

## ΦΩΤΟΓΡΑΜΜΕΤΡΙΚΕΣ ΑΠΟΤΥΠΩΣΕΙΣ ΜΕ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΟ ΣΑΡΩΤΗ

Πέτρου Πατιά, Καθ. Τμήματος Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, Α.Π.Θ., Χαράλαμπος Γεωργιάδης, Λέκτορας τμήματος Πολιτικών Μηχανικών, Α.Π.Θ

Τα τελευταία χρόνια η ανάπτυξη της τεχνολογίας τόσο στον τομέα των ηλεκτρονικών όσο και στον τομέα των υπολογιστών και του λογισμικού, έχει προσθέσει μια πληθώρα εργαλείων με σχετικά μικρό κόστος που βοηθούν στη δημιουργία τρισδιάστατων αποτυπώσεων με μεγάλη ακρίβεια, ελάχιστο κόστος και σε μικρό χρονικό διάστημα. Το κόστος των DSLR ψηφιακών φωτογραφικών μηχανών υψηλής ανάλυσης έχει μειωθεί δραστικά, γεγονός που επιτρέπει τη χρήση τους σε καθημερινές εφαρμογές αποτυπώσεων. Επιπλέον καινούριοι αλγόριθμοι και λογισμικά επιτρέπουν την βαθμονόμηση και χρήση απλών μηχανών στη φωτογραμμετρική επεξεργασία των δεδομένων. Παράλληλα οι νέες τεχνολογίες έχουν οδηγήσει στην κατασκευή τρισδιάστατων σαρωτών laser με σχετικά μικρό κόστος απόκτησης, γεγονός που έχει βοηθήσει στην ευρύτερη χρήση τους σε αποτυπώσεις. Οι μέθοδοι αποτύπωσης χωρίζονται στις άμεσες και τις έμμεσες. Οι πρώτες (τοπογραφικές, αρχιτεκτονικές, τοπομετρικές) μέθοδοι απαιτούν φυσική επαφή με το αντικείμενο της αποτύπωσης. Οι δεύτερες (Φωτογραμμετρία, Τηλεπισκόπηση, σάρωση laser) δεν απαιτούν. Τα προϊόντα των αποτυπώσεων είναι πολυποίκιλα και υπαγορεύονται κυρίως από τις ανάγκες του χρήστη και το σκοπό για τον οποίο αυτός θα τα χρησιμοποιήσει. Μπορεί να είναι τόσο απλά όσο μία αρχική εικόνα ή ένα σύνολο τρισδιάστατων συντεταγμένων είτε τόσο πολύπλοκα όσο ένα σύστημα πληροφοριών χώρου ή ένα σύστημα πολυμέσων.

Πολλά από τα προϊόντα αποτύπωσης, μπορούν να εξαχθούν με τη χρήση της μιας ή της άλλης μεθόδου αποτύπωσης ή ακόμη και με τη συνδυασμένη χρήση δύο ή και περισσότερων μεθόδων. Ένα γραμμικό σχέδιο επί παραδείγματι, μπορεί να είναι το τελικό προϊόν μιας αρχιτεκτονικής, μιας τοπογραφικής, μιας φωτογραμμετρικής αποτύπωσης ή ακόμη και συνδυασμός π.χ. φωτογραμμετρικής και τοπογραφικής μεθόδου.

Μέχρι την ανακάλυψη της Φωτογραμμετρίας, τα προϊόντα αποτύπωσης περιορίζονταν μόνο σε γραμμικά σχέδια οποιασδήποτε μορφής: όψεις, κατόψεις, τοπογραφικά, κλπ. Με τη φωτογραμμετρία εισάγονται και οι μετρήσιμες φωτογραφίες και τα παράγωγά τους (ορθοφωτογραφίες, φωτομωσαϊκά κλπ.), καθώς και η εφαρμογή τους σε συνθετότερα μέσα απεικόνισης του χώρου: πολυμέσα, συστήματα πληροφοριών χώρου, video-3D animation, που αποτελούν δευτερογενή προϊόντα αποτύπωσης.

