Αξιολόγηση του ΕΓΣΑ87 μέσω ενός σύγχρονου γεωδαιτικού μοντέλου ταχυτήτων για τον Ελλαδικό χώρο

Μ. Χατζηνίκος[1], Χ. Κωτσάκης[2]

[1]*Διδάκτωρ Τμήματος Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών ΑΠΘ*
[2]*Καθηγητής Τμήματος Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών ΑΠΘ*

Περίληψη

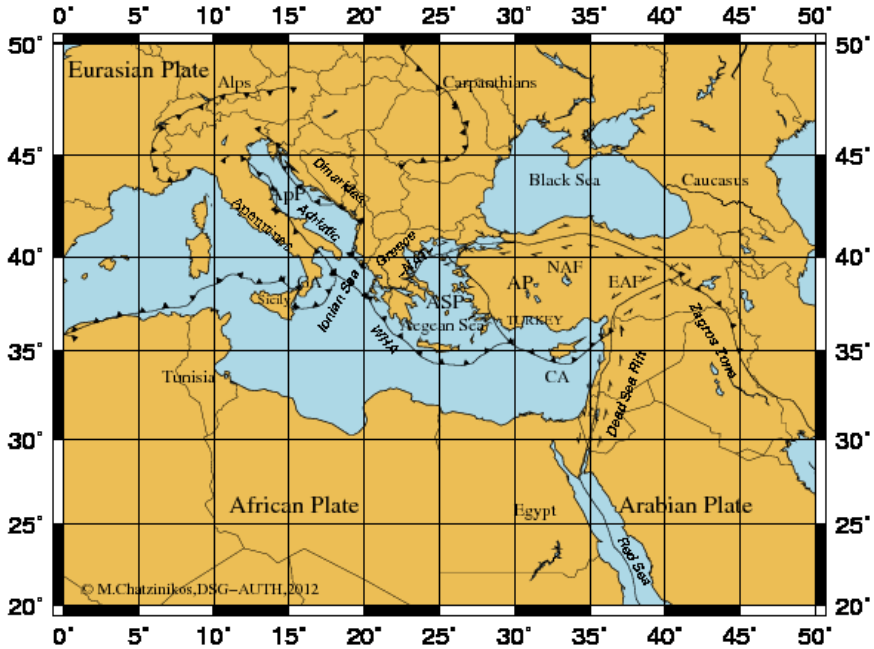
Στο πλαίσιο υλοποίησης του Εθνικού Κτηματολογίου και αξιοποίησης των δυνατοτήτων που προσφέρουν οι μετρητικές τεχνικές GNSS, δημιουργήθηκε από την ΕΚΧΑ Α.Ε. ένα σύγχρονο γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς για τον Ελλαδικό χώρο με την ονομασία HTRS07 (Hellenic Terrestrial Reference System 2007). Το HTRS07 είναι το βασικό σύστημα αναφοράς του δικτύου μόνιμων σταθμών του HEPOS (για την χρονική εποχή 2007.5) και αποτελεί ουσιαστικά την υλοποίηση του Ευρωπαϊκού Συστήματος Αναφοράς ETRS89 στην περιοχή της Ελλάδας. Για τη σύνδεση του HTRS07 με το επίσημο γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς της χώρας (ΕΓΣΑ87) έχει επίσης προσδιορισθεί από την ΕΚΧΑ Α.Ε. ένα αμφίδρομο μοντέλο μετασχηματισμού συντεταγμένων που βασίζεται στην ταυτόχρονη χρήση ενός τρισδιάστατου μετασχηματισμού ομοιότητας και ενός ζεύγους καννάβων οριζοντιογραφικών διορθώσεων (ΔΕ, ΔΝ) οι οποίες κυμαίνονται, ανάλογα με την περιοχή, από μερικά εκατοστά έως και 1-2 μέτρα. Οι συγκεκριμένοι κάνναβοι εμπεριέχουν τις τοπικές γεωμετρικές παραμορφώσεις του ΕΓΣΑ87 σε σχέση με το (εξαιρετικά καλύτερης εσωτερικής ακρίβειας) σύστημα HTRS07 και η χρήση τους είναι απαραίτητη προκειμένου να εξασφαλιστεί μία μέση ακρίβεια σύνδεσης μεταξύ HTRS07 και ΕΓΣΑ87 στα 8-10 εκατοστά για όλη την επικράτεια.

Λαμβάνοντας υπόψη ότι (α) από την υλοποίηση του ΕΓΣΑ87 μέχρι την εποχή αναφοράς του HTRS07 έχουν μεσολαβήσει σχεδόν 20 χρόνια και (β) οι φυσικές θέσεις των σημείων του Ελλαδικού χώρου παρουσιάζουν συνεχείς μεταβολές (λόγω τεκτονικών παραμορφώσεων) που κυμαίνονται, ανάλογα με την περιοχή, από μερικά χιλιοστά έως μερικά εκατοστά το χρόνο, γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι ένα μέρος της συστηματικής παραμόρφωσης που έχει ενσωματωθεί στους καννάβους διορθώσεων (ΔΕ, ΔΝ) δεν οφείλεται στα εσωτερικά γεωμετρικά σφάλματα του ΕΓΣΑ87 αλλά στη (σχεδόν) σταθερή τεκτονική κίνηση των σημείων του Ελλαδικού χώρου το μέγεθος και ο προσανατολισμός της οποίας διαφέρει από περιοχή σε περιοχή. Η παρούσα εργασία έχει ως στόχο να ανιχνεύσει το ποσοστό του προαναφερθέντος γεωδυναμικού σήματος που υπάρχει στις κανναβοποιημένες διορθώσεις (ΔΕ, ΔΝ) του μοντέλου μετασχηματισμού HTRS07-ΕΓΣΑ87, και να αξιολογήσει με πιο αντικειμενικό τρόπο τα πραγματικά συστηματικά σφάλματα του ΕΓΣΑ87. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιείται ένα σύγχρονο γεωδαιτικό μοντέλο (οριζόντιων) ταχυτήτων μετακίνησης του Ελληνικού γήινου φλοιού, το οποίο προέκυψε μέσω μετρήσεων GPS σε δίκτυο 108 μόνιμων σταθμών που είναι κατανεμημένοι σε όλη την επικράτεια και διαθέτουν συνεχόμενα ημερήσια δεδομένα με συνολική διάρκεια που κυμαίνεται από τρία έως επτά χρόνια για το χρονικό διάστημα 2007-2013.

1. Εισαγωγή

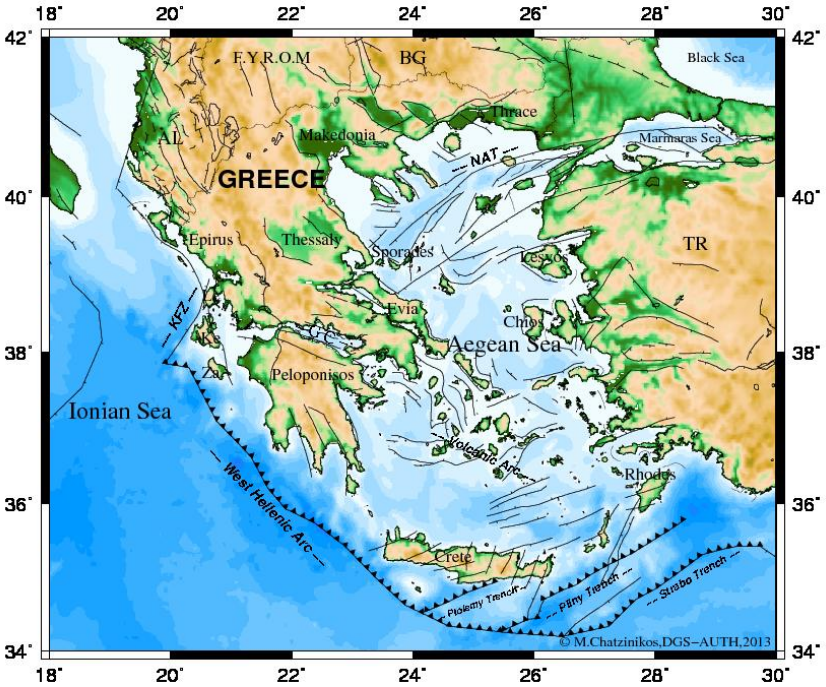
Η Νοτιοανατολική Ευρώπη και η Ανατολική Μεσόγειος (Σχήμα 1.1) είναι μία από τις πιο ενεργές γεωδυναμικά περιοχές στον κόσμο. Η συνύπαρξη τριών εκ των μεγαλύτερων λιθοσφαιρικών πλακών (Αφρικανική, Αραβική, Ευρασιατική) παράλληλα με την εμφάνιση των ζωνών σύγκρουσης μεταξύ των πλακών, όπως το τόξο της Καλαβρίας (Calabria Arc), το Δυτικό Ελληνικό τόξο (West Hellenic Arc), το Κυπριακό τόξο (Cyprus Arc), και το ρήγμα της Νεκράς Θάλασσας (Dead Sea Rift), αποτελούν μερικές από τις κύριες αιτίες της τόσο έντονης γεωδυναμικότητας.

Τις τελευταίες τέσσερις δεκαετίες έχει προταθεί η προσθήκη εκτός των τριών βασικών λιθοσφαιρικών πλακών και άλλων μικρότερων πλακών στη Νοτιοανατολική Ευρώπη και την Ανατολική Μεσόγειο (π.χ. McKenzie 1978, Taymaz et al. 1991, Pichon et al. 1995, Reilinger et al. 2006). Ο διαχωρισμός της Νοτιοανατολικής Ευρώπης και της Ανατολικής Μεσογείου σε μικροπλάκες ποικίλει ανάλογα με την πυκνότητα, την ποιότητα και το είδος των δεδομένων (γεωλογικά, σεισμολογικά, γεωδαιτικά) που χρησιμοποιούνται από τον εκάστοτε ερευνητή. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.1, οι σημαντικότερες από τις μικροπλάκες που υποστηρίζεται ότι θα έπρεπε να συμπληρώσουν το «μωσαϊκό» της περιοχής αυτής είναι η μικροπλάκα της Ανατολίας (Anatolian Plate) με κύρια όρια το Βόρειο (North Anatolian Fault) και Ανατολικό (East Anatolian Fault) ρήγμα της Ανατολίας, της Απουλίας (Apulia Plate) δυτικά από την οροσειρά των Διναρίδων (Dinarides) και ανατολικά από την οροσειρά των Απεννίνων (Apennines) και η μικροπλάκα του Αιγαίου Πελάγους (Aegean Sea Plate) τοποθετούμενη βόρεια της Αφρικανικής πλάκας και δυτικά της Ανατολίας.



Σχήμα 1.1: Τα ρήγματα στη Νοτιοανατολική Ευρώπη και Ανατολική Μεσόγειο, με μαύρα τρίγωνα αναπαρίστανται οι ζώνες σύγκρουσης μεταξύ των πλακών και με βελάκια τα δεξιόστροφα ή αριστερόστροφα ρήγματα οριζόντιας μετατόπισης (πηγή οριοθέτησης ρηγμάτων: World Stress Map Project-http://dc-app3-14.gfz-potsdam.de).

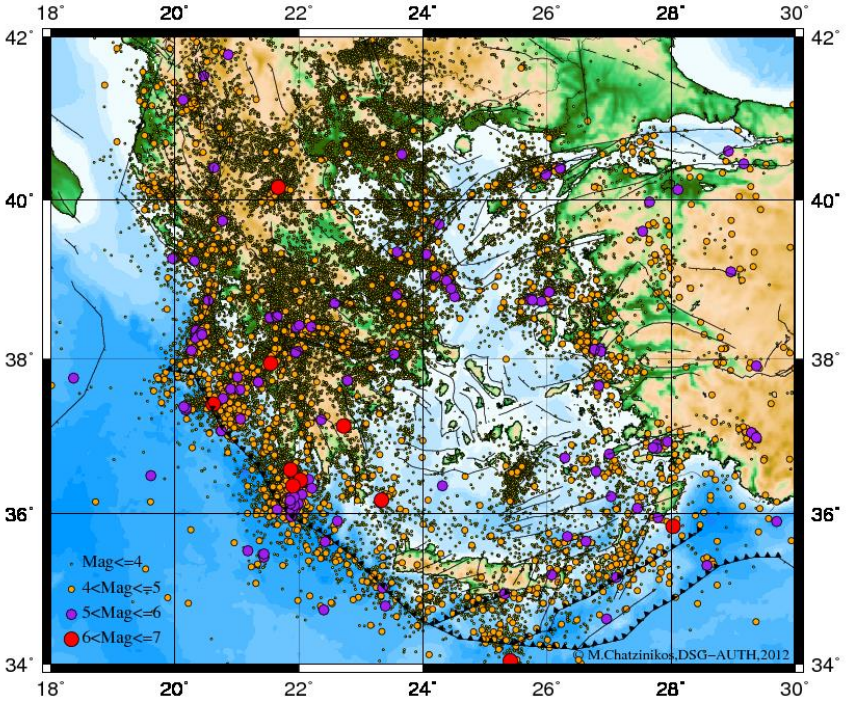
Στη Νοτιοανατολική Ευρώπη η περιοχή της Ελλάδας αποτελεί το πιο ενδιαφέρον και ξεχωριστό τμήμα του γήινου φλοιού όσον αφορά την τεκτονική συμπεριφορά. Η αιτία βρίσκεται στην παρουσία πολλών και διαφορετικών γεωδυναμικών φαινομένων. Σύμφωνα με τον Papazachos et al. (1984) τα κυριότερα από αυτά είναι τα κανονικά ρήγματα που συναντάμε σχεδόν σε όλη την επικράτεια (π.χ. Κορινθιακός Κόλπος, Πατραϊκός Κόλπος, Θεσσαλονίκη, Θεσσαλία κ.ά.), τα ανάστροφα ρήγματα που εκτείνονται κυρίως κατά μήκος της οροσειράς της Πίνδου, τα οριζόντιας μετατόπισης ρήγματα που υπάρχουν ως επί το πλείστον στην περιοχή του Βορείου Αιγαίου (π.χ. το ρήγμα της Βόρειας Ανατολίας), η ύπαρξη του ηφαιστειακού τόξου στο νότιο Αιγαίο και η βύθιση της Αφρικάνικης λιθοσφαιρικής πλάκας κάτω από την πλάκα της Ευρασίας (βλ. Σχήμα 1.2).



Σχήμα 1.2: Τα σημαντικότερα ρήγματα του ελληνικού γήινου φλοιού (πηγή: Howe and Bird 2010).

Ένα ακόμη στοιχείο που καθιστά την Ελλάδα μία από τις πιο ενεργές γεωδυναμικά περιοχές στον πλανήτη είναι η έντονη σεισμική δραστηριότητα που παρουσιάζει. Τα τελευταία δεκαπέντε χρόνια έχουν καταγραφεί πάνω από 50000 σεισμοί έντασης μέχρι 7 βαθμούς της κλίμακας Richter, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.3.

Αποτέλεσμα όλων των παραπάνω είναι οι έντονες και ανομοιογενείς μετακινήσεις του Ελληνικού γήινου φλοιού. Τις τελευταίες δεκαετίες έχει υλοποιηθεί ένας σημαντικός αριθμός μελετών (βλ. π.χ. McClusky et al. 2000, Hollenstein et al. 2008, Reilinger et al. 2006, Müller et al. 2013, Χατζηνίκος 2013) που δείχνουν ότι ο γήινος φλοιός στην Ελλάδα αποτελεί ένα «μωσαϊκό» του οποίου τα κομμάτια παρουσιάζουν διαφοροποιήσεις μεταξύ τους ως προς το μέτρο και τη διεύθυνση των μετακινήσεών τους. Λόγω αυτού, έχει προταθεί (Nyst and Thatcher 2004, Reilinger et al. 2006, Floyd et al. 2010, Χατζηνίκος 2013), κατά καιρούς, ο χωρισμός του Ελληνικού φλοιού σε ομάδες μικρότερων πλακών με πιο γνωστή τη μικροπλάκα του Αιγαίου.



Σχήμα 1.3: Η σεισμική δραστηριότητα της Ελλάδας από το 1995 μέχρι και το 2010 (πηγή: http://geophysics.geo.auth.gr).

Σύμφωνα με τα παραπάνω γίνεται εμφανές ότι ο φλοιός της Ελλάδας υπόκειται σε συνεχή (κυρίως οριζόντια) παραμόρφωση. Η παραμόρφωση αυτή έχει ως αποτέλεσμα τη συνεχή μεταβολή του σχήματος και του μεγέθους των γεωδαιτικών/τοπογραφικών δικτύων που είναι εγκατεστημένα στην Ελλάδα. Ο ρυθμός μεταβολής του σχήματος και του μεγέθους των δικτύων είναι ανάλογος του μεγέθους της ανομοιογένειας των μετακινήσεων στην περιοχή την οποία καταλαμβάνουν. Προφανώς, όσο πιο παλιό είναι ένα δίκτυο τόσο μεγαλύτερη θα είναι και η αναμενόμενη παραμόρφωση στο σχήμα και το μέγεθος του, με την προϋπόθεση βέβαια ότι καλύπτει περιοχή που χαρακτηρίζεται από έντονες μη-ομοιογενείς μετακινήσεις.

Το εθνικό γεωδαιτικό δίκτυο της Γεωγραφικής Υπηρεσίας Στρατού (ΓΥΣ), το οποίο είναι εγκατεστημένο σε όλη την έκταση της Ελληνικής επικράτειας, είναι αναμενόμενο να δέχεται τις μεγαλύτερες σε μέγεθος παραμορφώσεις. Αν αναλογιστούμε την εποχή των μετρήσεων (1962-1989) που συμμετείχαν στη συνόρθωση του συγκεκριμένου δικτύου, τότε μπορούμε εύκολα να συνειδητοποιήσουμε την έντονη παραμόρφωση που έχει υποστεί μέχρι σήμερα το σχήμα και το μέγεθος του. Άμεση συνέπεια αυτών είναι η συνεχής μείωση της εσωτερικής ακρίβειας του Ελληνικού Γεωδαιτικού Συστήματος Αναφοράς (ΕΓΣΑ87) που υλοποιείται μέσω του δικτύου της ΓΥΣ. Με απλά λόγια οι πραγματικές φυσικές θέσεις των σημείων του δικτύου (σε αρκετές περιοχές) δεν μπορούν πλέον να αντικατοπτριστούν με υψηλή ακρίβεια μέσω των συντεταγμένων τους στο ΕΓΣΑ87 εξαιτίας ανομοιογενών γεωδυναμικών μετακινήσεων που λαμβάνουν χώρα στην επιφάνεια της Ελλάδας. Υπενθυμίζεται ότι το ΕΓΣΑ87 είναι ένα στατικό σύστημα αναφοράς (ΣΑ) που δεν έχει τη δυνατότητα να ακολουθεί τις γεωδυναμικές μεταβολές που υφίσταται το επίγειο δίκτυο υλοποίησής του.

