ΜΕΤΡΟΛΟΓΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΔΕΚΤΩΝ GNSS ΚΑΤΑ ISO ΓΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΟΥ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟΥ ΧΡΟΝΟΥ

Π. Πουλίδης, Μ. Τσακίρη, Α. Σιούλης
Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχ/κων, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
peterpoulidis@yahoo.com, mtsakiri@central.ntua.gr, asioulis@central.ntua.gr

Περίληψη

Η ανάπτυξη των GNSS (Global Navigation Satellite Systems) τεχνικών που δίνουν αποτελέσματα σε πραγματικό χρόνο, όπως ο κινηματικός εντοπισμός (real-time kinematic, RTK) έχουν επιταχύνει και διευκολύνει τις εργασίες εντοπισμού θέσης σε πλήθος επιστημονικών εφαρμογών. Από το 2007, ο Οργανισμός ISO έχει δημοσιεύσει το πρότυπο ISO 17123-8, το οποίο ανήκει στην σειρά προτύπων 17123 «Οπτική και Οπτικά Όργανα» για τον έλεγχο των δεκτών GNSS σε μετρήσεις RTK. Ωστόσο, το πρότυπο ISO 17123-8 αναφέρεται μόνο σε γεωδαιτικούς δέκτες GNSS. Στο πλαίσιο αυτό πραγματοποιούνται μετρήσεις RTK με βάση το πρότυπο αυτό, ώστε να μελετηθεί και να αξιολογηθεί, εν πρώτοις, το ίδιο το πρότυπο και εν συνεχεία να διαπιστωθεί η συμμόρφωση των δεκτών που χρησιμοποιούνται με αυτό. Για τους παραπάνω στόχους χρησιμοποιούνται τόσο γεωδαιτικοί δέκτες (των εταιριών Leica και Trimble) όσο και μη γεωδαιτικοί δέκτες. Επιπλέον το πρότυπο επεκτείνεται με μετρήσεις χρησιμοποιώντας δίκτυα μόνιμων σταθμών αναφοράς.

Λέξεις-Κλειδιά: δέκτης GNSS, μετρολογικός έλεγχος, πρότυπο ISO, προσδιορισμός θέσης σε πραγματικό χρόνο.

Abstract

Since 2007, the International Standards Organisation (ISO) has developed specifications that assess the GNSS geodetic receivers in real-time kinematic (RTK) positioning. The ISO 17123 part 8 GNSS RTK standard refers only to geodetic type receivers. The purpose of this project is to examine the specific standard for two different types of geodetic GNSS receivers and evaluate that they conform to the requirements of ISO. Also, the standard is evaluated for non-geodetic type receivers. Specifically, it is used to asses the navigation type u-blox NEO-7P XXL bundle package with the low-cost antenna Tallysman TW2410. Finally, the assessment using the ISO standard was extended with measurements from a permanent RTK network.

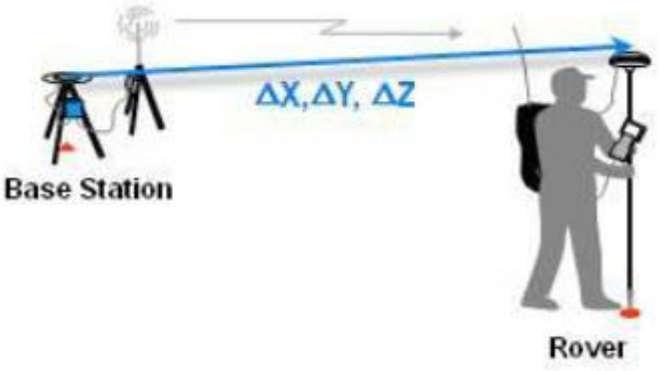
Keywords: δέκτης GNSS, Real Time Kinematic (RTK), RTK ISO standard

1. Εισαγωγή

Τα Συστήματα Δορυφορικού Εντοπισμού (GNSS, Global Navigation Satellite Systems), έχουν αναπτυχθεί πολύ την τελευταία δεκαετία με ολοένα και περισσότερα κράτη να αναπτύσσουν δικά τους συστήματα δορυφορικού εντοπισμού. Τη στιγμή αυτή (Δεκέμβριος 2016) βρίσκονται σε πλήρη λειτουργία τα συστήματα GPS και Glonass, ενώ μέσα στα επόμενα χρόνια αναμένεται η πλήρης ολοκλήρωση του Ευρωπαϊκού Galileo και η πλήρης λειτουργία, με παγκόσμια κάλυψη του BeiDou - Compass της Κίνας.

Κατά τη διαδικασία του δορυφορικού εντοπισμού οι δύο βασικοί τρόποι εντοπισμού θέσης αφορούν στον στατικό εντοπισμό και στον κινηματικό εντοπισμό. Ο πρώτος δίνει την μεγαλύτερη ακρίβεια και γίνεται με εκ των υστέρων επεξεργασία και ο δεύτερος αποτελεί την ταχύτερη μέθοδο και μπορεί να γίνει είτε σε πραγματικό χρόνο είτε εκ των υστέρων επεξεργασία (Kaplan & Hegarty 2006, Leick 2004). Η σύγχρονη και πιο διαδεδομένη εφαρμογή του κινηματικού εντοπισμού είναι σε πραγματικό χρόνο (Real Time Kinematic, RTK) και αποτελεί την ταχύτερη και ακριβέστερη εφαρμογή των συστημάτων δορυφορικού εντοπισμού, που παράγει αποτελέσματα με αβεβαιότητα της τάξης των λίγων cm (Armstrong, 2013).

