

Η χρήση της τεχνικής RTK για τον προσδιορισμό θέσης στο παλιό ελληνικό datum: Παρουσίαση μίας νέας εναλλακτικής μεθοδολογίας

Δημήτριος Αμπατζίδης

Τομέας Γεωδαισίας και Τοπογραφίας, Πολυτεχνική Σχολή, ΤΑΤΜ - ΑΠΘ.

Περίληψη: Η παρούσα εργασία παρουσιάζει μία νέα τεχνική προσδιορισμού των συντεταγμένων στο παλιό ελληνικό datum στην περίπτωση χρήσης της τεχνικής RTK. Η νέα μεθοδολογία βασίζεται στην εξαγόμενη γεωμετρική πληροφορία από τις βάσεις του GPS (κεκλιμένες αποστάσεις και γεωδαιτικά αζιμούθια). Η αξιοπιστία της μεθόδου διερευνάται μέσα από πραγματικά δεδομένα που συλλέχτηκαν στο δίκτυο της Πανεπιστημιούπολης του Α.Π.Θ., δίνοντας ικανοποιητικά αποτελέσματα.

Abstract: The present study deals with a new proposed strategy on coordinates' determination which referred to Old Greek Datum in case of using RTK technique. The new methodology relies on the geometrical information derived from GPS baselines (slope distances and geodetic azimuths). Strategy's validation is realized through a numerical application based on real data of Aristotle's University Campus network, performing sufficient results.

1. Εισαγωγή

Η χρήση της τεχνικής RTK (Real Time Kinematics) κατά την τελευταία δεκαετία έχει γίνει ευρέως διαδεδομένη. Βασίζεται στον προσδιορισμό 3-Δ θέσης σημείων με την χρήση του GPS σε **πραγματικό χρόνο**, με ακρίβεια που για την οριζόντια θέση κυμαίνεται μεταξύ 1-2 cm (βλ. π.χ Wanninger 2002).

Η τεχνική RTK βασίζεται στην ύπαρξη σταθμών αναφοράς (reference stations) και κινούμενων δεκτών GPS (rover) τα οποία επικοινωνούν μεταξύ τους με την χρήση ραδιοσημάτων. Οι συντεταγμένες των σταθμών αναφοράς είναι γνωστές με μεγάλη ακρίβεια. Οι παρατηρήσεις που συνδέουν τους σταθμούς αναφοράς με τους κινούμενους δέκτες είναι οι διαφορές φάσεων των συχνοτήτων GPS (βλ. π.χ Hoffmann-Wellenhoff 1997). Στην πλέον σύγχρονη εκδοχή, οι σταθμοί αναφοράς λειτουργούν επί 24-ωρης βάσης και χρησιμοποιούν ειδική μεθοδολογία για την χρήση του RTK όπως η τεχνική VRS (Virtual Reference Station, βλ. π.χ Φωτίου και Πικριδάς 2006).

Ένα κρίσιμο ζήτημα σε σχέση με την επιτυχή εφαρμογή του RTK είναι η δυνατό-

τητα υπολογισμού της θέσης στα υφιστάμενα τοπικά συστήματα αναφοράς. Υπενθυμίζεται ότι το πλαίσιο αναφοράς του GPS όπως αυτό χρησιμοποιείται για γεωδαιτικούς-τοπογραφικούς σκοπούς (οι τροχιές των δορυφόρων αναφέρονται σε αυτό), υιοθετείται από την IGS (International GNSS Service), το οποίο σε παγκόσμια κλίμακα ταυτίζεται με την τρέχουσα έκδοση του Διεθνούς Πλαισίου Αναφοράς-ITRF (International Terrestrial Reference Frame), βλ. Ferland and Piraszewski (2009). Για την πολιτική χρήση του GPS χρησιμοποιείται το σύστημα αναφοράς του WGS84 (και το ομώνυμο Ελλειψοειδές Αναφοράς) το οποίο ταυτίζεται με το τρέχον κάθε φορά ITRF με μία ακρίβεια της τάξης των 10 cm (βλ. Κατσάμπαλος 2005).

Μια συνήθης διαδικασία για τον προσδιορισμό συντεταγμένων στα υφιστάμενα τοπικά datums είναι η εφαρμογή ενός 3-Δ ή 2-Δ μετασχηματισμού ομοιότητας (βλ. π.χ Δερμάνης και Φωτίου 1992, Ρωσσικόπουλος 1999) με βάση κοινά σημεία μεταξύ των δύο συστημάτων αναφοράς (τοπικό και αυτό του GPS). Τα τελευταία χρόνια τη διαδικασία μετασχηματισμού μεταξύ των δύο συστημάτων αναφοράς (σύστημα αναφοράς του GPS και τοπικού) αναλαμβάνουν υπηρεσίες (δημόσιες ή ιδιωτικές) παροχής δεδομένων GPS. Οι συγκεκριμένες υπηρεσίες εκτός των άλλων προσφέρουν και τη δυνατότητα υπολογισμού της θέσης στο τοπικό datum σε εθνικό/περιφερειακό επίπεδο, χωρίς να χρειάζεται επιπλέον επεξεργασία από τον χρήστη. Παράδειγμα αποτελεί στην Ελλάδα η Κτηματολόγιο Α.Ε που μέσω του Ελληνικού Συστήματος Προσδιορισμού Θέσης (Hellenic Positioning System - HEPOS), δίνει τη δυνατότητα υπολογισμού συντεταγμένων στο ΕΓΣΑ87 (θα αναφερθούμε και παρακάτω). Εκτός της Κτηματολόγιο Α.Ε στην Ελλάδα υπάρχουν και ιδιωτικές υπηρεσίες παροχής δεδομένων GPS (σε πραγματικό χρόνο ή για μετεπεξεργασία).

