

ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΟΥ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΚΟΥ ΜΕ ΕΠΙΓΕΙΕΣ ΚΑΙ ΕΝΑΕΡΙΕΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ

Εφαρμογή στο Τεχνολογικό Και Πολιτιστικό Πάρκο Λαυρίου

Κων/νος Αζναβουρίδης, Στεφανία Ιωαννίδου, Γεώργιος Πανταζής¹

¹Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
email: kaznavouridis@gmail.com, stef.ioan.17@outlook.com

Περίληψη

Η ανάπτυξη τόσο των επίγειων – συμβατικών όσο και των εναέριων (UAS) συστημάτων μέτρησης την τελευταία δεκαετία, έχει βελτιώσει σημαντικά την ακρίβεια, το χρόνο αλλά και το κόστος δημιουργίας τοπογραφικών υποβάθρων. Στην εργασία αυτή διερευνάται η δυνατότητα δημιουργίας ενός τριδιάστατου τοπογραφικού, τόσο με επίγειες-γεωδαιτικές μεθόδους, όσο και με εναέριες-φωτογραμμετρικές, και πιο συγκεκριμένα χρησιμοποιώντας ενός σύστημα μη επανδρωμένου αεροσκάφους (UAS). Γίνεται συνοπτική παρουσίαση της βασικής μεθοδολογίας και των βημάτων για τη δημιουργία των τριδιάστατων μοντέλων, ενώ παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την εφαρμογή τους στο Τεχνολογικό και Πολιτιστικό Πάρκο Λαυρίου. Οι μέθοδοι αυτοί συνδυάζονται, με δεδομένα να μεταφέρονται από το ένα μοντέλο στο άλλο, προκειμένου το τελικό αποτέλεσμα, σε κάθε περίπτωση, να είναι πλήρες, αξιοποιήσιμο και γεωαναφερμένο στο Ελληνικό Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς του 1987 (ΕΓΣΑ '87). Επιπλέον πραγματοποιούνται δύο συγκρίσεις. Η πρώτη αφορά στις επίγειες γεωδαιτικές μεθόδους, τονίζοντας τις χρονικές διαφορές κυρίως, των δισδιάστατων και τριδιάστατων τοπογραφικών, ενώ η δεύτερη, στην ακρίβεια των εναέριων μεθόδων σε σχέση με αυτή των επίγειων. Αξίζει να σημειωθεί ότι ένα τριδιάστατο επίγειο τοπογραφικό είναι πιο αναλυτικό από ένα δισδιάστατο, ωστόσο απαιτεί περισσότερο χρόνο και πολλές φορές επιπλέον μη επίγειες πληροφορίες προκειμένου να υλοποιηθεί πλήρως. Επιπλέον, όσον αφορά στην ακρίβεια εξαγωγής σημείων, από ένα φωτογραμμετρικά δημιουργημένο τριδιάστατο μοντέλο, αυτή ποικίλει ανάλογα την στόχευση τους, ενώ διαπιστώνεται πως η ακρίβεια τους, ανά περίπτωση, δεν διαφέρει σημαντικά από αυτή των επίγειων γεωδαιτικών μετρήσεων.

Λέξεις κλειδιά: τριδιάστατο τοπογραφικό, τριδιάστατο μοντέλο, γεωδαιτικές μέθοδοι, εναέριες μέθοδοι, UAS

CREATION OF 3D PLAN BY USING TERRESTRIAL AND OVERHEAD METHODS

Application at Lavrion Technological and Cultural Park

Kon/nos Aznavouridis, Stefania Ioannidou, George Pantazis¹

¹School of Rural and Surveying Engineering, National Technical University

email: : kaznavouridis@gmail.com, stef.ioan.17@outlook.com

Abstract

Over the last decade, the development of both ground-based and airborne (UAS) measurement systems have greatly improved the accuracy and also the time and the cost of creating topographic backgrounds.

This paper explores the possibility of creating a three-dimensional topographic plan using both ground-based and aerial-photogrammetric methods, and more specifically, using an unmanned aircraft system (UAS). A brief overview of the basic methodology and the steps for the creation of the three-dimensional models is presented, including the results of the application which takes place in the Lavrion Technological and Cultural Park. These methods are combined, with data, being transferred from one model to another, so that the end result is, in any way, completed, usable and geo-referenced in the 1987 Greek Geodetic Reference System (EGSA '87). In addition, two comparisons are made. The first concerns the ground-based geodetic methods, emphasizing the temporal differences between two and three-dimensional topographic, and the second, the accuracy between overhead and terrestrial methods. It is important that a three-dimensional terrestrial plan is more detailed than a two-dimensional one. However it requires more time and sometimes it is necessary to add non-terrestrial information, in order to be fully implemented. In addition, the accuracy of the point extraction, between a photogrammetrically generated three-dimensional model and the terrestrial geodetic measurements, varies according to their targeting, and there is no significant difference in each case whatsoever.

1. Εισαγωγή

Η δημιουργία τοπογραφικών διαγραμμάτων ή μοντέλων σε δυο διαστάσεις είναι κάτι συνηθισμένο για τους μηχανικούς. Όμως, η ραγδαία εξέλιξη της τεχνολογίας τα τελευταία χρόνια έχει ανοίξει νέους ορίζοντες για το επάγγελμα και τον τρόπο με τον οποίο εκτελείται και παρουσιάζεται το αποτέλεσμα. Αυτό οδήγησε στη δημιουργία ψηφιακών μοντέλων που ανταποκρίνονται στο φυσικό αντικείμενο και παράλληλα δίνουν πολύ περισσότερες επιλογές επεξεργασίας και εξαγωγής πληροφορίας. Έτσι τα τριδιάστατα μοντέλα έγιναν ευρέως γνωστά και άκρως κατανοητά στον χρήστη, ενώ μπορούν να δημιουργηθούν είτε με επίγειες μεθόδους και τη χρήση reflectorless γεωδαιτικών σταθμών, είτε πιο προσιτά, με εναέρια μεθόδους, με τη χρήση συστημάτων μη επανδρωμένων αεροσκαφών (drone) που έχουν κατακλύσει την αγορά. Στην συγκεκριμένη εργασία περιγράφεται η κάθε μέθοδος ξεχωριστά, σε συνδυασμό με την πραγματοποίηση μιας εφαρμογής τους σε ένα κτηριακό συγκρότημα στο Τεχνολογικό και Πολιτιστικό Πάρκο Λαυρίου.