Η εφαρμογή της τεχνικής RTK απαιτεί την υλοποίηση μίας ραδιοζεύξης μεταξύ δύο δεκτών (του σταθερού ή δέκτη αναφοράς και του κινούμενου). Η ραδιοζεύξη αυτή μπορεί να είναι είτε από ένα ραδιομόντεμ (συνήθως UHF- Ultra High Frequency) είτε μέσω συστημάτων GSM (κινητής τηλεφωνίας), είτε έμμεσα μέσω Διαδικτύου. Μέσω αυτής, αποστέλλονται διορθώσεις από τον σταθερό δέκτη στον κινητό, ο οποίος τις χρησιμοποιεί για την παραγωγή αποτελεσμάτων την ίδια στιγμή (Σχ. 1). Η μετάδοση των διορθώσεων γίνεται με τη χρήση διαφόρων τύπων μηνύματος RTCM (Radio Technical Commission for Maritime Services).



Σχήμα 1. Απεικόνιση της μεθόδου RTK

Τα τελευταία χρόνια, λόγω της ταχύτατης διάδοσης και χρήσης του RTK, έγινε αντιληπτή η χρησιμότητα των δικτύων μόνιμων σταθμών αναφοράς για διευκόλυνση της τεχνικής αυτής. Συνεπώς, αναπτύχθηκε μία νέα προσέγγιση του κλασσικού Single Base RTK, που ονομάστηκε Δικτυακό RTK (Network RTK ή RTN). Με αυτό τον τρόπο, είναι δυνατή η παράκαμψη του περιορισμού της απόστασης μεταξύ σταθμού αναφοράς και κινητού δέκτη, διότι μέσω της ύπαρξης δικτύων μόνιμων σταθμών, ο χρήστης είναι σε θέση να

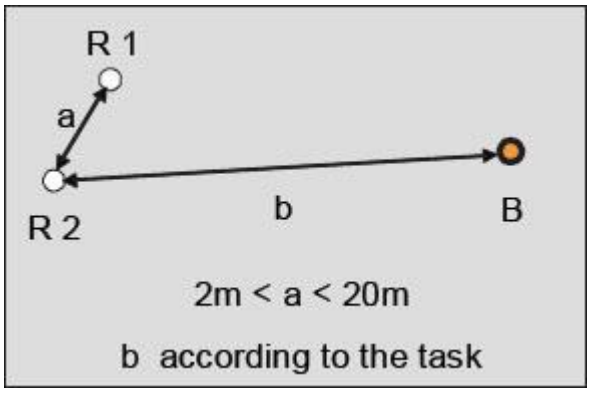
χρησιμοποιεί αυτούς, αντί για το δικό του δέκτη αναφοράς, που παρέχουν βελτιωμένη ακεραιότητα, συνοχή και αποτελέσματα της ίδιας τάξης ακρίβειας με το RTK, για βάσεις της τάξης των 50-70 km. Η λογική του δικτύου μόνιμων σταθμών, είναι ότι σε μία γεωγραφική περιοχή εγκαθίστανται δέκτες GNSS και πραγματοποιούν παρατηρήσεις συνεχώς, με τέτοιο τρόπο ώστε να υπάρχει πλήρης κάλυψη της περιοχής. Οι παρατηρήσεις αυτές, από όλους τους δέκτες, αποστέλλονται σε πραγματικό χρόνο σε ένα κεντρικό σταθμό ελέγχου, ο οποίος τις συγκεντρώνει, τις επεξεργάζεται και παράγει ένα ενιαίο αποτέλεσμα επίλυσης του δικτύου αυτού. Έπειτα, ο κάθε χρήστης είναι σε θέση, όπως και στο RTK, να λάβει διορθώσεις και σφάλματα παρατήρησης, υπό την προϋπόθεση ότι βρίσκεται εντός των ορίων του δικτύου. Στην Ελλάδα, τα εθνικά δίκτυα μόνιμων σταθμών αναφοράς είναι το Hepos (Hellenic Positioning System, www.hepos.gr) και του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών (www.noa.gr) ενώ υπάρχουν και αρκετά δίκτυα τα όποια έχουν αναπτυχθεί από ιδιωτικές εταιρείες.

Λόγω της εκτεταμένης χρήσης της μεθόδου RTK, ο διεθνής οργανισμός ISO (International Organization for Standardization) ενσωμάτωσε στο πρότυπο 17123, που ασχολείται με θέματα τοπογραφίας, γεωδαισίας και μετρολογίας, τις διαδικασίες ελέγχου των μετρήσεων RTK - GNSS (πρότυπο 17123.8). Το πρότυπο 17123 έχει συνταχθεί από την Τεχνική Επιτροπή TC 172, που τιτλοφορείται «Οπτική και Φωτονική» και από την Υποεπιτροπή SC 6, που ονομάζεται «Γεωδαιτικά και Τοπογραφικά Όργανα» (www.iso.org). Το πρότυπο 17123.8, όπως και τα υπόλοιπα της ίδιας σειράς, παρουσιάζει μεθόδους και διαδικασίες υπαίθρου που αποσκοπούν στον προσδιορισμό και την αξιολόγηση της ακρίβειας των μετρήσεων των δεκτών GNSS σε κινηματικό εντοπισμό πραγματικού χρόνου. Τα αποτελέσματα της διαδικασίας αποσκοπούν στο να αποφανθεί ο χρήστης αν ο συγκεκριμένος δέκτης είναι κατάλληλος, από άποψη ακρίβειας, για μια εργασία προσδιορισμού θέσης σε πραγματικό χρόνο. Επισημαίνεται ότι το συγκεκριμένο πρότυπο αναφέρεται μόνο σε γεωδαιτικούς δέκτες και σε χρήση της κλασσικής μεθόδου RTK (δηλαδή ένας σταθερός δέκτης αναφοράς και ένας κινούμενος δέκτης).

