

ΤΑ ΛΕΙΖΕΡ ΣΤΗ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΔΕΙΞΗ ΤΗΣ ΠΟΛΙΤΙΣΤΙΚΗΣ ΚΛΗΡΟΝΟΜΙΑΣ

Καθ. Κώστας Φωτάκης
ΙΗΔΑ – ΙΤΕ και Πανεπιστήμιο Κρήτης

Εισαγωγή
Δεν είχα την τύχη να υπάρξω μαθητής του Θεόδωρου Σκουλικίδη, όπως οι προηγούμενοι ομιλητές. Είχα όμως τη μεγάλη ευκαιρία να συνεργασθώ μαζί του για την αξιοποίηση της σύγχρονης τεχνολογίας λέιζερ στη προστασία της ανάδειξης των γλυπτών



της Ακρόπολης και ειδικότερα στον καθαρισμό της Δυτικής Ζωφόρου του Παρθενώνα. Η συνεργασία αυτή ήταν πολυετής κι οδήγησε στην κατανόηση βασικών φαινομένων που συμβαίνουν κατά την αλληλεπίδραση ακτινοβολίας λέιζερ με τα πρωτότυπα υλικά των γλυπτών και τις επικαθήσεις ποικίλης προέλευσης, που υπάρχουν σε αυτά. Η συνεισφορά του Θεόδωρου Σκουλικίδη για την επιτυχία του έργου αυτού ήταν τεράστια, και οργανωτικά και επιστημονικά. Πρώτος επισήμανε, κατά το Α΄ Διεθνές Συνέδριο για Εφαρμογές Λέιζερ στη Συντήρηση Έργων Τέχνης (LACONA), που έγινε το 1995 στην Κρήτη, τις χρωματικές αλλοιώσεις που μπορεί να επιφέρει η ακτινοβολία των λέιζερ που εχρησιμοποιούνται εκείνη την εποχή για τον καθαρισμό γλυπτών και μνημείων διεθνώς, κι αποτέλεσε μεγάλο σημείο προβληματισμού έκτοτε. Το πρόβλημα επιλύθηκε αργότερα με το καινοτόμο σύστημα λέιζερ, που αναπτύχθηκε στο ΙΤΕ και χρησιμοποιήθηκε για τον καθαρισμό της ζωφόρου με οδηγό πάντα τον Θεόδωρο Σκουλικίδη.

Γενικά, μπορούμε να ξεχωρίσουμε τρεις κύριες κατηγορίες εφαρμογών των λέιζερ για τη συντήρηση και ανάδειξη της πολιτιστικής κληρονομιάς. Υπάρχουν αναλυτικές εφαρμογές λέιζερ, που αποσκοπούν στον προσδιορισμό της σύστασης των πρωτότυπων υλικών από τα οποία αποτελούνται τα αντικείμενα πολιτιστικής κληρονομιάς ή των ρύπων που τα επιβαρύνουν. Μια άλλη κατηγορία εφαρμογών επικεντρώνεται στην αξιολόγηση της δομικής αρτιότητας αντικειμένων πολιτιστικής κληρονομιάς, δηλαδή στην ανίχνευση ασυνεχειών, εξαιτίας ρωγμάτων κι αποκολλήσεων στο εσωτερικό τους. Τέλος, η ανάδειξη έργων τέχνης κι αρχαιοτήτων με την απομάκρυνση ανεπιθύμητων υλικών από την

επιφάνειά τους μπορεί πάλι να επιτευχθεί με τη χρήση λέιζερ, με τρόπο ασφαλή. Η σχετική μεθοδολογία παρουσιάζει πλεονεκτήματα συγκριτικά με εκείνη που βασίζεται στη χρήση χημικών διαλυτών ή μηχανικών μέσων, αφού δεν υπάρχει άμεση επαφή με το αντικείμενο. Πρέπει όμως από την αρχή να τονισθεί, ότι οι αποτελεσματικότερες παρεμβάσεις καθαρισμού είναι εκείνες που συνδυάζουν την τεχνολογία λέιζερ με συμβατικές τεχνικές. Στην παρουσίαση αυτή θα κάνω μια σύντομη ανασκόπηση του τομέα αυτού, επικεντρώνοντας σε μεθοδολογίες και πειραματικές διατάξεις που έχουν αναπτυχθεί στα εργαστήρια λέιζερ του ΙΤΕ και ήδη δοκιμάζονται σε εφαρμογές σε μουσεία, μνημεία και αρχαιολογικές ανασκαφές.