Με βάση τα παραπάνω, ο σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η εκ νέου αξιολόγηση των εσωτερικών σφαλμάτων του ΕΓΣΑ87 και ο προσδιορισμός του ποσοστού συμμετοχής των παραμορφώσεων του Ελληνικού γήινου φλοιού σε αυτά. Για την επίτευξη του σκοπού της εργασίας θα χρησιμοποιηθεί ένα σύγχρονο μοντέλο ταχυτήτων μετακίνησης με στόχο την προσομείωση των οριζόντιων παραμορφώσεων που έχει υποστεί το δίκτυο της ΓΥΣ από την εποχή εγκατάστασής του έως την εποχή της δημιουργίας του HEPOS.

2. Το γεωδαιτικό δίκτυο της ΓΥΣ και η δημιουργία των συστημάτων αναφοράς ΕΓΣΑ87 και HTRS07

Σύμφωνα με τον Τάκο (1989) το έτος ίδρυσης της ΓΥΣ (1889) συμπίπτει με την έναρξη των εργασιών για την εγκατάσταση του εθνικού γεωδαιτικού δικτύου. Το 1918 η Ελλάδα για πρώτη φορά διαθέτει ένα τριγωνομετρικό δίκτυο Ι^{ης} τάξης το οποίο εκτείνεται από την Πελοπόννησο έως βόρεια της Λάρισας. Με το τέλος των Βαλκανικών πολέμων το δίκτυο επεκτάθηκε σε όλη τη Βόρεια Ελλάδα και συγκεκριμένα το 1925 αποτελούνταν από 2130 σημεία διαφόρων τάξεων τα οποία κάλυπταν όλο τον Ελλαδικό χώρο εκτός από τα Δωδεκάνησα και τα νησιά της Κρήτης και των Κυθήρων. Το δίκτυο αυτό χρησιμοποιούσε ως βασικό σημείο αναφοράς το βάθρο του Αστεροσκοπείου Αθηνών στο οποίο και πραγματοποιούνταν αστρονομικές παρατηρήσεις. Στη συνέχεια και στην περίοδο 1925–1940 το δίκτυο της ΓΥΣ επεκτάθηκε φτάνοντας τα 4500 σημεία, 160 εκ των οποίων ανήκαν στο δίκτυο Ι^{ης} τάξης και 320 στο δίκτυο ΙΙ^{ης} τάξης. Την περίοδο αυτή οι μετρήσεις των γωνιών του δικτύου έγιναν χωρίζοντας την Ελλάδα σε τρία τόξα (Ανατολικό, Κεντρικό και Δυτικό) με βασικότερο το Κεντρικό τόξο που περιελάμβανε τις περιοχές της Πτολεμαΐδας, Λάρισας, Αττικής και Κυκλάδων. Στο τόξο αυτό στηρίχθηκαν και οι μετρήσεις των δύο άλλων. Το 1930 το δίκτυο της ΓΥΣ επεκτάθηκε και στο νησί της Κρήτης καλύπτοντας για πρώτη φορά όλη την Ελληνική επικράτεια.

Η επόμενη περίοδος από το 1940 έως το 1949 μπορεί να χαρακτηριστεί ως μαύρη περίοδος για τη ΓΥΣ καθώς, λόγω της Γερμανικής Κατοχής, το μεγαλύτερο μέρος του εθνικού δικτύου καταστράφηκε και οι περισσότερες μετρήσεις χάθηκαν. Στην περίοδο 1949-1962 η ΓΥΣ κατάφερε με εντατικές εργασίες να μετρήσει και να δημιουργήσει ξανά ένα δίκτυο 566 σημείων Ι^{ης} και ΙΙ^{ης} τάξης. Τα σημαντικότερα, όμως, χρόνια για το δίκτυο της ΓΥΣ ήταν από το 1962 έως το 1989, περίοδος μέσα στην οποία δημιουργήθηκε και το ΕΓΣΑ87.

2.1 Η δημιουργία του ΕΓΣΑ87

Με έναυσμα το έργο *Χαρτογράφηση της Ελλάδας*, η ΓΥΣ ξεκίνησε το 1962 την αναθεώρηση των δικτύων Ι^{ης} και ΙΙ^{ης} τάξης καθώς επίσης και την εκ νέου ίδρυση των δικτύων ΙΙΙ^{ης} και ΙV^{ης} τάξης. Οι κυριότερες μετρήσεις για το δίκτυο Ι^{ης} τάξης υλοποιήθηκαν από το 1964 έως το 1979, ενώ για το ΙΙ^{ης} τάξης το διάστημα 1975-1989 με σημαντικότερες αυτές της περιόδου 1982-1987. Παράλληλα πραγματοποιούνταν και οι μετρήσεις των κατακόρυφων γωνιών και οριζόντιων διευθύνσεων των δικτύων ΙΙΙ^{ης} και ΙV^{ης} τάξης. Τα βασικά είδη παρατηρήσεων

που έγιναν στο δίκτυο της ΓΥΣ από το 1964 έως το 1989 ήταν μετρήσεις διευθύνσεων, αστρονομικών αζιμούθιων, προσδιορισμού της απόκλισης της κατακορύφου και μήκη πλευρών/βάσεων με το σύστημα DOPPLER ή άλλες μεθόδους.

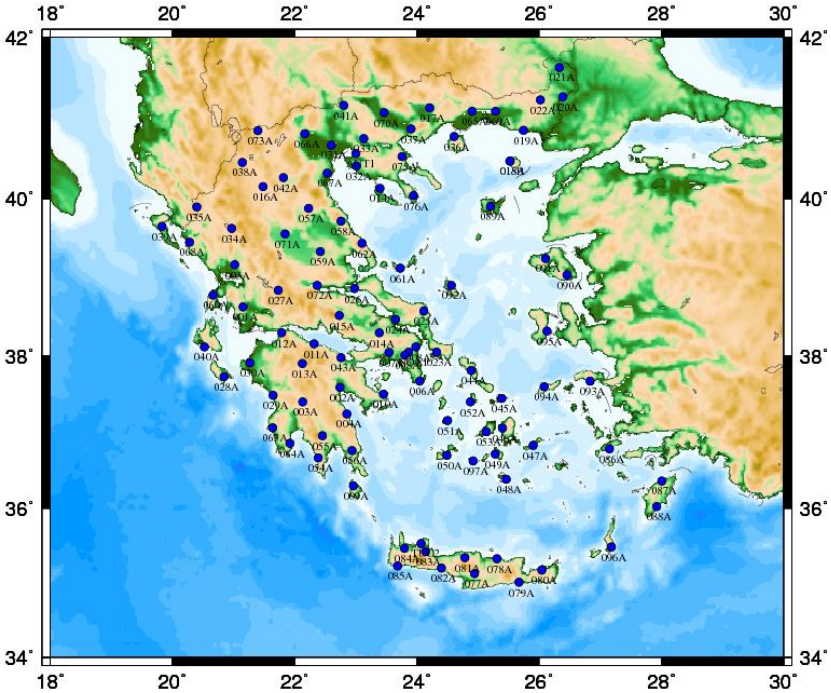
Μετά τις δύο ενιαίες συνορθώσεις, με τη μέθοδο των εξισώσεων συνθηκών, των δικτύων Ι^{ης} και ΙΙ^{ης} τάξης υλοποιήθηκε και η επίλυση των δικτύων ΙΙΙ^{ης} και ΙV^{ης} τάξης. Η επίλυση αυτή βασίστηκε σε σημεία των δικτύων ανώτερης τάξης. Έχοντας πλέον επιλυμένο το συνολικό δίκτυο των 25702 σημείων από επίγειες μετρήσεις, ο καθηγητής Γ. Βέης, το Νοέμβριο του 1986, πρότεινε τη δημιουργία ενός νέου ΣΑ το οποίο θα ελαχιστοποιεί τα υψόμετρα του γεωειδούς και τις αποκλίσεις της κατακορύφου στον ηπειρωτικό χώρο της Ελλάδας (Βέης 1995). Το νέο αυτό ΣΑ ονομάστηκε ΕΓΣΑ87, χρησιμοποιούσε το ελλειψοειδές αναφοράς GRS80 και ήταν προσανατολισμένο σύμφωνα με τους άξονες του International Terrestrial Reference Frame (ITRF) εκείνης της εποχής. Για τον ορισμό του ΕΓΣΑ87 χρησιμοποιήθηκε ως κεντρικό σημείο το βάθρο του Διονύσου στο Αστεροσκοπείο Αθηνών. Αξίζει να σημειωθεί ότι η δημιουργία του ΕΓΣΑ87 βασίστηκε σε μία προσαρμογή της συνόρθωσης του δικτύου της ΓΥΣ (από επίγειες μετρήσεις) σε μία επίλυση 30 σημείων του δικτύου 1^{ης} τάξης από δορυφορικές παρατηρήσεις που είχε πραγματοποιήσει εκείνη την εποχή το Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. Η ισχύς του ΕΓΣΑ87 ξεκίνησε το 1990 μέσα από ένα δίκτυο 26000 περίπου σημείων, υπενθυμίζοντας ότι η δημιουργία του βασίστηκε στη συνόρθωση των μετρήσεων που έγιναν από το 1964 έως το 1989. Η εσωτερική ακρίβεια του ΕΓΣΑ87, σύμφωνα με τον Τάκο (1989), εκτιμήθηκε από 0 έως 20 cm από 153 πλευρομετρήσεις που έγιναν σε περιοχές της Πελοποννήσου, Στερεάς Ελλάδας, Θεσσαλίας, Ηπείρου, Μακεδονίας, Θράκης και Δωδεκανήσων.

2.2 Η δημιουργία του HTRS07

Στο πλαίσιο υλοποίησης του Εθνικού Κτηματολογίου ιδρύθηκε το 2007 από την Κτηματολόγιο Α.Ε ένα δίκτυο 98 μόνιμων σταθμών GPS, οι οποίοι είναι ομοιόμορφα κατανεμημένοι σε όλη την Ελλάδα (βλ. Σχήμα 2.1). Η ονομασία του δικτύου είναι HEPOS (Hellenic Positioning System)(Gianniou 2009) και ο κύριος σκοπός του είναι η υλοποίηση ενός σύγχρονου συστήματος αναφοράς στην Ελλάδα το οποίο να είναι συμβατό με τα σημερινά δορυφορικά συστήματα μέτρησης προκειμένου να υποστηρίξει, μεταξύ άλλων, τις εκτεταμένες ανάγκες των κτηματογραφικών μελετών του Εθνικού Κτηματολογίου.

Παράλληλα με τη δημιουργία του HEPOS επαναμετρήθηκαν, μετά από περίπου 20 (+) χρόνια, 2470 σημεία του δικτύου της ΓΥΣ με τη βοήθεια του συστήματος GPS. Τα σημεία αυτά καλύπτουν το σύνολο της Ελληνικής επικράτειας (βλ. Σχήμα 2.2) και ανήκουν σε διάφορες τάξεις του υφισταμένου δικτύου της ΓΥΣ. Συγκεκριμένα, από το σύνολο των σημείων: 14 ανήκουν στο δίκτυο 1^{ης} τάξης, 39 στο δίκτυο 2^{ης} τάξης, 328 στο δίκτυο 3^{ης} τάξης και 2085 στο δίκτυο 4^{ης} τάξης. Η περίοδος των μετρήσεων κράτησε έξι μήνες και πραγματοποιήθηκαν όλες μέσα στο έτος 2007. Κάθε σημείο μετρήθηκε για τουλάχιστον μία ώρα και απέκτησε συντεταγμένες στα ΣΑ ITRF2000 και ETRF2000 (εποχή 2007.236) μέσω των Ευρωπαϊκών μόνιμων σταθμών αναφοράς που λειτουργούσαν εκείνη την περίοδο στην Ελλάδα. Η επίλυση των σημείων έγινε διατηρώντας μικρές βάσεις (<40 km) με στόχο την ελαχιστοποίηση των ατμοσφαιρικών και άλλων σφαλμάτων, ενώ η συνόρθωσή τους

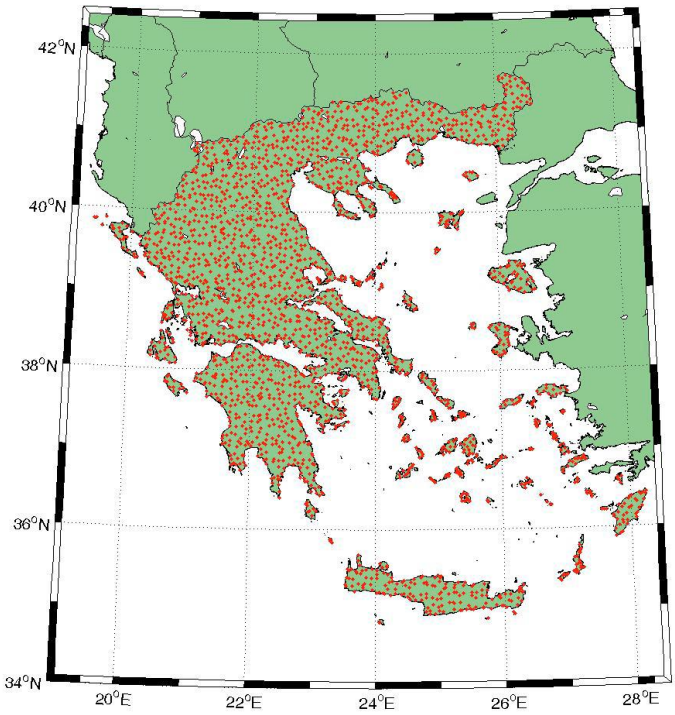
υλοποιήθηκε με ελάχιστες δεσμεύσεις κρατώντας σταθερές τις δορυφορικές εφημερίδες ακριβείας της IGS (Katsampalos et al. 2009).



Σχήμα 2.1: Το δίκτυο μόνιμων σταθμών GPS «HEPOS».

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε η συνόρθωση του δικτύου μόνιμων σταθμών του HEPOS. Χρησιμοποιήθηκαν δύο εβδομάδων δορυφορικά δεδομένα (1448 & 1449 GPS week) και η επεξεργασία τους έγινε ακολουθώντας τις οδηγίες των οργανισμών International Earth Rotation and Reference Systems Service (IERS) και European Reference Frame (EUREF). Η συνόρθωση του δικτύου υλοποιήθηκε εφαρμόζοντας μερικές εσωτερικές δεσμεύσεις σε 12 μόνιμους σταθμούς αναφοράς (συμπεριλαμβανομένων και των τριών Ελληνικών σταθμών AUT1, NOA1, TUC2) που ανήκουν στο European Permanent Network (EPN) και στις συντεταγμένες που διέθεταν στο ITRF2005 την εποχή 2007.79.

Η δημιουργία του νέου τρισδιάστατου επίγειου συστήματος αναφοράς για την Ελλάδα στηρίχθηκε στην επίλυση των δύο προαναφερθέντων δικτύων (δίκτυο 98 σταθμών HEPOS & υπο-δίκτυο 2470 τριγωνομετρικών σημείων της ΓΥΣ). Το σύστημα αυτό ονομάστηκε HTRS07 (Gianniou 2010) και αποτελεί την υλοποίηση του Ευρωπαϊκού Συστήματος Αναφοράς ETRS89 στην περιοχή της Ελλάδας. Αντίθετα με τα παγκόσμια ή τα περιφερειακά Πλαίσια Αναφοράς, π.χ. ITRF2008, IGS08, ETRF2000, το HTRS07 είναι ένα στατικό σύστημα αναφοράς, αναφέρεται σε μία συγκεκριμένη εποχή (2007.5) και δεν διαθέτει ταχύτητες μετακίνησης στα σημεία του δικτύου που το υλοποιούν.



Σχήμα 2.2: Τα 2470 σημεία του δικτύου της ΓΥΣ που επαναμετρήθηκαν το 2007 με το σύστημα GPS.

2.3 Η σύνδεση του HTRS07 με το ΕΓΣΑ87

Για τη σύνδεση του HTRS07 με το ΕΓΣΑ87 χρησιμοποιήθηκαν 2199 από τα 2470 τριγωνομετρικά σημεία του δικτύου της ΓΥΣ που είχαν μετρηθεί στο πλαίσιο υλοποίησης του συστήματος HEPOS. Το μαθηματικό μοντέλο που επιλέχθηκε για την εκτίμηση των παραμέτρων μετασχηματισμού από το ένα ΣΑ στο άλλο ήταν ο 7-παραμετρικός μετασχηματισμός ομοιότητας. Το RMS του μετασχηματισμού στα σημεία υπολογισμού εκτιμήθηκε στα 63 cm, ενώ η εξωτερική επαλήθευση των παραμέτρων που πραγματοποιήθηκε σε 231 σημεία τα οποία δεν συμμετείχαν στη συνόρθωση του μοντέλου μετασχηματισμού ήταν 68 cm (Κωτσάκης 2007). Αυτή είναι μία τιμή που δείχνει μετά από πολύ καιρό (17 χρόνια από το 1990) την τάξη μεγέθους των εσωτερικών σφαλμάτων που υπάρχουν στο ΕΓΣΑ87 σε εθνική κλίμακα (τουλάχιστον για το υπο-δίκτυο των 2199 τριγωνομετρικών σημείων). Σημειώνεται ότι η ακρίβεια των γνωστών συντεταγμένων ως προς το HTRS07 στα 2470 σημεία είναι εξαιρετικά καλύτερη από την ακρίβεια των συντεταγμένων στο ΕΓΣΑ87 στα ίδια σημεία, και για το λόγο αυτό θεωρείται ότι έχει μια αμελητέα συνεισφορά στο συνολικό RMS του μετασχηματισμού ομοιότητας που προαναφέρθηκε.

Για τη βελτίωση της ακρίβειας του μετασχηματισμού μεταξύ των δύο ΣΑ δημιουργήθηκε επίσης ένα ζεύγος καννάβων οριζοντιογραφικών διορθώσεων (ΔΝ, ΔΕ), οι οποίες ως στόχο έχουν να απορροφήσουν τα συστηματικά σφάλματα που αφήνει ο μετασχηματισμός ομοιότητας και να δώσουν στο χρήστη τη δυνατότητα βέλτιστης ένταξης στο ΕΓΣΑ87. Ο συνδυασμός των 7 παραμέτρων μετασχηματισμού και των καννάβων οριζοντιογραφικών διορθώσεων δίνει μία μέση ακρίβεια ένταξης στο ΕΓΣΑ87 που κυμαίνεται κατά μέσο στα 8 cm (Κωτσάκης 2007).

