Μετασχηματισμός δικτύου GPS στα ελληνικά γεωδαιτικά συστήματα αναφοράς

Α. Φωτίου και Χ. Πικριδάς
Τομέας Γεωδαισίας και Τοπογραφίας, Τμήμα Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, ΑΠΘ

Περίληψη: Παρουσιάζεται μια αξιόπιστη μεθοδολογία μετασχηματισμού συντεταγμένων δικτύου GPS σε ένα τοπικό γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς. Δίνεται έμφαση στα ελληνικά γεωδαιτικά συστήματα μέσω συγκεκριμένης αριθμητικής εφαρμογής για ένα δίκτυο στην περιοχή των λιμνών Κορώνειας και Βόλβης. Επίσης, εξετάζονται οι κίνδυνοι και τα προβλήματα που συνήθως υπάρχουν όταν εφαρμόζεται άκριτα ο τρισδιάστατος μετασχηματισμός ομοιότητας.

1 Εισαγωγή

Η χρήση του GPS στις τοπογραφικές και γεωδαιτικές εφαρμογές διευκολύνει σημαντικά την εκτέλεση των μετρήσεων, ιδιαίτερα στη μέτρηση δικτύων, με αποτέλεσμα το GPS να έχει επικρατήσει έναντι των κλασικών γεωδαιτικών οργάνων ως το μοναδικό μέσο για τον (σχετικό) προσδιορισμό θέσης. Επιπλέον οι μετρήσεις GPS (φάσεις) χαρακτηρίζονται από υψηλή εσωτερική ακρίβεια (1–2 mm), προϋπόθεση για υψηλής ακρίβειας αποτελέσματα, της τάξης των μερικών χιλιοστών και γενικά καλλίτερης του εκατοστού για τις συνήθεις εφαρμογές.

Το κλειδί για υψηλής ακρίβειας αποτελέσματα βρίσκεται στη σωστή ανάλυση και επεξεργασία των παρατηρήσεων GPS, την οποία από μόνο του ένα πρόγραμμα- λογισμικό (software) δεν εγγυάται εάν ο χρήστης δεν διαθέτει και ένα ικανοποιητικό επίπεδο σχετικών γνώσεων, π.χ. επίδραση της ατμόσφαιρας, επίλυση ασαφειών, μέθοδοι και σχεδιασμός μετρήσεων, συνόρθωση παρατηρήσεων, στατιστική αξιολόγηση, συστήματα αναφοράς και μετασχηματισμοί συντεταγμένων. Το ικανοποιητικό επίπεδο γνώσεων στην περίπτωση του GPS καθίσταται υποχρεωτικό αν ληφθεί υπόψη ότι τα λογισμικά των κατασκευάστριων εταιρειών λειτουργούν περίπου σαν 'μαύρα κουτιά', πιθανώς γιατί ο απλός χρήστης – επαγγελματίας – δεν ενδιαφέρεται για το 'πώς και το γιατί' αλλά για τα τελικά αποτελέσματα. Με τη λογική αυτή βέβαια αυξάνονται τα λάθη και τα προβλήματα στην πράξη και τελικά διαιωνίζεται μία κατάσταση που όλοι την απορρίπτουν στα λόγια αλλά ελάχιστοι προσπαθούν να την αναιρέσουν.

Ένα από τα σημαντικά θέματα, στα οποία γίνονται συχνά λάθη, αποτελεί ο μετασχηματισμός δικτύου GPS σε ένα τοπικό γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς. Για την περίπτωση της Ελλάδας, μας ενδιαφέρει κυρίως ο μετασχηματισμός στο ΕΓΣΑ87 (Ελληνικό Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς του 1987) με το προβολικό σύστημα της εγκάρσιας Μερκατορικής απεικόνισης (TM87) και δευτερευόντως ο μετασχηματισμός στο παλαιό ελληνικό datum γνωστό και ως 'Bessel' με τα προβολικά συστήματα της Hatt και της TM3.

