

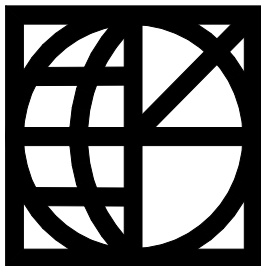
KENTRO ΔΟΥΡΥΦΟΡΩΝ ΔΙΟΝΥΣΟΥ DIONYSOS SATELLITE OBSERVATORY
ΤΟΜΕΑΣ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ ΕΜΠ DEPARTMENT OF SURVEYING NTUA

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

**ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΙΚΡΟΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΩΝ ΣΤΗ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΟΥ ΝΟΤΙΟΥ ΑΙΓΑΙΟΥ
ΠΕΛΑΓΟΥΣ ΜΕ ΣΥΝΔΥΑΣΜΟ ΙΣΤΟΡΙΚΩΝ ΓΕΩΔΑΙΤΙΚΩΝ, ΓΕΩΦΥΣΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΣΥΓΧΡΟΝΩΝ ΔΟΥΡΥΦΟΡΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ**

ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ ΓΚΕΓΚΑΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ ΠΑΡΑΔΕΙΣΗΣ



ΑΘΗΝΑ, ΜΑΡΤΙΟΣ 2014

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Αθανάσιου Ν. Γκέγκα

Διπλωματούχου Αγρονόμου Τοπογράφου Μηχανικού ΕΜΠ, MBA, MA

Η διατριβή υποβλήθηκε στη Σχολή Αγρονόμων Τοπογράφων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου προς εκπλήρωση των προϋποθέσεων του τίτλου του Διδάκτορος Μηχανικού

Συμβουλευτική Επιτροπή : Δημήτριος Παραδείσης , Καθηγητής ΕΜΠ (επιβλέπων)

Εγκρίθηκε από την επταμελή εξεταστική επιτροπή την

Δημήτριος Παραδείσης
Καθηγητής ΕΜΠ

Βασίλειος Βεσκούκης
Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

Χριστιάνα Μητσακάκη
Καθηγήτρια ΕΜΠ

Δημοσθένης Σταθάς
Καθηγητής ΕΜΠ

Βασίλειος Γκίκας
Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

Παρασκευή Νομικού
Λέκτορας ΕΚΠΑ

Γεώργιος Δρακάτος
Διευθυντής Ερευνών Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών

Αθήνα, Μάρτιος 2014

Αθανάσιος Ν. Γκέγκας

Υπ. Διδάκτωρ Σχολής Αγρονόμων Τοπογράφων Μηχανικών Ε.Μ.Π

Copyright © Αθανάσιος Ν. Γκέγκας, 2014

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείτε το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν την χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται στο συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Η έγκριση δε της διδακτορικής διατριβής από την Ανωτάτη Σχολή Αγρονόμων Τοπογράφων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/1932, Άρθρο 202).

Η παρούσα διδακτορική διατριβή υποστηρίχτηκε με υποτροφία που χορηγήθηκε από το Ίδρυμα Ωνάση.

Το σύνολο των ιστορικών γεωδαιτικών και γεωφυσικών δεδομένων προέρχονται από το ιστορικό αρχείο της Γεωγραφικής Υπηρεσίας Στρατού (ΓΥΣ) και χρησιμοποιούνται κατόπιν άδειας που χορηγήθηκε από την Διεύθυνση Γεωγραφικού Σώματος του ΓΕΣ .

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η διδακτορική έρευνα αποτελεί ένα δύσκολο και πολύχρονο εγχείρημα, που απαιτεί εργώδη προσπάθεια και προσήλωση για να καταλήξει σε μια σειρά παραδεκτών και αξιοποιήσιμων επιστημονικά συμπερασμάτων.

Είναι λοιπόν ιδιαίτερα σημαντική η στιγμή που η ερευνητική προσπάθεια ολοκληρώνεται και μια τόσο μεγάλη επένδυση χρόνου και κόπου ευοδώνεται και οδηγεί σε αποτελέσματα τα οποία παρέχουν πληροφορία και γνώση απαραίτητη στην επιστημονική και όχι μόνο κοινότητα.

Αν και το ταξίδι μιας διδακτορικής διατριβής είναι, εξαιτίας των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών και απαιτήσεων, εν πολλοίς μοναχικό εντούτοις λίγες φορές μπορεί να ολοκληρωθεί χωρίς την επιστημονική βοήθεια και τη ψυχική συμπαράσταση προς το πρόσωπο του υποψήφιου διδάκτορα.

Έτσι θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη και τις ιδιαίτερες ευχαριστίες μου στον επιβλέποντα τη διατριβή Καθηγητή ΕΜΠ κ. Δημήτριο Παραδείση καταρχήν για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε με την ανάθεση εκπόνησης της διατριβής και επιπλέον τόσο για την βοήθεια και τις συμβουλές που μου παρείχε καθόλη την διάρκεια της επίβλεψης όσο και για την άψογη, από κάθε πλευρά, στήριξη και συμπαράσταση που μου έδειξε.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τη Διεύθυνση Γεωγραφικού Σώματος (ΔΓΕ) του Γενικού Επιτελείου Στρατού (ΓΕΣ) καθώς και τη Γεωγραφική Υπηρεσία Στρατού (ΓΥΣ) για την έγκριση άδειας πρόσβασης και χρήσης του ιστορικού αρχείου μετρήσεων και δεδομένων της ΓΥΣ, την οποία μου παρείχαν αλλά και για την δυνατότητα που μου έδωσαν να εργάζομαι και να αναπτύσσομαι σε έναν οργανισμό υψηλού επιστημονικού επιπέδου και κύρους.

Ευχαριστώ επίσης το Ίδρυμα Ωνάση για την οικονομική στήριξη που μου παρείχε με την επιλογή μου ως υποτρόφου του Ιδρύματος καθώς επίσης και το προσωπικό του Ιδρύματος για την άψογη συνεργασία που είχαμε σε όλη την διάρκεια του προγράμματος υποτροφίας.

Τέλος θα ήθελα να πω ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένεια μου που με στηρίζει και με ανέχεται και στο φίλο μου Γιάννη για την πραγματική του φιλία και την στήριξη, την οποία ευελπιστώ κάποια στιγμή να ανταποδώσω.

Αθήνα, Μάρτιος 2014

Η εργασία αυτή αφιερώνεται για πολλούς και διάφορους λόγους στο Βικάκι.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	vii
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ	xi
ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ.....	xv
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΙΝΑΚΩΝ	xvii
ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ	xix
ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ.....	xxi
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	xxiii
ABSTRACT	xxvii
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	29
1.1. Ανάλυση Μικρομετακινήσεων και Γεωδαιτικές Μετρήσεις.....	31
1.2. Σκοπός και Επιδιώξεις της Παρούσας Έρευνας.....	31
1.3. Δομή Διατριβής	33
2. ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΚΑΙ ΓΕΩΔΑΙΣΙΑ	35
2.1. Εισαγωγικά Στοιχεία	37
2.2. Προσδιορισμός παραμορφώσεων με χρήση γεωδαιτικών μετρήσεων.....	37
2.2.1. Γενική προσέγγιση	37
2.2.2. Παραμόρφωση και τανυστές	39
2.2.3. Ανάλυση σε χώρο δύο διαστάσεων	41
2.2.4. Οι παράμετροι του τανυστή παραμόρφωσης	42
2.3. Μεθοδολογίες Προσδιορισμού Παραμέτρων Παραμόρφωσης.....	45
2.3.1. Η μέθοδος των συντεταγμένων	45
2.3.2. Η μέθοδος των παρατηρήσεων.....	47
2.4. Η Μέθοδος του F.C. Frank.....	48
2.5. Ανακεφαλαίωση	50
2.5.1. Γενικά στοιχεία.....	50

2.5.2. Μελέτες και έρευνες που χρησιμοποιούν τους τανυστές παραμόρφωσης για να προσδιορίσουν τις παραμορφώσεις μιας περιοχής.....	51
3. ΙΣΤΟΡΙΚΑ ΓΕΩΔΑΙΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ.....	57
3.1. Εισαγωγικά Στοιχεία	59
3.2. Προέλευση και Ταυτότητα Δεδομένων.....	60
3.2.1. Ιστορικά δεδομένα γωνιομετρήσεων για τη περιοχή μελέτης.....	61
3.2.2. Διαδικασία επεξεργασίας δεδομένων	63
3.3. Διαδικασία Ανάλυσης Δεδομένων	67
3.4. Απεικόνιση Αποτελεσμάτων Επεξεργασίας και Ανάλυσης Δεδομένων.....	70
3.5. Σχολιασμός των Αποτελεσμάτων Ανάλυσης	80
3.5.1. Σχολιασμός των αποτελεσμάτων στη περιοχή των Κυκλάδων.....	80
3.5.2. Σχολιασμός των αποτελεσμάτων στη περιοχή της Κρήτης.....	82
3.5.3. Σχολιασμός των αποτελεσμάτων στη περιοχή των Δωδεκανήσων.....	82
3.5.4. Σχολιασμός των αποτελεσμάτων στη περιοχή του Αιγαίου (Αν. Αιγαίο)	83
3.5.5. Συγκεντρωτικός σχολιασμός	83
4. ΙΣΤΟΡΙΚΑ ΓΕΩΦΥΣΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΚΑΙ ΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ	85
4.1. Εισαγωγικά Στοιχεία	87
4.2. Ιστορικά Γεωφυσικά Δεδομένα.....	88
4.2.1. Γεωφυσικά δεδομένα και τεκτονική συμπεριφορά μιας περιοχής.....	88
4.2.2. Δεδομένα βαρύτητας	90
4.2.3. Δεδομένα γεωμαγνητισμού	95
4.2.4. Συμπεράσματα από την επεξεργασία και ανάλυση των ιστορικών γεωφυσικών δεδομένων.....	100
4.3. Έρευνες με Χρήση Επίγειων και Δορυφορικών Μεθόδων	101
4.3.1. Αποτελέσματα ερευνών με χρήση μετρήσεων τριγωνισμού.....	101
4.3.2. Αποτελέσματα ερευνών με χρήση δεδομένων ΔΣΕ.....	103

4.4. Εκτίμηση Παραμορφώσεων στη Περιοχή Μελέτης με Επεξεργασία και Ανάλυση Σεισμικών Γεγονότων.....	110
4.5. Βασικά Στοιχεία για τη Τεκτονική Συμπεριφορά της Περιοχής Μελέτης όπως προκύπτουν από την Επεξεργασία των Ιστορικών Γεωφυσικών Δεδομένων και από τα Συμπεράσματα Προγενέστερων Ερευνών.....	112
4.6. Ερμηνεία Αποτελεσμάτων Ανάλυσης των Ιστορικών Γεωδαιτικών Μετρήσεων και Σύγκριση τους τα Συμπεράσματα Προγενέστερων Ερευνών	114
5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....	123
5.1. Εισαγωγή.....	125
5.2. Βασικά Συμπεράσματα.....	125
5.3. Προτάσεις Μελλοντικής Έρευνας.....	126
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	129

ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 3-1 : Η περιοχή μελέτης και οι υπό-περιοχές ανάλυσης.....	59
Εικόνα 3-2 : Κύριοι άξονες παραμόρφωσης για τη πρώτη περίοδο ανάλυσης (1895-1929).....	72
Εικόνα 3-3 : Κύριοι άξονες παραμόρφωσης για τη δεύτερη περίοδο ανάλυσης (1929/30-1956/53).....	73
Εικόνα 3-4 : Κύριοι άξονες παραμόρφωσης για τη τρίτη περίοδο ανάλυσης (195x-197x) (όλη η περιοχή).....	74
Εικόνα 3-5 : Κύριοι άξονες παραμόρφωσης για τη τρίτη περίοδο ανάλυσης (195x-197x) (Κυκλάδες)	75
Εικόνα 3-6 : Κύριοι άξονες παραμόρφωσης για τη τρίτη περίοδο ανάλυσης (195x-197x) (Δωδεκάνησα)	76
Εικόνα 3-7 : Κύριοι άξονες παραμόρφωσης για τη τρίτη περίοδο ανάλυσης (195x-197x) (Κρήτη).....	77
Εικόνα 3-8 : Κύριοι άξονες παραμόρφωσης για τη τέταρτη περίοδο ανάλυσης (1929/3x-197x).....	78
Εικόνα 3-9 : Κύριοι άξονες παραμόρφωσης για τη πέμπτη περίοδο ανάλυσης (1975-1982).....	79
Εικόνα 4-1 : Σταθμοί βαρύτητας 1 ^{ης} τάξης	90
Εικόνα 4-2 : Σταθμοί βαρύτητας 2 ^{ης} τάξης	92
Εικόνα 4-3 : Δίκτυο πύκνωσης μετρήσεων βαρύτητας.....	95
Εικόνα 4-4 : Σταθμοί μέτρησης γεωμαγνητισμού.....	95
Εικόνα 4-5 : Γράφημα εξέλιξης τιμών μαγνητικής απόκλισης των σταθμών ΚΥΚΛΑΔΩΝ	97
Εικόνα 4-6 : Γράφημα εξέλιξης τιμών μαγνητικής απόκλισης των σταθμών ΚΡΗΤΗΣ.....	98
Εικόνα 4-7 : Γράφημα εξέλιξης τιμών μαγνητικής απόκλισης των σταθμών ΔΩΔΕΚΑΝΗΣΩΝ-ΑΝΑΤΟΛΙΚΟΥ ΑΙΓΑΙΟΥ	98
Εικόνα 4-8 : Γράφημα εξέλιξης τιμών μαγνητικής απόκλισης του συνόλου των σταθμών που περιλαμβάνονται στη περιοχή μελέτης.....	99
Εικόνα 4-9 : Κύριοι άξονες παραμόρφωσης σύμφωνα με τους Βέη et al.....	102
Εικόνα 4-10 : Οι τέσσερεις μικροπλάκες και η σεισμική δραστηριότητα της περιοχής του Αιγαίου σύμφωνα με τους Nyst και Thatcher.....	105

Εικόνα 4-11 : Εφαπτομενικές και ακτινικές συνιστώσες (ενός κύκλου που προσεγγίζει τις θέσεις των σταθμών μέτρησης) των διανυσμάτων ταχύτητας, όπως αυτά έχουν υπολογιστεί από την ανάλυση των μετρήσεων ΔΣΕ από τους Hollenstein et al.	106
Εικόνα 4-12 : Πεδίο κύριων παραμορφώσεων (κύριοι άξονες και ιδιοτιμές) σύμφωνα με τους Hollenstein et al.....	107
Εικόνα 4-13 : Πεδίο ρυθμών μεταβολής κύριων παραμορφώσεων συμφωνά με τη μελέτη της Ροντογιάννη	108
Εικόνα 4-14 : Κύριοι άξονες παραμόρφωσης σύμφωνα με τους Floyd et al.....	109
Εικόνα 4-15 : Διευθύνσεις ολικής διάτμησης και ρηγμάτων της ευρύτερης περιοχής του τριγώνου ΚΟΦΙΝΑΣ-ΔΙΚΤΥ-ΙΔΗ.....	115
Εικόνα 4-16 : Διευθύνσεις ολικής διάτμησης και ρηγμάτων της ευρύτερης υπό-περιοχής ανάλυσης ΔΩΔΕΚΑΝΗΣΑ	117
Εικόνα 4-17 : Διευθύνσεις ολικής διάτμησης και ρηγμάτων της ευρύτερης υπό-περιοχής ανάλυσης ΚΥΚΛΑΔΕΣ για τη πρώτη περίοδο ανάλυσης	118
Εικόνα 4-18 : Διευθύνσεις ολικής διάτμησης και ρηγμάτων της ευρύτερης υπό-περιοχής ανάλυσης ΚΥΚΛΑΔΕΣ για τη δεύτερη περίοδο ανάλυσης.....	119
Εικόνα 4-19 : Διευθύνσεις ολικής διάτμησης και ρηγμάτων της ευρύτερης υπό-περιοχής ανάλυσης ΚΥΚΛΑΔΕΣ για τη τέταρτη περίοδο ανάλυσης.....	120
Εικόνα 4-20 : Διευθύνσεις ολικής διάτμησης και ρηγμάτων της ευρύτερης υπό-περιοχής ανάλυσης ΚΥΚΛΑΔΕΣ για τη τρίτη περίοδο ανάλυσης	122

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 3-1 : Τριγωνομετρικοί σταθμοί Ιης τάξης που περιέχονται στη περιοχή μελέτης	64
Πίνακας 3-2 : Χρονολογίες των γωνιομετρήσεων των τριγωνομετρικών σταθμών Ιης τάξης που λαμβάνουν μέρος στην εκτίμηση παραμορφώσεων.....	66
Πίνακας 3-3 : Πληροφορίες για τα τρίγωνα που χρησιμοποιούνται στην εκτίμηση παραμορφώσεων.....	67
Πίνακας 3-4 : Αποτελέσματα ανάλυσης παραμορφώσεων για τη πρώτη περίοδο (1895-1929).....	68
Πίνακας 3-5 : Αποτελέσματα ανάλυσης παραμορφώσεων για τη δεύτερη περίοδο (1929/30-1956/53).....	68
Πίνακας 3-6 : Αποτελέσματα ανάλυσης παραμορφώσεων για τη τρίτη περίοδο (195x-197x).....	69
Πίνακας 3-7 : Αποτελέσματα ανάλυσης παραμορφώσεων για τη τέταρτη περίοδο (1929/3x-197x).....	69
Πίνακας 3-8 : Αποτελέσματα ανάλυσης παραμορφώσεων για τη πέμπτη περίοδο (1975-1982).....	70
Πίνακας 3-9 : Χρονική περίοδος που χρησιμοποιείται στην απεικόνιση	71
Πίνακας 3-10 : Αποτελέσματα ανάλυσης παραμορφώσεων τριγώνων που είχαν παραληφθεί τη τέταρτη περίοδο (1929-1975).....	82
Πίνακας 3-11 : Τρίγωνα με υψηλή τιμή μέγιστης διατμητικής παραμόρφωσης	83
Πίνακας 3-12 : Τρίγωνα με υψηλή τιμή μέγιστης διατμητικής παραμόρφωσης	84
Πίνακας 4-1 : Διαφορές απόλυτων τιμών βαρύτητας για τους σταθμούς 1 ^{ης} τάξης της περιοχής μελέτης	91
Πίνακας 4-2 : Διαφορές τιμών βαρύτητας για τους σταθμούς 2 ^{ας} τάξης της περιοχής μελέτης	92
Πίνακας 4-3 : Διαφορές απόλυτων τιμών βαρύτητας για τους σταθμούς 1 ^{ης} τάξης της περιοχής μελέτης μεταξύ των ετών 1966-1986.....	93

ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 2-1 : Δισδιάστατο σύστημα αναφοράς.....	41
Σχήμα 2-2 : Οι διατμητικές παραμορφώσεις γ_1 και γ_2	44
Σχήμα 2-3 : Γεωδαιτικός τριγωνισμός. Μετρήσεις και συμβολισμοί.....	48

ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ

AMS	Army Map Service
CGPS	Continuous Global Positioning System
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
IGS	International GNSS Service
ΓΥΣ	Γεωγραφική Υπηρεσία Στρατού
ΔΣΕ	Δορυφορικά Συστήματα Εντοπισμού
MET	Μέθοδος Ελαχίστων Τετραγώνων

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο προσδιορισμός των παραμορφώσεων της επιφάνειας της γης καθώς και των αλληλεπιδράσεων αυτών με σεισμικά γεγονότα μέσα από διεπιστημονικές προσεγγίσεις και με χρήση μεθόδων, τεχνικών και δεδομένων διαφόρων επιστημονικών πεδίων έχει τη δυναμική να προσφέρει στους ερευνητές μια ευρύτερη και πιο ολοκληρωμένη εικόνα για τη τεκτονική συμπεριφορά μιας περιοχής

Ο κύριος σκοπός της παρούσας διδακτορικής διατριβής είναι ο προσδιορισμός των διαχρονικών παραμορφώσεων της περιοχής μελέτης (Νότιο - Ανατολικό Αιγαίο) με χρήση ιστορικών γεωδαιτικών μετρήσεων και η διερεύνηση της συσχέτισης αυτών με την σεισμική και τεκτονική συμπεριφορά της περιοχής.

Η περιοχή μελέτης μπορεί, με βάση τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά κάθε περιοχής άλλα και την διαθεσιμότητα ιστορικών γεωδαιτικών στοιχείων, να καταταμηθεί περαιτέρω σε τέσσερις μεγάλες υπό-περιοχές με ονομασία Κυκλάδες, Αιγαίο (εννοείται η περιοχή του Ανατολικού Αιγαίου), Δωδεκάνησα και Κρήτη.

Τα διαθέσιμα ιστορικά γεωδαιτικά δεδομένα περιλαμβάνουν μετρήσεις τριγωνισμού από το αρχείο της ΓΥΣ, που εκτείνονται χρονικά μεταξύ των ετών 1895 και 1982 όχι όμως ενιαία για όλο το δίκτυο, αλλά ανά περιοχές και για διαφορετικές χρονικές περιόδους (συνολικά πέντε χρονικές περίοδοι ανάλυσης).

Μετά την καταγραφή, την τεκμηρίωση και την επιλογή των δεδομένων που θα συμμετέχουν στην διαδικασία ανάλυσης, αυτά επεξεργάστηκαν ανά χρονική περίοδο σύμφωνα με τη μέθοδο που παρουσιάστηκε από τον Frank το 1966 (Frank, 1966).

Η επιλεγμένη μέθοδος επεξεργασίας χρησιμοποιεί τις διαφορές των μετρήσεων γωνιών ενός τριγώνου, για δύο χρονικές εποχές, ώστε να προσδιορίσει τις παραμέτρους (γ_1, γ_2) του τανυστή παραμόρφωσης για τη περιοχή του συγκεκριμένου τριγώνου.

Για την απεικόνιση των αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκαν οι κύριοι άξονες παραμόρφωσης στο κέντρο βάρους κάθε τριγώνου και με μέγεθος που να αντιστοιχεί σε κάθε περίπτωση με την ολική διάτμηση της περιοχής σε βάθος μιας χρονικής περιόδου κατάλληλα επιλεγμένης ώστε να είναι όσο το δυνατό αναγνώσιμη η απεικόνιση.

Η διαφοροποίηση και πρωτοτυπία της συγκεκριμένης διατριβής σε σχέση με άλλες μελέτες που έχουν λάβει χώρα στο παρελθόν με ανάλογες επιδιώξεις [(Bέης et al., 1992) και (Stiros, 1993)] έγκειται στο γεγονός ότι κάνει χρήση του συνόλου της διαθέσιμης πληροφορίας (γωνιομετρήσεις όλων των χρονολογιών) και παράλληλα χρησιμοποιεί ως χωρική μονάδα ανάλυσης την μικρότερη δυνατή (τη περιοχή ενός τριγώνου). Μάλιστα για ορισμένες υπό-περιοχές μελέτης (Ανατολικό Αιγαίο, Δωδεκάνησα και Κρήτη) αυτό γίνεται για πρώτη φορά.

Προσφέρεται έτσι η δυνατότητα να προκύψουν στοιχεία για τις παραμέτρους των τανυστών παραμόρφωσης μέσα από μια ενιαία και ομοιογενής επεξεργασία των πρωτογενών δεδομένων (γωνιομετρήσεις) με αποτέλεσμα την ολοκληρωμένη και συνεκτική ερμηνεία τους.

Αναφορικά με τα αποτελέσματα της όλης διαδικασίας επεξεργασίας και ανάλυσης των μετρήσεων γωνιών των τριγωνομετρικών σταθμών πρώτης τάξης, η βασική διαπίστωση είναι ότι για το σύνολο των περιοχών (τριγώνων) οι οποίες παρουσιάζουν υψηλές τιμές ολικής διάτμησης η συμπεριφορά αυτή μπορεί να συνδεθεί είτε με τη σεισμική ιστορική συμπεριφορά των εν λόγω περιοχών είτε με τη γεωλογία τους (διευθύνσεις ρηγμάτων) σύμφωνα και με τις παρατηρήσεις του Pope (Pope, 1966).

Ως δευτερεύουσες διαπιστώσεις μπορούν να αναφερθούν η συμφωνία των αποτελεσμάτων ανάλυσης με αυτά των σύγχρονων μελετών αναφορικά με τις διευθύνσεις συστολής και διαστολής στη περιοχή της Ρόδου-Καρπάθου καθώς και η σημασία της μη «αδύναμης» γεωμετρίας των τριγώνων ανάλυσης στην ερμηνεία των τανυστών και την εξαγωγή συμπερασμάτων.

Οι προηγούμενες διαπιστώσεις οδηγούν αυτομάτως στο συμπέρασμα ότι οι ιστορικές γεωδαιτικές μετρήσεις είναι σε θέση, κατόπιν κατάλληλης επεξεργασίας και ανάλυσης, να παρέχουν πληροφορία για την τεκτονική συμπεριφορά της περιοχής μελέτης και τα αποτελέσματα αυτής (όπως οι παραμορφώσεις της επιφανείας).

Κατά συνέπεια μπορεί να αναφερθεί ότι η προσδιοριζόμενη συμπεριφορά αυτή παρουσιάζει μια διαχρονικότητα σε βάθος χρόνου (άνω των 100 ετών) και δεν θα πρέπει να θεωρείται ότι αποτελεί χαρακτηριστικό των τελευταίων δεκαετιών, κατά τις οποίες οι σύγχρονες δορυφορικές μέθοδοι έχουν επιτρέψει την πολύ καλή μοντελοποίησης και τεκμηρίωση της.

Τέλος αναφορικά με την επεξεργασία και ανάλυση των διαθέσιμων ιστορικών γεωφυσικών (βαρύτητα και γεωμαγνητισμός) δεδομένων, η κύρια και μόνη διαπίστωση είναι ότι τόσο η χωρική όσο και η χρονική κατανομή τους αλλά στη περίπτωση του γεωμαγνητισμού και το είδος των διαθέσιμων στοιχείων δεν παρέχουν μια βάση για την εξαγωγή κατάλληλων συμπερασμάτων, τα οποία θα λειτουργήσουν είτε αυτόνομα είτε συμπληρωματικά προς τα αποτελέσματα που προέρχονται από την επεξεργασία και ανάλυση των γωνιομετρήσεων με απώτερο σκοπό την υποβοήθηση της τεκμηρίωσης και ερμηνείας της τεκτονικής συμπεριφοράς της περιοχής μελέτης.

ABSTRACT

The determination of crustal deformations and their interactions with seismic events through interdisciplinary approaches and the use of methods, techniques and data from various scientific fields offers to researchers a broader and more complete picture of the tectonic behavior of a region.

This thesis focuses on the determination of the temporal crustal deformations of the study area (South - East Aegean Sea) through historical geodetic measurements and the investigation of their correlation with the seismotectonic behavior of the region.

The study area is further divided into four subareas named Cyclades, Aegean (referring to the area of the Eastern Aegean), Dodecanese and Crete, based on the characteristics of each area and the availability of historical geodetic data be split.

The available historical geodetic data includes triangulation measurements from the Hellenic Military Geographical Service, for the time period between 1895 and 1982, not uniform for the whole network but for different time periods (total five periods of analysis) for each area of analysis (triangle).

After the recording and documentation of all the historical data, selected data were processed for each analysis period with the method presented by Frank in 1966 (Frank, 1966).

The chosen processing method uses the differences of angles measurements of a triangle, for two sequential time periods, in order to determine the parameters (γ_1, γ_2) of the strain tensor for the area of a triangle.

To present the results of the above mentioned analysis the principal axes of strain are plotted at the center of gravity of each triangle with magnitude corresponding in each case to the total shear area for a time period suitably chosen.

The differentiation of this thesis in relation to older studies with similar scope [(Veis et al., 1992) and (Stiros, 1993)] lies in the process of all the available data (triangulation measurements of first order for all the time period) and in the use of the triangle as a spatial unit of analysis. Also for three of the study subareas (East Aegean, Dodecanese

and Crete) this was the first time that the historical geodetic data were used to estimate crustal deformation.

This approach of a uniform and homogeneous process of raw data (triangulation measurements) provides information concerning the parameters of strain tensor, which permits a comprehensive and coherent interpretation of study areas deformation.

The key finding of the results interpretation is that the deformation behavior of all the triangles, which exhibit high values of total shear strain rates, can be associated with either the historical seismic behavior of these areas or with their geology (faults direction) in accordance with the suggestions of Pope (Pope, 1966).

As secondary findings could be mentioned the agreement of this thesis results with those of other studies (which use GPS data) regarding the directions of contraction and expansion in the area of Rhodes-Karpathos and also the importance of a proper triangle geometry for the analysis and interpretation of strain tensor.

The results of this thesis lead automatically to the conclusion that historical geodetic measurements could, after a proper processing and analysis, provide information on the tectonic behavior of a region.

Therefore could be concluded that the specified deformation behavior of the study area presents a temporal sequence over the past 100 years and it should not be regarded as a characteristic of the two last decades, whereas the modern satellite methods have allowed its detailed determination.

Finally regarding the usefulness of the available historical geophysical (gravity and geomagnetism) data, the main and only ascertainment is that both spatial and temporal distribution of them and also in the case of geomagnetism and the type of available data do not provide a basis to obtain appropriate information, which can assist the documentation and interpretation of the tectonic behavior of the study area.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1. Ανάλυση Μικρομετακινήσεων και Γεωδαιτικές Μετρήσεις

Ο προσδιορισμός των παραμορφώσεων της γήινης επιφάνειας έχει ιδιαίτερα μεγάλη σημασία για τον εντοπισμό, την ανάλυση και την ερμηνεία πολλών φυσικών φαινομένων και των συνεπειών αυτών.

Ένα από τα φυσικά φαινόμενα, τα οποία σχετίζονται άμεσα με τις τεκτονικές παραμορφώσεις και τις μικρομετακινήσεις της γήινης επιφάνειας, είναι οι σεισμοί με αποτέλεσμα αρκετές ερευνητικές προσπάθειες διαχρονικά να έχουν ενδιαφερθεί για την εξέταση της αλληλεπίδρασης τους.

Στο παραπάνω πλαίσιο προσδιορισμού των παραμορφώσεων της επιφάνειας της γης και των αλληλεπιδράσεων αυτών με τα σεισμικά γεγονότα αποκτά ιδιαίτερη σημασία η διεπιστημονική προσέγγιση και η χρήση μεθόδων, τεχνικών και δεδομένων διαφόρων επιστημονικών πεδίων με σκοπό την όσο το δυνατό καλύτερη και αξιόπιστη εκτίμηση ενός αριθμού παραμέτρων και συμπεριφορών που με κατάλληλη ανάλυση και συνδυασμό μπορούν να παρέχουν εμπειριστατωμένη εικόνα στους ερευνητές.

Στη πράξη αυτό που ενισχύει την αποτελεσματικότητα και εν τέλει την αξιοπιστία της ως άνω προσπάθειας είναι η ανεξαρτησία των επιλεγόμενων προσεγγίσεων (μεθόδων, τεχνικών και δεδομένων), η οποία και επιτρέπει τόσο την πολυπαραμετρική προσέγγιση, όσο και την επαλήθευση των όποιων αποτελεσμάτων.

Δεδομένου ότι η έρευνα στο πεδίο της σεισμικής δραστηριότητας και των αποτελεσμάτων αυτής βασίζεται κυρίως στη χρήση σεισμικών, γεωλογικών και παλαιομαγνητικών μετρήσεων και δεδομένων η δυναμική που προσφέρει η επιστήμη της γεωδαισίας ως μια ανεξάρτητη προσέγγιση στην ως άνω έρευνα είναι ιδιαίτερα σημαντική.

1.2. Σκοπός και Επιδιώξεις της Παρούσας Έρευνας

Ο κύριος σκοπός της διδακτορικής διατριβής είναι ο προσδιορισμός των διαχρονικών παραμορφώσεων της περιοχής μελέτης (Νότιο - Ανατολικό Αιγαίο) με χρήση ιστορικών γεωδαιτικών μετρήσεων και η διερεύνηση της συσχέτισης αυτών με την σεισμική και τεκτονική συμπεριφορά της περιοχής.

Πέραν του κύριου σκοπού υπάρχουν άλλες δύο ερευνητικές επιδιώξεις. Η πρώτη είναι η καταγραφή και τεκμηρίωση της γεωδαιτικής (μετρήσεις τριγωνισμού) και γεωφυσικής (μετρήσεις βαρύτητας και γεωμαγνητισμού) μετρητικής ιστορίας της περιοχής, ώστε αυτή να είναι αξιοποιήσιμη σε μελλοντικές ερευνητικές προσπάθειες.

Η δεύτερη επιδίωξη είναι η σύγκριση των αποτελεσμάτων επεξεργασίας και ανάλυσης των ιστορικών γεωδαιτικών και γεωφυσικών μετρήσεων με τα αντίστοιχα ερευνών, που διεξήχθησαν με σύγχρονες δορυφορικές μεθόδους με διπλό σκοπό αφενός μεν τον έλεγχο της αξιοπιστίας των χρησιμοποιηθέντων μεθόδων και αποτελεσμάτων και αφετέρου την επαλήθευση της προσδιοριζόμενης τεκτονικής συμπεριφοράς της περιοχής ή τον εντοπισμό τυχόν αλλαγών της.

Για την επίτευξη του σκοπού και των επιδιώξεων, όπως αναφέρθηκαν προηγουμένως, της διδακτορικής διατριβής η έρευνα θα αναπτυχθεί σε τρεις κύριους άξονες :

- Ο πρώτος άξονας αφορά τον προσδιορισμό των παραμορφώσεων της γήινης επιφάνειας μέσω της επεξεργασίας και ανάλυσης των ιστορικών μετρήσεων τριγωνισμού, οι οποίες είναι διαθέσιμες για τη περιοχή μελέτης
- Ο δεύτερος άξονας θα αφορά την προσπάθεια προσδιορισμού της συμπεριφοράς του υπεδάφους της περιοχής μελέτης μέσω της επεξεργασίας και ανάλυσης ιστορικών μετρήσεων βαρύτητας και γεωμαγνητισμού
- Ο τρίτος άξονας αφορά την καταγραφή και παρουσίαση του συνόλου των ερευνών που έχουν γίνει διαχρονικά στη περιοχή μελέτης με χρήση σύγχρονων δορυφορικών μεθόδων καθώς και την συνδυαστική ανάλυση των αποτελεσμάτων των ερευνών αυτών με τα αντίστοιχα αποτελέσματα των δύο προηγούμενων αξόνων έρευνας

1.3. Δομή Διατριβής

Η παρούσα διδακτορική διατριβή αποτελείται από την εισαγωγή και τέσσερα κεφάλαια. Στην εισαγωγή γίνεται μια σύντομη παρουσίαση της δυναμικής που προσφέρει η επιστήμη της γεωδαισίας στη μελέτη της αλληλεπίδρασης των μικρομετακινήσεων και παραμορφώσεων της γήινης επιφάνειας με τη σεισμική δραστηριότητα και τα αντίστοιχα γεγονότα. Παρουσιάζεται επίσης ο κύριος ερευνητικός σκοπός της παρούσας εργασίας και αναλύονται οι άξονες με τους οποίους θα επιδιωχθεί και τέλος γίνεται μια σύντομη περιγραφή της δομής και του περιεχομένου της διατριβής.

Το πρώτο κεφάλαιο είναι αφιερωμένο στην παρουσίαση και ανάπτυξη των κύριων εννοιών που χρησιμοποιούνται στη συνέχεια της εργασίας. Αναπτύσσονται έτσι οι έννοιες της μετατόπισης, της παραμόρφωσης, των τανυστών παραμόρφωσης καθώς και των παραμέτρων παραμόρφωσης. Επιπλέον στο κεφάλαιο αυτό γίνεται η σύνδεση των παρουσιαζόμενων εννοιών με τις επιδιώξεις της παρούσας έρευνας, περιγράφονται οι μεθοδολογίες και οι προσεγγίσεις για τον προσδιορισμό των παρουσιαζόμενων εννοιών από γεωδαιτικές μετρήσεις και δεδομένα και τέλος παρουσιάζεται η ακολουθούμενη ερευνητική μεθοδολογία.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι ιστορικές γεωδαιτικές μετρήσεις τριγωνισμού, που αναφέρονται στη περιοχή μελέτης, η τεκμηρίωση τους, τα αποτελέσματα των διαφόρων σταδίων επεξεργασίας καθώς επίσης και τα τελικά αποτελέσματα ανάλυσης αυτών.

Το τρίτο κεφάλαιο περιέχει αναφορά στα ιστορικά γεωφυσικά δεδομένα (βαρύτητας και γεωμαγνητισμού) και στα αποτελέσματα μιας πρώτης επεξεργασίας και ανάλυσης αυτών. Σκοπός είναι η παρουσίαση των δεδομένων αυτών και η διερεύνηση της χρησιμότητας τους στην ερμηνεία της τεκτονικής συμπεριφοράς της περιοχής μελέτης.

Στο ίδιο κεφάλαιο παρουσιάζονται και τα αποτελέσματα του συνόλου των ερευνών που διεξήχθησαν στη περιοχή μελέτης με χρήση σύγχρονων δορυφορικών μεθόδων προσδιορισμού θέσης σε συνδυασμό και με όποια ιστορικά δεδομένα ήταν διαθέσιμα σε κάθε περίπτωση.

Επίσης γίνεται αναφορά σε βασικά στοιχεία της τεκτονικής συμπεριφοράς της περιοχής, όπως αυτά προκύπτουν από μελέτες που βασίστηκαν στην επεξεργασία και ανάλυση διάφορων σεισμικών γεγονότων.

Τέλος στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται μια σύντομη ερμηνεία των αποτελεσμάτων της επεξεργασίας και ανάλυσης των ιστορικών γεωδαιτικών μετρήσεων τριγωνισμού, που έλαβαν χώρα στο πλαίσιο του προηγούμενου κεφαλαίου, ενώ παράλληλα επιχειρείται η συσχέτιση τους με τα αποτελέσματα και τις διαπιστώσεις των ερευνών που παρουσιάζονται στο τρίτο κεφάλαιο.

Στο τέταρτο και τελευταίο κεφάλαιο διατυπώνονται τα τελικά συμπεράσματα της ερευνητικής προσπάθειας και προτείνονται μελλοντικές κατευθύνσεις έρευνας, οι οποίες εδράζονται πάνω σε αυτά.

2. ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΚΑΙ ΓΕΩΔΑΙΣΙΑ

2.1. Εισαγωγικά Στοιχεία

Στην ενότητα αυτή θα αναπτυχθεί το θεωρητικό υπόβαθρο καθώς και οι διάφορες προσεγγίσεις προσδιορισμού των τεκτονικών παραμορφώσεων μιας περιοχής με χρήση γεωδαιτικών μετρήσεων.

Αρχικά θα γίνει μια σύντομη περιγραφή της θεωρίας και θα αναλυθούν οι βασικές έννοιες με έμφαση στην ανάλυση παραμορφώσεων με χρήση τανυστών. Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν οι διάφορες προσεγγίσεις, που έχουν αναπτυχθεί για την υλοποίηση της θεωρίας, ενώ τέλος θα γίνει ειδική αναφορά στη μέθοδο προσδιορισμού των τεκτονικών παραμορφώσεων με χρήση γεωδαιτικών μετρήσεων τριγωνισμού, η οποία παρουσιάστηκε το 1966 από τον F. C. Frank (Frank, 1966).

Η συγκεκριμένη μέθοδος, με ορισμένες τροποποιήσεις, είναι και αυτή που ακολουθήθηκε στη παρούσα ερευνητική προσπάθεια, για λόγους που αναλύονται διεξοδικά στη συνέχεια.

2.2. Προσδιορισμός παραμορφώσεων με χρήση γεωδαιτικών μετρήσεων

2.2.1. Γενική προσέγγιση

Η πιο απλή προσέγγιση¹ στη χρήση των γεωδαιτικών μετρήσεων για τον προσδιορισμό των παραμορφώσεων και της τεκτονικής συμπεριφοράς εν γένει μιας περιοχής βασίζεται στην ύπαρξη στη περιοχή ενός δικτύου σημείων για τα οποία πραγματοποιούνται περιοδικά επαναλαμβανόμενες γεωδαιτικές μετρήσεις (τριγωνισμού, τριπλευρισμού κα).

Στη συνέχεια χρησιμοποιούνται οι μετρήσεις αυτές και με χρήση τεχνικών συνόρθωσης υπολογίζονται για κάθε εποχή μετρήσεων οι συντεταγμένες των σημείων που αποτελούν το δίκτυο. Συγκρινόμενες μεταξύ τους οι συντεταγμένες των διαφόρων εποχών μέτρησης δημιουργούν τα λεγόμενα «Διαγράμματα Διανυσμάτων Μετακίνησης», τα οποία αποτελούνται από τα διανύσματα μετάθεσης των σημείων της περιοχής και εμπεριέχουν κάθε πληροφορία για πιθανές μικρομετακινήσεις που μπορεί να δώσει ο τριγωνισμός της περιοχής (Pope, 1966).

¹ Αναφέρεται από τον Pope (Pope, 1966) και ως συμβατική μέθοδος.

Στη σύγχρονη εποχή όπου οι μετρήσεις από Δορυφορικά Συστήματα Εντοπισμού (ΔΣΕ)-GPS για τα σημεία των δικτύων είναι ευρέως διαδεδομένες και εκτείνονται τόσο χρονικά όσο και χωρικά, υπάρχει η δυνατότητα πέραν των «Διαγραμμάτων Διανυσμάτων Μετακίνησης» να παραχθούν και «Διαγράμματα Ταχυτήτων Μετακίνησης» για τα σημεία μιας πολύ μεγάλης σε έκταση περιοχής.

Τα διαγράμματα αυτά προσφέρουν με την σειρά τους σημαντική πληροφορία για την τεκτονική συμπεριφορά της περιοχής και σε συνδυασμό με άλλα δεδομένα μπορούν να διευκολύνουν την ερμηνεία διαφόρων συμπεριφορών και την εξαγωγή συμπερασμάτων.

Παρόλο που όπως έχει ήδη αναφερθεί τα «Διαγράμματα Διανυσμάτων Μετακίνησης», εάν έχουν κατασκευαστεί με προσοχή και είναι αξιόπιστα, περιέχουν το σύνολο της πληροφορίας για πιθανές μικρομετακινήσεις της περιοχής εντούτοις δεν την παρουσιάζουν με το καλύτερο και πιο αποτελεσματικό τρόπο αλλά και ούτε επιτρέπουν την εξαγωγή ειδικότερων συμπερασμάτων για την πηγή των παραμορφώσεων της περιοχής (Pope, 1966).