### ■ ΦΩΤΟΓΡΑΜΜΕΤΡΙΚΕΣ ΑΠΟΤΥΠΩΣΕΙΣ

Μια σύντομη περιγραφή των διαφορετικής μορφής αποτελεσμάτων της φωτογραμμετρικής αποτύπωσης είναι η παρακάτω:

- Φωτογραμμετρικές εικόνες είναι τα πρώτα και απλούστερα προϊόντα καθώς παρέχουν πλήθος πληροφοριών,

τόσο μετρητικών όσο και ποιοτικών: Μπορούν να είναι αναλογικές ή ψηφιακές και είναι χρήσιμες για τη δημιουργία ανηγμένων εικόνων, ορθοφωτογραφίας, μωσαϊκών κλπ., ακόμη και για στερεοσκοπική παρατήρηση. Με την μορφή κυρίως του στερεοζεύγους και συνοδευόμενη από κατάλληλες πληροφορίες (προσανατολισμού, φωτοσταθερών) αποτελούν από μόνες τους ένα μικρό "αρχείο τεκμηρίωσης". Ως πρωτογενές, βέβαια, υλικό είναι πλήρως εκμεταλλεύσιμες μόνο με την κατάλληλη μετρητική επεξεργασία.

- Αρχιτεκτονικά/Τοπογραφικά σχέδια : όψεις, κατόψεις, τομές κλπ.: Τα γραμμικά μετρικά σχέδια και διαγράμματα είναι το κλασικό προϊόν και αποτελούν το βασικό τεκμηριωτικό υλικό μιας αποτύπωσης. Στην τυπωμένη τους μορφή είναι αναγκαστικά δυσδιάστατα (όψεις, κατόψεις, τομές, προοπτικά). Καθώς όμως η πλήρης αποτύπωση είναι τρισδιάστατη, η τρίτη διάσταση υπάρχει πάντοτε και μπορεί να χρησιμοποιηθεί με τη μορφή είτε ισοϋψών καμπύλων είτε τρισδιάστατων ψηφιακών σχεδίων.

- Ανηγμένες φωτογραφίες: Αναγωγή ονομάζεται η διαδικασία με την οποία σημεία που βρίσκονται σε ένα επίπεδο, προβάλλονται με τη βοήθεια της κεντρικής προβολής σε άλλο επίπεδο, με την προϋπόθεση ότι είναι γνωστή η σχέση που υπάρχει ανάμεσα στα δύο αυτά επίπεδα. Μία ανηγμένη φωτογραφία μιας αντίστοιχης κεκλιμένης, αντιστοιχεί σε μία ισοδύναμη κατακόρυφη που λήφθηκε από το ίδιο κέντρο προβολής με την αντίστοιχη κεκλιμένη. Συνεπώς παραμορφώσεις εξ' αιτίας της κλίσης της φωτογραφίας έχουν απαλειφθεί στην ανηγμένη φωτογραφία. Ο προφανής λοιπόν σκοπός της αναγωγής είναι η απαλοιφή των σφαλμάτων αυτών. Οι ανηγμένες εικόνες παράγονται ευκολότερα από τις ορθοφωτογραφίες, αλλά βρίσκουν εφαρμογή μόνο σε επίπεδες επιφάνειες.

- Ορθοφωτογραφίες: Αντίθετα με τις ανηγμένες εικόνες στις οποίες έχουν εξαλειφθεί μόνο τα σφάλματα εξαιτίας της κλίσης της εικόνας, στην ορθοφωτογραφία έχουν εξαλειφθεί επιπλέον και οι αποκλίσεις από την ορθή προβολή που οφείλονται στο ανάγλυφο του αντικειμένου. Αποτέλεσμα είναι μία ορθή προβολή της συνολικής επιφάνειας του αντικειμένου.

- Ψηφιακό μοντέλο επιφάνειας: είναι ένα ενδιάμεσο προϊόν, που χρησιμοποιείται στην παραγωγή των ορθοφωτογραφιών, αποτελεί όμως και από μόνο του ένα σημαντικό τελικό φωτογραμμετρικό προϊόν σε πολλές εφαρμογές που σχετίζονται με την μορφολογία (σύγκριση επιφανειών, κατασκευή αντιγράφου τους). Στην γραφική του μορφή μπορεί να αποδοθεί με ισοϋψείς καμπύλες είτε με ένα τρισδιάστατο κάρναβο σημείων (wireframe) είτε ακόμα με ένα τρισδιάστατο φωτορρεαλιστικά σκιασμένο «στερεό» μοντέλο της επιφάνειας (shaded model).