Αναλυτικές Εφαρμογές Λέιζερ

Οι αναλυτικές εφαρμογές βασίζονται στην εκμετάλλευση διαφόρων τύπων φασματοσκοπίας λέιζερ και ιδιαίτερα των φασματοσκοπικών τεχνικών Raman, Φθορισμού (LIF) και Πλάσματος Λέιζερ (LIBS). Η αξιοποίηση των τεχνικών αυτών δεν προϋποθέτει κατ' ανάγκη τη λήψη και κατεργασία δείγματος και μπορεί να γίνει επί τόπου (*in situ*). Από την άποψη αυτή ενδείκνυται ιδιαίτερα για την ανάλυση πολύτιμων έργων τέχνης και αρχαιοτήτων, που η διατήρηση της ακεραιότητάς τους, δηλαδή η μη λήψη δείγματος, είναι αδιαπραγμάτευτη και η μετακίνησή τους επισφαλής ή αδύνατη. Η Φασματοσκοπία Πλάσματος Λέιζερ παρέχει πληροφορίες σχετικά με τη στοιχειακή σύσταση των υλικών, ενώ οι Φασματοσκοπίες Raman και Φθορισμού χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο για τον προσδιορισμό μοριακών υλικών. Εξαιτίας της συμπληρωματικότητας των τεχνικών αυτών, εφαρμογές που βασίζονται σε συνδυασμούς τους μπορούν να δώσουν πλήρεις πληροφορίες σχετικά με τα πρωτότυπα υλικά από τα οποία αποτελείται το αντικείμενο, όπως, για παράδειγμα, τις χρωστικές ενός έργου ζωγραφικής ή τους ρύπους που έχουν επικαθήσει ή τα αλλοιωμένα υλικά (π.χ. προϊόντα οξειδωσης ή πολυμερισμού) που έχουν

ΤΑ ΛΕΙΖΕΡ ΣΤΗ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΔΕΙΞΗ ΤΗΣ ΠΟΛΙΤΙΣΤΙΚΗΣ ΚΛΗΡΟΝΟΜΙΑΣ

δημιουργηθεί ως αποτέλεσμα της φυσικής γήρανσης των αντικειμένων [1,2]. Οι πληροφορίες αυτές είναι ιδιαίτερα χρήσιμες στους αρχαιολόγους ή ιστορικούς τέχνης για την εκτίμηση της αυθεντικότητας των αντικειμένων, της προέλευσής τους ή της τεχνικής που έχει εφαρμοσθεί για την κατασκευή τους και των εξωτερικών επεμβάσεων που έχουν υποστεί.

Ακόμη, φασματοσκοπικές τεχνικές λέιζερ και, κυρίως, η Φασματοσκοπία Πλάσματος Λέιζερ μπορεί να χρησιμοποιηθούν για την παρακολούθηση και τον έλεγχο επεμβατικών τεχνικών για την ανάδειξη έργων τέχνης, γλυπτών, και μνημείων, όπως είναι ο καθαρισμός κατά τη διάρκεια της εφαρμογής τους (*on line*). Το στοιχείο αυτό παρέχει σημαντικά πλεονεκτήματα για την ασφαλή εφαρμογή επεμβάσεων καθαρισμού, είτε αυτές γίνονται με λέιζερ, είτε με συμβατικές τεχνικές και διευκολύνει την υιοθέτησή τους [3].