Για παράδειγμα από τη μελέτη αυτών των διαγραμμάτων δε μπορεί να προσδιοριστεί αν η τεκτονική συμπεριφορά μιας περιοχής είναι αποτέλεσμα διατμητικών παραμορφώσεων που λαμβάνουν χώρα εξαιτίας της συμπεριφοράς κάποιων γεωλογικών χαρακτηριστικών της περιοχής (πχ ρήγματα) ή είναι αποτέλεσμα μιας περιστροφής, που μπορεί να είναι και αποτέλεσμα λανθασμένης επιλογής του σταθερού σημείου συνόρθωσης (Pope, 1966).

Η ανάλυση των παραμορφώσεων της περιοχής με χρήση τανυστών παραμόρφωσης, που προσδιορίζονται από τις τυχόν διαθέσιμες γεωδαιτικές μετρήσεις, είναι μια μεθοδολογία που μπορεί να προσφέρει επιπλέον πληροφορία και να υποβοηθήσει την ερμηνεία της τεκτονικής συμπεριφοράς της περιοχής.

Όπως όμως σημειώνει και ο Pope (Pope, 1966) οι τανυστές παραμόρφωσης παρόλη την χρησιμότητα τους δεν υποκαθιστούν, δεδομένης και της μη συσχέτισής τους με τη φυσική σύσταση του υπεδάφους της περιοχής, σε καμία περίπτωση τις άλλες μεθόδους και τεχνικές που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό των παραμορφώσεων μιας περιοχής, αλλά δρουν συμπληρωματικά σε αυτές προσφέροντας μια επιπλέον ανεξάρτητη προσέγγιση.

2.2.2. Παραμόρφωση και τανυστές

Η παραμόρφωση μιας περιοχής της γήινης επιφάνειας, εξαιτίας της επίδρασης διαφόρων δυνάμεων, μπορεί να θεωρηθεί ότι συντίθεται από την συνισταμένη των παραμορφώσεων του συνόλου των σημείων που αποτελούν την περιοχή.

Έτσι για κάθε σημείο της περιοχής, το οποίο μετά την επίδραση των δυνάμεων έχει μετατοπιστεί από την θέση x_1 στη θέση x_2 , η μετατόπιση αυτή μπορεί να περιγραφεί από το διάνυσμα \vec{u} .

Αν θεωρηθεί ένα τρισσορθογώνιο σύστημα αξόνων (x_1, x_2, x_3) και υποθεθεί ότι η μετατόπιση του σημείου λαμβάνει χώρα και στους τρεις άξονες τότε και με τη βοήθεια των δύο πρώτων όρων του αναπτύγματος της σειράς Taylor ως προς x_1 οι συντεταγμένες του διανύσματος μετατόπισης θα δίνονται από τη σχέση :

$$u_i(x_2) = u_i(x_1) + \varepsilon_{ij} dx_j = u_i(x_1) + \left. \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right|_{x_1} dx_j \quad \text{με } i, j = 1, 2, 3 \quad (2.1)$$

Η σχέση (2.1) παίρνει με την βοήθεια πινάκων την παρακάτω μορφή :

$$\begin{bmatrix} u_1(x_2) \\ u_2(x_2) \\ u_3(x_2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_1(x_1) \\ u_2(x_1) \\ u_3(x_1) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\partial u_1}{\partial x_1} & \frac{\partial u_1}{\partial x_2} & \frac{\partial u_1}{\partial x_3} \\ \frac{\partial u_2}{\partial x_1} & \frac{\partial u_2}{\partial x_2} & \frac{\partial u_2}{\partial x_3} \\ \frac{\partial u_3}{\partial x_1} & \frac{\partial u_3}{\partial x_2} & \frac{\partial u_3}{\partial x_3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dx_1 \\ dx_2 \\ dx_3 \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Ο πίνακας με στοιχεία τις μερικές παραγώγους ονομάζεται τανυστής κλίσης μετατόπισης (displacement gradient tensor), είναι δευτέρας τάξεως και αποτελείται από εννέα ανεξάρτητα στοιχεία. Όπως φαίνεται, στη σχέση (2.3) που ακολουθεί, ο πίνακας αυτός μπορεί να αναλυθεί σε άθροισμα δύο πινάκων :

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial u_1}{\partial x_1} & \frac{\partial u_1}{\partial x_2} & \frac{\partial u_1}{\partial x_3} \\ \frac{\partial u_2}{\partial x_1} & \frac{\partial u_2}{\partial x_2} & \frac{\partial u_2}{\partial x_3} \\ \frac{\partial u_3}{\partial x_1} & \frac{\partial u_3}{\partial x_2} & \frac{\partial u_3}{\partial x_3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial u_1}{\partial x_1} & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_1}{\partial x_2} + \frac{\partial u_2}{\partial x_1} \right) & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_1}{\partial x_3} + \frac{\partial u_3}{\partial x_1} \right) \\ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_2}{\partial x_1} + \frac{\partial u_1}{\partial x_2} \right) & \frac{\partial u_2}{\partial x_2} & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_2}{\partial x_3} + \frac{\partial u_3}{\partial x_2} \right) \\ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_3}{\partial x_1} + \frac{\partial u_1}{\partial x_3} \right) & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_3}{\partial x_2} + \frac{\partial u_2}{\partial x_3} \right) & \frac{\partial u_3}{\partial x_3} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_1}{\partial x_2} - \frac{\partial u_2}{\partial x_1} \right) & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_1}{\partial x_3} - \frac{\partial u_3}{\partial x_1} \right) \\ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_2}{\partial x_1} - \frac{\partial u_1}{\partial x_2} \right) & 0 & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_2}{\partial x_3} - \frac{\partial u_3}{\partial x_2} \right) \\ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_3}{\partial x_1} - \frac{\partial u_1}{\partial x_3} \right) & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_3}{\partial x_2} - \frac{\partial u_2}{\partial x_3} \right) & 0 \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

Ο πρώτος πίνακας του αθροίσματος της σχέσης (2.3) είναι συμμετρικός και αποτελείται από έξι ανεξάρτητα στοιχεία ενώ ο δεύτερος πίνακας είναι αντισυμμετρικός και αποτελείται από τρία ανεξάρτητα στοιχεία.

Η σχέση (2.2) μπορεί τώρα να γραφεί :

$$u_i(x_2) = u_i(x_1) + \varepsilon_{ij}dx_j = u_i(x_1) + e_{ij}dx_j + \omega_{ij}dx_j \text{ με } i, j = 1,2,3 \quad (2.4)$$

Όπου στη σχέση (2.4)

$$e_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) = \begin{bmatrix} e_{11} & e_{12} & e_{13} \\ e_{21} & e_{22} & e_{23} \\ e_{31} & e_{32} & e_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial u_1}{\partial x_1} & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_1}{\partial x_2} + \frac{\partial u_2}{\partial x_1} \right) & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_1}{\partial x_3} + \frac{\partial u_3}{\partial x_1} \right) \\ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_2}{\partial x_1} + \frac{\partial u_1}{\partial x_2} \right) & \frac{\partial u_2}{\partial x_2} & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_2}{\partial x_3} + \frac{\partial u_3}{\partial x_2} \right) \\ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_3}{\partial x_1} + \frac{\partial u_1}{\partial x_3} \right) & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_3}{\partial x_2} + \frac{\partial u_2}{\partial x_3} \right) & \frac{\partial u_3}{\partial x_3} \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

είναι ο τανυστής παραμόρφωσης (strain tensor), τα στοιχεία της διαγωνίου του οποίου (e_{11}, e_{22}, e_{33}) αποτελούν τις αξονικές ή κανονικές παραμορφώσεις (normal strains) ενώ τα υπόλοιπα στοιχεία ($e_{12}, e_{23}, e_{32}, \dots$) αποτελούν τις διατμητικές παραμορφώσεις (shear strains).

Ο τανυστής αυτός εκφράζει την καθαρή παραμόρφωση της περιοχής, η οποία απομένει αφού αφαιρεθεί κάθε επίδραση λόγω μετάθεσης ή περιστροφής των σημείων της περιοχής (Schneider, 1982).

Ομοίως στην ίδια σχέση (2.4) όπου

$$\omega_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) = \begin{bmatrix} \omega_{11} & \omega_{12} & \omega_{13} \\ \omega_{21} & \omega_{22} & \omega_{23} \\ \omega_{31} & \omega_{32} & \omega_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_1}{\partial x_2} - \frac{\partial u_2}{\partial x_1} \right) & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_1}{\partial x_3} - \frac{\partial u_3}{\partial x_1} \right) \\ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_2}{\partial x_1} - \frac{\partial u_1}{\partial x_2} \right) & 0 & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_2}{\partial x_3} - \frac{\partial u_3}{\partial x_2} \right) \\ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_3}{\partial x_1} - \frac{\partial u_1}{\partial x_3} \right) & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_3}{\partial x_2} - \frac{\partial u_2}{\partial x_3} \right) & 0 \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

είναι ο τανυστής περιστροφής.

Όπως λοιπόν συνάγεται από τα παραπάνω μια περιοχή που παραμορφώνεται από την επίδραση δυνάμεων, υπόκειται σύμφωνα με τη σχέση (2.4) στη συνδυαστική επίδραση της μετάθεσης, παραμόρφωσης και περιστροφής των σημείων της.

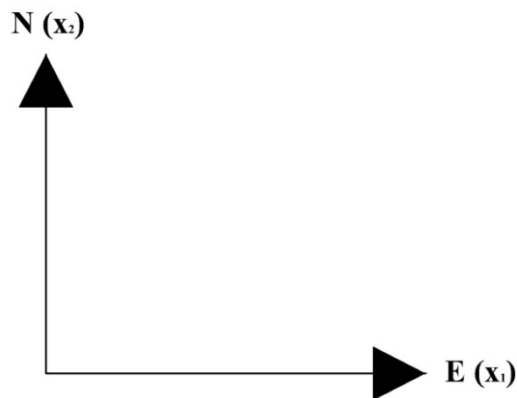
Η μελέτη της παραμόρφωσης και περιστροφής της περιοχής μπορεί να γίνει με την χρήση των τανυστών δευτέρας τάξης των σχέσεων (2.5) και (2.6), οι οποίοι είναι ειδικές μαθηματικές ποσότητες που παρέχουν, μέσω της ανάλυσής τους, κατάλληλη πληροφορία για την τοπική παραμόρφωση μιας περιοχής.

Το πλεονέκτημα των τανυστών παραμόρφωσης είναι η ανεξαρτησία τους από το επιλεγόμενο κάθε φορά σύστημα αναφοράς, αφού διατηρούν τις ιδιότητες τους ανεξαρτήτως του τελευταίου. Για κάθε δε παραμόρφωση υπάρχει ένα σύστημα αναφοράς τέτοιο ώστε οι παραμορφώσεις να είναι μόνο ομοαξονικές (σύστημα αξόνων κύριων παραμορφώσεων-principal strain axes).

2.2.3. Ανάλυση σε χώρο δύο διαστάσεων

Δεδομένου ότι τα περισσότερα ιστορικά γεωδαιτικά δεδομένα (μετρήσεις γωνιών και αποστάσεων) αναφέρονται σε σημεία πάνω στην επιφάνεια τη Γης, οι περισσότερες μελέτες τοπικών παραμορφώσεων της γήινης επιφάνειας αναφέρονται σε δύο διαστάσεις ακολουθώντας το κλασσικό γεωδαιτικό διαχωρισμό της οριζοντιογραφίας και υψομετρίας (Dermanis and Livieratos, 1983).

Η διάκριση αυτή, της ξεχωριστής μελέτης οριζοντιογραφίας και υψομετρίας, ομοίως και στο πεδίο του υπολογισμού και ανάλυσης των τανυστών παραμόρφωσης επιλύει σε ένα βαθμό προβλήματα που οφείλονται στους πολύπλοκους μαθηματικούς υπολογισμούς και τις προϋποθέσεις που απαιτούνται για τη μελέτη των παραμορφώσεων στο χώρο των τριών διαστάσεων.



Σχήμα 2-1 : Δισδιάστατο σύστημα αναφοράς

Scheme 2-1 : 2-Dimensional reference system

Στο παραπάνω πνεύμα και σε ένα δισδιάστατο σύστημα αναφοράς (x_1, x_2) με το πρώτο άξονα να δείχνει στην Ανατολή και το δεύτερο στο Βορρά, όπως σημειώνεται στο Σχήμα 2-1, η σχέση (2.4) λαμβάνει την παρακάτω μορφή :

$$\begin{bmatrix} u_1(x_2) \\ u_2(x_2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_1(x_1) \\ u_2(x_1) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} & \varepsilon_{12} \\ \varepsilon_{21} & \varepsilon_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dx_1 \\ dx_2 \end{bmatrix}$$

ή

$$\begin{bmatrix} u_1(x_2) \\ u_2(x_2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_1(x_1) \\ u_2(x_1) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_{11} & e_{12} \\ e_{21} & e_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dx_1 \\ dx_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & \omega \\ -\omega & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dx_1 \\ dx_2 \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

2.2.4. Οι παράμετροι του τανυστή παραμόρφωσης

Όπως ήδη αναφέρθηκε προηγουμένως ο τανυστής μετατόπισης μπορεί να αναλυθεί σε άθροισμα δύο τανυστών, ενός συμμετρικού (τανυστής παραμόρφωσης) και ενός αντισυμμετρικού (τανυστής περιστροφής). Για το πλήρη προσδιορισμό του δε στο χώρο των δύο διαστάσεων είναι προφανές ότι χρειάζονται συνολικά τέσσερις παράμετροι.

Τρεις διαφορετικές προσεγγίσεις είναι διαθέσιμες για τον προσδιορισμό του τανυστή παραμόρφωσης η προσέγγιση των μεγεθών κλίσης (gradient), των ιδιοτιμών-ιδιοδιανυσμάτων (eigenvalue-eigenvector) και των μηχανικών παραμέτρων (engineering) (Feigl, 1991).

Η πρώτη προσέγγιση απαιτεί τον πλήρη προσδιορισμό των στοιχείων των πινάκων της σχέσης (2.7), δηλαδή των $(e_{11}, e_{22}, e_{12}, \omega)$ αφού $e_{12} = e_{21}$. Η δεύτερη προσέγγιση βασίζεται στο γεγονός ότι για κάθε παραμόρφωση υπάρχει ένα σύστημα συντεταγμένων στο οποίο δεν υφίστανται διατμητικές παραμορφώσεις παρά μόνο κανονικές ή ομοαξονικές του συστήματος συντεταγμένων.

Οι παραμορφώσεις αυτές (e_1, e_2) , που ονομάζονται και κύριες παραμορφώσεις (principal strains), έχουν τιμές τις ιδιοτιμές του πίνακα e_{ij} ενώ οι άξονες του συστήματος συντεταγμένων (principal axes) είναι τα ιδιοδιανύσματα του ίδιου πίνακα.

Στη προσέγγιση αυτή απαιτείται, πέραν του προσδιορισμού των κύριων παραμορφώσεων (e_1, e_2) και της γωνίας περιστροφής ω , να υπολογιστεί επιπλέον η γωνία θ που σχηματίζει ο κύριος άξονας e_1 με τον αρχικό άξονα x_2 (Borράς) ώστε να ικανοποιηθεί και πάλι η απαίτηση των τεσσάρων παραμέτρων $(e_1, e_2, \theta, \omega)$.

Η τρίτη προσέγγιση (μηχανικών παραμέτρων) προϋποθέτει τον προσδιορισμό των ακόλουθων παραμέτρων $(\gamma_1, \gamma_2, \Delta, \omega)$, οι οποίες και δεν είναι τίποτα άλλο παρά γραμμικοί συνδυασμοί των στοιχείων του τανυστή κλίσης μετατόπισης (Schneider, 1982):

$$\gamma_1 = \varepsilon_{11} - \varepsilon_{22} = e_{11} - e_{22} \quad (2.8)$$

$$\gamma_2 = \varepsilon_{12} + \varepsilon_{21} = 2e_{12} \quad (2.9)$$

$$\Delta = \varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} = e_{11} + e_{22} \quad (2.10)$$

$$\omega = \frac{1}{2}(\varepsilon_{12} - \varepsilon_{21}) \quad (2.11)$$

Η παράμετρος Δ ονομάζεται διαστολή (dilatation) και εκφράζει την αλλαγή στο εμβαδό (2 διαστάσεις) ανά μονάδα εμβαδού (ή στον όγκο (3-διαστάσεις) ανά μονάδα όγκου). Όπως φαίνεται και από την σχέση (2.10) η διαστολή δεν είναι τίποτα άλλο παρά το ίχνος (trace) του πίνακα που ορίζει τον τανυστή παραμόρφωσης και δεδομένου ότι είναι ανεξάρτητη του συστήματος συντεταγμένων που χρησιμοποιείται αποτελεί μια αναλλοίωτη ποσότητα αυτού.

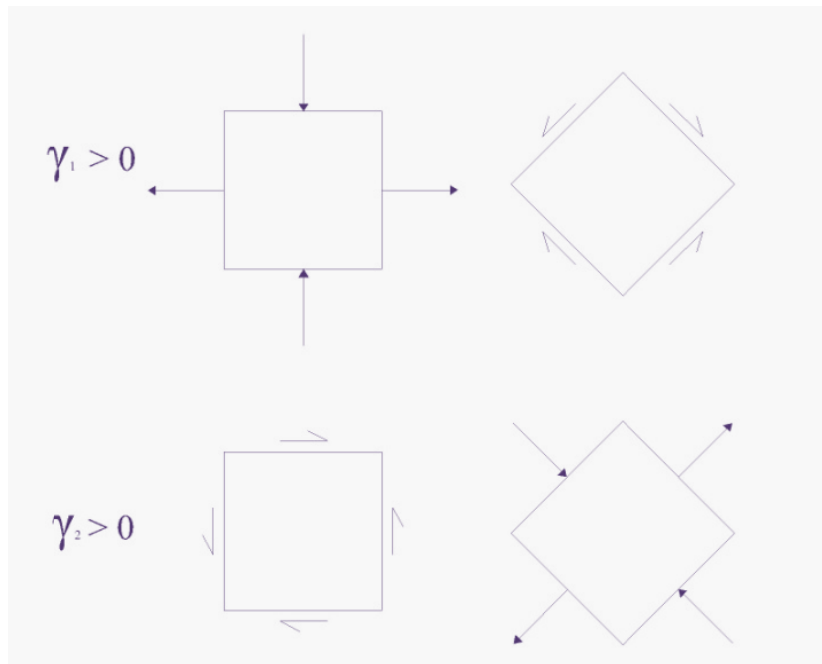
Οι δύο παράμετροι (γ_1, γ_2) αναφέρονται και ως διατμητικές παραμορφώσεις (shear components of strains) (Frank, 1966) και εκφράζουν την αλλαγή στη γωνία δύο διευθύνσεων, που αρχικά ήταν κάθετες μεταξύ τους. Πιο συγκεκριμένα (Frank, 1966), (Sauber, 1988) και (Feigl, 1991) :

- η παράμετρος γ_1 μετρά τη γωνιακή αλλαγή δύο διευθύνσεων, που αρχικά είχαν κατεύθυνση BA και BΔ

Η γωνιακή αυτή αλλαγή μπορεί να οφείλεται σε καθαρή διάτμηση (pure shear) λόγω διαστολής κατά την διεύθυνση A-Δ και συστολής κατά την διεύθυνση B-N ή σε απλή διάτμηση (simple shear) λόγω δεξιόπλευρης κίνησης ρήγματος που έχει διεύθυνση BΔ-NA (ή αριστερόπλευρης κίνησης ρήγματος που έχει διεύθυνση BA-NΔ)

- η παράμετρος γ_2 μετρά τη γωνιακή αλλαγή δύο διευθύνσεων, που αρχικά είχαν κατεύθυνση B και A

Η γωνιακή αυτή αλλαγή μπορεί να οφείλεται σε καθαρή διάτμηση (pure shear) λόγω διαστολής κατά την διεύθυνση BA-NΔ και συστολής κατά την διεύθυνση BΔ-NA ή σε απλή διάτμηση (simple shear) λόγω δεξιόπλευρης κίνησης ρήγματος που έχει διεύθυνση A-Δ (ή αριστερόπλευρης κίνησης ρήγματος που έχει διεύθυνση B-N)



Σχήμα 2-2 : Οι διατμητικές παραμορφώσεις γ_1 και γ_2

Scheme 2-2 : The engineering shear strains γ_1 και γ_2

Όλες οι παραπάνω προσεγγίσεις είναι ισοδύναμες και παρέχουν την ίδια ακριβώς πληροφορία για την παραμόρφωση μιας περιοχής. Κάθε μια από αυτές όμως έχει τα δικά της πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα που κρίνουν την καταλληλότητα χρήσης της ανάλογα με την περίπτωση.

Όπως σημειώνει ο Feigl (Feigl, 1991) η προσέγγιση των μεγεθών κλίσης είναι χρήσιμη στην εκτέλεση υπολογισμών αλλά σπάνια είναι πλήρως προσδιορίσιμες όλες οι παράμετροι.

Οι δε προσεγγίσεις των ιδιοτιμών-ιδιοδιανυσμάτων και των μηχανικών παραμέτρων εδράζουν την χρησιμότητά τους στο γεγονός ότι παρέχουν την δυνατότητα εξέτασης της γωνίας περιστροφής, η οποία στις περισσότερες περιπτώσεις δε μπορεί να προσδιοριστεί από τα διαθέσιμα δεδομένα, ως ξεχωριστής παράμετρο με αποτέλεσμα να μπορεί να αποσυνδεθεί από τη μελέτη των παραμορφώσεων της περιοχής.

Στη πράξη είναι φανερό ότι τα διαθέσιμα δεδομένα είναι εκείνα που θα οδηγήσουν τον ερευνητή στην επιλογή της πλέον χρήσιμης προσέγγισης για τον προσδιορισμό των παραμέτρων του ταυστή παραμόρφωσης αλλά και του αριθμού και του είδους των παραμέτρων, οι οποίες μπορούν κάθε φορά να υπολογισθούν.

Έτσι στη περίπτωση που στην διάθεση του ερευνητή βρίσκονται δεδομένα από ΔΣΕ είναι δυνατό να υπολογιστεί, με κατάλληλες προϋποθέσεις, τόσο η μετάθεση όσο και η παραμόρφωση αλλά και η περιστροφή και άρα το σύνολο των παραμέτρων του τανυστή μετατόπισης κλίσης.

Στη περίπτωση όμως που είναι διαθέσιμες μόνο μετρήσεις τριπλευρισμού μόνο οι παράμετροι του τανυστή παραμόρφωσης μπορούν να προσδιοριστούν με αποτέλεσμα να μη μπορεί να γίνει καμία εκτίμηση για τη περιστροφή της περιοχής.

Αν δε είναι διαθέσιμες μόνο γωνιομετρήσεις τότε μπορεί να γίνει μόνο προσδιορισμός των διατμητικών τάσεων και άρα η τρίτη προσέγγιση προσδιορισμού των παραμέτρων του τανυστή παραμόρφωσης είναι μονόδρομος.

2.3. Μεθοδολογίες Προσδιορισμού Παραμέτρων Παραμόρφωσης

Στη διεθνή βιβλιογραφία εντοπίζονται δύο μεθοδολογίες για τον προσδιορισμό των διαφόρων παραμέτρων παραμόρφωσης (καταπόνησης και περιστροφής), από γεωδαιτικές μετρήσεις, που είναι γνωστές ως η μέθοδος των συντεταγμένων (coordination method) και η μέθοδος των παρατηρήσεων (observation method) (Frank, 1966), (Pope, 1966), (Dermanis and Livieratos, 1983) και (Βέης et al., 1992).

Και οι δύο μέθοδοι απαιτούν την ύπαρξη στη περιοχή μελέτης σημείων, για τα οποία υπάρχει διαθέσιμη γεωδαιτική πληροφορία (μετρήσεις γωνιών, αποστάσεων, αζιμούθιων ή προσδιορισμένες συντεταγμένες) για δύο ή περισσότερες χρονικές περιόδους.

2.3.1. Η μέθοδος των συντεταγμένων

Η μέθοδος των συντεταγμένων βασίζεται στη σύγκριση των συντεταγμένων, που έχουν προέλθει από συνόρθωση του δικτύου για κάθε χρονική περίοδο, των σημείων της περιοχής και στον προσδιορισμό για κάθε ένα σημείο του διανύσματος μετάθεσης du_i .

Χρησιμοποιώντας το διάνυσμα αυτό η σχέση (2.4) μπορεί να γίνει :

$$\delta u_i = du_i + e_{ij}dx_j + \omega_{ij}dx_j \text{ με } i, j = 1,2,3 \quad (2.12)$$

Η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων της μεθόδου αυτής είναι άμεσα συνδεδεμένη με την αξιοπιστία τόσο των πρωτογενών μετρήσεων και δεδομένων όσο και των συνορθώσεων των δικτύων κατά τις δύο εξεταζόμενες χρονικές περιόδους. Βασικό ρόλο διαδραματίζουν τόσο το χρονικό εύρος διεξαγωγής των μετρήσεων όσο και τα επιλεγόμενα σταθερά σημεία συνόρθωσης.

Η συνόρθωση του δικτύου, για κάθε περίοδο, γίνεται χρησιμοποιώντας το σύνολο των μετρήσεων με τη παραδοχή ότι αυτές έγιναν την ίδια εποχή. Η παραδοχή αυτή, ιδίως για τις ιστορικές μετρήσεις γωνιών πρώτης τάξεως, δεν ισχύει αφού αυτές για μεγάλη περιοχή και δεδομένων των μεγάλων αποστάσεων μεταξύ των σταθμών μέτρησης μπορεί να εκτείνονται σε δύο ή περισσότερα χρόνια.

Είναι λοιπόν φανερό ότι η ερμηνεία των αποτελεσμάτων της σύγκρισης των συντεταγμένων των δύο εποχών, υπόκειται στην αβεβαιότητα που εισάγουν τυχόν επιδράσεις που έλαβαν χώρα κατά την χρονική διάρκεια των μετρήσεων (Frank, 1966) .

Βασικό ρόλο στις διεργασίες της συγκεκριμένης προσέγγισης διαδραματίζει επίσης η επιλογή των σταθερών σημείων (δύο σημεία ή ένα σημείο, μια γωνία διεύθυνσης ή/και μια απόσταση) τα οποία χρησιμοποιούνται στη συνόρθωση των δικτύων και διασφαλίζουν ότι τα αποτελέσματα αυτών ανήκουν στο ίδιο σύστημα αναφοράς και άρα μπορούν να συγκριθούν άμεσα.

Τα ως άνω σημεία μπορούν να επιλεγούν είτε σε μια απομακρυσμένη περιοχή από τη περιοχή μελέτης, η οποία και μπορεί να θεωρηθεί ανεπηρέαστη από τις επιδράσεις που δέχεται η περιοχή μελέτης, είτε εντός της περιοχής μελέτης (Frank, 1966).

Στη πρώτη περίπτωση ευνόητο είναι ότι πρέπει να υπάρχουν διαθέσιμες μετρήσεις σύνδεσης των επιλεγόμενων σημείων με σημεία της περιοχής μελέτης ενώ όπως είναι επίσης φανερό (Frank, 1966) μεταφέρεται το σύνολο των σφαλμάτων των διαθέσιμων γεωδαιτικών μετρήσεων (τριγωνισμού-τριπλευρισμού) στη περιοχή μελέτης.

Στη δεύτερη περίπτωση απαιτείται προσοχή στην επιλογή των σταθερών σημείων (ή του σταθερού σημείου και της γωνία διεύθυνσης) αναφορικά με την θέση τους ως προς τις χωρικές (ρήγματα κα.) και χρονικές (σεισμοί) ασυνέχειες της περιοχής μελέτης, αφού οι τελευταίες είναι προφανές ότι επιδρούν σημαντικά στη διαχρονική συμπεριφορά των σημείων αυτών.

Όπως σημειώνεται και στο Βέης et al. (Βέης et al., 1992), στο οποίο δίνεται και μια εναλλακτική προσέγγιση συνόρθωσης όπου δεν χρησιμοποιούνται σταθερά σημεία αλλά γίνεται χρήση της Μεθόδου των Ελαχίστων Τετραγώνων (MET) για τον προσδιορισμό της στροφής και της μετατόπισης που καταλήγουν σε μια μηδενική μέση μετάθεση για το δίκτυο.

Στη περίπτωση αυτή μπορεί να προσδιοριστεί ο πλήρης τανυστής παραμόρφωσης (καταπόνηση και περιστροφή) όχι όμως για το σύνολο της περιοχής αλλά για δεδομένες υπό-περιοχές αυτής.

2.3.2. Η μέθοδος των παρατηρήσεων

Η μέθοδος των παρατηρήσεων σε αντίθεση με τη μέθοδο των συντεταγμένων, χρησιμοποιεί τις πρωτογενείς μετρήσεις (γωνιών και αποστάσεων) που είναι διαθέσιμες σε κάθε περίοδο για να προσδιορίσει τις παραμέτρους του τανυστή παραμόρφωσης που δύνανται να υπολογιστούν κάθε φορά.

Στη περίπτωση αυτή και ανάλογα με τις διαθέσιμες μετρήσεις δομούνται εξισώσεις της μορφής (Frank, 1966), (Pope, 1966) και (Βέης et al., 1992) :

$$\delta\alpha = \frac{1}{2}\sin 2a \gamma_1 + \frac{1}{2}\cos 2a \gamma_2 + \omega \quad (2.13)$$

και

$$\frac{\delta s}{s} = -\frac{1}{2}\cos 2a \gamma_1 + \frac{1}{2}\sin 2a \gamma_2 + \frac{1}{2}\Delta \quad (2.14)$$

όπου a η γωνία διεύθυνσης του διανύσματος που παραμορφώνεται, s το αρχικό του μήκος και δs και $\delta\alpha$ η γραμμική και η γωνιακή καταπόνηση αυτού.

Από τις παραπάνω σχέσεις επιβεβαιώνεται η διαπίστωση, που εκφράστηκε προηγουμένως, ότι από γωνιακά δεδομένα μετρήσεων μπορεί να εξαχθεί πληροφορία για την διατμητική παραμόρφωση αλλά δε μπορεί να γίνει καμία εκτίμηση για την γραμμική παραμόρφωση ή για τη περιστροφή.

Προφανώς για να καταστεί δυνατός ο προσδιορισμός της γωνίας περιστροφής απαιτείται η γνώση μιας αξιόπιστης εξωτερικής ή συμβατικά υιοθετούμενης εσωτερικής του δικτύου διεύθυνσης αναφοράς ενώ αντίστοιχα της διαστολής η γνώση μιας απόστασης (Frank, 1966).

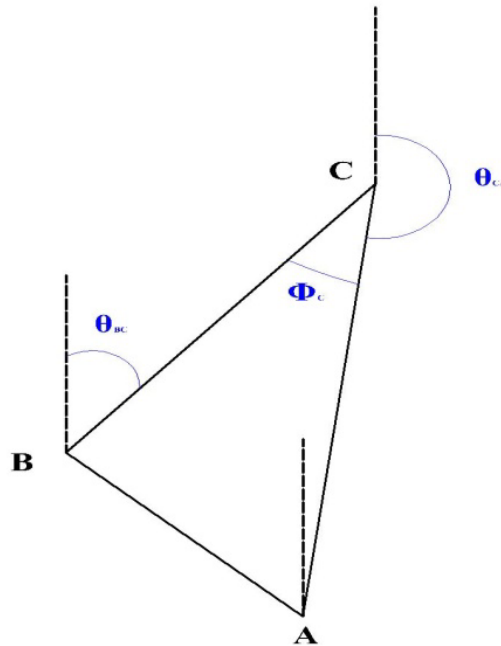
Πρακτικά δηλαδή τόσο η διαστολή όσο και η γωνία περιστροφής μπορούν να προσδιοριστούν μόνο αν η περιοχή μπορεί να συνδεθεί, μέσω μετρήσεων, με ένα σταθερό σε θέση και προσανατολισμό σύστημα αναφοράς (Βέης et al., 1992).

2.4. Η Μέθοδος του F.C. Frank

Ο F. C. Frank παρουσίασε το 1966 (Frank, 1966) μια μεθοδολογία προσδιορισμού των παραμέτρων παραμόρφωσης γ_1 και γ_2 , μέσω της χρήσης επαναλαμβανόμενων μετρήσεων τριγωνισμού.

Η προτεινόμενη από τον Frank μέθοδος βασίζεται στην υπόθεση ότι η παραμόρφωση σε μια περιοχή ενός γεωδαιτικού τριγώνου² είναι ομοιόμορφη. Έτσι αν υποτεθεί ένα τέτοιο τρίγωνο, το οποίο απεικονίζεται στο Σχήμα 2-3, τότε κάθε γωνία του τριγώνου μπορεί να οριστεί από την διαφορά των γωνιών διευθύνσεων των δύο πλευρών που την ορίζουν, για παράδειγμα :

$$\Phi_c = \theta_{BC} - \theta_{CA} + 180 \quad (2.15)$$



Σχήμα 2-3 : Γεωδαιτικός τριγωνισμός. Μετρήσεις και συμβολισμοί

Scheme 2-3 : Geodetic triangulation. Measurements and notations

² Δηλαδή μια περιοχή που ορίζεται από τρία σημεία στα οποία έχουν πραγματοποιηθεί γεωδαιτικές μετρήσεις (τριγωνισμού-τριπλευρισμού) μεταξύ τους.

Αν συνδυαστούν οι σχέσεις (2.13) και (2.15) προκύπτει για κάθε γωνία του τριγώνου μια σχέση της μορφής :

$$\delta\Phi_C = \frac{1}{2} \gamma_1(\sin 2\theta_{BC} - \sin 2\theta_{CA}) + \frac{1}{2} \gamma_2(\cos 2\theta_{BC} - \cos 2\theta_{CA}) \quad (2.16)$$

Αν ισχύει η συνθήκη $\delta\Phi_A + \delta\Phi_B + \delta\Phi_C = 0$, τότε με χρήση και μόνο δύο εκ των τριών εξισώσεων της μορφής (2.16) που ισχύουν σε κάθε τρίγωνο είναι δυνατό να υπολογιστούν οι παράμετροι γ_1 και γ_2 .

Σε διαφορετική περίπτωση, που μπορεί να οφείλεται κυρίως σε κινήσεις της γήινης επιφάνειας κατά την διάρκεια των μετρήσεων μπορεί να χρησιμοποιηθεί η MET ώστε οι τρεις εξισώσεις της μορφής (2.16) να ικανοποιούν την συνθήκη (Frank, 1966).

Η μέθοδος του Frank ανήκει, όπως φαίνεται, στη δεύτερη κατηγορία προσεγγίσεων προσδιορισμού παραμέτρων παραμόρφωσης με χρήση γεωδαιτικών μετρήσεων και παρουσιάζει ορισμένα βασικά πλεονεκτήματα, τα οποία την κάνουν ιδιαίτερα χρήσιμη και ελκυστική για πολλούς μελετητές.

Ως βασικότερα πλεονεκτήματα της προσέγγισης του Frank μπορούν να αναφερθούν τα κάτωθι (μερικώς από Frank, 1966) :

- Περιορίζει την ανάλυση σε μια μικρή περιοχή (επιφάνεια ενός τριγώνου) με αποτέλεσμα η πιθανότητα εισαγωγής λάθους (λόγω μη ταυτόχρονης μέτρησης όλων των γωνιών, λόγω λανθασμένης μέτρησης κτλ) να είναι περιορισμένη
- Ο περιορισμός της ανάλυσης σε μια μικρή περιοχή δίνει την δυνατότητα περισσότερων επιλογών ανάλυσης και ερμηνείας των αποτελεσμάτων και συσχέτισής τους με χωρικές και χρονικές ασυνέχειες της περιοχής μελέτης
- Επιτρέπει τη χρήση ιστορικών γεωδαιτικών μετρήσεων (τριγωνισμού) για την εξαγωγή πληροφορίας σχετικά με τις παραμορφώσεις μιας περιοχής, οι οποίες μετρήσεις δεν θα ήταν από μόνες τους αξιοποιήσιμες από άλλες μεθόδους

Τέλος πρέπει να αναφερθεί ότι κατά την εφαρμογή της μεθόδου τα δεδομένα μετρήσεων καλό είναι να βρίσκονται όσο πιο κοντά γίνεται στα πρωτογενή δεδομένα ώστε να αποφεύγονται οι επιδράσεις των διαφόρων διορθώσεων στα αποτελέσματα της ανάλυσης (Schneider, 1982).

Όπως επίσης αναφέρεται και στο (Pope, 1966) δεν έχει σημασία αν χρησιμοποιούνται σφαιρικές γωνίες ή οι διορθωμένες αυτών, αφού η σφαιρική υπεροχή για κάθε τρίγωνο παραμένει σταθερή και δεν αλλάζει μεταξύ των δύο περιόδων μετρήσεων με αποτέλεσμα να απαλείφεται κατά την χρήση των διαφορών γωνιών.

2.5. Ανακεφαλαίωση

2.5.1. Γενικά στοιχεία

Οι γεωδαιτικές μετρήσεις, οποιασδήποτε μορφής (τριγωνισμός, τριπλευρισμός, δορυφορικές μετρήσεις κτλ) είναι μια ιδιαίτερα χρήσιμη πηγή δεδομένων για τη μελέτη της συμπεριφοράς της γήινης επιφάνειας.

Είτε χρησιμοποιούμενα ανεξάρτητα είτε σε συνδυασμό με άλλη πληροφορία (προερχόμενη πχ από σειсмоγράφους, παλαιομαγνητικές μετρήσεις, ανάλυση γεωμορφολογικών χαρακτηριστικών κα) τα αποτελέσματα της επεξεργασίας και ανάλυσης των παραπάνω μετρήσεων μπορούν να δώσουν πολύτιμη γνώση για την τεκτονική συμπεριφορά μιας περιοχής.

Οι γεωδαιτικές μετρήσεις μπορούν να δώσουν πληροφορία είτε με τη μορφή διαγραμμάτων μετατόπισης ή διαγραμμάτων ταχυτήτων μετακίνησης σημείων είτε με τη μορφή τανυστών παραμόρφωσης περιοχών.

Κάθε μια από τις παραπάνω προσεγγίσεις έχει τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της καθώς και την καταλληλότητα εφαρμογής της. Στη περίπτωση των ιστορικών μετρήσεων τριγωνισμού, όπως έχει αποδειχτεί και στη πράξη μέσω της επιλογής της από τους περισσότερους μελετητές, η προσέγγιση των τανυστών παραμόρφωσης είναι η πλέον ενδεδειγμένη.

Στη βάση αυτή έχουν αναπτυχθεί αρκετές θεωρίες και μεθοδολογίες που οδηγούν στον προσδιορισμό των μέγιστων δυνατών παραμέτρων παραμόρφωσης που επιτρέπουν κάθε φορά οι διαθέσιμες γεωδαιτικές μετρήσεις.

2.5.2. Μελέτες και έρευνες που χρησιμοποιούν τους τανυστές παραμόρφωσης για να προσδιορίσουν τις παραμορφώσεις μιας περιοχής

Στην διεθνή βιβλιογραφία υπάρχει μια πλειάδα μελετών, που χρησιμοποιούν τη μέθοδο των τανυστών παραμόρφωσης για να προσδιορίσουν τις παραμορφώσεις μιας περιοχής με την χρήση γεωδαιτικών μετρήσεων.

Το σύνολο σχεδόν των μελετών ακολουθούν όσα αναφέρθηκαν στις προηγούμενες ενότητες για τον προσδιορισμό των παραμέτρων παραμόρφωσης, οι οποίοι είναι δυνατόν να εξαχθούν, σε κάθε περίπτωση, από τα διαθέσιμα στον ερευνητή δεδομένα μετρήσεων. Στη συνέχεια θα αναφερθούν ορισμένες από αυτές με κύριο κριτήριο επιλογής την διαφοροποίησή τους στη προσέγγιση που ακολούθησαν στην απεικόνιση και ερμηνεία των παραμέτρων παραμόρφωσης.

Οι Hunstad et al (Hunstad et al., 2003) υπολόγισαν τις παραμορφώσεις της ιταλικής χερσονήσου χρησιμοποιώντας γεωδαιτικές μετρήσεις για δύο χρονικές περιόδους. Τη περίοδο 1869-1881 (μέση χρονολογία περιόδου 1875), για την οποία υπήρχαν διαθέσιμες μόνο μετρήσεις γωνιών και τη περίοδο 2001-2002, κατά την οποία πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις με ΔΣΕ - GPS σε 51 από τα 203 αρχικά βάθρα της πρώτης περιόδου.

Η περιοχή μελέτης χωρίστηκε σε υπό-περιοχές, που αντιστοιχούσαν στις τρεις κύριες ζώνες της Ιταλικής χερσονήσου, ενώ επιλέχτηκε σύστημα αναφοράς τέτοιο ώστε ο άξονας x_1 να είναι κάθετος στη ζώνη των Απεννίνων και ο άξονας x_2 να είναι παράλληλος με αυτή.

Η επίλυση και συνόρθωση των δικτύων και των δύο περιόδων έγινε κρατώντας σταθερά δυο σημεία στις συντεταγμένες της περιόδου 2001. Δεδομένης της έλλειψης πληροφορίας κλίμακας και προσανατολισμού για τη πρώτη περίοδο από τη παραπάνω διαδικασία υπολογίστηκαν μόνο οι ρυθμοί μεταβολής των διατμητικών παραμορφώσεων (γ_1, γ_2) και η διεύθυνση (θ) του κύριου άξονα μέγιστης παραμόρφωσης (most extensional principal strain axis).

Ο υπολογισμός των παραμέτρων έγινε με χρήση των εξισώσεων, που ακολουθούν :

$$\gamma_1 = e_{11} - e_{22}$$

$$\gamma_2 = 2e_{12}$$

$$\tan 2\theta = \frac{\gamma_2}{\gamma_1}$$

Η απεικόνιση των αποτελεσμάτων της μελέτης, για κάθε υπό-περιοχή, έγινε με τη μορφή ράβδων το μέγεθος των οποίων αντιστοιχούσε στη τιμή του γ_1 ενώ η διεύθυνση τους αντιστοιχούσε στη διεύθυνση του κύριου άξονα μέγιστης παραμόρφωσης για θετικό γ_1 ή στη διεύθυνση του κύριου άξονα ελάχιστης παραμόρφωσης για αρνητικό γ_1 αντίστοιχα.

