



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ  
ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΕΝΤΡΟ ΔΟΡΥΦΟΡΩΝ ΔΙΟΝΥΣΟΥ**

**NATIONAL TECHNICAL  
UNIVERSITY of ATHENS  
SCHOOL OF RURAL  
AND SURVEYING ENGINEERING  
DIONYSOS SATELLITE OBSERVATORY**

**ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΠΕΔΙΟΥ ΤΕΚΤΟΝΙΚΩΝ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ ΓΙΑ ΤΟΝ ΕΛΛΗ-  
ΝΙΚΟ ΧΩΡΟ ΣΤΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗΣ ΕΝΟΣ ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΟΥ Η' ΗΜΙ-  
ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΝΑΦΟΡΑΣ**

**ΙΩΑΝΝΗΣ Ε. ΚΑΤΣΑΦΑΔΟΣ**



**ΑΘΗΝΑ, ΜΑΡΤΙΟΣ 2021**



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ  
ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΕΝΤΡΟ ΔΟΡΥΦΟΡΩΝ ΔΙΟΝΥΣΟΥ**

**NATIONAL TECHNICAL  
UNIVERSITY of ATHENS  
SCHOOL OF RURAL  
AND SURVEYING ENGINEERING  
DIONYSOS SATELLITE OBSERVATORY**

**ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΠΕΔΙΟΥ ΤΕΚΤΟΝΙΚΩΝ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ ΓΙΑ ΤΟΝ ΕΛΛΗ-  
ΝΙΚΟ ΧΩΡΟ ΣΤΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗΣ ΕΝΟΣ ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΟΥ Η' ΗΜΙ-  
ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΝΑΦΟΡΑΣ**

**ΙΩΑΝΝΗΣ Ε. ΚΑΤΣΑΦΑΔΟΣ**

Διπλωματική εργασία που υποβλήθηκε στη Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Τριμελής Επιτροπή

Βασίλειος Γκίκας, Καθηγητής ΣΑΤΜ, κύριος επιβλέπων

Γεώργιος Πανταζής, Καθηγητής ΣΑΤΜ

Ελισάβετ Τελειώνη, Λέκτορας ΣΑΤΜ



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ  
ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΕΝΤΡΟ ΔΟΡΥΦΟΡΩΝ ΔΙΟΝΥΣΟΥ

NATIONAL TECHNICAL  
UNIVERSITY of ATHENS  
SCHOOL OF RURAL  
AND SURVEYING ENGINEERING  
DIONYSOS SATELLITE OBSERVATORY

Ἵτι οὐκ ἔκτος φιλοσοφίας ἡ γεωγραφικὴ πραγματεία. Ἵτι καὶ Ἵμηρος αὐτῇ πανταχοῦ τῶν ἐπῶν φαίνεται χρώμενος. Ἵτι οἱ πρότερον αὐτῇ χρησάμενοι, ἔλλιπῶς, ἢ ἀναρθρώτως, ἢ ἐσφαλμένως, ἢ ψευδῶς, ἢ ἐαυτοῖς ἀσυμφώνως εἰρήκασιν. Ἵλεγχοι καὶ ἀποδείξεις τοῦ εἰκότως αὐτὸν οὔτω κρίνειν κεφαλαιώδεις, πάσης οἰκουμένης συντόμως ὑποτυποῦντες τὴν διάθεσιν. Πίστις εἰκότων, καὶ τεκμηρίων βεβαίωσις τοῦ κατὰ πολλὰ μέρη τὴν γῆν καὶ τὴν θάλασσαν εἰς ἀλλήλας μετατεθῆναι.

*Στράβωνος Γεωγραφικόν, 65 π.Χ. – 26 μ.Χ.*

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

All rights reserved.

Απαγορεύεται ἡ αντιγραφή, αποθήκευση καὶ διανομὴ τῆς παρούσας εργασίας, ἐξ ολοκλήρου ἢ τμήματος αὐτῆς, γιὰ ἐμπορικὸ σκοπὸ. Ἐπιτρέπεται ἡ ἀνατύπωση, ἀποθήκευση καὶ διανομὴ γιὰ σκοπὸ μὴ κερδοσκοπικὸ, ἐκπαιδευτικῆς ἢ ἐρευνητικῆς φύσης, ὑπὸ τὴν προϋπόθεση ἀναφοράς τῆς πηγῆς προέλευσης καὶ διατήρησης τοῦ παρόντος μηνύματος.

---

© Copyright 2021: Ἰωάννης Ε. Κατσαφάδος

© Copyright 2021: Ioannis E. Katsafados

Προσδιορισμὸς πεδίου τεκτονικῶν ταχυτήτων γιὰ τὸν ἐλληνικὸ χῶρο στο πλαίσιο υλοποίησης ἐνὸς κινηματικῆς ἢ ἡμι-κινηματικῆς συστήματος ἀναφοράς

Determination of tectonic velocity field for Greece in the context of implementing a kinematic or semi-kinematic reference system

Ἐθνικὸ Μετσόβιο Πολυτεχνεῖο  
Σχολὴ Ἀγρονόμων καὶ Τοπογράφων Μηχανικῶν  
Κέντρο Δορυφόρων Διονύσου

National Technical University of Athens  
School of Rural and Surveying Engineering  
Dionysos Satellite Observatory



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ  
ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΕΝΤΡΟ ΔΟΡΥΦΟΡΩΝ ΔΙΟΝΥΣΟΥ**

**NATIONAL TECHNICAL  
UNIVERSITY of ATHENS  
SCHOOL OF RURAL  
AND SURVEYING ENGINEERING  
DIONYSOS SATELLITE OBSERVATORY**

## **Determination of tectonic velocity field for Greece in the context of implementing a kinematic or semi-kinematic reference system**

**IOANNIS E. KATSAFADOS**

### **Diploma Thesis**

submitted to the School of Rural and Surveying Engineering, National Technical University of Athens.

### Advisory Committee

Vasilios Gikas, Professor NTUA, Supervisor

Georgios Pantazis, Professor NTUA

Elisavet Telioni, Lecturer NTUA



## Ευχαριστίες

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία σηματοδοτεί την ολοκλήρωση των προπτυχιακών μου σπουδών στη Σχολή Αγρονόμων – Τοπογράφων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου για τις οποίες νιώθω ιδιαίτερη τιμή και υπερηφάνεια καθώς είχα την ευκαιρία να γίνω μέλος ενός τόσο ιστορικού ιδρύματος και ταυτόχρονα να εξελιχθώ ως μηχανικός και ως άνθρωπος. Κατά τη διάρκεια των σπουδών μου αλλά και συγκεκριμένα για τη συγγραφή της παρούσας εργασίας πολλοί ήταν οι άνθρωποι που με την αρωγή τους συνέβαλλαν άμεσα ή έμμεσα για την επιτυχή ολοκλήρωσή της και τους οποίους θα ήθελα να ευχαριστήσω.

Κατ' αρχάς θέλω να ευχαριστήσω τον καθηγητή κ. Παραδείση Δημήτρη για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε με την ανάθεση της παρούσας εργασίας και τις βασικές κατευθύνσεις και οδηγίες με τις οποίες αυτή δομήθηκε. Ακόμα, θέλω να του ευχηθώ να έχει μια εξίσου δημιουργική συνέχεια στο καινούργιο κεφάλαιο της ζωής του, ανάλογη της λαμπρής πορείας που διέγραψε στο επιστημονικό γίγνεσθαι της χώρας.

Επίσης, θέλω να ευχαριστήσω τον καθηγητή κ. Γκίκα Βασίλειο που από την πρώτη στιγμή ανέλαβε με ενθουσιασμό την συνέχιση και ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας, η οποία εύχομαι να αποτελέσει το έναυσμα για μια εποικοδομητική και μακρόχρονη συνεργασία πάνω στα επιστημονικά θέματα ενδιαφέροντός μας.

Ακόμα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Ζαχαρή Ευάγγελο μέλος του Κέντρου Δορυφόρων Διονύσου ο οποίος κάτω από πρωτόγνωρες λόγω πανδημίας συνθήκες, συνέβαλλε τα μέγιστα σε τεχνικό, θεωρητικό και προσωπικό επίπεδο ώστε να διεξάγεται ομαλά και τελικά να ολοκληρωθεί η παρούσα εργασία.

Ευχαριστώ θερμά τους αρμόδιους φορείς για την παροχή των δεδομένων GPS που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα μελέτη. Συγκεκριμένα, αξίζει να αναφερθεί η σημαντική πρωτοβουλία του Γεωδυναμικού Ινστιτούτου του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών για την ελεύθερη διάθεση μεγάλου όγκου παρατηρήσεων GNSS μέσω του ηλεκτρονικού αποθετηρίου στη διεύθυνση: <http://www.gein.noa.gr/services/GPSData/>. Ακόμα, ευχαριστώ την εταιρία METRICA S.A. και προσωπικά τον κ. Γρηγορακάκη Παναγιώτη ο οποίος μου παρείχε τα δεδομένα για τους σταθμούς του δικτύου HxGN SmartNet υπό αντίξοες συνθήκες, επιβαρύνοντας το πρόγραμμα εργασίας του.

Νιώθω την ανάγκη να ευχαριστήσω τον Τχη (Γ) Παπαδόπουλο Νέστορα, ο οποίος συνέβαλλε στην σύλληψη του θέματος της παρούσας εργασίας και ο οποίος μέσα από την πολυετή συνεργασία μας μ' έχει καθοδηγήσει και εμπνεύσει ώστε να ασχοληθώ με την επιστήμη της Γεωδαισίας αλλά και να εξελιχθώ ως αξιωματικός και άνθρωπος.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω τον καλό φίλο και συνάδελφο Μπίθαρη Στυλιανό, Υποψήφιο Διδάκτορα του Τμήματος Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης για τις πολύτιμες συμβουλές και οδηγίες του σε σημαντικά ζητήματα που αφορούσαν την παρούσα εργασία αλλά και γενικότερα θεμάτων που άπτονται της Δορυφορικής Γεωδαισίας και να του ευχηθώ κάθε επιτυχία σε προσωπικό και επαγγελματικό επίπεδο.

Ωστόσο, τη μεγαλύτερη ευγνωμοσύνη θα ήθελα να την εκφράσω προς τη σύζυγο και τις δύο κόρες μου, για την συμπαράσταση, την υποστήριξη και την αγάπη με την οποία με περιβάλλουν όλα αυτά τα χρόνια κατά τη διάρκεια της επαγγελματικής και εκπαιδευτικής μου πορείας.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η τεκτονική συμπεριφορά και οι έντονες γεωδυναμικές διεργασίες που συντελούνται στον ελληνικό χώρο επιτάσσουν τη συνεχή και διαχρονική παρακολούθηση των φαινομένων που τα δημιουργούν και των συνεπειών που αυτά προκαλούν. Ειδικότερα, στο πλαίσιο της επιστήμης της Γεωδαισίας ο προσδιορισμός, με ακρίβεια, της θέσης σημείων πάνω στη φυσική γήινη επιφάνεια η οποία συνεχώς παραμορφώνεται, αποτελεί πραγματική πρόκληση. Βασικό εργαλείο προς αυτήν την κατεύθυνση αποτελεί ο προσδιορισμός ενός πεδίου γεωδαιτικών ταχυτήτων που περιγράφει με μεγάλη ακρίβεια τις μετακινήσεις του φλοιού και το οποίο συνεχώς παρακολουθείται και ανανεώνεται.

Οι σύγχρονες παρατηρήσεις μέσω των συστημάτων GNSS προσφέρουν ένα ασύγκριτο πλεονέκτημα ως προς τη πυκνότητα και την ακρίβεια τους, παρέχοντας τη δυνατότητα για συνεχή απ' ευθείας παρακολούθηση των μετακινήσεων του γήινου φλοιού με σχετικά χαμηλό κόστος. Έτσι, στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας προσδιορίζεται ένα μοντέλο γεωδαιτικών ταχυτήτων για το σύνολο της ελληνικής επικράτειας συγκεντρώνοντας δεδομένα από μόνιμους σταθμούς GNSS που λειτουργούν στην Ελλάδα αλλά και από σταθμούς του διεθνούς δικτύου της IGS, για το χρονικό διάστημα 2015-2019. Η επεξεργασία των πρωτογενών παρατηρήσεων σε επίπεδο κώδικα και φάσης, η τελική συνόρθωση του δικτύου και η ένταξη στο πλέον πρόσφατο πλαίσιο αναφοράς ITRF2014, πραγματοποιήθηκε εξ' ολοκλήρου με το ερευνητικό/επιστημονικό λογισμικό GAMIT/GLOBK έκδοσης 10.71.

Τα τελικά αποτελέσματα επιβεβαιώνουν τη ανομοιογένεια των ταχυτήτων που παρουσιάζονται στον ελλαδικό χώρο κατά μέτρο και διεύθυνση ενώ συγκρίνονται ως προς την ακρίβεια τους τόσο με τις επίσημα δημοσιευμένες ταχύτητες ευρωπαϊκών φορέων όσο και με παγκόσμια μοντέλα τεκτονικών μετακινήσεων. Μ' αυτόν τον τρόπο καταδεικνύεται η ανάγκη υιοθέτησης ενός πεδίου ταχυτήτων για τον ελλαδικό χώρο στο πλαίσιο υλοποίησης ενός σύγχρονου κινηματικού ή ημι-κινηματικού συστήματος αναφοράς, το οποίο θα ενσωματώνει τις παρατηρούμενες μετακινήσεις σ' αυτό και ταυτόχρονα θα καθιστά εφικτή τη σύνδεση του με διεθνή συστήματα αναφοράς ή με παρατηρήσεις σε διαφορετικές εποχές.

## **ABSTRACT**

Tectonics and the intense geodynamic processes that take place in the Greek territory require the continuous and timeless monitoring of the phenomena that create them and the aftermath that they cause. In particular, in the context of the science of geodesy, determining the exact position of points on the earth surface that is constantly deforming, is a real challenge. A key tool in this direction is the determination of a field of geodetic velocities that describes with great precision the movements of the crust which is constantly monitored and updated.

Modern observations through GNSS systems offer an incomparable advantage in terms of density and accuracy, enabling continuous direct monitoring of terrestrial crustal movements at relatively low cost. Thus, in the context of the present work, a model of geodetic velocities for the entire Greek territory is identified, collecting data from permanent GNSS stations operating in Greece and from stations of the IGS international network additionally, for the period 2015-2019. The processing of primary observations at the level of code and phase, the final collocation of the network and the integration in the most recent ITRF2014 reference framework, was carried out entirely with the research/scientific software GAMIT/GLOBK version 10.71.

The final results confirm the heterogeneity of the velocities presented in Greece in terms of measure and direction, while they are compared in terms of their accuracy both with the officially published velocities of European agencies and with global model of tectonic movements. In this way, the need to adopt a velocity field for the Greek territory is demonstrated in the context of implementing a modern kinematic or semi-kinematic reference system, which will integrate the observed movements in it and at the same time will make possible its connection with international reference frames or with observations to different epochs.

# Περιεχόμενα

ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Συστήματα και Πλαίσια Αναφοράς .....	4
1.1. Βασικές έννοιες .....	4
1.2. Το Διεθνές Επίγειο Σύστημα Αναφοράς – ITRS.....	5
1.3. Το δίκτυο της IERS .....	6
1.4. Οι υλοποιήσεις του ITRS.....	9
1.5. Το ITRF2014.....	10
1.5.1. Δεδομένα εισόδου για την παραγωγή του ITRF2014.....	10
1.5.2. Ανάλυση δεδομένων και εξαγωγή παραμέτρων του πλαισίου .....	11
1.6. Το Ευρωπαϊκό Επίγειο Σύστημα Αναφοράς – ETRS.....	13
1.7. Το Δίκτυο Μόνιμων Σταθμών της EUREF (EPN).....	15
1.8. Οι υλοποιήσεις του ETRS89 .....	17
1.9. Εθνικά Πλαίσια Αναφοράς (στατικά, ημι-κινηματικά, κινηματικά).....	18
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Προδιαγραφές Ίδρυσης Μόνιμου Σταθμού GNSS .....	22
2.1. Εισαγωγή .....	22
2.2. Προδιαγραφές τοποθεσίας και κατασκευής της εγκατάστασης .....	23
2.2.1. Εισαγωγή .....	23
2.2.2. Προδιαγραφές βάσει οδηγιών της IGS .....	30
2.2.3. Προδιαγραφές βάσει των οδηγιών της EUREF .....	34
2.3. Προδιαγραφές εγκατάστασης και τύπων κεραιών GNSS.....	36
2.3.1. Εισαγωγή .....	36
2.3.2. Προδιαγραφές βάσει οδηγιών της IGS .....	38
2.3.3. Προδιαγραφές βάσει των οδηγιών της EUREF .....	41
2.4. Προδιαγραφές δεκτών GNSS για εγκατάσταση σε Μόνιμο Σταθμό .....	43
2.4.1. Εισαγωγή .....	43
2.4.2. Προδιαγραφές βάσει των οδηγιών της IGS.....	46
2.4.3. Προδιαγραφές βάσει των οδηγιών της EUREF .....	48
2.5. Προδιαγραφές αποθήκευσης και μεταφοράς των αρχείων καταγραφής ενός Μόνιμου Σταθμού GNSS.....	50
2.5.1. Εισαγωγή .....	50
2.5.2. Το format RINEX.....	51
2.5.3. Προδιαγραφές βάσει των οδηγιών της IGS .....	55
2.5.4. Προδιαγραφές βάσει των οδηγιών της EUREF .....	59

2.6. Προδιαγραφές λειτουργίας, αναβάθμισης, επικοινωνίας και παροχής πληροφοριών ενός Μόνιμου Σταθμού GNSS .....	62
2.6.1. Εισαγωγή .....	62
2.6.2. Προδιαγραφές βάσει των οδηγιών της IGS .....	62
2.6.3. Προδιαγραφές βάσει των οδηγιών της EUREF .....	67
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Επεξεργασία Παρατηρήσεων GPS .....	69
3.1 Εισαγωγή .....	69
3.2 Επεξεργασία παρατηρήσεων φάσης και ψευδοαπόστασης.....	71
3.2.1. Σχεδιασμός εξισώσεων παρατήρησης ψευδοαπόστασης και φάσης.....	71
3.2.2. Τεχνική των διαφορών (απλές-διπλές-τριπλές διαφορές) .....	74
3.2.3. Γραμμικοί συνδυασμοί παρατηρήσεων διαφορετικών φορέων .....	76
3.2.4. Στρατηγική επίλυσης βάσεων και ασαφειών φάσης.....	78
3.2.5. Παράμετροι και μοντέλα εισαγωγής στο λογισμικό GAMIT .....	79
3.3 Μετασχηματισμός Ομοιότητας 3-Δ.....	82
3.4 Διαδοχικές συνορθώσεις δικτύου – Προσέγγιση Kalman.....	85
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Ανάλυση αποτελεσμάτων επεξεργασίας παρατηρήσεων GPS σε Δίκτυο Μελέτης στον ελληνικό χώρο .....	87
4.1. Εισαγωγή .....	87
4.2. Περιγραφή του Δικτύου Μελέτης .....	87
4.2.1. Το δίκτυο CoreNet.....	88
4.2.2. Το δίκτυο HelNet .....	91
4.2.3. Τα υποδίκτυα μελέτης .....	94
4.3. Δημιουργία και ανάλυση των χρονοσειρών θέσης για κάθε σταθμό .....	102
4.4. Ένταξη του Δικτύου στο Πλαίσιο Αναφοράς ITRF2014.....	113
4.5. Εκτίμηση γεωδαιτικών ταχυτήτων των σταθμών με χρήση του φίλτρου Kalman .....	117
4.5.1. Στατιστική αξιολόγηση αποτελεσμάτων.....	121
4.5.2. Αξιολόγηση βάσει εξωτερικής πληροφορίας .....	122
4.6. Παραγωγή του μοντέλου ταχυτήτων για τον ελληνικό χώρο .....	124
4.6.1. Αξιολόγηση του μοντέλου ταχυτήτων .....	126
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ .....	130
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	132

## Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1 - Δεδομένα εισόδου ITRF2014.....	10
Πίνακας 2 - Παράμετροι μετασχηματισμού από το ITRF2014 στο ITRF2008 στην εποχή 2010.0 .....	13
Πίνακας 3 - Παράμετροι μετασχηματισμού από το ITRF <sub>yy</sub> στο ETRF <sub>yy</sub> την εποχή 1989.0 και οι ρυθμοί μεταβολή τους ανά έτος. ....	18
Πίνακας 4 - Οδηγίες για το σχεδιασμό και την εγκατάσταση ενός σταθμού GNSS.....	27
Πίνακας 5 - Τύποι και χαρακτηριστικά εγκαταστάσεων .....	28
Πίνακας 6 - Προδιαγραφές τοποθεσίας της εγκατάστασης σύμφωνα με την IGS.....	30
Πίνακας 7 - Προδιαγραφές τοποθεσίας της εγκατάστασης σύμφωνα με την EUREF.....	34
Πίνακας 8 - Ζώνες συχνοτήτων .....	37
Πίνακας 9 – Προδιαγραφές εγκατάστασης και τύπων κεραιών σύμφωνα με την IGS .....	39
Πίνακας 10 - Προδιαγραφές εγκατάστασης και τύπων κεραιών σύμφωνα με την EUREF .....	42
Πίνακας 11 - Προδιαγραφές δεκτών GNSS σύμφωνα με την IGS.....	46
Πίνακας 12 - Προδιαγραφές δεκτών GNSS σύμφωνα με την EUREF .....	49
Πίνακας 13 - Δείκτες δορυφορικών συστημάτων .....	54
Πίνακας 14 - Είδη παρατηρήσεων και μονάδες μέτρησης .....	54
Πίνακας 15 - Προδιαγραφές χειρισμού των δεδομένων GNSS σύμφωνα με την IGS .....	56
Πίνακας 16 - Προδιαγραφές χειρισμού των δεδομένων σύμφωνα με την EUREF .....	59
Πίνακας 17 – Προδιαγραφές λειτουργίας μόνιμου σταθμού GNSS σύμφωνα με την IGS .....	62
Πίνακας 18 - Προδιαγραφές λειτουργίας μόνιμου σταθμού GNSS σύμφωνα με την EUREF.....	67
Πίνακας 19 - Σταθμοί του δικτύου CoreNet.....	89
Πίνακας 20 - Σύνθεση σταθμών δικτύου HelNet.....	91
Πίνακας 21 - Στατιστικά στοιχεία ταχυτήτων .....	120
Πίνακας 22 - Αποτελέσματα σύγκρισης EUREF – HelNet .....	123

## Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1 - Το δίκτυο σταθμών για το ITRF2014.....	8
Σχήμα 2 - Κλασσική θεώρηση ITRF <sub>yy</sub> .....	12
Σχήμα 3 - Το δίκτυο EPN (Ιούνιος 2019) .....	16
Σχήμα 4 - 7-παραμετρικός μετασχηματισμός ομοιότητας .....	83
Σχήμα 5 - Χρονοσειρά ποσοστών επιλυμένων ασαφειών φάσης (North subnet).....	96
Σχήμα 6 - Χρονοσειρά αριθμού σταθμών κατά τις πρωτογενείς επιλύσεις (North subnet).....	96
Σχήμα 7 - Χρονοσειρά ποσοστών επιλυμένων ασαφειών φάσης (South subnet) .....	98
Σχήμα 8 - Χρονοσειρά αριθμού σταθμών κατά τις πρωτογενείς επιλύσεις (South subnet) .....	98
Σχήμα 9 - Χρονοσειρά ποσοστών επιλυμένων ασαφειών φάσης (West subnet) .....	100
Σχήμα 10 - Χρονοσειρά αριθμού σταθμών κατά τις πρωτογενείς επιλύσεις (West subnet) .....	100
Σχήμα 11 - Χρονοσειρά ποσοστών επιλυμένων ασαφειών φάσης (East subnet) .....	102
Σχήμα 12 - Χρονοσειρά αριθμού σταθμών κατά τις πρωτογενείς επιλύσεις (East subnet) .....	102
Σχήμα 13 - Χρονοσειρές θέσης σταθμών δικτύου CoreNet.....	104
Σχήμα 14 - Χρονοσειρές θέσης σταθμών δικτύου HelNet .....	113
Σχήμα 15 - Χρονοσειρά αριθμού σταθμών που υλοποιούν το ITRF2014.....	114
Σχήμα 16 - Παράμετρος μετάθεσης Tx .....	114
Σχήμα 17 - Παράμετρος μετάθεσης Ty .....	115

Σχήμα 18 – Παράμετρος μετάθεσης Tz .....	115
Σχήμα 19 - Παράμετρος στροφής Rx.....	115
Σχήμα 20 - Παράμετρος στροφής Ry.....	116
Σχήμα 21 - Παράμετρος στροφής Rz.....	116
Σχήμα 22 - Μέσο τετραγωνικό σφάλμα Post-Rms μετασχηματισμού .....	116
Σχήμα 23 - Τυπική απόκλιση ταχυτήτων κατά North, East, Up ανά ποσοστό σταθμών του δικτύου HelNet.....	121
Σχήμα 24 - Διάγραμμα συσχέτισης παρατηρήσεων και τυπικής απόκλισης ταχυτήτων .....	122
Σχήμα 25 - Σύγκριση μοντέλων και διανυσμάτων ταχυτήτων.....	129

## **Κατάλογος Εικόνων**

Εικόνα 1 – Earthrise.....	2
Εικόνα 2 - Διάφοροι τύποι διαστημικών γεωδαιτικών τεχνικών της IERS.....	7
Εικόνα 3 - Η τοποθεσία συνταύτισης στον Διόνυσο Αττικής.....	9
Εικόνα 4 - Σήμα πολυανάκλασης προερχόμενο από κάθετο αντικείμενο .....	37
Εικόνα 5 - Σήμα πολυανάκλασης προερχόμενο από το έδαφος.....	37
Εικόνα 6 - Διαγραμματική απεικόνιση δέκτη GNSS.....	44
Εικόνα 7 – Αρχείο παρατηρήσεων RINEX 2.11.....	53
Εικόνα 8 - Το μοντέλο γεωειδούς EGM08 για την Ελλάδα.....	81

## **Κατάλογος Χαρτών**

Χάρτης 1 - Δίκτυο Μόνιμων Σταθμών CoreNet.....	90
Χάρτης 2 - Χωρική αποτύπωση σύνθεσης σταθμών δικτύου HelNet.....	92
Χάρτης 3 - Χάρτης διαθεσιμότητας δεδομένων των σταθμών .....	93
Χάρτης 4 - Υποδίκτυο North subnet.....	95
Χάρτης 5 - Υποδίκτυο South subnet .....	97
Χάρτης 6 - Υποδίκτυο West subnet .....	99
Χάρτης 7 - Υποδίκτυο East subnet .....	101
Χάρτης 8 - Οριζοντιογραφικές ταχύτητες σταθμών δικτύου CoreNet ως προς το ITRF2014 ...	117
Χάρτης 9 - Οριζοντιογραφικές ταχύτητες σταθμών δικτύου HelNet ως προς το ITRF2014.....	118
Χάρτης 10 - Ταχύτητες κατακόρυφης συνιστώσας των σταθμών του δικτύου HelNet ως προς το ITRF2014.....	119
Χάρτης 11 - Χάρτης μοντέλου οριζοντιογραφικών ταχυτήτων για τον ελληνικό χώρο .....	125
Χάρτης 12 - Ταχύτητες.....	126
Χάρτης 13 - Ταχύτητες μοντέλου παρούσας εργασίας και GSRM v.2.1.....	127

## Ακρωνύμια

BIH	-	Bureau International de l'Heure
DORRIS	-	Doppler Orbitography & Radiopositioning Integrated by Satellite
EOPs	-	Earth Orientation Parameters
GAMIT	-	GPS Analysis at MIT
GGOS	-	Global Geodetic Observing System
GLOBK	-	Global Kalman filter
GLOSS	-	Global Sea Level Observing System
GNSS	-	Global Navigation Satellite System
IAG	-	International Association of Geodesy
IAU	-	International Astronomical Union
IERS	-	International Earth Rotation & Reference Systems Service
IGS	-	International GNSS Service
ITRS	-	International Terrestrial Reference System
IUGG	-	International Union of Geodesy and Geophysics
LLR	-	Lunar Laser Ranging
RINEX	-	Receiver Independent Exchange Format
SINEX	-	Solution (technique) INdependent EXchange Format
SLR	-	Satellite Laser Ranging
TCG	-	Temps-coordonnée géocentrique
UELN	-	Unified European Levelling Network



## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

---

«Ένα μικρό βήμα για έναν άνθρωπο, ένα γιγάντιο άλμα για την ανθρωπότητα». Με αυτά τα λόγια, ο Αμερικανός αστροναύτης Neil Armstrong, στις 20 Ιουλίου 1969, σηματοδοτεί μια καινούργια εποχή για ολόκληρη την ανθρωπότητα, η οποία κάνοντας το πρώτο της βήμα για την εξερεύνηση της διαστημικής «γειτονιάς» της τελικά συνειδητοποίησε την αξία του δικού της πλανήτη, του δικού της «σπιτιού», της Γης. Γιατί ήταν μόνο τότε, όταν ο άνθρωπος πάτησε το πόδι του στη Σελήνη και κοίταξε πίσω προς τη Γη, διακρίνοντας μια Γη διαφορετική από τις παραδοσιακές χαρτογραφικές υδρογείους, χωρίς το πλαίσιο μεσημβρινών και παραλλήλων να διαμελίζουν τη στεριά και τη θάλασσα, όπως χαρακτηριστικά αποτυπώνεται στη διάσημη φωτογραφία του αστροναύτη Bill Anders, Earthrise (*Εικόνα 1*), που συνειδητοποίησε την αξία της εξερεύνησης και παρατήρησης του δικού του πλανήτη, της κατανόησης των φαινομένων που τον διαμορφώνουν και τέλος της προστασίας του από τις δικές του καταστροφικές ενέργειες.

Η παρατήρηση λοιπόν της Γης, είναι θεμελιώδης για την αντιμετώπιση επιστημονικών προκλήσεων που σχετίζονται με την ποσοτικοποίηση των αλλαγών που επηρεάζουν το γήινο σύστημα. Στο πλαίσιο αυτών των προκλήσεων θα μπορούσαν να τεθούν ερωτήματα όπως «Πώς παραμορφώνεται η Γη από τις τεκτονικές πλάκες, από προσεισμικές και μετασεισμικές παραμορφώσεις, τη παγκόσμια γεωφυσική δυναμική των ρευστών ή την τρέχουσα τήξη των πάγων;», «Πώς μπορούν να προσδιορισθούν με ακρίβεια θέσεις πάνω στην γήινη επιφάνεια η οποία συνεχώς παραμορφώνεται;», «Ποιος είναι ο ρυθμός αύξησης της στάθμης της θάλασσας και ποια η σχέση της με την κλιματική αλλαγή;». Ο τομέας της γεωδαισίας που εξετάζει τη Γη ως σύνολο, (Global geodesy), είναι μια από τις σημαντικότερες γεωεπιστήμες καθώς δεν εξετάζει μόνο τις αλλαγές του γήινου συστήματος στο χώρο και στο χρόνο αλλά επίσης είναι η μόνη επιστήμη που παρέχει το απαραίτητο πρότυπο σε σχέση με το οποίο αυτές οι αλλαγές και η μεταβλητότητα τους ποσοτικοποιούνται και αναφέρονται στο σωστό πλαίσιο (Altamimi, Rebischung, Métivier, & Collillieux, 2016). Έτσι, για να απαντηθούν τα παραπάνω επιστημονικά ερωτήματα είτε σε παγκόσμιο επίπεδο είτε σε τοπικό, στο πλαίσιο των γεωγραφικών ορίων μιας χώρας, βασική προϋπόθεση αποτελεί η εξασφάλιση ενός συνεχώς βελτιωμένου σε ακρίβεια και μακροπρόθεσμα σταθερού πλαισίου αναφοράς.

Το επίσημο κρατικό σύστημα αναφοράς της Ελλάδας είναι το Ελληνικό Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς του 1987 (ΕΓΣΑ87) όπως αυτό υιοθετήθηκε από την Γεωδαιτική και Γεωφυσική Επιτροπή του Κράτος (ΓΓΕΚ) και χρησιμοποιείται από το 1989. Η υλοποίηση του παραπάνω συστήματος πραγματοποιείται κυρίως από το τριγωνομετρικό δίκτυο της Ελλάδας που ιδρύθηκε από τη Γεωγραφική Υπηρεσία Στρατού (ΓΥΣ) και αποτελείται από περίπου 27000 τριγωνομετρικά σημεία σε ολόκληρο τον Ελλαδικό χώρο. Το ΕΓΣΑ87 είναι ένα στατικό σύστημα, το οποίο σημαίνει ότι οι συντεταγμένες των κορυφών του δικτύου έχουν παραμείνει σταθερές για περισσότερο από 30 χρόνια χωρίς να λαμβάνονται υπόψιν οι γεωδυναμικές διεργασίες που συντελούνται στον ελληνικό χώρο. Ωστόσο, είναι γνωστό ότι η Ελλάδα χαρακτηρίζεται από έντονη σεισμική και τεκτονική δραστηριότητα, η οποία έχει αποτελέσει αντικείμενο μελετών τόσο της ελληνικής όσο και της διεθνούς επιστημονικής κοινότητας και σύμφωνα με τις οποίες παρουσιάζονται έντονες μετατοπίσεις αρκετών χιλιοστών ή και εκατοστών το χρόνο, ανάλογα την περιοχή. Ως εκ τούτου τα σφάλματα στα μετρούμενα μεγέθη που εξαρτώνται από το ισχύον στατικό σύστημα αναφοράς κινούνται αυξανόμενα με την πάροδο του χρόνου.

Από τα παραπάνω γίνεται φανερό ότι το ΕΓΣΑ87 αδυνατεί πλέον να υποστηρίξει τις σύγχρονες γεωδαιτικές ανάγκες της χώρας, με την υιοθέτηση ενός νέου, κινηματικού ή ημι-κινηματικού συστήματος αναφοράς να κρίνεται πλέον επιβεβλημένη. Απαραίτητο στοιχείο της υλοποίησης ενός τέτοιου συστήματος αναφοράς αποτελεί η υιοθέτηση ενός πεδίου τεκτονικών ταχυτήτων στο οποίο θα αποτυπώνονται οι γεωδυναμικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στην περιοχή ενδιαφέροντος, με τη μέγιστη δυνατή ακρίβεια. Σκοπός λοιπόν της παρούσας μελέτης, αποτελεί η εκτίμηση των γεωδαιτικών ταχυτήτων μετακίνησης στον ελλαδικό χώρο μέσω παρατηρήσεων μόνιμων σταθμών GPS και ο υπολογισμός ενός αξιόπιστου πεδίου ταχυτήτων, το οποίο θα συμβάλει προς την κατεύθυνση εκσυγχρονισμού του ισχύοντος επίσημου συστήματος αναφοράς της Ελλάδας.



Εικόνα 1 – Earthrise  
(Πηγή: NASA, 1968)

Για την εκπλήρωση του παραπάνω σκοπού συγκεντρώθηκαν και επεξεργάστηκαν τα δεδομένα από 112 μόνιμους σταθμούς GNSS που χωροθετούνται εντός της ελληνικής επικράτειας και σε όμορες χώρες, για το χρονικό διάστημα από το 2015 έως και το 2019. Το σύνολο της επεξεργασίας πραγματοποιήθηκε με το επιστημονικό/ερευνητικό λογισμικό GAMIT/GLOBK σύμφωνα με τις οδηγίες των διαχειριστών και τη σχετική βιβλιογραφία. Αναλυτικά η εργασία ακολουθεί την κάτωθι διάρθρωση:

➤ **Κεφάλαιο 1:** Πραγματοποιείται μια θεωρητική προσέγγιση των συστημάτων και πλαισίων αναφοράς με έμφαση στα κινηματικά ή ημι-κινηματικά συστήματα ενώ παράλληλα παρουσιάζονται τα συστήματα αναφοράς που χρησιμοποιούνται σε διεθνές και ευρωπαϊκό επίπεδο καθώς επίσης και τα δίκτυα που τα υλοποιούν.

➤ **Κεφάλαιο 2:** Πραγματοποιείται εκτενής αναφορά των προδιαγραφών που πρέπει να ικανοποιούνται για την ίδρυση και λειτουργία ενός μόνιμου σταθμού GNSS σύμφωνα με τους κανονισμούς και τις οδηγίες που έχουν εκδοθεί από τους αρμόδιους ευρωπαϊκούς και διεθνείς οργανισμούς.

➤ **Κεφάλαιο 3:** Παρουσιάζεται η βασική μεθοδολογία, οι παράμετροι και οι σχέσεις που χρησιμοποιήθηκαν κατά την επεξεργασία των παρατηρήσεων GNSS και την τελική συνόρθωση του δικτύου μέχρι και την ένταξη του πλαισίου αναφοράς.

➤ *Κεφάλαιο 4:* Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της επεξεργασίας των πρωτογενών δεδομένων των σταθμών, τα ενδιάμεσα αποτελέσματα που παρήχθησαν από την ανάλυση των χρονοσειρών τους καθώς επίσης και η τελική εκτίμηση των γεωδαιτικών ταχυτήτων με την εξαγωγή του πεδίου ταχυτήτων για τον ελληνικό χώρο. Επίσης πραγματοποιείται ο έλεγχος και η αξιολόγηση τόσο των τελικών ταχυτήτων των σταθμών όσο και του μοντέλου ταχυτήτων βάσει εσωτερικής και εξωτερικής πληροφορίας.

➤ *Συμπεράσματα – Προτάσεις:* Αναφέρονται τα συμπεράσματα όπου εξήχθησαν από το σύνολο των διαδικασιών που πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας καθώς επίσης και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα είτε προς την κατεύθυνση της εμβάθυνσης σε ενδιάμεσα αποτελέσματα ή προβλήματα που εντοπίστηκαν κατά την διεξαγωγή της επεξεργασίας των δεδομένων είτε σε παραπλήσια πεδία ενδιαφέροντος.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Συστήματα και Πλαίσια Αναφοράς

---

### 1.1. Βασικές έννοιες

Το βασικό πρόβλημα της γεωδαισίας όπως χαρακτηριστικά διατυπώθηκε από τον Hirvonen (1960) είναι η εύρεση των αστρονομικών συντεταγμένων για κάθε σημείο  $P$  στη φυσική γήινη επιφάνεια (φ.γ.ε.)  $S$ , όταν ένας σημαντικός αριθμός γεωδαιτικών διεργασιών έχουν πραγματοποιηθεί κατά μήκος της επιφάνειας αυτής. Έτσι, ο προσδιορισμός του κατάλληλου πλαισίου στο οποίο αναφέρονται οι χωρικές συντεταγμένες είναι καθοριστικής σημασίας για τον προσδιορισμό της θέσης του σημείου  $P$ .

Ως Σύστημα Αναφοράς στη Γεωδαισία καλείται εκείνο το πλαίσιο παραμέτρων και συστημάτων συντεταγμένων που συνδέεται με μία συγκεκριμένη περιοχή ή με ένα συγκεκριμένο χώρο ή και ολόκληρη τη γη και ως προς το οποίο καθορίζονται οι θέσεις σημείων και αντικειμένων της φ.γ.ε. και μελετάται η κίνηση ή και η δυναμική συμπεριφορά τους με τον χρόνο (Μπιλλήρης, 2007). Συγκεκριμένα, ένα Σύστημα Αναφοράς είναι ένα σύνολο από συμβάσεις όπως ο άξονας περιστροφής της γης, πρότυπα όπως το ελλειψοειδές αναφοράς, μοντέλα (γεωδυναμικά ή τεκτονικά) και σταθερές όπως η ταχύτητα του φωτός που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της θέσης ενός σημείου στο χώρο. Με αυτόν τον τρόπο χρησιμεύει ως το απαραίτητο υπόβαθρο για τη μαθηματική παρουσίαση γεωμετρικών και φυσικών ποσοτήτων. Ένα Πλαίσιο Αναφοράς υλοποιεί το Σύστημα Αναφοράς φυσικά, δηλαδή με μια στέρεα υλοποίηση σημείων και μαθηματικά με τον προσδιορισμό παραμέτρων όπως οι γεωδαιτικές συντεταγμένες. Παραδείγματα αποτελούν οι χερσαίες και στέρες κατασκευές (βάθρα), των οποίων οι συντεταγμένες υπολογίζονται από μετρήσεις μετά τον ορισμό του Συστήματος Αναφοράς. Τέλος, το γεωδαιτικό datum καθορίζει με σαφήνεια τη σχέση μεταξύ του Συστήματος και του Πλαισίου Αναφοράς, παρέχοντας ένα σύνολο δεδομένων παραμέτρων όπως την αρχή του Συστήματος ( $X_0, Y_0, Z_0$ ), τις κατευθύνσεις των αξόνων των συντεταγμένων  $X, Y, Z$  και την κλίμακα ως μονάδα μήκους, για παράδειγμα χρησιμοποιώντας το μέτρο (Drewes, 2009).

Από τους παραπάνω ορισμούς εξάγεται το συμπέρασμα ότι τα Συστήματα Αναφοράς, τα Πλαίσια Αναφοράς και το γεωδαιτικό datum παρουσιάζουν την εξής ιεραρχική τάξη:

- ❖ Ο ορισμός ενός Συστήματος Αναφοράς πρέπει να είναι εντελώς ανεξάρτητος από την υλοποίηση του Πλαισίου Αναφοράς και του γεωδαιτικού datum δηλαδή η υλοποίηση του Συστήματος από το Πλαίσιο και τον καθορισμό του datum δεν πρέπει να αλλάζει τον ορισμό.
- ❖ Η υλοποίηση του datum πρέπει να πραγματοποιηθεί με μεθόδους ανεξάρτητες από τις παρατηρήσεις του Πλαισίου Αναφοράς δηλαδή λάθη των μετρήσεων ή φυσικές αλλαγές δεν πρέπει να επηρεάζουν το datum.
- ❖ Η μαθηματική υλοποίηση του Πλαισίου Αναφοράς πρέπει να γίνει με αλγόριθμους που διατηρούν τις παραμέτρους του datum αμετάβλητες και ακολουθούν αυστηρά τις αρχές που ορίζονται από το Σύστημα Αναφοράς.

Έτσι, όσον αφορά τα κλασικά διδιάστατα (οριζοντιογραφικά) γεωδαιτικά Συστήματα Αναφοράς, έπρεπε να ορισθούν τέσσερις παράμετροι για το datum: δύο για την αφετηρία (αρχικό σημείο), μια για τον προσανατολισμό και μία για την κλίμακα. Ο καθορισμός της αφετηρίας υλοποιούταν με τον ορισμό των συντεταγμένων του αρχικού σημείου στο Σύστημα Συντεταγμένων ( $\varphi_0, \lambda_0$ ) με σταθερές τιμές. Ο προσανατολισμός των αξόνων του Συστήματος Συντεταγμένων δινόταν από τα αζιμούθια μεταξύ επιλεγμένων σταθμών του δικτύου ενώ η κλίμακα υλοποιούνταν από το πρότυπο μέτρο. Τόσο οι συντεταγμένες της αφετηρίας όσο και τα αζιμούθια προέρχονταν από αστρονομικές παρατηρήσεις και έτσι ήταν ανεξάρτητα από τις μετρήσεις γωνιών και αποστάσεων του δικτύου. Με αυτόν τον τρόπο οι παράμετροι του datum παραμένουν σταθερές για πάντα και κανένα λάθος στις παρατηρήσεις που θα εντοπιστεί σε επόμενες επαναλήψεις ή μετακινήσεις των σταθμών του Πλαισίου Αναφοράς ή εισαγωγή και αφαίρεση σταθμών αναφοράς δεν θα αλλάξει τις συντεταγμένες της αφετηρίας, τον προσανατολισμό και την κλίμακα του δικτύου. Με αυτόν τον τρόπο, οποιαδήποτε μετακίνηση του δικτύου, με σταθερή την αφετηρία και τον προσανατολισμό μπορεί να ανιχνευθεί ακόμα και για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Στα μοντέρνα τριδιάστατα Συστήματα Αναφοράς με Καρτεσιανές συντεταγμένες θα πρέπει να ορισθούν επτά παράμετροι για το datum: τρεις για τον προσδιορισμό της αρχής του Συστήματος Συντεταγμένων, τρεις για τον προσανατολισμό των αξόνων του συστήματος και μία για την κλίμακα. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το Διεθνές Γήινο Σύστημα Αναφοράς (International Terrestrial Reference System – ITRS), το οποίο θα αναλυθεί στη συνέχεια.

## **1.2. Το Διεθνές Γήινο Σύστημα Αναφοράς – ITRS**

Η Διεθνής Υπηρεσία Περιστροφής της Γης ( International Earth Rotation Service – IERS) ιδρύθηκε το 1987 από την Διεθνή Ένωση Αστρονομίας και τη Διεθνή Ένωση Γεωδαισίας και Γεωφυσικής ενώ το 2003 μετονομάστηκε σε Διεθνή Υπηρεσία για την περιστροφή της Γης και τα Συστήματα Αναφοράς (International Rotation and Reference System Service – IERS). Η IERS είναι επιφορτισμένη με τον ορισμό, υλοποίηση και προώθηση του ITRS, το οποίο πληροί τις ακόλουθες συνθήκες (Petit & Luzum , 2010) :

α. Είναι γεωκεντρικό, με το κέντρο του στο κέντρο μάζας της Γης, συμπεριλαμβανομένων των ωκεανών και της ατμόσφαιρας.

β. Η μονάδα μήκους είναι το μέτρο (SI). Η κλίμακα είναι σύμφωνη με τη TCG χρονική συντεταγμένη για ένα γεωδαιτικό τοπικό πλαίσιο, σε συμφωνία με τις αποφάσεις (1991) των IAU και IUGG. Αυτό επιτυγχάνεται με τη κατάλληλη μοντελοποίηση της σχετικότητας.

γ. Ο προσανατολισμός του ταυτίστηκε με τον προσανατολισμό του BIH την εποχή 1984.0.

δ. Η χρονική εξέλιξη του προσανατολισμού εξασφαλίζεται με τη χρήση της συνθήκης Ελαχιστοποίησης της Σχετικής Στροφορμής (No-Net Rotation condition) σε σχέση με τις οριζοντιογραφικές τεκτονικές κινήσεις σε ολόκληρη τη Γη.

### 1.3. Το δίκτυο της IERS

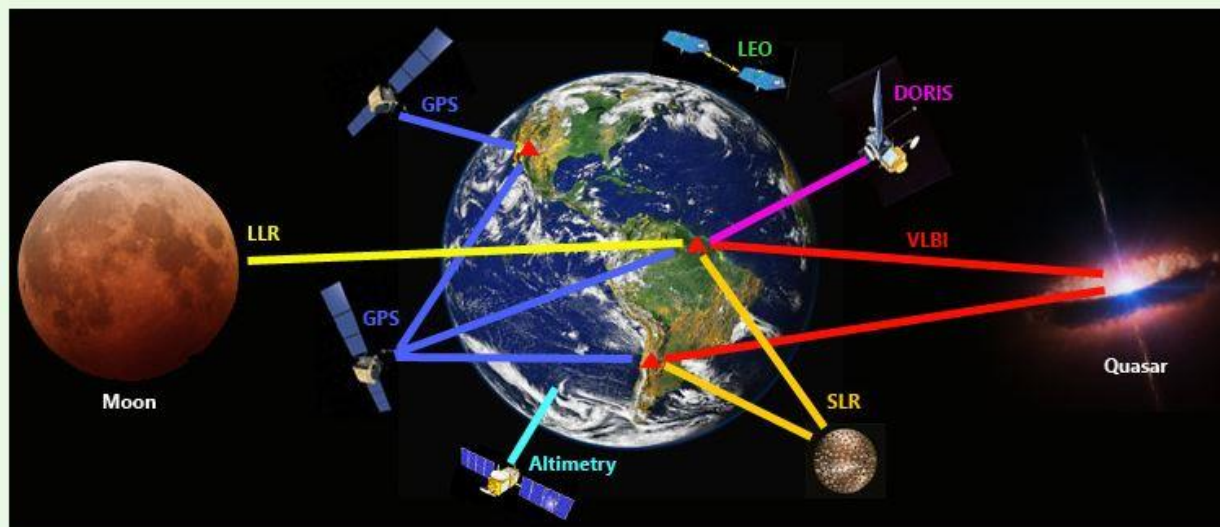
Το δίκτυο της IERS αρχικά αποτελούνταν από όλα τα όργανα εντοπισμού (SLR, LLR, VLBI) που χρησιμοποιούνταν από τα διάφορα ανεξάρτητα κέντρα ανάλυσης που συνεργάζονταν με την IERS. Στη συνέχεια στο δίκτυο προστέθηκαν σταθμοί GPS καθώς επίσης και το δίκτυο DORIS. Πλέον κάθε σημείο προσδιορίζεται από τον χαρακτηριστικό αριθμό DOMES (Directory of Merit Site). Η επεξήγηση των αριθμών DOMES παρουσιάζεται παρακάτω, ενώ τα κοντινά σημεία ομαδοποιούνται σε ένα σημείο. Σύμφωνα με τον ισχύοντα κανόνα όλα τα σημεία τα οποία μπορούν να συνδεθούν με συνδυαστικές επιλύσεις (co-location survey), μέχρι την απόσταση των 30 km, πρέπει να συμπεριληφθούν στο δίκτυο της IERS ως ένα σημείο με ένα μοναδικό αριθμό DOMES. Στην πραγματικότητα όμως για να επιτευχθούν τοπικές δεσμεύσεις ακρίβειας mm, οι τοποθεσίες συνεγκατάστασης - συνταύτισης δεν πρέπει να υπερβαίνουν το 1 km. Συγκεκριμένα, στο πλαίσιο της IERS, η έννοια της συνταύτισης μπορεί να οριστεί ως το γεγονός ότι δύο όργανα ίδιας ή διαφορετικής τεχνικής, ταυτόχρονα ή διαδοχικά, πραγματοποιούν παρατηρήσεις εντοπισμού σε πολύ μικρές μεταξύ τους αποστάσεις, με μεγάλη ακρίβεια και στις τρεις διαστάσεις.

Ακολουθώντας τις απαιτήσεις πολλών επιστημονικών κοινοτήτων το αρχικό δίκτυο της IERS επεκτάθηκε ώστε να περιλαμβάνει νέου τύπου συστήματα που παρουσιάζουν ενδιαφέρον. Έτσι, οι τωρινές τεχνικές (τύποι σταθμών), που επιτρέπονται στην IERS και για τις οποίες μπορεί να δοθεί αριθμός DOMES είναι οι κάτωθι:

- L για Δορυφορικά Αποστασιόμετρα Laser (Satellite Laser Ranging – SLR)
- M για Σεληνιακά Αποστασιόμετρα Laser (Lunar Laser Ranging – LLR)
- R για Συμβολομετρία μεγάλων αποστάσεων ( Very Long Baseline Interferometry – VLBI)
- P για Παγκόσμια Δορυφορικά Συστήματα Πλοήγησης (Global Navigation Satellite Systems – GNSS)
- D για Ολοκληρωμένο Ραδιοεντοπισμό Δορυφορικών Τροχιών (Determination d' Orbite et Radiopositionnement Integres par Satellite – DORIS)
- A για οπτική αστρομετρία
- X για εξοπλισμό αποστασιόμετρου μεγάλης ακρίβειας και εύρους τιμών ( Precise range and rate equipment – PRARE)
- T για μετρητή παλίρροιας
- W για μετεωρολογικό αισθητήρα

Ειδικά, η καταγραφή της παλίρροιας σε συνδυασμό με όργανα της IERS και συγκεκριμένα με τα συστήματα GNSS και DORIS, άπτονται των ενδιαφερόντων του προγράμματος του Παγκόσμιου Συστήματος Παρακολούθησης της Στάθμης της θάλασσας (Global Sea Level Observing System – GLOSS) υπό την αιγίδα της UNESCO. Μια άλλη εφαρμογή είναι η συλλογή μεγάλης ακρίβειας επιφανειακών μετεωρολογικών μετρήσεων, και ιδιαίτερα ατμοσφαιρικής πίεσης, με

σκοπό να εξαχθούν πρωτογενείς τροποσφαιρικές παράμετροι από καθυστερήσεις της διάδοσης του σήματος στην τροπόσφαιρα κατά τη διάρκεια των παρατηρήσεων με συστήματα GNSS, VLBI και DORIS. Τέλος, έντονη είναι η επιθυμία κάποιων ηπειρωτικών ή εθνικών οργανισμών να περιληφθούν τα δικά τους δίκτυα, στο δίκτυο της IERS, είτε μόνο για την εκτέλεση των απαραίτητων υπολογισμών (όπως για παράδειγμα η EUREF, με το αντίστοιχο δίκτυο μόνιμων σταθμών GNSS, το οποίο θα αναλυθεί στη συνέχεια) είτε λαμβάνοντας αριθμούς DOMES (όπως το δίκτυο μόνιμων σταθμών (CORS) των Η.Π.Α.).



Εικόνα 2 - Διάφοροι τύποι διαστημικών γεωδαιτικών τεχνικών της IERS  
(Πηγή: International Association of Geodesy (IAG), 2016)

Συγκεκριμένα, όπως απεικονίζεται στο *Σχήμα 1*, το δίκτυο που χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή του πλέον σύγχρονου Πλαισίου Αναφοράς ITRF2014, αποτελείται από 1499 σταθμούς εγκαταστημένους σε 975 περιοχές, όπου περίπου στο 10% των οποίων είναι συνεγκατεστημένα δύο, τρία ή τέσσερα διαφορετικά όργανα διαστημικής γεωδαισίας. Περιληπτικά, οι αντίστοιχες γεωδαιτικές τεχνικές που χρησιμοποιούνται στους παραπάνω σταθμούς είναι οι εξής (Weston & Soler, 2014):

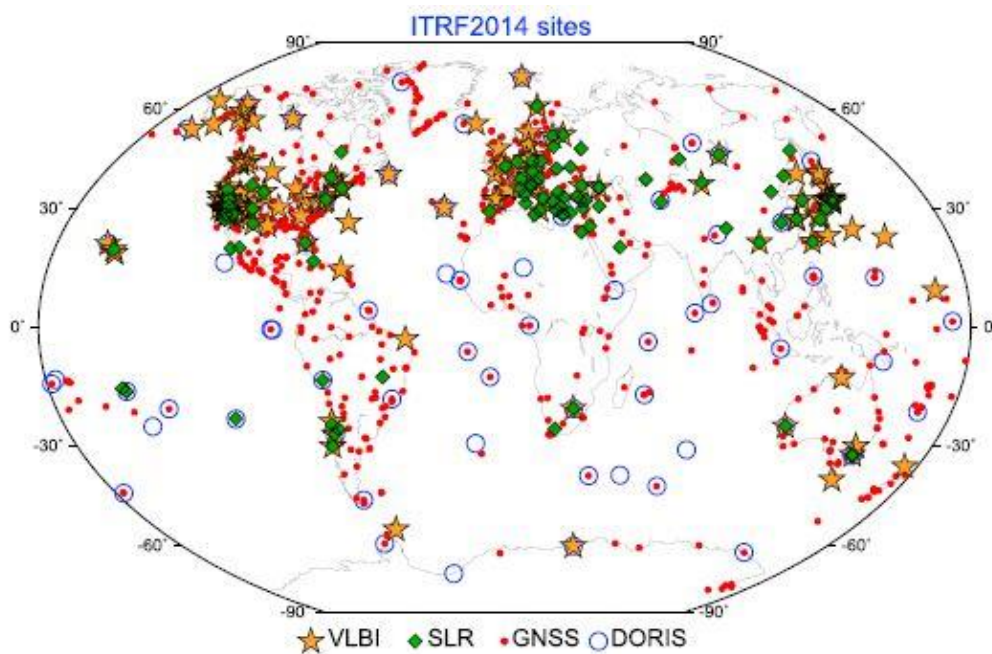
α. GNSS: Αποτελείται από έναν αστερισμό τουλάχιστον 24 δορυφόρων σε έξι τροχιακά επίπεδα, τα οποία παρέχουν συνεχώς πληροφορίες πλοήγησης και χρόνου σε παγκόσμια κλίμακα. Το σύστημα παρέχει υψηλής ακρίβειας 3-D πληροφορίες θέσης για την υποστήριξη στρατιωτικών, πολιτικών και εμπορικών σκοπών.

β. VLBI: Αποτελείται από μια σειρά από πολύ μεγάλα ραδιοτηλεσκόπια που λαμβάνουν συνεχόμενα ηλεκτρομαγνητικά μικροκύματα από εξωγαλακτικά κβάζαρ και πάλσαρ, με σκοπό να μετρήσουν συμβολομετρικά, καθυστερήσεις στις παρατηρήσεις μέσω άμεσης συσχέτισης των ρευμάτων των σημάτων.

γ. SLR: Αποτελείται από ένα δίκτυο σταθμών που μετράνε τον χρόνο πτήσης πολύ ασθενών παλμών laser που κινούνται μεταξύ σταθμών του εδάφους, δορυφόρων σε τροχιά γύρω από τη Γη και ανακλαστήρων στη Σελήνη. Αυτή η τεχνική είναι μία από τις πιο ακριβείς στον

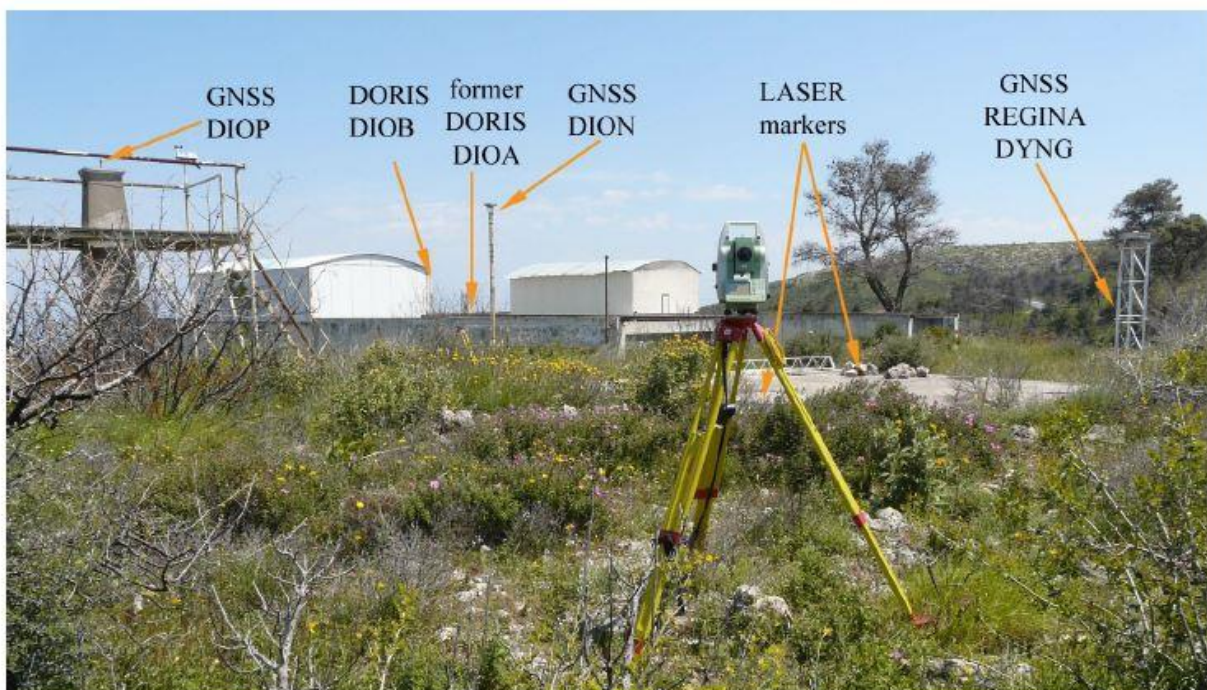
προσδιορισμό των θέσεων των δορυφόρων, στην ανίχνευση προσωρινών διακυμάνσεων στο βαρυτικό πεδίο της Γης και το γεώκεντρο και χρησιμοποιείται σε πολλές αποστολές παρατήρησης της Γης, όπως στην αλιμετρία στην επιφάνεια των ωκεανών.

δ. DORRIS: Είναι ένα σύστημα παρακολούθησης Doppler, με βασική αποστολή τον προσδιορισμό των τροχιών ακριβείας και των θέσεων στο έδαφος. Σήματα μικροκυμάτων μεταδίδονται από ένα δίκτυο 60 επίγειων φάρων και παρατηρούνται από δέκτες σε δορυφόρους που περιστρέφονται γύρω από τη Γη. Το DORRIS χρησιμοποιείται συνήθως για την μέτρηση των τροχιών δορυφόρων παρατήρησης της Γης (με ακτινική ακρίβεια του 1 cm).



Σχήμα 1 - Το δίκτυο σταθμών για το ITRF2014  
(Πηγή: Altamimi et al., 2016)





Εικόνα 3 - Η τοποθεσία συνταύτισης στον Διόνυσο Αττικής  
 Πηγή: (Poyard, 2011)

#### 1.4. Οι υλοποιήσεις του ITRS

Οι πρωτογενείς υλοποιήσεις του ITRS παράγονται από τα κέντρα ITRS (ITRS-PC) της IERS με την ονομασία Διεθνές Γήινο Πλαίσιο Αναφοράς (International Terrestrial Reference Frame – ITRF). Ξεκινώντας με την έκδοση ITRF88 και καταλήγοντας με την ITRF14 έχουν εκδοθεί μέχρι στιγμής 13 εκδόσεις ITRF. Μέχρι την έκδοση ITRF2000 ως δεδομένα εισόδου χρησιμοποιούνταν μακροπρόθεσμες παγκόσμιες επιλύσεις (θέσεων και ταχυτήτων των σταθμών) από τέσσερις τεχνικές (VLBI, SLR, GPS και DORIS). Ωστόσο, από την έκδοση ITRF2005 και μετά, για την κατασκευή των ITRF ως δεδομένα εισόδου χρησιμοποιούνται χρονοσειρές θέσεων των σταθμών και παράμετροι προσανατολισμού της Γης (Earth Orientation Parameters – EOPs). Η τρέχουσα διαδικασία προϋποθέτει τον συνδυασμό επιλύσεων της τεχνικής TRF, κάνοντας χρήση τοπικών δεσμεύσεων, σε τοποθεσίες συνταύτισης όπου λειτουργούν δύο ή περισσότερες γεωδαιτικές τεχνικές. Οι τοπικές δεσμεύσεις χρησιμοποιούνται ως συμπληρωματικές παρατηρήσεις με τις κατάλληλες διακυμάνσεις και συνήθως προέρχονται από τοπικές μετρήσεις είτε με μεθόδους κλασσικής γεωδαισίας είτε με συστήματα GNSS. Δεδομένου ότι αποτελούν βασικό στοιχείο της συνδυαστικής μεθόδου παραγωγής του ITRF, πρέπει να είναι καλύτερης ή τουλάχιστον ίσης ακρίβειας με τις μεμονωμένες λύσεις διαστημικής γεωδαισίας με τις οποίες συνδυάζονται. Ο αριθμός που ακολουθεί την ονομασία «ITRF» διευκρινίζει το τελευταίο έτος από το οποίο ανλήθηκαν τα δεδομένα για την παραγωγή του πλαισίου. Έτσι το ITRF2014 προσδιορίζει το πλαίσιο των θέσεων και ταχυτήτων των σταθμών που παρήχθη το 2016 χρησιμοποιώντας δεδομένα τα οποία ήταν διαθέσιμα μέχρι το τέλος του έτους 2014.

## 1.5. Το ITRF2014

Το ITRF2014 για πρώτη φορά σε σχέση με όλες τις προηγούμενες εκδόσεις των Διεθνών Γήινων Πλαισίων Αναφοράς (ITRF) παράγεται με μια βελτιωμένη μοντελοποίηση των μη γραμμικών κινήσεων των σταθμών αναφοράς, συμπεριλαμβανομένων των εποχιακών (ετήσιων και εξαμηνιαίων) σημάτων των θέσεων των σταθμών και των μετασεισμικών παραμορφώσεων, για τα σημεία εκείνα στα οποία πραγματοποιήθηκαν σημαντικές σεισμικές δονήσεις. Χρησιμοποιώντας όλες τις διαχρονικές παρατηρήσεις των τεσσάρων διαστημικών γεωδαιτικών τεχνικών, (VLBI, SLR, GNSS, DORIS), μέχρι και το τέλος του 2014, οι αντίστοιχες διεθνείς υπηρεσίες παρείχαν αναθεωρημένες χρονοσειρές (εβδομαδιαίες από τις τεχνικές SLR και DORIS και ημερήσιες από τις GNSS και VLBI) για τις θέσεις των σταθμών και ημερήσιες παραμέτρους EOPs. Έτσι, το ITRF2014 αποδεικνύεται ανώτερο των προηγούμενων εκδόσεων ITRF, καθώς μοντελοποιεί με ακρίβεια την πραγματική πορεία των σταθμών οδηγώντας σε ένα πιο ισχυρό παγκόσμιο πλαίσιο και σε πιο ακριβείς ταχύτητες των σταθμών (Altamimi et al., 2016).

### 1.5.1. Δεδομένα εισόδου για την παραγωγή του ITRF2014

Ο καθορισμός του ITRF εξαρτάται όχι μόνο από τις τεχνικές διαστημικής γεωδαισίας αλλά και από την διαθεσιμότητα των επίγειων παρατηρήσεων, ή των τοπικών μετρήσεων, οι οποίες συνδέουν τα σημεία αναφοράς των γεωδαιτικών οργάνων στα σημεία συνταύτισης.

Τα δεδομένα των τεσσάρων συνδυασμένων διαστημικών τεχνικών που χρησιμοποιήθηκαν για την παραγωγή του ITRF2014 φαίνονται στον Πίνακα 1, όπου αναγράφονται το χρονικό εύρος των παρατηρήσεων για κάθε τεχνική, η χρονική διάρκεια των παρατηρήσεων, ο τύπος της επίλυσης, οι δεσμεύσεις που εφαρμόστηκαν για τον ορισμό του πλαισίου αναφοράς και τέλος οι παράμετροι Περιστροφής της Γης (EOPs) που εξήχθησαν από κάθε τεχνική, επιπλέον των θέσεων των σταθμών.

Πίνακας 1 - Δεδομένα εισόδου ITRF2014  
(Πηγή: Altamimi et al., 2016)

TC	Data Span	Sampling	Solution Type	Constraints	EOPs
IVS	1980.0–2015.0	Daily	Normal equation	None	PM, PMr, LOD, UT1-UTC
ILRS	1983.0–1993.0	Fortnightly	Variance-covariance	Loose	PM, LOD
	1993.0–2015.0	Weekly	Variance-covariance	Loose	PM, LOD
IGS	1994.0–2015.1	Daily	Variance-covariance	Minimum	PM, PMr, LOD
IDS	1993.0–2015.0	Weekly	Variance-covariance	Minimum	PM

<sup>a</sup>PM: polar motion, PMr: polar motion rate, and LOD: length of day.

Η συνδυαστική μέθοδος παραγωγής του ITRF εξαρτάται θεμελιωδώς από την διαθεσιμότητα των τοποθεσιών συνταύτισης όπου πρώτον, χρησιμοποιούνται δύο ή περισσότερα γεωδαιτικά όργανα διαφορετικών τεχνικών και δεύτερον υπάρχουν διαθέσιμες τοπικές μετρήσεις μεταξύ των σημείων παρατήρησης των οργάνων. Οι τοπικές μετρήσεις συνήθως διενεργούνται με τεχνικές κλασσικής γεωδαισίας (μετρήσεις γωνιών, αποστάσεων και χωροσταθμίσεις) ή με χρήση GNSS. Στη συνέχεια εφαρμόζονται προσαρμογές με τη Μέθοδο των Ελαχίστων Τετραγώνων (M.E.T.) στις τοπικές μετρήσεις ώστε να προκύψουν οι τοπικές δεσμεύσεις που συνδέουν τα σημεία αναφοράς των οργάνων.

### **1.5.2. Ανάλυση δεδομένων και εξαγωγή παραμέτρων του πλαισίου**

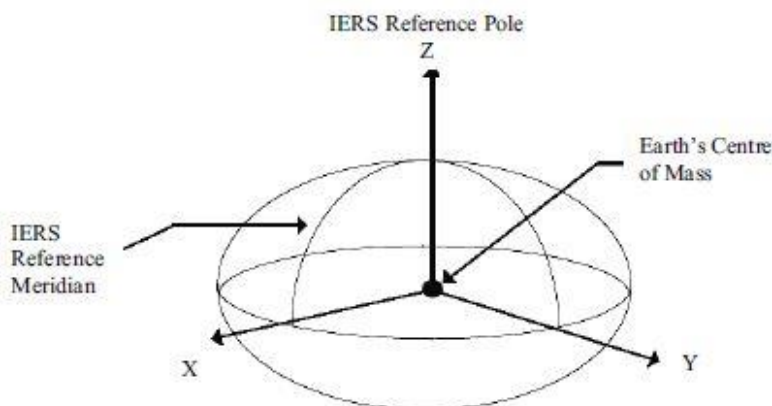
Η διαδικασία που ακολουθείται για την διαμόρφωση του ITRF2014 αποτελείται από δύο στάδια (Altamimi et al., 2016). Το πρώτο στάδιο πραγματοποιείται με τη συγκέντρωση των επιμέρους χρονοσειρών για τον υπολογισμό μιας μεγάλης διάρκειας επίλυση για κάθε τεχνική, που να περιλαμβάνει τη θέση των σταθμών στην εποχή αναφοράς, τις ταχύτητες των σταθμών και τις ημερήσιες παραμέτρους EOPs ενώ στο δεύτερο στάδιο συνδυάζονται οι επιμέρους επιλύσεις από τις τέσσερις προαναφερθείσες τεχνικές μαζί με τις τοπικές δεσμεύσεις στα σημεία συνταύτισης.