Επειδή οι αναλυτικές τεχνικές λέιζερ είναι κατεξοχήν μη επεμβατικές, οι εφαρμογές τους στη πολιτιστική κληρονομιά είναι ευκολότερο να υιοθετηθούν από την άποψη της ασφάλειας των αντικειμένων που εξετάζονται. Για τον λόγο αυτό έχουν πλέον φθάσει σε ένα ώριμο τεχνολογικό στάδιο ανάπτυξης. Υπάρχουν πλέον σχετικές διατάξεις και προϊόντα που είναι σε πολλές περιπτώσεις φορητά ή ακόμη έχουν τη δυνατότητα της ανάλυσης από μακριά, αφού οι ακτίνες λέιζερ μπορεί να κατευθυνθούν με ακρίβεια στο προς ανάλυση αντικείμενο από μεγάλες αποστάσεις [4,5]. Βεβαίως, η ταυτόχρονη εξέλιξη ευαίσθητων ανιχνευτικών συστημάτων και ιδιαίτερα συστημάτων πολυφασματικής απεικόνισης, έπαιξε σημαντικό ρόλο για τις ποικίλες επιτυχείς εφαρμογές των τεχνικών αυτών.

Σήμερα είναι διαθέσιμα πρωτότυπα φορητά ή μεταφερόμενα αναλυτικά συστήματα, που χρησιμοποιούνται σε μουσεία, αρχαιολογικές ανασκαφές και μνημεία. Η εικόνα 1 δείχνει ένα τέτοιο φορητό σύστημα LIBS.

Διαγνωστικές τεχνικές δομικής αρτιότητας

Η γνώση για τα δομικά χαρακτηριστικά αντικειμένων της πολιτιστικής κληρονομιάς, όπως η ύπαρξη ρωγμάτων, αποκολλήσεων, εξωτερικών επεμβά-

σεων ή άλλων αλλοιώσεων, είναι απαραίτητη για την αξιολόγηση των επεμβάσεων που έγιναν κατά τη συντήρησή τους, αλλά και γενικότερα για την προστασία τους στον χώρο που φυλάσσονται ή κατά τη μετακίνησή τους. Συμβολομετρικές τεχνικές, που βασίζονται στη χρήση λέιζερ, έχουν αποδειχθεί ιδιαίτερα αποτελεσματικές για τη συλλογή πληροφοριών δομικής αρτιότητας, που προέρχονται από το κύριο σώμα των αντικειμένων που εξετάζονται. Η χωρική διακριτική ικανότητα που μπορεί να επιτευχθεί είναι ιδιαίτερα υψηλή, ώστε σε πολλές περιπτώσεις να μπορεί να προσδιορισθούν εσωτερικές αλλοιώσεις, δηλαδή αλλοιώσεις σε βάθος που είναι αόρατες επιφανειακά. Πιο συγκεκριμένα, η τεχνική της ολογραφικής συμβολομετρίας διπλής έκθεσης φανερώνει τις φθορές του έργου που βρίσκονται κρυμμένες κάτω από την επιφάνειά του, μέσα από τις τρισδιάστατες μικροσκοπικές μετατοπίσεις που αυτές προκαλούν. Η μέθοδος αυτή είναι μη-καταστρεπτική και, πέρα από τη μεγάλη διακριτική ικανότητα που τη χαρακτηρίζει, έχει υψηλή ευαισθησία, ανεξάρτητα από το είδος των φθορών του υλικού ή της υφής της επιφάνειάς του. Η τεχνική αρχικά εφαρμόστηκε για την ανίχνευση κρυμμένων αλλοιώσεων σε γλυπτά και, ακολούθως, σε ζωγραφικά έργα τέχνης [1,6-8]. Επιπλέον, η ολογραφική απεικόνιση αποτελεί κατάλληλο εργαλείο για την παραγωγή «κανόνων αναφοράς», που διασφαλίζουν τη σωστή εφαρμογή επεμβατικών διαδικασιών σε έργα τέχνης, όπως είναι η αφαίρεση ανεπιθύμητων επιφανειακών στρωμάτων με χρήση λέιζερ. Υπάρχουν πολλά παραδείγματα, που βασίζονται στη χρήση οπτικής ολογραφίας, ενώ παρόμοια μεθοδολογία ακολουθείται πλέον και στην ψηφιακή καταγραφή συμβολογραμμάτων [9,10]. Τα συμβολομετρικά συστήματα που αποκαλύπτονται είναι δυνατόν να μελετηθούν σε μεγαλύτερη λεπτομέρεια μέσα από την προσομοίωση της γήρανσης των υλικών κάτω από διαφορετικές περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις. Έτσι εμπλουτίζονται οι γνώσεις μας για την πιθανή μελλοντική συμπεριφορά ή τις ευαισθησίες, που θα αναπτύξει το αντικείμενο. Τέλος, σε μια παρόμοια εφαρμογή, ο χάρτης των αλλοιώσεων, που λαμβάνεται με την τεχνική της