Κ. Αζναβουρίδης, Σ. Ιωαννίδου, Γ. Πανταζής

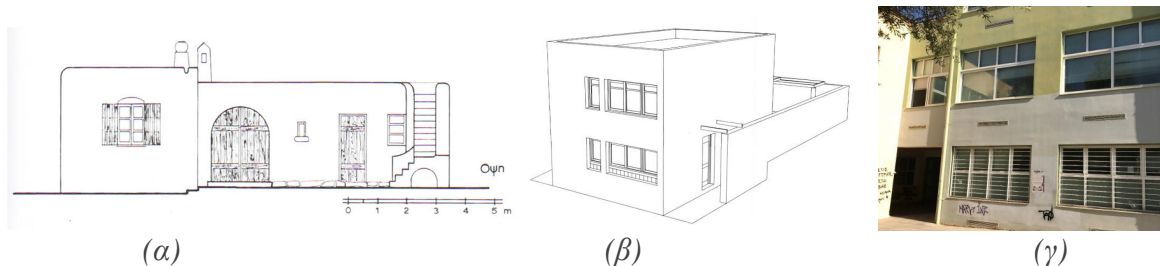
Δημιουργία τριδιάστατου τοπογραφικού με επίγειες και εναέρια μεθόδους. Εφαρμογή στο Τεχνολογικό Και Πολιτιστικό Πάρκο Λαυρίου

Τιμητικός – συλλεκτικός Τόμος στη μνήμη Ευαγγελίας Λάμπρου

2. Ανάπτυξη επίγειας-γεωδαιτικής μεθόδου

Όπως σε κάθε τοπογραφική εργασία προκειμένου να δημιουργηθεί ένα τριδιάστατο τοπογραφικό, απαιτούνται κάποιες βασικές διαδικασίες. Αυτές αφορούν στη δημιουργία σκαριφημάτων κατά την αναγνώριση της περιοχής, στην επιλογή της μεθόδου συλλογής, επεξεργασίας και απόδοσης των δεδομένων, στην ένταξη ή όχι της αποτύπωσης, στον έλεγχο ορθότητας και αξιοπιστίας καθώς και στην παράδοση του τελικού προϊόντος.

Αν και το αυτοσχέδιο υπαίθρου είναι μια απλή διαδικασία σε τοπογραφικά δύο διαστάσεων, γίνεται φανερό ότι όταν εμπλέκονται υψόμετρα οι απαιτήσεις αλλάζουν, καθώς δεν είναι μόνο απαραίτητη η υψομετρική πληροφορία ενός σημείου, αλλά και που τοποθετείται αυτό στο χώρο και ποια είναι η σχέση του με τα άλλα σημεία γύρω του. Για το σκοπό αυτό είναι απαραίτητη η χρήση όψεων, προοπτικών σχημάτων αλλά, και πολλές φορές, φωτογραφιών του αντικειμένου, προκειμένου να είναι κατανοητή η δομή του. Στην πρώτη περίπτωση, όπως φαίνεται στο σχήμα 1(α), το κάθε τμήμα του αντικειμένου αποδίδεται σε ένα σκαρίφημα όψης, ενώ δεν απαιτείται ιδιαίτερη γνώση γεωμετρίας. Στην συγκεκριμένη περίπτωση, σημαντικό ρόλο παίζει η γραμμογραφία ώστε να διαχωρίζονται προβαλλόμενα και τεμνόμενα στοιχεία. Αντίθετα στην δεύτερη περίπτωση, όπως στο σχήμα 1 (β), τα προοπτικά σχέδια εμφανίζουν δύο όψεις ενός κτηρίου σε ένα μόνο σχέδιο, που όμως χρήζουν γνώση προβολικής γεωμετρίας, ενώ έχει σημασία η θέση του παρατηρητή. Τέλος στην τελευταία περίπτωση του σχήματος 1(γ), το αντικείμενο έχει τη μορφή φωτογραφίας και περιλαμβάνει όλες τις λεπτομέρειές του.



Σχήμα 1: Αυτοσχέδιο όψης (αριστερά), Προοπτικό αυτοσχέδιο(μέση), Εικονιστικό-Φωτογραφικό (δεξιά)

Για να παραχθεί το τελικό προϊόν, σημαντικό είναι ο ρόλος του εξοπλισμού, καθώς και της μεθόδου συλλογής, επεξεργασίας και απόδοσης των δεδομένων. Πλέον, με την ύπαρξη reflectorless γεωδαιτικών σταθμών, υπάρχει δυνατότητα μέτρησης απρόσιτων σημείων χωρίς ιδιαίτερη δυσκολία. Έτσι για τη συλλογή όλων των απαραίτητων πληροφοριών προκειμένου να δημιουργηθεί ένα τριδιάστατο τοπογραφικό, απαιτείται ένας τέτοιος σταθμός, με όλα τα παρελκόμενα του, εφαρμόζοντας τη μέθοδο πολικών συντεταγμένων. Η αβεβαιότητά τους εξαρτάται από την ακρίβεια του οργάνου και υπολογίζεται εφαρμόζοντας νόμο μετάδοσης σφαλμάτων στις σχέσεις υπολογισμού.