- Φωτογραμμετρικά αποτυπωμένο αντικείμενο σε πλήρη τρισδιάστατη ψηφιακή διανυσματική μορφή: είναι ένα πλήρες φωτογραμμετρικό προϊόν. Οι δυνατότητες των σημερινών συστημάτων αυτοματοποιημένης σχεδίασης δίνουν αμέτρητες δυνατότητες για την γραφική απόδοση του προϊόντος αυτού. Αναφέρονται συγκεκριμένα τα τρισδιάστατα γραμμικά («διαφανή» - wireframe) σχέδια και οι συνθετικές εικόνες, που έχουν προκύψει από αυτά με πρόσθεση χρώματος και υφής. Γρήγορη διαδοχή τέτοιων συνθετικών εικόνων, στην οθόνη του υπολογιστή ή σε βίντεο, επιτρέπει παρουσιάσεις του αποτυπωμένου αντικειμένου με φωτορρεαλιστική κίνη-

ση διαμέσου του, γύρω του ή από ψηλά.

- Το πλήρες τρισδιάστατο ψηφιακό αντικείμενο με συνύπαρξη διανυσμάτων και εικονοψηφίδων: είναι ένα πιο πολύπλοκο φωτογραμμετρικό προϊόν. Αποτελείται από τη διανυσματική μορφή που περιγράφηκε πριν, όμως συμπεριλαμβάνονται και ψηφιακές εικόνες, κατά κανόνα ανηγμένες ή ορθοφωτογραφίες, που έχουν προβληθεί στις «στερεές» επιφάνειες. Το προϊόν αυτό είναι ιδιαίτερα εποπτικό και συνιστά το πρώτο στάδιο για ένα σύστημα πολυμέσων.

- Τα συστήματα πληροφοριών χώρου: συνδυάζουν τα πλήρη τρισδιάστατα (ή διδιάστατα) ψηφιακά γραφικά αρχεία των αντικειμένων με δομές βάσεων δεδομένων, όπου σε αλφαριθμητική μορφή καταχωρούνται μια σειρά από άλλες θεματικές πληροφορίες (αρχιτεκτονικές, αρχαιολογικές, ιστορικές κλπ.). Θεωρούνται ως τα πλέον ολοκληρωμένα προϊόντα και βρίσκουν εφαρμογή όταν τα προβλήματα είναι πιο πολύπλοκα ή η τεκμηρίωση πιο απαιτητική.

- Τα συστήματα πολυμέσων: εκμεταλλεύονται τη δυνατότητα της σύγχρονης τεχνολογίας για να εισαγάγουν και ηχητικές περιγραφές ως βοήθημα της τεκμηρίωσης. Συνήθως αποβλέπουν στην ευρεία διάδοση των επί μέρους φωτογραμμετρικών προϊόντων, και μάλιστα για μη ειδικευμένους τελικούς χρήστες και το ευρύ κοινό.

Αποτυπώσεις με σαρωτή laser

Μια από τις νεότερες τεχνολογίες δημιουργίας τρισδιάστατων μοντέλων είναι η τεχνολογία των σαρωτών laser. Η βασική αρχή λειτουργίας τους είναι η μέτρηση των τρισδιάστατων πολικών συντεταγμένων [των 2 γωνιών διεύθυνσης και της απόστασης] κάθε σημείου που προσπίπτει ο παλμός laser, με αρχή του συστήματος συντεταγμένων τον σαρωτή laser. Με τη χρήση του πρώτου θεμελιώδους προβλήματος της τοπογραφίας καθώς και των σχέσεων της τριγωνομετρικής υψομετρίας είναι δυνατός ο υπολογισμός των τρισδιάστατων καρτεσιανών συντεταγμένων των σημείων που έχουν μετρηθεί. Ανάλογα με τον τρόπο προσδιορισμού της απόστασης μεταξύ του σαρωτή και του σαρωμένου σημείου, οι σαρωτές laser διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες.