ΤΑ ΛΕΙΖΕΡ ΣΤΗ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΔΕΙΞΗ ΤΗΣ ΠΟΛΙΤΙΣΤΙΚΗΣ ΚΛΗΡΟΝΟΜΙΑΣ

ολογραφικής συμβολομετρίας, αποτελεί ένα συμβολομετρικό αποτύπωμα που μπορεί να χρησιμοποιηθεί, μέσα από κωδικοποιημένες διαδικασίες, ως τεκμήριο αυθεντικότητας του έργου τέχνης [10].

Όπως και για τα αναλυτικά συστήματα λέιζερ, σήμερα έχουν αναπτυχθεί και είναι διαθέσιμες μεταφερόμενες διατάξεις ολογραφικής συμβολομετρίας για δομική διάγνωση, κατάλληλες για εφαρμογές σε μουσεία ή μνημεία.

Καθαρισμός έργων τέχνης κι αρχαιοτήτων με λέιζερ

Ένα καίριο πρόβλημα για την ανάδειξη αντικειμένων πολιτιστικής κληρονομιάς είναι η απομάκρυνση επιφανειακών στρωμάτων, που αποτελούνται, είτε από επικαθίσεις οφειλόμενες σε περιβαλλοντικές επιδράσεις, είτε σε αλλοιώσεις υλικών που έχουν χρησιμοποιηθεί για την προστασία του έργου, όπως είναι, για παράδειγμα, η οξειδωση ή ο πολυμερισμός στο στρώμα του βερνικιού, που προστατεύει τα χρώματα ενός ζωγραφικού έργου τέχνης. Η αλληλεπίδραση της ακτινοβολίας παλμικών λέιζερ με τέτοια υλικά μπορεί να οδηγήσει στην αποδόμηση και απομάκρυνσή τους. Για την επιτυχή εφαρμογή της τεχνικής αυτής πρέπει να συνεκτιμηθούν οι παράμετροι του λέιζερ, όπως το μήκος κύματος, που εκπέμπει, η διάρκεια του παλμού, η συχνότητα του παλμού, η ενέργεια σε συνδυασμό με παραμέτρους που αφορούν τα υλικά προς απομάκρυνση, όπως είναι οι οπτικές τους ιδιότητες (π.χ. απορρόφηση) και οι θερμοδυναμικές παράμετροι που τα χαρακτηρίζουν. Πρέπει να τονισθεί ότι για τον λόγο αυτό διαφορετικοί τύποι λέιζερ αλληλεπιδρούν με διαφορετικό τρόπο με τα υλικά [1]. Στη μεγάλη πλειοψηφία των περιπτώσεων είναι δυνα-



Εικ. 1: Φορητή συσκευή Φασματοσκοπίας Πλάσματος Λέιζερ για στοιχειακή ανάλυση
Εικ. 2: Καινοτόμο σύστημα Λέιζερ, ικανό να εκπέμπει σε δύο μήκη κύματος ταυτόχρονα. Χρησιμοποιήθηκε για τον καθαρισμό της Δυτικής Ζωφόρου του Παρθενώνα

