

Προσδιορισμός συντεταγμένων στο ΕΓΣΑ87 μέσω του HEPOS

Γιαννίου Μιχάλης Δρ. ATM

ΚΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ Α.Ε., Μεσογείων 288, 155 62 Χολαργός

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι δορυφορικές τεχνικές εντοπισμού μέσω GPS, ή GNSS γενικότερα, αποτελούν σήμερα αναπόσπαστο μέρος της επαγγελματικής πρακτικής του Τοπογράφου Μηχανικού. Την τελευταία δεκαετία η διεθνής τάση στο χώρο του γεωδαιτικού εντοπισμού με GNSS είναι η χρήση μόνιμων σταθμών αναφοράς και ειδικότερα η χρήση δικτύων μόνιμων σταθμών. Οι τεχνικές αυτές μειώνουν το κόστος προμήθειας εξοπλισμού, το προσωπικό των μετρήσεων και το χρόνο παραμονής στο πεδίο, διευκολύνοντας το χρήστη στην καθημερινή πρακτική. Παράλληλα όμως απαιτούν βαθύτερες γνώσεις για τη σωστή εφαρμογή τους.

Στις κλασικές μετρήσεις όπου ο χρήστης εγκαθιστά προσωρινό σταθμό αναφοράς στην περιοχή εργασίας του τα μήκη των βάσεων διατηρούνται μικρά, ενώ κατά τη χρήση μεμονωμένων μόνιμων σταθμών αναφοράς οι αποστάσεις είναι συνήθως αισθητά μεγαλύτερες, γεγονός που δυσχεραίνει την επεξεργασία και μειώνει την ακρίβεια εντοπισμού. Αντίστοιχα, η σωστή χρήση δικτυακών τεχνικών, όπως VRS, FKP και MAC, προϋποθέτει την κατανόηση της αρχής λειτουργίας τους. Ο σημαντικότερος όμως παράγοντας για την παραγωγή συντεταγμένων σε ένα Εθνικό Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς συντεταγμένων είναι η γνώση των βασικών αρχών που διέπουν τα συστήματα αναφοράς και των τρόπων μετασχηματισμού συντεταγμένων.

Η παρούσα εργασία πραγματεύεται την παραγωγή συντεταγμένων στο ΕΓΣΑ87 όταν χρησιμοποιείται το Ελληνικό Σύστημα Εντοπισμού HEPOS. Αρχικά δίνεται μία συνοπτική περιγραφή του Γεωδαιτικού Συστήματος Αναφοράς HTRS07 στο οποίο είναι υπολογισμένες οι συντεταγμένες των σταθμών του HEPOS. Στη συνέχεια περιγράφεται η διασύνδεση του HTRS07 με το ΕΓΣΑ87 και αναλύονται οι πρακτικές που χρησιμοποιούνται σήμερα για τον υπολογισμό συντεταγμένων ΕΓΣΑ87 όταν γίνονται μετρήσεις από μόνιμους σταθμούς αναφοράς. Οι πρακτικές αυτές αξιολογούνται για την ορθότητα των αποτελεσμάτων. Η αξιολόγηση των χρησιμοποιούμενων πρακτικών γίνεται αρχικά σε θεωρητικό επίπεδο και στη συνέχεια επιβεβαιώνεται από ανάλυση δεδομένων εκτεταμένων μετρήσεων που έγιναν σε διάφορα τμήματα της χώρας. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στις περιπτώσεις μετρήσεων σε μεγάλη απόσταση από το σταθμό αναφοράς και στην αξιολόγηση του επίσημου μοντέλου μετασχηματισμού μεταξύ HTRS07 και ΕΓΣΑ87 που έχει δημοσιεύσει η ΚΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ Α.Ε. Τέλος, παρουσιάζονται τα πλεονεκτήματα του HEPOS σε σύγκριση με δίκτυα μεμονωμένων σταθμών αναφοράς.

1. ΔΙΚΤΥΑΚΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ GNSS

Οι δικτυακές τεχνικές GNSS αναπτύχθηκαν κατά τη δεκαετία του 1990 όταν ερευνητές άρχισαν να αξιοποιούν τις παρατηρήσεις μόνιμων σταθμών αναφοράς GPS με στόχο τη μοντελοποίηση σφαλμάτων (τροχιακό, τροποσφαιρικό και κυρίως ιονοσφαιρικό σφάλμα) που επηρεάζουν τον προσδιορισμό θέσης με GNSS. Αν και ο αρχικός στόχος της έρευνας ήταν ο υπολογισμός των μοντέλων σφαλμάτων, σύντομα η έρευνα οδηγήθηκε στην αξιοποίηση των μοντέλων αυτών για τη βελτίωση της ακρίβειας του γεωδαιτικού δορυφορικού εντοπισμού.

Κατά τη χρήση των δικτυακών τεχνικών GNSS ο χρήστης δεν χρησιμοποιεί στοιχεία (μετρήσεις ή διορθώσεις) που προέρχονται από ένα μόνο σταθμό αναφοράς (SB: Single-Base) αλλά χρησιμοποιεί επιπλέον πληροφορία που προέρχεται από ενιαία επεξεργασία μετρήσεων από περισσότερους σταθμούς οι οποίοι ανήκουν σε ένα δίκτυο. Στη συνέχεια περιγράφονται συνοπτικά οι τρεις δικτυακές τεχνικές που υλοποιεί το HEPOS: VRS, FKP και MAC. Μία αναλυτικότερη περιγραφή των δικτυακών τεχνικών ξεφεύγει από τους σκοπούς του παρόντος άρθρου.

Τεχνική VRS

Στην περίπτωση του VRS (Virtual Reference Station ή Εικονικός Σταθμός Αναφοράς) τα δεδομένα των (πραγματικών) σταθμών αναφοράς και τα υπολογισμένα μοντέλα των σφαλμάτων χρησιμοποιούνται για να δημιουργηθούν **εξ υπολογισμού** παρατηρήσεις **σε οποιοδήποτε σημείο εντός** της περιοχής του δικτύου (Wanninger, 1997). Σύμφωνα με τη θεωρία του VRS, οι παρατηρήσεις αυτές είναι ίδιες με αυτές που θα κατέγραφε ένας δέκτης εάν βρισκόταν σε λειτουργία στο σημείο αυτό κατά το συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Το σημείο για το οποίο μπορεί να ζητηθεί δημιουργία VRS, μπορεί στη φυσική πραγματικότητα να είναι εντελώς ακατάλληλο για μετρήσεις: μέσα σε δάσος, σε κτίσμα, ή ακόμα και κάτω από το έδαφος. Οι μετρήσεις θα αντιστοιχούν στις μετρήσεις που θα είχε καταγράψει ένας δέκτης τοποθετημένος στο σημείο αυτό, εάν δεν υπήρχε κανένα εμπόδιο.

