ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΕΠΙΓΕΙΩΝ ΣΑΡΩΤΩΝ LASER

Μ. Τσακίρη, Δ. Σταθάς, Α. Μπίθας, Α. Βαλάνη
Σχολή Αγρονόμων-Τοπογράφων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Email: mtsakiri@central.ntua.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η τεχνολογία της επίγειας σάρωσης laser αποτελεί σήμερα την πλέον υποσχόμενη μέθοδο για λεπτομερείς τοπογραφικές αποτυπώσεις και την δημιουργία τρισδιάστατων μοντέλων αντικειμένων του περιβάλλοντος χώρου. Η αναγκαιότητα της διακρίβωσης των συσκευών σάρωσης laser είναι μεγάλη, κυρίως γιατί διαφαίνεται ότι η ακρίβεια διαφοροποιείται στα συστήματα και εξαρτάται από τον συγκεκριμένο έλεγχο που έχει υποστεί κάθε όργανο. Η εργασία αυτή παρουσιάζει μια μεθοδολογία διακρίβωσης συστήματος επίγειου σαρωτή τόσο σε εργαστηριακό περιβάλλον όσο και στο πεδίο. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η επαναληψιμότητα μέτρησης του σαρωτή δεν επηρεάζεται από τις συνθήκες μέτρησης μέχρι την απόσταση των 100m, και οι απόλυτες διαφορές στις σχετικές θέσεις στόχων ελέγχου είναι της τάξης του 0.5mm όταν συγκρίνονται με γεωδαιτικές μεθόδους.

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η επίγεια τρισδιάστατη σάρωση laser (terrestrial laser scanning, TLS) μεγάλου βεληνεκούς (μέχρι περίπου 300m) είναι μια νέα και αναπτυσσόμενη τεχνολογία που προσφέρει την δυνατότητα καταγραφής μεγάλου αριθμού σημείων (νεφών) στο χώρο σε σύντομο χρονικό διάστημα, με μεγάλη πυκνότητα και ακρίβεια, χωρίς να υπάρχει φυσική επαφή με το αντικείμενο. Τα νέφη των σημείων αποτελούνται από τις τρισδιάστατες συντεταγμένες της επιφάνειας που έχει σαρωθεί.

Το γωνιακό εύρος εκπομπής του παλμού laser κατά την λειτουργία ενός σαρωτή κυμαίνεται από λίγα microradians σε λίγα milliradians, επιτρέποντας έτσι την συλλογή δεδομένων εκατομμυρίων σημείων μιας επιφάνειας σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα. Για παράδειγμα, το γωνιακό εύρος 5 μrad σε απόσταση 50m ισοδυναμεί με 0.25mm. Αυτό το βήμα σάρωσης αντιστοιχεί σε 16 εκατομμύρια σημεία ανά τετραγωνικό μέτρο.

Η χρήση της τεχνολογίας σε συνήθεις τοπογραφικές αποτυπώσεις μεγάλης κλίμακας έχει ξεκινήσει ουσιαστικά την τελευταία πενταετία ενώ ενδεικτικές εφαρμογές περιλαμβάνουν αποτυπώσεις για την τεκμηρίωση της πολιτιστικής κληρονομιάς, τον έλεγχο βιομηχανικών εγκαταστάσεων, την μέτρηση δομικών παραμορφώσεων, την δημιουργία μοντέλων εικονικής πραγματικότητας, ψηφιακών μοντέλων εδάφους, την μέτρηση χωματισμών σε ορυχεία.

Η αναγκαιότητα της διακρίβωσης των σαρωτών laser είναι μεγάλη, κυρίως γιατί διαφαίνεται ότι η ακρίβεια διαφοροποιείται από σύστημα σε σύστημα και εξαρτάται από τον συγκεκριμένο έλεγχο που έχει υποστεί κάθε όργανο, αφού η παραγωγή τους βρίσκεται ακόμα σε χαμηλά επίπεδα λόγω του αυξημένου κόστους της μονάδας παραγωγής παλμού laser για μεγάλο βεληνεκές. Επομένως, είναι απαραίτητο να

σχεδιαστεί μια μεθοδολογία διακρίβωσης των μετρήσεων σάρωσης που να επιτρέπει τόσο την εύκολη εφαρμογή της όσο και την αξιοπιστία ως προς την ιχνηλασιμότητα των αποτελεσμάτων σε σχέση με κάποιο πρότυπο σύστημα.