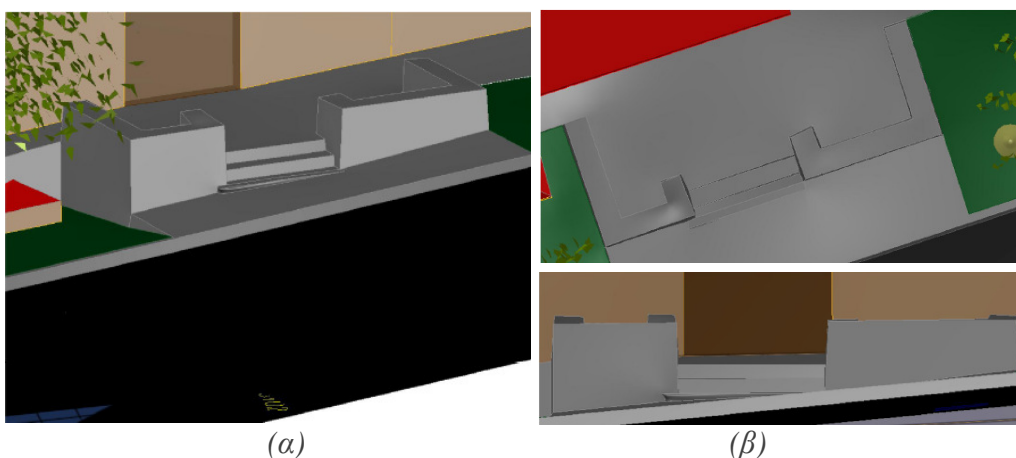
Αφού μετρηθούν τα απαραίτητα μεγέθη και υπολογιστούν οι συν/νες των σημείων, πραγματοποιείται απόδοση του τριδιάστατου σχεδίου, με τη χρήση κατάλληλου λογισμικού. Μέσα από διερεύνηση που πραγματοποιήθηκε καταλληλότερο για αυτή την εργασία είναι το AutoCAD, καθώς προβάλλει την ταυτότητα των σημείων και έχει πολλές δυνατότητες όσον αφορά στην επεξεργασία επιφανειών και αντικειμένων στις τρεις διαστάσεις.

Κ. Αζναβουρίδης, Σ. Ιωαννίδου, Γ. Πανταζής

Δημιουργία τριδιάστατου τοπογραφικού με επίγειες και εναέριας μεθόδους. Εφαρμογή στο Τεχνολογικό Και Πολιτιστικό Πάρκο Λαυρίου

Τιμητικός – συλλεκτικός Τόμος στη μνήμη Ευαγγελίας Λάμπρου

Με την ολοκλήρωση της απόδοσης του τελικού προϊόντος, σκόπιμο είναι να πραγματοποιηθεί έλεγχος ορθότητας και αξιοπιστίας, προκειμένου το τελικό παράγωγο να είναι πλήρες και να ανταποκρίνεται στον σκοπό υλοποίησής του. Όπως και στο διδιάστατο τοπογραφικό, έτσι και εδώ, απαιτείται η εκτύπωση αποσπασμάτων του σχεδίου, υπό κλίμακα, και η αυτοψία στο πεδίο, προκειμένου να ελεγχθεί η πληρότητα του. Μία απλή κάτοψη δεν αρκεί, ώστε να ελεγχθεί και η τρίτη διάσταση του αντικείμενου. Έτσι προτείνεται είτε η προοπτική εκτύπωσή του, είτε η συμπλήρωση της κάτοψης με την εκτύπωση μιας όψης, ώστε να ελεγχθεί πλήρως το τελικό παράγωγο. Πιο συγκεκριμένα, στην πρώτη περίπτωση, όπως φαίνεται στο σχήμα 2(α), είναι απαραίτητη η εκτύπωση υπό συγκεκριμένη οπτική γωνία ώστε να μην υπάρξει στρέβλωση του αντικείμενου, ενώ καλύτερα αποτελέσματα προκύπτουν αν επιλεγθεί προοπτική απεικόνιση από την στάση μέτρησης του αντικείμενου. Αντίθετα, στη δεύτερη περίπτωση και αντίστοιχα στο σχήμα 2(β), με τη χρήση της κάτοψης και της όψης του αντικείμενου, αυτό ελέγχεται πλήρως και στις τρεις διαστάσεις.



Σχήμα 2: Απόσπασμα προοπτικού σχεδίου υπό συγκεκριμένη γωνία (αριστερά), Κάτοψη και όψη αντικείμενου προς έλεγχο (δεξιά)

Αφού ελέγχθηκε το τελικό προϊόν, είναι έτοιμο προς παράδοση. Αυτή μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε ψηφιακά, είτε μέσω τριδιάστατης εκτύπωσης. Η δεύτερη μέθοδος χρήζει ιδιαίτερης διερεύνησης, ώστε να βρεθεί ο καταλληλότερος τριδιάστατος εκτυπωτής, λαμβάνοντας υπόψιν το κόστος, την κλίμακα, το υλικό εκτύπωσης καθώς και τη λεπτομέρεια αυτής. Η βελτιστοποίηση όλων των παραπάνω, οδηγεί στην ορθότητα και ακρίβεια του προϊόντος που θα φτάσει, τελικά, στα χέρια του χρήστη.

3. Ανάπτυξη εναέριας-φωτογραμμετρικής μεθόδου

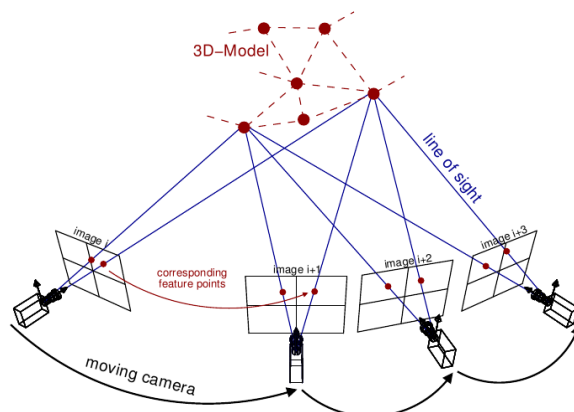
Για τη δημιουργία ενός τριδιάστατου τοπογραφικού ή αλλιώς ενός τριδιάστατου μοντέλου με τη χρήση φωτογραμμετρικών δεδομένων, απαιτούνται ποικίλες εργασίες υπαίθρου, αλλά και γραφείου. Αρχικά όμως, είναι απαραίτητη η κατανόηση των σταδίων και των παραμέτρων δημιουργίας ενός αντικείμενου στο τριδιάστατο χώρο. Η τεχνική με την οποία γίνεται ανακατασκευή του μοντέλου από διδιάστατες φωτογραφίες είναι αυτή του SfM (Structure from Motion). Όπως φαίνεται στο σχήμα 3, πρόκειται για την εκτίμηση της γεωμετρίας ενός τριδιάστατου άκαμπτου αντικείμενου με σχετική κίνηση της κάμερας, λαμβάνοντας ως δεδομένα διδιάστατες εικόνες. Στην παρούσα εφαρμογή η λήψη των εικόνων γίνεται με συστήματα μη επανδρωμένων αεροσκαφών (ΣμηΕΑ-UAS) ή αλλιώς drone, τα οποία αποτελούν μικρά ιπτάμενα οχήματα πολυλειτουργικού χαρακτήρα. Είναι