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται μία νέα τεχνική για την εκτίμηση των συντεταγμένων ως προς το παλιό ελληνικό datum, χωρίς την εφαρμογή των κλασικών μετασχηματισμών αλλά μέσω της αξιοποίησης της **γεωμετρικής πληροφορίας** που προσφέρει το GPS.

2. Η ελληνική γεωδαιτική πραγματικότητα

Στην Ελλάδα έχουν ιδρυθεί κατά καιρούς τα ακόλουθα datums (βλ. Φωτίου 2007):

- Το παλιό ελληνικό (GR Datum). Ο κεντρικός μεσημβρινός του περνά από το βάθρο του αστεροσκοπείου της Αθήνας και χρησιμοποιεί σαν Ελλειψοειδές Αναφοράς αυτό του Bessel (1841). Με το παλιό ελληνικό datum εφαρμόζονται δύο προβολικά συστήματα: Η αξιμουθιακή Hatt και η Εγκάρσια Μερκατορική 3 μοιρών (γνωστή ως TM3°). Η προβολή Hatt χρησιμοποιήθηκε τόσο από τη Γεωγραφική Υπηρεσία Στρατού, όσο και από την Τοπογραφική Υπηρεσία του Υπουργείου Γεωργίας. Η TM3° εφαρμόστηκε στα πλαίσια της Επιχείρησης

Πολεοδομικής Ανασυγκρότησης (ΕΠΑ). Το παλιό ελληνικό datum παρουσιάζει σημαντικά σφάλματα λόγω της παλαιότητας των μετρήσεων (πραγματοποιήθηκαν από τη δεκαετία του 1940 ως τη δεκαετία του 1970), ενώ επιπλέον προβλήματα προκαλεί το γεγονός ότι δε συνορθώθηκε ενιαία. Το παλιό ελληνικό datum περιλαμβάνει δύο ξεχωριστές υλοποιήσεις. Η πρώτη προέκυψε από τη συνόρθωση που έλαβε χώρα στη δεκαετία του 1940 (που καλείται “παλιό Bessel”) και στην οποία αναφέρονται οι διανομές του υπουργείου Γεωργίας. Η δεύτερη αφορά τη νέα συνόρθωση που έγινε τη δεκαετία του 1980 (βλ. Τάκος 1989) και χρησιμοποιείται από τη ΓΥΣ (καλείται “νέο Bessel”).

- Το Ευρωπαϊκό Datum (ED-50) που εφαρμόστηκε στην Ευρώπη (εξαιρέση οι χώρες του τέως ανατολικού μπλοκ). Χρησιμοποιεί το Διεθνές Ελλειψοειδές Αναφοράς (Hayford) και ως προβολή την Παγκόσμια Εγκάρσια Μερκατορική Προβολή (UTM). Η χρήση του εστιάζεται κυρίως σε στρατιωτικούς σκοπούς.
- Το Ελληνικό Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς του 1987 (ΕΓΣΑ87). Εφαρμόζεται από τις αρχές της δεκαετίας του 1990 και δημιουργήθηκε κυρίως για τις ανάγκες σύνταξης του Κτηματολογίου (Ο.Κ.Χ.Ε 1987). Χρησιμοποιεί ως Ελλειψοειδές Αναφοράς το GRS80 και σαν προβολικό σύστημα την Εγκάρσια Μερκατορική μίας ζώνης (γνωστή ως TM87).

Από τα μέσα του 2009 τέθηκε σε λειτουργία το HE.PO.S. Το σύστημα αναφοράς του HEPOS είναι το Ευρωπαϊκό Επίγειο Πλαίσιο Αναφοράς του 2005 (European Terrestrial Reference Frame 2005-ETRF 2005) κατά την εποχή αναφοράς 2007.5 (Katsampalos et al. 2010). Η κωδική ονομασία του συστήματος αναφοράς είναι Hellenic Terrestrial Reference System 2007 (HTRS07). Το HTRS07 είναι το πρώτο γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς που εφαρμόζεται στον Ελλαδικό χώρο το οποίο βασίζεται στην υλοποίηση ενός σύγχρονου δυναμικού συστήματος αναφοράς. Το HEPOS όπως σχολιάστηκε και παραπάνω παρέχει τη δυνατότητα μετασχηματισμού μεταξύ HTRS07 και ΕΓΣΑ87 με μία μέση ακρίβεια για όλη την χώρα της τάξης των 8.3 cm. Για τη διαδικασία μετασχηματισμού HTRS07 σε ΕΓΣΑ87 παραπέμπουμε στην εργασία (Κατσάμπαλος και Κωτσάκης 2008). Αξίζει επιπλέον να τονιστεί ότι το λογισμικό μετασχηματισμού είναι ελεύθερο για οποιαδήποτε χρήση.