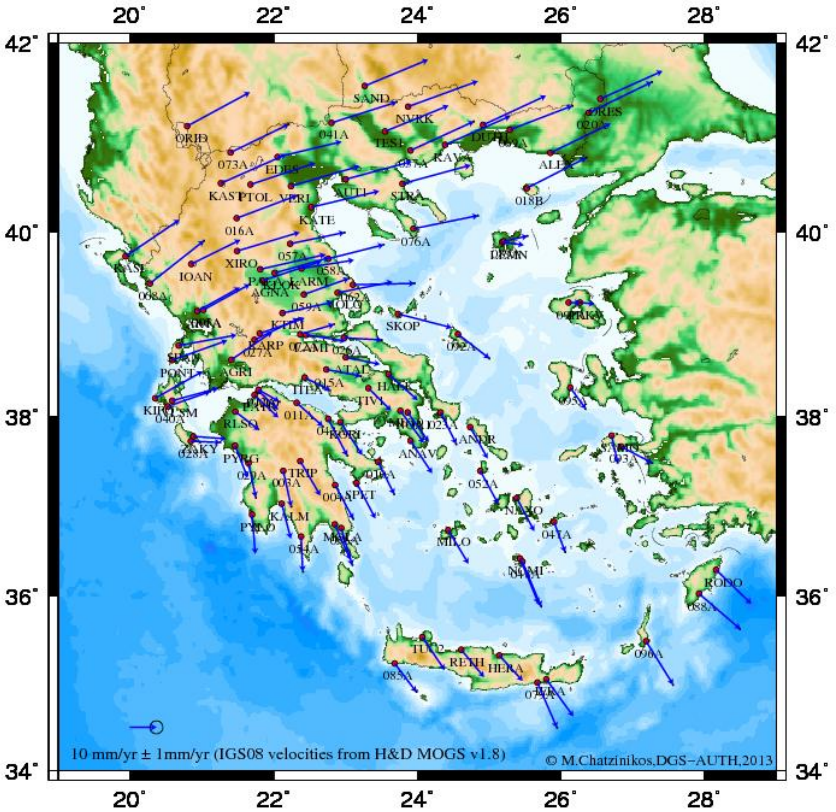
3. Το Ελληνικό Γεωδαιτικό Μοντέλο Ταχυτήτων Μετακίνησης (HGVM2013)

Για την αξιολόγηση της εσωτερικής ακρίβειας του ΕΓΣΑ87 είναι απαραίτητη η χρήση ενός σύγχρονου μοντέλου ταχυτήτων μετακίνησης του Ελληνικού γήινου φλοιού. Στόχος αυτού είναι η προσομοίωση των τεκτονικών μετακινήσεων από την εποχή ίδρυσης του ΕΓΣΑ87 έως την εποχή δημιουργίας του HTRS07. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήσαμε το Hellenic Geodetic Velocity Model 2013 (HGVM2013) το οποίο δημιουργήθηκε το 2013. Στο παρών κεφάλαιο γίνεται μία σύντομη περιγραφή της δημιουργίας του μοντέλου, για περισσότερες λεπτομέρειες ο αναγνώστης παραπέμπεται στις εργασίες των Χατζηνίκο (2013) και Chatzinikos et al. (2013).

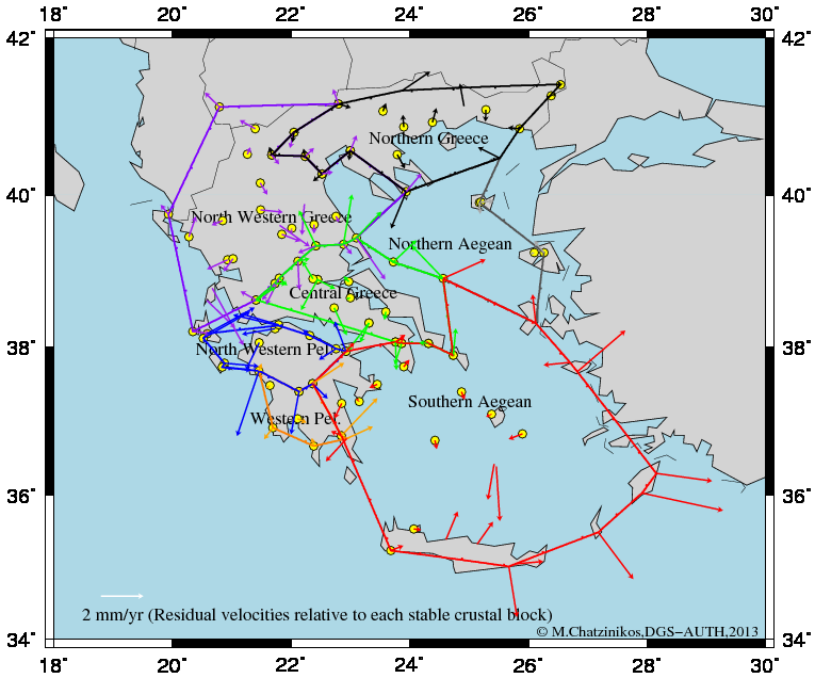
Η δημιουργία του HGVM2013 στηρίχθηκε σε 108 μόνιμους σταθμούς GPS που είναι εγκατεστημένοι στην Ελλάδα. Η χρονική διάρκεια των δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση των ταχυτήτων μετακίνησης των σταθμών GPS ποικίλοι από τρία έως εφτά έτη στο χρονικό διάστημα 2007-2013. Ως αρχικά δεδομένα για τη δημιουργία του μοντέλου μετακίνησης του Ελληνικού φλοιού ήταν οι οριζόντιες ταχύτητες μετατόπισης στο ITRF2008 των 108 σταθμών, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.1.

Η υλοποίηση του μοντέλου έγινε μέσα από δύο βασικά στάδια. Στο πρώτο στάδιο χωρίστηκε ο Ελληνικός γήινος φλοιός σε περιοχές ομοιογενούς μετακίνησης με τη βοήθεια του μοντέλου του πόλου Euler και της σάρωσης δεδομένων στα σφάλματα της προσαρμογής. Ως επίπεδο σημαντικότητας για τη σάρωση των δεδομένων επιλέχθηκε το α=5% και ο μοναδιαίος ήταν ο πίνακας βάρους που εφαρμόστηκε στη προσαρμογή του μοντέλου του πόλου Euler. Το RMS της προσαρμογής εκτιμήθηκε στα 3.3 mm/yr. Τα μεγαλύτερα σφάλματα παρουσιάστηκαν στο Νοτιοανατολικό Αιγαίο, κατά μήκος του ρήγματος της Ανατολίας και στα νησιά του Ιονίου πελάγους. Σύμφωνα με τη στρατηγική αυτή ο Ελληνικός γήινος φλοιός διαιρέθηκε σε εφτά περιοχές ομοιογενούς μετακίνησης. Οι περιοχές που συγκροτούν το γήινο φλοιό της Ελλάδας, όπως απεικονίζονται στο Σχήμα 3.2, είναι η περιοχή της Βόρειας Ελλάδας, της Βορειοδυτικής Ελλάδας, της Κεντρικής Ελλάδας, της Βορειοδυτικής Πελοποννήσου, του Νοτίου Αιγαίου, της Δυτικής Πελοποννήσου και του Βορείου Αιγαίου.

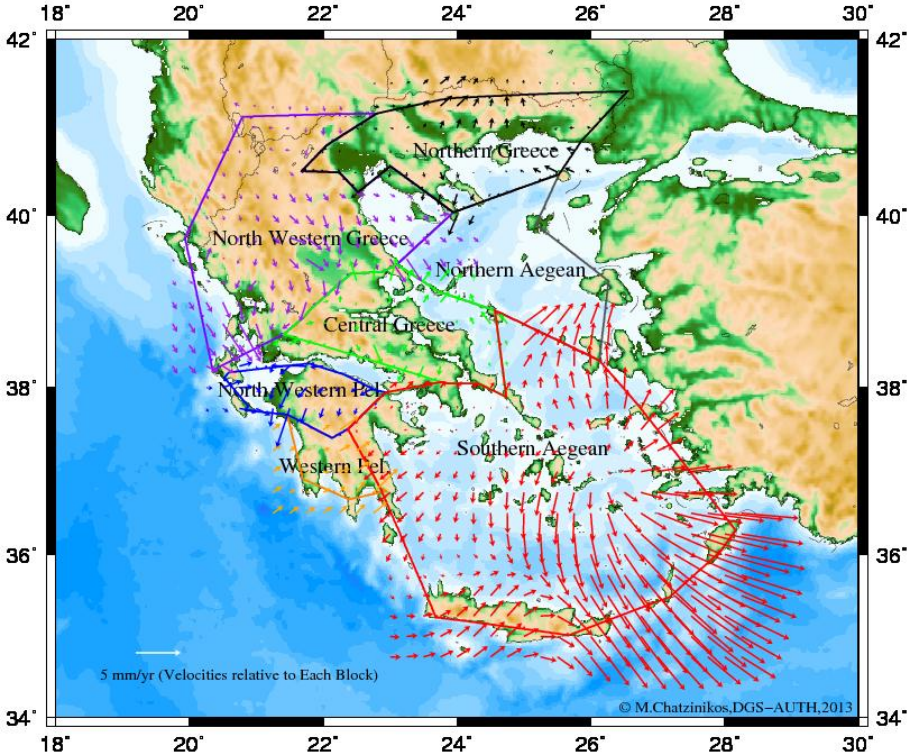
Στο δεύτερο στάδιο εφαρμόστηκε η μέθοδος της σημειακής προσαρμογής (Dermanis et al. 1981, Dermanis 1985, Ρωσσικόπουλος 1986, Κατσάμπαλος και Τζιαβός 1991) στα σφάλματα του μοντέλου του πόλου Euler για κάθε μία από τις έξι περιοχές ξεχωριστά. Από τη διαδικασία εξαιρέθηκε η περιοχή του Βορείου Αιγαίου λόγω περιορισμένου αριθμού δεδομένων. Στόχος αυτής της διαδικασίας ήταν η διόρθωση του μοντέλου του πόλου Euler και η βελτιστοποίηση του μοντέλου μετακίνησης του ελληνικού φλοιού. Το αποτέλεσμα αυτού του βήματος δίνεται στο Σχήμα 3.3.



Σχήμα 3.1: Οι ταχύτητες μετακίνησης στο ITRF2008 των 108 ελληνικών μόνιμων σταθμών GPS.



Σχήμα 3.2: Ο χωρισμός του ελληνικού γήινου φλοιού στις εφτά περιοχές ομοιογενούς μετακίνησης και η απεικόνιση των σφαλμάτων (του μοντέλου του πόλου Euler) των σταθμών ως προς τη περιοχή που ανήκουν.



Σχήμα 3.3: Ο κάναβος των διορθώσεων των ταχυτήτων μετακίνησης του μοντέλου του πόλου Euler για την Ελλάδα, όπως προέκυψε από τη μέθοδο της σημειακής προσαρμογής. Τα χρώματα των διανυσμάτων σχετίζονται με τη περιοχή στην οποία ανήκουν.

Συνδυάζοντας τα δύο προαναφερθέντα βήματα δημιουργείται η τελική μορφή του κινηματικού μοντέλου του Ελληνικού γήινου φλοιού (HGVM2013), η οποία μαθηματικά εκφράζεται από τη σχέση 1,

$$V_{(j)_i}^{IGS08} = A_i \;\; \omega_{(j)}^{IGS08} + U'^{(j)}_i \qquad (1)$$

όπου,

$V_{(j)_i}^{IGS08}$ ……. η πρόβλεψη της ταχύτητας μετατόπισης ως προς το ITRF2008 ενός σημείου i το οποίο βρίσκεται στη περιοχή (j) με j=1,2,…,7

j=1 …… η περιοχή της Βόρειας Ελλάδας,

j=2 …… η περιοχή της Βορειοδυτικής Ελλάδας,

j=3 …… η περιοχή της Κεντρικής Ελλάδας,

j=4 …… η περιοχή της Βορειοδυτικής Πελοποννήσου,

j=5 …… η περιοχή της Δυτικής Πελοποννήσου,

j=6 …… η περιοχή του Νοτίου Αιγαίου,

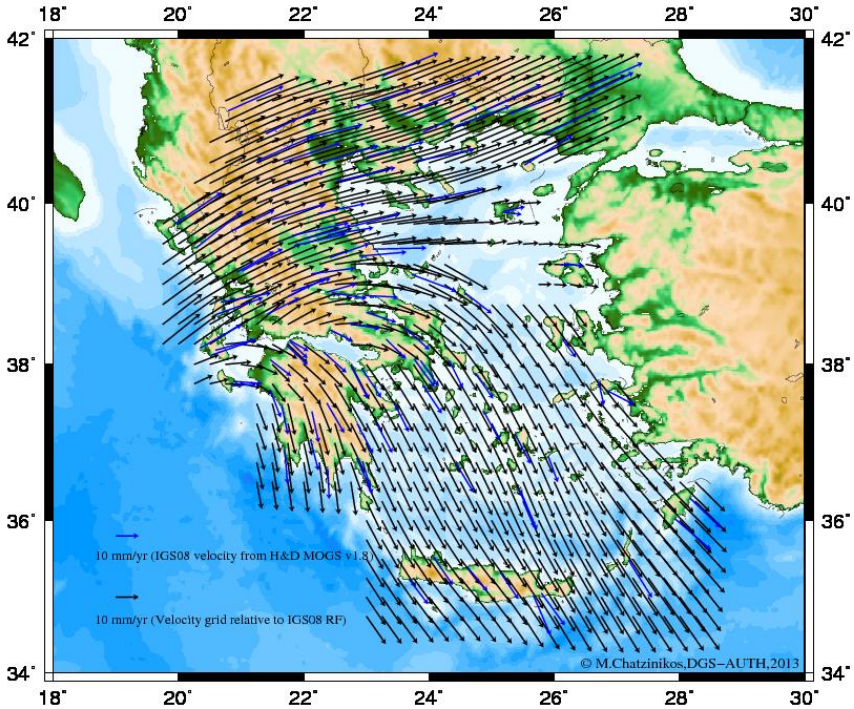
j=7 …… η περιοχή του Βορείου Αιγαίου,

A_i …….. ο πίνακας στροφής στο τοποκεντρικό σύστημα συντ/νων του σημείου i,

$\omega_{(j)}^{IGS08}$ …….. η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής της περιοχής (j) ως προς το ITRF2008

$U'^{(j)}_i$…….. η ταχύτητα μετατόπισης του σημείου i ως προς τη περιοχή (j).

Η ταχύτητα $U'^{(j)}_i$ μπορεί να προσδιοριστεί με τη βοήθεια της διγραμμικής παρεμβολής μέσω του κανάβου του Σχήματος 3.3. Σχετικά με τη περιοχή (j=7) του Βορείου Αιγαίου (Northern Aegean) που δεν διαθέτει διορθώσεις ως προς το κάναβο του Σχήματος 3.3, το ($U'^{(7)}_i$) θα πρέπει να λαμβάνεται ίσο με το μηδέν και η πρόγνωση των ταχυτήτων να προσδιορίζεται απευθείας από τη γωνιακή ταχύτητα περιστροφής της περιοχής. Οπότε με εφαρμογή της σχέσης 1 σε ένα κάνναβο σημείων (15'x15') δημιουργήθηκε το μοντέλο των οριζόντιων ταχυτήτων μετακίνησης του Ελληνικού γήινου φλοιού του σχήματος 3.4. Η ακρίβεια του μοντέλου εκτιμήθηκε στα 1.7 mm/yr συγκρίνοντας τις υπολογιζόμενες από το μοντέλο ταχύτητες μετακίνησης με αυτές που εκτιμήθηκαν στους 108 μόνιμους σταθμούς.



Σχήμα 3.4: Το Hellenic Geodetic Velocity Model 2013.

4. Αξιολόγηση του ΕΓΣΑ87 μέσω του HGVM2013

Για την αξιολόγηση της ακρίβειας του ΕΓΣΑ87 χρησιμοποιήθηκαν 2431 από τα 2470 τριγωνομετρικά σημεία του δικτύου της ΓΥΣ που μετρήθηκαν με το σύστημα GPS το 2007. Δεν χρησιμοποιήθηκαν τα 4 σημεία που βρίσκονται στο Καστελόριζο καθώς επίσης και σημεία που εμφάνιζαν έντονα χονδροειδή σφάλματα.

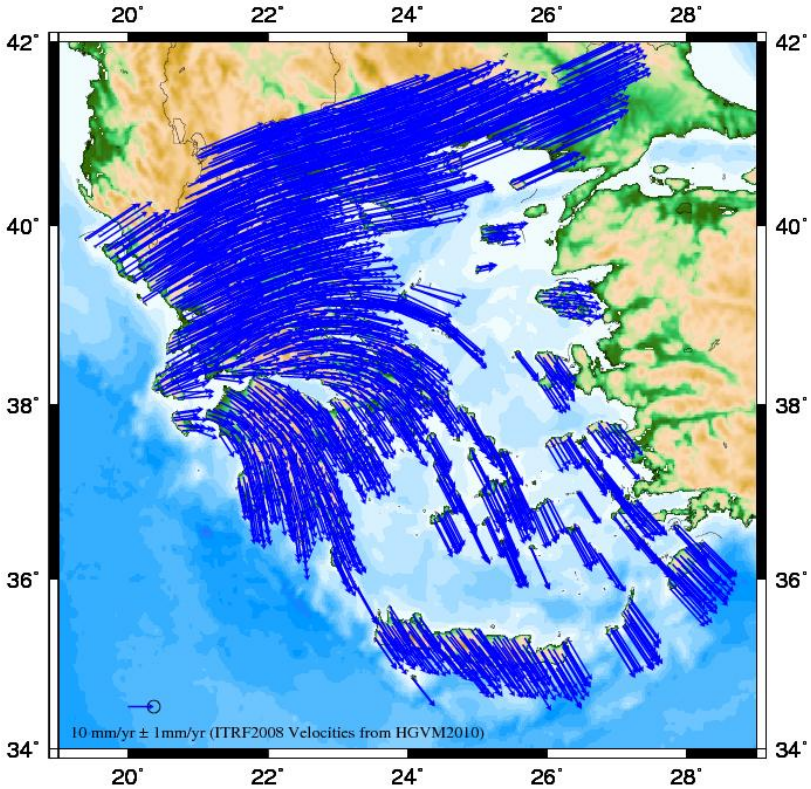
Στα 2431 σημεία είναι διαθέσιμα δύο βασικά σετ συντεταγμένων: το ένα αναφέρεται στις επίσημες γεωδαιτικές συντεταγμένες ΕΓΣΑ87 (φ, λ) και το άλλο στις Καρτεσιανές συντεταγμένες (X, Y, Z) ως προς το ITRF2000 που προέκυψαν από τις μετρήσεις GPS για τη χρονική εποχή t=2007.2. Επίσης, είναι διαθέσιμος ο κάνναβος των οριζόντιων ταχυτήτων, ως προς το ITRF2008, του μοντέλου HGVM2013 (βλ. Σχήμα 3.4) για την προσομοίωση των μετακινήσεων του Ελληνικού γήινου φλοιού.

