

Αποτυπώσεις αρχαιολογικών χώρων και ανασκαφών με χρήση τηλεκατευθυνόμενου ελικοπτέρου

Δημήτρης Σκαρλάτος
Τοπογράφος Μηχανικός

Σοφία Θεοδωρίδου
Τοπογράφος Μηχανικός

Σκοπός της νέας μεθοδολογίας που αναπτύχθηκε είναι η ταχύτατη και αποτελεσματική αποτύπωση αρχαιολογικών χώρων, ανασκαφών και μνημείων γενικότερα, με χρήση υπερσύγχρονων τεχνικών, που βασίζονται κατά κύριο λόγο στην αυτοματοποιημένη ψηφιακή φωτογραμμετρία.

Είναι γνωστό ότι τόσο κατά τη διάρκεια των ανασκαφών όσο και μετά την ολοκλήρωσή τους οι αρχαιολόγοι χρειάζονται ακριβή και λεπτομερή αποτύπωση για την τεκμηρίωση των ευρημάτων. Οι τεχνικές που εφαρμόζονται έως τώρα από τους αρχαιολόγους έχουν να κάνουν με την τοποθέτηση φυσικών καννάβων από νήματα στο χώρο των ανασκαφών και στη συνέχεια τη μεταφορά στο χαρτί των λεπτομερειών του κάθε καννάβου, σχεδιάζοντας με το χέρι ή με τη βοήθεια μετροτανίας. Η μέθοδος αυτή είναι τελείως εμπειρική, προσφέροντας αποτελέσματα με μικρή ακριβεία ειδικά για μεγάλες αποστάσεις και, επιπλέον, είναι εξαιρετικά χρονοβόρα και απαιτεί πλήθος εργατών για την εφαρμογή της. Επιπλέον, κατά τη διάρκεια της εμπειρικής αποτύπωσης, οι εργασίες αναστέλλονται προσωρινά με σκοπό τη διευκόλυνση της αποτύπωσης στους χώρους αυτούς. Σε ορισμένες περιπτώσεις χρησιμοποιούνται λαστική τοπογραφία, η οποία βασίζεται στη συλλογή ενός περιορισμένου αριθμού μεμονωμένων και συγκεκριμένων σημείων για την περιγραφή της υφιστάμενης κατάστασης στο ύπαιθρο και την απόδοσή τους σε γραμμικό διάγραμμα. Αν και τα τελευταία χρόνια ο ρυθμός συλλογής σημείων έχει αυξηθεί με τη χρήση αποστασιόμετρων με λείζερ, δεν έχει πληστάσει την ταχύτητα και την ποσότητα πληροφορίας της φωτογραμμετρίας. Η συλλογή σημείων γίνεται με σκόπευση κάθε σημείου χωριστά, μόνο σε συγκεκριμένα σημεία ενδιαφέροντος που πρέπει να είναι γνωστά κατά τη φάση των μετρήσεων. Η εκ των υστέρων συμπληρωματική επίσκεψη για συμπλήρωση είναι ανέφικτη, αφού ο ανασκαφικός χώρος αλλάζει δυναμικά.

Αεροφωτογράφιση

Mε δεδομένο τη διαπίρηση του κόστους σε πλαίσια ανάλογα με εκείνου της κλασικής τοπογραφίας, η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε υπέρτερε τόσο σε χρόνο συλλογής δεδομένων, όσο και σε παρεξόμενη πληροφορία, ενώ από πλευράς ακρίβειας είναι αντίστοιχη. Αυτό επιτυγχάνεται με χρήση τηλεκατευθυνόμενου ελικοπτέρου αερομοντελισμού, το οποίο έχει τροποποιηθεί ώστε να δέχεται φωτογραφικές μηχανές (μετρητικές έως, εραστεπνικές 35 ππ και ψηφιακές), ενώ μια μικρή βιντεοκάμερα αναμεταδίδει στο έδαφος τα οπικού πεδίο της φωτογραφικής μηχανής εξασφαλίζοντας την πλήρη καλύψη της περιοχής ενδιαφέροντος. Με αυτό τον τρόπο ο χειριστής της φωτογραφικής μηχανής καθοδηγεί τον χειριστή του ελικοπτέρου στις ενδεδειγμένες θέσεις.