Κατά το πρώτο στάδιο της διαδικασίας δηλαδή την ανάλυση και συγκέντρωση των επιμέρους χρονοσειρών, όπως έχει ήδη αναφερθεί, για πρώτη φορά εισήχθησαν δύο νέες καινοτομίες σχετικά με τις μη γραμμικές κινήσεις των σταθμών. Πρώτον, η μοντελοποίηση των περιοδικών εποχιακών σημάτων για τους σταθμούς με επαρκή χρονική διάρκεια και δεύτερον, η μετασεισμική παραμόρφωση (Post Seismic Deformation - PSD) για τοποθεσίες που επηρεάστηκαν από μεγάλης έντασης σεισμούς. Η μοντελοποίηση των εποχιακών σημάτων των σταθμών επιτυγχάνεται με την εισαγωγή στο συνδυαστικό μοντέλο των κατάλληλων παραμέτρων (συντελεστών) στις ημιτονοειδής συναρτήσεις ενώ οι μετασεισμικές παραμορφώσεις υπολογίζονται εφαρμόζοντας παραμετρικά μοντέλα στις καθημερινές χρονοσειρές των σταθμών της IGS. Με βάση την παραπάνω μεθοδολογία είναι εφικτό να προσδιοριστούν κάθε είδους μη γραμμικές κινήσεις, όπως ασυνέχειες, περιοδικά σήματα, μετασεισμικές παραμορφώσεις, αλλαγές στην ταχύτητα λόγω του φαινομένου τήξης των πάγων και άλλες άγνωστες προς το παρόν παράμετροι της πορείας κίνησης των σταθμών. Κάποιες από αυτές τις άγνωστες πηγές μη γραμμικών κινήσεων θα μπορούσαν να αποδοθούν σε τοπικές επιδράσεις, όπως ανθρωπογενής άντληση υπόγειων νερών ή σε κάποιες περιπτώσεις συστηματικών σφαλμάτων στην ανάλυση των δεδομένων. Αφού ολοκληρωθεί το πρώτο στάδιο διεξάγεται το δεύτερο στάδιο με τον συνδυασμό των επιλύσεων των τεσσάρων τεχνικών μαζί με τις τοπικές δεσμεύσεις στα σημεία συνταύτισης, τις θέσεις και ταχύτητες των σταθμών και τις παραμέτρους EOPs. Συγκεκριμένα, πραγματοποιούνται μια σειρά από πειράματα συνδυασμών στα οποία δίνονται διαφορετικοί συντελεστές βαρύτητας για τις επιλύσεις των τεσσάρων τεχνικών και τις τοπικές δεσμεύσεις. Τελικά προκύπτουν οι κάτωθι παράμετροι που προσδιορίζουν το ITRF2014:

α. Η αρχή του συστήματος ορίζεται με τέτοιο τρόπο ώστε να υπάρχουν μηδενικές παράμετροι μετάθεσης στην εποχή 2010.0 και αντίστοιχοι ρυθμοί μετάθεσης σε σχέση με τη μέση αφετηρία των χρονοσειρών SLR από την υπηρεσία ILRS.

β. Ο συντελεστής κλίμακας του πλαισίου καθώς και ο ρυθμός μεταβολής του ορίζεται με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι μηδενικός στην εποχή 2010.0 σε σχέση με τις χρονοσειρές από τις τεχνικές VLBI και SLR.

γ. Ο προσανατολισμός του πλαισίου ορίζεται με τέτοιο τρόπο ώστε να υπάρχουν μηδενικές παράμετροι προσανατολισμού και ρυθμού μεταβολής στην εποχή 2010.0 μεταξύ του ITRF2014 και του ITRF2008, χρησιμοποιώντας 127 σημεία αναφοράς. Κλασσικά, ως προς τον προσανατολισμό, τα ITRF<sub>yy</sub> ορίζονται ως προς τον Z άξονα με κατεύθυνση προς το Βόρειο Πόλο ή πιο συγκεκριμένα, προς τον συμβατικό επίγειο πόλο (Conventional Terrestrial Pole –CTP) όπως αυτός προσδιορίζεται από την IERS. Ο X άξονας διέρχεται από το σημείο μηδενικού γεωγραφικού μήκους (περίπου στον μεσημβρινό του Greenwich) όπως προσδιορίζεται από την IERS και ο άξονας Y δημιουργεί ένα σύστημα συντεταγμένων με τους άξονες X και Z με βάση τον κανόνα του δεξιού χεριού. Αυτές οι κλασσικές θεωρήσεις πλέον ελέγχονται ως προς την συνέχεια τους σε μετατόπιση και ρυθμό μετατόπισης για κάθε ITRF σε σχέση με το προηγούμενο (Weston & Soler, 2014).



Σχήμα 2 - Κλασσική θεώρηση ITRF<sub>yy</sub>  
(Πηγή: *The International Federation of Surveyors (FIG)*, 2006)

Οι παραπάνω 127 σταθμοί που χρησιμοποιήθηκαν για την ευθυγράμμιση του προσανατολισμού του ITRF2014 με το ITRF2008, χρησιμοποιήθηκαν επίσης για τον υπολογισμό των παραμέτρων μετασχηματισμού μεταξύ των δύο πλαισίων. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκε ένας 14-παραμετρικός μετασχηματισμός ομοιότητας με την μαθηματική σχέση και τις τιμές των παραμέτρων να παρουσιάζονται παρακάτω (Altamimi et al., 2016):

$$\left\{ \begin{array}{l} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}_{i08} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}_{i14} + T + D \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}_{i14} + R \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}_{i14} \\ \begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{pmatrix}_{i08} = \begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{pmatrix}_{i14} + \dot{T} + \dot{D} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}_{i14} + \dot{R} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}_{i14} \end{array} \right. \quad (1.1)$$

Πίνακας 2 - Παράμετροι μετασχηματισμού από το ITRF2014 στο ITRF2008 στην εποχή 2010.0  
(Πηγή: Altamimi et al., 2016)

	$T_x$ (mm)	$T_y$ (mm)	$T_z$ (mm)	$D$ (ppb)	$R_x$ (mas)	$R_y$ (mas)	$R_z$ (mas)
	$T_x$ (mm/yr)	$T_y$ (mm/yr)	$T_z$ (mm/yr)	$D$ (ppb/yr)	$R_x$ (mas/yr)	$R_y$ (mas/yr)	$R_z$ (mas/yr)
	1.6	1.9	2.4	-0.02	0.00	0.00	0.00
±	0.2	0.1	0.1	0.02	0.06	0.06	0.06
	0.0	0.0	-0.1	0.03	0.00	0.00	0.00
±	0.2	0.1	0.1	0.02	0.06	0.06	0.06

όπου το  $i08$  συμβολίζει το ITRF2008 και το  $i14$  το ITRF2014, το  $T$  είναι το διάνυσμα μετάθεσης  $T = (T_x, T_y, T_z)^T$ , το  $D$  είναι ο παράγοντας κλίμακας και το  $R$  είναι ο πίνακας που περιέχει τις γωνίες στροφής και δίνεται στην μορφή:

$$R = \begin{pmatrix} 0 & -R_z & R_y \\ R_z & 0 & -R_x \\ -R_y & R_x & 0 \end{pmatrix}$$

Τέλος, οι παράμετροι σε παράγωγο συμβολίζουν την παράγωγο των παραπάνω παραμέτρων ως προς τον χρόνο.

## 1.6. Το Ευρωπαϊκό Επίγειο Σύστημα Αναφοράς – ETRS

Η EUREF, «Επιτροπή για το Πλαίσιο Αναφοράς για την Ευρώπη – Reference Frame Sub-Commission for Europe» αποτελεί τμήμα της Υπό-επιτροπής 1.3, των Τοπικών Πλαισίων Αναφοράς, κάτω από την Επιτροπή 1 της IAG. Οι δραστηριότητες και τα καθήκοντα της EUREF περιλαμβάνουν τα κάτωθι (Bruyninx, et al., 2009):



α. Η ανάπτυξη, σε στενή συνεργασία με την IGS, του μονίμου δικτύου σταθμών της (EUREF Permanent Network – EPN) για την υλοποίηση του ευρωπαϊκού πλαισίου αναφοράς, συμπληρωματικά ως προς το ITRF και ως υποδομή για υποστήριξη σε άλλα σχετικά έργα και συγκεκριμένα στις ευρωπαϊκές πρωτοβουλίες σχετικά με το Galileo.

β. Η βελτίωση του Ενιαίου Ευρωπαϊκού Υψομετρικού Δικτύου (Unified European Levelling Network – UELN) με την επέκταση του σε όλες τις ευρωπαϊκές χώρες, λαμβάνοντας υπόψη την προοπτική του γεωκινηματικού υπολογισμού.

γ. Η διενέργεια των αναγκαίων εργασιών για την μακροπρόθεσμη συντήρηση του ETRS89 (Ευρωπαϊκό Επίγειο Σύστημα Αναφοράς – European Terrestrial Reference System) και του EVRS2000 (Ευρωπαϊκό Υψομετρικό Σύστημα Αναφοράς – European Vertical Reference System) καθώς επίσης και τη βελτίωση της συσχέτισης μεταξύ των δύο συστημάτων, σε στενή συνεργασία με τα άλλα τμήματα της IAG.

δ. Η συμβολή στο πρόγραμμα της IAG, GGOS (Global Geodetic Observing System), χρησιμοποιώντας τις εγκαταστημένες υποδομές που διαχειρίζονται τα μέλη της EUREF.

ε. Η προώθηση της υιοθέτησης των συστημάτων αναφοράς που ορίζονται από την EUREF (ETRS89 και EVRS2000) από τις ευρωπαϊκές χώρες και τους ευρωπαϊκούς οργανισμούς που ασχολούνται με δραστηριότητες γεωαναφοράς.

Το Ευρωπαϊκό Επίγειο Σύστημα Αναφοράς 89 (European Terrestrial Reference System 89 – ETRS89) υιοθετήθηκε το 1990 στην Φλωρεντία, ακολουθώντας το ψήφισμα 1 της EUREF που αναφέρει: « Η υπο-επιτροπή της IAG για το Ευρωπαϊκό Πλαίσιο Αναφοράς συνιστά το σύστημα που θα υιοθετηθεί από την EUREF να ευθυγραμμίζεται με το ITRS την εποχή 1989.0, να είναι σταθεροποιημένο στο σταθερό τμήμα της ευρασιατικής πλάκας και να ονομαστεί Ευρωπαϊκό Επίγειο Σύστημα Αναφοράς 89 (ETRS89)». Ο παραπάνω ορισμός συνεπάγεται των δύο κάτωθι προϋποθέσεων (Altamimi Z., 2018):

α. Το ETRS89 συμπίπτει με το ITRS στην εποχή 1989.0. Αυτή η συνθήκη οδηγεί στο συμπέρασμα ότι ο 7-παραμετρικός μετασχηματισμός που χρησιμοποιείται μεταξύ του ITRS και του ETRS89 έχει μηδενικές παραμέτρους στην εποχή 1989.0.

β. Το ETRS89 είναι σταθεροποιημένο στο σταθερό τμήμα της ευρασιατικής πλάκας. Αυτή η συνθήκη υποδηλώνει ότι το ETRS89 κινείται μαζί με την ευρασιατική τεκτονική πλάκα, ορίζοντας έτσι τον παράγοντα του χρόνου. Έτσι, οι χρονικές παράγωγοι του 7-παραμετρικού μετασχηματισμού μεταξύ του ITRS και του ETRS89 είναι μηδενικές, εκτός από τους τρεις ρυθμούς περιστροφής. Στην πραγματικότητα, οι τρεις ρυθμοί περιστροφής είναι οι τρεις συνιστώσες της ευρασιατικής γωνιακής ταχύτητας στα πλαίσια του  $ITRF_{yy}$ .

Από την εξίσωση (1.1) και τον αντίστοιχο πίνακα με τις γωνίες στροφής, τα οποία ουσιαστικά προσδιορίζουν τη γενική σχέση μεταξύ δύο συστημάτων και επιτρέπουν την μετατροπή των συντεταγμένων των θέσεων των σταθμών και των ταχυτήτων από το ένα σύστημα στο άλλο, μπορεί να προκύψουν οι κάτωθι μαθηματικές σχέσεις μετασχηματισμού που συνδέουν το ETRS89 με το ITRS, για τις θέσεις και τις ταχύτητες των σταθμών αντίστοιχα (Altamimi Z., 2018):

- Για τις θέσεις των σταθμών σε κάθε εποχή  $t$ :

$$X_{yy}^E(t) = X_{yy}^I(t) + T_{yy} + \begin{pmatrix} 0 & -\dot{R}_{3_{yy}} & \dot{R}_{2_{yy}} \\ \dot{R}_{3_{yy}} & 0 & -\dot{R}_{1_{yy}} \\ -\dot{R}_{2_{yy}} & \dot{R}_{1_{yy}} & 0 \end{pmatrix} \times X_{yy}^I(t) \cdot (t - 1989.0) \quad (1.2)$$

- Για τις ταχύτητες των σταθμών:

$$\dot{X}_{yy}^E = \dot{X}_{yy}^I + \begin{pmatrix} 0 & -\dot{R}_{3_{yy}} & \dot{R}_{2_{yy}} \\ \dot{R}_{3_{yy}} & 0 & -\dot{R}_{1_{yy}} \\ -\dot{R}_{2_{yy}} & \dot{R}_{1_{yy}} & 0 \end{pmatrix} \times X_{yy}^I \quad (1.3)$$

όπου  $(X_{yy}^I, \dot{X}_{yy}^I)$  και  $(X_{yy}^E, \dot{X}_{yy}^E)$  είναι τα ζεύγη για τις θέσεις και τις ταχύτητες των σταθμών σε κάθε  $yy$  υλοποίηση των δύο συστημάτων, ITRS και ETRS89, αντίστοιχα.

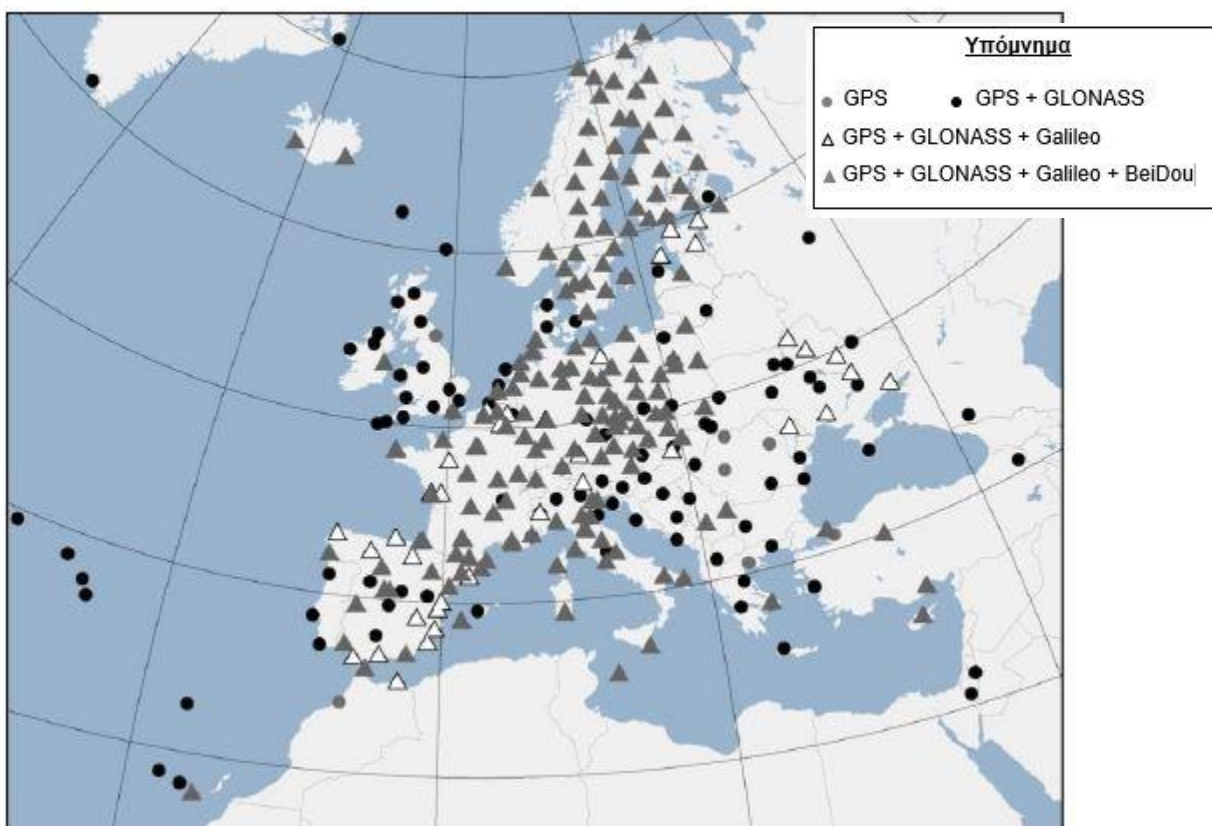
Αξίζει να σημειωθεί ότι ο ορισμός του ETRS89 δεν αναφέρεται σε καμιά περίπτωση στην κατακόρυφη κίνηση του σταθμού (που μπορεί να υπολογιστεί ως και 1 cm/yr σε περιοχές που παρατηρείται το φαινόμενο Postglacial Rebound). Επομένως, οι κατακόρυφες ταχύτητες είναι ίδιες στα αντίστοιχα πλαίσια του ITRS και ETRS89. Επίσης, πρέπει να σημειωθεί ότι ενώ αφαιρείται η παγκόσμια ταχύτητα της ευρασιατικής πλάκας στο ITRF<sub>yy</sub>, υπάρχουν κάποιες υπολειπόμενες ταχύτητες που μπορεί να είναι αρκετά μεγάλες σε σεισμικές περιοχές μεγάλων παραμορφώσεων.

## 1.7. Το Δίκτυο Μόνιμων Σταθμών της EUREF (EPN)

Το Δίκτυο Μόνιμων Σταθμών της EUREF (EUREF Permanent Network - EPN) είναι ένα δίκτυο μόνιμων σταθμών GNSS που δημιουργήθηκε το 1995 με πρωταρχικό σκοπό την υποστήριξη και βελτίωση της συντήρησης του Ευρωπαϊκού Επίγειου Συστήματος Αναφοράς (ETRS89) και των διαδοχικών υλοποιήσεων του (Bruyninx, Legrand, Fabian, & Pottiaux, 2019). Παρόμοια με την IGS, το EPN βασίζεται σε εθελοντικές συνεισφορές. Περισσότεροι από 130 φορείς σε όλη την Ευρώπη συμμετέχουν στο EPN. Οι σταθμοί του δικτύου μεταφορτώνουν δεδομένα σε μορφή RINEX (Receiver Independent Exchange Format) στα κέντρα δεδομένων του δικτύου (Data Centres - DC), τα οποία σε μόνιμη βάση αρχειοθετούν τα δεδομένα και τα διαθέτουν δωρεάν προς όλους τους χρήστες. Δεδομένα πραγματικού χρόνου του δικτύου διανέμονται μέσω τριών περιφερειακών αναμεταδοτών ενώ τα κέντρα ανάλυσης λαμβάνουν τα δεδομένα για τον υπολογισμό

των θέσεων και ταχυτήτων ακριβείας των σταθμών στο ETRS89, όπως επίσης και της τροποσφαιρικής καθυστέρησης. Αν και το δίκτυο αρχικά σχεδιάστηκε για την συντήρηση του πλαισίου αναφοράς, το EPN έχει πλέον καταστεί πολύτιμο για ένα πλήθος επιστημονικών εφαρμογών, όπως η μαθηματική πρόγνωση του καιρού, η παρακολούθηση της ιονόσφαιρας αλλά και των παραμορφώσεων του εδάφους.

Το δίκτυο παρακολούθησης EPN αυξήθηκε από τους 35 λειτουργικούς σταθμούς, που διέθεταν ημερήσια δεδομένα σε μορφή RINEX το 1996, σε περισσότερους από 330 σταθμούς αναφοράς GNSS το 2019 (Σχήμα 3). Όλοι οι σταθμοί παρέχουν ημερήσια δεδομένα, όμως το 97% των σταθμών παρέχουν επιπλέον ωριαία δεδομένα ενώ το 55% των σταθμών παρέχουν δεδομένα σε πραγματικό χρόνο. Επίσης, το 30% των σταθμών του δικτύου EPN ανήκουν και στο δίκτυο της IGS, εξασφαλίζοντας έτσι την ομογενοποίηση των προτύπων λειτουργίας των δύο δικτύων. Τέλος, 33 Ευρωπαϊκές Υπηρεσίες συμμετέχουν στο δίκτυο EPN, εκ των οποίων το 33% είναι πανεπιστήμια, το 28% είναι ερευνητικοί/διαστημικοί Οργανισμοί, το 36% είναι χαρτογραφικές Υπηρεσίες ενώ το δίκτυο συμπληρώνεται με ένα μικρό αριθμό ιδιωτικών εταιρειών. Η EUREF στοχεύοντας να διαδραματίσει ένα πρωταγωνιστικό ρόλο στον εκσυγχρονισμό των δικτύων μόνιμων σταθμών GNSS, προωθεί την εγκατάσταση δεκτών ικανών να παρατηρούν δορυφόρους των συστημάτων GLONASS, Galileo και BeiDou. Έτσι, μέχρι το 2019, το 95% των σταθμών του δικτύου παρατηρούν δορυφόρους του συστήματος GLONASS, το 65% Galileo και το 53% BeiDou εκτός φυσικά από το σύστημα GPS.



Σχήμα 3 - Το δίκτυο EPN (Ιούνιος 2019)  
(Πηγή: Bruyninx et al., 2019)



## 1.8. Οι υλοποιήσεις του ETRS89

Χρησιμοποιώντας τις παραπάνω εξισώσεις (1.2 και 1.3) ένα πλαίσιο ETRF<sub>yy</sub> μπορεί να προέλθει κατευθείαν από το αντίστοιχο ITRF<sub>yy</sub>, επιλέγοντας 6 παραμέτρους: τις τρεις συνιστώσες του διανύσματος μετάθεσης  $T_{yy}$  και τους τρεις ρυθμούς περιστροφής  $\dot{R}_{1,yy}, \dot{R}_{2,yy}, \dot{R}_{3,yy}$  (Altamimi Z. , 2018). Συγκεκριμένα, η παράμετρος  $T_{yy}$  θα έπρεπε να τίθεται μηδέν κάθε φορά που ένα ETRF<sub>yy</sub> προέρχεται από ένα ITRF<sub>yy</sub> σύμφωνα με την πρώτη συνθήκη του ETRS89 (περί ευθυγράμμισης μεταξύ του ETRS89 και του ITRS την εποχή 1989.0). Ωστόσο, στην πράξη η συνθήκη αυτή ικανοποιήθηκε μόνο για τον προσδιορισμό του ETRF89, που θεωρείται η πρώτη υλοποίηση του ETRS89. Στα επόμενα πλαίσια, το διάνυσμα  $T_{yy}$  υπολογίστηκε με βάση διαφορές στην αρχή του συστήματος ανάμεσα στο ITRF89 και των επόμενων ITRF επιλύσεων. Μετά την δημοσίευση του ITRF2000, τα επόμενα ITRF<sub>yy</sub> ως προς την αρχή του συστήματος παρουσιάζουν μεγαλύτερη σταθερότητα. Ειδικότερα, η εκτιμώμενη ακρίβεια και σταθερότητα της αρχής του συστήματος για το ITRF2014, όπως αντικατοπτρίζεται από το επίπεδο συμφωνίας με το ITRF2008, είναι της τάξης των 3 mm την εποχή 2010.0 και λιγότερο από 0.2 mm/yr στην κλίμακα του χρόνου. Έτσι, προτάθηκε ένα καινούργιο πλαίσιο ETRF2014 όπου οι συνιστώσες του διανύσματος  $T_{yy}$  επανακαθορίζονται ως μηδενικές, ώστε η αρχή του συστήματος να ευθυγραμμιστεί με αυτή του ITRF2014.

Λαμβάνοντας υπόψιν τα παραπάνω δεδομένα ακρίβειας ως προς την αρχή του συστήματος και την κλίμακα του ITRF2014 και τη σημασία βελτιστοποίησης της υλοποίησης του ETRS89 με βάση αυτό, το Ψήφισμα υπ' αριθμόν 1 της EUREF, το 2017, καλεί το Διοικητικό Συμβούλιο της EUREF (EUREF Governing Board – GB) να καταστήσει διαθέσιμες όλες τις παραμέτρους προσδιορισμού του ETRF2014 καθώς επίσης και την πλήρη σειρά παραμέτρων μετασχηματισμού μεταξύ των διαφόρων εκδόσεων ITRF και ETRF (Πίνακας 3). Το ίδιο ψήφισμα αναγνωρίζει τις διαφορετικές απαιτήσεις όσον αφορά τις εθνικές υλοποιήσεις του ETRS89 και σέβεται τις αποφάσεις των κρατών να υιοθετήσουν την υλοποίηση που προτιμούν. Έτσι, η υιοθέτηση του ETRF2014 μπορεί να προτιμηθεί για εφαρμογές υψηλής ακρίβειας και καλύτερη συνοχή με το υψηλής ακρίβειας ITRF2014 ενώ το ETRF2000 μπορεί να λαμβάνεται υπόψιν για σκοπούς γεωαναφοράς όπου οι συμφωνίες για υλοποιήσεις με γειτονικά κράτη είναι πολύ σημαντικές. Οι διαφορές στις συντεταγμένες μεταξύ του ETRF2014 και του ETRF2000 μπορεί να ανέρχονται στα 7cm (Altamimi Z. , 2018).

Πίνακας 3 - Παράμετροι μετασχηματισμού από το ITRF<sub>yy</sub> στο ETRF<sub>yy</sub> την εποχή 1989.0 και οι ρυθμοί μεταβολή τους ανά έτος. (Πηγή: Altamimi, 2018)

ETRF <sub>yy</sub>	T1 mm	T2 mm	T3 mm	D 10 <sup>-9</sup>	R1 mas	R2 mas	R3 mas
ETRF2014	0.0	0.0	0.0	0.00	0.000	0.000	0.000
rates	0.0	0.0	0.0	0.00	0.085	0.531	-0.770
ETRF2005	56.0	48.0	-37.0	0.00	0.000	0.000	0.000
rates	0.0	0.0	0.0	0.00	0.054	0.518	-0.781
ETRF2000	54.0	51.0	-48.0	0.00	0.000	0.000	0.000
rates	0.0	0.0	0.0	0.00	0.081	0.490	-0.792
ETRF97	41.0	41.0	-49.0	0.00	0.000	0.000	0.000
rates	0.0	0.0	0.0	0.00	0.200	0.500	-0.650
ETRF96	41.0	41.0	-49.0	0.00	0.000	0.000	0.000
rates	0.0	0.0	0.0	0.00	0.200	0.500	-0.650
ETRF94	41.0	41.0	-49.0	0.00	0.000	0.000	0.000
rates	0.0	0.0	0.0	0.00	0.200	0.500	-0.650
ETRF93	19.0	53.0	-21.0	0.00	0.000	0.000	0.000
rates	0.0	0.0	0.0	0.00	0.320	0.780	-0.670
ETRF92	38.0	40.0	-37.0	0.00	0.000	0.000	0.000
rates	0.0	0.0	0.0	0.00	0.210	0.520	-0.680
ETRF91	21.0	25.0	-37.0	0.00	0.000	0.000	0.000
rates	0.0	0.0	0.0	0.00	0.210	0.520	-0.680
ETRF90	19.0	28.0	-23.0	0.00	0.000	0.000	0.000
rates	0.0	0.0	0.0	0.00	0.110	0.570	-0.710
ETRF89	0.0	0.0	0.0	0.00	0.000	0.000	0.000
rates	0.0	0.0	0.0	0.00	0.110	0.570	-0.710

### 1.9. Εθνικά Πλαίσια Αναφοράς (στατικά, ημι-κινηματικά, κινηματικά)

Η πλειοψηφία των εθνικών πλαισίων αναφοράς που χρησιμοποιούνται σήμερα είναι στατικά, ευθυγραμμισμένα σε μια σταθερή εποχή (ή μια εποχή αναφοράς) στην υλοποίηση ενός ITRF και βασίζονται σε παθητικά σημεία αναφοράς, οι συντεταγμένες των οποίων έχουν μετρηθεί μια φορά και συνήθως διατηρούνται σταθερές από τότε. Όλα τα γεωχωρικά δεδομένα αναφέρονται στο συγκεκριμένο τοπικό ή εθνικό πλαίσιο και δεν υπάρχει καμιά χρονική εξέλιξη για τις συντεταγμένες και συνήθως καμιά πληροφορία για την εποχή των μετρήσεων. Έτσι, η ακρίβεια αυτών των πλαισίων αναφοράς (και των γεωχωρικών δεδομένων που εξαρτώνται απ' αυτά) υποβαθμίζεται με την πάροδο του χρόνου, ιδιαίτερα σε σχέση με ένα παγκόσμιο πλαίσιο αναφοράς (Poutanen & Häkli, 2018). Πιο συγκεκριμένα, τα συστήματα GNSS χρησιμοποιούν τροχιακά μοντέλα που ορίζονται στα πλαίσια αναφοράς ITRF ή WGS84. Ως συνέπεια αυτού, η ακριβής θέση μέσα σ' αυτά τα πλαίσια θα αλλάξει σε συνάρτηση με τον χρόνο εξαιτίας τεκτονικών διεργασιών και άλλων πηγών παραμορφώσεων όπως η καθίζηση και ο ερπυσμός του εδάφους. Αν δεν πραγματοποιηθεί προσδιορισμός ακριβείας της θέσης (μέσω ενός τοπικού δικτύου μόνιμων σταθμών ή με ένα μετασχηματισμό του σημείου αναφοράς) ο χρήστης θα παρατηρήσει τη θέση των σταθερών σημείων (σ' ένα τοπικό πλαίσιο αναφοράς) να αλλάζει τακτικά μέσα στον χρόνο.

Οι κλασσικές επίγειες γεωδαιτικές μέθοδοι μέτρησης προσφέρουν υψηλή ακρίβεια σε τοπικό επίπεδο με μόνο τις τοπικές στρεβλώσεις να μπορούν να επηρεάσουν τις μετρήσεις. Ωστόσο, οι σύγχρονες διαστημικές γεωδαιτικές μέθοδοι, και κυρίως τα συστήματα GNSS, μπορούν να προσφέρουν καλή ακρίβεια σε παγκόσμιο επίπεδο και έτσι αποκαλύπτουν ή επηρεάζονται από μεγάλης κλίμακας στρεβλώσεις ή μετακινήσεις όπως οι τεκτονικές κινήσεις των πλακών. Στην περίπτωση ενός παραμορφωμένου πεδίου και των σταθερών συντεταγμένων των σημείων αναφοράς, οι συντεταγμένες νέων σημείων θα επηρεαστούν όταν εξαρτηθούν από αυτά τα στατικά σημεία αναφοράς. Με αυτόν τον τρόπο, λαμβάνοντας υπόψη την αυξανόμενη ακρίβεια στις μετρήσεις και τις απαιτήσεις των χρηστών, προκύπτει ότι οι παρατηρήσεις GNSS μπορεί να παρουσιάζουν υψηλότερη ακρίβεια σε σχέση με το πλαίσιο αναφοράς στο οποίο έχουν υπολογισθεί οι συντεταγμένες. Ενώ λοιπόν, οι τεκτονικές πλάκες μετακινούνται αργά πάνω στον γήινο μανδύα, η μετακίνηση αυτή είναι αρκετά γρήγορη ώστε να εισαγάγει σφάλματα στην επεξεργασία μιας βάσης με στατικό ή κινηματικό δορυφορικό εντοπισμό, αν ο ρυθμός κίνησης είναι υψηλός και υπάρχει μεγάλη χρονική απόσταση μεταξύ των μετρήσεων και της εποχής αναφοράς του πλαισίου.

Σε πολλές περιοχές κοντά στα όρια των τεκτονικών πλακών όπως στην Χιλή, την Ιαπωνία, την Κίνα και την Ελλάδα η υιοθέτηση ενός στατικού πλαισίου αναφοράς σ' εθνικό επίπεδο δεν είναι κατάλληλη (Stanaway, 2014). Στις περιοχές αυτές, το μέγεθος των παραμορφώσεων στα όρια των πλακών μπορεί να είναι της τάξης κάποιων cm/yr μεταξύ δύο σταθμών στο εθνικό δίκτυο και να εμφανίζονται πιθανώς κάποια μέτρα παραμόρφωσης μετά από μεγάλους σεισμούς. Ειδικά όσον αφορά τον ελλαδικό χώρο, λόγω της πολυπλοκότητας που παρουσιάζει τόσο σε τεκτονικό όσο και σε γεωλογικό επίπεδο έχει πραγματοποιηθεί ένα πλήθος εργασιών που μελετούν είτε μεμονωμένες περιοχές με κλασσικές ή και δορυφορικές μεθόδους (Billiris et al., 1991; Avallone et al., 2004; Floyd et al., 2010) είτε ολόκληρο τον ελλαδικό χώρο (Hollenstein, Müller, Geiger, & Kahle, 2008; Χατζηνίκος, 2013; Bitharis, Fotiou, Pikridas, & Rossikopoulos, 2016; Papadopoulos et al., 2020), επιβεβαιώνοντας τον παραπάνω ισχυρισμό. Εξάλλου, ο χρόνος ζωής και η εγκυρότητα ενός τέτοιου στατικού πλαισίου αναφοράς εξαρτάται από το μέγεθος των τεκτονικών κινήσεων καθώς επίσης και την ακρίβεια των τεχνικών των μετρήσεων που χρησιμοποιήθηκαν (σε συνδυασμό με τις τότε απαιτήσεις ακρίβειας). Σταδιακά το πλαίσιο αναφοράς γίνεται εξαιρετικά ανακριβές σε σχέση με τις προσδοκίες των χρηστών. Μια επιλογή βελτίωσης της ακρίβειας αποτελεί η συχνή ανανέωση του πλαισίου μετρώντας το δίκτυο των παθητικών σταθμών. Ωστόσο, σ' αυτή την περίπτωση, τα γεωχωρικά δεδομένα πρέπει να μετασχηματιστούν στο καινούργιο πλαίσιο, καθιστώντας αυτήν την διαδικασία αργή και δαπανηρή. Ανάλογα με τις απαιτήσεις ακριβείας μπορεί να υπολογιστεί ο χρόνος που θα απαιτηθεί για την ανανέωση ολόκληρου του πλαισίου αναφοράς αλλά σε περιοχές που οι μετατοπίσεις είναι πολύ μεγάλες ή απότομες ακόμα και οι συχνές ενημερώσεις του πλαισίου μπορεί να μην είναι επαρκείς. Μια άλλη επιλογή είναι να ληφθούν υπόψη οι τεκτονικές κινήσεις στο εθνικό πλαίσιο αναφοράς υιοθετώντας ένα καινούργιο ημι-κινηματικό ή κινηματικό πλαίσιο αναφοράς.

Βασικός παράγοντας υλοποίησης της παραπάνω επιλογής είναι η ύπαρξη και χρήση ενός δικτύου Μόνιμων Σταθμών Αναφοράς (Continuously Operating Reference Stations – CORS). Οι σταθμοί του δικτύου λειτουργούν ως ενεργά σημεία αναφοράς και προσφέρουν τη δυνατότητα, με τις συνεχείς παρατηρήσεις τους, να υπολογίζονται οι συντεταγμένες τους και οι χρονοσειρές θέσης τους σ' ένα παγκόσμιο πλαίσιο αναφοράς, σε πραγματικό χρόνο. Από την πλευρά των χρηστών, ένα δίκτυο CORS με δυνατότητες εντοπισμού, όπως ο κινηματικός εντοπισμός πραγματικού χρόνου μέσω διαδικτύου (network-RTK), παρέχει ακρίβειες επιπέδου cm, αρκετά πιο εύκολα και οικονομικά αποδοτικότερα σε σχέση με τις παραδοσιακές μετρήσεις. Ωστόσο, για να αξιοποιηθούν πλήρως οι δυνατότητες ακρίβειας του συστήματος θα πρέπει να είναι γνωστές

οι ακριβείς συντεταγμένες των σταθμών αναφοράς σχεδόν σε πραγματικό χρόνο, στο ίδιο παγκόσμιο πλαίσιο αναφοράς που χρησιμοποιούν οι δορυφόροι GNSS, δηλαδή πρακτικά στο τελευταίο ITRF. Οι κύριες διαφορές μεταξύ ενός κινηματικού και ενός ημι-κινηματικού πλαισίου αναφοράς εγκινται στον τρόπο που υπολογίζονται οι συντεταγμένες μετά τις παρατηρήσεις και στο αν ο ορισμός του πλαισίου αναφοράς βασίζεται σε ενεργά σημεία αναφοράς ή σε παθητικά (Routanen & Häkli, 2018). Συγκεκριμένα, οι συντεταγμένες και στα δύο πλαίσια υπολογίζονται σε ένα κινηματικό (παγκόσμιο) πλαίσιο αναφοράς στην εποχή των παρατηρήσεων και ενώ στο κινηματικό πλαίσιο, όλες οι συντεταγμένες διατηρούνται σε συνάρτηση με το χρόνο και την εποχή της μέτρησης, στο ημι-κινηματικό οι συντεταγμένες μετασχηματίζονται σε μια προγενέστερη σταθερή εποχή αναφοράς παρέχοντας τη δυνατότητα ενσωμάτωσης γεωχωρικών δεδομένων με ακρίβεια, για μεγάλες χρονικές περιόδους (Stanaway, 2014).

Γενικότερα, σε περιπτώσεις που οι τεκτονικές κινήσεις είναι γνωστές σε ικανοποιητικό επίπεδο, αυτή η πληροφορία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αύξηση της χρονικής διάρκειας χρήσης του ισχύοντος πλαισίου αναφοράς. Έτσι, αντί να ανανεώνεται τακτικά ένα στατικό πλαίσιο αναφοράς, η διάρκεια ζωής του μπορεί να επεκταθεί με την υιοθέτηση της πληροφορίας των τεκτονικών κινήσεων. Με αυτή τη προσέγγιση μπορεί να οριστεί ένα ημι-κινηματικό πλαίσιο αναφοράς (Routanen & Häkli, 2018). Ο δορυφορικός εντοπισμός πραγματοποιείται σε ένα κινηματικό πλαίσιο αναφοράς, όπως το ITRF2014, στην εποχή των παρατηρήσεων ενώ ο μετασχηματισμός από την εποχή και το πλαίσιο των παρατηρήσεων στο στατικό πλαίσιο αναφοράς πραγματοποιείται μέσω της πληροφορίας των παραμορφώσεων. Μ' αυτό το τρόπο, παρέχεται η δυνατότητα σύνδεσης με ακρίβεια μεταξύ του παγκόσμιου και του εθνικού πλαισίου ενώ είναι προφανές ότι για να αναχθούν οι μετρήσεις από τη μια εποχή στην άλλη είναι απαραίτητο ένα ακριβές μοντέλο τεκτονικών μετακινήσεων. Επιπλέον, από την οπτική γωνία των χρηστών και των εθνικών αρχών, ένα ημι-κινηματικό πλαίσιο αναφοράς δεν επιφέρει σημαντικές αλλαγές σε σχέση με το στατικό καθώς οι χρήστες θα έχουν, σταθερές, χρονικά ανεξάρτητες συντεταγμένες στο εθνικό πλαίσιο αναφοράς. Βασική προϋπόθεση για την υλοποίηση των παραπάνω, αποτελεί η επένδυση σ' ένα πυκνό δίκτυο CORS και σε ερευνητικές εργασίες που θα εξασφαλίσουν τα κατάλληλα μοντέλα τεκτονικών κινήσεων, συμπελαμβανομένων των απότομων και μη γραμμικών κινήσεων.

Η εναλλακτική πρόταση για αντικατάσταση ενός στατικού πλαισίου αναφοράς έγκειται στην υιοθέτηση ενός κινηματικού (παγκόσμιου) πλαισίου αναφοράς για όλες τις δραστηριότητες γεωαναφοράς. Στα κινηματικά πλαίσια οι συντεταγμένες εξαρτώνται από τον χρόνο και η θέση ενός σημείου προσδιορίζεται από συντεταγμένες, ταχύτητες και την αντίστοιχη εποχή αναφοράς. Έτσι, εφόσον χρησιμοποιηθεί ως γεωδαιτικό υπόβαθρο σε εθνικό επίπεδο, όλες οι εγγραφές γεωχωρικών δεδομένων οφείλουν να συνοδεύονται τουλάχιστον από συντεταγμένες στον τρισδιάστατο χώρο μαζί με την εποχή αναφοράς τους και ιδανικά από ταχύτητες οι οποίες για αντικείμενα χωρίς συνεχή παρακολούθηση, θα έχουν εξαχθεί από μοντέλα ταχυτήτων (Routanen & Häkli, 2018). Γίνεται λοιπόν αντιληπτό ότι ένα μοντέλο ταχυτήτων υψηλής ακρίβειας, όπως και στο ημι-κινηματικό πλαίσιο είναι απαραίτητο ώστε να είναι εφικτός ο μετασχηματισμός των συντεταγμένων στις διάφορες εποχές για σύγκριση και ανάλυση των δεδομένων. Η διαφορά έγκειται στο γεγονός ότι ο εντοπισμός των σημείων που έχουν πρόσφατα μετρηθεί, ή μετρώνται σε πραγματικό χρόνο (όπως ένα όχημα) σε ένα παγκόσμιο πλαίσιο αναφοράς δεν μετασχηματίζονται σε άλλο πλαίσιο αναφοράς ή εποχή αλλά αντίθετα τα αναγκαία γεωχωρικά δεδομένα (για παράδειγμα τα δεδομένα του δρόμου στην περίπτωση του εντοπισμού του αυτοκινήτου) μετασχηματίζονται από την εποχή των παρατηρήσεων στην τωρινή.

Σε πρακτικό επίπεδο, η υιοθέτηση ενός κινηματικού πλαισίου αναφοράς προϋποθέτει σημαντικές αλλαγές στις υποδομές των γεωχωρικών δεδομένων. Από τεχνική άποψη, θα πρέπει τα

συστήματα στα οποία πραγματοποιούνται οι εγγραφές να παρέχουν τη δυνατότητα για εγγραφή της εποχής των παρατηρήσεων και της αντίστοιχης ταχύτητας ή αυτή να υπολογίζεται από ένα ενημερωμένο πεδίο ταχυτήτων. Από πρακτική άποψη, με τις μεταβαλλόμενες συντεταγμένες εγείρονται θέματα νομικής φύσεως στη χρήση του κτηματολογίου και στα ζητήματα ιδιοκτησίας γης. Τέλος, ένα ακόμα πρόβλημα αφορά τα φυσικά υψόμετρα, καθώς ακόμα δεν υφίσταται παγκόσμιο σύστημα υψομέτρων για κινηματικά υψόμετρα.

Από τα παραπάνω γίνεται προφανές ότι η επισήμανση της εποχής των μετρήσεων είναι υποχρεωτική ως η τέταρτη συντεταγμένη για την επίτευξη μεγαλύτερης ακρίβειας εντοπισμού. Επίσης, είναι πολύ σημαντική η γνώση των κινήσεων των σημείων αναφοράς σε συνδυασμό με την εποχή αναφοράς των συντεταγμένων τους, καθώς οι επιπτώσεις των τεκτονικών μετακινήσεων είναι αδύνατο να υπολογιστούν χωρίς την αντίστοιχη χρονική επισήμανση. Σε διαφορετική περίπτωση οι αβεβαιότητες των συντεταγμένων μπορεί να γίνουν πολύ χειρότερες από τις αναμενόμενες. Τελικά, διαφαίνεται ότι η γνώση των ταχυτήτων είναι απαραίτητη για κάθε είδους πλαίσιο αναφοράς. Αρχικά, για το στατικό, παρέχει μια εκτίμηση των παραμορφώσεων (ή της τρέχουσας ακρίβειας του πλαισίου), για το κινηματικό, καθιστά εφικτό τον μετασχηματισμό των γεωχωρικών δεδομένων στην πρόσφατη ή κοινή εποχή για ανάλυση ή σύγκριση των δεδομένων και για το ημι-κινηματικό παρέχει τη δυνατότητα μετασχηματισμού των συντεταγμένων από ένα παγκόσμιο πλαίσιο αναφοράς σε ένα εθνικό/τοπικό στατικό πλαίσιο (ή αντίστροφα) (Routanen & Häkli, 2018). Το γεγονός αυτό, υποδηλώνει την αξία ύπαρξης, για τον ελλαδικό χώρο, ενός αξιόπιστου και ενημερωμένου πεδίου ταχυτήτων, ανεξάρτητα από τον χρόνο υιοθέτησης ενός νέου πλαισίου αναφοράς (ημι-κινητικού ή κινηματικού) ως εθνικό πλαίσιο, που από την προαναφερθείσα βιβλιογραφική διερεύνηση κρίνεται επιβεβλημένη.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Προδιαγραφές Ίδρυσης Μόνιμου Σταθμού GNSS

---

### 2.1. Εισαγωγή

Ένα Δίκτυο Μόνιμων Σταθμών Αναφοράς GNSS διαδραματίζει θεμελιώδη και ουσιαστικό ρόλο στη δημιουργία, τον ορισμό και τη χρησιμότητα ενός σύγχρονου εθνικού πλαισίου αναφοράς. Το φάσμα των εργασιών στις οποίες μπορεί να εφαρμοστεί είναι πολύ ευρύ από τοπογραφικές μετρήσεις κτηματολογικού χαρακτήρα μέχρι απομακρυσμένο έλεγχο αγροτικών οχημάτων στην γεωργία, μηχανημάτων στον κατασκευαστικό κλάδο και πλοήγησης μέσω μαζικής μεταφοράς. Είναι προφανές πως οι παραπάνω εργασίες μπορούν να πραγματοποιηθούν υπό την προϋπόθεση επίτευξης υψηλής ακρίβειας τόσο του εθνικού πλαισίου που υλοποιείται μέσω του Δικτύου Μόνιμων Σταθμών όσο και των τελικών προϊόντων που παρέχονται στους χρήστες είτε σε πραγματικό χρόνο είτε για μεταγενέστερη επεξεργασία. Η τοποθεσία που θα επιλεγεί για την εγκατάσταση των σταθμών του δικτύου, ο εξοπλισμός που θα χρησιμοποιηθεί και η βαθμονόμηση του, όπως επίσης και η μεθοδολογία που θα ακολουθηθεί κατά την διαδικασία ίδρυσης των σταθμών του δικτύου, λειτουργίας και παροχής των δεδομένων είναι κάποιοι από τους βασικούς παράγοντες οι οποίοι εξασφαλίζουν την υψηλή ποιότητα του δικτύου και των προϊόντων του. Οι προδιαγραφές οι οποίες ρυθμίζουν τους παραπάνω παράγοντες περιγράφονται σε ειδικά εγχειρίδια τα οποία καταρτίζονται από τους λειτουργούς ή τους διαχειριστές του εκάστοτε δικτύου ανάλογα με τις απαιτήσεις και τις ανάγκες των χρηστών του δικτύου.

Συγκεκριμένα, η IGS έχει εκδώσει μια σειρά οδηγιών, προτύπων και συμβάσεων (IGS, 2020; IGS, 2015; Combrinck & Schmidt, 1998) οι οποίες αν και προσδιορίζουν τα χαρακτηριστικά των σταθμών του δικτύου της, εντούτοις αποτελούν ένα βασικό πλαίσιο κατευθύνσεων για κάθε μόνιμο σταθμό GNSS. Αντίστοιχα η EUREF έχει εκδώσει ένα πλαίσιο οδηγιών για την ίδρυση και λειτουργία των σταθμών του δικτύου EPN (EPN Central Bureau, 2019), βασισμένες στις οδηγίες της IGS. Τέλος, η UNAVCO, μια μη κερδοσκοπική οργάνωση με πανεπιστημιακή οργάνωση που δραστηριοποιείται σε διάφορους τομείς επιστημών της Γης και ειδικότερα στον τομέα της δορυφορικής γεωδαισίας, έχει εκδώσει μια σειρά συμπληρωματικών προδιαγραφών και συμβάσεων για τους μόνιμους σταθμούς GNSS με βασικό προσανατολισμό τις ανάγκες και τις απαιτήσεις των ΗΠΑ. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι καθώς η συμμετοχή στους παραπάνω οργανισμούς είναι εθελοντική, η θέσπιση αυστηρών κανόνων δεν συνάδει με τον χαρακτήρα τους. Ωστόσο, όλοι οι συμμετέχοντες σταθμοί πρέπει να συμφωνούν στην τήρηση συγκεκριμένων συμβάσεων και προτύπων με σκοπό την διασφάλιση της ποιότητας του δικτύου. Έτσι, η διάρθρωση των οδηγιών οργανώνεται σ' ένα πλαίσιο αυστηρών οδηγιών που θα πρέπει να υιοθετηθούν από όλους και από ένα πλαίσιο προτεινόμενων οδηγιών, οι οποίες αν και εφαρμόζονται λιγότερα αυστηρά, είναι επιθυμητές.

Στο πλαίσιο του παρόντος κεφαλαίου θα αναφερθούν οι προδιαγραφές και διαδικασίες που πρέπει να εφαρμοσθούν και να τηρηθούν για την ίδρυση και λειτουργία ενός μόνιμου σταθμού GNSS εφαρμόζοντας ως βάση τα εγχειρίδια που έχουν εκδοθεί από την IGS και την EUREF και τα οποία κρίνεται ότι καλύπτουν τις απαιτήσεις ίδρυσης ενός μόνιμου σταθμού GNSS και στον

ελλαδικό χώρο. Ακόμα, όπως συνίσταται και από την IGS, παρατίθενται συμπληρωματικές οδηγίες που έχουν εκδοθεί από την UNAVCO και καλύπτουν κάποια εξειδικευμένα θέματα κυρίως ως προς τον τύπο εγκατάστασης του σταθμού.

## **2.2. Προδιαγραφές τοποθεσίας και κατασκευής της εγκατάστασης**

### **2.2.1. Εισαγωγή**

Η τοποθεσία και η αντίστοιχη κατασκευή στην οποία τοποθετείται κυρίως η κεραία με το αντίστοιχο σημείο επισήμανσης αποτελούν βασικούς παράγοντες που καθορίζουν την επιτυχία της εγκατάστασης ενός γεωδαιτικού οργάνου, με βάση την ακρίβεια του τελικού προϊόντος. Σε γενικές γραμμές αυτό που απαιτείται είναι η καλύτερη δυνατή σταθερότητα της εγκατάστασης υπό οποιεσδήποτε συνθήκες. Βέβαια, εκτός της σταθερότητας, μια τοποθεσία θα πρέπει να αξιολογηθεί με βάση και άλλα προαπαιτούμενα, όπως ο χαμηλός ορίζοντας αποκοπής, οι πιθανές πηγές πολλαπλών διαδρομών του σήματος (multipathing) και οι απειλές βανδαλισμού του, τα οποία θα καθορίσουν αν η τοποθεσία είναι τελικά κατάλληλη για εγκατάσταση του σταθμού. Στην ουσία, η φύση της κάθε τοποθεσίας ορίζει σε μεγάλο βαθμό και το τύπο της εγκατάστασης που απαιτείται.

Από τη σχετική βιβλιογραφία, μπορούν να προσδιορισθούν οι εξής σημαντικοί παράγοντες τοποθεσίας και κατασκευής της εγκατάστασης ενός μόνιμου σταθμού GNSS, που χρήζουν περαιτέρω ανάλυσης και κρίνουν την επιτυχή έκβαση της εγκατάστασης και λειτουργίας του:

#### **α. Ορίζοντας αποκοπής**

Ως ορίζοντας αποκοπής ορίζονται εκείνες οι περιοχές του ορίζοντα, οι οποίες αν και μπορούν να παρατηρηθούν από την κεραία, εντούτοις αυτό εμποδίζεται, με αποτέλεσμα το σήμα του δορυφόρου να μην μπορεί να φτάσει σ' αυτήν (Combrinck & Schmidt, 1998). Ιδανικά, δεν θα πρέπει να υπάρχει κανένα εμπόδιο στον ορίζοντα, ωστόσο πρακτικά είναι σπάνιο να ισχύει αυτή η συνθήκη σε συνδυασμό με τις υπόλοιπες προδιαγραφές ενός σταθμού. Η ύπαρξη σημαντικών εμποδίων κάτω από ορισμένο ύψος ή σε συγκεκριμένες γωνίες μπορούν να περιορίσουν τη χρησιμότητα των συλλεχθέντων δεδομένων και έτσι να εγκλωβίσουν την κοινότητα των χρηστών σε συγκεκριμένες επιλογές αντί να ικανοποιήσουν τις ανάγκες μιας ευρύτερης ομάδας.

«Συμπαγή» αντικείμενα, όπως βουνά και κτήρια, δέντρα ή κατασκευές μπορούν να εμποδίσουν το σήμα του δορυφόρου. Σ' αυτή την περίπτωση, το σήμα θα χαθεί για το χρονικό διάστημα που ο δορυφόρος θα βρίσκεται πίσω ή κάτω από το εμπόδιο όπως για παράδειγμα σε μια βαθιά κοιλάδα ή εντός των ορίων μεγάλων πόλεων, όπου αυτό το διάστημα συνεπάγεται την απώλεια σημαντικού όγκου πληροφορίας. Σε περίπτωση ύπαρξης βλάστησης ή άλλων λιγότερο συμπαγών αντικειμένων, η απώλεια πληροφορίας μπορεί να είναι μικρότερη ανάλογα με την διαφάνεια του εμποδίου προς το σήμα του δορυφόρου. Επίσης, η ύπαρξη ή ο βαθμός που ένα αντικείμενο εμποδίζει το σήμα του δορυφόρου μπορεί να μεταβάλλεται στο χρόνο. Έτσι, φυλλοβόλα δέντρα, που χάνουν τα φύλλα τους, θα εμποδίζουν σε λιγότερο βαθμό σε σχέση με τα αειθαλή, πυκνά δέντρα. Επίσης, ο τύπος της βλάστησης (π.χ. πυκνό τροπικό δάσος ή αραιό δάσος κωνοφόρων δέντρων) είναι σημαντικός καθώς καθορίζει τον τύπο του δέκτη και της κεραίας που θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν. Κάποιοι συνδυασμοί δεκτών – κεραιών είναι σχεδιασμένοι ώστε να

λαμβάνουν σήμα κάτω από κάλυψη δέντρων ενώ άλλοι όχι. Ακόμα, τα δέντρα προφανώς μπορούν να μεγαλώσουν και έτσι με τη πάροδο του χρόνου να αποτελέσουν εμπόδιο ενώ παρόμοια η αστική ανάπτυξη ή αλλαγές στον περιβάλλοντα χώρο του σταθμού μπορούν να επηρεάσουν τον ορίζοντα αποκοπής αποτελώντας σημαντικά εμπόδια.

Η επιλογή λοιπόν, μιας τοποθεσίας με την ελάχιστη ύπαρξη εμποδίων αλλά και αβεβαιότητας, για την αλλαγή της υφιστάμενης έλλειψης αυτών με την πάροδο του χρόνου, αποτελεί βασική διαδικασία για την ίδρυση ενός νέου σταθμού. Συμπληρωματικά, κατά τη διαδικασία αναγνώρισης της τοποθεσίας μπορεί να προσδιορισθεί η έκταση της αναμενόμενης ανάπτυξης των όμορων ιδιοκτησιών, τα υφιστάμενα ή αναμενόμενα μελλοντικά εμπόδια και αφού σημειωθούν, με κατάλληλο λογισμικό να πραγματοποιηθεί πρόβλεψη του ορίζοντα αποκοπής και της επίδρασής του στη συλλογή των δεδομένων και άρα και στο εύρος των εργασιών που μπορεί να καλύψει ο συγκεκριμένος σταθμός. Σε κάθε περίπτωση, οι αλλαγές που μπορεί να πραγματοποιηθούν με την πάροδο του χρόνου θα πρέπει να σημειώνονται σε αρχείο καταγραφής.

### β. Φαινόμενο πολυανάκλασης

Το φαινόμενο της πολυανάκλασης μπορεί να προκαλέσει προβλήματα στις μετρήσεις GPS, η σοβαρότητα των οποίων εξαρτάται από την έκταση και τον τύπο της πολυανάκλασης (Combrinck & Schmidt, 1998). Το φαινόμενο της πολυανάκλασης αναφέρεται σε σήματα που φτάνουν στην κεραία μέσω πολλαπλών διαδρομών, οι οποίες προκαλούνται από ανακλαστικές επιφάνειες στον περιβάλλοντα χώρο της κεραίας. Η πολυανάκλαση προκαλεί παρεμβολές ή παραμόρφωση και έτσι υπεισέρχονται σφάλματα κυρίως στις ψευδο-αποστάσεις από τον κώδικα αλλά και στη φάση του φέροντος σήματος.

Το φαινόμενο της πολυανάκλασης στο λαμβανόμενο σήμα μπορεί να προκληθεί από διάφορους τύπους ανακλώμενων επιφανειών. Προφανώς, τα κτήρια ή ηλιακοί συσσωρευτές αποτελούν εξαιρετικά ανακλαστικές επιφάνειες, ωστόσο διακυμάνσεις στα επίπεδα της πολυανάκλασης μπορούν να προκληθούν από επιφάνειες όπως το νερό, όπου οι ανακλαστικές ιδιότητες του αλλάζουν με την πάροδο του χρόνου. Παρομοίως, η συσσώρευση χιονιού ή πάγου σε κοντινές κατασκευές ή στον περιβάλλοντα χώρο αλλάζουν τις ιδιότητες του ανακλώμενου σήματος σε συνάρτηση με το χρόνο ενώ οι μεταλλικές κατασκευές, όπως υψηλοί πύργοι κεραιών ή μεταλλικοί φράχτες μπορούν να προκαλέσουν διάχυτη σκέδαση στο εκπεμπόμενο σήμα. Τέλος, το ύψος της εγκατάστασης και της κεραίας μπορεί να επηρεάσει την ποιότητα του ληφθέντος σήματος (Anderson, et al., 2000). Η συχνότητα των παρεμβολών πολυανάκλασης (που προκαλείται από ανάκλαση του σήματος στο έδαφος) είναι άμεση συσχετισμένη με το ύψος της κεραίας πάνω από το επίπεδο του εδάφους. Για πολύ υψηλές εγκαταστάσεις κεραίας (πάνω από 3m), το σήμα πολυανάκλασης μπορεί να αλλάξει πολύ γρήγορα. Σε μικρότερα ύψη, η αργή μεταβολή του σήματος της πολυανάκλασης μπορεί να μην εντοπιστεί για μικρά χρονικά διαστήματα και έτσι να μην αφαιρεθεί από τις παρατηρήσεις, προκαλώντας τελικά συστηματικά σφάλματα στον προσδιορισμό της θέσης. Έτσι, ένα ύψος κεραίας της τάξης του 1.5m θεωρείται ότι είναι η βέλτιστη επιλογή μεταξύ των ακραίων θέσεων οι οποίες ελλοχεύουν τα προαναφερθέντα προβλήματα.

Η τοποθέτηση της εγκατάστασης της κεραίας και η παρακολούθηση πιθανών αλλαγών στον περιβάλλοντα χώρο είναι πολύ σημαντική. Πριν από την κατασκευή της εγκατάστασης στην τοποθεσία, θα πρέπει να συλλεχθούν δεδομένα χρησιμοποιώντας ίδιου τύπου εξοπλισμό με αυτόν που πρόκειται να εγκατασταθεί και όσο το δυνατόν εγγύτερα στο πιθανό σημείο εγκατάστασης. Στη συνέχεια, ένα σύνολο δεδομένων, για παράδειγμα παρατηρήσεις τουλάχιστον 72 ωρών, μπορεί να αναλυθεί ώστε να διαπιστωθεί η επίδραση της πολυανάκλασης στο σημείο των



μετρήσεων. Επιπλέον, μπορούν να δοκιμαστούν διάφορα ύψη κεραίας ώστε να επιλεγθεί το βέλτιστο για το σταθμό αναφοράς ενώ παράλληλα μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε προστατευτικοί θόλοι κεραίας (dome, radome) είτε υλικά που απορροφούν την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Επίσης, είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι τα ανακλώμενα κύματα που προέρχονται από επιφάνειες κάτω από την κεραία, όπως το έδαφος ή η στέψη ενός τσιμεντένιου πυλώνα μπορούν να προκαλέσουν προβλήματα και θα πρέπει να ληφθούν μέτρα μείωσης της πολυανάκλασης από πηγές κοντά στον σταθμό (Combrinck & Schmidt, 1998).

Συγκεκριμένα, σε περίπτωση ύπαρξης μεγάλου κενού μεταξύ της στέψης της εγκατάστασης και της κεραίας είναι πιθανή η δημιουργία μιας κοιλότητας συντονισμού (resonance cavity). Σ' αυτή την περίπτωση σήματα GNSS παγιδεύονται και ανακλώνται στον περιβάλλοντα χώρο, με αποτέλεσμα η κεραία να λαμβάνει σήματα ως αποτέλεσμα πολυανάκλασης. Έτσι, κάθε κενό κάτω από την κεραία πρέπει να ελαχιστοποιείται. Περιορίζοντας το πλάτος της εγκατάστασης της κεραίας σε μέγεθος μικρότερο από τη διάμετρο του επιπέδου της κεραίας (ground plane), οι ανακλάσεις σήματος από την κορυφή της εγκατάστασης ελαχιστοποιούνται. Αν το πλάτος της εγκατάστασης υπερβαίνει αυτό της κεραίας το σήμα μπορεί να ανακλαστεί στην επιφάνεια της εγκατάστασης και στη συνέχεια να προσκρούσει στην άκρη της κεραίας, συντελώντας έτσι στην πολυανάκλαση του σήματος, ειδικά όταν αυτό προέρχεται από δορυφόρους υψηλά στον ορίζοντα (Anderson, et al., 2000)

#### γ. Ύπαρξη πηγών ραδιοκυμάτων

Διάφορες πηγές ραδιοκυμάτων που εντοπίζονται στην ευρύτερη περιοχή του σταθμού αναφοράς μπορεί να προκαλέσουν παρεμβολές στο σήμα των δορυφόρων που λαμβάνεται από τον δέκτη του σταθμού. Αυτές οι παρεμβολές μπορούν να εμφανιστούν ως επιπλέον θόρυβος στο σήμα, προκαλώντας μείωση της ακρίβειας των επιλύσεων του σταθμού ή ακόμα μπορούν να καταστήσουν το σταθμό μη λειτουργικό. Τέτοιες πηγές ραδιοκυμάτων αποτελούν κεραίες μετάδοσης τηλεοπτικού ή ραδιοφωνικού σήματος, κεραίες τηλεπικοινωνιακού σήματος, κεραίες ραδιοεντοπιστών και γραμμές μεταφοράς ρεύματος υψηλής τάσης.

Η συλλογή λοιπόν, πληροφορίας σχετικά με τις υφιστάμενες και μελλοντικές εγκαταστάσεις αναμεταδοτών στην περιοχή, όπως επίσης και η πιθανή χρήση φορητού εξοπλισμού μετάδοσης ραδιοκυμάτων πριν την ίδρυση του σταθμού καθίσταται επιτακτική. Ως μέθοδος αντιμετώπισης της ύπαρξης πηγών ραδιοκυμάτων μπορεί και πάλι να χρησιμοποιηθεί η συλλογή και ανάλυση παρατηρήσεων τουλάχιστον 72 ωρών, σε συνδυασμό με ένα αναλυτή φάσματος ο οποίος συνδεδεμένος με έναν διαχωριστή με την κεραία του δέκτη μπορεί να αναγνωρίσει πηγές πιθανών παρεμβολών ραδιοκυμάτων στο εύρος του φάσματος του εκπεμπόμενου από τους δορυφόρους σήματος.

#### δ. Υλικά κατασκευής

Κατά το σχεδιασμό της κατασκευής της εγκατάστασης ενός μόνιμου σταθμού GNSS θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν θέματα αντοχής των χρησιμοποιούμενων υλικών της κατασκευής. Η σταθερότητα της θέσης και ο περιβάλλον χώρος αποτελούν αναμφισβήτητα κύριες προτεραιότητες αλλά ο σταθμός θα πρέπει να είναι επίσης οικονομικά εφικτός, σχετικά εύκολος στην ίδρυση και με μεγάλη διάρκεια ζωής. Έτσι, τα υλικά κατασκευής θα πρέπει να είναι εύκολο να ανευρεθούν και να προμηθευτούν ενώ κάθε πιθανόν εξάρτημα θα πρέπει να είναι εξ' αρχής διαθέσιμο και εύκολα αντικαταστάσιμο.

Η κατασκευή της εγκατάστασης εξαρτάται από τα στοιχεία οποία τα οποία συντίθεται και έτσι τα υλικά που θα χρησιμοποιηθούν θα πρέπει να αντέχουν στην έκθεση (έκθεση στον ήλιο, βροχόπτωση, θερμοκρασιακές μεταβολές, διαβρωτικές συνθήκες εδάφους κ.τ.λ.). Πολλά υλικά δεν παρουσιάζουν μεγάλες αντοχές στις καταστροφικές επιπτώσεις αυτών των διεργασιών ενώ άλλα αντέχουν περισσότερο. Συγκεκριμένα, ανάλογα με το μέγεθος και το σχήμα της κατασκευής, η θερμική διαστολή είναι ένας σημαντικός παράγοντας που πρέπει να ληφθεί υπόψιν κατά το σχεδιασμό. Η θερμική διαστολή των υλικών μπορεί να επηρεάσει τόσο το μέγεθος όσο και το σχήμα της κατασκευής αλλάζοντας μ' αυτό τον τρόπο το ύψος και τη θέση της. Όσο υψηλότερη είναι η κατασκευή τόσο πιο επιρρεπής είναι σ' αυτές τις αλλαγές. Αλλαγές στο σχήμα της κατασκευής μπορεί να δημιουργηθούν ως αποτέλεσμα διαφορετικής θέρμανσης των σημείων της λόγω μερικής σκίασης, προκαλώντας έτσι διαστολή σε διαφορετικά μέρη της κατασκευής. Το σκυρόδεμα και το ασάλι έχουν παρόμοιους συντελεστές διαστολής (περίπου 12ppm για κάθε βαθμό °C). Για παράδειγμα, μια κατασκευή με ύψος 10m αν εκτεθεί σε θερμοκρασιακές μεταβολές 56 °C θα υποστεί μεταβολή στο ύψος, της τάξης των 6mm. Μια κατασκευή από σκυρόδεμα ή χάλυβα ύψους περίπου 2m, που θα εκτεθεί στην ίδια θερμοκρασιακή μεταβολή, θα υποστεί μια αλλαγή της τάξης του 1mm.

Όταν μια μεταλλική κατασκευή τοποθετηθεί σ' ένα περιβάλλον που περιλαμβάνει υγρασία, άλατα και οξυγόνο είναι πιθανό να παρατηρηθεί το φαινόμενο της ηλεκτρόλυσης. Ειδικά, ο συνδυασμός ανομοιογενών μετάλλων είναι ιδιαίτερα ευάλωτος σ' αυτή την διαδικασία. Οι διαβρωτικές επιδράσεις που επιφέρει η διαδικασία της ηλεκτρόλυσης μπορούν να θέσουν σε κίνδυνο την σταθερότητα της κατασκευής και έτσι θα πρέπει να ληφθούν μέτρα για την αντιμετώπισή της. Το πρόβλημα της ηλεκτρόλυσης μπορεί να αποφευχθεί επιλέγοντας του κατάλληλους τύπους μετάλλων για τις συγκεκριμένες συνθήκες της τοποθεσίας και αποφεύγοντας την συνύπαρξη ανόμοιων μετάλλων.

Συνοψίζοντας, λαμβάνοντας υπόψιν την πληθώρα των υλικών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή της εγκατάστασης ενός μόνιμου σταθμού, όπως τα διάφορα είδη μετάλλων (ανοξειδωτος χάλυβας, χάλυβας γαλβανισμένος, αλουμίνιο κ.τ.λ.), σκυρόδεμα, πέτρα και ξύλο και τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, τα όποια το κάθε ένα παρουσιάζει, θα πρέπει να επιλέγονται τα πλέον κατάλληλα υλικά ανάλογα με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά και τις ιδιότητες του κάθε σταθμού.