Η εργασία αυτή αποσκοπεί στην παρουσίαση μιας μεθοδολογίας διακρίβωσης συστημάτων επίγειας σάρωσης laser τόσο σε εργαστηριακό περιβάλλον όσο και στο πεδίο. Η μεθοδολογία βασίζεται στην επαναληψιμότητα των μετρήσεων και στην χρήση σημείων ελέγχου. Αρχικά περιγράφονται οι βασικές αρχές λειτουργίας των επίγειων σαρωτών και η γεωμετρική αρχή που διέπει τις μετρήσεις και την μετατροπή τους σε ένα ενιαίο σύστημα αναφοράς. Στην συνέχεια περιγράφεται η πειραματική διαδικασία συλλογής δεδομένων με τον σαρωτή Cyrax2500 σε εργαστηριακό περιβάλλον όπου γίνεται χρήση μιας πρότυπης βάσης ελέγχου οργάνων EDM (electronic distance meter) μήκους 50m η οποία με τη σειρά της έχει μετρηθεί με το διακριβωμένο όργανο μέτρησης μήκους Mekometer 3000 KERN με ακρίβεια της τάξης των 0.1mm ± 1ppm. Σε περιβάλλον εξωτερικού χώρου, με το ίδιο όργανο εκτελούνται σειρές μετρήσεων για αποστάσεις και πέραν των 50m και ελέγχονται με χρήση διακριβωμένων οργάνων EDM. Στην εργασία περιγράφονται οι πειραματικές διατάξεις που χρησιμοποιούνται και οι διαδικασίες μέτρησης. Επίσης, δίνονται αποτελέσματα τόσο για την επαναληψιμότητα των μετρήσεων στο προσδιορισμό των συντεταγμένων των σημείων ελέγχου όσο και για τις ακρίβειες που επιτυγχάνονται στον προσδιορισμό αποστάσεων. Η αξιοπιστία του συστήματος σάρωσης προκύπτει από την στατιστική ανάλυση των αποτελεσμάτων. Τέλος, δίνονται συμπεράσματα για την μεθοδολογία διακρίβωσης και την ακρίβεια του σαρωτή Cyrax 2500.

2 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΩΝ ΕΠΙΓΕΙΩΝ ΣΑΡΩΤΩΝ LASER

Οι επίγειοι σαρωτές laser δύναται να είναι παλμικοί (pulse method) ή να βασίζονται στην μέτρηση της διαφοράς φάσης μιας συνεχούς διαμορφωμένης ακτινοβολίας (continuous-wave ranging) [1] ή τριγωνισμού (triangulation) [2]. Η εργασία αυτή επικεντρώνεται στην διακρίβωση παλμικών σαρωτών laser.

Κατά την διαδικασία μέτρησης με την μέθοδο του παλμού, ο σαρωτής εκπέμπει μια συγκεντρωμένη φωτεινή ενέργεια σε τακτά χρονικά διαστήματα που μετά την ανάκλασή της σε κάποια επιφάνεια προσλαμβάνεται από τον φωτοανιχνευτή του οργάνου. Η απόσταση ρ που διάνυσε το σήμα υπολογίζεται από τον χρόνο Δt μετάβασης-επιστροφής του παλμού, δηλαδή

$$\rho = \frac{1}{2} c \, \Delta t \qquad (1)$$

όπου c είναι η ταχύτητα του φωτός στο κενό. Ουσιαστικά, η αρχή λειτουργίας ενός σαρωτή είναι ίδια με αυτή των ηλεκτρονικών οργάνων μέτρησης μηκών (Electronic Distance Measurement, EDM) [3]. Επιπλέον, υπάρχουν περιστρεφόμενα κάτοπτρα και σερβομηχανισμοί που ανακλούν τον παλμό σε ισοδύναμα διαστήματα τόξου τόσο στο οριζόντιο όσο και στο κατακόρυφο επίπεδο. Ετσι δίνεται η δυνατότητα μέτρησης κατά τις τρεις διαστάσεις όπου επιτυγχάνεται με δύο βαθμούς ελευθερίας ως προς την περιστροφή.

Οι παλμικοί σαρωτές είναι συστήματα που δεν χρησιμοποιούν κάποιον παθητικό δέκτη (κάτοπτρο) ή ειδικό κατάφωτο, πρίσμα ή άλλου είδους ανακλαστήρα για την μέτρηση αποστάσεων, αλλά δέχονται την ανακλώμενη ακτινοβολία απ' ευθείας από τον στόχο. Η

ενέργεια του ανακλώμενου παλμού εξαρτάται από γεωμετρικούς και φυσικούς παράγοντες. Οι φυσικοί παράγοντες, οι οποίοι είναι εξαρτώμενοι από το μήκος κύματος της ακτινοβολίας, περιλαμβάνουν τις απώλειες κατά την ανάκλαση λόγω του υλικού, την μαγνητική περατότητα και αγωγιμότητα του υλικού [4], [5]. Αυτές οι παράμετροι υπαγορεύουν το ποσοστό ενέργειας του παλμού που απορροφάται από την επιφάνεια ανάκλασης. Οι γεωμετρικοί παράγοντες περιλαμβάνουν την γωνία πρόσπτωσης και την τραχύτητα της επιφάνειας που καθορίζει πως γίνεται η σκέδαση της ακτινοβολίας.

Ο χρόνος μετάβασης- επιστροφής καθορίζεται από τη στιγμή που θα φτάσει στον μετρητή του οργάνου ένα σήμα που είναι προιόν ετεροδυναμικής μίξης του σήματος που διαμόρφωσε την ακτινοβολία με ένα άλλο χαμηλότερης συχνότητας. Θεωρώντας για την μοναδιαία μέτρηση ότι έγινε μετάδοση σήματος σε μια ομαλή επιφάνεια με κάθετη γωνία πρόσπτωσης και μη λαμβάνοντας τις ατμοσφαιρικές επιδράσεις, η επιστρεφόμενη παλμική ακτινοβολία εξαρτάται από τις ιδιότητες του υλικού που διαφέρουν από επιφάνεια σε επιφάνεια. Επομένως, ένας ανακλώμενος παλμός με μειωμένο πλάτος φτάνει στο όργανο αργότερα από έναν αντίστοιχο παλμό πλήρους πλάτους [6]. Αυτή η χρονική καθυστέρηση δt, δίνει μια διαφορά μήκους δρ, βάσει της εξίσωσης (1), δηλαδή,