Για την υλοποίηση της αξιολόγησης είναι απαραίτητο να γίνουν πρώτα κάποια πρακαταρκτικά βήματα ώστε τα δύο αρχεία δεδομένων (Καρτεσιανές γεωκεντρικές συντεταγμένες στο ITRF2000 & ταχύτητες οριζόντιας μετακίνησης στο ITRF2008) να αναχθούν σε ένα κοινό πλαίσιο αναφοράς και να οδηγήσουν από κοινού σε ένα σετ γεωδαιτικών συντεταγμένων το οποίο θα δίνει τη δυνατότητα (πιο αξιόπιστης και άμεσης) σύγκρισης με το ΕΓΣΑ87. Τα βήματα αυτά περιγράφονται συνοπτικά παρακάτω.

• Οι γεωκεντρικές Καρτεσιανές συντεταγμένες των σημείων στο ITRF2000 (εποχή 2007.2) μετασχηματίστηκαν στην ίδια εποχή στο ITRF2008 (Altamimi et al. 2011). Η διαδικασία αυτή έγινε ώστε οι συντεταγμένες των σημείων και οι ταχύτητες μετακίνησης του μοντέλου να βρίσκονται σε ένα κοινό πλαίσιο αναφοράς.

• Στη συνέχεια οι γεωκεντρικές Καρτεσιανές συντεταγμένες στο ITRF2008 (εποχή 2007.2) μετασχηματίστηκαν σε γεωδαιτικές συντεταγμένες (φ, λ, h) ως προς το ελλειψοειδές αναφοράς GRS80.

• Το επόμενο βήμα είναι η παρεμβολή των οριζοντίων ταχυτήτων μετακίνησης (ως προς το ITRF2008) στα 2431 σημεία του δικτύου με τη βοήθεια του μοντέλου HGVM2013 (βλ. παρακάτω σχήμα).



Σχήμα 4.1: Οι ταχύτητες μετακίνησης στο ITRF2008 των 2431 σημείων του δικτύου της ΓΥΣ.

• Οι οριζόντιες (τοποκεντρικές) ταχύτητες μετακίνησης (V_{north}, V_{east}) των 2431 σημείων στο ITRF2008 μετασχηματίστηκαν σε γεωδαιτικές ταχύτητες μετακίνησης (V_{φ}, V_{λ}) σε σχέση με το ελλειψοειδές GRS80. Το βήμα αυτό υλοποιήθηκε μέσω των σχέσεων 2 και 3, όπου M και N οι ακτίνες καμπυλότητας της μεσημβρινής και της πρώτης κάθετης τομής, αντίστοιχα.

$$V_{\varphi} = V_{north}/M_i \quad (2)$$

$$V_{\lambda} = V_{east}/(N_i cos\varphi_i) \quad (3)$$

όπου,

$$N_i = \frac{a}{W_i} \quad (4)$$

$$M_i = \frac{a(1-e^2)}{W_i^3} \quad (5)$$

$$W_i = (1 - e^2 sin\varphi_i{}^2)^{1/2} \quad (6)$$

• Στο σημείο αυτό είναι πλέον δυνατή η αναγωγή των γνωστών συντεταγμένων των 2431 σημείων (όπως προέκυψαν από μετρήσεις GPS το 2007) πίσω στο χρόνο και σε εποχή αναφοράς t_{init} που αντιστοιχεί στην (υποτιθέμενη) εποχή αναφοράς του ΕΓΣΑ87. Η ενέργεια αυτή πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια των ταχυτήτων μετακίνησης που υπολογίστηκαν στα σημεία του δικτύου κατά το προηγούμενο βήμα.

• Τέλος διαθέτοντας τις γεωδαιτικές συντεταγμένες των σημείων στο ITRF2008/GRS80 (εποχή t_{init}) και στο ΕΓΣΑ87, εφαρμόστηκε ο 7-παραμετρικός μετασχηματισμός ομοιότητας ως βασικό εργαλείο για την αξιολόγηση της ακρίβειας του ΕΓΣΑ87. Ο μετασχηματισμός ομοιότητας εφαρμόστηκε με τη βοήθεια της μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων στις εξισώσεις 7 και 8.

$$\varphi_i' - \varphi_i = -\frac{\sin\varphi_i \cos\lambda_i}{M_i+H_i} t_x - \frac{\sin\varphi_i \sin\lambda_i}{M_i+H_i} t_y + \frac{\cos\varphi_i}{M_i+H_i} t_z - \sin\lambda_i \frac{aW_i+H_i}{M_i+H_i} e_x + \cos\lambda_i \frac{aW_i+H_i}{M_i+H_i} e_y - \\ -\frac{\mathrm{N}_i \mathrm{e}^2 \sin\varphi_i \sin\varphi_i}{M_i+H_i} \delta s + V_{\delta\varphi_i} \quad (7)$$

$$\lambda_i' - \lambda_i = -\frac{sin\lambda_i}{(N_i+H_i)\cos\varphi_i} t_x + \frac{cos\lambda_i}{(N_i+H_i)\cos\varphi_i} t_x + \frac{N_i(1-e^2)+H_i}{N_i+H_i} \frac{sin\varphi_i \cos\lambda_i}{\cos\varphi_i} e_x + \frac{N_i(1-e^2)+H_i}{N_i+H_i} \frac{sin\varphi_i \sin\lambda_i}{\cos\varphi_i} e_y - \\ -e_z + V_{\delta\lambda_i} \quad (8)$$

όπου,

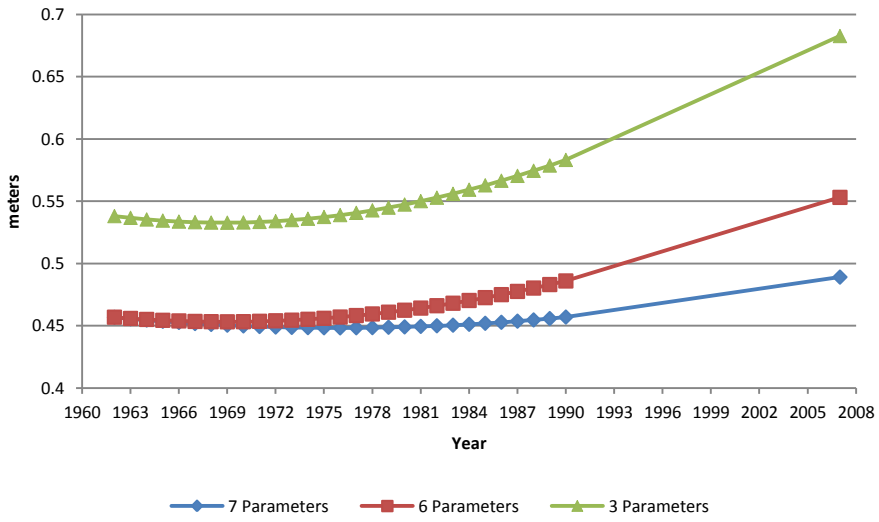
φ_i', λ_i'	το γεωδαιτικό πλάτος και μήκος αντίστοιχα ενός σημείου i στο ΕΓΣΑ87,
$\varphi_i, \lambda_i, H_i$	το γεωδαιτικό πλάτος, μήκος και γεωμετρικό υψόμετρο αντίστοιχα στο ITRF2008,
M_i, N_i	ακτίνα καμπυλότητας της μεσημβρινής και πρώτης κάθετης τομής,
t_x, t_y, t_z	οι τρεις μεταθέσεις ως προς τους άξονες X, Y, Z,
e_x, e_y, e_z	οι τρεις στροφές ως προς τους άξονες X, Y, Z,
δs	η μεταβολή της κλίμακας και
$V_{\delta\varphi_i}, V_{\delta\lambda_i}$	τα σφάλματα ενός σημείου i ως προς το γεωδαιτικό πλάτος και μήκος αντίστοιχα.

4.1 Βέλτιστη χρονική εποχή σύγκρισης του ΕΓΣΑ87 με το ITRF2008

Κύριο μέλημα για την αξιολόγηση του ΕΓΣΑ87 ήταν η εύρεση της εποχής στην οποία πρέπει να μετατεθεί χρονικά το δίκτυο από την εποχή αναφοράς (2007.2) των γνωστών συντεταγμένων στο ITRF2000, ώστε να απορροφηθούν πλήρως οι τεκτονικές μετακινήσεις

του Ελληνικού γήινου φλοιού. Όπως αναλύθηκε και στο 2° κεφάλαιο δεν υπάρχει κάποια συγκεκριμένη ημερομηνία στην οποία αναφέρονται οι συντεταγμένες ως προς το ΕΓΣΑ87. Γενικά, η εποχή στην οποία αναφέρεται η επίλυση ενός δικτύου βγαίνει μέσα από την χρονική περίοδο των μετρήσεων που έχουν γίνει και από την εποχή που αναφέρονται οι συντεταγμένες των σημείων που δεσμεύονται για τη συνόρθωση του δικτύου. Η εποχή των δεσμευμένων συντεταγμένων συνήθως αναφέρεται στο μέσο του χρονικού διαστήματος των μετρήσεων ώστε το δίκτυο να παίρνει τη πραγματική του θέση και το πραγματικό του σχήμα σύμφωνα με την εξέλιξη των τεκτονικών μετακινήσεων. Στην περίπτωση μας, για το ΕΓΣΑ87, το μόνο που γνωρίζουμε είναι ότι οι μετρήσεις έγιναν από το 1964 έως το 1989 και η συνόρθωσή του υλοποιήθηκε στα τέλη της δεκαετίας του 80. Οπότε η κατάλληλη εποχή για τη μετάθεση του δικτύου πρέπει να βρίσκεται μέσα στη χρονική περίοδο 1964-1990.

Για την εύρεση της βέλτιστης εποχής χρονικής μετάθεσης του δικτύου εφαρμόστηκε ο μετασχηματισμός ομοιότητας μεταξύ του ΕΓΣΑ87 και διαφορετικών εποχών στις οποίες αναφέρονται οι συντεταγμένες των σημείων στο ITRF2008. Συγκεκριμένα, οι συντεταγμένες των σημείων στο ITRF2008 ανάχθηκαν από την εποχή υπολογισμού τους (2007.2) σε όλες τις ακέραιες εποχές από το 1990 έως το 1964 με τη βοήθεια των γνωστών ταχυτήτων τους. Σημειώνεται ότι ο μετασχηματισμός ομοιότητας μεταξύ ΕΓΣΑ87 και ITRF2008 εφαρμόστηκε και για την εποχή 2007.2 που αναφέρονταν αρχικά οι θέσεις των 2431 σημείων του δικτύου, με στόχο την πληρέστερη εικόνα όσον αφορά την εύρεση της βέλτιστης εποχής. Εφαρμόστηκαν τρία διαφορετικά σενάρια του μετασχηματισμού ομοιότητας: στο πρώτο πήραν μέρος και οι 7 παράμετροι, στο δεύτερο χρησιμοποιήθηκαν μόνο οι τρεις στροφές και οι τρεις μεταθέσεις, και στο τρίτο μόνο οι τρεις μεταθέσεις.



Σχήμα 4.2: Το RMS του μετασχηματισμού ομοιότητας μεταξύ του ΕΓΣΑ87 και του ITRF2008, σε σχέση με την εποχή που αναφέρονται οι συντεταγμένες στο ITRF2008, εφαρμόζοντας τρία διαφορετικά σενάρια μετασχηματισμού στα 2431 σημεία του δικτύου της ΓΥΣ (μπλε: 3 μεταθέσεις + 3 στροφές + 1 συντελεστής κλίμακας, κόκκινο: 3 μεταθέσεις + 3 στροφές, πράσινο: 3 μεταθέσεις).

Στο Σχήμα 4.2 δίνεται το RMS των τριών σεναρίων μετασχηματισμού σε σχέση με τη χρονική εποχή που αναφέρονται οι συντεταγμένες του δικτύου στο ITRF2008. Οι τιμές του RMS του 7-παραμετρικού μετασχηματισμού, με ακρίβεια εκατοστού, δείχνουν ότι

μειώνεται από το 2007 μέχρι το 1987, ενώ σταθεροποιείται στο χρονικό διάστημα 1965-1987. Αν λάβουμε υπόψη το RMS με ακρίβεια χιλιοστού τότε βλέπουμε ότι η μικρότερη τιμή του εμφανίζεται το 1976, δηλαδή στο μέσο της περιόδου 1965-1987. Αξίζει να σημειωθεί πως από το 1964 και πίσω το RMS αρχίζει και αυξάνεται σε σχέση με τις τιμές της περιόδου 1965-1987.

Στα σενάρια του 3-παραμετρικού και 6-παραμετρικού μετασχηματισμού η κατάσταση είναι λίγο διαφορετική. Το RMS του μετασχηματισμού μειώνεται συνεχώς από το 2007 μέχρι το 1973, για να σταθεροποιηθεί με ακρίβεια εκατοστού την περίοδο 1965-1973. Ανατρέχοντας πάλι στην ακρίβεια του χιλιοστού βρίσκουμε πως η βέλτιστη εποχή που αναδεικνύουν και τα δύο αυτά σενάρια τοποθετείται στο μέσο του χρονικού διαστήματος 1965-1973, δηλαδή το 1969.

Μέσα και από τα τρία σενάρια μετασχηματισμού αναδεικνύεται η συμμετοχή των **ανομοιογενών τεκτονικών μετακινήσεων** του Ελληνικού γήινου φλοιού στα σφάλματα μετασχηματισμού μεταξύ του ΕΓΣΑ87 και του ITRF2008. Όσο προστίθενται τέτοιου είδους τεκτονικές μετακινήσεις στις φυσικές θέσεις των σημείων από την περίοδο δημιουργίας του ΕΓΣΑ87 ως το 2007, τόσο χειροτερεύει η ακρίβεια σύνδεσης μεταξύ των επίσημων (και χρονικά σταθερών) συντεταγμένων ΕΓΣΑ87 και των χρονικά-μεταβαλλόμενων συντεταγμένων ITRF2008 (βλ. Σχήμα 4.2).

Από την παραπάνω ανάλυση είναι ευδιάκριτο πως η βέλτιστη εποχή για τη χρονική μετάθεση των συντεταγμένων ως προς το ITRF2008 βρίσκεται στην περίοδο 1965-1973. Επιλέξαμε συμβατικά τη μέση εποχή 1969.0 θεωρώντας, για τη συνέχεια της εργασίας, ότι αυτό είναι το έτος στο οποίο αναφέρονται οι συντεταγμένες του ΕΓΣΑ87 (ή, ορθότερα, ότι αυτό είναι το έτος στο οποίο έχουν πλέον απορροφηθεί οι τεκτονικές μετακινήσεις μεταξύ των συντεταγμένων του ΕΓΣΑ87 και του ITRF2008).

4.2 Αξιολόγηση της ακρίβειας του ΕΓΣΑ87 στο σύνολο του Ελληνικού γήινου φλοιού

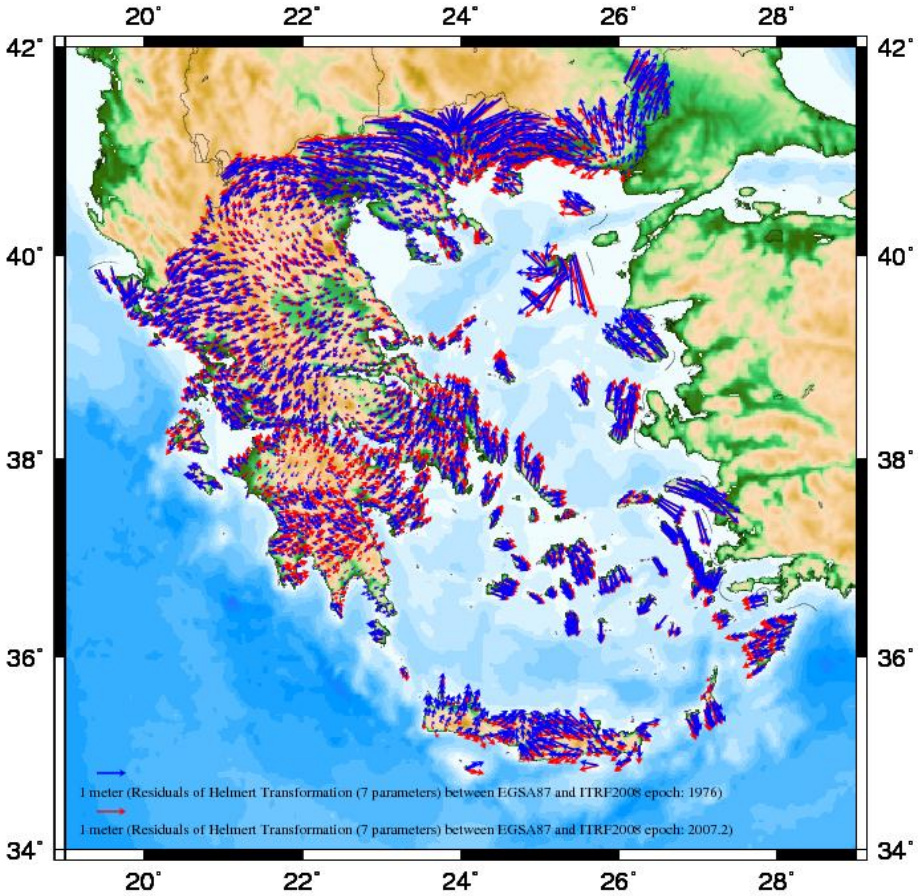
Έχοντας πλέον ορίσει τη συμβατική βέλτιστη εποχή για τη χρονική μετάθεση των συντεταγμένων του δικτύου ως προς το ITRF2008 είναι πλέον εφικτή η αξιολόγηση της ακρίβειας του ΕΓΣΑ87 για όλη την Ελλάδα. Δοκιμάστηκαν και τα τρία προαναφερθέντα σενάρια μετασχηματισμού μεταξύ του ΕΓΣΑ87 και του ITRF2008 (εποχή 1969.0) με στόχο την εξαγωγή ασφαλέστερων συμπερασμάτων ως προς την αξιολόγηση του ΕΓΣΑ87.

