

Προοπτικές των επερχόμενων συστημάτων GNSS για εφαρμογές κινηματικού εντοπισμού στον ελληνικό χώρο

Γ. Κατσιγιάννη, Δ. Δεληκαράογλου

*Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών,
Ηρώων Πολυτεχνείου 9, Ζωγράφου 15780*

Περίληψη: Η απόδοση των Παγκόσμιων Δορυφορικών Συστημάτων Εντοπισμού και Πλοήγησης μπορεί να προσδιοριστεί ποσοτικά από τη διαθεσιμότητα, την ακρίβεια και την αξιοπιστία τους. Σε σχέση με τις σημερινές δυνατότητες που παρέχει κυρίως το αμερικανικό σύστημα GPS, και με σημαντική συνεισφορά από το ρωσικό σύστημα GLONASS, στα επόμενα λίγα χρόνια, σε παγκόσμιο επίπεδο, οι σημαντικότερες εξελίξεις που αναμένονται να επηρεάσουν τις εφαρμογές εντοπισμού και πλοήγησης είναι ο εκσυγχρονισμός του GPS και η πλήρης ανάπτυξη του συστήματος GALILEO από την Ευρωπαϊκή Ένωση. Σκοπός της συγκεκριμένης εργασίας είναι η μελέτη και η σύγκριση της απόδοσης των παρόντων και των μελλοντικών δορυφορικών συστημάτων πλοήγησης και εντοπισμού θέσης, εστιάζοντας στα συστήματα GPS, GALILEO και EGNOS. Παρουσιάζονται αποτελέσματα σειράς αναλύσεων για διάφορες περιπτώσεις κινηματικού εντοπισμού που είναι αντιπροσωπευτικές των μελλοντικών εφαρμογών ενδιαφέροντος και συνάγονται χρήσιμα συμπεράσματα για τις διαφαινόμενες προοπτικές από τη συνδυασμένη χρήση των εν λόγω συστημάτων.

1. Τρέχουσες εξελίξεις στα συστήματα GNSS

Τα σύγχρονα συστήματα δορυφορικής πλοήγησης και εντοπισμού GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*) επιτρέπουν στον καθένα με ένα φορητό δέκτη να προσδιορίζει τη θέση του με μεγάλη ακρίβεια ανά πάσα στιγμή, χάρη στη λήψη σημάτων από ένα σχηματισμό πολλών δορυφόρων. Επί του παρόντος, το αμερικανικό GPS είναι το μόνο πλήρως λειτουργικό τέτοιο σύστημα, ενώ το αντίστοιχο ρωσικό σύστημα GLONASS συνεχίζει να βρίσκεται στο στάδιο της αποκατάστασης του να γίνει πλήρως επιχειρησιακό και για το λόγο αυτό δεν έχει τύχει ακόμα της ίδιας ευρείας αποδοχής και χρήσης όπως το GPS. Η Ευρωπαϊκή Ένωση αναπτύσσει το πρώτο σύστημα GNSS που σχεδιάστηκε για πολιτική χρήση, το οποίο εμπεριέχει το ήδη σε λειτουργία σύστημα EGNOS (*European Geostationary Navigation Overlay Service*) και το σύστημα GALILEO που στα επόμενα λίγα χρόνια με την πλήρη λειτουργία του θα παρέχει ποικίλες νέες υπηρεσίες εντοπισμού θέσης, πλοήγησης και χρονισμού ακριβείας. Παράλληλα η Κίνα προχωράει

στην επέκταση του τοπικού συστήματος *BEIDOU*, με την προοπτική αυτό να εξελιχθεί στο παγκόσμιο σύστημα εντοπισμού *COMPASS*.

Ενόψει του διαφαινόμενου ανταγωνισμού από το *GALILEO*, ήδη από το 2000, το *GPS* εκσυγχρονίζεται οδεύοντας προς το λεγόμενο σύστημα *GPS τρίτης γενιάς (GPS III)*. Το πρόγραμμα εκσυγχρονισμού περιλαμβάνει νέους σταθμούς εδάφους και πιο προηγμένης τεχνολογίας δορυφόρους (*GPS II-M, GPS II-F, GPS-III*), με επιπρόσθετα σήματα πλοήγησης (*L2C, L5, L1C, M*) για πολιτικούς και στρατιωτικούς σκοπούς. Στόχος είναι να βελτιώσει την ακρίβεια και τη διαθεσιμότητα των υπηρεσιών για όλους τους χρήστες διατηρώντας την συμβατότητα με τον υπάρχοντα εξοπλισμό *GPS* και παράλληλα να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις των στρατιωτικών και πολιτικών αναγκών πέρα από το 2030.

Το σύστημα *EGNOS* αποτελεί τη συνεισφορά της Ευρώπης στις τρέχουσες διαπεριφερειακές, διαλειτουργικές υπηρεσίες επέκτασης της λειτουργίας των *GNSS* πρώτης γενιάς (*GNSS Augmentation Systems*) και συνιστά ένα καθοριστικό βήμα για την υλοποίηση του *GALILEO*. Χρησιμοποιώντας τρεις γεωστατικούς δορυφόρους παρέχει στους χρήστες του στον ευρωπαϊκό χώρο πληροφορίες σχετικά με την εύρυθμη λειτουργία των δορυφόρων *GPS* και *GLONASS*, βελτιώνοντας έτσι την ακρίβεια των παρεχόμενων υπηρεσιών εντοπισμού και πλοήγησης, από την τυπική ακρίβεια των ± 20 m, σε ακρίβεια λιγότερη από ± 5 m σε πραγματικό χρόνο.