$$\delta\rho = \frac{1}{2} c\ \delta t \qquad (2)$$

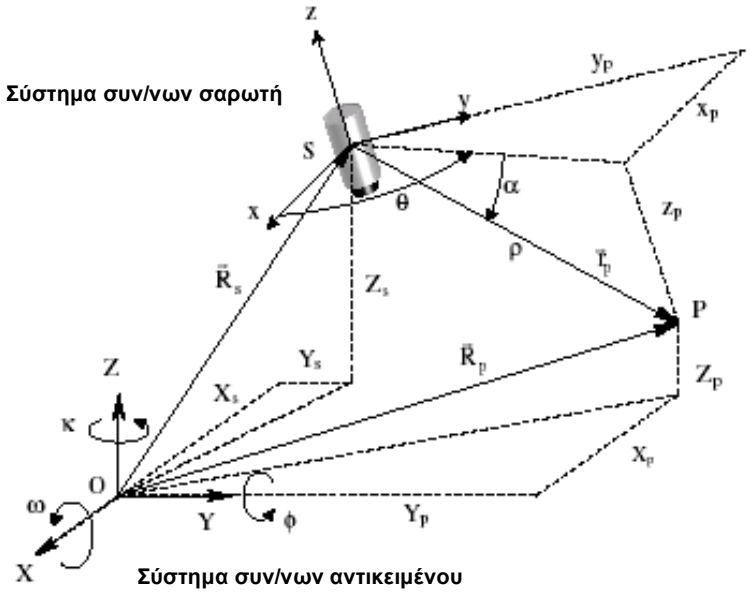
Εκτός από τις γωνιακές και τις μετρήσεις απόστασης, πολλοί σαρωτές προσφέρουν πληροφορία για το πλάτος της επιστρεφόμενης ακτινοβολίας, που συνηθίζεται να ονομάζεται «ένταση» σήματος (intensity). Η ένταση μπορεί να δώσει χρήσιμες πληροφορίες για τις ιδιότητες του υλικού των ανακλώμενων επιφανειών. Η φυσική σημασία της πληροφορίας αυτής, δηλαδή αν η ένταση δηλώνει πλάτος επιστρεφόμενου παλμού ή ενέργεια, δεν προσδιορίζεται από τους κατασκευαστές των συσκευών επίγειας σάρωσης.

Οι σαρωτές laser διαφέρουν από τις συσκευές EDM γιατί δεν στοχεύουν σε ένα μόνο σημείο. Με το EDM η μέτρηση της απόστασης προς ένα σημείο γίνεται με σαφήνεια τοποθετώντας το σταυρόνημα του τηλεσκοπίου του οργάνου στο κέντρο του στόχου. Κάτι τέτοιο δεν γίνεται με τον σαρωτή laser, όπου η μέτρηση της απόστασης γίνεται κατά ισόποσες γωνιακές τιμές τόξου. Αυτό δεν εμποδίζει την αποτύπωση επιφανειών, αντιθέτως αποτελεί πρόκληση για την διαδικασία ελέγχου και βαθμονόμησης των σαρωτών laser με χρήση ειδικών ανακλαστικών στόχων ως σημείων ελέγχου. Ετσι, αντί να γίνεται επιστροφή μίας μέτρησης, πραγματοποιείται ομάδα επιστροφών μέσω των οποίων προκύπτει η εκτιμώμενη θέση του κέντρου του στόχου. Οι πειραματικές διαδικασίες και τα αποτελέσματα των μετρήσεων με σαρωτή laser που περιγράφονται στην ενότητα 4 αναφέρονται στην καλύτερη εκτίμηση της θέσης του κέντρου στόχου.

3 ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΩΝ

Η γεωμετρία των παρατηρήσεων κατά τη μέτρηση με επίγειο σαρωτή laser περιγράφεται στο σχήμα 2. Οι παρατηρήσεις του σαρωτή είναι η απόσταση ρ, η γωνία ανύψωσης α, (ή αντίστοιχα γωνία ύψους) και η οριζόντια διεύθυνση θ, η οποία λαμβάνεται σε σχέση με το εσωτερικά ορισμένο σύστημα συντεταγμένων του σαρωτή (scanner space). Οι καρτεσιανές συντεταγμένες (x, y, z), προκύπτουν ως το αποτέλεσμα των λογισμικών επεξεργασίας των παραπάνω πρωτογενών μετρήσεων και θεωρούνται ως οι βασικές παρατηρήσεις της διαδικασίας σάρωσης. Αυτή η παραμετροποίηση διευκολύνει τις μαθηματικές σχέσεις που απαιτούνται για τον μετασχηματισμό όλων των νεφών σημείων σε ενιαίο σύστημα αναφοράς (γεωαναφορά).

Το πρόβλημα της γεωαναφοράς στην τεχνολογία της επίγειας σάρωσης αφορά τον μετασχηματισμό των παρατηρήσεων από το σύστημα συντεταγμένων του σαρωτή (scanner space) στο σύστημα συντεταγμένων του αντικειμένου (object space) που δύναται να είναι τοπικό ή γενικό σύστημα και ορίζεται από αριθμό τρισδιάστατων σημείων ελέγχου.