Οι Ferhat et al. (Ferhat et al., 1998) υπολόγισαν τις παραμορφώσεις της ΝΑ Γαλλίας χρησιμοποιώντας επίσης δεδομένα για δύο χρονικές περιόδους. Η πρώτη περίοδος περιλάμβανε δεδομένα τριγωνισμού πρώτης και δευτέρας τάξης κυρίως των εποχών 1947-1952 και 1981-1983 και μερικώς των ετών 1887 και 1931. Η δεύτερη περίοδος περιλάμβανε μετρήσεις ΔΣΕ – GPS δύο διαφορετικών εποχών (1993 και 1994).

Εξαιτίας πάλι της έλλειψης πληροφορίας κλίμακας και προσανατολισμού για τη πρώτη περίοδο μελέτης υπολογίστηκαν ομοίως οι ρυθμοί μεταβολής των διατμητικών παραμορφώσεων (γ_1, γ_2) ενώ αυτή τη φορά προσδιορίστηκε η διεύθυνση (θ) του κύριου άξονα ελάχιστης παραμόρφωσης (most compressive principal strain axis). Προσδιορίστηκαν επίσης ο ρυθμός μεταβολής της ολικής διάτμησης $\dot{\gamma}$ και η γωνία διεύθυνσης ψ του κάθετου επίπεδου στο οποίο αυτή λαμβάνει χώρα.

Ο υπολογισμός των παραπάνω παραμέτρων έγινε με χρήση των εξισώσεων, που ακολουθούν :

$$\dot{\gamma} = \sqrt{\dot{\gamma}_1^2 + \dot{\gamma}_2^2}$$

$$\theta = \psi - 45^\circ$$

$$\tan 2\psi = \frac{\gamma_1}{\gamma_2}$$

$$\theta = 0.5 \arctan \left(-\frac{\gamma_2}{\gamma_1} \right) \text{ εάν } \gamma_1 > 0$$

$$\theta = 0.5 \arctan \left(-\frac{\gamma_2}{\gamma_1} \right) - \frac{\pi}{2} \text{ εάν } \gamma_1 < 0 \text{ και } \gamma_2 > 0$$

$$\theta = 0.5 \arctan \left(-\frac{\gamma_2}{\gamma_1} \right) + \frac{\pi}{2} \text{ εάν } \gamma_1 < 0 \text{ και } \gamma_2 < 0$$

Η απεικόνιση των αποτελεσμάτων έγινε για κάθε τρίγωνο της περιοχής μελέτης με ράβδο, το μέγεθος της οποίας αντιστοιχούσε στο μέγεθος της ολικής διάτμησης και η διεύθυνση της στην διεύθυνση του κύριου άξονα ελάχιστης παραμόρφωσης, η οποία σύμφωνα με τους σεισμολόγους αντιστοιχεί στο P άξονα, που υπολογίζεται από τα σεισμικά δεδομένα (Ferhat et al., 1998).

Την ίδια προσέγγιση προσδιορισμού των στοιχείων των τανυστών παραμόρφωσης με τους Ferhat et al. ακολούθησαν και οι Calais et al. (Calais et al., 2000), οι οποίοι επεξεργάστηκαν και συνδύασαν δεδομένα τριγωνισμού 1^{ης} και 2ας τάξης (διαθέσιμα για το έτος 1948) καθώς και δεδομένα ΔΣΕ για το έτος 1998 για να υπολογίσουν τις εδαφικές παραμορφώσεις στη νότια περιοχή των Δυτικών Άλπεων.

Για την απεικόνιση των αποτελεσμάτων χρησιμοποίησαν επίσης ράβδους με διεύθυνση την γωνία θ και μέγεθος το ρυθμό μεταβολής της ολικής διάτμησης. Μια τέτοια απεικόνιση έχει το πλεονέκτημα ότι είναι εύκολα αναγνώσιμη και άμεσα συγκρίσιμη με τα αποτελέσματα της ανάλυσης των σεισμολογικών δεδομένων (αφού αντιστοιχεί στον P άξονα αυτών) όμως παράλληλα έχει το μειονέκτημα ότι δε μπορεί να συνεισφέρει στο διαχωρισμό της καθαρής (pure) από την απλή (simple) διάτμηση (Calais et al., 2000).

Το 1997 οι Bawden et al. (Bawden et al., 1997) χρησιμοποίησαν διαχρονικά γεωδαιτικά δεδομένα, διαθέσιμα για την ευρύτερη περιοχή του ρήγματος White Wolf-Garlock για να προσδιορίσουν τις χρονικές και χωρικές μεταβολές των ρυθμών παραμόρφωσης στην ευρύτερη περιοχή.

Πιο συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκαν διαχρονικά δεδομένα τριγωνισμού (1926-1974), τριπλευρισμού (1963-1979 και 1975-1989) και μετρήσεις ΔΣΕ για το έτος 1993, για να υπολογιστούν οι τανυστές παραμόρφωσης με την τροποποιημένη (extended) μέθοδο του Frank, όπως προτάθηκε από τον Prescott (Prescott, 1976) και σύμφωνα με τους κάτωθι τύπους :

$$\gamma_1 = e_{11} - e_{22}$$

$$\gamma_2 = 2e_{12}$$

$$\dot{\gamma} = \sqrt{\dot{\gamma}_1^2 + \dot{\gamma}_2^2}$$

$$\theta = 0.5 \arctan \left(-\frac{\gamma_2}{\gamma_1} \right)$$

όπου θ η γωνία διεύθυνσης του κύριου άξονα μέγιστης παραμόρφωσης.

Αυτό που παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον στην συγκεκριμένη ερευνητική εργασία ήταν προσπάθεια συσχετισμού των μεταβολών των τιμών των παραμέτρων παραμόρφωσης με το σεισμικό γεγονός ($M=7.8$), το οποίο έλαβε χώρα στη μέση (1952) περίπου της συνολικής περιόδου ανάλυσης (1926-1993).

Στο πιο πάνω πλαίσιο οι Bawden et al. διαπίστωσαν ότι στις περιοχές κοντά στο ρήγμα ο ρυθμός μεταβολής της ολικής διάτμησης ήταν υψηλός τόσο την εποχή ανάλυσης, που προηγούνταν του σεισμικού γεγονότος όσο και την αντίστοιχη αμέσως μετά το γεγονός και μάλιστα σε αυτή τη δεύτερη περίοδο παρατηρήθηκε και η μεγαλύτερή της τιμή. Άρχισε δε ο ρυθμός μεταβολής να παρουσιάζει πτωτική τάση μια δεκαετία μετά το σεισμικό γεγονός.

Τέλος στο σημείο αυτό αξίζει να αναφερθεί η εργασία των Prescott et al. (Prescott, Savage and Kinoshita, 1979), στην οποία παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της επεξεργασίας και ανάλυσης δεδομένων τριπλευρισμού με σκοπό τον προσδιορισμό των παραμορφώσεων στις δυτικές ΗΠΑ για τη χρονική περίοδο 1970-1978.

Η παραπάνω εργασία είναι σημαντική για δύο λόγους. Ο πρώτος αφορά την ερμηνεία των αποτελεσμάτων και την σύνδεση τους με τα χαρακτηριστικά των υπό-περιοχών ανάλυσης, για τα οποία ο αναγνώστης παραπέμπεται στην πρωτότυπη εργασία για περαιτέρω ανάλυση.

Ο δεύτερος αφορά το χρησιμοποιούμενο για τον προσδιορισμό των τανυστών παραμόρφωσης τυπολόγιο, το οποίο και αποτελεί πεδίο αναφοράς για πολλές μετέπειτα έρευνες και μελέτες. Πιο συγκεκριμένα οι χρησιμοποιούμενοι από τους Prescott et al. (Prescott, Savage and Kinoshita, 1979) τύποι είναι οι κάτωθι :

$$\gamma_1 = e_{11} - e_{22}$$

$$\gamma_2 = 2e_{12}$$

$$\dot{\gamma} = \sqrt{\dot{\gamma}_1^2 + \dot{\gamma}_2^2}$$

$$\Delta = e_{11} + e_{22}$$

$$\theta = 0.5 \arctan\left(-\frac{\gamma_2}{\gamma_1}\right) = \psi - 45$$

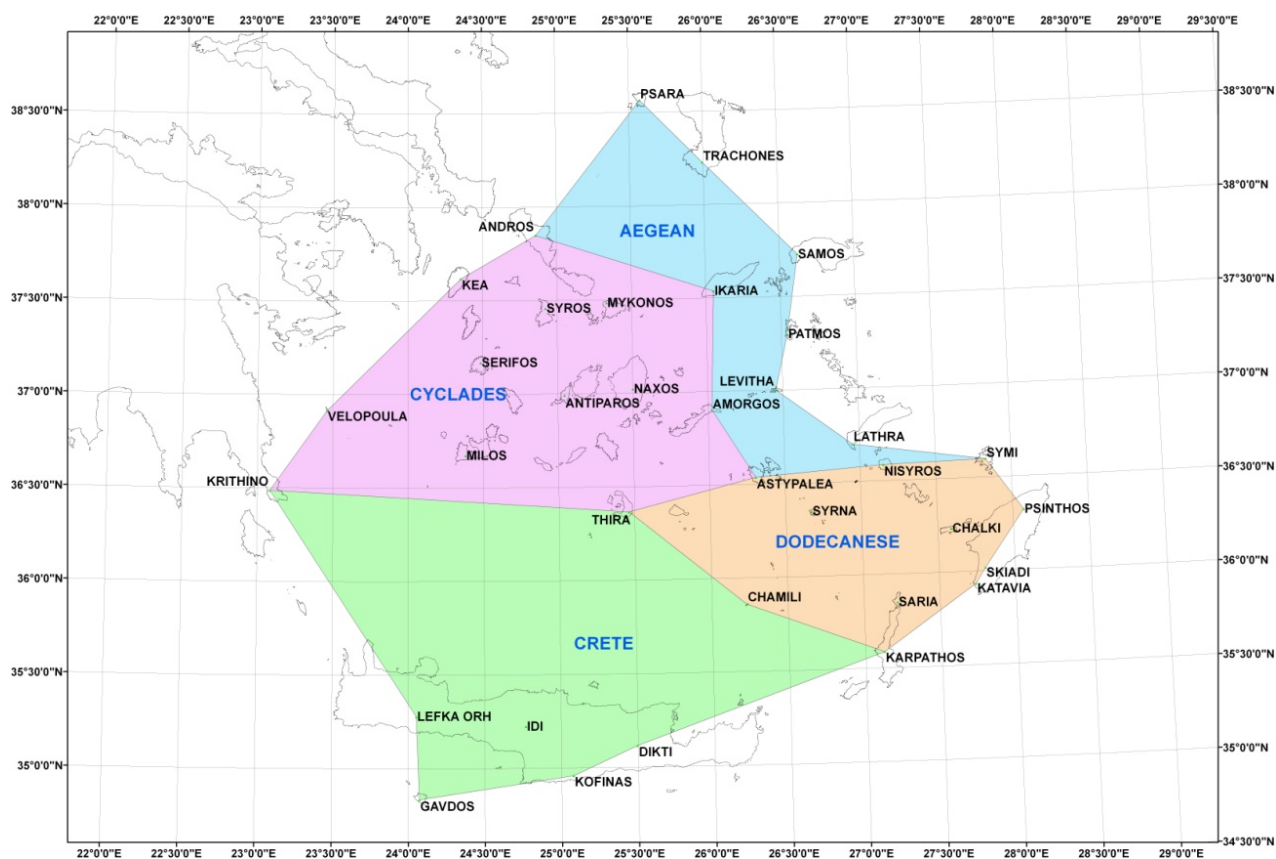
όπου θ η γωνία διεύθυνσης του κύριου άξονα μέγιστης παραμόρφωσης και ψ η γωνία διεύθυνσης στην οποία η δεξιόπλευρη διάτμηση είναι μέγιστη.

3. ΙΣΤΟΡΙΚΑ ΓΕΩΔΑΙΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ

3.1. Εισαγωγικά Στοιχεία

Το συγκεκριμένο κεφάλαιο αποτελεί το βασικότερο κομμάτι της διδακτορικής έρευνας και ασχολείται με την εύρεση, τεκμηρίωση, επεξεργασία και ανάλυση των ιστορικών γεωδαιτικών δεδομένων που είναι διαθέσιμα για την περιοχή μελέτης.

Η περιοχή μελέτης είναι η περιοχή του Νότιο-Ανατολικού Αιγαίου και μπορεί, με βάση τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά κάθε περιοχής αλλά και την διαθεσιμότητα ιστορικών γεωδαιτικών στοιχείων, να καταταμηθεί περαιτέρω σε τέσσερις μεγάλες υπό-περιοχές με ονομασία Κυκλάδες, Αιγαίο (εννοείται η περιοχή του Ανατολικού Αιγαίου), Δωδεκάνησα και Κρήτη.



Εικόνα 3-1 : Η περιοχή μελέτης και οι υπό-περιοχές ανάλυσης

Figure 3-1 : The study area and the analysis sub-regions

Τα ιστορικά γεωδαιτικά δεδομένα περιλαμβάνουν μετρήσεις τριγωνισμού από το αρχείο της ΓΥΣ, που εκτείνονται χρονικά μεταξύ των ετών 1895 και 1982 όχι όμως ενιαία για όλο το δίκτυο, αλλά ανά περιοχές και για διαφορετικές χρονικές περιόδους.

Πιο συγκεκριμένα στις ενότητες ,που ακολουθούν, παρουσιάζονται :

- Ο έλεγχος της προέλευσης και ταυτότητας των ιστορικών γεωδαιτικών δεδομένων, μέσω της περιγραφής της διαδικασίας συλλογής και καταγραφής αυτών
- Η διαδικασία επεξεργασίας και ανάλυσης των δεδομένων, που ακολουθήθηκε για να προκύψει η απαραίτητη πληροφορία
- Τα αποτελέσματα της ως άνω ανάλυσης, τα οποία αποτελούν το κορμό της παρούσας διδακτορικής έρευνας και παράλληλα τη γέφυρα σύνδεσης με τα προηγούμενα κεφάλαια, αφού πάνω σε αυτά βασίζεται το σύνολο των συγκρίσεων και αποτελεσμάτων

3.2. Προέλευση και Ταυτότητα Δεδομένων

Τα δεδομένα γωνιομετρήσεων για τη περιοχή συλλέχθηκαν μετά από έρευνα που διεξήχθη στο ιστορικό αρχείο της Γεωγραφικής Υπηρεσίας Στρατού (ΓΥΣ). Η δε διαδικασία που ακολουθήθηκε για τη συλλογή και τεκμηρίωση των δεδομένων περιλάμβανε τα κάτωθι στάδια :

1. Έρευνα στο ιστορικό αρχείο της ΓΥΣ και συλλογή του συνόλου των εντύπων που περιείχαν δεδομένα μετρήσεων καθώς και κάθε άλλη σχετική πληροφορία για τη περιοχή μελέτης, η οποία θα μπορούσε να φανεί χρήσιμη
2. Έρευνα των ηλεκτρονικών αρχείων της ΓΥΣ και συλλογή των αντίστοιχων ψηφιακών δεδομένων
3. Καταγραφή, τεκμηρίωση, ανάλυση και σύγκριση των τελικά χρησιμοποιούμενων δεδομένων

Τα δύο πρώτα στάδια καθώς επίσης και το τμήμα του τρίτου σταδίου που αναφέρεται στην επεξεργασία (καταγραφή και τεκμηρίωση) των δεδομένων περιγράφονται στο πλαίσιο της παρούσας ενότητας ενώ το τμήμα της ανάλυσης του τρίτου σταδίου παρουσιάζεται διεξοδικά στην ενότητα που ακολουθεί.

3.2.1. Ιστορικά δεδομένα γωνιομετρήσεων για τη περιοχή μελέτης

Σκοπός της υποενότητας αυτής είναι η παράθεση των ενεργειών και βημάτων, που έλαβαν χώρα για τη συλλογή και τεκμηρίωση των ιστορικών δεδομένων γωνιομετρήσεων που αναφέρονται στη περιοχή μελέτης.

Οι μετρήσεις τριγωνισμού έχουν μακρά ιστορία στην Ελλάδα με την απαρχή τους να τοποθετείται χρονικά τη περίοδο 1889-1890, όταν και ιδρύθηκε το «Γεωδαιτικό Απόσπασμα» και άρχισε να εκτελεί γεωδαιτικές εργασίες, υπό την καθοδήγηση του Αυστριακού Αντισυνταγματάρχη H. Hartl.

Μετά την αναχώρηση της αυστριακής αποστολής το σύνολο των γεωδαιτικών εργασιών αναλήφθηκε από το προσωπικό της ΓΥΣ, με τις διάφορες ονομασίες που είχε κατά καιρούς η Υπηρεσία.

Οι γωνιομετρήσεις συνέχισαν να είναι το κύριο εργαλείο τριγωνισμού μέχρι το έτος 1982, όπου και εντοπίζονται οι τελευταίες γεωδαιτικές εργασίες γωνιομετρήσεων μεγάλης κλίμακας και ακριβείας και αρχίζουν να παίρνουν την θέση αυτών άλλες πιο σύγχρονες μέθοδοι μετρήσεων (EDM-Doppler-GPS κα.).

Στη πράξη η ιστορία των γωνιομετρήσεων της περιοχής μελέτης θα μπορούσε να κατηγοριοποιηθεί στις κάτωθι τέσσερις χρονικές περιόδους :

➤ Περίοδος 1893-1896

Τα υπάρχοντα δεδομένα για αυτή τη περίοδο προέρχονται από την εργασία του Αντισυνταγματάρχη H. Hartl (Hartl, 1901) και αφορούν εργασίες που έλαβαν χώρα στην ελληνική επικράτεια κατά την περίοδο που βρισκόταν σε αυτή η Αυστριακή Αποστολή (1888-1896).

Πιο συγκεκριμένα όπως αναφέρει ο Κουτρουβέλης (Κουτρουβέλης, 1977) οι γεωδαιτικές εργασίες στη περιοχή μελέτης για τη περίοδο αυτή έλαβαν χώρα κατά τα έτη 1893-1896.

➤ Περίοδος 1927-1934

Τα δεδομένα της περιόδου αυτής προέρχονται από τον έντυπο Φάκελο με τίτλο «Φάκελος Ιης Τάξης. Βασικά Στοιχεία στο Διεθνές Ελλειψοειδές Hayford».

Ο ως άνω Φάκελος βρίσκεται στο αρχείο της ΓΥΣ και αφορά εργασία της ΓΥΣ που συντάχθηκε στις 21 Μαΐου 1962. Περιέχει δε στοιχεία γωνιομετρήσεων τριγωνομετρικών σταθμών Ιης Τάξης, οι οποίες πραγματοποιήθηκαν προς υποστήριξη εργασιών για τον καλύτερο προσδιορισμό του γήινου ελλειψοειδούς και έλαβαν χώρα υπό την αιγίδα της Διεθνούς Γεωδαιτικής και Γεωφυσικής Επιτροπής.

Πιο συγκεκριμένα οι γεωδαιτικές μετρήσεις για την περιοχή μελέτης πραγματοποιήθηκαν κατά περιόδους για τις μεν Κυκλάδες και τη Κρήτη τα έτη 1929 και 1930 αντίστοιχα (Τάκος, 1989) ενώ για τα νησιά της περιοχής του Αιγαίου (Σάμος, Ικαρία, Ψαρά, Τράχωνες) μεταξύ των ετών 1931-1933 (Κουτρουβέλης, 1977).

Τέλος για τα νησιά Αστυπάλαια, Λεβίθα και Πάτμο έλαβαν χώρα το έτος 1934, κατά την εκτέλεση μετρήσεων ειδικής αποστολής για σύνδεση της Δωδεκανήσου με το ελληνικό δίκτυο (Κουτρουβέλης, 1977).

➤ **Περίοδος 1949-1956**

Τα δεδομένα αυτής της περιόδου προέρχονται από το ηλεκτρονικό αρχείο καταγραφής των γωνιομετρήσεων που διατηρεί η ΓΥΣ και αντιστοιχούν σε μετρήσεις που έλαβαν χώρα για διάφορους λόγους κατά την ευρύτερη περίοδο 1949-1956.

Οι μετρήσεις αυτής της περιόδου ήταν αποσπασματικές και εντάσσονταν σε ένα σχέδιο κάλυψης των κενών του ελληνικού τριγωνομετρικού δικτύου, όπως αυτό διαμορφώθηκε από τις καταστροφές που προκλήθηκαν κατά την διάρκεια του Β Παγκοσμίου Πολέμου καθώς επίσης και από την προσάρτηση υπό την ελληνική κυριαρχία νέων εδαφών (όπως για παράδειγμα η Περιοχή Δωδεκάνησου).

Ενδεικτικά αναφέρεται ότι οι εργασίες που έλαβαν χώρα αυτή τη περίοδο αφορούσαν την σύνδεση των Δωδεκανήσων με το υπόλοιπο ελληνικό δίκτυο (1949-1953) καθώς και την επαναμέτρηση ενός μεγάλου μέρους των νησιών των Κυκλάδων (Τάκος, 1989).

➤ Περίοδος 1975-1982

Το έτος 1962 η ΓΥΣ ξεκίνησε μια νέα προσπάθεια επαναμέτρησης, αναθεώρησης και συντήρησης του τριγωνομετρικού δικτύου της Ελλάδας. Η περίοδος αυτή χαρακτηρίζεται από αυστηρές προδιαγραφές εκτέλεσης και επίλυσης των μετρήσεων τριγωνισμού και σχετίζεται άμεσα με την ανάληψη εκ μέρους της ΓΥΣ του έργου « Χαρτογράφηση της Ελλάδας» σε κλίμακα 1:5000 (Τάκος, 1989).

Πιο συγκεκριμένα οι γωνιομετρήσεις για τη περιοχή μελέτης έλαβαν χώρα για τις μεν Κυκλάδες τα έτη 1975-1976, για τα νησιά του Ανατολικού Αιγαίου το έτος 1975, για τα Δωδεκάνησα τα έτη 1978-1979 και για την Κρήτη το έτος 1978.

Υπάρχουν επίσης διαθέσιμες μετρήσεις για αρκετά από τα τριγωνομετρικά Ιης τάξης της περιοχής των Κυκλάδων και για το έτος 1982, οπότε και πραγματοποιήθηκε η επαναμέτρηση του τριγωνομετρικού δικτύου Ιας τάξης της περιοχής. Το σύνολο δε των δεδομένων της συγκεκριμένης χρονικής περιόδου προέρχεται από επίσημα βιβλιάρια τριγωνομετρικών, που τηρούνται στο αρχείο της ΓΥΣ.

Αναφορικά με τα χαρακτηριστικά των διαθέσιμων δεδομένων πρέπει να διευκρινιστεί ότι οι γωνιομετρήσεις της πρώτης περιόδου, οι οποίες και προέρχονται από την επίσημη έκδοση του Hartl (Hartl, 1901), προφανώς είναι οι αντίστοιχες διορθωμένες τιμές όπως επίσης το ίδιο ισχύει και για τα δεδομένα της τρίτης περιόδου τα οποία ελήφθησαν από το ηλεκτρονικό αρχείο καταγραφής. Αντίθετα οι γωνιομετρήσεις της δεύτερης και τέταρτης περιόδου, οι οποίες και προέρχονται από τα πρωτότυπα έντυπα βιβλία καταγραφής, αναφέρονται στις πρωτογενείς, μη διορθωμένες και ανηγμένες, μετρήσεις και δεν έχουν υποστεί καμία επεξεργασία.

3.2.2. Διαδικασία επεξεργασίας δεδομένων

Αρχικά έγινε ο προσδιορισμός και η επιλογή των τριγωνομετρικών σταθμών Ιης τάξης, οι οποίοι οριοθετούν και περιέχονται στη περιοχή μελέτης και θα αποτελέσουν τα σημεία ανάλυσης. Οι σταθμοί αυτοί, το πλήθος των οποίων είναι 35, καθώς και η υπό-περιοχή μελέτης στην οποία εντάσσονται φαίνονται στον Πίνακα 3-1 που ακολουθεί.

A/A	ΣΤΑΘΜΟΣ	ΠΕΡΙΟΧΗ
1	ΑΜΟΡΓΟΣ	ΚΥΚΛΑΔΕΣ
2	ΑΝΔΡΟΣ	ΚΥΚΛΑΔΕΣ
3	ΑΝΤΙΠΑΡΟΣ	ΚΥΚΛΑΔΕΣ
4	ΑΣΤΥΠΑΛΛΙΑ	ΔΩΔΕΚΑΝΗΣΑ
5	ΒΕΛΟΠΟΥΛΑ	ΚΥΚΛΑΔΕΣ
6	ΓΑΥΔΟΣ	ΚΡΗΤΗ
7	ΔΙΚΤΥ	ΚΡΗΤΗ
8	ΘΗΡΑ	ΚΥΚΛΑΔΕΣ
9	ΙΔΗ	ΚΡΗΤΗ
10	ΙΚΑΡΙΑ	ΑΙΓΑΙΟ
11	ΚΑΡΠΑΘΟΣ	ΔΩΔΕΚΑΝΗΣΑ
12	ΚΑΤΑΒΙΑ	ΔΩΔΕΚΑΝΗΣΑ
13	ΚΕΑ	ΚΥΚΛΑΔΕΣ
14	ΚΟΦΙΝΑΣ	ΚΡΗΤΗ
15	ΚΡΙΘΙΝΟ	ΚΥΚΛΑΔΕΣ
16	ΛΑΘΡΑ	ΑΙΓΑΙΟ
17	ΛΕΒΙΘΑ	ΑΙΓΑΙΟ
18	ΛΕΥΚΑ ΟΡΗ	ΚΡΗΤΗ
19	ΜΗΛΟΣ	ΚΥΚΛΑΔΕΣ
20	ΜΥΚΟΝΟΣ	ΚΥΚΛΑΔΕΣ
21	ΝΑΞΟΣ	ΚΥΚΛΑΔΕΣ
22	ΝΙΣΥΡΟΣ	ΔΩΔΕΚΑΝΗΣΑ
23	ΠΑΤΜΟΣ	ΔΩΔΕΚΑΝΗΣΑ
24	ΣΑΜΟΣ	ΑΙΓΑΙΟ
25	ΣΑΡΙΑ	ΔΩΔΕΚΑΝΗΣΑ
26	ΣΕΡΙΦΟΣ	ΚΥΚΛΑΔΕΣ
27	ΣΚΙΑΔΙ	ΔΩΔΕΚΑΝΗΣΑ
28	ΣΥΜΗ	ΔΩΔΕΚΑΝΗΣΑ
29	ΣΥΡΝΑ	ΔΩΔΕΚΑΝΗΣΑ
30	ΣΥΡΟΣ	ΚΥΚΛΑΔΕΣ
31	ΤΡΑΧΩΝΕΣ	ΑΙΓΑΙΟ
32	ΧΑΛΚΗ	ΔΩΔΕΚΑΝΗΣΑ
33	ΧΑΜΗΛΗ	ΔΩΔΕΚΑΝΗΣΑ
34	ΨΑΡΑ	ΑΙΓΑΙΟ
35	ΨΙΝΘΟΣ	ΔΩΔΕΚΑΝΗΣΑ

Πίνακας 3-1 : Τριγωνομετρικοί σταθμοί 1ης τάξης που περιέχονται στη περιοχή μελέτης

Table 3-1 : Trigonometric stations of 1st order included in study area

Το πρώτο βήμα στη επεξεργασία των δεδομένων γωνιομετρήσεων ήταν η καταγραφή τους. Σε αυτό το βήμα έγινε η καταγραφή του συνόλου των γωνιομετρήσεων, που ήταν διαθέσιμες για κάθε σταθμό προς οποιοδήποτε άλλο σταθμό της περιοχής μελέτης, ο διαχωρισμός τους ανά χρονική περίοδο μέτρησης και τέλος η μετατροπή των μονάδων μέτρησης σε μοίρες, πρώτα και δεύτερα, όπου αυτές ήταν διαφορετικές.

Το δεύτερο βήμα ήταν ο προσδιορισμός των μικρότερων δυνατών περιοχών ανάλυσης (τριγωνα), τα οποία δημιουργούνται από τον συνδυασμό διαθέσιμων δεδομένων των παραπάνω σταθμών.

Πιο συγκεκριμένα για κάθε συνδυασμό μεταξύ δύο χρονικών περιόδων εντοπίστηκε το σύνολο των τριγώνων, που δομούνται ανά υπό-περιοχή μελέτης, για τα οποία υπήρχαν διαθέσιμα στοιχεία γωνιομετρήσεων για όλες τους τις γωνίες και στις δύο χρονικές περιόδους.

Ο συνδυασμός των παραπάνω δύο βημάτων είχε ως αποτέλεσμα αφενός τον εντοπισμό των περιοχών ανάλυσης (τριγώνων) και αφετέρου την ταυτοποίηση των χρονολογιών κάθε χρησιμοποιούμενης μέτρησης.

Οι πίνακες που ακολουθούν περιέχουν τα παραπάνω αποτελέσματα. Πιο συγκεκριμένα ο πρώτος πίνακας περιέχει τους σταθμούς και τις χρονολογίες των μετρήσεων αυτών που θα συμμετέχουν στην διαδικασία εκτίμησης παραμορφώσεων.

Α/Α	ΣΤΑΘΜΟΣ	ΠΕΡΙΟΧΗ	ΧΡΟΝΟΛΟΓΙΑ				
			ΕΠΟΧΗ 1	ΕΠΟΧΗ 2	ΕΠΟΧΗ 3	ΕΠΟΧΗ 4	ΕΠΟΧΗ 5
1	ΑΜΟΡΓΟΣ	ΚΥΚΛΑΔΕΣ	1895	1929	1956	1975	-
2	ΑΝΔΡΟΣ	ΚΥΚΛΑΔΕΣ	1895	1929	1956	1975	1982
3	ΑΝΤΙΠΑΡΟΣ	ΚΥΚΛΑΔΕΣ	1895	1929	1956	1975	1982
4	ΑΣΤΥΠΑΛΛΙΑ	ΔΩΔΕΚΑΝΗΣΑ	-	1934	1950	μχ ³ 1977	-
5	ΒΕΛΟΠΟΥΛΑ	ΚΥΚΛΑΔΕΣ	1895	1929	-	μχ1972	-
6	ΓΑΥΔΟΣ	ΚΡΗΤΗ	-	1930	1953	1978	-
7	ΔΙΚΤΥ	ΚΡΗΤΗ	-	1930	1953	1978	-
8	ΘΗΡΑ	ΚΥΚΛΑΔΕΣ	1895	1929	1956	μχ1976	1982
9	ΙΔΗ	ΚΡΗΤΗ	-	1930	1953	μχ1977	-
10	ΙΚΑΡΙΑ	ΑΙΓΑΙΟ	-	1932	-	1975	-
11	ΚΑΡΠΑΘΟΣ	ΔΩΔΕΚΑΝΗΣΑ	-	-	1953	1978	-
12	ΚΑΤΑΒΙΑ	ΔΩΔΕΚΑΝΗΣΑ	-	-	1953	-	-
13	ΚΕΑ	ΚΥΚΛΑΔΕΣ	1895	1929	-	μχ1972	-
14	ΚΟΦΙΝΑΣ	ΚΡΗΤΗ	-	1930	1953	1978	-

³ Με τον όρο μχ (μέση χρονολογία) σημειώνεται το γεγονός ότι για το συγκεκριμένο σταθμό οι γωνιομετρήσεις εκτείνονται σε περισσότερα του ενός αλλά και μη διαδοχικά έτη.

Α/Α	ΣΤΑΘΜΟΣ	ΠΕΡΙΟΧΗ	ΧΡΟΝΟΛΟΓΙΑ				
			ΕΠΟΧΗ 1	ΕΠΟΧΗ 2	ΕΠΟΧΗ 3	ΕΠΟΧΗ 4	ΕΠΟΧΗ 5
15	ΚΡΙΘΙΝΟ	ΚΥΚΛΑΔΕΣ	1890	1929	-	μχ1975	-
16	ΛΕΒΙΘΑ	ΑΙΓΑΙΟ	-	1934	-	1975	-
17	ΛΕΥΚΑ ΟΡΗ	ΚΡΗΤΗ	-	1930	1953	μχ1977	-
18	ΜΗΛΟΣ	ΚΥΚΛΑΔΕΣ	1895	1929	1956	μχ1975	1982
19	ΜΥΚΟΝΟΣ	ΚΥΚΛΑΔΕΣ	1895	1929	1956	1975	1982
20	ΝΑΞΟΣ	ΚΥΚΛΑΔΕΣ	1895	1929	1956	1975	1982
21	ΠΑΤΜΟΣ	ΔΩΔΕΚΑΝΗΣΑ	-	1934	-	1975	-
22	ΣΑΜΟΣ	ΑΙΓΑΙΟ	-	1932	-	1975	-
23	ΣΑΡΙΑ	ΔΩΔΕΚΑΝΗΣΑ	-	-	1953	1978	-
24	ΣΕΡΙΦΟΣ	ΚΥΚΛΑΔΕΣ	1895	1929	1955	μχ1975	1982
26	ΣΥΜΗ	ΔΩΔΕΚΑΝΗΣΑ	-	-	1950	1979	-
27	ΣΥΡΝΑ	ΔΩΔΕΚΑΝΗΣΑ	-	-	1951	1978	-
28	ΣΥΡΟΣ	ΚΥΚΛΑΔΕΣ	1895	1929	1956	1975	1982
29	ΤΡΑΧΩΝΕΣ	ΑΙΓΑΙΟ	-	1929	-	1975	-
30	ΧΑΛΚΗ	ΔΩΔΕΚΑΝΗΣΑ	-	-	1949	1979	-
31	ΧΑΜΗΛΗ	ΔΩΔΕΚΑΝΗΣΑ	-	-	1951	1978	-
32	ΨΑΡΑ	ΑΙΓΑΙΟ	-	1932	-	1975	-
33	ΨΙΝΘΟΣ	ΔΩΔΕΚΑΝΗΣΑ	-	-	1949	1979	-

Πίνακας 3-2 : Χρονολογίες των γωνιομετρήσεων των τριγωνομετρικών σταθμών Ιης τάξης που λαμβάνουν μέρος στην εκτίμηση παραμορφώσεων

Table 3-2 : Dates of angle measurements of 1st order trigonometric stations included in deformation analysis

Από τον παραπάνω πίνακα απουσιάζουν δύο τριγωνομετρικοί σταθμοί (Λάθρα και Νίσυρος), από τους συνολικά 35 που οριοθετούσαν ή/και περιέχονταν στην περιοχή μελέτης (Πίνακας 3-1), καθόσον για αυτούς δεν βρέθηκαν κατάλληλα δεδομένα γωνιομετρήσεων προκειμένου να συμπεριληφθούν στην διαδικασία ανάλυσης, η οποία περιγράφεται στη συνέχεια.

Η ανάλυση των γωνιομετρήσεων ανά σταθμό και χρονολογία έδειξε ότι μπορούν να διαμορφωθούν συνολικά πέντε (1 έως 5) εποχές μετρήσεων, οι οποίες με την σειρά τους δομούν αντίστοιχα πέντε (1 έως 5) περιόδους ανάλυσης. Οι περίοδοι ανάλυσης αυτές δεν αντιστοιχούν ενιαία σε όλη τη περιοχή μελέτης αλλά στις διάφορες υπό-περιοχές αναλόγως με τα διαθέσιμα δεδομένα. Παρόλα αυτά υπάρχουν μεμονωμένα τρίγωνα για τα οποία είναι διαθέσιμα δεδομένα για το σύνολο των περιόδων ανάλυσης

Ο δεύτερος πίνακας, ο οποίος και ακολουθεί, περιλαμβάνει αναλυτικά στοιχεία (αριθμός, υπό-περιοχή μελέτης, χρονική περίοδος κτλ) για όσα από τα τρίγωνα χρησιμοποιήθηκαν τελικά στην διαδικασία ανάλυσης.

ΠΕΡΙΟΔΟΣ	ΑΡΙΘΜΟΣ ΤΡΙΓΩΝΩΝ	ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ	ΕΠΟΧΗ ΕΝΑΡΞΗΣ	ΕΠΟΧΗ ΛΗΞΗΣ	ΧΡΟΝΙΚΗ ΠΕΡΙΟΔΟΣ
1 ^η	12	ΚΥΚΛΑΔΕΣ	1895	1929	34
2 ^η	7	ΚΥΚΛΑΔΕΣ	1929	1956	27
	1	ΚΡΗΤΗ	1930	1953	23
3 ^η	7	ΚΥΚΛΑΔΕΣ	1956	1975	19
	3	ΚΡΗΤΗ	1953	1978	25
	11	ΔΩΔΕΚΑΝΗΣΑ	1951	1978	27
4 ^η	6	ΚΥΚΛΑΔΕΣ	1929	1975	46
	4	ΚΡΗΤΗ	1930	1975	45
	9	ΑΙΓΑΙΟ	1932	1975	43
5 ^η	2	ΚΥΚΛΑΔΕΣ	1975	1982	7

Πίνακας 3-3 : Πληροφορίες για τα τρίγωνα που χρησιμοποιούνται στην εκτίμηση παραμορφώσεων

Table 3-3 : Information regarding the triangles used in deformation analysis

Όπως προκύπτει από τη μελέτη των παραπάνω δύο πινάκων τα ιστορικά δεδομένα γωνιομετρήσεων δεν καλύπτουν διαχρονικά το σύνολο της περιοχής μελέτης, παρόλα αυτά υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα για το σύνολο των υπό-περιοχών για τουλάχιστον μια χρονική περίοδο ανάλυσης ενώ για κάποιες από αυτές (Κυκλάδες, Κρήτη) και για περισσότερες επιτρέποντας έτσι την εξαγωγή συμπερασμάτων μέσω συγκρίσεων διαχρονικών αποτελεσμάτων.

3.3. Διαδικασία Ανάλυσης Δεδομένων

Μετά την καταγραφή, την τεκμηρίωση και την επιλογή των δεδομένων που θα συμμετέχουν στην διαδικασία ανάλυσης ακολουθεί η εν λόγω διαδικασία. Τα δεδομένα ανά χρονική περίοδο επεξεργάστηκαν σύμφωνα με τη μέθοδο του Frank (Frank, 1966), η οποία αναλύθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή χρησιμοποιούνται οι διαφορές των μετρήσεων γωνιών ενός τριγώνου, για δύο χρονικές εποχές, ώστε να προσδιορισθούν οι παράμετροι (γ_1, γ_2) του ταυστή παραμόρφωσης για τη περιοχή του συγκεκριμένου τριγώνου.

Από τις δύο αυτές παραμέτρους προκύπτουν όλα τα υπόλοιπα αποτελέσματα της ανάλυσης, με χρήση των εξισώσεων που ακολουθούν :

$$\gamma_{tot} = \sqrt{\gamma_1^2 + \gamma_2^2} \quad (3.1)$$

$$\theta_{max} = 0.5 \arctan \frac{\gamma_2}{-\gamma_1} \quad (3.2)$$

$$\theta_{tot} = 0.5 \arctan \frac{\gamma_1}{\gamma_2} = \theta_{max} - 45^\circ \quad (3.3)$$

όπου γ_{tot} η ολική διάτμηση, θ_{max} η γωνία διεύθυνσης του κύριου άξονα μέγιστης παραμόρφωσης και θ_{tot} η γωνία διεύθυνσης της μέγιστης διάτμησης. Διευκρινίζεται ότι για τον προσδιορισμό τόσο της γωνίας διεύθυνσης θ_{max} όσο και της θ_{tot} γίνεται διερεύνηση, η οποία και ακολουθεί τη σύμβαση πρόσημων όπως αναφέρεται στο (Pope, 1966).

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης για κάθε περίοδο φαίνονται στους πίνακες που ακολουθούν. Σημειώνεται ότι στους πίνακες αυτούς οι τιμές των παραμέτρων παραμόρφωσης ($\gamma_1, \gamma_2, \gamma_{tot}$) δίνονται σε μstrain (ppm), των γωνιών διεύθυνσης ($\theta_{max}, \theta_{tot}$) σε μοίρες και του ρυθμού μεταβολής της ολικής διάτμησης ($\dot{\gamma}_{tot}$) σε $\mu\text{strain}/\text{year}$.