τόν να προσδιορισθούν οι κατάλληλοι παράμετροι και να επιλεγούν τα κατάλληλα συστήματα λέιζερ, ώστε να γίνουν επιτυχείς παρεμβάσεις. Αυτό ακριβώς είναι και το αντικείμενο λεπτομερών μελετών, που γίνονται στον τομέα αυτόν. Για παράδειγμα έχει δείχθει ότι για την αφαίρεση αλλοιωμένων επιφανειακών στρωμάτων βερνικιού από ζωγραφικά έργα τέχνης είναι κατάλληλα συστήματα λέιζερ, που εκπέμπουν στην υπεριώδη περιοχή του φάσματος, όπως είναι τα Excimer Λέιζερ [11]. Αυτό επιτεύχθηκε για πρώτη φορά στα Εργαστήρια Λέιζερ του ΙΤΕ σε συνεργασία με το Τμήμα Συντήρησης της Εθνικής Πινακοθήκης, αναδεικνύοντας παλαιές εικόνες και πίνακες ζωγραφικής με την αφαίρεση λεπτών επιφανειακών στρωμάτων ρύπων και αλλοιωμένου βερνικιού πάχους μερικών μμ, και αφήνοντας το πρωτότυπο υπόστρωμα πλήρως ανέπαφο. Η χρήση διαγνωστικών τεχνικών για τον έλεγχο του καθαρισμού κατά τη διάρκεια της επέμβασης (π.χ. με Φασματοσκοπία Πλάσματος Λέιζερ ή με Πολυφασματική Ανακλαστογραφία) διασφαλίζει ακόμη περισσότερο την αποφυγή αστοχιών. Αντίστοιχη ήταν η επιτυχία καθαρισμού ιζηματογενών επικαθίσεων και άλλων ρύπων από γλυπτά, όπως αυτά της Δυτικής Ζωφόρου του Παρθενώνα. Στη περίπτωση αυτή, η χρήση απλών λέιζερ που εκπέμπουν στο υπέρυθρο δεν ήταν κατάλληλη, γιατί, όπως είχαν δείξει ο Θεόδωρος Σκουλικίδης, η Εύη Παπακωνσταντίνου κι οι συνεργάτες τους, μπορούσε να οδηγήσει σε δυσχρωματισμό (κιτρίνισμα) [12, 13]. Η



αναγκαιότητα διατήρησης της αρχαιολογικής πατίνας ήταν ένα ακόμη πρόβλημα προς επίλυση [14]. Μετά από πενταετή έρευνα αυτών των προβλημάτων από στελέχη της ΥΣΜΑ και ερευνητές του ΙΗΔΛ-ΙΤΕ, προσδιορίστηκαν οι βέλτι-

ΤΑ ΛΕΙΖΕΡ ΣΤΗ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΔΕΙΞΗ ΤΗΣ ΠΟΛΙΤΙΣΤΙΚΗΣ ΚΛΗΡΟΝΟΜΙΑΣ

στες συνθήκες επέμβασης για τον καθαρισμό των γλυπτών. Για τον σκοπό αυτό αναπτύχθηκε στα Εργαστήρια Λέιζερ του ΙΤΕ καινοτόμο εξειδικευμένο σύστημα λέιζερ, που είναι ικανό να εκπέμπει σε δύο μήκη κύματος ταυτόχρονα, στο υπέρυθρο και το υπεριώδες (εικ. 2). Η επιλογή κατάλληλων αναλογιών εντάσεων ακτινοβολίας σε δύο μήκη κύματος (1064 και 355 nm) εξασφαλίζει την ασφαλή απομάκρυνση των ρύπων μέχρι του επιθυμητού σημείου, χωρίς την ύπαρξη δυσχρωματισμών ή άλλων παρενεργειών.