Με τη λογική των περισσοτέρων εμπορικών λογισμικών, ένα δίκτυο GPS συνορθώνεται αρχικά ως ελεύθερο ή με ελάχιστες δεσμεύσεις στο παγκόσμιο γεωδαιτικό σύστημα του 1984, γνωστό ως WGS84 (World Geodetic System 1984) ή και ως σύστημα του GPS. Η συνόρθωση του δικτύου αφορά συνήθως τη συνόρθωση όλων των βάσεων (ανεξαρτήτων ή όχι) που έχουν επιλεγεί είτε αυτόματα από το πρόγραμμα είτε από τον χρήστη και έχουν επιλυθεί επιτυχώς. Κατά την επίλυση μιας βάσης το ένα από τα δύο σημεία θεωρείται ως σταθερό, άσχετα αν είναι γνωστό τριγωνομετρικό ή άγνωστο προς προσδιορισμό σημείο. Σημασία έχει οι συντεταγμένες του να είναι γνωστές ως προς το WGS84 με μια ακρίβεια καλλίτερη από 20 m και κατά προτίμηση από 10 m, κάτι το οποίο παραβλέπεται συχνά στην πράξη. Το θεωρούμενο ως σταθερό σημείο ορίζει και το WGS84, στην πραγματικότητα ορίζει ένα 'ψευδό-WGS84' με την παραπάνω ανοχή των λίγων μέτρων. Η δυνατότητα για συντεταγμένες με ακρίβεια καλλίτερη από 20 m υπάρχει πάντοτε, για όλα τα σημεία, από τη λύση πλοήγησης (navigation solution) ή για μεγαλύτερη σιγουριά από μία συνόρθωση απόλυτου προσδιορισμού θέσης για κάθε σημείο με παρατηρήσεις κώδικα (single point positioning).

Αν η προηγούμενη απόκλιση είναι μεγαλύτερη από 10 – 20 m, η αντίστοιχη βάση που επιλύεται θα παρουσιάζει σφάλματα κλίμακας και προσανατολισμού τα οποία αυξάνουν σε σχέση με το μέγεθος της απόκλισης και το μήκος της βάσης. Η περίπτωση μιας μεγάλη απόκλισης των συντεταγμένων μας απασχολεί όταν είναι ενεργή η κατάσταση της επιλεκτικής διαθεσιμότητας (SA on) όπου η απόκλιση είναι της τάξης των 100 m. Το πρόβλημα αυτό υπήρχε πριν από τον Μάιο του 2000 και αντιμετωπίζονταν συνήθως με την επιλογή ως πρώτης βάσης που θα επιλύονταν εκείνης που το ένα άκρο της ήταν γνωστό τριγωνομετρικού σημείο, π.χ. στο ΕΓΣΑ87. Έτσι, εύκολα υπολογίζονταν οι προσεγγιστικές συντεταγμένες στο WGS84 με βάση κάποιες γνωστές παραμέτρους μετάθεσης με την ακρίβεια των λίγων μέτρων. Αν δεν υπήρχε γνωστό σημείο τότε εφαρμόζονταν η επιλογή του απόλυτου προσδιορισμού θέσης για το σημείο που θα θεωρούνταν ως σταθερό.

Η αρχική συνόρθωση του δικτύου με ελάχιστες δεσμεύσεις (ένα σημείο σταθερό) ή και ως ελεύθερο, αποσκοπεί κύρια στον έλεγχο της ποιότητας των μετρήσεων και της μελέτης της ακρίβειάς του. Αν τα προηγούμενα αποτελέσματα είναι αποδεκτά συνεχίζουμε με το μετασχηματισμό των συντεταγμένων GPS, από το WGS84 στο τοπικό σύστημα.

Πρέπει να σημειωθεί ότι η διαδικασία – μεθοδολογία μετασχηματισμού είναι κατά κανόνα διαφορετική για τις οριζόντιες συντεταγμένες (γεωδαιτικό μήκος και πλάτος, προβολικές συντεταγμένες) από την αντίστοιχη για τα ορθομετρικά υψόμετρα. Ο δυασμός αυτός οφείλεται στην όχι καλή γνώση του γεωειδούς που είναι και η συνήθης περίπτωση. Όπως είναι γνωστό το GPS παρέχει τόσο την οριζόντια θέση όσο και τα ελλειψοειδή υψόμετρα ή καλλίτερα τις ελλειψοειδείς υψομετρικές διαφορές με επίσης υψηλή ακρίβεια. Για να προσδιορισθούν τα ορθομετρικά υψόμετρα απαιτείται η γνώση των υψομέτρων του γεωειδούς με ικανοποιητική ακρίβεια. Σε αντίθετη περίπτωση, όταν δηλαδή αγνοείται το γεωειδές (περίπτωση συνήθης στην πράξη), ακολουθείται μία κατάλληλη μέθοδος παρεμβολής ανάλογα με την έκταση της περιοχής. Στην παρούσα εργασία θα μας απασχολήσει κυρίως ο μετασχηματισμός συντεταγμένων GPS με έμφαση την οριζόντια θέση, δηλαδή θα αναφερθούμε στα λεγόμενα δίκτυα οριζοντίου ελέγχου. Όταν το γεωειδές είναι γνωστό με ακρίβεια ανάλογη αυτής των οριζόντιων συντεταγμένων τότε ο μετασχηματισμός μπορεί να γίνει ταυτόχρονα και για τις τρεις διαστάσεις μέσω ενός μετασχηματισμού ομοιότητας. Αλλιώς, υπάρχει κίνδυνος να μειώσουμε την καλή ακρίβεια των οριζόντιων συντεταγμένων. Το σημείο αυτό απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή και θα σχολιαστεί παρακάτω αναλυτικότερα.