Κ. Αζναβουρίδης, Σ. Ιωαννίδου, Γ. Πανταζής

Δημιουργία τριδιάστατου τοπογραφικού με επίγειες και εναέριας μεθόδους. Εφαρμογή στο Τεχνολογικό Και Πολιτιστικό Πάρκο Λαυρίου

Τιμητικός – συλλεκτικός Τόμος στη μνήμη Ευαγγελίας Λάμπρου

ένα μέσο, συνήθως εφοδιασμένο με κάμερα, το οποίο μπορεί να λειτουργεί αυτόνομα, ημιαυτόνομα ή τελείως χειροκίνητα με τηλεχειριστήριο και να πραγματοποιεί φωτογραφικές λήψεις.



Σχήμα 3: Πρόβλημα SfM

Το πρόβλημα του SfM αντιμετωπίζεται ακολουθώντας μια συγκεκριμένη σειρά βημάτων και ενεργειών, όπως:

- Ο εντοπισμός και η εξαγωγή χαρακτηριστικών ομόλογων σημείων μεταξύ των εικόνων, πρόβλημα γνωστό και ως συνταύτιση σημείων (Matching)
- Η προσαρμογή του κατάλληλου γεωμετρικού μοντέλου. Στα συνταυτισμένα σημεία εφαρμόζεται η επιπολική γεωμετρία και προσδιορίζονται οι παράμετροι του εσωτερικού προσανατολισμού, ο προσανατολισμός των εικόνων και ένα αρχικό αραιό νέφος συνταυτισμένων σημείων (Sparse Point Cloud)
- Η γεωαναφορά νέφους σημείων, όπου θα του δοθεί ορθή κλίμακα, θέση και προσανατολισμός στο χώρο καθώς θα ενταχθεί στο σύστημα αναφοράς που επιθυμεί ο μηχανικός. Αυτή η γεωαναφορά απαιτεί τη χρήση τουλάχιστον δύο φωτοσταθερών (x,y,H) και ενός υψομετρικού (H) , ώστε να εφαρμοστεί ένας τριδιάστατος μετασχηματισμός ομοιότητας
- Η πυκνή συνταύτιση σημείων, ώστε το αρχικό αραιό νέφος να πυκνωθεί με την ανίχνευση επιπλέον συνταυτισμένων σημείων. Με τη χρήση ποικίλων αλγόριθμων δημιουργείται ένα πυκνότερο νέφος, ή αλλιώς ένα Dense Point Cloud
- Η δημιουργία ψηφιακού μοντέλου συνενώνοντας τα σημεία του πυκνού νέφους, δημιουργώντας τρίγωνα. Αυτή η διαδικασία δημιουργεί την επιφάνεια του μοντέλου και είναι γνωστή ως Meshing
- Η δημιουργία υφής με τη φωτορεαλιστική απεικόνιση του μοντέλου, ολοκληρώνοντας το οπτικά. Αυτή η διαδικασία ονομάζεται Texturing

4. Εφαρμογή

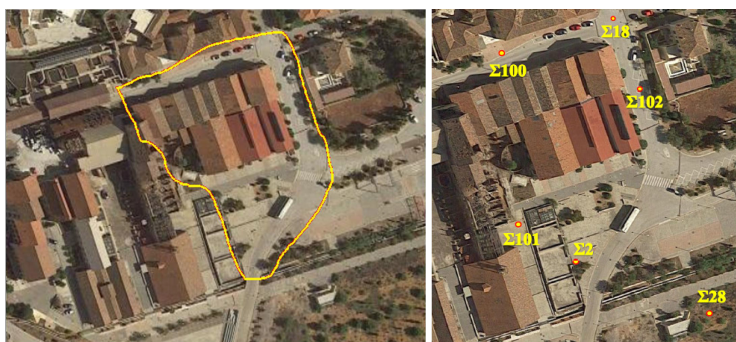
Γνωρίζοντας πλέον τις διαδικασίες επίγειων και εναέριων μεθόδων για τη δημιουργία ενός τριδιάστατου τοπογραφικού, πραγματοποιήθηκε εφαρμογή σε τμήμα του Τεχνολογικού και Πολιτιστικού Πάρκου στο Λαύριο, με δημιουργία ενός μοντέλου με κάθε μέθοδο. Η περιοχή αυτή επιλέχθηκε καθώς περιλάμβανε εγκατεστημένο δίκτυο από προηγούμενες τοπογραφικές εργασίες, προκειμένου τα μοντέλα αυτά να είναι ενταγμένα στο ΕΓΣΑ '87. Αξίζει να σημειωθεί ότι η κλίμακα που επιλέχθηκε ήταν η 1:200, ενώ δεδομένα μεταφέρθηκαν από το ένα μοντέλο στο άλλο ώστε να υπάρχει πληρότητα και στα δύο.