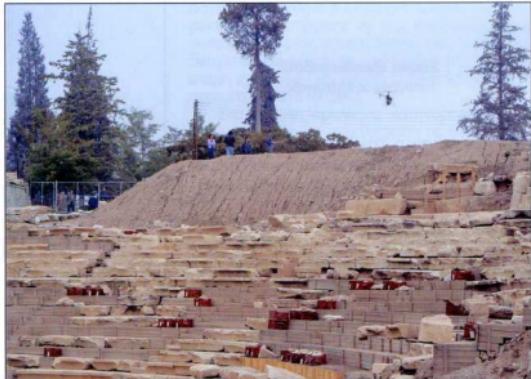
Πριν από την αεροφωτογράφιση, τοποθετούνται στόχοι με γνωστές συντεταγμένες στο Ελληνικό Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς (προστιμασμένα φωτοσταθερά) στην περιοχή ενδιαφέροντος. Με αυτόν τον τρόπο εξασφαλίζεται η εντατική του σχεδίου σε ενιαίο σύστημα αναφοράς, το κρατικό, δίνοντας τη δυνατότητα οποιαδήποτε μετέπειτα μελέτη να συσχετιστεί με αυτό. Οι θέσεις και το πλήθος τους εξαρτώνται από την έκταση και την κλίμακα απόδοσης.

Κατά τη διάρκεια εξέλιξης του συστήματος, δοκιμαστικές πτήσεις έγιναν σε δύο περιοχές στην Βέροια, μία εκ των οποίων ήταν στον αρχαιολογικό χώρο της Λευκόπετρας. Η πώτη πραγματική εφαρμογή έγινε σε συνεργασία με την δρ. Π. Βελένη σε μια αγροκάτια (muntatio) του Ζου-βού αιώνα μ.Χ., που ανακαλύφθηκε κατά την κατασκευή της Εγνατίας οδού, στην περιοχή της Ασπροβάλτας. Η δευτερη εφαρμογή έγινε στον

Πίν. 1. Στατιστικά στοιχεία αεροφωτογραφίσεων.

αρχαιολογικό χώρο της Δήλου, υπό την επιβλέψη του δρα Γ. Χατζήδη και αφορούσε νέα ανασκαφή βόρεια της Ιερής Λίμνης. Η τρίτη εφαρμογή αφορά το αρχαίο θέατρο της Λάρισας, και έγινε υπό την επιβλέψη του Α. Τζαράλλα. Στατιστικά στοιχεία σχετικά με τους χρόνους και το πλήθος φωτογραφών παρουσιάζονται στον πίνακα 1, απ' όπου γίνεται φανέρο στην άλλη μεθόδολογία βρίσκεται ακόμα σε φάση βελτιστοποίησης, αφού τα νούμερα και οι χρόνοι διαρκώς μειώνονται.

Περιοχή	Ζητούμενη κλίμακα επόδησης	Κλίμακα σε ψηφίστα	Υψης πτώσης (μ)	Επιπλέον (πτώμα)	Πλήθες ημέρων	Πλήθες η ώρα που χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή	Πλήθες φωτογραφών (άριτμος)	Χρόνος παραγωγής (ώρες)	Χρόνος παραδόσεως (ήμερες)
Ασπροβάλτα	1:100	1:600	30	1.3	72	6	11	12	21
Δήλος	1:50	1:400	20	1.4	72	32	25	8	45
Λάρισα	1:50	1:400	20	5.7	144	67	51	9	60



1. Αεροφωτογράφηση στο αρχαίο δέατρο της Λάρισας.

2. Ορθοφωτογραφία στην περιοχή της Ασπροβάλτας. Πρόκειται για πολύ μεγάλη σμήκηρνη της αρχικής, στην κενονήκη μορφή της οποίας διακρίνονται όλες οι πέτρες.

Συλλογή δεδομένων στην Ασπροβάλτα

Πριν από την πτήση του ελικοπτέρου, τοποθετήθηκαν στο εδάφος δέκα μεταλλικοί στάχι, οι οποίοι μετρήθηκαν με σύστημα δορυφορικού εντοπισμού και με πλεκτρονικό ταχύμετρο. Οι στάχι αυτοί αποτελούν τα σημεία ελέγχου (φωτοσταθέρω) και χρησιμοποιούνται για την εύρεση της ακριβούς θέσης και στροφών της κάθε φωτογραφίας στο χώρο, ενώ παράλληλα γίνεται και η σύνδεση στο Ελληνικό Σύστημα αναφοράς, εντάσσοντας ουσιαστικά την περιοχή στον ελλαδικό χώρο.