2 Αλγόριθμοι μετασχηματισμού

Περιγράφονται στη συνέχεια και σε διαδοχικά βήματα δύο διαδικασίες - αλγόριθμοι μετασχηματισμού συντεταγμένων GPS από το WGS84 στο τοπικό σύστημα αναφοράς και στην προβολή που χρησιμοποιείται. Οι αλγόριθμοι εξειδικεύονται για τις περιπτώσεις όπου το τοπικό σύστημα αναφοράς είναι το ΕΓΣΑ87 ή το παλαιό ελληνικό datum.

Στην παρούσα εργασία ενδιαφερόμαστε για τον προσδιορισμό παραμέτρων μετασχηματισμού, μέσω κοινών σημείων, με βάση τις οποίες θα μετασχηματισθούν οι συντεταγμένες των μη κοινών σημείων.

Για τυχόν σημείο, έστω (X_G, Y_G, Z_G) οι γεωκεντρικές συντεταγμένες GPS ως προς το WGS84, (λ_G, φ_G, h_G) οι γεωδαιτικές ελλειψοειδείς (μήκος, πλάτος, γεωμετρικό υψόμετρο), (X, Y, Z) οι συντεταγμένες στο τοπικό γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς, (λ, φ, h) οι ελλειψοειδείς στο τοπικό datum, (E, N) οι προβολικές συντεταγμένες στο τοπικό σύστημα (π.χ. στην ΤΜ87) και Η το ορθομετρικό υψόμετρο.

2.1 Μετασχηματισμός των (X_G, Y_G, Z_G) σε (E, N) μέσω της επιλογής μαθηματικού μοντέλου για τις δύο διαστάσεις.

<u>Α φάση</u>:

Προσεγγιστικός μετασχηματισμός σε (E^0, N^0).

- $X^0 = X_G + \Delta X$, $Y^0 = Y_G + \Delta Y$, $Z^0 = Z_G + \Delta Z$, όπου, για το ΕΓΣΑ87, με ακρίβεια μέτρου, ΔX = 199.723 m, ΔY = –74.030 m, ΔZ = –246.018 m, ενώ για το παλαιό ελληνικό datum, με ακρίβεια 5 έως 10 μέτρων, ΔX = – 456 m, ΔY = – 373 m, ΔZ = – 497 m.
- Οι συντεταγμένες (X^0, Y^0, Z^0) μετατρέπονται σε (λ^0, φ^0, h^0) με τους γνωστούς τύπους και με το ελλειψοειδές του GRS80 για το ΕΓΣΑ87 ή του Bessel για το παλαιό ελληνικό datum.
- Τα (λ^0, φ^0) μετατρέπονται με τις γνωστές εξισώσεις απεικόνισης σε (E^0, N^0) της ΤΜ87 για το ΕΓΣΑ87 ή της Hatt, ΤΜ3 για το παλαιό ελληνικό datum. Προκειμένου για την προβολή Hatt ή ΤΜ3, το λ^0 πρέπει προηγουμένως να αναχθεί ως προς τον μεσημβρινό του βάθρου του Αστεροσκοπείου Αθηνών ($\lambda^0 \rightarrow \lambda^0 - 23^o\ 42'\ 58''.815$).

Β φάση:

Υπολογισμός παραμέτρων μετασχηματισμού

- Επιλέγεται το κατάλληλο μαθηματικό μοντέλο του μετασχηματισμού για τις 2 – διαστάσεις, συνήθως του μετασχηματισμού ομοιότητας και αν δεν ικανοποιεί εκείνο του αφινικού και σπανιότερα ενός πολυωνυμικού ανώτερης τάξης. Για τα κοινά σημεία, που περικλείουν την περιοχή και είναι πάνω από τα ελάχιστα (για έλεγχο των σφαλμάτων), υπολογίζονται οι παράμετροι του μετασχηματισμού από το σύστημα των (E^0, N^0) στο σύστημα (E, N). Με βάση τα σφάλματα των παρατηρήσεων γίνεται αξιολόγηση της ποιότητας των παρατηρήσεων και της καταλληλότητας του μετασχηματισμού. Συνήθως αρκεί ένας εποπτικός έλεγχος αλλιώς εφαρμόζουμε στατιστικούς ελέγχους.