Στο πλαίσιο αυτό η εργασία αυτή αποσκοπεί στην εφαρμογή και στην αξιολόγηση του προτύπου ISO 17123.8 τόσο για γεωδαιτικούς όσο και μη γεωδαιτικούς δέκτες GNSS και από την άλλη, αποσκοπεί στην εφαρμογή του για δικτυακό RTK (real-time network, RTN). Παρ' όλο που το ίδιο το πρότυπο αναφέρει τη δυνατότητα εφαρμογής του σε τέτοιου είδους μετρήσεις δεν υπάρχουν αναφορές στην διεθνή βιβλιογραφία σε εφαρμογές του προτύπου σε RTN μετρήσεις. Η εργασία αποτελείται από 4 ενότητες. Στην δεύτερη δίνεται μια σύντομη περιγραφή του προτύπου 17123.8 και στην τρίτη περιγράφονται οι πειραματικές διαδικασίες ελέγχου των γεωδαιτικών και μη γεωδαιτικών δεκτών. Τέλος, τα συμπεράσματα της εργασίας δίνονται στην ενότητα 4.

2. Διαδικασία πεδίου βάσει του προτύπου 17123.8

Στο πρότυπο που μελετάται, ακολουθούνται δύο διαφορετικές διαδικασίες μετρήσεων, η απλοποιημένη διαδικασία (Simplified Test Procedure) και η πλήρης (Full Test Procedure). Και οι δύο, πραγματοποιούνται σε κοινό πεδίο μετρήσεων, που αποτελείται από ένα δίκτυο τριών σημείων.



Σχήμα 2. Διαδικασία μετρήσεων κατά το πρότυπο ISO 17123.8

Το σημείο Β του δικτύου (Σχ. 2) είναι αυτό που κατά τη διάρκεια των μετρήσεων καταλαμβάνει ο σταθερός δέκτης (base) και η απόσταση του από τα άλλα δύο σημεία δεν είναι συγκεκριμένη. Τα δύο σημεία, R1 και R2 (Σχ. 2) είναι αυτά που καταλαμβάνει ο κινούμενος δέκτης (rover) διαδοχικά. Η μεταξύ τους απόσταση, σύμφωνα με το πρότυπο, κυμαίνεται από 2-20m. Οι σχετικές θέσεις των σημείων, οριζοντιογραφικά και υψομετρικά, πρέπει να είναι προσδιορισμένες με ακρίβεια καλύτερη από 3mm, με μεθόδους διαφορετικές από εκείνη του RTK. Αυτές οι ποσότητες αποτελούν τις ονομαστικές τιμές, με τις οποίες θα συγκρίνονται οι μετρήσεις του RTK. Οι μετρήσεις των δεκτών GNSS πρέπει να αναφέρονται σε ένα παγκόσμιο ελλειψοειδές αναφοράς (π.χ. WGS84, ITRF) και ο προσδιορισμός θέσης να γίνεται είτε σε μορφή καρτεσιανών συντεταγμένων (X, Y, Z) είτε σε προβολικές συντεταγμένες (x,y) και γεωμετρικό υψόμετρο (h).

Οι μετρήσεις γίνονται με διαδοχικές καταλήψεις των σημείων rover. Μία μέτρηση των δύο αυτών σημείων, αποτελεί ένα σετ μετρήσεων. Τέλος, πέντε σετ μετρήσεων αποτελούν μία σειρά μετρήσεων. Ο χρόνος κατάληψης κάθε σημείου δεν ορίζεται από το πρότυπο ISO ωστόσο τα διαδοχικά σετ πρέπει να διαφέρουν μεταξύ τους, περίπου πέντε 5min. Συνολικά, μία σειρά διαρκεί περίπου 25min. Αυτός ο χρόνος είναι μεγαλύτερος από τα 5min, που σύμφωνα με έρευνες, είναι η διάρκεια του κύκλου μεταβολής του φαινόμενου πολλαπλών διαδρομών (Leick, 2004). Επομένως, η διαδικασία μετρήσεων καλύπτει επαρκώς αυτό τον παράγοντα. Τέλος, οι σειρές πρέπει να διαφέρουν μεταξύ τους τουλάχιστον 90min. Αυτό, σε συνδυασμό με το μεγάλο αριθμό παρατηρήσεων, επιτρέπει την ανάδειξη επιδράσεων που οφείλονται στην αλλαγή θέσης των δορυφόρων στον ουράνιο θόλο και στις διαφοροποιήσεις της ιονόσφαιρας και τροπόσφαιρας (Rizos, 2003).

Το απλοποιημένο τεστ, αποτελείται σε μεμονωμένες σειρές μετρήσεων.. Σκοπός του τεστ είναι να γίνει ανίχνευση χονδροειδών σφαλμάτων σε κάθε σειρά και παρέχει εκτίμηση για το κατά πόσο η ακρίβεια του συγκεκριμένου δέκτη είναι εντός καθορισμένων ορίων, τα οποία είναι η τυπική απόκλιση του οργάνου (π.χ., όπως δίνεται από τον κατασκευαστή ή όπως προκύπτει από κριτήρια ακριβείας μιας εργασίας). Η πλήρης διαδικασία, χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της ακρίβειας μέτρησης που μπορεί να επιτύχει ο δέκτης που χρησιμοποιείται. Στοχεύει στον υπολογισμό δύο μεγεθών, που ονομάζονται

πειραματικές τυπικές αποκλίσεις οριζοντιογραφίας και υψομετρίας, στις οποίες εφαρμόζονται μια σειρά από στατιστικά τεστ (www.iso.org).

