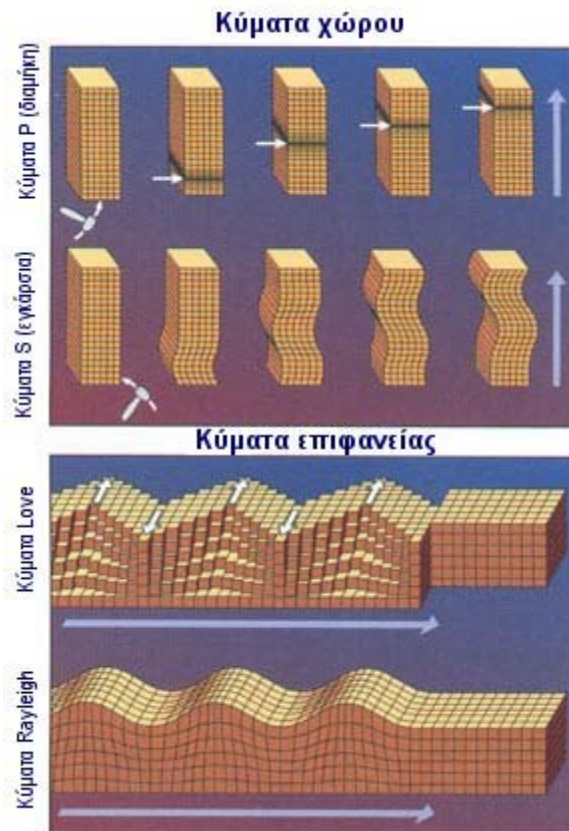
Σεισμικά κύματα είναι τα ελαστικά κύματα που παράγονται με φυσικό ή τεχνητό τρόπο μέσα ή πάνω στην επιφάνεια της Γης και διαδίδονται μέσα σ' αυτήν.

Κατά τη μελέτη της διάδοσης των σεισμικών κυμάτων γίνονται ορισμένες υποθέσεις που αφορούν τις ιδιότητες των πετρωμάτων της Γης και τον τρόπο των σχετικών μεταθέσεων των υλικών σημείων κατά την ταλάντωση αυτών. Οι πιο βασικές υποθέσεις είναι :

- Τα πετρώματα, μέσα στα οποία διαδίδονται τα σεισμικά κύματα, έχουν απόλυτες **ελαστικές ιδιότητες**, δηλαδή, η ανηγμένη παραμόρφωση που παθαίνουν αυτά κατά τη διέλευση των σεισμικών κυμάτων, είναι γραμμική συνάρτηση της τάσης.
- Τα πετρώματα είναι **ισότροπα**, δηλαδή, οι ελαστικές ιδιότητες αυτών είναι ίδιες προς όλες τις διευθύνσεις.
- Οι σχετικές μεταθέσεις των υλικών σημείων είναι **απειροστές**.

Η διάδοση των σεισμικών κυμάτων στο εσωτερικό της Γης εξαρτάται από διάφορες παραμέτρους που καθορίζουν τις ιδιότητες των σωμάτων. Τέτοιες παράμετροι είναι οι **ελαστικές σταθερές** και η **πυκνότητα**.

Τα σεισμικά κύματα διακρίνονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες οι οποίες παρουσιάζονται ενδελεχώς παρακάτω και είναι τα **κύματα χώρου** και τα **επιφανειακά κύματα**.



Εικόνα 4-1:Κύματα χώρου και κύματα επιφανείας (www.survey.ntua.gr)

4.4.1 Κύματα χώρου

Τα κύματα χώρου διαδίδονται προς κάθε διεύθυνση στο εσωτερικό της Γης, τόσο στα επιφανειακά στρώματα, όσο και στα βαθύτερα στρώματα μέχρι το κέντρο της. Τα κύματα χώρου παράγονται όταν προκληθεί μία διατάραξη σε ένα μέσο. Αυτό συμβαίνει γιατί τα στοιχεία του μέσου στο οποίο γίνεται η διατάραξη αντιδρούν τόσο στη μεταβολή του όγκου τους, όσο και στη μεταβολή του σχήματός τους.

Τα κύματα χώρου διακρίνονται με τη σειρά τους σε **διαμήκη κύματα (P)** και σε **εγκάρσια κύματα (S)** τα οποία αναπτύσσονται αναλυτικότερα παρακάτω. Τα δύο είδη κυμάτων αυτών διαφέρουν ως προς την ταχύτητα διάδοσής τους και ως προς τον τρόπο ταλάντωσης των υλικών σημείων του μέσου κατά τη διάδοση αυτών.

4.4.1.1 Διαμήκη κύματα (P)

Τα διαμήκη κύματα προκαλούν ταλαντώσεις κατά τη διεύθυνση της διάδοσης με αποτέλεσμα την εναλλαγή πύκνωσης και αραιώσης στο μέσο διάδοσης και είναι τα πρώτα κύματα που φτάνουν σε ένα σημείο, καθώς η ταχύτητά διάδοσής τους είναι μεγαλύτερη.

Τα διαμήκη κύματα διαδίδονται με ορισμένη ταχύτητα, V_p , μέσα σε ελαστικό και ισότροπο μέσο. Η ταχύτητα αυτή δίνεται από τη σχέση

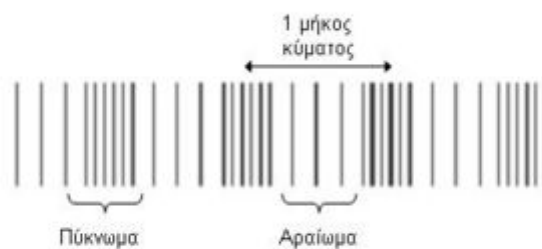
$$V_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2 \cdot \mu}{\rho}} \quad (4.11)$$

όπου, λ, μ : οι ελαστικές σταθερές του Lamé

ρ : η πυκνότητα του υλικού

Τα διαμήκη κύματα συμβολίζονται με το P (Primus) επειδή φθάνουν πρώτα στο σεισμολογικό σταθμό. Αυτό συμβαίνει γιατί η ταχύτητα διάδοσης των διαμηκών κυμάτων είναι μεγαλύτερη από την ταχύτητα των εγκάρσιων κυμάτων, ενώ και τα δύο είδη κυμάτων παράγονται συγχρόνως στην ίδια εστία.

Κατά τη διάδοση των διαμηκών κυμάτων μέσα σε ελαστικό μέσο, τα υλικά σημεία του μέσου αντιδρούν στους κραδασμούς κατά τη διεύθυνση που είναι παράλληλη προς τη διεύθυνση διάδοσης του κύματος, κατά τέτοιο τρόπο ώστε να δημιουργούνται πυκνώματα και αραιώματα.



Εικόνα 4-2: Κινήσεις των σημείων κατά τη διάδοση διαμηκών σεισμικών κυμάτων
(upload.wikimedia.org)

4.4.1.2 Εγκάρσια κύματα (S)

Τα εγκάρσια κύματα (S) προκαλούν ταλαντώσεις σε εγκάρσια προς τη διάδοση διεύθυνση και φθάνουν μετά από τα διαμήκη, καθώς η ταχύτητα διάδοσής τους είναι μικρότερη από την αντίστοιχη των διαμηκών κυμάτων.

Η διαφορά άφιξης εξαρτάται από την απόσταση που διανύουν τα κύματα και με βάση αυτήν προσδιορίζεται η απόσταση γένεσης ενός σεισμού ως προς κάποια θέση.

Κατά τη διάδοση των εγκάρσιων κυμάτων σε ελαστικό μέσο, τα υλικά σημεία αυτού, αντιδρούν στους κραδασμούς κάθετα προς τη διεύθυνση διάδοσης του κύματος και μάλιστα με τρόπο ώστε το μέσο να παθαίνει μόνο διατμητική παραμόρφωση. Η διάδοση της παραμόρφωσης αυτής αποτελεί τα εγκάρσια σεισμικά κύματα.

Η ταχύτητα διάδοσης των εγκάρσιων κυμάτων δίνεται από τη σχέση

$$V_S = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (4.12)$$

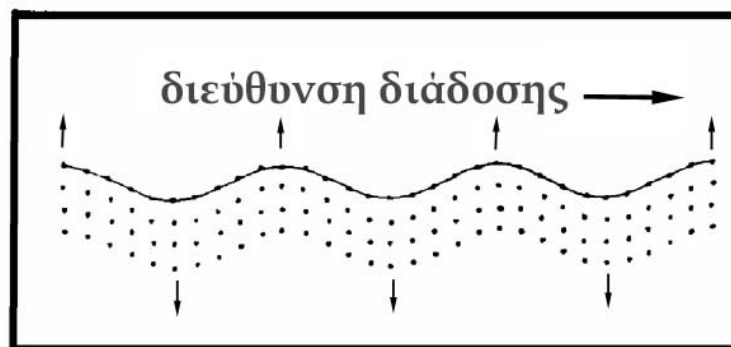
όπου μ : η σταθερά του Lamé

ρ : η πυκνότητα του υλικού.

Οι δύο αυτές παράμετροι εμπεριέχονται και στη σχέση που δίνει την ταχύτητα διάδοσης των διαμηκών κυμάτων και εάν οι δύο σχέσεις συγκριθούν, είναι φανερό ότι $V_P > V_S$ και έτσι αποδεικνύεται και μαθηματικά ότι η ταχύτητα διάδοσης των διαμηκών κυμάτων είναι μεγαλύτερη από την ταχύτητα διάδοσης των εγκάρσιων κυμάτων.

Τα εγκάρσια κύματα συμβολίζονται με S (secundus) γιατί φθάνουν δεύτερα και καταγράφονται στους σεισμολογικούς σταθμούς μετά τα διαμήκη κύματα.

Για τα ρευστά, δηλαδή τα υγρά και τα αέρια η σταθερά $\mu=0$ και έτσι τα εγκάρσια σεισμικά κύματα δε διαδίδονται μέσα σ' αυτά.



Εικόνα 4-3:Κινήσεις των σημείων κατά τη διάδοση εγκάρσιων σεισμικών κυμάτων
(www.geo.auth.gr)

4.4.2 Επιφανειακά κύματα

Τα επιφανειακά κύματα δεν διαδίδονται προς κάθε διεύθυνση αλλά ακολουθούν ορισμένες επιφάνειες ή ορισμένα στρώματα του επιφανειακού, κυρίως, τμήματος της Γης.

Τα επιφανειακά κύματα παράγονται όταν συμβαίνει μια διατάραξη, όχι όμως σε έναν απεριόριστο ελαστικό χώρο, αλλά κοντά στην επιφάνεια που χωρίζει το χώρο σε δύο

μέσα, τα οποία έχουν διαφορετικές ιδιότητες. Οι σεισμοί που έχουν τις εστίες τους κοντά στην επιφάνεια της Γης προκαλούν έντονα επιφανειακά κύματα. Τα πλάτη των κυμάτων αυτών είναι μεγάλα κοντά στην επιφάνεια και ελαττώνονται, όσο αυξάνεται το βάθος μέσα στη Γη.

Τα επιφανειακά κύματα χωρίζονται στα **κύματα Love**, στα **κύματα Rayleigh** και στα **κύματα Stonley**. Τα κύματα Love και Rayleigh προκαλούν εγκάρσιες και κυκλικές ταλαντώσεις στην επιφάνεια του εδάφους. Τα κύματα αυτά παρουσιάζονται παρακάτω :

- **Κύματα Love** : Τα κύματα Love ακολουθούν την επιφάνεια της Γης και συνήθως γράφονται με μεγάλα πλάτη από τα σεισμόμετρα. Καθώς διαδίδονται η κίνηση των μορίων γίνεται παράλληλα προς την επιφάνεια της Γης και κάθετα προς τη διεύθυνση διάδοσης. Τα κύματα αυτά είναι οριζόντια πολωμένα και γι' αυτό δεν γράφονται από τα κατακόρυφα σεισμόμετρα.
- **Κύματα Rayleigh** : Όπως και τα προηγούμενα κύματα, έτσι και αυτά ακολουθούν την επιφάνεια της Γης και γράφονται με μεγάλα πλάτη. Το πλάτος ταλάντωσης των υλικών σημείων κατά τη διάδοση των κυμάτων αυτών ελαττώνεται εκθετικά με το βάθος. Τα υλικά σημεία διαγράφουν ελλείψεις κατά τη διάδοση των θεμελιωδών κυμάτων Rayleigh. Οι ελλείψεις αυτές έχουν το μέγιστο άξονα κατακόρυφο και τον ελάχιστο άξονα κατά τη διεύθυνση διάδοσης του κύματος. Κοντά στην επιφάνεια της Γης η φορά κίνησης του υλικού σημείου πάνω στην ελλειπτική τροχιά του είναι συγκεκριμένη έτσι ώστε να συμπίπτει με τη φορά διάδοσης του κύματος στο κατώτερο σημείο της τροχιάς.
- **Κύματα Stonley** : Ακολουθούν επιφάνειες ασυνέχειας μέσα στη Γη και δεν διακρίνονται εύκολα στις σεισμικές αναγραφές.

4.5 Τρόποι και αίτια γένεσης των σεισμών

4.5.1 Τρόποι γένεσης των επιφανειακών σεισμών

Λόγω φυσικών αιτιών που βρίσκονται στο εσωτερικό της Γης, τεράστιες δυνάμεις ασκούνται στα πετρώματα των επιφανειακών στρωμάτων της Γης. Το αποτέλεσμα είναι η συνεχής ελαστική παραμόρφωση των πετρωμάτων και η συσσώρευση σ' αυτά μεγάλης δυναμική ενέργεια, η οποία ονομάζεται **ενέργεια ελαστικής παραμόρφωσης**. Οι τάσεις λοιπόν που αναπτύσσονται μέσα στα πετρώματα συνεχώς αυξάνονται. Αυξανόμενες λοιπόν οι τάσεις, επέρχεται ένα χρονικό σημείο που υπερβαίνουν την αντοχή του πετρώματος σε ορισμένη θέση. Το πέτρωμα σπάει και πραγματοποιείται απότομη σχετική κίνηση των δύο τεμαχών, κατά ορισμένη διεύθυνση μιας επιφάνειας η οποία χωρίζει το πέτρωμα στα δύο τεμάχη. Η επιφάνεια αυτή ονομάζεται **ρήγμα**.

Ο χώρος που παραμορφώνεται έντονα πριν από τη γένεση του σεισμού λέγεται **σεισμογόνος χώρος**. Μετά το σεισμό δεν υπάρχει μεγάλη δυναμική ενέργεια στο χώρο

αυτό κι έτσι δεν ασκούνται έντονες τάσεις στα πετρώματα γιατί αυτά δεν είναι πλέον παραμορφωμένα. Η διαδικασία αυτή ακολουθείται μέχρι τη γένεση καινούριου σεισμού. Οι σεισμοί που γεννιούνται κατά τον τρόπο που περιγράφηκε παραπάνω ονομάζονται **τεκτονικοί σεισμοί**.

Εγκατακρημνισιογενείς σεισμοί είναι εδαφικές δονήσεις που παράγονται κατά την εγκατακρήμνιση οροφών φυσικών εγκοίλων, τα οποία βρίσκονται μέσα στα επιφανειακά στρώματα του στερεού φλοιού της Γης. Δεν είναι γνωστός ο ακριβής μηχανισμός γένεσης των σεισμών αυτών.

Ηφαιστειογενείς σεισμοί είναι οι εδαφικές δονήσεις που προηγούνται ή συνοδεύουν τις ηφαιστειακές εκρήξεις.

4.5.2 Μηχανισμός γένεσης των τεκτονικών σεισμών

Η βασικότερη θεωρία για τον τρόπο γένεσης των τεκτονικών σεισμών διατυπώθηκε από τον Reid το 1930. Κατά τη θεωρία αυτή η γένεση μεγάλων επιφανειακών σεισμών είναι αποτέλεσμα διατμητικών τάσεων.

Αν μετά από κάποιο μεγάλο σεισμό χαραχθούν στον εστιακό χώρο γραμμές κάθετες στη διεύθυνση της διάρρηξης, τότε οι γραμμές αυτές θα παραμορφωθούν λόγω των διατμητικών τάσεων, οι οποίες τείνουν να προκαλέσουν σχετική κίνηση μεταξύ των δύο τεμαχών. Όταν η παραμόρφωση γίνει αρκετά μεγάλη, η τριβή που αντιστέκεται στη σχετική κίνηση των δύο τεμαχών, υπερνικείται και πραγματοποιείται σχετική κίνηση των τεμαχών κατά τη διεύθυνση ευθείας του ρήγματος. Μετά την απελευθέρωση όλης της ενέργειας του εστιακού χώρου, οι γραμμές που χαραχθηκαν εξ αρχής γίνονται και πάλι παράλληλες μεταξύ τους, αλλά παρουσιάζουν μετατόπιση σε σχέση με την αρχική τους θέση.

Τα σεισμικά ρήγματα φθάνουν μέχρι την επιφάνεια της Γης μόνο σε ελάχιστες περιπτώσεις. Σ' αυτές τις περιπτώσεις μπορούν να μελετηθούν με απευθείας παρατηρήσεις. Διάφορες μέθοδοι έχουν επινοηθεί και εφαρμοστεί με τις οποίες είναι δυνατόν να προσδιοριστεί ο προσανατολισμός των ρηγμάτων και η διεύθυνση διάρρηξης. Οι μέθοδοι αυτοί λειτουργούν ανεξάρτητα από το αν το ρήγμα είναι ορατό ή όχι στην επιφάνεια της Γης.

Όπως προκύπτει από τις σεισμικές αναγραφές, οι φορές των πρώτων κινήσεων, οι οποίες οφείλονται στα διαμήκη σεισμικά κύματα παρουσιάζουν αζιμουθιακή κατανομή γύρω από την εστία του σεισμού. Η αζιμουθιακή αυτή κατανομή εξαρτάται από τον προσανατολισμό του ρήγματος και τη διεύθυνση της διάρρηξης. Στις δύο κατά κορυφή στερεές γωνίες που σχηματίζει το επίπεδο του ρήγματος και το κάθετο επίπεδο στη διεύθυνση ολίσθησης η πρώτη κίνηση, που οφείλεται στα διαμήκη κύματα, είναι **συμπίεση (C)**, ενώ στις άλλες δύο κατά κορυφή στερεές γωνίες η πρώτη κίνηση είναι **αραίωση (D)**.

Εάν προσδιοριστεί η φορά των πρώτων αποκλίσεων των διαμηκών κυμάτων σε σημαντικό αριθμό σεισμολογικών σταθμών, μπορούν να οριστούν δύο κάθετα μεταξύ τους επίπεδα. Το ένα απ' αυτά τα επίπεδα παριστάνει το επίπεδο του ρήγματος και το οποίο διακρίνεται με τη χρήση πρόσθετων πληροφοριών κι έτσι είναι εύκολο να καθοριστούν η διεύθυνση και το είδος της διάρρηξης. Με την ανάλυση των σεισμικών αναγραφών των επιφανειακών κυμάτων, καθορίζεται το μέγεθος της μετάθεσης και ο τρόπος διάρρηξης.

Έτσι λοιπόν, το είδος της διάρρηξης καθορίζεται από τη διεύθυνση και φορά της σχετικής κίνησης των δύο πλευρών του ρήγματος. Παρακάτω αναπτύσσονται τα είδη της διάρρηξης, τα οποία είναι :

1. Δεξιόστροφη – αριστερόστροφη διάρρηξη

Δεξιόστροφη είναι η οριζόντια διάρρηξη κατά την οποία η μία πλευρά του ρήγματος φαίνεται κινούμενη από αριστερά προς δεξιά, όταν παρατηρείται από την άλλη πλευρά του ρήγματος, ενώ αριστερόστροφη είναι η αντίθετης φοράς διάρρηξη.

2. Κανονική – ανάστροφη διάρρηξη

Κανονική λέγεται η διάρρηξη κατά την οποία η πάνω πλευρά ενός κεκλιμένου ρήγματος κινείται προς τα κάτω, ενώ ανάστροφη λέγεται η διάρρηξη κατά την οποία η πάνω πλευρά του ρήγματος κινείται προς τα πάνω.

Το μήκος του ρήγματος εξαρτάται από το μέγεθος του σεισμού. Για τον ελληνικό χώρο και τις γύρω περιοχές βρέθηκε η παρακάτω σχέση, η οποία συσχετίζει το μήκος L (σε Km) του ρήγματος και το επιφανειακό μέγεθος M του σεισμού.

$$\log L = 0.51 \cdot M - 1.85 \quad (4.13)$$

Το μέγεθος της ολίσθησης πάνω στο ρήγμα εξαρτάται επίσης από το μέγεθος του σεισμού και κυμαίνεται από λίγα εκατοστά στους μικρούς σεισμούς μέχρι μερικά μέτρα στους πολύ μεγάλους. Επίσης η ταχύτητα διάρρηξης, δεν μπορεί, τουλάχιστον θεωρητικά να αποκτήσει τιμή μεγαλύτερη της ταχύτητας διάδοσης των διαμηκών κυμάτων.

Ο χρόνος διάρρηξης αυξάνεται καθώς αυξάνεται το μέγεθος του σεισμού. Ο χρόνος αυτός ποικίλλει από κλάσμα του δευτερολέπτου στους μικρούς σεισμούς μέχρι αρκετά δευτερόλεπτα στους μεγάλους σεισμούς.

4.5.3 Τρόποι γένεσης των πλουτώνιων σεισμών

Οι πλουτώνιοι σεισμοί γεννιούνται σε μεγάλο βάθος και γι' αυτό υπάρχουν πειραματικές και θεωρητικές δυσκολίες για τον καθορισμό του τρόπου γένεσης των σεισμών αυτών. Δεν είναι εύκολο να εξαχθούν σχετικά συμπεράσματα από απευθείας

παρατηρήσεις αφού οι σεισμοί αυτοί γεννιούνται σε πολύ μεγάλο βάθος από την επιφάνεια της Γης.

Στα βάθη που γεννιούνται οι σεισμοί αυτοί υπάρχουν πάρα πολύ μεγάλες πιέσεις, οι οποίες εξουδετερώνουν τις παραμορφώσεις των πετρωμάτων πριν αυτές φτάσουν σε μεγάλες τιμές και να προκαλέσουν διάρρηξη των πετρωμάτων.

Η πρώτη άποψη που διατυπώθηκε για τη γένεση των πλουτώνιων σεισμών αναφέρει ότι σε ορισμένες διαχωριστικές επιφάνειες υπάρχει υλικό σε υγρή κατάσταση και γι' αυτό η τάση που χρειάζεται για την ολίσθηση είναι μικρή.

Μια άλλη άποψη είναι ότι προκαλείται απότομη ελάττωση του όγκου των πετρωμάτων, λόγω μεταβολής της φάσης του υλικού, με συνέπεια την κίνηση του υλικού για να γεμίσει το κενό και τη γένεση του σεισμού.

Η επικρατέστερη άποψη σήμερα, σύμφωνα με τη **Νέα Παγκόσμια Τεκτονική** είναι ότι υπάρχουν περιοχές (ωκεάνιες τάφροι, νησιώτικα τόξα) όπου οι λιθοσφαιρικές πλάκες καταδύονται πλάγια μέσα στην ασθενόσφαιρα μέχρι ορισμένο βάθος που μπορεί να φθάσει τα 700 km. Κατά την κατάδυση αυτή, οι λιθοσφαιρικές πλάκες διατηρούν τις ελαστικές τους ιδιότητες και αναπτύσσονται μέσα σ' αυτές τάσεις που προκαλούν πλουτώνιους σεισμούς.

4.5.4 Αίτια γένεσης των σεισμών

Από τη γεωφυσική είναι γνωστό ότι η Γη μεταβάλλεται συνεχώς, αφού σ' αυτήν επιδρούν δυνάμεις που βρίσκονται μέσα ή έξω απ' αυτήν. Αιτία των δυνάμεων που βρίσκονται μέσα στη Γη είναι η βαρύτητα, η περιστροφή της Γης και η θερμότητα που είναι εντός του πλανήτη. Αιτία των δυνάμεων που βρίσκονται έξω από τη Γη είναι η ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στη Γη και οι έλξεις που προκαλούν οι παλίρροιες και ασκούνται από τη Σελήνη και τον Ήλιο.

Αποτέλεσμα των ενδογενών και εξωγενών δυνάμεων που ασκούνται στη Γη είναι η συνεχής παραμόρφωση και η σχετική μετάθεση των γήινων πετρωμάτων. Απόδειξη αυτών είναι τα διάφορα **γεωδυναμικά φαινόμενα** που παρατηρούνται στη Γη, όπως η ορογένεση, η ηπειρογένεση, η σεισμικότητα, η ηφαιστειότητα κλπ.

Για τη γένεση των σεισμών απαιτείται πραγματοποίηση σχετικών κινήσεων στη Γη, παραμόρφωση των πετρωμάτων και ανάπτυξη τάσεων μέσα στα πετρώματα. Σχετικές κινήσεις πραγματοποιούνται αλλά δεν υπάρχουν αποδείξεις για τη γενική διεύθυνση των κινήσεων αυτών.

Ο ρόλος των τεκτονικών κινήσεων στη γένεση των σεισμών και άλλων γεωδυναμικών φαινομένων είναι βασικός. Οι γνώσεις που υπάρχουν όμως σήμερα για τα αίτια των κινήσεων αυτών είναι περιορισμένες. Για το λόγο αυτό έγιναν διάφορες υποθέσεις σχετικά :

- ↳ **Η υπόθεση της συστολής** : Σύμφωνα με την υπόθεση αυτή, η Γη βρισκόταν αρχικά σε υγρή κατάσταση λόγω της υψηλής θερμοκρασίας της. Επειδή όμως ακτινοβολείται συνεχώς θερμότητα στο διάστημα, η Γη ψύχεται και συστέλλεται με συνέπεια τη συρρίκνωση των επιφανειακών στρωμάτων αυτής και την ανάπτυξη τάσεων συμπίεσης. Κατά την υπόθεση αυτή, λοιπόν, οι τάσεις συμπίεσης προκαλούν τις τεκτονικές κινήσεις και συνεπώς αποτελούν τα βασικά αίτια των γεωδυναμικών φαινομένων.
- ↳ **Η υπόθεση της διαστολής** : Σύμφωνα με την υπόθεση αυτή, η Γη διαστέλλεται συνεχώς. Ορισμένοι επιστήμονες υποστηρίζουν ότι η διαστολή οφείλεται σε μεταβολή της φάσης του υλικού του πυρήνα και μετατροπή σε υλικό του μανδύα. Άλλοι πάλι, υποστηρίζουν ότι η διαστολή οφείλεται στη μεταβολή της σταθεράς Παγκόσμιας έλξης G , συναρτήσεως του χρόνου.
- ↳ **Η υπόθεση των ρευμάτων μεταφοράς** : Κατά την υπόθεση αυτή, ρεύματα μεταφοράς, παρόμοια με τα ρεύματα της ατμόσφαιρας, δημιουργούνται μέσα στο μανδύα. Η κυκλοφορία των ρευμάτων αυτών διατηρείται με τη συνεχή κάθοδο ψυχρού υλικού των ανώτερων στρωμάτων του μανδύα και την άνοδο θερμού υλικού από τα βαθύτερα στρώματα. Το πιθανότερο είναι ότι τα ρεύματα μεταφοράς ανεβαίνουν στις μεσο – ωκεάνιες ράχες και κινούνται οριζόντια κάτω από τη λιθόσφαιρα την οποία παρασύρουν μαζί τους, στο ανέβασμά τους. Στις περιοχές κατάδυσης της λιθόσφαιρας τα ρεύματα κατεβαίνουν και αναγκάζουν τη λιθόσφαιρα να βυθίζεται μέσα στην ασθενόσφαιρα.

4.5.5 Η θεωρία των λιθοσφαιρικών πλακών

Η **λιθόσφαιρα** είναι ένα δύσκαμπτο επιφανειακό στρώμα πάχους 80 km περίπου, η οποία καλύπτει όλη τη Γη. Δεν είναι συνεχής αλλά χωρίζεται από τα δύο παγκόσμια συστήματα ζωνών διάρρηξης σε ορισμένο αριθμό λιθοσφαιρικών πλακών.

Οι **λιθοσφαιρικές πλάκες** είναι τα τεράστια κομμάτια στα οποία έχει χωριστεί η λιθόσφαιρα. Δημιουργούνται στις μεσο – ωκεάνιες ράχες από υλικό που βγαίνει από το εσωτερικό της Γης. Οι πλάκες αυτές απομακρύνονται από τις ράχες με σχετικές ολισθήσεις πάνω στα ρήγματα μετασχηματισμού και τελικά καταστρέφονται στο ηπειρωτικό σύστημα διάρρηξης (νησιώτικα τόξα, ωκεάνιες τάφροι κλπ). Συνεπώς, οι λιθοσφαιρικές πλάκες αποκλίνουν στις μεσο – ωκεάνιες ράχες και συγκλίνουν στο ηπειρωτικό σύστημα διάρρηξης. Κατά την κίνησή τους, οι λιθοσφαιρικές πλάκες παραμορφώνονται στις παρυφές τους.

Η θεωρία των λιθοσφαιρικών πλακών αποτελεί τη βάση της Νέας Παγκόσμιας Τεκτονικής που αναφέρθηκε και πιο πάνω. Οι σεισμοί γεννιούνται στις παρυφές των πλακών, όπου και παραμορφώνονται. Οι διευθύνσεις και οι φορές των κινήσεων που προσδιορίστηκαν με δεδομένα που αφορούν το μηχανισμό γένεσης των σεισμών συμφωνούν με τις διευθύνσεις και φορές των κινήσεων των λίθοσφαιρικών πλακών που προσδιορίστηκαν με μαγνητικές ή άλλες γεωφυσικές μεθόδους.

Αξίζει να σημειωθεί ότι υπάρχουν περιοχές όπου οι σεισμοί δεν μπορούν να ερμηνευτούν με τη θεωρία των λιθοσφαιρικών πλακών. Για τη γένεση των σεισμών στις περιοχές αυτές είναι δυνατές άλλες ερμηνείες. Έτσι, οι σεισμοί που γεννιούνται σε περιοχές συμπαγών ηπειρωτικών τεμαχών οφείλονται πιθανόν σε κατακόρυφες κινήσεις για την αποκατάσταση της βαρυτικής ισοστάθμισης. Στις περιοχές αυτές υπήρχαν παγετώνες και η εξαφάνισή τους δημιούργησε βαρυτομετρική διατάραξη.

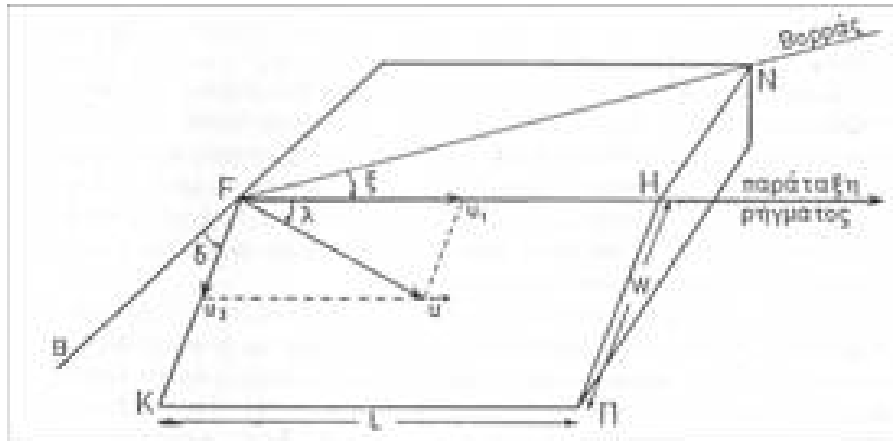
4.6 Παράμετροι της διαδικασίας γένεσης των σεισμών

4.6.1 Γεωμετρικές παράμετροι του σεισμικού ρήγματος

Οι τεκτονικοί σεισμοί οφείλονται σε διαρρήξεις πετρωμάτων που γίνονται πάνω σε επιφάνειες. Οι επιφάνειες αυτές λέγονται **επιφάνειες διάρρηξης**. Το επίπεδο, το οποίο εφάπτεται ή συμπίπτει με την επιφάνεια διάρρηξης, στην εστία του σεισμού λέγεται **επίπεδο του ρήγματος**. Η τομή, FH, του επιπέδου του ρήγματος με το οριζόντιο επίπεδο που περνάει από την εστία F του σεισμού ονομάζεται **διεύθυνση** ή **παράταξη** του επιπέδου του ρήγματος. **Διεύθυνση κλίσης** FK, του επιπέδου του ρήγματος, είναι η τομή του επιπέδου του ρήγματος με το κατακόρυφο επίπεδο, το κάθετο στη διεύθυνση (παράταξη) του επιπέδου του ρήγματος στην εστία του σεισμού.

Το επίπεδο του ρήγματος ορίζεται από το **αζιμούθιο** ξ , δηλαδή, από τη γωνία που σχηματίζει η διεύθυνση του FH με τη διεύθυνση FN του βορρά και από την **κλίση** του δ , η οποία είναι η γωνία που σχηματίζει η διεύθυνση κλίσης FK με την τομή FB του οριζοντίου επιπέδου με το κάθετο επίπεδο στην παράταξη FH του επιπέδου του ρήγματος.

Το αζιμούθιο ξ , μετριέται από το βορρά κατά τη φορά των δεικτών του ρολογιού και παίρνει τιμές $0 \leq \xi < 2\pi$ ενώ η κλίση δ , μετριέται από το οριζόντιο επίπεδο προς τα κάτω και παίρνει τιμές $0 \leq \delta < \pi/2$.



Εικόνα 4-4: Γεωμετρικές παράμετροι του σεισμικού ρηγμάτος (Parazachos, 1997)

Σεισμικά ρήγματα είναι οι επιφάνειες διάρρηξης, οι οποίες θεωρούνται συνήθως επίπεδες και συνεπώς συμπίπτουν με το επίπεδο του ρηγμάτος. Συνήθως τα ρήγματα αυτά θεωρούνται ορθογώνια παραλληλόγραμμα, με τη μεγαλύτερη πλευρά παράλληλη προς την επιφάνεια της Γης. Κάθε ρήγμα λοιπόν, έχει ορισμένο μήκος L , το οποίο είναι παράλληλο προς την επιφάνεια της Γης και ορισμένο πλάτος w , το οποίο είναι παράλληλο προς την κλίση του ρηγμάτος. Προκύπτει δηλαδή ότι η επιφάνεια S του ρηγμάτος είναι

$$S = L \cdot w \quad (4.14)$$

Ο απλούστερος τρόπος για τον καθορισμό των διαστάσεων ενός ρηγμάτος είναι με χαρτογράφηση των εστιών των μετασεισμών μιας σεισμικής ακολουθίας, οι οποίες καθορίζουν το ρήγμα του κύριου σεισμού. Οι διαστάσεις των ρηγμάτων αυξάνονται με το μέγεθος των σεισμών. Έτσι μεταξύ της επιφάνειας του ρηγμάτος S και του μεγέθους M του σεισμού, ισχύουν σχέσεις της μορφής

$$\log S = s_1 + s_2 \cdot M \quad (4.15)$$

Για τον ελληνικό χώρο και τις γύρω περιοχές έχουν βρεθεί οι τιμές $s_1 = -1.98$, $s_2 = 0.7$ όταν το M είναι επιφανειακό μέγεθος και η επιφάνεια S μετριέται σε km^2 .

Με την ίδια λογική, μεταξύ του μήκους L του ρηγμάτος και του επιφανειακού μεγέθους M βρέθηκε η σχέση

$$\log L = \lambda_1 + \lambda_2 \cdot M \quad (4.16)$$

Αντίστοιχα για τον ελληνικό χώρο και τις γύρω περιοχές, για τους επιφανειακούς σεισμούς βρέθηκαν οι τιμές $\lambda_1 = -1.85$ και $\lambda_2 = 0.51$, όταν το μήκος μετριέται σε km .

4.6.2 Μετάθεση στην εστία σεισμού

Ορίζεται ως **διάνυσμα μετάθεσης** ένα διάνυσμα το οποίο έχει διεύθυνση, τη διεύθυνση της ολίσθησης στην εστία του σεισμού, φορά, τη φορά της κίνησης του πάνω τεμάχους του ρήγματος, σημείο εφαρμογής την εστία του σεισμού και μέτρο u , τη σχετική μετάθεση των δύο τεμαχών. Το μέτρο της μετάθεσης δίνεται από τη σχέση

$$u = u^+ - u^- \quad (4.17)$$

όπου, u^+ : η μετάθεση του πάνω τεμάχους του ρήγματος

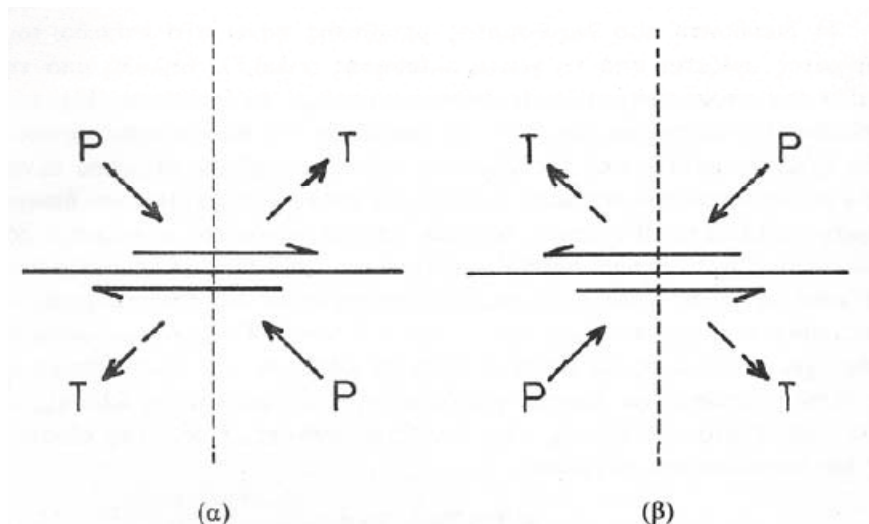
u^- : η μετάθεση του κάτω τεμάχους του ρήγματος

Η διεύθυνση του διανύσματος μετάθεσης πάνω στο επίπεδο του ρήγματος ορίζεται από τη **γωνία ολίσθησης λ** , δηλαδή από τη γωνία που σχηματίζει το διάνυσμα αυτό με τη διεύθυνση FH του επιπέδου του ρήγματος. Η διεύθυνση του διανύσματος μετάθεσης ορίζεται επίσης από το αζιμούθιο του κατακόρυφου επιπέδου πάνω στο οποίο βρίσκεται (επίπεδο κατάδυσης) και από την **κλίση του διανύσματος μετάθεσης**, η οποία είναι η γωνία που σχηματίζει το διάνυσμα αυτό με την ορθογώνια προβολή του στο οριζόντιο επίπεδο.

Το διάνυσμα μετάθεσης αναλύεται πάνω στο επίπεδο του ρήγματος, σε δύο συνιστώσες οι οποίες είναι κάθετες μεταξύ τους. Η **συνιστώσα διεύθυνσης u_1** βρίσκεται πάνω στη διεύθυνση (παράταξη) του επιπέδου του ρήγματος, ενώ η **συνιστώσα κλίσης u_2** βρίσκεται πάνω στη διεύθυνση κλίσης του επιπέδου του ρήγματος.

Όταν το διάνυσμα μετάθεσης έχει τη διεύθυνση του επιπέδου του ρήγματος τότε η διάρρηξη ονομάζεται **διάρρηξη παράταξης** (strike-slip) και η γωνία ολίσθησης παίρνει την τιμή $\lambda=0$ ή την τιμή $\lambda=\pi$. Όταν το διάνυσμα μετάθεσης έχει τη διεύθυνση κλίσης του επιπέδου του ρήγματος τότε η διάρρηξη ονομάζεται **διάρρηξη κλίσης** (dip-slip) και η γωνία ολίσθησης παίρνει την τιμή $\lambda=\pi/2$ ή την τιμή $\lambda=-\pi/2$.

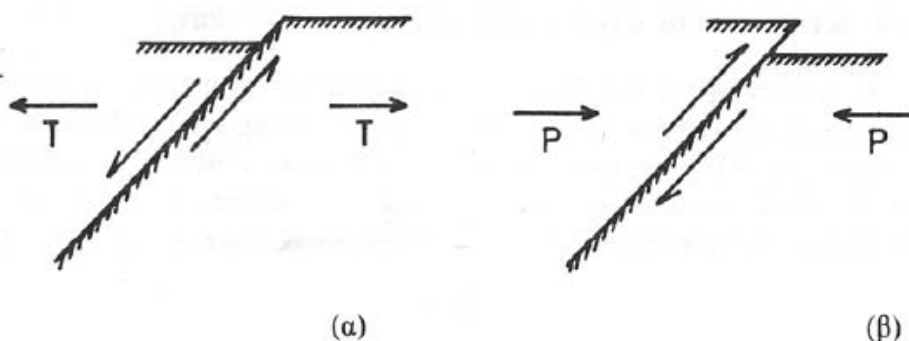
Όταν υπερέχει η διάρρηξη παράταξης, δηλαδή είναι $u_1 > u_2$ τότε η διάρρηξη λέγεται **δεξιόστροφη** αν κάθε τέμαχος κινείται από αριστερά προς τα δεξιά, ενώ η διάρρηξη ονομάζεται **αριστερόστροφη** αν κάθε τέμαχος του ρήγματος φαίνεται να κινείται από δεξιά προς τα αριστερά. Συμβατικά έχει οριστεί ότι στη δεξιόστροφη διάρρηξη, η γωνία ολίσθησης είναι $\lambda=\pi$ ενώ στην αριστερόστροφη διάρρηξη, η γωνία ολίσθησης είναι $\lambda=0$.



Εικόνα 4-5: (α) Δεξιόστροφη διάρρηξη, (β) Αριστερόστροφη διάρρηξη (Μαμούχα, 2008)

Όταν υπερέχει η διάρρηξη κλίσης, δηλαδή είναι $u_1 < u_2$ και η συνιστώσα κλίσης u_2 έχει φορά προς τα κάτω, δηλαδή το πάνω τέμαχος βυθίζεται σχετικά με το κάτω, τότε η διάρρηξη λέγεται **κανονική διάρρηξη** ή **διάρρηξη βαρύτητας** και η γωνία ολίσθησης παίρνει τιμές $-\pi \leq \lambda \leq 0$. Οι διαρρήξεις αυτές συμβαίνουν σε περιοχές όπου η **μέγιστη τάση εφελκυσμού T** είναι οριζόντια και η **μέγιστη συμπιεστική τάση P** είναι κατακόρυφη.

Όταν υπερέχει η διάρρηξη κλίσης, δηλαδή είναι $u_1 < u_2$ και η συνιστώσα κλίσης u_2 έχει φορά προς τα πάνω, δηλαδή το πάνω τέμαχος ανυψώνεται σχετικά με το κάτω, τότε η διάρρηξη ονομάζεται **ανάστροφη διάρρηξη** και η γωνία ολίσθησης παίρνει τιμές $0 \leq \lambda \leq \pi$. Οι ανάστροφες διαρρήξεις δημιουργούνται σε περιοχές όπου η **μέγιστη συμπιεστική τάση P** είναι οριζόντια και η **μέγιστη τάση εφελκυσμού T** είναι κατακόρυφη.



Εικόνα 4-6: (α) Κανονικό ρήγμα, (β) Ανάστροφο ρήγμα (Παπαζάχος, 1997)

4.7 Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό έγινε μια ανάλυση για τη θεωρία των σεισμών, καθώς και για τα στοιχεία που περιγράφουν τα σεισμικά ρήγματα. Η θεωρία που αναφέρθηκε στο κεφάλαιο

αυτό θα πρέπει να είναι γνωστή για την εύκολη κατανόηση της γεωμετρίας των ρηγμάτων, αλλά και των αιτιών που οδηγούν στη γένεση ενός σεισμού.

5 ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΤΗΣ ΘΕΩΡΙΑΣ ΤΑΣΕΩΝ ΚΑΙ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ

5.1 Γενικά

Όταν μελετάται ο τρόπος διάδοσης των σεισμικών κυμάτων στο εσωτερικό της Γης τότε γίνεται η παραδοχή ότι το υλικό της Γης είναι **ομοιογενές και ισότροπο**. Ένα σώμα είναι ομοιογενές όταν έχει τις ίδιες ιδιότητες σε όλα του τα σημεία, ενώ είναι ισότροπο ως προς κάποιες ιδιότητες όταν αυτές οι ιδιότητες είναι ίδιες προς όλες τις διευθύνσεις. Θεωρείται δηλαδή, ότι τα πετρώματα είναι ομοιογενή και ισότροπα και ότι οι τάσεις που ασκούνται σε αυτά, αλλά και οι παραμορφώσεις που προκαλούν οι τάσεις αυτές είναι πολύ μικρές.

Οι τάσεις που ασκούνται στα πετρώματα αποτελούν τη βασικότερη αιτία δημιουργίας τεκτονικών διαρρήξεων και εν συνεχεία τη γένεση των τεκτονικών σεισμών.

Αναπτύσσονται παρακάτω ορισμένα από τα βασικότερα στοιχεία της θεωρίας των τάσεων και των παραμορφώσεων, έτσι ώστε να γίνει πιο εύκολα κατανοητή η διάδοση των σεισμικών κυμάτων μέσα στα πετρώματα.

5.2 Ορισμός της δύναμης

5.2.1 Γενικά

Η **δύναμη** είναι μια διανυσματική ποσότητα γιατί για να χαρακτηριστεί χρειάζεται να οριστεί η κατεύθυνσή της στο χώρο, καθώς και το μέτρο της. **Η ιδέα της δύναμης** δίνει μια ποσοτική περιγραφή της αλληλεπίδρασης δύο σωμάτων ή μεταξύ ενός σώματος και του περιβάλλοντός του, δηλαδή εάν βρίσκεται σε κίνηση ή σε ισορροπία.

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, η δύναμη είναι διανυσματική ποσότητα. Για να περιγραφεί, λοιπόν, είναι απαραίτητο να δοθεί η κατεύθυνση της (διεύθυνση και φορά) κατά την οποία επενεργεί καθώς και το μέτρο της, το οποίο είναι η ποσότητα που καθορίζει «πόσο πολύ» ή «πόσο γερά» η δύναμη σπρώχνει ή έλκει. Η μονάδα μέτρησης της δύναμης στο διεθνές σύστημα μονάδων (S.I.) είναι το Newton (νιούτον), N.

Όταν δύο δυνάμεις F_1 και F_2 δρουν ταυτόχρονα στο ίδιο σημείο ενός σώματος, τότε το αποτέλεσμα της δράσης των δύο δυνάμεων είναι ίδιο με το αποτέλεσμα μιας μόνο δύναμης ίσης με το **διανυσματικό άθροισμα** ή την **συνισταμένη**, $R = F_1 + F_2$ των δύο αρχικών δυνάμεων. Γενικότερα, το αποτέλεσμα οποιουδήποτε αριθμού δυνάμεων που ασκούνται σε κάποιο σημείο ενός σώματος είναι το ίδιο με το αποτέλεσμα μιας και μοναδικής δύναμης ίσης με το διανυσματικό άθροισμα των δυνάμεων. Η αρχή αυτή ονομάζεται **επαλληλία δυνάμεων**.

Οι δυνάμεις που ασκούνται σε ένα σώμα διακρίνονται σε :

- **Εξωτερικές** : Δρουν στο σύνορο ή στη μάζα του σώματος λόγω πεδίου και αναφέρονται στις δυνάμεις που ασκούνται στο σώμα από τα γειτονικά του.

- **Εσωτερικές** : Αναπτύσσονται σε τμήμα σώματος κατά την υπόθεση αποκοπής του από το υπόλοιπο σώμα.

5.2.2 Δυνάμεις στα πετρώματα

Οι δυνάμεις που αφορούν τα πετρώματα διακρίνονται σε **δυνάμεις σώματος** και **δυνάμεις επιφάνειας**.

Οι δυνάμεις σώματος δρουν από απόσταση και εξαρτώνται από την ποσότητα της ύλης του σώματος πάνω στο οποίο δρουν.

Οι δυνάμεις επιφάνειας δρουν κατά μήκος των επιφανειών μεταξύ των γειτονικών τμημάτων ενός βραχώδους συστήματος. Το μέγεθός τους εξαρτάται από την έκταση της επιφάνειας στην οποία ασκείται η δράση τους. Διακρίνονται σε **θλιπτικές** και **εφελκυστικές**. Οι θλιπτικές είναι θετικές ενώ οι εφελκυστικές είναι αρνητικές.

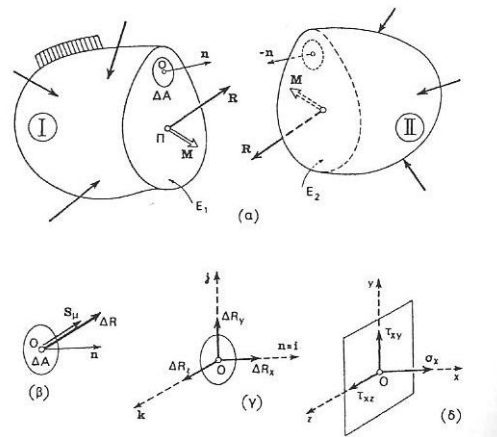
Η δρώσα σε ένα επίπεδο δύναμη μπορεί να έχει οποιαδήποτε διεύθυνση και μπορεί να σχηματίζει οποιαδήποτε γωνία με αυτό. Αν η δύναμη δρα κάθετα στο επίπεδο, ονομάζεται **ορθή δύναμη**, ενώ εάν δρα παράλληλα προς το επίπεδο, ονομάζεται **διατμητική δύναμη**. Στην περίπτωση που η δύναμη σχηματίζει τυχαία γωνία με το επίπεδο, τότε μπορεί να αναλυθεί στην ορθή και τη διατμητική συνιστώσα, οι οποίες είναι κάθετες μεταξύ τους, με βάση την επαλληλία δυνάμεων.

5.3 Ορισμός της τάσης

5.3.1 Τανυστής τάσης

Στο εσωτερικό των σωμάτων, στα οποία δρουν εξωτερικές δυνάμεις, αναπτύσσονται εσωτερικές δυνάμεις οι οποίες ονομάζονται **τάσεις**. Η τάση, όπως και η δύναμη είναι διανυσματικό μέγεθος και για το λόγο αυτό μπορεί να είναι είτε θλιπτικές είτε εφελκυστικές ή ακόμα είτε ορθές είτε διατμητικές. Κατά τη γεωτεχνική προσήμανση οι θλιπτικές τάσεις λαμβάνονται ως θετικές ενώ οι εφελκυστικές ως αρνητικές.

Για να γίνει πιο κατανοητή η έννοια της τάσης θεωρείται ένα σώμα στο οποίο υπάρχει τυχαία τομή, η οποία τέμνει το αρχικό σώμα σε δύο τμήματα **I** και **II**. Έτσι δημιουργούνται δύο επιφάνειες **E₁** και **E₂**. Από το τμήμα **A**, λοιπόν, ασκούνται στο τμήμα **B** επιφανειακές δυνάμεις που αντιστοιχούν σε συνισταμένη δύναμη **R** και μια συνισταμένη ροπή **M** ως δράσεις, και αντίστοιχα από το τμήμα **2** ασκούνται στο τμήμα **1** ίσες και αντίθετες δυνάμεις και ροπές, ως αντιδράσεις. Λόγω της συνέχειας του υλικού, είναι γενικά αποδεκτό ότι οι δυνάμεις δρουν επί των επιφανειών σαν κατανεμημένες ανά μονάδα επιφάνειας. Για τον προσδιορισμό τους θεωρείται στοιχειώδες τμήμα επιφάνειας εμβαδού **ΔA** επί του οποίου δρα μια κατανομή δυνάμεων με συνισταμένη **ΔR**.



Εικόνα 5-1: Οι εσωτερικές δυνάμεις που αναπτύσσονται σε υποθετική τομή σώματος (Σακελλαρίου, 2008)

Παρακάτω δίνονται ορισμένοι ορισμοί οι οποίοι είναι βοηθητικοί για τη συνέχεια :

- ✓ **Μέση τάση** ονομάζεται το πηλίκο

$$S_{\mu} = \frac{\Delta R}{\Delta A} \quad (5.1)$$

- ✓ **Ολική τάση** ονομάζεται η τιμή του πηλίκου της μέσης τάσης όταν το ΔA τείνει στο μηδέν και οι **ροπές μηδενίζονται**.

$$S = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta R}{\Delta A} \quad (5.2)$$

Αν η ολική τάση S αναλυθεί κατά τους άξονες x, y, z , τότε προκύπτει η **ορθή τάση σ_x** , που δρα κάθετα στην επιφάνεια, κατά τον άξονα x και οι **διατμητικές τάσεις τ_{xy} και τ_{xz}** οι οποίες αφού είναι διατμητικές δρουν εφαπτομενικά και παράλληλα προς τους άξονες y και z αντίστοιχα. Οι τάσεις αυτές δρουν από το τμήμα II στο τμήμα I και το μοναδιαίο διάνυσμα \mathbf{n} είναι παράλληλο προς τον άξονα x . Σύμφωνα με τον τρίτο νόμο του Νεύτωνα (αρχή δράσης – αντίδρασης), ίσες και αντίθετες αντιδράσεις ασκούνται από το τμήμα 1 στο τμήμα 2.