Γ φάση:

Μετασχηματισμός μη κοινών σημείων

- Με βάση τις παραμέτρους του μετασχηματισμού που υπολογίσθηκαν προηγουμένως μετασχηματίζουμε τις συντεταγμένες (E^0, N^0) των μη κοινών σημείων σε συντεταγμένες (E, N) της ΤΜ87 ή Hatt, ΤΜ3 .

2.2 Μετασχηματισμός των (X_G, Y_G, Z_G) σε (E, N) μέσω του τρισδιάστατου μετασχηματισμού ομοιότητας (Helmert transformation)

Α φάση:

Υπολογισμός των (X, Y, Z) στο ΕΓΣΑ87 ή στο παλαιό ελληνικό datum

- Με τις εξισώσεις απεικόνισης της ΤΜ87 ή της Hatt, ΤΜ3, οι προβολικές συντεταγμένες (E, N) των κοινών σημείων μετατρέπονται σε γεωδαιτικές (λ, φ). Με γνωστά τα ορθομετρικά υψόμετρα H και τα υψόμετρα του γεωειδούς *N* υπολογίζονται τα γεωμετρικά υψόμετρα h = H + *N*, οπότε από τα (λ, φ, h) υπολογίζονται οι καρτεσιανές γεωδαιτικές συντεταγμένες (X, Y, Z). Για την περίπτωση της Hatt ή της ΤΜ3, πριν από τον υπολογισμό των (X, Y, Z) το λ πρέπει να αναχθεί ως προς Greenwich.

Β φάση:

Υπολογισμός παραμέτρων μετασχηματισμού.

- Εφαρμογή του μετασχηματισμού ομοιότητας στις τρεις διαστάσεις, από όπου υπολογίζονται οι 7 παράμετροι του μετασχηματισμού με βάση τα κοινά σημεία. Το σύστημα των (X_G, Y_G, Z_G) μετασχηματίζεται στο σύστημα των (X, Y, Z). Γίνεται αξιολόγηση της ποιότητας των παρατηρήσεων και της καταλληλότητας του μετασχηματισμού (συνήθως αρκεί ένας εποπτικός έλεγχος αλλιώς εφαρμόζουμε στατιστικούς ελέγχους).

Γ φάση:

Μετασχηματισμός μη κοινών σημείων.

- Με βάση τις παραμέτρους του μετασχηματισμού, που υπολογίσθηκαν προηγουμένως, μετασχηματίζουμε τις συντεταγμένες (X_G, Y_G, Z_G) των μη κοινών σημείων σε συντεταγμένες (X, Y, Z) στο ΕΓΣΑ87 ή στο παλαιό ελληνικό datum. Στη συνέχεια, οι συντεταγμένες (X, Y, Z) μετατρέπονται σε (λ, φ, h) και τα (λ, φ) με βάση τις εξισώσεις απεικόνισης σε προβολικές (E, N) της ΤΜ87 ή της Hatt, ΤΜ3.

3 Εφαρμογή αλγορίθμων

Οι παραπάνω αλγόριθμοι εφαρμόσθηκαν σε δίκτυο GPS με πραγματικά δεδομένα, που αποτελείται από 5 σημεία και βρίσκεται βορειοανατολικά της πόλης της Θεσσαλονίκης στην περιοχή των λιμνών Κορώνειας και Βόλβης (Σχ. 1). Το δίκτυο καταλαμβάνει μία έκταση περίπου 50 km x 20 km. Οι μετρηθείσες βάσεις κυμαίνονται από 5 έως 35 km ενώ τα υψόμετρα των σημείων από 50 έως 400 m. Το συγκεκριμένο δίκτυο μπορεί να θεωρηθεί ως αντιπροσωπευτικό για τις συνήθεις εφαρμογές στην πράξη.