#### ε. Εγκατάσταση σταθμού σε κτήριο

Η εγκατάσταση ενός σταθμού σε κτήριο μπορεί να θεωρηθεί μια ασφαλής επιλογή εξαιτίας των πλεονεκτημάτων που μπορεί να παρουσιάζει ως προς την ικανοποίηση αρκετών προδιαγραφών που απαιτούνται για την ίδρυση ενός μόνιμου σταθμού GNSS, όπως η εύκολη πρόσβαση σε τροφοδοσία ρεύματος, ο καθαρός ορίζοντας, η ασφάλεια κ.α. Ωστόσο, θέματα σταθερότητας του κτηρίου και εγκαταστάσεων πηγών ραδιοκυμάτων θα πρέπει να λαμβάνονται σοβαρά υπόψιν. Η σταθερότητα του κτηρίου σε μεγάλο βαθμό εξαρτάται από το μέγεθος του κτηρίου, τη θεμελίωση του, την ηλικία και τη φύση του εδάφους στο οποίο κατασκευάστηκε. Σχετικά με τις πηγές ραδιοκυμάτων, εγκαταστάσεις μεταδόσεων VHF ή UHF μεταδοτών μπορούν να προκαλέσουν παρεμβολές στο σήμα από το δορυφόρο, γεγονός που θα υποβαθμίσει την ποιότητα του σταθμού. Επίσης, μεταλλικές κατασκευές όπως εγκαταστάσεις air condition, δεξαμενές νερού και κεραιές λήψης τηλεοπτικού σήματος μπορεί να αποτελέσουν επίσης πηγές υποβάθμισης του σήματος. Έτσι, ένα στέρεο κτήριο με ισχυρή θεμελίωση σε βράχο μπορεί να αποτελεί μια καλή επιλογή για εγκατάσταση σταθμού λαμβάνοντας πάντα υπόψιν τους περιορισμούς σταθερότητας



του και το γεγονός ότι μεγάλες κατασκευές αυξάνουν το περιθώριο αστάθειας (Combrinck & Schmidt, 1998).




Συγκεντρωτικά, μπορούν να παρουσιασθούν τα κάτωθι χαρακτηριστικά που αφορούν το σχεδιασμό της εγκατάστασης και της ίδρυσης ενός μόνιμου σταθμού GNSS σε μορφή πίνακα (Πίνακας 4) όπως επίσης και προτεινόμενες κατασκευές σύμφωνα με τις οδηγίες της Unavco (Πίνακας 5):

Πίνακας 4 - Οδηγίες για το σχεδιασμό και την εγκατάσταση ενός σταθμού GNSS  
(Πηγή: IGS, 2019)

<b>Επιθυμητά Χαρακτηριστικά Εγκατάστασης</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Σταθερότητα σε συνάρτηση με το χρόνο</li> <li>• Σταθερότητα μ' ένα συγκεκριμένο επίπεδο ακρίβειας</li> <li>• Μηδενική παρεμβολή στο σήμα</li> <li>• Χαμηλό κόστος</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Απλός σχεδιασμός</li> <li>• Εύκολη εγκατάσταση</li> <li>• Αντίσταση στη διάβρωση</li> <li>• Μεγάλη διάρκεια ζωής</li> </ul>
<b>Παράμετροι που επηρεάζουν την εγκατάσταση</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Κλιματικές επιπτώσεις</li> <li>• Φαινόμενο Frost Action (Διαδοχικές καταστάσεις ψύξης - απόψυξης)</li> <li>• Συστολή και διαστολή βραχώδους εδάφους εξαιτίας αλλαγών του επιπέδου υγρασίας</li> <li>• Αστάθεια της κλίσης του εδάφους</li> <li>• Συμπίεση του εδάφους</li> <li>• Ύπαρξη κοιλοτήτων λόγω καρστικών σχηματισμών</li> <li>• Ύπαρξη βράχου, ο τύπος και η κατάστασή του</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Διάβρωση</li> <li>• Ημερήσιες και εποχικές μεταβολές της θερμοκρασίας</li> <li>• Ανθρώπινη παρέμβαση</li> <li>• Παρεμβολές ραδιοκυμάτων</li> <li>• Παρουσία ρηγμάτων, θραυσμάτων και ζωνών διάτμησης</li> <li>• Υδροφόρος ορίζοντας</li> <li>• Εμπόδια</li> <li>• Βανδαλισμός</li> </ul>
<b>Χαρακτηριστικά καλής τοποθεσίας για εγκατάσταση</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Υψηλής ποιότητας βράχος σε μικρό βάθος</li> <li>• Καθαρός ορίζοντας</li> <li>• Ασφαλής από βανδαλισμό</li> <li>• Απουσία ανακλαστικών επιφανειών (φράχτες, μεταλλικοί στύλοι κ.τ.λ.)</li> <li>• Μικρή απόσταση από τον δέκτη</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Εύκολη πρόσβαση</li> <li>• Πρόσβαση στα δεδομένα μέσω τηλεφωνικής γραμμής ή σύνδεσης διαδικτύου</li> <li>• Σταθερή τροφοδοσία ηλεκτρικού ρεύματος</li> <li>• Απουσία τεκτονικής αστάθειας</li> <li>• Ελεγχόμενη βλάστηση</li> </ul>
<b>Καλές πρακτικές στο σχεδιασμό της εγκατάστασης</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Περιορισμός σημάτων πολυανάκλασης επιλέγοντας το βέλτιστο πλάτος και ύψος κεραίας από το επίπεδο του εδάφους</li> <li>• Εξέταση ύπαρξης πηγών παρεμβολών από ραδιοσυχνότητες στο περιβάλλοντα χώρο πριν την εγκατάσταση του σταθμού</li> <li>• Ελαχιστοποίηση των κοιλοτήτων συντονισμού μειώνοντας τον κενό χώρο μεταξύ της κορυφής της εγκατάστασης και της κεραίας</li> <li>• Θεμελίωση της εγκατάστασης σε βράχο για καλύτερη σταθερότητα</li> <li>• Βελτιστοποίηση της ορατότητας της κεραίας πάνω από εμπόδια</li> <li>• Προστασία υπέρτασης από κεραυνό</li> <li>• Εγκατάσταση κατακόρυφων και οριζόντιων κλισιόμετρων όταν απαιτείται υψηλή ακρίβεια (μεγαλύτερη του mm)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ελαχιστοποίηση της ποσότητας μετάλλου κοντά στην κεραία</li> <li>• Σχεδιασμός της εγκατάστασης να είναι ψηλότερη από τα επίπεδα χιονόπτωσης</li> <li>• Ικανό βάθος θεμελίωσης της εγκατάστασης ώστε να μην επηρεάζεται από το φαινόμενο frost action</li> <li>• Χρησιμοποίηση υλικών με χαμηλούς συντελεστές θερμικής διαστολής σε περιπτώσεις αναμενόμενων μεγάλων θερμοκρασιακών μεταβολών</li> <li>• Αποφυγή τοποθέτησης της κεραίας GNSS σε απόσταση 24.4 cm ή πολλαπλάσιων αυτής για αποφυγή της ανάκλασης σε οριζόντια επιφάνεια.</li> <li>• Εφαρμογή θερμομόνωσης σε περιπτώσεις αναμενόμενης θερμικής διαστολής</li> <li>• Αποφυγή κοντινών γραμμών υψηλής τάσης</li> </ul>

Πίνακας 5 - Τύποι και χαρακτηριστικά εγκαταστάσεων  
(Πηγή: UNAVCO, 2020)

Πρότυπο	Τύπος	Σταθερότητα	Κόστος Εγκατάστασης (€)	Χρόνος Εγκατάστασης (ημέρες)	Εργατικό Δυναμικό (άτομα)	Υπέδαφος	Περιβαλ/κο Αποτύπωμα
	Deep drilled braced	Υψηλή	7000-13000	2-4	3-4	Βράχος, Ασύνδετο έδαφος	Υψηλό
	Shallow drilled braced	Υψηλή	700+	1-3	2-3	Βράχος	Ήπιο

	Concrete pillar	Μεσαία	450-1800	1-3	2-3	Βράχος, Ασύνδετο έδαφος	Ήπιο
	Shallow foundation mast	Μεσαία προς Υψηλή	150	1-2	1	Βράχος	Χαμηλό
	Κτήριο	Μεσαία προς Υψηλή	150-200	1	1	Βράχος	Χαμηλό

## 2.2.2. Προδιαγραφές βάσει οδηγιών της IGS

Ακολουθώντας τη διάρθρωση των προδιαγραφών της IGS (IGS, 2015), στον Πίνακα 6 παρατίθενται ο κωδικός κάθε οδηγίας με την αντίστοιχη οδηγία και ο χαρακτηρισμός αυτής, αν πρόκειται για αυστηρή ή επιθυμητή οδηγία ή οδηγία αναβάθμισης του σταθμού. Επίσης, σε όποιες προδιαγραφές προβλέπεται περαιτέρω επεξήγηση, έχει καταγραφεί ως «Σημείωση», σύμφωνα με τις οδηγίες της IGS (IGS, 2020).

Πίνακας 6 - Προδιαγραφές τοποθεσίας της εγκατάστασης σύμφωνα με την IGS  
(Πηγή: IGS, 2015, 2020)

Κωδικός	Οδηγία	Χαρακτηρισμός
2.1.2	<p>Η τοποθεσία της εγκατάστασης του σταθμού πρέπει να είναι ασφαλής μακροπρόθεσμα, ώστε αλλαγές στην τοποθεσία εγκατάστασης κυρίως της κεραίας να είναι εξαιρετικά απίθανες στο κοντινό μέλλον (χωρίς προγραμματισμένη κατασκευή, κατεδάφιση, κλπ. στην περιοχή).</p> <p>Σημείωση: Οι σταθμοί της IGS πρέπει να έχουν μια μόνιμη θέση, σχεδιασμένη στην επιλεγμένη τοποθεσία, στην οποία θα είναι εγκατεστημένη η κεραία GNSS για το προσεχές μέλλον. Επιπρόσθετα σημεία στήριξης για την κεραία είναι επιθυμητά, σε περίπτωση προγραμματισμένων αναβαθμίσεων στο μέλλον. Ο κάθε σταθμός IGS θα πρέπει να παραμένει στην ίδια τοποθεσία για όλη τη διάρκεια της λειτουργίας του.</p>	Αυστηρή Οδηγία
2.1.3	Ο σταθμός πρέπει να σχεδιαστεί και να εγκατασταθεί για συνεχή και μόνιμη λειτουργία.	Αυστηρή Οδηγία
2.1.4	Ο σταθμός λειτουργεί υπό την εποπτεία ενός θεσμοθετημένου ιδρύματος, το οποίο έχει ως αντικείμενο επιστημονικές ή κατασκευαστικές εφαρμογές στο πλαίσιο των συστημάτων GNSS. Ο σταθμός θα πρέπει να λειτουργεί κυρίως για δημόσιο όφελος από μια γεωδαιτική ή διαστημική υπηρεσία ή έναν επιστημονικό ή ερευνητικό οργανισμό.	Αυστηρή Οδηγία
2.1.5	<p>Ο σταθμός θα πρέπει να συνδέεται με ένα εθνικό ή περιφερειακό γεωδαιτικό δίκτυο.</p> <p>Σημείωση: Η παραπάνω οδηγία εγγυάται ότι υπάρχει ισχυρό τοπικό/εθνικό/διεθνές ενδιαφέρον για τη σωστή διατήρηση της τοποθεσίας και εποπτείας των προδιαγραφών του σταθμού με την πάροδο του χρόνου και δεν υπάρχει πιθανότητα εγκατάλειψης ή χρήσης της τοποθεσίας για διαφορετικούς λόγους.</p>	Αυστηρή Οδηγία

2.1.6	<p>Αφού πραγματοποιηθεί η εγκατάστασή του σταθμού, κάθε ενέργεια που γίνεται δεν θα πρέπει να διαταράσσει τον εξοπλισμό και την διαμόρφωση του, εξαιρουμένων ενεργειών για την αναβάθμιση των δυνατοτήτων του σταθμού, σύμφωνα με τις παρούσες οδηγίες.</p> <p>Σημείωση: Οι μόνιμοι σταθμοί της IGS πρέπει να έχουν μεγάλης διάρκειας χρονοσειρές από συνεχόμενες σταθερές μετρήσεις με όσο το δυνατόν λιγότερες διακοπές ή αλλαγές στη διαμόρφωση του σταθμού.</p>	Αυστηρή Οδηγία
2.1.15	<p>Η εγκατάσταση του σταθμού θα πρέπει να συμμορφώνεται με τις βέλτιστες πρακτικές που παρατηρούνται από τους κύριους γεωδαιτικούς οργανισμούς. Τυπικοί σταθμοί που μπορούν να κατασκευαστούν είναι μια διάτρητη κωνική δομή τρίποδα ή μια κατασκευή τύπου πυλώνα. Οι οροφές ή οι εγκαταστημένες σε κατασκευές κεραίες πρέπει να αποφεύγονται εκτός εξαιρετικών καταστάσεων, οι οποίες θα πρέπει να αναφέρονται στο Κεντρικό Γραφείο πριν την ολοκλήρωση εγκατάστασης του σταθμού της IGS.</p> <p>Σημείωση: Η τοποθέτηση της κεραίας των σταθμών θα πρέπει να πραγματοποιείται με τέτοιο τρόπο ώστε να αποφεύγονται οι ανακλαστικές επιφάνειες ακριβώς κάτω από το επίπεδο της κεραίας, ειδικά αυτές με διαστάσεις μεγαλύτερων της κεραίας. Οι διαχειριστές των σταθμών και οι υπηρεσίες θα πρέπει να τοποθετούν τις κεραίες GNSS σε σταθερές εγκαταστάσεις, σε τοποθεσίες που δεν επηρεάζονται από τον άνεμο, δονήσεις από δρόμο κ.τ.λ. Περισσότερες λεπτομέρειες αναφέρονται στη διεύθυνση:  <a href="https://kb.igs.org/hc/en-us/articles/202094816">https://kb.igs.org/hc/en-us/articles/202094816</a> (Monumentation Recommendations).</p>	Αυστηρή Οδηγία
2.1.16	<p>Η θεμελίωση της εγκατάστασης του σταθμού θα πρέπει να εκτείνεται έως το βράχο ή να είναι σε αρκετό βάθος στο υπέδαφος ώστε να είναι απομονωμένη από επιφανειακές επιδράσεις όπου ο βράχος δεν είναι προσβάσιμος.</p>	Αυστηρή Οδηγία
2.1.17	<p>Ο σταθμός δεν πρέπει να μετακινηθεί σε διαφορετική εγκατάσταση εκτός αν είναι άκρως απαραίτητο. Η μετακίνηση σε νέα εγκατάσταση θα απαιτούσε την ίδρυση καινούργιου σταθμού με ξεχωριστό αναγνωριστικό κωδικό και αρχείο καταγραφής.</p> <p>Σημείωση: Πρόσθετες εγκαταστάσεις μπορούν να χρησιμοποιούνται για παράλληλο εξοπλισμό. Τα δεδομένα μεγάλων χρονικών περιόδων σε σταθερή τοποθεσία είναι αυτά που προσδίδουν αξία στον σταθμό στο δίκτυο της IGS. Εάν είναι απαραίτητη μια μετακίνηση θα πρέπει να πραγματοποιείται σύμφωνα με τις παρούσες οδηγίες.</p>	Αυστηρή Οδηγία

2.1.23	<p>Ο σταθμός θα πρέπει να έχει έναν μοναδικό 4-ψήφιο κωδικό, μετά από καθοδήγηση του Κεντρικού Γραφείου (Central Bureau). Ο διαχειριστής του σταθμού μπορεί να ελέγξει την διαθεσιμότητα των κωδικών από την ιστοσελίδα του οργανισμού SOPAC:  <a href="http://sopac.ucsd.edu/checkSiteID.shtml">http://sopac.ucsd.edu/checkSiteID.shtml</a></p> <p>Σημείωση: Η ύπαρξη του 4-ψήφιου κωδικού για τους σταθμούς GNSS είναι απαραίτητη για την ένταξη στο δίκτυο της IGS. Για την λήψη του κωδικού υπάρχουν οδηγίες στη διεύθυνση : <a href="http://kb.igs.org/hc/en-us/articles/202014573">http://kb.igs.org/hc/en-us/articles/202014573</a> (New Site Checklist).</p>	Αυστηρή Οδηγία
2.1.24	<p>Ο σταθμός πρέπει να έχει έναν μοναδικό κωδικό IERS DOMES από την IGN (Institut Géographique National) για την επισήμανση του μόνιμου σταθμού. Λεπτομέρειες για την αίτηση λήψης κωδικού αναφέρονται στην διεύθυνση:  <a href="http://itrf.ensg.ign.fr/domes_request.php">http://itrf.ensg.ign.fr/domes_request.php</a></p> <p>Σημείωση: Λεπτομέρειες της διαδικασίας περιγράφονται επίσης στη διεύθυνση: <a href="http://kb.igs.org/hc/en-us/articles/202014573">http://kb.igs.org/hc/en-us/articles/202014573</a> (New Site Checklist).</p>	Αυστηρή Οδηγία
2.1.25	<p>Η επισήμανση του μόνιμου σταθμού θα πρέπει να είναι κατάλληλη ώστε να είναι εφικτή η εκχώρηση ενός αριθμού IERS DOMES τύπου M, υποδεικνύοντας ότι η κεραία προσδιορίζει ένα φυσικό σημείο στην εγκατάσταση. Περισσότερες πληροφορίες για τον αριθμό DOMES στη διεύθυνση: <a href="http://itrf.ensg.ign.fr/domes_desc.php">http://itrf.ensg.ign.fr/domes_desc.php</a></p> <p>Σημείωση: Ο αριθμός IERS DOMES τύπου M αναφέρεται σ' ένα σημείο της εγκατάστασης δηλαδή του πυλώνα, του στύλου, της ορειχάλκινης επισήμανσης κ.τ.λ. Πληροφορίες αναφέρονται στη διεύθυνση: <a href="https://kb.igs.org/hc/en-us/articles/202014573">https://kb.igs.org/hc/en-us/articles/202014573</a> (New Site Checklist), για την ορθή εκχώρηση του αριθμού DOMES.</p>	Αυστηρή Οδηγία
2.1.39	<p>Ο διαχειριστής του σταθμού δεν πρέπει να αλλάξει τον εξοπλισμό του σταθμού (ειδικά την κεραία) για όσο το δυνατό μεγαλύτερη χρονική περίοδο (χρόνια αν είναι εφικτό), ειδικά αν πρόκειται για σταθμό που χρησιμοποιείται για την υλοποίηση του πλαισίου αναφοράς της IGS., εκτός περιπτώσεων επισκευών λόγω κάποιας καταστροφής,</p> <p>Σημειώνεται: Οι αλλαγές του εξοπλισμού σ' ένα σταθμό αποτελούν τη κύρια αιτία υποβάθμισης του Πλαισίου Αναφοράς. Η Ομάδα Εργασίας για το Πλαίσιο Αναφοράς (RFWG) επιλέγει έναν αριθμό σταθμών βασισμένη σ' αυτές τις οδηγίες και τη σταθερότητα των σταθμών ως προς τις συντεταγμένες και τις ταχύτητές τους ώστε να μπορούν να χρησιμοποιούνται στην υλοποίηση του ITRF στο μέλλον. Σε περίπτωση επιλογής του σταθμού από την RFWG, η IGS επικοινωνεί με τον διαχειριστή του σταθμού ώστε να του επισημάνει τις υποχρεώσεις του.</p>	Αυστηρή Οδηγία
2.2.6	<p>Ένας σταθμός θα πρέπει να έχει οριστεί ως ο κύριος IGS σταθμός σε τοποθεσίες όπου υπάρχουν περισσότεροι από ένα σταθμό GNSS. Σε περιπτώσεις όπου πολλαπλοί δέκτες GNSS έχουν την ίδια κεραία, κάθε</p>	Επιθυμητή Οδηγία



	<p>δέκτης GNSS θεωρείται ξεχωριστός σταθμός και πρέπει να διαθέτει διαφορετικό 4-ψήφιο κωδικό.</p> <p>Σημείωση: Εξαίρεση αποτελούν ιδιαίτερες καταστάσεις, όπως πολύ απομονωμένες περιοχές, όπου προτείνεται να υπάρχει μόνο ένας σταθμός IGS σε κάθε τοποθεσία, ώστε να αποφεύγεται η επανάληψη δεδομένων από την ίδια τοποθεσία.</p>	
2.2.7	<p>Η ύπαρξη επιπρόσθετων εγκαταστάσεων στην τοποθεσία είναι επιθυμητή, για την διεξαγωγή δοκιμών και τη λειτουργία εξοπλισμού παράλληλα κατά τη διάρκεια εργασιών αναβάθμισης του σταθμού.</p> <p>Σημείωση: Με την ύπαρξη επιπρόσθετων διαθέσιμων εγκαταστάσεων στην τοποθεσία, ο προγραμματισμένος εξοπλισμός για αναβαθμίσεις και αλλαγές μπορεί να χρησιμοποιηθεί ακριβώς όπως προβλέπεται από τις παρούσες οδηγίες.</p>	Επιθυμητή Οδηγία
2.2.22	<p>Η κεραία θα πρέπει να τοποθετηθεί με τέτοιο τρόπο ώστε να ελαχιστοποιούνται οι ανακλάσεις του σήματος (φαινόμενο πολυανάκλασης), μακριά από ανακλαστικές επιφάνειες ή τοποθετώντας παθητική προστασία ακριβώς κάτω από την κεραία (υλικό απορρόφησης ραδιοκυμάτων κ.τ.λ.). Εάν κρίνεται απαραίτητο, οδηγίες παρέχονται και από το Κέντρικό Γραφείο της IGS.</p> <p>Σημείωση: Η IGS παρακολουθεί τις τιμές πολυανάκλασης (MP values) ώστε να ανιχνεύσει προβλήματα και να ενημερώσει αντίστοιχα τον διαχειριστή του σταθμού.</p>	Επιθυμητή Οδηγία
2.2.27	<p>Στην τοποθεσία του σταθμού θα πρέπει να υπάρχουν επιπλέον εγκαταστάσεις (προτείνονται τρεις), διαθέσιμες για μελλοντικές έρευνες, αναβαθμίσεις εξοπλισμού κ.τ.λ.</p>	Επιθυμητή Οδηγία
2.3.7	<p>Όταν η μετακίνηση ενός σταθμού συνταύτισης ή υλοποίησης του Πλαισίου Αναφοράς σε μια διαφορετική εγκατάσταση της τοποθεσίας είναι αναπόφευκτη, απαιτούνται παράλληλες μετρήσεις για όσο χρονικό διάστημα είναι δυνατόν (3 μήνες ή περισσότερο), μεταξύ της παλιάς και της νέας θέσης του σταθμού.</p> <p>Σημείωση: Τα σύνολα δεδομένων την περίοδο αλληλεπικάλυψης των μετρήσεων είναι πολύ σημαντικά για την επίτευξη καλής σύνδεσης μεταξύ της παλιάς και της νέας εγκατάστασης και πρέπει να είναι διαθέσιμα στην IGS.</p>	Οδηγία Αναβάθμισης

### 2.2.3. Προδιαγραφές βάσει των οδηγιών της EUREF

Οι οδηγίες οι οποίες έχουν εκδοθεί από την EUREF σχετικά με τις προδιαγραφές της εγκατάστασης και της τοποθεσίας των μόνιμων σταθμών του δικτύου EPN ακολουθούν σε γενικές γραμμές τις οδηγίες της IGS οι οποίες σε αρκετές περιπτώσεις έχουν μεταφερθεί αυτούσιες. Στον Πίνακα 7 παρουσιάζονται οι προδιαγραφές της εγκατάστασης ενός σταθμού του δικτύου EPN, αναφέροντας την αντίστοιχη οδηγία της IGS, στις περιπτώσεις όπου υπάρχει σύμπτωση των προδιαγραφών. Η πολιτική που ακολουθείται από την EUREF ως προς τις προδιαγραφές είναι αντίστοιχη της IGS καθώς κάποιες από αυτές αν και δεν μπορούν να χαρακτηριστούν ως υπο-χρεωτικές, εντούτοις η συμμόρφωση προς αυτές αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση για την απο-δοχή ενός προτεινόμενου σταθμού στο δίκτυο. Αυτές οι προδιαγραφές χαρακτηρίζονται ως «Αυ-στηρές», ενώ αντίστοιχα ως «Επιθυμητές» χαρακτηρίζονται προδιαγραφές οι οποίες δεν αποτελούν απαραίτητη προϋπόθεση για την είσοδο ενός σταθμού στο EPN.

Πίνακας 7 - Προδιαγραφές τοποθεσίας της εγκατάστασης σύμφωνα με την EUREF  
(Πηγή: EPN Central Bureau, 2019)

Κωδικός	Οδηγία	Χαρακτηρισμός
2.2.1	Οδηγία 2.1.25 της IGS	Αυστηρή Οδηγία
2.2.2	Η επισήμανση του σημείου θα πρέπει να πληροί τις τυπικές απαιτήσεις για μια γεωδαιτική εγκατάσταση πρώτης τάξης σχετικά με την σταθερότητα, την ανθεκτικότητα, τη μακροχρόνια συντήρηση, την τεκμηρίωση και την πρόσβαση σ' αυτήν. Η περιγραφή της επισήμανσης θα πρέπει να τεκμηριώνεται πλήρως στο αρχείο καταγραφής του σταθμού EPN.	Αυστηρή Οδηγία
2.2.3	Τα εμπόδια θα πρέπει να είναι ελάχιστα πάνω από τις 5° γωνία ύψους, ενώ η παρατήρηση δορυφόρων και σε μικρότερες γωνίες είναι επιθυμητή όποτε αυτό είναι εφικτό.	Αυστηρή Οδηγία
2.2.4	Η ποιότητα του λαμβανόμενου σήματος θα πρέπει να ελέγχεται, ειδικά όσον αφορά παρεμβολές εξωτερικών πηγών σήματος όπως radars, λαμβάνοντας επίσης υπόψιν το φαινόμενο της πολυανάκλασης.	Αυστηρή Οδηγία
2.2.5	Οδηγία 2.2.22 της IGS	Αυστηρή Οδηγία
2.2.6	Οι τοπικές δεσμεύσεις με άλλες επισημάνσεις στην ίδια τοποθεσία θα πρέπει να προσδιορίζονται στο πλαίσιο ITRF με ακρίβεια 1mm και στις τρεις διαστάσεις. Οι μετατοπίσεις θα πρέπει να	Αυστηρή Οδηγία

	διατυπώνονται στη μορφή dX, dY, dZ, όπου X, Y, Z είναι οι γεωκεντρικές καρτεσιανές συντεταγμένες στο ITRF.	
2.2.7	Οδηγία 2.1.17 της IGS	Αυστηρή Οδηγία
2.2.8	Σε περίπτωση αναβάθμισης ενός σταθμού από μια ακατάλληλη κατασκευή σε μια καλύτερη, με μετακίνηση της αρχικής επισημάνσης, τότε αυτή σηματοδοτεί την έναρξη λειτουργίας ενός καινούργιου σταθμού με βασική προϋπόθεση την τήρηση όλων των προδιαγραφών για νέους σταθμούς.	Αυστηρή Οδηγία
2.2.9	Οδηγία 2.3.7 της IGS	Αυστηρή Οδηγία
2.3.1	Οδηγία 2.2.27 της IGS	Αυστηρή Οδηγία
2.3.2	Η συνταύτιση με άλλες γεωδαιτικές τεχνικές όπως SLR, VLBI, DORIS ή βαρυτήμετρα είναι άκρως επιθυμητή.	Επιθυμητή Οδηγία
2.3.4	Άλλα επιστημονικά συστήματα που βασίζονται σε ακριβή προσδιορισμό θέσης, όπως εργαστήρια μέτρησης χρόνου (timing labs), συνιστώνται όπου απαιτείται.	Επιθυμητή Οδηγία
2.3.5	Οι τοπικές δεσμεύσεις τριών διαστάσεων ανάμεσα στα σημεία των οργάνων GNSS και των σημείων των συνεγκατεστημένων οργάνων (π.χ. DORIS, SLR, VLBI, βαρύτητας, παλίρροιας, χωροστάθμησης) θα πρέπει να μετρώνται όσο το δυνατόν συχνότερα (ιδανικά κάθε 2 χρόνια) με ακρίβεια 1mm και να αναφέρονται στο ITRF <sup>1</sup>	Αυστηρή Οδηγία

<sup>1</sup> Για περισσότερες λεπτομέρειες ο αναγνώστης μπορεί να ανατρέξει στις παρούσες οδηγίες (EPN Central Bureau, 2019) και στις οδηγίες που έχουν εκδοθεί από το European Combined Geodetic Network (ECGN): "ECGN Standards for Local Ties" ([http://www.epncb.oma.be/documentation/guidelines/ECGN\\_local\\_ties\\_standards.pdf](http://www.epncb.oma.be/documentation/guidelines/ECGN_local_ties_standards.pdf))

## 2.3. Προδιαγραφές εγκατάστασης και τύπων κεραιών GNSS

### 2.3.1. Εισαγωγή

Το είδος της εγκατάστασης και ο τύπος της κεραίας που θα χρησιμοποιηθούν κατά την ίδρυση ενός μόνιμου σταθμού GNSS αποτελούν κρίσιμα στοιχεία του σταθμού. Η κεραία ενός δέκτη λαμβάνει το εξασθενημένο δορυφορικό σήμα από όλους τους ορατούς δορυφόρους, το ενισχύει με τον προενισχυτή και το διοχετεύει εσωτερικά στο δέκτη για περαιτέρω ενίσχυση και επεξεργασία (Φωτίου & Πικριδάς, 2012).

Κάποιες από τις σημαντικές ιδιότητες των κεραιών που μπορούν να επηρεάσουν την λειτουργικότητα και την απόδοσή τους περιλαμβάνουν τις κάτωθι (Moernaut & Urban, 2009):

➤ Κάλυψη συχνότητας: Οι καινούργιοι δέκτες GNSS μπορούν να λαμβάνουν σήμα στις ζώνες συχνοτήτων GPS L5, Galileo E5/E6 και GLONASS εκτός των παλαιότερων ζωνών GPS (Πίνακας 8) και έτσι η κεραία που τροφοδοτεί το δέκτη θα πρέπει να καλύπτει κάποιες ή όλες τις παραπάνω συχνότητες. Καθώς αυξάνονται οι απαιτήσεις για κάλυψη του εύρους της ζώνης συχνοτήτων από τις κεραίες, ο σχεδιασμός και η ανάπτυξη κεραιών με αυτές τις προδιαγραφές καθίσταται δυσκολότερος.

➤ Ευαισθησία λήψης σήματος διαφορετικής διεύθυνσης (gain pattern): Για μια κεραία εκπομπής σήματος η ευαισθησία λήψης (gain) είναι ο λόγος της έντασης της ακτινοβολίας σε μια δεδομένη κατεύθυνση προς την ακτινοβολία που θα ληφθεί εάν η ισχύς που έγινε αποδεκτή από την κεραία ακτινοβολήθηκε ισοτροπικά. Για μια κεραία λήψης, είναι ο λόγος της ισχύος που παρέχεται από την κεραία σε απόκριση ενός σήματος που λαμβάνεται από μια δεδομένη κατεύθυνση, σε σχέση μ' εκείνη που μεταδίδεται από μια υποθετική ισοτροπική κεραία αναφοράς. Η χωρική διαφοροποίηση της ευαισθησίας της κεραίας αναφέρεται ως μοτίβο (pattern) ακτινοβολίας ή μοτίβο λήψης. Ο δέκτης λειτουργεί καλύτερα με μια μικρή διαφοροποίηση της ισχύος μεταξύ των σημάτων από τους διαφορετικούς δορυφόρους που παρακολουθεί και ιδανικά η κεραία καλύπτει ολόκληρο το ημισφαίριο πάνω απ' αυτήν, χωρίς διαφοροποίηση της ευαισθησίας της.

➤ Κυκλική πόλωση: Τα διαστημικά συστήματα στην ζώνη-L τυπικά χρησιμοποιούν την κυκλική πόλωση (Circular Polarization – CP) για την μετάδοση και τη λήψη σημάτων. Ο μεταβαλλόμενος σχετικός προσανατολισμός των CP κεραιών εκπομπής και λήψης σήματος καθώς οι δορυφόροι περιστρέφονται γύρω από τη Γη, δεν προκαλεί εξασθένιση της πόλωσης όπως συμβαίνει με τα γραμμικά πολωμένα σήματα και κεραίες. Επιπλέον, η κυκλική πόλωση δεν επηρεάζεται από την επίδραση της περιστροφής Faraday που προκαλείται στην ιονόσφαιρα. Η περιστροφή Faraday επηρεάζει ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα από το διάστημα ώστε να φτάνει στην επιφάνεια της Γης με διαφορετική γωνία πόλωσης σε σχέση με αυτήν που θα έφτανε, εάν δεν υπήρχε η ιονόσφαιρα. Αυτό οδηγεί σε εξασθένιση του σήματος και δυνητικά κακή λήψη των γραμμικά πολωμένων σημάτων. Τα κυκλικά πολωμένα σήματα μπορεί να είναι δεξιόστροφα ή αριστερόστροφα. Οι δορυφόροι GNSS χρησιμοποιούν δεξιόστροφη πόλωση (RHCP) και επομένως μια GNSS κεραία θα πρέπει να είναι σχεδιασμένη για λήψη δεξιόστροφων πολωμένων σημάτων.

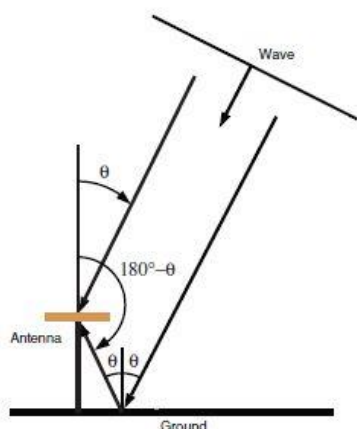
Πίνακας 8 - Ζώνες συχνοτήτων  
(Πηγή: Moernaut & Orban, 2009)

System	Frequencies (MHz)				
	L1	L2	L3	L5/E5	E6
GPS	1563–1588	1215–1240	N/A	1164–1189	N/A
GLONASS	1592–1615	1237–1257	1194–1209	N/A	N/A
Galileo	1554–1596	N/A	N/A	1145–1238	1258–1300

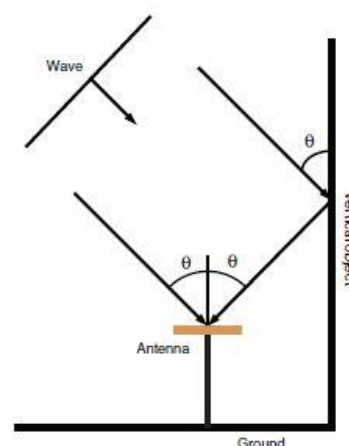
➤ Αντιμετώπιση σφάλματος πολυανάκλασης: Το φαινόμενο της πολυανάκλασης το οποίο έχει περιγραφεί και σε προηγούμενη ενότητα, έγκειται στο γεγονός της λήψης σημάτων από την κεραία τα οποία δεν προέρχονται απ' ευθείας από τον δορυφόρο αλλά από άλλες ανακλαστικές επιφάνειες, όπως το έδαφος, τα κτήρια ή άλλα εμπόδια. Συγκεκριμένα, οι βασικότερες πηγές και διευθύνσεις από τις οποίες μπορεί να προέλθει ένα σήμα πολυανάκλασης είναι οι κάτωθι:

- Το έδαφος και το σήμα να φθάσει στο κάτω τμήμα της κεραίας (Εικόνα 5).
- Το έδαφος ή ένα αντικείμενο και το σήμα να φτάσει στην κεραία σε μια χαμηλή γωνία ύψους.
- Ένα αντικείμενο και το σήμα να φθάσει στην κεραία σε μια υψηλή γωνία ύψους (Εικόνα 4).

Τα σφάλματα της πολυανάκλασης μειώνουν την ακρίβεια προσδιορισμού της θέσης και παρ' όλο που οι γεωδαιτικοί δέκτες είναι ικανοί να εξαλείψουν τα σφάλματα αυτά σε μεγάλο βαθμό, αποτελεί συνήθη πρακτική να μειώνονται και με τον κατάλληλο σχεδιασμό της κεραίας. Η τεχνική μείωσης του σφάλματος που προέρχεται από κάθε μία από τις παραπάνω πηγές και διευθύνσεις είναι διαφορετική και επιτυγχάνεται με τον προσδιορισμό και την ποσοτικοποίηση κατάλληλων χαρακτηριστικών κάθε κεραίας.



Εικόνα 5 - Σήμα πολυανάκλασης προερχόμενο από το έδαφος  
(Πηγή: Moernaut & Orban, 2009)



Εικόνα 4 - Σήμα πολυανάκλασης προερχόμενο από κάθετο αντικείμενο  
(Πηγή: Moernaut & Orban, 2009)

➤ Κέντρο φάσης: Ο προσδιορισμός της θέσης στην πλοήγηση με συστήματα GNSS σχετίζεται με το ηλεκτρικό κέντρο φάσης της κεραίας. Το κέντρο φάσης είναι το σημείο στο χώρο όπου όλες οι ακτίνες φαίνεται να προέρχονται από την (ή να συγκλίνουν στην) κεραία (Moernaut & Urban, 2009). Το ηλεκτρικό και το μηχανικό κέντρο φάσης μιας κεραίας δεν ταυτίζονται, με τις αποκλίσεις να φτάνουν μέχρι και το 1cm (Φωτίου & Πικριδάς, 2012). Επιπλέον, αν και το κέντρο φάσης θα έπρεπε να είναι ένα μοναδικό σημείο στο χώρο για όλες τις ζώνες συχνοτήτων, παρουσιάζονται πολλαπλά σημεία κέντρων φάσης ή το κέντρο φάσης φαίνεται να εξαλείφεται καθώς η συχνότητα και η γωνία παρατήρησης αλλάζουν. Έτσι, ο προσδιορισμός του κέντρου φάσης είναι πολύ σημαντικός, ειδικά για τις εφαρμογές GNSS με απαιτήσεις ακρίβειας τάξης μεγέθους mm. Οι κεραίες υψηλής ακρίβειας βαθμονομούνται κατάλληλα και οι μετατοπίσεις του κέντρου φάσης διατίθενται σε μορφή πίνακα, συχνά αναφέροντας την οριζόντια και κάθετη μετατόπιση του κέντρου για όλες τις ζώνες σε σχέση με την L1.

➤ Επίδραση στην ευαισθησία του δέκτη: Η ισχύς του σήματος από το δορυφόρο είναι της τάξης των -130 dBm. Έτσι, απαιτείται ένας πολύ ευαίσθητος δέκτης, ώστε να μπορεί να λάβει το σήμα, το οποίο ως προς την κεραία σημαίνει ότι απαιτείται η ύπαρξη ενός ενισχυτή χαμηλού θορύβου (Low Noise Amplifier - LNA) μεγάλης απόδοσης. Επιπλέον, ο ενισχυτής θα πρέπει να έχει την κατάλληλη ευαισθησία (gain) ώστε να ελαχιστοποιεί την επίδραση των μεγάλων σε μήκος ομοαξονικών καλωδίων της κεραίας, με μια τυπική τιμή να είναι της τάξεως των 30 dB. Πρέπει να σημειωθεί ότι είναι σημαντικό να υπάρχει η κατάλληλη ευαισθησία για την συγκεκριμένη εγκατάσταση. Πολύ μεγάλη ευαισθησία μπορεί να υπερφορτώσει τον δέκτη οδηγώντας τον σε μη γραμμική λειτουργία (συμπίεση), υποβαθμίζοντας την απόδοσή του. Πολύ μικρή ευαισθησία μπορεί να οδηγήσει σε απώλεια λήψης σήματος από χαμηλά ύψη παρατηρήσεως. Έτσι, οι κατασκευαστές συνήθως προσδιορίζουν την απαιτούμενη ευαισθησία του ενισχυτή για συγκεκριμένο μήκος καλωδίου και λειτουργία.

➤ Διαχείριση παρεμβολών: Αν και οι δέκτες GNSS έχουν μεγάλες δυνατότητες εξάλειψης ορισμένων θορύβων από παρεμβολές, είναι σημαντικό να διατηρούνται τα ανεπιθύμητα σήματα μακριά από τον δέκτη, όσο αυτό είναι δυνατό. Σημαντικός παράγοντας αποτελεί ο προσεκτικός σχεδιασμός της κεραίας εισάγοντας κάποια επιλεκτικότητα συχνότητας έναντι παρεμβολών σε διαφορετικές ζώνες. Οι μηχανισμοί με τους οποίους δημιουργούνται παρεμβολές από σήματα εντός του εύρους της ζώνης και εκτός από αυτή και οι οποίοι μπορούν να προκαλέσουν προβλήματα στον ενισχυτή και στο δέκτη είναι διαφορετικοί και έτσι χρήζουν και διαφορετικής αντιμετώπισης. Μια πηγή παρεμβολών εκτός εύρους ζώνης (out-of-band) είναι γενικά μια πηγή ραδιοσυχνοτήτων που λειτουργεί σε συχνότητες πέραν αυτών του συστήματος GNSS δηλαδή κεραίες εκπομπής σήματος κινητών τηλεφώνων, κινητά τηλέφωνα, κεραίες radar κτλ. ή και συνδυασμοί των παραπάνω σημάτων. Οι πηγές παρεμβολών εντός του εύρους της ζώνης (in-band) περιλαμβάνουν τις παραπάνω πηγές αλλά συνήθως προκαλούν σχετικά αδύναμες παρεμβολές οι οποίες συνήθως αντιμετωπίζονται από το δέκτη. Οι παρεμβολές από πηγές out-of-band συνήθως αντιμετωπίζονται με φίλτρα ραδιοσυχνοτήτων τα οποία όμως υποβαθμίζουν ως ένα βαθμό την απόδοση του δέκτη αυξάνοντας τις απώλειες σήματος.

### **2.3.2. Προδιαγραφές βάσει οδηγιών της IGS**

Ακολουθώντας και πάλι τις οδηγίες και τις συμπληρωματικές διευκρινήσεις από την IGS (IGS, 2015, 2020) παρατίθεται ο Πίνακας 9 με τον κωδικό κάθε προδιαγραφής και τον αντίστοιχο χαρακτηρισμό:

Πίνακας 9 – Προδιαγραφές εγκατάστασης και τύπων κεραιών σύμφωνα με την IGS  
(Πηγή: IGS, 2015, 2020)

Κωδικός	Οδηγία	Χαρακτηρισμός
2.1.12	<p>Η απόλυτη βαθμονόμηση της κεραιάς GNSS του σταθμού πρέπει να είναι διαθέσιμη στο αρχείο igs08.atx. Οι βαθμονομήσεις πεδίου με μετατροπή δεν επιτρέπονται πλέον σε νέους ή αναβαθμισμένους σταθμούς.</p> <p>Σημείωση: Όλοι οι σταθμοί θα πρέπει να έχουν καλά βαθμονομημένες κεραιές και συγκεκριμένα η απόλυτη βαθμονόμηση είναι απαιτούμενη για την είσοδο και την παραμονή στο δίκτυο της IGS<sup>1</sup></p>	Αυστηρή Οδηγία
2.1.13	<p>Η κεραία GNSS του σταθμού θα πρέπει να είναι οριζοντιωμένη και προσανατολισμένη στον πραγματικό βορρά, χρησιμοποιώντας τον καθορισμένο δείκτη της κεραιάς.</p> <p>Σημείωση: Για την εφαρμογή των απόλυτων βαθμονομήσεων της κεραιάς, οι οποίες έχουν τόσο αζιμουθιακές όσο και υψομετρικές διορθώσεις, είναι απαραίτητο η κεραία GNSS να είναι οριζοντιωμένη και προσανατολισμένη στο βορρά. Με αυτόν τον τρόπο η διόρθωση της μέτρησης από τις απόλυτες βαθμονομήσεις παράγει το αναμενόμενο αποτέλεσμα.</p>	Αυστηρή Οδηγία
2.1.14	<p>Η κεραία GNSS του σταθμού θα πρέπει να στερεωμένη με ασφάλεια στην κορυφή της εγκατάστασης του σταθμού</p>	Αυστηρή Οδηγία
2.1.18	<p>Οι εκκεντρότητες (east, north, up) από την επισήμανση του μόνιμου σταθμού στο σημείο αναφοράς της κεραιάς (το οποίο για κάθε τύπο κεραιάς αναφέρεται στο αρχείο: <a href="ftp://igs.org/pub/station/general/antenna.gra">ftp://igs.org/pub/station/general/antenna.gra</a>) θα πρέπει να έχουν μετρηθεί και να αναφέρονται στα αρχεία καταγραφής και στις κεφαλίδες του αρχείου RINEX του σταθμού με ακρίβεια <math>\leq 1</math> mm.</p>	Αυστηρή Οδηγία
2.1.19	<p>Η κάθε συνιστώσα (east, north, up) της εκκεντρότητας της κεραιάς κάθε σταθμού θα πρέπει να είναι μικρότερη από 5m.</p> <p>Σημείωση: Η εκκεντρότητα της κεραιάς σχετίζει την επισήμανση του μόνιμου σταθμού στο σημείο αναφοράς της κεραιάς GNSS και η απόσταση δεν πρέπει να είναι πολύ μεγάλη ώστε να ελαχιστοποιείται το σφάλμα της μέτρησης.</p>	Αυστηρή Οδηγία

<sup>1</sup> Περισσότερες λεπτομέρειες αναφέρονται στο αρχείο: (IGS Antenna Working Group, 2017)

2.1.20	<p>Η χρήση προστατευτικού θόλου (radome) πάνω από τη κεραία GNSS του σταθμού θα πρέπει να αποφεύγεται εκτός εάν συντρέχουν λόγοι προστασίας από ζώα ή το περιβάλλον.</p> <p>Σημείωση: Υπάρχουν ακόμα αμφιβολίες σχετικά με τη χρήση του θόλου πάνω από την κεραία. Οι αμφιβολίες περιλαμβάνουν μη προσδιορισμένες επιδράσεις που σχετίζονται με της καιρικές συνθήκες, πιθανά προβλήματα με τον προσανατολισμό του θόλου και η επανάληψη της απόλυτης βαθμονόμησης χρησιμοποιώντας διαφορετικά είδη θόλων.</p>	Αυστηρή Οδηγία
2.1.21	<p>Εάν κρίνεται απαραίτητη η χρήση προστατευτικού θόλου, ο συνδυασμός κεραίας και θόλου θα πρέπει να έχουν απόλυτη βαθμονόμηση, διαθέσιμη στο αρχείο <a href="ftp://igs.org/pub/station/general/igs08.atx">igs.atx</a>, στη διεύθυνση:</p> <p><a href="ftp://igs.org/pub/station/general/igs08.atx">ftp://igs.org/pub/station/general/igs08.atx</a></p>	Αυστηρή Οδηγία
2.1.22	<p>Ο προστατευτικός θόλος, εάν χρησιμοποιηθεί, θα πρέπει να είναι σφαιρικός, τοποθετημένος ομόκεντρα πάνω από μέσο ύψος του κέντρου φάσης της κεραίας και σωστά ευθυγραμμισμένος ακολουθώντας τις οδηγίες του κατασκευαστή.</p>	Αυστηρή Οδηγία
2.2.4	<p>Μη συμβατικοί δέκτες και κεραίες δεν συνιστώνται για χρήση στους σταθμούς, εκτός της υποστήριξης πιλοτικών ή πειραματικών δραστηριοτήτων. Μόνο προηγούμενα γνωστοί κατασκευαστές και μοντέλα δεκτών και κεραιών όπως αυτά περιγράφονται στα αρχεία της IGS <a href="#">cnr_ant.tab</a> και <a href="#">IGS08.atx</a> είναι αποδεκτά για πλήρη ένταξη στο δίκτυο της IGS.<sup>2</sup></p> <p>Σημείωση: Οι λειτουργοί των σταθμών θα πρέπει να διασφαλίζουν ότι ο εξοπλισμός που εγκαθίσταται στους σταθμούς της IGS είναι υψηλής ποιότητας και έχουν αποδεδειγμένο ιστορικό καταγραφής παρατηρήσεων ώστε να αποτρέπεται κάθε υποβάθμιση της ποιότητας των μετρήσεων. Πιθανός καινούργιος εξοπλισμός θα πρέπει να χαρακτηρίζεται από ένα ή περισσότερα κέντρα ανάλυσης. Ο λειτουργός του σταθμού που θέλει να εγκαταστήσει καινούργιο εξοπλισμό θα πρέπει να επικοινωνεί με το Συντονιστή του δικτύου IGS (IGS Network Coordinator) και με τα Κέντρα Ανάλυσης της IGS (IGS Analysis Centers).</p>	Επιθυμητή Οδηγία
2.2.5	<p>Προτιμάται μηδενική οριζόντια εκκεντρότητα (northing, easting) στους σταθμούς.</p>	Επιθυμητή Οδηγία

<sup>2</sup> Τα αρχεία αυτά μπορούν να μεταφορτωθούν από τη διεύθυνση: <ftp://igs.org/pub/station/general/>



	<p>Σημείωση: Η κεραία θα πρέπει να είναι εγκατεστημένη ακριβώς πάνω από την επισήμανση του μόνιμου σταθμού, εάν αυτό είναι δυνατόν.</p>	
2.3.8	<p>Όταν πραγματοποιείται αναβάθμιση μιας μη βαθμονομημένης κεραίας και θόλου σ' ένα σταθμό συνταύτισης ή σταθμό του Πλαισίου Αναφοράς, είναι σημαντικό να λειτουργήσει ο αρχικός σταθμός χωρίς τον προστατευτικό θόλο για μια περίοδο τουλάχιστον 4 εβδομάδων, πριν αντικατασταθεί ο παλαιός εξοπλισμός.</p> <p>Σημείωση: Τα δεδομένα των 4 αυτών εβδομάδων δεν διανέμονται, αλλά τίθενται διαθέσιμα και προσβάσιμα στην IGS για επεξεργασία. Είναι σημαντικό να μπορεί να μετρηθεί η επίδραση του μη-βαθμονομημένου θόλου στον αρχικό σταθμό, λειτουργώντας χωρίς αυτόν για λίγο διάστημα.</p>	Οδηγία Αναβάθμισης
2.3.9	<p>Μη βαθμονομημένες κεραίες και θόλοι που έχουν απεγκατασταθεί από σταθμούς είναι πιθανό να βαθμονομηθούν για ιστορικούς λόγους. Επικοινωνήστε με το Κεντρικό Γραφείο πριν την απόρριψη παλαιού εξοπλισμού.</p> <p>Σημείωση: Επικοινωνήστε με το Κεντρικό Γραφείο στην διεύθυνση <a href="mailto:igsceb@igs.org">igsceb@igs.org</a> για βοήθεια. Η βαθμονόμηση παλαιότερων κεραιών, ακόμα και μετά την αφαίρεση τους, είναι απαραίτητη αφού οι διορθώσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν στις εργασίες επανεπεξεργασίας δεδομένων όταν επανεξετάζεται ολόκληρο το ιστορικό δεδομένων για όλους τους σταθμούς. Σ' αυτές τις εργασίες, η γνώση της ορθής απόλυτης βαθμονόμησης από το μη βαθμονομημένο ζεύγος κεραίας και θόλου είναι σημαντική για την ελαχιστοποίηση των αλμάτων στη θέση του σταθμού μετά τις αλλαγές της κεραίας.</p>	Οδηγία Αναβάθμισης

### 2.3.3. Προδιαγραφές βάσει των οδηγιών της EUREF

Στον Πίνακα 10 αναφέρονται οι προδιαγραφές εγκατάστασης της κεραίας GNSS και των τύπων αυτής, για κάθε μόνιμο σταθμό του δικτύου EPN όπως αυτές παρατίθενται από τη EUREF (EPN Central Bureau, 2019). Σε ξεχωριστή στήλη αναφέρεται ο χαρακτηρισμός της κάθε προδιαγραφής ανάλογα με το βαθμό προτεραιότητας (αυστηρή ή επιθυμητή οδηγία) που της έχει αποδοθεί από το Κεντρικό Γραφείο του EPN.

Πίνακας 10 - Προδιαγραφές εγκατάστασης και τύπων κεραιών σύμφωνα με την EUREF  
(Πηγή: EPN Central Bureau, 2019)

Κωδικός	Οδηγία	Χαρακτηρισμός
2.1.12	Οδηγία 2.1.20 της IGS	Αυστηρή Οδηγία
2.1.13	Η κεραία (και ο προστατευτικός θόλος εάν υπάρχει) θα πρέπει να είναι γνωστά στην IGS και το EPN, οπότε και θα πρέπει να έχει αποδοθεί ένα συγκεκριμένο όνομα στην κεραία και στο θόλο στο αρχείο: <a href="ftp://epncb.oma.be/pub/station/general/rcvr_ant.tab">ftp://epncb.oma.be/pub/station/general/rcvr_ant.tab</a>	Αυστηρή Οδηγία
2.1.14	Η κεραία (και ο προστατευτικός θόλος εάν υπάρχει) θα πρέπει να περιλαμβάνονται στο αρχείο κέντρο φάσης του EPN <sup>3</sup> με ζε-νίθιες και αζιμουθιακές τιμές απόλυτης βαθμονόμησης.	Αυστηρή Οδηγία
2.1.15	Οδηγία 2.1.13 της IGS	Αυστηρή Οδηγία
2.1.16	Οδηγία 2.1.14 της IGS	Αυστηρή Οδηγία
2.1.17	Οδηγία 2.1.18 της IGS	Αυστηρή Οδηγία
2.1.18	Η εκκεντρότητα ύψους της κεραίας από την επισήμανση πρέπει να είναι μικρότερη από 10m ενώ οι οριζόντιες εκκεντρότητες πρέπει να είναι κάτω από 5m.	Αυστηρή Οδηγία
2.1.19	Οδηγία 2.1.22 της IGS	Αυστηρή Οδηγία
2.1.20	Η κεραία θα πρέπει να είναι ικανή να λαμβάνει σήμα από τα συστήματα GPS, GLONASS και Galileo (ακόμα κι αν ο δέκτης δεν έχει αυτή τη δυνατότητα ακόμα).	Επιθυμητή Οδηγία
2.1.21	Οι οριζόντιες εκκεντρότητες (northing, easting) προτιμάται να είναι μηδέν. Τα αποτελέσματα επαναλαμβανόμενων τοπικών δεσμεύσεων, που συνδέουν το σημείο αναφοράς της κεραίας με την επισήμανση πρέπει να είναι προσεκτικά τεκμηριωμένα.	Επιθυμητή Οδηγία
2.1.22	Προτείνεται να καθαρίζεται η κεραία (χωρίς να μετακινείται ή να αλλάζει η θέση της) τουλάχιστον μια φορά το χρόνο. Κατά, τη διάρκεια του χειμώνα, το χιόνι θα πρέπει να απομακρύνεται όσο	Επιθυμητή Οδηγία

<sup>3</sup> Για περισσότερες λεπτομέρειες ο αναγνώστης μπορεί να ανατρέξει στη διεύθυνση:  
[http://www.epncb.oma.be/documentation/equipment\\_calibration/](http://www.epncb.oma.be/documentation/equipment_calibration/)

	το δυνατόν συχνότερα. Να αναφέρετε το καθάρισμα στο αρχείο καταγραφής του σταθμού.	
2.1.23	Εάν πρέπει να χρησιμοποιηθεί ο προστατευτικός θόλος, προτείνονται θόλοι που έχουν κατασκευαστεί με επίσημες προδιαγραφές.	Επιθυμητή Οδηγία
2.1.24	Προτιμώνται οι απόλυτες ατομικές βαθμονομήσεις της κεραίας. Οι καινούργιες ατομικές απόλυτες βαθμονομήσεις για ένα ζεύγος κεραίας – θόλου θα πρέπει να στέλνονται στο EPN CB πριν την εγκατάστασή τους.	Επιθυμητή Οδηγία
2.1.25	Εάν μια μη βαθμονομημένη κεραία ή θόλος αφαιρεθεί <sup>4</sup> , παρακαλείται η τοποθέτηση της σε μια εγκατάσταση, για ατομική βαθμονόμηση και η αποστολή αυτής, στο EPN CB.	

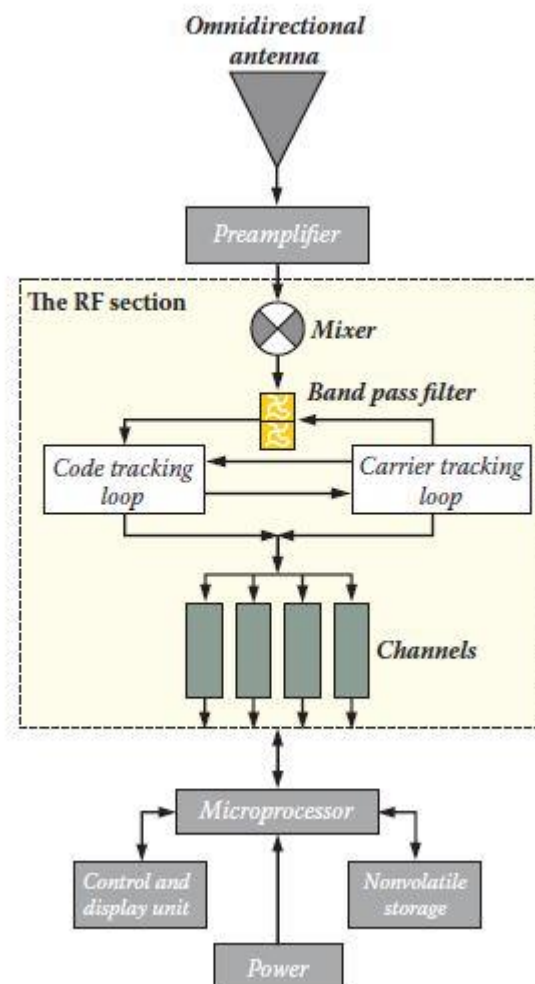
## 2.4. Προδιαγραφές δεκτών GNSS για εγκατάσταση σε Μόνιμο Σταθμό GNSS

### 2.4.1. Εισαγωγή

Ο δέκτης αποτελεί το σημαντικότερο εξάρτημα του εξοπλισμού (hardware) κατά τη λειτουργία των μετρήσεων με τα συστήματα GNSS καθώς τα χαρακτηριστικά και οι δυνατότητές του καθορίζουν τις διαθέσιμες τεχνικές και το εύρος των εργασιών του χρήστη. Σε γενικές γραμμές ένας δέκτης GNSS θα πρέπει να συλλέξει και στη συνέχεια να μετατρέψει τα σήματα από τους δορυφόρους σε παρατηρήσεις θέσεως, ταχύτητας και χρόνου. Το πρώτο τμήμα του δέκτη στο οποίο επεξεργάζεται το εισερχόμενο σήμα, μετά την προενίσχυση, είναι το τμήμα των ραδιοσυχνοτήτων (RF section) (Εικόνα 6). Η βασική επεξεργασία που υφίσταται το εισερχόμενο σήμα στο τμήμα αυτό είναι η μετατροπή της συχνότητας του σε μικρότερη συχνότητα ώστε να διαχειρίζεται από τον δέκτη με μεγαλύτερη ευκολία (Φωτίου & Πικριδής, 2012). Η συγκεκριμένη επεξεργασία πραγματοποιείται με την συμβολή του εισερχόμενου σήματος μ' ένα ημιτονοειδές σήμα αναφοράς που παράγεται από τον ταλαντωτή του δέκτη. Οι δύο συχνότητες πολλαπλασιάζονται μαζί σε μια συσκευή γνωστή ως mixer. Μ' αυτόν τον τρόπο εμφανίζονται δύο συχνότητες, η μία είναι το άθροισμα των δύο προαναφερθέντων συχνοτήτων και η άλλη είναι η διαφορά τους (Van Sickle, 2015).

---

<sup>4</sup> Στο αρχείο το οποίο μπορεί να μεταφορτωθεί από την παρακάτω διεύθυνση, αναφέρονται οι αποδεκτοί και βαθμονομημένοι συνδυασμοί κεραίας – θόλου:  
<ftp://epncb.oma.be/epncb/station/general/calibration.txt>



Εικόνα 6 - Διαγραμματική απεικόνιση δέκτη GNSS  
(Πηγή: Van Sickle, 2015)

Στη συνέχεια τα σήματα αυτά (το άθροισμα και η διαφορά των συχνοτήτων) διέρχονται από ένα κατάλληλο ηλεκτρονικό φίλτρο (bandpass filter), το οποίο απομακρύνει τις ανεπιθύμητες υψηλές συχνότητες και επιλέγει την χαμηλότερη από τις δύο, εξαλείφοντας παράλληλα ένα μέρος από το θόρυβο του σήματος. Το σήμα που προκύπτει τελικά, είναι η διαφορά μεταξύ του μεταβλητής συχνότητας, λόγω φαινομένου Doppler, εισερχόμενου από τον δορυφόρο σήματος και του σήματος που παρήχθη από τον ταλαντωτή του δέκτη. Το σήμα αυτό ονομάζεται συχνότητα κτύπων (beat frequency) ή ενδιάμεση συχνότητα (Intermediate Frequency) και είναι το παρατηρούμενο σήμα στο δέκτη.

Έπειτα, το IF σήμα μεταβιβάζεται στους διαύλους (channels). Η ίδια η κεραία δεν ταξινομεί τις πληροφορίες που συλλέγει. Τα σήματα από τους διάφορους δορυφόρους εισέρχονται στο δέκτη ταυτόχρονα και στους διαύλους του τμήματος RF τα μη διαφοροποιημένα σήματα αναγνωρί-

ζονται και διαχωρίζονται μεταξύ τους. Ο δίαυλος σ' ένα δέκτη GNSS είναι ένας συνδυασμός εξαρτήματος (hardware) και λογισμικού (software), συνδυασμένα ώστε να ξεχωρίζουν τα σήματα, λειτουργώντας παράλληλα. Οι γεωδαιτικοί δέκτες διαθέτουν αρκετούς διαύλους, έναν αποκλειστικά για κάθε δορυφόρο, οπότε ο αριθμός τους σχετίζεται άμεσα με τον αριθμό των δορυφόρων που μπορεί ο δέκτης να παρακολουθεί ταυτόχρονα. Ο σχεδιασμός της λειτουργίας των διαύλων επιτρέπει στον δέκτη να διατηρεί την ακρίβεια όταν βρίσκεται σε μια κινούμενη πλατφόρμα ενώ παράλληλα προσφέρει δυνατότητες κατά των παρεμβολών (anti-jamming) και μειώνει το χρόνο της πρώτης επίλυσης των ασαφειών φάσης. Ουσιαστικά κάθε δίαυλος επιτελεί δύο εργασίες, η πρώτη να λάβει το σήμα και η δεύτερη να το ακολουθήσει. Αφού ληφθεί το σήμα από έναν δορυφόρο, αυτό παρακολουθείται συνέχεια μέχρι να χαθεί και έτσι ο δίαυλος να επιστρέψει σε κατάσταση αναμονής σήματος.

Τέλος, σε κάθε δίαυλο, με τη βοήθεια των βρόγχων παρακολούθησης (tracking loops), αφού γίνει η ανάκτηση των συνιστωσών του σήματος του δορυφόρου (αποδιαμόρφωση) εξάγονται οι μετρήσεις μέσω τεχνικών συσχέτισης του εισερχόμενου σήματος μ' ένα σήμα αντίγραφο που παράγει ο δέκτης. Συγκεκριμένα, η μέτρηση της ψευδοαπόστασης, η οποία αποτελεί την πρώτη διαδικασία που επιτελείται στο δέκτη, πραγματοποιείται με τον συγχρονισμό του κώδικα C/A από τη συχνότητα L1 του σήματος του δορυφόρου μ' ένα αντίγραφο κώδικα C/A που παράγει ο δέκτης. Ο δέκτης μετατοπίζει χρονικά το σήμα αντίγραφο μέχρι να επιτύχει την καλύτερη συσχέτιση με το εισερχόμενο σήμα οπότε αυτό εγκλωβίζεται από τον βρόγχο προσδιορισμού καθυστέρησης (Delay Lock Loop – DLL) και στη συνέχεια τα δύο σήματα διατηρούνται ευθυγραμμισμένα. Αυτές οι χρονικές μετατοπίσεις που υπολογίστηκαν, είναι η μέτρηση του χρόνου ταξιδιού του σήματος από το δορυφόρο στο κέντρο φάσης της κεραίας και πολλαπλασιαζόμενες με την ταχύτητα του φωτός προκύπτει η απόσταση τους, η οποία καλείται ψευδοαπόσταση λόγω των σφαλμάτων κατά τη διάδοση και επεξεργασία του σήματος. Στη συνέχεια, το σήμα οδηγείται στους βρόγχους προσδιορισμού φάσης (Phase Lock Loop – PLL), όπου εκεί ένα τοπικό αντίγραφο συσχετίζεται με το εισερχόμενο σήμα και αφού διαβαστεί το μήνυμα πλοήγησης, πραγματοποιείται η μέτρηση της διαφοράς φάσης μεταξύ του IF σήματος και του τοπικού αντίγραφου.

Ο μικροεπεξεργαστής του δέκτη ελέγχει όλες τις λειτουργίες του, διαχειρίζοντας τη συλλογή των δεδομένων του. Έτσι, ελέγχει τα ψηφιακά κυκλώματα τα οποία με τη σειρά τους διαχειρίζονται τον εγκλωβισμό και την παρακολούθηση των δορυφόρων, την επεξεργασία του σήματος, την εξαγωγή των εφημερίδων και άλλων πληροφοριών από το μήνυμα ναυσιπλοΐας, τον υπολογισμό των δεδομένων απόστασης μέχρι και τον προσδιορισμό της θέσης σε πραγματικό χρόνο, εκτελώντας αν χρειάζεται γεωδαιτικούς μετασχηματισμούς. Τέλος, περιορίζει σφάλματα πολυανάκλασης και θορύβου στο σήμα, μεταβιβάζει τα αποτελέσματα των παραπάνω διεργασιών στο χρήστη και αλληλεπιδρά μαζί του μέσω της μονάδας ελέγχου και εμφάνισης (Control and Display Unit – CDU). Από τα παραπάνω γίνεται προφανές, ότι ένας ταχύς μικροεπεξεργαστής μπορεί να εγγυηθεί την καλή λειτουργία του δέκτη, προσφέροντας σημαντικά πλεονεκτήματα.

Η αποθήκευση των δεδομένων του δέκτη συνήθως πραγματοποιείται σε εσωτερική μνήμη ή ακόμα και εξωτερικά σε σκληρό δίσκο PC όταν υπάρχει σύνδεση, κυρίως για τις εγκαταστάσεις δεκτών σε μόνιμους σταθμούς. Ο όγκος των δεδομένων για αποθήκευση που απαιτείται εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως η διάρκεια των μετρήσεων, ο αριθμός των δορυφόρων πάνω από τον ορίζοντα του δέκτη και η χρονική διάρκεια των εποχών των μετρήσεων. Τέλος, η πηγή τροφοδοσίας του δέκτη είναι συνήθως κάποιου τύπου μπαταρία (συνεχές ηλεκτρικό ρεύμα, DC) για εργασίες στο πεδίο ενώ για μόνιμους σταθμούς μπορεί να χρησιμοποιηθεί μετασχηματιστής τροφοδοσίας για εναλλασσόμενα ρεύμα (AC) ή η τροφοδοσία να επιτευχθεί από ηλιακούς συσσωρευτές όταν δεν υπάρχει διαθέσιμη, μόνιμη εγκατάσταση τροφοδοσίας ρεύματος.