Στο πρώτο σενάριο υλοποιήθηκε ο μετασχηματισμός ομοιότητας μεταξύ των δύο ΣΑ εφαρμόζοντας και τις 7 παραμέτρους στα 2431 σημεία του δικτύου. Ο μετασχηματισμός πραγματοποιήθηκε δύο φορές, την πρώτη φορά έγινε μεταξύ του ΕΓΣΑ87 και του ITRF2008 (εποχή 1969.0) και τη δεύτερη μεταξύ του ΕΓΣΑ87 και του ITRF2008 (εποχή 2007.2). Η διαδικασία αυτή έγινε ώστε να μπορέσουμε να παρατηρήσουμε τη συμμετοχή των τεκτονικών μετακινήσεων στην ακρίβεια του μετασχηματισμού και ακολούθως στο μέγεθος των εσωτερικών συστηματικών σφαλμάτων του ΕΓΣΑ87. Στον πίνακα 4.1 δίνονται τα

στατιστικά στοιχεία των σφαλμάτων των δύο μετασχηματισμών. Όπως μπορεί εύκολα να παρατηρηθεί, τα στατιστικά αποτελέσματα του Πίνακα 4.1 είναι παρόμοια για τους δύο μετασχηματισμούς, εμφανίζοντας μία μικρή βελτίωση κατά 4 cm στο RMS του μετασχηματισμού όταν λαμβάνουμε υπόψη μας τις οριζόντιες μετακινήσεις του φλοιού.

Πίνακας 4.1: Τα στατιστικά στοιχεία των σφαλμάτων στο οριζόντιο επίπεδο του 7-παραμετρικού μετασχηματισμού ομοιότητας μεταξύ ΕΓΣΑ87 και ITRF2008.

Μετασχηματισμός / Σφάλματα (m)	min	max	mean	std	RMS
ΕΓΣΑ87 vs ITRF2008_1969	0.00	2.13	0.38	0.24	0.45
ΕΓΣΑ87 vs ITRF2008_2007.2	0.02	2.27	0.43	0.23	0.49

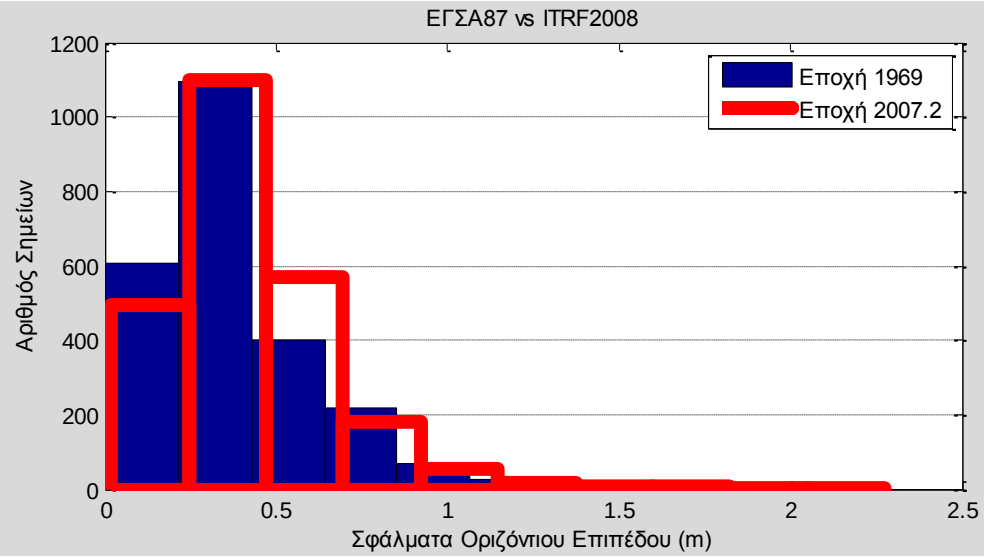


Σχήμα 4.3: Τα σφάλματα του 7-παραμετρικού μετασχηματισμού ομοιότητας μεταξύ ΕΓΣΑ87 και ITRF2008. Με μπλε διανύσματα απεικονίζονται τα σφάλματα μεταξύ ΕΓΣΑ87 και ITRF2008 (εποχή 1969) και με κόκκινα μεταξύ ΕΓΣΑ87 και ITRF2008 (εποχή 2007.2).

Η σχετική ομοιομορφία στα σφάλματα των δύο μετασχηματισμών καθώς επίσης και η επαλήθευση των αποτελεσμάτων του Πίνακα 4.1 απεικονίζεται στα Σχήματα 4.3 και 4.4. Συγκεκριμένα στο Σχήμα 4.3 δίνονται τα σφάλματα στο οριζόντιο επίπεδο των δύο μετασχηματισμών σε κάθε σημείο του δικτύου, ενώ στο Σχήμα 4.4 παραθέτονται τα ιστογράμματα των οριζόντιων σφαλμάτων σε σχέση με το μέγεθός τους. Το μέγεθος των σφαλμάτων και των δύο μετασχηματισμών κυμαίνεται από 0 έως 2 m περίπου, με μία μέση τιμή στα 40 cm περίπου. Ακόμη και η κατανομή των σφαλμάτων σε σχέση με το μέγεθός τους ήταν παρόμοια για τους δύο μετασχηματισμούς. Η χρονική μετάθεση του δικτύου

μέσω του μοντέλου HGVM2013 το μόνο που πέτυχε ήταν να μειώσει ελαφρώς τα σφάλματα στα σημεία που εμφάνιζαν τιμές πάνω από 50 cm και να ρίξει κατά 4 cm το RMS του μετασχηματισμού. Από την άλλη πλευρά βέβαια πρέπει να σημειωθεί ότι η εφαρμογή του μοντέλου HGVM2013 δεν μείωσε την ακρίβεια του μετασχηματισμού αναδεικνύοντας με τον τρόπο αυτό την εγκυρότητά του.

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να σημειωθεί ότι η παράμετρος της κλίμακας που συμμετέχει στο μετασχηματισμό ομοιότητας μεταξύ του ΕΓΣΑ87 και του ITRF2008 (εποχή 2007.2) αναλαμβάνει το ρόλο να απορροφήσει ένα μεγάλο μέρος των σφαλμάτων λόγω των μετακινήσεων του γήινου φλοιού, εμφανίζοντας για το λόγο αυτό 4 φορές μεγαλύτερη τιμή σε σχέση με αυτήν που εκτιμήθηκε όταν λάβαμε υπόψη εξ' αρχής τις παραμορφώσεις του φλοιού (δηλαδή κατά το μετασχηματισμό μεταξύ ΕΓΣΑ87 και ITRF2008_1969). Έτσι λοιπόν ο 7-παραμετρικός μετασχηματισμός ομοιότητας δεν δίνει τη δυνατότητα αξιόπιστης εκτίμησης του ποσοστού συμμετοχής των τεκτονικών μετακινήσεων στη μείωση της ακρίβειας του μετασχηματισμού μεταξύ του ΕΓΣΑ87 και του ITRF2008, και για το λόγο αυτό δεν θα συμπεριληφθεί ξανά στα επόμενα πειράματα.

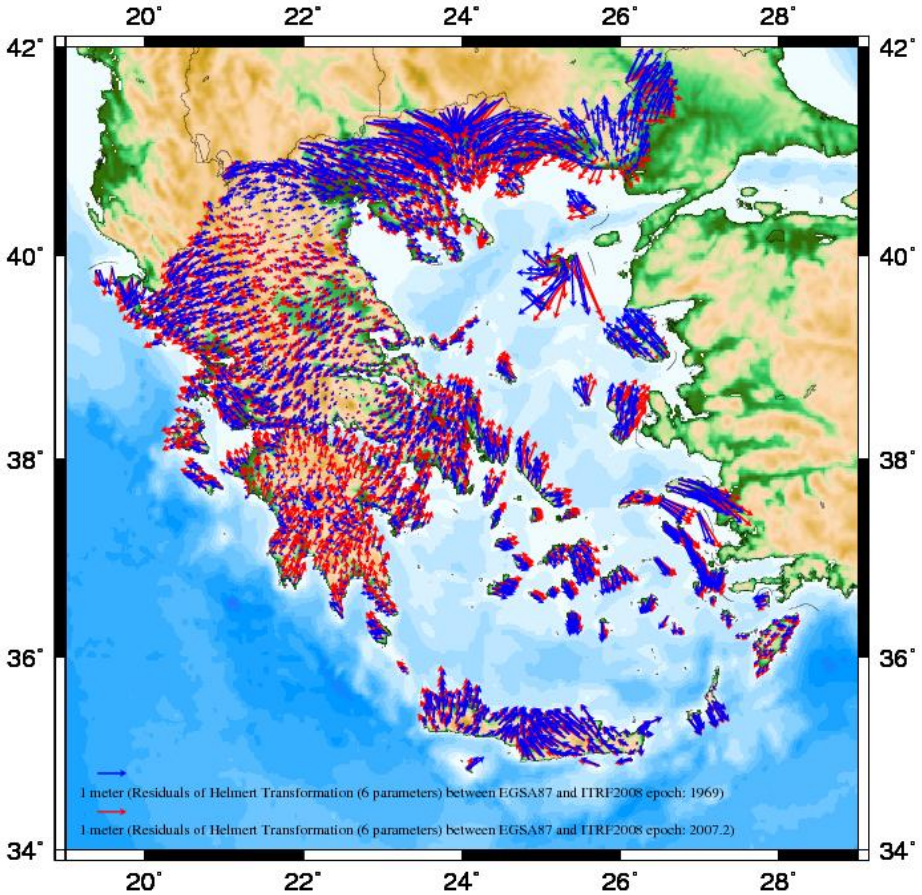


Σχήμα 4.4: Τα ιστογράμματα των σφαλμάτων του 7-παραμετρικού μετασχηματισμού ομοιότητας μεταξύ (μπλε ράβδοι) ΕΓΣΑ87 και ITRF2008 (εποχή 1969) και μεταξύ (κόκκινοι ράβδοι) ΕΓΣΑ87 και ITRF2008 (εποχή 2007.2).

Στο δεύτερο σενάριο εξετάστηκαν τα σφάλματα και η ακρίβεια του 6-παραμετρικού μετασχηματισμού (3 στροφές + 3 μεταθέσεις) μεταξύ του ΕΓΣΑ87 και του ITRF2008 (εποχή 1969), καθώς επίσης και μεταξύ του ΕΓΣΑ87 και του ITRF2008 (εποχή 2007.2). Στο σενάριο αυτό, έχοντας πλέον αποκλείσει την παράμετρο της κλίμακας, το μέγεθος των σφαλμάτων και οι τιμές της ακρίβειας των δύο μετασχηματισμών διαφοροποιείται. Η απορρόφηση των τεκτονικών μετακινήσεων πριν την υλοποίηση του μετασχηματισμού ομοιότητας μείωσε κατά 10 cm το RMS του μετασχηματισμού και κατά 11 cm τη μέση τιμή των σφαλμάτων (βλ. Πίνακα 4.2).

Πίνακας 4.2: Τα στατιστικά στοιχεία των σφαλμάτων στο οριζόντιο επίπεδο του 6-παραμετρικού μετασχηματισμού ομοιότητας μεταξύ ΕΓΣΑ87 και ITRF2008.

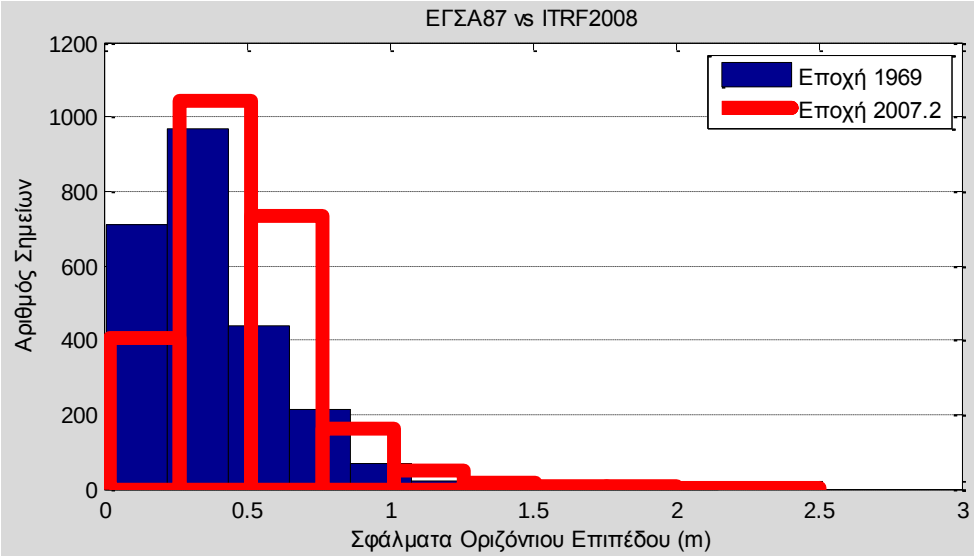
Μετασχηματισμός / Σφάλματα (m)	min	max	mean	std	RMS
ΕΓΣΑ87 vs ITRF2008_1969	0.01	2.15	0.38	0.25	0.45
ΕΓΣΑ87 vs ITRF2008_2007.2	0.02	2.50	0.49	0.26	0.55



Σχήμα 4.5: Τα σφάλματα του 6-παραμετρικού μετασχηματισμού ομοιότητας μεταξύ ΕΓΣΑ87 και ITRF2008. Με μπλε διανύσματα απεικονίζονται τα σφάλματα μεταξύ ΕΓΣΑ87 και ITRF2008 (εποχή 1969) και με κόκκινα μεταξύ ΕΓΣΑ87 και ITRF2008 (εποχή 2007.2).

Αν παρατηρήσουμε το Σχήμα 4.5, όπου απεικονίζονται τα οριζόντια σφάλματα κατά σημείο και μέγεθος των δύο μετασχηματισμών, είναι ευδιάκριτο ότι η χρονική μετάθεση του δικτύου την εποχή 1969.0 μειώνει τα σφάλματα κυρίως στις Περιφέρειες της Πελοποννήσου, της Δυτικής και Κεντρικής Μακεδονίας, των Ιονίων νησιών, της Αττικής και στα Βόρεια νησιά των Κυκλάδων. Ακόμη και τα ιστογράμματα του Σχήματος 4.6 για τα σφάλματα των δύο μετασχηματισμών αναδεικνύουν τη μεταβολή στην κατανομή του μεγέθους τους. Η απορρόφηση των μετακινήσεων μέσω του HGVM2013 μείωσε σημαντικά τον αριθμό των σημείων που παρουσιάζουν σφάλματα πάνω από 50 cm, ενώ αύξησε κατά 75% τον αριθμό των σημείων που παρουσιάζουν σφάλματα από 0 έως 25 cm σε σχέση με αυτά που έδωσε ο μετασχηματισμός μεταξύ του ΕΓΣΑ87 και του ITRF2008 (εποχή 2007.2). Συμπερασματικά, και με βάση τα αποτελέσματα του συγκεκριμένου σεναρίου, η συμμετοχή των μετακινήσεων του Ελληνικού γήινου φλοιού στην εσωτερική ακρίβεια του ΕΓΣΑ87 (για τη χρονική εποχή των μετρήσεων του HEPOS, 2007.2) υπολογίζεται σε ποσοστό 18%. Η

αγνόηση των μετακινήσεων του γήινου φλοιού αυξάνει κατά 10 cm την τιμή της εσωτερικής ακρίβειας του ΕΓΣΑ87 στο σύνολο της Ελλάδας, διογκώνοντας με τον τρόπο αυτό το μέγεθος των συστηματικών σφαλμάτων του.

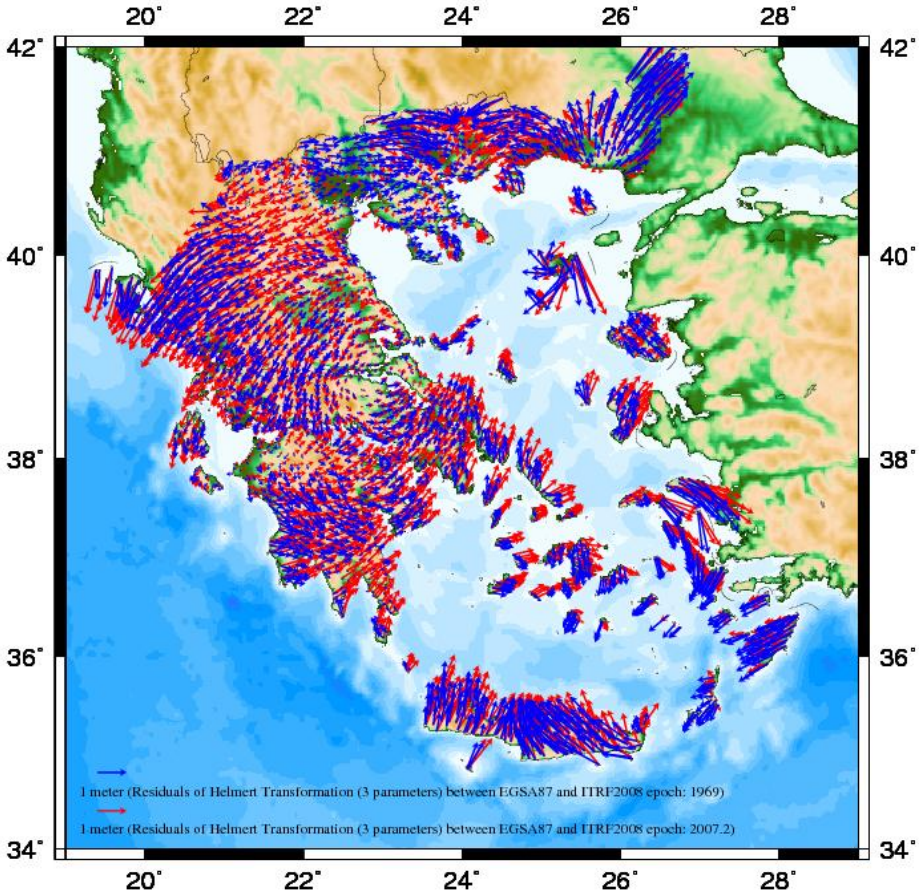


Σχήμα 4.6: Τα ιστογράμματα των σφαλμάτων του 6-παραμετρικού μετασχηματισμού ομοιότητας μεταξύ (μπλε ράβδοι) ΕΓΣΑ87 και ITRF2008 (εποχή 1969) και μεταξύ (κόκκινοι ράβδοι) ΕΓΣΑ87 και ITRF2008 (εποχή 2007.2).