- Τριγωνισμού. Ο ανιχνευτής κάνοντας χρήση της μεγάλης οπτικής ευκρίνειας μιας δέσμης laser που προβάλλεται επί του αντικειμένου και με χρήση εξισώσεων φωτογραμμετρίας υπολογίζει τη θέση του κάθε σημείου που φωτίζεται από την ακτίνα laser στον τρισδιάστατο χώρο. Σημαντικό ρόλο στην επιτυχημένη λειτουργία του ανιχνευτή laser είναι η ύπαρξη των κατάλληλων συνθηκών φωτισμού του αντικειμένου καθώς η αρχή λειτουργίας του στηρίζεται στον εντοπισμό του στίγματος της ακτίνας laser στην εικόνα του αντικειμένου που συλλαμβάνεται από τον ενσωματωμένο οπτικό αισθητήρα CCD. Σε μερικές μάλιστα περιπτώσεις υπάρχουν δύο οπτικοί αισθητήρες CCD που με παρόμοιο τρόπο με αυτόν της φωτογραμμετρικής εμπροσθοτομίας μπορεί να εντοπιστεί στο χώρο ένα σημείο εφόσον ανιχνευτούν οι εικονοσυντεταγμένες του σε δύο εικόνες των οποίων η σχετική θέση είναι γνωστή (απέχουν κατά μία γνωστή απόσταση που ονομάζεται και βάση).

- Χρόνος της πτήσης ενός παλμού laser (Time of Flight). Ένας παλμός laser εκπέμπεται προς το αντικείμενο και η απόσταση μεταξύ της συσκευής αποστολής σημείων και της επιφάνειας του αντικειμένου υπολογίζεται από το χρόνο που μεσολαβεί μεταξύ της μετάδοσης και της υποδοχής του παλμού. Αυτή η αρχή είναι ευρέως γνωστή από τα ηλεκτρονικά ταχύμετρα (Γεωδαιτικός Σταθμός). Στην πραγματικότητα, ένας γεωδαιτικός σταθμός θα μπορούσε να προγραμματιστεί ώστε να λειτουργεί όπως η συσκευή σάρωσης. Η ταχύτητα μέτρησης όμως θα ήταν πολύ χαμηλή, λόγω του μεγάλου όγκου του οργάνου και της χαμηλής απόκρισης



του οργάνου. Οι σαρωτές χρησιμοποιούν μικρές περιστρεφόμενες συσκευές (κάτοπτρα) για τη γωνιακή εκτροπή της ακτίνας laser (τουλάχιστον για μια από τις δύο γωνίες) και απλούστερους αλγόριθμους χρήσης για τον υπολογισμό της απόστασης που μπορεί να οδηγήσει σε υπολογισμό της μετρημένης απόστασης με μεγαλύτερη ακρίβεια. Οι χαρακτηριστικές τιμές της απόκλισης των μετρήσεων απόστασης από τους ανιχνευτές που χρησιμοποιούν την τεχνική Time of Flight είναι της τάξεως μερικών χιλιοστών. Δεδομένου ότι οι αποστάσεις είναι σχετικά μικρές, αυτή η ακρίβεια είναι σχεδόν η ίδια για ολόκληρο τον τρισδιάστατο χώρο. Η τρισδιάστατη ακρίβεια επηρεάζεται επίσης από την ακρίβεια της γωνιακής μέτρησης της ακτίνας που είναι της τάξης των εκατοστών του βαθμού [9].

• Σύγκριση φάσης (Phase Scanners). Αυτή η μέθοδος είναι επίσης ευρέως γνωστή από τα ταχυμετρικά όργανα. Σε αυτήν την περίπτωση, η εκπεμπόμενη ακτίνα διαμορφώνεται από ένα αρμονικό κύμα και η απόσταση υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τη διαφορά φάσης μεταξύ του κύματος αποστολής και λήψης. Από άποψη λειτουργικότητας, η μέθοδος δεν είναι πολύ διαφορετική από τη μέθοδο χρόνου πτήσης (Time of Flight). Λόγω της πολυπλοκότερης ανάλυσης των σημάτων, τα αποτελέσματα μπορεί να είναι ακριβέστερα (σε βάρος όμως του συνολικού αριθμού των μετρούμενων σημείων). Δεδομένου ότι απαιτείται ένα καλά καθορισμένο σήμα επιστροφής για την υπολογισμό των αποστάσεων, οι ανιχνευτές που χρησιμοποιούν τη μέθοδο σύγκρισης φάσης μπορεί να έχουν μειωμένη εμβέλεια.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι δυνατότητες των τριών κατηγοριών των σαρωτών laser. Τα προϊόντα μιας σύγκρισης laser είναι ένα νέφος σημείων

