

Αποτύπωση μνημείων για τη δημιουργία απτικών μοντέλων

Π. Τοκμακίδης, Κ. Τοκμακίδης

Τομέας Γεωδαισίας και Τοπογραφίας, Πολυτεχνική Σχολή, ΤΑΤΜ–ΑΠΘ

Περίληψη: Σκοπός της εργασίας αυτής είναι να παραθέσει την μέθοδο δημιουργίας ενός τρισδιάστατου μοντέλου υπάρχοντος μνημείου ώστε να καταστεί δυνατή η δημιουργία αντιγράφου του υπό κλίμακα, για να μπορούν να το «βλέπουν» δια της αφής άτομα με περιορισμό στην όραση. Η μέθοδος που περιγράφεται εφαρμόστηκε στα πλαίσια του προγράμματος Prospelasis στην Ροτόντα της Θεσσαλονίκης. Το μοντέλο που κατασκευάστηκε βρίσκεται στην αυλή του μνημείου στη νότια πλευρά του και σε θέση προσβάσιμη από άτομα που δεν μπορούν να το δουν στην πραγματικότητα. Αφού γίνεται μία ιστορική περιγραφή του μνημείου, στη συνέχεια αναπτύσσεται η μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε για την δημιουργία του τρισδιάστατου μοντέλου. Η Ροτόντα της Θεσσαλονίκης ως ιστορικό και θρησκευτικό μνημείο και η ύπαρξή του μέσα στους αιώνες, αποτελεί ένα κομμάτι που αδυνατεί να σπάσει τους δεσμούς μας με το ιστορικό παρελθόν και συνεχίζει να αναζητά μια θέση στο παρόν και στο μέλλον. Η ανάγκη διατήρησης ενός τέτοιου μεγάλου ιστορικού και θρησκευτικού μνημείου, συνδέεται άμεσα με την τεκμηρίωσή του τόσο για λόγους που αφορούν τη μελέτη του, όσο και για λόγους που αφορούν την ανάδειξή του.

1. Εισαγωγή

Η Ροτόντα αποτελεί ένα από τα πιο καλοδιατηρημένα μνημεία της Θεσσαλονίκης. Στην ιστορία των 16 αιώνων της άλλαξε ονόματα και χρήσεις, από ρωμαϊκός ναός σε χριστιανικό, σε μουσουλμανικό τζαμί και πάλι σε χριστιανικό ναό, κι έτσι εξηγούνται οι διάφορες φάσεις και προσθήκες στο κτίριο. Η Ροτόντα βρίσκεται βόρεια της οδού Εγνατίας στη συμβολή των οδών Φιλίππου και Δημητρίου Γούναρη, στο ανατολικό τμήμα της παλιάς πόλης και σε μικρή απόσταση από την Κασσανδρεωτική πύλη στη σημερινή πλατεία Συντριβανίου. Νότια της Ροτόντας και στη νοητή προέκταση του άξονά της Β-Ν, σε μικρή απόσταση και σε επαφή με τη οδό Εγνατία, υπάρχει ένα τμήμα της **Θριαμβικής Αψίδας του Γαλερίου**, (Καμάρας), με την οποία η Ροτόντα αποτελούσε ένα ενιαίο κτιριακό σύνολο.

Η θεμελίωση του κτιρίου γύρω στα 300 μ.Χ. είναι σίγουρη, αλλά το ερώτημα για τον αρχικό προορισμό της ακόμα παραμένει. Σύμφωνα με κάποιους ερευνητές ήταν Μουσουλείο του Γαλερίου ή ναός των Καβείρων ή ναός του Δία. Πιθανότερη φαίνεται η τελευταία άποψη. Επειδή ο Δίας ήταν ο προστάτης θεός του Διοκλητιανού και του Γαλερίου. Εκτός αυτού είναι γνωστό ότι ο Γαλέριος τάφηκε στην γενέτειρά του στο Σίρμιο και όχι στην Θεσσαλονίκη.



Εικόνα 1. Ανατολική όψη της Ροτόντας

Το κτίριο έχει ομοιότητες με το Πάνθεον του Αγρίππα στην Ρώμη. Οι τοίχοι του έχουν πάχος 6,30 μ. και αποτελούνται από πέτρα, ενισχυμένη σε κάποια σημεία με τούβλο. Έχει ύψος 29,80 μ. και τα τόξα και ο τρούλος αποτελούνται από κεραμίδι. Ένα οπαίο στην κορυφή της στέγης άφηνε να περάσει το φως και ο αέρας. Η στέγη κτίστηκε σε 3 επίπεδα (εικόνα 1). Ο τούβλινος θόλος, με διάμετρο 24,5 μ. περίπου, δεν είναι ορατός εξωτερικά. Ο περιμετρικός τοίχος, με μειωμένο πάχος, επεκτείνεται προς τα πάνω και σκεπάζει εξωτερικά τον θόλο. Πάνω στην τοιχοποιία αυτή εδράζεται η ξύλινη κυκλική κεραμωτή στέγη του μνημείου. Στο εξωτερικό του το κτίριο δείχνει βαρύ και ογκώδες, στο εσωτερικό όμως δίνει την αίσθηση του ανάλαφρου, λόγω των πολλών ανοιγμάτων και τόξων. Υπήρχαν 8 μεγάλες τετράγωνα κόγχες που καλύπτονταν από ημικυκλικά τόξα και μάλλον υπήρχαν ανοίγματα παραθύρων με επιστύλιο που ένωνε τους κίονες των παραθύρων ανά δύο. Πάνω από τις κόγχες υπήρχαν 8 μεγάλα παράθυρα και πάνω από αυτά και κάτω από τον τρούλο 8 μικρά παράθυρα.

Η κύρια είσοδος του κτιρίου ήταν κατά μήκος του άξονα προς τα νότια και ξεκινούσε από την νότια κόγχη του. Δίπλα από την είσοδο αυτήν υπήρχαν εκατέρωθεν δύο σκάλες που οδηγούσαν στην στέγη.

Σε ποια ακριβώς εποχή μετατράπηκε το κτίριο από κοσμικό σε χριστιανικό δεν είναι βέβαιο. Πρέπει να συνέβη μεταξύ του τέλους του 4^{ου} και των αρχών του 6^{ου} αιώνα, πιθανότατα στην εποχή του Θεοδοσίου του Μεγάλου (379-395 μ.Χ.). Η επικρατέστερη άποψη για τη μετονομασία του είναι ναός των Ασωμάτων ή των Αρχαγγέλων, που αναφέρεται σε πηγές του 9^{ου} 12^{ου} και 14^{ου} αιώνα. Το κτίριο μετατράπηκε στη Μητρόπολη Θεσσαλονίκης μεταξύ 1523-24 μ.Χ. και 1590-91 μ.Χ., οπότε και η προγενέστερη Μητρόπολη Αγ. Σοφία είχε μετατραπεί σε τζαμί. Η ανατολική κόγχη μετατράπηκε σε ορθογώνια με ασίδα για το Ιερό Βήμα. Έτσι

έχασε το κτίριο τη στατική του ικανότητα και ενισχύθηκε στο εξωτερικό της κόγχης με δύο αντιρρήδες. Για αυτό υπέστη μεγάλες ζημιές στο σεισμό του 1978. Επίσης προστέθηκε ψηφιδωτή διακόσμηση στην ανίδα του Ιερού Βήματος.