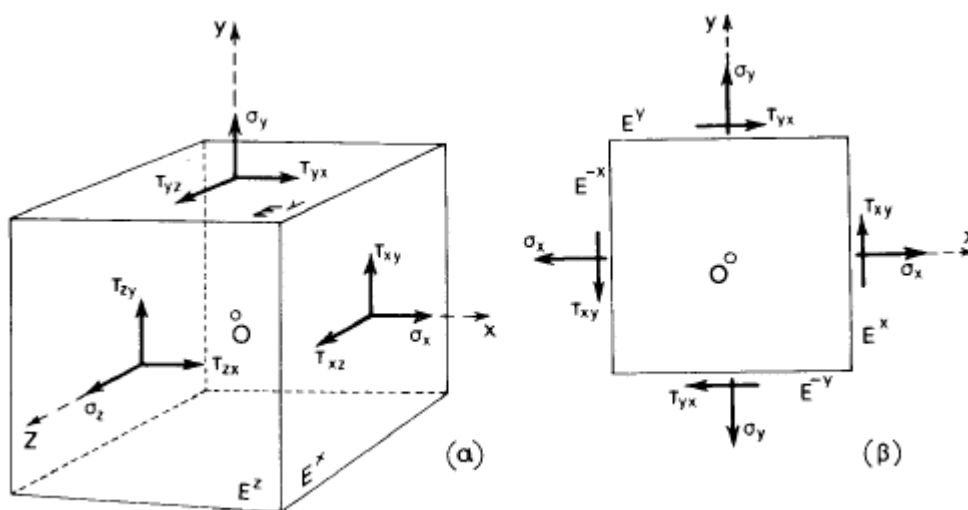
Αν θεωρηθεί κάποια άλλη διατομή, τότε ενεργεί κάποια άλλη δύναμη και επομένως υπάρχει διαφορετική ολική τάση. Εάν η νέα τομή επιλεγθεί να είναι κάθετη με την προηγούμενη τομή και το μοναδιαίο διάνυσμα στον άξονα y , τότε η ανάλυση της ολικής τάσης στους άξονες x, y, z δίνει ορθή τάση σ_y και διατμητικές τάσεις τ_{yx} και τ_{yz} . Αντίστοιχα μια άλλη τομή με μοναδιαίο διάνυσμα κατά τον άξονα z δίνει τάσεις σ_z, τ_{zx} και τ_{zy} .

Το μέγεθος της συνιστώσας του διανύσματος τάσης στην κάθετη διεύθυνση ονομάζεται **ορθή** ή **κάθετη τάση** ενώ το μέγεθος της συνιστώσας του διανύσματος τάσης στην εφαπτόμενη διεύθυνση ονομάζεται **διατμητική τάση**.

Στην παρακάτω εικόνα φαίνονται παραστατικά οι τάσεις που αναπτύσσονται σε τρία κάθετα επίπεδα στο σημείο O ενός σώματος. Για λόγους απεικόνισης θεωρείται το σημείο ως κύβος έτσι ώστε να είναι δυνατή η παρουσίαση του συνόλου των τάσεων. Με αυτόν τον τρόπο προκύπτει ένα μαθηματικό μέγεθος ανωτέρας τάξης, σε σχέση με το διάνυσμα, το οποίο ονομάζεται **Τανυστής**.

Ο τανυστής τάσεων, μαθηματικά, είναι ένας τετραγωνικός πίνακας 3×3 , ο οποίος περιέχει τις τιμές των συνιστωσών των τριών διανυσμάτων της τάσης, όπως αυτά εξηγήθηκαν παραπάνω. Όπως φαίνεται και παρακάτω (εικόνα 5-2) στο κάθε επίπεδο υπάρχει διαφορετικό διάνυσμα τάσης, και έτσι προκύπτουν για κάθε επίπεδο οι τάσεις που αναφέρθηκαν παραπάνω ($\sigma_x, \tau_{xy}, \tau_{xz} - \sigma_y, \tau_{yx}, \tau_{yz} - \sigma_z, \tau_{zx}, \tau_{zy}$). Ο τανυστής τάσεων, ως πίνακας παρουσιάζεται παρακάτω.

$$\begin{pmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{pmatrix}$$



Εικόνα 5-2: Οι τάσεις που ενεργούν σε τρία ορθογώνια επίπεδα διερχόμενα από το σημείο O (Σακελλαρίου, 2008)

Για την προσήμανση των ορθών και διατμητικών τάσεων ακολουθείται η καθιερωμένη σύμβαση κατά την οποία το κάθετο διάνυσμα έχει φορά, η οποία συμπίπτει με τη θετική φορά του αντίστοιχου άξονα. Οι θετικές φορές των τάσεων είναι ίδιες με τις θετικές φορές των αξόνων x, y, z . Συνεπάγεται λοιπόν ότι οι θετικές ορθές τάσεις ασκούν εφελκυσμό στις έδρες του κύβου και το μήκος των ακμών του κύβου τείνει να μεγαλώσει.

Έτσι προκύπτει ο κανόνας προσήμανσης των τάσεων σύμφωνα με τον οποίο οι εφελκυστικές τάσεις είναι θετικές ενώ οι θλιπτικές είναι αρνητικές.

5.3.2 Κύριες τάσεις

Στο επίπεδο είναι εύκολο να βρεθούν οι εξισώσεις των τάσεων σε τυχαία διεύθυνση. Εύκολα μπορεί να αποδειχθεί ότι υπάρχουν δύο χαρακτηριστικές διευθύνσεις, όπου οι τάσεις που ενεργούν είναι μόνον ορθές. Οι τάσεις αυτές ονομάζονται **κύριες τάσεις**.

Οι κύριες τάσεις αντιστοιχούν στη μέγιστη και ελάχιστη τιμή της διατμητικής τάσης. Η εξίσωση για τις κύριες τάσεις δίνεται παρακάτω :

$$(\sigma_{max}, \sigma_{min}) = \frac{1}{2} \cdot (\sigma_x + \sigma_y) \pm \left[\frac{1}{4} \cdot (\sigma_x - \sigma_y)^2 + \tau_{xy}^2 \right]^{1/2} \quad (5.3)$$

Οι διευθύνσεις των κύριων τάσεων ορίζονται από τη σχέση

$$\tan 2\theta = \frac{2 \cdot \tau_{xy}}{\sigma_x - \sigma_y} \quad (5.4)$$

5.4 Κύκλος τάσεων Mohr

Ο κύκλος Mohr αποτελεί το γεωμετρικό τόπο των τάσεων που ενεργούν σε ένα επίπεδο. Με τον κύκλο Mohr μπορεί να υπολογιστεί γραφικά η ένταση. Τα σημεία του γεωμετρικού αυτού τόπου δίνουν γραφικά τη σχέση μεταξύ της τάσης σε μια τυχαία διεύθυνση και την ανάλυση αυτής σε ορθή και διατμητική τάση σε ένα τυχαίο επίπεδο, το οποίο βρίσκεται εσωτερικά του σώματος. Το επίπεδο αυτό σχηματίζει τυχαία γωνία θ με το διάνυσμα της εξωτερικής τάσης. Ο κύκλος Mohr φέρεται έτσι ώστε το κέντρο του να βρίσκεται στον άξονα των ορθών τάσεων και στο μέσο της απόστασης $\sigma_1 - \sigma_2$ και παράλληλα διέρχεται από τα σημεία σ_1, σ_2 .

Εφαρμόζοντας τη μέθοδο αυτή, θεωρείται ότι για την προσήμανση των ορθών και διατμητικών τάσεων, ακολουθείται η κλασική προσήμανση, δηλαδή οι ορθές τάσεις είναι θετικές εφόσον είναι θλιπτικές, ενώ αντίστοιχα οι διατμητικές τάσεις είναι θετικές εφόσον είναι αριστερόστροφες.

Παρακάτω δίνονται ορισμένες σχέσεις οι οποίες είναι χρήσιμες για τον κύκλο Mohr.

Το κέντρο του κύκλου Mohr είναι

$$\text{κέντρο} = u = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \quad (5.5)$$

Η ακτίνα του κύκλου δίνεται από τη σχέση

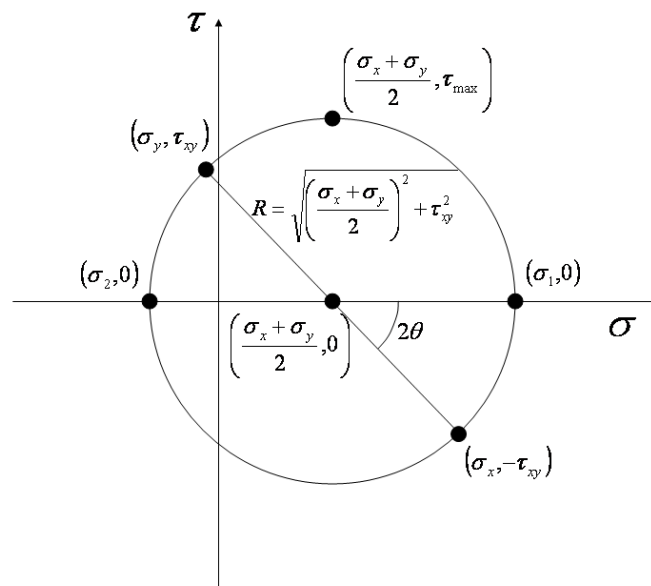
$$\text{ακτίνα} = r = \sqrt{\left[\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right]^2 + \tau_{xy}^2} \quad (5.6)$$

Οι κύριες τάσεις σ_1, σ_2 , οι οποίες είναι η μέγιστη και η ελάχιστη τάσεις, ορίζονται από τη σχέση

$$\sigma_{1,2} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\left[\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right]^2 + \tau_{xy}^2} \quad (5.7)$$

Από τον κύκλο του Mohr και τις παραπάνω εξισώσεις προκύπτει ότι :

- Το κέντρο και η ακτίνα του κύκλου Mohr υπολογίζονται από τις τάσεις που δίνονται. Με τη χάραξη του κύκλου προσδιορίζονται τα σημεία τομής του κύκλου και του άξονα των ορθών τάσεων σ . Τα δύο σημεία τομής αναπαριστούν τις δύο κύριες τάσεις, δηλαδή τις ορθές τάσεις στις διευθύνσεις των οποίων οι διατμητικές τάσεις είναι μηδενικές.
- Οι επίκεντρες γωνίες που ορίζονται μεταξύ των διαμέτρων του κύκλου Mohr είναι διπλάσιες των γωνιών που σχηματίζονται μεταξύ των διευθύνσεων στις οποίες αντιστοιχούν.
- Η γραφική αυτή λύση χρησιμοποιείται για να αναλυθεί η διάρρηξη των πετρωμάτων ή ακόμα η κίνηση επί των ρηγμάτων και των διακλάσεων.



Εικόνα 5-3: Ο κύκλος Mohr σε ορθογώνιο σύστημα συντεταγμένων (<http://bp3.blogger.com>)

5.5 Παραμόρφωση σώματος

Συνέπεια των τάσεων που ασκούνται σε ένα σημείο σώματος είναι η **παραμόρφωση** του υλικού σώματος που βρίσκεται στη γειτονιά του σημείου.

Η παραμόρφωση ενός στοιχείου ενός σώματος γύρω από το σημείο που βρίσκεται το στοιχείο αναλύεται σε τρία μέρη :

- Μεταβολή του όγκου του στοιχείου (κυβική παραμόρφωση).
- Μεταβολή του σχήματος του στοιχείου (διατμητική παραμόρφωση).
- Περιστροφή του στοιχείου.

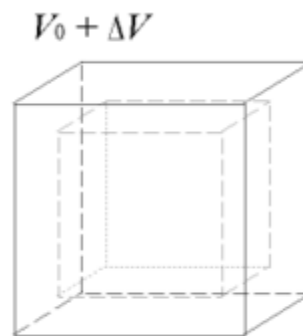
5.5.1 Κυβική παραμόρφωση

Ανηγμένη κυβική παραμόρφωση θ , είναι η μεταβολή δV του όγκου ενός στοιχείου του σώματος δια του αρχικού όγκου V του στοιχείου.

$$\theta = \frac{\delta V}{V} \quad (5.8)$$

Η κυβική παραμόρφωση είναι τανυστής δεύτερης τάξης του οποίου η κύρια διαγώνιος είναι μη μηδενική.

$$e_{ij} = \begin{pmatrix} e_{11} & 0 & 0 \\ 0 & e_{22} & 0 \\ 0 & 0 & e_{33} \end{pmatrix}$$

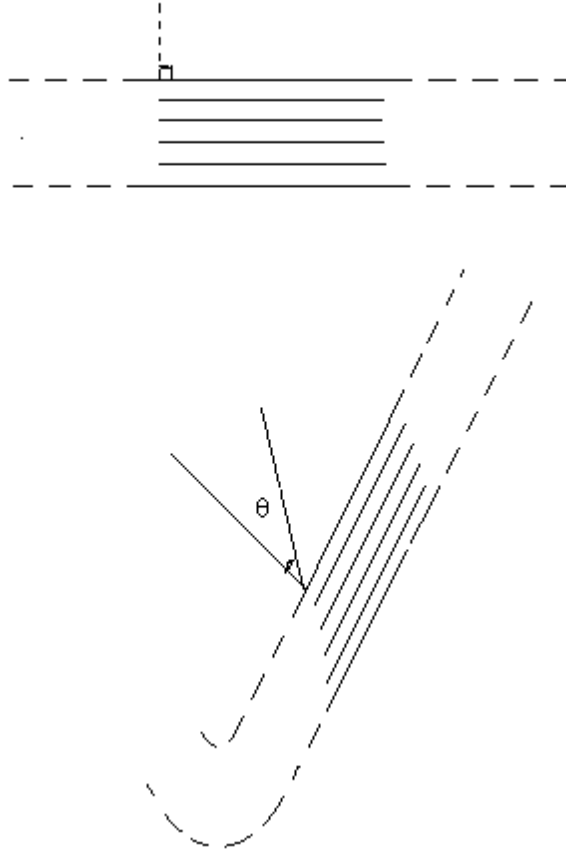


Εικόνα 5-4: Κυβική Παραμόρφωση (www.answers.com)

Οι συνιστώσες του τανυστή είναι οι συνιστώσες της ανηγμένης επιμήκυνσης. Το άθροισμα τους είναι ίσο με το λόγο της κυβικής παραμόρφωσης $\theta = e_1 + e_2 + e_3$ και γι' αυτό λέγεται **ανηγμένη κυβική παραμόρφωση**.

5.5.2 Διατμητική παραμόρφωση

Η **διατμητική παραμόρφωση** καθορίζει το ποσοστό το οποίο παράλληλες ευθείες μιας οικογένειας ευθειών έχουν ολισθήσει προς μια άλλη οικογένεια ευθειών. Η παραμόρφωση αυτή προσδιορίζεται από την τελική θέση μιας ευθείας η οποία αρχικά ήταν κάθετη στις προηγούμενες ευθείες.



Εικόνα 5-5: Οικογένεια ευθειών σε μη παραμορφωμένη κατάσταση αρχικά και οι ίδιες ευθείες σε παραμορφωμένη κατάσταση (Μαμούχα, 2008)

Η διατμητική παραμόρφωση είναι ένας συμμετρικός τανυστής δεύτερης τάξης του οποίου η κύρια διαγώνιος είναι μηδενική.

$$e_{ij} = \begin{pmatrix} 0 & e_{12} & e_{13} \\ e_{21} & 0 & e_{23} \\ e_{31} & e_{32} & 0 \end{pmatrix}$$

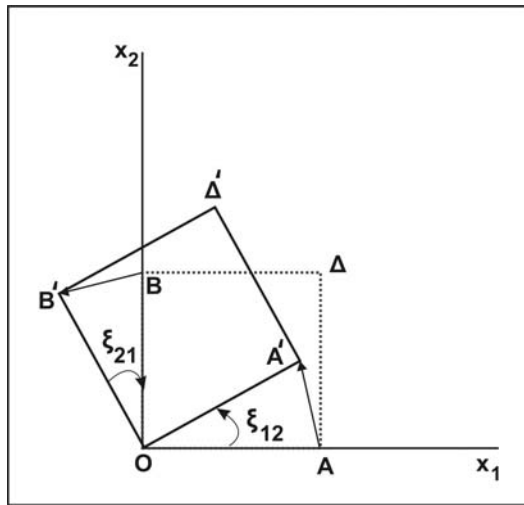
Οι σταθερές που βρίσκονται στον παραπάνω πίνακα λέγονται συνιστώσες **ανηγμένης διατμητικής παραμόρφωσης**.

5.5.3 Περιστροφή

Όταν σε ένα στερεό σώμα επιδρούν εξωτερικές δυνάμεις, τότε το στοιχείο του σώματος γύρω από το κεντρικό σημείο, εκτός από την κυβική και διατμητική παραμόρφωση, περιστρέφεται κατά ορισμένη γωνία.

Η περιστροφή του στοιχείου αναπαρίσταται με έναν τανυστή δεύτερης τάξης, ο οποίος είναι αντισυμμετρικός αφού ισχύει $\xi_{12} = -\xi_{21}$, $\xi_{32} = -\xi_{23}$, $\xi_{13} = -\xi_{31}$.

$$\xi_{ij} = \begin{pmatrix} 0 & \xi_{12} & \xi_{13} \\ \xi_{21} & 0 & \xi_{23} \\ \xi_{31} & \xi_{32} & 0 \end{pmatrix}$$



Εικόνα 5-6: Περιστροφή σώματος (Μαμούχα, 2008)

5.6 Ελαστικές σταθερές

Οι ελαστικές σταθερές του Lamé είναι αρκετές για να περιγραφεί η ελαστική παραμόρφωση ενός ελαστικού και ισότροπου μέσου. Οι σταθερές αυτές είναι οι λ και μ , όπου

$$\lambda = \frac{\nu \cdot E}{(1+\nu) \cdot (1-2\nu)}, \mu = \frac{E}{2 \cdot (1+\nu)} \quad (5.9)$$

Εκτός από τις σταθερές αυτές χρησιμοποιούνται και κάποιες άλλες, οι οποίες συνδέονται με τις σταθερές του Lamé αλλά καθορίζονται ευκολότερα πειραματικά. Τέτοιες σταθερές παρουσιάζονται παρακάτω :

1. **Μέτρο επιμήκους ελαστικότητας E** : Η σταθερά αυτή είναι ο λόγος της κάθετης τάσης που ασκείται κατά ορισμένη διεύθυνση προς την ανηγμένη επιμήκυνση που προκαλεί η τάση αυτή κατά την ίδια διεύθυνση (π.χ. $E = \frac{p_{11}}{e_{11}}$) και συνδέεται με τις σταθερές του Lamé με τη σχέση

$$E = \frac{\mu \cdot (3 \cdot \lambda + 2 \cdot \mu)}{\lambda + \mu} \quad (5.10)$$

2. **Λόγος Poisson ν** : Ο λόγος αυτός είναι της ανηγμένης επιμήκυνσης προς ορισμένη διεύθυνση προς την οποία ασκείται κάθετη τάση δια της ανηγμένης επιμήκυνσης του σώματος κατά τις διευθύνσεις που είναι κάθετες προς αυτή τη διεύθυνση (π.χ. $\nu = -\frac{e_{22}}{e_{11}} = -\frac{e_{33}}{e_{11}}$) και συνδέεται με τις ελαστικές σταθερές του Lamé με τη σχέση

$$\nu = \frac{\lambda}{2 \cdot (\lambda + \mu)} \quad (5.11)$$

3. **Μέτρο κυβικής ελαστικότητας κ** : Το μέτρο αυτό είναι ο λόγος της μεταβολής p , της υδροστατικής πίεσης που ασκείται ομοιόμορφα στην επιφάνεια ορισμένου σώματος δια της ανηγμένης κυβικής παραμόρφωσης θ , που προκαλείται στο σώμα από τη μεταβολή αυτή της πίεσης ($\kappa = -\frac{p}{\theta}$) και συνδέεται με τις σταθερές του Lamé με τη σχέση

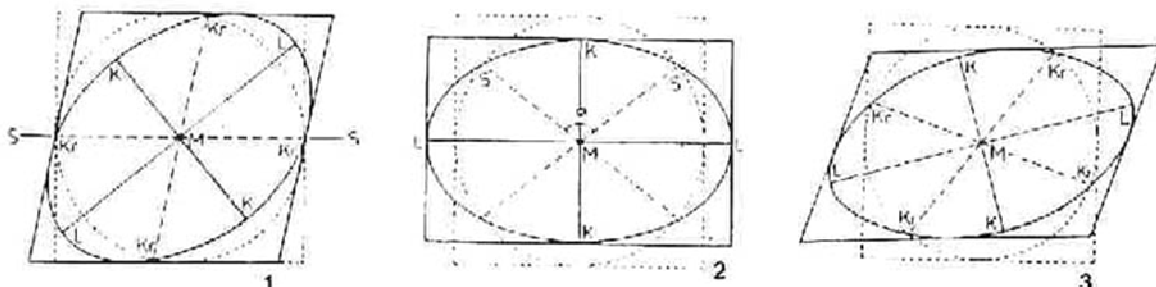
$$\kappa = \lambda + \frac{2}{3} \cdot \mu \quad (5.12)$$

Εκτός από το λόγο Poisson ο οποίος είναι αδιάστατος, οι υπόλοιπες σταθερές μετρώνται σε μονάδες τάσης (πίεσης).

5.7 Τύποι παραμορφώσεων με βάση την κινηματική τους θεώρηση

Τα διάφορα είδη παραμορφώσεων (τεκτονικές δομές), τα οποία παρατηρούνται στους γεωλογικούς σχηματισμούς, με βάση την κινηματική τους θεώρηση, ενδεχομένως να προκύψουν με έναν από τους τρόπους που παρουσιάζονται παρακάτω :

- ↪ **Περιστροφική παραμόρφωση** : Στην περίπτωση αυτή η παραμόρφωση συντελείται από ολισθήσεις, παραλληλεπιπέδων τμημάτων του γεωλογικού σχηματισμού, πάνω σ' ένα δίκτυο παράλληλων s – επιφανειών.
- ↪ **Μη περιστροφική παραμόρφωση** : Στην περίπτωση αυτή, η παραμόρφωση προκύπτει από την επίδραση πίεσης πάνω σε γεωλογικό σχηματισμό, ο οποίος έχει τη δυνατότητα να μεγεθύνεται πλευρικά.
- ↪ **Συνδυασμός περιστροφικής και μη παραμόρφωσης (πλάγια πίεση)**: Αποτελεί ενδιάμεση κατάσταση των δύο παραπάνω κύριων τύπων παραμόρφωσης. Πρόκειται για μια περιστροφική παραμόρφωση σε δύο διατμητικές επιφάνειες ολίσθησης, από τις οποίες η μία είναι εμφανής, ενώ η άλλη είναι υποτονισμένη.



Εικόνα 5-7: Οι τρεις τύποι παραμόρφωσης (Brinkmann, 1967) 1.Περιστροφική παραμόρφωση, 2.Μη περιστροφική παραμόρφωση, 3.Πλάγια παραμόρφωση

5.8 Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό αναφέρθηκε η συμπεριφορά των τάσεων που επικρατούν στα πετρώματα και στον τρόπο με τον οποίο η μεταβολή των τάσεων αλλάζει τη δυναμική κατάσταση των πετρωμάτων. Η μεταβολή των τάσεων οδηγεί στη συσσώρευση δυναμικής ενέργειας και όταν ξεπεραστούν τα όρια αντοχής των πετρωμάτων, στη θραύση τους και την εκδήλωση σεισμών για απελευθέρωση της συσσωρευμένης ενέργειας που βρίσκεται εντός των πετρωμάτων.

6 ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ COULOMB 3.1

6.1 Γενικά χαρακτηριστικά του Coulomb 3.1

6.1.1 Η λογική και η φιλοσοφία του προγράμματος

Το πρόγραμμα Coulomb δημιουργήθηκε από τη Γεωλογική Υπηρεσία των Ηνωμένων Πολιτειών Αμερικής (USGS) για εκπαιδευτικούς και ερευνητικούς σκοπούς. Είναι σχεδιασμένο έτσι ώστε να μπορεί να υπολογίζει στατικές μετατοπίσεις, παραμορφώσεις και τάσεις, οι οποίες προκαλούνται από την ενεργοποίηση των ρηγμάτων αλλά και από τη διείδυση του μάγματος στα πετρώματα. Οι μετατοπίσεις, οι παραμορφώσεις και οι τάσεις μπορούν να υπολογιστούν για οποιαδήποτε επιφάνεια και σε οποιοδήποτε βάθος.

Το πρόγραμμα αυτό είναι σχεδιασμένο για να ερευνήσει τις αλλαγές στις τάσεις Coulomb των ρηγμάτων, τα οποία έχουν χαρτογραφηθεί, αλλά ταυτόχρονα και σε αρχεία μετασεισμών. Όταν ένας σεισμός επιταχύνει ή εμποδίζει την ενεργοποίηση γειτονικών ρηγμάτων είναι πολύ σχετικά με το Coulomb. Είναι δυνατό να υπολογιστούν στατικές μετατοπίσεις πάνω σε μια επιφάνεια ή σε σταθμούς GPS. Όλοι οι υπολογισμοί γίνονται σε έναν ελαστικό και ισότροπο ημίχωρο με ομοιόμορφες ιδιότητες. Μια άλλη χρησιμότητα του Coulomb είναι η παραμόρφωση του γήινου φλοιού, η οποία συνδέεται με ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης, κανονικά ρήγματα ή πτυχές κάμψης πάνω σε μια επώθηση. Οι παραμορφώσεις αυτές απεικονίζονται εύκολα, χάρη στις πολλές επιλογές που υπάρχουν όπως οι ακμές που περιβάλλουν μια περιοχή, τα διανύσματα ή και η διαβάθμιση χρώματος.

Το κυριότερο χαρακτηριστικό είναι η εύκολη εισαγωγή των δεδομένων, καθώς και η τροποποίηση και οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων. Το πρόγραμμα διαθέτει menu, submenu και πλαίσια διαλόγου έτσι ώστε να γίνεται πιο εύκολη η λειτουργία. Τα γραφήματα που εξάγονται ως αποτέλεσμα μπορούν να εισαχθούν σε προγράμματα σχεδίασης για περαιτέρω επεξεργασία.

Βασικά προβλήματα τα οποία μπορούν να αντιμετωπιστούν με το πρόγραμμα αυτό είναι :

- Εάν ένας σεισμός μπορεί να προωθήσει ή να εμποδίσει τη μετέπειτα διάρρηξη γειτονικών ρηγμάτων.
- Εάν ένας σεισμός μπορεί να προκαλέσει τη συμπίεση μιας κοντινής ποσότητας μάγματος.
- Παρακολουθείται η παραμόρφωση του γήινου φλοιού, η οποία οφείλεται στην ολίσθηση και τη διάρρηξη των τεκτονικών ρηγμάτων. Οι ανηγμένες παραμορφώσεις απεικονίζονται εύκολα με διάφορες επιλογές παραμορφωμένου πλέγματος, ενώ οι οριζόντιες μετατοπίσεις χαρτογραφούνται με διανύσματα μετατοπίσεων και οι κατακόρυφες με σχέδια χρωματικής διαβάθμισης.

Το πρόγραμμα, το manual, καθώς και άλλα βοηθητικά στοιχεία βρίσκονται στην ιστοσελίδα <http://quake.usgs.gov>.

6.1.2 Απαιτήσεις του προγράμματος σε hardware και λογισμικό

- ✓ **Υπολογιστής Macintosh OS.X, Windows ή UNIX** : Δεν έχει ακόμα ελεγχθεί εάν το πρόγραμμα Coulomb 3.1 είναι συμβατό με υπολογιστές Unix ή με λειτουργικό Windows Vista αλλά μπορεί να «τρέξει» σε υπολογιστές με συστήματα Intel Mac.
- ✓ **Matlab 7.X ή μεγαλύτερης έκδοσης** : Δεν συνιστάται το Matlab 7.5 επειδή περιέχει πολλά bugs.
- ✓ **Έγχρωμη οθόνη**: Θα πρέπει η ανάλυση να είναι τουλάχιστον 600X400 pixel. Οι οθόνες των laptop (1024X768 pixel) είναι κατάλληλες.
- ✓ **Επεξεργαστής κειμένου** : Απαραίτητος για την επεξεργασία των αρχείων εισόδου τύπου ascii (Notepad), καθώς και φύλλα εργασίας για την ανάγνωση των κειμένων που ορίζονται με tabs (μερικά αρχεία εξόδου μπορούν να δημιουργηθούν με Excel).

6.1.3 Επιπλέον χαρακτηριστικά που προτείνονται

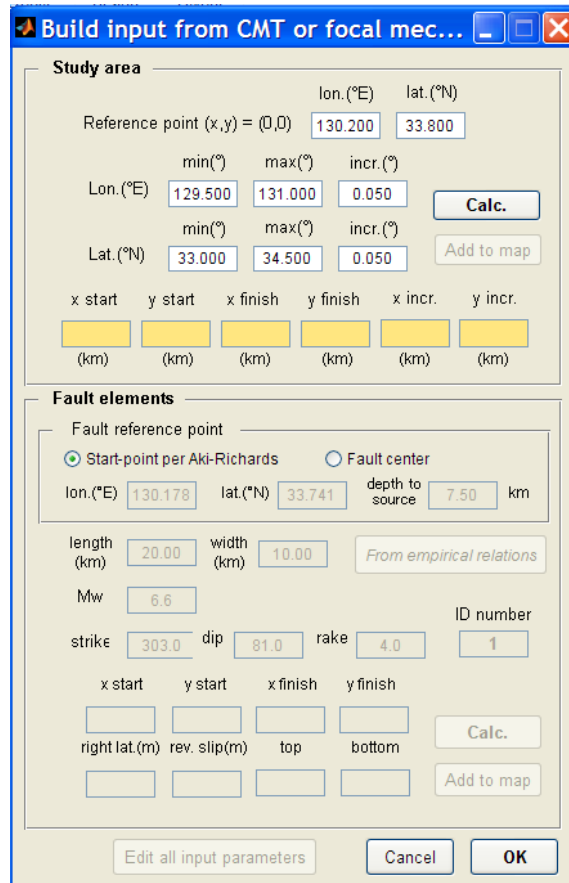
- Απαραίτητο ένα διανυσματικό (vector) πρόγραμμα σχεδίασης, όπως το Adobe Illustrator είναι απαραίτητο.
- Κατά την επεξεργασία των αρχείων εισόδου, προτείνεται η χρήση ενός επεξεργαστή κειμένου, η οποία επιτρέπει το διαχωρισμό των κενών διαστημάτων από τα tabs, όπως το BBEedit (διατίθεται ελεύθερα από την ιστοσελίδα www.barebones.com) ή Notepad για Windows.
- Το πρόγραμμα Google earth το οποίο είναι δωρεάν.
- Ένα πρόγραμμα επεξεργασίας εικόνας όπως το Microsoft Office Picture manager για καλύτερη οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων.

6.1.4 Νέες δυνατότητες του Coulomb 3.1

Στις προηγούμενες εκδόσεις του προγράμματος, το Coulomb μπορούσε να λειτουργήσει μόνο σε υπολογιστή Macintosh. Από την έκδοση Coulomb 3.0 και μετά το Coulomb μπορεί να λειτουργήσει τόσο σε Windows όσο και σε UNIX αλλά «τρέχει» με βάση το Matlab γιατί αποτελεί μια εφαρμογή του, όπως αναφέρθηκε και στις απαιτήσεις συστήματος.

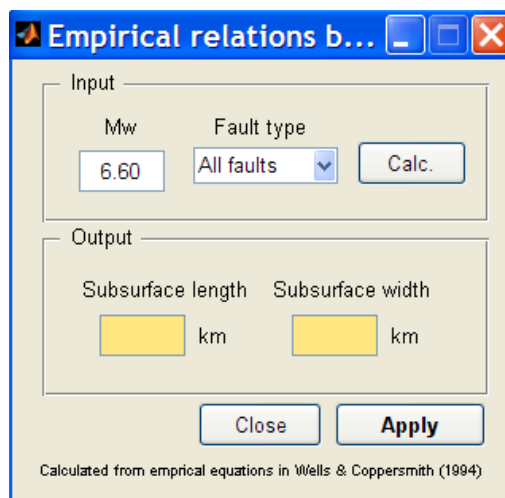
Ορισμένα χαρακτηριστικά του Coulomb έχουν βελτιωθεί στην έκδοση 3.1:

- Στα αρχεία εισόδου και εξόδου μπορεί να γίνει χρήση των (φ,λ) των σημείων.



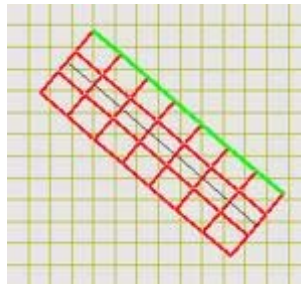
Εικόνα 6-1: Δημιουργία αρχείου εισόδου με απευθείας χρήση των ϕ και λ

- Από εμπειρικές σχέσεις υπολογίζονται το μήκος και το πλάτος της επιφάνειας του ρήγματος, γνωρίζοντας μόνο τη σεισμική ροπή M_w . Αξίζει να αναφερθεί ότι στην παρούσα διπλωματική εργασία δεν χρησιμοποιήθηκαν οι εμπειρικές σχέσεις αλλά οι σχέσεις του Παπαζάχου, οι οποίες αναφέρονται αποκλειστικά για τον Ελληνικό χώρο και παρουσιάστηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο.

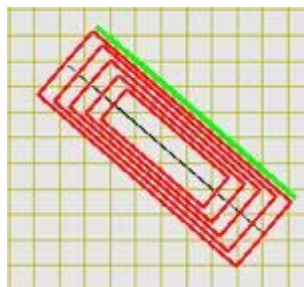


Εικόνα 6-2: Υπολογισμός επιφάνειας ρήγματος μέσω εμπειρικών σχέσεων

- Μπορούν να προστεθούν δεδομένα για ίχνη ενεργών ρηγμάτων, ακτογραμμών και σεισμών, τα οποία είναι διαθέσιμα στο διαδίκτυο και από βάσεις δεδομένων που βρίσκονται στο Coulomb. Τα δεδομένα αυτά μπορούν να ενσωματωθούν στα αρχεία εισόδου Matlab και να εμφανιστούν όταν «τρέξουν» ξανά τα αρχεία αυτά.
- Τα γραφήματα που προκύπτουν είναι πιο εύκολα στην επεξεργασία και το μέγεθος των αρχείων είναι μικρότερο.
- Οι αλλαγές τάσης μπορούν να επιλυθούν με βάση την κλίση των ρηγμάτων ή με προκαθορισμένες τιμές κλίσης. Οι τάσεις αυτές αναπαρίστανται τρισδιάστατα ή σε πίνακες. Οι αλλαγές στην ορθή και στη διατμητική τάση μπορούν να φανούν με την απόδοση σε εικόνα ενώ ο συντελεστής τριβής μπορεί να αλλάζει δυναμικά.
- Με το Coulomb μπορεί να αναπαρασταθεί η ολίσθηση που εμφανίζουν τα ρήγματα, με κωνοειδή κατανομή (tapered) ή ξεχωριστά για κάθε ένα τμήμα του ρήματος. Η κωνοειδής κατανομή δίνει αλλαγές τάσης που αντικατοπτρίζουν καλύτερα την πραγματικότητα από σεισμικές πηγές. Η ολίσθηση για κάθε ένα τμήμα του ρήματος χρησιμοποιείται σε διάφορα μοντέλα ολίσθησης που περιλαμβάνονται στη βάση δεδομένων.



Εικόνα 6-3: Επιφάνεια ρήματος για κάθε τμήμα ξεχωριστά (Subdivided slip)(quake.usgs.gov)



Εικόνα 6-4: Κωνοειδής ολίσθηση ρήματος (Tapered slip) (quake.usgs.gov)

- Τα αρχεία εξόδου μπορούν να εξαχθούν και να απεικονιστούν στο Google earth. Αυτό γίνεται εύκολα μέσω του Matlab και εισάγοντας την εντολή 'coulomb2googleearth'.

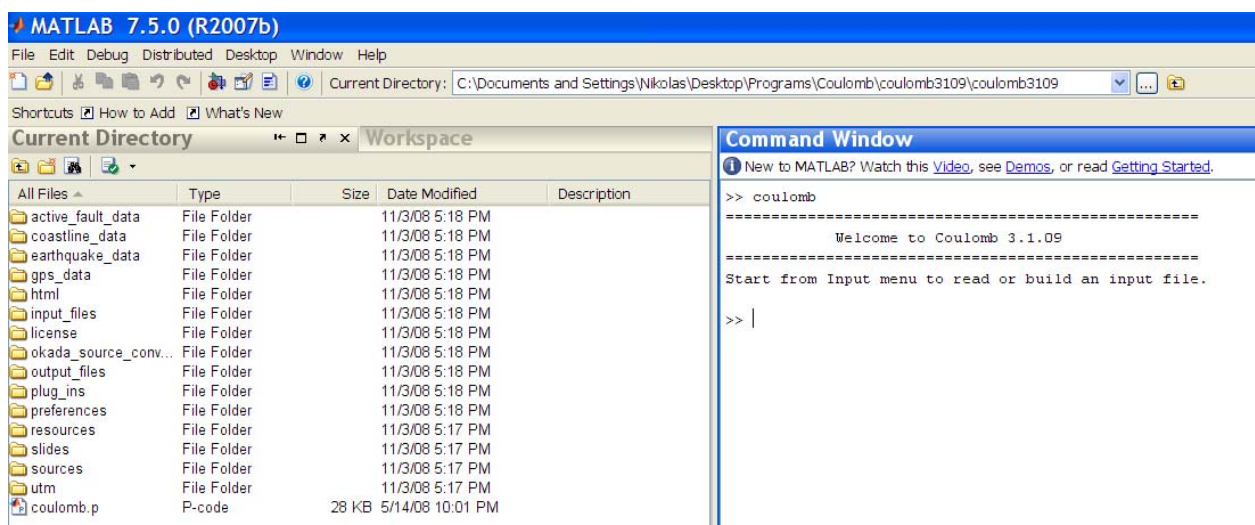
- Με χρήση των προσωρινών κεντροειδών και της σεισμικής ροπής M_w είναι εύκολη η δημιουργία αρχείων εισόδου ρηγμάτων με το επιθυμητό μήκος, πλάτος και ολίσθηση από εμπειρικές σχέσεις.
- Πάνω από 150 μοντέλα μεταβλητών ολίσθησης είναι διαθέσιμα στη διαδικτυακή βάση δεδομένων SCRMOD και μπορούν να φορτωθούν στο Coulomb ως αρχεία εισόδου.
- Είναι δυνατός ο υπολογισμός και η γραφική αναπαράσταση των τάσεων Coulomb που μεταδίδονται στις κομβικές ρηξιγενείς επιφάνειες.
- Το επιπρόσθετο αρχείο 1377 Faultsection Database το οποίο είναι μέρος της γεωλογικής έρευνας στο USGS της Καλιφόρνιας (California Geologic Fault Parameter Database) περιλαμβάνεται ως αρχείο εισόδου στη βάση του Coulomb σε τρεις διαφορετικές μορφές. Το αρχείο αυτό παρέχει όλα τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά που απαιτούνται για να χρησιμοποιηθούν τα ρήγματα της βάσης δεδομένων ως πηγές ή αποδέκτες και συμπεριλαμβάνονται η κορυφή και η βάση κάθε τμήματός τους, το ποσοστό της ολίσθησης κάθε τμήματός και η κλίση.
- Το Coulomb 3.1 σε αντίθεση με το Coulomb 3.0 περιέχει αρχεία ενεργών ρηγμάτων για τις δυτικές ΗΠΑ, την Ιαπωνία και την Τουρκία, τα οποία μπορούν να βοηθήσουν περισσότερο το χρήστη αφού είναι αμέσως διαθέσιμα.

6.2 Χρήση του Coulomb 3.1


6.2.1 Εκκίνηση του Coulomb

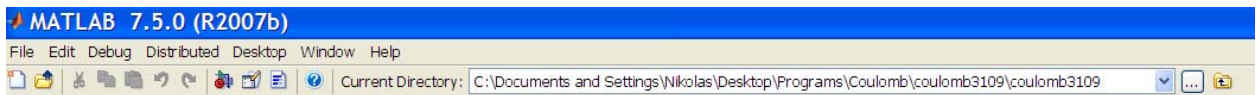
Όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω το Coulomb 3.1 αποτελεί εφαρμογή του Matlab. Παρακάτω παρουσιάζονται αναλυτικά τα βήματα που ακολουθούνται για την εκκίνηση του Coulomb 3.1 :

- Εκκίνηση του Matlab.



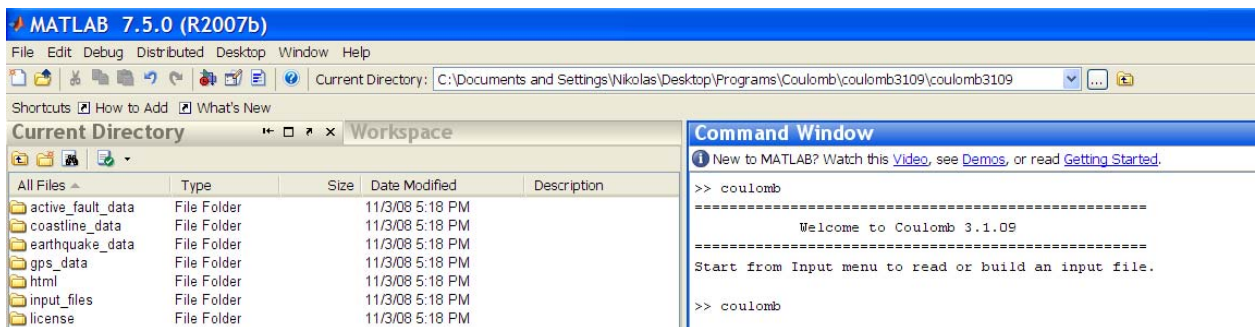
Εικόνα 6-5: Πρόγραμμα Matlab

- Από τη μπάρα εργαλείων που βρίσκεται στο πάνω μέρος του παραθύρου επιλέγεται το εικονίδιο  και στη συνέχεια ορίζεται το «μονοπάτι» (path) για το φάκελο που είναι αποθηκευμένο το Coulomb 3.1. Για παράδειγμα στην παρακάτω εικόνα φαίνεται ότι το Coulomb είναι αποθηκευμένο στο «C:\Documents and Settings\Nikolas\Desktop\Programs\Coulomb\coulomb3109».



Εικόνα 6-6:Επιλογή φακέλου που βρίσκεται το Coulomb

- Στο παράθυρο εντολών πληκτρολογείται η εντολή 'coulomb' και ένα καινούριο παράθυρο ανοίγει στο οποίο ανοίγει το Coulomb.

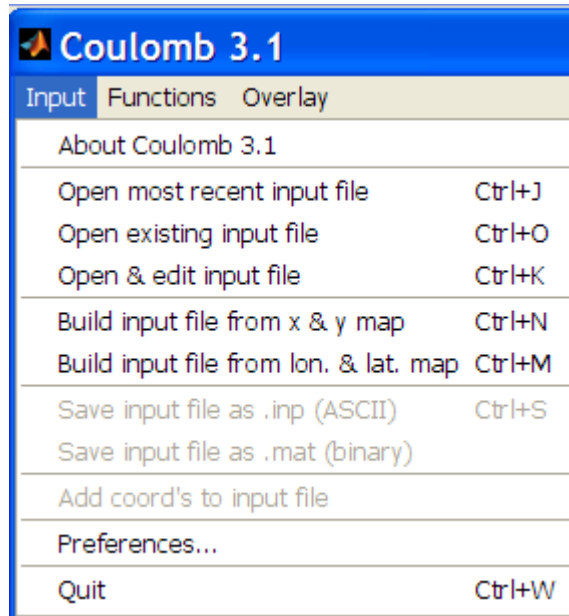


Εικόνα 6-7:Παράθυρο εντολών (command window) και εκκίνηση του Coulomb

6.2.2 Περιγραφή των menu

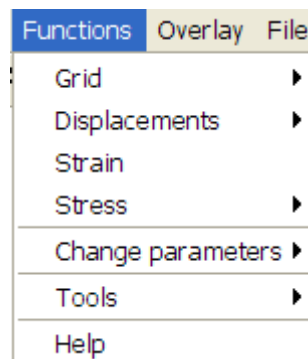
Όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω το πρόγραμμα αυτό περιέχει menu και submenu. Στην αρχική του μορφή το πρόγραμμα έχει τρεις επιλογές στο menu:

- ↳ **Input** : Το menu αυτό περιλαμβάνει εντολές που αφορούν τη διαχείριση των αρχείων, όπως δημιουργία (build), άνοιγμα (open), αποθήκευση (save as) καθώς και επιλογές (preferences). Αξίζει να αναφερθεί ότι στη δημιουργία αρχείου είναι δυνατό αυτό να δημιουργηθεί με X και Y αλλά και απευθείας με εισαγωγή φ, λ. Η αποθήκευση μπορεί να γίνει είτε σε μορφή .inp είτε σε μορφή .mat.



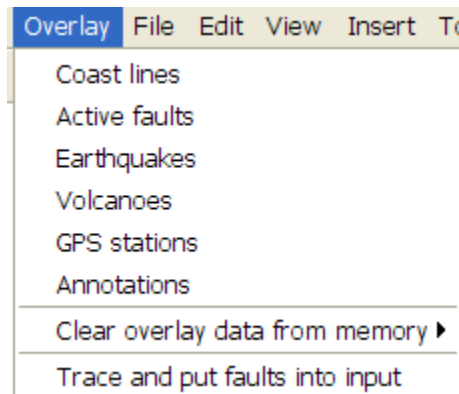
Εικόνα 6-8: Menu Input

- ↳ **Functions** : Μέσω του menu αυτού μπορούν να υπολογιστούν τάσεις, παραμορφώσεις και μετατοπίσεις. Επίσης μπορούν να τροποποιηθούν διάφορες παράμετροι που αφορούν κυρίως το πλέγμα (grid), το συντελεστή τριβής και το βάθος υπολογισμού.



Εικόνα 6-9: Menu Functions

- ↳ **Overlay** : Το menu overlay εξυπηρετεί την εισαγωγή δεδομένων που είναι ήδη διαθέσιμα. Δηλαδή μπορούν να προστεθούν αρχεία από έτοιμη βάση πάνω στα υπάρχοντα αρχεία, όπως είναι οι ακτογραμμές, οι σεισμοί και τα ενεργά ρήγματα. Αξίζει να αναφερθεί ότι το Coulomb 3.1 συμπεριλαμβάνει πολλά από αυτά τα δεδομένα.



Εικόνα 6-10: Menu Overlay

Κάτω από το menu αυτό υπάρχει η μπάρα εργαλείων με τα βασικά εικονίδια που υπάρχουν σχεδόν σε όλα τα προγράμματα Windows.



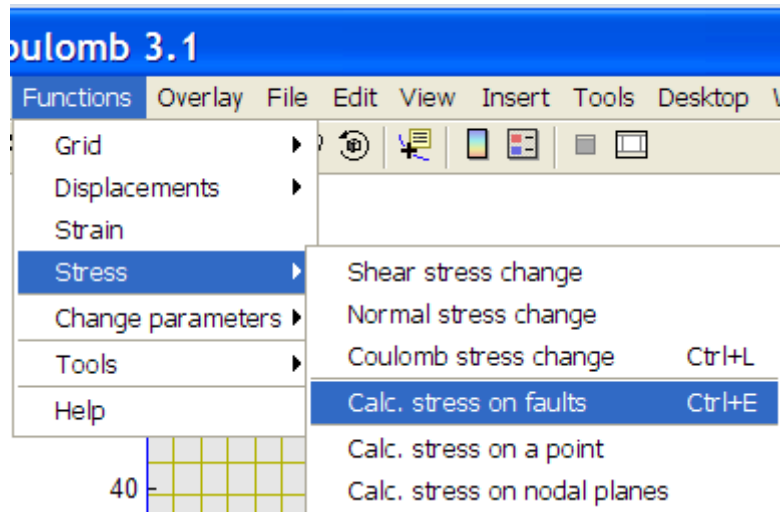
Εικόνα 6-11: Μπάρα εργαλείων

6.3 Βασικές έννοιες και διαστάσεις του προγράμματος

6.3.1 Η κρίσιμη έννοια των ρηγμάτων – πηγών και των ρηγμάτων – αποδέκτες

Τα *ρήγματα –πηγές* ολισθαίνουν κι έτσι μεταδίδουν την τάση στο φλοιό αλλά και στα περιβάλλοντα ρήγματα.

Τα *ρήγματα – αποδέκτες* δεν έχουν ολίσθηση, κι' αυτό φαίνεται από τα αρχεία εισόδου όπου $slip = 0.0m$. Τόσο τα ρήγματα – πηγές, όσο και τα ρήγματα – αποδέκτες εξετάζονται πανομοιότυπα στα αρχεία εισόδου. Η τάση που μεταδίδεται από τα ρήγματα – πηγές στα ρήγματα – αποδέκτες υπολογίζεται από την εντολή *Functions* → *Stress* → *Calc.stress on faults*.



Εικόνα 6-12: Υπολογισμός τάσης στα ρήγματα - αποδέκτες

6.3.2 Διαδικασία υπολογισμών

Παρακάτω παρουσιάζονται τα βήματα που ακολουθούνται έτσι ώστε να γίνουν υπολογισμοί τάσεων, μετατοπίσεων ή παραμορφώσεων στο Coulomb 3.1 από ένα αρχείο εισόδου:

- Έναρξη του Matlab στον υπολογιστή.
- Ορίζεται το path που βρίσκεται το Coulomb στη μπάρα εργαλείων του Matlab.
- Στο command window πληκτρολογείται coulomb για να ανοίξει το πρόγραμμα.
- Το Coulomb ανοίγει σε καινούριο παράθυρο. Μέσω της επιλογής Input του menu επιλέγεται *Input* → *Open an existing file* για να ανοίξει το αρχείο εισόδου. Το αρχείο αυτό δημιουργήθηκε και αποθηκεύτηκε σε προηγούμενη χρονική στιγμή.
- Από το menu επιλέγεται *Functions* → *Grid, Displacements, Strain or Stress*. Είναι δυνατό να επιλεγεί ένα από τα παραπάνω κάθε φορά αφού το καθένα αποτελεί ξεχωριστό submenu. Πολλές από αυτές τις επιλογές απαιτούν εισαγωγή επιπλέον στοιχείων ενώ υπάρχει η δυνατότητα αλλαγής των παραμέτρων σε ξεχωριστό παράθυρο. Με click στο *Calc & View* δημιουργείται μια καινούρια εικόνα αφού πρώτα εκτελεστούν όλοι οι υπολογισμοί αυτόματα από το πρόγραμμα.
- Όταν εκτελούνται υπολογισμοί μετατοπίσεων (displacements) ή τάσεων (stress) τότε δημιουργείται ένα νέο αρχείο εξόδου (output file), το οποίο ονομάζεται αυτόματα από το πρόγραμμα displacement.cou ή σε συντομία dcff.cou. Το αρχείο αυτό αντικαθίσταται κάθε φορά που εκτελείται ένας τέτοιος υπολογισμός και αποθηκεύεται στον υποφάκελο 'output files' που είναι μέσα στο φάκελο που βρίσκεται το Coulomb 3.1.

- Μπορούν επίσης να πραγματοποιηθούν πολλές λειτουργίες στην εικόνα που βρίσκεται στο παράθυρο, όπως *Zoom in*, *Zoom out*, *Pan* (μεταφορά αξόνων), *Rotate 3D* (τρισδιάστατη περιστροφή), *Data Cursor*, *Insert color bar* (εισαγωγή έγχρωμης μπάρας), *Insert color legend* (εισαγωγή έγχρωμου υπομνήματος) κ.ά. Η επιλογή αυτών γίνεται από το *menu Tools*. Η αποθήκευση των γραφημάτων γίνεται μέχρις ότου το παράθυρο είναι ανοικτό.
- Για να εκτυπωθεί μια εικόνα θα πρέπει να αποθηκευτεί ως .pdf αρχείο ή ως .jpg αρχείο και στη συνέχεια να εκτυπωθεί μέσω του Acrobat reader ή του Microsoft office picture manager.
- Για να εκτελεστεί ο επόμενος υπολογισμός θα πρέπει να επιλεγεί η επιθυμητή εντολή από το *Functions*. Μια νέα εικόνα θα απεικονίζει το νέο στοιχείο που υπολογίστηκε.
- Όταν ολοκληρωθούν όλοι οι επιθυμητοί υπολογισμοί κλείνει το *Coulomb* και στη συνέχεια και το *Matlab*.

6.3.3 Αλλαγή παραμέτρων στα αρχεία εισόδου

Οι περισσότερες ρυθμίσεις και παράμετροι μπορούν να αλλάξουν είτε τροποποιώντας τα αρχεία εισόδου με τη βοήθεια ενός επεξεργαστή κειμένου είτε μέσα από το πρόγραμμα. Αυτό γίνεται με την εντολή *Functions* → *Change parameters*. Οι αλλαγές είναι προσωρινές και το αρχείο δεν μεταβάλλεται μόνιμα. Κάθε φορά που το αρχείο αποθηκεύεται τότε σ' αυτό αποθηκεύονται όλες οι τρέχουσες ρυθμίσεις που τρέχουν στο αρχείο τη συγκεκριμένη στιγμή. Είναι επίσης δυνατόν να αποθηκευτεί το αρχείο με διαφορετικό όνομα για να μη χαθούν οι προηγούμενες ρυθμίσεις.

6.3.4 Αποθήκευση, εκτύπωση και επεξεργασία γραφήματος

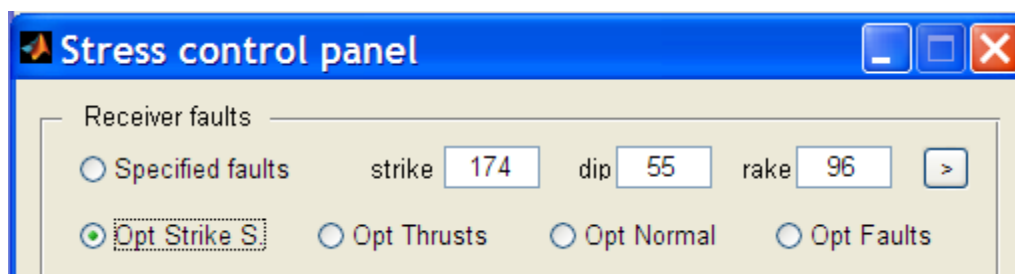
Επιλέγοντας *File* → *Save as ...* μπορεί να αποθηκευτεί το γράφημα αρχικά σε μορφή .pdf , αλλιώς θα αποθηκευτεί με αντικατάσταση ενός σημαντικού αρχείου με το όνομα *'main_menu_window.fig'* . Μπορεί στη συνέχεια το αρχείο αυτό να εκτυπωθεί μέσω του Acrobat reader ή κάποιου άλλου προγράμματος σχεδίασης. Επίσης είναι δυνατόν το γράφημα να αποθηκευτεί σε μορφή αρχείου .jpg με δυνατότητα περαιτέρω επεξεργασίας του γραφήματος.