TRIANGLE			SUB REGION	γ_1	γ_2	θ_{max}	θ_{tot}	γ_{tot}	$\dot{\gamma}_{tot}$
ANTIPAROS	THIRA	NAXOS	CYCLADES	1.78	-0.61	99.46	54.46	1.88	0.06
ANTIPAROS	THIRA	MILOS	CYCLADES	-9.41	-12.3	153.71	108.71	15.49	0.46
ANTIPAROS	MILOS	SERIFOS	CYCLADES	-7.28	5.68	18.98	153.98	9.23	0.27
ANTIPAROS	SERIFOS	SYROS	CYCLADES	-1.39	-1.39	157.50	112.50	1.97	0.06
ANTIPAROS	SYROS	MYKONOS	CYCLADES	-0.88	-0.02	179.35	134.35	0.88	0.03
ANTIPAROS	NAXOS	MYKONOS	CYCLADES	-0.83	-0.59	162.30	117.30	1.02	0.03
AMORGOS	NAXOS	MYKONOS	CYCLADES	67.31	14.52	83.91	38.91	68.86	2.03
VELOPOULA	KRITHINO	MILOS	CYCLADES	-37.82	17.74	12.56	147.56	41.77	1.23
AMORGOS	THIRA	NAXOS	CYCLADES	0.42	0.02	88.64	43.64	0.42	0.01
KEA	SYROS	SERIFOS	CYCLADES	0.17	0.1	74.77	29.77	0.20	0.01
KEA	SYROS	ANDROS	CYCLADES	-0.34	0.01	0.84	135.84	0.34	0.01
ANDROS	SYROS	MYKONOS	CYCLADES	-0.38	0.06	4.49	139.49	0.38	0.01

Πίνακας 3-4 : Αποτελέσματα ανάλυσης παραμορφώσεων για τη πρώτη περίοδο (1895-1929)

Table 3-4 : Deformation analysis results for the first period (1895-1929)

TRIANGLE			SUB REGION	γ_1	γ_2	θ_{max}	θ_{tot}	γ_{tot}	$\dot{\gamma}_{tot}$
ANTIPAROS	THIRA	NAXOS	CYCLADES	148.43	46.8	81.25	36.25	155.63	5.76
ANTIPAROS	MILOS	SERIFOS	CYCLADES	-9.54	-13.04	153.09	108.09	16.16	0.60
ANTIPAROS	SERIFOS	SYROS	CYCLADES	-11.69	7.63	16.57	151.57	13.96	0.52
ANTIPAROS	SYROS	MYKONOS	CYCLADES	-19.99	-20.85	156.90	111.90	28.88	1.07
ANTIPAROS	NAXOS	MYKONOS	CYCLADES	183.74	-104.21	104.78	59.78	211.23	7.82
AMORGOS	NAXOS	MYKONOS	CYCLADES	184.92	119.22	73.59	28.59	220.02	8.15
ANDROS	SYROS	MYKONOS	CYCLADES	-15.46	28.88	30.92	165.92	32.76	1.21
KOFINAS	DIKTY	IDI	CRETE	85.17	314.38	52.58	7.58	325.71	14.16

Πίνακας 3-5 : Αποτελέσματα ανάλυσης παραμορφώσεων για τη δεύτερη περίοδο (1929/30-1956/53)

Table 3-5 : Deformation analysis results for the second period (1929/30-1956/53)

TRIANGLE			SUB REGION	γ_1	γ_2	θ_{max}	θ_{tot}	γ_{tot}	$\dot{\gamma}_{tot}$
ANTIPAROS	THIRA	NAXOS	CYCLADES	32.93	-4.49	93.88	48.88	33.23	1.33
ANTIPAROS	MILOS	SERIFOS	CYCLADES	34.73	44.13	64.10	19.10	56.16	2.96
ANTIPAROS	SERIFOS	SYROS	CYCLADES	56.73	8.98	85.50	40.50	57.44	3.02
ANTIPAROS	SYROS	MYKONOS	CYCLADES	49.41	-20.55	101.29	56.29	53.51	2.82
ANTIPAROS	NAXOS	MYKONOS	CYCLADES	6.76	53.6	48.59	3.59	54.02	2.84
AMORGOS	NAXOS	MYKONOS	CYCLADES	-18.08	21.54	25.00	160.00	28.12	1.48
ANDROS	SYROS	MYKONOS	CYCLADES	-3.57	-13.9	142.20	97.20	14.35	0.76
KOFINAS	DIKTY	IDI	CRETE	3.89	-16.85	128.50	83.50	17.29	0.69
KOFINAS	GAVDOS	IDI	CRETE	-3.72	-13.71	142.59	97.59	14.21	0.57
GAVDOS	IDI	LEF. ORH	CRETE	-10.99	-1.75	175.48	130.48	11.13	0.45
CHALKI	SKIADI	PSINTHOS	DOD/NESE	1.71	8.45	50.72	5.72	8.62	0.32
CHALKI	SKIADI	KATAVIA	DOD/NESE	-0.41	6.4	43.17	178.17	6.41	0.24
CHALKI	SKIADI	SARIA	DOD/NESE	1.45	-11.6	131.44	86.44	11.69	0.43
SARIA	SKIADI	KATAVIA	DOD/NESE	-127.77	25.57	5.66	140.66	130.30	4.83
KARPATOS	SKIADI	KATAVIA	DOD/NESE	-300.19	-51.14	175.17	130.17	304.51	11.28
KARPATOS	SARIA	SKIADI	DOD/NESE	69.16	18.94	82.34	37.34	71.71	2.66
KARPATOS	SARIA	SYRNA	DOD/NESE	4.75	-43.81	131.91	86.91	44.07	1.63
KARPATOS	SYRNA	CHAMILI	DOD/NESE	-2.53	-5.71	146.95	101.95	6.25	0.23
CHAMILI	SYRNA	ASTYPALEA	DOD/NESE	9.45	-18.07	121.20	76.20	20.39	0.76
SYRNA	CHALKI	SARIA	DOD/NESE	0.47	7.05	46.91	1.91	7.07	0.26
CHALKI	SYMI	PSINTHOS	DOD/NESE	0.18	-9.5	134.46	89.46	9.50	0.35

Πίνακας 3-6 : Αποτελέσματα ανάλυσης παραμορφώσεων για τη τρίτη περίοδο (195x-197x)

Table 3-6 : Deformation analysis results for the third period (195x-197x)

TRIANGLE			SUB REGION	γ_1	γ_2	θ_{max}	θ_{tot}	γ_{tot}	$\dot{\gamma}_{tot}$
ANTIPAROS	THIRA	MILOS	CYCLADES	-36.63	117.3	36.33	171.33	122.89	2.67
VELOPOULA	KRITHINO	MILOS	CYCLADES	-1.68	9.53	40.00	175.00	9.68	0.21
AMORGOS	THIRA	NAXOS	CYCLADES	130.05	-66.39	103.52	58.52	146.02	3.17
KEA	SYROS	SERIFOS	CYCLADES	-9.14	3.16	9.54	144.54	9.67	0.21
KEA	SYROS	ANDROS	CYCLADES	-7.3	1.34	5.20	140.20	7.42	0.16
AMORGOS	THIRA	ASTYPALEA	CYCLADES	-55.94	24.06	11.64	146.64	60.89	1.42
IDI	DIKTY	THIRA	CRETE	37.86	19.45	76.40	31.40	42.56	0.95
THIRA	IDI	MILOS	CRETE	-74.98	21.95	8.16	143.16	78.13	1.74
IDI	MILOS	LEFKA ORH	CRETE	1.55	-5.27	126.81	81.81	5.49	0.12
LEFKA ORH	MILOS	KRITHINO	CRETE	-14.43	0.95	1.88	136.88	14.46	0.32
AMORGOS	MYKONOS	IKARIA	AEGEAN	-27.76	-1.64	178.31	133.31	27.81	0.65
ANDROS	PSARA	TRACHONES	AEGEAN	40.92	-55.11	116.70	71.70	68.64	1.60
ANDROS	MYKONOS	TRACHONES	AEGEAN	-3.78	31.18	41.54	176.54	31.41	0.73
MYKONOS	IKARIA	TRACHONES	AEGEAN	-17.73	-11.73	163.26	118.26	21.26	0.49
TRACHONES	IKARIA	SAMOS	AEGEAN	16.92	25.82	61.62	16.62	30.87	0.72
IKARIA	PATMOS	SAMOS	AEGEAN	-7.52	-7.2	158.12	113.12	10.41	0.24
AMORGOS	IKARIA	PATMOS	AEGEAN	11.32	-8.07	107.74	62.74	13.90	0.32
AMORGOS	LEVITHA	PATMOS	AEGEAN	22.82	26.57	65.33	20.33	35.02	0.81
AMORGOS	LEVITHA	ASTYPALEA	AEGEAN	-1.92	-31.86	136.72	91.72	31.92	0.74

Πίνακας 3-7 : Αποτελέσματα ανάλυσης παραμορφώσεων για τη τέταρτη περίοδο (1929/3x-197x)

Table 3-7 : Deformation analysis results for the fourth period (1929/3x-197x)

TRIANGLE			SUB REGION	γ_1	γ_2	θ_{max}	θ_{tot}	γ_{tot}	$\dot{\gamma}_{tot}$
ANTIPAROS	MILOS	SERIFOS	CYCLADES	12.72	4.33	80.60	35.60	13.44	1.92
ANTIPAROS	SERIFOS	SYROS	CYCLADES	6.24	13.56	57.36	12.36	14.93	2.13

Πίνακας 3-8 : Αποτελέσματα ανάλυσης παραμορφώσεων για τη πέμπτη περίοδο (1975-1982)

Table 3-8 : Deformation analysis results for the fifth period (1975-1982)

3.4. Απεικόνιση Αποτελεσμάτων Επεξεργασίας και Ανάλυσης Δεδομένων

Η απεικόνιση των αποτελεσμάτων της ανάλυσης που προηγήθηκε στη προηγούμενη ενότητα είναι ένα ιδιαίτερα σημαντικό βήμα στη προσπάθεια εξαγωγής συμπερασμάτων για την τεκτονική συμπεριφορά και τις παραμορφώσεις της περιοχής μελέτης με την βοήθεια του τανυστή παραμόρφωσης.

Όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενο κεφάλαιο διάφοροι ερευνητές⁴ έχουν χρησιμοποιήσει διαφορετικές προσεγγίσεις απεικόνισης των αποτελεσμάτων της ανάλυσης γεωδαιτικών μετρήσεων για την εξαγωγή παραμέτρων του τανυστή παραμόρφωσης με σκοπό την όσο το δυνατόν καλύτερη διερεύνηση και ερμηνεία αυτών και τελικά την πληρέστερη τεκμηρίωση των συμπερασμάτων τους. Έτσι ανάλογα με τις επιδιώξεις της κάθε μελέτης γίνεται και η κατάλληλη απεικόνιση της κάθε παραμέτρου ή και συνδυασμού αυτών.

Μια ιδιαίτερα σημαντική και ολοκληρωμένη προσπάθεια παρουσίασης των διαφόρων προσεγγίσεων απεικόνισης των αποτελεσμάτων της ανάλυσης παραμορφώσεων με χρήση τανυστών αποτελεί η εργασία του Pope (Pope, 1966), η οποία αν και αρκετά παλιά εντούτοις εξακολουθεί να περιέχει το σύνολο σχεδόν των, μέχρι και σήμερα, μεθόδων απεικόνισης καταδεικνύοντας έτσι την διαχρονικότητα της.

Όπως άλλωστε σημειώνει και ο ίδιος ο Pope (Pope, 1966) μια από τις επιδιώξεις της χρήσης τανυστών παραμόρφωσης για την ανάλυση των παραμορφώσεων μιας περιοχής είναι η όσο το δυνατόν καλύτερη απεικόνιση των αποτελεσμάτων ώστε να μπορούν να συνδυαστούν εύκολα με άλλα δεδομένα (σεισμικά, γεωφυσικά, γεωλογικά κα.) και να διευκολύνεται έτσι η ερμηνεία και η εξαγωγή συμπερασμάτων.

⁴ Ενδεικτικά αναφέρονται (Prescott, Savage and Kinoshita, 1979), (Ferhat et al., 1998), (Hunstad et al., 2003) και (Cheloni, 2008).

Η προσέγγιση απεικόνισης που ακολουθήθηκε στη παρούσα διατριβή βασίζεται στην αντίστοιχη των Ferhat et al. (Ferhat et al., 1998), η οποία και παρουσιάστηκε σε προηγούμενη ενότητα.

Η μόνη διαφορά της τελικά ακολουθούμενης προσέγγισης είναι το γεγονός ότι αντί να απεικονισθεί μόνο ο κύριος άξονας ελάχιστης παραμόρφωσης (most compressive strain) απεικονίζονται και οι δύο κύριοι άξονες, με τον μεν άξονα ελάχιστης παραμόρφωσης να επισημαίνεται με βέλη που κοιτάζουν προς το κέντρο του τριγώνου ενώ με τον άξονα μέγιστης παραμόρφωσης να απεικονίζεται με ευθεία γραμμή.

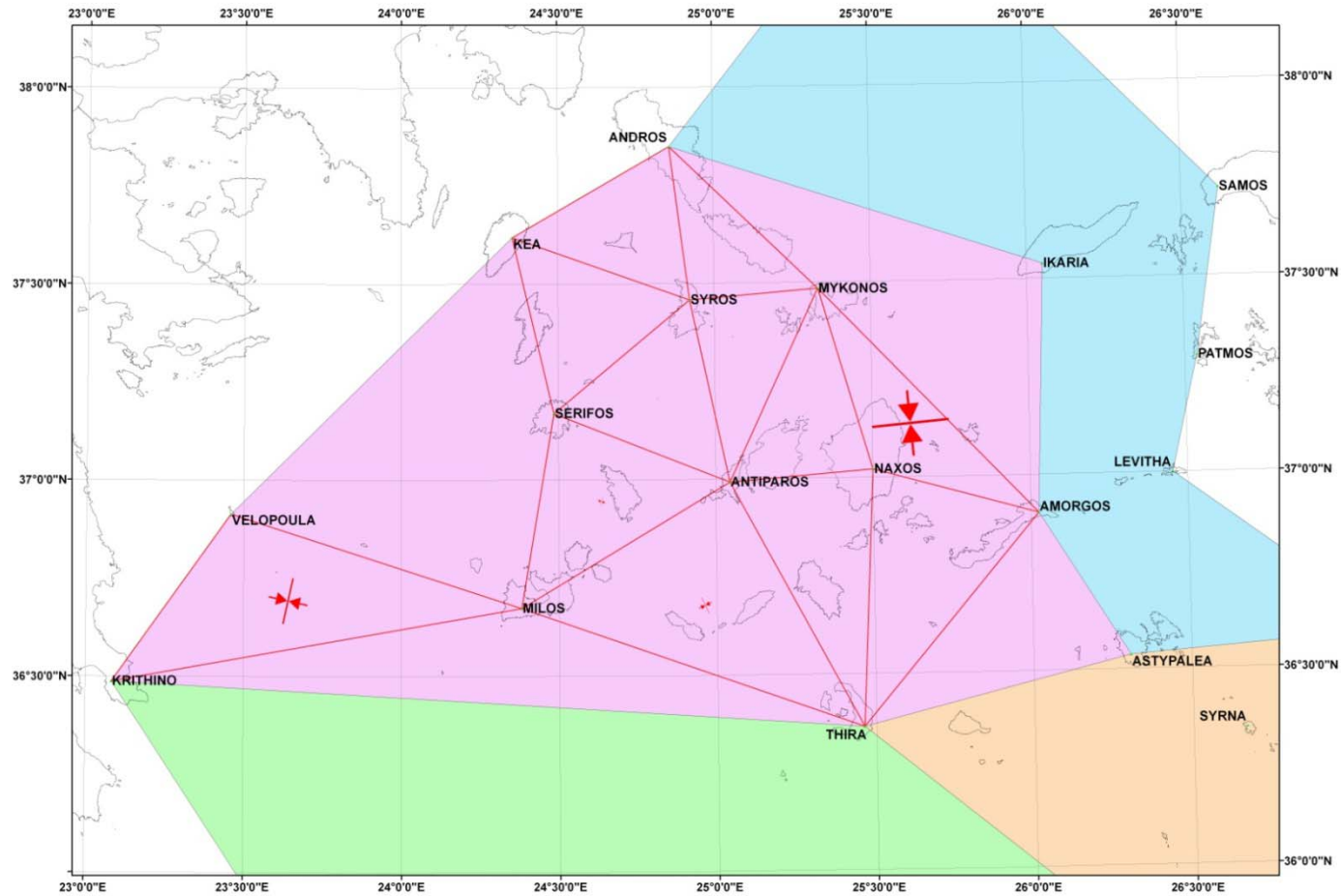
Έτσι για κάθε περίοδο ανάλυσης απεικονίζονται στο κέντρο βάρους κάθε τριγώνου οι κύριοι άξονες παραμόρφωσης, με το μέγεθος των οποίων να αντιστοιχεί σε κάθε περίπτωση με την ολική διάτμηση της περιοχής σε βάθος μιας χρονικής περιόδου κατάλληλα επιλεγμένης (Πίνακας 3-9) ώστε να είναι όσο το δυνατό αναγνώσιμη η απεικόνιση.

ΠΕΡΙΟΔΟΣ	ΧΡΟΝΙΚΗ ΠΕΡΙΟΔΟΣ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗΣ
1 ^η	100 έτη
2 ^η	50 έτη
3 ^η	25 έτη
4 ^η	100 έτη
5 ^η	50 έτη

Πίνακας 3-9 : Χρονική περίοδος που χρησιμοποιείται στην απεικόνιση

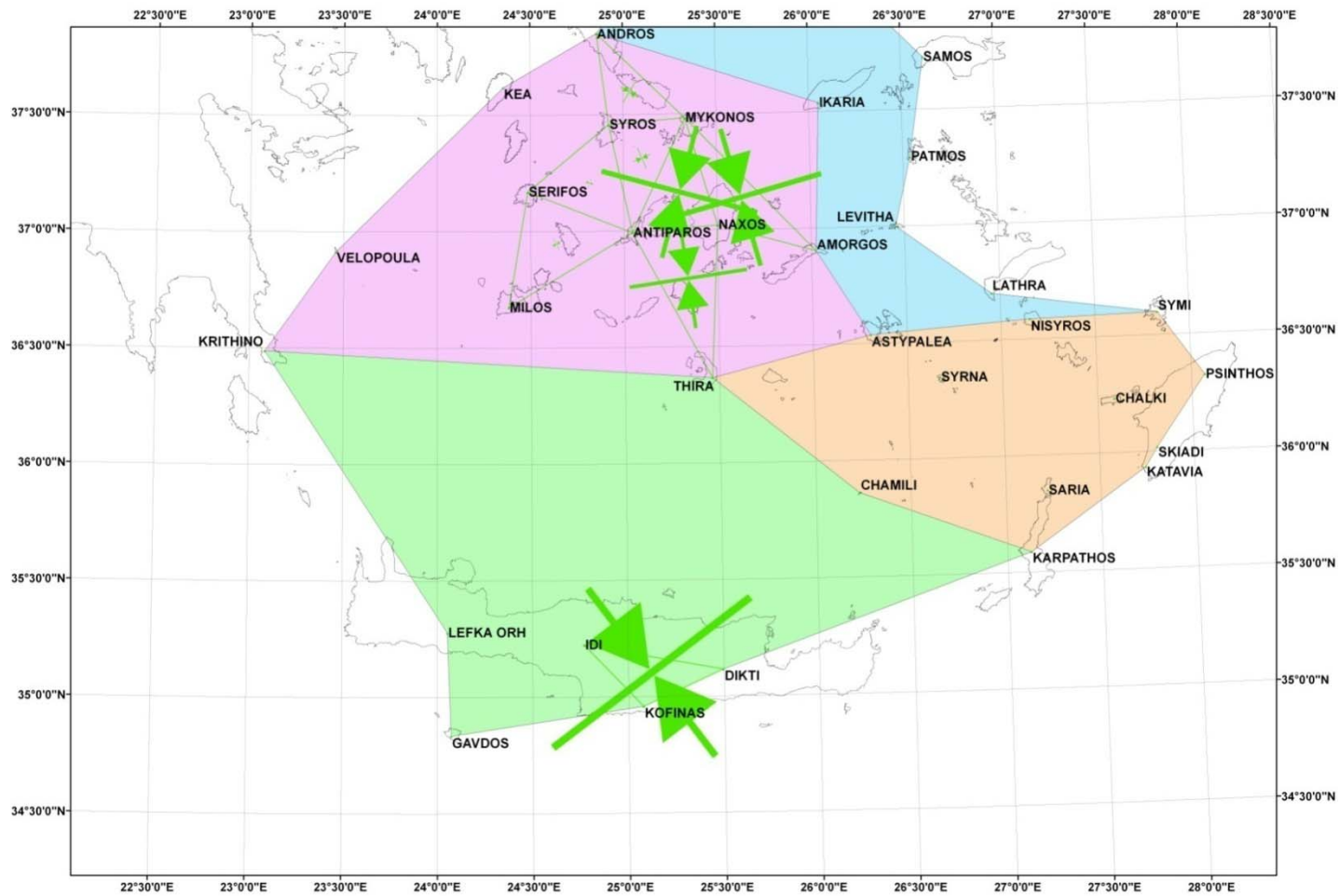
Table 3-9 : Time period used for strain presentation

Στις εικόνες που ακολουθούν παρουσιάζονται, σύμφωνα με την σύμβαση απεικόνισης που περιγράφηκε προηγουμένως, τα αποτελέσματα της ανάλυσης των γεωδαιτικών μετρήσεων για το σύνολο της περιοχής και για κάθε περίοδο ξεχωριστά. Όπου δε κρίθηκε σκόπιμο, για λόγους καλύτερης απεικόνισης και ερμηνείας, απεικονίζονται σε διαφορετική εικόνα τα αποτελέσματα για συγκεκριμένες υπό - περιοχές.



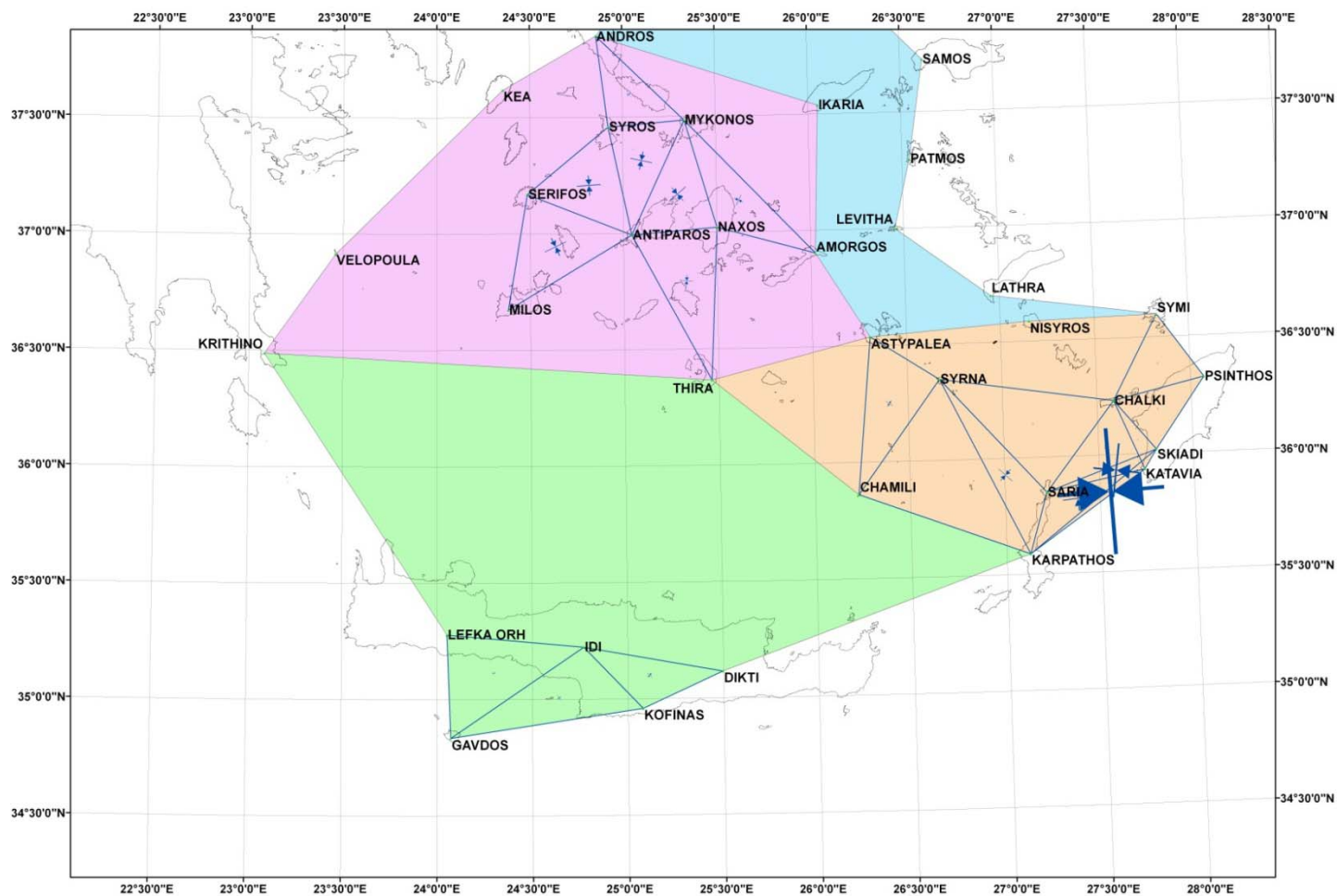
Εικόνα 3-2 : Κύριοι άξονες παραμόρφωσης για τη πρώτη περίοδο ανάλυσης (1895-1929)

Figure 3-2 : Principal strain axes for the first period of analysis (1895-1929)



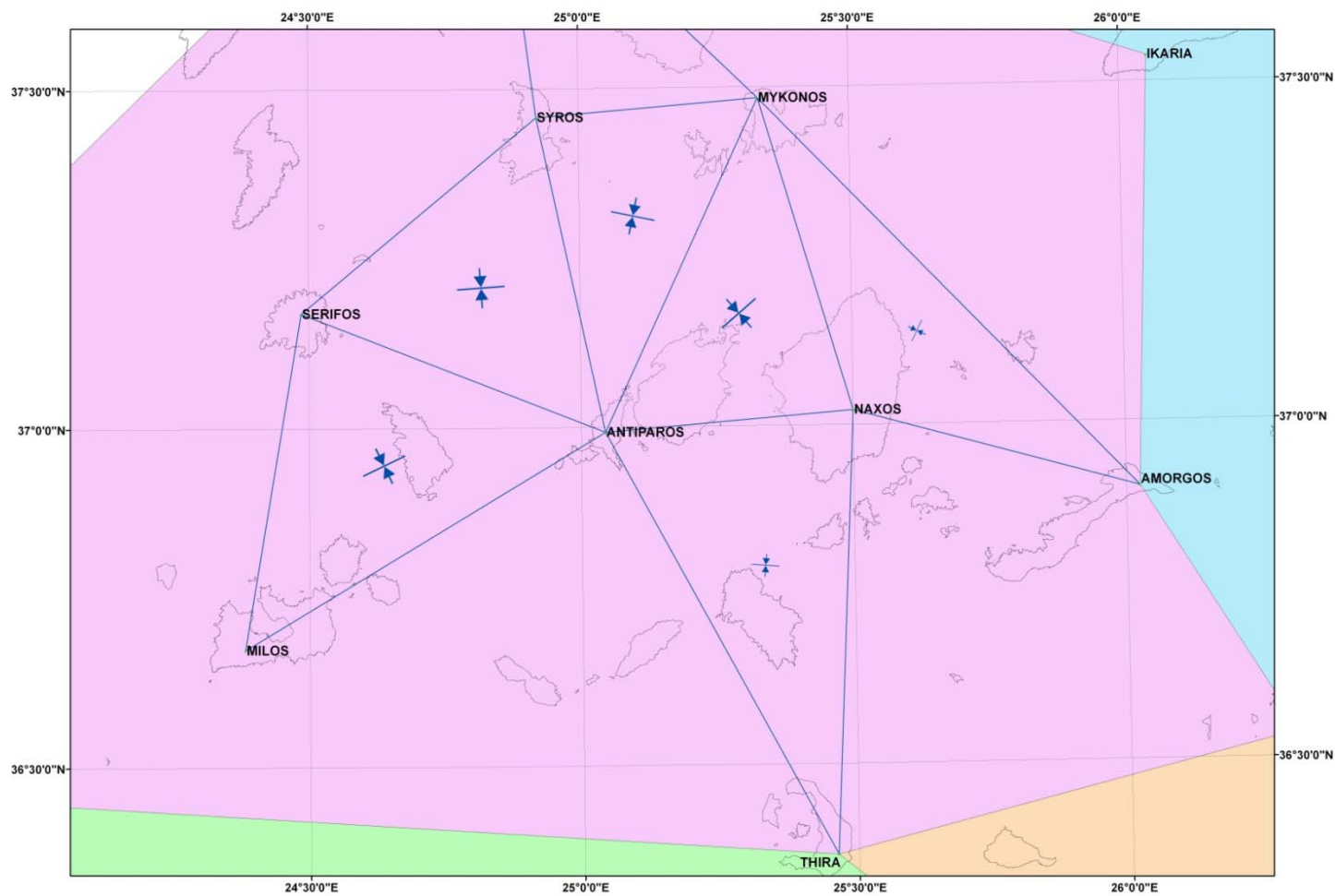
Εικόνα 3-3 : Κύριοι άξονες παραμόρφωσης για τη δεύτερη περίοδο ανάλυσης (1929/30-1956/53)

Figure 3-3 : Principal strain axes for the second period of analysis (1929/30-1956/53)



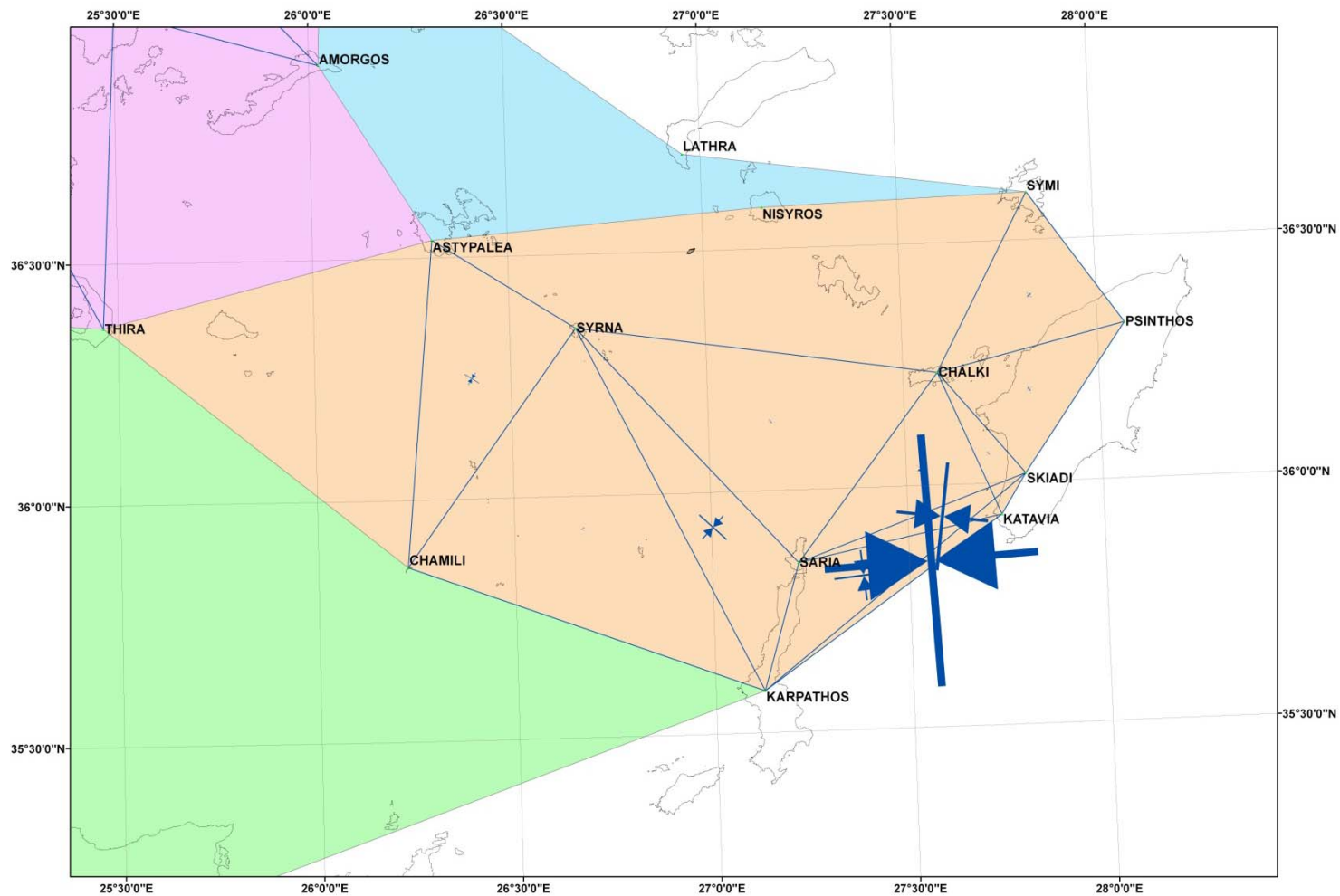
Εικόνα 3-4 : Κύριοι άξονες παραμόρφωσης για τη τρίτη περίοδο ανάλυσης (195x-197x) (όλη η περιοχή)

Figure 3-4 : Principal strain axes for the third period of analysis (195x-197x) (whole area)



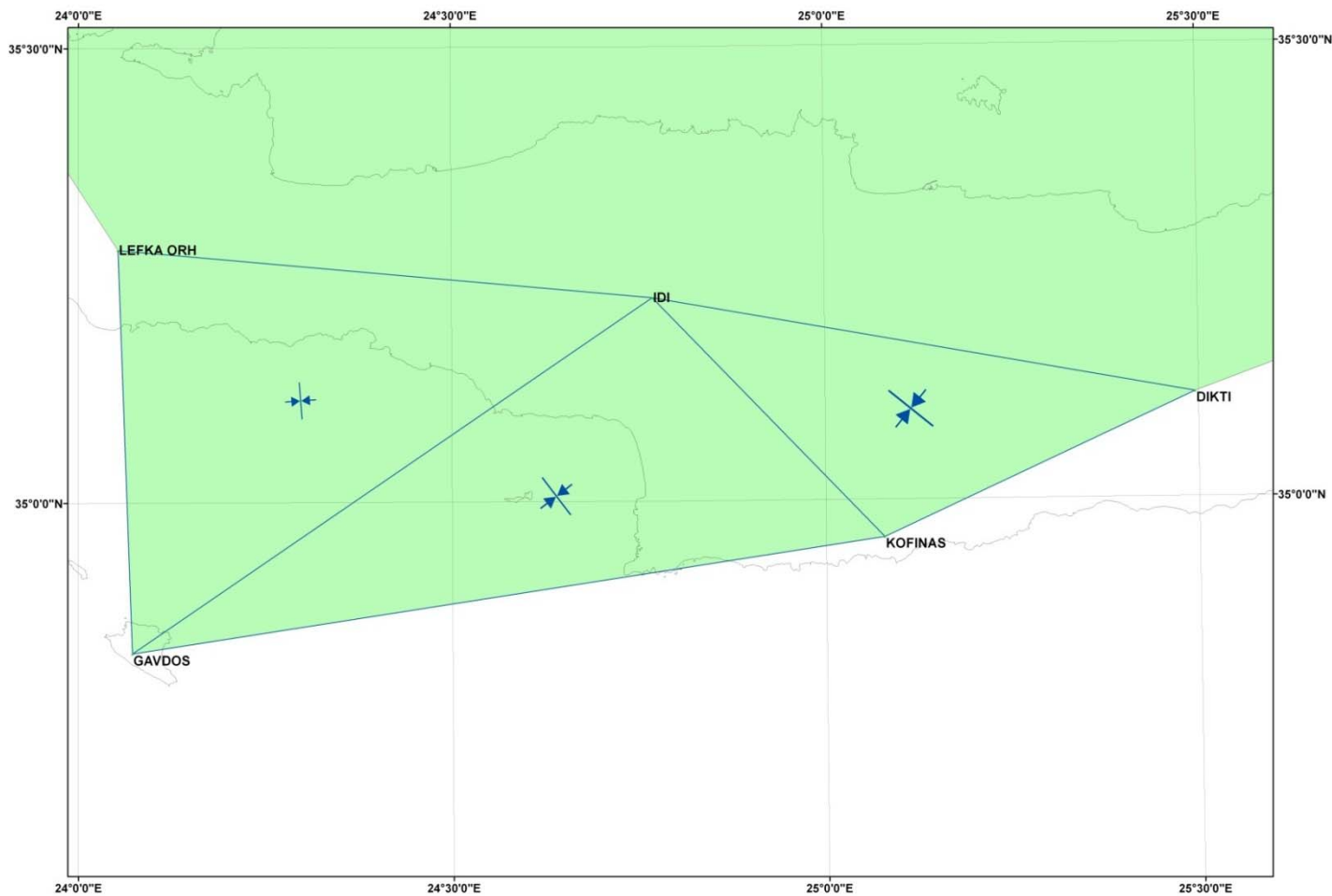
Εικόνα 3-5 : Κόρυτοι άξονες παραμόρφωσης για τη τρίτη περίοδο ανάλυσης (195x-197x) (Κυκλάδες)

Figure 3-5 : Principal strain axes for the third period of analysis (195x-197x) (Cyclades)



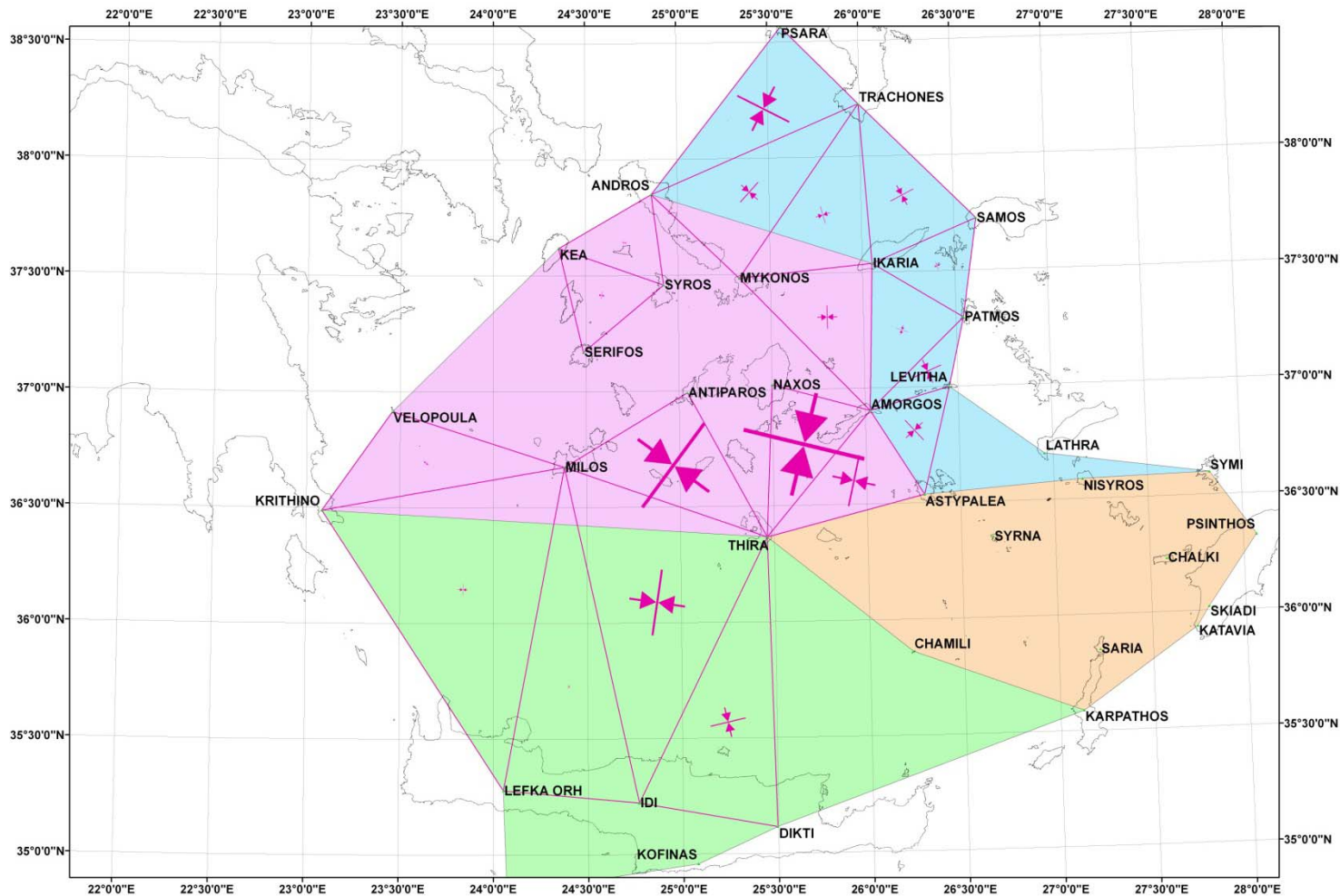
Εικόνα 3-6 : Κύριοι άξονες παραμόρφωσης για τη τρίτη περίοδο ανάλυσης (195x-197x) (Δωδεκάνησα)

Figure 3-6 : Principal strain axes for the third period of analysis (195x-197x) (Dodecanese)



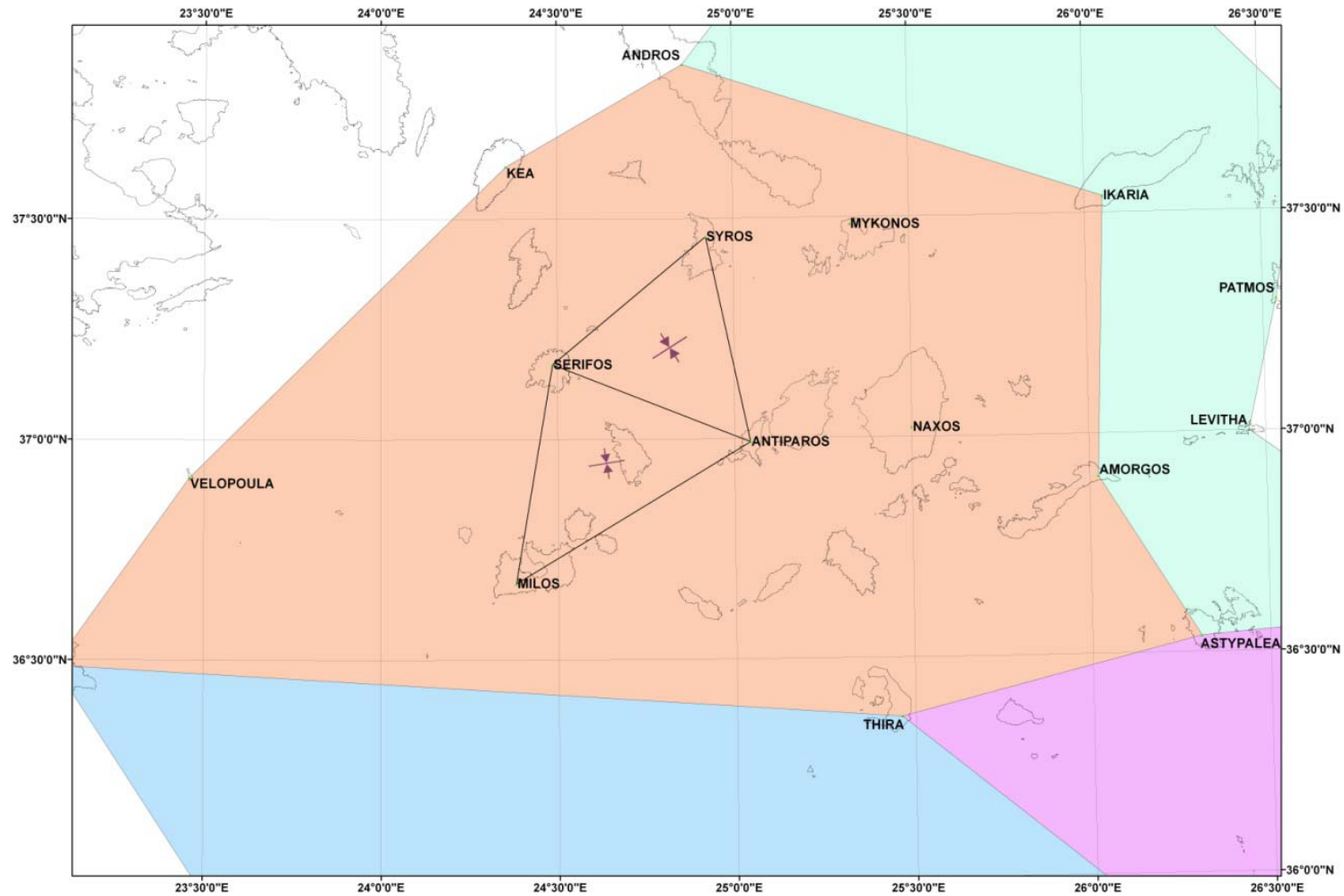
Εικόνα 3-7 : Κύριοι άξονες παραμόρφωσης για τη τρίτη περίοδο ανάλυσης (195x-197x) (Κρήτη)

Figure 3-7 : Principal strain axes for the third period of analysis (195x-197x) (Crete)



Εικόνα 3-8 : Κύριοι άξονες παραμόρφωσης για τη τέταρτη περίοδο ανάλυσης (1929/3x-197x)

Figure 3-8 : Principal strain axes for the fourth period of analysis (1929/3x-197x)



Εικόνα 3-9 : Κύριοι άξονες παραμόρφωσης για τη πέμπτη περίοδο ανάλυσης (1975-1982)

Figure 3-9 : Principal strain axes for the fifth period of analysis (1975-1982)

3.5. Σχολιασμός των Αποτελεσμάτων Ανάλυσης

Στην ενότητα αυτή θα γίνει ένας πρώτος σχολιασμός και έλεγχος των αποτελεσμάτων ανάλυσης ώστε να διερευνηθεί η δυνατότητα χρησιμοποίησης τους στις διαδικασίες ερμηνείας της τεκτονικής συμπεριφοράς της περιοχής μελέτης.