Μια άλλη μεγάλη αλλαγή ήταν η προσθήκη ενός περιμετρικού στεγασμένου διαδρόμου γύρω από όλο τον ρωμαϊκό κύλινδρο για να μεγαλώσει η χωρητικότητα του εσωτερικού του σχεδόν στο διπλάσιο. Έτσι γκρεμίστηκαν οι τοίχοι των 7 κογχών. Ο διάδρομος αυτός πρέπει να γκρεμίστηκε με το μεγάλο σεισμό του 7^{ου} αιώνα στην πόλη. Στη δυτική πλευρά χτίστηκε μια νέα είσοδος με νάρθηκα. Στη νότια είσοδο προστέθηκε ένας προθάλαμος με δύο παρεκκλήσια, ένα κυκλικό στα ανατολικά κι ένα οκταγωνικό στα δυτικά του. Αυτό δείχνει ότι η είσοδος προς τα νότια και προς το Ανάκτορο ακόμα υπήρχε και μάλλον ο ναός χρησίμευε στην παλαιохριστιανική εποχή σαν αυτοκρατορικός ναός του Ανακτόρου.

Δείγματα της λάμψης της παλαιохριστιανικής εποχής είναι τα υπέροχα ψηφιδωτά εργαστηρίου της Θεσσαλονίκης, που αποτελούν τα παλαιότερα σωζόμενα της Ανατολής. Ψηφιδωτά διακοσμούσαν τα εσωτερικά στις κόγχες, τα τόξα, τα επάνω παράθυρα και τον τρούλο. Ένα τμήμα αυτών των ψηφιδωτών της Ροτόντας σώζεται και σήμερα στον θόλο και στις καμάρες των κογχών. Τα ψηφιδωτά αυτά, που παριστάνουν αγίους της πρώτης Ανατολικής χριστιανικής Εκκλησίας (Ανανίας, Ρωμανός, Αρίσταρχος, Κύριλλος, Βασιλίσκος κ.ά.), καθώς και άλλα διακοσμητικά θέματα (κύρια στις καμάρες), είναι από τα πιο σημαντικά της παλαιохριστιανικής εποχής, αντίστοιχα σε σπουδαιότητα με αυτά της Ραβέννας της Ιταλίας. Επίσης υπήρχε πολύχρωμη ορθομαρμάρωση στους τοίχους μέχρι την βάση του τρούλου, η οποία δεν σώζεται καθόλου σήμερα. ενώ το υπόλοιπο τμήμα ήταν διακοσμημένο με ψηφιδωτά. Πίσω από τις μορφές των αγίων υπάρχουν υπέροχες συνθέσεις με διάφορα κτίρια, ανίδες, τόξα και αετώματα.

Το 1590-91 μ.Χ. ο ναός μετατράπηκε από το Σινάν Πασά και τον επικεφαλής της Μονής των Δερβίσηδων, Χορτάτζη Σουλεϊμάν Εφέντη, σε τζαμί, και ονομάστηκε Χορτάτζ Εφέντη Τζαμί. Ο Δερβίσης και κάποιος Γιουσούφ Μπέης τάφηκαν ανατολικά της κόγχης του Ιερού. Απομεινάρια της εποχής είναι ο μιναρές, η κρήνη στην αυλή και οι προθάλαμοι στη δυτική και νότια είσοδο του κτιρίου. Εκείνη την εποχή ονομαζόταν και σαν Εσκή Μετροπόλ (Παλαιά Μητρόπολη), από τις επιγραφές των περιηγητών του 18^{ου} και 19^{ου} αιώνα.

Το σημερινό όνομα Αγ. Γεώργιος, δόθηκε από το παρεκκλήσι του Αγίου, που βρισκόταν στη δυτική είσοδο του κτιρίου και ανήκε στη Μονή Γρηγορίου του Αγ. Όρους. Μετά την απελευθέρωση της πόλης το 1912 μ.Χ., ξαναχρησιμοποιήθηκε το κτίριο σαν χριστιανικός ναός. Το 1914 μ.Χ. έγιναν ανασκαφές από Γάλλους της Στρατιάς της Ανατολής, επιβλεπόμενες από Έλληνες και Δανούς. Το 1917 μ.Χ. ο Ελευθέριος Βενιζέλος ανακήρυξε το κτίριο σαν Μακεδονικό Μουσείο, κι έτσι αποτελούσε εκθετήριο χριστιανικών γλυπτών μέχρι το σεισμό του 1978 μ.Χ..

2. Σύγχρονες τεχνολογίες τρισδιάστατης αποτύπωσης

Τα τελευταία χρόνια νέα όργανα μετρήσεων έχουν εισαχθεί στις επιστήμες των αποτυπώσεων χώρων τα οποία είναι σε θέση να μετρήσουν και να ανακατασκευάσουν τον τριδιάστατο χώρο και τα αντικείμενα των διάφορων μορφών και μεγεθών με έναν γρήγορο και οικονομικό τρόπο. Αυτά τα όργανα, βασισμένα στην τεχνολογία laser, είναι συνήθως γνωστά ως επίγειοι τριδιάστατοι σαρωτές Laser (3D laser scanner).

Οι ρίζες της τεχνολογίας laser για την μέτρηση αποστάσεων βρίσκονται στα τέλη της δεκαετίας του 1970, ωστόσο εφαρμογές της όπως οι ψηφιακοί σαρωτές laser, καθυστέρησαν να εμφανιστούν στην αγορά. Πρόσφατα η ανάπτυξη τους έχει επιτρέψει την κατασκευή εμπορικών συσκευών ικανοποιητικής ακρίβειας, φορητών από άποψη μεγέθους και βάρους και προσιτών από άποψη τιμής. Τα πλεονεκτήματα της χρήσης τους είναι εμφανή, καθιστούν δυνατή την εύκολη συλλογή πυκνών Ψηφιακών Μοντέλων Επιφανείας μεγάλης ακρίβειας και πυκνότητας σε λίγα μόλις λεπτά. Στις περισσότερες επίγειες εφαρμογές η συλλογή των δεδομένων των μοντέλων με τοπογραφικές μεθόδους είναι σχεδόν αδύνατη λόγω των μεγεθών των αντικειμένων, οπότε η λύση που ακολουθείται είναι η φωτογραμμετρική στερεοσκόπηση, η εξαγωγή δηλαδή υψομετρικής πληροφορίας από προσανατολισμένα ζεύγη φωτογραφιών του αντικειμένου. Η διαδικασία ωστόσο είναι πολύ χρονοβόρα και παρά το γεγονός ότι η ακρίβεια που μπορεί να επιτευχθεί είναι μεγάλη, η χρήση των σαρωτών laser υπερτερεί.

Οι επίγειοι σαρωτές laser είναι όργανα ενεργής απεικόνισης τα οποία δίνουν σε πραγματικό χρόνο τις τριδιάστατες συντεταγμένες του αντικειμένου που αποτυπώνεται. Το προϊόν που παράγεται είναι νέφος σημείων με συντεταγμένες x,y,z που αναφέρονται στο σύστημα αναφοράς της σάρωσης και i η ένταση του ανακλώμενου σήματος. Οι σαρωτές laser ανάλογα με τη μέθοδο υπολογισμού της απόστασης διακρίνονται στους παθητικούς (μέθοδος τριγωνισμού) και στους ενεργητικούς (time of flight, τριγωνισμός με μια ή δύο κάμερες CCD). Η δεύτερη μέθοδος έγκειται στη μέτρηση του χρόνου που χρειάζεται το σήμα να πάει και να επιστρέψει στο σαρωτή. Ο χρόνος αυτός μετράται από ειδικά χρονόμετρα ακριβείας που είναι ενσωματωμένα στο σαρωτή. Έπειτα, για κάθε σημείο υπολογίζεται η απόσταση (d) με βάση τη σχέση $d = c \times t$, όπου c η ταχύτητα του σήματος και t ο χρόνος. Οι κύριες πηγές σφαλμάτων των σαρωτών time of flight είναι η ακρίβεια μέτρησης του χρόνου μετάβασης και επιστροφής του σήματος, η χρονική υστέρηση στη μέτρηση του σήματος, η αστάθεια του χρονομέτρου κλπ. Η ακρίβεια του σαρωτή time of flight τους επιτρέπει να χρησιμοποιούνται για σαρώσεις αντικειμένων από μεγάλη απόσταση και να πετυχαίνουν ακρίβειες 3mm-3cm.