6.3.5 Συντεταγμένες, μονάδες και συμβάσεις συμβολισμού

Το *Coulomb 3.1* πραγματοποιεί τους υπολογισμούς στο καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων (x, y, z). Όταν καθοριστεί το γεωγραφικό πλάτος και το γεωγραφικό μήκος (φ, λ) για τις γωνίες του πλέγματος στο αρχείο εισόδου (min and max latitude, min and max longitude), τότε η προβολή του αρχείου είναι δυνατόν να γίνει με χρήση των (φ, λ) στην προβολή των χαρτών στην οθόνη. Το x είναι θετικό από αριστερά προς δεξιά, ενώ το y είναι θετικό από κάτω προς τα πάνω ενώ το σύστημα συντεταγμένων υλοποιείται με το z το οποίο είναι θετικό προς τα πάνω για τη μετατόπιση. Το βάθος είναι θετικό προς τα κάτω

από τη γήινη επιφάνεια. Παρακάτω ακολουθούν οι μονάδες των παραμέτρων για τα αρχεία εισόδου :

- ✓ **PR1 Λόγος Poisson (Poisson's ratio)** : [αδιάστατος αριθμός, 0 – 1] : 0.25 είναι η πιο συνηθισμένη τιμή.
- ✓ **E1 Μέτρο ελαστικότητας (Young modulus)** : [bars] : Συνηθισμένη τιμή $8 \cdot 10^5 \text{ bars}$.
- ✓ **FRIC Συντελεστής τριβής (Friction coefficient)** : [αδιάστατος αριθμός] : Συχνά χρησιμοποιείται η τιμή 0.4.
- ✓ **Διευθύνσεις, γωνία και βύθιση (directions, angle and dip)** : [μοίρες] : Η βύθιση πρέπει να έχει θετική τιμή.
- ✓ **Θέσεις πλέγματος και ρηγμάτων (x, y) (grid and fault positions)** : [km].
- ✓ **Βάθος (depth)** : [km] : Προς τα κάτω θετικό από την επιφάνεια της γης.
- ✓ **Μετατοπίσεις (displacements)** : [m].
- ✓ **Ρήγματα (faults)** : [m] : Με θετική προσήμανση λαμβάνονται τα δεξιόστροφα ρήγματα και η ανάστροφη ολίσθηση.
- ✓ **Ρηγματώσεις (dikes)** : [m] : Θετική λαμβάνεται η διάνοιξη.
- ✓ **Σημειακή πηγή (point source)** : [m³] : Ως θετική λαμβάνεται η αναθόλωση.
- ✓ **Τοπικό καθεστώς τάσεων** : [bars] : Η θετική τιμή λαμβάνεται κατά τη θλίψη. Το τοπικό καθεστώς τάσεων δημιουργείται από το ρήγμα που μελετάται κάθε φορά και λαμβάνεται υπόψη μόνο εάν εκτελεστεί ο υπολογισμός *Functions* → *Stress* → *Coulomb stress change* και στη συνέχεια, αφού εμφανιστεί νέο παράθυρο διαλόγου επιλέγεται μία από τις επιλογές προσανατολισμού (optimally – oriented), αλλιώς οι τάσεις αγνοούνται. Επίσης μπορούν να οριστούν οι κύριοι άξονες της τάσης, οι οποίοι είναι κάθετοι μεταξύ τους, με την εντολή *Functions* → *Tools* → *Principal axes calculator*. Για την οπτικοποίηση των αξόνων επιλέγεται η εντολή *Functions* → *Stress* → *Coulomb stress change* και στη συνέχεια μαρκάρονται οι άξονες 'Principal axes' στο νέο παράθυρο που ανοίγει.



Εικόνα 6-13: Πλαίσιο διαλόγου για τις τάσεις Coulomb

- ✓ **Μέτρο διάτμησης** : Το μέτρο ελαστικότητας E1 και ο λόγος Poisson PR1 ορίζονται στο αρχείο εισόδου, ενώ μεταξύ τους ισχύει η σχέση

$$G = \frac{E1}{2 \cdot (1 + PR1)} \quad (6.1)$$

Για τις τιμές που αναφέρθηκαν πιο πάνω (PR1=0.25 και E1=8 · 10⁵ bars) προκύπτει ότι το μέτρο διάτμησης G είναι $G = 3.2 \cdot 10^5 \text{ bars}$ ή $G = 3.2 \cdot 10^{11} \text{ dyn} \cdot \text{cm}^{-2}$.

Όσον αφορά τα αρχεία εξόδου οι μονάδες των παραμέτρων αυτών, παρουσιάζονται παρακάτω :

- ✓ **Μετατόπιση (displacement)** : [m] : Θετικές λαμβάνονται οι μετατοπίσεις που έχουν βόρεια, ανατολική και προς τα πάνω κατεύθυνση.
- ✓ **Διατμητική τάση (shear stress)** : [dyn*cm⁻²] : Η δεξιόστροφη διατμητική τάση είναι θετική.
- ✓ **Κύρια τάση (Principal stress)** : [dyn*cm⁻²] : Ως θετικός λαμβάνεται ο εφελκυσμός (tensor notation).
- ✓ **Τάση διαστολής (dilatational stress)** : [dyn*cm⁻²] : Η διαστολή θεωρείται θετική.
- ✓ **Τάση (stress)** : [bars] : Η δεξιόστροφη τάση και ο εφελκυσμός έχουν θετικές τιμές.

6.4 Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό αναπτύχθηκε επιγραμματικά το πρόγραμμα Coulomb 3.1 το οποίο έχει πολλές δυνατότητες όσον αφορά τον υπολογισμό τάσεων, παραμορφώσεων και μετατοπίσεων αλλά και με την οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν. Αξίζει να αναφερθεί ότι περαιτέρω ανάλυση του προγράμματος υπάρχει στο manual του προγράμματος το οποίο βρίσκεται στην ιστοσελίδα <http://quake.usgs.gov/research/deformation/modeling/coulomb/download.html> που βρίσκεται το πρόγραμμα και το επιστημονικό υπόβαθρο.

7 ΤΟ ΓΕΩΔΑΙΤΙΚΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΤΟΥ ΕΠΙΠΕΔΟΥ COULOMB ΚΑΙ ΤΟΥ ΕΛΛΕΙΨΟΕΙΔΟΥΣ GOOGLE EARTH

7.1 Γενικά

Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, το Coulomb πραγματοποιεί τους υπολογισμούς στο επίπεδο σύστημα συντεταγμένων. Το πρόβλημα που δημιουργείται είναι ότι ενώ το Coulomb πραγματοποιεί τους υπολογισμούς στο επίπεδο σύστημα συντεταγμένων, όταν γίνεται η απεικόνιση στο Google earth, το οποίο είναι ελλειψοειδές, τότε υπεισέρχεται παραμόρφωση και το αποτέλεσμα είναι οι μετατοπίσεις να απεικονίζονται σε διαφορετικό σημείο απ' όπου πραγματικά βρίσκονται. Γι' αυτό κατ' αρχήν η περιοχή του Ιονίου χωρίστηκε με βάση τις γεωγραφικές συντεταγμένες ϕ και λ σε τρεις υποπεριοχές, ανάλογα με το πού βρίσκονται τα ρήγματα. Οι τρεις υποπεριοχές επιλέχθηκαν με βάση τα νησιά που είναι πλησίον των αντίστοιχων ρηγμάτων και προέκυψαν τα ρήγματα της Ζακύνθου, της Λευκάδας και της Κεφαλονιάς. Παρακάτω παρουσιάζεται εκτενέστερα το πρόβλημα αυτό, καθώς και η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την αποφυγή του προβλήματος αυτού.

7.2 Ασυμβατότητα Coulomb και Google earth

Όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω οι υπολογισμοί των οριζόντιων μετατοπίσεων στο Coulomb πραγματοποιούνται στο επίπεδο σύστημα συντεταγμένων (X, Y, Z) και το Google Earth είναι ελλειψοειδές.

Από τη θεωρία της επίπεδης γεωδαισίας είναι γνωστό πως το επίπεδο και το ελλειψοειδές ταυτίζονται μόνο σε μια μικρή έκταση. Εάν απεικονιστούν οι μετατοπίσεις στο ελλειψοειδές του Google earth τότε αυτές θα απεικονιστούν σε διαφορετικό σημείο απ' ότι στην πραγματικότητα γιατί το επίπεδο και το ελλειψοειδές δεν ταυτίζονται παντού, αλλά σε μια μικρή έκταση. Υπάρχει όμως μια μικρή περιοχή που με βάση την ακρίβεια που υπάρχει στον υπολογισμό των μετατοπίσεων, όπου μπορεί το ελλειψοειδές να θεωρηθεί επίπεδο. Για το λόγο αυτό το Ιόνιο χωρίστηκε σε μικρότερες περιοχές ούτως ώστε οι μετατοπίσεις να απεικονίζονται εκεί που πραγματικά είναι γιατί σε μικρή έκταση θεωρείται ότι το ελλειψοειδές ταυτίζεται με το επίπεδο. Η έκταση αυτή θα προσδιοριστεί παρακάτω. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι το επίπεδο και το ελλειψοειδές ταυτίζονται σε μια έκταση της οποίας το κέντρο είναι το κέντρο βάρους της περιοχής. Η έκταση που ταυτίζονται οι δύο επιφάνειες αναφοράς προσδιορίζεται παρακάτω και αντιστοιχεί σε ακτίνα $R = \chi$ από το κέντρο της περιοχής.

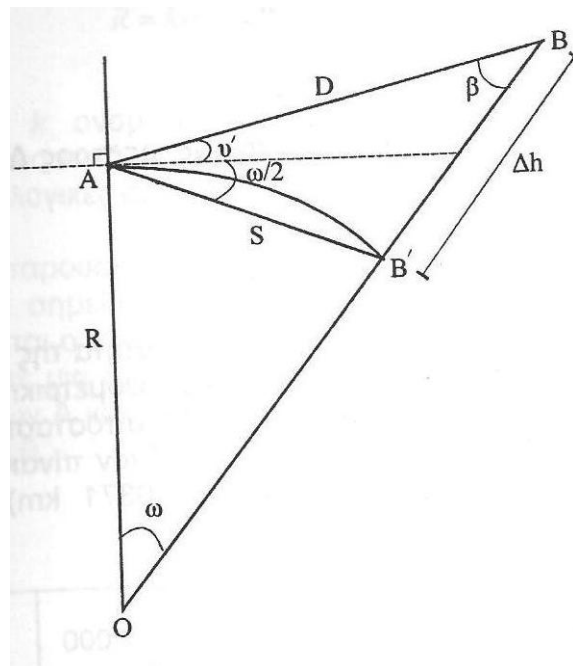
7.3 Επίδραση της καμπυλότητας

Για περιορισμένες εκτάσεις, τα σημεία της επιφάνειας της Γης προβάλλονται σε ένα επίπεδο που εφάπτεται της επιφάνειας της «σφαιρικής» Γης. Το επίπεδο αυτό πρακτικά ταυτίζεται με την επιφάνεια της σφαίρας για μικρή απόσταση από το σημείο επαφής, δηλαδή, για μικρές αποστάσεις, η γη ταυτίζεται με ένα επίπεδο, χωρίς αυτό να προσδίδει μεγάλα σφάλματα. Όσο όμως η απόσταση μεγαλώνει, τόσο μεγαλύτερη είναι η απόκλιση της επιφάνειας της σφαιρικής Γης από το επίπεδο. Το γεγονός αυτό συνεισφέρει τόσο

οριζοντιογραφικό όσο και υψομετρικό σφάλμα στον προσδιορισμό της θέσης των σημείων της φυσικής γήινης επιφάνειας.

Έτσι κατά τον προσδιορισμό των οριζόντιων μετατοπίσεων το οριζοντιογραφικό και υψομετρικό σφάλμα υπεισέρχεται σ' αυτές, με αποτέλεσμα να εμφανίζονται σε άλλο σημείο απ' ότι είναι στην πραγματικότητα.

Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται μια τομή της γης κατά το μέγιστο κύκλο που ορίζεται από τα σημεία A και B. Η γη θεωρείται σφαίρα ακτίνας R.



Εικόνα 7-1: Τομή της γης κατά το μέγιστο κύκλο (Μπαλοδήμος – Αραμπατζή, 2004)

Από το τρίγωνο ABO προκύπτει :

$$(v' + 100^g) + \omega + \beta = 200^g \quad (7.1)$$

και

$$\beta = 100^g - (v' + \omega) \quad (7.2)$$

Αν στο τρίγωνο ABB' εφαρμοστεί ο νόμος ημιτόνων, τότε :

$$\frac{\Delta h}{S} = \frac{\sin(v' + \frac{\omega}{2})}{\sin \beta} = \frac{\sin(v' + \frac{\omega}{2})}{\cos(v' + \omega)} \quad (7.3)$$

όπου, v' : η γωνία ύψους μετρημένη στο σημείο A, χωρίς την επίδραση της διάθλασης

ω : η γεωκεντρική γωνία

$\frac{\omega}{2}$: η γωνία χορδής και εφαπτομένης

Θεωρείται ότι το τόξο $AB'=S$ ισούται με το μήκος AB' , γιατί η καμπυλότητα του τόξου AB' είναι αμελητέα ($S \ll R$).

Επειδή η γεωκεντρική γωνία είναι πολύ μικρή, αν τα $\sin(v' + \frac{\omega}{2})$ και $\cos(v' + \omega)$ αναπτυχθούν σε σειρά, θα είναι :

$$\sin(v' + \frac{\omega}{2}) = \sin v' + \frac{\omega}{2} \cdot \cos v' + \dots \quad (7.4)$$

και

$$\cos(v' + \omega) = \cos v' + \dots \quad (7.5)$$

Επομένως, αντικαθιστώντας στις σχέσεις (7.4) και (7.5) στη σχέση (7.3), θα προκύψει η παρακάτω σχέση :

$$\frac{\Delta h}{S} = \frac{\sin v' + \frac{\omega}{2} \cos v'}{\cos v'} = \tan v' + \frac{\omega}{2} \quad (7.6)$$

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η γωνία ω είναι πολύ μικρή και έτσι από το τρίγωνο $AB'O$ προκύπτει :

$$\sin \omega \approx \omega \approx \frac{S}{R} \quad (7.7)$$

Αντικαθιστώντας τη σχέση (7.7) στη σχέση (7.6) και λύνοντας ως προς Δh , θα προκύψει τελικά η σχέση :

$$\Delta h = S \cdot \tan v' + \frac{S^2}{2 \cdot R} \quad (7.8)$$

Η ποσότητα $\frac{S^2}{2 \cdot R}$ προστίθεται πάντοτε στον υπολογισμό υψομετρικών διαφορών που προσδιορίζονται με Τριγωνομετρική Υψομετρία. Αυτό γίνεται λόγω της επίδρασης στον προσδιορισμό των υψομετρικών διαφορών της καμπυλότητας της Γης.

Η επίδραση της καμπυλότητας από το ελλειψοειδές στο επίπεδο παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα.

S (km)	0.12	0.5	1	2.5	5	10
S²/2*R (cm)	0.1	2	7.9	49	196.2	784.8

Πίνακας 7-1: Επίδραση της καμπυλότητας (Μπαλοδήμος – Αραμπατζή, 2004)

Όπως φαίνεται και στον παραπάνω πίνακα η επίδραση λόγω καμπυλότητας στα 10 km είναι $784.8 \text{ cm} \approx 785 \text{ cm} = 7.85 \text{ m}$.

7.4 Ενδεικτικό παράδειγμα

Αφού παρουσιάστηκε η επίδραση της καμπυλότητας, παρακάτω παρουσιάζεται ένα ενδεικτικό παράδειγμα ούτως ώστε να αποδειχθεί και πρακτικά ότι ισχύουν τα παραπάνω.

Υπολογίστηκε λοιπόν, μια απόσταση στο ελλειψοειδές και στο επίπεδο με βάση τις γεωγραφικές και τις καρτεσιανές συντεταγμένες των δύο σημείων της γραμμής αντίστοιχα. Τα σημεία αυτά ήταν γνωστά και στα δύο συστήματα αναφοράς και γι' αυτό χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό της απόστασης. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι συντεταγμένες των δύο σημείων στο ελλειψοειδές και το επίπεδο.

<u>ΕΠΙΠΕΔΟ</u>		<u>ΕΛΛΕΙΨΟΕΙΔΕΣ</u>	
X_1	4626811.0237	ϕ_1	38° 35' 57".65547
Y_1	1874394.0140	λ_1	22° 03' 13".27391
Z_1	3958350.4470	h_1	1115.70 m
X_2	4628581.7070	ϕ_2	38° 29' 08".452
Y_2	1889602.2980	λ_2	22° 12' 27".23454
Z_2	3948105.1680	h_2	494.814 m

Πίνακας 7-2: Συντεταγμένες σημείων στο επίπεδο και το ελλειψοειδές

Υπολογίζοντας της απόσταση μέσω των συντεταγμένων στο επίπεδο προκύπτει ότι η γεωμετρική απόσταση των δύο σημείων είναι περίπου 18419 km ενώ υπολογίζοντας την γεωδαισιακή απόσταση μέσω των γεωγραφικών συντεταγμένων προκύπτει ότι η απόσταση των δύο σημείων είναι περίπου 18434 km. Είναι προφανές ότι το σφάλμα προσδιορισμού της απόστασης των δύο σημείων στα αντίστοιχα συστήματα αναφοράς είναι περίπου της τάξης των 15 km. Παρακάτω θα αναφερθούν οι λόγοι για τους οποίους ακόμη και με ένα σφάλμα της παραπάνω τάξης, το ελλειψοειδές μπορεί να θεωρηθεί ότι ταυτίζεται με το επίπεδο.

7.5 Σύγκριση της επίδρασης της καμπυλότητας με την ανάλυση του Google earth

Όπως αναλύθηκε και πιο πάνω, η επίδραση της καμπυλότητας στην απόσταση των 10 km είναι 7.85 m ενώ υπολογίζοντας την απόσταση δύο σημείων στο ελλειψοειδές και στο επίπεδο προκύπτει μια διαφορά περίπου 15 km.

Η ανάλυση του Google earth κυμαίνεται σε διάφορες τιμές, οι οποίες εξαρτώνται από την περιοχή που κάθε φορά παρατηρείται. Όσον αφορά την Ελλάδα, η καλύτερη του ανάλυση είναι στην Αττική. Η ανάλυση αυτή, φθάνει στην καλύτερη της τιμή τα 15 m.

Όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω σε απόσταση 10 km η επίδραση λόγω καμπυλότητας είναι 7.85 m και η τιμή αυτή πρέπει πάντα να προστίθεται στις υψομετρικές διαφορές που προσδιορίζονται με τριγωνομετρική υψομετρία.

Στην Ελλάδα όμως, η καλύτερη ανάλυση (pixel size) που παρέχει το Google earth είναι της τάξης των 15 m, τιμή η οποία είναι μεγαλύτερη από την τιμή επίδρασης της καμπυλότητας για την απόσταση των 10 km. Γίνεται αντιληπτό λοιπόν, ότι είναι πιθανόν και σε μεγαλύτερη απόσταση των 10 km να θεωρηθεί ότι το επίπεδο ταυτίζεται με το ελλειψοειδές του Google earth, αφού η ανάλυση του Google earth είναι της τάξης των 15 m.

Θεωρώντας ότι η επίδραση της καμπυλότητας στην απόσταση των 10 km είναι περίπου της τάξης του μισού της ανάλυσης του Google earth, μπορεί να θεωρηθεί ο ισχυρισμός ότι στη διπλάσια απόσταση των 10 km το επίπεδο ταυτίζεται με το ελλειψοειδές. Για να αποφευχθεί η εισαγωγή περαιτέρω σφάλματος από αυτήν την παραδοχή αλλά και για μεγαλύτερη ακρίβεια και ασφάλεια, δεν θα γίνει αυτή η παραδοχή αλλά θα θεωρηθεί η έκταση η οποία ικανοποιεί όλες τις παραμέτρους που επηρεάζουν.

Για τον προσδιορισμό της έκτασης αυτής, λαμβάνονται υπόψη η επίδραση της καμπυλότητας, όπως αυτή παρουσιάστηκε παραπάνω, η ανάλυση του Google earth, η οποία για την Ελλάδα κυμαίνεται στα 15 m, αλλά και το παράδειγμα υπολογισμού της απόστασης σε ελλειψοειδές και επίπεδο.

7.6 Προσδιορισμός έκτασης στην οποία το ελλειψοειδές ταυτίζεται με το επίπεδο

Για τον προσδιορισμό της έκτασης αυτής, ως δεδομένα θεωρούνται τα στοιχεία του πίνακα 7-1, τα οποία απεικονίζουν την επίδραση της καμπυλότητας, το παράδειγμα που αναφέρθηκε πιο πάνω και ο υπολογισμός απόσταση τόσο στο ελλειψοειδές, όσο και στο επίπεδο της απόστασης μεταξύ δύο σημείων. Λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση της καμπυλότητας στα 10 km, το γεγονός ότι γεωμετρική και γεωδαισιακή απόσταση διαφέρουν 15 km και ότι η ανάλυση του Google earth είναι μεγαλύτερη, δηλαδή χειρότερη από άποψη ακρίβειας, από την επίδραση της καμπυλότητας εξάγεται το παρακάτω συμπέρασμα.

Οριακά, λοιπόν, μπορεί κανείς να θεωρήσει ότι μια μέση επιφάνεια των $15 \cdot 15 \text{ km}^2$ στο ελλειψοειδές, ταυτίζεται με την ίδια επιφάνεια στο επίπεδο, αφού όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω και συγκρίνοντας τον προσδιορισμό απόστασης των ίδιων σημείων στο επίπεδο και στο ελλειψοειδές είναι της τάξης των 15 km.

Για να αποφευχθεί η λάθος απεικόνιση των οριζόντιων μετατοπίσεων, το Ιόνιο πέλαγος χωρίστηκε σε τρεις μικρότερες περιοχές έτσι ώστε να μειωθούν τα όρια της περιοχής, αλλά και με βάση την παραπάνω ανάλυση έγινε η παραδοχή ότι στην έκταση που αναφέρθηκε το ελλειψοειδές θεωρείται επίπεδο. Στη συνέχεια το πρόβλημα αυτό λύνεται, αφού πλέον μελετάται ξεχωριστά η κάθε υποπεριοχή καθώς τα όρια της κάθε μίας έχουν μειωθεί.

7.7 Συμπεράσματα

Το Coulomb 3.1 κάνει όλους τους υπολογισμούς στο επίπεδο σύστημα συντεταγμένων, ενώ το Google earth είναι ελλειψοειδές. Είναι προφανές ότι κατά την απεικόνιση των τάσεων και των μετατοπίσεων στο Google earth προκύπτουν προβλήματα λόγω αυτής της διαφοράς των δύο προγραμμάτων στο σύστημα αναφοράς που χρησιμοποιούν. Στο κεφάλαιο αυτό αναλύθηκε το πρόβλημα αυτό, καθώς και τα μέτρα που ακολουθήθηκαν για την αντιμετώπισή του.

8 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ – ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΑΣΕΩΝ COULOMB ΚΑΙ ΟΡΙΖΟΝΤΙΩΝ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΕΩΝ

8.1 Γενικά

Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο ο σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη αλληλεπίδρασης των ρηγμάτων που βρίσκονται στην περιοχή των Ιονίων νήσων. Ο υπολογισμός δηλαδή της μεταβολής των τάσεων Coulomb και των οριζόντιων μετατοπίσεων, η απεικόνισή τους στο Google earth και εν τέλει ο υπολογισμός παραμορφώσεων από τα δεδομένα GPS και σύγκριση με αποτελέσματα από προηγούμενη εργασία.

Συγκεκριμένα παρακάτω θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα για τους σεισμούς που έχουν συμβεί στην περιοχή των Ιονίων νήσων τα τελευταία τριάντα χρόνια (1972 – 2003). Αξίζει να αναφερθεί ότι τα ρήγματα που έχουν διαρρηχθεί και φαίνονται παρακάτω είναι κυρίως ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης και ανάστροφα, ενώ λίγα δε, έχουν κανονικό χαρακτήρα.

8.2 Διαδικασία που ακολουθήθηκε

8.2.1 Υπολογισμός τάσεων Coulomb και οριζόντιων μετατοπίσεων και απεικόνισή τους στο Google earth

Στο προηγούμενο κεφάλαιο παρουσιάστηκε η επίδραση της καμπυλότητας κατά την εκπόνηση της διπλωματικής αυτής εργασίας. Στο κεφάλαιο αυτό αναλύθηκε και ο τρόπος με τον οποίο αντιμετωπίστηκε το πρόβλημα αυτό.

Όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω η περιοχή του Ιονίου πελάγους, χωρίστηκε σε τρεις υποπεριοχές έτσι ώστε να μειωθούν τα όρια της περιοχής. Οριακά μπορεί να θεωρηθεί ότι μια μέση επιφάνεια των $15 \cdot 15 \text{ km}^2$ στο ελλειψοειδές, ταυτίζεται με την ίδια επιφάνεια στο επίπεδο.

Τα δύο προγράμματα (Coulomb και Google earth) ταυτίζονται μόνο στο κέντρο της περιοχής. Για τον λόγο αυτό και λαμβάνοντας υπόψη τη μέση επιφάνεια που στο ελλειψοειδές μπορεί να θεωρηθεί επίπεδη, η περιοχή χωρίστηκε με βάση τα φ και λ σε τρεις μικρότερες.

Τα δεδομένα των σεισμών πάρθηκαν από προηγούμενες διπλωματικές εργασίες στις οποίες είχαν μελετηθεί οι ίδιες σεισμικές διαρρήξεις.

Αρχικά λοιπόν, συγκεντρώθηκαν τα δεδομένα και χωρίστηκαν με βάση τις γεωγραφικές συντεταγμένες φ και λ σε τρεις υποπεριοχές. Δόθηκαν σ' αυτές τα ονόματα των πλησιέστερων νησιών προς αυτά (Ζάκυνθος, Λευκάδα και Κεφαλονιά).

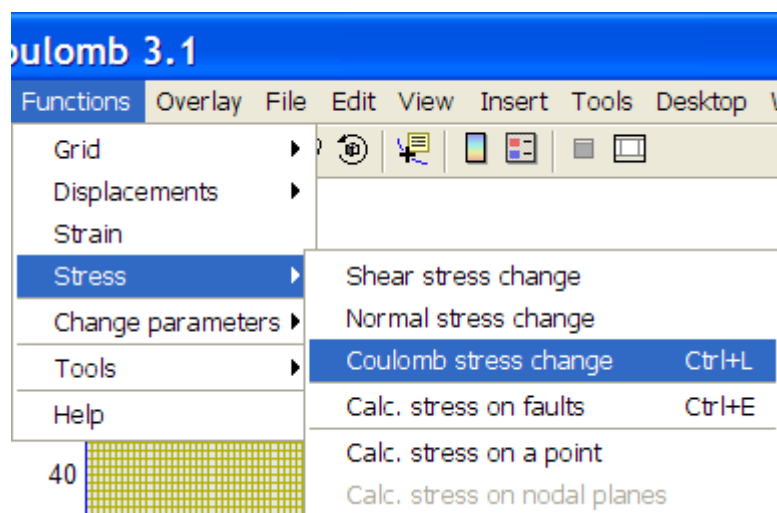
Αφού χωρίστηκαν οι περιοχές, δημιουργούνται τα αρχεία εισόδου για κάθε ομάδα ρηγμάτων. Τα ρήγματα όμως δεν ενεργοποιήθηκαν όλα μαζί και ταυτόχρονα. Σύμφωνα με την αρχή της επαλληλίας ισχύει ότι η μεταβολή των τάσεων που προκαλείται από τη

διαδοχική ενεργοποίηση δύο ή περισσότερων ρηγμάτων είναι η ίδια εάν αυτά ενεργοποιηθούν την ίδια χρονική στιγμή. Έτσι λοιπόν δημιουργούνται τα αρχεία εισόδου ξεκινώντας από την πρώτη διάρρηξη χρονικά και προσθέτοντας μία κάθε φορά διάρρηξη. Αποτέλεσμα της αρχής της επαλληλίας είναι ότι και οι τάσεις Coulomb που προκαλεί η επόμενη διάρρηξη θα προστίθενται στις υπολογιζόμενες τάσεις από την προηγούμενη διάρρηξη και συνολικά στις προϋπάρχουσες. Συμπεραίνεται λοιπόν, ότι τα ενεργοποιημένα ρήγματα λειτουργούν ως ρήγματα – πηγές, ενώ τα υπόλοιπα λειτουργούν ως ρήγματα – αποδέκτες.

Κατά τη δημιουργία των αρχείων εισόδου ορίζεται αρχικά το σημείο αναφοράς της περιοχής μελέτης. Το σημείο αναφοράς είναι συνήθως το κέντρο της περιοχής το οποίο προκύπτει από το μέσο όρο των γεωγραφικών συντεταγμένων όλων των σημείων που απαρτίζουν την κάθε περιοχή. Στη συνέχεια εισάγονται τα όρια και η ανάλυση του κανάβου που επιθυμείται. Έπειτα εισάγονται τα στοιχεία των ρηγμάτων που μελετώνται.

Για κάθε νέα διάρρηξη υπολογίζονται οι τάσεις Coulomb και οι οριζόντιες μετατοπίσεις με τιμές για το συντελεστή τριβής 0.4 και για εστιακό βάθος 7.5 km. Παρακάτω παρουσιάζεται η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για τον υπολογισμό των τάσεων Coulomb και των οριζόντιων μετατοπίσεων, καθώς και για την απεικόνισή τους στο Google earth.

- **Τάσεις Coulomb :**
 - Δημιουργία αρχείων εισόδου (input file).
 - Υπολογισμός τάσεων Coulomb.



Εικόνα 8-1: Υπολογισμός των τάσεων Coulomb

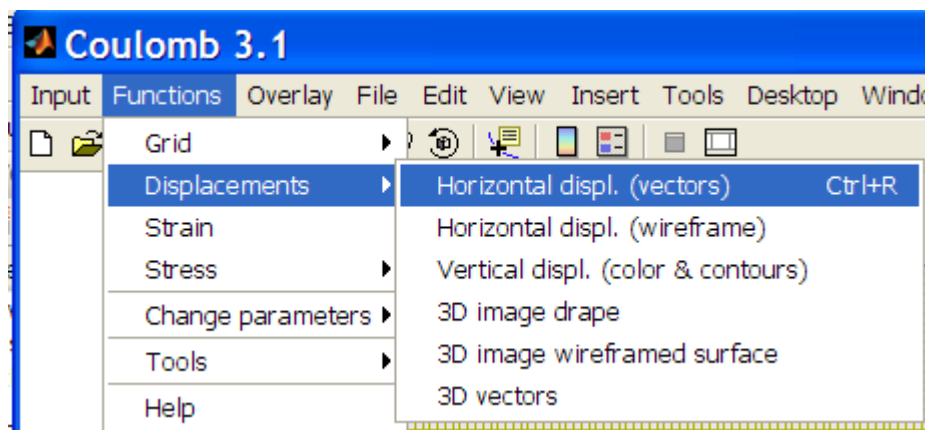
- Αποθήκευση της εικόνας με τη μορφή .jpg και όνομα coulombmap1.

- Αφαίρεση των αξόνων με τη βοήθεια λογισμικού επεξεργασίας εικόνας (π.χ. Microsoft office Picture manager) και αποθήκευση της σε αρχείο .jpg με όνομα coulombmap.
- Επιλογή στο Matlab του φακέλου μέσα στον οποίο αποθηκεύτηκε η εικόνα.
- Εκτέλεση στο Matlab της εντολής 'coulomb2googleearth'.

Με την παραπάνω διαδικασία δημιουργούνται τρία KML (Keyhole Markup Language) αρχεία. Κατά το άνοιγμα των αρχείων αυτών, παρουσιάζεται στο Google earth η προβολή της αντίστοιχης περιοχής μελέτης, τα ρήγματα της ίδιας περιοχής καθώς και η απεικόνιση των τάσεων Coulomb.

- **Οριζόντιες μετατοπίσεις :**

- Τα αρχεία εισόδου είναι τα ίδια που δημιουργήθηκαν κατά τον υπολογισμό των τάσεων.
- Υπολογισμός μετατοπίσεων.



Εικόνα 8-2: Υπολογισμός οριζόντιων μετατοπίσεων

- Αποθήκευση της εικόνας σε αρχείο .jpg με όνομα coulombmap.
- Επιλογή στο Matlab του φακέλου μέσα στον οποίο αποθηκεύτηκε η εικόνα.
- Εκτέλεση στο Matlab της εντολής 'coulomb2googleearth'.

Με την μεθοδολογία αυτή δημιουργούνται τρία KML αρχεία. Κατά το άνοιγμα των αρχείων αυτών, παρουσιάζεται στο Google earth η προβολή της αντίστοιχης περιοχής, τα ρήγματα της ίδιας περιοχής, καθώς και η απεικόνιση των οριζόντιων μετατοπίσεων που προκλήθηκαν από τις διαρρήξεις.

8.2.2 Κριτήριο αστοχίας Coulomb

Στο κριτήριο αστοχίας Coulomb, η αστοχία συμβαίνει σε μια επιφάνεια όταν η τάση Coulomb σ_f ξεπεράσει την τιμή

$$\sigma_f = \tau_\beta - \mu \cdot (\sigma_\beta - p) \quad (8.1)$$

Η τιμή τ_β πρέπει να είναι πάντοτε θετική και επιλέγεται κατάλληλα, ενώ η εξίσωση μπορεί να δώσει είτε θετική τιμή είτε αρνητική, ανάλογα εάν το ρήγμα έχει δεξιόστροφη ή αριστερόστροφη ολίσθηση.

Συνήθως η παραπάνω σχέση χρησιμοποιείται για τη μεταβολή της τάσης Coulomb κι έτσι ισχύει η παρακάτω σχέση.

$$\Delta\sigma_f = \Delta\tau - \mu' \cdot (\sigma_\beta - p) = \Delta\tau - \mu' \cdot \Delta\sigma_n \quad (8.2)$$

όπου, $\Delta\sigma_f$: η μεταβολή της τάσης Coulomb

$\Delta\tau$: η μεταβολή της διατμητικής τάσης

μ' : ο συντελεστής τριβής

$\Delta\sigma_n$: η μεταβολή της ορθής τάσης

Η ποσότητα $\mu \cdot \Delta\sigma_n$, δηλαδή ο συντελεστής τριβής πολλαπλασιασμένος με τη μεταβολή της ορθής τάσης, είναι στην ουσία η μεταβολή της διατμητικής αντοχής.

Εάν η μεταβολή της τάσης Coulomb είναι θετική, τότε υπάρχει συσσώρευση τάσεων στη γειτονική περιοχή του σημείου εκδήλωσης του σεισμού και συνέπεια αυτού είναι η θετική αλληλεπίδραση στα γειτονικά ρήγματα του σημείου εκδήλωσης κι έτσι η διαδικασία γένεσης σεισμών επιταχύνεται, ενώ εάν η μεταβολή της τάσης Coulomb είναι αρνητική τότε η διαδικασία γένεσης σεισμών από γειτονικά ρήγματα επιβραδύνεται.

Αν $\Delta\sigma_f > 0 \Rightarrow \Delta\tau > \mu' \cdot \Delta\sigma_n$ τότε υπάρχει θετική αλληλεπίδραση, ενώ αν $\Delta\sigma_f < 0 \Rightarrow \Delta\tau < \mu' \cdot \Delta\sigma_n$ τότε υπάρχει αρνητική αλληλεπίδραση.

8.3 Επεξεργασία και αποτελέσματα

Παρακάτω γίνεται εκτενής παρουσίαση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την επεξεργασία που περιγράφηκε παραπάνω. Αξίζει να αναφερθεί ότι στις εικόνες που ακολουθούν για τις τάσεις Coulomb, το κόκκινο χρώμα δείχνει αύξηση της τάσης μετά από κάθε διάρρηξη, ενώ το μπλε χρώμα δείχνει σε ποια διεύθυνση εκτονώθηκε η τάση αυτή. Οι υπολογισμοί έγιναν σε βάθος 7.5 km.

8.3.1 Λευκάδα

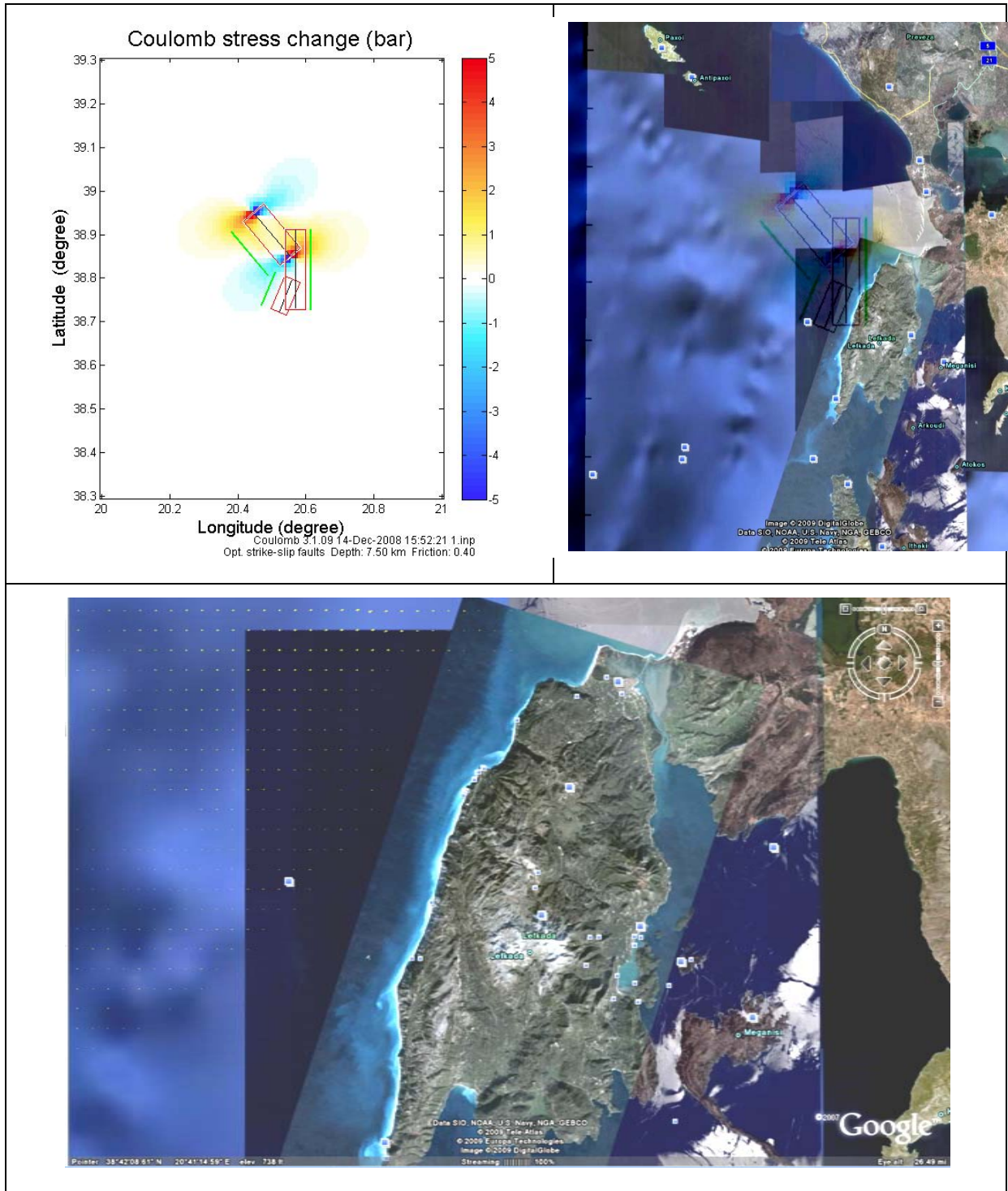
8.3.1.1 Ενεργά ρήγματα

Τα ρήγματα που μελετήθηκαν στην περιοχή της Λευκάδας χρονολογούνται από το 1973 μέχρι και τον τελευταίο σεισμό το 2003. Αυτά παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

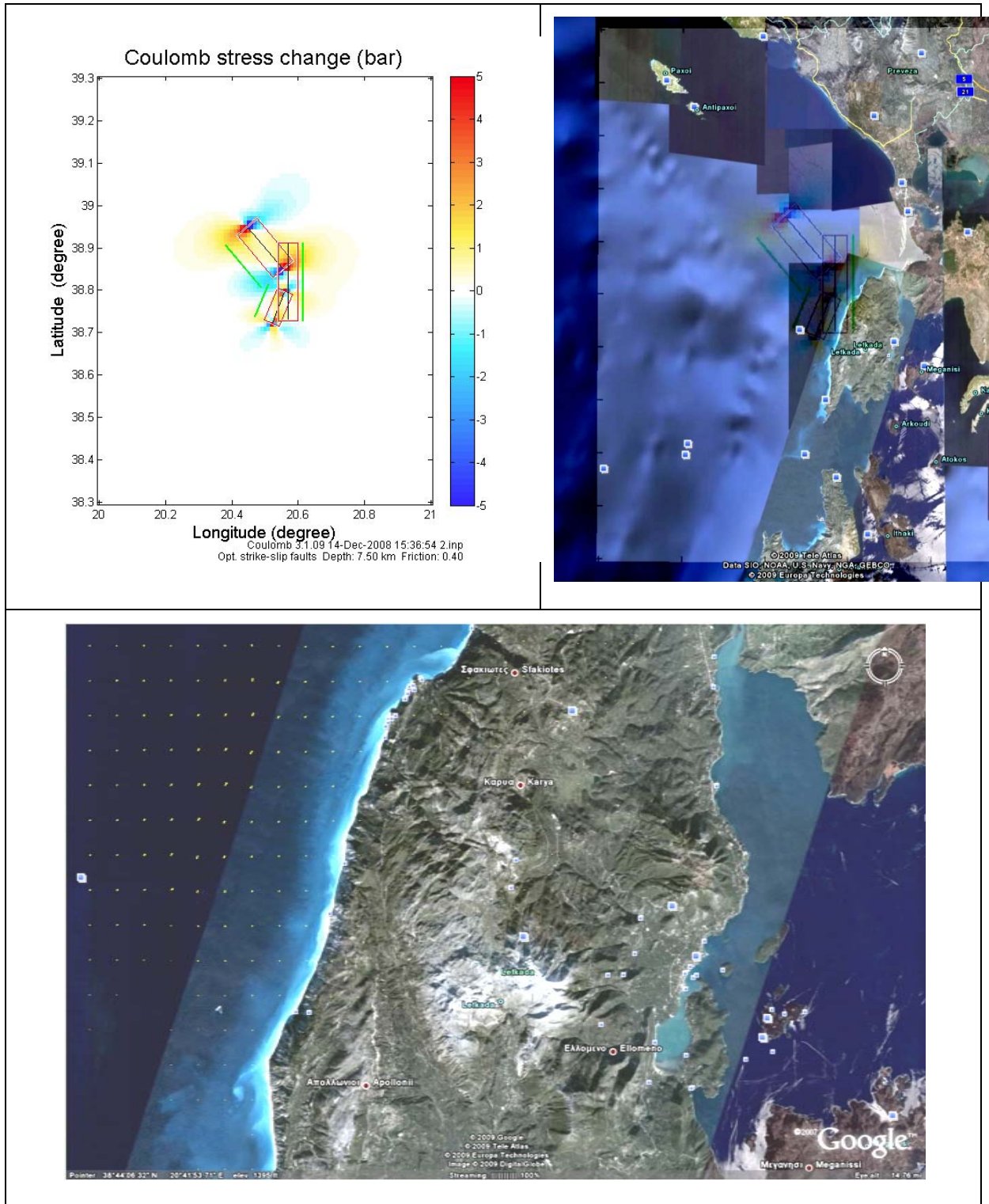
Date	Lat(^o N)	Long (^o E)	Depth (km)	M	Mechanism			L(km)	u (cm)	Lateral slip (cm)	Dip slip (cm)	w (cm)
					Strike(^o)	Dip(^o)	Rake(^o)					
4/11/1973	38,90	20,50	3 - 15	5,9	320	45	80	14,42	13,428	2,332	13,224	9,795
25/2/1994	38,76	20,54	3 - 15	5,5	22	58	168	9,02	6,31	-6,172	1,312	8,218
14/8/2003	38,82	20,57	3 - 15	6,2	180	63	90	20,51	23,66	0,000	6,677	11,17
Reference point	38.83	20.54										

Πίνακας 8-1: Στοιχεία σεισμών Λευκάδας

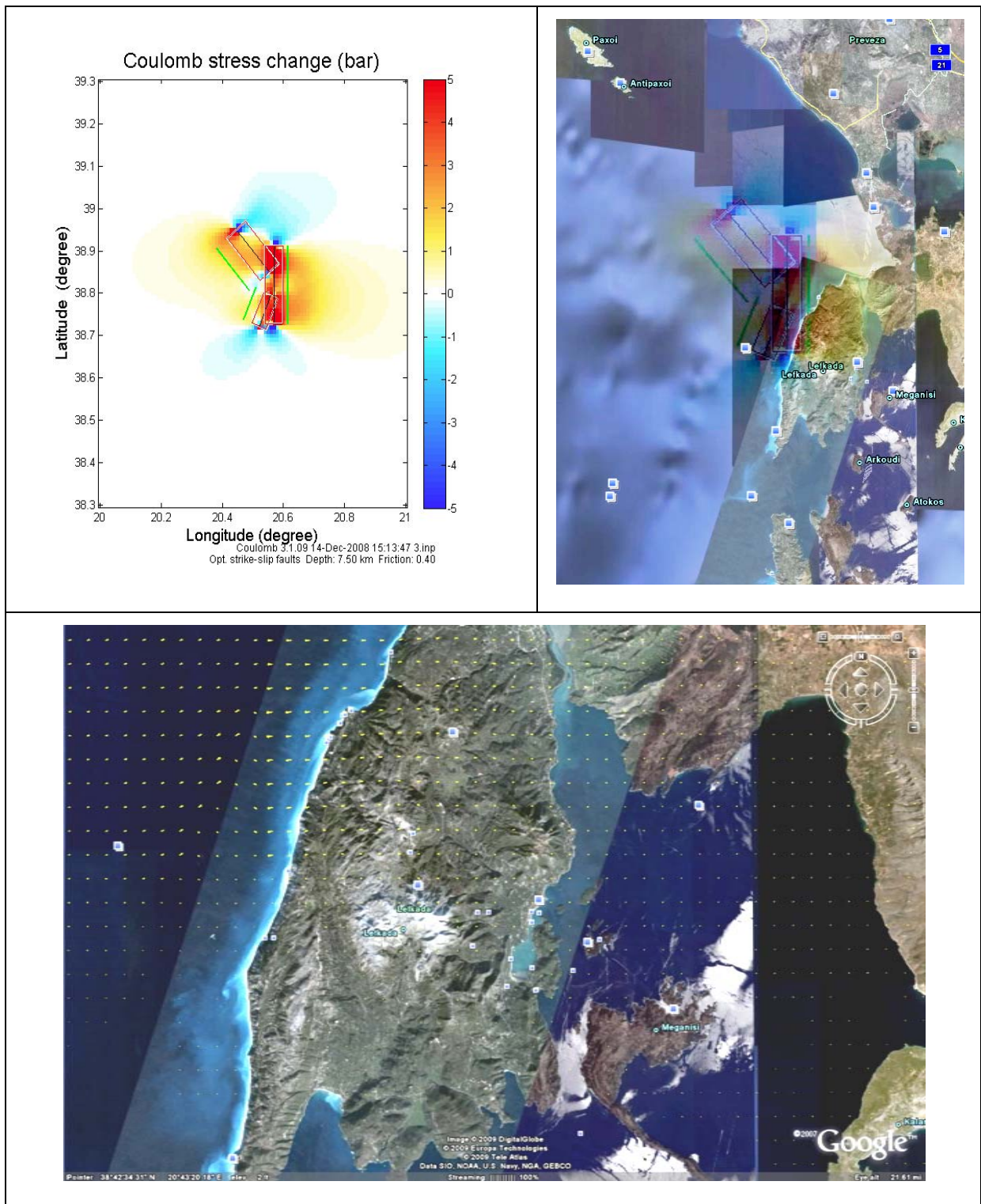
Παρακάτω ακολουθούν οι τάσεις Coulomb και οι οριζόντιες μετατοπίσεις, καθώς και η απεικόνισή τους στο Google earth για την Λευκάδα. Αξίζει να αναφερθεί, ότι στην παραπάνω ομάδα ρηγμάτων ανήκει και το ρήγμα του Αγίου Νικήτα – Αθανίου, το οποίο όμως δεν έχει διαρρηχθεί και γι' αυτό μελετάται στο τέλος της ενότητας αυτής, ούτως ώστε να προκύψουν συμπεράσματα γιατί το ρήγμα αυτό παρέμεινε ανενεργό μετά από τόσες σεισμικές διαρρήξεις στην επιφάνειά του.



Εικόνα 8-3: 1η διάρρηξη 4/11/1973



Εικόνα 8-4: 2η διάρρηξη 25/2/1994



Εικόνα 8-5 : 3η διάρρηξη 14/8/2003

8.3.1.2 Το ρήγμα του Αγίου Νικήτα – Αθανίου

Το ρήγμα του Αγίου Νικήτα – Αθανίου δεν παρουσιάστηκε μαζί με τα υπόλοιπα ρήγματα της Λευκάδας γιατί δεν έχει ενεργοποιηθεί από κάποια σεισμική διάρρηξη κι έτσι μελετάται ξεχωριστά. Το γεγονός αυτό προξενεί εντύπωση και έτσι με διάφορες παραδοχές αλλά και μια μικρή μελέτη θα αναζητηθούν οι λόγοι που το ρήγμα αυτό παραμένει ανενεργό.

Το ρήγμα Αγίου Νικήτα – Αθανίου βρίσκεται σε απόσταση λίγων εκατοντάδων μέτρων από τη δυτική ακτογραμμή της Λευκάδας και είναι ορατό από τον όρμο του Αγίου Νικήτα μέχρι και νότια από το χωριό Αθάνι. Η διεύθυνσή του είναι ΒΒΑ – ΝΝΔ και είναι ρήγμα οριζόντιας ολίσθησης.

Κατ' αρχήν θα αναφερθούν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του ρήγματος αυτού. Το ρήγμα αυτό έχει γεωγραφικές συντεταγμένες $\varphi = 38^{\circ}43'26''.54$, $\lambda = 20^{\circ}35'02''.7$ στο ΕΓΣΑ 87'. Επειδή όμως στο Coulomb εισάγονται οι γεωγραφικές συντεταγμένες στο WGS 84', αυτές μετατρέπονται και γίνονται $\varphi = 38^{\circ}.73$, $\lambda = 20^{\circ}.59$. Το μήκος του ρήγματος είναι 16 km και πιθανότατα συνεχίζεται προς το θαλάσσιο χώρο τόσο προς τον Βορρά, όσο και ως προς το Νότο. Σύμφωνα με μετρήσεις που έχουν γίνει στο ύπαιθρο, η κλίση του ρήγματος αυτού είναι 70° ανατολικά, ενώ έχει ολίσθηση 8° Νότια και ο προσανατολισμός του 10° ως προς το Βορρά. Η κίνησή του είναι δεξιόστροφη και επιβεβαιώνεται από τις παράλληλες γραμμές ολίσθησης. Όσον αφορά το βάθος του υπάρχουν αμφιβολίες. Εάν ληφθούν υπόψη όμως η φύση του ρήγματος και η κατανομή των επικέντρων σε κάποιες σεισμολογικές τομές τότε μπορεί να θεωρηθεί με ασφάλεια ότι το ελάχιστο βάθος κυμαίνεται στα 10 Km. Το πλάτος του ρήγματος θα υπολογιστεί αντίστοιχα, με βάση τα παραπάνω δεδομένα.



Εικόνα 8-6: Η κατοπτρική επιφάνεια του ρήγματος Αγίου Νικήτα – Αθανίου, κοντά στο χωριό Δράγανο. Διακρίνονται οι υποοριζόντιες τεκτονικές αυλακώσεις της επιφάνειας του ρήγματος. Το κόκκινο βέλος δείχνει την έννοια της κίνησης (Ροντογιάννη - Τσιαμπάος, 2008)

Η δράση του ρήγματος αυτού και των άλλων αντίστοιχων μικρότερων ρηγμάτων στη γειτονία του, είναι συμβατή με την επικράτηση συμπιεστικών τάσεων κατά τη διεύθυνση ΒΑ – ΝΔ. Η ομοιότητα των γεωμετρικών και δυναμικών χαρακτηριστικών του ρήγματος, με τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά του υποθαλάσσιου ρήγματος οριζόντιας ολίσθησης Κεφαλονιάς – Λευκάδας, όπως είναι γνωστά από σεισμικές και σεισμολογικές έρευνες, καθώς και από το μηχανισμό γένεσης του σεισμού το 2003, οδηγεί στο συμπέρασμα ότι τα δύο ρήγματα είναι άμεσα συνδεδεμένα και προφανώς το ρήγμα Αγίου Νικήτα – Αθανίου, αποτελεί ένα μικρότερο και παράπλευρο ρήγμα στην ξηρά του αντίστοιχου υποθαλάσσιου ρήγματος.