Η πτήση του ελικοπτέρου έγινε με τη μετρητική φωτογραφική μηχανή Rollei Metric 6006, με το φακό των 80 mm. Τα ύψος πτήσης ήταν από 32 μέχρι 40 μ. και τη κλίμακα των φωτογραφών από 1:400 μέχρι 1:500. Οι σταύροι που φαίνονται στον ορθοφωτοχάρτη της εικόνας 2, είναι οι εσωτερικοί σταύροι της φωτογραφικής μηχανής που χρησιμοποιούνται για τη βαθμονόμηση της μηχανής και οι οποίοι αφαιρέθηκαν ψηφιακά στο τελικό στάδιο επεξεργασίας προκειμένου να μην μπερδεύουνται με τους σταυρούς του καναβόου, αλλά και για αισθητικούς λόγους;

Η διάρκεια της πρώτης πτήσης ήταν δύο ώρες και λήφθηκαν 24 φωτογραφίες. Την περίοδο εκείνη δεν έγινε τοποθετείται ακόμα η ψηφιακή βιντεοκάμερα που μεταδίδεται στο εδάφος το πλαίσιο της φωτογραφικής μηχανής ανά πάσα στιγμή, με αποτέλεσμα η κάλυψη των αρχοντικών φωτογραφών να μην είναι πλήρης για 1 μ., γεγονός το οποίο διαπιστώθηκε μετά την εμφάνιση των



φωτογραφιών. Μετά την τοποθέτηση της βιντεοκάμερας, επαναλήφθηκε η πτήση με τα ίδια ακριβίας χαρακτηριστικά. Συνολικά συγκεντρώθηκαν 48 λήψεις, από τις οποίες οι 9 υποβλήθηκαν σε επεξεργασία, και το τελικό προϊόν αποτελεί σύνθετη 5 φωτογραφίαν.

Τα αντίστοιχα μεγέθη για τη Δήλο και τη Λάρισα φαίνονται στον πίνακα 1.

Επεξεργασία

Η φάση της επεξεργασίας περιλαμβάνει 5 διαφορετικά στάδια:

- τη σάρωση των φωτογραφιών στον ειδικό φωτογραμμετρικό σαρωτή, ώστε να μετατραπούν σε ψηφιακές;
- την επίλυση του αεροτριγωνισμού για να βρεθεί η ακριβής θέση και οι στροφές των φωτογραφών στο χώρο τη σημείωση της λήψης;
- τη δημιουργία του ψηφιακού μοντέλου εδάφους, απαραίτητο για το επόμενο στάδιο;
- τη δημιουργία των ορθοφωτογραφών, δηλαδή την ψηφιακή διαφορική διόρθωση των φωτογραφιών, χρησιμοποιώντας τη θέση και τις στροφές της κάθε φωτογραφίας σε συνδυασμό με τη ψηφιακή μοντέλο εδάφους, ώστε να μετατραπούν από κεντρική προβολή σε ορθή;
- τη δημιουργία του μωσαϊκού, όπου γίνεται η σύνθεση δώλων των ορθοφωτογραφών για να καλυφθεί πλήρως και ενιαία όλο το αντικείμενο. Σε αυτό το τελικό στάδιο γίνονται και οι τελικές διορθώσεις για το βελτιστό οπτικό αποτέλεσμα (αφίρεση των φωτογραφιών, βελτιστοποίηση

ιστογράμματος κ.λπ.). Στο τέλος, προστίθενται το υπόμνημα, ο κάναβος και οι ισούψεις, εφόσον ζητούνται και το αποτέλεσμα εντυπώνεται.

Όλες οι παραπάνω διαδικασίες διήρκεσαν 13 εργάσιμες ημέρες, από τη σπηλή που εμφανίστηκαν στα φωτογραφίες. Οι χρόνοι που αναμένεται να μειωθούν, καθώς το προσωπικό της εταιρείας αποκτά περισσότερη εμπειρία στο αντικείμενο. Τελικός στόχος είναι εργασίες με αυτή την έκταση να διαρκούν λιγότερο από 10 εργάσιμες ημέρες.