Επομένως, η χρήση της τεχνικής RTK για τον προσδιορισμό συντεταγμένων σημείων στο ΕΓΣΑ87 έχει πρακτικά λυθεί. Ακόμη και στην περίπτωση που δεν χρησιμοποιούνται οι υπηρεσίες του HEPOS (ή των αντίστοιχων ιδιωτικών) και οι συντεταγμένες των σημείων αναφέρονται στο τρέχον ITRF, είναι δυνατό να μετασχηματιστούν αρχικά στο ETRF 2005 (μέσω της διαδικασίας που περιγράφεται από τους Boucher and Altamimi 2008) και στη συνέχεια στο ΕΓΣΑ87.

Σημαντικό ζήτημα παραμένει ο μετασχηματισμός των συντεταγμένων που υπολογίζεται με την τεχνική RTK στο παλιό ελληνικό datum. Μία κλασική αντιμετώπιση του προβλήματος θα ήταν η εφαρμογή ενός μετασχηματισμού ομοιότητας. Η συγκεκριμένη διαδικασία προϋποθέτει γνώση τουλάχιστον 3 σημείων, επιλεγμένα με

τρόπο που θα περικλείουν την ευρύτερη περιοχή. Μία επίσης εναλλακτική τεχνική θα ήταν η χρήση των πολυωνύμων του OKXE που επιτρέπουν τον αμφίδρομο μετασχηματισμό από τις συντεταγμένες Hatt του παλιού ελληνικού datum στο ΕΓΣΑ87 (Κατσάμπαλος 2006). Η συγκεκριμένη διαδικασία έχει τρία μειονεκτήματα: Πρώτον, ότι απαιτεί ένα αρχικό μετασχηματισμό της λύσης του RTK ΕΓΣΑ87 (πηγή επιπλέον σφαλμάτων). Δεύτερον, ότι η εφαρμογή πολυωνύμων του OKXE εφαρμόζεται με μία μέση ακρίβεια 10-15 cm για όλη την χώρα. Τρίτον ότι αφορά τις συντεταγμένες Hatt όπως αυτές υλοποιούνται στο λεγόμενο “νέο Bessel”.

Στην περίπτωση του “παλιού Bessel” τα προβλήματα είναι εντονότερα. Τις περισσότερες περιπτώσεις είναι διαθέσιμος είναι ένας χάρτης κλίμακας 1:5000 και συντεταγμένες οροσήμων και τριγωνομετρικών που πολλές φορές προέκυψαν από μετρήσεις της δεκαετίας του 1920, ενώ η συντριπτική πλειοψηφία αυτών έχει καταστραφεί. Επιπλέον, πολλές φορές ακόμη και οι συντεταγμένες των διαφόρων οροσήμων ή τριγωνομετρικών δεν παρουσιάζουν συμβατότητα μεταξύ τους. Η απόσταση τους στην πραγματικότητα είναι δυνατό να απέχει σημαντικά από την εξαγόμενη από τις συντεταγμένες απόσταση. Η προαναφερθείσα κατάσταση κάνει ακόμη πιο δύσκολη την επιτυχή εφαρμογή ενός μετασχηματισμού που θα δώσει αξιόπιστα αποτελέσματα.

Με βάση τα παραπάνω θα πρέπει να αναζητηθεί μία νέα μεθοδολογία που θα επιτρέψει τον κατά το δυνατό ακριβέστερο προσδιορισμό θέσης στο παλιό ελληνικό datum χωρίς την ανάγκη χρήσης πολλών κοινών σημείων ανάμεσα στα δύο συστήματα αναφοράς.

3. Η νέα προτεινόμενη μέθοδος

3.1. Μαθηματική τεκμηρίωση

Η μέθοδος βασίζεται στην εξαγωγή γεωμετρικής πληροφορίας από τις βάσεις GPS, σύμφωνα με τις ακόλουθες σχέσεις (π.χ Vanicek and Krakiwsky 1982, Fotiou et al. 2003):

$$S_{ij} = \sqrt{\Delta X_{ij}^2 + \Delta Y_{ij}^2 + \Delta Z_{ij}^2} \quad (1)$$

$$A_{ij}^g = \tan^{-1} \frac{-\Delta X_{ij} \sin \lambda_i + \Delta Y_{ij} \cos \lambda_i}{-\Delta X_{ij} \sin \varphi_i \cos \lambda_i - \Delta Y_{ij} \sin \varphi_i \sin \lambda_i + \Delta Z_{ij} \cos \varphi_i} \quad (2)$$

όπου S_{ij} είναι η κεκλιμένη απόσταση μεταξύ των σημείων i και j , A_{ij}^g το αντίστοιχο γεωδαιτικό αζιμούθιο, $\Delta X_{ij}, \Delta Y_{ij}, \Delta Z_{ij}$ οι συνιστώσες βάσεις του GPS κατά τους 3 άξονες X, Y, Z αντίστοιχα και φ, λ οι καμπυλόγραμμες γεωδαιτικές συντεταγμένες (πλάτος και μήκος)