Οι συντεταγμένες GPS των κορυφών του δικτύου δίνονται στον Πίνακα 1 και πρόκειται να μετασχηματισθούν σε προβολικές συντεταγμένες (E, N) της ΤΜ87 στο ΕΓΣΑ87. Επειδή οι προβολικές συντεταγμένες (E, N) είναι επίσης γνωστές (Πίνακας 2), τα σημεία του δικτύου είναι όλα κοινά και με βάση αυτά θα προσδιορισθούν οι παράμετροι του μετασχηματισμού.

Αρχικά θα εφαρμοστεί ο διδιάστατος μετασχηματισμός ομοιότητας μέσω του αλγορίθμου του κεφ. 2.1. Στη συνέχεια θα εφαρμοστεί ο τρισδιάστατος μετασχηματισμός ομοιότητας (κεφ. 2.2) για δύο περιπτώσεις δεδομένων όπου η ακρίβεια στα υψόμετρα είναι διαφορετική για λόγους σύγκρισης των αποτελεσμάτων.

Στον διδιάστατο μετασχηματισμό ομοιότητας και σύμφωνα με τον πρώτο αλγόριθμο του κεφαλαίου 2.1, οι μετασχηματισμένες συντεταγμένες των κοινών σημείων και οι διαφορές τους από τις ήδη γνωστές δίνονται στον Πίνακα 3. Παρατηρούμε ότι η βέλτιστη προσαρμογή είναι της τάξης των ± 4 cm, αρκετά καλή αν λάβουμε υπόψη την έκταση

της περιοχής και την ακρίβεια του κρατικού δικτύου στο ΕΓΣΑ87. Έτσι, ο μετασχηματισμός ομοιότητας αποδεικνύεται κατάλληλος στην περίπτωση που εξετάζεται.

Κατά τον τρισδιάστατο μετασχηματισμό ομοιότητας και σύμφωνα με το κεφάλαιο 2.2, ο αλγόριθμος εφαρμόσθηκε για δύο περιπτώσεις:

Περίπτωση 1: Στην πρώτη περίπτωση οι συντεταγμένες GPS μετασχηματίζονται σε τοπικές γεωδαιτικές που αντιστοιχούν στα δεδομένα του Πίνακα 4 όπου η ακρίβεια των γεωμετρικών υψομέτρων είναι της τάξης των ± 2 m, περίπτωση ρεαλιστική στην πράξη αν λάβουμε υπόψη ότι τα υψόμετρα του γεωειδούς λαμβάνονται από κάποιον χάρτη και τα ορθομετρικά υψόμετρα έχουν προκύψει από τριγωνομετρική χωροστάθμηση. Στον Πίνακα 5 δίνονται οι μετασχηματισμένες τοπικές γεωδαιτικές συντεταγμένες ενώ στον Πίνακα 6 φαίνονται οι διαφορές τους από τις γνωστές στο ΕΓΣΑ 87. Οι διαφορές στον Πίνακα 6 είναι αρκετά μεγάλες, ιδίως οι ΔΖ, μέχρι –140 cm. Για καλλίτερη αντίληψη, αν τα αποτελέσματα μετασχηματισθούν στις δύο και στη μία διάσταση (Πίν. 7), παρατηρούμε ότι οι διαφορές (ΔΕ, ΔΝ) στην οριζόντια θέση είναι σχεδόν ίδιες με εκείνες που προέκυψαν από τον διδιάστατο μετασχηματισμό (Πίν. 3). Το πρόβλημα βέβαια υπάρχει στα υψόμετρα όπου οι διαφορές Δh φτάνουν τα 140 cm. Κατά συνέπεια ενώ η οριζόντια θέση επηρεάζεται ελάχιστα από την αβεβαιότητα των υψομέτρων, η κατακόρυφη θέση, σε αντίθεση, επηρεάζεται σημαντικά. Αυτό δεν θα συνέβαινε εάν τα γεωμετρικά υψόμετρα που χρησιμοποιήθηκαν χαρακτηρίζονταν από μικρή αβεβαιότητα όπως συμβαίνει συνήθως με τις οριζόντιες συντεταγμένες. Χρειάζεται, λοιπόν, προσοχή στην εφαρμογή του τρισδιάστατου μετασχηματισμού.

Αν αγνοήσουμε τελείως τα υψόμετρα του γεωειδούς, δηλαδή, χρησιμοποιήσουμε τα ορθομετρικά υψόμετρα στη θέση των γεωμετρικών, τότε για μικρές σχετικά εκτάσεις, της τάξης των μερικών χιλιομέτρων, όπου το γεωειδές κατά κανόνα είναι ομαλό, ο τρισδιάστατος μετασχηματισμός οδηγεί σε μετασχηματισμένα γεωμετρικά υψόμετρα που μπορούν να θεωρηθούν ως ορθομετρικά για κάποιες εφαρμογές σχετικά μειωμένης ακρίβειας. Για τη συγκεκριμένη περιοχή που εξετάζουμε (50 km x 20 km), η αγνόηση του γεωειδούς οδήγησε σε ορθομετρικά υψόμετρα με αβεβαιότητα μέχρι 20 cm.