1.1 Διαφαινόμενες προοπτικές από τη λειτουργία του *GALILEO*

Με την πλήρη λειτουργία του *GALILEO*, τα προαναφερόμενα συστήματα θα είναι διαλειτουργικά μεταξύ τους και θα παρέχουν, σε σύγκριση με τις υπάρχουσες δυνατότητες, διπλάσιο αριθμό δορυφόρων στη διάθεση των χρηστών και επιπλέον εκπεμπόμενα ραδιοσήματα σε περισσότερες συχνότητες. Αυτό αναμένεται να οδηγήσει σε σημαντικές βελτιώσεις στην ακρίβεια, αξιοπιστία και ακεραιότητα που θα παρέχεται τόσο από κάθε ένα από τα εν λόγω συστήματα, αλλά πολύ περισσότερο από τη συνδυασμένη χρήση τους, η οποία αναμένεται να 'απογειώσει' τις δυνατότητες εντοπισμού σε πραγματικό χρόνο και να διαμορφώσει τεράστιες προοπτικές για ευέλικτες νέες εφαρμογές και καινοτόμες υπηρεσίες *GNSS*. Ήδη από υπάρχουσες οικονομικό-τεχνικές μελέτες διαφαίνεται ότι μαζί με το συνεχώς εξελισσόμενο *GPS*, το *EGNOS* σήμερα, και το *GALILEO* αργότερα, ενισχύεται σταδιακά η αναγκαία υποδομή που οδηγεί σε μια πραγματικά παγκόσμια αγορά προηγμένων προϊόντων και υπηρεσιών δορυφορικού εντοπισμού και πλοήγησης. Οι εξελίξεις αυτές οδηγούν στη διαμόρφωση ενός νέου κανονιστικού πλαισίου, όπως υπηρεσίες Ανοικτής Πρόσβασης, Εμπορικές, Ασφάλειας της Ανθρώπινης Ζωής, Έρευνας και Διάσωσης και Κρατικά Ρυθμιζόμενες Υπηρεσίες που θα παρέχονται από το σύστημα *GALILEO*.

Οι μεταφορές στο σύνολό τους, θαλάσσιες, εναέριες, οδικές και σιδηροδρομικές

είναι ο τομέας που αναμένεται να επωφεληθεί περισσότερο από κάθε άλλον, από τη βελτίωση των συστημάτων GNSS, δεδομένου ότι το φάσμα των εφαρμογών τους είναι εξαιρετικά ευρύ και κυρίως επειδή η συνδυασμένη χρήση των επερχόμενων GNSS θα αυξήσει σημαντικά την αξιοπιστία και τη διαθεσιμότητα υπηρεσιών πλοήγησης και εντοπισμού θέσης σε ολόκληρο τον πλανήτη (ΕΕ, 2006). Το κοινό χαρακτηριστικό των εν λόγω πεδίων εφαρμογών είναι ότι βασίζονται σε διαδικασίες κινηματικού εντοπισμού, κατά τις οποίες η δυναμική εξέλιξη της ακρίβειας πλοήγησης ενός δέκτη είναι ιδιαίτερα σημαντική καθώς η κινηματική διαδικασία περιλαμβάνει τη λήψη μιας σειράς μετρήσεων, ενώ ο δέκτης κινείται στον τρισδιάστατο χώρο. Στην ίδια κατηγορία εμπίπτουν και πολλές από τις σύγχρονες κινηματικές τεχνικές που ενδιαφέρουν τον κλάδο των Τοπογράφων Μηχανικών, για τις οποίες η χρήση των συστημάτων GNSS αναμένεται να βελτιώσει την ακρίβεια και την αξιοπιστία τους και να δώσει νέα ώθηση σε ιδιαίτερα απαιτητικές εφαρμογές, όπως: η *βυθομετρία* και η *επιφανειακή θαλάσσια αλτιμετρία*, οι *φωτογραμμετρικές αποτυπώσεις* με τη χρήση αεροφωτογραφήσεων με τη βοήθεια μικρών τηλεκατευθυνόμενων ελικοπτέρων ή αεροσκαφών αερομοντελισμού, η *κινηματική χαρτογράφηση* με ψηφιακές κάμερες πανοραμικής λήψης και η *αυτοκίνητη τριγωνομετρική υψομετρία* (Κατσιγιάννη, 2011).

2. Μεθοδολογία ανάλυσης

Το σύστημα GALILEO προς το παρόν δεν έχει τεθεί πλήρως σε λειτουργία, καθώς μόνο δύο (GIOVE-A και -B) από τους 30 προγραμματισμένους δορυφόρους του έχουν τεθεί σε τροχιά. Συνεπώς, μια συστηματική αξιολόγηση και τεκμηρίωση των ποιοτικών χαρακτηριστικών του νέου αυτού συστήματος, προκειμένου να επιβεβαιωθούν οι διαφαινόμενες δυνατότητες του, σε σύγκριση τόσο με τα υπάρχοντα, όσο και με τα μελλοντικά συστήματα GNSS, μπορεί να γίνει μόνο μέσω εκτιμήσεων από προσομοιωμένα δεδομένα. Μια προσομοίωση, εξ ορισμού, αναπαράγει υπό ελεγχόμενες συνθήκες τις διαδικασίες διεξαγωγής των μετρήσεων καθώς και τις επιπτώσεις του άμεσου περιβάλλοντος τους που ένας δέκτης “βλέπει” στον πραγματικό κόσμο. Το ελεγχόμενο περιβάλλον είναι απαραίτητο για την άρση ποικίλων εξωτερικών μεταβλητών όπως οι επιπτώσεις της ιονόσφαιρας και της τροπόσφαιρας ή ακόμη για να συμπεριλάβει τέτοιους ή άλλους παράγοντες, αλλά με ποσοτικό τρόπο. Είναι συνεπώς σημαντικό, οι εκάστοτε συνθήκες προσομοίωσης να είναι ακριβείς και ρεαλιστικές, ώστε να μπορεί να διερευνηθούν οι διάφοροι επιδρώντες παράγοντες ξεχωριστά (ή από κοινού) και να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα για την πραγματική απόδοση της μετρητικής διαδικασίας και των συνθηκών που την επηρεάζουν.