## 2.4.2. Προδιαγραφές βάσει των οδηγιών της IGS

Ακολουθώντας τις οδηγίες και τις συμπληρωματικές διευκρινήσεις από την IGS (IGS, 2015, 2020) παρατίθεται ο Πίνακας 11 με τον κωδικό κάθε προδιαγραφής και τον αντίστοιχο χαρακτηρισμό:

Πίνακας 11 - Προδιαγραφές δεκτών GNSS σύμφωνα με την IGS  
(Πηγή: IGS, 2015, 2020)

Κωδικός	Οδηγία	Χαρακτηρισμός
2.1.7	<p>Ο δέκτης θα πρέπει να ρυθμιστεί ώστε να παρατηρεί δορυφόρους τουλάχιστον από γωνία ύψους 5°.</p> <p>Σημείωση: Ο δέκτης πρέπει να ρυθμιστεί ώστε να μην έχει γωνία αποκοπής του σήματος. Έτσι, η εγκατάσταση της κεραίας αναμένεται να παρέχει τη δυνατότητα για εκτέλεση παρατηρήσεων τουλάχιστον πάνω από γωνία ύψους 5°. Αυτό συνεπάγεται ότι δεν θα πρέπει να υπάρχουν περιορισμοί από την πλευρά του δέκτη και ότι η επιλογή της τοποθεσίας θα είναι η βέλτιστη ώστε να ελαχιστοποιούνται τα εμπόδια στον ορίζοντα παρατήρησης (κτήρια, δέντρα κ.α.).</p>	Αυστηρή Οδηγία
2.1.8	<p>Οι δέκτες GNSS πρέπει να είναι ρυθμισμένοι να παρατηρούν το μέγιστο δυνατό αριθμό δορυφόρων, υγιών ή προβληματικών (all-in-view tracking), απ' όσο το δυνατόν περισσότερα συστήματα (αστερισμούς), περιλαμβάνοντας πάντα κατ' ελάχιστον τους δορυφόρους του συστήματος GPS.</p> <p>Σημείωση: Το δίκτυο της IGS πρέπει να μπορεί να παρέχει όσο το δυνατόν περισσότερες μετρήσεις GNSS για κάθε τοποθεσία ώστε να υποστηρίζει όλες τις διαφορετικές δραστηριότητες. Δυσνητικά όλες οι δορυφορικές μετρήσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν από την IGS για να χαρακτηριστεί ο σταθμός ή η συμπεριφορά του δορυφόρου. Ακόμα κι αυτές που χαρακτηρίζονται ως μη χρήσιμες ή αξιόπιστες θα πρέπει να έχουν καταγραφεί ως μετρήσεις από τον δέκτη.</p>	Αυστηρή Οδηγία
2.1.9	<p>Ο δέκτης GNSS θα πρέπει να καταγράφει μετρήσεις κώδικα και φάσης (τουλάχιστον ένα από αυτά) από τουλάχιστον δύο συχνότητες (για τους καινούργιους δέκτες αναμένεται τρεις συχνότητες). Για τις δύο συχνότητες των συστημάτων GPS και</p>	Αυστηρή Οδηγία

	<p>GLONASS αυτές περιλαμβάνουν τις: P1 (και/ή C1), L1, L2, P2 (και C2, εάν υπάρχει δυνατότητα από τον δέκτη).</p> <p>Σημείωση: Εάν δεν υπάρχει κρυπτογράφηση για υποκλοπές όλες οι παρατηρήσεις σε συχνότητες P θα πρέπει να καταγράφονται απ' ευθείας.</p>	
2.2.1	<p>Ο δέκτης ενός σταθμού GNSS θα πρέπει να ρυθμιστεί να παρατηρεί δορυφόρους μέχρι και γωνία ύψους ίση με 0°.</p> <p>Σημείωση: Με τη χρήση όλο και πιο εξελιγμένων τροποσφαιρικών συναρτήσεων απεικόνισης (GMF κ.α.) για την επεξεργασία των δεδομένων GNSS, είναι σημαντικό να υπάρχουν καλής ποιότητας μετρήσεις από τους δορυφόρους GNSS όσο το δυνατόν σε μικρότερη γωνία ύψους για όλες τις τοποθεσίες των σταθμών. Αυτό θα εξυπηρετούσε τόσο στην καλύτερη αξιολόγηση του σταθμού όσο και στην καλύτερη απόδοση της ίδιας της συνάρτησης απεικόνισης.</p>	Επιθυμητή Οδηγία
2.2.2	<p>Ο δέκτης του σταθμού GNSS και ιδανικά ο υπόλοιπος εξοπλισμός όπως ο H/Y, θα πρέπει να προστατεύεται από διακοπές ρεύματος χρησιμοποιώντας σταθεροποιητές τάσης και εφεδρικές πηγές τροφοδοσίας ρεύματος.</p>	Επιθυμητή Οδηγία
2.2.8	<p>Οι σταθμοί θα πρέπει να παρέχουν τις τιμές signal-to-noise που υπολογίζονται για όλες τις συχνότητες: S1, S2 κ.τ.λ. στα αρχεία RINEX με την υψηλότερη δυνατή ακρίβεια.</p>	Επιθυμητή Οδηγία
2.2.18	<p>Λειτουργίες βελτιστοποίησης της ψευδοαπόστασης ή/και της φάσης θα πρέπει να είναι απενεργοποιημένες από τον δέκτη. Οδηγίες παρέχονται από τον κατασκευαστή του δέκτη ή από το Κεντρικό Γραφείο. Σε κάθε περίπτωση, οι ρυθμίσεις του δέκτη γι' αυτό το θέμα θα πρέπει να σημειώνονται στο αρχείο καταγραφής του σταθμού.</p> <p>Σημείωση: Η βελτιστοποίηση και εξομάλυνση των δεδομένων είναι δύσκολο να ανιχνευθεί από επεξεργασία των αρχείων RINEX εκτός των πολύ μικρότερων από των αναμενόμενων τιμών πολυανάκλασης για τα δεδομένα του σταθμού. Η IGS θα παρακολουθεί τις τιμές πολυανάκλασης ώστε να ανιχνεύσει και να προειδοποιήσει τους λειτουργούς των σταθμών για πιθανά προβλήματα βελτιστοποίησης.</p>	Επιθυμητή Οδηγία
2.2.19	<p>Η λειτουργία εξάλειψης των σφαλμάτων πολυανάκλασης θα πρέπει να απενεργοποιηθεί από τον δέκτη GNSS. Σε κάθε περίπτωση, οι ρυθμίσεις του δέκτη γι' αυτήν το θέμα θα πρέπει να σημειώνονται στο αρχείο καταγραφής του σταθμού.</p>	Επιθυμητή Οδηγία

	Σημείωση: Πολλοί σύγχρονοι δέκτες με σκοπό την παροχή πιο σταθερών μετρήσεων, εφαρμόζουν τους δικούς τους αλγόριθμους μείωσης των σφαλμάτων πολυανάκλασης, οι οποίοι μπορούν να επηρεάσουν τις καταγεγραμμένες μετρήσεις. Η IGS λοιπόν, επιθυμεί τη καταγραφή των μη επεξεργασμένων μετρήσεων από του δορυφόρους GNSS για κάθε σταθμό, χωρίς πιθανές παρεμβάσεις από τον δέκτη.	
2.2.20	Ο δέκτης GNSS θα πρέπει να έχει τη δυνατότητα να παρέχει μετρήσεις στη τρίτη συχνότητα (L5) στα αρχεία δεδομένων RINEX για όλους τους «αστερισμούς» των δορυφόρων.	Επιθυμητή Οδηγία
2.2.21	Ο δέκτης GNSS θα πρέπει να έχει την δυνατότητα να παρέχει μετρήσεις στα συστήματα GLONASS, Galileo και Beidou (ή να αναβαθμίζεται εύκολα για αυτήν την δυνατότητα μέσω του λογισμικού του). Εάν είναι περιορισμένος ο αριθμός των διαύλων του δέκτη, θα πρέπει να ερωτάται τα Κεντρικό Γραφείο ώστε να αποφασίζεται ποιες παρατηρήσεις θα διατηρούνται.	Επιθυμητή Οδηγία
2.3.1	<p>Οι δέκτες των σταθμών θα πρέπει να αναβαθμίζονται με αναβαθμίσεις του λογισμικού τους από τους κατασκευαστές μέσα σε χρονικό διάστημα 6 μηνών από τη δημοσίευση του λογισμικού. Οι αναβαθμίσεις του λογισμικού θα πρέπει να αναφέρονται στο αρχείο καταγραφής του σταθμού και να ανακοινώνονται μέσα από ένα μήνυμα ηλεκτρονικού ταχυδρομείου IGSStation. Εξαιρέσεις θα πρέπει να συζητώνται με το Κεντρικό Γραφείο.</p> <p>Σημείωση: Οι σύγχρονοι δέκτες μπορούν να διορθώσουν πολλά προβλήματα και σφάλματα μέσα από τις προτεινόμενες από τον κατασκευαστή αναβαθμίσεις του λογισμικού. Με σκοπό την εγγύηση της καλής λειτουργίας του δικτύου της IGS θα πρέπει ο δέκτης να αναβαθμίζεται τακτικά σύμφωνα με τις οδηγίες του κατασκευαστή, λαμβάνοντας υπόψιν και τις κοινές εμπειρίες όλων των λειτουργών της IGS. Έτσι, οι λειτουργοί των σταθμών θα πρέπει να ενημερώνονται μέσω των ηλεκτρονικών ταχυδρομείων IGSStation και IGSMail για τις κοινές εμπειρίες αναβάθμισης του λογισμικού.</p>	Οδηγία Αναβάθμισης

### **2.4.3. Προδιαγραφές βάσει των οδηγιών της EUREF**

Στον Πίνακα 12 αναφέρονται οι προδιαγραφές των δεκτών GNSS για κάθε μόνιμο σταθμό του δικτύου EPN όπως αυτές παρατίθενται από τη EUREF (EPN Central Bureau, 2019). Σε ξεχωριστή στήλη αναφέρεται ο χαρακτηρισμός της κάθε προδιαγραφής ανάλογα με το βαθμό



προτεραιότητας (αυστηρή ή επιθυμητή οδηγία) που της έχει αποδοθεί από το Κεντρικό Γραφείο του EPN.

Πίνακας 12 - Προδιαγραφές δεκτών GNSS σύμφωνα με την EUREF  
(Πηγή: EPN Central Bureau, 2019)

Κωδικός	Οδηγία	Χαρακτηρισμός
2.1.1	Οδηγία 2.2.1 της IGS	Αυστηρή Οδηγία
2.1.2	Οδηγία 2.1.8 της IGS	Αυστηρή Οδηγία
2.1.3	Οδηγία 2.1.9 της IGS	Αυστηρή Οδηγία
2.1.4	Οδηγία 2.2.18 της IGS	Αυστηρή Οδηγία
2.1.5	Ο ακριβής χρόνος των παρατηρήσεων θα πρέπει να είναι συγχρονισμένος με τον χρόνο GPS με ακρίβεια $\pm 1$ millisecond στην δεύτερη εποχή των μετρήσεων.	Αυστηρή Οδηγία
2.1.6	Ο δέκτης θα πρέπει να έχει τη δυνατότητα παροχής μετρήσεων στα συστήματα GLONASS και Galileo (ή να μπορεί εύκολα να αναβαθμιστεί μέσω του λογισμικού του γι' αυτήν την δυνατότητα) συμπληρωματικά με το GPS.	Επιθυμητή Οδηγία
2.1.7	Οδηγία 2.2.20 της IGS	Επιθυμητή Οδηγία
2.1.8	Οδηγία 2.2.8 της IGS	Επιθυμητή Οδηγία
2.1.9	Προτείνεται η καταγραφή των παρατηρήσεων Doppler.	Επιθυμητή Οδηγία
2.1.10	Οδηγία 2.2.2 της IGS	Επιθυμητή Οδηγία
2.1.11	Οι δέκτες των σταθμών θα πρέπει να αναβαθμίζονται με αναβαθμίσεις του λογισμικού τους από τους κατασκευαστές μέσα σε χρονικό διάστημα 6 μηνών από τη δημοσίευση του λογισμικού. Οι αναβαθμίσεις του λογισμικού θα πρέπει να αναφέρονται	Επιθυμητή Οδηγία

	στο αρχείο καταγραφής του σταθμού και να ανακοινώνονται μέσα από ένα μήνυμα ηλεκτρονικού ταχυδρομείου της EUREF.	
--	--	--

## **2.5. Προδιαγραφές αποθήκευσης και μεταφοράς των αρχείων καταγραφής ενός Μόνιμου Σταθμού GNSS**

### **2.5.1. Εισαγωγή**

Διάφορα μορφότυπα (format) των αρχείων GNSS έχουν αναπτυχθεί από κυβερνητικές υπηρεσίες, ιδιωτικούς φορείς (κατασκευαστές) και τον ακαδημαϊκό κόσμο με σκοπό μέσα από την τυποποίηση τους να διευκολύνεται η ανάπτυξη της βιομηχανίας των συστημάτων GNSS, με την διαλειτουργική και αποτελεσματική ανταλλαγή δεδομένων και προϊόντων μεταξύ των παρόχων και των χρηστών (Montenbruck & MacLeod, 2017). Τα τρέχοντα μορφότυπα GNSS υποστηρίζουν μεταδεδομένα σχετικά με το σταθμό GNSS, το δέκτη, την κεραία, τις πληροφορίες του εξοπλισμού βαθμονόμησης, τις παρατηρήσεις GNSS και το μήνυμα πλοήγησης όπως επίσης και προϊόντα GNSS όπως τις ακριβείς τροχιές, διορθώσεις των ρολογιών των δορυφόρων, ατμοσφαιρικές μετρήσεις και τις συντεταγμένες του σταθμού. Τα μορφότυπα RINEX, BINEX και η τυποποίηση των αρχείων από την IGS έχουν γίνει ευρέως αποδεκτά και είναι τα πλέον διαδεδομένα, ωστόσο η ανάπτυξη νέων «αστερισμών» GNSS έχει οδηγήσει στην ανάγκη υιοθέτησης καινούργιων προτύπων και στην προώθηση υψηλότερου επιπέδου επικοινωνίας και συνεργασίας μεταξύ των νέων και παλαιότερων συστημάτων.

Τα πλέον διαδεδομένα format αρχείων που έχουν αναπτυχθεί από μη κερδοσκοπικούς οργανισμούς και έχουν γίνει αποδεκτά τόσο από τον ακαδημαϊκό κόσμο αλλά και τους κατασκευαστές είναι τα κάτωθι (Montenbruck & MacLeod, 2017):

- RTCM SC-104, πρότυπο για τεχνικές διαφορικού εντοπισμού με GNSS από την Τεχνική Επιτροπή Ραδιοσυχνοτήτων για Ναυτιλιακές Υπηρεσίες (Radio Technical Commission for Maritime Services – RTCM).
- NMEA 0183, πρότυπο για πληροφορίες (θέσης, ταχύτητας, χρόνου) σε πραγματικό χρόνο υπολογισμένες από δέκτες GNSS από την National Marine Electronics Association – NMEA.
- RINEX (Receiver INdependent EXchange), πρότυπο για αρχεία παρατηρήσεων και μηνυμάτων πλοήγησης από την IGS.
- BINEX (BInary EXchange), πρότυπο για ερευνητικούς και λειτουργικούς σκοπούς από τη UNAVCO.

Συμπληρωματικά με τα παραπάνω πρότυπα για την ανταλλαγή δεδομένων δεκτών GNSS, η IGS έχει αναπτύξει ένα σύνολο προτύπων για την εναρμόνιση της ανταλλαγής προϊόντων και μεταδεδομένων. Τα σημαντικά των οποίων είναι τα κάτωθι:

- Το πρότυπο Standard Product 3 (SP3), για πληροφορίες των τροχιών και ρολογιών των δορυφόρων.
- Το πρότυπο Clock RINEX, για την ανταλλαγή των εκ των υστέρων επιλύσεων των διαφορών μεταξύ των ρολογιών δορυφόρου και δέκτη.
- Το πρότυπο IONosphere EXchange (IONEX), για την μελέτη της ιονόσφαιρας.
- Το πρότυπο ANTenna Exchange (ANTEX), για την παροχή πληροφοριών των μετατοπίσεων και παραλογιών των κέντρων φάσεων των κεραιών GNSS.
- Το πρότυπο SiteLog για πληροφορίες σχετικά με τον σταθμό.
- Το πρότυπο Solution Independent Exchange (SINEX) για την ομαλή ανταλλαγή εκτιμώμενων παραμέτρων από όλες τις διαστημικές τεχνικές (VLBI, SLR, GNSS, DORRIS).

### **2.5.2. Το format RINEX**

Η πρώτη έκδοση του format RINEX αναπτύχθηκε από το Αστρονομικό Ινστιτούτο του Πανεπιστημίου της Βέρνης το 1989, για την εύκολη ανταλλαγή δεδομένων GPS που συλλέγονταν κατά τη διάρκεια των εκτενών εργασιών EUREF 89, στις οποίες εμπλέκονταν περισσότεροι από 60 δέκτες από τέσσερις διαφορετικούς κατασκευαστές (Gurtner & Estey, 2007). Είναι γνωστό ότι ο κάθε κατασκευαστής χρησιμοποιεί το δικό του format για τα αρχεία παρατηρήσεων των δεκτών κατασκευής του και για την επεξεργασία με το δικό του λογισμικό. Πλέον παρέχεται η δυνατότητα μέσω των παραπάνω λογισμικών κάθε εταιρίας, να μετατρέπονται τα αρχεία καταγραφής των δεκτών των διαφορετικών εταιριών σε μορφή RINEX και να εισάγονται για επεξεργασία σε λογισμικά διαφορετικά κατασκευαστών με τα αντίστοιχα αρχεία παρατηρήσεων RINEX. Επίσης, εκτός από το αρχείο των παρατηρήσεων, σε μορφή RINEX εξάγεται και το αρχείο του μηνύματος πλοήγησης (navigation file).

Η τελευταία έκδοση RINEX 2.11, η οποία έχει υιοθετηθεί από την IGS, υποστηρίζει δεδομένα παρατηρήσεων GNSS για τα συστήματα GPS, GLONASS και SBAS, όπως επίσης και τα αντίστοιχα μηνύματα πλοήγησης και συγκεκριμένη μορφή μετεωρολογικών φαινομένων. Αν και ακόμα πολύ διαδεδομένη στη κοινότητα των χρηστών GNSS, οι εγγενείς περιορισμοί της έχουν οδηγήσει στην ανάπτυξη ενός καινούργιου format αρχείου παρατηρήσεων GNSS και μηνύματος πλοήγησης. Το format RINEX 3.x ενεργοποιήθηκε από τη σταδιακή ανάπτυξη του συστήματος Galileo και τον συνεχιζόμενο εκσυγχρονισμό του GPS και προσφέρει πιο ευέλικτους και λεπτομερείς κώδικες παρατήρησης σε σχέση με τον προκάτοχό του. Συγκεκριμένα, για κάθε σήμα που εγκλωβίζεται καταγράφεται ένα πλήθος παρατηρήσεων (ψευδοαπόσταση, φάσης, λόγου σήματος προς θορύβου και δείκτη απώλειας σήματος) ενώ παράλληλα οι εγγραφές παρουσιάζουν μια

πιο ευανάγνωστη για τον άνθρωπο δομή. Η πιο πρόσφατη έκδοση RINEX 3.04 που δημοσιεύθηκε το 2018, υποστηρίζει παρατηρήσεις και μηνύματα πλοήγησης των συστημάτων GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou, QZSS, IRNSS/NavIC και SBAS.

Για την υποστήριξη τόσο της ανθρώπινης όσο και της μηχανικής ανάγνωσης, όλα τα αρχεία δεδομένων RINEX χρησιμοποιούν τις μορφές κειμένου ASCII με προκαθορισμένα πλάτη πεδίων για τα δεδομένα και τις ετικέτες. Έτσι, για το RINEX 2 έχει οριστεί ως μέγιστο πλάτος γραμμής οι 80 χαρακτήρες, χαρακτηριστικό το οποίο έχει εξαλειφθεί στα αρχεία παρατηρήσεων RINEX 3.x ώστε να εξυπηρετούνται καλύτερα ο μεγάλος αριθμός των ατομικών παρατηρήσεων που είναι διαθέσιμες με τα νέα και σύγχρονα συστήματα πλοήγησης. Παρακάτω παρουσιάζεται ένα παράδειγμα αρχείου format RINEX 2.11, το οποίο αποτελεί έως τη συγγραφή της παρούσας εργασίας, το format αναφοράς για την IGS και ακολουθεί περιληπτική αναφορά των διαφόρων τμημάτων που το απαρτίζουν. Για την αναλυτική περιγραφή αυτής της έκδοσης αλλά και των επόμενων, οι οποίες έχουν ήδη δημοσιευθεί και αναμένεται να υιοθετηθούν από την IGS, ο αναγνώστης μπορεί να ανατρέξει στην αντίστοιχη βιβλιογραφία, όπως έχει αναστηθεί στον ιστότοπο της IGS: <ftp://ftp.igs.org/pub/data/format/>

### ➤ Παράδειγμα αρχείου RINEX 2.11

2.11	OBSERVATION DATA						G	RINEX VERSION / TYPE
Spider V7.2.2.7822	NOA						2020 02 01 00:00	PGM / RUN BY / DATE
NOA1								MARKER NAME
12620M001								MARKER NUMBER
NOA GNSS Team	National Observatory of Athens							OBSERVER / AGENCY
462590	LEICA GRX1200PRO						9.20/2.127	REC # / TYPE / VERS
103326	LEIAT504						LEIS	ANT # / TYPE
4599643.3185	2034827.9762	3909890.7491					APPROX POSITION XYZ	
	1.8910	0.0000				0.0000	ANTENNA: DELTA H/E/N	
1	1						WAVELENGTH FACT L1/2	
6	C1	L1	S1	P2	L2	S2	# / TYPES OF OBSERV	
30.000							INTERVAL	
2020	01	31	00	00	0.0000000	GPS	TIME OF FIRST OBS	
2020	01	31	23	59	30.0000000	GPS	TIME OF LAST OBS	
18							LEAP SECONDS	
31							# OF SATELLITES	
G 1	776	776	776	776	776	776	PRN / # OF OBS	
G 2	1022	1022	1022	1022	1022	1022	PRN / # OF OBS	
G 3	893	893	893	893	893	893	PRN / # OF OBS	
G 4	835	835	835	835	835	835	PRN / # OF OBS	
G 5	1083	1083	1083	1083	1083	1083	PRN / # OF OBS	
G 6	1061	1061	1061	1061	1061	1061	PRN / # OF OBS	
G 7	745	745	745	745	745	745	PRN / # OF OBS	
G 8	742	742	742	742	742	742	PRN / # OF OBS	
G 9	869	869	869	869	869	869	PRN / # OF OBS	
G10	804	804	804	804	804	804	PRN / # OF OBS	
G11	736	736	736	735	735	735	PRN / # OF OBS	
G12	937	937	937	937	937	937	PRN / # OF OBS	
G13	818	818	818	818	818	818	PRN / # OF OBS	
G14	864	864	864	864	864	864	PRN / # OF OBS	

G15	774	774	774	773	773	773	PRN / # OF OBS
G16	755	755	755	754	754	754	PRN / # OF OBS
G17	1031	1031	1031	1030	1030	1030	PRN / # OF OBS
G19	964	964	964	964	964	964	PRN / # OF OBS
G20	793	793	793	789	789	789	PRN / # OF OBS
G21	887	887	887	887	887	887	PRN / # OF OBS
G22	925	925	925	925	925	925	PRN / # OF OBS
G23	922	922	922	922	922	922	PRN / # OF OBS
G24	769	769	769	769	769	769	PRN / # OF OBS
G25	854	854	854	854	854	854	PRN / # OF OBS
G26	701	701	701	701	701	701	PRN / # OF OBS
G27	795	795	795	795	795	795	PRN / # OF OBS
G28	729	729	729	728	728	728	PRN / # OF OBS
G29	929	929	929	929	929	929	PRN / # OF OBS
G30	853	853	853	853	853	853	PRN / # OF OBS
G31	1118	1118	1118	1118	1118	1118	PRN / # OF OBS
G32	1044	1044	1044	1044	1044	1044	PRN / # OF OBS
BIT 2 OF LLI FLAGS DATA COLLECTED UNDER A/S CONDITION							COMMENT
SNR is mapped to RINEX snr flag value [1-9]							COMMENT
LX:	>= 25dBHz -> 1; 26-27dBHz -> 2; 28-31dBHz -> 3						COMMENT
	32-35dBHz -> 4; 36-38dBHz -> 5; 39-41dBHz -> 6						COMMENT
	42-44dBHz -> 7; 45-48dBHz -> 8; >= 49dBHz -> 9						COMMENT
Product							COMMENT
							END OF HEADER
ρ0	01	31	00	00	0.0000000	0	10G08G10G11G14G16G20G21G26G27G32
					21455385.120	112748825.77009	49.750 21455385.540 87856220.00748
					46.750		
					20753694.780	109061424.39109	50.750 20753694.980 84982947.35149
					50.250		
					23713594.100	124615781.37206	40.750 23713591.280 97103182.00043
					30.000		
					24022364.960	126238356.24606	41.500 24022360.220 98367548.62444
					34.500		
					23225125.360	122048858.56707	44.500 23225122.500 95102985.27645
					37.250		
					22164018.620	116472721.48408	45.750 22164015.820 90757982.56846
					41.750		
					24196258.720	127152218.20107	43.250 24196255.840 99079639.94145
					37.250		
					24751442.420	130069701.44606	39.250 24751443.580 101353012.86344
					32.000		
					20303275.400	106694447.24009	51.250 20303275.200 83138539.56549
					51.250		
					22602033.160	118774498.14908	46.750 22602034.120 92551569.43947
					43.000		
20	01	31	00	00	30.0000000	0	10G08G10G11G14G16G20G21G26G27G32
					21443200.300	112684794.09009	49.750 21443200.640 87806325.18548
					46.750		
					20760915.500	109099369.35509	50.750 20760915.680 85012514.85749
					50.250		
					23694960.760	124517862.32306	41.250 23694957.740 97026881.46544
					33.500		
					24004411.080	126144007.26306	39.750 24004405.900 98294030.01244
					34.500		

Εικόνα 7 – Αρχείο παρατηρήσεων RINEX 2.11

Κάθε αρχείο RINEX μπορεί να διαχωριστεί σε δύο βασικά τμήματα (*Εικόνα 7*), το τμήμα A, το οποίο ονομάζεται κεφαλίδα (header) και στην οποία αναφέρονται οι σχετικές πληροφορίες για τα δεδομένα και το τμήμα B, όπου παρέχονται οι τιμές των παρατηρήσεων που έχουν πραγματοποιηθεί από το δέκτη. Πιο αναλυτικά, στην κεφαλίδα (τμήμα A) αναφέρεται αρχικά η έκδοση του format (2.11) και η πληροφορία ότι πρόκειται για δεδομένα παρατηρήσεων μόνο του συστήματος GPS στο συγκεκριμένο παράδειγμα (observation data, G). Στον *Πίνακα 13* αναφέρονται όλοι οι δείκτες των δορυφορικών συστημάτων που χρησιμοποιούνται στην παρούσα έκδοση RINEX αλλά και εκείνοι που έχουν προστεθεί στις μεταγενέστερες εκδόσεις RINEX 3.x.

Πίνακας 13 - Δείκτες δορυφορικών συστημάτων

Δείκτης	Δορυφορικό Σύστημα
G	GPS
R	GLONASS
S	SBAS
E	Galileo
C	BeiDou
J	QZSS
I	IRNSS/NavIC

Πίνακας 14 - Είδη παρατηρήσεων και μονάδες μέτρησης

Κωδικός	Παρατήρηση	Μονάδα Μέτρησης
C	Ψευδο απόσταση	m
L	Φορέα - Φάσης	Ακέραιοι κύκλοι (cy)
D	Doppler	Hz
S	Ισχύς σήματος	db - Hz

Στη δεύτερη γραμμή αναφέρεται η πληροφορία του λογισμικού που χρησιμοποιήθηκε για τη δημιουργία του αρχείου (Spider V7.2.2.7822), του οργανισμού (NOA) και της ημερομηνίας και ώρας που αυτό δημιουργήθηκε. Στις δύο επόμενες γραμμές αναφέρονται το 4ψήφιο όνομα του σημείου (NOA1) και ο αντίστοιχος αριθμός του σημείου (12620M001). Στην πέμπτη γραμμή αναφέρεται η ταυτότητα του παρατηρητή (NOA GNSS Team) και του οργανισμού που εκτελούν τη μέτρηση (National Observatory of Athens). Στην επόμενη γραμμή παρουσιάζεται ο αριθμός και τύπος του δέκτη (LEICA GRX1200PRO) καθώς επίσης και η έκδοση του λογισμικού του. Στην έβδομη γραμμή αντίστοιχα αναφέρεται ο αριθμός και ο τύπος της κεραίας (LEIAT504) και ο τύπος του προστατευτικού θόλου, αν χρησιμοποιείται (LEIS).

Στην όγδοη γραμμή, αναφέρονται προσεγγιστικές γεωκεντρικές συντεταγμένες του δέκτη του σταθμού (4599643.3185m, 2034827.9762m, 3909890.7491m) ενώ στην επόμενη γραμμή αναφέρονται τα στοιχεία εκκεντρότητας της κεραίας δηλαδή το ύψος κεραίας H (1.8910 m) έως το γεωμετρικό κέντρο ARP και οι εκκεντρότητες κατά N, E του ARP από το σημείο μέτρησης. Στη δέκατη γραμμή αναφέρονται οι παράγοντες μήκους κύματος στις συχνότητες L1 και L2 με την τιμή 1 να συμβολίζει τις ασάφειες πλήρους κύκλου. Στην επόμενη γραμμή αναφέρονται τα διαφορετικά είδη των παρατηρήσεων που εκτελέστηκαν, αρχικά ως ποσότητα (6) και στη συνέχεια η ταυτότητά τους σύμφωνα με τον *Πίνακα 14* (C1 - ψευδοαποστάσεις C/A, L1 – φάσεις στην L1, S1 –



ισχύς σήματος στην L1, P2 – ψευδοαποστάσεις P στην L2, L2 – φάσεις στην L2 και S2 – ισχύς σήματος στην L2).

Στη δωδέκατη γραμμή αναφέρεται ο ρυθμός καταγραφής (30s) ενώ στις δύο επόμενες γραμμές ο χρόνος πρώτης και τελευταίας καταγραφής (31/01/2020 – 2020 01 31 δηλ. σε μορφή “yyymmdd” και ώρα καταγραφής έναρξης 0<sup>h</sup> 0<sup>m</sup> 0<sup>s</sup> και λήξης 23<sup>h</sup> 59<sup>m</sup> 30<sup>s</sup> σε ώρα GPS). Στην επόμενη γραμμή αναφέρεται η διόρθωση της ώρας UTC από τις 6/1/1980, οπότε και συγχρονίστηκε με την ώρα GPS (18s) και στην 14<sup>η</sup> γραμμή αναφέρεται ο συνολικός αριθμός των παρατηρηθέντων δορυφόρων (31).

Στις επόμενες γραμμές αναφέρονται για κάθε δορυφόρο PRN ο συνολικός αριθμός των παρατηρήσεων του (π.χ. από τον δορυφόρο PRN 8 καταγράφηκαν 742 παρατηρήσεις ψευδοαπόστασης C/A, 742 παρατηρήσεις φάσεις στην L1, 742 παρατηρήσεις για την ισχύ του σήματος στην L1 και ακολουθούν οι αντίστοιχες παρατηρήσεις για την L2 συχνότητα). Τέλος, η κεφαλίδα τελειώνει με το μήνυμα END OF HEADER αφού αναφερθεί η κωδικοποίηση που ακολουθείται για τους δείκτες απώλειας παρακολούθησης του δορυφόρου (Loss of Lock Indicator – LLI) και του λόγου σήματος προς θόρυβο (Signal to Noise Ratio – SNR).

Στο τμήμα B του αρχείου αναφέρονται οι τιμές των παρατηρήσεων που περιγράφηκαν παραπάνω για κάθε εποχή μέτρησης. Κάθε «παραγράφος» του τμήματος ξεκινάει με μία γραμμή που αναφέρεται στην εποχή μέτρησης, τον αριθμό και τον κωδικό PRN των λαμβανόμενων δορυφόρων. Πιο συγκεκριμένα, στην πρώτη γραμμή της πρώτης «παραγράφου» που είναι η εξής:

**20 01 31 00 00 0.000000 0 10G08G10G11G14G16G20G21G26G27G32**

αναφέρονται η ημερομηνία και η εποχή καταγραφής με τη μορφή που αναφέρθηκε παραπάνω, ο δείκτης εποχής GPS (epoch flag) ο οποίος καταγράφει την λειτουργία του δέκτη (τιμή 0 για καλή λειτουργία και τιμές  $\geq 1$  για τυχόν πρόβλημα ή αλλαγή κατά τη συλλογή των δεδομένων), ο συνολικός αριθμός των λαμβανόμενων δορυφόρων την τρέχουσα εποχή (10) και οι PRN αριθμοί των δορυφόρων (G08G10G11G14G16G20G21G26G27G32) για τους οποίους με τη συγκεκριμένη σειρά θα αναφερθούν σε κάθε επόμενη γραμμή οι παρατηρήσεις (C1, L1, S1, P2, L2, S2). Έτσι, ακολουθούν οι δέκα σειρές των παρατηρήσεων για τη συγκεκριμένη εποχή και για κάθε δορυφόρο. Στις επόμενες «παραγράφους» (προς χάριν συντομίας δεν παρατέθηκαν στο παραπάνω αρχείο – παράδειγμα) αναφέρονται ακολουθώντας την ίδια μεθοδολογία, όλες οι παρατηρήσεις από κάθε δορυφόρο για κάθε εποχή μέτρησης.

### **2.5.3. Προδιαγραφές βάσει των οδηγιών της IGS**

Ακολουθώντας τις οδηγίες και τις συμπληρωματικές διευκρινήσεις από την IGS (IGS, 2015, 2020) παρατίθεται ο Πίνακας 15 με τον κωδικό κάθε προδιαγραφής και τον αντίστοιχο χαρακτηρισμό:

Πίνακας 15 - Προδιαγραφές χειρισμού των δεδομένων GNSS σύμφωνα με την IGS  
(Πηγή: IGS 2015, 2020)

Κωδικός	Οδηγία	Χαρακτηρισμός
2.1.10	Ο σταθμός GNSS πρέπει να παρέχει τα αρχεία παρατηρήσεων του σε μορφή RINEX μεικτών παρατηρήσεων (RINEX M) με αναφορά στην ώρα GPS ( τα αρχεία GLONASS –only ‘R’ ή Galileo-only ‘E’, δεν χρησιμοποιούνται από την IGS παρά μόνο σε μελλοντικές ερευνητικές εργασίες). Η ομάδα εργασίας RINEX (RINEX Working Group) είναι υπεύθυνη για την υιοθέτηση της χρησιμοποιούμενης έκδοσης RINEX για την IGS, με την τρέχουσα έκδοση να είναι η 2.11 (από τις 16 Μαΐου 2011).	Αυστηρή Οδηγία
2.1.27	Η διαχείριση και αποστολή των δεδομένων του σταθμού στο αντίστοιχο Κέντρο Δεδομένων πρέπει να πραγματοποιείται αξιόπιστα σύμφωνα με τον προγραμματισμό.	Αυστηρή Οδηγία
2.1.28	Τα δεδομένα του σταθμού θα πρέπει να αποθηκεύονται στην αρχική τους μορφή από τον λειτουργό του σταθμού, σε περίπτωση που απαιτηθούν για ανάκτηση δεδομένων ή άλλους τεχνικούς λόγους.  Σημείωση: Είναι πιθανόν τα binary αρχεία του σταθμού να φανούν χρήσιμα στην εξαγωγή πρόσθετων πληροφοριών από τα binary δεδομένα του δέκτη. Επομένως, συνιστάται τα binary δεδομένα του δέκτη να αποθηκεύονται με ασφάλεια για κάποιο χρονικό διάστημα (το οποίο μπορεί να προσδιορισθεί από τον λειτουργό του σταθμού), έτσι ώστε να μπορούν να διορθωθούν σφάλματα κωδικοποίησης ή να γίνουν βελτιώσεις σε παλαιότερα δεδομένα του σταθμού.	Αυστηρή Οδηγία
2.1.29	Ο σταθμός θα πρέπει να παρέχει τα δεδομένα σε format RINEX, στην τρέχουσα έκδοση 2.11 (ή σε μελλοντική μορφή RINEX 3.XX/2.XX όπως ενδέχεται να υιοθετηθεί στο μέλλον από την ομάδα εργασίας RINEX) και να διαβιβάζουν τα αρχεία των δεδομένων στο καθορισμένο Κέντρο Δεδομένων, ακολουθώντας τις οδηγίες που παρέχονται απ’ αυτό.  Σημείωση: Ο λειτουργός του σταθμού θα πρέπει να ελέγξει και να επιβεβαιώσει τις λεπτομέρειες της αποστολής και ανταλλαγής των αρχείων των δεδομένων με το Κέντρο Δεδομένων όπως επίσης και την αποδεκτή μέθοδος συμπίεσης των αρχείων: Hatanaaka, gzip, bzip2 κ.τ.λ.	Αυστηρή Οδηγία
2.1.30	Ακόμα και αν ο δέκτης έχει τη δυνατότητα να παρέχει δεδομένα υψηλού ρυθμού ή χαμηλής υστέρησης, τα ημερήσια και ωριαία	Αυστηρή Οδηγία



	<p>δεδομένα θα πρέπει να παρέχονται σε διαστήματα των 30s και ευθυγραμμισμένα στις :00 και :30.</p> <p>Σημείωση: Οι κανόνες για την παροχή δεδομένων 1 Hz καλύπτονται στο τμήμα 7.1 των οδηγιών της IGS (IGS, 2015)<sup>5</sup>.</p>	
2.1.31	<p>Οι κεφαλίδες των αρχείων RINEX θα πρέπει να ταιριάζουν με το αρχείο καταγραφής του σταθμού (ο τύπος της κεραίας, ο κωδικός του σημείου κ.τ.λ. θα πρέπει να είναι συμπληρωμένα και σωστά).</p> <p>Σημείωση: Οι λειτουργοί των σταθμών θα πρέπει να διαθέτουν μηχανισμούς για την αποφυγή ασυνεπειών μεταξύ των πραγματικών και των αναφερόμενων στοιχείων ταυτοποίησης του σταθμού. Η IGS θα ελέγχει τη συνέπεια των υποβαλλόμενων κεφαλίδων των αρχείων RINEX σε σχέση με τα επίσημα αρχεία καταγραφής των σταθμών ώστε να ειδοποιεί σχετικά τους χειριστές των σταθμών.</p>	Αυστηρή Οδηγία
2.1.33	<p>Τα αρχεία των δεδομένων του σταθμού θα πρέπει να διαβιβάζονται στο Κέντρο Δεδομένων από τον λειτουργό του σταθμού όσο το δυνατόν συντομότερα, μετά την τελευταία εποχή καταγραφής και να είναι ελεγμένα ότι δεν είναι κατεστραμμένα.</p> <p>Σημείωση: Με σκοπό την ελαχιστοποίηση του χρόνου παράδοσης των αρχείων ο λειτουργός του σταθμού θα πρέπει να πραγματοποιεί ελέγχους κατά το χρόνο παράδοσης των αρχείων των δεδομένων ώστε να διασφαλίσει ότι το αρχείο έφτασε στο Κέντρο Δεδομένων όπως αναμενόταν. Η εκ των υστέρων διόρθωση λανθασμένης αποστολής αρχείων μπορεί να οδηγήσει σε σύγχυση και μη διαθεσιμότητα των δεδομένων σε κρίσιμες στιγμές για την παραγωγή των αποτελεσμάτων.</p>	Αυστηρή Οδηγία
2.1.34	<p>Ο σταθμός θα πρέπει τουλάχιστον να παρέχει 24hr ημερήσια δεδομένα των διαστημάτων των 30s, τα οποία θα αποστέλλονται όσο το δυνατόν συντομότερα μετά τις 23:59:30 της προηγούμενης ημέρας.</p>	Αυστηρή Οδηγία
2.1.35	<p>Σε περίπτωση διακοπής επικοινωνίας με το σταθμό, τα δεδομένα κατά την διακοπή θα πρέπει να μεταφορτώνονται στο Κέντρο Δεδομένων, εάν είναι διαθέσιμα. Επίσης θα πρέπει να στέλνεται ένα IGSStation email στο οποίο θα αναφέρονται οι λόγοι της διακοπής και η διαθεσιμότητα των δεδομένων γι' αυτήν την περίοδο.</p>	Αυστηρή Οδηγία

<sup>5</sup> Ο αναγνώστης μπορεί να ανατρέξει στις οδηγίες της IGS (IGS, 2015) για πληροφορίες σχετικά με δεδομένα 1 HZ, ωριαία δεδομένα και παροχή δεδομένων σε πραγματικό χρόνο.

2.2.9	<p>Οι λειτουργοί των σταθμών θα πρέπει να διασφαλίζουν ότι τα αρχεία των δεδομένων είναι πλήρη κατά τη στιγμή της αποστολής ώστε να αποφεύγεται κατά το δυνατόν η επανάληψη αποστολής των δεδομένων,</p> <p>Σημείωση: Μη πλήρη ημερήσια, ωριαία ή 15min αρχεία δεδομένων δεν είναι επιθυμητά, ώστε να αποφεύγεται η επανάληψη της διαβίβασης των δεδομένων και η σύγχυση αυτών. Προτείνεται η αναμονή μερικών λεπτών για την λήψη των δεδομένων ώστε να συμπληρώνεται το πλήρες αρχείο με τα αναμενόμενα δεδομένα.</p>	Επιθυμητή Οδηγία
2.2.10	<p>Οι λειτουργοί των σταθμών θα πρέπει να χρησιμοποιούν προγράμματα για τον έλεγχο της ποιότητας των δεδομένων όπως το TEQC πριν την αποστολή των δεδομένων στα Κέντρα Δεδομένων (προτείνεται η επικοινωνία με τον κατασκευαστή του δέκτη ή οι οδηγίες για το πρόγραμμα TEQC στον ιστότοπο: <a href="http://facility.unavco.org/software/teqc/teqc.html">http://facility.unavco.org/software/teqc/teqc.html</a>)</p> <p>Σημείωση: Προτείνεται οι λειτουργοί των σταθμών να παρακολουθούν την ποιότητα των δεδομένων τους και να διορθώνουν σφάλματα που ανιχνεύονται στην ποιότητά τους, πριν αυτά να έχουν αντίκτυπο στην παραγωγή προϊόντων της IGS.</p>	Επιθυμητή Οδηγία
2.2.12	<p>Τα ημερήσια αρχεία RINEX των σταθμών θα πρέπει να αποστέλλονται όσο το δυνατόν συντομότερα στο τέλος της ημέρας με λιγότερη από 2 ώρες καθυστέρηση καθώς μεγαλύτερο χρονικό διάστημα καθυστέρησης μειώνει τη χρησιμότητα των δεδομένων για τις περισσότερες ωριαίες εφαρμογές.</p>	Επιθυμητή Οδηγία
2.2.23	<p>Ο σταθμός αναμένεται να έχει πολύ υψηλής ποιότητας δεδομένα (σύγκλιση φάσης στην ανάλυση AC/PPP &lt; 15mm).</p> <p>Σημείωση: Η IGS θα παρακολουθεί τις τιμές ποιότητας των RINEX δεδομένων προσπαθώντας να εντοπίσει προβλήματα ώστε να ειδοποιήσει κατάλληλα τους λειτουργούς των σταθμών.</p>	Επιθυμητή Οδηγία
2.2.24	<p>Ο σταθμός αναμένεται να μπορεί να εκτελεί παρατηρήσεις σε πολλούς δορυφόρους (ο αριθμός των παρατηρήσεων θα πρέπει να είναι &gt; 95% των αναμενόμενων).</p> <p>Σημείωση: Η IGS θα παρακολουθεί τις τιμές ποιότητας των RINEX δεδομένων προσπαθώντας να εντοπίσει προβλήματα ώστε να ειδοποιήσει κατάλληλα τους λειτουργούς των σταθμών.</p>	Επιθυμητή Οδηγία
2.2.25	<p>Ο σταθμός αναμένεται να έχει πολύ μικρό σφάλμα πολυανάκλασης (&lt; 0.3 m).</p>	Επιθυμητή Οδηγία

	Σημείωση: Η IGS θα παρακολουθεί τις τιμές ποιότητας των RINEX δεδομένων προσπαθώντας να εντοπίσει προβλήματα ώστε να ειδοποιήσει κατάλληλα τους λειτουργούς των σταθμών.	
2.2.26	Ο σταθμός αναμένεται να έχει πολύ μικρό σφάλμα ολίσθησης κύκλων (<1 για κάθε 1000 παρατηρήσεις). Σημείωση: Η IGS θα παρακολουθεί τις τιμές ποιότητας των RINEX δεδομένων προσπαθώντας να εντοπίσει προβλήματα ώστε να ειδοποιήσει κατάλληλα τους λειτουργούς των σταθμών.	Επιθυμητή Οδηγία

#### 2.5.4. Προδιαγραφές βάσει των οδηγιών της EUREF

Στον Πίνακα 16 αναφέρονται οι προδιαγραφές για την αποθήκευση και αποστολή των δεδομένων των παρατηρήσεων GNSS για κάθε μόνιμο σταθμό του δικτύου EPN όπως αυτές παρατίθενται από την EUREF (EPN Central Bureau, 2019). Σε ξεχωριστή στήλη αναφέρεται ο χαρακτηρισμός της κάθε προδιαγραφής ανάλογα με το βαθμό προτεραιότητας (αυστηρή ή επιθυμητή οδηγία) που της έχει αποδοθεί από το Κεντρικό Γραφείο του EPN. Αξίζει να σημειωθεί πως βάσει της διάρθρωσης του δικτύου EPN, ο λειτουργός του σταθμού (Operational Centre) δεν ταυτίζεται απαραίτητα με το χειριστή του σταθμού (Tracking Station). Έτσι, ο λειτουργός του σταθμού μπορεί να λαμβάνει τα δεδομένα του δέκτη στην αρχική τους μορφή (raw data) από τον χειριστή του δέκτη, στη συνέχεια να τα επεξεργάζεται (έλεγχος ποιότητας, μετατροπή σε RINEX) και στο τέλος να τα αποστέλλει στα τοπικά ή περιφερειακά κέντρα δεδομένων. Οι προδιαγραφές που παρατίθενται παρακάτω, αφορούν κυρίως τους λειτουργούς των σταθμών καθώς τις περισσότερες φορές τελικά αυτοί έχουν και την ευθύνη για τον χειρισμό του σταθμού.

Πίνακας 16 - Προδιαγραφές χειρισμού των δεδομένων σύμφωνα με την EUREF  
(Πηγή: EPN, 2019)

Κωδικός	Οδηγία	Χαρακτηρισμός
3.1.2	Οδηγία 2.1.28 της IGS	Αυστηρή Οδηγία
3.1.3	Τα δεδομένα των σταθμών του τοπικού δικτύου μεταφορτώνονται από το δέκτη και μετασχηματίζονται στο καθορισμένο πρότυπο ανταλλαγής (σύμφωνα με τις οδηγίες 3.2 και 3.3).	Αυστηρή Οδηγία
3.1.4	Τα αποτελέσματα των ποιοτικών ελέγχων των δεδομένων GNSS θα πρέπει να ελέγχονται σε συχνή βάση ώστε να ανιχνεύονται πιθανές υποβαθμίσεις της λειτουργίας του σταθμού.	Αυστηρή Οδηγία

3.1.5	Θα πρέπει να πραγματοποιούνται κατάλληλες ενέργειες εάν η λειτουργία του σταθμού υποβαθμίζεται π.χ. προειδοποίηση/εμπλοκή του προσωπικού του σταθμού.	Αυστηρή Οδηγία
3.1.6	Θα πρέπει να διασφαλίζεται η αξιοπιστία για την ασφαλή διαχείριση και μετάδοση των αρχείων στο αντίστοιχο Κέντρο Δεδομένων (σύμφωνα με τις οδηγίες 3.2 και 3.3)	Αυστηρή Οδηγία
3.1.7	Τα μετα-δεδομένα των αρχείων των σταθμών ή των κεφαλίδων των RINEX θα πρέπει να διορθώνονται το συντομότερο δυνατόν σε περίπτωση που πραγματοποιηθεί σύσταση για ασυνέπεια από το Κεντρικό Γραφείο.	Αυστηρή Οδηγία
3.2.1	Ο σταθμός θα πρέπει να παρέχει τα ωριαία και ημερήσια αρχεία των παρατηρήσεων στο αντίστοιχο κυρίως και δευτερεύων Κέντρο Δεδομένων (όπως αυτά αναφέρονται στο αρχείο καταγραφής του σταθμού) σε μορφή RINEX. Η πρόσφατη έκδοση RINEX που χρησιμοποιείται μπορεί να αναζητηθεί στην ηλεκτρονική διεύθυνση: <a href="http://epncb.oma.be/documentation/formats/rinex.php">http://epncb.oma.be/documentation/formats/rinex.php</a>	Αυστηρή Οδηγία
3.2.2	Τα αρχεία RINEX θα πρέπει να δημιουργούνται από τα αρχικά δεδομένα του σταθμού με την επισήμανση της ώρας GPS.	Αυστηρή Οδηγία
3.2.3	Οι σταθμοί με δέκτες που λαμβάνουν σήμα με περισσότερες των δύο συχνοτήτων ή με δυνατότητα παρακολούθησης δορυφορικών συστημάτων επιπλέον του GPS και του GLONASS θα πρέπει να παρέχουν τα δεδομένα τους στη μορφή RINEX 3. Προαιρετικά τα δεδομένα μπορούν να παρέχονται επίσης και στο μορφότυπο RINEX 2. Οι σταθμοί που λαμβάνουν σήμα μόνο δύο συχνοτήτων από GPS και GLONASS μπορούν να διαθέτουν τα δεδομένα σε μορφή RINEX 2 ή/και σε RINEX 3. Συνεχείς εναλλαγές σε διάθεση δεδομένων μόνο στη μορφή RINEX 2 και RINEX 3 δεν επιτρέπονται. <sup>6</sup>	Αυστηρή Οδηγία
3.2.4	Οδηγία 2.1.30 της IGS	Αυστηρή Οδηγία
3.2.5	Τα ημερήσια δεδομένα περιέχουν παρατηρήσεις που συλλέχθηκαν μεταξύ της 00:00:00 και 23:59:59 ώρας GPS.	Αυστηρή Οδηγία
3.2.7	Οι πληροφορίες που αναγράφονται στην κεφαλίδα του αρχείου RINEX της παρατήρησης και ειδικά ο 4-ψήσιος κωδικός του σταθμού, οι πληροφορίες του δέκτη και της κεραίας, ο αριθμός	Αυστηρή Οδηγία

<sup>6</sup> Ο αναγνώστης μπορεί να ανατρέξει στις οδηγίες της EUREF (EPN, 2019) για λεπτομέρειες σχετικά με την συμπίεση των αρχείων RINEX που πρέπει να ακολουθηθεί κατά περίπτωση.

	DOMES και οι εκκεντρότητες της κεραίας θα πρέπει να είναι ε-νημερωμένες και να ταιριάζουν με το αρχείο καταγραφής του σταθμού. <sup>7</sup>	
3.2.8	Το ημερήσιο μήνυμα πλοήγησης του αρχείου RINEX περιέχει όλα τα μηνύματα με τις ώρες TOC/TOE (time of clock, time of ephemeris) μεταξύ της 00:00 και 23:59 ώρας GPS της αντίστοιχης ημέρας.	Αυστηρή Οδηγία
3.2.9	Η αποθήκευση και μεταφορά των δεδομένων στα αντίστοιχα πρωτεύοντα και δευτερεύοντα Κέντρα Δεδομένων από τον λειτουργό του σταθμού θα πρέπει να πραγματοποιείται υπεύθυνα, όπως έχει προγραμματισθεί (μέσα σε 10 λεπτά από την τελευταία εποχή μέτρησης, για τα ημερήσια αρχεία και μέσα σε 5 λεπτά για τα ωριαία) χρησιμοποιώντας αυτοματοποιημένες διαδικασίες και επαληθεύοντας ότι είναι πλήρη με σκοπό την αποφυγή επανάληψης της αποστολής τους.	Αυστηρή Οδηγία
3.2.10	Μετά από επεισόδιο διακοπής της επικοινωνίας μεταξύ του χειριστή και του λειτουργού του σταθμού ή του λειτουργού και των Κέντρων Δεδομένων, όλα τα ανακτημένα αρχεία δεδομένων πρέπει να υποβληθούν στα Κέντρα Δεδομένων το συντομότερο δυνατόν. Θα πρέπει να πραγματοποιείται επανάληψη τουλάχιστον κάθε μία ώρα και προτείνεται η χρήση αυτοματοποιημένων διαδικασιών. Επίσης θα πρέπει να στέλνεται EUREF mail όπου θα πρέπει να αναφέρεται η διακοπή και η διαθεσιμότητα των δεδομένων εκείνη τη χρονική περίοδο.	Αυστηρή Οδηγία
3.2.12	Προτείνεται η αποστολή μικτών αρχείων μηνυμάτων πλοήγησης (κάταληξη MN για την έκδοση RINEX 3) αντί της αποστολής ξεχωριστών αρχείων μηνυμάτων πλοήγησης για κάθε αστερισμό.	Επιθυμητή Οδηγία
3.2.13	Οι παρατηρήσεις της ισχύος του σήματος (signal-to-noise) θα πρέπει να περιλαμβάνονται στα αρχεία RINEX.	Επιθυμητή Οδηγία
3.2.14	Προτείνεται οι σταθμοί οι οποίοι είναι εξοπλισμένοι με υψηλής ακρίβειας μετεωρολογικούς αισθητήρες να αποστέλλουν καθημερινά αρχεία RINEX μετεωρολογικού περιεχομένου.	Επιθυμητή Οδηγία

<sup>7</sup> Ο αναγνώστης μπορεί να ανατρέξει στις οδηγίες της EUREF (EPN, 2019) σχετικά με τις συμβάσεις που ακολουθούνται στην αναγραφή των πληροφοριών της κεφαλίδας του αρχείου RINEX των παρατηρήσεων όπως επίσης και στην εισαγωγή του παρόντος κεφαλαίου (σελ. 50)

## 2.6. Προδιαγραφές λειτουργίας, αναβάθμισης, επικοινωνίας και παροχής πληροφοριών ενός Μόνιμου Σταθμού GNSS

### 2.6.1. Εισαγωγή

Η θέσπιση κανόνων σχετικά με τις διαδικασίες των περιφερειακών λειτουργιών ενός Μόνιμου Σταθμού όπως το είδος και ο τρόπος παροχής πληροφοριών σχετικά με την εγκατάσταση και την λειτουργία του και η έγκυρη καταγραφή και ενημέρωση για τις πιθανές αλλαγές σ' αυτά αποτελεί εγγύηση για την ποιότητα των παραγόμενων προϊόντων αλλά και πιστοποιεί την επαγγελματική διάρθρωση που πρέπει να χαρακτηρίζει ένα δίκτυο Μόνιμων Σταθμών GNSS. Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται οι οδηγίες που έχουν εκδοθεί τόσο από την IGS όσο και την EUREF σχετικά με θέματα που άπτονται τη λειτουργία, επικοινωνία, αναβάθμιση και παροχή μεταδεδομένων των σταθμών των αντίστοιχων δικτύων.

### 2.6.2. Προδιαγραφές βάσει των οδηγιών της IGS

Με βάση τις οδηγίες και τις συμπληρωματικές διευκρινήσεις από την IGS (IGS, 2015, 2020) παρατίθεται ο Πίνακας 17 όπου αναγράφεται κάθε προδιαγραφή με τον αντίστοιχο κωδικό και χαρακτηρισμό:

Πίνακας 17 – Προδιαγραφές λειτουργίας μόνιμου σταθμού GNSS σύμφωνα με την IGS  
(Πηγή: IGS 2015, 2020)

Κωδικός	Οδηγία	Χαρακτηρισμός
2.3.2	<p>Η εγκατάσταση καινούργιου εξοπλισμού προϋποθέτει πρώτα την εγκατάσταση του εξοπλισμού σ' ένα από τα συμπληρωματικά σημεία της τοποθεσίας του σταθμού (οδηγία 2.3.4) ή σ' ένα ημιμόνιμο σημείο της τοποθεσίας που θα ιδρυθεί γι' αυτό το σκοπό. Τα δεδομένα από τη συμπληρωματική εγκατάσταση θα πρέπει να καταγράφονται για όσο το δυνατόν μεγαλύτερο χρονικό διάστημα με τον καινούργιο εξοπλισμό (τουλάχιστον 1 μήνα), παράλληλα με τον αρχικό σταθμό (εκτός της περίπτωσης αντικατάστασης λόγω καταστροφής του σταθμού).</p> <p>Σημείωση: Τα δεδομένα για την περίοδο των παράλληλων παρατηρήσεων δεν διανέμονται γενικά. Απαραίτητη κρίνεται η επικοινωνία με το Κεντρικό Γραφείο της IGS για τη λήψη απαραίτητων πληροφοριών και τεχνικής υποστήριξης.</p>	Οδηγία Αναβάθμισης

2.3.3	Κατά την αναβάθμιση ενός σταθμού σε σημείο συνταύτισης ή σταθμού που χρησιμοποιείται για το πλαίσιο αναφοράς η περίοδος των παράλληλων παρατηρήσεων θα πρέπει να είναι τουλάχιστον 2 μήνες ή περισσότερο. Η αναβάθμιση αυτής της κατηγορίας σταθμού θα πρέπει να ακολουθεί συγκεκριμένο πλάνο το οποίο εκπονείται από τον λειτουργό του σταθμού σε συνεργασία με το Κεντρικό Γραφείο, ώστε να ελαχιστοποιείται η διακοπή λειτουργίας του σταθμού και να μεγιστοποιούνται τα πιθανά οφέλη.	Οδηγία Αναβάθμισης
2.3.4	Τα παράλληλα δεδομένα που καταγράφονται με τον καινούργιο εξοπλισμό θα πρέπει να καθίστανται διαθέσιμα στο Κεντρικό Γραφείο ώστε να ελέγχονται τα αρχεία RINEX, η ορατότητα της κεραίας, η ποιότητα των δεδομένων, ο υπολογισμός των δεσμεύσεων κ.τ.λ.	Οδηγία Αναβάθμισης
2.3.5	Οι αλλαγές στο δέκτη και την κεραία στο σταθμό της IGS, μετά την επιτυχή ταυτοποίηση στη συμπληρωματική τοποθεσία, θα πρέπει να ανακοινώνονται τουλάχιστον μία μέρα νωρίτερα μέσω του καταλόγου email IGStation.	Οδηγία Αναβάθμισης
2.3.6	<p>Εάν η αναβάθμιση του σταθμού αφορά την μετακίνηση από μία κακή εγκατάσταση σε μία καλύτερη εγκατάσταση για την κεραία, συμπεριλαμβανομένου της μετακίνησης από την αρχική επισήμανση, τότε η αναβάθμιση είναι στην ουσία η έναρξη λειτουργίας ενός καινούργιου σταθμού. Σ' αυτήν την περίπτωση όλες οι παρούσες οδηγίες θα πρέπει να εφαρμοστούν πλήρως.</p> <p>Σημείωση: Μία καινούργια εγκατάσταση κεραίας είναι ένας καινούργιος σταθμός (καινούργιο όνομα, καινούργιος κωδικός DOMES, καινούργιο αρχείο καταγραφής του σταθμού κ.λ.π), έτσι η εγκατάσταση πρέπει να πραγματοποιηθεί με το υψηλότερο δυνατό επίπεδο ποιότητας. Η απόφαση δημιουργίας ενός καινούργιου σταθμού μετά από μία αναβάθμιση θα πρέπει να εξετάζεται σε σχέση με τη διατήρηση της συνέχειας της προηγούμενης εγκατάστασης και επισήμανσης με ένα όμως πιθανό άλμα στις συντεταγμένες εξαιτίας της καινούργιας κεραίας. Προκειμένου για αναβάθμιση σε σταθμό συνταύτισης ή του πλαισίου αναφοράς, ο λειτουργός του σταθμού θα πρέπει να βρίσκεται σε επικοινωνία με την IGS, ώστε να ελαχιστοποιείται η αρνητική επίδραση στο δίκτυο και το Πλαίσιο Αναφοράς και να μεγιστοποιείται η πιθανότητα να πραγματοποιηθούν μακροπρόθεσμες βελτιώσεις.</p>	Οδηγία Αναβάθμισης
2.3.7	Όταν η μετακίνηση ενός σταθμού συνταύτισης ή πλαισίου αναφοράς σε μια καινούργια τοποθεσία είναι αναπόφευκτη, οι παράλληλες εργασίες θα πρέπει να διαρκέσουν όσο το δυνατόν	Οδηγία Αναβάθμισης

	<p>περισσότερο (3 μήνες ή περισσότερο) μεταξύ της παλιάς και της καινούργιας τοποθεσίας του σταθμού.</p> <p>Σημείωση: Τα δεδομένα που συλλέγονται κατά την περίοδο των επικαλυπτόμενων εργασιών είναι σημαντικά ώστε να επιτευχθεί σύνδεση μεταξύ της παλιάς και της καινούργιας εγκατάστασης και έτσι θα πρέπει να καθίστανται διαθέσιμα στην IGS.</p>	
2.3.8	<p>Κατά την αναβάθμιση μιας μη βαθμονομημένης κεραίας και του αντίστοιχου θόλου σ' ένα σταθμό συνταύτισης ή πλαισίου αναφοράς, είναι σημαντικό να λειτουργεί η κεραία χωρίς το θόλο στην αρχική εγκατάσταση για μια περίοδο τουλάχιστον τεσσάρων εβδομάδων πριν την απεγκατάσταση του παλιού εξοπλισμού.</p> <p>Τα δεδομένα απ' αυτές τις τέσσερις εβδομάδες δεν πρέπει να διανεμηθούν αλλά να διατεθούν στην IGS για περαιτέρω επεξεργασία. Είναι σημαντικό να υπάρχει η δυνατότητα να μετρηθεί η επίδραση ενός μη βαθμονομημένου θόλου στον αρχικό σταθμό, λειτουργώντας τον χωρίς αυτόν για κάποια χρονική περίοδο.</p>	Οδηγία Αναβάθμισης
2.3.9	<p>Υπάρχει πιθανότητα μη βαθμονομημένες κεραίες και θόλοι που απεγκαταστάθηκαν από σταθμούς, να βαθμονομηθούν για ιστορικούς λόγους. Έτσι θα πρέπει να υπάρχει επικοινωνία με το Κεντρικό Γραφείο πριν την απόρριψη παλιού εξοπλισμού.</p> <p>Σημείωση: Η βαθμονόμηση παλαιών κεραιών ακόμα και μετά την απομάκρυνση από το σταθμό είναι σημαντική καθώς οι διορθώσεις μπορούν να εφαρμοστούν σ' εργασίες επαναληπτικών υπολογισμών των δεδομένων των σταθμών. Η εφαρμογή της ορθής απόλυτης βαθμονόμησης για ένα μη βαθμονομημένο ζευγάρι κεραίας και θόλου είναι σημαντική για την ελαχιστοποίηση του άλματος στις συντεταγμένες μετά από αλλαγή της κεραίας.</p>	Οδηγία Αναβάθμισης
2.1.1	<p>Οι λεπτομέρειες και η ταυτοποίηση του σταθμού για όλη την περίοδο λειτουργίας του θα πρέπει να καταγράφονται ορθά στο προβλεπόμενο αρχείο καταγραφής. Οδηγίες και πρότυπα μπορούν να αναζητηθούν στις παρακάτω διευθύνσεις:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <a href="ftp://igs.org/pub/station/general/blank.log">ftp://igs.org/pub/station/general/blank.log</a></li> <li>• <a href="ftp://igs.org/pub/station/general/sitelog_instr.txt">ftp://igs.org/pub/station/general/sitelog_instr.txt</a></li> <li>• <a href="http://igs.org/network/sitelog_tester.php">http://igs.org/network/sitelog_tester.php</a></li> </ul> <p>Σημείωση: Το αρχείο καταγραφής του σταθμού είναι η βασική πηγή πληροφοριών για την ίδρυση και τις αλλαγές που πραγματοποιούνται στο σταθμό και ως εκ τούτου πρέπει να είναι ορθό, πλήρες και ενημερωμένο καθ' όλη τη διάρκεια λειτουργίας του σταθμού. Επιπλέον, οι πληροφορίες επικοινωνίας για</p>	Αυστηρή Οδηγία



	το σταθμό είναι ιδιαίτερης σημασίας και θα πρέπει να είναι ενημερωμένες όπως και οι υπόλοιπες πληροφορίες.	
2.1.32	Οι ασυνέπειες στην κεφαλίδα του αρχείου RINEX ή στο αρχείο καταγραφής του σταθμού θα πρέπει να αποκαθίστανται ταχέως μετά την σύσταση από το Κεντρικό Γραφείο της IGS.  Σημείωση: Ο λειτουργός του σταθμού θα πρέπει να διορθώνει μέσα σε διάστημα μίας ημέρας, εφόσον αυτό είναι δυνατό, οποιαδήποτε σύσταση λαμβάνεται από το Κεντρικό Γραφείο σχετικά με ασυνέπεια στις πληροφορίες του σταθμού.	Αυστηρή Οδηγία
2.1.36	Ο σταθμός θα πρέπει να διαθέτει συγκεκριμένη ιστοσελίδα όπου θα διατίθενται πρόσφατες φωτογραφίες, ιστορικό ταυτοποίησης και λοιπές πληροφορίες, η οποία θα συντηρείται από τον λειτουργό του σταθμού (ή την αντίστοιχη Υπηρεσία).	Αυστηρή Οδηγία
2.1.37	Ο σταθμός θα πρέπει να διαθέτει φωτογραφίες της εγκατάστασης της κεραίας στις 4 βασικές διευθύνσεις (κατ' ελάχιστον) στην ιστοσελίδα του ή να είναι διαθέσιμες στην IGS.	Αυστηρή Οδηγία
2.1.38	Ο σταθμός θα πρέπει να διαθέτει πρόσφατες φωτογραφίες, ειδικά μετά από αλλαγές στην εγκατάσταση ή στο περιβάλλον χώρο αυτής ή της κεραίας.  Σημείωση: Οι λειτουργοί των σταθμών θα πρέπει να διαθέτουν στην IGS φωτογραφίες της κεραίας ανά τακτά χρονικά διαστήματα, σωστά αρχειοθετημένες ανάλογα με το πρόγραμμα. Ο οπτικός έλεγχος μιας πληθώρας πρόσφατων και ιστορικών φωτογραφιών εγκαταστάσεων των κεραιών είναι πολύ χρήσιμος για την IGS και τους ερευνητές της ώστε να εντοπίσουν θέματα εξοπλισμού ή του περιβάλλοντος του σταθμού στην τρέχουσα ή σε μελλοντική κατάσταση.	Αυστηρή Οδηγία
2.1.40	Οι λειτουργοί των σταθμών θα πρέπει να ενημερώνουν τους χρήστες της IGS σχετικά με γεγονότα που αφορούν το σταθμό χρησιμοποιώντας τους καταλόγους IGSMail και IGSSStation. Στα μηνύματα που σχετίζονται μ' ένα σταθμό θα πρέπει να αναφέρεται ο 4-ψήφιος κωδικός του σταθμού στο πλαίσιο του θέματος του μηνύματος.  Σημείωση: Οδηγίες για την αποστολή μηνυμάτων ηλεκτρονικού ταχυδρομείου στους καταλόγους της IGS μπορούν να ανακτηθούν από την ιστοσελίδα:  <a href="http://kb.igs.org/hc/en-us/articles/201142366#Maillists">http://kb.igs.org/hc/en-us/articles/201142366#Maillists</a>	Αυστηρή Οδηγία
2.1.41	Οι λειτουργοί των σταθμών θα πρέπει να χρησιμοποιούν την υπηρεσία IGSMail για γενικές ανακοινώσεις του σταθμού και τον	Αυστηρή Οδηγία

	<p>κατάλογο email IGStation για λεπτομέρειες λειτουργίας του σταθμού.</p> <p>Σημείωση: Η υπηρεσία IGSMail χρησιμοποιείται για την ενημέρωση σχετικά με θέματα του σταθμού που αφορούν παροπλισμό, μακροπρόθεσμη διακοπή λειτουργίας (σχεδιασμένη ή μη, μεγαλύτερης της μίας εβδομάδας), αναβαθμίσεις εξοπλισμού σε νέες τεχνολογίες (καινούργιες δυνατότητες GNSS, εξωτερική συχνότητα) κ.τ.λ.</p> <p>Η υπηρεσία IGStation χρησιμοποιείται για βραχυπρόθεσμες διακοπές λειτουργίας, επαναυποβολή αρχείων δεδομένων, αναβαθμίσεις λογισμικού, προβλήματα ή λάθη στο σταθμό ή στο αρχείο καταγραφής του που εντοπίστηκαν και διορθώθηκαν (αναφέροντας συνοπτικά τις αλλαγές που πραγματοποιήθηκαν) κ.τ.λ. Συστήνεται στους λειτουργούς των σταθμών να κρίνουν και να επιλέξουν την κατάλληλη υπηρεσία ενημέρωσης και σε κάθε περίπτωση να ενημερώνουν την IGS για οποιοδήποτε πρόβλημα σχετίζεται με το σταθμό.</p>	
2.1.42	<p>Οι αλλαγές στον σταθμό θα πρέπει να αποστέλλονται μέσω του καταλόγου email IGStation, μία ημέρα ή και περισσότερο πιο πριν. Όλες οι αλλαγές στον σταθμό θα πρέπει να καταγράφονται στο ειδικό αρχείο καταγραφής ενημερώσεων του Κεντρικού Γραφείου.</p> <p>Σημείωση: Η θεματολογία των αλλαγών του σταθμού που πρέπει να αναφέρονται στην IGS περιλαμβάνει τα κάτωθι (αλλά δεν περιορίζεται μόνο σ' αυτά):</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Αλλαγές στην κεραία, τον θόλο, την εγκατάσταση, το δέκτη, την καλωδίωση, τις συχνότητες, τις ρυθμίσεις του δέκτη (όπως ο ορίζοντας αποκοπής) ή το περιβάλλον (όπως η απομάκρυνση δέντρων ή η κατασκευή κτηρίου). Γενικότερα, περιλαμβάνεται κάθε αλλαγή που μπορεί να επηρεάσει τις επιλύσεις της θέσης του σταθμού και η οποία θα πρέπει να περιγράφεται συνοπτικά στο μήνυμα ενημέρωσης.</li> <li>• Τη διακοπή λειτουργίας του σταθμού για χρονικό διάστημα μεγαλύτερο της μίας εβδομάδας.</li> <li>• Τη μόνιμη διακοπή λειτουργίας ενός σταθμού.</li> </ul>	Αυστηρή Οδηγία
2.1.43	<p>Ο λειτουργός του σταθμού, ή η αντίστοιχη υπηρεσία, θα πρέπει να παρακολουθεί συχνά τις υπηρεσίες IGSMail και IGStation ώστε να παραμένει ενημερωμένος σχετικά με τις εξελίξεις της IGS και τα πιθανά προβλήματα των σταθμών. Σημαντικές ανακοινώσεις ειδικά για τους λειτουργούς των σταθμών αποστέλλονται μέσω της υπηρεσίας IGS –SO. Οι διαθέσιμοι κατάλογοι email διατίθενται στην κάτωθι ιστοσελίδα:  <a href="http://igs.org/mail/index.html">http://igs.org/mail/index.html</a></p>	Αυστηρή Οδηγία

### 2.6.3. Προδιαγραφές βάσει των οδηγιών της EUREF

Στον Πίνακα 18 αναφέρονται οι προδιαγραφές λειτουργίας, ενημέρωσης και αναβάθμισης για κάθε μόνιμο σταθμό του δικτύου EPN, όπως αυτές παρατίθενται από τη EUREF (EPN Central Bureau, 2019). Σε ξεχωριστή στήλη αναφέρεται ο χαρακτηρισμός της κάθε προδιαγραφής ανάλογα με το βαθμό προτεραιότητας (αυστηρή ή επιθυμητή οδηγία) που της έχει αποδοθεί από το Κεντρικό Γραφείο του EPN.