Οι σαρωτές τριγωνισμού άρχισαν να χρησιμοποιούνται από τη δεκαετία του '80 και βρίσκουν εφαρμογή σε μικρά αντικείμενα και κοντινές αποστάσεις. Οι σαρωτές μέτρησης απόστασης από την άλλη είναι κατάλληλοι για αποτυπώσεις αρχιτε-

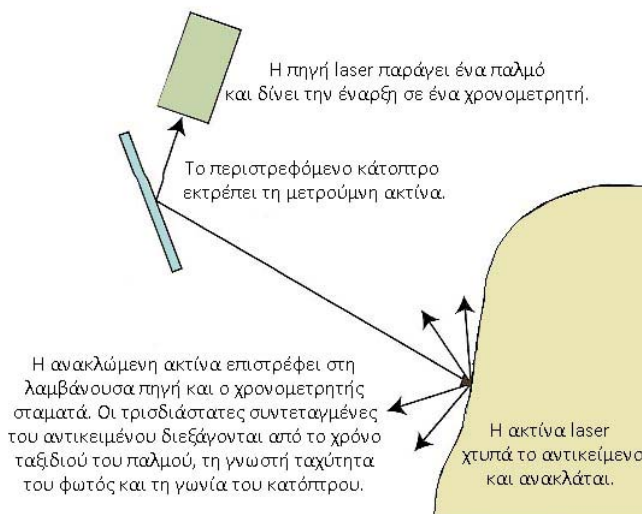
κτονικού ενδιαφέροντος και χρησιμοποιούνται ευρέως μόλις από τη δεκαετία του '90.

Η τεχνολογία του laser scanner βρίσκει ευρεία εφαρμογή σε πάρα πολλούς τομείς που απαιτούν συλλογή δεδομένων με μεγάλη ταχύτητα και ακρίβεια. Ενδεικτικές εφαρμογές χρήσης του τριδιάστατου σαρωτή είναι η αποτύπωση αρχαιολογικών χώρων, αποτύπωση διατηρητέων κτιρίων ή μνημείων, αποτύπωση ορυχείων, σηράγγων, σπηλαίων, μεταλλείων κ.α., αποτύπωση ειδικών κατασκευών όπως για παράδειγμα κεραιών κινητής τηλεφωνίας, συλλογή δεδομένων και σχεδιασμός 3D μοντέλων εργοστασιακών και βιομηχανικών «όπως χτίστηκαν» (as - built) εφαρμογών, 3D σχεδιασμός μοντέλων αεροσκαφών, πλοίων και οχημάτων (κατασκευή - επισκευή), εικονική πραγματικότητα, προσομοίωση, ειδικά effects και πολλές άλλες.

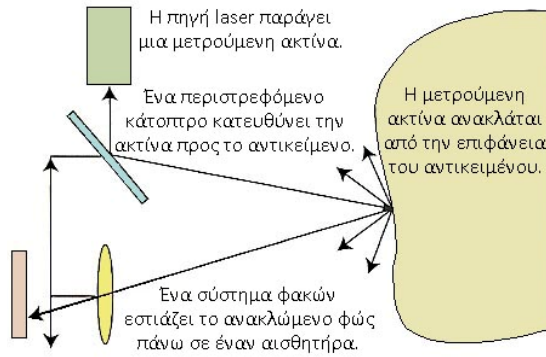
3. Αρχές λειτουργίας των σαρωτών

Με βάση την αρχή λειτουργίας τους τα συστήματα laser scanner διακρίνονται σε σαρωτές μέτρησης απόστασης (εικόνα 2) και σαρωτές τριγωνισμού (εικόνα 3). Οι σαρωτές της πρώτης κατηγορίας έχουν τη δυνατότητα μέτρησης της απόστασης με δύο τρόπους:

- *Χρόνος πτήσης της ακτίνας laser (Time of Flight Measurement)*. Μια ακτίνα laser εκπέμπεται στο αντικείμενο και η απόσταση μεταξύ πηγής και ανακλώμενης επιφάνειας υπολογίζεται από το χρόνο ταξιδιού του σήματος μεταξύ εκπομπής και λήψης.



Εικόνα 2. Αρχή σαρωτή μέτρησης απόστασης



Η θέση του παλμού laser στον αισθητήρα συνδυάζεται με τη γνωστή διαφορά μεταξύ αυτού και του κατόπτρου για να προσδιορίσει τις συντεταγμένες ενός σημείου βάσει του τριγωνισμού.

Εικόνα 3. Αρχή σαρωτή τριγωνισμού

- *Σύγκριση φάσης (Phase Shift Measurement).* Στην περίπτωση αυτή η εκπεμπόμενη ακτίνα μετατρέπεται σε αρμονικό κύμα και η απόσταση υπολογίζεται από τη διαφορά φάσης μεταξύ εκπεμπόμενου και λαμβανομένου κύματος.

Οι σαρωτές τριγωνισμού μπορούν να διαθέτουν μονή ή διπλή κάμερα:

- *Σαρωτές με μονή κάμερα.* Ο σαρωτής αυτός περιλαμβάνει συσκευή εκπομπής στέλνοντας την ακτίνα laser σε καθορισμένη μεταβαλλόμενη γωνία από την άκρη μηχανικής βάσης στο αντικείμενο και μια CCD κάμερα στην άλλη άκρη της βάσης εντοπίζει την κηλίδα του laser πάνω στο αντικείμενο. Η τριδιάστατη θέση του αντικειμένου διεξάγεται από την επίλυση του τριγώνου που σχηματίζεται.
- *Σαρωτές με διπλή κάμερα.* Μια παραλλαγή της αρχής του τριγωνισμού εφαρμόζεται με χρήση δύο CCD καμερών κάθε μια από τις οποίες βρίσκεται στα άκρα μιας βάσης. Η κηλίδα του laser που πρέπει να εντοπιστεί στην περίπτωση αυτή υποδεικνύεται από ένα προβολέα φωτός που δεν έχει καμία μετρητική λειτουργία. Η γεωμετρική λύση βασίζεται στην ίδια αρχή με την μία κάμερα και έχει τα ίδια χαρακτηριστικά ακρίβειας.

Οι σαρωτές τριγωνισμού βρίσκουν εφαρμογή μόνο σε κοντινές αποστάσεις και μικρά αντικείμενα καθώς η ακρίβεια της απόστασης μεταξύ οργάνου και αντικειμένου εξαρτάται από το τετράγωνο της απόστασης. Ενώ για αποτυπώσεις αρχιτεκτονικού ενδιαφέροντος, κατάλληλοι είναι οι σαρωτές μέτρησης απόστασης καθώς μπορούν να μετρήσουν πολύ μεγάλες αποστάσεις (τυπικά από 2-100 μέτρα).