Ο σχολιασμός θα βασισθεί κατά κύριο λόγο στη τιμή του ρυθμού μεταβολής της μέγιστης διατμητικής παραμόρφωσης $\dot{\gamma}_{tot}$ αφού, δεδομένου ότι έχει θεωρηθεί ότι η παραμόρφωση στις περιοχές των τριγώνων ανάλυσης είναι ομοιόμορφη τόσο χωρικά (ώστε να μπορεί να εφαρμοσθεί η μεθοδολογία του Frank) όσο και χρονικά (ώστε να μπορεί να αρθεί η παράμετρος της διαφορετικής διάρκειας της χρονικής περιόδου), είναι το μόνο αποτέλεσμα της διαδικασίας ανάλυσης που προηγήθηκε που μπορεί να λειτουργήσει συγκριτικά.

Στη συνέχεια ακολουθεί σχολιασμός των αποτελεσμάτων ανά υπό - περιοχή μελέτης. Επιλέχθηκε δε αυτή η προσέγγιση αντί του σχολιασμού ανά περίοδο ανάλυσης διότι προσφέρει την δυνατότητα διαχρονικού σχολιασμού της συμπεριφοράς επιμέρους τριγώνων και υπό - περιοχών ανάλυσης.

Βασικό παράγωγο της ενότητας αυτής είναι οι τελικοί πίνακες στους οποίους καταγράφονται τα τρίγωνα με «ιδιαιτέρη» συμπεριφορά, σύμφωνα με την προϋπόθεση που τέθηκε προηγουμένως, καθώς επίσης και οι τιμές των βασικών παραμέτρων του τανυστή παραμόρφωσης για τα υπόψη τρίγωνα.

3.5.1. Σχολιασμός των αποτελεσμάτων στη περιοχή των Κυκλάδων

Η πρώτη περίοδος ανάλυσης (1895-1929) δεν δίνει σημαντικά μεγάλες τιμές ρυθμού μεταβολής της μέγιστης διατμητικής παραμόρφωσης παρά μόνο στη περίπτωση δύο τριγώνων. Τα τρίγωνα αυτά είναι το ΑΜΟΡΓΟΣ-ΝΑΞΟΣ-ΜΥΚΟΝΟΣ στο οποίο υπολογίστηκε $\dot{\gamma}_{tot}=2.03$ $\mu\text{strain}/\text{έτος}$ με γωνία διεύθυνσης του κύριου άξονα επιμήκυνσης (διαστολής) 84° και το ΒΕΛΟΠΟΥΛΑ-ΚΡΙΘΙΝΟ-ΜΗΛΟΣ για το οποίο υπολογίστηκαν αντίστοιχα υπολογίστηκε $\dot{\gamma}_{tot}=1.23$ $\mu\text{strain}/\text{έτος}$ με γωνία διεύθυνσης του κύριου άξονα επιμήκυνσης (διαστολής) 13° .

Κατά την δεύτερη περίοδο ανάλυσης (1929-1956) παρατηρούνται ορισμένα τρίγωνα με πολύ υψηλές τιμές $\dot{\gamma}_{tot}$ σε σχέση με τα υπόλοιπα. Πρόκειται για τα τρίγωνα ΑΜΟΡΓΟΣ-ΝΑΞΟΣ-ΜΥΚΟΝΟΣ με $\dot{\gamma}_{tot}=8.15$ $\mu\text{strain}/\text{έτος}$ και γωνία διεύθυνσης του κύριου άξονα επιμήκυνσης (διαστολής) 74° , ΑΝΤΙΠΑΡΟΣ-ΝΑΞΟΣ-ΜΥΚΟΝΟΣ με $\dot{\gamma}_{tot}=7.82$ $\mu\text{strain}/\text{έτος}$ και γωνία διεύθυνσης του κύριου άξονα επιμήκυνσης (διαστολής) 105° και ΑΝΤΙΠΑΡΟΣ-ΘΗΡΑ-ΝΑΞΟΣ με $\dot{\gamma}_{tot}=5.76$ $\mu\text{strain}/\text{έτος}$ και γωνία διεύθυνσης του κύριου άξονα επιμήκυνσης (διαστολής) 81° .

Η ΑΝΤΙΠΑΡΟΣ διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην τρίτη περίοδο ανάλυσης (1956-1975), αφού όλα τα τρίγωνα στα οποία συμμετέχει παρουσιάζουν σχετικά υψηλές τιμές. Πιο συγκεκριμένα το τρίγωνο ΑΝΤΙΠΑΡΟΣ-ΣΕΡΙΦΟΣ-ΣΥΡΟΣ έχει $\dot{\gamma}_{tot}=3.02$ $\mu\text{strain}/\text{έτος}$ και γωνία διεύθυνσης $\theta_{max} = 86^\circ$, το τρίγωνο ΑΝΤΙΠΑΡΟΣ-ΜΗΛΟΣ-ΣΕΡΙΦΟΣ έχει $\dot{\gamma}_{tot}=2.96$ $\mu\text{strain}/\text{έτος}$ και $\theta_{max} = 65^\circ$, το τρίγωνο ΑΝΤΙΠΑΡΟΣ-ΝΑΞΟΣ-ΜΥΚΟΝΟΣ έχει $\dot{\gamma}_{tot}=2.84$ $\mu\text{strain}/\text{έτος}$ και $\theta_{max} = 49^\circ$ και τέλος το τρίγωνο ΑΝΤΙΠΑΡΟΣ-ΣΥΡΟΣ-ΜΥΚΟΝΟΣ έχει $\dot{\gamma}_{tot}=2.82$ $\mu\text{strain}/\text{έτος}$ και $\theta_{max} = 101^\circ$.

Δύο είναι τα τρίγωνα που παρουσιάζουν σημαντικά υψηλές τιμές ρυθμού μεταβολής μέγιστης παραμόρφωσης κατά την τέταρτη περίοδο ανάλυσης (1929-1975). Αυτά είναι τα ΑΜΟΡΓΟΣ-ΘΗΡΑ-ΝΑΞΟΣ με $\dot{\gamma}_{tot}=3.17$ $\mu\text{strain}/\text{έτος}$ και γωνία διεύθυνσης $\theta_{max} = 103^\circ$ και το ΑΝΤΙΠΑΡΟΣ-ΘΗΡΑ-ΜΗΛΟΣ με $\dot{\gamma}_{tot}=2.67$ $\mu\text{strain}/\text{έτος}$ και γωνία διεύθυνσης $\theta_{max} = 36^\circ$.

Ενδιαφέρον έχει εδώ να παρουσιαστούν τα αποτελέσματα της ανάλυσης για τα τρίγωνα της υπό-περιοχής μελέτης τα οποία δεδομένου ότι αναλύθηκαν στο πλαίσιο των προηγούμενων δύο περιόδων ανάλυσης (1929-1956 και 1956-1975) δεν συμπεριλήφθηκαν στην ανάλυση της τετάρτης περιόδου (1929-1975), αφού αυτή δεν είναι τίποτα άλλο παρά η ενοποιημένη περίοδος των δύο προηγούμενων.

Έτσι αν δεν χρησιμοποιηθούν για τα υπόψη τρίγωνα οι μετρήσεις της εποχής 1956 και γίνει πάλι η επεξεργασία τους μόνο για τις εποχές 1929 και 1975, τότε προκύπτουν τα αποτελέσματα του πίνακα που ακολουθεί.

TRIANGLE			SUB REGION	γ_1	γ_2	θ_{max}	θ_{tot}	γ_{tot}	$\dot{\gamma}_{tot}$
ANTIPAROS	THIRA	NAXOS	CYCLADES	181.36	42.31	83.43	38.43	186.23	4.05
ANTIPAROS	MILOS	SERIFOS	CYCLADES	25.19	31.09	64.51	19.51	40.01	0.87
ANTIPAROS	SERIFOS	SYROS	CYCLADES	45.04	16.61	79.88	34.88	48.01	1.04
ANTIPAROS	SYROS	MYKONOS	CYCLADES	29.42	-41.4	117.30	72.30	50.79	1.10
ANTIPAROS	NAXOS	MYKONOS	CYCLADES	190.5	-50.61	97.44	52.44	197.11	4.28
AMORGOS	NAXOS	MYKONOS	CYCLADES	166.84	140.76	69.92	24.92	218.29	4.75
ANDROS	SYROS	MYKONOS	CYCLADES	-19.03	14.98	19.10	154.10	24.22	0.53

Πίνακας 3-10 : Αποτελέσματα ανάλυσης παραμορφώσεων τριγώνων που είχαν παραληφθεί τη τέταρτη περίοδο (1929-1975)

Table 3-10 : Deformation analysis results for omitted triangles of the fourth period (1929-1975)

Τέλος κατά την πέμπτη και τελευταία περίοδο υπήρξαν μόνο δύο τρίγωνα προς ανάλυση τα οποία έδωσαν αρκετά υψηλές τιμές ρυθμού μεταβολής μέγιστης διατμητικής παραμόρφωσης. Το τρίγωνο ΑΝΤΙΠΑΡΟΣ - ΜΗΛΟΣ-ΣΕΡΙΦΟΣ με $\dot{\gamma}_{tot}=1.92$ $\mu\text{strain}/\text{έτος}$ και γωνία διεύθυνσης $\theta_{max} = 80^\circ$ και το τρίγωνο ΑΝΤΙΠΑΡΟΣ-ΣΥΡΟΣ-ΣΕΡΙΦΟΣ με $\dot{\gamma}_{tot}=2.13$ $\mu\text{strain}/\text{έτος}$ και $\theta_{max} = 58^\circ$.

3.5.2. Σχολιασμός των αποτελεσμάτων στη περιοχή της Κρήτης

Κατά την πρώτη περίοδο ανάλυσης (1930-1953) υπάρχει μόνο ένα τρίγωνο για τη συγκεκριμένη υπό - περιοχή ανάλυσης, το ΚΟΦΙΝΑΣ-ΔΙΚΤΥ-ΙΔΥ για το οποίο και υπολογίζεται $\dot{\gamma}_{tot}=14.16$ $\mu\text{strain}/\text{έτος}$, γωνία διεύθυνσης $\theta_{max} = 53^\circ$ και γωνία διεύθυνσης $\theta_{tot} = 8^\circ$. Κατά την επόμενη περίοδο μέτρησης (1953-1975) για την οποία και υπάρχουν στοιχεία για το υπόψη τρίγωνο η τιμή που παρουσιάζει είναι πολύ χαμηλή ($\dot{\gamma}_{tot}=0.69$ $\mu\text{strain}/\text{έτος}$) σε σχέση με την παραπάνω αναφερόμενη.

Η τρίτη περίοδος μέτρησης (1953-1975) δεν παρουσιάζει ιδιαίτερα υψηλές τιμές ρυθμού μεταβολής μέγιστης διατμητικής παραμόρφωσης, ενώ κατά την τέταρτη περίοδο μόνο το τρίγωνο ΘΗΡΑ-ΙΔΗ-ΜΗΛΟΣ παρουσιάζει μια ιδιαίτερα αυξημένη τιμή με $\dot{\gamma}_{tot}=1.74$ $\mu\text{strain}/\text{έτος}$ και $\theta_{max} = 8^\circ$.

3.5.3. Σχολιασμός των αποτελεσμάτων στη περιοχή των Δωδεκανήσων

Η περιοχή των Δωδεκανήσων αναλύθηκε για τη περίοδο 1951-1978 και από την ανάλυση διαπιστώθηκαν υψηλές τιμές του ρυθμού μεταβολής μέγιστης διατμητικής παραμόρφωσης στα παρακάτω τρίγωνα :

ΚΑΡΠΑΘΟΣ-ΣΚΙΑΔΙ-ΚΑΤΑΒΙΑ	με $\dot{\gamma}_{tot}=11.28$ $\mu\text{strain}/\text{έτος}$ και $\theta_{max} = 175^\circ$
ΣΑΡΙΑ-ΣΚΙΑΔΙ-ΚΑΤΑΒΙΑ	με $\dot{\gamma}_{tot}=4.83$ $\mu\text{strain}/\text{έτος}$ και $\theta_{max} = 6^\circ$
ΚΑΡΠΑΘΟΣ-ΣΑΡΙΑ-ΣΚΙΑΔΙ	με $\dot{\gamma}_{tot}=2.66$ $\mu\text{strain}/\text{έτος}$ και $\theta_{max} = 82^\circ$
ΚΑΡΠΑΘΟΣ-ΣΑΡΙΑ-ΣΥΡΝΑ	με $\dot{\gamma}_{tot}=1.63$ $\mu\text{strain}/\text{έτος}$ και $\theta_{max} = 132^\circ$

3.5.4. Σχολιασμός των αποτελεσμάτων στη περιοχή του Αιγαίου (Αν. Αιγαίο)

Η υπό – περιοχή ανάλυσης του Αιγαίου (πρόκειται ουσιαστικά για την περιοχή του Ανατολικού Αιγαίου) αναλύθηκε για τη περίοδο 1932-1975 και από την ανάλυση διαπιστώθηκε σχετικά υψηλή τιμή του ρυθμού μεταβολής μέγιστης διατμητικής παραμόρφωσης μόνο στο τρίγωνο ΑΝΔΡΟΣ-ΨΑΡΑ-ΤΡΑΧΩΝΕΣ με $\dot{\gamma}_{tot}=1.60$ $\mu\text{strain}/\text{έτος}$ και $\theta_{max} = 116^\circ$.

3.5.5. Συγκεντρωτικός σχολιασμός

Οι παρατηρήσεις του σχολιασμού της ανάλυσης ανά υπό - περιοχή μελέτης που προηγήθηκε μπορούν να συνοψιστούν στους ακόλουθους δύο πίνακες. Ο πρώτος πίνακας περιέχει τα τρίγωνα, τα οποία παρουσιάζουν αυξημένη τιμή ρυθμού μεταβολής μέγιστης διατμητικής παραμόρφωσης καθώς και τη περίοδο ανάλυσης που αυτή παρουσιάζεται.

TRIANGLE			SUB REGION	Περίοδος 1	Περίοδος 2	Περίοδος 3	Περίοδος 4	Περίοδος 5
ANTIPAROS	THIRA	NAXOS	CYCLADES		+		√	
ANTIPAROS	MILOS	SERIFOS	CYCLADES			+		+
ANTIPAROS	SERIFOS	SYROS	CYCLADES			+		+
ANTIPAROS	SYROS	MYKONOS	CYCLADES			+		
ANTIPAROS	NAXOS	MYKONOS	CYCLADES		+	+	√	
ANTIPAROS	THIRA	MILOS	CYCLADES				+	
AMORGOS	NAXOS	MYKONOS	CYCLADES	+	+		√	
AMORGOS	THIRA	NAXOS	CYCLADES				+	
KOFINAS	DIKTY	IDI	CRETE		+		+	
THIRA	IDI	MILOS	CRETE					
SARIA	SKIADI	KATAVIA	DOD/NESE		+			
KARPATOS	SKIADI	KATAVIA	DOD/NESE		+			
KARPATOS	SARIA	SKIADI	DOD/NESE		+			
KARPATOS	SARIA	SYRNA	DOD/NESE		+			
ANDROS	PSARA	TRACHONES	AEGEAN				+	

Πίνακας 3-11 : Τρίγωνα με υψηλή τιμή μέγιστης διατμητικής παραμόρφωσης

Table 3-11 : Triangles with high value of total shear strain

Στον πίνακα αυτόν με το σύμβολο ∇ εμφανίζονται τα τρίγωνα, για τα οποία ενώ υπάρχουν δεδομένα τόσο για την 2^η όσο και για την 3^η περίοδο ανάλυσης εντούτοις υπολογίστηκαν οι παράμετροι του τανυστή παραμόρφωσης και για την 4^η περίοδο. Οι διατμητικές τάσεις και τα λοιπά στοιχεία και για την τέταρτη ενοποιημένη περίοδο υπολογίστηκαν μέσω της ίδιας διαδικασίας ανάλυσης που εφαρμόστηκε για τις άλλες περιόδους.

Ο δεύτερος πίνακας περιέχει συγκεντρωτικά τις τιμές της μέγιστης διατμητικής παραμόρφωσης και της διεύθυνσης του κύριου άξονα μέγιστης επιμήκυνσης για κάθε ένα από τα παραπάνω τρίγωνα ανά περίοδο ανάλυσης.

TRIANGLE			Περίοδος 1		Περίοδος 2		Περίοδος 3		Περίοδος 4		Περίοδος 5	
			θ_{max}	$\dot{\gamma}_{tot}$	θ_{max}	$\dot{\gamma}_{tot}$	θ_{max}	$\dot{\gamma}_{tot}$	θ_{max}	$\dot{\gamma}_{tot}$	θ_{max}	$\dot{\gamma}_{tot}$
ANTIPAROS	THIRA	NAXOS	100	0.06	81	5.76	94	1.33	83	4.05	-	-
ANTIPAROS	MILOS	SERIFOS	19	0.27	153	0.60	64	2.96	65	0.87	81	1.92
ANTIPAROS	SERIFOS	SYROS	158	0.06	17	0.52	86	3.02	80	1.04	57	2.13
ANTIPAROS	SYROS	MYKONOS	179	0.03	157	1.07	101	2.82	117	1.10	-	-
ANTIPAROS	NAXOS	MYKONOS	162	0.03	105	7.82	49	2.84	97	4.28	-	-
ANTIPAROS	THIRA	MILOS	154	0.46	-	-	-	-	36	2.67	-	-
AMORGOS	NAXOS	MYKONOS	84	2.03	74	8.15	25	1.48	70	4.75	-	-
AMORGOS	THIRA	NAXOS	89	0.01	-	-	-	-	104	3.17	-	-
VELOPOULA	KRITHINO	MILOS	13	1.23	-	-	-	-	40	0.21	-	-
KOFINAS	DIKTY	IDI	-	-	53	14.16	129	0.69	-	-	-	-
THIRA	IDI	MILOS	-	-	-	-	-	-	8	1.74	-	-
SARIA	SKIADI	KATAVIA	-	-	-	-	6	4.83	-	-	-	-
KARPATHOS	SKIADI	KATAVIA	-	-	-	-	175	11.28	-	-	-	-
KARPATHOS	SARIA	SKIADI	-	-	-	-	82	2.66	-	-	-	-
KARPATHOS	SARIA	SYRNA	-	-	-	-	132	1.63	-	-	-	-
ANDROS	PSARA	TRACHONES	-	-	-	-	-	-	117	1.60	-	-

Πίνακας 3-12 : Τρίγωνα με υψηλή τιμή μέγιστης διατμητικής παραμόρφωσης

Table 3-12 : Triangles with high value of total shear strain

Οι προηγούμενοι δύο πίνακες περιέχουν το σύνολο των αποτελεσμάτων της ανάλυσης τα οποία είναι σε θέση να δώσουν πληροφορίες και να ερμηνεύσουν την διαχρονική τεκτονική συμπεριφορά της περιοχής μελέτης. Η μελέτη δε και ερμηνεία των αποτελεσμάτων αυτών παρέχουν τα βασικά συμπεράσματα, αναφορικά με τον προσδιορισμό των παραμορφώσεων των υπό-περιοχών της περιοχής μελέτης από την ανάλυση των ιστορικών γεωδαιτικών δεδομένων, τα οποία παρουσιάζονται και αναλύονται σε ξεχωριστή ενότητα του κεφαλαίου που ακολουθεί.

4. ΙΣΤΟΡΙΚΑ ΓΕΩΦΥΣΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΚΑΙ ΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

4.1. Εισαγωγικά Στοιχεία

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται συμπληρωματικά στοιχεία και δεδομένα μετρήσεων για τη περιοχή μελέτης, με κύρια επιδίωξη να λειτουργήσουν επικουρικά στην ερμηνεία των αποτελεσμάτων της ανάλυσης, που προηγήθηκε, με τελικό σκοπό τον προσδιορισμό της διαχρονικής τεκτονικής συμπεριφοράς της περιοχής του Νοτίου Αιγαίου.

Πιο συγκεκριμένα παρουσιάζονται τρεις διαφορετικές κατηγορίες δεδομένων και στοιχείων. Η πρώτη κατηγορία είναι τα διαθέσιμα γεωφυσικά δεδομένα, τα οποία προέρχονται από το αρχείο της ΓΥΣ και αφορούν δεδομένα βαρύτητας (σταθμών 1^{ης} και 2^{ας} τάξεως) και γεωμαγνητισμού που καλύπτουν διαχρονικά τη περιοχή.

Η δεύτερη κατηγορία αφορά στοιχεία που προέρχονται από έρευνες που έλαβαν χώρα στη περιοχή με σκοπό τον προσδιορισμό των παραμορφώσεων αυτής με χρήση γεωδαιτικών μετρήσεων τόσο επιγείων (γωνιομετρήσεις) όσο και κυρίως δορυφορικών.

Τέλος η τρίτη κατηγορία στοιχείων αναφέρεται στα αποτελέσματα ερευνών που βασίστηκαν στην επεξεργασία και ανάλυση σεισμικών γεγονότων για να προσδιορίσουν τις τάσεις και παραμορφώσεις της περιοχής μελέτης.

Η αξιοποίηση των παραπάνω κατηγοριών στοιχείων και δεδομένων και η συνδυαστική τους ανάλυση με τα αποτελέσματα των παραμορφώσεων, όπως προέκυψαν από τις ιστορικές μετρήσεις γωνιών εκτιμάται ότι μπορεί να συνεισφέρει σημαντικά στην τεκμηρίωση των τελευταίων και τελικά στον προσδιορισμό της τεκτονικής συμπεριφοράς της περιοχής μελέτης από μια κατεύθυνση διαφορετική αυτών της γεωλογίας ή της σεισμολογίας.

Επιπλέον στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται μια πρώτη ερμηνεία των αποτελεσμάτων της επεξεργασίας και ανάλυσης των ιστορικών γεωδαιτικών δεδομένων, όπως έλαβαν χώρα και παρουσιάζονται στο κεφάλαιο που προηγήθηκε.

4.2. Ιστορικά Γεωφυσικά Δεδομένα

Τα γεωφυσικά δεδομένα βαρύτητας και γεωμαγνητισμού, τα οποία είναι διαθέσιμα για τη περιοχή μελέτης παρουσιάζονται στην συγκεκριμένη ενότητα. Ακολουθούν τρεις υποενότητες, όπου στη πρώτη γίνεται μια αναφορά σε ερευνητικές προσπάθειες που εξετάζουν την συσχέτιση αυτής της κατηγορίας δεδομένων με την τεκτονική και σεισμική συμπεριφορά μιας περιοχής, ενώ στις επόμενες δύο παρουσιάζονται τα ιστορικά δεδομένα βαρύτητας και γεωμαγνητισμού αντίστοιχα, τα οποία είναι διαθέσιμα για την περιοχή μελέτης.

4.2.1. Γεωφυσικά δεδομένα και τεκτονική συμπεριφορά μιας περιοχής

Η προσπάθεια συσχέτισης των μεταβολών της βαρύτητας μιας περιοχής με την σεισμική δραστηριότητα αυτής δεν είναι κάτι καινούργιο στην διεθνή ερευνητική κοινότητα. Αρκετές ερευνητικές δραστηριότητες έχουν λάβει χώρα στο παρελθόν με σκοπό την συσχέτιση των μεταβολών της βαρύτητας με συγκεκριμένα σεισμικά γεγονότα και ενδεικτικά αναφέρονται οι (Oliver, Kane and Pakiser, 1961) και (Barnes, 1966).

Πιο πρόσφατες έρευνες, οι οποίες συνδυάζουν διαχρονικές μετρήσεις βαρύτητας και σεισμική δραστηριότητα καταλήγουν σε ορισμένα βασικά συμπεράσματα, ιδιαίτερα χρήσιμα για την παρούσα διατριβή.

Το 2010 οι Issawy et al (Issawy et al., 2010) μελέτησαν τις διαχρονικές μεταβολές βαρύτητας στο δίκτυο έντεκα συνολικά σταθμών, κατάλληλα τοποθετημένων στην ευρύτερη περιοχή του Κάιρο, καθώς και την συσχέτιση τους με την σεισμική δραστηριότητα της εν λόγω περιοχής.

Πιο συγκεκριμένα επεξεργάστηκαν και ανέλυσαν τις διαφορές των μετρήσεων βαρύτητας των έντεκα σταθμών για δύο διαδοχικές χρονικές περιόδους, την 2000-2004 (1^η περίοδος) και 2004-2007 (2^η περίοδος) αντίστοιχα.

Η ανάλυση έδειξε αύξηση των τιμών βαρύτητας στο Νότιο τμήμα του δικτύου (με μέγιστη τιμή τα +41 μgal) και μείωση στο Βόρειο τμήμα του δικτύου (με ελάχιστη τιμή τα -41 μgal), κατά την πρώτη περίοδο και ακριβώς αντίστροφη συμπεριφορά κατά την δεύτερη περίοδο (με μέγιστη τιμή +49 μgal στο Βόρειο τμήμα του δικτύου και ελάχιστη -50 μgal στο Νότιο τμήμα στους ίδιους όμως σταθμούς).

Οι Issawy et al. διαπιστώνουν ότι υπάρχει συσχέτιση μεταξύ των μεταβολών βαρύτητας και της σεισμικής δραστηριότητας με αύξηση των τιμών πριν την εμφάνιση σχετικά μεγάλων σεισμικών γεγονότων ($M > 4$) και σχεδόν ισόποση μείωση αμέσως μετά.

Αποδίδουν δε αυτή την αύξηση στην παραμόρφωση των περιοχών ή την συσσώρευση των τάσεων πριν την εμφάνιση του σεισμού και τη μείωση στην έκλυση της ενεργείας και την απελευθέρωση των τάσεων που προκαλείται από το σεισμό.

Βασικό συμπέρασμα της εργασίας των Issawy et al. είναι ότι υπάρχει σχέση μεταξύ των μεταβολών της βαρύτητας και της διαδικασίας συνεχούς παραμόρφωσης μιας περιοχής δεν μπορεί όμως να τεκμηριωθεί μια άμεση σχέση των πρώτων με την εμφάνιση σεισμών εξαιτίας του μικρού αριθμού των διαθέσιμων παρατηρήσεων.

Το 2011 οι Zhan et al. (Zhan et al., 2011) επεξεργάστηκαν και ανέλυσαν τα δεδομένα βαρύτητας του κρατικού δικτύου βαρύτητας της Κίνας (εικοσιπέντε σταθμοί μέτρησης απόλυτης βαρύτητας και τριακόσιοι εξήντα σχετικής) για τέσσερις διαφορετικές χρονολογίες μετρήσεων (1998-2000-2002-2005).

Προέβησαν επίσης στη συσχέτιση των παραπάνω δεδομένων με εννιά μεγάλα ($M > 6.8$) σεισμικά γεγονότα, τα οποία έλαβαν χώρα στην κινέζικη επικράτεια από τον Νοέμβριο του 2001 έως τον Αύγουστο του 2008.

Η κύρια διαπίστωση της ως άνω μελέτης ήταν ότι πριν την εμφάνιση των υπό μελέτη σεισμικών γεγονότων έλαβαν χώρα σημαντικές μεταβολές βαρύτητας σε μια μεγάλη έκτασης περιοχή γύρω από το επίκεντρο καθενός από τα σεισμικά γεγονότα. Οι μεταβολές αυτές παρουσίαζαν παρόμοια συμπεριφορά με αυτή που αναφέρθηκε προηγουμένως στην έρευνα των Issawy et al..

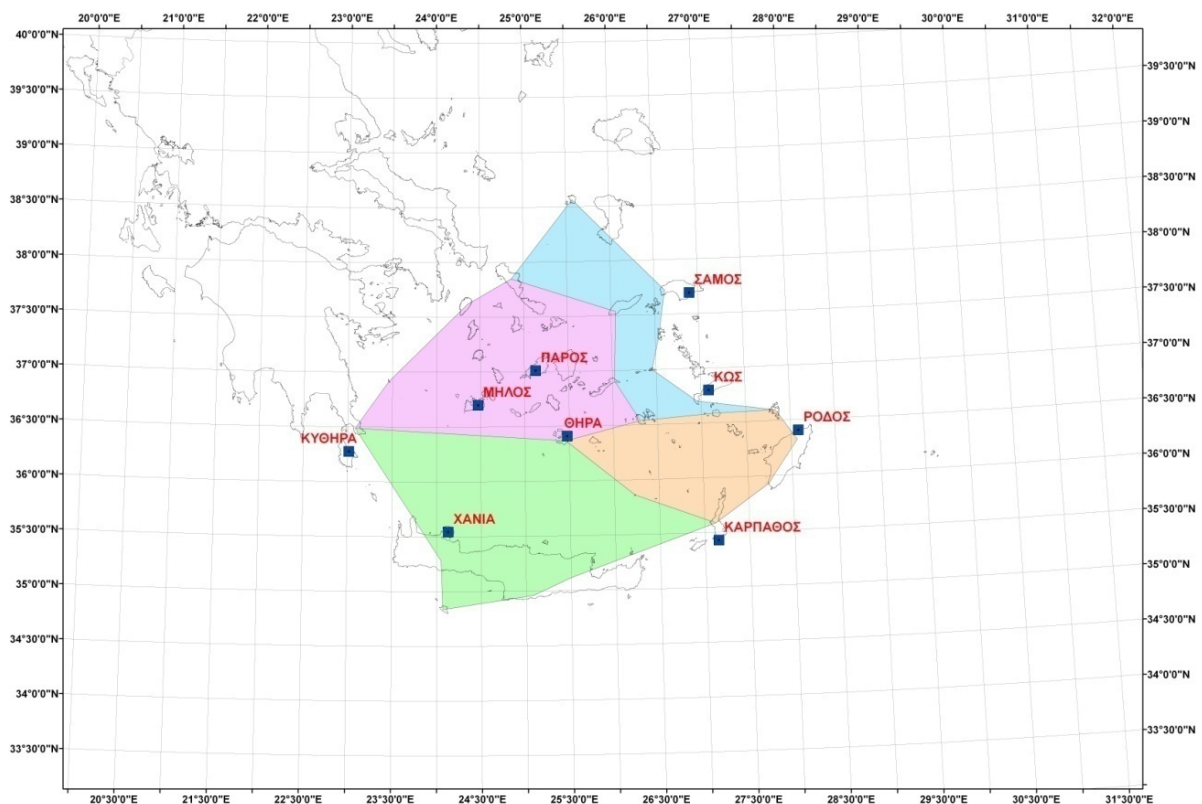
Πιο συγκεκριμένα η περιοχή γύρω από το επίκεντρο παρουσίασε αυξημένες τιμές τη περίοδο πριν τον σεισμό και μειωμένες τιμές τη περίοδο μετά τον σεισμό ενώ η περιβάλλουσα την περιοχή αυτή ζώνη είχε ακριβώς την αντίστροφη συμπεριφορά, παρουσιάζοντας τιμές βαρύτητας μειωμένες πριν τον σεισμό και αυξημένες μετά.

Η διαπίστωση αυτή είχε ως αποτέλεσμα να υιοθετηθεί η άποψη ότι οι μεταβολές βαρύτητας μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως βασική πληροφορία για τη μεσοπρόθεσμη (μικρότερη των τριών χρόνων) πρόβλεψη μεγάλων σεισμών αν λειτουργήσουν σε συνδυασμό με τη γνώση της διαχρονικής σεισμικής συμπεριφοράς και των γεωλογικών και τεκτονικών χαρακτηριστικών και συνθηκών της εκάστοτε περιοχής (Zhan et al., 2011).

Από τις παραπάνω δύο έρευνες καθίσταται φανερό ότι η μελέτη των διαχρονικών μεταβολών της βαρύτητας τόσο μιας τοπικής όσο και μιας ευρύτερης περιοχής (επιπέδου χώρας) μπορεί να συνεισφέρει στην ερμηνεία της τεκτονικής συμπεριφοράς μιας περιοχής, κάτω από αυστηρές όμως προϋποθέσεις.

4.2.2. Δεδομένα βαρύτητας

Η περιοχή μελέτης περιλαμβάνει ή/και ορίζεται από εννιά και δεκαπέντε σταθμούς μέτρησης βαρύτητας 1^{ης} και 2^{ας} τάξης αντίστοιχα, η γεωγραφική κατανομή των οποίων φαίνεται στις εικόνες 4-1 και 4-2 αντίστοιχα.



Εικόνα 4-1 : Σταθμοί βαρύτητας 1^{ης} τάξης

Figure 4-1 : Gravimetric stations of first order

Για τους σταθμούς πρώτης τάξεως υπάρχουν διαθέσιμες τιμές βαρύτητας για τα έτη 1986 και 1988 ενώ για κάποιους από αυτούς υπάρχουν και για τα έτη 1989 και 2000. Οι διαφορές των μετρήσεων απόλυτης βαρύτητας (σε mgals) για τις αναφερόμενες χρονικές περιόδους βρίσκονται στον πίνακα που ακολουθεί.

ΣΤΑΘΜΟΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ	ΠΕΡΙΟΔΟΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ		
	1986-1988	1988-1989	1989-2000
ΘΗΡΑ	-0.006	-	-
ΚΑΡΠΑΘΟΣ	-0.016	-	-
ΚΥΘΗΡΑ	-3.675	-	-
ΚΩΣ	-0.049	0.013	0.033
ΜΗΛΟΣ	-0.061	0.002	0.065
ΠΑΡΟΣ	-0.007	0.000	0.028
ΡΟΔΟΣ	-0.035	0.002	-
ΣΑΜΟΣ	-0.102	0.059	0.044
ΧΑΝΙΑ	0.013	-	-

Πίνακας 4-1 : Διαφορές απόλυτων τιμών βαρύτητας για τους σταθμούς 1^{ης} τάξης της περιοχής μελέτης

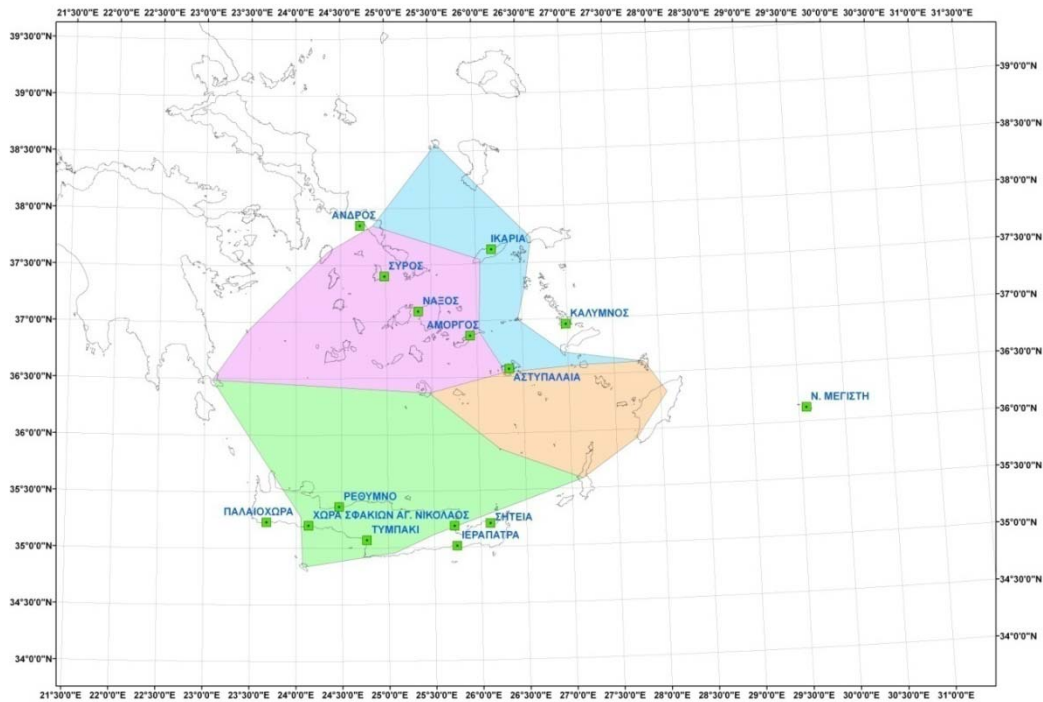
Table 4-1 : Gravity changes for first order gravimetric station

Όπως προκύπτει από την ανάλυση των μεταβολών το σύνολο των σταθμών πλην δύο (ΚΥΘΗΡΑ και ΧΑΝΙΑ) παρουσιάζουν την ίδια συμπεριφορά με μείωση των τιμών μεταξύ των ετών 1986 και 1988 και σταδιακή αύξηση μεταξύ των ετών 1988 και 2000. Για τους περισσότερους δε σταθμούς το άθροισμα των αυξητικών διαφορών βαρύτητας, που λαμβάνουν χώρα μεταξύ των ετών 1988 και 1989 και 1989 και 2000, ισούται σχεδόν με την αντίστοιχη μείωση που έλαβε χώρα μεταξύ των ετών 1986-1988.

Ο σταθμός των ΧΑΝΙΩΝ είναι ο μόνος που παρουσιάζει διαφορετική συμπεριφορά με αυξητική διαφορά μεταξύ των ετών 1986-1988 ενώ ο σταθμός των ΚΥΘΗΡΩΝ παρουσιάζει υπερβολική μεταβολή στις τιμές μεταξύ των ίδιων ετών, που οφείλεται στην εκ νέου κατασκευή του σταθμού σε άλλη θέση.

Αναφορικά με τους σταθμούς μέτρησης βαρύτητας δευτέρας τάξης οι διαθέσιμες τιμές βαρύτητας για αυτούς που βρίσκονται στη Νήσο Κρήτη⁵ ανήκουν στα έτη 1985 και 1996 ενώ για τους υπόλοιπους σταθμούς στα έτη 1989 και 2000.

⁵ Πρόκειται για συνολικά επτά σταθμούς



Εικόνα 4-2 : Σταθμοί βαρύτητας 2^{ης} τάξης

Figure 4-2 : Gravimetric stations of second order

Ομοίως και για τους σταθμούς μέτρησης βαρύτητας δευτέρας τάξης οι διαφορές των μετρήσεων απόλυτης βαρύτητας (σε mgals) βρίσκονται στον πίνακα που ακολουθεί.

ΣΤΑΘΜΟΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ	ΠΕΡΙΟΔΟΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ	
	1985-1996	1989-2000
ΙΕΡΑΠΕΤΡΑ	-0.027	
ΤΥΜΠΑΚΙ	-0.105	
ΣΗΤΕΙΑ	-0.041	
ΧΩΡΑ ΣΦΑΚΙΩΝ	-0.054	
ΑΓ. ΝΙΚΟΛΑΟΣ	-0.056	
ΠΑΛΑΙΟΧΩΡΑ	-0.022	
ΡΕΘΥΜΝΟ	-0.062	
Ν. ΜΕΓΙΣΤΗ		-0.073
ΑΣΤΥΠΑΛΛΙΑ		0.054
ΑΜΟΡΓΟΣ		0.025
ΚΑΛΥΜΝΟΣ		0.068
ΝΑΞΟΣ		0.021
ΣΥΡΟΣ		0.079
ΑΝΔΡΟΣ		0.047

Πίνακας 4-2 : Διαφορές τιμών βαρύτητας για τους σταθμούς 2^{ης} τάξης της περιοχής μελέτης

Table 4-2 : Gravity changes for second order gravimetric station

Η ανάλυση των μεταβολών⁶ αυτών δείχνει ότι οι δύο περιοχές έχουν διαφορετική συμπεριφορά κατά την ίδια σχεδόν χρονική περίοδο με τους σταθμούς της Κρήτης να παρουσιάζουν μια πτωτική μεταβολή και τους σταθμούς των Κυκλάδων και Δωδεκανήσων (πλην Ν. Μεγίστης) να παρουσιάζουν αυξητική μεταβολή.

Τα δεδομένα δε των σταθμών 2ας τάξης των Κυκλάδων και Δωδεκανήσων συμφωνούν, όπως ήταν αναμενόμενο, με τα αποτελέσματα των σταθμών πρώτης τάξης των αντίστοιχων περιοχών.

Πέρα των παραπάνω τιμών βαρύτητας υπάρχουν επίσης για ορισμένους από τους σταθμούς διαθέσιμες τιμές βαρύτητας για το έτος 1966, οι οποίες προέρχονται από τις μετρήσεις που πραγματοποίησε η ΓΥΣ από κοινού με την αμερικανική AMS.