Πίνακας 18 - Προδιαγραφές λειτουργίας μόνιμου σταθμού GNSS σύμφωνα με την EUREF  
(Πηγή: EPN Central Bureau, 2019)

Κωδικός	Οδηγία	Χαρακτηρισμός
2.1.26	Οι σταθμοί πρέπει να σχεδιάζονται και να εγκαθίστανται για συνεχή και μόνιμη λειτουργία.	Αυστηρή Οδηγία
2.1.27	Η τοποθεσία του σταθμού θα πρέπει να παρέχει ασφάλεια μακροπρόθεσμα, ώστε οι αλλαγές στην εγκατάσταση της κεραίας να είναι εξαιρετικά απίθανες στο άμεσο μέλλον (χωρίς προγραμματισμένες επεμβάσεις όπως κατασκευές, κατεδαφίσεις κ.τ.λ.)	Αυστηρή Οδηγία
2.1.28	Κατ' ελάχιστον ο σταθμός θα πρέπει να παρέχει 24h καθημερινά δεδομένα σε ρυθμό 30 s, τα οποία θα διατίθενται όσο το δυνατόν νωρίτερα μετά τις 23:59:30 της προηγούμενης ημέρας.	Αυστηρή Οδηγία
2.1.29	Κατά τον προγραμματισμό μεγάλων αναβαθμίσεων του εξοπλισμού σ' έναν σταθμό που λειτουργεί καλά, όπως η αναβάθμιση από δυνατότητα εγκλωβισμού σήματος μόνο GPS σε δυνατότητα multi-GNSS, θα πρέπει ο νέος εξοπλισμός να τοποθετείται σε καινούργια εγκατάσταση και να προτείνεται ο σταθμός στο EPN. Συνιστάται να διατηρείται ο παλιός σταθμός στο EPN όσο το δυνατό περισσότερο χρονικό διάστημα.	Επιθυμητή Οδηγία
3.1.9	Η καταγραφή των αλλαγών του σταθμού (ή του περιβάλλοντός του) πρέπει να πραγματοποιείται με την συμπλήρωση του αρχείου καταγραφής ανανέωσης μέσα σε χρονικό διάστημα μίας ημέρας, στο Κεντρικό Γραφείο, σύμφωνα με το έγγραφο: "Metadata Management and distribution system for Multiple GNSS Networks (M3G)" που διατίθεται στην ιστοσελίδα: <a href="https://gnss-metadata.eu/">https://gnss-metadata.eu/</a>	Αυστηρή Οδηγία
3.1.10	Οδηγία 2.1.32 της IGS	Αυστηρή Οδηγία

3.1.11	Θα πρέπει να παρέχονται φωτογραφίες της εγκατάστασης της κεραίας στις τέσσερις βασικές διευθύνσεις (κατ' ελάχιστον), του σταθμού και του περιβάλλοντος χώρου, οι οποίες θα πρέπει να ενημερώνονται μετά από κάθε αλλαγή. Η μεταφόρτωση φωτογραφιών πραγματοποιείται μέσω της κάτωθι ιστοσελίδας: <a href="http://epncb.oma.be/networkdata/sitepicturesubmission/">http://epncb.oma.be/networkdata/sitepicturesubmission/</a>	Αυστηρή Οδηγία
3.1.12	Η Υπηρεσία που θα εγγυάται τη σωστή λειτουργία του σταθμού θα πρέπει να αποστέλλει τα αρχεία της ατομικής βαθμονόμησης της κεραίας στο Κεντρικό Γραφείο του EPN, τουλάχιστον τρεις εργάσιμες ημέρες πριν την εγκατάσταση της κεραίας στον σταθμό.	Αυστηρή Οδηγία

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Επεξεργασία Παρατηρήσεων GPS

---

### 3.1 Εισαγωγή

Αντικειμενικός σκοπός και τελικό προϊόν της παρούσας εργασίας αποτελεί η παραγωγή ενός πεδίου τεκτονικών ταχυτήτων για το σύνολο του ελλαδικού χώρου. Η αναγκαιότητα υιοθέτησης ενός πεδίου ταχυτήτων έχει αναλυθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο, τόσο στο πλαίσιο υλοποίησης σύγχρονων κινηματικών ή ημι-κινηματικών Συστημάτων Αναφοράς όσο και ως συμπληρωματικό εργαλείο αξιολόγησης της ακρίβειας του ισχύοντος στατικού ΕΓΣΑ '87. Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται η μεθοδολογία και το θεωρητικό υπόβαθρο που ακολουθήθηκε για την επεξεργασία των παρατηρήσεων GPS που συλλέχθηκαν από μόνιμους σταθμούς GNSS σ' όλη την ελληνική επικράτεια, για την παραγωγή των χρονοσειρών των συντεταγμένων τους και την τελική εκτίμηση των ταχυτήτων μετατόπισής τους, όπως αυτά υλοποιούνται από τους αλγόριθμους των υπολογιστικών πακέτων που χρησιμοποιήθηκαν. Συγκεκριμένα, η επεξεργασία των δεδομένων GPS πραγματοποιήθηκε με χρήση του επιστημονικού πακέτου προγραμμάτων GAMIT έκδοσης 10.7 (Herring, King, Floyd, & McClusky, 2018) και η τελική συνόρθωση του δικτύου με το συμπληρωματικό πακέτο προγραμμάτων GLOBK έκδοσης 10.6 (Herring, Floyd, King, & McClusky, 2015). Η μεθοδολογία υπολογισμού των ταχυτήτων των μόνιμων σταθμών αποτελείται από τρία βασικά στάδια τα οποία θα αναλυθούν στη συνέχεια:

- α. Επίλυση των ημερήσιων 24<sup>h</sup> δεδομένων των μόνιμων σταθμών GNSS στο επίπεδο παρατηρήσεων ψευδοαπόστασης και φάσης.
- β. Δημιουργία και ανάλυση των χρονοσειρών θέσης των μόνιμων σταθμών.
- γ. Τελική συνόρθωση του δικτύου, με χρήση του φίλτρου Kalman και εκτίμηση των γεωδαιτικών ταχυτήτων των σταθμών.

Το GAMIT/GLOBK είναι ένα ολοκληρωμένο πακέτο ανάλυσης παρατηρήσεων GNSS που αναπτύχθηκε και συντηρείται από το Τεχνολογικό Πανεπιστήμιο Μασαχουσέτης (MIT), το κέντρο Αστροφυσικής Harvard-Smithsonian, το Ινστιτούτο Ωκεανογραφίας Scripps και το Εθνικό Πανεπιστήμιο Αυστραλίας για τον υπολογισμό των συντεταγμένων και των ταχυτήτων ενός σταθμού, τις στοχαστικές ή λειτουργικές αναπαραστάσεις των μετα-σεισμικών παραμορφώσεων, των ατμοσφαιρικών καθυστερήσεων, των τροχιών των δορυφόρων και των παραμέτρων προσανατολισμού της Γης (Herring et al., 2018).

Τα υποπρογράμματα που απαρτίζουν το πακέτο GAMIT/GLOBK έχουν σχεδιασθεί σε γλώσσες προγραμματισμού Fortran ή C και μπορούν να λειτουργήσουν σε λογισμικά UNIX που υποστηρίζουν X-Windows συμπεριλαμβανομένων των LINUX και MacOS. Μέσα από το σύνολο των αλγορίθμων, μοντέλων και παραμέτρων τις οποίες ανάλογα με το πείραμα ο κάθε χρήστης μπορεί να τροποποιήσει, πραγματοποιείται η επεξεργασία και ανάλυση των δεδομένων των δικτύων GNSS στις δύο φέρουσες συχνότητες κάθε συστήματος (ανεξάρτητα από τη δυνατότητα εκπομπής περισσότερων συχνοτήτων). Στην παρούσα έκδοση του προγράμματος GAMIT επιτρέπεται η επεξεργασία των δεδομένων κάθε αστερισμού δορυφόρων ξεχωριστά, με τις τελικές

συντεταγμένες να δύναται να προκύψουν από το συνδυασμό των επιμέρους επιλύσεων μέσω του προγράμματος GLOBK.

Συγκεκριμένα το GAMIT (μέσω του υποπρογράμματος solve) ενσωματώνει έναν αλγόριθμο της Μεθόδου Ελαχίστων Τετραγώνων (MET) με βάρη, για την εκτίμηση των σχετικών θέσεων ενός συνόλου σταθμών, των παραμέτρων τροχιάς και περιστροφής της Γης, των ατμοσφαιρικών καθυστερήσεων και των ασαφειών φάσης, προσαρμόζοντας τις παρατηρήσεις των διπλών διαφορών φάσης. Επειδή το μαθηματικό μοντέλο που σχετίζεται με τις παραμέτρους και τις παρατηρήσεις δεν είναι γραμμικό, το GAMIT παράγει τα εξής δύο ζεύγη επιλύσεων:

α. Constrained bias-free και Constrained bias-fixed: Πρόκειται για επιλύσεις με αυστηρές a priori αβεβαιότητες των προσδιορισθέντων στοιχείων χωρίς και με την επίλυση των ασαφειών φάσης. Πρόκειται για επιλύσεις με φυσική σημασία, εάν η επεξεργασία τερματιστεί σε επίπεδο GAMIT καθώς οι συντεταγμένες των σταθμών μπορούν να υπολογιστούν με ακρίβεια κάποιων cm.

β. Loose bias free και Loose bias-fixed: Πρόκειται για επιλύσεις με χαλαρές a priori αβεβαιότητες στα προσδιορισθέντα στοιχεία χωρίς και με την επίλυση ασαφειών φάσης. Μ' αυτές τις επιλύσεις υπολογίζονται εκτιμήσεις και ο αντίστοιχος πίνακας μεταβλητότητας-συμμεταβλητότητας των συντεταγμένων των θέσεων των σταθμών και κατ' επιλογή των παραμέτρων τροχιάς και περιστροφής της Γης, δεδομένα τα οποία εισάγονται στο λογισμικό GLOBK ώστε σε συνδυασμό και μ' άλλες επιλύσεις ή δεδομένα να υπολογισθούν οι τελικές συντεταγμένες και ταχύτητες των σταθμών.

Το πρόγραμμα GLOBK χρησιμοποιεί ένα φίλτρο Kalman που λειτουργεί ως τελεστής στους παραπάνω πίνακες μεταβλητότητας-συμμεταβλητότητας αντί των κανονικών εξισώσεων και ως εκ τούτου απαιτείται ο καθορισμός αυστηρών a priori αβεβαιοτήτων για κάθε υπολογιζόμενη παράμετρο. Ωστόσο, με σκοπό την αποφυγή εισαγωγής σφαλμάτων χρησιμοποιούνται οι επιλύσεις των χαλαρών δεσμεύσεων ως εισαγωγικά δεδομένα για την περαιτέρω επεξεργασία. Τέλος, για να αποκτήσουν φυσικό νόημα οι υπολογισμοί των τεκτονικών κινήσεων θα πρέπει να καθορισθεί ένα πλαίσιο αναφοράς επιβάλλοντας δεσμεύσεις στις επιλύσεις. Σ' αυτό το στάδιο μπορούν να υλοποιηθούν δύο διαφορετικές προσεγγίσεις. Η πρώτη, η οποία είναι η μόνη που μπορεί να πραγματοποιηθεί με το GAMIT και είναι επίσης διαθέσιμη στο GLOBK, υλοποιείται με τις ελάχιστες δεσμεύσεις και με καθορισμό ρεαλιστικών a priori αβεβαιοτήτων στις συντεταγμένες και τις ταχύτητες ενός ή περισσότερων σταθμών. Σ' αυτή την προσέγγιση, η εισαγωγή των ελάχιστων δεσμεύσεων θα προκαλούσε περιορισμό της μετάθεσης, δεσμεύοντας τις τρεις συντεταγμένες ενός σταθμού και περιορισμό της στροφής, δεσμεύοντας τις παραμέτρους περιστροφής της Γης. Η δέσμευση των παραμέτρων περισσότερων σταθμών, παρ' όλο που θα προσέφερε επάρκεια συνόρθωσης στο σύστημα θα μπορούσε να προκαλέσει παραμόρφωση του δικτύου και να μην επιτρέψει την ανίχνευση σφαλμάτων σ' αυτούς τους σταθμούς, πέραν της αύξησης των χαρακτηριστικών μεγεθών στην κατανομή  $\chi^2$ .

Η δεύτερη προσέγγιση, η οποία υλοποιείται μέσω του υποπρογράμματος glorg του GLOBK, είναι πιο γενικευμένη καθώς επιλέγεται ένας όσο το δυνατόν μεγαλύτερος αριθμός σταθμών με καλές a priori συντεταγμένες, ελαχιστοποιούνται οι διορθώσεις τους ενώ ταυτόχρονα υπολογίζεται μια συνολική μετάθεση, στροφή και κλίμακα (παραμέτροι Helmert) του δικτύου. Μ' αυτό τον τρόπο όλοι οι σταθμοί που ορίζουν το πλαίσιο μπορούν να μετακινηθούν ελεύθερα και οι ακραίες τιμές μπορούν να ανιχνευθούν εύκολα και να αφαιρεθούν ενώ ταυτόχρονα αποφεύγεται η εσωτερική παραμόρφωση του δικτύου (Herring et al., 2018).

## 3.2 Επεξεργασία παρατηρήσεων φάσης και ψευδοαπόστασης

### 3.2.1. Σχεδιασμός εξισώσεων παρατήρησης ψευδοαπόστασης και φάσης

Η γενική μέθοδος προσδιορισμού των συντεταγμένων ενός σημείου που χρησιμοποιείται για υψηλής ακρίβειας γεωδαιτικές και τοπογραφικές εργασίες είναι ο στατικός σχετικός προσδιορισμός θέσης. Σύμφωνα μ' αυτή τη μέθοδο προσδιορίζονται οι συντεταγμένες ενός σημείου σε σχέση μ' ένα άλλο σημείο, οι συντεταγμένες του οποίου θεωρούνται γνωστές ως προς το WGS84 (ή το ITRFxx). Σύμφωνα μ' αυτήν την μέθοδο απαιτούνται τουλάχιστον δύο δέκτες, οι οποίοι εκτελούν παρατηρήσεις ταυτόχρονα (προς τους ίδιους δορυφόρους) στα αντίστοιχα σημεία. Οι ταυτόχρονες πρωτογενείς παρατηρήσεις επεξεργάζονται κατάλληλα, μέσω γραμμικών συνδυασμών (τεχνική διαφορών – συνθετικές παρατηρήσεις) με αποτέλεσμα τον προσδιορισμό της σχετικής θέσης μεταξύ των σημείων. Γίνεται αντιληπτό ότι για κάθε ζεύγος δεκτών δημιουργείται η αντίστοιχη βάση GPS, οι συνιστώσες του διανύσματος της οποίας ( $\Delta X_{12} = X_2 - X_1, \Delta Y_{12} = Y_2 - Y_1, \Delta Z_{12} = Z_2 - Z_1$ ) υπολογίζονται με μεγάλη ακρίβεια λόγω της εξάλειψης ή ελαχιστοποίησης κοινών συστηματικών σφαλμάτων. Η ακρίβεια της σχετικής θέσης προκύπτει της τάξης του 1-2 ppm ή και 0.1 ppm, η οποία κρίνεται κατάλληλη για γεωδαιτικές και τοπογραφικές εφαρμογές (Φωτίου & Πικριδάς, 2012). Προφανώς η απόλυτη ακρίβεια των προσδιορισθέντων σημείων εξαρτάται και είναι σχεδόν ίδια με την απόλυτη ακρίβεια του γνωστού σημείου.

Ο σχετικός προσδιορισμός μπορεί να πραγματοποιηθεί με ταυτόχρονη μέτρηση σε περισσότερα από δύο σημεία, με αντίστοιχο αριθμό δεικτών, προσδιορίζοντας τη σχετική θέση μεταξύ όλων των σημείων, υλοποιώντας έτσι ένα δίκτυο GNSS. Στην περίπτωση αυτή μετρώνται περισσότερες βάσεις από τις ελάχιστες που απαιτούνται, ώστε με την πλεονάζουσα πληροφορία να πραγματοποιηθεί συνόρθωση του δικτύου, να εντοπισθούν και να αφαιρεθούν πιθανά σφάλματα και τελικά να εξαχθούν αποτελέσματα υψηλότερης ακρίβειας. Η συνόρθωση του δικτύου εκτελείται και στις τρεις διαστάσεις και έτσι καταλήγει στον υψηλό σχετικό προσδιορισμό του δικτύου, δηλαδή της γεωμετρικής του μορφής (σχήμα και μέγεθος). Η απόλυτη ακρίβεια των σημείων ως προς το σύστημα αναφοράς είναι του μεγέθους της ακρίβειας του γνωστού ή των γνωστών σημείων του δικτύου κατά την συνόρθωση, τα οποία μέσω των δεσμεύσεων τους ορίζουν και το σύστημα αναφοράς. Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, η ένταξη του δικτύου των Μόνιμων Σταθμών GNSS του ελλαδικού χώρου επιτυγχάνεται, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, μέσω του μετασχηματισμού ομοιότητας (Helmert transformation) με βάση μόνιμους σταθμούς της IGS στο πλαίσιο αναφοράς ITRF2014.

Το δορυφορικό σήμα αποτελείται από δύο φορείς (L1 και L2 για το σύστημα GPS), οι οποίοι είναι διαμορφωμένοι από δύο κώδικες PRN (C/A για τον φορέα L1, P(Y) και για τους δύο φορείς) και ένα μήνυμα δεδομένων (πριν τα πρόσθετα σήματα L2C, L5 και L1C). Από τη μέτρηση στους κώδικες προκύπτει η παρατήρηση της ψευδοαπόστασης ενώ από τη μέτρηση στους φορείς προκύπτει η παρατήρηση της φάσης. Η εξίσωση παρατήρησης της ψευδοαπόστασης εκφράζει τη σχέση ανάμεσα στην ψευδοαπόσταση, την αντίστοιχη γεωμετρική απόσταση και τα διάφορα συστηματικά και τυχαία σφάλματα. Σ' απλή μορφή η ψευδοαπόσταση  $P_A^i(t)$  μεταξύ δέκτη A και δορυφόρου i, μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$P_A^i = \rho_A^i + c\Delta\tau + c\delta_A - c\delta^i + e_A^i \quad (3.1)$$

όπου:

- $\rho_A^i$  η γεωμετρική απόσταση δορυφόρου – δέκτη
- $\delta_A$  και  $\delta^i$  τα σφάλματα των ρολογιών του δέκτη και του δορυφόρου αντίστοιχα
- $\Delta\tau$  η χρονική καθυστέρηση λόγω μετάδοσης του σήματος στην ατμόσφαιρα, στις εσωτερικές διαδρομές δορυφόρου και δέκτη και λόγω πολυανάκλασης
- $e_A^i$  το τυχαίο σφάλμα της μέτρησης

Στην παραπάνω εξίσωση θα πρέπει να ληφθούν υπόψιν τα συστηματικά σφάλματα που προκαλούνται από τις ατμοσφαιρικές καθυστερήσεις στις οποίες υπόκειται το δορυφορικό σήμα κατά τη διάδοσή του. Οι ατμοσφαιρικές καθυστερήσεις (σε μονάδες απόστασης) είναι οι κάτωθι:

α. Η ιονοσφαιρική καθυστέρηση  $I_A^i$ , η οποία εξαρτάται από τη συχνότητα του φέροντος κύματος (L1 ή L2) και η οποία είναι ίδια αλλά με αντίθετο πρόσημο για τις παρατηρήσεις φάσης, όπως θα αναφερθεί στη συνέχεια.

β. Η τροποσφαιρική καθυστέρηση  $T_A^i$ , η οποία είναι ανεξάρτητη της συχνότητας και ίδια για τις παρατηρήσεις κώδικα και φάσης.

Η παραπάνω εξίσωση της ψευδοαπόστασης μπορεί να εμπλουτισθεί με το σφάλμα πολυανάκλασης  $M_A^i$  (σε μονάδες απόστασης), με τη χρονική καθυστέρηση του σήματος από την παραγωγή μέχρι την εκπομπή από την κεραία του δορυφόρου  $D^i$  και με τη χρονική καθυστέρηση από τη λήψη του σήματος στην κεραία του δέκτη μέχρι τον βρόγχο παρακολούθησης  $D_A$ , οπότε προκύπτει η κάτωθι εξίσωση:

$$P_A^i = \rho_A^i + c\delta_A - c\delta^i + I_A^i + T_A^i + M_A^i + c(D_A + D^i) + e_A^i \quad (3.2)$$

Τέλος, εάν απαλειφθούν το σφάλμα πολυανάκλασης και οι καθυστερήσεις D λόγω των εσωτερικών διαδρομών μέσω γραμμικών συνδυασμών ή εκτιμήσεων προκύπτει η εξίσωση παρατήρησης της ψευδοαπόστασης στην απλουστευμένη μορφή:

$$P_A^i = \rho_A^i + c\delta_A - c\delta^i + I_A^i + T_A^i + e_A^i \quad (3.3)$$



Με αντίστοιχο τρόπο μπορεί να εκφρασθεί και η εξίσωση παρατήρησης φάσης. Όπως έχει αναφερθεί ο δέκτης μπορεί να μετρά μόνο τη στιγμιαία κλασματική φάση  $\varphi_A^i(t)$  σε κάθε χρονική στιγμή, στον καθαρό φορέα IF της συχνότητας κτύπων (για την L1 ή την L2). Καθώς ο δέκτης δεν μπορεί να μετρήσει άμεσα τον ακέραιο αριθμό κύκλων (ασάφεια φάσης) μεταξύ δέκτη – δορυφόρου, κατά την πρώτη στιγμή του εγκλωβισμού του σήματος, θα πρέπει στο παρατηρούμενο μέγεθος να προστεθεί αυτή η ποσότητα ώστε να προκύψει η συνολική φάση του εισερχόμενου σήματος και η μέτρηση να αντιστοιχεί στη διαφορά φάσης μεταξύ του εισερχόμενου φορέα και του παραγόμενου αντιγράφου. Έτσι, προκύπτει η κάτωθι εξίσωση φάσης:

$$\varphi_A^i(t) + n_A^i = \varphi_A(t_A) - \varphi^i(t_A) \quad (3.4)$$

όπου:

- $\varphi_A(t_A)$  η φάση του παραγόμενου αντιγράφου
- $\varphi^i(t_A)$  η φάση του εισερχόμενου φορέα
- $n_A^i$  η αρχική ασάφεια φάσης

Οι φάσεις των φορέων (εισερχόμενου και αντίγραφου) λαμβάνοντας υπόψιν τα σφάλματα των ρολογιών δέκτη ( $\delta_A$ ) και δορυφόρου ( $\delta^i$ ), την εποχή λήψης ( $t = t_A - \delta_A$ ) και την εποχή εκπομπής ( $t^{ri} = t - \tau$ ) διαμορφώνονται ως εξής:

$$\begin{aligned} \varphi_A(t_A) &= \varphi_A(t) + f\delta_A = ft + f\delta_A + \varphi_{0,A} \\ \varphi^i(t^i) &= \varphi^i(t^{ri} + \delta^i) = \varphi^i(t - \tau + \delta^i) = f(t - \tau + \delta^i) + \varphi_o^i = ft - f\tau + f\delta^i + \varphi_o^i \end{aligned} \quad (3.5)$$

Επίσης, αντίστοιχα με την εξίσωση της ψευδοαπόστασης ο χρόνος ταξιδιού θα είναι  $\tau = \tau_0 + \Delta\tau$ , όπου με τον όρο  $\Delta\tau$  εκφράζονται οι διάφορες χρονικές καθυστερήσεις λόγω ατμόσφαιρας, εσωτερικών διαδρομών του σήματος ( $d^i$  στον δορυφόρο και  $d_A$  στον δέκτη) και πολυανάκλασης. Αξίζει να αναφερθεί ότι η ιονοσφαιρική καθυστέρηση σ' αυτήν την περίπτωση αφαιρείται καθώς η επίδρασή της στις μετρήσεις φάσεις οδηγούν σε μικρότερες αντίστοιχες ψευδοαποστάσεις. Τέλος, για να σχηματισθεί η εξίσωση παρατήρησης θα πρέπει να συνδεθεί η γεωμετρική απόσταση δέκτη-δορυφόρου με την παρατήρηση φάσης. Άρα λαμβάνοντας υπόψιν τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει η εξίσωση παρατήρησης φάσης σε κύκλους:

$$\varphi_A^i(t) = f\tau_0 + f\Delta\tau + f\delta_A - f\delta^i + n_A^i + \varphi_{0,A} - \varphi_o^i + \varepsilon_A^i \quad (3.6)$$

ή

$$\varphi_A^i = \frac{1}{\lambda}(\rho_A^i - I_A^i + T_A^i) + \frac{c}{\lambda}(\delta_A - \delta^i) + n_A^i + \frac{m_A^i}{\lambda} + \frac{c}{\lambda}(d_A - d^i) + \varphi_{0,A} - \varphi_0^i + \varepsilon_A^i \quad (3.7)$$

Καθώς στο σχετικό προσδιορισμό θέσης οι αρχικές φάσεις και οι καθυστερήσεις  $d$  απαλείφονται μέσω γραμμικών συνδυασμών (διπλές διαφορές) και επιπλέον αν θεωρηθεί ότι το σφάλμα πολυανάκλασης και ο θόρυβος επιδρούν ελάχιστα στις φάσεις, προκύπτει η εξίσωση φάσης σε κύκλους στην παρακάτω απλοποιημένη μορφή:

$$\varphi_A^i = \frac{1}{\lambda}(\rho_A^i - I_A^i + T_A^i) + \frac{c}{\lambda}(\delta_A - \delta^i) + n_A^i + \varepsilon_A^i \quad (3.8)$$

Τέλος, μπορεί να εκφρασθεί η παραπάνω εξίσωση παρατήρησης φάσης και σε μονάδες απόστασης, πολλαπλασιάζοντας με το μήκος κύματος ( $\lambda = c/f$ ):

$$L_A^i = \rho_A^i + c\delta_A - c\delta^i - I_A^i + T_A^i + \lambda n_A^i + \varepsilon_A^i \quad (3.9)$$

Οι υψηλής ακρίβειας γεωδαιτικές εργασίες πραγματοποιούνται χρησιμοποιώντας τις παρατηρήσεις φάσης καθώς η ακρίβεια του μπορεί να είναι της τάξης του 1mm σε σχέση με τις παρατηρήσεις ψευδοαποστάσεων με κώδικες που είναι της τάξης των δεκάδων cm έως και 3m. Βασική μεθοδολογία επίλυσης των διαφορών σφαλμάτων που εισέρχονται ως άγνωστες παράμετροι στις παραπάνω εξισώσεις αποτελεί η χρησιμοποίηση κατάλληλων γραμμικών συνδυασμών και η μοντελοποίηση των εναπομεινάντων σφαλμάτων.

### 3.2.2. Τεχνική των διαφορών (απλές-διπλές-τριπλές διαφορές)

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας και σύμφωνα με τους αλγόριθμους που χρησιμοποιούνται από το λογισμικό GAMIT (Herring et al., 2018) πραγματοποιήθηκαν επιλύσεις σε ημερήσιο επίπεδο για τα έτη 2015 - 2019 (συνολικά 1826 ημέρες x 4 υποδίκτυα = 7304 επιλύσεις), χρησιμοποιώντας δεδομένα στις δύο φέρουσες συχνότητες L1 και L2 του συστήματος GPS. Η επίλυση της αρχικής ασάφειας φάσης και η εξάλειψη ή ελαχιστοποίηση των διαφορών συστηματικών σφαλμάτων πραγματοποιήθηκε είτε με χρήση της τεχνικής των διαφορών των δεδομένων (απλές –διπλές- τριπλές διαφορές) για τα δεδομένα ίδιου τύπου που μετρήθηκαν από διαφορετικούς σταθμούς είτε με χρήση γραμμικών συνδυασμών για δεδομένα που μετρήθηκαν από τον ίδιο δέκτη στον ίδιο σταθμό. Οι σχετικοί αλγόριθμοι σύμφωνα με τους οποίους διεξάγονται οι υπολογισμοί του λογισμικού GAMIT περιγράφονται από τους (Bock, Gourevitch, Counselman, King, & Abbot, 1986). Περιληπτικά παρακάτω αναφέρονται οι βασικές μαθηματικές σχέσεις που διέπουν τις διάφορες τεχνικές των διαφορών:

➤ **Απλές διαφορές:** Ως απλή διαφορά ορίζεται η διαφορά ταυτόχρονων παρατηρήσεων μεταξύ δύο δεκτών ως προς τον ίδιο δορυφόρο. Έτσι, για δύο δέκτες, A και B που παρατηρούν ταυτόχρονα τον ίδιο δορυφόρο  $i$ , την εποχή  $t_1$ , η απλή διαφορά για τις ψευδοαποστάσεις και τις φάσεις των φορέων θα είναι:

$$P_{AB}^i = P_A^i - P_B^i \quad (3.10)$$

$$L_{AB}^i = L_A^i - L_B^i \quad (3.11)$$

ή αναλυτικά για τους δύο φορείς L1 και L2:

$$P_{1AB}^i = \rho_{AB}^i + c\delta_{AB} + I_{1AB}^i + T_{AB}^i + e_{AB}^i \quad (3.12)$$

$$P_{2AB}^i = \rho_{AB}^i + c\delta_{AB} + \gamma_{12}I_{1AB}^i + T_{AB}^i + e_{2AB}^i \quad (3.13)$$

$$L_{1AB}^i = \rho_{AB}^i + c\delta_{AB} - I_{1AB}^i + T_{AB}^i + \lambda_1 n_{1AB}^i + \varepsilon_{1AB}^i \quad (3.14)$$

$$L_{2AB}^i = \rho_{AB}^i + c\delta_{AB} - \gamma_{12}I_{1AB}^i + T_{AB}^i + \lambda_2 n_{2AB}^i + \varepsilon_{2AB}^i \quad (3.15)$$

Από τις παραπάνω σχέσεις παρατηρείται ότι με τις απλές διαφορές απαλείφονται τα κοινά σφάλματα του ρολογιού του δορυφόρου και επίσης μειώνονται σε μεγάλο βαθμό οι όροι των ατμοσφαιρικών καθυστερήσεων, οι οποίοι για αποστάσεις λίγων χιλιομέτρων απαλείφονται πλήρως. Ωστόσο μειονέκτημα των απλών διαφορών αποτελεί το γεγονός ότι τα σφάλματα των ρολογίων των δεκτών, τα οποία είναι σημαντικού μεγέθους σε σχέση με τα υπόλοιπα, παραμένουν.

➤ **Διπλές διαφορές:** Ως διπλή διαφορά ορίζεται η διαφορά δύο ταυτόχρονων απλών διαφορών μεταξύ δύο δεκτών ως προς δύο δορυφόρους. Έτσι, μεταξύ δύο δεκτών A και B που παρατηρούν ταυτόχρονα δύο δορυφόρους i και j την εποχή  $t_1$  η διπλή διαφορά για τις ψευδοαποστάσεις και τις φάσεις εκφράζεται ως εξής:

$$P_{AB}^{ij} = P_{AB}^i - P_{AB}^j \quad (3.16)$$

$$L_{AB}^{ij} = L_{AB}^i - L_{AB}^j \quad (3.17)$$

ή αναλυτικά για τους δύο φορείς L1 και L2:

$$P_{1AB}^{ij} = \rho_{AB}^{ij} + I_{1AB}^{ij} + T_{AB}^{ij} + e_{1AB}^{ij} \quad (3.18)$$

$$P_{2AB}^{ij} = \rho_{AB}^{ij} + \gamma_{12}I_{1AB}^{ij} + T_{AB}^{ij} + e_{2AB}^{ij} \quad (3.19)$$

$$L_{1AB}^{ij} = \rho_{AB}^{ij} - I_{1AB}^{ij} + T_{AB}^{ij} + \lambda_1 n_{1AB}^{ij} + e_{1AB}^{ij} \quad (3.20)$$

$$L_{2AB}^{ij} = \rho_{AB}^{ij} - \gamma_{12}I_{1AB}^{ij} + T_{AB}^{ij} + \lambda_2 n_{2AB}^{ij} + e_{2AB}^{ij} \quad (3.21)$$

Από τις παραπάνω εξισώσεις παρατηρείται ότι με τις διπλές διαφορές απαλείφονται τα κοινά σφάλματα των δεκτών και ειδικά τα σημαντικά σφάλματα των ρολογιών τους. Επιπλέον,

απαλείφονται οι εσωτερικές καθυστερήσεις των σημάτων στους δέκτες με την προϋπόθεση ότι παραμένουν σταθερές για κάθε δορυφόρο κατά τη διάρκεια των μετρήσεων. Επισημαίνεται ότι οι διπλές διαφορές είναι συσχετισμένες μεταξύ τους ακόμα και για μία βάση, με τον πίνακα συμμεταβλητότητας τους να προκύπτει από την εφαρμογή του νόμου μετάδοσης των συμμεταβλητοτήτων στις απλές διαφορές. Ως εκ τούτου, απαιτείται η υιοθέτηση συγκεκριμένης μεθοδολογίας για τη δημιουργία των διπλών διαφορών, του πίνακα συμμεταβλητότητάς τους και την επίλυση των ασαφειών. Σύμφωνα, με το εγχειρίδιο του λογισμικού GAMIT (Herring et al., 2018) η επίλυση των ασαφειών πραγματοποιείται με βάση τις διπλές διαφορές, ξεκινώντας από τη βάση με το μικρότερο μήκος και συνεχίζοντας διαδοχικά στις επόμενες. Έτσι, αφού η βάση με το μικρό μήκος επιλυθεί σωστά, η επίλυση αυτή ενισχύει την επίλυση της επόμενης βάσης με μεγαλύτερο μήκος, μέχρι την επίλυση όλων των βάσεων (τεχνική boot-strapping).

➤ **Τριπλές διαφορές:** Ως τριπλή διαφορά ορίζεται η διαφορά δύο διπλών διαφορών ως προς δύο διαφορετικές εποχές. Σημειώνεται, ότι για τις παρατηρήσεις φάσης η ασάφεια φάσης παραμένει σταθερή ως προς το χρόνο, εφόσον δεν υπάρχει απώλεια σήματος. Έτσι, για δύο εποχές  $t_1$  και  $t_2$ , η τριπλή διαφορά για τους δύο φορείς θα είναι:

$$L_{1AB}^{ij}(t_2, t_1) = \rho_{AB}^{ij}(t_2) - \rho_{AB}^{ij}(t_1) - [I_{1AB}^{ij}(t_2) - I_{1AB}^{ij}(t_1)] + \varepsilon_{1AB}^{ij}(t_2, t_1) \quad (3.22)$$

$$L_{2AB}^{ij}(t_2, t_1) = \rho_{AB}^{ij}(t_2) - \rho_{AB}^{ij}(t_1) - \gamma_{12} [I_{1AB}^{ij}(t_2) - I_{1AB}^{ij}(t_1)] + \varepsilon_{2AB}^{ij}(t_2, t_1) \quad (3.23)$$

Από τις παραπάνω εξισώσεις παρατηρείται ότι απαλείφονται οι ακέραιες ασάφειες φάσεις, γεγονός που επιτρέπει μια α-ρίογι συνόρθωση και εκτίμηση των συντεταγμένων, για την επίλυση των ασαφειών φάσης των διπλών διαφορών. Σύμφωνα με το εγχειρίδιο του λογισμικού GAMIT (Herring et al., 2018) οι τριπλές διαφορές χρησιμοποιούνται στο στάδιο της προεπεξεργασίας των δεδομένων, μαζί με αλγοριθμικές τεχνικές, για τον εντοπισμό πιθανών σφαλμάτων λόγω της ολίσθησης κύκλων, πριν από την επίλυση των βάσεων.

### 3.2.3. Γραμμικοί συνδυασμοί παρατηρήσεων διαφορετικών φορέων

Οι τεχνικές των διαφορών αφορούν δεδομένα ίδιου τύπου που συλλέχθηκαν από διαφορετικούς δέκτες ενώ οι γραμμικοί συνδυασμοί αφορούν παρατηρήσεις του ίδιου τύπου από έναν δέκτη αλλά μεταξύ διαφορετικών φορέων. Με τους συνδυασμούς αυτούς διευκολύνεται η επίλυση των ασαφειών φάσης μέσω της ελαχιστοποίησης διάφορων συστηματικών επιδράσεων, όπως της ιονοσφαιρικής καθυστέρησης. Μ' αυτό τον τρόπο η τελική συνόρθωση θα περιέχει άγνωστες παραμέτρους που είναι πραγματικοί και όχι ακέραιοι αριθμοί (Φωτίου & Πικριδάς, 2012). Επίσης, διάφοροι αλγόριθμοι γραμμικών συνδυασμών μαζί με την εφαρμογή τριπλών διαφορών χρησιμοποιούνται στο στάδιο της προεπεξεργασίας των δεδομένων για τον έλεγχο της ποιότητάς τους, ανιχνεύοντας π.χ. τους πιθανούς κύκλους ολίσθησης. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι παρατηρήσεις που συνθέτουν τους γραμμικούς συνδυασμούς μπορεί να είναι είτε οι αρχικές φάσεις (φάσεις μηδενικής διαφοράς) είτε κάποιες διαφορές τους, συνήθως οι διπλές διαφορές. Παρόμοιοι συνδυασμοί μπορούν να εξαχθούν και για τον κώδικα P αλλά και για τα νέα πολιτικά σήματα. Παρακάτω παρατίθενται οι βασικές σχέσεις των γραμμικών συνδυασμών που χρησιμοποιούνται σύμφωνα με το εγχειρίδιο του λογισμικού GAMIT (Herring et al., 2018) τόσο για την προεπεξεργασία των δεδομένων όσο και για την επίλυση των ασαφειών φάσης:

➤ **Συνδυασμός  $L_3$  (ελεύθερος ιονόσφαιρας):**

$$L_3 = a_1 L_1 - a_2 L_2 = 2.5457 L_1 - 1.5457 L_2 \quad (\text{σε μονάδες μήκους}) \quad (3.24)$$

$$\text{όπου} \quad \alpha_1 = m_1 \frac{f_1}{f_m}, \quad \alpha_2 = m_2 \frac{f_2}{f_m}, \quad f_m = m_1 f_1 + m_2 f_2$$

$f_m$  η φάση του γραμμικού συνδυασμού

$f_1$  και  $f_2$  οι φάσεις των φορέων

$m_1$  και  $m_2$  αυθαίρετοι, ακέραιοι ή πραγματικοί αριθμοί

Με τη χρήση του παραπάνω συνδυασμού σχεδόν απαλείφεται το ιονοσφαιρικό σφάλμα αλλά ταυτόχρονα εισάγεται περίπου τριπλάσιος θόρυβος σε σχέση με τις αρχικές παρατηρήσεις. Έτσι, για βάσεις μερικών km δεν θα πρέπει να χρησιμοποιείται καθώς οι ασάφειες φάσεις μπορούν να επιλυθούν σε ικανοποιητικό βαθμό με τη χρήση των διπλών διαφορών.

➤ **Συνδυασμός  $L_4$  (ανεξάρτητος γεωμετρίας)**

$$L_4 = L_1 - L_2, \quad \alpha_1 = 1, \quad \alpha_2 = -1 \quad (3.25)$$

Ο παραπάνω συνδυασμός είναι ανεξάρτητος των σφαλμάτων των ρολογιών, της τροπόσφαιρας καθώς και της γεωμετρίας (τροχιές δορυφόρων, θέσεις σημείων). Επίσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση ιονοσφαιρικών μοντέλων και την ανίχνευση κύκλων ολίσθησης, παρακολουθώντας τη μεταβολή του στο χρόνο καθώς για παρατηρήσεις με μικρή χρονική διαφορά η ιονοσφαιρική μεταβολή είναι μικρή και ο όρος των ασαφειών παραμένει σταθερός (εφόσον δεν υπάρξει απώλεια σήματος).

➤ **Συνδυασμός στενής οδού  $L_n$**

$$L_n = \frac{1}{f_1 + f_2} (f_1 L_1 + f_2 L_2), \quad \alpha_1 = 154/274, \quad \alpha_2 = 120/274 \quad (3.26)$$

➤ **Συνδυασμός ευρείας οδού  $L_5$**

$$L_5 = \frac{1}{f_1 - f_2} (f_1 L_1 - f_2 L_2), \quad \alpha_1 = 154/34, \quad \alpha_2 = 120/34 \quad (3.27)$$

Ο συνδυασμός  $L_5$  μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επίλυση των ασαφειών καθώς έχοντας σχετικά μεγάλο μήκος κύματος ( $\lambda_m = 86\text{cm}$ ) είναι λιγότερος ευαίσθητος στα συστηματικά σφάλματα. Ωστόσο σημαντικό μειονέκτημα αποτελεί το γεγονός ότι με τον συνδυασμό αυτό αυξάνεται ο θόρυβος περίπου 5.7 φορές. Έτσι, αποτελεί κοινή πρακτική, όπως θα αναλυθεί στη συνέχεια, να προσδιορίζονται αρχικά οι ασάφειες του συνδυασμού ευρείας οδού  $L_5$  και στη συνέχεια με τη βοήθεια του συνδυασμού της στενής οδού  $L_n$  να προσδιορίζονται οι ασάφειες φάσης στην  $L_1$  και  $L_2$ . Ο συνδυασμός  $L_n$  χαρακτηρίζεται από παρατηρήσεις μεγαλύτερης ακρίβειας σε σχέση με τον  $L_5$ , αλλά λόγω μικρότερου μήκους κύματος ( $\lambda_m = 11\text{cm}$ ) οι ασάφειες επιλύονται δυσκολότερα (Φωτίου & Πικριδάς, 2012).

#### ➤ Συνδυασμός $L_6$ (Melbourne – Wübbena LC)

$$L_6 = L_5 - P_n \quad (3.28)$$

Ο συνδυασμός  $L_6$  αποτελεί συνδυασμό φάσεων και κώδικα και ισούται με τη διαφορά των συνδυασμών ευρείας οδού των φάσεων και στενής οδού των ψευδοαποστάσεων κώδικα. Με τη χρήση του συνδυασμού  $L_6$  απαλείφονται σφάλματα των ρολογιών, της γεωμετρίας, της τροπόσφαιρας και της ιονόσφαιρας. Επίσης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό των ασαφειών της ευρείας οδού με καλής ποιότητας ψευδοαποστάσεις ενώ επειδή είναι ανεξάρτητος του μήκους της βάσης χρησιμοποιείται για ανίχνευση και εντοπισμό των κύκλων ολίσθησης σε επίπεδο μηδενικών διαφορών.

### 3.2.4. Στρατηγική επίλυσης βάσεων και ασαφειών φάσης

Πριν από την επίλυση των βάσεων πραγματοποιείται η προεπεξεργασία των παρατηρήσεων. Συγκεκριμένα, στο λογισμικό GAMIT αυτή η διαδικασία πραγματοποιείται από το υποπρόγραμμα autcln. Μέσω κατάλληλων αλγορίθμων που υλοποιούν τους γραμμικούς συνδυασμούς παρατηρήσεων φάσεων και ψευδοαποστάσεων και των τεχνικών των διαφορών επιτυγχάνεται η ανίχνευση χονδροειδών σφαλμάτων, ο έλεγχος για την ύπαρξη σφαλμάτων πολυανάκλασης και ο εντοπισμός ή η διόρθωση των απωλειών κύκλων. Στη συνέχεια, ακολουθεί η παρακάτω διαδικασία επίλυσης των ασαφειών σε επίπεδο διπλών διαφορών, όπως αυτή εφαρμόζεται για κάθε βάση (Dong, Herring, & King, 1998):

α. Πραγματοποιείται εκτίμηση των συντεταγμένων των άγνωστων σημείων και των υπολοίπων παραμέτρων, με συνόρθωση των διπλών διαφορών θέτοντας αυστηρές δεσμεύσεις τις συντεταγμένες των σταθμών του δικτύου της IGS και κάνοντας χρήση του συνδυασμού  $L_3$  (ελεύθερο ιονόσφαιρας)

β. Οι συντεταγμένες των σημείων, όπως έχουν προκύψει από την επίλυση με  $L_3$ , διατηρούνται σταθερές και με χρήση του συνδυασμού  $L_5$  (ευρείας οδού) και μιας διαδικασίας επαναλήψεων και συγκλήσεων επιλύονται οι ασάφειες φάσης της ευρείας οδού σε ακέραιους αριθμούς.

γ. Εφόσον έχουν επιλυθεί σωστά οι ασάφειες της ευρείας οδού, διατηρώντας σταθερές τις συντεταγμένες μόνο των γνωστών σημείων, πραγματοποιείται και η επίλυση των ασαφειών

φάσης της στενής οδού  $L_n$ . Στο στάδιο αυτό χρησιμοποιούνται επίσης εφημερίδες ακριβείας για τις τροχιές των δορυφόρων αλλά και μοντελοποίηση της τροπόσφαιρας ειδικά για μεγάλες βάσεις.

δ. Μετά την επίλυση των ασαφειών και της στενής οδού, πραγματοποιείται η επίλυση των ασαφειών φάσης στην  $L_1$  και στην  $L_2$  και στη συνέχεια η τελική συνόρθωση της βάσης (υπο-πρόγραμμα solve στο λογισμικό GAMIT), κατά την οποία χρησιμοποιείται συνήθως ο συνδυασμός  $L_3$  (επιλογή LC\_AUTCLN στο GAMIT). Στο στάδιο αυτό, παράγονται οι δύο επιλύσεις που έχουν αναφερθεί σε προηγούμενη ενότητα, με αυστηρές και χαλαρές δεσμεύσεις, όπου η μεν πρώτη παρέχει τον προσδιορισμό των συντεταγμένων των άγνωστων σημείων εάν η διαδικασία ολοκληρωθεί σε επίπεδο GAMIT, ενώ η δεύτερη λειτουργεί ως είσοδος για περαιτέρω επεξεργασία με το λογισμικό GLOBK.

### **3.2.5. Παράμετροι και μοντέλα εισαγωγής στο λογισμικό GAMIT**

Οι περισσότερες μεταβλητές, μοντέλα και παράμετροι εισαγωγής που επηρεάζουν τον αλγόριθμο επεξεργασίας του GAMIT περιέχονται στο αρχείο sestbl. Στην ενότητα αυτή θα αναφερθούν οι βασικότερες επιλογές αυτών των παραμέτρων ώστε να υπάρξει η κατάλληλη τεκμηρίωση των πειραμάτων και των αποτελεσμάτων που θα παρουσιασθούν στην συνέχεια. Ο αναγνώστης παραπέμπεται στη σχετική βιβλιογραφία (Τζαβάρας, 2010; Παπαδόπουλος, 2015) για μια πιο ολοκληρωμένη εικόνα των επιλογών και της απαραίτητης μεθοδολογίας για την εγκατάσταση και διεξαγωγή των πειραμάτων.

Στο πλαίσιο προσδιορισμού των συντεταγμένων των Μόνιμων Σταθμών υπολογίσθηκαν επίσης οι παράμετροι προσανατολισμού της Γης και οι ζενίθιες ατμοσφαιρικές υστερήσεις του GPS (επιλογή στο GAMIT Choice of Experiment = RELAX). Έτσι, συνολικά υπολογίσθηκαν:

- Οι 3-διάστατες καρτεσιανές συντεταγμένες του κάθε σταθμού.
- Οι 6 τροχιακές παράμετροι Kepler για τον κάθε δορυφόρο:

$\sqrt{a}$  : τετραγωνική ρίζα μεγάλου ημιάξονα της ελλειπτικής τροχιάς

$e$ : εκκεντρότητα της ελλειπτικής τροχιάς

$i_0$  : γωνία κλίσης κατά την εποχή αναφοράς

$\Omega_0$ : μήκος συνδέσμου ανάβασης κατά την εποχή αναφοράς

$M_0$  : μέση ανωμαλία κατά την εποχή αναφοράς

- Οι παράμετροι προσανατολισμού της Γης:

$X_p, Y_p, \dot{X}_p, \dot{Y}_p$  : οι συντεταγμένες του πόλου και αντίστοιχοι ρυθμοί μεταβολής

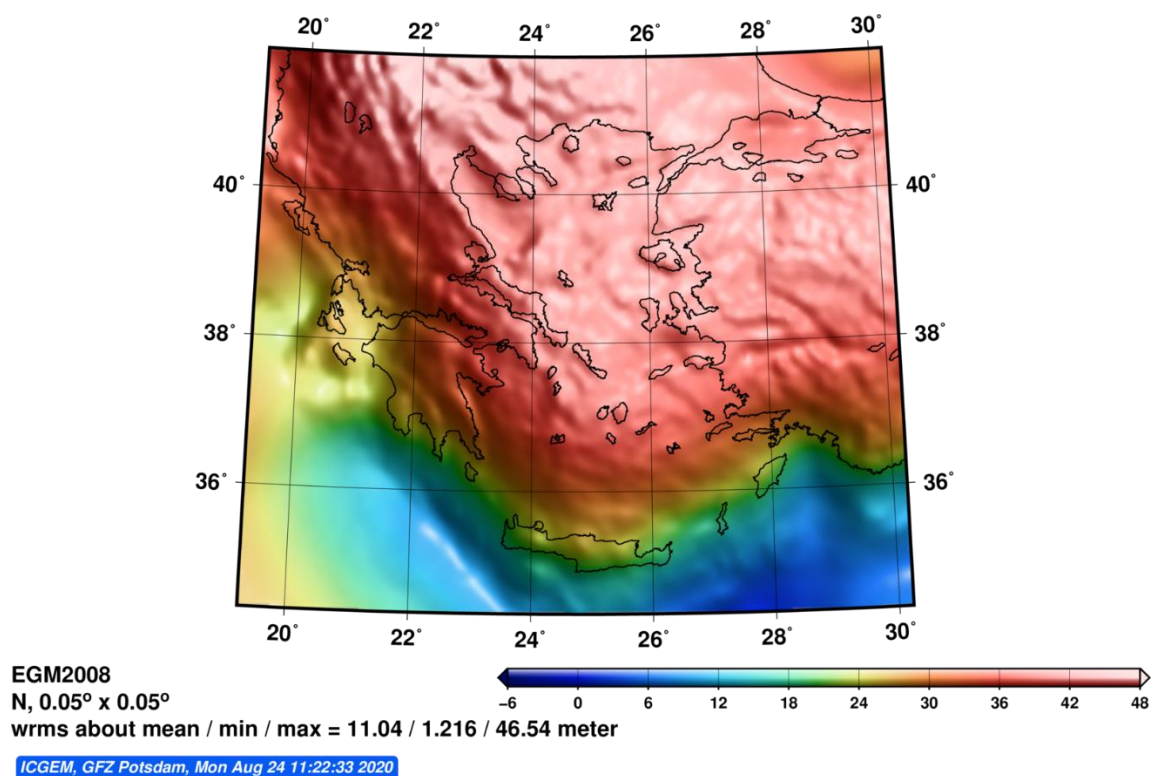
$UT1, UT1$  : ο παγκόσμιος χρόνος και ο ρυθμός μεταβολής

$\Delta_\varepsilon, \Delta_\psi$  : κλώνιση και λόξωση

Βασικό παράγοντα κάθε υψηλής ακρίβειας γεωδαιτικού πειράματος GNSS αποτελεί το μοντέλο κίνησης των δορυφόρων καθώς η τριδιάστατη ακρίβεια της εκτιμώμενης βάσης, ως κλάσμα του μήκους της, είναι περίπου ίση με την κλασματική ακρίβεια των τροχιακών εφημερίδων που χρησιμοποιούνται στην ανάλυση. Επιπλέον, η ακριβής μοντελοποίηση της κίνησης των δορυφόρων προϋποθέτει τη γνώση της επιτάχυνσης που προκαλείται από τη βαρυτική έλξη του Ηλίου και της Σελήνης, τους υψηλότερους συντελεστές του γήινου πεδίου βαρύτητας, τις παλίρροιες του σταθερού φλοιού της Γης και των ωκεανών και κάποιες μη βαρυτικές επιδράσεις όπως η επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας, της ακτινοβολίας που ανακλάται από τη Γη, της ακτινοβολίας από την μετάδοση των ραδιοσημάτων του δορυφόρου και των εκπομπών αερίων από το σύστημα ελέγχου ύψους του δορυφόρου. Τέλος, εκτός της τροχιακής κίνησης του δορυφόρου, θα πρέπει να ληφθούν υπόψιν μετατοπίσεις (τάξης μεγέθους μέτρου) ανάμεσα στο κέντρο μάζας του δορυφόρου και του κέντρου φάσης της κεραίας μετάδοσης και προσωρινές μετακινήσεις (τάξης μεγέθους αρκετών cm) διάρκειας έως και μισής ώρας κατά τη διάρκεια ελιγμών των δορυφόρων για να διατηρήσουν τους ηλιακούς συλλέκτες στραμμένους προς τον Ήλιο (yaw bias).

Οι παραπάνω επιδράσεις λαμβάνονται υπόψιν για την διεξαγωγή των πειραμάτων καθορίζοντας τις κατάλληλες παραμέτρους και χρησιμοποιώντας τα αντίστοιχα μοντέλα, κυρίως στο προπαρασκευαστικό αρχείο *sestbl*. για το λογισμικό GAMIT. Έτσι, για τις *a-priori* τιμές των τροχιακών στοιχείων των δορυφόρων χρησιμοποιήθηκαν οι τελικές εφημερίδες ακριβείας της IGS ενώ για τις παραμέτρους προσανατολισμού της Γης, οι πίνακες Bulletin A της IERS. Οι δεσμεύσεις για τις παραμέτρους προσανατολισμού της Γης, τέθηκαν στα 3" και 0.3"/d για τη θέση του πόλου και το ρυθμό μεταβολής αντίστοιχα, ενώ για το χρόνο UT1 0.00002 sec και 0.02s/d για το ρυθμό μεταβολής. Το γεωδυναμικό μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε είναι το EGM08 (Pavlis, Holmes, Kenyon, & Factor, 2012), ενώ για τις παλίρροιες του σταθερού φλοιού της Γης, ακολουθήθηκαν οι συμβάσεις της IERS το 2003 (Mccarthy & Petit, 2004) και χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο FES2004 για τις ωκεάνιες παλίρροιες.





Εικόνα 8 - Το μοντέλο γεωειδούς EGM08 για την Ελλάδα  
 (Πηγή: ICGEM)

Σημαντικός παράγοντας στην ορθή επίλυση των ασαφειών φάσης αποτελεί η μοντελοποίηση της τροποσφαιρικής καθυστέρησης. Το λογισμικό GAMIT παρέχει την δυνατότητα εκτίμησης των παραμέτρων τροποσφαιρικής υστερήσης του σήματος για κάθε σταθμό, με τα χρονικά διαστήματα των υπολογισμών να επιλέγονται ανά δύο ώρες ενώ οι δεσμεύσεις για την ζενίθια υστερήση να καθορίζονται στο 0.5 m και 0.01m για τις ατμοσφαιρικές βαθμίδες σε γωνία ύψους 10°. Παράλληλα χρησιμοποιήθηκε ως συνάρτηση απεικόνισης για την τροποσφαιρική επίδραση η VMF1 (Vienna Mapping Function 1) (Boehm, Werl, & Schuh, 2006a). Ο προσδιορισμός της VMF1 πραγματοποιήθηκε με δεδομένα από το Ευρωπαϊκό Κέντρο Καιρικών Προγνώσεων μετά από ανάλυση 40 ετών, τα οποία αποθηκεύτηκαν ως παράμετροι αναπτύγματος σφαιρικών αρμονικών συναρτήσεων με οριζόντια ανάλυση που αντιστοιχεί σε περίπου 125 km. Έτσι, δημιουργήθηκαν μηνιαία προφίλ της ατμόσφαιρας ανά 6 ώρες σε παγκόσμιο κάναβο με βήμα 30° κατά μήκος και 15° κατά πλάτος, αποτελούμενα από 23 επίπεδα, που περιέχουν τιμές υψομέτρου, θερμοκρασίας, πίεσης υδρατμών και συνολικής πίεσης. Σημειώνεται ότι επειδή ο υγρός παράγοντας της τροποσφαιρικής καθυστέρησης και οι τοπικές βαθμίδες δεν μπορούν να προσδιορισθούν εύκολα ακόμα και από ένα αριθμητικό μοντέλο καιρού, όπως το VMF1, είναι απαραίτητος ο υπολογισμός αυτών των παραμέτρων από τα δεδομένα GPS.

Τέλος, στην επεξεργασία χρησιμοποιήθηκαν οι απόλυτες τιμές βαθμονόμησης των κεραιών για τους δορυφόρους (επιλογή SV antenna model = ELEV) και τις κεραιές των δεκτών GNSS (επιλογή Antenna Model = AZEL). Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο ngs14\_2076.atx για τις απόλυτες τιμές βαθμονόμησης των κεραιών των δεκτών.

### 3.3 Μετασχηματισμός Ομοιότητας 3-Δ

Η φυσική σημασία της διαχρονικής επεξεργασίας των συντεταγμένων των σταθμών αποδίδεται με την υλοποίηση και την ένταξη σ' ένα πλαίσιο αναφοράς. Συγκεκριμένα με το υποπρόγραμμα `glogr` του λογισμικού `GLOBK` δύναται να πραγματοποιηθεί ένας 7-παραμετρικός μετασχηματισμός ομοιότητας μέσω του οποίου οι σταθμοί GPS του δικτύου μελέτης μετασχηματίζονται και εντάσσονται σε κάποιο πλαίσιο αναφοράς. Στο πλαίσιο της παρούσας μελέτης, ως σταθμοί αναφοράς χρησιμοποιήθηκαν 20 Μόνιμοι Σταθμοί του δικτύου της IGS, υλοποιώντας έτσι το παγκόσμιο πλαίσιο αναφοράς ITRF2014.

Οποιοδήποτε καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων μπορεί να μετασχηματισθεί σ' ένα άλλο καρτεσιανό σύστημα μέσω τριών στροφών, εάν το κέντρο των αξόνων τους είναι ίδιο και είναι και τα δύο δεξιόστροφα ή αριστερόστροφα συστήματα συντεταγμένων (Χυ, 2007). Οι τρεις πίνακες περιστροφής είναι οι εξής:

$$R_1(a) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos a & \sin a \\ 0 & -\sin a & \cos a \end{pmatrix} \quad R_2(a) = \begin{pmatrix} \cos a & 0 & -\sin a \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin a & 0 & \cos a \end{pmatrix} \quad R_3(a) = \begin{pmatrix} \cos a & \sin a & 0 \\ -\sin a & \cos a & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3.29)$$

όπου  $a$ : η γωνία περιστροφής

Για δύο καρτεσιανά συστήματα συντεταγμένων με διαφορετικές αρχές των αξόνων και διαφορετικές μονάδες μήκους, ο γενικός μετασχηματισμός δίνεται από τον παρακάτω πίνακα και διαγραμματικά φαίνεται στο αντίστοιχο σχήμα:

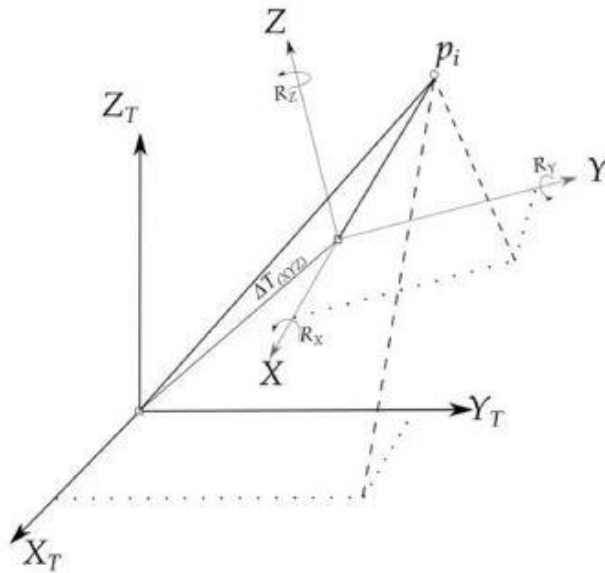
$$\begin{pmatrix} x_n \\ y_n \\ z_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_o \\ y_o \\ z_o \end{pmatrix} + \mu R \begin{pmatrix} x_{old} \\ y_{old} \\ z_{old} \end{pmatrix} \quad (3.30)$$

όπου  $\mu$ : ο παράγοντας κλίμακας (ή ο λόγος των δύο μονάδων μήκους)

$R$ : πίνακας μετασχηματισμού που σχηματίζεται από τρεις κατάλληλες στροφές

$x_n, x_{old}$ : οι καινούργιες και οι παλιές συντεταγμένες

$x_o$ : το διάνυσμα μετάθεσης της αρχής των αξόνων του παλιού και καινούργιου συστήματος συντεταγμένων



Σχήμα 4 - 7-παραμετρικός μετασχηματισμός ομοιότητας

Εάν οι γωνίες στροφής  $\alpha$  είναι πολύ μικρές τότε ισχύει  $\sin \alpha \approx \alpha$  και  $\cos \alpha \approx 1$ . Έτσι, ο πίνακας στροφής μπορεί να απλοποιηθεί και να λάβει την κάτωθι μορφή:

$$R = \begin{pmatrix} 1 & \alpha_3 & -\alpha_2 \\ -\alpha_3 & 1 & \alpha_1 \\ \alpha_2 & -\alpha_1 & 1 \end{pmatrix} \quad (3.31)$$

όπου  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  και  $\alpha_3$  είναι μικρές γωνίες στροφής γύρω από τους άξονες  $x$ ,  $y$  και  $z$  αντίστοιχα. Χρησιμοποιώντας αυτόν τον απλοποιημένο πίνακας στροφής ο μετασχηματισμός 3.30 ονομάζεται μετασχηματισμός Helmert.

Σε γραμμική μορφή και για προσεγγιστικές συντεταγμένες  $[X_i^0, Y_i^0, Z_i^0]$  ο μετασχηματισμός Helmert μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$\begin{bmatrix} \tilde{X}_i - X_i^a \\ \tilde{Y}_i - Y_i^a \\ \tilde{Z}_i - Z_i^a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & -Z_i^0 & Y_i^0 & X_i^0 \\ 0 & 1 & 0 & Z_i^0 & 0 & -X_i^0 & Y_i^0 \\ 0 & 0 & 1 & -Y_i^0 & X_i^0 & 0 & Z_i^0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \\ R_x \\ R_y \\ R_z \\ D \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix} \quad (3.32)$$

όπου  $T_x, T_y, T_z$  : οι τρεις μεταθέσεις για τους άξονες x, y, z

$R_x, R_y, R_z$  : οι τρεις στροφές για τους άξονες x, y, z

D: η μεταβολή του συντελεστή κλίμακας

Τέλος για  $i = 1, 2, \dots, n$  σημεία που συμμετέχουν στον μετασχηματισμό ο πλήρης πίνακας εξισώσεων θα είναι ο εξής:

$$\begin{bmatrix} \tilde{X}_1 - X_1^a \\ \tilde{Y}_1 - Y_1^a \\ \tilde{Z}_1 - Z_1^a \\ \vdots \\ \tilde{X}_i - X_i^a \\ \tilde{Y}_i - Y_i^a \\ \tilde{Z}_i - Z_i^a \\ \vdots \\ \tilde{X}_n - X_n^a \\ \tilde{Y}_n - Y_n^a \\ \tilde{Z}_n - Z_n^a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & -Z_1^0 & Y_1^0 & X_1^0 \\ 0 & 1 & 0 & Z_1^0 & 0 & -X_1^0 & Y_1^0 \\ 0 & 0 & 1 & -Y_1^0 & X_1^0 & 0 & Z_1^0 \\ \vdots & & & & \vdots & & \\ 1 & 0 & 0 & 0 & -Z_i^0 & Y_i^0 & X_i^0 \\ 0 & 1 & 0 & Z_i^0 & 0 & -X_i^0 & Y_i^0 \\ 0 & 0 & 1 & -Y_i^0 & X_i^0 & 0 & Z_i^0 \\ \vdots & & & & \vdots & & \\ 1 & 0 & 0 & 0 & -Z_n^0 & Y_n^0 & X_n^0 \\ 0 & 1 & 0 & Z_n^0 & 0 & -X_n^0 & Y_n^0 \\ 0 & 0 & 1 & -Y_n^0 & X_n^0 & 0 & Z_n^0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \\ R_x \\ R_y \\ R_z \\ D \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix} \quad (3.33)$$

### 3.4 Λαδογικές συνορθώσεις δικτύου – Προσέγγιση Kalman

Το υποπρόγραμμα GLOBK είναι ένα φίλτρο Kalman, με κύρια αποστολή τον συνδυασμό επιλύσεων από επεξεργασία πρωτογενών δεδομένων από διαστημικές-γεωδαιτικές ή επίγειες παρατηρήσεις. Ως δεδομένα εισάγονται «ψευδο-παρατηρήσεις» της εκτίμησης και των πινάκων συμμεταβλητότητας των συντεταγμένων των σταθμών, των παραμέτρων προσανατολισμού της Γης και των τροχιακών στοιχείων, τα οποία έχουν προκύψει από την επεξεργασία των πρωτογενών παρατηρήσεων. Οι αρχικές επιλύσεις θα πρέπει να έχουν προκύψει με χαλαρές αρχικές αβεβαιότητες, έτσι ώστε οι δεσμεύσεις να εφαρμοστούν στο πλαίσιο της συνδυασμένης επίλυσης.