Περίπτωση 2: Εδώ οι συντεταγμένες GPS μετασχηματίζονται σε τοπικές γεωδαιτικές που αντιστοιχούν στα δεδομένα του Πίνακα 8, όπου η ακρίβεια των γεωμετρικών υψομέτρων είναι της τάξης των ± 20 m, περίπτωση που αν και δεν είναι ρεαλιστική δίνεται για να φανεί η επίδραση των χονδροειδών λαθών των γεωμετρικών υψομέτρων στις μετασχηματισμένες προβολικές συντεταγμένες. Στον Πίνακα 9 δίνονται οι μετασχηματισμένες τοπικές γεωδαιτικές συντεταγμένες ενώ στον Πίνακα 10 φαίνονται οι διαφορές τους από τις γνωστές στο ΕΓΣΑ 87. Οι διαφορές στον Πίνακα 10 είναι σημαντικά μεγάλες, όπως αναμένεται, μέχρι 15 m. Αν τα αποτελέσματα μετασχηματισθούν στις δύο διαστάσεις (Πίν. 11), παρατηρούμε ότι οι διαφορές (ΔΕ, ΔΝ) στην οριζόντια θέση είναι επίσης μεγάλες, μέχρι 1.7 m, αν και σημαντικά μικρότερες από τις διαφορές (ΔΧ, ΔΥ, ΔΖ) του Πϊνακα 10. Επίσης, είναι αναμενόμενο ότι στα μετασχηματισθέντα υψόμετρα οι διαφορές θα είναι σημαντικά μεγάλες και φτάνουν τα περίπου 18 m (Πίν. 11).

Οι διαφορές μεταξύ των δύο προηγουμένων περιπτώσεων του τρισδιάστατου μετασχηματισμού ομοιότητας παρατηρούνται έντονα και στις αντίστοιχες επτά παραμέτρους μετασχηματισμού που δίνονται παρακάτω.

Παράμετροι μετασχηματισμού της 1ης Περίπτωσης:

Μετάθεση κατά Χ: –87.888 m
Μετάθεση κατά Υ: –342.892 m
Μετάθεση κατά Ζ: 186.599 m

Στροφή γύρω από τον άξονα Χ: 0°. 00099119
Στροφή γύρω από τον άξονα Υ: –0°. 00158332
Στροφή γύρω από τον άξονα Ζ: –0°. 00032024
Συντελεστής διαφοράς κλίμακας: 0.434 ppm

Παράμετροι μετασχηματισμού της 1ης Περίπτωσης:

Μετάθεση κατά Χ: –981.052 m
Μετάθεση κατά Υ: –5153.103 m
Μετάθεση κατά Ζ: 3385.856 m

Στροφή γύρω από τον άξονα Χ: 0°. 02228865
Στροφή γύρω από τον άξονα Υ: –0°. 01467221
Στροφή γύρω από τον άξονα Ζ: –0°. 01426338
Συντελεστής διαφοράς κλίμακας: –0.187 ppm

Σχήμα 1. Το δίκτυο GPS στην περιοχή των λιμνών Κορώνειας και Βόλβης.

No.	X (m)	Y (m)	Z (m)
31	4461992.0692	1892242.7173	4132887.8368
32	4454408.6561	1923858.4091	4126367.4151
52	4437799.9820	1939631.8420	4136673.5780
07	4445431.3475	1919746.6495	4137591.0781
05	4448435.6252	1919369.6009	4134483.1496

Πίνακας 1. Γεωκεντρικές συντεταγμένες GPS στο WGS84.

No.	E (m)	N (m)	H (m)
31	413678.371	4499605.223	365.461
32	445633.842	4490797.854	272.725
52	446790.093	4504316.232	193.697
07	445527.388	4505739.364	90.786
05	443961.043	4501694.912	43.330

Πίνακας 2. Προβολικές συντεταγμένες ΤΜ87 στο ΕΓΣΑ87 και ορθομετρικά υψόμετρα.