Μια πρώτη επεξεργασία των παραπάνω τιμών και συγκεκριμένα η σύγκρισή τους με τα αντίστοιχα του έτους 1986 δίνει υπερβολικά υψηλές τιμές μεταβολών βαρύτητας, οι οποίες φαίνονται στο Πίνακα 4-3 (οι τιμές είναι σε mgals).

ΣΤΑΘΜΟΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ	ΠΕΡΙΟΔΟΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ
	1966-1986
ΘΗΡΑ	5.418
ΚΩΣ	-1.067
ΠΑΡΟΣ	-6.672
ΡΟΔΟΣ	3.449
ΣΑΜΟΣ	-2.439

Πίνακας 4-3 : Διαφορές απόλυτων τιμών βαρύτητας για τους σταθμούς 1^{ης} τάξης της περιοχής μελέτης μεταξύ των ετών 1966-1986

Table 4-3 : Gravity changes for first order gravimetric station the time period 1966-1986

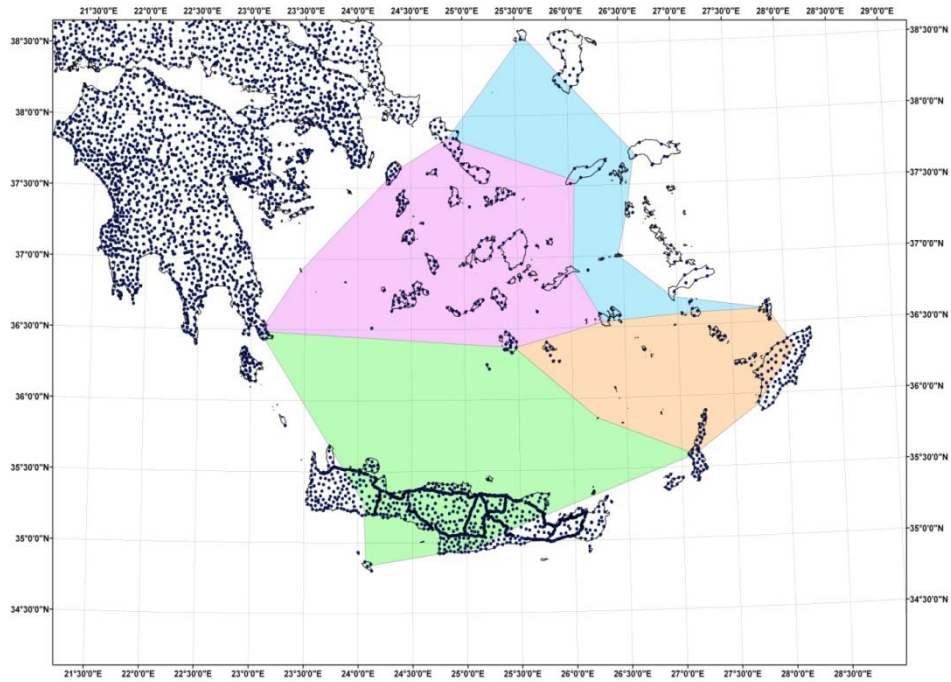
Δεδομένης της επιμέλειας με την οποία διεξήχθησαν οι μετρήσεις του 1966 καθώς και της συνοχής αυτών, οι παραπάνω παρατηρούμενες υψηλές διαφορές δε μπορούν παρά να αποδοθούν κυρίως στην αλλαγή των θέσεων των σημείων μέτρησης.

Η παραδοχή αυτή είναι σύμφωνη και με τα σύγχρονα δεδομένα μετρήσεων (1986 και μετά) αφού ανάλογης τάξης διαφορά παρατηρείται και στο σταθμό μέτρησης ΚΥΘΗΡΩΝ, όπου και εκεί υπήρχε αλλαγή της θέσης του σταθμού μέτρησης.

⁶ Για τον σταθμό μέτρησης ΙΚΑΡΙΑ δεν υπάρχουν διαθέσιμες μετρήσεις παρά μόνο για το έτος 1989 με αποτέλεσμα να μην είναι δυνατός ο προσδιορισμός της μεταβολής της βαρύτητας.

Τα διαθέσιμα, για τη περιοχή μελέτης, δεδομένα βαρύτητας 1^{ης} και 2^{ης} τάξης όπως αυτά παρουσιάστηκαν προηγουμένως οδηγούν στα κάτωθι βασικά συμπεράσματα σχετικά με την χρησιμότητα τους αναφορικά με τον προσδιορισμό και την ερμηνεία της τεκτονικής συμπεριφοράς της περιοχής μελέτης:

- Οι διαθέσιμες μετρήσεις βαρύτητας 1^{ης} και 2^{ης} τάξης δεν φαίνεται να έχουν ούτε την χωρική διασπορά ούτε και την χρονική κατανομή, που θα επέτρεπαν την εξαγωγή αξιοποιήσιμων συμπερασμάτων για τους σκοπούς της έρευνας της παρούσας διατριβής καθώς επίσης και για ανάλογες μελλοντικές έρευνες
- Παρόλη τη προηγούμενη διαπίστωση τα αποτελέσματα της επεξεργασίας και ανάλυσης των υπαρχόντων μετρήσεων δίνουν κάποια βασικά πρότυπα συμπεριφοράς, βασισμένης στη βαρύτητα, για τις διάφορες υπό-περιοχές της περιοχής μελέτης. Απαιτούνται όμως πολύ περισσότερα δεδομένα μετρήσεων για να επιβεβαιωθούν και να τεκμηριωθούν τα πρότυπα αυτά
- Ως απόρροια των προηγούμενων δύο συμπερασμάτων, η οποιαδήποτε σύγκριση και συσχέτιση των παρουσιαζόμενων βαρυτικών μετρήσεων με την σεισμοτεκτονική συμπεριφορά και την γεωλογική δομή της περιοχής κρίνεται παρακινδυνευμένη
- Πιο αξιόπιστα και ίσως περισσότερα χρήσιμα συμπεράσματα θα μπορούσαν να προέλθουν από την ανάλυση των διαχρονικών μετρήσεων βαρύτητας των τοπικών δικτύων που αναπτύχθηκαν από τη ΓΥΣ σε κάθε νησί που περιέχεται στη περιοχή μελέτης, τα οποία και αποτυπώνονται γενικά στην εικόνα που ακολουθεί. Μια ανάλυση σε αυτή την κλίμακα αν συνδυαστεί επιπλέον και με περιοδικό πρόγραμμα μετρήσεων ανά τακτά χρονικά διαστήματα είναι σίγουρο ότι μπορεί να παρέχει χρήσιμα συμπεράσματα όπως αποδεικνύουν και οι μελέτες που αναφέρθηκαν σε προηγούμενη ενότητα

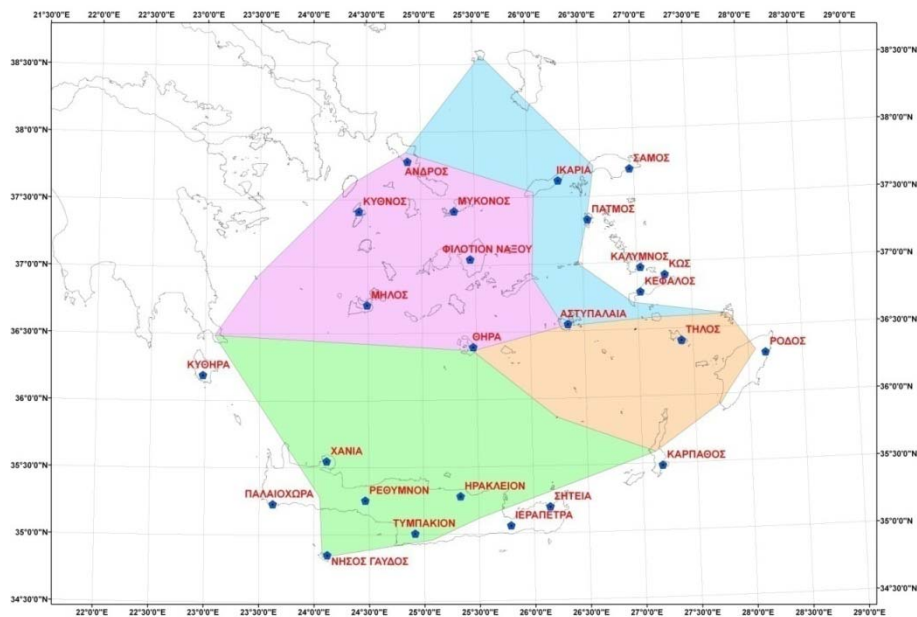


Εικόνα 4-3 : Δίκτυο πύκνωσης μετρήσεων βαρύτητας

Figure 4-3 : Network of relative gravity measurement stations

4.2.3. Δεδομένα γεωμαγνητισμού

Αναφορικά με τα δεδομένα γεωμαγνητισμού υπάρχουν στη περιοχή μελέτης είκοσι έξι σταθμοί εκτέλεσης μετρήσεων γεωμαγνητισμού, η γεωγραφική κατανομή των οποίων φαίνεται στο χάρτη που ακολουθεί.



Εικόνα 4-4 : Σταθμοί μέτρησης γεωμαγνητισμού

Figure 4-4 : Geomagnetic measurement stations

Για τους σταθμούς αυτούς υπάρχουν διαθέσιμες μετρήσεις μαγνητικής απόκλισης D για τα έτη 1985, 1990, 1995, 1998, 2005 ενώ για ορισμένους από αυτούς υπάρχουν επίσης μετρήσεις μαγνητικής απόκλισης για τα έτη 1976, 1998 και 2005.

Οι τιμές αυτές της μαγνητικής απόκλισης είναι καταγεγραμμένες στην ηλεκτρονική βάση δεδομένων της ΓΥΣ και έχουν χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή των διαχρονικών χαρτών μαγνητικών ανωμαλιών της Υπηρεσίας με αποτέλεσμα η αξιοπιστία τους να θεωρείται υψηλή.

Επίσης για ορισμένους από τους σταθμούς και για κάποιες από τις χρονολογίες υπάρχουν διαθέσιμες τιμές και για άλλα δύο γεωμαγνητικά στοιχεία, την μαγνητική έγκλιση I και την ένταση του πεδίου F. Τα δύο αυτά στοιχεία επιλέχθηκε όμως να μην χρησιμοποιηθούν καθόλου στο πλαίσιο της συγκεκριμένης διατριβής εξαιτίας δύο κυρίως λόγων, που αναλύονται στη συνέχεια.

Ο πρώτος λόγος αφορά το γεγονός ότι δεν έχουν εντοπιστεί στην ηλεκτρονική βάση δεδομένων της ΓΥΣ αλλά από επιτόπια έρευνα που πραγματοποιήθηκε στα βιβλιάρια εργασιών πεδίου με αποτέλεσμα να πρόκειται για τα πρωτογενή δεδομένα μετρήσεων, τα οποία και δεν έχουν υποστεί κανένα έλεγχο για την αξιοπιστία και ακεραιότητα τους.

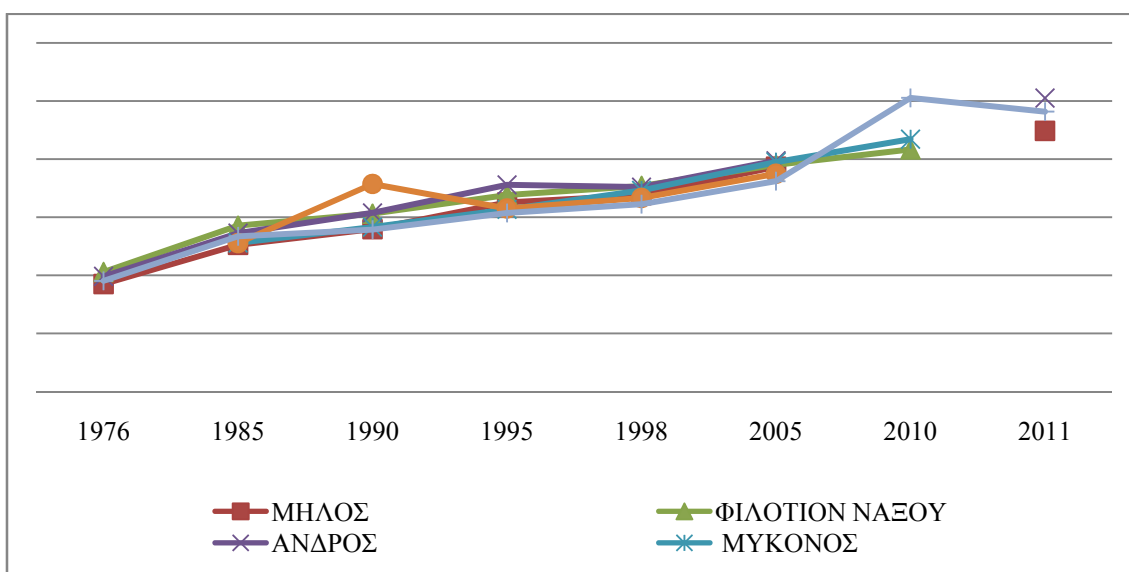
Η ούτως ή άλλως κακή χωρική και χρονική κατανομή των μετρήσεων των στοιχείων αυτών τα οποία δεν παρουσιάζουν καμία συνοχή και είναι αποσπασματικά, με άμεσο αποτέλεσμα να μην δύνανται να δώσουν χρήσιμη πληροφορία ακόμα και μετά από ενδελεχή επεξεργασία και ανάλυσή τους.

Στη βάση των παραπάνω επιλέχθηκε να επεξεργασθούν μόνο οι τιμές μαγνητικής απόκλισης και ο προσφορότερος τρόπος για αυτό κρίθηκε ότι είναι η δημιουργία γραφημάτων, τα οποία να απεικονίζουν την εξέλιξη των τιμών της μαγνητικής απόκλισης για το σύνολο των σταθμών της περιοχής αλλά και για κάθε μια από τις τρεις υπό-περιοχές (ΚΡΗΤΗ, ΚΥΚΛΑΔΕΣ, ΔΩΔΕΚΑΝΗΣΑ-ΑΝΑΤΟΛΙΚΟ ΑΙΓΑΙΟ) που αναγνωρίζονται από την ανάλυση της συμπεριφοράς των δεδομένων.

Οι τρεις υπό-περιοχές στις οποίες κατατιμήθηκε η περιοχή μελέτης προέκυψαν από μια αρχική επεξεργασία των δεδομένων μετρήσεων που κατέληξε στην ομαδοποίηση των σταθμών μέτρησης, με βάση την τιμή της μαγνητικής απόκλισης αλλά και τη χωρική κατανομή τους. Η διαδικασία κατέληξε, όπως αναμένονταν στη ταύτιση της γεωμαγνητικής συμπεριφοράς των σταθμών με την χωρική τους κατανομή.

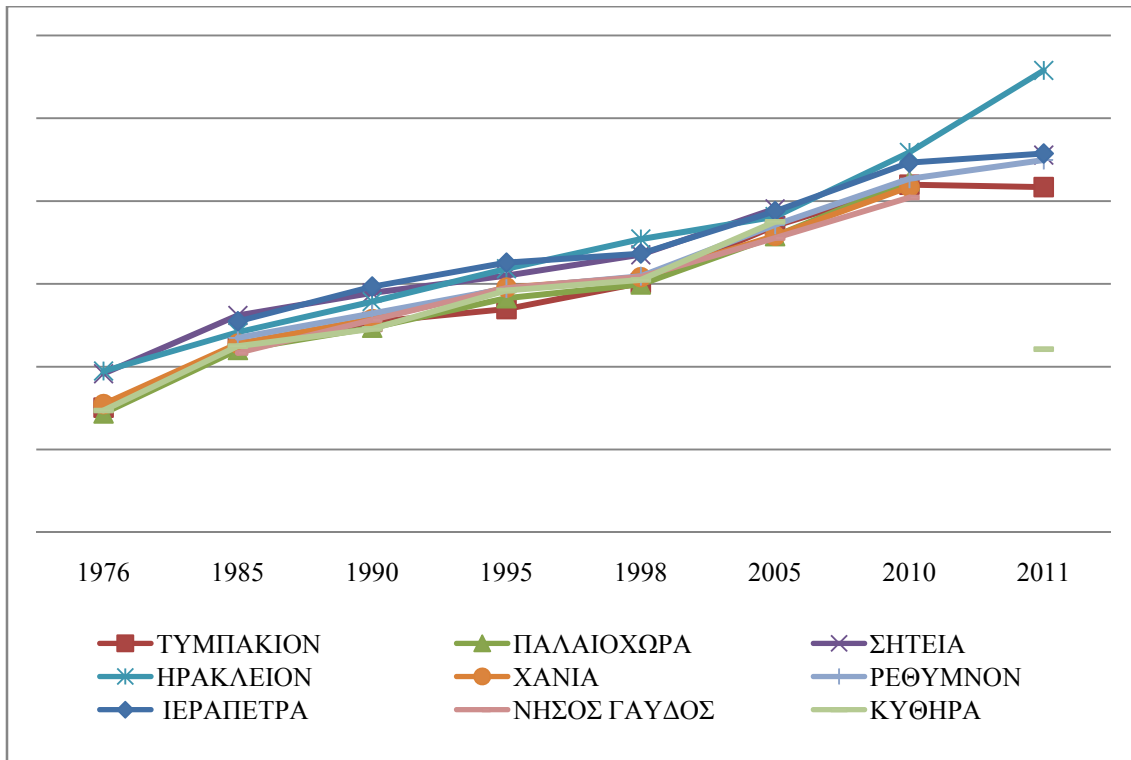
Πιο συγκεκριμένα στην συνέχεια ακολουθούν τέσσερις εικόνες, στις οποίες απεικονίζονται τα γραφήματα εξέλιξης των τιμών της μαγνητικής απόκλισης για τους σταθμούς γεωμαγνητικών μετρήσεων, οι οποίοι περιέχονται στη περιοχή μελέτης. Από τη μελέτη των γραφημάτων αυτών προκύπτουν τα επόμενα βασικά συμπεράσματα :

- Το σύνολο των σταθμών μέτρησης παρουσιάζουν σχεδόν ομοιογενή συμπεριφορά με χρονικά αυξανόμενη τιμή μαγνητικής απόκλισης
- Σε αντίθεση με την παραπάνω περιγραφόμενη συμπεριφορά υπάρχουν ορισμένοι σταθμοί που σε ορισμένες χρονικές περιόδους εμφανίζουν διαφορετική συμπεριφορά, πάντα όμως με αυξητική τάση (ενδεικτικά αναφέρονται οι σταθμοί της ΚΥΘΝΟΥ για το έτος 1990, της ΣΑΜΟΥ για το 1995, της ΡΟΔΟΥ και της ΘΗΡΑΣ για το 2010
- Μόνο ο σταθμός των ΚΥΘΗΡΩΝ παρουσιάζει διαφορετική συμπεριφορά για το έτος 2011 με την τιμή της μαγνητικής απόκλισης να κατεβαίνει στο επίπεδο του έτους 1985
- Κατόπιν των παραπάνω φαίνεται ότι τα διαθέσιμα γεωμαγνητικά δεδομένα δεν μπορούν να συνεισφέρουν σημαντικά στην παρούσα ερευνητική προσπάθεια



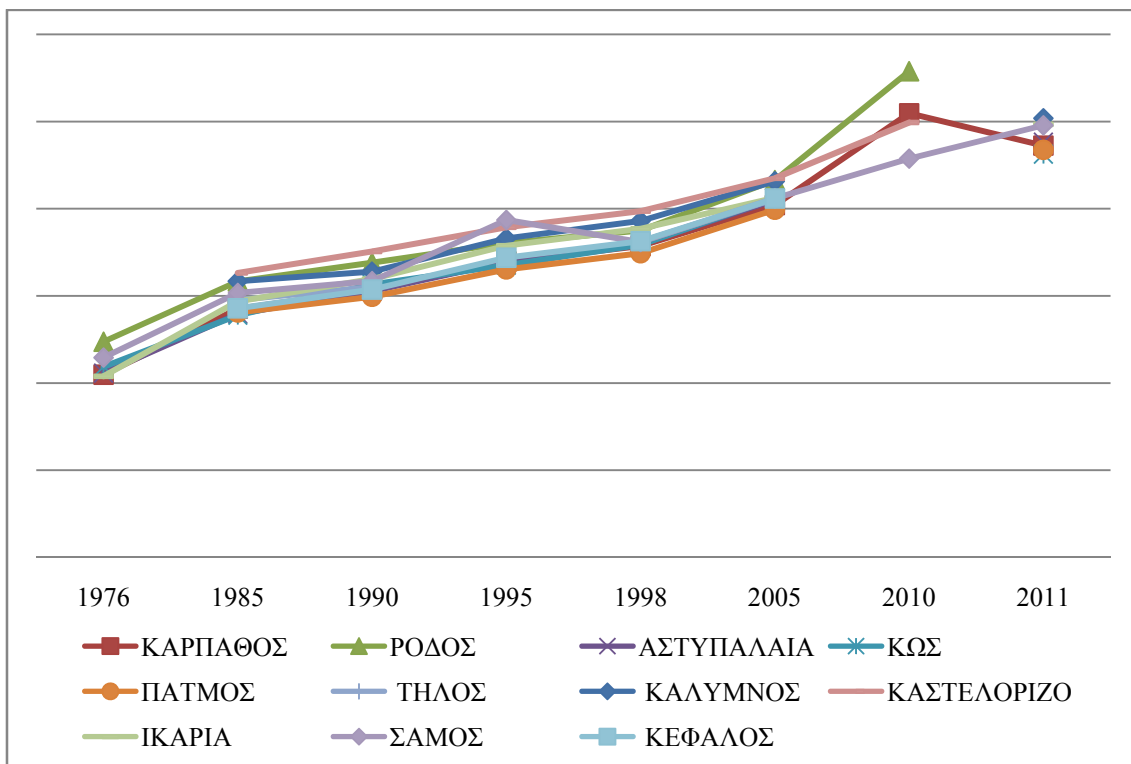
Εικόνα 4-5 : Γράφημα εξέλιξης τιμών μαγνητικής απόκλισης των σταθμών ΚΥΚΛΑΔΩΝ

Figure 4-5 : Magnetic declination values for the stations of Cyclades subarea



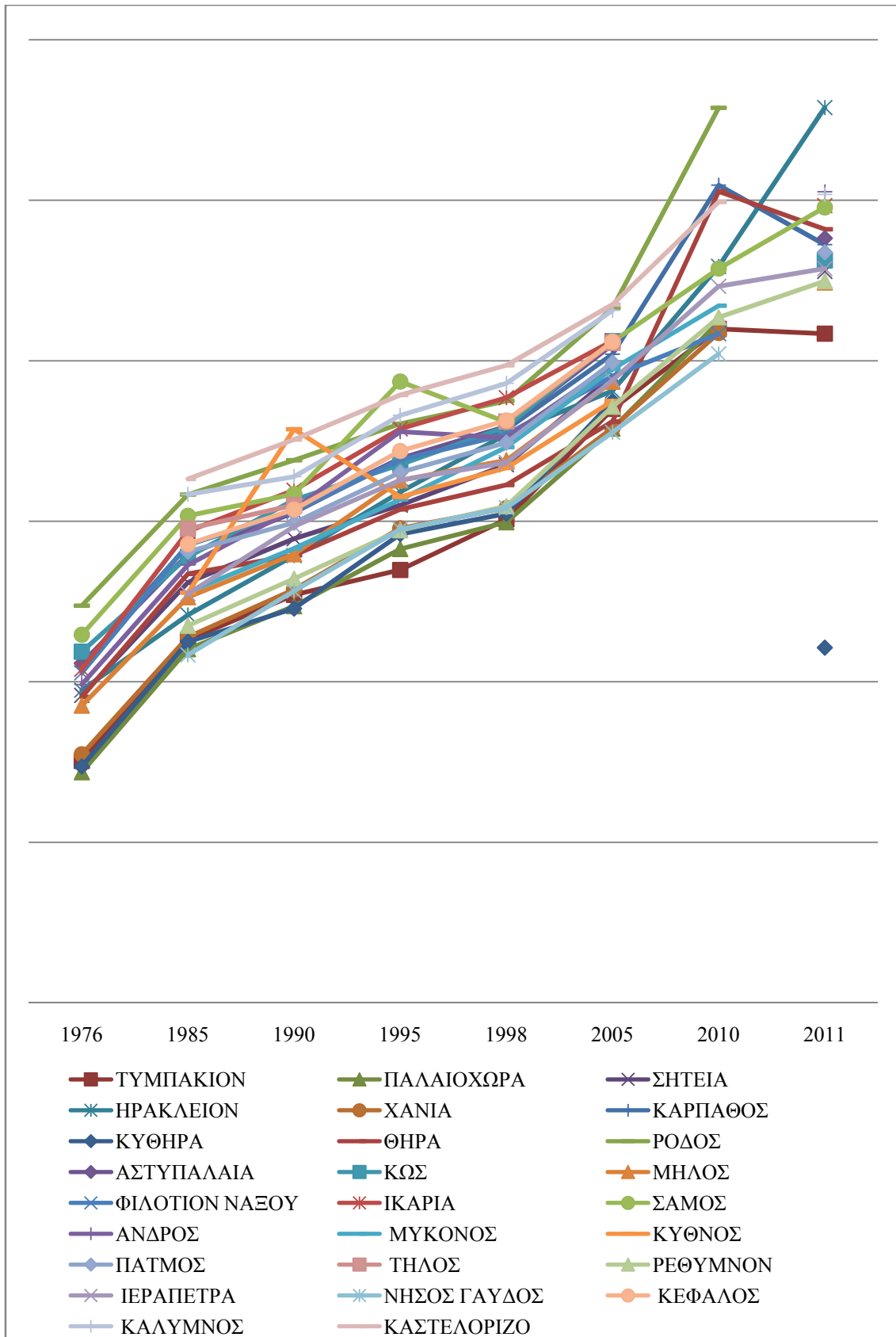
Εικόνα 4-6 : Γράφημα εξέλιξης τιμών μαγνητικής απόκλισης των σταθμών ΚΡΗΤΗΣ

Figure 4-6 : Magnetic declination values for the stations of Crete subarea



Εικόνα 4-7 : Γράφημα εξέλιξης τιμών μαγνητικής απόκλισης των σταθμών ΔΩΔΕΚΑΝΗΣΩΝ-ΑΝΑΤΟΛΙΚΟΥ ΑΙΓΑΙΟΥ

Figure 4-7 : Magnetic declination values for the stations of Dodecanese - East Aegean subarea



Εικόνα 4-8 : Γράφημα εξέλιξης τιμών μαγνητικής απόκλισης του συνόλου των σταθμών που περιλαμβάνονται στη περιοχή μελέτης

Figure 4-8 : Magnetic declination values for all stations of the study area

4.2.4. Συμπεράσματα από την επεξεργασία και ανάλυση των ιστορικών γεωφυσικών δεδομένων

Η χρησιμότητα των γεωφυσικών δεδομένων για τη μελέτη της τεκτονικής συμπεριφοράς μιας περιοχής είναι αδιαμφισβήτητη και έχει καταδειχθεί από πλήθος παλιότερων άλλα και σύγχρονων ερευνών⁷.

Στο πλαίσιο αυτό θα ήταν σίγουρα πολύτιμη η συνδρομή των αντίστοιχων διαθέσιμων, για τη περιοχή μελέτης της παρούσας διατριβής, δεδομένων ώστε καταρχήν να εξαχθούν ορισμένα συμπεράσματα για τη συμπεριφορά το υπεδάφους αυτής και στη συνέχεια να συνδυαστούν αυτά με τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τη μελέτη της συμπεριφοράς επιφανείας, όπως αυτή προσδιορίζεται από την ανάλυση των ιστορικών γεωδαιτικών μετρήσεων τριγωνισμού, ώστε να προκύψει μια ολοκληρωμένη εικόνα για την διαχρονική τεκτονική συμπεριφορά για τη περιοχή.

Τα διαθέσιμα όμως δεδομένα μετρήσεων τόσο βαρύτητας όσο και γεωμαγνητισμού, όπως αυτά συγκεντρώθηκαν, επεξεργάστηκαν, αναλύθηκαν και παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες υπό-ενότητες δεν φαίνεται να μπορούν να συνεισφέρουν σημαντικά στην εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων.

Το γεγονός αυτό είναι απόρροια αφενός της έλλειψης συνοχής αναφορικά με τη χρονική κατανομή των μετρήσεων, που δεν επιτρέπει την αποτελεσματική επεξεργασία και ανάλυση αυτών σε βάθος χρόνου ώστε να προκύψουν αξιόπιστα συμπεράσματα και αφετέρου της αραιής χωρικής κατανομής των σταθμών μέτρησης ως επακόλουθου της νησιωτικής φύσης της περιοχής μελέτης.

Για τους παραπάνω λόγους είναι προφανές ότι η χρήση των διαθέσιμων γεωφυσικών δεδομένων (βαρύτητας και γεωμαγνητισμού) δεν έχει προστιθέμενη αξία για την χωρική κλίμακα της παρούσας έρευνας θα μπορούσε όμως να συνεισφέρει αρκετά στο πλαίσιο ερευνών, που θα αναφέρονται σε μικρότερης έκτασης τοπικές περιοχές.

⁷ Όπως των (Barnes, 1966), (Chen et al., 2009), (Chen et al., 2010), (Issawy et al., 2010) και (Zhu and Zhan, 2012) για να αναφερθούν μερικές από αυτές στις οποίες ο αναγνώστης μπορεί να ανατρέξει για περισσότερες λεπτομέρειες και πληροφορίες.

4.3. Έρευνες με Χρήση Επίγειων και Δορυφορικών Μεθόδων

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα διαφόρων μελετών που διεξήχθησαν στη περιοχή μελέτης με σκοπό τον προσδιορισμό των παραμορφώσεων με χρήση γεωδαιτικών μετρήσεων. Η παρουσίαση χωρίζεται σε δύο υποενότητες, στη πρώτη υποενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα ερευνών που διεξήχθησαν κάνοντας χρήση μόνο επίγειων γεωδαιτικών μετρήσεων (τριγωνισμού) ενώ στη δεύτερη ερευνών, οι οποίες βασίζονται στη χρήση δεδομένων από ΔΣΕ.

4.3.1. Αποτελέσματα ερευνών με χρήση μετρήσεων τριγωνισμού

Για την περιοχή μελέτης είναι διαθέσιμες δύο ερευνητικές προσπάθειες σχετικά με τον προσδιορισμό της τεκτονικής της συμπεριφοράς με χρήση μετρήσεων τριγωνισμού. Η πρώτη προσπάθεια είναι αυτή των Βέη et al. (Βέης et al., 1992) ενώ η δεύτερη αυτή του Στίρου (Stiros, 1993).

Η έρευνα των Βέη et al. περιλάμβανε την σύγκριση δύο συνόλων δεδομένων γωνιομετρήσεων, τα οποία αναφέρονται στις χρονικές περιόδους 1890-1900 (μέση εποχή μετρήσεων 1895) και 1968-1982 (μέση εποχή 1975) αντίστοιχα. Για κάθε σταθμό υπολογίστηκε το διάνυσμα μετατόπισης και στη συνέχεια με βάση αυτά προσδιορίστηκαν οι διατμητικές παραμορφώσεις.

Ολόκληρη η περιοχή μελέτης χωρίστηκε σε εννέα υπό - περιοχές με βασικό κριτήριο την ομοιομορφία της παραμόρφωσης, όπως προκύπτει από τα διανύσματα μετατόπισης, με τη περιοχή των Κυκλάδων να αποτελεί μία από αυτές τις περιοχές. Για κάθε περιοχή υπολογίστηκαν ο ρυθμός περιστροφής, οι κύριοι άξονες παραμόρφωσης καθώς και ο ρυθμός της μέγιστης διατμητικής παραμόρφωσης. Ο ρυθμός μεταβολής διατμητικής παραμόρφωσης για το σύνολο της περιοχής υπολογίστηκε σε $\dot{\gamma}_{tot}=0.048 \mu\text{strain}/\text{έτος}$ ενώ για τη περιοχή των Κυκλάδων μόνο υπολογίστηκε σε $\dot{\gamma}_{tot}=0.115 \mu\text{strain}/\text{έτος}$.

Στην εικόνα που ακολουθεί φαίνονται οι κύριοι άξονες παραμόρφωσης για όλη τη περιοχή με βήμα μισής μοίρας τόσο στο γεωγραφικό μήκος όσο και στο γεωγραφικό πλάτος. Όπως είναι φανερό η περιοχή των Κυκλάδων χαρακτηρίζεται από έκταση με γενική διεύθυνση Βορρά - Νότου.



Εικόνα 4-9 : Κύριοι άξονες παραμόρφωσης σύμφωνα με τους Βέη et al.

(Βέης et al., 1992)

Figure 4-9 : Principal strain axes from Βέη et al.

(Βέης et al., 1992)

Η ερευνητική προσπάθεια του Στίρου (Stiros, 1993) βασίστηκε στα δεδομένα γωνιομετρήσεων του αρχείου της ΓΥΣ, με βάση τα οποία υπολόγισε με μεθόδους ΜΕΤ τις συντεταγμένες ενός δικτύου τριάντα οκτώ σταθμών για δύο χρονικές περιόδους⁸ μεταξύ των εποχών 1889/1895 και 1927/30 (1^η περίοδος) και 1927/30 και 1950/1970 (2^η περίοδος) αντίστοιχα.

Από τα διανύσματα μετάθεσης και χρησιμοποιώντας τη μέθοδο του Prescott (Prescott, 1976) υπολογίστηκαν οι διατμητικές παραμορφώσεις γ_1 και γ_2 για τέσσερις διαφορετικές περιοχές, οι οποίες παρουσιάζουν πιθανώς διαφορετικό πρότυπο παραμόρφωσης (Stiros, 1993).

Μια από τις περιοχές ανάλυσης ήταν οι Κυκλάδες, που συμμετείχαν στη διαδικασία επεξεργασίας με επτά σταθμούς (ΚΕΑ, ΑΝΔΡΟΣ, ΣΥΡΟΣ, ΜΥΚΟΝΟΣ, ΣΕΡΙΦΟΣ, ΚΡΙΘΙΝΟ και ΒΕΛΟΠΟΥΛΑ⁹).

⁸ Οι κοινοί σταθμοί και στις δύο χρονικές περιόδους ανέρχονται σε τριάντα δύο

⁹ Για το συγκεκριμένο σταθμό υπήρχαν δεδομένα μόνο για την δεύτερη περίοδο ανάλυσης

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης για τη περιοχή των Κυκλάδων ήταν $\dot{\gamma}_{tot}=0.28$ $\mu\text{strain}/\text{έτος}$ ($\gamma_1=0.26$ και $\gamma_2 = 0.08$ $\mu\text{strain}/\text{έτος}$) για τη 1^η περίοδο και $\dot{\gamma}_{tot}=8.46$ $\mu\text{strain}/\text{έτος}$ ($\gamma_1= -3.24$ και $\gamma_2 = -7.82$ $\mu\text{strain}/\text{έτος}$) για τη 2^η περίοδο.

4.3.2. Αποτελέσματα ερευνών με χρήση δεδομένων ΔΣΕ

Για τη περιοχή μελέτης υπάρχουν διαθέσιμες αρκετές έρευνες, οι οποίες χρησιμοποιούν δεδομένα που προέρχονται από δορυφορικές μεθόδους (SLR, GPS κα) με σκοπό να προσδιορίσουν την κινηματική συμπεριφορά και κατ' επέκταση τις διαχρονικές παραμορφώσεις της περιοχής.

Οι Le Pichon et al. (Le Pichon et al., 1995) χρησιμοποιώντας δεδομένα SLR-GPS (της περιόδου 1983-1992) επτά σταθμών κατανεμημένων στις περιοχές της Ανατολίας και του Αιγαίου και συνδυάζοντας τα με υφιστάμενες την περίοδο της έρευνας επίγειες και γεωδαιτικές μετρήσεις παρήγαγαν ένα κινηματικό μοντέλο για τη περιοχή της κεντρικής Ελλάδας.

Τα κύρια συμπεράσματα της έρευνας των Le Pichon et al., αναφορικά με την περιοχή μελέτης της παρούσας διατριβής είναι τα κάτωθι :

- Το Νότιο Αιγαίο χαρακτηρίζεται από μια νοτιοδυτική κίνηση σε σχέση με την Ευρώπη με μια ταχύτητα περίπου 30 mm/ έτος
- Στο σταθμό της Καταβιάς παρατηρείται μια έκταση προς το Νότο της τάξεως των 10 mm/ έτος
- Η περιοχή των Κυκλάδων παρουσιάζει τις μικρότερες ταχύτητες μετατόπισης από όλη τη περιοχή μελέτης
- Σε αντίθεση οι περιοχές της κοιλάδας του Λεβαντίνου (Ν. της Ρόδου) και του Νοτίου Ιονίου παρουσιάζουν αρκετά υψηλή ταχύτητα και χαρακτηρίζονται από ρήγματα με αριστερόπλευρη και δεξιόπλευρη κίνηση αντίστοιχα
- Η τεκτονική συμπεριφορά της περιοχής μπορεί να εξηγηθεί με τη διαίρεση της σε δύο μικροπλάκες (Βόρεια Ελλάδα και Ανατολία)

Το 2000 οι McClusky et al. (McClusky et al., 2000) επεξεργάστηκαν και ανέλυσαν δεδομένα μετρήσεων από ΔΣΕ τα οποία εκτείνονταν σε μια χρονική περίοδο εννέα χρόνων (1988-1997) με σκοπό τον προσδιορισμό των συγχρονων τεκτονικών διεργασιών που λαμβάνουν χώρα στη περιοχή της σύγκρουσης της αφρικανικής και ευρασιατικής πλάκας.

Οι κύριες διαπιστώσεις της συγκεκριμένης έρευνας που αναφέρονται στη περιοχή μελέτης της παρούσας διατριβής είναι τα κάτωθι :

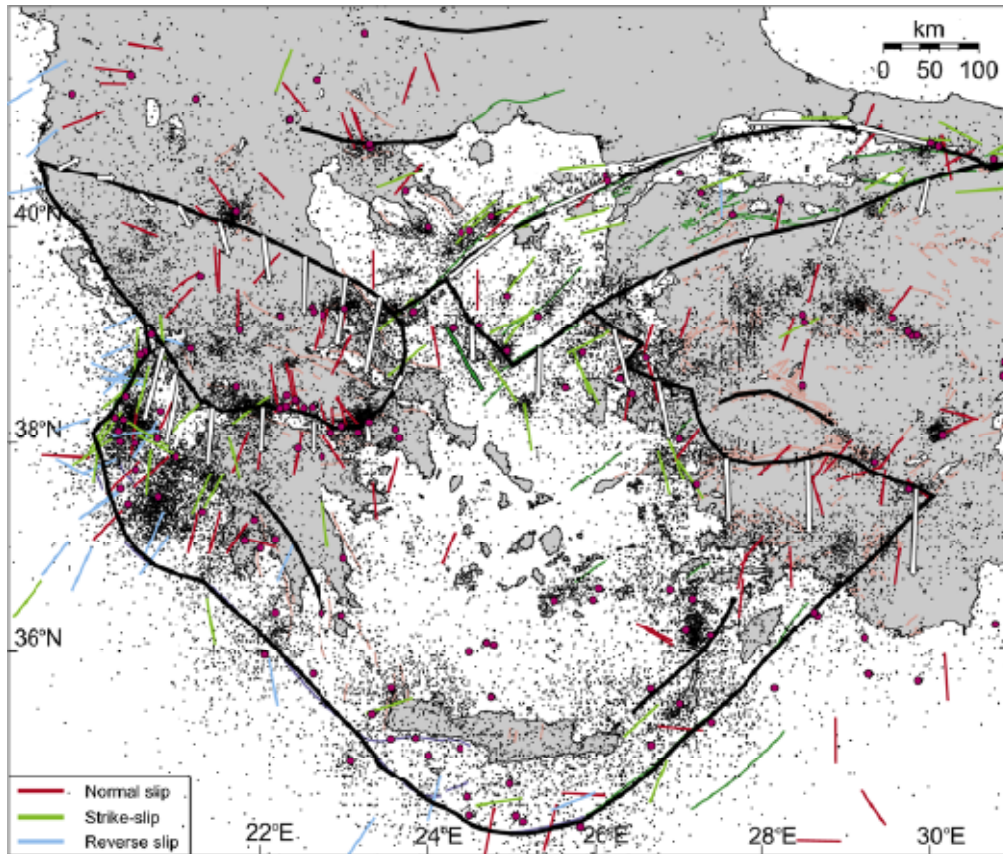
- Το Νότιο Αιγαίο κυριαρχείται από μια νοτιοδυτική κίνηση σε σχέση με την Ευρώπη με μια ταχύτητα περίπου 30 mm/ έτος και χαρακτηρίζεται από χαμηλό επίπεδο σεισμικότητας και μικρή εσωτερική παραμόρφωση της τάξεως των 2 mm/έτος
- Οι σταθμοί μέτρησης ΔΣΕ που βρίσκονται στο ΝΑ άκρο της περιοχής μελέτης (Καταβιά, Κάρπαθος, Αστυπάλαια κα) παρουσιάζουν υψηλές ταχύτητες με αριστερόστροφη περιστροφή ως προς τη προηγούμενη ΝΔ κίνηση και με κατεύθυνση την ελληνική τάφρο, με το σταθμό της Καταβιάς να κινείται ΝΑ με ταχύτητα 10 mm/ έτος ως προς το Αιγαίο

Το 2004 οι Kreemer και Chamot-Rooke (Kreemer and Chamot-Rooke, 2004) υπολόγισαν ένα συνεχές πεδίο ταχυτήτων και ρυθμών παραμόρφωσης, με χρήση των διανυσμάτων ταχυτήτων που είχαν παραχθεί από διάφορες έρευνες μέχρι τότε και τα οποία ανήγαγαν σε ένα σταθερό πλαίσιο αναφοράς της Ευρασίας.

Η μελέτη των Kreemer και Chamot-Rooke επιβεβαίωσε την ΝΔ κίνηση του Αιγαίου σε σχέση με την Ευρασία, την οποία είχαν διαπιστώσει και οι μέχρι τότε μελέτες (Le Pichon et al. και McClusky et al.), ενώ διαπίστωσε επίσης ότι η περιοχή της κεντρικής Κρήτης χαρακτηρίζεται από ΒΒΔ-ΝΝΑ συμπίεση, η ανατολική Κρήτη από μικρή έκταση κατά την κατεύθυνση Α-Δ και η περιοχή της Ρόδου από ΒΔ-ΝΑ συμπίεση.