Κ. Αζναβουρίδης, Σ. Ιωαννίδου, Γ. Πανταζής

Δημιουργία τριδιάστατου τοπογραφικού με επίγειες και εναέριες μεθόδους. Εφαρμογή στο Τεχνολογικό Και Πολιτιστικό Πάρκο Λαυρίου

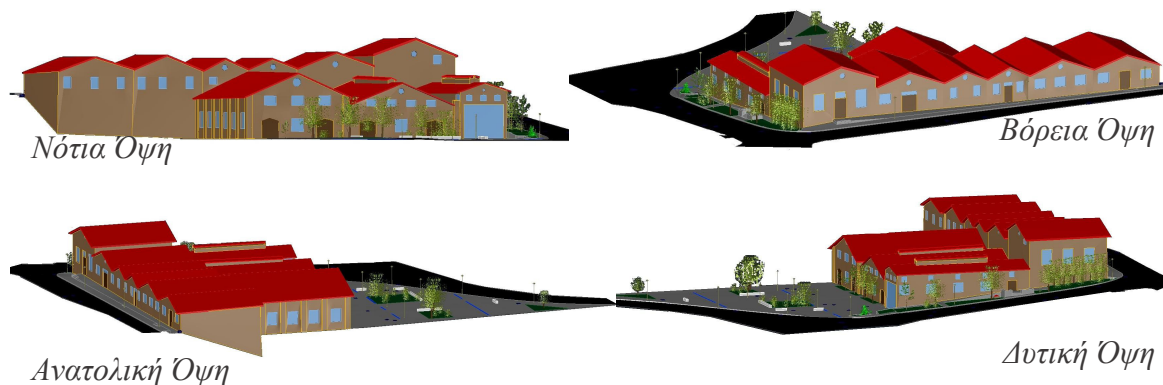
Τιμητικός – συλλεκτικός Τόμος στη μνήμη Ευαγγελίας Λάμπρου

Στην περίπτωση της επίγειας μεθόδου, κατά την αναγνώριση της περιοχής, εντοπίστηκαν τόσο τα όρια της περιοχής όσο και οι υφιστάμενες στάσεις (Σ2,Σ18,Σ28), ενώ δημιουργήθηκαν και κάποιες επιπλέον (Σ100, Σ101, Σ102), όπως φαίνονται στο σχήμα 4. Για την παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε ο reflectorless γεωδαιτικός σταθμός Leica TC405, μαζί με τα παρελκόμενα του, προσφέροντας αβεβαιότητα $\pm 15^{\text{cc}}$ στην μέτρηση διευθύνσεων και $\pm 3\text{mm} \pm 2\text{ppm}$ στη μέτρηση μηκών. Για μεγαλύτερη ευκολία χρησιμοποιήθηκαν φωτογραφικά-εικονιστικά σκαριφήματα, ενώ όπου ήταν αναγκαίο αποδόθηκαν, προοπτικά, κάποιες λεπτομέρειες. Κατά τη διαδικασία αποτύπωσης πραγματοποιήθηκε καταγραφή των μετρήσεων σε αρχείο στο γεωδαιτικό όργανο, ενώ μετρήθηκαν περίπου 1020 σημεία. Η αβεβαιότητα τους κυμαίνεται από $\pm 10\text{mm}$ έως $\pm 28\text{mm}$ δεδομένου ότι οι στάσεις που χρησιμοποιήθηκαν είχαν σφάλμα της τάξεως του $\pm 1\text{cm}$.



Σχήμα 4: Περιοχή μελέτης (αριστερά) και σκαρίφημα στάσεων (δεξιά)

Με την ολοκλήρωση των μετρήσεων, η απόδοση έγινε στο AutoCAD Civil σε κλίμακα 1:1. Δημιουργήθηκαν συνολικά 33 επίπεδα με σημειακή, γραμμική και επιφανειακή πληροφορία ενώ υπήρχαν και επίπεδα αντικειμένων. Στο σχήμα 5 παρουσιάζεται το τριδιάστατο σχέδιο στις τέσσερις όψεις του.



Σχήμα 5: Τριδιάστατο σχέδιο

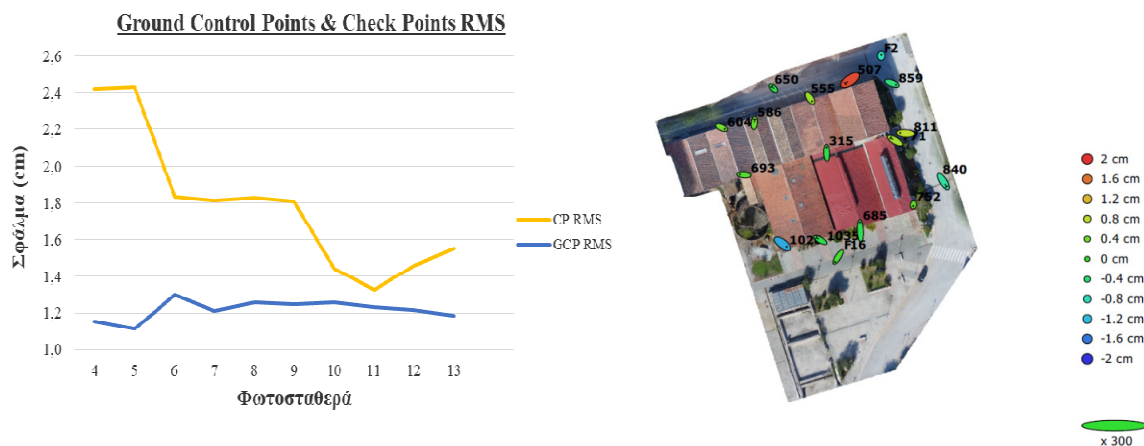
Κατά τη διαδικασία του ελέγχου διαπιστώθηκαν σημαντικές ελλείψεις, στις στέγες των κτηρίων, που όμως ήταν αδύνατο να συμπληρωθούν με τη χρήση επίγειων μεθόδων. Για το λόγο αυτό αντλήθηκε πληροφορία από το τριδιάστατο μοντέλο που δημιουργήθηκε εναέρια με τη χρήση drone. Στη συγκεκριμένη εφαρμογή χρησιμοποιήθηκε ένα drone DJI Phantom 4 Pro το οποίο χρησιμοποιείται ευρέως από πολλούς επαγγελματίες για την παραγωγή τριδιάστατων μοντέλων και ορθοφωτοχάρτων.