No.	E (m)	N (m)	ΔE (cm)	ΔN (cm)
31	413678.398	4499605.250	-2.7	-2.7
32	445633.771	4490797.799	7.1	5.5
52	446790.108	4504316.304	-1.5	-7.2
07	445527.374	4505739.338	1.4	2.6
05	443961.086	4501694.894	-4.3	1.8

Πίνακας 3. Μετασχηματισμένες συντεταγμένες του διδιάστατου μετασχηματισμού ομοιότητας και διαφορές από τις γνωστές συντεταγμένες του Πίνακα 2.

No.	E (m)	N (m)	h (m)
31	413678.371	4499605.223	367.461
32	445633.842	4490797.854	271.725
52	446790.093	4504316.232	193.697
07	445527.388	4505739.364	89.486
05	443961.043	4501694.912	42.800

Πίνακας 4. Περίπτωση 1: Δεδομένα για τον τρισδιάστατο μετασχηματισμό ομοιότητας στο ΕΓΣΑ 87 με γεωμετρικά υψόμετρα ακρίβειας ± 2 m.

No.	X (m)	Y (m)	Z (m)
31	4462193.9842	1892168.5228	4132643.7874
32	4454609.5764	1923783.7973	4126121.4258
52	4438001.4414	1939557.4744	4136428.1101
07	4445633.1893	1919672.4359	4137345.9803
05	4448637.2356	1919295.2844	4134237.6380

Πίνακας 5. Περίπτωση 1: Μετασχηματισμένες τοπικές γεωδαιτικές συντεταγμένες GPS στο σύστημα ΕΓΣΑ87.

No.	ΔX (cm)	ΔY (cm)	Δ Z (cm)
31	-2.3	-2.4	81.4
32	6.9	7.1	-39.0
52	-6.9	-2.0	120.6
07	1.8	1.4	-141.0
05	0.5	-4.1	-22.0
RMS	5.1	4.5	103.8

Πίνακας 6: Περίπτωση 1: Διαφορές μετασχηματισμένων συντεταγμένων από τις γνωστές που αντιστοιχούν στα δεδομένα του Πίνακα 4.

No.	E (m)	N (m)	ΔE (cm)	ΔN (cm)	Δh (cm)
31	413678.385	4499605.242	-1.4	-1.9	81.9
32	445633.759	4490797.781	8.3	7.3	-38.6
52	446790.103	4504316.296	-1.0	-6.4	121.0
07	445527.363	4505739.341	2.5	2.3	-140.6
05	443961.073	4501694.901	-0.3	1.1	-21.6

Πίνακας 7: Περίπτωση 1: Μετασχηματισμένες προβολικές συντεταγμένες και διαφορές από τις γνωστές του Πίνακα. 4.

No.	E (m)	N (m)	h (m)
31	413678.371	4499605.223	380.461
32	445633.842	4490797.854	265.725
52	446790.093	4504316.232	173.697
07	445527.388	4505739.364	95.786
05	443961.043	4501694.912	60.330

Πίνακας 8. Περίπτωση 2: : Δεδομένα για τον τρισδιάστατο μετασχηματισμό ομοιότητας στο ΕΓΣΑ 87 με γεωμετρικά υψόμετρα ακρίβειας ± 20 m.

No.	X (m)	Y (m)	Z (m)
31	4462207.0039	1892172.1574	4132653.4510
32	4454604.4871	1923779.8530	4126115.053
52	4437993.2999	1939552.1582	4136418.8805
07	4445635.0333	1919671.4022	4137346.2071
05	4448637.8899	1919293.6956	4134236.9859

Πίνακας 9. Περίπτωση 2: Μετασχηματισμένες τοπικές γεωδαιτικές συντεταγμένες GPS στο σύστημα ΕΓΣΑ87.

No.	Δ X (cm)	Δ Y (cm)	Δ Z (cm)
31	-1.6	-19.6	-644.1
32	13.9	6.4	-55.8
52	-2.7	-1.0	-855.5
07	-2.1	8.0	71.9
05	-7.5	6.3	1483.7
RMS	8.1	11.5	916.0

Πίνακας 10: Περίπτωση 2: Διαφορές μετασχηματισμένων συντεταγμένων από τις γνωστές που αντιστοιχούν στα δεδομένα του Πίνακα 8.

No.	E (m)	N (m)	ΔE (cm)	ΔN (cm)	Δh (cm)
31	413676.917	4499604.542	145.4	681	-338.8
32	445632.151	4490797.008	169.1	846	249.6
52	446788.489	4504315.557	160.4	675	-550.2
07	445525.678	4505738.689	171.0	675	377.3
05	443959.351	4501694.287	169.2	625	1789.1

Πίνακας 11: Περίπτωση 2: Μετασχηματισμένες προβολικές συντεταγμένες και διαφορές από τις γνωστές του Πίνακα.8.