Με βάση τις προαναφερόμενες εφαρμογές ενδιαφέροντος, αναλύθηκαν μια σειρά προσομοιώσεων κινηματικού εντοπισμού, με σκοπό να διερευνηθούν και να τεκμηριωθούν ορισμένα από τα χαρακτηριστικά του συστήματος GALILEO. Ως βα-

σικό εργαλείο για τις απαραίτητες αναλύσεις χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό GSSF (*GALILEO System Simulation Facility*), το οποίο έχει αναπτυχθεί από την Ευρωπαϊκή Υπηρεσία Διαστήματος και έχει διατεθεί στο Εργαστήριο Ανώτερης Γεωδαισίας της ΣΑΤΜ, ΕΜΠ. Το GSSF διαθέτει προηγμένα μοντέλα και αλγόριθμους που παρέχουν στον χρήστη τη δυνατότητα να δημιουργήσει αντιπροσωπευτικά σενάρια που προσομοιώνουν τη λειτουργικότητα του GALILEO και των άλλων συστημάτων GNSS για διαφορετικά περιβάλλοντα και συνθήκες μετρήσεων (VEGA, 2005). Επιπλέον, επιτρέπει την εύκολη τροποποίηση μιας ευρείας σειράς παραμέτρων της εκάστοτε προσομοίωσης, με σκοπό την εύκολη και άμεση δοκιμή εναλλακτικών σεναρίων που μπορεί να μεταβάλλονται ανάλογα με τις ανάγκες των θεωρούμενων εφαρμογών τόσο στο χώρο, όσο και στο χρόνο. Με τον τρόπο αυτό, είναι δυνατόν να εξεταστούν και να συγκριθούν οι αποδόσεις ενός εκάστου ή/και σε συνδυασμό μεταξύ τους των συστημάτων GNSS σε διαφορετικές φάσεις της επιχειρησιακής λειτουργίας τους (π.χ. το GPS και το EGNOS του σήμερα, το GPS της 3^{ης} γενιάς, το GALILEO της επιχειρησιακής φάσης του, κλπ).

Συγκεκριμένα, για όλα τα συστήματα GNSS, τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά απόδοσης που ενδιαφέρουν, είναι η **πιστότητα** (*accuracy*) της λύσης εντοπισμού, η **διαθεσιμότητα** (*availability*) και η **ακεραιότητα** (*integrity*) του συστήματος και η **συνέχεια** (*continuity*) των παρεχόμενων υπηρεσιών. Η ποιότητα αυτών των χαρακτηριστικών εξαρτάται κυρίως από τα διάφορα σφάλματα των μετρήσεων, τα οποία διακρίνονται συνήθως σε *σφάλματα των δορυφόρων, των δεκτών και της διάδοσης του σήματος*. Ένας δόκιμος τρόπος για να ληφθούν αυτά υπόψη, είναι να μετατραπεί η συνολική επίδραση από κάθε σφάλμα σε ένα ισοδύναμο σφάλμα της απόστασης χρήστη-δορυφόρου που μετράται από τον δέκτη, το αποκαλούμενο UERE (*User Equivalent Range Error*) που δίνεται από την απλή σχέση

$$UERE = \sqrt{\sum_i \sigma_i^2},$$

όπου σ_i είναι η επιμέρους συνεισφορά των εκάστοτε θεωρούμενων σφαλμάτων.

Ο Πίνακας 1, αποτελεί ένα τυπικό παράδειγμα τιμών UERE για το σύστημα GALILEO, όπου το σφάλμα της απόστασης δέκτη-δορυφόρου εκφράζεται ως μεταβαλλόμενο αντιστρόφως ανάλογα με τη γωνία ύψους του δορυφόρου. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, οι αναφερόμενες τυπικές τιμές UERE αφορούν την Ανοικτή Υπηρεσία (*Open Service, OS*) του GALILEO, για μετρήσεις στη συχνότητα L1 με δέκτες κατάλληλους για πεζούς και οχήματα. Παρόμοιοι πίνακες UERE χρησιμοποιούνται για το GPS και το EGNOS, ανάλογα με τον τύπο των μετρήσεων, τη συχνότητα του σήματος και τις σημερινές ή τις μετέπειτα δυνατότητες κατά τις φάσεις εκμοντερνισμού του GPS (βλ. Πίνακα 2).

Επιπρόσθετα, το τελικό σφάλμα εντοπισμού της θέσης ενός δέκτη εξαρτάται από την εκάστοτε σχετική γεωμετρία των χρησιμοποιούμενων ορατών δορυφόρων.

Πίνακας 1: Ενδεικτικές τιμές UERE (σε cm) για το σύστημα GALILEO (συχνότητα L1)

	Πηγή σφαλμάτων	Γωνία ύψους [°]								
		5	10	15	20	30	40	50	60	90
UERE, σε cm	Υπόλοιπο ιονόσφαιρας	737	660	591	530	430	357	325	325	325
	Τροχιακή εφημερίδα και δορυφορικά χρονόμετρα	67	67	67	67	67	67	67	67	67
	Υπόλοιπο τροπόσφαιρας	135	75	51	39	27	21	18	16	14
	Θερμικός θόρυβος και πολυανάκλαση σήματος (τυχαία επιρροή)	55	50	46	43	40	38	38	38	38
	Πολυανάκλαση σήματος (συστηματική επιρροή)	120	120	120	120	120	120	120	120	120
	Καθυστέρηση του κώδικα (group delay)	56	56	56	56	56	56	56	56	56
	Ιονοσφαιρική απόκλιση μετρήσεων κώδικα/φάσης	60	60	60	60	60	60	60	60	60
	Συνολικό σφάλμα	768	685	616	557	462	394	364	364	364
	Συνολικό σφάλμα + 10%	845	753	678	612	508	433	401	401	401