Στο τρίτο και τελευταίο σενάριο υλοποιήθηκαν οι μετασχηματισμοί μεταξύ του ΕΓΣΑ87 και του ITRF2008 (εποχές 1969 και 2007.2) λαμβάνοντας υπόψη μόνο τις τρεις παραμέτρους μετάθεσης. Η σημαντικότερη διαφοροποίηση αυτού του σεναρίου σε σχέση με τα δύο προηγούμενα είναι η σχετική αύξηση του μεγέθους των σφαλμάτων μετασχηματισμού. Πρέπει να σημειωθεί ότι η μεγαλύτερη αύξηση παρατηρείται στο μετασχηματισμό μεταξύ του ΕΓΣΑ87 και του ITRF2008 (εποχή 2007.2) όπου η μέση τιμή των σφαλμάτων είναι 60 cm σε αντίθεση με τα 48 cm και 43 cm του 6 και 7-παραμετρικού μετασχηματισμού αντίστοιχα. Αντίθετα η μέση τιμή των σφαλμάτων του 3-παραμετρικού μετασχηματισμού μεταξύ ΕΓΣΑ87 και ITRF2008 (εποχή 1969) αυξήθηκε μόνο κατά 6 cm σε σύγκριση με τους αντίστοιχους μετασχηματισμούς των δύο παραπάνω σεναρίων. Αντίστοιχες, περίπου, αυξήσεις παρατηρήθηκαν και ως προς το RMS των σφαλμάτων μετασχηματισμού (βλ. Πίνακα 4.3).

Πίνακας 4.3: Τα στατιστικά στοιχεία των σφαλμάτων στο οριζόντιο επίπεδο του 3-παραμετρικού μετασχηματισμού ομοιότητας μεταξύ ΕΓΣΑ87 και ITRF2008.

Μετασχηματισμός / Σφάλματα (m)	min	max	mean	std	RMS
ΕΓΣΑ87 vs ITRF2008_1969	0.01	2.16	0.44	0.30	0.53
ΕΓΣΑ87 vs ITRF2008_2007.2	0.00	2.31	0.60	0.32	0.68

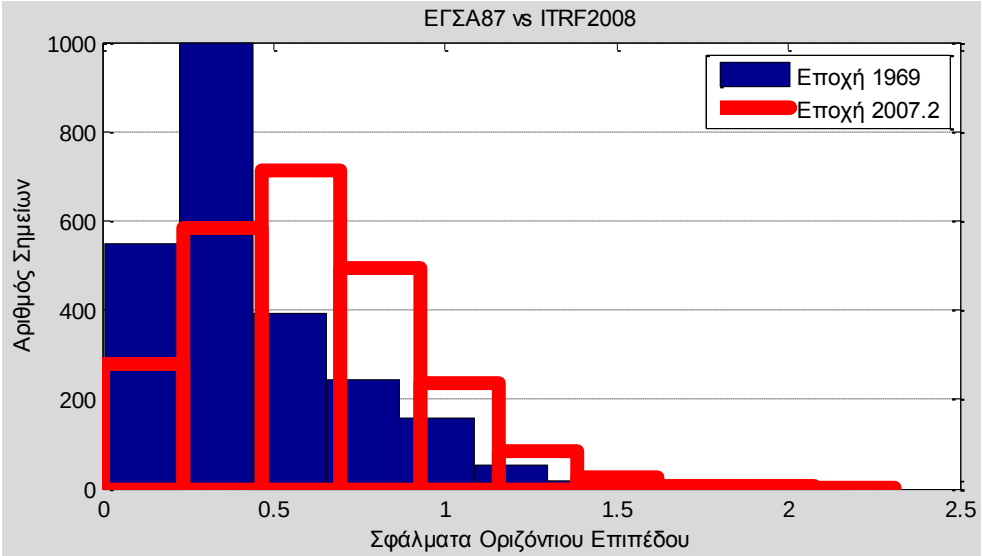


Σχήμα 4.7: Τα σφάλματα του 3-παραμετρικού μετασχηματισμού ομοιότητας μεταξύ ΕΓΣΑ87 και ITRF2008. Με μπλε διανύσματα απεικονίζονται τα σφάλματα μεταξύ ΕΓΣΑ87 και ITRF2008 (εποχή 1969) και με κόκκινα μεταξύ ΕΓΣΑ87 και ITRF2008 (εποχή 2007.2).

Παρόμοιες διαφοροποιήσεις των σφαλμάτων παρατηρήθηκαν και ως προς τη θέση των σημείων του δικτύου, αλλά και ως προς το μέγεθος τους. Στο Σχήμα 4.7 παρατηρείται αύξηση στα μεγέθη των σφαλμάτων και των δύο 3-παραμετρικών μετασχηματισμών σε σχέση με τα προηγούμενα σενάρια, διατηρώντας όμως την ίδια περίπου σε μέγεθος διαφορά μεταξύ του μετασχηματισμού ΕΓΣΑ87 και του ITRF2008 (σε εποχές 1969 και 2007.2) συγκρινόμενες με αυτές του δευτέρου σεναρίου. Δηλαδή, αν και αυξήθηκαν σε μέγεθος τα σφάλματα των δύο μετασχηματισμών, η μέση διαφορά μεταξύ των δύο παρέμεινε στα επίπεδα των 15 cm. Ακόμη σημαντική είναι και η διαφοροποίηση της κατανομής των σφαλμάτων ως προς το μέγεθος τους μεταξύ των δύο μετασχηματισμών, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.8. Η εφαρμογή των τεκτονικών μετακινήσεων επέφερε αύξηση 100% περίπου στον αριθμό των σημείων που εμφανίζουν σφάλματα από 0 έως 25 cm και 80% στον αριθμό των σημείων που εμφανίζουν σφάλματα από 25 έως 50 cm σε σχέση με την περίπτωση αγνόησης των μετακινήσεων του φλοιού. Συνέπεια αυτού είναι η έντονη μείωση του αριθμού των σημείων που εμφανίζουν σφάλματα πάνω από 50 cm όταν (πριν το μετασχηματισμό) λαμβάνονται υπόψη οι τεκτονικές μετακινήσεις.

Με την εφαρμογή του 3-παραμετρικού μετασχηματισμού παρατηρούμε πως η συμβολή των τεκτονικών μετακινήσεων του Ελληνικού γήινου φλοιού στη μείωση της εσωτερικής ακρίβειας του ΕΓΣΑ87 υπολογίζεται στο 22%, ή διαφορετικά σε 15 cm. Αν συγκρίνουμε τις τιμές αυτές με τις αντίστοιχες τιμές του δεύτερου σεναρίου θα εντοπίσουμε μία αύξηση

κατά 4 ποσοστιαίες μονάδες (ή 5 cm) στην συμβολή των μετακινήσεων ως προς τα γεωμετρικά συστηματικά σφάλματα του ΕΓΣΑ87 σε όλη την Ελλάδα.



Σχήμα 4.8: Τα ιστογράμματα των σφαλμάτων του 3-παραμετρικού μετασχηματισμού ομοιότητας μεταξύ (μπλε ράβδοι) ΕΓΣΑ87 και ITRF2008 (εποχή 1969) και μεταξύ (κόκκινοι ράβδοι) ΕΓΣΑ87 και ITRF2008 (εποχή 2007.2).

Ανακεφαλαιώνοντας τα όσα έχουν αναφερθεί σε αυτήν την ενότητα, είναι εμφανές ότι η παρουσία των τεκτονικών μετακινήσεων στο σύνολο του Ελληνικού γήινου φλοιού έχει μειώσει την εσωτερική ακρίβεια του ΕΓΣΑ87 κατά 18%-22% από την εποχή ίδρυσής του έως το 2007. Μεταφραζόμενο αυτό το ποσοστό σε απόλυτες τιμές και με εργαλείο το μετασχηματισμό ομοιότητας, οι τεκτονικές μετακινήσεις επέφεραν κατά 10-15 cm αύξηση στην τιμή της μέσης ακρίβειας του ΕΓΣΑ87 στο σύνολο της ελληνικής επικράτειας. Από την άλλη πλευρά η μέση τιμή των συστηματικών σφαλμάτων του ΕΓΣΑ87, έχοντας απομακρύνει τη συμβολή των τεκτονικών μετακινήσεων, κυμαίνεται από 45-53 cm.

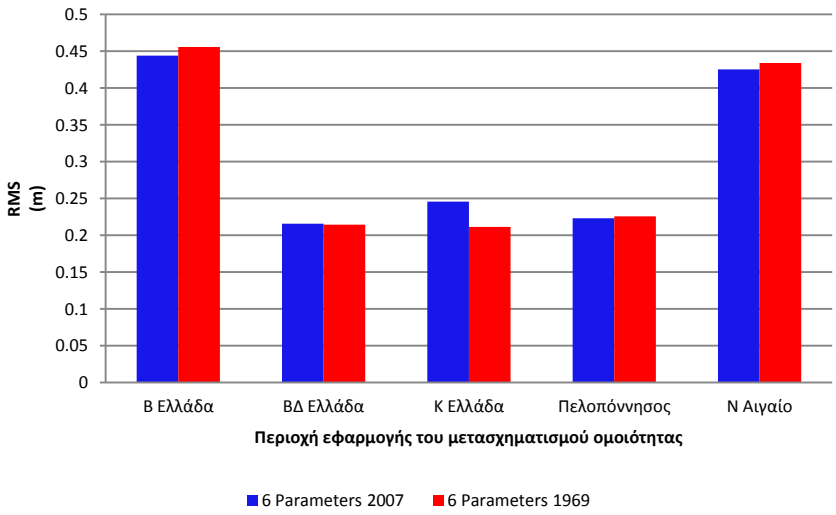
4.3 Αξιολόγηση της ακρίβειας του ΕΓΣΑ87 σε περιοχές ομοιογενούς μετακίνησης του Ελληνικού γήινου φλοιού

Στο προηγούμενο κεφάλαιο είδαμε ότι η συμμετοχή των τεκτονικών μετακινήσεων αυξάνει κατά μέσο όρο 18%-22% την τιμή της εσωτερικής ακρίβειας του ΕΓΣΑ87, ενώ ο μέσος όρος των συστηματικών σφαλμάτων του υπολογίστηκε περίπου στα 50 cm. Είναι όμως η ακρίβεια αυτή ενιαία για όλες τις περιοχές της Ελλάδας? Οι τεκτονικές μετακινήσεις προκαλούν μείωση της εσωτερικής ακρίβειας του ΕΓΣΑ87 σε τοπικό επίπεδο? Τι συμβαίνει στις περιοχές όπου παρατηρούνται ομοιογενείς τεκτονικές μετακινήσεις?

Για να δοθούν απαντήσεις στα παραπάνω ερωτήματα χωρίσαμε την Ελλάδα σε πέντε περιοχές ομοιογενούς μετακίνησης έχοντας ως γνώμονα το Σχήμα 3.3. Οι περιοχές αυτές είναι η Βόρεια Ελλάδα, η Βορειοδυτική Ελλάδα, η Κεντρική Ελλάδα, η Πελοπόννησος και το Νότιο Αιγαίο. Σε κάθε μία από τις περιοχές αυτές εφαρμόστηκε, ξεχωριστά, ο 3-παραμετρικός και 6-παραμετρικός μετασχηματισμός μεταξύ του ΕΓΣΑ87 και του ITRF2008

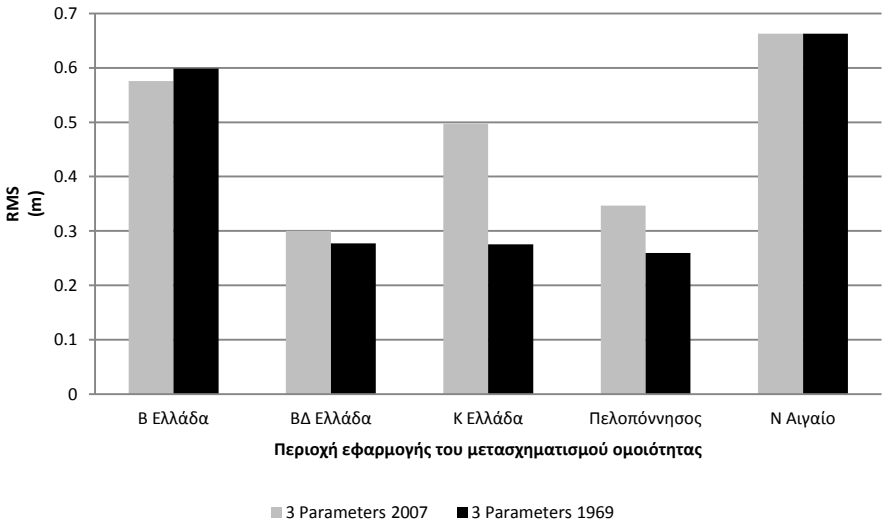
(εποχές 1969 και 2007.2). Στόχος της διαδικασίας αυτής ήταν να παρατηρήσουμε τη συμπεριφορά της ακρίβειας του ΕΓΣΑ87 σε τοπικό επίπεδο και να υπολογίσουμε τη συμβολή των τεκτονικών μετακινήσεων στα εσωτερικά σφάλματα του ΕΓΣΑ87 σε περιοχές που δεν παρουσιάζουν έντονες παραμορφώσεις του γήινου φλοιού.

Τα RMS του 3-παραμετρικού και 6-παραμετρικού μετασχηματισμού για κάθε μία από τις πέντε περιοχές απεικονίζονται στα Σχήματα 4.9 και 4.10. Συγκεκριμένα για τον 6-παραμετρικό μετασχηματισμό, το RMS των περιοχών της Βορειοδυτικής Ελλάδας, Κεντρικής Ελλάδας και Πελοποννήσου ήταν 21.5 cm, ενώ στο Νότιο Αιγαίο και τη Βόρεια Ελλάδα οι τιμές του RMS ήταν 45 cm και 43 cm αντίστοιχα. Οι τιμές αυτές δείχνουν ότι η ραχοκοκαλιά της Ελλάδας εκφράζεται από μία ενιαία εσωτερική ακρίβεια ως προς το ΕΓΣΑ87, ενώ τα άκρα της παρουσιάζουν δύο σχεδόν φορές χειρότερη ακρίβεια. Το κύριο στοιχείο, όμως, που βγαίνει από το Σχήμα 4.9 είναι ότι η συμβολή των τεκτονικών μετακινήσεων σε περιοχές που δεν εμφανίζουν παραμορφώσεις του γήινου φλοιού είναι σχεδόν μηδενική. Σε κάθε μία από τις πέντε περιοχές, η χρονική μετάθεση του δικτύου στην εποχή 1969 δεν μετέβαλε καθόλου την ακρίβεια του μετασχηματισμού μεταξύ των δυο ΣΑ σε σχέση με την περίπτωση όπου το δίκτυο παρέμεινε χρονικά αμετακίνητο ως προς το ITRF2008 (στην εποχή 2007.2).



Σχήμα 4.9: Το RMS του 6-παραμετρικού μετασχηματισμού ομοιότητας μεταξύ (κόκκινες ράβδοι) του ΕΓΣΑ87 και του ITRF2008 (εποχή 1969) και (μπλε ράβδοι) μεταξύ του ΕΓΣΑ87 και του ITRF2008 (εποχή 2007.2) σε κάθε μία από τις πέντε περιοχές ομοιογενούς μετακίνησης.

Ακριβώς στα ίδια συμπεράσματα καταλήγουμε και με τη βοήθεια του 3-παραμετρικού μετασχηματισμού. Δηλαδή, από την Φλώρινα μέχρι την Καλαμάτα και από τα νησιά του Ιονίου μέχρι την Εύβοια η εσωτερική ακρίβεια του ΕΓΣΑ87 είναι σχεδόν ενιαία, ενώ στη Βόρεια Ελλάδα και το Νότιο Αιγαίο η ακρίβεια μειώνεται κατά 100%. Ακόμη, η συμβολή των τεκτονικών μετακινήσεων είναι σχεδόν μηδενική στην εσωτερική ακρίβεια του ΕΓΣΑ87 για κάθε μία περιοχή ξεχωριστά. Εξαίρεση αποτελεί η περιοχή της Κεντρικής Ελλάδας, όπου παρατηρείται σημαντική διαφοροποίηση στις τιμές του RMS μεταξύ των δύο μετασχηματισμών.



Σχήμα 4.10: Το RMS του 3-παραμετρικού μετασχηματισμού ομοιότητας μεταξύ (μαύροι ράβδοι) του ΕΓΣΑ87 και του ITRF2008 (εποχή 1969) και (γκρι ράβδοι) μεταξύ του ΕΓΣΑ87 και του ITRF2008 (εποχή 2007.2) σε κάθε μία από τις πέντε περιοχές ομοιογενούς μετακίνησης.

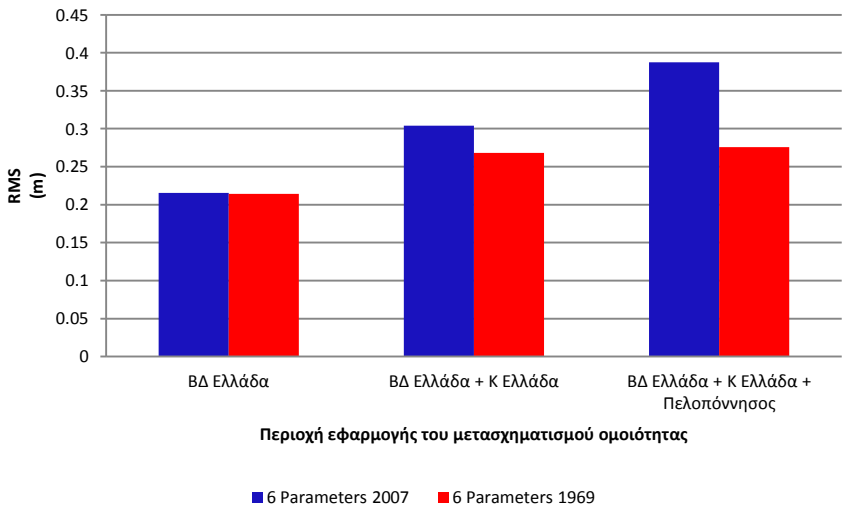
Οπότε εάν θέλαμε με δύο λόγια να δώσουμε απάντηση στα ερωτήματα που τέθηκαν στο παρόν κεφάλαιο, αυτά θα ήταν ότι οι τεκτονικές μετακινήσεις δεν επηρεάζουν την εσωτερική ακρίβεια του ΕΓΣΑ87 σε περιοχές που δεν παρουσιάζει παραμορφώσεις ο γήινος φλοιός και ότι η εσωτερική ακρίβεια του ΕΓΣΑ87 δεν είναι ενιαία για όλη την Ελλάδα.