1^η παρατήρηση: Οι συνιστώσες της βάσης αναφέρονται στο σύστημα αναφοράς του GPS (ITRS/ETRS89). Για τοπογραφικές εργασίες μικρής έκτασης (όχι παραπάνω από 1-1.5 km σε μήκος) μπορεί να θεωρηθεί (με μία ακρίβεια των μερικών cm) ότι πρακτικά ταυτίζονται με τις αντίστοιχες συνιστώσες στο παλιό ελληνικό datum. Δηλαδή:

$$\Delta X_{ij}^{GRD} \approx \Delta X_{ij}^{TRF}, \quad \Delta Y_{ij}^{GRD} \approx \Delta Y_{ij}^{TRF} \quad \text{και} \quad \Delta Z_{ij}^{GRD} \approx \Delta Z_{ij}^{TRF} \quad (3)$$

όπου *GRD* είναι το παλιό ελληνικό datum και *TRF* οποιοδήποτε διεθνές ή περιφερειακό πλαίσιο αναφοράς (ITRF/ETRF).

Πρακτικά, οι παραπάνω σχέσεις εκφράζουν ότι τα δύο συστήματα αναφοράς **είναι παράλληλα μεταξύ τους και έχουν ταυτόχρονα κοινή κλίμακα**. Βάσεις μεγαλύτερου μήκους (π.χ. μερικών χιλιομέτρων) είναι πολύ πιθανό να δημιουργήσουν προβλήματα. Αν λάβουμε υπόψη το γεγονός ότι τα δύο συστήματα αναφοράς διαφέρουν σε κλίμακα μερικά ppm, τότε σε βάσεις 10 χιλιομέτρων θα υπεισέρχεται μία συστηματική επίδραση μεγαλύτερη από 1cm. Ακόμη μεγαλύτερη επίδραση υφίστανται τα αζιμούθια. Στην περίπτωση που τα δύο συστήματα αναφοράς διαφέρουν στον προσανατολισμό τους κατά μερικά τόξα δευτερολέπτου της μοίρας (ρεαλιστικό σενάριο), η υιοθέτηση της παραλληλίας των δύο συστημάτων αναφοράς οδηγεί σε συστηματικές διαφοροποιήσεις μερικών εκατοστών (σε βάσεις άνω των 10 χιλιομέτρων).

Επομένως, η παραλληλία και η κοινή κλίμακα των δύο συστημάτων αναφοράς μπορεί να θεωρηθεί ρεαλιστική μόνο για σχετικά μικρού μήκους βάσεις. Μία τεχνική για τη διερεύνηση της ισχύος της σχέσης (3), είναι η μέτρηση μίας ή περισσότερων βάσεων (π.χ. με EDM ή μέσω αναλυτικής γεωμετρίας), των οποίων είναι γνωστό το μήκος τους και ο προσανατολισμός τους. Αν διαπιστωθεί ότι η σύγκριση των υπολογισμένων με τη νέα μέθοδο γεωμετρικών ποσοτήτων και των ήδη γνωστών είναι ικανοποιητική, τότε η υιοθέτηση της σχέσης (3) είναι επιτυχής. Ειδικά η περίπτωση εφαρμογής της μεθόδου στο λεγόμενο “παλιό Bessel” εγκυμονεί μεγαλύτερους κινδύνους, λόγω της παλαιότητας του και των συστηματικών σφαλμάτων που παρουσιάζονται κατά την υλοποίησή του.

2^η παρατήρηση: Το γεωδαιτικό πλάτος και μήκος ενός σημείου αναφέρονται αρχικά στο αρχικό πλαίσιο αναφοράς (ITRF/ETRF) και συνδέονται με την χρήση ενός σύγχρονου Ελλειψοειδούς Αναφοράς (π.χ GRS80). Για τη μετατροπή των γεωδαιτικών συντεταγμένων από το αρχικό πλαίσιο αναφοράς στο παλιό ελληνικό datum προτείνεται η ακόλουθη διαδικασία: Από τις Καρτεσιανές συντεταγμένες που είναι προσδιορισμένες στο ITRF ή στο ETRF προστίθενται οι 3 συνιστώσες μετάθεσης (όπως δίνονται από τον OKXE), ώστε να υπολογιστούν οι αντίστοιχες Καρτεσιανές συντεταγμένες στο παλιό ελληνικό datum (με ακρίβεια της τάξης των 5-10 m). Στις συνέχεια μετατρέπονται σε γεωδαιτικές χρησιμοποιώντας τις παραμέτρους

του ελλειψοειδούς του Bessel (1841). Το ακόλουθο σχήμα περιγράφει την παραπάνω διαδικασία, για κάθε σημείο i .

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_i^{TRF} \xrightarrow{\begin{matrix} \Delta X^{OKXE} \\ \Delta Y^{OKXE} \\ \Delta Z^{OKXE} \end{matrix}} \begin{pmatrix} X^o \\ Y^o \\ Z^o \end{pmatrix}_i^{GRD} \xrightarrow{\text{(παράμετροι Bessel)}} \begin{pmatrix} \varphi^o \\ \lambda^o \\ h^o \end{pmatrix}_i$$

Σχήμα 1. Η διαδικασία υπολογισμού των προσεγγιστικών γεωδαιτικών συντεταγμένων στο παλιό ελληνικό datum.