Πίνακας 2: Τιμές UERE για συνδυασμούς μετρήσεων μονής ή διπλής συχνότητας

Single frequency UERE									
Elevation (°)	5	10	15	20	30	40	50	60	90
GPS (current L1)	844	770	709	659	581	529	496	476	460
GPS, EGNOS (current L1)	284	229	200	176	146	127	116	109	102
GAL, EGNOS (L1)	284	229	199	175	145	126	115	108	102
GPS, GAL (L1)	844	762	693	634	540	474	441	434	427
GAL, GPS, EGNOS (L1)	339	275	239	212	175	152	139	131	123
Dual Frequency UERE (L1/L5)									
Elevation (°)	5	10	15	20	30	40	50	60	90
GPS II	227	186	171	164	159	157	156	156	156
GPS III	190	136	115	104	96	93	92	91	91
GPS III, EGNOS	184	128	104	92	82	78	77	76	76
GPS III, GAL	182	127	107	97	89	86	84	84	83
GAL, EGNOS	177	120	98	87	78	74	72	72	71
GAL, GPS III, EGNOS	181	125	103	92	82	79	77	77	76

Αυτή εκφράζεται από τους δείκτες γεωμετρικής ισχύος **DOP** (*dilution of precision factors*), οι οποίοι υπολογίζονται από τα στοιχεία της διαγωνίου του πίνακα μεταβλητότητας-συμμεταβλητότητας $C_X = (A^T A)^{-1}$, όπου A είναι ο πίνακας σχεδιασμού που αντιπροσωπεύει τη γεωμετρική συμβολή των μετρήσεων από τους χρησιμοποιούμενους ορατούς δορυφόρους στη λύση εντοπισμού ενός σημείου (Langley 1999). Όταν συνδυάζονται δύο συστήματα GNSS (π.χ. GPS και GALILEO), το τελικό σφάλμα εντοπισμού θέσης $\sigma_{GPS \& GALILEO}$ προκύπτει από το συνδυασμό των UERE των δύο συστημάτων (Hein and Rodriguez, 2006):

$$\sigma_{GPS \& GALILEO} = \sqrt{\frac{2}{\frac{1}{UERE_{GPS}^2} + \frac{1}{UERE_{GALILEO}^2}}} DOP_{GPS \& GALILEO} \quad (1)$$

Κατά παρόμοιο τρόπο, οι ίδιες έννοιες μπορούν να επεκταθούν για τη γεωμετρία των μετρήσεων με διαδικασίες σχετικού εντοπισμού (π.χ. με παρατηρήσεις φάσης διπλών διαφορών), μέσω των δεικτών *Σχετικής Αραιώσης της Ακρίβειας* ή RDOP (*Relative DOP* ή *Relative Dilution of Precision*) που υπολογίζονται από τον αντίστοιχο πίνακα μεταβλητότητας-συμμεταβλητότητας $C_X = (A_{DD}^T A_{DD})^{-1}$, όπου A_{DD} είναι ο πίνακας σχεδιασμού των παρατηρήσεων των διπλών διαφορών.

Η συνδυασμένη χρήση των δεικτών DOP και των τιμών UERE επιτρέπει να υπολογιστούν οι λεγόμενοι **δείκτες της ακρίβειας πλοήγησης NSP** (*Navigation System Precision*): Overall NSP (*ONSP*), Time NSP (*TNSP*), Horizontal NSP (*HNSP*), and Vertical NSP (*VNSP*), βλ. *VEGA (2005)*. Οι τιμές τους, εκφράζουν τη διασπορά της αντίστοιχα εκτιμώμενης στιγμιαίας θέσης (ή χρόνου) του δέκτη από την μέση θέση (ή/και χρόνο), για ένα σταθερό ή κινούμενο χρήστη και για όλη τη διάρκεια μιας περιόδου μετρήσεων. Επίσης, αυτό που ενδιαφέρει είναι η ανάλυση της ακεραιότητας του εκάστοτε συστήματος ή του συνδυασμού τους κατά τη διάρκεια των μετρήσεων, η οποία εκφράζει την πιθανότητα ο χρήστης να λάβει ανακριβείς ή λανθασμένες πληροφορίες και συνεπώς υποδηλώνει την αξιοπιστία του συστήματος ως προς τις παρεχόμενες προς τους χρήστες πληροφορίες.

3. Ενδεικτικά αποτελέσματα αναλύσεων κινηματικού εντοπισμού

Για την παρούσα εργασία, αρχικά αναλύθηκαν οι συνθήκες ορατότητας των δορυφόρων και η γεωμετρική ισχύς των αντίστοιχων μετρήσεων από ένα σύνολο δεκτών διατεταγμένων σε πλέγμα καννάβου (ανά μία μοίρα) στον ευρωπαϊκό και τον ελλαδικό χώρο. Για την επεξεργασία του συγκεκριμένου σεναρίου επιλέχθηκε διάρκεια μιας ημέρας, της 28/04/10 προς 29/04/10, με χρονικό βήμα μετρήσεων ανά 300 sec και χωρίς περιορισμό στη γωνία ύψους των δορυφόρων. Πλήρη αποτελέσματα σχετικά με τον αριθμό των ορατών δορυφόρων και των δεικτών DOP (*GDOP*, *PDOP*, *TDOP*, *HDOP*, *VDOP*) της γεωμετρίας των ορατών δορυφόρων

δίνονται από την Κατσιγιάννη (2011). Στον Πίνακα 3 δίνονται ενδεικτικά αποτελέσματα για τον αριθμό των ορατών δορυφόρων και το δείκτη GDOP για τα διαφορετικά συστήματα GNSS, όπου αναγράφονται η μέση τιμή της παραμέτρου ενδιαφέροντος καθώς και εντός παρενθέσεων η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή που καταγράφηκε. Παρατηρείται ότι ο μέσος αριθμός ορατών δορυφόρων στον ελληνικό χώρο δεν διαφέρει από τις τιμές που παρατηρούνται στην ευρύτερη περιοχή της Ευρώπης. Παρόμοια είναι και η διαφοροποίηση (κατά περίπου 0.1 με 0.2 χαμηλότερες τιμές στην Ευρώπη) στα αποτελέσματα για τους δείκτες γεωμετρίας DOP. Όπως ήταν αναμενόμενο, ο συνδυασμός των συστημάτων GPS, EGNOS και GALILEO δίνει τα καλύτερα αποτελέσματα (παρέχοντας κατά μέσο όρο 20 ορατούς δορυφόρους και τιμές GDOP 1.7 και 1.9 στην ευρύτερη Ευρώπη και τον ελληνικό χώρο αντίστοιχα).