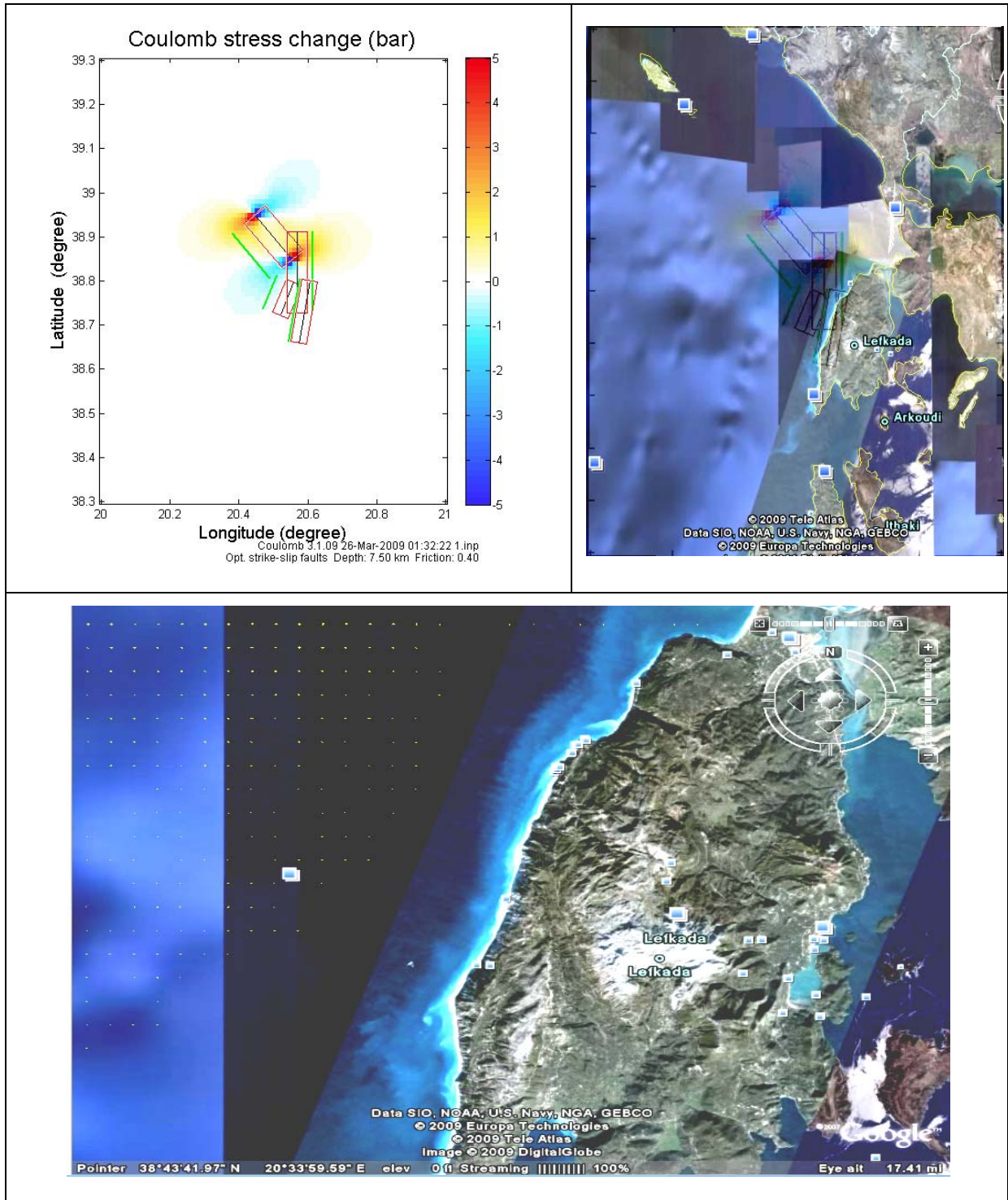
Για να υπολογιστεί το βάθος του ρήγματος θεωρούνται οι σχέσεις των Παπαζάχου (4.14, 4.15 και 4.16), ειδικά για τον ελληνικό χώρο και των Wells & Coppersmith (1994) και γίνεται η παραδοχή για υποτιθέμενο σεισμό, αφού το ρήγμα είναι ανενεργό, γιατί μόνο έτσι μπορεί να υπολογιστεί το πλάτος. Για μεγαλύτερη αξιοπιστία, υπολογίζεται το πλάτος και με τις σχέσεις και των δύο και τελικώς λαμβάνεται ο μέσος όρος. Οι σχέσεις του Παπαζάχου αναφέρθηκαν πιο πάνω στο κεφάλαιο 4. Παρακάτω δίνονται οι σχέσεις των Wells & Coppersmith (1994).

$$M = 5.08 + 1.16 \cdot \log L \quad (8.3)$$

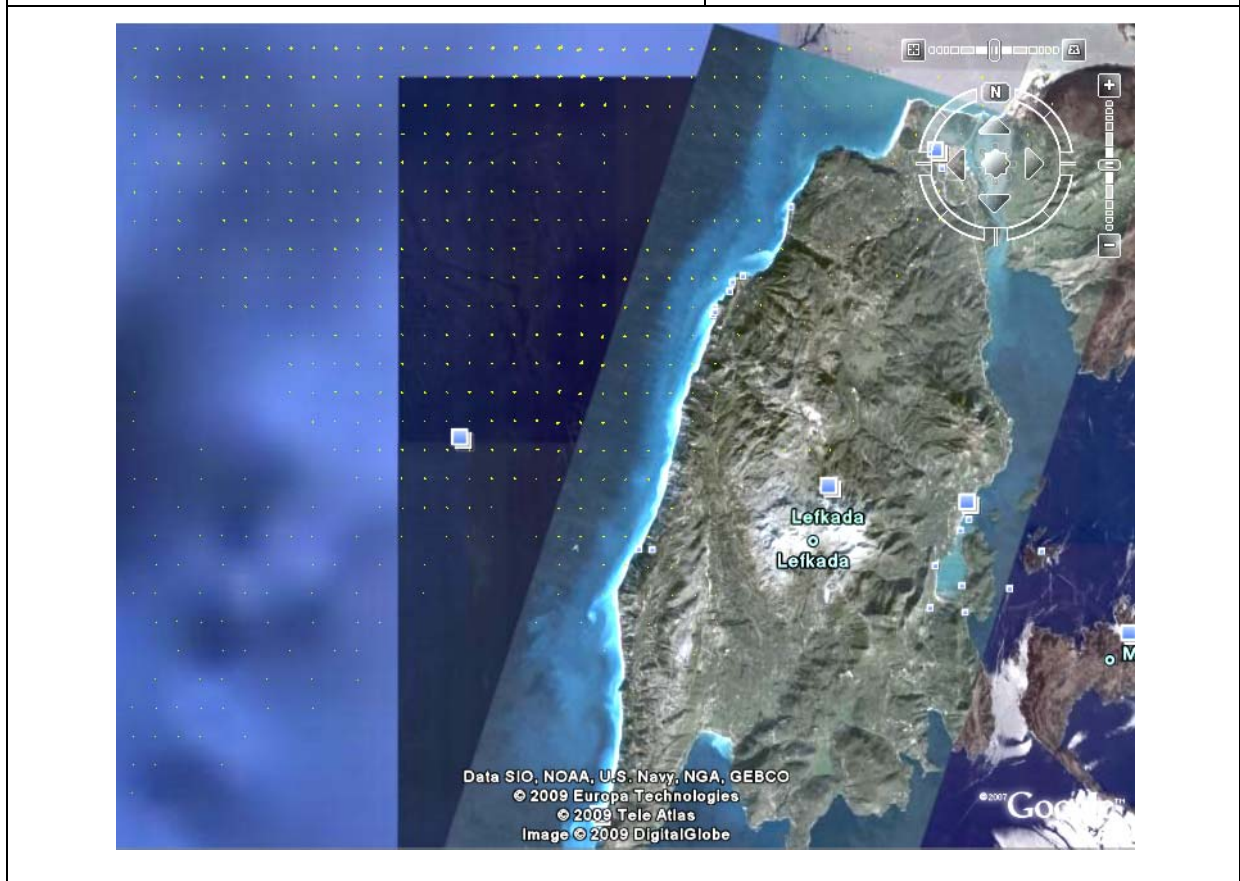
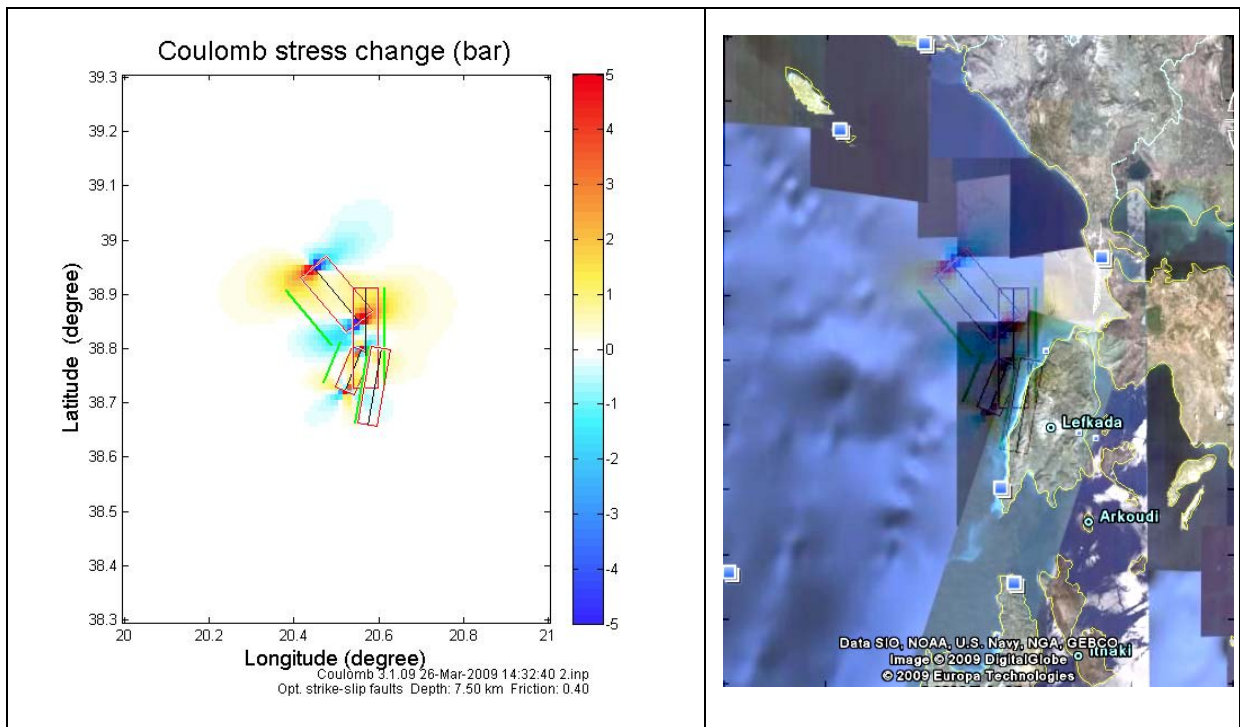
$$\log W = 0.19 \cdot M - 0.13 \quad (8.4)$$

Με τις σχέσεις 4.15, 8.3 υπολογίζεται το υποθετικό μέγεθος σεισμού σε περίπτωση διάρρηξης, ούτως ώστε να υπάρχει μια ένδειξη για το μέγεθος. Τελικά, το μέγεθος αυτό τοποθετείται στις σχέσεις 4.16, 8.4 αντίστοιχα για να υπολογιστεί το πλάτος του ρήγματος. Με τις σχέσεις του Παπαζάχου και αντικαθιστώντας το μήκος του ρήγματος $L = 16km$ προκύπτει το μέγεθος του υποτιθέμενου σεισμού $M = 6$ και το πλάτος του ρήγματος $W = 10.37km$, ενώ αντίστοιχα με τις σχέσεις 8.3 και 8.4 το μέγεθος $M = 6.5$ και το πλάτος του ρήγματος $W = 12.74km$. Ο μέσος όρος που λαμβάνεται είναι $W = 11.56km$.

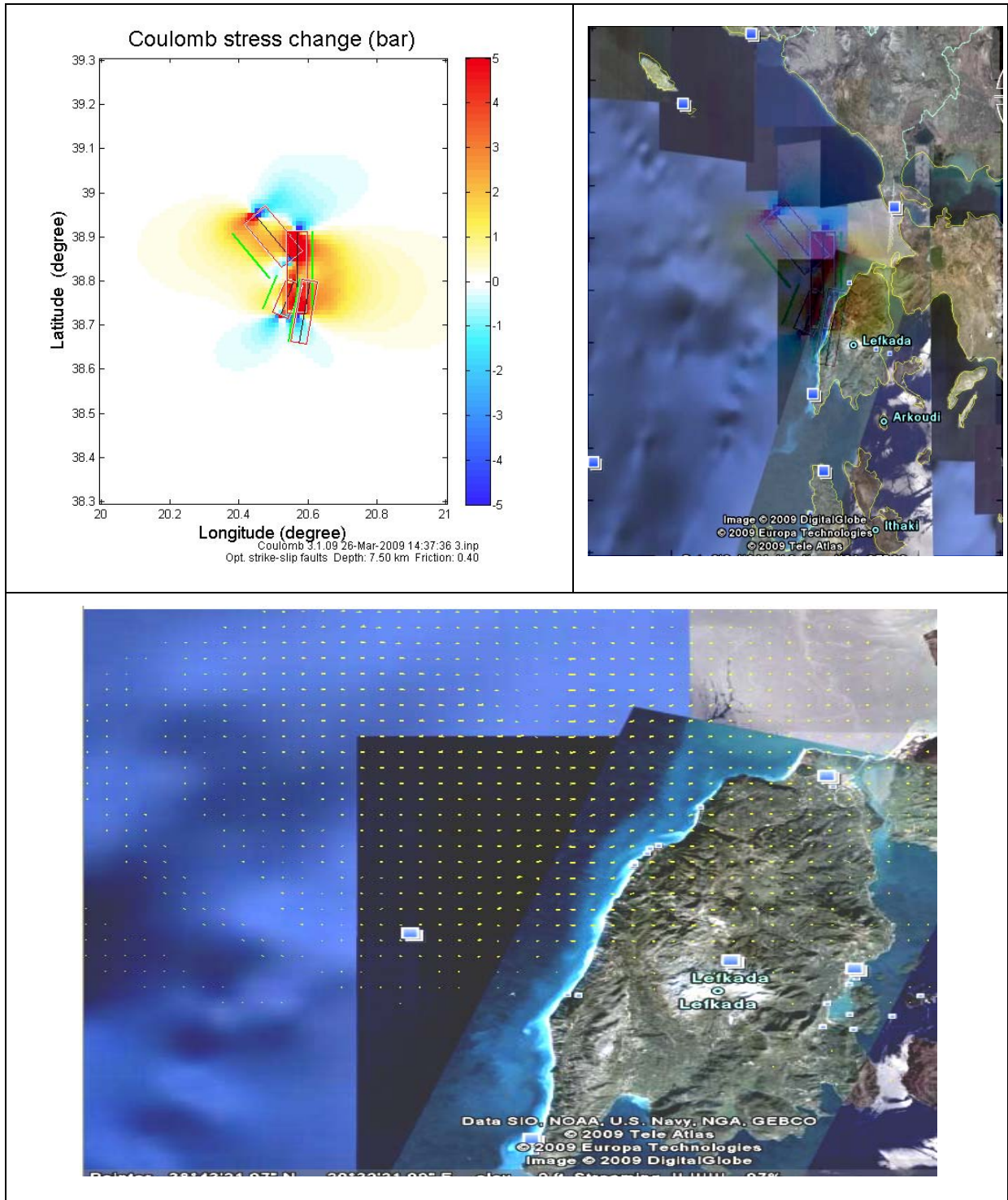
Για να διερευνηθεί το ανενεργό ρήγμα, εισάγονται όλα τα ρήγματα της Ζακύνθου, συμπεριλαμβανομένου και του ανενεργού ρήγματος στο Coulomb. Ακολουθείται η ίδια διαδικασία που περιγράφηκε πιο πάνω, αλλά αυτή τη φορά προστίθεται στα αρχεία εισόδου το ανενεργό ρήγμα με τα γεωμετρικά του χαρακτηριστικά, όπως αυτά αναφέρθηκαν πιο πάνω. Ξεκινώντας χρονικά από την πρώτη διάρρηξη, προστίθεται κάθε φορά η επόμενη χρονική διάρρηξη, ενώ σε όλα τα αρχεία συμπεριλαμβάνεται το ρήγμα Αγίου Νικήτα. Υπολογίζονται μετά από κάθε διάρρηξη οι τάσεις Coulomb και οι οριζόντιες μετατοπίσεις, οι οποίες παρουσιάζονται παρακάτω.



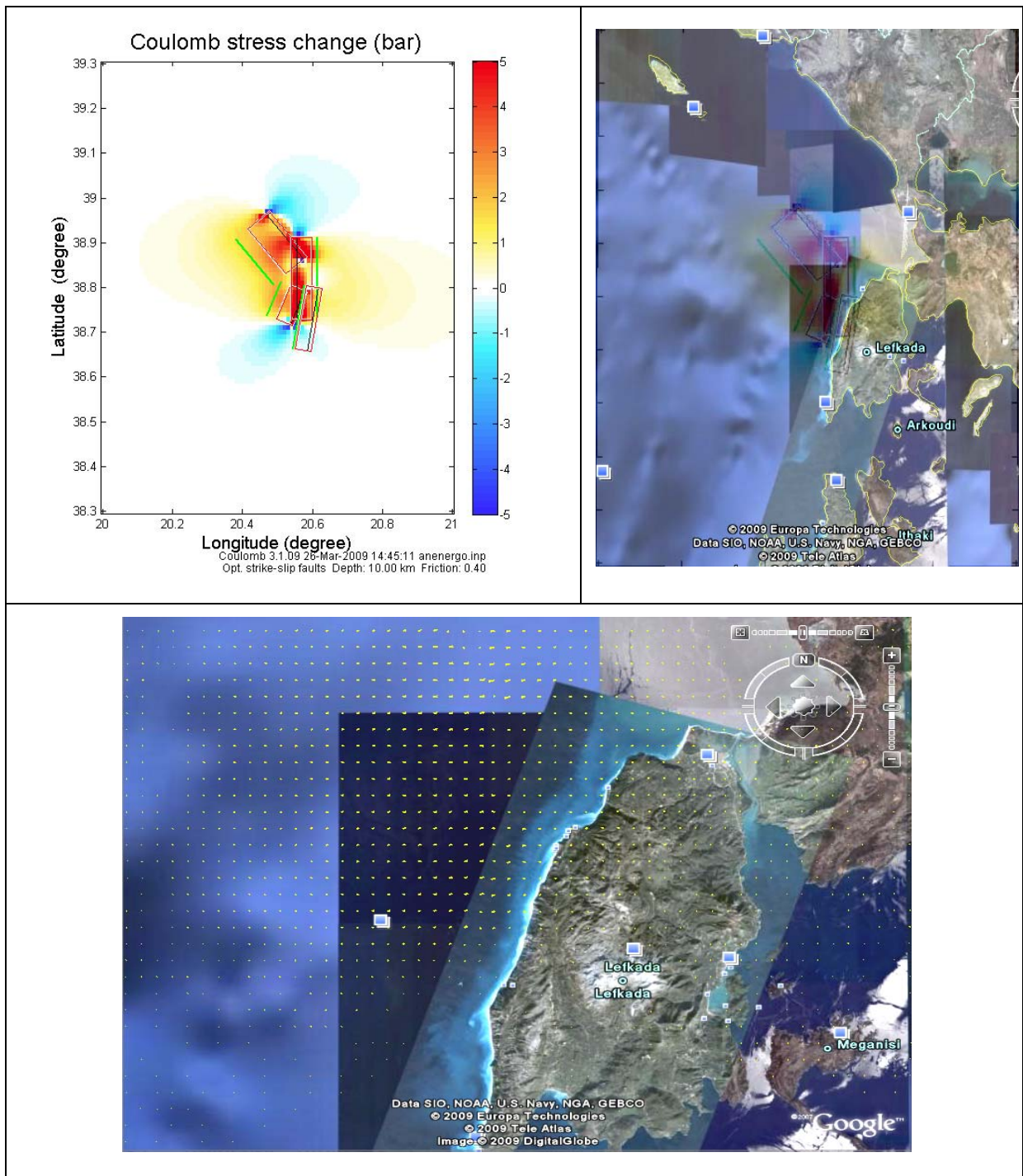
Εικόνα 8-7: 1η διάρρηξη 4/11/1973



Εικόνα 8-8: 2η διάρρηξη 25/2/1994



Εικόνα 8-9: 3η διάρρηξη 14/8/2003 (Βάθος υπολογισμού 7.5Km)



Εικόνα 8-10: 3η διάρρηξη 14/8/2003 (Βάθος υπολογισμού 10Km)

Αφού παρατέθηκαν οι τάσεις Coulomb και οι οριζόντιες μετατοπίσεις για τη Λευκάδα (συμπεριλαμβανομένου του ρήγματος Αγίου Νικήτα), θα γίνει μια μικρή ανάλυση για να ερμηνευτούν τα παραπάνω αποτελέσματα.

Κατ' αρχήν αξίζει να αναφερθεί ότι ισχύει η αρχή της επαλληλίας που αναφέρθηκε πιο πάνω. Κάθε φορά προστίθεται η αμέσως επόμενη διάρρηξη, ξεκινώντας από την πρώτη

χρονικά, ενώ στην περίπτωση αυτή στο αρχείο εισόδου τοποθετήθηκε και το ανενεργό ρήγμα Αθανίου με μηδενική σεισμική ροπή. Η εικόνα 8-9 απεικονίζει τις τάσεις και τις μετατοπίσεις μετά και την τελευταία διάρρηξη που έγινε στη Λευκάδα σε βάθος υπολογισμού 7.5 Km, ενώ στην εικόνα 8-10 απεικονίζονται οι ίδιες τάσεις και μετατοπίσεις αλλά σε βάθος υπολογισμού 10 Km αφού παραπάνω έγινε η παραδοχή ότι το ελάχιστο βάθος του ρήγματος Αγίου Νικήτα είναι τουλάχιστον 10 Km. Οι τάσεις που υπάρχουν δηλαδή, είναι αυτές που παρουσιάζονται στην τελευταία εικόνα.

Γίνεται εύκολα κατανοητό, ότι οι τάσεις που υπάρχουν μετά και την τελευταία διάρρηξη, εκτείνονται μέχρι και το ρήγμα Αθανίου και φτάνουν μέχρι και το κέντρο του ρήγματος. Είναι όμως απορίας άξιο, αφού φαίνεται ότι οι τάσεις στην περιοχή του ρήγματος αυτού αυξάνονται, το γεγονός ότι ακόμα δεν έχει ενεργοποιηθεί και δεν υπάρχει σεισμική δραστηριότητα από το ρήγμα αυτό.

Εάν ληφθεί υπόψη ότι το ρήγμα αυτό έχει παρόμοια γεωμετρικά και δυναμικά χαρακτηριστικά με το υποθαλάσσιο ρήγμα Κεφαλονιάς – Λευκάδας, τότε μέσα στο συγκεκριμένο σεισμοτεκτονικό περιβάλλον είναι αξιοσημείωτο το γεγονός της μη επιφανειακής ανάδρασης του ρήγματος Αγίου Νικήτα – Αθανίου, παρά την έντονη μορφοτεκτονική του παρουσία και την καταγραφή πολλών σεισμικών επικέντρων κατά μήκος του.

Η μη ενεργοποίηση του ρήγματος αυτού ενδεχομένως να οφείλεται στη μεγάλη περίοδο επανάληψης της δράσης του, αν και η περιοχή του ρήγματος αυτού συνδέεται σχεδόν σε όλους τους σεισμούς, με αυξημένες καταστροφές στο δομημένο και φυσικό περιβάλλον.

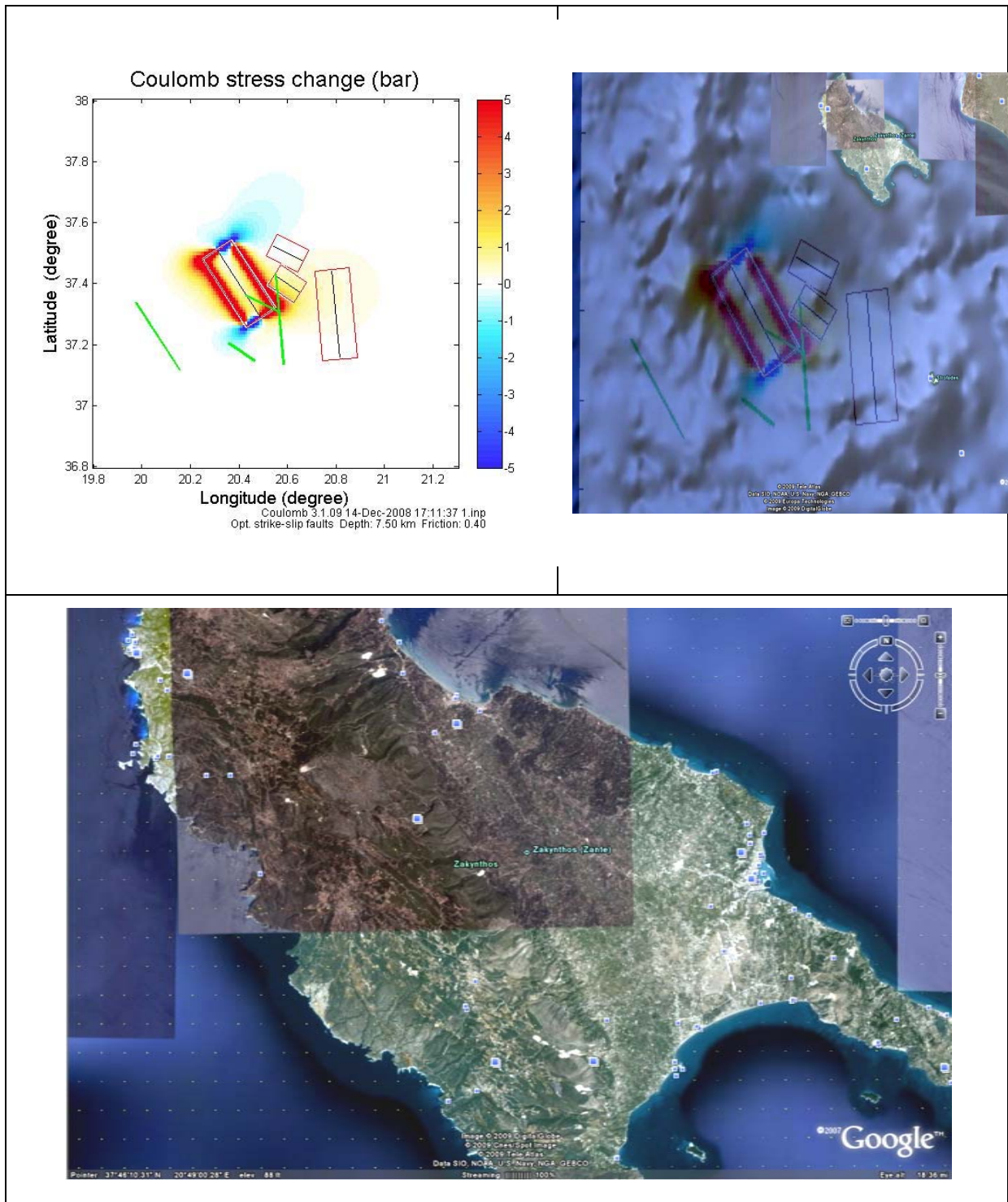
8.3.2 Ζάκυνθος

Τα ρήγματα που μελετήθηκαν στην περιοχή της Ζακύνθου χρονολογούνται από το 1976 μέχρι και το 1997. Αυτά παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

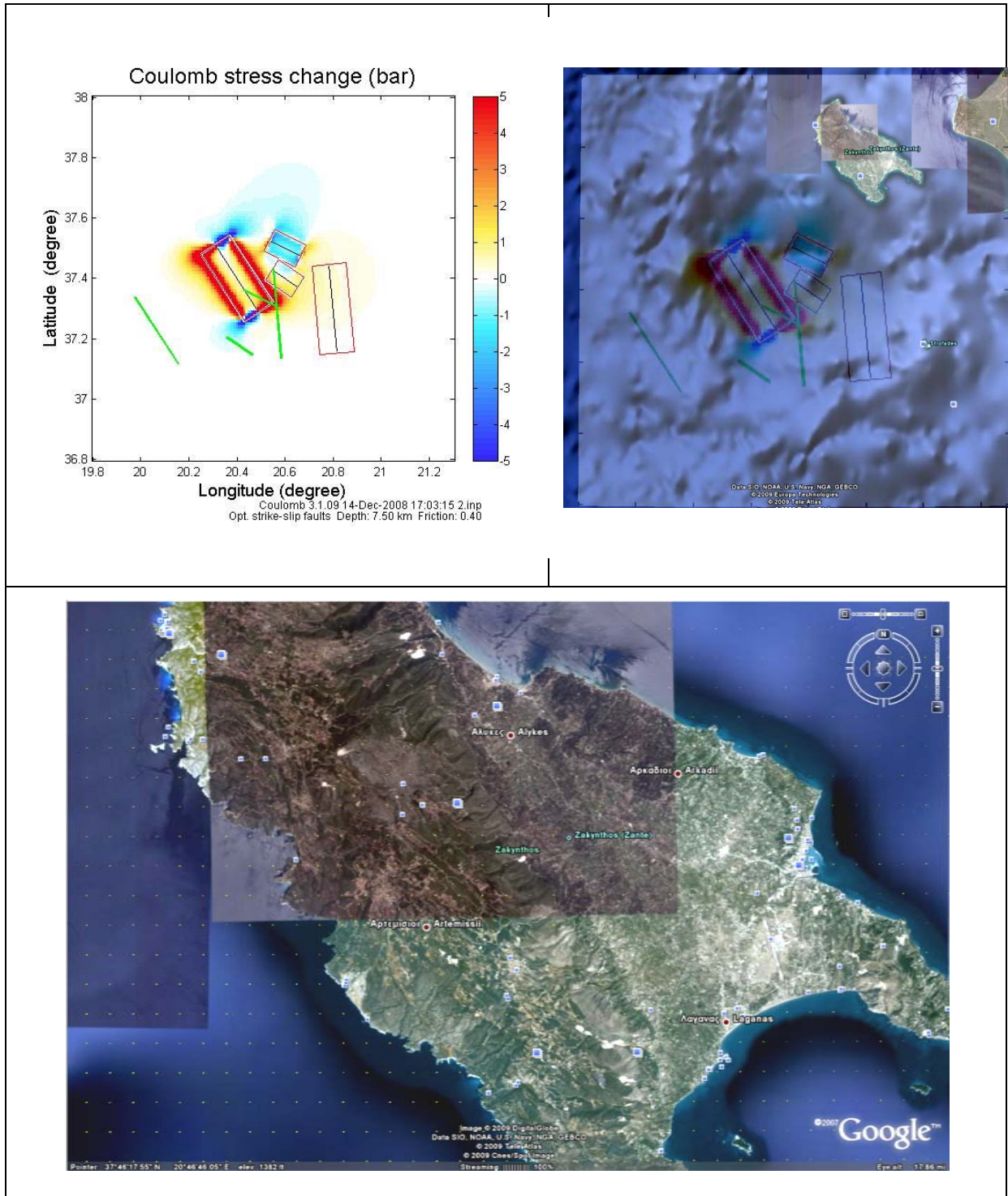
Date	Lat(^o N)	Long (^o E)	Dept h (km)	M	Mechanism			L(km)	u (cm)	Lateral slip (cm)	Dip slip (cm)	w (cm)
					Strike (°)	Dip(°)	Rake(°)					
11/5/1976	37,40	20,40	3 - 15	6,5	327	12	90	29,17	41,687	0,000	13,428	12,74
12/6/1976	37,50	20,60	3 - 15	5,8	297	20	90	12,82	11,117	0,000	41,687	9,38
16/4/1994	37,40	20,60	3 - 15	5,7	304	14	90	11,40	9,20	0,000	9,204	8,98
18/11/1997	37,30	20,80	3 - 15	6,6	355	20	159	32,81	50,35	-47,006	18,044	13,304
Reference point	37.4	20.6										

Πίνακας 8-2: Στοιχεία σεισμών Ζακύνθου

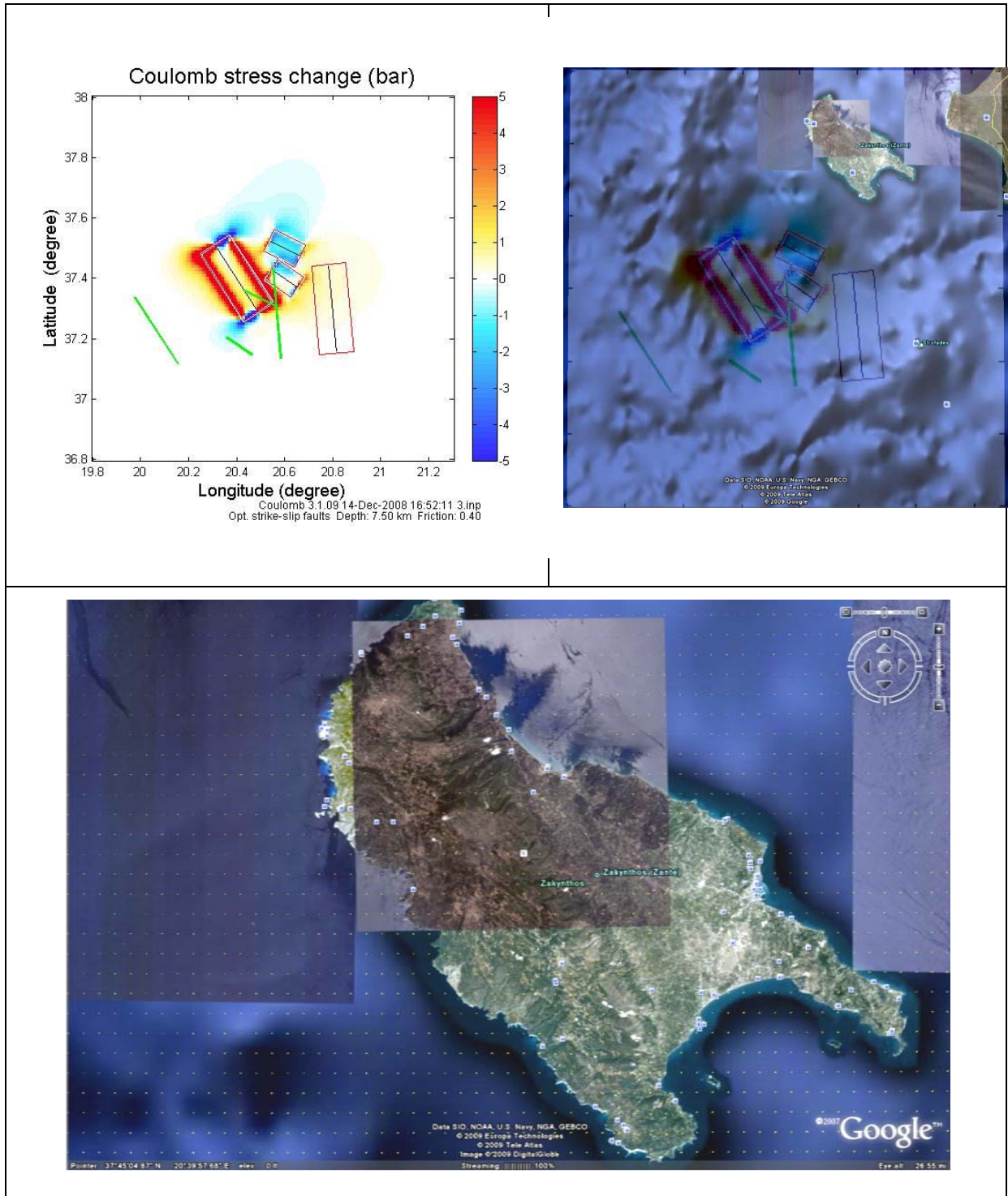
Παρακάτω ακολουθούν οι τάσεις Coulomb και οι οριζόντιες μετατοπίσεις, καθώς και η απεικόνισή τους στο Google earth για τη Ζάκυνθο.



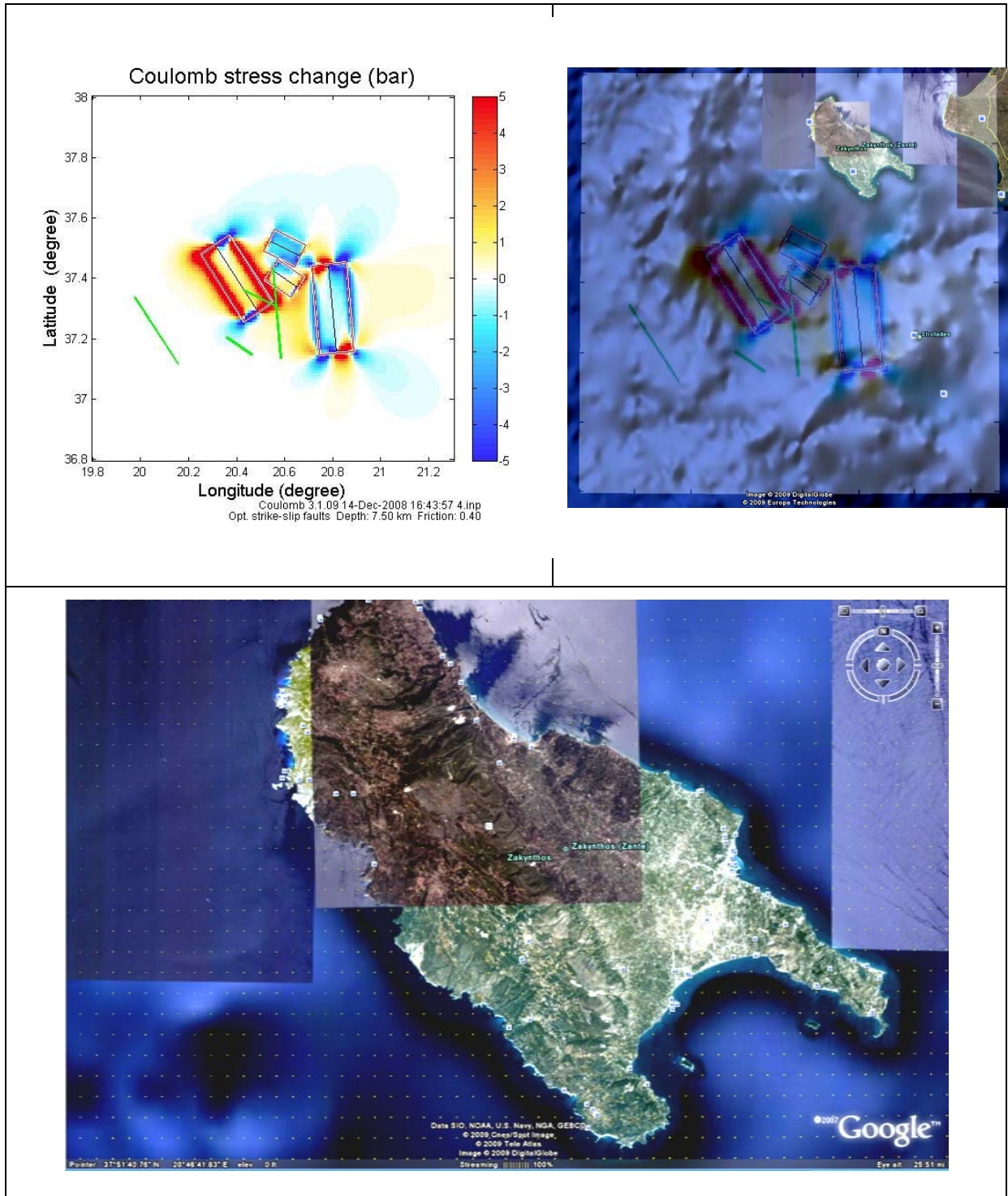
Εικόνα 8-11: 1η διάρρηξη 11/5/1976



Εικόνα 8-12 : 2η διάρρηξη 12/6/1976



Εικόνα 8-13: 3η διάρρηξη 16/4/1994



Εικόνα 8-14: 4η διάρρηξη 18/11/1997

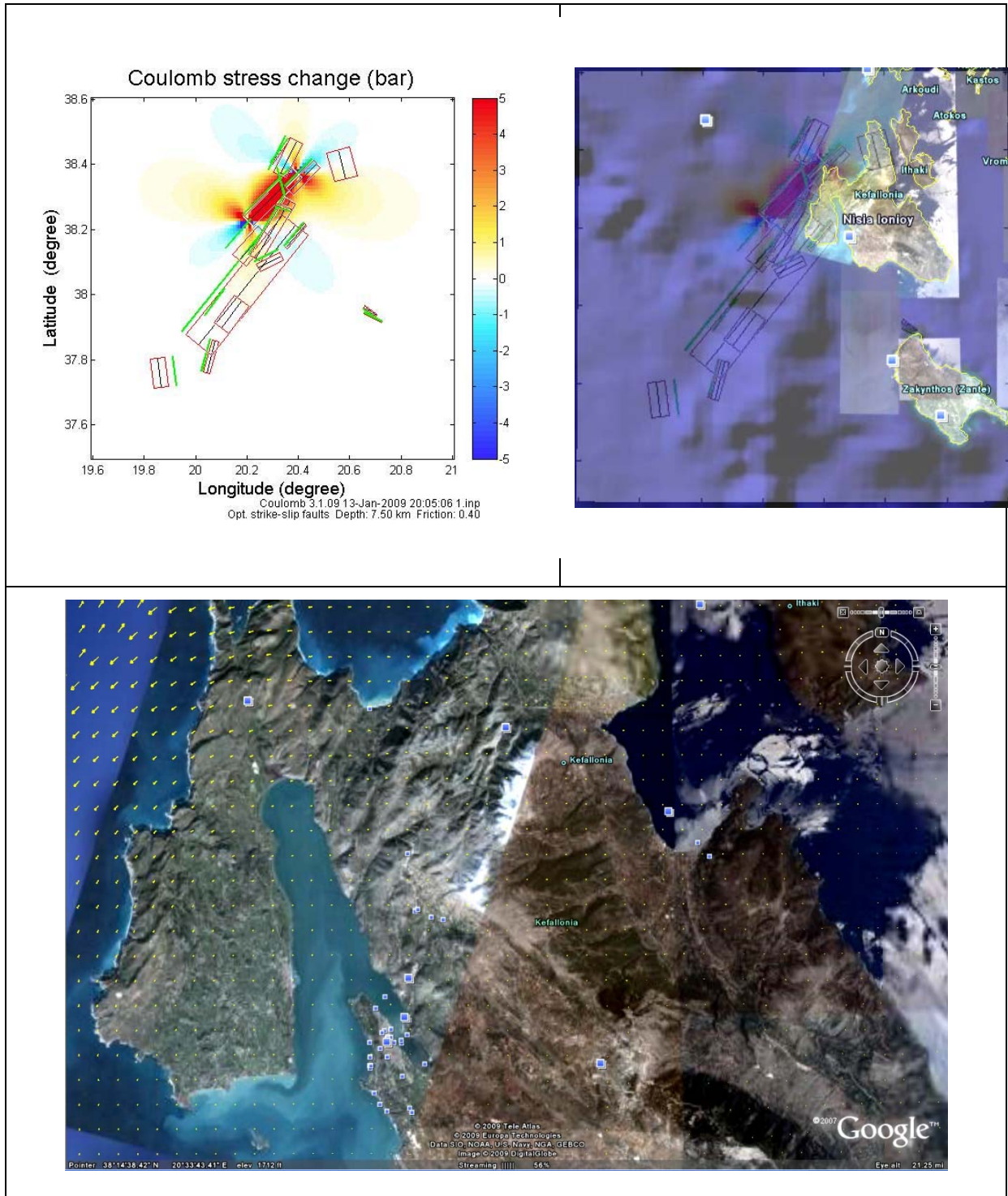
8.3.3 Κεφαλονιά

Τα ρήγματα που μελετήθηκαν στην περιοχή της Κεφαλονιάς χρονολογούνται από το 1972 μέχρι και το 2003. Αυτά παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

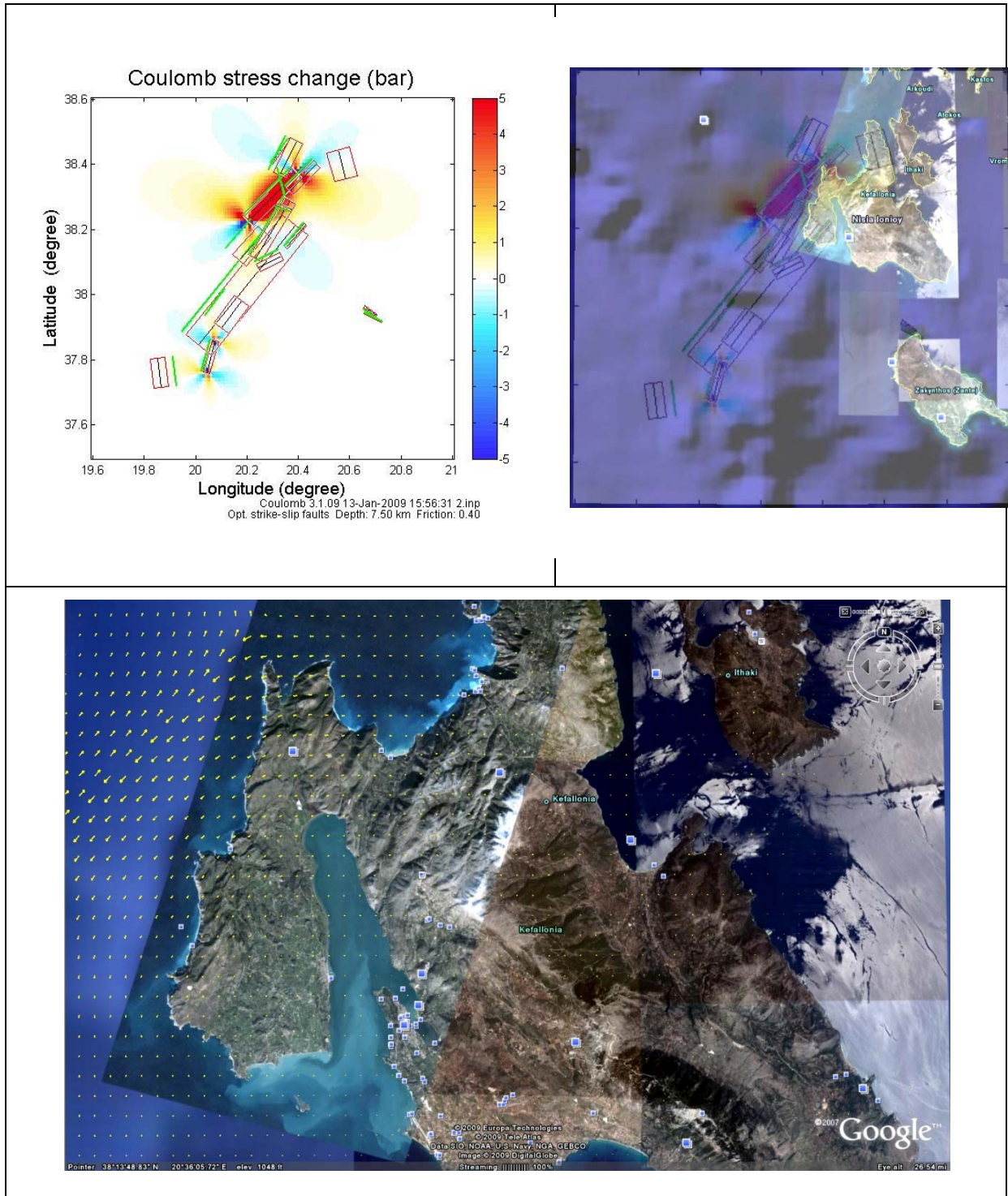
Date	Lat (°N)	Long (°E)	Depth (km)	M	Mechanism			L(km)	u (cm)	w (km)	Lateral slip (cm)	Dip slip (cm)
					Strike(°)	Dip(°)	Rake(°)					
17/9/1972	38,30	20,30	3 - 15	6,30	45	68	-174	23,07	28,58	11,67	-28,419	-2,987
28/6/1981	37,81	20,06	3 - 15	5,7	15	76	180	11,40	9,204	8,98	-9,204	0,000
17/1/1983	38,03	20,20	3 - 15	7	39	45	175	52,48	107,152	15,85	-106,744	9,339
19/1/1983	38,15	20,22	3 - 15	5,8	41	49	171	12,82	11,117	9,378	-10,980	1,739
31/1/1983	38,18	20,39	3 - 15	5,6	41	82	-177	10,14	7,621	8,59	-7,610	-0,399
23/3/1983	38,20	20,30	3 - 15	6,3	31	69	174	23,07	28,576	11,67	-28,419	2,987
24/3/1983	38,10	20,29	3 - 15	5,5	62	70	172	9,02	6,310	8,22	-6,248	0,878
14/5/1983	38,44	20,33	3 - 15	5,6	36	86	167	10,14	7,621	8,59	-7,425	1,714
27/2/1987	38,42	20,36	3 - 15	5,8	26	61	168	12,82	11,117	9,378	-10,874	2,311
18/5/1988	38,36	20,42	3 - 15	5,80	45	70	163	12,82	11,12	9,378	-4,996	1,527
24/8/1989	37,94	20,14	3 - 15	5,7	36	46	142	11,40	9,20	8,976	-3,408	2,663
23/1/1992	38,40	20,57	3 - 15	5,60	345	19	68	10,14	7,62	8,59	2,855	7,066
1/2/1996	37,76	19,86	3 - 15	5,60	173	55	71	10,14	7,62	8,59	2,481	7,206
6/11/2002	37,95	20,68	3 - 15	5,01	306	83	-11	5,07	2,50	6,637	2,456	-0,477
28/7/2003	37,93	20,69	3 - 15	5,25	119	87	28	6,72	3,94	7,372	3,475	1,848
16/11/2003	38,27	20,34	3 - 15	5,05	289	85	-13	5,31	2,70	6,76	2,629	-0,607
Reference point	38.14	20.32										

Πίνακας 8-3: Στοιχεία σεισμών Κεφαλονιάς

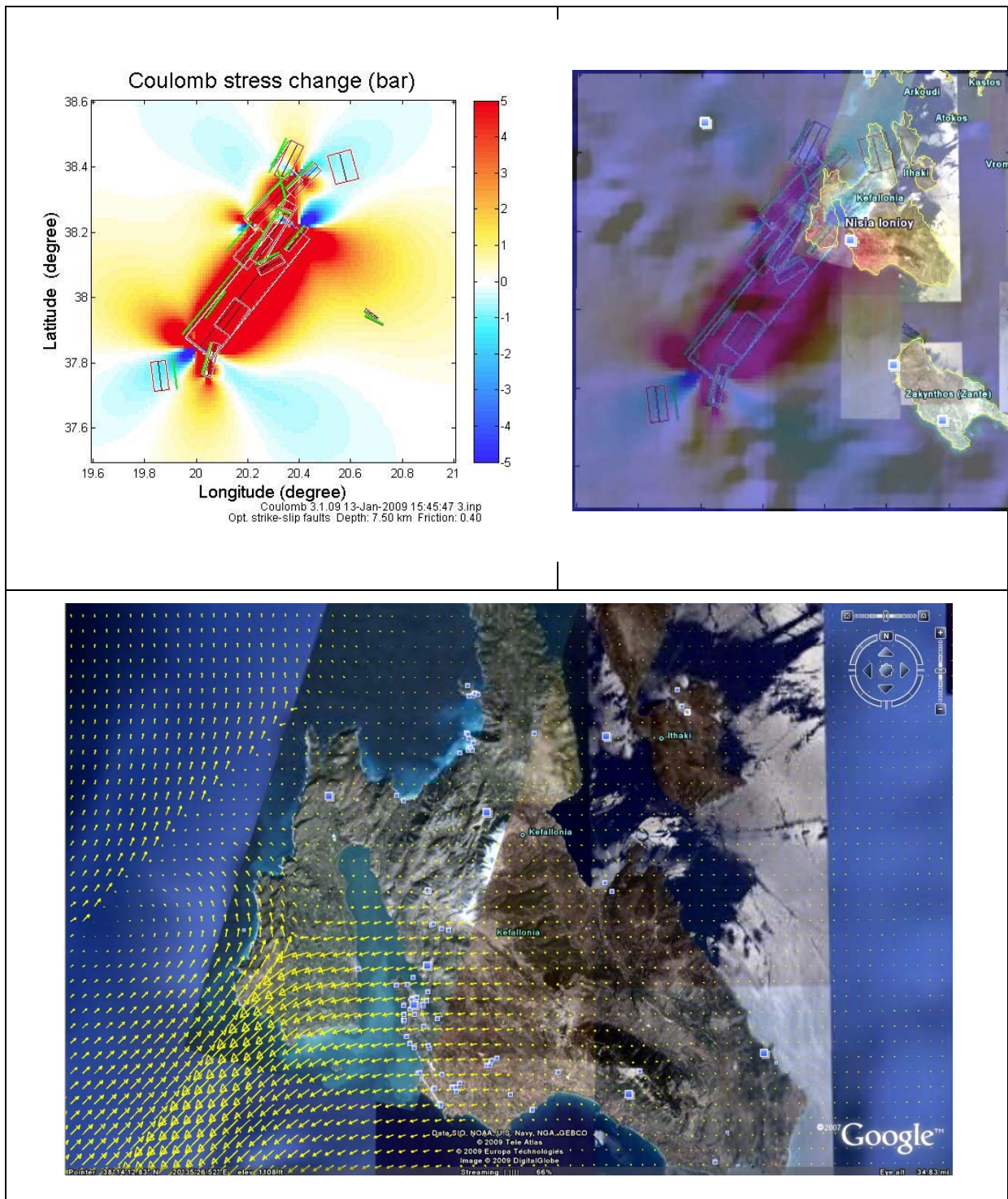
Παρακάτω ακολουθούν οι τάσεις Coulomb και οι οριζόντιες μετατοπίσεις, καθώς και η απεικόνισή τους στο Google earth για την Κεφαλονιά.