Την ίδια χρονιά (2004) δημοσιεύτηκε η μελέτη των Nyst και Thatcher (Nyst and Thatcher, 2004), οι οποίοι αναλύοντας τα δεδομένα έξι εργασιών μέτρησης συνολικά 374 σταθμών με χρήση ΔΣΕ κατέληξαν σε ένα μοντέλο τεσσάρων μικροπλακών, το οποίο περιγράφει την τεκτονική συμπεριφορά της ευρύτερης περιοχής του Αιγαίου.

Το Ν. Αιγαίο αποτελεί μια από αυτές τις μικροπλάκες και παρουσιάζει ρυθμό κύριας διαστολικής παραμόρφωσης της τάξεως των 0.047 $\mu\text{strain}/\text{έτος}$ με τον άξονα αυτής να σχηματίζεται σε γωνία διεύθυνσης 115° .



Εικόνα 4-10 : Οι τέσσερις μικροπλάκες και η σεισμική δραστηριότητα της περιοχής του Αιγαίου σύμφωνα με τους Nyst και Thatcher

(Nyst and Thatcher, 2004)

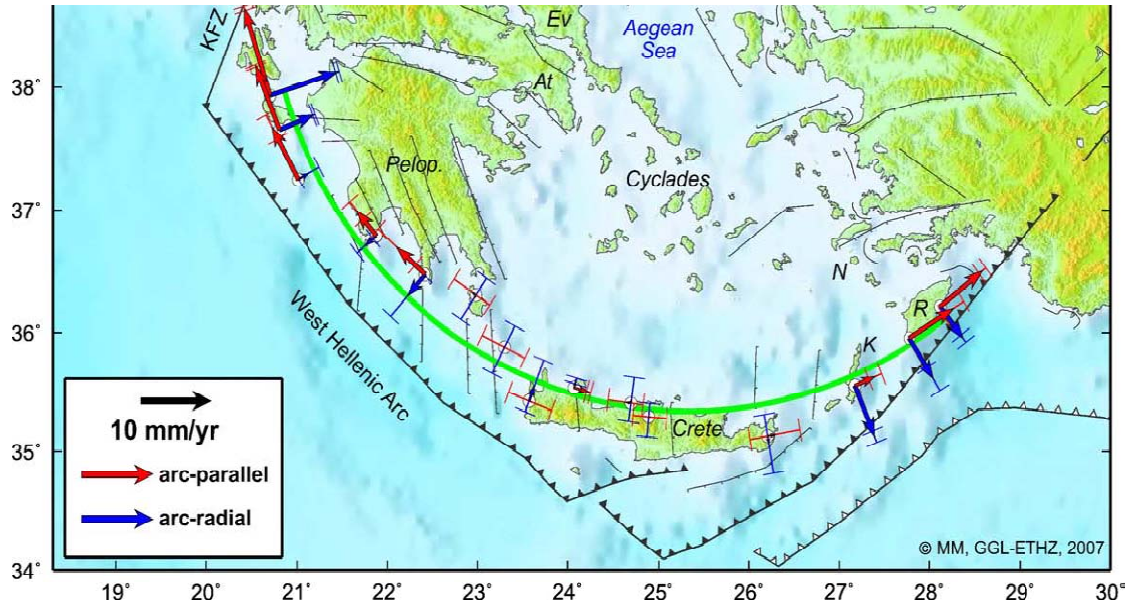
Figure 4-10 : The four microplates and the seismicity of the Aegean region

(Nyst and Thatcher, 2004)

Όπως γίνεται φανερό και από την Εικόνα 4-10 η μελέτη και ανάλυση των δεδομένων ΔΣΕ καταδεικνύει ότι στη περιοχή του Αιγαίου το μεγαλύτερο μέρος της σεισμικής δραστηριότητας λαμβάνει χώρα στα όρια των προτεινομένων μικροπλακών (Nyst and Thatcher, 2004), για αυτό και ο ακριβής προσδιορισμός έχει ιδιαίτερη σημασία.

Οι Hollenstein et al. (Hollenstein et al., 2008) διεξήγαγαν το 2008 μια μελέτη όπου παρουσιάζονταν οι μετακινήσεις και παραμορφώσεις του φλοιού της γήινης επιφανείας στη περιοχή της Ελλάδας μέσα από την επεξεργασία και ανάλυση δεδομένων μέτρησης ΔΣΕ.

Τα δεδομένα για την περιοχή της Ελλάδας προέρχονται από ένα συνδυασμό σταθμών συνεχούς μέτρησης (CGPS), συνολικά 22 σταθμοί με χωρική κατανομή από το Ιόνιο έως τη Ρόδο και χρονική κατανομή από το 1995 έως το 2003, και εργασιών επαναμέτρησης σε 76 σταθμούς, οι οποίες έλαβαν χώρα από το 1992 έως το 2003.



Εικόνα 4-11 : Εφαπτομενικές και ακτινικές συνιστώσες (ενός κύκλου που προσεγγίζει τις θέσεις των σταθμών μέτρησης) των διανυσμάτων ταχύτητας, όπως αυτά έχουν υπολογιστεί από την ανάλυση των μετρήσεων ΔΣΕ από τους Hollenstein et al.

(Hollenstein et al., 2008)

Figure 4-11 : Tangential and radial components of GPS-velocity vectors with respect to a circle which optimally fits the plotted GPS sites

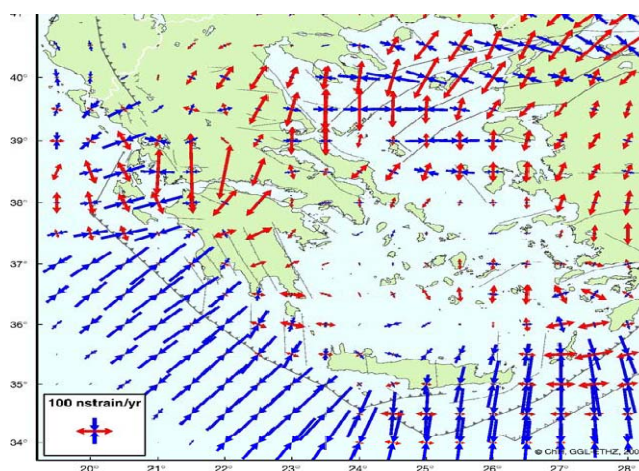
(Hollenstein et al., 2008)

Τα κύρια σημεία της παραπάνω μελέτης που αναφέρονται στη περιοχή ενδιαφέροντος της παρούσας διατριβής είναι τα κάτωθι :

- Το Νότιο Αιγαίο χαρακτηρίζεται από μια ομογενή κίνηση προς τα Δυτικά
- Υπάρχει μια περιοχή (μικροπλάκα) μικρής εσωτερικής παραμόρφωσης , η οποία περιλαμβάνει την Αττική, την Ν. Εύβοια, τις Κυκλάδες, την Κρήτη και την Πελοπόννησο
- Στο Νοτιοανατολικό τμήμα της περιοχής μελέτης παρατηρείται μια ιδιαίτερα σημαντική κίνηση της τάξεως των 2-10 mm/έτος με τη Ρόδο να κινείται προς τα Ανατολικά και την Κάρπαθο προς τα Νοτιοανατολικά

- Παρατηρείται επίσης μια γενική επιμήκυνση με κατεύθυνση Ανατολή - Δύση κατά μήκος του Νοτίου Αιγαίου (της Ελληνικής Τάφρου). Πιο συγκεκριμένα τόσο στο Ανατολικό όσο και στο Δυτικό άκρο διαπιστώνεται μια διαστολή συνολικού μεγέθους 199 mm/έτος ενώ στο κεντρικό τμήμα της τάφρου δεν παρατηρείται ιδιαίτερη παραμόρφωση.

Στο πλαίσιο της υπόψη μελέτης υπολογιστήκαν επίσης το πεδίο των ρυθμών μεταβολής των οριζόντιων παραμορφώσεων, το οποίο και απεικονίζεται στην εικόνα που ακολουθεί με την μορφή των κύριων αξόνων επιμήκυνσης και συμπίεσης.



Εικόνα 4-12 : Πεδίο κύριων παραμορφώσεων (κύριοι άξονες και ιδιοτιμές) σύμφωνα με τους Hollenstein et al.

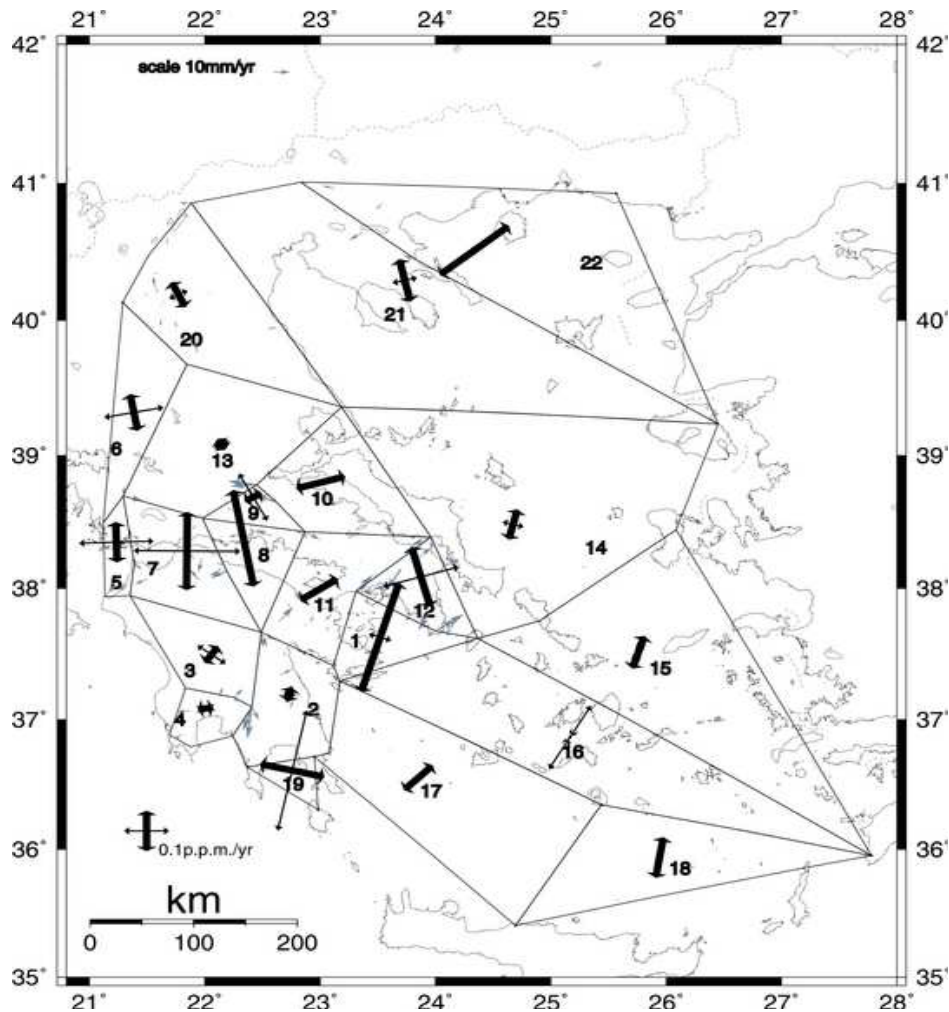
(Hollenstein et al., 2008)

Figure 4-12 : Field of strain rate tensor (principal axes and eigenvalues)

(Hollenstein et al., 2008)

Το 2010 δημοσιεύθηκε η εργασία της Ροντογιάννη (Rontogianni, 2010), η οποία χρησιμοποίησε δεδομένα από 18 εργασίες μέτρησης με ΔΣΕ (χρονικό διάστημα 1994-2000) για να καταλήξει σε μια ολοκληρωμένη επίλυση του συνόλου των εργασιών (43 σταθμοί του παγκόσμιου δικτύου IGS και 280 σταθμοί στην ελληνική επικράτεια).

Το αποτέλεσμα της επίλυσης αυτής ήταν ο προσδιορισμός του πεδίου οριζόντιων ταχυτήτων σε ένα πλαίσιο αναφοράς (ITRF 2000) σταθερό ως προς την Ευρώπη. Από το πεδίο αυτό προσδιορίστηκαν στην συνέχεια οι ρυθμοί μεταβολής των παραμορφώσεων της περιοχής με δύο μεθόδους (των διακριτών πολυγώνων και της επιφάνειας ελάχιστης καμπυλότητας).



Εικόνα 4-13 : Πεδίο ρυθμών μεταβολής κύριων παραμορφώσεων συμφώνα με τη μελέτη της Ροντογιάννη

(οι κύριοι άξονες επιμήκυνσης και συμπίεσης απεικονίζονται με έντονες και λεπτές γραμμές αντίστοιχα)(Rontogianni, 2010)

Figure 4-13 : Field of strain rate tensor

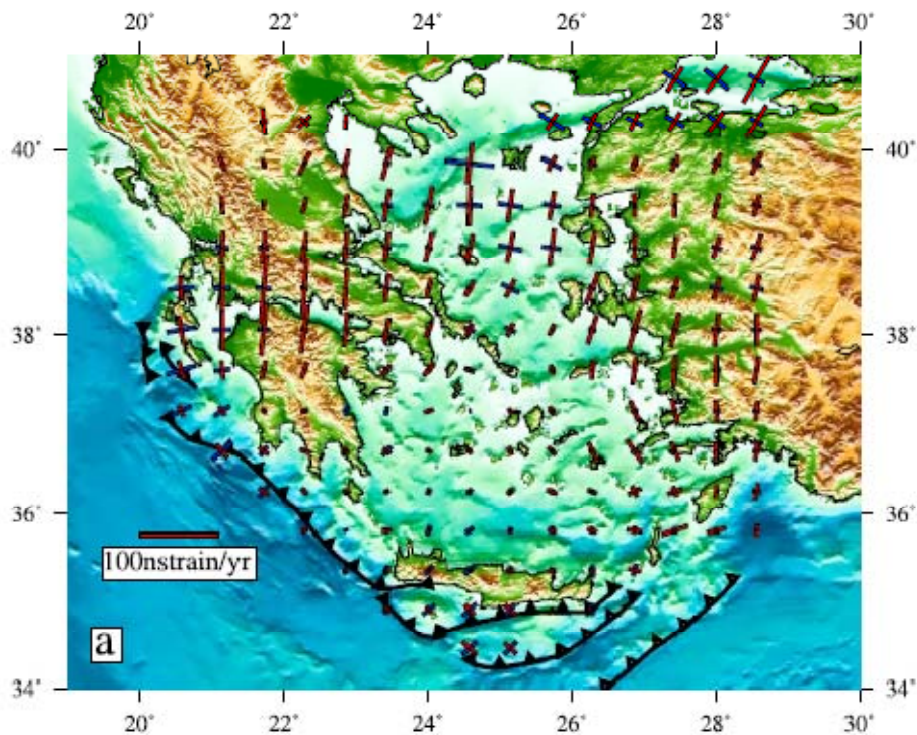
(principal extensional axes are shown as thick lines and compressional axes as thin lines (Rontogianni, 2010)

Τα κύρια συμπεράσματα από την εργασία της Ροντογιάννη (Rontogianni, 2010) είναι τα κάτωθι :

- Η παραμόρφωση, που υπολογίζεται με βάση τις δορυφορικές μετρήσεις, είναι μεγαλύτερη από την παραμόρφωση που υπολογίζεται με βάση τα σεισμολογικά δεδομένα γεγονός που οδηγεί στη πρόταση ότι η συσσωρευμένη τάση στη περιοχή δεν έχει ακόμα εκλυθεί από τη σεισμική δραστηριότητα

- Στο Νότιο Αιγαίο και τις Κυκλάδες παρατηρείται μια αλλαγή στην συμπεριφορά, σε σχέση με την Κεντρική Ελλάδα, που χαρακτηρίζεται από αριστερόστροφη περιστροφή
- Το Κεντρικό Αιγαίο παρουσιάζει διαστολική παραμόρφωση με διεύθυνση ΒΑ-ΝΔ (0.08 rpm/έτος) και με την περιοχή των Κυκλάδων να έχει σχεδόν μηδενικούς ρυθμούς παραμόρφωσης

Το 2010 παρουσιάστηκε επίσης η εργασία των Floyd et al. (Floyd et al., 2010) η οποία βασίστηκε σε δεδομένα ΔΣΕ 38 εργασιών μετρήσεων, οι οποίες έλαβαν χώρα από 1991 έως το 2004, καθώς επίσης και μόνιμων σταθμών μέτρησης ΔΣΕ με σκοπό την δημιουργία ενός ομογενούς συνόλου δεδομένων σε ένα κοινό πλαίσιο αναφοράς.



Εικόνα 4-14 : Κύριοι άξονες παραμόρφωσης σύμφωνα με τους Floyd et al.

(οι κύριοι άξονες επιμήκυνσης και συμπίεσης απεικονίζονται με κόκκινο και μπλέ χρώμα αντίστοιχα)(Floyd et al., 2010)

Figure 4-14 : Principal axes of strain rate

**(principal extensional axes are shown as red bars and compressional axes as blue bars)
(Floyd et al., 2010)**

Από την εργασία των Floyd et al. προκύπτουν τα κάτωθι συμπεράσματα :

- Επιβεβαιώνεται η νοτιοδυτική κίνηση του Αιγαίου ως προς την Ευρασία, η οποία έχει διαπιστωθεί και από πλήθος προηγούμενων μελετών
- Οι Κυκλάδες και το Νότιο Αιγαίο μετακινούνται ως ομογενής περιοχή (μικροπλάκα)
- Η μελέτη της τεκτονικής συμπεριφοράς της περιοχής του Αιγαίου με την χρήση μικροπλακών απαιτεί ένα μεγαλύτερο αριθμό από αυτόν που είχε προταθεί από ανάλογες μελέτες στο παρελθόν (δύο έως έξι)
- Σε αντίθεση με τους Nyst και Thatcher, οι οποίοι συμπέραναν ότι το μεγαλύτερο μέρος της σεισμικής δραστηριότητας λαμβάνει χώρα στα όρια των προτεινόμενων από αυτούς μικροπλακών το 50% των σεισμών που έλαβαν χώρα τα τελευταία 120 χρόνια ήταν σε απόσταση μεγαλύτερη των 30 χλμ από τα παραπάνω όρια
- Από τη μελέτη των κύριων αξόνων παραμόρφωσης, οι οποίοι υπολογίστηκαν από τα διανύσματα ταχυτήτων, προκύπτει ότι η περιοχή του Αιγαίου χαρακτηρίζεται γενικά από επιμήκυνση κατά την διεύθυνση Βορρά – Νότου, η οποία στο νότιο άκρο της περιοχής (όριο της ελληνικής τάφρου) αλλάζει και μετατρέπεται σε επιμήκυνση κατά την γενική διεύθυνση Δύση - Ανατολή (παράλληλα με την τάφρο)

4.4. Εκτίμηση Παραμορφώσεων στη Περιοχή Μελέτης με Επεξεργασία και Ανάλυση Σεισμικών Γεγονότων

Παρόλο το γεγονός ότι το Αιγαίο πέλαγος είναι μια από τις περιοχές που υφίστανται μεγάλες και γρήγορες παραμορφώσεις (Floyd et al., 2010) και χαρακτηρίζεται ίσως από τη πιο πολύπλοκη γεωδυναμική συμπεριφορά σε όλη τη Μεσόγειο (Hatzfeld, 1993) εντούτοις εξαιτίας και της ύπαρξης ενός καλά τεκμηριωμένου αρχείου σεισμικών γεγονότων, έχει αποτελέσει πεδίο σημαντικού αριθμού ερευνών που βασίζονται στην επεξεργασία και ανάλυση σεισμικών δεδομένων με απώτερο σκοπό την εξαγωγή κάθε πληροφορίας που μπορεί να προκύψει για την συμπεριφορά της περιοχής.

Σκοπός της συγκεκριμένης ενότητας δεν είναι να παρουσιάσει τα αποτελέσματα του συνόλου των σχετικών ερευνών που διεξήχθησαν στη περιοχή αλλά μέσα από την παράθεση των κύριων συμπερασμάτων ορισμένων εξ αυτών να υποβοηθήσει τόσο την τεκμηρίωση όσο και την ερμηνεία των αποτελεσμάτων της ανάλυσης των ιστορικών γεωδαιτικών δεδομένων, η οποία ακολουθεί στο επόμενο κεφάλαιο.

Στο παραπάνω προσδιοριζόμενο πλαίσιο η εργασία του England (England, 2003), στην οποία συσχετίζει τους κύριους άξονες (T και P) όπως προκύπτουν από τα σεισμικά γεγονότα με τους κύριους άξονες παραμόρφωσης που προκύπτουν από γεωδαιτικές μετρήσεις στη ευρύτερη περιοχή του Αιγαίου έχει ιδιαίτερη σημασία.

Το κύριο συμπέρασμα του England είναι ότι η πλειοψηφία (πάνω από 60%) των αξόνων T, που προκύπτουν από τα σεισμικά γεγονότα που χρησιμοποίησε, ευθυγραμμίζεται εντός ενός εύρους¹⁰ 20° με τους κύριους άξονες μέγιστης παραμόρφωσης, οι οποίοι προκύπτουν από διάφορες μελέτες επεξεργασίας και ανάλυσης γεωδαιτικών μετρήσεων που έλαβαν χώρα στη περιοχή.

Μελετώντας τα αποτελέσματα των συγκρίσεων του ο England συμπεραίνει ότι υπάρχει μια ομοιογενή σεισμική συμπεριφορά στη περιοχή του Αιγαίου, η οποία χαρακτηρίζεται από ευθυγράμμιση των αξόνων T των σεισμικών γεγονότων με τους κύριους άξονες μέγιστης παραμόρφωσης που προσδιορίζονται γεωδαιτικές μετρήσεις.

Πιο συγκεκριμένα για την περιοχή μελέτης της παρούσας διδακτορικής διατριβής ο προσανατολισμός και των δύο αξόνων έχει σχεδόν την διεύθυνση B-N, στο κεντρικό Αιγαίο (περιοχή Κυκλάδων και Κρητικού Πελάγους), ενώ στρέφεται σχεδόν 90° στο Νότιο Αιγαίο προς της περιοχές χαμηλού ενεργειακού δυναμικού (προς τα βαθύτερα σημεία της δυτικής ελληνικής τάφρου στα Δ και το αντίστοιχο βαθύτερο σημείο NA της Ρόδου στα Α).

Ιδιαίτερη δε αναφορά γίνεται από τον England στο σεισμικό γεγονός της Αμοργού (1956, M=7.4) για το οποίο και διαπιστώνει πολύ καλή ταύτιση των δύο αξόνων (από σεισμικό γεγονός και γεωδαιτικές μετρήσεις αντίστοιχα) με μια κατεύθυνση B/BA-N/NA.

¹⁰ Το εύρος αυτό των 20° είναι ανάλογο με την αβεβαιότητα προσδιορισμού του προσανατολισμού των κύριων αξόνων παραμόρφωσης, όπως έχει υπολογιστεί από τον England την χρήση των γεωδαιτικών δεδομένων.

Το 1993 ο Hatzfeld (Hatzfeld, 1993) χρησιμοποιώντας τις καταγραφές σεισμικών γεγονότων που έλαβαν χώρα μεταξύ των ετών 1984 και 1989 και πραγματοποιηθήκαν με την εγκατάσταση προσωρινών δικτύων φορητών σειсмоγράφων προσπάθησε να διερευνήσει την γεωδυναμική του Αιγαίου με μια διαφορετική προσέγγιση από αυτή της μελέτης των σεισμικών γεγονότων μεγάλου μεγέθους.

Ειδικά για τη περιοχή μελέτης ο Hatzfeld κατέληξε στα εξής συμπεράσματα :

- Η Κρήτη και η περιοχή της θάλασσας της Κρήτης δεν παρουσιάζει σχεδόν καθόλου σεισμική δραστηριότητα
- Στη περιοχή του Κεντρικού Αιγαίου (Κυκλάδες) οι Τ άξονες έχουν μια γενική κατεύθυνση B-N
- Στη περιοχή της ελληνικής τάφρου και ιδίως στη περιοχή της Κρήτης οι Τ άξονες στρέφονται και έχουν μια γενική κατεύθυνση A-Δ, όπως επίσης συμβαίνει και στη περιοχή της Ρόδου

Ο ίδιος ερευνητής το 1999 (Hatzfeld, 1999) επιβεβαιώνει ότι η περιοχή του Αιγαίου χαρακτηρίζεται από συστολή κατά μήκος της ελληνικής τάφρου με γενική κατεύθυνση κάθετη σε αυτή και διαστολή στο εσωτερικό της περιοχής με γενική κατεύθυνση B-N.

4.5. Βασικά Στοιχεία για τη Τεκτονική Συμπεριφορά της Περιοχής Μελέτης όπως προκύπτουν από την Επεξεργασία των Ιστορικών Γεωφυσικών Δεδομένων και από τα Συμπεράσματα Προγενέστερων Ερευνών

Στην ενότητα αυτή θα αναφερθούν τα κυριότερα συμπεράσματα, όπως προκύπτουν τόσο από την επεξεργασία και ανάλυση των διαθέσιμων, για τη περιοχή μελέτης, γεωφυσικών δεδομένων όσο και από τη μελέτη προγενέστερων ερευνών, οι οποίες προσπάθησαν να προσδιορίσουν τη συμπεριφορά της επιφανείας της περιοχής καθώς και τις διαχρονικές παραμορφώσεις αυτής με χρήση γεωδαιτικών (επίγειων και δορυφορικών) και σεισμικών δεδομένων.

Τα συμπεράσματα αυτά έχουν ως κάτωθι :

- Τα διαθέσιμα για τη περιοχή δεδομένα μετρήσεων βαρύτητας σε σταθμούς πρώτης και δευτέρας τάξεως εκτιμάται ότι δε μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων αναφορικά με την διερεύνηση και ερμηνεία της συμπεριφοράς της περιοχής, όπως αυτή επιδιώκεται στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής
- Ομοίως και τα ανάλογα ιστορικά δεδομένα βαρύτητας (προ του έτους 1966), τα οποία μπορεί να είναι διαθέσιμα στο αναλογικό αρχείο της ΓΥΣ δεν προσφέρονται για διαδικασίες επεξεργασίας και σύγκρισης με τα σύγχρονα δεδομένα εξαιτίας κυρίως της αλλαγής των θέσεων των σταθμών, που δεν συντελεί στην συνοχή των μετρήσεων
- Τέλος αναφορικά με τις μετρήσεις βαρύτητας, πιο χρήσιμη θα ήταν ίσως η διερεύνηση της συνεισφοράς τους σε μεγαλύτερες κλίμακες ανάλυσης και με χρήση των διαχρονικών μετρήσεων πυκνώσης, που έλαβαν χώρα κατά καιρούς στα τοπικά δίκτυα μέτρησης βαρύτητας
- Τα διαθέσιμα γεωμαγνητικά δεδομένα εκτιμάται επίσης ότι δε μπορούν να συνεισφέρουν στην εξαγωγή κατάλληλων συμπερασμάτων, δεδομένου ότι περιορίζονται μόνο σε μια από τις παραμέτρους του μαγνητικού πεδίου, αυτή της μαγνητικής απόκλισης D , ενώ η μέτρηση και ο προσδιορισμός των λοιπών παραμέτρων είναι αποσπασματικά
- Η έρευνα του Στίρου (Stiros, 1993) καταλήγει σε χαμηλές τιμές ρυθμού μεταβολής ολικής διάτμησης για τη πρώτη περίοδο ανάλυσης και σε πολύ μεγαλύτερες τιμές (συντελεστής 40) για την δεύτερη περίοδο
- Το σύνολο σχεδόν των μελετών, που χρησιμοποίησαν γεωδαιτικά δεδομένα για το προσδιορισμό των τανυστών παραμόρφωσης, υποδεικνύουν ότι η περιοχή μελέτης χαρακτηρίζεται από διαστολή κατά την διεύθυνση B-N στη περιοχή των Κυκλάδων και κατά την διεύθυνση A-Δ στο όριο της ελληνικής τάφρου (Κρήτη-Δωδεκάνησα)

- Σύμφωνα με τους Kreemer και Chamot-Rooke (Kreemer and Chamot-Rooke, 2004) η περιοχή της Ρόδου χαρακτηρίζεται από ΒΔ-ΝΑ συμπίεση, χαρακτηριστικό που επιβεβαιώνεται και από τη μελέτη των Hollenstein et al. (Hollenstein et al., 2008). Αντίθετα σύμφωνα με τους Floyd et al. (Floyd et al., 2010) η συγκεκριμένη περιοχή χαρακτηρίζεται από διαστολή κατά την γενική διεύθυνση Α-Δ
- Σύμφωνα με τον England (England, 2003) οι άξονες T που προσδιορίζονται από τα σεισμικά γεγονότα είναι, για τη περιοχή του Αιγαίου, παράλληλοι με τους κύριους άξονες μέγιστης παραμόρφωσης, όπως αυτοί υπολογίζονται από γεωδαιτικές μετρήσεις
- Ο συνδυασμός του προηγούμενου συμπεράσματος με τα συμπεράσματα των μελετών του Hatzfeld (Hatzfeld, 1993),(Hatzfeld et al., 1993) και (Hatzfeld, 1999) σύμφωνα με τα οποία οι άξονες T, που προκύπτουν από ανάλυση των σεισμικών δεδομένων της περιοχής τους Αιγαίου, έχουν διεύθυνση Β-Ν στο κεντρικό Αιγαίο και Α-Δ στο νότιο άκρο της περιοχής (όριο ελληνικής τάφρου) επιβεβαιώνουν τα συμπεράσματα των μελετών με χρήση γεωδαιτικών δεδομένων, όπως αναφέρονται προηγουμένως

4.6. Ερμηνεία Αποτελεσμάτων Ανάλυσης των Ιστορικών Γεωδαιτικών Μετρήσεων και Σύγκριση τους τα Συμπεράσματα Προγενέστερων Ερευνών

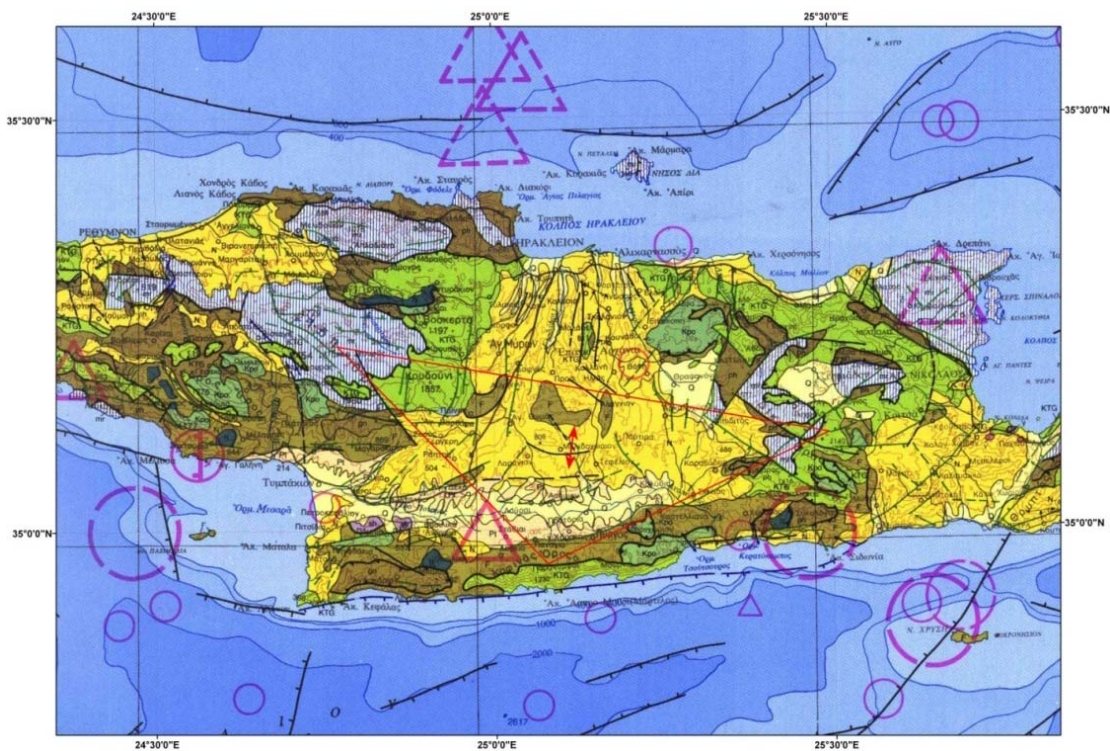
Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα βασικά συμπεράσματα, τα οποία εξάγονται από τη μελέτη και ερμηνεία των αποτελεσμάτων της επεξεργασίας και ανάλυσης των ιστορικών γεωδαιτικών δεδομένων που έλαβαν χώρα στο προηγούμενο κεφάλαιο. Επιπλέον επιχειρείται να συγκριθούν αυτά με τα αποτελέσματα των ερευνών, οι οποίες παρουσιάστηκαν στο παρόν κεφάλαιο.

Πιο συγκεκριμένα εξαιρετικό ενδιαφέρον παρουσιάζει η περίπτωση του τριγώνου ΚΟΦΙΝΑΣ-ΔΙΚΤΥ-ΙΔΥ, το οποίο και παρουσιάζει την υψηλότερη τιμή ρυθμού μεταβολής μέγιστης διάτμησης, από όσες έχουν υπολογιστεί στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής με $\dot{\gamma}_{tot}=14.16$ $\mu\text{strain}/\text{έτος}$ κατά την 2^η περίοδο ανάλυσης (1930-1953).

Το ενδιαφέρον εστιάζεται στο γεγονός ότι κατά την αμέσως επόμενη περίοδο (1953-1975) το συγκεκριμένο τρίγωνο παρουσιάζει αρκετά χαμηλότερη τιμή ρυθμού μεταβολής ολικής διάτμησης ($\dot{\gamma}_{tot}=0.69$ $\mu\text{strain}/\text{έτος}$) καθώς και διαφορετική διεύθυνση άξονα μέγιστης παραμόρφωσης (σχεδόν κάθετη στη προηγούμενη από 53° στις 129°).

Η παραπάνω συμπεριφορά του τριγώνου αυτού εκτιμάται ότι μπορεί να εξηγηθεί ικανοποιητικά από την σεισμική δραστηριότητα της ευρύτερης περιοχής και πιο συγκεκριμένα από το σεισμικό γεγονός της 25 Φεβρουαρίου 1935, το οποίο έλαβε χώρα στην περιοχή των Ανωγείων και είχε μέγεθος σχεδόν $M=7$ στη κλίμακα Richter.

Πέραν του παραπάνω αν εξεταστεί η διεύθυνση της ολικής διάτμησης $\theta_{tot} = 8^\circ$ σε σχέση με τα ρήγματα της περιοχής, εξάγεται το συμπέρασμα ότι αυτή είναι σχεδόν παράλληλη με τα περισσότερα από αυτά όπως φαίνεται και στην Εικόνα 4-15 ¹¹.



Εικόνα 4-15 : Διευθύνσεις ολικής διάτμησης και ρηγμάτων της ευρύτερης περιοχής του τριγώνου ΚΟΦΙΝΑΣ-ΔΙΚΤΥ-ΙΔΗ

Figure 4-15 : Directions of total shear and faults of the area around the triangle KOFINAS-DIKTI-IDI

¹¹ Ως υπόβαθρο της απεικόνισης χρησιμοποιείται ο Σεισμοτεκτονικός Χάρτης της Ελλάδος με Σεισμογεωλογικά στοιχεία κλίμακας 1:500000, εκδόσεως Ινστιτούτου Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών (ΙΓΜΕ) 1989.

Η παραπάνω παραλληλία φανερώνει σύμφωνα με τον Pope (Pope, 1966) το γεγονός ότι τα ρήγματα της περιοχής είναι ενεργά κατά την περίοδο των μετρήσεων και καθορίζουν την τεκτονική συμπεριφορά και τις παραμορφώσεις της περιοχής.

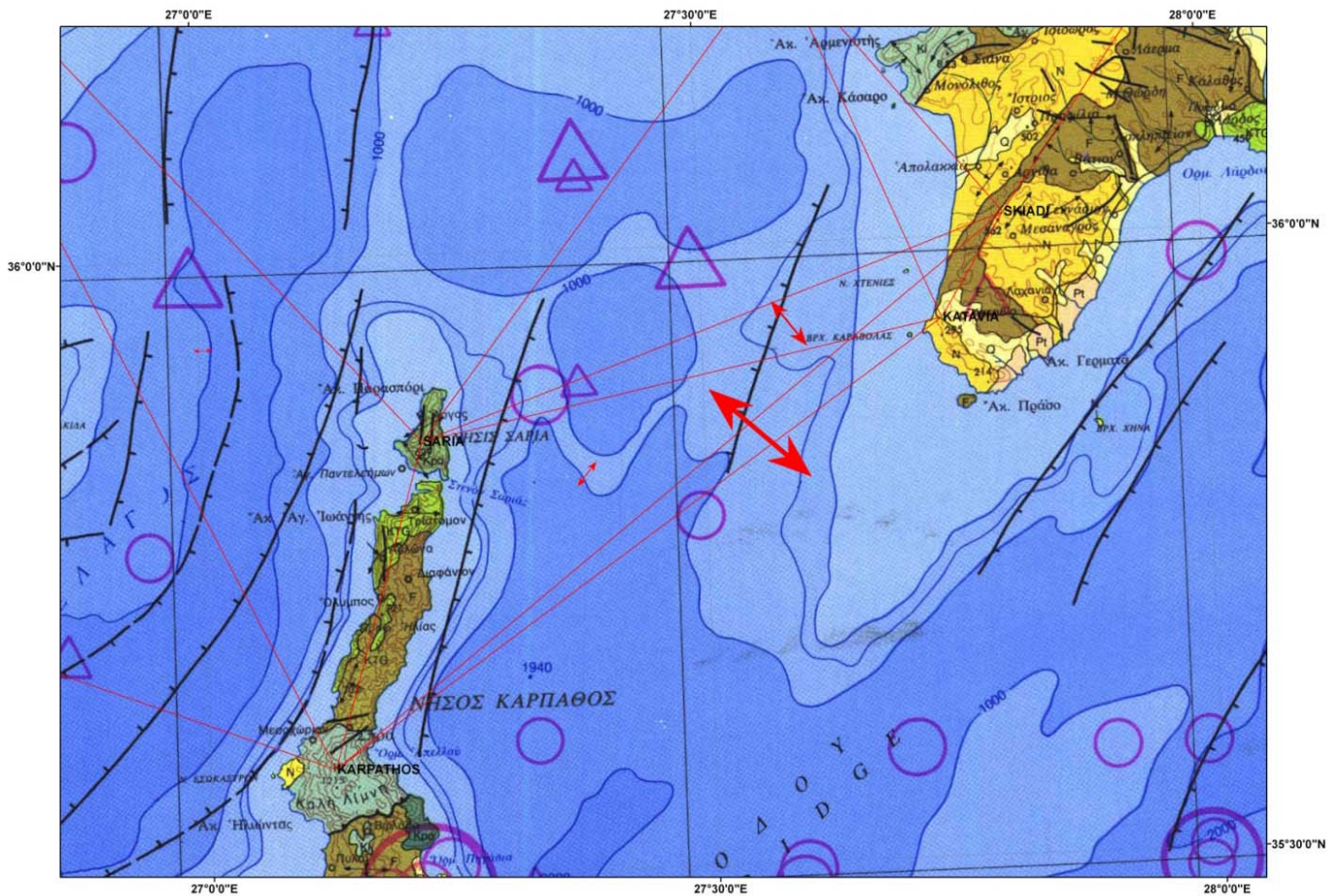
Η υπό-περιοχή μελέτης των Δωδεκανήσων αναλύθηκε μόνο για την τρίτη περίοδο (1951-1978), για την οποία και υπήρχαν διαθέσιμα δεδομένα. Για την συγκεκριμένη περίοδο αρκετά υψηλές τιμές ρυθμού μεταβολής της ολικής διάτμησης παρουσιάζουν τα τρίγωνα ΣΑΡΙΑ-ΣΚΙΑΔΙ-ΚΑΤΑΒΙΑ ($\dot{\gamma}_{tot}=4.83$ $\mu\text{strain}/\text{έτος}$) και ΚΑΡΡΙΑΘΟΣ-ΣΚΙΑΔΙ-ΚΑΤΑΒΙΑ ($\dot{\gamma}_{tot}=11.28$ $\mu\text{strain}/\text{έτος}$).

Δεδομένου ότι δεν υπάρχει κάποιο στοιχείο που να εδράζεται είτε στη γεωλογία είτε στη σεισμική δραστηριότητα της περιοχής, κατά την περίοδο μελέτης, που να δικαιολογεί αυτές τις υψηλές τιμές ρυθμού μεταβολής της ολικής διάτμησης σε σχέση και με το υπόλοιπο δίκτυο τριγώνων της περιοχής, δύο είναι οι πιθανές αιτίες που μπορούν με κάποιο βαθμό αξιοπιστίας να ερμηνεύσουν την εμφάνιση τους.

Η πρώτη είναι η πιθανότητα λανθασμένων στοιχείων μετρήσεων για κάποιους από τους τριγωνομετρικούς σταθμούς που συμμετέχουν και στα δύο τρίγωνα και πιο συγκεκριμένα τους σταθμούς ΣΚΙΑΔΙ και ΚΑΤΑΒΙΑ, με τον δεύτερο να συγκεντρώνει τις περισσότερες πιθανότητες αφού πρόκειται για τον μοναδικό τριγωνομετρικό σταθμό IIας τάξεως που λαμβάνει μέρος στην διαδικασία ανάλυσης τα δεδομένα μετρήσεων του οποίου δεν έχουν επαληθευτεί από το σύνολο των πηγών που χρησιμοποιήθηκαν και για τους άλλους.