Πίνακας 3: Αριθμός ορατών δορυφόρων και δείκτης γεωμετρικής ισχύος GDOP σε κάρναβο σημείων

Σχηματισμός	# Ορατών δορυφόρων	Ευρώπη	Ελλάδα	GDOP	Ευρώπη	Ελλάδα
GPS		8.9 (6-12)	8.6 (6-12)		2.2 (1.4-5.8)	2.3 (1.5-4.5)
GPS + EGNOS		11.9 (9-15)	11.6 (9-15)		1.9 (1.3-2.8)	2.0 (1.4-3.4)
GPS + GIOVE		9.6 (6-13)	9.4 (6-13)		2.0 (1.4-3.9)	2.1 (1.4-4.5)
GPS + EGNOS + GIOVE		12.6 (9-16)	12.4 (9-16)		1.7 (1.3-2.9)	1.9 (1.4-3.2)
GPS + GALILEO		17.4 (13-22)	16.4 (13-20)		1.4 (1.0-2.1)	1.5 (1.1-2.0)
GALILEO		8.4 (6-11)	7.8 (6-11)		2.1 (1.6-3.4)	2.3 (1.6-3.5)
GALILEO + EGNOS		11.0 (9-13)	10.8 (9-14)		1.8 (1.4-3.0)	2.0 (1.5-3.1)
GPS + GALILEO + EGNOS		19.8 (16-24)	19.5 (16-23)		1.3 (1.0-1.7)	1.4 (1.2-1.9)

Για την ίδια ημερομηνία 28/04/10 (όπως και για όλες τις κινηματικές διαδρομές που ακολουθούν), μελετήθηκαν πέντε χαρακτηριστικές κινηματικές πορείες πλοίων, σε διαφορετικές περιοχές της Ελλάδας και όσο το δυνατόν προς κάθε κατεύθυνση, με διαφορετικές διάρκειες πλεύσης (5-15 ώρες) και χρονικό βήμα υπολογισμών (ανά 10 ή 15 sec), ενώ δεν επιβλήθηκε περιορισμός στη γωνία ύψους αφού στις θαλάσσιες διαδρομές έχουμε συνήθως ανοιχτό ουρανό. Οι τιμές UERE που χρησιμοποιήθηκαν αντιστοιχούσαν σε μετρήσεις μονής συχνότητας στη συχνότητα

L1. Γενικά, οι αναλύσεις έδειξαν ότι το GPS και GALILEO από μόνα τους δίνουν 6 έως 11 ορατούς δορυφόρους, με το δείκτη γεωμετρική ισχύος GDOP να κυμαίνεται από 1.4 έως 3.4 και ποσοστά ακεραιότητας μέχρι 6% για το GPS και 2% για το GALILEO. Στον Πίνακα 4, παρουσιάζονται οι ενδεικτικές τιμές που υπολογίστηκαν για την ολική ακρίβεια πλοήγησης *ONSP*, για τις συγκεκριμένες διαδρομές πλοίων. Είναι ενδεικτικό ότι ο συνδυασμός των GPS, EGNOS και GALILEO οδηγεί σε σημαντικές βελτιώσεις στις εφικτές ακρίβειες (δίνοντας πολύ καλές τιμές *ONSP*, λιγότερο από 8 m σε πραγματικό χρόνο, ανάλογα με την διαδρομή), ενώ το ίδιο παρατηρήθηκε και στις τιμές της ακεραιότητας, όπου παρατηρήθηκαν σχεδόν μηδενικές τιμές. Παρόμοια επιπλέον αποτελέσματα αναφέρονται από την Κατσιγιάννη (2011) για δύο πιο ευέλικτες πορείες ιστιοπλοϊκών σκαφών που αλλάζουν πιο συχνά κατευθύνσεις και αφορούν διαδρομές πιο τοπικού χαρακτήρα (Πειραιά-Γύθειο και Λευκάδα-Ιθάκη) με σχετικά μέτριες ως χαμηλές ταχύτητες πλεύσης και διάρκειας αρκετών ωρών.

Πίνακας 4: Αποτελέσματα Ολικής Ακρίβειας Πλοήγησης στις διαδρομές πλοίων, με χρήση μετρήσεων μονής συχνότητας L1

	Σημιατισμός	Αλεξανδρούπολη - Σαμοθράκη	Πειραιάς - Ηράκλειο	Πειραιάς - Χίος	Πειραιάς - Θήρα	Θεσ/νίκη - Μυτιλήνη
ONSP [m]	GPS	28.3 (22.2-47.7)	30.8 (22.1-45.1)	29.5 (22.0-43.4)	30.8 (22.1-45.3)	31.9 (22.2-54.7)
	GPS + EGNOS	6.3 (5.4-8.9)	6.8 (5.4-8.9)	6.6 (5.4-8.8)	6.8 (5.4-8.9)	7.0 (5.4-9.4)
	GPS + GIOVE	25.1 (20.1-41.8)	26.8 (20.9-37.1)	25.7 (20.9-32.7)	26.9 (20.9-37.2)	27.8 (21.0-49.8)
	GPS + EGNOS + GIOVE	7.3 (6.2-8.9)	7.8 (6.5-10.1)	7.5 (6.5-8.9)	7.8 (6.5-10.1)	8.0 (6.4-11.3)
	GPS + GALILEO	18.9 (16.1-22.8)	19.6 (16.5-24.1)	19.2 (16.7-23.1)	19.6 (16.7-24.1)	19.6 (16.0-24.0)
	GALILEO	28.6 (22.8-35.1)	28.5 (24.3-35.1)	28.6 (23.3-34.7)	28.8 (24.5-35.1)	28.3 (22.7-35.2)
	GALILEO + EGNOS	7.1 (6.0-8.8)	7.2 (6.5-8.7)	7.2 (6.1-8.7)	7.3 (6.5-8.8)	7.1 (6.0-8.8)
	GPS + GALILEO + EGNOS	5.7 (5.0-6.8)	6.0 (5.2-7.0)	5.8 (5.2-6.9)	6.0 (5.2-7.01)	6.0 (5.0-7.1)