Παραδοτέα

Τα τελικά παραδοτέα ήταν εκτυπωμένοι χάρτες σε κλίμακες 1:50, εκτυπωμένες φωτογραφίες, όπως αυτές εμφανίστηκαν από το εργαστήριο και ο φωτιακός ορθοφωτοχάρτης σε CD. Θα πρέπει να τονιστεί ότι ο προγραμματισμός της φωτογράφησης (επιλογή ύψους πτήσης, φακού, φωτογραφικής μηχανής και προστιλογή θέσης λήψεων, ακρίβεια μέτρησης φωτοσταθερών και επιλογή της θέσης τους), καθώς και η επεξεργασία των φωτογραφιών (ανάλυση σάρωσης, επίλυση αεροπτηγωνισμών, συλλογή σημειών και γραμμών για το φωτιακό μοντέλο εδάφους, ανάλυση ορθοφωτογραφιών) έγιναν για τελικό ορθοφωτοχάρτη κλίμακας 1:100. Εκ του περισσότερο εκτυπώθηκε ο ορθοφωτοχάρτης και σε κλίμακα 1:50 για επιποκικούς λόγους, χωρίς όμως να έχει την ακρίβεια και την ευκρίνεια ορθοφωτοχάρτη με κλίμακα 1:50.

Συμπεράσματα

Η επιλογή του ελικοπτέρου ως πλατφόρμας φωτογραφικής μηχανής, έδωσε λύση σε τρία σημεία από τα παραπάνω:

- μείωσε το κόστος συντήρησης και πτήσης (σε σχέση με την ενοικίαση συμβατικού ελικοπτέρου)
- μείωσε το χρόνο προετοιμασίας (ενοικίαση ελικοπτέρου και άδεια πτήσης)
- μείωσε την πιθανότητα διατάραξης του χώρου ανασκαφών, αφού το τηλεκατευθυνόμενο ελικόπτερο έχει πολύ μικρότερη ροή αέρα σε σχέση με το συμβατικό ελικόπτερο.
- μείωσε το χρόνο παραμονής στο χώρο εκσκαφών (σε σχέση με την κλασική τοπογραφία)
- μείωσε το ύψος πτήσης δίνοντας τη δυνατότητα για κλίμακες και ακρίβεια 1:50 (ή και καλλιτεχνική).

Η ορθοφωτογραφία ως επιλογή τελικού προϊόντος συντέλεσε:

- στη μείωση του χρόνου επεξεργασίας ώστε το τελικό προϊόν να φτάνει στα χέρια του τελικού χρήστη σε μικρότερο χρονικό διάστημα από τη φωτογραφική απόδοση (γραμμικό σχέδιο με όλες τις «λεπτομέρειες»)
- στην παραδοση ενός προϊόντος με όλη την πληροφορία του αρχαιολογικού χώρου, από το οποίο ο αρχαιολόγος μπορεί να επιλέξει και να μετρήσει αξιόπιστα τις διαστάσεις που τον ενδιαιφέρουν, χωρίς να παρεμβαίνει η εργυνεία του τοπογράφου.



a



b



y

3. Απλές φωτογραφίες (α, β) και τη τελική σύνθεσή τους (γ), όπου έχουν αλλαχθεί από στροφές και έχουν γίνει μία ορθοφωτογραφία, με μετρητική αξία (στάδιο 4 και 5)

4. Φωτοεαλιστικό τριδιάστατο της περιοχής μελέτης.



Ειδικά το τελευταίο θα πρέπει να τονιστεί ιδιαίτερα, αφού, στην περίπτωση που το τελικό παραδοτέο είναι ένα γραμμικό διάγραμμα με τις λεπτομέρειες που έχουν υποδειχθεί από τον αρχαιολόγο, ο χειριστής του φωτογραμμετρικού οργάνου δεν είναι δυνατόν να ερμηνεύσει τα αρχαιολογικού ενδιαφέροντος αντικείμενα. Σε περίπτωση που ζητηθούν άλλες οι πέτρες του αρχαιολογικού χώρου, ο χειριστής αντιμετωπίζει σοβαρό πρόβλημα ερμηνείας και δημιουργίας γραμμάτων σε χαρακτηριστικά όπως οι ρωγμές, τα σχισματικά στις πέτρες και τα σημεία οπου οι πέτρες εισέρχονται στο έδαφος. Επίσης, η δουλειά αυτού του είδους δεν είναι αυτοματοποιημένη, αλλά επιπονή και χρονοβόρη με αποτέλεσμα να ανέβασε το κόστος τούτο ώστε να είναι ασύνφορο για αρχαιολογικές εφαρμογές με μικρό πρόποταλογισμό.