3. Πειραματικοί έλεγχοι πεδίου

Οι μετρήσεις που απαιτούνταν πραγματοποιήθηκαν εξ' ολοκλήρου στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου (δώμα κτιρίου σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, ΣΑΤΜ). Το συγκεκριμένο πεδίο έχει ανοιχτό ορίζοντα χωρίς σημαντικά εμπόδια, μεγάλου ύψους. Επίσης, στην επιλογή του πεδίου μετρήσεων, έπαιξε η ύπαρξη μόνιμων κορυφών γνωστών συντεταγμένων οι οποίες είναι προσδιορισμένες με μεγάλη ακρίβεια. Οι κορυφές αυτές είναι η Β (βάθρο), και οι 4 και 9 (μόνιμα πλακίδια στο δώμα), όπως φαίνονται στην Εικ. 1. Ο εξοπλισμός της ΣΑΤΜ που εξετάστηκε αφορά τα ζεύγη των γεωδαιτικών δεκτών Leica 1200+ και Trimble R8 GNSS/R6/5800 καθώς και τους μη γεωδαιτικούς δέκτες u-blox NEO-7P XXL (με κεραία Tallysman TW2410).

Εικόνα 1. Θέση των κορυφών του πειραματικού δικτύου

3.1. Έλεγχος γεωδαιτικών δεκτών

3.1.1 Χρήση κλασσικού RTK

Κατά την πειραματική διαδικασία συλλογής των μετρήσεων πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις διαφορετικής χρονικής διάρκειας για κάθε σημείο, με σκοπό τη σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ τους, για να διαπιστωθεί η σημασία του χρόνου παρατήρησης στην ακρίβεια που επιτυγχάνεται. Έτσι, έγιναν μετρήσεις για το ίδιο σημείο διάρκειας 60sec και μετά για 30sec (Εικ. 2). Άρα το κάθε σετ μετρήσεων αποτελείτο από 4 μετρήσεις, δύο για κάθε σημείο. Ο χρόνος μέτρησης του κάθε σετ στο συγκεκριμένο πείραμα, διαρκούσε περίπου 35min, ενώ το σύνολο των τριών σετ είχε διάρκεια περίπου 3h και 40min.

Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων, παρατηρούνταν δορυφόροι τόσο του συστήματος GPS όσο και του συστήματος Glonass, και ο αριθμός τους κυμαινόταν μεταξύ 15 και 17.

Οι ονομαστικές τιμές των συντεταγμένων των κορυφών 4 και 9 προέκυψαν από συνόρθωση με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων μετρήσεων ακριβείας με στατικό εντοπισμό (με

σταθερή κορυφή Β) και από γεωμετρική χωροστάθμηση για τον προσδιορισμό των ορθομετρικών υψομέτρων. Συγκεκριμένα, βάσει των συντεταγμένων των δύο κορυφών 4 και 9 (στην προβολή του ΕΓΣΑ87) με τις αντίστοιχες αβεβαιότητές τους που δίνονται στον Πίνακα 1, προέκυψε ότι η ονομαστική απόσταση $D_{4\text{-}9}$ είναι 11.381m και η ονομαστική υψομετρική διαφορά τους $\Delta H_{4\text{-}9}$ = -0.003m.

Εικόνα 2α. Συνδεσμολογία Σταθερού Δέκτη Leica

Εικόνα 2β. Μέτρηση της βάσης μεταξύ των κορυφών 4 και 9

Πίνακας 1. Συντεταγμένες και αντίστοιχες αβεβαιότητες των κορυφών του δικτύου μετρήσεων

	x (m)	y (m)	H (m)	σ_X (m)	σ_Y (m)	σ_H (m)
Κορυφή 4	480537.129	4202804.316	207.105	0.0004	0.0004	0.0005
Κορυφή 9	480526.069	4202801.631	207.102	0.0007	0.0003	0.0005
Κορυφή Β	480548.908	4202791.749	210.754	0	0	0

Σύμφωνα με το απλοποιημένο τεστ, οι μετρήσεις του κάθε σετ υποβάλλονται σε ένα υποτυπώδες στατιστικό τεστ, το οποίο πρέπει να πληρούν για να θεωρηθεί ότι δεν εμπεριέχουν χονδροειδή σφάλματα. Σε αυτό το σημείο, γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων με την οριζοντιογραφική και την υψομετρική ακρίβεια του δέκτη (s_{xy} και s_h) όπως αυτές δίνονται από τον κατασκευαστή (και για τους δύο τύπους δεκτών είναι 10 mm ± 1 ppm οριζοντιογραφικά, 20 mm ± 1 ppm υψομετρικά). Το στατιστικό αυτό τεστ είναι:

$$\begin{aligned} \left|\varepsilon_{D_{i,j}}\right| &\leq 2{,}5 \times \sqrt{2} \times s_{xy} \\ \left|\varepsilon_{h_{i,j}}\right| &\leq 2{,}5 \times \sqrt{2} \times s_h \end{aligned} \qquad (1)$$