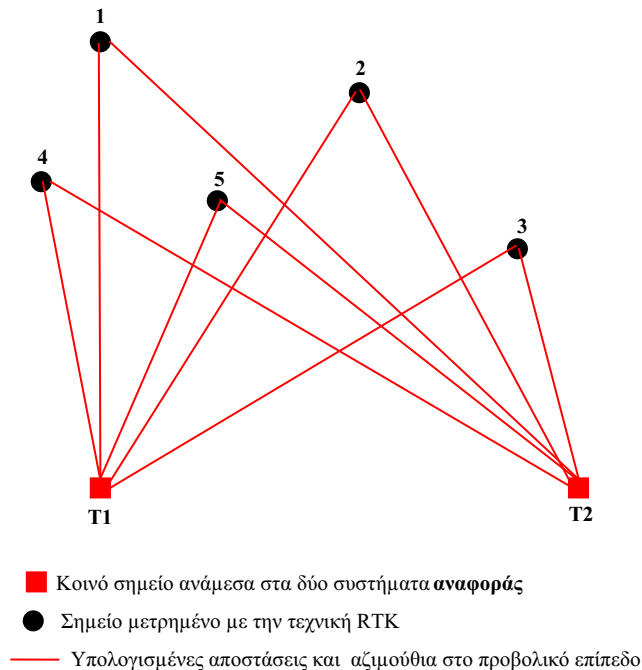
Με την παραπάνω διαδικασία η αντίστοιχη ακρίβεια των γεωδαιτικών συντεταγμένων στο παλιό ελληνικό datum είναι μεταξύ 0.2” και 0.4”. Αξίζει εδώ να αναφερθεί πως όσα αναφέρθηκαν παραπάνω ισχύουν για τη νέα συνόρθωση του παλιού ελληνικού datum. Στην περίπτωση του “παλιού Bessel” στο οποίο αναφέρονται οι διανομές του υπουργείου Γεωργίας, είναι δυνατό να εφαρμοστούν, αλλά οι γεωδαιτικές συντεταγμένες θα υπολογιστούν με χαμηλότερη ακρίβεια.

3.2 Προτεινόμενος αλγόριθμος για τον προσδιορισμό των συντεταγμένων σημείων που μετρήθηκαν με την τεχνική RTK στο παλιό ελληνικό datum

1. Προσδιορισμός των συντεταγμένων των σημείων με την τεχνική RTK. Επιλογή ενός **βασικού σημείου** p το οποίο είναι κοινό και στα δύο συστήματα αναφοράς. Σχηματίζονται όλες οι συνιστώσες τις βάσεις μεταξύ του p και όλων των υπόλοιπων σημείων.
2. Υπολογίζονται οι κεκλιμένες αποστάσεις και τα γεωδαιτικά αζιμούθια με την χρήση των εξισώσεων (1) και (2) μεταξύ του βασικού σημείου και των υπολοίπων.
3. Γίνεται η αναγωγή των κεκλιμένων αποστάσεων και των γεωδαιτικών αζιμουθίων στο προβολικό επίπεδο της προβολής Hatt (ή της TM3^o) σύμφωνα με τους αλγόριθμους που περιγράφονται από τον Φωτίου (2007). Εδώ θα πρέπει να τονιστεί ότι όπου στη διαδικασία αναγωγών εμφανίζεται γεωμετρικό υψόμετρο, θα πρέπει να αναφέρεται στο παλιό ελληνικό datum.
4. Υπολογισμός των προβολικών συντεταγμένων με την εφαρμογή του ευθέως γεωδαιτικού προβλήματος (γνωστό και ως 1^o θεμελιώδες θεώρημα βλ. Βλάχος 1987):

$$x_i = x_p + S_{pi}^{\text{ΠΕ}} \sin A_{pi}^{\text{ΠΕ}} \quad (4\alpha)$$

$$y_i = y_p + S_{pi}^{\text{ΠΕ}} \cos A_{pi}^{\text{ΠΕ}} \quad (4\beta)$$



Σχήμα 2. Η δυνατότητα χρήσης της νέας προτεινόμενης μεθοδολογίας για τη συνόρθωση ενός τοπογραφικού δικτύου.