Ο προγραμματισμός της πτήσης πραγματοποιήθηκε με εξειδικευμένο γι' αυτό το σκοπό λογισμικό και συγκεκριμένα το Pix4D Capture. Έγιναν 4 πτήσεις σε μεταβλητά υψόμετρα, καθώς υπήρχε ανάγκη και για ναδρικές λήψεις αλλά και φωτογραφίες των όψεων, από τις οποίες αποκτήθηκαν 693 φωτογραφίες. Ο συνολικός χρόνος πτήσης ήταν 50 λεπτά και η έκταση που καλύφθηκε ήταν 140 στρέμματα.

Η επεξεργασία των δεδομένων και η παραγωγή του τριδιάστατου μοντέλου έγινε στο Agisoft PhotoScan Pro. Από τις 693 φωτογραφίες χρησιμοποιήθηκαν μόνο 185 αφού ήταν αρκετές για το τελικό παράγωγο και δεν υπήρχε λόγος να ξοδεύονται άσκοπα υπολογιστικοί πόροι αφού δεν επέφεραν κάποια βελτίωση.

Κατά τη συνταύτιση των σημείων (alignment) δημιουργήθηκε το Sparse Point Cloud με 277.997 σημεία. Από αυτά διεγράφησαν 50 χιλιάδες με κάποια αυτοματοποιημένα κριτήρια καθαρισμού του προγράμματος.

Πριν τη γεωαναφορά του μοντέλου έγινε μια έρευνα για το ποιος είναι ο ιδανικός αριθμός φωτοσταθερών και σημείων ελέγχου. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο σχήμα 6 (αριστερά). Για τη γεωαναφορά του μοντέλου χρησιμοποιήθηκαν τόσο φωτοσταθερά όσο και τοποσταθερά σημεία. Τα πρώτα σημάνθηκαν στο έδαφος με αυτοσχέδια ξύλινη ιδιοκατασκευή τετραγωνικής διατομής και ο προσδιορισμός των συντεταγμένων τους έγινε με δορυφορικό δέκτη GNSS αξιοποιώντας την τεχνική RTK. Αντίθετα σαν τοποσταθερά χρησιμοποιήθηκαν διακριτά σημεία πάνω στην φυσική επιφάνεια των κτηρίων τα οποία αποτελούσαν σημεία της γεωδαιτικής αποτύπωσης. Το μοντέλο γεωαναφέρθηκε με 11 σημεία (τοποσταθερά και φωτοσταθερά), ενώ το αποτέλεσμα της διαδικασίας ελέγχθηκε με 7 σημεία ελέγχου. Το συνολικό σφάλμα του μετασχηματισμού είναι $\pm 1.2\text{cm}$ ενώ του μοντέλου $\pm 1.3\text{cm}$, όπως φαίνεται στο σχήμα 6 (δεξιά).



Σχήμα 6: Σχέση αριθμού φωτοσταθερών με τα συνολικά σφάλματα (αριστερά), Οπτικοποίηση σφαλμάτων (δεξιά)

Για τη δημιουργία του τελικού τριδιάστατου μοντέλου είναι αναγκαία η πύκνωση των συνταυτισμένων σημείων και η δημιουργία των επιφανειών. Το πυκνό νέφος σημείων είχε 49 εκατομμύρια σημεία ενώ κατά τη ανακατασκευή επιφανειών δημιουργήθηκαν 8 εκατομμύρια πρόσωπα και 4 εκατομμύρια κορυφές. Η ανακατασκευή διήρκησε περίπου 11 ώρες.

Το τελευταίο στάδιο είναι η προσθήκη υφών στις ανακατασκευασμένες επιφάνειες. Οι λεπτομέρειες για τις υφές προέρχονται από τις φωτογραφίες και με την περάτωση αυτής της διαδικασίας το μοντέλο αποκτά μια φωτορεαλιστική διάσταση. Το τελικό μοντέλο παρουσιάζεται στο σχήμα παρακάτω.

Κ. Αζναβουρίδης, Σ. Ιωαννίδου, Γ. Πανταζής
Δημιουργία τριδιάστατου τοπογραφικού με επίγειες και εναέριες μεθόδους. Εφαρμογή στο Τεχνολογικό Και Πολιτιστικό Πάρκο Λαυρίου
Τιμητικός – συλλεκτικός Τόμος στη μνήμη Ευαγγελίας Λάμπρου



Σχήμα 7: Τριδιάστατο μοντέλο (Περιβάλλον Agisoft PhotoScan Pro)

Από τον οπτικό έλεγχο του ανακατασκευασμένου μοντέλου παρατηρείται ότι υπάρχουν περιοχές με έντονες παραμορφώσεις ή και κενά, όπως φαίνεται στο σχήμα 8. Αυτό οφείλεται στην αδυναμία του αλγορίθμου να βρει σημεία σύνδεσης στις συγκεκριμένες περιοχές λόγω της ομοιότητας των επιφανειών (πρόβλημα διαφράγματος) ή λόγω επαναλαμβανόμενων μοτίβων.



Σχήμα 8: Παραμορφώσεις σε επιφάνειες

Κατά τον αριθμητικό έλεγχο για την ακρίβεια του ανακατασκευασμένου μοντέλου σημειώνεται ότι η μέγιστη απόκλιση οριζοντιογραφικά είναι 7.1cm και υψομετρικά 4.5cm. Για την εξαγωγή συντεταγμένων από το 3D μοντέλο και την εισαγωγή τους στην γεωδαιτική αποτύπωση, με βάση τον παρακάτω πίνακα, οι αποκλίσεις είναι εντός ορίων επομένως μπορεί το ένα μοντέλο να συμπληρώσει το άλλο.