Τεχνική FKP

Στην περίπτωση της τεχνικής FKP (Flächen Korrekturparameter ή Area Correction Parameters) το δίκτυο στέλνει στο χρήστη τις παραμέτρους μαθηματικών επιφανειών που περιγράφουν τα εκάστοτε σφάλματα που υπεισέρχονται στις μετρήσεις (Wübbena and Willgalis, 2001). Ο χρήστης χρησιμοποιεί αυτές τις επιφάνειες για να υπολογίσει τις τιμές των σφαλμάτων στο σημείο στο οποίο βρίσκεται και να κάνει τις ανάλογες διορθώσεις στις παρατηρήσεις.

Τεχνική MAC

Στην περίπτωση της τεχνικής MAC (Master Auxiliary Concept) το δίκτυο στέλνει στο χρήστη τις Διορθώσεις (Corrections) ενός κύριου σταθμού αναφοράς (Master station) καθώς και Διαφορές Διορθώσεων (Correction differences) γειτονικών βοηθητικών σταθμών αναφοράς (Auxiliary stations). Σύμφωνα με τη θεωρία της τεχνικής MAC, ο χρήστης λαμβάνει όλη την πρωτογενή πληροφορία σχετικά με τα σφάλματα χωρίς να μεσολαβεί κάποια μοντελοποίηση από το δίκτυο. Μπορεί έτσι να εφαρμόσει προηγμένους αλγόριθμους και να πετύχει μεγαλύτερη ακρίβεια..

2. HTRS07: ΤΟ ΓΕΩΔΑΙΤΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΑΦΟΡΑΣ ΤΟΥ ΗΕΡΟΣ

ETRS89

Όπως περιγράφηκε στην προηγούμενη ενότητα, η λειτουργία των δικτυακών τεχνικών στηρίζεται στη λεπτομερή μοντελοποίηση των σφαλμάτων. Η μοντελοποίηση αυτή προϋποθέτει τη γνώση των συντεταγμένων των σταθμών αναφοράς με τη μέγιστη δυνατή ακρίβεια. Επιπλέον οι συντεταγμένες των σταθμών πρέπει να είναι συμβατές με τις συντεταγμένες των δορυφόρων, οι οποίες παρέχονται από τις τροχιές ακριβείας στο εκάστοτε ισχύον πλαίσιο αναφοράς ITRF (International Terrestrial Reference Frame) του ITRS (International Terrestrial Reference System). Για το λόγο αυτό, σε δίκτυα όπως το ΗΕΡΟΣ τα οποία υποστηρίζουν δικτυακές τεχνικές, οι εσωτερικοί υπολογισμοί γίνονται σε κάποιο πλαίσιο αναφοράς ITRF, στο οποίο πρέπει να είναι γνωστές και οι συντεταγμένες των σταθμών αναφοράς. Λόγω των σημαντικών ρυθμών μεταβολής των συντεταγμένων ITRF στον Ευρωπαϊκό χώρο, η επιτροπή EUREF της Ε.Ε. εισήγαγε προς χρήση από τις Ευρωπαϊκές χώρες το Ευρωπαϊκό σύστημα αναφοράς ETRS89 (European Terrestrial Reference System 1989). Το ETRS89 εξ' ορισμού ταυτίστηκε με το ITRS κατά την εποχή 1989.0 και θεωρείται σταθερά προσκολλημένο στο σταθερό μέρος της Ευρασιατικής τεκτονικής πλάκας. Βασικό πλεονέκτημα του ETRS89 είναι ότι ελαχιστοποιεί το ρυθμό μεταβολής των συντεταγμένων. Στον Πίνακα 1 δίνονται ενδεικτικά οι ταχύτητες τριών σταθμών του δικτύου EPN: KOSG στην Ολλανδία, WTZR στη Γερμανία και AUT1 στη Θεσσαλονίκη (βάσει της επίλυσης C1555 της EUREF).

Πίνακας 1: Ταχύτητες (m/year) σταθμών του δικτύου EPN στο ITRS και στο ETRS89.

Σταθμός	ITRS				ETRS89			
	V _X	V _Y	V _Z	V _{3D}	V _X	V _Y	V _Z	V _{3D}
KOSG	-0.0138	0.0162	0.0106	0.0238	-0.0002	-0.0006	0.0001	0.0006
WTZR	-0.0156	0.0168	0.0104	0.0252	-0.0005	-0.0005	-0.0003	0.0008
AUT1	-0.0149	0.0206	0.0027	0.0256	0.0024	0.0021	-0.0086	0.0092