Η βασική αρχή της κλασικής μορφής του φίλτρου Kalman συνοψίζεται ως εξής (Yang, 1999) :

Το γραμμικοποιημένο σύστημα των εξισώσεων παρατήρησης μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$V_i = L_i - A_i X_i \quad P_i \quad (3.34)$$

όπου:

L: το διάνυσμα των παρατηρήσεων διαστάσεως m

A: ο πίνακας των συντελεστών των αγνώστων διαστάσεως  $m \times n$

X: το διάνυσμα των αγνώστων διαστάσεως n

V: το διάνυσμα των υπολοίπων διαστάσεως m

n: ο αριθμός των αγνώστων

m: ο αριθμός των παρατηρήσεων

P<sub>i</sub>: ο πίνακας βάρους

Θεωρώντας ότι το σύστημα των εξισώσεων είναι γνωστό αναπαρίσταται ως εξής:

$$U_i = X_i - F_{i,i-1} X_{i-1} \quad i = 2, 3, \dots, \quad (3.35)$$

όπου:

F: ο μεταβατικός πίνακας διαστάσεων  $n \times n$

U: το διάνυσμα των υπολοίπων διαστάσεων n

Τα διανύσματα U και V είναι ασυσχέτιστα και τείνουν προς το μηδέν και χρησιμοποιώντας τον νόμο μετάδοσης μεταβλητοτήτων, από την εξίσωση (3.35) προκύπτει:

$$Q(X_i) = F_{i,i-1} Q(X_{i-1}) (F_{i,i-1})^T + Q_U \quad (3.36)$$

Η κανονική εξίσωση 3.34 μπορεί να σχηματισθεί ως εξής:

$$M_i X_i = B_i \quad (3.37)$$

Στην πρώτη επανάληψη ή εποχή, όπου  $i = 1$ , η εξίσωση (3.37) επιλύεται σύμφωνα με την μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων:

$$\tilde{X}_i = Q_i B_i, \text{ όπου } Q_i = M_i^{-1} \text{ και υποθέτοντας ότι } \tilde{Q}_i = Q_i$$

όπου  $\tilde{X}_i$  και  $\tilde{Q}_i$  είναι οι εκτιμώμενες τιμές. Χρησιμοποιώντας αυτές τις τιμές και τον μεταβατικό πίνακα, μπορούν να υπολογιστούν οι άγνωστες τιμές και ο πίνακας μεταβλητότητας της επόμενης εποχής (για  $i = 2$ ):

$$X'_i = F_{i,i-1} \tilde{X}_{i-1} \text{ και} \quad (3.38)$$

$$Q'_i = F_{i,i-1} \tilde{Q}_{i-1} (F_{i,i-1})^T + Q_U \quad (3.39)$$

όπου  $X'_i$  και  $Q'_i$  είναι οι τιμές πρόβλεψης (διάνυσμα και πίνακας). Οι εκτιμώμενες τιμές αυτής της εποχής μπορούν να υπολογιστούν ως εξής:

$$\tilde{X}_i = X'_i + K(L_i - A_i X'_i) \quad (3.39)$$

$$\tilde{Q}_i = (E - KA_i)Q'_i \quad (3.40)$$

$$K = Q'_i A_i^T (A_i Q'_i A_i^T + Q_V)^{-1} \quad (3.41)$$

όπου  $K$  ο πίνακας κέρδους Kalman.

Για την επόμενη εποχή  $i$ , οι τιμές πρόβλεψης μπορούν να υπολογισθούν με τις εξισώσεις (3.38) και (3.39), και οι εκτιμώμενες τιμές με τις εξισώσεις (3.39) και (3.40). Αυτή η επαναληπτική διαδικασία ονομάζεται φίλτρο Kalman.

Στο κλασικό φίλτρο Kalman, πραγματοποιείται η υπόθεση ότι για το πρόβλημα της εξίσωσης (3.34) υπάρχει ένας μεταβατικός πίνακας  $F_{i,i-1}$  στην εξίσωση (3.35) και ο συμπαραγόμενος  $Q_U$ . Έτσι, οι εκτιμώμενες τιμές από τη διαδικασία του φίλτρου Kalman εξαρτώνται από τον  $F_{i,i-1}$  και  $Q_U$ . Ο πίνακας μετάβασης θα πρέπει να εξαρτάται από ισχυρά φυσικά μοντέλα και ο συμπαραγόμενος θα πρέπει να είναι γνωστός ή λογικά ορισμένος. Εάν λοιπόν η περιγραφή του συστήματος είναι αρκετά ακριβής, το φίλτρο Kalman θα οδηγήσει σε μια επίλυση με μεγαλύτερη ακρίβεια. Ωστόσο, εάν το σύστημα δεν είναι επαρκώς γνωστό, τα αποτελέσματα του φίλτρου μερικές φορές δεν συγκλίνουν στις αληθινές τιμές. Επιπλέον, μια κινηματική διαδικασία είναι γενικά δύσκολο να περιγραφεί με ακρίβεια από θεωρητικά συστήματα εξισώσεων, σε αντίθεση με μια δυναμική διαδικασία (όπως η χρήση GPS για παρακολούθηση δορυφόρου από δορυφόρο ή για καθορισμό τροχιών) όπου το σύστημα εξισώσεων μπορεί να σχηματισθεί πολύ καλά από τις εξισώσεις της τροχιάς. Τέλος, ένα άλλο πρόβλημα του φίλτρου Kalman είναι η μεγάλη εξάρτηση του από τις αρχικά ορισμένες τιμές. Για την αντιμετώπιση των παραπάνω αδυναμιών έχουν αναπτυχθεί διάφορες τεχνικές όπως το Robust φίλτρο Kalman ή το προσαρμοσμένο φίλτρο Kalman, η περιγραφή των οποίων εκφεύγουν από τον σκοπό της παρούσας εργασίας.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Ανάλυση αποτελεσμάτων επεξεργασίας παρατηρήσεων GPS σε Δίκτυο Μελέτης στον ελληνικό χώρο

---

### 4.1. Εισαγωγή

Η παραγωγή ενός αξιόπιστου πεδίου ταχυτήτων για τον ελλαδικό χώρο, μέσα από την επεξεργασία πρωτογενών παρατηρήσεων μόνιμων σταθμών GPS, προϋποθέτει την ύπαρξη ενός ορθά καταμεμημένου και ικανού σε αριθμό σταθμών, δικτύου μελέτης. Η υλοποίηση του δικτύου στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, πραγματοποιήθηκε με γνώμονα την θέση των σταθμών, ώστε να βρίσκονται ισοκαταμεμημένοι σ' όλη την ελληνική επικράτεια, το χρονικό διάστημα λειτουργίας τους, ώστε να καλύπτεται τουλάχιστον το απαραίτητο χρονικό διάστημα των 2.5 ετών, για την εκτίμηση αξιόπιστων ταχυτήτων (Blewitt & Lavallée, 2002) και τέλος την δυνατότητα διάθεσης των δεδομένων από τους διαχειριστές των σταθμών. Με βάση τα παραπάνω κριτήρια επιλέχθηκαν συνολικά 112 μόνιμοι σταθμοί GNSS κυρίως στην ελληνική επικράτεια αλλά και σε όμορες χώρες, όπως θα αναλυθούν στην συνέχεια. Λόγω της ανομοιογένειας του χρονικού διαστήματος λειτουργίας και διαθεσιμότητας των δεδομένων των παραπάνω σταθμών επιλέχθηκε ως συνολική περίοδος μελέτης του δικτύου τα 5 έτη (2015 – 2019) ώστε κάθε σταθμός να καλύπτει τουλάχιστον το κρίσιμο διάστημα των 2.5 ετών.

Τα πρωτογενή δεδομένα των σταθμών αποτελούνται από αρχεία 24h παρατηρήσεων GNSS (RINEX 30-sec), τα οποία συγκεντρώθηκαν εν μέρει από το ηλεκτρονικό αποθετήριο δεδομένων του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών (<http://www.gein.noa.gr/services/GPSData/>) και αφορούν σταθμούς του δικτύου NOANET, HxGN SmartNet αλλά και σταθμούς που έχουν ιδρυθεί μεμονωμένα από ελληνικούς και διεθνείς φορείς στο πλαίσιο διαφόρων εργασιών. Επιπλέον, δεδομένα των σταθμών του δικτύου HxGN SmartNet τα οποία δεν ήταν διαθέσιμα μέσω της παραπάνω πλατφόρμας διατέθηκαν από την εταιρία Metrica A.E, η οποία αποτελεί τον διαχειριστή του δικτύου στην Ελλάδα. Ο συνολικός όγκος των πρωτογενών δεδομένων των σταθμών που συμμετείχαν στην επεξεργασία, χωρίς να λαμβάνονται υπόψιν τα δεδομένα των μόνιμων σταθμών των δικτύων της IGS και της EUREF ξεπερνάει τα 50GB (σε συμπιεσμένη μορφή και με αρχική συμπίεση Hatanaka) ενώ ο όγκος των αποτελεσμάτων των ημερήσιων επιλύσεων εκτιμάται μεγαλύτερος του 1TB. Η ανομοιογένεια της μορφής με την οποία διατέθηκαν αρκετά δεδομένα (π.χ. παρατηρήσεις ανά ωριαία χρονικά διαστήματα) προϋπέθετε την αρχική προεπεξεργασία τους με διάφορα λογισμικά (GFZRNX, TEQC) ενώ ο μεγάλος όγκος των δεδομένων που παραγόταν κατά την επίλυση με το λογισμικό GAMIT απαιτούσε την συνεχή ανάλυση και οργάνωση των αποτελεσμάτων. Συνολικά πραγματοποιήθηκαν 7304 ημερήσιες επιλύσεις (για το σύνολο των υποδικτύων) τα αποτελέσματα των οποίων θα παρουσιασθούν στο παρόν κεφάλαιο.

### 4.2. Περιγραφή του Δικτύου Μελέτης

Το Δίκτυο Μελέτης που υλοποιήθηκε για την εκπόνηση της παρούσας εργασίας αποτελείται από τις κάτωθι κατηγορίες σταθμών:

---

α. Σταθμοί του δικτύου της IGS που υλοποιούν το πλαίσιο αναφοράς ITRF2014 για τα αποτελέσματα της εργασίας και βρίσκονται περιφερειακά της Ελλάδας.

β. Σταθμοί του δικτύου EPN, οι οποίοι βρίσκονται εντός της ελληνικής επικράτειας και λόγω πληρότητας των δεδομένων χρησιμοποιούνται για τη σύνδεση των υποδικτύων που θα αναφερθούν στη συνέχεια αλλά και στην μείωση του μήκους των βάσεων κατά τις πρωτογενείς επιλύσεις GPS.

γ. Σταθμοί που ανήκουν είτε σε δίκτυα μόνιμων σταθμών GNSS εντός της ελληνικής επικράτειας (NoaNet, SmartNet) είτε έχουν δημιουργηθεί στο πλαίσιο διαφόρων ερευνητικών εργασιών (π.χ. παρακολούθηση Κορινθιακού κόλπου) και βρίσκονται υπό την εποπτεία διαφόρων δημόσιων ή ιδιωτικών φορέων (πανεπιστήμια, ερευνητικά κέντρα, εταιρίες κτλ.).

Οι σταθμοί που ανήκουν στις πρώτες δύο κατηγορίες (των δικτύων IGS και EPN) αποτελούν στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας το δίκτυο **CoreNet** και συμμετέχουν σ' όλες τις επιμέρους επιλύσεις, ενώ οι σταθμοί της τελευταίας κατηγορίας, οι οποίοι στην ουσία αποτελούν και τους σταθμούς μελέτης, συγκροτούν δίκτυο, το οποίο στο πλαίσιο της παρούσας μελέτης ονομάζεται **HeiNet** (Hellenic Network). Εξαιτίας του μεγάλου αριθμού των σταθμών και της σύστασης από τους δημιουργούς του λογισμικού GAMIT, για τη λειτουργικότητα του κατά τις πρωτογενείς επιλύσεις (όριο συμμετοχής στις επιλύσεις 50 σταθμών) το δίκτυο HeiNet διαιρείται σε τέσσερα υποδίκτυα με κριτήρια κυρίως τη γεωγραφική κατανομή των σταθμών και την ομοιομορφία στην πληρότητα των δεδομένων. Η κατανομή των σταθμών και η συμμετοχή τους στα επιμέρους υποδίκτυα αποτελεί πειραματική προσέγγιση στο πλαίσιο της εργασίας καθώς το πρόβλημα διαίρεσης και κατανομής των σταθμών μπορεί να επιλυθεί με διάφορες προσεγγίσεις λαμβάνοντας κάθε φορά υπόψιν διαφορετικούς παράγοντες. Έτσι, μέσα από τα τελικά αποτελέσματα μπορούν να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα τα οποία μπορεί είτε να επιβεβαιώνουν την αρχική προσέγγιση είτε να επιβάλουν τη χρήση διαφορετικής, σχετικά με το πρόβλημα κατανομής και υλοποίησης των υποδικτύων των σταθμών στο ελληνικό χώρο.

#### 4.2.1. Το δίκτυο CoreNet

Το δίκτυο CoreNet αποτελείται συνολικά από 26 μόνιμους σταθμούς. Συγκεκριμένα, 20 μόνιμους σταθμούς GNSS του δικτύου της IGS, κατανεμημένοι περιφερειακά της Ελλάδας στην περιοχή της Ευρώπης και της Ασίας και 6 μόνιμους σταθμούς GNSS του δικτύου EPN, οι οποίοι βρίσκονται εντός της ελληνικής επικράτειας. Βασικά κριτήρια επιλογής των παραπάνω σταθμών αποτελούν τα κάτωθι:

- Η γεωγραφική κατανομή περιφερειακά της Ελλάδας
- Η πληρότητα και ποιότητα των δεδομένων του σταθμού
- Η συμμετοχή στο κύριο δίκτυο σταθμών της IGS (IGS14 Core)
- Η διάρκεια και έλλειψη ασυνεχειών στη λειτουργία του σταθμού.

Οι σταθμοί του CoreNet, όπως αναφέρθηκε, συμμετέχουν σ' όλες τις επιμέρους επιλύσεις καθώς επιτελούν τρεις βασικές λειτουργίες. Πρώτον, συνδέουν τα διάφορα υποδίκτυα των υπό μελέτη σταθμών, δεύτερον υλοποιούν μέσα από τους σταθμούς της IGS το πλαίσιο αναφοράς ITRF2014 και τρίτον μέσα από τους σταθμούς του EPN μειώνουν το μήκος των βάσεων

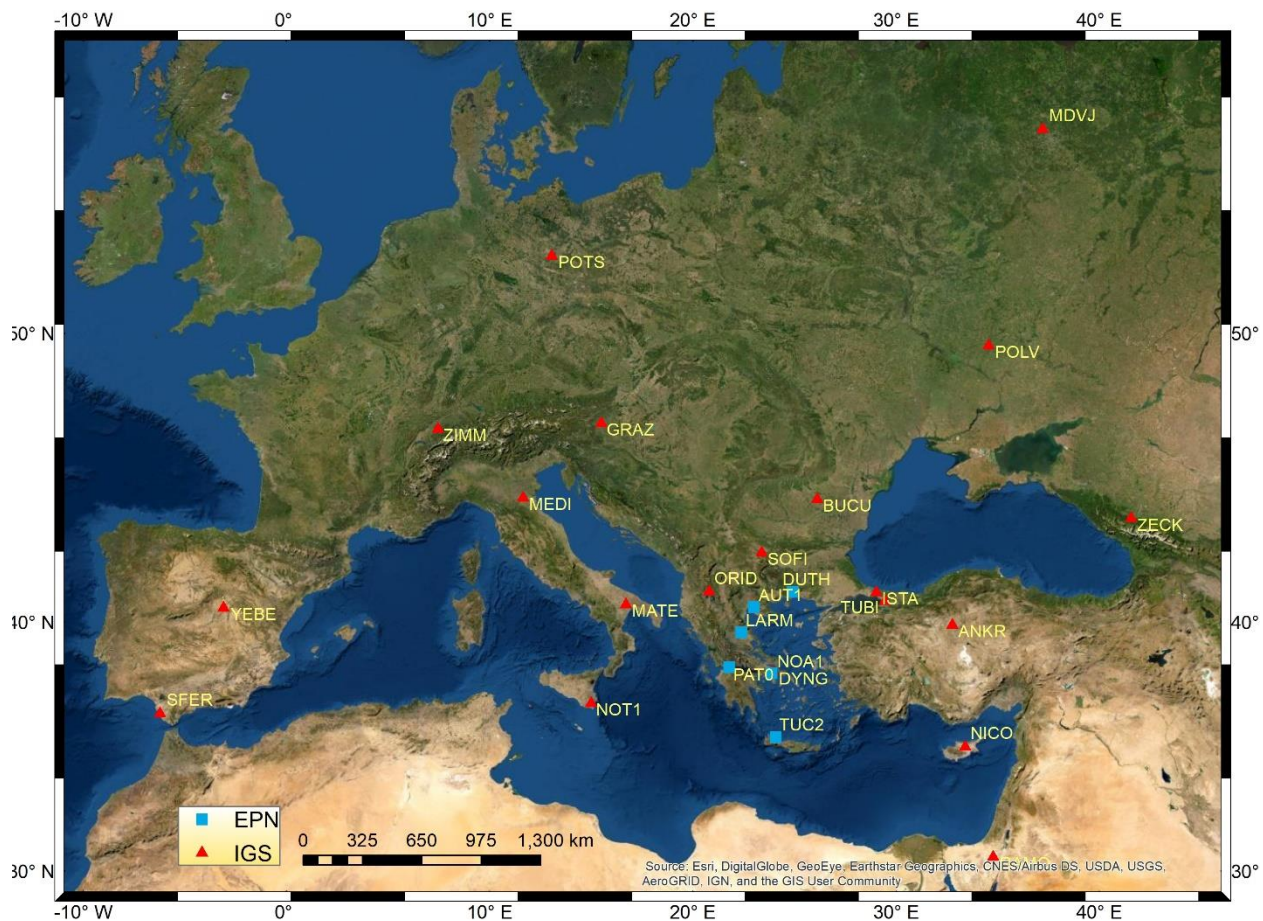


επιφέροντας ταχύτερες και λειτουργικότερες επιλύσεις. Στον Πίνακα 19 και στο Χάρτη 1 παρουσιάζονται πληροφορίες και η χωρική κατανομή των σταθμών του δικτύου CoreNet.

Πίνακας 19 - Σταθμοί του δικτύου CoreNet

<b>Όνομα</b>	<b>Χώρα</b>	<b>Πόλη</b>	<b>Δίκτυο</b>
<i>ANKR</i>	Τουρκία	Άγκυρα	IGS
<i>BUCU</i>	Ρουμανία	Βουκουρέστι	IGS
<i>DYNG</i>	Ελλάδα	Διόνυσος	IGS
<i>GRAZ</i>	Αυστρία	Graz	IGS
<i>ISTA</i>	Τουρκία	Κωνσταντινούπολη	IGS
<i>MATE</i>	Ιταλία	Ματέρα	IGS
<i>MDVJ</i>	Ρωσία	Mendeleevno	IGS
<i>MEDI</i>	Ιταλία	Medicina	IGS
<i>NICO</i>	Κύπρος	Λευκωσία	IGS
<i>NOT1</i>	Ιταλία	Noto	IGS
<i>ORID</i>	Βόρεια Μακεδονία	Οχρίδα	IGS
<i>POLV</i>	Ουκρανία	Poltava	IGS
<i>POTS</i>	Γερμανία	Potsdam	IGS
<i>RAMO</i>	Ισραήλ	Mitzpe Ramon	IGS
<i>SFER</i>	Ισπανία	San Fernando	IGS
<i>SOFI</i>	Βουλγαρία	Σόφια	IGS
<i>TUBI</i>	Τουρκία	Gebze	IGS
<i>YEBE</i>	Ισπανία	Yebe	IGS
<i>ZECK</i>	Ρωσία	Zelenchukskaya	IGS

ZIMM	Ελβετία	Zimmerwald	IGS
AUT1	Ελλάδα	Θεσσαλονίκη	EPN
DUTH	Ελλάδα	Ξάνθη	EPN
LARM	Ελλάδα	Λάρισα	EPN
NOA1	Ελλάδα	Αθήνα	EPN
PAT0	Ελλάδα	Πάτρα	EPN
TUC2	Ελλάδα	Χανιά	EPN



Χάρτης 1 - Δίκτυο Μόνιμων Σταθμών CoreNet  
(Πηγή Υποβάθρου: ESRI)

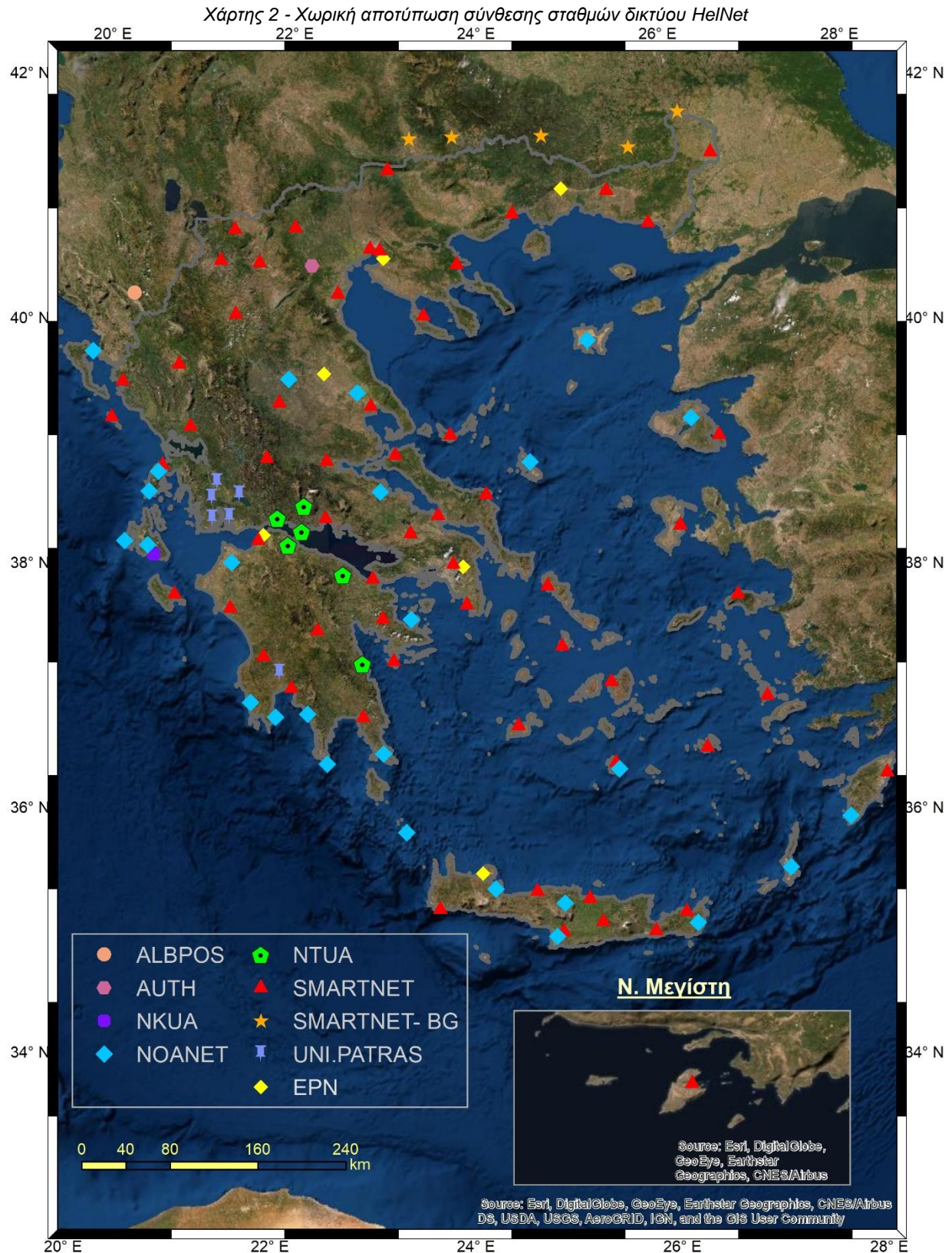
#### 4.2.2. Το δίκτυο HelNet

Το δίκτυο HelNet αποτελεί το τοπικό δίκτυο μελέτης και αποτελείται από 106 μόνιμους σταθμούς, κατανεμημένους κυρίως σ' όλο τον ελλαδικό χώρο αλλά και σε όμορες χώρες, σε σημεία εγγύς των ελληνικών συνόρων. Επιπλέον, στο δίκτυο αυτό μπορούν να περιληφθούν και οι ελληνικοί σταθμοί του δικτύου EPN καθώς συμμετέχουν σ' όλες τις επιλύσεις των επιμέρους δικτύων συνδέοντας τα υποδίκτυα μεταξύ τους ενώ παράλληλα δεν συμμετέχουν στην ένταξη του πλαισίου αναφοράς καθώς αυτό υλοποιείται αποκλειστικά από τους 20 μόνιμους σταθμούς του δικτύου της IGS. Έτσι, ο συνολικός αριθμός του δικτύου HelNet ανέρχεται στους 112 μόνιμους σταθμούς των οποίων πληροφορίες και η χωρική κατανομή φαίνονται στον παρακάτω πίνακα και χάρτη αντίστοιχα:

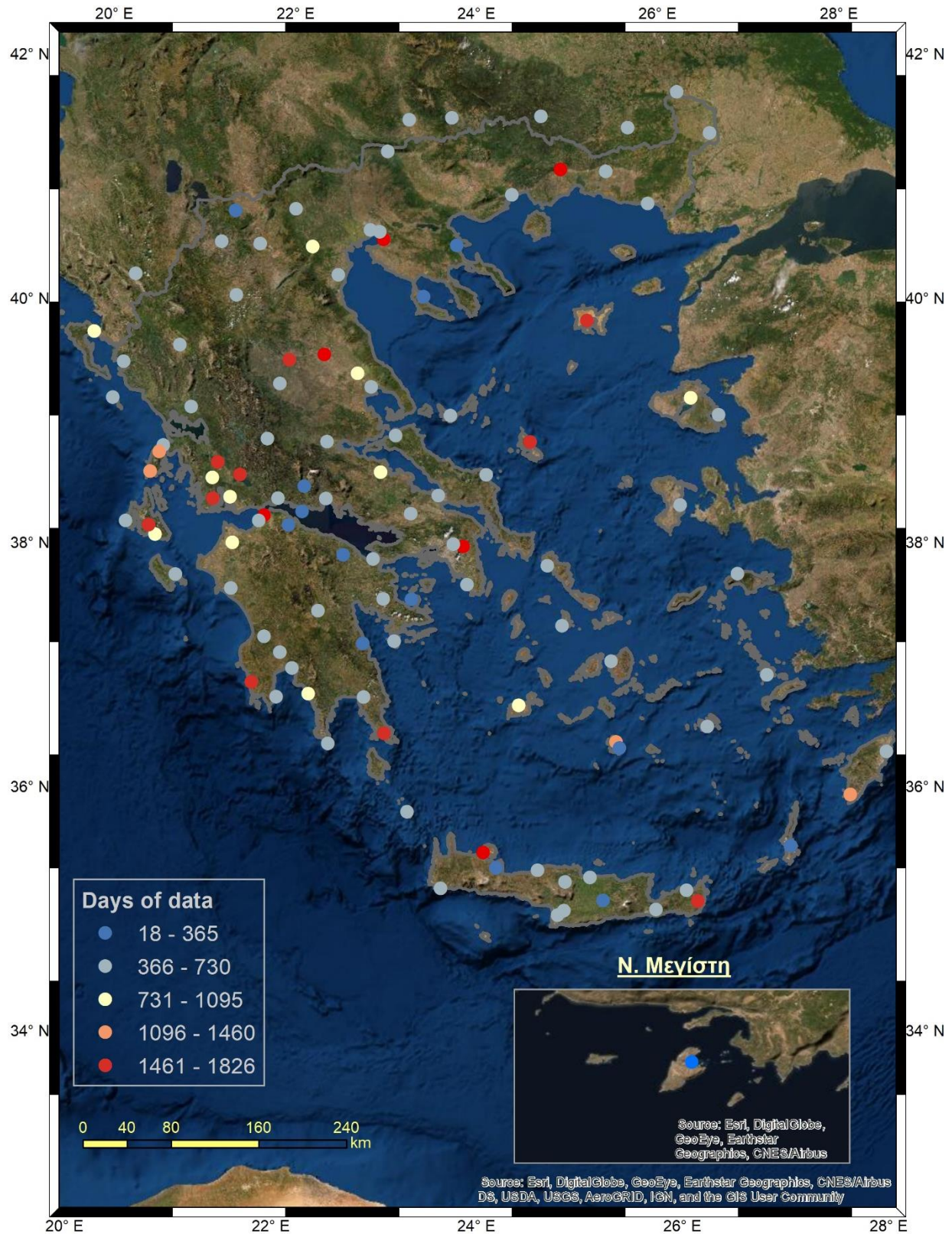
Πίνακας 20 - Σύνοψη σταθμών δικτύου HelNet.

Κύριος Φορέας Διαχείρισης	Δίκτυο GNSS	Αριθμός σταθμών στο δίκτυο HelNet
<b>Metrica A.E.</b>	HxGN SmartNet	61
<b>Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών</b>	NOANET	25
<b>EUREF</b>	EPN	6
<b>Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο</b>	NTUA	6
<b>Πανεπιστήμιο Πατρών</b>	-	6
<b>Metrica A.E.</b>	HxGN SmartNet - BG	5
<b>Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών</b>	NKUA	1
<b>ZRPP</b>	ALBPOS	1
<b>Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης</b>	HERMES	1









Χάρτης 3 - Χάρτης διαθεσιμότητας δεδομένων των σταθμών

Στον *Χάρτη 3* αποδίδεται χωρικά η διαθεσιμότητα των δεδομένων των μόνιμων σταθμών που συμμετέχουν στο δίκτυο HelNet. Παρατηρείται ότι τα δεδομένα παρουσιάζουν μια ομοιόμορφη κατανομή σ' όλη την ελληνική επικράτεια, εξαιρουμένου του κορινθιακού κόλπου, στον οποίο λόγω ιδιαίτερων μορφολογικών συνθηκών διατίθενται μια πληθώρα δεδομένων από διάφορους φορείς.

### 4.2.3. Τα υποδίκτυα μελέτης

Σύμφωνα με τις οδηγίες του λογισμικού GAMIT (Herring, King, Floyd, & McClusky, 2018) η διαδικασία των επιλύσεων επιτελείται πιο αποδοτικά για δίκτυα των οποίων οι σταθμοί δεν ξεπερνούν συνολικά τους 50. Έτσι, αποφασίσθηκε ο καταμερισμός των σταθμών σε τέσσερα υποδίκτυα τα οποία αποτελούνται το καθένα από περίπου 50 σταθμούς. Σημειώνεται ότι στον αριθμό αυτόν συμπεριλαμβάνονται και οι σταθμοί του δικτύου CoreNet (IGS και EPN) που εκτός των άλλων αποτελούν και τα κοινά σημεία μεταξύ των εκάστοτε υποδικτύων. Έτσι, τα τέσσερα υποδίκτυα που δημιουργήθηκαν είναι τα κάτωθι:

α. Το υποδίκτυο **North subnet**, το οποίο περιλαμβάνει σταθμούς που χωροθετούνται στη βόρεια Ελλάδα, που αποτελεί το πιο σταθερό τμήμα της Ελλάδας αφού ακολουθεί την κίνηση της ευρασιατικής πλάκας.

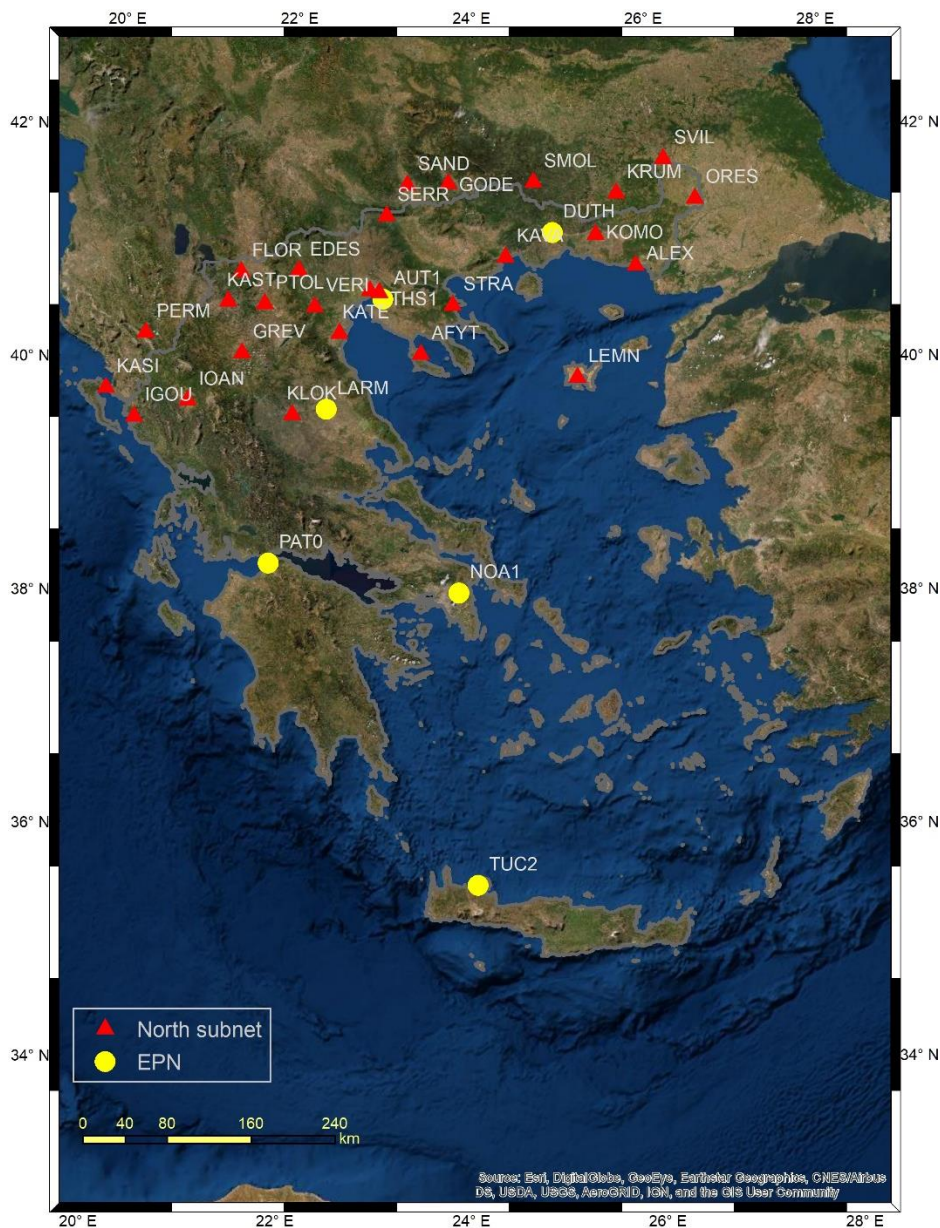
β. Το υποδίκτυο **South subnet** που περιλαμβάνει σταθμούς στη νότια Ελλάδα, περιοχή με έντονες γεωδυναμικές μεταβολές.

γ. Το υποδίκτυο **West subnet** που περιλαμβάνει σταθμούς στη δυτική Ελλάδα και κυρίως στα νησιά του Ιονίου και τον Κορινθιακό Κόλπο, περιοχές με έντονη γεωδυναμική συμπεριφορά.

δ. Το υποδίκτυο **East subnet** που περιλαμβάνει σταθμούς στην Ανατολική Ελλάδα, περιοχή με ηπιότερες γεωδυναμικές μεταβολές.

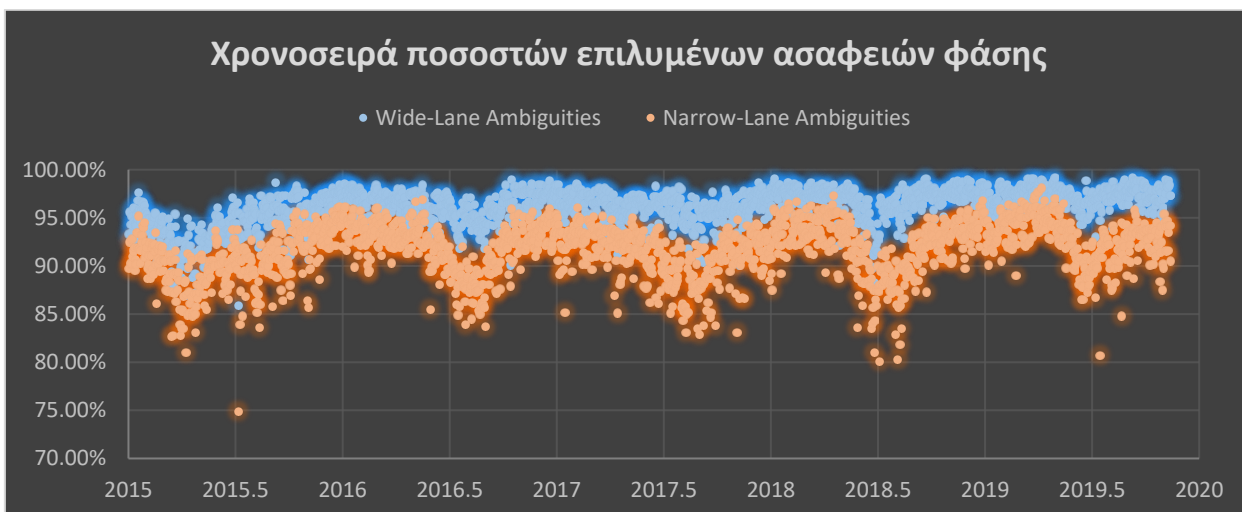
Συγκεκριμένα, το δίκτυο **North subnet** αποτελείται από 27 σταθμούς του δικτύου HelNet και επιπλέον 26 σταθμούς του δικτύου CoreNet, δηλαδή συνολικά 53 σταθμούς. Έξι σταθμοί βρίσκονται εκτός της ελληνικής επικράτειας, πέντε κοντά στα ελληνο-βουλγαρικά σύνορα και ένας εντός αλβανικών εδαφών κοντά στα ελληνο-αλβανικά σύνορα. Η πλειονότητα των σταθμών του υποδικτύου αποτελείται από σταθμούς του δικτύου SmartNet ενώ υπάρχουν επίσης και τρεις σταθμοί του δικτύου NOANET. Η χωρική κατανομή του δικτύου φαίνεται στον *Χάρτη 4*



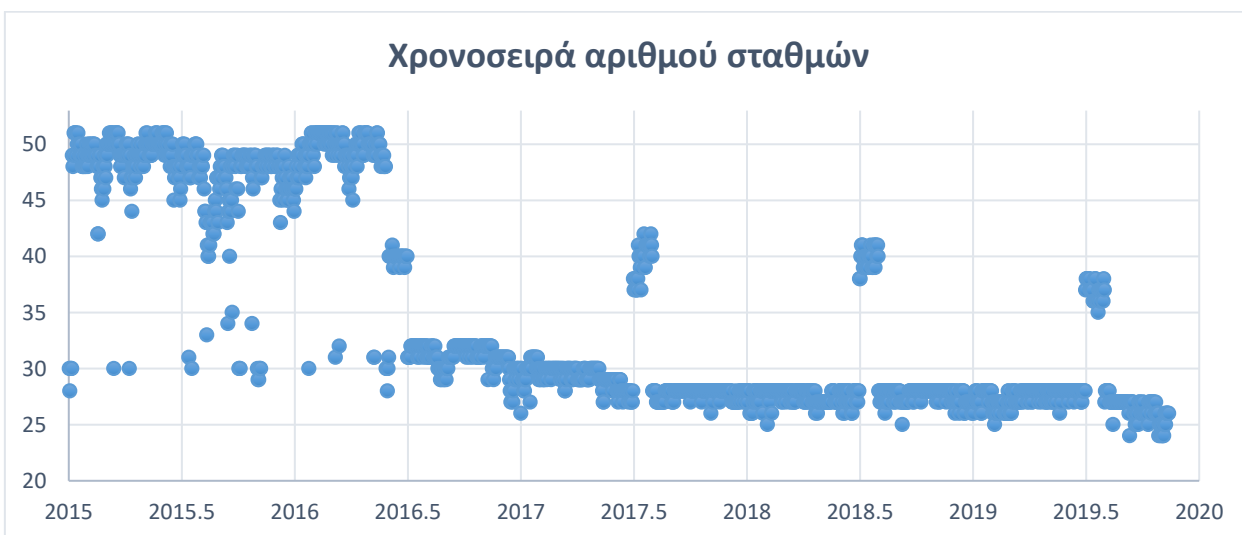


Χάρτης 4 - Υποδίκτυο North subnet  
(Πηγή υποβάθρου: ESRI)

Στο πλαίσιο της επεξεργασίας των πρωτογενών παρατηρήσεων με το λογισμικό GAMIT, τα αποτελέσματα παρουσίασαν υψηλή αξιοπιστία καθώς τα ποσοστά των επιλύμενων ασαφειών φάσης τόσο της ευρείας όσο και της κρισιμότερης, στενής οδού κινήθηκαν σε υψηλά επίπεδα. Σύμφωνα με τις οδηγίες του λογισμικού GAMIT το ανεκτό όριο για τις επιλύσεις φάσης στενής οδού αποτελεί το 70%, ενώ για το δίκτυο ο μέσος όρος για τα 5 έτη επιλύσεων κυμαίνεται στο 91.2 %. Διαγραμματικά τα ποσοστά των επιλύσεων φάσης ευρείας και στενής οδού φαίνονται στο Σχήμα 5 ενώ στο Σχήμα 6 φαίνεται ο αριθμός των σταθμών που συμμετέχουν στις επιλύσεις κατά εξάμηνο για τα πέντε έτη.



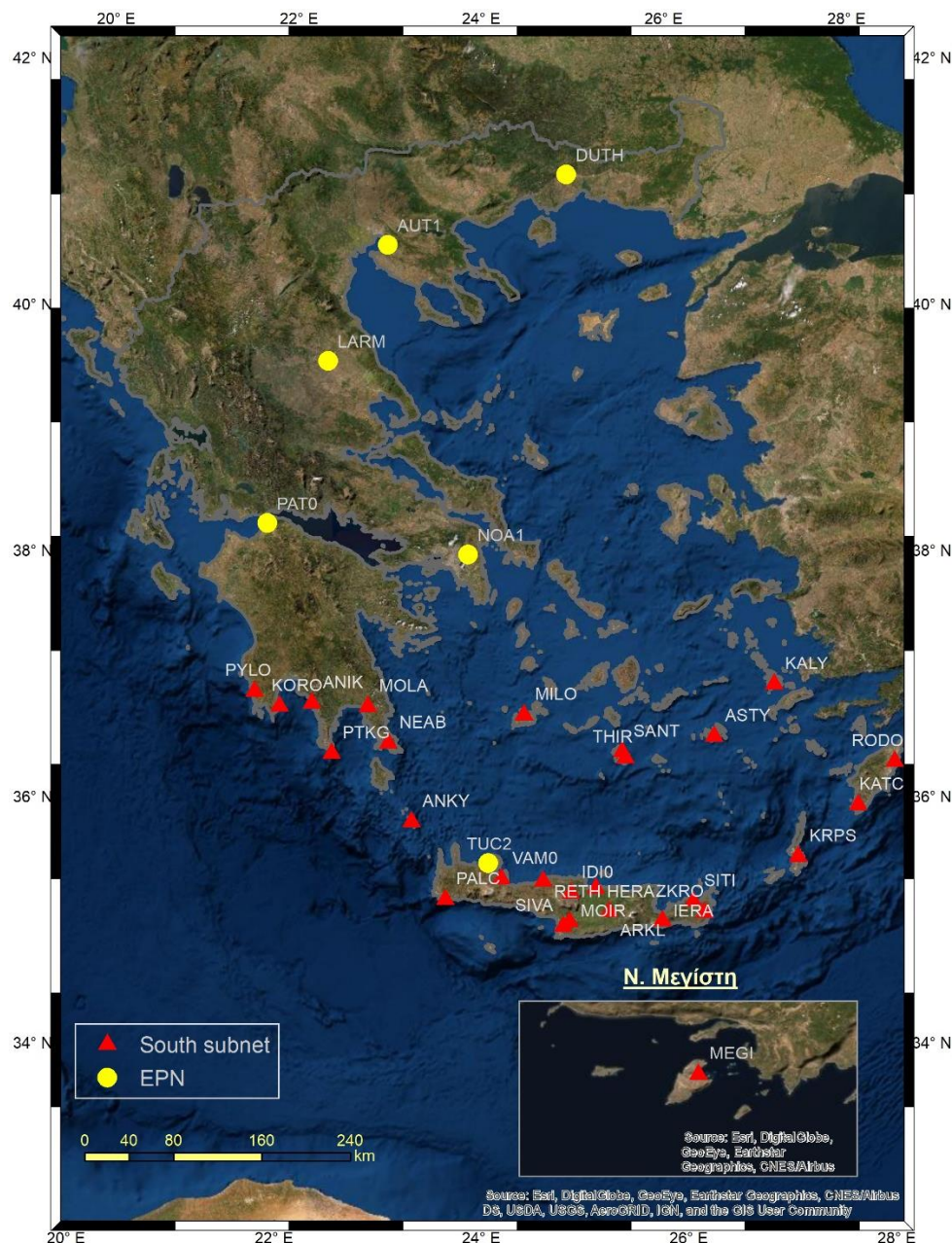
Σχήμα 5 - Χρονοσειρά ποσοστών επιλυμένων ασαφειών φάσης (North subnet)



Σχήμα 6 - Χρονοσειρά αριθμού σταθμών κατά τις πρωτογενείς επιλύσεις (North subnet)

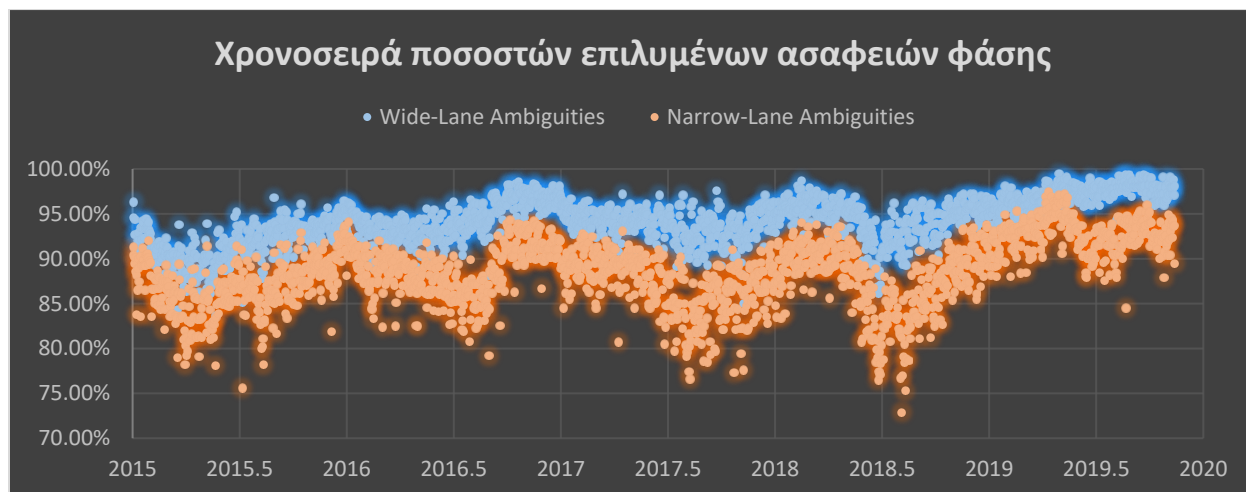
Το υποδίκτυο **South subnet** αποτελείται επίσης από 26 σταθμούς του δικτύου Hellnet και συμπεριλαμβάνοντας τους 26 σταθμούς του δικτύου CoreNet ο συνολικός αριθμός των σταθμών του υποδικτύου ανέρχεται στους 52 μόνιμους σταθμούς. Οι σταθμοί του δικτύου αποτελούνται σχεδόν κατά το ήμισυ από σταθμούς του δικτύου NOANET και οι υπόλοιποι υλοποιούν το δίκτυο SmartNet. Η χωρική κατανομή του δικτύου φαίνεται στον *Χάρτη 5*.



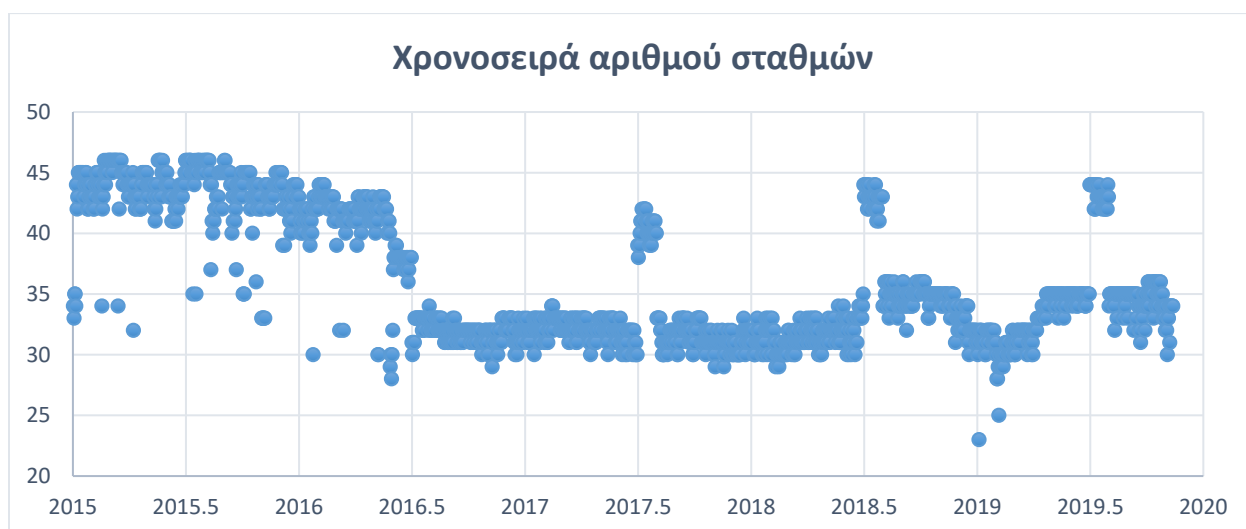


Χάρτης 5 - Υποδίκτυο South subnet

Κατά την επεξεργασία των πρωτογενών παρατηρήσεων των σταθμών του υποδικτύου South subnet ο μέσος όρος του ποσοστού των επιλυμένων ασαφειών φάσης ανέρχεται σε 88.4% για τη στενή οδό ενώ το αντίστοιχο χρονοδιάγραμμα για όλη τη χρονική περίοδο επεξεργασίας φαίνεται στο Σχήμα 7. Επίσης στο Σχήμα 8 φαίνεται ο αριθμός των σταθμών που συμμετείχαν στις επιλύσεις των βάσεων για κάθε χρονικό διάστημα.

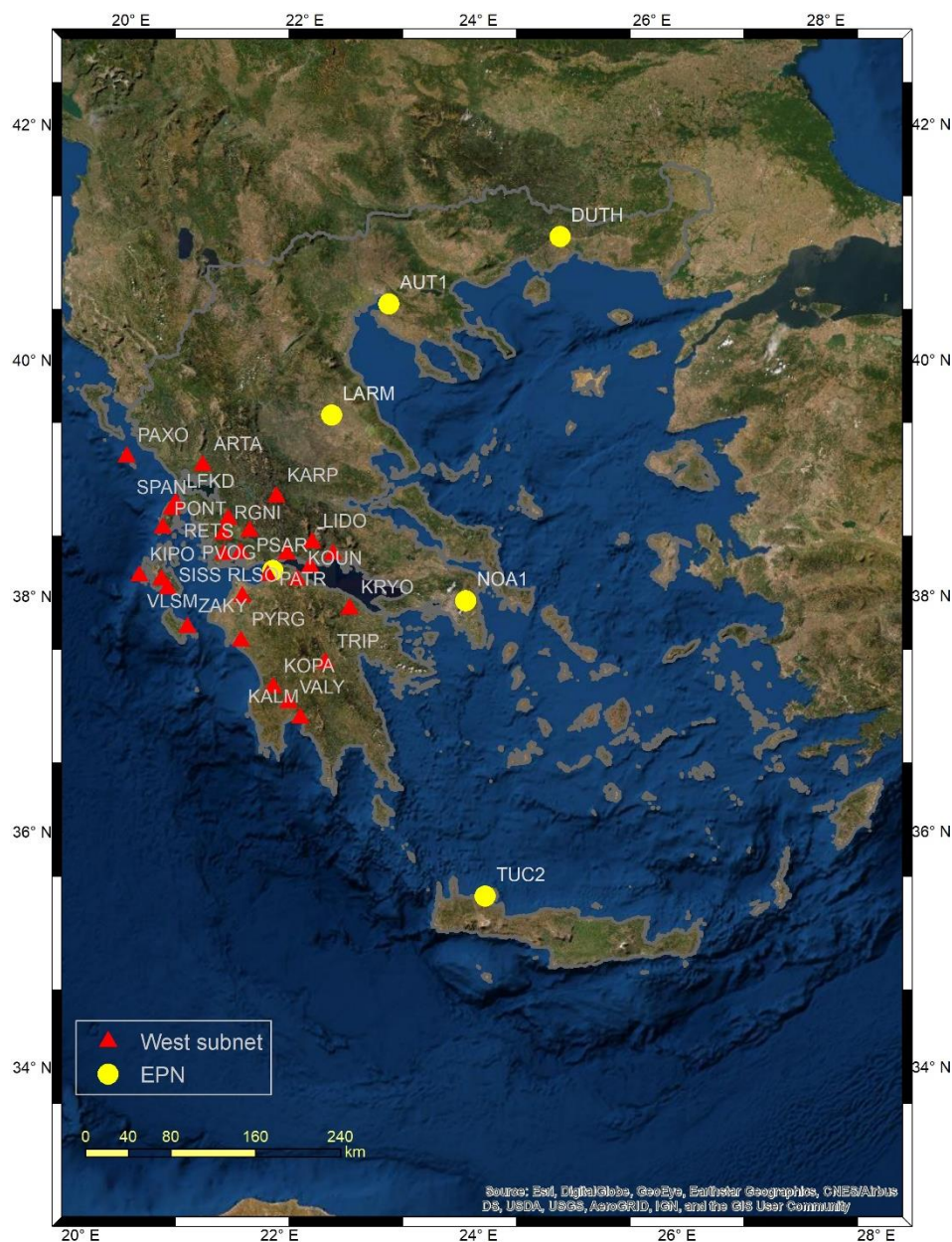


Σχήμα 7 - Χρονοσειρά ποσοστών επιλυμένων ασαφειών φάσης (South subnet)



Σχήμα 8 - Χρονοσειρά αριθμού σταθμών κατά τις πρωτογενείς επιλύσεις (South subnet)

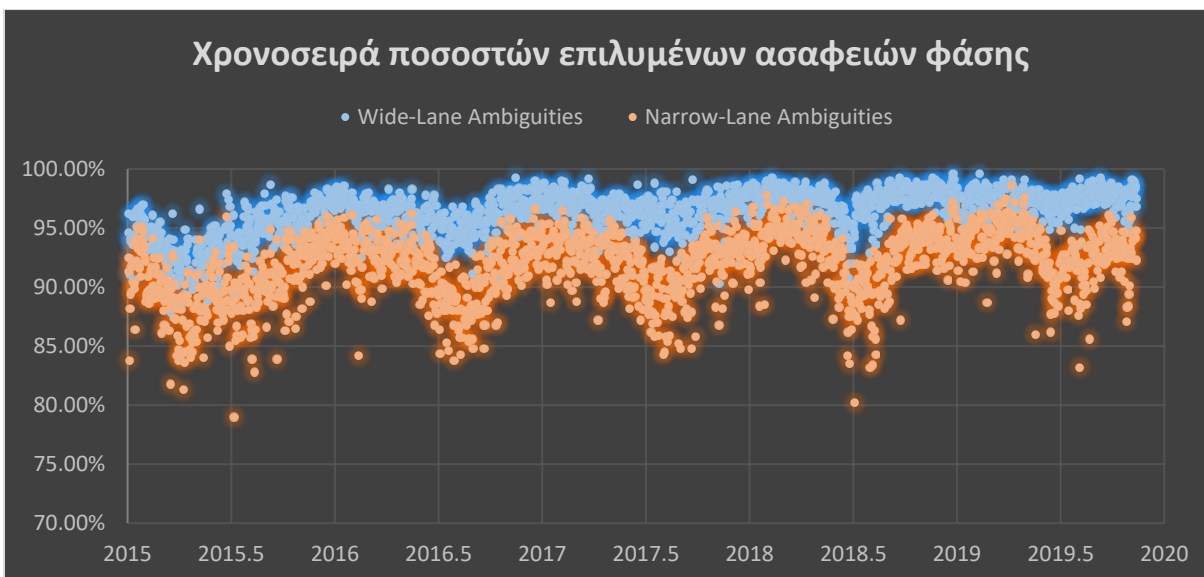
Το υποδίκτυο **West subnet** αποτελείται από 28 σταθμούς του δικτύου Hellnet και λαμβάνοντας υπόψιν και τους 26 σταθμούς του δικτύου CoreNet ο συνολικός αριθμός των σταθμών ανέρχεται στους 54 σταθμούς. Λόγω του μεγάλου ενδιαφέροντος της περιοχής εξαιτίας των έντονων γεωδυναμικών μεταβολών τόσο στην περιοχή του Ιονίου όσο και του Κορινθιακού Κόλπου όλοι οι φορείς που αναφέρονται παραπάνω και από τους οποίους έχουν αντληθεί τα δεδομένα επεξεργασίας έχουν ιδρύσει μια σειρά από μόνιμους σταθμούς στην περιοχή μελέτης. Η χωρική κατανομή των σταθμών φαίνονται στο *Χάρτη 6*



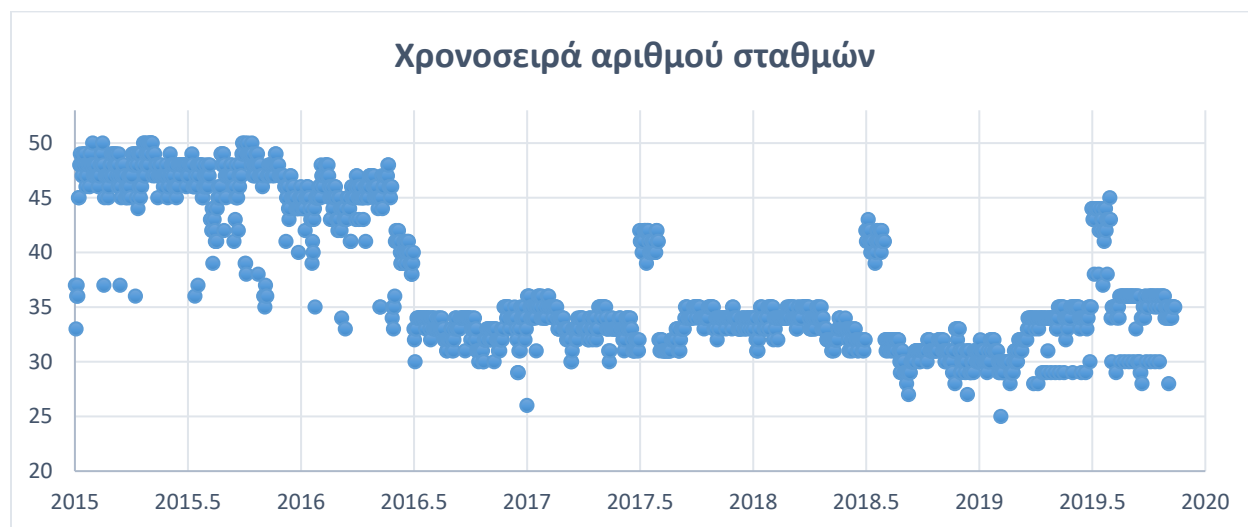
Χάρτης 6 - Υποδίκτυο West subnet

Κατά την επεξεργασία των πρωτογενών παρατηρήσεων των σταθμών του υποδικτύου West subnet ο μέσος όρος του ποσοστού των επιλυμένων ασαφειών φάσης ανέρχεται σε 91.8% για τη στενή οδό ενώ το αντίστοιχο χρονοδιάγραμμα για όλη τη χρονική περίοδο επεξεργασίας φαίνεται στο Σχήμα 9. Επίσης στο Σχήμα 10 φαίνεται ο αριθμός των σταθμών που συμμετείχαν στις επιλύσεις των βάσεων για κάθε χρονικό διάστημα.



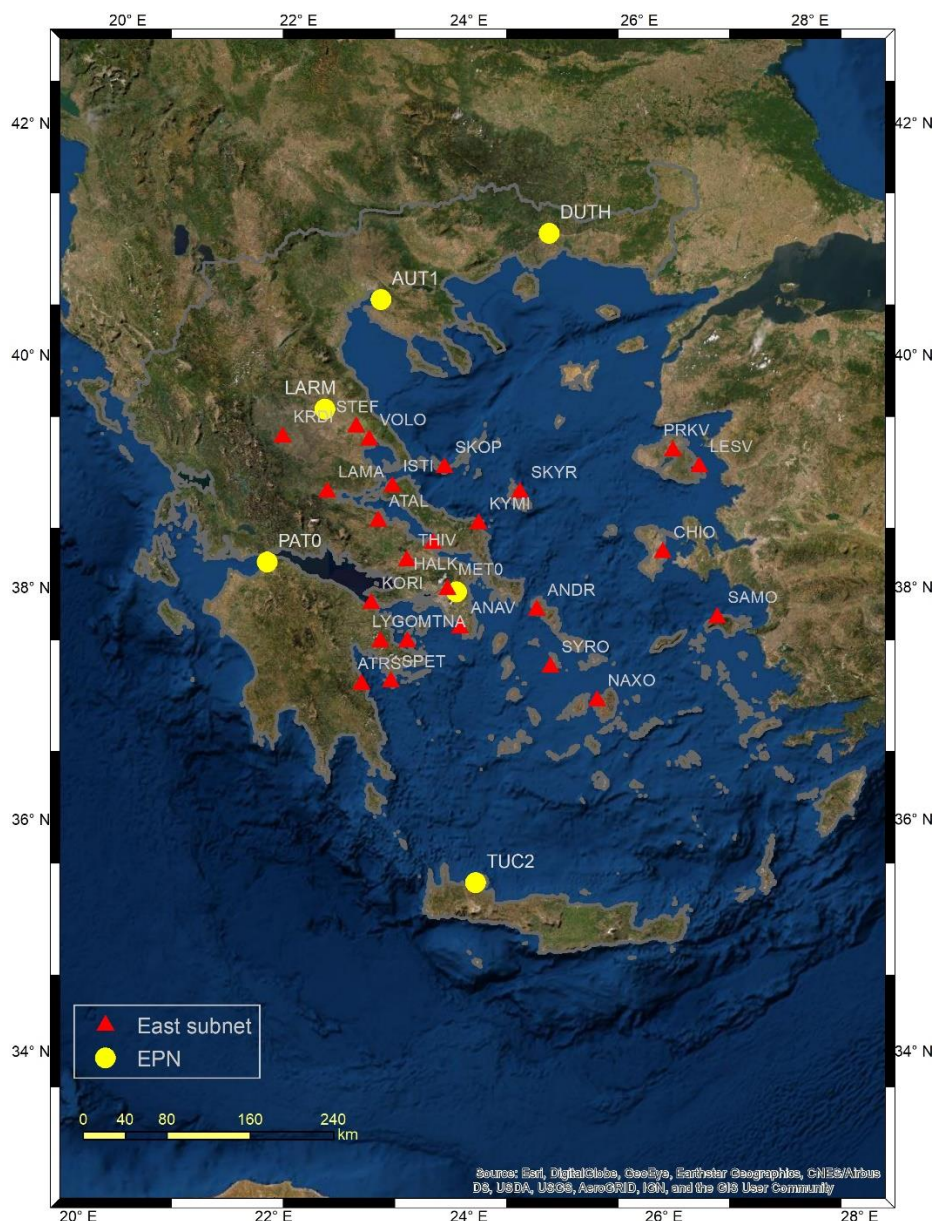


Σχήμα 9 - Χρονοσειρά ποσοστών επιλυμένων ασαφειών φάσης (West subnet)



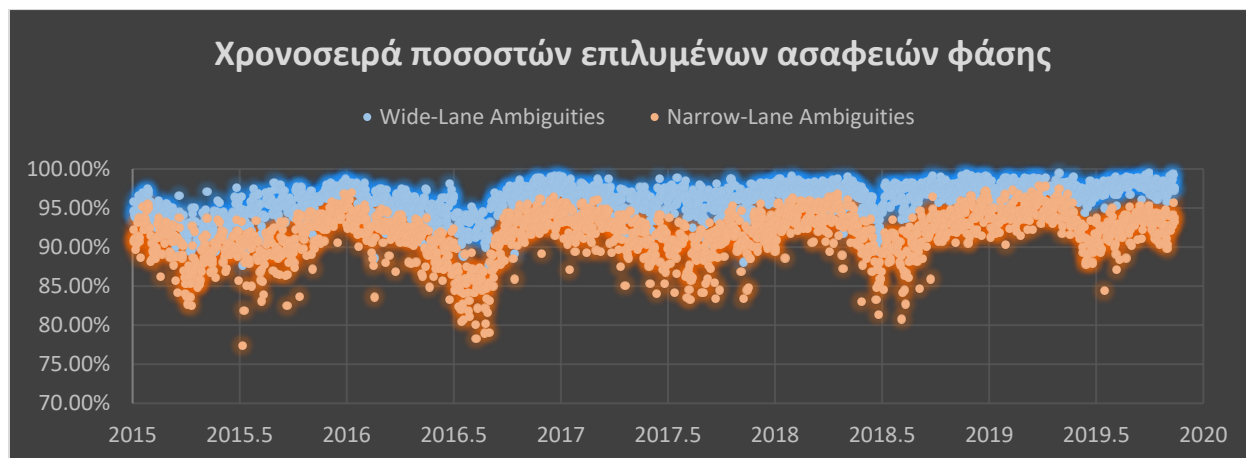
Σχήμα 10 - Χρονοσειρά αριθμού σταθμών κατά τις πρωτογενείς επιλύσεις (West subnet)

Τέλος, το υποδίκτυο **East subnet** αποτελείται από 25 σταθμούς του δικτύου Hellnet και συμπεριλαμβάνοντας τους 26 σταθμούς του δικτύου CoreNet ο συνολικός αριθμός των σταθμών ανέρχεται στους 51. Οι περισσότεροι σταθμοί βρίσκονται εγκατεστημένοι στην ηπειρωτική Ελλάδα, ενώ περιλαμβάνονται επίσης σταθμοί στις Κυκλάδες, τις Σποράδες και νησιά του κεντρικού Αιγαίου. Αναλυτικά η χωρική κατανομή των σταθμών παρουσιάζεται στον *Χάρτη 7*

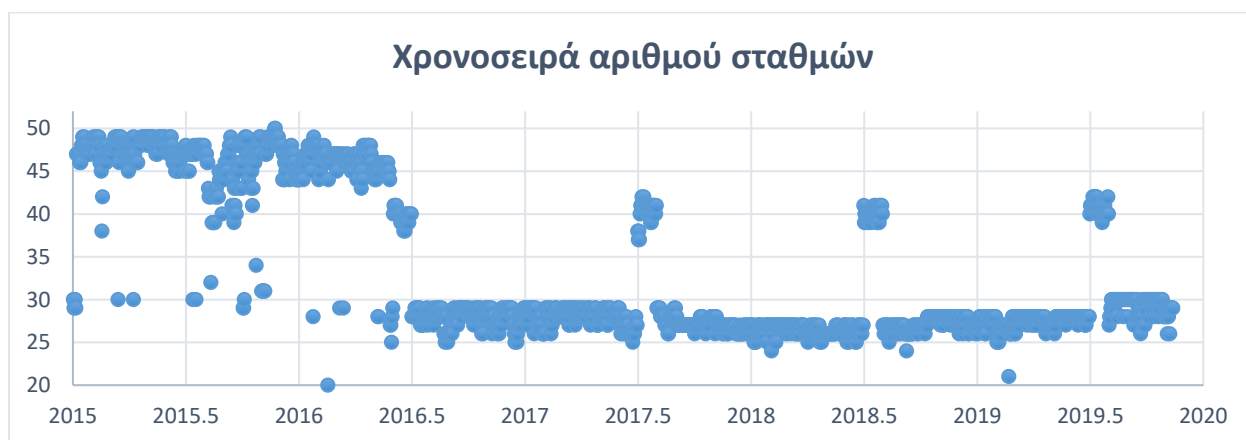


Χάρτης 7 - Υποδίκτυο East subnet

Κατά την επεξεργασία των πρωτογενών παρατηρήσεων των σταθμών του υποδικτύου East subnet ο μέσος όρος του ποσοστού των επιλυμένων ασαφειών φάσης ανέρχεται σε 91.6% για τη στενή οδό ενώ το αντίστοιχο χρονοδιάγραμμα για όλη τη χρονική περίοδο επεξεργασίας φαίνεται στο Σχήμα 11. Επίσης στο Σχήμα 12 φαίνεται ο αριθμός των σταθμών που συμμετείχαν στις επιλύσεις των βάσεων για κάθε χρονικό διάστημα.