	δ_x	δ_y	δ_H
Μέση τιμή (cm)	1.0	1.9	1.1
RMSE	1.3	2.5	1.7
Ακρίβεια 95%	2.5	4.9	3.3

Πίνακας: Παραμορφώσεις σε επιφάνειες

Προστέθηκαν περίπου 100 σημεία, τα οποία αποτελούσαν ακμές παραθύρων και φωταγωγών. Τέλος, για την πληρότητα του επίγειου μοντέλου, το 91% της σημειακής πληροφορίας μετρήθηκε γεωδαιτικά, ενώ μόλις το 9% αποδόθηκε φωτογραμμετρικά. Στο σχήμα 9, παρουσιάζονται οι προβληματικές περιοχές αλλά και οι προσθήκες που έγιναν.



Σχήμα 9: Αρχικό σχέδιο (αριστερά), Περιοχές όπου θα αντληθεί σημειακή πληροφορία (κέντρο), Τελικό παράγωγο (δεξιά)

5. Συμπεράσματα

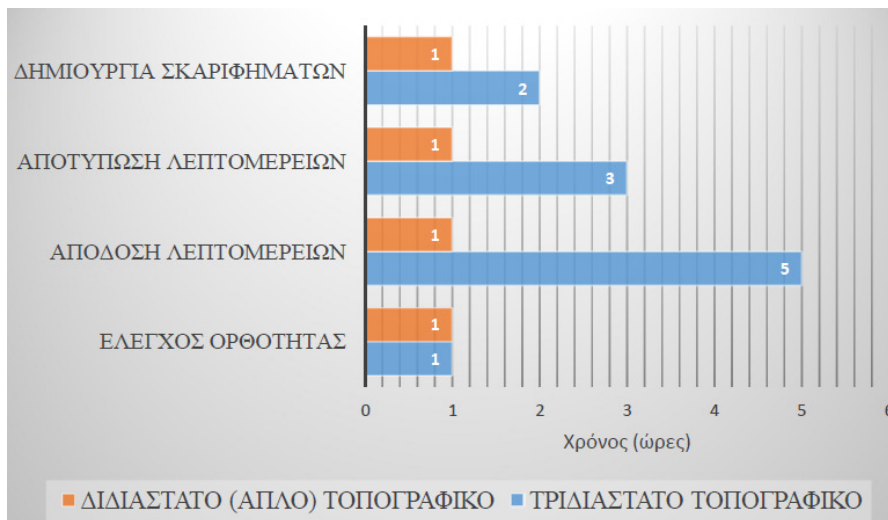
Ολοκληρώνοντας και τα δύο μοντέλα, προέκυψαν κάποια σημαντικά συμπεράσματα τόσο μεταξύ διδιάστατων και τριδιάστατων απεικονίσεων όσο και μεταξύ επίγειων και εναέριων μεθόδων.

Αρχικά, διαπιστώθηκε ότι η χρονική διάρκεια δημιουργίας ενός τριδιάστατου τοπογραφικού με επίγειες μεθόδους, σε σχέση με ένα αντίστοιχο διδιάστατο, αυξάνεται σημαντικά. Στο σχήμα 10, παρακάτω, παρουσιάζεται ο αρχικός χρόνος για το απλό τοπογραφικό, ενώ δίνεται και ο πολλαπλάσιος του για το τριδιάστατο.

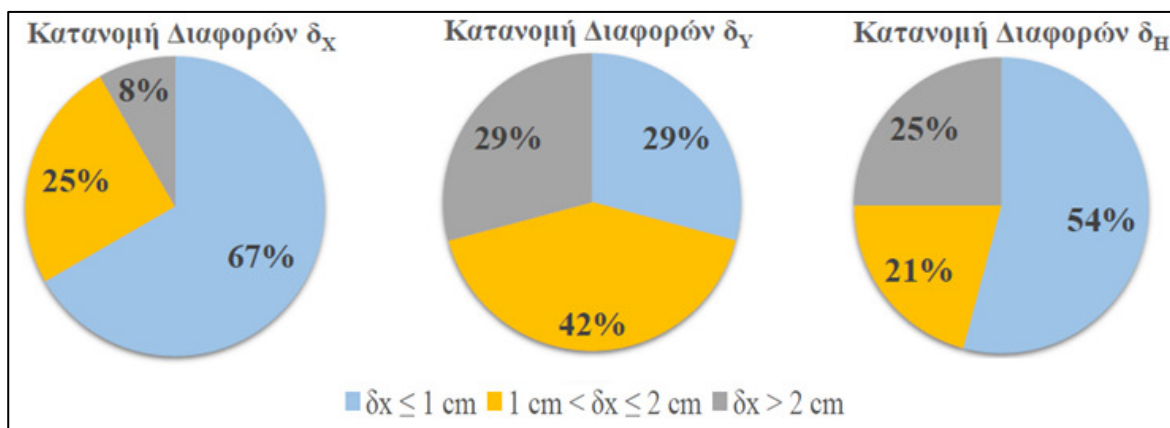
Όσον αφορά στη συσχέτιση γεωδαιτικών και φωτογραμμετρικών μεθόδων, μελετήθηκαν οι αποκλίσεις των συντεταγμένων των σημείων κατά x , y , H , όπως αυτές αντλούνται από κάθε μοντέλο χωριστά και απεικονίζονται ποσοστιαία στο σχήμα 11.

Παρατηρείται πως τα σημεία με τις μεγαλύτερες αποκλίσεις, αποτελούν σημεία των οποίων οι θέσεις δεν μπορούσαν να προσδιοριστούν εξ' αρχής με ακρίβεια πάνω στις φωτογραφίες για σκόπευση, με αποτέλεσμα την μη ικανοποιητική πύκνωση των σημείων και συνεπώς τη λανθασμένη κατασκευή της επιφάνειας του μοντέλου.