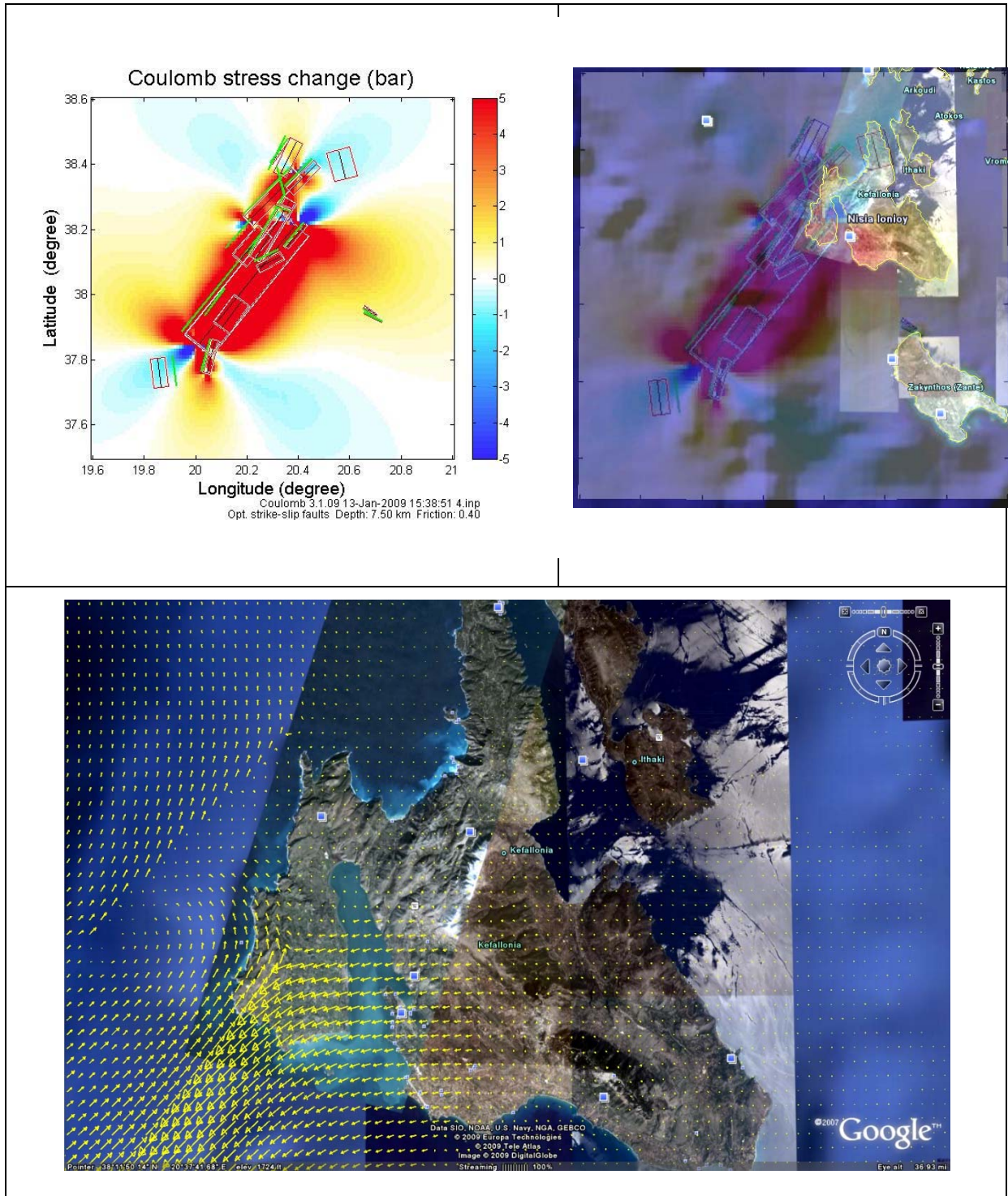
Εικόνα 8-15: 1η διάρρηξη 17/9/1972



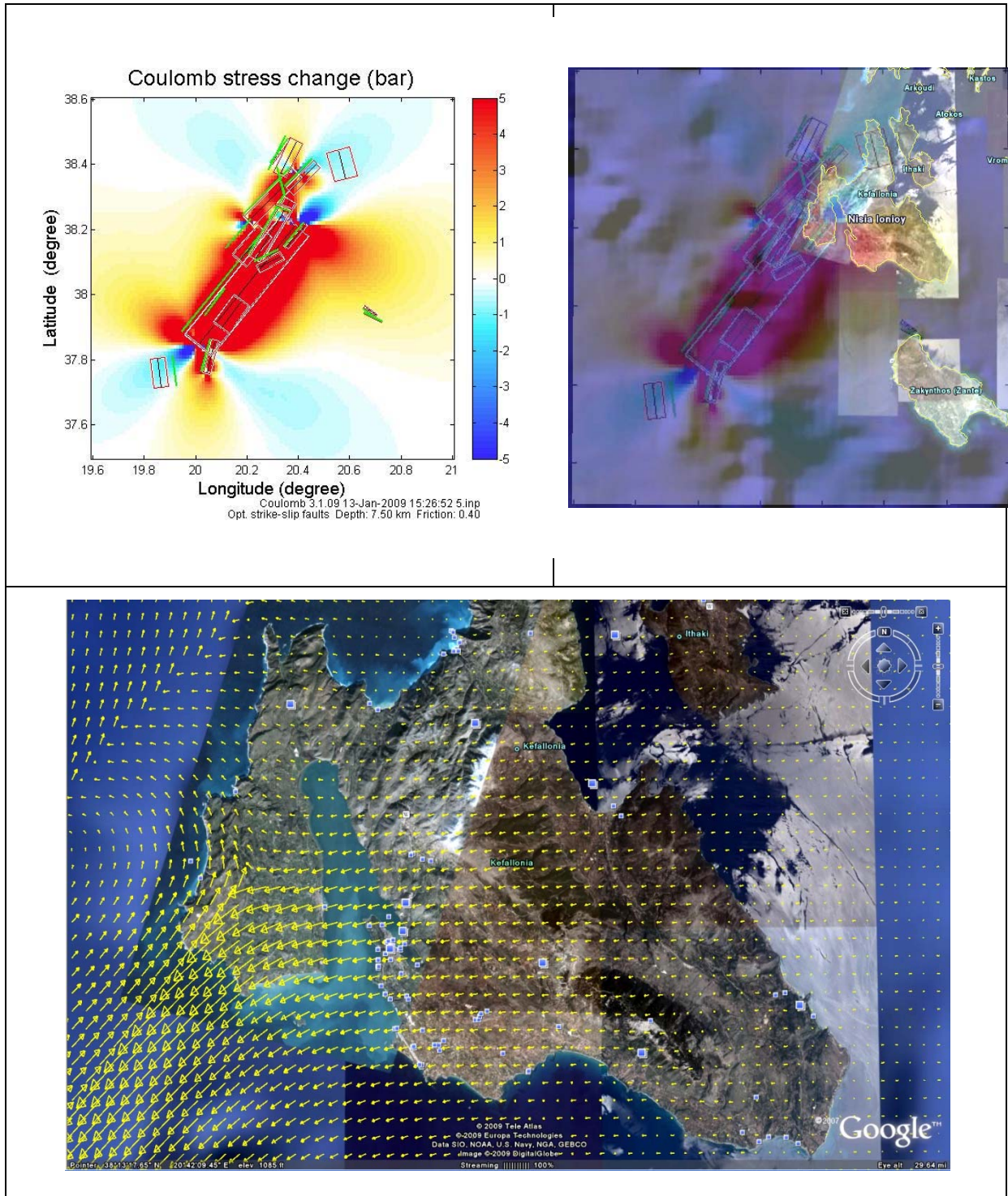
Εικόνα 8-16: 2η διάρρηξη 28/6/1981



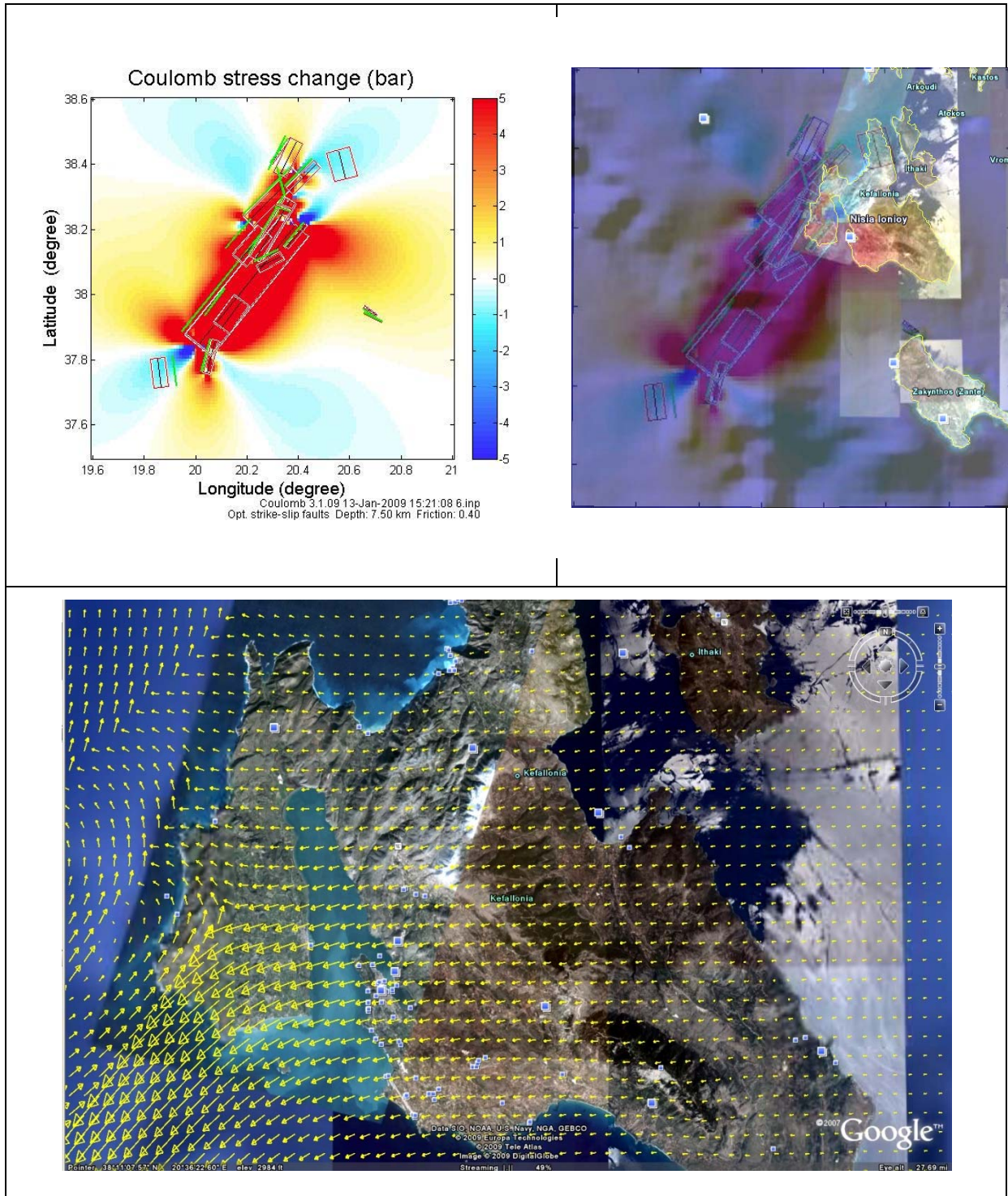
Εικόνα 8-17: 3η διάρρηξη 17/1/1983



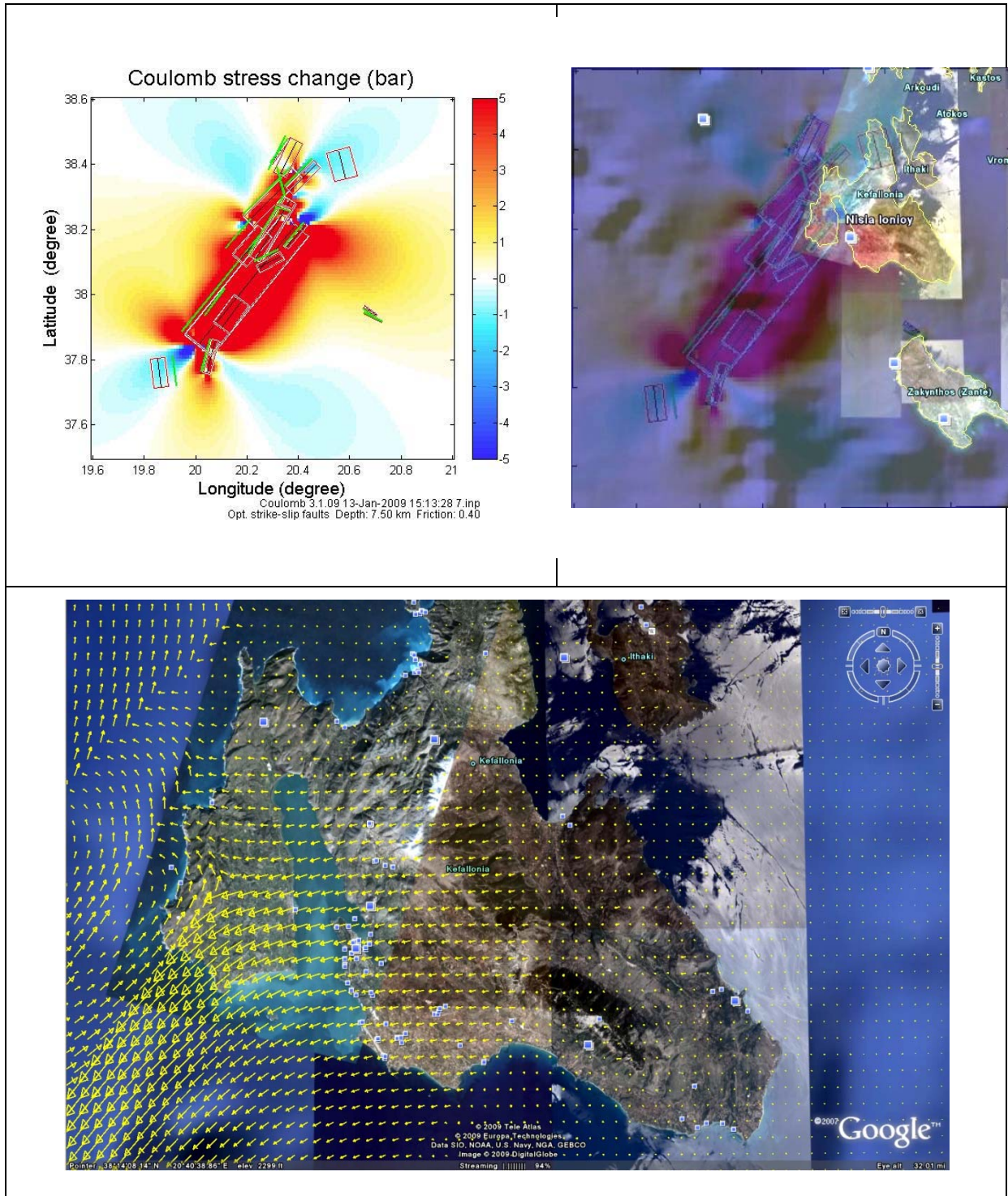
Εικόνα 8-18: 4η διάρρηξη 19/1/1983



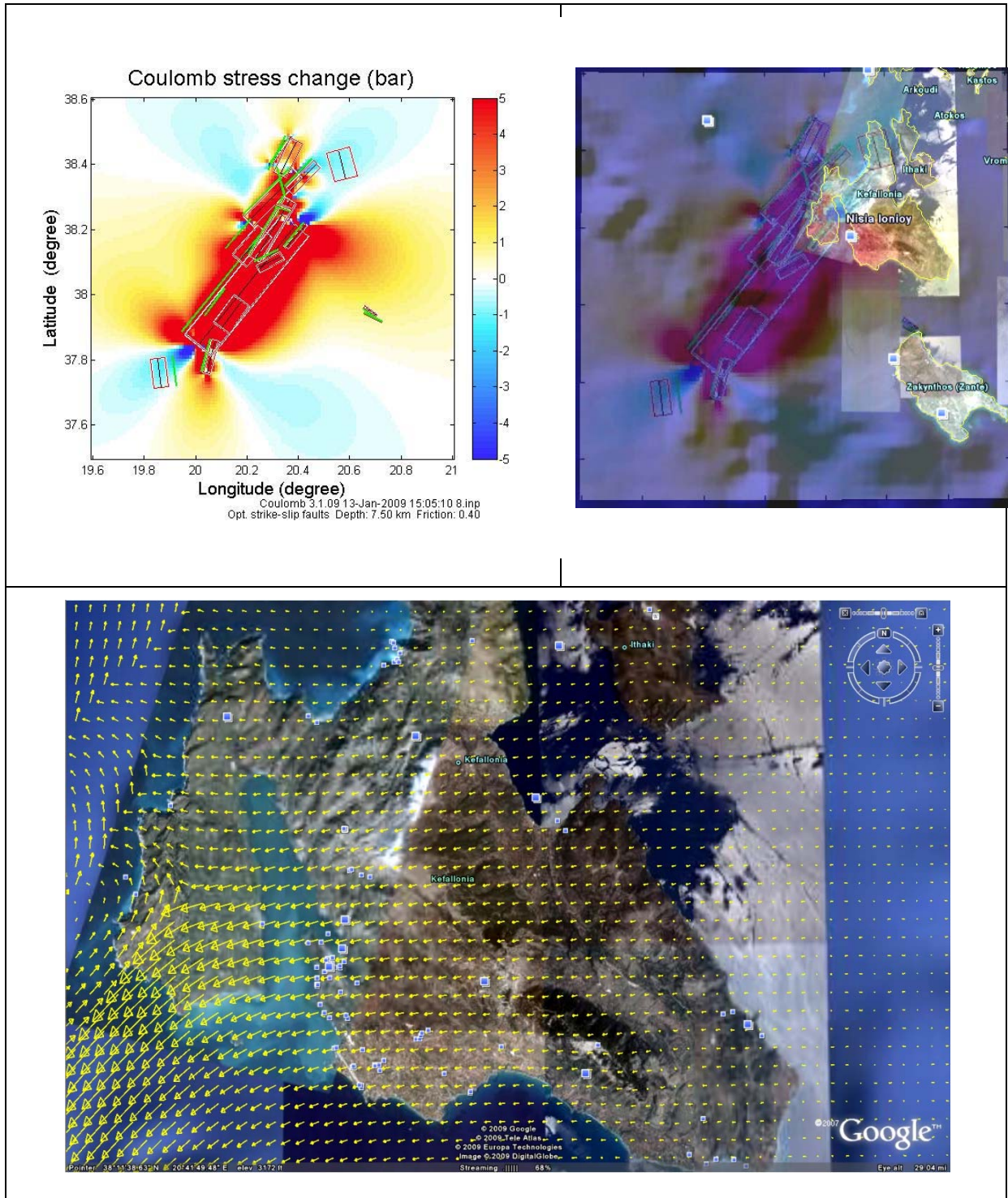
Εικόνα 8-19: 5η διάρρηξη 31/1/1983



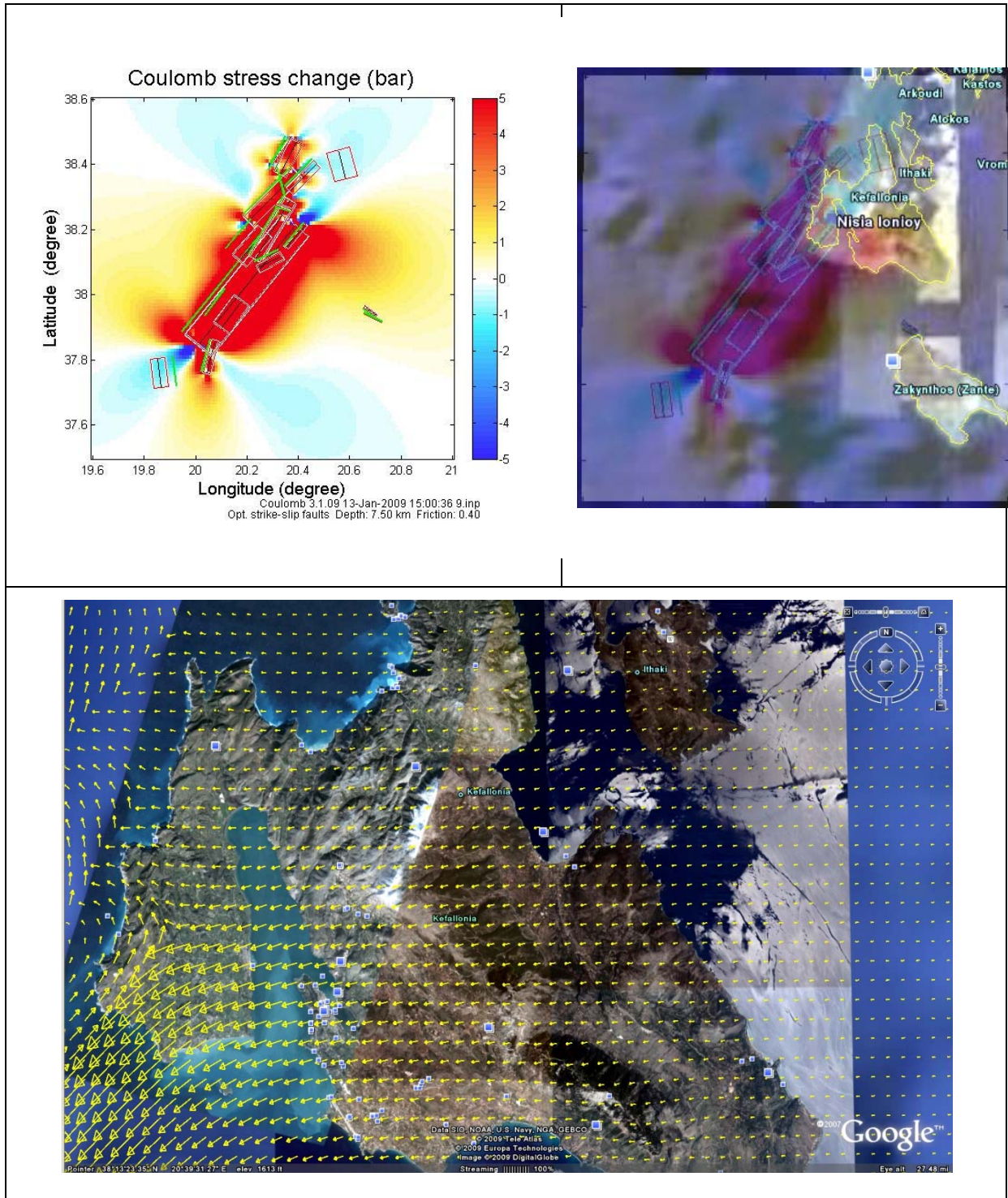
Εικόνα 8-20: 6η διάρρηξη 23/3/1983



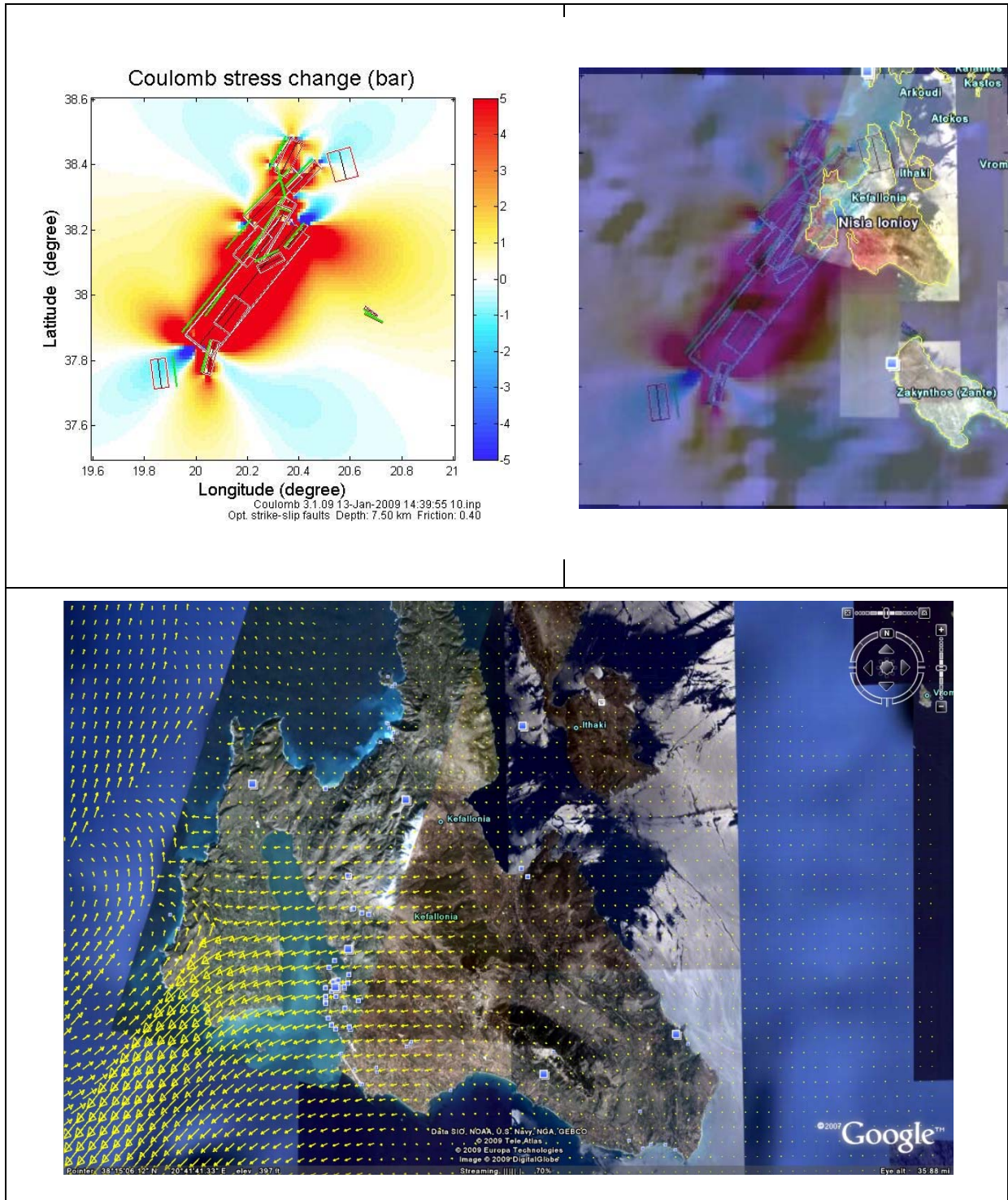
Εικόνα 8-21: 7η διάρρηξη 24/3/1983



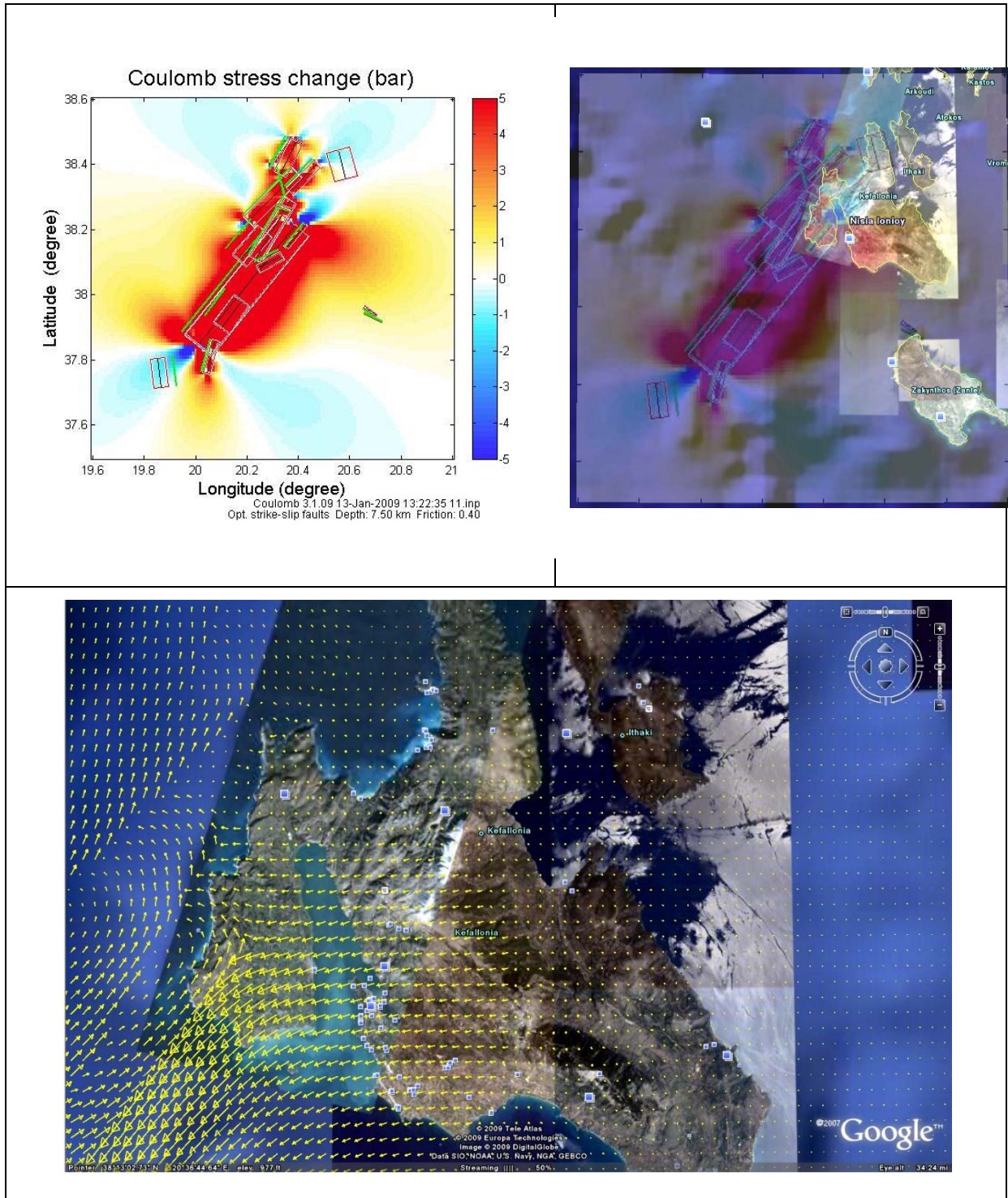
Εικόνα 8-22: 8η διάρρηξη 14/5/1983



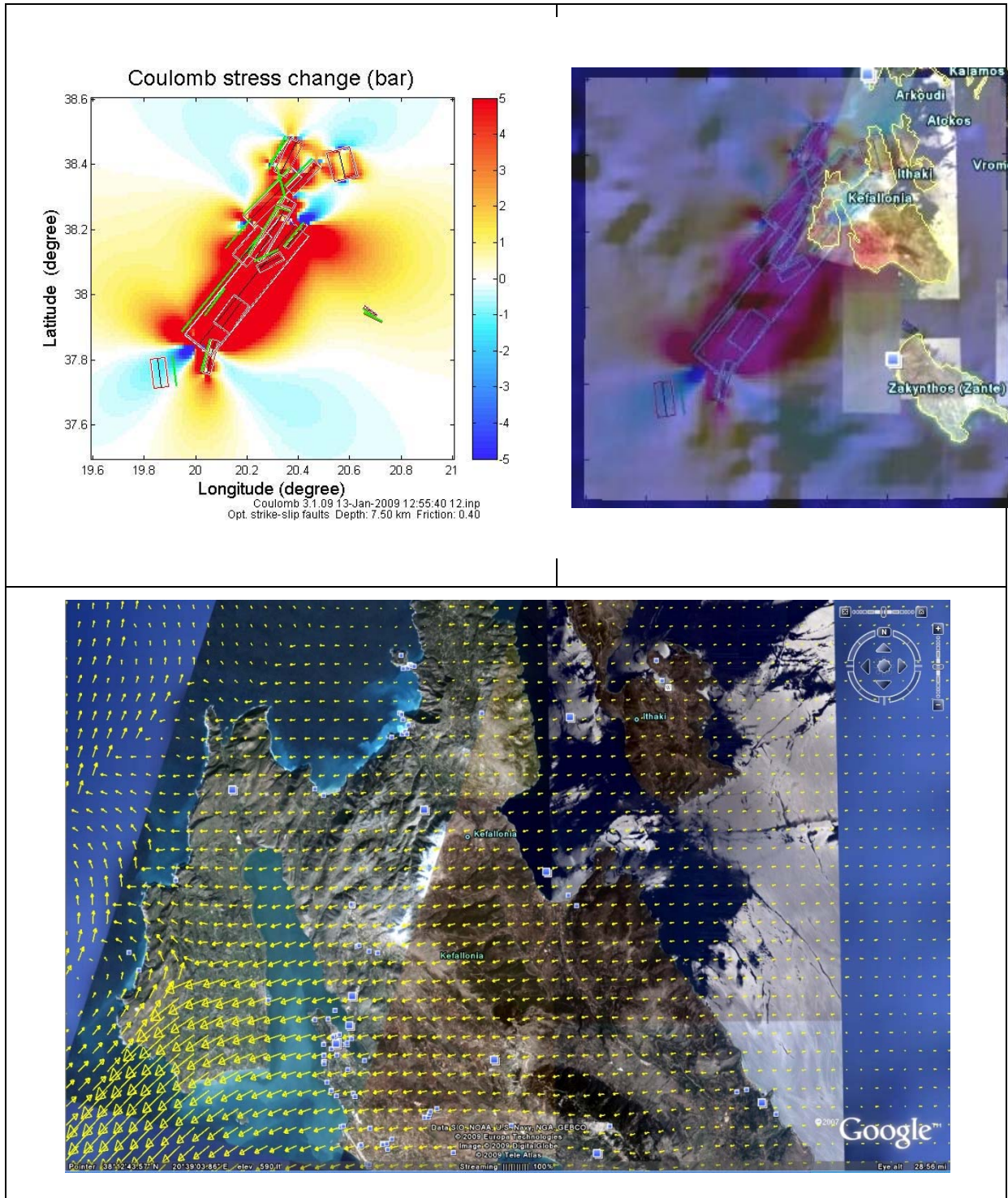
Εικόνα 8-23: 9η διάρρηξη 27/2/1987



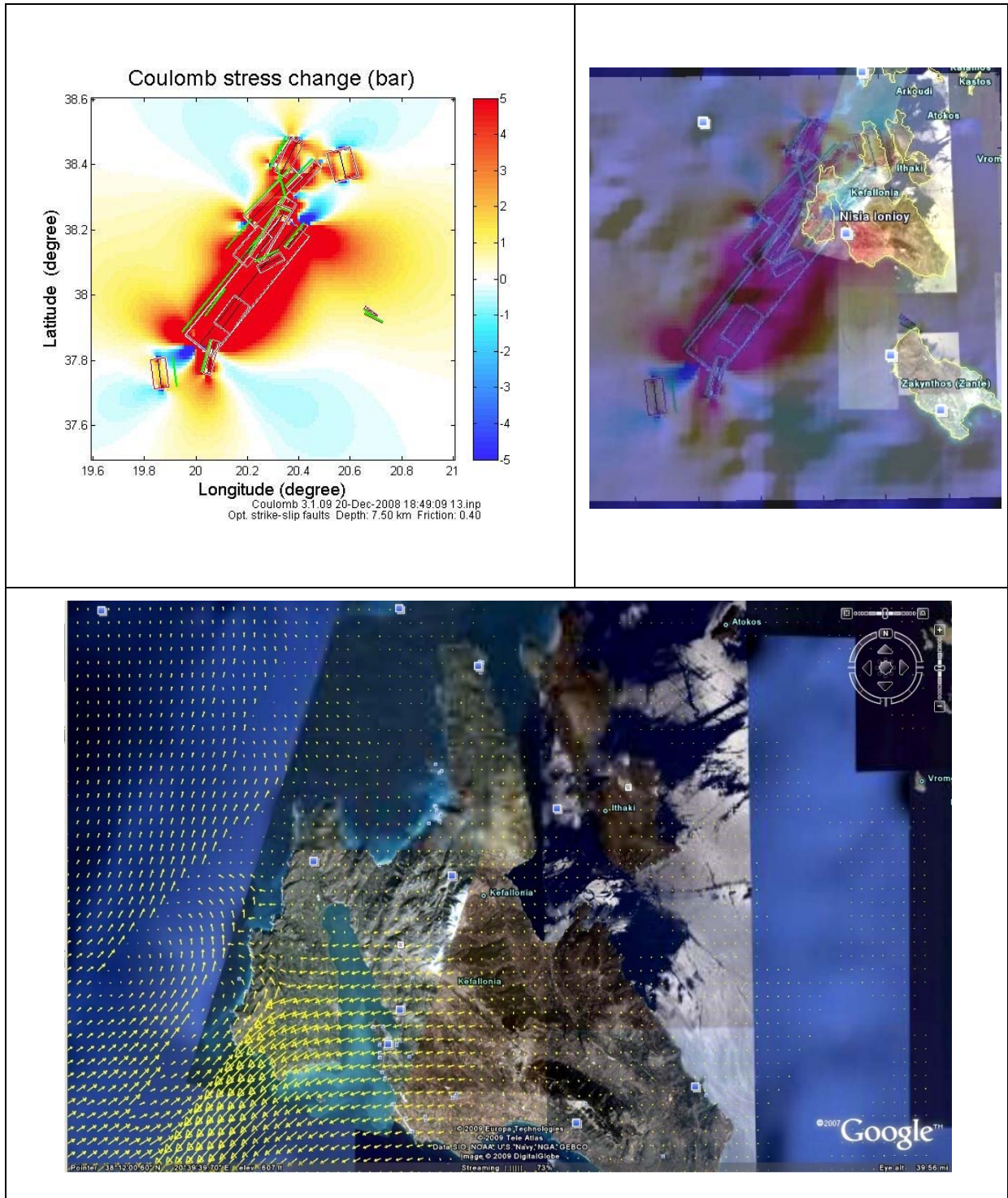
Εικόνα 8-24: 10η διάρρηξη 18/5/1988



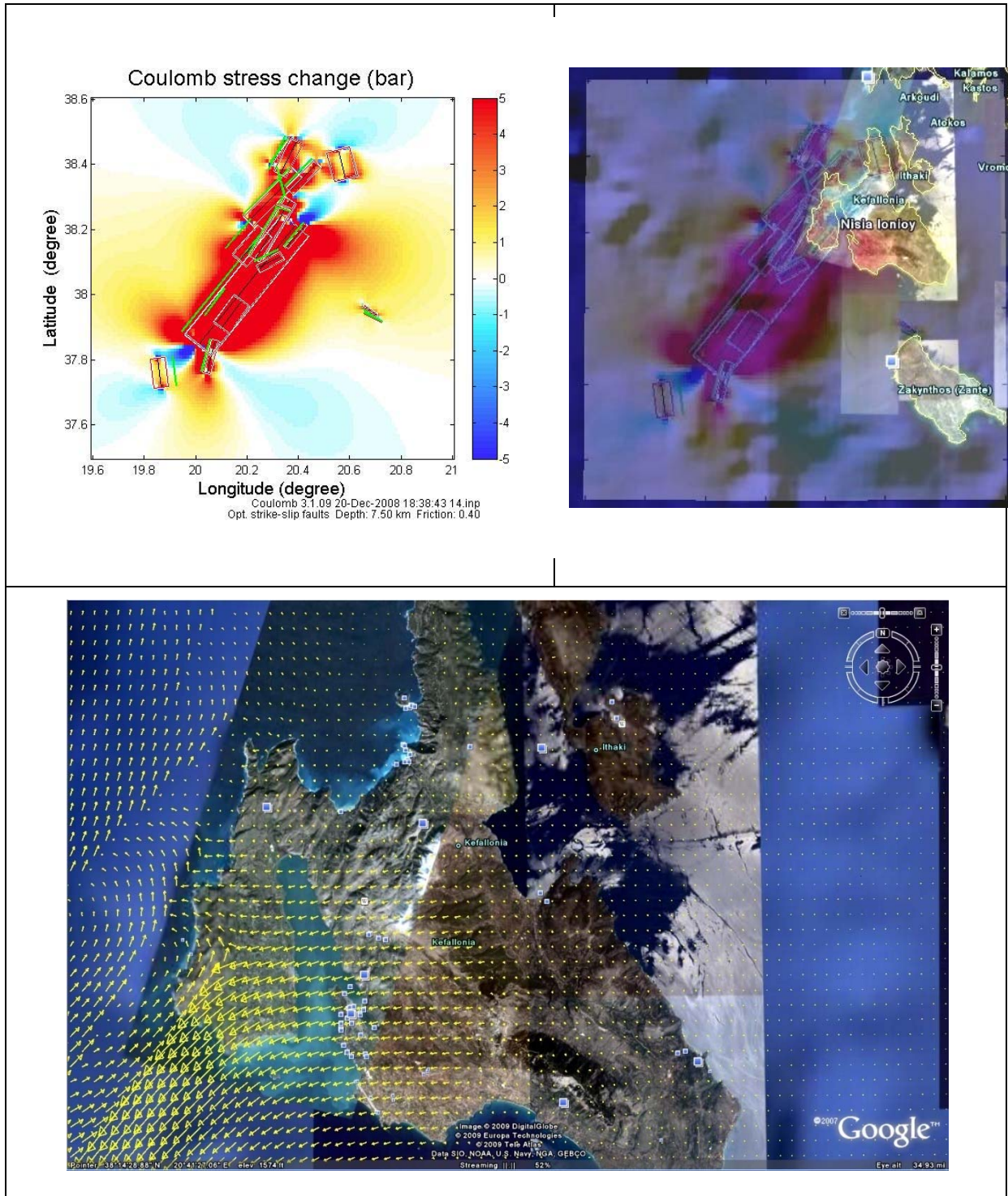
Εικόνα 8-25: 11η διάρρηξη 24/8/1989



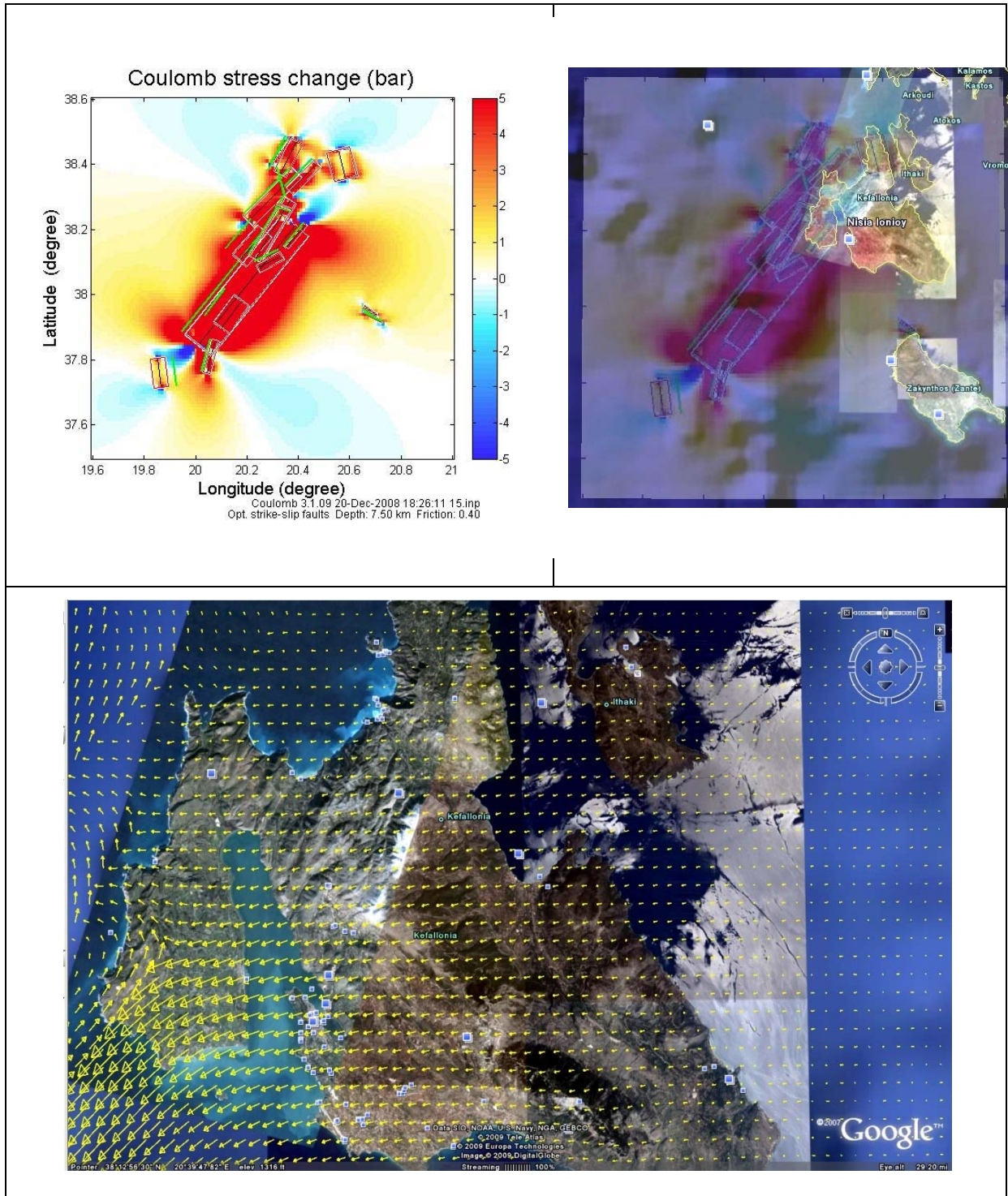
Εικόνα 8-26: 12η διάρρηξη 23/1/1992



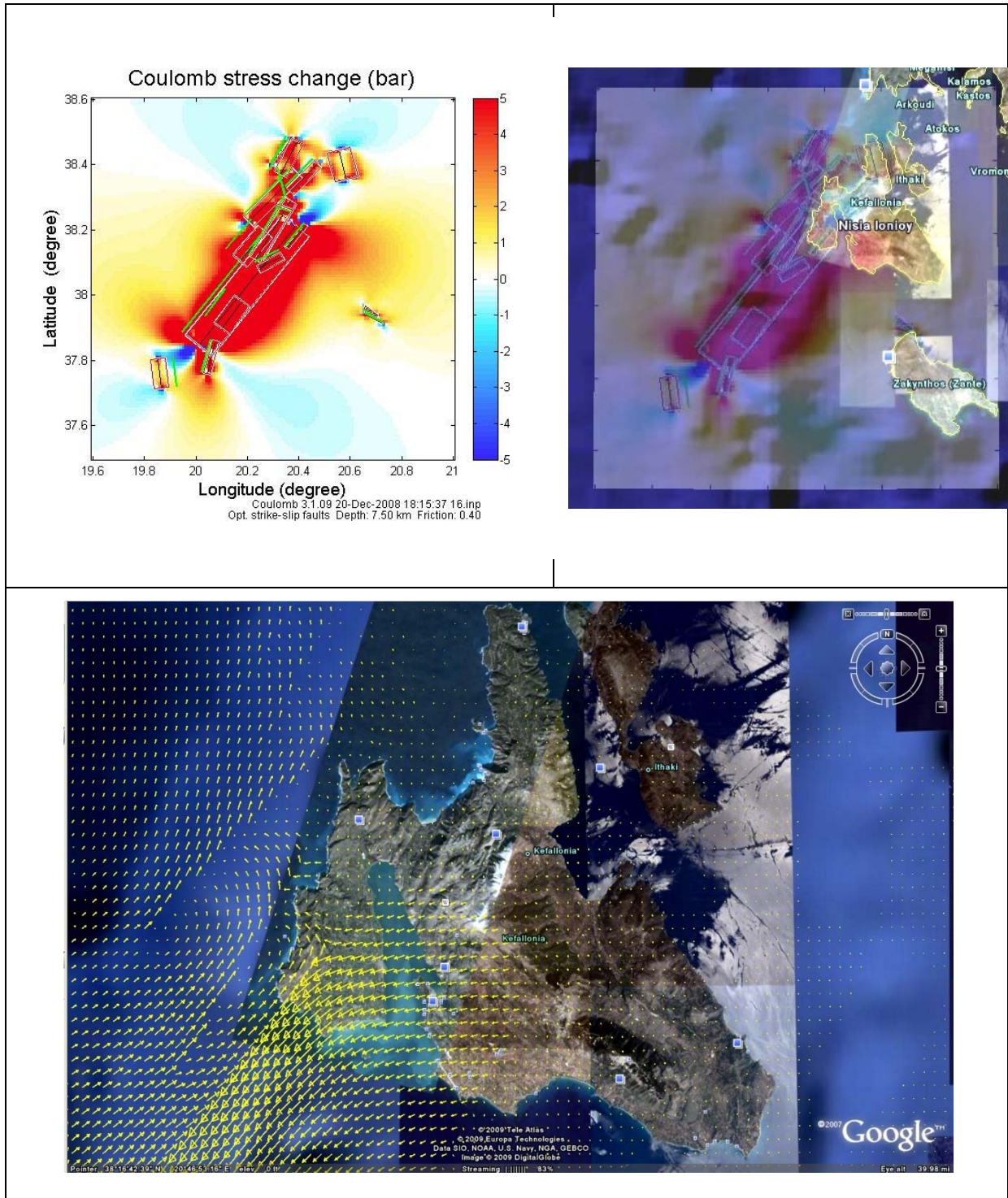
Εικόνα 8-27: 13η διάρρηξη 1/2/1996



Εικόνα 8-28: 14η διάρρηξη 6/11/2002



Εικόνα 8-29: 15η διάρρηξη 28/7/2003



Εικόνα 8-30: 16η διάρρηξη 16/11/2003

8.4 Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό αναλύθηκε η διαδικασία που ακολουθήθηκε για τον υπολογισμό των τάσεων Coulomb και των οριζόντιων μετατοπίσεων, καθώς και τα

προβλήματα που υπήρχαν και πώς αυτά αντιμετωπίστηκαν. Τέλος παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την επεξεργασία.

9 ΓΕΝΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΓΙΑ ΤΟ ΠΑΓΚΟΣΜΙΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ (GPS)

9.1 Περιγραφή του συστήματος GPS

Ο προσδιορισμός θέσεων στη φυσική γήινη επιφάνεια και η ένταξή τους σε κατάλληλο σύστημα αναφοράς είναι ο κυριότερος σκοπός του εφαρμοσμένου μέρους της Γεωδαισίας. Η χρήση τεχνητών δορυφόρων αλλά και η ανάπτυξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών έχουν αλλάξει τα δεδομένα που ίσχυαν πριν από μερικά χρόνια. Έτσι ο τρισδιάστατος εντοπισμός, μεγάλης ακρίβειας, με σύντομες εργασίες υπαίθρου είναι πλέον μια εύκολη διαδικασία.

Το σύστημα GPS βασίζεται στις αρχές λειτουργίας των παθητικών δορυφορικών συστημάτων ναυσιπλοΐας και εξασφαλίζει συνεχή, παγκόσμια, κάτω από οποιοσδήποτε καιρικές συνθήκες, πλοήγηση (τρειςδιάστατη θέση, ταχύτητα, χρόνος) σε απεριόριστο αριθμό χρηστών. Ταυτόχρονες μετρήσεις αποστάσεων σε τουλάχιστον τέσσερις δορυφόρους χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό των παραμέτρων αυτών.

Το δορυφορικό σύστημα GPS σχεδιάστηκε και αναπτύχθηκε από τις ΗΠΑ για την ικανοποίηση στρατιωτικών αναγκών ναυσιπλοΐας. Το GPS αποτελείται από τρία λειτουργικά κυρίως τμήματα:

1. **Το τμήμα του διαστήματος :** Αποτελείται από τους δορυφόρους NAVSTAR, οι οποίοι εκπέμπουν σήματα και κωδικοποιημένες πληροφορίες στην περιοχή των μικροκυμάτων (L – band). Ο σχεδιασμός του συστήματος απαιτεί τη λειτουργία τεσσάρων δορυφόρων ανά τροχιακό επίπεδο, ενώ συνολικά υπάρχουν έξι τροχιακά επίπεδα, όμοια κατανομημένα ως προς τον ισημερινό της Γης. Σε κάθε τροχιακό επίπεδο οι δορυφόροι περιστρέφονται σε σχεδόν κυκλικές τροχιές, που έχουν γωνία κλίσης 55° ως προς τον ισημερινό, με περίοδο ολοκλήρωσης γύρω από τη Γη δώδεκα ωρών, οποιαδήποτε χρονική στιγμή, με καλή γεωμετρική διάταξη, 5° ή και υψηλότερα από τον τοπικό ορίζοντα σε οποιαδήποτε θέση στη Γη. Το ύψος της τροχιάς τους είναι 20200 km. Σαν βασικό εξοπλισμό, οι δορυφόροι έχουν τέσσερα ατομικά χρονόμετρα υψηλής σταθερότητας για τη μέτρηση του χρόνου και για την παραγωγή σήματος. Τα δύο απ' αυτά είναι χρονόμετρα ρουβιδίου με σχετική ακρίβεια 10^{-12} και τα άλλα δύο είναι χρονόμετρα καισίου με σχετική σταθερότητα 10^{-13} .
2. **Το επίγειο τμήμα ελέγχου :** Παρακολουθεί και κατευθύνει τη λειτουργία κάθε δορυφόρου του συστήματος. Αποτελείται από :
 - ↳ Πέντε αρκετά απομακρυσμένους σταθμούς παρακολούθησης (Monitor Stations), οι οποίοι πραγματοποιούν μετρήσεις συνεχώς και στις δύο εκπεμπόμενες συχνότητες χρησιμοποιώντας όλους τους δορυφόρους. Τα δεδομένα των παρατηρήσεων μεταδίδονται στον κεντρικό σταθμό ελέγχου για την πρόβλεψη των εφημερίδων (τροχιών) των δορυφόρων και των διορθωτικών παραμέτρων για τα μοντέλα των σφαλμάτων των χρονομέτρων των δορυφόρων.
 - ↳ Τρεις σταθμούς επικοινωνίας (Upload Ground Antennas).

↳ Έναν κεντρικό σταθμό ελέγχου (Master Control Station). Ο σταθμός αυτός, ελέγχει ολοκληρωτικά τη λειτουργία του δορυφορικού και του επίγειου σχηματισμού του GPS. Επεξεργάζεται συνεχώς τα δεδομένα παρατηρήσεων, υπολογίζει τις εφημερίδες των δορυφόρων και ενεργοποιεί τη διαδικασία ενημέρωσής τους. Έχει τη δυνατότητα επέμβασης στον δορυφορικό σχηματισμό, τροποποιώντας τη θέση και τη λειτουργία των δορυφόρων.

3. **Το τμήμα χρηστών** : Παρακολουθεί τα σήματα των δορυφόρων, αποτελείται από όλους τους χρήστες που μπορούν να εκμεταλλευτούν τις δυνατότητες του συστήματος για ναυσιπλοΐα, γεωδαισία και άλλες χρήσεις.

9.2 Δορυφορικά Γεωδαιτικά Συστήματα Αναφοράς και επιπλέον χαρακτηριστικά

Το κυριότερο πλεονέκτημα του GPS που το κάνει να ξεχωρίζει από τα άλλα συστήματα προσδιορισμού θέσης είναι ότι για τη γεωμετρική σύνδεση της φυσικής γήινης επιφάνειας δεν απαιτείται αμοιβαία ορατότητα μεταξύ των σημείων, ενώ ταυτόχρονα μπορούν να προσδιοριστούν οι συντεταγμένες τους σε παγκόσμιο γεωκεντρικό σύστημα αναφοράς (X, Y, Z, ταχύτητα, χρόνος) ή σε επιλεγμένο ελλειψοειδές (φ, λ, h).