Σχήμα 11 - Χρονοσειρά ποσοστών επιλυμένων ασαφειών φάσης (East subnet)



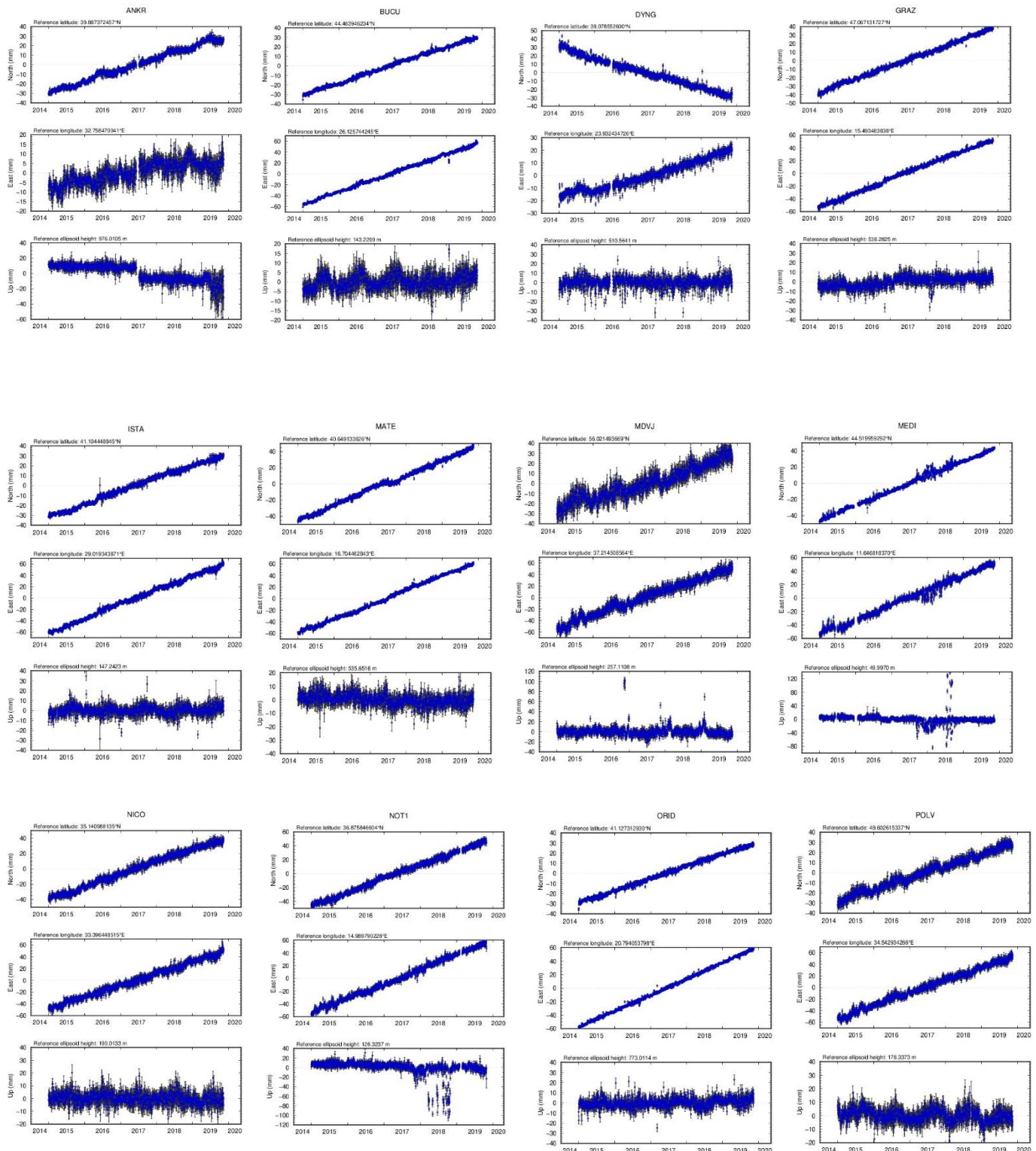
Σχήμα 12 - Χρονοσειρά αριθμού σταθμών κατά τις πρωτογενείς επιλύσεις (East subnet)

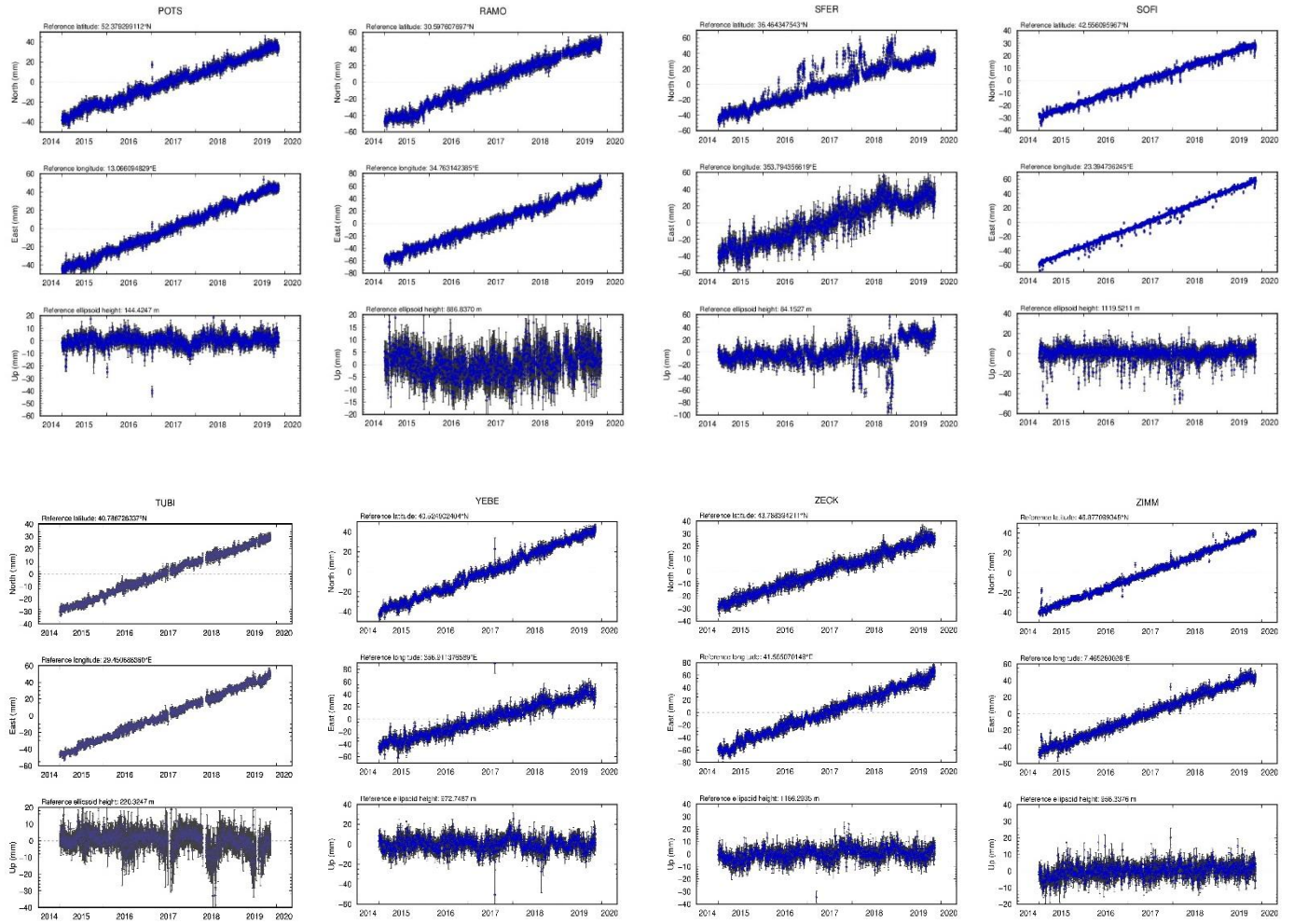
#### 4.3. Δημιουργία και ανάλυση των χρονοσειρών θέσης για κάθε σταθμό

Επόμενο στάδιο κατά την επεξεργασία των παρατηρήσεων των μόνιμων σταθμών για την παραγωγή των ταχυτήτων τους, αποτελεί η δημιουργία και αντίστοιχη ανάλυση των χρονοσειρών θέσης για κάθε σταθμό. Μέσα από την ανάλυση των χρονοσειρών μπορούν να εντοπισθούν είτε μόνιμες μετακινήσεις που επήλθαν στον σταθμό ως αποτέλεσμα έντονων σεισμικών φαινομένων, είτε μικρές μετατοπίσεις της θέσης του σταθμού που προκλήθηκαν από αναβαθμίσεις ή αλλαγές στον εξοπλισμό που χρησιμοποιείται στο σταθμό (αλλαγές κεραίας, καλωδίων κεραίας κ.τ.λ). Παράλληλα, ακραίες τιμές (outliers) των συντεταγμένων που προκύπτουν από τις επιλύσεις κάθε σταθμού, οι οποίες μπορεί να προέρχονται από κακή μοντελοποίηση των διάφορων συστηματικών σφαλμάτων θα πρέπει να εντοπίζονται και να αφαιρούνται ώστε να μην επηρεάζουν αρνητικά το τελικό αποτέλεσμα.



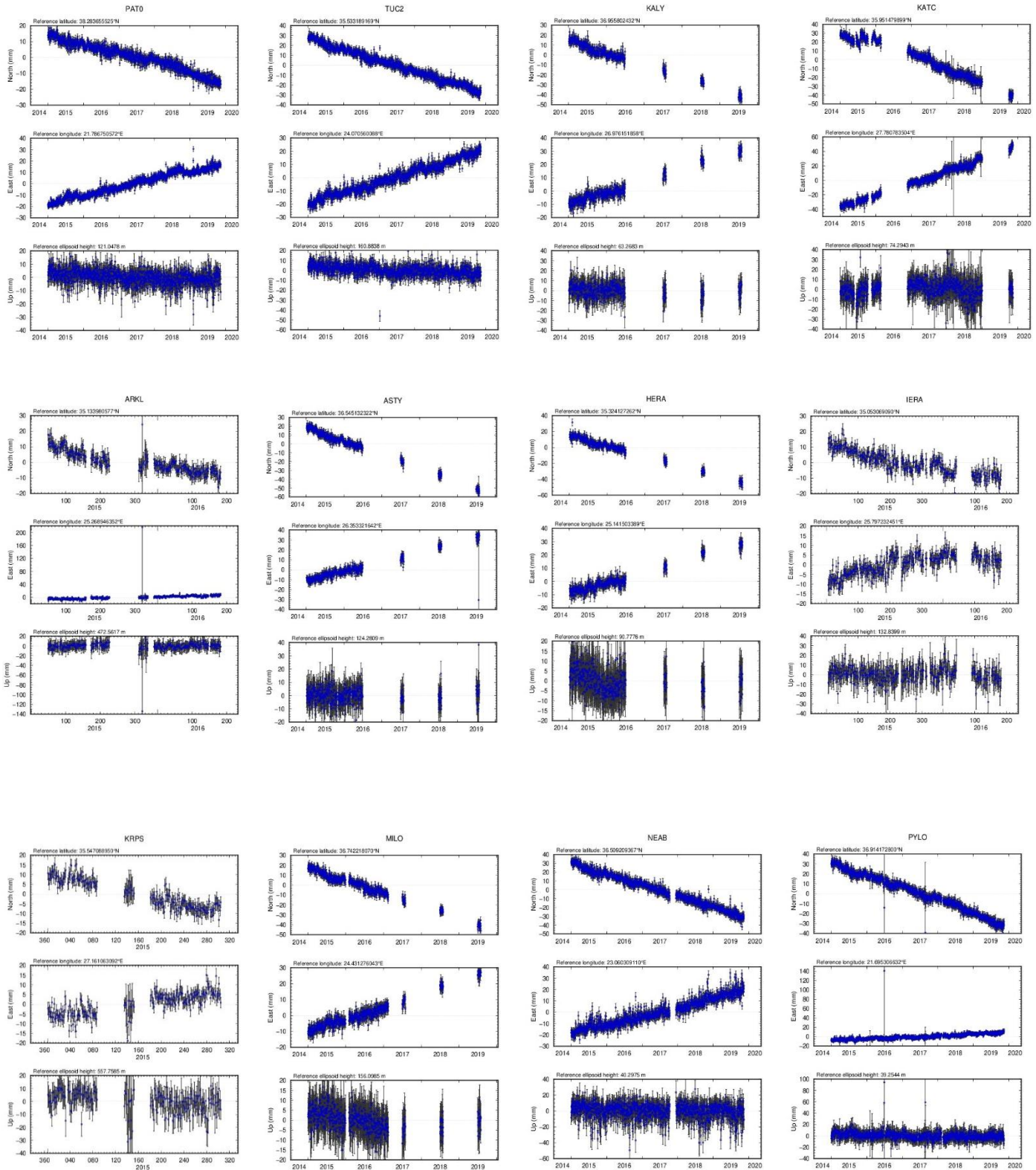
Στο πλαίσιο αυτό, μέσω του προγράμματος GAMIT/GLOBK, μετά την διεξαγωγή των ημερήσιων επιλύσεων κάθε υποδικτύου, πραγματοποιήθηκε η ενιαία συνόρθωση του δικτύου HelNet και η ημερήσια υλοποίηση του πλαισίου αναφοράς, σύμφωνα με τους σταθμούς του δικτύου CoreNET. Μ' αυτόν τον τρόπο δημιουργήθηκαν γραφήματα των χρονοσειρών για κάθε σταθμό και αντίστοιχα εξετάστηκαν για την ανεύρεση των παραπάνω ανωμαλιών. Τα αποτελέσματα αυτής της διαδικασίας καταγράφονται σε κατάλληλο αρχείο το οποίο λαμβάνεται υπόψιν κατά την τελική συνόρθωση του δικτύου με το φίλτρο Kalman για την εξαγωγή των ταχυτήτων των σταθμών. Παρακάτω παρουσιάζονται οι χρονοσειρές θέσης για τους σταθμούς κάθε δικτύου.

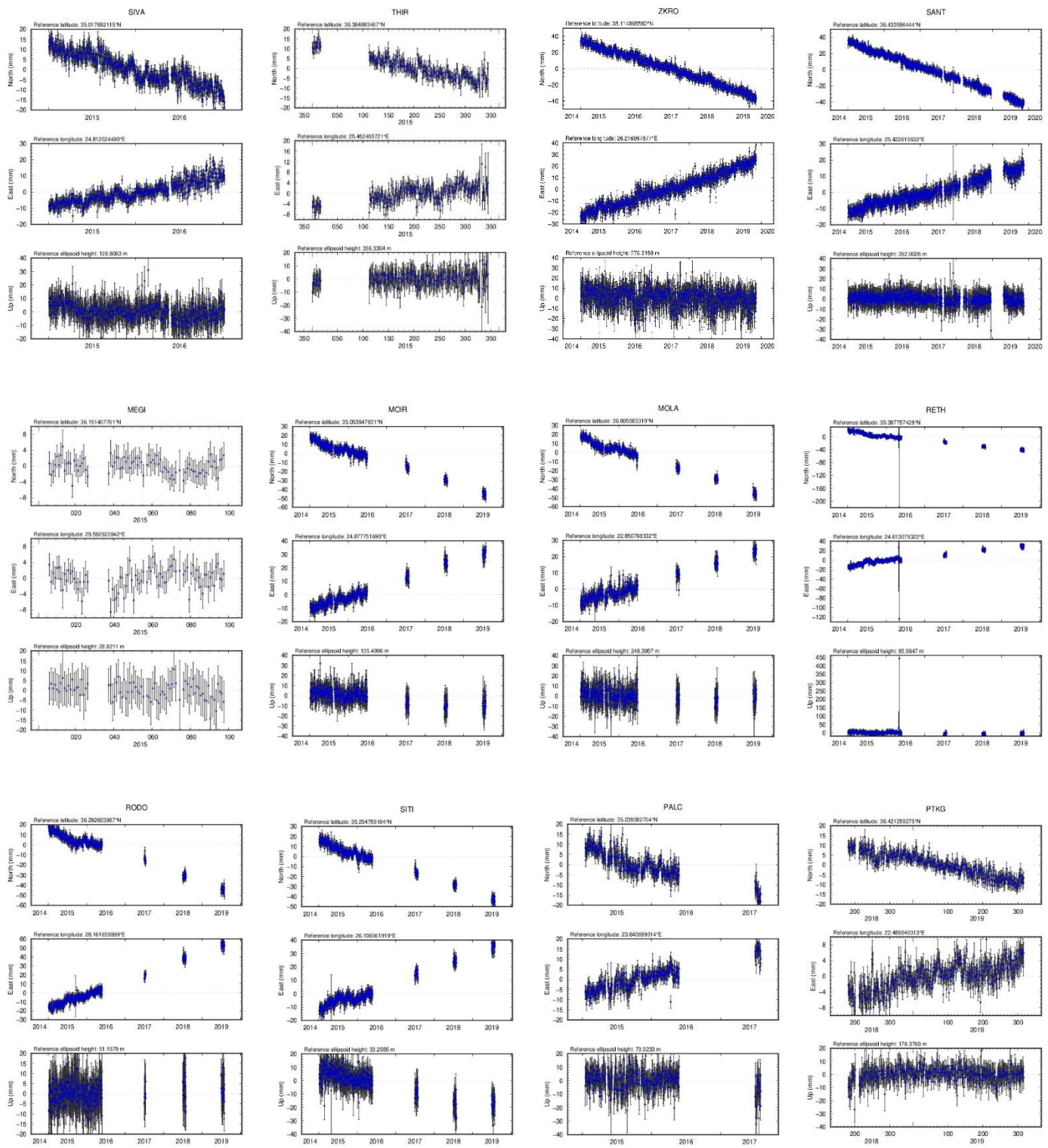




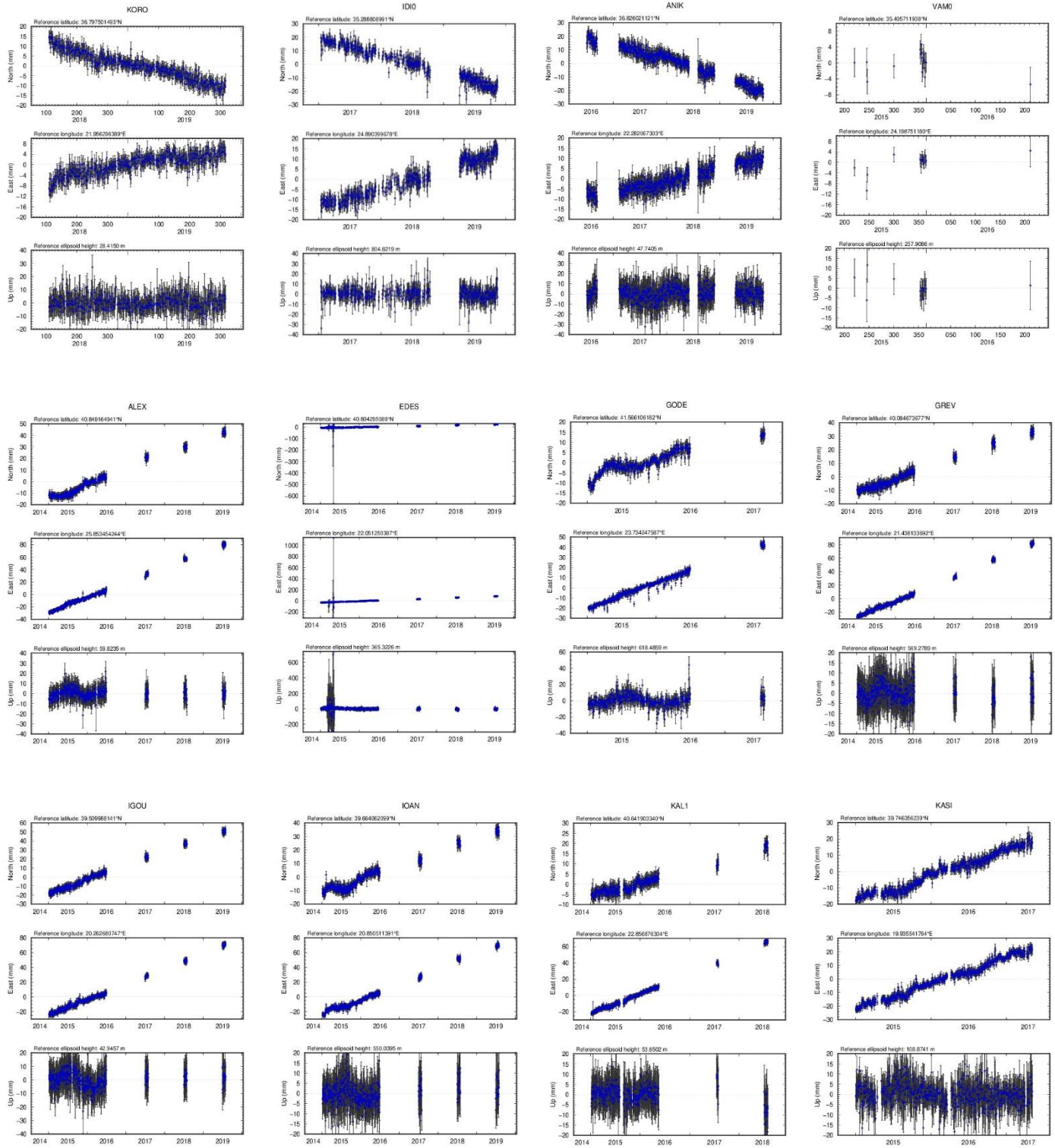
Σχήμα 13 - Χρονοσειρές θέσης σταθμών δικτύου CoreNet

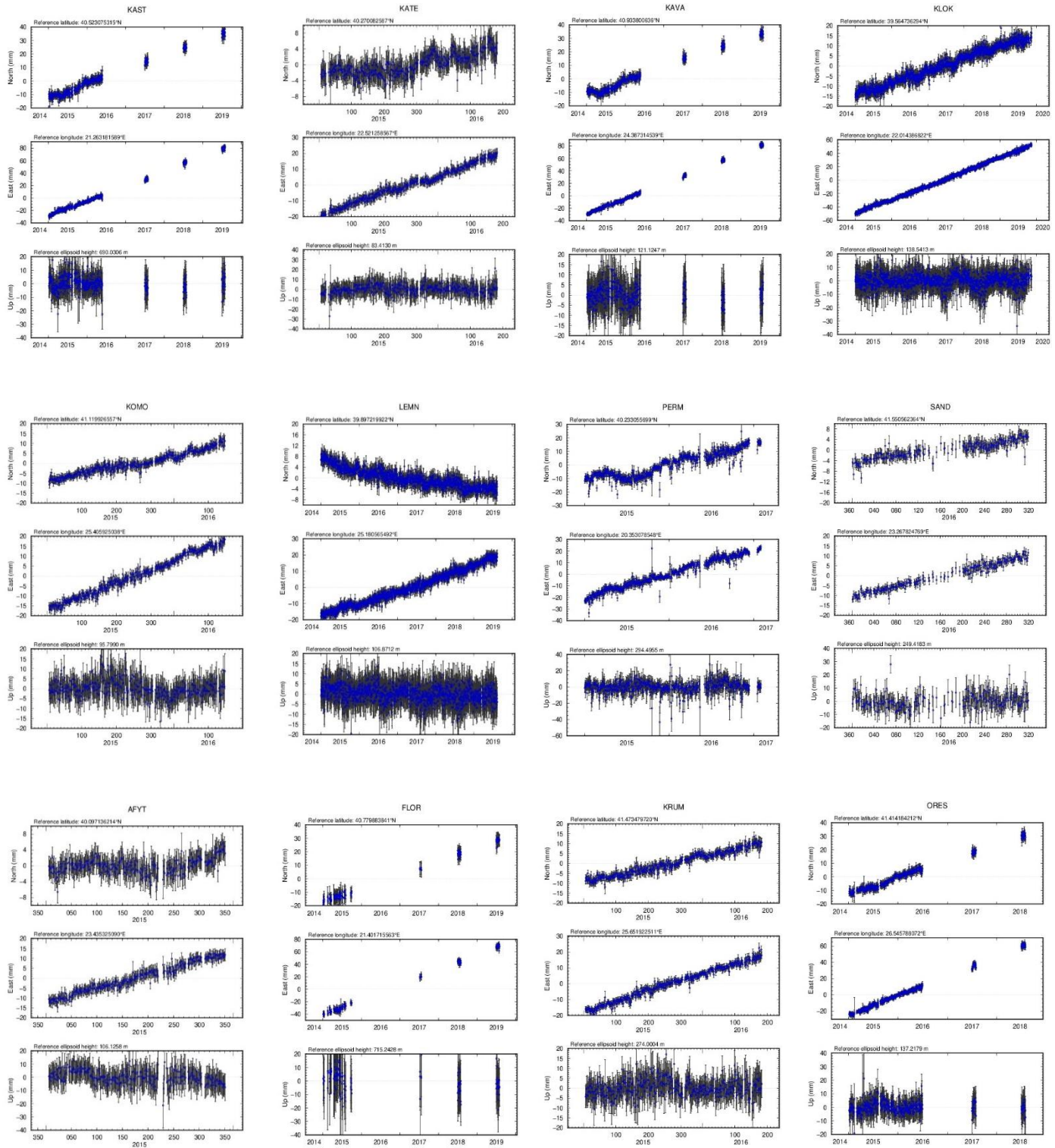




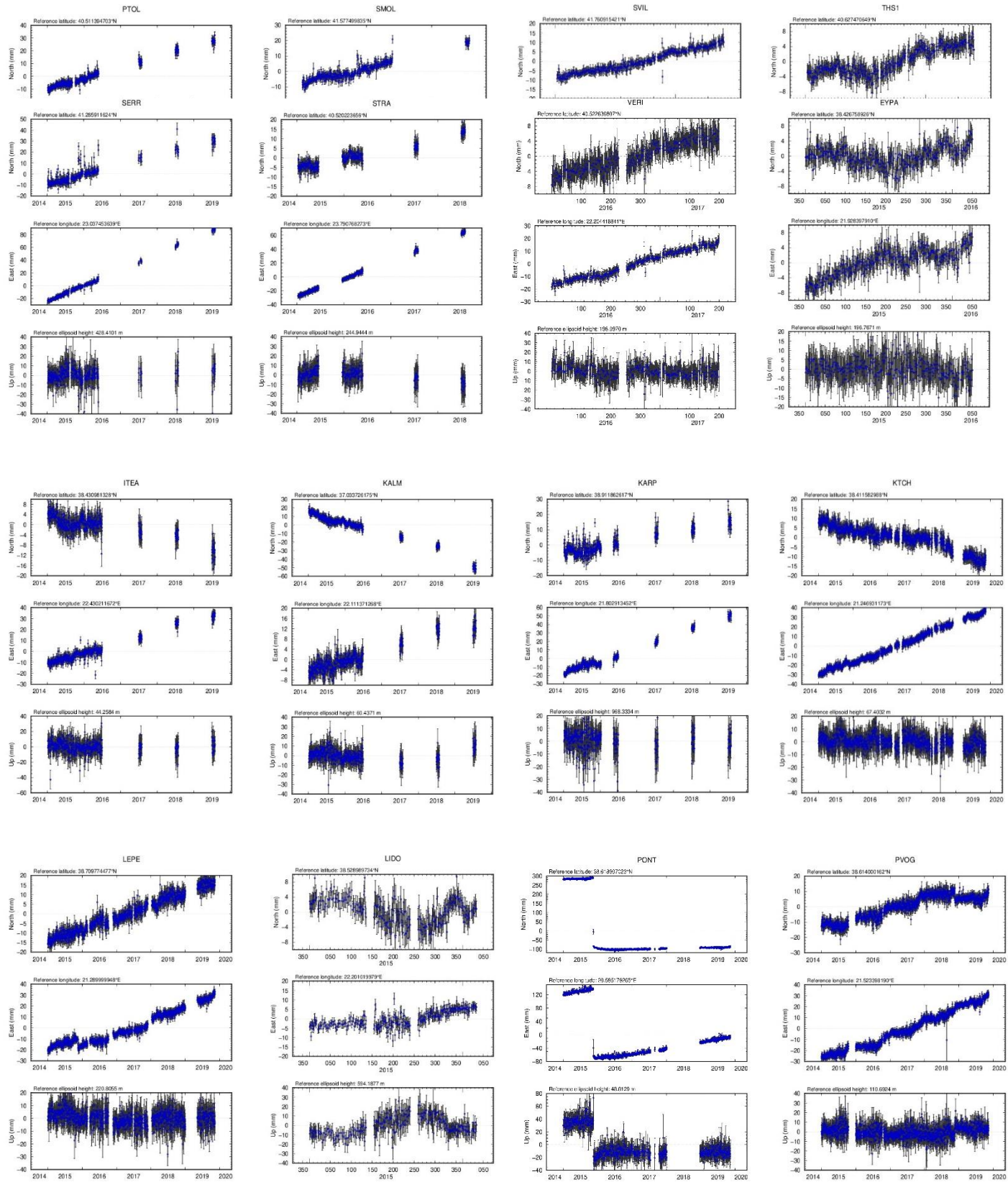


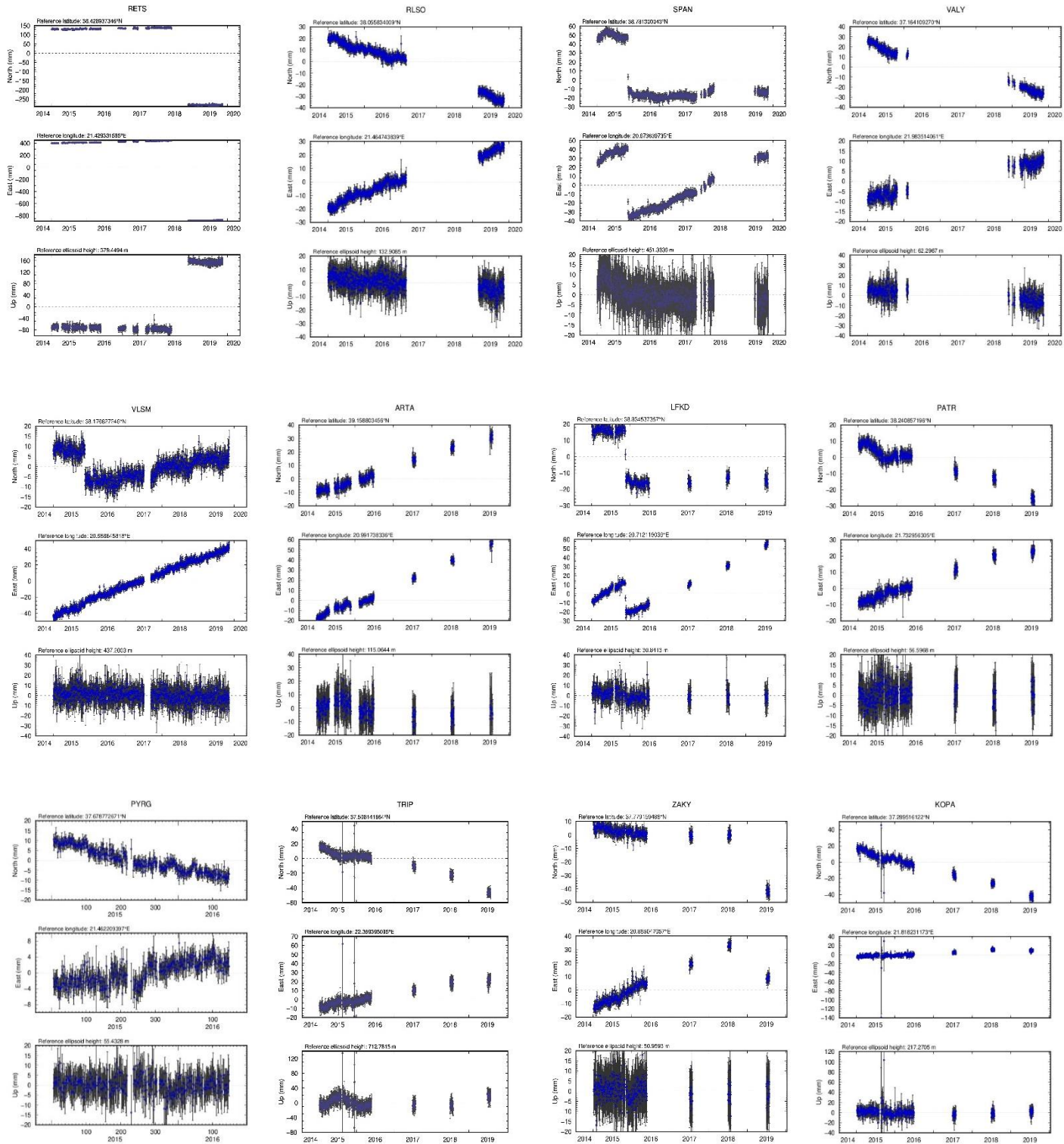




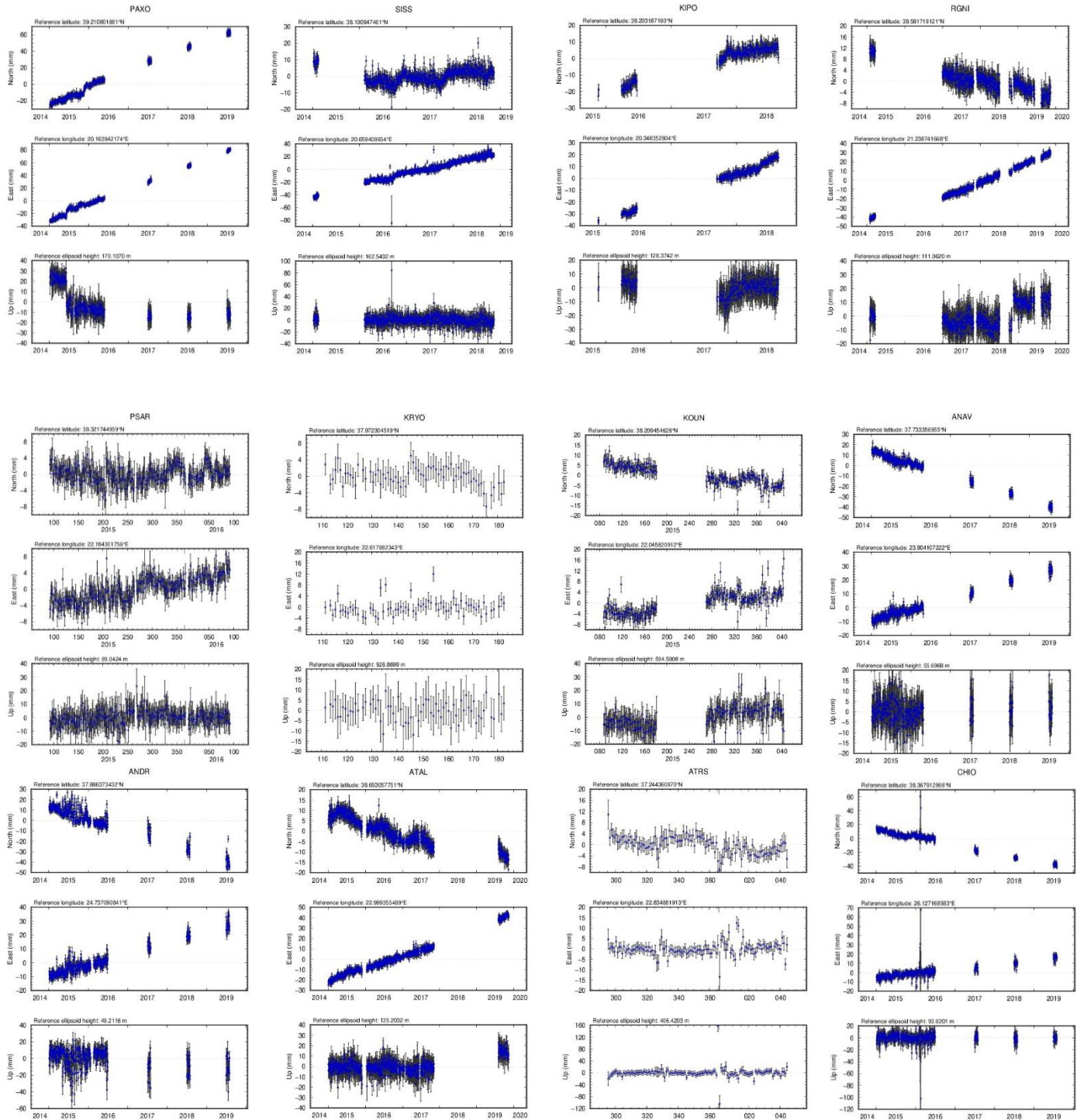


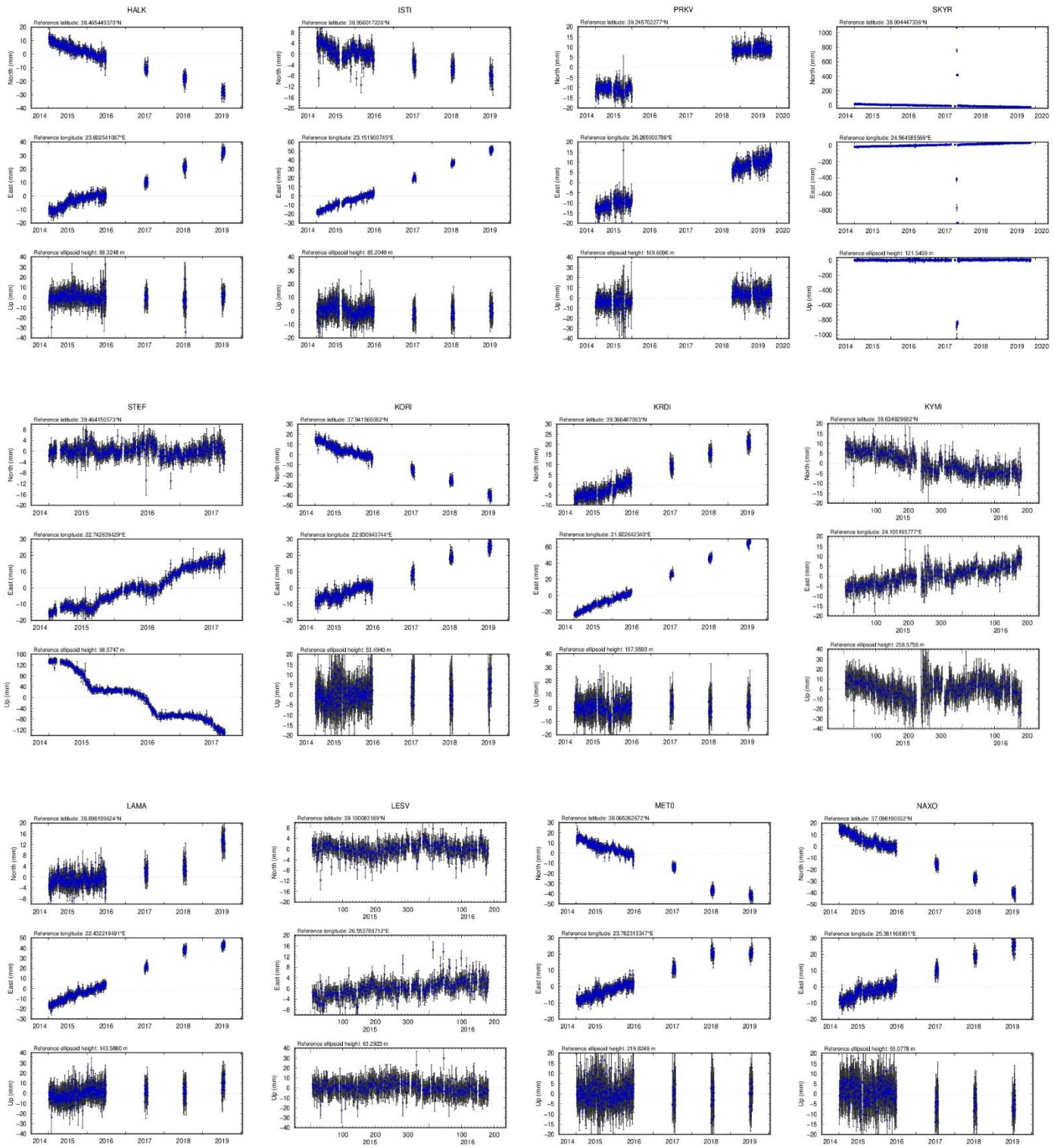




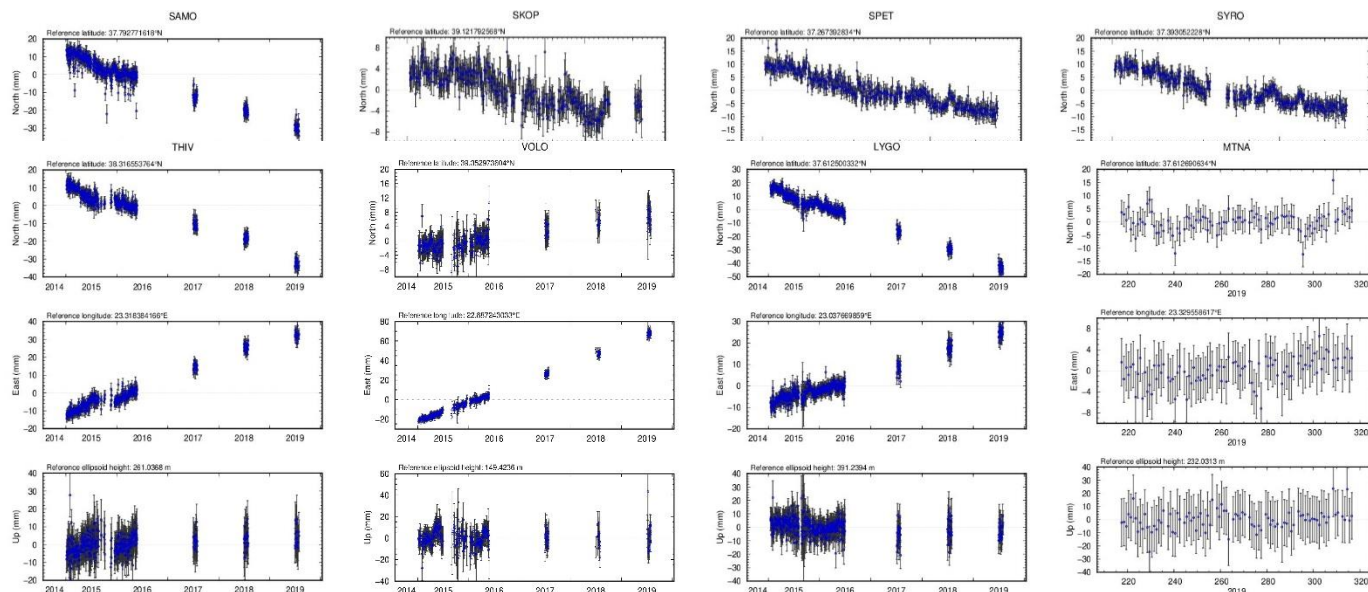












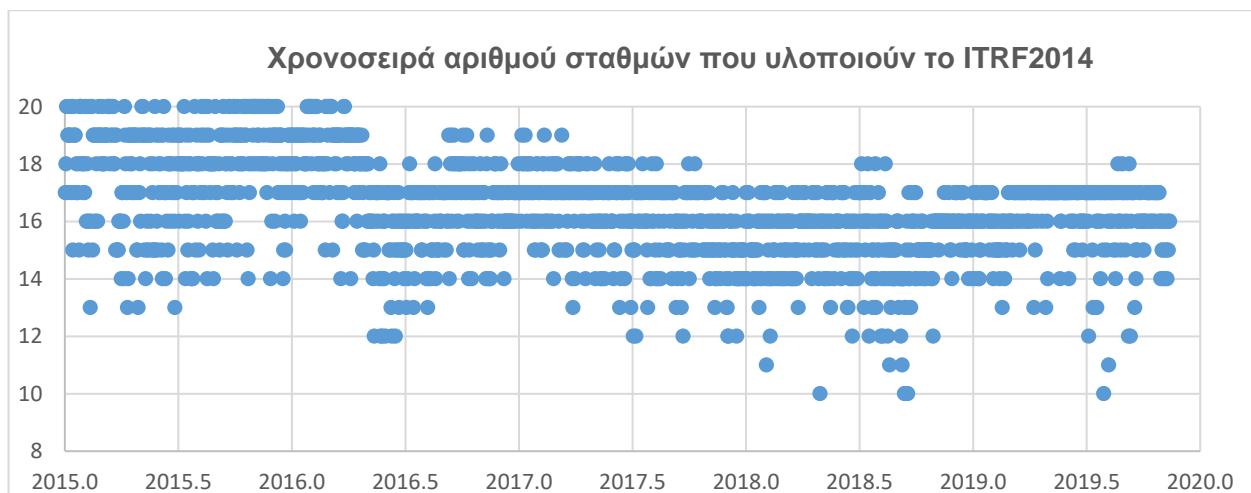
Σχήμα 14 - Χρονοσειρές θέσης σταθμών δικτύου HelNet

Χαρακτηριστικά παραδείγματα της ανάλυσης χρονοσειρών των σταθμών που πραγματοποιήθηκε αποτελούν οι σταθμοί LFKD, PONT και SPAN στη ν. Λευκάδα, στις οποίες αποτυπώνεται η μόνιμη μετακίνηση που επήλθε στη θέση των σταθμών, μετά τον σεισμό μεγέθους 6 ML που έπληξε την περιοχή, στις 17/11/2015. Αντίστοιχα στη χρονοσειρά θέσης του σταθμού NOA1 παρατηρείται η μετατόπιση της θέσης του σταθμού λόγω αλλαγής των καλωδίων της κεραίας που πραγματοποιήθηκε στις 11/07/2018.

#### 4.4. Ένταξη του Δικτύου στο Πλαίσιο Αναφοράς ITRF2014

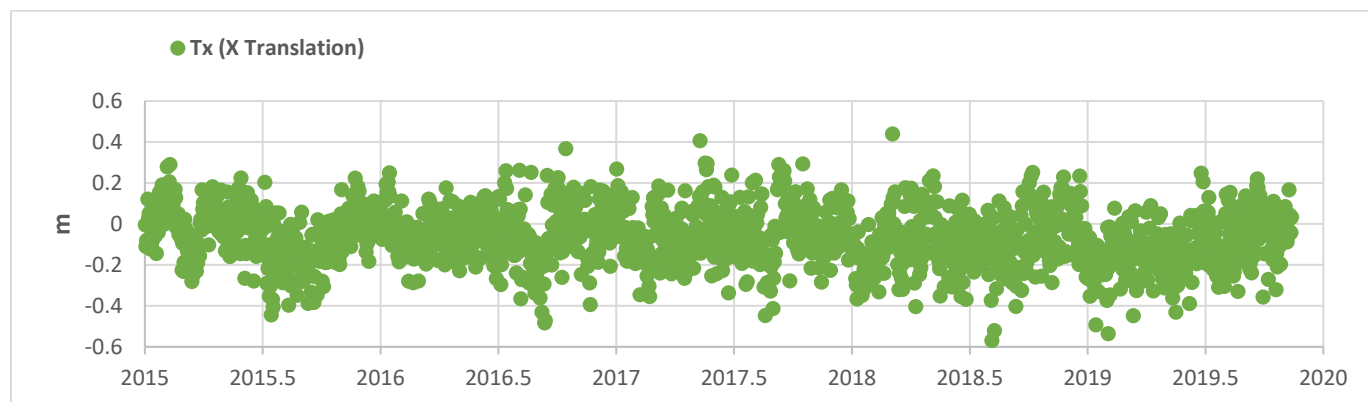
Η ένταξη του δικτύου στο Πλαίσιο Αναφοράς ITRF2014 διεξήχθη σε ημερήσιο επίπεδο με χρήση του υποπρογράμματος glorg του GLOBK. Η υλοποίηση του πλαισίου πραγματοποιήθηκε με τους 20 σταθμούς της IGS του δικτύου CoreNet, μέσω μιας επαναληπτικής διαδικασίας κατά την οποία σταθμοί με κακές παρατηρήσεις αφαιρούνταν. Στο Σχήμα 15 φαίνονται οι σταθμοί που συμμετείχαν στην υλοποίηση του ITRF2014, σε ημερήσιο επίπεδο. Σύμφωνα με τους Herring, Floyd, King, & McClusky (2015) απαιτούνται τουλάχιστον δέκα σταθμοί για την ορθή υλοποίηση ενός πλαισίου αναφοράς, αριθμός ο οποίος καλύπτεται για όλο το χρονικό διάστημα επεξεργασίας των παρατηρήσεων. Το μαθηματικό μοντέλο που χρησιμοποιείται είναι ο μετασχηματισμός ομοιότητας, όπως περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 3.3, με τη διαφορά ότι οι παράμετροι που τελικά εκτιμήθηκαν ήταν έξι (τρεις για την μετάθεση του συστήματος ( $T_x$ ,  $T_y$ ,  $T_z$ ) και τρεις για την στροφή ( $R_x$ ,  $R_y$ ,  $R_z$ )) καθώς η παράμετρος της κλίμακας θεωρήθηκε σταθερή. Σύμφωνα με τους Dong, Herring, & King (1998) και τους Tregoning & Van Dam (2005) προτείνεται για δίκτυα μεγαλύτερης εμβέλειας, ο υπολογισμός μόνο των έξι παραμέτρων του μετασχηματισμού Helmert και η αγνόηση της παραμέτρου της κλίμακας. Μ' αυτόν τον τρόπο υπολογίζονται με μεγαλύτερη

ακρίβεια οι ταχύτητες για τους σταθμούς καθώς μειώνονται αισθητά οι επιδράσεις των επιφανειακών διεργασιών (surface loading effects) σ' αυτούς.

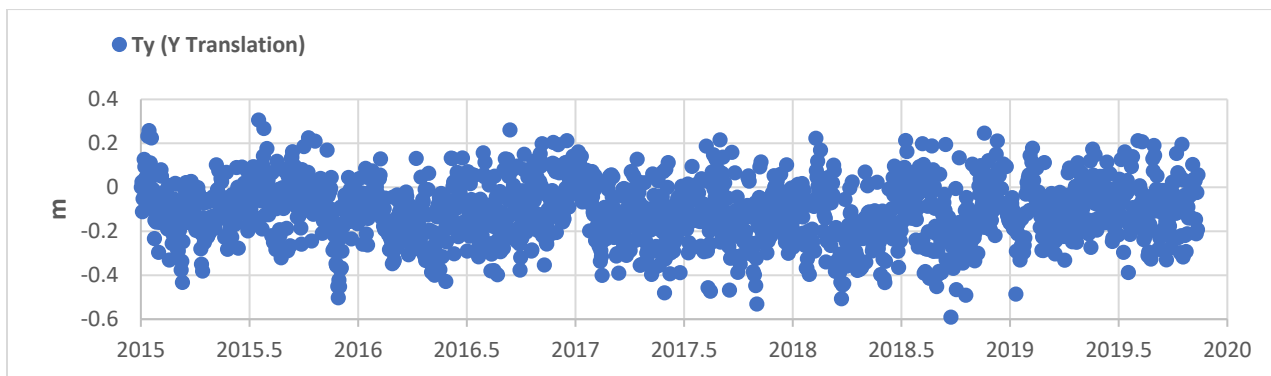


Σχήμα 15 - Χρονοσειρά αριθμού σταθμών που υλοποιούν το ITRF2014

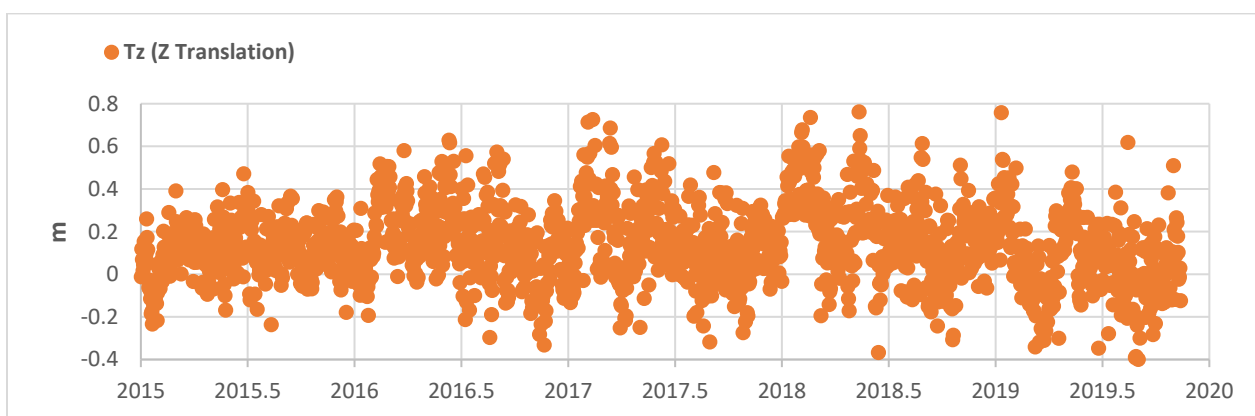
Στα Σχήματα 16 – 21 παρατίθενται οι τιμές των παραμέτρων μετάθεσης και στροφής του μετασχηματισμού, σε ημερήσιο επίπεδο. Η ακρίβεια της εφαρμογής του μετασχηματισμού μπορεί να διαπιστωθεί εξετάζοντας το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (postfit rms). Στο Σχήμα 22 παρουσιάζεται το rms για κάθε ημερήσια υλοποίηση του πλαισίου αναφοράς. Ο μέσος όρος των τιμών του μετασχηματισμού είναι **2.4 mm** με τυπική απόκλιση  $\pm 0.6$  mm. Τα αποτελέσματα αυτά κρίνονται ικανοποιητικά και εντός της αναμενόμενης ακρίβειας.



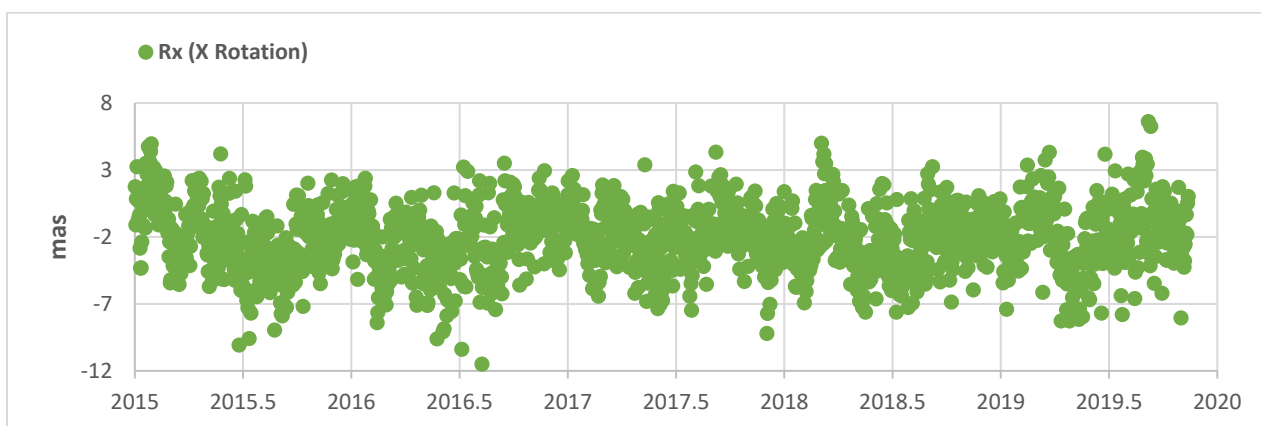
Σχήμα 16 - Παράμετρος μετάθεσης Tx



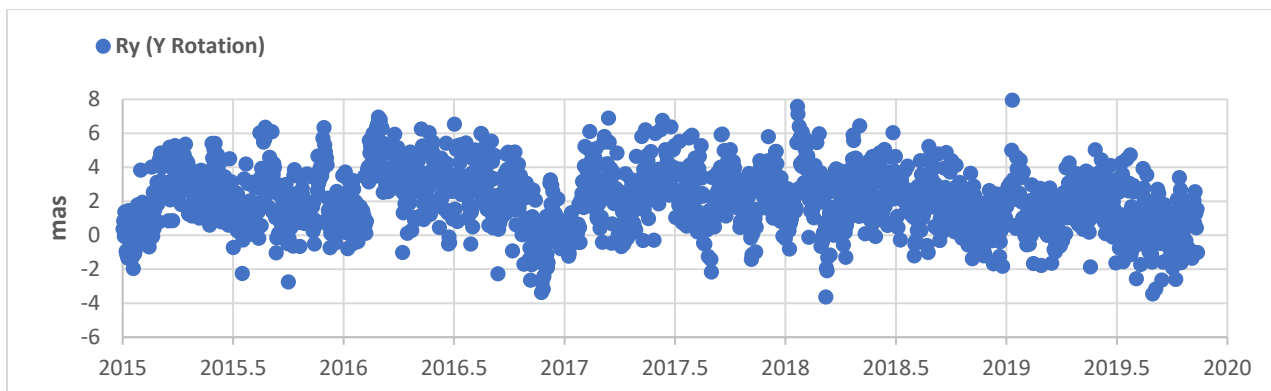
Σχήμα 17 - Παράμετρος μετάθεσης Ty



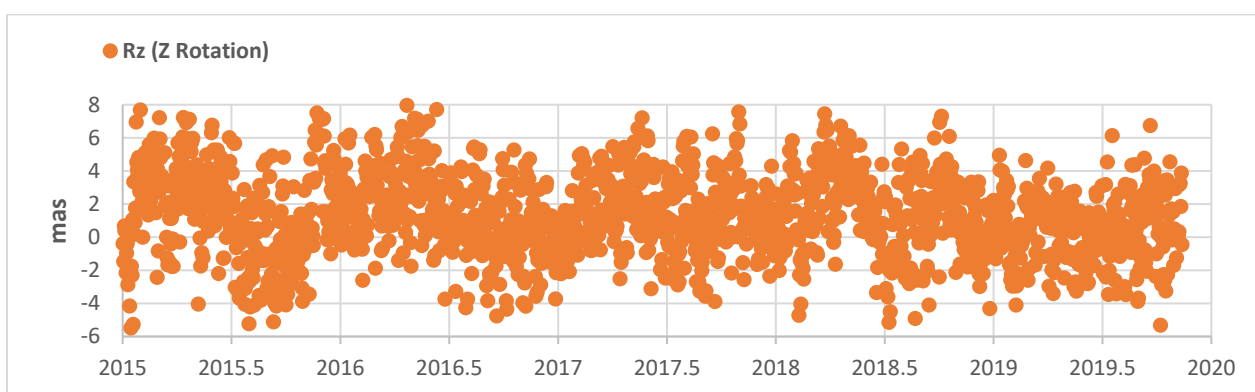
Σχήμα 18 – Παράμετρος μετάθεσης Tz



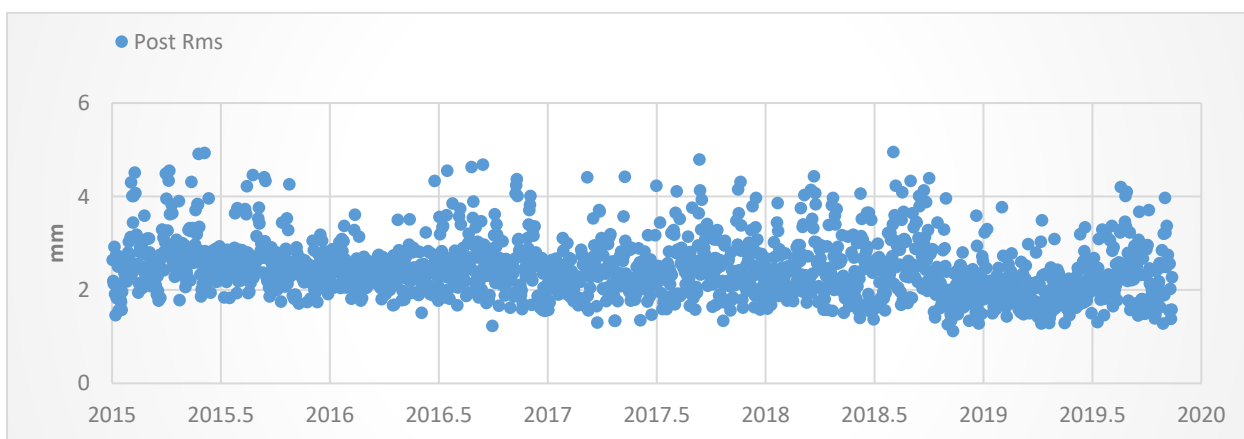
Σχήμα 19 - Παράμετρος στροφής Rx



Σχήμα 20 - Παράμετρος στροφής Ry



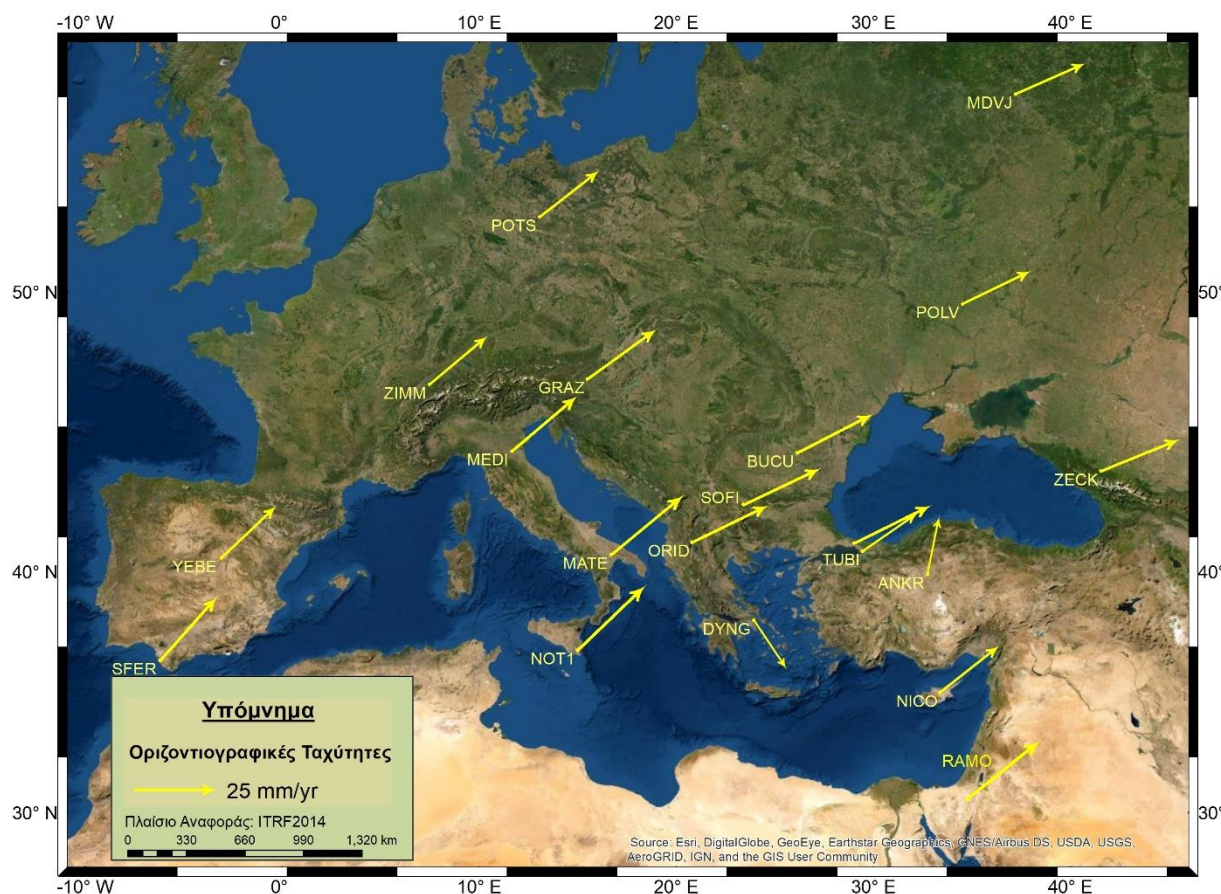
Σχήμα 21 - Παράμετρος στροφής Rz



Σχήμα 22 - Μέσο τετραγωνικό σφάλμα Post-Rms μετασχηματισμού

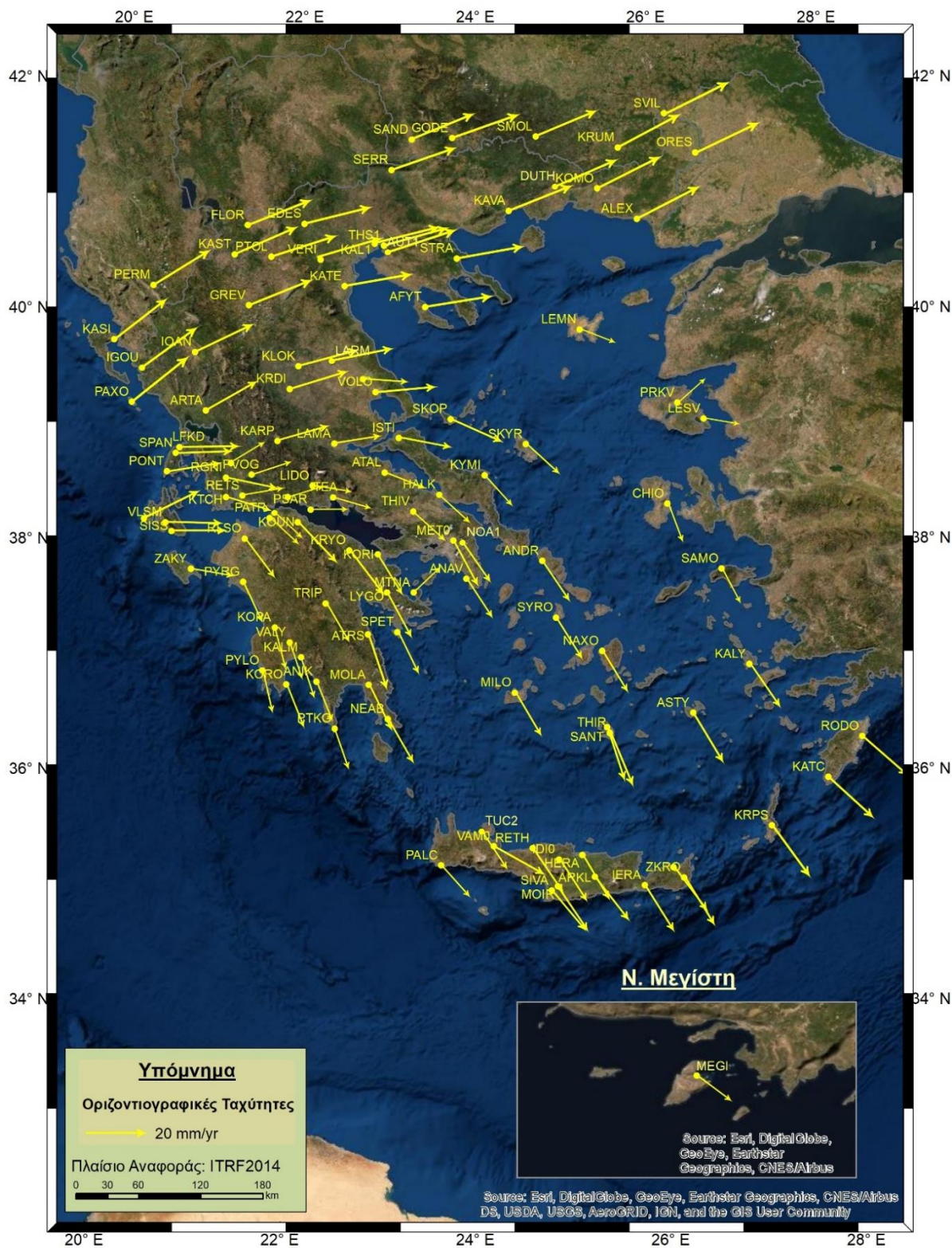
#### 4.5. Εκτίμηση γεωδαιτικών ταχυτήτων των σταθμών με χρήση του φίλτρου Kalman

Το τελικό στάδιο για την εκτίμηση των γεωδαιτικών ταχυτήτων των σταθμών σε μια συγκεκριμένη εποχή αναφοράς, αποτελεί η ενιαία συνόρθωση του δικτύου και η ένταξη του πλαισίου αναφοράς ακολουθώντας τη μέθοδο της διαδοχικής συνόρθωσης με την προσέγγιση του φίλτρου Kalman, όπως αυτή περιγράφηκε στο *Κεφάλαιο 3.4*. Οι συντεταγμένες θέσης και οι ταχύτητες που προκύπτουν από τις παραπάνω διαδικασίες αναφέρονται στην μέση εποχή των μετρήσεων για τον κάθε σταθμό ξεχωριστά, παράλληλα όμως μπορούν να ανιχνευθούν συσχετίσεις και ανάμεσα σ' όλους τους σταθμούς του δικτύου. Οι εκτιμώμενες συντεταγμένες και ταχύτητες αρχικά αναφέρονται σε γεωκεντρικό καρτεσιανό σύστημα, στο διεθνές πλαίσιο αναφοράς ITRF2014, ενώ στη συνέχεια μετασχηματίζονται σε τοποκεντρικό σύστημα συντεταγμένων, στο οποίο παρουσιάζο-νται καλύτερα οι τεκτονικές μεταβολές των διαφόρων περιοχών. Στον *Χάρτη 8* παρουσιάζονται οι οριζοντιογραφικές ταχύτητες των σταθμών του δικτύου CoreNet ενώ στους *Χάρτες 9-10* οι οριζοντιογραφικές ταχύτητες και οι ταχύτητες στο κατακόρυφο επίπεδο των σταθμών του δικτύου HelNet αντίστοιχα.