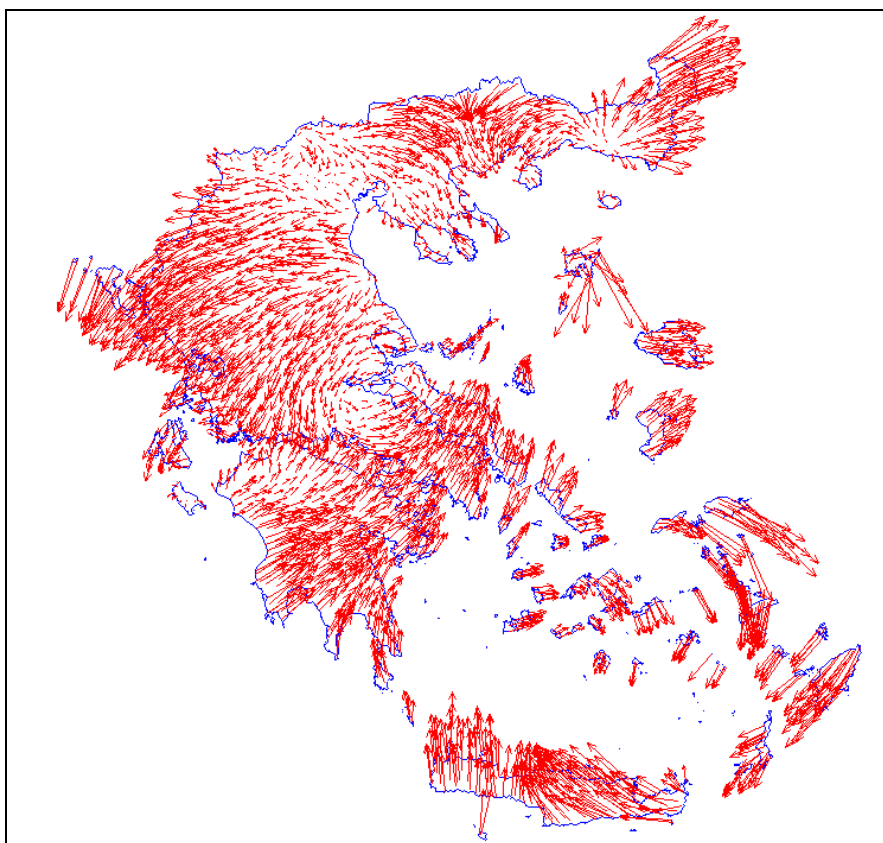
Όπως φαίνεται από τις τιμές του Πίνακα 1 οι περιοχές της Κεντρικής Ευρώπης παρουσιάζουν σημαντικές ταχύτητες στο Παγκόσμιο σύστημα, ενώ οι ταχύτητές τους στο Ευρωπαϊκό σύστημα είναι αμελητέες. Η Ελλάδα βρίσκεται στα όρια της Ευρασιατικής πλάκας και χαρακτηρίζεται από ανομοιογενές πεδίο τεκτονικών κινήσεων με αποτέλεσμα να ανατρέπεται αυτή η ισορροπία, ιδίως όσο απομακρυνόμαστε από τα βόρεια σύνορα της χώρας. Για τις βόρειες περιοχές όμως της Ελλάδας, το ETRS89 εξακολουθεί να παρουσιάζει μικρότερες ταχύτητες, όπως φαίνεται και από τις ταχύτητες του AUT1 στο ITRS και στο ETRS89. Μια εκτενέστερη ανάλυση του θέματος ξεφεύγει από τους σκοπούς της παρούσας εργασίας. Είναι σημαντικό πάντως να τονιστεί ότι **οι χρήστες πρέπει να θεωρούν τις συντεταγμένες των σταθμών του ΗΕΡΟΣ σταθερές** και δεν πρέπει να κάνουν καμία μεταβολή στις τιμές τους (αρχική δημοσιοποίηση: Μάιος 2009).

Το ΗΤΡΣ07 και η Ευρωπαϊκή του διάσταση

Η Ελλάδα σε συνεννόηση με την Ε.Ε. που συγχρηματοδότησε το Έργο υιοθέτησε το ETRS89 ως σύστημα αναφοράς του ΗΕΡΟΣ. Η λύση αυτή πέραν των γεωδαιτικών πλεονεκτημάτων που παρουσιάζει είναι επιπλέον συμβατή και με την Ευρωπαϊκή

3. ΕΣΩΤΕΡΙΚΗ ΣΥΝΟΧΗ ΤΟΥ ΕΓΣΑ87

Το ΕΓΣΑ87 υλοποιείται μέσω των συντεταγμένων των τριγωνομετρικών σημείων του Κρατικού δικτύου. Το δίκτυο αυτό έχει μετρηθεί με την τεχνική των τριγωνισμών χρησιμοποιώντας κατά κύριο λόγο γωνιομετρήσεις και επιλύοντας διαδοχικά τα δίκτυα Ι έως ΙV τάξης. Κατά συνέπεια το ΕΓΣΑ87 είναι επηρεασμένο από τον τρόπο μετάδοσης των σφαλμάτων στους τριγωνισμούς, γεγονός που έχει άμεσο αντίκτυπο στην εσωτερική συνοχή του δικτύου. Αντίθετα οι σύγχρονες δορυφορικές υλοποιήσεις των ΓΣΑ είναι απαλλαγμένες από προβλήματα συνοχής. Η ακρίβεια υπολογισμού των συντεταγμένων των 98 σταθμών του HEPOS είναι στο επίπεδο των λίγων mm. Συνεπώς το HTRS07 είναι πρακτικά ένα δίκτυο χωρίς παραμορφώσεις. Στο πλαίσιο του έργου των μετρήσεων του HEPOS μετρήθηκαν περίπου 2500 τριγωνομετρικά σημεία του Κρατικού δικτύου με μετρήσεις GPS ακριβείας και υπολογίστηκαν οι συντεταγμένες τους στο HTRS07 (Gianniou, 2008). Έχουμε συνεπώς ένα σύνολο 2500 σημείων με συντεταγμένες στο ΕΓΣΑ87 και στο HTRS07. Η ακρίβεια προσδιορισμού των οριζόντιων συντεταγμένων των τριγωνομετρικών σημείων στο HTRS07 είναι στο επίπεδο των 1-2 cm και μάλιστα η ακρίβεια αυτή είναι ομοιογενής σε όλη τη χώρα. Κατά συνέπεια τα υπόλοιπα (residuals) ενός μετασχηματισμού ομοιότητας μεταξύ των δύο συστημάτων αναφοράς, αντανakλούν ουσιαστικά τις ανομοιογένειες του ΕΓΣΑ87. Στην Εικόνα 2 δίνονται τα υπόλοιπα ενός ενιαίου 7-παραμετρικού μετασχηματισμού



Εικόνα 2. Υπόλοιπα ενός ενιαίου για όλη τη χώρα μετασχηματισμού ομοιότητας μεταξύ HTRS07 και ΕΓΣΑ87 (οι μέγιστες τιμές είναι της τάξης των 2.5m).

Helmert που υπολογίστηκε μεταξύ ΕΓΣΑ87 και HTRS07 χρησιμοποιώντας τα προαναφερθέντα 2500 σημεία. Η γραφική αναπαράσταση των υπολοίπων αναδεικνύει μία συμπεριφορά που θεωρείται τυπική για συμβατικά ΓΣΑ. Παρόμοια αποτελέσματα έχουν προκύψει και σε άλλες Ευρωπαϊκές χώρες, όπως Γερμανία (Cai, 2000), Γαλλία (Kasser and Breton, 2003) και Αγγλία (Greaves and Cruddace, 2001).

4. ΕΠΙΣΗΜΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥ HTRS07 - ΕΓΣΑ87

Για τη διασύνδεση του HTRS07 και του ΕΓΣΑ87 η ΚΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ Α.Ε. ανέπτυξε σε συνεργασία με το ΤΑΤΜ/ΑΠΘ ένα επίσημο μοντέλο για τον αμφίδρομο μετασχηματισμό μεταξύ των δύο συστημάτων αναφοράς. Το μοντέλο αυτό πρέπει να χρησιμοποιείται κατά την παραγωγή συντεταγμένων ΕΓΣΑ87 μέσω του HEPOS. Στη συνέχεια δίνεται μια συνοπτική περιγραφή του συγκεκριμένου μοντέλου μετασχηματισμού. Πλήρης τεκμηρίωση του μοντέλου δίνεται από τους *Κωτσάκης et al., 2008*.

4.1 Περιγραφή του επίσημου μοντέλου μετασχηματισμού

Από την ανάλυση της ενότητας 3 γίνεται ξεκάθαρο ότι λόγω της περιορισμένης ομοιογένειας του ΕΓΣΑ87 δεν είναι δυνατόν να επιτευχθεί γεωδαιτική ακρίβεια στο μετασχηματισμό HTRS07-ΕΓΣΑ87 εάν χρησιμοποιηθεί αποκλειστικά ένας ενιαίος μετασχηματισμός ομοιότητας για όλη τη χώρα. Για την επιλογή του κατάλληλου μοντέλου μετασχηματισμού αξιοποιήθηκε η εμπειρία από αντίστοιχες Ευρωπαϊκές χώρες και εξετάστηκαν όλες οι δυνατές επιλογές (Gianniou et al., 2009). Η λύση που τελικά επιλέχθηκε ήταν η συνδυασμένη χρήση:

- ενός 7-παραμετρικού μετασχηματισμού και
- καννάβων διορθώσεων των προβολικών συντεταγμένων (correction/shift grids).

Συνοπτικά η διαδικασία για τον ευθύ μετασχηματισμό (από HTRS07 σε ΕΓΣΑ87) έχει ως εξής:

Αρχικά οι 3Δ γεωκεντρικές καρτεσιανές συντεταγμένες μετασχηματίζονται από HTRS07 σε ΕΓΣΑ87 με χρήση του ακόλουθου 7-παραμετρικού μετασχηματισμού

$$\begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix}_{\text{ΕΓΣΑ87}} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{\text{HTRS07}} + \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \delta s & \varepsilon_z & -\varepsilon_y \\ -\varepsilon_z & \delta s & \varepsilon_x \\ \varepsilon_y & -\varepsilon_x & \delta s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{\text{HTRS07}}$$

όπου:

$$\begin{aligned} t_x &= 203.437 \text{ m} & \varepsilon_x &= -0.170 \text{ arcsec} & \delta s &= -0.294 \text{ ppm} \\ t_y &= -73.461 \text{ m} & \varepsilon_y &= -0.060 \text{ arcsec} \\ t_z &= -243.594 \text{ m} & \varepsilon_z &= -0.151 \text{ arcsec} \end{aligned}$$

Στη συνέχεια οι παραπάνω συντεταγμένες μετατρέπονται σε προβολικές συντεταγμένες Ε' Ν' με χρήση της προβολής TM87. Με βάση την ανάλυση της ενότητας 3, ο παραπάνω μετασχηματισμός οδηγεί στο ΕΓΣΑ87 με μία προσέγγιση η οποία πανελλαδικά μπορεί να οδηγήσει σε σφάλματα της τάξης των 2.5 m. Για να επιτευχθεί μετασχηματισμός στο επίπεδο των λίγων cm, οι παραπάνω συντεταγμένες

διορθώνονται με χρήση των δύο καννάβων διορθώσεων. Από τους δύο αυτούς καννάβους υπολογίζονται με διγραμμική παρεμβολή οι αντίστοιχες διορθώσεις δE και δN . Οι τελικές συντεταγμένες προκύπτουν από τις σχέσεις:

$$E'_{\text{τελικό}} = E' + \delta E$$

$$N'_{\text{τελικό}} = N' + \delta N$$

Αντίστοιχη είναι και η διαδικασία του αντίστροφου μετασχηματισμού (από ΕΓΣΑ87 σε HTRS07).

4.2 Υλοποίηση του επίσημου μοντέλου μετασχηματισμού

Η ΚΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ Α.Ε. με ανακοίνωσή της στον ιστοχώρο του HEPOS τον Νοέμβριο του 2008 κάλεσε τους κατασκευαστές γεωδαιτικού λογισμικού και συστημάτων GNSS να ενσωματώσουν το μοντέλο μετασχηματισμού στα συστήματά τους. Δόθηκε η οδηγία, ο συγκεκριμένος μετασχηματισμός να ονομάζεται «HEPOS_GGRS87», όνομα που υποδηλώνει την υλοποίηση του ΕΓΣΑ87 μέσω του HEPOS. Παράλληλα, για να υποστηρίξει τους χρήστες του HEPOS που δεν διαθέτουν εξοπλισμό με ενσωματωμένο τον επίσημο μετασχηματισμό, η ΚΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ Α.Ε. διαθέτει ελεύθερα μέσω του ιστοχώρου του HEPOS (www.hepos.gr) σχετικό λογισμικό.

5. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΩΝ ΣΤΟ ΕΓΣΑ87 ΜΕ ΤΟ HEPOS

Από τα παραπάνω γίνεται σαφές ότι για τον προσδιορισμό συντεταγμένων στο ΕΓΣΑ87 μέσω του HEPOS απαιτείται μετασχηματισμός συντεταγμένων από το HTRS07 στο ΕΓΣΑ87. Ο μετασχηματισμός αυτός μπορεί να γίνει με κάποιον από τους τρεις ακόλουθους τρόπους:

Χρήση του επίσημου μοντέλου μετασχηματισμού

Με τη χρήση του επίσημου μοντέλου μετασχηματισμού επιτυγχάνεται ακρίβεια λίγων εκατοστών στον προσδιορισμό συντεταγμένων ΕΓΣΑ87. **Πρόκειται για την ενδεδειγμένη μέθοδο εργασίας.**