4.4 Αξιολόγηση της ακρίβειας του ΕΓΣΑ87 σε περιοχές ανομοιογενούς μετακίνησης του Ελληνικού γήινου φλοιού

Στα δύο προηγούμενα κεφάλαια παρατηρήσαμε πως αν και οι τεκτονικές μετακινήσεις προκαλούν κατά 20% περίπου μείωση στην εσωτερική ακρίβεια του ΕΓΣΑ87 στο σύνολο της Ελληνικής επικράτειας, σε τοπικό επίπεδο και όταν η περιοχή δεν χαρακτηρίζεται από παραμορφώσεις του γήινου φλοιού τότε οι μετακινήσεις δεν επηρεάζουν την (τοπική) ακρίβεια του ΕΓΣΑ87. Τότε, ποιά είναι η αιτία που προκαλεί τη μείωση στην εσωτερική ακρίβεια του ΕΓΣΑ87 στο σύνολο του Ελληνικού γήινου φλοιού?

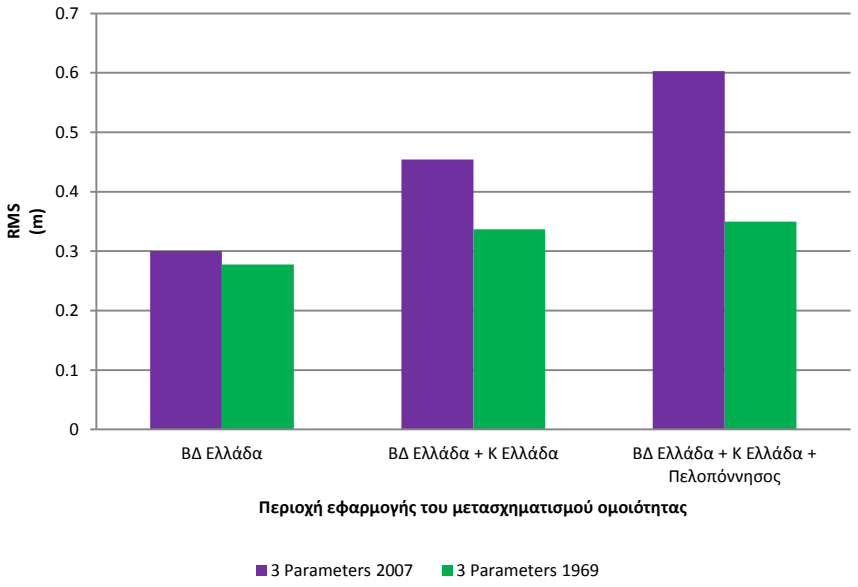
Για να δώσουμε απάντηση σε αυτό το ερώτημα εφαρμόσαμε τον 3-παραμετρικό και 6-παραμετρικό μετασχηματισμό (μεταξύ ΕΓΣΑ87 και ITRF2008 στις εποχές 1969 και 2007.2) σε τοπικό επίπεδο αλλά σε περιοχές που εμφανίζουν ανομοιογενείς μετακινήσεις είτε ως προς το μέγεθός τους είτε ως προς τον προσανατολισμό. Οι μετασχηματισμοί εφαρμόστηκαν σε τρεις περιοχές. Η πρώτη περιοχή είναι η Βορειοδυτική Ελλάδα (βλ. Σχήμα 3.3) η οποία χαρακτηρίζεται από ομοιογενείς μετακινήσεις του γήινου φλοιού. Για τη δημιουργία της δεύτερης περιοχής προσθέσαμε στα σημεία του δικτύου της ΓΥΣ, που βρίσκονται στη Βορειοδυτική Ελλάδα, σημεία από το ίδιο δίκτυο αλλά που έχουν εγκατασταθεί στην Κεντρική Ελλάδα (βλ. Σχήμα 3.3). Η τρίτη και τελευταία περιοχή αποτελείται από την Βορειοδυτική Ελλάδα, την Κεντρική Ελλάδα και την Πελοπόννησο. Οι δύο τελευταίες περιοχές εμφανίζουν έντονες ανομοιογενείς μετακινήσεις του γήινου φλοιού τόσο σε σχέση με το μέγεθός τους όσο και με τον προσανατολισμό τους (βλ. Σχήμα 3.1).

Τα αποτελέσματα του RMS των μετασχηματισμών για τις τρεις προαναφερθείσες περιοχές δίνονται στα Σχήματα 4.11 και 4.12 αντίστοιχα. Είναι εμφανές, μέσω και των δύο σχημάτων, πως όσο προσθέτουμε σημεία του δικτύου ΓΥΣ που χαρακτηρίζονται από ανομοιογενείς μετακινήσεις μεταξύ τους τόσο αυξάνεται το RMS του μετασχηματισμού μεταξύ του ΕΓΣΑ87 και του ITRF2008 (εποχή 2007.2). Από την άλλη πλευρά, όταν λαμβάνουμε υπόψη τις μετακινήσεις του φλοιού, μεταθέτοντας τις συντεταγμένες (ITRF2008) του δικτύου στην εποχή 1969, τότε το RMS του μετασχηματισμού μεταξύ των δύο ΣΑ διατηρείται σε μικρότερες τιμές. Ακόμη το RMS του μετασχηματισμού, όταν λαμβάνουμε υπόψη τις μετακινήσεις των σημείων, δείχνει να σταθεροποιείται ανεξάρτητα της περιοχής και του μοντέλου (3 μεταθέσεις ή 3 στροφές + 3 μεταθέσεις) μετασχηματισμού που εφαρμόζεται. Μία μικρή διαφοροποίηση, κατά 6 cm, που εμφανίζεται στις τιμές του RMS κυρίως μεταξύ των δύο τελευταίων περιοχών και της Βορειοδυτικής Ελλάδας μπορεί να οφείλεται στην ακρίβεια του μοντέλου ταχυτήτων HGVM2013, καθώς στο προηγούμενο κεφάλαιο είδαμε πως οι περιοχές αυτές χαρακτηρίζονται από ενιαία εσωτερική ακρίβεια ως προς το ΕΓΣΑ87.



Σχήμα 4.11: Το RMS του 6-παραμετρικού μετασχηματισμού ομοιότητας μεταξύ (κόκκινοι ράβδοι) του ΕΓΣΑ87 και του ITRF2008 (εποχή 1969) και (μπλε ράβδοι) μεταξύ του ΕΓΣΑ87 και του ITRF2008 (εποχή 2007.2) σε κάθε μία από τις τρεις περιοχές.

Η μόνη διαφορά που παρατηρείται μεταξύ του 3-παραμετρικού και 6-παραμετρικού μετασχηματισμού στις τρεις περιοχές είναι οι απόλυτες τιμές του RMS. Συγκεκριμένα ο 6-παραμετρικός μετασχηματισμός εμφανίζει κατά 33% μικρότερες τιμές του RMS σε σχέση με το μοντέλο μετασχηματισμού απλής μετάθεσης. Το ποσοστό αυτό ισχύει ανεξάρτητα αν λαμβάνουμε υπόψη ή όχι τις μετακινήσεις των σημείων. Από την άλλη πλευρά, οι σχετικές ακρίβειες μεταξύ των τριών περιοχών και για τα δύο μοντέλα μετασχηματισμού είναι σχεδόν παρόμοιες. Δηλαδή, η εσωτερική ακρίβεια του ΕΓΣΑ87 μειώνεται λόγω των μετακινήσεων των σημείων κατά 43%-50% όταν προθέτουμε στη Βορειοδυτική Ελλάδα τα σημεία της Κεντρικής Ελλάδας. Όταν προστίθενται και τα σημεία της Πελοποννήσου τότε η εσωτερική ακρίβεια του ΕΓΣΑ87 μειώνεται κατά 81% στον 6-παραμετρικό μετασχηματισμό και 100% στον 3-παραμετρικό μετασχηματισμό σε σχέση με την ακρίβεια που εμφανίζει από μόνη της η Βορειοδυτική Ελλάδα.



Σχήμα 4.12: Το RMS του 3-παραμετρικού μετασχηματισμού ομοιότητας μεταξύ (πράσινοι ράβδοι) του ΕΓΣΑ87 και του ITRF2008 (εποχή 1969) και (μωβ ράβδοι) μεταξύ του ΕΓΣΑ87 και του ITRF2008 (εποχή 2007.2) σε κάθε μία από τις τρεις περιοχές.

Μέσω του προαναφερθέντος πειράματος είναι εμφανές ότι μείωση στην εσωτερική ακρίβεια του ΕΓΣΑ87 δεν επιφέρουν από μόνες τους οι μετακινήσεις του γήινου φλοιού αλλά ο κυριότερος παράγοντας είναι η ανομοιογένεια που εμφανίζουν μεταξύ τους. Συνέπεια της ανομοιογένειας αποτελεί η παραμόρφωση του δικτύου με αποτέλεσμα οι σχετικές φυσικές θέσεις των σημείων να εμφανίζονται με μειωμένη ακρίβεια ως προς το ΕΓΣΑ87.

4.5 Η διαφοροποίηση της ακρίβειας του ΕΓΣΑ87 μεταξύ της Δυτικής και της Ανατολικής Ελλάδας

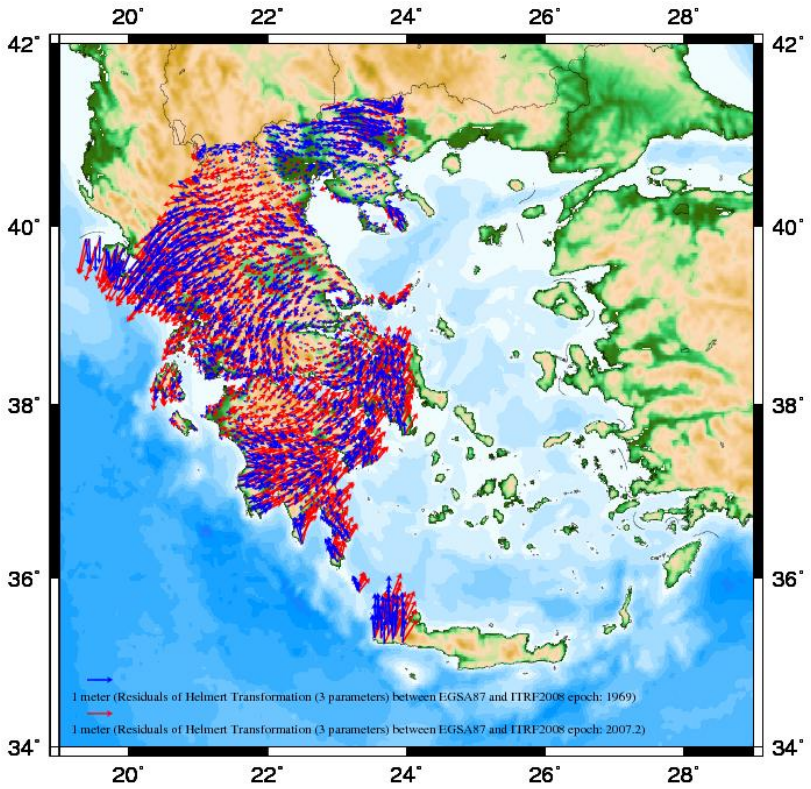
Μέσα από τα παραπάνω πειράματα και χωρίζοντας την Ελλάδα σε μικρότερες περιοχές, προέκυψε μία σημαντική διαφοροποίηση ως προς τη σχέση της εσωτερικής ακρίβειας του ΕΓΣΑ87 και των τεκτονικών μετακινήσεων μεταξύ της Ανατολικής και Δυτικής Ελλάδας. Με τον όρο Ανατολική και Δυτική Ελλάδα εννοούνται τα σημεία του δικτύου της ΓΥΣ που βρίσκονται ανατολικά και δυτικά του μεσημβρινού των 24°.

Για το παρόν πείραμα εφαρμόστηκε πρώτα ο 3-παραμετρικός μετασχηματισμός μεταξύ του ΕΓΣΑ87 και του ITRF2008 (εποχές 1969 και 2007.2) για όλα τα σημεία του δικτύου της ΓΥΣ που βρίσκονται δυτικά του μεσημβρινού των 24°. Τα στατιστικά αποτελέσματα του μετασχηματισμού δίνονται στον πίνακα 4.4, όπου παρατηρείται μία μείωση κατά 39% της τιμής του RMS όταν λαμβάνουμε υπόψη τις μετακινήσεις των σημείων. Η μείωση αυτή παρουσιάζεται και στο μέσο όρο των οριζόντιων σφαλμάτων, όπως φαίνονται στο Σχήμα 4.13. Το αξιοσημείωτο στην περίπτωση αυτή είναι η σύγκριση των αποτελεσμάτων με τα αντίστοιχα για όλη την Ελλάδα. Ενώ σε όλη την Ελλάδα ο 3-παραμετρικός μετασχηματισμός έδειχνε ότι οι τεκτονικές μετακινήσεις μείωσαν κατά 22% την εσωτερική ακρίβεια του ΕΓΣΑ87, στη Δυτική Ελλάδα, η οποία διαθέτει τα 1600 από τα 2431 σημεία του δικτύου, το

ποσοστό της μείωσης της εσωτερικής ακρίβειας του ΕΓΣΑ87 λόγω των μετακινήσεων των σημείων σχεδόν διπλασιάστηκε.

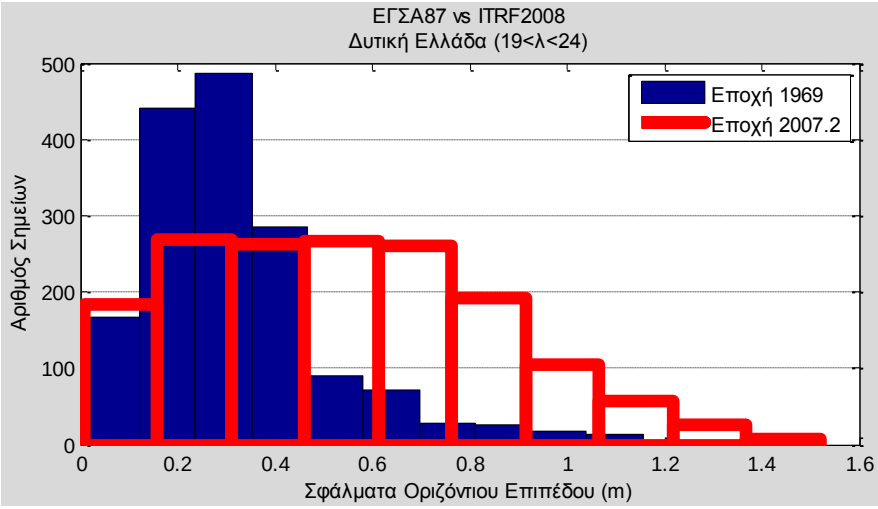
Πίνακας 4.4: Τα στατιστικά στοιχεία των σφαλμάτων στο οριζόντιο επίπεδο του 3-παραμετρικού μετασχηματισμού ομοιότητας μεταξύ ΕΓΣΑ87 και ITRF2008 για τη Δυτική Ελλάδα.

Μετασχηματισμός / Σφάλματα (m)	min	max	mean	std	RMS
ΕΓΣΑ87 vs ITRF2008_1969	0.01	1.16	0.32	0.19	0.38
ΕΓΣΑ87 vs ITRF2008_2007.2	0.01	1.52	0.54	0.31	0.62



Σχήμα 4.13: Τα σφάλματα του 3-παραμετρικού μετασχηματισμού ομοιότητας μεταξύ ΕΓΣΑ87 και ITRF2008 στη Δυτική Ελλάδα. Με μπλε διανύσματα απεικονίζονται τα σφάλματα μεταξύ ΕΓΣΑ87 και ITRF2008 (εποχή 1969) και με κόκκινα μεταξύ ΕΓΣΑ87 και ITRF2008 (εποχή 2007.2).

Ακόμη και τα ιστογράμματα των σφαλμάτων, του Σχήματος 4.14, των δύο μετασχηματισμών στη Δυτική Ελλάδα αποκαλύπτουν την έντονη συνεισφορά των μετακινήσεων του γήινου φλοιού στην εσωτερική ακρίβεια του ΕΓΣΑ87. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.14 τα σφάλματα των περισσότερων σημείων είναι σχεδόν όμοια κατανεμημένα από το 0 μέχρι το 1 m όταν δεν λαμβάνονται οι μετακινήσεις των σημείων. Αντίθετα η μετάθεση του δικτύου στην εποχή 1969 υποχρεώνει το 88% των σημείων να παρουσιάζουν σφάλματα από 0 έως 40 cm.



Σχήμα 4.14: Τα ιστογράμματα των σφαλμάτων του 3-παραμετρικού μετασχηματισμού ομοιότητας μεταξύ (μπλε ράβδοι) ΕΓΣΑ87 και ITRF2008 (εποχή 1969) και μεταξύ (κόκκινοι ράβδοι) ΕΓΣΑ87 και ITRF2008 (εποχή 2007.2) για τη Δυτική Ελλάδα.

Αντίστοιχα αποτελέσματα προέκυψαν και με την εφαρμογή του 6-παραμετρικού μετασχηματισμού ομοιότητας μεταξύ του ΕΓΣΑ87 και του ITRF2008 (εποχές 1969 και 2007.2) στα σημεία της Δυτικής Ελλάδας. Όπως φαίνεται στον Πίνακα 4.5, οι τεκτονικές μετακινήσεις προκάλεσαν μεταβολή κατά 29% στο RMS του μετασχηματισμού, ποσοστό μεγαλύτερο κατά 11 μονάδες σε σχέση με αυτό που ισχύει για όλη την Ελλάδα.

Πίνακας 4.5: Τα στατιστικά στοιχεία των σφαλμάτων στο οριζόντιο επίπεδο του 6-παραμετρικού μετασχηματισμού ομοιότητας μεταξύ ΕΓΣΑ87 και ITRF2008 για τη Δυτική Ελλάδα.