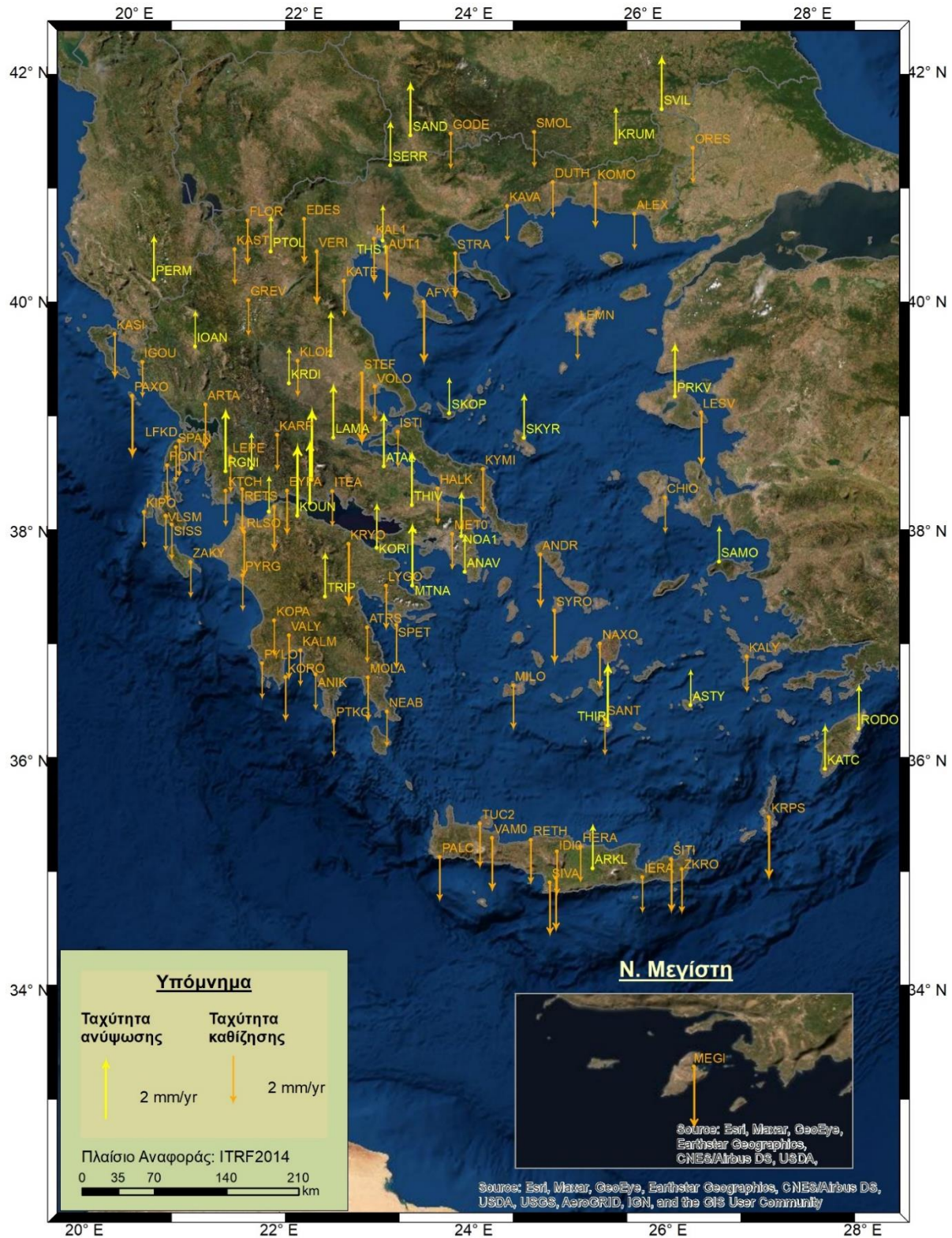
Χάρτης 8 - Οριζοντιογραφικές ταχύτητες σταθμών δικτύου CoreNet ως προς το ITRF2014  
(Πηγή υποβάθρου: ESRI)





Χάρτης 9 - Οριζοντιογραφικές ταχύτητες σταθμών δικτύου HelNet ως προς το ITRF2014 (Πηγή υποβάθρου: ESRI)





Χάρτης 10 - Ταχύτητες κατακόρυφης συνιστώσας των σταθμών του δικτύου HelNet ως προς το ITRF2014 (Πηγή Υποβάθρου: ESRI)

Η συνόρθωση του δικτύου έχει γίνει συνολικά για τους σταθμούς όλων των επιμέρους υποδίκτυων. Ωστόσο καθώς ο καταμερισμός των υποδικτύων πραγματοποιήθηκε κυρίως με γεωγραφικά κριτήρια και λαμβάνοντας υπόψιν την αντίστοιχη γεωδυναμική συμπεριφορά της κάθε περιοχής, κάθε υποδίκτυο μπορεί να αντιπροσωπεύσει μία αντίστοιχη υποπεριοχή της ελληνικής επικράτειας. Στον Πίνακα 21 εμφανίζονται συγκεντρωτικά στατιστικά για τις ταχύτητες (vHorizontal, vUp) σε mm/yr όπως αυτές υπολογίσθηκαν για κάθε υποδίκτυο-υποπεριοχή. Σημειώνεται ότι οι τιμές οριζοντιογραφικά εξετάζονται ως προς το μέτρο του διανύσματος της κάθε ταχύτητας ώστε να διαπιστωθεί το πραγματικό μέγεθος της μετακίνησης.

Πίνακας 21 - Στατιστικά στοιχεία ταχυτήτων (mm/yr)

Statistics	North Subnet	South Subnet	West Subnet	East Subnet
min - max vH	21.44 – 30.64	13.19 – 23.41	9.39 - 30.95	4.57 – 20.37
average vH	25.33	16.37	14.95	13.99
std vH	± 0.21	± 0.21	± 0.15	± 0.27
min - max vUp	0.04 -  -8.25	0.08 -  -10.41	0.11 - 16.83	0.09 -  -97.23
average vUp	- 0.8	-1.47	- 0.73	- 4.43
std vUp	± 0.57	± 0.55	± 0.41	± 0.78

Από το Χάρτη 9 και τον Πίνακα 21 γίνεται αντιληπτό το ετερογενές πεδίο ταχυτήτων που χαρακτηρίζει τον ελλαδικό χώρο. Έτσι, παρατηρείται ότι η Μακεδονία, η Θράκη και η Ήπειρος (περιοχές που καλύπτονται από το North Subnet) παρουσιάζουν μεγαλύτερες σε μέτρο και διαφορετικές σε διεύθυνση οριζοντιογραφικές ταχύτητες σε σχέση με τις αντίστοιχες στην υπόλοιπη Ελλάδα. Οι ταχύτητες αυτές με μ.ο τα 25.33 mm/yr είναι συμβατές τόσο με το μέτρο όσο και με τη διεύθυνση των ταχυτήτων που καταγράφονται από τους σταθμούς στην υπόλοιπη Ευρώπη (Χάρτης 8), ακολουθώντας την κίνηση της ευρασιατικής πλάκας. Αντίθετα, από τη Θεσσαλία και νοτίως (περιοχές που καλύπτονται από τα υπόλοιπα τρία υποδίκτυα) οι ταχύτητες των σταθμών παρουσιάζουν ομοιογένεια ως προς το μέτρο των διανυσμάτων με περίπου ίσους μέσους όρους τιμών. Ωστόσο, η διεύθυνση των διανυσμάτων είναι διαφορεική με τις ταχύτητες να μην ακολουθούν τις κινήσεις της ευρωπαϊκής πλάκας, κινούμενοι με διεύθυνση ανατολικά και νότιο ανατολικά.

Αντίστοιχα, στον Χάρτη 10 παρουσιάζονται οι ταχύτητες των σταθμών στο κατακόρυφο επίπεδο. Οι ταχύτητες στο κατακόρυφο επίπεδο φαίνεται ότι παρουσιάζουν ομοιογένεια ως προς το μέτρο και τη διεύθυνση. Ο μεγαλύτερος μ.ο ο οποίος εμφανίζεται στο East subnet οφείλεται κυρίως στη μεγάλη καθίζηση που καταγράφηκε στο σταθμό στο χωριό Στεφανοβίκειο της Π.Ε. Μαγνησίας. Η ύπαρξη σε κοντινή απόσταση της τεχνητής λίμνης Κάρλα φαίνεται ότι προκαλεί επιβάρυνση στην ευρύτερη περιοχή, καθώς παρατηρήθηκε έντονη καθίζηση ταχύτητας 97.2 mm/yr. Ωστόσο, σημειώνεται ότι εξαιτίας της εγγενούς αδυναμίας των συστημάτων GNSS να παρέχουν αξιόπιστες συντεταγμένες των σταθμών και άρα και των αντίστοιχων ταχυτήτων σε κατακόρυφο επίπεδο, οι ταχύτητες στην συνιστώσα του υψομέτρου είναι έως και 3 φορές χειρότερης

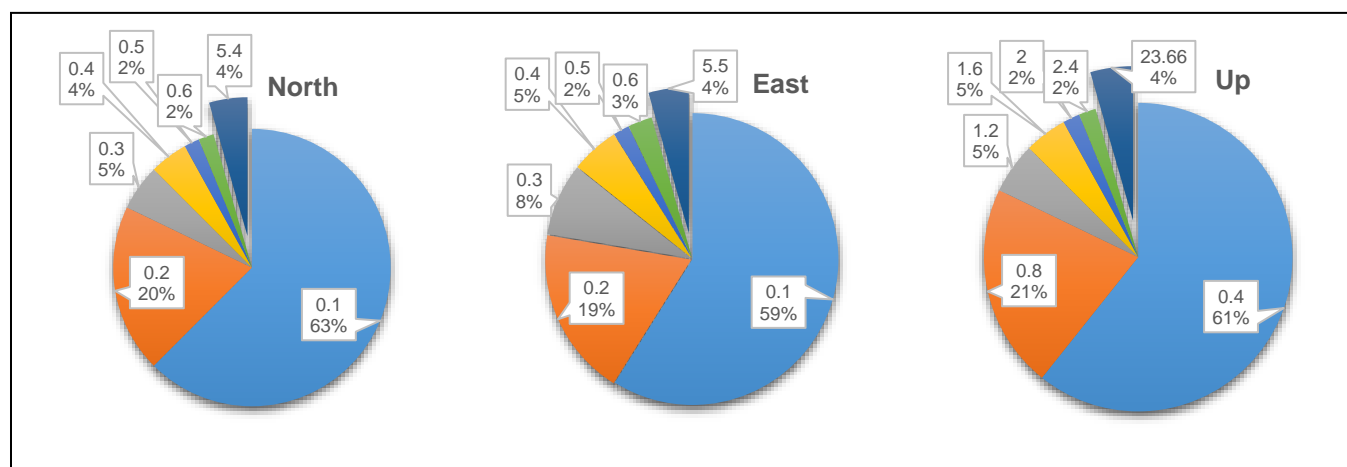


ακρίβειας. Παράλληλα, καθώς οι ταχύτητες που υπολογίσθηκαν στο κατακόρυφο επίπεδο κινούνται εντός του σφάλματος τους, δεν κρίνεται τελικά αξιόπιστη η εκτίμησή τους. Έτσι, για ασφαλέστερες εκτιμήσεις και για την επίτευξη ακρίβειας παρόμοιας με τις εκτιμήσεις σε οριζοντιογραφικό επίπεδο, ο συνδυασμός των μεθόδων δορυφορικής γεωδαισίας (παρατηρήσεις με δέκτες GNSS), κλασσικής γεωδαισίας (παρατηρήσεις γεωμετρικής χωροστάθμησης) και φυσικής γεωδαισίας (παρατηρήσεις βαρύτητας) κρίνεται απαραίτητος.

#### 4.5.1. Στατιστική αξιολόγηση αποτελεσμάτων

Η ακρίβεια των εξαγόμενων αποτελεσμάτων μπορεί να διαπιστωθεί ελέγχοντας στατιστικά την υλοποίηση του πλαισίου αναφοράς μέσω του μετασχηματισμού ομοιότητας όσο και των τυπικών αποκλίσεων των ταχυτήτων που υπολογίσθηκαν. Έτσι, όσον αφορά το μετασχηματισμό ομοιότητας για τους σταθμούς του δικτύου CoreNet, που υλοποίησαν το Πλαίσιο Αναφοράς, το Post RMS υπολογίσθηκε  $\pm 2.5$  mm ενώ για τις ταχύτητες  $\pm 1$  mm/yr. Τα αποτελέσματα αυτά κρίνονται ικανοποιητικά συνυπολογίζοντας τα αποτελέσματα του Πίνακα 21 και εντός της αναμενόμενης ακρίβειας, ενώ εξασφαλίζουν την ορθή ένταξη του δικτύου στο ITRF2014.

Σχετικά με τις τυπικές αποκλίσεις των ταχυτήτων των σταθμών του δικτύου HelNet κινήθηκαν εξίσου σε ικανοποιητικά επίπεδα. Συγκεκριμένα μπορούν να σχηματισθούν τα κάτωθι διαγράμματα για τις ακρίβειες των ταχυτήτων ανά συνιστώσα σε τοποκεντρικό σύστημα και του ποσοστού των αριθμών των σταθμών:



Σχήμα 23 - Τυπική απόκλιση ταχυτήτων κατά North, East, Up ανά ποσοστό σταθμών του δικτύου HelNet.

Από τα παραπάνω διαγράμματα μπορούν να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα για την εσωτερική ακρίβεια των υπολογισθέντων ταχυτήτων. Έτσι, παρατηρείται ότι για τις συνιστώσες North και East το 96% των σταθμών παρουσιάζουν ακρίβεια καλύτερη από 0.6 mm/yr ενώ η αντίστοιχη ακρίβεια για την συνιστώσα Up είναι 2.4 mm/yr. Για την διερεύνηση του ποσοστού των

σταθμών οι οποίοι παρουσίασαν χειρότερη ακρίβεια (4% των σταθμών), σχηματίστηκε το κάτωθι διάγραμμα συσχέτισης της ακρίβειας των ταχυτήτων με τον αριθμό των παρατηρήσεων:



Σχήμα 24 - Διάγραμμα συσχέτισης παρατηρήσεων και τυπικής απόκλισης ταχυτήτων

Από το παραπάνω διάγραμμα παρατηρείται η υψηλή συσχέτιση της ακρίβειας των εκτιμώμενων ταχυτήτων με τον αριθμό των παρατηρήσεων. Οι σταθμοί οι οποίοι παρουσίασαν χαμηλότερη ακρίβεια (συνολικά 5 μόνιμοι σταθμοί) έχουν και τον μικρότερο αριθμό των παρατηρήσεων. Εξετάζοντας την τυπική απόκλιση αλλά και την συνεισφορά του κάθε σταθμού ως προς τον τελικό υπολογισμό του πεδίου ταχυτήτων αποφασίσθηκε οι σταθμοί MEGI, KRYO και MTNA να αφαιρεθούν από την περαιτέρω επεξεργασία. Συνολικά, αφαιρώντας τους τρεις παραπάνω σταθμούς, οι ταχύτητες παρουσιάζουν κατά μέσο όσο τυπική απόκλιση  $\pm 0.2$  mm/yr οριζοντιογραφικά και  $\pm 0.7$  mm/yr υψομετρικά.

#### 4.5.2. Αξιολόγηση βάσει εξωτερικής πληροφορίας

Η αξιολόγηση των εκτιμώμενων ταχυτήτων για τους σταθμούς του δικτύου HelNet, που ταυτόχρονα συμμετέχουν στο ευρωπαϊκό δίκτυο της EPN, μπορεί να πραγματοποιηθεί τόσο έμμεσα με τη σύγκριση των συντεταγμένων των σταθμών σε μια κοινή εποχή αναφοράς, όσο και άμεσα με τη σύγκριση τους με τις αντίστοιχες ταχύτητες που δημοσιεύονται επίσημα από την EUREF. Συγκεκριμένα, η EUREF έχει διαχωρίσει τους σταθμούς που συμμετέχουν στο δίκτυο EPN, ανάλογα με την αξιοπιστία τους σε δύο κλάσεις (Class A και B). Για τους σταθμούς που ανήκουν στην Class A δημοσιεύονται οι συντεταγμένες τους και οι ταχύτητες σε γεωκεντρικό σύστημα συντεταγμένων μετά από ενιαία επίλυση του δικτύου (Cumulative Solution) για μια κοινή εποχή αναφοράς. Για τους σταθμούς που ανήκουν στην Class B δημοσιεύονται μόνο οι συντεταγμένες τους, την εποχή αναφοράς κατά την οποία παρουσιάζουν τη μικρότερη μεταβλητότητα.

Ως εκ τούτου, η σύγκριση των ταχυτήτων μπορεί να πραγματοποιηθεί άμεσα ενώ για τις συντεταγμένες, χρησιμοποιώντας τις ταχύτητες που υπολογίσθηκαν στην παρούσα μελέτη, μεταφέρονται στην εποχή αναφοράς που έχουν υπολογισθεί οι αντίστοιχες από την EUREF, βάσει της σχέσης (4.1) και υπολογίζεται η απόκλιση τους. Στον Πίνακα 22 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των διαφορών από τη σύγκριση των συντεταγμένων και των ταχυτήτων για τους ελληνικούς σταθμούς του δικτύου EPN.

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{(t)}^{ITRF14} = \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{bmatrix}_{(t_0)}^{ITRF14} + \begin{bmatrix} \dot{X}_i \\ \dot{Y}_i \\ \dot{Z}_i \end{bmatrix}_{(t-t_0)}^{ITRF14} \quad (4.1)$$

Πίνακας 22 - Αποτελέσματα σύγκρισης EUREF – HelNet

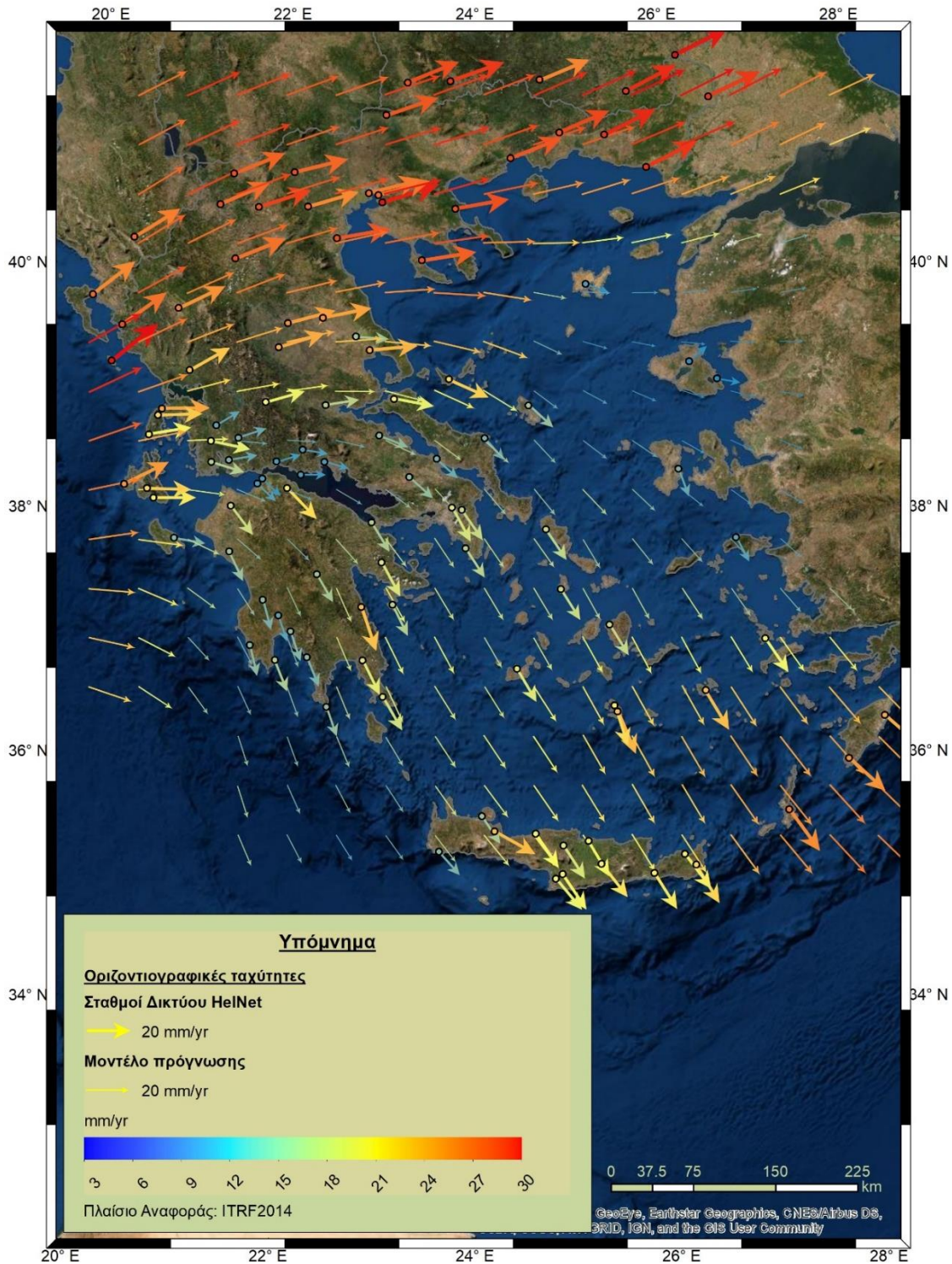
Μόνιμος Σταθμός	Class	$dX$ (mm)	$dY$ (mm)	$dZ$ (mm)	$d\dot{X}$ (mm/ yr)	$d\dot{Y}$ (mm/ yr)	$d\dot{Z}$ (mm/ yr)	Εποχή Αναφοράς
AUT1	B	-2.8	0.02	-3.0	-	-	-	2017.186
DUTH	B	-1.1	-0.4	-1.8	-	-	-	2017.249
LARM	B	0.4	-0.7	-2.2	-	-	-	2015.945
NOA1	B	0.3	1.7	-1.0	-	-	-	2019.055
TUC2	A	-8.0	-3.3	0.5	0.9	0.9	0.3	2010.003
PAT0	A	-4.0	-8.0	-4.1	0.1	1.2	0.4	2010.003

Από τον παραπάνω πίνακα παρατηρείται ότι οι διαφορές που προκύπτουν τόσο για τις συντεταγμένες όσο και για τις ταχύτητες, για τους περισσότερους σταθμούς, είναι μικρότερες από 2.5 mm για τις συντεταγμένες και 1 mm/yr για τις ταχύτητες (ακρίβεια ένταξης του πλαισίου αναφοράς στο δίκτυο HelNet). Ειδικότερα, οι συντεταγμένες που υπολογίσθηκαν σε εποχή αναφοράς το οποίο εμπίπτει εντός της χρονικής διάρκειας που εξετάσθηκε στην παρούσα εργασία (2015-2019) παρουσιάζουν μικρότερες αποκλίσεις ανάμεσα στα δύο σύνολα δεδομένων.

#### **4.6. Παραγωγή του μοντέλου ταχυτήτων για τον ελληνικό χώρο**

Η μοντελοποίηση ενός πεδίου ταχυτήτων μπορεί να εξασφαλίσει την ανάγκη για γνώση των γεωδαιτικών ταχυτήτων σε κάθε σημείο της ελληνικής επικράτειας εξυπηρετώντας τόσο γεωδαιτικούς όσο και γεωδυναμικούς σκοπούς. Συγκεκριμένα, η υιοθέτηση ενός μοντέρνου κινηματικού ή ημι-κινηματικού συστήματος αναφοράς προϋποθέτει την ύπαρξη ενός εξίσου σύγχρονου μοντέλου ταχυτήτων ως αναπόσπαστο στοιχείο της υλοποίησής του. Στο πλαίσιο αυτό, χρησιμοποιώντας τις ταχύτητες των μόνιμων σταθμών του δικτύου HelNet όπως υπολογίσθηκαν στα προηγούμενα στάδια, πραγματοποιήθηκαν διάφορες μέθοδοι παρεμβολής για τη δημιουργία ενός μοντέλου μετακινήσεων για όλο τον ελληνικό χώρο. Μετά την εξέταση των αποτελεσμάτων αλλά και παρόμοιων μελετών αξιολόγησης μεθόδων παρεμβολής (Bogusz, Klos, Grzempowski, & Kontny, 2013) επιλέχθηκε ως καταλληλότερη μέθοδος, η μέθοδος παρεμβολής Kriging χρησιμοποιώντας το Gaussian μαθηματικό μοντέλο για το ημιβαριόγραμμα (semi-variogram).

Ταυτόχρονα, λαμβάνοντας υπόψιν τη γεωγραφική έκταση κυρίως της ηπειρωτικής Ελλάδας και το σύνολο των διαθέσιμων σταθμών δημιουργήθηκε ένας κάρναβος πρόγνωσης με βήμα 24' x 24', στα σημεία του οποίου υπολογίσθηκαν οι οριζοντιογραφικές ταχύτητες σε τοποκεντρικό σύστημα (Χάρτης 11). Σημειώνεται ότι καθώς η συνιστώσα του υψομέτρου υπολογίζεται με χειρότερη ακρίβεια και επειδή τα φαινόμενα ανύψωσης και καθίζησης όπως αναφέρθηκε, είναι αρκετά συσχετισμένα με την τοπική μορφολογία της κάθε περιοχής, η παραπάνω διαδικασία παρεμβολής κρίθηκε αρκετά επισφαλής. Έτσι, η δημιουργία ενός μοντέλου ταχυτήτων που θα περιλαμβάνει και την συνιστώσα του υψομέτρου θα πρέπει να λαμβάνει υπόψιν επιπλέον των παρατηρήσεων GNSS και γεωλογικά, σεισμολογικά και βαρυτημετρικά δεδομένα της κάθε περιοχής. Στον Χάρτη 11 παρουσιάζονται οι ταχύτητες όπως προσδιορίσθηκαν στους σταθμούς του δικτύου HelNet και οι ταχύτητες στον κάρναβο πρόγνωσης, όπως αυτές μοντελοποιήθηκαν από τον αλγόριθμο παρεμβολής.



Χάρτης 11 - Χάρτης μοντέλο οριζοντιογραφικών ταχυτήτων για τον ελληνικό χώρο (Πηγή υποβάθρου: ESRI)



#### 4.6.1. Αξιολόγηση του μοντέλου ταχυτήτων

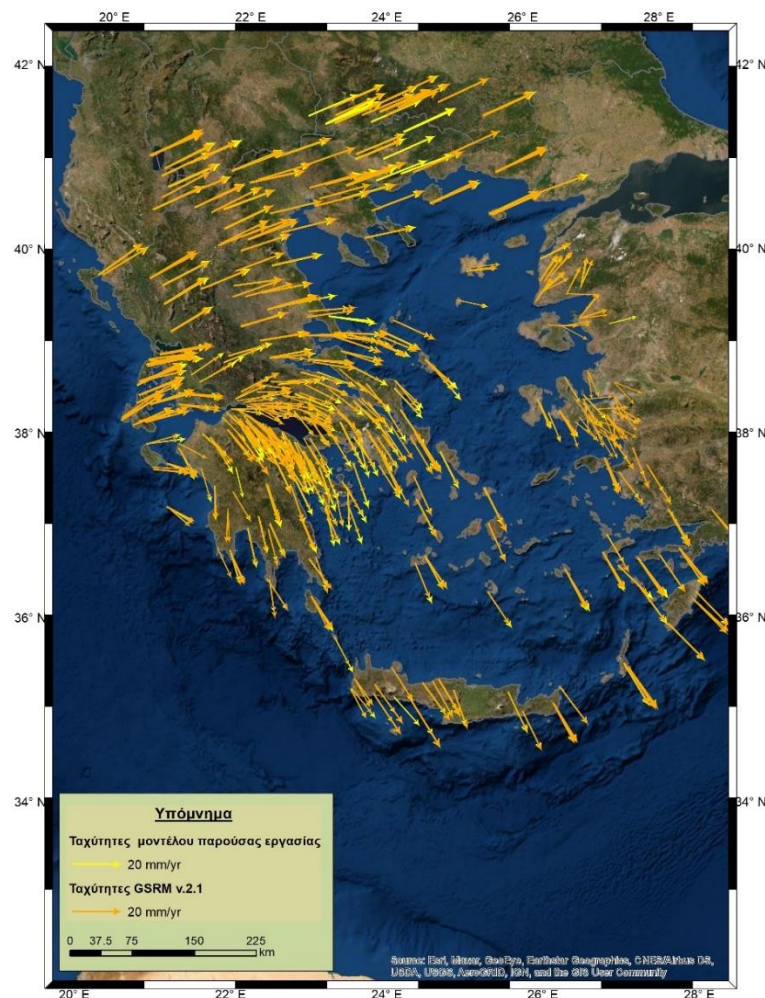
Η αξιολόγηση του παραγόμενου μοντέλου γεωδαιτικών ταχυτήτων πραγματοποιήθηκε με τρεις μεθόδους. Η πρώτη μέθοδος αφορά τον υπολογισμό των διαφορών που παρατηρούνται στις ταχύτητες των σταθμών του δικτύου HeiNet από τις πρωτογενείς παρατηρήσεις GPS και τις ταχύτητες που προκύπτουν από το μοντέλο ταχυτήτων για τους ίδιους σταθμούς. Στον *Χάρτη 12* αποτυπώνονται τα διανύσματα των ταχυτήτων από τις παρατηρήσεις και από το μοντέλο ταχυτήτων.





Οι διαφορές, όπως υπολογίσθηκαν οριζοντιογραφικά, κυμαίνονται στο  $1 \text{ mm/yr} \pm 0.7 \text{ mm/yr}$ , ακρίβεια που μπορεί να αποδοθεί τελικά στο παραγόμενο μοντέλο. Από τον παραπάνω χάρτη παρατηρείται ότι οι σημαντικότερες διαφορές παρουσιάζονται κυρίως στο νησιωτικό χώρο, όπου τα δεδομένα παρατηρήσεων GPS είναι περιορισμένα, γεγονός που υποβαθμίζει την ποιότητα του αλγόριθμου παρεμβολής.

Η δεύτερη μέθοδος αξιολόγησης του μοντέλου μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω της σύγκρισης με δεδομένα ταχυτήτων που προέρχονται από παγκόσμια μοντέλα κίνησης των πλακών. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε το παγκόσμιο μοντέλο κίνησης των πλακών, GSRM v.2.1 (Global Strain Rate Model) (Kreemer, Blewitt, & Klein, 2014). Συγκεκριμένα, ο υπολογισμός του GSRM έχει προέλθει από την ανάλυση και το συνδυασμό παρατηρήσεων είτε μόνιμων σταθμών GNSS είτε μεμονωμένων εργασιών ανά τον κόσμο με σκοπό την παραγωγή των αντίστοιχων γεωδαιτικών ταχυτήτων. Στο πλαίσιο αξιολόγησης της παρούσας εργασίας, συγκεντρώθηκαν συνολικά 551 σημεία, των οποίων οι οριζοντιογραφικές ταχύτητες χρησιμοποιήθηκαν κατά την παραγωγή του GSRM και αφορούν κυρίως διάφορες καμπάνιες που έχουν πραγματοποιηθεί στον ελληνικό χώρο. Στα σημεία αυτά, υπολογίσθηκαν οι αντίστοιχες ταχύτητες όπως αυτές προκύπτουν από το μοντέλο της παρούσας εργασίας, με τα δύο σύνολα δεδομένων να απεικονίζονται στον *Χάρτη 13*.

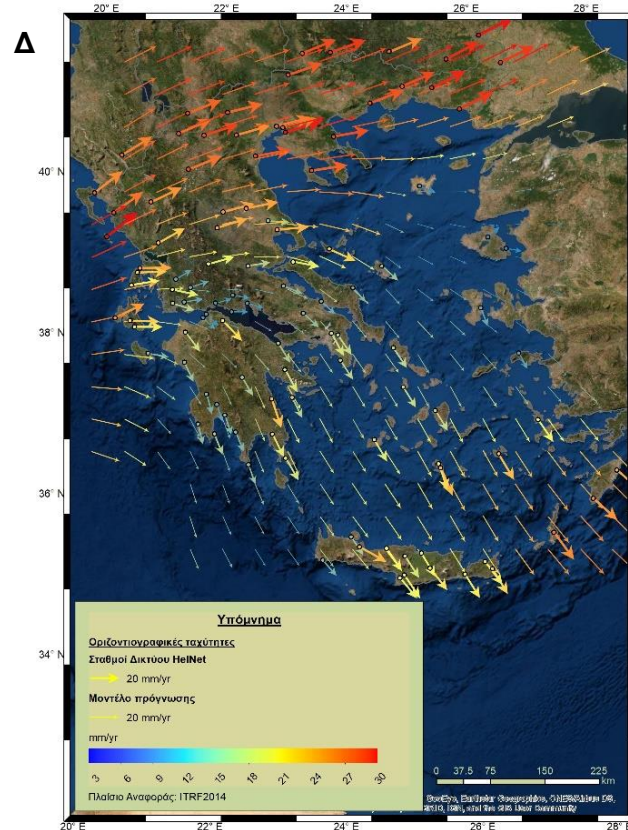
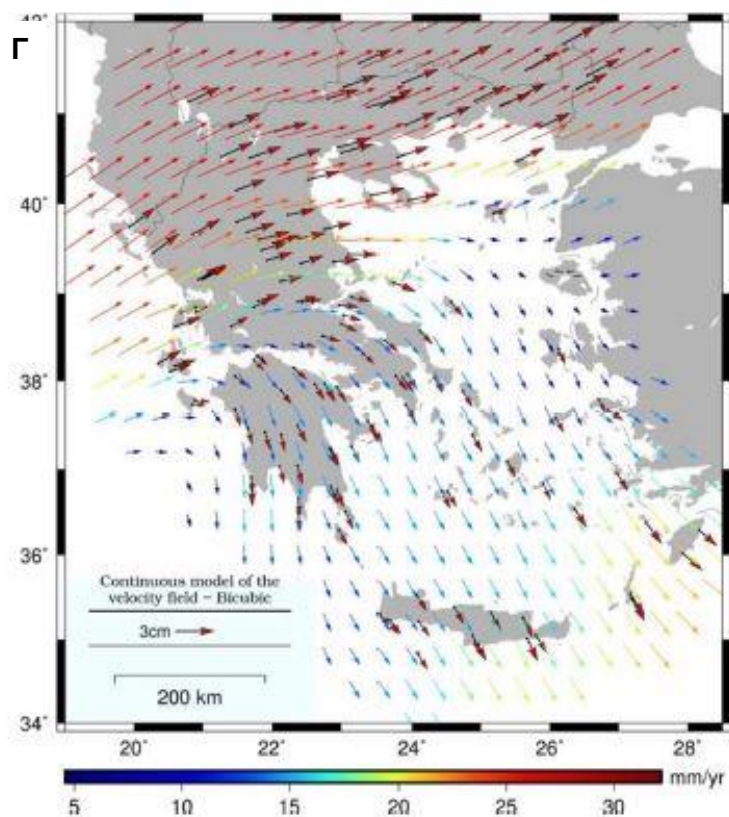
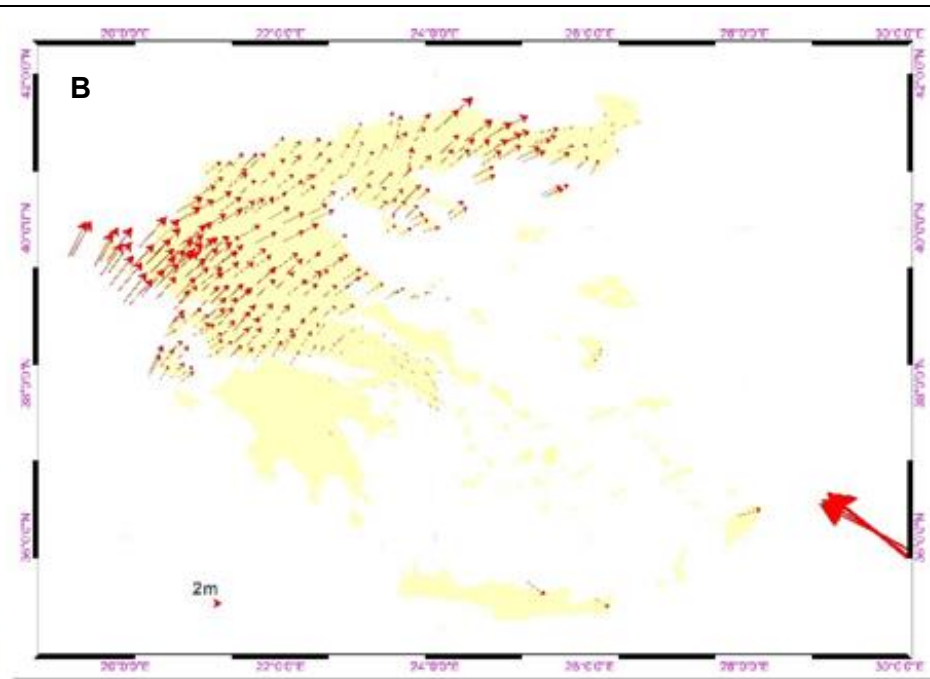
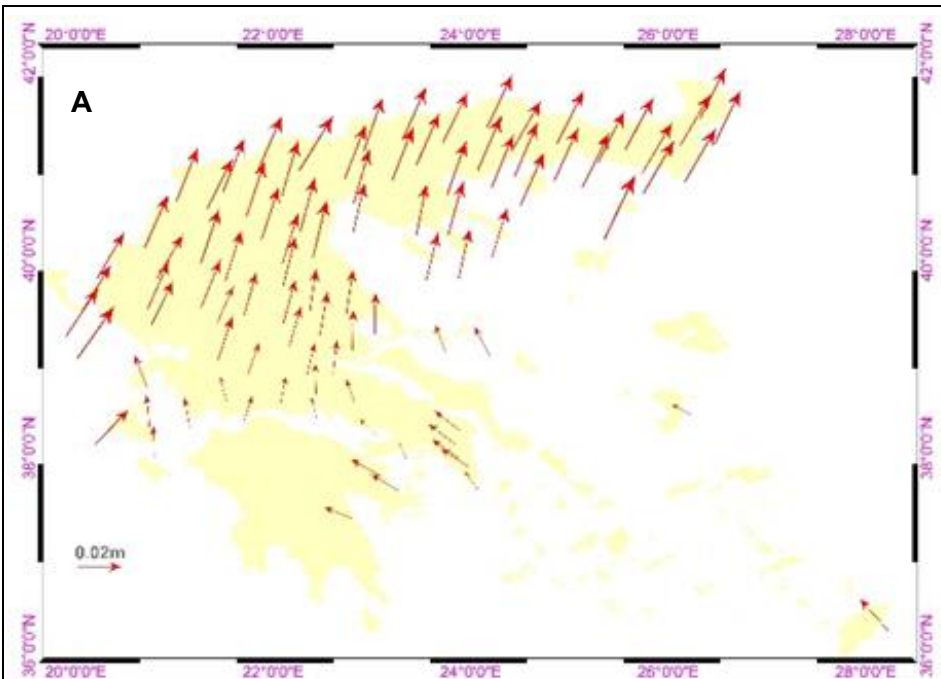


*Χάρτης 13 - Ταχύτητες μοντέλου παρούσας εργασίας και GSRM v.2.1. (Πηγή υποβάθρου: ESR)*

Μέσα από τη σύγκριση των παραπάνω σημείων προκύπτει ότι ο μέσος όρος των διαφορών στο οριζοντιογραφικό επίπεδο κυμαίνεται στα 2.2 mm/yr με τυπική απόκλιση  $\pm 1.7$  mm/yr. Συγκεκριμένα, παρατηρείται ότι οι μεγαλύτερες διαφορές εντοπίζονται είτε στα ακραία σημεία του κανάβου, όπου λόγω έλλειψης παρατηρήσεων, το μοντέλο παρεμβολής παρουσιάζει μεγαλύτερα σφάλματα, είτε σε περιοχές με έντονες γεωδυναμικές μεταβολές, όπως ο κορινθιακός κόλπος ή η Κεφαλονιά. Αξίζει να σημειωθεί, ότι οι παρατηρήσεις που χρησιμοποιήθηκαν για την παραγωγή του GSRM, για τον ελλαδικό χώρο, αποτελούνται κυρίως από μεμονωμένες εργασίες και όχι από δεδομένα μόνιμων σταθμών. Συνήθως η διάρκεια αυτών των μετρήσεων είναι μικρή και έτσι η εκτίμηση ταχυτήτων από αυτές τις παρατηρήσεις ενέχουν μεγάλη αβεβαιότητα. Επίσης, τα δύο σύνολα ταχυτήτων που συγκρίνονται αναφέρονται σε διαφορετικό Πλαίσιο Αναφοράς, καθώς το GSRM v.2.1 υλοποιείται βάσει του ITRF08, ενώ οι επιλύσεις στην τρέχουσα εργασία έχουν πραγματοποιηθεί στο ITRF2014. Το γεγονός αυτό λειτουργεί αθροιστικά για τη διαμόρφωση των παρατηρούμενων διαφορών.

Τελευταία μέθοδος αξιολόγησης του παραγόμενου μοντέλου αποτελεί η ποιοτική σύγκρισή του με παλαιότερες εργασίες που έχουν πραγματοποιηθεί για τον υπολογισμό μικρομετακινήσεων στον ελληνικό χώρο. Στο πλαίσιο της παρούσας αξιολόγησης θα αναφερθούν δύο προγενέστερες εργασίες. Η πρώτη αφορά την εργασία που πραγματοποιήθηκε από τους Bitharis, et al.(2016) κατά την οποία υπολογίσθηκε ένα μοντέλο γεωδαιτικών ταχυτήτων για τον ελληνικό χώρο μετά από επεξεργασία συνεχόμενων ημερήσιων παρατηρήσεων GPS 155 μόνιμων σταθμών για χρονικό διάστημα επτά ετών (2008 – 2014). Η δεύτερη μελέτη αφορά την εργασία που πραγματοποιήθηκε από τους Papadopoulos, et al. (2020) και στην οποία ανιχνεύθηκαν μικρομετακινήσεις, κυρίως στην περιοχή της Βόρειας Ελλάδας μέσω της υλοποίησης διαφορετικών συστημάτων αναφοράς σε διαφορετικές εποχές.

Στο Σχήμα 25 παρουσιάζονται οι χάρτες με τα αποτελέσματα της παρούσας και των παραπάνω εργασιών. Από τη σύγκριση των χαρτών προκύπτει ότι τα διανύσματα των ταχυτήτων που έχουν υπολογισθεί απ' όλες τις εργασίες ταυτίζονται ποιοτικά τόσο κατά μέτρο όσο και κατά τη διεύθυνσή τους. Συγκεκριμένα, λαμβάνοντας υπόψιν τα αποτελέσματα της εργασίας των Papadopoulos et., al (2020), οι μετατοπίσεις των τριγωνομετρικών σημείων της ΓΥΣ στη Β. Ελλάδα, μέσα από τις υλοποιήσεις των διαφορετικών πλαισίων σε διαφορετικές εποχές συμπίπτουν με το πεδίο ταχυτήτων που εξήχθη στην παρούσα εργασία, με το μέτρο τους να κυμαίνεται κατά μέσο όρο στα 30 mm/yr και τη διεύθυνση τους να ακολουθεί τη κίνηση της ευρασιατικής πλάκας. Αντίστοιχα, η μοντελοποίηση των ταχυτήτων που πραγματοποιήθηκε από τους Bitharis et. al., (2016) ταυτίζεται με το μοντέλο ταχυτήτων της παρούσας εργασίας στο σύνολο του ελληνικού χώρου. Οι μεγαλύτερες ταχύτητες παρατηρούνται στην Β. Ελλάδα με διεύθυνση ΒΑ ενώ στην υπόλοιπη Ελλάδα οι ταχύτητες έχουν μικρότερο μέτρο και διαφορετική διεύθυνση, με τους σταθμούς κατά μήκος του ελληνικού τόξου (Κεφαλονιά, Κρήτη και Ρόδο) να παρουσιάζουν αντίστοιχα τις μεγαλύτερες ταχύτητες.



**Υπόμνημα**

**A:** Διανύσματα μετατόπισης τριγωνομετρικών HEGNET 2002 – HEGNET 2016

**B:** Διανύσματα μετατόπισης τριγωνομετρικών ΕΓΣΑ87 – HEGNET 2016

**Γ:** Πεδίο ταχυτήτων (Bitharis, et. al., 2016)

**Δ:** Πεδίο ταχυτήτων παρούσας εργασίας

Σχήμα 25 - Σύγκριση μοντέλων και διανυσμάτων ταχυτήτων



## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

---

Στη παρούσα μελέτη πραγματοποιήθηκε επεξεργασία των παρατηρήσεων από 112 μόνιμους σταθμούς GNSS στον ελλαδικό χώρο και 20 μόνιμους σταθμούς του δικτύου της IGS, με σκοπό τον προσδιορισμό ενός ενιαίου πεδίου ταχυτήτων, υψηλής ακρίβειας για την ελληνική επικράτεια. Η διαδικασία επεξεργασίας των πρωτογενών παρατηρήσεων για τον αρχικό υπολογισμό των γεωδαιτικών ταχυτήτων των παραπάνω σταθμών, όπως περιγράφεται στα αντίστοιχα κεφάλαια, ακολούθησε τρία βασικά στάδια και εκτελέστηκε με το επιστημονικό λογισμικό GAMIT/GLOBK έκδοσης 10.71. Συγκεντρωτικά η διαδικασία και τα αποτελέσματα συνοψίζονται ως εξής:

α. Πραγματοποιήθηκε επίλυση των δεδομένων στο επίπεδο παρατηρήσεων ψευδοαπόστασης κώδικα και φάσης, λαμβάνοντας υπόψιν τις τροχιές ακριβείας των δορυφόρων και διάφορων μοντέλων που επιδρούν σ' αυτές (βαρύτητας, ηλιακής ακτινοβολίας κ.α), τα μοντέλα ωκεάνιων παλιρροιών και παλιρροιών του σταθερού φλοιού, την τροποσφαιρική υστέρηση και τη βαθμονόμηση των κεραιών των δορυφόρων και των δεκτών. Στη συνέχεια αναλύθηκαν οι χρονοσειρές των συντεταγμένων των σταθμών, όπου εντοπίστηκαν είτε μόνιμες μετατοπίσεις είτε μεμονωμένα ακραίες τιμές οι οποίες συμπεριλήφθηκαν ή εξαιρέθηκαν, ανάλογα με τη προέλευσή τους, από την περαιτέρω επεξεργασία. Τελευταίο στάδιο της επεξεργασίας των πρωτογενών παρατηρήσεων ήταν η τελική συνόρθωση του δικτύου με χρήση του φίλτρου Kalman και παράλληλα η ένταξη του δικτύου στο πλαίσιο αναφοράς ITRF2014 και η εκτίμηση των τελικών γεωδαιτικών ταχυτήτων των σταθμών.

β. Καθ' ένα από τα παραπάνω στάδια ελέγχθηκε ποιοτικά ως προς το ποσοστό των επιλυόμενων ασαφειών φάσεις, των postfit rms των επιλύσεων και του rms του μετασχηματισμού ομοιότητας για την ένταξη του πλαισίου αναφοράς, το οποίο υπολογίσθηκε στα  **$\pm 2.5$  mm**.

γ. Μέσα από την παραπάνω ανάλυση και την τελική εκτίμηση των ταχυτήτων, πιστοποιήθηκε η ανομοιογένεια που παρουσιάζει ο ελληνικός χώρος ως προς τις ταχύτητες του φλοιού, τόσο κατά μέτρο όσο και κατά διεύθυνση. Οι εκτιμώμενες ταχύτητες κυμαίνονται από 5 – 30 mm/yr και μετά από έλεγχο τόσο ως προς την εσωτερική τους ακρίβεια όσο και με βάση εξωτερική πληροφορία, το εκτιμώμενο σφάλμα των υπολογισμών προσδιορίστηκε στα  **$\pm 0.7$  mm/yr**. Συγκεκριμένα, η Βόρεια Ελλάδα παρουσιάζει μεγαλύτερες ταχύτητες σε σχέση με την υπόλοιπη χώρα, με διεύθυνση ΒΑ ακολουθώντας την κίνηση της ευρασιατικής πλάκας όπως αυτή καταγράφηκε από τη διεύθυνση των ταχυτήτων των μόνιμων σταθμών της IGS. Αντίθετα, οι ταχύτητες στην υπόλοιπη Ελλάδα, αν και μικρότερες σε μέτρο, παρουσιάζουν διαφορετική διεύθυνση κίνησης, με προσανατολισμό ανατολικό και νοτιοανατολικό προς την αφρικανική πλάκα. Η παραπάνω γενική εικόνα συνοδεύεται από τοπικά έντονες μεταβολές και ανομοιογένειες του πεδίου ταχυτήτων, όπως στην περιοχή του κορινθιακού κόλπου, της Κεφαλονιάς και της Λευκάδας που αναδεικνύουν τις μεγάλες γεωδυναμικές διεργασίες που συντελούνται στις περιοχές αυτές. Παράλληλα, η εξαγωγή ταχυτήτων στο κατακόρυφο επίπεδο, αν και εν γένει χαμηλότερης ακρίβειας, μπορεί να αναδείξει τοπικές τάσεις που με συνδυασμό διαφορετικών γεωδαιτικών και γεωφυσικών τεχνικών μπορούν να οδηγήσουν σε χρήσιμα συμπεράσματα.

δ. Παράχθηκε ένα μοντέλο ταχυτήτων για τις οριζοντιογραφικές ταχύτητες με κατάλληλη μέθοδος παρεμβολής των παραπάνω ταχυτήτων σ' ένα κάναβο σημείων που καλύπτει το σύνολο του ελληνικού χώρου. Το εκτιμώμενο πεδίο ταχυτήτων ελέγχθηκε τόσο ως προς τη ποιότητα της διαδικασίας της παρεμβολής όσο και με βάση το πλέον πρόσφατο παγκόσμιο μοντέλο μετακίνησης των πλακών GSRM v.2.1, με τις διαφορές να προκύπτουν κατά μέσο όρο στα **2.2 mm/yr ± 1.7 mm/yr**.

ε. Το παραχθέν μοντέλο ταχυτήτων ελέγχθηκε ποιοτικά σε σχέση με δύο προγενέστερες εργασίες που εξετάζουν μικρομετακινήσεις στον ελληνικό χώρο (Bitharis, et. al., 2016; Paradoroulos, et. al., 2020) και διαπιστώθηκε να προκύπτουν παρόμοια αποτελέσματα.

Μέσα από την παρούσα εργασία αναδεικνύεται η χρησιμότητα προσδιορισμού και επικαιροποίησης ενός σύγχρονου πεδίου ταχυτήτων καθώς μέσω αυτού μπορούν να εξαχθούν συμπεράσματα για το γεωδυναμικό χαρακτήρα κάθε υποπεριοχής, την ύπαρξη ενεργών ρηγμάτων ή την δημιουργία καινούργιων και εν γένει τις κινήσεις του γήινου φλοιού. Ταυτόχρονα, από γεωδαιτική σκοπιά, ένα σύγχρονο πεδίο ταχυτήτων επιτελεί έναν διπλό ρόλο. Πρώτον, καθιστά εφικτή τη σύνδεση ενός πλαισίου αναφοράς με αντίστοιχα ευρωπαϊκά ή διεθνή σε συγκεκριμένη εποχή αναφοράς καθώς επίσης επιτρέπει την σύγκριση παρατηρήσεων που έχουν πραγματοποιηθεί σε διαφορετικές εποχές και πλαίσια. Δεύτερον, υιοθετώντας ένα πεδίο γεωδαιτικών ταχυτήτων στο πλαίσιο υλοποίησης ενός κινηματικού ή ημι-κινηματικού συστήματος αναφοράς υιοθετούνται παράλληλα και οι αντίστοιχες τεκτονικές μικρομετακινήσεις της περιοχής της οποίας αναφέρεται.

Περαιτέρω έρευνα μπορεί να πραγματοποιηθεί εξετάζοντας αναλυτικά τα δεδομένα υποπεριοχών που παρουσιάζουν έντονη γεωδυναμική συμπεριφορά (Κορινθιακός Κόλπος, νησιά Ιονίου), λαμβάνοντας υπόψιν και τα περιοδικά σήματα των σταθμών για την μελέτη των διεργασιών στις περιοχές αυτές. Επίσης η χρήση δεδομένων από τεχνικές κλασσικής γεωδαισίας, βαρυτημετρίας και συμβολομετρίας θα μπορούσαν να βοηθήσουν ώστε να εξαχθούν αποτελέσματα υψηλότερης ακρίβειας ειδικά στην συνιστώσα του υψομέτρου όπου τα συστήματα GNSS δεν μπορούν να επιτύχουν την αντίστοιχη οριζοντιογραφική ακρίβεια. Η έρευνα προς αυτήν την κατεύθυνση θα επέτρεπε τον υπολογισμό ενός αντίστοιχης ακρίβειας πεδίου ταχυτήτων και για την συνιστώσα του υψομέτρου, συνεισφέροντας έτσι στην ακριβέστερη μελέτη των γεωδυναμικών διεργασιών που συντελούνται στον ελληνικό χώρο.

Συνολικά από τις παραπάνω παρατηρήσεις καθίσταται σαφής η αναγκαιότητα υιοθέτησης ενός σύγχρονου συστήματος αναφοράς για την Ελλάδα, το οποίο θα λαμβάνει υπόψιν του τις επιδράσεις των έντονων γεωδυναμικών διεργασιών που διενεργούνται στις θέσεις των σημείων που το υλοποιούν. Γίνεται φανερό, ότι το σύστημα αναφοράς της Ελλάδας ΕΓΣΑ'87, όντας στατικό και μετά από περισσότερο από 30 χρόνια σε ισχύ, δεν μπορεί να καλύψει πλέον τις σύγχρονες γεωδαιτικές απαιτήσεις της χώρας. Τα σφάλματα που δημιουργούνται από την αγνόηση της επίδρασης των τεκτονικών μετακινήσεων με την πάροδο του χρόνου κυμαίνονται σε αρκετά cm ανά περιοχή, καθιστώντας τις πρόσφατες παρατηρήσεις GNSS καλύτερης ακρίβειας από το ίδιο το σύστημα αναφοράς στο οποίο αναφέρονται.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

---

- Altamimi, Z. (2018). Relationship and Transformation between the International and the European Terrestrial Reference Systems. *EUREF Technical Note 1*. Retrieved from <http://etrs89.ensg.ign.fr/pub/EUREF-TN-1.pdf>
- Altamimi, Z., Rebischung, P., Métivier, L., & Collilieux, X. (2016). ITRF2014: A new release of the International Terrestrial. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 121, pp. 6109–6131. doi:10.1002/2016JB013098
- Anderson, R., Chin, M., Cline, M., Hoar, D., Murray, O., & Stone, W. (2000). *NATIONAL CONTINUOUSLY OPERATING REFERENCE STATION (NATIONAL CORS) - SITE MONUMENTATION*. NATIONAL GEODETIC SURVEY.
- Avallone, A., Briole, P., Agatza-Balodimou, A.-M., Billiris, H., Charade, O., Mitsakaki, C., Veis, G. (2004). Analysis of eleven years of deformation measured by GPS in the Corinth Rift Laboratory area. *Comptes Rendus - Geoscience*, 336, pp. 301–311. doi:10.1016/j.crte.2003.12.007
- Billiris, H., Paradissis, D., Veis, G., England, P., Featherstone, W., Parsons, B., & Ambraseys, N. (1991). Geodetic determination of tectonic deformation in central Greece from 1900 to 1988. *Nature*, 350(6314), pp. 124-129. doi:10.1038/350124a0
- Bitharis, S., Fotiou, A., Pikridas, C., & Rossikopoulos, D. (2016). A New Velocity Field of Greece Based on Seven Years (2008–2014) Continuously Operating GPS Station Data. In J. Freymueller, & L. Sánchez, *International Symposium on Earth and Environmental Sciences for Future Generations, International Association of Geodesy Symposia* (Vol. 147). Springer International Publishing. doi:10.1007/1345\_2016\_230
- Bitharis, S., Papadopoulos, N., Pikridas, C., Fotiou, A., Rossikopoulos, D., & Kagiadakis, V. (2018). Assessing a new velocity field in Greece towards a new semi-kinematic datum. *Survey Review*. doi:10.1080/00396265.2018.1479937
- Bitharis, S., Pikridas, C., & Fotiou, A. (2019). A methodology investigation for a semi-kinematic datum realization in Greece combining geodetic and geological data. *4th Joint International Symposium on Deformation Monitoring (JISDM)*. Athens, Greece.
- Blewitt, G., & Lavallée, D. (2002). Effect of annual signals on geodetic velocity. *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH*, 107.
- Bock, Y., Gourevitch, S. A., Counselman, C. C., King, R. W., & Abbot, R. I. (1986). Interferometric analysis of GPS phase observation. *Man. Geodaetica*, 11, pp. 282-288.
- Boehm, J., Niell, A., Tregoning, P., & Schuh, H. (2006). Global Mapping Function (GMF): A new empirical mapping function based on numerical weather model data. *Geophys Res Lett*, 33. doi:10.1029/2005GL025546



- Boehm, J., Werl, B., & Schuh, H. (2006a). Troposphere mapping functions for GPS and very long baseline interferometry from European Centre for Medium-Range Weather Forecasts operational analysis data. *J Geophys Res Solid Earth*, 111, pp. 1-9. doi:10.1029/2005JB003629
- Bogusz, J., Klos, A., Grzempowski, P., & Kontny, B. (2013). Modelling the Velocity Field in a Regular Grid in the Area of Poland on the Basis. *Pure and Applied Geophysics*. doi:10.1007/s00024-013-0645-2
- Briole P., Rigo A., Lyon-Caen H., et al., (2000). Active deformation of the Corinth rift, Greece: Results from repeated Global Positioning System surveys between 1990 and 1995. *J Geophys Res* 105:25605. doi: 10.1029/2000JB900148.
- Bruyninx, C., Altamimi, Z., Boucher, C., Brockmann, E., Caporali, A., Gurtner, W., Weber, G. (2009). The European Reference Frame: Maintenance and Products. In H. Drewes , *Geodetic Reference Frames. International Association of Geodesy Symposia* (Vol. 134). Berlin, Heidelberg: Springer. doi:https://doi.org/10.1007/978-3-642-00860-3\_20
- Bruyninx, C., Legrand, J., Fabian, A., & Pottiaux, E. (2019). GNSS Metadata and Data Validation in the EUREF. *GPS Solut*, 23(106). doi:https://doi.org/10.1007/s10291-019-0880-9
- Caputo R, Chatzipetros A, Pavlides S, Sboras S (2012) Active tectonics around the Mediterranean The Greek Database of Seismogenic Sources (GreDaSS): state-of-the-art for northern Greece. *Ann Geophys* 55:859–894. doi: 10.4401/ag-5168
- Chatzinikos, M., Fotiou, A., Pikridas, C., & Rossikopoulos, D. (2015). The Realization of a Semi-Kinematic Datum in Greece Including a New Velocity Model. (S. I. Publishing, Ed.) *International Association of Geodesy Symposia*. doi:10.1007/1345\_2015\_93
- Cocard M., Kahle H.G., Peter Y., et al., (1999). New constraints on the rapid crustal motion of the Aegean region: Recent results inferred from GPS measurements (1993-1998) across the West Hellenic Arc, Greece. *Earth Planet Sci Lett* 172: 39 – 47. doi:10.1016/S0012-821X(99)00185-5.
- Combrinck, W. L., & Schmidt, M. (1998). *Physical Site Specifications: Geodetic Site Monumentation*. Annapolis: IGS Network Systems Workshop.
- Delikaraoglou D, Billiris H, Paradissis D, et al (2006) Geodetic measurements in the Aegean Sea region for the detection of crustal deformation. *Adria Microplate GPS Geod Tectonics Hazards* 61:287–304.
- Dong, D., Herring, T. A., & King, R. W. (1998). Estimating regional deformation from a combination of space and terrestrial geodetic data. *Journal of Geodesy*, 72, pp. 200-214.
- Dong, D.-N., Herring, A., & King, R. (1998). Estimating regional deformation from a combination of space and terrestrial geodetic data. *J. Geodesy*, 72, pp. 200-214.
- Doukas I, Fotiou A, Ifadis IM (2004) Displacement field estimation from GPS measurement in the Volvi area. In: Proceedings of FIG 27th Working Week “The Olympic Spirit in Surveying”, Athens, Greece, 22 - 27 May.

- Drewes, H. (2009). Reference Systems, Reference Frames, and the Geodetic Datum. In M. G. Sideris, *Observing our Changing Earth. International Association of Geodesy Symposia* (Vol. 133). Berlin, Heidelberg: Springer. doi:[https://doi.org/10.1007/978-3-540-85426-5\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-540-85426-5_1)
- EPN Central Bureau. (2019). *GUIDELINES FOR EPN STATIONS & OPERATIONAL CENTRES*.
- Floyd, M. A., Billiris, H., Paradissis, D., Veis, G., Avallone, A., Briole, P., England, P. C. (2010). A new velocity field for Greece: Implications for the kinematics and dynamics of the Aegean. *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH*, 115. doi:10.1029/2009JB007040
- Fotiou A, Kagiadakis V, Pikridas C, Rossikopoulos D (2003) *Geodetically derived displacements and crustal deformation analysis: Application in the volvi area*. In: Proceedings of the 11th International Symposium on Deformation Measurements. FIG commission 6, Santorini, Greece, 25 – 28 May.
- Ganas a., Marinou a., Anastasiou D, et al (2013) GPS-derived estimates of crustal deformation in the central and North Ionian Sea, Greece: 3-yr results from NOANET continuous network data. *J Geodyn* 67:62–71. doi:10.1016/j.jog.2012.05.010
- Gurtner, W., & Estey, L. (2007). *RINEX: The Receiver Independent Exchange Format Version 2.11*. IGS/RTCM RINEX Working Group.
- Herring, T. A., King, R. W., Floyd, M. A., & McClusky, S. C. (2018). *Documentation of the GAMIT GPS Analysis Software release 10.7*. Department of Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences, Massachusetts Institute of Technology.
- Herring, T. A., Floyd, M. A., King, R. W., & McClusky, S. C. (2015). *GLOBK: Global Kalman filter VLBI and GPS analysis program Version 10.6*. Department of Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences, Massachusetts Institute of Technology.
- Hirvonen, A. R. (1960). New theory of the gravimetric geodesy. *Annales Academiae Scientiarum Fennicae*, 56.
- 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), pp. 17–40. doi:10.1016/j.tecto.2007.12.006
- IGS. (2015). *IGS Site Guidelines*.
- IGS. (2019). Monumentation Recommendations. Retrieved from <https://kb.igs.org/hc/en-us/articles/202094816-Monumentation-Recommendations>
- IGS. (2020). Site Guidelines Clarifications. Retrieved from <https://kb.igs.org/hc/en-us/articles/203840328-Site-Guidelines-Clarifications>
- IGS Antenna Working Group. (2017). *IGS antenna files*.
- International Association of Geodesy (IAG). (2016). Description of the Global Geodetic Reference Frame. Retrieved from <https://www.iag-aig.org/topic/3>

- Kahle H.-G., Müller M.V., Mueller S., Veis G., Billiris H., Paradissis D., Drewes H., Kaniuth K., Stuber K., Tremel H., Zerbini S., Corrado G., Verrone G., (1993). Monitoring West Hellenic Arc Tectonics and Calabrian Arc Tectonics “WATH A CAT” using the Global Positioning System. In: Smith, D., Turcotte, D. (Eds.), *Contributions of Space Geodesy to Geodynamics: Crustal Dynamics*, volume 23 of AGU Geodynamics Series, pp. 417–429.
- Kreemer, C., Blewitt, & Klein, E. (2014). A geodetic plate motion and Global Strain Rate Model. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 15, pp. 3849–3889. doi:10.1002/2014GC005407.
- Mccarthy, D., & Petit, G. (2004). IERS conventions (2003). *IERS Technical Note*, 32.
- Moernaut, G., & Orban, D. (2009). GNSS antennas an introduction to bandwidth, gain pattern, polarization, and all that. *GPS World*, 20, pp. 42-48.
- Montenbruck, O., & MacLeod, K. (2017). Data Formats. In P. J. Teunissen, & O. Montenbruck, *Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems*. Switzerland : Springer, Cham. doi:https://doi.org/10.1007/978-3-319-42928-1
- Μπίθαρης, Σ. (2015). *Επεξεργασία δεδομένων μόνιμων σταθμών GPS και προσδιορισμό του πεδίου ταχυτήτων στον Ελλαδικό χώρο. Μεταπτυχιακή διατριβή*. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών.
- Μπιλλήρης, Χ. (2007). Συστήματα Αναφοράς. Στο Χ. Μπιλλήρης, Χ. Μητσακάκη, Μ. Α. Αγατζά-Μπαλοδήμου, Μ. Τσακίρη, & Δ. Σταθάς, *Εισαγωγή στη Γεωδαισία*. Αθήνα: ΣΑΤΜ.
- National Aeronautics and Space Administration. (1968). Earthrise. Retrieved from [https://www.nasa.gov/multimedia/imagegallery/image\\_feature\\_1249.html](https://www.nasa.gov/multimedia/imagegallery/image_feature_1249.html)
- Papadopoulos, N., Paraskevas, M., Katsafados, I., Nikolaidis, G., & Anagnostou, E. (2020). Deformation detection through the realization of reference frames. *J. Appl. Geodesy*. doi:doi.org/10.1515/jag-2019-0056
- Παπαδόπουλος, Ν. (2015). *Επεξεργασία δορυφορικών παρατηρήσεων στη Νήσο Μεγίστη με το λογισμικό GAMIT/GLOBK. Μεταπτυχιακή διατριβή*. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Αγρονόμων-Τοπογράφων Μηχανικών.
- Pavlis, N. K., Holmes, S. A., Kenyon, S. C., & Factor, J. K. (2012). The development and evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008). *J Geophys Res Solid Earth*, 117. doi:10.1029/2011JB008916
- Petit , G., & Luzum , B. (2010). IERS Conventions. In (*IERS Technical Note ; 36*) Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie.
- Poutanen, M., & Häkli, P. (2018). Future of National Reference Frames – from static to kinematic? *Geodesy and Cartography*, 67(1), 117–129. doi:10.24425/118697
- Poyard, J.-C. (2011). *Dionysos ITRF co-location survey*. Institut géographique national - Service de Géodésie et Nivellement.

- Rossikopoulos D, Fotiou a., Livieratos E, Baldi P (1998) A rigorous analysis of GPS data to detect crustal deformations. Application in the area of the Ionian Sea. *Tectonophysics* 294:271–280. doi: 10.1016/S0040-1951(98)00105-X
- 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. *J Geodyn* 50:381–399. doi: 10.1016/j.jog.2010.04.008
- Stanaway, R. (2014). Regional and National Reference Frames. In G. Blick, C. Crook, N. Donnelly, R. Fraser, M. Lilje, D. Martin, N. D. Weston, *Reference Frames in Practice Manual. Commission 5 Working Group 5.2 Reference Frames* (Vol. 64). Copenhagen, Denmark: The International Federation of Surveyors (FIG).
- The International Federation of Surveyors (FIG). (2006). *FIG Guide on the Development of a Vertical Reference Surface for Hydrography*. Denmark, Copenhagen: Author.
- Tregoning, P., & Van Dam, T. (2005). Effects of atmospheric pressure loading and seven-parameter transformations on estimates of geocenter motion and station heights from space geodetic observations. *J. Geophys. Res.*, 110. doi:10.1029/2004JB003334
- Τζαβάρας, Π. (2010). *Επεξεργασία παρατηρήσεων GPS και σύγκριση αποτελεσμάτων από δύο διαφορετικά πακέτα προγραμμάτων υψηλής ακρίβειας. Διπλωματική εργασία*. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Τμήμα Αγρονόμων-Τοπογράφων Μηχανικών.
- UNAVCO. (2020). *UNAVCO Resources: GNSS Station Monumentation*. Retrieved from <https://kb.unavco.org/kb/article/unavco-resources-gnss-station-monumentation-104.html>
- Van Sickle, J. (2015). *GPS for Land Surveyors* (4th ed.). CRC Press.
- Weston, N. D., & Soler, T. (2014). Global Terrestrial Reference Systems and Frames. In G. Blick, C. Crook, N. Donnelly, R. Fraser, M. Lilje, D. Martin, . . . N. Weston, *Reference Frames in Practice Manual. Commission 5 Working Group 5.2 Reference Frames* (Vol. 64). Copenhagen, Denmark: The International Federation of Surveyors (FIG).
- Φωτίου, Α., & Πικριδάς, Χ. (2012). *GPS και Γεωδαιτικές Εφαρμογές*. Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις ΖΗΤΗ.
- Χατζηνίκος, Μ. (2013). *Μελέτη των μετακινήσεων του γήινου φλοιού στον ελλαδικό. Διδακτορική Διατριβή*. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης (ΑΠΘ). Τμήμα Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών.
- Xu, G. (2007). *GPS Theory, Algorithms and Applications*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Yang, Y. (1999). Robust estimation of geodetic datum transformation. *Journal of Geodesy*, 73, pp. 268-274.