Το γεγονός αυτό δεν σημαίνει ότι η εξαγωγή συντεταγμένων με σημεία που σκοπεύτηκαν κατευθείαν πάνω στο μοντέλο είναι λάθος. Είναι μια καλή και γρήγορη λύση για ορισμένα σημεία αλλά όχι για όλα. Θέσεις οι οποίες παρουσιάζουν μια ομοιογενή και ακριβή ανακατασκευή επιφανειών είναι κατάλληλες για άμεση εξαγωγή πληροφορίας. Οι θέσεις αυτές αφορούν κυρίως επιφάνειες οι οποίες δεν παρουσίασαν πρόβλημα σε κανένα στάδιο της παραγωγής του μοντέλου, επιφάνειες χωρίς έντονες γεωμετρικές διαφοροποιήσεις, επαρκή πύκνωση σημείων και καλή δημιουργία τριγώνων. Για τις υπόλοιπες λεπτομέρειες, που δεν ανήκουν στις επιφάνειες αυτές, κρίνεται σκόπιμο να στοχευθούν σε μερικές φωτογραφίες οι ζητούμενες θέσεις ώστε να διορθωθούν οι συντεταγμένες φωτογραμμετρικά πλέον.



Σχήμα 10: Χρονική αξιολόγηση εργασιών για διδιάστατο και τριδιάστατο τοπογραφικό με επίγειες μεθόδους



Σχήμα 11: Κατανομή διαφορών κατά x , y , H

Συνοψίζοντας, λοιπόν, συγκρίνοντας τους χρόνους εργασιών υπαίθρου και γραφείου για κάθε μοντέλο, γίνεται κατανοητό ότι με τις εναέριες μεθόδους εξοικονομείται κυρίως χρόνος αλλά και χρήμα για το μηχανικό, καθώς η παραμονή στο πεδίο για την απόκτηση των πρωτογενών δεδομένων διαρκεί το πολύ μια μέρα προσθέτοντας μία ακόμα μέρα για τις εργασίες γραφείου. Αντιθέτως για τη δημιουργία ενός τοπογραφικού με επίγειες γεωδαιτικές μεθόδους, οι εργασίες υπαίθρου και απόδοσης του σχεδίου μπορεί να κρατήσουν έως και μια βδομάδα.

Επιπροσθέτως, με το γεωδαιτικό σταθμό, ο μηχανικός μπορεί να αποτυπώσει οτιδήποτε βρίσκεται στο οπτικό πεδίο του οργάνου. Με τα drone μπορούν να φωτογραφηθούν όλες οι λεπτομέρειες ενός κτίσματος εκτός όμως από αυτές που κρύβονται πίσω από άλλα φυσικά αντικείμενα όπως δέντρα. Σε περίπτωση που είναι επιθυμητή η δημιουργία τριδιάστατου τοπογραφικού, οι λεπτομέρειες οι οποίες δεν μπορούν να αποτυπωθούν επίγεια, μπορούν να συμπληρωθούν από ένα φωτογραμμετρικά κατασκευασμένο τριδιάστατο μοντέλο. Παράλληλα η φωτογραμμετρική επεξεργασία θα είναι σε θέση να παρέχει και πληροφορίες για τις υψές και τα χρώματα των αντικειμένων όπως επίσης και ένα ψηφιακό μοντέλο εδάφους και ορθοφωτοχάρτη για την περιοχή. Έτσι το κάθε μοντέλο λειτουργεί συμπληρωματικά στο άλλο, με αποτέλεσμα την πληρότητα και την ορθότητα του τελικού παραγώγου.

Βιβλιογραφία

Barry P., Coakley R., Accuracy of UAV Photogrammetry compared with Network RTK GPS, Δημοσίευση, Ιρλανδία 2013.

Kraus K., Φωτογραμμετρία, Γ' Έκδοση, Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας, Αθήνα 2010.

Αζναβουρίδης Κ., Δημιουργία τριδιάστατου τοπογραφικού με χρήση συστήματος μη επανδρωμένου αεροσκάφους (UAS). Εφαρμογή στο Τεχνολογικό και Πολιτιστικό πάρκο Λαυρίου, Διπλωματική Εργασία, ΣΑΤΜ, ΕΜΠ, Αθήνα 2018.

Γκότσης Β., Μοντελοποίηση γεωμετρικών και μη γεωμετρικών επιφανειών με την χρήση Χωροεικονογεωδαιτικών Σταθμών, Διπλωματική Εργασία, ΣΑΤΜ, ΕΜΠ, Αθήνα 2012.

Δρόσος Σ., Τρισδιάστατη αποτύπωση αντικειμένων με Μη επανδρωμένα Εναέρια Μέσα-UAV, Διπλωματική Εργασία, ΣΑΤΜ, ΕΜΠ, Αθήνα 2015.

Ιωαννίδου Σ., Δημιουργία τριδιάστατου τοπογραφικού με επίγειες γεωδαιτικές μεθόδους. Εφαρμογή στο Τεχνολογικό και Πολιτιστικό πάρκο Λαυρίου, Διπλωματική Εργασία, ΣΑΤΜ, ΕΜΠ, Αθήνα 2018.

Καλημέρης Γ., Έλεγχος της δυναμικής συμπεριφοράς μόνιμου σταθμού αναφοράς GNSS, Εφαρμογή στον σταθμό 024A του HEPOS στην Εύβοια, Διπλωματική Εργασία, ΣΑΤΜ, ΕΜΠ, Αθήνα 2016, σελ. 143-176.

Λάμπρου Ε., Πανταζής Γ., Εφαρμοσμένη Γεωδαισία, Εκδόσεις ΖΗΤΗ, Αθήνα 2010, Διορθωμένη έκδοση, Φεβρουάριος 2013.

Μελανίτης Ν., Εφαρμογές τρισδιάστατης ανακατασκευής με γεωμετρία πολλών όψεων, Διπλωματική Εργασία, ΗΜΜΥ, ΕΜΠ, Αθήνα 2014.

Μπαλοδήμος Δ., Λάμπρου Ε., Πανταζής Γ., Γεωργόπουλος Γ., Δογγούρης Σ., Σημειώσεις Τεχνικής Γεωδαισίας, ΣΑΤΜ, ΕΜΠ, Αθήνα 2005.