Για τους δέκτες Leica, ισχύει ότι $\varepsilon_{Dij} \leq 3.5$cm και $\varepsilon_{h\ i,j}$ = 7cm βάσει της εξίσωσης (1). Από τις σειρές των μετρήσεων (με χρονική διάρκεια παραμονής σε κάθε σημείο 30sec) προέκυψε ότι οι διαφορές για τις αποστάσεις κυμαίνονται από -0.011m έως 0.027 m για τις υψομετρικές διαφορές από -0.005m έως 0.001m. Αντίστοιχα, για τις σειρές των μετρήσεων (με χρονική διάρκεια παραμονής σε κάθε σημείο 60sec) για τις αποστάσεις οι τιμές

βρίσκονται μεταξύ -0.005m και 0.28m ενώ για τις υψομετρικές διαφορές μεταξύ -0.005m και 0.002m. Όλες οι παραπάνω διαφορές είναι εντός των αποδεκτών ορίων των ±0.035m (οριζοντιογραφικά) και 0.07m (υψομετρικά). Η σημασία του χρόνου παρατήρησης δεν συμβάλει με καθοριστικό τρόπο στα τελικά αποτελέσματα. Οι πειραματικές τυπικές αποκλίσεις που παράγονται από τις μετρήσεις με διαφορετικό Δt διαφοροποιούνται μόνο κατά 1 mm στην οριζοντιογραφία, και στην υψομετρία από 0 έως 1 mm, που δεν μπορεί να θεωρηθεί ότι διαφοροποιεί τα τελικά αποτελέσματα, σημαντικά.

Σύμφωνα με το πλήρες τεστ απαιτούνται τρεις σειρές μετρήσεων προκειμένου να υπολογισθούν οι πειραματικές τυπικές αποκλίσεις για την οριζοντιογραφία και την υψομετρία, αντίστοιχα (Εξ. 2) και στις οποίες . εφαρμόζονται συγκεκριμένα στατιστικά τεστ για την εξαγωγή του τελικού συμπεράσματος ως προς την ακρίβεια των δεκτών.

$$s_{ISO-GNSS\,RTK_xy} = \sqrt{s_x^2 + s_y^2} \qquad (2)$$
$$s_{ISO-GNSS\,RTK_h} = s_h$$

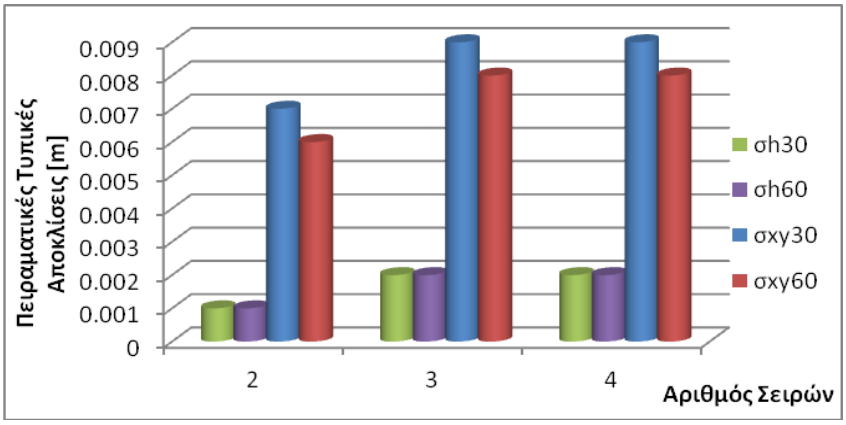
Προκειμένου να διαπιστωθεί η σημασία του πλήθους των σειρών μετρήσεων που χρησιμοποιούνται στο παραγόμενο αποτέλεσμα, έγινε ξεχωριστή επίλυση, για δύο, τρεις και τέσσερις σειρές μετρήσεων. Επίσης, για να εντοπιστούν πιθανές διαφορές στα αποτελέσματα, ανάλογα με τις σειρές που συμμετέχουν στην επίλυση, έγιναν επιλύσεις με όλους τους δυνατούς συνδυασμούς, με την προϋπόθεση ότι οι σειρές που συμμετέχουν, είναι διαδοχικές.

Στο Σχήμα 3 δίνονται οι πειραματικές τυπικές αποκλίσεις για την χρήση δύο, τριών ή τεσσάρων σειρών μετρήσεων. Παρατηρείται ότι η επίλυση με τις σειρές 1 και 2 έχει αποδώσει αποτελέσματα καλύτερης ακρίβειας απ' ότι οι υπόλοιπες επιλύσεις. Η διαφοροποίηση των αποτελεσμάτων είναι της τάξης των 2mm, για την οριζοντιογραφία και 1mm, για την υψομετρία. Η διαφορά των αποτελεσμάτων δεν είναι μεγάλη, δεν ξεπερνά καμία από τις δύο τιμές τα όρια του κατασκευαστή και η διακύμανση των αποτελεσμάτων είναι πέντε φορές μικρότερη από την ακρίβεια του δέκτη.