Χρήση του 3-παραμετρικού μετασχηματισμού WGS84-ΕΓΣΑ87

Πριν την ύπαρξη του HEPOS ο συνηθισμένος τρόπος προσδιορισμού συντεταγμένων ΕΓΣΑ87 από μετρήσεις GPS ήταν η εγκατάσταση ενός προσωρινού σταθμού αναφοράς (π.χ. σε τριγωνομετρικό ΓΥΣ) ή η χρήση ενός μόνιμου σταθμού αναφοράς (π.χ. σταθμοί ιδιωτικών εταιριών αντιπροσώπευσης εξοπλισμού GPS). Ο χρήστης εισήγαγε ως σταθερές τις συντεταγμένες ΕΓΣΑ87 του σταθμού αναφοράς (τριγωνομετρικό ή μόνιμος σταθμός) και επέλυε τις βάσεις προς τα άγνωστα σημεία. Κατά τη διαδικασία αυτή ο χρήστης όριζε στο λογισμικό γραφείου ή στο δέκτη RTK ως σύστημα αναφοράς εργασίας το ΕΓΣΑ87 (συντά χρησιμοποιούταν οι ονομασίες GGRS87 και Greece). Ο ορισμός αυτός συνέδεε το WGS84 με το ΕΓΣΑ87 μέσω ενός 3-παραμετρικού μετασχηματισμού που περιγράφει τις συνιστώσες της μετάθεσης της αρχής των αξόνων του ενός συστήματος ως προς το άλλο. Από την ανάλυση της ενότητας 3 γίνεται σαφές ότι αυτές οι τρεις παράμετροι δεν επαρκούν για να επιτευχθεί επαρκής ακρίβεια

μετασχηματισμού μεταξύ των δύο συστημάτων. Επίσης προκύπτει θεωρητικά, αλλά επιβεβαιώνεται και στην πράξη, ότι αν χρησιμοποιηθούν παρόμοιες τιμές μετάθεσης τα αποτελέσματα δεν διαφοροποιούνται. Οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενοι παράμετροι είναι:

$$\Delta X = 193.723 \text{ m}$$

$$\Delta Y = - 74.030 \text{ m}$$

$$\Delta Z = -246.018 \text{ m}$$

Η χρήση αυτού του 3-παραμετρικού μετασχηματισμού βασίζεται στο γεγονός ότι το ΕΓΣΑ87 είναι σε πολύ μεγάλο βαθμό παράλληλο με το WGS84. Πέραν όμως αυτού προϋποθέτει ότι δεν υπάρχει άλλη διαφοροποίηση μεταξύ των δύο συστημάτων. Αυτό βέβαια, όπως είδαμε παραπάνω, δεν ισχύει λόγω των παραμορφώσεων του ΕΓΣΑ87. Όπως φαίνεται και από την Εικόνα 2, η εσωτερική ανομοιογένεια του ΕΓΣΑ87 γίνεται αισθητή όταν μεγαλώνει η περιοχή εργασίας, με άλλα λόγια όταν αυξάνουν τα μήκη των βάσεων. Τα μήκη των βάσεων διατηρούνταν μικρά όταν γινόταν εγκατάσταση προσωρινού σταθμού αναφοράς καθώς η τοποθέτησή του γινόταν κατά κανόνα σε κάποιο κοντινό τριγωνομετρικό. Με την εξάπλωση όμως των μόνιμων σταθμών αναφοράς, παρατηρείται συχνά το φαινόμενο οι επαγγελματίες να χρησιμοποιούν σταθμούς αναφοράς που βρίσκονται σε αποστάσεις δεκάδων Km από την περιοχή εργασίας. Όπως θα αποδειχθεί και από την ανάλυση της επόμενης ενότητας, **η προσέγγιση του 3-παραμετρικού μετασχηματισμού δεν πρέπει να ακολουθείται καθώς μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικά σφάλματα**, ιδιαίτερα όταν αυξάνει το μήκος της βάσης.

Υπολογισμός τοπικού μετασχηματισμό

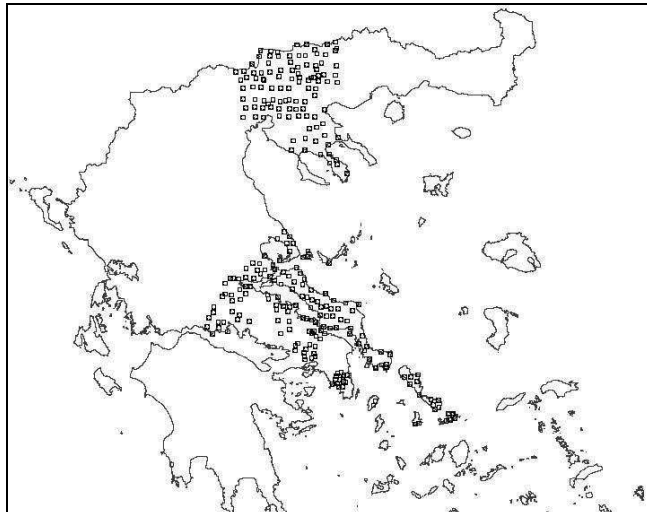
Μια άλλη μεθοδολογία εργασίας είναι η μέτρηση σημείων γνωστών συντεταγμένων ΕΓΣΑ87 στην περιοχή εργασίας και ο υπολογισμός ενός τοπικού μετασχηματισμού μεταξύ ΕΓΣΑ87 και HTRS07. Αυτή η μέθοδος είναι ασφαλέστερο να ακολουθείται σε περιοχές έντονης ανομοιογένειας του ΕΓΣΑ87 ή σε εργασίες με ιδιαίτερα υψηλές απαιτήσεις τοπικής προσαρμογής.

Στην επόμενη ενότητα δίνονται αποτελέσματα από επεξεργασία δεδομένων πεδίου από τα οποία επιβεβαιώνονται τα παραπάνω και προσδιορίζεται ποσοτικά η ακρίβεια που επιτυγχάνεται.

6. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΑ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ

6.1 Δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν

Για μία αντιπροσωπευτική διερεύνηση της ακρίβειας προσδιορισμού συντεταγμένων ΕΓΣΑ87 είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθούν δεδομένα μετρήσεων από διάφορες περιοχές της χώρας, καθώς επίσης και βάσεις διαφόρων μηκών. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα που είχαν συλλεχθεί σε τριγωνομετρικά σημεία του Κρατικού δικτύου σε όλη τη χώρα κατά τη διάρκεια υλοποίησης των έργων Γ'ΚΠΣ της ΚΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ Α.Ε. Πρόκειται κατά κύριο λόγο για τα έργα παραγωγής ορθοφωτοχαρτών LSO. Τα τριγωνομετρικά σημεία στα οποία έγιναν οι μετρήσεις που χρησιμοποιήθηκαν για την παρούσα εργασία φαίνονται στην Εικόνα 3.