Συμβατικά σε ένα Δορυφορικό Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς (Δ.Γ.Σ.Α.) ως άξονας των Z λαμβάνεται ο άξονας περιστροφής της Γης, ως κέντρο του συστήματος λαμβάνεται το κέντρο μάζας της Γης, ο άξονας των X περνάει από το μεσημβρινό του Greenwich ενώ ο άξονας των Y απλώς συμπληρώνει το δεξιόστροφο σύστημα και αυτός ακριβώς είναι και ο ορισμός ενός Δ.Γ.Σ.Α. Μετά τον υπολογισμό του Δ.Γ.Σ.Α., το ελλειψοειδές προσδιορίζεται από δεδομένα χωροστάθμησης, που πραγματοποιείται στο έδαφος συνδέοντας τους σταθμούς παρακολούθησης με τη μέση στάθμη της θάλασσας. Αν τα ορθομετρικά υψόμετρα που προκύπτουν από τη χωροστάθμηση αφαιρεθούν από τα γεωμετρικά υψόμετρα, που είναι αποτέλεσμα δορυφορικών παρατηρήσεων απομένουν τα υψόμετρα του γεωειδούς και στις τιμές αυτών προσαρμόζεται το καλύτερο ελλειψοειδές. Το Δ.Γ.Σ.Α. υλοποιείται τελικώς μέσω των τροχιών των δορυφόρων ή μέσω των συντεταγμένων τριγωνομετρικών σημείων.

Το GPS είναι ένα παθητικό σύστημα εντοπισμού θέσης και γι' αυτό όλη η πληροφορία που απαιτείται για τον εντοπισμό της θέσης του χρήστη παρέχεται μέσω του σήματος του δορυφόρου. Η πληροφορία αυτή περιλαμβάνει σήματα χρόνου στον οποίο αναφέρεται η εκπεμπόμενη πληροφορία και τη θέση του δορυφόρου στο χρόνο εκπομπής. Για τις γεωδαιτικές εργασίες υψηλής ακρίβειας είναι απαραίτητες οι μετρήσεις στις συχνότητες L1 και L2 και οι μετρήσεις στους κώδικες C/A και P και στις δύο συχνότητες. Στην συχνότητα L2 δεν εκπέμπεται ο κώδικας C/A κι έτσι δεν είναι δυνατός ο προσδιορισμός της ιονοσφαιρικής διάθλασης. Σε τέτοιες περιπτώσεις, που χρησιμοποιείται

δέκτης μόνο μιας συχνότητας, το πρόβλημα αυτό μπορεί να αντιμετωπιστεί με κάποιο ιονοσφαιρικό μοντέλο. Οι μετρήσεις αυτές παρέχουν όλη τη δυνατή πληροφορία για τη διόρθωση των σφαλμάτων λόγω της τροχιάς των δορυφόρων, των χρονομέτρων των δεκτών και της ατμόσφαιρας, έτσι ώστε να γίνεται με μεγαλύτερη ακρίβεια ο προσδιορισμός των βάσεων που μετρούνται.

Η ακρίβεια που μπορεί να παρέχει το σύστημα στο σχετικό προσδιορισμό συντεταγμένων X, Y είναι δυνατόν να φτάσει τα ± 3 mm, ενώ για τα υψόμετρα h το ± 1.5 cm. Λαμβάνοντας μετρήσεις από τέσσερις δορυφόρους, μπορεί να παρέχει τυπική ακρίβεια στιγμιαίου απόλυτου προσανατολισμού καλύτερη από ± 10 m ενώ για τις γεωδαιτικές εφαρμογές η ακρίβεια κυμαίνεται από 1ppm έως και 0.01 ppm για τον προσδιορισμό βάσης μήκους 1 km έως μερικές δεκάδες km.

Με την ανάπτυξη του συστήματος αυτού ο προσδιορισμός των γεωγραφικών συντεταγμένων γίνεται ταχύτερα και στο σύστημα αναφοράς που έχει οριστεί. Τα υψόμετρα όμως που προσδιορίζονται είναι γεωμετρικά, γεγονός που δυσκολεύει τις γεωδαιτικές εργασίες, καθώς σ' αυτές χρησιμοποιούνται τα ορθομετρικά. Για να υπολογιστούν τα ορθομετρικά υψόμετρα λοιπόν, θα πρέπει να είναι γνωστό το υψόμετρο στην επιφάνεια του γεωειδούς (N), ώστε να υπολογιστεί με αξιοπιστία το ορθομετρικό υψόμετρο (H) των σημείων που μετρώνται με το GPS από τη σχέση $h = H + N$. Με τον τρόπο αυτό απαλείφονται τα προβλήματα σύνδεσης στα δίκτυα που ιδρύονται και μετρώνται για γεωδαιτικές εργασίες.

Οι τιμές των υψομέτρων στην επιφάνεια του γεωειδούς :

- Δίνονται από *παγκόσμια γεωδυναμικά μοντέλα*, τα οποία έχουν αναπτυχθεί, χρησιμοποιώντας μετρήσεις δορυφορικής αλτιμετρίας και βαρυτημετρικές παρατηρήσεις σε ορισμένα σημεία της φυσικής γήινης επιφάνειας. Τα μοντέλα αυτά δεν μπορούν σε αρκετές περιπτώσεις να δώσουν ακριβείς και αξιόπιστες προσεγγίσεις για τις τιμές N , ξ , η σε τμήματα με έντονο τοπογραφικό ανάγλυφο.
- Υπολογίζονται με τη μέθοδο της *αστρογεωδαιτικής χωροστάθμησης*, αφού πριν προσδιοριστούν οι αστρονομικές συντεταγμένες Φ και Λ και οι γεωγραφικές συντεταγμένες ϕ , λ για ένα σημείο σε ελλειψοειδές αναφοράς.

9.3 Ειδικές τεχνικές

Οι γεωδαιτικές εργασίες αποτύπωσης με το σύστημα GPS μπορούν να γίνουν με το σχετικό εντοπισμό. Δηλαδή τον προσδιορισμό των συντεταγμένων όλων των σημείων που ενδιαφέρουν σε σχέση με κάποιο σταθερό σημείο, το οποίο είναι γνωστό. Οι βάσεις μετρώνται μεταξύ του σταθερού σημείου (Reference Point), στο οποίο τοποθετείται ο ένας

δέκτης, και του άγνωστου σημείου, στο οποίο τοποθετείται ο δεύτερος δέκτης (Rover). Στην περίπτωση αυτή, οι δύο δέκτες θα πρέπει να μετρούν για το ίδιο χρονικό διάστημα.

Τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί διάφορες ειδικές τεχνικές μέτρησης με το σύστημα GPS, οι οποίες χρησιμοποιούνται ανάλογα με το είδος της γεωδαιτικής εργασίας και ανάλογα με την ακρίβεια που απαιτείται. Οι τεχνικές αυτές παρουσιάζονται πιο αναλυτικά παρακάτω :

✓ **Στατικός εντοπισμός (Static)**

Ο στατικός εντοπισμός χρησιμοποιείται για μεγάλες βάσεις (>30 km) και παρέχει τη μέγιστη δυνατή ακρίβεια. Απαιτούνται δύο δέκτες σταθεροί στα δύο σημεία της βάσης. Το χρονικό διάστημα που πρέπει οι δύο δέκτες να λαμβάνουν δεδομένα από τους δορυφόρους εξαρτάται από την επιθυμητή ακρίβεια.

✓ **Ταχέως στατικός εντοπισμός (Fast Static)**

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται για να δώσει αποτελέσματα μεγάλης ακρίβειας σε μικρό χρονικό διάστημα παρατηρήσεων. Απαιτεί δύο ή περισσότερους δέκτες δύο συχνοτήτων.

✓ **Κινηματικός εντοπισμός (Kinematic)**

Ο κινηματικός εντοπισμός θέσης χρησιμοποιείται για την τοπογραφική αποτύπωση περιοχών με εύρος περίπου 10 έως 15 km, στις οποίες δεν υπάρχουν πολλά φυσικά ή τεχνητά στοιχεία που να εμποδίζουν το σήμα των δορυφόρων.

✓ **Ημικινηματικός εντοπισμός (Stop and Go Kinematic)**

Στην μέθοδο αυτή, ο σταθμός αναφοράς μένει σταθερός σε ένα σημείο μέχρι το τέλος της εργασίας. Ο κινητός δέκτης επισκέπτεται τα σημεία που χρειάζεται να αποτυπωθούν. Ο χρόνος που παραμένει στο κάθε σημείο κυμαίνεται από λίγα δευτερόλεπτα, μέχρι 1 έως 2 λεπτά.

✓ **Συνεχής κινηματικός εντοπισμός (Continuous Kinematic)**

Η μέθοδος αυτή απαιτεί τον ένα δέκτη σταθερό σε γνωστό σημείο και το δεύτερο δέκτη σε διαρκή κίνηση. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται συνεχής λήψη σημείων, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την απόδοση της φυσικής γήινης επιφάνειας ή για οποιαδήποτε άλλη εφαρμογή.

✓ **Κινηματικός εντοπισμός σε πραγματικό χρόνο (Real Time Kinematic)**

Η τεχνική του κινηματικού εντοπισμού πραγματικού χρόνου είναι η ακριβέστερη μέθοδος αποτύπωσης χρησιμοποιώντας το σύστημα GPS σε πραγματικό χρόνο και είναι επίσης η μοναδική μέθοδος της δορυφορικής γεωδαισίας που μπορεί να δώσει τόσο ακριβή αποτελέσματα σε πραγματικό χρόνο. Η ακρίβεια της μετρούμενης βάσης εκτιμάται ότι είναι $\pm 1 \text{ cm} \pm 2 \text{ ppm}$ και ο συνήθης χρόνος μετρήσεων 10 έως 30 δευτερόλεπτα.

9.4 Σφάλματα

Όπως είναι προφανές καμία εργασία δεν είναι απόλυτα ακριβής. Έτσι και στις παρατηρήσεις που πραγματοποιούνται με το σύστημα GPS υπεισέρχονται ορισμένα

σφάλματα. Τα σφάλματα που παρουσιάζονται κατά τη διάρκεια των μετρήσεων GPS οφείλονται στους παρακάτω παράγοντες :

- Στη γεωμετρία και τον αριθμό των δορυφόρων που «βλέπει» ο δέκτης.
- Στις συνθήκες που επικρατούν τη δεδομένη στιγμή στην ιονόσφαιρα και την τροπόσφαιρα, αφού τα στοιχεία με τα οποία διορθώνονται τα δεδομένα του GPS προέρχονται από ιονοσφαιρικά μοντέλα, τα οποία περιέχουν κι αυτά σφάλματα ή από παρατηρήσεις και στις δύο συχνότητες.
- Στις πολλαπλές διαδρομές που ακολουθεί το σήμα από την αντανάκλαση του σε άλλες επιφάνειες. Εντούτοις οι σύγχρονοι δέκτες διαθέτουν ειδικά φίλτρα τα οποία δεν επιτρέπουν στα εξ ανακλάσεως σήματα να καταγράφονται στις μετρήσεις.
- Στη μετατόπιση του κέντρου φάσης της κεραίας. Η μετατόπιση αυτή είναι τυχαία και συμβαίνει όταν μετατεθεί το κέντρο φάσης της κεραίας γύρω από το φυσικό της κέντρο. Η μετατόπιση αυτή αλλάζει καθώς αλλάζει ο σχηματισμός των δορυφόρων και έτσι οι δέκτες δεν μετρούν από το ίδιο σημείο. Εάν προσανατολιστούν και οι δύο κεραίες προς το ίδιο σημείο του ορίζοντα (συνήθως Βορράς), τότε το σφάλμα αυτό εξαλείφεται κατά τον σχετικό εντοπισμό θέσης.
- Στις απώλειες κύκλων φάσης.
- Στο σφάλμα κέντρωσης και το σφάλμα μέτρησης του ύψους της κεραίας από το ύψος παρατήρησης.
- Στην κρυπτογράφηση (Anti – spoofing). Είναι η δυνατότητα που παρέχεται στους χειριστές του συστήματος, να μετατρέψουν το γνωστό ακριβή κώδικα $P(t)$ σε κάποιο άγνωστο $Y(t) = P(t) \cdot W(t)$, ώστε να αποφεύγεται η σκόπιμη παρεμβολή θορύβου στο εκπεμπόμενο σήμα.
- Στην επιλεκτική διαθεσιμότητα (Selective availability). Είναι η σκόπιμη υποβάθμιση της παρεχόμενης από το σύστημα ακρίβειας μέσω εισαγωγής θορύβου στο εκπεμπόμενο σήμα και μείωσης της ακρίβειας της εκπεμπόμενης εφημερίδας του δορυφόρου.

9.5 Το σύστημα GPS και το Δυτικό Ελληνικό τόξο

Η περιοχή της Μεσογείου, στην οποία βρίσκεται και η Ελλάδα, θεωρείται μία από τις πιο σεισμογενείς ενεργές περιοχές. Πολλοί καταστροφικοί σεισμοί πάνω από 7 Richter έχουν συμβεί κατά καιρούς. Αρκετοί επιστήμονες έχουν προτείνει διάφορα τεκτονικά μοντέλα, ούτως ώστε να εξηγηθούν οι γεωδυναμικές διαδικασίες που λαμβάνουν χώρα στη Μεσόγειο. Τα μοντέλα αυτά μπορούν να εξηγήσουν την υπάρχουσα κατάσταση. Η Μεσόγειος είναι μια ενεργά σεισμική περιοχή, επειδή κυριαρχεί η σύγκρουση της Αφρικανικής, της Αραβικής και της Ευρασιατικής πλάκας, με αποτέλεσμα να υπάρχει συμπίεση κατά τη διεύθυνση Βορρά – Νότου. Αξιοσημείωτο στοιχείο για την κατανόηση των δυνάμεων και της σεισμικής δραστηριότητας που επικρατούν στη ζώνη σύγκρουσης

των παραπάνω πλακών είναι η μελέτη του Δυτικού Ελληνικού τόξου, που βρίσκεται στην περιοχή των Ιονίων νήσων. Έτσι η γεωδυναμική και σεισμική δραστηριότητα που παρατηρείται στην περιοχή γίνεται εύκολα κατανοητή από τη μελέτη του τασικού πεδίου, των παραμορφώσεων και των μετατοπίσεων του τόξου αυτού.

Η γεωδυναμική αποτελεί μια επιστήμη, η οποία είναι συνδυασμός του μαγνητισμού, της σεισμολογίας, της γεωθερμικής και της γεωλογίας. Η γεωφυσική προσφέρει αρκετά εργαλεία για τον υπολογισμό των γεωδυναμικών διαδικασιών που συμβαίνουν (παραμορφώσεις, μετατοπίσεις), αλλά είναι δύσκολο να παρέχει ακριβείς αριθμούς του ρυθμού μετακίνησης. Με την ανακάλυψη όμως, των δορυφορικών γεωδαιτικών εφαρμογών, η μελέτη των τεκτονικών διαδικασιών έγινε πιο εύκολη και οι εφαρμογές αυτές μπορούν να δώσουν ικανοποιητικά αποτελέσματα για τις μετατοπίσεις. Η χρήση των συστημάτων GPS επιτρέπει την έρευνα περιοχών που μπορεί να απέχουν αρκετά χιλιόμετρα μεταξύ τους με ακρίβεια που επιτρέπει να καθοριστούν οι γεωδαιτικές παραμορφώσεις και οι μετατοπίσεις.

Από το 1985 κι έπειτα, σχετικές μετακινήσεις μετρήθηκαν στην περιοχή της Μεσογείου με Satellite Laser Ranging, με χρήση σταθερού και κινητού εξοπλισμού. Όταν αναλύθηκαν οι μετρήσεις που συλλέχθηκαν στο πεδίο, τότε προέκυψε ότι η Αραβική πλάκα κινείται στη Βόρεια – Βορειοδυτική κατεύθυνση, η Ανατολική μικρόπλακα κινείται δυτικά και το νότιο τμήμα του Αιγαίου κινείται νοτιοδυτικά.

Αφού η δυτική Ελλάδα αποτελεί όριο σύγκρουσης των δύο αυτών πλακών, έτσι η μελέτη των μετατοπίσεων στο ελληνικό τόξο μπορεί να δώσει ικανοποιητικά αποτελέσματα που να εξηγούν την κινηματική κατάσταση της περιοχής και τους ρυθμούς μετατόπισης. Στα παρακάτω αναφέρονται οι θέσεις που τοποθετήθηκαν σταθμοί GPS, τα αποτελέσματα που προέκυψαν, καθώς και η οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων αυτών.

Το 1989 ξεκίνησαν παρατηρήσεις GPS στην περιοχή για να ερευνηθεί η κινηματική της Αφρικανικής – Ευρασιατικής πλάκας. Οι παρατηρήσεις αυτές θα χρησιμοποιηθούν στην παρούσα εργασία ούτως ώστε να προσδιοριστούν οι παραμορφώσεις για την περιοχή των Ιονίων νήσων, να συγκριθούν με προηγούμενα αποτελέσματα και να εξαχθούν συμπεράσματα. Οι παρατηρήσεις αυτές ξεκίνησαν το 1989 και σ' αυτές έλαβε μέρος ο Max Muller, από τη διδακτορική διατριβή του οποίου πάρθηκαν οι μετρήσεις.

Οι μετρήσεις αυτές ξεκίνησαν με την τοποθέτηση είκοσι σταθμών ενώ το δίκτυο επεκτάθηκε το 1991 με άλλους έξι σταθμούς. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την επεξεργασία των μετρήσεων αυτών χρησιμοποιούνται στην εργασία αυτή, για να υπολογιστούν οι οριζόντιες μετατοπίσεις μέσω GPS και τέλος να συγκριθούν με τις αντίστοιχες που προέκυψαν από προηγούμενη εργασία. Η διαδικασία αυτή παρουσιάζεται παρακάτω.

9.6 Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό αναπτύχθηκαν οι βασικές έννοιες για το παγκόσμιο σύστημα εντοπισμού (GPS), για τα δορυφορικά συστήματα αναφοράς, καθώς και οι ειδικές τεχνικές που έχουν αναπτυχθεί για τις διάφορες γεωδαιτικές εργασίες αλλά και τα σφάλματα που συνοδεύουν το σύστημα αυτό. Τέλος, έγινε μικρή αναφορά στις μετρήσεις που έλαβαν χώρα στο Δυτικό Ελληνικό τόξο, όπου βρίσκεται και η περιοχή μελέτης σε σχέση με το σύστημα GPS.

**10 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ
ΙΟΝΙΩΝ ΝΗΣΩΝ ΜΕ ΔΕΔΟΜΕΝΑ GPS ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ
ΠΡΟΗΓΟΥΜΕΝΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ**

10.1 Γενικά

Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει υπολογισμός των παραμορφώσεων (εφελκυσμός και θλίψη) βασισμένες σε δεδομένα μετρήσεων με το σύστημα GPS για την περιοχή του Δυτικού Ελληνικού τόξου. Τέλος οι παραμορφώσεις αυτές συγκρίνονται με προηγούμενα αποτελέσματα και μελετώντας αναλυτικά όλα τα αποτελέσματα εξάγονται συμπεράσματα για τη σεισμοτεκτονική των Ιονίων νήσων.

10.2 Επεξεργασία μετρήσεων GPS

Κατ' αρχήν θα πρέπει να αναφερθεί ότι οι μετρήσεις GPS πάρθηκαν από το διδακτορικό του Max Vinzenz Muller με τίτλο «Satellite Geodesy and Geodynamics : Current deformation along the West Hellenic Arc».

Οι μετρήσεις αυτές ξεκίνησαν το 1989 και ολοκληρώθηκαν το 1994. Σε μερικούς σταθμούς υπάρχουν περισσότερες μετρήσεις, ενώ σε κάποιους άλλους λιγότερες. Από τους σταθμούς αυτούς πάρθηκαν οι γεωγραφικές συντεταγμένες κάθε σταθμού, οι οποίες προέκυψαν από τις μετρήσεις που έγιναν και παρουσιάζονται στο διδακτορικό.

Για να γίνει πιο εύκολη η ανάγνωση των παρακάτω πινάκων θα αναφερθεί εν συντομία η διαδικασία που ακολουθήθηκε. Κατ' αρχήν αφού πάρθηκαν οι γεωγραφικές συντεταγμένες ϕ , λ , μετατράπηκαν με τη βοήθεια του λογισμικού GEOCOMP σε καρτεσιανές συντεταγμένες X , Y , Z . Η μετατροπή έγινε με τα ϕ , λ να εισάγονται στο εξηκονταδικό σύστημα μέτρησης επειδή το λογισμικό αυτό ως στοιχείο εισόδου δέχεται τις γεωγραφικές συντεταγμένες στο σύστημα αυτό και όχι ως δεκαδικό αριθμό. Αυτό έγινε για όλες τις περιόδους μετρήσεων για κάθε ένα σταθμό ξεχωριστά.

Έπειτα υπολογίστηκαν οι μεταβολές ΔX , ΔY , ΔZ μεταξύ των καρτεσιανών συντεταγμένων, χρησιμοποιώντας την πρώτη μέτρηση και την τελευταία μέτρηση κάθε σταθμού. Οι σχέσεις που χρησιμοποιήθηκαν παρουσιάζονται παρακάτω.

$$\Delta X = X_n - X_1 \quad (10.1)$$

$$\Delta Y = Y_n - Y_1 \quad (10.2)$$

$$\Delta Z = Z_n - Z_1 \quad (10.3)$$

όπου n : η τελευταία μέτρηση κάθε σταθμού, όποτε αυτή είναι.

Στη συνέχεια, αφού οι μεταβολές ΔX , ΔY , ΔZ για κάθε σταθμό είναι γνωστές, το τελευταίο στάδιο μετατροπών είναι, να μετατραπούν σε ΔN , ΔE , ΔU_p , μεταβολές οι οποίες είναι συμβατές με το σύστημα GPS. Η μετατροπή αυτή γίνεται με QBasic με τη βοήθεια του λογισμικού ECCEN. Αφού γίνουν οι υπολογισμοί αυτοί, τότε μπορεί να προσδιοριστούν οι οριζόντιες μετατοπίσεις μέσω του τανυστή παραμόρφωσης. Στα παρακάτω

παρουσιάζονται αναλυτικά οι πίνακες με τα αρχικά δεδομένα, καθώς και οι πίνακες που προκύπτουν μετά από κάθε μετατροπή.

10.3 Μετατροπές και πίνακες αποτελεσμάτων

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται όλοι οι πίνακες που προκύπτουν από τη διαδικασία που περιγράφηκε παραπάνω, μέχρι να υπολογιστούν οι μεταβολές ΔΝ, ΔΕ, ΔΥρ. Κατ' αρχήν παρουσιάζεται ο πίνακας των δεδομένων, χωρίς όμως να αναφέρεται το μέσο σφάλμα της κάθε μίας μέτρησης, αφού αυτό δεν χρησιμοποιήθηκε στην διαδικασία αυτή. Ενδεικτικά το μέσο σφάλμα (RMS) παρουσιάζεται αναλυτικά στο παράρτημα.

ΣΤΑΘΜΟΣ	ΕΤΟΣ	φ	λ	h(m)
LOGO	1989	37° 40' 31".435839	20° 47' 56".108549	229.6471
	1991	37° 40' 31".436167	20° 47' 56".108031	229.6529
	1993	37° 40' 31".436940	20° 47' 56".108679	229.5420
	1994	37° 40' 31".437553	20° 47' 56".108886	229.5751
KSSI	1989	37° 43' 23".475812	20° 59' 19".267202	63.9146
	1991	37° 43' 23".476156	20° 59' 19".268031	63.9171
	1993	37° 43' 23".476367	20° 59' 19".267904	63.8519
SKIN	1989	37° 55' 45".914213	20° 42' 13".346354	88.8943
	1991	37° 55' 45".914506	20° 42' 13".346571	88.8797
	1993	37° 55' 45".915507	20° 42' 13".347294	88.8370
TSAR	1989	38° 10' 0".651352	20° 40' 39".699690	630.3177
	1990	38° 10' 0".651467	20° 40' 39".700020	630.3194
	1991	38° 10' 0".651585	20° 40' 39".700370	630.3213
	1992	38° 10' 0".652343	20° 40' 39".700776	630.2821
	1993	38° 10' 0".652623	20° 40' 39".701331	630.2280
	1994	38° 10' 0".653334	20° 40' 39".704084	630.2404
LKTR	1989	38° 07' 54".187063	20° 30' 32".657404	241.0159
	1991	38° 07' 54".187404	20° 30' 32".658231	240.9598
	1993	38° 07' 54".188756	20° 30' 32".659645	240.9432
	1994	38° 07' 54".189321	20° 30' 32".659936	240.9193
K₁AM	1989	38° 13' 15".791586	20° 22' 18".856206	475.4188
	1992	38° 13' 15".792529	20° 22' 18".856089	475.3791
	1993	38° 13' 15".793452	20° 22' 18".857129	475.3141
K₂AM	1989	38° 13' 15".788672	20° 22' 18".968866	475.3476
	1990	38° 13' 15".789109	20° 22' 18".968199	475.3947

	1991	38° 13' 15".789431	20° 22' 18".968821	475.3497
	1994	38° 13' 15".791536	20° 22' 18".970676	475.2774
ASSO	1989	38° 22' 14".438198	20° 32' 51".558353	178.7123
	1990	38° 22' 14".438517	20° 32' 51".559465	178.5869
	1991	38° 22' 14".438677	20° 32' 51".559666	178.6527
	1993	38° 22' 14".440017	20° 32' 51".559993	178.5999
1	1994	38° 22' 14".440827	20° 32' 51".559977	178.5957
2	1994	38° 22' 14".440841	20° 32' 51".560605	178.6372
SARA	1989	38° 21' 49".247685	20° 43' 56".256080	154.4877
	1990	38° 21' 49".246616	20° 43' 56".253371	154.3183
	1991	38° 21' 49".247091	20° 43' 56".254803	154.5249
	1992	38° 21' 49".248516	20° 43' 56".256558	154.3929
	1993	38° 21' 49".248866	20° 43' 56".257946	154.4399
1	1994	38° 21' 49".249563	20° 43' 56".257783	154.4179
2	1994	38° 21' 49".249274	20° 43' 56".257892	154.4372
EXOG	1989	38° 27' 18".726412	20° 37' 56".794682	531.2142
	1990	38° 27' 18".725417	20° 37' 56".791049	531.0105
	1991	38° 27' 18".726730	20° 37' 56".794366	531.1826
	1993	38° 27' 18".727704	20° 37' 56".796022	531.0732
	1994	38° 27' 18".728762	20° 37' 56".795859	531.0474
ATKO	1989	38° 29' 38".251087	21° 07' 11".346698	164.0631
	1991	38° 29' 38".250765	21° 07' 11".346550	163.9801
	1993	38° 29' 38".251600	21° 07' 11".348325	163.9469
STRO	1989	37° 15' 0".377226	21° 00' 58".381592	32.6335
	1991	37° 15' 0".376819	21° 00' 58".381502	32.6426
	1993	37° 15' 0".377644	21° 00' 58".380436	32.6000
	1994	37° 15' 0".378152	21° 00' 58".380180	32.6288
VASI	1989	38° 36' 26".076378	20° 34' 23".280201	345.3634
	1990	38° 36' 26".075148	20° 34' 23".276297	345.2015
	1991	38° 36' 26".076426	20° 34' 23".279806	345.2774
	1992	38° 36' 26".077713	20° 34' 23".282889	345.2806
	1993	38° 36' 26".077820	20° 34' 23".282268	345.2237
	1994	38° 36' 26".078632	20° 34' 23".282481	345.2364
1KVL	1989	38° 47' 28".735915	20° 39' 21".176196	507.9675
	1990	38° 47' 28".736234	20° 39' 21".176322	507.8962
	1991	38° 47' 28".736556	20° 39' 21".175673	507.9922
	1992	38° 47' 28".737456	20° 39' 21".178148	507.9417

	1993	38° 47' 28".737709	20° 39' 21".178399	507.8803
1	1994	38° 47' 28".738615	20° 39' 21".178321	507.8814
2	1994	38° 47' 28".738596	20° 39' 21".178657	507.9057
MESS	1989	38° 22' 12".229793	21° 07' 20".156102	26.6270
	1991	38° 22' 12".229259	21° 07' 20".155550	26.5764
	1993	38° 22' 12".229544	21° 07' 20".157295	26.4961
XRIS	1989	36° 47' 29".202999	21° 52' 39".412685	476.2304
	1991	36° 47' 29".202674	21° 52' 39".412522	476.2451
	1992	36° 47' 29".203768	21° 52' 39".413248	476.2721
	1993	36° 47' 29".203057	21° 52' 39".412316	476.1951
1	1994	36° 47' 29".203154	21° 52' 39".412368	476.1927
2	1994	36° 47' 29".202961	21° 52' 39".412304	476.2000
DIOC	1989	38° 04' 42".799097	23° 55' 56".918566	510.5750
	1991	38° 04' 42".799097	23° 55' 56".918566	510.5750
	1992	38° 04' 42".799097	23° 55' 56".918566	510.5750
	1993	38° 04' 42".799097	23° 55' 56".918566	510.5750
1	1994	38° 04' 42".799097	23° 55' 56".918566	510.5750
2	1994	38° 04' 42".799097	23° 55' 56".918566	510.5750

Πίνακας 10-1: Δεδομένα GPS

Στον πίνακα 10-1 φαίνεται ότι στα σταθμό DIOC όλες οι γεωγραφικές συντεταγμένες σε όλες τις περιόδους μέτρησης είναι ίδιες. Αυτό συμβαίνει γιατί ο συγκεκριμένος σταθμός είναι το κέντρο δορυφόρων Διονύσου και θεωρείται σταθερός. Αυτό θα φανεί και παρακάτω, όπου οι μεταβολές στο σταθμό αυτό είναι μηδενικές.

Ο παραπάνω πίνακας παρουσιάζει ουσιαστικά τα δεδομένα στην αρχική τους μορφή. Στη συνέχεια έγινε η μετατροπή σε καρτεσιανές συντεταγμένες, και τα αποτελέσματα εμφανίζονται παρακάτω.

ΣΤΑΘΜΟ Σ	ΕΤΟΣ	φ	λ	h(m)	X (m)	Y (m)	Z (m)
LOGO	1989	37° 40' 31".435839	20° 47' 56".108549	229.6471	4725308.393	1794874.249	3877130.730
	1991	37° 40' 31".436167	20° 47' 56".108031	229.6529	4725308.392	1794874.248	3877130.742
	1993	37° 40' 31".436940	20° 47' 56".108679	229.5420	4725308.290	1794874.227	3877130.693
	1994	37° 40' 31".437553	20° 47' 56".108886	229.5751	4725308.302	1794874.237	3877130.728
KSSI	1989	37° 43' 23".475812	20° 59' 19".267202	63.9146	4716186.915	1809306.041	3881226.268
	1991	37° 43' 23".476156	20° 59' 19".268031	63.9171	4716186.903	1809306.058	3881226.278
	1993	37° 43' 23".476367	20° 59' 19".267904	63.8519	4716186.853	1809306.036	3881226.243
SKIN	1989	37° 55' 45".914213	20° 42' 13".346354	88.8943	4712014.523	1780870.348	3899322.353

	1991	37° 55' 45".914506	20° 42' 13".346571	88.8797	4712014.505	1780870.347	3899322.351
	1993	37° 55' 45".915507	20° 42' 13".347294	88.8370	4712014.449	1780870.345	3899322.349
TSAR	1989	38° 10' 0".651352	20° 40' 39".699690	630.3177	4698024.493	1773145.708	3920410.623
	1990	38° 10' 0".651467	20° 40' 39".700020	630.3194	4698024.489	1773145.715	3920410.626
	1991	38° 10' 0".651585	20° 40' 39".700370	630.3213	4698024.486	1773145.723	3920410.630
	1992	38° 10' 0".652343	20° 40' 39".700776	630.2821	4698024.440	1773145.717	3920410.625
	1993	38° 10' 0".652623	20° 40' 39".701331	630.2280	4698024.390	1773145.712	3920410.598
	1994	38° 10' 0".653334	20° 40' 39".704084	630.2404	4698024.363	1773145.774	3920410.623
LKTR	1989	38° 07' 54".187063	20° 30' 32".657404	241.0159	4705191.935	1760048.328	3917103.518
	1991	38° 07' 54".187404	20° 30' 32".658231	240.9598	4705191.880	1760048.329	3917103.491
	1993	38° 07' 54".188756	20° 30' 32".659645	240.9432	4705191.832	1760048.348	3917103.514
	1994	38° 07' 54".189321	20° 30' 32".659936	240.9193	4705191.802	1760048.344	3917103.513
K₁AM	1989	38° 13' 15".791586	20° 22' 18".856206	475.4188	4703818.796	1746709.434	3925044.022
	1992	38° 13' 15".792529	20° 22' 18".856089	475.3791	4703818.754	1746709.416	3925044.016
	1993	38° 13' 15".793452	20° 22' 18".857129	475.3141	4703818.681	1746709.416	3925043.998
K₂AM	1989	38° 13' 15".788672	20° 22' 18".968866	475.3476	4703817.845	1746712.005	3925043.903
	1990	38° 13' 15".789109	20° 22' 18".968199	475.3947	4703817.877	1746712.000	3925043.942
	1991	38° 13' 15".789431	20° 22' 18".968821	475.3497	4703817.833	1746711.999	3925943.922
	1994	38° 13' 15".791536	20° 22' 18".970676	475.2774	4703817.727	1746712.008	3925043.929
ASSO	1989	38° 22' 14".438198	20° 32' 51".558353	178.7123	4688582.341	1757435.298	3937895.574
	1990	38° 22' 14".438517	20° 32' 51".559465	178.5869	4688582.234	1757435.287	3937895.504
	1991	38° 22' 14".438677	20° 32' 51".559666	178.6527	4688582.278	1757435.308	3937895.549
	1993	38° 22' 14".440017	20° 32' 51".559993	178.5999	4688582.212	1757435.292	3937895.548
1	1994	38° 22' 14".440827	20° 32' 51".559977	178.5957	4688582.195	1757435.285	3937895.565
2	1994	38° 22' 14".440841	20° 32' 51".560605	178.6372	4688582.220	1757435.311	3937895.591
SARA	1989	38° 21' 49".247685	20° 43' 56".256080	154.4877	4683327.736	1772699.267	3937271.526
	1990	38° 21' 49".246616	20° 43' 56".253371	154.3183	4683327.654	1772699.166	3937271.395
	1991	38° 21' 49".247091	20° 43' 56".254803	154.5249	4683327.785	1772699.253	3937271.535
	1992	38° 21' 49".248516	20° 43' 56".256558	154.3929	4683327.648	1772699.246	3937271.488
	1993	38° 21' 49".248866	20° 43' 56".257946	154.4399	4683327.664	1772699.289	3937271.525
1	1994	38° 21' 49".249563	20° 43' 56".257783	154.4179	4683327.637	1772699.274	3937271.528
2	1994	38° 21' 49".249274	20° 43' 56".257892	154.4372	4683327.655	1772699.284	3937271.533
EXOG	1989	38° 27' 18".726412	20° 37' 56".794682	531.2142	4680778.972	1762414.679	3945466.755
	1990	38° 27' 18".725417	20° 37' 56".791049	531.0105	4680778.872	1762414.547	3945466.604
	1991	38° 27' 18".726730	20° 37' 56".794366	531.1826	4680778.946	1762414.661	3945466.743
	1993	38° 27' 18".727704	20° 37' 56".796022	531.0732	4680778.834	1762414.662	3945466.698
	1994	38° 27' 18".728762	20° 37' 56".795859	531.0474	4680778.797	1762414.644	3945466.708

ATKO	1989	38° 29' 38".251087	21° 07' 11".346698	164.0631	4662852.995	1801098.496	3948606.652
	1991	38° 29' 38".250765	21° 07' 11".346550	163.9801	4662852.942	1801098.472	3948606.593
	1993	38° 29' 38".251600	21° 07' 11".348325	163.9469	4662852.887	1801098.497	3948606.592
STRO	1989	37° 15' 0".377226	21° 00' 58".381592	32.6335	4745122.221	1823022.902	3839543.811
	1991	37° 15' 0".376819	21° 00' 58".381502	32.6426	4745122.236	1823022.905	3839543.807
	1993	37° 15' 0".377644	21° 00' 58".380436	32.6000	4745122.199	1823022.863	3839543.801
	1994	37° 15' 0".378152	21° 00' 58".380180	32.6288	4745122.214	1823022.862	3839543.831
VASI	1989	38° 36' 26".076378	20° 34' 23".280201	345.3634	4672620.842	1753822.551	3958554.658
	1990	38° 36' 26".075148	20° 34' 23".276297	345.2015	4672620.730	1753822.409	3958554.592
	1991	38° 36' 26".076426	20° 34' 23".279806	345.2774	4672620.733	1753822.500	3958554.670
	1992	38° 36' 26".077713	20° 34' 23".282889	345.2806	4672620.686	1753822.562	3958554.703
	1993	38° 36' 26".077820	20° 34' 23".282268	345.2237	4672620.648	1753822.532	3958554.670
	1994	38° 36' 26".078632	20° 34' 23".282481	345.2364	4672620.641	1753822.535	3958554.698
1KVL	1989	38° 47' 28".735915	20° 39' 21".176196	507.9675	4658246.332	1756106.806	3974604.768
	1990	38° 47' 28".736234	20° 39' 21".176322	507.8962	4658246.273	1756106.787	3974604.731
	1991	38° 47' 28".736556	20° 39' 21".175673	507.9922	4658246.343	1756106.797	3974604.799
	1992	38° 47' 28".737456	20° 39' 21".178148	507.9417	4658246.268	1756106.833	3974604.789
	1993	38° 47' 28".737709	20° 39' 21".178399	507.8803	4658246.217	1756106.820	3974604.757
1	1994	38° 47' 28".738615	20° 39' 21".178321	507.8814	4658246.202	1756106.812	3974604.779
2	1994	38° 47' 28".738596	20° 39' 21".178657	507.9057	4658246.217	1756106.827	3974604.794
MESS	1989	38° 22' 12".229793	21° 07' 20".156102	26.6270	4670650.013	1804339.460	3937747.780
	1991	38° 22' 12".229259	21° 07' 20".155550	26.5764	4670649.991	1804339.437	3937747.736
	1993	38° 22' 12".229544	21° 07' 20".157295	26.4961	4670649.912	1804339.452	3937747.693
XRIS	1989	36° 47' 29".202999	21° 52' 39".412685	476.2304	4745949.602	1905705.963	3799169.045
	1991	36° 47' 29".202674	21° 52' 39".412522	476.2451	4745949.620	1905705.966	3799169.045
	1992	36° 47' 29".203768	21° 52' 39".413248	476.2721	4745949.615	1905705.983	3799169.089
	1993	36° 47' 29".203057	21° 52' 39".412316	476.1951	4745949.578	1905705.944	3799169.025
1	1994	36° 47' 29".203154	21° 52' 39".412368	476.1927	4745949.574	1905705.943	3799169.026
2	1994	36° 47' 29".202961	21° 52' 39".412304	476.2000	4745949.584	1905705.945	3799169.026
DIOC	1989	38° 04' 42".799097	23° 55' 56".918566	510.5750	4595218.353	2039437.505	3912626.176
	1991	38° 04' 42".799097	23° 55' 56".918566	510.5750	4595218.353	2039437.505	3912626.176
	1992	38° 04' 42".799097	23° 55' 56".918566	510.5750	4595218.353	2039437.505	3912626.176
	1993	38° 04' 42".799097	23° 55' 56".918566	510.5750	4595218.353	2039437.505	3912626.176
1	1994	38° 04' 42".799097	23° 55' 56".918566	510.5750	4595218.353	2039437.505	3912626.176
2	1994	38° 04' 42".799097	23° 55' 56".918566	510.5750	4595218.353	2039437.505	3912626.176

Πίνακας 10-2: Στοιχεία μετατροπών σε επίπεδες καρτεσιανές συντεταγμένες

Έπειτα, μεταξύ των καρτεσιανών συντεταγμένων υπολογίστηκαν οι μεταβολές μεταξύ πρώτης και τελευταίας περιόδου μετρήσεων με τις σχέσεις που αναφέρθηκαν πιο πάνω. Αξίζει να σημειωθεί εδώ, ότι οι ενδιάμεσες παρατηρήσεις δε λήφθηκαν υπόψη. Οι μεταβολές αυτές παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

ΣΤΑΘΜΟΣ	ΕΤΟΣ	X (m)	Y (m)	Z (m)	ΔX (m)	ΔY (m)	ΔZ (m)
LOGO	1989	4725308.393	1794874.249	3877130.730	-0.0910	-0.0120	-0.0020
	1991	4725308.392	1794874.248	3877130.742			
	1993	4725308.290	1794874.227	3877130.693			
	1994	4725308.302	1794874.237	3877130.728			
KSSI	1989	4716186.915	1809306.041	3881226.268	-0.0620	-0.0050	-0.0250
	1991	4716186.903	1809306.058	3881226.278			
	1993	4716186.853	1809306.036	3881226.243			
SKIN	1989	4712014.523	1780870.348	3899322.353	-0.0740	-0.0030	-0.0040
	1991	4712014.505	1780870.347	3899322.351			
	1993	4712014.449	1780870.345	3899322.349			
TSAR	1989	4698024.493	1773145.708	3920410.623	-0.1300	0.0660	0.0000
	1990	4698024.489	1773145.715	3920410.626			
	1991	4698024.486	1773145.723	3920410.630			
	1992	4698024.440	1773145.717	3920410.625			
	1993	4698024.390	1773145.712	3920410.598			
LKTR	1989	4705191.935	1760048.328	3917103.518	-0.1330	0.0160	-0.0050
	1991	4705191.880	1760048.329	3917103.491			
	1993	4705191.832	1760048.348	3917103.514			
	1994	4705191.802	1760048.344	3917103.513			
K₁AM	1989	4703818.796	1746709.434	3925044.022	-0.1150	-0.0180	-0.0240
	1992	4703818.754	1746709.416	3925044.016			
	1993	4703818.681	1746709.416	3925043.998			
K₂AM	1989	4703817.845	1746712.005	3925043.903	-0.1180	0.0030	0.0260
	1990	4703817.877	1746712.000	3925043.942			
	1991	4703817.833	1746711.999	3925943.922			
	1994	4703817.727	1746712.008	3925043.929			
ASSO	1989	4688582.341	1757435.298	3937895.574	-0.1210	0.0130	0.0170
	1990	4688582.234	1757435.287	3937895.504			
	1991	4688582.278	1757435.308	3937895.549			
	1993	4688582.212	1757435.292	3937895.548			

1	1994	4688582.195	1757435.285	3937895.565			
2	1994	4688582.220	1757435.311	3937895.591			
SARA	1989	4683327.736	1772699.267	3937271.526			
	1990	4683327.654	1772699.166	3937271.395			
	1991	4683327.785	1772699.253	3937271.535			
	1992	4683327.648	1772699.246	3937271.488	-0.0810	0.0170	0.0070
	1993	4683327.664	1772699.289	3937271.525			
1	1994	4683327.637	1772699.274	3937271.528			
2	1994	4683327.655	1772699.284	3937271.533			
EXOG	1989	4680778.972	1762414.679	3945466.755			
	1990	4680778.872	1762414.547	3945466.604			
	1991	4680778.946	1762414.661	3945466.743	-0.1750	-0.0350	-0.0470
	1993	4680778.834	1762414.662	3945466.698			
	1994	4680778.797	1762414.644	3945466.708			
ATKO	1989	4662852.995	1801098.496	3948606.652			
	1991	4662852.942	1801098.472	3948606.593	-0.1080	0.0010	-0.0600
	1993	4662852.887	1801098.497	3948606.592			
STRO	1989	4745122.221	1823022.902	3839543.811			
	1991	4745122.236	1823022.905	3839543.807	-0.0070	-0.0400	0.0200
	1993	4745122.199	1823022.863	3839543.801			
	1994	4745122.214	1823022.862	3839543.831			
VASI	1989	4672620.842	1753822.551	3958554.658			
	1990	4672620.730	1753822.409	3958554.592			
	1991	4672620.733	1753822.500	3958554.670	-0.2010	-0.0160	0.0400
	1992	4672620.686	1753822.562	3958554.703			
	1993	4672620.648	1753822.532	3958554.670			
	1994	4672620.641	1753822.535	3958554.698			
1KVL	1989	4658246.332	1756106.806	3974604.768			
	1990	4658246.273	1756106.787	3974604.731			
	1991	4658246.343	1756106.797	3974604.799			
	1992	4658246.268	1756106.833	3974604.789	-0.1150	0.0210	0.0260
	1993	4658246.217	1756106.820	3974604.757			
1	1994	4658246.202	1756106.812	3974604.779			
2	1994	4658246.217	1756106.827	3974604.794			
MESS	1989	4670650.013	1804339.460	3937747.780			
	1991	4670649.991	1804339.437	3937747.736	-0.1010	-0.0080	-0.0870
	1993	4670649.912	1804339.452	3937747.693			

XRIS	1989	4745949.602	1905705.963	3799169.045	-0.0180	-0.0180	-0.0190
	1991	4745949.620	1905705.966	3799169.045			
	1992	4745949.615	1905705.983	3799169.089			
	1993	4745949.578	1905705.944	3799169.025			
1	1994	4745949.574	1905705.943	3799169.026			
2	1994	4745949.584	1905705.945	3799169.026			
DIOC	1989	4595218.353	2039437.505	3912626.176	0.0000	0.0000	0.0000
	1991	4595218.353	2039437.505	3912626.176			
	1992	4595218.353	2039437.505	3912626.176			
	1993	4595218.353	2039437.505	3912626.176			
1	1994	4595218.353	2039437.505	3912626.176			
2	1994	4595218.353	2039437.505	3912626.176			

Πίνακας 10-3:Στοιχεία υπολογισμού μεταβολών ΔΧ, ΔΥ, ΔΖ

Το τελικό στάδιο πριν τον προσδιορισμό του τανυστή περιελάμβανε τη μετατροπή των ΔΧ, ΔΥ, ΔΖ σε ΔΝ, ΔΕ, ΔUp για να γίνουν οι μεταβολές συμβατές με το σύστημα GPS. Η μετατροπή αυτή εμφανίζεται στον πίνακα που ακολουθεί.

ΣΤΑΘΜΟΣ	ΕΤΟΣ	ΔΧ (m)	ΔΥ (m)	ΔΖ (m)	ΔΝ	ΔΕ	ΔUp
LOGO	1989	-0.0910	-0.0120	-0.0020	0.0530	0.0211	-0.0719
	1991						
	1993						
	1994						
KSSI	1989	-0.0620	-0.0050	-0.0250	0.0167	0.0175	-0.0625
	1991						
	1993						
SKIN	1989	-0.0740	-0.0030	-0.0040	0.0401	0.0234	-0.0579
	1991						
	1993						
TSAR	1989	-0.1300	0.0660	0.0000	0.0608	0.1077	-0.0773
	1990						
	1991						
	1992						
	1993						
	1994						
LKTR	1989	-0.1330	0.0160	-0.0050	0.0695	0.0616	-0.0967
	1991						

	1993						
	1994						
K₁AM	1989						
	1992	-0.1150	-0.0180	-0.0240	0.0517	0.0232	-0.1045
	1993						
K₂AM	1989						
	1990	-0.1180	0.0030	0.0260	0.0882	0.0439	-0.0700
	1991						
	1994						
ASSO	1989						
	1990						
	1991	-0.1210	0.0130	0.0170	0.0808	0.0546	-0.0747
	1993						
1	1994						
2	1994						
SARA	1989						
	1990						
	1991						
	1992	-0.0810	0.0170	0.0070	0.0488	0.0446	-0.0503
	1993						
1	1994						
2	1994						
EXOG	1989						
	1990						
	1991	-0.1750	-0.0350	-0.0470	0.0727	0.0289	-0.1671
	1993						
	1994						
ATKO	1989						
	1991	-0.1080	0.0010	-0.0600	0.0155	0.0399	-0.1159
	1993						
STRO	1989						
	1991	-0.0070	-0.0400	0.0200	0.0286	-0.0348	-0.0045
	1993						
	1994						
VASI	1989						
	1990	-0.2010	-0.0160	0.0400	0.1522	0.0557	-0.1265

	1991						
	1992						
	1993						
	1994						
1KVL	1989						
	1990						
	1991						
	1992	-0.1150	0.0210	0.0260	0.0830	0.0602	-0.0618
	1993						
1	1994						
2	1994						
MESS	1989						
	1991	-0.1010	-0.0080	-0.0870	-0.0079	0.0289	-0.1301
	1993						
XRIS	1989						
	1991						
	1992						
	1993	-0.0180	-0.0180	-0.0190	-0.0012	-0.0100	-0.0301
1	1994						
2	1994						
DIOC	1989						
	1991						
	1992						
	1993	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
1	1994						
2	1994						

Πίνακας 10-4:Στοιχεία υπολογισμού μεταβολών ΔN, ΔE, ΔUρ

10.4 Υπολογισμός μετατοπίσεων, παρουσίαση αποτελεσμάτων και συμπεράσματα

Αφού υπολογίστηκαν οι μεταβολές, το επόμενο βήμα είναι ο υπολογισμός των μετατοπίσεων και η παρουσίαση των αποτελεσμάτων. Κατ' αρχήν θα αναφερθούν οι βασικές έννοιες της θεωρίας του προσδιορισμού της παραμόρφωσης, καθώς και ορισμένα βασικά στοιχεία για το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε.

10.4.1 Προσδιορισμός της παραμόρφωσης μιας περιοχής με χρήση γεωδαιτικών μετρήσεων GPS – Τανυστής παραμόρφωσης

Ο προσδιορισμός της παραμόρφωσης μιας περιοχής είναι σημαντικός για τη μελέτη της τεκτονικής συμπεριφοράς του φλοιού της γης, ταυτόχρονα με τη μελέτη της σεισμικής δραστηριότητας που λαμβάνει χώρα λόγω της μεγάλης συσχέτισης των δύο.

Ο προσδιορισμός των τεκτονικών παραμορφώσεων μέσω μετρήσεων GPS, ανεξάρτητα από τη σεισμικότητα είναι σημαντικός για να συνδεθούν με τη σεισμική δραστηριότητα, καθώς και για να συγκριθούν τα αποτελέσματα αυτά με τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τα γεωλογικά και τα σεισμολογικά δεδομένα. Οι γεωδαιτικές μέθοδοι είναι δυνατόν να δώσουν, με απ' ευθείας μετρήσεις, τόσο τη γραμμική, όσο και τη γωνιακή παραμόρφωση. Παρακάτω θα αναφερθούν η διαδικασία που ακολουθήθηκε για να υπολογιστεί η παραμόρφωση μέσω των γεωδαιτικών μετρήσεων, καθώς και το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε.

Παραπάνω παρουσιάστηκε ο πίνακας με τα δεδομένα που πάρθηκαν από το διδακτορικό του Max Vinzenz Muller, σύμφωνα με το οποίο πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις με το σύστημα GPS για να εξακριβωθεί η τεκτονική του Δυτικού Ελληνικού τόξου (Ιόνια νησιά). Με τις μετατροπές που παρουσιάστηκαν μέχρι τώρα, προέκυψαν οι μεταβολές των σταθμών GPS.

Οι γεωγραφικές συντεταγμένες φ, λ που παρουσιάστηκαν στον πίνακα δεδομένων, μετατρέπονται σε επίπεδες συντεταγμένες φ, λ στο Ε.Γ.Σ.Α. 87. Η μετατροπή έγινε με το λογισμικό *Geodetic transforms* και τα αποτελέσματα αποθηκεύτηκαν σε αρχείο .txt, τα οποία παρουσιάζονται στο παράρτημα.

10.4.2 Το λογισμικό υπολογισμού των τανυστών παραμόρφωσης

Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε λειτουργεί με βάση τη γλώσσα προγραμματισμού Q-Basic και δημιουργήθηκε από το Κέντρο Δορυφόρων Διούσου.

Κατ' αρχήν λοιπόν και αφού μετατραπούν οι γεωγραφικές συντεταγμένες φ, λ σε επίπεδες συντεταγμένες x, y δημιουργείται το αρχείο εισόδου deform.txt, στο οποίο περιέχονται οι επίπεδες συντεταγμένες των σταθμών που είναι επιθυμητό κάθε φορά να συμπεριληφθούν στον υπολογισμό των παραμορφώσεων και οι αντίστοιχες μεταβολές των σταθμών αυτών ΔN και ΔE. Στο σημείο αυτό αξίζει να αναφερθεί ότι στο αρχείο αυτό περιλαμβάνονται κάθε φορά οι σταθμοί που επιθυμείται να λάβουν μέρος στον υπολογισμό των μετατοπίσεων. Όπως θα φανεί και παρακάτω, θα υπολογιστούν μετατοπίσεις με διαφορετικούς συνδυασμούς σταθμών, καθώς θα απεικονιστούν μετατοπίσεις για ολόκληρη την περιοχή, για κάθε ένα νησί ξεχωριστά κ.ο.κ. Έτσι λοιπόν, κάθε φορά περιλαμβάνονται όσοι σταθμοί επιθυμούνται.

Στη συνέχεια μέσω της Q-Basic γίνεται είσοδος με το αρχείο αυτό και τα αποτελέσματα που προκύπτουν σε αρχείο ar.txt παρουσιάζουν το κέντρο βάρους της περιοχής (Xcen., Ycen.), τη μετάθεση των σημείων στους άξονες X και Y (Sx, Sy), τη στροφή, τις κύριες κλίμακες x και y, τη μέση κλίμακα (mean. scale), το αζιμούθιο A που δείχνει τη στροφή των αξόνων, καθώς και τη συνολική παραμόρφωση γ που παρουσιάζουν οι άξονες.

Αφού υπολογιστούν όλα τα παραπάνω στοιχεία, τότε πρέπει να δημιουργηθεί ένα δεύτερο αρχείο εισόδου. Το αρχείο αυτό περιλαμβάνει όλα όσα υπολογίστηκαν και ονομάζεται stain.txt. Το αρχείο αυτό εισάγεται στην Q-Basic και τελικώς δημιουργούνται τέσσερα αρχεία Autocad script τα οποία εισάγονται στο Autocad για την τελική απεικόνιση των μετατοπίσεων. Το πρώτο αρχείο είναι ο μοναδιαίος κύκλος στον οποίο περιλαμβάνεται η περιοχή, το δεύτερο είναι η έλλειψη παραμόρφωσης και τα άλλα δύο αρχεία είναι οι άξονες, που έχουν το κέντρο τους στις συντεταγμένες του κέντρου βάρους της περιοχής, και οι οποίοι απεικονίζουν τη διεύθυνση που υπάρχει εφελκυσμός και τη διεύθυνση που υπάρχει θλίψη ανάλογα πώς μεγαλώνει ή μικραίνει ο συγκεκριμένος άξονας στην έλλειψη παραμόρφωσης.