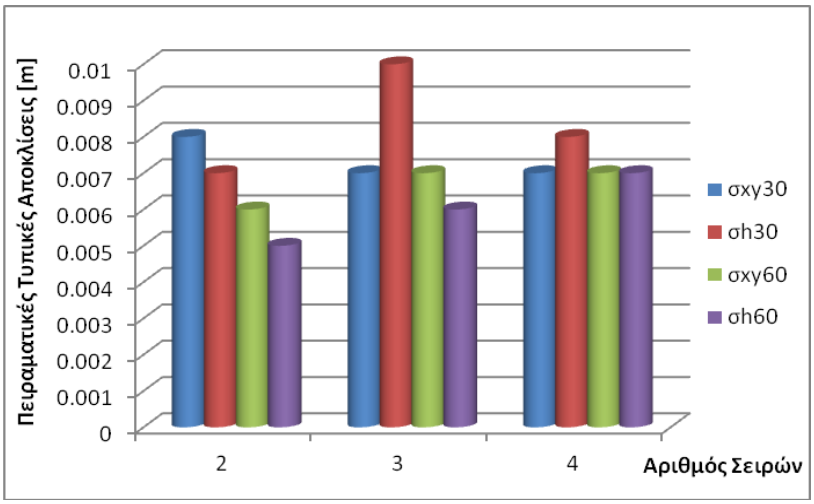
Οι μετρήσεις που προέκυψαν από τους δέκτες Trimble υποβλήθηκαν στην ίδια ακριβώς διαδικασία και όλες οι σειρές περνούν με επιτυχία το απλοποιημένο τεστ και χρησιμοποιούνται ως δεδομένα για το πλήρες τεστ. Θεωρώντας ότι για τους δέκτες Trimble ισχύει ότι $\varepsilon_{Dij} \leq 3.5$cm και $\varepsilon_{h\,i,j} = 7$cm βάσει της εξίσωσης (1), οι διαφορές των αποστάσεων είναι όλες εντός των ορίων μεταξύ των τιμών -0.024 m και -0.002 m, ενώ οι διαφορές των υψομετρικών διαφορών κυμαίνονται μεταξύ -0.013 m και 0.034 m. Επομένως θεωρείται ότι οι συγκεκριμένες μετρήσεις δεν εμπεριέχουν χονδροειδή ή συστηματικά σφάλματα.

Όπως και προηγούμενα, έγινε ξεχωριστή επίλυση για δύο, τρεις και τέσσερις σειρές μετρήσεων (Σχήμα 4). Ως προς τις πειραματικές τιμές της υψομετρίας, το εύρος τιμών των 0.006m είναι αρκετά μεγαλύτερο από της οριζοντιογραφίας, με τιμές μεταξύ 0.004m και 0.010m. Τα εύρος αυτό είναι περίπου τρεις φορές μικρότερο από την ακρίβεια του κατασκευαστή και σε κάθε περίπτωση τα αποτελέσματα είναι εντός αυτής της ακρίβειας. Η απόκλιση των αποτελεσμάτων από τη μέση τιμή, φτάνει σε κάποιες επιλύσεις μέχρι τα 3mm.

Σημειώνεται ότι οι μέγιστες τιμές αυτές εμφανίζονται σε επιλύσεις δύο σειρών. Συγκεκριμένα, οι διαφοροποιήσεις που παρατηρούνται είναι της τάξης του 1mm, με εξαίρεση τις επιλύσεις των σειρών 2,3 και 3,4, που δίνουν διαφορές 4 και 3 mm, αντίστοιχα. Αντίθετα, στην οριζοντιογραφία, οι διαφορές μεταξύ των επιλύσεων διαφορετικού χρόνου είναι πολύ μικρότερες και ανέρχονται στο 1mm για όλες τις επιλύσεις, ενώ κατά τις επιλύσεις τριών και τεσσάρων σειρών είναι μηδενικές.



Σχήμα 3. Πειραματικές τυπικές αποκλίσεις για τους δέκτες Leica



Σχήμα 4. Πειραματικές τυπικές αποκλίσεις για τους δέκτες Trimble

3.1.2 Χρήση RTN

Όλα τα παραπάνω αποτελέσματα αφορούν σε μετρήσεις με εφαρμογή της κλασσικής μεθόδου RTK. Στην περίπτωση εφαρμογής μετρήσεων RTK χρησιμοποιώντας δίκτυο μόνιμων σταθμών αναφοράς, τότε ελέγχεται μόνο ο ένας δέκτης δεδομένου ότι ο σταθερός δέκτης αντικαθίσταται από το δίκτυο σταθμών που στέλνουν τις διορθώσεις στον κινούμενο δέκτη. Επομένως, ο έλεγχος των δεκτών δεν γίνεται βάσει των ακριβειών που δίνονται από το κατασκευαστή των δεκτών, αλλά περισσότερο με βάση τις ακρίβειες που δίνονται από τους διαχειριστές του δικτύου. Στο συγκεκριμένο πείραμα οι διορθώσεις λαμβάνονταν από

το δίκτυο Metricanet (www.metricanet.gr). Έτσι, βάσει της εξίσωσης (1), για s=1cm (οριζοντιογραφικά) και s=3cm (υψομετρικά) προκύπτει ότι $\varepsilon_{Dij} \leq 3.5$cm και $\varepsilon_{h\,i,j} = 10.6$cm. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν μόνο με ένα δέκτη (Leica) και για δύο διαφορετικές χρονικές περιόδους παραμονής σε κάθε σημείο, 30sec και 60sec. Για τη διάρκεια των 30sec, οι διαφορές των συντεταγμένων κυμαίνονται μεταξύ -0.019m και 0.034m (οριζοντιογραφικά) και μεταξύ -0.091m και 0.041m (υψομετρικά). Με βάση τα όρια ε_{Dij} και $\varepsilon_{h\,i,j}$, οι μετρήσεις είναι ελεύθερες χονδροειδών σφαλμάτων και είναι δυνατή η επεξεργασία τους σύμφωνα με το πλήρες τεστ. Αντίστοιχα, Για τη διάρκεια των 60sec, οι διαφορές με τις αληθείς τιμές είναι μεταξύ των τιμών -0.012m και 0.021m (οριζοντιογραφικά) και μεταξύ -0.064m και 0.050m (υψομετρικά).