Κατηγορία Σαρωτή	Ταχύτητα Συλλογής	Εμβέλεια	Ακρίβεια
Τριγωνισμού	<250000 σημεία/scan	<15 m	Καλύτερη από 0.1cm
Χρόνος της πτήσης ενός παλμού laser	<60000 σημεία/sec	<1500 m	Καλύτερη από 1.5cm
Σύγκριση φάσης	>800000 σημεία/sec	<130 m	Καλύτερη από 0.5cm

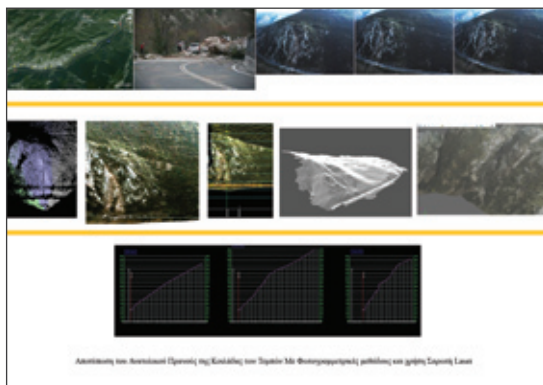
(τρισδιάστατες συντεταγμένες και ισχύς οπισθοσκεδαζόμενης δέσμης), και χρώμα (RGB) για κάθε σημείο με χρήση ενσωματωμένης ή πρόσθετης φωτογραφικής μηχανής.

### ■ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Η χρήση της φωτογραμμετρίας όσο και των μεθόδων που χρησιμοποιούν σαρωτή laser στις αποτυπώσεις καλύπτει ένα ευρύ πεδίο εφαρμογών. Η χρήση των παραπάνω μεθόδων επιτρέπει την δημιουργία τρισδιάστατων μοντέλων μεγάλης ακριβείας ενός πλήθους αντικειμένων και περιοχών. Σαν αποτέλεσμα μπορούν να δημιουργηθούν τρισδιάστατα μοντέλα μικροαντικειμένων, μνημείων, αντικειμένων μεσαίου μεγέθους, αρχαιολογικών χώρων ή άλλων περιοχών ενδιαφέροντος. Στα πλαίσια του άρθρου γίνεται αναφορά σε εφαρμογές που έχουν πραγματοποιηθεί από το Εργαστήριο Φωτογραμμετρίας και Τηλεπισκόπησης του Τμήματος Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών του Α.Π.Θ.

### ■ ΤΕΜΠΗ

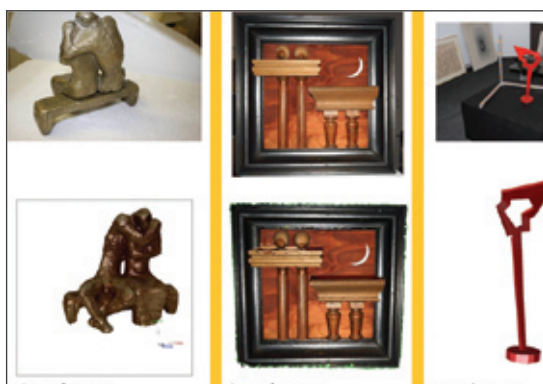
Στην περίπτωση της αποτύπωσης του ανατολικού πρανού της κοιλάδας των Τεμπών έγινε ταυτόχρονη χρήση φωτογραμμετρικών μεθόδων και μεθόδων τρισδιάστατων σαρωτών laser. Σκοπός της αποτύπωσης ήταν η παραγωγή ενός τρισδιάστατου μοντέλου εδάφους με ακρίβεια μικρότερη των 30 cm για την προσομοίωση πιθανών κατολισθήσε-



Αποτύπωση του Ανατολικού Πρανού της Κοιλάδας του Στενού ΜΚ Φωτογραμμετρικές μεθόδους και χρήση Σαρωτή Laser

ων κατά μήκος του ανατολικού πρανού της κοιλάδας. Στη συγκεκριμένη περίπτωση προτιμήθηκε η κοινή χρήση των δυο μεθόδων λόγω της φύσης του αντικείμενου και της περιορισμένης ορατότητας σε πολλά σημεία της περιοχής. Παρακάτω παρουσιάζονται μερικά παραδείγματα των αρχικών δεδομένων συλλογής και των παραχθέντων προϊόντων.