Μια επιπλέον κατηγορία αποτελεί ο από αέρα laser scanner. Βασίζεται είτε στις

αρχές του τριγωνισμού, είτε του χρόνου πτήσης. Στην περίπτωση αυτή ο σαρωτής είναι απαραίτητο να εξοπλιστεί με αισθητήρες για τη μέτρηση της θέσης, του προσανατολισμού και της στάσης του αεροσκάφους κατά τη διάρκεια συλλογής των δεδομένων, μέσω GPS και αδρανειακών συστημάτων. Συνδυάζοντας αυτές τις μετρήσεις με δεδομένα απόστασης που συλλέγονται από τον laser scanner παράγεται ένα τριδιάστατο νέφος σημείων που αναπαριστά την τοπογραφία του εδάφους, παρόμοιο με αυτό που δημιουργείται από ένα laser scanner σταθερό στο έδαφος.

Η εταιρεία FARO με το laser scanner Focus 3D παρέχει ένα μηχάνημα τριδιάστατης αποτύπωσης ικανό να καταγράφει μεγάλο όγκο δεδομένων-παρατηρήσεων σε μικρό χρονικό διάστημα. Η αρχή λειτουργίας του συγκεκριμένου 3D laser scanner είναι να στέλνει μια ακτίνα laser στο πεδίο καταγραφής και όταν αυτή η ακτίνα προσπίπτει σε μια ανακλώμενη επιφάνεια επιστρέφει πίσω στη διεύθυνση του scanner (σαρωτής μέτρησης απόστασης). Για το προσδιορισμό της θέσης του αντικειμένου το laser scanner δουλεύει με πολικές συντεταγμένες οι οποίες περιλαμβάνουν οριζόντια, κατακόρυφη γωνία και τη μετρούμενη απόσταση σε σχέση με τη θέση του laser scanner.

Η οριζόντια γωνία υπολογίζεται σε σχέση με τη γωνία στροφής του laser scanner γύρω από τον κατακόρυφο άξονα, η οποία μετριέται με ένα μετρητή-κωδικοποιητή γωνίας. Η κατακόρυφη γωνία προσδιορίζεται μέσω της γωνίας στροφής του καθρέφτη-πρίσματος το οποίο εκτρέπει την εκπεμπόμενη ακτίνα σε κυκλική τροχιά μέσω του χώρου. Αυτή η γωνία μετριέται με ένα δεύτερο μετρητή-κωδικοποιητή γωνίας. Ο αισθητήρας απόστασης μετρά την απόσταση από το laser scanner στο αντικείμενο. Στο συγκεκριμένο μοντέλο για τη μέτρηση των αποστάσεων χρησιμοποιείται η σύγκριση φάσης (Phase Shift Measurement) για τον υπολογισμό της απόστασης.

Επιπλέον για την ποιοτική πληροφορία το 3D laser scanner καθορίζει την αντανάκλασιμότητα της προσπίπτουσας επιφάνειας μετρώντας την ένταση της ληφθείσας ακτίνας laser. Γενικά, οι φωτεινές επιφάνειες αντανάκλουν μεγαλύτερο ποσοστό του εκπεμπόμενου φωτός από ότι οι σκοτεινές επιφάνειες. Αυτή η αντανάκλασιμη ποσότητα χρησιμοποιείται για να συσχετίσει τη διαβάθμιση της βαθμίδας του γκρι σε κάθε σημείο.

Το 3D laser scanner έχει τη δυνατότητα να εκτελεί ταχύτερες σαρώσεις υψηλής ακρίβειας έως 976.000 σημεία/sec. Το αποτέλεσμα από τις μετρήσεις αποκαλείται νέφος σημείων (Point Cloud). Ανάλογα από τη επιλεγμένη ανάλυση, κάθε νέφος σημείων μπορεί να αποτελείται από εκατομμύρια σκαναρισμένα σημεία.

Το laser scanner Focus3D έχει ενσωματωμένη οθόνη αφής από την οποία γίνεται ο έλεγχος όλων των λειτουργιών και των παραμέτρων της σάρωσης. Η εικόνα που προκύπτει από τη σάρωση είναι ένα σύνολο από εκατομμύρια έγχρωμα 3D σημεία μέτρησης, το οποίο αποτελεί μια ακριβή ψηφιακή αναπαραγωγή της υφιστάμενης



Εικόνα 4. Το Laser Scanner Faro Gocus 3D στην είσοδο της Ροτόντας

κατάστασης. Ο συγκεκριμένος σαρωτής έχει εμβέλεια μέτρησης από 0,6μ. έως και 120μ. σε εσωτερικούς ή εξωτερικούς χώρους και πρόσπτωση σε επιφάνεια με 90% αντανακλαστικότητα. Η ακρίβεια μέτρησης είναι ± 2 χιλ. στα 10 και 25 μέτρα και η διάμετρος της δέσμης κατά την έξοδο μόλις 3.8 χιλ. σφαιρική. Έχει δυνατότητα μέτρησης μέχρι και 976.000 σημείων το δευτερόλεπτο και εύρος κίνησης 360° στο οριζόντιο επίπεδο και άνοιγμα 305° στο κατακόρυφο επίπεδο.

Ορισμένα επιπλέον χαρακτηριστικά του είναι τα ακόλουθα. Διαθέτει ενσωματωμένη έγχρωμη κάμερα ανάλυσης 70MPixels με δυνατότητα παραγωγής φωτορεαλιστικών έγχρωμων σαρώσεων τριών διαστάσεων. Η διαχωριστική ικανότητα του σαρωτή, ανέρχεται σε 0,16 mrad, που είναι ιδανική για τον έλεγχο και την αποτύπωση αρχιτεκτονικών λεπτομερειών. Όλα τα δεδομένα αποθηκεύονται σε μια αποσπώμενη κάρτα μνήμης SD για την εύκολη και ασφαλή μεταφορά τους σε Η/Υ. Τέλος έχει τη δυνατότητα να τοποθετηθεί κεκλιμένα ώστε να αποτυπωθεί το αντικείμενο που ενδιαφέρει, ενώ η περιοχή σάρωσης είτε ορίζεται αυτόματα είτε επιλέγεται από τον χειριστή.

Για να εξασφαλιστεί η πλήρης κάλυψη του προς αποτύπωση αντικειμένου, κατασκευής ή χώρου, απαιτείται συνήθως ένας αριθμός σαρώσεων από διαφορετικές θέσεις. Κατά τη συλλογή των δεδομένων το όργανο τοποθετείται σε άγνωστη θέση και τα σκαναρίσματα βασίζονται σε αυθαίρετο σύστημα αναφοράς. Οι παράμετροι των μετρήσεων (πυκνότητα των σημείων που θα αποτυπωθούν, προσεγγιστική απόσταση σαρωτή - αντικειμένου κτλ.) καθορίζονται από το χειριστή στο software

του οργάνου. Η περιοχή ενδιαφέροντος που πρόκειται να σαρωθεί μπορεί να ορίζεται επίσης μέσα από το πρόγραμμα αφού ο χειριστής την επιλέγει με πλαίσιο στο συνολικό πανόραμα που ο laser scanner δημιουργεί κατά την έναρξη της λειτουργίας του.