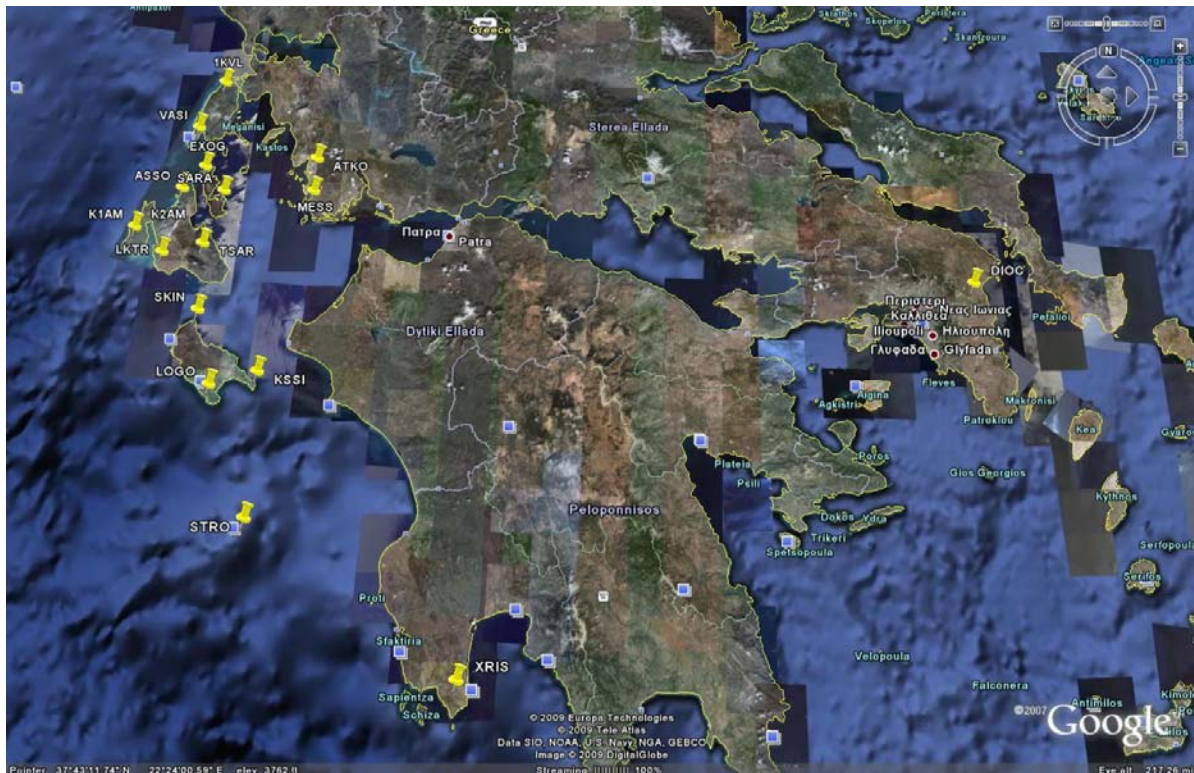
Εν κατακλείδι, μπορεί να αναφερθεί ότι η παραπάνω διαδικασία αποσκοπεί στην απεικόνιση των μετατοπίσεων στο Autocad ούτως ώστε να γίνει διερεύνηση της σεισμοτεκτονικής της περιοχής μέσω των συμπερασμάτων από τα αποτελέσματα αλλά και να επιβεβαιωθεί το αποτέλεσμα με τη σύγκριση με προηγούμενα αποτελέσματα. Αφού δημιουργείται ο μοναδιαίος κύκλος και η έλλειψη παραμόρφωσης (τανυστής) τότε υπάρχει μια ένδειξη σε ποια διεύθυνση η περιοχή εφελκύεται (μεγαλώνει) και σε ποια διεύθυνση η περιοχή θλίβεται (μικραίνει).

10.4.3 Παρουσίαση των αποτελεσμάτων

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των παραμορφώσεων που υπολογίστηκαν με τη διαδικασία που περιγράφηκε παραπάνω. Οι σταθμοί που αναφέρθηκαν πιο πάνω συνδυάστηκαν, κι έτσι προέκυψαν αρκετοί συνδυασμοί για τον υπολογισμό μετατοπίσεων. Οι παραμορφώσεις που υπολογίστηκαν είναι για :

- Ιόνια νησιά
- Λευκάδα
- Κεφαλονιά
- Ζάκυνθο
- Νότια Κεφαλονιά
- Βόρεια Κεφαλονιά
- Βόρεια Κεφαλονιά – Ιθάκη – Νότια Λευκάδα
- Ζάκυνθο - Κεφαλονιά
- Ζάκυνθο - Στροφάδες
- Σταθμούς Vasi – Atko – Sara – Exog – Mess

Η απεικόνιση των σταθμών για να φανεί η θέση τους έγινε στο Google earth και φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



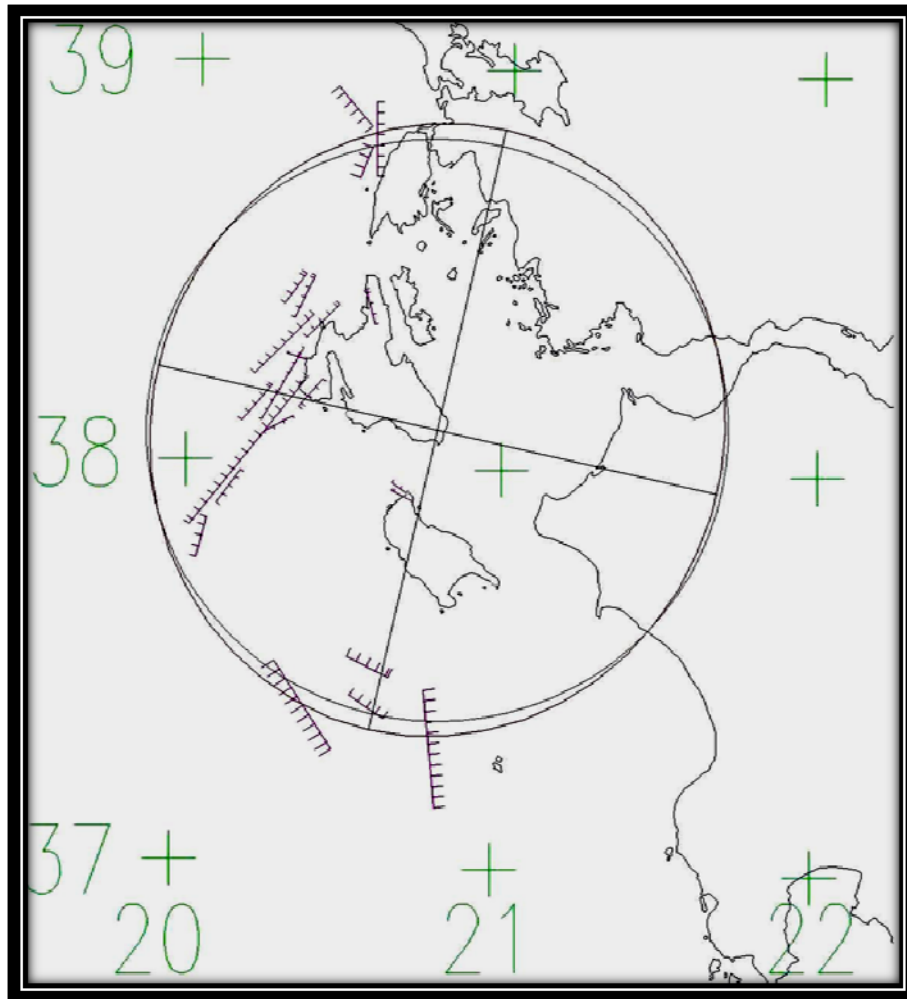
Εικόνα 10-1: Απεικόνιση σταθμών GPS στο Google earth

Για κάθε ένα από τους παραπάνω συνδυασμούς ακολουθήθηκε η διαδικασία υπολογισμού τανυστών παραμόρφωσης με το αντίστοιχο λογισμικό κάθε φορά. Αξίζει να σημειωθεί ότι στα αρχεία deform.txt τοποθετούνται κάθε φορά οι σταθμοί που ενδιαφέρουν για την κάθε μετατόπιση που υπολογίζεται και όχι όλοι οι σταθμοί. Οι συνδυασμοί των σταθμών για τον υπολογισμό διάφορων τανυστών παραμορφώσεων, έγιναν ούτως ώστε να εξαχθούν περισσότερα συμπεράσματα για τη σεισμοτεκτονική της περιοχής. Τα αρχεία που χρησιμοποιήθηκαν, παρουσιάζονται στο παράρτημα.

Παρακάτω παρουσιάζονται όλοι οι τανυστές παραμόρφωσης που υπολογίστηκαν με συνδυασμούς σταθμών. Οι τανυστές αναλύονται και ερμηνεύονται παρακάτω, ενώ τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τη διαδικασία αυτή ακολουθούν σε επόμενη παράγραφο.

Στο σημείο αυτό αξίζει να αναφερθεί ότι σε κάθε τανυστή η κλίμακα στους άξονες x και y πολλαπλασιάστηκε με ένα σταθερό αριθμό, για να είναι εμφανής η μετατόπιση γιατί στην αρχική μορφή ήταν πολύ μικρή και δε θα ήταν ξεκάθαρες οι διευθύνσεις των κυρίων τάσεων. Συνήθως η σταθερά αυτή ήταν ο αριθμός 100 ή 10.

10.4.3.1 Ιόνια νησιά



Εικόνα 10-2: Τανυστής παραμόρφωσης Ιονίων νήσων

Στον τανυστή παραμόρφωσης που παρουσιάζεται εδώ, διακρίνονται οι διευθύνσεις των παραμορφώσεων. Οι ημιάξονες είναι κοινοί για το μοναδιαίο κύκλο και την έλλειψη. Στη διεύθυνση ΒΑ – ΝΔ παρατηρείται αύξηση του μήκους του άξονα, έτσι συμπεραίνεται εφελκυσμός και αύξηση των τάσεων, ενώ στη διεύθυνση ΒΔ – ΝΑ παρατηρείται μείωση του μήκους του άξονα, έτσι συμπεραίνεται θλίψη.

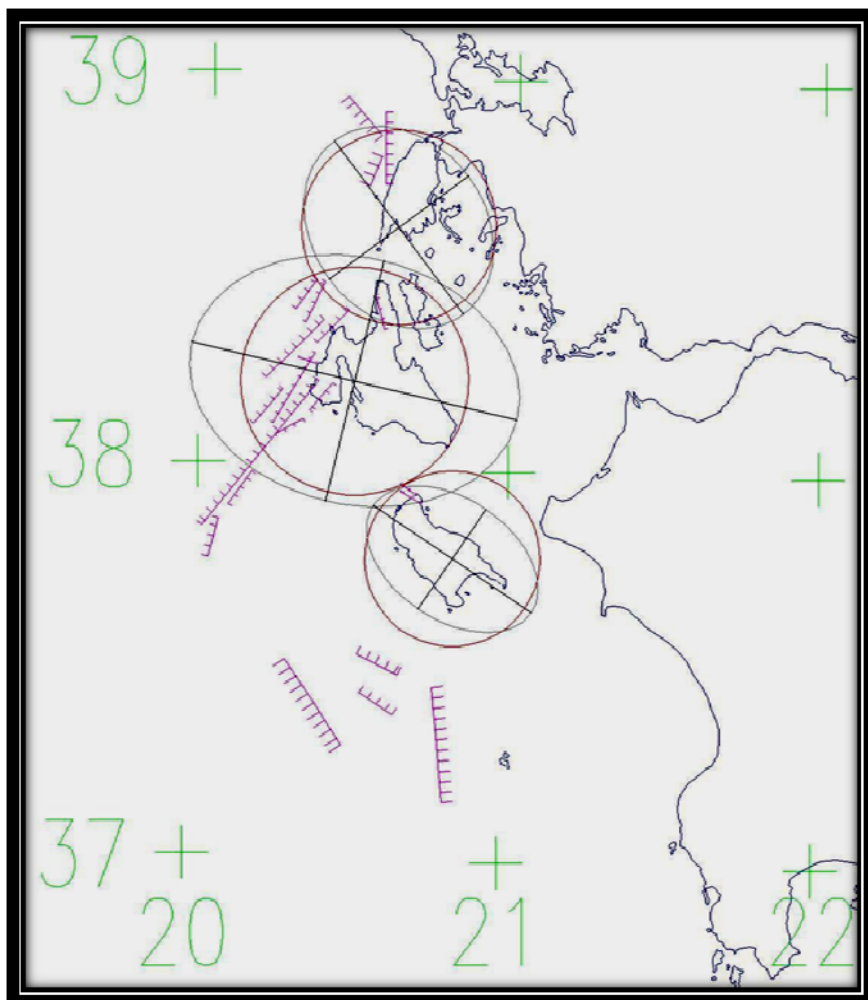
Στην περίπτωση του εφελκυσμού φαίνεται επίσης ότι η έλλειψη είναι έξω από τον κύκλο, ενώ στην περίπτωση της θλίψης η έλλειψη παραμόρφωσης βρίσκεται μέσα στον κύκλο. Οι διευθύνσεις εφελκυσμού και θλίψης που αναφέρθηκαν πιο πάνω δηλώνουν τον προσανατολισμό του εφελκυσμού και της θλίψης, δηλαδή πού μεγαλώνει η περιοχή και πού μικραίνει.

Με βάση τα παραπάνω μπορεί να ειπωθεί ότι τα Ιόνια νησιά μεγαλώνουν στη διεύθυνση ΒΑ – ΝΔ και μικραίνουν στη διεύθυνση ΒΔ – ΝΑ. Αυτό το συμπέρασμα προκύπτει από τον υπολογισμό των παραμορφώσεων μέσω των δεδομένων GPS.

Ο τανυστής παραμόρφωσης αυτός, αντιπροσωπεύει ολόκληρη την περιοχή των Ιονίων νήσων που μελετήθηκαν και στον οποίο λήφθηκαν υπόψη όλοι οι σταθμοί εκτός του σταθμού Διονύσου, ο οποίος αποτελεί σταθμό αναφοράς και οι συντεταγμένες του θεωρούνται σταθερές.

10.4.3.2 Λευκάδα- Κεφαλονιά - Ζάκυνθος

Για λόγους ευκολίας αλλά και σύγκρισης οι τανυστές παραμόρφωσης για τα τρία παραπάνω νησιά παρουσιάζονται στην ίδια ενότητα και θα ερμηνευθούν ξεχωριστά για καλύτερη κατανόηση.

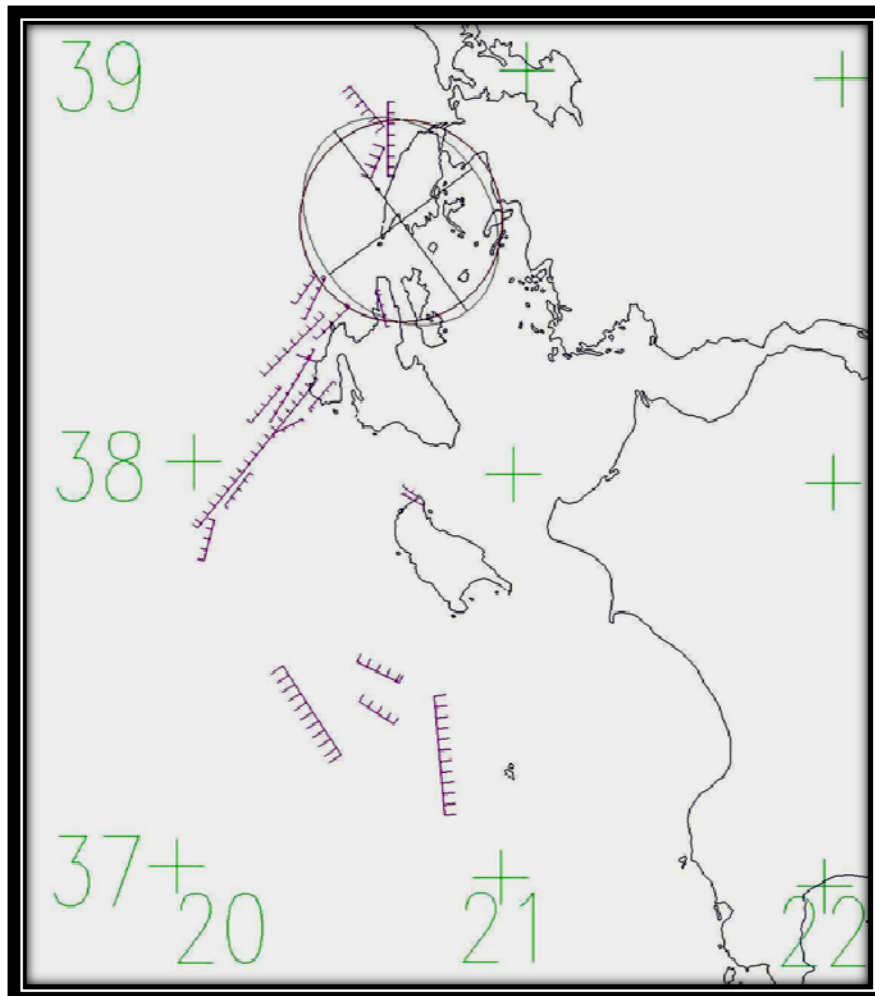


Εικόνα 10-3: Τανυστές παραμόρφωσης Λευκάδας – Κεφαλονιάς – Ζακύνθου

1. Λευκάδα

Παρακάτω θα ερμηνευθεί ο κάθε τανυστής ξεχωριστά με αρχή αυτόν της Λευκάδας. Σ' αυτόν παρατηρείται αύξηση του μήκους του άξονα (εφελκυσμός) στη διεύθυνση ΒΔ –

ΝΑ, ενώ στη διεύθυνση ΒΑ – ΝΔ παρατηρείται μείωση του άξονα (θλίψη). Αξίζει να αναφερθεί ότι κατά τον υπολογισμό του τανυστή παραμόρφωσης της Λευκάδας λήφθηκε υπόψη και ένας σταθμός GPS από τον οποίο πάρθηκαν δεδομένα, ο οποίος βρίσκεται στην Ιθάκη, γιατί η Λευκάδα είχε μόνο δύο σταθμούς και το λογισμικό αδυνατούσε να λύσει τη συνάρτηση μόνο με δεδομένα από δύο σταθμούς.



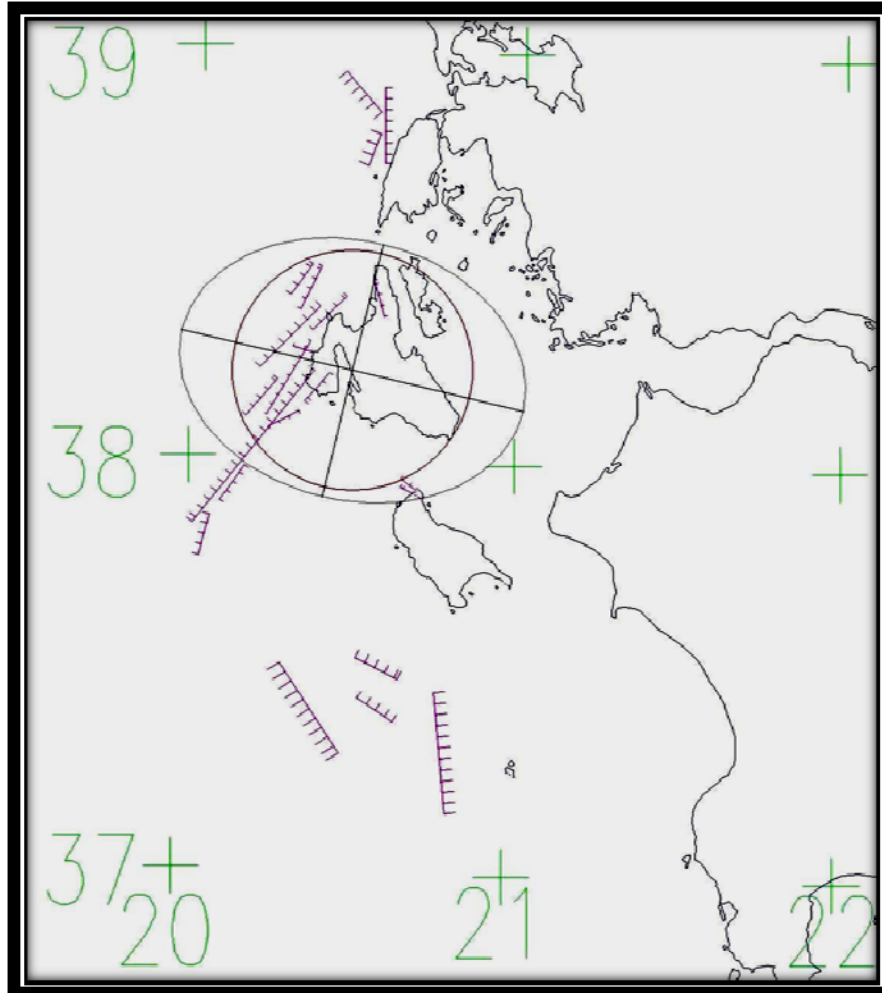
Εικόνα 10-4: Τανυστής παραμόρφωσης Λευκάδας

Στην περίπτωση του εφελκυσμού, η παραπάνω εικόνα δείχνει ότι η έλλειψη βρίσκεται εκτός των ορίων του κύκλου, ενώ στην περίπτωση της θλίψης η έλλειψη βρίσκεται εντός των ίδιων ορίων. Με βάση το συμπέρασμα αυτό, διαπιστώνεται ότι η Λευκάδα μεγαλώνει στη διεύθυνση ΒΔ – ΝΑ και μικραίνει στη διεύθυνση ΒΑ – ΝΔ.

2. Κεφαλονιά

Στη συνέχεια αναλύεται και ερμηνεύεται ο τανυστής παραμόρφωσης της Κεφαλονιάς. Το σχήμα του φαίνεται στην εικόνα 10-5, ενώ παρακάτω παρουσιάζονται οι διευθύνσεις εφελκυσμού και θλίψης, όπου αυτές υπάρχουν. Ο τανυστής παραμόρφωσης της Κεφαλονιάς παρουσιάζει μια ιδιαιτερότητα σε σχέση με τους άλλους. Υπάρχει

εφελκυσμός και στις δύο διευθύνσεις. Τόσο στη διεύθυνση ΒΑ – ΝΔ, όσο και στη διεύθυνση ΒΔ – ΝΑ ο άξονας του μοναδιαίου κύκλου αυξάνεται και η έλλειψη είναι εκτός των ορίων του κύκλου, οπότε συμπεραίνεται ότι στο νησί υπάρχει εφελκυσμός σε όλες τις διευθύνσεις.

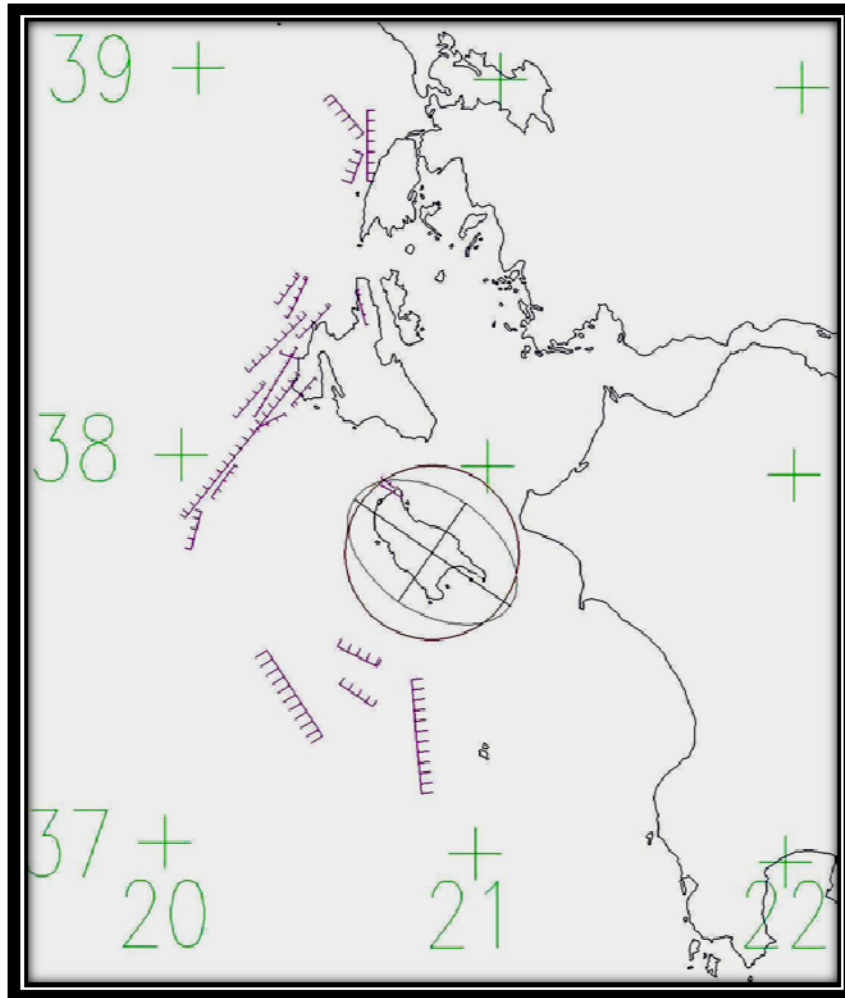


Εικόνα 10-5: Τανυστή παραμόρφωσης Κεφαλονιάς

Τελικώς μπορεί να ειπωθεί ότι η Κεφαλονιά μεγαλώνει και στις δύο διευθύνσεις (ΒΑ – ΝΔ, ΒΔ – ΝΑ) και αυτό επιβεβαιώνεται με τα παραπάνω.

3. Ζάκυνθος

Παρακάτω ακολουθεί η ανάλυση και η ερμηνεία του τανυστή παραμόρφωσης της Ζακύνθου. Το σχήμα του φαίνεται στην εικόνα 10-6 και παρουσιάζονται οι διευθύνσεις εφελκυσμού και θλίψης. Η Ζάκυνθος σύμφωνα με τον τανυστή παραμόρφωσης της εικόνας αυτής παρουσιάζει στη διεύθυνση ΒΔ – ΝΑ εφελκυσμό και στη διεύθυνση ΒΑ – ΝΔ θλίψη, όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα.

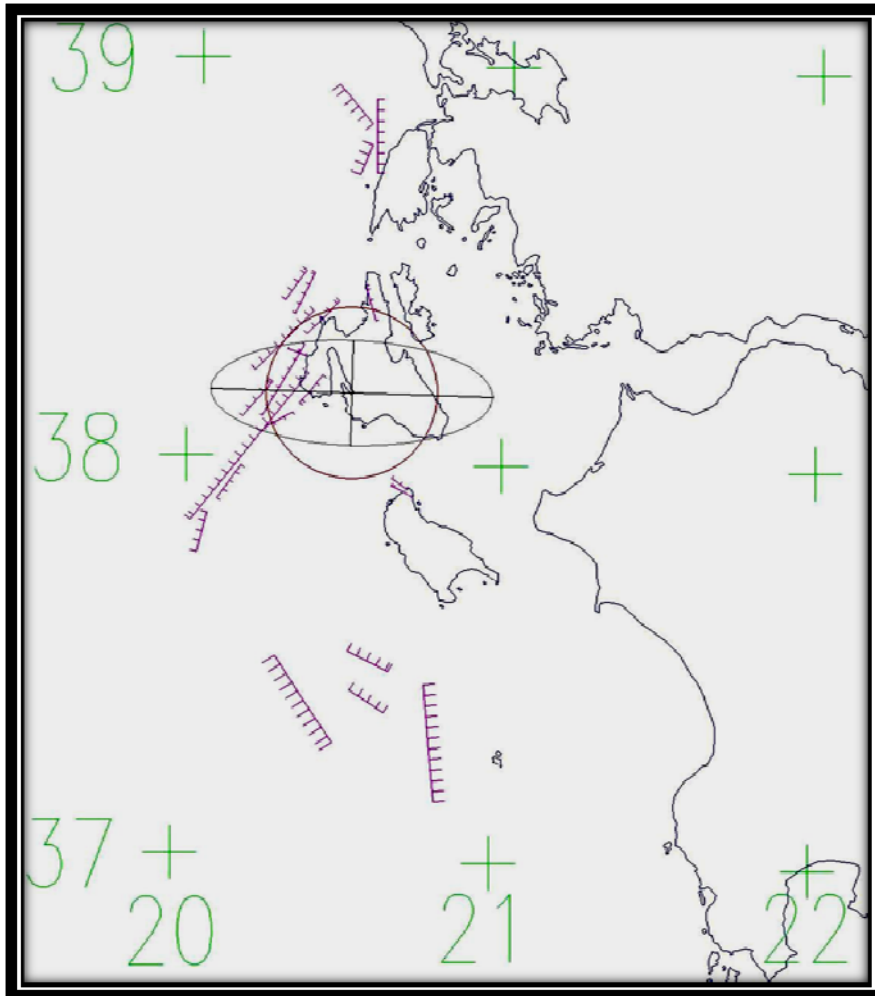


Εικόνα 10-6: Τανυστής παραμόρφωσης Ζακύνθου

Είναι προφανές ότι η Ζάκυνθος μεγαλώνει στη διεύθυνση ΒΑ – ΝΔ , ενώ μικραίνει στη διεύθυνση ΒΔ – ΝΑ.

10.4.3.3 Νότια Κεφαλονιά

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται ο τανυστής παραμόρφωσης της Νότιας Κεφαλονιάς, για τον υπολογισμό του οποίου χρησιμοποιήθηκαν οι σταθμοί που βρίσκονται στο νότιο μόνο μέρος του νησιού.



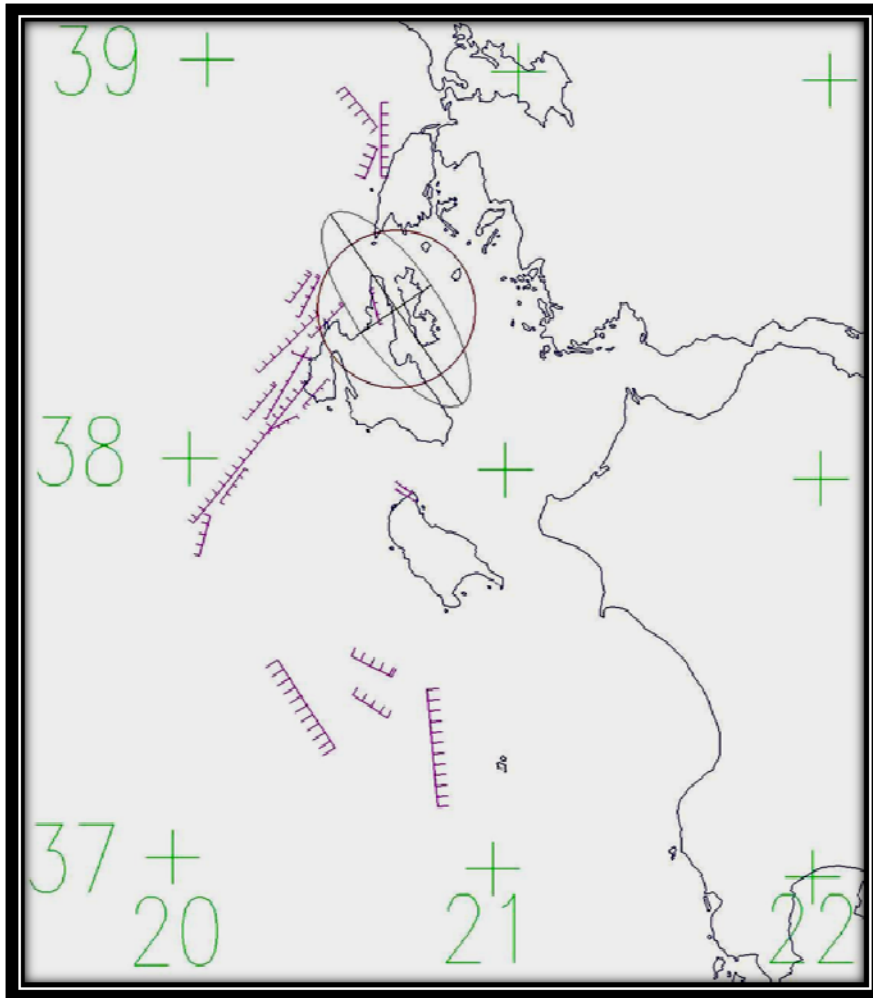
Εικόνα 10-7: Τανυστής παραμόρφωσης Νότιας Κεφαλονιάς

Ο τανυστής παραμόρφωσης της Νότιας Κεφαλονιάς παρουσιάζει αύξηση των αξόνων και επομένως τάσεων (εφελκυσμός) στη διεύθυνση ΒΔ – ΝΑ και μείωση των αξόνων και επομένως θλίψη στη διεύθυνση ΒΑ – ΝΔ. Οι διευθύνσεις λαμβάνονται ως οι ανωτέρω, αφού παρατηρείται ότι δεν είναι απολύτως κατακόρυφοι για να θεωρηθούν οι διευθύνσεις των σημείων του ορίζοντα (Β – Ν και Α – Δ).

Όπως φαίνεται και από την παραπάνω εικόνα, η νότια Κεφαλονιά μεγαλώνει στη διεύθυνση ΒΔ – ΝΑ ενώ μικραίνει στη διεύθυνση ΒΑ – ΝΔ.

10.4.3.4 Βόρεια Κεφαλονιά

Αντίστοιχα με τον τανυστή της νότιας Κεφαλονιάς, δημιουργήθηκε και ο τανυστής για το βόρειο τμήμα του νησιού. Λόγω έλλειψης όμως σταθμών GPS στο βόρειο τμήμα του νησιού, για τον υπολογισμό του τανυστή αυτού συμπεριλήφθηκαν και οι δύο σταθμοί που βρίσκονται στην Ιθάκη.

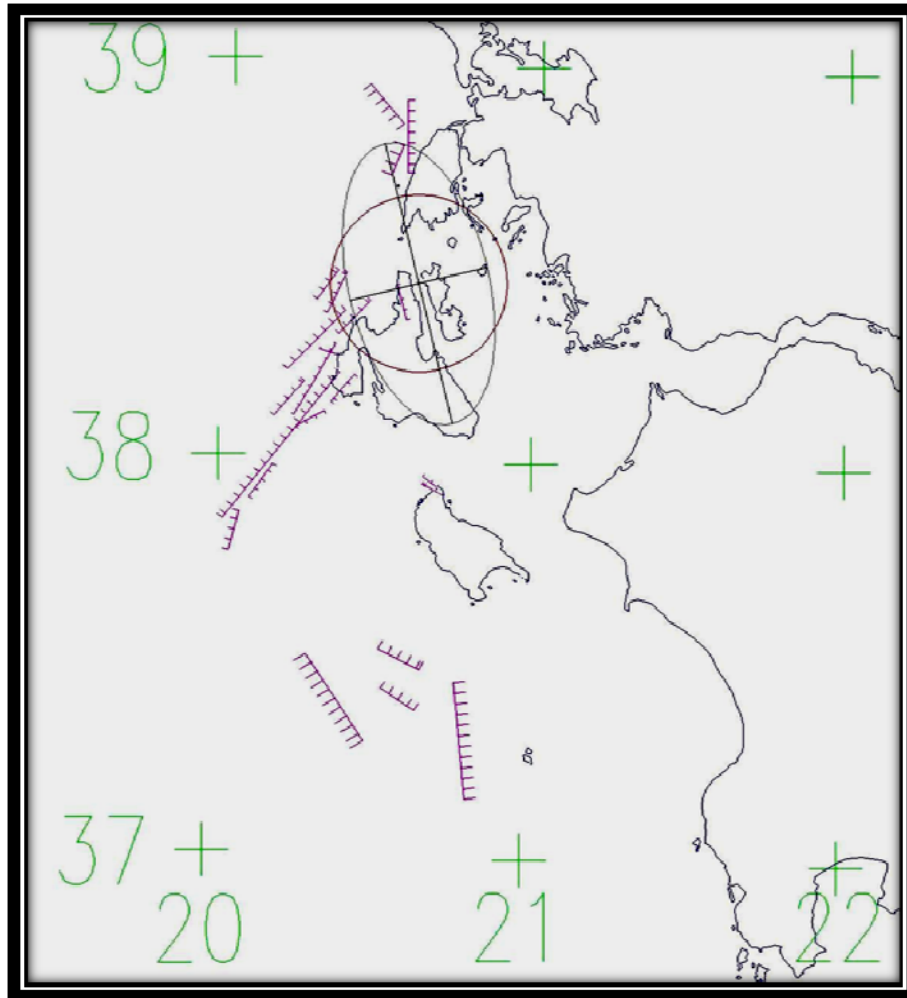


Εικόνα 10-8: Τανυστής παραμόρφωσης Βόρειας Κεφαλονιάς

Ο τανυστής αυτός παρουσιάζει αύξηση τάσεων (εφελκυσμός) στη διεύθυνση ΒΔ – ΝΑ και μείωση των αξόνων του μοναδιαίου κύκλου στη διεύθυνση ΒΑ – ΝΔ, όπως φαίνεται και παραπάνω.

10.4.3.5 Βόρεια Κεφαλονιά – Ιθάκη – Νότια Λευκάδα

Με συνδυασμό των σταθμών που βρίσκονται στα παραπάνω νησιά, υπολογίστηκε ο τανυστής παραμόρφωσης για την περιοχή της Βόρειας Κεφαλονιάς – Ιθάκης – Νότιας Λευκάδας.



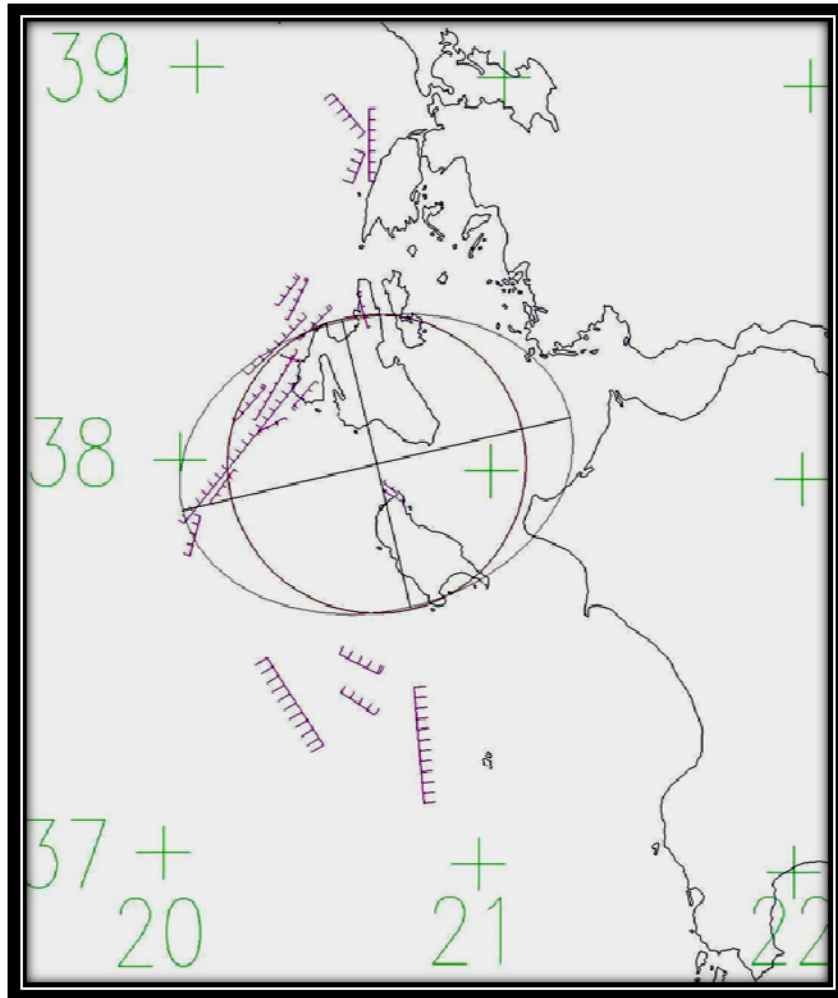
Εικόνα 10-9: Τανυστής παραμόρφωσης Βόρειας Κεφαλονιάς – Ιθάκης – Νότιας Λευκάδας

Ο τανυστής παραμόρφωσης στην περίπτωση αυτή παρουσιάζει την έλλειψη παραμόρφωσης εκτός των ορίων του κύκλου στη διεύθυνση ΒΔ – ΝΑ και επομένως υπάρχει εφελκυσμός. Αντίστοιχα, στη διεύθυνση ΒΑ – ΝΔ η έλλειψη βρίσκεται εντός των ορίων του μοναδιαίου κύκλου κι έτσι υπάρχει θλίψη.

Είναι προφανές λοιπόν ότι η περιοχή αυτή μεγαλώνει στη διεύθυνση ΒΔ – ΝΑ και μικραίνει στη διεύθυνση ΒΑ – ΝΔ.

10.4.3.6 Ζάκυνθος – Νότια Κεφαλονιά

Στην παράγραφο αυτή αναλύεται και ερμηνεύεται ο τανυστής παραμόρφωσης για την Ζάκυνθο και τη Νότια Κεφαλονιά. Επιλέγοντας τους σταθμούς που βρίσκονται στη Ζάκυνθο και στο νότιο μέρος της Κεφαλονιάς προκύπτει ο τανυστής παραμόρφωσης που φαίνεται παρακάτω.

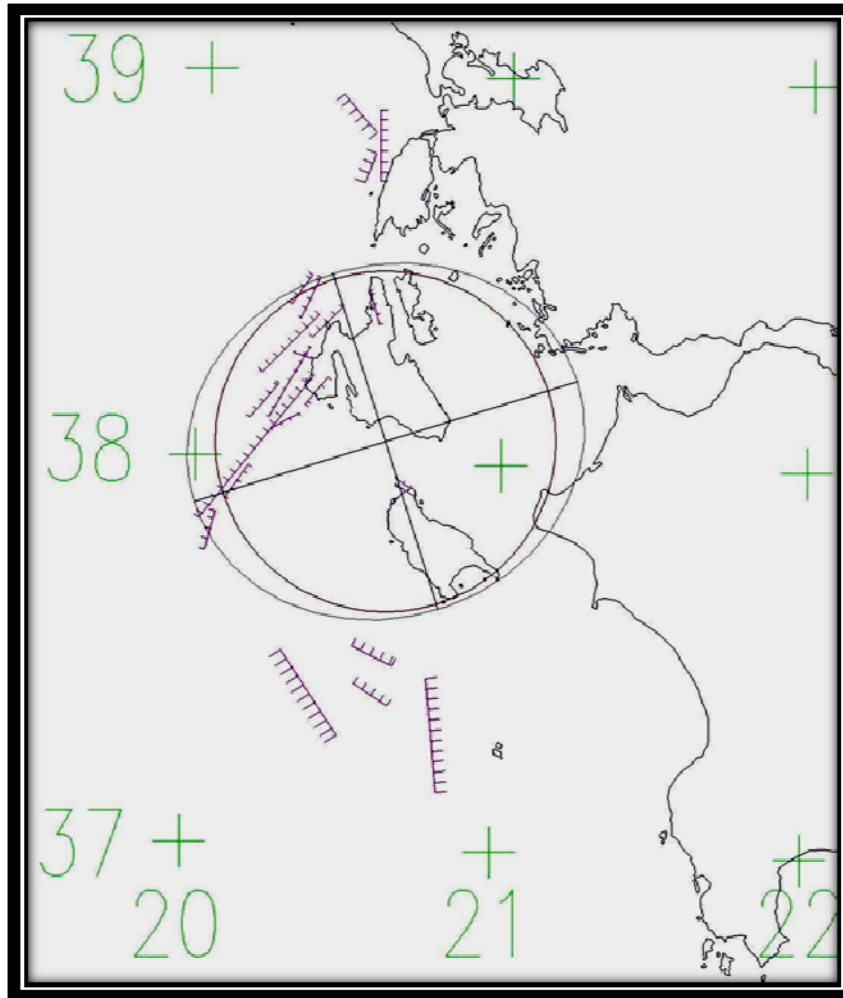


Εικόνα 10-10: Τανυστής παραμόρφωσης Ζακύνθου – Νότιας Κεφαλονιάς

Ο τανυστής αυτός παρουσιάζει αύξηση των αξόνων στη διεύθυνση ΒΑ – ΝΔ με αποτέλεσμα τον εφελκυσμό, ενώ στη διεύθυνση ΒΔ – ΝΑ οι άξονες μειώνονται με αποτέλεσμα τη θλίψη, και έτσι Ζάκυνθος – Νότια Κεφαλονιά μεγαλώνουν στη διεύθυνση ΒΑ – ΝΔ, ενώ μικραίνουν στη διεύθυνση ΒΔ – ΝΑ.

10.4.3.7 Ζάκυνθος – Κεφαλονιά

Στην ενότητα αυτή αναλύεται ο τανυστής παραμόρφωσης Ζακύνθου – Κεφαλονιάς, ο οποίος υπολογίστηκε με συνδυασμό των σταθμών που βρίσκονται στα δύο νησιά. Η παρακάτω εικόνα απεικονίζει τον τανυστή αυτόν.



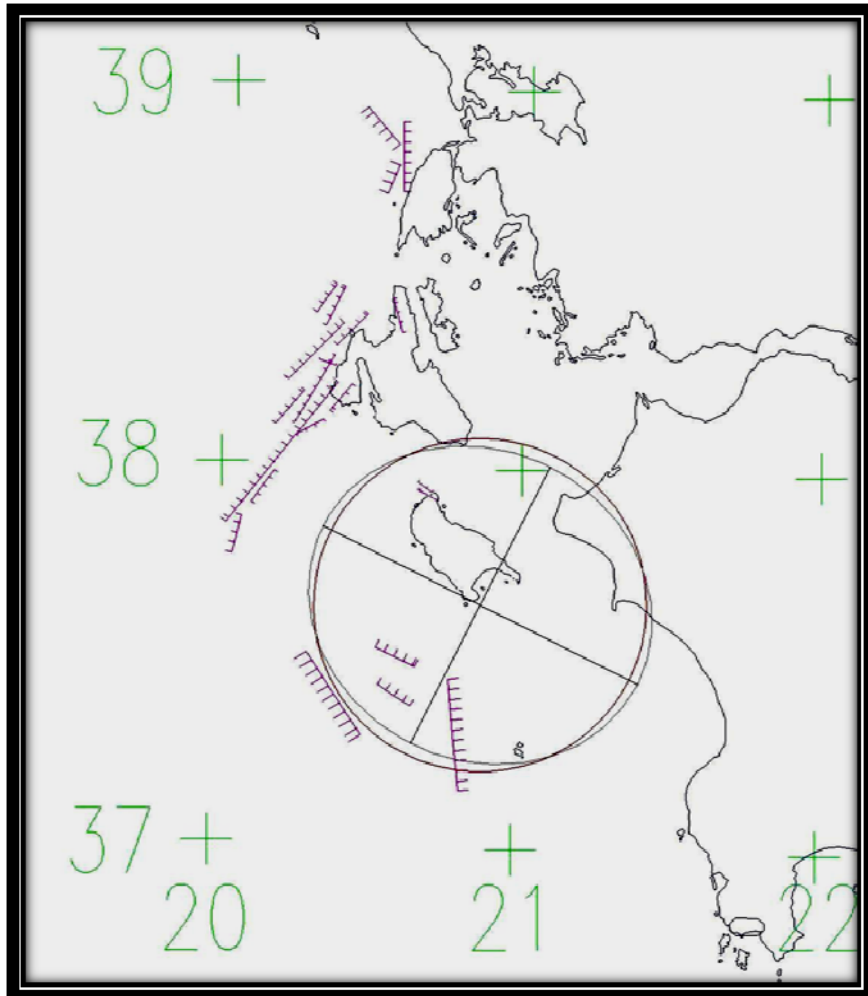
Εικόνα 10-11: Τανυστής παραμόρφωσης Ζακύνθου – Κεφαλονιάς

Ερμηνεύοντας τον τανυστή αυτόν, είναι προφανές ότι οι άξονες της έλλειψης αυξάνονται στη διεύθυνση ΒΔ – ΝΑ και έτσι υπάρχει εφελκυσμός, ενώ οι άξονες της έλλειψης αυξάνονται και στη διεύθυνση ΒΑ – ΝΔ. Γίνεται αντιληπτό ότι συνολικά τα δύο νησιά εφελκύνονται σε όλες τις διευθύνσεις. Ο εφελκυσμός αυτός αποδεικνύεται με τις παραπάνω εικόνες που δείχνουν τον τανυστή παραμόρφωσης στις δύο διευθύνσεις.

Από την ανάλυση, είναι προφανές ότι Ζάκυνθος – Κεφαλονιά μεγαλώνουν και στις δύο διευθύνσεις και συμπεράσματα από την ανάλυση αυτή, ακολουθούν παρακάτω.

10.4.3.8 Ζάκυνθος – Στροφάδες

Στην παράγραφο αυτή φαίνεται ο τανυστής παραμόρφωσης Ζακύνθου – Στροφάδων. Οι Στροφάδες είναι ένα μικρό νησί, το οποίο βρίσκεται νότια της Ζακύνθου. Εκεί τοποθετήθηκε σταθμός GPS, τα δεδομένα του οποίου χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό του τανυστή αυτού.



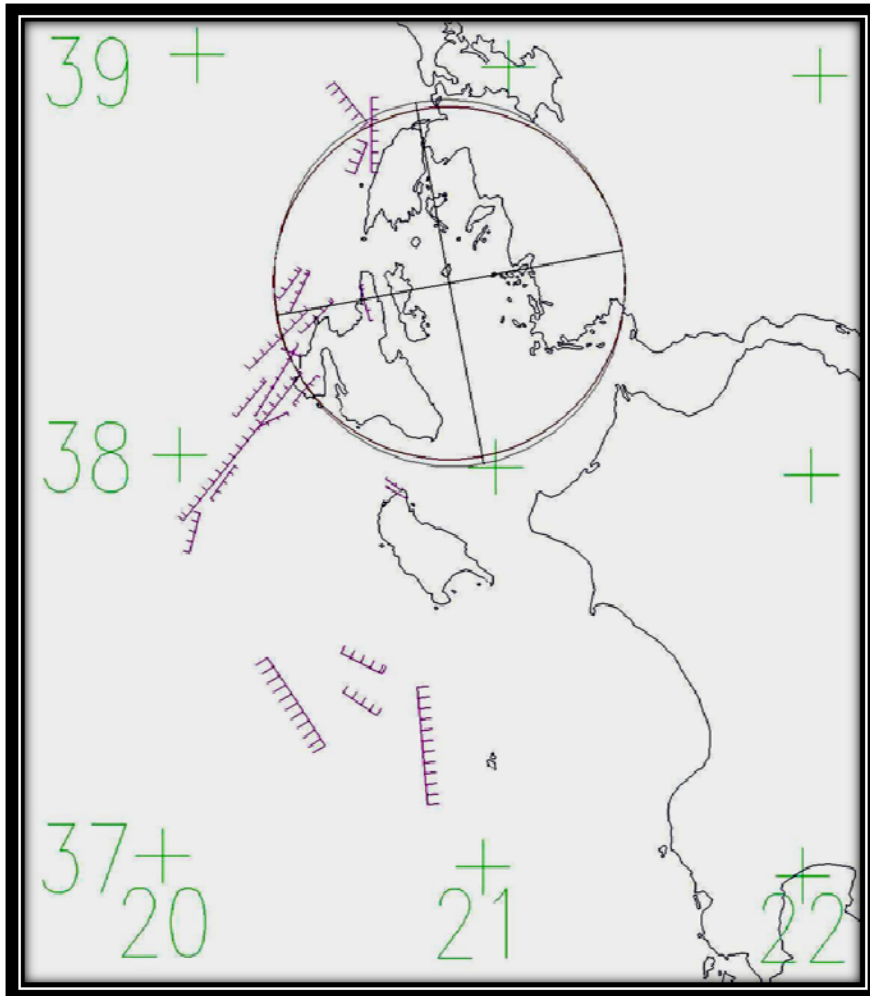
Εικόνα 10-12: Τανυστής παραμόρφωσης Ζακύνθου – Στροφάδων

Ο τανυστής παραμόρφωσης Ζακύνθου – Στροφάδων παρουσιάζει εφελκυσμό και αύξηση των τάσεων στη διεύθυνση ΒΔ – ΝΑ, ενώ στη διεύθυνση ΒΑ – ΝΔ παρουσιάζει θλίψη, όπως φαίνεται και παραπάνω.

Όπως αναλύθηκε, το σύμπλεγμα των νησιών Ζακύνθου και Στροφάδων μεγαλώνει στη διεύθυνση ΒΔ – ΝΑ, ενώ μικραίνει στη διεύθυνση ΒΑ – ΝΔ.

10.4.3.9 Σταθμοί Vasi – Atko – Sara – Exog – Mess

Στο τέλος, συνδυάστηκαν οι σταθμοί Vasi – Atko – Sara – Exog – Mess, οι οποίοι είναι γειτονικοί, για τον υπολογισμό του αντίστοιχου τανυστή παραμόρφωσης. Η τοποθεσία των σταθμών αυτών, απεικονίζεται στην εικόνα 10-1, ενώ αξίζει να αναφερθεί ότι οι σταθμοί Atko και Mess δε βρίσκονται στην περιοχή των Ιονίων νήσων, αλλά περίπου απέναντι από τη Νότια Λευκάδα, στη Στερεά Ελλάδα.


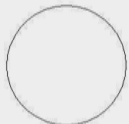





Εικόνα 10-13: Τανυστής παραμόρφωσης Vasi – Atko – Sara – Exog – Mess

Ο τανυστής αυτός εμφανίζεται με αυξημένους τους άξονες της έλλειψης στη διεύθυνση ΒΔ – ΝΑ, ενώ οι άξονες μειώνονται στη διεύθυνση ΒΑ – ΝΔ. Το αποτέλεσμα είναι, στην πρώτη διεύθυνση, εφελκυσμός και αύξηση των τάσεων και στη δεύτερη διεύθυνση θλίψη και μείωση των τάσεων.