Σχήμα 2. Η γεωμετρία των μετρήσεων με επίγειο σαρωτή laser (από [7])

Ο παραμετρικός μετασχηματισμός ενός διανύσματος παρατήρησης από σύστημα συντεταγμένων του σαρωτή στο σύστημα συντεταγμένων του αντικειμένου δίνεται από την σχέση

$$\vec{R}_p = M\,\vec{r}_p + \vec{R}_S \qquad (3)$$

όπου

$\vec{r}_p = [x_p \quad y_p \quad z_p]^T$ προκύπτει από τις παρατηρήσεις και είναι το διάνυσμα θέσης του σημείου p στον σύστημα συντεταγμένων του σαρωτή

$\vec{R}_p = [X_p \quad Y_P \quad Z_P \quad]^T$ είναι το διάνυσμα θέσης του σημείου p στο σύστημα συντεταγμένων του αντικειμένου

$\vec{R}_S = [X_S \quad Y_S \quad Z_S]^T$ είναι το διάνυσμα θέσης της αρχής του συστήματος συντεταγμένων του σαρωτή στο σύστημα συντεταγμένων του αντικειμένου

M είναι ο πίνακας στροφής των γωνιών (ω, ϕ, κ) γύρω από τους άξονες X, Y και Z αντίστοιχα και δίνεται από:

$$M = \begin{bmatrix} \cos\varphi\cos\kappa & \cos\omega\sin\kappa + \sin\omega\sin\varphi\cos\kappa & \sin\omega\sin\kappa - \cos\omega\sin\varphi\cos\kappa \\ -\cos\varphi\sin\kappa & \cos\omega\cos\kappa - \sin\omega\sin\varphi\sin\kappa & \sin\omega\cos\kappa + \cos\omega\sin\varphi\sin\kappa \\ \sin\varphi & -\sin\omega\cos\varphi & \cos\omega\cos\varphi \end{bmatrix}$$

Η μοναδική λύση για τον προσδιορισμό των παραμέτρων μετασχηματισμού (Xs, Ys, Zs) και των γωνιών στροφής (ω, ϕ, κ) απαιτεί 6 παρατηρήσεις από 3 σημεία στο σύστημα

συντεταγμένων του αντικειμένου, ενώ για περισσότερες παρατηρήσεις χρησιμοποιείται η μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων. Το παραμετρικό μοντέλο που εφαρμόζεται προκύπτει όταν στην εξίσωση (3) οι όροι αναδιαταχθούν ως εξής

$$\vec{r}_p = M^T (\vec{R}_p - \vec{R}_S)$$

Ο πίνακας μεταβλητότητας-συμμεταβλητότητας των εκτιμώμενων παρατηρήσεων (x_p, y_p, z_p) πρέπει να προκύψει από τον αντίστοιχο πίνακα των παρατηρήσεων (ρ_p, α_p, θ_p) μέσω του νόμου μετάδοσης των μεταβλητοτήτων. Ομως, στην πράξη θεωρείται ότι προκύπτει διαγώνιος πίνακας μεταβλητότητας-συμμεταβλητότητας ώστε να διευκολύνει τον σχηματισμό των κανονικών εξισώσεων και την στατιστική ανάλυση των συνορθωμένων αποτελεσμάτων.

Οταν η συσκευή του σαρωτή διαθέτει την δυνατότητα να οριζοντιώνεται, να κεντρώνεται και να έχει προσανατολισμό τότε η διαδικασία της γεωαναφοράς απλουστεύεται σημαντικά. Με βάση το σχήμα 2, η οριζοντίωση επιτρέπει ώστε οι γωνίες ω και φ να είναι ίσες με μηδέν. Η κέντρωση πάνω από γνωστό σημείο ή η μέτρηση με τοπογραφικό όργανο ή GPS δίνει απευθείας τις 3 παραμέτρους αρχής των αξόνων. Τέλος, η γωνία στροφής κ μπορεί να έχει συγκεκριμένη τιμή από μετρήσεις διεύθυνσης με χρήση εξωτερικού γωνιομετρικού οργάνου που βρίσκεται πάνω στον σαρωτή.

4 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΕΛΕΓΧΟΥ

Η πειραματική διαδικασία που παρουσιάζεται στην εργασία αυτή πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του επίγειου σαρωτή laser Cyrax 2500. Το συγκεκριμένο όργανο έχει ένα πεδίο σάρωσης 40° επί 40° και λειτουργεί στην περιοχή του πράσινου laser (532nm). Η διάμετρος της δέσμης είναι μικρότερη από 6mm για αποστάσεις μέχρι 50m, ενώ οι αποστάσεις μετρώνται με ακρίβεια ± 4mm και οι γωνίες με ακρίβεια ± 60micro-radians. Σύμφωνα με τους κατασκευαστές, η ακρίβεια προσδιορισμού ενός σημείου είναι ± 6mm για αποστάσεις που κυμαίνονται από 1.5m – 50m. Ο ρυθμός σάρωσης είναι υψηλός και μετράει 1000 σημεία ανά δευτερόλεπτο. Το σύστημα λειτουργεί με την χρήση εξωτερικού υπολογιστή και η επεξεργασία των δεδομένων μπορεί να γίνει με το λογισμικό πακέτο Cyclone που συνοδεύει το συγκεκριμένο όργανο (www.cyrax.com).

Εγιναν δύο σειρές πειραμάτων για τον έλεγχο του οργάνου, η πρώτη σε εργαστηριακό περιβάλλον όπου γίνεται χρήση μιας πρότυπης βάσης ελέγχου οργάνων EDM μήκους 50m και η δεύτερη σε εξωτερικό χώρο για αποστάσεις και πέραν των 50m. Η περιγραφή των εργασιών συλλογής δεδομένων και τα αντίστοιχα αποτελέσματα κάθε σειράς μετρήσεων δίνονται στις παρακάτω ενότητες.