4. Επεξεργασία του νέφους σημείων

Κατά τη διάρκεια της σάρωσης ο laser scanner αποτυπώνει σημεία τα οποία δεν θα χρησιμοποιηθούν απαραίτητα για τη δημιουργία του μοντέλου (δέντρα, πινακίδες κ.α.). Η προετοιμασία της επεξεργασίας των μετρήσεων συνίσταται στη διαδικασία «καθαρισμού» των σημείων αυτών κάτι που επιτρέπει μια σημαντική μείωση των δεδομένων, με αποτέλεσμα την καλύτερη διαχείριση του νέφους των σημείων. Επίσης τα σημεία που παίρνουμε από τις τριδιάστατες σαρώσεις προσβάλλονται από μια διαταραχή που γενικά δηλώνεται ως «θορύβος», είναι ευμετάβλητη ανάλογη με τη λειτουργία της μεθόδου μέτρησης του σαρωτή που χρησιμοποιούμε, ενώ εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας του αντικειμένου. Η επίδραση του «θορύβου» επηρεάζει σε σημαντικό βαθμό την ποιότητα των μοντέλων που προκύπτουν από τριδιάστατες σαρώσεις. Η μείωση του θορύβου επιτυγχάνεται με την εφαρμογή φίλτρων - μέσα από το πρόγραμμα επεξεργασίας των μετρήσεων – τα οποία είναι ικανά να αναλύουν στατιστικούς δείκτες (μέγιστη απόσταση, μέση απόσταση και μέση τετραγωνική απόκλιση) με βάση τους υπολογισμούς που έχουν διενεργηθεί. Ένα υπερβολικό φιλτράρισμα πάντως δεν φέρνει το επιθυμητό αποτέλεσμα καθώς δεν επιτρέπει την αναγνωσιμότητα των μορφών του αντικειμένου.

Τα δεδομένα μέτρησης του laser scanner συνίστανται σε μεμονωμένα νέφη σημείων. Μετά τον καθαρισμό και την απομάκρυνση του θορύβου για να αξιοποιηθούν στο σύνολό τους θα πρέπει να αλλάξει η θέση και ο προσανατολισμός τους έτσι ώστε κάθε σκανάρισμα να χρησιμοποιεί ένα κοινό σύστημα συντεταγμένων. Η διαδικασία αυτή χαρακτηρίζεται ως cloud alignment ή registration και μπορεί να γίνει με δύο τρόπους.

Σύμφωνα με τον πρώτο, χρησιμοποιούνται ειδικοί στόχοι ή σφαίρες - που συμπεριλαμβάνονται στον εξοπλισμό του οργάνου – οι οποίες τοποθετούνται σε διάφορες θέσεις πάνω στο αντικείμενο, αυτές στη συνέχεια σκανάρονται με ακρίβεια από κάθε θέση, προσδιορίζονται οι συντεταγμένες τους και τα σκαναρίσματα ενώνονται βάσει των αντίστοιχων στόχων.

Η δεύτερη μέθοδος ένωσης των νεφών καλείται γεωαναφορά, αυτή τη φορά κάθε νέφος προσανατολίζεται με βάση τα γνωστά σημεία των οποίων οι συντεταγμένες έχουν προσδιοριστεί από την τοπογραφική αποτύπωση. Έτσι όλα τα νέφη αναφέρονται σε ένα κοινό σύστημα αναφοράς.

Από την επεξεργασία των στοιχείων από το laser scanner εξασφαλίζεται συνήθως ένα δίκτυο το οποίο περιγράφει σε γενικές γραμμές τα επιμέρους αρχιτεκτονικά

στοιχεία μιας κατασκευής. Η αναγνώριση στοιχειωδών γεωμετρικών μορφών μπορεί να γίνει με διαδικασίες ημιαυτόματες, όμως στοιχεία που αποτελούνται από σύνθετες μορφές πρέπει να πραγματοποιούνται με τρόπο εξολοκλήρου χειροκίνητο. Ο διαχωρισμός σε τμήματα ενός ιστορικού κτιρίου είναι εφικτός από άποψη κατασκευαστική, λειτουργική, δομική κλπ. Όμως γίνεται μια διαδικασία περίπλοκη αν σκεφτεί κανείς τις ιδιαιτερότητές του τόσο εξαιτίας του χειρονακτικού τρόπου κατασκευής του όσο και εξαιτίας των φθορών που έχουν υποστεί τα δομικά του στοιχεία με το πέρασμα του χρόνου. Ακόμη και ένα δάπεδο ή ένας τοίχος δεν μπορεί να περιγραφεί ακριβώς με την έννοια του επιπέδου εξαιτίας των υλικών ή των τεχνικών κατασκευής με τις οποίες πραγματοποιήθηκε. Και αν ακόμη στην έννοια αυτή του επιπέδου υπάρξει ένας βαθμός ανοχής, είναι αντιληπτή η διαφορά του επιπέδου ενός τοίχου δομημένου με πλίνθους από έναν επιχρισμένο τοίχο. Όμως η επιπεδότητα των παραπάνω στοιχείων που επικαλούμαστε είναι γεωμετρικά επιχειρήματα συνήθως αποδεκτά στην τριδιάστατη ανάπλαση της αρχιτεκτονικής.

Ακόμη και μετά τον καθαρισμό των δεδομένων είναι σημαντικό να μειωθούν τα σημεία του νέφους σε αυτά που είναι αναγκαία. Έτσι θα μπορέσει να διαχειριστεί ο όγκος των δεδομένων και να καταστεί δυνατή η πραγματοποίηση των μοντέλων ανάλογων γεωμετρικών χαρακτηριστικών με το αρχικό. Οι αλγόριθμοι που εφαρμόζονται στα πιο διαδεδομένα λογισμικά για την επεξεργασία των νεφών των σημείων, μπορούν να συνοψιστούν στις ακόλουθες περιπτώσεις :

- Εκατοστιαία δραστική μείωση, που εφαρμόζεται με τρόπο τυχαίο σε ολόκληρο το νέφος.
- Ομοιογενής δραστική μείωση κατά την οποία ο χώρος διαιρείται σε κυβικά κελιά ίδιων διαστάσεων και έπειτα απαλείφονται όλα τα σημεία εκτός από ένα για κάθε κελί.
- Δραστική μείωση με τη λειτουργία της καμπυλότητας. Πρόκειται για μια εξειδικευμένη διαδικασία που βασίζεται στην καμπυλότητα μιας στρογγυλεμένης επιφάνειας λαμβανομένης ως επιφάνειας αναφοράς, έτσι απαλείφονται περισσότερα σημεία στα ομοιογενή τμήματα ενώ αντίστοιχα διατηρούνται περισσότερα όπου η μορφολογία του αντικειμένου είναι πιο περίπλοκη.

Σύμφωνα με τα δύο πρώτα συστήματα μείωσης των σημείων δεν μεταβάλλεται ο τρόπος καταγραφής των σημείων από τον laser scanner, συνεπώς δεν γίνεται διάκριση της πυκνότητας των σημείων ανάλογα με τη μορφολογία του αντικειμένου που αποτυπώνεται. Το σύστημα που βασίζεται στην καμπυλότητα, είναι μια αυτόματη διαδικασία επιλογής των δεδομένων που παίρνουμε, η οποία μπορεί μερικώς να παρομοιαστεί με τις εργασίες κριτικής επιλογής που εκτελούνται από το χειριστή που πραγματοποιεί μια τοπογραφική αποτύπωση ή μια φωτογραμμετρική αποκατάσταση, στην οποία η δειγματοληψία εξαρτάται από τη μορφή που εξετάζεται.

Το πέρασμα στο μοντέλο που περιγράφεται από μια επιφάνεια γίνεται μέσω του «τριγωνισμού». Πρόκειται για ένα τριγωνισμένο ακανόνιστο δίκτυο (TIN - Triangular irregular network), δηλαδή ένα πλέγμα πολυγώνων, που δημιουργείται από τα σημεία του νέφους.