Μέσα από τη μελέτη των αποτελεσμάτων των τανυστών, ακολουθούν παρακάτω αναλυτικά τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τη μελέτη των αποτελεσμάτων αυτών σε συνδυασμό με τα αποτελέσματα του Coulomb.

Τέλος παρακάτω παρουσιάζεται το υπόμνημα των παραπάνω εικόνων, το οποίο απεικονίζει τα στοιχεία που περιλαμβάνονται στις εικόνες.

<u>ΥΠΟΜΝΗΜΑ</u>	
	Ημιάξονες
	Έλλειψη παραμόρφωσης
	Μοναδιαίος κύκλος
	Σημεία κανάβου
	Ακτογραμμή

Εικόνα 10-14: Υπόμνημα τανυστών παραμόρφωσης

10.4.4 Συμπεράσματα

Μετά από την απεικόνιση των τανυστών παραμόρφωσης και των διευθύνσεων εφελκυσμού και θλίψης σε κάθε έναν απ' αυτούς εξάγονται ορισμένα συμπεράσματα, μέσα από τη μελέτη των τανυστών ξεχωριστά αλλά και τη μελέτη όλων μαζί . Για καλύτερη κατανόηση παρακάτω παρουσιάζεται ένας πίνακας που δείχνει όλες τις διευθύνσεις εφελκυσμού και θλίψης για τους συνδυασμούς που έγιναν.

ΠΕΡΙΟΧΗ	ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΣ	ΘΛΙΨΗ
ΙΟΝΙΑ ΝΗΣΙΑ	BA - ΝΔ	ΒΔ - ΝΑ
ΛΕΥΚΑΔΑ	ΒΔ - ΝΑ	BA - ΝΔ
ΚΕΦΑΛΟΝΙΑ	ΒΔ - ΝΑ, BA - ΝΔ	-
ΖΑΚΥΝΘΟΣ	ΒΔ - ΝΑ	BA - ΝΔ
ΝΟΤΙΑ ΚΕΦΑΛΟΝΙΑ	ΒΔ - ΝΑ	BA - ΝΔ
ΒΟΡΕΙΑ ΚΕΦΑΛΟΝΙΑ	ΒΔ - ΝΑ	BA - ΝΔ
ΒΟΡΕΙΑ ΚΕΦΑΛΟΝΙΑ - ΙΘΑΚΗ - ΝΟΤΙΑ ΛΕΥΚΑΔΑ	ΒΔ - ΝΑ	BA - ΝΔ
ΖΑΚΥΝΘΟΣ - ΝΟΤΙΑ ΚΕΦΑΛΟΝΙΑ	BA - ΝΔ	ΒΔ - ΝΑ
ΖΑΚΥΝΘΟΣ - ΚΕΦΑΛΟΝΙΑ	BA - ΝΔ, ΒΔ - ΝΑ	-
ΖΑΚΥΝΘΟΣ - ΣΤΡΟΦΑΔΕΣ	ΒΔ - ΝΑ	BA - ΝΔ
VASI - ΑΤΚΟ - SARA - ΕΧΟΓ - MESS	ΒΔ - ΝΑ	BA - ΝΔ

Πίνακας 10-5: Πίνακας διευθύνσεων κύριων τάσεων στους τανυστές παραμόρφωσης

Ως πρώτο συμπέρασμα, από τον πίνακα 10-5 προκύπτει ότι στους περισσότερους τανυστές παραμόρφωσης στη διεύθυνση ΒΔ – ΝΑ υπάρχει εφελκυσμός, ενώ στη διεύθυνση ΒΑ – ΝΔ θλίψη. Εξαιρούνται οι περιπτώσεις του τανυστή των Ιονίων νήσων, που συμπεριλαμβάνονται όλοι οι σταθμοί και του τανυστή Ζακύνθου – Νότιας Κεφαλονιάς που η διεύθυνση του εφελκυσμού είναι ΒΑ – ΝΔ. Αντίστοιχα στους τανυστές αυτούς, η θλίψη είναι στη διεύθυνση ΒΔ – ΝΑ.

Το στοιχείο που προξενεί εντύπωση σε σχέση με το παραπάνω συμπέρασμα είναι ότι ενώ οι περισσότεροι τανυστές παρουσιάζουν εφελκυσμό στη διεύθυνση ΒΔ – ΝΑ και θλίψη στη διεύθυνση ΒΑ – ΝΔ, ο τανυστής παραμόρφωσης όλης της περιοχής (Ιόνια νησιά), καθώς και ο συνδυασμός Ζάκυνθος – Νότια Κεφαλονιά παρουσιάζουν τις αντίθετες διευθύνσεις για τον εφελκυσμό και τη θλίψη.

Το νησί της Κεφαλονιάς παρουσιάζει τόσο στη διεύθυνση ΒΔ – ΝΑ, όσο και στη διεύθυνση ΒΑ – ΝΔ εφελκυσμό. Η θλίψη δεν υπάρχει. Μάλιστα αυτό επιβεβαιώνεται και από τον τανυστή Ζακύνθου – Κεφαλονιάς, όπου πάλι υπάρχει εφελκυσμός και στις δύο διευθύνσεις. Επίσης στους δύο τανυστές που υπάρχουν αντίθετες διευθύνσεις γίνεται η παρατήρηση ότι και στους δύο περιλαμβάνεται το νησί της Κεφαλονιάς.

Εάν δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στον παραπάνω πίνακα, γίνεται αντιληπτό, ότι οι αντίθετες διευθύνσεις παρουσιάζονται στον τανυστή παραμόρφωσης των Ιονίων νήσων και

στους συνδυασμούς Ζακύνθου – Κεφαλονιάς και Ζακύνθου – Νότιας Κεφαλονιάς. Αυτό το γεγονός, σε συνδυασμό με τον εφελκυσμό και στις δύο διευθύνσεις στην Κεφαλονιά οδηγεί στη σκέψη, ότι το σεισμοτεκτονικό καθεστώς στην περιοχή των δύο αυτών νησιών ίσως να είναι διαφορετικό, απ' ότι στην υπόλοιπη περιοχή και ίσως αυτή η διαφορετικότητα επηρεάζει αρκετά ούτως ώστε να δημιουργεί και τις αντίθετες διευθύνσεις στον ταυυστή των Ιονίων νήσων.

Γίνεται αντιληπτό ότι οι διαφορές των διευθύνσεων γίνονται σε συνδυασμούς μόνο Ζακύνθου και Κεφαλονιάς, σε ολόκληρο το νησί της Κεφαλονιάς, αλλά και στον ταυυστή ολόκληρης της περιοχής. Ένα άλλο στοιχείο που προκαλεί εντύπωση, είναι ότι ακόμα και ο ταυυστής των Ιονίων νήσων εμφανίζεται με αντίθετες διευθύνσεις σε εφελκυσμό και θλίψη.

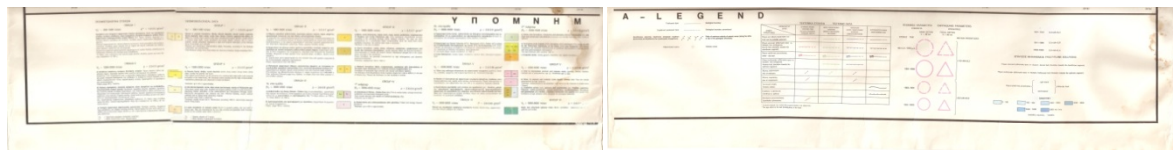
Συνδυάζοντας όλα τα παραπάνω συμπεράσματα, είναι προφανές ότι ανάμεσα σε Ζάκυνθο και Κεφαλονιά ισχύει διαφορετικό καθεστώς, απ' ότι στην υπόλοιπη περιοχή και έτσι αναζητήθηκαν περισσότερες πηγές για να διευκρινιστεί η διαφορετικότητα που προέκυψε από τους ταυυστές παραμόρφωσης.

Παρακάτω παρουσιάζεται ο «Σεισμοτεκτονικός χάρτης Ελλάδας με σεισμογεωλογικά στοιχεία», ο οποίος παράχθηκε από το «Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών». Στο χάρτη αυτό παρατίθενται διάφορα δεδομένα, σχετικά με τη σεισμοτεκτονική της Ελλάδας, τα οποία μετά από μελέτη και ανάλυση θα φανούν χρήσιμα για περαιτέρω διευκρινίσεις, όσον αφορά τις διαφορές που βρέθηκαν παραπάνω.



Εικόνα 10-15: Σεισμοτεκτονικός Χάρτης της Ελλάδας με Σεισμογεωλογικά στοιχεία (Ι.Γ.Μ.Ε., 1989)

Ο χάρτης αυτός είναι σε κλίμακα 1:500000 και όπως φαίνεται και εν μέρει στο υπόμνημα, τις σεισμικές παραμέτρους για $h > 60km$ και για $h < 60km$, τα όρια των μεγεθών των σεισμών που έλαβαν χώρα, κατανεμημένα χρονολογικά, καθώς και σεισμογεωλογικά στοιχεία για τους σχηματισμούς του φλοιού και στοιχεία για τα πετρώματα. Επίσης αναφέρονται οι επιλύσεις των μηχανισμών γένεσης των σεισμών, η βαθυμετρία, τα τεκτονικά στοιχεία για την χρονολογία και τις δομές. Τέλος φαίνονται οι τιμές της μέγιστης αναμενόμενης επιτάχυνσης με πιθανότητα 90% να γίνει υπέρβαση της τα επόμενα 25 χρόνια με περίοδο επανάληψης 238 χρόνια (Δρακόπουλος – Μακρόπουλος, 1982), καθώς και τα μέγιστα πιθανά μεγέθη που αναμένονται για τα επόμενα 100 χρόνια (Δρακόπουλος – Μακρόπουλος, 1982).



Εικόνα 10-16: Υπόμνημα χάρτη

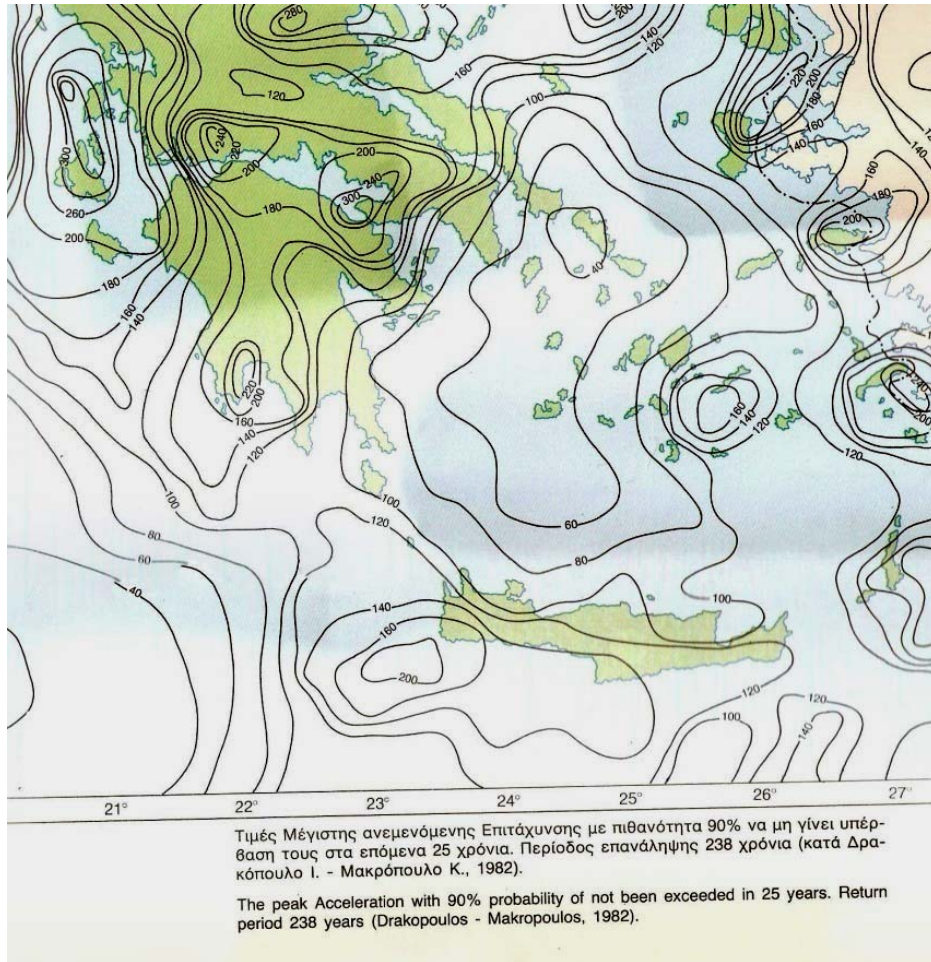
Με προσεκτική μελέτη του παρακάτω χάρτη προκύπτουν τρία βασικά συμπεράσματα, τα οποία εξηγούν σε μεγάλο βαθμό τη διαφορά στις διευθύνσεις της Ζακύνθου και της Κεφαλονιάς σε σχέση με τις διευθύνσεις στους υπόλοιπους τανυστές. Τα συμπεράσματα αυτά αναλύονται πιο κάτω.

Επικεντρώνοντας την προσοχή στην περιοχή που ενδιαφέρει (εικόνα 10-17), γίνεται η παρατήρηση ότι υπάρχει ένα ρήγμα (ασυνέχεια) ακριβώς ανάμεσα στη Ζάκυνθο και την Κεφαλονιά, ενώ ταυτόχρονα υπάρχουν και άλλα τα οποία είναι παράλληλα στην ακτογραμμή των δύο νησιών. Αντίστοιχα παρατηρώντας την ίδια περιοχή, ανάμεσα στην Κεφαλονιά και τη Λευκάδα δεν υπάρχει κανένα ρήγμα. Γίνεται εύκολα κατανοητό, ότι τα ρήγματα που υπάρχουν ανάμεσα στη Ζάκυνθο και την Κεφαλονιά δημιουργούν διαφορετικές συνθήκες για τη σεισμοτεκτονική δραστηριότητα σε σχέση με τα νησιά Κεφαλονιά – Λευκάδα που έχουν διαφορετική δραστηριότητα. Είναι αντιληπτό λοιπόν, ότι η σεισμοτεκτονική ανάμεσα στη Ζάκυνθο και την Κεφαλονιά είναι διαφορετική απ' αυτήν ανάμεσα στην Κεφαλονιά και τη Λευκάδα.



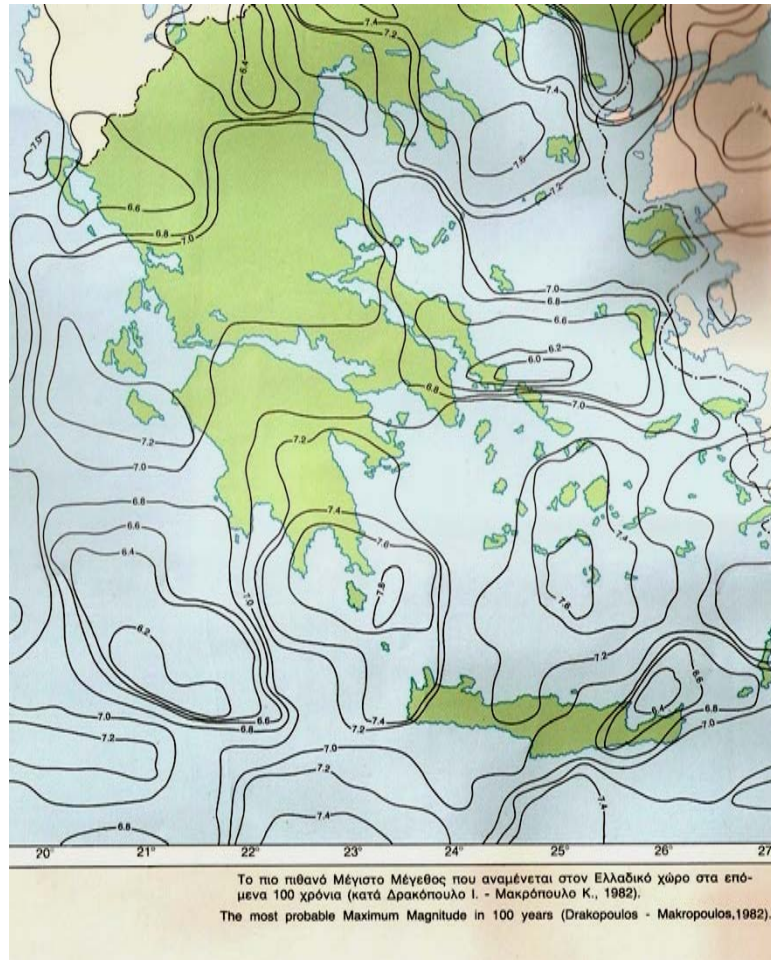
Εικόνα 10-17: Σεισμοτεκτονικός χάρτης Ιονίων νήσων με σεισμογεωλογικά στοιχεία (Ι.Γ.Μ.Ε., 1989)

Επιπλέον, παρατηρώντας τις τιμές της μέγιστης αναμενόμενης επιτάχυνσης των νησιών (εικόνα 10-17), φαίνεται ότι η τιμή της μέγιστης επιτάχυνσης μεταξύ Ζακύνθου και Κεφαλονιάς κυμαίνεται στα 260, ενώ μεταξύ Κεφαλονιάς και Λευκάδας κυμαίνεται στα 300. Η παράμετρος αυτή δικαιολογεί τη διαφορετικότητα των δύο συμπλεγμάτων νησιών ως προς την τεκτονικότητα. Η ένδειξη αυτή είναι ένα δεύτερο στοιχείο το οποίο επιβεβαιώνει τη λογική των αντίθετων διευθύνσεων που προκύπτουν στους τανυστές παραμόρφωσης Ζακύνθου – Κεφαλονιάς και Ζακύνθου – Νότιας Κεφαλονιάς, με αποτέλεσμα να επηρεάζουν ενδεχομένως και τον τανυστή των Ιονίων νήσων.



Εικόνα 10-18: Τιμές μέγιστης αναμενόμενης επιτάχυνσης με πιθανότητα 90% να μη γίνει υπέρβαση (Ι.Γ.Μ.Ε., 1989)

Τέλος παρακάτω απεικονίζονται τα πιθανά μέγιστα μεγέθη σεισμών που αναμένονται για τον ελληνικό χώρο τα επόμενα 100 χρόνια. Στην περιοχή των Ιονίων νήσων, η καμπύλη που δίνει το μέγιστο αναμενόμενο μέγεθος για τη Ζάκυνθο και την Κεφαλονιά είναι 7.2 και δεν περνάει από τη Λευκάδα. Η Λευκάδα βρίσκεται ανάμεσα στην καμπύλη αυτή και την αμέσως μικρότερη που αντιστοιχεί σε μέγεθος 7. Με βάση το χάρτη αυτό δηλαδή, οι σεισμικές διαρρήξεις που αναμένονται στην Κεφαλονιά και τη Ζάκυνθο είναι μεγαλύτερου μεγέθους απ' ό,τι οι σεισμικές διαρρήξεις που αναμένονται στη Λευκάδα. Με την απεικόνιση αυτή συμπεραίνεται ότι η περιοχή Ζακύνθου – Κεφαλονιάς είναι πιο επικίνδυνη απ' ό,τι η περιοχή της Κεφαλονιάς – Ζακύνθου. Το τελευταίο αυτό στοιχείο – συμπέρασμα επιβεβαιώνει τον αρχικό προβληματισμό, ότι το σεισμοτεκτονικό καθεστώς Ζακύνθου – Κεφαλονιάς είναι διαφορετικό από το αντίστοιχο καθεστώς Κεφαλονιάς – Λευκάδας.



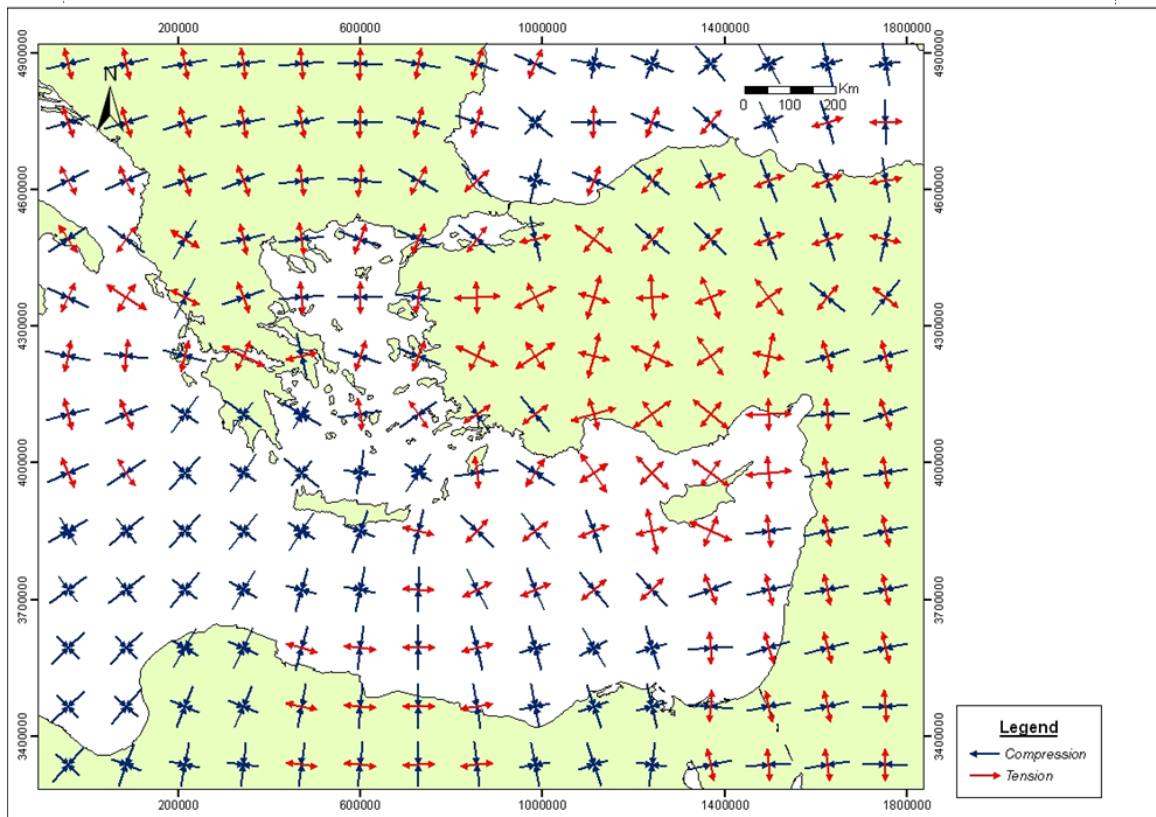
Εικόνα 10-19: Πιθανά μέγιστα μεγέθη στον Ελλαδικό χώρο για τα επόμενα 100 χρόνια (Ι.Γ.Μ.Ε., 1989)

Λαμβάνοντας υπόψη τα ρήγματα που βρίσκονται μεταξύ Κεφαλονιάς και Ζακύνθου και δεν υπάρχουν μεταξύ Κεφαλονιάς και Λευκάδας, τη διαφορά των επιταχύνσεων που έχουν τα δύο συμπλέγματα νησιών, καθώς και τη διαφορά των πιθανών μεγίστων μεγεθών τότε συμπεραίνεται ότι η σεισμοτεκτονική είναι διαφορετική μεταξύ των συγκρινόμενων συμπλεγμάτων νησιών. Με τα επιχειρήματα αυτά έγινε μια προσπάθεια να εξηγηθούν οι ελάχιστες διαφορές που προκύπτουν ανάμεσα στο Coulomb και τους τανυστές παραμόρφωσης αλλά και στις αντίθετες σε σχέση με τις υπόλοιπες διευθύνσεις που εμφανίζονται στους τανυστές.

10.4.5 Σύγκριση αποτελεσμάτων με αντίστοιχα από προηγούμενη εργασία

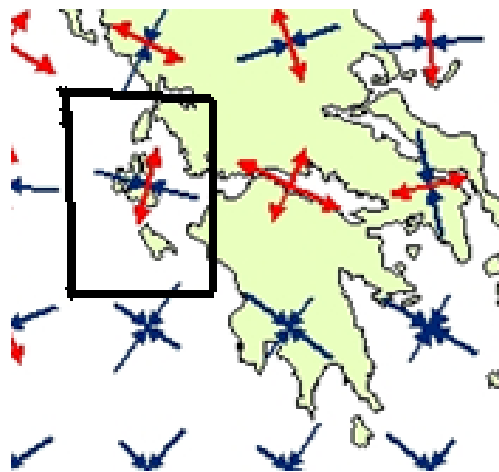
Στην παράγραφο αυτή θα γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων που παρουσιάστηκαν παραπάνω, με αντίστοιχα αποτελέσματα που προέκυψαν από προηγούμενη μεταπτυχιακή εργασία. Η εργασία αυτή είναι του Δημήτριου Θ. Τσίνα και έχει τίτλο «Σύζευξη μετρήσεων GPS και Μεθόδου Πεπερασμένων Στοιχείων για τον υπολογισμό των τάσεων του φλοιού στον Ελλαδικό χώρο». Μέσα από τη διαδικασία που αναλύεται στην εργασία αυτή, γίνεται μετατροπή των διατμητικών τάσεων κι έτσι προκύπτουν οι άξονες των κύριων τάσεων για τον ευρύτερο Ελλαδικό χώρο. Οι άξονες αυτοί φαίνονται στην παρακάτω εικόνα.

Άξονες Κύριων Τάσεων



Εικόνα 10-20: Άξονες κύριων τάσεων στον ευρύτερο Ελλαδικό χώρο (Τσίνας, 2006)

Στην εικόνα 10-20 απεικονίζονται οι άξονες κύριων τάσεων (εφελκυσμού και θλίψης), όπως αυτοί προέκυψαν για τον Ελλαδικό χώρο από την εργασία του Δ. Τσίνας. Όπως φαίνεται και στο υπόμνημα (legend) οι μπλε άξονες αντιστοιχούν σε θλίψη, ενώ αντίστοιχα οι κόκκινοι άξονες αντιστοιχούν σε εφελκυσμό. Εστιάζοντας στην περιοχή που ενδιαφέρει (Ιόνια νησιά) είναι προφανές ότι υπάρχει εφελκυσμός στη διεύθυνση ΒΑ – ΝΔ και θλίψη στη διεύθυνση ΒΔ – ΝΑ. Το αποτέλεσμα αυτό φαίνεται καλύτερα στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 10-21: Άξονες κυρίων τάσεων στα Ιόνια νησιά (Τσίνας, 2006)

Ανατρέχοντας στον υπολογισμό του τανυστή παραμόρφωσης των Ιονίων νήσων (εικόνα 10-2) γίνεται αντιληπτό ότι ο υπολογισμός του τανυστή που έγινε στην παρούσα διπλωματική εργασία με δεδομένα GPS συμφωνεί με τους άξονες κυρίων τάσεων που υπολογίστηκαν στην εργασία του Δ. Τσίνα κι έτσι το αποτέλεσμα που παρουσιάστηκε παραπάνω επιβεβαιώνεται.

Η διαφορά που υπάρχει μεταξύ των δύο αποτελεσμάτων είναι ότι στην εργασία αυτή, μελετήθηκε αποκλειστικά η περιοχή των Ιονίων νήσων, ενώ στην προηγούμενη εργασία μελετήθηκε ευρύτερα ο Ελλαδικός χώρος. Αποτέλεσμα αυτού είναι ότι δε μπορεί να γίνει οποιαδήποτε άλλη σύγκριση μεταξύ των δύο εργασιών και για τους υπόλοιπους τανυστές που υπολογίστηκαν, γιατί ο κλίμακος των κυρίων τάσεων στην προηγούμενη εργασία αναφέρεται σε ολόκληρο τον ελλαδικό χώρο κι έτσι στα Ιόνια νησιά υπάρχει μόνο ένας τανυστής, ο οποίος είναι στο κέντρο της περιοχής και μπορεί να συγκριθεί μόνο με τον τανυστή παραμόρφωσης των Ιονίων νήσων. Στην εργασία αυτή αφού μελετήθηκε αποκλειστικά η περιοχή του Δυτικού Ελληνικού τόξου, υπολογίστηκαν κι άλλοι τανυστές, με συνδυασμούς σταθμών. Συμπεράσματα από τους τανυστές αυτούς αναφέρθηκαν παραπάνω.

10.5 Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό αναλύθηκε η διαδικασία υπολογισμού των τανυστών παραμόρφωσης. Παρουσιάστηκαν οι πίνακες μετατροπών των δεδομένων GPS, η διαδικασία που ακολουθήθηκε, έγινε η παρουσίαση των αποτελεσμάτων (τανυστών παραμόρφωσης) και η εξαγωγή συμπερασμάτων για την σεισμοτεκτονική των Ιονίων νήσων. Τελικώς η σύγκριση των υπολογισμένων αποτελεσμάτων με αντίστοιχα προηγούμενης εργασίας.

11 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

11.1 Γενικά

Η διπλωματική εργασία ολοκληρώνεται με το κεφάλαιο αυτό, στο οποίο γίνεται προσπάθεια να αναφερθούν τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την εργασία αυτή. Αναφέρονται τα συμπεράσματα που βγήκαν από τη μελέτη, την επεξεργασία αλλά και τα προβλήματα που παρουσιάστηκαν κατά την εκπόνηση της εργασίας αυτής.

Η διπλωματική αυτή χωρίζεται σε τρία μέρη. Στο πρώτο μέρος γίνεται αναφορά στο γεωλογικό και τεκτονικό υπόβαθρο της Ελλάδας και κυρίως των Ιονίων νήσων, καθώς και στη θεωρία των ρηγμάτων, των σεισμών και των τάσεων – παραμορφώσεων, αντικείμενα τα οποία σχετίζονται άμεσα με την τεκτονική γεωλογία και αποτελούν το θεωρητικό υπόβαθρο της εργασίας αυτής. Στο δεύτερο μέρος υπολογίζονται οι τάσεις Coulomb και οι οριζόντιες μετατοπίσεις που υπάρχουν μετά από κάθε διάρρηξη σεισμικών ρηγμάτων. Τα Ιόνια νησιά χωρίστηκαν σε τρεις μικρότερες περιοχές (Ζάκυνθος, Λευκάδα και Κεφαλονιά) και υπολογίστηκαν οι τάσεις και οι μετατοπίσεις για κάθε διάρρηξη. Επίσης μελετήθηκε ταυτόχρονα με τη Λευκάδα και το ανενεργό ρήγμα Αγίου Νικήτα – Αθανίου. Οι τάσεις αυτές, καθώς και οι μετατοπίσεις απεικονίστηκαν αργότερα στο Google earth. Στο τρίτο και τελευταίο μέρος, υπολογίζονται διάφοροι συνδυασμοί τανυστών παραμόρφωσης που αφορούν την περιοχή, εξάγονται συμπεράσματα και τελικά συγκρίνονται με αποτελέσματα που υπολογίστηκαν σε προηγούμενη εργασία.

Η αφορμή που οδήγησε στην ιδέα για ανάπτυξη της διπλωματικής αυτής εργασίας, ήταν η ανάγκη για να απαντηθεί το ερώτημα, εάν μια σεισμική διάρρηξη ενός ρήγματος μπορεί να προκαλέσει εκ νέου ή να αποτρέψει μια νέα διάρρηξη ενός γειτονικού ρήγματος. Με τον υπολογισμό των τάσεων, παρατηρείται πού υπάρχει αύξηση της τάσης, οπότε αναμένεται και νέα διάρρηξη, αλλά και πού υπάρχει μείωση ή εκτόνωση των τάσεων που απελευθερώθηκαν από τη διάρρηξη.

Για να συνδυαστεί η ιδέα αυτή με την κλασική ασχολία του Τοπογράφου Μηχανικού, τη Γεωδαισία, στη συνέχεια, υπολογίστηκαν οι τανυστές παραμόρφωσης μέσω δεδομένων GPS για να δοθούν οι άξονες των κυρίων τάσεων στην περιοχή των Ιονίων νήσων και να προκύψουν συμπεράσματα για το σεισμοτεκτονικό καθεστώς αυτών.

Κατά την εκπόνηση της εργασίας, χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Coulomb 3.1, το οποίο φτιάχτηκε από την Γεωλογική Υπηρεσία των Η.Π.Α. (U.S. Geological Survey). Το πρόγραμμα αυτό χρησιμοποιήθηκε για τους παρακάτω λόγους :

- Έχει τη δυνατότητα υπολογισμού των μεταβολών των τάσεων Coulomb που επέρχονται μετά από σεισμική διάρρηξη ενός ρήγματος.
- Για να ελεγχθούν οι δυνατότητές του.
- Μπορεί να υπολογίζει τις οριζόντιες μετατοπίσεις των ρηγμάτων μετά από κάθε σεισμική διάρρηξη.

- Με τη νέα έκδοση η οποία «τρέχει» με βάση το Matlab, οι υπολογιζόμενες τάσεις ή μετατοπίσεις μπορούν να απεικονιστούν στο Google earth.

Το Coulomb είναι ένα αξιόπιστο πρόγραμμα, το οποίο τώρα πλέον απευθύνεται σε ευρύτερο αριθμό χρηστών, καθώς από την έκδοση 3.0 και άνω, το πρόγραμμα για να λειτουργήσει χρειάζεται την υποστήριξη του Matlab 7.X και άνω, αλλά έχει τη δυνατότητα να λειτουργεί σε λειτουργικό Windows, πλεονέκτημα το οποίο δεν υπήρχε στις προηγούμενες εκδόσεις. Έχει τεράστιες δυνατότητες υπολογισμού τάσεων Coulomb, οριζόντιων μετατοπίσεων και ανηγμένων παραμορφώσεων, οι οποίες προκαλούνται κατά τη διάρρηξη ενός ρήγματος. Η αξιοπιστία του φαίνεται και από το γεγονός ότι αποτέλεσε το σημαντικότερο εργαλείο υπολογισμού στον υπολογισμό τάσεων Coulomb στη ζώνη ρηγμάτων του Αγίου Ανδρέα στην Καλιφόρνια, όπως αναφέρει ενδεικτικά και επίσημη ιστοσελίδα της U.S.G.S. Το μειονέκτημά του είναι ότι δεν υπάρχει αρκετή βιβλιογραφία λόγω της εξειδικευμένης χρήσης του και επίσης ότι ενώ υπάρχει η δυνατότητα απεικόνισης των τάσεων και των μετατοπίσεων στο Google earth, παρουσιάζεται πρόβλημα επειδή το Coulomb υπολογίζει τα αποτελέσματα στο επίπεδο, ενώ το Google earth είναι σφαίρα. Το μειονέκτημα αυτό αναλύθηκε και πιο πάνω.

Το εστιακό βάθος που θεωρήθηκε για τον υπολογισμό τάσεων και μετατοπίσεων ήταν ίσο με 7.5 km ενώ ο συντελεστής τριβής λήφθηκε στην τιμή 0.4.

Παρακάτω ακολουθούν μερικά συμπεράσματα, τα οποία προέκυψαν από τη μελέτη, επεξεργασία και απόδοση όλων των στοιχείων για να επιτευχθεί το τελικό αποτέλεσμα που είναι χρήσιμα, καθώς και μερικές προτάσεις για περαιτέρω επεξεργασία της παρούσας εργασίας.

11.2 Συμπεράσματα

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα κυριότερα συμπεράσματα που εξάγονται από τη διπλωματική αυτή εργασία :

- ↪ Για να δημιουργηθούν τα αρχεία εισόδου δεν είναι απαραίτητη η μετατροπή των γεωγραφικών συντεταγμένων φ, λ σε καρτεσιανές X, Y, Z, αφού πλέον το Coulomb μπορεί να κάνει αυτή τη μετατροπή απ' ευθείας κι έτσι απλοποιούνται κατά πολύ οι πράξεις.
- ↪ Με τη νέα έκδοση του Coulomb, το πρόγραμμα χρειάζεται το Matlab για να λειτουργήσει κι έτσι είναι δυνατό να αξιοποιηθούν οι υπολογιστικές δυνατότητες του.
- ↪ Η απεικόνιση των ρηγμάτων σε χάρτη μπορεί να γίνει πλέον χωρίς τη χρήση Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών, αφού με την εντολή 'coulomb2googleearth' είναι εφικτή η απεικόνιση των τάσεων Coulomb και των οριζόντιων μετατοπίσεων στο Google earth.

- ↪ Μελετώντας προσεκτικά τα αποτελέσματα είναι δυνατόν να δοθούν απαντήσεις σε ερωτήματα που αφορούν την τεκτονική της περιοχής.
- ↪ Η μελέτη των αποτελεσμάτων οδηγεί στην εξαγωγή συμπερασμάτων για τη σεισμική επικινδυνότητα της περιοχής. Μπορεί να χρησιμεύσει για την πιθανή πρόβλεψη σεισμών, αφού μέσω των τάσεων γίνεται εύκολα κατανοητή η αλληλεπίδραση των ρηγμάτων και φαίνεται ο χώρος που αναμένεται νέα σεισμική διάρρηξη.
- ↪ Για την απεικόνιση των τάσεων και των μετατοπίσεων θα πρέπει να θεωρηθεί ότι σε μια καθορισμένη έκταση το επίπεδο ταυτίζεται με τη σφαίρα για να μην υπάρχουν μεγάλες παραμορφώσεις. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί χωρίζοντας την περιοχή σε μικρότερες.
- ↪ Κατά τον υπολογισμό των τάσεων και των οριζόντιων μετατοπίσεων για τη Λευκάδα, μελετήθηκε και το ανενεργό ρήγμα Αγίου Νικήτα – Αθανίου, το οποίο επηρεάζεται από τις τάσεις Coulomb αλλά δεν έχει διαρρηχθεί. Στην περιοχή του ρήγματος υπάρχουν αρκετά σεισμικά επίκεντρα κατά μήκος του, αλλά το συγκεκριμένο ρήγμα δεν έχει υποστεί κάποια διάρρηξη. Αυτό ίσως οφείλεται στην μεγάλη περίοδο επανάληψης της δράσης του.
- ↪ Κατά τον υπολογισμό των παραμορφώσεων με δεδομένα GPS προσδιορίστηκαν αρκετοί τανυστές παραμόρφωσης με διάφορους συνδυασμούς. Κάθε φορά λήφθηκαν υπόψη οι μετρήσεις GPS από τους σταθμούς που ενδιέφεραν το συγκεκριμένο συνδυασμό.
- ↪ Με τον προσδιορισμό των παραμορφώσεων από δεδομένα GPS υπολογίζονται οι άξονες των κύριων τάσεων για τους συνδυασμούς που έγιναν και με προσεκτική μελέτη εξάγονται συμπεράσματα. Οι παραμορφώσεις αυτές συγκρίνονται με προηγούμενα αποτελέσματα.
- ↪ Λόγω ορισμένων διαφορών που παρουσιάστηκαν στους τανυστές παραμόρφωσης έγινε περαιτέρω μελέτη για διερεύνηση της σεισμοτεκτονικής της περιοχής. Διαπιστώθηκε ότι το τεκτονικό καθεστώς μεταξύ Ζακύνθου – Κεφαλονιάς είναι διαφορετικό απ' ό,τι το αντίστοιχο καθεστώς μεταξύ Κεφαλονιάς – Λευκάδας.
- ↪ Σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων του Coulomb και των τανυστών παραμόρφωσης δεν μπορεί να γίνει γιατί οι τάσεις που υπολογίζονται μέσω του Coulomb είναι διατμητικές, ενώ οι τάσεις που υπολογίζονται στους τανυστές είναι κύριες. Οποιαδήποτε σύγκριση λοιπόν μεταξύ τους είναι ανέφικτη. Για να είναι δυνατόν να γίνει αυτή η σύγκριση θα πρέπει οι διατμητικές τάσεις να μετατραπούν σε κύριες.
- ↪ Για τον παραπάνω λόγο οι τάσεις που προέκυψαν από τους τανυστές παραμόρφωσης συγκρίθηκαν με κύριες τάσεις που προέκυψαν από προηγούμενη εργασία, στην οποία οι διατμητικές τάσεις είχαν μετατραπεί σε κύριες, κι έτσι η σύγκριση αυτή ήταν εφικτή.

11.3 Προτάσεις

Όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω η Ελλάδα αποτελεί μία από τις πιο σεισμογόνες χώρες, αφού εδώ είναι τα όρια της Αφρικανικής με την Ευρασιατική λιθοσφαιρική πλάκα. Παρακάτω παρουσιάζονται μερικές προτάσεις για συνέχεια της παρούσας εργασίας για ερευνητικούς σκοπούς όπως :

- Την εκμετάλλευση των δυνατοτήτων του Coulomb μπορεί να δώσει μακροπρόθεσμα προβλέψεις για τους σεισμούς και αυτό μπορεί να γίνει με εκτενή μελέτη των μέχρι σήμερα σεισμών που έχουν γίνει.
- Τον υπολογισμό των ΔN , ΔE και ΔU_r και να ληφθούν υπόψη και οι ενδιαμέσες παρατηρήσεις και όχι μόνο η πρώτη και τελευταία παρατήρηση.
- Τη βελτίωση της μετάβασης από το επίπεδο Coulomb στο ελλειψοειδές Google earth για να μη χρειάζεται κάθε φορά να χωρίζεται η περιοχή σε μικρότερες.
- Τη διερεύνηση και με άλλα στοιχεία της σεισμοτεκτονικής των Ιονίων νήσων για να εξηγηθούν τα φαινόμενα του μη ενεργοποιημένου ρήγματος Αγίου Νικήτα – Αθανίου, αλλά και των διαφορών που υπάρχουν στις διευθύνσεις των τανυστών παραμόρφωσης.
- Τη διερεύνηση της σεισμοτεκτονικής των συμπλεγμάτων Κεφαλονιάς – Ζακύνθου και Κεφαλονιάς – Λευκάδας για να εξηγηθεί περαιτέρω η διαφορετικότητά τους.
- Την επεξεργασία των διατμητικών τάσεων που προκύπτουν από το Coulomb και υπολογισμό των κύριων τάσεων, ούτως ώστε να συγκριθούν με τις κύριες τάσεις που προέρχονται από τα δεδομένα GPS και τους τανυστές παραμόρφωσης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ελληνική Βιβλιογραφία

1. Παπαζάχος Βασίλης, 1997. Εισαγωγή στη σεισμολογία, Εκδόσεις Ζήτη.
2. Φυτρολάκης Νικόλαος, 1985. Γενική Γεωλογία, ΕΜΠ.
3. Κουκούβελας Ιωάννης, 1998. Τεκτονική Γεωλογία, Εκδόσεις Leader books.
4. Σακελλαρίου Μιχαήλ, 2008. Γεωτεχνική Μηχανική, ΕΜΠ.
5. Μουντράκης Δημοσθένης, 1985. Γεωλογία της Ελλάδας, University Studio Press.
6. Δ.Δ. Μπαλοδήμος – Ο. Αραμπατζή, 2004. Υψομετρία, ΕΜΠ.
7. Δ. Παραδείσης, 2000. Σημειώσεις Δορυφορικής Γεωδαισίας, ΕΜΠ.
8. Π. Μήλας – Χ. Μπιλλήρης, 2004. Μετατροπές Συστημάτων Αναφοράς και Προβολικών Συστημάτων – Υψομετρικά Συστήματα Αναφοράς, ΕΜΠ.
9. Γ. Βέης – Χ. Μπιλλήρης – Κ. Παπαζήση, 2005. Κεφάλαια Ανώτερης Γεωδαισίας, ΕΜΠ.
10. Θ. Ροντογιάννη - Γ. Τσιαμπάος, 2008. Το ενεργό ρήγμα Αγίου Νικήτα – Αθανίου στη Λευκάδα και η γεωλογική επικινδυνότητα του νησιού, ΕΜΠ.

Διπλωματικές εργασίες

1. Διερεύνηση της τεκτονικής των Ιονίων Νήσων με τη μέθοδο “Τάσεων Coulomb” και σύγκριση των αποτελεσμάτων με μετρήσεις GPS, Ευγενία Ν. Λυτρίβη, 2005.
2. Μελέτη της κατανομής των τάσεων Coulomb στην περιοχή του Ιονίου, του Κορινθιακού και του Β. Αιγαίου, και η απεικόνιση των αποτελεσμάτων στο Google Earth, Μαμούχα Ευσταθία, 2008.
3. Γεωδαιτικός προσδιορισμός τεκτονικών μετατοπίσεων στην περιοχή Κοζάνης – Γρεβενών Μαρίνου Αγγελική, 1998.
4. Σύζευξη των μετρήσεων GPS και Μεθόδου Πεπερασμένων Στοιχείων για τον υπολογισμό των τάσεων του φλοιού στον Ελλαδικό χώρο, Δημήτριος Θ. Τσίνας, 2006.

Ξένη Βιβλιογραφία

1. Hugh D. Young, 1994. Φυσική, Τόμος Α', Μηχανική και Θερμοδυναμική, Εκδόσεις Παπαζήση
2. Geoffrey C.P. King, Ross S. Stein and Jian Lin, 1994. Static stress change and the triggering of earthquakes.
3. Jian Lin and Ross S. Stein, 2004. Stress triggering in thrust and subduction earthquakes and stress interaction between the southern San Andreas and nearby thrust and strike – slip faults.
4. Shinji Toda and Ross S. Stein, 2001. Response of the San Andreas to the 1983 Coalinga – Nunez Earthquakes: An Application of Interaction – based Probabilities for Parkfield.
5. Diane I. Doser, Kim B. Olsen, Fred F. Pollitz, Ross S. Stein and Shinji Toda, 2007. The 1911 $M \sim 6.6$ Calaveras earthquake: Focal mechanism and relationship to static and dynamic Coulomb stress changes imparted by the 1906 San Francisco earthquake.

6. Serkan B. Bozkurt, Ross S. Stein and Shinji Toda, 2007. Forecasting Probabilistic Seismic Shaking for Greater Tokyo from 400 Years of Intensity Observations.
7. Chung – Han Chan and Ross S. Stein, 2008. Stress evolution following 1999 Chi – Chi Taiwan, earthquake: Consequences for afterslip, relaxation, aftershocks and departures from Omori decay.
8. Theodora Rondoyanni and Paul Marinos, 2008. The Athens – Corinth highway and railway crossing a tectonically active area in Greece.
9. Max Vinzenz Muller, 1995. Satellite Geodesy and Geodynamics : Current deformation along the West Hellenic Arc.

Πηγές στο Διαδίκτυο

1. <http://quake.usgs.gov/research/deformation/modeling/coulomb/download.html>

(Ιστοσελίδα download του λογισμικού Coulomb 3.1.05 καθώς και του αντίστοιχου manual του προγράμματος)

2. <http://quake.wr.usgs.gov/research/deformation/modeling/coulomb/background.html>

(Σελίδα σχετική με το λογισμικό και υπόβαθρο λειτουργίας και στήριξης του προγράμματος)

3. http://earth.google.com/intl/en/userguide/v4/ug_kml.html

(Ιστοσελίδα σχετική με το Google earth και τα KML files)

4. http://earth.google.com/intl/en/userguide/v4/ug_importdat.html

5. <http://www.survey.ntua.gr/main/labs/struct/geotech/terminology.html>

(Ιστοσελίδα του εργαστηρίου Γεωτεχνικής Μηχανικής της Σχολής ATM του ΕΜΠ)

6. http://www.metal.ntua.gr/uploads/3113/3d_ELLHNIKO_TOJO.pdf

(Ιστοσελίδα της Σχολής Μεταλλειολόγων και Μηχανικών Μεταλλείων)

7. <http://users.att.sch.gr/xtsamis/OkosmosMas/Seismoi.htm>

8. http://biologion.blogspot.com/2008/06/blog-post_13.html

9. www.oasp.gr

10. http://www.geo.auth.gr/871/ch5/sxima_45.jpg

11. http://upload.wikimedia.org/wikipedia/el/thumb/a/ac/Diamikes_kima.JPG/350px-Diamikes_kima.JPG

12. <http://www.earthquakeprediction.gr/Aegeanplateen.htm>

13. <http://www.survey.ntua.gr/main/labs/struct/geotech/terminology.html>

14. <http://bssa.geoscienceworld.org>

15. <http://whatonearth.olehnielsen.dk/faults/hangingwall.gif>

16. http://www.nationmaster.com/wikimir/images/upload.wikimedia.org/wikipedia/en/2/2c/Nor_rev.png

17. <http://www.geog.nau.edu/courses/alew/ggr346/text/maps/fault-types.jpg>

18. [http://geography.sierra.cc.ca.us/booth/California/1 lithosphere/graben horst.jpg](http://geography.sierra.cc.ca.us/booth/California/1_lithosphere/graben_horst.jpg)
19. <http://mycourses.ntua.gr/courses/SURVEY1018/>
20. http://bp3.blogger.com/_aB6uGxzNs_4/SJF6lpBiG7I/AAAAAAAAAZc/pixLBh6TGhk/s1600-h/Mohrs_circle.png
21. www.geo.auth.gr
(Ιστοσελίδα τμήματος Γεωλογίας Α.Π.Θ.)
22. www.itia.ntua.gr/~soulman.icoordstans
(Λογισμικό χρήσιμο για μετατροπή συντεταγμένων)
23. www.gein.noa.gr
(Ιστοσελίδα Γεωδυναμικού Ινστιτούτου Αθηνών)
24. [http://wpcontent.answers.com/wikipedia/commons/thumb/8/81/Approximation_v
olume_deformation.png/400px-Approximation_volume_deformation.png](http://wpcontent.answers.com/wikipedia/commons/thumb/8/81/Approximation_volume_deformation.png/400px-Approximation_volume_deformation.png)
25. www.googleearth.com
(Ιστοσελίδα που περιλαμβάνεται το Google earth)

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Ενδεικτικά στο παράρτημα εδώ, παρουσιάζεται ένα αρχείο εισόδου του προγράμματος Coulomb, καθώς και τα αρχεία για τον υπολογισμό ενός εκ των τανυστών παραμόρφωσης για να φανεί η μορφή τους. Τα υπόλοιπα αρχεία, καθώς και το πλήρες παράρτημα βρίσκονται στην ηλεκτρονική μορφή της εργασίας αυτής.

Lefkada 3.inp

header line 1

header line 2

#reg1= 0 #reg2= 0 #fixed= 3 sym= 1

PR1= 0.250 PR2= 0.250 DEPTH= 7.500

E1= 8.000e+005 E2= 8.000e+005

XSYM= .000 YSYM= .000

FRIC= 0.400

S1DR= 19.000 S1DP= -0.010 S1IN= 100.000 S1GD= 0.000

S2DR= 89.990 S2DP= 89.990 S2IN= 30.000 S2GD= 0.000

S3DR= 109.000 S3DP= -0.010 S3IN= 0.000 S3GD= 0.000

X-start Y-start X-fin Y-fin Kode rt.lat reverse dip angle top bot

xxx xxxxxxxxxxx xxxxxxxxxxx xxxxxxxxxxx xxxxxxxxxxx xxx xxxxxxxxxxx xxxxxxxxxxx xxxxxxxxxxx xxxxxxxxxxx xxxxxxxxxxx

1 -1.4861 0.0331 -10.7551 11.0795 100 -0.0322 0.1827 45.0000 4.0352 10.9648 Fault 1

1 -3.7089 -11.1496 -0.3300 -2.7864 100 0.0869 0.0185 58.0000 4.0145 10.9855 Fault 2

1 5.1352 9.1428 5.1352 -11.3672 100 -0.0000 0.3225 63.0000 2.5237 12.4763 Fault 3

Grid Parameters

1 ----- Start-x = -46.7955626

2 ----- Start-y = -58.9335147

3 ----- Finish-x = 39.8627556

4 ----- Finish-y = 52.2613271
5 ----- x-increment = 0.8665832
6 ----- y-increment = 1.1119484

Size Parameters

1 ----- Plot size = 2.0000000
2 ----- Shade/Color increment = 1.0000000
3 ----- Exaggeration for disp.& dist. = 10000.0000000

Cross section default

1 ----- Start-x = 20.3553667
2 ----- Start-y = 20.7477122
3 ----- Finish-x = 38.6861078
4 ----- Finish-y = 39.0638228
5 ----- Distant-increment = 1.0000000
6 ----- Z-depth = -30.0000000
7 ----- Z-increment = 1.0000000

Map info

1 ----- min. lon = 20.0000000
2 ----- max. lon = 21.0000000
3 ----- zero lon = 20.5400009
4 ----- min. lat = 38.3000000
5 ----- max. lat = 39.2999992
6 ----- zero lat = 38.8300018

lonia nisia deform.txt

LOGO ,217531.777,4174335.879,0.053,0.0211
KSSI ,234442.895,4179084.530,0.0167,0.0175
SKIN ,210127.560,4202822.367,0.0401,0.0234
TSAR ,208783.482,4229257.766,0.0608,0.1077
LKTR ,193859.173,4225901.853,0.0695,0.0616
K1AM ,182220.830,4236280.708,0.0517,0.0232
K2AM ,182223.590,4236280.540,0.0882,0.0439
ASSO ,198232.808,4252300.706,0.0808,0.0546
SARA ,214340.582,4250935.940,0.0488,0.0446
EXOG ,205985.392,4261409.253,0.0727,0.0289
ATKO ,248659.166,4264267.2060,0.155,0.0399
STRO ,235204.566,4126502.979,0.0286,-0.0348
VASI ,201437.999,4278478.134,0.1522,0.0557
1KVL ,209392.138,4298645.500,0.0830,0.0602
MESS ,248442.957,4250509.051,-0.0079,0.0289
XRIS ,310482.073,4073549.982,-0.0012,-0.01

Total rotation : $\sigma = 0.199 \rho 0.193$ in ppm

Scale : $\sigma_x = -0.112 \rho 0.340$ in ppm

$\sigma_y = 0.467 \rho 0.185$ in ppm

$\sigma_{\max} = 0.499 \rho 0.248$ in ppm

$\sigma_{\min} = -0.145 \rho 0.367$ in ppm

Mean scale : $\sigma = 0.177 \rho 0.193$ in ppm

Azimuth : $Az = 12.997 \rho 17.212$ in deg

Strain : $\max = 0.644 \rho 0.443$ in ppm

lonia nisia ap.txt

0.177,218835,4221285,0.00354,0.0062,-0.112,0.467,0.499,-0.145,12.997,0.644

ΤΕΛΟΣ