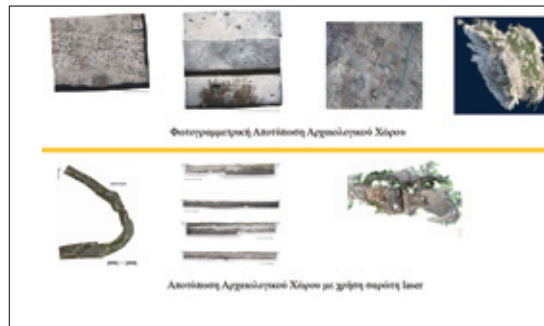
### ■ ΜΙΚΡΟΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΑ



Για τη δημιουργία τρισδιάστατων μοντέλων μικροαντικειμένων μπορούν να χρησιμοποιηθούν τόσο φωτογραμμετρικές μέθοδοι όσο και τεχνικές βασισμένες στη χρήση σαρωτών laser. Στις συγκεκριμένες εφαρμογές χρησιμοποιούνται σαρωτές τριγωνισμού κυρίως λόγω της μεγάλης ακριβείας που προσφέρουν καθώς και του μικρού μεγέθους του αντικείμενου. Οι φωτογραμμετρικές μέθοδοι αποτύπωσης χρησιμοποιούνται συνήθως για αντικείμενα με σαφές γεωμετρικό σχήμα, ενώ για πιο πολύπλοκα αντικείμενα είναι προτιμότερη η χρήση σαρωτή laser. Παρακάτω παρουσιάζονται μερικά παραδείγματα αποτυπώσεων μικροαντικειμένων (εκθέματα του Μακεδονικού Μουσείου Σύγχρονης Τέχνης).

### ■ ΜΝΗΜΕΙΑ - ΑΡΧΑΙΟΛΟΓΙΚΟΙ ΧΩΡΟΙ

Στις περιπτώσεις αποτυπώσεων μνημείων και αρχαιολογικών χώρων χρησιμοποιούνται ευρύτατα τόσο η φωτογραμμετρία όσο και οι σαρωτές laser. Από πλευράς σαρωτών laser, συνήθως γίνεται χρήση μοντέλων Time of Flight και Phase Scanner. Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζονται δυο παραδείγματα αποτύπωσης μνημείων. Το πρώτο αφορά την αποτύπωση της πρόσοψης ενός κτιρίου με χρήση φωτογραμμετρικών μεθόδων, ενώ το δεύτερο αφορά την αποτύπωση της Καμάρας με χρήση σαρωτή laser, που πραγματοποιήθηκε κατά τη διάρκεια του σεμιναρίου Μέθοδοι Αποτύπωσης

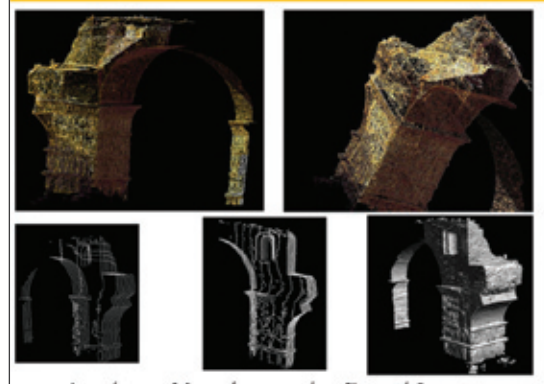


Φωτογραμμετρική Αποτύπωση Αρχαιολογικού Χώρου

Αποτύπωση Αρχαιολογικού Χώρου με χρήση σαρωτή laser



Αποτύπωση Μνημείου με χρήση Φωτογραμμετρικών Μεθόδων



Αποτύπωση Μνημείου με χρήση Σαρωτή Laser

Μνημείων Πολιτισμού από Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών "Προστασία, Συντήρηση και Αποκατάσταση Αρχιτεκτονικών Μνημείων", του Α.Π.Θ.

Στην παραπάνω εικόνα παρουσιάζονται δυο παραδείγματα αποτυπώσεων σε αρχαιολογικούς χώρους (Δισπηλιό, Κέρος) με ταυτόχρονη χρήση φωτογραμμετρίας και σαρωτή laser. ■

### Βιβλιογραφία

<https://blogs.auth.gr/tsioukas/2011/08/21/22/>