Πίνακας 1. Οι Καρτεσιανές συντεταγμένες των σημείων ως προς το ITRF94 και οι αντίστοιχες προβολικές στην προβολή Hatt

κωδικός σημείου	ITRF 94			Hatt	
	X (m)	Y (m)	Z (m)	x (m)	y (m)
230	4463604.844	1890577.138	4131383.939	-1104.24	-13380.39
232	4463629.584	1890686.202	4131308.489	-1013.47	-13480.20
233	4463565.581	1890722.523	4131366.100	-955.05	-13407.32
237	4463650.209	1890856.288	4131211.756	-864.91	-13609.19
301	4463573.869	1891252.636	4131143.713	-470.20	-13715.72
303	4463659.914	1891151.885	4131081.213	-596.52	-13789.15
305	4463712.14	1891002.774	4131081.488	-754.20	-13782.39
306	4463692.449	1890931.288	4131133.759	-812.33	-13712.76
308	4463649.270	1890773.384	4131249.226	-940.87	-13559.12
309	4463625.14	1890718.548	4131299.379	-981.94	-13492.66
310	4463626.336	1890650.945	4131327.681	-1044.66	-13454.71
311	4463622.482	1890549.004	4131377.528	-1137.02	-13388.68
312	4463620.056	1890479.292	4131411.404	-1200.22	-13343.84
313	4463583.046	1890610.556	4131403.363	-1064.95	-13361.07
314	4463571.693	1890603.028	4131418.044	-1067.46	-13341.21
315	4463427.278	1890552.982	4131598.220	-1057.19	-13105.18
318	4463562.952	1890707.808	4131379.695	-967.58	-13391.69

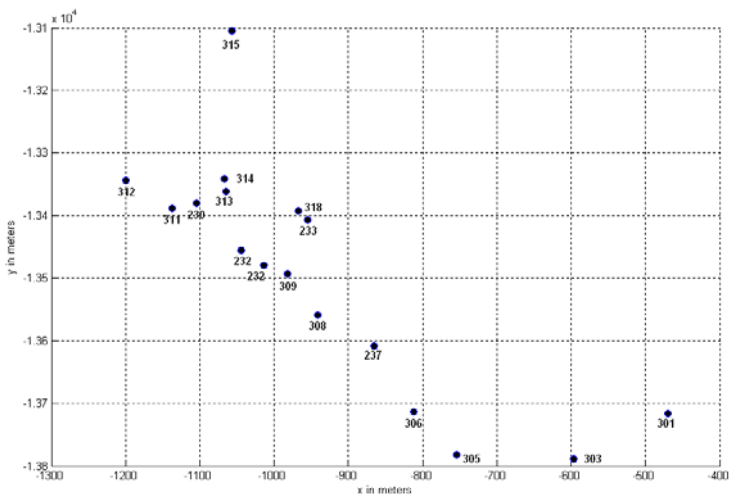
όπου: x_i, y_i οι προβολικές συντεταγμένες τυχαίου σημείου i , x_p, y_p οι προβολικές συντεταγμένες του βασικού σημείου p , S_{pi}^{PIE} η προβολική απόσταση μεταξύ του βασικού σημείου p και του i και A_{pi}^{PIE} το αντίστοιχο προβολικό αζιμουθίο.

3^η παρατήρηση: Θα πρέπει εδώ να τονιστεί πως η συγκεκριμένη μεθοδολογία μπορεί να εφαρμοστεί με περισσότερα του ενός κοινού σημείου. Τότε είναι δυνατή η εκτίμηση των συντεταγμένων των σημείων ως τριγωνομετρικού δικτύου με παρατηρήσεις αποστάσεων και αζιμουθίων (βλ. Ρωσικόπουλος 1999). Στο σχήμα 2 παρουσιάζεται η περίπτωση εφαρμογής της τεχνικής υπό μορφή δικτύου.

4. Αριθμητική εφαρμογή της μεθόδου

Τον Ιούνιο του 2007 μετρήθηκε ένα μέρος του τοπογραφικού δικτύου του Α.Π.Θ με την τεχνική RTK (Αμπατζίδης κ.α 2007). Το πλαίσιο αναφοράς των μετρήσεων GPS ήταν το ITRF94. Οι συντεταγμένες του τοπογραφικού δικτύου Α.Π.Θ αναφέρονται στο παλιό ελληνικό datum (“νέο Bessel”) στην προβολή Hatt (<http://e-topo.web.auth.gr>). Στον Πίνακα 1 παρουσιάζονται οι εκτιμήσεις των συντεταγμένων ως προς το ITRF94 και οι επίσημες προβολικές συντεταγμένες των σημείων του δικτύου.

Το 230 αποτελεί το βασικό σημείο. Η μέγιστη απόσταση μεταξύ του βασικού και των υπόλοιπων σημείων ήταν της τάξης των 717 m. Στον πίνακα 2 παρουσιάζεται η στατιστική συμπεριφορά των διαφορών των επίσημων προβολικών αποστάσεων και αζιμουθίων από τις αντίστοιχες υπολογισμένες με βάση τη νέα μεθοδολογία (συμβολίζονται με δS και δA αντίστοιχα).



Σχήμα 3. Τμήμα του τοπογραφικού δικτύου το Α.Π.Θ στο οποίο προσδιορίστηκαν οι συντεταγμένες με την τεχνική RTK. Στο σχήμα διακρίνονται οι κωδικό των σημείων.