Επίλογος

Η χώρα μας πρωταγωνιστεί διεθνώς, τόσο ερευνητικά όσο και από την άποψη των εφαρμογών, στο πεδίο αυτό. Η συνεισφορά του Θεόδωρου Σκουλικίδη και των συνεργατών του γι' αυτή την παγκόσμια αναγνώριση, όπως αποτυπώθηκε από την εφαρμογή των λέιζερ στα γλυπτά της Ακρόπολης, ήταν καθοριστικής σημασίας. Έχοντας λοιπόν τη μορφή του μπροστά μας, θα ήθελα να κλείσω αυτή τη σύντομη παρέμβαση με τα λόγια του Ελύτη: «Μια λάμψη ο άνθρωπος, κι αν είδες, είδες...»

Αναφορές

- [1] Fotakis C., Anglos D., Zafirooulos V., Georgiou S., Tornari V., "Lasers in the Preservation of Cultural Heritage – Principles and Applications", Taylor & Francis, New York, London, 2007.
- [2] Anglos D., "Laser-induced breakdown spectroscopy in art and archaeology", Appl. Spectrosc. 2001; 55: 186A, 2001.
- [3] Maravelaki P.V., Zafirooulos V., Kylikoglou V., Kalaitzaki M., Fotakis C., "Laser induced breakdown spectroscopy as a diagnostic technique for the laser cleaning of marble", Spectrochim Acta 1997; B52: 41-53.
- [4] Grönlund R., Lundqvist M. and Svanberg S. "Remote imaging laser-induced breakdown spectroscopy and remote cultural heritage ablative cleaning", Optics Lett. 2005; 30; 2882.

[5] Tzortzakis S., Anglos D., Gray D., "Ultraviolet laser filaments for remote laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS) analysis: applications in cultural heritage monitoring", Optics Lett. 2006; 31; 1139.

[6] Asmus J.F., Guattari G., Lazzarini L., Musumeci G., Wuerker R.F., "Holography in the conservation of statuary" Studies in Conservation 1973; 18: 49-63.

[7] Amadesi S., Altorio A.D., Paoletti D. Sandwich holography for paintings diagnostics. Appl Opt 1982; 21: 1889-90.

[8] Tornari V., Zafirooulos V., Bonarou A., Vainos N.A. and Fotakis C., "Modern Technology in Artwork Conservation: A laser based approach for process control and evaluation", Opt. and Lasers in Eng. (JOLE) 2000; 34; 309.

[9] Tornari V., Orphanos Y., Dabu R., Blaranu C., Stratan A., Ursu D., "Non-destructive speckle interferometry diagnosis method for art conservation" Adv. Laser Technologies (ALT'06), Brasov, Romania, September 2006.

[10] Boone P.M., Markov V.B., "Examination of museum objects by means of video holography" Stud Conservation 1995; 40: 103-9.

[11] Zafirooulos V., "Laser ablation in cleaning of artworks", Chapter 8 in: Laser Cleaning, Ed. B. Luk'yanchuk (World Scientific, Singapore, New Jersey, London, Hong Kong, 2002) pp. 337-386.

[12] Pouli P., Frantzikinaki K., Papakonstantinou P., Zafirooulos V. and Fotakis C., in Proc. 5th Int. Conf. Lasers in the Conservation of Artworks (LACONA V) (Dickmann K., Fotakis C. and Asmus J.) 333 (Springer Proceedings in Physics 100, New York, 2005).

[13] Nevin A., Pouli P., Georgiou S. and Fotakis C., "Laser conservation of art", Nature Materials 2007; 6, 320.

[14] Frantzikinaki K., Panou A., Vasiliadis C., Papakonstantinou E., Pouli P., Ditsa Th., Zafirooulos V., Fotakis C., in Proceeding of the 10th International Congress Deterioration and Conservation of Stone (ICOMOS, 27 June -2 July 2004, Stockholm, Sweden), Series Eds. Daniel Kwiatkowski and Runo Lofventdahl (ICOMOS Sweden, 2004).