Προκειμένου να εξεταστούν εναέριες διαδρομές, με τυπικά χαρακτηριστικά ανάλογα των απαιτήσεων φωτογραμμετρικών αεροφωτογραφήσεων, εξετάστηκαν (καταγεγραμμένες με GPS) πραγματικές διαδρομές μικρών ανεμόπτερων, εκτός από την περίπτωση του Κιθαιρώνα που χρησιμοποιήθηκε η πραγματική διαδρομή ενός αλεξίπτωτου πλαγιάς (*paragliding*). Οι τιμές UERE που χρησιμοποιήθηκαν αντιστοιχούσαν σε μετρήσεις διπλής συχνότητας, και συγκεκριμένα για το GPS III (L1/L5) και στη περίπτωση του GALILEO για την Υπηρεσία Ασφάλειας της ζωής SoL (L1/E5a). Αναλύθηκαν πέντε εναέριες διαδρομές, με διάρκειες πτήσεων από 2 έως 6 ώρες και χρονικό βήμα υπολογισμών ανά 3 έως 15 sec, για τις οποίες είναι εμφανές, από τον Πίνακα 5, ότι η χρήση μετρήσεων διπλής συχνότητας δίνει πολύ καλύτερη ακρίβεια πλοήγησης. Αυτό είναι κατανοητό αφού στην περίπτωση αυτή μειώνεται κατά πολύ το σφάλμα της ιονόσφαιρας, ενώ σχεδόν εξαλείφεται το σφάλμα της απόκλισης των μετρήσεων κώδικα και φάσης εξ αιτίας της ιονόσφαιρας και βελτιώνεται σημαντικά η ακρίβεια των δορυφορικών εφημερίδων. Γενικά, από μόνα τους τα συστήματα GPS και GALILEO παρέχουν σχεδόν τις ίδιες ακρίβειες (σε πραγματικό χρόνο), περίπου στα επίπεδα ± 5 m, και ο συνδυασμός των

Πίνακας 5: Αποτελέσματα Ολικής Ακρίβειας Πλοήγησης σε εναέριες διαδρομές, με χρήση μετρήσεων μονής συχνότητας L1

	Σχηματισμός	Σκιάθος - Κωπαΐδα	Πρέβεζα - Παπαδάτες	Καλάβρυτα	Κιθαιρώνας	Παραμυθιά
ONSP [m]	GPS	5.2 (3.9-8.0)	4.9 (4.1-5.7)	5.2 (3.9-8.0)	4.9 (3.9-5.6)	4.8 (4.1-5.7)
	GPS + EGNOS	4.4 (3.4-6.4)	3.9 (3.4-4.6)	4.1 (3.2-5.8)	3.9 (3.2-4.5)	3.9 (3.4-4.6)
	GPS + GIOVE	4.5 (3.6-6.0)	4.3 (3.8-4.8)	4.5 (3.6-6.0)	4.4 (3.6-4.9)	4.3 (3.8-4.8)
	GPS + EGNOS + GIOVE	3.8 (3.2-4.8)	3.8 (3.4-4.1)	3.8 (3.2-4.8)	3.8 (3.2-4.2)	3.8 (3.4-4.1)
	GPS + GALILEO	3.3 (2.8-4.2)	3.3 (2.9-3.61)	3.3 (2.9-4.1)	3.3 (2.9-3.6)	3.3 (2.9-3.6)
	GALILEO	5.0 (3.8-6.4)	5.1 (4.4-6.4)	5.0 (4.1-6.4)	5.0 (4.4-6.4)	5.2 (4.4-6.4)
	GALILEO + EGNOS	4.2 (3.4-5.4)	4.3 (3.9-5.5)	4.2 (3.5-5.4)	4.2 (3.8-5.4)	4.4 (3.9-5.5)
	GPS + GALILEO + EGNOS	3.0 (2.5-3.7)	2.9 (2.6-3.3)	3.0 (2.6-3.6)	2.9 (2.6-3.2)	2.9 (2.6-3.3)

δύο δίνει ακρίβεια περίπου ± 3.5 m, ενώ και η συμπερίληψη του EGNOS δίνει ακόμα καλύτερες ακρίβειες κάτω από ± 3 m.

Ο Πίνακας 6 αναφέρεται σε σειρά αναλύσεων για μια εκτεταμένη διαδρομή οχήματος από την Κόνιτσα έως το Λιδωρίκι, η οποία περιλαμβάνει ορεινές και πεδινές περιοχές και επιλέχθηκε γιατί παρουσιάζει πολλές εναλλαγές στο τοπίο (π.χ. μεταβαλλόμενη βλάστηση) και στη μορφολογία του εδάφους (π.χ. έντονες κλίσεις, στροφές). Για αυτό το λόγο, η διαδρομή “χωρίστηκε” σε μικρότερες πορείες διάρκειας από 1 έως σχεδόν 3 ώρες και εφαρμόστηκαν, σε κάθε τμήμα ξεχωριστά, διαφορετικοί περιορισμοί (10° έως 30°) στη γωνία ύψους των ορατών δορυφόρων. Η επίδραση των έντονων εναλλαγών στο τοπίο και στη μορφολογία του εδάφους είναι εμφανής στις παρατηρούμενες τιμές των δεικτών GDOP, για τους οποίους οι μεγαλύτερες τιμές (συνεπώς και η χειρότερη γεωμετρία) παρατηρήθηκαν στη διαδρομή Γιάννενα-Σαγιάδα όπου εφαρμόστηκε περιορισμός 30° στις γωνίες ύψους των δορυφόρων. Είναι ωστόσο αξιοσημείωτο ότι σε αυτό το τμήμα διαδρομής το GALILEO δίνει χαμηλότερες τιμές GDOP από ότι το GPS (περίπου 20 για το GPS και 8 για το GALILEO), αν και με λιγότερους ορατούς δορυφόρους. Όπως και με