Πίνακας 2. Στατιστική συμπεριφορά των διαφορών των επίσημων αποστάσεων και αζιμουθίων από τα αντίστοιχα υπολογισμένα μεγέθη από τη νέα μεθοδολογία

	δS (cm)	δA (cc)
μέγιστη τιμή	5.4	85
ελάχιστη τιμή	-1.4	-69
μέσος όρος	0.1	10
τυπική απόκλιση	1.6	30

Πίνακας 3. Οι υπολογισμένες με τη νέα μεθοδολογία συντεταγμένες και οι διαφορές τους από τις επίσημες

κωδικός σημείου	x (m)	y (m)	δx (cm)	δy (cm)
230	-1104.24	-13380.39	-	-
232	-1013.477	-13480.196	0.7	-0.4
233	-955.060	-13407.329	1.0	0.9
237	-864.923	-13609.192	1.3	0.2
301	-470.223	-13715.794	<u>2.3</u>	<u>7.4</u>
303	-596.536	-13789.175	1.6	2.5
305	-754.203	-13782.394	0.3	0.4
306	-812.345	-13712.760	1.5	0.0
308	-940.883	-13559.122	1.3	0.2
309	-981.959	-13492.662	1.9	0.2
310	-1044.655	-13454.712	-0.5	0.2
311	-1137.026	-13388.682	0.6	0.2
312	-1200.272	-13343.824	5.2	-1.6
313	-1064.965	-13361.071	1.5	0.1
314	-1067.466	-13341.209	0.6	-0.1
315	-1057.195	-13105.170	0.5	-1.0
318	-967.582	-13391.697	0.2	0.7

Παρατηρούμε ότι ενώ η στατιστική συμπεριφορά των αποστάσεων είναι αρκετά ικανοποιητική (αν λάβει υπόψη κανείς και τα σφάλματα κέντρωσης και οριζοντίωσης). Αντίθετα, στην περίπτωση των αζιμουθίων παρατηρείται μία σχετικά υψηλή τιμή της τυπικής απόκλισης και του μέσου όρου. Τα στατιστικά στοιχεία της διαφοράς των αζιμουθίων αποτελούν **ένδειξη για την ύπαρξη σημαντικών διαφοροποιήσεων στον προσανατολισμό των δύο συστημάτων αναφοράς**. Από τοπογραφικής πλευράς, η ακρίβεια 35 cc είναι σχετικά χαμηλή, αν ληφθεί υπόψη ότι η ακρίβεια των σημερινών οργάνων αποτύπωσης είναι τουλάχιστον της τάξης των 20 cc. Βέβαια είναι δυνατό η χαμηλή ακρίβεια να οφείλεται λόγω χονδροειδούς / συστηματικού σφάλματος κατά τη μέτρηση RTK (όπως θα δούμε αμέσως παρακάτω).

Στον πίνακα 4 εμφανίζονται τα στατιστικά χαρακτηριστικά των διαφορών των επίσημων από τις υπολογισμένες με τη νέα μεθοδολογία συντεταγμένων, χωρίς τη συμμετοχή του 301 που είναι προβληματικό (πιθανό σφάλμα κατά την μέτρηση με RTK).

Η στατιστική συμπεριφορά των διαφορών κρίνεται ικανοποιητική με την τυπική απόκλιση των διαφορών να είναι της τάξης του 1 cm κατά τις δύο διαστάσεις. Θα πρέπει εδώ να τονιστεί πως η αφαίρεση του προβληματικού σημείου 301 βελτιώνει και τα στατιστικά στοιχεία της διαφοράς των αζιμουθίων του πίνακα 3. Ο μέσος όρος του δΑ είναι πλέον 5 cc ενώ η τυπική απόκλιση μειώνεται στα 18 cc.

Πίνακας 4. Στατιστική συμπεριφορά των διαφορών των επίσημων συντεταγμένων από τα αντίστοιχα υπολογισμένες τη νέα μεθοδολογία

	δx (cm)	δy (cm)
μέγιστη τιμή	5.2	2.5
ελάχιστη τιμή	-0.5	-1.6
μέσος όρος	1.2	0.2
τυπική απόκλιση	1.3	0.9

5. Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία παρουσιάστηκε μία νέα μεθοδολογία για τον προσδιορισμό των συντεταγμένων που προέρχονται από την τεχνική RTK στο παλιό ελληνικό datum. Σημαντικό πλεονέκτημα αποτελεί το γεγονός ότι **απαιτείται μόνο ένα κοινό σημείο** μεταξύ δύο συστημάτων αναφοράς σε σχέση με τον κλασικό 3-Δή 2-Δ μετασχηματισμό. Πρέπει για άλλη μια φορά να τονιστεί ότι η προτεινόμενη μεθοδολογία δίνει αξιόπιστα αποτελέσματα **μόνο σε εργασίες μικρής έκτασης που δεν ξεπερνούν γενικά το 1-1.5 km**.

Η νέα τεχνική μπορεί να εφαρμοστεί **είτε για την ίδρυση στάσεων είτε για την αποτύπωση σημείων λεπτομέρειας**. Ιδιαίτερα χρήσιμη μπορεί να αποδειχθεί στις περιπτώσεις που χρειάζεται η τοπογραφική τεκμηρίωση (π.χ αποτύπωση ή χάραξη) σε εργασίες που πραγματοποιούνται σε διανομές του υπουργείου Γεωργίας, όπου υπάρχει πρόβλημα λόγω έλλειψης τριγωνομετρικών και στάσεων.