Στη συνέχεια, ακολούθησε η εφαρμογή του πλήρους τεστ στις μετρήσεις, σύμφωνα με τις διαδικασίες του προτύπου ISO (Πίνακας 2). Τα πειράματα διαφορετικής χρονικής διάρκειας παρατηρήσεων επεξεργάζονται χωριστά, και επίσης, γίνεται επίλυση για 2 και 3 σειρές μετρήσεων. Λόγω των διαφορετικών συνδυασμών που μπορούν να γίνουν κατά την επεξεργασία των 2 σειρών, πραγματοποιούνται όλες οι δυνατές επιλύσεις, με την προϋπόθεση οι σειρές που συμμετέχουν σε αυτή να είναι διαδοχικές, ώστε να διατηρείται η συνθήκη του προτύπου που καθορίζει το χρόνο αναμονής μεταξύ τους, στα 90 λεπτά της ώρας.

Πίνακας 2. Σύνοψη Αποτελεσμάτων πλήρους τεστ για τους δέκτες Leica με δικτυακό RTK

Πλήθος Σειρών που Συμμετέχουν στην Επίλυση	2 Σειρές				3 Σειρές		Μέσος Όρος
Αύξων Αριθμός Σειρών που Συμμετέχουν στην Επίλυση	*1,2*	*1,2*	*2,3*	*2,3*	*1,2,3*	*1,2,3*	
	30 sec	60 sec	30 sec	60 sec	30 sec	60 sec	
σ_x [m]	0.020	0.019	0.019	0.018	0.017	0.016	
σ_y [m]	0.020	0.019	0.012	0.011	0.019	0.019	
$s_{ISO-GNSS\ RTK_xy}$ [m]	0.028	0.027	0.023	0.021	0.025	0.025	0.025
$s_{ISO-GNSS\ RTK_h}$ [m]	0.032	0.031	0.030	0.028	0.030	0.029	0.030

Συγκρίνοντας τις επιλύσεις των ίδιων σειρών, για τους διαφορετικούς χρόνους παρατήρησης, φαίνεται ότι δεν συμβάλουν σημαντικά στα τελικά αποτελέσματα. Συγκεκριμένα, στην επίλυση των 60 sec, φαίνεται ότι βελτιώνει τα αποτελέσματα κατά 1 mm, σε σχέση με αυτά της επίλυσης των 30 sec. Στην επίλυση των σειρών 2 και 3, η διαφορά φτάνει τα 2 mm, στην υψομετρία, που και πάλι είναι αμελητέο σε σχέση με την ακρίβεια εκατοστού που επιτυγχάνεται από τις μετρήσεις RTK. Όσο για την επίλυση των τριών σειρών, παρατηρείται ότι η πειραματική τυπική απόκλιση της οριζοντιογραφίας δεν διαφοροποιείται καθόλου λόγω του χρόνου παρατήρησης.

3.2. Έλεγχος μη γεωδαιτικών δεκτών

Στη παρούσα εργασία εξετάζεται βάσει του προτύπου ISO17123-8, η ακρίβεια του δέκτη u-blox NEO-7P XXL σε συνδυασμό με την εξωτερική κεραία Tallysman TW2410. Πρόκειται για δέκτη υψηλής ευαισθησίας (High sensitivity) (Takasu & Yasuda, 2008, Zhang et al.,

2010), μίας συχνότητας του συστήματος GPS με δυνατότητα μέτρησης φάσης φέροντος κύματος (GPS L1 C/A & P(Y)) και με διαστάσεις 105 x 64 x 26 mm (Εικ. 3). Επίσης εξετάζεται η απόδοση του ως άνω δέκτη και με χρήση εξωτερικής κεραίας γεωδαιτικού τύπου Trimble 5800. Επαναλήφθηκε η διαδικασία των μετρήσεων όπως και προηγούμενα, και συλλέχθηκαν πέντε σειρές μετρήσεων.

Εικόνα 3. Ο δέκτης u-blox NEO-7P XXL με την κεραία Tallysman TW2410

Λόγω του γεγονότος ότι για τους δέκτες πλοήγησης, όπως είναι ο δέκτης u-blox NEO-7P XXL με την κεραία του, δεν υπάρχουν προδιαγραφές ακριβείας από τους κατασκευαστές, οι τιμές των s_{xy} και s_h για το απλοποιημένο τεστ εξαρτώνται από τα επίπεδα ακρίβειας της εφαρμογής RTK και δίνονται ξεχωριστά για την οριζοντιογραφία (H) και υψομετρία (V) (Πίνακας 3).