Η διαδικασία του τριγωνισμού περιλαμβάνει τα παρακάτω στάδια:

Στο πρώτο στάδιο γίνεται η επεξεργασία των πολυγώνων. Αρχικά γίνεται ο καθαρισμός των κατακερματισμένων πολυγώνων, δηλαδή των πολυγώνων που δεν τέμνονται με το κυρίως αντικείμενο ή που δεν διαπλέκονται (είναι μπερδεμένα). Τα πολύγωνα που δεν τέμνονται με το αντικείμενο μπορούν αυτόματα να καθαριστούν από το πρόγραμμα, ενώ τα υπόλοιπα πρέπει να καθαριστούν χειροκίνητα. Τα κενά που δημιουργούνται μετά από αυτή τη διαδικασία πρέπει να αποκατασταθούν (γεμιστούν). Ο αριθμός των κενών που θα εμφανισθούν, έγκειται στην αρτιότητα των δεδομένων και τον αριθμό των κατακερματισμένων πολυγώνων. Η αρχή του γεμίσματος των κενών στο λογισμικό βασίζεται στην κυρτότητα που υπάρχει γύρω από αυτό. Όσο μικρότερο είναι το κενό και όσο πιο καθαρά είναι τα όριά του τόσο καλύτερη είναι η ακρίβεια. Αφού καλυφθούν όλα τα κενά γίνεται εκ νέου ο καθαρισμός των πολυγώνων. Όμως κατά το γέμισμα των κενών δημιουργούνται νέα κατακερματισμένα πολύγωνα, οπότε η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να μην υπάρχουν άλλα κενά.

Στη συνέχεια περνάμε στο στάδιο της προσαρμογής επιφάνειας. Σε αυτό περιλαμβάνεται σε πρώτη φάση η κατασκευή των τομέων, δηλαδή η διαίρεση σε τομείς, που βασίζεται στην ανάλυση της επιφάνειας. Οι τομείς δεν πρέπει να χωριστούν σε πολύ μικρά κομμάτια, αλλιώς η επιφάνεια θα είναι τόσο κατακερματισμένη ώστε δεν θα μπορούν να ακολουθήσουν τα επόμενα βήματα της διαδικασίας. Βέβαια, οι τομείς δεν θα πρέπει να διαιρεθούν ούτε σε πολύ μεγάλα κομμάτια, αλλιώς η ποιότητα της επιφάνειας θα είναι κακή καθώς θα είναι δύσκολο να αποδοθεί με πιστότητα το σχήμα του νέφους των σημείων. Συνεπώς, οι τομείς είναι πολλοί και λεπτομερειακοί σε περιοχές του μνημείου με έντονα χαρακτηριστικά (έντονο ανάγλυφο) και αντίστροφα.

Όταν ολοκληρωθεί η επεξεργασία κατασκευής των τομέων ακολουθεί η «κατασκευή δικτύων». Τα δίκτυα μπορούν να γίνουν το ίδιο συμμετρικά και συνεκτικά με τεχνητό τρόπο. Σε γενικές γραμμές όσο πιο πυκνά είναι τα δίκτυα, τόσο πιο ακριβής είναι η επιφάνεια που περιγράφουν. Βέβαια, ένα πολύπλοκο μοντέλο με πολλές επιφάνειες έχει σαν αποτέλεσμα το αρχείο που θα δημιουργηθεί να είναι τόσο μεγάλο ώστε να μην είναι δυνατή η διαχείριση του.

Το μοντέλο σε αυτό το σημείο είναι έτοιμο για την εισαγωγή του μέσα σε κάποιο πρόγραμμα CAD. Η μεταφορά του νέφους σημείων σε σχεδιαστικά προγράμματα 2D ή 3D, επιτρέπει την παραγωγή σχεδίων (όψεις, κατόψεις, τομές) καθώς και την τριδιάστατη θέση (3D viewing) με απόδοση της υψής των υλικών.



Εικόνα 5. Αποψη της Ροτόντας από τα νοτιοανατολικά

5. Αποτύπωση της Ροτόντας

Οι μετρήσεις στο πεδίο διήρκησαν τρεις (3) μέρες και πραγματοποιήθηκαν κατά τις πρωινές ώρες. Οι καιρικές συνθήκες και τις τρεις μέρες των μετρήσεων ήταν καλές με ηλιοφάνεια. Η ανάλυση που χρησιμοποιήθηκε και τις τρεις μέρες κατά τη διάρκεια των σαρώσεων ήταν resolution $\frac{1}{4}$ και quality 8x με point distance 6,136 mm/10m.

Την πρώτη μέρα των μετρήσεων πραγματοποιήθηκαν έξι (6) σαρώσεις από τις περιμετρικές οικοδομές της Ροτόντας (1 & 2 σάρωση από τον 5^ο όροφο και οι υπόλοιπες από τις ταράτσες). Στις σαρώσεις που ήταν εφικτό δημιουργήσαμε “παράθυρο” έτσι ώστε να μειώσουμε όσο το δυνατόν τον όγκο των δεδομένων.

Τη δεύτερη μέρα των μετρήσεων πραγματοποιήθηκαν δέκα (10) επίγειες σαρώσεις περιμετρικά της Ροτόντας και εντός του περιβάλλοντος του μνημείου. Στις σαρώσεις που ήταν εφικτό δημιουργήσαμε “παράθυρο” έτσι ώστε να μειώσουμε όσο το δυνατόν τον όγκο των δεδομένων.

Την τρίτη μέρα των μετρήσεων πραγματοποιήθηκαν εννέα (9) συμπληρωματικές σαρώσεις πάνω στη στέγη της Ροτόντας, από τις οποίες οι οκτώ ήταν στην στέγη του μνημείου και η ένατη πραγματοποιήθηκε στη στέγη του ιερού της Ροτόντας. Ο λόγος για τον οποίο έλαβαν χώρα αυτές οι σαρώσεις ήταν διότι από την πρώτη μέρα των μετρήσεων δημιουργήθηκαν κενά στη στέγη του κυρίου κτιρίου και του



Εικόνα 6. Σάρωση στη στέγη της Ροτόντας

ιερού του μνημείου, λόγω του ότι οι περιμετρικές οικοδομές δεν ήταν αρκετά ψηλές έτσι ώστε να μπορέσουμε να μετρήσουμε τη στέγη. Στις σαρώσεις που ήταν εφικτό δημιουργήσαμε “παράθυρο” έτσι ώστε να μειώσουμε όσο το δυνατόν τον όγκο των δεδομένων. Στις εικόνες που ακολουθούν φαίνονται ενδεικτικά το εύρος των σαρώσεων από τις διάφορες θέσεις.