Ο ορθοφωτοχάρτης από την άλλη γίνεται με αυτοματοποιημένες διαδικασίες σε μεγάλο βαθμό, μειώνοντας το χρόνο επεξεργασίας, άρα και το κόστος, ενώ δεν είναι προϊόν αφαιρετικής σύμφωνα με την ερμηνεία του φωτογραμμετρικού χειριστή, περιέχοντας με αυτό τον τρόπο ό,τι αποτυπώνεται στη φωτογραφία.

Σημαντικό και κρίσιμο χαρακτηριστικό του ορθοφωτοχάρτη είναι η ακρίβεια, η οποία είναι ομοιομορφή στο τελικό προϊόν, ακριβώς όπως σε ένα γραμμικό διάγραμμα. Έτσι σε ορθοφωτοχάρτη κλίμακας 1:100, η απόσταση μεταξύ οιωνόδηποτε δύο σημείων, έχει πιθανότητα απόλυτης 4 εκ., ακόμα και εάν αυτά βρίσκονται σε απόσταση 1 χιλιομέτρου.

Η διαφορά πληροφορίας μεταξύ διαγράμματος και ορθοφωτοχάρτη (εικ. 2) γίνεται εύκολα αντιληπτή. Τα δύο αυτά φωτογραμμετρικά προϊόντα έχουν την ίδια ακρίβεια, ενώ ο χρόνος που απαιτείται για τη δημιουργία του διαγράμματος είναι υπερδιπλάσιος. Παράλληλα, στα διάγραμμα φαίνονται μόνο γραμμές οι οποίες δεν επιδεχόνται καμία ερμηνεία από τον αρχαιολόγο, αφού η

ερμηνεία έχει γίνει σε προηγούμενο στάδιο από τον χειριστή του φωτογραμμετρικού οργάνου. Στον ορθοφωτοχάρτη, όμως, ακόμα και ο αδαής μπορεί να διακρίνει ότι στο κέντρο του κτίσματος υπάρχουν κεραμίδια (έντονη διαφορά χρώματος) και όχι μόνο πέτρες. Ο ειδικευμένος αρχαιολόγος μπορεί προφανώς να ερμηνεύσει πολύ περισσότερα στοιχεία, ενώ παράλληλα διατηρεί τη γεωμετρική ακρίβεια του διαγράμματος.

Οι πεδίοι ιδιαίτερου ενδιαφέροντος θεωρείται και διερευνάται η δημιουργία δυναμικών φωτοεαλιστικών τριδιάστατων μοντέλων (εικονική πραγματικότητα). Με κατάλληλο λογισμικό ο χρηστής θα έχει τη δυνατότητα να μετακινηθεί και να δει το μοντέλο από οποιαδήποτε γωνία. Επίσης θα μπορεί να μετρήσει γωνίες και αποστάσεις πάνω σε αυτό. «Σελίχοντας» δύο σημεία. Εκείνο που διερευνάται είναι η καταλληλότητα των λογισμών να αντέξουν την ποσότητα της πληροφορίας και το επιπλέον πληροφοριαίς και λεπτομερειών που μπορούν να διαχειριστούν (εικ. 4).

Imprints of Archaeological Sites and Excavations With the Use of Guided Helicopter

Dimitris Skarlatos - Sophia Theodoridou

This article presents the application of digital photogrammetry with the use of radio-controlled helicopter for the faster and more precise imprint of archaeological sites and excavations. The minimization of stay in the archaeological site, the precision and the reduced cost are the main advantages of the method. The promptitude, ease and quantity of the recorded information that photograph, as a measuring medium, provides makes it a handy instrument for the documentation of every stage of an excavation. The photogrammetry has a clear advantage over all other methods, when the necessary stay in the site is minimal, when it is not sure that the measurements will be finally needed and when it is not known in advance which are the details that must be recorded.

Βιβλιογραφία

DALLAS R.W.A., «Architectural and Archaeological Photogrammetry», στο K. Atkinson (edmu.), *Close Range Photogrammetry and Machine Vision*, B. Whittles Publishing, Scotland 1996, σ. 283-302.

GEORGOPoulos A., NAKOS B., MASTORIS D., SKARLATOS D., «Three Dimensional Modelling of the Built Environment Using Digital Orthophotography», *Photogrammetric Record* 15/90 (1997), σ. 913-921.

THEODORIDOU S., TOKMAKIDES K., SKARLATOS D., «Use of Radio-Controlled Model Helicopters in Archaeology Survey and Building Construction Industry», *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing XIX Congress*, Amsterdam 2000.

SKARLATOS D., «Orthophotograph Production in Urban Areas», *Photogrammetric Record* 16/94 (1998), σ. 643-650.