4. 1 Ελεγχος σε εργαστηριακό περιβάλλον

Η επαναληψιμότητα των μετρήσεων για τον εσωτερικό έλεγχο των μετρήσεων είναι σημαντικό χαρακτηριστικό ενός επίγειου σαρωτή. Με σκοπό να διερευνηθεί για το σύστημα Cyrax 2500 χρησιμοποιήθηκε η βάση ελέγχου οργάνων EDM μήκους 50m που βρίσκεται στην Σχολή Αγρονόμων-Τοπογράφων Μηχανικών του ΕΜΠ. Η βάση έχει μετρηθεί με το διακριβωμένο όργανο μέτρησης μήκους Mekometer 3000 KERN με

ακρίβεια της τάξης των 0.1mm ± 1ppm. Αποτελείται από 26 βάθρα, όπως φαίνεται στην εικόνα που ακολουθεί (Εικόνα 1).

Εικόνα 1. Η πρότυπη βάση ελέγχου EDM

Σε συγκεκριμένες αποστάσεις βάθρων (συνήθως ανά 5m) τοποθετήθηκε σε ειδική συσκευή ο ειδικός ανακλαστικός στόχος της Cyrax (Cyra target) που αναγνωρίζεται αυτόματα από το λογισμικό του σαρωτή. Ο σαρωτής τοποθετήθηκε στην μία άκρη της βάσης και έγιναν 5 επαναλαμβανόμενες σαρώσεις σε κάθε θέση του στόχου. Ολες οι σαρώσεις έγιναν με διακριτική ικανότητα (resolution) 2mm και οι ατμοσφαιρικές συνθήκες που επικρατούσαν στον εργαστηριακό χώρο καθ' όλη την διάρκεια των πειραμάτων ήταν θερμοκρασία 21ºC και πίεση 999.5mb.

Μέσω του λογισμικού Cyclone έγινε εξαγωγή των συλλεγόμενων δεδομένων σε αρχεία μορφής ASCII που περιλαμβάνουν τις καρτεσιανές συντεταγμένες στο σύστημα του σαρωτή καθώς και την ανακλαστικότητα κάθε σημείου που περιέχεται στο νέφος σημείων. Ο προσδιορισμός των συντεταγμένων του κέντρου του στόχου για κάθε σάρωση έγινε με λογισμικό που αναπτύχθηκε σε περιβάλλον Matlab μέσω του αλγορίθμου "fuzzyposfine" [9] και σε κάθε περίπτωση υπολογίστηκε η αντίστοιχη τυπική απόκλιση.

Σημείο	X (m)	σ_χ (mm)	Y(m)	σ_Y (mm)	Z(m)	σ_Z (mm)
1	-0.478	0.4	1.171	0.4	-50.006	0.3
2	-0.289	0.3	1.049	0.4	-45.013	0.2
3	-0.097	0.1	0.933	0.1	-40.015	0.1
4	0.093	0.2	0.809	0.3	-35.020	0.2
5	0.283	0.3	0.691	0.1	-30.024	0.2
6	0.438	0.1	0.590	0.2	-26.027	0.2
7	0.667	0.1	0.441	0.2	-20.037	0.2
8	0.863	0.2	0.314	0.1	-15.065	0.1
9	1.052	0.0	0.196	0.1	-10.048	0.3
10	1.247	0.1	0.069	0.2	-5.066	0.3

Πίνακας 1. Συντεταγμένες στόχων βάθρων όπως προέκυψαν από πολλαπλές σαρώσεις μέσω του αλγορίθμου "fuzzyposfine"

Τα αποτελέσματα συνοψίζονται στον Πίνακα 1 και δίνουν την μέση τιμή του κέντρου κάθε στόχου (X, Y, Z) στο σύστημα συντεταγμένων του σαρωτή χρησιμοποιώντας τις 5 σαρώσεις καθώς και την αντίστοιχη τυπική απόκλιση (σ_X, σ_Y, σ_Z). Όπως φαίνεται, η μικρή τυπική απόκλιση στις συντεταγμένες των σημείων υποδεικνύει ότι η επαναληψιμότητα των μετρήσεων είναι αρκετά μεγάλη και ανεπηρέαστη από την απόσταση. Επίσης οι τιμές των απόλυτων διαφορών κυμαίνονται σε αναμενόμενα επίπεδα, δεδομένου ότι το τυπικό σφάλμα του μετασχηματισμού μεταξύ του συστήματος συντεταγμένων του σαρωτή και του αντίστοιχου γεωδαιτικού συστήματος είναι 1.7mm. Αυτό σημαίνει ότι για επίπεδο εμπιστοσύνης 95%, διαφορές στις σχετικές θέσεις σημείων της τάξης των ± 5mm είναι στατιστικά αποδεκτές.

Ο προσδιορισμός του κέντρου κάθε στόχου έγινε επίσης με κλασσικές γεωδαιτικές μεθόδους, δηλαδή μετρήσεις γωνιών και μετρήσεις υψομετρικών διαφορών με όργανα που είναι διακριβωμένα (total station Leica TC307). Οι οριζόντιες αποστάσεις μεταξύ των στόχων που ήταν τοποθετημένοι στα βάθρα υπολογίστηκαν τόσο από τις γεωδαιτικές συντεταγμένες όσο και από τις συντεταγμένες των σαρώσεων. Ο Πίνακας 2 δίνει τα παραπάνω αποτελέσματα μαζί με τις απόλυτες διαφορές τους. Από τα αποτελέσματα του πίνακα φαίνεται ότι οι τιμές των αποστάσεων διαφέρουν ελάχιστα και οι διαφορές δεν φαίνεται να σχετίζονται με την απόσταση.