Μεγάλη προσοχή χρειάζεται στη διαδικασία υπολογισμού των αζιμουθίων που παρουσιάζουν προβλήματα, λόγω του έντονα διαφοροποιημένου προσανατολισμού μεταξύ των δύο συστημάτων αναφοράς (GPS και παλιού ελληνικού datum).

Προφανώς, η παραπάνω μεθοδολογία μπορεί να εφαρμοστεί με την ίδια ακριβώς λογική και στην περίπτωση στατικών μετρήσεων GPS (παραμονή στο σημείο μερικά λεπτά ή μερικές ώρες).

Πιστεύουμε ότι η συγκεκριμένη μεθοδολογία μπορεί να εφαρμοστεί στην καθημερινή πρακτική του τοπογράφου Μηχανικού και φυσικά η αξιοπιστία της μπορεί να διερευνηθεί με αντίστοιχα πειράματα σε όλη την χώρα. Στο προσεχές μέλλον η νέα προτεινόμενη μεθοδολογία θα εφαρμοστεί στην ευρύτερη περιοχή του νομού της Θεσσαλονίκης, για την αξιολόγησή της σε μεγαλύτερη κλίμακα.

Βιβλιογραφία

- Αμπατζίδης, Δ., Ζ. Ιερωνυμάκη, Π. Παπαγεωργίου και Θ. Παπανικολάου (2007): Εργασία για το μάθημα “Ειδικές Εφαρμογές του GPS”, ΤΑΤΜ-Α.Π.Θ
- Βλάχος Δ. (1987): *Τοπογραφία, Τόμος II. Υπηρεσία Δημοσιευμάτων Α.Π.Θ.*
- Δερμάνης, Α. και Α. Φωτίου (1992): *Μέθοδοι και εφαρμογές Συνόρθωσης Παρατηρήσεων.* Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη.
- Κατσάμπαλος, Κ. (2005): Σημειώσεις για το μάθημα “Εφαρμογές GPS”. ΤΑΤΜ-ΑΠΘ.
- Κατσάμπαλος, Κ. (2006): Μετασχηματισμοί TM87/Hatt. *Δελτίο Συλλόγου Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών Βορείου Ελλάδας*, Τεύχος 5^ο.
- Κατσάμπαλος Κ. και Χ. Κωτσάκης (2008): Το γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς του HEPOS (HTRS07). *Παρουσίαση στο επιστημονικό διήμερο εργασίας: HEPOS και σύγχρονα γεωδαιτικά συστήματα αναφοράς : Θεωρία και υλοποίηση, προοπτικές και εφαρμογές.* Θεσσαλονίκη 25-26 Σεπτεμβρίου.
- Οργανισμός Κτηματολογίου και Χαρτογραφίσεων Ελλάδος (1987): Το Ελληνικό Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς, Διεύθυνση Χαρτογραφίσεων Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε.
- Ρωσσικόπουλος, Δ. (1999): *Τοπογραφικά Δίκτυα και Υπολογισμοί* (β' έκδοση). Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη.
- Τάκος, Ι. (1989): Νέα συνόρθωση των τριγωνομετρικών δικτύων της Ελλάδας, *Δελτίο ΓΥΣ*, Τεύχος 136, Έτος Έκδοσης 50, σελ. 20-91.
- Φωτίου, Α. (2007): *Γεωμετρική Γεωδαισία. Θεωρία και Πράξη.* Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη.
- Φωτίου Α. και Χ. Πικριδάς (2006): *GPS και Γεωδαιτικές Εφαρμογές.* Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη.
- Boucher C., Altamimi Z. (2008): Memo: Specifications for reference frame fixing in the analysis of a EUREF GPS campaign. <http://etrs89.ensg.ign.fr/memo-V7.pdf>
- Ferland, R., M. Piraszewski (2009): The IGS-combined station coordinates, earth rotation parameters and apparent geocenter. *Journal of Geodesy*, vol. 83, pp. 385-392.
- Fotiou A., C. Pikridas and D. Rossikopoulos (2003): Adjustment of 2-D Networks using geometric derived observations from GPS baselines. *Proceedings of the International Symposium on Modern Technologies, Education and Professional Practice in the Globalizing World.* 6-7 November, Sofia, Bulgaria.
- Gianniou M., K. Katsampalos, C. Kotsakis (2009): Real-time Positioning in ETRS89 using

the Hellenic Positioning System. *Presented at EUREF 2009 Symposium*, May 27-30, Florence, Italy.

Hoffmann-Wellenhoff, B., H. Lichtenegger and J. Collins (1997), *Global Positioning System. Theory and practice* (4th edition), Springer Verlag, Wien/New York.

Katsampalos, K., C. Kotsakis and M. Gianniou (2010): Hellenic Terrestrial Reference System 2007 (HTRS07): A regional realization of ETRS89 over Greece in support of HEPOS, accepted in *Bulletin of Geodesy and Geomatics* (in print).

Vanicek, P. and E.J. Krakiwsky (1982): *Geodesy. The Concepts*. North-Holland Publishing Company, New York.

Wanninger, L. (2002), Virtual Reference Stations for Centimeter-Level Kinematic Positioning. *Proceedings of ION GPS 2002*, Portland, Oregon, pp. 1400-1407.