Πίνακας 6: Ολική Ακρίβεια Πλοήγησης σε οδικές διαδρομές, με χρήση μετρήσεων μονής συχνότητας L1 και διαφορετικές γωνίες αποκοπής για την ορατότητα των δορυφόρων.

	Σχηματισμός	Κόνιτσα - Γιάννενα (10°)	Γιάννενα - Σαγιάδα (30°)	Σαγιάδα - Πρέβεζα (15°)	Πρέβεζα - Μεσολόγγι (10°)	Μεσολόγγι - Λιδωρίκι (20°)
ONSP [m]	GPS	29.5 (24.5-33.6)	210.1 (35.5-2767)	38.5 (26.9-53.4)	31.9 (25-37.1)	46.0 (29.7-109.8)
	GPS + EGNOS	6.6 (6.03-7.02)	9.63 (7.3-13.1)	8.3 (6.2-10.6)	7.06 (6-7.9)	9.3 (6.5-18.6)
	GPS + GIOVE	24.6 (21-28.1)	144.4 (30.8-556.9)	32.7 (24.8-46.2)	28.6 (23.3-34)	39.9 (27.8-99.4)
	GPS + EGNOS + GIOVE	7.5 (6.8-8.0)	10.9 (8.4-15.2)	9.2 (7.4-12.0)	8.3 (7.1-9.4)	10.8 (7.8-22.6)
	GPS + GALILEO	19.8 (17.7-22.7)	38.9 (24.1-109.4)	22.8 (18.8-29.1)	20.0 (17.3-22.2)	25.1 (21.6-36.7)
	GALILEO	28.6 (26.4-34.4)	71.4 (34.1-202.1)	33.0 (29.5-39.3)	28.7 (25.6-35.3)	36.7 (33.0-45.2)
	GALILEO + EGNOS	7.1 (6.8-7.7)	12 (7.7-14.6)	8.2 (7.4-9.5)	7.5 (6.9-9)	8.7 (7.5-10.4)
	GPS + GALILEO + EGNOS	5.9 (5.6-6.3)	9.2 (6.7-11.0)	6.9 (5.8-8.6)	6.1 (5.4-6.6)	7.3 (6.4-10.2)

τις θαλάσσιες και εναέριες διαδρομές, η συνεισφορά του EGNOS παρέχει ιδιαίτερα σημαντική βελτίωση της ακρίβειας πλοήγησης, από ότι στην περίπτωση των GPS και GALILEO από μόνα τους ή με τον συνδυασμό τους.

Τα αποτελέσματα στον Πίνακα 7 αφορούν μια τυπική οδική πορεία διάρκειας πλέον των 3 ωρών, σε αστικό περιβάλλον στην περιοχή Ν. Σμύρνη-ΟΑΚΑ, από την οποία φαίνονται οι διαφορές που προκύπτουν από τη χρήση μετρήσεων μονής και διπλής συχνότητας, με περιορισμό όμως στη ορατότητα των δορυφόρων εξ αιτίας της παρουσίας υψηλών κτιρίων και δένδρων. Οι παρατηρούμενες υψηλές τιμές σε DOP και NSP (όπως και στις τιμές της ακεραιότητας) οφείλονται στο ότι σε αρκετά τμήματα των διαδρομών αυτών είναι ορατοί μόνο τέσσερις δορυφόροι, δηλαδή ο ελάχιστος απαιτούμενος αριθμός ώστε να έχουμε λύση εντοπισμού, αλλά όχι πάντα με βέλτιστη γεωμετρία δορυφόρων.

Πίνακας 7: Απόδοση των συστημάτων GNSS κατά μήκος της διαδρομής Ν. Σμύρνη - ΟΑΚΑ, σε αστικό περιβάλλον μετρήσεων μονής ή διπλής συχνότητας.

Σχηματισμός	# Ορατών δορυφόρων	GDOP	ONSP [m]	Μονή συχνότητα, L1	Διπλή συχνότητα, L1/L5
GPS	6.2 (4-7)	9.4 (3.1-90)		103.4 (37.0-1083.7)	19.5 (6.7-211.4)
GPS + EGNOS	6.8 (4-9)	8.5 (3.0-59)		21.6 (8.2-163.1)	14.4 (5.4-100.2)
GPS + GIOVE	6.3 (4-8)	9.3 (3.0-90)		93.4 (32.1-998.5)	17.7 (5.9-193.7)
GPS + EGNOS + GIOVE	8.2 (6-10)	6.1 (2.9-19.9)		18.3 (9.3-54.4)	10.4 (5.2-32.4)
GPS + GALILEO	9 (6-12)	4.8 (2.5-14.7)		48.2 (26.9-135.2)	9.1 (4.9-26.0)
GALILEO	4.4 (4-5)	26.8 (4.5-373.1)		228.6 (42.6-3139.8)	44.1 (8.0-606.8)
GALILEO + EGNOS	6.4 (6-7)	9.7 (4.1-45.0)		23.4 (10.6-106.1)	15.2 (6.7-68.3)
GPS + GALILEO + EGNOS	11 (8-14)	4.2 (2.5-12.6)		13.2 (8.0-35.5)	7.4 (4.4-20.5)