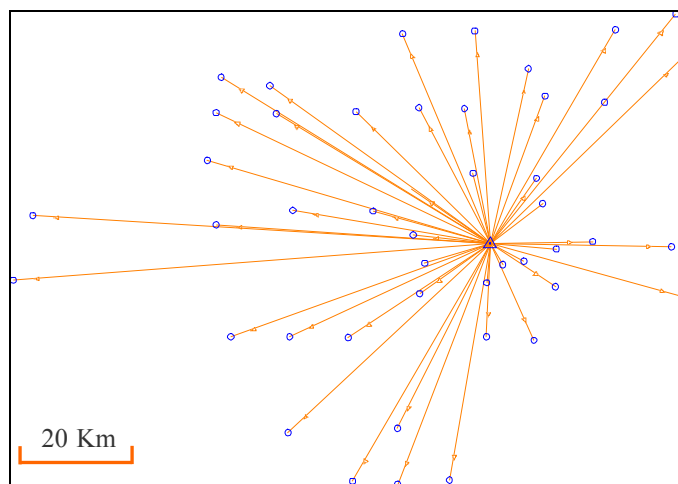


Εικόνα 3. Οι θέσεις των τριγωνομετρικών σημείων που χρησιμοποιήθηκαν.

Όλες οι μετρήσεις που χρησιμοποιήθηκαν έχουν γίνει με δέκτες δύο συχνοτήτων. Η διάρκεια παρατήρησης κάθε σημείου ήταν κατ' ελάχιστο 45' ενώ υπήρχαν και πολύωρες παρατηρήσεις διάρκειας έως και πέντε ωρών.

6.2 Επεξεργασία μετρήσεων

Για να δημιουργηθούν βάσεις διαφόρων μηκών, επιλύθηκαν από ένα σταθμό HEPOS σημεία σε διάφορες αποστάσεις από 2 έως 64 Km. Μία τυπική διάταξη αυτού του μετρητικού σχήματος δίνεται στην Εικόνα 4.

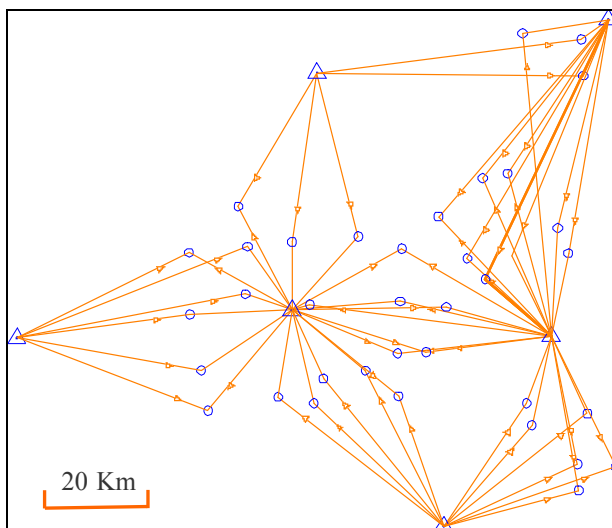


Εικόνα 4. Τυπική διάταξη των μετρήσεων για τη δημιουργία βάσεων διαφόρων μηκών.

Οι επιλύσεις έγιναν με το λογισμικό Trimble Geomatics Office ver. 1.63. Για να εξασφαλιστεί ακόμα μεγαλύτερη ακρίβεια, όλες οι επιλύσεις έγιναν χρησιμοποιώντας

τροχιές ακριβείας της IGS. Σε όλες τις περιπτώσεις επιτεύχθηκε η επίλυση των ασαφειών φάσης, γεγονός που οφείλεται κατά κύριο λόγο στους μεγάλους χρόνους παρατήρησης. Τα στατιστικά των επιλύσεων ήταν ιδιαίτερα ικανοποιητικά τεκμηριώνοντας την υψηλή ακρίβεια των υπολογισμών.

Προκειμένου να διασφαλιστεί η υψηλή ακρίβεια της επίλυσης των βάσεων, όλες οι βάσεις επιλύθηκαν από τους δύο εκάστοτε πλησιέστερους σταθμούς HEPOS. Στην Εικόνα 5 φαίνονται αυτή προσέγγιση ενδεικτικά για την περιοχή της Στερεάς Ελλάδας. Από καθένα από τους δύο σταθμούς υπολογίστηκαν οι συντεταγμένες ΕΓΣΑ87 εφαρμόζοντας το επίσημο μοντέλο μετασχηματισμού. Οι διαφορές των συντεταγμένων που προέκυψαν από κάθε σταθμό ήταν στο επίπεδο των 1-2 cm. Οι διαφορές αυτές είναι ιδιαίτερα ικανοποιητικές αν λάβουμε υπόψη τα διαφορετικά μήκη βάσεων. Για παράδειγμα, στην περίπτωση της Εικόνας 5, υπάρχουν σημεία που απέχουν 5 Km από τον ένα σταθμό, ενώ από τον άλλο 54 Km.



Εικόνα 5. Κάθε σημείο επιλύθηκε από τους δύο πλησιέστερους σταθμούς του HEPOS.

Για τη συγκριτική αξιολόγηση της ακρίβειας που επιτυγχάνεται με κάθε τεχνική μετασχηματισμού (επίσημο μοντέλο, 3-παραμετρικός μετασχηματισμός) 205 βάσεις επιλύθηκαν με δύο τρόπους:

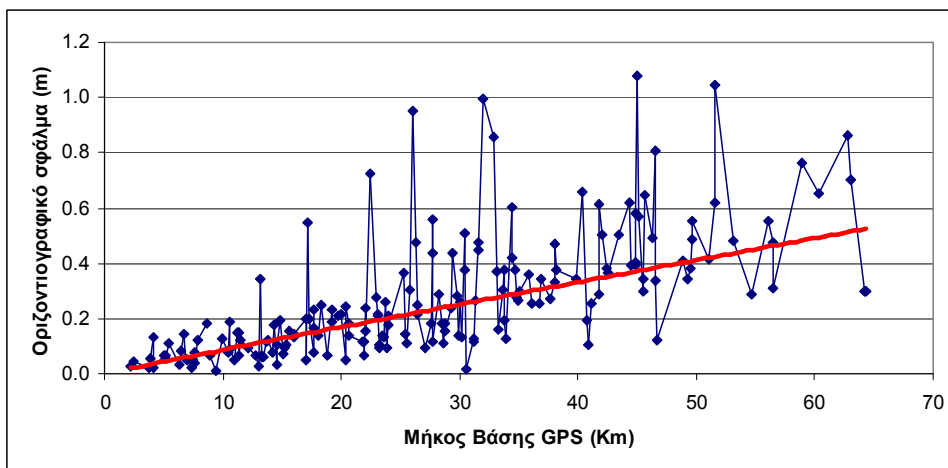
- αφενός χρησιμοποιώντας τον 3-παραμετρικό μετασχηματισμό και εισάγοντας στο σταθμό αναφοράς συντεταγμένες ΕΓΣΑ87 και
- αφετέρου χρησιμοποιώντας το επίσημο μοντέλο μετασχηματισμού και εισάγοντας στο σταθμό αναφοράς συντεταγμένες HTRS07.