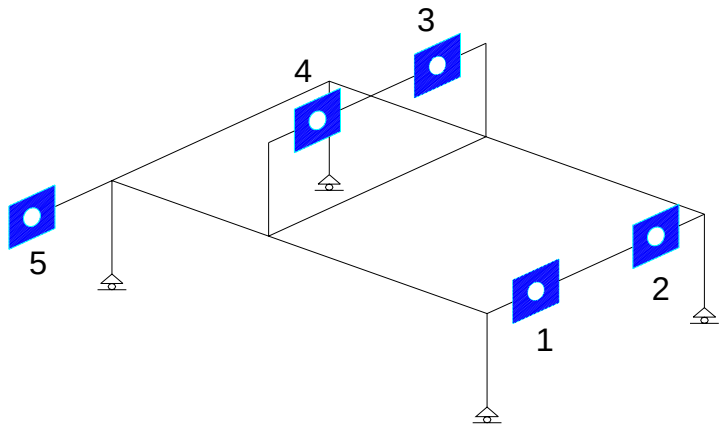
Σχετική θέση βάθρων	Απόσταση από συν/νες σαρωτή (m)	Απόσταση από γεωδαιτικές συν/νες (m)	Απόλυτες διαφορές (mm)
1-2	4.9982	4.9996	1.4
2-3	5.0030	5.0005	2.5
3-4	5.0001	5.0002	0.1
4-5	5.0003	5.0054	5.1
5-6	4.0011	4.0005	0.6
6-7	5.9970	5.9980	1.0
7-8	4.9774	4.9780	0.6
8-9	5.0213	5.0200	1.3
9-10	4.9879	4.9845	3.4

Πίνακας 2. Αποστάσεις μεταξύ στόχων βάθρων όπως προέκυψαν από γεωδαιτικές συντεταγμένες και συντεταγμένες σαρωτή, και οι αντίστοιχες απόλυτες διαφορές

4. 2 Ελεγχος σε εξωτερικό περιβάλλον

Η διερεύνηση της ακρίβειας και διακριτικής ικανότητας μέτρησης του συστήματος για αποστάσεις μεγαλύτερες των 50m ήταν ο στόχος της δεύτερης σειράς των πειραμάτων. Σε σταθερό πλαίσιο τοποθετήθηκαν πέντε στόχοι όπως φαίνεται στο σχήμα 4. Το πλαίσιο μετακινήθηκε στα 15m, 35m, 55m και 100m από τον σαρωτή και οι σαρώσεις των στόχων έγιναν με βήμα 1.5mm. Οι εξωτερικές συνθήκες θερμοκρασίας ήταν 7ºC, υγρασίας 72% και πίεσης 756mm. Για αποστάσεις από τον σαρωτή στα 15m, 35m, 55m έγιναν επιπλέον σαρώσεις πυκνότητας 1mm σε 4 στόχους. Συγκεκριμένα, οι «λεπτομερείς» σαρώσεις πυκνότητας 1mm προκύπτουν εφόσον ο χρήστης ζητήσει από το λογισμικό που συνοδεύει το σαρωτή να προσδιορίσει τη θέση του κέντρου του κάθε στόχου (ωστόσο, για να είναι δυνατόν κάτι τέτοιο, ο χρήστης πρέπει να υποδείξει κατά προσέγγιση τη θέση του στόχου σε φωτογραφία χαμηλής ανάλυσης που είναι ενσωματωμένη στον σαρωτή). Επίσης, μέσω

γεωδαιτικών μετρήσεων, προσδιορίστηκαν οι συντεταγμένες του κέντρου όλων των στόχων σε τοπικό σύστημα με ακρίβεια της τάξης του 1mm.



Σχήμα 4. Πλαίσιο στόχων

Πέραν των γεωδαιτικών συντεταγμένων και των συντεταγμένων που προσδιορίστηκαν χρησιμοποιώντας το λογισμικό του σαρωτή, μία ακόμη σειρά συντεταγμένων για το κέντρο των στόχων προέκυψε χρησιμοποιώντας μία βελτιωμένη έκδοση του αλγορίθμου "fuzzyposfine" [9]. Πρόκειται για έναν αλγόριθμο ο οποίος βασίζεται στην fuzzy ταξινόμηση της ανακλαστικότητας των σημείων ενός νέφους για τον ακριβή προσδιορισμό του κέντρου ενός στόχου. Προηγούμενα πειράματα, έχουν δείξει ότι μέσω του συγκεκριμένου αλγορίθμου, σε συνθήκες εργαστηρίου και για μικρές αποστάσεις (μέχρι 15m), η ακρίβεια προσδιορισμού της θέσης του κέντρου του στόχου είναι της τάξης των 10^{-4} m ακόμη και όταν η σάρωση των στόχων γίνεται υπό γωνία [9].