4 Συμπεράσματα

Ο τρισδιάστατος μετασχηματισμός ομοιότητας για τον μετασχηματισμό συντεταγμένων GPS σε κάποιο τοπικό γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς, πρέπει να γίνεται με μεγάλη προσοχή εξαιτίας της σημαντικά μεγαλύτερης αβεβαιότητας στα γεωμετρικά υψόμετρα σε σχέση με την αβεβαιότητα των οριζόντιων συντεταγμένων.

Δεν μπορούμε εκ των προτέρων να θέσουμε κάποια συγκεκριμένα "όρια" για το πότε μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο τρισδιάστατος μετασχηματισμός ομοιότητας. Εξαρτάται από την έκταση της περιοχής, τη μορφή του γεωειδούς, την εμπιστοσύνη μας τόσο στα ορθομετρικά υψόμετρα όσο και στα υψόμετρα του γεωειδούς καθώς και από την ακρίβεια που επιζητούμε. Τα κοινά σημεία θα πρέπει να περικλείουν την περιοχή και να είναι αρκούντως περισσότερα από τα ελάχιστα.

Η ασφαλέστερη διαδικασία μετασχηματισμού για τις οριζόντιες συντεταγμένες είναι ένας διδιάστατος μετασχηματισμός όπου αγνοούνται τα υψόμετρα, συνήθως ο μετασχηματισμός ομοιότητας με την αλγοριθμική διαδικασία που παρουσιάζεται στην εργασία αυτή.

Για την κατακόρυφη θέση (ορθομετρικά υψόμετρα), εφαρμόζεται διαφορετική μεθοδολογία, κυρίως μία βέλτιστη προσαρμογή επιφάνειας (επιπέδου για μικρές σχετικά εκτάσεις) σε συνδυασμό με κάποια κατάλληλη μέθοδο παρεμβολής (π.χ. σημειακή παρεμβολή). Στην παρούσα εργασία δεν ασχοληθήκαμε με παρόμοιες μεθόδους για την κατακόρυφη θέση και ο αναγνώστης μπορεί να ανατρέξει στη σχετική βιβλιογραφία.

Αναφορές

Ανδριτσάνος Β.Δ., Β. Καγιαδάκης, Γ. Κωστάκης, Ε. Μυλωνά – Κοτρογιάννη, Χ. Πικριδάς, Δ. Ρωσσικόπουλος, Η.Ν. Τζιαβός και Α.Φωτίου, 1999. *"Προσδιορισμός τοπικού μοντέλου γεωειδούς συνδυάζοντας μετρήσεις GPS, βαρύτητας και υψομετρίας. Εφαρμογή*

στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης", Τεχνικά Χρονικά, Επιστημονική έκδοση ΤΕΕ, τεύχος 3, σελ. 61-74.

Andritsanos, V.D., A. Fotiou, E. Paschalaki, C. Pikridas, D. Rossikopoulos and I. N. Tziavos, 2000. "Local Geoid Computation and Evaluation". Physics and Chemistry of the Earth,Vol. 25, No 1, pp.63-69.

Δερμάνης, Α. και Α. Φωτίου, 1992. *Μέθοδοι και εφαρμογές συνόρθωσης παρατηρήσεων*. Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη.

Hofmann – Wellenhof, B., H. Lichtenegger and J. Collins, 1997. *Global Positioning System*. Theory and Practice. Fourth revised edition. Springer.

Ρωσσικόπουλος, Δ. 1999. *Τοπογραφικά Δίκτυα και Υπολογισμοί*, 2η έκδοση. Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη.

Φωτίου Α. και Ε. Λιβιεράτος, 2000. *Γεωμετρική Γεωδαισία και Δίκτυα*. Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη.

Φωτίου Α. και Χ. Πικριδάς, 2002. *Το Δορυφορικό σύστημα GPS*, Πανεπιστημιακές Σημειώσεις ΤΑΤΜ-ΑΠΘ, Θεσσαλονίκη.

A. Fotiou and C. Pikridas
Transformation of a GPS network to the greek geodetic reference systems
Department of Geodesy and Surveying
Faculty of Rural and Surveying Engineering, Aristotle University of Thessaloniki
afotiou@topo.auth.gr, cpik@topo.auth.gr