Πίνακας 3. Ταξινόμηση των εργασιών RTK GNSS για επίπεδο εμπιστοσύνης 95% (Henning, 2011)

	Κατηγορία RT1	Κατηγορία RT2	Κατηγορία RT3	Κατηγορία RT4
Ακρίβεια	0.015m H 0.025m V	0.025m H 0.040m V	0.050m H 0.060m V	0.150m H 0.250m V

Βάσει της Εξ. (1) και του Πίνακα 3, προέκυψαν τα κατώφλια ακρίβειας με τα οποία συγκρίνονται οι συλλεγόμενες μετρήσεις προκειμένου να διαπιστωθεί ότι οι μετρήσεις είναι ορθές και δεν εμπεριέχουν χονδροειδή ή συστηματικά σφάλματα και μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως δεδομένα για την εφαρμογή του πλήρους τεστ. Οι πειραματικές μετρήσεις έδειξαν ότι οι ακρίβειες της κατηγορίας 2 του Πίνακα 3 ικανοποιούνται και επομένως των κατηγοριών 3 και 4 αλλά όχι της κατηγορίας 1 (για 95%). Στη συνέχεια, ακολούθησε η εφαρμογή του πλήρους τεστ στις μετρήσεις, σύμφωνα με τις διαδικασίες του προτύπου ISO και προέκυψαν οι τιμές $s_{ISO\,xy}$ και $s_{ISO\,h}$ για κάθε κατηγορία (Πίνακας 4). Έπειτα, ελέγχεται αν η μηδενική υπόθεση (για 95%) $s_{ISO\,xy} \leq s_{xy}$ και $s_{ISO\,h} \leq s_h$ ισχύει ή όχι. Συμπεραίνεται, ότι η οριζοντιογραφική και υψομετρική ακρίβεια που επιτυγχάνεται με τον συγκεκριμένο δέκτη καλύπτει μόνο τις κατηγορίες 2, 3, 4 (βλ. Πιν. 3 και 4).

Πίνακας 4. Ταξινόμηση των εργασιών RTK GNSS για επίπεδο εμπιστοσύνης 95%

Κατηγορία RT1	Κατηγορία RT2	Κατηγορία RT3	Κατηγορία RT4
$s_{ISO\,xy} \leq 0.016$m	$s_{ISO\,xy} \leq 0.027$m	$s_{ISO\,xy} \leq 0.055$m	$s_{ISO\,xy} \leq 0.166$m
$s_{ISO\,h} \leq 0.028$m	$s_{ISO\,h} \leq 0.046$m	$s_{ISO\,h} \leq 0.068$m	$s_{ISO\,h} \leq 0.285$m

4. Συμπεράσματα

Οι επιλύσεις που γίνονται με χρήση της τεχνικής RTK δίνουν αποτελέσματα που βρίσκονται σε συμφωνία με τα στοιχεία των κατασκευαστών των γεωδαιτικών δεκτών. Συγκεκριμένα, όλες οι τιμές είναι κάτω από τα 10 mm (οριζοντιογραφικά) και 20mm (υψομετρικά). Οι επιλύσεις που γίνονται με χρήση της δικτυακής τεχνικής RTK δίνει μέση τιμή 25mm στην οριζοντιογραφία και 30mm στην υψομετρία. Αν θεωρηθεί ως κατώφλι ακρίβειας τα 1-2cm, τότε οι μετρήσεις δεν είναι ικανοποιητικής ακρίβειας. Ωστόσο, δεδομένου ότι το πρότυπο αυτό ελέγχει την εσωτερική ακρίβεια που επιτυγχάνει ένας δέκτης, συμπεραίνεται ότι η εφαρμογή του δεν έχει νόημα για RTN.

Από την επεξεργασία των δειγμάτων που συλλέχθηκαν, συμπεραίνεται η εύστοχη υιοθέτηση των τριών σειρών μετρήσεων από το πρότυπο. Από τη μία, οι επιλύσεις τεσσάρων σειρών δίνουν σχεδόν τα ίδια αποτελέσματα με αυτά των τριών επιλύσεων και άρα κρίνεται ασύμφορη η πραγματοποίηση τέτοιων επιλύσεων, δεδομένου του επιπλέον χρόνου παραμονής που συνεπάγεται αυτό. Από την άλλη, οι επιλύσεις δύο σειρών δίνουν ασταθή αποτελέσματα.

Η χρήση του δέκτη u-blox NEO-7P XXL καλύπτει την πλειονότητα των εργασιών της μεθόδου RTK ως προς την παρεχόμενη ακρίβεια. Παρ' ότι τα αποτελέσματα της παρούσης εργασίας κρίνονται πολύ ικανοποιητικά, είναι αναγκαία η διενέργεια περισσότερων δοκιμών μεγαλύτερης χρονικής διάρκειας προκειμένου να διεξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα ως προς τα σφάλματα που σχετίζονται με την ιονόσφαιρα και τροπόσφαιρα και επηρεάζουν τις μετρήσεις της μονής συχνότητας.

Βιβλιογραφία

Armstrong M. L., "RTK/RTN Precision vs. Accuracy & Occupation Time" NOAA, Oregon, USA, 2013.

Henning W., "User Guidelines for single base Real Time GNSS Positioning". Vers. 2.1, National Geodetic Survey, NOAA, USA, 2011.

Kaplan E., Hegarty C. J. "Understanding GPS, Principles and Applications*",* ARTECH HOUSE Inc., Norwood Ma, USA, 2006.

Leick A. "GPS Satellite Surveying" 3d Edition, 2004, John Wiley & Sons Inc., New Jersey, USA.

Rizos C. "Network RTK Research and Implementation – A Geodetic Perspective", Journal of Global Positioning Systems, Vol.1 - No.2, pg. 144-150, 2004.

Takasu T., and Yasuda A. "Evaluation of RTK-GPS Performance with Low-cost Single-frequency GPS Receivers". Proc. 13th GPS/GNSS Symposium 2008, Nov. 11-14, Tokyo, Japan.

Zhang J., Li B., Dempster A.G., Rizos C. "Evaluation of High Sensitivity GPS Receivers". Proc. Int. Symposium on GPS/GNSS, October 26-28, 2010, Taipei, Taiwan.