Για αποστάσεις από τον σαρωτή στα 15m, 35m, 55m και χρησιμοποιώντας τις γεωδαιτικές συντεταγμένες των στόχων, τις συντεταγμένες που προέκυψαν από το λογισμικό του σαρωτή για τις τρεις σειρές σαρώσεων (ονομάζονται εδώ C15, C35 και C55) καθώς και τις συντεταγμένες που προέκυψαν από τον αλγόριθμο "fuzzyposfine" (ονομάζονται εδώ FF15, FF35 και FF55) έγινε ο παρακάτω έλεγχος: Θεωρώντας ως σύστημα αναφοράς το γεωδαιτικό σύστημα συντεταγμένων, προσδιορίστηκαν μέσω συνόρθωσης ελαχίστων τετραγώνων τα τυπικά σφάλματα των μετασχηματισμών από το εκάστοτε σύστημα του σαρωτή (C15, C35, C55, FF15, FF35, FF55) στο γεωδαιτικό σύστημα. Στον Πίνακα 3, φαίνεται ότι η ακρίβεια προσδιορισμού σ_o των κέντρων των στόχων είναι της τάξης του 10^{-4} m και δείχνει να είναι ανεξάρτητη από την απόσταση ενώ τα αποτελέσματα που προκύπτουν για τις συντεταγμένες που δίνει το πρόγραμμα του σαρωτή (C15, C35, C55) είναι ελαφρώς καλύτερα.

Τυπικό σφάλμα	Συν/νες σαρώσεων από λογισμικό σαρωτή			Συν/νες σαρώσεων από αλγόριθμο		
	C15	C35	C55	FF15	FF35	FF55
σ_o(m)	5.70E-04	6.17E-04	6.01E-04	7.97E-04	7.90E-04	8.43E-04

Πίνακας 3. Τυπικά σφάλματα μετασχηματισμών από το εκάστοτε σύστημα του σαρωτή προς το γεωδαιτικό σύστημα

Επίσης, έλεγχοι που αφορούσαν στην εκτίμηση της σχετικής ακρίβειας προσδιορισμού των κέντρων των στόχων χρησιμοποιώντας συντεταγμένες που έχουν προκύψει μόνο μέσω του σαρωτή έδειξαν ότι τα τυπικά σφάλματα των μετασχηματισμών μεταξύ διαφορετικών συστημάτων του σαρωτή κυμαίνονται από 4.8E-04m ως 7E-04m με τα αποτελέσματα του αλγορίθμου "fuzzyposfine" να είναι ελαφρώς καλύτερα.

Ένας ακόμα έλεγχος αφορούσε στη διερεύνηση της αξιοποίησης σαρώσεων μικρότερης πυκνότητας. Για το σκοπό αυτό, έγιναν σαρώσεις των 4 στόχων από τα 15m, 55m και 100m. Στην περίπτωση αυτή, ο αλγόριθμος που χρησιμοποιήθηκε ονομάζεται "fuzzypos" [9]. Προτιμήθηκε η χρήση του γιατί δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα ακόμη και όταν το βήμα σάρωσης είναι μεγαλύτερο από 1mm. Συγκεκριμένα, η τυπική ακρίβεια προσδιορισμού του κέντρου των στόχων στα 15m, 55m και 100m (ονομάζονται εδώ F15, F55 και F100) βρέθηκε ίση με 0.0011m, 00016m και 0.0017m αντίστοιχα. Αυτή η ακρίβεια για τις περισσότερες εφαρμογές είναι αρκετά ικανοποιητική ακόμη και σε μεγάλες αποστάσεις. Επίσης, επαναλαμβάνοντας τους ελέγχους που αφορούν στην εκτίμηση της σχετικής ακρίβειας προσδιορισμού των κέντρων των στόχων επιβεβαιώνεται ότι η ακρίβεια προσδιορισμού του στόχου δεν επηρεάζεται από την απόσταση (τουλάχιστον μέχρι τα 100m).

Τέλος, τόσο για αποτελέσματα των λεπτομερών σαρώσεων όσο και για τα αποτελέσματα των σαρώσεων μικρότερης πυκνότητας έγινε ένας ακόμη έλεγχος. Συγκεκριμένα, υπολογίστηκαν για όλες τις περιπτώσεις οι αποστάσεις μεταξύ όλων των στόχων καθώς και η μέση απόλυτη διαφορά για κάθε θέση του σαρωτή. Οι ίδιες αποστάσεις προσδιορίστηκαν μέσω των γεωδαιτικών συντεταγμένων και στον πίνακα που ακολουθεί (Πίνακας 4) συνοψίζονται τα αποτελέσματα των συγκρίσεων.

	Απόλυτες διαφορές για το λογισμικό του σαρωτή (mm)			Απόλυτες διαφορές για τον αλγόριθμο "fuzzyposfine" (mm)			Απόλυτες διαφορές για τον αλγόριθμο "fuzzypos" (mm)		
Απόσταση	C15	C35	C55	FF15	FF35	FF55	F35	F55	F100
1-2	0.0	0.5	0.7	0.0	0.1	1.4	1.9	1.7	2.5
1-3	1.4	1.8	1.0	1.5	2.4	1.4	1.4	0. 3	3.3
1-4	0.3	1.1	0.0	0.0	1.0	0.5	1.6	0. 7	0. 5
2-3	0.1	1.1	0.4	0.3	1.3	0.1	0. 8	3.9	0.0
2-4	0.5	0.1	1.5	0.7	0.1	1.9	0. 2	2.8	1.0
3-4	0.9	0.0	0.2	1.2	0.9	0.8	2.6	0. 1	3.9
μέση απόλυτη διαφορά (mm)	0.5	0.8	0.6	0.6	1.0	1.0	1.4	1.6	1.9