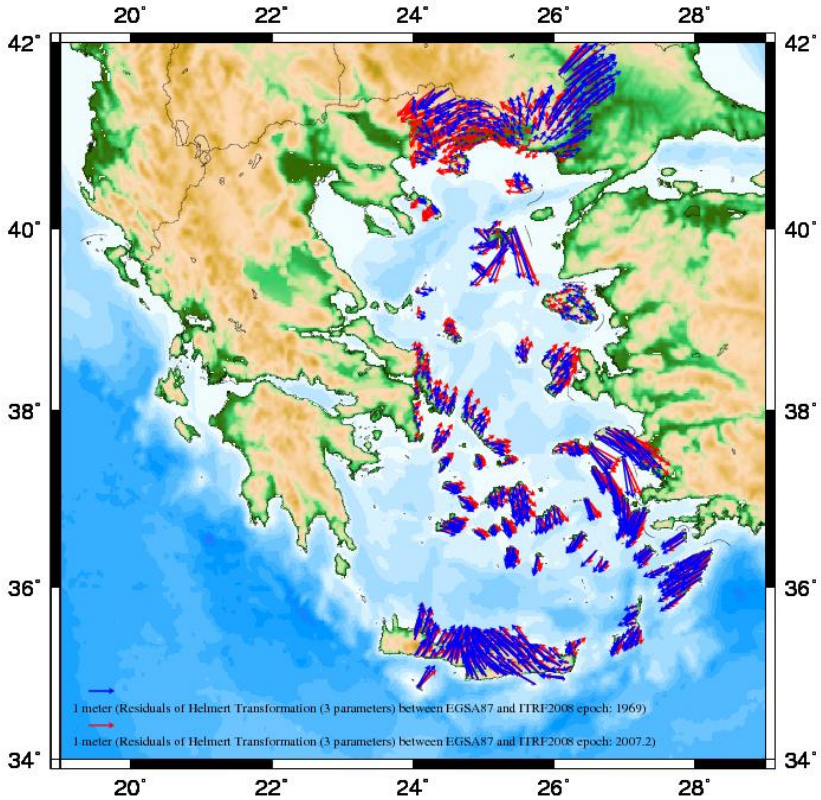
Μετασχηματισμός / Σφάλματα (m)	min	max	mean	std	RMS
ΕΓΣΑ87 vs ITRF2008_1969	0.01	1.01	0.25	0.14	0.29
ΕΓΣΑ87 vs ITRF2008_2007.2	0.01	1.03	0.37	0.18	0.41

Στη συνέχεια εφαρμόστηκε ο 3-παραμετρικός μετασχηματισμός μεταξύ του ΕΓΣΑ87 και του ITRF2008 (εποχές 1969 και 2007.2) για τα 831 σημεία της Ανατολικής Ελλάδας. Η κατάσταση των αποτελεσμάτων είναι τελείως διαφορετική σε σχέση με αυτή της Δυτικής Ελλάδας. Σύμφωνα με τον Πίνακα 4.6, οι τεκτονικές μετακινήσεις δεν παίζουν πλέον κανένα ρόλο στην εκτίμηση του RMS του μετασχηματισμού ομοιότητας, ενώ και οι τιμές των μέσων οριζόντιων σφαλμάτων σχεδόν ταυτίζονται. Ακόμη, οι μέγιστες τιμές των σφαλμάτων που παρουσιάζει η Ανατολική Ελλάδα έχουν σχεδόν διπλασιαστεί από αυτές της Δυτικής.

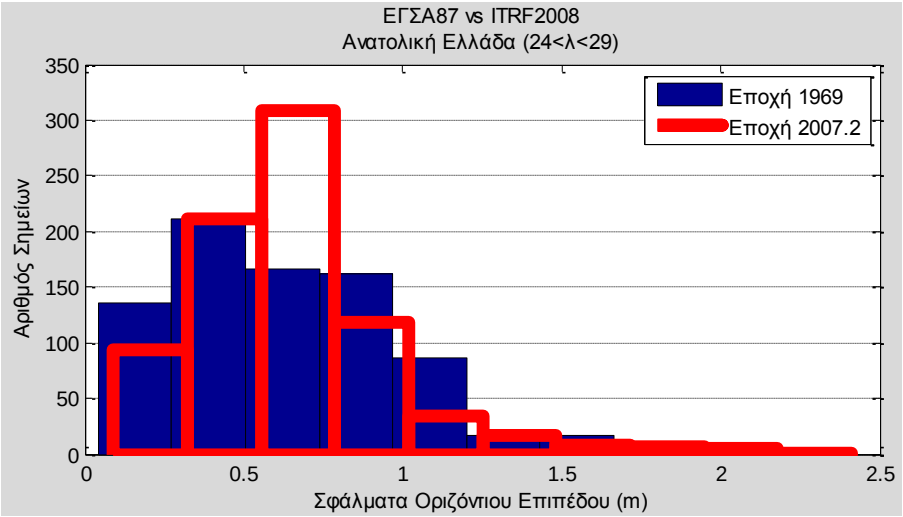
Πίνακας 4.6: Τα στατιστικά στοιχεία των σφαλμάτων στο οριζόντιο επίπεδο του 3-παραμετρικού μετασχηματισμού ομοιότητας μεταξύ ΕΓΣΑ87 και ITRF2008 για την Ανατολική Ελλάδα.

Μετασχηματισμός / Σφάλματα (m)	min	max	mean	std	RMS
ΕΓΣΑ87 vs ITRF2008_1969	0.04	2.36	0.63	0.36	0.73
ΕΓΣΑ87 vs ITRF2008_2007.2	0.09	2.41	0.65	0.32	0.73

Η οπτική αναπαράσταση των σφαλμάτων σε σχέση με τη θέση (Σχήμα 4.15) ή το μέγεθός τους (Σχήμα 4.16) επαληθεύει την ταύτιση των αποτελεσμάτων των δύο μετασχηματισμών στην Ανατολική Ελλάδα. Μία μόνο μικρή διαφοροποίηση στα αποτελέσματα των σφαλμάτων εμφανίζεται στη Νότια Εύβοια και στα Βόρεια νησιά των Κυκλάδων όπου η μετάθεση του δικτύου στην εποχή 1969 μειώνει ελαφρώς το μέγεθος των σφαλμάτων.



Σχήμα 4.15: Τα σφάλματα του 3-παραμετρικού μετασχηματισμού ομοιότητας μεταξύ ΕΓΣΑ87 και ITRF2008 στην Ανατολική Ελλάδα. Με μπλε διανύσματα απεικονίζονται τα σφάλματα μεταξύ ΕΓΣΑ87 και ITRF2008 (εποχή 1969) και με κόκκινα μεταξύ ΕΓΣΑ87 και ITRF2008 (εποχή 2007.2).



Σχήμα 4.16: Τα ιστογράμματα των σφαλμάτων του 3-παραμετρικού μετασχηματισμού ομοιότητας μεταξύ (μπλε ράβδοι) ΕΓΣΑ87 και ITRF2008 (εποχή 1969) και μεταξύ (κόκκινοι ράβδοι) ΕΓΣΑ87 και ITRF2008 (εποχή 2007.2) για την Ανατολική Ελλάδα.

Για την πληρότητα των αποτελεσμάτων του παρόντος πειράματος εφαρμόστηκε και ο 6-παραμετρικός μετασχηματισμός μεταξύ του ΕΓΣΑ87 και του ITRF2008 (εποχές 1969 και 2007.2) στα σημεία της Ανατολικής Ελλάδας. Όπως ήταν αναμενόμενο η εισαγωγή των τριών στροφών στο μοντέλο του μετασχηματισμού απλά βελτίωσε τις απόλυτες τιμές του

RMS του μετασχηματισμού (βλ. Πίνακα 4.7), διατηρώντας όμως το συμπέρασμα της ανεξαρτησίας των σφαλμάτων μετασχηματισμού από τις τεκτονικές μετακινήσεις του γήινου φλοιού.

Πίνακας 4.7: Τα στατιστικά στοιχεία των σφαλμάτων στο οριζόντιο επίπεδο του 6-παραμετρικού μετασχηματισμού ομοιότητας μεταξύ ΕΓΣΑ87 και ITRF2008 για την Ανατολική Ελλάδα.

Μετασχηματισμός / Σφάλματα (m)	min	max	mean	std	RMS
ΕΓΣΑ87 vs ITRF2008_1969	0.22	2.27	0.46	0.27	0.54
ΕΓΣΑ87 vs ITRF2008_2007.2	0.20	2.36	0.48	0.30	0.57

Σύμφωνα με τα παραπάνω είναι εμφανές ότι η εσωτερική ακρίβεια του ΕΓΣΑ87 δεν είναι ενιαία μεταξύ της Δυτικής και Ανατολικής Ελλάδας. Ακόμη οι τεκτονικές μετακινήσεις συμβάλουν κατά 30%-40% στη μείωση της εσωτερικής ακρίβειας του ΕΓΣΑ87 στη Δυτική Ελλάδα. Αντίθετα η ακρίβεια του ΕΓΣΑ87 στην Ανατολική Ελλάδα δεν εξαρτάται καθόλου από τις μετακινήσεις των σημείων παρά μόνο από τα συστηματικά γεωμετρικά σφάλματα του ίδιου του δικτύου της ΓΥΣ.

5. Συμπεράσματα

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας ήταν η αξιολόγηση της εσωτερικής ακρίβειας του ΕΓΣΑ87 και η εξάρτηση της ακρίβειας αυτής από τις τεκτονικές μετακινήσεις του Ελληνικού γήινου φλοιού. Μέσω της ανάλυσης που εφαρμόστηκε αναδείχτηκαν τα εξής συμπεράσματα:

- Η εσωτερική ακρίβεια του ΕΓΣΑ87 δεν εξαρτάται από το μέγεθος και τον προσανατολισμό των μετακινήσεων των σημείων που αποτελούν το δίκτυο της ΓΥΣ, αλλά από το βαθμό ανομοιογένειας που χαρακτηρίζει τις σχετικές κινήσεις μεταξύ των σημείων.

- Οι έντονες ανομοιογενείς μετακινήσεις του ελληνικού γήινου φλοιού προκάλεσαν μείωση κατά περίπου 20% της μέσης εσωτερικής ακρίβειας του ΕΓΣΑ87, σε εθνική κλίμακα, από την εποχή ίδρυσής του έως το 2007.2.

- Απομακρύνοντας τις τεκτονικές μετακινήσεις των σημείων του δικτύου της ΓΥΣ τότε η μέση ακρίβεια του ΕΓΣΑ87 για όλη την Ελλάδα εκτιμάται στα 50 cm περίπου.

- Σε τοπικό επίπεδο και σε περιοχές ομοιογενών μετακινήσεων η εσωτερική ακρίβεια του ΕΓΣΑ87 δεν παραμένει ενιαία. Οι περιοχές που παρουσιάζουν την καλύτερη εσωτερική ακρίβεια με μία μέση τιμή ανάμεσα στα 25 με 30 cm είναι η Βορειοδυτική Ελλάδα, η Κεντρική Ελλάδα και η Πελοπόννησος. Αντίθετα στη Βόρεια Ελλάδα και στο νησιωτικό κομμάτι της χώρας το ΕΓΣΑ87 παρουσίασε σχεδόν δύο φορές χειρότερη εσωτερική ακρίβεια με μία μέση τιμή μεταξύ 45 και 60 cm.

- Η εσωτερική ακρίβεια του ΕΓΣΑ87 στα σημεία που βρίσκονται ανατολικά του μεσημβρινού των 24° οφείλεται αποκλειστικά σε συστηματικά γεωμετρικά σφάλματα και είναι ανεξάρτητη των σχετικών μετακινήσεων μεταξύ των σημείων. Αντίθετα, η εσωτερική ακρίβεια του ΕΓΣΑ87, δυτικά του μεσημβρινού των 24°, επηρεάζεται κατά 30% έως 40% από τις ανομοιογενείς μετακινήσεις των σημείων του δικτύου. Ακόμη, η μέση τιμή των

συστηματικών γεωμετρικών σφαλμάτων του ΕΓΣΑ87 στη Δυτική Ελλάδα (~35 cm), έχοντας απομακρύνει την επίδραση των τεκτονικών μετακινήσεων, εμφανίζεται σχεδόν δύο φορές μικρότερη σε σχέση με αυτή της Ανατολικής (~65 cm).

Κλείνοντας αξίζει να σημειωθεί πως τα συμπεράσματα της παρούσας εργασίας βασίστηκαν στην υπόθεση ότι τόσο η επίλυση του δικτύου της ΓΥΣ στο ITRF2000 (εποχή 2007.2) όσο και το μοντέλο μετακινήσεων HGVM2013 ήταν απαλλαγμένα από σφάλματα. Για την ακριβέστερη αξιολόγηση της εσωτερικής ακρίβειας του ΕΓΣΑ87 θα βοηθούσε μία μελλοντική μελέτη της ακρίβειας επίλυσης του δικτύου στο ITRF2000 το έτος 2007, όπως επίσης και μία αξιολόγηση της πραγματικής ακρίβειας του HGVM2013.

Ευχαριστίες. *Για τον υπολογισμό των ταχυτήτων μετακίνησης και τη δημιουργία του μοντέλου HGVM2013 χρησιμοποιήθηκαν δορυφορικά δεδομένα από μόνιμους σταθμούς που ανήκουν στα δίκτυα "METRICANET" της εταιρείας METRICA A.E, "HEPOS" της εταιρείας ΕΘΝΙΚΟ ΚΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ ΚΑΙ ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΗ A.E και "NOANET του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών."*

6. Βιβλιογραφία

Altamimi, Z., Collilieux, X., Métivier, L., 2011. ITRF2008: an improved solution of the international terrestrial reference frame. Journal of Geodesy 85, 457–473.

Βέης, Γ., 1995. Τα συστήματα αναφοράς και η εφαρμογή του ΕΓΣΑ87. Τεχνικά χρονικά, 2η έκτακτη έκδοση, έτος 64ο.

Chatzinikos M, Fotiou A, Pikridas C, Rossikopoulos D (2013) The realization of a semi-dynamic datum in Greece including a new velocity model. Proceedings of the IAG Scientific Assembly, September 1-6, Potsdam, Germany

Dermanis, A., Livieratos, E., Rossikopoulos, D., Vlachos D., 1981. Geodetic prediction of crustal deformations at the seismic area of Volvi. In: Deutsche Geod. Komm., Reihe B, Heft Nr. 258/V, 234-248.

Dermanis, A., 1985. Geodetic applications of interpolation and prediction. Eratosthenes, 22, 229-262.

Φωτίου, Α., 2007. Γεωμετρική Γεωδαισία - Θεωρία και Πράξη. Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη.

Floyd, M.A., Billiris, H., Paradissis, D., Veis, G., Avallone, A., Briole, P., McClusky, S., Nocquet, J.-M., Palamartchouk, K., Parsons, B., England, P.C., 2010a. A new velocity field for Greece: Implications for the kinematics and dynamics of the Aegean. J. Geophys. Res. 115, B10403.

Gianniou, M., 2009. National report of Greece to EUREF 2009. Presented at the EUREF Annual Symposium, May 27-30 2009, Florence, Italy.

Gianniou, M., 2010. Realization of ETRS89 in Greece by the HEPOS network. 53th EUREF TWG Meeting, Gävle, June 1, Sweden.

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

Howe, T.M., Bird, P., 2010. Exploratory models of long-term crustal flow and resulting seismicity across the Alpine-Aegean orogen. Tectonics 29, TC4023."

Κατσάμπαλος, Κ., Τζιαβός, Η., 1991. Φυσική Γεωδαισία, Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη.

Κωτσάκης, Χ., 2007. Σύνδεση του ΕΓΣΑ87 με τα σύγχρονα γεωκεντρικά συστήματα αναφορά τύπου-ITRF/ETRF. Ημερίδα HEPOS, 6 Δεκεμβρίου, Αθήνα.

Katsampalos, K., Kotsakis, C., Gianniou, M., 2009. Hellenic Terrestrial Reference System 2007 (HTRS07): a regional densification of ETRS89 over Greece in support of HEPOS. EUREF 2009 Symposium, May 27-30, Florence, Italy.

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., Peter, Y., Prilepin, M., Reilinger, R., Sanli, I., Seeger, H., Tealeb, A., Toksöz, M.N., Veis, G., 2000. Global Positioning System constraints on plate kinematics and dynamics in the eastern Mediterranean and Caucasus. J. Geophys. Res. 105, 5695–5719

McKenzie, D., 1978. Active tectonics of the Alpine—Himalayan belt: the Aegean Sea and surrounding regions. Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society 55, 217–254

Müller, M.D., Geiger, A., Kahle, H.G., Veis, G., Billiris, H., Paradisis, D., Felekis, S., 2013. Velocity and deformation fields in the North Aegean domain, Greece, and implications for fault kinematics, derived from GPS data 1993-2009. Tectonophysics 597-598, 34-49.

Ρωσσικόπουλος, Δ., 1986. Ολοκληρωμένα Τοπογραφικά Δίκτυα Ελέγχου. Διδακτορική Διατριβή, ΤΑΤΜ-ΑΠΘ.

Reilinger, R., McClusky, S., Vernant, P., Lawrence, S., Ergintav, S., Cakmak, R., Ozener, H., Kadirov, F., Guliev, I., Stepanyan, R., Nadariya, M., Hahubia, G., Mahmoud, S., Sakr, K., ArRajehi, A., Paradissis, D., Al-Aydrus, A., Prilepin, M., Guseva, T., Evren, E., Dmitrotsa, A., Filikov, S.V., Gomez, F., Al-Ghazzi, R., Karam, G., 2006. GPS constraints on continental deformation in the Africa-Arabia-Eurasia continental collision zone and implications for the dynamics of plate interactions. J. Geophys. Res. 111, B05411.

Papazachos, B.C., Kiratzi, A.A., Hatzidimitriou, P.M., Rocca, A.C., 1984. Seismic faults in the Aegean area. Tectonophysics 106, 71–85.

Pichon, X.L., Chamot-Rooke, N., Lallemant, S., Noomen, R., Veis, G., 1995. Geodetic determination of the kinematics of central Greece with respect to Europe: Implications for eastern Mediterranean tectonics. J. Geophys. Res. 100(B7), 12675–12690.

Τάκος, Ι., 1989. Νέα συνόρθωση των τριγωνομετρικών δικτύων της Ελλάδας. *Bulletin of the Hellenic Military Geographic Service (HMGS)*, 136: 19-93.

Taymaz, T., Jackson, J., McKenzie, D., 1991. Active tectonics of the north and central Aegean Sea. Geophysical Journal International 106, 433–490.

Χατζηνίκος, Μ., 2013. Μελέτη των μετακινήσεων του γήινου φλοιού στον ελλαδικό χώρο με ανάλυση δορυφορικών δεδομένων GNSS. Διδακτορική διατριβή, ΤΑΤΜ-ΑΠΘ.