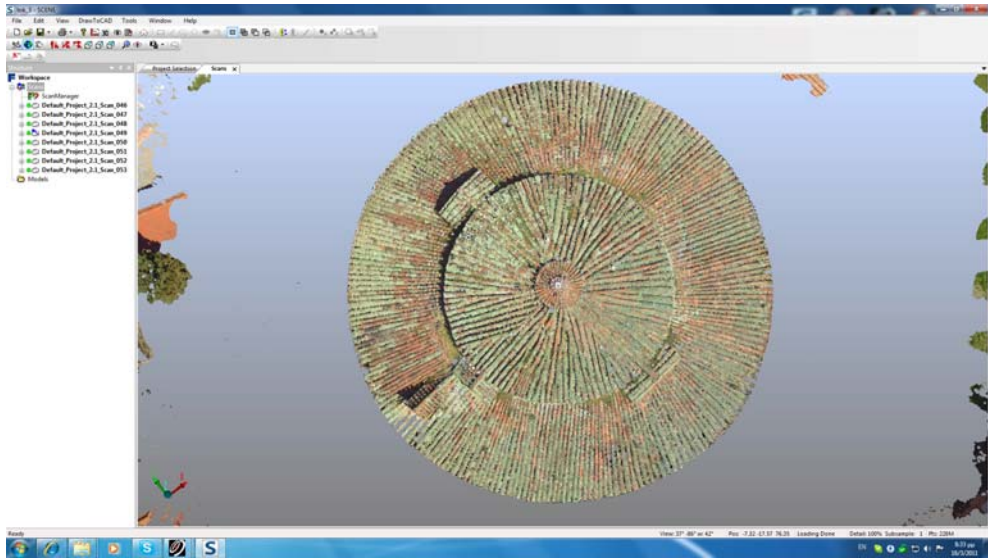
6. Επεξεργασία του νέφους των σημείων

Για την επίλυση και την επεξεργασία των εξαγομένων αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκαν τα λογισμικά Scene της FARO και Polyworks v.11 της εταιρείας INNOVMETRIC. Το λογισμικό αυτό είναι ειδικά σχεδιασμένο για το laser scanner της FARO. Επεξεργάζεται και διαχειρίζεται τα δεδομένα της σάρωσης εύκολα και αποτελεσματικά, χρησιμοποιώντας την αυτόματη αναγνώριση αντικειμένων, την ευθυγράμμιση και τη γεωαναφορά των σαρώσεων. Επιπλέον μπορεί να χρωματίσει τα νέφη των σημείων με το πραγματικό τους χρώμα RGB το οποίο συλλαμβάνεται μέσω της ενσωματωμένης φωτογραφικής μηχανής του Focus 3D. Το λογισμικό είναι εξαιρετικά φιλικό προς το χρήστη και παράγει υψηλής ποιότητας δεδομένα σε ελάχιστο χρόνο.

Μόλις το Scene επεξεργαστεί τα δεδομένα της σάρωσης, μπορούμε αμέσως να αρχίσουμε την αξιολόγηση και την περαιτέρω ανάλυση. Έχουμε στη διάθεσή μας πλήθος λειτουργιών, από απλές μετρήσεις στην 3D προβολή, μέχρι τη δημιουργία μοντέλων και την εξαγωγή δεδομένων σε διάφορα formats.

Περιοχές εφαρμογής:

- Βιομηχανία και δυναμικός σχεδιασμός εγκαταστάσεων
- Ψηφιακό εργοστάσιο / εικονική πραγματικότητα
- Αρχιτεκτονική
- Έργα πολιτικού μηχανικού / σχεδιασμός εγκαταστάσεων
- Αρχαιολογία και διαφύλαξη πολιτιστικής κληρονομιάς
- Εργοστασιακός σχεδιασμός / τεχνολογίες αυτοματισμού
- Ασφάλειας της μηχανικής και εγκληματολογίας
- Μάρκετινγκ, διαφήμιση και γραφικά υπολογιστών



Εικόνα 7. Κάτοψη της στέγης όπως φαίνεται από το χρωματισμένο νέφος σημείων

Το λογισμικό Polyworks αποτελεί διεθνώς την πιο ευρέως αποδεκτή λύση επεξεργασίας νεφών σημείων για μια ποικιλία εφαρμογών, από την Τοπογραφία μέχρι την Αεροναυπηγική. Διαχειρίζεται μέχρι 100 εκατομμύρια σημεία.

Ειδικότερα για τις εφαρμογές αποτυπώσεων και παρακολούθησης τεχνικών έργων, το λογισμικό παρέχει εξειδικευμένα εργαλεία για την ταχεία βασική επεξεργασία με ιδιαίτερη έμφαση στην εξαγωγή συγκριτικών αποτελεσμάτων. Η διαδικασία περιλαμβάνει:

Ευθυγράμμιση σαρώσεων για τη δημιουργία ενιαίου νέφους: Είναι δυνατή με μια ποικιλία μεθόδων αυτόματων ή ημιαυτόματων. Η δυνατότητα βέλτιστης αυτόματης προσαρμογής επικαλυπτόμενων νεφών μέσω επαναληπτικού αλγορίθμου το καθιστά πολύ χρήσιμο εργαλείο όταν είναι αδύνατη η χρήση ή ο εντοπισμός των στόχων κατά τη διενέργεια των μετρήσεων, με αποτέλεσμα σημαντικό κέρδος χρόνου. Η αυτόματη ευθυγράμμιση αποτελεί ένα από τα πιο ισχυρά χαρακτηριστικά του Polyworks.

Γεωαναφορά (μεταφορά σε γνωστό σύστημα συντεταγμένων): Αρκούν τρία ή περισσότερα σημεία διακριτά επί του ενιαίου νέφους με γνωστές συντεταγμένες για να επιτευχθεί η γεωαναφορά του. Για τη σύγκριση διαδοχικών φάσεων δεν είναι απαραίτητη η γεωαναφορά, όταν η ταύτιση των νεφών μπορεί να γίνει βάσει κάποιων περιοχών που παραμένουν αμετάβλητες. Για παράδειγμα, κατά την παρακολούθηση πρανών μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ταύτιση επιφάνειες γειτονικών σταθερών σχηματισμών ή κατασκευών, ενώ κατά την ανάλυση παραμόρφωσης γέφυρας με και χωρίς φορτίο μπορεί να θεωρηθεί ότι τα βάθρα παραμένουν αμετάβλητα.

Σύγκριση και έλεγχος αποκλίσεων - διαφορών: Μπορεί να γίνει μεταξύ νεφών σημείων ή / και πολυγωνικών μοντέλων (από σάρωση διαδοχικών φάσεων ή άλλες πηγές, π.χ. μελέτες), με άμεσα προϊόντα χάρτες αποκλίσεων-διαφορών, σύνθετες τομές επί των συγκρινόμενων αντικειμένων, συγκριτικούς πίνακες, μετρήσεις κάθε είδους, υπολογισμό όγκων, ισοϋψείς καμπύλες διαδοχικών φάσεων, κλπ.

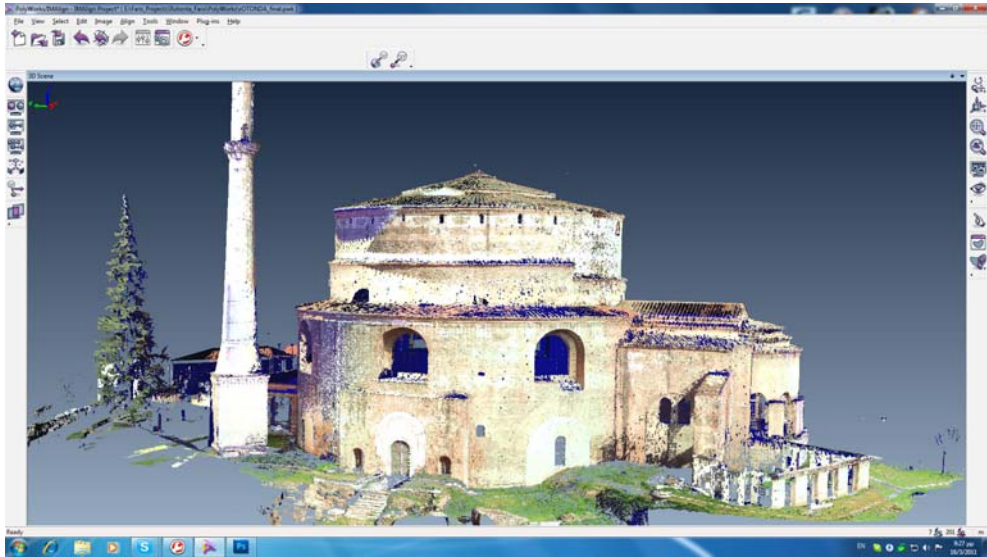
Περαιτέρω επεξεργασία: Επιπλέον, παρέχονται εξελεγμένα εργαλεία για την εξαγωγή 3D διανυσματικών χαρακτηριστικών, τη δημιουργία και επεξεργασία πολυγωνικών ή στερεών μοντέλων (π.χ. για στατικές αναλύσεις), φωτορεαλιστικών μοντέλων, προσομοιώσεων κίνησης, παρουσιάσεων, video, κλπ.