Πίνακας 4. Διαφορές των σχετικών αποστάσεων μεταξύ των κέντρων των στόχων όπως προκύπτουν από τις γεωδαιτικές μεθόδους και τις σαρώσεις

Όπως φαίνεται, για τις περισσότερες περιπτώσεις οι απόλυτες διαφορές είναι μικρότερες του χιλιοστού και τα αποτελέσματα φαίνεται να είναι ανεξάρτητα από την απόσταση του σαρωτή από το αντικείμενο. Οι σχετικά μεγάλες διαφορές (της τάξης του 1.5mm) που παρατηρούνται με τα δεδομένα σάρωσης που έγιναν με βήμα μεγαλύτερο του 1mm πιθανόν να οφείλονται στα αραιά δεδομένα σάρωσης που παρατηρήθηκαν για τους μακρινότερους στόχους. Αυτό οφείλεται στην δυσκολία εντοπισμού από τον χρήστη της

προσεγγιστικής θέσης του στόχου στην φωτογραφία που λαμβάνεται από την εσωτερική αλλά χαμηλής ανάλυσης ψηφιακή κάμερα του συστήματος.

5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η τεχνολογία της επίγειας σάρωσης laser προσφέρει μεγάλες δυνατότητες στην τοπογραφική κοινότητα για την συλλογή μεγάλης πυκνότητας χωρικής πληροφορίας και την αποτύπωση επιφανειών με λεπτομέρεια σε μικρό χρονικό διάστημα. Ωστόσο, δεδομένου ότι πρόκειται για νέα τεχνολογία απαιτείται διερεύνηση σχετικά με την διακρίβωση των σαρωτών laser γιατί η ακρίβεια των συστημάτων σάρωσης διαφοροποιείται ανάμεσα στους κατασκευαστές.

Οι τρέχουσες πρακτικές διακρίβωσης των οργάνων EDM δεν είναι άμεσα εφαρμόσιμες στους σαρωτές laser λόγω της βασικής διαφοράς στην μεθοδολογία μέτρησης (ομοιόμορφη δειγματοληψία σημείων έναντι σημειακής μέτρησης). Επομένως κατάλληλες διαδικασίες διακρίβωσης πρέπει να αναπτυχθούν για να επιβεβαιώνεται η ποιότητα των μετρήσεων ενός σαρωτή. Στην εργασία αυτή παρουσιάστηκε μια μεθοδολογία διακρίβωσης για ένα από τα ευρέως χρησιμοποιούμενα συστήματα σαρωτή (Cyrax 2500) που βασίστηκε τόσο σε χρήση πρότυπης βάσης ελέγχου EDM όσο και στον προσδιορισμό επιλεγμένων στόχων πάνω σε τρισδιάστατο πλαίσιο στο πεδίο και συσχετισμό τους με τα αποτελέσματα γεωδαιτικών μετρήσεων. Η εσωτερική ακρίβεια των μετρήσεων του σαρωτή μελετήθηκε μέσω της επαναληψιμότητας των μετρήσεων που είναι της τάξης του 0.2mm και ανεξάρτητη της απόστασης του σαρωτή από τον στόχο. Η εξωτερική ακρίβεια του σαρωτή διερευνήθηκε με συγκρίσεις των σχετικών θέσεων στόχων που έδωσαν απόλυτες διαφορές με τις γεωδαιτικές τεχνικές της τάξης του 0.5mm.

Σε συνέχεια της εργασίας αυτής θα αξιολογηθεί η επίδραση της επιφάνειας ανάκλασης της δέσμης laser και η επίδραση των ατμοσφαιρικών συνθηκών στις διαδικασίες σάρωσης για την διακρίβωση σαρωτών laser σε μη εργαστηριακό περιβάλλον.

Λέξεις-Κλειδιά: επίγεια σάρωση laser (laser scanning), EDM

6 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] Wehr, A. and U. Lohr, 1999, Airborne laser scanning— an introduction and overview, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 54: 68-82.

[2] Beraldin, J. –A., F. Blais, P. Boulanger, L. Cournoyer, J. Domey, S. F. El-Hakim, G. Godin, M. Rioux and J. Taylor, 2000, Real world monitoring through high resolution digital 3D imaging of objects and structures, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 55: 230-250.

[3] Rueger J. M., 1996, Electronic Distance Measurement: An Introduction. 4th Edition, Springer.

[4] Fowles, G. R., 1975, Introduction to Modern Optics, Second Edition, New York, NY Dover Publications Inc., 328 p.

[5] Jelalian, A., 1992, Laser Radar Systems, Boston, MA, Artech House, 292 p.

[6] Baltsavias, E. P., 1999, Airborne laser scanning: basic relations and formulas, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 54: 199-214.

[7] Lichti, D.D., M.P. Stewart, M. Tsakiri, and A.J. Snow, 2000, Benchmark Testing on a Three-dimensional Laser Scanning System. *Geomatics Research Australasia*, (72): 1-23.

[8] Weichel, H., 1990, Laser Beam Propagation in the Atmosphere, Bellingham, WA, SPIE Optical Engineering Press, 98 p.

[9] Valanis A. and M. Tsakiri, 2004, Automatic target identification for laser scanners. Proc. XX. ISPRS Congress, Istanbul, Turkey, 12-23 July, Vol XXXV [CD-ROM].