Στον Πίνακα 8 αναλύεται μία οδική διαδρομή (διάρκειας πλέον των 8 ωρών) γύρω από τη λίμνη του Μόρνου, συγκρίνοντας τις χρήσεις μετρήσεων L1, L1/L2 και διπλής συχνότητας L1/E5a με ακεραιότητα από την υπηρεσία SoL του GALILEO.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι τρεις τελευταίες γραμμές, όπου θεωρήθηκε ότι επιπλέον ο χρήστης θα λαμβάνει RTK/VRS διορθώσεις από ένα δίκτυο σταθμών αναφοράς, όπως το HEPOS. Στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιούνται πολύ χαμηλότερες τιμές UERE, δεδομένου ότι τα περισσότερα επιμέρους σφάλματα των μετρήσεων μειώνονται ή εξαλείφονται. Παραδείγματος χάριν, για RTK μετρήσεις στη συχνότητα L1 με το σύστημα GALILEO, χρησιμοποιώντας μια VRS υπηρεσία, οι αντίστοιχες εγγραφές του Πίνακα 1 για τα σφάλματα της ιονόσφαιρας και της τροπόσφαιρας μειώνονται περίπου κατά 95%, το σφάλμα λόγω της ιονοσφαιρικής απόκλισης των μετρήσεων κώδικα/φάσης μειώνεται κατά 98%, ενώ τα σφάλματα συγχρονισμού και της τροχιάς των δορυφόρων, και της καθυστέρηση του κώδικα σχεδόν εξαλείφονται τελείως.

Πίνακας 8: Δείκτες γεωμετρικής ισχύος GDOP και Ολικής Ακρίβειας Πλοήγησης σε οδική διαδρομή στην περιοχή του Μόρνου, αυτόνομα ή με RTK διορθώσεις από δίκτυα μονίμων σταθμών αναφοράς τύπου HEPOS.

Σχηματισμός	L1 / L1/L5 / SoL	Single frequency	Dual frequency	SoL
GPS	2.3 (1.5-3.7)	30.9 (22.1-45.1)	5.4 (3.9-8.0)	5.4 (3.9-8.0)
GPS + EGNOS	2.1 (1.4-3.1)	6.9 (5.4-8.9)	4.2 (3.2-5.8)	4.2 (3.2-5.8)
GPS + GIOVE	2.1 (1.5-3.0)	26.8 (20.9-37.1)	4.7 (3.6-6.5)	4.7 (3.6-6.5)
GPS + EGNOS + GIOVE	1.9 (1.4-2.6)	7.8 (6.4-10.1)	4.0 (3.2-5.0)	4.0 (3.2-5.1)
GPS + GALILEO	1.5 (1.1-2.1)	19.5 (16.4-24.0)	3.4 (2.8-4.2)	3.4 (2.8-4.2)
GALILEO	2.4 (1.6-3.5)	28.4 (22.8-35.1)	4.9 (3.8-6.4)	4.9 (3.8-6.5)
GALILEO + EGNOS	2.1 (1.5-3.2)	7.2 (6.0-8.8)	4.2 (3.4-5.4)	4.2 (3.4-5.4)
GALILEO	2.4 (1.6-3.5)	8.1 (5.9-11.3)	1.39 (1.18-1.63)	
GPS + GALILEO	1.5 (1.1-2.1)	5.4 (4.3-7.3)	0.99 (0.87-1.15)	

4. Συμπεράσματα

Από τη συνοπτική αξιολόγηση των συστημάτων GNSS για τυπικές κινηματικές πορείες συνάγονται τα ακόλουθα γενικά συμπεράσματα: Από τη συνδυασμένη χρήση και των τριών συστημάτων GPS, EGNOS και GALILEO που έδωσε τιμή DOP 1.4 θα είναι εφικτό να επιτυγχάνουμε στο άμεσο μέλλον εντοπισμό της θέσης σημείων οπουδήποτε στον ελλαδικό χώρο με ακρίβεια της τάξης $DOP \times \sigma_{obs}$, όπου σ_{obs} θα εξαρτάται κυρίως από τις δυνατότητες των μελλοντικών δεκτών GNSS. Επιπρόσθετα θα είναι δυνατόν να έχουμε ακριβείς λύσεις σε πραγματικό χρόνο ακόμα και σε πολύ απαιτητικά περιβάλλοντα (με περιορισμούς σε μεγάλες γωνίες ύψους των δορυφόρων). Σε αστικά περιβάλλοντα, εάν οι ίδιες διαδρομές εκτελεστούν με μετρήσεις φάσης μέσω διαδικασιών RTK ή ο χρήστης λαμβάνει αντίστοιχα διαφορικές διορθώσεις από εικονικούς σταθμούς αναφοράς, όπως το HEPOS, οι αντίστοιχες αποδόσεις των συστημάτων GPS και GALILEO θα μπορούν να βελτιωθούν περίπου κατά δύο τάξεις μεγέθους εξ αιτίας των χαμηλότερων UERE που συνεπάγονται οι εν λόγω διαδικασίες.

Βιβλιογραφία

- Ευρωπαϊκή Επιτροπή, 2006. *Πράσινη Βίβλος για τις εφαρμογές της δορυφορικής πλοήγησης*
- Κατσιγιάννη, 2011. *Ανάλυση Επιδόσεων των Επερχόμενων Συστημάτων GNSS για Κινηματικές Εφαρμογές Εντοπισμού στον Ελληνικό Χώρο*. Διπλωμ. Εργ. Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Hein, G.W. and Rodriguez, J-A.A., 2006. Combining Galileo PRS and GPS M-Code. Inside GNSS, Jan./Febr.
- Langley, R.B., 1999. *Dilution of Precision*, GPS World, Vol. 10 (5), pp. 52-59.
- VEGA Group PLC, 2005. *Galileo System Simulation Facility-Algorithms and Models*. GSSFP2.OM.002, June.