7. Επεξεργασία των μετρήσεων

Για την επεξεργασία των σαρώσεων και των τριών ημερών χρησιμοποιήθηκαν τα προγράμματα Scene της FARO και Polyworks v.11 της INNOVMETRIC. Αρχικά χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Scene της FARO για να εισάγουμε τα αρχεία των μετρήσεων από το Laser Scanner, μέσω της κάρτας SD, στον H/Y.

Για τις σαρώσεις της πρώτης μέρας χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Scene της FARO για να χρωματίσει τα νέφη των σημείων με το πραγματικό τους χρώμα RGB (colorization) και την εξαγωγή των νεφών των σημείων σε μορφή dxf, έτσι ώστε η ευθυγράμμιση των σαρώσεων (registration) να γίνει μέσω του λογισμικού Polyworks v.11 της INNOVMETRIC με ομόλογα σημεία. Η ευθυγράμμιση των διαφόρων σαρώσεων (registration) ήταν αδύνατο να γίνει με το λογισμικό Scene διότι ήταν αδύνατος ο εντοπισμός των στόχων-σφαιρών, καθώς η απόσταση ανάμεσα στο Laser Scanner και τις σφαίρες ήταν πολύ μεγάλη (σε κάποιες σαρώσεις η απόσταση ξεπερνούσε τα 70 μέτρα). Με την ολοκλήρωση της επεξεργασίας των μετρήσεων της πρώτης μέρας δημιουργήθηκε το ευθυγραμμισμένο νέφος των σημείων στο οποίο απεικονίζονταν η Ροτόντα με κάποια κενά στη στέγη και στη βάση του μνημείου κοντά στο έδαφος λόγω του περιμετρικού τοιχίου.

Η δεύτερη μέρα των μετρήσεων είχε στόχο την επίγεια αποτύπωση του μνημείου, έτσι ώστε να συμπληρωθούν τα κενά που υπήρχαν στη βάση του μνημείου. Η επεξεργασία των μετρήσεων για την ευθυγράμμιση των σαρώσεων (registration)



Εικόνα 8. Νότια όψη της Ροτόντας μέσω του λογισμικού Polyworks

και το χρωματισμό των νεφών των σημείων (colorization) των σαρώσεων επιτεύχθηκε μέσω του Scene χρησιμοποιώντας την αυτόματη αναγνώριση αντικειμένων, αφού ήταν εύκολος ο εντοπισμός των στόχων-σφαιρών λόγω της κοντινής απόστασης των σαρώσεων και του μνημείου. Αφού δημιουργήθηκε το ευθυγραμμισμένο νέφος των σημείων στο οποίο απεικονιζόταν η βάση της Ροτόντας με πολύ μεγάλη ακρίβεια, ακολούθησε η ευθυγράμμιση των σαρώσεων (registration) των δύο ευθυγραμμισμένων νεφών. Η διαδικασία της ευθυγράμμισης των δύο νεφών υλοποιήθηκε μέσω του Polyworks με χρήση ομολόγων σημείων. Αξίζει να επισημανθεί ότι ήταν δύσκολη η ευθυγράμμιση των νεφών λόγω του μεγάλου όγκου των σαρώσεων (περίπου 16 GigaBytes).

Την τρίτη μέρα των μετρήσεων πραγματοποιήθηκαν εννέα (9) σαρώσεις με κύριο στόχο τη συμπλήρωση των κενών που υπήρχαν στην κεντρική στέγη και το ιερό του μνημείου. Η επεξεργασία των μετρήσεων για την ευθυγράμμιση των σαρώσεων (registration) και το χρωματισμό των νεφών των σημείων (colorization) των σαρώσεων επιτεύχθηκε μέσω του Scene χρησιμοποιώντας την αυτόματη αναγνώριση αντικειμένων, αφού ήταν εύκολος ο εντοπισμός των στόχων-σφαιρών λόγω της κοντινής απόστασης των σαρώσεων και του μνημείου. Αφού δημιουργήθηκε το ευθυγραμμισμένο νέφος των σημείων στο οποίο απεικονιζόταν η στέγη της Ροτόντας με πολύ μεγάλη ακρίβεια, ακολούθησε η ευθυγράμμιση της συγκεκριμένης σάρωσης με τις δύο προηγούμενες (registration) για να δημιουργηθεί η τελική μορφή του μνημείου. Η διαδικασία της ευθυγράμμισης των τριών νεφών υλοποιήθηκε μέσω του Polyworks με χρήση ομολόγων σημείων.



Εικόνα 9. Άποψη του τελικού 3D μοντέλου από τα βορειοανατολικά

Μετά την επιτυχή ευθυγράμμιση των νεφών και τη δημιουργία του ενιαίου πολυγωνικού μοντέλου επιφάνειας (mesh) μέσω του Polyworks, ακολούθησε η δημιουργία τομών μέσω του λογισμικού Cyclone της Leica.

8. Δημιουργία του μοντέλου

Για την δημιουργία του τελικού μοντέλου του μνημείου που θα αναπαραχθεί πρέπει να κατασκευαστεί στην οθόνη του υπολογιστή ένα τρισδιάστατο «υδατοστεγανό» (waterproof) μοντέλο. Για τον σκοπό αυτόν οι μετρήσεις επεξεργάζονται στο Polyworks κλείνοντας όλα τα ενδεχόμενα κενά της αποτύπωσης.



Εικόνα 10. Το εκμαγείο της Ροτόντας σε κλίμακα 1:250 από την πρώτη εκτύπωσή του

Στην συνέχεια το μοντέλο εκτυπώνεται κατ' αρχάς σε έναν τρισδιάστατο εκτυπωτή ακρυλικής σκόνης και έτσι έχουμε το εκμαγείο του μνημείου. Κατόπιν αποφασίζεται η τελική κλίμακα του αντιγράφου που θα παραχθεί και εκτυπώνονται τα εκμαγεία χύτευσης. Ακολουθεί η προπαρασκευή της χύτευσης και η χύτευση του μοντέλου. Το χυτό μοντέλο επεξεργάζεται ώστε να απομακρυνθούν οι ατέλειες που ενδεχόμενα παρουσιάζει. Υπάρχει τέλος η δυνατότητα απόδοσης της υφής των επιφανειών του μνημείου χρησιμοποιώντας κατάλληλα υλικά.

Βιβλιογραφία

Sistemi a scansione per l' architettura e il territorio, Alinea, Firenze, 2007, σελ. 111.

Κ. Τοκμακίδης, Αποτυπώσεις μνημείων και αρχαιολογικών χώρων, Σημειώσεις.