Το γεγονός όμως ότι τα υπόλοιπα τρίγωνα, τα οποία σχηματίζονται με την συμμετοχή των ως άνω δύο τριγωνομετρικών σταθμών, παρουσιάζουν χαμηλές τιμές ρυθμού μεταβολής της ολικής διάτμησης (ενδεικτικά αναφέρεται το τρίγωνο ΧΑΛΚΗ-ΣΚΙΑΔΙ-ΚΑΤΑΒΙΑ με $\dot{\gamma}_{tot}=0.24$ $\mu\text{strain}/\text{έτος}$ και ΧΑΛΚΗ-ΣΚΙΑΔΙ-ΨΙΝΘΟΣ με $\dot{\gamma}_{tot}=0.32$ $\mu\text{strain}/\text{έτος}$) απομακρύνει την πιθανότητα οι παραπάνω υψηλές τιμές να εξηγούνται πιθανώς από λανθασμένα δεδομένα μετρήσεων.

Η δεύτερη πιθανή αιτία εμφάνισης αυτών των υψηλών τιμών είναι η γεωμετρία των αντίστοιχων τριγώνων, η οποία όπως φαίνεται και στην Εικόνα 4-16 είναι αρκετά διαφορετική (ύπαρξη οξείων γωνιών και μεγάλη ανισοροπία στο μήκος των πλευρών) από αυτή των υπόλοιπων τριγώνων της υπό-περιοχής.



Εικόνα 4-16 : Διευθύνσεις ολικής διάτμησης και ρηγμάτων της ευρύτερης υπό-περιοχής ανάλυσης ΔΩΔΕΚΑΝΗΣΑ

Figure 4-16 : Directions of total shear and faults of the DODECANESE subarea of analysis

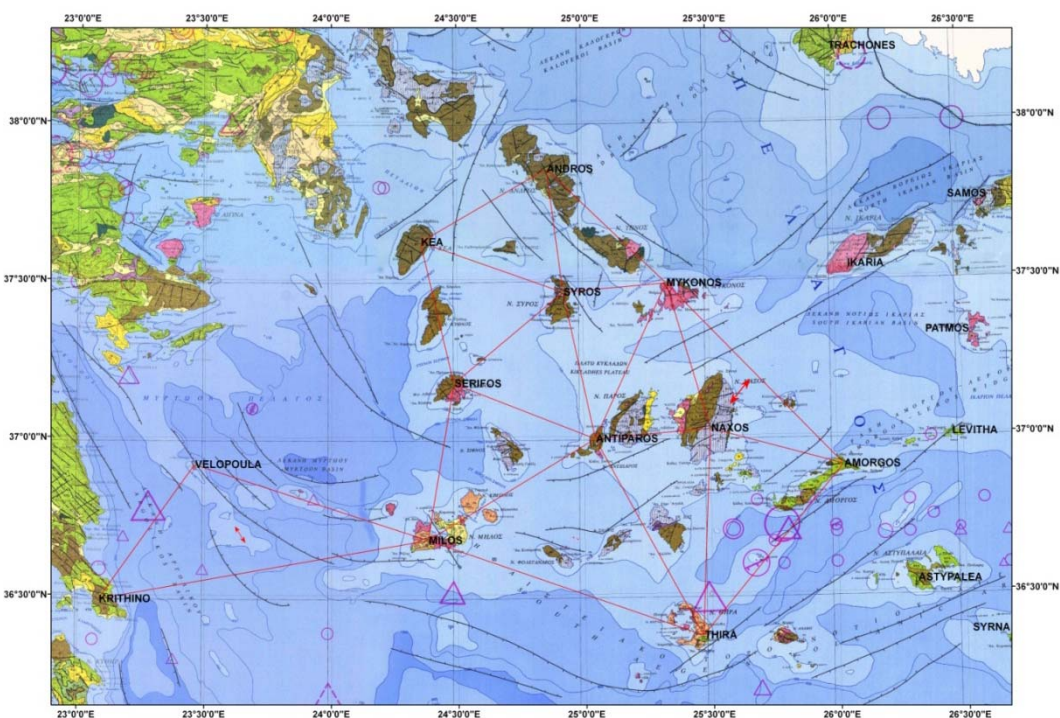
Η ύπαρξη «κακής» γεωμετρίας έχει χρησιμοποιηθεί και από άλλους ερευνητές (Calais et al., 2000) για την εξήγηση υπερβολικών τιμών ολικής διάτμησης σε κάποια από τα τρίγωνα ενός δικτύου, αφού φαίνεται ότι δεν διασφαλίζει την απαίτηση της ακολουθούμενης μεθοδολογίας προσδιορισμού των ταυστών παραμόρφωσης περί ομοιόμορφης κατανομής των παραμορφώσεων στην περιοχή του τριγώνου.

Είναι λοιπόν πολύ πιο πιθανό οι εξαιρετικά υψηλές αυτές τιμές ολικής διάτμησης, σε σχέση και με το υπόλοιπο δίκτυο, να οφείλονται στη «κακή» γεωμετρία των επιλεγόμενων τριγώνων, καταδεικνύοντας με αυτό τον τρόπο την σημασία της κατάλληλης επιλογής των τριγώνων για την ανάλυση και ερμηνεία των ταυστών παραμόρφωσης.

Το επόμενο τρίγωνο της περιοχής το οποίο παρουσιάζει υψηλό ρυθμός μεταβολής ολικής διάτμησης είναι το τρίγωνο ΚΑΡΠΑΘΟΣ - ΣΑΡΙΑ - ΣΚΙΑΔΙ (με $\dot{\gamma}_{tot} = 2.66$ $\mu\text{strain}/\text{έτος}$). Η διεύθυνση του διανύσματος ολικής διάτμησης για το τρίγωνο αυτό, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 4-16, είναι παράλληλη με το ρήγμα της ΚΑΡΠΑΘΟΥ ενώ ο άξονας ελάχιστης παραμόρφωσης, όπως είναι φανερό και στην Εικόνα 4-6, έχει διεύθυνση ΒΑ-ΝΔ, γεγονός που συμφωνεί και με τις βασικές διαπιστώσεις των ερευνών του παρόντος κεφαλαίου.

Στη περιοχή των ΚΥΚΛΑΔΩΝ, το τρίγωνο που παρουσιάζει διαχρονικά υψηλούς ρυθμούς μεταβολής ολικής διάτμησης είναι το ΑΜΟΡΓΟΣ-ΝΑΞΟΣ-ΜΥΚΟΝΟΣ, εντοπίζεται με υψηλές τιμές και στις τρεις περιόδους ανάλυσης που συμμετέχει.

Όπως φαίνεται και στη Εικόνα 4-17 κατά την πρώτη περίοδο ανάλυσης το συγκεκριμένο τρίγωνο είναι ένα από τα δύο, το άλλο είναι το ΒΕΛΟΠΟΥΛΑ - ΚΡΙΘΙΝΟ - ΜΗΛΟΣ, τα οποία παρουσιάζουν υψηλή τιμή ολικής διάτμησης. Και για τα δύο τρίγωνα πάντως η διεύθυνση της ολικής διάτμησης για τη συγκεκριμένη περίοδο είναι γενικά παράλληλη με τις διευθύνσεις των ρηγμάτων που βρίσκονται εντός αυτών.

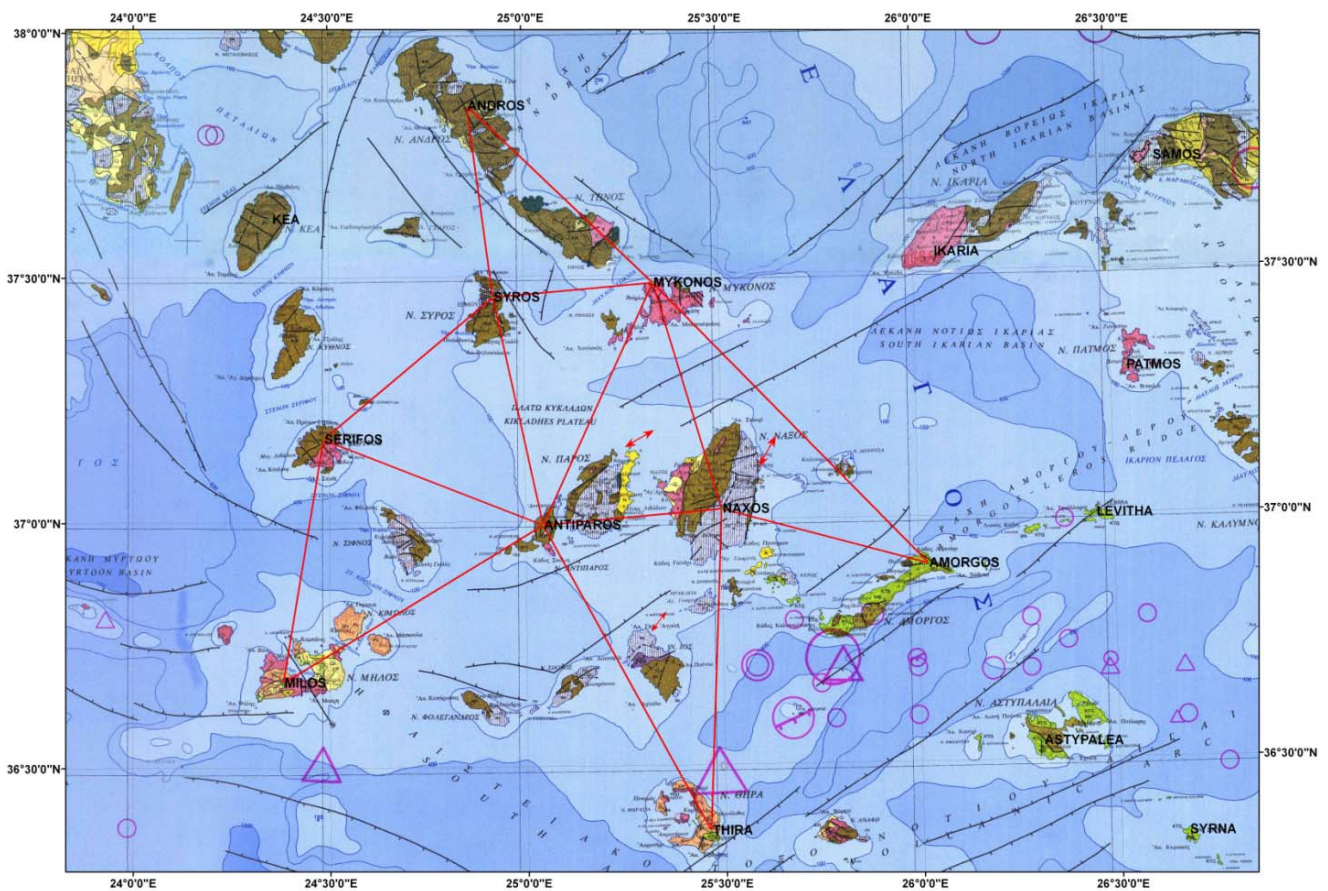


Εικόνα 4-17 : Διευθύνσεις ολικής διάτμησης και ρηγμάτων της ευρύτερης υπό-περιοχής ανάλυσης ΚΥΚΛΑΔΕΣ για τη πρώτη περίοδο ανάλυσης

Figure 4-17 : Directions of total shear and faults of the CYCLADES subarea of analysis and for the first analysis period

Τη μεγαλύτερη τιμή ρυθμού μεταβολής ολικής διάτμησης τη παρουσιάζει το συγκεκριμένο τρίγωνο κατά την δεύτερη περίοδο ανάλυσης, όπου μαζί με άλλα δύο τρίγωνα τα ΑΝΤΙΠΑΡΟΣ - ΘΗΡΑ - ΝΑΞΟΣ και ΑΝΤΙΠΑΡΟΣ -ΝΑΞΟΣ -ΜΥΚΟΝΟΣ αποτελούν τα τρίγωνα, που τη συγκεκριμένη περίοδο έχουν τις μεγαλύτερες τιμές όπως φαίνεται και από το μέγεθος των διανυσμάτων στην Εικόνα 4-18.

Οι τιμές αυτές είναι πάρα πολύ υψηλές σε σχέση με τη εν γένει συμπεριφορά των τριγώνων της περιοχής για όλες τις άλλες περιόδους ανάλυσης, παρόλα αυτά βρίσκονται σε συμφωνία με τα αντίστοιχα αποτελέσματα της μελέτης του Στίρου (Stiros, 1993) , η οποία βασίζεται στην ίδια πηγή δεδομένων, με αποτέλεσμα να αποκλείεται η περίπτωση λάθους στην διαδικασία επεξεργασίας.



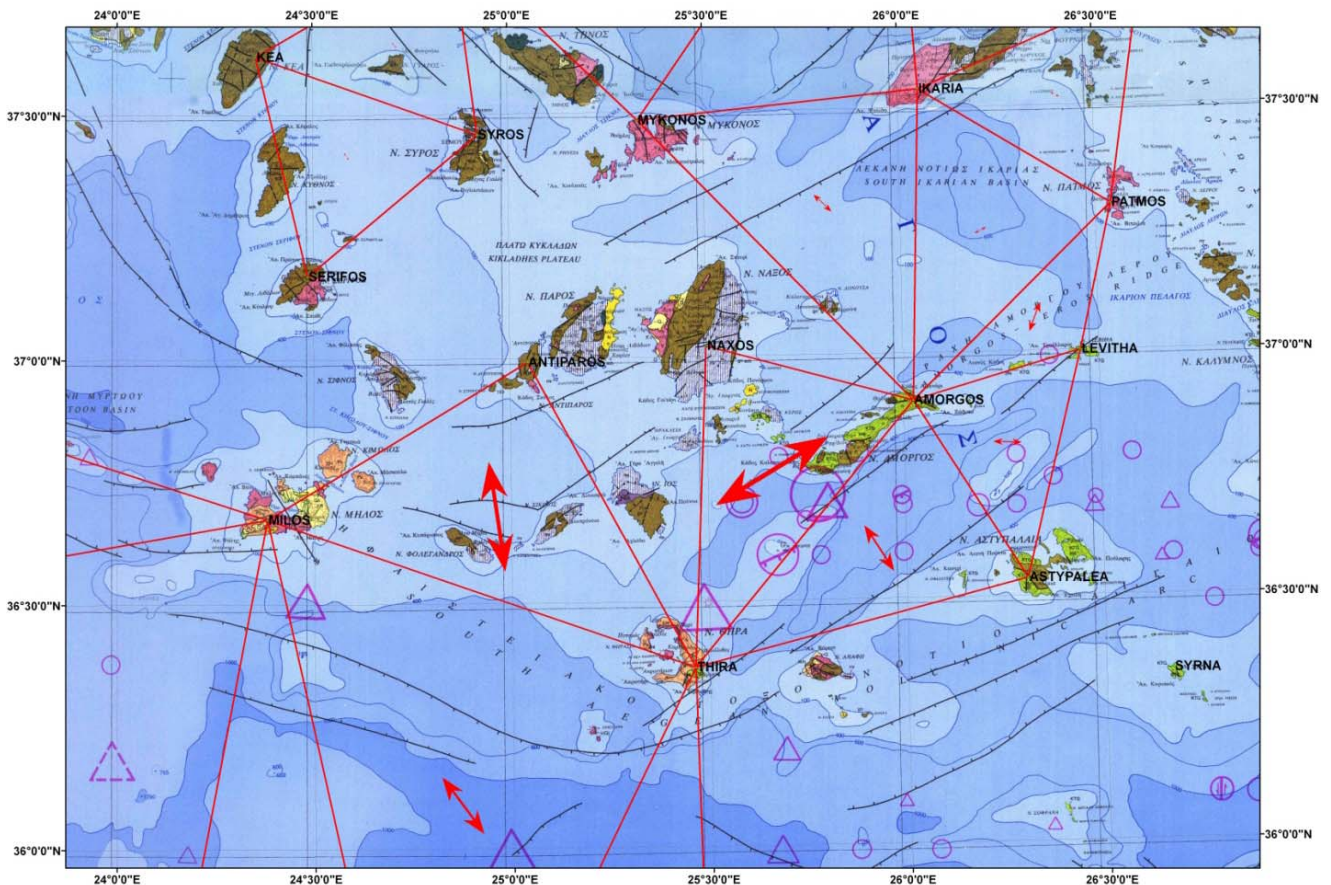
Εικόνα 4-18 : Διευθύνσεις ολικής διάτμησης και ρηγμάτων της ευρύτερης υπό-περιοχής ανάλυσης ΚΥΚΛΑΔΕΣ για τη δεύτερη περίοδο ανάλυσης

Figure 4-18 : Directions of total shear and faults of the CYCLADES subarea of analysis and for the second analysis period

Όπως γίνεται φανερό από τη μελέτη των διευθύνσεων της ολικής διάτμησης και στα τρία τρίγωνα, αυτές είναι παράλληλες σε ένα μεγάλο βαθμό με τις διευθύνσεις των ρηγμάτων, τα οποία είτε διασχίζουν είτε περιέχονται στις περιοχές των αντίστοιχων τριγώνων.

Αξίζει εδώ να σημειωθεί ότι κατά την τρίτη περίοδο ανάλυσης (1956-1975) η τιμή του ρυθμού μεταβολής ολικής διάτμησης για το τρίγωνο ΑΜΟΡΓΟΣ-ΝΑΞΟΣ-ΜΥΚΟΝΟΣ υποτετραπλασιάζεται (από 8.15 σε 1.48 $\mu\text{strain}/\text{έτος}$).

Αυτή η συμπεριφορά μπορεί να ερμηνευθεί πιθανώς σαν απόρροια της απελευθέρωσης τάσεων που προκάλεσε ο σεισμός της Αμοργού ($M=7.5$), ο οποίος έλαβε χώρα στις 9 Ιουλίου 1956.



Εικόνα 4-19 : Διευθύνσεις ολικής διάτμησης και ρηγμάτων της ευρύτερης υπό-περιοχής ανάλυσης ΚΥΚΛΑΔΕΣ για τη τέταρτη περίοδο ανάλυσης

Figure 4-19 : Directions of total shear and faults of the CYCLADES subarea of analysis and for the fourth analysis period

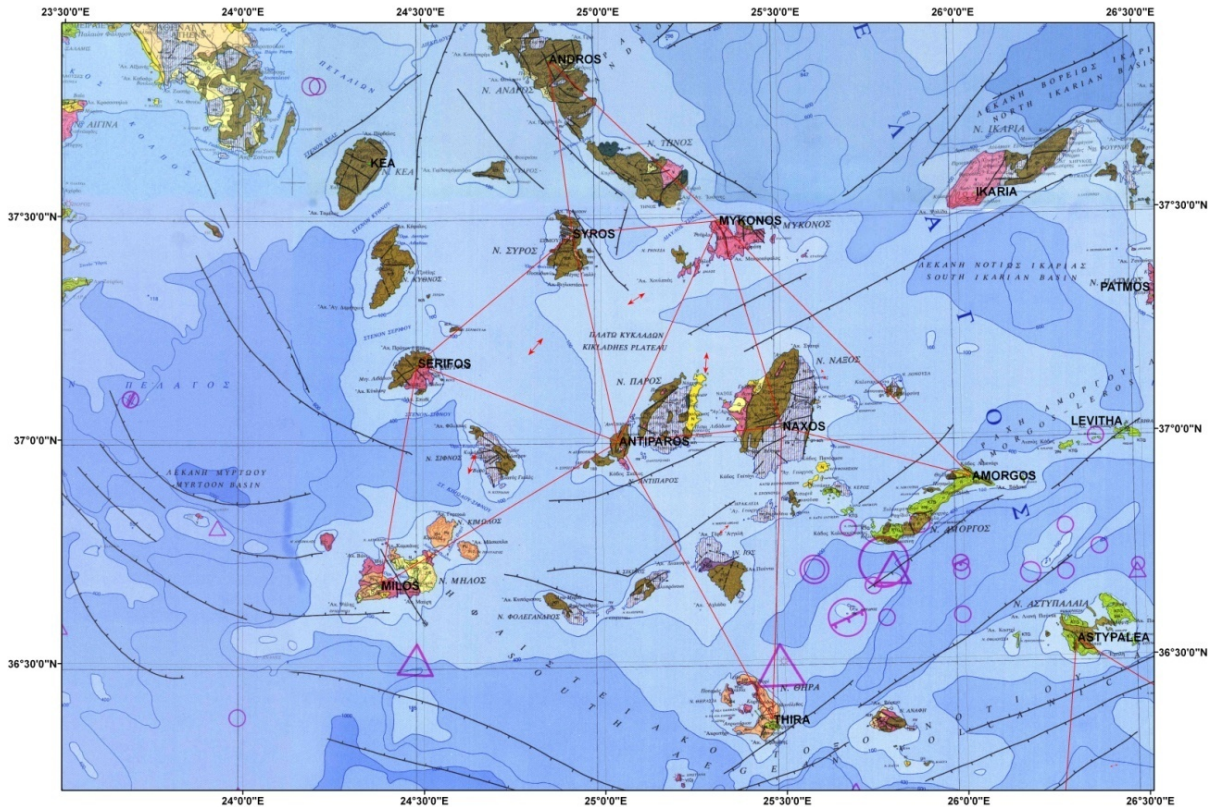
Η επίδραση του συγκεκριμένου σεισμικού γεγονότος είναι, μάλλον, πιο εμφανής στα αποτελέσματα της ανάλυσης για το τρίγωνο ΑΜΟΡΓΟΣ - ΘΗΡΑ- ΝΑΞΟΣ, το οποίο ενώ κατά την πρώτη περίοδο ανάλυσης παρουσιάζει πολύ χαμηλό ρυθμό μεταβολής ολικής διάτμησης (0.01 $\mu\text{strain}/\text{έτος}$) στην επόμενη περίοδο ανάλυσης στην οποία συμμετέχει (4^η περίοδος 1929-1975) παρουσιάζει σημαντικά αυξημένη τιμή (3.17 $\mu\text{strain}/\text{έτος}$, η μεγαλύτερη που ανιχνεύεται τη συγκεκριμένη περίοδο σε όλα τα συμμετέχοντα τρίγωνα ανάλυσης).

Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 4-19 η διεύθυνση του διανύσματος της ολικής διάτμησης για το τρίγωνο ΑΜΟΡΓΟΣ - ΘΗΡΑ- ΝΑΞΟΣ, για την ανάλυση της τέταρτης περιόδου ακολουθεί την διεύθυνση των ρηγμάτων που βρίσκονται στη περιοχή του τριγώνου.

Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειωθεί η συμπεριφορά του τριγωνομετρικού σταθμού ΑΝΤΙΠΑΡΟΣ αφού συμμετέχει στο σύνολο σχεδόν των τριγώνων, τα οποία παρουσιάζουν υψηλό ρυθμό μεταβολής ολικής διάτμησης σε όλες σχεδόν τις περιόδους ανάλυσης..

Ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα αποτελέσματα για τα τρίγωνα ΑΝΤΙΠΑΡΟΣ- ΜΗΛΟΣ- ΣΕΡΙΦΟΣ, ΑΝΤΙΠΑΡΟΣ-ΣΕΡΙΦΟΣ-ΣΥΡΟΣ και ΑΝΤΙΠΑΡΟΣ-ΣΥΡΟΣ-ΜΥΚΟΝΟΣ αφού σε αντίθεση με τα τρίγωνα ΑΝΤΙΠΑΡΟΣ-ΘΗΡΑ-ΝΑΞΟΣ και ΑΝΤΙΠΑΡΟΣ-ΝΑΞΟΣ-ΜΥΚΟΝΟΣ, τα οποία αναφέρθηκαν προηγουμένως και παρουσιάζουν υψηλές τιμές ρυθμού μεταβολής ολικής διάτμησης κατά την δεύτερη περίοδο ανάλυσης, παρουσιάζουν χαμηλές τιμές ολικής διάτμησης κατά τη δεύτερη περίοδο αλλά υψηλές τιμές κατά την τρίτη, γεγονός που οφείλεται κατά κύριο λόγο στη μεταβολή της διατμητικής παραμόρφωσης γ_1 από χαμηλές αρνητικές τιμές κατά την δεύτερη περίοδο σε υψηλές θετικές τιμές κατά την τρίτη περίοδο.

Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 4-20 οι διευθύνσεις της ολικής διάτμησης και στα τρία αυτά τρίγωνα έχουν μια γενική διεύθυνση ΒΑ-ΝΔ, υποδεικνύοντας μια ομοιόμορφη συμπεριφορά παραμόρφωσης για το σύνολο αυτών των τριγώνων, κατά την συγκεκριμένη χρονική περίοδο.



Εικόνα 4-20 : Διευθύνσεις ολικής διάτμησης και ρηγμάτων της ευρύτερης υπό-περιοχής ανάλυσης ΚΥΚΛΑΔΕΣ για τη τρίτη περίοδο ανάλυσης

Figure 4-20 : Directions of total shear and faults of the CYCLADES subarea of analysis and for the third analysis period

Συμπερασματικά μπορεί να αναφερθεί ότι η συμπεριφορά των τριγώνων, τα οποία παρουσιάζουν υψηλό ρυθμό μεταβολής διάτμησης σε όλες τις χρονικές περιόδους, είναι δυνατόν να συνδεθεί με τη γεωλογία (ρηγμάτα) και τη σεισμική ιστορία των συγκεκριμένων περιοχών και σε μια περίπτωση με την «αδύναμη» γεωμετρία του επιλεγόμενου τριγώνου ανάλυσης. Επιπλέον σημαντικό είναι να αναφερθεί για άλλη μια φορά το γεγονός ότι ιδιαίτερα υψηλές τιμές που εντοπίζονται στη περιοχή των Κυκλάδων κατά την δεύτερη περίοδο ανάλυσης (1929-1956) συμφωνούν με τις αντίστοιχες της έρευνας του Στίρου (Stiros, 1993), η οποία βασίζεται στα ίδια δεδομένα.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

5.1. Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό θα συνοψιστούν τα κύρια συμπεράσματα της διατριβής και στη συνέχεια θα προταθούν ορισμένες κατευθύνσεις μελλοντικής έρευνας, οι οποίες να εδράζονται στα τελευταία

5.2. Βασικά Συμπεράσματα

Κύρια επιδίωξη της παρούσας διδακτορικής έρευνας ήταν η διερεύνηση της χρησιμότητας των ιστορικών γεωδαιτικών δεδομένων τριγωνισμού και δευτερευόντως βαρύτητας και γεωμαγνητισμού για την εξαγωγή χρήσιμων και αξιοποιήσιμων συμπερασμάτων για τις παραμορφώσεις και τη τεκτονική συμπεριφορά της περιοχής του Νοτίου Αιγαίου.

Η διαφοροποίηση και πρωτοτυπία της συγκεκριμένης διατριβής σε σχέση με άλλες μελέτες που έχουν λάβει χώρα στο παρελθόν με ανάλογες επιδιώξεις [(Βέης et al., 1992) και (Stiros, 1993)] έγκειται στο γεγονός ότι κάνει χρήση του συνόλου της διαθέσιμης πληροφορίας (γωνιομετρήσεις όλων των χρονολογιών) και παράλληλα χρησιμοποιεί ως χωρική μονάδα ανάλυσης την μικρότερη δυνατή (τη περιοχή ενός τριγώνου).

Αντίθετα όλες οι προηγούμενες προσπάθειες περιορίζονταν στη χρήση δεδομένων δύο ή τριών διαδοχικών χρονικών περιόδων (και πάντως όχι όλων των διαθέσιμων) ενώ η χωρική μονάδα ανάλυσης ήταν ευρύτερη του ενός τριγώνου και αναφέρονταν σε μια ολόκληρη περιοχή.

Έτσι στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής πραγματοποιείται επεξεργασία και ανάλυση όλων των διαθέσιμων δεδομένων και μάλιστα για ορισμένες υπό-περιοχές μελέτης (Ανατολικό Αιγαίο, Δωδεκάνησα και Κρήτη) αυτή γίνεται για πρώτη φορά.

Προσφέρεται έτσι η δυνατότητα να προκύψουν στοιχεία για τις παραμέτρους των τανυστών παραμόρφωσης μέσα από μια ενιαία και ομοιογενής επεξεργασία των πρωτογενών δεδομένων (γωνιομετρήσεις) με αποτέλεσμα την ολοκληρωμένη και συνεκτική ερμηνεία τους.

Αναφορικά με τα αποτελέσματα της όλης διαδικασίας επεξεργασίας και ανάλυσης των μετρήσεων γωνιών των τριγωνομετρικών σταθμών πρώτης τάξης, η βασική διαπίστωση είναι ότι για το σύνολο των περιοχών (τριγώνων) οι οποίες παρουσιάζουν υψηλές τιμές ολικής διάτμησης η συμπεριφορά αυτή μπορεί να συνδεθεί είτε με τη σεισμική ιστορική συμπεριφορά των εν λόγω περιοχών είτε με τη γεωλογία τους (διευθύνσεις ρηγμάτων) σύμφωνα και με τις παρατηρήσεις του Pope (Pope, 1966).

Ως δευτερεύουσες διαπιστώσεις μπορούν να αναφερθούν η συμφωνία των αποτελεσμάτων ανάλυσης με αυτά των σύγχρονων μελετών αναφορικά με τις διευθύνσεις συστολής και διαστολής στη περιοχή της Ρόδου-Καρπάθου καθώς και η σημασία της μη «αδύναμης» γεωμετρίας των τριγώνων ανάλυσης στην ερμηνεία των τανυστών και την εξαγωγή συμπερασμάτων.

Οι προηγούμενες διαπιστώσεις οδηγούν αυτομάτως στο συμπέρασμα ότι οι ιστορικές γεωδαιτικές μετρήσεις είναι σε θέση, κατόπιν κατάλληλης επεξεργασίας και ανάλυσης, να παρέχουν πληροφορία για την τεκτονική συμπεριφορά της περιοχής μελέτης και τα αποτελέσματα αυτής (όπως οι παραμορφώσεις της επιφανείας).

Κατά συνέπεια μπορεί να αναφερθεί ότι η προσδιοριζόμενη συμπεριφορά αυτή παρουσιάζει μια διαχρονικότητα σε βάθος χρόνου (άνω των 100 ετών) και δεν θα πρέπει να θεωρείται ότι αποτελεί χαρακτηριστικό των τελευταίων δεκαετιών, κατά τις οποίες οι σύγχρονες δορυφορικές μέθοδοι έχουν επιτρέψει την πολύ καλή μοντελοποίηση και τεκμηρίωση της.

Τέλος αναφορικά με την επεξεργασία και ανάλυση των διαθέσιμων ιστορικών γεωφυσικών (βαρύτητα και γεωμαγνητισμός) δεδομένων, η κύρια και μόνη διαπίστωση είναι ότι τόσο η χωρική όσο και η χρονική κατανομή τους αλλά στη περίπτωση του γεωμαγνητισμού και το είδος των διαθέσιμων στοιχείων δεν παρέχουν μια βάση για την εξαγωγή κατάλληλων συμπερασμάτων, τα οποία θα λειτουργήσουν είτε αυτόνομα είτε συμπληρωματικά προς τα αποτελέσματα που προέρχονται από την επεξεργασία και ανάλυση των γωνιομετρήσεων με απώτερο σκοπό την υποβοήθηση της τεκμηρίωσης και ερμηνείας της τεκτονικής συμπεριφοράς της περιοχής μελέτης.

5.3. Προτάσεις Μελλοντικής Έρευνας

Με βάση τα κύρια συμπεράσματα της παρούσας διατριβής, τα οποία αναφέρθηκαν στη προηγούμενη ενότητα, προτείνονται οι κάτωθι δύο κύριοι άξονες μελλοντικής έρευνας :

- Συσχέτιση και ανάλυση σε βάθος της σχέσης των αποτελεσμάτων των τανυστών παραμόρφωσης, όπως υπολογίστηκαν στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής, με έτερα αποτελέσματα προερχόμενα από σεισμολογικά (πχ κατευθύνσεις και μεγέθη των P και T αξόνων) και γεωλογικά δεδομένα

- Επεξεργασία και ανάλυση σε ακόμα μεγαλύτερη κλίμακα όλων των διαθέσιμων ιστορικών δεδομένων γωνιομετρήσεων (2^{ης}, 3^{ης} και 4^{ης} τάξεως) και βαρύτητας, όπου ιδίως τα τελευταία αναμένεται να συνεισφέρουν αρκετά περισσότερα συμπεράσματα για τη τεκτονική συμπεριφορά της εκάστοτε υπό μελέτη περιοχής

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Barnes, D.F. (1966) 'Gravity changes during Alaska earthquake', *Journal of Geophysical Research*, vol. 71, pp. 451–456.
- Bawden, G.W., Donnellan, A., Kellog, L.H., Dong, D. and Rundle, J.B. (1997) 'Geodetic measurements of horizontal strain near the White Wolf fault, Kern County, California, 1926-1993', *Journal of Geophysical Research*, vol. 102, no. B3, pp. 4957-4967.
- Calais, E., Galisson, L., Stephan, J.-F., Delteil, J., Deverchere, J., Larroque, C., Mercier de Lepinay, B., Popoff, M. and Sosson, M. (2000) 'Crustal strain in the Southern Alps, France, 1948–1998', *Tectonophysics*, no. 319, pp. 1–17.
- Cheloni, D. (2008) *Estimating Crustal Deformation from Geodetic Data*, PhD Thesis: University of Bologna.
- Chen, C.H., Liu, J.Y., Lin, P.Y., Yen, H.Y., Hattori, K., Liang, W.T., Chen, Y.I., Yeh, Y.H. and Zeng, X. (2010) 'Pre-seismic geomagnetic anomaly and earthquake location', *Tectonophysics*, no. 489, pp. 240-247.
- Chen, C.H., Liu, J.Y., Yang, W.H., Yen, H.Y., Hattori, K., Lin, C.R. and Yeh, Y.H. (2009) 'SMART analysis of geomagnetic data observed in Taiwan', *Physics and Chemistry of the Earth*, no. 34, pp. 350-359.
- Clarke, P.J. (1996) *Tectonic Motions and Earthquake Deformation in Greece from GPS Measurements*, PhD Thesis: University of Oxford.
- Delacou, B., Sue, C., Nocquet, J.-M., Champagnac, J.-D., Allanic, C. and Burkhard, M. (2008) 'Quantification of strain rate in the Western Alps using geodesy: comparisons with seismotectonics', *Swiss Journal of Geoscience*, no. 101, pp. 377–385.
- Dermanis, A. and Livieratos, E. (1983) 'Applications of Deformation Analysis in Geodesy and Geodynamics', *Reviews of Geophysics and Space Physics*, pp. 41-50.
- England, P. (2003) 'The Alignment of Earthquake T-Axes with the Principal Axes of Geodetic Strain in the Aegean Region', *Turkish Journal of Earth Sciences*, vol. 12, pp. 47-53.
- Feigl, K.L. (1991) *Geodetic Measurement of Tectonic Deformation in Central California*, Massachusetts Institute of Technology.

Ferhat, G., Feigl, K.L., Ritz, J.-F. and Souriau, A. (1998) 'Geodetic measurement of tectonic deformation in the southern Alps and Provence, France, 1947–1994', *Earth and Planetary Science Letters*, pp. 35–46.

Floyd, M.A., Billiris, H., Paradissis, D., Veis, G., Avallone, A., Briole, P., McClusky, S., Nocquet, J.-., Palamartchouk, K., Parsons, B. and England, P.C. (2010) 'A new velocity field for Greece: Implications for the kinematics and dynamics of the Aegean', *Journal of Geophysical Research*, vol. 115, p. B10403.

Frank, F.C. (1966) 'Deductions of earth strains from survey data', *Bulletin of the Seismological Society of America*, pp. 35-42.

Hartl, H. (1901) 'Griechenland : Bericht uber die Dreiecksmessungen', *Comptes-Rendus de la 13me Conference Generale de L' Association Geodesique International*.

Hatzfeld, D. (1993) 'Geodynamics of the Aegean : a microseimotectonic approach', *Annali di Geofisica*, vol. 36, no. 2, pp. 215-227.

Hatzfeld, D. (1999) 'The present-day tectonics of the Aegean as deduced from seismicity', in Durand, B., Jolivet, L., Hornath, F. and Seranne, M. (ed.) *The Mediterranean Basins: Tertiary Extension within the Alpine Orogen*, London: Geological Society.

Hatzfeld, D., Besnard, M., Makropoulos, K. and Hatzidimitriou, P. (1993) 'Microearthquake seismicity and fault - plane solutions in the southern Aegean and its geodynamic implications', *Geophysics Journal International*, vol. 115, pp. 799-818.

Hollenstein, C., Müller, M.D., Geiger, A. and Kahle, H.G. (2008) 'Crustal motion and deformation in Greece from a decade of GPS measurements, 1993–2003', *Tectonophysics*, vol. 449, pp. 17–40.

Hunstad, I., Selvaggi, G., D'Agostino, N. and England, P. (2003) 'Geodetic strain in peninsular Italy between 1875 and 2001', *Geophys. Res. Let.*

Issawy, E.A., Radwan, A.H., Dahy, S.A. and Rayan, A. (2010) 'Monitoring of recent crustal movements around Cairo by repeated gravity and geodetic observations', *Contributions to Geophysics and Geodesy*, vol. 40, no. 2, pp. 173-184.

Kenner, S. and Segall, P. (2000) 'Postseismic deformation following the 1906 San Francisco earthquake', *Journal of Geophysical Research*, vol. 105, no. B6, pp. 13195-13209.

Kreemer, C. and Chamot-Rooke, N. (2004) 'Contemporary kinematics of the southern Aegean and the Mediterranean Ridge', *International Journal of Geophysics*, pp. 1377–1392.

Le Pichon, X., Chamot-Rooke, N., Lallemand, S., Noomen, R. and Veis, G. (1995) 'Geodetic determination of the kinematics of central Greece with respect to Europe: implications for eastern Mediterranean tectonics', *Journal of Geophysical Research*, July, pp. 12675–12690.

McClusky, S., Balassanian, S., Barka, A., Demir, C., Ergintav, S., Georgiev, I., Gurkan, O., Hamburger, M., Hurst, K., Kahle, H., Kastens, K., Kekelidze, G., King, R., Kotzev, V., Lenk, O., Mahmoud, S., Mishin, A., Nadariya, M., Ouzounis, A., Paradissis, D. et al. (2000) 'Global Positioning System constraints on plate kinematics and dynamics in the eastern Mediterranean and Caucasus', *Journal of Geophysical Research*, vol. 105, no. B3, pp. 5695-5719.

Nyst, M. and Thatcher, W. (2004) 'New constraints on the active tectonic deformation of the Aegean', *Journal of Geophysical Research*.

Oliver, H.W., Kane, M.F. and Pakiser, L.C. (1961) 'Gravity anomalies in Central Sierra Nevada, California', *Journal of Geophysical Research*, vol. 66, pp. 4265–4271.

Pope, A.J. (1966) *Strain Analysis of Repeated Triangulation for the Investigation of Crustal Movement*, Ohio State University.

Prescott, W.H. (1976) 'An extension of Frank's method for obtaining crustal shear strains from survey data', *Bulletin of the Seismological Society of America*, pp. 1847 – 1853.

Prescott, W.H., Savage, J.C. and Kinoshita, W.T. (1979) 'Strain Accumulation Rates in the Western United States Between 1970 and 1978', *Journal of Geophysical Research*, vol. 84, no. B10, pp. 5423-5435.

Reilinger, R., McClusky, S., Paradissis, D., Ergintav, S. and Vernant, P. (2010) 'Geodetic constraints on the tectonic evolution of the Aegean region and strain accumulation along the Hellenic subduction zone', *Tectonophysics*, no. 488, pp. 22-30.

Rontogianni, S. (2010) 'Comparison of geodetic and seismic strain rates in Greece by using a uniform processing approach to campaign GPS measurements over the interval 1994-2000', *Journal of Geodynamics*.

Ruiz, A.M., Ferhat, G., Alfaro, P., Sanz de Galdeano, C., de Lacy, M.C., Rodriguez-Caderot, G. and Gil, A.J. (2003) 'Geodetic measurements of crustal deformation on NW–SE faults of the Betic Cordillera, southern Spain, 1999–2001', *Journal of Geodynamics*, vol. 35, pp. 259–272.

Sauber, J.-M. (1988) *Geodetic Measurements of Deformation in California*, Massachusetts Institute of Technology.

Savage, J.C. and Burford, R.O. (1973) 'Geodetic Determination of Relative Plate Motion in Central California', *Journal of Geophysical Research*, vol. 8, no. 5, pp. 832-845.

Schneider, D. (1982) *The Complex Strain Approximation in Space and Time Applied to the Kinematical Analysis of Relative Horizontal Crustal Movement*, The University of New Brunswick.

Stiros, S.C. (1993) 'Kinematics and deformation of central and southwestern Greece from historical triangulation data and implications for the active tectonics of the Aegean', *Tectonophysics*, vol. 220, pp. 283-300.

Yu, E. and Segall, P. (1996) 'Slip in the 1868 Hayward earthquake from the analysis of historical triangulation data', *Journal of Geophysical Research*, July, pp. 16101 – 16118.

Zhan, B.F., Zhu, Y., Ning, J., Zhou, J., Liang, W. and Xu, Y. (2011) 'Gravity Changes Before Large Earthquakes in China:1998-2005', *Geo-spatial Information Science*, vol. 14, no. 1, pp. 1-9.

Zhu, Y. and Zhan, F.B. (2012) 'Medium-Term Earthquake Forecast Using Gravity Monitoring Data: Evidence from the Yutian and Wenchuan Earthquakes in China', *International Journal of Geophysics*.

Βέης, Γ., Μπιλλίρης, Χ., Νάκος, Β. and Παραδείσης, Δ. (1992) 'Γεωδαιτικός Προσδιορισμός Τεκτονικών Παραμορφώσεων στον Ελληνικό Χώρο', Πρακτικά Ακαδημίας Αθηνών, Αθήνα, 129-166.

Κουτροβέλης, Κ. (1977) *Ιστορία της Γεωγραφικής Υπηρεσίας Στρατού. Τόμος I (1889-1939)*, Αθήνα: Γεωγραφική Υπηρεσία Στρατού.

Κουτροβέλης, Κ. (1989) *Ιστορία της Γεωγραφικής Υπηρεσίας Στρατού. Τόμος II (1940-1989)*, Αθήνα: Γεωγραφική Υπηρεσία Στρατού.

Παυλίδης, Σ. (2008) 'Ασθενείς ρηξιγενείς ζώνες του Αιγαίου για ένα σταθερό φλοιό', 3ο Πανελλήνιο Συνέδριο Αντισεισμικής Μηχανικής και Τεχνικής Σεισμολογίας.

Τάκος, Ι. (1989) 'Νέα Συνόρθωση των Τριγωνομετρικών Δικτύων της Ελλάδας', *Δελτίο Γεωγραφικής Υπηρεσίας Στρατού*, pp. 23-93.