Τονίζεται ότι η προσέγγιση του 3-παραμετρικού μετασχηματισμού αντενδείκνυται. Επειδή όμως χρησιμοποιείται στην επαγγελματική πρακτική, ακολουθήθηκε εδώ για να δειχθεί το μέγεθος των σφαλμάτων στα οποία μπορεί να οδηγήσει.

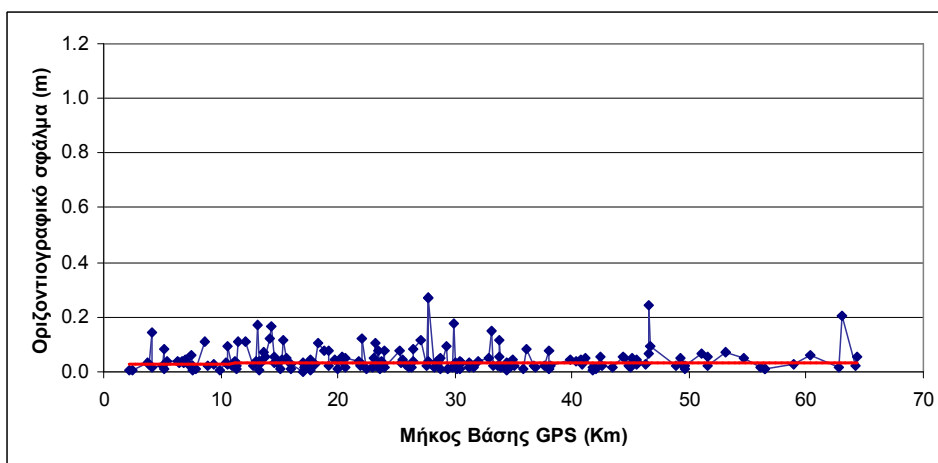
6.3 Ανάλυση αποτελεσμάτων

Μετά την επίλυση των βάσεων και τον σχετικό έλεγχο ποιότητας, υπολογίστηκαν οι διαφορές συντεταγμένων της κάθε λύσης (3-παραμετρικός, επίσημο μοντέλο) σε σχέση με τις επίσημες τιμές των τριγωνομετρικών όπως δίνονται από τη ΓΥΣ. Από τις διαφορές αυτές dE, dN υπολογίστηκε το οριζοντιογραφικό σφάλμα κάθε λύσης. Η

Εικόνα 6 δείχνει το σφάλμα για την περίπτωση χρήσης του 3-παραμετρικού μετασχηματισμού. Τα σημεία έχουν ταξινομηθεί με βάση το μήκος της βάσης προκειμένου να διαπιστωθεί η συσχέτιση μεταξύ του μεγέθους του σφάλματος και της απόστασης από το σταθμό αναφοράς. Παρατηρούμε ότι για αποστάσεις μέχρι 10 Km, το σφάλμα παραμένει μικρότερο από 20cm, ενώ για μεγαλύτερες αποστάσεις το σφάλμα αυξάνεται βαθμιαία και μπορεί να υπερβεί το 1 m. Στο διάγραμμα της Εικόνας 6 δίνεται και μία βέλτιστα προσαρμοζόμενη καμπύλη, από τη μορφή της οποίας καθίσταται σαφής η έντονη εξάρτηση της τιμής του σφάλματος από το μήκος της βάσης.



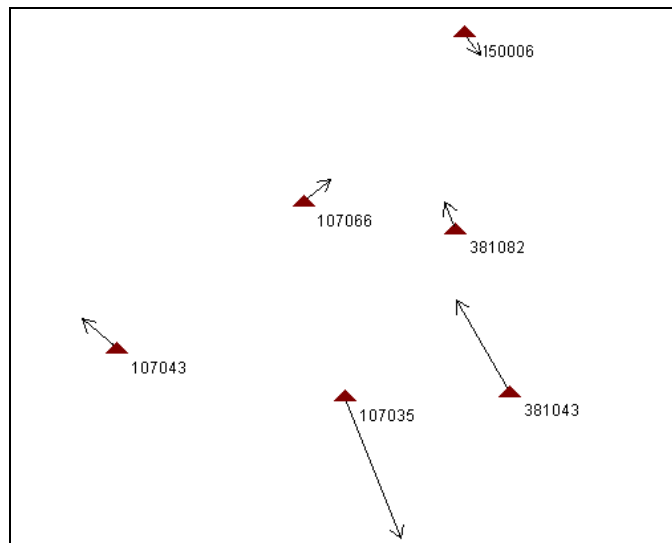
Εικόνα 6. Οριζοντιογραφικό σφάλμα των επιλύσεων που έγιναν με χρήση του 3-παραμετρικού μετασχηματισμού.



Εικόνα 7. Οριζοντιογραφικό σφάλμα των επιλύσεων που έγιναν με χρήση του επίσημου μοντέλου μετασχηματισμού.

Στην Εικόνα 7 δίνεται το οριζοντιογραφικό σφάλμα για την περίπτωση χρήσης του επίσημου μοντέλου μετασχηματισμού. Πρόκειται για τα ίδια σημεία με αυτά της Εικόνας 6. Για να είναι άμεσα συγκρίσιμες οι δύο εικόνες, έχει χρησιμοποιηθεί κοινό εύρος τιμών στον άξονα Y. Παρατηρούμε ότι το οριζοντιογραφικό σφάλμα διατηρείται αρκετά χαμηλό και ότι σε ελάχιστες μόνο περιπτώσεις υπερβαίνει τα 20 cm.

Παράλληλα το σφάλμα είναι ανεξάρτητο του μήκους βάσης, όπως σαφώς προκύπτει και από τη μορφή της βέλτιστα προσαρμοζόμενης καμπύλης. Αναφορικά με τις περιπτώσεις που παρουσιάζεται αυξημένο σφάλμα, πρέπει να αναφερθεί ότι κατά κανόνα αυτό οφείλεται στα συγκεκριμένα σημεία και όχι σε αδυναμίες του μοντέλου μετασχηματισμού. Για παράδειγμα το σημείο 107035 που παρουσιάζει σφάλμα 24 cm (βάση μήκους 47 Km) αποδεικνύεται ότι δεν είναι συμβατό με τα γειτονικά του τριγωνομετρικά. Ο έλεγχος έγινε μέσω ενός τοπικού μετασχηματισμού ομοιότητας μεταξύ των συντεταγμένων HTRS07 και των συντεταγμένων ΕΓΣΑ87 της ΓΥΣ. Στην Εικόνα 8 δίνονται τα υπόλοιπα αυτού του μετασχηματισμού, όπου διακρίνεται εμφανώς ότι το σημείο παρουσιάζει το μέγιστο υπόλοιπο (17.3 cm) και μάλιστα προς αντίθετη κατεύθυνση από τα γειτονικά του σημεία.



Εικόνα 8. Υπόλοιπα ενός μετασχηματισμού ομοιότητας στην περιοχή του σημείου 107035.

Μία συγκριτική αξιολόγηση των δύο τρόπων επίλυσης (3-παραμετρικός, επίσημο μοντέλο) γίνεται στον Πίνακα 1, ο οποίος δίνει τα στατιστικά στοιχεία των σφαλμάτων που προκύπτουν από την κάθε προσέγγιση.

Πίνακας 1. Στατιστικά συμπεριφορά των οριζοντιογραφικών σφαλμάτων για κάθε τρόπο επίλυσης.

Μοντέλο μετασχηματισμού	Στατιστικά οριζοντιογραφικών σφαλμάτων		
	Μέγιστη τιμή	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση
3-παραμετρικός	1.076 m	0.270 m	0.218 m
Επίσημο μοντέλο	0.268 m	0.045 m	0.048 m

Σημειώνεται πάντως ότι αν και το στατιστικό δείγμα είναι μεγάλο (205 βάσεις), δεν είναι επαρκές ώστε οι τιμές του πίνακα να θεωρηθούν αντιπροσωπευτικές για όλη τη χώρα. Μία τέτοια ανάλυση θα απαιτούσε μεγαλύτερο δείγμα με εκτενέστερη γεωγραφική διασπορά.

7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην εργασία αυτή διερευνήθηκε η ακρίβεια προσδιορισμού συντεταγμένων ΕΓΣΑ87 μέσω μετρήσεων GPS με έμφαση στη χρήση μόνιμων σταθμών αναφοράς. Έγινε σύγκριση δύο βασικών μεθοδολογιών: της χρήσης συντεταγμένων ΕΓΣΑ87 για το σταθμό αναφοράς σε συνδυασμό με έναν 3-παραμετρικό μετασχηματισμό και της χρήσης συντεταγμένων HTRS07 σε συνδυασμό με το επίσημο μοντέλο μετασχηματισμού. Η ανάλυση των αποτελεσμάτων επιβεβαίωσε πλήρως τα αναμενόμενα συμπεράσματα, ότι δηλαδή η πρώτη μεθοδολογία δεν πρέπει σε καμία περίπτωση να ακολουθείται για την επίλυση βάσεων μεγαλύτερων από 10-15 Km καθώς μπορεί να οδηγήσει σε πολύ μεγάλα σφάλματα της τάξης του 1m. Αντίθετα το επίσημο μοντέλο μετασχηματισμού εξασφαλίζει υψηλή ακρίβεια στο επίπεδο των λίγων cm, η οποία μάλιστα επιτυγχάνεται ακόμα και για μήκη βάσεων της τάξης των δεκάδων Km.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Το HEPOS υλοποιήθηκε μέσω του Επιχειρησιακού Προγράμματος του Γ' Κοινοτικού Πλαισίου Στήριξης (Κ.Π.Σ.) "Κοινωνία της Πληροφορία - ΚτΠ" και χρηματοδοτήθηκε σε ποσοστό 50% από το Ευρωπαϊκό Ταμείο Περιφερειακής Ανάπτυξης (ΕΤΠΑ) και 50% από Εθνικούς πόρους. Ευχαριστίες εκφράζονται στη συνάδελφο ΑΤΜ Ιφιγένεια Σταυροπούλου για την επίλυση των βάσεων και την ουσιαστική συμμετοχή της στην ανάλυση των αποτελεσμάτων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Cai J. (2000): HEPOS: "The systematic analysis of the transformation between the German geodetic reference system (DHDN, DHHN) and the ETRF system (DREF91)", *Earth, Planets, Space*, Vol 52 2000, pp. 947–952.

EUREF (2010): "Resolutions of the EUREF Symposium in Gävle, June 2-6, 2010.

Gianniou M. (2008): "HEPOS: Designing and Implementing an RTK-Network", *Geoinformatics Magazine for Surveying, Mapping & GYS Professionals*, Jan./Feb. 2008 Vol 11, p.p 10-13.

Gianniou M., K. Katsampalos, C. Kotsakis (2009): "Real-time Positioning in ETRS89 using the Hellenic Positioning System", *EUREF 2009 Symposium*, May 27-30 2009, Florence Italy.

Greaves M. and P. Cruddace (2001): "The OS's new Coordinate Transformation for Great Britain – GPS to OSGB36 National Grid Transformation", *Geomatics World*, November / December 2001, pp. 34-36.

Kasser M. and J. Breton (2003): "Necessity to work in a Reference Frame in France", *FIG Working Week*, April 13-17 2003, Paris

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

Κωτσάκης Χ., Κ. Κατσάμπαλος, Μ. Γιαννίου (2008): “Μοντέλο Μετασχηματισμού Συντεταγμένων μεταξύ του Συστήματος Αναφοράς του HEPOS (HTRS07) και του Ελληνικού Γεωδαιτικού Συστήματος Αναφοράς (ΕΓΣΑ87) - Βασική μεθοδολογία και αριθμητικά παραδείγματα”, ΤΑΤΜ/ΑΠΘ – ΚΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ Α.Ε.

Wanninger L. (1997): “Real-Time Differential GPS-Error Modelling in Regional Reference Station Networks”, in: Brunner, F.K. (Editors): *Advances in Positioning and Reference Frames, Proceedings of the IAG Scientific Assembly*, 86-92, Rio de Janeiro, 1997.

Wübbena G., S. Willgalis (2001): “State Space Approach for Precise Real Time Positioning in GPS Reference Networks”, *International Symposium on Kinematic Systems in Geodesy, Geomatics and Navigation*, KIS-01, Banff, June 5-8, Canada.